中国金矿物探、化探方法技术的研究与应用

[illegible]

Geological Emir

地 [illegible] 出 版

华夏土地网
http://bbs.hxland.com/

序

金是人类历史发展过程中久为人所重视的宝贵金属。历史上，它是财富、权势的象征；现代又具有在工业技术中的特殊性能。正因为如此，从自然界获取尽可能多的金，就成为人类历史中受到重视的生产活动之一。

由于同样的原因，地表及地下浅部的、易于发现和取得的金，就早已被拾取、淘洗、挖掘而去了。随着科学技术的进步，在一定的历史阶段，遗留在自然界中的金，总是比前一阶段更难于发现和采取。总的趋势是地表金矿的富矿石愈来愈少，赋存愈加隐蔽，当然地下隐蔽地段中也还不能排除有高品位矿床存在的可能性，这些情况对于金矿勘查的科学技术来说，将永远是一种挑战。

为了国家当前和长远国力的增强，大力增长金的产量和储量是势所必需的。其中，地球物理、地球化学勘探技术的研究和发展，是在上述难度日益增加的情况下，为保证不断发现后备产地和增加储量所必不可少的工作。因此，在国家科委组织协调的国家重点攻关项目“中国主要金矿类型及成矿区带远景预测”（88—94）中，列有课题“金矿地球物理地球化学勘探方法的研究及寻找金的隐伏矿床物探、化探新方法新技术的研究”（90051-10）。

此课题设置物探专题14个，化探专题18个，共32个。地矿、冶金、有色、核工业、武警黄金部队五个部门及大专院校共178名科技人员在全国18个省（区）120个金矿床（点）上进行了大量的科研工作。最后由课题负责单位冶金工业部地球物理勘查院、地质矿产部中国地质勘查技术院共同提出研究成果，并于1994年10月30日经过专家评审，认为“该项研究是在较高起点上开展的，是我国各部门物探化探专业队伍联合攻关获得成功的范例之一，是目前我国金矿物探、化探方法技术涵盖最广泛、研究较深入、内容丰富、创新较多的一项研究成果、有较高的学术和应用价值，总体上达到国际先进水平。”

本书就是在上述研究成果的基础上编著的；按物探和化探分为上、下两篇。

在物探部分中，从分析金矿的地球物理特点出发，讨论了用直接方法在找金方面的困难和利用与金伴生的矿物特点而可以采取的有效物探方法。进而从金矿赋存的地质背景讨论地质及其物性特征的综合标志，以此为依据运用适当的物探方法有效地查明隐伏的控矿综合地质条件和标志的间接找金的途径。在这种思路的基础上，根据在具体矿床上的实测成果，较深入地探讨了综合航空物探方法（研究的重点），地面物探方法（高精度磁测，地面甚低频电磁法等），γ能谱法及井中物探方法（综合电法及井中电磁波法层析技术等）。对各种方法的实效加以评述，并在技术上，数据处理上，进一步提高方法的精度上，都有不少新经验和重要发展。

化探部分中，首先从金的表生作用地球化学特征讨论其在找矿中的应用，进而应用相态分析技术评价金地球化学异常及寻找掩埋金矿床的方法。然后依次讨论各种地球化学方法如：气体、水、包裹体地球化学，化探快速追踪异常源等的原理、方法、运用实例。最后，讨论了筛选与评序区域地球化学异常寻找金矿的数据处理方法，并介绍了综合化探方

华夏土地网
http://bbs.hxland.com/

法的主要技术进展与应用效果。

综观上下两篇所具有的共同特点是针对金及与其密切相关的其它元素、金矿石、金矿床在自然界里的已知赋存状态以及地质的成矿控制因素等众多方面的物性与异常特征和地球化学标志，即广义的地质背景，在理论探讨和实践中研究和发展具有一定实效的方法，并加以提高、优化选择，力图以综合的方式有效的查明隐蔽金矿床的综合地质（广义）标志，从而在金矿的发现中发挥高度积极的作用。以找金为主要目标的如此大规模的综合物探、化探研究工作成果，确实还不多见。

总之，我同意前举专家评审对此项研究成果的意见。作为一项重要地质科技文献，本书的出版无疑地将对我国的金矿勘查，物探、化探科学技术向更高水平发展起着重要作用，对其它金属矿产的勘查，也将有重要的参考价值。

张炳熹

1995 年 11 月

华夏土地网
http://bbs.hxland.com/

前　言

金是一种十分贵重的金属。随着露头矿已多被发现，找矿难度日益加大，寻找隐伏金矿床的任务更为迫切，因此金矿地质、地球物理、地球化学勘查方法技术的研究得到了国家的重视和支持。

本书是根据国家重点黄金地质科技攻关项目中“金矿地球物理、地球化学勘查方法研究及寻找金的隐伏矿床物探、化探新方法新技术的研究”课题的研究成果编著的。该课题下属专题的设置详见书末附表。

书中总结的课题研究工作所取得的主要成果可简述如下：

1. 航空物探方面。首次成功地将国外引进的直升机载和国内研制的固定翼机载的综合航空物探新技术应用于金矿普查。在我国首次开发应用了航磁垂直梯度技术，并论证可用等效偶极层磁场代替磁场梯度的抽象数学概念，简化了梯度异常定性和定量解释方法。研究解决了识别航空甚低频电磁法地形干扰异常等关键技术，使该方法在我国山区得到成功的应用。首次开发研究了以双频航电异常为单元的三种主要统计预测评价方法技术及其综合分析方法。开发了 TS-2605H 微机数字图像处理系统，研制了用于综合信息找矿预测的数字图像处理软件系统，并用图像处理技术分析研究了胶东金矿区航磁航电异常。研究提出了金矿航空 γ 能谱的数据处理及成矿预测方法。

通过研究提出了牟乳金矿带控矿构造的新认识，圈定的 17 个东西向与北东、北北东向构造交会的成矿有利部位，与已知大、中型金矿的分布符合，预测的新区已开始验证。

冀东金矿带利用综合航空物探找矿预测模型圈定了 10 个 I 级远景区（其中一个远景区已见金矿），及 152 条断裂蚀变带（其中 54 条与已知的相符合，有 20 多条已发现金矿化）。

在航空物探（电/磁）异常综合分析、图像解译的基础上，研究和应用胶东招莱金矿带双频航电异常的找矿信息量法、逻辑信息法和数量化理论 I 等三种综合地学信息统计预测数学模型，筛选出 I 类（大中型金矿）找矿远景区 27 处，Ⅱ类（中小型金矿远景区）42 处，其中三处已见矿或矿化。

根据航磁资料的研究，指出了玲珑岩体北部超伏区下三条北东向郭家岭花岗闪长岩带，首次指出了其对区内金矿床成矿的重要作用。

2. 地面物探方面。首次开展了招掖金矿带大面积的及小秦岭驾鹿金矿区的高精度磁测的应用与研究，发现了以往中精度磁测难以发现的有意义弱磁异常，总结提出了金矿高精度磁测工作方法及岩矿石磁性测定方法和技术要求，以及高精度磁测数据处理与转换方法等。总结提出了金矿 γ 能谱特征和地面、车载 γ 能谱各种数据处理方法，为 γ 能谱找金提供了方法与经验。研究提出了甚低频电磁法提高信噪比及提取小感应参数地质体虚分量异常的数据处理方法。

地面高精度磁测通过对已知岩性区磁性及磁场特征分析，在 1:10000 的磁测图上圈定

华夏土地网
http://bbs.hxland.com/

了焦家断裂带下盘隐伏的郭家岭岩体的分布，扩大了新的找矿远景区。对焦家断裂中部及南延部位提出了新的依据与认识，总结提出了郭家岭花岗闪长岩体相变的地质与磁场模型及该区破碎带蚀变岩型金矿高精度磁测找矿模型，预测找矿靶区 6 处。在小秦岭驾鹿地区应用高精度磁测找矿标志进行了找矿预测。

利用总结提出的不同的地质蚀变条件下金矿 γ 能谱特征及找矿模型，在东坪等金矿区预测了 7 处找矿靶区；利用区域地面、车载及航空 γ 能谱资料预测了冀东、冀北及六安地区金矿远景区 11 处，其中 6 处见有矿体或矿化。

利用频率测深结合综合物探与地质研究，预测控矿构造，在撰山子、莲花山等金矿区已被证实，并获工业储量 1.025t。地面甚低频电磁法应用其研究提出的数据处理方法，在金矿区构造填图中也初获成功。

3．井中物探方面。总结提出了金矿综合电测井异常模式及井中电法技术措施和工作系列方案。开发研究了“简化边界元法”及井中 ρ_s 和 η_s 异常计标机联合反演方法技术及程序。井中电磁波层析技术经理论模型计标，指出射线层析技术只适用于大目标，对于小目标提出了新的解释方法——特征解释法。

井中综合电测在葫芦沟金矿区发现一条新的含矿构造带及一个盲矿化体。

利用井中 ρ_s 及 η_s 计标机联合反演方法，在湖北董家口金矿区圈定了井旁金矿（化）脉。

4．通过对表生介质中金的不同存在形式的研究，可以归纳为五种主要的存在形式，即水溶性的金、被表生介质表面吸附的金、与有机质结合难溶的金、游离自然金和分散在原生矿物及包裹在次生矿物中的微粒金。金的各种存在形式与金矿体之间存在一定的空间分布规律，对找矿有指导意义。

通过研究制定了新的偏提取分析步骤、室内模拟实验和对 25 个已知各类金矿床上的试点研究，提出了一些应用相态分析技术发现和评价金异常以及寻找掩埋金矿床的新方法和新技术，如新制定的分析 Au^{3+}、Au^{+}、Au^{0} 的偏提取分析法以及通过查明金在地质体中是呈集中状态还是分散状态存在来判断金异常是矿致异常还是非矿异常的方法等，并评价和圈定了河南宽坪沟等一批靶区，为覆盖区寻找隐伏金矿提供了新的手段。

5．首次研制成功了壤中气 Rn-CO_2 两用采样器，研究制定了合理的工作方法，实现了 Rn-CO_2 联测，提高了工作效率，并在瑶沟矿区和香炉碗子矿区的实际应用中对所测结果进行了成矿预测，经工程验证，见到了工业金矿体，其反映深度一般在 10m 到几十米或更深。地气法的初步试验结果预示为寻找隐伏金矿提供了一个以金找金的气体地球化学指标。

研制成功野外现场使用的泡塑动态吸附水中金的预富集方法和取样箱，解决了大量水样的保存、运输和变质的问题，制定了二种测定水中痕量金的高灵敏度分析方法。赣中地区根据水地球化学测量结果预测了金的找矿远景区 5 片，其中 3 片经详查或工程揭露，均发现了金矿化或工业矿体。

通过对二十多个金矿床包裹体地球化学研究，总结出判别石英脉含金性和寻找盲矿及判别金矿剥蚀程度的包裹体地球化学模型和找矿标志。应用叠加晕模型和总结出的标志进行了找矿预测，提出了三处找矿靶区，其中有一处已被深部工程证实，找到了矿体。

6．根据不同景观条件，试验和完善了多种快速追踪异常源的方法，如主要根据 X 射

华夏土地网
http://bbs.hxland.com/

线荧光测量圈定的 Pb 的 X 射线荧光异常展布特征进行成矿预测，经工程验证，在东坪新增了数十吨金的普查储量。采用沟系土壤测量在甘肃西秦岭地区共发现金矿脉 27 条，提交 F 级储量 10t 普查基地 3 处，F 级储量 20t 普查基地一处。采用异常源分析法在冀东温家沟地区获 D+E 级金矿储量 6.2t。采用“面型”岩石地球化学测量在山西五台山地区圈定的 1 号异常（正沟—黄草 -带），局部已达工业品位（12.20×10^{-6}），找金可望获得突破。

7. 在地球化学数据处理方法的应用研究方面，在我国首次运用了因子协克立格方法和熵滑动平均方法，并提出了“金本位”方法及与其相配套的异常多参数排序方法，通过试点地区实际应用的结果表明，在区域地球化学异常识别和评序中，与传统的一些方法相比，都取得了更为令人满意的结果，还把联列表中的 χ^2 检验和贝叶斯判别准则推广到异常下限的确定和有意义的异常形态的识别，也都取得了较好的效果。

本书由上篇（物探部分）及下篇（化探部分）组成。它是前述 32 个专题报告中主要科技成果的汇总，并在汇总的基础上进行了必要的精炼、综合和提高完善后编著的；因此，本书是参予课题与专题研究的全体技术人员的集体成果。

本书上篇（物探部分）共分七章，其中第三章、第四章分别由齐文秀、傅祥麟编写初稿，由王继伦修订，其余部分由王继伦编写，并负责组织清绘图件。英文摘要由戴继舒翻译。索忠恕、顾正乾对上篇的编著提出了积极的建议与意见。

本书下篇（化探部分）共分 8 章。第一、三章由李善芳执笔；第二章由朱有光、周丽沂执笔；第四章由朱有光、李善芳执笔；第五章由李惠执笔；第六章由朱有光、张洪执笔；第七章由余金生执笔；第八章由朱有光、李善芳、羌荣生执笔；化探文稿由李善芳统一定稿，羌荣生负责组织清绘图件，郑康乐高级工程师审阅了化探文稿。英文摘要由张中民翻译。

本书的前言由王继伦、李善芳共同编写。

本书承蒙张炳熹院士书写序言。在课题研究与本书的编写过程中得到地矿部科技司的指导，得到孙文珂、杨尔煦、陈云昇、袁学诚、郑康乐、孙焕振、徐振邦、吴传璧、袁方等高级工程师的指导帮助，对本书提出了不少宝贵意见，在此谨一并致谢。

华夏土地网
http://bbs.hxland.com/

目　录

上篇　物探部分

第一章　金矿物探的发展与特点 …… (3)
第二章　综合航空物探方法在金矿普查预测中的应用研究 …… (5)
第一节　直升机综合航空物探方法技术研究及其在金矿普查预测中的应用 …… (5)
第二节　综合航空物探方法在花岗岩-绿岩地体金矿普查预测中的应用研究 …… (14)
第三节　固定翼机航空物探（电/磁）异常的数字图像处理和统计评价方法及其在金矿预测中的应用研究 …… (24)
第四节　航空电磁法异常统计评价方法在胶东地区金矿预测中的应用研究 …… (26)
第五节　结语 …… (43)
第三章　金矿地面高精度磁测的应用研究 …… (45)
第一节　金矿高精度磁测的方法技术 …… (45)
第二节　高精度磁测在金矿区研究应用实例 …… (47)
第三节　结语 …… (60)
第四章　金矿放射性γ能谱特征及其应用研究 …… (61)
第一节　K、Th、U 含量变化及诸比值的地质意义 …… (61)
第二节　研究区金矿地质及γ能谱特征 …… (64)
第三节　γ能谱测量方法找金的应用效果与实例 …… (67)
第四节　结语 …… (77)
第五章　地面甚低频电磁法及频率测深法在金矿找矿中的应用研究 …… (78)
第一节　甚低频电磁法在冀东等地金矿找矿中的应用研究 …… (78)
第二节　频率测深在金矿区外围深入找矿中的应用效果 …… (84)
第三节　结语 …… (85)
第六章　金矿井中综合电测、井中电法计算机反演方法与井中电磁波层析技术的应用研究 …… (87)
第一节　井中综合电测在小秦岭地区金矿床上的应用研究 …… (87)
第二节　井中电法（ρ_s，η_s）计算机化反演技术的研究及其在金矿勘探中的应用 …… (97)
第三节　井中电磁波法层析技术在金矿床上的应用研究 …… (110)
第四节　结语 …… (115)
第七章　综合物探方法在金矿地质工作中的应用、研究与展望 …… (117)
参考文献 …… (119)

华夏土地网
http://bbs.hxland.com/

下篇 化探部分

第一章 寻找金矿的地球化学勘查方法、技术概况……(123)
第二章 金的表生地球化学特征及其在找矿中的应用……(126)
第一节 表生介质中金的存在形式……(126)
第二节 金的溶解实验、水电化学试验和有关问题的探讨……(131)
第三节 表生介质中金的富集粒度特征的研究……(137)
第四节 金的表生地球化学特征在找矿中的应用……(137)
第五节 结语……(144)
第三章 寻找隐伏金矿床的气体地球化学方法……(146)
第一节 金矿床中的 Rn、CO_2、Hg 气源……(146)
第二节 气体测量仪器、设备、采样技术和工作方法……(147)
第三节 雨水影响与异常的重现性……(150)
第四节 气体地球化学等方法技术的应用实例与效果……(151)
第五节 结语……(163)
第四章 寻找隐伏金矿的水地球化学方法技术……(165)
第一节 水地球化学找金分析方法的研究……(165)
第二节 水地球化学方法找金的效果……(167)
第三节 结语……(175)
第五章 寻找金矿的包裹体地球化学方法……(176)
第一节 寻找金矿的包裹体地球化学方法的理论基础及研究方法……(176)
第二节 含金与不含金石英脉的包裹体地球化学特征……(177)
第三节 典型金矿床包裹体地球化学垂直变化规律及垂直分带序列……(177)
第四节 金矿床包裹体地球化学异常特征及叠加晕模型……(179)
第五节 包裹体地球化学找金标志……(184)
第六章 金矿化探快速追踪异常源的方法……(186)
第一节 沟系土壤地球化学测量方法……(186)
第二节 山区-低山丘陵区金异常源的快速追踪方法……(196)
第三节 黄土覆盖区掩埋金矿的异常追踪方法……(203)
第四节 核方法在快速追踪异常源中的应用……(204)
第五节 应用痕量相态分析技术评价金地球化学异常的方法……(217)
第六节 结语……(227)
第七章 筛选与评序区域地球化学异常寻找金矿的数据处理方法……(229)
第一节 空间数据分析的多元地质统计学方法……(229)
第二节 确定 Au 异常下限的 χ^2 检验准则……(233)
第三节 分离异常的最大熵原理……(235)
第四节 识别异常形态的贝叶斯准则……(237)
第五节 Au 含量的换算——“金本位”法……(239)
第六节 Au 异常的多参数排序……(240)

华夏土地网
http://bbs.hxland.com/

第七节　方法评述……（243）
第八节　结语……（246）
第八章　综合化探方法的主要技术进展与应用效果……（248）
第一节　金在表生作用中的地球化学性状、特征及其在找矿中的应用……（248）
第二节　寻找隐伏金矿的非常规地球化学勘查方法的研究……（249）
第三节　不同景观条件下快速追踪异常源方法的进展……（250）
第四节　金矿化探数据处理方法的新进展……（251）
参考文献……（252）
附表（专题设置一览表）……（254）
英文摘要……（256）

华夏土地网
http://bbs.hxland.com/

CONTENTS

Part Ⅰ Geophysical exploration

Chapter 1 Development and features of geophysical exploration for gold deposits …… (3)
Chapter 2 Integrated airborne geophysics methodology and its application …… (5)
2. 1 Helicopter integrated geophysical methods and its application to prospecting and prognosticating gold deposits …… (5)
2. 2 Application of integrated airborne geophysics to granite-greenstone belt gold deposits …… (14)
2. 3 Study of digital image processing and geostatistical evaluation of fixed-wing aircraft EM anomalies …… (24)
2. 4 Application of geostatistical evaluation of fixed-wing aircraft EM anomalies to prospecting and prognosticating gold deposits in Jiaodong aera …… (26)
2. 5 Conclusions …… (43)
Chaptar 3 Ground high resolution magnetic survey in gold deposits …… (45)
3. 1 Study on techniques of ground high resolution magnetic survey …… (45)
3. 2 Effect and experience of ground high resolution magnetic survey in gold deposits …… (47)
3. 3 Conclusions …… (60)
Chapter 4 Characteristics of γ-ray spectrogram of gold deposits and their applied study …… (61)
4. 1 Geological meanings of content changes of K, Th, U and their ratio …… (61)
4. 2 Characteristics of geology and γ-ray spectrogram in studied aeras …… (64)
4. 3 Effect and experience of γ-ray spectrometry in gold deposits …… (67)
4. 4 Conclusions …… (77)
Chapter 5 Ground VLF-EM method and alternating current soundings in gold deposits or ore fields …… (78)
5. 1 Effect and experience of applied study of VLF-EM method in Eastern Hebei gold deposits …… (78)
5. 2 Effect of alternating current soundings in gold ore fields …… (84)
5. 3 Conclusions …… (86)
Chapter 6 Applied study of integrated electrical loggings, inversion of borehole electrical anomalies and borehole EM wave tomography …… (87)
6. 1 Effect and experience of integrated electrical loggings in Xiaoqinling

华夏土地网
http://bbs.hxland.com/

gold deposits ····· (87)
6. 2 Study of computerized inversion of borehole electrical anomalies (ρ_s, η_s) and its application to gold deposits ····· (97)
6. 3 Applied study of borehole EM wave tomography in gold deposits ····· (110)
6. 4 Conclusions ····· (115)
Chapter 7 Application, study and prospect of integrated geophysical methods for gold exploration ····· (117)
References ····· (119)

Part Ⅱ Geochemical exploration

Chapter 1 Brief introduction to methods and techniques of geochemical exploration for gold ····· (123)
Chapter 2 Supergene geochemical characteristics of gold and their application to prospecting ····· (126)
2. 1 Forms of occurrence of gold in supergene media ····· (126)
2. 2 Experiments on gold dissolution, electro-hydrogeochemical tests and discussions on related problems ····· (131)
2. 3 Granularity characteristics of gold enrichment in supergene media ····· (137)
2. 4 The application of supergene geochemical characteristics of gold to prospecting ····· (137)
2. 5 Conclusions ····· (144)
Chapter 3 Gas geochemical methods in search for concealed gold deposits ····· (146)
3. 1 The origin of Rn, CO_2 and Hg gases in gold deposits ····· (146)
3. 2 Instruments, sampling techniques and working procedures for gas survey ····· (147)
3. 3 Influence of rainfall and reproducibility of anomalies ····· (150)
3. 4 Examples and results on application of gas geochemical as well as other methods ····· (151)
3. 5 Conclusions ····· (163)
Chapter 4 Hydrogeochemical methods in search for concealed gold deposits ····· (165)
4. 1 Analytical methods for hydrogeochemical gold prospecting ····· (165)
4. 2 Effectiveness of hydrogeochemical method in search for gold ····· (167)
4. 3 Conclusions ····· (175)
Chapter 5 Inclusion geochemical method in search for gold deposits ····· (176)
5. 1 Theoretical basis and research method of inclusion geochemical technique in gold prospecting ····· (176)
5. 2 Inclusion geochemical characteristics of auriferous and barren quartz veins ····· (177)

华夏土地网
http://bbs.hxland.com/

5.3 Geochemical vertical variation regularity of inclusions in typical gold deposits …… (177)
5.4 Characteristics of inclusion geochemical anomaly of gold deposits and superimposed halo models …… (179)
5.5 Criteria for inclusion geochemical gold prospecting …… (184)
Chapter 6 Rapid follow-up of anomaly sources in geochemical exploration for gold …… (186)
6.1 Soil geochemical survey in gulch system …… (186)
6.2 Rapid follow-up of gold anomaly sources in areas of mountain/low mountain and hill …… (196)
6.3 Follow up anomalies of buried gold deposits in loesscovered area …… (203)
6.4 The application of nuclear method to rapid follow-up of anomaly sources …… (204)
6.5 The application of trace phase-state analytical technique to the appraisal of gold geochemical anomalies …… (217)
6.6 Conclusions …… (227)
Chapter 7 Data processing method in the sieving and ranking of regional geochemical anomalies for gold prospecting …… (229)
7.1 Multivariate geostatistical method for analysis of spatial data …… (229)
7.2 χ^2-test criterion for determining threshold of gold anomaly …… (233)
7.3 The maximum entropy principle for anomaly separation …… (235)
7.4 Bayesian criterion for distinguishing anomaly shapes …… (237)
7.5 Conversion of gold content—'gold equivalent unit' method …… (239)
7.6 Multiparameter sorting of gold anomalies …… (240)
7.7 Review of various methods …… (243)
7.8 Conclusions …… (246)
Chapter 8 Main technical advances and application effects of integrated geochemical methods …… (248)
8.1 Geochemical behaviors and characteristics of gold in supergenesis and their application to prospecting …… (248)
8.2 Uncoventional geochemical exploration methods in search for concealed gold deposits …… (249)
8.3 Advances in methods of rapid follow-up of anomaly sources under the condition of different landscapes …… (250)
8.4 New advances in data-processing techniques of geochemical exploration for gold …… (251)
References …… (252)
Appendix (A List of Subjects Involved in the Research Topic) …… (254)
English Abstract …… (256)

华夏土地网
http://bbs.hxland.com/

上　篇

物　探　部　分

华夏土地网
http://bbs.hxland.com/

华夏土地网
http://bbs.hxland.com/

第一章　金矿物探的发展与特点

我国金矿物探始于60年代初。与当时金矿地质工作水平和经验相适应，金矿物探工作集中用于“直接”找矿方面。作为金矿体，单纯以金的含量而言，不足以引起金矿体与其围岩的物性差异以形成可探测的物探异常，就此可言，现今各种物探方法都不能直接找金。然而在金矿体或金矿床中金的富集常有各种硫化物、磁性矿物或含放射性元素的矿物等相伴生，当这些伴生矿物与金矿有密切的成因或空间关系时，物探方法可利用这些伴生矿物所形成的金矿体与围岩间的物性差异去“直接”找矿。只要具备上述条件，且干扰异常较少或易于区别时，物探在“直接”找金矿上经常能取得良好的效果，例如著名的黑龙江团结沟金矿床的发现，磁法、激电、自电等物探方法发挥了重要作用；安徽黄狮涝山金矿床的圈定，物探磁法起了主导作用；激电、磁法、电阻率法在山东招掖金矿带蚀变岩型金矿的“直接”找矿上也取得了重要的找矿效果，以及其它等等。

对于金的共生与伴生矿床，物探方法能更好地发挥作用更自不待言了。

但是这类可用物探“直接”找到的金矿床和金矿体，还只是各类金矿的一小部分，其余大部分金矿，或因金矿中虽有不同数量的上述伴生矿物，但它们在成因上或空间上与金的富集相关性差，造成干扰异常多且不易区分；或因物性差异不大，使得物探“直接”找矿的效果常常不佳。

随着金矿地质研究水平的提高与物探实践经验的积累，人们认识到不同类型的金矿床，总是在不同的地层、构造和火成岩的综合地质条件及其变化发展的地质背景上形成，是有规律可循的，例如后生金矿床总是在各自的综合地质背景上，受控于构造断裂，并赋存在特定的构造或构造部位中，而且伴随赋矿构造中的多期富集成矿作用，常发生不同类型与强度的热液蚀变现象，它们构成了后生金矿重要的找矿综合地质标志。这些控矿综合地质条件与找矿综合地质标志除了地表出露部分可直接用地质调查的方法来发现外，对查明隐伏的以及深部的大量未出露部分，各种物探方法可发挥重要作用。尤其是这些控矿与赋矿的断裂构造，各种类型后生金矿的蚀变带与未发生过构造变动和热液蚀变的围岩相比，经常会形成较明显的各种物性差异，为物探方法间接找金提供了广泛的地质及物性依据，扩大了金矿物探的应用范围。

为查明上述的“控矿综合地质条件”、“找矿综合地质标志”，必须利用相应的“各种物性差异”。因此单一物探方法的应用条件和效果在多数情况下是有局限性的，必须依据地区具体条件应用相应的综合物探方法并以科学的成矿理论与客观控矿规律的研究为指导，才能最大限度地发挥物探的作用，提高地质找矿效果。

在国外，在金矿地质工作中重视应用综合物探方法调查“控矿综合地质条件”以优选找矿靶区，以及为查明金矿的“找矿综合地质标志”，把物探工作扩展到间接找金的广大领域。他们的工作起步早，已取得了显著的成果，其中著名案例有：重力及航空电磁法在发现日本菱刈特大型金矿上发挥了重要作用；在加拿大赫姆洛地区应用磁法、电磁法特别

是激电法找金矿先后都取得了成功；南非兰德金矿区应用磁法、重力法圈定深部隐伏的含金层，使找矿获重大突破；在发现乌兹别克穆龙套金矿过程中，磁法、重力和 γ 能谱测量分别在成矿预测与矿区普查中发挥了重要作用，此类国外案例甚多。这些众多的案例说明随着金矿地质工作水平的提高，找矿难度的增大以及经验的积累，从而重视发挥金矿综合物探方法在间接找矿这一广大领域中的作用，是金矿地质工作发展的必然趋势。

相对而言，国内对此起步较晚。但随着金矿地质工作的发展，通过实践，总结经验，提高认识，现在国内金矿物探正在不断扩大其应用范围，从而正在不断提高在地质找矿中的作用与效果。

基于上述金矿物探特点的分析，确定了本书中物探部分侧重于阐述间接找矿方法技术的研究和应用，包括综合航空物探方法，地面高精度磁测法，γ 能谱法，地面电磁法及井中电法、电磁波法等五个方面的研究成果。

第二章　综合航空物探方法在金矿普查预测中的应用研究

近年来，国内已有两套综合航空物探系统正式应用于金矿普查工作，一套是冶金部物探公司自加拿大引进的直升机载的包括磁、电、γ能谱的航空物探综合站；另一套是地矿部物化探研究所研制的固定翼机载的综合磁、电的航空物探系统。

由于两套系统各具特点，侧重研究的方法技术也不同，现将研究成果分述如下。

第一节　直升机综合航空物探方法技术研究及其在金矿普查预测中的应用

直升机载的航空物探综合站，多用于山区，它由两个垂直相距3m的VIW232/HB铯光泵磁力仪，SE-99航空甚低频电磁仪和碘化钠晶体为1024立方英寸的256道γ能谱仪及相关设备组成。测定的参数有：航磁ΔT，航磁垂直梯度$\frac{\partial \Delta T}{\partial z}$，甚低频磁场水平分量$H_x$，垂直实分量$\mathrm{Re}H_z$、垂直虚分量$\mathrm{Im}H_z$和钾、钍、铀及总道计数率等9个。该系统在冀东、冀北、胶东三个金矿区开展了1:25000比例尺的面积共11,000km^{2}的综合航空物探工作。

根据国内外相应方法技术的发展水平，确定了研究的重点为：航磁垂直梯度异常的正演计算与解释方法，航空甚低频电磁异常的区分与解释，以及上述航空物探综合信息在金矿普查预测中的应用研究。

一、磁异常梯度的解释

磁异常梯度作为航空综合站测量的一个新参数，在磁异常的探测和解释中可以发挥重要作用。但是，由于梯度是一纯数学概念，不易与磁性地质体的特征相联系，这已成为物探和地质人员在研究和解释航磁梯度资料时所面临的新问题。

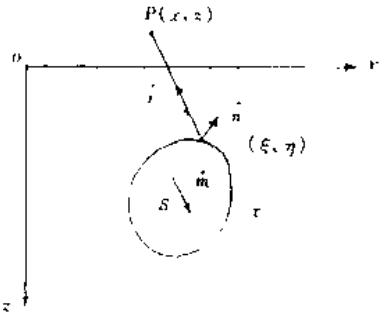

图2-1　二度体剖面示意图

目前，根据磁荷观点，分析磁性体的磁异常梯度一般是采用如下模式进行的：场源（磁荷或磁化强度）→磁异常→磁异常梯度。为了使磁异常梯度易与场源特征相联系，便于磁梯度资料的解释，可以将磁梯度转化为一种磁异常来理解，即采用如下模式来分析磁梯度：场源（用新的场源形式代替磁荷或磁化强度）→磁异常（等价于磁荷或磁化强度的磁异常梯度）。

下面从位场理论出发，来讨论磁性体磁梯度与磁偶层磁异常之间的等价性问题，据此给出磁梯度的正演计算公式与磁偶层分析方法。

如图 2-1 所示，二度体被均匀磁化即磁化强度 $\vec{M}$ 为一常量。根据位场理论，空间任意点 P（x，z）的磁位计算公式为

$$U = \frac{1}{4\pi}\iint_S \frac{2(\vec{M}\cdot\vec{r})}{r^2}\mathrm{d}s \tag{2.1.1}$$

式中：$\vec{r}$为 P（x，z）点到场源点之间的距离矢量，其方向指向 P（x，z）点。

设 $\vec{t}_1$ 方向磁异常为 T_1，对（2.1.1）式求方向 $\vec{t}_1$ 的导数可得 T_1 的计算公式

$$\begin{aligned} T_1 &= -\vec{t}_1\cdot\mu_0\nabla_P U = -\frac{\mu_0}{2\pi}\iint_S \vec{t}_1\cdot\nabla_P\frac{(\vec{M}\cdot\vec{r})}{r^2}\mathrm{d}s \\ &= -\frac{\mu_0}{2\pi}\iint_S\left[\frac{(\vec{M}\cdot\vec{t}_1)}{r^2} - \frac{2(\vec{r}\cdot\vec{M})(\vec{r}\cdot\vec{t}_1)}{r^4}\right]\mathrm{d}s \end{aligned} \tag{2.1.2}$$

设 $\vec{l}$ 方向上的方向梯度为$\frac{\partial T_1}{\partial l}$，对（2.1.2）式求导数可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial l} &= \vec{l}\cdot\nabla T_1 = -\vec{l}\cdot\frac{\mu_0}{2\pi}\iint_S \nabla_P\left[\frac{\vec{M}\cdot\vec{t}_1}{r^2} - \frac{2(\vec{r}\cdot\vec{M})(\vec{r}\cdot\vec{t}_1)}{r^4}\right]\mathrm{d}s \\ &= -\frac{\mu_0}{2\pi}\iint_S(\vec{l}\cdot\nabla_P R)\mathrm{d}s = \frac{\mu_0}{2\pi}\iint_S(\vec{l}\cdot\nabla_m R)\mathrm{d}s \end{aligned} \tag{2.1.3}$$

式中：$R = \frac{\vec{M}\cdot\vec{t}_1}{r^2} - \frac{2(\vec{r}\cdot\vec{M})(\vec{r}\cdot\vec{t}_1)}{r^4}$；$\nabla_P = -\nabla_m$，$\nabla_P$ 和∇_m 分别为计算点和场源点的梯度算子。

根据矢量叉乘恒等式可得

$$-(\vec{l}\cdot\nabla_m R) = \vec{n}_1\cdot[\vec{l}(\nabla_m R\cdot\vec{n}_1) - \vec{n}_1(\nabla_m R\cdot\vec{l})] = \vec{n}_1\cdot[\nabla_m R\times(\vec{l}\times\vec{n}_1)]$$

根据已知的旋度恒等式可得

$$\begin{aligned} \vec{n}_1\cdot[\nabla_m R\times(\vec{l}\times\vec{n}_1)] &= \vec{n}_1\cdot[R\,\mathrm{rot}_m(\vec{l}\times\vec{n}_1) + \nabla_m R\times(\vec{l}\times\vec{n}_1)] \\ &= \vec{n}_1\cdot\mathrm{rot}_m[(\vec{l}\times\vec{n}_1)R] \end{aligned}$$

式中：$\vec{n}_1$ 为 $\mathrm{d}s$ 的法线方向，并且与边界的正方向构成右手螺旋关系。

利用旋度的斯托克斯公式，即可将（2.1.3）式面积分转变为线积分，即有

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial l} &= -\frac{\mu_0}{2\pi}\iint_S \mathrm{rot}_m[(\vec{l}\times\vec{n}_1)R]\cdot\vec{n}_1\mathrm{d}s = -\frac{\mu_0}{2\pi}\int_\tau(\vec{l}\times\vec{n}_1)R\cdot\vec{\tau}\,\mathrm{d}\tau \\ &= -\frac{\mu_0}{2\pi}\int_\tau\vec{l}\cdot(\vec{n}_1\times\vec{\tau})R\,\mathrm{d}\tau \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi}\int_\tau(\vec{l}\cdot\vec{n})\left[\frac{\vec{M}\cdot\vec{t}_1}{r^2} - \frac{2(\vec{r}\cdot\vec{M})(\vec{r}\cdot\vec{t}_1)}{r^4}\right]\mathrm{d}\tau \end{aligned} \tag{2.1.4}$$

式中：$\vec{\tau}$为边界 τ 的切线矢量，$\vec{n}$为 τ 的外法线方向，它们与 $\vec{n}_1$ 的关系为 $\vec{n}_1 = \vec{n}\cdot\vec{\tau}$，这里的 r 为P（x，z）点到边界点之间的距离，$\vec{r}$为 r 的方向矢量，方向指向 P（x，z）点。

对（2.1.1）式应用高斯公式，可得到相当于边界 τ 上的面磁荷密度为$\omega_m = \vec{M}\cdot\vec{n}$的

空间任意点 P（x，z）磁位公式

$$U = \frac{1}{2\pi}\int_{\tau}(\vec{M}\cdot\vec{n})\ln\frac{1}{r}\mathrm{d}\tau \qquad (2.1.1)'$$

对（2.1.1）′式求 $\vec{t}_1$ 方向导数，亦可得 T_1 计算公式

$$T_1 = -\vec{t}_1\cdot\mu_0\nabla_P U = -\frac{\mu_0}{2\pi}\vec{t}_1\cdot\int_{\tau}\nabla_P[(\vec{M}\cdot\vec{n})\ln\frac{1}{r}]\mathrm{d}\tau$$

$$= \frac{\mu_0}{2\pi}\int_{\tau}(\vec{M}\cdot\vec{n})\frac{\vec{t}_1\cdot\vec{r}}{r^2}\mathrm{d}\tau \qquad (2.1.2)'$$

对（2.1.2）′式求 l 方向导数，又可得 $\frac{\partial T_1}{\partial l}$ 计算公式

$$\frac{\partial T_1}{\partial l} = \vec{l}\cdot\nabla_P T_1 = \frac{\mu_0}{2\pi}\vec{l}\int_{\tau}(\vec{M}\cdot\vec{n})\nabla_P\frac{\vec{t}_1\cdot\vec{r}}{r^2}\mathrm{d}\tau$$

$$= \frac{\mu_0}{2\pi}\int_{\tau}(\vec{M}\cdot\vec{n})\left[\frac{(\vec{t}_1\cdot\vec{l})}{r^2} - \frac{2(\vec{r}\cdot\vec{l})(\vec{t}_1\cdot\vec{r})}{r^4}\right]\mathrm{d}\tau \qquad (2.1.3)'$$

假若如图 2-1 所示的二度磁性体用磁偶矩面密度等于 $\vec{m}$，其形状与边界 τ 相同的磁偶层替代，根据偶极子磁位公式，可得该磁偶层在 P（x，z）点的磁位计算公式

$$U = \frac{1}{2\pi}\int_{\tau}\frac{(\vec{m}\cdot\vec{r})}{r^2}\mathrm{d}\tau \qquad (2.1.5)$$

设 $\vec{t}_2$ 方向的磁异常记为 T_2，对（2.1.5）式求导数，可得磁异常 T_2 的计算公式为

$$T_2 = -\vec{t}_2\cdot\mu_0\nabla_P U = -\frac{\mu_0}{2\pi}\vec{t}_2\cdot\int_{\tau}\nabla_P\left(\frac{\vec{m}\cdot\vec{r}}{r^2}\right)\mathrm{d}\tau$$

$$= -\frac{\mu_0}{2\pi}\int_{\tau}\left[\frac{\vec{m}\cdot\vec{t}_2}{r^2} - \frac{2(\vec{r}\cdot\vec{t}_2)(\vec{m}\cdot\vec{r})}{r^4}\right]\mathrm{d}\tau \qquad (2.1.6)$$

1. 磁异常垂直梯度与磁偶层磁异常的等价条件

在（2.1.4）式，（2.1.3）′式和（2.1.6）式中，令 $\vec{t}_1 = \vec{t}_2 = \vec{t}_0$，$\vec{t}_0$ 为航磁异常（ΔT 或者 ΔT_a）的单位方向矢量，$\vec{l} = \vec{k}$（$\vec{k}$ 为坐标 z 轴的单位方向矢量），$T_1 = \Delta T$，$T_2 = \Delta T_a$，$\frac{\partial T_1}{\partial l} = \frac{\partial T_1}{\partial z}$，则有

$$\frac{\partial\Delta T}{\partial z} = \frac{\mu_0}{2\pi}\int_{\tau}(\vec{M}\cdot\vec{n})\left[\frac{\vec{t}_0\cdot\vec{k}}{r^2} - \frac{2(\vec{r}\cdot\vec{k})(\vec{t}_0\cdot\vec{r})}{r^4}\right]\mathrm{d}\tau \qquad (2.1.7)$$

$$= \frac{\mu_0}{2\pi}\int_{\tau}(\vec{n}\cdot\vec{k})\left[\frac{\vec{M}\cdot\vec{t}_0}{r^2} - \frac{2(\vec{r}\cdot\vec{M})(\vec{t}_0\cdot\vec{r})}{r^4}\right]\mathrm{d}\tau \qquad (2.1.7)'$$

$$\Delta T_a = -\frac{\mu_0}{2\pi}\int_{\tau}\left[\frac{\vec{m}\cdot\vec{t}_0}{r^2} - \frac{2(\vec{r}\cdot\vec{t}_0)(\vec{m}\cdot\vec{r})}{r^4}\right]\mathrm{d}\tau \qquad (2.1.8)$$

对比（2.1.8）式与（2.1.7）′或（2.1.7）式可以看出，在(2.1.8)式中若用 $-(\vec{n}\cdot\vec{k})\vec{M}$ 或

者 $-(\vec{M}\cdot\vec{n})\,\vec{k}$ 替代 $\vec{m}$，即可使 ΔT_a 与 $\frac{\partial \Delta T}{\partial z}$ 等价，即

若 $\vec{m}\to-(\vec{n}\cdot\vec{k})\vec{M}$ 或者 $-(\vec{M}\cdot\vec{n})\vec{k}$，则 $\Delta T_a\to\frac{\partial \Delta T}{\partial z}$

同理可证，若 $\vec{m}\to-(\vec{n}\cdot\vec{k})\vec{M}$ 或者 $-(\vec{M}\cdot\vec{n})\vec{k}$，则 $Z_a\to\frac{\partial \Delta Z}{\partial z}$；$H_a\to\frac{\partial \Delta H}{\partial z}$

其中：Z_a 和 H_a 分别为磁偶层的垂直磁异常和水平磁异常；$\frac{\partial \Delta Z}{\partial z}$ 和 $\frac{\partial \Delta H}{\partial z}$ 分别为二度体垂直磁异常的和水平磁异常的垂直梯度。

2. 磁异常水平梯度与磁偶层磁异常的等价条件

在（2.1.4）式和（2.1.3)′式中，令 $\vec{t}_1=\vec{t}_0$，$\vec{l}=\vec{i}$（$\vec{i}$ 为坐标 x 轴的单位方向矢量），$T_1=\Delta T$，$\frac{\partial T_1}{\partial l}=\frac{\partial \Delta T}{\partial x}$，则有

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial x}=\frac{\mu_0}{2\pi}\int_\tau(\vec{M}\cdot\vec{n})\left[\frac{\vec{t}_0\cdot\vec{i}}{r^2}-\frac{2(\vec{r}\cdot\vec{i})(\vec{t}_0\cdot\vec{r})}{r^4}\right]d\tau \qquad (2.1.9)$$

$$=\frac{\mu_0}{2\pi}\int_\tau(\vec{n}\cdot\vec{i})\left[\frac{\vec{M}\cdot\vec{t}_0}{r^2}-\frac{2(\vec{r}\cdot\vec{M})(\vec{t}_0\cdot\vec{r})}{r^4}\right]d\tau \qquad (2.1.9)'$$

对比（2.1.8）式与（2.1.9）式或（2.1.9)′式可看出，在(2.1.8)式中若用 $-(\vec{n}\cdot\vec{i})\,\vec{M}$ 或者 $-(\vec{M}\cdot\vec{n})\,\vec{i}$ 替代 $\vec{m}$，即可使 ΔT_a 与 $\frac{\partial \Delta T}{\partial x}$ 等价，即

若 $\vec{m}\to-(\vec{n}\cdot\vec{i})\,\vec{M}$ 或者 $-(\vec{M}\cdot\vec{n})\,\vec{i}$，则有 $\Delta T_a\to\frac{\partial \Delta T}{\partial x}$

同理可证，若 $\vec{m}\to-(\vec{n}\cdot\vec{i})\,\vec{M}$ 或者 $-(\vec{M}\cdot\vec{n})\,\vec{i}$，则有 $Z_a\to\frac{\partial \Delta Z}{\partial x}$；$H_a\to\frac{\partial \Delta H}{\partial x}$。其中 $\frac{\partial \Delta Z}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial \Delta H}{\partial x}$ 分别为二度体垂直和水平磁异常的水平梯度，其它符号意义同前。

经过类似的论证，我们可知二度体的磁异常梯度与磁偶层磁异常有和上述形式相同的等价条件（略）。

3. 通过上述各等价条件的推导，①给出了直接计算任意形状均匀磁化体各磁场梯度的简便正演计算公式，离散化后即可用于电算，②对于规则几何形体，利用等价条件可直接由其界面上的磁偶层面（即大家熟悉的“磁薄板”）磁异常组合成该磁化体的磁梯度异常。

这在二度体情况下尤为直观和方便。例如，对于二度的向下延深无限的薄板，可推导出：

$$\Delta T(\alpha,i_s)=A\cdot\Delta Z(\alpha,i'_s)=A(\Delta Z_s\cos i'_s-\Delta H_s\sin i'_s) \qquad (2.1.10)$$

式中：α 为薄板倾角，i_s 为有效磁化强度 M_s 的倾角，$i'_s=2i_s-\alpha-90°$，ΔZ_s 与 ΔH_s 分别为顺层磁化薄板即磁荷线的垂直及水平磁异常，当磁化方向与地磁方向一致时，$A=\frac{\sin I_0}{\sin i_s}$（$I_0$ 为地磁倾角）。这样，任一磁化方向薄板的 $\Delta T(\alpha,i_s)$ 都可分解为最简单的磁荷线磁场 ΔZ_S 及 ΔH_S 的组合。

有限延深薄板的磁异常可用两无限延深薄板磁场相减得出，这是众所周知的。

如磁性地质体可用无限延深薄板代替，可证明它的航磁垂直梯度异常可用埋深相同的偶极线的 ΔT 来等价，偶极倾角与薄板的有效磁化倾角相等。

在图 2-2 中，二度体梯度异常可看作主要是由磁偶层面 AB 产生的磁异常。偶层面 $AB\infty$ 的 $\alpha=0$，$i_s=90°$，由（2.1.10）式可知 $AB\infty$ 的 $\Delta T_A=-A\cdot\Delta H_A$，$B\infty$ 偶层的 $\alpha=0$，$i_s=90°$，$-\Delta T_B=A\cdot\Delta H_B$，即 ΔT_z 相当在 A，B 两点处分别置有一正一负磁荷线所产生的 ΔH 之和。

如将 M_s 顺时针转 90°，则 ΔT（α，i'_s）相当于 $-\Delta T_x$，由（2.1.10）式可知，对偶极层 AB，$\Delta T_x=-A\ (\Delta Z_A-\Delta Z_B)$。对比图 2-2 中 ΔT_z 及 ΔT_x 曲线形态，与上述的分析结果基本吻合。

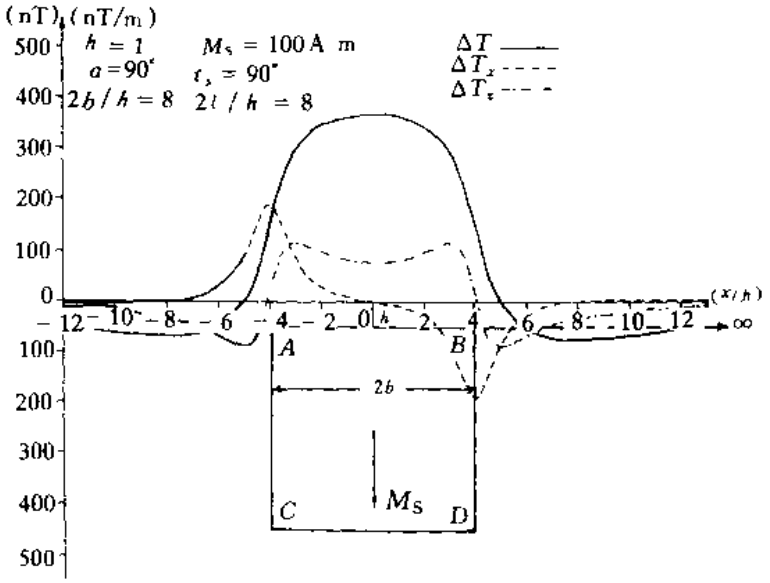

图 2-2　二度厚板 ΔT 及其梯度曲线图

（据管志宁，1993）

二、航空甚低频电磁异常的边界元分析及有关理论问题研究

根据电磁场的基本理论，对于任意二维 VLF 电磁场都可分解为 E 极化电磁场（TM 场）与 H 极化电磁场（TE 场）之和。并且，已知二者边值问题与求解方法类似，所以，下面仅讨论 E 极化电磁场的边值问题和求解方法。

对于二维 E 极化电磁场，在直角坐标系中，电场 E_x 与磁场（测线方向的水平分量 H_y 和垂直分量 H_z）的计算，归结为求解如下方程及其边值问题（SI 单位，时间因子 $e^{-i\omega t}$）：

$$\nabla^2 E_x+k^2E_x=0 \tag{2.1.11}$$

$$E_x^{(1)}|_{\tau_1}=E_x^{(2)}|_{\tau_1} \tag{2.1.12}$$

$$E_x^{(0)}|_{\tau_s}=E_x^{(1)}|_{\tau_s} \tag{2.1.13}$$

$$\left.\frac{\partial E_x^{(1)}}{\partial n}\right|_{\tau_1} = \left.\frac{\partial E_x^{(2)}}{\partial n}\right|_{\tau_1} \tag{2.1.14}$$

$$\left.\frac{\partial E_x^{(0)}}{\partial n}\right|_{\tau_s} = \left.\frac{\partial E_x^{(1)}}{\partial n}\right|_{\tau_s} \tag{2.1.15}$$

$$E_x^{(1)}|_{\tau\infty} = A_0 \cdot e^{ik_1 z} \tag{2.1.16}$$

$$\left.E_x^{(1)}\right|_{\tau'\infty} = A_0 \cdot \left[\cos(k_0 z) + i\frac{k_1}{k_0} \cdot \sin(k_0 z)\right] \tag{2.1.17}$$

式中：τ_s 为地表面，τ_1 为地下异常体的边界，τ_∞ 与 τ'_∞ 分别为均匀大地和空气介质的无穷远边界。k 为介质的波数，A_0 为 VLF 电磁场的电场振幅。$E_x^{(0)}$、$E_x^{(1)}$、$E_x^{(2)}$、$\frac{\partial E_x^{(0)}}{\partial n}$、$\frac{\partial E_x^{(1)}}{\partial n}$和$\frac{\partial E_x^{(2)}}{\partial n}$分别为区域$\Omega_0$、$\Omega_1$、$\Omega_2$ 的电场及其法向导数，Ω_0、Ω_1 和 Ω_2 分别为空气介质、均匀大地和地下异常体的分布区域，i 为复数的虚单位，ω 为 VLF 电磁场的圆频率，它与频率 f 的关系为$\omega = 2\pi f$。

根据格林公式，可得边界上电场 E_x，及其法向导数$\frac{\partial E_x}{\partial n}$应满足的边界积分方程是

$$\frac{\alpha_P}{2\pi} \cdot E_x(P) = -\oint_\tau \left[E_x \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial n} - \varphi \cdot \frac{\partial E_x}{\partial n}\right] d\tau \tag{2.1.18}$$

式中：α_P 是边界τ 上P 点对区域的张角，φ 为亥姆霍兹方程的基本解，$\varphi = \frac{i}{4}H_0^{(1)}(kr)$，$H_0^{(1)}(kr)$ 为第一类零阶汉克尔函数，$\frac{\partial \varphi}{\partial n}$为$\varphi$ 的法向导数。

根据（2.1.18）式和边界条件（2.1.12）—（2.1.17），可导出边界（τ_s 和 τ_1）上电场 E_x 及其法向导数$\frac{\partial E_x}{\partial n}$所满足的边界积分方程分别为：

$$\begin{aligned}\frac{\alpha'_P}{2\pi}E_x^{(1)}(P) = &-\int_{\tau_s} E_x^{(1)} \cdot \frac{\partial \varphi^{(1)}}{\partial n} d\tau + \int_{\tau_s} \varphi^{(1)} \cdot \frac{\partial E_x^{(1)}}{\partial n} d\tau \\ &- \oint_{\tau_1} E_x^{(1)} \cdot \frac{\partial \varphi^{(1)}}{\partial n} d\tau + \oint_{\tau_1} \varphi^{(1)} \cdot \frac{\partial E_x^{(1)}}{\partial n} d\tau + C_P\end{aligned} \tag{2.1.19}$$

$$\left(1 - \frac{\alpha'_P}{2\pi}\right) \cdot E_x^{(2)}(P) = \oint_{\tau_1} E_x^{(2)} \cdot \frac{\partial \varphi^{(2)}}{\partial n} d\tau - \oint_{\tau_1} \varphi^{(2)} \cdot \frac{\partial E_x^{(2)}}{\partial n} d\tau \tag{2.1.20}$$

$$\frac{\alpha''_P}{2\pi} \cdot E_x^{(1)}(P) = \int_{\tau_s} E_x^{(1)} \cdot \frac{\partial \varphi^{(0)}}{\partial n} d\tau - \int_{\tau_s} \varphi^{(0)} \cdot \frac{\partial E_x^{(1)}}{\partial n} d\tau + A_P \tag{2.1.21}$$

其中

$$C_P = A_0 \int_{\tau_\infty} \frac{ik_1}{4} e^{ik_1 z} \cdot \left[H_1^{(1)}(k_1 r)\cos\beta + iH_0^{(1)}(k_1 r) \cdot \cos(n, z)\right] d\tau$$

$$A_P = -\int_{\tau'_\infty} \frac{ik_0}{4} H_1^{(1)}(k_0 r)\cos\beta \cdot A_0 \cdot [\cos(k_0 z) + i\frac{k_1}{k_0}\sin(k_0 z)]d\tau +$$

$$\int_{\tau'_\infty} A_0 \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_0 r) \cdot \cos(n, z) \cdot [k_0 \cdot \sin(k_0 z) - ik_1 \cos(k_0 z)]d\tau$$

$H_1^{(1)}(kr)$ 为第一类 一阶汉克尔函数，α'_P 是边界 τ_s 和 τ_1 上的边界点对 Ω_1 的张角，α''_P 是边界 τ_s 上的边界点对 Ω_0 的张角。

用边界元法数值处理（2.1.19）—（2.1.21）三式，即可导出边界上 E_x 及其 $\frac{\partial E_x}{\partial n}$ 所满足的线性代数方程组。然后，用常规方法求解该线性代数方程组（例如高斯消去法），即可获得边界上的电场及其法向导数。

根据麦克斯韦方程，即可导出计算空间任意点电磁场的计算公式：

$$E_x(P) = -\oint_\tau [E_x \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial n} - \varphi \cdot \frac{\partial E_x}{\partial n}] \cdot d\tau \qquad (2.1.22)$$

$$H_y(P) = -\oint_\tau [E_x \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial n \partial z} - \frac{\partial \varphi}{\partial z} \cdot \frac{\partial E_x}{\partial n}]/(i\omega\mu) \cdot d\tau \qquad (2.1.23)$$

$$H_z(P) = -\oint_\tau [E_x \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial n \partial y} - \frac{\partial \varphi}{\partial y} \cdot \frac{\partial E_x}{\partial n}]/(i\omega\mu) \cdot d\tau \qquad (2.1.24)$$

式中：μ 为介质的导磁率。

因此，根据（2.1.22）—（2.1.24）和前面已计算出的边界上的电场及其法向导数，即可计算空间任意一点的电磁场。

①设 VLF 电磁场的频率 $f = 17.4$kHz，电场振幅 $A_0 = 1$，地下岩石电阻率 $\rho_1 = 4000$ Ω·m，导磁率和介电常数与自由空间中 μ_0，ε_0 相同，即取 $\mu_1 = 4\pi \times 10^{-7}$H/m，$\varepsilon_1 = 8.8538 \times 10^{-12}$F/m。

由均匀无限半空间电磁场理论计算公式，可求得地下观测平面（$Z = 100$m）上的电磁场分别为

$$E_x^{(0)} = 1.4128 - 0.4151 \cdot i$$

$$H_y^{(0)} = 0.0302 + 0.0300 \cdot i$$

$$H_z^{(0)} = 0.0000$$

用边界元方法的计算结果见表 2-1 所示。对比两者可以看出，解析计算结果与数值计算结果基本一致，由此说明了该数值计算法的正确性。

②通过分析边界元法正演模拟计算结果发现（见图 2-4—2-8），山脊地形所产生的垂直磁场 H_z 虚、实分量异常与图 2-3 中绝缘介质中导电体所产生的 H_z 类似，它们的 H_z 虚、实分量都表现为沿测线方向由负到正的变化；山谷地形与山脊地形的 H_z 异常正好相反，虚、实分量表现为沿测线方向由正到负的变化；对于导电介质中的良导体（大感应参数）所产生的 H_z 虚分量异常与山谷虚分量类似，而实分量异常与山脊实分量类似。因

表 2-1

点　位（m）	$\mathrm{Re}E_x^{(0)}$	$\mathrm{Im}E_x^{(0)}$	$\mathrm{Re}H_y^{(0)}$	$\mathrm{Im}H_y^{(0)}$	$\mathrm{Re}H_z^{(0)}$ (10^{-5})	$\mathrm{Im}H_z^{(0)}$ (10^{-5})
-700	1.3995	-0.3929	0.0304	0.0300	-0.4700	-0.5600
-600	1.3989	0.3923	0.0304	0.0300	-0.3300	-0.5000
-500	1.3981	0.3919	0.0304	0.0300	-0.2300	-0.4500
-400	1.3971	-0.3917	0.0304	0.0300	0.1800	0.4300
-300	1.3969	-0.3914	0.0304	0.0300	-0.1600	-0.4400
-200	1.3969	0.3912	0.0304	0.0300	-0.1800	0.4700
-100	1.3956	-0.3990	0.0304	0.0300	-0.2000	-0.4400
0	1.3952	-0.3908	0.0304	0.0300	-0.0680	0.0590
100	1.3955	0.3909	0.0304	0.0300	0.1900	0.3000
200	1.3959	-0.3912	0.0304	0.0300	0.1600	0.3100
300	1.3963	0.3914	0.0304	0.0300	0.1300	0.2600
400	1.3966	0.3915	0.0304	0.0300	0.1300	0.2300
500	1.3970	-0.3917	0.0304	0.0300	0.1600	0.2300
600	1.3973	-0.3920	0.0304	0.0300	0.2200	0.2400
700	1.3998	-0.3925	0.0304	0.0300	0.2400	0.2500

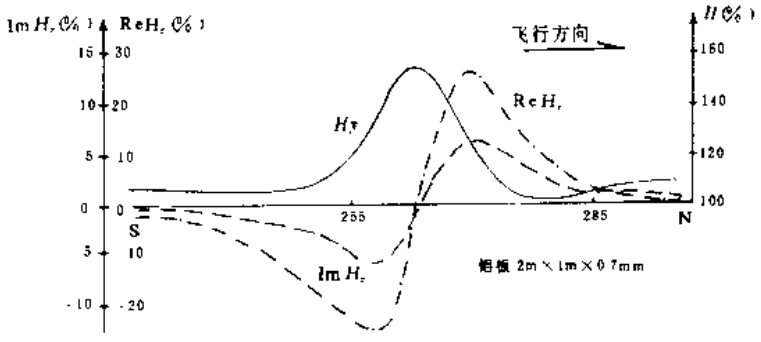

图 2-3　垂直铝板 VLF 模型实验曲线

此，根据上述正演模拟曲线的变化规律，首先从理论上证实了在实际工作中根据统计对比结果所得出的 VLF 电磁场山脊地形异常识别方法的正确性。其次，利用该异常变化规律，同样也可以用于山谷地形异常的识别，这就进一步完善了 VLF 电磁异常识别方法。理论与实践还表明了导电围岩中导体综合参数的大小，决定着异常正负与形状的不同，对此应予重视。因此所开发的甚低频电磁异常边界元分析方法对于大面积航空 VLF 电磁法资料的分析研究具有重要实际意义。

其次，通过分析（2.1.18）—（2.1.24）各式不难看出，用边界元数值计算方法，还可以解决如下两个方面的问题：①用边界元方法不仅可以解决地下存在单个异常体的VLF电磁场的正演数值模拟，而且还可以用于地下存在多个异常体复杂地电断面的VLF电磁场的数值模拟计算。②根据观测已知的VLF电场或者VLF磁场分量，采用边界元方法即可实现VLF电磁场的向上延拓、电磁场分量转换、导数换算和曲化平处理等。

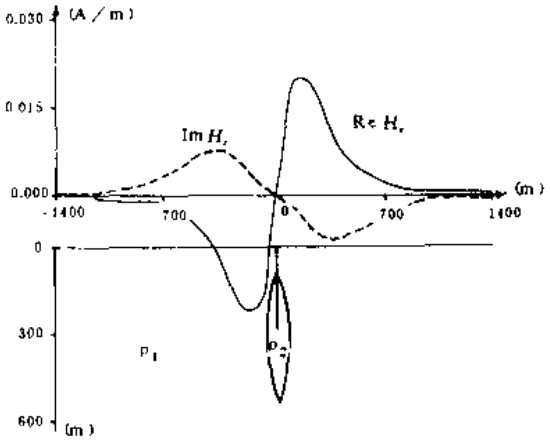

图2-4　导电围岩中良导体VLF垂直磁场虚实分量
f=17.4kHz；地下围岩电阻率ρ_1=4000Ω·m；
异常体电阻率ρ_2=10Ω·m；计算平面Z=-100m

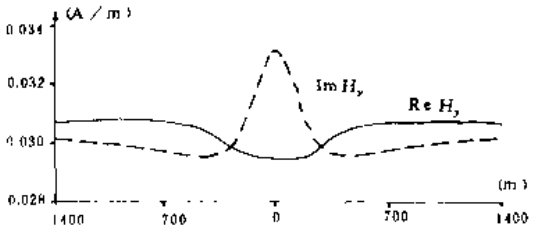

图2-5　导电围岩中良导体VLF
水平磁场虚实分量

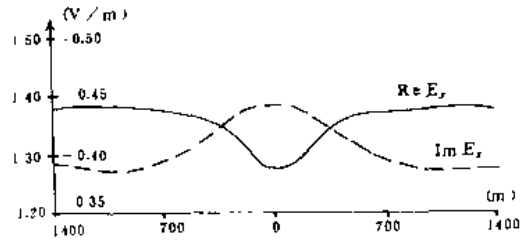

图2-6　导电围岩中良导体VLF
电场虚实分量

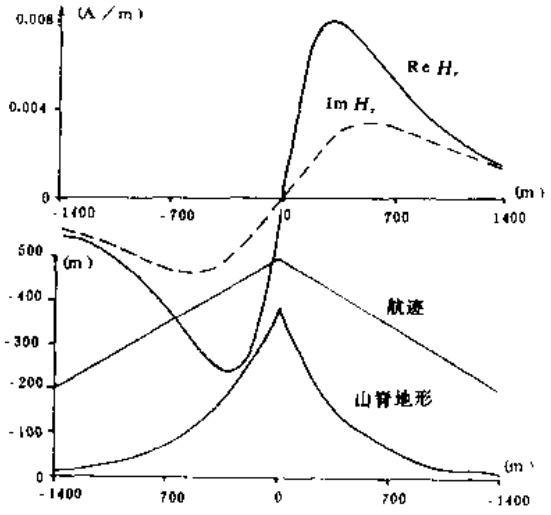

图2-7　起伏观测面山脊VLF
垂直磁场虚实分量

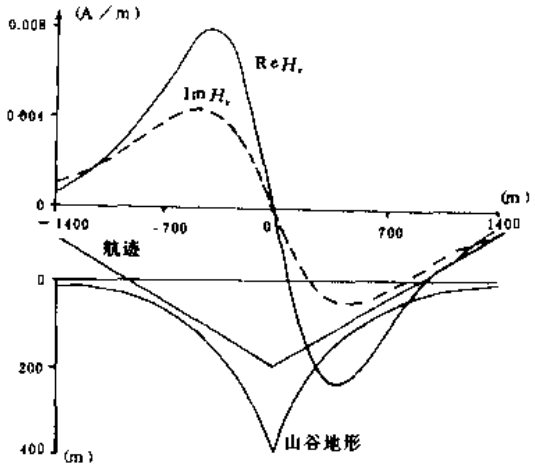

图2-8　起伏观测面山谷VLF
垂直磁场虚实分量

第二节　综合航空物探方法在花岗岩-绿岩地体金矿普查预测中的应用研究

一、综合航空物探方法在花岗岩-绿岩地体金矿控矿地质条件的调查研究中的依据与作用

（一）华北地台花岗岩-绿岩地体金矿的基本地质特征

我国华北地台前寒武纪花岗岩-绿岩地体是一重要的金矿分布区。

华北地台花岗岩-绿岩地体主要由前寒武纪绿岩带和T.T.G.（英云闪长岩，奥长花岗岩，花岗闪长岩）以及其后的重熔或者侵入的新老花岗岩组成。其中绿岩带主要是由海相火山喷发的基性和中基性火山岩经区域变质作用所形成的老变质岩系构成。华北地台绿岩带与国外绿岩带相比，前者在深变质后又遭受了多次的构造岩浆作用的改造。目前，根据绿岩带的构造活化改造程度的不同，又可分为稳定型、弱活化改造型和强烈活化改造型三种类型。由于绿岩带中所含高铁镁质岩石一般具有较高的金丰度，并且金的可活化转移性强，因而一般认为，绿岩带是花岗岩-绿岩地体金矿的主要成矿物质来源，即所谓的金矿矿源层。

根据花岗岩-绿岩地体金矿的空间分布规律，花岗岩体与金矿有密切的空间关系。例如，许多已知金矿即产在花岗岩体内部、内外接触带上或者岩体附近。再结合已知金矿床的同位素组成和包裹体流体特征可以看出，花岗岩与金矿成矿还有密切的成因关系。花岗岩的控矿作用主要表现在两个方面，一方面通过岩浆活动促使矿源层中的金活化、迁移和进一步富集成矿；另一方面就是直接为金矿提供成矿物质。该区内各期岩浆活动以燕山期岩浆活动最为强烈，燕山期花岗岩体与金矿成矿关系最为密切，并且，燕山期为区内金矿成矿的重要成矿期之一。

花岗岩-绿岩地体金矿构造控矿特征极为明显，这是因为多期构造运动为含Au热液的运移、富集和沉淀提供了动力、通道和容矿空间。根据构造规模大小的不同，构造控矿主要表现在两个方面，即区域性深大断裂和大断裂本身就是控岩构造，因而地体内金矿带展布方向一般与区内主构造线方向一致。而较小规模的构造带（例如老地层和花岗岩的断裂破碎带，蚀变断裂带以及韧脆性剪切带等）一般控制了金矿床的产出空间位置和金矿床形态等。

该地体内的金矿主要为中低温的含金石英脉型和含金破碎蚀变岩型。有时可发现上部为石英脉型向深部逐渐过渡为破碎蚀变岩型金矿。由于该类金矿主要为热液成矿作用，因而金矿床都有程度不同的围岩蚀变，主要包括硅化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化以及钾长石化等。

根据上面的讨论不难看出，花岗岩-绿岩地体金矿，在区域上其成矿地质条件是共同的。因此，花岗岩-绿岩地体金矿的找矿预测，关键是发现和优选控制金矿分布或赋存的有利的地质构造蚀变条件。这些地质构造蚀变作用，多形成一种或一种以上的物性差异，从而为综合物探方法的应用，提供了地质与物性依据。

（二）综合航空物探信息在花岗岩-绿岩地体金矿控矿综合地质条件研究中的作用

通过研究与金矿生成有关的老变质岩、构造蚀变带和岩体的物性参数发现，它们往往

具有如下几个上要特征：

①绿岩带老变质岩系磁性较强且不均匀，具有明显的区域磁场特征，基本上反映了变质前地层、岩性的磁性特征。

②与金矿成矿关系密切的火成岩体一般具有较低的磁性或较高的放射性元素含量。

③构造蚀变带常造成老地层或岩体物性变化，如磁性的降低；蚀变破碎带假若其内充填地下水可使其表现为低电阻率特点，若有硅化或石英脉充填又可形成高阻特点；钾化的蚀变（或构造）带，具有较高钾元素含量的特征等。

因此，综合航空物探方法与单一的航空物探方法相比，在花岗岩-绿岩地体金矿控矿综合地质条件研究过程中，能更好地发挥综合物探信息在间接找矿中多方面的作用。

1．利用航磁梯度及其磁偶层磁异常解释方法可研究多级构造和准确确定地层和岩体的分布范围

由于梯度异常与总场异常相比，前者可以有效减弱区域场的影响，提高异常的水平分辨率以及突出浅源磁异常的影响等，因此，充分利用梯度资料，可以更详细的研究构造、地层和火成岩的分布情况。

首先，实际资料分析研究表明，综合利用航磁总场及其梯度资料，不仅可以研究规模

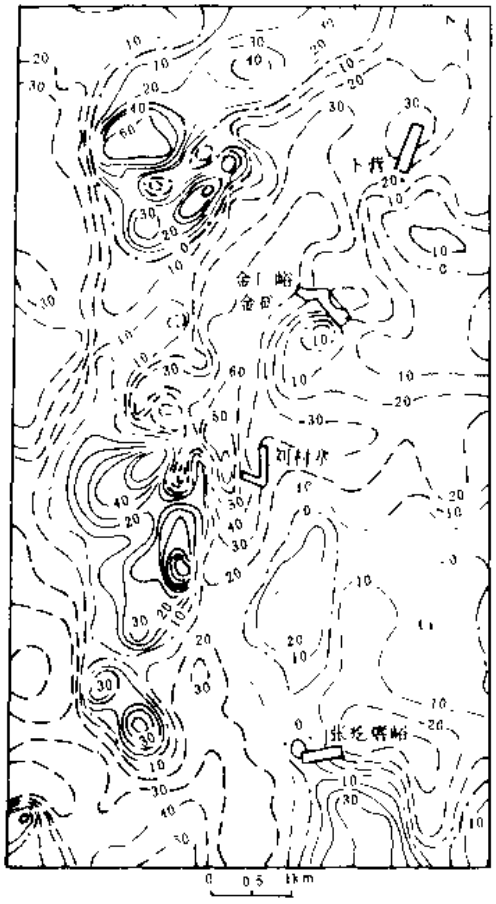

图 2-9 冀东金厂峪地区航磁 ΔT 平面等值线图
（单位：10nT）

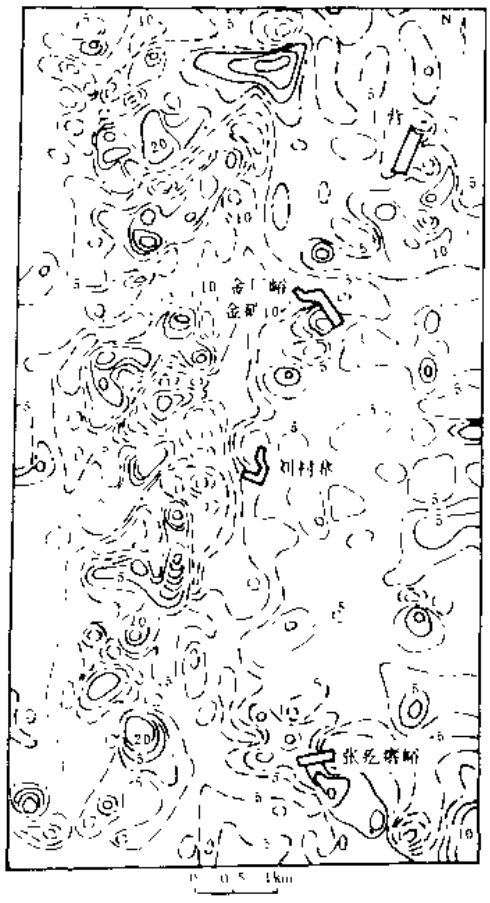

图 2-10 冀东金厂峪地区航磁 ΔT_z 平面等值线图
（单位：0.1nT/m）

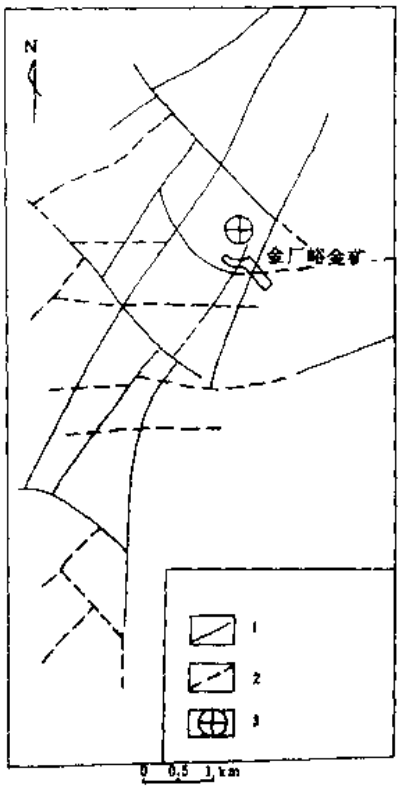

图 2-11 冀东金厂峪地区航磁 ΔT_z 构造解释推断图

1—与梯度推断一致的已知断层；2—梯度推断断层；3—大型金矿床

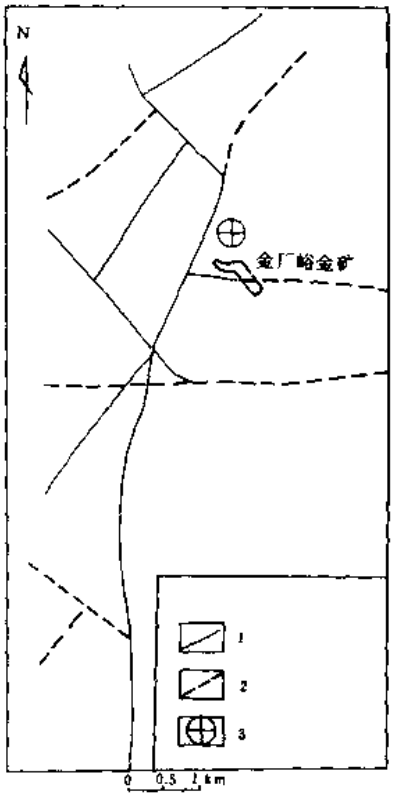

图 2-12 冀东金厂峪地区航磁 ΔT 构造解释推断图

1—与航磁推断一致的已知断层；2—航磁推断断层；3—大型金矿床

较大的断裂构造（例如控制金矿矿区分布的深大断裂带），而且还可以研究规模较小的次级构造（例如控制金矿床或金矿体产出空间位置的容矿构造等），例如，图 2-9—2-12 所示。根据航磁总场（ΔT）所填绘的断裂构造主要反映了该区“多”字型构造的宏观分布；而航磁梯度异常（ΔT_z）比较详细地反映了区内复杂构造体系的分布形态。该区内的金厂峪金矿为产在太古宙高级变质区花岗岩-绿岩所形成的构造变质杂岩带中，受韧（脆）性剪切带控制的石英脉型金矿床，与区内其它地方相比较，其构造最为发育，表现出了较为明显的构造控矿特点。由此可以看出，上述研究成果对于在该区进行构造地球化学找矿也是有重要意义的。其次，利用航磁梯度资料可以更准确地划分不同地层和确定火或岩的分布。尤其是当不同地质体边界受附近强磁性地质体的影响，航磁梯度更能显示出其优越性。例如，图 2-13，图 2-14 及图 2-15 所示，根据总场和梯度异常都可以较准确地确定区内基性岩体（φ_4）的北部边界。但是，若仅利用总场（包括化极总场）确定该岩体的其余边界是比较困难的。然而，总场垂直梯度（ΔT_z）可较准确地指示出了基性岩体的全部边界，以及该岩体南部太古宇老地层（Ar）与震旦系地层（Z）的接触线、闪长岩岩体（例如，峪耳崖东部的闪长岩体（δ_5）和孤山子西部的中粒黑云母闪长岩体（δ_5），见图 2-15 所示）的分布，由于总场异常受强磁性岩体 φ_4 磁异常的影响，老地层与闪长岩体的异常特征被模糊，所以给识别和圈定该类地质体的磁异常造成很大困难。然而，航磁梯度

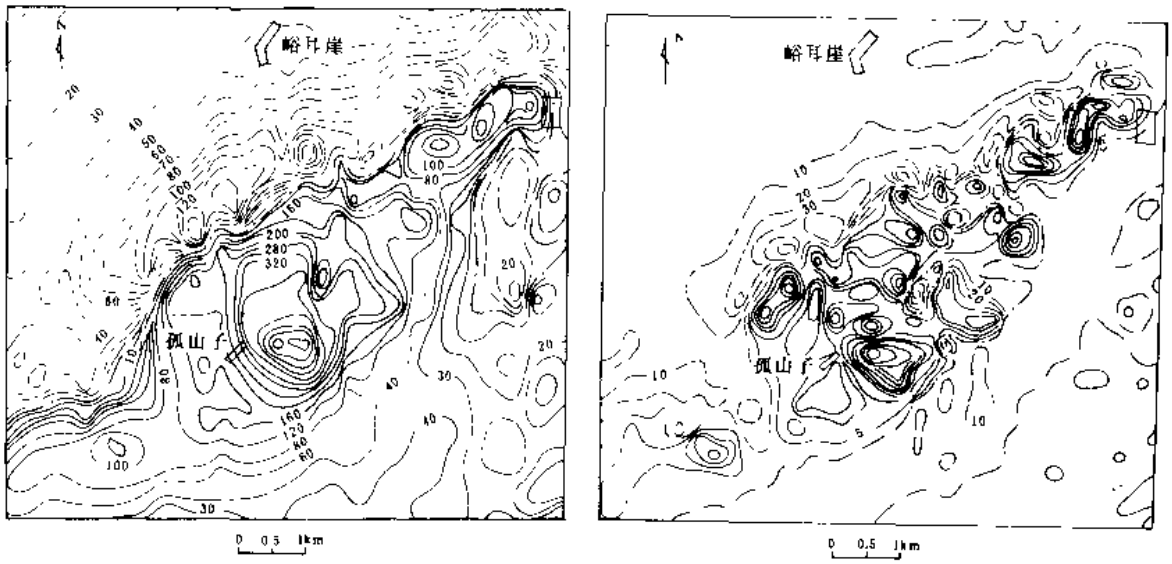

图 2-13　冀东孤山子地区实测 ΔT 平面等值线图

（单位：nT）

可以有效地压制岩体（φ_4）磁异常的影响，增加了异常的分辨率，使得不同地质体之间的分界变得比较清楚，以便进行近地表的详细地质填图。

总之，在金矿地质填图中，若能充分利用航磁总场及其梯度的各自异常特点，必将会进一步提高航磁方法地质填图的应用效果。

2. 航空 VLF 电磁异常在断裂构造研究中的作用

（1）地形（山谷和山脊）异常的识别方法

对于在山区开展航空 VLF 电磁测量所获得的异常，地形起伏不平所产生的干扰异常不容忽视，对于异常研究的影响极为普遍。例如，工作初期通过对冀东测区 4000 多平方公里面积上的航空 VLF 测量结果统计分析发现，全区垂直磁场虚、实分量异常共有 334 个，其中虚、实分量符号相同的异常共有 222 个，后者与山脊地形吻合的异常多达 215 个，占这类异常的 97%；而已知断裂的垂直磁场虚、实分量异常则符号相反。

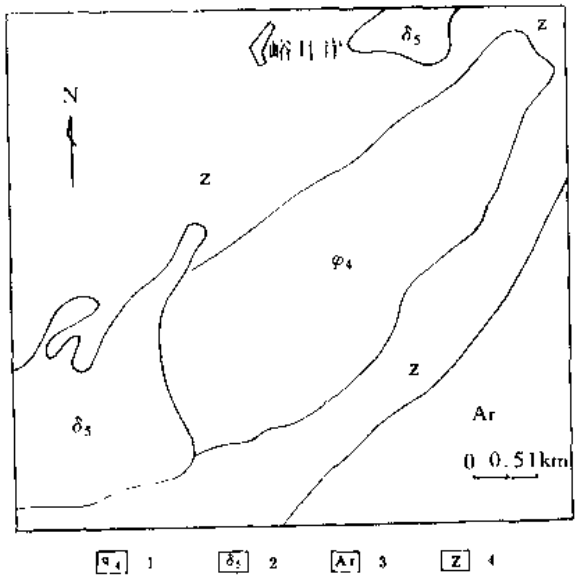

图 2-15　冀东孤山子地区地质简图

1—基性岩体；2—闪长岩体；3—太古宇地层；4—震旦系地层

对此，进行了物理模拟实验和边界元数值模拟研究。最后研究结果表明，地形异常…

般表现为垂直磁场虚、实分量为同号异常（其中山谷为沿测线方向从正到负变化，山脊为从负到正变化）；而感应参数大的低阻断裂带上垂直磁场虚、实分量一般为符号相反的异常。

（2）利用 VLF 垂直磁场（水平梯度）进行断裂构造填图

首先，利用上述已总结出的 VLF 异常识别方法，进行异常分类，即区分出地形异常与构造带异常。根据 VLF 异常的零值点连线，可确定断裂带的地面位置，再分析异常的对称性情况，即可大致估计断裂带的倾向，例如，图2-16 即为冀东测区潘杖子—王厂地区航空 VLF 垂直磁场（H_z）虚分量异常，该异常与实分量异常符号相反（即沿飞行方向由正到负变化）。根据 VLF 异常识别方法推测，该异常带为 NWW 向断裂带反映。

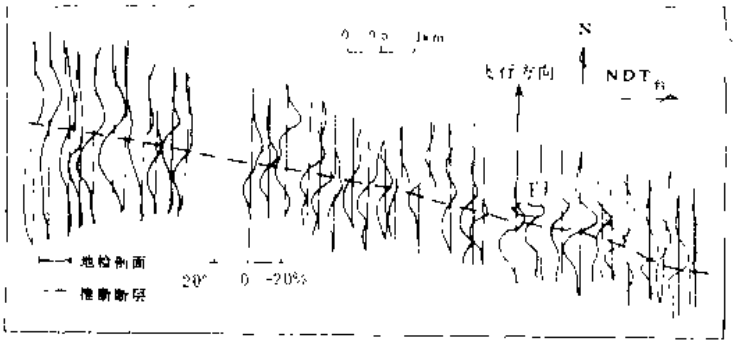

图 2-16　冀东潘杖子—王厂 VLF 法 H_z 虚实分量异常图

为了检验上述推断，在该异常带上进行了地面检查工作，其中王厂附近的地检结果见图 2-17 所示（H_x 为水平磁场振幅，D 为极化椭圆倾角）。

其次，在 VLF 异常研究过程中，还利用了 VLF 垂直磁场的水平梯度异常（计算步长等于点距）。并且利用该方法对整个胶东牟平—乳山测区的垂直磁场 H_z 的虚、实分量进行了转换处理。通过对比分析发现，由于水平梯度异常可以有效地减弱区域场的影响以及正常场选择不准的干扰，因此可以更好地指示构造带的地面位置。此外，根据垂直磁场的异常识别方法，提出了水平梯度的三种异常识别模型，即①正的虚分量梯度异常与负的实分量梯度异常，为低阻断裂带异常反映；②虚、实分量梯度异常同时为正异常，为山谷地形异常反映；③虚、实分量梯度异常同时为负异常，为山脊地形异常反映。例如，图 2-18 与图 2-19 分别为上王格庄附近地区实测航空 VLF 垂直磁场及其虚分量水平梯度异常。根据上述总结出的垂直磁异常识别方法及其梯度异常的识别模型，推测该异常带为一近东

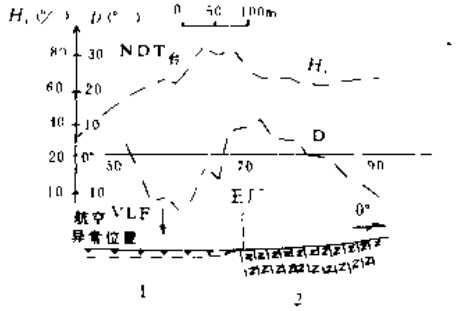

图 2-17　王厂 VLF 异常地检剖面图

1—浮土；2—绢云母化绿泥石化斜长角闪岩

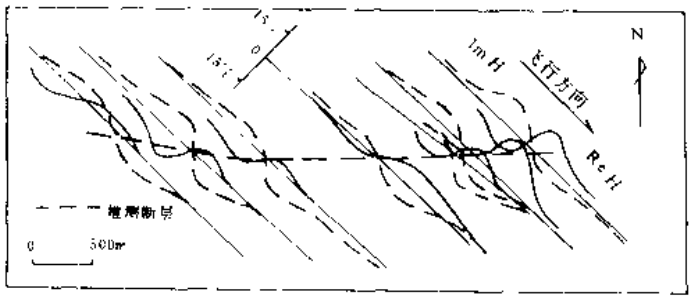

图 2-18　胶东牟平-乳山测区上王格庄 VLF 法 H_z 虚实分量图

西向断裂反映；根据其异常曲线的对称性情况，推测该带产状近于直立。地面检查工作发现了岩石的破碎现象，地检剖面见图 2-20 所示。

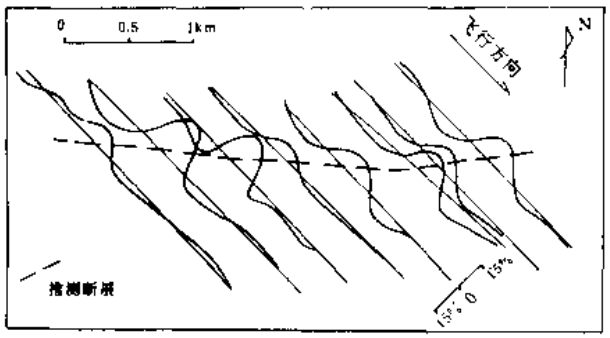

图 2-19 胶东牟平-乳山测区上王格庄 VLF 法 H_2 虚分量水平梯度图

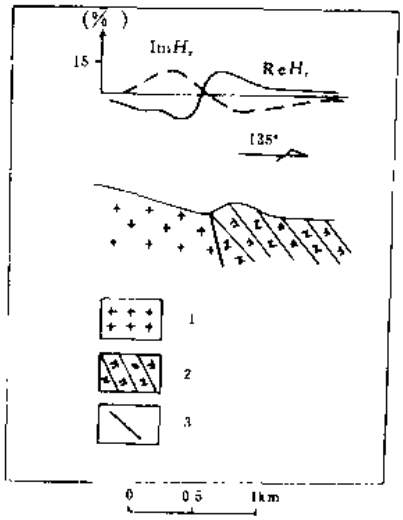

图 2-20 上王格庄 VLF 异常踏勘综合剖面图
1-花岗岩；2-黑云母斜长片麻岩；3-断层

3. 航空 γ 能谱异常的应用特点

目前，国内外航空 γ 能谱方法的应用实践表明，该方法可以广泛地应用于地层、构造和岩体的地质填图。根据对冀东遵化—青龙等测区航放资料的分析研究可以看出，对于当前广泛开展的金矿地质填图工作，该方法至少在如下两个方面可以发挥其重要作用。

①利用钾（K），铀（U），钍（Th）三元素以及 K/Th 比值异常，可以有效地圈定与金矿成矿相关的无磁异常的中小型酸（或碱）性岩体。这是因为在花岗岩-绿岩地体地区，往往有富钾的花岗岩类岩体出露，而该类岩体 K、U、Th 含量又远比绿岩带中的高，并且，当岩体发生钾质交代作用情况下，又可以导致 K 元素的带入。例如在冀东，与牛心山金矿形成有关的牛心山岩体（γ_5^3）在航磁及其梯度上无反映，但其航放异常却表现为 K、U、Th 为高值异常和 K/Th 为低值异常的反映，其中 K 和 K/Th 异常见图 2-21 和图 2-22 所示。在岩体西南侧发现有反映构造蚀变的 ΔT_a 低值异常。综合分析与该类岩体有关的金矿床航空地球物理场和控矿条件不难看出，该类金矿床主要表现为小岩体及其外围的构造蚀变岩控矿，故具有高放射性及 ΔT_a 低值异常的综合异常特征。利用这个牛心山式金矿航空物探找矿异常模型，对冀东测区的太平寨周围地区的航空 γ 能谱异常及 ΔT_a 低值异常进行了综合评价，圈定了渠子地具蚀变围岩的小岩体。后经化探取样分析表明，该岩体周围存在金矿化现象，构造蚀变发育，是金厂峪与牛心山两金矿区之间，最有远景的金矿找矿区。

②利用 K、K/Th 和 K^2/Th 异常，可以确定构造（断裂或蚀变）带、钾化区（带）及其分布情况。

根据已知构造带上的 K 和 K/Th 异常特征，初步总结出利用 K 高或 K/Th 高的异常呈线性或串珠状的分布规律，可以圈定钾化蚀变构造带等的分布。

综合上述及冀东两种主要“控矿综合地质条件”（即燕山期小岩体或韧性剪切带及其

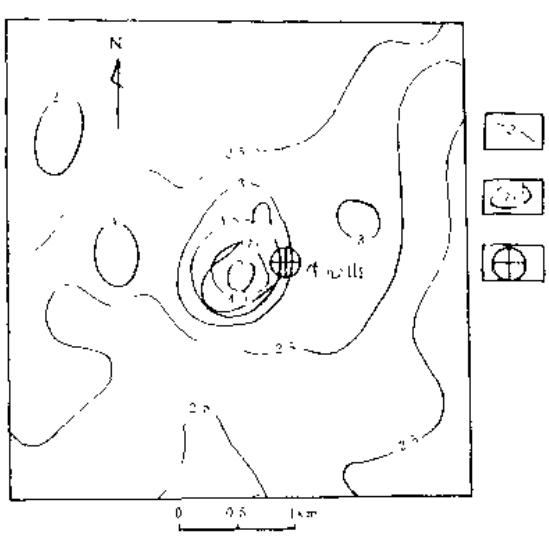

图 2-21 冀东牛心山地区航空 γ 能谱
K 道平面等值线图
（单位：%）
1—K 异常；2—花岗岩体；3 金矿床

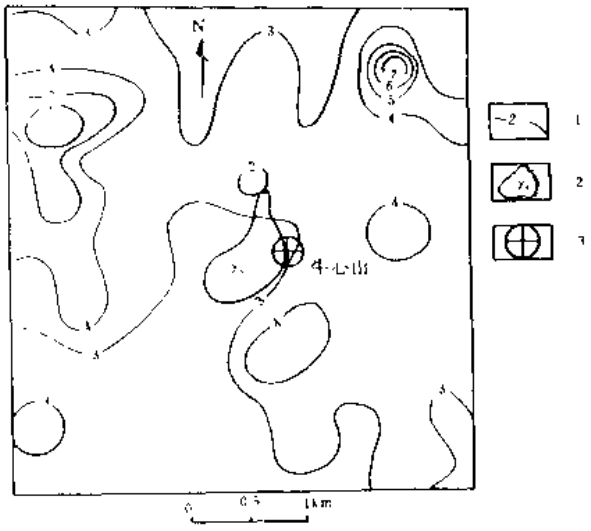

图 2-22 冀东牛心山地区航空 γ 能谱
K/Th 平面等值线图
（单位：10^{-4}）
1—K/Th 异常；2—花岗岩体；3—金矿床

附近的构造蚀变带控矿），通过综合航空物探资料的分析研究，除圈定出已见矿的渠子地找金远景区外，还圈定了 9 个Ⅰ级找金远景区及可能赋矿的 152 条断裂蚀变带（其中 54 条与已知的相符合，有 20 几条已发现金矿化）。

二、胶东牟平-乳山地区综合航空物探应用研究实例

胶东牟平-乳山地区位于华北陆台的东南部边缘，胶北地体的东部。

区内出露主要地层是元古宇荆山群老变质岩系，其原岩为粘土岩、白云岩类夹中基性火山岩，属于正常沉积夹火山岩建造。其次是在本区仅有零星出露的侏罗系和白垩系地层以及第四系地层。

本区火成岩分布广泛，其岩石类型以花岗岩为主，其中昆嵛山花岗岩在区内广泛出露，长轴方向为 NNE，呈岩基产出。它是从元古宙到中生代继承演化的结果，为一多期相侵位的复式岩体。此外，还有位于研究区东部的三佛山岩体和西南部的七崮顶岩体等。

该区老变质岩系有一定强度的磁性，并且变化范围较大。例如，片麻岩类磁化率可在 0—15088×10^{-6}·4πSI 之间变化；其电性特征主要表现为低电阻率，大多数在 100—400 Ω·m之间。当岩石破碎后，其电阻率可明显下降；老变质岩的放射性元素含量较低，例如，黑云斜长片麻岩 U 元素含量均值为 1.1×10^{-6}，Th 含量均值为 4.4×10^{-6}，K 含量均值为 2.9%，但是 K/Th 值相对较高。

多数断裂构造一般表现为弱磁或无磁性。但是，如果后期中基性岩脉充填，可以在断裂带上形成高值线性异常带。

区内火成岩类中，昆嵛山花岗岩体磁性较弱，磁化率均值仅为 99×10^{-6}·4πSI 其电阻率一般在 2000～4000Ω·m 之间变化。如果岩石发生破碎后，其电阻率可明显地降低，例如，碎裂状花岗岩电阻率最小可达 70Ω·m 左右。该岩体的放射性元素含量特征基本与老

变质岩相似，其次，三佛山花岗岩磁性较强，其磁化率均值为 $1014\times10^{-6}\cdot4\pi SI$；并且该岩体的 K、U、Th 元素含量较高，其 U、Th 元素含量均值分别为 3.9×10^{-6} 和 26.4×10^{-6}；K/Th 相对较小。

1. 航空 VLF 电磁异常与航磁异常在本区断裂构造填图中的作用

为了研究区内断裂构造，在本区主要利用了航空 VLF 电磁异常，并且结合航磁（总场和梯度）和遥感等资料。根据研究提出的 VLF 电磁异常识别方法，经过对该区 VLF 电磁异常的分析研究并结合航磁异常特征，最后，全区共获得 37 条异常特征线。其中近东西（EW）向共有 16 条，NNE 向共有 10 条，NE 向共有 11 条，详细分布情况见图 2-23 所示。将这些异常特征线与已知地质情况对比发现，NNE 向特征线与已知断裂吻合的有 17 号、20—22 号和 26 号，18 号局部与已知断裂吻合；NE 向特征线与已知吻合的有 32 号和 35 号，28 号和 36 号局部与已知断裂吻合。因此，根据从已知到未知的原则，推测 NNE 和 NE 向的其它异常特征线也为断裂构造的反映。

由于在已知地质图上研究区内并没有近 EW 向断裂构造存在，因此，为了证实近 EW 向异常特征线是否反映了近 EW 向断裂构造存在这个问题，对区内几条规模较大的近 EW 向异常特征线（4 号、7 号、9 号和 10 号等）进行了重点研究。经研究发现，可从如下几个方面进一步证明，近 EW 向异常特征线即为近 EW 向断裂构造的反映。

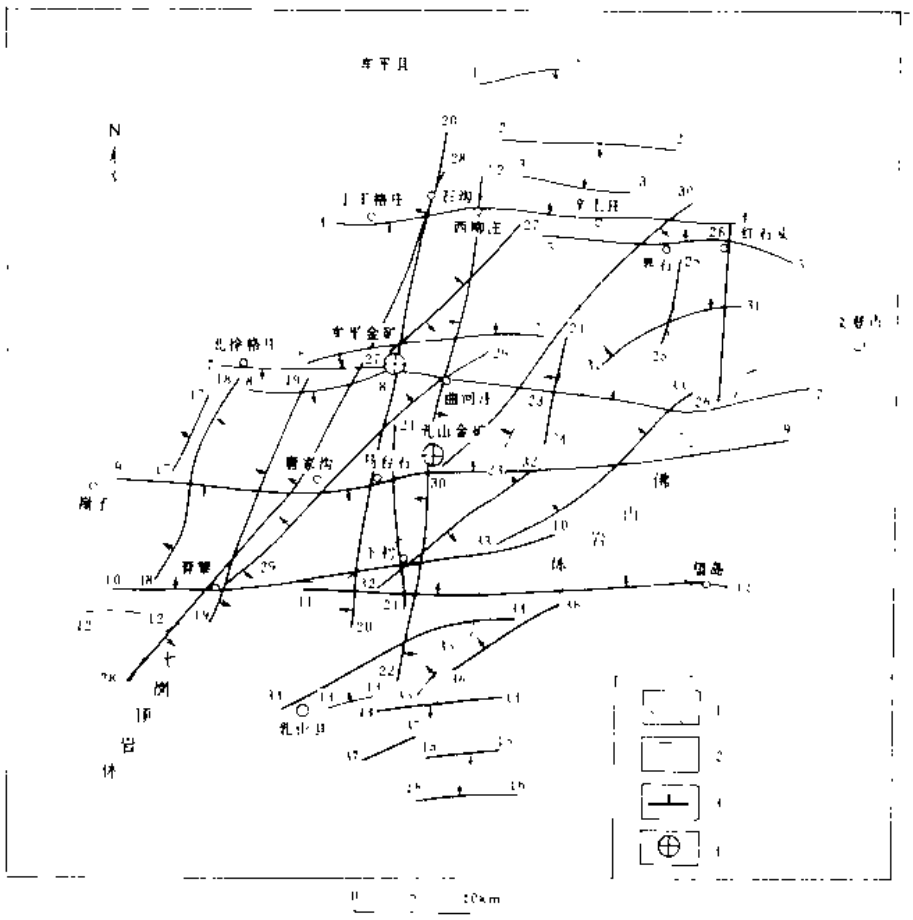

图 2-23　胶东牟平-乳山地区综合航空物探解释推断图

1—岩体界线；2—ΔTh 背景场界线；3—推断断层编号及倾向；4—金矿床

①根据研究区外围构造地质资料，4 号和 9 号异常特征线向西延伸，即可分别与盘长岭岩体上的近 EW 向断裂和崖子村附近 EW 向断裂构造相接。

②根据该区遥感资料，对应 4、7、9 和 10 号异常特征线都有较清晰的线性影像反映。

③大量的地面检查工作结果发现，在异常特征线对应的地表都发现了程度不同的断裂破碎现象。

下面以辛上庄异常地检结果为实例说明之。

该异常的地检位置在 4 号异常特征线中段的辛上庄村北，其部分航空 VLF 垂直磁场（H_z）异常如图 2-24 所示。1992 年 7 月王继伦和战克等同志，对该区进行了实地踏勘，在 VLF 异常对应部位发现了两条近 EW 向的破碎带（见图 2-25），证实了上述推断的正确性。

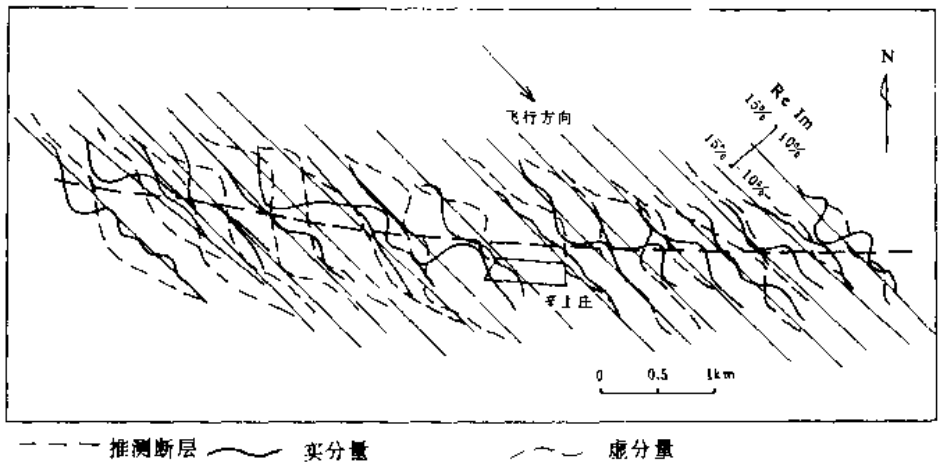

图 2-24　辛上庄航空 VLF 法 H_z 异常平面剖面图

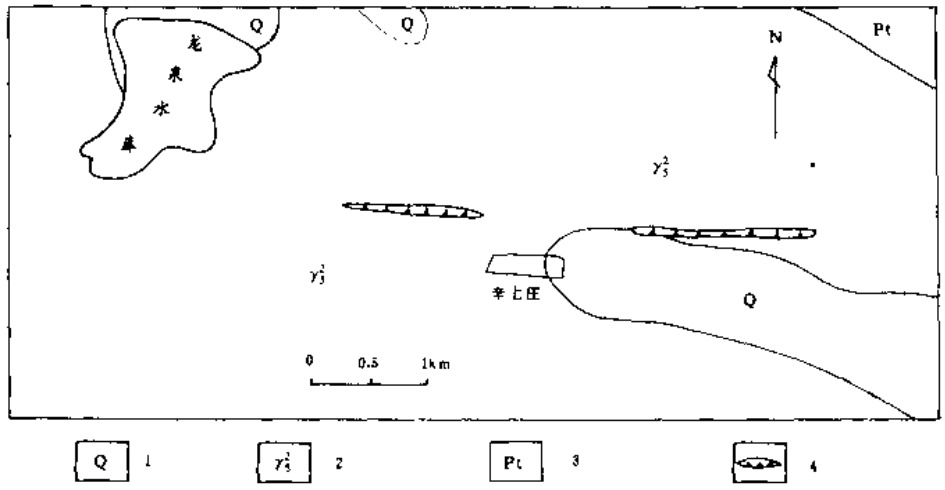

图 2-25　辛上庄 VLF 法 H_z 异常区地质图

1—第四系；2—昆嵛山花岗岩；3—荆山群片麻岩；4—破碎带

尽管过去有关文献曾指出，在胶北地体基底褶皱构造为 EW 向的，但是，在本研究区从未指出近 EW 向断裂的存在。本区用综合航空物探信息所确定的断裂构造，改变了该区已知的构造格架。尤其是该区近 EW 向断裂构造的准确定位（其中包括它们整体倾

向的确定），为进一步研究该区的金矿控矿规律提供了重要信息。

2．航放和航磁信息在花岗岩体研究中的作用

根据研究区的航空γ能谱异常，可明显地看出，区内三佛山花岗岩和碱性侵入岩的γ能谱异常主要表现为U元素和Th元素高值异常，K/Th相对低值异常（见图2-26及图2-27）以及航磁高磁异常等特点。根据上述综合航空物探异常特点以及物性资料，比较准确地圈出了区内三佛山和七崮顶等花岗岩体的分布范围。利用航放和航磁方法所圈定的侵入岩边界与已知地质边界基本一致，其中部分地段作了一定修正。

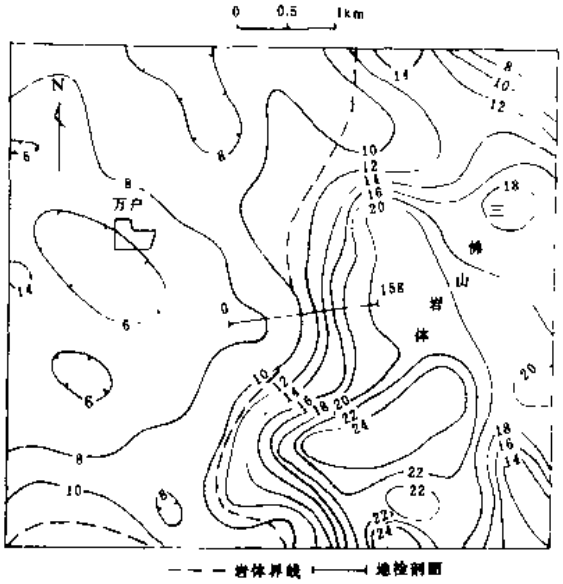

图2-26 万户航空放射性钍（Th）道等值线平面图
（等值线间距：2CPS）

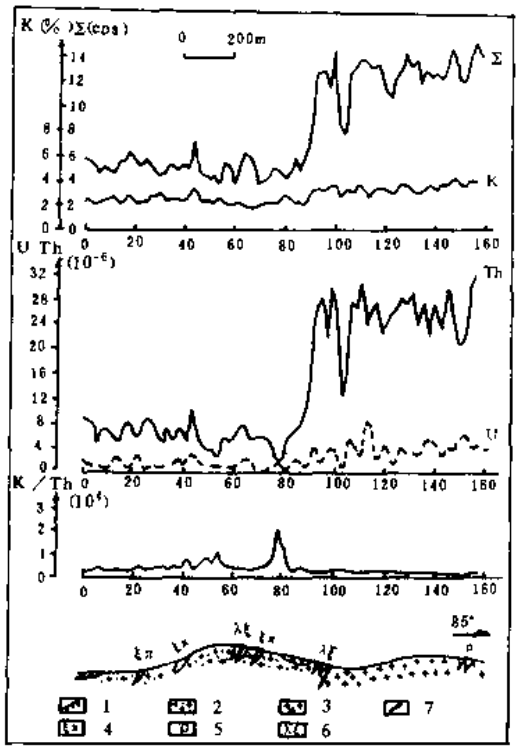

图2-27 万户航空放射性异常地检剖面图
1—第四系；2—昆嵛山花岗岩；3—花岗岩；4—正长岩脉；5—伟晶岩脉；6—石英正长岩脉；7—地质界线

通过对比昆嵛山岩体与本区其它酸性和碱性花岗岩体的航放和航磁场可以看出，昆嵛山岩体航磁场变化平稳，表现为低负磁异常等特征。昆嵛山岩体的U元素与Th元素含量相对较低，基本与老地层接近。已知区内老变质岩系的原岩主要是含中基性岩较少的火山沉积岩。据此，推测昆嵛山花岗岩体是由老地层重熔而形成，即属于壳源重熔型花岗岩。区内的其它花岗岩体，主要表现为高磁场背景，并且具有远高于昆嵛山岩体的Th和U元素含量异常。这说明该类岩体的组成物质可能主要来自地幔与地壳深部。在形成过程中，地下深处的含较多铁镁质和Th、U元素的物质，被地幔岩浆带到地壳浅部，并与地壳浅部的物质相结合，即形成了该类侵入体。因此，推测三佛山等岩体可能属于壳幔型花岗岩系列。显然，昆嵛山岩体对金的迁移与富集有重要作用。

3．本区金矿床航空物探的综合信息预测标志及找矿预测区

（1）含矿构造分布特征

昆嵛山岩体与成矿关系密切，区内主要含矿构造都赋存在该岩体与老地层的内外接触带的特定的断裂构造部位。

（2）已知金矿床（点）分布特征

本区已发现的金矿床（点）已多达100多处。通过分析不难看出它们的空间分布，绝大多数的金矿床都产在近EW向与NNE向（或NE向）两组或者三组构造交汇及其附近地区。例如著名的邓格庄金矿和金青顶金矿即产在近EW向构造与NNE向构造的交汇处附近。通过对金青顶金矿控矿构造的研究，发现该矿床浅部主要受NNE向构造控制，但是，在深部转变为主要受近EW向构造控制。

（3）低缓（负）磁异常（梯度）特征

低缓（负）磁异常（梯度）区分布在区内昆嵛山岩体和老变质岩系地层的局部地区，反映其变质或蚀变程度比较深，并且比较均匀。另外，根据已知矿产资料，本区大多数金矿床（点）均分布在上述低缓（负）磁异常（梯度）区。

（4）已知金矿床航磁异常（垂直梯度）特征

通过分析区内已知金矿床上磁异常（梯度）发现，金矿床上的磁异常（梯度）特征可以分为两大类，即邓格庄型和金青顶型。邓格庄型金矿床上方有局部小正异常，这主要是由于该类型金矿床伴生有一定数量的磁性矿物，可以产生局部的航磁异常（梯度）。而金青顶金矿床则位于局部低（负）磁异常（梯度）及其附近。该类金矿床没有磁性矿物伴生。

根据上述四条预测标志，在昆嵛山岩体及其接触带附近除已知金矿床外，我们认为：本区的NNE，NE向断裂与EW向断裂交汇处附近为金矿产出的有利构造部位。育黎、下初、唐家沟、马台石和金青顶金矿东、曲河庄和曲河庄北、石沟、西柳庄等地段是本区进一步开展金矿找矿的有望区。为了进一步验证上述预测的有效性，1992年7月，对部分预测区进行了实地踏勘，均见到了矿化程度不同的石英脉出露。例如，石沟的样品金元素含量达到1.25×10^{-6}，罗家屯的样品金元素含量达到2.565×10^{-6}等，初步证实了上述预测的合理性。

第三节　固定翼机航空物探（电/磁）异常的数字图像处理和统计评价方法及其在金矿预测中的应用研究

固定翼机载的航空物探系统适用于低山丘陵和部分平原地区。该系统由JHHC-302型核旋磁力仪，HDY-Ⅲ型双频（463/1562Hz）收发线圈共面翼尖硬架补偿式电磁系统以及相关的设备组成。测量的参数有航空电磁法高、低频虚、实分量（$\mathrm{Im}H_2^{(H)}$、$\mathrm{Im}H_2^{(L)}$、$\mathrm{Re}H_2^{(H)}$、$\mathrm{Re}H_2^{(L)}$）及航磁ΔT等5个。该系统于1985年在胶东招-莱金矿带开展了1∶50000的3211km^{2}的综合物探测量。

一、航空物探（电/磁）资料的数据及图像处理方法与经验

航磁、航电数据转换处理：航磁ΔT换算成垂直磁化航磁Z_a；将航磁Z_a向上延拓500m、1000m、2000m；计算航磁Z_a的垂向二次导数；计算航电、航磁Z_a以及上延不同高度Z_a的各方向一阶导数以突出不同走向的线性断裂构造。

单参数图像处理及多参数图像综合处理：用天顶角60°，反差系数127的反射率光照

模型处理了航磁 Z_a 上延 200m、500m、1000m、2000m 的资料，使焦家、灵山沟-北截、招平、滦家河等北东向断裂显示更加明显；低通滤波与假彩色增强处理很好圈定了北截岩体的边界；利用 $ReH_2^{(H)}/Z_a$ 比值复合处理则突出反映了毕郭岩体的分布与边界；利用航电与航磁等五个参数图像做 K-L 变换，生成的特征向量 F_2 图像上毕郭岩体上的断裂构造及位于该岩体南缘的推测隐伏岩体边界得以清楚地显示。

（上述数字图像处理工作是由武警黄金地研所董晓辉和常西临同志利用他们开发的 TS-2605H 微机数字图像处理系统完成的，并对全区 1500km^2 的航电、航磁各种数字图像成果，做了全面分析和解释。）

实践经验表明，先进的数字图像处理技术不仅在物探资料及其各种转换成果的平面表达上比传统方法具有直观、明显的效果，而且在突出微弱信息和信息的综合对比分析上都有其独特的作用，而为了充分发挥数字图像处理的作用，首先要重视物探数据的预处理工作（如航空物探数据的“调平”……），其次要求综合解释人员不但要掌握物探、地质知识还要了解数字图像处理方法技术，自始至终主动参予图像处理工作，提出要求和验收成果，选择“加强”或“放大”区域等，把综合解释与图像处理二者紧密结合起来。

二、航空双频电磁法异常的统计评价方法特点简介

胶东招-莱地区是我国重要的黄金产地，区内金矿成矿地质条件优越，已有众多的黄金生产矿山，并进行大量的地质勘探、地质、物探、化探的普查找矿与科研工作，取得了丰富的资料，对控制金矿床分布的综合地质条件已有规律性的认识。

因此，在该区已具备了应用地质统计预测方法评价航电异常基本条件。

现将该区选用的三种各具特点的统计评价方法的特点简介如下。

1．逻辑信息法

该方法又称变异序列法，是以数理逻辑，组合分析和概率统计为基础的一种综合性统计评价方法。它可用于预测矿床产出的可能规模。

该方法的特点是要在研究区内选择若干个研究程度最高的已知矿床作标准对象，建立其变异序列，然后通过组合分析，逻辑运算及概率统计来筛选地质变量（标志），计算其标志权，信息权及对象分权。最后将待评价对象的对象分权的总和（对象权），作为该对象在地质变量的整体结构上与规模上已知的矿床（标准对象）的相似程度来评价其可能产出矿床的规模。该方法在逻辑及数学运算上较严密，强调了对比各地质变量在整体结构上的相似性，而不是孤立地讨论一个个地质变量作用大小。

2．数量化理论Ⅰ方法

该方法的实质是先将定性地质变量定量化，然后运用逐步回归分析方法，来筛选诸地质变量中起主导作用且不相关的各地质变量，从而建立矿床值（例如取金矿床储量的对数值）与各主导地质变量的回归方程，经已知矿床验证后，用来评价未知对象（单元）可能产出矿床的矿床值（如储量大小等）。

其特点是排除具相关性地质变量中作用较小者，突出矿床值与起主导作用的独立地质变量间统计意义上的定量关系。

3．找矿信息量法（综合信息量条件概率模型评价法）

该方法是 60 年代末，由 E.Б. 维索科奥斯特罗夫斯卡娅等人提出并得到应用的一种单变量统计分析方法。

其特点是首先分别计算每一地质变量（或标志）的信息量，用以衡量该变量（或标志）对发现矿床的作用大小程度。信息量用条件概率由下列公式来定义

$$I_{A_j \to B} = \lg \frac{P(B/A_j)}{P(B)} \qquad (2.3.1)$$

式中：$I_{A_j \to B}$是出现标志A的j状态时，提供事件B发生（即发现矿床）的信息量。$P(B/A_j)$为出现标志A的j状态条件下，发现矿床的概率。$P(B)$表示评价区中矿床出现的概率。

由于$P(B)$难于估算，可利用概率乘法定理将（2.3.1）式改写成

$$I_{A_j \to B} = \lg \frac{P(A_j/B)}{P(A_j)} \qquad (2.3.2)$$

式中：$P(A_j/B)$为已发现矿床的条件下，A_j出现的条件概率，$P(A_j)$为评价区中A_j出现的概率。

具体计算时，取$P(A_j/B) \simeq N(A_j)/N$，$P(A_j) \simeq S(A_j)/S$，式中$N(A_j)$为具有A_j的含矿单元数，N为研究区中含矿单元数，$S(A_j)$为出现A_j的单元数，S为评价区单元总数。

最后计算出预测单元内各地质变量（或标志）信息量的总和代表该单元的综合标志的找矿信息量。

该方法不排除具相关性变量的信息量，在应用时要注意建立综合信息量与矿床规模的相关关系。该方法简便易行，应用范围较广。

第四节　航空电磁法异常统计评价方法在胶东地区金矿预测中的应用研究

一、胶东招-掖LU85-Ⅲ区（见本节图2-31）航空电磁异常的三种统计评价方法研究应用实例

对LU85-Ⅲ区航电航磁资料的一系列数字图像解译后，在所推测断裂的综合分类及金矿控矿因素分析的基础上，对航电异常在金矿上的分布特征及地球化学土壤测量资料等综合研究后，对区内预测单元进行划分，选择并提取地质变量，采用三种各具特点的统计预测方法对区内各单元进行成矿预测。最后综合三种预测数据，对靶区进行优选和分级。

（一）矿化单元划分和变量提取

1．矿化单元特点的基本分析

从本区（1500km^2）金矿控矿因素的综合分析可以看出，区内新城、河西等12个大、中、小金矿床主要分布于胶东群与郭家岭岩体和玲珑花岗岩的接触带和郭家岭岩体侵入到玲珑岩体的接触部位及其附近，并严格受断裂构造控制。航电、航磁图像处理不仅对断裂构造的圈定有明显的地质效果，而且航电异常在已知含矿断裂上也有显示，当硫化物含量增高时，除航电$\mathrm{Re}H_2^{(H)}$、$\mathrm{Im}H_2^{(H)}$、$\mathrm{Im}H_2^{(L)}$有明显异常显示外，航电$\mathrm{Re}H_2^{(L)}$亦有微弱显示，且实分量异常与虚分量异常之比小于1，乃属于小感应参数导体的反映。因此，可以把推测断裂上的航电异常作为划定金矿成矿预测单元（即矿化单元）的基本依据。这样划定的矿化单元是断裂构造上含矿概率较高的航电异常区，使预测单元更有选择性和针对

性。

2．矿化单元边界圈定

以航空物探推测断裂带为单元轴，以航电 $ReH_2^{(L)}$、$ImH_2^{(L)}$、$ReH_2^{(H)}$、$ImH_2^{(H)}$ 异常相重合的区域为边界，全区共圈出 70 个待评价的矿化单元。

3．地质变量的提取

把对评价单元成矿有利与否的地质（地层、岩体、断裂），地球物理（航磁、航电异常）与土壤地球化学测量（Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Mo、Bi 元素）等因素作为地质变量，按如下原则提取：

①根据航电、航磁数字图像处理解译结果以及地质、土壤地球化学测量等综合资料进行变量提取。

②在已知含金矿单元对比分析基础上提取变量。在建立预测模型中，将含矿单元分成大型、中型、小型和矿化点四个等级。对四个等级的含矿单元进行对比分析时发现，有些地质变量，如断裂构造，在各级单元中都出现，是一个确定性地质条件，对预测单元含矿规模不起作用（但对含矿单元的确定起决定性作用）。有些地质变量，在某些单元中出现，而在另一些单元中不出现，如航磁异常向上延拓数字图像上反映的深断裂，在含大型矿床的单元中出现，而在含小型矿床的单元中不出现说明这些变量出现与否对预测单元矿化规模起着重要作用。

③根据含矿单元上航电、航磁测量数据特征分析提取地质变量。在已知含矿单元上对航电、航磁测量数据进行一些转换与统计分析，并根据统计分析结果提取变量。如，在已知含矿单元上对航电高频实分量与高频虚分量比值（$ReH_2^{(H)}/ImH_2^{(H)}$）进行统计，发现大多数含矿单元的该比值在 0.4—0.6 之间变化。因此，$ReH_2^{(H)}/ImH_2^{(H)}$ 可以作为重要地质变量予以提取。

根据上述提取变量的原则，共确定变量 46 个，其中地质变量 18 个，地球物理变量 21 个，地球化学变量 7 个，见表 2-2。

（二）成矿统计预测

为了尽可能客观全面地进行成矿统计预测，研究工作中选择了三种各具特点的统计预测方法，然后综合这三种方法预测结果，作出最终评价预测，以减少统计预测中不可避免的涨落误差。

1．逻辑信息法预测

（1）标准单元和变异序列

选取 8 个已知含矿单元作为标准单元（见表 2-3）其中大、中、小型矿床和矿化点各两个，构成由小到大的变异序列。

（2）相对标志权和信息权

对变异序列剔除全 1 全 0 标志，这些标志已无区分意义，得表 2-4。表 2-4 中 22 个标志为参加 建立预测模型的变量，这些变量中有的变异序列完全相同，有的则完全相反，将这种标志再加以合并，形成互不相同或相反的标志，即简化变异序列表。在此基础上，根据编码理论，用位移帕斯卡三角形计算出标志权 P^* 和相对标志权 $\bar{P}^*$，得表 2-5。

对参加建模的 22 个标志，对照表 2-4 和表 2-5 可分三类：

①起正作用（$\bar{P}^*(1) > \bar{P}^*(0)$）的信息标志有 15 个，标志号为 6，9，11，14，

表 2-2　统计预测变量表

变量类型及名称					顺序号	变量号	地质意义
地质	地层	Ar_{jd}			1	22	胶东群地层，金矿矿源层
	岩浆岩	γ_5^1			2	23	玲珑花岗岩、Au 矿体直接围岩
		γ_5^2			3	24	郭家岭花岗岩、Au 矿体直接围岩
	接触带	Ar_{jd}/γ_5^1			4	25	胶东群与玲珑花岗岩的接触带金矿成矿有利部位
		γ_5^1/γ_5^2			5	26	玲珑花岗岩与郭家岭花岗岩接触带金矿成矿有利部位
	断裂	走向	NE		6	35	断裂呈 NE 走向，主要控矿方向断裂
			NNE		7	36	断裂 NNE 走向，次要控矿方向断裂
			NEE		8	37	断裂呈 NEE 走向，次要控矿方向断裂
			SN		9	38	断裂呈 SN 走向，次要控矿方向断裂
		强度	破碎带		10	27	地质图上的断裂破碎蚀变带
			交汇		11	39	两条以上断裂交叉区，成矿有利地区
			条数	0	12	43	无断裂显示
				1	13	44	有一条断裂
				2	14	45	有二条断裂
				3	15	46	有三条断裂
			Z_a 上延断裂	500	16	40	航磁上延 500m 后有显示的断裂
				1000	17	41	航磁上延 1000m 后有显示的断裂
				2000	18	42	航磁上延 2000m 后有显示的断裂
地球化学	土壤测量某元素异常	Au			40	28	Au 元素异常，对 Au 矿化有直接指示作用
		Ag			41	29	Ag 元素异常，对 Au 矿化有指示作用
		Cu			42	30	Cu 元素异常，对 Au 矿化有指示作用
		Pb			43	31	Pb 元素异常，对 Au 矿化有指示作用
		Zn			44	32	Zn 元素异常，对 Au 矿化有指示作用
		Bi			45	34	Bi 元素异常，对 Au 矿化有指示作用
		Mo			46	33	Mo 元素异常，对 Au 矿化有指示作用

续表

变量类型及名称				顺序号	变量号	地质意义
地球物理	航电	$Re H_2^{(H)}/Im H_2^{(H)}$	-	19	1	$Re H_2^{H}/Im H_2^{H}$ 可反映地质体导电性的好坏，对判别航电异常性质有一定意义，大多数金矿 $Re H_2^{(H)}/Im H_2^{H}$ 在 0.4—0.6 之间变化，$Re H_2^{(H)}/Im H_2^{(H)}$ 的 -、0、+，分别代表其取值＜均值＋均方差、均值－均方差－均值＋均方差、＞均值＋均方差（下同）
			0	20	2	
			+	21	3	
		$\Delta Re H_2^{(H)}/\Delta Im H_2^{(H)}$		22	4	$\Delta Re H_2^{(H)}/\Delta Im H_2^{(H)}$ 表示 $Re H_2^{(H)}$ 的 6 阶趋势分析剩余值，称为 $Re H_2^{(H)}$ 残差异常。$\Delta Re H_2^{(H)}/\Delta Im H_2^{(H)}$ 表示 $Re H_2^{(H)}$ 与 $Im H_2^{(H)}$ 残差异常比值，可反映地质体导电性相对好坏，对判别航电异常有一定意义
			0	23	5	
			+	24	6	
		$\Delta Re H_2^{(L)}/\Delta Im H_2^{(L)}$	-	25	7	$\Delta Re H_2^{(L)}/\Delta Im H_2^{(L)}$ 物理意义同 $\Delta Re H_2^{(H)}/\Delta Im H_2^{(H)}$
			0	26	8	
			+	27	9	
		$\Delta Re H_2^{(H)}$		28	16	$\Delta Re H_2^{(H)}$ 表示 $Re H_2^{(H)}$ 的 6 阶趋势分析剩余值，为残差异常
			0	29	17	
			+	30	18	
		$\Delta Im H_2^{(L)}$	-	31	19	物理意义同 $\Delta Re H_2^{(H)}$
			0	32	20	
			+	33	21	
	航磁	Z_a	-	34	10	航磁化极 Z_a，反映地质体磁性差异
			0	35	11	
			+	36	12	
		Z_a 上延 200m	-	37	13	航磁化极 Z_a 上延 200m 后磁场特征，反映一定深度地质体的磁性差异
			0	38	14	
			+	39	15	

表 2-3 标准单元表

矿床规模	对象	储量对数值	矿床名称	单元号
矿点	1			18
	2			30
小型	3	1.388	草头沟	35
	4	1.510	金翅岭	37
中型	5	2.248	洼孙家	16
	6	2.334	灵山沟	23
大型	7	4.153	新城	9
	8	4.026	河西	10

表 2-4　筛选后的变异序列表

标志 / 对象	5	6	8	9	11	12	14	15	16	19	20	22	24	25	26	27	30	34	37	40	41	42
1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
3	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
5	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
6	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1
7	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1
8	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1

表 2-5　简化变异序列标志权一览表

标志 / 对象		5	8	11	16	22	30	34	37	40	41	42
1		0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2		1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
3		1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4		1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0
5		1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0
6		1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1
7		0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1
8		0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1
P^*	0	6	6	2	0	0	6	4	1	0	0	0
	1	2	0	4	3	3	2	4	2	8	10	8
$\bar{P}^*$	0	0.75	1	0.33	0	0	0.75	0.5	0.33	0	0	0
	1	0.25	0	0.67	1	1	0.25	0.5	0.67	1	1	1

16，19，22，24，25，26，27，37，40，41 和 42。

②起负作用（$\bar{P}^*$（0）$>\bar{P}^*$（1））的信息标志有 6 个，标志号为 5，8，12，15，20 和 30。

这些标志的地质意义见表 2-2。

③标志 34，它的 $\bar{P}^*$（0）$=\bar{P}^*$（1），故最终应被剔除。

值得注意的是，标志号小于 22 的标志都是航空物探的图像数据，这些图像所提取的数据都分为三组，对成矿的正负指示作用往往成对出现。比如，航电 $\mathrm{Re}H_2^{(H)}$ 与 $\mathrm{Im}H_2^{(H)}$ 的残差比值图像数据的 5，6 标志，航磁化极 Z_a 上延 200m 图像数据的 14，15 标志等，表明了航空物探数据对该区成矿规模有一定的指示能力。

标志权是只考虑单个标志对资源变异作用及方向的度量。要进一步研究任一标志在全部信息标志组合中对资源变异相对作用大小，则要计算标志的信息权。

标志信息权通过最小区分标志组合来计算。对表 2-5 的变异序列按行（单元）两两对比，找出取值不同的标志，形成标志组。剔除包含较短标志组的较长标志组，得出区分标志组。然后通过建立区分标志枝状图（见图 2-28），查明最小区分标志组合。

根据枝状图确定出如下 15 个最小区分标志组合：

1．40-30-41-5④　　9．40-34-41-5④

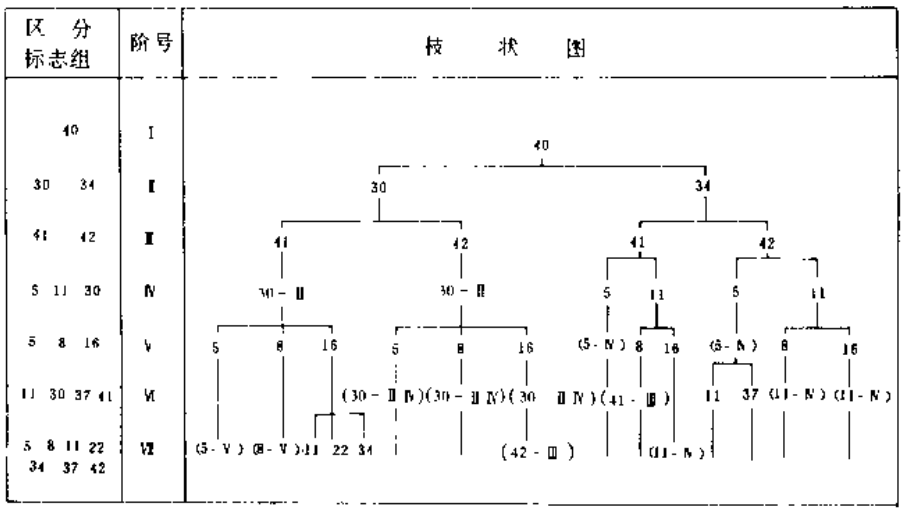

图 2-28　枝状图联接与最小区分组合

2．40-30-41-8③　　10．40-34-41-11④-8③

3．40-30-41-16③-11④　　11．40-34-41-11③-16④

4．40-30-41-16③-22②　　12．40-34-42-5④-11④

5．40-30-41-16③　　13．40-34-42-5④-37

6．40-30-42-5④　　14．40-34-42-11④-8③

7．40-30-42-8③　　15．40-34-42-11④-16④

8．40-30-42-16③

上述标志组合中具有上角标的标志注明了该标志实际代表的标志数，因此这 15 个组合实际代表了 110 个最小区分标志组合。利用下式计算出标志的信息权

$$P_k = \frac{\text{含有标志 } k \text{ 的最小区分组合数}}{\text{全部最小区分组合数}} \qquad (2.4.1)$$

得出表 2-6。

表 2-6　标志信息权表

标　志	5	6	8	9	11	12	14	15	16	19	20
信息权 P_k	0.072	0.072	0.091	0.091	0.173	0.173	0.173	0.173	0.145	0.072	0.072
标　志	22	24	25	26	27	30	34	37	40	41	42
信息权 P_k	0.072	0.145	0.072	0.145	0.091	0.345	0.682	0.036	1.000	0.509	0.491

从最小区分标志组合和标志信息权可以看出：

①本次航磁资料数字图像综合处理解译出延深较大的断裂构造有较强的金矿成矿区分能力。如 Z_a 上延 500m，1000m 和 2000m 的断裂构造其标志信息权分别是 1.0，0.509 和 0.419，进一步验证了该区深断裂构造对金矿床的控制作用。

②土壤地球化学 Cu 异常（标志 30）虽然有较高信息权（0.345），但其相对标志权说明其指示作用主要体现在指示中、小型矿方面。

逻辑信息法预测函数的表达式是：

$$I_i = \sum_{k=1}^{R}\left[\left|\bar{P}_k^*(1) - \frac{1}{2}\right| + \left(\bar{P}_k^*(1) - \frac{1}{2}\right)(2X_k - 1)\right] \cdot P_k \qquad (2.4.2)$$

式中：X_k 为地质变量 k 的取值，I_i 为对象（单元）i 的对象权。

将上述求出的各变量相对标志权和信息权代入（2.4.2）式，整理可得本区金矿规模的预测函数表达式：

$$\begin{aligned} I_i = {} & 0.452 - 0.036X_5 + 0.036X_6 - 0.091X_8 + 0.091X_9 + 0.058X_{11} \\ & - 0.058X_{12} + 0.058X_{14} - 0.058X_{15} + 0.154X_{16} + 0.036X_{19} - 0.036X_{20} \\ & - 0.027X_{22} + 0.154X_{24} + 0.027X_{25} + 0.154X_{26} + 0.091X_{27} - 0.173X_{30} \\ & + 0.012X_{37} + 1.000X_{40} + 0.509X_{41} + 0.491X_{42} \end{aligned} \qquad (2.4.3)$$

将表 2-5 诸标准对象的各变量分别代入式（2.4.3），求出它们的对象权列于表 2-7 中。

表 2-7　标准单元对象权一览表

标准单元	1	2	3	4	5	6	7	8
对象权	0.15	0.23	0.40	1.23	1.69	2.23	2.90	3.11

根据表 2-7 中各标准单元对象的大小，确定如下级别划分标准：

矿化级别	对象权
Ⅰ	$2.5 \leqslant I$
Ⅱ	$1.5 < I \leqslant 2.5$
Ⅲ	$0.3 < I \leqslant 1.5$
Ⅳ	$I \leqslant 0.3$

对该预测函数模型我们采用了两种方法进行检验：

①标准单元对象权 I_i 的检验。据表 2-7 作标准单元对象权 I_i 的变化曲线，I_i 值曲线随矿床规模增大呈单调上升（图 2-29），说明模型区分能力明显，模型可用。

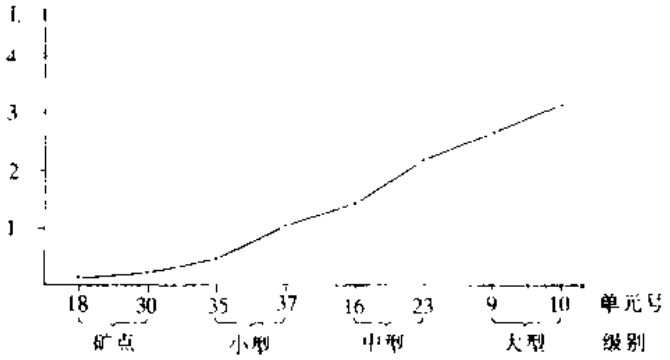

图 2-29　标准单元对象权 I_i 变化曲线

②已知非标准单元对象权 I_i 的检验。区内已知有大型金矿床产出的单元只有 9，10 两单元，所以选用含有矿点、小型和中型矿床单元各两个进行该项检验。中型单元是 7（界河金矿）和 21（北截金矿），小型单元是 27（邹家金矿）和 42（十里铺金矿），矿点单元是 18 和 39。将各单元标志值代入预测函数式（2.4.3），计算结果为：

$I_7=2.34$，已知中型，预测Ⅱ级；　　$I_{42}=2.02$，已知小型，预测Ⅱ级；

$I_{21}=1.91$，已知中型，预测Ⅱ级；　　$I_{18}=0.15$，已知矿点，预测Ⅳ级；

$I_{27}=1.36$，已知小型，预测Ⅲ级；　　$I_{39}=0.30$，已知矿点，预测Ⅳ级。

从中可见除十里铺金矿的预测级别比已知规模提高外，其它都相符。该批检验对象的判对率为 5/6＝83%。据此检验结果，说明模型可靠，可以用于预测。

最后计算出各单元的对象权 I 值，即为本方法的预测结果。

2. 数量化理论 I 预测

建立回归模型所用的单元和说明变量见表 2-8。该表中的基准变量取值是储量加 1 的对数值。

表 2-8　数量化理论 1 初始数据表

单元号	基准变量	说　明　变　量　反　映　矩　阵
7	2.197	0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 1 1 0 1 1 0 0 1 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 1
8	2.079	0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 0 0 0 1 1 1 0 0 1 0
9	4.153	0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 1 0 0 0 0 1 1 1 0 0 1 0
10	4.026	0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 1 0 0 1 0
11	2.027	0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0
16	2.248	1 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0
21	2.197	0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 1 1 1 1 0 1 1 0 1 0 1 1 1 0 0 0 1 0
23	2.334	0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 1 0 1 0 0
27	1.490	1 0 0 0 1 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 0 1 1 0 0 1 0 0 0 0 0 1 0
35	1.388	0 0 1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0
37	1.510	0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0
42	0.281	0 0 1 0 1 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 1 1 0 1 1 0 0 0 0 1 0 0 1 1 0 0 1 0 0
81	0.000	0 0 1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
82	0.000	0 1 0 0 0 1 0 1 0 0 0 1 0 0 1 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
83	0.000	0 1 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 1 1 0 0 0 1 0 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
84	0.000	0 1 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
85	0.000	0 0 1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
86	0.000	0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
87	0.000	0 1 0 0 1 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
88	0.000	0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
89	0.000	1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0
90	0.000	1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0
91	0.000	0 1 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
92	0.000	0 0 1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0

采用逐步回归分析法，求出与基准变量关系密切的说明变量，建立的数量化理论 I 预测方程是

$$Y = -0.01 - 0.82X_7 + 1.66X_9 + 0.85X_{25} + 0.29X_{28} + 0.78X_{29} + 0.50X_{33} + 0.49X_{34} + 0.67X_{39} + 0.48X_{42} \qquad (2.4.4)$$

式中各说明变量的地质意义是：

①X_7 和 X_9 是航电 $ReH_2^{(L)}$ 与 $ImH_2^{(L)}$ 残差的比值数据，属于同一项目，其中 X_7 低于平均值减标准差，X_9 高于平均值加标准差。X_9 的权系数高达 1.657，远远高于其它变

量，而 X_7 又是方程中唯一有负权系数且其绝对值较大的变量，从而说明 $\mathrm{Re}H_2^{(1)}$ 与 $\mathrm{Im}H_2^{(1)}$ 残差的比值对该区的矿床产出规模有较大的指示作用，可作为重要的找矿标志。

②X_{28}，X_{29}，X_{33}和 X_{34}分别是化探次生晕 Au，Ag，Mo 和 Bi。这一说明变量组合对基准变量有较大贡献，是直接找矿的重要标志。

③X_{25}变量是玲珑花岗岩（γ_5^1）和胶东群（Ar_{jd}）的接触带，其权系数仅低于 X_9，说明它对矿床产出规模有一定的控制作用。

④X_{39}和 X_{42}分别是构造交汇变量和航磁上延 2000m 解译推断的断裂构造变量。这两个变量反映了构造的强度对矿床产出规模的控制作用。

方程（2.4.4）的复相关系数 $R=0.998$，剩余标准差 $\bar{S}=0.098$，表明其有较高的预测精度。

已知单元的回代结果，表明含矿单元与无矿单元的回归值有明显差异，6 号单元实际 Y 值为 2.25，其回归值与实际值偏差最大为 0.19。因此，该模型可靠，可以用于预测。

根据（2.4.4）式计算出所有单元（共 70 个）的 Y 值，即为统计预测的各单元可能产出矿床的规模。

3. 找矿信息量法预测

选择区内已知含矿单元 12 个，已知无矿单元 13 个，计算各标志找矿信息量，选出 16 个有利找矿标志。表 2-9 列出 16 个找矿有利标志的变量号及找矿信息量，变量的地质意义见表 2-2。

表 2-9　有利找矿标志及其信息量表

变量号	18	21	24	26	28	29	31	33
信息量	0.319	0.319	0.319	0.319	0.319	0.319	0.284	0.319
变量号	34	36	39	40	41	42	45	46
信息量	0.319	0.319	0.277	0.319	0.319	0.319	0.319	0.319

利用 16 个有利找矿标志对已知单元进行回代计算，所有已知含矿单元的信息量都在 1.24—3.11 之间，无矿单元的信息量最高只为 0.28，说明这 16 个标志对有无矿的区分能力最强。但是对有矿单元的矿化规模辨别能力较差，如含中型矿床（界河金矿）的 7 号单元信息量值为 2.47，而含大型矿床（新城金矿）的 9 号单元却为 2.16。因此需对预测方法进行调整。

在预测模型建立中，我们进行了两套方案的对比。一是利用上述 16 个有利找矿标志进行预测，二是利用全部提供正信息量的 32 个标志都参加预测。经过对预测结果的分析，认为第二种方案的效果较好。该方案保持了矿与非矿的区分能力，又在矿化规模的辨别能力上有所加强，如 7 号和 9 号单元的信息量值分别为 3.21 和 3.25。因此，将第二种方案的计算结果作为下一步综合分析和分级的基础。利用 32 个标志计算出各单元的找矿信息，即为本区找矿信息量法的统计预测结果。

（三）预测结果的综合分级

通过对上述三种预测结果的对比，可看出不同方法预测的结果大体一致，但也有一定差异。经分析研究我们认为，对各单元的评价，每种方法产生的结论都有其内在的客观

性，出现的差异是因为各自数学方法本身的特点，解决问题的角度和途径有所不同因而造成的。即使同一方法也会因为采用标准单元的不同使预测的结果出现差异。因此，对前述三种方法的预测结果还需加以综合。为了更可靠地划分各预测单元成矿有利程度，我们采用对三种预测结果进行因子分析的综合分析方法，以因子计量作为分级主要依据，最后结合数字图像处理综合解译和地质分析给出最终分级结果。

以前述三种方法的预测值为初始数据，经正交变换的方差极大旋转，计算得出 2 个主因子，累计方差为 0.88。表 2-10 中给出主因子载荷矩阵。

表 2-10　主因子载荷

主因子 / 载荷 / 变量	F_1	F_2
逻辑信息法	0.252	0.968
找矿信息量法	0.821	-0.571
数量化理论 I	0.982	-0.187

从表中可以看出，主因子 F_1 主要代表了数量化理论 I 和找矿信息量两种方法提供的信息，F_2 主要代表了逻辑信息法提供的信息。

以两个主因子为轴构成的平面直角坐标系，F_1 为横轴，F_2 为纵轴。将各单元以其主因子计量值为坐标落在图上，见图 2-30。令

$$I_i = \sqrt{F_{1i}^2 + F_{2i}^2} \tag{2.4.5}$$

式中：i 为单元号，F_{1i} 和 F_{2i} 分别是单元 i 的主因子 F_1 和 F_2 的计量，可把单元成矿规模看作为因子 F_1、F_2 平面上空间的随机矢量。

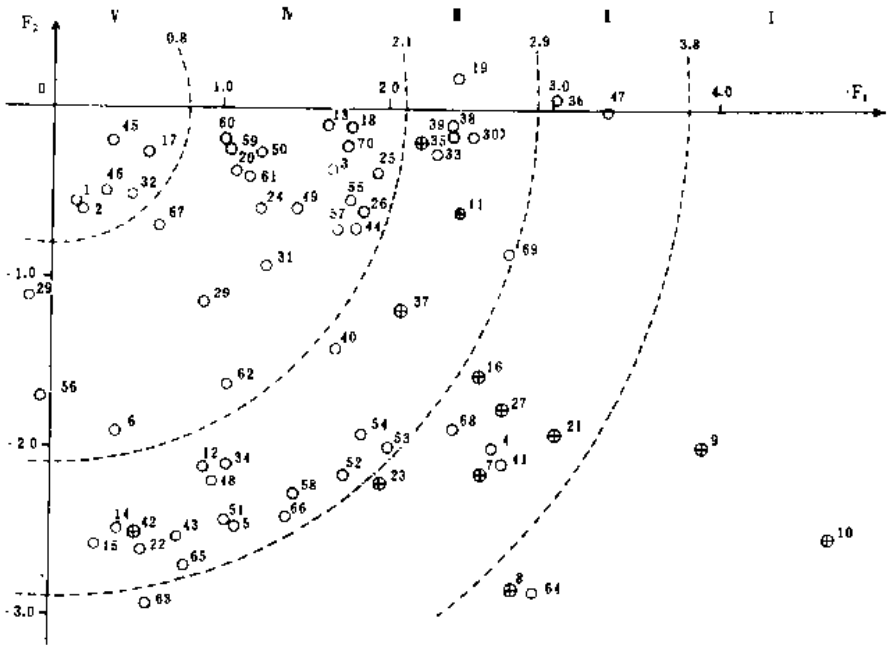

图 2-30　各单元主因子 F_1、F_2 二维标度图

⊖为已知单元；○为未知单元

在图 2-30 上以坐标原点为圆心，以 I 等于 2.9 和 3.8 为半径，画出两条弧线，则已知含有大型矿床的单元9、10 位于 $I>3.8$ 处，含有中型矿床的单元一般位于 $2.9<3.8$ 之间，含有小型矿床的单元位于 $I<2.9$ 处。这两条弧控制了已知成矿单元的分带，因而可作为划分预测单元矿化规模的界限。

综合的过程也是对预测含矿单元的筛选过程。结合各单一方法预测的结果，以 I 等于 2.1 和 0.8 为半径再画出两条弧线，对于与已知小型矿床偏离较大的靠近坐标原点的那些预测单元，又划分为有待进一步工作确定其成矿意义的单元（Ⅳ级）和无矿单元（Ⅴ级）。对那些某一方法的预测值较高，而因子计量标度时却落在偏低位置的单元，要与数字图像综合处理解译结果和已知地质情况相对照分析，若有必要，可作适当的级别调整。如 58 号单元，在因子计量标度图上落在Ⅲ级区域，而在逻辑信息法预测中为Ⅰ级矿化单元，且位于航空物探（电/磁）资料数字图像处理推测的上覆胶东群地层的隐伏岩体上，因此，将其归并到Ⅱ级矿化单元中。最终的分级结果见表 2-11。

表 2-11　预测单元综合分级结果表

级　别	单元个数	单　元　号
Ⅰ	4	9，10，8，64
Ⅱ	12	7，16，21，23，27，4，36，41，47，63，68，58
Ⅲ	25	35，37，42，11，5，12，14，22，30，33，34，38，39，40，43，48，51，52，53，65，66，69
Ⅳ	25	3，6，13，18，20，24，25，26，28，29，31，44，49，50，55，56，57，59，60，61，62，67，70，17，46
Ⅴ	4	1，2，32，45

根据航空物探（电/磁）资料数字图像综合处理解译图和上述各种统计预测方法预测结果的综合分析，编制了 1∶50000 的《山东招掖地区（LU85-Ⅲ）航空物探（电/磁）资料数字图像处理金矿成矿预测图》（略）。

（四）有利找矿靶区

从上述综合预测成果中首批筛选出的 5 个最为有利的预测单元（找矿靶区）分别描述如下：

8 号单元

该单元大致以×庄为中心，面积约 2.24km^2。位于焦家成矿断裂构造带（F_4）上并有推测的 NE 向断裂构造 F_{10}穿插其中。单元内部有部分第四纪覆盖，出露的岩石主要为郭家岭花岗闪长岩，局部可见玲珑花岗岩。遥感 TM 影像构造解译表明，该单元位于复合环形构造的边缘上。单元内有土壤地球化学测量 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Mo、Bi 的异常，有已知中型金矿床。

统计预测结果表明该单元为Ⅰ级矿化单元，或许有大型金矿床产出的可能。

64 号单元

该单元位于北截-灵山沟成矿断裂构造带上，并且处于推测岩体（北截岩体）与玲珑花岗岩过渡部位，成矿条件十分有利，遥感 TM 影像构造解译表明，单元处于环形构造上。单元内有土壤地球化学测量 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Bi 的异常，有已知矿化点。

统计预测结果表明该单元为Ⅰ级矿化单元，有产出中到大型金矿床的可能性。

41 号单元

单元中心位于×庄以西 1.5km 处，面积约为 2.53km^2。单元内全部为第四纪覆盖，它处于推测的破头青成矿断裂破碎带的西南延伸部位（F_{37}），成矿环境十分有利。遥感 TM 影像解译的 NNE 向两条线形构造切割该单元。从土壤地球化学测量结果中获知，在该单元内出现 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Mo 多元素组合异常，说明该单元为矿化单元。

统计预测结果表明该单元为Ⅱ级矿化单元，可能产出中型矿床。

经地表揭露已见金矿化，有待深部验证。

66 号单元

单元中心在×村南 0.7km 处，面积约 2.86km^2。单元大部分被第四纪覆盖，有部分玲珑花岗岩出露，它位于本次工作推测出的区内延伸长度约 14km 的 F_{27}断裂构造上。遥感 TM 影像构造解译表明，单元处于环形构造边缘，并且受到 NWW，NNW 和 NNE 向三条线形构造切割。单元内有土壤地球化学测量 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Mo 的异常，且有已知矿化点。

统计预测结果表明该单元为Ⅲ级矿化单元，有可能产出小到中型金矿床。

58 号单元

单元中心位于×××以北 0.7km 处，面积约 2.36km^2，单元内地层为胶东群。本次工作推测此处胶东群下部有隐伏的岩体，并推测有近东西向断裂构造 F_{94}贯穿单元。在遥感影像构造解译图中，该单元被两条 NEE 向和一条 NWW 向构造所控制。该单元位于已知化探扫面范围之外，故无化探资料。

统计预测结果表明该单元为Ⅱ级矿化单元，可能产出中型金矿床。

二、胶东招-莱地区航空电磁异常的综合信息量条件概率模型评价方法研究应用实例

预测区选择在胶东招远-莱州地区（见图 2-31），其基本条件有如下三条：

①胶东招-莱地区是全国著名的盛产黄金重要基地之一，金矿地质工作程度很高，仅以山东地矿局地质六队和省物化探勘查院而言，分别在该区开展了详细而系统的金矿地质工作，包括区域地质调查，地球化学水系沉积物测量，乃至 1:25000 和 1:10000 的小面积的地质-物探-化探测量，发现了以焦家、新城、三山岛、仓上、大尹格庄等为代表的大型、特大型和一大批中小型金矿床，近百处的矿点星罗棋布，为该区进一步开展预测工作，提供了丰富的地学信息。

②地矿部物探化探研究所于 1983、1985 年在招远-莱州-平度地区开展了以普查金矿为主要目标的 1:50000 航空电/磁综合勘查，获得了丰富的电/磁信息，因而为预测破碎带蚀变岩型金矿提供了区域性的航空物探重要基础资料。

③胶东招-莱地区第四系广泛覆盖，金矿成矿条件良好，潜在金矿资源丰富；同时，本区正处于第二轮普查找矿的重要时期，大量的地质、物探、化探资料急待二次开发研究，以满足金矿勘探后备基地所急需的普查靶区。

（一）金矿信息量条件概率模型的建立

本模型是应用找矿信息量法来建立的。

1. 找矿标志的研究和标志状态的划分

（1）中酸性岩体金矿分布模式的研究及找矿标志状态的划分

本区玲珑岩体和郭家岭岩体是金矿成矿的母岩，现有的地质、航磁、重力和化探等资

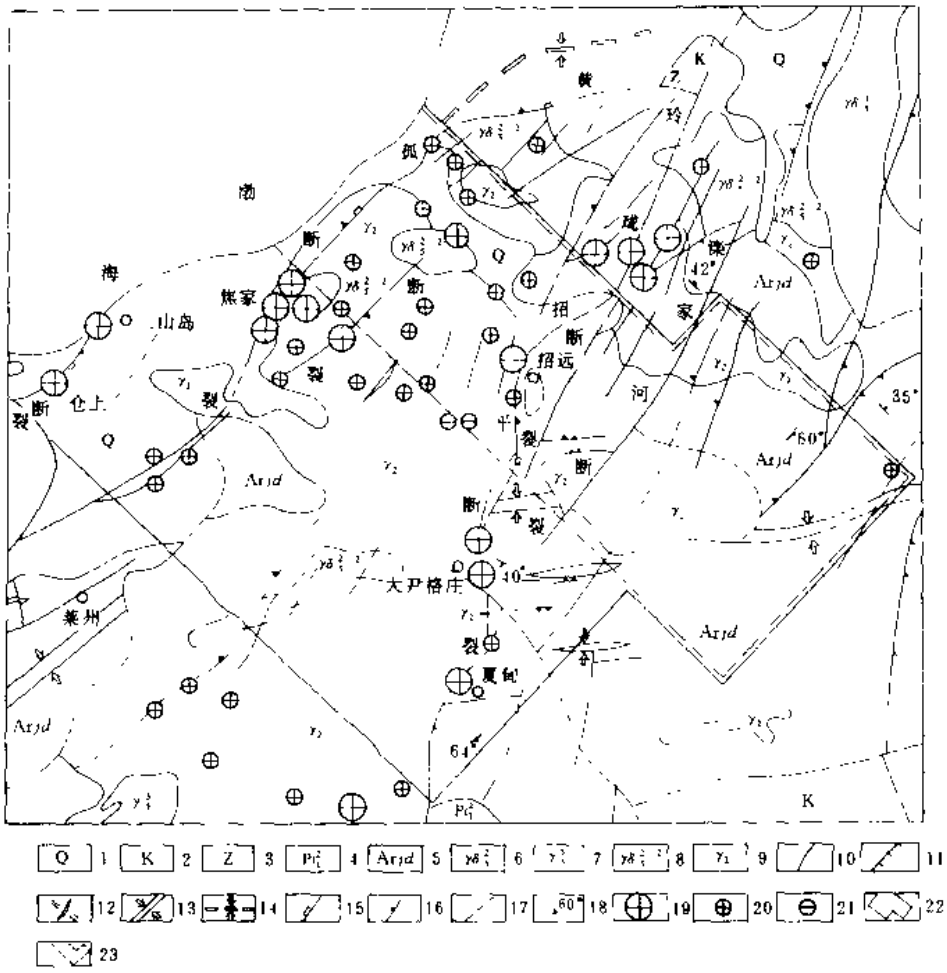

图 2-31　胶东招远-莱州地区金矿预测区地质略图

1—第四系；2—白垩系；3—震旦系；4—上元古宇蓬莱群；5—太古宇胶东群；6—花岗闪长岩；7—花岗岩；8—郭家岭斑状花岗闪长岩；9—玲珑花岗岩；10—地质界线；11—不整合；12—向斜；13—背斜；14—隐伏背斜；15—S 型压扭性断裂；16—压扭性断裂；17—推测断裂；18—片麻理产状；19—大中型金矿床；20—小型金矿床；21—银矿床；22—预测区范围；23—LU85-Ⅲ区

料的研究成果，表明了岩体中金元素活化—迁移—富集的基本规律，是由岩体中心（高温、高压区）向岩体边部（低温、低压区）迁移富集并在适当的构造条件下定位成矿。

为了掌握金矿富集区域，必须划分金矿富集的区域标志状态。根据地质和重磁资料的研究结果，玲珑岩体和郭家岭岩体内金矿（含矿点、矿化点）都具有特定的概率分布模式，其分布模式如图 2-32 和表 2-12 所示。图表中清楚地划出了两岩体的金矿富集区间（即标志状态）。

表 2-12　胶东西北部地区中酸性岩体金矿分布特征一览表

岩体名称	金矿概率分布模式	金矿区域分布特征变量			矿体及矿点总数
		富集区间 W	矿点频率 F	数学期望 E（km）	
郭家岭岩体	指数分布	内接触带 0—3km	90%	1.1	65
玲珑岩体	混合分布	内接触带 0—8km	85%	4.2	82

（2）胶东群地层的找矿标志状态的划分

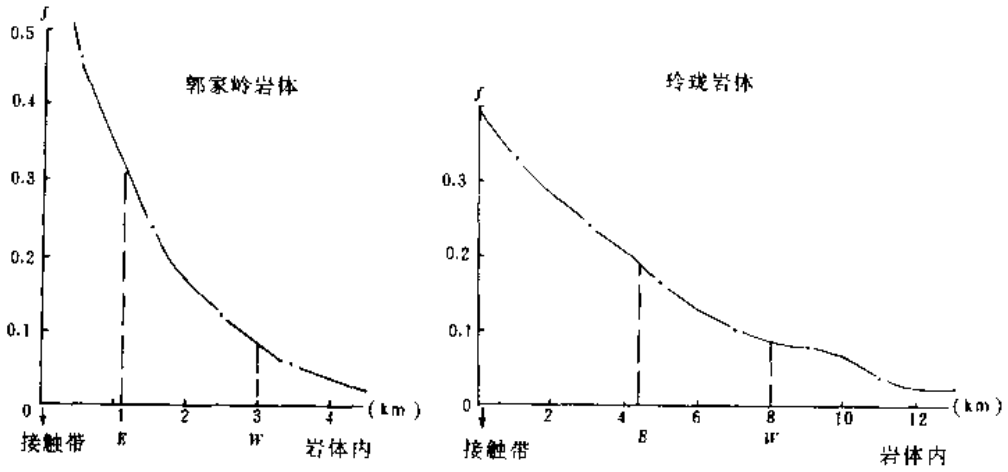

图 2-32　胶东地区西北部中酸性岩体金矿分布模式图

胶东群变质岩是本区交代-重熔岩浆的主要物质源，即所谓金矿的矿源层，作为广义的矿源层，胶东群金的丰度值变化很大，这就是各个岩体金的丰度值和成矿特征不同的重要内在原因之一。胶东群中金矿的形成一方面与其重熔交代作用有关；另一方面与重熔岩体的岩浆期后含金热液向岩体接触带外侧的扩散渗透作用也有关系。因此胶东群的找矿标志主要是外接触带。显然，其标志状态也是因地而异的（这与胶东群金丰度值和重熔岩体规模有关)。根据统计研究结果，其找矿标志状态可划分为外接触带 0—3km 和＞3km 两种情况研究。

(3) 断裂构造找矿标志及标志状态划分

预测区内，NE 向与 NNE 向招-平断裂带以及基底复活改造了的东西向断裂系统，是区内金矿的控矿断裂构造。剪压性的Ⅱ级断裂构造为特大型—大型蚀变岩型金矿的直接定位的构造因素，Ⅲ级以下剪压性断裂为含金石英脉 型和含金硫化物石英脉型金矿的控矿断裂。根据区域构造控矿的特点，本区主要为 NE 向断裂控矿。

根据本区构造格架的特点，断裂标志状态可划分为 NE、NNE（SN)、EW 和 NW 向四种状态进行研究。

(4) 围岩蚀变的找矿标志

金矿的围岩蚀变主要有黄铁矿化、绢云母化、硅化、钾长石化，其次为碳酸盐化和绿泥石化，它们构成围岩蚀变的找矿标志。

(5) 地球化学异常找矿标志

本区金矿地球化学的指示元素主要为 Au、Ag、As、Bi、Sb、Cu、Pb、Zn 等 8 个元素。

(6) 地球物理场找矿标志的研究

①航电异常找矿标志：航电异常经过筛选，剔除地表覆盖层异常、人文干扰异常和磁化效应（即 $ReH_2^{(L)}$、$ReH_2^{(H)}$ 为负）异常之外，具有相对低阻性质的基岩导体异常都可做为“低阻断裂破碎带”对其进行含金性评价研究。在本区，航电异常的走向是十分重要的，因此其含金性评价，可仿照断裂构造的找矿标志划分为 NE、NNE、EW 和 NW 向四种状态研究赋值。

②重力异常找矿标志：重力资料研究结果表明，玲珑岩体边缘变异特征区，如“岩鼻”区，重力缓梯级带所表征的岩体超复区及其前峰面，是重要的区域找矿标志。

③航磁异常找矿标志：与航电异常相伴的线性低磁带或航电异常邻侧存在的航磁线性异常带均是找矿的重要构造标志。其标志状态的划分同样仿照断裂构造研究赋值。

2．综合信息量条件概率模型的构制

本区为金矿重要的成矿区，地质工作程度高，已知矿床、矿点甚多；同时，系统地开展了1:50000地质填图，1:50000水系沉积物测量，1:50000航空电/磁测量和1:200000区域重力测量，这些资料为提取综合信息、构制找矿模型奠定了良好的基础。根据上述资料对地、物、化各找矿标志的信息量分别计算，构制了综合信息量条件概率模型（见表2-13）。该模型包括了本区与金矿相关的全部地、物、化的找矿标志共10项（含找矿标志状态21个）。

表2-13　胶东招远-莱州地区金矿综合信息量概率模型

找矿标志	找矿标志状态	信　息　量
已知矿点，矿化	已知矿点	1.33
	已知矿化点	0.80
玲珑岩体	内接触带（0—8km）	0.15
郭家岭岩体	内接触带（0—3km）	0.46
胶东群	外接触带（0—3km）	0.16
断裂构造	NE向	0.69
	NNE向	0.04（招平带0.68）
	NW向	0.05
	EW向	0.05（NE向牟就段0.7）
围岩蚀变	黄铁绢英岩化等	0.61
航空电/磁异常	反映断裂破碎带的线性异常带	按相应构造带赋值
激电异常	反映金属硫化物富集体	0.61
重力异常	反映玲珑岩体超覆区岩鼻区	0.29
地球化学指示元素	Au	0.62
	Ag	0.59
	Cu	0.39
	Pb	0.45
	Zn	0.40
	As	0.34
	Sb	0.49
	Bi	0.50

为清楚起见，模型中的标志信息量赋值需加如下补充说明：

①模型表中的郭家岭岩体大都系根据航磁异常推断的隐伏岩体。

根据预测区的岩石磁性和航磁化极异常平面图，郭家岭岩体以约100nT的局部异常为标志，以NE、NNE走向呈带状、平行展布于玲珑岩体北部超覆区，其大部以隐伏状态

产出为特征。自西向东大体可划分出三个主要岩带。

本区已知的大型、特大型金矿床和地化金异常均分布于航磁圈定的郭家岭岩体接触带上及其附近。因此郭家岭岩体对本区金矿形成的贡献应居玲珑岩体之上。

②根据实际统计资料计算金矿点的信息量为1.33，矿化点也是重要的直接找矿标志，则赋给信息量为0.8。

③根据本区断裂构造控矿关系的实际情况，在招-平断裂带主要为NNE向构造控矿，其统计的信息量为0.68；而其他区域该组构造的控矿关系不甚明显，其统计的信息量为0.04。

④值得强调的是，NE向构造为本区成矿的主控构造，而EW向构造属成矿前的构造，一般与成矿的关系不甚密切，其信息量为0.05，但当EW向构造被NE向构造牵就启开的地段，则往往是大型、特大型金矿赋存的重要部位，故该地段信息量特给予加权赋值0.70。

（二）航电异常找矿信息量评序及分类

以找矿信息量条件概率模型为标度，以本区前述地、物、化等资料提供的综合信息为基础，现对全区222处航电异常逐一进行金矿找矿信息评价。同时，按概率拐点法统计绘制了异常信息量频率分布曲线，其拐点即信息量临界值，分别为6.3和3.9，将异常分成A、B、C三类，详见异常信息量频数分布图2-33。

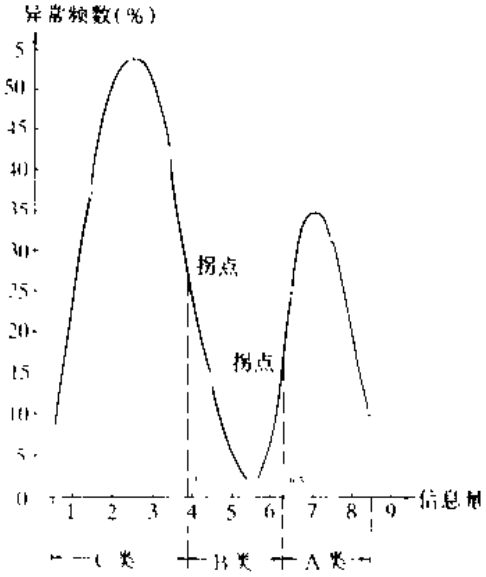

图2-33 航电异常综合信息量频数分布图

这样，航电异常—金矿找矿信息量最终评价结果是A类异常（一类找矿异常）63处（其中已知矿床19处）占异常总数的28.3%；B类异常（二类找矿异常）22处，占总数9.9%；C类异常（一般异常）137处，占总数61.8%。从区域成矿条件来看，A、B两类异常均分布于成矿远景区内，而且已知矿床均在A类异常中。据此可见异常的评价分类较客观，预测效果良好。

（三）金矿远景带的划分和找矿靶区评价

本次研究工作还全面利用上述地、物、化资料，应用“综合信息量条件概率模型评价法”，对胶东招-莱地区开展金矿远景区带和金矿靶区预测，并在此基础上进而研究航电局部异常做为间接找矿标志-赋（控）矿构造的可信度。

1．航空物探（电/磁）-综合信息金矿靶区预测图的编制

首先将预测区划分为2596个单元（$1\times1km^2$为1单元），应用所建的“信息量找矿模型”（表2-13），计算出每个单元中地质、物探、化探等有关找矿标志的总信息量然后勾绘出以1.0为间距的信息量等值线图，再将此图和航空电/磁异常推断的地质构造图合并，即构成内容完整的航空物探（电/磁）——综合信息金矿靶区预测图（略）。

2．金矿远景区带的划分

（1）金矿远景区带的划分原则

具备金矿成矿地质背景——控矿的中酸性岩体和控矿断裂构造，具有已知金矿床（点）和若干预测的金矿靶区，具有成带分布，反映可能赋矿、控矿构造带的若干A、B类航电异常带。

（2）金矿远景区带的划分

综合信息量等值线图的编制，为金矿预测展示了一幅十分明确的靶区图景。根据控矿岩体、控矿构造和靶区的展布特征，本区可划分出如下11条金矿远景带：

①仓上-三山岛金矿带（Ⅰ级），②过西镇-后坡金矿带（Ⅲ级），③朱由-黄山馆金矿带（Ⅰ级），④肖家-北截金矿带（Ⅰ级），⑤北障-东战家金矿带（Ⅱ级），⑥修家沟-英里金矿带（Ⅱ级），⑦东小夼-谢家沟金矿带（Ⅲ级），⑧芝下-十里铺金矿带（Ⅰ级），⑨大吴家-滦家河金矿带（Ⅲ级），⑩上庄（夏甸）-韩家金矿带（Ⅲ级），⑪大解家-孙疃金矿带（Ⅲ级）。

3．金矿靶区及赋（控）矿构造评价

信息量等值线平面图中的封闭圈，就是定量化的找矿靶区。对1∶50000预测而言，这种靶区是具有矿床级性质的找矿靶区。据此，金矿靶区又进一步赋予靶区中航空电/磁A类和B类异常反映的断裂带以更可靠的直接找矿标志，即“赋（控）矿构造带”的实义。

金矿靶区的评价，包括对靶区的评序和分类。对于定量化靶区的评序是很确定的，仅以其所拥有的综合信息量的大小来排列即得其序号。而金矿靶区的分级划分则以单元信息量的频率分布特征即频率分布曲线的拐点来划分。本区单元信息量频率分布曲线可选择3个一级拐点，以其信息量做为靶区分级的临界值，其值分别为6.5、3.8和2.5，即可将金矿靶区划为A、B、C三级（详见图2-34）。

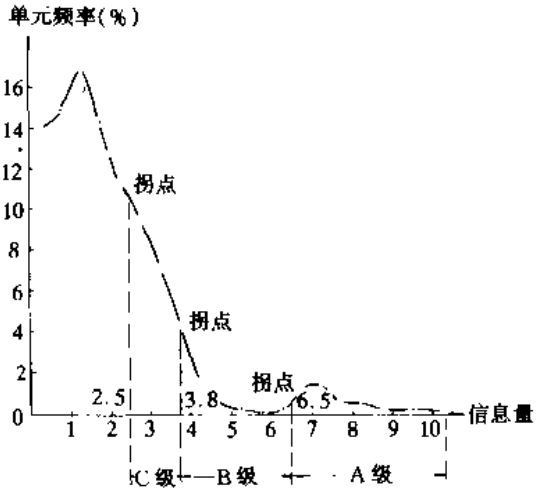

图2-34　单元综合信息量频率分布图

本区共圈出金矿靶区104个，其中A级靶区74个，B级15个，C级15个。

4．金矿靶区和赋（控）矿构造可信度检验

从金矿靶区的分布情况来看，A级靶区中均有矿床、矿点赋存而且区内已知的15个大型、特大型、乃至中小型金矿全部囊括在A级靶区之中，除马塘、焦家、东季、新城、河东和河西等六个特大型矿床密集赋存于一条蚀变构造带内而囊括在B-6大型靶区中外，其它单个矿床均对应着一个靶区；在15个B级靶区中，其中11个靶区赋存金矿点；而C级靶区中均无已知矿点，但具有明显的蚀变构造带和地球化学金等组合异常。

地面查证结果：A、B类航电异常除控制着已知矿床者外，大部分见有地表蚀变或矿化带。值得一提的是，B-39靶区及其赋矿构造-小于家FD83-22-2经地面工程揭露已见金矿脉4条，每条矿脉宽1—2m，金品位一般10×10^{-6}，最高$n10\times10^{-6}$，现正边探边采；同时B-85（××隐伏靶区）及赋（控）矿构造FD83-42，42-1，42-2和42-3经地面检查，见有$D\eta_1$至$D\eta_5$五条激电异常带，其中$D\eta_1$、

$D\eta_3$ 和 $D\eta_5$ 具一定规模（见图 2-35）并伴存金异常，正待工程验证，可望取得更大的找矿突破。

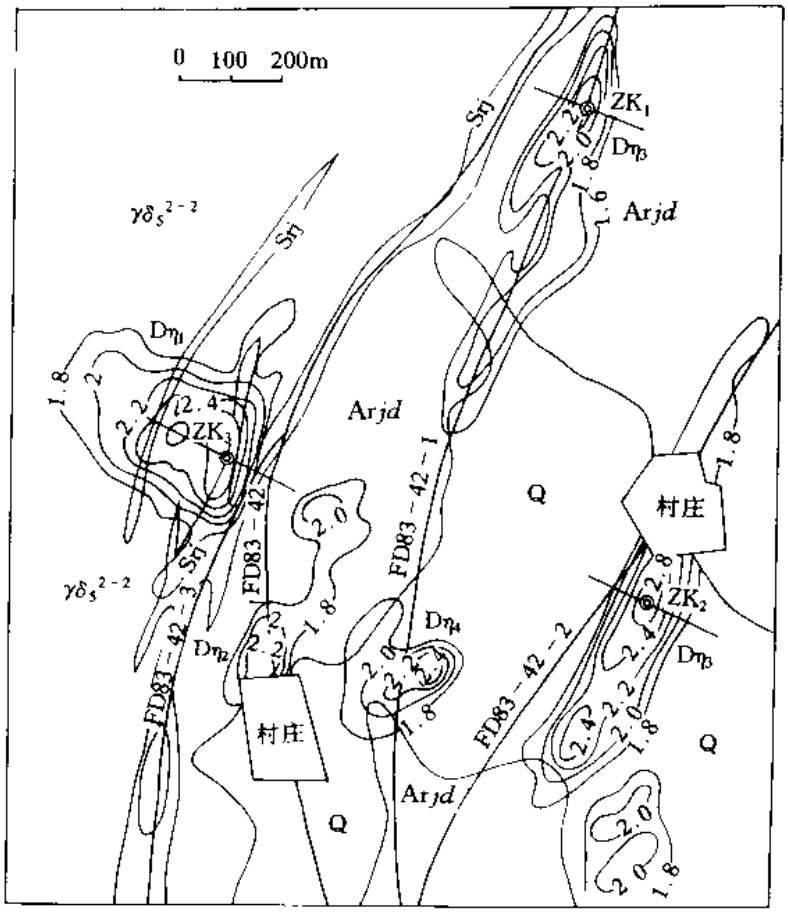

图 2-35 ××航电-激电综合异常图

Q—第四系；Ar*jd*—胶东群；$\gamma\delta_5^{2-2}$—花岗闪长岩；Srj—绢英岩化碎裂花岗岩；FD83-42—航电推断破碎带；$D\eta_1$—激电异常；ZK_1—设计钻孔

根据上述室内资料的检验和野外有限工作量的查证结果可以证明：A、B 级靶区的可信度是很高的，而 C 级靶区的信息量虽小，但从寻找隐伏矿床的意义而言，亦不宜忽视。值得强调的是，A、B 类航电异常所解释的赋（控）矿构造，进一步缩小了靶区的范围，因为它们是靶区中找矿的直接目标物。

第五节 结 语

金矿综合航空物探的优点在于其快速和综合。快速可以缩短时间，降低整体勘查费用开支，综合可以尽可能全面地调查研究金矿区、带的成矿基础地质背景与综合控矿条件、找矿标志，补充完善地质地表调查和单一物探方法的局限性和不足之处，从而提高整体勘查工作的地质效果与经济效益。

多学科综合方法的地质调查，已是现代地质勘查发展的总趋势。

本次综合航空物探方法在金矿勘查中的应用研究，体现了上述优点，既促进了方法技术的提高，又在找矿预测上取得了许多有意义的成果。

在技术方法上，山区航空甚低频电磁法的开发应用成功，取得了良好的应用效果，已

具备在我国推广应用的成熟条件，且不需从国外引进等新的投入。航磁垂直梯度测量对于突出浅部异常信息（特别是在强异常背景上的局部弱异常）以及与航磁异常配合，综合分析深部及浅部地质情况都是很有用的。在不具备由 ΔT 利用理论公式换算其垂直梯度的条件时，实际测量是十分必要的。这个换算条件主要是地形起伏，观测与定位精度及测线间距等对所需探测的梯度异常能满足理论计算公式的要求。用等效磁偶层的磁异常作磁场梯度异常的定性、定量分析与解释，理论严格，方法简便，可直接应用已掌握的基本磁场理论与经验，这点对于“二维地质体”尤为明显。

数字图像处理技术，在综合航空物探方法大量的数据处理、提取和综合信息、综合解释、成果表达等方面都有其突出的优点，特别是能在高档微机上实现，既降低了费用，又便于解释人员直接参予，为推广应用创造了有利条件。

我国自行研制的双频航电系统，在金矿上的应用是成功的，取得了明显的地质效果和实践经验。

对于大量的航空物探异常（本次研究中以双频航电异常为主），在已知含矿单元多且有足够代表性，地质、物探、化探推断的信息丰富可靠的情况下，应用矿床统计预测方法评价航空物探异常是一个值得重视的综合解释的新领域，而合理地选取地质变量及对不同的统计预测方法结果的分析和综合，我们的工作经验表明这是两个关键步骤。该项研究已在胶西北金矿带上取得很好的应用效果。

本次综合航空物探方法在金矿勘查中的研究与应用的经验证明，通过上述技术方法的研究与开发以及密切结合各区的具体地质条件综合应用，在冀东、胶西北及牟乳三个主要金矿带都取得了良好效果，通过圈定破碎蚀变带和控矿岩体，查明控矿构造体系的分布以及赋矿蚀变构造带异常的综合评价预测等研究工作，提出了一批找矿靶区和新的找矿远景区可供下一步工程验证或进一步做地面详细找矿工作。其中已有少量靶区经工程验证初步见到金矿或矿化体。

这些成果与经验可供扩大应用，并在扩大应用中继续研究提高。

由于综合航空物探飞行面积大，所获信息丰富，其资料可供长期应用于地质找矿或基础地质研究，但一次性投入较大，宜参照地质区测工作，当前仍应以国家支持或投入为主，在国家重点矿区或地区继续开展该项工作，必有效果与效益。

第三章　金矿地面高精度磁测的应用研究

随着科技进步，当前磁测仪器如 MP-4 质子磁力仪，其野外观测精度已可达到均方误差＜2.5nT，且操作简便，工作效率高。有鉴于此，开展金矿区及其外围的高精度磁测，以圈定和研究以往中精度磁测（野外观测的均方差为 5—10nT）不易发现的弱磁异常（这些弱磁异常反映的常是金矿蚀变带及构造带乃至金矿体本身的微弱磁性变化），是十分必要的。

通过胶西北招掖金矿带 523km^2（1∶10000）及矿区高精度磁测以及小秦岭驾鹿金矿带的面积性及剖面性高精度磁测试验，总结了工作方法和工作经验，取得了新的良好的地质效果。

第一节　金矿高精度磁测的方法技术

地面高精度磁测具有信息量多，弱异常特征可靠性高，研究解决深部地质问题的能力强等特点。为了保证野外观测的高精度以及成果推断解释的需要，工作中应用和总结了以下方法技术。

一、野外工作方法技术

①在投入野外生产工作之前，首先要认真进行仪器噪声、零飘、一致性检验，以及现场进行仪器探头高度的试验，通过不同高度的试验，选择工作地区最佳探头高度，招掖地区此次选择的探头高度为 2m。

②总基点、日变站、校正点的选择。根据《地面高精度磁测技术规程》的要求，对每个测区均建立日变站及仪器校正点，每个测区的日变站均与总基点进行联测。胶西北地区联测总精度为 0.26nT。

日变采样时间的选择。当采样间隔较密时，可以准确地观测到磁场的微小变化，但这时仪器本身的电子噪声也随之增加；当采样间隔较疏时，可以压制一部分仪器噪声，但却影响地磁场的观测精度。因此，必须进行不同采样间隔（2s，10s，20s，30s）下观测精度的试验。通过试验，2s 间隔时最高精度可达 0.77nT，我们此次选择 30s 采样间隔进行日变观测，即可满足高精度磁测的要求，保持精度在 1.5nT 以内。

③观测数据的各项改正。对野外磁测的观测数据值进行日变改正，正常场和高度改正。日变改正是由日变观测仪器与生产仪器用 RS-232 接口连接，自动进行内插改正。

正常场改正与高度改正是用高斯球谐分析法计算程序，计算出工区范围内纬向、经向、高度改正值，然后用计算机逐点进行该三项改正。本次高精度磁测资料质量可靠，总精度可达到 2.5nT 以内。

④工作比例尺与测网的选择。工作比例尺与测网的选择主要应根据地质任务和探测目标物的大小。招掖地区破碎带蚀变岩型金矿均产于玲珑花岗岩与郭家岭花岗闪长岩的内外

接触带上。控矿断裂构造的拐弯部位，分支复合部位，倾向由陡变缓的部位往往是成矿有利地段。本区探测目标一般在几公里到几十公里，宽一般几十米至几百米。经过网度试验，采用1:10000的工作比例尺和100m×20m的测网（矿区1:2000工作比例尺，采用20m×5m的测网）。实践证明，是合适的。

⑤为配合高精度磁测，胶西北地区采集系统的岩矿石标本，在室内用WWS-1型数字式双无定向磁力仪测定 κ 及 M_r 以适应高精度磁测对弱异常解释的需要。驾鹿地区在野外试验和应用了将MP-4探头与标本放在同一水平上测定中、强磁性标本的方法。该方法简便，只要严格操作，测定精度满足规范要求。

二、资料处理方法

随着磁测精度的提高，高精度磁测的原始数据曲线一般情况下是很不光滑的，这主要是浅层磁性不均匀产生的噪声，强度可达几纳特至数十纳特不等，这种噪声会淹没了我们所要发现的弱异常，所以对原始数据必须进行预处理，不做处理就无法发挥高精度磁测的作用。对高精度磁测资料处理可分为滤除干扰的一般处理与提取信息的专项处理两类。一般处理的目的在于滤除干扰，得到能客观反映磁场面貌的基础图件。滤除干扰主要采用插值切割法和一维三点平滑滤波或最佳线性滤波处理，滤掉数据中的地表磁性不均匀或人文干扰所引起的强干扰异常，然后再进行二维滤波，效果明显。

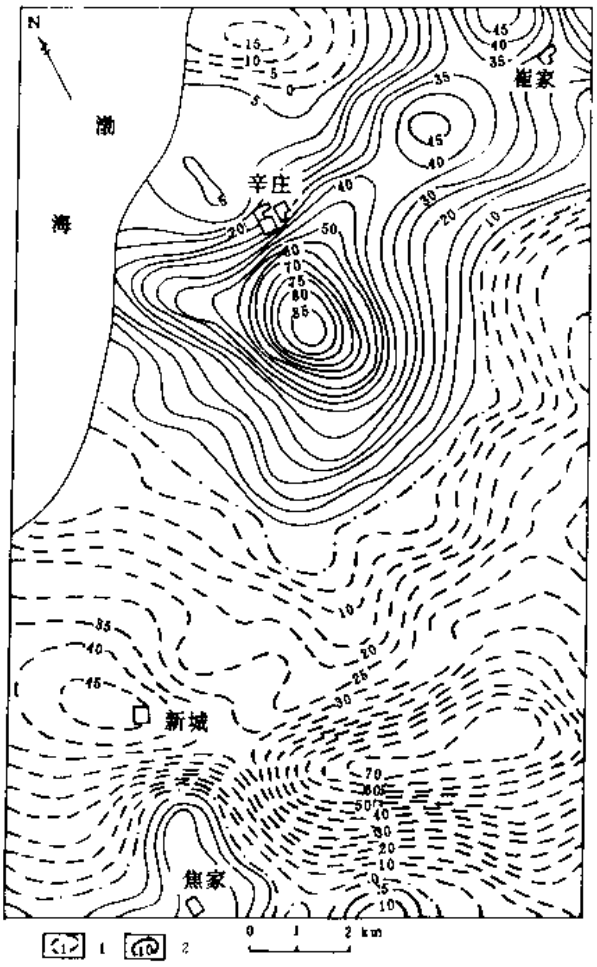

图3-1 ΔT 上延500m等值线平面图
1—负等值线；2—正等值线

提取信息的专项处理，其目的在于尽可能多地提取有用信息，或改变异常形式，使其便于解释。

本次专项处理采用了①化极处理，将 ΔT 转化成 $\Delta T_{\perp} = \Delta Z_{\perp}$ 使磁异常解释由复杂到简单。根据物性测定的结果，招掖地区岩石磁性以感应磁化为主，$\overline{M}_i/\overline{M}_r \approx n \times 10 - n \times 10^2$，满足化极的条件，化极处理效果是好的。②磁场向上延拓处理，利用向上延拓消除浅部磁性不均匀的高频异常，分离垂向叠加的区域背景和局部异常，突出深部规模较大的磁性地质体的磁异常（胶西北地区分别作了50，100，200，300，500m五个不同高度的延拓处理）。如图3-1清楚地反映了与招掖地区金矿成矿关系十分密切的郭家岭岩体，呈NE向自焦家到崔家膨缩展布情况。③ΔT 磁场水平方向一次导数，主要是为突出带状异常，推断断裂构造，划分岩体边界。招掖地区水平方向的一次导数是在化极上延100m的基础上计算的。通过水平一次导数的处理，NE或

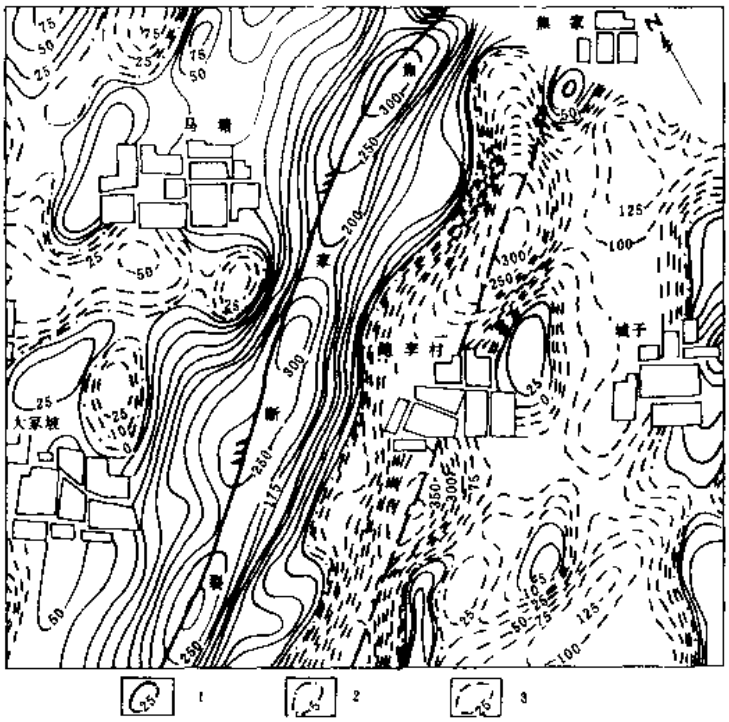

图 3-2　焦家断裂带中段 ΔT 的 120°方向水平导数图

1—正等值线（nT/km）；2—零等值线；3—负等值线（nT/km）

NNE 向构造在 120°方向水平导数图上反映更明显（见图 3-2）。

根据第二章中提出的用等效磁偶层面的水平磁异常来解释磁场水平梯度异常的方法，可清楚地看出与胶东群地层相接触的玲珑花岗岩下面有一郭家岭花岗闪长岩体侵入，侵入体的顶部较平缓，它的 NW 与 SE 界面分别位于图中正、负异常极值带下方，倾向依次为 NW 与 SE，倾角较陡。具体的半定量解释过程可参照第二章第一节之 3（p.8）。

基于上述对水平梯度异常的推断、分析，显然在这一隐伏郭家岭花岗闪长岩的 SE 接触带及其附近注意找矿，会有新的发现。

此外，还应用彩色图像处理技术对本区的磁测资料（122.5km^2）进行了处理，分别作了彩色场强图及阴影图，前者色彩鲜明，轮廓清晰直观，在平面等值线图上不易反映的某些磁异常特征，可以一目了然。彩色场强阴影图，能更直接反映磁场的梯度变化，显示线性构造特征。

第二节　高精度磁测在金矿区研究应用实例

一、研究区地质及磁性特征

高精度磁测在金矿区的应用效果，如同其它物探方法一样，在客观上取决于金矿控矿地质条件、找矿标志及其磁性特征，这些也是研究工作的基础与依据。

（一）胶西北地区破碎带蚀变岩型金矿成矿地质条件与磁性特征

1．胶西北地区金矿成矿地质条件

该区位于黄（县）—莱（州）断裂带的中段（即焦家断裂带）及玲珑岩体的西北边缘

部位。

①胶东群英庄夼组地层主要由斜长角闪岩、黑云斜长变粒岩、黑云变粒岩、黑云斜长片麻岩等组成。

已经勘查评价的大型金矿床如焦家、东季、马塘、寺庄等金矿床，均位于胶东群英庄夼组地层与花岗岩的断裂接触带内。

②三山岛断裂带、焦家断裂带是区内的主体含矿构造。

三山岛断裂带位于莱州湾东岸，沿花岗岩与胶东群地层接触带分布，长 11km，宽 50—200m。三山岛、仓上金矿床赋存于该断裂中。

焦家断裂带宽几十到几百米，沿玲珑花岗岩岩体与胶东群地层接触带分布，局部切穿岩体。并与其东侧派生的望儿山支断裂、龙埠-河西支断裂、候家断裂等共同组成焦家控矿断裂系统，控制了新城、焦家、马塘、河东、望儿山、上庄等大、中型金矿床。区内还有灵山-北截断裂出露，断裂带宽约 4—20m，主要发育在玲珑岩体中。该断裂带控制着灵山沟、蚕庄、原家大中型矿床。

③区内岩浆岩广泛分布，主要为著名的玲珑花岗岩及郭家岭花岗闪长岩。

玲珑花岗岩是区内的主体岩石，可分为中粗粒和片麻状花岗岩。岩体内老地层残留体发育，大部分残留体与其呈渐变过渡关系。中粗粒花岗岩主要是重熔成因，副矿物组合为以磁铁矿为主。片麻状花岗岩主要是交代型成因，交代残留结构发育。

郭家岭花岗闪长岩按其中酸性、斑晶大小等可分为内部相、过渡相及边缘相，三相带呈渐变过渡关系。区内上庄岩体以内部相为主，岩体的边缘则具边缘相特点，北截岩体只具过渡相特点。郭家岭花岗闪长岩成因类型为重熔-侵入型。

岩浆岩与金矿床的关系非常密切，绝大部分矿床直接产在玲珑花岗岩或郭家岭斑状花岗闪长岩中，或其边缘及外接触带。金矿床多数分布在以郭家岭斑状花岗闪长岩接触带为中心的 0—3km 在范围内，且有些就直接产于郭家岭斑状花岗闪长岩中，如上庄、界河金矿。

④区内主要矿化带为焦家蚀变带及其东侧的望儿山等次级蚀变断裂带。岩石的蚀变与矿化密切相关，蚀变作用主要有：绢云母化、硅化，其次有绿泥石化、碳酸盐化、黄铁矿化等。

蚀变带的范围控制着矿化范围，矿体均在蚀变带中，地表蚀变宽度一般为几米到 200 余米。

2．胶西北地区岩矿石磁性特征

本区较系统地测定了岩矿石磁性标本共 6390 块，按要求加工成立方体或圆柱体，用 WWS-1 型双无定向磁力仪测定。

（1）变质岩的磁性

角闪岩类岩石磁性最强，其磁化率 $\bar{\kappa}$ 在（500—4000）$\times 10^{-6}4\pi$SI，剩余磁化强度也较大，$\bar{M}_r$ 在（50—1000）$\times 10^{-3}$A/m；次之为变粒岩，其磁化率 $\bar{\kappa}$ 在（125—170）$\times 10^{-6}4\pi$SI，$\bar{M}_r$ 在（10—30）$\times 10^{-3}$A/m，最弱为片麻岩、片岩、大理岩等，其磁化率 $\bar{\kappa}$ 在 $30\times 10^{-6}4\pi$SI 左右。岩石的磁性强弱与岩石中所含铁磁性矿物的多少有直接的关系，变质岩中各岩性铁磁性矿物的含量是不同的，斜长角闪岩中磁铁矿的含量最高，达 1782 $\times 10^{-6}$，黑云石英片岩最低，仅 10×10^{-6}。

（2）花岗岩的磁性

①玲珑花岗岩的磁化率 $\bar{\kappa}$ 在（30—150）$\times 10^{-6}4\pi$SI，剩磁 $\bar{M}_r$ 在（5—20）$\times 10^{-3}$ A/m，综观不同地点玲珑花岗岩，其磁性变化相对较稳定。

②郭家岭花岗闪长岩的磁化率 κ 一般在（300—700）$\times 10^{-6}4\pi$SI（剩磁 $M_r < 50 \times 10^{-3}$A/m），局部地段较高，磁化率可达 $1428 \times 10^{-6}4\pi$SI。又如上庄岩体边缘相其磁化率可达 $298 \times 10^{-6}4\pi$SI，而上庄岩体内部相，磁化率仅 $50.3 \times 10^{-6}4\pi$SI。其边缘相磁铁矿含量可达 1678×10^{-6}，而内部相磁铁矿含量仅 795×10^{-6}。

另外，北截岩体磁性较弱，磁化率仅 $12.8 \times 10^{-6}4\pi$SI，M_r 为 0.98×10^{-3}A/m，是否目前的北截岩体是一个较大岩体的内部相部分，而边缘相则处于隐伏状态，有待于深入研究。

（3）蚀变碎裂岩及矿石磁性特征

蚀变碎裂岩或矿石是原岩经过多期的地质构造运动及蚀变矿化作用而形成的，结果使原岩中的铁磁性矿物贫化，其平均磁化率 $\bar{\kappa} < 30 \times 10^{-6}4\pi$SI，$\bar{M}_r < 3 \times 10^{-3}$A/m，因此构造蚀变破碎带往往形成比周围磁场较低的磁异常带。

（二）胶西北地区磁场特征

1. 地层、岩体的磁场特征

（1）胶东群变质岩分布区的磁场

根据磁性测定结果及高精度磁测资料，可按照磁场幅值及变化梯度，将胶东群变质岩划分三大类，见图 3-3。

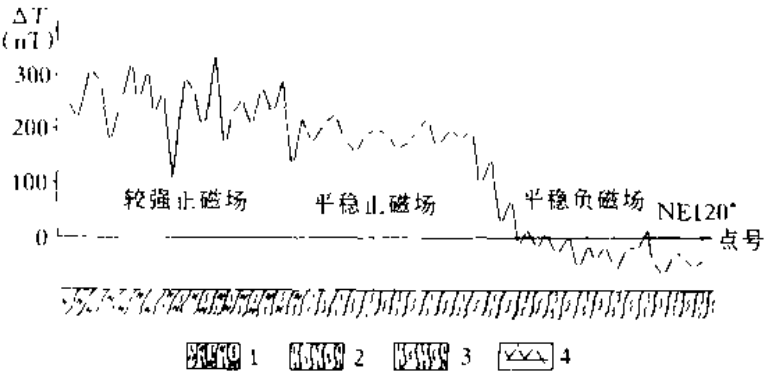

图 3-3 变质岩区 ΔT 剖面特征示意图

1—斜长角闪岩；2—黑云变粒岩；3—斜长片麻岩；4—ΔT 曲线

（2）玲珑花岗岩分布区的磁场

根据磁性测定结果及实测磁场强度与其变化梯度，可将玲珑岩体划分为两大类即中粗粒花岗岩及片麻状花岗岩，如图 3-4。在地区分布上，拉格庄—西曲城—焦家一线以北以片麻状花岗为主，以南以中粗粒二长花岗岩为主。

（3）郭家岭花岗岩岩体的磁场特征

不同的郭家岭花岗岩体及同一岩体表现出不同的磁场特征。从物性分析可知，引起这种磁场特征不同的原因，主要是由于岩体的不同相带磁性矿物的含量不同引起。通过实测磁场、物性资料的总体归纳可建立郭家岭花岗闪长岩岩体磁场模型如图 3-5。图中示出了

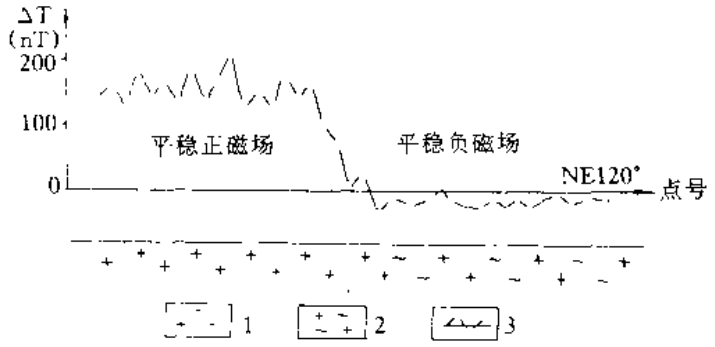

图 3-4　玲珑花岗岩磁场剖面特征示意图

1—中粗粒花岗岩；2—片麻状花岗岩；3—ΔT 曲线

位于岩体不同剥蚀程度的两个观测面上的磁场模型：Ⅱ剖面为岩体完全出露，且内外相带发育完整，磁场特征的边缘相带为高磁场，内部相带为负磁场特征。剖面上呈马鞍状，平面上边部为环形正磁场，中心为降低的负磁场。上庄岩体即为此特征。Ⅰ剖面为玲珑花岗岩呈上覆盖层，郭家岭花岗闪长岩呈隐伏状态。此时，远离岩体为波动的负磁场，主要是玲珑花岗岩的磁场特征，岩体上部为正磁场，反映了郭家岭花岗闪长岩体边缘相带的较强磁性特征。

这次研究工作根据上述模型及高精度磁测资料的分析，发现沿着焦家主干断裂的下盘在玲珑花岗岩下有一郭家岭花岗闪长岩的岩带侵入，这个岩带自焦家向北延伸至高家庄子、崔家，向南延至大栏丘家、徐家院一带。这一岩带与金矿成矿关系密切，除在其西侧接触带及附近的构造破碎带中应继续找矿外，还应扩大到其东部接触带附近的破碎带中找矿，当有新的发现。

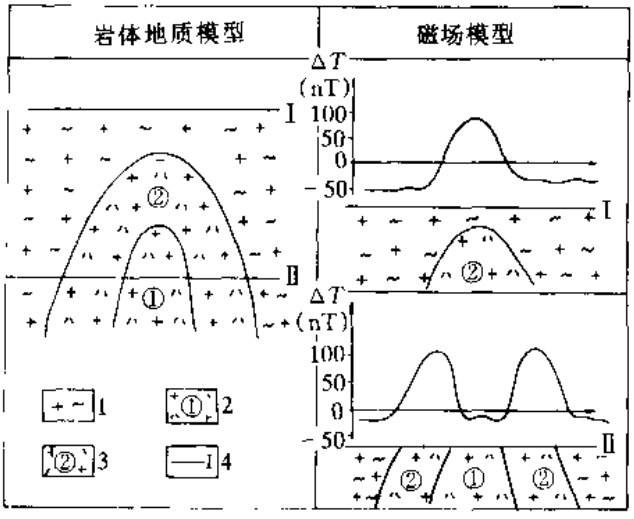

图 3-5　郭家岭花岗闪长岩磁场模型

1—片麻状花岗岩；2—郭家岭花岗闪长岩（内部相）；3—郭家岭花岗闪长岩（边缘相）；4—观测平面（剖面方位为东西向）

2. 岩性分界与断裂构造、蚀变破碎带磁场特征

根据前述的地层、岩体的磁性与磁场幅值及其梯度特征从高精度磁测成果图上不难识别出不同岩性分界与断裂构造的存在与展布（实例略）。

蚀变破碎带是胶西北地区金矿的主要控矿与赋矿构造。多期构造破碎尤其是多期的热液蚀变作用，造成破碎蚀变带的磁性相对围岩有不同程度的降低，其磁场特征如下：

①灵北断裂北段处在片麻状黑云母花岗岩中，由前述可知，它的磁性较弱。从图 3-6 可见，沿断裂带上方为带状较弱的低负异常特征。这主要是原岩的磁性本来就较弱，经破碎蚀变后，磁性降低。破碎蚀变带规模的大小、破碎蚀变程度则是影响磁异常特征的重要原因。

②焦家断裂带纪家地段的磁场特征如图 3-7 所示，以斜长角闪岩为主的变质岩分布区，表现为正磁场特征，ΔT 在 40—80nT，黑云母片麻状花岗岩下伏郭家岭花岗闪长岩分布区，也为正磁场分布区，曲线跳跃相对剧烈，ΔT 在 60—120nT，断裂带通过处，反映了平稳的低值带，ΔT 在 -40—-60nT，这主要是该段破碎带宽度较大，由于岩石破碎及蚀变所造成退磁作用较强所致。

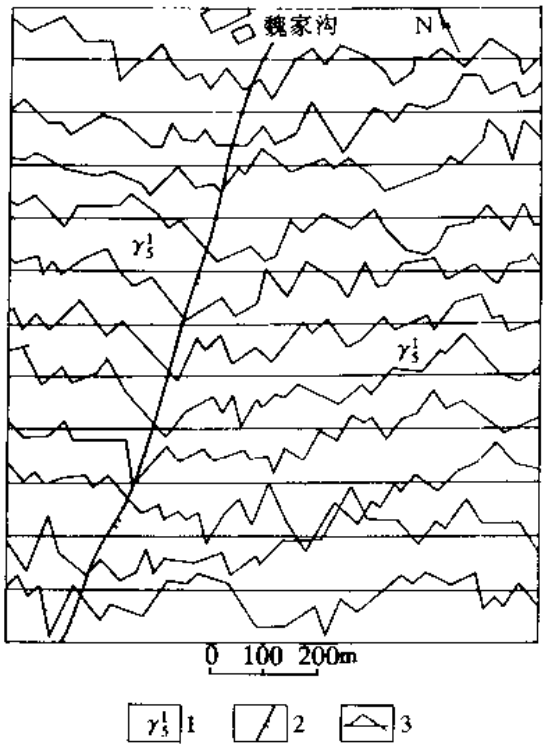

图 3-6 灵山-北截断裂魏家沟地段 ΔT 剖面平面图

1—玲珑花岗岩；2—断裂带；3—ΔT 曲线

(1cm = 100nT)

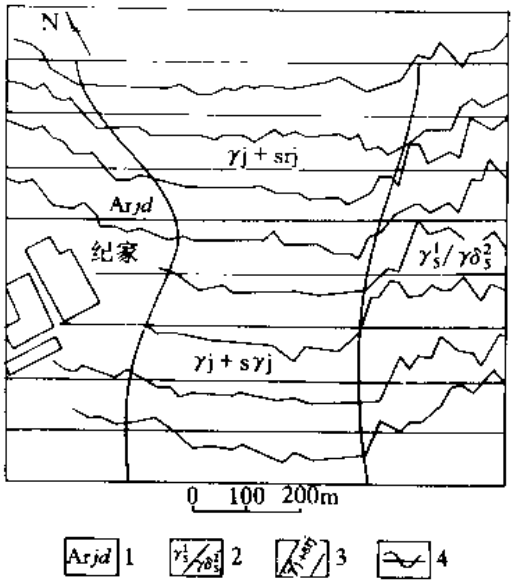

图 3-7 焦家断裂破碎带纪家地段 ΔT 剖面图

1—胶东群地层；2—玲珑花岗岩下伏郭家岭花岗闪长岩；3—蚀变破碎带；4—ΔT 曲线

(1cm = 100nT)

③为研究蚀变（矿化）破碎带磁场特征，在焦家断裂带中段的东季金矿区进行了 1∶2000 的高精度磁测（精度达 1.33nT）。从东季矿区 ΔT 等值线平面图 3-8 可见，区内的磁场特征基本可分为三类：波动的负磁场区，对应蚀变带西侧的胶东群斜长片麻岩，ΔT 在 -50—-100nT；蚀变破碎带东侧（东季金矿东、东南）为正磁场区，对应了玲珑花岗岩体分布区，ΔT 在 70—120nT；在这两个特征区之间为幅值更低、变化平稳的磁场区，其西边界是以密集排列的等值线突然消失为特征，东边界基本与零等值线分布位置吻合。

综观蚀变破碎带内的磁场特征，东季露天金矿床东北部，由于龙埠多条平行的分支断裂在此与主干断裂交汇，故断裂带的边界不如南段明显。露天开采的三个矿体南部覆盖区的矿体，磁场总体表现为等值线稀疏，ΔT 在 -100—-150nT，ΔT 幅值明显低于相邻区域，反映了矿体及周围的蚀变岩（矿化）蚀变较强。值得注意的是南北矿体赋存部位均为西部北西向串珠状磁异常与北东向断裂蚀变带交汇部位，因此，南部第三条北西向串珠状异常与此主蚀变破碎带相交部位低缓异常区具有较大的找矿意义。

此例用以说明利用大比例尺高精度磁测资料，划定蚀变破碎带位置与宽度是可能的，

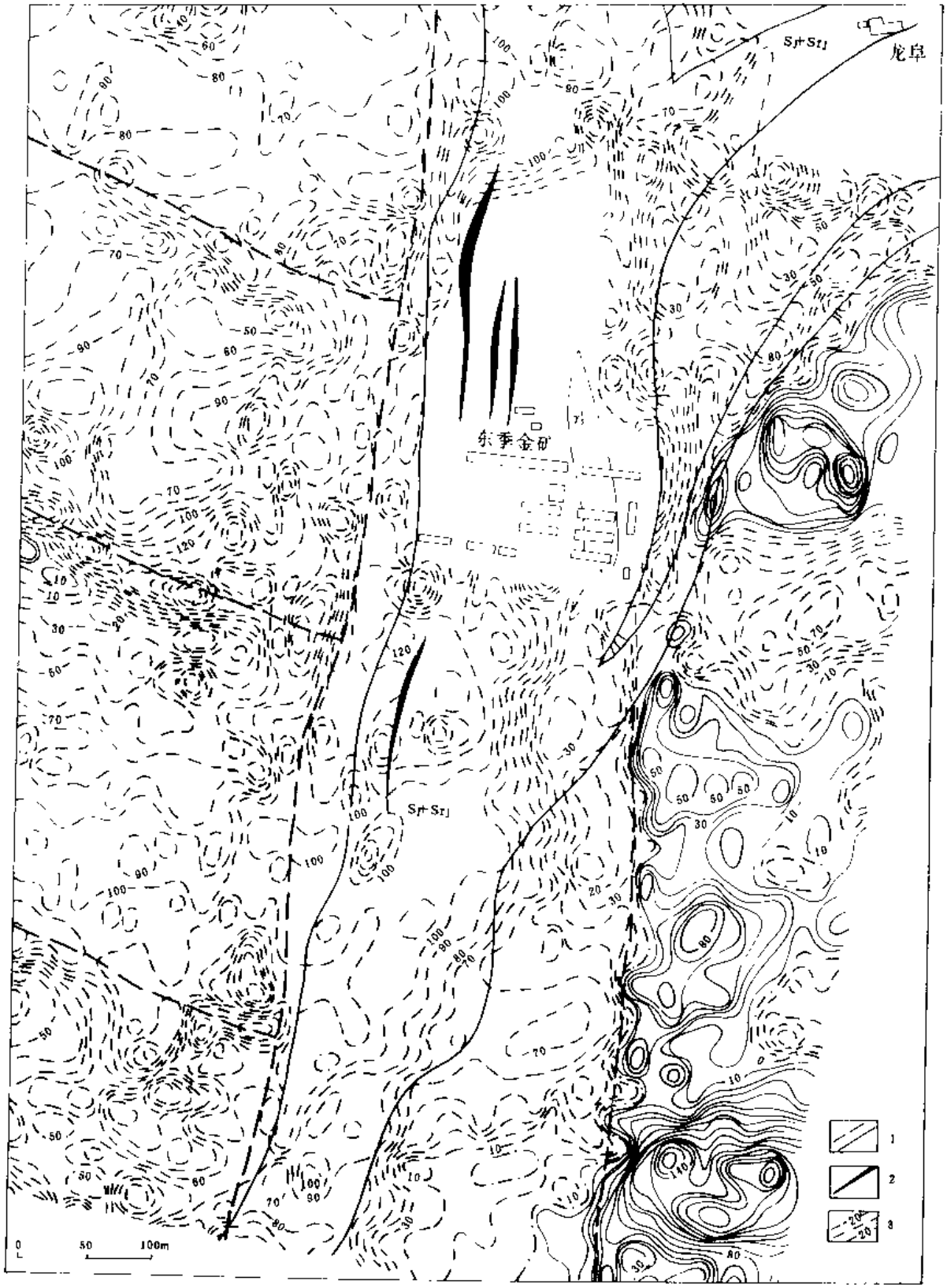

图 3-8　东季矿区高精度磁测 ΔT 平面图

1—实测及推断断裂；2—金矿体；3—ΔT 负、零、正等值线

尤其通过研究蚀变带内的低缓磁异常（< -100nT），对预测成矿的有利区段（强蚀变区）是有效的。

（二）对焦家断裂带的认识

焦家断裂带（破碎蚀变带）是区内的主要控矿构造，追索断裂的位置及延伸分布，是扩大找金远景的关键问题，一直被人们所关注。本次高精度磁测提供了重要信息，在上述地层、岩体及蚀变破碎带磁性及磁场特征的研究基础上，经系统对比分析研究，提出了如下新的认识：

1．对焦家控矿断裂带北段延展的探讨

根据磁测资料划出的焦家控矿断裂带的位置，由南往北为朱桥—寺庄—大家坡—马塘—焦家—龙埠—河西—河东—上庄—大涝洼—陈家西—朱宋（如图 3-9）。北段由朱宋往北与地质上划定的焦家断裂带位置一致，南段朱桥—龙埠段的位置也与焦家断裂带一致。龙埠—河西段与地质上划定的龙埠—河西断裂带一致，河西—朱宋段为已知的望儿山次级断裂带，但其宽度大于原划定的望儿山断裂带。

在新城以北平稳负磁场区，也有局部的呈线性串珠状分布的局部低值或高值异常，其幅度、范围、连续性都较差，说明地质原划定新城以北断裂带规模、蚀变矿化等程度较差。而上庄—大涝洼地段以往地质工作程度相对较低，是潜在的找金远景地段。

另外据高精度磁测资料在望儿山次级断裂带东约 750…1000m，有一条明显的与望儿山断裂带平行的低磁异常带，沿汪家—大庄家—陈家—西沟李家西—童家—卧龙杨家东展布。对此断裂带的找矿意义也不容忽视。

2．焦家断裂带南延的探讨

关于焦家断裂的南延，至今尚未取得统一的认识，通过对高精度磁测资料的分析对比，根据磁场变化特征，经分析研究认为焦家断裂带在朱桥附近受北西向断裂影响，在徐家院与欣木村之间向南西延伸，经小战家—前李家，在苗家附近尖灭。

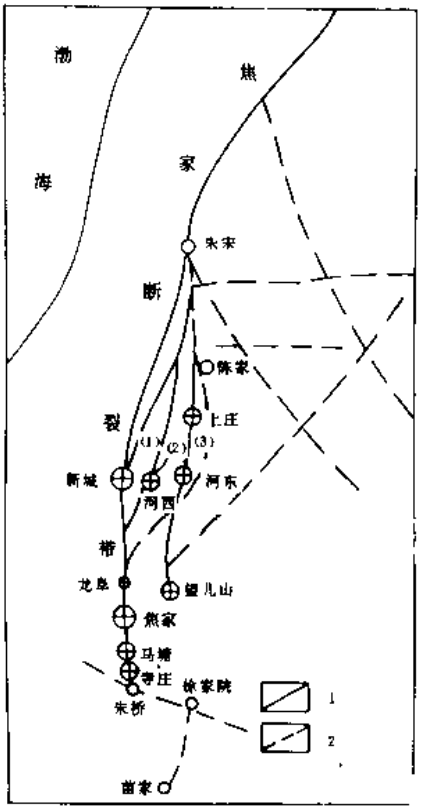

图 3-9　焦家断裂示意图

1—实测断层；2—推断断层

（1）候家断裂；（2）龙阜—河西断裂；

（3）望儿山断裂

二、破碎带蚀变岩型金矿床的磁场特征

破碎带蚀变岩型金矿床，严格受构造控制，蚀变构造带内各种蚀变岩往往以矿体为中心具有明显的分带性，矿体是各种蚀度作用最强烈的部位。从磁性角度而言，这种强烈的蚀变矿化、破碎作用，使原岩磁性降低，如果在成矿过程中有新的磁性矿物参入，磁性会有所提高。这种降低和升高的磁信息是微弱的，只有在大比例尺及高精度的条件下，才可以发现这种弱磁信息。

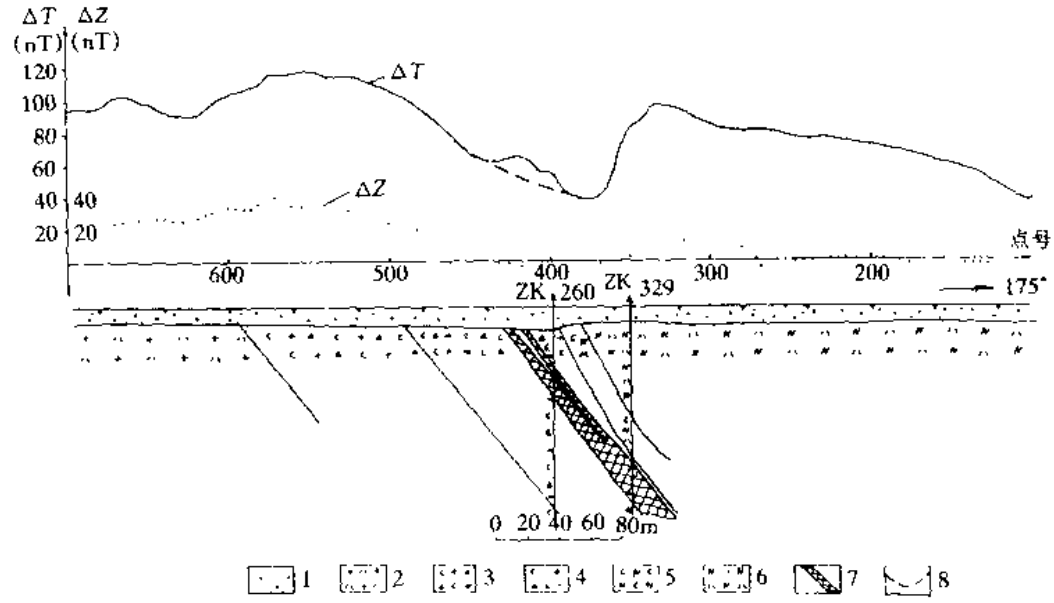

图 3-10　仓上金矿 507 勘探线磁测剖面曲线图

1—第四系；2—郭家岭花岗闪长岩；3—绢英岩化破碎裂状花岗岩；4—黄铁绢英化碎裂岩；5—绢英岩化斜长角闪岩；6—斜长角闪岩；7—金矿体；8—ΔT 背景场

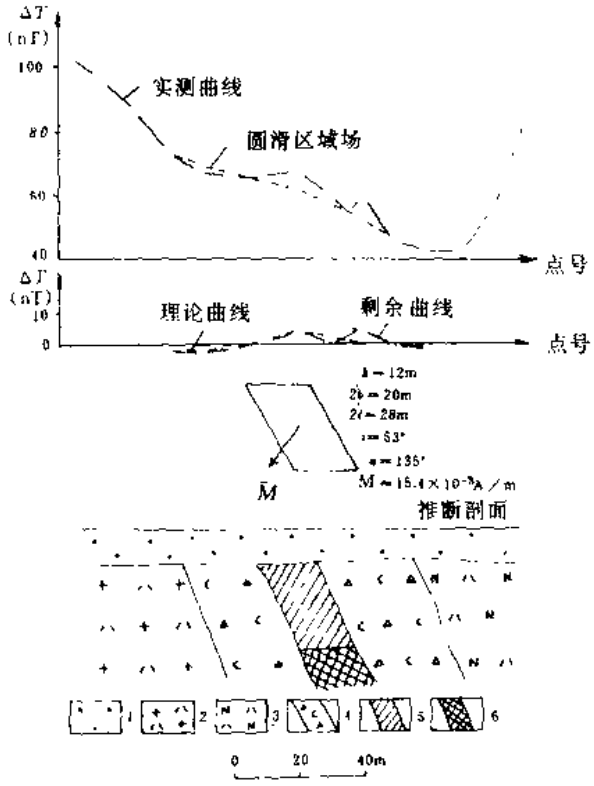

图 3-11　仓上金矿 507 勘探线正演计算曲线

1—第四系；2—郭家岭花岗闪长岩；3—胶东群地层；4—蚀变破碎带；5—矿化体；6—矿体

1．仓上大型金矿床的磁场

仓上金矿不同勘探线以 5m 点距观测结果表明矿头部位磁性降低特征不明显，而在连续五条勘探线上低值带中磁性升高的特征都较明显。以 507 勘探线观测结果（图 3-10）为例，断裂带上、下盘岩性分别为变质岩及郭家岭花岗闪长岩，分别对应 70—100nT，80—100nT 的正磁场分布区，蚀变带的边缘对应降低的磁异常，而主矿体所在蚀变带上方出现一 40nT 的低磁异常，伴生一升高的正磁异常，如果蚀变带内没有磁性矿物，ΔT 曲线应为降低的特征（图中虚线），相对于低磁异常而言，磁异常的幅值 20nT 左右。通过正演计算结果（见图 3-11）表明，微弱正磁异常是由矿体上部具一定磁性的矿化体引起。据地质研究成果："仓上矿床的矿体和矿化体的一个重要区分标志，就是矿化体中有磁性矿物（磁铁矿、赤铁矿），而矿体中极少见到"（详见山东地质六队提交的"胶东地区焦家

式金矿成矿模式与找矿方向的研究报告”，1990），可见磁异常是含有磁性矿物的矿化体的反映。矿化体与矿体的关系极其密切，这种低值磁场带中局部升高异常，是高精度磁测间接找矿的一个有用标志。

2．焦家特大型金矿床的磁场

该矿床位于焦家断裂带中段，处在玲珑花岗岩体与胶东群地层的接触带上，共圈出大小矿体二十七个，其中1号为主矿体，占总储量的92%。

在焦家金矿床进行了三条点距为5m的剖面工作。在其中两条勘探线也观测到了低值带中的局部磁场升高的特征（图3-12），升高幅度不足20nT，可能是矿化体中磁性矿物引起，如仓上金矿床。该矿床磁场的主要特征是：①在磁场平面图上，断裂带为低磁场到高磁场的过渡带，矿床位于三种特征磁场的交界处偏向低值一侧；②在磁场剖面图上矿头有降低的磁异常（降低20nT），大比例尺工作时，在矿体上方有局部升高的磁异常（东季金矿上亦有此现象）。

区内其它大、中型金矿的磁场特征见表3-1。

表3-1

矿　区	所处蚀变带磁场特征	矿头在地表投影位置磁场特征
新城金矿	正负磁场过渡带负值一侧	主矿体倾向一侧有降低20nT负磁场
东季、龙埠金矿	正负磁场过渡带负值一侧	磁场降低10—20nT局部负磁异常
寺庄3、4号矿体	平稳正磁场与高正磁场过渡带靠近低值一侧	不明显
河东金矿	负磁场分布区，磁场降低特征，4、5号矿体处，正负磁场过渡带负值一侧	1号矿体为降低20nT局部负磁异常
河西金矿	2号矿体处正负磁场过渡带，其它不明显	2号矿体倾向侧，为降低20nT的局部负磁异常
上庄1、4、6、7号矿体	正负磁场过渡带负值一侧	7号矿体倾向侧有磁场降低的局部异常
上庄2、3、5号矿体	负磁场分布区，局部为负磁场中低到高的过渡带	5号矿体倾向侧有磁场降低的局部异常

三、胶西北破碎蚀变岩型金矿床高精度磁测找矿模型

蚀变岩型金矿与地层、岩体、构造关系密切，研究磁测找矿模型，离不开对上述地质体磁场特征的研究。磁测找矿模型实质上是对与金矿有关地质体磁性特征的总结、概括。通过对胶东群地层、玲珑花岗岩、郭家岭花岗闪长岩、断裂蚀变带及矿床的磁场特征分析，建立了不同围岩接触关系的两类四种类型的高精度磁测找矿模型（见图3-13）。这四种找矿模型，是本区矿床及控矿因素（地层、岩体、构造）不同磁场特征的最小组合，具有代表性。

1．不同岩性接触蚀变带中的金矿床

①仓上金矿类型：矿体上盘为斜长片麻岩及斜长角闪岩，对应为平稳低及高磁场；下盘为玲珑花岗岩及郭家岭花岗闪长岩，磁场为平稳低及较高磁场，蚀变带上方为低磁场中叠加有升高的局部磁异常。

②焦家金矿类型：矿体上盘为斜长片麻岩，对应平稳低磁场；下盘为玲珑花岗岩下伏郭家岭花岗闪长岩，磁场为高正磁场，蚀变带上方为低值带中微弱异常。

2．花岗岩体内断裂蚀变带中的金矿床

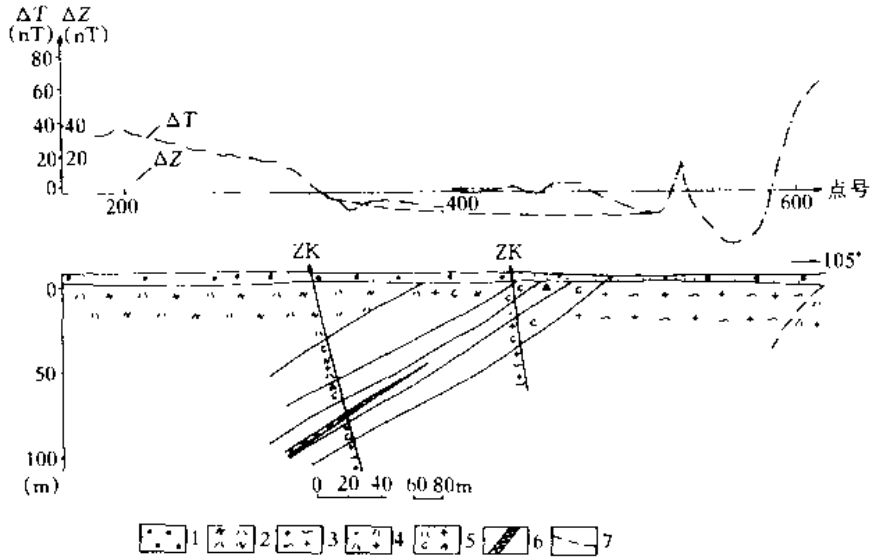

图 3-12　焦家金矿 128 勘探线磁测剖面曲线

1—第四系；2—胶东群；3—玲珑花岗岩；4—郭家岭花岗闪长岩；5—蚀变带；6—金矿体；7—ΔT 背景场

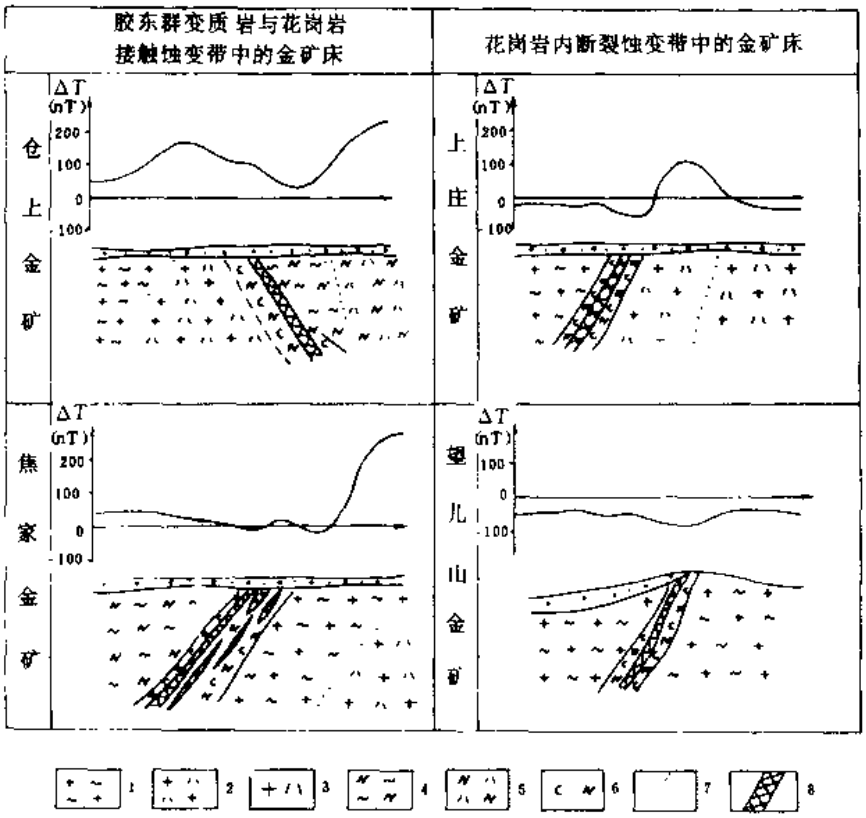

图 3-13　高精度磁测找矿模型示意图

1—黑云母片麻状花岗岩；2—中、小斑状花岗闪长岩；3—中、大斑状花岗闪长岩；4—斜长片麻岩；5—斜长角闪岩；6—蚀变带；7—岩性界线；8—矿体

（剖面方位为东西向）

①上汇金矿类型：上盘为片麻状黑云母花岗岩，为平稳的负磁场；下盘为郭家岭花岗闪长岩，其边缘带（中、小斑状花岗闪长岩）为正磁场，内部带（中、大斑状花岗闪长岩）为平稳波动负磁场，蚀变带上方为低磁异常带。

②望儿山金矿类型：矿体上下盘均为片麻状黑云母花岗岩，均为平稳负磁场，蚀变带上方为负磁场背景的低值磁异常。

四、胶西北破碎蚀变岩型金矿高精度磁测找矿预测研究

（一）靶区预测标志

根据破碎带蚀变岩型金矿的控矿地质条件，在对以往资料认识的基础上，以深化研究1:10000高精度磁测资料为主，结合1:10000—1:20000地质、激电及土壤、岩石测量等资料，利用前述各地质体的磁场特征，找矿模型及其它方法在已知矿上的反映规律，建立找矿靶区预测标志如下：

①处于岩体内、岩体边部、或岩体与胶东群地层接触的蚀变断裂带及附近，尤其断裂带的转弯、交汇是金矿成矿的有利部位。

②北东向展布的由隐伏郭家岭花岗闪长岩引起的正异常带边部及附近。

③以北东向为主的低磁异常带（彩色图像阴暗色调异常带）内，及与北西、近东西向串珠状磁异常交汇处。

④低磁异常带中局部更低的磁异常（降低20—30nT），或者等值线同向弯曲变宽地段及局部升高（约20nT左右）异常地段，处在三种或三种以上磁场交界处。

（二）预测的找矿靶区

根据上述预测原则，充分利用多种信息，综合激电、岩石、土壤测量异常，确定和优选找矿靶区，研究区内第一批预测了6处主要找矿靶区。

1号靶区

靶区中心位于×××东南600m处的望儿山断裂带与焦家主断裂交汇附近，面积800×600m^2，周围均为黑云母花岗岩，靶区南部为上庄7号矿体，成矿条件有利。

靶区对应高精度磁测资料正负磁场的过渡带，负等值线向东凸出，正等值线凹进部位，且有－20nT局部磁异常分布，与其南部××矿体对应的异常特征相似。

靶区内有明显的激电异常，异常中心对应高精度磁测正、负磁场过渡带负等值线向东凸出部位，该异常南端对应××7号矿体。区内有明显的Au异常分布，异常梯度明显，覆盖了局部低磁及激电异常区。靶区的物化探异常明显，吻合程度高，各元素组合性好，且地质构造条件有利。因此，认为靶区内激电异常为蚀变破碎带内含金硫化矿物富集体引起，有较大的找矿意义。建议布钻验证。

2号靶区

靶区内激电异常明显，异常区位于磁场过渡带处。区内分布有金异常，其它元素异常较明显，组合较好。

综合上述，认为该异常特征明显，所处的地质成矿条件有利，靶区内激电异常为岩体内蚀变带中的含金硫化矿物富集体引起。建议布钻验证。

3号靶区

靶区位于×××附近，面积600×800m^2，地表为第四系覆盖，偶见黑云母花岗岩。

高精度磁测表明，异常中心位于彩色图件近南北向阴暗色调异常带，及北西向的串珠

状磁异常带（彩色图件为北西向明亮色调异常带）的交汇部位，且对应了激电异常的南峰值。这两条磁异常带分别为岩体内断裂带及断裂带被磁性矿物充填所致。

区内有明显的金及各元素异常。

综合上述，认为靶区位于近南北向与北西向断裂交汇部位，靶区内激电异常系断裂带内的含金硫化矿物富集体引起，找矿希望较大。建议在南峰异常布钻验证。

4 号靶区

靶区中心位于×××村西南 200m 处，面积 800×700m^2，焦家支断裂通过异常区，断裂西侧为胶东群地层，东侧为黑云母花岗岩，成矿地质条件有利。

靶区对应 ΔT 在 60—120nT 的正磁场分布区，且 NE、NW、SW 方向局部小正异常呈串珠状在此交汇，认为是多条断裂的复合部位，激电资料有明显异常显示。认为该异常存在较大的找矿希望，建议在××点施钻验证。

5 号靶区

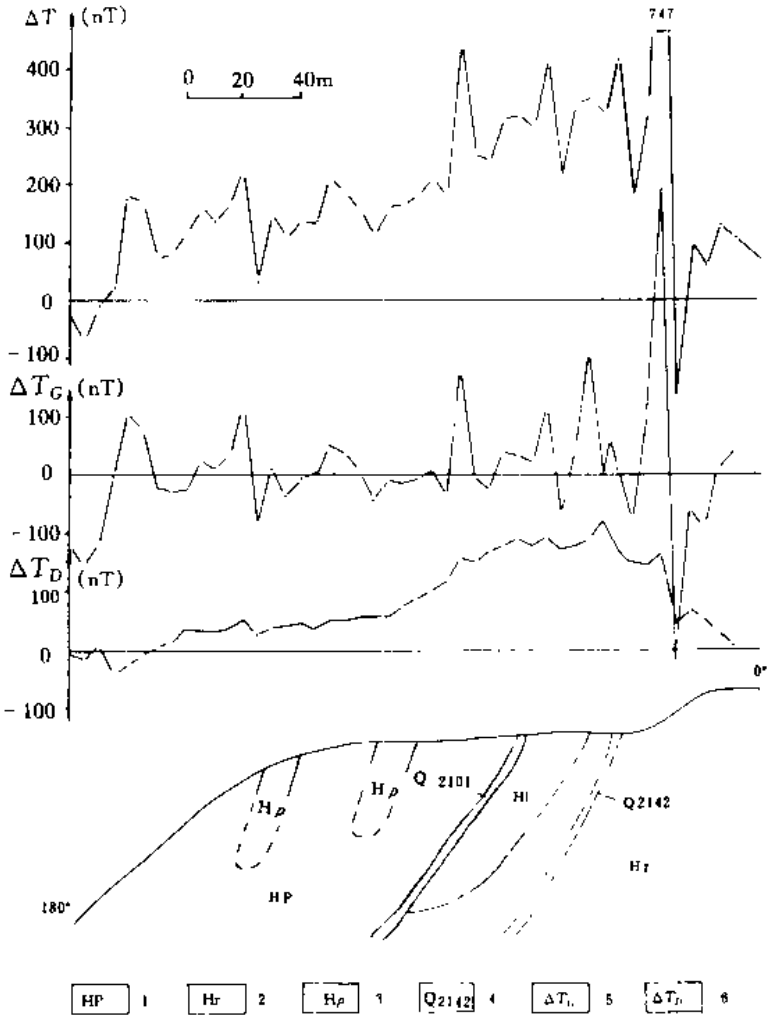

图 3-14　王排沟 12 线磁测综合剖面图

1—混合岩化黑云母斜长片麻岩；2—混合花岗岩；3—伟晶岩脉；4—含金矿脉及编号；5—高通滤波后磁异常曲线；6—低通滤波后磁异常曲线

靶区处于黑云母花岗岩分布区，面积约 $800\times1000m^2$，近南北向的断裂通过靶区，在靶区北部与北东向的断裂交汇，成矿地质条件较为有利。

磁场平面图上××附近以正磁异常分布为特点，ΔT 在 20—100nT，其它均为 -100nT——20nT 负磁场，区内 NE 向断裂呈现串珠状局部相间的正负异常，而 NW 向断裂以局部异常走向发生变化为特点。激电有明显的异常显示。异常区位于正、负磁场的交界处。

该异常所处的地质条件较为有利，建议进行岩石、土壤地球化学测量。

6 号靶区

靶区面积约 $4km^2$，位于推断的焦家断裂构造由近东西向转为北东向的转弯部位，该区内有三条串珠状低磁异常带与望儿山断裂带交汇，认为是岩体内断裂所致。区内 1∶20000 激电资料有四处激电异常，其中两处已知矿异常均处在该区域西边界望儿山断裂带上；认为该区磁测异常明显，处于岩体内，有构造信息及激电异常显示，找矿意义较大。

上述六处主要找矿靶区，前五处工作程度高，预测的范围较小和具体，可供直接验证；6 号靶区高精度磁测特征明显，可作为下一步物探、化探普查重点靶区（进行 1∶10000 激电、土壤测量）。

五、鸳鹿地区石英脉及蚀变岩型金矿床高精度磁测工作成果

陕西小秦岭鸳鹿地区金矿属太古界太华群高级变质区金矿床，金矿主要类型为含金石英脉型和构造蚀变破碎岩型。金矿赋存于构造断裂中。

刘家沟含金石英脉是沿构造带充填交代的破碎带石英脉型金矿床。王排沟金矿为自然

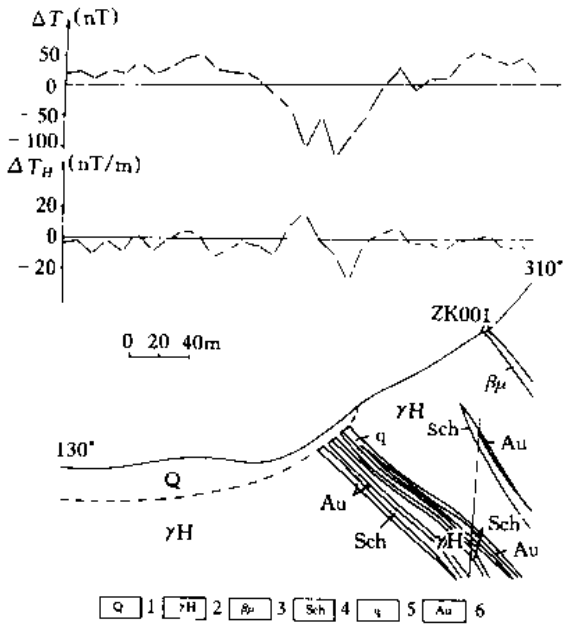

图 3-15　刘家沟 0 线磁测综合剖面图

1—坡积物、冲积物；2—花岗混合岩；3—辉绿岩；4—绢云母化绿泥石片麻岩；5—含金石英脉；6—金矿体

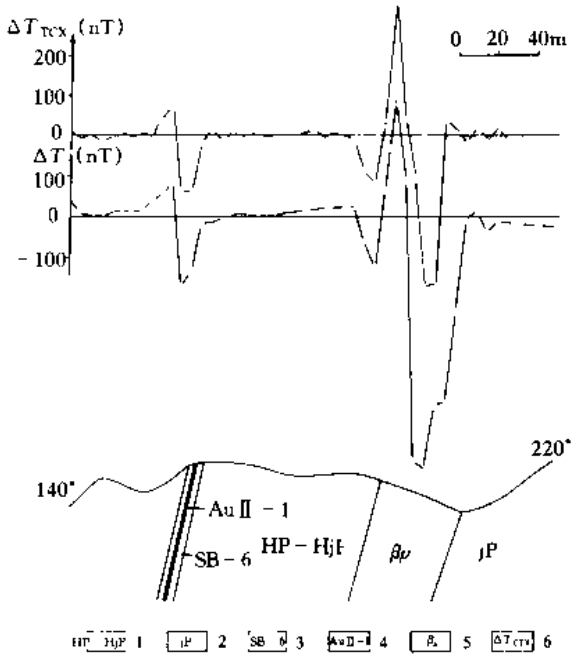

图 3-16　葫芦沟 59 线磁测综合剖面图

1—混合岩化黑云母斜长片麻岩夹混合岩化云母角闪斜长片麻岩；2—角闪斜长片麻岩；3—蚀变体及编号；4—金矿体及编号；5—辉绿岩；6—插值切割法处理后的磁测曲线

金-多金属硫化物-石英脉型，金矿体主要赋存在石英脉中。

围岩磁性与岩性有关，为中等和弱磁性且磁性的分布不均匀。构造蚀变作用使围岩磁性降低。

王排沟 12 线高精度磁测综合剖面如图 3-14 所示。

ΔT 呈高背景叠加异常特征，通过最佳线性滤波可分离背景场 ΔT_D 与高频异常场 ΔT_C。由于混合岩化黑云母斜长片麻岩磁性不均匀，因此以单剖面直接识别石英脉的异常较困难，但在磁性较均匀的花岗混合岩中较厚的石英脉群则较易直接利用负磁异常来发现，这点可由刘家沟 0 线高精度磁测综合剖面证实（见图 3-15）。

葫芦沟的已知剖面试验结果如图 3-16 所示。沿断裂构造发育的含金蚀变体上为负磁异常，在围岩低值平稳背景上很明显，但辉绿岩脉可产生很大的干扰异常，要注意区分。

根据高精度磁测成果，结合地质条件用类比法，对葫芦沟、岳王庙、刘家沟及王排沟等矿区进行了金矿的找矿预测，有待验证。

第三节　结　　语

高精度磁测由于使用了先进的仪器，不但提高了磁测的工效，降低了工作费用，而且能提供更多、更微弱的异常信息，提高了磁测解决地质找矿问题的能力，扩大了应用范围。

高精度磁测的上述优点，在这次金矿高精度磁测的应用研究中通过大面积及不同地区高精度磁测资料的分析研究（包括与原中精度磁测资料的对比），已充分得以证实。

高精度磁测能更可靠地反映控矿地质体的磁性变化，这些变化反映为磁场的或强或弱的变化及不同的形态特征，从而能更客观地了解隐伏的控矿岩体、构造和破碎蚀变带的分布，在间接找矿与预测找矿靶区上发挥重要作用。

在条件有利时，尚可根据金矿自身的微弱磁性变化与磁场特征（如低磁场中的局部升高）“直接找矿”，这些都需要配合以相应岩（矿）石磁性测定和研究工作。

高精度磁测由于上述优点以及扫面的费用较低，故在金矿区宜作为一项先行的基础调查工作。

但用单一的磁性及磁测资料来解决复杂的金矿地质找矿问题是有局限性的，宜与其它方法相结合。

这次应用研究的经验还说明，如将高精度磁测局限于直接找金矿，其效果在多数情况下是不够理想的。

今后有必要结合实际，继续开发研究金矿高精度磁测的数据处理方法，以便在强干扰和强异常背景上，更有效地提取和分解出更多有意义的弱磁异常。

第四章　金矿放射性γ能谱特征及其应用研究

γ能谱测量找金，主要是通过研究钾、钍、铀三元素的分配、分布与金矿成矿地质条件及金矿近矿围岩蚀变的关系，总结出作为间接找金的γ能谱标志，用来进行同类地质条件地区的找金预测。

γ能谱测量，现场确定土壤或岩（矿）石中铀、钍、钾含量，是利用铀系、钍系和^{40}K核素（占自然界中K的0.012%）的γ射线能谱存在的一定差异，通过测量铀系、钍系的核素（即^{214}Bi及^{208}Tl）和^{40}K核素γ射线特征能谱的射线强度来推算的。

本课题的研究思路是在地质及地球化学理论指导下，从已知金矿床的天然放射性元素γ能谱特征的研究开始，通过数据处理，提取和总结出控制金矿成矿的综合地质条件和金矿围岩蚀变的γ能谱诸标志，最后对测区γ能谱资料进行分析，类比和野外查证，提出成矿有利地区供地质找矿验证。

研究地区位于冀东、冀北的花岗岩-绿岩金矿带，以及安徽六安地区火山岩盆地。同时在其它一些金矿上也做了部分试验工作。

第一节　K、Th、U含量变化及诸比值的地质意义

在各种岩浆岩中，从超基性岩到中、酸性岩，铀、钍含量逐渐增高。酸性岩中铀含量最高约为基性岩的7倍，超基性岩的1200倍。在碱性岩中则相对富钍。而金在岩浆岩中的分布正好相反，从超铁镁质岩石到酸性岩逐渐降低。

在岩浆演化分异进入中晚期，铀、钍浓度逐渐增高。铀多分散在副矿物中，在岩浆期后亦局部富集在构造有利地段。岩浆分异愈完全，时代愈新，形成深度愈浅的花岗岩愈是富铀，钍铀比值也愈低。在火山岩中，铀、钍的分配特征与侵入岩有某些相同之处。花岗伟晶岩中，铀、钍富集在早期钙-钠阶段及晚期的交代阶段。碱性伟晶岩中钍的含量增高，钍富集在岩浆期后以钾钠为特征的共生矿物组合中。在热液作用中，随着热液温度降低而铀与钍分离。金在岩浆阶段分散，热液作用是金富集的主要阶段，在中低温阶段产生明显富集矿化。

在表生作用中，铀、钍因氧化而分离。铀的活动性大，易受化学风化转入溶液，可为胶体物质吸附或形成次生矿物及盐晕。钍不大活泼，以机械风化、迁移为主，富集在土壤和风化岩石残积物中。在各类沉积岩中，铀、钍分布极不均匀，一般以蒸发岩及碳酸盐岩中含铀量最低，碎屑岩在其次，泥质岩石中较高，富有机质（腐殖质、腐泥质）的岩石（如海相黑色页岩）中铀含量最高。

变质作用中，随变质程度加深而铀、钍含量减低。区域变质作用的低级变质过程中，铀的活动性比钍强，铀首先发生迁移，钍铀比值增高。而高级变质过程中，钍发生强烈转

移，导致岩石钍铀比值降低。最高阶段的超变质作用，在有深源碱质流体参加下，铀、钍可在所形成的碱交代岩中相对富集。

区域超变质作用，实质上是一种钾长石重结晶的钾交代作用。在伟晶作用、热液作用和变质作用中都可以发生钾交代作用。钾交代作用包括钾长石化、黑云母化、云英岩化、绢云母化及冰长石化等，此时往往伴有氟的活动，可使有关地质体中分散的部分金属元素活化集中。在含金矿床蚀变围岩中，当靠近矿床时氧化钾含量通常总是增加，这是钾质交代作用的反映。

钾在岩石中分布广泛，从超基性岩到酸性岩都有富集，而以超基性岩为最低，可相差百余倍。

由于不同温度成矿热液在不同围岩和构造条件下形成的金矿床围岩蚀变不同，三种元素的比例也不同，故用K、Th、U的不同比值有突出显示某种金矿蚀变带的作用。

在金矿的找矿工作中，选用何种比值没有固定的模式。不同地区、不同类型的金矿，应经理论分析和实际试验，恰当地选取比值才能取得较好的找矿效果。

目前国内外常用的三种比值是：

1．K/Th

很多文献都提到在热液过程中K与Th的对抗性。在岩浆期后热液蚀变过程中，常有大量的K进入，使得热液中碱的浓度不断增加，钍的络合物溶解度也明显增高，造成钍以液相的形式大量流失。如冰长石化的花岗岩中钍损失达50%。K/Th比值就是利用K与Th的对抗性突出热液的钾化蚀变作用。该比值应用广泛，较适用于K高Th低异常形态的中低温热液型金矿及其蚀变带。

综观冀东航放K/Th异常，几乎处处都伴随着钾化蚀变现象发生，在这些蚀变带附近，往往是找矿的有利地段，见图4-1。

2．KU/Th（F参数）

F参数是1978年由埃菲莫夫提出，F参数指示蚀变岩有特殊功效。他发现，非蚀变岩F值小，蚀变岩F值大。

将F参数作一变换：

$$F = \mathrm{KU/Th} = \mathrm{K}/\frac{\mathrm{Th}}{\mathrm{U}}$$

其中Th/U为表征地球化学特征的参数，它与岩浆岩的物质成分有关，且不同温度的热液中U、Th富集程度不同。故用Th/U来归一K元素，有助于消除岩浆岩成分或高温热液蚀变的影响，突出中低温的钾化蚀变带。

冀东偏道沟（见图4-2）F参数的异常与金的水系沉积物Au剩余异常吻合较好，并包含有一个金矿点。

3．$K^2/(U\cdot Th)$

将比值写成二部分乘积：

$$K^2/(Th\cdot U) = \frac{K}{Th}\cdot\frac{K}{U}$$

乘积的第一部分（K/Th）前面已经叙述过，它有突出钾化热液蚀变的作用；乘积的第二部分（K/U）可作如下分析：在热液成矿过程中，U与K常有分带现象。在中低温条件

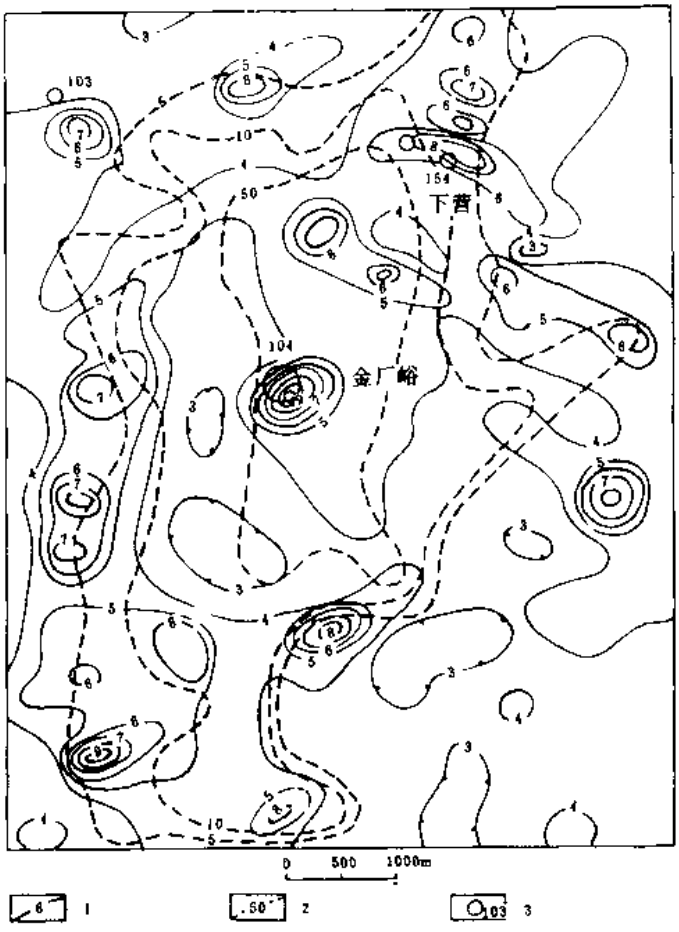

图 4-1　金厂峪金矿 γ 能谱 K/Th 异常图

1—K/Th 异常；2—水系沉积物 Au 异常；3—金矿床（点）及编号

下，K 异常往往是蚀变矿化的中心，是内带，而 U 异常则是外带，因此 K/U 有突出蚀变中心的作用。

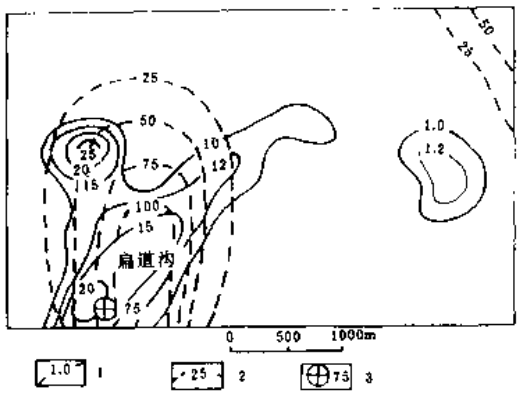

图 4-2　遵化县偏道沟 γ 能谱 F 参数异常图

1—F 参数等值线；2—水系沉积物 Au 剩余异常；3—金矿点及编号

因此两部分的乘积 $K^2/(Th \cdot U)$ 有同时突出热液蚀变和蚀变内带的作用。

图 4-3 是迁西渠子地 $K^2/(Th \cdot U)$ 异常与岩石测量 Au 异常图，二者吻合还算较好，物勘院设计的 ZK1 验证钻孔也在异常内，说明该比值有一定的找矿效果。

最后要指出：钾是地壳中含量较高的造岩元素之一，属典型的亲石性元素，但钾又常常富集于许多类型后生金矿的蚀变带中，主要赋存在绢云母、粘土矿物，长石（正长石、斜长石、冰长石）或明矾石中，尤其常见于那些绢云母化、钾长石化和冰长石化等与金矿密切相关的蚀变带中。因而上述各比值的主要目的在于提取指示这些热液蚀变作用的 K 异常。

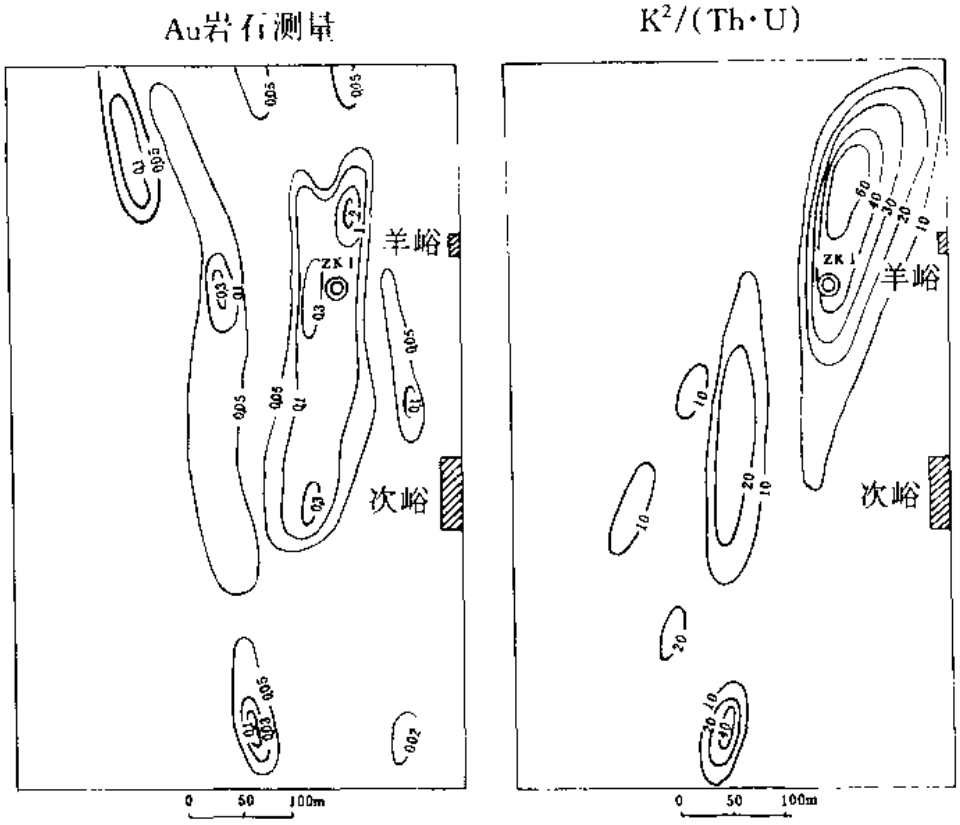

图 4-3　迁西渠子地北岩石测量金与 $K^2/(Th\cdot U)$ 关系对比图

第二节　研究区金矿地质及γ能谱特征

金厂峪金矿床：矿区位于燕山台褶带山海关隆起与马兰峪背斜的衔接部位。矿体产于太古代高级变质区的斜长角闪岩、角闪斜长片麻岩、绢云母片岩等火山喷发-碎屑沉积变质岩系中，金矿脉为含金石英脉。围岩蚀变有绢云母化、绿泥石化，黄铁矿化、钠长石化、硅化等。图 4-4 为金厂峪三号矿脉坑内γ能谱异常图，在矿脉处具 K 高，Th、U 低特征。

峪耳崖金矿床：产于燕山期花岗岩体内外接触带。产于接触带的金矿蚀变带上有“三高”即 K 高、Th 高、U 高，而灰岩中金矿蚀变带上有钾高，铀、钍波动。

金厂沟梁金矿床：位于内蒙地轴北缘，是与中酸性小岩株有关的大型中温热液型金矿床。矿体赋存于太古宇斜长角闪片麻岩与花岗闪长岩接触带，近矿围岩蚀变有黄铁矿化、绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化。γ能谱特点是钾高，钍、铀低。当金矿蚀变带位于石英斑岩

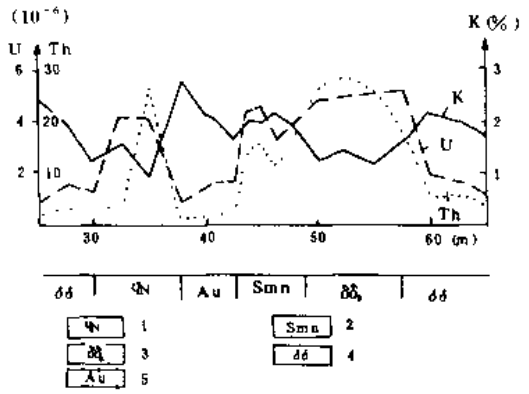

图 4-4　金厂峪金矿 I -3 号脉坑道γ能谱异常图

1—钠长石英脉；2—绢云母绿泥片岩；3—片理化斜长角闪岩；4—斜长角闪岩；5—金矿脉

中时亦有“三高”异常。

柏杖子金矿床：矿体产于长城统大红峪组石英砂岩中，是含金黄铁矿石英脉型。主要围岩蚀变有钾长石化、钠长石化、绢云母化、硅化、黄铁矿化、碳酸盐化等。金矿蚀变带上是钾高，钍、铀低。

石湖金矿床：产于山西台背斜，阜平隆起紫荆关-阜平断裂带的次级构造中，围岩蚀变有钾长石化、硅化、绢云母化、黄铁矿化、绿泥石化等。γ能谱特征是钾高钍、铀低及

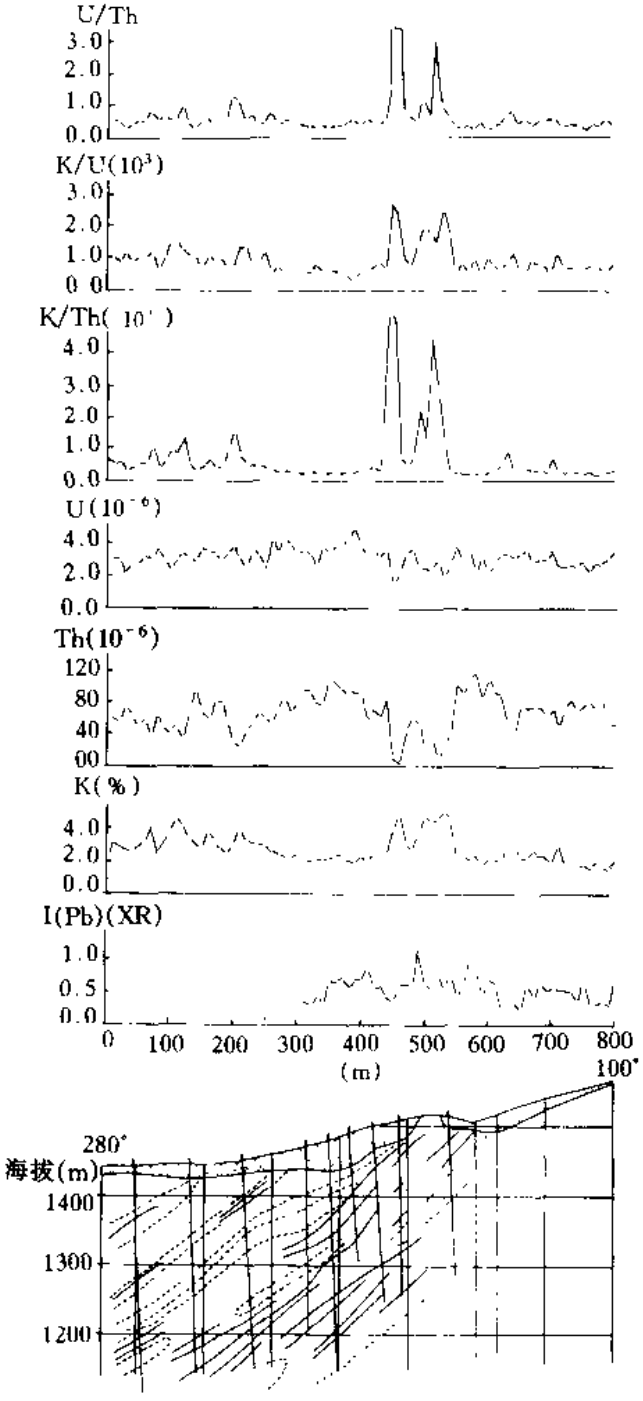

图 4-5　东坪金矿 1 号矿脉 I -2 线 γ 能谱及 X 射线荧光精测剖面

钾、钍高铀低两种。

红石金矿床：位于中生代阜新-义县拗陷带内，晚侏罗系义县组安山岩、流纹斑岩内，围岩蚀变为硅化、绢云母化、赤铁矿化。金矿蚀变带上有 K 高 Th、U 低及 K、Th 高 U 低两种能谱特征。

东坪金矿床：产于冀北太古代地层中的海西期水泉沟碱性杂岩体的内接触带。矿田上部以石英脉型为主，下部以蚀变岩型为主，是多源、多期次岩浆期后中高温热液充填交代型金矿床。围岩蚀变除钾长石化、硅化及绢英岩化外，还有黄铁矿化、褐铁矿化、碳酸盐化、重晶石化、绿帘石化及高岭土化等。钾长石化带主要分布在石英脉（体）两侧，厚度从几厘米至几米不等，最厚可超过 10m，远大于矿脉（体）厚度。钾长石化、硅化、绢英岩化以及黄铁矿化与褐铁矿化是重要的找矿标志。

矿体上 γ 能谱特征如图 4-5 所示。

安徽六安东溪金矿地质与 γ 能谱特征。

矿区位于多旋回构造-岩浆（火山）活动频繁地区。前寒武区域变质作用强烈。晚太古以来各时代地层发育较全。金与多金属矿产都有产出。

东溪金矿为火山岩型金矿床，产在磨子潭断裂北侧中生代陆相火山岩盆地。主岩为上侏罗系安山质熔岩和碎屑岩。矿化受走向 NW，倾角较陡的石英脉、方解石脉控制，群脉最厚 20m。青磐岩化广泛发育，近矿围岩蚀变以冰长石化为主，次为硅化，黄铁矿化和炭酸盐化。

在六安地区东溪矿床作了地面 γ 能谱测量和金原生晕取样分析。

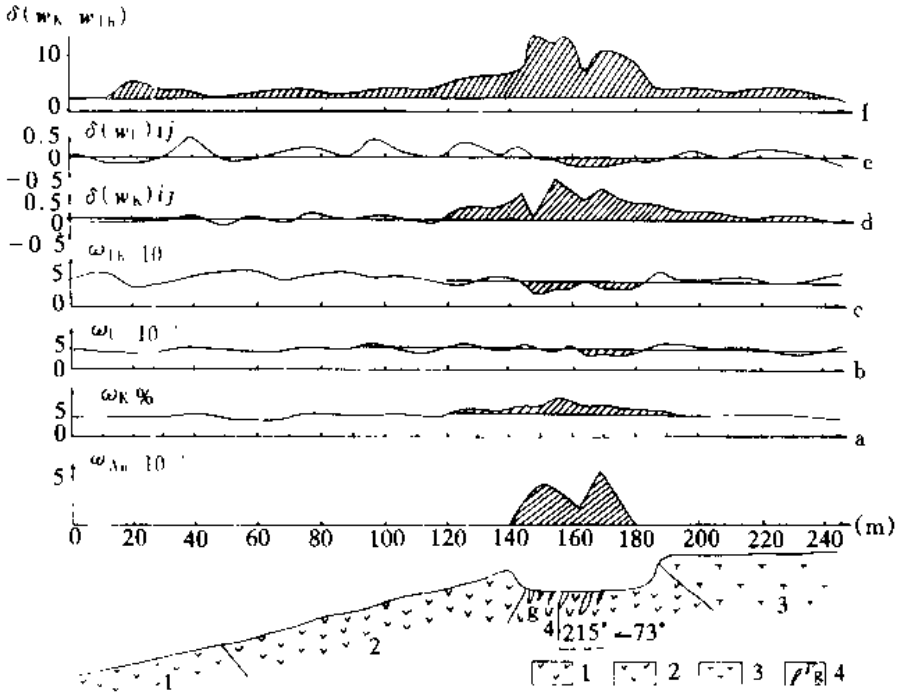

图 4-6　霍山东溪金矿Ⅲ号矿体综合剖面图

1—安山角砾凝灰岩；2—安山岩凝灰质安山岩；3—粗安岩；4—破碎带、石英脉

a、b、c 分别为钾、铀、钍含量变化曲线，d、e 分别为钾、铀标准变换结果，f 为提取钾化信息模式计算结果

从东溪3号金矿（图4-6）可以看出在安山岩、凝灰质安山岩蚀变带和金矿体上有较明显的钾高、铀低、钍低的基本特点。

第三节　γ能谱测量方法找金的应用效果与实例

一、γ能谱测量在冀东花岗岩-绿岩型金矿预测中的应用效果

首先，在金矿田的圈定上，主要根据航空γ能谱测量结果，选择蚀变集中区。原则上讲，可以利用K异常圈定，但其易受岩体高K异常的影响效果不佳。根据我们的经验，此时利用K/Th的效果最好，既有明显的地质含义，又基本消除了岩体异常的影响。其次，亦可用（U+Th）/K，KU/Th，$K^2/Th \cdot U$[1]等导出参数，再结合地质构造、岩体分布、金的水系沉积物异常以及其它地球物理方法圈定金矿田。贾杖子小型金矿田的预测（见图4-7）即为一例。

至于金矿矿体的确定则主要依据地面γ能谱测量资料。由于放射性元素的分布具有与每个矿床相关的特征，因此，想用一个固定的γ能谱异常模式去套实际工作中的各种情况是不能奏效的。

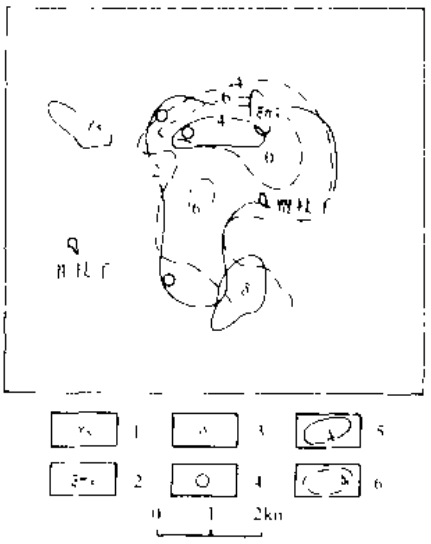

图4-7　贾杖子金矿田γ能谱异常图
1—花岗岩；2—正长斑岩；3—闪长岩；4—金矿点；5—K/Th等值线；6—KU/Th等值线

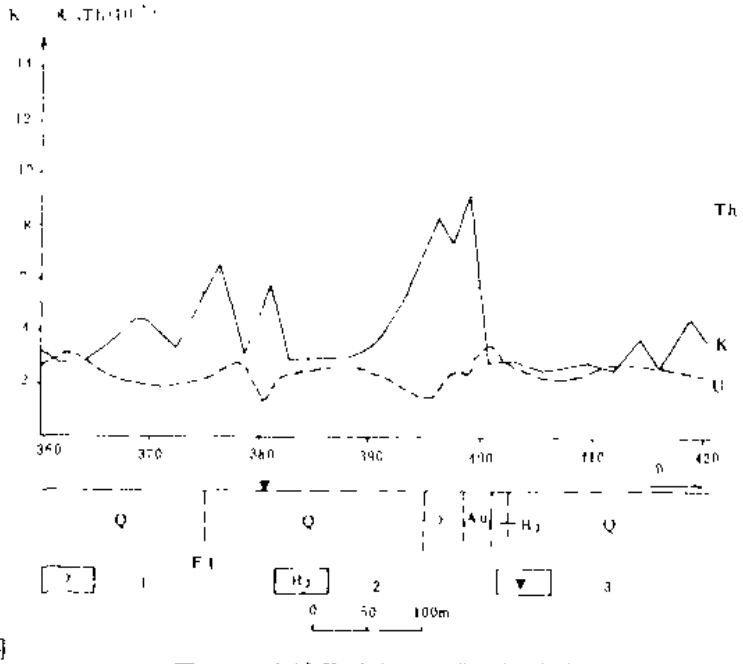

图4-8　赤城县后沟119线γ能谱异常图
1—似斑状花岗岩；2—钾质蚀变带；3—推测有矿地段

前节列举的几个金矿上的γ能谱特征虽属常见，但在实际资料中，远比上面提到的特征复杂得多，所以单一使用γ能谱法找金具有局限性。但条件有利时，分析方法得当亦能取得较好的效果。工作中依据各个矿区的地质条件与已知区γ能谱异常特点，预测了数处找金点，它们是：前面提到的渠子地北（与冶金部物勘院航测队设计的ZK1钻孔位置相

[1] 这里的Th、K、U"含量"是指Th等的质量分数w（Th）、w（K）、w（U），为了书写方便，以下均简写为Th、K、U，请读者注意它们与元素符号Th、K、U相区别。

近)。后沟119线381号点附近，见图4-8。北沟103线191号点（与ZK100-1见矿钻孔相近）见图4-9。西水沟X剖面114号和130号点，见图4-10。

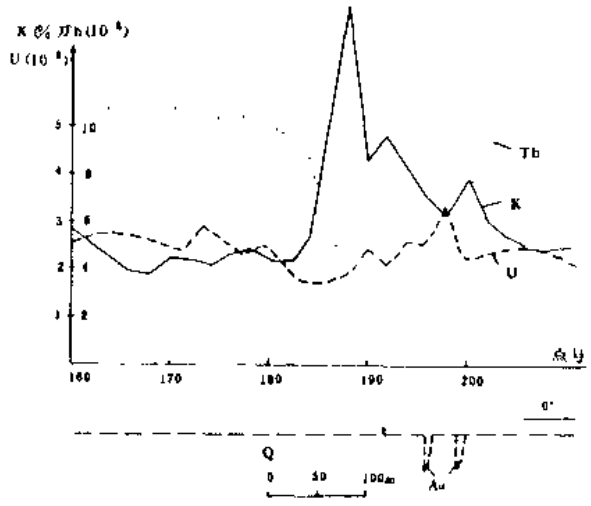

图4-9　赤城县北沟103线γ能谱异常图

二、地面γ能谱测量在东坪金矿区的应用效果

通过试验研究工作，可综合归纳出东坪金矿田伽玛能谱的找矿作用为：

①在水泉沟碱性杂岩体的南北内接触带，特别是在交代蚀变强烈的南部内接触带内开展小比例尺的伽玛能谱多参数测量，寻找与金矿化有关的矿化远景异常区。

②通过1∶10000比例尺的伽玛能谱测量，利用K的异常圈定可能的含金钾化带范围。

③在圈出的钾化带上，以K/Th比值参数异常圈定可能含金的近矿围岩蚀变带。用以指示金成矿的可能范围或赋存部位。

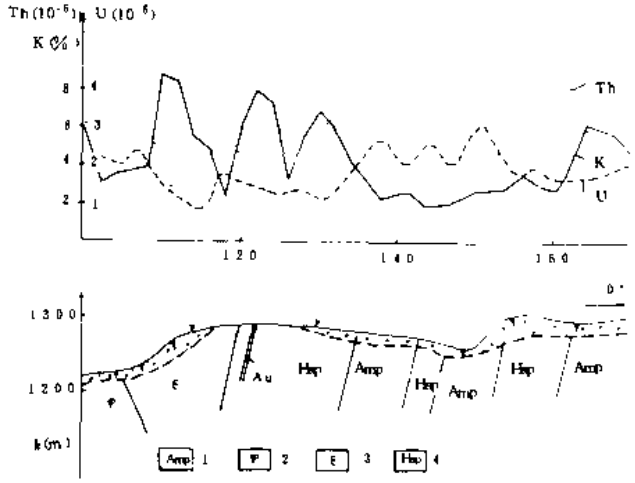

图4-10　赤城县西水沟X剖面γ能谱异常图

1—混合岩化浅粒岩；2—透辉石岩；3—正长岩；4—混合岩化蚀变破碎带

④以上述方法为主，用X射线荧光方法配合（选择该区能作为金矿化间接指示元素的Pb）能更有效地指示含金石英脉的可能赋存部位。

为了配合东坪矿区主矿体1号矿脉勘探报告的提交，了解伽玛能谱场在矿区的分布特征，选择包括1、2、3号及72号等矿脉在内面积约4km^2，用1∶10000比例尺作伽玛能谱测量，同时伴以X射线荧光测量Pb的工作。测量结果，捕获了一批有意义的异常。由伽玛能谱K与K/Th比值平面等值线图（见图4-11和4-12），可知，K及K/Th异常或异常的高值区绝大部分位于矿体或矿脉的两侧周围，仅当矿脉在浅部或地表出露规模较大，且矿脉群产状交错时，才有部分异常与矿体重合。

此外，由X射线荧光测量结果可知（见图4-12），已知的1号矿体及72—75号矿脉均处于K/Th比值异常的夹持部位，面该部位的X荧光异常明显。在矿化不明显的3号

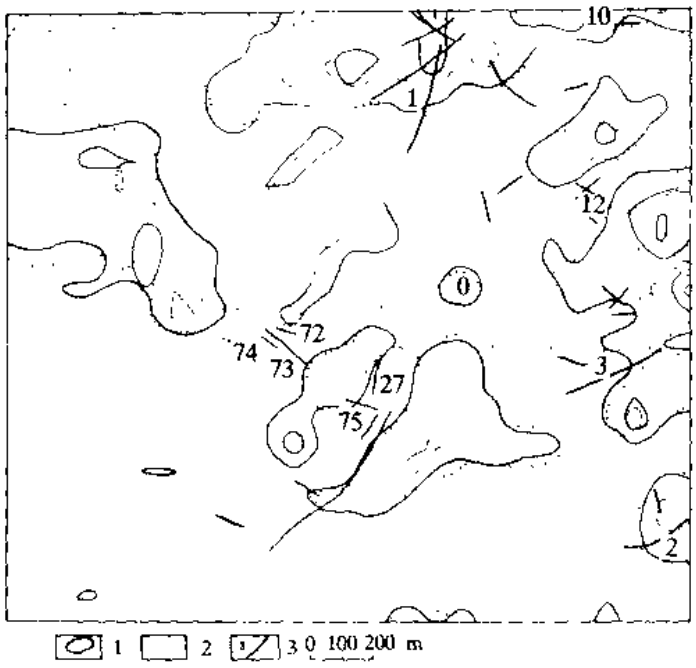

图 4-11　东坪金矿区 γ 能谱测量 K 与 K/Th 比值异常综合图

1—K/Th 比值异常；2—K 含量异常；3—矿体及编号

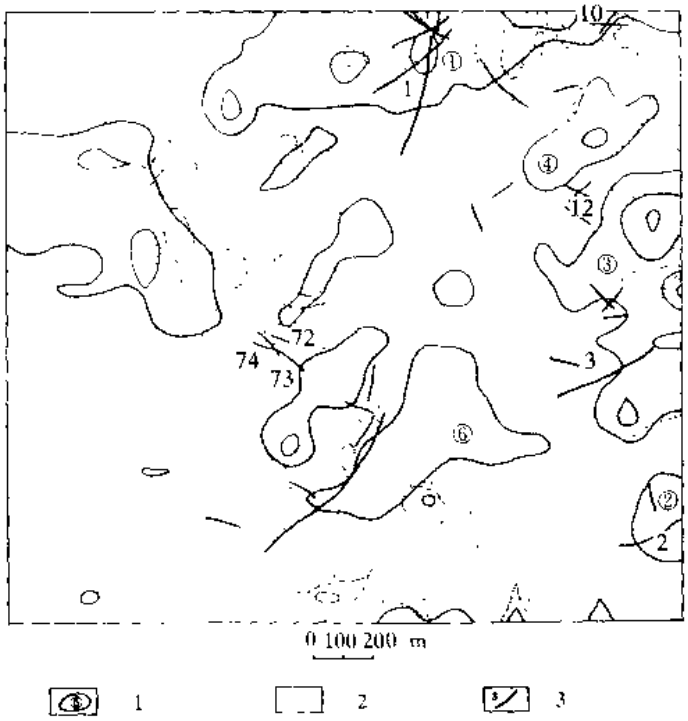

图 4-12　东坪金矿区 γ 能谱测量（K/Th）与 X 射线荧光（Pb）异常综合图

1—γ 能谱（K/Th）异常；2—X 荧光（Pb）异常；3—矿体及编号

脉，虽然也处于 K/Th 比值异常的一侧，但无 X 射线荧光 Pb 异常。因此，用伽玛能谱的 K/Th 比值异常为主，对比 X 射线荧光异常分析，能更有效地预示本区可能的未知成矿远景区。在测区的最南部，有 K/Th 比值异常，从趋势上看，具有一定规模，它与 6 号 K/

Th 比值异常形成夹持状态，其间的 X 射线荧光异常位于照山凹处，推测照山凹是具有矿化意义的远景区。4 号 K/Th 比值异常与 1 号异常的比值相当，且具有一定规模，它与 3 号及 3 号与 2 号 K/Th 比值异常之间的部位，分布有 X 射线荧光明显的异常，该地段应是具有矿化意义的远景区。

为了研究东坪金矿区及外围不同岩性的伽玛能谱特征，在更大范围寻找新的矿化异常远景区，在水泉沟碱性杂岩体内外共完成 3 条 10km 长剖面的伽玛能谱测量。测量结果，在岩体南北内接触带附近，共发现 4 个新异常点（即西坪、大枫沟、下水泉及转枝莲异常点）。与东坪 1 号脉群比较，伽玛能谱各参数的异常值均较高，而且规模较大。从目前已查证的 3 个异常点看，具矿化（体）的希望较大。

西坪异常点位于西坪村西，22 号脉上盘（西侧），该异常为 NE 向展布，钾化带较宽。该异常的南部已发现矿脉多条，目前正在民采。

下水泉异常点伽玛能谱异常位于东坪矿区最东部。对该异常用 4 条南北向剖面控制，剖面间距 300m。发现异常清晰，钾化蚀变强烈，异常宽度约 200m 左右，走向 NW。从整个下水泉异常看，似为复脉或矿化不均匀，因而总体异常宽大，异常峰值较多。

转枝莲异常点位于水泉沟碱性杂岩体北部内接触带，异常区内，钾化不如东坪矿区中的强烈，但由于该处钾的背景含量较低，形成对度相对较大的异常，因而异常清晰，形态完整，宽度达 300—500m 左右，异常走向 NW，长度＞500m。已知矿体与 K/Th 比值异常对应较好，该区已开采，但从目前民采的情况看，转枝莲矿已不是石英脉型及蚀变岩型金矿，而与煌斑岩关系密切。该异常的这一地质特征，又为伽玛能谱在水泉沟岩体内寻找非石英脉型-蚀变岩（钾化）型金矿提供了依据，拓宽了找矿领域。

三、冀北小比例尺车载 γ 能谱方法找金的试验研究实例

工作中所用的约 50000km^2 的 γ 能谱测量资料，是用 GP-106A 型车载 γ 能谱测量系统，在工作地区进行比例尺约 1:500000 的、高精度 γ 能谱测量取得的。测量车速为 25—30km/h，采样时间为 6s，每个采样点的长度为 25—50m

（一）工作地区地质概况及该区 γ 能谱的变换参数的地质意义

1. 工作地区（太仆寺旗、赤峰、丰宁、隆化）地质概况

基底地层由太古宙一套由角闪岩相到麻粒岩相的中深变质岩系组成。西部地层层位偏新为红旗营子群。东部地层层位偏老为建平群，其原岩以基性火山岩为主。

盖层地层，主要是一套复杂的陆相火山岩-沉积岩系，由中酸性钙碱-偏碱性火山岩和部分中基性火山岩、陆源碎屑岩组成。

基底构造，有近东西方向的康保-围场-丰宁-隆化和北东方向的上黄旗-半截塔、赤城-御道口、张北-高山堡等深部断裂构造。

盖层构造，主要为 NE 方向、NNE 方向。

岩浆岩，主要为燕山期和海西期花岗岩类，前者呈大面积的分布于上黄旗-御道口、丰宁-围场及隆化-锦山断裂带，在西部的康保，分布有大面积的海西期花岗岩。

工作地区中的金矿（或矿点）多分布在东部赤峰以西、围场以东的红花沟到四合永一带和隆化到旺业店、锦山、金洞沟一带，含金矿的主要围岩为太古宙中-基性火山岩变质的片麻岩。

2. 变换参数的地质意义

根据该区地质及K、Th、U分布特征，为进行小比例尺金矿成矿预测，经研究确定了以下4个γ能谱的变换参数。

(1) 工作地区地质热活动参数 $\sigma_{Th}/\overline{Th}$

通常，在一定的区域地质环境下形成的各地质体中的Th含量● 愈大，Th含量变化的均方差 σ_{Th} 也愈大，而其Th含量变化的相对均方差 $\sigma_{Th}/\overline{Th}$ 值变化很小。各地质体 $\sigma_{Th}/\overline{Th}$ 之间的变化差异也是不大的，但处在区域地质体形成之后的火成活动发育地带（区）的Th将产生强烈活化，迁移和再富集变化，使其内的 $\sigma_{Th}/\overline{Th}$ 参数值远高于各地质体形成时的 $\sigma_{Th}/\overline{Th}$ 参数值，而且这种 $\sigma_{Th}/\overline{Th}$ 参数值主要同区域地质体形成之后的火成活动（如后期岩浆侵入等热活动）的强度和频繁程度成正相关。这样，就可采用相应地质体大小的滑动计算窗口滤波技术，提取大范围的区域地质体中的 $\sigma_{Th}/\overline{Th}$（$\overline{Th}$ 为工作区内滑动计算窗口上 $11\times11km^2$ 中地质体内Th的平均值）参数。该 $\sigma_{Th}/\overline{Th}$ 参数称地质热活动参数，$\sigma_{Th}/\overline{Th}$ 高值带（区），属火成活动强烈、频繁发育带（区）的反映。$\sigma_{Th}/\overline{Th}$ 低值带（区），属火成活动弱带（区）的反映。通常，区域地质体中Au、Pb、K、U……等，伴随遭受的热活动从 $\sigma_{Th}/\overline{Th}$ 参数高值区的被活化迁移到其边缘外侧的 $\sigma_{Th}/\overline{Th}$ 低值区沉淀富集，形成矿源物质的聚集带。

本区的金矿化的分布同相应地区 $\sigma_{Th}/\overline{Th}$ 参数高值区边缘梯度带及其外侧 $\sigma_{Th}/\overline{Th}$ 低值区（带）存在空间上的联系。

(2) 工作地区地质构造活动参数 $\sigma_K/\overline{K}$

通常地质体中K含量的分布变化服从正态分布，其相对均方差 $\sigma_K/\overline{K}$ 变化较小。但在区域地质体形成之后的剧烈地质活动的构造断裂带环境，将产生强烈的K迁出或迁入的变化，促使这些构造断裂带中的 $\sigma_K/\overline{K}$ 值突变增大，而远高于区域地质体形成时体内的 $\sigma_K/\overline{K}$ 值；这些构造断裂带的 $\sigma_K/\overline{K}$ 值，主要和区域地质体形成之后的构造断裂带中岩浆、热液、变质等活动的强度和频繁程度成正相关。该 $\sigma_K/\overline{K}$ 参数可称地质构造活动参数，它的高值带，为区域地质体中地质构造频繁活动带（区）的反映，即有利地质体中Au多次活化和再富集的地带（区），$\sigma_K/\overline{K}$ 参数低值分布区，为区域地质体内地质构造弱活动区的反映。

本区东部的 $\sigma_K/\overline{K}$ 高值带或相对高值带，是一个同金矿化关系密切的莫霍界面隆起区边缘地质构造断裂活动地区的反映。

(3) 工作地区K盈亏参数 $(K_i-\overline{K}_{区})$ 和 $(K_i-\overline{K}_j)$ 特征

区域地质体在长期地质演化过程中，遭受的地质构造作用强度和频繁程度存在着很大的差异，其内K的分布将伴随地质构造作用形成区域性和局部性的盈亏特征带；用大的滑动计算窗口滤波的K盈亏参数 $(K_i-\overline{K}_{区})$（式中 K_i 为任意 i 点处K的含量，$\overline{K}_{区}$ 为以 i 点为中心的滑动计算窗口 $11\times11km^2$ 中地质体内K的平均含量），主要提取区域性的K盈亏变化特征带信息，用小的滑动计算窗口滤波的K盈亏参数 $(K_i-\overline{K}_j)$（式中 $\overline{K}_j$ 为以 i 点为中心的滑动计算窗口 $1.1\times1.1km^2$ 中地质体内K的平均含量），提取局部性的K盈亏变

● 这里的“Th含量”是指Th的质量分数 w（Th），为了书写方便，以下均简写为Th。K、U含量也照此简写。请读者注意将它们与元素符号Th、U、K相区别。以下均同。

化特征带信息。用该参数分布的特征区信息，可划分出同金的迁移和富集相关的盈余 K 区和亏损 K 区，以及各区内 K 盈亏剧烈变化带；结合地质情况可筛选出有利 Au 多次活化、富集的 K 化高值带。

本区东部的（K_i-$\overline{K}_{区}$）参数高值带和升高值梯度带或（K_i-$\overline{K}_j$）参数剧烈变化高值带，属一种同金成矿关系密切的、埋深较浅的地质断块边缘构造断裂带中地质活动地区的反映。

（二）工作地区金成矿远景预测及野外验证工作结果

根据分布在本区东部的偏低 U 或低 U、偏高 K 或高 K 的特征地区，反映该区具有广泛发育碱（钾）交代岩活动的信息，它恰对应着本工作地区主要含金矿围岩——由太古界中基性火山岩变质的片麻岩类，属工作地区中最佳的金矿源区；在金矿源区中地质热活动参数 $\sigma_{Th}/\overline{Th}$ 高值区边缘梯度带及其外侧的低值区，是一个活化 Au、K 物质的再聚集带；在这类 Au、K 再聚集带中与地质构造活动参数 $\sigma_K/\overline{K}$ 高值带或相对高值带，K 盈亏参数（K_i-$\overline{K}_{区}$）高值带或升高值梯度带，（K_i-$\overline{K}_j$）参数剧烈变化高值带相复合地区（带），存在着对 Au 活化和再富集极为有利的，并具有频繁碱（钾）交代活动的构造断裂带信息，而且这 4 种反映金成矿地质因素的 γ 能谱参数特征带的复合地区，还同地幔隆起边缘陡斜坡带以及地表的一些地质构造带对应。工作地区中的金矿或矿点多分布在这 4 种 γ 能谱参数特征带复合区的端部或其附近，具有金矿化显示的地质构造断裂带地区。

因此，在东部的前述 4 种 γ 能谱参数特征带的复合地区，预测为金成矿远景区共两片：一是 NNE 方向的朝阳地-红花沟地区，二是 NE 方向的隆化-旺业店地区。

1992 年 7 月，在 NNE 方向的金成矿远景区中尚没有金矿化点分布的部分地区——朝阳地周围 530km^2，在汽车通行的地区用车载 γ 能谱方法进行了验证和调查路线剖面 8 条，共 180km。在其中的 4 条剖面上取了 26 个基岩金样品。结果在验证区内（北岗子村附近）的斑状花岗岩体测到的金含量为 9.6×10^{-9}；在验证区西侧盖善堂村北的混合花岗岩体测到的金含量为 10.4×10^{-9}；在益善堂村南的角闪斜长片麻岩层测到的金含量为 8.8×10^{-9}，并在测量工作中了解到在验证区内的温珠沟门村西覆盖层下面的太古宙地层中有一含金石英脉矿点。由此可见，应用车载 γ 能谱测量方法研究金成矿地质环境，圈定金成矿远景区或找金工作靶区是有效的。

四、航空 γ 能谱测量在安徽六安地区金矿预测中的研究应用实例

本次研究工作是利用六安地区（24000km^2）已有的 1∶100000 航空 γ 能谱测量资料，为该区找金而进行的二次开发工作。

（一）研究区地质概况及已知矿区试验结果

根据该区基本地质条件，将控制金矿主要地质因素概述如下：

在区域构造上，主要是北淮阳褶皱带火山岩建造和沉积变质岩系中发育的破碎带、复向斜等线状构造控制已知矿带、矿床（点）的分布。

大断裂，沿磨子潭-晓天断裂两侧的次级断裂控制金、铬、镍等矿产的展布，沿金寨断裂控制火山岩、碱性岩及有关的矿产展布。

岩相和建造因素，滨海-浅海相，海陆交互相以及陆相火山岩建造并伴生侵入-火山岩建造，为金、铁等提供了物源保证。做为矿源岩，有资料表明生成火山热液金矿的火山盆地位于含金丰度高的变质岩的背景之上，例如东溪金矿。

东溪金矿自地表向下约200m范围内可分三个带：硅质风化壳（蛋白石、玉髓组成），青磐岩化（绿泥石、方解石、黄铁矿和绿帘石）带；明矾石、高岭石（伊利石）黄铁矿化带；绢云母、石英、冰长石（黄铁矿）带。其中第一个带在地表范围较大、强度变化不一，可能是成矿前形成的；第二个带是矿体周围的蚀变；第三个带是直接指示矿体的蚀变，其中冰长石是富矿段的标志蚀变矿物。

东溪金矿放射性元素分布特征见表4-1。基本参数可以表征岩石放射性元素的分布特征，从中可以看出东溪金矿主岩中钾和铀的平均含量与文献发表的数据相比明显偏高，一般高一倍以上，钾高是由于主岩伴随青磐岩化发生钾交代作用造成的，而钍含量未发生变化，属于岩石的正常含量。由此说明在东溪金矿主岩放射性元素的分布上，至少发生过一次钾和铀元素的叠加作用。

表4-1　东溪金矿床地面伽玛能谱测量特征参数表

矿床名称			东溪金矿						
剖面编号			3			1			
岩石名称			安山角砾凝灰岩	安山岩、凝灰质安山岩	粗安岩	安山质角砾凝灰岩	安山质凝灰熔岩	安山岩、凝灰质安山岩	粗安岩
基本参数	平均含量	$\bar{w}_K$（%）	4.0	4.6	4.7	4.89	4.18	3.69	4.25
		$\bar{w}_U$（10^{-6}）	4.5	4.5	5.4	5.65	5.42	4.31	4.44
		$\bar{w}_{Th}$（10^{-6}）	6.0	5.7	6.7	7.94	6.65	4.79	4.7
	均方误差	σ_K	0.23	1.05	0.52	0.84	1.02	0.19	0.39
		σ_U	0.98	0.91	0.45	0.66	0.77	0.42	1.13
		σ_{Th}	1.43	1.29	2.5	2.04	1.21	0.74	1.39
	比值	K/（10^3U）	8.8	10.0	8.7	8.7	7.7	8.6	9.6
		K/（10^3Th）	6.7	8.1	7.0	6.2	6.3	7.7	9.0
		Th/U	1.3	1.3	1.2	1.4	1.2	1.1	1.1

总的来看，三元素中只有钾的峰值与金矿化有稳定、明显的对应关系，见本章第二节图4-6中a曲线的阴影部分；铀和钍均以偏低的趋势与金矿化相对应，见第二节图4-6中b，c线阴影部分（上述对应关系也见之于其它金矿）。由此得出结论：与金矿化相关的放射性元素的分布模型是富钾贫铀、钍。

（二）γ能谱找矿模式的拟定

1．钾含量标准变换模式

如前所述，找矿首先需确定钾的正、负异常信息，然而运用常规的钾含量w_K等值图难以解决此问题。

因此拟定以钾的质量分数w_K（简写为K）之相对异常作为钾含量标准变换模式，即：

$$\delta(w_K)_{ij} = \frac{w_{K_i} - \bar{w}_{K_j}}{\bar{w}_{K_j}} = \frac{w_{K_i}}{\bar{w}_{K_j}} - 1$$

式中：w_{K_i}为钾的观测含量值，$\bar{w}_{K_j}$为第j编码统计单元钾含量的算术平均值。结果见第

二节图 4-6 中 d 曲线。

2．铀含量标准变换模式

出于同钾类似的考虑，找金矿需要确定铀的负异常和背景值，以利于界定富镁铁质岩石的出露范围。为此拟定铀含量的标准变换模式：

$$\delta(w_U)_{ij} = \frac{w_{U_i} - \overline{w_U}_i}{w_{U_i}} = \frac{w_{U_i}}{\overline{w_U}_i} - 1$$

式中各变量的含意可与钾相对照。计算结果见第二节图 4-6 中 e 曲线。

3．提取钾化信息的模式

如前所述，找矿是通过钾交代晕圈界定钾化范围来达到找金目的。然而钾交代并不等于简单的钾富集。

提取钾交代岩引起的钾化信息并掩抑造岩阶段形成的钾富集，需要认识正常岩石中钾与钍含量之间的变化关系。1963 年海尔与罗杰斯发现各种火成岩的 K/Th 比值几乎是一个恒定值，近于 (3×10^3)。利用这一规律性认识对 K/Th 比值进行数学处理，便可以实现设计要求，从而拟定

$$\delta(w_K/w_{Th})_i = [w_{K_i}/(3\times10^3 w_{Th_i})] - 1$$

式中各变量意义同前所述。计算结果见第二节的图 4-6 中 f 曲线，其地质效果是十分明显的。可以看到，既有突出的峰值异常信息，又有宽阔的高背景信息分别与冰长石化、钾化相对应。

4．提取找金优化组合信息的模式

如前所述找金尚需提取多元素优化组合信息，即富钾贫铀钍优化组合信息。为此利用钾、铀、钍含量在金矿体上形成的钾波峰与铀、钍波谷相对应的关系拟定：

$$\frac{\delta(w_K/w_{Th})_i}{\delta(w_U)_{ij}} = \{[w_{K_i}/(3\times10^3 w_{Th_i})] - 1\}/(w_{U_i}/\overline{w_U}_i)$$

式中各变量意义同前述。它突出了富钾贫铀钍组合信息。试验结果见图 4-13。

但是上述模式对航测数据的处理效果又如何呢？仍然以东溪金矿区为例经对比可见：

①处理后的图面清晰度较高，主要表现在大范围的背景区已转化为空白区；②晕圈相对独立、轮廓清楚、浓集中心明显；③地质效果好，主要表现为与矿化吻合概率高，特别是钾化信息图，几乎百分之百的金矿化点全部囊括于晕圈带中，参见图 4-13，其找矿指示意义不言而喻。

（三）找金特征信息的选择，野外检查初步结果及成矿远景预测

1．找金特征信息选择标准

通过已知金矿带地质图与上面拟定的找金信息图对比分析，确定找金特征信息如下：

（1）钾峰值异常特征选择标准

试验区钾峰值异常共计有九个，组成 NW 向线状异常带，沿磨子潭断裂北侧展布，与金矿（点）带组成平行侧列、分带产出的配套关系，为该断裂其它部位所没有，是唯一的钾异常组合。因此可把线状钾异常沿深断裂分布的特征定为选择钾异常（带）的标准。

（2）富钾信息特征选择标准

试验区富钾信息组合呈集群状沿磨子潭断裂及其两侧展布，亦为该断裂其它部位所不

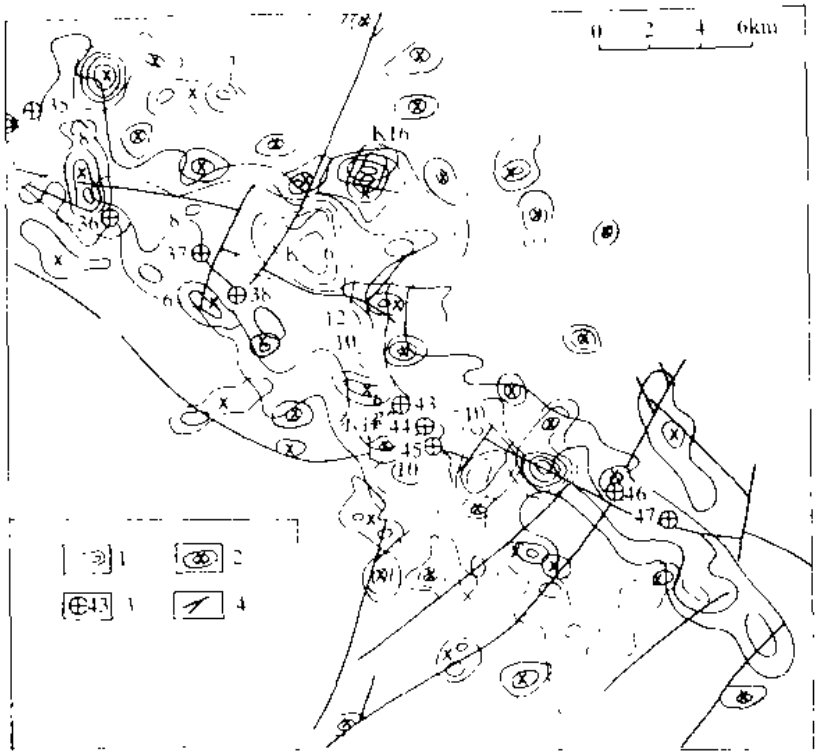

图 4-13　东溪金矿化带钾化与优化信息空间关系图

1—钾化信息；2—优化信息；3—金矿床（点）；4—断裂构造

及，仍具有唯一性特征。其实质是不同成因、不同类型的富钾侵入岩、火山熔岩及后期叠加钾交代作用的杂岩群体呈岩株、岩枝状沿深断裂侵入的综合反映信息群，与钾异常组合配套同属于反映偏碱性或钾化侵入岩引起的集群信息组合，定为选择富钾信息的标准。

（3）钾化信息特征选择标准

该区钾化信息提供的选择标准是以断裂（含深断裂）为骨架，浓集中心与断裂交叉结相扣合延伸发育成带状并跨越了不同年代的岩石类型，显现出热液蚀变带沿透水性良好的断裂脆弱带发育的典型特征；与富钾信息的关系取决于反映的实体是否叠加了热液蚀变的钾交代。所有金矿（点）带全部圈围于钾化带中，充分表明该信息组合对金矿化的相关性。以上三种信息组合称为金矿的三钾配套信息组合，是内生金矿化区域定位极其重要的相关信息组合。

（4）优化信息组合特征的选择标准

优化组合信息的实质是钾、铀、钍元素的原始成岩含量比例遭受破坏的局部反映，其疏密程度和信息量的多寡及其产出部位的归属均与成矿因素密切相关，概括地讲它是富钾贫铀钍的局部组合反映信号，该信息多受断裂构造和其它容易发生钾交代的场所制约，并且呈集群信息组合发育于钾化带内或其边缘，这一特点成为选择优化组合信息的标准。

（5）贫铀信息特征选择标准

该区贫铀信息组合分布的特征是受断裂及交叉结控制、呈现小片串珠状、NW 向排列，亦属于富铁镁质中基性侵入岩产出的组合反映信号。与其它信息呈现交替、移位等组合配套关系，并且金矿（点）带多产在其外围附近，是作为矿源岩信息组合的特征标准。

2．典型找金特征信息的野外检查验证结果及成矿预测

为了验证上述分析与认识，选定了六片靶区的 22 个靶点进行了野外检查，检查结果发现金的矿化点两处，金的异常点 17 个，说明利用上述找金特征信息组合指导找金可取得一定效果。

现将两个矿化点初步评价结果简述如下：

（1）指封山金矿化点初步评价

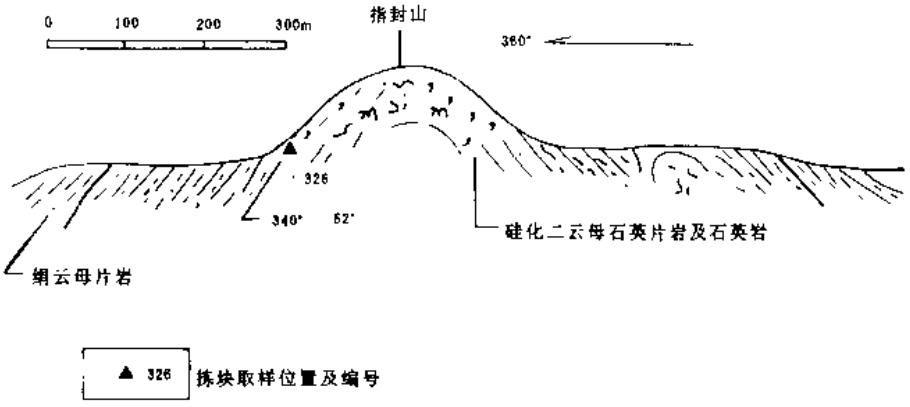

图 4-14　指封山 326 号金矿化点取样位置示意图

该点位于霸山县与儿街镇西南约 3km 处的指封山北坡。地层为诸佛庵组硅化含黄铁矿二云母石英片岩及石英岩。图 4-14 取样位置为层间滑动破碎带，宽约 1—2m，长约 30—40m，再往东没有追索控制。露头处见不规则钾长石脉，含黄铁矿黄铜矿石英网脉及胶结角砾岩，其中一组黄铁矿脉已风化为褐铁矿。岩金拣块化验痕金为 306×10^{-9}。推测为一条金矿化异常带。其中 32 号点产于钾长片麻岩和硅质胶结角砾岩中，风化色呈黄褐色、红色，沿路见硅化构造角砾岩转石。拣块样分析结果为 20×10^{-9}。220 号点亦产于钾长片麻岩的构造破碎角砾岩中。第一次采样时，是在人工新鲜露头上，化验结果为 142×10^{-9}。而时隔两年之后于原取样位置重新取样化验结果仅为 6×10^{-9}可能是表生作用对金淋失作用很强烈。在多雨的大别山区进行地表岩金采样由于表生淋失作用会明显偏低，所以对矿化异常带应进行加密追索和深部揭露。因为该点是受层间滑动挤压破碎带控制，估计产状比较稳定，矿化作用可能比较连续，值得进一步做工作。同时也指出小溪河组和诸佛庵组地层向东和向西两翼的找金远景意义。特别是向西直至佛子岭水库，配套信息比较齐全，钾长片麻状花岗岩和其它富钾贫铀钍小岩株（二长花岗岩）都有出露，应是有利的金成矿环境之一。

（2）大关金矿化点（644 号）初步评价

该点位于桐城县大关乡南部约 2km 处的潘家冲 NE 约 300m 处的山坡上。围岩为元古界浅粒岩及石英正长斑岩。矿化主要产于石英正长斑岩的边缘相或顶盖相，受一组断层角砾岩控制，厚约 20cm，长约 5m，可见石英细脉；金属硫化物主要有黄铁、黄铜、方铅等矿物。沿走向控制 3 个探槽均未见构造及矿化。拣块分析结果 Au 为 143.9×10^{-9}，与揭露前的分析结果 157×10^{-9}接近。可做为找矿线索。在其外围追索未发现类似的地质条件，取样均为偏高反映，例如在华盖山岩体内的余洼附近取样仅有 7×10^{-9}。

在上述一系列工作的基础上，经综合对比对试验研究区进行了成矿远景预测，最终划出 8 片Ⅱ级远景预测区及 4 片Ⅲ级远景预测区，它们是：

（Ⅱ$_1$）大关找金预测区，（Ⅱ$_2$）龙井关找金预测区，（Ⅱ$_3$）卢镇关找金预测区，（Ⅱ$_4$）真龙地找金预测区，（Ⅱ$_5$）与儿街找金预测区，（Ⅱ$_6$）石关找金预测区，（Ⅱ$_7$）青山-磨子潭找金预测区，（Ⅱ$_8$）响洪甸找金预测区。

（Ⅲ$_1$）庐江找金预测区，（Ⅲ$_2$）九井找金预测区，（Ⅲ$_3$）金军找金预测区，（Ⅲ$_4$）双河找金预测区。

上述的指封山及大关金矿化点分别位于（Ⅱ$_5$）及（Ⅱ$_1$）预测区中。今后如能将试验区的航磁水系沉积物测量资料加以综合，定会进一步优选出重点找金预测区。

第四节　结　　语

γ能谱测量是圈定找金的钾化热液蚀变构造带简便而有效的方法技术。

γ能谱测量同时也是在区域上研究和圈定与金矿成矿有关的岩体、地层或构造的简便易行的方法技术。这已为前述的研究应用成果所证实。

尤其是利用已有的大量航空（或车载）γ能谱资料进行找金的二次开发应用，不需要大量的资金投入，便可快速取得用于金矿找矿预测的重要信息，这是十分有益的经验，可供推广。

为提高γ能谱测量找金的效果，一是认真研究利用工作区已知的地质成矿规律及其它物、化探方法资料，二是要从本区实际地质情况出发，通过已知区的试验，研究拟定适于该区的K、Th、U三元素的数据处理方法与变换参数，以消除多因素干扰，提取或突出有效信息。后者是γ能谱测量找金的方法技术关键所在。

本课题对此提供了许多方法与经验，但应注意的是具体地区应具体研究。

含金矿钾化蚀变的γ能谱异常特征也不止本章所列举常见的几种，不同的成矿地质条件、不同的表生作用以及点距、覆盖层等都会改变γ能谱异常特征。甚至在同一金矿床上不同金矿体的蚀变构造带上，其γ能谱特征有时也有差异，这一点也应予注意。

至于利用单一地面γ能谱测量圈定蚀变带的办法去直接找金矿体，并不是普遍有效的。

因此，一般而言，γ能谱测量找金，主要作用与效果应是在间接找矿方面，当然对U（Th）与Au的共生矿床则当别论了。

第五章　地面甚低频电磁法及频率测深法在金矿找矿中的应用研究

第一节　甚低频电磁法在冀东等地金矿找矿中的应用研究

一、甚低频电磁法在金矿找矿中的作用

物探方法找金，宜采用综合物探方法间接找矿，这是获得良好地质效果的有效途径。

甚低频电磁法可以做为综合物探方法找金中的主要方法之一。冶金一勘局物探队使用甚低频电磁法、高精度磁测、伽玛能谱和化探在冀东等地普查金矿，取得了良好的地质效果。甚低频电磁法在冀东金矿普查中，主要用于圈定断裂破碎带。该区低阻厚覆盖层分布并不广泛，与金矿有关的多期次构造活动所形成的断裂破碎带，被水充填后，形成良导地质体。这些形成应用甚低频电磁法的有利条件。尽管许多其它电法也可以做为找寻低阻断裂带的方法，然而甚低频电磁法的经济快速等特点是其它方法所不及的。

甚低频电磁法既可以用于金矿物探的普查阶段，也可以用于详查阶段。

二、野外工作方法和资料解释

（一）测区、测网和一次场源的选择

在确定地质任务时，应根据测区的地质、地球物理的具体情况，以寻找具有电性差异为前提的地质体作为甚低频电磁法的探测目标。例如圈定良导断裂破碎带，划分具有不同电性的地层接触线，寻找低电阻率的岩（矿）脉等。如果探测的目标地质体与围岩的电性差异不明显，或其规模太小，或埋藏太深，以及低阻厚覆盖分布广泛以致甚低频电磁法不能得到明显异常，则不宜投入该方法。

在准备投入甚低频电磁法的测区，必要时应选择测区内地质情况较清楚的已知地段进行现场踏勘性的试验工作，以便确定甚低频电磁法在该区内的有效性。

在应用甚低频电磁法进行断裂破碎带填图时，测区内往往有若干组断裂，与成矿有关的断裂有时有两组，并在其交叉部位有利于成矿。此时测线方向显然要兼顾到这两组断裂的方向，有时还要应用NDT及NWC两个甚低频发射台。

对于找金中通常找寻的良导断裂，可以将其看成是向下无限延伸的薄板状体，异常响应主要是由集中在板顶端的涡流线产生。线电流源埋深的公式为：

$$d = 0.5\Delta x$$

式中：d 近似地为板状体顶端埋深，Δx 为极化椭圆倾角曲线极大值和极小值之间的水平距离。

考虑到甚低频电磁法的工作频率较高，地表地质噪声较大，勘探深度较浅等特点，以寻找最大埋深为 $d = 50$m 的板状导体计算，$\Delta x = 100$m，所以一般取点距为 10m 至 40m

为宜。

（二）观测的物理量及用于衡量观测精度的量

甚低频电磁法的一次磁场只有水平分量 H_x^p，当有导体存在时，观测的 H_{x0} 是一次场 H_x^p，与二次场 H_x^s 的复数向量和。理论上可以证明，在均匀导电半空间上，二次磁场也只有水平分量 H_x^s，其垂直分量 $H_z^s=0$。如设法消除时变影响，H_{x0} 将在大地电性填图方面起到一定作用。对于局部导体，由于异常范围窄，所需要的观测时间短，仍能发现较明显的 H_{x0} 局部异常。

磁场垂直分量振幅 H_{z0} 仅是由局部导体产生的，是不含一次场的“纯二次场”。由于二次场强与一次场强有正比关系，一次场的时变仍然影响到 H_{z0}。从面积普查资料上看，几乎不存在 $H_{z0}=0$ 的点。显然在那些大面积出露的同一岩层（体）上，H_{z0} 异常所反映的是地形起伏，局部浮土变化，或地下局部电性不均匀。

极化椭圆倾角 D 也是仅反映局部导体的参量。它不受一次场时变的影响，在甚低频电磁法的磁场参量中，极化椭圆倾角 D 是寻找局部导体的较为理想的参量之一。

在陡倾斜板导体上，极化椭圆倾角 D 曲线是由“正”“负”两部分组成，它标志着在导体两侧接收线圈面向不同方向倾斜。目前按 DDS-2 仪器说明书上规定的正、负，有时造成图示上的混乱，为了便于读图，建议统一于导体的大号点一侧为正，小号点一侧为负。

甚低频电磁法测量的电场，是以接地的方式测量地面电场水平分量振幅 E_{y0}。由测得的 E_{y0} 和 H_{x0}，根据均匀导电半空间的表达式，导出视电阻率的表达式，$\rho_a=\frac{1}{\mu_0\omega}\left|\frac{E_{y0}}{H_{x0}}\right|^2$。视电阻率 ρ_a 是甚低频电磁法中可以用来寻找高阻地质体或进行大地电性填图的参量，由于甚低频电磁法使用的工作频率较高，在地面测量的 E_{y0} 受地表起伏，以及接地电极附近的局部电性不均匀的影响较大，难以反映较深部的地电信息。目前在金矿普查中多用 H_{x0}、H_{z0}、D 三个量，E_{y0} 只做少量的剖面工作。

为评价野外观测质量，要对各量的原始观测点进行一定数量的重复检查观测，并计算观测误差。考虑到甚低频一次场随时间变化的特点，直接用 H_{x0}（或 H_{z0}）的两次观测结果来衡量其观测精度显然是不合适的。前苏联地面甚低频电磁法规范中，把一次场在一小时之内的变化看成线性变化，近似地求得各测点一次场值 H_{x0}^0 后，分别计算 $\frac{H_{x0}}{H_{x0}^0}$、$\frac{H_{z0}}{H_{x0}^0}$ 的平均相对误差。我们认为直接以 H_{z0}/H_{x0} 作为衡量 H_{x0}、H_{z0} 的观测精度的量，并计算其误差，能更好地消除时变影响，更真实地反映 H_{x0}、H_{z0} 的观测质量。

倾角 D 和波阻抗 E_{y0}/H_{x0} 可以直接用于观测误差的计算。

（三）资料的处理和异常解释

对实测数据以不同的方法做适当的处理，有助于解释的准确性。目前冀东地区应用的资料处理方法有：

1. Fraser 滤波

对于大面积普查资料，以 Fraser 滤波结果绘制平面等值线图，可以较为准确、清晰地反映导体的位置和走向。

Fraser 滤波公式为

$$\tilde{D}_{n+2,n+1} = (D_{n+3} + D_{n+2}) - (D_{n+1} + D_n)$$

式中：n 为测点顺序，$n=1$，2，3……；D 为测点上极化椭圆倾角读数值；$\tilde{D}$ 为倾角滤波后的结果。

2．计算视电流密度

利用实测倾角 D 的数据，按照 M．Karous 的方法，计算剖面上不同深度的视电流密度，并绘制视电流密度的拟断面图，有助于了解良导地质体在剖面上的分布形态。

3．地形影响校正

实际和理论计算表明，山脊会产生类似于导体的异常。为在地形影响条件下识别有用地电信息，需要计算并消除地形引起的异常。

4．计算 H_{z0}/H_{x0}

考虑到同一测点上 H_{z0}、H_{x0}的观测时间间隔很短，可近似地看成是同时观测时，其比值 H_{z0}/H_{x0}可消除时变影响。为使 H_{z0}/H_{x0}数据更好地用于异常解释，研究 H_{z0}/H_{x0}与其它物理量之间的近似关系是有意义的。

①设在 xoz 平面磁场的振幅为$A = (H_{x0}^2 + H_{z0}^2)^{1/2}$，由于 $H_{x0} > H_{z0}$，近似地得到

$$\frac{A - H_{x0}}{H_{x0}} = \frac{(H_{x0}^2 + H_{z0}^2)^{1/2} - H_{x0}}{H_{x0}} = \frac{H_{z0}^2}{2H_{x0}^2}$$

②由椭圆极化方程可以得出

$$H_{z0}^2 = a^2\sin^2 D + b^2\cos^2 D$$

$$H_{x0}^2 = a^2\cos^2 D + b^2\sin^2 D$$

式中：a、b 分别为极化椭圆的长、短轴，D 为极化椭圆倾角。

令 $\varepsilon = \frac{b}{a}$，当 $\varepsilon^2\tan^2 D \ll 1$，近似地有

$$\frac{H_{z0}^2}{H_{x0}^2} = \tan^2 D + \varepsilon^2$$

为了充分利用实测资料，得到更多的地电信息，又研究并应用了以下两种资料的处理方法：

1．相关分析的应用

在金矿成矿的地质理论中，两组断裂的交汇部位常常是成矿的有利部位，在使用一个甚低频台观测的资料中，由于两组断裂走向与一次场方向之间的夹角不同，从而使某一组断裂的异常响应较弱，或因某组断裂属次级断裂，其导电率厚度积较小，在一定的干扰背景情况下，使异常走向难以清晰地反映出来。为达到准确填图的目的，灵活地应用相关分析的方法来突出干扰背景上的弱异常带，可以取得较好的地质效果。

经过 Fraser 滤波后的倾角 D 的资料便于应用相关分析的方法进行处理。

2．计算 H_{x0}的垂向导数$\frac{\partial H_{x0}}{\partial z}$

H_{x0}不仅可以反映局部导体，也可以反映大地电性，是一个很有应用前景的物理量。只是由于甚低频一次场随时间变化，使直接应用 H_{x0}进行解释工作有许多不方便之处。经过$\frac{\partial H_{x0}}{\partial z}$处理后，可以消除一次场的线性变化部分，突出某些局部异常，从而便于异常解

释。

像 M. Karous 那样，设地面观测的 H_{x0} 是由地下二维直流等效电流产生的磁场强度，该直流场满足拉氏方程。

设一次场的时变在局部测线长度内为线性变化，并表示成 $H_0 = Ax + B$，式中 A、B 为常数。二次场为 H_{2x}，则实测的场可以写成

$$H_{x0} = H_{2x} + Ax + B$$

由于

$$\frac{\partial H_{x0}}{\partial x} = \frac{\partial H_{2x}}{\partial x} + A$$

则

$$\frac{\partial H_{x0}}{\partial z} = \pi \int_{\alpha}^{+\infty} \frac{\frac{\partial H_{2x}}{\partial x}}{x} \mathrm{d}x$$

由此可见，$\frac{\partial H_{x0}}{\partial z}$ 中已消除了一次场的线性变化部分。对于一次场时变非线性变化部分，它们在相邻测线上是不相关的，而地质体异常却具有相关性。对 $\frac{\partial H_{x0}}{\partial z}$ 曲线作互相关处理，可以突出有用的地质信息。

在实测的甚低频电磁法资料里，可能遇到许多干扰异常，例如：①地表局部电性不均匀。②人工设施的干扰异常。③一次场随时间变化，使 H_{z0}、H_{x0} 异常产生畸变，甚至产生假异常。④地形起伏产生的异常。

为在干扰背景中识别断裂带等与找金有关的地质体引起的异常，在定性解释时可以从以下几方面考虑。

①采用不受一次场时变影响的物理量，例如极化椭圆倾角 D，以及由 D 计算的 Fraser 滤波结果。或采用经过一定的处理方法能够消除或部分消除一次场时变影响的量，例如 H_{z0}/H_{x0}、$\frac{\partial H_{x0}}{\partial z}$，进行解释。实际工作中，通常是以倾角 D 的 Fraser 滤波结果做平面剖面图和平面等值线图，并以此作为解释的主要图件。这是因为经过 Fraser 滤波处理后的 $\tilde{D}$ 值，既不受一次场时变的影响，又可以在某些干扰背景下较为准确地确定导体的位置。H_{z0}/H_{x0}、$\frac{\partial H_{x0}}{\partial z}$ 的异常较为复杂，可以用它们的平面剖面图作辅助图件，以便在某些情况下可以互相弥补其不足。

②根据断裂带具有一定走向长度的特点，可以采用相邻测线作相关分析的方法来压制局部干扰体的异常。

③根据异常形态来识别异常。例如人工设施具有埋深浅，良导等特点，与此相应地有异常范围小，幅值大等特征可供识别。

④尽可能收集并运用测区内地质和其它物、化探方法的资料进行综合解释，以便提高解释的准确性。

⑤对异常进行实地踏勘，易于识别地形、地表良导浮土、电力线等干扰异常源，以及某些地表可见的地质体异常。

三、应用实例

冶金部第一地勘局物探队在冀东等地区 200 多平方公里的面积上，先后对太古宇和元古宇绿岩系中的金矿以及侏罗纪火山岩金矿进行了综合物、化探普查工作。

甚低频电磁法主要是用来圈定断裂构造和裂隙发育带。普查工作的比例尺为 1∶10000，测网为 100m×20m。本章选用的实例其数据资料均来自冀东甚低频电磁法的普查结果。

（一）实例 1

图 5-1 是冀东南大线的 $\tilde{D}$ 值平面等值线图。从 $8^\circ \geqslant \tilde{D} > 0^\circ$ 的等值线所圈定的异常范围可以看出，异常呈条带状或断续条带状，按 70°、90°、110° 三组走向分布。而由 $\tilde{D} > 8^\circ$ 等值线所圈定的异常范围，主要反映了 70°、110° 两组交叉的成网格状分布的异常特征。

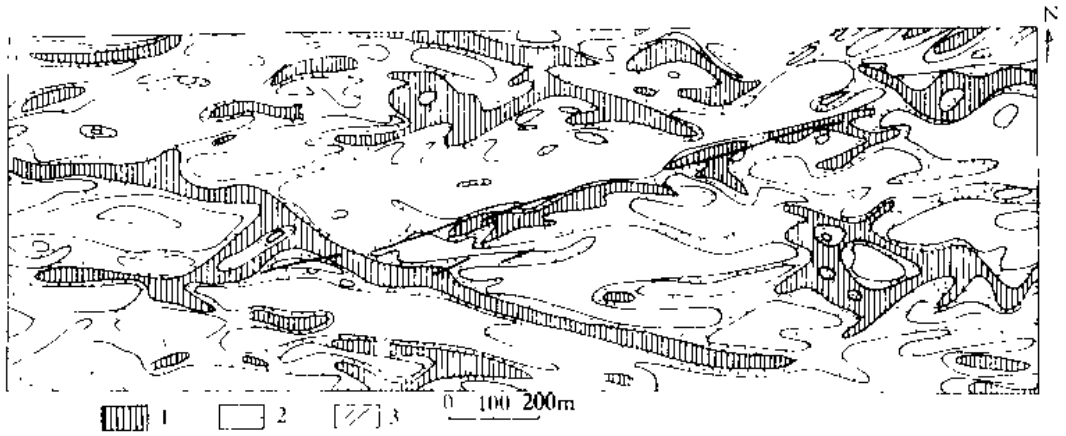

图 5-1 南大线 VLF 倾角（$\tilde{D}$）异常图

1—$\tilde{D} > 8^\circ$ 范围；2—$8^\circ \geqslant \tilde{D} > 0$ 范围；3—已知金矿（化）脉

实际地质资料表明，该区主要有 0°、70°、90°、110° 四组断裂。成矿主要是受 70°、110° 两组断裂控制。

用 $\tilde{D}$ 值等值线圈定该区与成矿有关的 70°、110° 两组断裂构造带的地质效果是明显的。为地质找矿缩小了靶区。

（二）实例 2

测区位于细粒黑云母闪长岩体上。在 $\tilde{D}$ 值平剖面图上（见图 5-2），除了由山脊地形引起的近东西向的弧形异常外，还有许多低值异常。根据这些低值异常圈定断裂位置有困难。如果将 $\tilde{D}$ 平剖面图，结合磁场水平分量垂向导数（$\partial H_{x0}/\partial z$）平剖面图（图 5-3），则可以发现一些弱异常带的存在。例如位于测区西北角处的北西向 $\partial H_{x0}/\partial z$ 异常与地质图的已知断裂相对应，它的东部还有一近东西向的 $\partial H_{x0}/\partial z$ 异常，该异常亦应是东西向断裂的响应。由此可见，$\tilde{D}$ 虽然较 D 更易于识别较大干扰背景上的局部异常，但对于那些幅值较小，难以判断其走向上连续的 $\tilde{D}$ 异常，感应 $\partial H_{x0}/\partial z$ 异常是否存在来判断异常走向的连续性是有意义的。

何以 $\tilde{D}$ 反映很不明显的低阻断裂，在经数据处理的 $\frac{\partial H_{x0}}{\partial z}$ 资料中可得到较明显的异常呢？

从前面理论分析中可知 $\frac{\partial H_{x0}}{\partial z} \sim \frac{\partial H_{2x}}{\partial z}$，而 $H_{2x} = \sqrt{(\mathrm{Re}H_{2x})^2 + (\mathrm{Im}H_{2x})^2}$。当断裂的宽度与导电率乘积不大，使其感应参数较小，从而其 $\mathrm{Re}H_{2x} \ll \mathrm{Im}H_{2x}$ 时，$H_{2x} \simeq \mathrm{Im}H_{2x}$，而椭圆极化倾角 $D = \frac{\mathrm{Re}H_z}{H_1} \to 0$。故对应宽度小的断裂或导电性较差的断裂，当其异常的

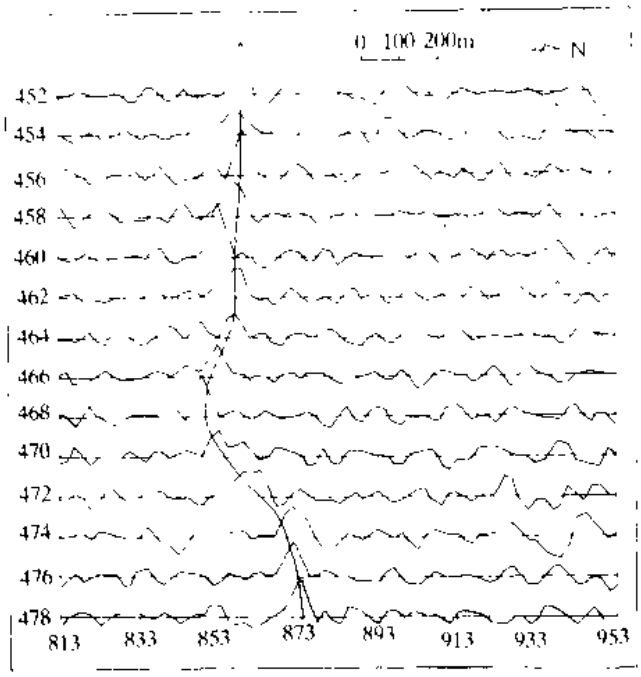

图 5-2　冀东某地县低频极化椭圆倾角 Fraser 滤波（D）平面剖面图

— 山脊走向

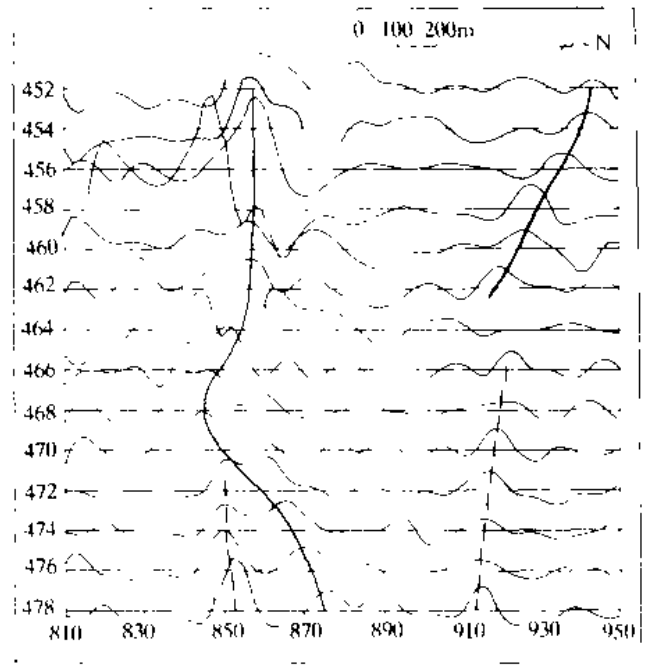

图 5-3　冀东某地县低频水平分量振幅垂向导数平面剖面图

——已知断裂　　- - -推断断裂　　- —山脊走向

实分量远小于其虚分量时，即可出现倾角 D 无异常，而包括虚分量异常的参数$\frac{\partial H_{zx}}{\partial z}$尚可获得可分辨的异常。

同样$\frac{H_{z0}}{H_{x0}} \simeq (D^2+\epsilon^2)^{\frac{1}{2}}$，当 $D \ll \epsilon$ 时，$\frac{H_{z0}}{H_{x0}} \simeq \epsilon \simeq \frac{\mathrm{Im}H_z}{H_{x0}}$，故上述$\frac{H_{z0}}{H_{x0}}$亦具有反映虚分

量异常的特点，但异常形态较复杂。

由于 DDS-2 型甚低频电磁仪不能测定虚分量异常，利用上述两个参数则有可能弥补其不足，扩展当前地面甚低频法的应用范围。

第二节　频率测深在金矿区外围深入找矿中的应用效果

一、方法特点

金矿老矿区或资源危急矿山外围的深入找矿，既是黄金生产中长期不断提出的课题，又是黄金地质工作的一个重要任务。

这项地质工作难度大，特别是厚层或外来堆积物覆盖地区。在这类地区，地面甚低频法由于勘探深度小，难以发挥作用。因此选择了频率测深法。

频率测深法是用一个发射偶极 AB 供电，可在 AB 两侧很大的扇形区内测量，在山区可根据地形灵活选择发射机位置。测量时只移动接收机便可进行面积性测深工作，从而提高了效率，降低了成本。其次是低频段的穿透深度大。以工作区主要岩石的平均电阻率＞240Ω·m，低频为 3.8Hz 估算的趋肤深度约为 4000m。工作中使用的是煤科院西安分院研制的 DD-1 型数字电磁测深仪。$AB \simeq 1000$m，$MN = 100$m，收发距为 4000m，以点距 100m 的剖面进行重点区的面积性工作。

二、应用实例

几年来曾在内蒙古莲花山，红花沟，撰山子金矿区以及辽宁柏杖子、青龙沟、盘道沟金矿区进行了以频率测深为主，辅以高精度磁测和伽玛能谱法等方法的综合物探方法工作。密切结合地质成矿规律与预测的研究成果，在莲花山、红花沟、撰山子及柏杖子四个金矿区外围，圈定出找矿的有利构造及岩性地段，取得了较好的地质找矿效果。

今举内蒙古撰山子金矿为例，该矿位于赤峰东约 50km 处。矿区出露的地层主要是一套海相碳酸岩-碎屑岩建造，下部是砂板岩，中部是大理岩。区内构造十分发育，一组近东西向，另一组是北西向，成群出现，平行排列。已知矿脉严格受构造控制，无一不在断裂中产出。

本区用 400m×100m 的网度安排了 89 个点的频率测深工作，控制面积为 3km^2，主要控制东西向构造体系的分布规律。同时，还投入了面积性激电、伽玛能谱和高精度磁测工作，以便用综合参数对成矿远景做出预测。

根据频率测深结果，推断了撰山子区的主要构造格架。已知的金矿脉大部分受这一构造格架控制。从 4 号和 5 号脉出发，沿垂直北西向构造体系的北东方向打一条长穿脉，见到了近似等间距的含金破碎带和工业矿体。验证结果与频率测深反映的控矿构造格架相当吻合。

为了给钻探、坑探提供靶区，本区的物探工作，除了频率测深外，还投入直流激发极化法、高精度磁测法和地面伽玛能谱法。

由于区内大面积存在碳质岩石，激电异常较多，但经过数据处理求剩余异常，则可基本上去掉碳质岩的影响。不但在已知的 4 号、5 号矿脉上方获得了正的激电剩余异常 $\Delta\eta_s$，在一些未知地段也获得了激电剩余异常 $\Delta\eta_s$，表明与金矿化关系密切的硫化物的存在。

高精度磁测结果比较明显地圈出了地表不甚清楚，或被黄土覆盖的27号脉的位置和展布。在已知的4号、5号矿脉上，为线状的磁场低，说明在金矿成矿过程中有对围岩退磁的地质过程发生。呈线性的相对磁场低可作为追索矿脉的一个标志。

图5-4是32线的综合剖面图，从中可以看到各种物探方法的相辅相成关系。后来的工程结果验证了综合物探方法的有效性。

由于金属矿区地质构造及地质条件的复杂性，该专题频率测深法的技术成果尚需进一步分析总结。

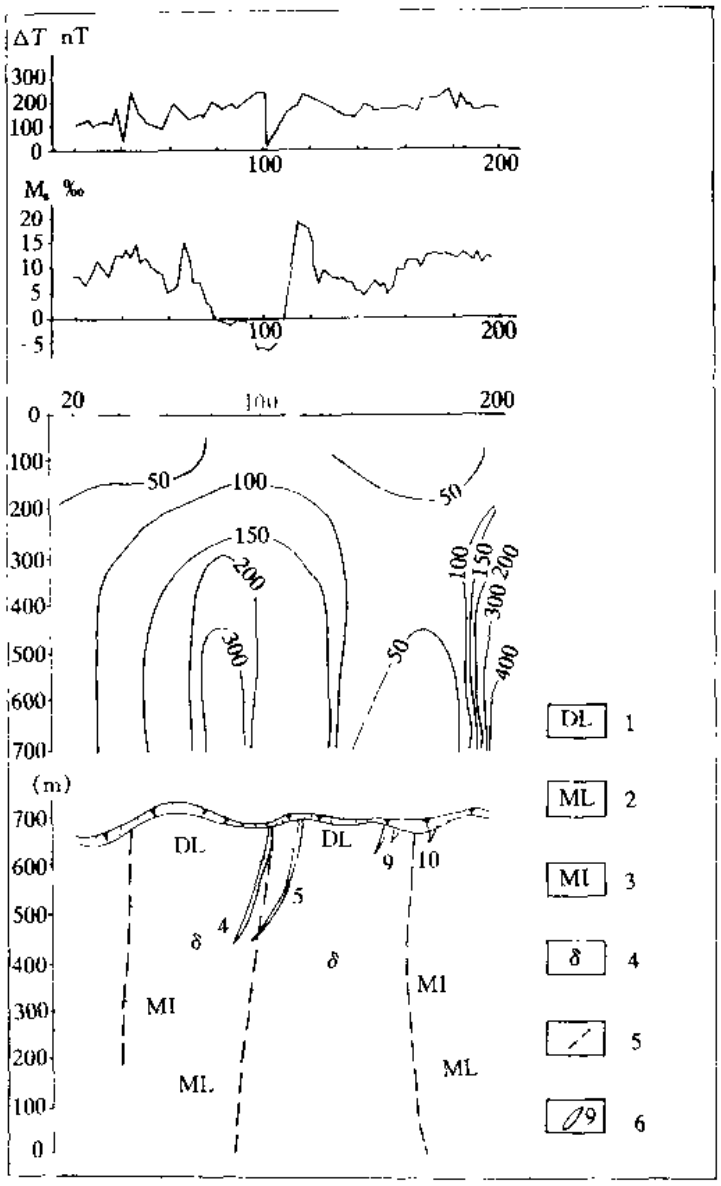

图5-4　撰山子金矿区32线综合剖面图

1—大理岩；2—灰岩；3—板岩；4—闪长岩；5—推测断层；6—矿脉及编号

第三节　结　　语

地面甚低频电磁法适于在低阻覆盖层不发育的测区快速普查良导的断裂破碎带。

对极化椭圆倾角 D 的观测数据，施以点距合适的 Fraser 滤波后的 $\tilde{D}$，能更清楚地反映良导断裂带的位置与分布，必要时可对 $\tilde{D}$ 进行测线间的相关分析，突出 $\tilde{D}$ 的走向及其连续性特征，应注意地形干扰异常的识别或改正。

由于极化椭圆倾角 D 较小时只能反映 $\mathrm{Re}H_z$ 异常，不能反映 $\mathrm{Im}H_z$ 异常，故对普查宽度小或导电性较差的低阻断裂带是不适用的。因此在当前地面甚低频电磁法工作中，为弥补上述不足，有必要重视应用$\frac{H_{z0}}{H_{x0}}$或$\frac{\partial H_{x0}}{\partial z}$这些包含虚分量异常的参数，来发现这类低阻断裂带的虚分量异常。利用虚分量异常来圈定低阻断裂带在航空甚低频电磁法中已取得普遍的良好效果。

对于已知金矿床外围特别是厚覆盖区、要求勘探深度要大时，可采用频率测深法（或 CSAMT 法）。频率测深法具有工效高成本低的优点，并在几个已知金矿区外围的综合方法勘探中取得了初步的应用效果。

但就频率测深法（或 CSAMT 法）勘测控矿低阻断裂破碎带的技术方法而言，尚需通过进一步的试验研究。主要研究内容有两个：

①如何区分由静态效应产生的低阻“异常”与陡倾低阻断裂破碎带产生的低阻异常；如何消除由静态效应产生的高阻“异常”对成果解释的干扰。

因为利用以空间域滤波为基础的现有静态效应改正方法都不能解决上述问题。

②通过理论计算模拟，研究典型二维地电断面上不同产状及电性参数的低阻断裂带的异常特征，以了解野外点距、记录点的选取及检验由 $\rho_s(f)$ 转换成 $\rho_s(h)$ 的方法与误差范围。

第六章　金矿井中综合电测、井中电法计算机反演方法与井中电磁波层析技术的应用研究

在地质与构造条件较为复杂的金矿区开展电测井及井中电法，可以圈定矿化体或蚀变带和充分利用普查或勘探钻孔，寻找钻井周围或钻井间盲矿体。实践证明这也是金矿物探发挥作用的一个重要方面。

第一节　井中综合电测在小秦岭地区金矿床上的应用研究

一、方法技术简介

1．仪器设备

①接收机为加拿大产 IPR-8 积分式激电仪。

②发射机采用上海 SJJ-1 发射机组或北京 DJM-1 型供电系统。供电电流一般为 2—3A。

③井下电极系：测量电极采用自制的聚氯乙烯-硫酸铜不极化电极，供电电极为铅丝缠绕的棒状电极。

2．方法技术

①电测井主要投入自然电位测井、极化率测井和电阻率测井。目的是了解井壁电性特征，校验钻孔地质剖面，为井中激电异常的解释提供背景参数。

②井中激电：地-井方式激电以寻找井旁矿体为目的，供电“A”极按解决的地质问题不同，分别布置在钻孔周围或矿体露头上，“B”极位于无穷远（r_B一般为 3—5 倍井深）；井-地方式激电以寻找井中已知矿体或井旁盲矿的延伸为目的，采用梯度装置进行剖面测量或向量测量。供电极“A”位于钻井（或坑道）中的矿体露头或矿体上下盘处。

二、金矿井中综合电测的技术措施及异常解释方法研究

（一）金矿井中综合电测的技术措施

在国内外，有关金矿区井中综合电测配合地质找矿的报道甚少。我们针对小秦岭金矿区具体的地质问题，开展了相应的数值模拟和物理模拟研究工作，进行了一系列的方法试验，其结果摘要如下：

1．金矿电测井方法技术措施

（1）电极系装置的选择　在水槽中进行模拟试验表明：①电位电极系反映灵敏、观测异常幅值大，与矿体模型对应较好；②用顶部梯度电极系观测时，不同延时取样的结果有明显差异，表明装置电磁耦合影响大；而电位电极系不同延时取样结果基本上一致，表明

电位电极系受电磁耦合影响不大。故在实际应用中选用电位电极系。

（2）电极系极距的确定　电极系的极距是根据大量钻孔的实际观测结果选定了小极距（$B2.0A0.1M$）电位电极系，观测成果异常明显，M_s、ρ_s 异常与矿化（蚀变体）对应较好，能较准确地划分钻孔地质剖面。

2．地-井方式激电的探测能力及 A 极的布置

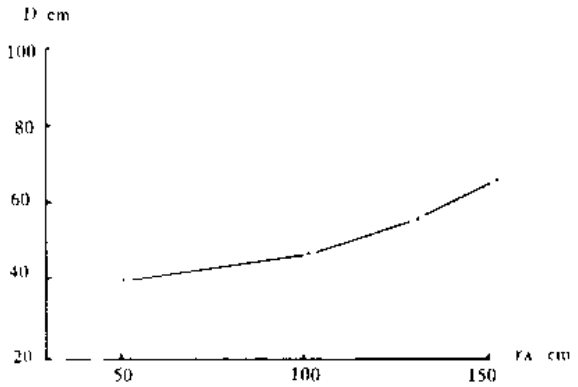

图 6-1　水槽模拟实验成果图

图 6-1 为水槽模拟实验成果。当球状矿体中心离井轴距离 d 一定时，随着供电极距 r_A 增大，M_s 异常幅值明显增大。以 3‰作为 JPR-8 仪器观测的 M_s 值的最低值，供电极距 r_A 与最大探测范围 D 的关系，经统计 $D\approx(0.4—0.6)\ r_A$。

所以，适当增大供电极距 r_A 是增大探测范围的有效途径，一般应选择 $r_A\geqslant h$（矿体中心埋深）；为了对不同方位测量结果进行对比分析和解释，应尽量使各方位的供电极距接近相等，即使由于客观原因 r_A 相差较大时，亦必须考虑 r_A 不同对异常幅值的影响。

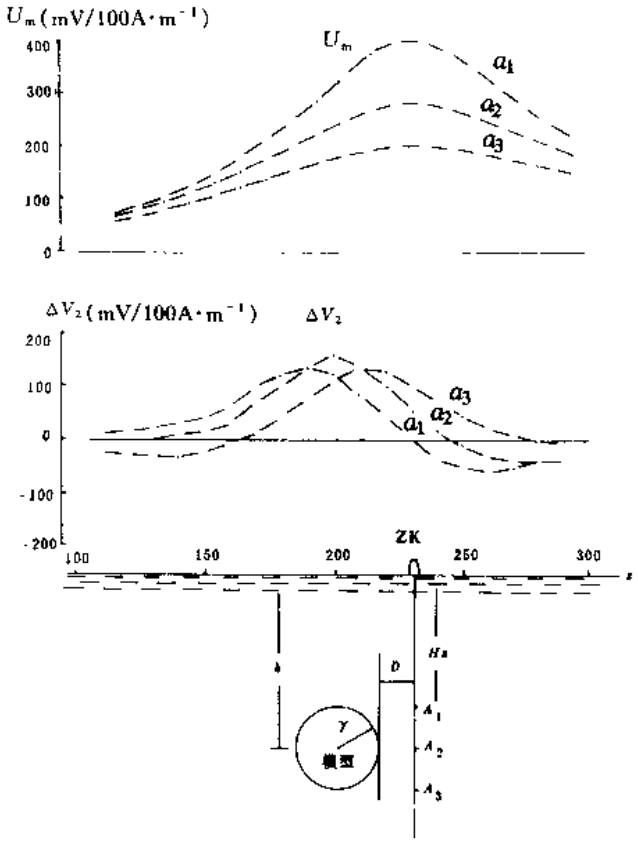

图 6-2　球体井中不同深度充电 ΔV_1、ΔV_2 异常曲线

模型：紫铜球壳 $r=15$cm；$h=55$cm；$D=15$cm

电极：$H_{s_1}=50$cm；$H_{s_2}=65$cm；$H_{s_3}=80$cm

3．井-地激电剖面测量方法技术研究

井-地方式激电与充电法的工作方法相近，当供电点不在矿体上，供电极的布置要求及异常特征则与充电法有所不同。

图 6-2、6-3 分别是井旁低阻高极化球体和板状体，不同深度供电的井-地方式水槽模拟实验结果。从图中可以看出，无论是球体或板状体，对其间接充电时，一次电位 ΔV_1 异常中心与模型在水平面上位置相差较大，而二次电位 ΔV_2 异常的中心与模型水平投影基本对应，模型体始终处在 ΔV_2 主异常范围内。

若异常对称，异常中心就是模型中心，若异常不对称，模型体偏向主异常梯度大的一侧，但此时不同深度供电（含矿体上、下盘）的 ΔV_2 曲线交点正好处于曲线较陡的一侧，并且该交点在模型体水平投影的范围内，当相交的两条曲线彼此对称或接近对称时，其交点就是模型中心。

上述结果告诉我们：①布置井-地方式供电点时，应把供电点尽量放在矿体（或井中异常）下部。②为了较准确地确定矿体地面的投影位置，应在钻孔不同深度分别供电，这样还可以根据不同深度供电点的异常变化，判断矿体埋深范围。③井-地方式间接充电，应以分析 ΔV_2 异常为主。

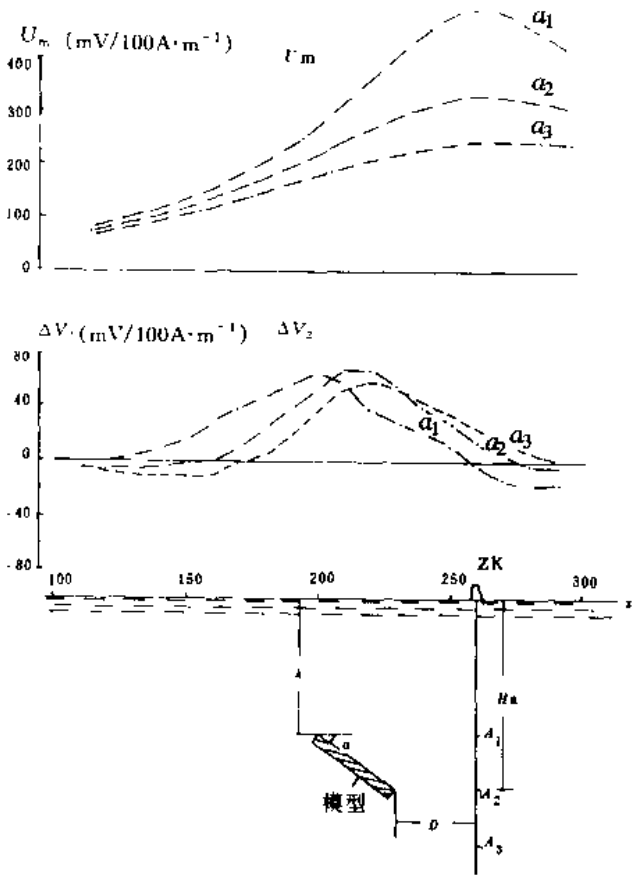

图 6-3 倾斜板状体井中不同深度充电 ΔV_1、ΔV_2 异常曲线

模型：倾斜石墨板 $\alpha = 45°$；$h = 50cm$；$D = 30cm$

电极：$H_{A_1} = 50cm$；$H_{A_2} = 65cm$；$H_{A_3} = 80cm$

（二）地-井方式观测成果的解释方法研究

地-井方式激电是井中综合电测的一个重要分支。我们在异常解释方法方面进行了一些有益的探讨，捕捉到了一些规律性的、很有用的信息。

1. 地-井方式 ΔV_1 异常的解释方法

图 6-4 表明：地-井方式 ΔV_1 正常场幅值随 r 增大迅速减小，我们在分析实测 ΔV_1 成果时，要在考虑正常场特征之后再分析地质原因，对于二倍 ΔV_{1max} 出现深度以下空间，可以近似看成均匀场，在这部分空间可以用均匀极化理论来分析、解释异常。

图 6-5 为倾斜铜板地-井方式物理模拟曲线，两种图示方法均有异常反映，但是 $\Delta V_1 - \Delta V_{1背景}$ 即 $\Delta V_{1纯}$ 曲线更直观，方位信息更清楚，较 ΔV_1 能更准确地确定异常源空间位置及规模，所以在实际工作中，模拟野外条件用正演计算除去正常场，分析剩余纯异常效果较好。

2. 层状介质的影响

图 6-6 为水平层状介质地-井方式正常场特征，可以看出层状介质能引起地-井方式 ΔV_1、ρ_s 假异常，因此分析实测资料要充分考虑这方面的因素。有条件的情况下要利用测井资料进行层状介质正常场的改正。

3. 地形起伏的影响

地形影响，对地-井方式尤为重要，甚至会造成井中一次电场反向。必要时，应做地形影响的改正。通常在野外选择供电极位置时，应尽量减少地形影响。

4. 地-井方式 M_s 异常及解释方法研究

地-井方式 M_s 异常的分析，前人做了大量的工作，总结了一些很有用的规律。图 6-7 是不同产状板状体地-井方式七、反方位的 M_s 水槽实验成果。在图中所示的实验条件下

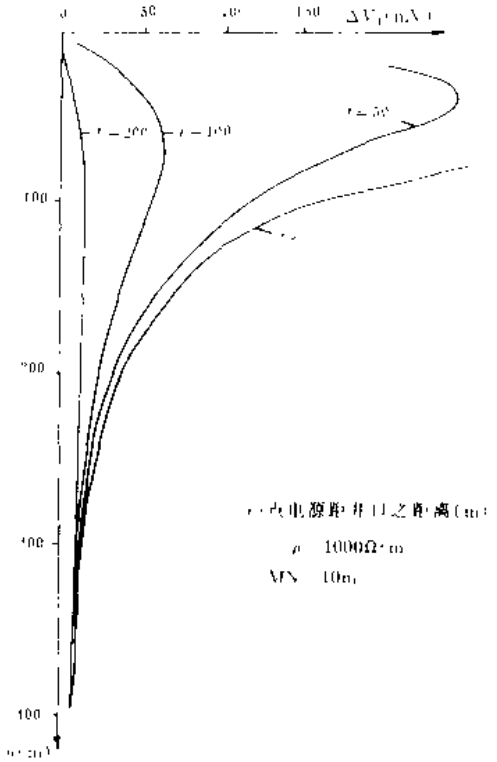

图 6-4　均匀介质中地-井方式正常场特征

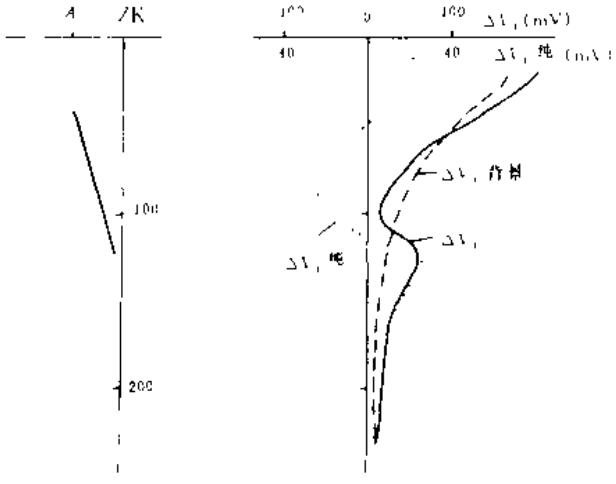

图 6-5　水槽模拟地-井方式倾斜铜板 ΔV_1 成果图

——ΔV_1 实测　- -　ΔV_1 背景　……ΔV_1 纯异常

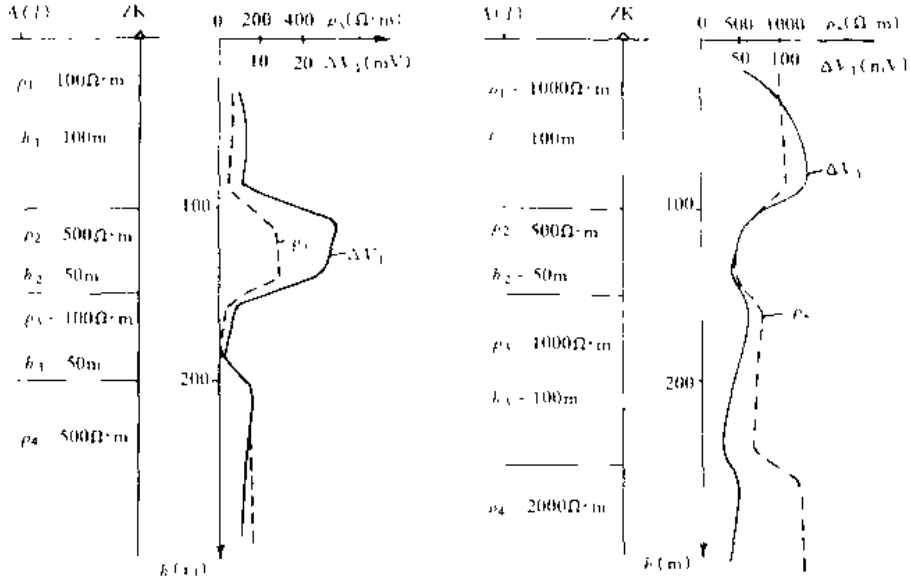

图 6-6　水平四层介质地-井方式正常场特征

- - - ρ_s　　— · ΔV_1

可以看出：①不论板状体产状如何，大多数情况下主方位 M_a 曲线均呈上正下负的反“S”型，反方位 M_a 曲线均呈上负下正的“S”型；②向井倾斜的板状体主方位 M_a 曲线幅值明显大于反方位；但背井倾斜的板状体，其反方位 M_a 曲线幅值大于主方位，且其方位信息比主方位明显。根据以上两点，可以判断矿体的方位和产状；③当矿体产状较缓或水平时，主反方位 M_a 曲线的交点与矿体埋深基本对应；当矿体产状较陡或直立时，M_a 极值

点深度与矿体中心埋深相近，所以当矿体产状较陡或直立时，可用上、反方位 M_a 曲线极值点深度的平均值估矿体中心埋深

三、井中电法在金矿上的应用效果

（一）提供了金矿床上的电性特征规律

电测井和地面典型剖面上的电法成果，互相印证、互相补充，可提供研究区内金矿床岩矿石电性的基础资料，对研究金矿床上电法异常、建立矿区井中地质-综合电法异常模式是有重要意义的。

图 6-8 是葫芦沟破碎蚀变岩型金矿上见矿井段部分的电测井成果。在已知矿体和蚀变岩的井段上，电测井均呈负自电、高极化率异常，同时常伴随视电阻率增高（或降低）。

事实上，在所有工作区内，无论是蚀变岩型金矿床，还是石英脉型金矿床，矿化蚀变体上都有此特征。异常的组合特征，随着金矿类型的不同，没有明显的变化，而在同一类型的金矿上，由于个体条件和赋存环境的不同，异常组合还可能稍有差异。在研究区不管是哪种类型的金矿，黄铁矿化破碎带及多期次的热液蚀变带是金矿的基本控矿地质条件和找矿标志。

（二）校验钻孔地质剖面，指出含矿有利井段

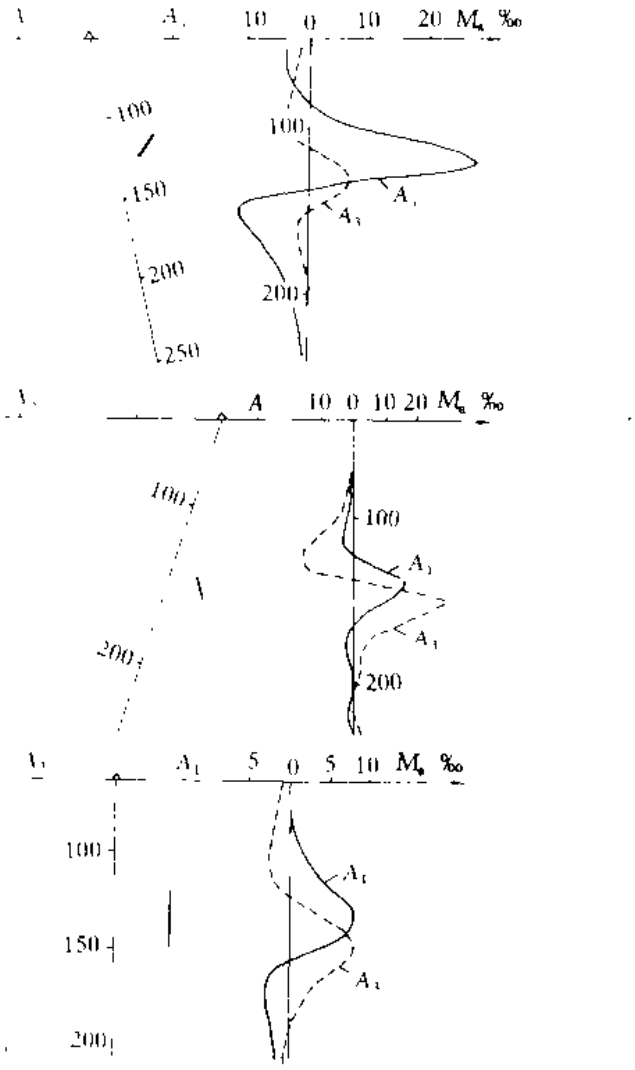

图 6-7　水槽模拟良导体地-井方式实测曲线

校验钻孔地质柱状剖面，指出含矿有利井段，实现对目标层的定深、定性、定厚是测井工作又一目的。一般来讲，固体矿产由于岩心采取率较高，常无此需要。但当金矿单体规模小，品位不均匀，分枝、复合、尖灭、再现比较常见时以及地质标志不明显和钻孔取心不全等，都可能发生漏矿现象。此时利用电测井弥补上述的不足，为地质工作提供各种有用的信息，就显得很有必要。

在我们进行电测井的钻孔中，按前述异常组合特征共发现电测井异常 40 多处，大多都与已知矿（化）体对应，或被证实与矿（化）体蚀变带有关，其中地质未发现后经验证为矿化蚀变体的异常 4 处。

洛原 A 区 ZK001 的电测井是确定漏矿层位的一个实例（见图 6-9）。钻孔中 85m 处岩层破碎，地质定为糜棱岩，无法认识其含矿性，电测井有明显的负自电和高极化率异常，同时地-井方式激电亦有显示，分析认为该井段是本孔中硫化物最富集的井段，经地质实施补矿，在 85m 见到了矿化体，确定为 1-2 矿体的平行矿体。

图 6-10 是葫芦沟 ZK3602 孔的电测井成果。在图中 100—125m 井段，地质描述为辉绿岩，未见到任何明显的矿化蚀变，而电测井的 M_a 却有明显的异常，同时视衰减率 C_S^2

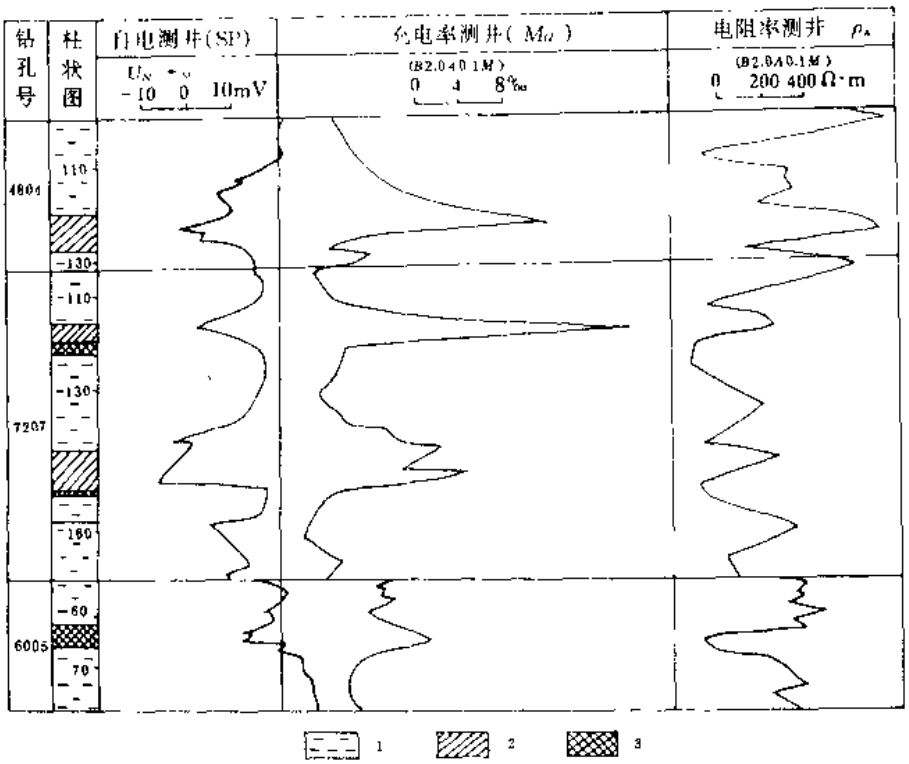

图 6-8　葫芦沟已知金矿段电测井典型曲线

1—角闪斜长片麻岩；2—蚀变体；3—矿（化）体

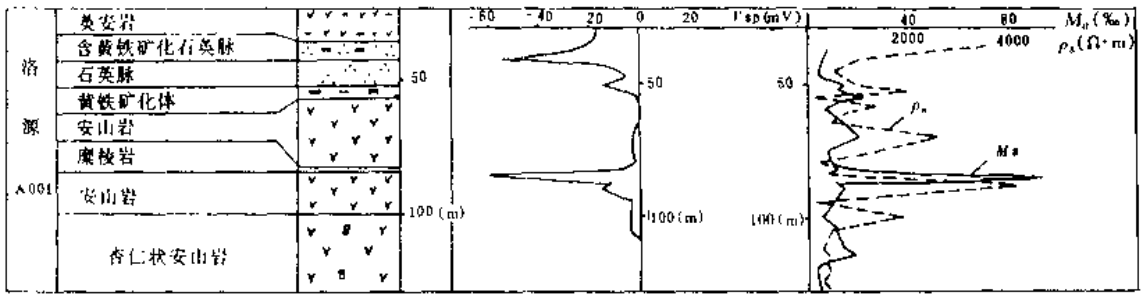

图 6-9　电测井指示漏矿层位实例

和衰减比（C_{IS}^2均为“凹”型异常，具有 $C_S^2<0.5$，$C_{IS}^2<1$ 的特征（这是金属硫化物异常的标志），说明有金属硫化物富集体存在，经地质复查岩心，发现黄铁矿化较多，为矿化蚀变体。

（三）发现井旁矿（化）体、确定矿体大致范围

小秦岭地区金矿（化）体与黄铁矿化和构造蚀变带关系密切，尚未发现碳质层等干扰体的影响，引起自电、充电率异常原因比较单一，有利于井中电测工作的开展。但不利因素是，地质情况比较复杂，矿体规模小，矿体与围岩的电性差异不甚明显。本次研究工作表明，井中电法能发现井旁盲矿（化）体，指示矿体在钻孔外空间的分布，但受地质条件的限制，有一定局限性。下面举出两个金矿区井中电测典型实例说明之。

1. 葫芦沟 ZK6005 孔

ZK6005 实钻 88.6m 分别在 30m、63—67m 井段见蚀变混合岩，有硅化、钾化和黄铁

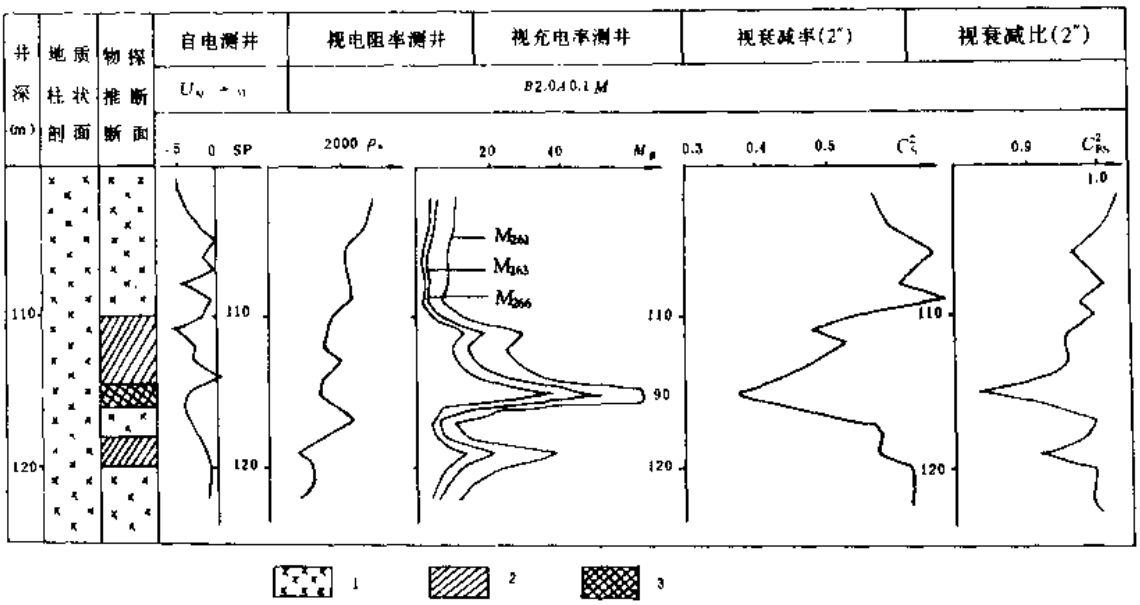

图 6-10　葫芦沟 ZK3602 孔电测井成果图

1—辉绿岩；2—蚀变岩；3—矿（化）体

矿化。井中电测结果如图 6-11，地-井方式激电除 A_3 方位外，ΔV_1 均未发生反向，所以，这时直接分析 M_a（或 ΔV_2）异常就比较可靠，在本孔中，A_0 方位 M_a 有一幅值明显，形态规整的负充电率异常及当供电极移到 A_1 方位时 M_a 呈“S”型，在 25m 和 40m 分别有两个过零点和正值区宽大等特征都表明异常所反映的高极化体主要位于钻孔轴南侧，推断结果如图 6-12 所示，经 ZK6002 孔等工程证实，在预计部位确有含金蚀变带，黄铁矿化较发育。尽管蚀变体金品位低于工业要求，但说明该方法寻找盲矿(化)体确实是有效的。

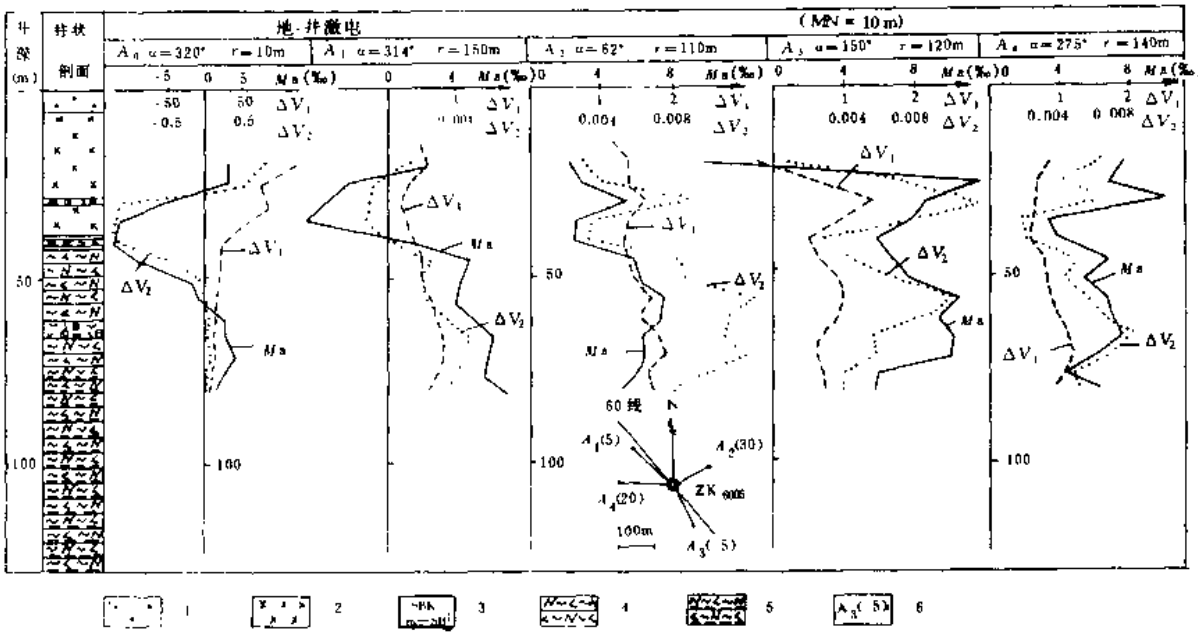

图 6-11　葫芦沟 ZK6005 孔井中电测成果图

1—第四系；2—辉绿岩；3—钾化、硅化、黄铁矿化蚀变岩；4—角闪斜长片麻岩；5—黑云母角闪斜长片麻岩；6—“A”极位置（相对井口高程）

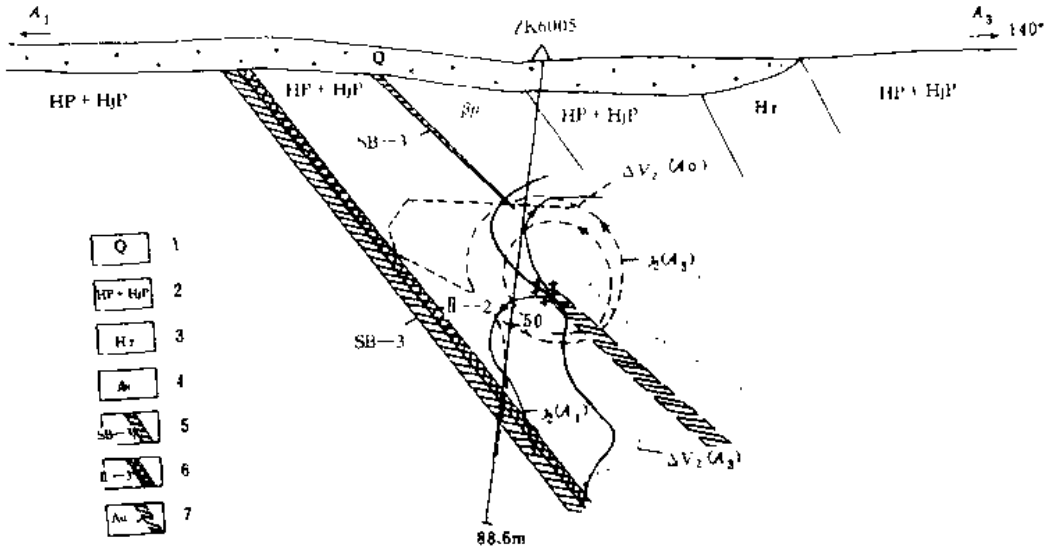

图 6-12　葫芦沟 60 线综合剖面图

1—第四系；2—混合岩化角闪斜长片麻岩；3—混合花岗岩；4—辉绿岩；5—蚀变体；6—含金矿体；7—推断金矿体

2．刘家沟金矿区

本区首先施工 ZK001 孔，探索 Q2243 脉体中的矿体延深情况，结果仅见两层黄铁矿比较发育的石英脉，金的含量不够工业品位，经地-井方式测量，由图 6-13 可见，A_1 及 A_3 方位 M_a 反映的均是旁侧高极化体的尾端异常，也就是说 Q2243 脉体中的金属硫化物富集地段延深不大。

图 6-14 是在 0 线附近的 T_3 坑道中矿体露头上供电，获得的坑-地方式激电结果，由图可见在剖面上 ΔV_1 和 ΔV_2 曲线，在平面上 E_1 和 E_2 电位矢量仅在 0 线，1 线有异常，

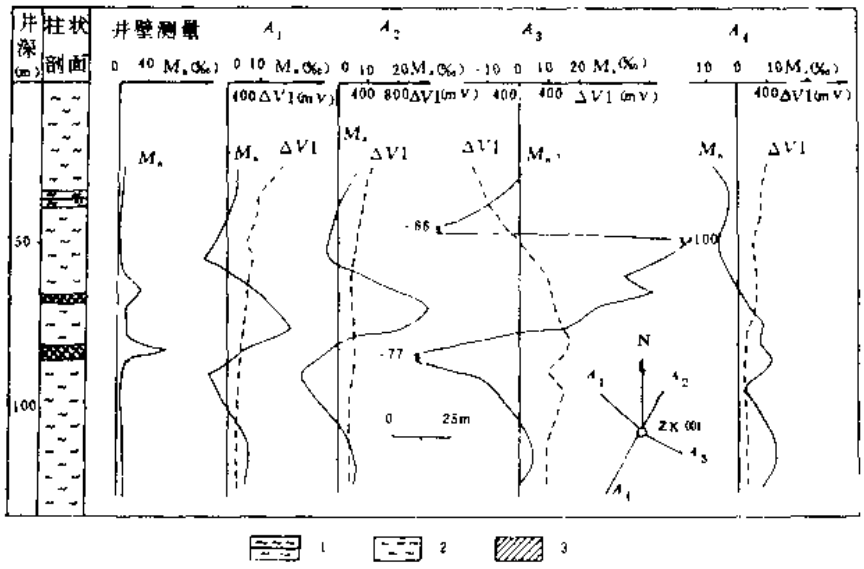

图 6-13　刘家沟 ZK001 孔井中电测成果图

1—绿泥片岩；2—混合花岗岩；3—含金黄铁矿石英脉

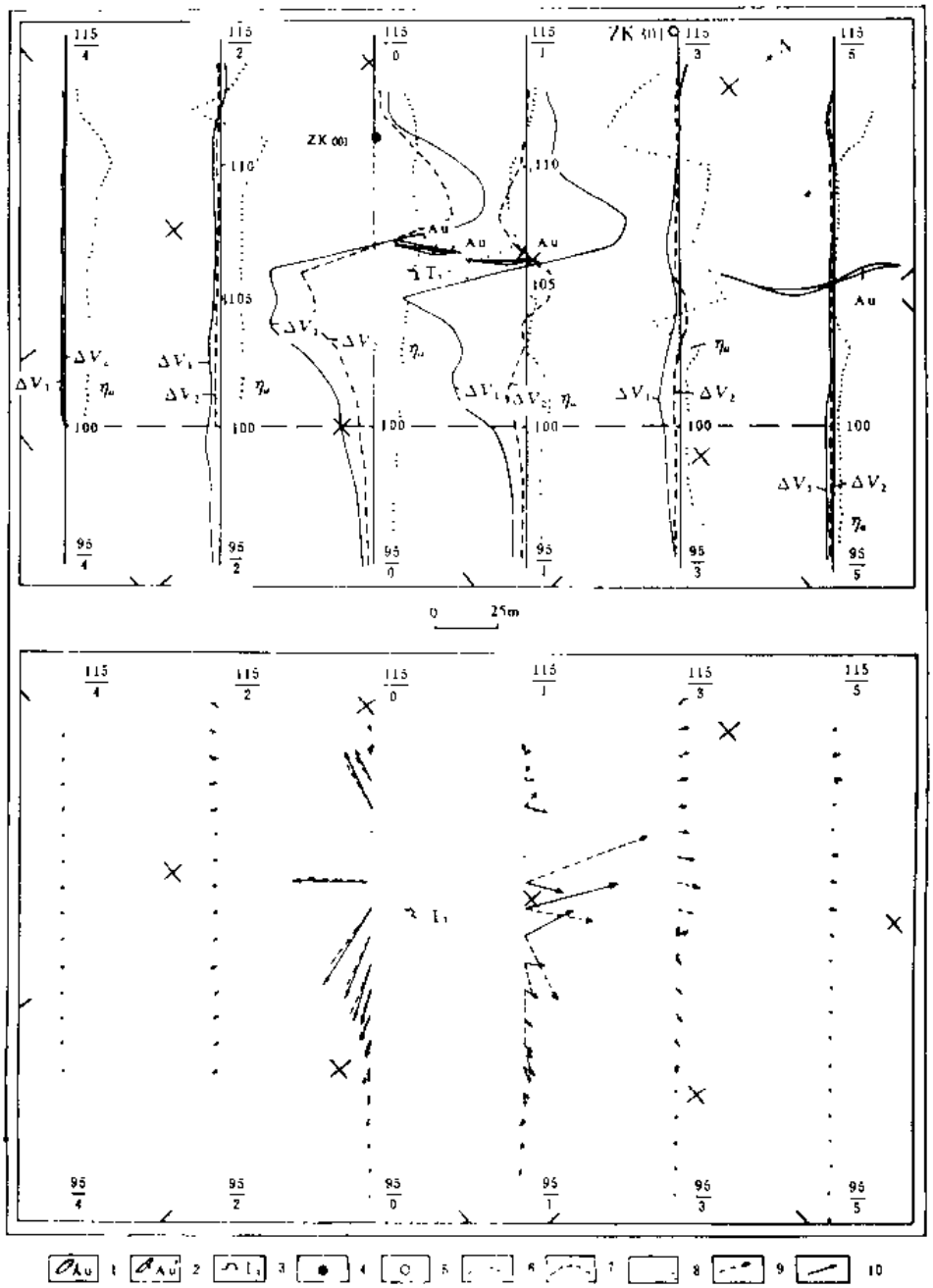

图 6-14　刘家沟金矿 T_1 坑-地方式激电成果图

1—金矿体；2—金矿化体；3—坑道位置及编号；4—见矿钻孔；5—未见矿钻孔；6—ΔV_1（1cm=500mV）；7—ΔV_2（1cm=50mV）；8—η_s（1cm=4%）；9—一次电位矢量 E_1（1cm=1000mV）；10—二次电位矢量 E_2（1cm=1000mV）

异常范围较小，类似点源场特征，说明矿体延伸确实较小。经后期布设的 ZK002 及 ZK701、ZK301 孔等地质工程控制证明，该脉体的金属硫化物富集地段水平只有 80m，延深 60m 左右，其空间范围与我们推断的一致。

四、金矿井中电法异常模式及工作系列方案

（一）金矿井中电法异常模式

通过本次的研究工作，依据本区地质-地球物理特性和实际工作成果，初步建立起金矿电测井异常模式和金矿井中激电异常准模式。

1. 金矿电测井异常模式

截止到目前，在小秦岭地区洛南葫芦沟金矿、王排沟金矿、洛源金矿和刘家沟金矿进行了近30个孔的电测井和井中激电工作。矿床类型包括了破碎蚀变岩型和石英脉型，其共同特征是，金矿化与黄铁矿化和构造破碎蚀变带关系密切，它们是找矿最明显的地质标志。黄铁矿化能引起高极化率异常，常有自电异常的伴生；破碎带岩石电阻率变低，而硅化、石英脉都能使岩石电阻率升高，因此，金矿电测井的异常模式如图6-15。黄铁矿化石英脉为高阻高极化，纯破碎带为低阻负自电异常，但一般无 M_a 异常，破碎带含矿时为负自电、高极化率，并有电阻率的局部增高变化。

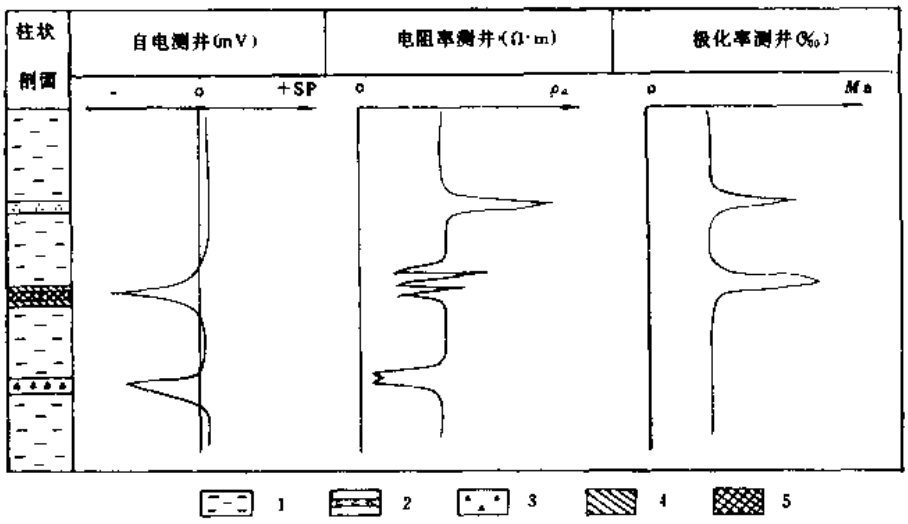

图6-15　金矿电测井异常模式

1—围岩；2—石英脉；3—破碎带；4—蚀变体；5—金矿体

2. 金矿井中的激电异常准模式

根据金矿体多以脉状产出，显示高极化特性，在野外实际资料中，排除井斜、地形等诸影响外，矿（化）体引起的地-井方式激电异常特征是：

①M_a（ΔV_2）呈“S”型和反“S”型异常。

②ΔV_2 的变号或不同方位有明显差异。

③M_a 虽无“S”型，但在各个方位有明显差异。

④M_a 的“凸”异常，ΔV_1 的“凹”异常。

这些特征都可作为识别有用异常的标志。要进一步判断异常体存在的位置、产状和范围等，还要根据地质、物探、化探资料提供的信息，利用计算机正演或模拟实验的结果，做进一步的推断解释。

（二）金矿井中电法系列方案

目前情况下，在所有的物探工作方法中，对金矿床来说，井中电法是比较经济实用的。表6-1是根据小秦岭地区金矿的情况总结的井中电测工作系列方案。这个方案是在本次工作的基础上提出的，可作为金矿井中电测工作的参考，实际工作中还可根据具体情况进行选择、调整和补充。

表 6-1

地 质 任 务	方 法 系 列
划分、校验钻孔剖面，发现井周或井底含矿层	自然电位测井、视电阻率测井、视极化率测井、零方位地-井方式激电
了解相邻矿体部位的相关性、寻找井间盲矿	电测井（井中物性填图）、井-井激电
寻找井旁盲矿，确定盲矿空间位置	地-井激电、井-地激电
圈定矿化蚀变体范围	井（坑）-地激电

第二节　井中电法（ρ_s，η_s）计算机化反演技术的研究及其在金矿勘探中的应用

如上所述，目前国内井中电法（直流电阻率及激发极化法）工作基本上限于以水槽模拟实验为基础的简单“半定量”解释，因而难以确切圈定出场源地质体，更谈不上计算其异常与实测异常去比较和拟合了，这严重限制着方法应用效果的提高。

实际上电法的定量化反演解释工作一直就是一个非常复杂的难题，反演离不开正演做基础，由于地下电场分布的复杂性，能够导出正演解析公式的情况甚少。随着电子计算技术的高速发展及其在物探工作中的应用和普及，地面电法的正演模拟计算技术，从有限元法到边界元法，已经开展了不少工作，取得了明显进展。只是国内这方面的工作还未深入到定量化反演解释工作中。对于井中电法 ρ_s 及 η_s 联合反演的工作尚未见有公开发表的文献。

一、方法的理论基础

广义的反演方法，其基本过程可由如下流程图（图 6-16）表示：

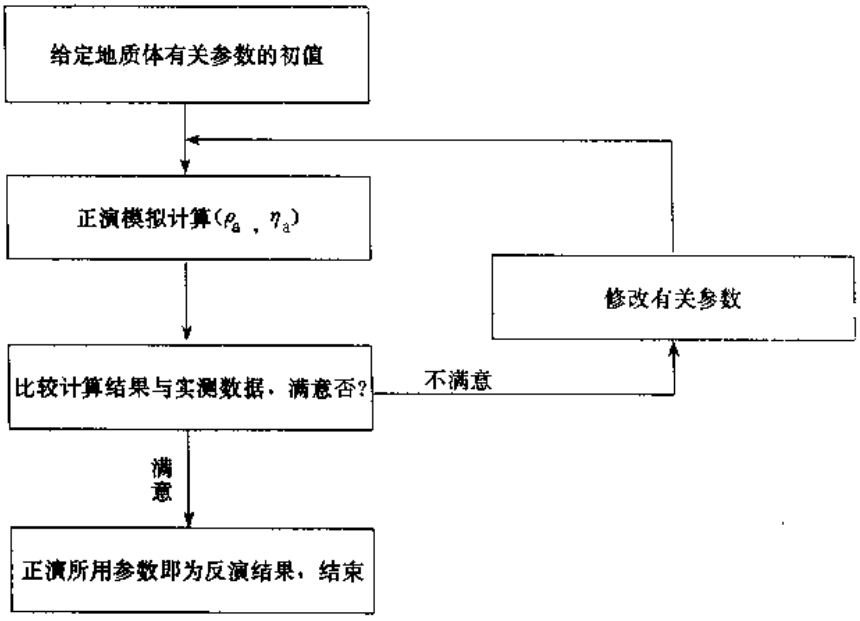

图6-16　反演流程图

要实现这一反演过程，关键在于要有一个理论的正演模拟计算方法。首先它的计算结果必须正确，其次考虑到计算条件上的限制（如计算的速度、存储空间等），正演方法应

使计算速度较快，占用空间省。因而正演模拟计算技术是本专题研究的主要内容，现将正演模拟计算的基本理论简述如下。

1. 富里叶变换对

如图6-17所示，均匀空间介质中有一个水平的二度电性异常体。供电点 A 位于 xoz 平面内。

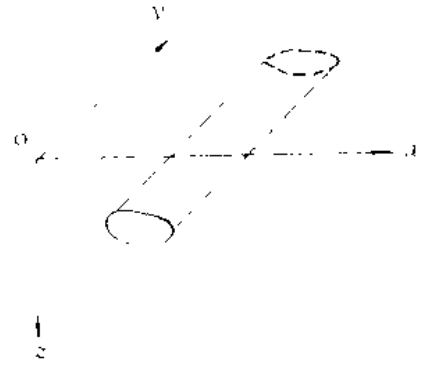

图6-17 均匀介质中的二度水平异常体

观察空间一点 M（x_M、y_M、z_M）的电位函数 U（M），除 A 点外 U 是 y 的连续函数，且当 y 趋于正负无穷时，U 趋向于零（除非异常体是理想等位体），因而一般可以对 U 沿 y 轴进行富里叶变换。以 m 表示 M 在 xoz 平面上的投影，则有：

$$\varphi(m,\lambda) = 2\int_0^{\infty} U(M)\cos\lambda y \,dy \tag{6.2.1}$$

$$U(M) = \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty} \varphi(m,\lambda)\cos\lambda y \,d\lambda \tag{6.2.2}$$

式中：λ 为变换变量，φ 为 U 的变换函数，我们称之为变换域电位，且在不会混淆时简称为电位。φ 和 U 为一对富里叶变换对，知道其中一个，便可由（6.2.1）式或（6.2.2）式求出另外一个。

2. 基本方程

空间域求解电位问题，通常是从拉普拉斯方程出发，对它两边同时做（6.2.1）式所示变换，可以导出：

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} - \lambda^2\varphi = 0 \tag{6.2.3}$$

方程（6.2.3）可称为变换域基本方程，是求解点源二度体电场各种具体问题的基本出发点。λ 虽然是 φ 函数的一个变量，但它在方程（6.2.3）中只起到一个参量的作用，因而在变换域中求解方程（6.2.3）时可以只在 xoz 二维坐标系中讨论，使问题得到简化。

3. 边界条件

求解拉普拉斯方程的边界条件为：

$$U_1|_S = U_2|_S$$

$$\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial U_1}{\partial n}\Big|_S = \frac{1}{\rho_2}\frac{\partial U_2}{\partial n}\Big|_S$$

对它们的两端同时做变换（6.2.1），得到：

$$\varphi_1|_S = \varphi_2|_S \tag{6.2.4}$$

$$\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial\varphi_1}{\partial n}\Big|_S = \frac{1}{\rho_2}\frac{\partial\varphi_2}{\partial n}\Big|_S \tag{6.2.5}$$

（6.2.4）、（6.2.5）两式则是在变换域求解基本方程（6.2.3）的常用边界条件。

4. 基本函数

在空间域中有许多函数满足拉普拉斯方程，其中有一个特别重要，即：

$$U_0(M) = \frac{I\rho}{4\pi R}$$

它是均匀全空间中点源场的电位函数，其中 I 为供电电源强度，ρ 为介质电阻率，R 是电源点 A 与测点 M 的距离。对 U_0 做变换，得到：

$$\varphi_0(m,\lambda) = 2\int_0^{\infty} \frac{I\rho}{4\pi R}\cos\lambda y \mathrm{d}y = \frac{I\rho}{2\pi}\mathrm{K}_0(\lambda r) \qquad (6.2.6)$$

式中：r 为 xoz 平面内 A 点到 m 点（M 点的投影点）的距离。K_0 为第二类零阶变形贝塞尔函数。φ_0 是均匀空间点源场在变换域中的电位表达式，我们称之为变换域基本函数，因为它对求解某些具体问题有很大帮助。

5. 半空间问题——镜像法

为了使正演技术对井中与地面方法均能得到精确解，我们选择镜像原理来处理半空间问题。这样一来就不能套用已有的研究成果，必须从镜像法的观点重新导出正演模拟的计算方法。按镜像原理，在均匀半空间点源场中，变换域电位函数的基本解为：

$$\varphi(m,\lambda) = \frac{I\rho}{2\pi}[\mathrm{K}_0(\lambda r_{Am}) + \mathrm{K}_0(\lambda r_{A'm})] \qquad (6.2.7)$$

式中：$r_{A'm}$ 为点电源 A 的镜像 A' 至 m 点的距离。

我们假定电流强度 $I=1$。又由于我们的讨论大都在变换域中进行，因此将其电位也记为 U，一般不会发生混淆，且较合乎习惯，必要时我们会特别指明变换域电位与空间域电位的区别。此外为方便，我们记：

$$U_0 = U_0(m,\lambda) = \mathrm{K}_0(\lambda r_{Am}) + \mathrm{K}_0(\lambda r_{A'm}) \qquad (6.2.8)$$

于是半空间电位基本解（6.1.7）式用 U 代表可写成：

$$U(m,\lambda) = \frac{\rho}{2\pi}U_0 \qquad (6.2.9)$$

6. 正演模拟近似数值解的求解

对于各种具体的点源二度体问题，依据边界条件在变换域中求解基本方程（6.2.3）求得电位函数 φ（m，λ）后，再由逆变换（6.2.2）求得空间域电位 U（M），进而由常规方法计算视电阻率，或是经等效变换计算视极化率。这些就是利用富里叶变换进行正演模拟计算的基本思路。

其实要在变换域求出电位函数的数学表达式是非常困难的，甚至远远超过在空间域中直接求解，这从前面给出的 U_0 与 φ_0 一对函数的表达式可以略见一斑。U_0 的主体只是简单的 $\frac{1}{R}$ 函数，φ_0 的主体则是很复杂的 K_0 贝塞尔函数（其具体表示后面还要讨论）。但我们可以在变换域根据具体需要求得电位的近似数值解，再由数值逆变换方法求出相应空间域电位的近似数值解（具体方法在后面讨论），而在空间域直接求取电位的近似数值解则是很难做到的。

二、简单形体的视电阻率正演

（一）等效面电荷法

如图 6-18 所示，Γ 与 Γ' 分别为异常体及其镜像的边界。设 Γ 上一点 P 处的电荷密度为 δ_P，Γ' 上 P' 点的电荷密度为 δ'_P，则测点 m 处的电位可以写出为：

$$U(m,\lambda)=\frac{\rho_0}{2\pi}U_0(m,\lambda)+\frac{1}{2\pi}\int_{\Gamma}\delta_P K_0(\lambda r_{Pm})d\Gamma+\frac{1}{2\pi}\int_{\Gamma'}\delta'_P K_0(\lambda r_{P'm})d\Gamma' \quad (6.2.10)$$

式中的 r_{Pm} 与 $r_{P'm}$ 分别为 P 点及 P' 点到 m 点的距离。

如果把异常体以外的区域上的电位记作 U_1，异常体内部的电位记为 U_2，则 U_1 与 U_2 的表达形式都是（6.2.10）式。

将 Γ 和 Γ' 离散化，即把它们分成 n 个互相对应的小线元 Γ_j 和 Γ'_j（$j=1,2,\cdots\cdots n$），n 足够大时，使每个线元都能近似看成直线，线元上的电荷密度 δ_j 与 δ'_j 可以近似为常量。由镜像原理可知 $\delta_j=\delta'_j$。令 $\sigma_j=\delta_j/\rho_0$。

这样可以把（6.2.10）式化成：

$$U=\frac{\rho_0}{2\pi}[U_0+\sum_{j=1}^{n}\sigma_j\int_{\Gamma_j}K_0(\lambda r_{Pm})d\Gamma+\sum_{j=1}^{n}\sigma_j\int_{\Gamma'_j}K_0(\lambda r_{P'm})d\Gamma'] \quad (6.2.11)$$

利用边界条件（6.2.14），并经过数学推导，最终得到：

$$[\frac{2}{k}+\int_{\Gamma_i}K_0(\lambda r)\frac{\partial(\lambda r)}{\partial n}d\Gamma_i]\sigma_i+\sum_{j\neq i}\sigma_j[\int_{\Gamma'_j}+\int_{\Gamma_j}]K_1(\lambda r)\frac{\partial(\lambda r)}{\partial n}d\Gamma_j=\frac{\partial U_0}{\partial n} \quad (6.2.12)$$

式中电位计算点位于 Γ_i 上，$k=(\rho_0-\rho_1)/(\rho_1+\rho_0)$。在（6.2.12）式中取 $i=1,2,\cdots\cdots n$，从而得 n 个方程，联立起来就能求出 σ_i（$i=1,2,\cdots\cdots n$）的值。将 σ_i 值代回到（6.2.11）式便可计算出变换域中 m 点电位值。

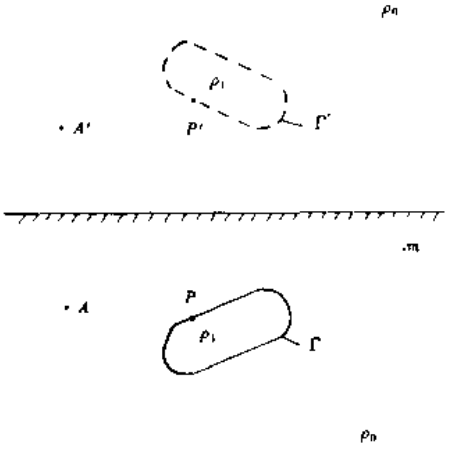

图 6-18　等效面电荷法计算剖面示意图

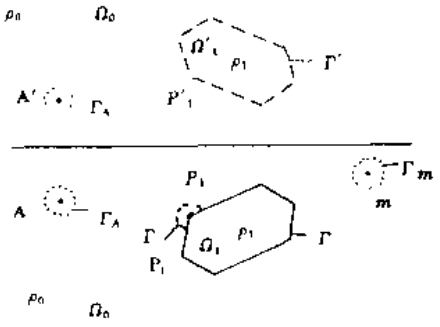

图 6-19　边界元法计算剖面示意图

（二）边界元法

地电条件如图 6-19 所示，边界元法利用格林公式

$$\int_{\Omega}(U\nabla^2\varphi-\varphi\nabla^2U)d\Omega=\int_{\Gamma}(U\frac{\partial\varphi}{\partial n}-\varphi\frac{\partial U}{\partial n})d\Gamma \quad (6.2.13)$$

式中：U、φ 两函数在区域 Ω 内有二阶连续偏导数，Γ 为 Ω_1 的边界。

在变换域中，把异常体及其虚像以外的区域上的电位记为 U，而 Ω_1 与 Ω'_1 的电位记为 U'。

对于给定的测点 m，以及与 m 相距为 r_{mP} 的一点 P，作格林函数：

$$\varphi(P)=\varphi(P,\lambda)=\frac{1}{2\pi}K_0(\lambda r_{mP}) \quad (6.2.14)$$

先考察 U，U 由半空间点源场基本电位及异常体产生的异常电位 U_a 两部分叠加组成：

$$U=\frac{\rho_0}{2\pi}U_0+U_a \tag{6.2.15}$$

把 U 与（6.2.14）式定义的 φ 代入格林公式（6.2.13），但 φ 在 m 点不满足格林公式的先决条件，U 在 A 与 A' 点也一样。我们用半径分别为 r_m，r_A 与 $r_{A'}$ 的三个小圆 Γ_m，Γ_A 和 $\Gamma_{A'}$ 把 m，A 及 A' 三个点包住，在剩下的区域 Ω_0 上就可以应用格林公式了（参见图 6-19）。这时 Ω_0 边界为 Γ、Γ'、Γ_m、Γ_A 和 $\Gamma_{A'}$，还有无穷远的边界，由于无穷远处 U 与 φ 均趋于零而无需考虑，于是有：

$$\int_{\Omega_0}(U\nabla^2\varphi-\varphi\nabla^2U)\mathrm{d}\Omega=(\int_{\Gamma}+\int_{\Gamma'}+\int_{\Gamma_m}+\int_{\Gamma_A}+\int_{\Gamma_{A'}})(U\frac{\partial\varphi}{\partial n}-\varphi\frac{\partial U}{\partial n})\mathrm{d}\Gamma \tag{6.2.16}$$

三个奇异点附近边界上的积分经数学运算，可以得到：

$$\lim_{r_m\to 0}\int_{\Gamma_m}(U\frac{\partial\varphi}{\partial n}-\varphi\frac{\partial U}{\partial n})\mathrm{d}\Gamma=-U(m)$$

$$\lim_{r_A\to 0}\int_{\Gamma_A}(U\frac{\partial\varphi}{\partial n}-\varphi\frac{\partial U}{\partial n})\mathrm{d}\Gamma=\rho_0\varphi(A)$$

$$\lim_{r_{A'}\to 0}\int_{\Gamma_{A'}}(U\frac{\varphi}{\partial n}-\varphi\frac{\partial U}{\partial n})\mathrm{d}\Gamma=\rho_0\varphi(A')$$

（6.2.16）式最终简化为

$$(\int_{\Gamma}+\int_{\Gamma'})(U\frac{\partial\varphi}{\partial n}-\varphi\frac{\partial U}{\partial n})\mathrm{d}\Gamma+\rho_0[\varphi(A)+\varphi(A')]-U(m)=0$$

由于 $\rho_0[\varphi(A)+\varphi(A')]=\frac{\rho_0}{2\pi}[\mathrm{K}_0(\lambda r_{mA})+\mathrm{K}_0(\lambda r_{mA'})]=\frac{\rho_0}{2\pi}U_0(m)$

故上式又可写作：

$$U(m)=\frac{\rho_0}{2\pi}U_0(m)+(\int_{\Gamma}+\int_{\Gamma'})(U\frac{\partial\varphi}{\partial n}-\varphi\frac{\partial U}{\partial n})\mathrm{d}\Gamma \tag{6.2.17}$$

由此可见，只要我们知道了边界 Γ 与 Γ' 上的 U 及其偏导数 $\frac{\partial U}{\partial n}$ 的分布，就确定了 m 点的电位 $U(m)$。

为了求出 U 及 $\frac{\partial U}{\partial n}$ 在边界上的分布，我们把 m 点移到边界 Γ 上，如图 6-19 中的 P_1 点，利用（6.2.17）式并将奇异点附近积分经处理后，得到：

$$\frac{\omega_{P_1}}{2\pi}U(P_1)=\frac{\rho_0}{2\pi}U_0(P_1)+\int_{\Gamma}(U\frac{\partial\varphi_{P_1}}{\partial n}-\varphi_{P_1}\frac{\partial U}{\partial n})\mathrm{d}\Gamma+\int_{\Gamma'}(U\frac{\partial\varphi_{P_1}}{\partial n}-\varphi_{P_1}\frac{\partial U}{\partial n})\mathrm{d}\Gamma' \tag{6.2.18}$$

式中 ω_{P_1} 为 P_1 点对 Ω_0 区域的张角。

（6.2.17）及（6.2.18）式构成普通边界元法的理论公式。

但是（6.2.17）及（6.2.18）式还可进一步简化。为此，我们对同一个 P_1 点，在异常体的内部即 Ω_1 上对其电位 U' 应用格林公式，并利用边界条件可以得到：

$$-\frac{\omega'_{P_1}}{2\pi}U(P_1)=\int_{\Gamma}U\frac{\partial\varphi_{P_1}}{\partial n}\mathrm{d}\Gamma-\frac{\rho_1}{\rho_0}\int_{\Gamma}\varphi_{P_1}\frac{\partial U}{\partial n}\mathrm{d}\Gamma \qquad (6.2.19)$$

式中 ω'_{P_1} 是 P_1 点对 Ω_1 所张的平面角。此外（6.2.19）式中的 $\vec{n}$ 与（6.2.18）式中的 $\vec{n}$ 原本应该反向，但为了两式统一，我们特别规定前者与后者一致，因而左端出现一个负号。

事实上我们还可以把 m 点取在 Γ' 上 P_1 的镜像点 P'_1 处，对 Ω'_1 区域应用格林公式，由于对称性，Γ' 上的电位及其偏导数与 Γ 上的完全对应相等，因而可得：

$$-\frac{\omega'_{P'_1}}{2\pi}U(P'_1)=\int_{\Gamma'}(U\frac{\partial\varphi_{P_1}}{\partial n}-\frac{\rho_1}{\rho_0}\varphi_{P'_1}\frac{\partial U}{\partial n})\mathrm{d}\Gamma' \qquad (6.2.20)$$

式中 $\omega'_{P'_1}$ 是 P'_1 点对 Ω'_1 所张平面角。注意到对称性，$\omega'_{P'_1}=\omega'_{P_1}$，$U(P'_1)=U(P_1)$，$\int_{\Gamma}U\frac{\partial\varphi_{P_1}}{\partial n}\mathrm{d}\Gamma=\int_{\Gamma'}U\frac{\partial\varphi_{P'_1}}{\partial n}\mathrm{d}\Gamma'$ 以及 $\int_{\Gamma}\varphi_{P_1}\frac{\partial U}{\partial n}\mathrm{d}\Gamma=\int_{\Gamma'}\varphi_{P'_1}\frac{\partial U}{\partial n}\mathrm{d}\Gamma'$，所以（6.2.19）与（6.2.20）完全等价；（6.2.19）式中的 Γ 上的积分与（6.2.18）式中的 Γ 上的积分结果相同，但（6.2.20）式中 Γ' 上的积分则与（6.2.18）式中 Γ' 上的积分结果不同。

现在我们把张角 ω 的定义作一个推广，即当 P 点在 Ω 之外，我们则规定 P 对 Ω 的张角 $\omega_P=0$。这样一来，我们也可以对（6.2.20）式作一个推广，把 P'_1 点移到区域 Ω'_1 的外面 Γ 上的 P_1 点处，于是由于 P_1 点对 Ω'_1 的张角为 0，得到

$$\int_{\Gamma'}U\frac{\partial\varphi_{P_1}}{\partial n}\mathrm{d}\Gamma'=\frac{\rho_1}{\rho_0}\int_{\Gamma'}\varphi_{P_1}\frac{\partial U}{\partial n}\mathrm{d}\Gamma' \qquad (6.2.21)$$

把（6.2.19）式与（6.2.21）式代入到（6.2.18）式中可以消去关于 $\frac{\partial U}{\partial n}$ 的积分项，得到：

$$(\frac{\omega_{P_1}}{2\pi}+\frac{\rho_0}{\rho_1}\frac{\omega'_{P_1}}{2\pi})U(P_1)=\frac{\rho_0}{2\pi}U_0(P_1)+(1-\frac{\rho_0}{\rho_1})(\int_{\Gamma}+\int_{\Gamma'})U\frac{\partial\varphi_{P_1}}{\partial n}\mathrm{d}\Gamma \qquad (6.2.22)$$

如将 P_1 点自边界 Γ 上移到 Ω_0 域中 m 点处，此时 $\omega_m=2\pi$，$\omega'_m=0$，由（6.2.22）式可得到：

$$U(m)=\frac{\rho_0}{2\pi}U_0(m)+(1-\frac{\rho_0}{\rho_1})(\int_{\Gamma}+\int_{\Gamma'})U\frac{\partial\varphi_m}{\partial n}\mathrm{d}\Gamma \qquad (6.2.23)$$

由于（6.2.22）及（6.2.23）式中不出现 $\frac{\partial U}{\partial n}$ 积分项，使得离散化后的数值计算工作量大为减少，故称之为“简化边界无法”。至于边界的具体离散化方法同普通边界元法，故不赘述。

（三）几个计算技术问题

1．贝塞尔函数 K_0 与 K_1 数值的计算

无论是等效面电荷法还是边界元法，在求解其相应未知量和最后计算变换电位 U_m 时，均会遇到大量含有第二类变形贝塞尔函数 K_0 和 K_1 的积分。我们是用高斯积分法来计算的，因此，必须反复、大量地计算这两个函数的值。对此我们经过反复探索，大量试算后采用：

$$K_0(x) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2x}}e^{-x}\left[1-\frac{1}{8x}+\frac{9}{128x^2}-\frac{46.8}{1024x^3}\right]$$

$$K_1(x) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2x}}e^{-x}\left[1+\frac{3}{8x}-\frac{14}{128x^2}+\frac{50}{1024x^3}\right]$$

经验证，两式对于 $2 \leqslant x \leqslant 9.99$ 范围内计算出的函数值，与精确值的相对误差在万分之一左右。它们的计算速度当然也是非常理想的。

2. 数值富里叶逆变换

前面解决了计算 $\varphi(m, \lambda)$ 的技术问题，这里的任务是找出由 φ 计算 U 的方法，即解决数值逆变换的问题。

对于二度体，只要了解了供电点源所在的横截剖面上电场的分布情况就已足够了，即求

$$U(M)\big|_{y=0} = \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty}\varphi(m,\lambda)\mathrm{d}\lambda$$

其数值积分的一般公式为：

$$U(m) = \frac{1}{\pi}\sum_{i=1}^{n}\varphi(m,\lambda_i)\cdot C_i \qquad (6.2.24)$$

提高（6.2.24）式计算精度的关键是选择适当的 λ_i 及其相应的积分系数 C_i。在这方面前人已经作了不少工作，提出了各自的 λ_i 和 C_i 数值。

我们通过典型的变换

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty}2K_0(\lambda r)\mathrm{d}\lambda \qquad (6.2.25)$$

都作了验证，发现结果都不够理想，误差比较大。正演最终是为反演服务的，反变换带来的正演误差会直接对反演结果产生很大影响，因此我们自己又做了新的探索。

（6.2.25）式是一个广义积分，而且积分上限本身和被积函数在积分下限均无界。把它分成两部分：

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{\pi}\int_0^{1}2K_0(\lambda r)\mathrm{d}\lambda + \frac{1}{\pi}\int_1^{\infty}2K_0(\lambda r)\mathrm{d}\lambda$$

分别作变量替换 $\lambda = e^{-t}$ 与 $\lambda = t+1$ 后得：

$$\frac{1}{r} = \frac{2}{\pi}\int_0^{\infty}K_0(e^{-t}r)e^{-t}\mathrm{d}t + \frac{2}{\pi}\int_0^{\infty}K_0[(t+1)r]\mathrm{d}t$$

对这两个广义积分分别应用经典的 4 点和 3 点高斯型拉盖尔求积公式：

$$\int_0^{\infty}e^{-x}f(x)\mathrm{d}x = \sum_{k=1}^{4}C_k^{(4)}f(\xi_k^{(4)}),\int_0^{\infty}g(x)\mathrm{d}x = \sum_{k=1}^{3}C_k^{(3)}e^{\xi_k^{(3)}}g(\xi_k^{(3)})$$

把所给的 $C_k^{(n)}$，$\xi_k^{(n)}$ 重新反算回原来的表达形式，得到：

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{\pi}\sum_{i=1}^{7}C_i\cdot 2K_0(\lambda_i\cdot r) \qquad (6.2.26)$$

其中 λ_i 与 C_i 见下表：

i	1	2	3	4	5	6	7
λ_i	0.00008313283	0.01070954	0.1745121	0.7243014	1.415774	3.294280	7.289945
C_i	0.0005392947	0.03888791	0.3574187	0.6031541	1.077693	2.762143	5.601095

（6.2.26）式算出的结果在 $r=1$ 附近精度很好，但若 r 离开 1 向小或向大变化，均会使误差增大。（6.2.26）式的计算误差与其计算结果之间存在非线性变化规律，我们经过试验探索了一套分段线性改正方法。经过分段线性改正，变换（6.2.25）的计算结果对于 $0.1<r<1000$ 这一范围其误差均在千分之一以内。

（四）两种正演方法计算实例与计算速度比较

为了节省篇幅，这里只给出 2 个有代表性的计算结果，如图 6-20 及图 6-21 所示。

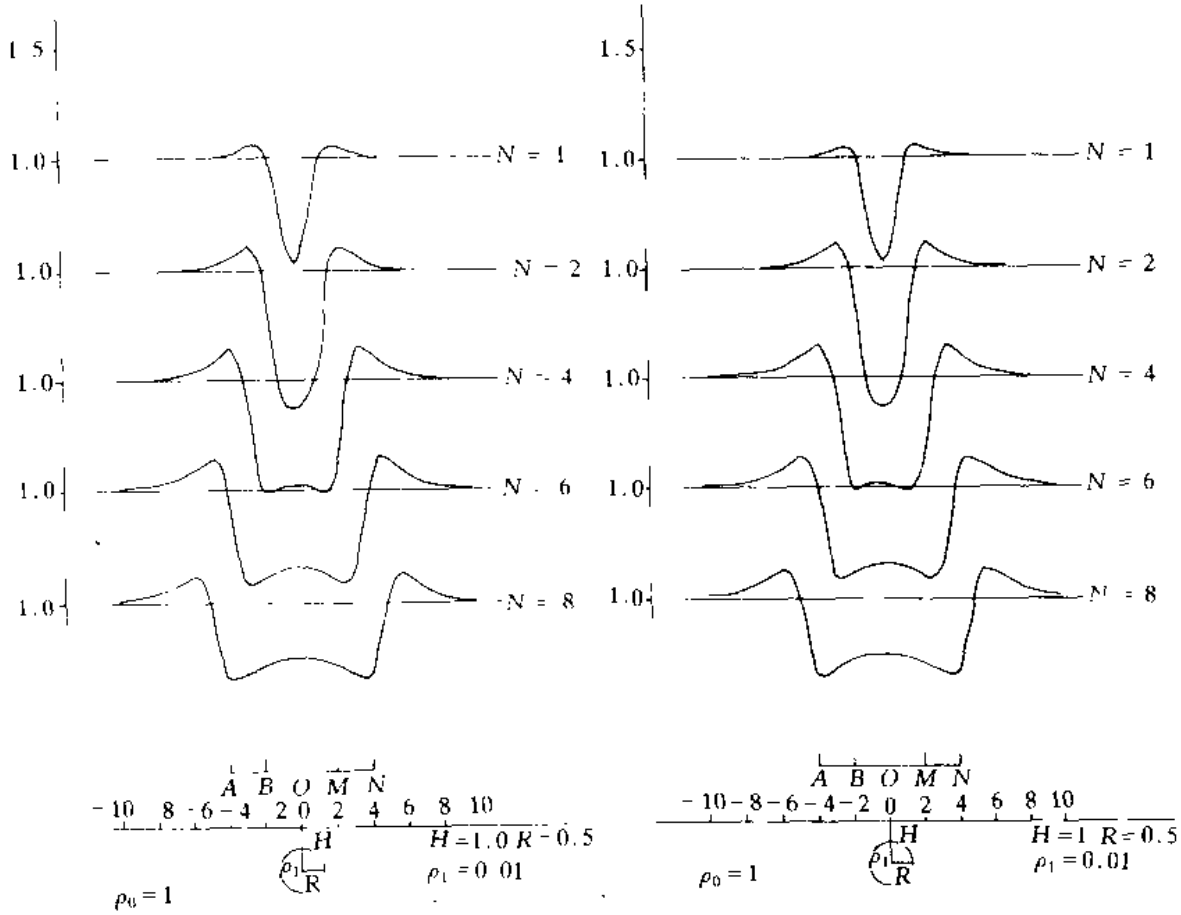

图 6-20　面电荷计算结果
（低阻水平圆柱体、偶极剖面）

图 6-21　边界元法计算结果
（低阻水平圆柱体、偶极剖面）

面电荷法与边界元法计算结果相当一致，可说明两种计算方法的正确性。

至于计算速度在 VAX/11—750 上面电荷法的计算时间比边界元法多了两倍，简化边界元法运算速度比普通边界元法还要快三分之一左右，而运算结果的精度与普通边界元法相差不多。

三、复杂形体的视电阻率正演

（一）复杂形体的处理方法

所谓复杂形体指的是在工作剖面上存在多个异常体，以及虽然只有一个异常体，但其

内部有明显的电性分区，或是截面形状复杂等。

复杂形体总能看成是由一些截面形状规则的简单形体组合而成的。

经过比较，我们认为用矩形体来进行组合较为理想。与三角形组合相比，边界及组合体的个数都会少得多，从而离散化，形成系数矩阵与解方程等计算过程既简单又快速得多。

考虑到后面要讨论的反演的需要，这样作也是适宜的。由于正演的复杂和困难，要想由计算机直接自动反演出电法勘探地质体的空间范围和电性参数，目前还很难做到。我们考虑采用以下方案：依据观测曲线特征初步圈定出地质体可能赋存的较大空间范围，将它分成若干简单区域，用计算机自动反演出各自的电参数；根据反演的结果对分区情况进行调整或重新组合，以缩小反演范围，继续进行电参数自动反演；直至得到较好的拟合结果。显然在这样做时，每次将参加反演的区域分成若干个矩形比其它形状来得方便。

（二）组合形体的正演技术及计算实例

我们先来研究只有两个相互分离异常体组合的情形，然后将结果推广到其它情形。

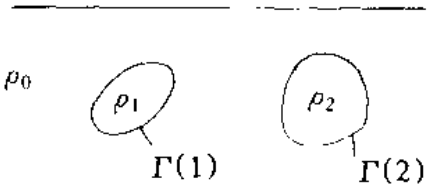

图 6-22　两个异常体的剖面

如图 6-22 所示，这两个异常体内区域上的电位分别记 $U^{(1)}$和 $U^{(2)}$，围岩中的电位记为 U，边界条件为：

$$U(m)\big|_{m\in\Gamma(1)} = U^{(1)}(m)\big|_{m\in\Gamma(1)}$$

$$\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial U(m)}{\partial n}\bigg|_{m\in\Gamma(1)} = \frac{1}{\rho_1}\frac{\partial U^{(1)}(m)}{\partial n}\bigg|_{m\in\Gamma(1)}$$

$$U(m)\big|_{m\in\Gamma(2)} = U^{(2)}(m)\big|_{m\in\Gamma(2)}$$

$$\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial U(m)}{\partial n}\bigg|_{m\in\Gamma(2)} = \frac{1}{\rho_1}\frac{\partial U^{(2)}(m)}{\partial n}\bigg|_{m\in\Gamma(2)}$$

这里仍然是在变换域中讨论，并且为了简便省去了变换量 λ 没写。

我们只研究边界元法的正演技术。还是按镜像原理加入虚电源与虚异常体，虚异常体的边界分别为 Γ'（1）和 Γ'（2）。在异常体及其虚像以外的（U 所在）区域上应用格林公式，可以导出简化边界元法的计算公式：

$$\left(\frac{\omega_m}{2\pi}+\sum_{l=1}^{2}\frac{\rho_0}{\rho_l}\frac{\omega_m^{l}}{2\pi}\right)U(m)=\frac{\rho_0}{2\pi}U_0(m)+\sum_{l=1}^{2}\left(1-\frac{\rho_0}{\rho_l}\right)\left(\int_{\Gamma(1)}+\int_{\Gamma(2)}\right)U\frac{\partial\varphi}{\partial n}\mathrm{d}\Gamma \qquad (6.2.27)$$

此式不难推广到 2 个以上异常体的情况。

下面仅举两个正演计算的实例。

图 6-23 中的异常体是一个，图 6-24 中的异常体实际上也是一个，但人为地把它分成 4 个电阻率相同的异常体来计算。两图对比可知，它们的计算结果很难看出有任何差异，说明了我们叠加组合计算方法是正确的。

四、视极化率正演

激电法是金矿勘探中电法应用的主要手段，井中电法的情形当然也不例外。

找金工作经常遇到的极化体属于体极化类型，其正演问题通常都是用等效电阻率法来

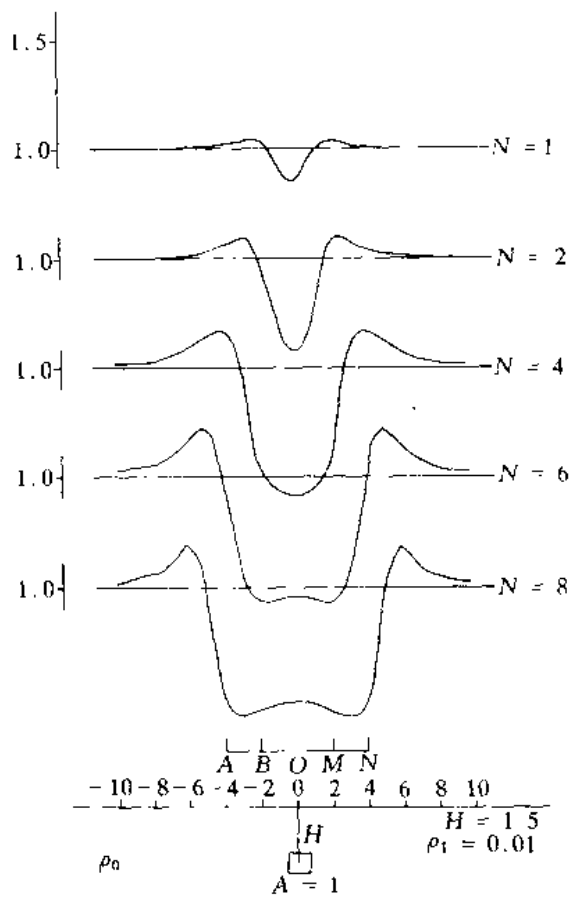

图 6-23　单个水平方柱体上的偶极剖面

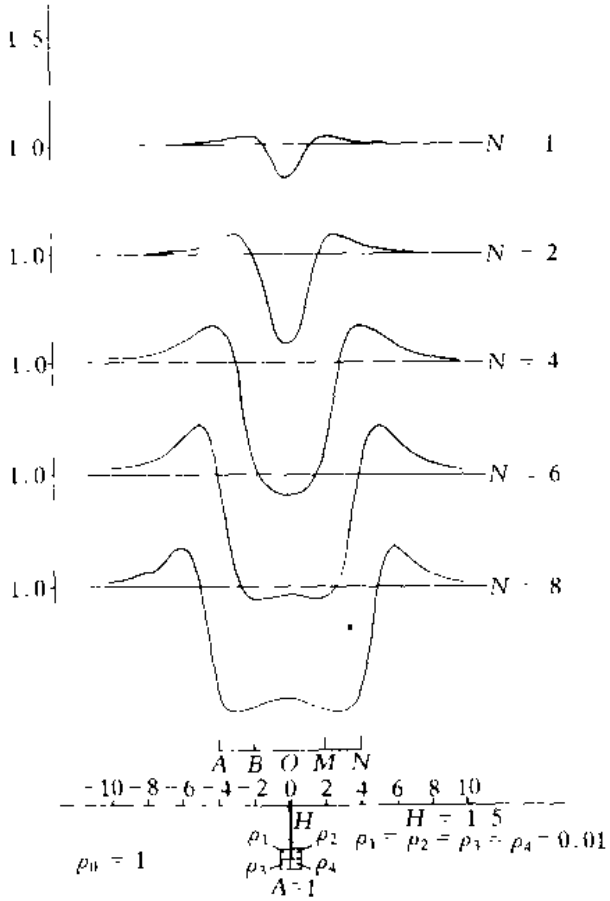

图 6-24　四个组合在一起的电阻率相同异常体上的偶极剖面

解决。

在有极化体存在时，地下电场中除有普通一次场成分外，还叠加有极化体产生的二次电场，它们的总和称为极化场。在供电饱和时，极化场电位也满足拉普拉斯方程，体极化类型的极化场还满足如下边界条件：

$$U^{(1)}\Big|_{s} = U^{(2)}\Big|_{s},\quad \frac{1}{\rho_1}\eta_1\frac{\partial U^{(1)}}{\partial n}\Big|_{s} = \frac{1}{\rho_2}\eta_2\frac{\partial U^{(2)}}{\partial n}\Big|_{s}$$

如果我们引入等效电阻率 $\rho^* = \frac{\rho}{1-\eta}$，并代入第二个边界条件，就会发现极化场电位的边界条件与一次场电位的在形式上完全一样，因而也就能用同样方法求得极化场电位。

由此可见，有前面视电阻率正演技术做基础，体极化类型的视极化率正演在理论上没有新的实质性的困难。真正的困难在于具体编写实用的计算程序。要想实现反演计算，正演计算的速度就必须足够快。为此目的，我们花费大量时间和精力对视极化率计算程序进行优化处理，取得了较好效果，使正演速度得以满足反演计算的需要。

下面举两个简单的计算实例。

图 6-25 与图 6-26 都是模拟计算的水平方柱体用中梯装置测量的视极化率曲线。图 6-25 中的矩形极化体电阻率与围岩相等，可以看到明显的视极化率异常位于极化体正上方。

图 6-26 中极化体电阻率比围岩高 100 倍，因而在极化体上方有明显的高阻异常，但极化率异常却很小。当 $\rho_1/\rho_0 \ll 1$ 时，亦有类似现象，即所谓饱和效应。由此可见为了可靠的评估地质体激发极化率 η，从而估算其金属矿物含量，η_s 及 ρ_s 联合反演是必要的。

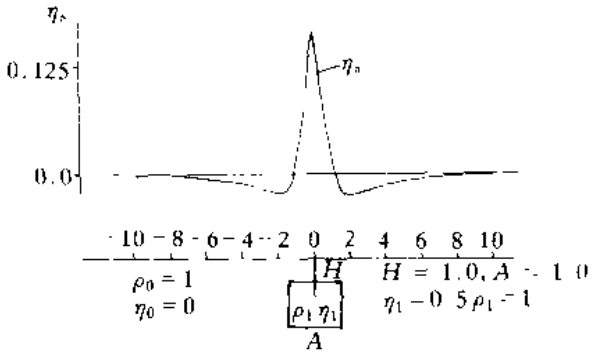

图 6-25 等阻极化体上的中梯测量

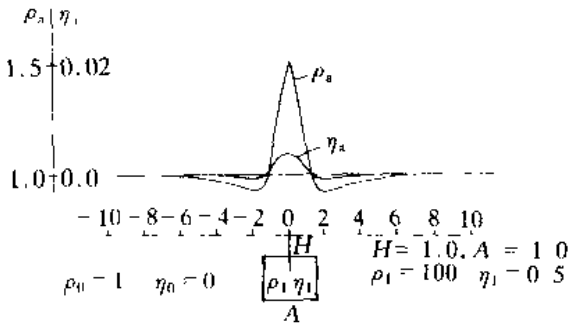

图 6-26 高阻极化体上的中梯测量

五、电参数反演及应用实例

（一）反演方案的选择及反演技术

电法要反演的参数可以分为两类：一类是几何参数，一类是电性参数，它们共同影响电法勘探的观测数据。在一般情况下这些参数都是未知的，但要想用计算机自动修改参数的方法把这些参数全部反演出来，其计算量之大，至少我们目前的计算机条件是不能容许的。

从我们前面的研究还可以看到，如果修改了几何参数，那么整个正演过程就需从头作起，包括边界剖分和全部的积分运算。如果几何参数确定不变，那么对边界的剖分和出相互位置所决定的大量积分运算的值就都不会改变。这时如要改变电参数，只需要形成求解未知量的系数矩阵时，给积分值乘以变化以后的系数再求和即可。数值积分乃是正演计算中花费时间最多的运算，为在运算速度上保证反演计算的实现，势必要尽量减少数值积分的计算量。

鉴于以上分析，我们采用以计算机自动反演电参数为主，人工修改几何参数为辅的反演方案。对于地下情况完全未知，又很难根据观测数据作出判断时，如果计算机条件允许，可以把较大的区域分解成许多小区域进行反演。如果某些区域反演出的参数相近或与围岩差不多，那么在新的一轮反演中把这些区域合并或划成围岩；同时根据各相邻区域电参数反演结果的变化情况也可以重新划分反演区域。如此循序渐进，当能逐渐缩小靶区，乃至较好地圈定出地质体。当然这样做除了要求计算机运算速度足够快和能够提供所需的存贮空间外，为减少多解性还要求有足够多的精确的信息量。这也是开展井中电法工作与地面电法工作相互配合的优势所在。

反演技术引用了带有马奎特阻尼系数和加权矢量的电参数反演公式。为了提高反演速度，对反演中的正演程序作出了专门优化，最大可能地避免重复计算，从而极大地提高了运算速度。

为了提高反演的成功率，我们对反演参数的控制方式专门进行了研究，发现在最初几次迭代时只用其中部分参数进行反演，以后改为对另外一些参数反演或逐步增加反演参数，这样不仅可以提高反演成功率，通常还能加快反演速度。

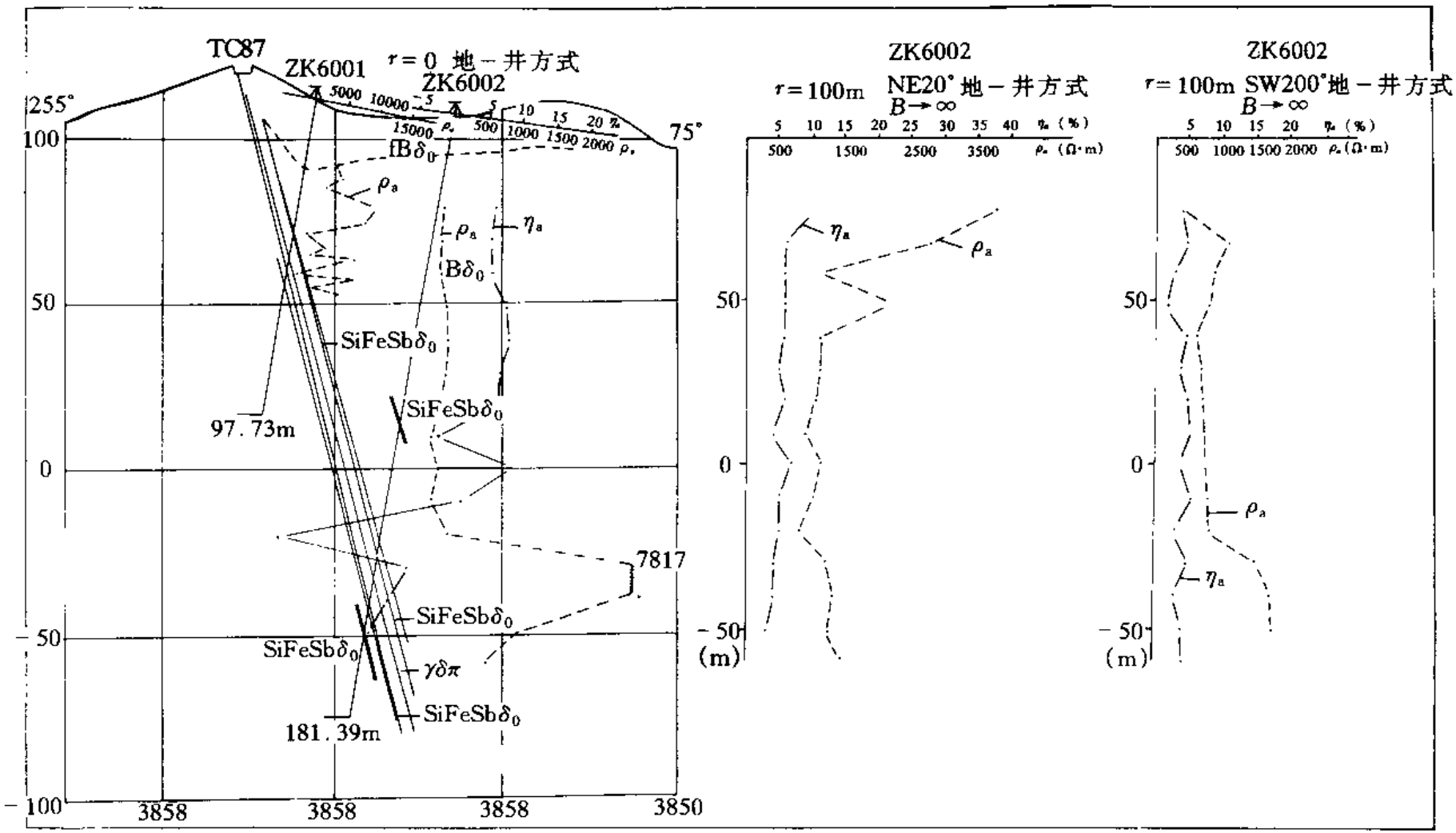

图 6-27　董家口工区 60 线井中激电、地质综合剖面图

针对初值选取的不同不仅会影响反演收敛速度，有时还会收敛于假值，我们的办法是通过给以不同的初值以及用不同控制方法进行反演，从中选取符合实际地质条件且拟合程度好的作为最终反演结果。

（二）井中 ρ_s 和 η_s 反演应用实例

①理论模型的反演结果表明，只要没有上面提到的“饱和效应”，初值误差如电阻率为100%，极化率为50%时，反演迭代一般不超过10次便收敛于真值。

②反演实例。作反演计算的实际资料来自冶金部中南地勘局606队在鄂东南董家口工区找金钻孔（6002孔）的井中电法成果。该孔激电、电阻率、地质综合剖面见图6-27。该区金矿为产于硅化，黄铁矿化石英闪长岩中的含金硫化物石英脉。在与该孔有关的报告中称：“矿化带及其上下盘围岩一般对应高极化和高密度值，具备物探井中电法间接找金的物理前提”；“6002孔井中激电曲线于井深110m段出现上正下负的反“S”形异常。该孔岩心标本综合参数曲线无异常，表明井中无矿化带存在，但井旁可能存在矿化带。推测矿化带可能赋存于NW—SE方位上。”

对井口供电（$r=0$），井中梯度测量的数据进行反演计算。根据已知地质情况并对井中全部 ρ_s 及 η_s 曲线对比分析得出围岩 ρ 及 η 值及异常体产状后，进行反演拟合，反演结果如图6-28及图6-29所示，在6001孔与6002孔之间应存在一高极化脉状体（厚7m，极化率为31%），推测为含金硫化物矿化带。

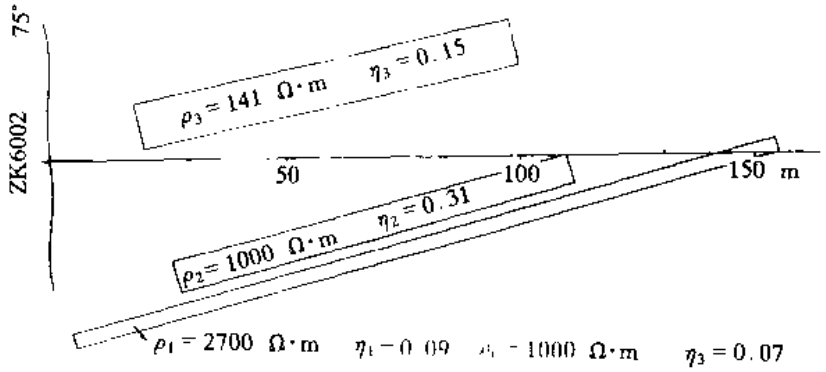

图6-28 反演结果（一）

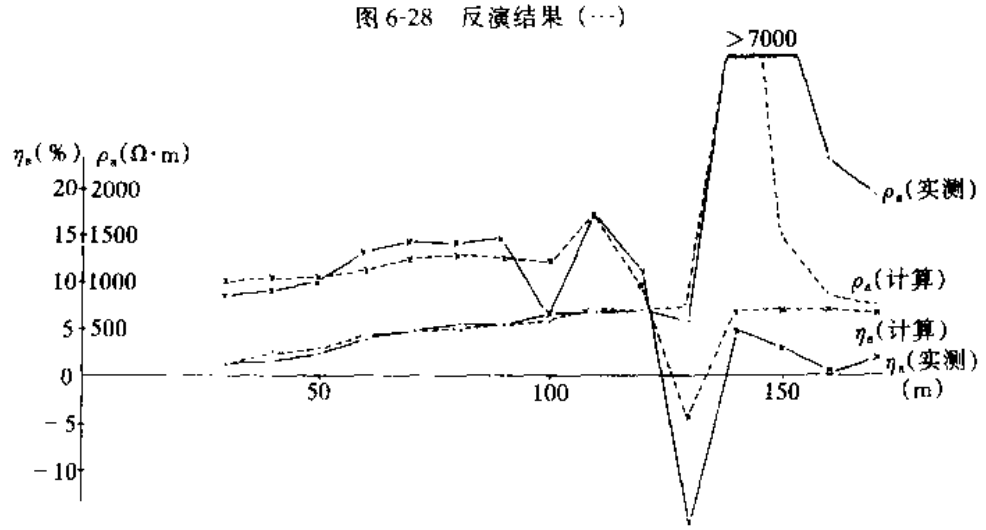

图6-29 反演结果（二）

这个反演结果已知数据少，虽然不能充分说明反演的应用效果，但证实了原来定性推断的可靠性，并给出了该矿化带的具体位置与极化率，以便工程验证寻找盲矿体。

第三节　井中电磁波法层析技术在金矿床上的应用研究

1977 年美国洛伦兹、利物莫尔国家实验室（LLL）的 J. R. Lytle 等人提出并发表了利用地下电磁波法层析技术研究双孔控制的剖面。我国 1978 年开始引进，并研究、开发了自己的地下电磁波法层析系统。80 年代以来，这套系统应用于工程物探、矿区水文勘查、配合煤矿开采探测陷落柱和小构造、金属和非金属矿的勘查等，取得了地质效果、社会和经济效益。就实用而言，我国的地下电磁波层析技术应在国际先进之列。

与医用 CT 相比，地下电磁波法 CT 存在不少困难和问题，详见表 6-2。

表 6-2

	医用 X 光 CT	地下电磁波法 CT
工作波长	10^{-11}m	200—2m
目标尺寸	$>10^{-3}$m	>1m
探测范围	$<3\times10^{-1}$m	10^{1}—10^{3}m
目标/波长	$10^{-3}/10^{-11}=10^{8}$（大目标）	1/2—1/200（相对为小目标）
范围/波长	$10^{-1}/10^{-11}$　10^{10}	$10^{3}/10^{0}$—$10^{1}/10^{2}$（10^{3}—10^{-1}）
波区	远区	中区—近区
反演理论	射线模型	射线模型不能普遍适用
探测方位	全方位	非全方位

用层析技术直接找金矿，原理上说是困难的。但金矿床或赋存于一定岩性之中，或受成矿构造控制，或与其它金属矿物共生等，利用地下电磁波法层析技术研究这些目标，间接研究金矿是可能的。间接研究金矿床也还存在特殊的问题，主要的有：矿体小、控矿构造规模小，或含矿目标相对围岩呈高阻电性等，这是本课题主要的研究内容。

一、反映金矿地质状况的几个物理模型

1. 模拟构造控矿的物理模型

目的：研究大而厚的构造带在地下电磁波法层析成像时的现象和规律。

模型：二维，剖面形态见图 6-30，虚线框代表较薄的构造带，实线框代表较厚的构造带。

参数：围岩电参数，$\rho_1=n_1\times10^{3}\Omega\cdot$m，$\varepsilon_{r_1}=25$；目标电参数，$\rho_2=n_2\times10^{-1}\Omega\cdot$m，$\varepsilon_{r_2}=49$；$n_1$，$n_2$ 为正整数。

网格划分：$k\times l$，ΔX、ΔY、k、l 均可变。

发射数：$k/2$ 四舍五入取整；T_i：第 i 个接收点。

接收数：$k+1$，R_j：第 j 个接收点。

模型正反演要求：

①根据给定的电阻率和相对介电常数值，查表求出相应的吸收系数 β。

②利用远区场公式，求出已知条件下场值的分布即：

$$E = E_0 \frac{e^{jkr}}{r} f(\theta)$$

式中：E 为计算出的场值，代表观测值；E_0 为代表发射系统性能的辐射条件；r 为发、收点间的距离；$f(\theta)$ 为天线的方向性函数。

③用CT模块反演“观测值”，研究反演结果与模型条件的符合程度。

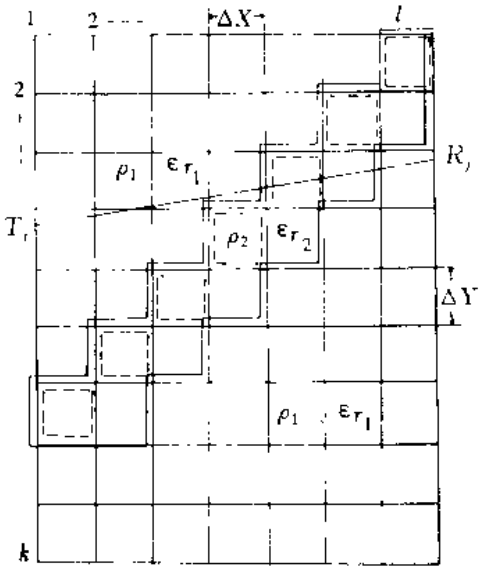

图 6-30　构造控矿模型

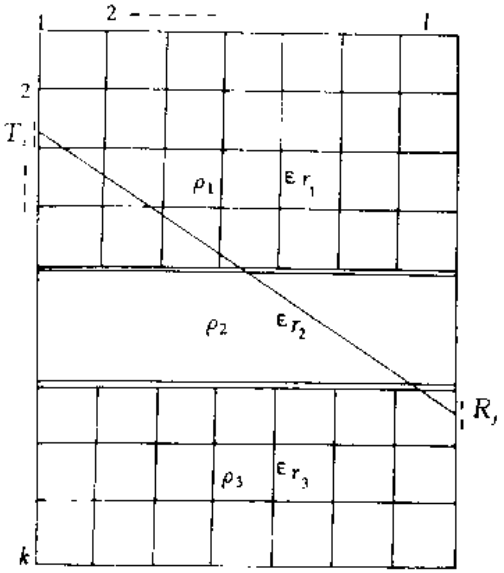

图 6-31　地层控矿模型

2. 模拟地层控矿的物理模型

目的：研究对电性差异不同的地层，电磁波法的分辨能力。

模型：二维，剖面状态见图 6-31，实线框代表目标地层。

参数：ρ_2，ε_{r2}代表目标地层电性参数，作三次变动，即：

ρ_2：$n_2 \times 10^3 \Omega \cdot m$，$n'_2 \times 10^1 \Omega \cdot m$，$n''_2 \times 10^{-1} \Omega \cdot m$，$\varepsilon_{r2} - 49$；

上围岩：$\rho_1 = n_1 \times 10^3 \Omega \cdot m$，$\varepsilon_{r1} = 16$；下围岩：$\rho_3 = n_3 \times 10^2 \Omega \cdot m$，$\varepsilon_{r3} = 36$；$n_1$、$n_2$、$n'_2$、$n''_2$、$n_3$ 均可变化。

3. 模拟不同尺寸共生矿体的物理模型

目的：研究电磁波对不同尺寸目标的分辨能力

模型：二维，剖面中的形态见图 6-32，实、虚线和斜线体分别代表三种目标在纵剖面中的尺寸。

参数：$\rho_1 = n_1 \times 10^3 \Omega \cdot m$，$\varepsilon_{r1} = 25$；$\rho_2 = n_2 \Omega \cdot m$。

4. 模拟小构造产状变化和岩脉的物理模型

目的：研究不同产状小构造或脉岩的场值特征，和 CT 反演的效果和问题。

模型：三维，以不同大小、不同倾角的小板，在不同的电性条件下，分别代表小构造和岩脉。表示大小的方法为：（长方向单位数×宽方向单位数×高方向单位数）×单位长度。

表示倾角的方法：板面与垂轴的夹角 θ，$\theta = 0°$代表直立板，$\theta = 90°$代表水平板，$\theta = 45°$、$135°$等，代表倾斜板，θ 符号为 sata。

SX：代表板中心在 x 方向的位置；SZ：代表板中心在 z 方向的位置；M：代表目标；r_0：代表直达波路程；r_1、r_2：代表散射波路程。

参数：ρ_1、ε_{r1}为围岩电参数，ρ_2、ε_{r2}为目标电参数，均随具体模型而变，详见模型正、反演结果图。

钻孔分布及发、接布置见图 6-33，n 为接收点数。

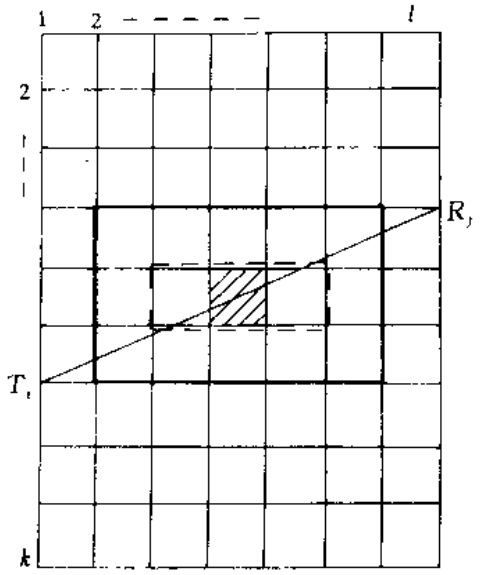

图 6-32　共生矿体模型

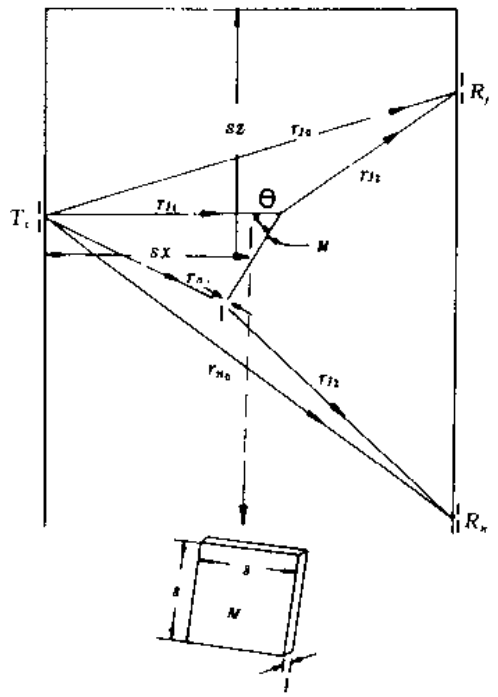

图 6-33　倾斜板模型

二、射线模型的反演结果简介

射线模型具体指模型 1、2、3，是在电磁波传播几何光学近似理论基础上来讨论问题的。

工作频率为 1—9MHz，相应地在空气中的波长为：λ_1—λ_9 = 300m—33m，其在岩、矿媒质中的波长为 λ'_1—λ'_9 = 100m 至 60m—11m 至 6.6m。

对前述 3 个二度体物理模型 1，2 及 3 的不同尺寸和电参数 9 个频率的多重（即多发射点）正演结果（共 72 组数据），分别用吸收系数代数重现法 ART-β 与吸收系数联合迭代重现法 SIRT-β 作了反演。反演效果都很好，比较而言，ART-β 法更好些。其中模型 3 最小尺寸的低频率（1MHz）的反演结果如图 6-34 可作代表。这些结果说明上述 1、2、3 模型，符合射线条件，所以反演结果很好。

三、散射模型的正演计算及 CT 反演结果

散射模型的概念是：观测到的场值 $\dot{E}$ 是直达波场值 $\dot{E}_i$ 和目标散射波场值 $\dot{E}_s$ 的叠加，即 $\dot{E} = \dot{E}_i + \dot{E}_s$。目标产生的散射场，与目标同围岩电学性质的差异，目标的尺寸、形态等几何因素有关，且受叠加场 $\dot{E}$ 的制约。

为了研究小目标问题，利用散射模型正问题库开展了小目标模型 4 散射模型正演计算并用 CT 方法反演，研究其对目标反映的规律。

（一）不同尺寸、倾斜板的叠加场正演计算结果和 CT 反演现象

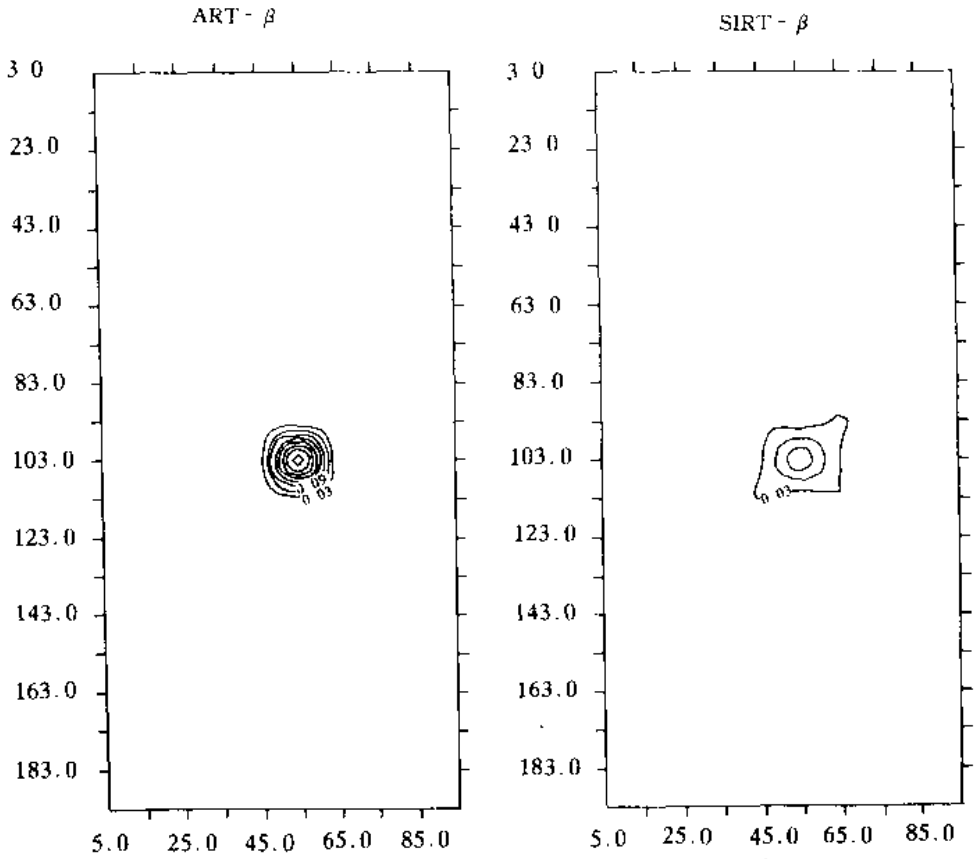

图 6-34　共生矿体模型 CT 反演结果

所谓小目标，首先它是三维模型。研究模型 4 的目的，首先是要看到散射模型场的现象与射线模型场的现象的异同，其次要研究用射线 CT 法反演叠加场的正演数据能否以吸收系数的分布反映目标的位置、尺寸、形态等参数，是否与射线模型规律一致，如果不一致，散射模型正演场值 CT 反演结果的规律是什么?

对模型 4 作了 9 个频率的多频计算和 21 个发射点的多重计算，研究了（1×8×8）×0.5m，（1×8×8）×1m，（1×8×8）×1.5m，（1×8×8）×2.5m，（1×8×8）×8m，（4×8×2）×0.5m 等六个不同尺寸的模型。今举其中的两个典型反演结果如下：

图 6-35 是（1×8×8）×8m 较大直立板，4MHz 的多重正演计算结果的 CT 反演结果，4MHz 是因它在计算频段中为居中偏低频率，其在空气中波长 $\lambda_4 = 75$m，媒质中波长 $\lambda'_4 \approx 38$m。

面向辐射源，模型的尺寸为 64×64m^2，CT 用两种方法反演，不难看出，它与模型 1、2、3 不同，高吸收异常对称地分布在模型板的两端和两侧，而正对板而处是亮点，此外两侧的高吸收异常位置连线的中点为目标中心位置。这两个现象表明观测场值的低值不是媒质吸收的效果，而是叠加场中 $\bar{E}_s$ 与 $\bar{E}_i$ 间相位差引起的现象，因此不能像大目标时认为高 β 值异常处即为目标位置。

目标为（4×8×2）×1m 及（4×8×2）×0.5m 用 ART、SIRT 及 ARTM1（具阻尼措施的 ART）算法 CT 处理结果表明对小于波长的模型，目标处及其周围都没有异常，说明在这种条件下，地下电磁波法的资料用 CT 反演，是会漏目标的。

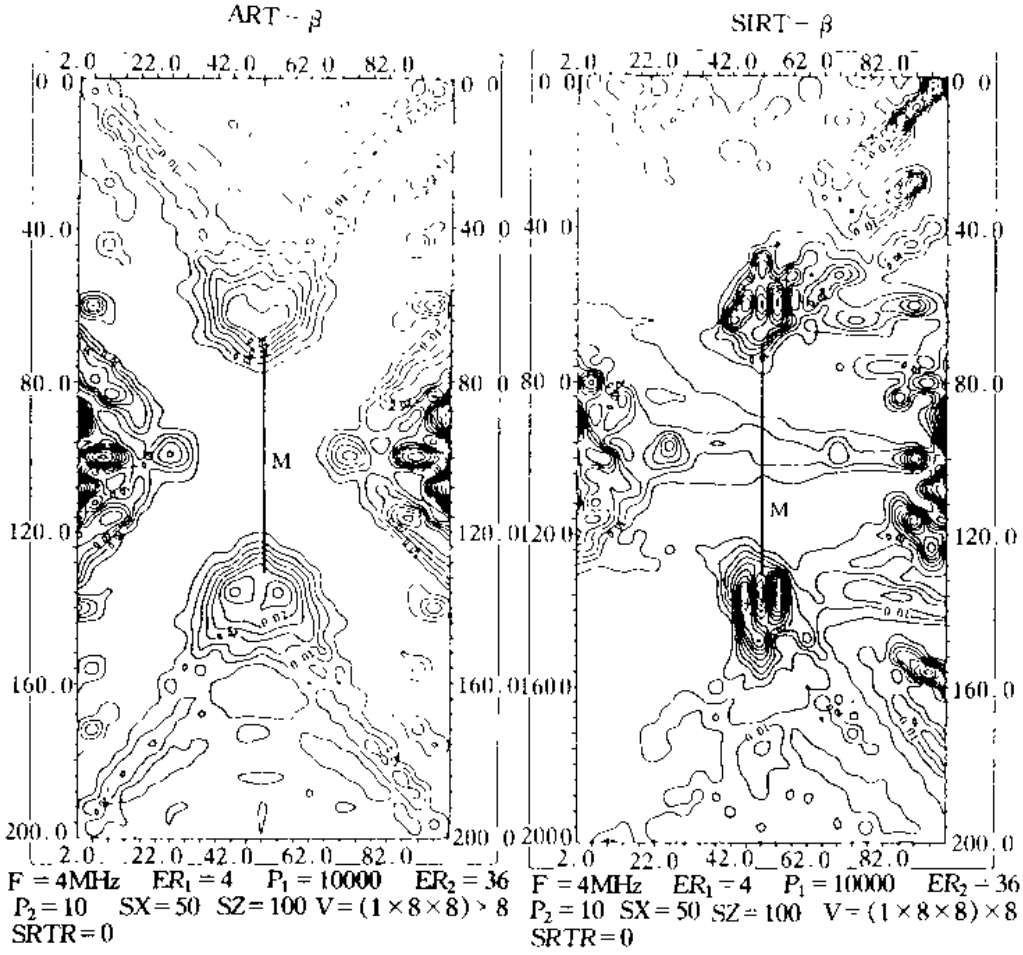

图 6-35 (1×8×8)×8m 直立板正演结果的 CT 反演现象

用比较典型的 (1×8×8)×2.5m 倾角 45°和 135°倾斜板模型 8MHz 进行对比研究结果表明，板目标无论其倾角如何，板两侧的异常都是明显的，板两端的异常则出现的不规律。

图 6-36 为 5MHz 高阻 45°倾斜板目标 CT 的反演现象，两种算法得到的结果一致，高阻目标位置处是高吸收异常，略有倾角表示。

(二) 小目标 CT 反演结果的讨论和存在的问题

①小目标叠加场的 CT 反演结果与通常大目标射线场 CT 反演结果不同，对应低阻目标处并未出现阴影，反而是高阻目标处出现阴影，这说明阴影异常出现的条件不但要考虑目标的电性，还要考虑目标的尺寸。此外，观测场值出现的极小，并不一定代表吸收现象，可以是直达波与目标散射波相干的结果。

②在小目标的条件下，观测值中的极小既然不一定反映吸收的结果，CT 反演中高 β 异常处也就不一定代表吸收体位置，因此对异常要有新的认识，要从其分布规律中去研究其反演结果，而研究分布规律应该首先从观测值的分布开始。

总之，在目标散射场起作用的条件下，例如小目标，用射线 CT 的反演要特别慎重，要改变过去那种见了吸收异常，就认为是吸收体存在位置的看法，那是忽视了射线 CT 的应用条件。这也是在金矿床的层析技术应用中应引起重视的一个重要问题。

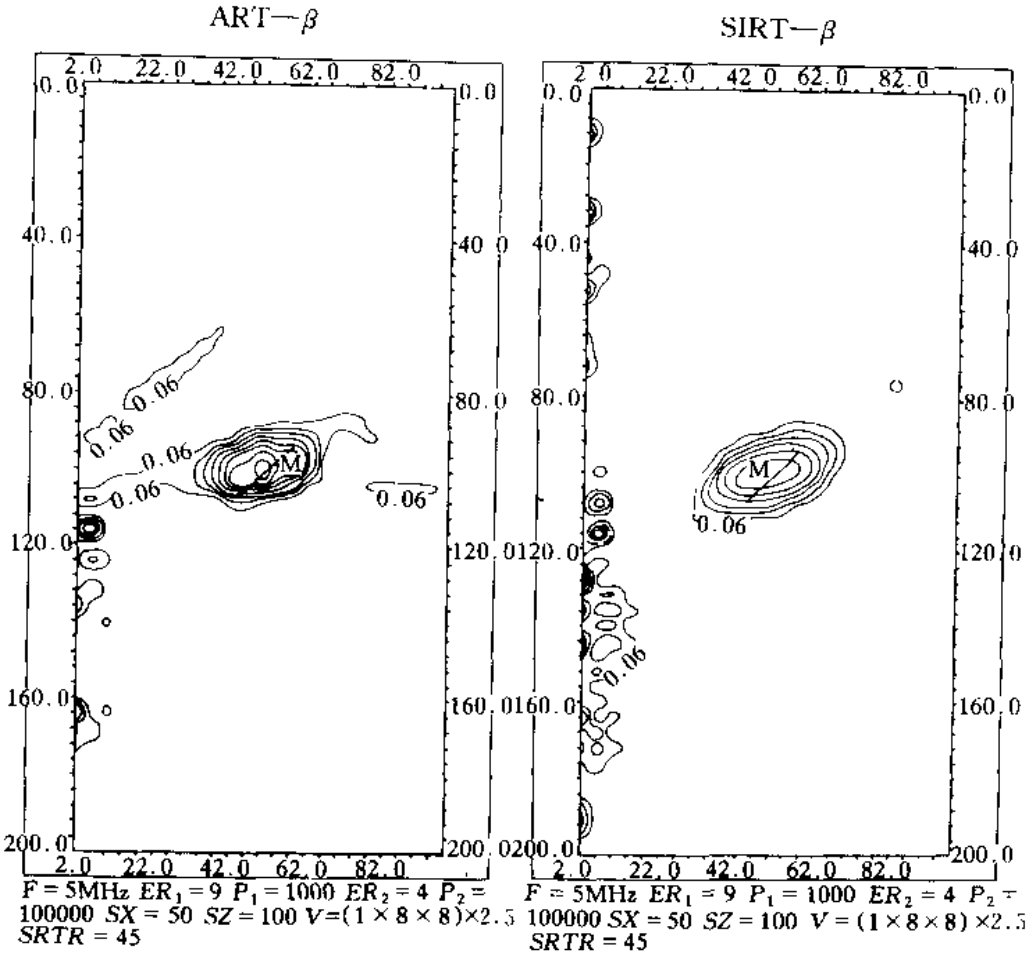

图 6-36 (1×8×8)×2.5m 高阻 45°倾斜板目标 5MHz 叠加场正演计算结果的 CT 反演现象

四、地下电磁波法的特征解释法

特征解释法的提出是从 CT 反演中存在的上述问题开始的。特征解释法研究的对象是包括散射场在内的宏观的观测数据组，方法是统计性的，因此可以认为特征解释法是地下电磁波异常统计方法与模式识别相结合的新技术，在金矿勘查中可以与射线 CT 法互相校验、互相补充。

特征解释法的具体内容请参看“地下电磁波法多重信息平面的场值分布模式”（地球物理学报，第 37 卷，第二期）。

第四节 结 语

当金矿区的成矿地质条件复杂，或矿化富集带地质标志不明显，或矿化带破碎钻探取心困难时，开展综合电测井工作经常能在划分、圈定矿化带，确定其位置及厚度等方面提供有意义的资料。

所以开展金矿综合电测井工作除要具备必要的物性前提外，重要的是地质工作是否有此实际需要。既有条件又有需要，该项工作定能取得良好效果。此外，综合电测井还可为井中综合电测提供必要的电参数资料。

在金矿床的普查钻孔中和成矿地质条件复杂多变的勘探钻孔中，只要具备圈定矿体或

矿化带的电性条件，及时开展井中综合电法工作对发现和圈定井旁盲矿体或矿化带，了解其展布等常可提供重要信息。应用研究的实践已证明这不仅可扩大钻孔的找矿范围，同时也是深部找矿和扩大电法勘探深度的有效途径。

应用研究的实践还表明，井中 ρ_s 及 η_s 综合电测，具有仪器设备简单，方法易行，效果明显等优点，是金矿物探中值得重视而未被普遍重视的一项重要方法技术。

在解释井中 ρ_s 及 η_s 综合电测资料时，除应考虑围岩电性的不均匀性外，还应注意减少或消除山区地形起伏的影响。后者对地-井工作方式尤为重要。

为了配合金矿井中及地面综合电测工作而研究开发的 ρ_s、η_s 异常计算机联合反演方法技术，可对提高点源二度体条件下的 ρ_s、η_s 综合推断解释工作水平和找矿效果，提供一个较为先进和实用的方法技术。

因为对电法工作者而言，对异常的定性解释固然重要，但只有反演定量解释的地质体，既能符合地质成矿条件又能产生与观测结果相符合的异常时，才算有一个确能“自圆其说”的依据来对异常进行评价和验证。

当然 ρ_s 及 η_s 联合反演是个复杂而困难的课题，本次研究工作主要是在导出利用镜像原理的“简化边界元法”，改进数值计算的技巧与优化计算程序等方面取得进展，使这一方法得以在 VAX/11-750 小型计算机上实际运行。今后应将该程序移植应用于高档微机，以利推广应用，并在应用中继续改进提高，此外，为了提高反演效果，还应有足够数量的高质量的井中和地面电测资料，这也是在推广应用中应予重视的问题。

井中电磁波法层析技术是 80 年代以来迅速发展起来的一项新技术，它对符合射线反演条件的大目标应用效果良好，且已在我国山东临沂金矿及俄罗斯某金矿取得较好和好的试验结果。取得良好效果的关键除应是射线大目标外，目标体与金矿体（或矿化体）应有良好的相关性。

进一步的研究发现对散射模型的三度体小目标而言，其 CT 反演结果与大目标条件下的反演结果完全不同，如不加区分，将导至错误的解释结果。由于三度体小目标的多重、多频观测值仍有分布规律可循，故宜应用特征解释法。

在金矿床应用井中电磁波 CT 反演技术时，应注意小目标（高阻小岩脉或低阻小裂隙带等）的存在，对 CT 反演结果产生影响与干扰。对这个问题应开展大目标与小目标同在时，CT 反演结果的理论研究工作及相应的金矿床上实际应用的研究工作。

第七章　综合物探方法在金矿地质工作中的应用、研究与展望

1．金矿物探在调查金矿的“控矿综合地质条件”以及查明“找矿综合地质标志”方面，有着广泛的应用范围。这已为越来越多的实践经验所证实，也为本研究课题的成果所证实。

将金矿物探从“直接”找矿扩大到间接找矿，标志着认识水平和金矿地质工作整体技术水平的提高。

我们的应用研究工作还表明，在金矿地质工作中因地制宜，在地质成矿规律研究成果的指导下，参照类似地区的经验或找矿模型，有选择地将综合物探方法用于金矿的间接找矿领域体现了多学科的综合勘查方法的优势。

本次应用研究从航空到地面、到井中的诸物探方法多用于花岗岩-绿岩地体金矿，但其方法技术和应用经验可供其它类型金矿的间接找矿工作借鉴或引用。

例如，通过与火山岩型金矿的“控矿综合地质条件”及“找矿综合地质标志”的物性特征对比可知，本书中所总结的综合物探方法技术对火山岩型金矿同样是有效的。

2．本次应用研究的课题内容较为广泛，综合物探在金矿地质中的应用还有两点应予强调：

（1）利用区域重、磁资料，经过必要的数据处理和深入的综合研究，可对金矿区域地质，特别是深部地质的调查研究提供重要的资料或结论，能更好地进行小比例尺的金矿区、带成矿预测。

（2）在金矿区、带的基础地质研究中，综合物探资料，可用来综合分析或解决某些疑难的或有争议的基础地质或深部地质问题。

综合物探在上述两个方面的应用，在国内已引起地质和物探专家的重视。这是地质与物探学科发展中大有作为的一项重要工作方法与工作领域，尚待大力提倡与开拓。

3．虽然金矿物探在“间接找矿”上扩大了应用范围，但要从实际的地质-物性条件出发，不宜“千篇一律”，在此前提下，对于不同的地质工作阶段，可参照下述工作系列方案，应用和布署金矿物探工作：

（1）金矿小比例尺成矿预测中，应用小比例尺（例如1∶100000—1∶500000）区域重、磁及γ能谱资料，分析区域地层、火成岩及构造的分布与深部变化情况，结合区域地质、化探、金矿床（或矿点）分布及金矿区带成矿理论和模型，综合研究，以圈定和优选金矿成矿的有利区带及主要金矿类型。

（2）在优选的金矿成矿有利区带或重点金矿区，开展1∶25000—1∶50000的面积性综合航空物探工作，与地质、化探以及1∶50000—1∶100000重力等工作相配合，参照综合地质勘查方法找矿模型，详细圈定控矿或容矿的构造、地层及岩体，并予以综合评价和排序，以预测寻找金矿床为主要目的。

（3）在控矿和容矿有利地段或已知矿体外围，开展1:10000—1:2000的地面综合物探工作，物探方法的选择可参照综合航空物探异常，并以区内地质-地球物理找矿模型为依据，进行间接找矿或“直接找矿”。

（4）在普查、勘探阶段，开展地下物探，可扩大找矿深度，寻找钻孔或坑道附近的盲矿体。

根据需要，可开展综合物探测井，目的在于了解地下物性和钻孔的地质、矿体（或矿化）的分布情况。

在金矿物探解释工作中，通常以定性解释为主，但应配合以必要的定量解释，以扩大物探在三度空间立体找矿的效果和作用。

4．本次研究应用的物探方法技术虽然较多，但在金矿地质找矿中值得重视和研究应用的也还不止于此。例如：

（1）激发极化法无论在地面或井中对金矿而言都是一个直接找矿的重要方法，为了更全面地研究激电异常，利用谱激电或激电二次电位衰减特性来研究区分多期黄铁矿化等问题应是很有意义的一个课题。

（2）频率测深（或CSAMT），虽有工效较高的特点，但用于岩性、构造复杂的金矿区，尚有诸如静态改正、地形影响与记录点位置等技术问题需要研究解决。

相对而言，时域（瞬变）电磁法（TEM）不但具有较好的穿透低阻覆盖层的能力，而且在应用上方式灵活，在数据解释上精度较高，效果也较好，是金矿物探中很有潜力的一种勘探深度大的电磁法。

（3）金矿的震电勘探法也是值得重视研究应用的一个新方法。

5．本次的应用研究课题在取得方法技术成果的同时，还通过研究工作优选出一批金矿的找矿远景区、找矿靶区和可供工程验证的找矿异常。这些是本次研究工作所取得的重要应用成果即潜在的找矿效果。由于方法技术的研究—应用—验证的周期一般较长，所以迄今因时间与勘查资金的限制，只有其中一小部分得到验证转化为现实的找矿效果，但尚不能全面体现出各专题的主要找矿效果。这批潜在的找矿成果还有待于今后通过找矿工作或工程验证继续予以证实和转化。

参 考 文 献

[1] 邹光华. 金矿普查中的物探工作 物探与化探. 1990

[2] 孙文珂. 物探找隐伏矿的几个技术问题 物探与化探 1991. 2.

[3] Peter Hood Gradient measurements in aeromagnetic surveying Geophysics, Vol. 30 1965.

[4] Peter Hood et al Aeromagnetic gradiometer programe of the Geological Survey of Canada. Geophysics. Vol. 54. No. 8. 1989.

[5] Keating, P. B. et al. An automatic method for the interpretation of magnetic vertical-gradient anomalies. Geophysics. Vol 55 336—343. 1990.

[6] 张秋光 重力与磁法勘探中垂向二次导数的物理意义 桂林冶金地质学院学报 1981 年第一期.

[7] 蔡宗熹 偶层场强分量表达式在求磁异常各阶导数上的应用. 物化探计算技术. 1984. 6 (1).

[8] 秦葆瑚 高精度磁法勘探. 中南工业大学出版社 1988.

[9] 王继伦. 直升飞机装载的航空物探综合站在金矿地质普查中的应用. 勘探地球物理北京 (89) 国际讨论会论文摘要 1989.

[10] Kaikkonen, P.. Numerical VLF modeling. Geophys. Prosp. Vol 27. 815—834. 1979.

[11] Ponkonenel, A . On modeling airborne very low frequency measurements Geophysics Vol. 54. No 12 1596—1606. 1989

[12] Baker, H. A. et al. A topographic correction for VLF－EM profiles based on model studies. Geoexploration Vol. 18 135—144. 1980.

[13] B. Л. 沃罗比约夫等著. 普查金属矿床的航空伽玛能谱测量方法. 地质出版社. 1985.

[14] 王继伦. 二维最佳线性数字滤波器的设计原理. 地球物理学报. 1977. 20 (2).

[15] 安玉林等. 滤除高频干扰的正则化稳定因子. 物化探计算技术. 1985. 7 (1).

[16] 王继伦等. 二维最佳线性数字滤波器的设计原理在重磁数据处理中的应用和效果的研究. 地球物理学报 1983. 26 (增刊)

[17] 刘圣民. 电磁场的数值方法. 华中理工大学出版社. 1991

[18] 栾世伟等. 金矿床地质及找矿方法. 四川科学技术出版社 1987

[19] 沈保丰等. 华北陆台太古宙花岗岩—绿岩地体中金矿床类型和演化. 国际金矿地质与勘探学术会议论文集 1989.

[20] 王继伦. 山区大比例尺综合航空物探在金矿区外围找矿预测中的应用. '93 北京国际黄金矿山技术研讨会论文集. 金矿开采. 万国学术出版社. 1993.

[21] 张志敏. 胶北隆起热液金矿成矿条件及分布规律. 地质与勘探 1990. (4)

[22] 周凤桐. 补偿式航空电磁法. 物化探研究导报 11 期. 地球物理探矿研究所 1982.

[23] 朱裕生. 矿产资源评价方法学导论. 地质出版社. 1984.

[24] 赵鹏大等. 矿床统计预测. 地质出版社. 1983

[25] 丁鸿佳等 WWS—1 小型数字双无向磁力仪. 物探与化探. 1993. 4.

[26] 熊光楚. 磁 (重力) 异常的变换及滤波技术. 冶金工业出版社 1990.

[27] 文百红. 插值切割法在消除磁异常干扰中的应用 地质与勘探. 1991. 第 2 期.

[28] Prichystal. 航空伽玛能谱测量发现捷克新的锌矿 物化探译丛 1987 5.

[29] 邱元德. 金矿带铀、钍、钾、氡异常特征 地质与勘探 1992 8

[30] R W 博伊尔 金的地球化学及金矿床. 地质出版社 1984.

[31] 章 晔等 放射性方法勘查. 原子能出版社. 1990

[32] 河北省地质局. 河北省北京市天津市区域地质志. 地质出版社 1991.

[33] 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志 地质出版社. 1991

[34] 杜乐天 硅谜和碱盲—近代热液成矿学的两大暗区 铀矿地质 1990 6.

[35] Cameron. E. M. 深部韧性剪切带氧化变质作用萃取金的概念模式 国外火山地质. 第 1 期. 1990.

[36] 史保连. 甚低频电磁法 地质出版社. 1986

[37] Karous, M.. Liner filtering of VLF dip angle measurement. Geophysical prospecting. Vol. 31. No. 5. 1983.

[38] 李永年. 金矿普查中的地球物理工作. 勘探地球物理北京（89）国际讨论会论文摘要. 1989.

[39] 魏富有. 甚低频电磁法对含金断裂破碎带的追踪效果. 物探与化探. 1991. 15（4）.

[40] 力尼安. 电磁测深基础. 煤炭工业出版社. 1979.

[41] 蔡柏林等. 井中激发极化法. 地质出版社. 1983.

[42] 周熙襄等. 电法勘探数值模拟技术. 四川科学出版社. 1986

[43] 田宪谟等. 电法勘探用边界元法. 地质出版社.

[44] 黄兰珍等. 用边界元法计算点源二维地电体的 ρ_s 与 η_s. 物化探计算技术. 1988. 10.

[45] 田正中隆等. 边界元法的基础与应用. 煤炭工业出版社. 1987.

[46] 张秋光. 场论（中册）. 地质出版社. 1985.

[47] 徐世浙. 点电源二维电场问题中付氏反变换的波数 K 的选择. 物化探计算技术. 1988. 8.

[48] 徐世浙等. 复杂地电条件下点源三维电阻率模拟的新方法. 物探化探计算技术. Vol. 13. No. 1. 1991.

[49] Darrel, L. et al. Determining a subsurface electromagnetic profile from hi-frequency measurements by applying reconstruction-technique algorithms. Radio Science. Vol. 12 No. 2 (19).

[50] 吴以仁等. 地下电磁波法多重信息平面的场值分布模式. 地球物理学报. 1994. Vol. 37. No. 2.

[51] 杨文采等. 应用地震层析成像. 地质出版社. 1993.

[52] 李治华. 华北地台地球物理场、深部构造和金矿床. 物探与化探. 1987. 11（6）.

[53] 陈继宇. 我国东中部深部重力场特征与金矿床的分布. 地质与勘探. 1983.（2）.

[54] 史元盛. 金矿地球物理找矿. 中国地质大学出版社. 1989.

[55] 王继伦等. 山区航空甚低频电磁法的关键技术与效果. 中国地球物理学会年刊. 1994.

下　篇

化　探　部　分

第一章　寻找金矿的地球化学勘查方法、技术概况

我国由于80年代初痕量金测试技术的突破[1,2]，痕量金标准参考样的制备和应用，改变了以往只能利用化探样品中银、砷、汞、锑、铅等伴生元素找金的局面，进入以金找金的新阶段。根据我国对几个省采集的岩石样品所作的金的分析表明国外文献上发表的金的克拉克值数据一般均偏高，它很可能在1×10^{-9}以下。自从1978年开展第二代区域化探全国扫面计划，把金列入必分析的元素，并确定检出限为1×10^{-9}，后来又将检出限降到0.3×10^{-9}。我国重视金的区域性异常（一般常用2×10^{-9}—3×10^{-9}来圈定），单个点的金异常并不重要，因为单个点样品金分析的重现性可能很差，但几次分析所圈定的异常形状，强度和规模可能是相似的，这些参数的稳定性对异常的正确解释更重要，并可在相当程度上避开了金分析中遇到的严重误差这一难题的困扰[3][4]。我国化探找金的独特思路与掌握了金的检出限为0.3×10^{-9}的金的分析方法以及采用标准参考样监控分析质量等，在此基础上开展的第二代区域化探工作已迅速覆盖了我国可扫国土的大部分地区，发现了大量包括金在内的很多元素的地球化学异常。特别值得指出的是金的低背景区、高背景区、区域性异常及异常浓集中心的强度与规模的变化都在地球化学图上清晰展现，透露出大量找金的直接信息。综合研究金及其伴生元素的异常，布置异常查证和进一步的化探工作，提出工程验证建议，根据化探方法找到了很多金矿产地和矿床。地矿部各地矿局于1980—1987年对化探方法所发现的具有找矿意义的异常，经地表工程和深部钻探工程验证，已发现的黄金矿床和矿产地共277处[5]，其中目前已查明为工业矿床的共62处（大型矿床4处、中型矿床26处、小型矿床32处）[6]。化探方法已成为金矿找矿工作中最主要最普遍采用的一种方法，效果非常突出。从1993年在中国召开的第16届国际化探大会上宣读的金矿化探文章可以看出北欧国家和北美的金矿化探已开始接受中国的做法，分析水系沉积物的细粒级部分和降低金分析的检出限，北欧国家对金分析检出限要求要$<1\times10^{-9}$。在此以前美国能源部1983年出版的阿拉斯加地球化学图集由于采用检出限为50×10^{-9}的中子活化方法分析金，整个阿拉斯加图幅金的地球化学图上只有零星散布的金的高含量点出现[7]。北欧三国的Nordkallot计划中金的检出限则为40×10^{-9}。

我国于80年代初研制成功了一种预先进行化学浓集的痕量金的化学光谱测定法[1][2]。能测出化探样品中低达0.1×10^{-9}—0.3×10^{-9}的金含量。1985年研制成检出限为0.2×10^{-9}的石墨炉原子吸收分光光度法，1988年研制成金的检出限为0.2×10^{-9}的痕量金的微珠析出比色法，1993年研制成检出限达0.5×10^{-9}的金的野外快速分析方法。1993年还用激光单原子探测技术（LSAD）去测定超痕量的金，检出限可达0.005×10^{-9}。上述金的测试方法与技术的进展大大推动了金矿化探的新发展。

多种非常规化探方法的研制成功和实际应用为我国寻找金矿特别是隐伏金矿提供了找

矿手段。如汞蒸气测量技术在寻找金矿床中已发挥了作用[8]并已制定了汞蒸气测量规范[9]。地电化学部分提取金属法所发现的电提取异常，其中如新疆等地已经钻探验证见到金矿。现场X射线荧光测量在金矿普查中也已取得地质效果[10]。用偏提取技术可以发现覆盖层下数十米至300多米处的含矿岩体和盲矿体。还开展了地气法以金找金的试验工作等。

国外在金矿的地球化学勘查工作中开展了大量的研究和实际工作。为了克服样品金分析的重现性差这一难题，采取分析重砂中的金或采集大样进行分析两种方法来改善金分析的重现性。

加拿大、美国、原苏联对金的表生作用地球化学研究这一基础理论问题给予很大的重视，注意对不同地质地理条件下金及其伴生元素表生地球化学迁移过程的研究。同时对偏提取技术的开发和应用给予了极大的重视，用以查明浓集了重要找矿信息的相态。如美国地调所从1989年起在美国西部执行一项为期五年的地球化学找金计划，用偏提取技术，地电化学法（CHIM）等方法手段寻找地下埋深几十米至几百米的金矿床。加拿大地调所近年来提出主要提取两种相态，一是用焦磷酸钠提取有机质中与腐殖酸和富里酸结合的有机相金，另一则是用盐酸羟胺提取土壤和冰碛物中的非晶质铁锰氧化物相的金[11]。美国地调所近年提出的研究后生异常的酶浸析法是一项新进展[11]。他们认为一般只占土壤中氧化锰总量很少一部分的非晶质氧化锰，是地表及近地表环境中活动的痕量元素最有效的天然捕集器之一。酶浸析技术优先浸析包覆在矿物颗粒上的非晶质氧化锰，使用葡萄糖氧化酶和右旋糖在浸析液中发生反应产生痕量过氧化氢和葡糖酸。过氧化氢很容易还原和溶解非晶质的二氧化锰，并将这种化合物所捕集的痕量元素释放出来，而结晶质的氧化锰相仅起很弱的化学反应。对浸析液中很多痕量元素的分析采用电感耦合等离子质谱法(ICP/MS)。在美国明尼苏达北部采集的一批1670件B层土壤样品中，酶浸析溶解的锰平均不到以锰的氧化物形式存在的锰全量的5%。对麓源沉积覆盖区的四个金矿床开展了酶浸析技术用于分析B层土壤的试点研究。在这四个试点研究区，异常比背景高出50倍。将浸析法用于选择性地浸析土壤中的非晶质二氧化锰，为运积层覆盖地区提供了一种有用的地球化学勘查手段。

国外找金的气体地球化学方法中，美国在沉积型金矿床上开展了土壤气测量的研究工作，用一钢管插入0.75m深的地方采集土壤气体，并立即在车载质谱仪上进行分析。测量结果表明，低分子量的烃-甲烷、丙烷的异常与矿化带的相关性最好；在有的金矿床的氧化矿上方CO_2为正异常，O_2为负异常。在另一金矿床上，氨同矿化带相关性也好。烃的气体异常则主要存在于贝茨矿床的还原矿石上方，而不在氧化矿石上方。气体异常通常为背景值的2—3倍，而且不一定常有好的重现性。但仍认为土壤气测量在寻找隐伏金矿床方面不失为一种有用手段[12]。瑞典首先将地气法用于金矿勘查，尽管采用的质子激发X射线发射光谱法尚不能测出金的含量，但金与贱金属和砷密切共生，用地气法在沙特阿拉伯干旱条件下浅部金矿体上方发现了清晰的地气砷异常。德国与捷克合作研究提出了一种新的寻找金等金属矿床的找矿方法称之为元素的分子形式方法，通过气溶胶过滤器用泵将大气抽到盛在一专门器件中的液体吸着剂中，为了测金每个点的取样时间约10分钟。然后用原子吸收分光光度法分析所采集样品中金等多种金属元素的含量。该方法成本低、快速，已在生产工作中得到应用，充分表明这是一种很有发展前景的找矿手段。原苏联通

过研究提出有20多种金属元素能够以气体金属微粒从深部矿源通过垂向或近似垂向构造散发到大气中。通过高压抽吸，大气微尘过滤，经液体吸附，以及遥感激光检测，可以在地表、汽车或飞机上快速测量气体的痕迹元素含量。并提到这种方法是主动吸附气体的金属元素，其观测灵敏度和一致性比经典气体方法要好。实际应用效果包括能发现埋藏深度数百米到一公里的Au、Au-Hg、Pb-Zn、Cu、Hg、W等金属矿床。

随着金矿勘查工作的广泛开展，找矿难度日益加大，这就要求地球化学找金工作要有新的发展，一方面要加强对寻找隐伏金矿的地球化学勘查方法的研究，另一方面要提高地球化学异常评价水平的研究，为此侧重研究了金的表生地球化学特征、寻找隐伏金矿的非常规地球化学勘查方法、快速追踪异常源、地球化学数据处理方法等方面的内容。

第二章　金的表生地球化学特征及其在找矿中的应用

在80年代的世界找金热潮中，地球化学方法发挥了重要的作用。在我国，由于执行了区域化探扫面计划和超痕量金分析测试技术的突破，地球化学方法在金矿勘查中占有更为重要的地位。但是，随着找矿工作的深入，无论是在水系沉积物地球化学方法找金过程中，还是在金的土壤地球化学测量和水地球化学测量工作中，都遇到了一系列异常评价、筛选问题和更有效的找矿方法、技术问题。诸如水系沉积物样品的代表性问题；不同类型矿床金地球化学异常发育特征的差异问题；以及厚覆盖区金的偏提取技术应用的可能性问题等。这些问题的存在，已直接阻碍着金矿勘查中地球化学方法作用的进一步发挥。然而，这些问题的解决，离不开对金的表生地球化学特征和金异常形成机制的研究。

1991年国际勘查地球化学家协会（AEG）成立了一个特别委员会来调查勘查地球化学的现状与前景[13]。调查报告认为，勘查地球化学在过去50年发展迅速，并取得巨大成功，但当前勘查地球化学必须从经验式阶段进入具更高创新精神的、更加科学的阶段，以保证未来的顺利发展。勘查地球化学如果不革新技术，不在元素迁移机制的理论研究上下功夫，则将会削弱产业界与学术界两方面对它的信任。

金矿地球化学勘查的发展，也面临着加强基础研究并进而革新技术的任务。因此，开展金的表生作用地球化学特征和各种金的次生异常形成机制的研究，已是当前金矿地球化学勘查的迫切任务之一。

第一节　表生介质中金的存在形式

金矿化探中水系沉积物或土壤样品的代表性问题与“粒金”效应有关，粒金效应的存在与否，与表生介质中金的存在形式有关；金矿化探中，金的偏提取分析应用的可能性，以及金表生地球化学行为的阐明，均与表生介质中金的存在形式特征有关。因此，表生介质中金的存在形式的研究将是金的表生地球化学研究的核心问题。

一、金的存在形式的研究方法

根据国内、外文献的报道，金矿化地段的地表疏松物中的金，具有多种多样的存在形式[23]。为了适应不同研究目的需要，下面分别列出了经我们试验研究制定的三种可供选择的研究金的存在形式的循序提取分析方案：

方案一：

1．水溶性的最易活动形式金的提取

称取20.0g＜200目的粉末样品于一个100mL带有密封内盖的圆塑料瓶中，加入50mL含有1%盐酸酸化过的去离子水，加盖密封后置于振荡器中振荡提取2h，然后将塑料瓶放进离心机中离心分离残渣与溶液10min，取出塑料瓶，倾滗出上层清液至一只

250mL 三角烧瓶中，加 5mL（1＋9）王水酸化清液，再加入 5 滴 30% 三氯化铁溶液后，放入一小块重约 0.2—0.3g 经过酸处理过的聚氨酯泡沫塑料，盖上表面皿在摇床上振摇 1h，将溶液中溶解的金预富集到泡沫塑料上，然后将吸附有金的泡沫塑料取出，用水洗净、挤干，放入 1 支 10mL 的比色管内，并向管内定量加入 5mL 1% 的硫脲溶液，于沸水浴上将泡沫塑料上定量吸附的金解脱入溶液。将解脱液用石墨炉原子吸收分光光度法在选定的最佳仪器工作条件下进行金的定量测定。测定中所用的工作标准，应该用与处理被测定样品同样的步骤的方法进行处理与测定，以期获得准确可靠的痕量金分析结果。

这一步提取出来的主要是以 Au^{3+} 形式存在的水溶性金，是金在表生作用中最活动的存在形式。本步提取中分离出的残渣留作下一步提取用。

2．金的有机络合物和稳定的无机络合物形式的提取

向步骤 1 分离出的残渣中定量加入 50mL0.1mol/L $Na_4P_2O_7$（焦磷酸钠）－0.1mol/L NaOH（氢氧化钠）溶液，将塑料瓶加盖密封后，在振荡器上振荡提取 4h，然后将带盖塑料瓶放入离心机中离心分离 30min，倾滗出上层清液至一只 250mL 三角玻璃烧瓶中，用双氧水（H_2O_2）和王水氧化溶液中的有机质，直至溶液清亮为止，将烧瓶置于电热板上将溶液蒸发至适当体积以控制酸度，加入 5mL（1＋9）王水，5 滴 30% 三氯化铁，加入约 0.2—0.3g 经过酸处理过的泡沫塑料，盖上表面皿在摇床上振摇 1h，取出泡塑，用水洗净、挤干，放进 10mL 比色管内，定量加入 5mL 1% 硫脲在沸水浴中解脱金入解脱液，送解脱液去做石墨炉原子吸收分光光度法测定痕量金的含量。

这一步提取出来的主要是以 Au^{3+} 形式存在的金的有机络合物和稳定的无机络合物，其中包括金的腐植酸和富里酸盐。这部分赋存状态的金也是金比较活动的存在形式，是金在表生地球化学作用中进行迁移、富集的主要方式。由本步提取分离出的样品残渣，留待下一步提取分析测定自然金用。

3．自然金的测定

将步骤 2 中提取分离出来的样品残渣用王水分解，泡沫塑料预富集，硫脲定量解脱，然后用石墨炉原子吸收分光光度法测定金的含量。

这一步测得的金主要是以 Au^0 形式存在的自然金，是金的最不活动形式，是组成金矿床（体）的物质基础。

4．金全量的测定

另外单独称取一份样品，用王水全分解，泡沫塑料预富集后，用石墨炉原子吸收分光光度法测定样品中的金的全量。

方案二：

1．可交换离子和碳酸盐

1M HOAc＋1M NH_4OAc，pH＝4，固液比 1∶10，25℃（室温），振荡 1h，过滤，取清液测定；

2．锰的氧化物

0.25M $NH_2OH \cdot HCl$＋0.1% HNO_3，固液比 1∶10，25℃，振荡 1h，取清液测定；

3．与有机物结合的金属元素

0.1M $Na_2P_2O_7$＋0.1M NaOH，样品先用 0.05N H_2SO_4 浸泡搅拌 1h，脱 Ca，再用去离子水洗至中性，然后按固液比1∶10加入上述试剂，浸泡一昼夜，离心取出上层清液，

用 1N H_2SO_4 中和到 pH = 1.5，加热到 70℃，放置冷至室温，用致密滤纸滤出沉淀，然后低温灰化，再用王水提取，测定其中的金属元素，或者直接测定离心清液中的金属元素；

4．非晶质铁的氧化物

0.25M $NH_2OH \cdot HCl$ + HOAc，固液比 1∶10，50℃，保温 1h，过滤，测定清液；

5．晶质铁的氧化物

0.175M $(NH_4)_2C_2O_4$ + 0.1M $H_2C_2O_4$，固液比 1∶20，煮沸 10min，冷却至室温，过滤，测定清液；

6．硫化物

10% H_2O_2 + 5% HNO_3，固液比 1∶20，煮沸 20min，放置冷却至室温，过滤，测定清液；

7．硅酸盐

在上步残渣中加入 $HClO_4$ + HNO_3 + HF 加热蒸至高氯酸白烟冒尽，然后用 HCl 浸提，制成 10% HCl 溶液，测定清液。

方案三：

见表 2-1。

表 2-1　金矿区土壤和水系沉积物中金的循序提取相态分析方案

顺序	方　　法	作　　用
1	称取 10g 样品置于 250mL 三角烧瓶中，加入 100mL 双蒸馏水，振荡 1h，取下，离心分离出清液，在清液中加入 10mL 王水。过滤，吸附，测定金含量	测定水溶相金
2	将上步残渣置于 250mL 三角烧瓶中，加入 100mL 5% 柠檬酸铵溶液，振荡 1h，取下，离心分离出清液，用 20mL 蒸馏水洗残渣，离心，合并清液，向清液中加 10mL 王水，过滤，吸附，测定金含量	测定被粘土矿物或铁锰氧化物表面吸附的金
3	将上步残渣 置于 250mL 三角烧瓶中，加入 7% I_2 和 15% KI 混合溶液 100mL，振荡 1h，取下，离心分离出清液，每次用 20mL 蒸馏水洗残渣 2 次，离心，合并清液，在清液中加入 10mL 王水，测定金含量	测定游离的自然金
4	将上步残渣置于 250mL 三角烧瓶中，加入 4mol/L HAc50mL，振荡 20min，再加入 7% I_2—15% KI 混合溶液 50mL，振荡 40min，离心分离出清液，每次用 20mL 蒸馏水洗残渣 2 次，离心，合并清液，向清液中加 10mL 王水，测定金含量	醋酸溶解碳酸盐，测定被碳酸盐包裹的自然金
5	将上步残渣置于 250mL 三角烧瓶中，加入 25mL 5% 次氯酸钠溶液，放置 15h，煮至近沸 3h，离心分离后倒出清液，再如上处理一次，离心分离后用 0.1mol/L 盐酸 20mL 洗 2 次，离心，合并清液，用 0.1mol/L 盐酸 20mL 洗 2 次，离心，合并清液，清液中加 20mL 盐酸，5mL 硝酸，煮沸 0.5h，取下，冷 却，测定金含量	测定难溶有机相的金
6	将上步残渣置于 250mL 三角烧瓶中，加入 50mL2.5% 连二亚硫酸钠溶液，振荡 1h 后再加入 7% I_2—15% KI 混合溶液 50mL，振荡 1h，离心分离出清液，每次用 20mL 蒸馏水洗残渣 2 次，离心，合并清液，向清液中加 10mL 王水，测定金含量	测定被铁锰氧化物包裹的自然金
7	将上步残渣移入 40mL 瓷坩埚中，放入马弗炉内，先在 200℃ 以下烘烤干燥，再升温至 400℃ 灼烧 2h，取出冷却，将残渣移入 250mL 三角烧瓶中，加入 7% I_2—15% KI 溶液 100mL，振荡 1h，离心分离出清液，向清液中加王水 10mL，测定金含量	测定硫化物矿物中赋存的金
8	将上步残渣移入塑料坩埚中，加入 15mL 氢氟酸，搅匀，于电热板上蒸干后，再加 15mL 氢氟酸，2mL 硝酸，蒸干，加入王水 10mL，于电热板上温热溶解至清亮，取下，用水稀释至 20mL，过滤，吸附，测定金含量	测定赋存于石英及硅酸盐矿物中的金

注：当各相的金含量较低时，可采用加大样品称量的办法抑制各相的分析误差。

在方案三中，之所以要将游离自然金相放在第三步来测定，目的就在于要和后续提取的被碳酸盐包裹和被铁锰氧化物包裹的自然金相区别。

二、表生介质中金的不同存在形式的分布特征

根据上述循序提取方案，对我国湿润区和干旱区，以及不同金矿类型矿区残坡积土壤和水系沉积物样品进行了金的存在形式的研究，所获得的主要成果，列于表 2-2 和表 2-3 中。

表 2-2　循序提取各相中元素的含量[1] 及其占全量的百分数

	干旱半干旱地区								温热潮湿地区							
元素	Cu	Pb	Mn	Zn	Fe	As	Au	Ag	Cu	Pb	Mn	Zn	Fe	As	Au	Ag
碳酸盐与可交换部分	0.9 3.5	10.9 19.8	32 8.4	1.9 2.8	15 0.5	≤0.05	1.9 16.5	0.02 10.5	0.6 2.5	4.8 8.1	16 12.8	4.1 6.0	15 0.1	≤0.05	0.9 11.0	0.01 5.0
锰氧化物	0.1 0.4	4.5 8.2	154 40.5	0.2 0.4	19 0.1	0.12 1.3	2.8 24.4	0.01 5.3	0.1 0.4	2.3 3.9	89 31.2	0.4 0.6	45 0.3	0.08 0.5	0.6 7.3	0.05 25.0
有机物	0.9 3.5	≤1.0	3 0.7	0.6 0.9	19 0.1	0.96 10.0	1.0 8.7	0.05 26.3	1.3 5.5	≤1.0	1 0.8	0.7 1.0	41 0.3	2.80 18.2	2.6 31.7	0.01 5.0
非晶质铁氧化物	0.8 3.1	2.5 4.5	21 5.5	4.5 6.7	111 0.8	0.36 3.8	2.3 20.0	0.03 15.8	2.7 11.4	6.0 10.1	11 8.8	7.5 11.1	195 1.5	0.52 3.3	0.5 6.1	0.01 5.0
晶质铁氧化物	6.1 23.9	15.2 27.6	46 12.1	20.3 30.5	5020 35.8	3.44 35.8	1.2 10.4	0.02 10.5	8.2 34.7	15.2 25.7	32 25.6	17.4 25.7	5992 43.4	5.5 35.7	0.8 9.7	0.04 20.0
硫化物	4.8 18.8	8.1 14.7	46 12.1	23.7 35.6	3149 22.4	0.84 8.8	0.8 6.9	0.06 31.6	2.7 11.4	4.7 7.9	8 6.4	10.3 15.2	2314 16.8	1.76 11.4	1.1 13.4	0.05 25.0
硅酸盐	4.7 18.4	16.2 29.5	62 16.3	16.7 25.1	4612 32.9	3.72 38.8	1.8 15.6	0.02 10.5	8.9 37.7	27.0 45.6	30 24.0	26.5 39.2	4790 34.7	5.03 32.7	2.8 34.1	0.04 20.0
全量	25.5	55.0	380	66.5	14035	9.60	11.5	0.19	23.6	59.2	125	67.6	13815	15.40	8.2	0.20

①表中各元素的"含量"系指各元素的质量分数，如 Cu 应为"$w(Cu)$"（其它元素同），为书写方便，均简写为 Cu。

注：分子为该相中元素的含量，含量单位：Au 10^{-9}，其它元素 10^{-6}；分母为其占全量的%。

从表 2-2 和表 2-3 可以总结出如下的初步规律：

1．不同矿床类型或不同景观区疏松物中金的主要存在形式是各不相同的。表明金异常形成机制的多样性和复杂性。

2．水溶性金的普遍存在

水溶性金是金的表生地球化学性质的关键性存在形式，引起人们的普遍关注。在所研究金矿区矿体上方 B 层土壤或水系沉积物样品中，几乎无例外地均检出了水溶性的金。虽然水溶性金占金全量的比例，一般情况下不超过 10%，但水溶性金的普遍存在，是一个值得重视的重要事实。这一事实是原生金矿物在表生条件下可以普遍被溶解的有力佐证，是对表生条件下金可呈溶液形式迁移观点的有力支持。为用水地球化学方法和生物地球化学方法找金提供了重要依据，也为金的溶解机制研究及偏提取技术在金矿化探中的应用提供了基础。因而具有重要的实际和理论意义。

表 2-3　不同类型金矿床硫松物中金的存在形式分配特征

矿区名称	矿床类型	赋矿围岩	所属气候区（带）	海拔高程（m）	年平均气温（℃）	年降雨量（mm）	上壤的pH值	水溶性金所占（%）	吸附相金所占（%）	游离自然金所占（%）	碳酸盐相金所占（%）	有机相金所占（%）	铁锰氧化物相金所占（%）	硫化物相金所占（%）	硅酸盐相金所占（%）	表生地球化学参数测定时间
福建建阳小坑	与酸性火山岩有关的石英脉型金矿	酸性火山凝灰岩	中低山亚热带温润气候区	250—600	17—21	1575	4.83—5.2	0.6—6.8		60—94						1989 年
广西凤山金牙	微细浸染型金矿	白云质粉砂岩、泥岩	同上	700—800	19.2	1547	6.77—6.93	0.2—2（0.57）	10.1—80.2（43.44）	0—1.01（0.3）		7.5—81（41.61）	0.38—8.10（3.87）	0.23—4.95（1.37）	0.53—3.78（1.54）	1990 年
甘肃岷县鹿儿坝	同上	钙质砂岩	高原湿润气候区	2500—3000	最高 34 最低 18	800	7.0—8.84	1.07—1.7（1.38）	1.1—1.76.7—8.6（7.65）			50.0—64.5（57.25）	10.0—10.75（10.38）	5.4—13.3（9.35）	8.6—16.7（12.65）	1991 年
四川松潘东北寨	同上	碳质板岩	同上	3200—3700	2.3—3.4	860—938	5.27—6.97 地下水 6.9—7.9	0.79—7.09（4.77）	2.62—9.52（5.47）	23.81—67.38（37.42）	1.42—13.11	10.64—52.42（30.55）	<4.76—12.9	0.92—4.76（4.20）	<6.45—23.81	1992 年
四川松潘东北寨	同上	同上	同上	3200—3700	同上	同上	水系沉积物样品	2.31—2.78（2.55）	<1.54—1.67	55.56—65.39（60.48）	1.54 2.22（1.88）	2.22—3.85（3.04）	3.85—6.67（5.26）	11.54—22.22（16.88）	6.67—11.54（9.11）	1992 年
内蒙古武川东伙房	变质岩中的石英脉型金矿	斜长片麻岩	高原干旱气候区	>1500	<8	<300	8.2	26.3	12.5	44.6		0.8	0.05	9.5	6.2	1992 年
内蒙古武川东伙房	同上	斜长片麻岩	高原干旱气候区	>1500	<8	<300	水系沉积物样品 7.5	20.9	0.7	74.7		1.0	0.3	1.7	0.7	1992 年
内蒙古固阳老羊壕	同上	角闪斜长片麻岩	同上	同上	同上	<300	6.8	8.5	9.5	68.8		7.5	0.5	3.8	1.5	1992 年
甘肃文县何家湾	与铁白云岩有关的石英脉型金矿	绢云石英片岩、铁白云岩	中高山峡谷湿润区	580—1840	14	500—800	5.0	0.22—0.50（0.33）	0.18—3.94（1.71）	86.7—88.3（87.71）	0.1—0.73（0.35）	4.01—11.29（6.85）	0.03—0.37（0.22）	0.17—2.22（0.89）	0.28—2.10（1.41）	1993 年
甘肃文县何家湾	同上	同上	同上	同上	同上	同上	水系沉积物样品	0.27—0.73（0.5）	1.86—8.4（5.13）	54.07—74.71（64.39）	1.70—2.70（2.2）	9.24—40.36（24.8）	0.21—0.54（0.38）	0.12—1.73（0.93）	1.41—1.97（1.69）	1993 年

注：1. ××相所占比例是指某种存在形式占样品中金的全量的百分比。

2.（ ）内系指平均百分比。

3．湿润气候区有机态金所占比例普遍高于干旱区。

4．游离自然金是含金石英脉型金矿附近疏松物中金的主要存在形式。

研究表明，尽管所处的景观条件不同，矿化的围岩不同，凡是以石英脉形式产出的金矿体（床）附近的土壤或水系沉积物中，金的主要存在形式几乎无例外地是游离自然金。游离自然金在金的全量中，或占绝对优势，或所占百分比例最大。这又是一个值得重视的重要事实，游离自然金作为石英脉型金矿区疏松物中金的主要存在形式，为疏松物样品中金的颗粒效应的普遍存在提供了依据，也为砂金矿的形成条件提供了部分地球化学依据。

为什么在以石英脉形式产出的金矿体（床）附近的土壤或水系沉积物中，金主要以游离自然金的形式存在，应该说它与金在原生矿石中的产出特征及金的表生地球化学行为有关。

矿床学的资料表明，石英脉型金矿比微细浸染型金矿的矿石中存在更多的粗粒金。如我国胶东地区玲珑金矿金的粒度在12.5μm--2.5μm者占67%，内蒙古赛乌素石英脉型金矿原生矿石中>10μm粒度的金占23.71%，>5μm粒度的金占55.65%。而我国湖南石峡微细浸染型金矿原生矿石中金的粒度介于0.06μm—0.16μm之间者占95%左右，广西金牙金矿原生矿石中金的粒度在1μm--0.2μm之间者占66.08%[20]。含金石英脉中相对粗粒的自然金，一方面本身的化学稳定性高，溶解度小，在表生条件下主要以机械方式迁移，保留在疏松物中，成为游离自然金形式存在的组成部分。同时，在表生条件下，“被溶解的金的沉淀或结晶过程中首先要解决成核问题”[20]。因为石英脉型金矿石风化后的粗粒金很容易成为溶解金析出的晶核，并以它为中心进行生长，致使部分呈溶解状态的金最终亦以游离自然金的形式产出。这就是游离自然金是含金石英脉型金矿附近疏松物中金的主要存在形式的可能原因，以及砂金矿比较发育的地球化学因素。

5．微细浸染型金矿床附近的疏松物中，金的主要存在形式呈现复杂的情况。

（1）四川松潘东北寨金矿区的B层土壤中，金亦以游离自然金为主，平均占金全量的37.42%，最高可达67.4%。其次为有机相金，占金全量的30.55%。

（2）甘肃岷县鹿儿坝金矿区，土壤中的金主要以有机相为主，占金全量的57.25%。游离自然金仅占金全量的7.7%。

（3）广西凤山金牙金矿，土壤中的金主要以吸附态（占金全量的43.44%）和有机相（占金全量的41.61%）的形式存在，游离自然金所占的比例亦甚低（0.3%）。

对比三种不同景观条件的微细浸染型金矿，土壤中金的存在形式的共同特点是有机相金占有重要的地位，占金全量的百分比均属第一位或第二位，而游离自然金除东北寨矿区外，所占比例均较低。

第二节　金的溶解实验、水电化学试验和有关问题的探讨

金矿区地表疏松物中水溶性金的普遍存在和金矿区中金的水地球化学异常的普遍存在，是表生条件下自然金可以被溶解的佐证，而含金水溶液中成分特征的研究及金矿石的溶解试验，是研究金的溶解、迁移机制的基础。

一、土壤水浸出液成分特征的研究

实验目的：通过含金土壤水浸出液成分特征的研究，以了解表生条件下自然金溶解的可能途径和迁移形式。

实验方法和结果：样品采自东北寨矿区 Tc9 探槽矿体上方的 C 层土壤，由武汉大学化学系进行含金土壤水浸出液中阳离子、阴离子和氨基酸成分的测定。

试验样品土壤水浸出液中检出的阳离子、阴离子、氨基酸的成分及含量见表 2-4。

表 2-4　东北寨矿区土壤水浸出液中被检出与未被检出成分一览表

检出阴离子	未检出阴离子	检出阳离子及含量		检出氨基酸及含量	
Cl^-	Br^-	NH_4^+	5.8×10^{-6}	半胱氨酸	0.7×10^{-6}
SO_4^{2-}	SCN^-	Zn^{2+}	$>15\times10^{-6}$	缬氨酸	0.5×10^{-6}
NO_3^-	CN^-	Cu^{2+}	150×10^{-9}	甲硫氨酸（蛋氨酸）	1.1×10^{-6}
F^-	$S_2O_3^{2-}$	Co^{2+}	500×10^{-9}	异亮氨酸	0.2×10^{-6}
AsO_4^{3-}	SO_3^{2-}	Fe^{3+}	$<150\times10^{-9}$	亮氨酸	0.3×10^{-6}
NO_2^-	CO_3^{2-}	Au^{3+}	20×10^{-9}	苯丙氨酸	0.7×10^{-6}
HCO_3^-		Ca^{2+}	大　量	赖氨酸	0.2×10^{-6}
AsO_3^{3-}		Mg^{2+}	大　量		
PO_4^{3-}		Si^{4+}	大　量		
S^{2-}		K^+	大　量		
		Na^+	大　量		
		Al^{3+}	少　量		

从上述结果可看出，水浸出液中存在着广泛的无机阳离子、络阴离子和有机的氨基酸。表明自然金被溶解的途径也可能是广泛的。

二、金的溶解机制试验

（一）金矿石浸泡溶解实验

实验目的：了解金矿石在水介质中的自然溶解性

实验用矿石：A，属富硫化物的致密块状黄铁矿金矿石，矿石重量 6100g、含 Au 28.10×10^{-6}；B，属贫硫化物型的浸染状黄铁矿-石英金矿石，矿石重量 4100g、含 Au 8.05×10^{-6}。

浸泡液：蒸馏水 600mL，

浸泡容器：密封玻璃器皿，

浸泡条件：室温、静止。

实验中共取浸泡液两次。第一次距起始浸泡日 183 天，第二次 1045 天。对浸泡液分析 Au、Cu、Pb、Zn、Fe、Mn、As 八种元素和测 pH 值。

浸泡液的测定结果见表 2-5。

从表 2-5 中可得出如下认识：

1．同一浸泡液两个平行样的测定结果十分接近，表明分析方法所达到的精密度符合要求。

2．同一浸泡液前后两次取样分析，多种元素（包括金元素）的含量有明显差别，第 2 次所取浸泡液中元素的含量较高，说明随浸泡时间延长，元素的溶解度增高。

表 2-5　金矿石浸泡溶解实验浸泡液分析数据

浸泡液 \ 分析项目		Au	Cu	Pb	Zn	Fe	Mn	Mo	As	pH
第一次采样 (90.4.6)	A	0.06	28.54	1.47	2.59	78.3	8.00	0	(—)	(—)
		0.05	28.24	1.50	2.61	73.8	7.95	0	(—)	(·)
	B	0.05	0	0	0.05	0	0.47	0	(—)	(—)
		0.05	0	0	0.05	0	0.46	0	(—)	(—)
第二次采样 (92.7.17)	A	0.09	114.7	1.68	12.41	3956	7.74	0.05	1.40	<1
		0.11	113.3	1.99	12.64	4244	7.70	0.05	1.53	<1
	B	0.04	<0.1	<0.5	<0.5	3	<0.5	0.03	<0.002	6.5
		0.05	<0.1	<0.5	<0.5	6	<0.5	0.03	<0.002	6.5

注：两种浸泡液各自两次平行取样测定，含量单位 μg/mL；(··) 为未测。

3．两种金矿石的溶解能力有明显差异，致密块状矿石浸泡液中元素的含量明显高于浸染状矿石，说明浸泡液中的元素含量与矿石中硫化物的含量有关。

4．实验表明，即使在蒸馏水的短期浸泡下，矿石中的金与伴生元素也能溶出，说明在自然水体的长期作用下，矿石中的金与伴生元素完全可以逐渐被溶解。

（二）氨基酸对金粒的溶解试验

在东北寨金矿区土壤浸出液中，检出了 12 种阳离子、10 种阴离子和 7 种氨基酸，选择其中的半胱氨酸对金粒进行溶解的热化学反应试验。

试验工作在法国赛特勒姆公司生产的卡尔维微量热计中进行。

试验结果表明，半胱氨酸对金粒有溶解作用，产生吸热反应。并且这一溶解过程是一个吸热、放热振荡的动力学过程。如图 2-1 所示。

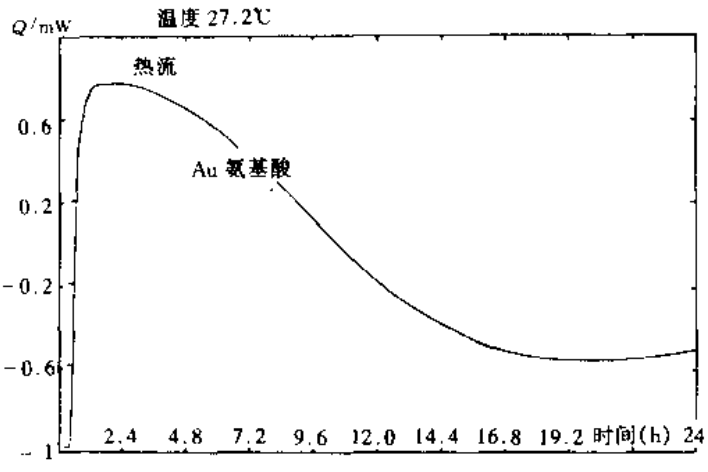

图 2-1　半胱氨酸对金粒溶解的热流曲线

上述两个实验都说明，无论是矿石中的金，还是纯金粒，在表生条件下均可被溶解。

在无机化学中，金是惰性金属之一。它不易氧化，不溶于水，不溶于单一酸。但表生条件下水溶性金及金的溶解机制的普遍存在，说明金在表生条件下呈现相当的活性，这与金在自然介质中的存在形式及自然体系中水溶液成分的复杂性有关。

R．W．Boyle（1979）早已指出，金的溶解度随金的粒度的变小而明显增大[15]。表 2-6 列出了金的溶解度随金的粒度减小而增大的具体数据[20]。

从表 2-6 中可看出，当金的粒度从 2.0mm 减小到 2μm 时，其溶解度将增加 5 个数量级。

表 2-6　金粒度与溶解度之间的关系（据关广岳，1989）

球体直径 D	球体数量	球体体积（cm^3）	溶解度 S（N）
2.0cm	1	4.2	
2.0mm	10^2	4.2×10^{-3}	$10^{-7.15}$
0.2mm	10^6	4.2×10^{-6}	$10^{-8.5}$
0.02mm	10^9	4.2×10^{-9}	$10^{-5.85}$
12μm	$10^{9.7}$	$4.2\times10^{-9.7}$	$10^{-5.5}$
6μm	$10^{10.6}$	$4.2\times10^{-10.6}$	$10^{-4.5}$
4μm	$10^{11.1}$	$4.2\times10^{-11.1}$	$10^{-3.5}$
2μm	10^{12}	4.2×10^{-12}	$10^{-2.5}$

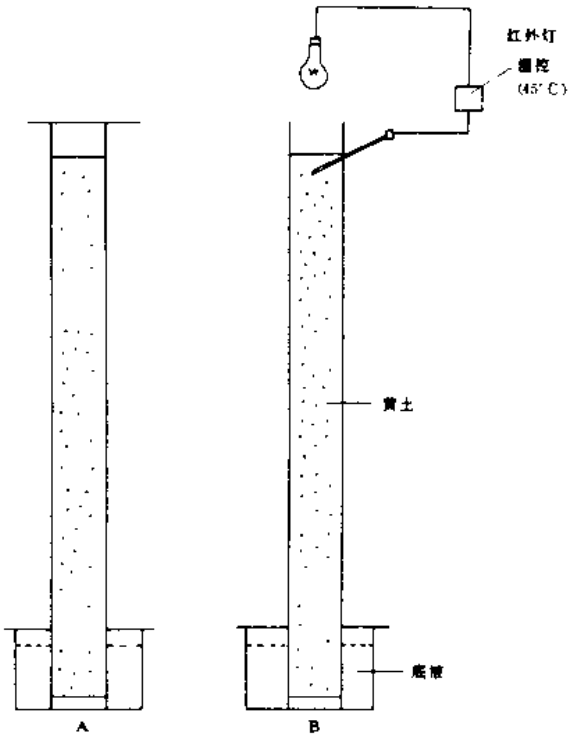

图 2-2　土柱试验装置略图

各种类型金矿床的金矿石中，自然金多数是以微米粒级的形式存在，微细浸染型金矿矿石中的金，更是大部分以＜1μm的粒级存在，部分可达 nm 级（即 0.001—0.1μm）。纳米科学认为，nm 级物质与其结晶块体在物理化学性质上有很大差异。如某些元素当它以结晶块体的形式存在时，表现为溶解度很小，化学惰性很大。当它处于 nm 粒级的状态时，就具有随水迁移的特性，表现为“粒径越小，化学活性越大”[21]。这就从金矿石的产出特征决定了金在表生条件下的可溶性和化学活性。

此外，金矿石在表生条件下遭受氧化时，必然经受硫酸、砷酸等无机酸及各种有机酸复杂成分的溶解作用，不可能处于一种纯水或单一酸的介质体系中，表生的复杂的介质体系从外因上决定了金将比实验室条件具有更大的溶解度和化学活性。

三、水溶性金的迁移机制试验

为了解水溶性金在金矿体上覆运积物中的迁移机制，探索利用金的后生异常找金的可能性，设计了土柱实验和土壤浸出液的电提取试验。

（一）土柱实验

实验装置与方法：A、B 两根塑料管，管长 110cm，内径 10cm，管内装黄土模拟外来堆积物（如图 2-2 所示）。

黄土采自山西无矿地段，黄土的元素本底含量见表 2-7。

柱下端底液皿中人工配制的底液模拟有一定矿质浓度的地下水，底液中元素的配制浓

度见表 2-8。

土柱 A，柱顶加盖，使盖下柱内空间中水蒸气呈饱和状态，模拟潮湿气候条件。

土柱 B，顶端上方 15cm 处安一热电偶以温控（45℃）红外灯，模拟温热、干旱气候条件。

表 2-7　土柱样品元素的本底含量 w_B

样　号	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Mo	Fe	Mn	As
893006	1.2	0.09	30.2	50.6	54.8	7.9	13800	451	6.1
007	1.3	0.08	41.0	48.4	48.8	7.6	13000	433	10.5
008	3.4	0.06	18.8	48.8	46.4	7.8	13400	455	7.6
009		0.06	19.5	53.4	47.0	7.9	12500	442	10.2
010	1.2	0.10	18.9	49.9	44.80	7.9	13000	441	10.2
算术平均值 X	1.233①	0.078	25.68	50.22	49.25	7.82	13140	444.4	8.92
标准差 S	0.057	0.017	9.83	1.980	3.837	0.130	487.85	8.70	1.96
变异系数 CV	0.046	0.219	0.382	0.039	0.077	0.016	0.037	0.019	0.219

①舍 008、009 号样后算得；w_B 单位：Au 10^{-9}；其它元素：10^{-6}。

表 2-8　土柱实验中底液的配制浓度 ρ_B

元　素	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Mo	Fe	Mn	As	F
ρ_B (mg/L)	0.73×10^{-2}	0.7×10^{-1}	3	0.3	2	0.3×10^{-1}	15	3	0.3	10

塑料管在间隔 10cm 的 9 个横截面的相互垂直方向各留 4 个直径 1cm 的圆孔，每柱共 36 孔，备不同时期（4 次）采柱内土样之用。采样孔在采样前、后均用透明胶纸密封。

实验共持续 218 天。实验中共对土柱采样 4 次，目的在于了解不同时期，土柱的不同部位元素含量的变化情况。所采样品分析 Au、Cu、Pb、Zn、Ag、As、Fe、Mn、Mo 9 种元素。

实验结果：4 次采样 9 种元素的平均值与本底值的对比情况，列于表 2-9 中。

表 2-9　土柱 4 次采样的 w_B 平均值与相应元素的 w_B 本底值之对比

	Au	Ag	As	Zn	Cu	Fe	Mn	Pb	Mo
本底值	1.755	0.078	8.92	49.25	25.68	1.31	444.4	50.22	7.82
A 柱平均	2.795	0.052	8.13	57.58	27.99	1.93	446.21	61.10	14.06
B 柱平均	2.470	0.044	7.75	56.42	28.44	1.93	441.35	56.19	13.94
A、B 柱平均	2.632	0.048	7.94	57.00	28.21	1.93	443.78	58.64	14.00
富集系数	1.50	0.61	0.89	1.15	1.09	1.47	0.99	1.16	1.79

w_B 单位：Fe 为 10^{-2}；Au 为 10^{-9}；其它元素：10^{-6}

根据表 2-9 所列各元素的富集系数，反映出各元素形成后生异常能力的顺序为：Mo—Au、Fe—Pb、Zn—Cu—Mn—As—Ag。

通过土柱模拟实验，可以得出如下初步认识：

1. 实验条件下的 Mo、Au、Fe、Pb、Zn、Cu 等元素能在上覆的堆积物中形成后生异常；

2. 所模拟的温热干旱气候条件下，下部底液虽能因毛细作用而上升，但存在明显的

矿质滞留现象；

3．所模拟的常温湿润气候条件下，在水蒸气饱和的上覆堆积物中，后生异常的形成主要在于元素的扩散、吸附作用；

4．在常温湿润气候条件下，也能形成与温热干旱条件下同样强度的后生异常。

（二）土壤水浸出液的电提取试验与现场水电化学测量试验

选择山东招远地区进行水电化学测量试验。在大尹格庄金矿区，进行土壤水浸出液电提取试验，其方法是将采集的土壤样品放入蒸馏水中，用水电化学测量使用的装置进行电提取。室内试验结果表明，对于一般的金矿化样品，用电提取方法能提取 Au、Ag 全量的0.5%—1%。两个试验都首次发现在正、负电极上均能测出 Au、Ag 含量。其中土壤电提取 Au 和 Ag 的异常以负极上的异常反映更为清晰，与基岩出露处附近土壤中的 Au 异常具有较好的对应关系。

土壤水浸出液电提取试验的结果，也再一次证明了疏松物中水溶性金的普遍存在及其含量范围，证明水溶性金可在电场作用下迁移。而水电化学和土壤水浸出液电提取试验中，正、负电极均有金含量检出的事实，为含金水溶液中金的形态的研究，提出了新的课题。

从上述金的溶解和迁移机制实验的结果可看出，金在表生条件下可被无机酸和有机酸溶解，被溶解的水溶性金在疏松物中，可因毛细管作用、扩散、吸附等多种作用迁移，也可在电场作用下，产生电化学迁移，形成金的多种后生异常，成为掩埋金矿床的地表地球化学标志。

四、有关含金水溶液中金的形态特征的讨论

金的水化学异常和疏松物中水溶性金的普遍存在，以及金矿石用蒸馏水的浸泡实验结果，已使人们从金元素是一种惰性金属的传统概念中解放出来。金的表生地球化学性质和行为的新认识，将推动金矿化探的发展和金异常评价水平的提高。

在水溶性金特征的研究过程中，进一步研究了含金水溶液中金的形态特征。

东北寨矿区土壤浸出液中已检出了 20×10^{-9} 的 Au^{3+}。

根据聚氨酯泡沫塑料在弱酸性介质溶液中选择性定量吸附 Au^{3+} 的特性[17]，已证实了 Au^{3+} 的大量存在。

根据采集水样测得我国赣中地区天然水属低矿化度的重碳酸-氯化物-钙-镁水，Eh 值平均为 380mV，pH 值为 6.5，$S_2O_3^{2-}$ 和 Cl^- 的浓度分别为 0.0049 和 2.4mg/L 的具体条件，通过包括 48 种形式的金的化合物热力学参数数据库的建立和自行编制的水中金存在形式的计算机程序（AUSP）的计算，认为赣中临川茅排、温泉地区浅部水中 $Au(S_2O_3)_2^{3-}$ 是金的主要存在形式，其次是 $Au(OH)_2^-$，金在其中呈正一价。水中有极少量的 $Au(OH)_3$，其中金呈正三价。

在胶东地区金矿的水电化学测量试验和土壤水浸出液的电提取试验中，均首次发现正、负电极上均有金元素析出，说明含金水溶液中，既有金的阳离子，又有络阴离子，还可能有带电荷的胶体金的存在。

在表生带水体或土壤水浸出液中，就 Au 存在的价态而言，金元素具有 Au^+、Au^{3+} 和胶体金（Au^0）三种形态。但上述资料说明在不同景观条件下，不同类型金矿区水体或疏松物水浸出液中，甚至同一条件下，由于距矿体的远、近不同，三种形态金的比例可能是不同的。研究不同条件下含金水溶液中不同形态金的比例，是研究表生条件下金的溶解、

迁移机制的前提，并进而预测地表活动性金的沉淀条件。从地球化学环境的角度预测砂金矿沉积的条件。这一研究也是确定有效找矿标志，选择合理分析方法的重要依据。

因此，研究表生带水体或土壤浸出液中活动性金的形态，不仅在进一步揭示金的表生地球化学性质方面有重要的理论意义，而且对覆盖区金的地球化学找矿方法的改进方面，具有重要的实际意义，将产生良好的找矿效果。是一项值得进一步研究的基础性工作。

第三节　表生介质中金的富集粒度特征的研究

金矿地球化学勘查中，由于金的颗粒效应而造成的样品代表性问题，是长期困扰金矿化探工作的重要问题之一，为此，国内外著名勘查地球化学家都曾著文从理论上，实践上进行讨论[3][16]。

金矿化探中样品代表性问题的解决，应从疏松物中金的存在形式和金在疏松物中粒度分布特征的研究入手。

本章第一节的研究成果已表明，在以含金石英脉形式产出的金矿化地段的疏松物中，金元素主要以游离自然金的形式存在，为金矿化探中金的颗粒效应的存在提供了实验依据。

有关金元素在疏松物中的粒度分布特征，早在 1982 年，湖北省地矿局物探队胡协成等在总结湖北省 28 个典型矿床水系沉积物样品中元素富集粒度规律后指出，包括金元素在内的大多数元素都倾向于在＞60 目和＜140 目的粒级中富集[16]。

根据在甘肃文县何家湾金矿点附近和矿脉上方采集 2 个水系沉积物大样和 3 个 B 层土壤大样所进行的金的富集粒度试验结果列于表 2-10 中。

表 2-10　甘肃文县何家湾金矿点金在疏松物各粒级中的分配

含量 / 粒度 / 样号	20—60 目	60—100 目	100—140 目	140—200 目	＜200
BSH-1	241.2	233.1	97.5	59.7	149.1
BSH-2	644.0	153.7	229.4	185.8	129.7
BTH-1	162.2	100.6	108.8	269.4	119.6
BTH-2	181.2	143.1	89.1	162.8	228.8
BTH-3	158.2	452.9	134.8	180.6	286.6

w（Au）单位为 10^{-9}。

表中 BSH 为水系沉积物样品，BTH 为土壤 B 层样品。从表 2-9 中亦可看出金元素在粗粒级和细粒级中富集而在中间粒级中贫化的趋向。其中，水系沉积物样品更倾向在粗粒级中富集，土壤样品更倾向在细粒级中富集。

金元素在粗、细两端粒级中富集的统计规律，与铜、铅、锌等元素的富集粒度分布规律、及土壤的自然粒度分布量的规律是一致的，可以认为具有一定的普遍性。

第四节　金的表生地球化学特征在找矿中的应用

一、水溶性金的存在形式在找矿中的应用试验

金矿区疏松物中金的各种存在形式均可作为有效的找矿标志，其中水溶性金的应用条

件最为广泛，操作最为方便，成本最为低廉，最具应用前景。

利用水溶性金指标找矿的试验工作按剖面试验和面积性试验两种方式进行。水溶性金的提取也可按两种方式进行：一是直接测定疏松物中的水溶性金，即测定疏松物浸出液中的金含量；一是测定被聚氨酯泡塑富集的水溶性金。即是将一定重量的聚氨酯泡塑埋入取样点的土坑中，在覆土上浇淋一定体积远离矿区，未受矿化影响的背景水，一定时间后取出泡塑，洗净后灰化，测定其中的金含量。

（一）剖面性的试验工作

1．东北寨矿区的试验

试验工作在东北寨矿区第7勘探线上进行，试验结果表示在图2-3中。

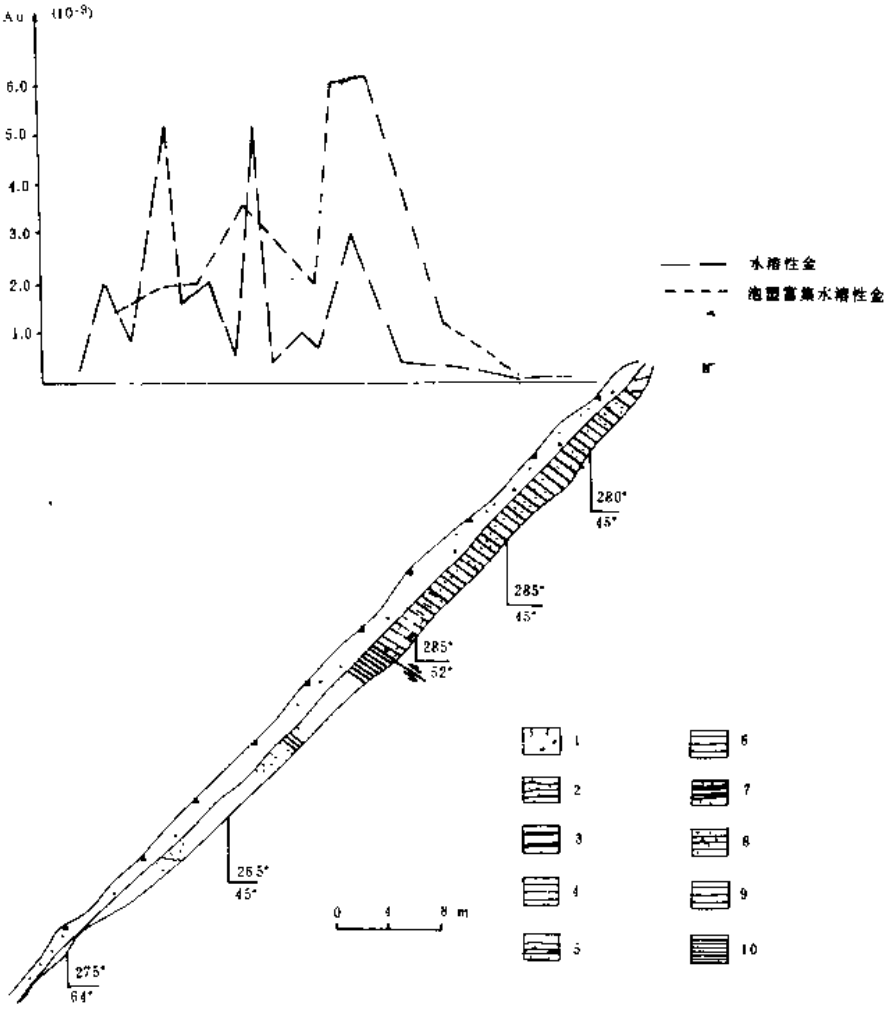

图2-3　东北寨矿区Tc9土壤中水溶性金、泡塑富集水溶性金的含量曲线图

1—残坡积层；2—碳质绢云母片岩；3—粉砂质板岩；4—灰岩；5—绢云母碳质板岩；6—白云质灰岩；7—钙泥质板岩；8—泥质条带状灰岩；9—碳质绢云母千枚岩；10—矿体

从图2-3中可看出，土壤浸出液中测定出的金含量和由泡塑富集的水溶性金的含量变化曲线均能很好的指示矿体位置，其中由泡塑富集的水溶性金所显示的异常更为明显。不过，在实践中，泡塑吸附条件的一致性较难掌握。

尽管根据聚氨酯泡塑选择性吸附Au^{3+}的特点，可以认为泡塑富集的水溶性金并不是水溶性金含量的全部，但由于泡塑的富集作用，仍然明显强化了异常。

2．宽坪沟金矿区试点研究

宽坪沟金矿点位于河南省嵩县。该矿点是1:200000区域化探发现的，现正在进行矿产勘查之中，矿区位于熊耳山东南坡，海拔800—1100m，相对高差300—500m。区内植被茂盛，主要为次生阔叶林。矿区位于中生代燕山期华山花岗岩体西南侧。区内出露中元古界熊耳群偏基性中性火山岩。沿岩体外接触带发育一条北西向断裂。矿化主要发育在与主断裂有关的次级北西向构造蚀变带中。主要热液蚀变有硅化、粘土化、碳酸盐化、绿泥石化等。伴随热液蚀变发育黄铁矿化等矿化，偶见自然金。地表矿化不连续，沿走向发生尖灭再现现象，品位变化较大，未能圈出有工业价值的工业矿体。

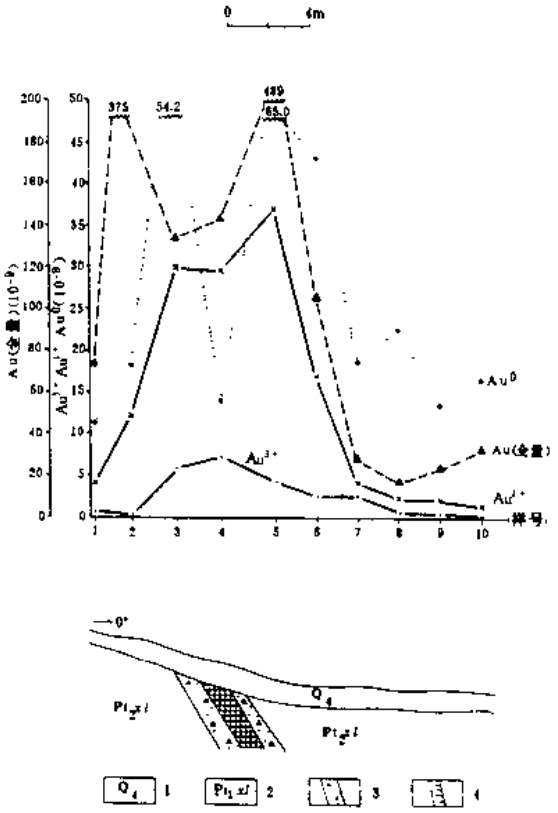

图2-4 宽坪沟金矿区土壤偏提取金含量变化曲线图

1—第四系残、坡积层；2—元古界熊耳群安山玢岩；3—构造蚀变带；4—金矿体

为进一步评价该矿点，在主要含矿断裂上采集了土壤样品进行了试点研究。试点测量结果（图2-4）表明，在含矿构造蚀变带，金的几种存在形式均出现清晰异常。异常参数见表2-11。由表可见，在构造蚀变带上方土壤中，水溶态金出现清晰异常，占金的全量的比例较大，并有强的有机态金的异常。而在蚀变带上方游离状态的自然金含量并不高，占金的全量的40%左右。这种异常特征类似银洞坡金矿远矿地段异常特征。因此，推测在深部可能存在有价值的金矿体。这种推断意见与深部工程揭露符合。在剖面下方50、100m硐探表明，构造蚀变带发育，金矿体厚度由地表几厘米至几十厘米，增加到1m左右，品位$>5\times10^{-6}$，最高达$n\cdot10\times10^{-6}$。该矿区地方上已准备建矿开采。

表2-11 宽坪沟异常特征表

部　位	水溶态金（Au^{3+}）	有机态金	自然金（Au^{0}）
下　盘	0.44/0.76	8.0/4.37	14.7/10.14
构造蚀变带	5.64/3.47	32.09/17.09	44.4/43.25
上　盘	1.93/5.08	7.70/14.6	27.97/36.57

注：分子为w（Au）单位为10^{-9}，分母为其占全量的百分数。

（二）面积性的试验工作

1．银洞坡金矿区的试验研究

银洞坡金矿区位于河南省桐柏县，是桐柏-大别山金银及多金属成矿省围山城金银成矿带的主体组成部分之一。大地构造位置属秦岭褶皱系北秦岭褶皱带。矿带处于桃园-梁

湾花岗岩体西南侧，沿走向290°—300°的围山城韧性剪切带展布，东西长约30km，东宽西窄，平均宽约1km。银洞坡金矿属大型金矿。矿区出露地层为上元古界二郎坪群歪头山组，为一套中浅变质火山-沉积岩系。主要岩性为云母变粒岩、云母石英片岩、角闪片岩、大理岩。金矿体集中产于歪头山组第二、三岩性段，空间分布受河前庄倾伏背斜转折端和枢纽倾伏方向控制，在轴部呈鞍状，两翼呈似层状、透镜状，形态与背斜一致。矿体受高角度层间破碎带及含矿岩层（含炭变粒岩、片岩）双重控制，产状与地层产状一致，平行排列，呈多层状出现。银洞坡金矿属变质热液型矿床。区内围岩蚀变广泛而且强烈，以硅化、绢云母化、碳酸盐化、粘土化为主。硅化与矿化关系密切。矿石为含金属硫化物、氧化物及金、银矿物的构造蚀变岩石。

试点区位于桐柏山北坡，海拔220—350m，相对高差50—100m，属构造侵蚀低山。区内植被主要为次生阔叶林及灌丛。区内基岩裸露，山坡分布残坡积物，厚度50—100cm，沟谷中为近距离洪水冲积物，厚几米至几十米。土壤属棕壤与黄壤的过渡类型，山坡为黄棕壤，沟谷为黄胶土，呈弱酸性，pH 5.5—6.5。区内气候温暖湿润，年降水量1000—1200mm。水质类型为 HCO_3^--Ca 型淡水。

试点研究工作选择在矿区西段W4、W6、W15、W18勘探线剖面进行了土壤、岩石测量。这一地段以隐伏矿体为主，详细产状见表2-12。

表2-12 矿体出露及剥蚀程度表

线号	矿体					
	1	3-1	55	54	52	51
W4	隐伏，65m以下见矿	部分剥蚀，主体在地下	大部分被剥蚀	全部被剥蚀	全部被剥蚀	大部分被剥蚀
W6	隐伏，100m以下见矿	隐伏，55m以下见矿	中等剥蚀	全部被剥蚀	全部被剥蚀	大部分被剥蚀
W15	隐伏，埋深>300m	隐伏，埋深>250m	隐伏，90m以下见矿	部分剥蚀	部分剥蚀	部分剥蚀
W18	隐伏，埋深>300m	隐伏，埋深>300m	隐伏，130m以下见矿	隐伏，30m以下见矿	部分剥蚀	残留矿体

研究区土壤中不同形态金含量列于表2-13。与岩石测量对比可以发现不同形态金含量变化趋势与岩石中的基本一致。表明研究区土壤与基岩有着明显的继承性。土壤中的金异常完全可以反映基岩中金矿化的存在。选用土壤测量来评价测区内的含金性是可行的。

表2-13 银洞坡矿区土壤中不同形态金含量特征表

部位	水溶态	有机态	自然金	全量
矿上	$\frac{2.06}{1.04}$	$\frac{28.77}{8.08}$	$\frac{221.85}{66.25}$	349.4
近矿	$\frac{1.19}{3.05}$	$\frac{2.17}{6.43}$	$\frac{25.03}{50.00}$	50.05
远矿	$\frac{0.65}{3.3}$	$\frac{3.63}{10.1}$	$\frac{20.8}{32.3}$	41.7
背景	$\frac{1.04}{14}$	$\frac{1.15}{14}$	$\frac{2.28}{37}$	5.53

注：分子为 w_B（Au）单位为 10^{-9}；分母为其占全量的百分数。

研究区不同存在形式金的土壤测量结果见图2-5。从表及图中可以看出：对水溶性金

来说，其异常呈带状主要分布在背斜两翼，尤其是呈半隐伏状态的51号金矿体所在的背斜北翼含矿带以及轴部矿带东南部地段的半隐伏矿体上方；有机态金异常亦呈带状沿背斜轴部矿化带和北翼矿化带延伸，其异常强度与水溶态相当，但异常范围更大更有规律；自然金异常基本上与全量金异常相似，均呈面型包围了全部金的矿化带，异常范围大、强度高、浓集梯度明显、浓集中心与地表出露矿体相吻合。

以上不同存在形式金异常分布特征表明，在表生地球化学作用下，水溶态和有机态的金可以迁移较远的距离，对隐伏金矿化具有一定的指示意义，是寻找隐伏金矿化的重要标志。而自然金则主要在矿体中或其附近分布，是寻找出露金矿体的重要标志。

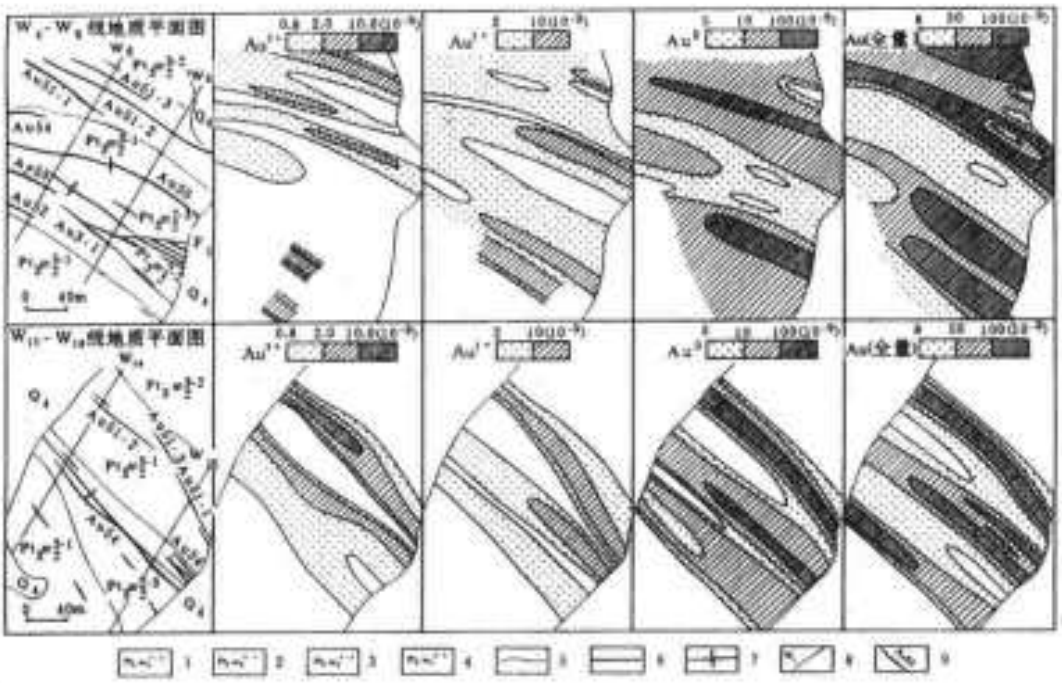

图2-5　银洞坡金矿区土壤偏提取金异常图

（上元古界歪头山组中部）

1—三段第二层；2—三段第一层；3—二段第三层；4—二段第二层；5—地质界线；6—实测断层；7—背斜轴；8—勘探线；9—金矿体及编号

2．东坪金矿区试验研究

测区位于河北省崇礼县东南约15km，海拔1600—2100m，相对高差300—500m，属构造剥蚀山地地形。水系较发育，但多为季节性水流，水量变化大。测区在尚义-崇礼-赤城深大断裂南侧约10km，区内主要分布水泉沟碱性杂岩和太古界桑干群洞沟河组绿色变粒岩。近东西向尚义-赤城深大断裂南侧的低序次压扭性断裂控制着区内金矿的分布，主要有北西西、北西两组。东坪金矿的赋矿岩相为石英正长岩和石英二长岩系列。已发现含金矿脉几十条。围岩蚀变强烈，主要有钾长石化、硅化、绢云母化、粘土化、碳酸盐化等，其中钾长石化、硅化与金矿化关系最密切。矿石为构造蚀变岩型矿石，金属硫化矿物主要为黄铁矿，其次为方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等。金矿物以自然金为主，其次为碲金矿等。该矿床金品位高，储量达大型规模，属混合岩化热液蚀变岩型，被人们称之为“东坪式金矿床”。

表 2-14　东坪地区偏提取金异常特征对比表

异常特征	水溶态	有机态	自然金	全　量
异常面积（km^2）	13.5	6.5	6.5	8.5
异常强度（10^{-9}）	0.63	5.10	5.88	35.84
衬　　值	3.2	4.3	4.9	6.9

在区内进行了水系沉积物试点测量，面积约 40km^2，采集水系沉积物样品 42 件，除测定水溶态、有机态、自然金和金的全量外，还测定了 ΔC（土壤饱变碳酸盐）。各种存在形式金的地球化学图见图 2-6。总的来看，各种形态金异常均清楚地圈定了东坪金矿区的范围，异常呈北西西向带状沿水泉沟碱性岩体内接触带分布，异常浓集地段对应于几个有价值的矿脉出露部位。经对比后发现（表 2-14），水溶性金异常面积最大，除已知的东坪矿区外，在矿区北东方向出现大面积异常。自然金和有机态金异常围绕矿区分布。有意义的是，金的全量和自然金异常等指出矿区东部畜湾子南、北有进一步找矿价值；而水溶性金异常在东坪矿区东北部更发育，推测可能是隐伏金矿床上方的异常，ΔC 测量出现相似的异常。综上所述，水系沉积物偏提取金异常不仅可以很好地圈定成矿有利地区，提供找矿靶区和依据，而且可以利用不同存在形式金异常分布与矿床（体）的关系，为寻找隐伏金矿床提供手段和地球化学依据。

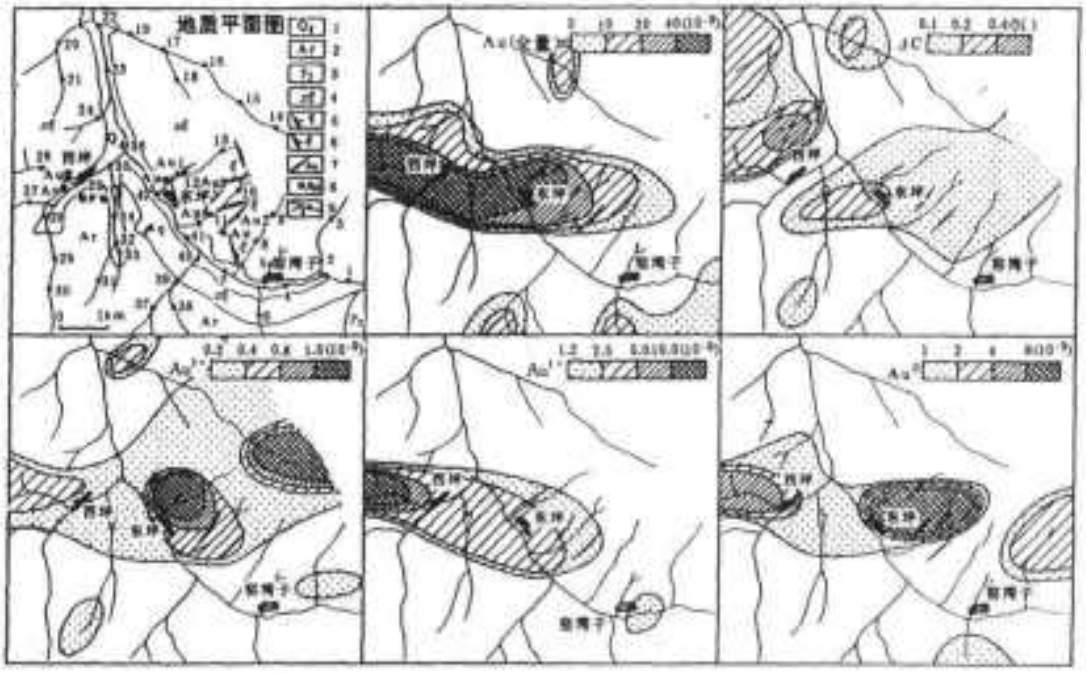

图 2-6　东坪地区水系沉积物测量偏提取金、ΔC 地球化学异常图

1—第四系冲洪积物；2—太古界含榴角闪透辉变粒岩；3—燕山期花岗岩；4—混合岩；5—石英脉；6—正长岩脉；7—金矿体；8—采金矿硐；9—水系及采样点位

二、金矿区疏松物中金的富集粒度特征在找矿中的应用试验

根据金元素在疏松物中既有在粗粒级中富集，又有在细粒级中富集的倾向，可以想象，金的颗粒效应在粗粒级中的表现，应比细粒级中更为明显。同时，由于自然金的延展性，样品磨细过程中，金的粒度状况并无明显改善，对金的颗粒效应不能起到明显的消除

作用。因此，可以认为，根据金在疏松物中的粒度分布特征，在条件适合地区，采用直接分析细粒级样品的方法，可以取得与常规要求方法相似的找矿效果。并可有效地抑制样品中的颗粒效应，使样品更具代表性。还可省略样品粉碎流程，降低找矿成本。

基于以上认识，在东北寨矿区第24勘探线和陕西镇安地区进行了细粒级样品的找矿试验研究。

在东北寨矿区主要是进行土壤样品的粒度对比试验。取样时，同一样品分装两袋，一袋过20目筛后经磨细再分析金；一袋过200目筛后直接分析金。根据－20目和－200目样品分析结果所作的含量变化曲线表示在图2-7中。从图中可看出，根据－200目样品分析结果所显示的异常，与－20目样品所显示的异常吻合极好。也与24线矿体出露位置相对应。这一试验结果表明，在条件合适地区用直接过筛的－200目样品代替土壤地球化学测量的常规方案是存在应用前景的。

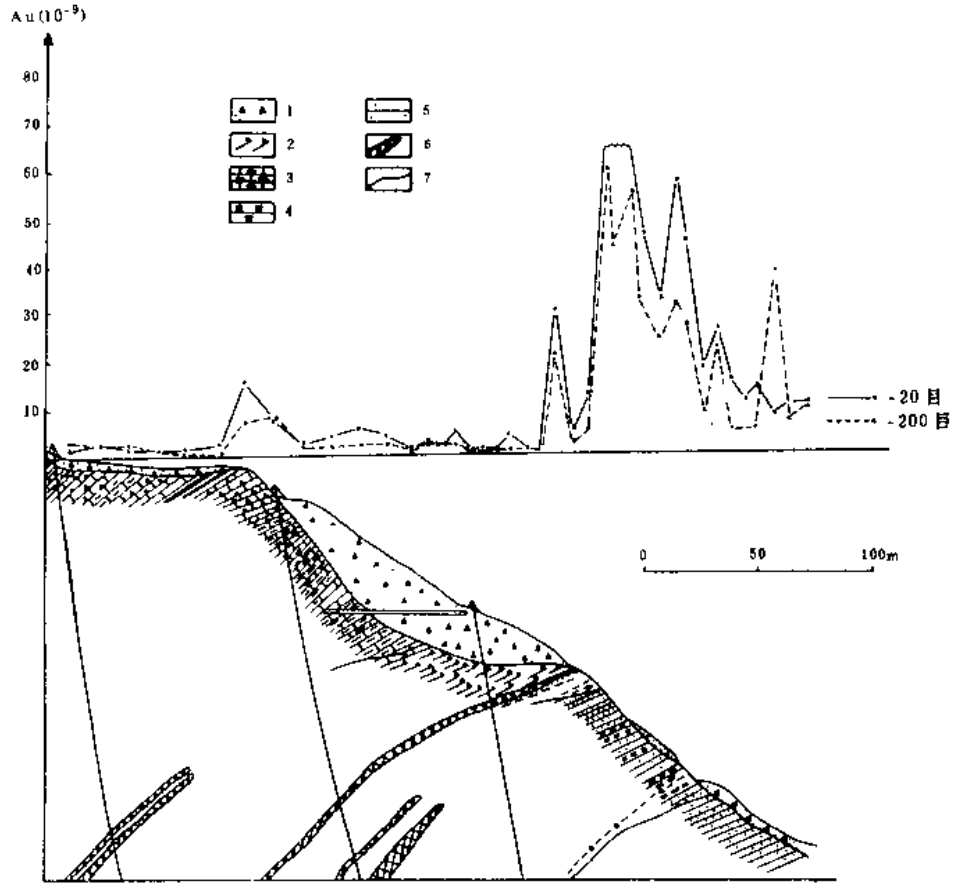

图2-7　东北寨矿区24线土壤中不同粒级样品的金含量变化曲线图

1—残坡积层；2—断裂带；3—白云质灰岩；4—千枚岩；5—砂岩；6—金矿体；7—断层面

在陕西镇安地区所进行的是水系沉积物样品的粒度对比试验。

镇安地区位于南秦岭北缘多金属、贵金属成矿带的东段，金矿化主要发育在少硫化物的石英脉及其两侧的蚀变围岩中。

在进行1:50000水系沉积物地球化学测量时，开展了金的粒度对比试验，每一样品弃去＞5目的砾石，然后过160目样筛，＞160目的样品经磨细后送分析，＜160目的样品直接送分析。根据两种粒级样品分析结果所圈定的金异常，表示在图2-8、图2-9中。

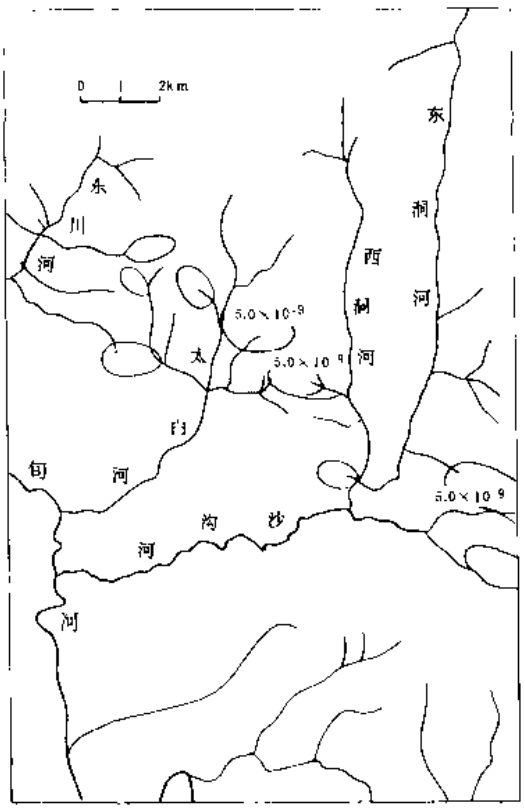

图 2-8 陕西镇安地区水系沉积物测量 5—160 目粒级样品金异常图

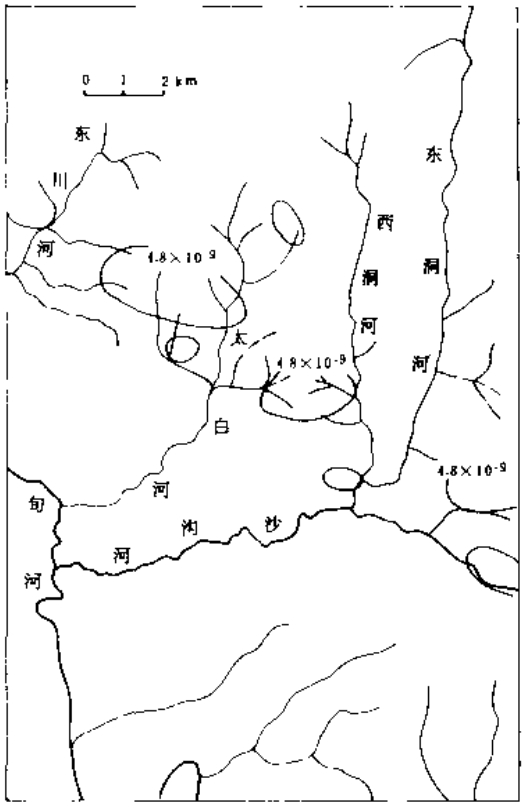

图 2-9 陕西镇安地区水系沉积物测量＜160 目粒级样品金异常图

通过二异常图的对比可以看出，二图中各异常空间位置基本吻合，已知矿点均在二图的异常范围内，从一个例子说明在 1∶5 万水系沉积物地球化学测量中，细粒样品可与常规样品一样取得相似的找矿效果。

第五节 结 语

总结本章的研究内容，取得的主要成果是：

1．为顺利进行金的存在形式研究，研制和完善了三种可供选择的疏松物中金的存在形式循序提取分析方案。

2．各种类型金矿床发育区的疏松物中，普遍地存在水浸出的金，这一现象具有重要的实际意义和理论意义。

3．含金石英脉型的金矿化地段，疏松物中的金，主要以游离自然金的形式存在，为疏松物中粒金效应的存在提供了实验依据。微细浸染型金矿化地段的疏松物中，金的主要存在形式，除游离自然金外，有机态或吸附态的金也占有相当比例。

4．金矿石的浸泡实验表明，即使在蒸馏水的短期浸泡条件下，矿石中的金也能部分被溶解，意味着表生条件下天然水可能是金溶解的主要介质。

5．无论是模拟的干旱还是温湿气候条件下，在金矿体上覆堆积物中均可能形成后生地球化学异常，金及其伴生元素在上覆堆积物中富集系数由高到低的排序为：Mo—Au、Fe—Pb、Zn—Cu—Mn—As—Ag。

6．水电化学和土壤水浸出液电提取试验，均首次发现正、负电极上都有金元素富集的现象。这一事实为地表含金水体或疏松物水浸出液中金的形态的研究，提出了新的课题。

7．含金水体或疏松物水浸出液中，金元素具 Au^{3+}、Au^{+} 和 Au^{0}（胶体金）3 种价态，在不同条件下，3 种价态的相对比例可能是不同的。研究不同价态金的空间分布是一项具有重要理论意义和实际意义的基础研究工作。

8．在东北寨金矿区的土壤水浸出液中，检出了 10 种阴离子，12 种阳离子和 7 种氨基酸，首次为我国提供了一个金矿区土壤水浸出液的成分资料。

9．氨基酸对金粒溶解的热化学过程是一个吸热、放热振荡的动力学过程。

10．金元素在金矿区疏松物中表现出在粗粒级和细粒级两端富集的倾向。水系沉积物样品中金更倾向在粗粒级中富集；土壤样品中，金更倾向在细粒级中富集。

11．利用土壤水浸出液中金的含量指标，在东坪、宽坪沟、银洞坡、东北寨等金矿区，均取得了较好的找矿效果，土壤水浸出液中的金可成为寻找隐伏金矿的有效地球化学指标。

12．在条件合适的地区，无论是水系沉积物测量还是土壤测量，采用＜160 目天然粒级的样品直接分析，可以取得与常规方法相似的找矿效果，并可降低找矿成本，压抑金的颗粒效应，提高样品的代表性。

第三章　寻找隐伏金矿床的气体地球化学方法

第一节　金矿床中的 Rn、CO_2、Hg 气源

氡是地壳中三大放射性系列（铀系、钍系和锕系）的中间性产物，是一种放射性气体。这三个系列中的气体核素分别是铀氡（^{222}Rn）、钍氡（^{220}Rn）、锕氡（^{219}Rn），统称射气。CO_2 的来源很多，其中一个重要来源是矿床中的硫化矿物氧化时产生的硫酸与围岩或脉石矿物中的碳酸盐矿物发生作用生成 CO_2。当矿床中伴生有汞时，在氧化带中当硫化物氧化成硫酸盐时，汞易于从化合物中还原成 Hg^0[24]，并进一步转化为汞蒸气。与矿床有关的 Rn、CO_2、Hg 气，从矿源向地表沿着压力梯度最大或阻力最小的裂隙迁移，并在上升途中与各种介质相互作用，在矿床周围不同介质中形成不同类型的气体分散晕，这种晕是一种动态体系。

金矿床中的 Rn、CO_2、Hg 气源是指金矿床中伴生的铀、碳酸盐矿物和汞。几个金矿床中伴生铀、汞和碳酸盐矿物的情况列于表 3-1 中。从表中可知，瑶沟、拉日玛、北干沟等矿床中伴生有铀、且与围岩有较明显的差异，发现了 Rn 异常，Rn 法地质效果好；拉日玛、香炉碗子矿床中伴生有 $n\times10^{-6}$ 以上的汞，Hg 法有较清晰的异常；瑶沟、香炉碗子、北干沟等矿床中伴生有碳酸盐矿物时 CO_2 法能发现清晰的异常。

表 3-1　四个金矿床中的铀、汞和碳酸盐矿物及三种方法发现异常的情况

矿床	类型	铀含量（10^{-6}）		汞含量（10^{-6}）	碳酸盐矿物	发现异常情况		
		金矿石	围岩	金矿石		Rn 法	CO_2 法	Hg 法
瑶沟南区	构造蚀变岩型石英脉型	7.77	3.21	0.24	方解石	有异常	有异常	无异常
香炉碗子	构造蚀变岩型	1.90	1.37	2.56	方解石	无异常	有异常	有异常
拉日玛	微细浸染型	57.17	22.76	90.78	无	大异常	无异常	大异常
北干沟	石英脉型	1.35	0.66	0.08	方解石	有异常	有异常	

有些金矿床中的自然金与铀矿物、碳酸盐矿物、汞的矿物共生，也是 Rn、CO_2、Hg 气的来源之一，如东秦岭丹凤地区某花岗伟晶岩型铀矿床的人工重砂样中发现自然金与晶质铀矿的连生体[25]。香炉碗子矿床的矿石中发现自然金就产在方解石中。拉日玛矿床中的橙红石为含金 3.44% 的汞矿物[26]。

矿区地下水中的 Rn 和游离 CO_2 的浓度大大高于地表水中的 Rn、CO_2 浓度，根据实测资料得出瑶沟矿区地下水中的 Rn、CO_2 浓度分别为地表水 Rn、CO_2 浓度的 2.6—8.5 倍和 18—1650 倍，可见矿区地下水中的 Rn、CO_2 也是壤中气 Rn、CO_2 的重要来源。

第二节　气体测量仪器、设备、采样技术和工作方法

一、仪器和设备

壤中气 Rn 的测量采用上海电子仪器厂生产的 FD-3017RaA 测氡仪，其灵敏度为 0.37 (Bq/L)[1]。这是一种现场可测出结果的轻便测氡仪。

壤中气 CO_2 瞬时测量采用了二种仪器：一种是在配置锥形螺纹采样器，双层静电滤膜过滤器等必要的辅助设备后，将北京分析仪器厂生产的实验室用的 GXH-305 红外 CO_2 检测仪移植到野外现场测定壤中气 CO_2 的浓度[2]。该仪器具有灵敏度高、稳定性好、分析速度快、水蒸气的干扰小等特点，仪器的测定范围为 10×10^{-6}—20000×10^{-6}，最低检出量为 10×10^{-6}。另一种是采用二氧化碳快速检测管，其检出限为 $0.2\times10^{4}mg/m^3$。这是北京环境保护研究所的专利产品，可在现场快速半定量测定大气中的 CO_2 浓度。在研制成壤中气（Rn、CO_2）两用采样器等配套设备和开展有关试验研究工作的基础上，成功地实现了壤中气 Rn 和 CO_2 的联测。

壤中气汞量测量采用了两类仪器：一类是采用原子吸收分光光度计原理的 XG-3 型测汞仪或 XG-4Z 塞曼测汞仪，其检出限为 0.02ng。另一类是采用 JM-4 型数字金膜测汞仪，该仪器是基于金膜吸附汞蒸气时，其电阻率便发生变化。通过测量金膜电阻率变化来测定 Hg 的含量，它的优点是体积小、轻便、可带到现场测量。其检出限为 0.002ng。

二、采样技术

（一）壤中气 Rn-Hg 联测法

将 Rn 捕集器和 Hg 捕集器串接在同一气路中，用抽气筒抽取壤中气。捕汞管安放在该气筒的进气口，为了防止水气和微尘的干扰，在进气口上接静电滤膜过滤器。抽气分二次进行，总共抽取 2.5L 壤中气，先富集 Hg，后捕集 Rn。Rn 捕集片收集 Rn 子体时间为 2min，壤中气体积为 1.5L[27]。Rn-Hg 联测法采用有较好密封性能的螺纹锥形采样器。

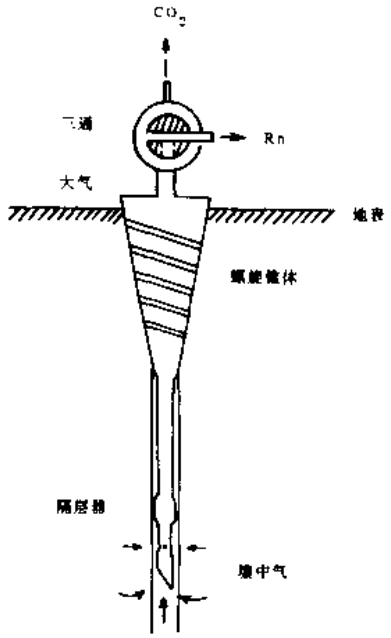

图 3-1　壤中气（Rn-CO_2）两用采样器

（二）壤中气 Rn-CO_2 联测法的研制

1．新研制成壤中气 Rn-CO_2 两用采样器（图 3-1），其结构有三个特点：一是上部有三通阀门，用于 Rn-CO_2 联测；二是下部有隔层器，可阻止孔中上部空气窜入孔底；三是导管内径细，仅 3mm，可减少大气被带入孔中。

2．检测壤中气 Rn 对 CO_2 浓度的影响

---

[1] 壤中气 Rn 测量的是放射性活度 A 的浓度 c_A（Rn），为书写方便均简写为 Rn，单位为 Bq/L。

[2] 壤中气 CO_2 的浓度，系为质量分数 ω（CO_2），单位为 10^{-6}。另一方法测定结果，系为质量浓度 ρ（CO_2），单位为 mg/m^3。为书写方便均简写为 CO_2，但以不同单位相区别。

同一孔中多次测 Rn 测 CO_2 的实验数据列于表 3-2 中。从表中可以看出：测 Rn 之后所测得的 CO_2 浓度总是比单独测定 CO_2 的浓度高，以后便很快出现相同的数据，看来在同一孔中先测 Rn 后测 CO_2 所带来的影响是测到了底层土壤中的 CO_2 浓度，从而有利于获得来自深部的地质体信息。其原因是先测 Rn 时抽走了 1.5L 的气体，之后补充进来的气体来自更深层，再抽小体积（50mL）气样测 CO_2 时为补充进来的底层土壤气样中的 CO_2 气体。

表 3-2　同一孔中多次测 Rn 测 CO_2 的实验数据

孔　号	抽气顺序号	ρ_{CO_2}/（$10^4 mg \cdot m^{-3}$）	抽气顺序号	$c_{A(Rn)}$（Bq/L）
1	1	3.2	2	116
1	3	4.0	4	117
1	5	4.0	6	117
2	1	2.6	2	89
2	3	3.4	4	127
2	5	3.8	6	121
2	7	3.8	8	107

（三）采样深度

为了获得一个合适的采样深度，在异常点上进行了采样深度的实验。结果表明 Rn-CO_2 浓度是随着采样深度的加深而升高。考虑到既不漏掉异常又能排除表上层的影响，且又有一定的工作效率，因而提出采样深度以 70cm 为宜。

（四）二氧化碳快速检测管的读数时间

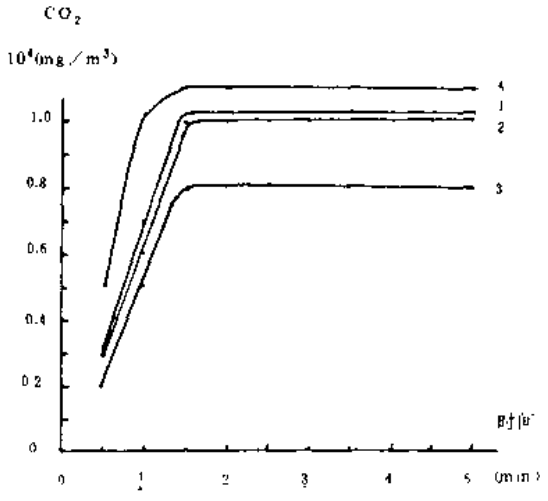

图 3-2　CO_2 检测管读数时间实验曲线

为了实现壤中气 Rn-CO_2 联测，需要查明 CO_2 检测管在进样体积一定的条件下，其变色饱和点的最佳读数时间。为此在 CO_2 浓度不同的四个孔中进行了读数时间实验。用小型抽气泵抽取壤中气样 50mL 进入检测管内，每隔 30s 读数一次，共读数 10 次，所得结果示于图 3-2。从图中可以看出，曲线的拐弯处就是该管的变色饱和点，其对应的读数时间为 1.5min，即 90s，因而，90s 为该检测管的最佳读数时间。

（五）CO_2 瞬时测量与埋管测量的对比实验

CO_2 瞬时测量与埋管测量的对比实验结果示于图 3-3 和表 3-3。从图 3-3 中可以看出，两种方法的曲线相似，在霏细斑岩脉的上方均有异常显示，这表明瞬时测量可以取得与埋管测量同样的地质效果。瞬时测量还提高了异常衬度。图 3-3 中埋管测量 CO_2 的异常衬度为 2.1，瞬时测量则为 6.8。表 3-3 也表明瞬时测量提高了异常衬度。其原因是埋管法测量的是整个采样孔中及其周围的气样中

的 CO_2 浓度，并且是24h的平均值；而瞬时法是用两用采样器和先测Rn后测 CO_2 的新方法，测量的是底层气样中的 CO_2 浓度。

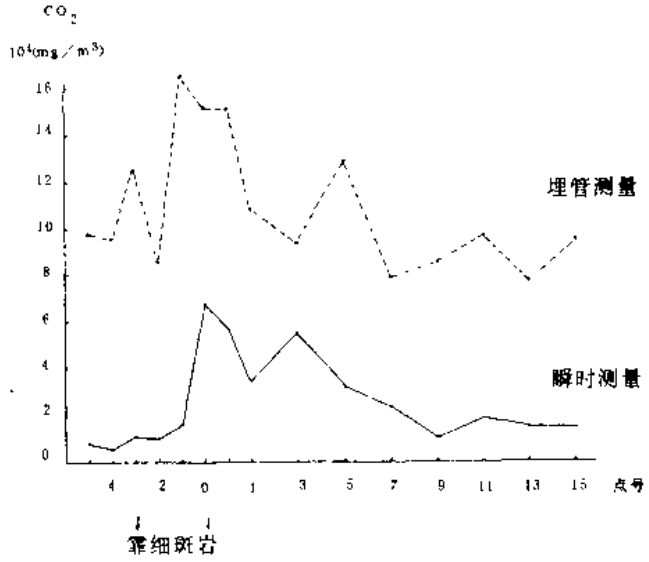

图3-3 壤中气 CO_2 瞬时测量与埋管测量对比曲线

（香炉碗子金矿区西山矿段北带27线）

表3-3 瞬时测量与埋管测量的 CO_2 异常平均衬度

测量方法	矿区	异常号	异常样品数（个）	异常平均值（$10^4mg/m^3$）	异常平均衬度
瞬时法	瑶沟南区	1	38	1.36	5.2
瞬时法	瑶沟北区	1、2、3	54	1.70	3.1
埋管法	香炉碗子	1	28	（$10^4mg/m^3$）12.5	1.6

三、工作方法

（一）壤中气 Rn-CO_2 联测法

测网的布置是以不漏掉有意义的异常为原则。测线垂直于构造线方向，测点距离一般为10m。用钢钎打孔，孔深70cm，将两用采样器插入孔中，周围压严实。用导气胶管分别将测氡仪进样孔、CO_2 快速检测管（敲开两端，上端接小型抽气泵，一端经导气胶管接三通）与采样器上的三通连接起来，并将三通阀门置于测Rn的位置上。首先抽气测氡（测氡方法按FD-3017RaA测氡仪使用说明书操作即可）；然后转动三通阀门，堵住Rn气路，打开 CO_2 的气路，再抽气测量 CO_2。测量 CO_2：用小型抽气泵抽取50mL的土壤底层的气样缓慢进入检测管内，管内下端的化学试剂开始变色：蓝变白。经过90s后，终止变色。从外管表面读出白色柱上端所对应的刻度，便是被测样品的 CO_2 浓度，记入野外记录本。完成一个测点的壤中气（Rn-CO_2）联测工作时间约5min。

（二）壤中气Hg量现场测量

专门单独打孔（深70cm），与壤中气Rn-CO_2测量同步进行。

（三）壤中气Rn-Hg联测法

从地表疏松覆盖层内50—70cm深处抽取壤中气；Rn、Hg的捕集方式相似，只是使用的捕集器不同，Rn采用Rn子体捕集片，而Hg用的是金丝捕汞管。Rn子体捕集片收

集时间为2min，取出捕集片，将捕集片光面朝上放至操作台的测量盒内。用FD-3017RaA测氡仪经2min计数来测量Rn浓度，如有必要也可按Rn浓度强弱决定计数时间。Hg则是将野外现场已捕集汞的金丝捕汞管带回驻地用XG-3（或XG-4Z）测汞仪测定Hg浓度。

（四）壤中气CO_2瞬时测量

在采样点上先打一个50—70cm深的小孔，用螺纹锥形采样器拧入孔中，将采样器、双层静电滤膜过滤器和GXH-305红外CO_2检测仪连接好，注意各连接部分要密封好，打开阀门，接通气路，使液晶数字显示到达极大值后开始缓慢变小，记下峰值读数，便可测出壤中气CO_2的浓度。

第三节　雨水影响与异常的重现性

一、雨水影响

为了查明雨水对壤中气Rn-CO_2测量的影响，进行了雨水影响实验，结果表明：雨水对壤中气Rn、CO_2浓度的影响效果是相反的，雨水使Rn浓度降低，异常宽度变窄；而雨水使CO_2浓度升高，异常宽度变宽。雨水对壤中气Hg浓度的影响则与氡相似。因此，在进行壤中气（Rn-CO_2、Hg）测量时应避开雨天和沼泽地带，雨后也不宜立即测量，一般应在雨后两天为宜。

二、异常的重现性

气体异常受到各种气象因素变化的影响而在时间上呈动态变化，致使不同时间进行的两次观测结果往往不可能完全一致。一般情况是异常地段的变化大而背景地段的变化小。因此，重复测量的目的主要是检查异常地段是否重现。

（一）壤中气（Rn-CO_2、Hg）异常的重现性

在瑶沟、香炉碗子、拉日玛、北干沟四个矿区的重复测量工作量按测点计算，Rn为17.7%，CO_2为17.8%，气Hg为12.9%。重复测量结果示于图3-4、3-5、3-6。从图中可以看出，两次测量的曲线形态基本符合，异常出现的形态基本一致，异常地段仍然显示异常，均符合汞蒸气测量规范要求和其他相应的规定要求[9,29]。

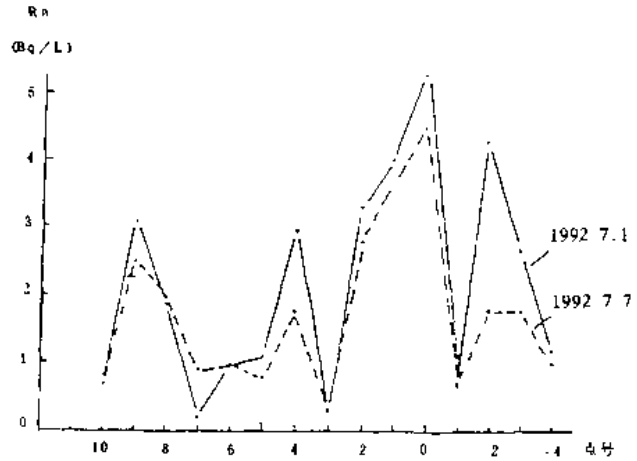

图3-4　壤中气Rn重复测量曲线

（瑶沟15号带24线）

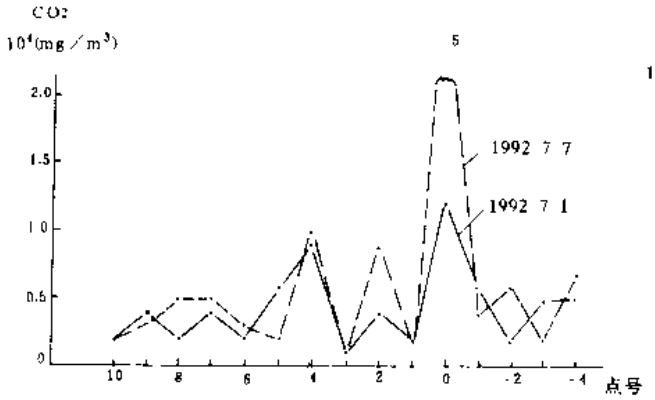

图 3-5　壤中气 CO_2 重复测量曲线
（瑶沟 15 号带 24 线）

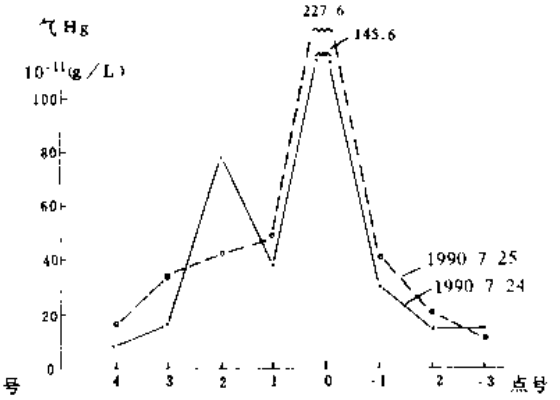

图 3-6　壤中气 Hg 重复测量曲线
（拉日玛矿床邛莫矿段 11 线）

（二）壤中气（Rn-Hg、CO_2）异常的重现性

在大尹格庄金矿区和有含矿远景的后疃普查区进行了观测点总数的 5% 的壤中气（Rn-Hg、CO_2）的重复测量，合格率达 90%，对异常地段作了部分检查，80% 以上的异常点能重复出现，均符合相应规范要求。

第四节　气体地球化学等方法技术的应用实例与效果

一、河南瑶沟矿区

（一）矿区地质概况

该区位于河南省嵩县德亭乡境内，处于华北地台南缘内侧熊耳山复背斜南东麓的陶村-马元断裂与下蛮峪-旧县断裂之间的地区内。矿区内出露地层为中元古界熊耳群鸡蛋坪组火山岩及第四系的坡积冲积物（图 3-7）。区内有燕山期的辉绿玢岩、云煌岩、正长岩等。火山岩系组成向南东倾斜的单斜构造。区内断裂构造十分发育，控制金矿化的分布。金矿化由多期热液活动成矿，矿后期为微石英-方解石阶段。金矿石中铀含量为 7.77×10^{-6}，围岩中的铀含量为 3.21×10^{-6}。

（二）瑶沟南区的壤中气 Rn-CO_2 测量

本区的金矿化是由构造蚀变岩型和石英脉型构成，以前者为主，如 14 号带（F_{14}）即属此种类型。其走向近东西，倾向北。15 号带（F_{15}）在 14 号带的北部，二者大体平行。该带的 24 线已有两个钻孔（ZK15241 和 ZK15243）打到金矿体（图 3-8）。但 15 号带的西部（24 线以西）被第三系第四系所覆盖（图 3-9a），覆盖层厚度从几米至二十多米。在该区当地地质队曾作过土壤金量测量，由于受所采用金的分析方法的影响致使金的异常下限定得过高，即使这样仍有众多的金异常显示（图 3-9b），但异常连续性差。15 号带是否向西部延伸的踪迹仍然不甚明朗。为追索被覆盖的 15 号带开展了壤中气（Rn-CO_2）综合测量，测量结果示于图 3-9c、9d。Rn 和 CO_2 异常的参数分别列于表 3-4、表 3-5。从图 3-9c、9d 可以看出①号 Rn 异常和①号 CO_2 异常均为主体异常，长 640m（未封闭），宽 20m 至 80m，Rn 异常的平均衬度为 4.7，CO_2 异常的平均衬度为 5.2。其东段（24 线以东）与 15 号带大体吻合。从 24 线壤中气（Rn-CO_2）测量剖面图（图 3-9）可以看出，在埋深 90m 的金矿体及其含矿断裂构造 15 号带（F_{15}）上端的上方，有壤中气 Rn、CO_2 综合异

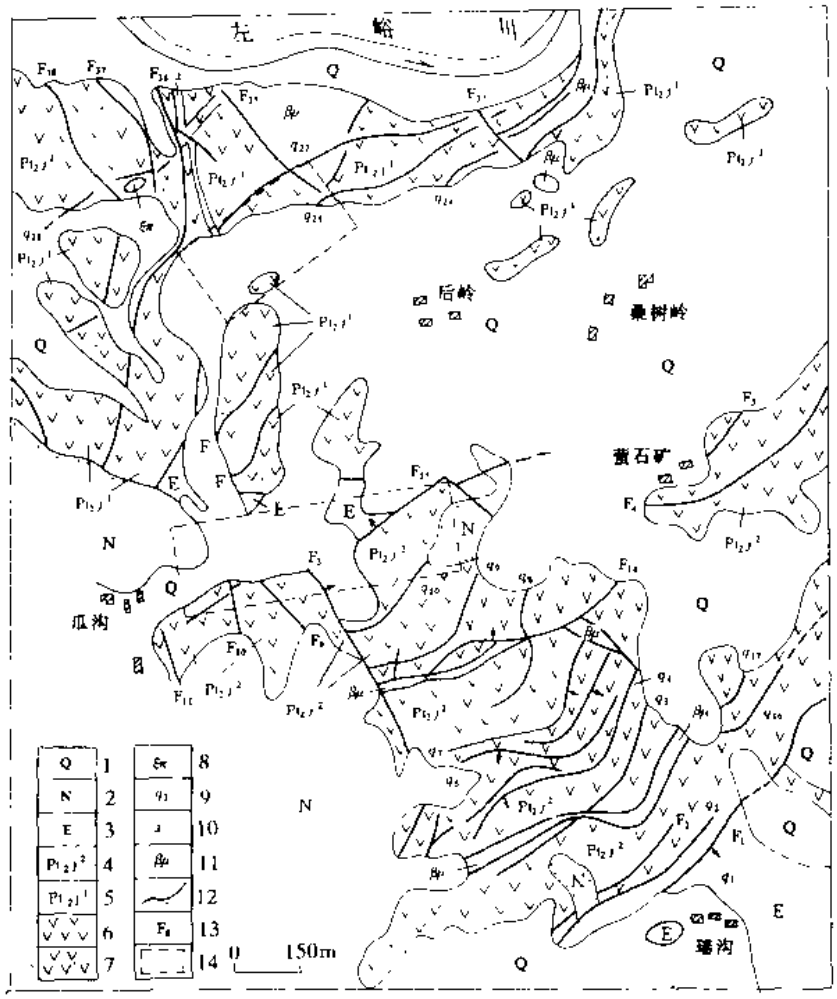

图 3-7　瑶沟矿区地质图

（据核工业中南 308 大队）

1—坡积冲积物；2—灰白色砂砾岩；3—紫红色砂岩；4—熊耳群鸡蛋坪组上段；5—鸡蛋坪组下段；6—熔岩与角砾熔岩互层；7—熔岩夹凝灰岩；8—正长斑岩；9—含金石英脉及编号；10—煌斑岩；11—辉绿玢岩；12—不整合地质界线；13—构造蚀变带及编号；14—试验工作区

常显示，在矿体的正上方有 Rn 异常显示。

表 3-4　瑶沟金矿床 15 号带壤中气 Rn 异常参数

异常号	长（m）	宽（m）	n（个）	$\bar{X}$（Bq/L）	S（Bq/L）	max（Bq/L）	衬度		地质体
							平均	最大	
1	640	20—80	33	4.7	2.8	5.6	4.7	5.6	F_{15}等

注：n 为异常样品数。

表 3-5　瑶沟金矿床 15 号带壤中气 CO_2 异常参数

异常号	长（m）	宽（m）	n（个）	$\bar{X}$ 10^4(mg/m³)	S 10^4(mg/m³)	max 10^4(mg/m³)	衬度		地质体
							平均	最大	
1	640	20—70	38	1.36	1.0	5.5	5.2	21.2	F_{15}等

注：n 为异常样品数。

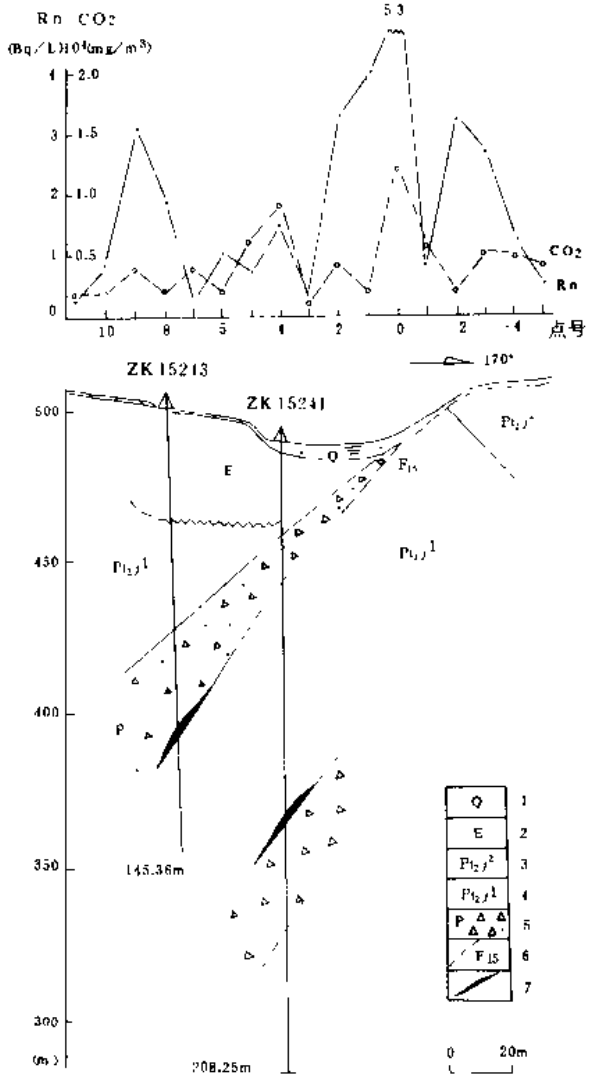

图 3-8　瑶沟金矿区 24 线壤中气（Rn-CO_2）测量剖面图

1—坡积冲积物；2—紫红色砂岩；3—熔岩与角砾熔岩互层；4—熔岩夹凝灰岩；5—破碎蚀变带；6—断层及编号；7—金矿体

从图 3-9 的 24 线往西（大部分为第四系覆盖）圈出了一个呈带状展布（长轴方向约为 70°）的 Rn、CO_2 综合异常。①号 Rn、CO_2 综合异常从已知含矿构造地段（12—24 线）到未知地段（24—44 线），是一个产在沟谷冲积层中的连续又较完整的多峰异常，由此推测 Rn、CO_2 综合异常反映了 15 号带向西部延伸的踪迹。特别是在 32—40 线之间 Rn、CO_2 综合异常呈现出规模大、浓度高的现象，并有金异常出现，推测是两组不同走向的断裂（F_{15}、F_{10}）可能在此交汇，有良好的找矿前景，建议揭露验证。经浅井、钻孔揭露验证，在浅部见到了 15 号带和金矿体，深部五层金矿体（图 3-10），品位在 1.2×10^{-6}—55.05×10^{-6}，累计视厚度达 7.92m。当地核工业中南地勘局 308 大队认为壤中气 Rn 异常和 CO_2 异常显示真实，可以指导工程揭露，提高见矿率，减少了布置工程的盲目性。

二、香炉碗子金矿区

（一）矿区地质概况

该区位于吉林省梅河口市水道乡境内。该区处于华北地台北西部边缘，磨盘山背斜东

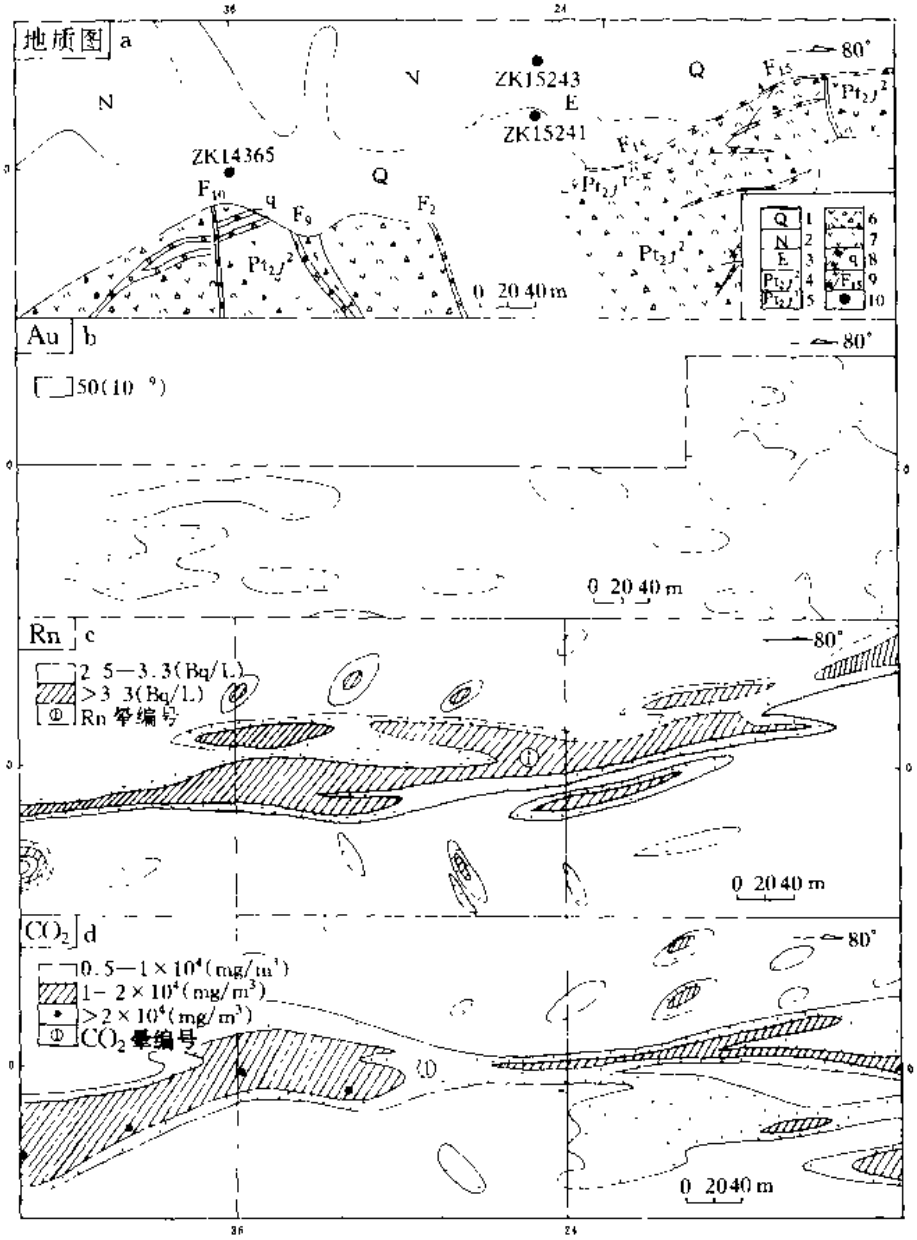

图 3-9　瑶沟金矿区 15 号带地段地质地球化学图

a—地质图；b—上壤金量等值图；c—壤中气 Rn 浓度等值图；d—壤中气 CO_2 浓度等值图；1—坡积冲积物；2—灰白色砂砾岩；3—紫红色砂岩；4—熊耳群鸡蛋坪组上段；5—鸡蛋坪组下段；6—熔岩与角砾熔岩互层；7—熔岩夹凝灰岩；8—石英脉；9—破碎蚀变带；10—见矿孔

南翼的北端，密山-抚顺深大断裂带与柳河中生代断陷带所控制的太古界地块内（图 3-11）。区内出露的地质体主要有太古界鞍山群杨家店组下段的变质岩，华力西期的石英二长岩及一些中基性脉岩，燕山期的流纹质火山隐爆角砾岩及火山通道相流纹斑岩，次火山相流纹斑岩及脉岩相的霏细斑岩等。该区的构造主要有断裂构造、火山通道构造和火山隐

爆构造。东西向的火山通道构造与北东向的火山隐爆构造为该矿床的重要控矿构造。本区的热液蚀变主要有水云母化、硅化和碳酸盐化。金矿化有三个阶段：石英-黄铁矿阶段，石英-金属硫化物阶段和石英方解石-多金属硫化物阶段。方解石主要见于晚阶段的矿脉和矿化带中。在脉状体中，方解石常充填在石英的缝隙中，而自然金则分布在石英中。有的矿石中的自然金就产于方解石中。该矿床的金矿石及其围岩中的铀含量相差甚小。

（二）香炉碗子的壤中气 CO_2 测量

壤中气 CO_2 测量工作区的选区是根据 1∶10000 的土壤地球化学测量结果（图 3-12）而确定的。

从图 3-12 可以看出地表金矿体周围发育有相当规模的金的土壤地球化学异常，西部也发育有金的土壤地球化学异常，但在两异常之间出现了一块空白地带（即西山矿化段北带）。该地带植被发育，第四系覆盖广泛，基岩露头甚少。主要采用壤中气 CO_2 测量来追索被覆盖的有碳酸盐化的含金构造与被覆盖的金矿脉。在该区用埋管（24h）法所做的壤中气 CO_2 测量的结果示于图 3-13。CO_2 异常的参数列于表 3-6。

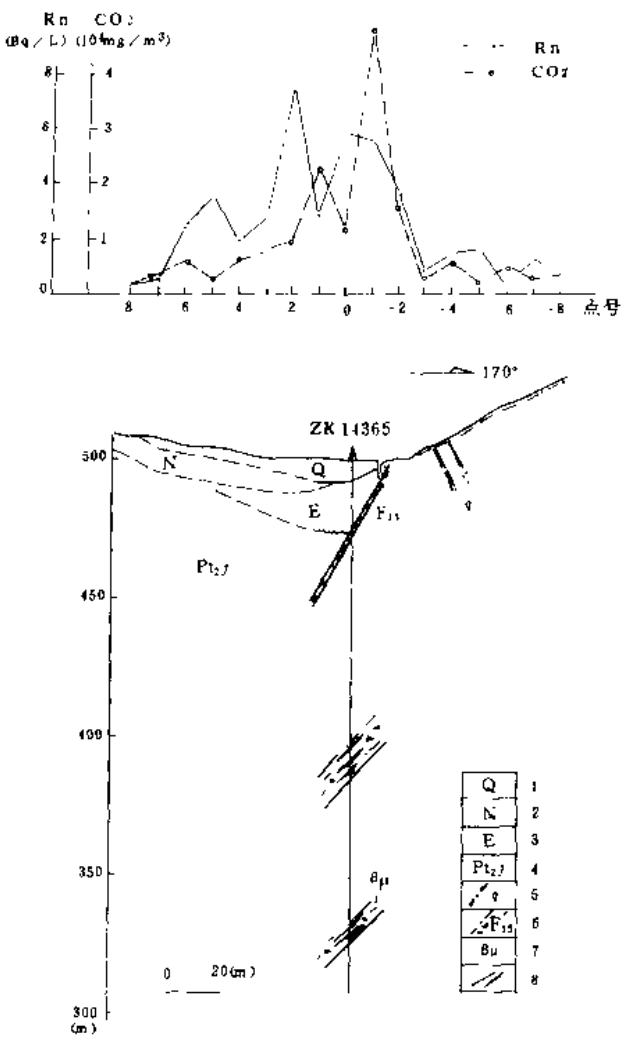

图 3-10 瑶沟金矿区 15 号带 36 线壤中气（Rn-CO_2）测量剖面

1—坡积冲积物；2—灰白色砂砾岩；3—紫红色砂岩；4—熊耳群鸡蛋坪组；5—石英脉；6—构造蚀变带；7—辉绿岩脉；8—金矿体

表 3-6 香炉碗子金矿区西山矿化段北带壤中气 CO_2 异常参数

异常号	长（m）	宽（m）	n（个）	$\bar{X}$	max	S	平均衬度	最大衬度	地质体
				(10^4mg/m³)					
1	400	20—60	28	12.5	18.0	2.1	1.6	2.3	闪长玢岩 霏细斑岩
2 A，B，C	40，120，110	20—40	2，3，2	11.9，12.1，13	13.0		1.5，1.5，1.6	1.6	闪长玢岩
3	160	30—40	8	13.0	18.0	2.6	1.6	2.3	

注：n 为异常样品数。

从图 3-13 中可以看出，CO_2 异常的总体趋势呈东西方向展布，特别是①号异常自东向西纵贯全区，长 400m（两端均未封闭），宽 20—60m，平均浓度为 12.5×10^4（mg/m³）

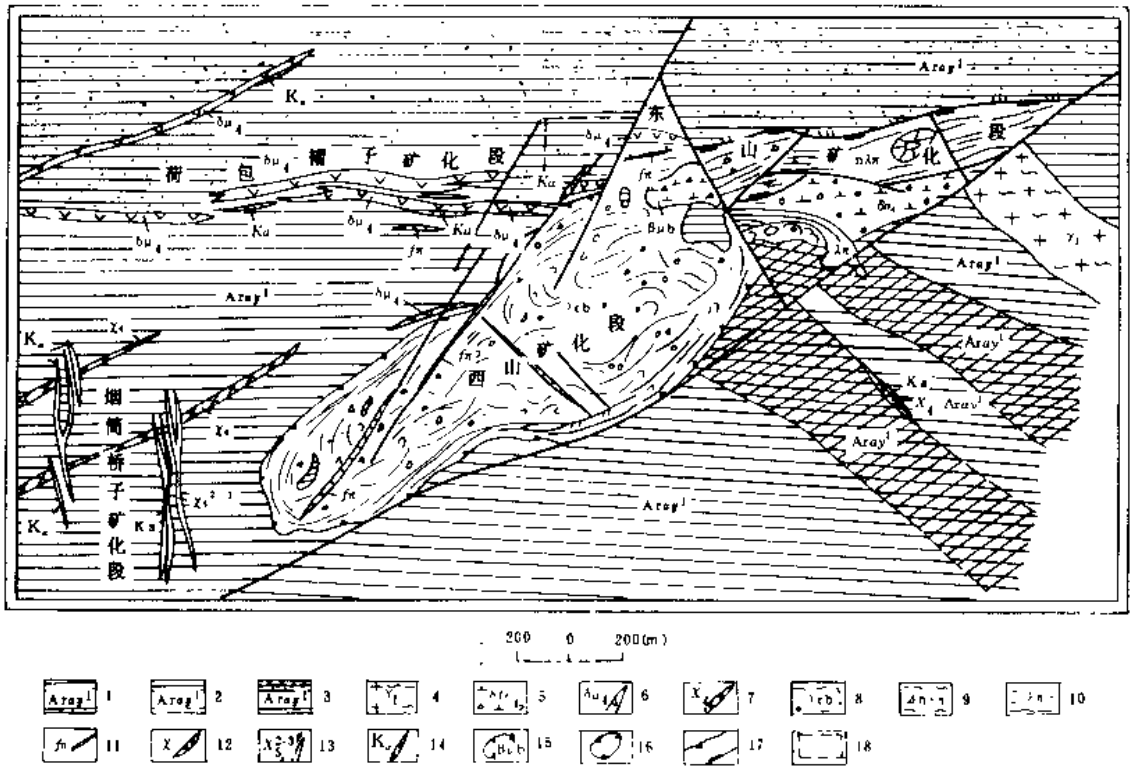

图 3-11　香炉碗子金矿床地质图

1—太古宙鞍山群杨家店组变粒岩；2—鞍山群石英云母片岩；3—鞍山群含石榴石黑云斜长片岩、黑云斜长角闪岩（为含金矿层）；4—太古宇片麻状花岗岩；5—华力西期石英二长岩；6—华力西期闪长玢岩，斜长角闪玢岩；7—华力西期煌斑岩；8—燕山期流纹质隐爆熔岩角砾岩；9—燕山期火山通道相流纹斑岩；10—燕山期次流纹斑岩；11—燕山期霏细斑岩；12—燕山期煌斑岩；13—含金石英脉；14—含金硅化脉；15—燕山晚期辉绿质角砾岩筒；16—隐爆构造；17—火山通道构造；18—工作区

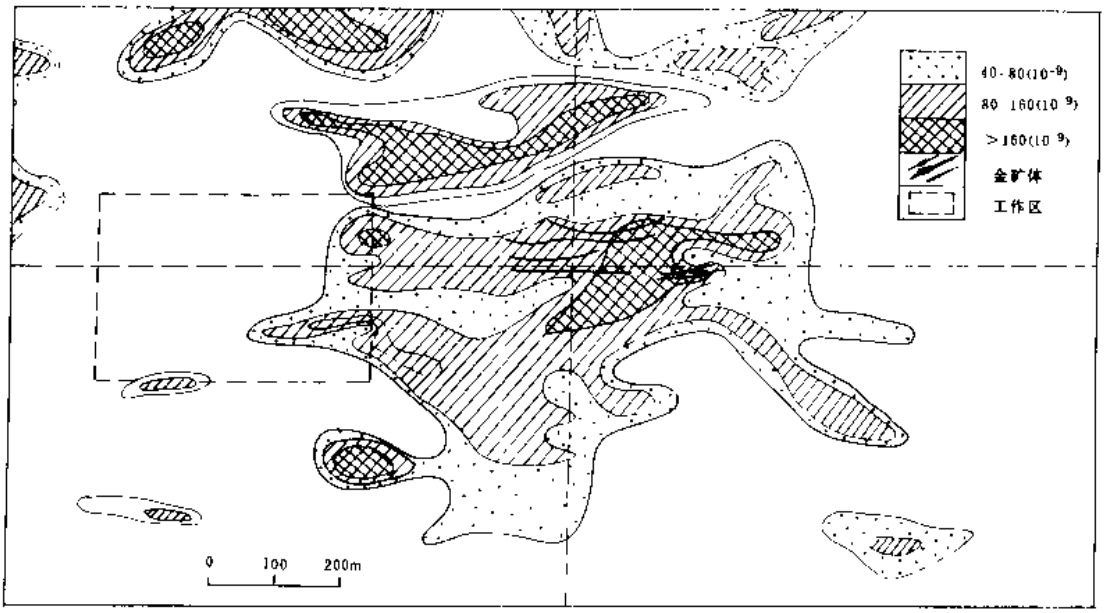

图 3-12　香炉碗子金矿床土壤金含量等值线图

（据东北地勘局 244 大队）

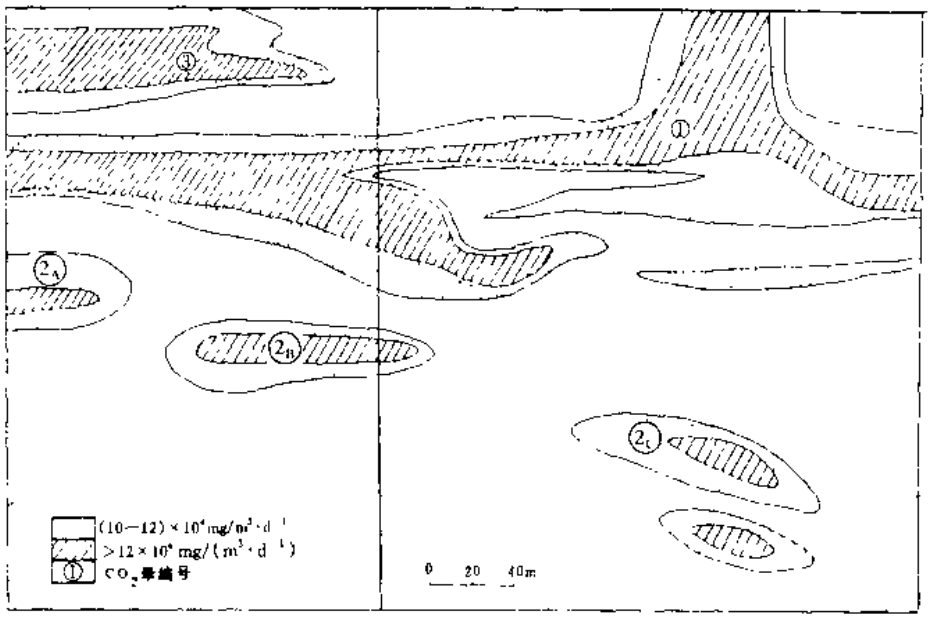

图 3-13　香炉碗子金矿区西山矿化段北带壤中气 CO_2 测量平面图

注：d^{-1}为一天即 24h。

平均衬度 1.6。东山矿段 0 线剖面（图 3-14）上的壤中气 CO_2 异常和 Hg 异常反映了东西向的含矿断裂（F_1）和金矿体。图 3-13 所示壤中气 CO_2 的①号异常是该异常继续向西的延伸，显示了东山的东西向含矿断裂（F_1）向西延伸的踪迹。经过两年来的钻探工程揭露验证结果（图 3-15，图 3-16）既见到了东西向构造 F_1，又见到了金矿体，四个见矿孔即 ZK15-2、ZK19-2、ZK23-0、ZK23-2 均在壤中气 CO_2 异常之内，见矿深度均在 100m 以下，品位为 1×10^{-6}—6.46×10^{-6}，单矿体的真厚度为 0.48—1.53m。其中 ZK27-3 号孔在 88m 至 158m 见 F_1 断裂和闪长玢岩、霏细斑岩（图 3-16）。这一地区壤中气 CO_2 测量结果表明该技术对于地质找矿、构造地质填图具有实际意义。在探测该矿床具热液活动的碳酸盐化的构造方面具有独特的作用。

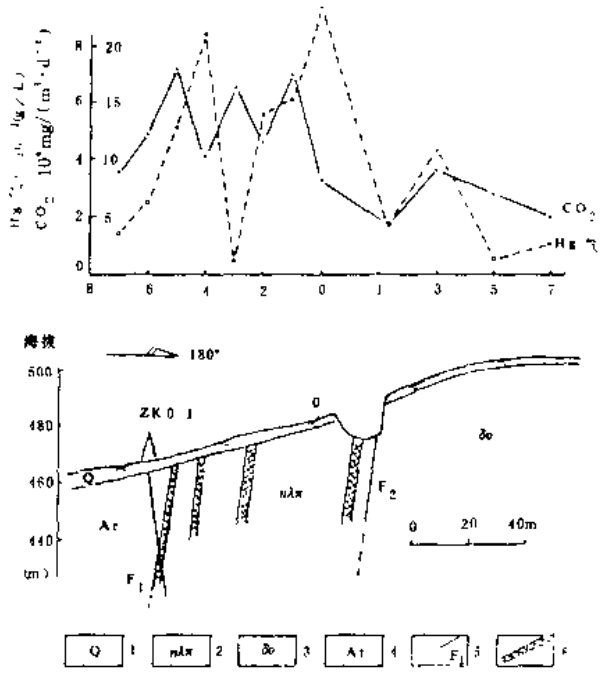

图 3-14　香炉碗子金矿床 0 线壤中气（CO_2、Hg）测量剖面

1—残坡积物；2—流纹斑岩；3—石英二长岩；4—混合岩；5—断层及编号；6—金矿体

三、山东大尹格庄金矿区

（一）矿区地质概况

该矿区位于胶北隆起的西北部，在中燕山期玲珑花岗岩体东

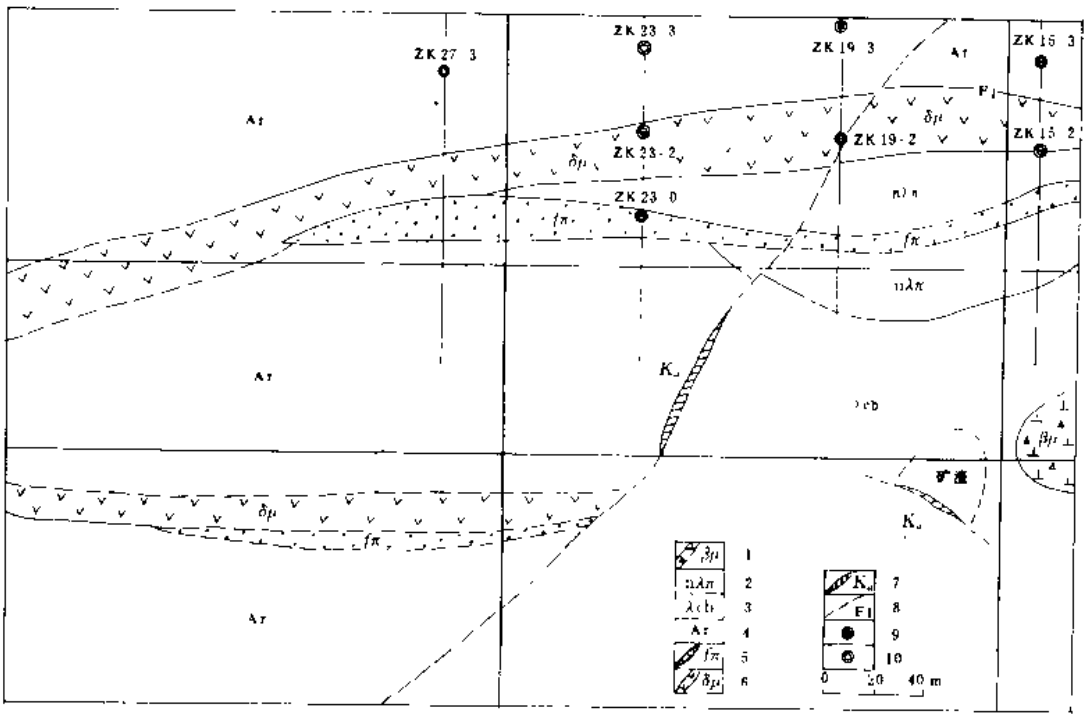

图 3-15　香炉碗子金矿区西山矿化段北带地质图

1—辉绿质角砾岩；2—流纹斑岩；3—隐爆角砾岩；4—混合岩；5—霏细斑岩；6—闪长玢岩；7—含金硅化脉；8—断裂及编号；9—见矿孔；10—未见矿孔

缘，招平断裂带中段。在招平断裂以西，主要有玲珑片麻状混合花岗岩，在招平断裂以东，主要为太古界胶东群变质岩系，有黑云变粒岩、黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩等；区内岩脉发育，主要有 NNE 向的闪长玢岩、石英闪长玢岩等。大尹格庄金矿床产于招平断裂带之黄铁绢云岩蚀变带中。矿床和蚀变带被后期东西向的断裂所切割，并伴随有多金属硫化物矿化叠加。

含矿蚀变带一般宽 29—54m，最宽达 85m，含矿围岩蚀变以绢云岩化为主，多发育在招平断裂的花岗岩一侧，主断裂面之下的碎裂-糜棱岩中。蚀变程度和蚀变带规模严格受断裂破碎带的控制。矿体的形态和规模，则严格受蚀变带的控制。断裂带、蚀变带和矿化带三者之间具有明显的共消长关系。蚀变以绢云岩化为主，此外还有黄铁绢云岩化，碳酸盐化和绿泥石化。

大尹格庄金矿有大小隐伏金矿体 30 个，其中以 1 号和 2 号为主矿体。矿体呈蛇曲脉状，总体走向 NE20°，倾向 SE，倾角 18°—53°，平均品位 4.17×10^{-6}左右。矿体头部埋深在距地表 200—300m 之下，为一典型盲矿床。

（二）大尹格庄壤中气 Rn-Hg 联测法与壤中气 CO_2 瞬时测量

对大尹格庄金矿床 80 线勘探剖面进行了壤中气 Rn-Hg 联测与壤中气 CO_2 瞬时测量，其测量结果示于图 3-17。在该金矿床 76 线勘探剖面进行了相同的气体测量，其测量结果示于图 3-18。由图 3-17 和图 3-18 可以看出，CO_2 和 Rn 异常具有相对较好的相关性，两者的异常主要分布在隐伏矿体的垂直投影部位。在蚀变带的地表出露处有弱的 Rn 异常显示。壤中气氡异常的存在得到了成都理工学院 α 杯法测量结果的证实。最强的汞异常出现在隐伏矿的上方或蚀变露头部位，壤中气 Hg 异常分布于控矿构造近地表处和矿体倾斜

方向。CO_2 异常和 Rn 异常主要分布于矿体倾斜方向。所发现的 Rn、Hg、CO_2 异常与已知控矿构造和矿体吻合较好，表明这三种气体地球化学方法有一定的探测深度，可用以圈定断裂构造位置，并可进一步为寻找隐伏金矿提供地球化学依据。

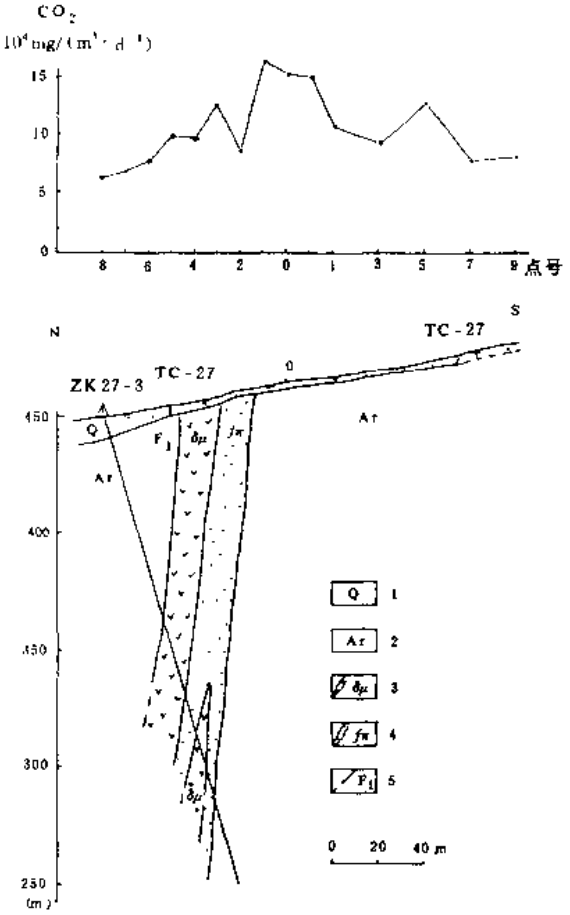

图 3-16　香炉碗子金矿区西山矿化段北带 27 线壤中气 CO_2 测量剖面图

1—坡积冲积物；2—混合岩；3—闪长玢岩；4—霏细斑岩；5—断裂及编号

（三）大尹格庄地气法试验研究

地气法尚属试验研究阶段，地气法的工作方法是将地气捕集器通过累积或瞬时方式预富集地气中的金属元素，然后用原子吸收分光光度法测定捕集器中的 Au、Ag、Cu、Pb、Zn 等元素的含量。在大尹格庄金矿床 80 线开展壤中气 Rn-Hg 联测的同时开展了地气法的试验工作，其测量结果示于图 3-19。地气 Au 异常仅动态测量法（瞬时方式）有异常显示，异常分布在蚀变露头附近和矿体头部的投影位置。这一剖面的地气 Au 异常的形态与成都理工学院在此同一剖面同测点开展的累积方式的地气法所得到的地气 Au 异常的形态具有相似之处（图 3-19）。累积方式的地气法的工作周期长，在测点上将地气捕集器埋 60 天后取出，放入洁净塑料小袋，将口封装。采用仪器中子活化分析（INAA）技术测定 Au、As、Sb 等十多个元素。

从图 3-19 可以看出，无论在控矿构造近地表接触断裂蚀变带的位置和 200 余米埋深的隐伏金矿体上方均发现了地气 Au 异常，在 62—64 测点出现较强的地气 Au 异常，正好位于隐伏金矿体头部的投影位置。瞬时方式的地气法虽是初步试验结果，由于有了累积方式的地气法的结果相比较，可以说取得了令人有所鼓舞的结果。地气 Au 是寻找隐伏金矿最令人关注的直接的气体地球化学指标。地气 Au 异常是寻找隐伏金矿的指示，在运积物覆盖区更能发挥其独特的作用。

四、后疃普查区壤中气测量

（一）普查区地质概况

后疃普查区位于大尹格庄金矿区北东延伸地段。该区范围内，招平主干断裂的规模较大，蚀变带宽为 7—87m 之间，在主干断裂两侧近于平行的次一级断裂蚀变带发育。主干断裂沿太古界胶东群变质岩系与燕山期花岗岩的接触带分布（图 3-20），走向近南北、倾向东至南东，倾角 27°—63°。蚀变带内主要岩石组合为糜棱岩、碎裂岩、角砾岩及少量断层泥。主裂面位于蚀变带的中上部，由断层泥及糜棱岩组成。厚 0.1—2m，连续性较好。主裂面之下普遍发育有绢云岩化。金矿化主要赋存于主裂面之下，其上方仅有弱的金矿

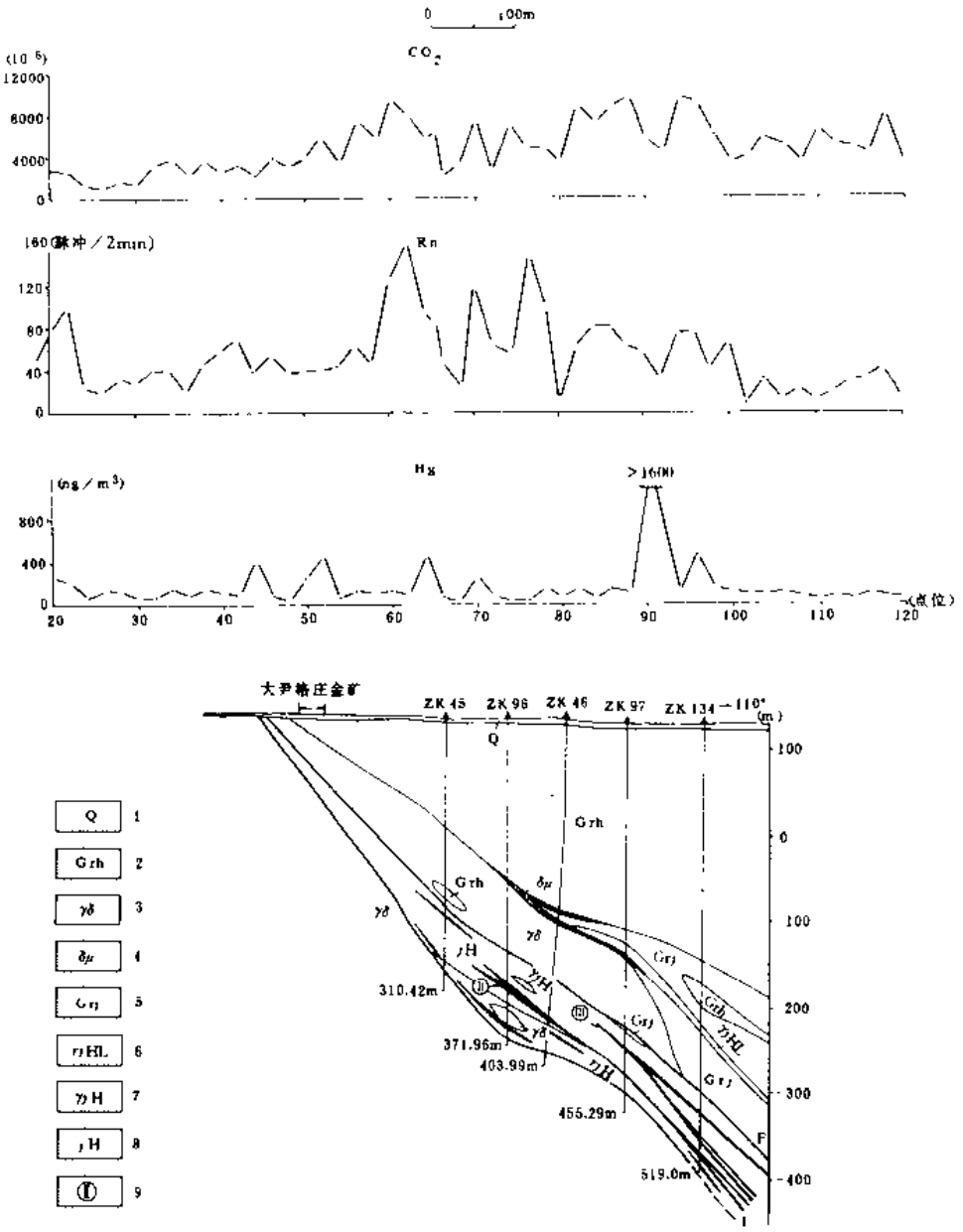

图 3-17　招远大尹格庄金矿床 80 线壤中气 CO_2、Rn、Hg 剖面图

1—第四系；2—混合质黑云斜长变粒岩；3—花岗岩闪长岩；4—闪长玢岩；5—斜长角闪岩；6—黄铁绢英岩化花岗闪长岩质碎裂岩；7—黄铁绢英岩化花岗闪长岩；8—黄铁绢英岩；9—蚀变带及编号

化。与金矿化关系最为密切的是黄铁绢云岩化。在招平断裂形成之后还形成有近东西向的断裂，与后期的汞和多金属矿化关系密切。

（二）后疃普查区壤中气 Rn-Hg 联测法与壤中气 CO_2 瞬时测量

后疃地段壤中气汞量测量的结果示于图 3-20。区内壤中气汞的平均含量为 100ng/m³，异常下限为 200ng/m³，最大异常含量为＞1600ng/m³，壤中气 Hg 异常较为准确地圈出了两条已知的断裂蚀变带，在已知断裂带的两侧还圈出了 3 条近于平行的带状异常。最西部的 Hg 异常带，经检查见到了与之相应的蚀变带。最东部的两个汞异常带分布在运积物覆

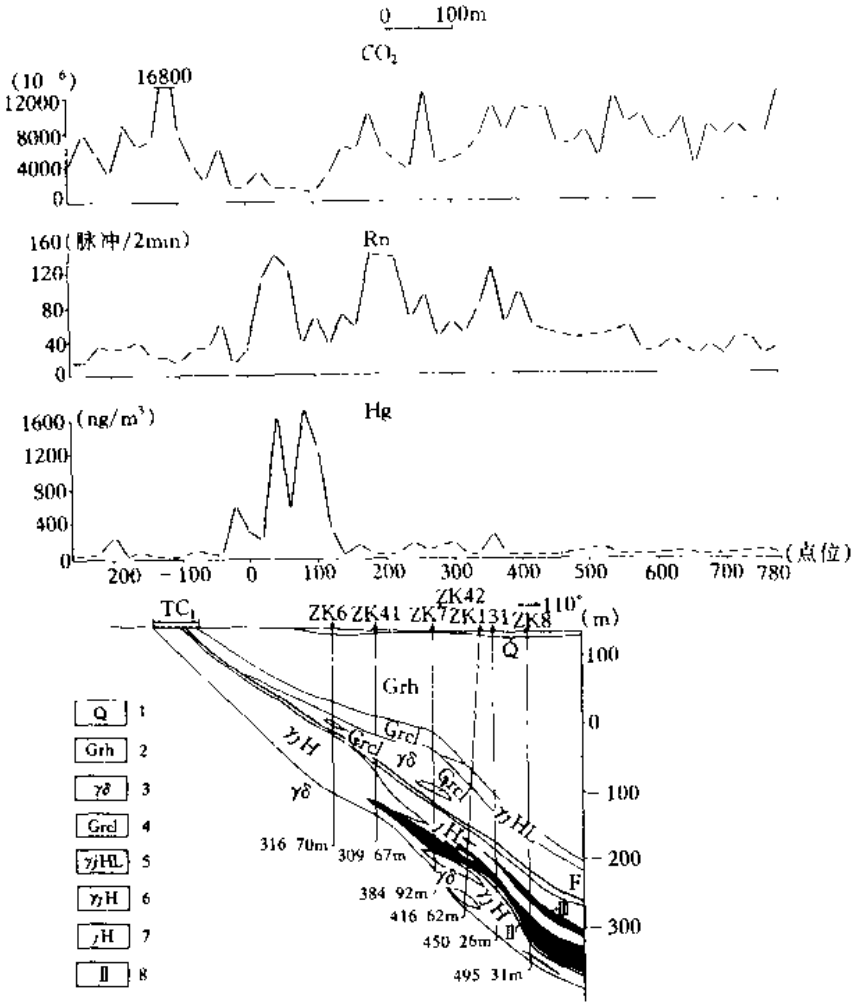

图 3-18 招远大尹格庄金矿床 76 线壤中气 CO_2、Rn、Hg 剖面图

1—第四系；2—混合质黑云斜长变粒岩；3—花岗岩闪长岩；4—碳酸盐化变粒岩质碎裂岩；5—黄铁绢英岩化花岗闪长岩质碎裂岩；6—黄铁绢英岩化花岗闪长岩；7—黄铁绢英岩；8—蚀变带及编号

盖区，与早先开展的航空电法所得到的结果而推测的断裂位置和早先发现的激电异常的位置基本吻合，说明 $D\eta$-4 和 $D\eta$-5 激电异常与断裂有关。由于开展壤中气测量测线方向所限，近东西向分布的断裂反映不明显。

对本区 1080、1270、1420、1600 和 1780 等五条测线进行了壤中气 Rn 量测量和 CO_2 瞬时测量，CO_2 和 Rn 的异常均出现在招平断裂的倾斜方向，另外 CO_2 的含量和碳酸盐化的分布规律较为一致，表明招平断裂深部的含矿性值得注意。

对本区 1420 线进行了壤中气 Rn-Hg 联测与壤中气 CO_2 瞬时测量，其测量结果示于图 3-21。从该图可以看出，壤中气 Hg 异常对断层破碎带有明显的反映，特别是在 1420 线南东方向运积物覆盖较厚的 F_4 和 F_5 断层破碎带上方也出现有清晰的壤中气 Hg 异常。壤中气 Rn 和 CO_2 在 1420 线也有明显的异常显示，在招平断裂带的倾斜方向有明显的 CO_2 和 Rn 异常存在。

壤中气 Hg、CO_2、Rn 测量的结果表明，区内地表断裂构造的规模相对较小，结构也较为简单，除后疃北有一近东西向的断裂外，绝大部分构造为 NE 向或近 SW 向分布，表

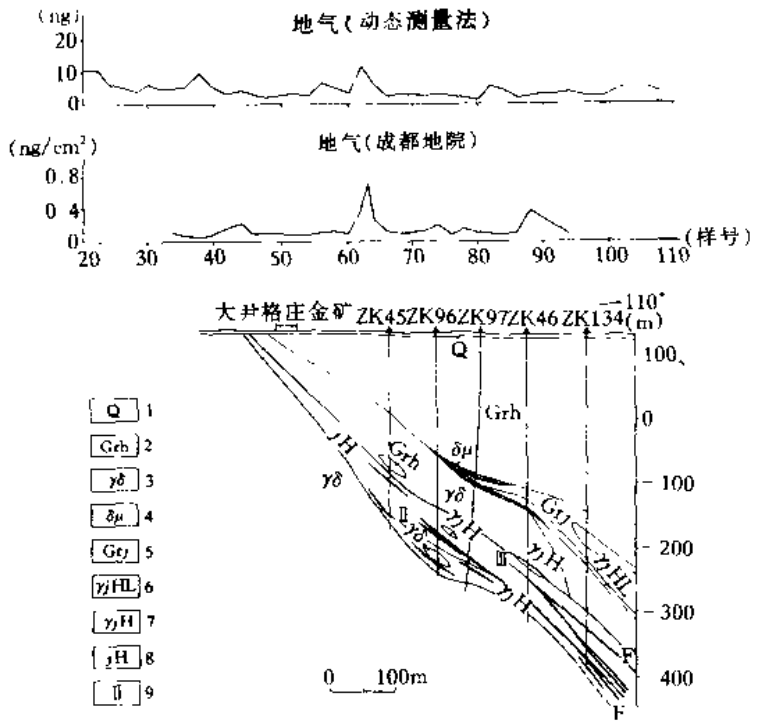

图 3-19　山东大尹格庄金矿 80 线壤中气 Au 剖面图

1—第四系；2—混合质黑云斜长变粒岩；3—花岗岩闪长岩；4—闪长玢岩；5—斜长角闪岩；6—黄铁绢英岩化花岗闪长岩质碎裂岩；7—黄铁绢英岩化花岗闪长岩；8—黄铁绢英岩；9—蚀变带及编号

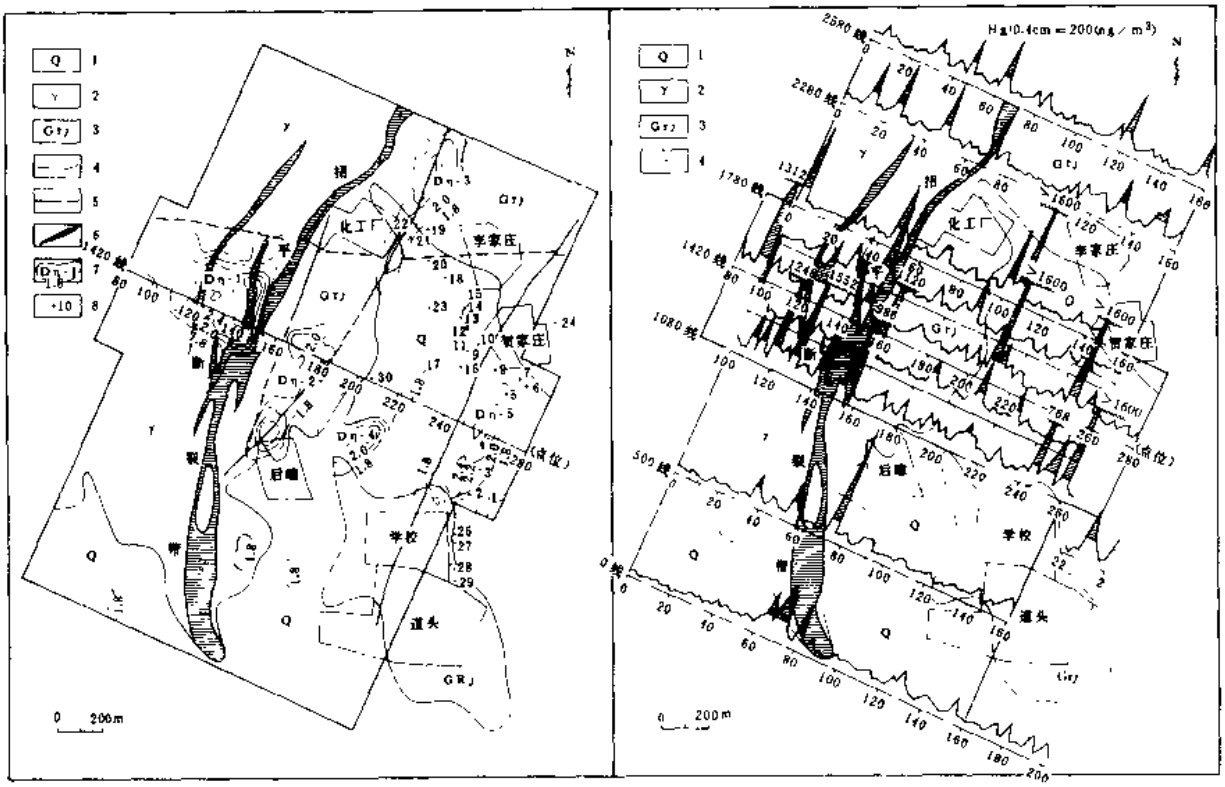

图 3-20　后疃工区地质、壤中气 Hg 平剖面图（地质图引自山东地质六队资料）

1—第四系；2—花岗岩；3—斜长角闪岩；4—地质界线；5—实测及推测断层；6—断裂蚀变带；7—激电异常及编号；8—井壁基岩采样点及编号

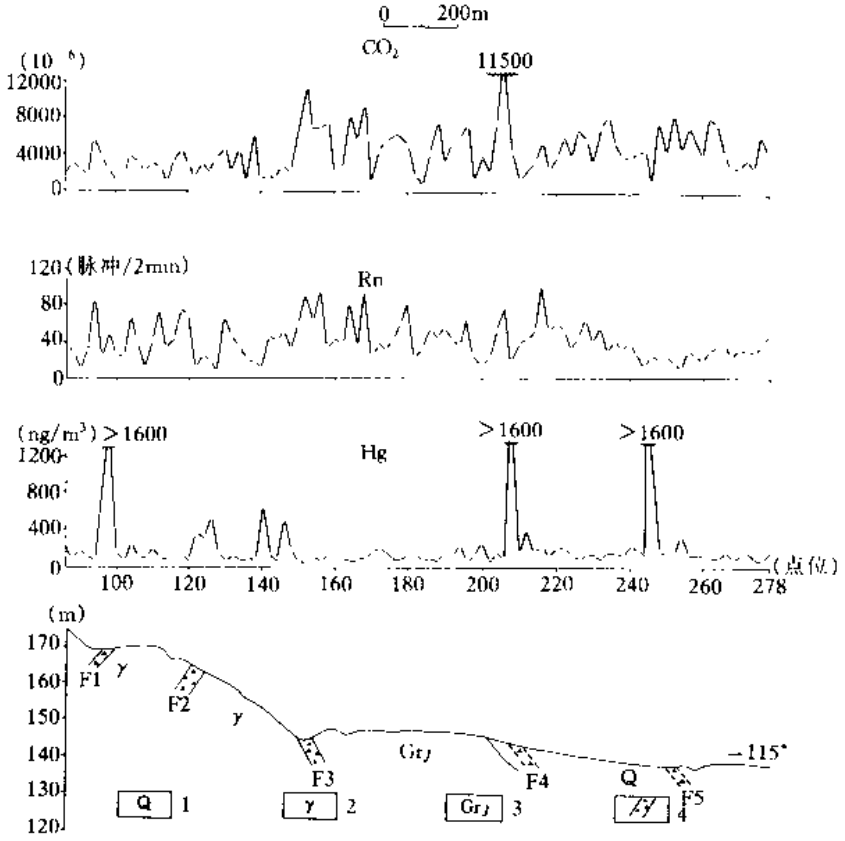

图 3-21 招远后疃地段 1420 线壤中气 CO_2、Rn、Hg 剖面图

1—第四系；2—花岗岩；3—斜长角闪岩；4—断层破碎带

明本区近地表的含矿性欠佳。壤中气 Hg 异常还指出在测区东边运积物覆盖区有两条隐伏断裂存在，在招平断裂的倾斜方向出现有明显的 CO_2 和 Rn 异常，表明招平断裂深部的含矿性值得注意。

第五节 结 语

1．金矿床中的 Rn 气源主要来自矿床中伴生的铀。CO_2 气源主要来自硫化矿体氧化时产生的硫酸与围岩或脉石矿物中的碳酸盐矿物发生作用生成 CO_2。Hg 气源主要来自矿床中的含汞矿物，在氧化带中当硫化物氧化成硫酸盐时汞易于从化合物中还原成 Hg°，并进一步转化为汞蒸气。上述的 Rn、CO_2 及 Hg 气，从矿源向地表沿着压力梯度最大或阻力最小的裂隙迁移。因此，所见壤中气 Rn、CO_2 及 Hg 异常一般多沿断裂破碎带分布，当断裂构造产状较平缓情况下，与金属矿有关的壤中气异常一般与矿体在地表的投影位置比较吻合。这些就是 Rn、CO_2 及 Hg 气测量寻找隐伏金矿的基本依据。

2．首次研制成功壤中气 Rn-CO_2 两用采样器，并研究了合理的工作方法，实现了壤中气 Rn-CO_2 联测，提高了工作效率。由于在同一孔中先测 Rn 后测 CO_2，有利于测得底层土壤的 CO_2 浓度，有利于提高异常强度。

3. 研制了壤中气 CO_2 瞬时测量方法，将实验室用的 GXH-305 红外 CO_2 检测仪，在配置必要的辅助设备后，使其移植到野外现场测定壤中气 CO_2 的浓度。该方法与 CO_2 检气管测量方法相比，提高了工作效率，增强了对水蒸汽的抗干扰能力，为运积物覆盖区提供了一种较好的 CO_2 气体测量方法。

4. 地气法的初步试验结果表明，地气 Au 异常出现在控矿构造近地表接触断裂蚀变带的位置和隐伏矿体头部的投影位置，预示今后为运积物覆盖区找寻隐伏金矿提供一个以金找金的气体地球化学指标，并可用以评价壤中气 Rn、CO_2、Hg 异常是否有含金远景。

5. 在瑶沟矿区和香炉碗子矿区进行了成矿预测，经工程揭露验证，见到了工业金矿体，其反映深度一般在 10m 至 $n \times 10$m 或更深，表明应用壤中气 CO_2、Rn 等勘查被覆盖的含矿断裂构造和含金岩脉等是有效的（有当地地质队证明材料）。另外指出了山东后疃北金异常深部有较好的含矿前景，值得进一步重视，后疃地段东部发现的壤中气汞异常与激电异常 $D\eta$-5 的位置基本吻合，说明 $D\eta$-5 激电异常与断裂有关，其深部的含金性也值得注意。

第四章　寻找隐伏金矿的水地球化学方法技术

金矿区土壤和水系沉积物中水溶性金的普遍存在；金矿石的纯水淋滤溶解实验及金矿区地表或地下水体中金含量普遍增高的事实，为采用水地球化学方法找金提供了重要依据。多少年来国内、外勘查地球化学家进行了相当数量的水地球化学方法找金的试验研究[30][31]，但至今尚未得到广泛的应用，主要原因有二：一是缺乏简便、灵敏、经济实用的水样采集方法和分析测试方法，二是对水地球化学异常找金效果的评价不一，有必要针对上述问题进行进一步的探索。

第一节　水地球化学找金分析方法的研究

鉴于天然水体中金的含量低达10^{-12}级，一般为1×10^{-12}—5×10^{-12}，平均含量为3×10^{-12}[15]。欲改进水化学找金的分析方法，主要有两种途径：一是提高和改善天然水中金的预富集方法；一是研制高灵敏度的测金新方法。无论是金的预富集方法，还是高灵敏度的测金新方法的研制，均以金在天然水体中存在形式的基本认识为基础。

一、天然水体中金的存在形式的初步分析

根据实验及现有资料的分析，天然水体中的金可分为三类。

第一类为非溶解状态的粒径大于胶体粒级的金的各种悬浮物。这些悬浮物可以是被水化了的大于胶粒的金粒，也可以是被粘土、有机质或其它物质吸附的金的胶体。地表或地下水体中金的各种悬浮物，可通过水样的静置，离心或滤膜（一般用$0.45\mu m$）的过滤加以分离。

第二类为以粒径0.1—$0.01\mu m$的金的胶粒形式分散在水体中的胶体（Au^0）。

第三类为在水体中呈溶解状态的金，由金的简单阳离子和金的络阴离子形式存在。主要表现为Au^{3+}和Au^{+}，即金的胶粒可由金的原生矿石氧化后析出，可由溶解的金的化合物被有机质或其它物质还原形成；可由溶解的金的化合物水解，离解等作用形成。

金的阳离子如Au^{3+}和络阴离子如$[Au(S_2O_3)_2]^{3-}$等是水溶性金中真正呈离子形式存在的金。它们可呈简单阳离子或络阴离子的形式存在于水体中。呈真溶液形式存在于水体中的金量占水体中金全量的比例，以及金离子各自的相对比例，目前还存在不同的认识。一种认为金在淡水中的主要迁移形式是胶体，其次为呈各种可溶性络合物形态，另一种认为天然水，尤其是地下水中的金主要呈不同的络合物形式存在，也可能有相当数量的金呈胶体形式存在。一种认为真溶液中的金主要以Au^{3+}形态存在，另一种认为真溶液中的金在一定条件下主要为$[Au(S_2O_3)_2]^{3-}$。这些不同认识的存在有利于研究的深入，更何况当前的分析化学理论和技术已有可能将水体中的胶体金、Au^{3+}和络阴离子分离开，

随着今后实验数据的积累必将得到统一的认识，而这些基础知识是确定水样分析方案和金量分析结果地质解释的依据。

二、天然水中金的预富集方法研究

以往天然水中金的预富集方法计有蒸发法、萃取法、共沉淀法、活性炭吸附法及泡塑吸附法[33]。这些方法都在不同程度上存在搬运水样量大、预富集步骤繁杂，所需时间过长，所需设备，试剂难以携带等弊病，下面列出新研制的两种方法是对以往预富集方法的改进。

方法一：

该方法在水样的酸度、吸附速度以及加入 $FeCl_3$ 对金的吸附率的影响等条件试验的基础上指出，用洗净盐酸型泡塑作为吸附体的吸附效果较好。水样中加 5—10mL 盐酸可达泡塑吸附金的最好效果。水样中加 $FeCl_3$ 溶液后，可明显地提高泡塑的吸附效果。通过不同体积过滤水样试验，1000mL 水样吸附的相对金量明显高于 500mL 的水量，并以 1000mL/30min 的过滤速度吸附金的效果最好，于是提出了如下的工作步骤：

取一升水样，加 5—10mL HCl，使水样保持在 pH＜2，加适量 $FeCl_3$ 溶液（以不出现絮状沉淀物为宜），将处理好的洗净盐酸型泡塑吸附体置于 2.5cm（直径）×3cm（高）的圆柱体过滤装置中，将水样放在挤瓶里，挤压挤瓶（见图 4-1），使水样以 1000mL/30min 的速度通过吸附体。在野外现场过滤完 1L 水样后，将吸附体放在塑料袋或纸袋中，回驻地后将吸附体晾干，送实验室分析。

按上述最佳条件进行水样泡塑预富集处理，金的回收率可达 95%。

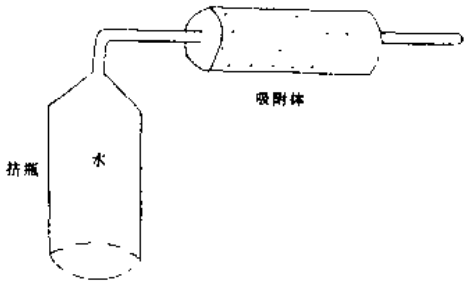

图 4-1　水样预富集野外动态吸附、过滤装置

方法二：

为实现应用聚氨酯泡塑在野外现场动态吸附富集水中的金，研制了适用于野外水化学找金的取样箱。该箱木质，其规格为 35×25×20cm，含试剂、器皿、活动支架在内重量为 2kg。可用于野外现场快速地富集水中的金。

金的野外分离富集方法如下：采取 1000mL 水样于细口玻璃瓶中，加入 100mL 现配王水，摇匀，插入玻璃虹吸管（装有止水夹）。于玻璃吸附柱中塞入 0.5×3×3cm 大小，重 0.3g，用 10% 盐酸煮沸 20min 处理过的聚氨酯泡塑块至底部，关闭吸附柱活塞。注入水样，打开活塞至适当位置（控制流速为 70—100mL/min），至全部水样通过吸附柱。用不锈钢丝勾出泡塑、挤干水，用滤纸包好，标明样号，带回驻地或送实验室进行金的测定。

以上两种方法均为野外现场动态吸附富集金的方法，操作简便，工作效率高，解决了水体中金富集方法的一大难题。

三、高灵敏度金的分析方法的制定

方法一： TMK-TBP 液珠萃取比色法

操作步骤如下：将野外送来的泡塑用少量蒸馏水冲洗，挤干水，用 1/4 张滤纸包好，放入瓷坩埚中，坩埚置于马弗炉中从低温开始，在 600℃ 灰化 30min，取出坩埚冷却后，加 2 滴 10% KCl，1mL 王水，于水浴上蒸干，再加 4 滴浓盐酸蒸至无味。加 3 滴混合掩蔽

剂，1滴10%KCl，5滴缓冲溶液摇匀，于水浴上温热片刻，取下冷至室温，加1滴显色剂，5min后与标准色阶比色测定。

分析检出限为1ng/L，RSD=4.7%。

方法二：甲酸还原硅钼酸-动力学分光光度法。

该方法的分析检出限为0.2ng/L。

方法三：利用硫尿解脱被泡塑吸附的金，用无火焰原子吸收分光光度法测定金的含量。

第二节　水地球化学方法找金的效果

在水体中金预富集方法得到改进和高灵敏度金分析方法有所突破的基础上，在内蒙、江西等金矿区及其外围进行了水化学找金试验，取得了较好的找矿效果，现分述如下：

一、内蒙干旱区的水化学找金试验

试点工作在内蒙中部干旱区选择两个不同地形特征、不同金矿类型的矿区进行。其一为武川县东伙房金矿，处于大青山北坡丘陵山地，属富硫化物蚀变岩型金矿，试验面积132km^2，采样密度1个点/3—4km^2；其二为固阳县老羊壕金矿及其外围合教一带，处于内蒙高原上残山低缓丘陵区，属石英脉型金矿。试验面积232km^2，采样密度1个点/4—5km^2。水样中的金含量通过泡塑预富集后用无火焰原子吸收分光光度法测定。水样干渣测定了Cu、Pb、Zn、Ag、Sn、Fe、Mn、Co、Ni、Ti、V、Cr、Ga、Be、As、Sb、Bi。另外还测定了Se。

两矿区地下水中金含量的分布特征见表4-1，表4-2。

表4-1　东伙房、老羊壕矿区地下水中金含量的空间分布特征

工　区	东　伙　房			老　羊　壕	
水井编号	D_{32}	D_{10}	D_{11}	LD_{12}	LD_{22}
水井位置	矿井排水	距金矿脉700m	距金矿脉1400m	距金矿脉500m	距金矿脉1500m
金含量（10^{-12}）	713	3.6	0.4	15	4.8

表4-2　东伙房、老羊壕矿区地下水中金含量的参数特征

工　区	采样季节	样品数	全区均值（10^{-12}）	背景值（10^{-12}）	异常值（10^{-12}）
东伙房	雨季（1989年）	29	1.06	0.2—1.3	1.3—20
	旱季（1990年）	33	1.74	0.2—3.0	3—20
老羊壕	雨季（1989年）	25	0.58	0.2—1.0	1—4
	旱季（1990年）	18	8.1	0.2—10.0	10—30

由表4-1、表4-2可见：（1）水井中地下水的金含量与距金矿脉的远近有关。矿脉附近的地下水有金异常显示，当水井距矿脉超过1.4km后，水中金含量降至背景含量；（2）地下水中金的背景含量范围为0.2×10^{-12}—$n\times10^{-12}$，异常含量为1×10^{-12}—30×10^{-12}。

面积性水化学测量结果表明，东伙房和老羊壕两工区地下水中金的平均值旱季明显高

于雨季，不同季节金异常的位置及背景含量有一定差异，但大多数金异常反映的异常源是相同的。为发现更多的异常，为便于水化学测量成果的对比，水化学测量宜集中在旱季进行。

（一）东伙房金矿试点测量

该区处于内蒙地轴中部北缘。出露太古宙兴和群紫苏斜长片麻岩及角闪斜长片麻岩，乌拉山群黑云斜长片麻岩，元古宙马家店群变质砂砾岩及绢云石英片岩；二叠—三叠系及侏罗系砂岩和砂砾岩。白垩系砂砾岩以及第三系杂色粘土和第四系冲洪积层、风成砂等（见图 4-2）。

出露的岩浆岩有太古代斜长花岗岩，吕梁期二长花岗岩，加里东期石英闪长岩，华力西期花岗闪长岩及燕山期正长斑岩等。

区内发育北东向酒馆断裂，北西向东坡-王子沟断裂为金矿热液的运移提供了通道，3 组近东西向断裂构成了东伙房金矿的主要储矿空间。

地表发育的褐铁矿化破碎带是重要的找矿标志。1 号金矿带长 1km 有余，宽几十 m，求出金储量达 3t 以上，为富硫化物多金属的蚀变岩型金矿床。

利用东伙房全区水井中水的分析资料研究水中元素共生组合关系，发现存在两类元素组合，一类是与金矿有关的组合，包括 Au、As、Cr、V、Cu、Ni、Ti、Sb、Zn、Mn。这一组合反映金矿与太古宙变质岩和加里东期石英闪长岩有关。另一类是 Pb、Se、Mo，这一组合反映铅、钼硫化物矿化，与金矿成矿关系不大。

通过六口井的动态观测结果表明，地下水中金含量与降雨量呈反消长关系，与蒸发量呈正消长关系。如图 4-3 所示。

雨季以 1.3×10^{-12} 为异常下限圈定金异常，旱季以 3×10^{-12} 为异常下限圈定金异常。

金异常多分布在断裂带附近，多为单点的弱异常，异常值为 3×10^{-12}—18×10^{-12}，元素组合较多，已知金矿和变质岩中异常的元素组合为 Au、As、Sb、Cu、Ag、Zn、Mo、Sn 等。分布于侏罗系地层中的金异常元素组合为 Au、Ag、Pb、Mn 等，而白垩系和第四系地层中的金异常只有金单一元素组合（见图 4-2）

在所圈定的 6 个金的水地球化学异常中，其中 AHr_2 异常为已知东伙房金矿引起，AHr_6 等异常经查证在地表发现矿石与矿化，是有进一步找金希望的矿致异常。AHr_{4-3} 异常发育于中下侏罗统地层中，推测该异常是寻找与含金的银铅矿有关的矿致异常。

（二）老羊壕金矿区及其外围合教一带的试点测量

该区亦处于内蒙地轴中部北缘。大面积第四系覆盖，下元古宙色尔腾山群呈残留体出露。其岩性为斜长角闪片麻岩夹磁铁石英岩和黑云母浅粒岩，北部为上侏罗统白女羊盘组中酸性火山岩及其凝灰岩。加里东期斜长花岗岩广布全区。区内发育北西向断裂及近东西向挤压带，是本区的主干断裂和控矿构造。

老羊壕金矿床属小型石英脉型金矿，由两条含金片理化蚀变带组成。北部蚀变带呈北西走向，产于色尔腾山群片麻岩中。金矿脉品位高、规模大。南部蚀变带呈北东走向，产于斜长花岗岩中，金矿体规模小，品位低。

合教金矿点，含金石英脉产于色尔腾山群阳起石角闪片岩中。含金石英脉规模小。

根据老羊壕工区水化学资料分析，与金矿有关的元素组合是 Au、Cu、Pb、Ti、Zn、

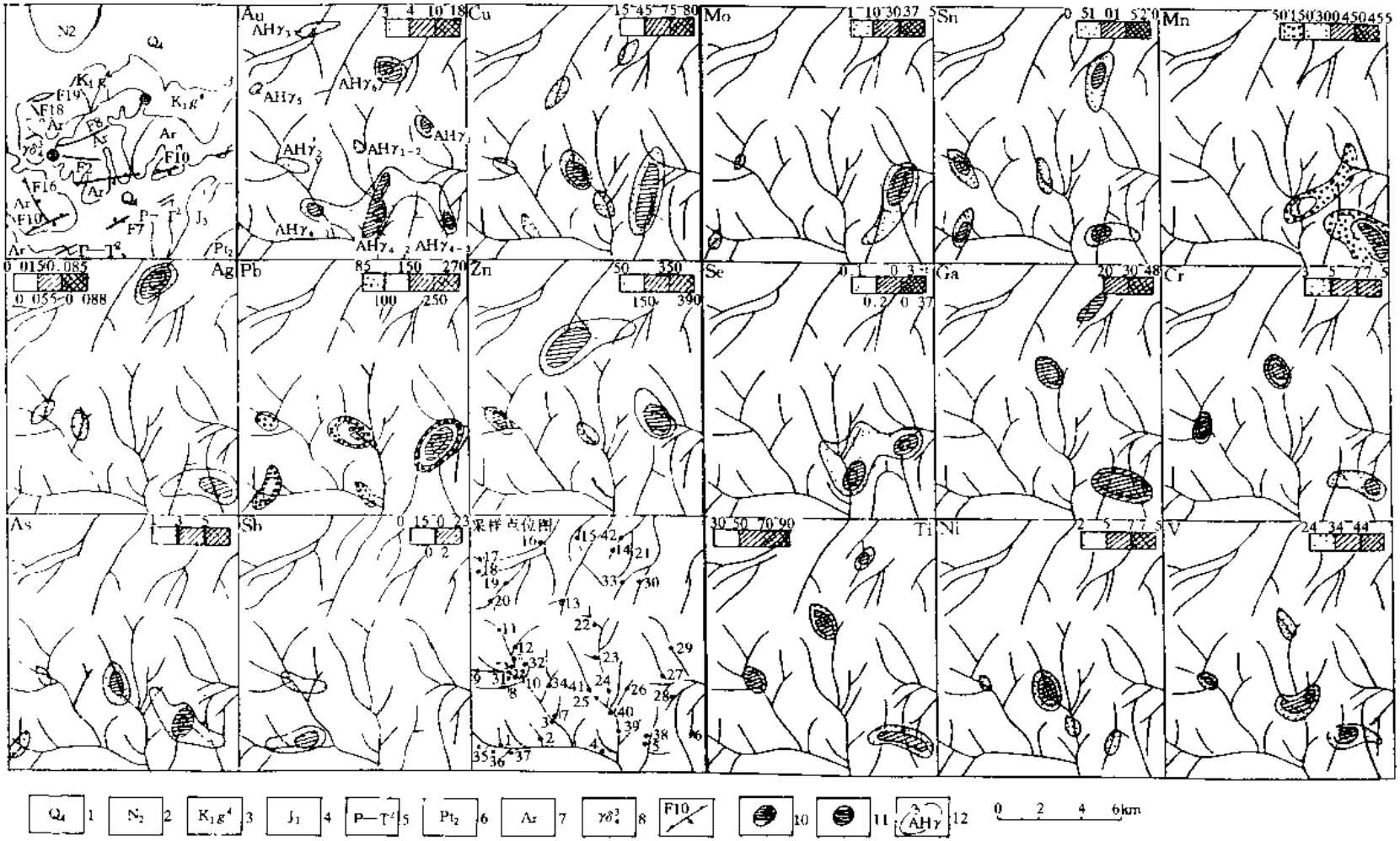

图 4-2　东伙房金矿区地质及水化学异常图

1—第四系冲洪积层风成沙；2　第三系粘土及砂岩；3—白垩系砾岩、砂岩；4—侏罗系砾岩、砂岩；5—二叠系粗砂岩；6—元古宙变质砾岩、片岩；7—太古宙片麻岩；8—燕山期花岗闪长岩；9　实测断层及编号；10　金矿床；11—金矿点；12—水化学金异常及编号　含量单位：Au 为 10^{-12}，其余为 10^{-9}

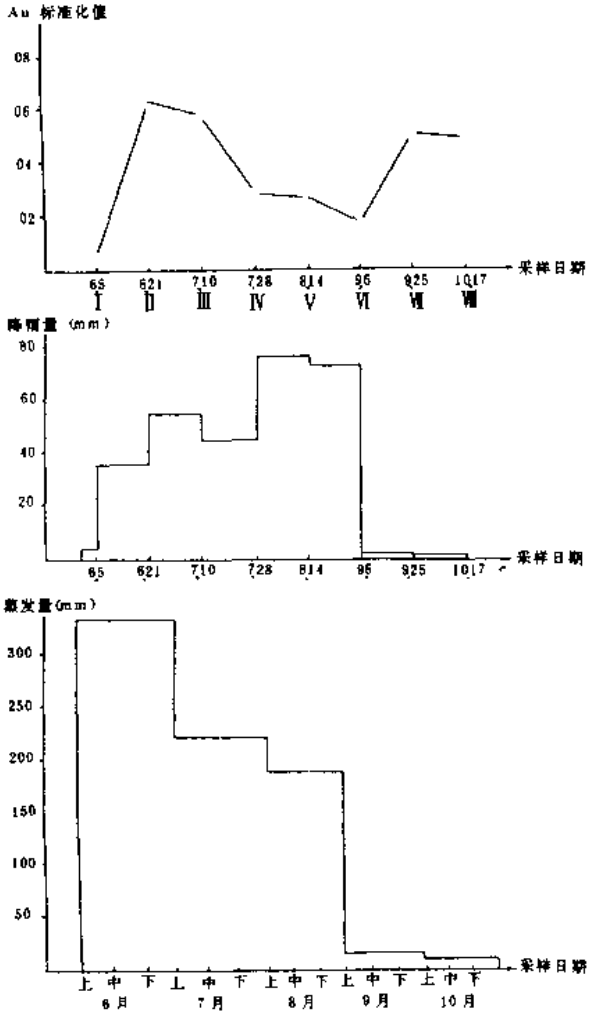

图 4-3　东伙房地下水中金含量的季节性变化

Ag、V。旱季全区水中金平均值为 8.1×10^{-12}，雨季为 0.58×10^{-12}。旱季以 10×10^{-12} 为金的异常下限圈定了三处异常，雨季以 1×10^{-12} 为金的异常下限亦圈定了三处金异常。

与老羊壕金矿有关的水地球化学异常范围可达十几 km^2，距金矿 0.7—2km 的水井中均有金异常显示。

在所圈定的三个金异常中（见图 4-4），AHr_{3-2} 异常为已知矿点所引起，还有 Zn、Se、As 等元素异常。AHr_{3-3} 异常的元素组合为 Pb、Zn、Sn、Cr、Ti、Ni、V、Ga 等元素。AHr_{3-3} 异常位于 F_1 断裂南侧，出露加里东期斜长花岗岩。垂直断裂带布置三条壤中气汞量测量剖面，具有明显的壤中气汞异常。异常检查时见有褐铁矿化石英脉，含金 10×10^{-9}，推测该异常可能与隐伏的金矿有关。AHr_{3-3} 异常区内第四系广布，且覆盖较厚，以往的水系沉积物测量和土壤测量均无金异常显示。这一水地球化学金异常的显示，正是深部矿化的一种信息。

合教金矿点附近共圈定了 6 处金的水化学异常（AH_4—AH_9）。其中除 AH_5 异常为已知合教石英脉型金矿引起外，AH_6 和 AH_7 异常经进一步开展壤中气汞量测量与岩石地球化学测量后被推测为有较好找矿前景的矿致异常。

二、赣中地区（湿润气候区）水地球化学找金的试验效果

在湿润气候区选择了赣中临川茅排、温泉地区开展了金的表生地球化学研究，并进行水地球化学找金工作的试验。茅排地区为已知金矿区，温泉地区为找矿远景区。

（一）茅排地区的水化学找金试验

1. 地质概况

茅排金矿床地处江西省宜黄-南城-临川三县交界处。大地构造位置属于华南加里东褶皱系赣中南褶隆东北侧的大湖山-芙蓉山隆断束与武夷山隆起区的广昌-南城拗断束之交结部位，处于大余-南城深大断裂与安远-鹰潭深大断裂交接部位的旁侧。区内断裂构造以 NE-NNE 向为主，并与 NEE 向及 NW 向断裂构造构成该区的基本格架。

茅排地区出露的地层有震旦系周潭群和洪山群，寒武系荷塘组和杨柳岗组，三叠系安源组，侏罗系林山组，白垩系南雄组及第四系。区内北部和南部出露有加里东期和燕山期的花岗岩和斜长花岗岩。

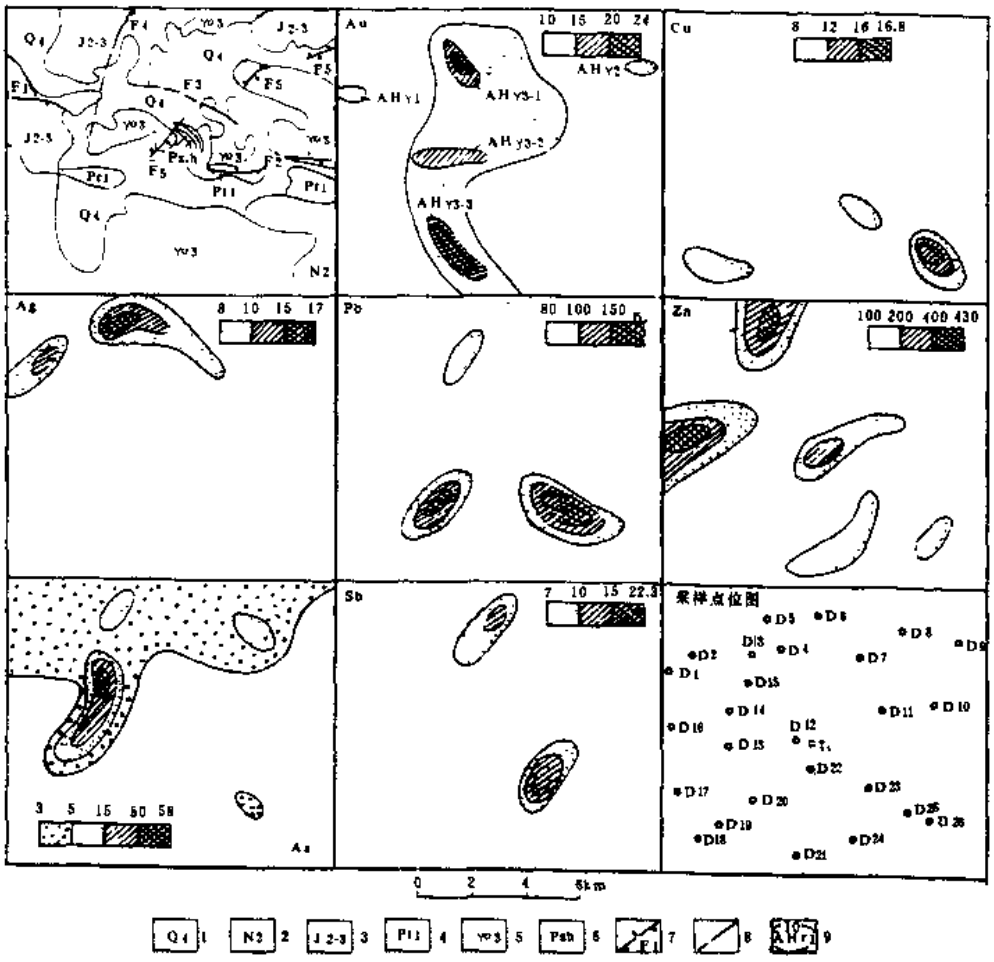

图 4-4　老羊壕金矿区地质及水化学异常图

1—第四系粘土、砂土；2—第三系泥岩、砂土；3—侏罗系流纹岩、凝灰岩；4—元古宙浅粒岩、片麻岩；5—华力西期斜长花岗岩；6—片理化蚀变带；7—断层及编号；8—实测及推测断层；9—水化学金异常及编号

含量单位：Au 10^{-12}，其余为 10^{-9}（老羊壕金矿赋存 Psh 中）

金矿化均发育于茅排混合杂岩带中，并严格受断裂破碎带控制，总体产状为走向30°—40°，倾向 NW，与金共生的金属硫化物主要有黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和闪锌矿等。属于少到中等硫化物的石英脉型金矿床，目前已具中型规模。

2．水地球化学特征

（1）地下水类型和水化学成分

该区地下水可分为四种类型，即基岩裂隙潜水，构造裂隙脉状承压水，堆积层孔隙潜水和第四系孔隙潜水。

结合地下水的矿化度和 pH 值，可将该区地下水划分为两种类型，即微矿化弱酸性重碳酸型水和微矿化中性重碳酸-硫酸型水。后者主要分布于矿化地段。

（2）金的水地球化学特征

茅排地区地表水中金的最低含量为 0.5×10^{-12}，最高含量为 600×10^{-12}（矿坑水），金的平均值为 0.84×10^{-12}，标准偏差为 0.43×10^{-12}，异常下限值为 1.5×10^{-12}。水中金含量沿水流运动方向降低的规律见表 4-3。

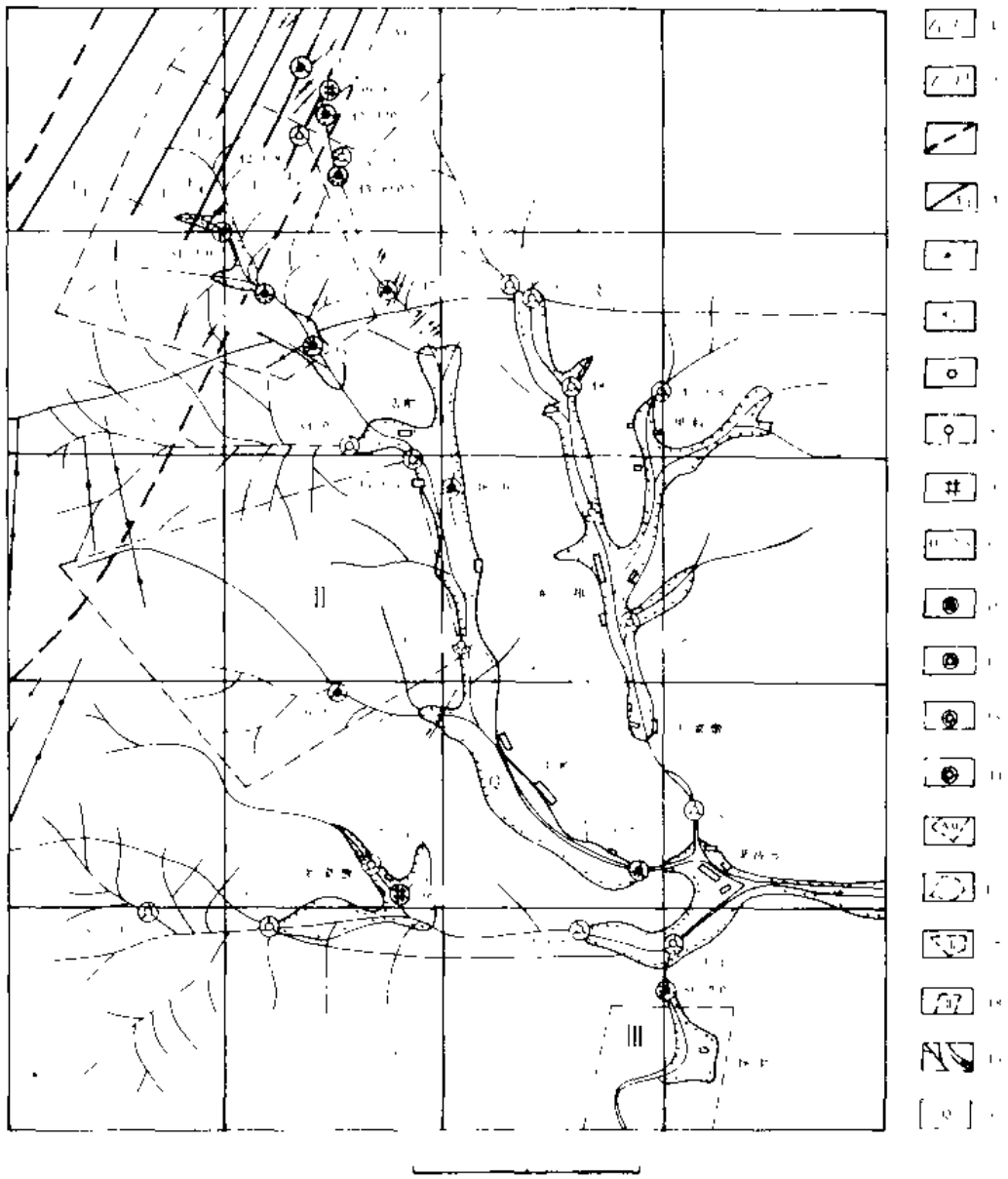

图 4-5　临川茅排地区水地球化学找金综合成果图

1—下震旦周潭群上段；2—下震旦周潭群下段；3—推测断层及韧性剪切带边界；4—性质不明的实测断层；5—石英脉；6—地质产状；7—地表水取样点；8—下降泉；9—水井；10—水样点编号—金含量（×10⁻⁹g/L）；11—金异常点；12—铜异常点；13—氟异常点；14—硫代硫酸根异常点；15—已知金矿区；16—Ⅰ号远景区；17—Ⅱ号远景区；18—Ⅲ号远景；19—水系及河流；20—第四系

表 4-3　茅排地区水中金含量与迁移距离之间的关系

距矿床距离	矿坑水	1km	1.5km	3km
水中金含量（1×10⁻⁹g/L）	600	70	30	7

上表说明在湿润气候区金的水化学异常在距矿床 3km 以外的地方仍有显示。

水中 Au 的含量与 Cl^-、Cu^{2+}、$S_2O_3^{2-}$ 及 SO_4^{2-} 等离子或络离子的含量具有相关性，异常的分布特征具有相似性。因此，水中 Au 的含量可作为直接找矿标志，Cl^-、Cu^{2+}、$S_2O_3^{2-}$ 及 SO_4^{2-} 则为间接找矿标志。根据以上标志在进行 1∶50000 比例尺的水地球化学调

查时，在茅排已知矿床外围圈定了三个找矿远景区。在进行1:25000比例尺水地球化学调查时（调查面积相对小些，为10km²），圈定了2个找矿远景区，（见图4-5），二者所获得的成果是一致的，仅是1:25000水地球化学调查所圈定的找矿远景区比1:50000的更加详细、可靠。在Ⅰ号远景区内，经华东地勘局262地质大队4个钻孔的验证，2个见工业矿化，一个见表外矿化，效果显著。

（二）温泉地区的找矿试验

1. 地质概况

温泉地区地处临川县温泉乡和展坪乡。大地构造位置属扬子准地台与加里东华南褶皱系的接触部位，处于萍乡-广丰深大断裂的南侧，南昌-黎川深大断裂的西南侧及北东向的德兴-遂川深大断裂带上。

该区出露的地层主要有前震旦系双桥山群浅变质的千枚岩，石炭系下统华山岭组和梓山组的粉砂岩和砂岩，白垩系上统南雄组的砂岩、砂砾岩及第四系松散沉积物。区内桐山庙至青莲山一带还出露有燕山期花岗岩。见图4-6。

金矿化主要发育在双桥山群和梓山组两套地层的硅化破碎带中。集中分布在展坪王古塘地段和桐山庙地段。与金共生的主要金属矿物为黄铁矿，次为磁铁矿、磁黄铁矿、褐铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、赤铁矿、黑钨矿、重晶石等，属硫化物型石英脉金矿。

区内还发育有第四纪冲积型砂金矿和白垩系南雄组红层风化壳型砂金矿。

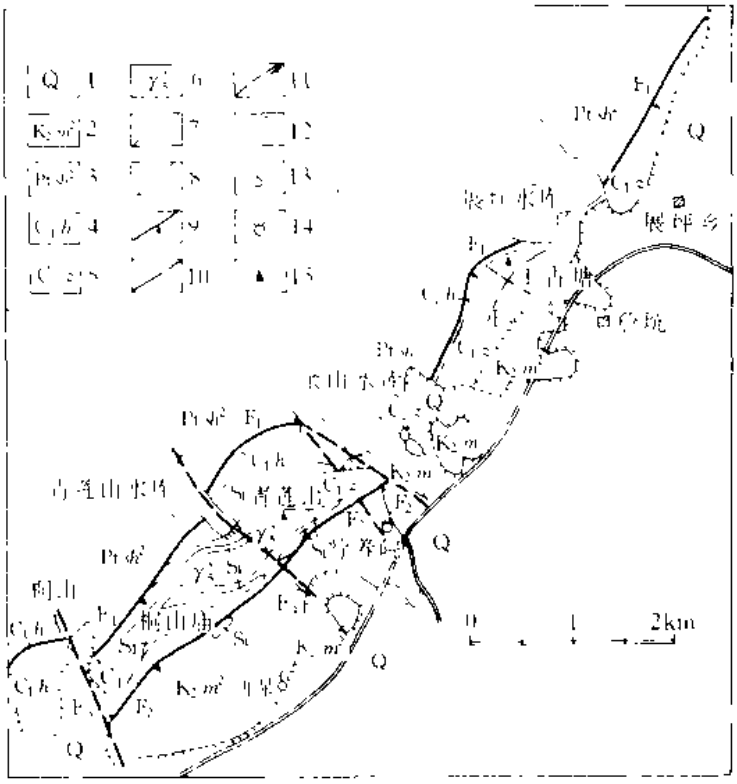

图4-6 临川温泉地区地质图

1—第四系；2—白垩系上统南雄组；3—前震旦系双桥山群；4—石炭系下统华山岭组；5—石炭系下统梓山组；6—燕山期花岗岩；7—地层界线；8—沉积不整合界线；9—断层；10—推测断层；11—推测平移断层；12—硅化带；13—干升冷泉；14—温泉；15—山峰

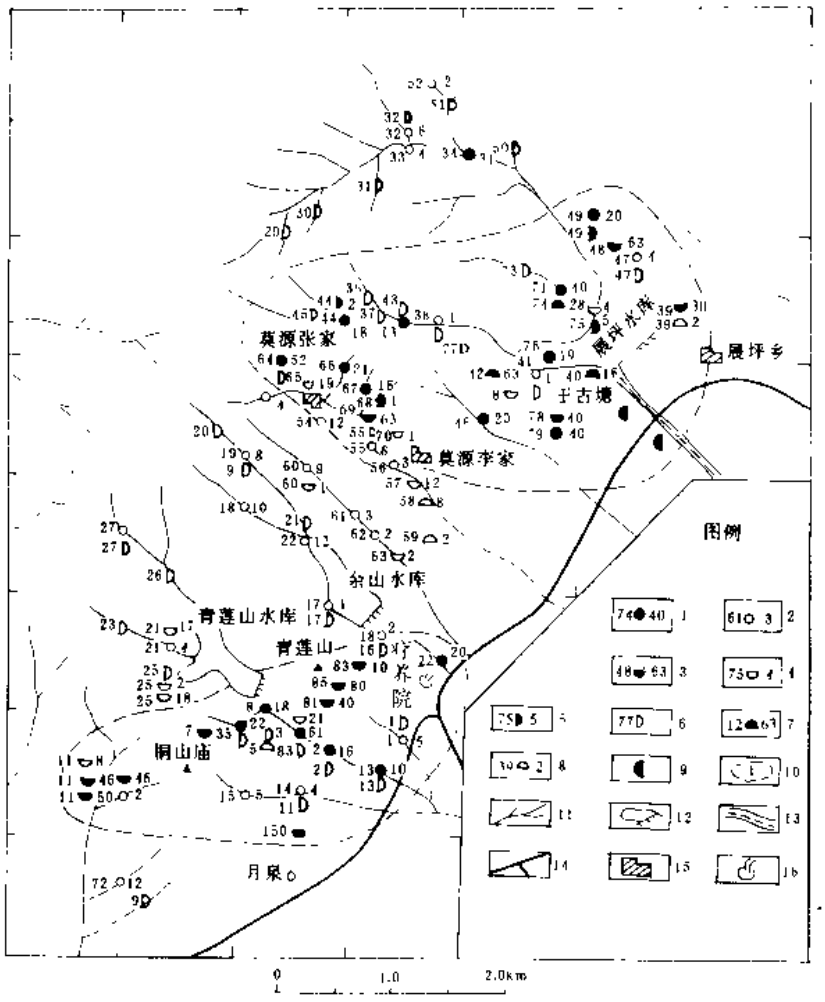

图 4-7　临川温泉地区金地球化学异常评价成果图

1—水系沉积物取样点，左边为编号，右边为金含量（10^{-9}）；2—水系沉积物异常点；3—岩石地球化学异常点，左边为编号，右边为金含量（10^{-9}）；4—岩石地球化学取样点；5—自然重砂见明金点，左边为编号，右边为见金颗粒；6、7—土壤地化异常点，左边为编号，右边为金含量（10^{-9}）；8—土壤地球化学取样点；9—砂金矿点；10—一级找金远景区；11—水系；12—水库；13—溢洪道；14—公路；15—民房；16—温泉

2．水地球化学特征

按地下水赋存的空间及埋藏条件，区内地下水可归纳为 3 类，即裂隙潜水，构造裂隙脉状承压水和第四系孔隙潜水。按水的矿化度、pH 值、SiO_2 含量及水中其它各种离子的存在，该区的地下水可归纳为 3 种水化学类型：微矿化弱酸性至中性的硅酸或硅酸-重碳酸型水，基岩出露山区的冷水多属此类；弱矿化碱性的重碳酸硅质热水，深层断裂带中的热水属此类；弱矿化中性-弱碱性的重碳酸-氯化物型水，第四系孔隙潜水属此类。

3．金的水地球化学特征

温泉地区地表水，泉水及井水中金含量分析表明，该区水中金含量的离散度很小。求得水中金的平均含量为 0.68×10^{-12}，标准偏差为 0.21×10^{-12}，异常下限值定为 1.0×10^{-12}。从统计数字看，温泉地区地下水中的金含量普遍高于地表水。

温泉地区的桐山庙地段，水中金的最低含量为 1×10^{-12}，最高含量为 4.0×10^{-12}

求得水中金的平均含量为 1.46×10^{-12}，标准偏差为 0.49×10^{-12}，异常下限为 1.95×10^{-12}。

温泉地区水中间接找矿标志为 Cl^-、K^+、Pb^{2+}。

4．找矿效果

根据1:50000金的水地球化学调查所获得的资料，在温泉地区圈出王古塘-莫源张家和桐山庙-青莲山两个金矿远景区，根据1:25000金的水地球化学调查所获得的资料，在桐山庙-青莲山远景区内进一步圈出两个金矿找矿远景区。说明两次金的水地球化学调查所获得的成果是一致的。

为了评价温泉地区水地球化学找金矿的效果，在 $20km^2$ 的范围内布置了水系沉积物地球化学测量和自然重砂测量，并配合少量岩石和土壤地球化学测量。

在45个水系沉积物采样点中，圈出了17个异常点。在41个自然重砂样品中，有4个样品见有明金。结合岩石、土壤样品金的分析结果编制了金地球化学异常评价成果图，(见图4-7)，圈出两个金矿远景区与应用水地球化学法所圈出的两个远景区相一致。进一步证实了金矿远景区的存在。后经工程揭露，在王古塘-莫源张家远景区内发现金矿化点3处，检块样分析结果，金最高含量为 17.74×10^{-6}。在桐山庙-青莲山远景区内圈定了7条金矿化带并发现许多金矿化点，据检块样分析结果，金最高含量为 16.8×10^{-6}。充分表明水地球化学方法寻找金矿的有效性。

第三节 结 语

1．为满足水地球化学方法找金对分析技术的要求，研制成功了水样预富集方法和野外水化学找金的取样箱，实现了野外现场快速预富集水中金量的设想，解决了水地球化学测量工作中大量水样采集，运输和变质的难题。研制成功TMK-TBP液珠萃取比色法和甲酸还原硅钼酸-动力学分光光度法，金的检出限分别为1ng/L和0.2ng/L。

2．提供了研究区水中金背景含量的基础数据。赣中抚州地区为 1×10^{-12}，茅排地区为 0.84×10^{-12}，温泉地区为 0.68×10^{-12}，内蒙老羊壕地区旱季为 8.1×10^{-12}，雨季为 0.58×10^{-12}；内蒙东伙房地区旱季为 1.74×10^{-12}，雨季为 1.06×10^{-12}。研究表明无论旱季和雨季均能发现水中金等元素的地球化学异常，一般情况下旱季取样的效果更为明显。

3．试验工作表明，水中金可作为找金矿的直接标志，Ag、As、Cu、Zn、Pb、Sb、Mo、Se、K、Cl^-、SO_3^{2-}、$S_2O_3^{2-}$、SO_4^{2-}/Cl 等可作为找金矿的间接标志。不同地区要根据金矿床各自的地质、地球化学特征并结合各地区的实际情况分别确定相应的找金矿的间接标志。

4．水地球化学方法找金，无论是在南方湿润气候区、内蒙干旱气候区和东北地区的中温带湿润气候区均可取得找矿效果。赣中地区用水地球化学方法预测了金的找矿远景区5片，其中3片已进行了详查或工程揭露，均发现了金矿化和工业矿体。老羊壕地区用水地球化学方法发现了以往水系沉积物测量和土壤测量未曾发现的 AHr_{3-3} 号异常，经初步查证可能与隐伏金矿有关。

第五章　寻找金矿的包裹体地球化学方法

国内外地球化学家对流体包裹体地球化学的研究，过去主要集中于了解成矿溶液的成分和成矿的物理化学环境等成矿机制方面，而用于直接找矿的研究较少。在找矿应用方面主要作过蒸发晕、热晕及红外光谱测定 H_2O 和 CO_2 相对光密度在找金中的试验研究

本章着重探讨区分含金与不含金石英脉的包裹体地球化学标志，重点是研究寻找盲矿和判别金矿剥蚀程度的包裹体地球化学标志。

研究方法是从解剖典型矿床入手，研究和发现典型金矿床的包裹体地球化学垂直分带规律，总结出矿体前缘、矿头、矿中、矿尾的包裹体地球化学判别标志，建立找矿模型，然后用模型进行预测。

通过我国山东招掖金矿带、牟乳金矿带、河北张宣地区及广西龙水金矿、内蒙赛乌素金矿等20多个大、中、小型金矿床和矿点的研究，总结出判别石英脉含金性和寻找盲矿及判别金矿剥蚀程度的包裹体地球化学模型和找矿标志，并进行了找矿预测。

第一节　寻找金矿的包裹体地球化学方法的理论基础及研究方法

一、包裹体地球化学找金的理论基础

矿物中包裹体是在矿物形成时俘获的成矿介质，能直接反映成矿溶液的性质和成矿的物理化学环境，因而可用于直接找矿。

由于含金与不含金石英脉的物质来源、溶液的成分、性质及形成环境不同，因此矿物包裹体俘获的溶液介质也会有很大差别，研究和发现包裹体的这些地球化学参数的差异可作为判别石英脉含金性的依据。

在金矿的成矿过程中，随着成矿作用的进行，物理化学条件不断变化，各种矿物依次结晶，成矿溶液的成分、性质也在有规律地变化，矿物包裹体则全面纪录下了这些变化的特征和规律。因此，矿体周围三度空间，特别是轴向（垂向）上包裹体地球化学参数的变化规律是找盲矿和判别金矿剥蚀程度的重要依据。

不同成因类型的金矿或同一矿床不同成矿阶段，由于成矿溶液成分、性质及矿物形成的物理化学环境不同，也导致矿物包裹体地球化学参数上的差异，这些差异就构成了根据包裹体地球化学参数确定金矿类型和同一矿床不同成矿阶段的依据之一。

二、包裹体地球化学找矿方法[34]

应用包裹体地球化学参数直接找金矿方法可分为蒸发晕法、热晕法、气晕法和离子晕法。

蒸发晕：热液矿体或脉体周围岩石中矿物包裹体数量随远离矿体中心而减少的这种晕

称为蒸发晕。根据爆裂仪测定各测点包裹体的爆裂累积脉冲数可圈出矿体的蒸发晕图。

热晕：矿体周围的热梯度晕称为热晕。应用热台所测定的石英矿物包裹体的均一温度或用爆裂仪所测定的矿物包裹体爆裂温度圈出的等值线图叫热晕图，根据热晕图可圈定赋矿部位和指出热液活动方向。

气晕和离子晕：在成矿过程中，矿体周围矿物包裹体中保留了热液中某些气体和离子成分。应用气相色谱仪分析石英单矿物包裹体中的气相成分和用离子色谱仪分析石英包裹体液相成分中的离子。根据包裹体中的气体和离子成分浓度梯度圈定的异常分别称为气晕和离子晕。根据气晕和离子晕可圈定矿体赋存部位、寻找盲矿和判别矿体剥蚀程度。

第二节　含金与不含金石英脉的包裹体地球化学特征

所谓含金石英脉既包括含金矿体的石英脉，也包括达不到目前工业品位要求的强矿化石英脉，不含金石英脉指含金量很低的石英脉，其含量接近于围岩背景值或异常下限值。

通过对我国内蒙古、山东、河北、吉林等矿区（带）含金与不含金石英脉包裹体成分及比值特征的研究表明：不同成矿区带含金与不含金石英脉在包裹体地球化学参数上都有明显差异，主要表现为：

（1）含金与不含金石英脉包裹体中 H_2O、CO_2、CH_4 及其比值有明显差异。含金石英脉一般 CO_2、CH_4、H_2O 含量高于不含金石英脉，CO_2/H_2O、CH_4/CO_2 和 CO_2、H_2O、平均相对光密度（$\bar{D}_{CO_2}/\bar{D}_{H_2O}$）等比值也高于不含金石英脉；（2）不同矿区含金与不含金石英脉包裹体成分中 CO_2、CH_4、H_2O 的含量及某些比值的区分界线是不同的，如 CH_4/H_2O，招掖含金石英脉 $>0.35\times10^{-3}$，而内蒙古赛乌素金矿区则 $>1.5\times10^{-3}$；又如 $\bar{D}_{CO_2}/\bar{D}_{H_2O}$，金厂峪和石湖的含金石英脉包裹体 >0.1，而海沟则 >0.05，其原因是成矿物质来源、成矿溶液成分性质及成矿环境不同造成的。

第三节　典型金矿床包裹体地球化学垂直变化规律及垂直分带序列

一、典型金矿床包裹体成分参数的垂直变化规律

（一）河北东坪金矿包裹体成分参数的垂直变化规律

东坪金矿为一大型金矿，矿床上部为石英脉型，下部为蚀变岩型，成因与碱性杂岩体有关。矿床由几十条矿脉组成，其中1号矿脉最大，1号矿脉8线上部矿体不同标高的石英包裹体成分（表5-1）特点是：

气相成分中 CO_2、H_2O 从上至下有降低趋势，而离子成分 K^+、Na^+、Ca^{2+}、SO_4^{2-} 从上至下有增高的趋势，F^-、Cl^- 升高又降低，CO_2/Ca^{2+}、H_2O/Ca^{2+}、Na^+/K^+、CO_2/Cl^- 等从上至下有降低的趋势。

（二）山东牟乳金矿带金青顶、邓格庄金矿床包裹体成分的垂直变化规律

金青顶为大型石英脉型金矿，地表矿体延长300多米，向下延深700多米还未尖灭。该矿床上部四个中段垂深250m范围内从上至下 D_{CO_2} 逐渐降低，而 $\bar{D}_{H_2O}/D_{CO_2}$ 升高，$\bar{D}_{H_2O}$

表 5-1　河北省东坪金矿床 8 线石英包裹体成分垂直变化表

标高 (m)	样号	CO_2	H_2O	F^-	Cl^-	SO_4^{2+}	K^+	Na^+	Ca^{2+}	$\frac{CO_2}{Ca^{2+}}$	$\frac{H_2O}{Ca^{2+}}$	$\frac{CO_2}{Cl^-}$	$\frac{K^+ + Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$	$\frac{Na^+}{K^+}$	$\frac{H_2O}{Cl}$
1640	C_1	66.7	1138	0.57	3.51	2.95	0.31	8.75	3.02	22	377	19	2.8	28	324
1620	C_2	54.9	895	0.54	468	2.47	0.77	8.83	2.72	20.2	329	11.7	2.9	11.5	191
1600	C_3	63.7	1116	1.08	3.97	2.93	0.68	7.39	4.21	15.1	265	16	1.6	10.9	281
1560	C_4	56.8	995	0.24	5.26	2.49	0.55	8.63	5.82	9.8	171	10.8	1.3	15.7	189
1520	C_5	52.9	1027	2.81	8.05	4.45	1.69	10.03	6.99	7.6	147	6.6	1.5	5.9	128
	C_7	49	610	1.39	4.1	6.04	3.77	16.89	10.71	4.6	57	12	1.9	4.5	149
1460	C_6	17.6	565	0.53	5.63	3.66	2.04	17.73	20.8	0.85	27	3.1	0.95	8.7	99

注：CO_2、H_2O 单位为 10^{-6}，F^-、Cl^-、SO_4^{2-}、K^+、Na^+、Ca^{2+} 单位为 g/L。

升高又降低。

邓格庄为大中型石英脉型金矿，为盲矿，地表石英脉金含量不够工业品位，从地表到矿体中下部垂深 200 余米内，$\bar{D}_{CO_2}$从上至下明显降低，而 $\bar{D}_{H_2O}/\bar{D}_{CO_2}$升高。

两个矿床的共性是从上至下 $\bar{D}_{CO_2}$降低，而 $\bar{D}_{H_2O}/\bar{D}_{CO_2}$升高，但其具体数值不同，邓格庄 $\bar{D}_{CO_2}$从 4.76→0.82，$\bar{D}_{H_2O}/\bar{D}_{CO_2}$从 1.53→4.35；金青顶 $\bar{D}_{CO_2}$从 1.05→0.36，$\bar{D}_{H_2O}/\bar{D}_{CO_2}$从 3.45→9.08，反映了两个矿床成矿环境和成矿溶液成分性质的差异。

（三）玲珑金矿 52 号脉、55 号脉中矿体包裹体成分的垂直变化规律

玲珑金矿是特大型石英脉型金矿，矿田内的 200 多条石英脉中已有几十条是工业矿脉。研究了 52 号脉和 55 号脉内两个矿体不同标高包裹体成分的垂直变化规律。

52 号脉：研究了赋存于地表至 170m 标高间的 110m 垂深范围内的一个矿体，该矿体延深 70 多 m，走向长 40 余 m，厚度 0.2—0.8m，为含金黄铁矿石英脉，金品位 3×10^{-6}—5×10^{-6}，矿体前缘、矿体中上部及尾部的包裹体成分列于表 5-2，从上到下 $\bar{D}_{H_2O}$、$\bar{D}_{CO_2}$、$\bar{D}_{H_2O}/\bar{D}_{CO_2}$从矿体前缘至矿体下部降低，而 F⁻、F⁻ + Cl⁻、F⁻/Cl⁻ 是矿前缘＞矿体下部而＜矿体中上部，说明 F^-、F⁻ + Cl⁻、F^-/Cl^- 对找盲矿具有重要指示意义。Ca^{2+}、Mg^{2+} 是前缘和中上部低于矿下部，是矿体下部的重要指示参数。55 号脉也具有类似的垂直变化规律。

表 5-2　玲珑金矿 52 号脉某矿体不同标高包裹体成分

样数	标高 (m)	$\bar{D}_{H_2O}$	D_{CO_2}	$\bar{D}_{H_2O}/\bar{D}_{CO_2}$	F⁻	Cl⁻	F⁻ + Cl⁻	F⁻/Cl⁻	Ca^{2+}	Mg^{2+}	备注
2	250	4.68	1.73	2.7	2.8	3.43	6.2	0.82	5.72	0.08	前缘
3	206	2.83	1.06	2.67	7.3	4.45	11.8	1.64	1.65	0.09	矿中上部
3	170	2.9	1.30	2.23	0.3	3.77	4.1	0.08	23	0.2	矿下部

注：F⁻、Cl^-、Ca^{2+}、Mg^{2+} 单位为 g/L。

综上所述，金矿床包裹体某些成分具有明显垂直变化规律，这些规律既有共性，又有特性，其共性是 CO_2、H_2O、F^- 从上至下有降低的趋势，$\bar{D}_{CO_2}$也有同样规律，但各矿床上述成分比值的具体数值不同，有的相差还很大。Ca^{2+}、Mg^{2+} 离子倾向于在矿体下部富集。

二、典型金矿床包裹体成分的垂直分带序列

采用E·M·克维雅特科夫斯基方法和C·B·格里戈良方法分别计算了某些典型金矿床包裹体成分的浓度梯度（以各中段平均值计算）的垂直分带序列，参考各典型金矿床包裹体成分异常垂直分带特点，综合研究后得出了各典型金矿床包裹体成分的垂直分带序列，各典型矿床从上到下是：

东坪金矿：CO_2—H_2O—H_2—F^-—SO_4^{2-}—Cl^-—Na^+—K^+—Ca^{2+}；

金厂峪金矿：H_2—Cl^-—H_2O—CO_2—CH_4—F^-—SO_4^{2-}—CO—K^+—Na^+；

玲珑55号脉：H_2O—H_2—CO—CO_2—CH_4—Na^+—SO_4^{2-}—Ca^{2+}—F^-—Cl；

三甲金矿：K^+—F^-—CO—CH_4—H_2—SO_4^{2-}—H_2O—Na^+—CO_2—Cl^-。

东坪金矿和金厂峪金矿的包裹体成分垂直分带序列中气相成分CO_2、H_2O、H_2、CH_4及离子成分中F^-、Cl^-一般出现在上部，而K^+、Na^+、Ca^{2+}出现在下部。三甲金矿的CO_2、Cl^-出现在矿体下部，为“反分带”，是深部矿体头部叠加的反映，这一认识已被深部工程所证实，该矿向深部还有很大延深。玲珑金矿55号脉的F^-、Cl^-也出现在下部，据此预测深部还有另一个矿体。

包裹体成分垂直分带序列的计算，由于采用计算方法不同、取值方法不同、截面数不同及参与计算的成分不同，其结果都会有一定差异，有些成分上、下有微调。在正常情况下气相成分中CO_2、H_2、CO、CH_4及液相成分中F^-、Cl^-会出现在矿体上部，而K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}等离子总是出现在下部，总体看计算结果能定性地反映金矿床包裹体成分的垂直分带特点。由于各矿床多是多阶段叠加成矿的结果，计算出的分带序列结果很难是理想情况，甚至会出现CO_2、CH_4、F^-、Cl^-处于分带序列的下部，即所谓“反分带”。这种“反分带”在找矿中具有重要实用价值，它指示了该矿体向深部还有很大延伸或深部还有盲矿。

第四节　金矿床包裹体地球化学异常特征及叠加晕模型

通过对胶东招掖和牟乳金矿带、内蒙古赛乌素、广西龙水等典型金矿床包裹体地球化学异常包括热晕、蒸发晕、气晕、离子晕特征的研究，总结出了金矿床单阶段包裹体地球化学特征及叠加晕理想模型。

一、金矿床包裹体地球化学异常特征

（一）热晕特点

通过对赛乌素金矿区四条典型含金石英脉三度空间石英均一温度的研究得出：

1．含金石英脉赋矿部位形成温度高于矿化（金不够工业品位）部位，一般赋矿部位均一温度>210℃，而矿化部位较低（<180℃）。

2．含金石英脉体在走向上，由脉中部向两端尖灭处，温度逐渐降低（<180℃），矿化也随之减弱。

3．在垂向上，由于该区石英脉已处于中等剥蚀，一般石英脉向深部延伸只有150—250m，向深部矿化减弱。由地表富矿部位向深部石英脉尖灭部位石英均一温度逐渐降低（<180℃）。

4．含金石英脉体内横向温度变化大，由脉中心至边缘，温度从>210℃到<180℃。

（二）蒸发晕特点

图 5-1 中长剖面是穿过龙水破碎带硫化物型和石英脉型金矿带的蒸发晕，该图是采用全岩爆裂累积脉冲数作成的，蒸发晕清楚地反映了龙水金矿区（带）的宽度。背景的累积脉冲数为 200，异常下限为 300。矿带上异常在 4000—30754 间跳动，充分反映了构造控矿的特点。右边花岗岩背景脉冲数在 4000—7000 间变化，但很平稳，与矿带有明显区别。

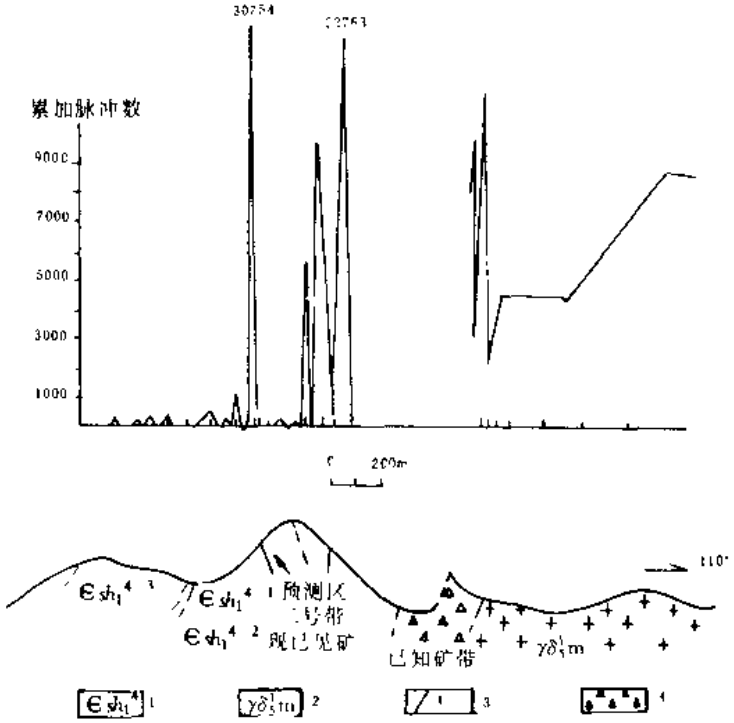

图 5-1　广西龙水金矿区长剖面蒸发晕

1—水口群清溪亚群第四段不等粒砂岩夹含碳质页岩；2—印支期斑状黑云母花岗闪长岩；
3—矿脉及编号；4—压碎岩

图 5-2 是胶东牟乳金矿带邓格庄和三甲金矿脉不同标高石英爆裂累积脉冲数异常的垂直纵投影图。邓格庄为中大型石英脉型金矿，地表圈不出矿体，石英爆裂累积脉冲数在 4087—15686 之间，一般为 8000—10000 之间，按 10000 和 12000 两个浓度值圈定异常，可圈出三个异常，其中有两个大异常出现在矿体前缘及矿体上部，反映了在成矿过程中矿体前缘及上部包裹体数目多，这是找盲矿的一个重要标志。矿脉中下部出现一个异常，该异常下部矿体延深最大，可能反映了另一个成矿阶段叠加的结果；三甲金矿为一中型石英脉型金矿，已剥蚀到中部，矿脉中石英爆裂累积脉冲数低于邓格庄，脉冲数范围在 3078—14802 间，一般为 5000—8000，按 6000 和 10000 两浓度值圈异常，发现两个异常，矿体上部异常是已知矿的异常，伴随着矿体的剥蚀，该异常已大部分被剥蚀，下部出现了强异常，是深部盲矿的显示，与气晕和离子晕预测一致。该异常已被深测工程所证实。

（三）气晕和离子晕特征

金矿床中石英包裹体气相成分一般是以水蒸气为主，并含有 CO_2、H_2S、O_2、CH_4、CO、N_2、H_2 等，有时还含惰性气体，包裹体中液相成分有 K^+、Na^+、F^-、Cl^-、Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-} 等。

通过对胶东牟乳金矿带邓格庄、三甲等含金石英脉、招掖金矿带新城蚀变岩型金矿及

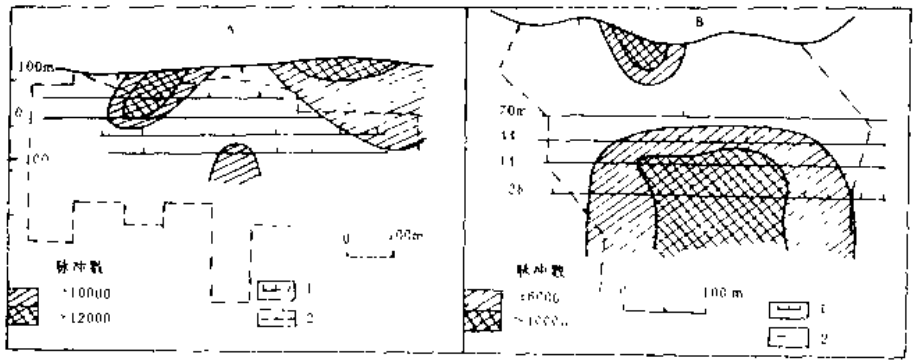

图 5-2　胶东邓格庄（A）三甲（B）金矿床石英爆裂累积脉冲数异常垂直纵投影图

1—坑道及采样点；2—矿体纵投影界线

玲珑石英脉型金矿的研究表明，金矿床周围存在着气晕和离子晕，而且具有明显分带性。由于各典型金矿的物质来源，成矿溶液成分及成矿环境的差异，各矿床的气晕和离子晕强度不同，异常分带也采用了不同浓度标准（见图注）。

1．邓格庄石英脉型金矿床的气晕和离子晕

邓格庄金矿为大型石英脉型金矿，地表石英脉宽 50cm 左右，硫化物少见，向深部到 50—100m 处，石英脉变为 1—2m 厚，为含大量黄铁矿的金矿体。图 5-3 是邓格庄金矿Ⅱ号含金石英脉包裹体气体晕和离子晕垂直纵投影图。在气相成分中 CH_4 气体、D_{H_2O}、$\bar{D}_{CO_2}$和液相中 Cl^-、F^-等离子，在矿脉中上部及前缘形成了明显异常，其中 Cl^-、F^- 离子是矿体前缘的特征指示离子，是预测深部盲矿的重要标志。

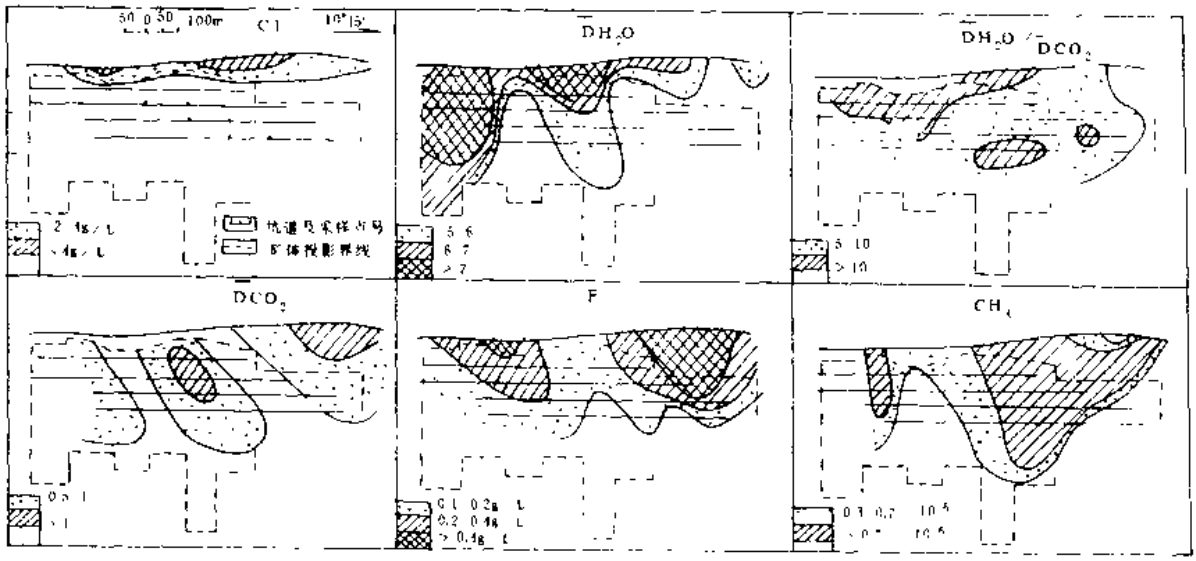

图 5-3　山东邓格庄Ⅱ号含金石英脉包裹体气晕和离子晕垂直纵投影图

2．三甲石英脉型金矿床的气晕和离子晕

三甲金矿为地表出露矿体，零米标高以上提交了 2.6t 金，其深部是否有第二个富集带需要预测。通过包裹体地球化学研究表明，气相成分中 CO_2、CH_4、D_{CO_2}、$\bar{D}_{H_2O}$、$\bar{D}_{H_2O}/\bar{D}_{CO_2}$及离子 SO_4^{2-}、Cl^-、F^-均在已知矿体上部和下部出现了异常，根据该金矿多阶段叠加的特点，认为上部异常是已知矿引起，下部异常是深部第二个金矿富集体的反映，下部两个异常一个是在垂直方向，一个是向北侧伏，这与原生晕预测完全一致，而且

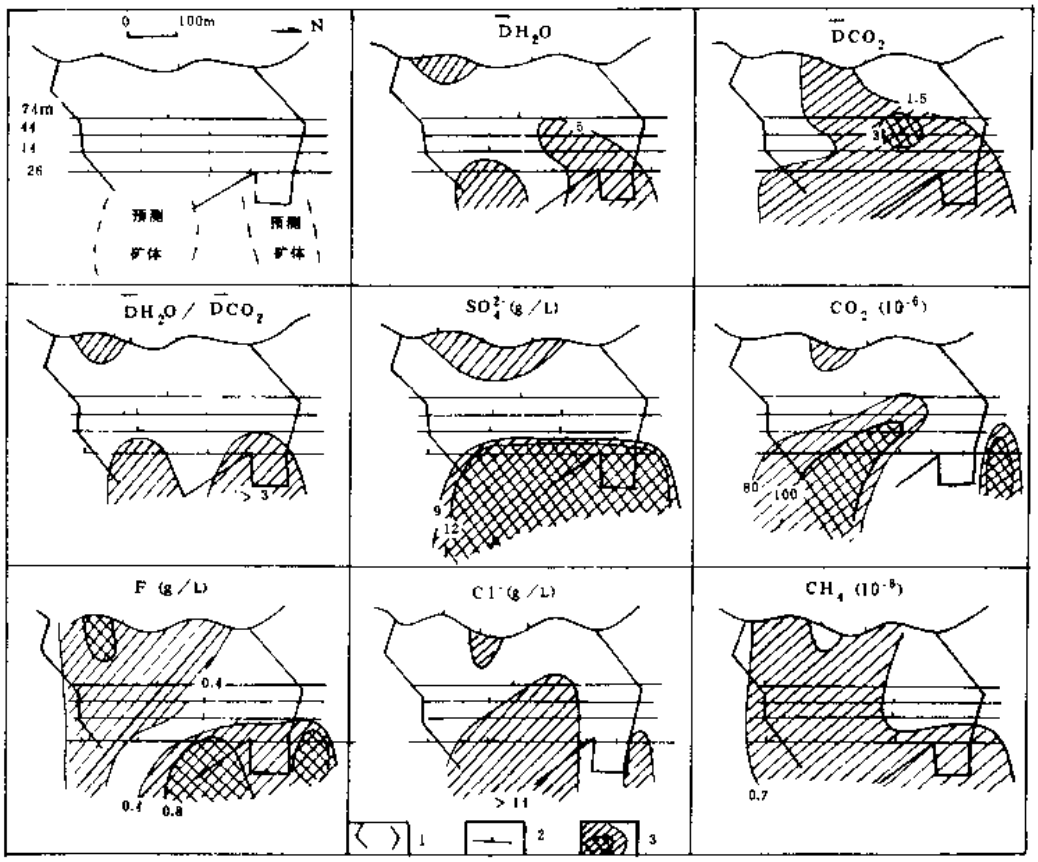

图 5-4　山东三甲金矿床包裹体气晕和离子晕垂直纵投影图

1—金矿体垂直纵投影界线；2—坑道及采样点；3—异常

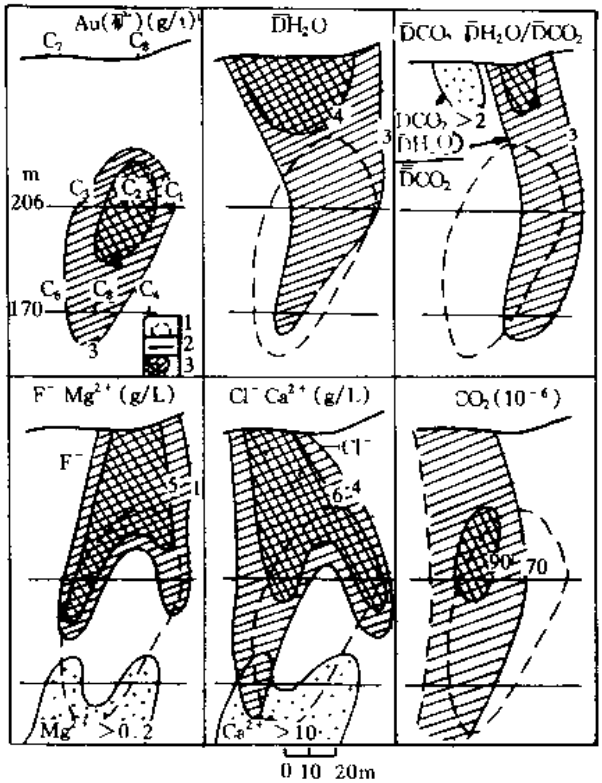

图 5-5　玲珑 52 号矿脉单个矿体包裹体离子晕和气晕垂直纵投影图

1—矿体垂直纵投影界线；2—坑道及采样点；3—异常

深部钻探见矿资料已证实了这种预测的正确性（图 5-4）。

3．玲珑金矿床 52 号脉气晕和离子晕

图 5-5 是玲珑 52 号脉的气晕和离子晕，其特点是 $\bar{D}_{CO_2}$、$\bar{D}_{H_2O}$、$\bar{D}_{H_2O}/\bar{D}_{CO_2}$、$Cl^-$、$F^-$ 在矿体头部及前缘均形成了明显异常，而 Mg^{2+}、Ca^{2+} 离子则在矿体尾部形成明显异常，该矿体的气晕和离子晕表现了明显的垂直分带性。

二、金矿床包裹体叠加晕理想模型

根据金矿的成矿成晕多期多阶段叠加特点，已总结出了金矿床原生叠加晕理想模式[35]，根据金矿成矿成晕多期叠加和包裹体气晕和离子晕的分带性总结出了金矿床多期多阶段包裹体气晕和离子晕的理想模型（图 5-6）分为四种叠加晕模型。

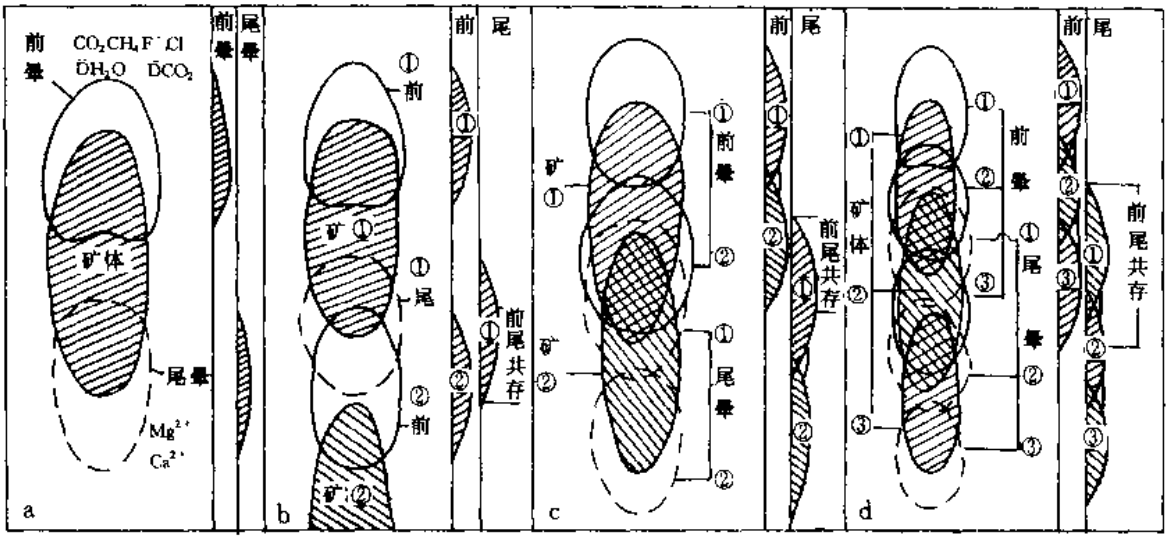

图 5-6　金矿床多期多阶段成矿包裹体气体和离子叠加晕垂直纵投影理想模型

a—模型 1：单阶段或两个阶段形成的矿、晕全重叠；b—模型 2：①②矿，晕为一个阶段形成尖灭再现或两个阶段形成；c—模型 3：两个主要成矿阶段形成矿、晕部分叠加；d—模型 4：第一主成矿阶段形成①、③矿、晕，第二七成矿阶段形成②矿、晕叠加其间

模型 1 是单阶段成矿或两个阶段成矿在空间上完全叠加的模型，前缘晕、尾晕分带清晰，即在每一个成矿阶段形成的矿体都有自己的前缘晕、尾晕，而且是正向分带，前缘特征气晕有 CO_2、CH_4 及反映包裹体中 H_2O 和 CO_2 相对光密度的 $\bar{D}_{H_2O}$ 和 $\bar{D}_{CO_2}$，前缘特征离子晕有 F^-、Cl^-，特征尾晕有 Mg^{2+}、Ca^{2+} 离子晕。

模型 2 是同一成矿阶段形成的串珠状矿体或两个主成矿阶段的两个矿体。叠加晕特点是上部矿体尾晕与下部矿体前缘晕叠加共存，即 CO_2、CH_4、F^-、Cl^- 晕与 Mg^{2+}、Ca^{2+} 晕共存。在含金石英脉圈不出工业矿体时，出现前尾晕共存则指示深部还有盲矿存在。

模型 3 是两个阶段形成的两个矿体部分叠加，其特点是两个矿体的前、尾晕分别相接加长（延深），并且在矿体中部有上部矿体尾晕与下部矿体前缘晕叠加共存，因此当金矿体中出现前、尾晕共存时指示该矿体是多阶段成矿叠加的结果，矿体向下延伸还很大。

模型 4 是三个矿体部分叠加，可理解为三个阶段形成的三个矿体叠加，也可理解为第一主成矿阶段形成上、下二个串珠状矿体，第二主成矿阶段形成的矿体②叠加在其间，叠加晕特点是三个矿体的前、尾晕分别相接加长，且矿体中部前、尾晕共存部分加长。对找矿的指示作用是当矿体中出现前、尾晕叠加时，指示矿体是多期多阶段叠加的结果，并指

示该矿体延深很大。

第五节　包裹体地球化学找金标志

一、含金与不含金石英脉的判别标志

1．赛乌素金矿区

含金石英脉：$CH_4>1.5\times10^{-6}$，$D_{H_2O}>3.2$，$CH_4/H_2O>1.5\times10^{-3}$；

不含金石英脉：$CH_4<1.5\times10^{-6}$，$\bar{D}_{H_2O}<3.2$，$CH_4/H_2O<1.5\times10^{-3}$；

2．招掖金矿带：

含金石英脉：$CO_2/H_2O>0.065$，$CH_4/H_2O>0.35\times10^{-3}$；

不含金石英脉：$CO_2/H_2O<0.065$，$CH_4/H_2O<0.35\times10^{-3}$。

3．金厂峪金矿区

含金石英脉：$\bar{D}_{CO_2}>1.5$，$\bar{D}_{CO_2}/\bar{D}_{H_2O}>0.1$；

不含金石英脉：$\bar{D}_{CO_2}<1.5$，$\bar{D}_{CO_2}/\bar{D}_{H_2O}<0.08$。

共性标志是含金石英脉石英包裹体中含 CO_2、CH_4 及 $\bar{D}_{CO_2}/\bar{D}_{H_2O}$、$CH_4/H_2O$ 都高于不含金石英脉，但具体数值难以统一。

二、盲矿的包裹体地球化学预测标志

1．蒸发晕标志：中、内带异常的出现指示深部有盲矿（注意不同矿区中、内带的标准不同）。

2．气晕标志：CO_2、CH_4 及 $\bar{D}_{CO_2}$、$\bar{D}_{H_2O}$异常的出现指示深部有盲矿。

3．离子晕标志：F^-、Cl^- 离子晕的出现指示深部有盲矿。

4．叠加晕综合标志

（1）前缘晕特征组合 CO_2、CH_4、F^-、Cl^- 及 $\bar{D}_{CO_2}$出现异常是深部有盲矿的指示；

（2）尾晕特征组分 Ca^{2+}、Mg^{2+} 出现异常而又无前缘组分异常，指示深部无矿；

（3）共存规律，即前缘晕和尾晕共存指示深部有盲矿或矿体向深部延伸较大。当地表或坑道石英脉或蚀变破碎带（圈不出金矿体）石英包裹体成分中既有 CO_2、CH_4、F^-、Cl^- 异常，又有 Ca^{2+}、Mg^{2+} 异常共存时，则指示深部还有盲矿；若在金矿体中采样发现有 CO_2、CH_4、F^-、Cl^- 与 Ca^{2+}、Mg^{2+} 异常共存则指示该矿向深部延伸较大。

（4）反转规律：当含金石英脉有三个以上中段控制时，按不同中段采样，发现 CO_2、CH_4、F^-、Cl^- 从上到下有三个中段连续下降，第四个中段又突然上升时，则指示该矿向深部延伸较大或深部有盲矿体。

三、金矿体剥蚀程度的包裹体地球化学标志

1．山东焦家蚀变岩型金矿床剥蚀程度的包裹体地球化学标志（表 5-3）。

表 5-3　焦家金矿剥蚀程度的地球化学标志

	CH_4	CO_2	CO	Cl
上　部	>0.3	>40	>4	>0.4
下　部	<0.25	<40	<3	<0.4

单位：CH_4、CO_2、CO 为 10^{-6}，Cl 为 g/L。

2．山东玲珑石英脉型金矿剥蚀程度的包裹体地球化学标志（表 5-4）。

表 5-4　玲珑金矿 52 号脉矿体剥蚀程度的地球化学标志

	$\bar{D}_{CO_2}$	$\bar{D}_{H_2O}/\bar{D}_{CO_2}$	F	F + Cl	Ca^{2+}	Mg^{2+}
前缘	>1.5	>2.6	>2.5	>5	<10	<0.1
中上部		>2.6	>5	>10	<5	<0.1
中下部	<1.5	<2.3	<1	<5	>20	>0.2

单位：F^-、Ca^{2+}、Mg^{2+} 为 g/L。

3．山东牟乳金矿带金青顶和邓格庄金矿剥蚀程度的包裹体地球化学标志（表 5-5）。

表 5-5　金青顶、邓格庄金矿剥蚀程度的包裹体地球化学判别标志

金青顶			邓格庄		
	$\bar{D}_{CO_2}$	D_{H_2O}/D_{CO_2}		D_{CO_2}	$\bar{D}_{H_2O}/D_{CO_2}$
上部	>1	<4	前缘	>4	<2
中部	0.4—1	4—9	中部	1—4	2—4
下部	<0.4	>9	中下部	<1	>4

四、包裹体地球化学找金预测

根据所建立的金矿包裹体地球化学叠加晕模式和找矿标志在一些矿区进行深部找矿预测，提出了 3 处找矿靶区，有一处已证实见矿（三甲金矿深部）。

第六章　金矿化探快速追踪异常源的方法

自从八十年代实施1:200000区域化探全国扫面计划和1:50000重点成矿区带地球化学普查以来，在全国范围内查明了数以万计的金地球化学异常。常规的异常查证模式周期长，耗资较大。并且逐步深入的查证程序并不都能获得满意的找矿效果。因而采用合理的异常查证程序和有效的快速追踪异常源的方法技术，保证异常查证质量，加快查证速度，加速矿产资源的开发、利用就具有重要意义。

异常源快速追踪方法是异常评价的重要组成部分。近年来的研究成果及找矿实践均已表明，异常评价工作不能套用统一的模式，而应根据不同的景观条件、矿床类型及异常形成机制采用不同的异常评价方法。本章重点介绍几种非常规方法在不同景观区或某些类型金矿床快速追踪金异常源中的应用和效果。

第一节　沟系土壤地球化学测量方法

沟系土壤地球化学测量（俗称沟系次生晕法）是沟系化探方法中的一种。沟系化探方法包括沟系岩石测量方法和沟系土壤测量方法。它是以沟系为定点依据，在沟谷或两旁采集岩石或残坡积土壤样品，快速评价水系沉积物地球化学异常的一种方法。即将评价水系沉积物地球化学异常的正规测网方法改变为自然条件下沿沟系的树枝状测网的方法。这是一种经济、快速的水系沉积物地球化学异常源追踪方法。本节重点介绍在西秦岭地区进行1:25000沟系土壤地球化学测量方法和应用效果。

一、追踪水系沉积物地球化学异常的1:25000沟系土壤地球化学测量方法、技术

（一）应用条件

沟系土壤测量适宜于地形切割，水系发育，基岩出露好，地表仅有不厚的残坡积物覆盖的山区，异地运积物覆盖地区不适宜进行沟系土壤测量。

（二）方法技术试验

1．采样密度

通过甘肃礼县李坝研究区25.5km^{2}加密采样（80个/km^2）和抽稀试验（60、40、20个/km^2）对比，沟系土壤采样密度以40个/km^{2}为宜。

2．布点原则

布点底图为1:50000地形图放大的1:25000地形图。首先，在图上将长度＞200m的沟谷勾绘出来，然后，沿沟系边坡布点，样点间距100m左右，尽可能使样点分布均匀。沟谷宽度＞200m时，两侧边坡均要布点。相邻两条沟系间距＞300m时，应在山脊或小路加布样点。采样点密度为40个/km^2。见图6-1。

3．采样层位

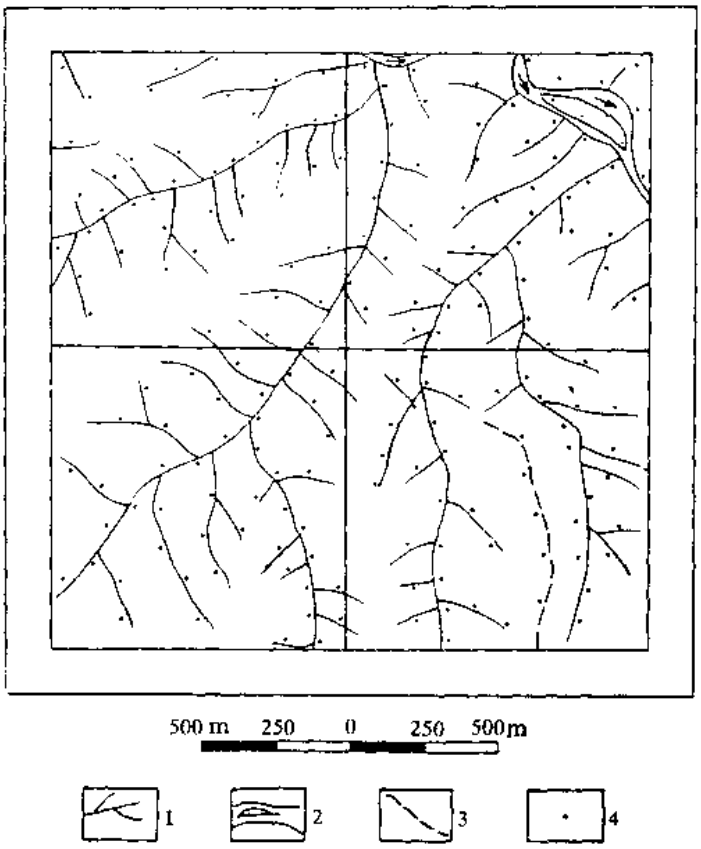

图 6-1 沟系土壤地球化学测量点位分布图

1—沟系；2—河床；3—山脊或小路；4—采样点

表 6-1 不同条件下采样层位及深度

覆盖条件	实例	地质现象	采样层位	采样深度
残坡积物（<5m）	李坝	未见矿化蚀变	B	>30cm
		见矿化蚀变	C	以采C层为目的
	金山		B	>30cm
黄土或较厚层残坡积物（>5m）	李坝		B	>50cm
森林覆盖	李子园	未见矿化蚀变	B	>30cm
		见矿化蚀变	C	以采C层为目的

试验确定的各景观条件下采样层位、深度要求见表 6-1。

4. 指示元素选择

指示元素与矿化类型有关。根据西秦岭地区已知金矿异常和矿床元素组合特征，各类金矿床最佳指示元素见表 6-2，Au、Ag、As、Sb、Hg、Cu、Pb、Zn 是本区通用的指示元素。

（三）地质效果及经济效益

与1∶10000正规测网土壤测量相比，1∶25000沟系土壤测量具有快速、经济、地质效

表 6-2　各类金矿床最佳指示元素

金矿类型	地　区	矿产类型	最佳指示元素
微细浸染型	礼-岷地区五大岩体北部和东部	岩　金	Au As Pb Sb
	崖湾-岩昌一带三叠系地层内	汞锑金	Au Sb Hg Cu
	角曲-武都一带	金铜钼	Au Ag Cu Pb Zn Mo
韧性剪切带中石英脉、蚀变岩型	天水-李子园一带	金铜钼	Au Cu Mo Ag Pb
		金铅锌 金银铅锌	Au Ag As Cu Pb Zn
	西成地区 西成铅锌矿及邻域	金铅锌	Au Ag Pb Zn
SK 岩型	崖湾-岩昌一带三叠系地层中小岩体边部	铜　金	Au Cu Sb Hg Ag

果好等特点，如表 6-3 所示。在投入相同人力的情况下评价速度提高近 8 倍，费用降低 90%，工作效率提高 10 倍以上。

表 6-3　两种方法工作效率及找矿效果的对比

方法	每年扫面面积（km^2）	每平方公里采样点数（个）	总采样点数（个）	可评价的水系沉积物异常（个）	提供进一步工作基地
1:25000 沟系土壤测量	300	40	12000	8—15	2—3 处
1:10000 土壤地球化学测量	20	505	11000	1—2	不定
二者比较（倍）	15	0.08	1.1	8	

二、快速追踪沟系土壤地球化学异常源的方法

沟系土壤测量缩小了水系沉积物异常的追踪范围，获得了更详细的地球化学异常信息，为进一步追踪异常源奠定了基础。这样，水系沉积物异常源的追踪就转化为沟系土壤地球化学异常源的追踪。

（一）异常分类

根据异常特征、覆盖类型及基岩出露情况等将所圈定的土壤异常划分为四种类型。

甲类异常区：金为强异常，并有高值点；前缘元素异常发育；组合异常吻合性好，规模大，浓集中心明显。基岩出露面积＞30%以上；覆盖层为残坡积物为主，或有少量薄层黄土；地质成矿环境有利。

乙类异常区：金元素异常级别为中-强异常，无金高值点；异常有前缘元素组合，其中至少有一个元素异常级别为强异常。组合异常规模较大，浓集中心明显，吻合性好；基岩出露情况一般或较差，覆盖物以残坡积物或薄层黄土为主；地质情况有利成矿。

丙类异常区：金元素异常级别为弱-中异常；异常有前缘元素组合，有的元素达中-强异常级，组合异常具一定规模，吻合性好；但浓集中心不明显，覆盖物为厚层残坡积物或厚层黄土；基岩出露不好；地质条件有利成矿。主要指已知矿体的延伸地段或类同找矿有望地质条件或推测为盲矿体或覆盖层下隐伏矿体地段。

丁类异常区：金异常值低弱、分布零星；组合异常元素较少或虽具一定规模，但浓集

中心不明显，吻合性差，且前缘、尾晕元素混杂；多为分散矿化或高背景场地质体引起；地质条件不利成矿。

（二）异常源追踪方法和应用范围

沟系土壤地球化学异常源的追踪方法按其与金的关系可分为直接追踪法和间接追踪法，现分述如下：

1. 直接追踪法（又称以金找金法）

直接追踪法分为：直接踏勘金高值点、小范围大比例尺土壤短剖面法、低背景场中低缓金异常追踪法三种。

（1）直接踏勘金高值点

该方法适用于甲类异常的初期追踪。基岩出露条件好的异常区效果更佳。

（2）小范围大比例尺土壤短剖面法

小范围大比例尺土壤短剖面追踪法适用于乙类异常。比例尺根据自然条件、异常元素组合类型确定。

（3）低背景场中低缓金异常的追踪主要手段：①加密加深采样和加大采样量；②提高金分析方法的灵敏度。

该方法主要用于较厚层黄土覆盖区或可能存在浅埋矿体地段的异常源追踪。

2. 间接追踪方法

分为化探、物探两类：

化探方法有：①指示元素异常浓集中心的追踪；②热释汞和碘量测量；③构造地球化学强化异常法。

物探方法有：高精度磁法和电法（中间梯度法、偶极法）。

上述间接方法主要适用于被黄土或洪、冲积物掩埋的矿（化）体及隐伏矿床或对已知矿体延伸地段的追踪。

（1）指示元素异常浓集中心的追踪

不同地质、地球化学条件下的各成矿远景区的特征元素十分相似，但元素组合次序有较大的差别，如表6-4。

表6-4 不同成矿远景区的元素组合表

序号	成矿远景区	特征元素组合	最佳追踪指示元素组合
1	金矿远景区	As、Sb、Au、Pb、Ag、Hg	As、Sb
2	铅锌金矿远景区	Pb、Zn、Au、As、Sb	Pb、Zn、As
3	锑铜金矿远景区	Sb、Hg、Au、Cu、As、Ag、Pb	Sb、Hg、As
4	金多金属矿远景区	Au、Cu、Zn、Mo、Ag	Cu、Mo
5	金银多金属成矿远景区	Pb、Ag、Au、Zn、Cu、As	Pb、Ag

根据追踪条件选择最佳追踪指示元素，对沟系土壤地球化学组合异常浓集中心进一步追踪，达到追踪异常源的目的。

（2）热释汞和碘量测量

李坝金矿床及外围热释汞和碘量测量表明，已知矿体中均有较强的热释汞、碘异常。黄土覆盖下的矿体或隐伏矿体上部也有明显的异常。另外，不同级次断裂中的热释汞和碘

异常差异明显。

（3）构造地球化学强化异常法

金矿体与构造关系密切，可通过追踪构造带，采集断裂带物质，达到追踪异常源的目的。

三、追踪方法的应用及效果

（一）研究区概况

研究区位于甘肃省礼县洮坪金山，李坝和天水市李子园（图 6-2），属低—中山区，地形切割强烈，水系发育。气候属温带半干旱季风气候，年降水量 400—600mm，年均气温 9—12℃。研究区处于秦岭北坡。李坝地区覆盖有 1—5m 的黄土，Au 等元素在土壤中含量受黄土影响较大。李子园一带植被茂密，主要为次生林，残坡积物较厚，一般 0.5—2m，土壤分层明显，pH 值约为 7 左右。Au 在土壤各层中含量差别不大。金山一带植被稀疏，主要为杂草、灌木，残坡积物不发育，基岩裸露。矿体上方土壤中，Au、As、Sb 明显富集在 C 层。

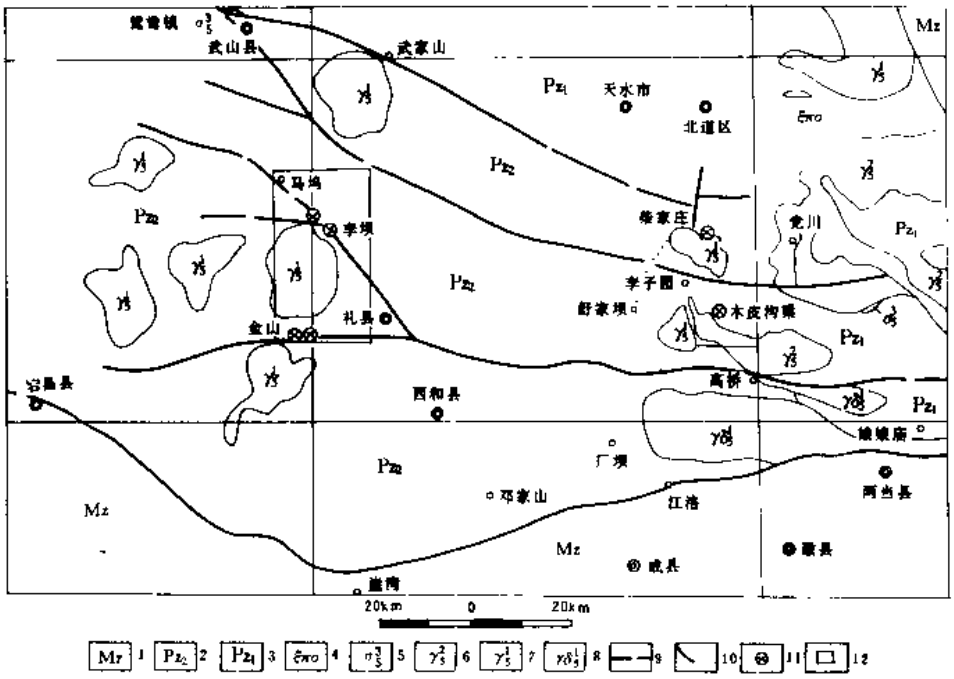

图 6-2　研究区区域地质图（附金矿产地）

1—中生界；2—上古生界；3—下古生界；4—正长斑岩；5—橄榄岩；6—黑云母花岗岩；7—黑云二长花岗岩；8—花岗闪长岩；9—断裂带；10—地质界线；11—金矿床（点）；12—研究区范围

研究区处于秦岭褶皱系北秦岭褶皱带。区内构造复杂，岩浆活动强烈，是秦岭重要的金属成矿带。出露地层有下古生界李子园群变质中基性火山岩系、泥盆系舒家坝组、西汉水组、大草滩群，石炭系和二叠系木寨岭群，主要岩性为浅变质的碎屑岩和碳酸盐岩。

通过对区域内 100 余处以金元素为主的水系沉积物异常区和已知矿床（点）的研究，总结归纳出水系沉积物地球化学异常的元素组合可划分为下列 4 种：

1．独立金矿床为 Au、As、Sb；

2．与锑矿伴生的金矿为 Au、As、Sb、Hg；

3．与铜矿伴生的金矿为 Au、Cu、Sb、(Pb、Zn)；

4．与多金属矿伴生的金矿为 Au、Ag、Cu、Pb、Zn。

这些异常元素组合特征为异常查证选择指示元素提供了依据。

（二）甘肃省礼县金山的试点

1:50000 水系沉积物 Au 异常见图 6-3，除 Au 异常外，还伴有 As、Sb、Cu、Ag 等元素的异常。最大的金异常位于郑家山和金山的西部，面积 8km²。

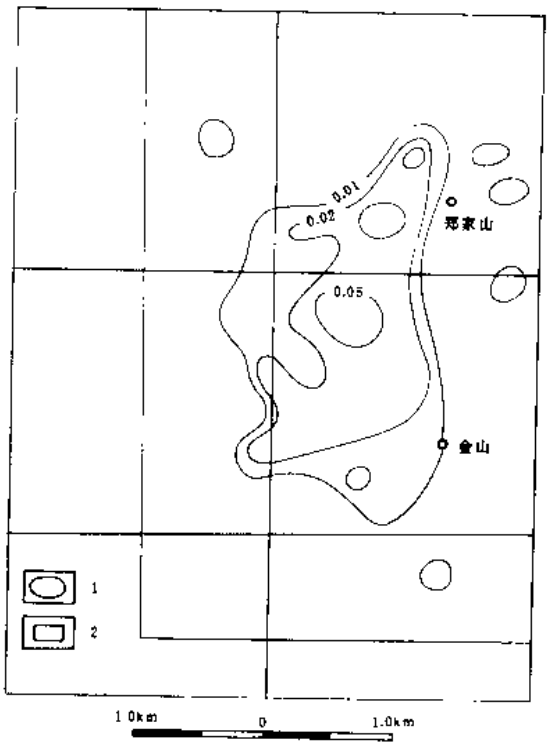

图 6-3　甘肃礼县金山 1:50000 水系沉积物 Au 异常图

1—Au 异常等值线，含量单位×10⁻⁶；2—沟系土壤测量范围

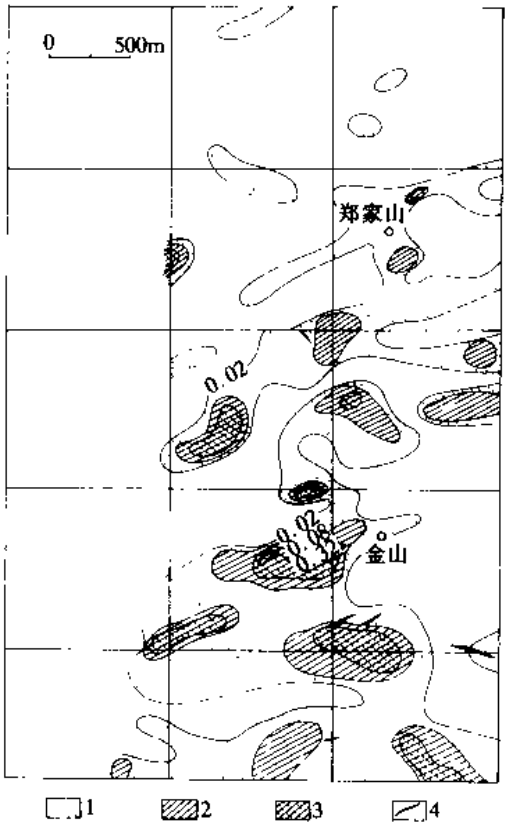

图 6-4　甘肃礼县金山沟系土壤 Au 异常图

1—0.02—0.08×10⁻⁶；2—0.08—0.32×10⁻⁶；3—>0.32×10⁻⁶；4—金矿体

1．1:25000 沟系土壤测量

完成采样面积 10.5km²，采样 350 件。土壤测量发现金异常点 183 个，呈不规则带状分布，最高值 18×10^{-6}，$>4\times10^{-6}$的有 4 个点，$>0.4\times10^{-6}$的有 14 个点。伴生 As、Sb、Ag 等元素异常。异常南部、东部未封闭（图 6-4）。

2．1:25000 沟系土壤异常的追踪及效果

采用高值点踏勘法进行追踪，在 14 个金高值点均发现金矿化或金矿体，矿化产于蚀变破碎带中，其中发育黄铁矿、毒砂、白铁矿及少量方铅矿矿化。矿化地段进行了 1:5000 地质填图和岩石测量，并进行地表工程揭露，发现九条矿化蚀变破碎带，圈出九个金矿体，其中 7 个为表内矿体。从面肯定了该区进一步找矿前景。提供金矿普查基地一处。该区现已成为一个中型规模的金矿床。

（三）甘肃省礼县李坝的试点

1∶50000 水系沉积物测量异常见图 6-5。该异常是一个以金为主的多元素异常，元素组合为 Au、Pb、Ag、Sb、As 等，面积达 60km^2。根据分类标准，该异常属Ⅰ类异常。对该异常采用 1∶25000 沟系土壤测量→多种方法追踪 1∶25000 沟系土壤异常→地表工程揭露的追踪程序。

1. 1∶25000 沟系土壤测量

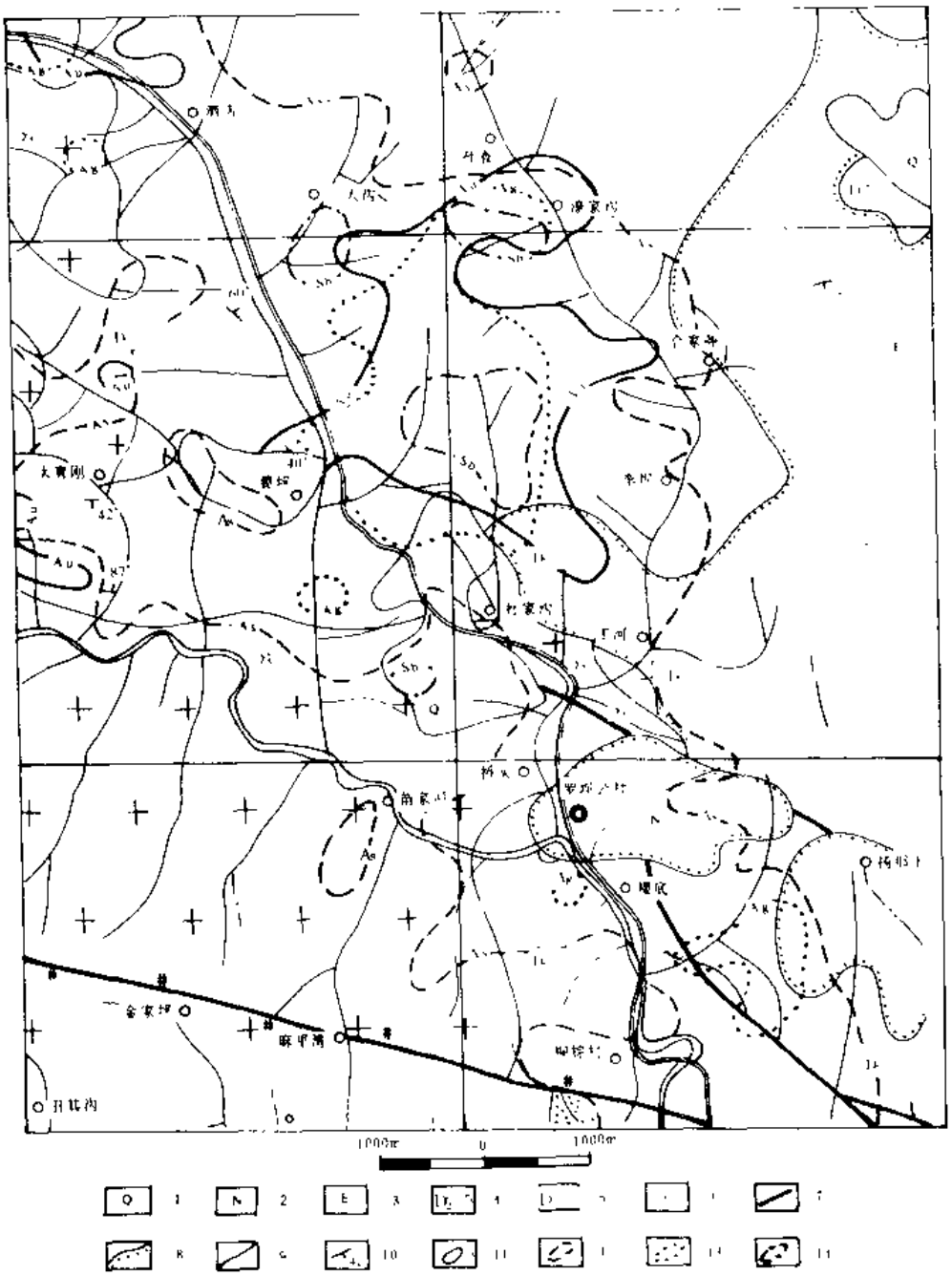

图 6-5 李坝水系沉积物地球化学综合异常图

1—黄土冲积层；2—红色砂粘土、砾石层；3—红色紫红色含砾泥岩、砂砾岩；4—灰色粉砂质板岩；5—板岩、粉砂岩、薄层灰岩；6—黑云母花岗岩；7—断层；8—沉积不整合地质界线；9—地质界线；10—岩层产状；11—金元素异常；12—砷元素异常；13—银元素异常；14—锑元素异常

1:25000 沟系土壤测量面积 48km^2，共发现以 Au、As 为主的 Au、As、Sb、Pb、Ag 组合异常几十处，其中 Au≥50×10^{-9}的 48 处，高值点（≥400×10^{-9}）的 89 处

2. 金高值点踏勘

通过对李坝地区 15 个金高值点的追踪，蚀变体走向延伸的追踪以及工程揭露，共发现了四条金矿体（图 6-6）。经进一步工作，它们两两连成一体，构成了李坝大型金矿床的两条主矿体：5 号、6 号矿体。

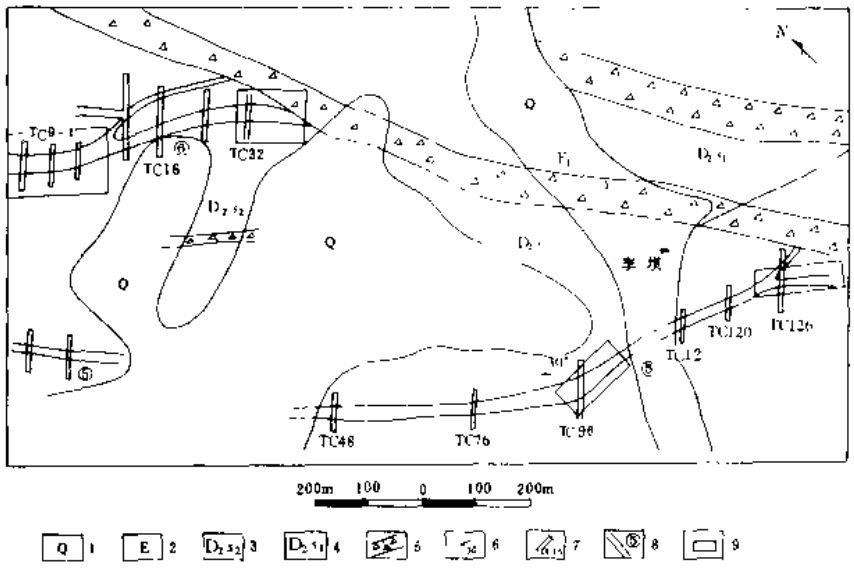

图 6-6 李坝沟系土壤地球化学异常金高值点追踪验证成果

1--第四系黄土层；2—第三系红层；3—暗灰色斑点板岩；4—灰绿色千枚状板岩；5—断层挤压破碎带；6—岩层产状；7—槽探工程及编号；8—矿体及编号；9—高值点首次追踪矿（化）体

李坝金矿从沟系土壤测量到提交黄金普查基地历时仅 6 个月。投入沟系土壤测量 4 个组，用时 1 个月；异常追踪，地质工程验证组 5 人，历时 2 个月，耗资不足 10 万元。

近几年来，对李坝及邻域 89 个金高值点中的近 60 个点进行直接踏勘和工程揭露，所有金高值点均见矿化蚀变现象。除李坝地区 5、6 号主矿体和介于二者之间的平行小矿体外，在李坝邻域共发现矿（化）体（点）20 处。其中供利用（堆浸）的矿体 15 条。金高值点见矿率高达 95%。

3. 小范围 100×10m 或 40×5m 短剖面追踪

金高值点踏勘所发现的金矿（化）带沿走向方向往往被黄土、残坡积物覆盖，无法进行直接踏勘、布槽。同时沟系点位稀，沿沟系也还会漏掉金矿（化）体。根据这种情况，采用小范围 100×10m，40×5m 的短剖面追踪法。如李坝金矿 6 号矿体最早发现的地段在零线附近，后沿控矿断裂 310°方向向西揭露出 480m 矿体。再往西沿矿体走向揭露，虽有沟系土壤金异常，但 Tc61 和 Tc79-1 槽均未见矿。通过 100×10m 小范围短剖面对金浓集中心位置进一步确定和槽探揭露，发现了（6）和（6-1）两段矿体（图 6-7）。使 6-1 号矿体沿走向方向向西推进近 600m，发现了 4 条金矿体，提交金矿 F 级 20t 储量普查基地一处。

运用相同的方法将李坝 5 号矿体东段向西推进了 150m。另在李坝外围新发现金矿体 5 条。

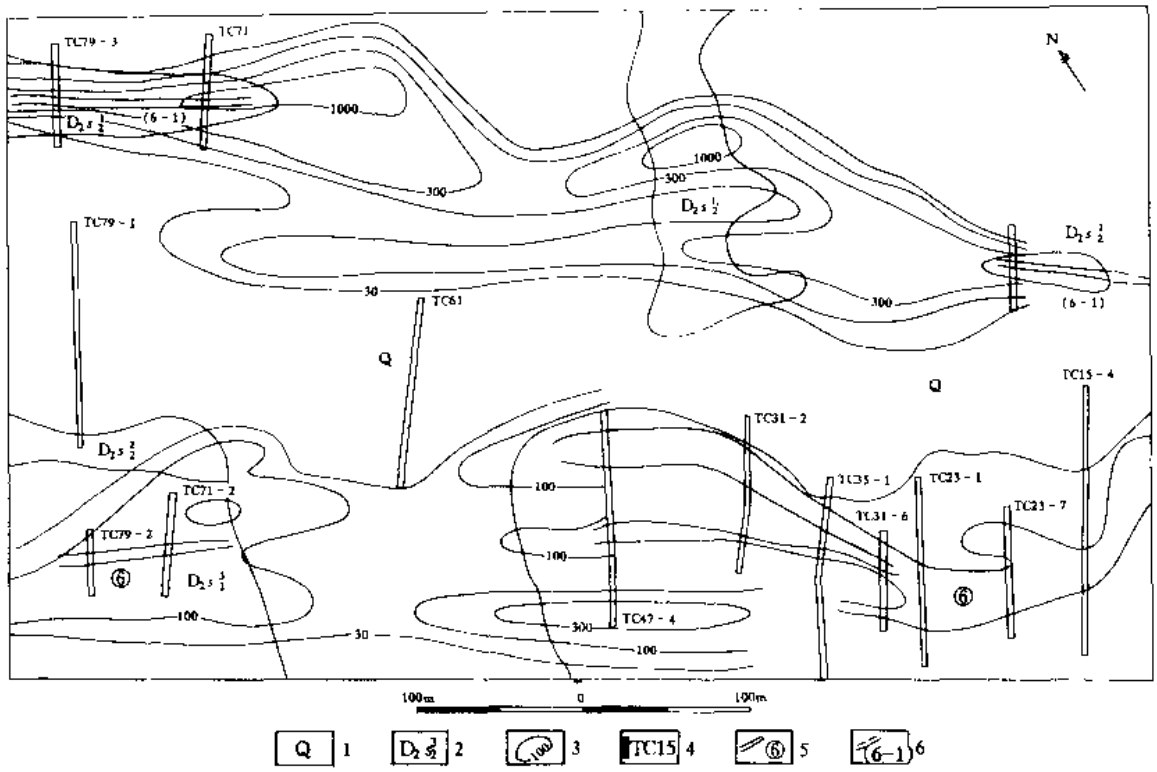

图 6-7　李坝金矿区已知矿体 100×10m 土壤地球化学测量追踪实例

1—第四系河沟冲积物及残坡积物；2—斑点板岩；3—土壤金含量等值线（×10 $^{-9}$）；4—探槽及编号；5—已知矿体及编号；6—经追踪后发现的金矿体及编号

4. 特征元素组合异常浓集中心追踪方法

对于沟系金元素浓集中心不明显或无金异常，但 As、Sb、Pb 等特征元素组合异常发育地段（黄土覆盖区），通过对特征元素组合浓集中心进一步追踪，达到追踪金异常源的目的。通过一个具 As、Sb、Hg、Pb、Ag 沟系土壤元素组合异常（但无金异常）地段，加密采样，对样品进行多元素，多种方法分析，获得了低缓的金异常及 As、Sb、热释汞综合异常，经工程验证发现了一条长 200m、宽 2m 的金矿体。

（四）甘肃省天水市李子园的试点

1∶50000 水系沉积物测量圈出 Au、Ag、As、Cu、Pb、Zn 等组合异常。异常沿天子山二长花岗岩体与中奥陶统绿片岩接触带分布，面积达 110km^2，属Ⅰ类异常。

1∶25000 沟系土壤测量（65km^2），获得了较好的 Au、Ag、As、Cu、Pb、Zn 元素组合异常。从中筛选出两处金浓集中心明显的综合异常作为进一步追踪靶区。由于区内森林密布，中—厚层残坡积物覆盖较广，一般沟谷中亦少见基岩露头。根据其自然景观和地质条件，采用在金异常浓集中心地段进行 1∶10000 正规测网的土壤测量，进一步圈定了以金为主的 Au、Ag、As 等元素异常（图 6-8）。通过对 1∶10000 土壤测量金高值点踏勘和工程揭露，在Ⅱ-1 异常区发现了一条长近 2000m，宽 100—200m 的含金破碎带（图 6-8），其中圈出 3 个金矿体。在Ⅱ-3 号异常区，圈出金矿体 4 条。在工程未控制的周围进行 40×5m 土壤短剖面测量追踪（图 6-9），为探矿施工提供依据。通过异常追踪，上述两个异常

区提交了两处金储量（F级）为10t的普查基地。

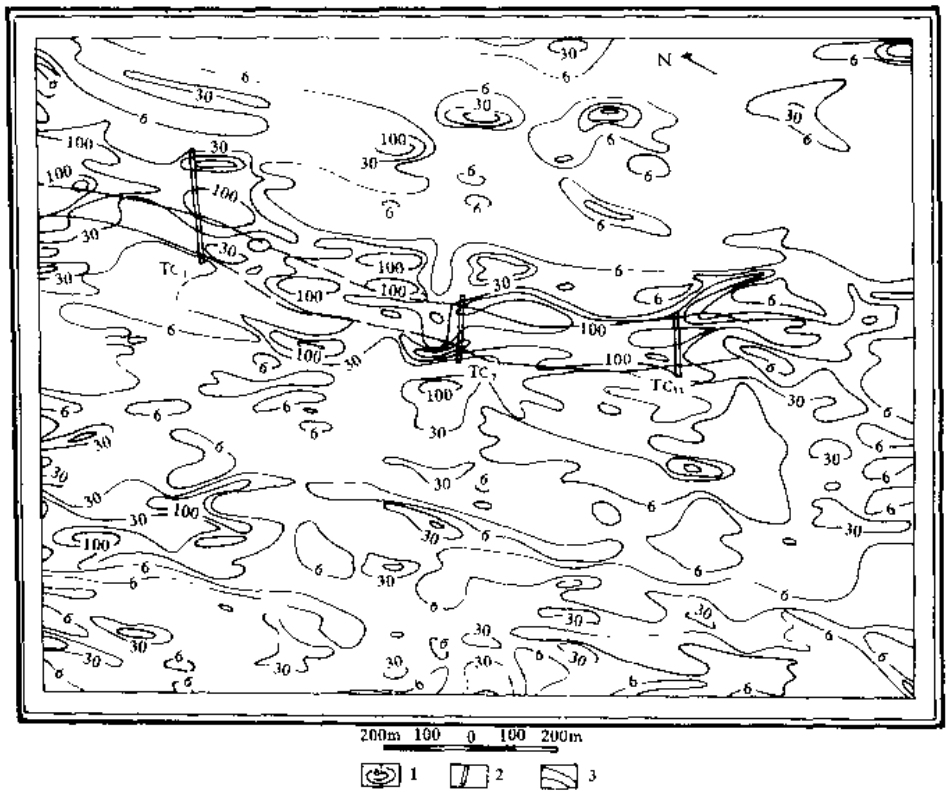

图6-8 李子园构造蚀变岩型金矿追踪实例

1—金含量等值线（$\times 10^{-9}$）；2—探槽及编号；3—含金构造蚀变带

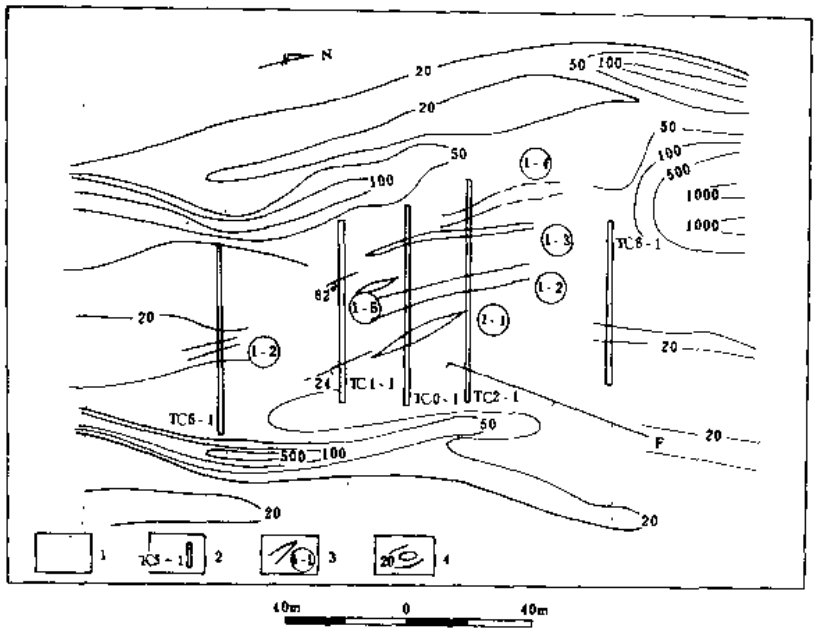

图6-9 李子园金矿已知矿体40×5m土壤测量追踪实例

1—40×5m土壤异常追踪点位；2—探槽及编号；3—金矿体及编号；4—土壤金含量等值线（$\times 10^{-9}$）

第二节　山区-低山丘陵区金异常源的快速追踪方法

本节主要介绍山区-低山丘陵景观条件下金异常源的快速追踪方法。山区-低山丘陵区金异常源快速追踪方法的试验研究工作主要在山西繁峙县伯强-黄草一带和冀东燕山地区进行。

一、山西繁峙伯强-黄草一带金异常源快速追踪综合方法

（一）地质、景观特征

该区处于五台山隆起北缘的鸿门岩-童子崖复式向斜展布地段（图6-10），出露地层主要为太古宇五台群深变质岩系，上元古宇长城系和古生界寒武系、奥陶系碎屑岩、碳酸盐岩。上述地层构成一轴向大体为NE-SW向展布的复式向斜；断裂构造主要有NW，NE

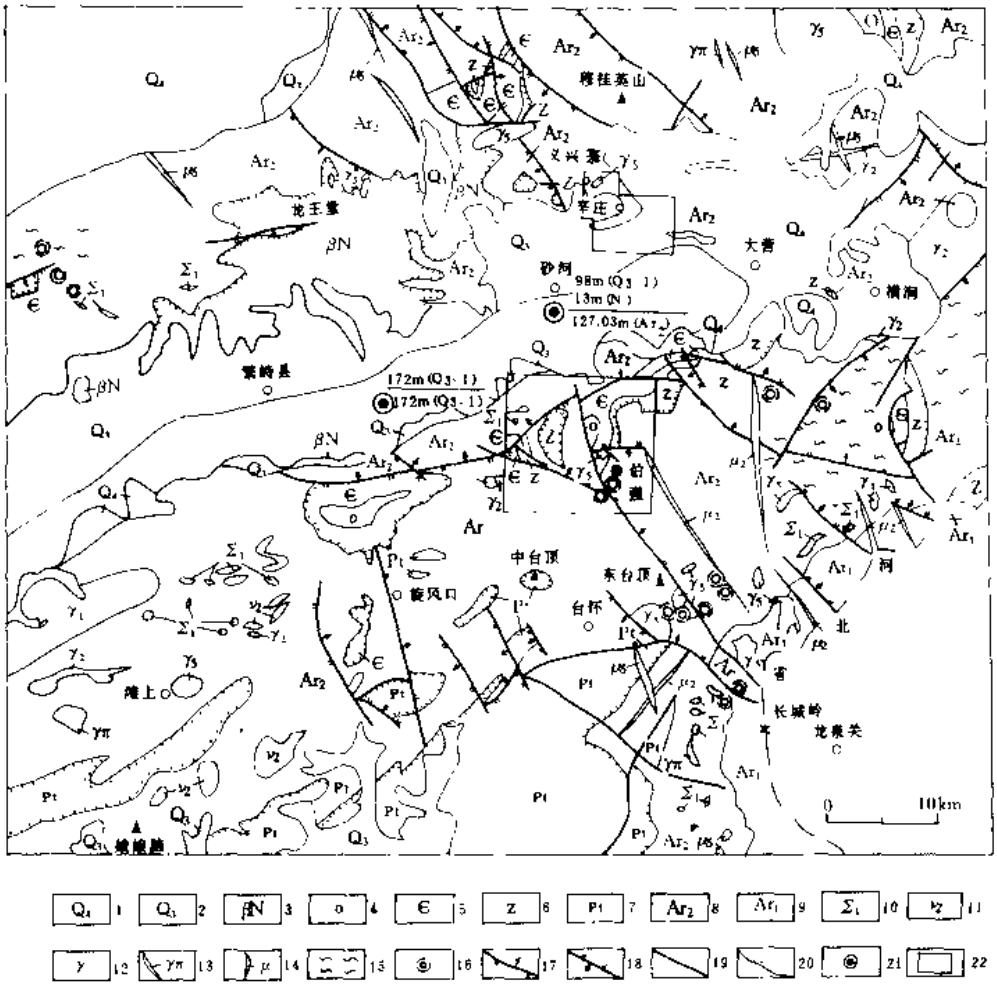

图6-10　山西省五台山地区地质略图

1—现代冲洪积物；2—黄土堆积物；3—繁峙玄武岩；4—石灰岩，白云岩；5—紫红色页岩，鲕状灰岩；6—石英砂岩等；7—变质砾岩，千枚岩等；8—黑云角闪斜长片麻岩，变粒岩等；9—黑云斜长片麻岩，变粒岩夹浅粒岩，大理岩；10—变质超基性岩；11—基性岩；12—花岗岩；13—花岗斑岩脉；14—辉绿岩脉；15—混合岩化；16—硅化；17—正断层；18—逆断层；19—性质不明断层；20—不整合接触界线；21—钻孔；22—试点研究区位置

和 EW 向三组，以 NW 向最为发育，具多期活动特征，是主要控矿断裂。区内岩浆活动频繁，燕山期中酸性浅成-超浅成侵入岩与金、银、铜、钼及多金属矿化关系密切。已知矿产主要有金、铜、钼、铅、锌、铁等，已发现矿床（点）达 40 余处。区内采金历史久远，目前民采极盛，采矿污染给区域化探异常筛选、评序带来困难。

（二）金异常源的快速追踪方法

该区在 1:200000 区域化探扫面时，获得平 As26 Au 异常呈 NW-SE 向展布于伯强一带（图 6-11）。以 2×10^{-9} 圈定的 Au 异常面积约 $84km^2$。异常浓度分带清晰，有明显的浓集中心。除 Au 外，Ag、Mo、Cu、Pb、Zn、As、Cd、W 等元素也出现异常，各异常特征值见表 6-5。但由于长期采冶黄金的活动的污染，成为水系沉积物地球化学异常的严重干扰因素。进一步的异常源追踪，必须排除采金活动污染的干扰。

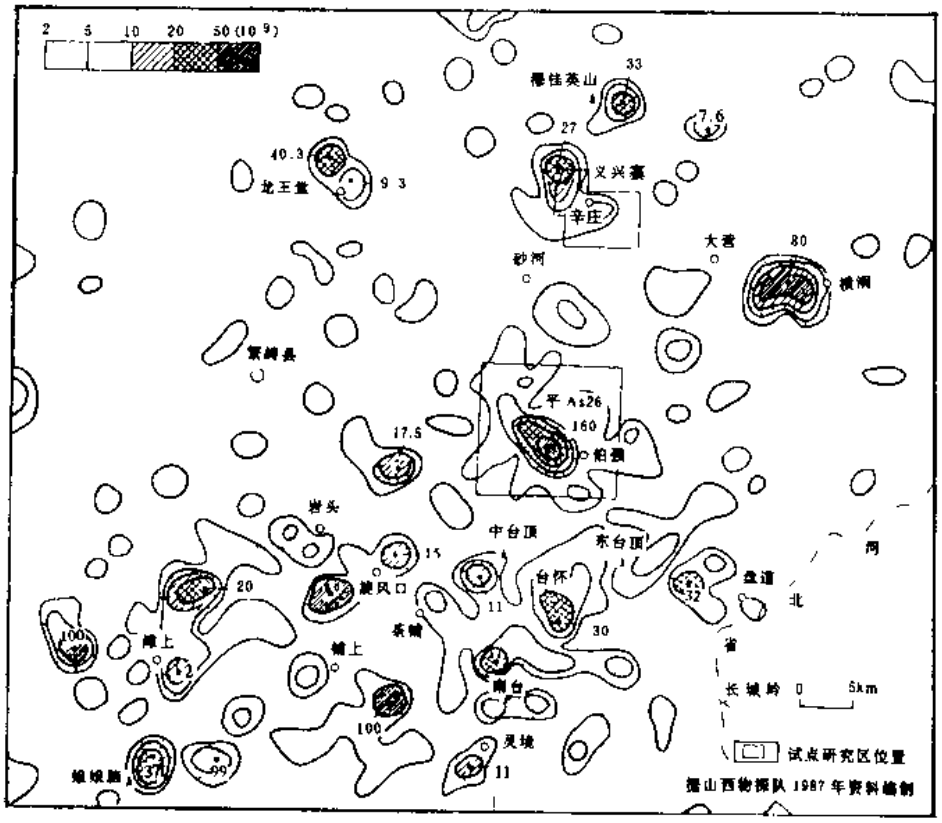

图 6-11　山西省五台山地区水系沉积物测量 Au 异常图

考虑到本区水点分布较均匀，且密度较大；井、泉分布范围广，并具有一定数量的上升泉；井水和地表径流多为基岩裂隙水和第四纪泉水汇集而成的特点，提出本区区域化探异常追踪的方法技术是：以大面积水地球化学测量避开人为污染，快速圈定找矿靶区；对比研究水化学和水系沉积物测量成果，优选区域地球化学异常追踪评价地段；改进常规化探详查方法，以地质-地球化学岩石剖面和“面型”岩石测量方法技术相结合，快速追踪异常源、圈定详查找矿靶区。

1．水地球化学测量方法

测区布设于伯强平 As26 Au 异常分布地段，控制有效面积 $150km^2$。野外采样集中于旱季完成。样点布设较均匀，平均采样密度1个点/$2.6km^2$。每个采样点分别采集2000mL

表 6-5　山西省五台山地区水系沉积物地球化学测量平 As26（伯强）综合异常特征值表

元　素	Au	Ag	Hg	Cd	As	Sb	Bi	W	F
含量单位		(10^{-9})				(10^{-6})			
面积（km^2）	84	53.60	3.68	40.0	28.28	27.48	22.72	31.68	2.80
异常平均值	18.46	347	20.54	282	9.62	1.17	0.63	19.52	237.2
异常下限	2.5	30.15	10.8	37.28	2.45	0.22	0.11	0.47	158.6
平均衬度	7.38	11.57	1.90	7.5	3.96	5.32	5.71	41.53	1.5
极大值	160	1540	2054	1123	26.50	3.32	0.97	54.81	237.2
浓度分带	3	3		3	3	3	3	3	
内带面积（km^2）	12	29.10		20.36	7.00	13.2	9.92	24.68	

元　素	Mo	Cu	Pb	Zn	Co	U	Ti	Mn	Fe
含量单位				(10^{-6})					(%)
面积（km^2）	38.92	31.52	28.60	7.08	3.48	16.96	4.28	1.76	3.72
异常平均值	19.38	210.96	13.97	22.64	35.9	4.04	1709	181	2.27
异常下限	0.30	10.24	5.33	15.09	20	0.31	757	141	1.39
平均衬度	64.60	20.6	2.43	1.5	1.8	13.03	2.62	1.28	1.63
极大值	99.41	489.64	37.42	23.03	35.9	6.28	1709	181	2.87
浓度分带	3	3	3			3	2		
内带面积（km^2）	33.36	23.12	3.72			1.96			

据山西物探队（1992）资料编制。

水样、500mL 瓶装水样、50mL 瓶装水样各一个以及 100mL 瓶装水样 2 个。其中，2000mL 水样经现场泡塑富集处理后，将泡塑样本装袋编号，备送实验室用无火焰原子吸收分光光度法测定 Au、Ag；500mL 瓶装水样带回驻地作共沉淀预处理，将其共沉淀物晾干，送实验室用定量光谱法测试 Cu、Pb、Zn、Mo 等 17 种微量元素；其它瓶装水样带回驻地及时酸化处理（50mL 样本）或加入保护剂（100mL 样本），备送实验室分别用原子荧光光谱法测定 As、Sb、Se、Hg，用离子色谱法测定 SO_4^{2-}、F^-、Cl^-、Br^-、I^-。此外，野外作业时，同步测定采样点的水温、pH 值，并对样点及其周围的水文地质特征、地质、地貌概况作必要的记录描述，累积区内水地球化学异常推断解释的第一性资料。

对比水化学和水系沉积物测量金等元素的地球化学异常图（图 6-12）可见，采矿污染强烈的塘后，耿庄一带，原水系沉积物 Au 异常是连成一片的，浓集中心即采矿地段。但水化学 Au 异常则分解为两个高衬度异常，并在其它地段圈出了 4 个以 Au、Ag 为主的多元素组合异常（Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ号异常）。既滤除了采矿污染，又有效地圈出了新的找金靶区。

通过水化学测量，将原水系沉积物的平 As26 Au 异常分解为 8 个水化学异常地段。以测区中部大代黄山-童子崖山脊为界，可划分为东西二部，东部Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ、Ⅴ号 Au 异常地段为已知矿化集中分布区，以 Au、Cu、Mo 元素组合为主；西部Ⅲ、Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ异常地段为未知区，以 Au、Ag 元素组合为主。这预示着东、西两区具有不同的矿化类型。对东部已知矿化集中区的异常地段采用剖面岩石测量为主的方法进行异常追踪，对西部未知区的异常地段采用“面型”岩石测量方法进行追踪。

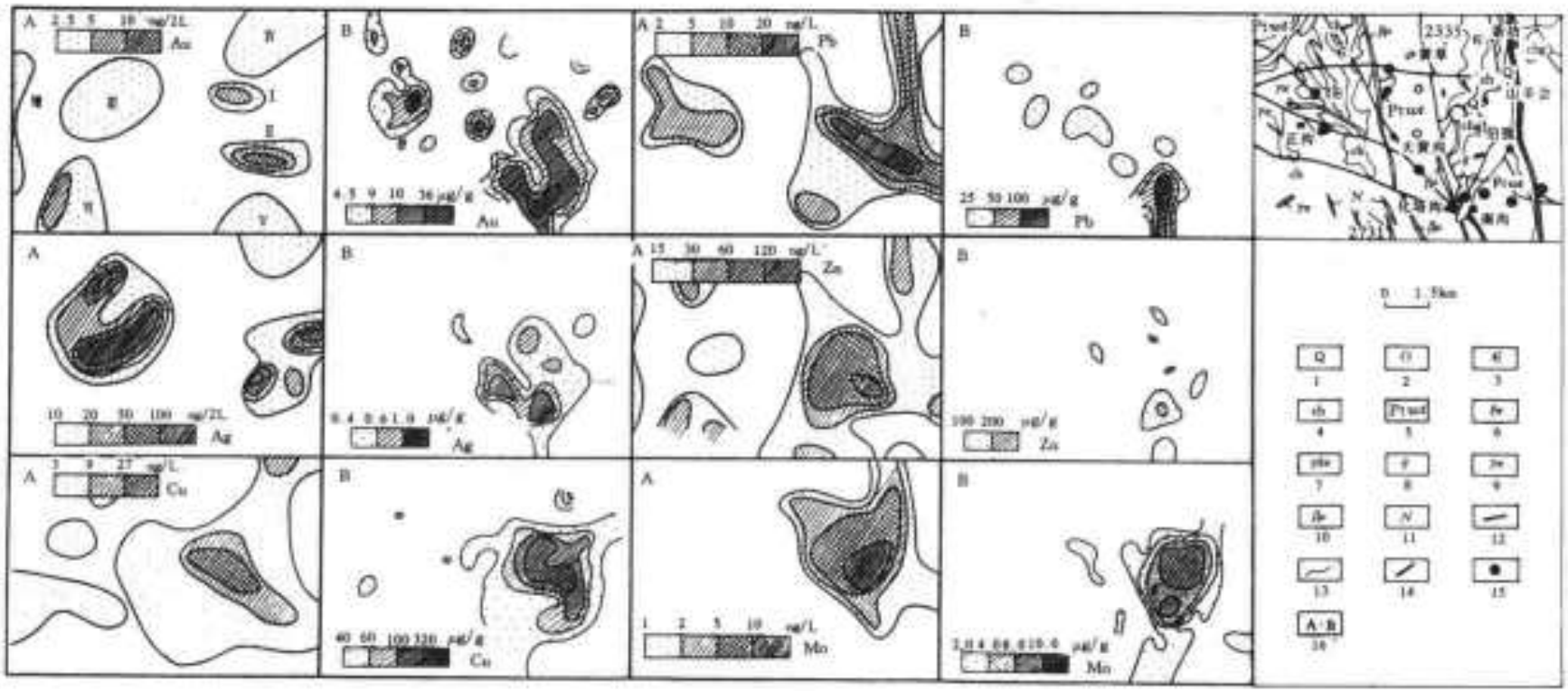

图 6-12　山西五台山伯强地区水化学、水系沉积物测量异常图

1—第四系；2—奥陶系；3—寒武系；4—长城系；5—五台群；6—正长斑岩；7—花岗闪长玢岩；8—爆发角砾岩；9—花岗斑岩；10—辉绿岩；11—变基性岩；12—断层；13—地质界线；14—公路；15—金矿（化）点；16—A 为水化学异常，B 为水系沉积物异常

2．剖面岩石地球化学测量

剖面地球化学样品主要分层位、岩性采集有代表性的新鲜基岩。采样间距30—50m，有条件的地段同步采集土壤样品；对主要断裂、脉岩、蚀变带和肉眼可辨的矿化部位增采地球化学样品，以便对比研究；地球化学岩石测量的同时，同步进行地质剖面测量。

通过东区剖面岩石地球化学测量，可将该区的岩石地球化学异常进一步划分为三类，即分布在燕山期中酸性杂岩体中与其浅成斑岩有关的Mo-Cu-Au多元素异常、分布于上述杂岩体内外接触带的Pb-Zn-Cu-Au多元素异常、分布于离杂岩体内外接触带较远地段受断裂控制的Au-Ag-Pb多元素异常。三类异常表征出测区潜在有斑岩矿化、接触交代矿化和离岩体内外接触带较远受断裂构造控制的热液多金属矿化。三类矿化在空间分布上以燕山期中酸性杂岩体为中心由岩体向外，呈现出（Mo、Cu、Au）—（Pb、Zn、Cu、Au）—（Au、Ag、Pb）多金属矿化的宏观带状分布模式。这三类矿化都与燕山期岩浆活动有成因联系。

3．面型岩石地球化学测量

该方法是以一定大小的面积（矩形或正方形网格）为一采样单元，每个采样单元内均匀地布采多个子样（一般8—12个）组合为一个单元样品，样品原始重量不小于300g。室内样品加工应尽量采用无污染加工工艺，以确保样品的代表性；样品分析选用高灵敏度分析方法测试多种微量元素，以尽可能多地提取每个单元样品的地球化学信息。

采用上述方法技术，对Ⅲ号水化学异常地段20km^{2}范围进行了以500×500m为一采样单元的多子样组合网格式“面型”岩石测量试验研究。目的在于评价该异常的找矿远景，快速圈定其详查找矿靶区。结果，由4名技术人员组成的两个野外作业组平行作业，仅用6天共12个组日，完成了20km^{2}共80个采样单元的“面型”岩石测量。然而，当地地质队组建一个12人的野外作业队伍，在该区开展常规的点线式土壤测量，大约耗费204个组日才完成相应地段100×25m测网的土壤测量，采集土壤样品多达7160个（事后每两个样品组合成一件共3580件样品送实验室分析）。其野外作业时间是“面型”岩石测量的17倍；分析测试的样品数是“面型”岩石测量的44.8倍。图6-13表明，“面型”岩石测量成果明显地优于常规的点线式土壤测量成果（图6-14），二者相比，“面型”岩石测量不仅大大减少了样品采集和分析工作量，大幅度地降低了工作成本，而且更重要的是能快速有效地评价区域化探异常找矿远景、圈定矿产详查靶区。

在Ⅲ号水化学异常区（20km^2），面型岩石测量圈出三个以Au为主的多元素异常（图6-15），评价认为均为Au、Ag多金属矿化引起，根据现有资料尚难对Ⅱ、Ⅲ号异常找金价值作出结论，但是Ⅰ号异常无疑是寻找以Au为主的多金属矿产的很有远景的地段，尤其是Au浓集中心所处部位，地表就有可能圈出有一定规模的Au-Ag多金属矿体，找Au可望获得突破。同时应该指出，Cu、Pb、Zn的主体异常和高浓度带偏向Au浓集中心西南侧，Hg、As、Sb等挥发组份的主体异常和高浓度带偏向Au浓集中心的北东侧聚集。这种分布态势表明，成矿热液是自南西向北东方向运移的，其主要矿质来源于形成西南部花岗岩类的多阶段岩浆及其期后热液活动。

二、冀东地区金异常源快速追踪方法

在追索水系沉积物地球化学异常中，一般把注意力集中在异常的浓集中心部位，由于表生地球化学作用的影响，浓集中心与金矿床（点）并不总是存在一一对应的关系。据冀

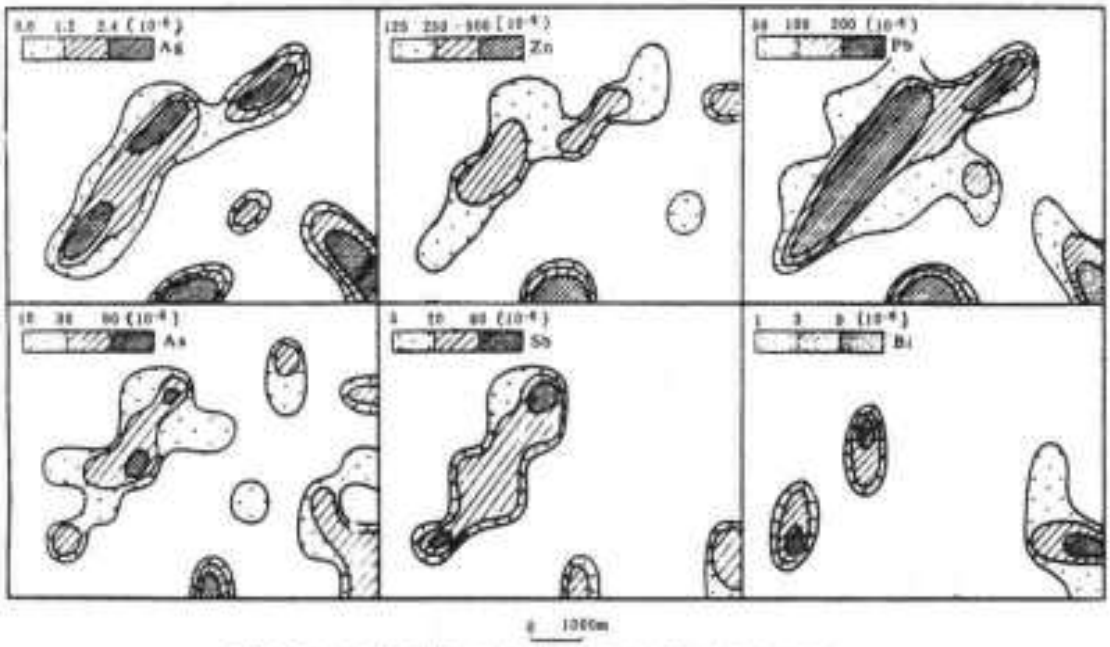

图 6-13　山西繁峙县正沟-黄草岩石测量地球化学异常图

（据山西省第 211 地质队 1991 年资料缩编）

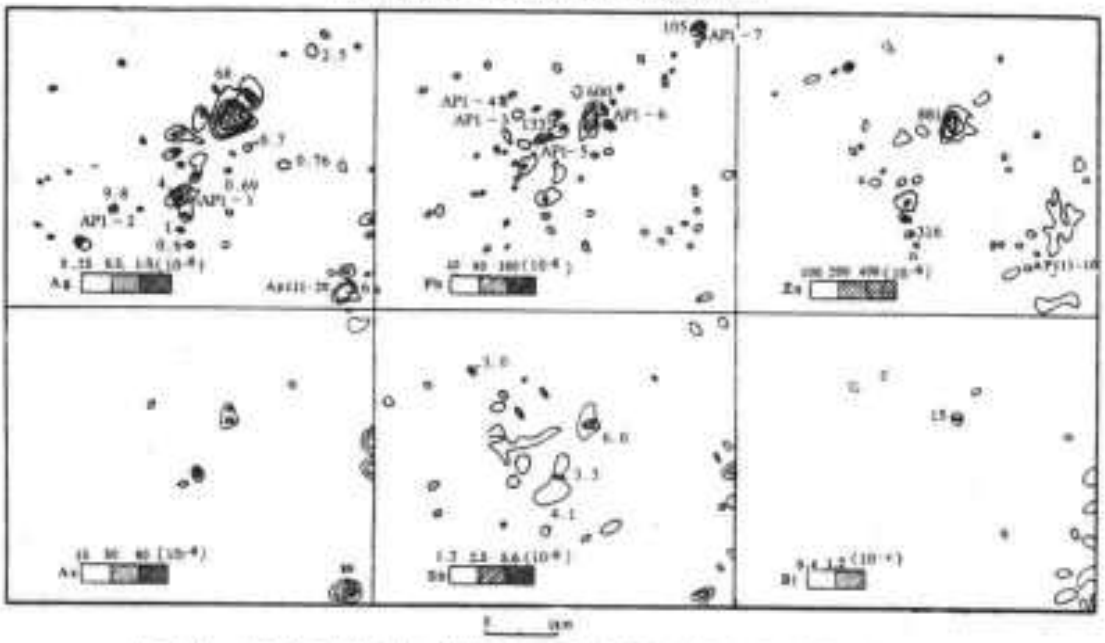

图 6-14　山西繁峙县正沟-黄草 100×25m 剖网土壤测量地球化学异常图

（据山西省第 211 地质队 1991 年资料缩编）

东白石峪地区统计，全区共有 64 处金异常浓集中心，在已发现 52 处金矿产地中，金分布在异常浓集中心的仅 13 处，占 20%，然而，采用异常源分析法，在该区划出 25 处金异常源，有 49 处金矿产地分布在异常源范围内，占已发现金矿产地总数的 94%。这是因为多数浓集中心都是沿着水系分布的，所以必须把异常源和浓集中心区别开来。

所谓异常源分析法，就是以异常源分布范围作为异常追踪目标的方法。异常源分布范围就是把分水岭和下方汇水盆地所有水系的近源异常点连线所包围的范围，如图6-16所

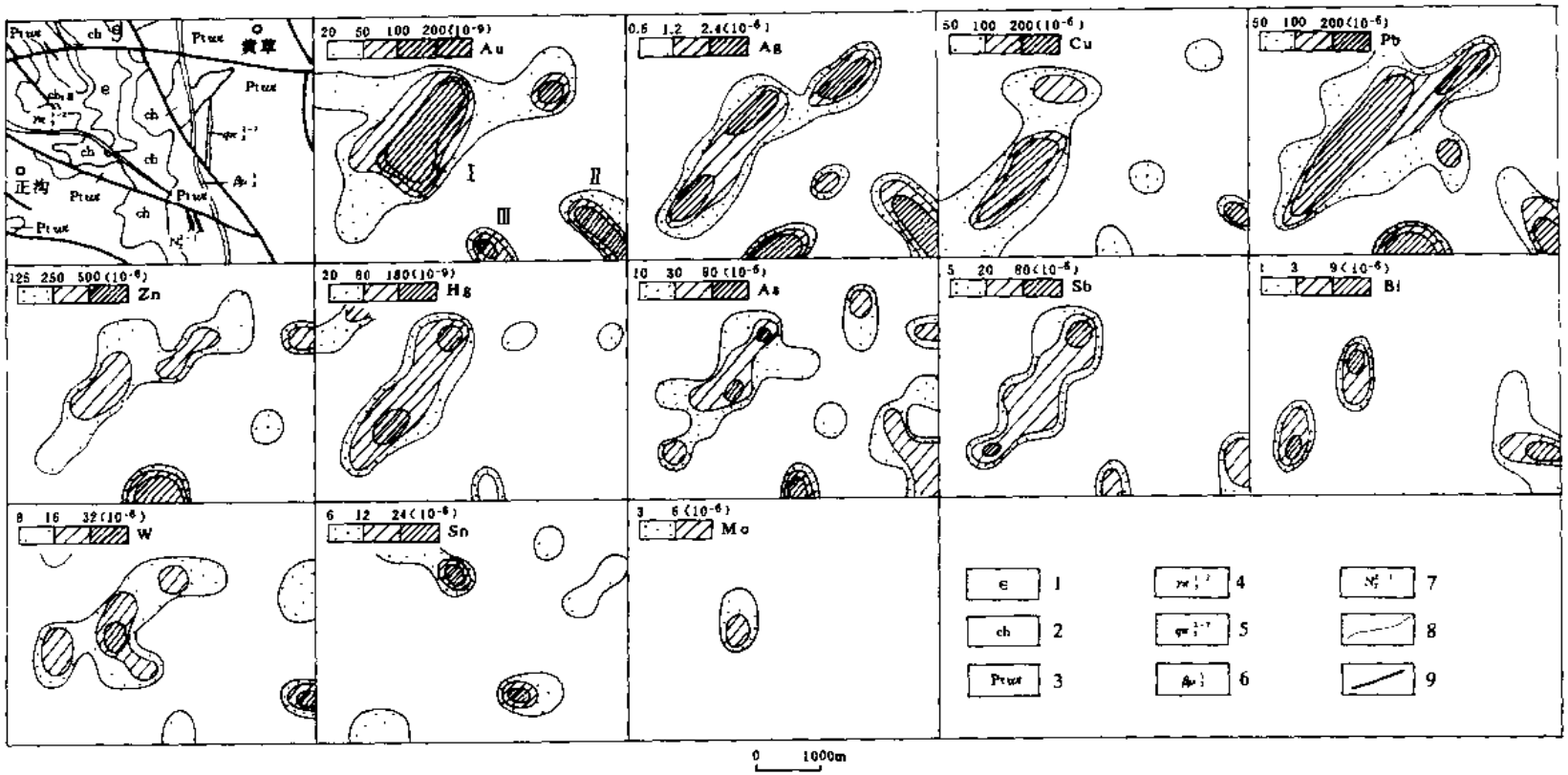

图 6-15　山西繁峙县正沟-黄草岩石测量地球化学异常图

1—寒武系；2—长城系；3—五台群；4—花岗斑岩；5—石英斑岩；6—辉绿玢岩；7—变基性岩脉；8—地质界线；9—断层

示。近源异常点是最靠近分水岭的异常点，一般是指水系上游第一个异常点。异常源分布范围比金的水系沉积物地球化学异常的面积大大缩小了，使追踪的目标更为集中。

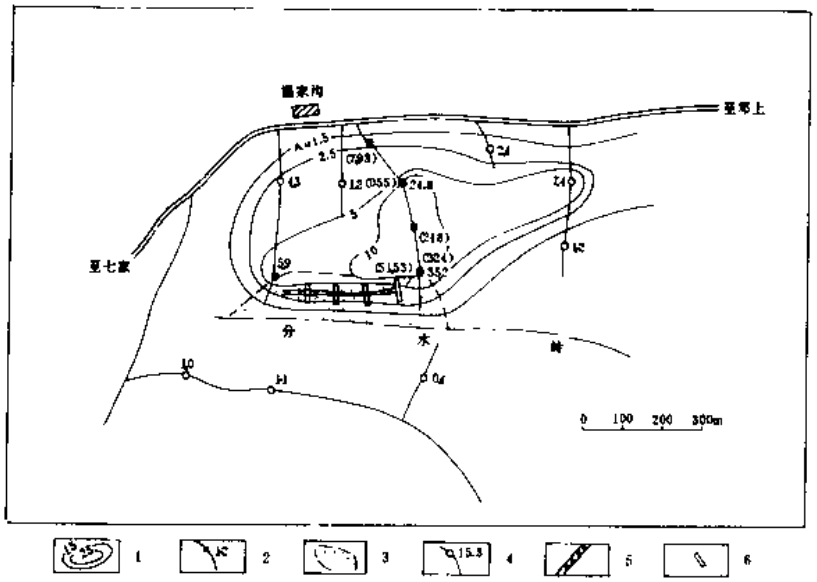

图 6-16　温家沟地区异常源分布图

1—水系沉积物地球化学异常等值线（10^{-9}）；2—重组分取样点及含量（10^{-6}）；3—异常源；4—水系异常点；5—金矿化体；6—探槽工程

注：括号内为重组分含量（10^{-6}），水系长 650m

在编制异常源分布图的基础上，在异常源范围内从近源异常点向上直至分水岭作溯源追踪，按 100—200m 的间距沿沟谷采集水系沉积物样和重组份样。新出现的近源异常点和异常消失点之间或两侧的地段，就是金矿体的赋存部位。

异常源分析法在研究区获得了满意的找矿效果。如温家沟的一个水系沉积物地球化学异常，金的异常面积不足 $1km^2$，最大值仅 35.2×10^{-9}。沿沟谷追踪异常源，在近源异常点附近发现铁帽转石，经探槽揭露见到工业矿体，接着进行了重组份取样，发现重组份中有多种金属硫化物矿物，而且“粒金效应”显著，认为该异常是个有远景的矿异常，后经钻探工程验证，在华北地台北缘，又发现了一个上部以银为主，下部以金为主的金-多金属矿床，获得 6.2tD+E 级金储量。

第三节　黄土覆盖区掩埋金矿的异常追踪方法

黄土属异地运积覆盖物。黄土覆盖区土壤地球化学异常的形成机制不同于正常残坡积土壤地球化学异常的形成机制，不具备形成机械分散晕（或碎屑异常）的先决条件，但在矿体上方的黄土中可形成各种后生异常（盐晕）和气体地球化学异常，以及水化学异常和生物地球化学异常等。

山西恒山北麓义兴寨-辛庄一带黄土覆盖区地球化学特征研究表明，不同介质中微量元素除 Au 在残坡积物中略有富集（但在黄土中又大幅度贫化）和 Hg 从岩石—残坡积物—黄土具有明显富集趋势外，其它微量元素如 Ag、Cu 等在上述介质中呈现递减规律。显

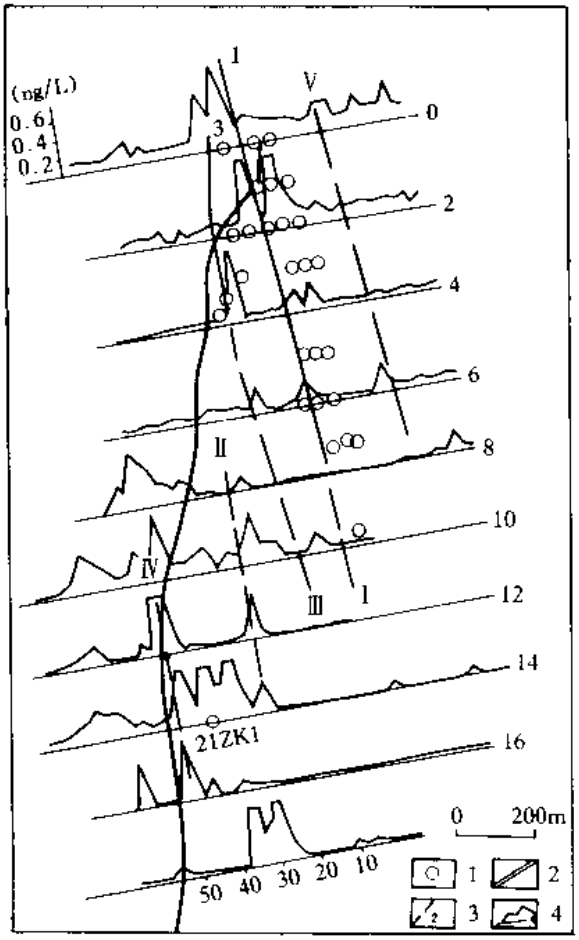

图 6-17 山西辛庄金矿区南段壤中气汞量测量异常图

1—钻孔；2—大路；3—蚀变石英脉带及编号；4—剖面线及编号

然，运用常规化探方法追索该区黄土掩埋金矿难以获得预期效果。多种非常规方法技术试验研究结果表明，CO_2、电导率、气汞、热释 CO_2 及地电化学部分离子提取法是追索黄土覆盖区掩埋金矿的有效方法技术，这几种方法技术配合使用，相互印证，可更有效地圈定掩埋金矿化带。

辛庄金矿黄土覆盖区掩埋金矿追索结果，不仅已知的 1、3 号含金石英脉带向南部厚层黄土覆盖区有较大的延伸；而且还在已知矿带的东西两侧共圈定出三条与已知矿带大体平行的综合异常带，尤其是已知矿带西侧的Ⅱ、Ⅳ号异常带，无论是异常强度还是异常的连续性，都可与已知矿带上的异常相比拟，显示出了良好的找矿前景（图 6-17）。

甘肃西秦岭地区的礼县李坝及邻区黄土覆盖面积达 70%，通过对异常区内外的黄土中金的测定，查明其背景值为 1×10^{-9}。已知矿体上方厚层黄土中金元素在垂向上变化梯度大，地表黄土中金元素的含量比下部近矿体黄土中低 1—2 个数量级以上。因此，采取加密，加深采样，加大采样量和提高金分析方法的灵敏度等措施获取金异常信息，达到黄土覆盖下异常源的追踪目的。

李坝 5 号矿体西段东延地段运用短剖面采取 50cm 以下黄土样品，并提高金分析方法的灵敏度，发现了四个低缓异常，显示了新的异常源位置和展布方向。

对于沟系金元素浓集中心不明显或无金异常，但 As、Sb、Pb 等特征元素组合异常发育的黄土覆盖区，通过对特征元素组合浓集中心进一步追踪，达到追踪金异常源的目的。通过一个具 As、Sb、Hg、Pb、Ag 沟系土壤元素组合异常（但无金异常）地段，加密采样，获得了低缓的金异常及 As、Sb、热释汞综合异常，经工程验证，发现了一条长 200m、宽 2m 的金矿体。

第四节 核方法在快速追踪异常源中的应用

核方法是运用核物理学的技术与方法，测量岩石或土壤介质中天然的或人工的放射性射线的能量与活度的变化，以揭示所测介质中元素含量或浓度变化规律的方法。它既具有地球化学方法的特点，又具有地球物理方法的特点。由于核方法所测量的对象主要是岩

石、土壤，测网不宜过稀，故该方法主要适用于矿区及其外围的异常源快速追踪。

国内、外在金矿勘查中应用放射性同位素 X 射线荧光法已有二、三十年的实践，但仍存在一系列的关键技术问题，欲使该方法在快速追踪金异常源方面发挥更好的作用，必须使某些关键技术有所突破。为此，系统研究了金矿勘查中 X 射线荧光测量的基体效应、几何效应的消除方法，综合应用“特散比法”、“补偿法”、“经验分类法”、“标准值法”消除基体效应和不平度对 X 射线荧光测量结果的影响。提出了用标准片将 X 射线荧光测量值换算成以 XR 为测量单位的标准值，解决了 X 射线荧光测量的一致性问题，不但实现了多台仪器测量的一致性，而且使不同地区，不同岩性或不同时期的 X 射线荧光测量具有可比性。

一、各类核方法的特点和作用

常用的核方法主要是指 X 射线荧光测量。γ 能谱测量和氡量测量，表 6-6 列出了常用核方法的特点和作用。

表 6-6　快速追踪异常源方法常用核方法的特点和作用

方法	比例尺	测量对象	特　　点	作　　用
X 射线荧光	1:10000 到 1:2000 面积或剖面	岩石 土壤	1. 野外现场原位测量。2. 测量速度快，每测点约几十秒或几分钟。3. 定量半定量分析多种金属元素或金属元素组合的含量，主要元素有：Ti、Mn、Co、Ni、Fe、Cu、Pb、Zn、As、Sn、Sb、Hg、W、Ag、Sr、Ba、Mo 等几十种元素。4. 野外工作适应性强，工作评价周期短，经济效益显著。5. 仪器轻便操作简单	1. 快速圈定金矿（化）指示元素或指示元素组合的地球化学场，了解其分布规律。2. 快速圈定或及时追索金矿（化）体的可能地段，发现盲矿体。3. 现场指导地质人员布置地质工程。4. 评价地质工程，指导地质人员布样，减少非矿地段采样的数目和防止漏矿。5. 划分岩性。6. 确定矿体边界
γ 能谱	1:10000 到 1:2000 面积或剖面	岩石 土壤	1. 野外现场原位测量。2. 测量速度快，每测点约几分钟。3. 定量分析 U、Th、K 的含量。4. 工作与评价周期短。5. 仪器轻便，操作简单	1. 快速了解地质体中 K、U、Th 的分布规律，圈定钾化带和富钾地段。2. 快速圈定或及时追索金矿（化）体的可能地段，发现盲矿体。3. 现场指导地质工程布置。4. 评价地质工程，指导地质人员布样。5. 划分岩性，圈定构造破碎带。6. 划分矿体，确定矿体边界
氡法	1:10000 到 1:2000 面积或剖面	土壤	1. 野外现场原位测量。2. 定量，半定量分析土壤中 Rn 的浓度。3. 测量速度快。4. 工作与评价周期短。5. 仪器轻便操作简单	1. 快速圈定土壤中 Rn 浓度的地球化学场，了解 Rn 浓度的分布规律。2. 圈定构造破碎带和埋藏较深的隐伏构造破碎带。3. 圈定金矿（化）体的可能地段，发现盲矿体。4. 现场指导地质工程布置

实际调查工作原则

通过近几年的研究与实践，总结了一套在野外进行实际调查的工作程序分述如下。

剖面测量　根据分析研究异常源信息的特征确定追踪的方法技术（如 X 射线荧光法或 γ 能谱法或氡法或它们的组合），首先布置一条剖面（常称之为主剖面）进行测量，其点距一般为 5m 至 40m，旨在捕获局部异常。

追索异常　在主剖面捕获异常的两侧，再布置剖面（称之为次剖面），次剖面线的长度、线距和条数一般以控制异常范围为宜。在次剖面上采用与主剖面相同的方法技术进行

测量。该步骤旨在圈定异常的范围和确定异常浓集中心和梯度带。

异常定性　在异常浓集中心或者梯度带（根据选定的方法和技术）采集一定的地球化学样品，在野外（如用痕量金快速分析）或者室内定量测定金的含量，旨在对异常定性，判别异常是否与金矿（化）体有关。

异常源立体特征　根据金矿（化）体的赋存部位及其与围岩的电性和磁性差异，在异常地段开展电法测量或磁法测量，进一步查明金矿（化）体（尤其是隐伏金矿（化）体）的产状和埋深。

方法技术

在快速追踪异常源工作中，选择的方法和技术是关键，以下方法技术原则可供参考应用：

1．对与多金属硫化物有关的金矿（化）体，一般采用X射线荧光方法，其最佳指示元素为As，Pb，Cu，Zn，Hg，Sb和亲铜元素总量●（能量区间8keV—12keV）等，尤其是As，Cu，Pb，Zn和亲铜元素总量。

2．对与石英脉有关的金矿（化）体一般采用X射线荧光方法，其最佳指示元素为As，Cu，Pb，Ba，Hg和亲铜元素总量，尤其是As，Pb和亲铜元素总量。

3．对与构造破碎带有关的金矿（化）体：

（1）采用氡法，常用测量方法有射气测量，α卡法，活性炭法；

（2）采用X射线荧光法，最佳指示元素：As，Pb，Cu，Zn，Sn，Ag，Sb，亲铜元素总量和银组总量●（21—26keV），尤其是As，亲铜元素总量，银组总量；

（3）采用γ能谱法，主要测量U，Th，K的含量和总道计数。

4．对与钾化蚀变有关的金矿（化）体。

（1）采用γ能谱法，测量K，U，Th的含量，尤其是K及K/Th的比值；

（2）X射线荧光法，最佳指示元素：As，Ba，Pb。

5．对卡林型金矿床，采用X射线荧光法，其最佳指示元素为As，Hg，Sb尤其是As。

6．对未知区，一般采用X射线荧光法和γ能谱法，尤其采用X射线荧光法，其最佳指示元素为亲铜元素总量和银组总量。

本节重点介绍X射线荧光法在大比例尺异常源追踪中的应用。

二、东坪金矿区的试点

（一）矿区概况

东坪金矿位于崇礼县东南，距近东西向尚义-崇礼-赤城深大断裂南约10km（图6-18），区内主要分布水泉沟碱性杂岩和太古界崇礼群绿色变粒岩。近东西向深大断裂南侧的低序次压扭性断裂控制着区内金矿的分布。东坪金矿的赋矿岩相为石英正长岩和石英二长岩系列。已发现含金矿脉几十条，围岩蚀变强烈，主要有钾长石化、硅化、绢云母化、粘土化、碳酸盐化等，其中钾长石化、硅化与金矿化关系最密切。矿石为构造蚀变岩型，金属硫化物主要为黄铁矿，其次为方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等。金矿物以自然金为主，次

● 亲铜元素组：主要指Cu、Pb、Zn、As、Sc、W、Hg、Bi

● 银组：主要指Ag、Sb、Sn。

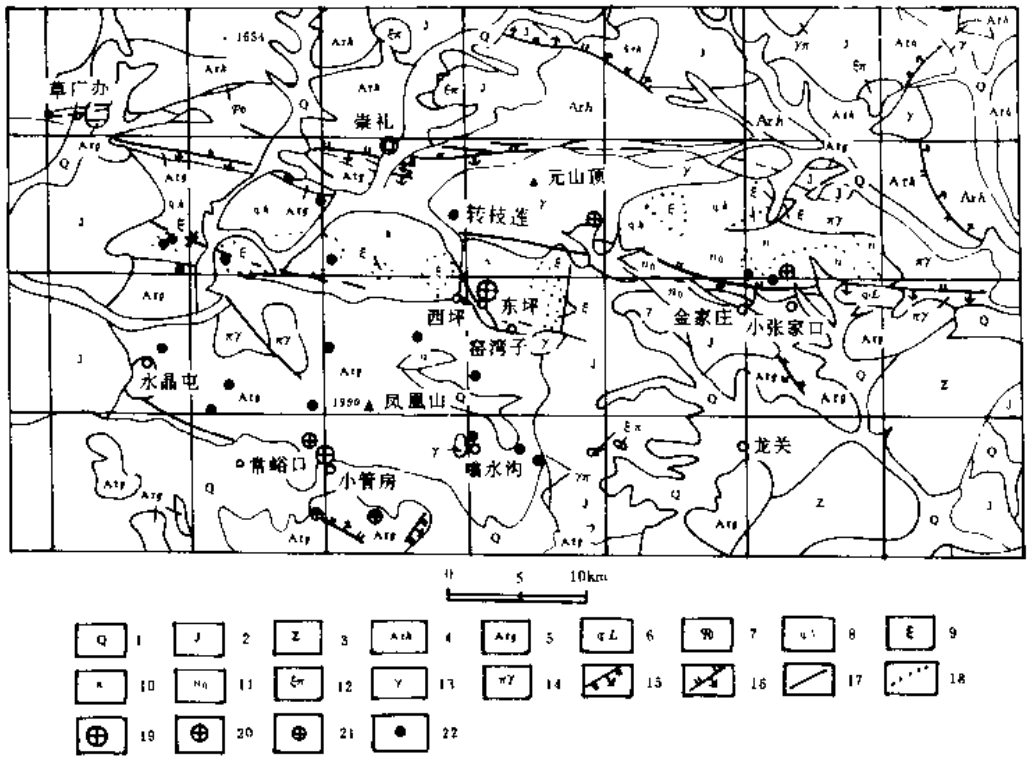

图 6-18　东坪金矿区区域地质图

1—第四系；2—侏罗系；3—震旦系；4—太古宇红旗子组；5—太古宇桑干群；6—辉石岩；7—角闪石岩；8—角闪二长岩；9—正长岩；10—二长岩；11—石英二长岩；12—正长斑岩；13—花岗岩；14—斑状花岗岩；15—正断层；16—逆断层；17—地质界线；18—渐变地质界线；19—大型金矿床；20—中型金矿床；21—小型金矿床；22—金矿点

为碲金矿等。金品位高，储量达大型规模，属混合岩化热液蚀变岩型。

区内岩（矿）石磁性有较大差异。据此可用地球物理方法确定岩体接触带、捕掳体和岩体分布等。石英脉和细粒石英二长岩或硅化二长岩电阻率较高。这与一般围岩有很大差别。1990 年在矿区中部 10km^2 范围内进行 1∶10000 电阻率、激电测量，圈定 6 个高阻异常，呈北西向展布，除 ρ_{s-5}异常未见矿外，其余异常分别与 1、2、3、70、22 号矿脉的硅化带有关。含金石英脉极化率与金属硫化物含量有关。

东坪金矿属贫硫化物型，与围岩极化率差异不大。矿化与钾长石化关系密切，γ 能谱测量（40km^2）圈出 8 个异常，主要分布在 1、2、3 号脉群地段，呈北西向展布（图 6-19）。异常形态规整，有明显的浓集中心，与金的次生异常、矿体、矿化体有较好的对应关系。1988 年矿区 1∶10000 土壤测量（40km^2）以土壤样品中金的含量为 4×10^{-9}作为异常下限，共圈定 15 个金异常，异常与矿脉群有很好的对应关系（图 6-20）。通过与已知矿异常对比，4、7、8、14 号异常均具有较好的找矿前景。

（二）异常源快速追踪

矿区 1 号脉群已达大型金矿床规模，在其南延部位，圈出 1 号高阻异常，呈 NW320° 方向展布，与 1 号脉成 50° 交角。在 1 号高阻异常南西部重叠有 5 号金的土壤地球化学异常。因此，对此处异常进行快速追踪查证具有重要价值。

1. X 射线荧光法最佳指示元素的选择

矿区围岩（二长岩、石英二长岩、正长岩等）、蚀变岩和矿体中 Au、Pb 等元素含量

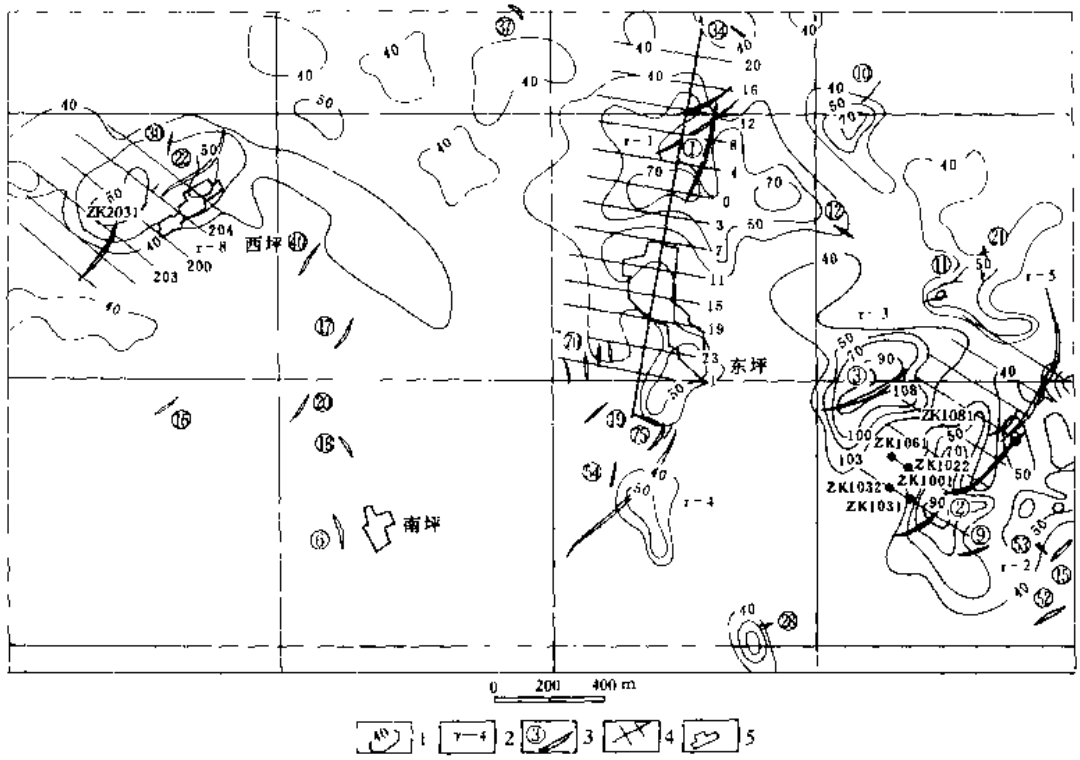

图 6-19　东坪矿区 γ 能谱异常图

1—γ-K 等值线（单位%）；2—γ-K 异常编号；3—矿脉及编号；4—勘探线及编号；5—居民点

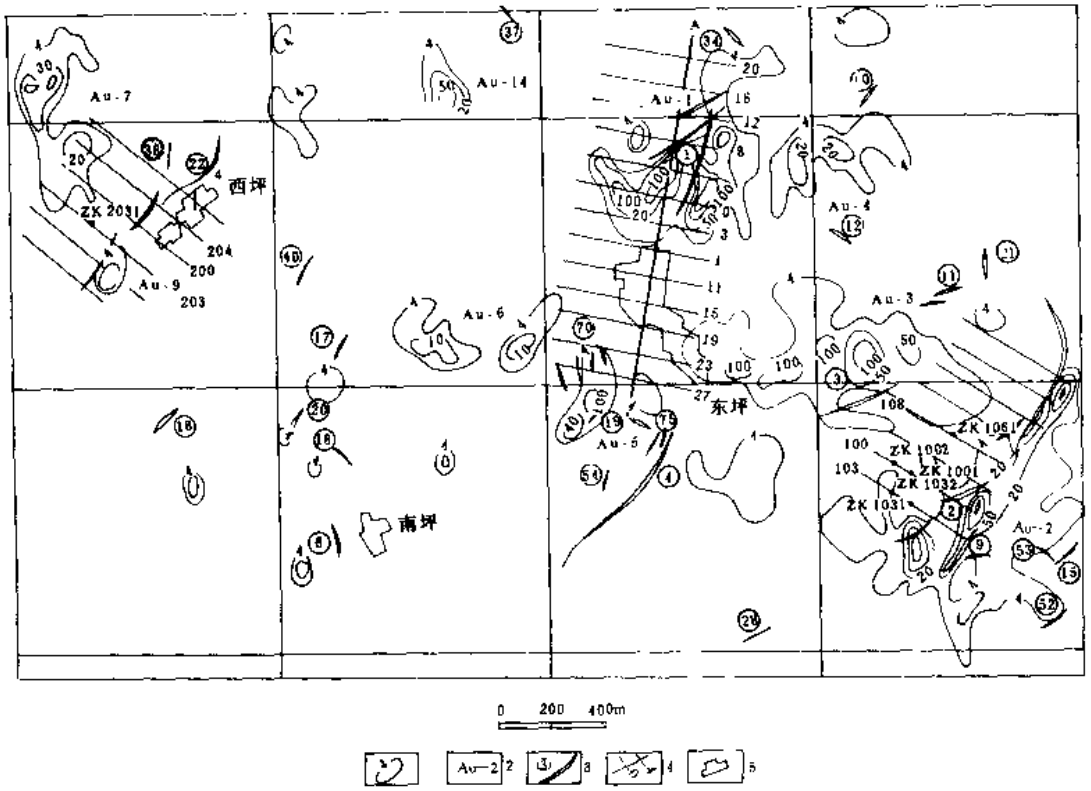

图 6-20　东坪金矿区金的土壤地球化学异常图

1—Au 等值线（单位×10⁻⁹）；2—Au 异常编号；3—矿脉及编号；4—勘探线及编号；5—居民点

表 6-7　围岩、蚀变岩、矿体 Au、Pb 含量表

元　素	克拉克值	围岩背景值	蚀变围岩	矿　体
Au	4	5.4	1095	54070
Pb	12.5	11.4	26.2	420.9

含量单位：Au 为 10^{-9}，Pb 为 10^{-6}。　　（据河北第三地质队，宋瑞先）

有很明显的差别（表 6-7），Au 与 Pb 有较好的相关性，因此，Pb 应是有效的指示元素。

选择了几种与矿体相关性较好的指示元素的滤波器，对 1 号脉群部分样品室内 X 射线荧光测量结果（见图 6-21）表明，选取 Pb 和 $Au^{1\#}$ 滤波器是合适的。$Au^{1\#}$ 滤波器测出的为亲铜元素组 X 射线荧光照射量率的总量。

2. 测量方法的选择

在实际测量中，选用 γ 能谱测量的 K 和 K/Th 来圈定钾化带和追索矿（化）体赋存部位。为不漏掉有意义的找矿信息，在 γ 能谱测量的同时，同线共点配置 X 射线荧光测量。这种配置在一些实际测量中，显得十分重要。

依照综合方法的工作原则，野外实际测量中对不同追踪对象，选用面积和剖面相结合的方法，以大致控制异常范围、走向和规模。在大比例尺异常追踪查证时，可选取适当面积进行网测，以求得较为完整的地球物理场和地球化学场的空间展布形态，用以追踪异常源和矿产预测。

在东坪矿区内详查追踪时，对 4km² 面积选用 1∶10000 比例尺测网（100×20m），采用 X 射线荧光法和 γ 能谱法进行土壤测量。在异常定性时，配以“泡塑取样法”，在异常中心进行取样，野外用“液珠萃取比色法”分析 Au。

这些方法的使用，在实际工作中取得了良好的效果，说明方法选择是适当的。

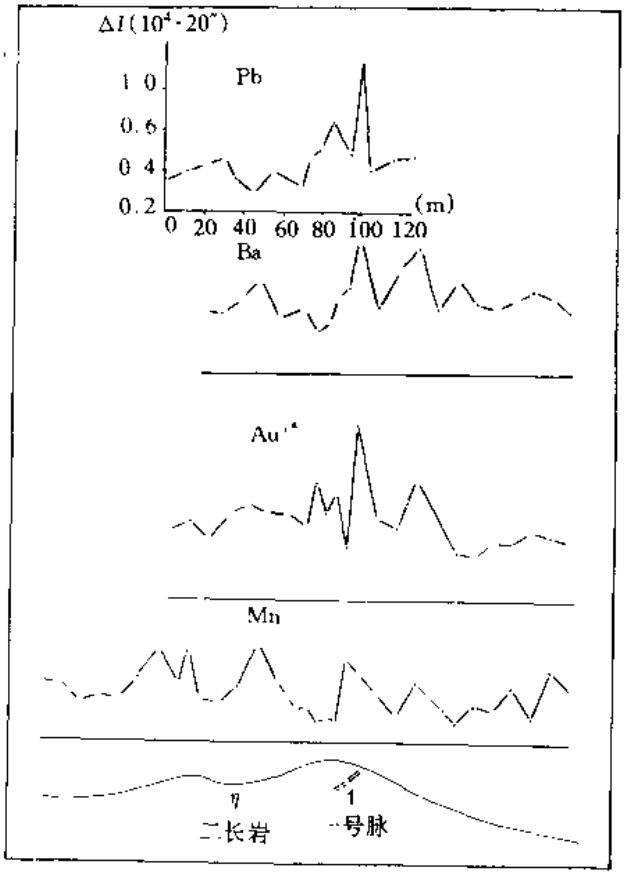

图 6-21　东坪金矿区 X 射线荧光测量最佳指示元素选择对比曲线

注：测量时间为 20s

3. 异常源的快速追踪

（1）对 1 号高阻异常范围投入了 X 射线荧光法和 γ 能谱法开展 200×20m 沿勘探线的网测，捕获了 3 个（Pb）X 射线荧光异常。其中位于 311 线的（Pb）X 射线荧光异常与 5 号土壤地球化学（Au）异常重合；另外两个 X 射线荧光异常呈长条状位于测区东侧，中间一个异常中心位于 312 线处，最北一个异常带，自 320 线至 336 线，直至延伸出高阻异常测区（见图 6-22、6-23）。

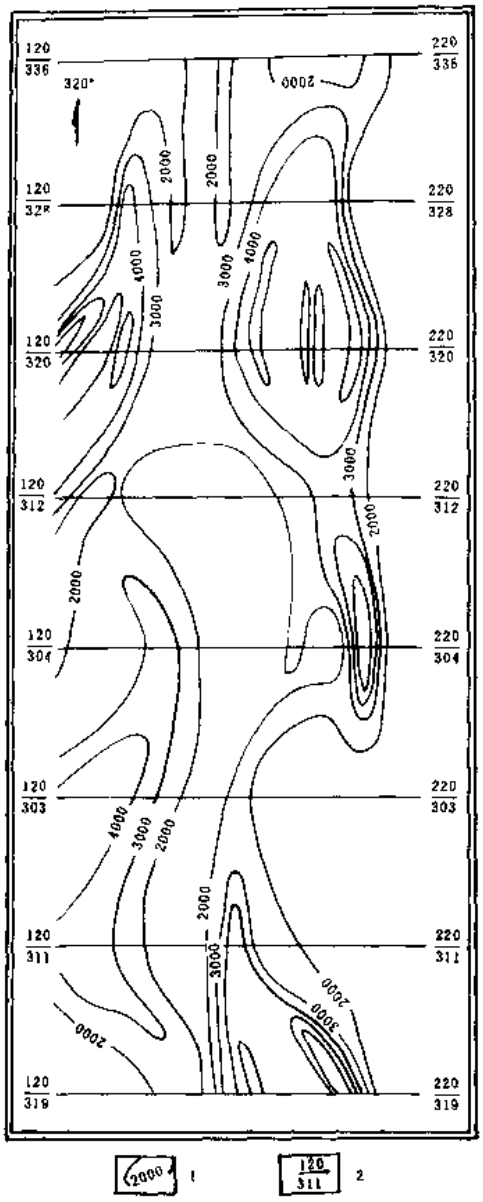

图 6-22　W-1 号高阻带 ρ_s 等值线图

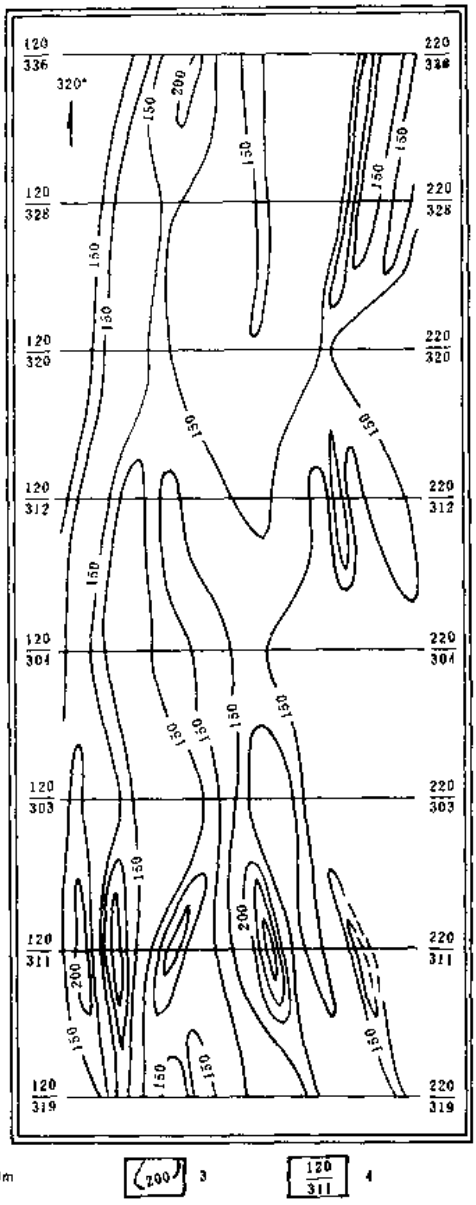

图 6-23　W-1 号高阻带(Pb)X 射线荧光等值线图

1—电阻率 ρ_s（Ω·m）及等值线；2—测点号/勘探线编号；3—X 射线荧光计数率（cps，20″）及等值线；4—测点号/勘探线编号

为了更详尽地了解 311 线处（Pb）X 射线荧光异常的展布特征，向 SW 方向扩大了测区范围，直至 335 线，结果获得了更加清晰完整的（Pb）X 射线荧光异常（见图 6-24）。对比该处（Pb）X 荧光异常与 1 号脉的（Pb）X 射线荧光异常的展布形态，沿 311 线施工的 CD10 号平硐继续向前施工，在荧光异常范围内，能见到多层矿体；沿基线方向至 303 线矿体将收缩或尖灭，新开口施工的 CD11 号平硐将见不到矿体。施工结果证实了这种推测。该处 X 射线荧光异常所控制的为一厚大的矿体群，其矿脉赋存状态与（Pb）X 射线荧光异常场的空间展布特征相一致。

据（Pb）X 射线荧光场的分布特征分析，推测到 319 线处矿体将尖灭，或者只有较弱

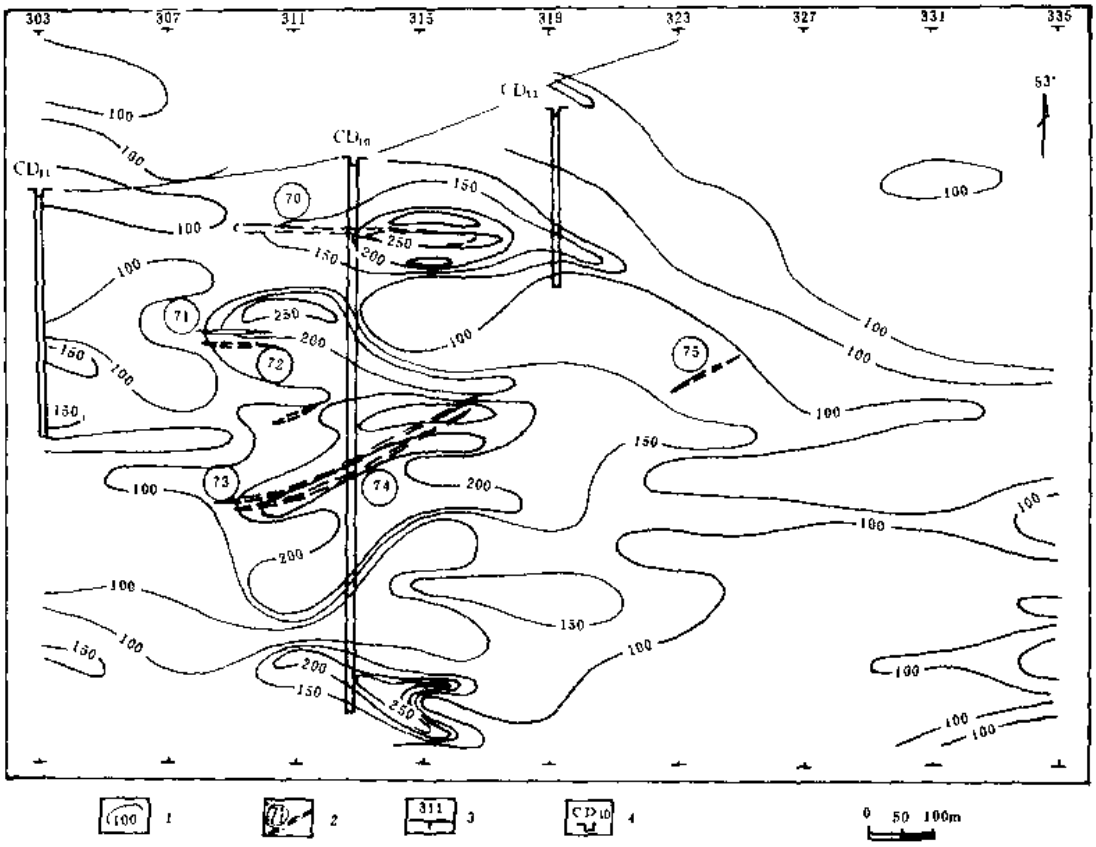

图 6-24　东坪金矿区土壤 Au-5 号地球化学异常区 X 射线荧光测量等值线图

1—X 射线荧光计数率（cps. 20″）及等值线；2—矿体及编号；3—勘探线编号；4—平硐及编号

的矿化存在。后经 CD12 号平硐的施工，又一次证实了该方法预测的准确性。

该异常区普查阶段已经完成，控制储量已达几十吨，经济效益十分可观，而异常源追踪只用了十几天的时间，其速度之快是其他方法不能比拟的。

（2）为了全面了解矿区的核地球物理场特征，配合 1 号脉群地质报告的提交，以及新一轮的找矿的需要，对矿区作了 4km^2 的 100×20m（Pb）X 射线荧光法和 γ 能谱法的网测，捕获（Pb）X 射线荧光异常 8 处（见图 6-25），其中 1 号、2 号、7 号和 8 号异常为已知矿体所引起；而 3、4、5、6 号等异常皆为未知异常，经对这几个异常部位的地质、地球物理场和地球化学场的综合分析，以及与已知矿异常的特征的比较，确定这些异常为矿引起的可能性较大。

4 号、5 号 X 射线荧光异常所处地质环境、地球物理、地球化学场特征等，都与 70 号矿脉群所处 2 号 X 射线荧光异常类似。为了进一步查清 4、5 号异常与 2 号已知矿体异常的共性，使用泡塑埋人偏提取法，于 2 号、4 号、5 号三个异常中心作一条剖面取样（点距 20m），并于野外驻地用液珠萃取比色法进行了 Au 的分析，结果显示，在 70 号矿体的 2 号异常与 4、5 号两异常上 Au 含量都处于同一数量级，且含量都偏低，这说明 4、5 号异常的性质与 2 号异常性质基本上是一致的。如果 4、5 号异常为矿异常，其矿体赋存状态将与 70 号矿体一样，具有一定的埋深。

据此，应首先对 4 号“照山凹”异常及 5 号“炸药库”异常进行工程验证；其次可对 3 号和 6 号异常进一步查证。将会取得较好的效果。

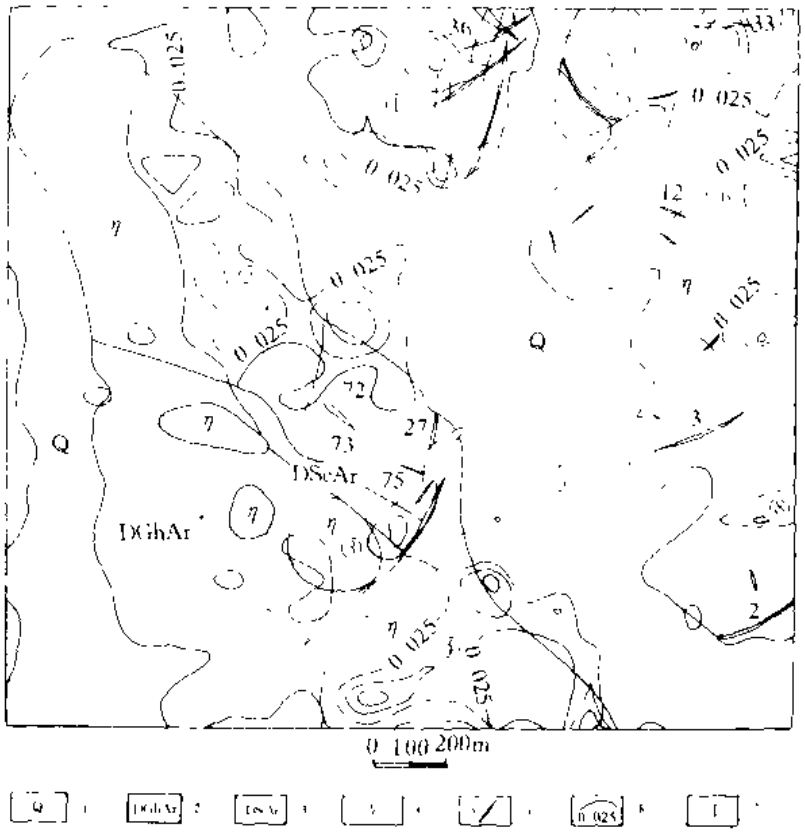

图 6-25　东坪矿区（Pb）X 射线荧光测量平面等值线图

1—第四系；2—太古宙大白杨组角闪斜长片麻岩；3—太古宙大白杨组云母片岩；4—二长岩；5—矿体及编号；6—X 射线荧光强度等值线；7—X 射线荧光异常编号

（3）在 γ 能谱工作中，初步圈出了 5 处 K 异常，这些异常以东坪沟为界，北东侧的 K 异常范围都比较宽大，已知矿脉多处在 K 的异常中，且 K 异常较之矿脉要宽大得多，X 射线荧光异常多包含于 K 的异常中；而在沟的南西侧，K 异常往往与 X 射线荧光异常相伴，只有部分重叠（见图 6-26）。

东坪沟两侧 K 异常、X 射线荧光异常场的不同的分布特征，可能是剥蚀程度不同引起的组合元素的差异；或者是不同期次的碱交代的强烈程度的不同，抑或是成矿标高的不同造成的元素分带现象所致。

东坪金矿区不同成矿阶段 Au、Pb 矿物含量差异较大（见表 6-8），在第一成矿阶段中，含 Pb 金矿物较多，铅金矿（?）为 3.01%，铅锌碲含金矿物为 9.13%；而第二成矿阶段含 Pb 金矿物都较少，铅金矿仅为 0.46%，铅锌碲含金矿物为 5.10%，约为第一成矿阶段的一半。这些金矿物含 Pb 量的多少，必然引起地球化学异常分布的差异，而 X 射线荧光异常在这里恰恰是以 Pb 作为最佳指示元素的，所以，对两个含 Pb 量有较大差别的不同成矿阶段形成的矿体晕，就会有较大的差异：含 Pb 较多的成矿阶段，会造成与矿体吻合较好的（Pb）X 射线荧光异常；反之，（Pb）X 射线荧光异常与矿体吻合就较差。根据这种差异判断，东坪沟南西侧（Pb）X 射线荧光异常与矿体吻合较好的矿体（如 70 号矿体），应为第一成矿阶段的产物，东坪沟北东侧（Pb）X 射线荧光异常与矿体吻合较差的矿体（如 1 号矿脉群），应为第二成矿阶段的产物。

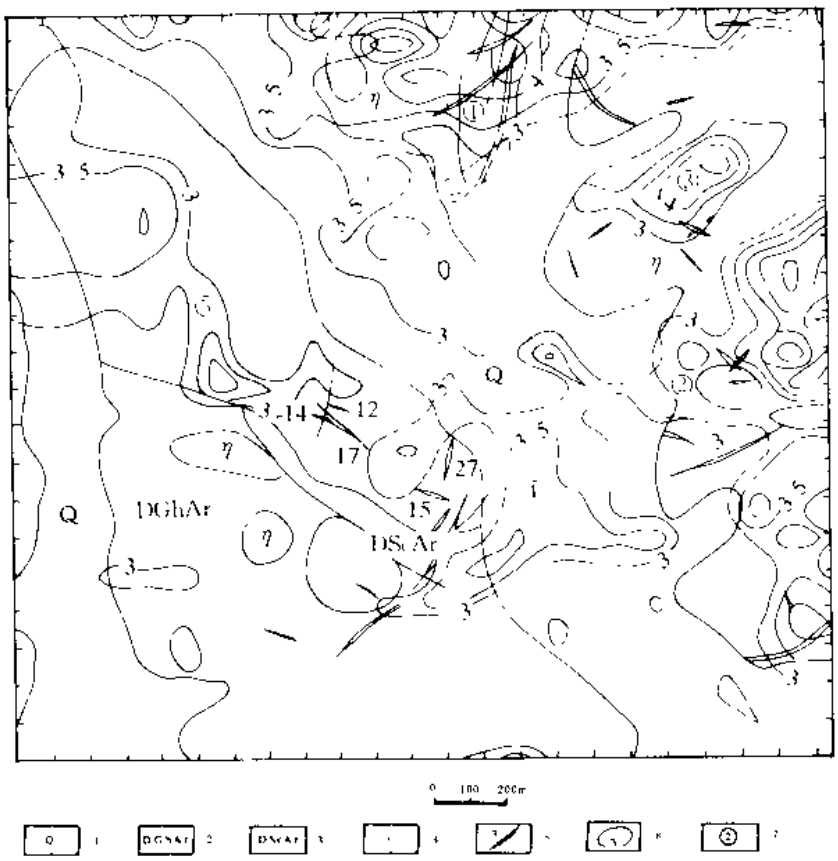

图 6-26　东坪金矿区 γ 能谱（K）等值图

1—第四系；2—太古宙大白杨组角闪斜长片麻岩；3—太古宙大白杨组云母片岩；4—二长岩；5—矿体及编号；6—K（%）含量及等值线；7—γ 能谱 K 异常编号

表 6-8　不同成矿阶段矿石中金矿物含量对比表

金矿物含量（%） / 成矿阶段	自然金	次生自然金	碲金矿	铅金矿（?）	铅锌碲（?）含金矿物
第一阶段	18.36	69.50	0	3.01	9.13
第二阶段	75.38	18.40	0.66	0.46	5.01

（4）为了从宏观上了解东坪金矿区及其相邻外围的核地球物理场的分布特征，以期对水泉沟碱性杂岩体与金矿成矿规律有进一步的了解，通过矿区对该岩体作了三条 10km 长的剖面，其中 1 号长剖面为东西向测线，主要了解岩体内接触带的情况；2 号、3 号两条长剖面为穿过岩体至两侧围岩的南北向测线。

1 号长剖面上除了东坪矿区矿体都有异常显示外，还发现了“下水泉异常”和“西坪异常”（见图 6-27）；2 号长剖面除了东坪矿区异常外，还新发现了“大枫沟异常”；3 号长剖面除了“下水泉异常”重复出现外，还发现了“转枝莲异常”。

这三条长剖面将矿区，以及与矿区相邻的外围部分大都控制住了，并发现了一些有相当规模的 X 射线荧光异常和 γ 能谱异常，这为东坪矿区的进一步扩大提供了新的靶区。同时，也为水泉沟碱性杂岩体的研究及找矿工作，提供了十分有意义的资料。

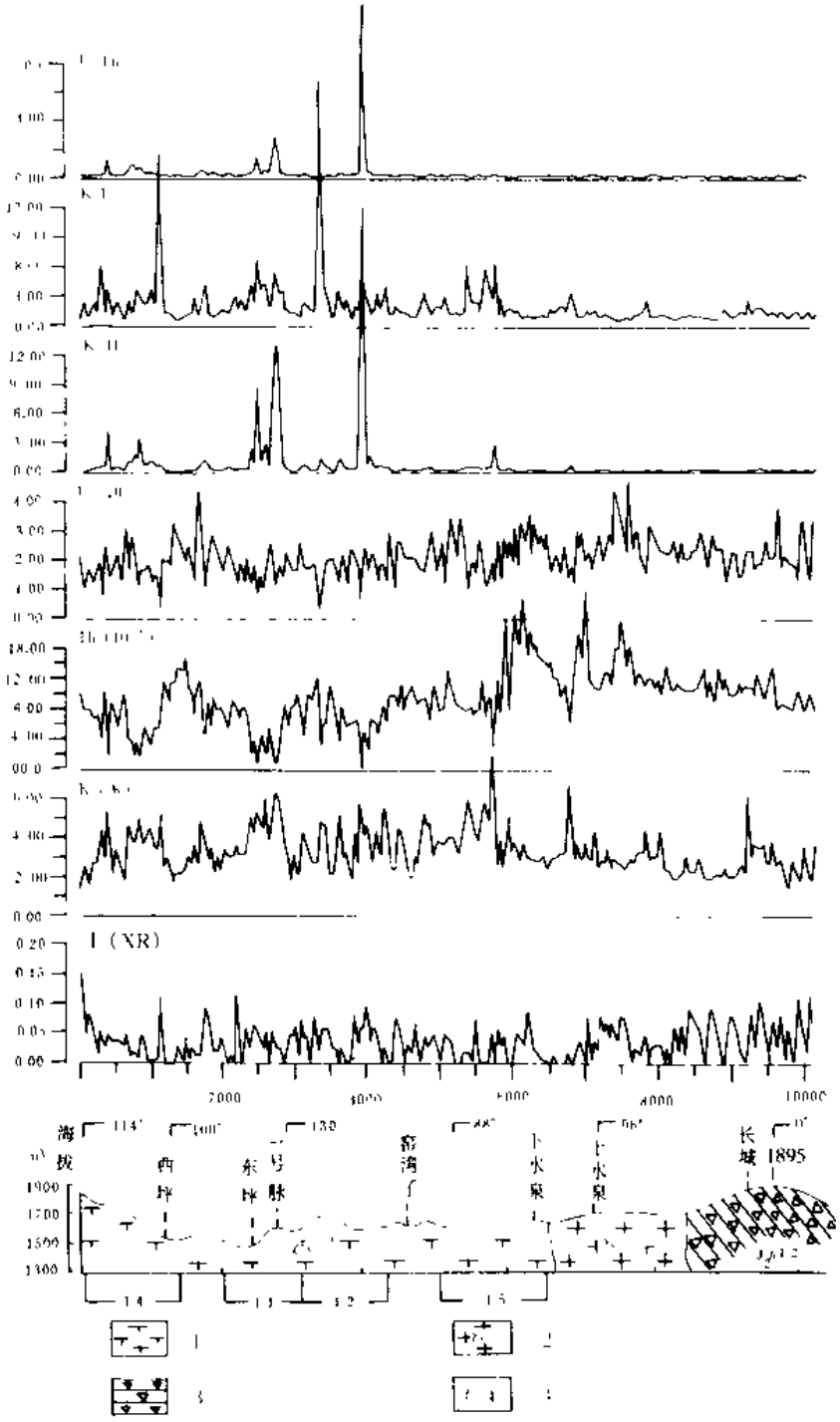

图 6-27　水泉沟岩体（Pb）X 射线荧光、γ 能谱 1 号长剖面图

1—石英二长岩；2—巨斑状花岗岩；3—火山凝灰岩；4—异常点编号

为了进一步认识这些异常，给以初步定性，对“西坪异常”、“下水泉异常”、“转枝莲异常”又用 20m 点距的剖面进行了追索。

“西坪异常”位于西坪村西，22 号矿脉西侧（上盘）。从图 6-28 可以看出，最东边的狭窄异常即为 22 号矿脉异常，其西侧相邻的衬度大、峰值强烈的异常即为西坪异常主体。该异常呈 NE 展布，钾化带较宽，从 K/Th 的剖面平面图上可以看到，其异常可分为三条

带，它们很强的峰值反映了矿（化）体的赋存部位及不大的埋深，同时测量捕获的（Pb）X 射线荧光异常与 γ 能谱异常也重叠在一起（见图 6-29）。该异常南部已发现矿脉多条，正在民采。

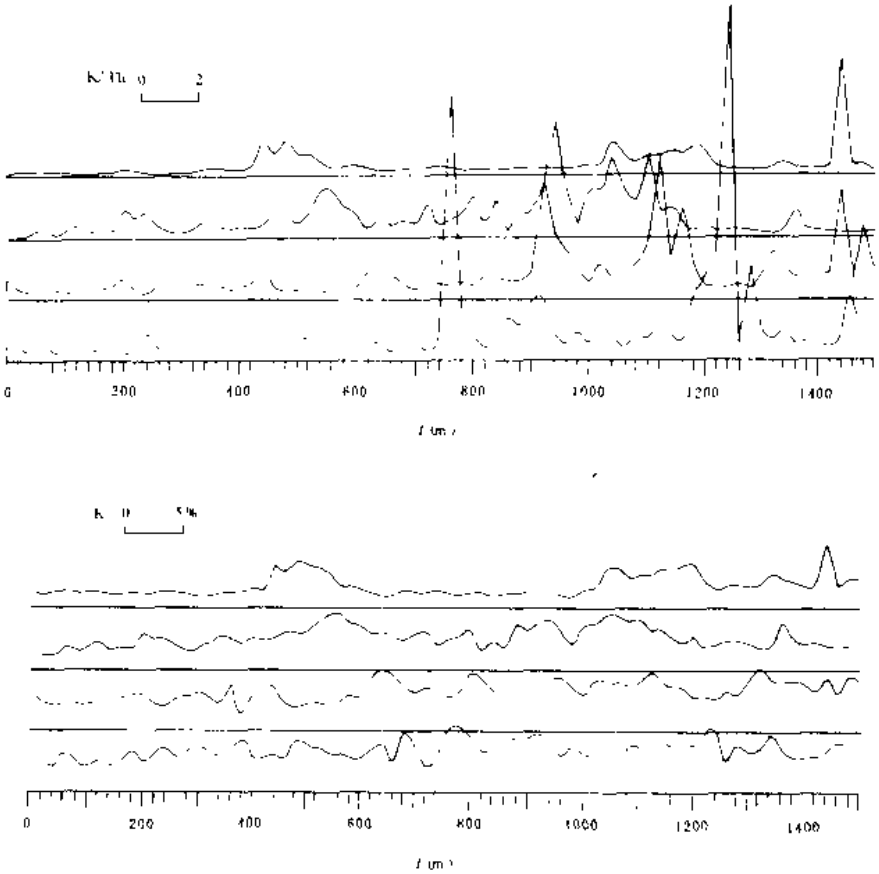

图 6-28　西坪异常 γ 能谱 K、K/Th 剖面平面图

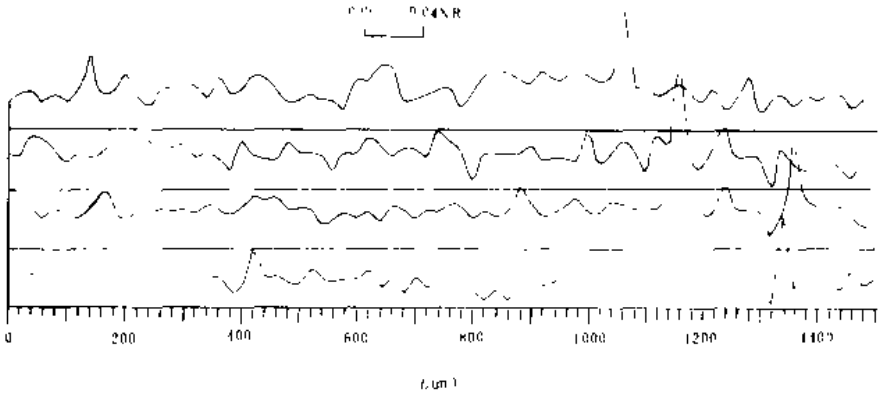

图 6-29　西坪异常（Pb）X 射线荧光剖面平面图

“转枝莲异常”位于水泉沟碱性杂岩体北接触带内部，1992 年 5 月由 3 号长剖面发现（见图 6-30），从图中可以看出，异常区段钾化不如东坪矿区强烈，但由于该处钾的背景较低，形成相对衬度较大的异常。因而不但异常清晰、形态规整，而且宽度也较大（300—500m），走向 NW，其 K/Th 异常与矿脉也对应较好，并与东坪矿区能谱的“找矿模型”相同，现该处矿脉已工业开采。不过，转枝莲金矿体从目前开采情况看已不是东坪

矿区那种石英脉—蚀变岩型的，而是与煌斑岩关系密切。该异常的这一地质特征，又为γ能谱在水泉沟碱性杂岩体内寻找非石英脉-蚀变岩（钾化）型金矿提供了依据。

下水泉异常”位于东坪矿区的最东部，水泉沟碱性杂岩体东南接触带内部。对该异常用四条南北向、间距300m、点距20m的剖面进行了追索，控制面积1.29km^2（见图6-31），从图中可以看到，异常清晰、钾化强烈，异常宽度在200m左右，走向NW。从K/Th剖面平面图中还可以看到，异常大致可分为两条带，南侧异常宽大、峰值衬度大，连续性好，说明该处异常对应的矿（化）体可能埋深不大，该异常沿走向已控制在千米以上。北侧异常规模较小。

从整个下水泉异常看，异常似为多条复脉所引起，且矿化较为均匀，因而形成整体异常宽大，峰值连续。类比于东坪矿区已知矿脉上的“找矿模型”，及转枝莲矿体的异常特征，下水泉异常应有很好的寻找工业矿体的前景。

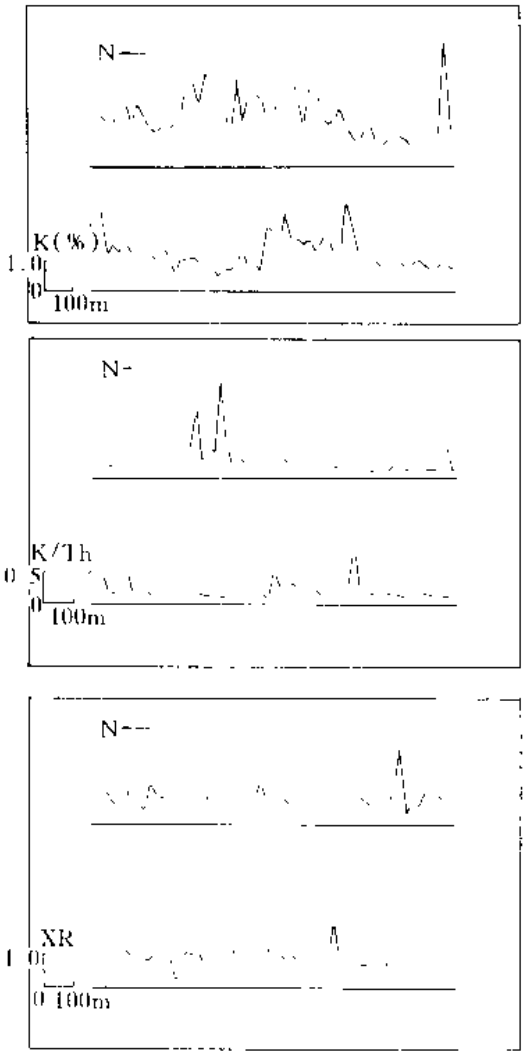

图6-30 转枝莲异常（Pb）X射线荧光、γ能谱剖面平面图

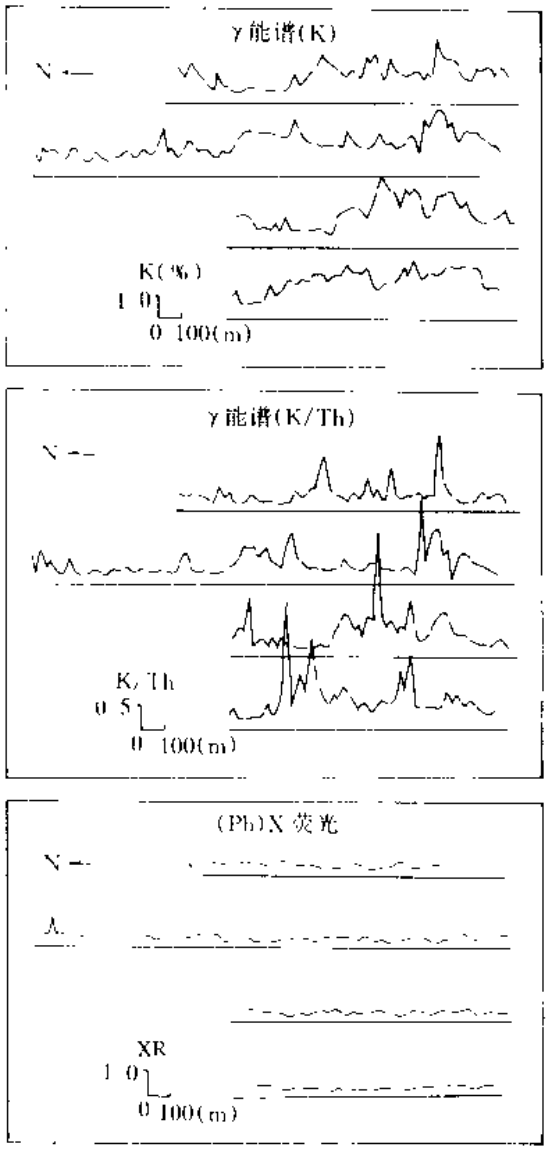

图6-31 下水泉异常（Pb）X射线荧光、γ能谱剖面平面图

（5）东坪金矿区土壤地球化学 Au-3 号异常位于 1 号矿体以东，3 号矿脉则处在该异常的东北角，3 号脉往东则与 2 号脉相邻（见图 6-20）。该异常呈东西向展布，长约 1000m，宽 300m，其两端几乎与 1 号和 2 号矿脉相交，其异常强度和规模都与 1 号矿脉部位相当，但地表却无矿体出露。用 X 射线荧光法进行了 100×10m 网测，结果无明显的异常显示。改用 γ 能谱测量，获得了清晰的 K 异常（见图 6-32），该 K 异常的规模和强度也与 1 号矿脉处的 K 异常相当。

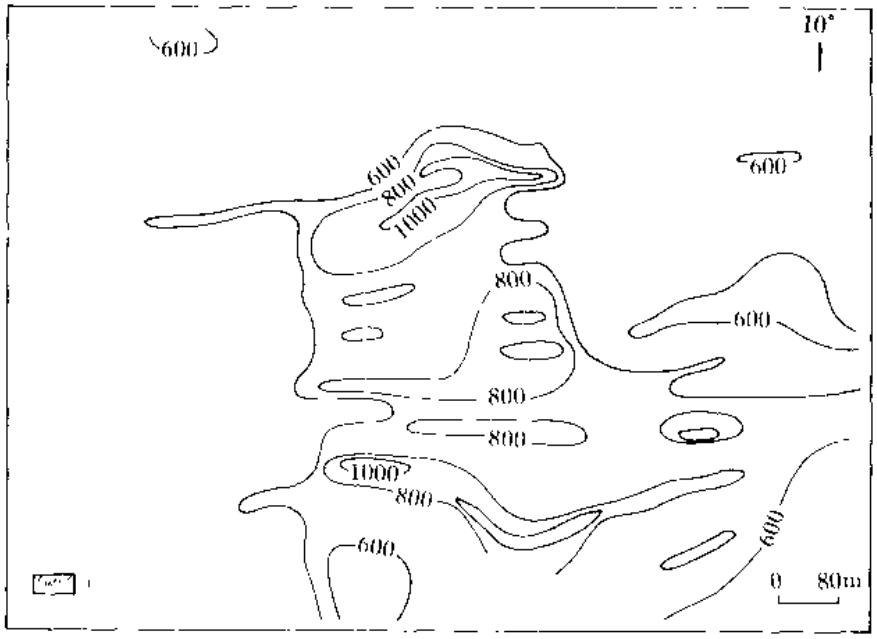

图 6-32　东坪金矿区土壤地球化学 Au-3 号异常分布地段 γ 能谱测量的 K 等值线图

1—γ 能谱 K（cps，2"）及等值线

4．地质效果与经济效益

对东坪金矿区及其外围水泉沟碱性杂岩体的一部分的物探化探工作，证实了以核方法为主的综合物化探工作是快速追踪异常源的一种快速方法，而且准确可靠。该追踪方法不但在已知矿床上清楚地划出了蚀变带、矿体赋存部位，而且在未知区准确地预测了隐伏矿和盲矿的赋存位置和展布情况。取得了很好的地质效果；有些异常经工程验证使东坪金矿储量成倍增加，经济效益十分可观。

在研究过程中，还不断地提出了新的成矿靶区，除现已验证见矿异常一处，成为一个大型矿产地外，还提出了规模较大的可供验证的有重要找矿意义的异常 6 处，其中一处也已工程见矿并投入生产。这些成果对东坪矿区的进一步扩大，对水泉沟碱性杂岩体的找矿方向都具有重要意义。

第五节　应用痕量相态分析技术评价金地球化学异常的方法

传统的评价金地球化学异常的方法主要是根据金元素本身的强度和异常规模，综合异常的元素组合或元素间的比值。由于金在自然界的丰度很低，分布很不均匀，成矿地质条

件和矿床成因类型复杂多样，不同地区间各种元素地球化学背景差异往往很大，这就使得金的地球化学异常评价工作复杂化。在评价异常缩小找矿靶区的程序上则采取从小比例尺化探到大比例尺化探层层叠套的方法，这就使得评价周期拖长，评价费用增大。在总结传统评价方法的基础上，试验研究了一种快速评价研究热液金矿床形成的金的地球化学异常的新方法、新技术。

一、方法的基本原理

方法系根据金元素的地球化学和金矿床产出的地质背景条件特征，通过查明金是呈集中状态存在，还是分散状态存在来判别是矿（化）异常还是非矿异常。金矿床中的金通常主要呈自然金和金属互化物状态存在，并常与硫、砷化物如黄铁矿、毒砂、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等共生，这些硫化物氧化后形成的褐铁矿也可能包裹有金，查明金与这些比重较大的矿物的共生关系是否密切，无疑是用来说明金在地质体中是呈集中状态还是分散状态的重要标志。对岩石地球化学测量样品中的金和找金的指示元素进行准确定量测定，然后计算金和它们的相关系数，相关密切的，说明金可能呈集中状态存在，反之则可能呈分散状态存在。再把该样品进行重砂分离，淘取重矿物，同样测定这些元素，也求出金与它们的相关系数，看在重矿物中是否有类似情况。如果重矿物中金与这些元素的相关序列与原样大致相似，则说明金赋存在这些元素的载体矿物中，这是金呈集中状态的很好证明，这也是该异常为金矿（化）异常的必要条件。

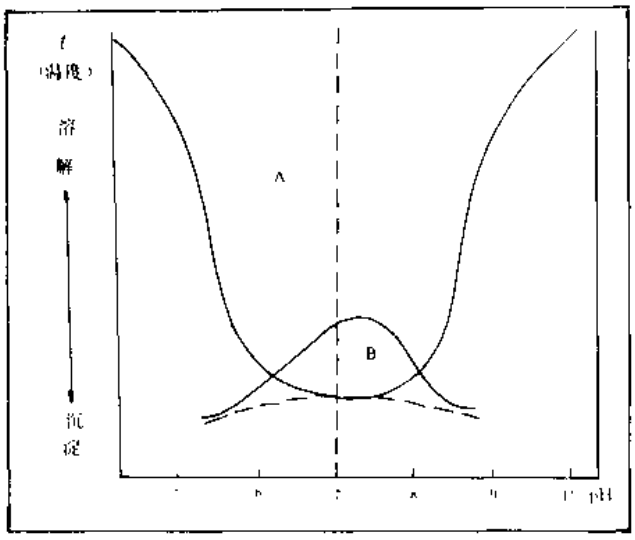

图 6-33　金沉淀相图

（转引自王友文等编著《中国金矿地质及普查勘探方法》陕西省地质矿产局，1985 年，西安）

A—石英沉淀区；B—金沉淀区

另外，通过研究金产出的地质背景条件来进一步判断呈集中状态存在的金有没有富集成矿的物质条件。对热液金矿床而言，硅化通常是重要的找矿标志。含金热液中硅沉淀为石英的温度比金沉淀的温度高得多，pH 范围也宽些，见附图 6-33。因此，析出的石英中包裹有一定量的原子态或胶态金，其包裹金的含量将与热液中金的浓度成正比，通过查明异常样品中石英包裹金的含量，可大致判别原始热液中金的浓度，进而推断是否具备富集成矿的物质基础，借此来查明形成金矿床的地质背景条件。

二、金地球化学异常的评价程序

通过七个已知的不同类型的金矿床（点）的岩石样品和若干个非金矿石英的采样分析、数据处理和规律性的研究，总结得出金地球化学异常的评价程序如下：

（一）异常复查

取原获得异常的正样或副样 30—40 件，作金的精确定量分析，确证异常存在。

（二）采取评价研究样品

根据异常形态、地质条件，设计一条通过异常中心的采样剖面，采取岩石样品 6—12

个，每个样重约1kg。采样点分布不要求直线和等距，尽可能采自蚀变强烈，能反映热液活动，硅化、黄铁矿化或褐铁矿化明显的部位。

（三）样品加工

全部样品加工至粒径<0.175mm（-80目），混匀，取出100g，用无污染加工方法细磨至粒径<0.075mm（-200目），为原样。

（四）富集重矿物

所余全部粒径<0.175mm的样品作重砂分离，保留重矿物40—50g，用无污染加工方法细磨至粒径<0.075mm，为重矿物样。

（五）提取富石英样

从轻矿物部分用适当方法富集石英，最好能达到含石英80%以上，样品重量30—40g，细磨至粒径<0.075mm。石英富集程度较低时，则应适当增加样品重量。

（六）对原样和重矿物样作多元素分析

测定Au、Ag、Pb、Zn、Cu、As、Sb、Bi、Hg的含量，其检出限列出如下：Au（0.1×10^{-9}），Ag（20×10^{-9}），Pb、Zn、Cu（1×10^{-6}），As、Sb、Bi（0.1×10^{-6}），Hg（20×10^{-9}）。

（七）数据处理

对原样和重矿物样的多元素分析结果作元素相关矩阵（条件不许可时，可只计算Au与其他元素间的相关系数），并把与Au相关的元素按r值大小排序，获得相关系数≥0.5的元素组合。

（八）石英包裹金的测定

对原样有相关元素组合的异常，取富石英样测定石英包裹Au的含量，金的检出限为0.1×10^{-9}。

（九）异常性质判别

不同性质的异常大致有如下规律：

1. 矿（化）异常：原样与重矿物样有相似甚至一致的相关元素组合，相关元素数≥3，重矿物样中Au的含量与原样相比有不同程度的富集；石英包裹Au的含量多数样品$>1\times10^{-9}$，平均应≥3×10^{-9}。

2. 非矿异常：原样无相关元素组合或最多只有两个元素相关；重矿物样中Au的含量与原样相比没有富集或很少富集，甚至贫化；石英包裹Au多数样品≤1×10^{-9}。

3. Au呈伴生组分存在时：原样与重矿物样有相似甚至一致的相关元素组合；除Au外，有几个元素间的相关系数较高；重矿物样中Au有不同程度富集；石英包裹Au≥1×10^{-9}。

（十）金的相态分析

取异常峰值样（原样）和重矿物样中Au含量高的试样作Au的赋存状态分析，目的在于查明该异常找金的找矿标志。

（十一）野外追踪评价

（十二）写出评价意见

三、建立评价程序的基本依据

（一）研究已知金矿床（点）的地球化学异常

已知金矿床（点）的选择，大致考虑了各种金矿床类型，共选择了7个已知金矿床（点），它们是新疆哈图金矿（产于变质火山沉积岩中的含金石英脉，矿区超基性岩及中酸性侵入岩发育）。新疆托里县柳树沟金矿点（产于变质火山沉积岩中的破碎蚀变岩型金矿），陕西洛南葫芦沟金矿（产于太古宇花岗-绿岩地体中的构造蚀变岩型金矿）和王排沟金矿（产于太古宇花岗-绿岩地体中的硫化物石英脉型金矿），陕西勉县李家沟金矿（产于碧口群下部火山岩和上部沉积岩层间断裂带中的热水溶滤型金矿），陕西太白县老铁厂金矿点（产于泥盆系钙质千枚岩中挤压破碎带的细脉浸染型金矿），湖南水口山铁帽型金矿（产于泥质砂岩与花岗闪长岩接触带附近的破碎带中）。

还对甘肃安西县金窝子金矿床，测定了石英中包裹金的含量。非金矿床石英样则采自新疆、陕西、甘肃等地。

（二）评价研究的特征元素选择

研究方法基本上按金地球化学异常的评价程序进行，对原样和重矿物样均测定了Au、Ag、As、Sb、Bi、Hg、Pb、Zn、Cu、Ni、Co、W、Mo等元素。经过反复分析研究和数据处理，选定了前面9个元素，这9个元素是金矿的成矿元素和主要指示元素。以Au找金无疑是最有效的，Pb、Zn、Cu、As、Sb则是常见的金的载体矿物的组成元素，通过这些元素的含量变化规律，对研究地质体中Au是呈集中状态还是呈分散状态存在是重要的环节。对7个已知异常的原样和重矿物样全部进行了上述9个元素的定量分析，以哈图金矿为例把数据列于表6-9（其他6个已知矿点从略）。

表6-9　新疆哈图金矿异常评价分析数据（10^{-6}）

样品号 \ 成分 / 类		Au	Ag	As	Sb	Bi	Hg	Pb	Zn	Cu	石英包裹金（10^{-9}）
哈1	原样	0.178	0.084	300	6.34	0.16	0.068	9	61	81	22.0
	重矿物	1.19	0.34	559	12.7	0 10	0.32	162	84	102	
哈2	原样	0.040	0.084	35.1	3.01	0.14	0.016	10	86	163	1.1
	重矿物	0.35	0.09	71.0	5.5	0.52	0.24	68	113	174	
哈3	原样	5.63	0.084	1970	108	0.11	0.145	4	82	129	19.0
	重矿物	33.0	0.78	4850	278	0.20	0.46	40	140	231	
哈4	原样	0.064	0.252	39.5	2.63	0.14	0.064	7	24	20	1.0
	重矿物	0.64	0.14	104	4.7	0.24	0.38	102	91	54	
哈5	原样	0.019	0.140	34.7	5.74	0.16	0.028	6	91	159	1.7
	重矿物	0.58	0.34	129	11.0	0.36	0.38	67	127	175	
哈6	原样	0.226	0.112	284	8.2	0 22	0.033	15	88	107	13.0
	重矿物	1.62	0.11	591	25.4	0.10	0.22	37	138	166	
哈7	原样	0.156	0.084	168	5.47	0.30	0.026	16	93	78	35.0
	重矿物	0.87	0.05	422	15.4	0.10	0.23	30	147	166	
哈8	原样	3.48	0.365	2400	75.5	0.19	0.162	11	89	118	51.0
	重矿物	6.61	0.30	4640	105	0.20	0.19	53	137	238	

从表6-9结果可见，与原样相比，对应的重矿物样中Au的含量有不同程度的富集，其它的元素多数也有相似规律。

（三）金矿（化）异常的相关元素组合特征

由于金在矿石中通常主要呈自然金状态存在，特别是当其嵌布粒度较粗时，样品加工

很难均匀，这就使得分析取样的代表性常常不好。因此，采取了对原样和重矿物样分别作相关矩阵的方法来研究元素间的规律性。

哈图金矿多元素分析数据的相关矩阵列于表6-10（其它6个矿点从略）。

把与Au的相关系数(γ)≥0.5的元素按γ值大小排序，可得相关元素组合。七个金

表6-10 哈图金矿多元素分析结果相关矩阵

原 样

	Au	Ag	As	Sb	Bi	Hg	Pb	Zn	Cu
1Au	1.00000								
2Ag	0.22238	1.00000							
3As	0.92079	0.49424	1.00000						
4Sb	0.99799	0.26444	0.94082	1.00000					
5Bi	-0.63053	0.07950	-0.39306	-0.60359	1.00000				
6Hg	0.88799	0.55478	0.95137	0.90192	-0.49033	1.00000			
7Pb	-0.41771	-0.05499	-0.22130	-0.40067	0.88091	-0.37763	1.00000		
8Zn	-0.04571	-0.15895	-0.08317	-0.01219	0.46483	-0.20210	0.51966	1.00000	
9Cu	0.21521	-0.23754	0.18277	0.23229	0.23905	-0.03813	-0.15902	0.70492	1

重 矿 物

	Au	Ag	As	Sb	Bi	Hg	Pb	Zn	Cu
1Au	1.00000								
2Ag	0.89431	1.00000							
3As	0.79394	0.71885	1.00000						
4Sb	0.98379	0.87396	0.88650	1.00000					
5Bi	0.12580	-0.08262	0.19739	-0.14435	1.00000				
6Hg	0.57332	0.70774	0.13343	0.46180	0.09206	1.00000			
7Pb	-0.28872	-0.00962	-0.32499	0.35214	-0.03778	0.22902	1.00000		
8Zn	0.34481	0.12462	0.44081	0.42371	-0.14828	0.25486	-0.93757	1.00000	
9Cu	0.53363	0.43901	0.71960	0.63204	0.10300	-0.18009	-0.67875	0.80109	1

表6-11 七个金矿床（点）相关元素组合表

矿床（点）名称	样品类别	相关元素组合
哈图金矿	原 样	Au-Sb-As-Hg
	重矿物	Au-Sb-Ag-As-Hg-Cu
柳树沟	原 样	Au-Ag
	重矿物	Au-Ag
干排沟	原 样	Au-Sb-Cu-Pb-Ag
	重矿物	Au-Cu-Sb
葫芦沟	原 样	Au-Ag-Sb-Cu
	重矿物	Au-Ag-Sb-Cu
老铁厂	原 样	Au-Ag-Bi-As
	重矿物	Au-Ag-Bi
李家沟	原 样	Au-Ag-As-Bi-Sb
	重矿物	Au-Ag-Bi-As-Hg
水口山	原 样	Au-As-Ag-Pb
	重矿物	Au-Bi-Ag

矿床（点）的相关元素组合列于表6-11（γ值<0.5的元素不参加排序）。

从表6-11结果可见，全部7个已知金矿床（点）的原样和重矿物样两者有相似甚至一致的相关元素组合。重矿物样中金元素不同程度的富集，并保持与原样有相似的相关元素组合，是金在异常中呈集中状态存在的特征标志，因为它表明了金呈自然金状态和赋存在一些载体矿物（如黄铁矿、毒砂、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等）中呈连生体或包裹体状态存在。

（四）石英包裹金含量与异常定性的关系

八个金矿床（点）和六个非金矿石英样的石英包裹金测定结果列于表6-12。

表6-12　石英包裹Au含量分析结果（10^{-9}）

编号	哈图	柳树沟	王排沟	葫芦沟	老铁厂	李家沟	金窝子	水口山	非金矿石英
1	22.0	0.7	0.6	3.0	4.1	22	3	9.7	0.2
2	1.1	15.0	0.6	2.1	82	142	1	32	0.1
3	19.0	0.7	0.3	1.3	68	52	4	20	0.1
4	1.0	5.0	10.0	3.4	68	180	8	1.4	0.3
5	1.7	1.0	0.3	9.3	78	60	9	1.4	0.3
6	13.0	3.6	0.3	3.2		65	2		0.1
7	35.0	24.0	1.6	6.2		33	3		
8	51.0	0.7	2.5	1.1		38	1		
9		1.0	2.0	4.0					
10			2.0	7.2					
11			91.0	1.8					
平均值	18.0	5.7	10.1	3.9	59	74	3.9	15.4	0.2

注：非金矿石英采样地点为：宁夏（2个），陕西省的凤太、洛南、眉县、潼关各一个。

从表6-12结果可见，8个金矿床（点）的石英包裹金含量，绝大多数≥1×10^{-9}，按各点分别平均计，均≥3×10^{-9}，而采自非金矿石英，其包裹金含量最高为0.3×10^{-9}，平均为0.17×10^{-9}。

四、金地球化学异常评价实例

（一）新疆B县AR-25异常的评价

AR-25异常的元素组合为Mo-W-Au-Ag-As-Sb，面积约64km^2。异常区出露岩性主要为一套酸性火山岩及其凝灰岩（如石英斑岩、石英正长岩、流纹岩、石英安山岩、火山集块岩、凝灰岩、角砾岩等）。异常中心部位可见强烈的火山喷出迹象，岩石破碎，褶皱断裂发育，蚀变强烈，主要为硅化、黄铁矿化和绢云母化，其中黄铁矿多发育在斜穿破碎带的黄铁矿石英脉中，多已成为褐铁矿染，但仍保留着黄铁矿晶形淋失孔。

按金地球化学异常的评价程序进行工作，通过异常中心垂直破碎带设计一条剖面，采岩石样品7件，原样和重矿物样的多元素分析及石英包裹金的结果列于表6-13，经相关矩阵计算，原样和重矿物样的相关元素组合如下：

原样：　Au-Ag-As-Sb-Bi

重矿物样：Au-As-Ag-Sb-Hg-Pb

与原样相比，重矿物样中Au略有富集，说明Au呈集中状态存在。样品含石英高达

40%—60%，石英包裹 Au 的含量为 6×10^{-9}—248×10^{-9}，平均 77×10^{-9}，说明形成金矿床的地质条件有利，初步定为典型的金矿（化）异常。金富集倍数不高，很可能是金嵌布粒度很细，并赋存在风化了的褐铁矿中所致。

表 6-13　AR25 金异常评价分析数据（10^{-6}）

样品号	成分类	Au	Ag	As	Sb	Bi	Hg	Pb	Zn	Cu	石英包裹金（10^{-9}）
1	原　样	0.034	2.2	302	25	0.89	0.41	21	65	54	16
	重矿物	0.061	0.26	354	40	2.05	0.75	37	174	130	
2	原　样	0.23	15	326	78	1.07	0.72	28	47	61	78
	重矿物	0.19	15	400	105	1.92	1.00	72	168	315	
3	原　样	0.050	2.9	205	18	0.89	0.58	23	55	390	17
	重矿物	0.080	12	229	26	1.65	0.16	59	79	1690	
4	原　样	0.26	9.4	733	49	1.63	1.22	124	187	87	60
	重矿物	0.41	54	1330	86	5.36	2.20	90	564	290	
5	原　样	0.54	38	865	150	4.36	28.1	41	73	466	44
	重矿物	0.63	39	948	84	1.99	1.44	181	212	316	
6	原　样	0.99	54	2400	182	1.58	4.34	41	28	191	249
	重矿物	0.90	39	2890	149	1.98	1.98	41	46	626	

取原样的 6 号样作金的赋存状态分析，结果以 10^{-6}表示分别为：裸露和半裸露自然 Au 为 0.970，褐铁矿包裹 Au 为 0.092，黄铁矿包裹金占 0.010，脉石包裹 Au 占 0.062。相态分析的数据表明，金主要呈自然金状态和赋存在黄铁矿被氧化后形成的褐铁矿中。

从以上资料可以判断，这个金矿可能属受破碎带控制的含黄铁矿石英脉型 Au-Ag 矿，褐铁矿化石英脉是找金矿体的找矿标志。

野外追踪评价。根据室内研究结果，决定以该异常的 6 号采样点位置为中心，划出约 $4km^2$ 区域作为重点，以褐铁矿化石英脉为找矿标志，组织追踪评价。

第一阶段找矿是在约 $4km^2$ 范围内采集各种岩石标本，从中选了 16 块进行加工后分析 Au 和 Ag，16 个样品中只有 1 个样品含 Au 达 0.2×10^{-6}，含 Ag30×10^{-6}，该样品标本正是含褐铁矿化石英脉。

第二阶段找矿仍在此 $4km^2$ 范围内专找褐铁矿化石英脉。采回 12 块标本，加工后分析结果表明，有多块标本含 Au 为 0.1×10^{-6}—0.2×10^{-6}，有一块含 Au 1.2×10^{-6}，含 Ag 70×10^{-6}，该标本采自一块较大的转石。

第三阶段找矿重点放在找那块含 Au 大转石的来源上，结果在该转石的北坡约 20m 处，发现了褐铁矿化石英脉露头，采样（编号 64），分析结果为含 Au 1.8×10^{-6}—2.0×10^{-6}，含 Ag 40×10^{-6}。

接着，通过 64 号采样点，垂直于破碎带，呈正南北方向设计并爆破了一条探槽，槽长 35m，北端连坡顶露头，南端已出现流纹岩，发现了 3 条黄铁矿褐铁矿化石英脉，其中 Py-1 脉宽 30cm，栋块分析结果含 Au 3.0×10^{-6}，含 Ag 70×10^{-6}；Py-2 脉宽 20cm，两次栋块分析结果，一块含 Au 5.0×10^{-6}，含 Ag 64×10^{-6}，一块含 Au 4.8×10^{-6}，含 Ag

114×10^{-6}。

评价意见：AR-25 地球化学综合异常是一个受破碎带控制的含黄铁矿石英脉型 Au-Ag 找矿靶区。

（二）新疆 Z 县三个异常（H2、H3、H5）的评价

对 3 个金多金属综合异常的评价，每个异常沿一条剖面采集岩石样品，H2、H3 各采样 6 个，H5 采样 8 个，按金地球化学异常的评价程序进行工作，3 个异常的原样和重矿物样的多元素分析结果列于表 6-14 和表 6-15。

表 6-14　H2、H3、H5 异常原样多元素分析结果（10^{-6}）

样品编号	Au	Ag	As	Sb	Bi	Hg	Pb	Zn	Cu
H2-1	0.008	0.47	63.7	1.78	0.40	0.014	99	40	22
2	0.009	0.58	56.0	2.02	0.45	0.042	59	71	34
3	0.283	30.00	389	9.54	124	0.028	1731	117	46
4	0.057	2.40	372	9.19	1.34	0.014	106	79	50
5	0.066	2.10	348	12.26	1.65	0.014	225	102	62
6	0.069	1.60	107	8.83	4.28	0.007	225	44	72
H3-1	0.002	5.60	103	66.19	22.60	0.021	93	495	4502
2	0.003	0.68	7.3	1.71	1.56	0.028	66	264	476
3	0.052	0.68	484	13.03	0.39	0.014	139	376	60
4	0.004	0.30	29.8	2.22	0.40	0.007	59	87	54
5	0.001	0.47	19.6	2.00	0.18	0.049	66	54	12
6	0.010	0.74	54.5	9.40	0.79	0.035	73	359	68
H5-1	0.006	0.74	110	8.37	0.50	0.028	73	98	122
2	0.003	0.50	131	14.41	1.01	0.042	53	56	58
3	0.008	0.42	12.5	23.10	0.26	0.069	198	167	92
4	0.003	0.53	18.4	12.26	0.21	0.035	73	121	142
5	0.021	0.50	29.4	4.60	0.11	0.035	86	104	56
6	0.003	0.40	13.2	4.67	0.06	0.056	53	112	88
7	0.001	0.30	10.0	1.24	0.08	0.041	46	31	16
8	0.003	0.53	149.0	24.80	0.70	0.035	79	224	122

三个异常的评价依据和结论如下：

1. H2 异常

原样和重矿物样的相关元素组合为：

原　样：　Au-Pb-Ag-Bi-Zn-As

重砂物样：Au-Ag-Pb-Bi-Zn-Sb-As-Hg-Cu

与原样相比，重矿物样中 Au 有较好富集，这说明该异常的 Au 以集中状态存在。

石英包裹 Au 的含量为 0.8×10^{-9}—5.2×10^{-9}，平均为 2.1×10^{-9}，说明有较好的成矿地质条件。

表 6-15　H2、H3、H5 异常重矿物多元素分析结果（10^{-6}）

样品编号	Au	Ag	As	Sb	Bi	Hg	Pb	Zn	Cu	石英包裹金（10^{-9}）
H2-1	0.051	0.89	213	5.30	1.79	0.014	357	56	68	1.2
2	0.087	0.47	186	5.20	1.62	0.014	278	83	104	2.1
3	1.39	92	2000	41.9	224	0.083	5037	653	154	1.6
4	0.122	1.90	432	10.5	3.70	0.021	225	112	68	1.8
5	0.294	2.00	900	19.0	2.53	0.028	363	229	156	5.2
6	0.200	8.10	276	15.1	16.8	0.062	628	71	74	0.8
H3-1	0.003	6.10	107	76.7	20.0	0.014	126	609	10586	1.8
2	0.033	0.74	17.3	1.80	2.00	0.042	119	374	578	–
3	0.189	0.58	467	12.5	0.40	0.069	139	104	66	1.9
4	0.004	0.30	30.0	2.10	0.36	0.028	99	686	48	1.1
5	0.002	0.30	27.2	2.70	0.18	0.007	112	87	16	14.2
6	0.054	0.58	80.0	23.0	0.41	0.056	145	582	110	–
H5-1	0.018	0.63	67.0	8.00	0.59	0.028	231	129	200	1.1
2	0.004	0.40	314	30.6	1.48	0.014	86	85	60	2.0
3	0.013	0.63	18.6	20.9	0.26	0.021	456	180	66	5.9
4	0.030	0.57	26.0	15.7	0.29	0.014	159	125	174	1.3
5	0.013	0.30	31.4	5.30	0.14	0.028	86	135	52	1.1
6	0.028	0.40	15.5	3.38	0.06	0.021	73	144	76	0.7
7	0.002	0.40	19.8	1.28	0.06	0.035	119	25	14	0.4
8	0.004	0.30	148	22.2	0.55	0.021	93	135	118	2.5

评价意见：H2 异常为金矿（化）异常。经地质工作检查，发现该异常的砂岩中，有的含 Au 已达 20×10^{-6}。

2．H3 异常

原样与重矿物样的相关元素组合为：

原　样：　Au-As-Sb

重矿物样：Au-As-Hg-Pb

与原样相比，重矿物样中 Au 略有富集。

石英包裹 Au 的含量为 1.1×10^{-9}—1.9×10^{-9}，平均 1.6×10^{-9}。

评价意见：该异常为 Pb-Zn-Cu-Au-As-Ag 综合异常，此前，按 Pb-Zn-Cu 异常评价，已确定为 Cu-Pb-Zn 多金属矿异常，经地质工作检查，已发现铜矿化 6 处，根据上述资料，评价为该异常中 Au 以铜多金属矿的伴生组分存在。

3．H5 异常

该异常为 Au-Ag-Pb-Cu-Zn 综合异常，但各元素的异常强度均较低。按金地球化学异常评价程序进行工作，原样无相关元素组合，重矿物样也只有 Au-Cu 相关（$\gamma=0.5348$），说明该异常 Au 以分散状态存在，没有找矿意义，属非矿异常。

（三）陕西紫阳县 GY-482 号异常的评价

该金多金属综合异常位置处于碳质板岩中。按金地球化学异常评价程序进行工作，沿一条剖面采集岩石样品共10个，原样和重矿物样的多元素分析结果和个别样品碳分析结果列于表6-16，经数据处理，原样和重矿物样的相关元素组合为：

原　样：　Au-Hg-Sb

重矿物样：Au-Sb-Ag-Hg-Zn-Pb

表6-16　GY-482异常原样、重矿物多元素分析结果（10^{-6}）

顺序	样号		Au (10^{-9})	Ag	Pb	Zn	Cu	As	Sb	Bi	Hg	C (%)
1	原样	GY482-1	9.9	3.20	69	1445	298	39	31	1.3	2.04	5.90
2		2	1.9	0.95	29	592	127	48	39	0.3	0.58	
3		3	3.5	1.9	49	3408	409	42	12	0.3	0.18	
4		4	16	0.95	37	2155	316	1717	4444	0.3	1.16	
5		5	1.0	0.33	26	361	78	19	7.1	0.2	0.60	
6		6	2.1	0.1	20	143	149	5.0	2.4	0.2	0.14	
7		7	3.3	0.1	20	84	231	6.3	3.7	0.2	0.15	
8		8	0.2	0.1	51	75	55	14	2.9	0.2	0.16	
9		9	6.4	1.7	49	492	2776	19	5.3	0.4	1.22	
10		10	2.6	0.1	23	1420	331	12	4.1	0.2	0.37	
11	重矿物	GY482-1	7.3	3.53	48	1280	188	27	36	0.28	1.29	3.57
12		2	1.0	1.8	16	261	66	27	94	0.16	0.18	
13		3	2.6	2.0	48	2562	262	40	13	0.16	0.13	
14		4	13	2.47	39	1910	218	9.8	43	0.12	0.76	
15		5	0.3	0.18	19	146	31	4.5	1.8	0.12	0.43	
16		6	0.9	0.1	10	60	37	1.9	0.6	0.12	0.07	
17		7	0.6	0.1	10	63	70	3.0	1.1	0.12	0.04	
18		8	0.7	0.1	42	49	21	6.9	1.1	0.16	0.10	
19		9	0.5	0.1	13	101	826	3.6	1.3	0.16	0.28	
20		10	1.5	0.1	10	270	108	6.0	1.0	0.16	0.19	

对比原样和重矿物样中金及多元素含量的变化，重矿物样中碳的含量降低了，金的含量也降低了。曾任意取该地区一含碳较高的样品浮选富集碳，即把原样分成碳精矿和碳尾矿两部分，连同该样的重矿物样作C含量与多元素的消长关系考察，结果列于表6-17。

表17　GY-482异常碳与金多元素含量消长关系（10^{-6}）

顺序	样别	C (%)	Au (10^{-9})	Ag	Pb	Zn	Cu	As	Sb	Bi	Hg
1	原样	10.6	50	4.57	15	40	64	36	20	0.40	0.16
2	重矿物	-	17	4.65	19	53	70	29	22	0.19	0.15
3	碳精矿	15.7	97	12.3	33	111	93	57	29	0.63	0.23
4	碳尾矿	9.9	35	3.60	16	31	53	29	18	0.36	0.01

从表6-17结果可见，Au以及全部的多元素分析结果均与C含量呈正消长关系，说明有相当部分的Au和多元素呈被碳吸附状态存在。

评价意见：GY-482异常属典型的碳质板（页）岩中金、多金属地球化学异常，Au和找Au的一些指示元素均主要呈被碳质吸附状态存在，异常检查中未发现明显的热液活动迹象，成岩时初步富集的Au难以富集成矿，该异常无找矿意义。

五、小结

试验研究了评价热液金矿床形成的金地球化学异常的一种新方法、新技术。其原理主要基于金的地球化学性质和金矿床产出的地质条件特征，通过查明金是呈集中状态还是分散状态存在，来判断金异常是矿致异常还是非矿异常；通过查明石英包裹金的含量特征来判断金异常产出的地质条件。通过七个已知的不同类型的金矿床（点）的研究，拟定了金地球化学异常的评价程序和金异常定性的若干特征标志。应用这套程序已进行了15个金地球化学异常的评价实践，表明方法具有准确率高、效率高、成本低等特点。

第六节　结　　语

异常源的快速追踪或异常查证方法是异常评价的难点，至今在国内外尚未取得突破性的进展，究其原因，可从两方面来分析。一是由于金矿成矿类型，成矿条件和金矿化地段景观特征的复杂性，导致了金异常形成机制的多样性和复杂性，不可能期望采用一两种异常评价、查证方法解决所有类型金异常的评价、查证问题。异常评价方法的真正突破，有待于对不同地质成矿背景，不同矿化类型、不同景观特征条件下异常形成机制资料的长期积累和相应新技术、新方法的不断涌现。二是异常评价方法的可行性，直接受找矿实践的检验，国内外众多学者相继提出的各种异常评价方法，在取得大量找矿实践的检验以前，难以得到公认。

本章根据不同景观条件、不同找矿阶段及热液型金矿床成矿的地球化学特征，提出了一些在一定条件下可供选择的金异常源快速追踪方法和矿与非矿的原生异常评价方法，其主要成果是：

1. 对于以残坡积层覆盖为主的中低山区，采用1:25000沟系土壤测量的方法，是对水系沉积物地球化学异常进行异常源追踪的有效方法。通过西秦岭地区的试验，该方法与1:10000正规测网土壤地球化学测量相比，节约经费90%，异常评价速度提高8倍。该方法在研究区共发现金矿脉27条，提交F级10t储量基地3处，20t储量基地1处。

2. 异常源分析法是一种具有实用价值的，简便的溯源追踪异常源的方法。该法使异常追踪目标更为集中，提高找矿效率，并可望取得良好的找矿效果。应用该法在冀东地区发现D+E级储量达6.2t金矿1处。

3. 在民间采金活动活跃，地表人为污染严重的山西五台山地区进行区域地球化学异常追踪时，当研究区水点分布密度较大，且有一定数量上升泉的条件下，采用以大面积水地球化学测量滤除人为污染并快速圈定找矿靶区；对比研究水地球化学和水系沉积物地球化学测量成果，优选异常追踪地段，打破常规点线式网格测量方法，以地质—地球化学岩石综合剖面和“面型”岩石测量方法技术相结合的方法是一种有效的、快速追踪异常源、圈定详查靶区的方法。追踪检查结果表明，山西五台地区的平As26Au地球化学异常地段

具有寻找斑岩型金、铜、钼矿化，接触交代型铜、铅、锌、金矿化和热液型金、银、铅多金属矿化的远景。特别是面型岩石测量圈定的Ⅰ号异常（黄草-正沟一带）找金可望获得突破。

4．根据黄土为外来运积物的特点，通过多种方法试验表明，壤中气汞量测量、CO_2和热释CO_2测量、电导率测量以及地电化学部分离子提取法等方法是追索黄土覆盖区掩埋金矿的有效方法。应用这些方法，在山西五台辛庄南部黄土覆盖区和甘肃礼县李坝矿区黄土覆盖地段均发现了新的金矿化带的线索。

5．系统研究了金矿勘查中X射线荧光测量的基体效应、几何效应的消除方法，综合应用“特散比法”、“补偿法”、“经验分类法”、“标准值法”消除基体效应和不平度对X射线荧光测量结果的影响。提出了用标准片将X射线荧光测量值换算成以XR为测量单位的标准值，解决了X射线荧光测量的一致性问题，不但实现了多台仪器测量的一致性，而且使不同地区，不同岩性或不同时期的X射线荧光测量具有可比性。

6．X射线荧光测量和γ能谱测量等方法是基岩裸露地区或残坡积层分布地区进行地球化学异常评价的有效方法。

对东坪金矿区W-1号高阻异常与5号土壤地球化学异常的重叠地段，使用X射线荧光测量和伽玛能谱法进行了金异常源的快速追踪，仅用了十多天时间，就根据圈定的(Pb)-X射线荧光异常展布特征成功地进行了解释与成矿预测，经工程验证，新增了数十吨的普查储量。使东坪矿区储量增加了两倍。在矿区面积性工作和水泉沟岩体长剖面工作中发现了6处有重要价值的（Pb)-X射线荧光异常或伽玛能谱（K）异常。其中“转枝莲”γ能谱异常已见工业矿体并已开采。研究指出：研究区X射线荧光异常和γ能谱(K）异常的不同分布特征，是金矿体剥蚀程度不同（或成矿标高不同）造成的异常分带现象所致，或是不同期次的碱交代的强烈程度不同所致。

7．根据金的地球化学性质和金矿床产出的地质条件特征，通过查明金在异常中是呈集中状态还是分散状态的标志判断金地球化学异常是矿致异常还是非矿异常；通过查明石英包裹金的含量特征来判断金异常产出的地质条件。通过对已知的不同类型的金矿床（点）的研究，拟定了金地球化学异常的评价程序和金异常定性的若干特征标志。应用这套评价程序结果表明，该方法技术具有准确、高效、成本低的特点。

第七章　筛选与评序区域地球化学异常寻找金矿的数据处理方法

第一节　空间数据分析的多元地质统计学方法

多元地质统计学方法，简而言之，是把多个所谓“区域化变量”的统计相关性和空间相关性结合起来，对这些变量进行联合估计的一种空间数据分析方法。我们把多元地质统计学方法用于区域化探数据处理完全顺理成章。

如同地球科学中许多其它测量数据一样，区域化探数据的最重要属性之一是它的空间属性。凡具有空间属性的数据都称为空间数据。区域化探测量数据作为空间数据，除了元素的测量值之外，还包括这些测量值的载体——采样介质的空间位置。因此，区域化探数据的数学处理，严格地说，应在特征空间和采样空间中同时进行。这才是完整的数据处理方法。从这一观点出发，纵观以往数据处理方法便会发现，空间属性被大多数方法所忽略了。除了所使用的一元地质统计学方法之外，能兼顾空间性的方法大致可归纳为以下两个方面：一是以多项式趋势面分析为代表的各种趋势面分析方法；二是以滑动平均为代表的各种基于“窗口”的作业方法。趋势面分析由于预先把某一类型函数所表达的曲面强加于区域化探数据，而越来越受到人们的非议和冷落。基于“窗口”的作业方法由于其多变性和适应性，仍沿用至今，并受到偏爱。它的最大问题之一是窗口大小的确定。在一些传统的基于窗口的作业方法中，窗口大小的确定往往是先验的，在数据处理之前就确定，因此，带有浓厚的经验色彩。但是，一元地质统计学的发展及时地为基于窗口的作业方法提供了确定窗口大小的有力工具——变差函数（Variogram）。因此，我们说，一元地质统计学不仅为区域化探测量数据直接提供了空间数据分析的新方法，而且为传统的基于窗口的作业方法注入了新鲜血液。如在本章第五节中金本位法就采用了变差函数确定窗口的大小。由于窗口大小是在数据处理过程中，通过分析数据在空间的相关结构后确定的，无疑地就排除了一些人为因素。

在基于窗口的作业方法中，所谓窗口大小，用地质统计学的术语来说，就是“空间相关尺度”或简而言之“空间尺度”。一个空间变量或区域化变量的空间相关性有时可以明显地表现在若干个不同的空间尺度范围内。正因为如此，当按不同大小的窗口进行作业时，有时会得到在不同空间尺度上都是有意义的结果。

一元地质统计学方法尽管借助变差函数可以对变量在空间的相关结构进行分析，并在此基础上确定其空间尺度，但是，所考虑的仅仅是单个变量在空间的自相关。实际上，区域化探数据的空间相关性还表现为多个元素在空间的互相关。例如，任何一种地球化学过程或其结果，往往都由特定的一组元素的共同行为所表征，而不是由单独某一种元素的独自行为所决定；在化探找矿中，我们除了研究成矿元素的行为之外，总是同时研究指示元

素和伴生元素的行为以及所有这些元素的共同行为。由此可见，我们把多元地质统计学方法用于处理区域化探数据完全顺应数据本身的特点。

多元地质统计学的理论基础是由 Matheron（1982）奠定的。主要方法包括：协克立格法（Cokriging，CK 法），因子协克立格法（Factorial Cokriging，FCK 法）和多元变差函数法（Multivariate Variogram，MVV 法）。我们选用的是 FCK 法[1-3]。它的优点是在建立模型的过程中就考虑到了影响数据的各种不同空间环境，把数据的空间相关结构进行分解，并提取包含在数据中的相应信息。

为了方便起见，我们用多元地质统计学中的术语“区域化变量”来称呼区域化探中的元素。设定义在区域 $\mathbf{R}^2$ 上的区域化变量集为：$\{Z_i(x); i=1,\cdots,m\}$，并且它们在 n 个点 $x_\alpha(x_\alpha\in\mathbf{R}^2,\alpha=1,\cdots,n)$ 上的取值构成样本 $\{Z_i(x_\alpha); i=1,\cdots,m;\alpha=1,\cdots,n\}$。不失一般性，设 $Z_i(x)$ 是弱平稳（或二阶平稳）的。

FCK 法的最重要数学模型之一是交叉-变差函数模型（cross-variogram）。变量 $Z_i(x)$ 与 $Z_j(x)$ 的交叉-变差函数模型可表示为：

$$\gamma_{ij}(h,a_0,\cdots,a_{s-1})=\sum_{u=0}^{s-1}\gamma_{ij}^u(h,a_u)=\sum_{u=0}^{s-1}b_{ij}^u g_u(h,a_u) \qquad (7.1.1)$$

式中：$\gamma_{ij}^u(h,a_u)=b_{ij}^u g_u(h,a_u)$ 为第 u 重结构的交叉-变差函数；b_{ij}^u 表示各个基本变差函数 $g_u(h,a_u)$ 对总变差的贡献率；a_u 为第 u 重结构的变程或空间尺度；s 为空间相关结构的重数。称（7.1.1）为 s 重套合结构模型（s-fold nested structure model），或用矩阵表示为：

$$\boldsymbol{\Gamma}(h,a_0,\cdots,a_{s-1})=\sum_{u=0}^{s-1}\boldsymbol{\Gamma}_u(h,a_u)=\sum_{u=0}^{s-1}\mathbf{B}_u g_u(h,a_u) \qquad (7.1.2)$$

式中：$\boldsymbol{\Gamma}(h,a_0,\cdots,a_{s-1})=(\gamma_{ij}^u(h,a_u))$；$\mathbf{B}_u=(b_{ij}^u)$ 称为第 u 重结构的协区域化矩阵。

具体到区域化探数据，我们所使用的交叉-变差函数模型是：

1. 二重套合结构模型

$$\boldsymbol{\Gamma}(h,a_0,a_1)=\mathbf{B}_0 g_0(h,a_0)+\mathbf{B}_1 g_1(h,a_1) \qquad (7.1.3)$$

式中：$g_0(h,a_0)$ 为“块金效应函数”；$g_1(h,a_1)$ 可以是除了“块金效应”函数之外的所有其它基本变差函数。模型（7.1.3）起着“多元空间滤波”作用，借助于 $\mathbf{B}_0$ 空间分量可滤掉微小结构或采样误差所引起的干扰，与 $\mathbf{B}_1$ 所对应的空间分量可解释为所需要的“信号”部分。

2. 三重套合结构模型

$$\boldsymbol{\Gamma}(h,a_0,a_1,a_2)=\mathbf{B}_0 g_0(h,a_0)+\mathbf{B}_1 g_1(h,a_1)+\mathbf{B}_2 g_2(h,a_2) \qquad (7.1.4)$$

式中：$g_0(h,a_0)$ 为“块金效应”函数；$g_1(h,a_1)$ 和 $g_2(h,a_2)$ 可以是“块金效应”函数之外的所有其它变差函数；模型中的结构变程 $a_2>a_1$。模型（7.1.4）除了具有“多元空间滤波”作用之外，还能分解出两个不同空间尺度上的分量，用于区域化探数据中“背景”和“异常”的描述可能是一个非常有效的模型。

根据模型（7.1.1），对 $Z(x)$ 作相应的正交分解，就得到线性区域化模型（Linear Coregionalization Model，LCM）：

$$Z_i(x)=\sum_u Z_i^u(x) \qquad 或 \qquad Z(x)=\sum_u Z^u(x) \qquad (7.1.5)$$

满足$E[Z^u(x)Z^v(x+h)]=0(u\neq v)$。称$Z_i^u(x)$为第$u$重结构空间分量，相应的交叉-变差函数为$\gamma_{ij}^u(h,a_u)$。对变量$Z_i^u(x)$在研究区中每一点$x$上的估计值计算如下：

$$Z_i^{u*}(x)=\sum_{i=1}^{m}\sum_{a=1}^{k}\lambda_{ai}^{u}Z_i(x_a)\qquad(i=1,\cdots,m)\qquad(7.1.6)$$

式中：$x_a(a=1,\cdots,k)$为x点附近变程在a_u范围之内的k个点；权系数λ_{ai}^u由协克立格方程组求出[4]。

我们把上面介绍的FCK法应用于新疆哈巴河1:200000图幅水系沉积物数据的处理，目的在于识别与Au成矿有关的Au化探异常。该图幅范围内为多金属成矿区，已相继发现的金属矿产有Au、Cu、Pb、Zn等，其中有3个金矿床已达到工业规模。在了解该图幅范围内金成矿地质环境和地球化学条件的基础上，选用了两组元素Au、Cu、Pb、Zn和Au、As、Ag、Hg、Sb、Bi分别作为区域化变量集来处理。这些元素都是主要的成矿元素，或Au的重要伴生元素和主要指示元素[5]。

通过对交叉-变差函数的实际拟合，我们所采用的是（7.1.3）中的二重套合模型。模型中的$g_1(h,a_1)$是结构变程a_1等于8个网格单位的球状模型：

$$g_1(h,a_1)=\begin{cases}\dfrac{3h}{2a_1}-\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{h}{a_1}\right)^3 & 0\leqslant h\leqslant a_1\\ 1 & h>a_1\end{cases}$$

在此基础上，利用公式（7.1.6）便可估计出第一重结构的各变量的空间分量，它们已经过“多元空间滤波”，滤掉了小于一个网格单位的微小结构或测量误差所引起的“块金效应”。

在4元素组合（Au、Cu、Pb、Zn）和6元素组合（Au、As、Ag、Hg、Sb、Bi）下估出的Au的FCK值在空间分布上基本一致，所圈定的Au异常区与区内的已知Au矿区和金矿点吻合得都较好，并给出了三个新的有前景的Au异常区（见图7-1，7-2）

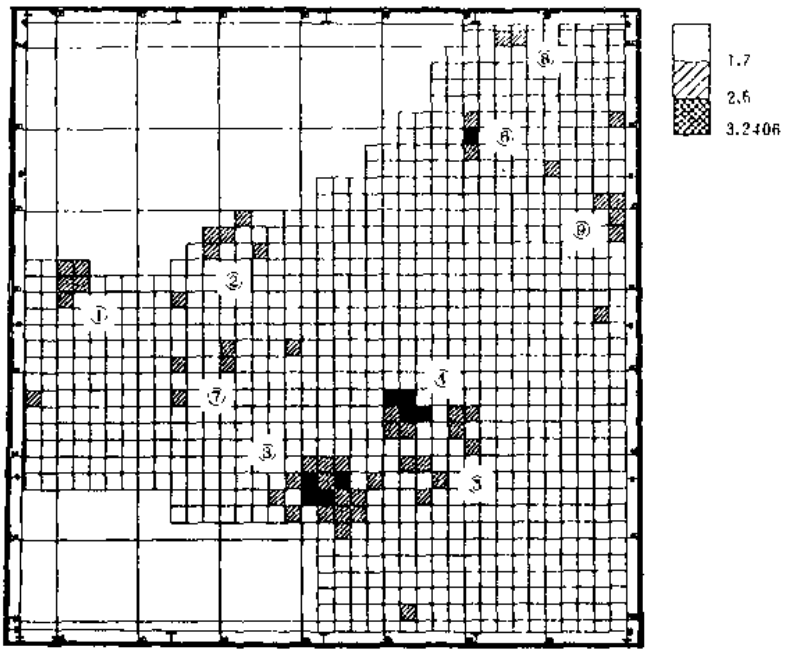

图7-1 由Au、Cu、Zn、Pb对Au作FCK估值后所得的等值线图

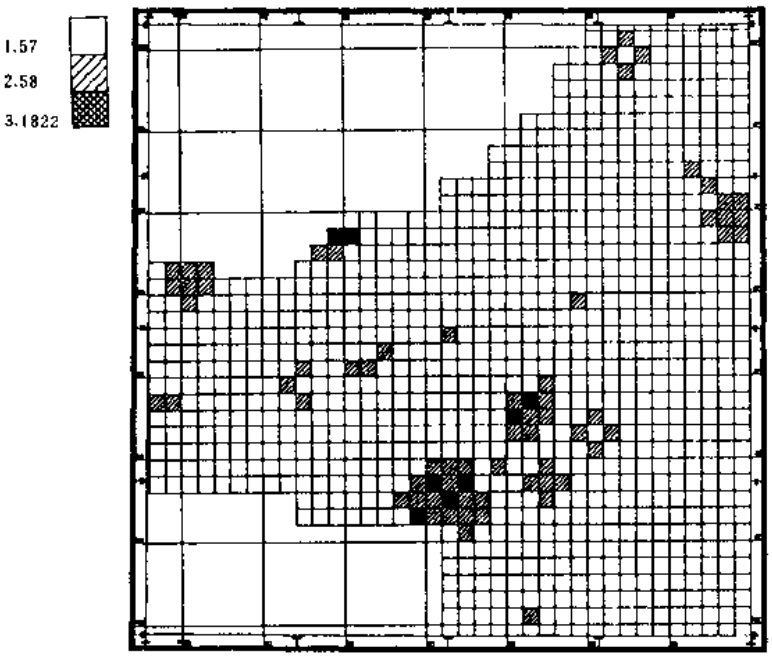

图 7-2　由 Au、As、Ag、Hg、Sb、Bi 对 Au 作 FCK 估值后所得的等值线图

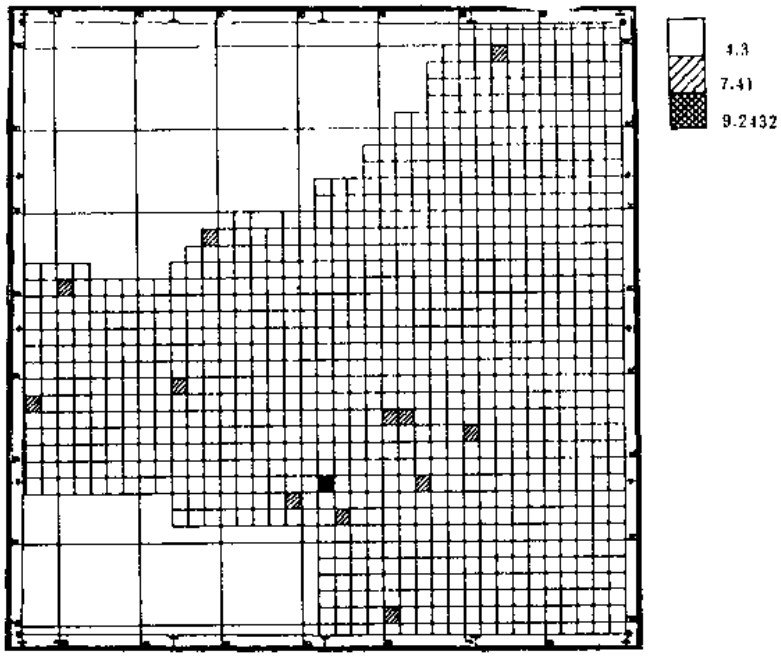

图 7 3　Au 的普通克立格法估值所得的等值线图

我们对所圈出的异常编号，现说明如下：(1)、(3) 和 (7) 号异常为已知的金矿分布区；(4)、(5) 号异常是已知金矿点的分布区；(2)、(8) 和 (9) 号异常为三个新的有前景的 Au 异常区。

我们将上述结果与 Au 的普通克立格估计值作了比较，发现后者虽然对区内已知金矿区和金矿点都有所反映，但是异常区的面积和形态与已知金矿区和金矿点不能很好吻合，且重点矿床反映不够突出（见图 7-3）。

第二节　确定 Au 异常下限的 χ^2 检验准则

如上所述，在 FCK 法中，二级套合模型（7.1.3）仅在数据中消除了“块金”效应，还不能把异常和背景分量有效地区分开来。为了更好地从二级套合结构模型下所得到的，消除了“块金”效应之后的 Au 的 FCK 估计值中分离出异常和背景分量，我们采用 χ^2 检验来确定 Au 的异常下限。并且，为了再次利用多元信息，还根据在各网格上计算而得的各元素的 FCK 估计值，计算了到背景总体的马哈拉诺比斯距离（Mahalanobis Distance），根据这些距离编制了 Au 异常图。结果表明，这样得到的异常（图 7-4 和图 7-5），比图 7-1 和图 7-2 的金异常更加突出。

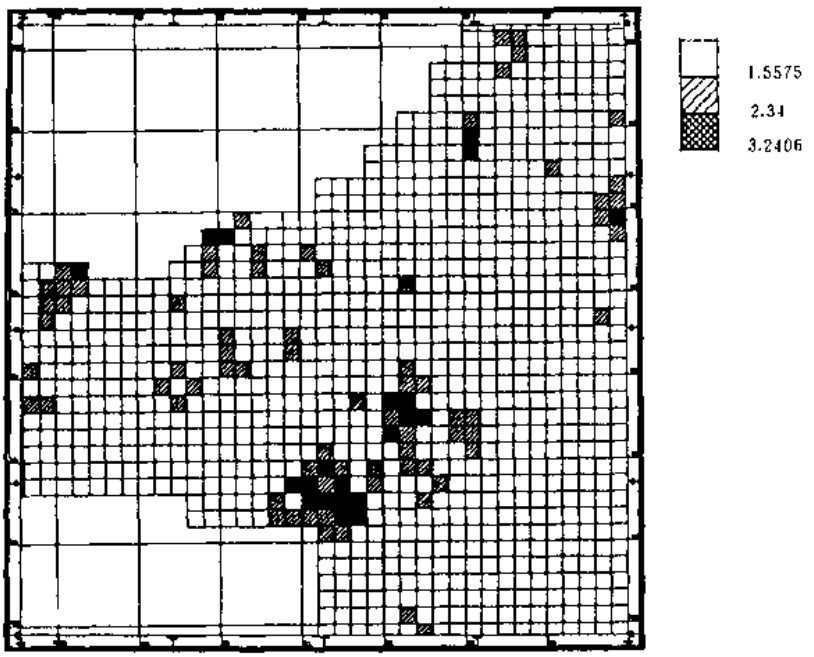

图 7-4　图 7-1 中使用的 Au 的 FCK 估值经联合利用 χ^2 检验和马哈拉诺比斯距离后编制的异常分布图（$\alpha=0.05$）

采用 χ^2 检验确定 Au 异常下限的具体步骤如下：

1．任选一异常下限VCRT(m)。

2．将 Au 的 FCK 估计值作如下变换：

$$x_i=\begin{cases}0 & \text{若对网格 } i,\ \text{Au 的 FCK 估计值}>\text{VCRT(m)}\\ 1 & \text{否则}\end{cases}$$

3．令

$$y_i=\begin{cases}0 & \text{若网格 } i \text{ 与金矿区或金矿点叠合}\\ 1 & \text{否则}\end{cases}$$

4．构造 x_i 和 y_i 的二元列联表（表 7-1）。表中的表值 n_{lk}（l、$k=0$，1）表示满足条件 $x_i=l$ 和 $y_i=k$ 的网格总数。如果 x_i 和 y_i 分别为二态变量 x 和 y 的观测值，则可根据表 7-1 对 x 和 y 的统计独立性作 χ^2 检验。

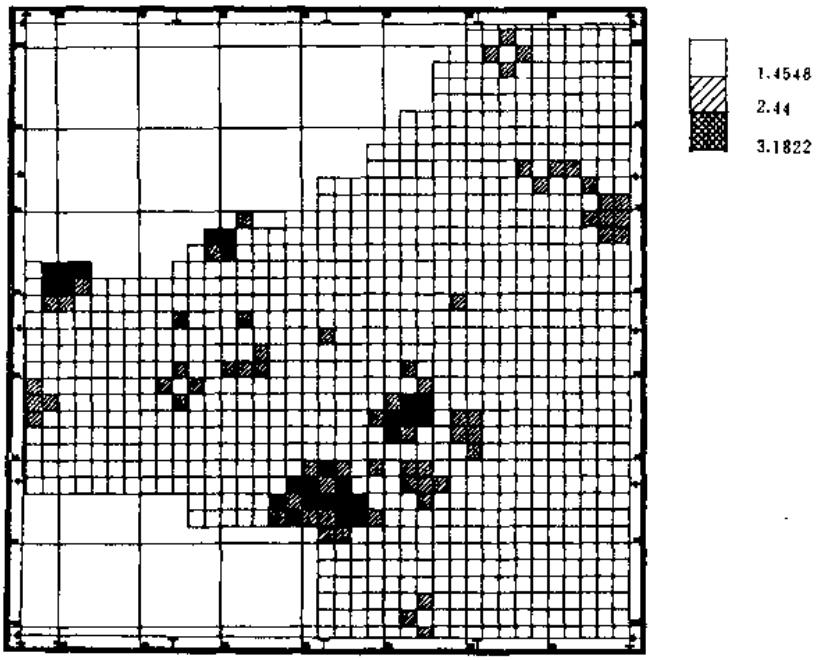

图 7-5　图 7-2 中使用的 Au 的 FCK 估值经联合利用 χ^2 检验和马哈拉诺比斯距离后编制的异常分布图（$\alpha=0.05$）

表 7-1　x_i 和 y_i 的二元联列表

x \ y	0	1	$\sum$
0	n_{00}	n_{01}	$n_{0\cdot}=n_{00}+n_{01}$
1	n_{10}	n_{11}	$n_{1\cdot}=n_{10}+n_{11}$
$\sum$	$n_{\cdot 0}=n_{00}+n_{10}$	$n_{\cdot 1}=n_{01}+n_{11}$	$n_{\cdot\cdot}=n_{00}+n_{01}+n_{10}+n_{11}$

5．令

$$\eta_m^2 = n_{\cdot\cdot}\left[\sum_{i=0}^{1}\sum_{k=0}^{1}\frac{n_{ik}^2}{n_{i\cdot}n_{\cdot k}}-1\right]=\frac{n_{\cdot\cdot}[n_{00}n_{11}-n_{01}n_{10}]^2}{n_{0\cdot}n_{1\cdot}n_{\cdot 0}n_{\cdot 1}}$$

则 η_m^2 的极限分布是自由度为（2－1）×（2－1）＝1 的 χ^2 分布。

步骤 1—5 可对 $m=1, 2, \cdots, m_0$ 重复 m_0 次，于是，对 m_0 个不同的VCRT(m)值就可以得到 m_0 个不同的 η_m^2 值。

6．确定最终的 Au 异常下限值。在给定的显著性水平之下，设自由度为 1 的 χ^2 分布的临界值为 $\chi_1^2(\alpha)$。并且，假定在所有的 m_0 个 η_m^2 值中，有

$$\eta_{m_i}^2 > \chi_1^2(\alpha) \qquad i=1,2,\cdots,i_0;\ i_0 \leqslant m_0$$

$$\eta_{\min}^2 = \min(\eta_{m_i}^2)$$

则认为，与 $\eta_{\min}^2$相对应的 VCRT 值为最终确定的 Au 异常下限。

从步骤 1—6 可知，采用 χ^2 检验确定异常下限必须具备的一个条件是：在工作区内，一定要有相当数量的已知金矿床或金矿点。因此，它主要适合于中小比例尺区域化探找矿。

在确定了最终的 Au 异常下限之后，就可以根据在各个网格上的 Au 的 FCK 估计值决

定各个网格的归属，或属于异常总体，或属于背景总体。在得到 Au 的异常总体和背景总体之后，为了再次利用多元信息，根据在各个网格上 m 个元素的 FCK 估计值，可计算其到背景总体的马哈拉诺比斯距离：

$$D^2 = (Z - \mu)^T \sum^{-1} (Z - \mu)$$

式中：$Z = (Z_1, \cdots, Z_m)^T$ 为网格上 m 个元素的 FCK 估计值所组成的向量；$\mu = (\mu_1, \cdots, \mu_m)^T$ 为背景总体的 m 个元素的 FCK 估计值的算术平均值向量；$\sum = (\sigma_{ij})_{m \times m}$ 为背景总体的 m 个元素的 FCK 估计值的方差-协方差矩阵。在我们的例子中，m 个元素或为 4 个元素（Au、Cu、Pb、Zn），或为 6 个元素（Au、As、Ag、Hg、Sb、Bi）。由于

$$\frac{(n-m)n}{(n^2-1)m} D^2$$

服从于自由度为 m 和 $n-m$ 的 F 分布，其中 n 为背景总体中的网格数。于是，在一定的显著性水平 α 下，就可对计算出的 D^2 的统计显著性作检验，若

$$D^2 > D_\alpha^2 = \frac{(n^2-1)m}{(n-m)n} F_\alpha(m, n-1)$$

则认为相应的网格为异常。其中 $F_\alpha(m, n-1)$ 为 F 分布的临界值。

在对所有的网格都计算出了马哈拉诺比斯距离，并对它们作了显著性检验之后，就可编制出相应的异常图，这就是我们在图 7-4 和图 7-5 中见到的图。

我们还作了以下的对比试验：不根据元素的 FCK 估计值，而根据元素的原始观测值，按上述同样的步骤计算并编制异常图，但结果很不理想。这说明二重套合结构模型下的 FCK 法所起的空间滤波作用具有重要的意义。

第三节　分离异常的最大熵原理

在本章第一节“空间数据分析的多元地质统计学方法”中，曾对区域化探数据处理中各种基于滑动窗口的作业方法从某一角度作过扼要的评述。在这类方法中滑动平均方法是较有代表性的方法，目的在于，计算窗口内的观测值的加权的或非加权的平均值并以此平均值作为窗口中心的区域分量的估计值。这样做的理论基础是，假定窗口内的观测值来自一个较为“均匀”的总体，权系数或与观测值出现的频率有关，或与观测值离开窗口中心点的距离有关，或同时与上述两者有关。因此，如果在窗口内的观测值中混入了个别来自别的总体的观测值，就有可能使求出来的平均值失真。这种情况的一个典型例子就是，在窗口内存在个别特高值或特低值，统称为特异值（outlier），统计检验结果，这些值的出现仅是个概率非常小的事件，实际上被认为是不可能出现的事件。这种特异值的作用如同杠杆作用，即使是一个较笨重的物体，也很容易使其重心移动较大的距离。

为了使得求出来的平均值具有代表性，在统计上不发生显著的失真，在稳健统计学中有三种常用的处理方案。第一种是识别出这些特异值，并把它们剔除掉；第二种是识别出这些特异值，并采用加权的办法，在不同程度上削弱它们的不良影响；第三种是采用与分布无关的非参数统计学方法。本节将采用上述第二种方案。第二种方案的具体做法很多，我们根据的是最大熵原理，对窗口内的各观测点作加权平均，并以此平均值作为窗口中心的区域分量[6]。相应的局部分量由窗口中心的观测值减去区域分量得到。这样，就达到

分离区域分量与局部分量的最终目的。

根据最大熵原理对窗口内的各观测点作加权平均的方法最早于1976年由前苏联的Г. С. 瓦赫罗麦耶夫和А. Ю. 达维坚科首先提出，现设窗口中心的加权平均值为：

$$A_H = A_0 + \sum_{i=1}^{n}(A_i - A_0)\cdot h_i \tag{7.3.1}$$

式中：A_i 为窗口内 n 个观测值；A_0 为这 n 个观测值之一；h_i 为差$(A_i - A_0)$的权系数。求 h_i 的函数是

$$h_i = -kq_i\log q_i \tag{7.3.2}$$

$$q_i = |A_i - A_0| / \sum_{i=1}^{n}|A_i - A_0| \tag{7.3.3}$$

$$k = 1/\log(n-1) \tag{7.3.4}$$

k 是为了把 h_i 变换成与对数底无关的相对值而引进的系数。不难验证：

$$0 \leqslant -k\sum_{i=1}^{n} q_i\log q_i \leqslant 1$$

并由(7.3.3)可以得出：

$$\sum_{i=1}^{n} q_i = 1$$

之所以选择函数(7.3.2)作为权系数，是因为当 q_i 接近于0或1时，它最小；而当$0.2 < q_i < 0.6$ 及 h_i 取最大值时，它的变化又较平稳。在这种情况下，A_0 点应这样来选择，即让那些较有代表性(或具有较高出现频率)的 A_i 值比那些不太有代表性(或具有较低出现频率)的 A_i 值有较大的权系数。在下列条件下，从 $A_1, A_2, \cdots, A_n$ 中选择 A_0，是可以达到此要求的。该条件是：

$$H(A_0) = \sum_{i=1}^{n} h_i(A_0) = \max(\text{最大}) \tag{7.3.5}$$

如果把上式与申农为了衡量具有 n 个结局的试验 A 的不确定性而提出来的熵

$$H = -\sum_{i=1}^{n} p(A_i)\log p(A_i) \tag{7.3.6}$$

相比，便会知道，$H(A_0)$ 描述的是窗口内 n 个$|A_i - A_0|$值的分布的均匀性程度。因为在(7.3.6)中，当所有事件 A_i 的概率 $p(A_i)$ 都相等时，H 达到最大，由此可推测，当 A_i $(i=1, \cdots, n)$ 中存在一个特高值，并取 A_0 等于该值时，$H(A_0)$ 将达到最大，这时，相对于 A_0 来说，A_i 的所有其它的值都将是“相近的”。

可以把上述用“熵法”求窗口中心 A_H 值的算法归纳如下。

1. 找出窗口内的所有观测值 A_i，设共计 n 个；

2. 在 A_i $(i=1, \cdots, n)$ 中选择 A_0，使其满足条件(7.3.5)；

3. 按公式(7.3.1)计算 A_H 值。请注意，在(7.3.1)中的 h_i 在选择 A_0 时就已计算过，如保存下来了，可再次利用，否则可根据(7.3.2)式重新计算。

在Г. С. 瓦赫罗麦耶夫和А. Ю. 达维坚科的文章中，曾对一个典型例子，分别用三种方法，即算术平均值法，求中位数法和这里介绍的求“熵”平均值法作过比较。在该例子中，原始曲线由三部分组成：一个异常、正态分布随机干扰和3个特高值。结果表明，算术平均值法使异常发生较大畸变，中位数法和“熵”平均值法使异常发生的畸变较

小，而且就得到的结果与异常的均方误差而言，“熵”平均值法最小，即与异常最贴近。由于中位数法在统计上具有一定的稳健性，因此，从这个例子来看，“熵”平均值法对克服特异值所带来的不良影响是有一定效果的。

我们用“熵”平均值法处理了甘南地区1:200000水系沉积物测量所获得的金含量数据。在该批数据中明显含有一些特异值，如对它们不作任何处理，用常规的滑动平均法，则在异常图中靶区面积偏大，且不甚明显。经本方法处理后，用户认为，靶区的面积显著缩小，异常的形态和结构也更趋合理，比较真实地反映了该地区的异常特征。

第四节　识别异常形态的贝叶斯准则

评价化探异常，区分有意义的和无意义的异常，或有远景的和无远景的异常具有重要的意义。根据工作区内已知有意义的异常形态来识别或判断此工作区内是否还存在具有类似形态的其它异常，是解决上述问题的途径之一。在这里我们将利用概率论中的贝叶斯判别准则来做这种识别。

从找矿角度，金化探数据或主要由有意义的金异常形态所致，或主要由除有意义的金异常之外其它原因所致。记某种有意义的金异常形态为事件A，其它为事件$\bar{A}$；事件A和$\bar{A}$出现的（先验）概率分别为P（A）和P（$\bar{A}$）；在所测数据为D的条件下，事件A和$\bar{A}$出现的条件概率（或后验概率）分别为P（A/D）和P（$\bar{A}$/D）；在事件A或$\bar{A}$出现的条件下，所测数据为D的条件概率为P（D/A）或P（D/$\bar{A}$）。那么，根据贝叶斯公式，有

$$P\ (A/D) = P\ (A)\ P\ (D/A) / [P\ (A)\ P\ (D/A) + P\ (\bar{A})\ P\ (D/\bar{A})] \tag{7.4.1}$$

$$P\ (\bar{A}/D) = 1 - P\ (A/D) \tag{7.4.2}$$

并且，根据贝叶斯判别准则，可以认为，若

$$P(A/D) \geqslant P(\bar{A}/D) \tag{7.4.3}$$

则所测数据D主要由有意义的金化探异常形态所致；若

$$P(A/D) < P(\bar{A}/D) \tag{7.4.4}$$

则所测数据D主要由其它原因所致。

为了进行实际应用，需要解决如下两个问题。

1. 如何在数学上描述一个有意义的异常形态A。在此地，我们以一维情况为例。在一维情况下，异常沿测线方向展布，因此，其宽度可以用测点的数目来度量。设有意义的异常形态A的宽度为n_0，则A可描述如下：

$$A = (a_1, a_2, \cdots, a_{n_0}) \tag{7.4.5}$$

其中a_i（$i=1$，…，n_0）为在第i个测点所测数据。

2. 如何确定P（A）和P（$\bar{A}$）的大小。由于事先不知道P（A）和P（A）的大小，也难以对它们进行统计估计，因此，此地假设

$$P(A) = P(\bar{A}) = 0.5 \tag{7.4.6}$$

把假设（7.4.6）代入公式（7.4.1），可得：

$$P(A/D) = P(D/A)/[P(D/A) + P(D/\bar{A})] \tag{7.4.7}$$

或

$$P(\mathrm{A}/D) = \Lambda/(\Lambda + 1) \tag{7.4.8}$$

其中

$$\Lambda = P(\mathrm{A}/D)/P(\bar{\mathrm{A}}/D) = P(D/\mathrm{A})/P(D/\bar{\mathrm{A}}) \tag{7.4.9}$$

根据有意义的异常形态描述（7.4.5），我们可以设计一个识别有意义的异常形态的过程。首先，沿着测线建立一个宽度为 n_0 个测点的滑动窗口，并获取滑动窗口内的所测数据。窗口中心的初始位置

$$j_b = \begin{cases} n_0/2 & n_0 \text{ 为偶数} \\ (n_0+1)/2 & n_0 \text{ 为奇数} \end{cases} \tag{7.4.10}$$

窗口沿测线滑动，每滑动一次，窗口中心从当前所在测点位置移到下一个测点位置。窗口中心的最后位置

$$j_b = \begin{cases} n_0/2 & n_0 \text{ 为偶数} \\ n-(n_0+1)/2 & n_0 \text{ 为奇数} \end{cases} \tag{7.4.11}$$

式中：n 为测线上的测点数。当窗口中心处于第 j 个测点位置时（$j_b \leqslant j \leqslant j_e$），窗口内所测数据为

$$D_j = (d_{j+1-n_0/2},\ d_{j+2-n_0/2},\ \cdots,\ d_{j+n_0/2}) \tag{7.4.12}$$

其次，判别 D_j 的形态是否属于在（7.4.5）中的有意义异常形态 A 这种类型。为此，我们还要具体假设有关的一些概率分布如下。

1．如果 D_j 主要由有意义的异常形态 A 所致，那么，D_j 除了包括 A 之外，通常还包括随机干扰

$$R_j = (r_{j+1-n_0/2}, r_{j+2-n_0/2}, \cdots, r_{j+n_0/2}) \tag{7.4.13}$$

假设：$r_{j+k-n_0/2}$（$k=1, 2, \cdots, n_0$）服从正态分布 $N(0, \delta_{\mathrm{A}})$，且互相独立。

2．如果 D_j 主要由其它原因 $\bar{\mathrm{A}}$ 所致，则假设：$d_{j+k-n_0/2}$（$k=1, 2, \cdots, n_0$）服从正态分布 $N(\mu, \delta_{\bar{\mathrm{A}}})$，且互相独立。

在上述假设下，可得：

$$P(D_j/\mathrm{A}) = \frac{1}{(2\pi)^{n_0/2}\cdot\sigma_{\mathrm{A}}^{n_0}}\exp\left[-\frac{1}{2\sigma_{\mathrm{A}}^2}\sum_{k=1}^{n_0} r_{j+k-n_0/2}^2\right] \tag{7.4.14}$$

$$P(D_j/\bar{\mathrm{A}}) = \frac{1}{(2\pi)^{n_0/2}\cdot\sigma_{\bar{\mathrm{A}}}^{n_0}}\exp\left[-\frac{1}{2\sigma_{\bar{\mathrm{A}}}^2}\sum_{k=1}^{n_0} d_{j+k-n_0/2}^2\right] \tag{7.4.15}$$

把上述两式代入公式(7.4.1)或(7.4.2)，便可计算出 $P(\mathrm{A}/D_j)$ 的值，然后，利用判别式(7.4.3)和(7.4.4)就可判断 D_j 是否属于有意义的异常形态A。上述情况还可以推广到二维的情形。

在识别有意义的异常时，如同一般的判别分析那样，存在两类错误，第一类错误是，本来属于有意义的异常A，而把它判断为相斥的事件$\bar{\mathrm{A}}$；第二类是，本来属于$\bar{\mathrm{A}}$，把它判断为A。这两类错误有各自发生的概率，一般来说，我们希望总的错误概率为最小。在此仅给出最后的结论：总的错误概率主要与

$$\rho = \sum_{i=1}^{n_0} a_i^2/\sigma_{\mathrm{A}}^2$$

有关，尤其是在 $\sigma_A^2 = \sigma_{\bar{A}}^2$ 的情况下更是如此，ρ 愈大，识别有意义的异常形态的可靠性就愈高。

我们把识别有意义的异常形态法具体应用于四川省若尔盖县拉日玛金矿田次生晕地化找金资料。该研究区的放射性和非放射性气体地球化学勘查金矿的经验表明，有意义的综合异常均由上部岩石中 Au 及其它与 Au 共生的 U、Hg 原生晕，残坡积物中的 Au、U、Hg 次生异常及土壤覆盖层中壤中气（Rn-Hg）异常三部分组成，其形态为一个上宽下窄的“V”形，取名 V 形异常。这种对该研究区有意义的异常形态，为我们应用异常形态识别法提供了可靠的基础。

我们以已知有矿而幅值不同的三类 V 形异常形态作为先验信息，对从该研究区收集到的次生晕金含量数据进行形态识别，并以 $P\ (A/D_j)$ 值表示识别结果。凡该值在 0.5 以上的异常区，属有意义的异常区。这样得到的有意义的异常区比原始资料图上的“异常区”要小得多。这一事实说明，在选择好有意义的异常形态条件下，用本方法对未知地区资料进行形态识别，以作出比较合理的结论是有可能的。

第五节　Au 含量的换算——“金本位”法

Au 含量的换算指的是，将与 Au 相关的元素的含量换算成 Au 的含量。设 A 和 B 为两个在统计上相关的变量，并有关系

$$A = \beta_0 + \beta_1 B + e \tag{7.5.1}$$

式中 e 为正态变量，其平均值为零，方差为 σ。如果 A 和 B 的平均值都为零，则 $\beta_0 = 0$。如果把 e 理解为不能换算成 A 的随机部分，则有

$$A = \beta_1 B \tag{7.5.2}$$

上式可理解为将变量 B 换算成变量 A 的公式。

同样地，如果变量 A 和一组变量 B_1，B_2，…，B_n 具有统计相关关系，就可以得到将该组变量换算成变量 A 的公式：

$$A = \sum_{i=1}^{n} \beta_i B_i \tag{7.5.3}$$

式中的 $\beta_i\ (i = 1, 2, \cdots, n)$ 可以利用最小二乘法进行估计。

我们把上述换算方法称为“金本位”法。采用金本位法可以减少制图工作量，加快评价异常的速度，提高评价异常的效果。例如，在我们的工作区内，有一个已知的伴生金矿，但未出现 Au 异常，而“金本位”异常却既明显又规则。

金本位法主要是求“换算系数”，即诸 β_i。实际换算方法有三种。

1. 固定“换算系数”法。该方法是将一个工作区的“换算系数”固定，即在一个工作区内，统一使用相同的换算系数。在用最小二乘法求换算系数时，为了保证统计上的稳健性，不能让一些非异常样品参加到计算中来，否则将使求出的换算系数严重歪曲。

这种方法忽略了不同地点 Au 与其它元素在统计相关性上存在的差异，在效果方面有所损失，但计算量较少，所以在处理速度方面受益较大。

2. 多组“换算系数”法。该方法是根据工作区异常的不同，每一个异常求一组“换算系数”进行换算，这样就不只是一组换算系数，而是多组换算系数。

该方法照顾到不同地点 Au 与其它元素在统计相关性上存在的差异，在效果方面比固定“换算系数”法有所改善，但该方法计算机自动完成有些困难，往往需要人工干预，工作量较大。

3．变“换算系数”法。该方法按滑动窗口进行操作。在每一窗口位置上仅利用窗口内的样品求“换算系数”，并只对窗口中心点进行换算。这样一点一组“换算系数”，一点一点地进行换算。

这种方法集中了前两种方法的优点，既考虑了在不同地点 Au 与其它元素在统计相关性上存在的差异（对这种差异考虑的更加细微），而且还能由计算机很容易地自动完成。只是在计算量上增加了好多，需要多花费一些机时。除此之外，该方法对面积小的异常不太有利。因为在这种异常所在的窗口内，必然要混入非异常样品，致使复相关系数减小，也即换算的 Au 含量减少，压抑了这些异常。

我们考虑到在一个矿带或一个成矿区，各 Au 的相关元素及其相关性大同小异和人力物力的限制，选择了第一种方法——固定“换算系数”法。如果称原来的 Au 含量和用金本位法换算而得 Au 含量两者的代数和为一综合指标，由该指标所得的异常图为综合异常图，那么从综合异常图与原来的 Au 异常图的对比图可以看出：

1．原来的 Au 异常大部分得到了反映，只有个别的弱异常变小和极少数的点异常消失；

2．使有些不连续的 Au 异常变得连续了，或面积大了，或强度强了。如 90 号异常；

3．发现了一些新的异常。比如 50 号异常以及较多的点异常；

4．有些综合异常与原 Au 异常在位置上不太一致，这除了“金本位”效应之外，还可能是由于不同人的勾图方法所致。

金本位法结果可结合下面的 Au 异常的多参数排序进一步作出评价。

第六节　Au 异常的多参数排序

所谓“Au 异常的多参数排序”指的是，将与 Au 相关的找 Au 指示元素或伴生元素换算成 Au 含量并和原来的金含量相加而成一个综合指标，并对由这一指标得到的异常用 7 个参数进行全面刻划，最后将 7 个参数从连续型变量转换为离散型数字，并利用它们的代数和对异常进行排序。

上面提到的综合异常的 7 个参数是：背景、“强度”、“面积”、方差、Au 含量、头尾晕元素比和因子得分比。下面分别对它们作些说明。

1．异常“强度”和“面积”。“强度”是相对于背景而言的，具有衬度的含义，可以用来表示矿化作用的集中程度。异常“强度”可分为低、中、高异常三级。

“面积”是以异常包含的点数近似表示的。实际的计算是这样的：以每一个异常点为中心，搜索 $1km^2$ 面积内的异常点，异常点的数目就是该中心点的近似异常“面积”。异常“面积”分为三级，异常点数小于等于 3 者为第 3 级，大于 3 而小于等于 6 者为第 2 级，大于 6 者为第 1 级。

2．背景。背景的高低对成矿的影响说法不一。有的认为高背景对成矿有利；有的认为正是高背景说明矿化分散，是条件不好的表现。但不管怎么说，在高背景的基础上，只

要有比较弱的矿化就有可能成矿，是一种成矿环境有利的表现。

3．方差。每一点的方差指，在以每一点为中心的滑动窗口内的样品的“方差”（如稳健统计学中的尺度估计值）。它是随机变量离散性的度量，在这里是矿化集中与分散程度的度量。

4．Au 含量。在每一点上的 Au 含量都是由原来的 Au 含量和用“金本位”法换算的 Au 含量两部分组成。如果 Au 与其它元素的复相关系数愈大，那么换算成的金含量与原来的金含量之比也就愈大（在最小二乘法估计意义上）。一般可以认为，复相关系数在 0.4 以下时，换算成的金含量占的比例就很小，很可能是单一的 Au 异常。因此，可以以此为界限，将 Au 含量分成 2 级。

5．头晕元素/尾晕元素。一般认为，这个参数反映矿的剥失深度。我们对这个参数的计算并不是直接用头晕元素的连乘除以尾晕元素的连乘计算的。其计算过程是：

（1）对工作区内的异常点进行分类；

（2）对不同类型的异常点进行主分量分析或因子分析；

（3）用头尾晕元素在第一主分量或第一因子（以下将主分量和因子统称为因子）上的载荷的平方作为头尾晕元素的系数，再根据一般的计算方法进行计算。

这样做的意义在于：

（1）可以根据不同类型的异常采用不同的头尾晕元素；

（2）头尾晕元素乘以上述系数之后更能真实地反应剥失深度。这是因为，一般可以认为这样得到的第一因子是成矿作用或主成矿作用的表现，其它主分量（因子）则不然。

6．因子得分比。“因子得分比”是指每一异常点各因子的得分比例。目的在于比较异常点上各因子的得分，以便弄清楚异常点主要反映的是由哪一个因子所代表的地质作用过程。在把因子得分比离散化时，实际做法是，如果主成矿因子的得分＜0，则赋值 1；如果主成矿因子的得分比较起来最大，且＞0，则赋值 5；其它情况赋值 3。

表 7-2 列出了把上述 7 个参数从连续型变量转换为离散型数字的一般准则。其中有关异常面积，Au 含量和因子得分比这三个栏目的等级划分细则见上述相应参数的说明，其它四个参数的等级划分在它们各自的说明中未作详细规定，可根据实际情况而定。

表 7-2　7 个参数从连续型变量转换成离散型数字的一般准则

参数 \ 等级划分 / 离散化数字	高（1 级）	中（2 级）	低（3 级）
强　　度	3	2	1
面　　积	3	2	1
背　　景	3	2	1
方　　差	3	2	1
Au 含量	3	2	
头晕元素/尾晕元素	4	3	2
因子得分比	5	3	1

根据本节开头我们所说的“Au异常的多参数排序”原则，排序的依据是7个参数离散化后所得数字的代数和，其具体做法是：

1．求每一异常点7个参数的代数和 X，称 X 为评价指标；

2．根据图面上异常点的自然聚集情况，圈定异常，求异常中各异常点评价指标 X_i 的平均值，把这种平均值作为异常的序号。这样一来，序号愈靠后异常就愈有意义，这不符合人们的习惯。为此，我们令

$$\text{序号} = 200 - \sum_{i=1}^{n} X_i / n$$

式中：X_i 为所评价异常中异常点 i 的评价指标，n 为该异常中异常点的数目。这样一来，序号愈靠前异常就愈有意义。

在介绍金本位法时，最后我们曾提到，将通过上述异常的多参数排序对金本位法的结果作进一步的评价。为此，首先要对异常的多参数排序的合理性作些必要的说明。我们认为，排序的合理性表现为以下两个方面：

1．排序与已知情况的符合程度。譬如已知矿异常和无矿异常的序号是否符合实际情况。如果已知的大、中型矿异常的序号很靠前，无矿异常的序号很靠后，则说明排序是合理的，否则不然。

2．野外追踪情况。野外追踪主要是追踪那些序号比较靠前和靠后的异常。

在综合异常与金异常对比图（未附图）中的20号异常是已知的茶坊金矿所致，其最高品位达 130×10^{-6}，储量也相当可观。而我们的排序结果，序号最靠前。87.5号、90号、107号异常已知是盖层中的Au矿化所致，目前地质上认为是分散矿化，不具成矿远景。已知Au矿中没有一个是在盖层中发现的。而我们的排序结果，它们的序号是很靠后的，与地质上的认识一致。

图7-6中52（A）号异常是我们新发现的异常，有连续5个异常点，排序结果其序号中间偏前　野外追踪时，在岩体与老地层接触带以及老地层中发现4条破碎带。通过岩石

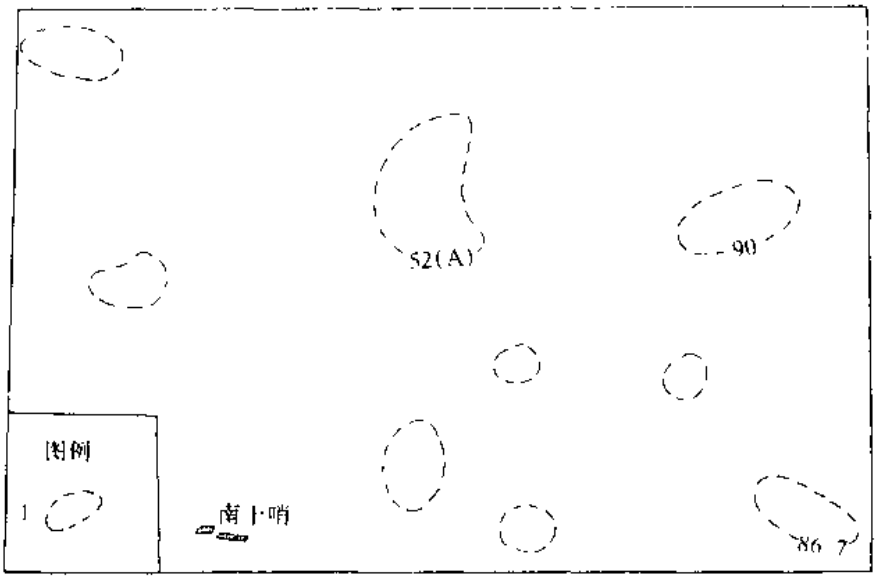

图7-6　山西柏家庄幅异常排序图（部分）

注：虚线为综合异常，数字为序号

地球化学测量样品的详细分析，我们认为，是一个有希望的金银矿远景区。

关于野外追踪的其它可用于多参数排序合理性证据的发现在此就不一一例举。

总之，无论从排序结果与已知情况的对比来看，或是从排序结果的野外检查来看，都说明，我们的排序是合理的。

第七节　方法评述

1．区域化探数据的空间属性得到了重视。正如在本章第一部分中曾指出的那样，区域化探数据属于空间数据。因此，完整的区域化探数据应既包括特征数据（如元素的测量值）又包括坐标数据。同样地，对这类数据的处理也应同时包括对特征数据和坐标数据的处理才是完整的处理。

在使用多元地质统计学方法处理区域化探数据之前，曾使用各种多元统计分析的方法处理区域化探数据，并把处理的结果按其坐标进行填图，编制出多种多样的解释性图件，而且，这种做法广泛地沿用至今。由于多元统计方法只对区域化探中的特征数据进行处理，因此，按照我们上面的观点，并不是完整的处理方法，其结果也自然有其局限性。

过去曾有人把多元统计分析中的典型相关分析（canonical correlation analysis）和趋势面分析结合起来使用，称为典型趋势面分析。作这种分析的目的在于，提取一个或几个与坐标的关系最为密切的典型变量——原始变量的线性组合，并通过多项式趋势面研究它（们）的区域性变化趋势。这可以说是唯一同时对特征数据和坐标数据作处理的一种多元统计方法。在该种方法中，空间的尺度是由多项式的次数人为的控制的。一般地认为，低次多项式趋势面比高次多项式趋势面反映的是较“粗略”的变化，或者说更区域性的变化。但是，由于典型变量的意义往往不够明确，而且多项式趋势面这种数学模型本身的一些问题，典型趋势面分析实际上已名存实亡。

我们之所以使用多元地质统计学方法，尤其是其中的 FCK 方法来处理区域化探数据，是因为，FCK 方法的理论基础扎实，更主要的是其数学模型与区域化探数据的空间分布模式较为贴近。

在区域化探中，“背景”与“异常”是两个密切相关的极其重要概念。关于它们的定义，许多学者有他们各自的理解，不尽相同。但是有一点是肯定的，它们都是一个相对的概念，或者说，它们都离不开空间尺度，离开了一定的空间尺度去谈“背景”与“异常”就毫无意义。正如我们在本章第六节中最后例子中所见到的那样，在那里一个异常都包括一个以上的异常点。“异常”与“异常点”实际上是就两个不同的空间尺度而定义的。

科学院院士谢学锦在研究了全球不同空间尺度上的一些主要区域化探异常之后指出，局部异常，区域异常，地球化学省和全球异常之间在空间分布模式上具有某种套合关系，具有这种套合关系的异常最具有研究价值。

FCK 方法中的交叉-变差函数模型，即 S 重套合结构模型（7.1.1）恰好与上述区域地球化学模式相贴近。根据这种套合模型对原始变量作分解，分解所得的分量也自然能反映相应空间尺度上的变化特点。在我们的例子中，尽管只用了最简单的二重套合结构，它主要起“多元空间滤波”作用，但是，基于这种滤波与基于原始数据或一元克立格方法的各种结果相比，前者显示出更好的效果。因此，我们认为，在现有基础上，对 FCK 方法

作进一步深入的应用研究是一件极有意义的事情。

从我们的应用中可以看出，参与 FCK 方法计算的元素组合对联合估算的元素的 FCK 值是有一定影响的。因此，在使用 FCK 方法之前，认真研究预测对象的地球化学特征及其区域地球化学特征，合理选择参与计算的元素组合是非常必要的。这将影响方法的使用效果。

另外，FCK 方法的第一步是要建立交叉-变差函数模型，所以，变差函数的类型及其参数，套合结构的重数等也都会直接影响到最终的估计结果，这些都要引起足够重视。原则上，变差函数类型及其参数和套合结构的重数都取决于数据本身的结构，但又受使用者洞察力和经验的影响。即使存在多重套合结构，使用者也未必都能恰如其分地捕捉到它们，这是使用上的复杂与困难所在。对初用者，困难就更大，我们本身就遇到了这种困难。解决这一问题的最原始办法就是反复试验和对比，从中选择“最”合理的。

2．区域化探数据处理方法的统计稳健性引起更广泛地注意。在统计学中，稳健性（robustness）的概念早就有人提出来，如著名统计学家 C．R．Rao 在 1973 年就曾正式提出过这个概念[45]。但是，这个问题直到 80 年代稳健统计学开始作为统计学的一个分支确立之后才引起各界的重视。统计上的不稳健性表现在两个方面：

（1）概率分布问题。许多统计方法都对它所涉及的随机变量的概率分布作了一定的假设。当所涉及的随机变量在概率分布上偏离其假设时，就会影响它们的使用效果。

（2）特异值问题。即使是在随机变量的概率分布满足统计方法中对其所作的假设时，由于取样误差或测量误差，也有可能使个别的不是属于我们所研究总体的观测值（特异值）混入我们的样本中，使样本的经验分布与理论分布在统计上出现显著差异。这也会导致方法使用上的失败。

为了克服一些统计方法的不稳健性，许多学者从不同的角度作了努力。概括起来主要有以下几个方面：

（1）用具有类似功能的非参数统计方法替代依赖于分布的统计方法。由于非参数统计方法对分布不作假设，所以更确切地说，应称之为与分布无关的统计方法；

（2）对原始随机变量作适当的代数变换，使其尽量接近统计方法中对其所作的假设；

（3）尽量减少特异值的影响，或剔除这些特异值，或对数据采取某种加权的办法，以减小这些特异值的影响。

在本章第三节介绍的分离异常的最大熵原理就是基于最大熵的加权滑动平均法。这种方法在求平均曲面或背景面时，采用加权的办法减小特异值的影响。

在以往的区域化探数据处理中，为了得到平均曲面曾在滑动平均中用窗口内的中位数替代算术平均值。对正态分布而言，中位数较之算术平均值是数学期望的更稳健的估计量。但是，中位数的缺点是，没有把窗口内 n 个数据的全部信息都利用起来，它仅利用了 n 个数据的大小排列次序信息和中间那个数据的数值。

我们使用的熵滑动平均方法则利用了窗口内 n 个数据的全部信息，并对特异值的作用有抑制效果。但是，作为一个统计量，即使是在总体为正态分布的情况下，熵平均值的概率分布至今仍不知道，因此，不可能对它的统计性质作更多的定量讨论。对它我们唯一可做的是，通过为了多种多样特殊的目的而伪造的数据或实际的例子去检验其统计稳健性。

熵滑动平均法早在1976年就提出来了，但是，在我们之前，在国内似乎还没有见到过它的应用。尽管在我们的应用实例中取得了效果并得到生产部门的认同，但是，这些都只能启发我们去进一步尝试，对它的进一步的结论，如在总体服从正态分布的情况下，它是否比中位数方法更稳健，仍有待更多的实践和理论上的深入研究。

除了熵滑动平均方法之外，为了寻求统计上的稳健性，我们还采取许多其它措施。这些措施包括对原始数据作变换，以便使其更接近于所要求的概率分布；剔除特异值；采用除熵平均值以外的其它稳健位置估计量和尺度估计量；按地质条件分区，把复杂的工作区分成一些地质条件相对单一的子区，等等。

3. 更加重视多元信息的利用。化探工作者早在表示原生分散晕多元素测量结果时，就采用了累加晕和累乘晕这样的综合指标来增强原生晕的有效规模和衬度。类似的思想也被用来评价区域化探异常。在本章第六节介绍的Au异常多参数排序中，我们就把刻划异常特征的7个参数的得分相加，并用所得的代数和作为异常排序的依据。在本章第五节介绍的金本位法中，我们把与Au相关的元素都换算成Au的含量，并与原来的Au的含量相加，用它们的代数和编制Au综合异常图。从效果上来看，用7个参数的代数和要比仅用其中的两个参数的要好。当然，这并不是说参数愈多愈好，只是说，多一些相关的参数对增强“信号”与“噪声”比可能是有好处的。把由金本位法得到的Au综合异常图与原来的单Au异常图相比，前者的效果也比后者好。这只能归因于在Au综合异常图中，除原来的Au信息之外，还部分地包含Au的指示元素和伴生元素的一些附加信息。

在本章第一节中介绍了多元地质统计学中的FCK方法。我们虽然仅使用了它的最简单数学模型-两重套合结构模型，该模型仅起多元滤波作用，滤掉“块金”效应或微小结构引起的“误差”。但是，可以看出，基于FCK估计值的各种处理结果比基于原始数据或一元克立格估计值的同类结果更易于解释，也更与实际符合，尤其是与一元克立格估计值相比，更显示了多元FCK估计值的优点。

在异常的分类评价中，我们还使用了诸如因子分析、对应分析和聚类分析等传统的多元统计方法。这些方法有选择地用于特定场合时也都取得了较满意的结果。

其实，多元信息的重要性是不言而喻的。化探工作者早就把元素分为成矿元素，指示元素和伴生元素。在研究成矿元素的同时，总是还要研究相应的指示元素和伴生元素。关键在于如何综合运用这些信息。对多元信息的处理，化探工作者和统计工作者都不约而同地走到了一起。那就是对多元信息进行压缩，或者说降维。后一种说法比前一种说法更科学，也更严格。如上面提到的Au异常的多参数排序法和金本位法，都采用一种非常直观的方法把多个参数或变量变为一个综合性的参数或变量。而在所使用的多元统计分析中，则采用了较为复杂的统计原则。例如，在因子分析中，逐个提取主因子的原则是它们应能最大限度地解释变量之间的相关或剩余相关；在判别分析中，逐个提取的典型变量应能最大限度地解释组内离差与组间离差之比。因此，降维的做法可以说是利用多元信息的唯一做法。随着维数的降低，就会愈来愈有利于人们的直观分析与判断，愈来愈方便于人们去驾驶数据。

降维的再一种说法就是投影。当从高维空间向低维空间投影的时候，是要损失一些信息的。一个圆球的2维正投影是圆，一个圆饼的2维正投影也是圆。根据投影就很难说清楚那个是圆球，那个是圆饼。在本章第二节介绍确定异常下限的χ^2检验时提到的马氏距

离，也是一个综合性变量，即使样品到背景总体的马氏距离相同，样品还是可以千差万别的，为了了解更具体的情况，就要细看各元素在样品中的含量。因此，当我们利用任何一个综合性变量时，都应当充分注意这一点。譬如说，对到背景总体的马氏距离较大，经 χ^2 检验被认为是异常样品的时候，应对这些样品逐个细致研究，看看到底是哪些元素对马氏距离的贡献较大，这对了解异常样品的地球化学性质会有帮助。

4．有关识别异常形态的贝叶斯准则中一个值得商榷的问题。在本章第四节中介绍的识别异常形态的贝叶斯准则实际上是贝叶斯判别分析用于异常形态识别时的直接推广。在这里，实质上有两个总体，一个是有意义的异常形态所组成的总体，另一个应是其它形态组成的总体。我们的目的在于鉴别哪些形态可归入有意义的异常形态，哪些形态应排除于有意义的异常形态之外。为此，我们对两个总体的概率分布都作了假设。对第一个总体的概率分布实际上是就它的随机误差部分所做的；对第二个总体的概率分布则是对整个形态所做的。对第二个总体假设它服从正态分布 N（μ，σ_A）（就我们的特殊抽样方式而言）。这是有问题的。因为除有意义的异常形态之外，其它形态也是千变万化的，绝非正态分布所能归纳。所以我们的问题事实上要比在本章第四节中所假设的要复杂的多。为此，我们必须寻求其它的解决办法。

第八节　结　　语

本章所取得的主要成果可以归纳如下。

1．多元地质统计学方法在处理区域化探数据方面的应用与实践证明，基于因子协克立格估计值的一些结果与基于原始数据或一元克立格估计值的一些结果相比，前者得到的区域化探异常分布更为合理，轮廓更加清晰。在某 1∶200000 图幅范围内，三个主要金矿区都有明显的地球化学异常显示，并且还圈出了另外三个颇有前景的金的地球化学异常。在此基础上，进一步把因子协克立格法与确定异常下限的 χ^2 准则以及马哈拉诺比斯距离结合起来使用，圈定地球化学异常的效果得到了进一步的改善。

2．“熵”滑动平均法为处理区域化探数据提供了一种在统计上较为稳健的滑动平均方法。用熵滑动平均法处理甘南地区水系沉积物数据以缩小找金靶区的应用实例表明，该方法的效果是好的，它有效地压抑了原始数据中离群点（特异值）的干扰，使得“异常区”比常规的方法有显著缩小，异常的形态和结构也更趋合理。

3．异常形态识别方法在应用上虽然存在较大的局限性，但在研究区内存在对金矿有意义的异常形态时，该方法对缩小“异常区”还是有较明显效果的。我们在对四川省某地金矿田次生晕地球化学数据处理中，以已知有矿而幅值不同的 3 类“V”形异常形态为先验信息，应用该方法对金数据作了处理，所编制的概率等值线图上，属于有意义的异常形态范围显然比原始资料图上的“异常区”要小。

4．提出了把与 Au 相关的其它元素的含量换算成 Au 含量的方法——“金本位”法。对山西境内两幅 1∶50000 的区域化探数据处理的结果表明，利用原来的 Au 含量与换算所得的 Au 含量两者的代数和这一综合指标编制的 Au 的综合异常图与原来的 Au 异常图相比，（1）金本位法基本上不存在漏掉异常的情况；（2）存在个别弱小异常变小和少数点异常消失的现象，由于对区域化探而言，形成弱小异常的因素很多，其成矿率很小，因此，

我们认为影响不大；（3）发现了原来 Au 异常图上没有的异常，其中一些异常经野外检查，已证实属有希望的远景区。

5．提出了金异常的多参数综合排序法。在该方法中用 7 个参数来全面描述由金本位法得到的各个异常，并利用数字化后的 7 个参数的代数和对异常进行排序。对山西境内两幅异常排序的结果来看，可以得出以下结论：

（1）序号靠前的异常找金的成功率要比序号靠后的异常要好；

（2）弱金异常，或新增加的异常，只要序号较靠前，也应优先考虑；

（3）规模较大的金异常，其序号不一定靠前。只要序号较靠后，也应稍后考虑。

金本位法和多参数综合排序法已被首钢地质勘查院所建立的“北京地区金（铁）矿产资源信息系统”所采纳。已处理和正在处理北京地区约 4000km^2 1∶50000 的水系沉积物测量数据，共 15000 个点，已提交可供检查的异常 10 个。对用多参数排序法在山西柏家庄幅新发现的 52（A）号异常进行了野外查证，发现是个有希望的金银矿远景区。

第八章　综合化探方法的主要技术进展与应用效果

综合化探方法研究在金矿地球化学勘查方法、技术方面取得了不少新进展和新认识，并取得了可喜的找矿实效和地质效果。主要表现为四个方面：一、通过表生介质中金的存在形式等方面的研究，加深了对金在表生作用中的地球化学性状、特征的新认识，并在金矿勘查工作中得到应用；二、研制和完善了一系列寻找隐伏金矿的非常规地球化学勘查方法；三、根据不同景观条件，试验和完善了多种快速追踪异常源的方法；四、试验和研究了金矿化探的一些新的数据处理方法。现分别综述如下。

第一节　金在表生作用中的地球化学性状、特征及其在找矿中的应用

一、表生介质中金的存在形式特征

金的表生作用地球化学的一个基础问题是金的存在形式问题。

1．为顺利进行金的存在形式研究，研制和完善了疏松物中金的存在形式循序提取分析方案。还新制定了分析 Au^{3+}、Au^{+}、Au^{0} 的偏提取方法。

2．通过对地下水、地表水、土壤和水系沉积物等表生介质所进行的痕量金的测定和偏提取方法研究，可以认为表生介质中的金以多种形式存在。归纳为五种主要的存在形式，即水溶性的金，被表生介质表面吸附的金，与有机质结合难溶的金，游离自然金和分散在原生矿物、包裹在次生矿物中的微粒金。

3．不同地区、不同类型金矿床发育区的疏松物中，普遍地存在有水溶性金。

4．一般情况下，含金石英脉型金矿化地段的疏松物中，金主要以游离自然金的形式存在，为疏松物样品中粒金效应的存在提供了依据。微细浸染型金矿化地段的疏松物中，除游离自然金外，有机态或吸附态的金也占有相当比例。

5．在金矿化地段的疏松物中，金的各种存在形式含量的相对比例与金矿体之间存在一定的空间分布规律，对找矿有一定的指导意义。

二、水溶性金的找矿方法及效果

表生介质中水溶性金的普遍存在是一个重要的事实，这不仅为水地球化学方法和生物地球化学方法找金提供了实验依据，并且为含金表生介质中偏提取方法的应用提供了依据。在研制成功野外现场使用的泡塑动态吸附水中金的预富集方法、技术的基础上，内蒙古老羊壕地区在以往水系沉积物和土壤测量未发现异常的地段发现了 AHr_{3} 号 Au、Pb、Zn 等元素的水地球化学异常，经初步查证，见有褐铁矿化石英脉，推测该异常可能与隐伏金矿有关。赣中地区用水地球化学方法预测了金的找矿远景区 5 片，其中 3 片经详查或工程揭露均发现了金矿化或工业矿体。表生介质中水溶性金偏提取技术在有效地发现，评

价异常，特别是发现，评价疏松物覆盖区的金异常，寻找隐伏金矿从方面是一种经济，简便，很有发展前景的方法技术。

三、水溶性金存在的理论意义

通过山东招掖地区水电化学测量实测结果和土壤水浸出液的电提取测量均发现正负电极上都有金离子富集。水电化学正、负电极显示的异常在空间分布上有明显的差异。负极金异常相对接近矿化露头；土壤水浸出液电提取的负极异常相对较清晰，与土壤金地球化学异常有较好的对应关系。这些均是国内第一次发现，它具有潜在的实用意义。这些试验结果表明，水溶性的金，除阳离子形式存在外，还可以络阴离子的形式存在以及带电胶体的形式存在。

深入研究各种条件下地表水、地下水和土壤水浸出液中金的多种存在形式的相对比例，对于完善水地球化学测量的预富集方法，完善水溶性金的偏提取技术，正确运用上述方法进行异常评价及阐明金在表生条件下的溶解、迁移机制，具有重要的实际意义和理论意义。

金矿石浸泡溶解实验表明，纯水（蒸馏水）对金矿石存在可以检出的溶解量。由此可说明天然水是表生条件下金溶解、迁移的主要介质。

四、金矿区土壤浸出液成分研究

在东北寨金矿区的土壤浸出液中，检出了 10 种阴离子，12 种阳离子和 7 种氨基酸，首次为我国提供了一个金矿区土壤的水浸出液的成分资料。

第二节　寻找隐伏金矿的非常规地球化学勘查方法的研究

一、包裹体地球化学方法

通过对二十多个金矿床包裹体地球化学研究，确定了一系列包裹体地球化学找矿指标：

1．含金石英脉包裹体中 CO_2、CH_4 的含量，CO_2 相对光密度平均值（$\bar{D}_{CO_2}$）和 CO_2/H_2O 等参数指标明显高于不含金石英脉。

2．金矿床的地球化学分带性在包裹体地球化学参数上得到明显反映：从矿体头部至下部，F^-、Cl^-、CO_2、CH_4 的含量有逐渐降低的趋势，而 Ca^{2+} 含量则有逐渐升高的趋势；热晕的中心一般是矿体的赋存部位、矿体前缘和中上部的蒸发晕的强度高于中下部。

3．根据金矿成矿多期、多阶段叠加的特点，总结出了金矿床包裹体地球化学叠加晕的理想模型。

4．应用叠加晕模型和其它包裹体地球化学找矿标志进行了找矿预测，提出了三个找矿靶区，其中有一处已被深部工程证实，找到了矿体。

二、气体地球化学方法

1．首次研制成功壤中气 Rn-CO_2 两用采样器，拟定了合理的工作方法，实现了壤中气 Rn-CO_2 联测，提高了工作效率。由于在同一孔中先测 Rn 后测 CO_2，有利于测得底层土壤的 CO_2 浓度，有利于提高异常强度。

2．研制了壤中气 CO_2 瞬时测量方法。将实验室使用的 GXH-305 红外 CO_2 检测仪在配置必要的辅助设备后，移植到野外现场测定壤中气 CO_2 的浓度。该方法与 CO_2 检气管

测量方法相比，增强了对水蒸气的抗干扰能力。

3. 地气测量的初步试验结果表明，壤中气 Au 异常出现在控矿构造近地表蚀变带和隐伏矿体头部的投影位置。预示今后为运积物覆盖区寻找隐伏金矿提供了一个以金找金的气体地球化学指标。

4. 应用气体地球化学方法在瑶沟和香炉碗子矿区进行了成矿预测，经工程验证见到了工业金矿体。其反映深度一般在 10 米至数十米或更深。

三、痕量相态分析技术评价金异常

根据金的地球化学性质和金矿床产出的地质条件特征，试验研究成功一种评价金异常的新方法。该方法通过原样同重矿物样的相关元素组合及含量的对比，查明金是呈集中状态还是分散状态存在来判断金地球化学异常是矿致异常还是非矿异常，通过石英包裹金的含量特征来判断金异常产出的地质条件。通过对已知不同类型金矿床（点）的研究表明，该方法技术具有准确、高效、成本低等特点。

第三节　不同景观条件下快速追踪异常源方法的进展

一、核方法在金矿勘查中的成功应用

（1）系统研究了金矿勘查中 X 射线荧光测量基体效应、几何效应的消除方法，提出了用标准片将 X 射线荧光测量值换算成以 XR 为测量单位的标准值，解决了 X 射线荧光测量的一致性问题，不但实现了多台仪器测量的一致性，而且使不同地区，不同岩性或不同时期的 X 射线荧光测量具有可比性。

（2）对东坪金矿区 W-1 号高阻异常与 5 号土壤地球化学金异常的重叠地段，使用 X 射线荧光测量和 γ 能谱法进行了金异常源的快速追踪，仅用了十多天时间，就根据圈定的（Pb）-X 射线荧光异常展布特征进行解释与成矿预测，经工程验证，新增了数十吨的普查储量。使矿区金的储量增加了两倍。在矿区面积性工作和水泉沟岩体长剖面工作中发现了 6 处有重要价值的（Pb）-X 射线荧光异常或 γ 能谱（K）异常。其中“转枝莲”γ 能谱异常已见工业矿体并已开采。“西坪”（Pb）-X 射线荧光异常和 γ 能谱（K）异常与 9 号土壤地球化学金异常重叠部分经工程验证，已见相当规模的工业矿体。“转枝莲”钾化煌斑岩-蚀变（钾化）岩型的矿床特征为 γ 能谱法找金矿开拓了新路。

二、异常源分析法是一种具有实用价值的、简便的溯源追踪异常源的方法。该法使异常追踪目标更为集中，提高找矿效率。应用该法在冀东地区发现 D + E 级储量达 6.2t 的金矿 1 处。

三、对于以残坡积层覆盖为主的中低山区，采用 1:25000 沟系土壤地球化学测量的方法，是对水系沉积物地球化学异常进行异常源追踪的有效方法。通过西秦岭地区的试验，该方法与 1:10000 正规测网土壤地球化学测量相比，节约经费 90%，异常评价速度提高 8 倍。该方法在研究区共发现金矿脉 27 条，提交 F 级 10t 储量普查基地 3 处，20t 储量普查基地 1 处。

四、在民间采金活动活跃，地表人为污染严重的山西五台山地区进行区域化探异常追踪时，当研究区水点分布密度较大，且有一定数量上升泉的条件下，采用大面积开展水地球化学测量滤除人为污染，快速圈定找矿靶区。在优选异常追踪评价地段，采用打破常规

的点线式网格测量方法，以地质-地球化学岩石综合剖面和“面型”岩石地球化学测量相结合的方法是一种有效快速追踪异常源、圈定详查靶区的方法。追踪检查结果表明，山西五台山地区的平 $As_{26}Au$ 异常地段具有寻找斑岩型金、铜、钼矿化，接触交代型铜、铅、锌、金矿化和热液型金、银、铅多金属矿化的远景。特别是面型岩石地球化学测量圈定的Ⅰ号异常（黄草-正沟一带）找金可望获得突破。

第四节　金矿化探数据处理方法的新进展

一、在我国首次运用因子协克立格方法（FCK 法）处理评价新疆哈巴河幅 1∶200000 水系沉积物地球化学数据，圈出了 8 个有意义的金异常区。其中 5 个与已知金矿（点）相吻合，其余 3 个是较有前景的金矿远景区。该方法中二级套合模型在空间数据的多元滤波方面确实起到了较好的作用。将该法与确定异常下限的 χ^2 准则，以及马哈拉诺比斯距离结合起来使用，使圈定地球化学异常的效果得到了进一步的改善。利用 χ^2 准则确定异常下限的方法也属国内首次使用。

二、在国内首次把“熵”滑动平均法用于区域化探数据处理，提供了一种在统计上较为稳健的滑动平均方法。该方法有效地抑制了离群值对数据处理结果的影响，使得异常区的面积比常规移动平均法有明显缩小，异常的形态和结构也更趋合理，比较真实地反映了试点地区的异常特征，减少了找矿的盲目性，取得了较好的地质效果。

三、在金矿异常评价中，重视与金共生、伴生指示元素及评价参数等多元信息的重要作用，采用了金本位法、金异常的多参数综合排序法评价异常。该方法可提高评价的可靠性，且易于掌握。检查了一个由金本位法新发现的异常，在岩体与老地层接触带附近及老地层中发现了 4 条破碎带，并见有黄铁矿、黄铜矿等矿化，推测为一个有望的金银矿远景区。

参 考 文 献

[1] 陈绍仁. 化探样品中痕量金的化学光谱测定法 物探与化探 1980, (2) 19—27.

[2] 蒋建华等. 化学光谱法测定超痕量的金. 岩矿测试. 1982, (2) 48—52.

[3] 谢学锦 金矿化探 (二) ——采样与取子样的难关. 国外地质勘探技术. 1988, (2—3): 146—154.

[4] 谢学锦 化探找金·国内与国外. 地球化学探矿实例, 第四辑, 地质出版社. 1991: 1—7.

[5] 孙焕振, 李善芳. 金矿化探新进展及若干问题. 中国地质. 1988, (12): 13--16.

[6] 孙焕振, 周庆来. 地矿部1978—1987年金矿化探回顾和展望. 物探与化探. 1988, (5) 326—335.

[7] Weaver T. A., Freeman S. H., Geochemical Atlas of Alaska. U. S. Dept. Energy, Rept. GJBX-32 (83), 1983.

[8] 伍宗华. 汞量测量方法对寻找各类型矿床的应用 地矿部地球物理地球化学勘查研究所所刊. 1988, 第3号: 165—195.

[9] 地矿部. 汞蒸气测量规范. 中华人民共和国地质矿产行业标准DZ0003-91, 中国标准出版社. 1992.

[10] 齐涿. X射线荧光测量在贵州金矿普查中的地质效果. 勘查地球物理勘查地球化学文集. 1986, 第4集: 215—225.

[11] Abstracts. 16th International Geochemical Exploration Symposium, 1993.

[12] Abstracts With program, 15th International Geochemical Exploration Symposium, 1991.

[13] 谢学锦. 勘查地球化学的过去、现在和未来. 物探化探译丛. 1992, (4—5) 20—31.

[14] Росляков Н. А. 表生作用带中金的地球化学. 物探化探译丛. 1987, (3)

[15] Boyle R. W. 金的地球化学及金矿床. 地质出版社. 1984.

[16] 朱有光, 蒋敬业. 金矿地球化学找矿. 中国地质大学出版社. 1993.

[17] 熊昭春. 泡塑吸附技术研究及其在化学分析中的应用 地质出版社 1992.

[18] 李善芳. 寻找隐伏金矿的几种非常规化探方法. 物探化探译丛. 1992, (4—5) 136—140.

[19] 孙作为等. 物理化学 地质出版社. 1979

[20] 关广岳等. 中国金矿表生地球化学. 东北大学出版社 1994.

[21] 姜泽春. 纳米粒级物质的地球化学活性. 中国矿物学岩石学地球化学研究新进展 (二). 兰州大学出版社. 1994.

[22] Chao, T. T., Use of partial dissolution techniques in geochemical exploration. J. Geochem Explor., 1984, 20: 101--135.

[23] Росляков Н. А., Цимдалист В. Г., формы Нахождения золота в почве и их прогнозное значение, геология и геофизика. 1988, (10) 44—51.

[24] 阮天健, 朱有光. 地球化学找矿. 地质出版社 1985.

[25] 冯明月, 孙志富. 铀-金共生研究的新进展. 铀矿地质 1992, (4).

[26] 钱法荣, 周德安. 拉日玛矿床的自然金研究. 铀矿地质. 1993, (3).

[27] 金仰芬, 伍宗华等. 壤中气Rn-Hg联测方法与应用. 物探与化探. 1991, (5).

[28] 伍宗华, 金仰芬等. 汞的勘查地球化学. 地质出版社. 1994.

[29] 吴慧山, 林玉飞等. 氡测量方法与应用. 原子能出版社. 1995.

[30] 蒋瑞金. 天然水中金的某些地球化学特征. 地质与勘探 1993, (2).

[31] Cidu R. 等. 金矿普查水化学方法的初步研究——英国的结果. 金矿物探 (专辑二). 1991.

[32] 栾世伟等编著. 金矿床地质及找矿方法. 四川科学技术出版社. 1987.

[33] 候智慧. 表面活化吸附体野外预富集——测定天然水中微量金. 地质与勘探. 1986, (5).

[34] 卢焕章等. 包裹体地球化学. 地质出版社 1990.

[35] 李惠. 热液金矿床原生叠加晕的理想模式 地质与勘探 1993, (4).

[36] 刘英俊, 马东升. 金的地球化学 科学出版社 1991, 249—251.

[37] 孙凤舟. 黄土覆盖区叠加元素分散晕的测量方法及找矿效果. 地质与勘探. 1991 (3).

[38] 张敏, 龚美菱 冶金分析. 1991, 11 (3).

[39] 龚美菱. 相态分析与地质找矿. 地质出版社. 1994.

[40] 童晔, 谢庭周. X 射线荧光探矿技术. 地质出版社. 1984.

[41] 童晔. 放射性方法勘查 原子能出版社. 1990.

[42] Goulard, M., Inference in a coregionalization Model, in M. Armstrong (Ed.), Geostatistics, Vol. 2, Quantitative Geology and Geostatistics: Kluwer Academic Publishers, 1989, P. 397—408.

[43] Sandjivy, L., The Factorial Kriging Analysis of Regionalization Data: Its Application to Geochemical Prospecting, in G. Verly et al. (Eds.), Geostatistics for Natural Resources Characterization, Part I, D. Reidel, Dordrecht, 1984, P. 559—571.

[44] Wackernagei, H., Geostatistics Techniques For Interpreting Multivariate Spatial Information, in C. F. Chung et al. (Eds), Quantitative Analysis of Mineral and Energy Resources, 1988, P. 393—409.

[45] Rao, C. R., Linear Statistical Inference And Its Applications, Jonh Wiley &Sons, 1973, 676P.

[46] 杜鲍夫. P. N., 普查地球化学资料的数学处理. 地质出版社 1976. 216P. (中译本)

附表

专题设置一览表

专题名称及编号	承担单位及专题负责人	专题组主要成员	协作单位
（1）综合航空物探方法在金矿预测中的应用研究，90051-10-1(1)	冶金部地球物理勘查院航空物探大队，战克、线纪安、侯俊胜、王继伦（技术指导）	王德广、欧宗豪、杨国志、陈明娥	
（2）胶东地区航空物探（电/磁）在金矿预测中的应用研究，90051-10-1(2A)	地矿部物化探研究所、山东省地矿局第六地质队，欧介甫、刘崇群	孟庆敏、袁桂琴、柳义、林少一	
（3）胶东航空物探（电/磁）资料的图像处理及统计预测方法在金矿预测中的应用研究，90051-10-1(2B)	武警部队黄金地质研究所，董晓辉	常西林、张爱华	
（4）胶东破碎带蚀变岩型金矿高精度磁测的应用研究，90051-10-4(1)	山东省物化探勘查院，肖霏岳	方国普、杨茂森、黄太岭	
（5）高精度磁测在找金工作中方法技术的应用研究，90051-10-4(2)	西北有色物化探总队，张云明、张晓明		
（6）安徽省六安地区应用航空伽玛能谱资料找金及成矿预测的试验研究，90051-10-1(3)	核工业航测遥感中心，刘英杰	陆兆蒸、李法文	
（7）冀北等地区应用车载γ能谱方法找金的研究，90051-10-2(1)	核工业北京地质研究院，马宗祥、刘腾耀（技术指导）	张鹏、陆士立、翟玉贵、马艳芳	
（8）绿岩型金矿伽玛能谱特征及应用研究，90051-10-2(2)	冶金部第一地质勘查局物探队，姜玉林、张代伦		
（9）伽玛能谱找金矿的应用研究，90051-10-2(3)	武警黄金八支队、成都理工学院核工系，索忠恕、梁锦华	赵友清、门春茂、葛良全、周四春、陈国勤、谢庭周	
（10）地面甚低频电磁法找金的应用研究，90051-10-3(1)	冶金部物勘院物化探研究所，闫恕	郭卡峰	冶金部第一地质勘查局物探队
（11）地面电磁法在金矿找矿中的应用研究，90051-10-3(2)	有色辽宁地勘局地球物理勘查大队，郑长生	李松、李劭辉、曲跃春、贾清华	
（12）井中综合电测在小秦岭地区金矿床上的应用研究，90051-10-6	西北有色物化探总队，姚治龙、樊金生	郭文波	
（13）井中电法计算机化反演技术在金矿勘探中的应用研究，90051-10-7(1)	冶金部地球物理勘查院物化探研究所，戴继舒、王继伦（技术指导）	周京涛、房向众	
（14）地下电磁波法层析技术在金矿床上的应用研究，90051-10-7(2)	地矿部北京计算中心，吴以仁	张海云、唐玉民、刘立振、何建文	协作人员：张子玲、瞿兴昌、高文利
（15）山西五台山地区绿岩型金矿金异常源的化探追索方法研究，90051-10-A1	地矿部物化探研究所，任天祥、李应桂	杨少平、余学东、成杭新、王英秀、赵传冬	
（16）甘肃西秦岭地区化探快速追踪异常源研究，90051-10-A2	甘肃有色地质勘查局五队，段家训	高珍权、王怀运、高鑫、刘菊琴、伏海涛	

续表

专题名称及编号	承担单位及专题负责人	专题组主要成员	协作单位
（17）综合应用多种物化探方法现场测试技术快速追踪和评价金异常的研究，90051-10-*A*3	武警部队黄金八支队，门春茂	谢庭周、葛良全、赵友清、梁锦华、索忠恕、周四春、陈瑞林等	成都理工学院核工系
（18）化探快速追踪金异常源方法研究，90051-10-*A*4	冶金部第一地质勘查局物探队，李兴国	孟庆茹、喻健荣、李长民、齐伟	
（19）包体地球化学方法找金的研究，90051-10-*B*1	冶金部物勘院，李惠	娄元生、王支农、宛月肖、李德亮、王真光等	有色总公司北京矿产地质所
（20）湿润气候区金的表生作用地球化学研究及其在找矿中的应用，90051-10-*C*1	中国地质大学（武汉），朱有光	蒋敬业、胡国俊、李树新	
（21）赣中地区金表生地球化学作用及其在找矿中的应用，90051-10-*C*2	华东地质学院，史维浚、周文斌	张卫民、袁晓庆、彭人勇、卢治平、陈泽堂	
（22）新疆阿尔泰地区哈巴河幅金矿地球化学异常识别及分类评序方法研究，90051-10-*D*1	地矿部矿床所，余金生	蒋金荷、张效民	
（23）区域化探找金快速评价筛选异常的数理统计方法，90051-10-*D*2	冶金部物勘院，许金荣	林植如	
（24）拉日玛等地区金矿物化探异常分离数形拟合计算机处理及应用，90051-10-*D*3	核工业北京地质研究院，唐声唯	张静波、毛玉仙、芮本普、赵志明	
（25）山东招掖地区非常规化探方法找寻隐伏金矿的研究，90051-10-*E*1	地矿部物化探所，伍宗华、金仰芬	刘崇群、郭英杰、黄宏库、张利芬、汪家广、刘华忠	山东地矿局六队
（26）瑶沟等地区勘查金矿的放射性和非放射性气体地球化学方法的研究，90051-10-*E*2	核工业北京地质研究院，游云飞	周奇荣、赵安德、谢佑新、刘开兴、朱杰辰、张述华	核工业中南地勘局308队、东北地勘局244队
（27）运积物地区利用后生异常寻找金矿方法技术的研究，90051-10-*F*1	冶金部物勘院，王义为、孙凤舟	王春起、郝然、刘振昌	
（28）应用偏提取技术评价金异常以及寻找掩埋金矿床的方法，90051-10-*F*2	地矿部物化探所，周丽沂	张洪、孙晓玲、杨少平、张勤、彭桂仙	河北地质学院
（29）运用后生地球化学异常寻找隐伏金矿床的研究，90051-10-*F*3	有色总公司矿产地质研究院，张茂忠	周奇明、李水明、赖锦秋、黄华鸾	
（30）痕量相态分析技术在金化探异常评价中的应用研究，90051-10-*F*4	西北有色地质研究所，龚美菱	黄毓立、张喜元、才世福、张敏、李展	
（31）东北地区水文地球化学方法找金的研究，90051-10-*G*1	核工业东北地勘局二四四地质大队，王超	黄国劲、赵淑云、孙作振、姚汝江	
（32）北方干旱区普查寻找金盲矿的水化学方法研究，90051-10-*G*2	内蒙古第一物化探勘查院，冷福荣	蒋瑞金、苏美霞、王连珍	地矿部物化探所

GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION FOR GOLD IN CHINA ——RESEARCH AND APPLICATIONS

Wang Jilun Li Shanfang Qi Wenxiu
Zhu Youguang Fu Xianglin and others

This book consists of two parts-Geophysical and Geochemical exploration.

I GEOPHYSICAL EXPLORATION

In the geophysics part we emphatically studied and summarized the effects of various geophysical methods for "indirect" gold prospecting—applying integrated geophysical methods to investigate and outline "ore-controlling comprehensive geological settings" and "comprehensive geological prospecting marks", based on analyzing the effect and limitation of "direct" gold geophysical prospecting.

With stress on integrated airborne geophysics methodology, a series of techniques from three main geophysical exploration domains—airborne, ground and borehole—are discussed. And among them some are for the first time researched out and successfully apllied in China.

1. Integrated airborne geophysical gold exploration is characterized by its fastness and integration. Fastness can result in a shorter prospecting period and less overall expenses. While integration may lead to a best possibly complete survey on basic geological metallogenetic environment, ore-controlling comprehensive geological settings and comprehensive geological prospecting marks of gold deposits, so as to improve on the ground geological survey and geophysical survey by single method, and increase the geological effect and economic benefit of the whole exploration.

Our research on integrated airborne geophysical methods applied in gold exploration has confirmed the above advantages, not only improved the technology but also achieved a lot of valuable results on metallogenetic prognosis.

In technology, the research and development on interpretation of mountainy airborne VLF data have obtained good application effect. Now it is ripe for the technique to be popularized in our country. Airborne vertical magnetic gradient survey is useful to highlight shallow anomolies (especially the weak ones on strong backgrounds), and to comprehensively analyze,

in cooperation with airborne magnetic survey, deep and shallow geological settings. Actually measuring the vertical magnetic gradient is necessary when conditions of the conversion of ΔT into theoretical gradient are not met. Adopting equivalent magnetic dipoles instead of magnetic charges in qualitative and quantitative analysis and interpretation of the gredient anomoly is strict in theory, simple in technique, and advantageous by directly utilizing the known basic magnetic field theory and experience, especially for "2-D geological bodies".

Digital image processing technique is specially superior in massive integrated airborne geophysical data processing, extraction and synthesis of information, comprehensive interpretation and result expression etc. Its software can be used on the advanced microcomputer, and this reduces the cost and brings convenience to the interpreters' personal participation, providing a favourable condition for its popularization and application.

In gold exploration, we have successfully applied the helicopter-borne integrated geophysical system imported from Scientrex, Canada and the airborne dual-frequency electromagnetic system developed in China. With flying area more than 13000 km^2, we have achieved remarkable geological effects and practical experience.

For great quantity of airborne geophysical anomolies, a hopeful new comprehensive interpretation domain is applying statistical prognosis technique for ore deposits to evaluating the anomolies, on condition of existing many and representative enough known ore-bearing units with sufficient reliable geological, geophysical and geochemical data. This kind of research work has gained inspiring applied results in Jaodong gold ore zones. Our working experience shows that two key procedures are proper selection of geological variahle and comparison-synthesis of different statistic prognosis results.

2. By using advanced instruments, high resolution magnetic survey has not only raised working efficiency and reduced costs, hut also provided more and weaker useful information, this improved its ability of solving geological problems and widened its application fields.

The above advantages have been fully confirmed in our high resolution magnetic survey application and research on gold deposits, through analyzing data of large and different areas (including comparison with original medium resolution data).

High resolution magnetic survey can reliably represent the magnetic variation of ore-controlling geological bodies, which is expressed as the changing of magnetic field to being stronger or weaker and its different pattern characteristics, so as to more objectively reveal the distribution of concealed ore-controlling rocks, structures and fractured alteration zones. Therefore it functions importantly in gold "indirect" prospecting and prognosis of targets.

On favourable condition the technique is also possibly used for "direct" prospecting according to the weak magnetic change and the field characteristics (such as local rising on low background field). This must cooperate with magnetism determination and research of the related ores and rocks.

It is feasible to use high resolution magnetic survey in gold exploration as a basic investigation means ahead of others, because of the above advantages and its cheap regional coverage

cost.

Anyhow it is rather limited to use single magnetic survey for solving the complex gold geological and prospecting problems. Combination with other techniques is necessary.

Ground VLF is fit for fast investigation of good conductive faults and fracture zones in fields without thick low resistance covering strata.

$\tilde{D}$ obtained from filtered polarization ellipse tilt angle D data in a proper spacing can reflect the position and distribution of conductive fault zones more clearly. When necessary, $\tilde{D}$ should be processed with correlation analysis between survey lines, to highlight its strike and continuity character. And topographic disturbance anomolies should be recognized and corrected.

Because polarization ellipse tilt angle D in small values mainly reflects $\mathrm{Re}H_z$ but not $\mathrm{Im}H_z$ anomolies, it is not feasible for investigating the position and distribution of narrow or poor conductive fault zones. To remedy the defect it is necessary in our country 's ground VLF work to purposely apply the kind of parameters mainly including imaginary component such as H_{zo}/H_{xo} or $\partial H_{xo}/\partial z$, to find out imaginary component anomoly of the fault zones. Utilizing the imaginary component anomoly in the above airborne VLF survey to outline low resistance fault zones has achieved general encouraging effect.

3. γ-ray spectrometric survey is a simple and effective technique for outlining potassic altered structure zones in gold prospecting.

γ-ray spectrometric survey is also a simple and convenient technique of regional researching and outlining magmatic rocks, strata and structures related to gold mineralization.

Especially, utilizing the massive original airborne (or car-carried) γ-ray spectrometric data for uranium exploration to do the secondary research costs little, while it can quickly draw important information to be used in gold prospecting prognosis. This is a very useful experience, which is worthy of popularization.

To improve γ-ray spectrometric survey's effect in gold prospecting needs, first, to carefully study and make full use of known geological mineralization model, and geophysical and geochemical data of the working area; and secondly, to work out , by means of testing in known area, the K, Th and U data processing technique and converted parameters fitting the actual geological condition, thus to remove a variety of disturbances and extract or highlight useful information. The latter is a key technique for the γ-ray spectrometric survey to be used in gold prospecting, of which a great deal of methods and experiences are provided in this book.

Generally, the main effect and result of γ-ray spectrometric survey used in gold prospecting comes from "indirect" prospecting, surely with exception of U (Th) and Au paragenetic deposits.

4. Integrated electric logging is usually able to provide useful information for dividing and outlining mineralized zones and determining their position and thickness in gold mine areas with complex geological minerogenetic condition, or unclear mark of gold mineralization enrichment zones, or fractured mineralized zones being difficult for coring.

As long as geoelectric condition for outlining ore body or mineralized zone is favourable, in-

tegrated borehole electric prospecting in such area with complex and changeable geologic minerogenetic condition may provide information being important to finding and outlining blind gold ore body beside the hole. Besides expanding the prospecting range of the hole, it is an effective means of deep prospecting and extension of electrical prospecting depth, which has been verified by our practice of application research.

The practice of application research has also indicated that integrated borehole ρ_s and η_s survey is superior in simple instruments and equipments, easy in technique and distinct in effectiveness. It is important, but the attention has been not paid enough to it yet in gold geophysical exploration.

Besides electric inhomogeneity of the country rock, topographic disturbance in mountain districts should be considered in the interpretation of integrated borehole ρ_s and η_s data. And this is specially important for ground-borehole configurations.

The computerized ρ_s and η_s joint inversion technique, developed as a support to gold ore integrated borehole and ground electric prospecting, may improve the technical level of interpretation and prospecting effect of ρ_s and η_s integrated survey in the condition of 2-D geological bodies with the point source, and is quite advanced and practical.

For electrical geophysicists, though a qualitative interpretation of an anomoly is important, a justifiable basis for evaluating and verifying the anomoly is only the geological body interpreted by quantitative inversion, which not only meets the geological minerogenetic condition but also produces the anomoly approaching to the actually observed data. Towards the goal, the above ρ_s and η_s joint inversion technique is very meaningful.

The application of computerized tomography at borehole electromagnetic wave measurements is very effective for big target with the condition fitting for the ray-inversion, and so is the result of our domestic test. The key to its gaining good effectiveness in gold prospecting is, besides big target, a satisfactory correlation between the target and the gold ore body (or mineralized body).

Further research reveals that the result of CT ray-inversion of scattering small 3-D models differs completely from that of the big target. Without distinction, the inversion result is very probably a mistake. Anyhow there are some distributing rules followed by the observed multisource and multifrequency values of small 3-D targets.

The disturbing influence of small targets (e. g. small high resistance dykes or low resistance fractures) should he considered in application of borehole electromagnetic wave CT inversion technique to gold deposits.

5. Gold geophysical prospecting has a wide application in investigating "ore-controlling comprehensive geologic settings" and ascertaining "comprehensive geological prospecting marks". That is confirmed by the results in this book.

Extending the scope of gold geophysical prospecting from "direct prospecting" to "indirect prospecting" marks the rising of entire technical level in gold geological work, and shows the superiority of the integrated exploration with multiple subjects.

Though the research content in this book covers an extensive range, two more points should be stressed about the application of integrated geophysical prospecting in gold geological work:

(1) By necessary processing and deepgoing comprehensive research, regional gravitive and magnetic data may provide important materials or conclusions for regional gold geological investigation, espcially in depth, so as to make a better prognosis for large and superlarge deposits.

(2) Integrated geophysical data can be used for comprehensively analyzing and solving some difficulties or contentious basic or deep problems in regional geological research of gold deposits.

The application of integrated geophysical prospecting in these aspects has been appealing to geologists and geophysicists in China.

6. Besides the advance in technology, the application research project in this book has also provided a great number of optimum gold prospects, target areas and deposit anomolies which are capable of the follow-up verification. This is another kind of achievements—the confirmed or waiting to be confirmed actual prospecting effectiveness.

Ⅱ GEOCHEMICAL EXPLORATION

Gold is usually classified as a kind of rare and noble metal. In primary ore, gold content is merely in the range of several parts per million, and gold minerals can hardly be detected by naked eye, especially in gold ores of altered rock type and microgranular dissemination type. Hence, it seems to be a very difficult problem in prospecting for gold with traditional geology where useful minerals are recognized mainly by sight. Due to extremely low content of gold in ore, the physical property of gold minerals in ore can not be able to reflect that of the whole ore, which in turn causes difficulty in direct geophysical prospecting for gold. Through analyzing gold and associated elements in ores and wall rocks, geochemical method makes use of their variation in concentration to guide the prospecting; as a result, this method can effectively eliminate lots of obstacles caused by the difficulty in megascopic examination of extremely fine grains of gold minerals in ores and the impossibility in determination of very low gold content by geophysical technique, so as to acheive the aim of direct gold prospecting. Generally, it can be concluded that geochemical method is bound to become the most effective prospecting technique in gold exploration.

In China, the second round of Nationwide Regional Geochemical Survey Program began to be carried out at the beginning of 1980s, with geochemical survey of stream sediments as the main means. In this scheme, gold was included in the 39 assigned elements which must be analyzed, and the detection limit of gold is first fixed at $1\times10^{-9}$and then lowered to 0.3×10^{-9}. It thus made geochemical exploration enter a new stage of prospecting for gold utilizing gold itself as a major indicator. Since then, geochemical prospecting for gold has made remarkable breakthrough in China. From 1980 to 1987, experts from various bureaus under the Ministry

of Geology and Mineral Resources carried out surface engineering and deep drilling for inspection of geochemical anomalies and, as a result, 277 gold deposits and occurrences, including 4 large-size, 26 medium-size and 32 small-size deposits were discovered. These achievements fully recognize that regional geochemical survey occupies an important strategic position in geochemical exploration of gold deposits.

Although significant achievements have been made in geochemical prospecting for gold in China, the difficulty in ore-prospecting work seems to be increasing with the extensive development of gold exploration. In such a situation, new advances in geochemical prospecting for gold should be made, and application of new methods and techniques should be studied as well, such as seiving of regional geochemical anomalies, rapid follow-up for anomaly sources, geochemical exploration techniques for concealed gold deposits, and data-processing technique in gold exploration etc.

Through three years' hard work, experts of this project have made new advances in some fields such as basic research of geochemical exploration for gold, exploration technology and data-processing technique, and obtained encouraging practical ore-prospecting and geological effects mainly in the following four aspects:

(Ⅰ) Geochemical behaviors and characteristics of gold in supergenesis and their application to ore-prospecting

1. Study on forms of occurrence of gold in supergene media

(1) A scheme of sequential extraction analysis for different forms of occurrence of gold in loose sediments was developed and improved so as to be able to carry out the study of forms of occurrence of gold smoothly.

(2) Partial extraction analysis of gold for groundwater, surface water, soil and stream sediment samples has shown that gold in supergene media exists mainly in five major forms, i. e. soluble gold in water, gold adsorbed on the surface of supergene media, insoluble gold combined with organic matter, micro-grained gold scattered in secondary minerals as well as free native gold.

(3) Water-extractable gold exists ubiquitously in loose materials in different areas and different types of gold deposits.

(4) In loose materials within auriferous quartz vein type gold mineralization areas, gold mainly exists in the form of free native gold, which provides the basic evidence for the existence of nugget effect of gold in loose material samples.

2. Hydrogeochemical and water-extractable gold prospecting methods and their effects

(1) A pre-enrichment technique was successfully developed, and the principle of which is utilizing the foamed polyurethane as a dynamic adsorbant for enrichment of gold in narural water directly on the spot.

(2) In some areas of Inner Mongolia Autonomous Region where no anomalies had ever been discovered by stream sediment and soil geochemical surveys, the utilization of hydrogeochemical method led to the discovery of gold hydrogeochemical anomalies, which, as proved by

preliminary inspection, are related to concealed gold deposits.

In Central Jiangxi, five gold prospective areas were discovered through hydrogeochemical prognosis, and detailed investigation or engineering has proved that the hydrogeochemical anomalies in three out of these five areas are caused by gold mineralization or economic orebodies.

(3) The partial extraction technique for water-extractable gold in surface loose materials seems to be an economical, simple and easy as well as promising technique in the effective discovery and appraisal of gold anomalies, especially anomalies in thick overburden areas, and the prospecting for concealed gold deposits.

3. Theorectical significance of the existence of water-extractable gold

(1) Field study on electro-hydrogeochemical method, electro-geochemical measurements for gold in water extracts of soils and laboratory experiments on electrochemical activation and migration all detected the enrichment of gold ions in both positive and negative electrodes. These tests show that gold in water body and water extracts exists not only as cations but also complex anions and charged colloids.

(2) A thorough investigation of proportions of various forms of gold in surface water, underground water and gold solution in loose materials under different conditions is of important practical and theoretical significance in perfecting preenrichment technique in hydrochemical survey, improving partial extraction technique of water-extractable gold in extracts of loose materials, and applying the above techniques to the appraisal of anomalies and the study of dissolution, migration and precipitation mechanism of gold under the supergene condition.

(3) Immersion and dissolution experiments of gold ores show that natural water is the main medium for the dissolution and migration of gold under supergene condition.

4. Composition of water extracts of soil from gold mineralization districts and dissolution mechanism of gold

(1) In water extracts of soil taken from the Dongbeizhai gold mineralization district, 10 sorts of anions, 15 sorts of cations and 7 sorts of amino acid were detected.

(2) Experiments on thermochemical reaction show that semicystine can dissolve gold grains, and such a dissolution process is a dynamic process characterized by endothermic-exothermic oscillating reaction.

(Ⅱ) Unconventional geochemical exploration methods in search for concealed gold deposits

1. Inclusion geochemical method

On the basis of geochemical studies of inclusions in more than 20 gold deposits, a series of inclusion geochemical prospecting indices were fixed:

(1) Some parameters and indices such as CO_2 and CH_4 contents, average relative optical density of CO_2 ($\bar{D}CO_2$) and CO_2/H_2O are obviously higher in inclusions of auriferous quartz veins than in inclusions of barren quartz veins.

(2) Geochemical zonation of gold deposits is obviously reflected in geochemical parameters

of inclusions: From the top to the lower part of an orebody, F^-, Cl^-, CO_2, CH_4 tend to decrease, whereas Ca^{2+} seems to increase gradually; the center of a thermal aureole is generally the position where an orebody occurs; the intensity of evaporation halo is generally higher in the front and the middle-upper part of an orebody than in the middle-lower part.

(3) According to multiphase and multistage superimposition characteristics of gold mineralization, an ideal model was constructed for superimposed geochemical inclusion halos of gold deposits.

2. Gas geochemical method

(1) The soil gas Rn-CO_2 dual-purpose collector was successfully developed, the rational procedure was worked out and soil gas Rn-CO_2 combined measurement was realized. All this has helped to raise efficiency. The principle of determining Rn earlier and CO_2 later for the same hole contributes to determining CO_2 concentration of bottom soil and also to raising anomaly intensity.

(2) Instantaneous measurement method for CO_2 in soil gas was developed. Equipped with necessary accessory devices, the laboratory-used GXH-305 infrared CO_2 detector can be used in field to determine concentration of soil gas CO_2 in situ. Compared with measurement by CO_2-detection tube, this technique has higher tolerance limit against the interference of water vapor.

(3) Test result of geogas survey shows that Au anomalies in geogas appear in ore-controlling near-surface alteration zone and projection of the head of an concealed orebody. Such a phenomenon would provide a gas geochemical index for gold prospecting using gold as an indicator, and might be used to judge whether Rn, CO_2 and Hg anomalies are of auriferous prospects.

3. Electro-adsorption method

The electro-adsorption method is a kind of ore-prospecting method in which soil samples are put into distilled water (with the addition of some reagents which helps to keep elements soluble) to conduct electric extraction. Compared with field electrogeochemical extraction method, electro-adsorption method obviously has the merits of simple equipment, low cost, high efficiency and readily controllable working conditions and qualities. Nevertheless, the sample representative of this method is not so good as the field electrogeochemical extraction method.

4. The appraisal of gold anomalies with technique of trace phase state analysis.

On the basis of geochemical behaviors of gold and geological conditions for the formation of gold deposits, a new method for the appraisal of gold anomalies was successfully developed. Through a comparison of relevant element associations and element contents between rock samples of geochemical anomalies and heavy mineral samples, the method can find out whether gold exists in concentrate state or in disperse state so as to judge whether a gold geochemical anomaly is related to mineral deposit or not. Geological condition for the formation of a gold anomaly is found out by means of content characteristics of gold enclosed in quartz. Investigations into known gold deposits (occurrences) of different types show that feature of this method is high accuracy, high efficiency and low cost in prospecting.

(Ⅲ) Methods for rapid follow-up of anomaly sources under different landscape conditions

1. In medium-low mountain areas covered with residual-slope materials, the 1 : 25000 gulch system soil geochemical survey is effective in follow up sources of stream sediment geochemical anomalies. In comparison with soil geochemical survey of normal 1 : 10000 network, this method has the advantages of reducing the cost by 90% and raising the efficiency of anomaly appraisal by 8 times. With this method, 27 gold ore veins were discovered in the study area, 3 exploration bases with Grade F reserves of 10 tons and 1 exploration base with reserves of 20 tons were submitted to the higher authorities.

2. Regional follow-up of geochemical anomalies was conducted in Wutai Mountain area where surface pollution was serious due to local people's gold mining activity. In this area, water spots are densely distributed along with the existence of quite a few ascension springs, large-area hydrogeochemical survey was performed to filter off man-made pollution and delineate target areas rapidly. In preferential selected segments for follow-up of anomaly, a technique combining geological-geochemical rock profile survey with the use of 'planar' rock geochemical survey to replace the routine grid survey. This technique has been proved to be effective and rapid in follow-up of anomaly sources and delineation of target areas discovered by detailed investigation.

3. The successful application of nuclear method to gold exploration

In a segment of the Dongping gold ore district where W-1 high resistivity anomaly is superimposed on No. 5 soil geochemical gold anomaly, X-ray fluorescence measurement and gamma spectral method were used to make rapid follow-up for gold anomaly sources. On the basis of distribution characteristics of delineated (Pb)-X-ray fluorescence anomalies, the interpretation and perspective inference were completed merely in some ten days. Engineering inspection resulted in an increase in reconnaissance reserves by tens of tons, and hence the gold reserves of the ore district were increased by two times. Through engineering inspection, an industrial orebody with considerable dimension was discovered in Xiping, at the superimposed position of the (Pb)-X-ray fluorescenece anomaly and gamma spectral (K) anomaly with No.9 soil geochemical gold anomaly.

(Ⅳ) New advances in data-processing technique of geochemical exploration for gold

1. The factorial co-kriging method (FCK method) was used to process and evaluate 1 : 200000 stream sediment geochemical data of Haba River Sheet in Xinjiang. As a result, 8 significant gold anomalous areas were delineated, among which 5 are coincident with the known gold deposits (occurrences), and other 3 are fairly promising gold prospect areas. The two-order nested structure model in this technique has really played a rather better role in multivariant filtering of spatial data. The combination of this technique with threshold-determining χ^2 criterion and Mahalanobis distance could futher improve the delineation of geochemical anomalies.

2. The application of entropy moving average method to regional geochemical data processing has provided a statistically robust moving average method. With the method, the effects of outlying values upon the result in data processing can be suppressed effectively, the

area of anomaly is obviously reduced as compared with that deduced by routine moving average method, and the shape and structure of the anomaly become more reasonable.

3. The important role of multivariant information obtaining from indicator elements of gold associated or co-existed and appraisal parameters etc. shoule be emphasized in evaluation of gold anomalies, and thus the 'gold equivalent unit method' was put forward. In this method, the indicator elements for gold propecting are converted into gold content equivalent units, which is then added to the original gold content to form an integrated index. This integrated index is futherly used to compile the composite anomaly map. The 'gold equivalent unit method' and the multiparameter integrated ranking method for gold anomalies were adopted to evaluate anomaly. Such a technique, which is easy to master, and can enhance the reliability of appraisal. In follow-up of an anomaly detected by 'gold equivalent unit method', four fracture zones with pyrite and chalcopyrite mineralizations were discovered near the contact zone between the rock body and the old strata as well as within the old strata. These zones were inferred to be a promising gold-silver prospect area.