脉状金矿床深部大比例尺统计预测理论与应用

郭光裕 林卓虹 编著

Maizhuang Jinkuangchuang Shenbu Dabilichi Tongji Yuce Lilun yu Yingyong

冶金工业出版社

7121

脉状金矿床
深部大比例尺统计预测
理论与应用

ISBN 7-5024-3005-9
9 787502 430054 >

ISBN 7-5024-3005-9/TD·358 定价 38.00元

国家科学技术学术著作出版基金资助出版
国家自然科学基金资助项目

脉状金矿床深部大比例尺统计预测理论与应用

郭光裕　林卓虹　编著

北　京
冶 金 工 业 出 版 社
2002

内 容 提 要

本书详尽地论述了脉状金矿床深部大比例尺统计预测理论、方法与应用。全书共分8章，主要论述了脉状金矿床的地质、地球化学特征，金沉淀富集成矿的控制因素，脉状金矿床深部大比例尺统计预测的理论基础，建立了成矿模式，金矿产资源量估计及评价，矿体定位预测方法及跟踪预测。

本书可供从事金矿地质理论研究和地质找矿人员、高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

脉状金矿床深部大比例尺统计预测理论与应用/郭光裕等编著.—北京：冶金工业出版社，2002.7
ISBN 7-5024-3005-9

Ⅰ.脉… Ⅱ.郭… Ⅲ.脉金矿床-区域-地质调查-统计预测，比例尺 Ⅳ.P618.510.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第026771号

出版人 曹胜利 （北京沙滩嵩祝院北巷39号，邮编100009）
责任编辑 王之光 美术编辑 熊晓梅 责任校对 符燕蓉 责任印制 李玉山
北京鑫正大印刷有限公司印刷；冶金工业出版社发行；各地新华书店经销
2002年7月第1版，2002年7月第1次印刷
787mm×1092mm 1/16；14.25印张；341千字；205页；1-1000册
38.00元
冶金工业出版社发行部 电话：(010)64044283 传真：(010)64027893
冶金书店 地址：北京东四西大街46号(100711) 电话：(010)65289081
（本社图书如有印装质量问题，本社发行部负责退换）

序　言

社会的可持续发展要求有可持续供给的矿产资源为其提供保证。人们一直关注作为不可再生资源的各类矿产资源现有储量的保证程度和采取何种措施提高这种保证程度的问题。一个严峻的客观事实是现有的许多大中型矿山都不同程度的面临资源危机。有人预测，我国现有147座大型矿山，到2010年将消失50%以上，到2020年将消失80%。这不仅会造成矿产资源供给的紧张，而且还将使大量国有资产流失和带来大量的失业人员。为了缓解矿产资源供给的紧张形势和满足21世纪对矿产资源的新要求，应积极开展国土资源大调查，努力寻找新矿床，开发和建立新的矿物原料后备基地；积极开展非传统矿产资源的发现与开发研究，寻求新型的接替资源和建立新型的资源产业；积极开展国际合作，开拓国际矿业市场，充分利用国外资源等都是重要的、可取的措施。与此同时，还应积极开展现有生产矿山周边和深部地质勘查工作，发现新资源，获取新储量，延长矿山寿命，焕发矿山青春也是十分重要的，而且是具有更大的社会和经济效益的工作。

在貌似资源已经枯竭，甚至面临闭坑危机的老矿山开展地质勘探工作，从中发现新资源、获取新储量的潜力是很大的。首先，已知矿山，特别是大型矿山所在区，在地质环境上都位于有利成矿的地质异常区，在成矿环境上代表着金属或其他有用矿物的富集区。这种大型的含矿地质异常区不仅具有巨大的成矿潜力，而且具有以其综合地质、地球化学及地球物理特征为基础的成矿多样性，表现为以某种主导成矿元素为中心、多种相关元素配套、在不同地质环境和不同地质演化阶段而构成的复杂成矿谱系。现在一些生产矿山所开采利用的主要矿床(矿体)可能只是整个成矿谱系中的一部分“成员”。“就矿找矿”之所以经常奏效，“多层楼式”的不同矿种、不同成矿类型和不同形态类型矿化时空组合与配套之所以屡见不鲜，恰是这种成矿多样性和配套性的明证。从这个角度说，在已知生产矿山不仅具有扩大已知类型矿床的潜力，而且还具有发现新类型矿床的前景。

其次，从我国金属、非金属矿床目前勘探和开采的深度而言，发现新矿床(矿体)、探获新储量的潜力也是很可观的。据报道，南非兰德金矿一竖井将加深至4117m，这将是世界上最深的矿井。在俄罗斯，黑色金属矿石平均采矿深度为600m，有色金属矿石平均开采深度为500m，但许多已超过1000m，将来可达1500～2000m。已探明的三分之一以上的铜储量，几乎所有的镍、钴，大部分铝土矿、金刚石、金、优质铁矿及磷矿的开采深度将大于1000m。其他国家的采矿

深度:加拿大 2000m,美国 3000m,印度最深达 3500m。而我国绝大多数金属矿床开采深度不足 500m。在我国,埋深大于 500m 的矿床被称为"大深度矿床",目前还很少勘查和评价。但在已知生产矿山,充分挖掘矿床浅部的勘探和开采资料信息,充分利用已有的采矿和探矿工程,特别是以创新性的成矿地质环境分析为基础,以新理论、新技术、新方法为指导和手段,努力获取新信息,形成对成矿和找矿的新认识,再以新的勘查工程进行追踪和验证,则扩大矿山成矿远景,延长矿山寿命,甚至获得找矿勘探工作的新突破都是完全可能的。

由郭光裕、林卓虹编著的《脉状金矿床深部大比例尺统计预测理论与应用》一书正是作者多年来在山东招掖金矿化带、云南腾冲-梁河热泉型金矿分布区进行矿区外围及深部矿体定量定位预测理论与实践的总结。作者采用多学科理论与方法的综合研究手段,全面分析脉状金矿床地质、地球化学、数学地质特征,成矿机制和控矿因素,并建立矿床和矿体成矿模型。在此基础上,提出了一套矿床深部矿体定量定位预测理论、预测工作途径及定量定位预测方法。其中,有一些方法,如模糊聚类分析法、欧氏距离分析法、波的分解与合成方法等是作者在预测工作实践中创建的,具有很大的实用性。

最近,作者领导的一个科研组在玲珑金矿田深部成矿定位预测及开采技术条件研究中,应用上述理论和方法对地表以下 370～1080m 深处开展矿体定位预测,确定了 21 个成矿远景区段。有关矿山对其中的 18 个投入资金 1615.59 万元进行探矿(投入坑探工程 4256m,钻探工程 29749.8m),结果有 17 个见矿(见矿率达 94%),探获 D+E 级储量 18147.61kg。其中的 9916.87kgD 级储量创潜在价值 74082 万元,经济效益总额 4826 万元。应该说,这是本书作者与该区矿山地质工作者共同努力进行生产矿山深部预测找矿的一次十分有益的实践,实现了在新深度上取得找矿的突破。这一实践再次表明者矿山发现新资源的巨大潜力,也证明了本书所述预测理论、预测方法的正确性和实用性。达是本书在当今找矿勘探新形势和新要求下具有重要启示作用和指导作用的价值所在。

"深部找矿"还是一个较少涉足的半处女地,然而在老的生产矿山开展深部找矿已是当务之急。但愿今后在达方面涌现出更多的新成采,为满足 21 世纪对矿产资源的新需求,为丰富和发展我国成矿预测和找矿地质理论与方法做出更大的贡献。

赵 鹏 大

2000 年 8 月 5 日于北京

前　言

当今世界上的矿产大国，矿业开发深度多数在千米以上。印度的科拉尔金矿开采深度已达3000m以上。在南非，最深的金矿井已达4117m。而我国对于固体矿产的开发利用，多数局限于地下500m以上的浅部空间。经过长年开采，上部矿产资源大幅度减少。至2010年，由于我国主要矿种的大多数主干矿山将面临资源危机，因此探寻、开发深部矿产资源工作势在必行。作为深部找矿工作的一个重要环节和前驱，需要开展深部大比例尺矿床预测。该工作是在三度空间上对矿床进行的立体预测，是在深部预测区地质情况不确知的条件下，估计矿产资源量和矿体空间位置的工作。该工作通常隐含着两种不确定性：一是根据现有控矿地质条件推断类比所得出的深部预测区有矿无矿结论是否为真；二是在有矿条件下，根据现有成矿条件与矿床值的推断类比所得出的矿产资源估计量和矿化空间位置是否确切。这两种不确定性构成了矿床预测工作的风险。不难想象，这种风险是极大的。由于难度太大，至今尚无较成熟和较系统的理论与方法解决该问题。本书作者提出一套较系统的、行之有效的深部大比例尺统计预测理论和方法，为我国21世纪势必开展的深部矿产资源开发工作做出贡献。

从20世纪80年代中期开始，本书作者就通过实际金矿带、金矿田、金矿床、金矿体的研究工作，开展脉状金矿床深部大比例尺统计预测理论和方法研究。先后开展了“招掖金矿化带地球化学异常（次生晕）致矿性数学地质评判”、“山东招远玲珑108矿脉矿床统计预测”、“云南腾冲-梁河地区现代热泉型金矿床成矿模式及成矿远景评价”、“龙口地区金矿控矿地质条件、找矿方向研究及105矿床深部及外围找矿前景评价”、“山东招掖金矿带金矿成矿模式和资源评价”等项目的系统研究工作。在此基础上，在国家自然科学基金委员会资助下，开展了“脉状金矿床深部大比例尺统计预测理论和方法研究”的课题。采用了多学科理论方法的综合研究手段，全面地总结了脉状金矿床地质、地球化学、数学地质特征，成矿机制，主要控矿因素，建立了成矿模式。在此基础上，提出一套矿床深部矿体定量定位预测理论，系统完整地阐明了预测工作途径和矿体定位预测方法。以此为指导，进一步开展“玲珑金矿田深部成矿定位预测及开采技术条件研究”项目。其中的一个目的是检验研究所得矿床深部大比例尺统计预测理论和方法的正确性、实用性。其间，改进了波的分解与合成技术，建立了一组波形分布数学模型，用该模型能够定量地把控矿地质标志向深部推测，从而实现了定量定位地预测深部空间地质环境。作者在上述一系列研究工作成果基

础上，编写了此书。

全书共分8章。第1章是脉状金矿床的地质特征。框定了脉状金矿床的含义。阐述了脉状金矿床空间分布特征、脉状金矿床矿化的时空特点、金矿体特征等。指出，脉状金矿床受区域上分布的断裂构造控制。控矿的断裂构造规模大，发育时间长，具有继承、间断，频繁活动特点。1级构造控制矿化带的分布，2级构造控制矿田的分布，3级构造控制矿床的产出，3级构造内部致矿构造异常及更次级构造控制矿体的产出。矿脉具有垂向分带、水平等间距分布及多期、多阶段不均匀矿化特点。矿体的成生受构造结构面控制，按一定方向和角度向下多层等间距侧列分布。

第2章是脉状金矿床金矿化地球化学特征。内容包括金的统计分布特征及其研究方法；金矿化最佳地球化学标志组合及其研究方法；金矿化元素地球化学模型；金矿体原生晕及其研究方法。指出，金在大多数脉状金矿床中服从多个对数正态分布总体叠加的混合分布，不同的矿化阶段金分布函数不同，金矿化强度差异极大，最佳控矿地球化学标志组合也不同。金矿体原生晕分带规律明显，同一空间上发生不同阶段矿化信息和不同深度矿体地球化学信息的叠加。

第3章是金沉淀富集成矿的控制因素。阐明了金的基本性质；热液迁移循环的主要动力；控制金沉淀富集成矿的构造与围岩因素。指出，热液本身的高温过压性质和构造及构造活动是热液迁移循环的主要动力，也是金矿体成生的主要控制因素。

第4章是脉状金矿床深部大比例尺统计预测的理论基础。阐明了脉状金矿床深部大比例尺统计预测的基本任务、工作性质、工作条件、研究途径。全面系统地探讨了脉状金矿床深部大比例尺统计预测的特点、基本内容及研究工作步骤。指出，开展深部矿体定量、定位预测的研究途径是对地表和近地表处各种工程揭露出来的地质现象，以及应用各种手段和方法(地质的、矿物的、地球化学的、地球物理的、数学地质的)获得的矿化及控矿标志信息进行详细研究，从中提取矿产值的统计分布特征和空间分布规律，建立深部资源定量估计模型，估计预测空间的金矿产资源量，做出是否进一步开展深部探矿的决策。提取最佳控矿地质标志，查明它们的空间变化规律，以这种规律为依据，把标志向矿床深部推测。研究上部已知矿与控矿地质标志之间的内在联系，建立多种数学模型，以推测的控矿地质标志为变量，对深部预测区的含矿性定量评价，确定成矿或聚矿的有利地段。进行“预测-验证-再预测-再验证”的跟踪研究。

提出并论证求异理论，相似类比理论，空间分带理论，波形分布理论，时、空叠加理论，不确定理论。它们是应用本文提出的一系列预测方法的理论依据。

第5章是建立成矿模式。包括金沉淀富集成矿的理论分析；描述性模型；空

间几何模型；构造－围岩异常模型。指出，含金热液是一种过压流体。在中低温条件下，金的硫氢化物络合物是金在热液中迁移最重要的形式。异常事件（构造活动、围岩变异）的发生是促使热液物理状态发生改变，金硫氢化物络合物解体，金沉淀富集成矿的重要机制。强调成矿模式必须反映矿体的形成机制、控制因素、空间分布特征。通过实例阐明了金矿体的描述性模型，空间几何模型，构造－围岩异常模型。

第6章是金矿产资源量估计及评价。包括金矿产资源量估计的理论与方法，预测区进一步找矿工作的统计决策等。阐明了体积估计法，矿石品位-矿床规模经验估计模型法，齐波夫分布律估计法，矿产值历史资料估计模型法等金矿产资源量估计的方法原理、理论基础、数学模型、应用条件及实例。指出，为减少风险，应通过经济价值、找矿效益和开发风险的综合分析，对预测区进一步找矿工作做出统计决策。为此，需要调整好开发成本、找矿概率、期望价值三者的关系。

第7章是矿体定位预测方法。内容包括异常地质环境类比法；空间分带模型法；矿床模型法等。在异常地质环境类比法中，用实例阐明了研究途径，研究内容，预测范围和预测单元的划分原则，控矿地质标志确定和取值方法。介绍了一系列单元含矿性评判数学模型。其中，本书作者创建的欧氏距离分析法不但能精确地评判“矿”与“非矿”，而且能检验模型单元的代表性，发现新的矿化类型。本书作者还以波形分布理论为依据，创造性地改进波的分解与合成技术，建立了一组波形分布模型，实现了深部预测区地质环境的定量定位推测。阐明了矿体有利赋存空间划分原则。在空间分带模型法中，介绍了矿体空间分布找矿模型和地球化学标志值空间变异模型。前者是根据矿体在矿脉中沿一定方向和角度向下多层等间距侧列分布规律建立起来的。后者是根据矿体原生晕垂向分带规律建立起来的。包括“矿”与“非矿”的识别模型和样品相对于矿体空间位置估计模型两大类，7个具体的数学模型。此外，还给出了矿物包体信息空间变异模型和黄铁矿形态标型空间变异模型。用实例介绍了矿床模型法。指出，矿体定位预测是对矿床及其外围深部矿体赋存空间位置的预测。一般情况下，深部预测区地质情况是不确知的，只能根据地表及近地表处工程揭露的地质现象，以及地质现象显现的空间分布规律向深部推测。在实际预测中，应根据具体的矿床特征、控矿因素、资料状况、工作条件等选择合适的方法进行。

第8章是跟踪预测。对深部大比例尺统计预测工作性质、工作条件分析后指出，通过一次预测，很难达到矿体精确定位目的。应把深部矿体定位预测看作一项不断深化的跟踪找矿研究。根据初始预测结论，进行工程验证。用验证所获深部预测区地质与矿化信息，检验各种推测标志状态的合理性。并以其为

依据。重新对控矿标志在深部预测区各点上的状态进行推测，重新开展定位预测。对深部预测区多次“预测-验证-修订预测方案-再验证”后，必然会取得好的找矿效果。本章以108矿床的深部预测为例，说明了跟踪预测的必要性和具体做法。

本书所述脉状金矿床深部大比例尺统计预测理论和方法，是依据我国目前矿山开发状况和深部预测工作条件提出来的。如果条件允许，在预测工作中能补充少量必要的工程，开展详细的地质、构造、矿物、地球化学观测和取样，以及系统的化探、物探工作。对构造-围岩异常、标型矿物异常、地球化学异常、地球物理异常，以及矿体空间分布规律等进行综合研究，开展多种找矿手段、多信息、多方法的深部统计预测，必然会取得更好的预测效果。因条件所限，我们具体进行的几个矿床的深部统计预测工作，没有一个能达到上述“以必要的工程相配合……”水平。

本书的第1至第3章、第8章由林卓虹撰写，第4至第7章由郭光裕撰写，全书最后由郭光裕负责汇编审定完成。

参加各个项目的其他研究人员有朱学文、丛桂新、张俊苓、白宇辉、陈瑞、郭万超、吴贺军、康慧、马力、韩秋芬、武际春、刘永堂、吟本海、戴立新、刘维民、刘建强、张玉森、高广军等。本书的每个章节都反映了他们的智慧和劳动成果。在此，本书著者向他们表示崇高的敬意！本书的诞生和出版得到国家自然科学基金委员会、国家科学技术学术著作出版基金委员会、国家黄金管理局、冶金部地质局、冶金部天津地质研究院的资助。中国科学院院士、中国地质大学教授赵鹏大，中国科学院地质研究所研究员刘承祚，北京科技大学教授侯景儒，冶金部天津地质研究院教授黄佳展，中国地质科学研究院地质所研究员荣耀楚和矿床所研究员陈文明等审阅了本书初稿并提出宝贵的意见。赵鹏大院士又为本书作序，高级工程师李永明为本书翻译英文目录和前言。在此，本书著者向他们表示衷心的感谢！我们热忱希望本书的出版能对从事地质工作的科技工作者有所裨益，并欢迎对该书不足之处予以指正。

作　者

1999年8月

INTRODUCTION

Ores are being mined to depth more than 1000m in some countries. In Kolar gold mine of India mining depth is over 3000m and it reaches 4117m in South Africa. China mines her solid ores only within depth of 500m so as to confront resource crisis in many of her mines till 2010. It is imperative to make projects for ore search, exploration and development to more depthes. Prediction of deep ore bodies at large scale is the prerequisite for such projects foreseeing the ore bodies in three dimensions and estimating location and volume under uncertain geological condition at depth. The predition includes two uncertainties. The first is the authenticity of conclusion drawn from inferring and correlating the known ore-controling geologial conditions at shallow to depth. The second is the definiteness of mineral resource volume of spatial location of ore bodies within the predicted area estimated by inferring and correlating. No theories and methods have been matured and systemized for the prediction up to now thus it is doomed to take risks and face many difficulties. The authors attempt to devote a series of prediction theories and methods in this book to next century's mineral resource exploration and development to more depth in China.

Since 1980s the authors have been working at researches on theories and methods of large scale statistical prediction for Au ore belts and fields in China. Projects have been completed, such as "Mathematical Judgement of Ore-Causing Geochemical Anomlies (secondary halo) in Zhaoye Au ore Belt, Shandong Province", "Statistical prediction for No. 108 Ore Vein in Linglong Au Mine, Shandong Province", "Metallogenic Model and Prospect Appreciation of Modern Hot Spring Type Au Deposit in Tengchong-Lianghe Area, Yunnan Province", "Research On Au Ore-controlling Conditions of Longkou and Prospecting Directions and Prospect Assessment at depth and in the surroundings of 105 Au Deposit", "Metallogenic Model and Au Mineral Resource Assessment of Zhaoye Au ore Belt". According to results of the projects Scientific Fund Organization of China supported the authors to carry out the program "Research on Theories and Methods of Large Scale Prediction of Deep Quartz Vein Au Deposit". The researches mentioned above adopted and integrated multi-disciplinary theories and methods summing up geological, geochemical and mathematical characteristics, metallogenic mechanism and main ore-controlling factors of quartz vein Au deposits and establishing the metallogenic model. A set of prediction theories for quantitative volume and location of deep ore bodies is put forward and the methodology is systemized on basis of the characteristics, factors and models. Then the theories and methods were applied to the program "Study on Locality Prediction of Ore Bodies at Depth and Technical Condition of Mining in Linglong Au Ore Field". Their practicity and validity are cheked and proved by the program and the decomposition and composition technique of wave is improved. A mathematical model for a set of morphological distribution of wave is established.

By using the model the known ore-controlling marks can be quantitatively inferred to depth and the unknown geological setting can be predicted quantitatively and localizably. This book is based on results of the mentioned above researches.

This book includes 8 chapters. The first summs up geological characteristics of quartz vein Au deposit and gives description to the the deposit. The spatial and temporal distribution and ore body features are described. Such deposit is controled by regional faults which are characterized by large size, multi-staged and intermittentely and prolongedly inherited movements. The faults related to ore occur in varied sizes. Au mineralization belts are controled by the first class fault; Au field, by the second class; ore deposit, by the third class. Au ore bodies are controled by ore-causing structural anomalies and subfaults related to the third class. Ore veins show vertical zonation and horizontally equal distant distribution pattern, multi-staged uneven mineralization. Downward ore bodies occur in array which includes parallel ore bodies in different layers plunging in the same direction and at the same angle. The ore bodies are genetically related to structural planes.

The second chapter deals with geochemical characteristics of quartz vein Au deposit including statistical distribution characterisics and the research methods, the optimum geochemical mark's association and the research methods of Au mineralization, element geochemical model, primary halo of ore body and the research method. Gold distribution in most quartz vein Au deposits is coincided with the mixed population of multi-overprinted logarithmic normal distribution. Ore-forming stages are varied in gold distribution function, the optimum association of ore-controlling geochemical marks, especially in the mineralization intensity. Primary halo of ore bodies is clearly zoned. Mineralization informations of different ore-forming stages and geochemical information overprint or ore bodies at different depth appear in the same space.

The third chapter is concentrated on factors which control gold precipitation and enrichment to ore. Here is expounded the nature of gold, convecting dynamics of hydrothermal fluid and relation of gold precipitation and enrichment to structures and wallrocks. High temperature and overpressure of hydrothermal fluid, structures and their activity lead to fluid convection thus they are the main factors governing formation of ore bodies.

The fourth chapter lays theoretical foundation for large scale statistical prediction of deep quartz vein Au ore deposits. The nature, condition, methodology and tasks of the prediction are defined and the pediction characteristics, contents and steps are discussed systematically. Detail investigation and study of geological phenomna naturally and artificially exposed at surface and subsurface, ore-controlling and mineralization mark informations obtained from geology, mineralogy, math geology, geochemistry and geophysics are the only way to predict volume and location of deep ore bodies. During the investigation and study statitical distribution and spatial distribution pattern of mineral resource values are picked up and a model is established to make quantitative estimation of deep mineral resource within the predicted space. Then it would conclude if the localized prediction of deep ore bodies goes on. The optimum ore-controlling geological marks are extracted and their spatial variation pattern is acertained then infer the marks to depth. Study of internal relation between the known ore bodies and the ore-controlling marks

gives rise to several mathematical models which use ore-controlling geological marks as variables to appraize ore-bearing property of the predicted areas at depth and locate ore focus. Tasks of the prediction is completed in a way of prediction-verification-reprediction-reverification.

In this book are described the theories, such as analogy, geo-anomlies extraction, spatial zontion, distribution of wave morphology, temporal-spatial overpint and uncertainty on which theories and methods of the prediction are based.

The fifth chapter deals with metallogenic model. The mechanism of gold precipitation and enrichment is discussed. Descriptive, spatialy geometric model and structure-wallrock anomly model of gold ore deposit are established. Gold-bearing fluid is an overpressure hydrothermal fluid by which Au sulhydryl complexes are transported at medium-low temperature. Anomly events(structural activity, wallrock variation etc.) are the main factors to change physical states and lead to decomposition of gold sulhydryl complexes and gold enrichment. The chapter stresses that formation mechanism, controlling factor and spatial distribution characteristics of ore bodies must be reflected in the metallogenic model. Descriptive model, spatial geometry and structure-wallrock anomly of ore bodies are examplified by some cases of quartz vein Au deposit.

The sixth chapter discusses estimation and assessment of gold mineral resource including the estimation methods and statisticaly-made decision for further exploration. Theories, principles, math models and application conditions of the methods, such as volumetric estimation, empiric estimation model of ore grade and size of ore deposit, estimation of Zipfs Law, estimation of historic resource values are elaborated and the estimation is examplified by known gold deposits. In order to reduce risk the statistically-made decision for further exploration in predicted areas must be based on analysing of ore development cost, ore discovery probability and the expectation value.

The seventh chapter elboates prediction methods for locating ore bodies, such as analogy of anomly geological settings, spatial zonation model and ore deposit model. For the analogy of ore-causing anomly geological settings the ways, contents, limits of prediction and division principles of prediction cells and determination of ore-controlling geological marks and their vlues are described by known gold deposits. Math model for discriminating ore-bearing property of a serial cells is introduced. And Euclidean distance analysis method is invented which does not only make accurate discrimination of ore and non-ore but also check the representiveness and discover new mineralization type. Elaboration is made to the infering method for state of optimum ore-controlling geological marks in the deep predicted area. According to the theory of morphological distribution techniques for wave decomposition and composition are improved innovatively and a distribution model of a serial waves is established thus the quantitative and localizable infering of the geological setting for the predicted area at depth is realized and classification principles for favourable spaces in which ore might occur is defined. The spatial zonation model is introduced including ore-searching model of orebodie spatial distribution and spatial variation model of geochemical mark's values. The former is based on the ore distribution pattern that ore bodies in a vein occur as an array in which ore bodies located in different layers are horizontally in equal distance and plunge in the same direction and at the same angle; the later, on vertical

zonation in the primary halo of gold deposits. Alltogether, seven math models for discriminating ore and non-ore and estimating the distance of samples which are collected to indicate ore body to the predicted ore bodies and models of spatial variation of fluid inclusion data and typomorphic facies of pyrite are introduced and taken into acount. The model methodology is examplified by the known gold deposits. Localizable prediction of ore body is to forecast the possible spaces at depth and in the surroundings of the known ore deposit in which ore bodies might occur. Generally, geology of the deep area predicted is uncertain and it can be only infered on basis of geological phenomina exposed at surface and sub-surface and their spatial distribution. In practice the prediction must be carried out by choosing proper methods according to particnlar features, ore-controlling factors and availability of data of the ore deposit concerned.

The eighth chapter describes continuous predictions followed one by one. One prediction can not achieve the goal of accurate location of deep ore bodies. Conclusion of the primary prediction is checked by exploration engineerings. In turn results obtained from the engineerings of the predicted deep areas is used to check resonableness of state of the infered marks. The reasonableness is applied to infer state of ore-controlling marks at each point of the predicted deep area thus to repredict location of the unknown ore bodies. The deep prediction at large scale is completed in a process of "prediction-check-revision-prediction-recheck". Deep prediction of No. 108 ore deposit is a successful example showing necessity of the continuous prediction.

Theories and methodology mentioned above are drawn from the present situation in China. Explorational engineerings are recommended to the prediction. The engineering can reveal geology and structures and mineralogical and geochemical samples can be collected and comprehensive study of structure-wallrock, typomorphic mineralogy, geochemical and geophysical anomlies and spatial distribution pattern of ore bodies can be done. Muti-disciplinary data and methods must result in fruitful prediction. Prediction carried out by the authors for several gold deposits are not so completely done as mentioned above. However, the results are ok.

Participants of the projects and progras mentioned above are Zhu Xuewen, Cong Guixin, Zhang junling, Bai Yuhui and Chen Rui. Each of them makes contribution to the book. The authors take oppertunity of publication of the book to express the highest respect to them. Publication of the book is subsidized by China National Science Fund Commision, China Gold Bureau and Tianjin Geological Academy. Zhao Pengda(academian of Chinese Academy of Sciences, professor of China University of Geoscience), Liu Chengzuo(research fellow of Geological Institute of Chinese Academy of Sciences), Hou Jingru(professor of Beijing Scientific and Technological University), Huang Jiazhan(professor of Tianjin Geological Academy), Cai Yaochu(research fellow of Geological Institute of Chinese Academy of Geology and Mineral Resources)and Chen Wenming(research fellow of Ore Deposit Institute of Chinese Academy of Geology and Mineral Resources) go over manuscript of the book; Professor Zhao Pengda writes preface for the book; Li Yongming translates the introduction into English. Here the authors are sincerely grateful to them for help. Criticism is wellcome to the book.

目　录

1　脉状金矿床的地质特征 …… 1
1.1　脉状金矿床空间分布特征 …… 1
1.2　脉状金矿床矿化的时、空特点 …… 3
1.2.1　矿化期、矿化阶段 …… 3
1.2.2　金矿脉类型 …… 6
1.3　金矿体特征 …… 8
1.3.1　含金硫化物石英细脉网脉浸染带中的金矿体 …… 8
1.3.2　含金硫化物石英脉、复脉带中的金矿体 …… 8
1.3.3　矿体中金含量的变化性 …… 9
1.3.4　矿体的垂直分带现象 …… 11

2　脉状金矿床金矿化地球化学特征 …… 12
2.1　金的统计分布特征 …… 13
2.2　金矿化的最佳地球化学标志组合 …… 16
2.2.1　相关分析 …… 17
2.2.2　因子分析 …… 18
2.2.3　模糊聚类分析 …… 20
2.2.4　最佳地球化学标志组合 …… 23
2.3　金矿化元素地球化学模型 …… 25
2.4　金矿体地球化学原生晕 …… 26
2.4.1　热海金矿床标志元素的垂直分带 …… 27
2.4.2　玲珑金矿田脉状金矿床标志元素垂直分带 …… 29

3　金沉淀富集成矿的控制因素 …… 35
3.1　金的基本性质 …… 35
3.2　热液迁移循环的主要动力 …… 36
3.3　金成矿的控制因素 …… 37
3.3.1　构造及构造活动控制因素 …… 37
3.3.2　围岩控制因素 …… 40

4　脉状金矿床深部大比例尺统计预测的理论基础 …… 42
4.1　概述 …… 42
4.2　深部大比例尺矿床统计预测的理论基础 …… 43

4.2.1 求异理论…… 43
4.2.2 相似类比理论…… 44
4.2.3 空间分带理论…… 44
4.2.4 波形分布理论…… 45
4.2.5 时、空叠加理论 …… 45
4.2.6 不确定理论…… 46
4.3 脉状金矿床深部大比例尺统计预测的特点、基本内容及工作步骤 …… 46
4.3.1 脉状金矿床深部大比例尺统计预测的特点…… 46
4.3.2 脉状金矿床深部大比例尺统计预测的基本内容…… 48
4.3.3 脉状金矿床深部大比例尺统计预测的工作步骤…… 49

5 建立成矿模式…… 52
5.1 金沉淀富集成矿的理论分析…… 52
5.1.1 含金热液是一种过压流体…… 52
5.1.2 金硫氢化物络合物是金在热液中迁移最重要的存在形式…… 52
5.1.3 促使金硫氢化物络合物解体的异常事件导致金沉淀…… 52
5.2 描述性模型…… 54
5.2.1 中温热液充填型金矿床…… 54
5.2.2 热泉型金矿床…… 56
5.3 空间几何模型…… 57
5.3.1 热泉型金矿床的空间结构…… 57
5.3.2 空间几何模型图…… 60
5.4 构造-围岩异常模型 …… 60
5.4.1 构造异常…… 60
5.4.2 围岩异常…… 62

6 金矿产资源总量估计及评价…… 64
6.1 金矿产资源总量估计方法…… 64
6.1.1 体积估计法…… 64
6.1.2 矿石品位-矿床规模经验估计法 …… 93
6.1.3 齐波夫分布律估计法…… 94
6.1.4 矿产值历史资料估计法…… 98
6.2 预测区进一步找矿工作的统计决策 …… 100

7 矿体定位预测方法 …… 102
7.1 异常地质环境类比法 …… 103
7.1.1 105 矿床深部矿体定位预测 …… 103
7.1.2 10 号脉群深部矿体定位预测 …… 119
7.1.3 讨论 …… 162

7.2 空间分带模型法 …… 162
7.2.1 矿体空间分布找矿模型 …… 163
7.2.2 地球化学标志值空间变异模型 …… 164
7.2.3 矿物包体信息空间变异模型 …… 187
7.2.4 黄铁矿形态标型空间变异模型 …… 188
7.3 矿床模型法 …… 190
7.3.1 以热泉型金矿床空间几何模型为依据的矿体定位预测 …… 190
7.3.2 以构造-围岩异常模型为依据的矿体定位预测 …… 195
7.4 小结 …… 195

8 跟踪预测 …… 197

参考文献 …… 204

CONTENT

Chapter 1 Geological characteristics of quartz vein Au deposits ····· 1

1.1 Spatial distribution characteristics of quartz vein Au deposits ····· 1

1.2 Characteristics of temporal-spatial distribution of quartz vein Au deposits ····· 3

1.2.1 Mineralization periods and stages ····· 3

1.2.2 Types of ore veins ····· 6

1.3 Characteristics of Au ore bodies ····· 8

1.3.1 Au ore bodies in Au-bearing sulfide-quartz vein(veinlet)and dissemination zone ····· 8

1.3.2 Au ore bodies in Au-bearing sulfide-quartz vein and complex vein zone ····· 8

1.3.3 Au content variattion in ore body ····· 9

1.3.4 Vertical zonation of ore bodies ····· 11

Chapter 2 Geochemical characteristics of mineralization in quartz vein Au deposits ····· 12

2.1 Au distribution Characteristics by statistics ····· 13

2.2 The optimum geological mark associations for Au mineralization ····· 16

2.2.1 Correation analysis ····· 17

2.2.2 Factor analysis ····· 18

2.2.3 Fuzy cluster analysis ····· 20

2.2.4 The optimum geochemical mark associations ····· 23

2.3 Elementary geochemical model of Au mineralization ····· 25

2.4 Geochemical primary halo of Au ore body ····· 26

2.4.1 Mark element vertical zonation in Rehai Au deposit ····· 27

2.4.2 Mark element vertical zonation in quartz vein Au deposits, Linglong Au ore field ····· 29

Chapter 3 Control factors of Au precipitation and enrichment to ore ····· 35

3.1 Nature of gold ····· 35

3.2 Dynamics for flow and convection of fluid ····· 36

3.3 Control factors of Au ore formation ····· 37

3.3.1 Structure and structural activities ····· 37

3.3.2 Wall rock ····· 40

Chapter 4 Theoretical foundation for large scale statistical predition of deep quartz vein Au ore deposits ····· 42

4.1 Outline ····· 42
4.2 Theoretical base of deep ore body prediction by statistics at large scale ····· 43
4.2.1 Anomaly seeking ····· 43
4.2.2 Similarity-analogy ····· 44
4.2.3 Spatial zonation ····· 44
4.2.4 Morphological distribution of wave ····· 45
4.2.5 Temporal-spatial overprint ····· 45
4.2.6 Uncertainty theory ····· 46
4.3 Characteristics, contents and research steps of deep quartz vein Au deposit prediction by statistics at large scale ····· 46
4.3.1 Characteristics of statistical prediction of deep quartz vein Au deposit at large scale ····· 46
4.3.2 Contents of statistical prediction of deep quartz vein Au deposit at large scale ····· 48
4.3.3 Steps of statistical prediction of deep quartz vein Au deposit at large scale ····· 49

Chapter 5 Establishment of metallogenic model ····· 52
5.1 Theoretical analysis of Au precipitation and enrichment to ore ····· 52
5.1.1 Au ore fluid——an overpressure hydrothermal fluid ····· 52
5.1.2 Sulhydryl complex transporation with hydrothermal fluid ····· 52
5.1.3 Anomaly events resulting in decomposition of Au-sulhydryl complex and Au precipitation ····· 52
5.2 Descriptive model ····· 54
5.2.1 Mesothermal fracture-filling Au deposit ····· 54
5.2.2 Hot spring Au deposit ····· 56
5.3 Spatial geometric model ····· 57
5.3.1 Spatial structural features of hot spring Au deposit ····· 57
5.3.2 Spatial geometric model ····· 60
5.4 Structure-wallrock anomly model ····· 60
5.4.1 Structure anomly ····· 60
5.4.2 Wall rock anomly ····· 62

Chapter 6 Estimation and assessment of total Au mineral resource ····· 64
6.1 Estimation techniques for total Au mineral resource ····· 64
6.1.1 Volumetric estimation ····· 64
6.1.2 Empiric estimation based on ore grades and sizes of ore deposits ····· 93
6.1.3 Estimation based on Zipfs distribution law ····· 94
6.1.4 Estimation based on historic information of mineral resource values ····· 98

6.2 The statisticaly-made decision for further exploration in the predicted areas ····· 100

Chapter 7 Prediction techniques for location of ore body ····· 102
7.1 Analogy of geo-anomly settings ····· 103
7.1.1 Location prediction of deep ore bodies for No. 105 ore body ····· 103
7.1.2 Location prediction of deep ore bodies for No. 10 vein group ····· 119
7.1.3 Discussion ····· 162
7.2 Spatial zonation model ····· 162
7.2.1 Ore-searching model based on spatial distribution of ore bodies ····· 163
7.2.2 Spatial variation model of geochemical mark values ····· 164
7.2.3 Spatial variation model of fluid inclusion information ····· 187
7.2.4 Spatial variation model of pyrite typomorphs ····· 188
7.3 Deposit model ····· 190
7.3.1 Ore body location prediction based on spatial geometric model of hot spring Au deposit ····· 190
7.3.2 Ore body location prediction based on structure-wall rock anomly model ··· 195
7.4 Sub-conclusion ····· 195

Chapter 8 Follow-up prediction ····· 197

Reference ····· 204

1 脉状金矿床的地质特征

我们研究的脉状金矿床，是在三度空间上呈二向延长为主的形似脉状的金矿化体，包括含金石英脉、含金石英多金属硫化物细脉、网脉浸染破碎蚀变岩带。它们具有下列特征：

(1)形态、产状、规模等严格受断裂构造控制。

(2)显示热液成矿作用特征。热液可有多种成因与来源，如岩浆热液、火山、次火山热液、变质热液、大气降水热液和混合热液等，它们之间在成分与成生条件方面虽有一定的差别，但总体上在金的迁移循环富集成矿机制与条件方面是相似的。

(3)矿床赋存于任何时代、任何岩性的围岩中。但对一个具体的金矿化带而言，金矿床往往产于一定的地层层位上或一定的岩体中。

1.1 脉状金矿床空间分布特征

脉状金矿床主要分布在不同时代板块活动的俯冲带或碰撞接触带范围内。例如，古生代的金矿床集中分布在阿巴拉契亚褶皱带、乌拉尔山褶皱带、天山褶皱带、阿尔泰山褶皱带、华南褶皱带中。这些褶皱带都是古板块活动的俯冲带或碰撞接触带。中、新生代，脉状金矿床则集中分布成两大成矿带——环太平洋成矿带和阿尔卑斯-喜马拉雅成矿带。前者位于板块活动的俯冲带范围中，后者位于板块活动的碰撞接触带范围内。

脉状金矿床赋存的大地构造位置，对金矿床的成生十分有利。长期不断频繁活动的板块运动，使板块边界上发生强烈频繁的构造活动，形成并积聚大量热能，引发火山喷发活动、岩浆侵入活动、各种变质作用不断发生，促使金的活化转移，迁移循环，富集成矿。

在区域上，脉状金矿床具有成区、成带分布的特点。一般情况下，脉状金矿床沿着某个巨型构造带分布。在这种巨型构造带上，不但发育各种级别的断裂构造，而且沿断裂带发育多期岩浆侵入活动和火山喷发活动。各种级别的断裂构造带严格控制金矿床的空间分布，并按不同级别断裂构造特征及其组合情况，控制金矿带、金矿田、金矿床、金矿脉、金矿体的空间分布。例如，招掖金矿化带即分布在沂沐巨型转换裂解带主断裂东侧的扩容带上。因断裂构造活动长期不断，强烈频繁，造成区内以断裂为主的构造格局。1 级断裂构造是分布于矿带空间范围的 NNE 向深断裂带，由密集的 NNE 向、NE 向断裂构造组成。该断裂带形成于晚元古代，中生代达到活动的顶峰，不但引发深部选择性熔融岩浆向上侵漫，形成 NNE 向分布的燕山期花岗岩带和平行密集分布的脉岩带，而且在矿化带所处空间上，产生大量各种级别的断裂裂隙，构成完整的裂隙系统。2 级断裂构造以 NE 向、NNE 向为主，NW 向其次，少量 EW 向。NE 向、NNE 向断裂是该区最重要的控矿构造。断裂构造带出露长度一般数十千米，波及宽度数千米，沿断裂带岩石破碎，裂隙纵横，并不同程度地发育硅化、绢云母化、钾化，有时发育黄铁矿化、碳酸盐化、绿泥石化，形成绢英岩化带。在带的局部空间上发育金矿化，分布大小不等的金矿床。两条或两条以上 2 级断裂构造带的交切复合或贴近部位，控制金矿田的空间分布。3 级断裂构造呈 NE 向、NNE 向、NEE 向，控制金矿脉的空间分布。这种断裂构造中的减压空间——压扭性断裂裂隙中的局部张扭带、构造交切复合

部位、次级张裂隙等，控制矿体的产状、形态和规模。更次级的裂隙控制矿脉和矿体内部矿石组构的变化和金的贫富变化。

脉状金矿床在垂直空间上，往往有分带现象。例如，招掖金矿带上的金矿床属中温热液充填型，按所处裂隙性质及相应的物理化学环境不同，分为含金属硫化物石英脉型和蚀变岩中细脉网脉状金属硫化物石英浸染型。两个类型的矿化期、矿化阶段，金属成分、矿物成分、矿物组合和地球化学特征等基本一致。但在地理分布上，石英脉型金矿床主要出露在200m标高以上的地区，细脉网脉浸染型金矿床主要出露在0m标高以下的地区。0～200m标高为过渡带，见图1-1。单个矿脉在矿化类型上，也有垂直分带现象。图1-2是灵山沟金矿1号脉剖面图，可以看出，矿脉兼有含金属硫化物石英脉和细脉网脉状金属硫化物石英浸染两个类型。并自上而下从石英脉型矿化为主向浸染型矿化为主过渡。两者在空间上虽然没有截然的界线，但石英脉型矿化主要赋存于－20m标高以上，浸染型矿化位于－115m标高以下，－115～－20m标高是两种类型共存的过渡带。脉状金矿床这种垂直分布规律，是控矿的压扭性断裂构造向深部延伸时，局部张扭裂隙的规模逐渐变小，数量逐渐增多，从而使矿化由含金属硫化物石英脉型为主，过渡为细脉网脉状金属硫化物石英浸染型为主。

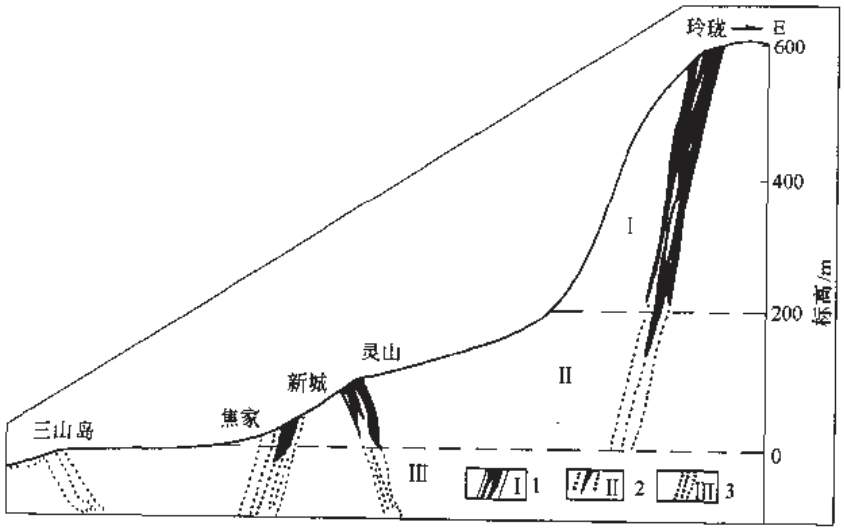


图1-1　不同类型金矿化空间分布示意图

（据范永香，1990年）

1—含金石英脉型金矿化；2—过渡型金矿化；3—含金硫化物石英细脉网脉浸染型金矿化

脉状金矿床在水平空间上，有呈等距性分布规律。例如，受控于招平断裂带的夏甸金矿床、大尹格庄金矿床、龙王水库大型土壤地球化学矿致异常分布区、台上金矿床等，相邻的两两之间相距15km。其中的台上、大尹格庄金矿床为特大型，夏甸金矿床为大型，龙王水库大型地球化学异常由宽60余米的含金蚀变岩构成，已经发现金矿体。受控于灵山沟—双目顶断裂带的黄埠岭、灵山沟、魏家沟、北截、马家等金矿床，相邻的两两之间距离为5km。此外，矿脉与矿脉之间也有等间距分布规律。例如，玲珑金矿田西山矿段，自南向北，83、92、56、55等矿脉间距为1000m。东山矿段，由南向北，38、36、210、211、33、33支等矿脉间距40～50m。

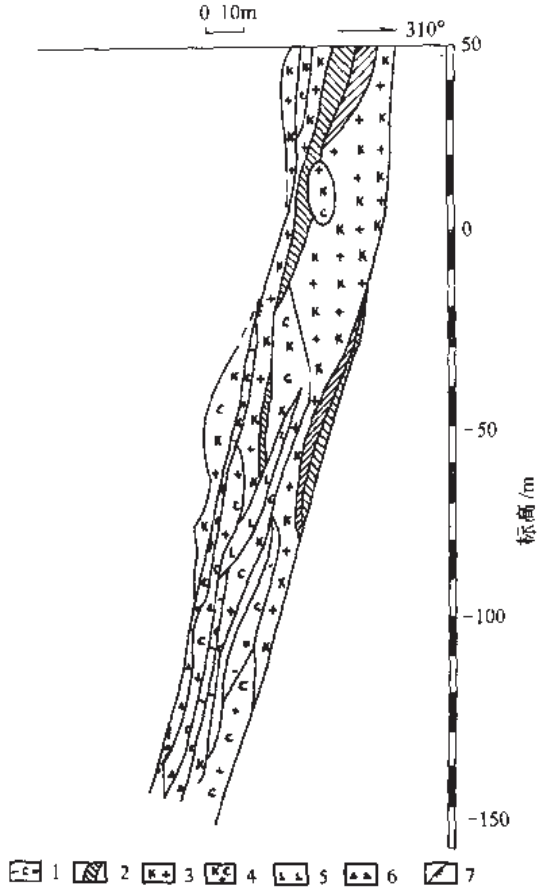


图 1-2　灵山沟金矿 1 号脉不同矿化类型垂直分带

（据张均，1990 年）

1—细脉网脉状金属硫化物石英浸染型矿化体；2—石英脉型矿化体；
3—钾化花岗岩；4—绢英岩化钾化花岗岩；5—闪长玢岩；
6—破碎带；7—断裂

1.2　脉状金矿床矿化的时、空特点

1.2.1　矿化期、矿化阶段

前已述及，脉状金矿床严格受断裂构造活动控制。因断裂构造具有长期不断频繁活动及脉动、继承等特点，除现代热泉型金矿床只有 1 期矿化外，绝大多数脉状金矿床具有多期、多阶段矿化特点，并且，总是有 2～3 个阶段是金的主要矿化阶段。在空间分布上，则表现为多期、多阶段金矿化的叠加。兹以招掖金矿化带上的金矿化为例说明之。

在招掖金矿化带上，控制热液活动的断裂构造活动，大体上分为两期。第 1 期构造活动，主应力方向为 NW—SE 向，在区域上形成 NE 向为主的断裂构造带。带内发育密集的、互相平行的压性断裂裂隙，伴有挤压片理、构造透镜体、碎裂岩、糜棱岩、断层泥等。与之相伴随，发生第 1 期金矿化。热液沿裂隙迁移，并以扩散为主的交代方式使围岩（花岗岩）绢云母化、硅化、钾长石化。在区域上沿断裂构造带形成绢英岩化破碎花岗岩带和硅化带。从表

1-1 可见，绢英岩化过程，是热液向围岩输入硅、钾，带出钠、钙、镁、铁的交代过程。这期热液活动的金矿化强度较小，绢英岩的金平均含量仅为 0.0252μg/g，不能形成工业金矿体。

第 2 期构造活动，主应力方向为 NWW-SEE 向，在区域上形成 NNE 向为主的断裂构造带。金矿化主要受这一期构造活动控制。因构造活动具有脉动、继承和由强变弱的特点，与之相对应，金矿化也是多阶段的。

表 1-1　绢英岩化过程中金属原子相对含量变化

岩　性	金属原子相对百分数/%										$\frac{I}{II}$①
	Si	Ti	Fe^{2-}	Fe^{3+}	Mn	Mg	Ca	Na	K	Al	
花岗岩(玲珑)	67.28	0.22	0.76	1.09	0.11	0.65	2.07	7.07	4.46	16.30	6.16
花岗岩(郭家岭)	63.88	0.33	1.19	1.63	0.11	1.74	3.05	6.31	4.66	16.70	4.99
绢英岩化花岗岩	70.11	0.06	0.28	0.34	0	0.17	0.03	7.39	5.28	15.73	9.44
绢英岩化花岗岩	71.05	0.11	0.57	0.34	0.06	0.34	0.63	5.77	6.51	14.56	10.14
绢英岩化花岗岩	71.30	0.11	0.40	0.40	0	0.23	0.74	6.44	5.69	14.69	9.38
红化花岗岩	71.01	0.06	0.23	0.87	0.06	0.17	0.12	5.53	5.47	16.47	11.05
黄铁矿化绢英岩	74.99	0.12	0.48	1.14	0.06	0.42	0.06	0.30	6.10	16.28	33.99
黄铁矿化绢英岩	72.82	0.12	0.48	1.68	0.06	0.42	0	0.72	7.04	17.45	24.20

①$I = Si + K$，$II = Fe^{3+} + Fe^{2-} + Mg + Ca + Na$。

第 1 阶段构造活动形成的裂隙，主体为压扭性，局部为张扭性。与之相伴随，发生第 1 阶段金矿化，在张性、张扭性裂隙中，充填脉状、细脉状、网脉状含黄铁矿石英。此时，热液温度为 300～320℃，见表 1-2，脉中常见石英集合体包含绢英岩碎块或呈细脉穿插绢英岩。石英乳白色，以半自形晶为主，少量全自形晶和它形晶，发育晶洞和晶簇。常见石英晶体垂直脉壁生长，形成梳状构造。黄铁矿含量低于 5%，呈斑晶和斑块状集合体分布于石英脉中，矿物颗粒粗大，粒径一般 5mm 以上，以全自形晶、半自形晶为主，呈立方体状晶体。金呈显微粒状、片状的银金矿和少量自然金赋存于黄铁矿和石英晶体、晶隙中。金的成色较高，银金矿中金含量一般为 65.13%～76.07%，平均 70.99%，Au/Ag 平均值为 2.61。自然金中金含量一般为 79.79%～82.76%，平均 81.28%，Au/Ag 平均值为 5.22，见表 1-3。矿石以含金黄铁矿石英为主，Au/Ag 平均值为 0.18。

表 1-2　不同矿化阶段石英包体测温结果

样　号	矿　石　名　称	矿化阶段	测定次数	温度/℃
80-2-1	黄铁矿化绢英岩	1	6	320
G-2-2	乳白色石英	1	7	300
B-1-2	含黄铁矿石英	1	6	300
B-1-3	黄铁矿石英	1	1	300
G-2-1	黄铁矿石英	2	6	320
B-1-2	含黄铁矿石英	2	5	300

续表 1-2

样　号	矿　石　名　称	矿化阶段	测定次数	温度/℃
G-2-5	黄铁矿石英	2	7	275
59-1-1	黄铁矿石英	2	9	260
56-1-1	含黄铁矿石英	3	8	230
61-1-1	黄铁矿石英	3	7	200
60-1-2	黄铁矿石英	3	10	230
G-2-4	黄铁矿石英	3	4	230
G-2-7	黄铁矿石英	3	5	220
39-2-1	黄铁矿化硅化花岗岩	3	6	200

表 1-3　不同矿化阶段金矿物电子探针分析结果

样　号	矿化阶段	矿物	分　析　结　果(质量分数)/%										Au/Ag
			Au	Ag	Fe	S	Cu	As	Cc	Zn	Se	Te	
G-2-5	1	银金矿	72.19	25.75	0.12	0.05	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.04	2.80
60-1-2	1	银金矿	73.50	27.19	0.62	0.44	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.09	2.70
C-7-1	1	银金矿	65.18	33.50	1.71	0.18	0.00	0.05	0.00	0.01	0.00	0.07	1.95
C-43-1	1	银金矿	76.07	21.94	0.40	0.13	0.00	0.00	0.02	0.00	0.06	0.04	3.47
B-1-5-2	1	银金矿	67.95	32.18	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.04	2.11
51-5-1	1	自然金	82.76	16.79	0.19	0.06	0.01	0.00	0.00	0.05	0.04	0.04	4.93
B-1-10-1	1	自然金	79.79	14.51	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.06	0.02	0.00	5.50
K-1-1	2	自然金	83.37	12.87	5.39	3.90	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	6.48
59-1-2-1	2	银金矿	75.11	23.21	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	3.03
K-15-1	2	银金矿	70.51	28.87	0.00	0.10	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	2.04
C-39-1	2	银金矿	65.33	28.82	0.04	0.10	0.00	0.02	0.00	0.01	0.09	0.01	2.21
C-37-1	3	银金矿	59.05	39.85	0.16	0.09	0.27	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	1.48
K-29-1	3	金银矿	48.27	53.10	0.33	0.10	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.91
G-6-1	3	银金矿	70.26	31.26	0.03	0.05	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	1.25

第 2 阶段构造活动形成的裂隙总体仍为压扭性,但活动强度比第 1 阶段小。裂隙只在应力最集中的第 1 阶段构造裂隙变化大的局部空间上产生。与之相伴随,发生第 2 阶段金矿化,在张性、张扭性裂隙中充填脉状、细脉状、网脉状石英黄铁矿。此时,热液温度为260～320℃,见表 1-2。石英为灰色、灰白色,它形晶为主,少量为半自形晶体。早世代黄铁矿呈中－粗粒半自形五角十二面体状和立方体状晶体及其聚形,表面发育较多的裂纹。晚世代黄铁矿多呈细粒和粉尘状集合体产出。此外,有少量磁黄铁矿和毒砂。磁黄铁矿呈块状集合体,有被黄铁矿和石英细脉穿插现象。毒砂多数呈交代残留体包含于黄铁矿中。金矿物以银金矿为主,少量为自然金,它们呈微粒状、片状赋存于黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿、石英等矿物晶体、晶隙和裂隙中。金的成色较高,银金矿中金含量一般为 63.55%～75.11%,平均 69.72%,Au/Ag 平均值为 2.63。自然金中金含量为 83.37%,Au/Ag 平均值为 6.48 见表

1-3。矿石以含金灰白色石英黄铁矿和块状黄铁矿为主，Au/Ag 平均值为 2.04。

第 3 阶段构造活动强度比第 2 阶段更弱，只在前两个阶段构造裂隙应力最集中的局部空间上形成张扭性裂隙。与之相伴随，发生第 3 阶段金矿化，形成石英(方解石)多金属硫化物脉、细脉和网脉。此时，热液温度降低至 200～230℃，见表 1-2。常见的金属矿物有黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、斑铜矿、斜方辉铅铋矿。呈脉状、不规则状、团块状集合体分布。脉石矿物为石英、方解石。金矿物以银金矿为主，少量金银矿。它们呈显微粒状、片状赋存于上述矿物的晶体、晶隙、裂隙中，在极少的情况下，以微细脉状和粒状明金形式出现。金的成色较低，银金矿中金含量一般为 59.05%～70.26%，平均 64.66%，Au/Ag 平均值为 1.37。金银矿中金含量占 48.27%，Au/Ag 平均值为 0.91，见表 1-3。矿石以含金石英(方解石)多金属硫化物为主，Au/Ag 平均值为 0.26。

以上各阶段金矿化以第 2 阶段最重要，该阶段矿化提供的金矿产资源量，占矿床资源总量的 76.52%。

因断裂构造活动具有脉动、继承、从早到晚依次变弱的特点，不同矿化期，矿化阶段的作用产物叠加在断裂构造带应力最集中的一些局部空间上，按其产状和组构特点，形成不同的矿脉类型。

1.2.2 金矿脉类型

脉状金矿床一般由不同形态、规模、产状的矿脉组成，每一条矿脉都是一个相对独立的矿化体。在生产实践中，人们总是根据实际需要把矿脉划分成矿体和非矿体两部分，其中的矿体是我们预测的对象。研究目标是估计矿脉所含的金矿产资源量，指出矿体赋存的具体空间位置。为此，详细研究矿脉，了解它们的形态、规模、产状、矿石组合、组构特点及空间分带性，矿体空间分布规律等，是开展大比例尺深部及外围统计预测的前提。

依矿脉形态、构造、产状及矿石组合、组构特点，把矿脉分为含金硫化物石英脉和含金硫化物石英细脉网脉浸染带两种类型。进一步根据矿石成分、脉体数量及其组合特点，把含金硫化物石英脉划分为含金石英脉、含金硫化物石英脉、含金硫化物石英复脉带 3 个亚类。

1.2.2.1 含金硫化物石英脉

(1)含金石英脉(图 1-3)。脉体主要由第 1 阶段矿化产物组成，以贫硫化物为特征。矿物成分以乳白色石英为主，少量黄铁矿。矿脉规模较大，长数百至数千米，宽 1～3m，少数达 10 余米。受局部张扭性裂隙控制，在空间上沿一定方向断续分布，其间以绢英岩带相隔。脉体规则完整，与围岩界线清楚。沿走向和倾向，矿脉呈舒缓波状，并经常出现分枝、复合、尖灭、再现及膨缩交替变化等现象。矿脉金含量一般不高，脉中的黄铁矿含量不足 5%，大多数呈星散状的立方体，不均匀地分布于石英脉中。有时富集成斑块状集合体，在局部空间上形成含金黄铁矿石英矿石。这种矿石分布极不均匀，构成的矿体很小，一般没有开采价值。

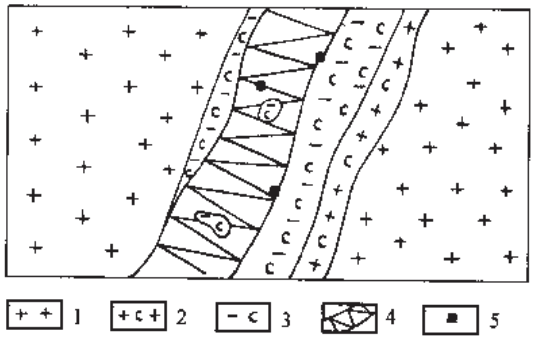


图 1-3 含金石英脉

1—花岗岩；2—绢英岩化花岗岩；3—绢英岩；4—含金石英脉；5—黄铁矿

(2)含金硫化物石英脉(图 1-4)。脉体由多个阶段的矿化产物叠加而成，是乳白色石英

脉、烟灰色石英黄铁矿脉、多金属硫化物石英脉复合而成的矿脉。规模较大，长数百至数千米，宽 1～4m，少数达 10 余米。受局部空间上的张扭性构造裂隙控制，沿一定方向断续分布，其间以绢英岩带相隔。脉体规则完整，与围岩界线清楚。沿走向和倾向，矿脉呈平缓波状，并有较多的分枝、复合、尖灭、再现及膨缩交替变化等现象。组成矿脉的矿物比较复杂，既有乳白色石英、烟灰色石英、粗粒黄铁矿、中细粒黄铁矿、粉尘状黄铁矿、磁黄铁矿，也有黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、斜方辉铅铋矿等多金属硫化物矿物。这些矿物的分布极不均匀，在矿脉膨大处、急剧转弯处、分枝复合处、二条矿脉交切处等变化大的空间以及矿脉与岩脉交切部位，多个阶段矿化产物往往集中分布叠加于一起，形成含金的金属硫化物石英矿石。其余的空间上，矿脉主要由第 1 阶段矿化产物乳白色石英构成，少量其他阶段矿化产物零星分布于脉中。金属硫化物石英矿石的金品位一段较高，构成的矿体规模较大，延伸稳定，并且延深大于延长，是可供开采的重要金矿脉。

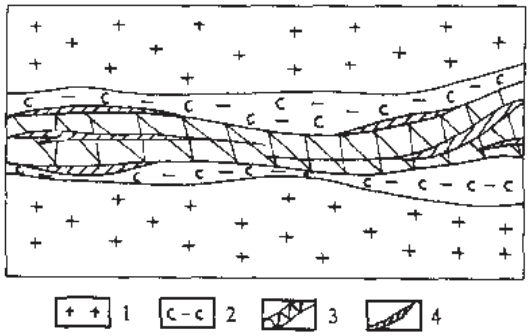


图 1-4　含金硫化物石英脉

1—花岗岩；2—绢英岩；3—含金石英(第 1 阶段)；4—含金硫化物石英(第 2,3 阶段)

(3)含金硫化物石英复脉带(图 1-5)。由数条大小不等的金矿脉及挟持在其间的绢英岩组成。矿脉在空间上彼此间有时平行，有时呈一定角度时分、时合分布，产状变化极大。脉体也是由多个阶段矿化产物构成的，特点与含金硫化物石英脉相同。复脉带长数百至数千米，脉带宽数米至数十米。矿石以含金硫化物石英和块状黄铁矿为主，少量细脉网脉状浸染含金硫化物石英。工业矿体连续性好，长数十米至数百米。矿脉与围岩间界限清楚，向深部延伸稳定。硫化物在矿脉中分布极不均匀，金品位变化极大，矿石金品位较高，是可供开采的重要金矿脉。

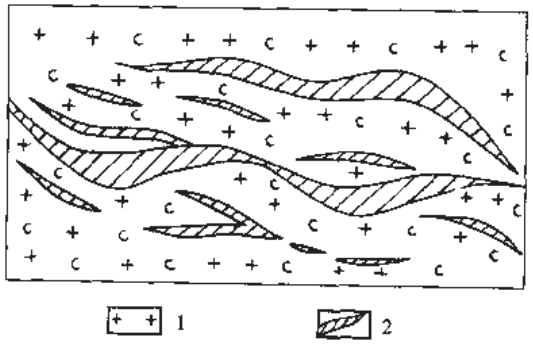


图 1-5　含金硫化物石英复脉带

1—绢英岩化花岗岩；2—含金硫化物石英脉

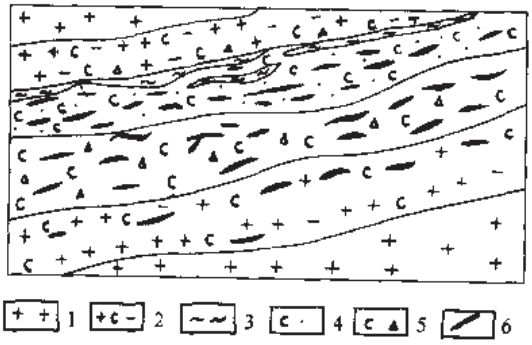


图 1-6　含金硫化物石英细脉网脉带

1—花岗岩；2—绢英岩化碎裂花岗岩；3—断层泥；4—糜棱岩(黄铁绢英岩)；5—角砾岩(黄铁绢英岩)；6—含金硫化物石英细脉网脉

1.2.2.2　含金硫化物石英细脉网脉浸染带

含金硫化物石英细脉网脉浸染带(图 1-6)大多数分布于 2 级断裂构造破碎带中。破碎带受大量密集分布的、互相平行的压性及压扭性断裂构造控制，发育挤压片理，形成长数百

米至数千米，宽数十米至数百米的蚀变岩带。在主断裂面上往往发育有稳定分布的断层泥，自断层泥向下盘，依次发育糜棱岩、碎裂岩、碎裂状围岩。向上盘依次发育碎裂岩、碎裂状围岩。

围岩蚀变自主断面向上、下盘有硅质岩、绢英岩、钾化、绢英岩化围岩的分带现象。金矿化作用主要在断裂破碎带中的微裂隙中发生，形成细脉网脉状含金石英脉、含金硫化物石英脉，它们是多阶段矿化作用的产物。矿体一般分布在主断裂面下盘 5～30m 范围内，随远离主断裂面，矿化逐渐减弱。矿石由含金硫化物石英细脉网脉浸染的绢英岩构成。矿石金品位不高，一般 10μg/g 以下，这种含金硫化物石英细脉网脉浸染带延长和延深都较稳定。圈定的矿体长度可达千米以上，延深也可达 700～800m，有时整个浸染带构成一个连续的矿体。这类矿脉结构单一，金品位较低，金含量变化较小。但矿体规模巨大，延伸稳定，往往形成大型、特大型金矿床，是可供开采的重要金矿脉。

1.3 金矿体特征

1.3.1 含金硫化物石英细脉网脉浸染带中的金矿体

前已述及，含金硫化物石英细脉网脉浸染带中的金矿体分布于主断裂面下盘 5～30m 范围内。但矿体不是随处都有的，而是赋存于容矿断裂构造的一定空间位置上。矿体由充填于碎裂岩中的细脉状和网脉状含金硫化物石英或含金硫化物构成，呈宽大的脉状体，延长数十、数百米至千余米，延深数十米至数百米，最深超过 1000m，厚度 3～9m，最厚可达 30 余米。矿体大、连续稳定，产状与断裂构造的产状一致，且完全受主断裂构造控制。矿体与非矿地段呈渐变过渡关系。矿体形态和结构简单，矿石品位不高，但规模巨大且延深稳定，往往形成大型、特大型金矿床。

1.3.2 含金硫化物石英脉、复脉带中的金矿体

矿体大多数分布于矿脉沿走向方向某些具有特定方位角的地段。即使在这种地段中，也不是随处都有矿体存在，工业矿体只出现在容矿断裂构造的一定空间部位上。矿体形态复杂，在平面和剖面上呈脉状、透镜状、不规则状，往往似雁行状排列，见图 1-7。在垂直纵

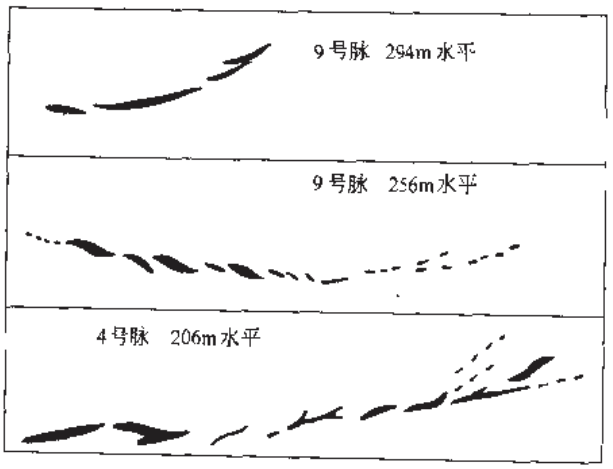


图 1-7 含金硫化物石英脉中矿体形态平面图

投影图上则表现为不规则的矿包、矿饼以及矿巢、矿柱。矿体大小不等，厚薄不一。大矿体沿走向长 300～450m，延深 250～500m。小矿体延长 20～80m。矿体厚度一般数十厘米至数米，最厚 16m，最薄 10 余厘米。在空间分布上变化极大，分枝复合、尖灭再现或侧现等现象十分普遍。沿走向和倾向，膨胀与收缩变化十分频繁。

矿体的形态和产状严格受断裂构造控制。控矿断裂构造一般为压扭性，断裂面具有舒缓波状分布特征。波状结构面的一定位置上，发育张性、张扭性裂隙和破碎带，这些减压空间恰是金矿体赋存的场所。特别当围岩成分和结构比较均匀时，在一定方向和大小的挤压力作用下，波峰、波谷等构造结构面在空间上的分布相对均匀，呈现有规律的变化。不但使矿体在形态上多数呈饼状、透镜体状，而且在空间上具有沿矿液流动方向呈多层侧列式分布特征。由于断裂构造活动的复杂性及围岩内部实际上的不均匀性，张性裂隙和张扭性裂隙在空间上的分布是不确定的，受构造裂隙控制的矿体在空间上出现与否，也是不确定的。有时一个含矿结构面控制一个矿体，有时含矿结构面上没有矿体，而只是一个金的相对富集空间，有时相邻的几个含矿结构面构成一个大矿体，见图 1-8。

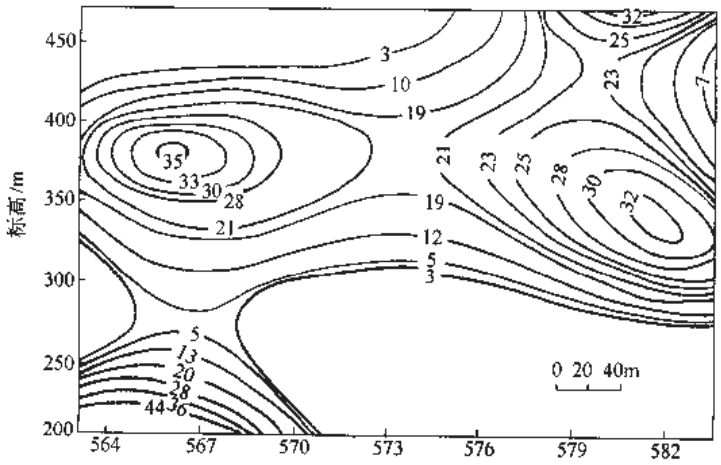


图 1-8　108 脉 9 号矿体金品位(μg/g)四次趋势面图

(据姚凤良等，1990 年)

1.3.3　矿体中金含量的变化性

无论含金硫化物石英细脉网脉浸染带中的矿体，还是含金硫化物石英脉和复脉带中的矿体，其中的金品位变化极大，与高品位矿石(例如数十 μg/g)紧邻的样品，金品位有时会低于工业利用最低数量指标(例如低于 1μg/g)，见图 1-9。这一事实表明，矿体中除满足工业利用的矿石外，还随机分布有一定数量的金品位低于工业利用最低数量指标的非矿石。也就是说，品位满足工业利用指标的矿石，在金矿体中只占一定比例，我们称之为含矿概率。对于一个矿田而言，可以通过抽样统计的方法求出。例如，在玲珑金矿田上的 7 个已知矿床中，各随机抽取一个矿体，以最低边界品位 3μg/g 为临界值，统计各个矿体包含的矿石与非矿石数量(参加统计的是刻槽样品，样长 1m 左右)，计算每个矿体的含矿概率，结果列于表 1-4。经进一步计算，得平均数 $\bar{P}=65.37\%$，均方差 $S_p=13.79\%$，变异系数 $V=0.2110$。若以平均数为该矿田金矿床的矿体含矿概率，在 95% 置信水平下，矿体含矿概率的变化区间为 37.79%～92.25%。

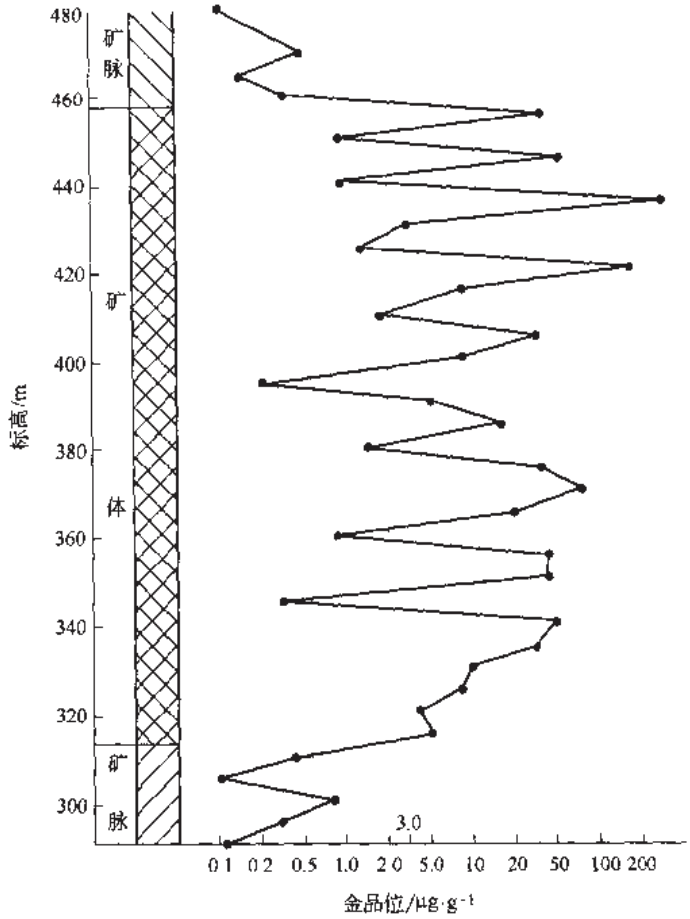


图 1-9　108 脉 2 号矿体 1 号纵剖面金品位变化曲线

表 1-4　　矿体含矿概率统计结果

矿体编号	1	2	3	4	5	6	7
总样品数/个	187	411	238	126	285	75	616
金品位高于 3μg/g 样品数/个	111	317	136	51	200	58	468
含矿概率/%	59.36	77.13	57.14	40.08	70.18	77.33	75.97

应用钻探工程查明深部地质情况，圈定矿体是重要的勘探手段之一，它与坑探工程相比，有成本低、速度快的优点。但钻探样品的代表性远不如坑探取样好，正确利用钻探结果圈定矿体是极需解决的问题。在目前的金矿钻探工作中，判断金矿体是否存在的标志是钻孔岩芯金品位高于工业利用最低数量指标和厚度大于可采厚度指标。如上所述，因金矿体中存在一定数量的非矿岩石，对一个实在矿体的判断上，有时会因钻探岩芯的金品位低于工业利用最低数量指标而使我们错误地判断矿体不存在。这种失误在详查中有可能使我们否定一个成矿远景区，在勘探中会使我们不能正确地了解矿体的形态和规模而丢失一定的储量。可见，在金矿勘查中，钻探结果具有不确定性而受概率法则所制约。减少上述失误的途径有两个，其一是增加评判标志，即除金品位外，增加变化相对小的综合评判标志。本书第 2 章中所述金元素地球化学模型即是一个很好的综合评判标志。其二是在一个矿体上增加

钻孔数量，如果有矿体存在，钻孔多了自然会打到金品位满足工业利用数量指标的矿石。但打钻要消耗人力和财力，我们的原则是，在减少上述失误的前提下，尽可能地少打钻。这里有一个求最低钻孔数的问题，需要用数学方法来解决。

在一个矿化带或矿田上，相同成因类型的矿床，矿体含矿概率是一定的。因此，在同一个矿体上打 n 个钻孔（$n=1,2,\cdots$）。用钻孔岩芯金品位进行矿与非矿的判断，相当于在相同条件下独立进行 n 次试验。则 n 个孔中有 k 个孔（$k=0,1,\cdots,n$）岩芯金品位满足工业利用数量指标这一事件，遵从二项分布，其概率为：

$$P_n(K)=C_n^kP^k(1-P)^{n-k} \tag{1-1}$$

式中，P 为矿体的含矿概率，$P_n(0)$表征打 n 个钻孔，岩芯金品位均低于工业利用最低数量指标这一事件出现的概率；$P_n(1),P_n(2),\cdots,P_n(n)$分别表征打 n 个钻孔，其中有 $1,2,\cdots,n$ 个孔岩芯金品位满足工业利用数量指标等事件出现的概率。由于我们是在成矿最有利的地段打钻，在深部有矿体存在这一假设前提下，“打 n 个钻都不见矿”属于小概率事件，其概率值通常低于 5%。因此，可用 $P_n(0)=0.05$ 求 n 值。即：

$$n=-2.9957/\ln(1-P) \tag{1-2}$$

式中，n 为所要求的最低钻孔数。

玲珑金矿田的矿体含矿概率为 65.37%，用式(1-2)计算 $n=2.8250$。表明在一个点上揭露该类型矿体时，需要随机施工 3 个钻孔才能对矿体存在与否作出确切的判断。进一步用式(1-1)计算不同孔数的见矿概率：$P_3(3)=0.2793$；$P_3(2)=0.4439$；$P_3(1)=0.2352$；$P_3(0)=0.0415$。不难看出，对该类型矿床而言，在同一点上同时打 3 个钻孔，有两个孔见矿的可能性最大。如果 3 个孔都不见矿，则表明被揭露的空间上不存在矿体。

1.3.4 矿体的垂直分带现象

有些脉状金矿床，矿体在垂直空间上往往有分带现象。以玲珑金矿田中的工业金矿体为例，矿体上部控矿构造以压扭性断裂为主，局部发育张扭性断裂，并发育有破碎带。沿断裂带发生强烈的硅化、绢英岩化。组成矿体的石英脉较连续，但硫化物矿物较少，以第 1 阶段矿化为主。矿石以粗粒自形黄铁矿、石英组合为主。矿石金品位较低，矿化不连续。

矿体中部控矿断裂构造以多期、多阶段叠加为特征。局部张扭性裂隙和分枝复合现象十分发育。矿体产状复杂多变，沿断裂带发生强烈的硅化、绢英岩化。矿体厚度大，细脉网脉状硫化物脉极发育，以第 2、3 阶段矿化叠加为特征，矿石以烟灰色石英黄铁矿、块状黄铁矿、石英多金属硫化物为主，矿石中硫化物细脉有互相穿插现象。矿石金品位高，矿化较连续。

矿体下部控矿构造具有明显的多期性，但断裂破碎带宽度明显变窄，蚀变带厚度变小，蚀变变弱。矿体厚度变小，有较多的分枝复合、尖灭再现现象出现，并时有岩脉切穿或代替矿体现象发生。以较晚阶段矿化为主。矿石以石英（方解石）多金属硫化物为主，矿石金品位跳跃式变化，矿化极不连续。

2 脉状金矿床金矿化地球化学特征

脉状金矿床的金矿化是热液循环系统长期演化过程中的一种特殊的地质现象。在热液循环系统所在的某些局部空间上，形成含金石英脉、细脉、网脉组成的矿化体。在矿化体内部，各个含金石英脉之间，具有类似的矿化特征、控制因素及分布规律。同一个含金石英脉内部各点之间千丝万缕的内在联系，使之在矿化特征上存在某种变化规律。例如，对108矿脉的金品位、水平宽度分别进行趋势面分析结果表明，金的富集带和贫化带，以及矿脉较厚带与较薄带，都分布在一定的构造结构面上，并在空间上依构造结构面的变化相间分布。向两侧（走向方向）和向深部（倾向方向）变化稳定，没有收敛的趋势，见图2-1。此外，金矿化强度、矿脉的走向方差、倾向方差、金的线金属量、充填脉体与蚀变围岩间的线金属量比值等，在垂向上也表现出稳定周期性的变化特征，见图2-2。

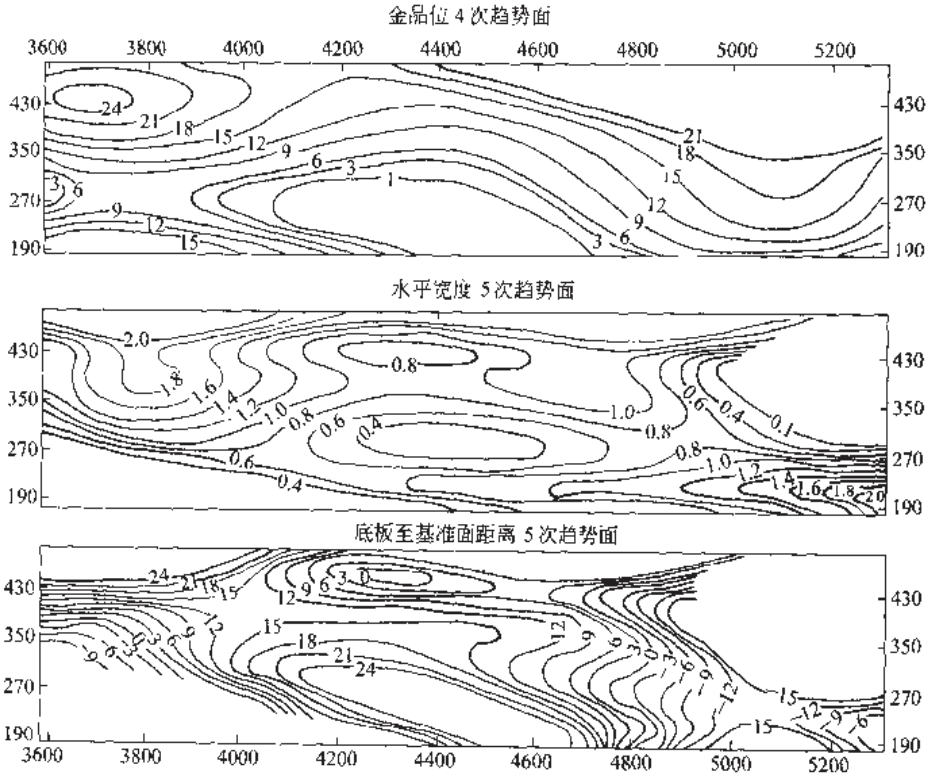


图2-1 108矿脉空间变化标志趋势面分析结果图

对后地矿段垂直空间上金的矿化规律定量研究发现，自320m标高向下，长宽各为1km，垂深400m大小的矿化块，所含的金矿产资源量以斜率0.0094的速度递减。至-120m标高处为0。与之相对应，矿化体的累积厚度自上而下逐渐减少，至-120m标高尖灭。

矿脉深部矿化与上部矿化的内在联系，以及客观上存在的金矿化空间变化规律等，给金

矿床深部预测带来可能性。也揭示了从研究上部已揭露的部分入手，探寻各种矿化信息和控矿标志的空间分布规律，将各种标志状态向下推测，用推测的标志和信息完成深部预测的研究途径。

含金热液迁移演化过程中，各种化学组分依其自身的地球化学性质，在复杂多变的环境影响下，发生沉淀或溶解反应。在热液流渗或扩散所经空间上，留下各自的痕迹。在金矿化过程中，比较重要的是那些亲硫、亲铁元素：Au、Ag、As、Sb、Hg、Bi、Se、Te、Tl、Mo、Cu、Pb、Zn、Cd、Mn、S、Fe 等。此外，W、Ba、F、Cl、CO_2 等也很重要。因不同地区、不同时代、不同期次的热液性质、活动强度和赋存环境不同，金的赋存状态、集散特点有一定的差别，与金伴生的最佳元素及其组合、各元素的空间分布等都有各自的特点。但同一类型或同一矿化带上的金矿床，金及其伴生组分在空间分布上有一定的规律性，查明它们的这种规律性，有助于我们窥探深部矿体的定位信息。因而，开展金的统计分布特征研究，确定金矿化的最佳地球化学标志组合，建立金矿化元素地球化学模型和金矿体原生晕空间分带模型是深部矿体定量定位预测工作的重要环节。

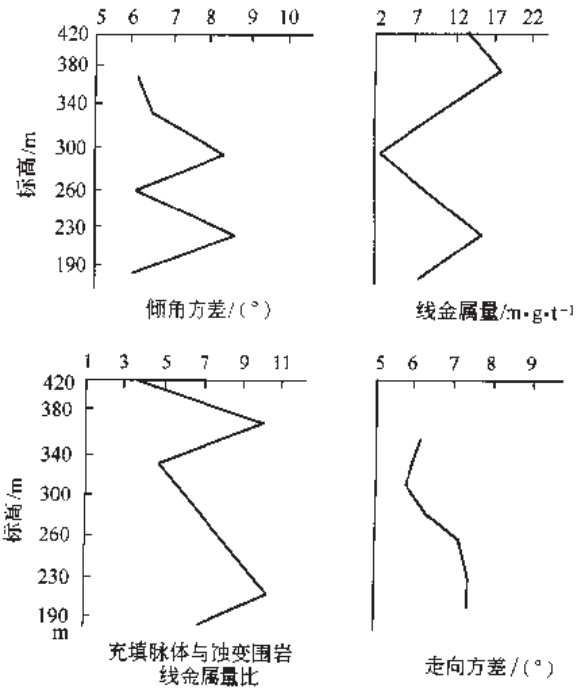


图 2-2　108 矿脉部分空间变化标志垂直变化图

2.1　金的统计分布特征

数理统计的许多基本理论和方法是以数据服从一定的分布律为基础的。地质学中通常遇到的许多连续型变量，都接近于正态分布或对数正态分布。不同成因地质体，其数据统计分布特征不同，可通过数据统计分布特征探讨地质体的成因。

地质作用的长期性、复杂性，往往使地质体经历多个形成阶段。对地质体观测取样所得数据，大多数是多种成因或多次作用叠加的产物，在统计分布特征上，往往表现为多个总体叠加的混合分布。混合分布总体的筛分和单一分布总体的研究，有助于矿床成因分析和矿产资源定量评价。

单一总体分布律的研究和混合分布总体的筛分，可在概率纸上进行。单一正态分布总体的累积概率，在正态概率纸上表现为一条直线，直线上对应于累积概率 50% 的变量等于总体平均数，对应于累积概率 15.87% 和84.13% 的变量，分别等于总体平均数减、加均方差。

混合分布总体累积概率在正态概率纸上，表现为一条有明显拐点的曲线。辛格莱 A J(Sinclair A J)认为，混合分布总体累积概率，与组成它的各单一分布总体的累积概率之间有下列关系：

$$P(A+B+C+\cdots)=f_A P(A)+f_{B+C+\cdots}P(B+C+\cdots) \tag{2-1}$$

式中，$P(A+B+C+\cdots)$为混合分布总体累积概率；$P(A)$为单一分布总体 A 累积概率；

$P(B+C+\cdots)$为剩余分布总体累积概率；f_A 为单一分布总体A 在混合分布总体中所占百分数；$f_{B+C+\cdots}=1-f_A$。

累积概率曲线上的拐点是分布总体 A 和剩余分布总体在混合分布总体中所占比例的分界点。不言而喻，找到拐点就确定了分布总体 A 在混合分布总体中所占百分数。此外，当累积概率曲线从拐点处向左移动到一定的信息水平时，混合分布总体累积概率将主要由分布总体 A 的累积概率构成。剩余分布总体累积概率在该处表现为可以忽略不计的微小数字。因此，可以用混合分布总体在该信息水平上的累积概率，估计分布总体 A 的累积概率。从而十分精确地把分布总体 A 筛分出来。重复上述筛分过程，筛分出总体 B、总体 C，直到把全部总体筛分出来。

受本身地球化学性质所制约，金在脉状金矿床中，多数情况下服从对数正态分布。并且除现代热泉型金矿床中的金服从单一对数正态分布总体外，绝大多数脉状金矿床中的金，都表现为多个单一对数正态分布总体叠加的混合分布。例如，腾冲热海热泉型金矿床的金含量就服从对数正态分布，密度分布函数为：

$$P(u)=\frac{1}{1.9873\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u+2.8392}{1.9873}\right)^2\right] \qquad (u=\ln x) \tag{2-2}$$

不仅如此，金的最佳标志元素银、砷、锑、汞、铊等，都构成单一分布总体，具有对数正态分布特征。它们的密度分布函数分别为：

$$\text{银：}P(u)=\frac{1}{2.1526\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u+0.1431}{2.1526}\right)^2\right] \qquad (u=\ln x) \tag{2-3}$$

$$\text{砷：}P(u)=\frac{1}{1.9027\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u-4.5597}{1.9027}\right)^2\right] \qquad (u=\ln x) \tag{2-4}$$

$$\text{锑：}P(u)=\frac{1}{1.7710\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u-1.6634}{1.7710}\right)^2\right] \qquad (u=\ln x) \tag{2-5}$$

$$\text{汞：}P(u)=\frac{1}{1.4695\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u+0.7588}{1.4695}\right)^2\right] \qquad (u=\ln x) \tag{2-6}$$

$$\text{铊：}P(u)=\frac{1}{0.7952\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u-0.8829}{0.7952}\right)^2\right] \qquad (u=\ln x) \tag{2-7}$$

山东玲珑金矿田 105 矿脉的金则表现为 3 个对数正态分布总体叠加的混合分布，经筛分，3 个对数正态分布总体的密度分布函数为：

$$P_1(u)=\frac{1}{1.55\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u-1.275}{1.55}\right)^2\right] \qquad (u=\ln x) \tag{2-8}$$

$$P_2(u)=\frac{1}{0.65\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u+0.58}{0.65}\right)^2\right] \qquad (u=\ln x) \tag{2-9}$$

$$P_3(u)=\frac{1}{0.94\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u+2.22}{0.94}\right)^2\right] \qquad (u=\ln x) \tag{2-10}$$

脉状金矿床金含量表现的混合分布特征，反映了多阶段金矿化在空间上的叠加。对混合分布总体筛分，求出各单一分布总体在混合分布总体中所占比例和各分布总体的分布函数，有助于定量描述各个矿化阶段的矿化规模和矿化强度，以便确定出最重要的成矿阶段。兹以招掖金矿化带金的统计分布特征研究为例，说明此问题。

为研究招掖金矿化带金的统计分布特征，在玲珑、九曲、新城、焦家、灵山沟等矿区，收集矿石样金的化学分析数据 1010 个。金含量变化范围为0.15～215μg/g。对其进行自然对数变换，变换后的数据在 －1.8971～5.3706 间变化。取对数值分组间隔 0.8276，把数据分成 10 组。计算各组的频数、频率及累积概率，把累积概率表示在正态概率纸上，从图 2-3 可见，累积概率在正态概率纸上表现为一条曲线，表明它是一个混合分布总体。用辛格莱的方法进行筛分，得到 3 个对数正态分布总体。图 2-4 描绘了 3 个对数正态分布总体的密度函数。总体Ⅰ在混合分布总体中占 40.13%，几何平均值 12.49μg/g。密度分布函数为：

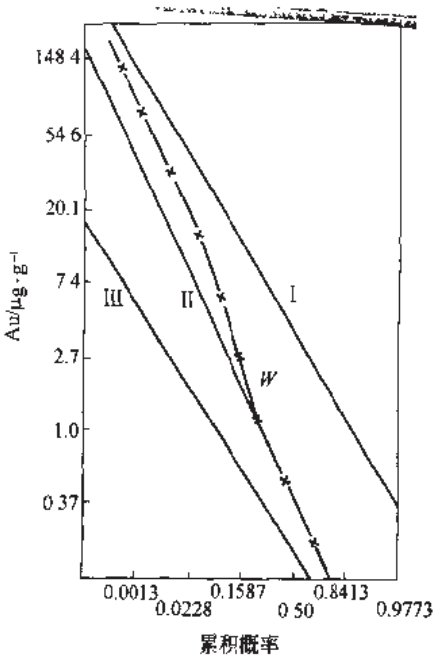


图 2-3　金品位混合分布总体筛分结果

Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ—筛分出的单一总体累积概率分布曲线；

W—混合分布总体累积概率理论分布曲线；

×—混合分布总体累积概率实测值

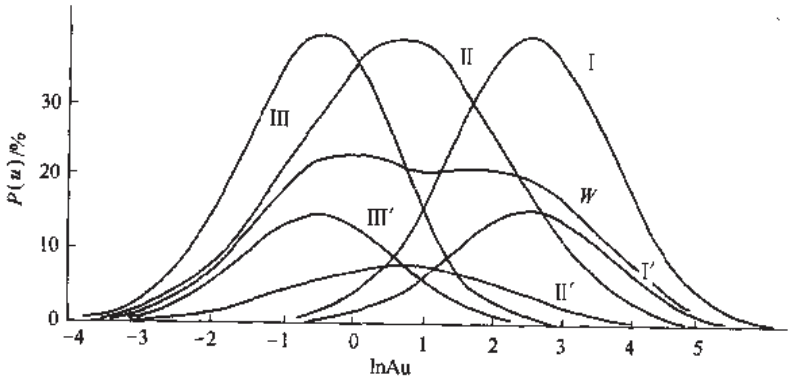


图 2-4　混合分布总体和单一分布总体密度函数曲线

W—混合分布总体密度函数曲线；Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ—各单一分布总体密度函数曲线；

Ⅰ′，Ⅱ′，Ⅲ′—各单一分布总体在混合分布总体中的密度函数曲线

$$P_1(u)=\frac{1}{1.175\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u-2.525}{1.175}\right)^2\right] \qquad (u=\ln x) \tag{2-11}$$

总体Ⅱ在混合分布总体中占 21.18%，几何平均值 1.92μg/g，密度分布函数为：

$$P_2(u)=\frac{1}{1.5\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u-0.65}{1.5}\right)^2\right] \qquad (u=\ln x) \tag{2-12}$$

总体Ⅲ在混合分布总体中占 38.69%，几何平均值 0.62μg/g，密度分布函数为：

$$P_3(u)=\frac{1}{1.0875\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u+0.4813}{1.0875}\right)^2\right] \qquad (u=\ln x) \tag{2-13}$$

为探寻各分布总体的地质意义，对筛分出的各单一分布总体进一步研究，发现金含量为0.75μg/g以下的样品，主要由总体Ⅲ构成(总体Ⅲ在该数量范围中占76.68%)。样品特征主要是含少量黄铁矿的乳白色石英，属第1阶段金矿化产物。由密度分布函数特征可以看出，该阶段金的富集程度低，金含量一般为0.07～5.44μg/g，最高16.14μg/g。金品位3μg/g以上的在该阶段矿化中占7.32%，在矿化期中占2.83%。该阶段产生的金矿产资源量仅占矿床资源总量的6.03%。

金含量7.39μg/g以上的样品，主要由总体Ⅰ构成(在该含量范围样品中总体Ⅰ占86.15%)。样品特征为烟灰色石英黄铁矿和块状黄铁矿，属第2阶段金矿化产物。从该分布总体的密度分布函数不难看出，第2阶段金矿化的富集程度很高，金含量一般为1.19～130.97μg/g，最高可达424.11μg/g。金品位3μg/g以上的在该阶段中占88.76%，在矿化期中占35.62%。第2矿化阶段产生的金矿产资源量在矿床资源总量中占76.52%，是最重要的成矿阶段。

总体Ⅱ表征第3阶段金矿化，样品特征为石英(方解石)多金属硫化物。从该总体的密度分布函数可见，第3矿化阶段的富集程度较高，金含量一般为0.1～38.47μg/g，最高可达172.43μg/g。金品位3μg/g以上的在该阶段中占38.24%，在矿化期中占8.1%。第3矿化阶段产生的金矿产资源量在矿床资源总量中占17.4%，是较重要的成矿阶段。

综上所述，筛分出的3个对数正态分布总体，分别表征金在3个矿化阶段中的数量特征。第Ⅰ、Ⅱ分布总体表征的第2、3矿化阶段，是金矿化带中两个重要的成矿阶段。

2.2 金矿化的最佳地球化学标志组合

一定的地质环境，产生一定的矿产资源。一定类型矿床，必然有一组控矿地质、地球化学标志与之相伴生。就控矿的地球化学标志而言，各种标志元素指示成矿的作用大小、性质和方向不同，在不同的成矿阶段，各种标志元素的参与程度，组合特点也不一样。对于特定的矿床或具体的成矿阶段，一定存在有最佳控矿地球化学标志组合，包括最必要的标志元素个数，它们的最优取值范围，表征其所起作用大小、性质、方向，参与程度的数学特征等。赵鹏大教授曾把它形象地比喻成针对某种特定病症的一剂中药方，它必须包括各味药材的名称和合理的剂量，两者缺一不可。为此，必须综合研究控矿地球化学标志组合，而不是仅停留在某个标志元素上；另一方面，还必须研究各标志元素的合理"剂量"，即必须定量地研究控矿地球化学标志组合，而不是仅限于定性的分析和推断。为达此目的，必须以地质、地球化学研究为基础，地球化学方法和数学地质方法相结合，对数量众多的地球化学标志进行筛选，以使标志结构最优化。这种最优的地球化学标志组合，既保证了标志个数达到最少，还不损失与成矿有直接和间接联系的主要信息。

和其他类型矿床一样，脉状金矿床也有一系列与金相伴生的标志元素。如银、铜、铅、锌、硒、碲、汞、锑、砷、铋、钨、铊、钼、铁、钴、镍、锰、锶、钡、硫等。但因不同地区脉状金矿床的物质来源和条件不同，其最佳地球化学标志组合有一定的差别。如热泉型金矿床的最佳标志元素组合为金、银、砷、锑、汞、铊。小秦岭地区脉状金矿床的最佳标志元素组合为金、银、铅、铜、锌、钼、钨、钡。金厂峪脉状金矿床的最佳标志元素组合为金、银、钼、铋。招掖金矿化带脉状金矿床最佳标志元素组合为金、银、铋、碲、钨、铜、铅、锌、硒、锰。赛乌素脉状金矿床

最佳标志元素组合为金、银、砷、锑、铅、锌、钼。

在矿床深部统计预测中，确定最佳地质、地球化学标志组合，是影响预测成败的重要工作环节。因此，以招掖金矿化带脉状金矿床最佳控矿地球化学标志组合的确定为例，介绍一些筛选最佳控矿地球化学标志的方法。

为提炼受矿化作用制约，且在不同矿化阶段差异明显的地球化学标志，对焦家、新城、灵山沟3个金矿床76个矿石样品的金、银、铜、铅、锌、铝、铋、砷、钨、硒、碲等元素化学分析数据进行研究。

2.2.1 相关分析

相关分析是依据变量在数值上的线性相关关系提炼变量组合的一种简单的统计分析方法。统计量是相关系数 r：

$$r = \frac{\sum (X_i - \overline{X})(Y_i - \overline{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \overline{X}) \sum (Y_i - \overline{Y})}} \tag{2-14}$$

提炼变量组合的基本原则是，变量组合中的各元素之间满足传递性。即当变量组合中包含 i、j、k 3个变量时，必然有 $r_{ij} \geqslant r_\lambda$，$r_{ik} \geqslant r_\lambda$，$r_{jk} \geqslant r_\lambda$。其中的 r_λ 是一定信度和自由度下的相关系数临界值。表2-1列出了各元素之间的相关系数。当信度 $\alpha = 0.05$，自由度 $f = 74$ 时，检验临界值 $r_\lambda = 0.2239$。根据上述分组原则，共提炼出7个满足传递性的变量组合，它们表征7种热液活动的地球化学标志组合：

(1)Au-Ag-W

(2)Au-Ag-Bi-Te

(3)Au-Ag-Cu-Bi

(4)Ag-Pb-As-W

(5)Cu-Se

(6)Zn

(7)Mo

其中，(1)、(2)、(3)是与金矿化关系最密切的地球化学标志组合。

表2-1 地球化学标志相关系数矩阵

元素	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Mo	As	Bi	W	Te	Se
Au	1	0.5675	0.3840	0.1343	-0.1299	-0.0417	0.1125	0.8875	0.2293	0.8461	-0.1654
Ag		1	0.4268	0.4264	0.1212	-0.0238	0.3562	0.4963	0.3297	0.4039	-0.0406
Cu			1	-0.0415	-0.0083	0.0388	0.1895	0.2613	0.1559	0.1827	-0.2472
Pb				1	-0.0051	-0.0088	0.2983	0.1949	0.2249	-0.0102	0.1003
Zn					1	-0.0247	-0.0360	-0.1889	-0.0726	-0.1673	0.0067
Mo						1	0.0194	-0.0297	-0.0775	-0.0429	0.0690
As							1	0.1781	0.2791	0.0321	-0.0443
Bi								1	0.1579	0.9352	-0.1639
W									1	0.0961	-0.0769
Te										1	-0.1348
Se											1

2.2.2 因子分析

因子分析能把多次地质作用叠加在一起的一组变量表征值提炼、归纳成少数几个综合因子，每个因子与其内部的变量之间存在线性相关关系。在地质问题上，综合因子往往是一定地质作用(或矿化阶段)的表征。因此，该方法具有筛分多变量混合分布总体的功能。其基本数学模型为：

$$X_i = a_{i1}F_1 + a_{i2}F_2 + \cdots + a_{im}F_m \tag{2-15}$$

$$F_j = B_{j1}X_1 + B_{j2}X_2 + \cdots + B_{jp}X_p \tag{2-16}$$

式中，X_i 为第 i 个变量　$i=1,2,\cdots,P$；F_j 为第 j 个综合因子　$j=1,2,\cdots,m$；a_{ij} 为 i 变量在 j 因子上的载荷。表征变量与综合因子的相关程度及其自身的变异度；B_{ij} 为 i 变量对 j 因子计量的权系数。

对招掖金矿化带脉状金矿床的 11 个元素进行因子分析，表 2-2 列出了方差极大正交旋转后的因子载荷。在主因子轴相互独立假设条件下，因子载荷表征不同地质作用下的元素组合特点、各元素与地质作用的密切程度以及所起作用大小等。从表 2-2 可归纳出下列热液活动地球化学标志组合：

第Ⅰ主因子：Au-Ag-Bi-Te

第Ⅱ主因子：Ag-Pb-As

第Ⅲ主因子：Au-Ag-Cu-Pb-As

第Ⅳ主因子：Mo

第Ⅴ主因子：Ag-Zn

第Ⅵ主因子：Se

第Ⅶ主因子：W-Ag

表 2-2　方差极大正交旋转后因子载荷矩阵

元　素	主　因　子						
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ
Au	0.9639	−0.0738	0.2151	−0.0173	0.0138	−0.0487	0.1301
Ag	0.5638	−0.5671	0.4231	−0.0164	−0.3268	0.1068	0.2512
Cu	0.2113	−0.0309	0.9646	0.0349	−0.0314	−0.1273	0.0741
Pb	0.1335	−0.9239	−0.2905	0.0124	−0.1161	0.1044	0.1402
Zn	−0.1356	0.0105	0.0263	−0.0173	−0.9889	−0.0189	−0.0467
Mo	−0.0273	−0.0051	0.0282	0.9978	0.0169	0.0330	−0.0389
As	−0.0344	−0.8895	0.3893	−0.0023	0.1985	−0.0968	0.0855
Bi	0.9763	−0.1596	0.0624	−0.0048	0.1032	−0.0806	0.0189
W	0.0893	−0.1760	0.0791	−0.0416	0.0456	−0.0396	0.9744
Te	0.9926	0.0637	0.0206	−0.0203	0.0867	−0.0479	−0.0039
Se	−0.1054	−0.0267	−0.1089	0.0344	0.0153	0.9867	−0.0364
方差贡献	3.5465	1.6264	1.2017	1.0448	1.078	0.7519	0.7121

事实上，有些地质作用相互间有密切的成因联系。因此，用斜旋转法使因子载荷矩阵结构简

化，用其探讨各地质作用之间的关系，更接近客观实际。表 2-3 列出了 Promax 斜旋转因子结构矩阵 $S=[S_{ij}]$。其中，$S_{ij}(i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m)$是第 i 个变量的向量 P_i 在斜因子轴 T_j 上的投影，相当于 i 变量与 j 斜因子轴的相关系数，表征元素与地质作用之间的密切程度。从该表可以归纳出下列地球化学标志组合：

表 2-3 Promax 斜旋转参考结构矩阵($k=3$)

元 素	结 构						
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ
Au	0.9916	-0.1837	0.3024	-0.0828	0.0662	0.2205	0.2130
Ag	0.7195	-0.7392	0.5063	0.1991	-0.3900	0.5663	0.4035
Cu	0.3517	-0.3030	0.9825	0.0651	-0.0601	0.8546	0.1418
Pb	0.2473	-0.8449	-0.1955	0.1342	-0.2219	-0.0657	0.2785
Zn	-0.1241	-0.0338	0.0336	0.5606	-0.9710	0.0656	-0.0123
Mo	-0.0398	-0.0102	0.0277	0.8043	0.1664	0.0632	-0.0568
As	0.1681	-0.9383	0.4748	-0.0308	0.0488	0.4489	0.2333
Bi	0.9867	-0.1946	0.1550	-0.1234	0.1583	0.0638	0.1072
W	0.2097	-0.3845	0.2240	-0.0791	-0.0129	0.2029	0.9947
Te	0.9593	0.0274	0.0873	-0.1452	0.1729	0.0026	0.0492
Se	-0.1365	-0.0400	-0.3267	0.0962	-0.0464	0.2496	-0.0704

斜因子轴Ⅰ：Au-Ag-Bi-Te-Cu-Pb

斜因子轴Ⅱ：Ag-Pb-As-Cu-W

斜因子轴Ⅲ：Au-Ag-Cu-As-Se-W

斜因子轴Ⅳ：Mo-Zn

斜因子轴Ⅴ：Zn-Ag-Pb

斜因子轴Ⅵ：Cu-Ag-As-Se-Au

斜因子轴Ⅶ：W-Ag-Pb-Au-As

表 2-4 列出了 Promax 斜旋转因子模型矩阵，表征各元素在不同地质作用中的变异度。从表可以看出：与第Ⅰ斜因子轴密切相关的 Au、Ag、Bi、Te 变化大，Cu、Pb 变化小；与第Ⅱ斜因子轴密切相关的 Pb、As、Ag 变化大，Cu、W 变化小；和第Ⅲ斜因子轴密切相关的 Cu、As、Se 变化大，Au、Ag、W 变化小；与第Ⅳ斜因子轴密切相关的 Mo 变化大，Zn 变化小；和第Ⅴ斜因子轴密切相关的 Zn 变化大，Ag、Pb 变化小；和第Ⅵ斜因子轴密切相关的 Se 变化大，Au、Ag、Cu、As 变化小；和第Ⅶ斜因子轴密切相关的 W 变化大，Ag、Pb、Au、As 等变化小。

表 2-5 列出了 Promax 斜旋转因子相关系数矩阵，表征不同地质作用之间的成因联系。从表不难看出，Ⅱ、Ⅲ、Ⅵ因子轴间，Ⅱ、Ⅶ因子轴间，Ⅳ、Ⅴ因子轴间，都有紧密相关关系。

从 Promax 斜旋转后的因子结构、因子模型和因子相关系数等提供的信息中，提炼出与金矿化密切相关的重要元素组合：

(1)Au-Ag-Bi-Te

(2)Au-Ag-Cu-As-Pb-Se-W

(3)Au-Ag-Pb-As-Cu-W

表 2-4　Promax 斜旋转因子模型矩阵

元素	模　型						
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ
Au	0.9803	0.1029	0.1049	−0.082	0.0184	0.0063	0.0552
Ag	0.5794	−0.4149	0.0091	0.0320	−0.2722	0.2236	0.0808
Cu	0.1651	0.0911	0.4440	0.0234	0.0040	0.1704	−0.0466
Pb	0.1420	−1.0155	−0.4594	0.0362	−0.0611	−0.1567	−0.0053
Zn	−0.0482	0.1394	0.1490	0.1615	−0.9393	−0.1434	−0.0411
Mo	−0.0046	−0.0025	0.0184	1.1052	0.6684	−0.0025	0.0137
As	−0.1057	1.0240	0.3414	−0.0550	0.2164	−0.1935	−0.1306
Bi	0.9949	−0.0452	0.0475	−0.0064	0.1049	−0.1347	−0.0622
W	0.0146	−0.0337	0.0321	−0.0430	0.0668	−0.0048	0.9804
Te	1.0242	0.2189	−0.0189	−0.0189	0.0721	−0.0419	−0.0387
Se	−0.0243	0.0672	−1.7365	−0.0094	0.0753	1.7426	−0.0220

表 2-5　Promax 斜旋转因子相关系数矩阵($K=3$)

模型	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ
Ⅰ	1	−0.2362	0.2240	−0.0604	0.0373	0.1682	0.1792
Ⅱ		1	−0.3519	−0.1204	0.2015	−0.4294	−0.3639
Ⅲ			1	0.0490	−0.0678	0.8313	0.1912
Ⅳ				1	−0.4517	0.1327	−0.0102
Ⅴ					1	−0.1482	−0.0933
Ⅵ						1	0.1832
Ⅶ							1

2.2.3　模糊聚类分析

模糊聚类分析是依据“物以类聚”的原则，对模糊集合进行客观分类的一种统计分析方法。本文提出的模糊聚类法，在分类过程中，首先建立一组基本模糊子集，通过对各子集的线性模糊度和各元素在子集中的隶属度，以及各子集间贴近度的分析，依照分类原则(要求同一类的元素间同时满足(1)自反性；(2)对称性；(3)传递性进行分类。

为提炼最佳地球化学标志组合，以相关系数为统计量(表 2-1)进行模糊聚类分析。计算结果如下：

(1)相对亲密度矩阵 $\underline{E}$：

$$\underline{E}=\begin{bmatrix}
1 & 0.7273 & 0.6364 & 0.3636 & 0.2727 & 0.0909 & 0.1818 & 0.8182 & 0.5455 & 0.8182 & 0.4545 \\
 & 1 & 0.7273 & 0.6364 & 0.2727 & 0.0909 & 0.4545 & 0.7273 & 0.3636 & 0.5455 & 0.1818 \\
 & & 1 & 0.2727 & 0.0909 & 0.1818 & 0.5455 & 0.6364 & 0.3636 & 0.4545 & 0.6364 \\
 & & & 1 & 0.0909 & 0.0909 & 0.8182 & 0.5455 & 0.6364 & 0.0909 & 0.4545 \\
 & & & & 1 & 0.3636 & 0.2727 & 0.4545 & 0.0909 & 0.5455 & 0.0909 \\
 & & & & & 1 & 0.0909 & 0.0909 & 0.2727 & 0.2727 & 0.3636 \\
 & & & & & & 1 & 0.3636 & 0.7273 & 0.1818 & 0.2727 \\
 & & & & & & & 1 & 0.1818 & 0.9091 & 0.2727 \\
 & & & & & & & & 1 & 0.3636 & 0.1818 \\
 & & & & & & & & & 1 & 0.4545 \\
 & & & & & & & & & & 1
\end{bmatrix}$$

(2)$e_\lambda=0.7$ 时的截矩阵 $F_{0.7}$:

$$F_{0.7}=\begin{bmatrix}1&1&0&0&0&0&0&1&0&1&0\\1&1&1&0&0&0&0&1&0&0&0\\0&1&1&0&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&1&0&0&1&0&0&0&0\\0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0\\0&0&0&1&0&0&1&0&1&0&0\\1&1&0&0&0&0&0&1&0&1&0\\1&0&0&0&0&0&0&1&0&1&0\\0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1\end{bmatrix}$$

按分群原则分群,得下列基本模糊子集:

a.{Au、Ag、Bi}

b.{Au、Bi、Te}

c.{Ag、Cu}

d.{Pb、As}

e.{As、W}

f.{Zn}

g.{Mo}

h.{Se}

可见,Ag、Bi、Te 是伴随金矿化的最重要指示元素。

(3)元素在基本模糊子集中的隶属度矩阵$\boldsymbol{M}$:

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix}1&0.9667&0.7895&0.3&0.4211&0.2727&0.0909&0.4545\\0.9643&0.7374&1&0.6&0.4736&0.2727&0.909&0.1818\\0.7857&0.6333&1&0.45&0.5263&0.0909&0.1818&0.6364\\0.6071&0.3667&0.5263&1&0.8421&0.0909&0.0909&0.4545\\0.3928&0.4667&0.2105&0.2&0.2105&1&0.3636&0.0909\\0.1071&0.1666&0.1519&0.1&0.2105&0.3636&1&0.3636\\0.3928&0.2666&0.5789&1&1&0.2727&0.0909&0.2727\\1&1&0.7895&0.5&0.3158&0.4545&0.0909&0.2727\\0.4286&0.4&0.421&0.75&1&0.0909&0.2727&0.1818\\0.8329&1&0.5769&0.15&0.3158&0.5455&0.2727&0.4545\\0.3571&0.4333&0.4737&0.4&0.2631&0.0909&0.3636&1\end{bmatrix}$$

(4)基本模糊子集的线性模糊度矩阵$\boldsymbol{L}$:

$\boldsymbol{L}=(0.176\quad 0.4\quad 0.4515\quad 0.4231\quad 0.4372\quad 0.4091\quad 0.3181\quad 0.5151)'$

(5)基本模糊子集间贴近度矩阵$\boldsymbol{W}$:

$$\boldsymbol{W}=\begin{bmatrix}1 & 0.9098 & 0.8575 & 0.5768 & 0.5427 & 0.4879 & 0.3731 & 0.5292\\ & 1 & 0.7698 & 0.5125 & 0.5112 & 0.5608 & 0.4309 & 0.5905\\ & & 1 & 0.6421 & 0.6159 & 0.4702 & 0.4159 & 0.6189\\ & & & 1 & 0.8835 & 0.4815 & 0.4549 & 0.5730\\ & & & & 1 & 0.4942 & 0.4870 & 0.5790\\ & & & & & 1 & 0.6783 & 0.6154\\ & & & & & & 1 & 0.6294\\ & & & & & & & 1\end{bmatrix}$$

(6)分群临界值$\boldsymbol{W}(A,B)=0.6$时的截矩阵$\boldsymbol{F}_{0.6}$:

$$\boldsymbol{F}_{0.6}=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1\\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1\end{bmatrix}$$

依分群原则分群,得图 2-5 所示的分群:

Ⅰ(一)—(二)—(三)

元素:Au、Ag、Bi、Te、Cu

元素组合:

(一)Au-Ag-Bi

(二)Au-Bi-Te

(三)Cu-Ag

Ⅱ(三)—(四)—(五)

元素:Ag、Cu、Pb、As、W

元素组合:

(三)Ag-Cu

(四)Pb-As

(五)As-W

Ⅲ(三)—(八)

元素:Ag、Cu、Se

元素组合:

(三)Ag-Cu

(八)Se

Ⅳ(六)—(七)—(八)

元素:Se、Zn、Mo

元素组合:

(六)Zn

(七)Mo

(八)Se

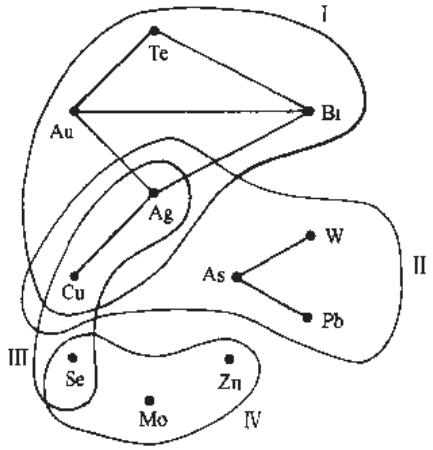


图 2-5 $\boldsymbol{W}(A,B)=0.6$时分群图

(7)元素在上列4个分群中的隶属度矩阵$\underset{\sim}{M}^*$：

$$\underset{\sim}{M}^* = \begin{bmatrix} 0.9778 & 0.6923 & 0.7692 & 0.4737 \\ 0.9111 & 0.8974 & 0.8077 & 0.3158 \\ 0.8444 & 0.8205 & 1 & 0.5263 \\ 0.4667 & 0.9487 & 0.5764 & 0.3685 \\ 0.4 & 0.2307 & 0.1923 & 0.8421 \\ 0.1778 & 0.2051 & 0.2692 & 1 \\ 0.4222 & 1 & 0.5384 & 0.1842 \\ 1 & 0.6923 & 0.6923 & 0.4737 \\ 0.444 & 0.8718 & 0.3846 & 0.3158 \\ 0.9111 & 0.4615 & 0.6153 & 0.7369 \\ 0.4889 & 0.4872 & 0.7692 & 0.8421 \end{bmatrix}$$

(8)各分群的线性模糊度矩阵$\underset{\sim}{L}^*$：

$\underset{\sim}{L}^* = (0.3889\ 0.9654\ 0.4671\ 0.5)'$

(9)各分群的贴近度矩阵$\underset{\sim}{W}^*$：

$$\underset{\sim}{W}^* = \begin{bmatrix} 1 & 0.7442 & 0.7973 & 0.5875 \\ & 1 & 0.7713 & 0.4794 \\ & & 1 & 0.6366 \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

根据隶属度、线性模糊度、贴近度提供的信息，将元素做如下分群：

第1群：表征导致金矿化的热液活动

第1亚群：

Au、Ag、Bi、Te、Cu

第2亚群：

Au、Ag、Cu、Pb、As、Bi、W

第3亚群：

Au、Ag、Cu、Bi、Se

第2群：表征不发生金矿化的热液活动

Zn、Mo、Te、Se

2.2.4 最佳地球化学标志组合

综合考虑相关分析、因子分析、模糊聚类分析结论，结合矿床学、矿物学研究成果，确定出与金矿化有关的地球化学标志组合：

(1)Au-Ag-Bi-Te

(2)Au-Ag-Cu-Bi-As-Se

(3)Au-Ag-Cu-Pb-As-Bi-W-Zn

(4)Au-Ag-W

上列4组地球化学标志组合各属哪个矿化阶段？从金在3个矿化阶段中表现的数学特征可见，金品位0.75μg/g以下的样品，主要采自第1矿化阶段形成的地质体中，从中抽取14个金含量低于0.75μg/g的样品，对金和其他元素进行相关分析，从表2-6可见，金和银、钨密切相关。银和钨的相关系数$\gamma_{Ag,W}(12)=0.8324$，两者也紧密相关。因此，第1矿化阶

段的地球化学标志组合为 Au-Ag-W。

金含量高于 7.39μg/g 的样品，主要采自第 2 阶段金矿化产物。从中抽取 12 个金品位高于 7.39μg/g 的样品，研究金与其他元素之间的相关性。从表 2-7 可见，金与银、铋、碲等密切相关。银、铋、碲三者间的相关系数分别为 $\gamma_{Ag,Bi}(10)-0.795$；$\gamma_{Ag,Te}(10)=0.8145$；$\gamma_{B,Te}(10)=0.9578$，表明 Au、Ag、Bi、Te 四者间具有紧密线性相关关系。因此，第 2 阶段矿化的地球化学标志组合为 Au-Ag-Bi-Te。

表 2-6　第 1 阶段金矿化金和其他元素相关系数表

顺序号	元素的质量分数/%										
	Au	As	Cu	Po	As	Bi	Te	Se	W	Zn	Mo
1	0 3	46	20	130	7	2	16	7.5	56	100	26
2	0.3	43	20	170	25	0.5	0.9	3	78	180	1.2
3	0.15	34	20	130	—	0.5	—	—	40	640	0.6
4	0.15	2.6	40	130	1	0.5	—	2.5	48	120	1
5	0.15	2.0	20	130	3	0.5	—	—	48	40	0.4
6	0.15	3.4	30	130	2	0.5	0.9	—	56	110	0.8
7	0.1	2.6	20	600	2	3	—	3.2	56	70	0.7
8	0.175	2.4	23	120	—	0.5	—	0.5	56	69	27
9	0.125	3.2	150	60	1	0.5	—	0.5	48	39	0.5
10	0.7	11.85	35	460	4	2	44	3.6	>110	360	0.6
11	0.6	2.0	4.0	900	1	0.5	—	2.6	5.2	610	0.8
12	0.6	3.2	170	90	5	0.5	—	2.7	4.8		0.4
13	0.75	8.6	350	280	80	25	—	3.4	95	190	1.0
14	0.425	3.6	6.0	63	4	2.5	0.5	0.5	52	620	0.2
和金之间相关系数		(14) 0.5720	(14) 0.4826	(14) 0.2841	(12) 0.5565	(14) 0.3094	(5) 0.5304	(11) 0.3185	(14) 0.5733	(13) 0.5070	(14) 0.0567

表 2-7　第 2 阶段金矿化金和其他元素相关系数表

顺序号	元素的质量分数/%							
	Au	Ag	Bi	Te	Cu	Pb	Se	As
1	38.25	22.99	2.4	5.8	725	356	0.5	32
2	112.4	22.93	50	29	41	16	0.5	70
3	123	83.26	13	37	—	5	0.5	32
4	110	84.26	36	42	109	34	1.5	150
5	26.03	21.99	12	11	24	28	—	30
6	42.86	26.95	8	17	63	377	0.5	12
7	52.5	24.94	22	31	26	44	0.5	50
8	144	112.37	140	88	230	323	2.4	—
9	86	72.54	27	27	—	170	0.5	17.8
10	30.75	25.03	9.4	13	109	106	0.5	37
11	14.29	10.07	0.1	0.2	34	48	0.35	7
12	14.82	8.97	0.2	1.7	150	35	0.35	186
和金之间相关系数		(12) 0.8863	(12) 0.8700	(12) 0.8750	(10) 0.1532	(12) −0.0857	(12) 0.5541	(11) 0.2043

各矿化阶段在空间上的紧密相依关系，使第3阶段金矿化产物与第1、2阶段金矿化产物叠加在一起，无法用抽样进行相关分析的方法来确定地球化学标志组合。但是，第3阶段金矿化在宏观上的产物是石英(方解石)多金属硫化物。不难想象，该阶段的地球化学标志，必定是包括金、银在内的多金属元素组合。而相关分析，因子分析和模糊聚类分析结论中，除去第1、第2阶段的地球化学标志组合外，剩下的恰是以多金属元素为特征的地球化学标志组合：

(1)Au-Ag-Cu-Bi-As-Se

(2)Au-Ag-Cu-As-Bi-Zn-W

其中，标志元素Zn是根据矿物学研究成果确定的。

综上所述，确定金矿床的地球化学标志如下：

最佳指示元素：Au、Ag、Bi、Te、Cu、Pb、As、Se。

一般指示元素：Zn、W。

最佳地球化学标志组合：

(1)Au-Ag-Bi-Te

(2)Au-Ag-Cu-Bi-As-Se

(3)Au-Ag-Cu-Pb-As-Bi-Zn-W

上述地球化学标志及其组合的地质、地球化学意义在于：第1矿化阶段沉淀乳白色石英和少量黄铁矿。少量Au、Ag呈银金矿赋存于黄铁矿、石英的晶体、晶隙中。W也有一定的活动，其存在形式不清楚，可能呈杂质混杂于矿石中。

第2矿化阶段沉淀烟灰色石英和黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂。大量Au、Ag呈银金矿、自然金形式赋存于黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、石英的晶体、晶隙、裂隙中。少量Te、Bi和Au、Ag呈金属互化物显微包裹体混杂于银金矿或黄铁矿中。此外，可能有极少量的Cu、Pb呈自然金属形式混杂于矿石中。

第3矿化阶段沉淀黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿和少量斜方辉铅铋矿等多金属硫化物矿物，相应的标志元素参加到上述矿物的晶格中。Au、Ag呈银金矿、金银矿赋存于上述矿物晶体、晶隙、裂隙中。在矿化阶段早期，矿液温度相对较高，较多的Se进入黄铜矿晶格，类质同象代换硫离子(硫离子共价键半径$S^{2-}=1.74\pm$；硒离子共价键半径$Se^{2-}=1.91\pm$)。因热液富含硫，也富含钼、银、铅等碱性金属离子，砷多以铜-砷硫盐形式形成类质同象混晶。到矿化阶段后期，热液温度降低，限制了硒对硫的代换，黄铜矿中硒含量减少。银和砷、铋一起类质同象代换铅($Ag^{+}+(As^{3+},Bi^{3+})\rightarrow 2Pb^{2+}$)赋存于方铅矿、斜方辉铅铋矿晶格中。值得一提的是，闪锌矿中不但有黄铜矿固熔分离体，而且也见有银金矿的固熔分离体。钨在该阶段中也有一定的活动，但赋存状态不清楚。到矿化末期，除石英外，还沉淀有方解石。有时会发现银金矿，金银矿呈微粒状、微细脉状明金形式产出。

2.3 金矿化元素地球化学模型

大量统计资料表明，在同一个矿化阶段中，金与其伴生元素之间有时存在紧密线性相关关系。考虑到金含量在空间上的极大变化性，可以利用伴生组分的数量估计金的矿化特征。但是，同一空间上矿化作用的多期、多阶段性以及各种偶然因素的影响，金与伴生元素之间的数量关系具有不确定性，需要用统计分析方法来建立金与各伴生元素间数量关系的数学

模型，即对大量观测数据进行统计分析，去除随机干扰，突出元素之间的内在联系，建立表征元素间互相制约，互相关联的数学模型。

多元回归分析是研究变量间相关关系的一种有效的统计分析方法。用该方法能够客观地建立表征金与伴生元素之间相关关系的数学模型。当金元素与 P 个元素 $C(C_1, C_2, \cdots, C_P)$ 间存在线性相关关系时，取样分析所得数据具有下列关系式：

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \cdots + b_p x_p + \varepsilon \tag{2-17}$$

式中，y 为金元素的分析数据；x_i 为伴生元素 C_i 的分析数据；b_i 为相对于 C_i 的回归系数；ε 为随机误差。

多元回归分析的任务就是根据最小二乘原理模拟随机误差 $\varepsilon \to 0$ 的线性回归方程式：

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 X_2 + \cdots + b_p x_p \tag{2-18a}$$

兹以招掖金矿化带上脉状金矿床最重要的第 2 矿化阶段金与伴生元素的回归分析为例说明之。为提炼第 2 阶段金矿化元素地球化学模型，根据各元素服从对数正态分布这一特点，模型中的因变量是金品位自然对数值。自变量是最佳指示元素银、铋、碲、铜含量的自然对数值。样本大小为 77。经计算得线性回归模型。

$$\ln Au = 0.9522\ln Ag - 0.1494\ln Bi + 0.5087\ln Te + 0.2081\ln Cu - 1.1601 \tag{2-18b}$$

$$F = 28.2195,\ F_{\ln Ag} = 20.1360, F_{\ln Bi} = 0.7738, F_{\ln Te} = 15.8542, F_{\ln Cu} = 3.6639$$

检验临界值 $F_{0.05}(4,72) = 2.5, F_{0.05}(1,72) = 3.98$。表明上列回归方程对金的含量变化有较高的指示作用。从各伴生元素的指示作用看，银、碲 2 元素的指示作用极高，而铋、铜 2 元素不具有指示作用。为此，以银、碲含量的自然对数值为自变量，重新模拟回归方程。经计算得：

$$Au = \exp[1.045\ln Ag + 0.4223\ln Te - 0.5353] \tag{2-19}$$

$$F = 58.3946, F_{\ln Ag} = 30.3605, F_{\ln Te} = 19.2345$$

检验临界值 $F_{0.05}(2,74) = 3.12, F_{0.05}(1,74) = 3.97$，表明，式(2-19)具有显著意义。银和碲对金品位具有重要的指示作用。因此，确定式(2-19)为第 2 阶段金矿化元素地球化学模型。该模型在深部矿体钻探验证工作中，具有实用意义。实践经验表明，金矿体中随机分布有一定比例的金品位低于边界品位的矿石，有时，占探工程虽然打到了矿体，但岩芯恰是这种金品位低于边界品位的矿石，单纯用金品位作评价指标，会漏失一个金矿体。此时，如果同时用银、碲品位作评价指标，有可能会通过银、碲指示的矿化信息肯定一个金矿体。

2.4 金矿体地球化学原生晕

所谓矿化，是有用组分及其伴生元素在一定空间上的沉淀富集。通常人们总是依有用组分的工业利用数量指标，把上述富集分为矿体和原生晕两部分。并且通过原生晕的发现和研究来寻找矿体。

从实际需要出发，人们对原生晕研究过程中，主要着眼于最佳控矿地球化学标志的垂向分带。根据地球化学标志的垂向分带特征，确定矿体前缘晕和尾晕。进一步探寻相关元素对在垂直空间上的变化规律，有可能提供深部矿体的定位信息。李惠对大量典型的脉状金矿床指示元素垂直分带序列的统计，总结出我国脉状金矿床指示元素分带序列：

Hg-Sb、F(B、I)-As、Pb-Zn、Ag-Au、Cu-Mo、Bi、Co、Ni(Sn)

从该分带可以看出，脉状金矿床标志元素的垂向分带属于正常分带。挥发性强，化学性

质活泼的元素处于上部，而化学性质显惰性的那些元素位于中、下部。

由于各个矿床的物质来源、形成条件有较大的差异，不同地区的脉状金矿床，最佳标志元素组合和矿体原生晕垂向分带有一定的差异，见表 2-8。因此，在对一个具体矿区开展矿体深部定位预测时，必须具体地研究该矿床的矿体原生晕垂向分带规律。

表 2-8　不同脉状金矿床原生晕垂直分带序列

矿　床	垂向分带（自上而下）	资料来源
金青顶	Sb-Pb-Zn-(Hg)-Cu-As-Mo-Au-Ag-Bi	李惠 等
	Hg(Pb)-Sb-Zn-Cu-As-Mo-Ag-Bi-Au①	
邓格庄	Zn-Hg-Pb-Ag-As-Sb-Bi-Mo-Cu-Au	李惠 等
	Pb-Ti-Zn-Ag-Mn-Cu-Au-As-Mo-Sb-Bi①	
玲　珑	Sb、Hg、As、Ag、Te、(MO)-Pb、Cu、Se、Au-Zn、Mn	李富国
	Cu(Pb)-As、Ag-Au、Te-Mn	郭光裕
赛乌素	Sb-Hg-Bi-Ag-As-Pb-Ba-Sr-Au-Co-Mo-Ni-Cl-F-Cu-Ti-V-Zn-Cr-Mn-Cd①	李惠 等
龙　水	(Hg)Pb-As-Ti、Cl-Sb-Mo-Cu、Ag、V-Ni-CO-Au、Cd-Ba、Mn、Be、Bi-Zn①	李惠 等
金厂峪	(Hg)Zn-Sb-Ti-As-Mn-Pb-Bi-Cu-Ag-Mo-Au	李惠 等
夹皮沟	(Hg、As)-Sb-F-Pb-Ag-Cu-Au-Co-Mo-Ni-Mn	朱太天
小秦岭	As、Sb、Hg、Ba—Ag、Pb、Bi、Au、W、Sn、Cu、Mo-Co、Ni	王定国
热　海	Tl-Sb-Hg-As-Ag、Au	郭光裕

①矿体浓度梯度分带。

目前，进行原生晕分带规律的研究方法有变异指数法、垂向变化梯度法、元素浓度梯度法等。下面举两个实际例子说明这些方法。

2.4.1　热海金矿床标志元素的垂直分带

热海金矿属热泉型金矿床，其最佳地球化学标志组合为 Au、Ag、As、Sb、Hg、Tl。为研究标志元素的垂直分带，按自上而下的矿床地质分带，在泉华和泉底沉积物、酸淋滤作用蚀变带、上部硅质岩带上分别取 49、134、148 个样进行化学分析，用下列方法研究 Au、Ag、As、Sb、Hg、Tl 的垂直分带序列。

2.4.1.1　变异性指数法

变异性指数法是格里戈良 C B 提出的一种确定元素垂直分带的方法。该法进行时，首先把样品按垂直地质空间——泉华和泉底沉积物、酸淋滤作用蚀变带、上部硅质岩带分成 3 组。计算 Au、Ag、As、Sb、Hg、Tl 在各组中平均含量 C。为了使各元素的量纲一致，根据具体的数值大小，依次给定每个元素一个标准化变换乘子 $K=10,1,10^{-2},10^{-1},10,1$。并按下列数学模型计算每个元素在各组中的标准化值 B：

$$B=KC \tag{2-20}$$

对各组元素的标准化值求和，用其除该组中每个元素的标准化值，得每个元素在各组中的分带指数 D。确定每个元素在不同组中的最大值，依具有最大分带指数的组，把各组分成上下两部分。分别按下列数学模型计算每个元素的变异性指数 G：

$$G = \sum D_{max}/D_i \tag{2-21}$$

进一步计算上、下两部分变异性指数 G 的差，并进行比较，不难理解，元素的变异性指数差愈小，愈位于分带序列的上部。因而可按自然数依变异性指数差从小到大赋值，按自然数由小到大排列的元素，即为从上到下变化的元素垂直分带序列。表 2-9 列出了计算过程和结果。从表可以看出，各元素在垂直空间上的分带序列自上而下为：

Tl→Sb－Hg→As→Ag→Au

表 2-9　应用变异性指数确定元素垂直分带顺序

项　目	垂直分带	Au	Ag	As	Sb	Hg	Tl	Σ
平均值 C /μg·g^{-1}	泉华和泉底沉积物	0.0129	0.2389	31.8728	4.6663	0.2432	2.6194	
	酸淋滤作用蚀变带	0.0425	0.4695	77.5658	5.1145	0.4997	2.1427	
	上部硅质岩带	0.2225	3.2655	219.0063	11.9871	0.6618	3.2426	
标准化值 B	标准化变换乘子	10	1	10^{-2}	10^{-1}	10	1	
	泉华和泉底沉积物	0.129	0.2389	0.3187	0.4666	2.432	2.6194	6.2046
	酸淋滤作用蚀变带	0.425	0.4695	0.7757	0.5115	4.997	2.1427	9.3214
	上部硅质岩带	2.225	3.2655	2.1901	1.1987	6.618	3.2426	18.7399
分带指数 D	泉华和泉底沉积物	0.0208	0.0385	0.0514	0.0752	0.392	0.4222	
	酸淋滤作用蚀变带	0.0456	0.0504	0.0832	0.0549	0.5361	0.2299	
	上部硅质岩带	0.1187	0.1743	0.1169	0.0640	0.3532	0.1730	
变异性指数 G	$G = \Sigma D_{max}/D_i$	8.3098	7.9856	3.6794	2.5448	2.8854	4.2769	
	$G_{上}$	8.3098	7.9856	3.6794	0	1.3676	0	
	$G_{下}$	0	0	0	2.5448	1.5178	4.2769	
	$G_{上} - G_{下}$	8.3098	7.9856	3.6794	－2.5448	－0.1502	－4.2769	
分带	自上而下顺序	6	5	4	2	3	1	

2.4.1.2　*垂向变化梯度法*

垂向变化梯度法是克维亚特科夫斯基 E M 提出的一种确定元素垂直分带的方法。该法进行时，首先按垂直地质空间把样品分组，计算每个元素在各组中的平均含量，给定标准化变换乘子，求出各组各元素的标准化值。按垂直空间分组的上、下次序对每个元素的标准化值求比值，得每个元素在不同垂直空间上的变化梯度值 g_r。对每个垂直空间上各元素的变化梯度值进行比较，按从小到大顺序排队，并以递增的自然数对它们赋值，称其为分带序号 N。对每个元素在各垂直空间上的变化梯度、分带序号求和。进而对各元素的变化梯度和、分带序号和分别进行比较，按从小到大顺序对它们分别排队，并以递增的自然数分别赋值。计算每个元素两种赋值的和。不难理解，两种赋值之和大的元素应该位于垂直分带序列的上部。因而按两种赋值之和从大到小对元素排队，并以递增的自然数分别赋值，即为从上到下变化的元素垂直分带序列。表 2-10 是应用垂向变化梯度法对热泉型金矿床 Au、Ag、As、Sb、Hg、Tl 等元素垂直分带序列研究的计算过程和结果。可以看出，各元素在垂直空间上的分带序列自上而下为：

Tl→Sb→Hg→As→Ag→Au

综上所述，两种方法研究所得结论相同。考虑到 Au 和 Ag 是下部起主导作用的元素，它们的变异性指数差接近，自酸淋滤作用带向上部硅质岩带，Ag 比 Au 的变化梯度大等特点，把 Au 和 Ag 置于同一个带中。因此，确定热海金矿床元素垂向分带序列自上而下为：

$$Tl \rightarrow Sb \rightarrow Hg \rightarrow As \rightarrow Ag、Au$$

2.4.2 玲珑金矿田脉状金矿床标志元素垂直分带

元素浓度变化梯度分析法

传统地球化学理论认为，受控于裂隙的热液型矿床，有用组分及其伴生元素在形成矿床侧向晕过程中，以扩散作用为主。在形成垂向晕过程中，以流渗作用为主。随原生晕各点远离矿体，各元素浓度依一定的变化梯度降低。但是，由于多阶段矿化作用在空间上的叠加，还由于各种随机因素的干扰，有用组分及其指示元素在空间上各点具有不确定性而只存在统计规律性。因而，可以根据各元素浓度在空间上的变化梯度，应用统计分析方法来研究矿体原生晕的分带。

表 2-10 按元素平均值的垂向变化梯度确定元素垂直分带顺序

项 目	垂直分带	Au	Ag	As	Sb	Hg	Tl
平均值 C /$\mu g \cdot g^{-1}$	泉华和泉底沉积物	0.0129	0.2389	31.8728	4.6663	0.2432	2.6194
	酸淋滤作用蚀变带	0.0425	0.4695	77.5658	5.1145	0.4997	2.1427
	上部硅质岩带	0.2225	3.2655	219.0068	11.9871	0.6618	3.2426
标准化值	标准化变换乘子	10	1	10^{-2}	10^{-1}	10	1
	泉华和泉底沉积物 A	0.129	0.2389	0.3187	0 4666	2.432	2.6194
	酸淋滤作用蚀变带 B	0.425	0.4695	0.7757	0.5115	4.997	2.1427
	上部硅质岩带 C	2.225	3.2655	2.1901	1.1987	6.618	3.2346
变化梯度	$\frac{A}{B}\left(\frac{g_r}{N}\right)$	$\frac{0.3035}{1}$	$\frac{0.5088}{4}$	$\frac{0.4109}{2}$	$\frac{0 9122}{5}$	$\frac{0.4867}{3}$	$\frac{1.2225}{6}$
	$\frac{A}{C}\left(\frac{g_r}{N}\right)$	$\frac{0.0580}{1}$	$\frac{0.0732}{2}$	$\frac{0.1455}{3}$	$\frac{0.3893}{5}$	$\frac{0.3675}{4}$	$\frac{0.8078}{6}$
	$\frac{B}{C}\left(\frac{g_r}{N}\right)$	$\frac{0.1910}{2}$	$\frac{0.1438}{1}$	$\frac{0.3542}{3}$	$\frac{0.4267}{4}$	$\frac{0.7551}{6}$	$\frac{1.6608}{5}$
梯度和及分带序号和	Σg_r	$0.5525^{①}$	$0.7258^{②}$	$0.9106^{③}$	$1.7282^{⑤}$	$1.6093^{④}$	$2.6911^{⑥}$
	ΣN	$4^{①}$	$7^{②}$	$8^{③}$	$14^{⑤}$	$13^{④}$	$17^{⑥}$
	Σn	$2^{①}$	$4^{②}$	$6^{③}$	$10^{④}$	$8^{⑤}$	$12^{⑥}$
分带	自上而下顺序	6	5	4	2	3	1

为研究玲珑金矿田脉状金矿床地球化学原生晕，对大开头矿段 52 号脉 83 剖面进行地质、地球化学、数学地质研究。从图 2-6 可见，52 号脉所在空间上，发育一组 *NE* 向的，平行密集分布的张性裂隙，使矿床在该处膨大，发育成透镜体状矿体，延深长 355m，最大宽度 13m，产状 133°∠63°。矿体中发育灰白、烟灰色石英黄铁矿脉，乳白色含黄铁矿石英脉，石英(方解石)多金属硫化物脉以及少量黄铁矿化绢英岩，黄铁矿化、绢英岩化花岗岩。脉中金属矿物以黄铁矿为主，还有黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、斜方辉铅铋矿。脉石矿物以石英、方解石为主，还有少量绢云母、绿泥石。金主要呈银金矿赋存于上述金属矿物和石英的晶体、晶隙、裂隙中。矿体围岩为似斑状花岗岩。近矿围岩破碎，发育硅化、绢英岩化、黄铁矿化、碳

酸盐化。矿体中金含量为2～290.6μg/g,其中3μg/g以上的占71.93%。按金的统计分布模型计算,第1矿化阶段富集的金在矿体中占13.97%,平均浓度2.93μg/g,其中金品位3μg/g以上的在该矿化阶段中占18.47%,在矿体中占4.34%。第2矿化阶段富集的金在矿体中占63.55%,平均浓度13.42μg/g,其中金品位3μg/g以上的在该矿化阶段中占95.77%,在矿体中占54.65%。第3矿化阶段富集的金,在矿体中占22.48%,平均浓度2.82μg/g,其中金品位3μg/g以上的在该阶段矿化中占64%,在矿体中占12.43%。

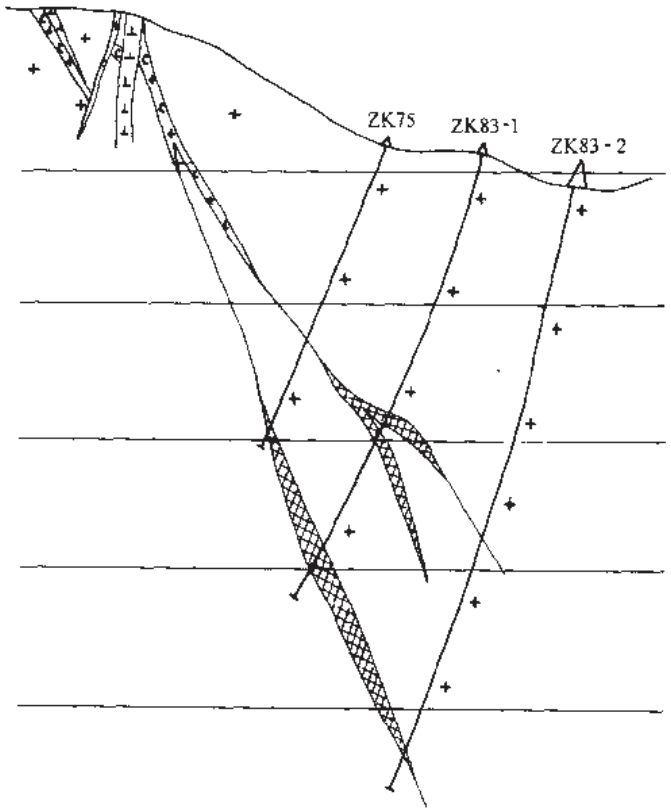


图2-6　52号脉83线地质剖面图

综上所述,金的3个矿化阶段,在矿体中都有较大的富集。但仍以第2矿化阶段为主,第3矿化阶段其次。

表2-11　52号脉83剖面矿体及其侧向晕中指示元素相关系数矩阵

元素	Au	Ag	Bi	Te	Cu	Pb	As	Se	Mn
Au	1	0.8291	0.7833	0.6754	0.6189	-0.3781	0.9144	-0.0758	0.3799
Ag		1	0.9564	0.5363	0.9173	-0.1398	0.8617	-0.0661	0.3068
Bi			1	0.4839	0.8972	-0.0638	0.8082	-0.1205	0.0613
Te				1	0.6754	-0.3633	0.7569	0.2054	0.1873
Cu					1	-0.1185	0.6543	-0.3465	-0.0484
Pb						1	-0.1445	0.4233	0.1320
As							1	0.0883	0.2204
Se								1	-0.1622

为提炼与金密切相关的一组伴生元素，对矿体及其原生晕中的 Au、Ag、Bi、Te、Cu、Pb、As、Se、Mn 等进行相关分析，表 2-11 列出了计算结果。当信度 $\alpha=0.05$，自由度为 13 时，检验临界值 $\gamma_\alpha=0.514$。不难看出，Ag、Bi、Te、Cu、As 等与 Au 密切相关。并且，除 Bi、Te 间相关系数稍低于临界值外，上列元素彼此间也密切相关。Mn 虽然和其他元素间不存在线性相关关系，但它紧密伴随矿体中的碳酸盐矿物富集，是第 3 矿化阶段的最后产物，属近矿体的指示元素。因此，确定与金矿化密切相关的成晕元素：Au、Ag、Bi、Te、Cu、As、Mn，它们在矿体及其两侧的含量变化特征见图 2-7。下面，用元素浓度变化梯度分析法研究上列各元素的空间分带。

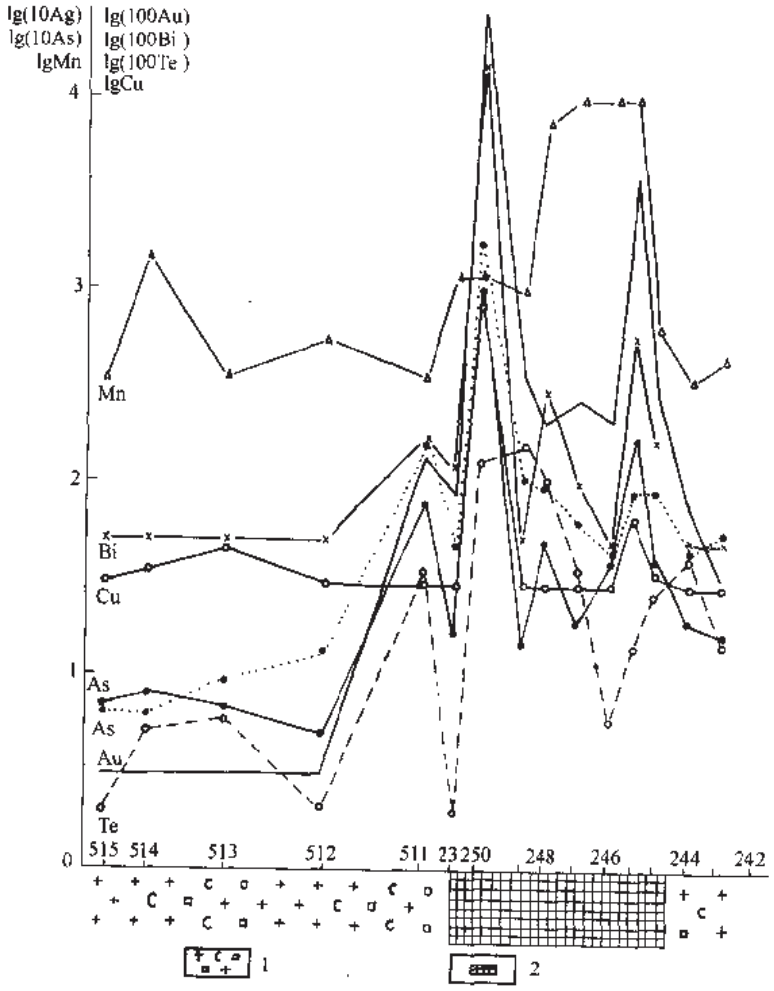


图 2-7　玲珑 52 号脉 83 剖面矿体中心及其外围指示元素含量变化曲线

1—黄铁矿化绢英岩；2—金矿体

在矿体侧向晕研究中，把包括矿体及其侧向晕在内的地球化学剖面分作矿体、矿体上盘晕、矿体下盘晕三部分。用指示元素在各部分的几何平均值代表各元素在矿体中心点、上盘晕中心点、下盘晕中心点的浓度。以各元素在矿体中心点的浓度为单位分别对各元素在矿体中心点、矿体上盘晕中心点、矿体下盘晕中心点的浓度进行变换。分别依矿体中心点至上、下盘晕中心点的距离计算有用组分及其伴生元素的平均浓度变化梯度。参考各元素矿化异常下限值，计算各元素的异常范围。表 2-12 列出了计算过程和结果。从表可以看出：

(1)金矿体侧向晕具有上盘晕窄,下盘晕宽的特点;

(2)上盘晕中,各指示元素原生晕范围由大到小排列顺序为:Te-Ag-Cu-Au-As-Mn。

相对而言,Te异常指示样品空间向下3.77～4.74m见矿;Te、Ag组合指示样品空间向下2.28～3.77m见矿;Te、Ag、Cu组合指示样品空间向下1.61～2.28m见矿;Te、Ag、Cu、Au组合指示样品空间向下1.35～1.61m见矿;Te、Ag、Cu、Au、As组合指示样品空间向下1.26～1.35m见矿;Te、Ag、Cu、Au、As、Mn组合指示样品空间向下0～1.26m见矿。

(3)下盘晕中,各指示元素原生晕范围从大到小排列顺序为:Ag-Cu-Mn-Au-As-Te

表2-12　玲珑大开头矿段52号脉83剖面指示元素侧向矿化特征表

矿化特征	指示元素浓度标志	Au	Ag	As	Te	Cu	Mn
上盘晕	异常浓度/μg·g⁻¹(几何平均值)	0.47	1.54	0.20	0.15	0	46.9
	与矿体中心浓度的比值	0.0576	0.2554	0.0271	0.3192	0	0.0151
	用比值表示的平均浓度梯度	0.1229	-0.0971	-0.1268	-0.0888	-0.1304	-0.1284
矿体	异常浓度/μg·g⁻¹(几何平均值)	8.16	6.03	7.37	0.47	25.2	3102.7
	与矿体中心浓度的比值	1	1	1	1	1	1
	用比值表示的平均浓度梯度	0	0	0	0	0	0
下盘晕	异常浓度/μg·g⁻¹(几何平均值)	0.06	0.88	0.31	0.05	2.9	240.6
	与矿体中心浓度的比值	0.0074	0.1459	0.0426	0.1034	0.1151	0.0776
	用比值表示的平均浓度梯度	-0.0574	-0.0494	-0.0968	-0.1025	-0.0512	-0.0533
指示元素最低异常值距矿体距离/m	上盘晕	1.61 (8.14)①	3.77 (10.30)	1.35 (7.88)	4.74 (11.27)	2.28 (8.81)	1.26 (7.79)
	下盘晕	10.90 (17.49)	13.73 (20.26)	3.80 (10.33)	3.23 (9.76)	13.02 (19.55)	12.22 (18.75)

①括弧中数字表征指示元素最低异常值到矿体中心距离。

相对而言,Ag、Cu组合指示样品空间位于矿体下盘12.22～13.73m处;Ag、Cu、Mn组合指示样品空间位于矿体下盘10.90～12.22m范围;Ag、Cu、Mn、Au组合指示样品空间位于矿体下盘3.8～10.9m范围;Ag、Cu、Mn、Au、As、Te组合指示矿体空间位于矿体下盘0～3.8m范围。

为研究矿体垂向晕特征,分别在(1)400m标高(上部晕)、(2)225m标高(上部晕)、(3)10m标高(矿体)、(4)-135m标高(下部晕)进行地球化学剖面取样分析。分别计算各剖面中指示元素的几何平均值,用它们代表元素在不同空间上的浓度。以矿体浓度为单位进行变换后,依矿体中心点距各剖面的距离计算各元素在矿体上部晕、矿体下部晕中的分布范围。表2-13列出了计算过程和结果。从表可以看出:

表 2-13　玲珑大开头矿段 52 号脉 83 剖面指示元素垂向矿化特征表

矿化特征及标高/m	指示元素浓度标志	Au	Ag	Te	Cu	As	Mn
矿体上部晕（+400）	异常浓度/$\mu g \cdot g^{-1}$（几何平均值）	0.01	0.30	0.0	16.7	0.40	—
	与矿体中心浓度的比值	0.0012	0.0498	0.0	0.6627	0.0543	—
	用比值表示的平均浓度梯度	-0.0021	-0.0020	-0.0022	-0.0007	-0.0020	—
矿体上部晕（+225）	异常浓度/$\mu g \cdot g^{-1}$（几何平均值）	0.22	1.34	0.22	15.8	0.30	18.4
	与矿体中心浓度的比值	0.0270	0.2222	0.4681	0.6270	0.0407	0.0059
	用比值表示的平均浓度梯度	-0.0036	-0.0029	-0.0020	-0.0014	0.0036	-0.0037
矿体中心（+10）	异常浓度/$\mu g \cdot g^{-1}$（几何平均值）	8.16	6.03	0.47	25.2	7.37	3102.7
	与矿体中心浓度的比值	1	1	1	1	1	1
	用比值表示的平均浓度梯度	0	0	0	0	0	0
矿体尾部晕（-135）	异常浓度/$\mu g \cdot g^{-1}$（几何平均值）	0.05	0.39	0.13	19.8	0.61	39.7
	与矿体中心浓度的比值	0.0061	0.0647	0.2766	0.7857	0.0828	0.0128
	用比值表示的平均浓度梯度	-0.0058	-0.0054	-0.0042	-0.0012	0.0053	-0.0057
指示元素最低异常值距矿体中心点距离/m	矿体上部晕	465.12 (290.12)①	488.87 (313.87)	464.55 (289.55)	1377.25 (1202.25)	491.21 (316.21)	269.61 (94.61)
	矿体下部晕	173.78 (0)①	184.66 (9.66)	238.76 (63.76)	806.03 (631.03)	188.31 (13.31)	114.96 (0)

①括弧中数字表征指示元素最低异常值到矿体距离。

(1)矿体上部晕比矿体下部晕规模大。

(2)上部晕中，各指示元素原生晕范围由大到小排列顺序为：Cu-As-Ag-Au-Te-Mn。其中，Cu 异常指示样品空间向下 314～1200m 范围内出现矿体；Cu、As、Ag 组合指示样品空间向下 290～314m 范围内出现矿体；Cu、As、Ag、Au、Te 组合指示样品空间向下 95～290m 范围内出现矿体；Cu、As、Ag、Au、Te、Mn 组合指示样品空间以下 0～95m 范围内出现矿体。

(3)下部晕中，各指示元素原生晕范围由大到小排列顺序为：Cu-Te-As-Ag-Au、Mn 其中，Cu 异常指示矿体在样品空间上部 64～630m 范围内；Cu、Te 组合指示矿体在样品空间上部 13～64m 范围内；Cu、Te、As、Ag 异常组合指示矿体在样品空间上部 0～10m 范围内；Au 和 Mn 不形成矿体下部晕。

综上所述，指示矿体上部晕的异常组合为：(1)Cu、As、Ag；(2)Cu、As、Ag、Au、Te；(3)Cu、As、Ag、Au、Te、Mn。指示矿体下部晕的异常组合为：①Cu、Te；②Cu、Te、As、Ag。而单独的 Cu 异常指示作用模糊。

根据上列研究，绘出模拟金矿床的指示元素 Au、Ag、Te、Cu、Mn 原生晕分带模型，见图 2-8。

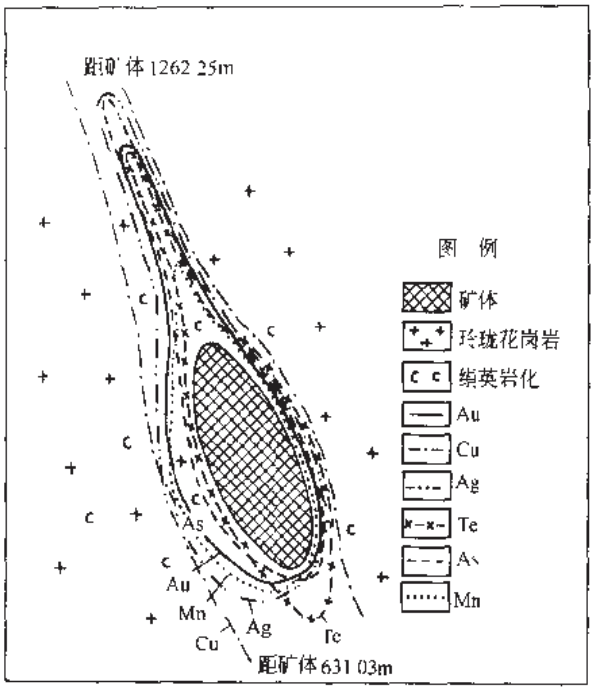


图 2-8　矿体原生晕经验模式

3 金沉淀富集成矿的控制因素

3.1 金的基本性质

金是化学元素周期表第六周期 IB 族元素，外层电子数为 1，次外层电子数为 18。具有亲硫、亲铁性。电离势、电负性、氧化还原电位等均较高。化学性质显惰性。在自然界中，主要以原子状态存在。金原子几乎不溶于水，在水溶液中，哪怕只有十分微少的金，也会迅速沉淀下来。因金的地壳丰度只有 1ng/g，要形成工业品位的矿石，需要经过数千，甚至上万倍的富集。

金虽然是一种化学性质不活泼的元素，但在高温环境下，也会变得不稳定而发生电离。当溶液中有含量较高的 HS^-、S^{2-}、CO_3^{2-}、CN^-、CN_3^- 及卤族元素时，金能和它们构成络阴离子。特别当热液富含碱质时，这种络合物在热液中有较高的溶解度。

在低氧化还原电位的高温高压热液中，金主要以正一价氧化态形式出现。Au^+ 具有半径大(0.137nm)，电离势高(8778J/mol)，极化性强，外层有多变位的 d—电子等特点。是一种松散的电子接收体(Seward T M,1988)，与 HS^- 之类松散的"b"类配位基相互结合，在能量上是优先的。因而，下列金的硫氢化物络合物对金在热液中的迁移循环十分有利：

$[Au(HS)]^0$ 在酸性介质中稳定存在；

$[Au(HS)S]^2$ 在碱性介质中稳定存在；

$[Au(HS)_2]^-$ 在弱酸至弱碱性介质中稳定存在。

金与卤族元素也能结合成易溶的络合物。结合能力及其在热液中的稳定性，依 $Cl^- \rightarrow Br^- \rightarrow I^-$ 顺序增加。由于热液中氯的含量比溴和碘大得多，在自然界中以金氯的络合物较为重要。

Au^+ 在热液中可呈简单化合物 AuCl 和络合物 $[AuCl_2]^-$ 两种形式出现。但简单化合物在热液中极不稳定，很快被分解并歧化：

$$AuCl \rightleftharpoons Au^+ + Cl^-$$

$$3Au^+ \longrightarrow Au^{3+} + 2Au^0$$

Au^{3+} 的离子电位较高。酸性较 Au^+ 强，故能够形成随介质酸碱度从酸性向碱性变化的 $[AuCl_4]^-$、$[AuCl_3(OH)]^-$、$[AuCl_2(OH)_2]^-$、$[AuCl(OH)_3]^-$ 金氯化物络合物系列。

大量实验数据表明，环境温度对金硫氢化物络合物和金氯化物络合物在热液中的稳定性有很大的影响。范宏瑞(1991 年)的实验结果表明，当 $t=250℃$ 时，以金氯化物络合物形式从岩石中浸出的金，淋滤迁出率仅为 5.4%；$t=350℃$ 时为 6.81%；$t=450℃$ 时为 17.41%；$t=550℃$ 时为 17.69%。以金硫氢化物络合物形式从岩石中迁出金的数量恰恰相反，当 $t=250℃$ 时，淋滤迁出率高达 28.4%；$t=350℃$ 时降低到 18.92%。Seward T M (1988 年)有关金在 350℃ 的 NaCl—HCl 溶液中溶解度的测定结果也表明，在接近中性的氯化物溶液中，金是很难溶解的，此时，$[AuCl_2]^-$ 比 $[Au(HS)_2]^-$ 在溶液中的稳定性低约 20 个

数量级。

在还原条件下，热液中的硫以 H_2S、HS^-、S^{2-} 形式存在，其综合平衡化学反应式为：

$$H_2S \rightleftharpoons H^+ + HS^- \rightleftharpoons S^{2-} + 2H^+$$

各种形式在热液中的相对含量，受温度和酸碱度制约。图 3-1 是在 25℃ 和 227℃ 条件下，热液中不同形式硫的优势场相图。不难看出，随着温度的逐渐升高，HS 的稳定范围越来越小，而 S^{2-} 的稳定范围逐渐增大。当温度超过 290℃ 时，HS^- 的稳定域就很小了。HS^- 的减少，势必影响金硫氢化物络合物的稳定性。

综上所述，当温度在 400℃ 以上时，金主要以金氯化物络合物（介质由酸性到碱性依次为 $[AuCl_4]^-$、$[AuCl_3(OH)]^-$、$[AuCl_2(OH)_2]$、$[AuCl(OH)_3]^-$、$[AuCl_2]^-$）和其他金的卤化物络合物形式在热液中稳定存在。当温度在 400℃ 以下时，金主要以硫氢化物络合物（介质由酸性到碱性依次为 $[Au(HS)]^0$、$[Au(HS)_2]^-$、$[Au(HS)S]^{2-}$）形式在热液中稳定存在。

大量矿物液态包裹体测试结果表明，大多数脉状金矿床，金沉淀时的温度在 350℃ 以下，热液一般呈弱酸到弱碱性。因而，$[Au(HS)_2]^-$ 是金在热液中迁移循环的重要形式。

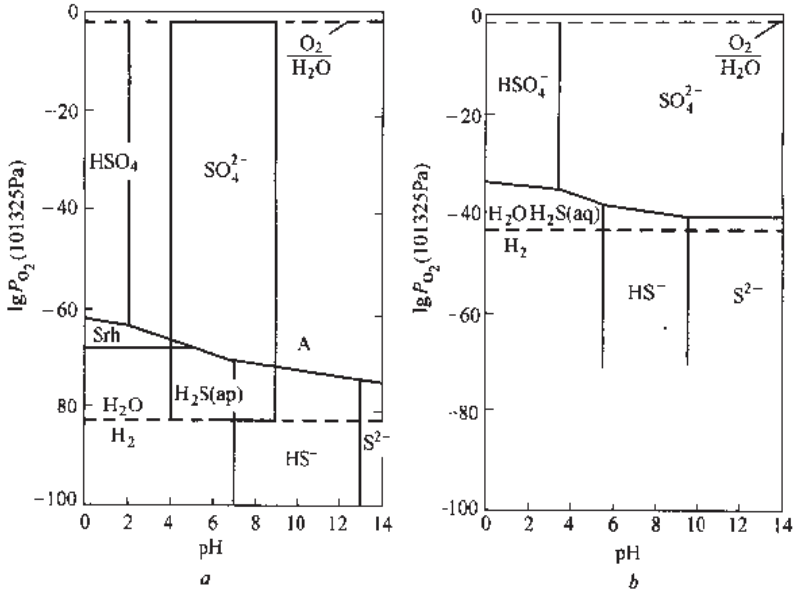


图 3-1 硫溶解类型优势场相图

（据克劳斯科普，1967 年）

a—t = 25℃；b—t = 227℃

$\sum S$ = 0.001mol

3.2 热液迁移循环的主要动力

众所周知，地下深处的热液赋存于各种裂隙、孔隙构成的裂隙系统中。这种系统如果是一成不变的“死”空间。尽管热液本身具有高温过压性质，它们在其中也无法流动，因而不能进行迁移循环。热液各部分温度、压力和物质成分的不均衡，只能通过传导的方式进行内部调节，使不同空间上热液的温度、压力逐渐趋于平衡。不同空间热液物质成分的不均一，也只能靠扩散作用方式进行内部调节，使之达到平衡状态。不难想象，这样的平衡速度是相当

缓慢的。上述平衡过程和结果，使物质成分在热液中达到均一化，对成矿十分不利。

断裂构造活动经常不断地发生，会不断地改变裂隙系统的内部结构。在断裂构造活动作用下，原来张开的裂隙有可能闭合，原来闭合的裂隙有可能张开，原来没有裂隙的空间有可能产生新的裂隙。这些变化都会改变裂隙系统的内部结构，使热液所处环境压力条件发生大幅度的改变。张开裂隙的闭合会产生压力，闭合裂隙的张开及新裂隙的出现会产生减压空间。这一切都会引起高温过压热液的流动而发生迁移循环。如果构造活动经常不断地发生，裂隙自身的张开与闭合，裂隙空间的扩容与收缩，以及新裂隙的产生等，会随着时间的向前推移，伴随着构造活动，在不同的空间上出现，这就意味着热液赋存环境不断地有新的减压空间出现，使热液不断地发生迁移循环。可以断言，热液本身特有的高温过压性质和频繁不断发生的构造活动是热液迁移循环的主要动力。

3.3 金成矿的控制因素

既然金在热液中以络合物的形式稳定迁移，那些导致络合物解体的因素，应该是金沉淀富集的控制因素。

3.3.1 构造及构造活动控制因素

大量地质事实表明，断裂构造和断裂构造活动，是脉状金矿床最重要的控制因素。例如，山东招掖金矿化带即位于沂沭巨型转换裂解带内的扩容带上，受长期不断的构造活动影响，这里岩石破碎、裂隙纵横，岩浆岩、脉岩遍布，成为地壳薄弱带和构造-岩浆强烈频繁活动带，这种构造环境对金矿化有下列控制作用：

(1)断裂构造活动控制了金矿床的主要围岩——燕山期花岗岩的成生和分布。从

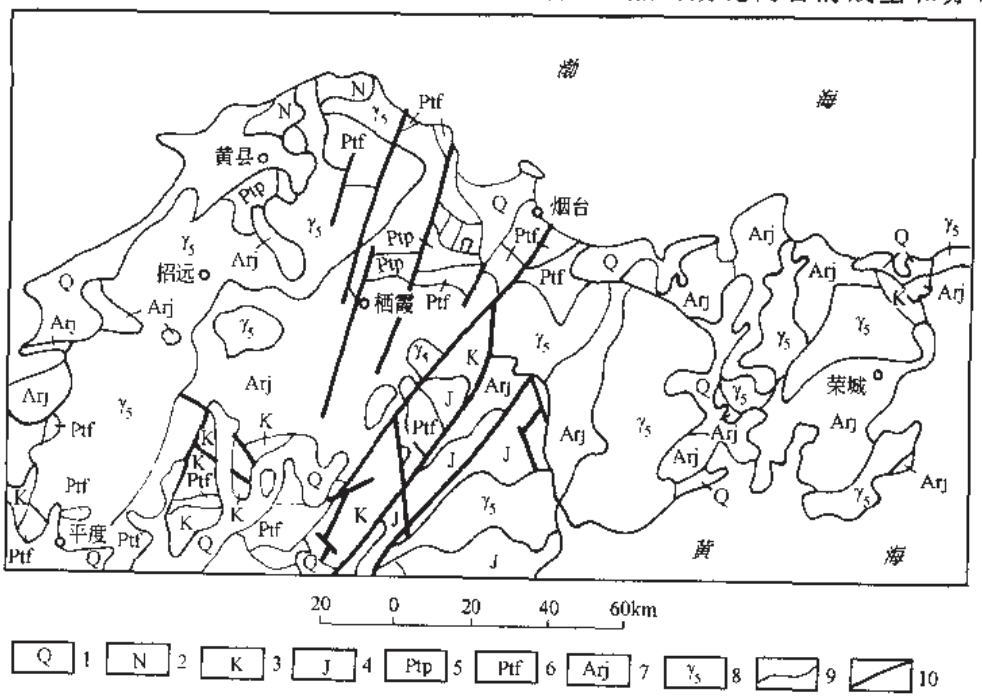


图 3-2 山东胶东半岛地质略图

1—第四系；2—第三系；3—白垩系；4—侏罗系；5—蓬莱群
6—粉子山群；7—胶东群；8—花岗岩；9—地质界线；10—断层

图 3-2可见，花岗岩南自平度，北至龙口、蓬莱，沿 NNE 向呈宽带状横切栖霞-掖县复背斜分布。其所处空间恰是大量的、密集分布的、向下延伸很深的 NE 向、NNE 向断裂构造裂隙分布空间，是转换裂解带中的扩容带。这种断裂多属深断裂，走向长度一般几百千米，切割深度至少达地壳下部。地壳中突然发生的这种减压环境，使地壳深部处于准稳定平衡状态的，选择性熔融的炽热岩浆，因上部环境压力的骤然降低而冲破界面，沿构造裂隙向上侵漫，熔蚀交代围岩，形成沿 NNE 向分布的花岗岩带。在宏观上，燕山期花岗岩的分布空间，就是招掖金矿化带的分布范围。因而，NE 向、NNE 向断裂构造体系，控制了招掖金矿化带的空间分布。

(2)2 级断裂构造控制了金矿床和金地球化学异常的空间分布，即金矿床和金的地球化学异常，都分布在 2 级断裂构造带上。远离 2 级断裂构造带，不可能有金矿床和金的地球化学异常出现。例如，招掖金矿化带上 176 个金矿床(点)和 250 多个金的地球化学异常，都沿着该区 2 级断裂构造带：三山岛断裂带、焦家—新城断裂带、灵山沟—双目顶断裂带、玲珑断裂带、破头青断裂带、招—平断裂带等分布。2 条以上 2 级断裂构造带交切、复合或贴近部位，控制矿田的分布。例如，玲珑金矿田即位于 NNE 向招—平断裂带、NE 向玲珑断裂带、NEE 向破头青断裂带的交切、复合及贴近部位。

(3)3 级断裂构造控制金矿脉的空间分布，即金矿脉充填 3 级断裂裂隙产出。断裂构造中的减压空间——压扭性断裂中的局部张扭带，构造交切复合部位，次级张裂隙等，控制矿体的产状、形态和规模。

(4)更次级的裂隙控制矿脉和矿体内部矿石组构的变化和金的贫富变化。表 3-1 列出了部分矿石的金品位、破裂程度和破裂次数。破裂程度 1 表征矿石的裂隙较少，矿物碎块无位移。破裂程度 2 表征矿石发育大量裂隙，矿物碎块有位移。经统计计算，破裂程度为 1 的金矿石平均品位为 23.7μg/g，破裂程度为 2 的金矿石平均品位为 40.1μg/g，破裂次数为 3 的金矿石平均品位为 30.8μg/g，破裂次数为 4 的金矿石平均品位为 39.1μg/g。破裂指数(破裂程度表征值与破裂次数的乘积)综合表征矿石的破裂强度，可得到 4 种类型，与之相对应的金品位如下：

破裂指数	3	4	6	8
金品位/$\mu g \cdot g^{-1}$	18.14	28.29	35.90	44.96

表 3-1　矿石金品位和破碎程度对比

序号	样号	矿石名称	矿石结构	Au/$\mu g \cdot g^{-1}$	破裂程度	破裂次数	破裂指数
1	182-1	含闪锌矿破碎绢英岩	网眼状结构	18.57	1	4	4
2	145-2	烟灰色石英黄铁矿	碎裂结构	20.87	2	3	6
3	142-2	烟灰色石英黄铁矿	网眼状结构破碎结构	177.6	2	4	8
4	160-5	乳白色黄铁矿石英	网眼状结构破碎结构	15.04	2	4	8
5	161-1	黄铁矿绢英岩	网眼状结构破碎结构	12.74	2	3	6
6	73-5	黄铜矿黄铁矿绢英岩	细脉充填结构	23.03	1	3	3
7	78-2	褐铁矿化绢英岩	碎裂结构	55.79	2	3	6
8	108-1	黄铁矿石英	碎裂结构，网眼状结构	56.25	1	4	4

续表 3-1

序号	样号	矿石名称	矿石结构	Au/μg·g⁻¹	破裂程度	破裂次数	破裂指数
9	白-1-1	乳白色石英	碎斑结构	14.29	1	3	3
10	金-2-1	黄铁矿石英	碎斑结构	14.82	2	4	8
11	金 2-2	黄铁矿石英	港湾状结构	21.68	1	4	4
12	金-2-5	黄铁矿方解石石英	碎斑结构	43.84	2	3	6
13	金-2-6	灰白色石英黄铁矿	碎斑结构	61.52	2	3	6
14	金-2-8	块状黄铁矿	网眼状结构碎斑结构	26.52	2	4	8
15	59-1-1	黄铁矿石英	碎斑结构	61.88	2	3	6
16	59-1-2	石英黄铁矿	碎斑结构	69.50	2	4	8
17	坑-16	含 Au 石英黄铁矿	碎斑结构	58.50	2	4	8
18	西-37	石英黄铁矿	细脉充填结构	87.0	2	4	8
19	西-7	黄铁矿	网眼状结构	30.5	2	3	6

图 3-3 描绘了矿石破裂指数与金品位的变化关系。不难看出，二者之间存在对数分布

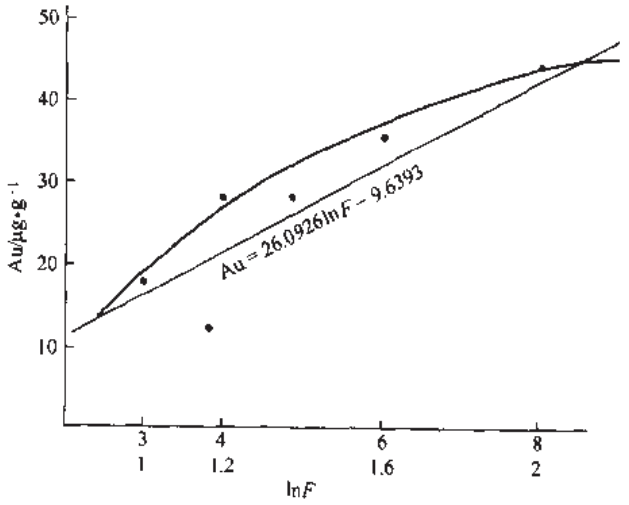


图 3-3 矿石金品位与破裂指数关系

关系。破裂指数自然对数值与金品位之间的相关系数为 0.9930。当信度 $\alpha=0.05$，自由度 $f=2$ 时，检验临界值 $\gamma_a=0.95$。表明两者之间具正向线性相关关系。经回归分析，得矿石金品位与破裂指数自然对数值的回归模型：

$$Au = 26.0926\ln F - 9.6393 \tag{3-1}$$

式中，F 为矿石破裂指数表征值。

表 3-2 列出了用该模型计算的矿石金品位估计值、实测值及其相对误差，两者的平均相对误差仅为 0.0014，表明矿石破裂次数愈多，破裂程度愈高，金品位愈高。这一规律进一步表明构造活动强度和次数对金矿化的控制作用。并告诉我们，可以用矿石的破裂指数定量估计矿石的金品位。

断裂构造对金矿化之所以有严格的控制作用，是因为构造活动在该区形成完整的“活”裂隙系统，为含金热液的积聚、迁移和演化以及金的沉淀富集成矿等提供了空间和动力。此问题在第5章中有较详细的说明，在此不赘述。

表3-2 矿石金品位估计值与实测值相对误差

序 号	破裂指数	金品位/$\mu g \cdot g^{-1}$		相对误差
		实测值	估计值	
1	3	18.14	19 0294	0.0467
2	4	28.29	26.5357	−0.0661
3	6	35.90	37.1154	0.0327
4	8	44.96	44.6217	−0.0076

3.3.2 围岩控制因素

热液成矿作用的主要特点之一，是溶液与围岩之间发生物质交换反应。表现为矿物的部分溶解、扩散、离子交换以及难溶产物的沉淀。围岩对矿石沉淀的有利程度，取决于它的可溶性，形成新矿物所需元素在围岩中的存在情况(数量，存在形式)，造岩矿物被金属矿物交代的相对能力等。对于热液中金的沉淀富集成矿而言，重要的围岩控制因素如下：

(1)当中性、基性、超基性岩为围岩时，由于这些岩石含有丰富的Fe、Ca、Mg、Mn等，当含金热液扩散流与之接触时，热液中的CO_2、H_2S、S和As等，与岩石中Fe、Mn、碱土元素相结合，形成难溶的碳酸盐类、绿泥石、黄铁矿、毒砂等。CO_2、H_2S、S、As等是易溶的金络合物的配位基，热液中这些组分的大量消耗，势必导致金络合物的大量解体，使金从热液中迅速沉淀下来。

(2)如果组成围岩的岩石含较高的碳质，碳质对含金热液的还原作用，会使金从离子状态还原成原子状态而迅速沉淀。

(3)当含碳酸盐的岩石为围岩时，因这种岩石易被交代，对热液起中和作用，大幅度地改变热液的酸碱度，使碱性热液向酸性热液演化，从而大大降低金的硫氢化物络合物在热液中的溶解度，使金沉淀下来。

(4)围岩为富含铁(硫化物、氧化物)的岩石时，含金热液中的硫与铁结合成难溶的硫化物矿物，硫的大量减少，会使热液中的硫化氢离子向硫离子转化，导致金的硫氢化物络合物的解体，使金沉淀下来。

综上所述，围岩化学成分对含金热液的影响，使金在不同尺度的地质实体中(造岩矿物、一定的矿物集合体、岩石、岩石—地层综合体及其组合)选择性沉淀，使金矿石有规律地分布在特定的地质实体中。

热液与围岩的化学反应，是在热液与围岩的接触面上进行的。接触面积愈大，两者之间的反应愈充分，对热液的改造作用愈大，对金的沉淀愈有利。

热液与围岩接触面积的大小，受围岩的有效孔隙度和围岩变形特征、变形强度所制约。而围岩的构造变形，基本上取决于岩石的塑性、脆性、各向异性及愈合能力等物理特征。可见，围岩的物理性质对热液成矿作用具有重大的影响。

组成岩石的矿物成分、粒度及其结合特点，岩石结构构造等，决定着岩石的构造特性—自然变形条件下岩石的行为特征(包括岩石的各向异性、脆性、塑性、韧性、变形形式等)。例

如，细而致密的和玻璃状的岩石受力作用时，只能产生裂隙，不发生粒内和粒间的变形。粗粒的岩石则易于发生粒内和粒间变形。具有平行面状构造(层状的、片状的、片麻状的)岩石塑性增强，脆性减低。砾岩、砂岩、斑状构造和块状构造的岩浆岩等脆性增强，塑性减低。此外，岩石不同，有效孔隙度也不一样，因而，热液在不同岩石中的渗透性有较大的差异。渗透性大的岩石能增加热液与围岩之间的接触面积，有利于矿化作用的发生。矿物的可溶性决定着岩石的愈合能力，即岩石依靠溶解与沉淀自身矿物质而自我愈合正在生长的裂隙的能力。例如，碳酸盐岩石的愈合能力最强，硅酸盐岩石的愈合能力比碳酸盐岩石小得多。

前已述及，围岩对成矿的控制作用，是通过过压热液与围岩接触，两者发生物质交换反应，使热液性质发生大幅度改变，破坏金在热液中原有的赋存平衡状态，使金沉淀富集成矿。因而需具备的必要条件是，必须有使热液发生迁移循环并与围岩大面积接触的因素，这就是构造与构造活动，构造活动在围岩中引发的大大小小的减压空间，促进过压热液的迁移循环。构造作用在围岩中造成的大大小小的各种性质的裂隙，大幅度地增加热液与围岩的接触面积。使围岩对成矿的控制作用得以实现。构造活动在不同成分、结构及不同组构的围岩上作用，所发生的变形截然不同，因而，构造控矿作用和围岩控矿作用是互相制约，相辅相成的。但相对而言，围岩控制因素与构造控制因素相比，构造控制是最重要的，在控矿的诸因素中起纲的作用。

4 脉状金矿床深部大比例尺统计预测的理论基础

4.1 概　　述

脉状金矿床深部大比例尺统计预测是在已知矿床(矿脉)范围内对矿体的定量、定位预测,是在三度空间上进行的立体预测。基本任务如下:

(1)论证有用组分在矿床深部和外围富集成矿的可能性,评价预测空间的矿化强度。

(2)估计预测空间矿产资源量,做出向深部或外围进一步探矿的决策。

(3)预测矿体赋存的有利空间。

不难看出,这是一项为深部及外围进一步探矿决策提供科学依据,指导具体工程布置的战略性和战术性并重的工作,比例尺一般为1:2000~1:5000,是一个点中求点的问题,需在矿床形成地质概念模型指导下,从已知矿床,矿体研究入手,深入细致地对矿床、矿体的各种控制因素进行地质、矿物、地球化学、数学地质研究。从中提炼出控制矿体的最佳地质标志组合,建立多种形式、各种方法的数学模型,对研究对象进行定量预测。因此,要求的资料和数据水平最高。不但要有相应比例尺的地质、构造、矿产、物探、化探资料、数据和图件,而且应尽可能地收集和利用已有的深部勘探资料,各种专题研究成果和资料。

因预测空间的地质特征在一般情况下是不清楚的,只能根据地表和近地表处的地质现象和地质现象显现的空间分布规律向深部推测。由于地质作用及其产物的不确定性,地质现象显现的空间分布规律只是一种受概率法则制约的统计规律,用其推测出来的深部地质信息是不确定的。因此,根据控矿地质标志信息得出的有矿或无矿结论,以及根据控矿地质标志与矿产值的关联程度得到的矿产资源量和矿体空间位置等也是不确定的。可以认为,矿床深部预测实质上是一种在不确定条件下进行的统计决策工作。

开展矿床深部预测一般具备下列有利条件:

(1)矿床所处地质构造环境的研究程度一般较高,有较多的地质资料和研究成果可以利用和借鉴。

(2)矿床上部有较系统的工程控制,有较齐全的编录和采样资料可以利用。

(3)因是已知矿床,多数情况下属于资源危机矿山,预测结论有可能较快地得到验证。

但也存在下列不利因素:

(1)矿床上部资料虽然较多,但工程控制和相应的编录及取样资料仅能满足生产上的需要,尤其对于变化多端的脉状金矿床而言,现有工程往往控制不住矿脉在空间上的变化。分析数据仅限于有用组分,缺乏其他重要的地球化学信息,给矿化规律的研究带来很大困难。

(2)矿床上部资源大多数已经被采掘一空,许多坑道坍塌或被填死而无法进入。少数坑道虽然能够进入,但矿石已被采尽,无法进一步系统地补充收集矿化和控矿地质标志等方面的信息。

(3)深部资料极少或根本没有,缺乏向深部推测的直接地质依据。

(4)一般情况下,微薄的科研经费根本无法支付研究所需的少量工程控制和大比例尺

物、化探工作等的费用。大多数情况下，预测只能在原有资料和数据的基础上开展。

综上所述，矿床深部预测一方面要求精度很高的定量和定位；另一方面，现有资料和研究工作条件的局限性，很难满足预测工作中对矿化空间变化规律的探求，给预测工作增添了极大的难度和风险。

在这种条件下，开展深部预测应采取的研究途径只能是：对地表和近地表处各种工程揭露出来的地质现象，以及应用各种手段和方法（地质的、矿物的、地球化学的、地球物理的、数学地质的）获得的矿化及控矿标志信息进行详细研究。从中提取各种矿产值的统计分布规律和空间分布规律，建立深部资源预测模型，估计预测空间的金矿产资源量。提取最佳控矿空间变化标志，查明各种标志的空间变化规律，以这种规律为依据，把标志向矿床深部推测。研究矿床上部已知矿与控矿标志之间的内在联系，建立多种数学模型，以深部推测出来的控矿地质标志为变量，用模型对预测空间的含矿性进行定量评价，确定成矿或聚矿的有利地段。为此，应注意解决好以下几个问题：

（1）在矿化带、矿田范围内，开展以控矿地质条件为主的矿床成因研究，建立矿床形成地质概念模型，确定重要的控矿地质因素和最佳控矿地质标志组合，查明预测对象在矿化带、矿田中的地质特征、几何特征及经济特征诸方面的位置。

（2）对矿田中与预测对象同类型的矿床进行综合研究，查明该类矿床的矿化特征和控矿地质因素，以及矿床在时、空上的变化性。若有可能，建立矿床空间几何模型。

（3）对预测对象进行详细研究，查明深部矿化的直接和间接标志（或参数），以及这些标志（或参数）的空间变化规律（或变化趋势）。以空间变化规律为依据，把控矿标志向深部推测。论证有用组分在矿床深部富集成矿的可能性，估计预测空间金矿产资源量。查明矿产值与各种控矿地质标志之间的成因联系，并把这种联系转化为多种形式的数学模型，用该模型和推测的标志状态评价预测空间的含矿性，确定矿体赋存的有利地段。为此，不仅要依据已知的地质标志，而且要利用推测的地质标志。不仅应用矿化的直接标志，而且要应用间接标志。

（4）预测对象是矿体。此时，我们把矿床视为预测对象的环境（背景）。在确定控矿地质标志和建立各种预测模型时，必须掌握好这一研究尺度，注意把控制矿体（定量、定位）的标志提炼出来，用它们建立各种预测模型。

（5）采用多信息，多方法手段的预测途径。

（6）和矿山的地质及采矿人员密切结合。

（7）进行“预测—验证—再预测—再验证”的跟踪研究。

4.2 深部大比例尺矿床统计预测的理论基础

深部大比例尺矿床统计预测是在已知矿床深部预测新矿体的研究工作。由于深部地质情况是未知的，只能根据一定的成矿理论、成矿条件和控矿因素的分析与归纳来完成该项工作。因此，预测理论的研究和预测方法的选择是取得预测成功的关键。

在矿床深部统计预测中，主要应用求异理论、相似类比理论、空间分带理论、波形分布理论、时空叠加理论、不确定理论等。

4.2.1 求异理论

通过正常场中地球物理异常、地球化学异常、重砂异常的发现，进一步寻找矿床的找矿

途径，已广泛用于当代的地质找矿活动中，并取得了相当好的效果。1974 年，原苏联学者在找矿实践中提出了地质异常概念。近年来，我国著名的数学地质学家赵鹏大教授对地质异常给出了明确的定义："地质异常是指在结构构造或成因序次上与周围地质环境有明显差异的地质体或地质体组合"。不难理解，地质异常是相对于正常地质环境而言的。是有异于正常地质环境的那些特殊的地质现象。地质异常与其所在的正常地质环境有时空的概念。在空间概念上有不同尺度的正常地质环境和地质异常。一般情况下，大尺度的异常往往是小尺度异常的正常环境（背景）。在时间上则有不同地质历史时期形成的地质环境和地质异常。

矿化是地质作用过程中的一种特殊现象。矿化体（包括矿床和控矿地质标志）就是一种地质异常。因而，在区域上寻找和发现控矿地质标志和矿床的工作，就是在正常地质环境中的求异过程。在已知矿床中预测和寻找矿体的工作，也是求异过程。此时，矿床本身是正常地质环境，矿体及控制其成生的地质标志是地质异常。

地质异常的概念是广义的，矿化现象只是地质异常中的一种。因此，矿床（矿体）必然赋存于地质异常中。但有地质异常不一定有矿床（矿体），矿床（矿体）仅寓于与矿密切相关的致矿地质异常中。

与矿密切相关的地球物理异常、地球化学异常、重砂异常、近年来兴起的遥感地质异常等，都是因矿体或矿化作用引起的与矿有关的地球物理标志、地球化学标志、重砂标志、遥感地质标志。因而，它们都属于地质异常。

根据求异理论，找矿活动就是一种在不同尺度的正常地质环境中，发现、评价地质异常的过程。我们应用相似类比理论进行的各种方法的类比，实质上是对地质异常的类比。因而，类比是求异的手段之一。

在求异理论指导下，可以开展不同尺度的求异活动。例如，在矿体的定量定位预测中，构造异常、岩性异常、地球化学异常、地球物理异常的发现，圈定和综合研究，就是一种大比例尺矿床预测的求异活动。

4.2.2 相似类比理论

相似类比理论是地球科学研究中应用最广泛的理论。用于矿床统计预测的相似类比理论，主要建立在下列成矿理论基础上：

（1）一定的矿床或矿床系列赋存于一定的地质环境中。矿床类型相似，它们成生的地质环境也相似。

（2）一定类型的矿床在其成生的地质环境中，必然有一组最佳控矿地质标志与之相伴生。矿床相似，最佳控矿地质标志组合也相似。

（3）一定类型的矿床及其最佳控矿地质标志组合，具有一定的数学特征。矿床相似，最佳控矿地质标志组合及其数学特征也相似。

在相似类比理论指导下，可以开展不同形式，各种尺度的类比。如矿体成生地质环境的相似性类比；控矿地质标志组合相似性类比；标志状态与矿床空间几何模型的相似性类比等。

4.2.3 空间分带理论

单一的地质作用过程，在时、空上都有一定的规律性。由此成生的各种地质现象，在空间分布上，有时会显现出分带规律。例如，由补给源到沉积中心，碎屑沉积物颗粒由粗到细

的变化规律；矿体厚度沿一定方向增厚、变薄，以及厚薄相间变化规律；地层序列中的沉积旋回或沉积韵律；矿化带中，一定方向上由依次出现的金矿床、砷矿床、锑矿床、汞矿床等构成的矿床系列；反映构造控制的矿床或矿体沿一定方向等间距分布规律；矿体原生晕的空间分带规律等。

空间分带理论为各种尺度的成矿预测提供了重要的依据。通过矿化作用产物空间分布规律的探索，往往能够取得很好的预测效果，特别是在矿床深部大比例尺定位预测中，根据空间分带理论探求矿体空间分布规律，建立矿体空间分布找矿模型，预测矿体赋存的空间位置。进行矿体原生晕分带规律的研究，利用指示元素及有关元素比值在空间上的变化规律，建立矿体埋藏深度定量预测模型，预测矿体赋存的空间的位置，都是开展深部预测的重要方法。

4.2.4 波形分布理论

众所周知，断裂构造裂隙是一定方向的压力作用于地质体形成的，而这种压力在地质体中是以波的形式传递的，特别当地质体成分和结构相对均匀时，地质体中的断裂构造形迹呈波状分布。波具有周期性，在压力传递的方向上，波形按周期重复出现。在一个周期内部，波的不同位置上，力对地质体的作用方向和作用大小不同，形成的断裂裂隙性质和规模也不一样，反映在受控于该断裂构造的矿脉上，走向方位角、倾向倾角等产状要素，在不同的空间上，会发生变异。矿脉厚度、矿石品位、矿体形态规模等矿化要素，也会在不同空间上发生变异。随着波形的周期性变化，上述产状要素和矿化要素的变异，会在空间上周期性重复出现。

由于地质作用的长期性、复杂性，我们在野外看到的地质现象，因多次地质作用的叠加而变得十分复杂。具体到一个断裂构造而言，受多期或多组构造作用，在空间形态上，往往表现为多个波的叠加。即使在成分和结构相对均匀的地质体中，呈现在人们面前的，是一条不规则的波形裂隙组合。如果能把这种波分解成每个单一的波，并且能把每个单一的波合成为混合波，就能利用波的周期性变化在未知区中预测断裂构造形迹，以及相应的矿脉产状要素和矿化要素，从而推断出深部预测空间的地质环境。

波形分布理论为在地质情况不确知的深部空间预测断裂构造形迹，以及受控于断裂构造的矿脉产状要素和矿化要素等提供了重要依据。通过上部已知区构造形迹及相应的矿脉产状要素和矿化要素的波形分析，建立波形分布模型，就有可能预测深部未知区的地质环境。

4.2.5 时、空叠加理论

地质作用过程和实验过程不同，它具有漫长的时间，广阔的空间，以及地质因素多种多样，错综复杂等特点。地质过程的每个阶段，都伴随着新地质作用产物的出现，旧地质作用产物的改变，甚至消失。我们在野外观察到的仅仅是地质历史长河中某一瞬间各种因素综合作用的结果。在大多数情况下，不同期、不同阶段地质作用产物在空间上叠加于一起。我们在野外采取的任何一件矿石样品，都包含着多个矿化期、矿化阶段的信息。一个样品空间也可能包含不同深度上多个矿体的信息。

时、空叠加理论的第2个含义是，不同时期地质作用产物，在空间上的叠加极不均匀，在不同的空间坐标上，有时会突出某个矿化阶段产物的特点。

时、空叠加理论在成矿预测中，具有下列重要意义：

(1)我们在野外观测到的各种地质现象,采取的各种岩石、矿石样品,大多数是不同期、不同阶段地质作用叠加产物。必须通过一定的方法对其进行筛分,才能达到客观认识地质作用产物,摸清地质作用规律的目的。

(2)我们在野外观测到的各种地质现象,采取的各种岩石、矿石样品,反映多期、多阶段地质作用信息。因此,可以在一个样品空间上,获得多种地质作用信息。例如,不同矿化阶段的矿化强度信息。不同深度的矿体信息等。

(3)地质作用在空间上叠加的不均匀性,给混合样品的筛分和各种矿化信息的提取带来可能性。如果仅是按一定比例的均匀叠加,因无法筛分,会使我们达不到提取矿化信息的目的。

4.2.6 不确定理论

前已述及,地质作用过程具有漫长的时间,广阔的空间,以及地质因素多种多样,错综复杂等特点。面对广大的地质空间,人类的生产活动范围显得如此渺小,以至于我们在野外观测取样所获得的资料和数据,仅仅是地质作用过程或地质体全貌的一小部分。虽然每个单一的地质作用是有规律的,由于多种地质作用产物在空间上不均匀地叠加,会使地质现象变得十分复杂,显现不出规律性。加上资料和数据本身的不完整,以及各种各样的误差。使得大多数地质现象成为区域规律性变化因素、局部空间规律性变化因素,偶然性因素综合作用的结果,即

$$A_i = a_i + b_i + \varepsilon_i \tag{4-1}$$

式中 A_i——某地质现象;

a_i——区域规律性变化因素作用产物;

b_i——局部空间规律性变化因素作用产物;

ε_i——偶然性因素作用产物。

当某个规律性变化因素起主导作用时,地质现象表现为空间坐标的函数,它们在一定的空间方向上,规律性变化明显。

当多个规律性变化因素不均匀地叠加于一起,或随机因素起主导作用时,地质现象主要表现为随机性。其变化与空间坐标没有明显的关系,在很大程度上受概率法则所制约。需要借助于研究随机现象的数学工具——概率论和数理统计来对其进行研究。

不确定理论告诉我们,在大多数情况下,地质作用产物的出现与否,具有随机性。我们通常预测出来的矿体赋存空间,其含义只是矿体出现机会较大的空间。各类控矿地质标志也是如此,它们的出现与否,也是受概率法则所制约的。

4.3 脉状金矿床深部大比例尺统计预测的特点、基本内容及工作步骤

4.3.1 脉状金矿床深部大比例尺统计预测的特点

脉状金矿床深部大比例尺统计预测有如下特点:

(1)脉状金矿床深部大比例尺统计预测是在矿床(矿脉)范围内进行的矿体定量定位预测。相对而言,矿床(矿脉)是正常的地质环境,矿体及其控制因素是异常。因而预测是一种在矿床(矿脉)中开展的求异活动。预测比例尺一般 1:2000~1:5000 或更大。

(2)预测的目标是矿体,研究的各种控制因素必须是那些控制矿体生成,或指示矿体存

在的地质标志。

(3)热液沸腾使金沉淀富集的成矿理论,为客观上存在的构造和构造活动对金矿体的重要控制作用做出了合理的解释。特别对金矿体的定位预测而言,构造控制在诸多控制因素中起纲的作用。毫不夸张地讲,正常构造环境中寻求构造异常的活动,是脉状金矿床深部矿体定位预测中最重要的一项工作。

(4)金矿体原生晕是深部矿体重要的指示标志。在矿体定位预测中,提炼最佳地球化学标志,利用地球化学标志与空间坐标之间的函数关系,建立矿体埋藏深度定量预测模型,预测矿体的有利赋存空间,是脉状金矿床深部矿体定位预测的重要工作。

(5)脉状金矿床深部大比例尺统计预测是以现代成矿地质理论为基础,在矿床成因模式指导下,以矿体定量、定位为目标的一项定量预测工作。众所周知,一定的地质环境,产出一定的矿产资源,是传统地质学找矿勘探及研究工作的立足点。脉状金矿床深部大比例尺统计预测也不例外,也是以此作为开展定量预测的理论基础的。开展统计预测之始,首先进行一定研究尺度的、以控矿地质条件为重点的矿体成因研究,建立矿体形成地质概念模型。在其指导下,才能进一步确定预测方案,选定预测方法,提取最佳控矿地质标志组合,选择有效的数学方法,把地质概念模型转化为定量预测的数学模型,开展定量、定位预测。并以地质概念模型为依据,对预测出的矿体有利赋存空间进行综合地质评价和找矿效益、经济价值及开发风险等方面的分析,以某种决策理论为依据,做出进一步的探矿决策。

(6)脉状金矿床深部大比例尺统计预测的目的是寻找深部矿体,而深部地质情况在大多数情况下是不确知的,需要科学地推测。因此,特别强调矿体空间分布规律(或趋势)和控矿地质标志空间变化规律(或趋势)的研究。只有查明矿体的空间分布规律,才能依此建立矿体空间变化找矿模型来进行矿体定位预测。只有查明各类最佳控矿地质标志的空间变化规律,才能依此建立不同的标志状态空间分布预测模型,把最佳控矿地质标志向深部推测。并依此进行深部地质环境含矿性评判。

(7)脉状金矿床深部大比例尺统计预测还以"地质作用和地质现象的发生都是随机事件,各种地质标志及其取值的出现以及矿体的形成都是不确定的,受概率法则所制约"为基础。强调矿产值的统计分布特征研究,矿化强度统计规律研究,各种地质因素及其组合的控矿概率研究,成矿过程统计模型研究。因而,概率论和数理统计的理论和方法是脉状金矿床深部大比例尺统计预测工作重要的理论基础和应用的数学方法之一。

(8)脉状金矿床深部大比例尺统计预测中,应用最广的是"定量类比法"。即通过地质异常的定量化和模型化,开展地质异常的定量类比,达到定量预测目的。因此,进行地质异常的定量化、模型化,给出对比准则和定量标准,开展成矿地质环境相似性定量类比和"矿"与"非矿"的定量评判,估计金矿产资源量,开展矿体定位,指出含矿概率,给出丢矿风险系数和判错率,是脉状金矿床深部大比例尺统计预测工作的特点之一。

(9)脉状金矿床深部大比例尺统计预测是一项在不确定条件下进行的统计决策工作。前已述及,成矿作用是随机活动,矿体及各种控矿地质标志状态的出现是随机事件。预测是在不确定条件下进行的。矿床统计预测的数学模型只是一种概率统计模型。由此得出的预测结论只是具有一定成功概率的随机事件。因而,依此进行的进一步的地质勘查工作,是一项风险极大的工作。为减少风险,应通过经济价值、找矿效益、开发风险的综合分析,对远景做出统计决策。此外,在我们圈定出来的矿体内部,由于金品位变化极大,有许多空间达不

到边界品位。这一客观现象，对钻探验证工作而言，因评判“矿”与“非矿”的指标仅仅是金品位，有时虽然打到了矿体，会因岩芯金品位偏低而否定矿体的存在。使钻探工程验证具有很大的丢矿风险。因而需要有一些补救的办法，例如，以二项分布理论和方法为依据，确定控制一个矿体所需的最低钻孔数，就是一种较好的补救方法。

4.3.2 脉状金矿床深部大比例尺统计预测的基本内容

建立矿床模型，评价矿产资源潜力，进行成矿或找矿的概率估计，开展对象的定量类比，实现矿体的深部定位，做出找矿的统计决策，是脉状金矿床深部大比例尺统计预测的基本内容。

4.3.2.1 建立矿床模型

矿床模型是矿床特征及其形成规律的一种理想化的表征。具有十分重要的理论意义和实用价值。不同研究尺度下，矿床模型的形式和内容不同。以矿体定量定位预测为目的的矿床模型，是表征矿体特征及其分布规律，控制因素的模型。概括起来有以下几种：

(1)地质概念模型。是以控矿地质条件为重点的地质学、矿床学、地球化学、数学地质学等多学科的综合研究建立的矿体成因地质概念模型。其形式可以是矿体形成环境和矿体形成过程的地质描述；最佳控矿地质标志及其组合的系统分析；矿体生成空间几何特征的描绘等。可作为脉状金矿床深部大比例尺统计预测工作各个环节，如预测区范围的确定，控制区、控矿地质标志以及数学地质方法的选择，各种数学模型的建立，矿体赋存有望地段评价等的依据。

(2)成矿地质条件数学模型。是表征矿体值与各种控矿地质标志之间关系的数学模型。系采用多元回归分析方法建立起来的。成矿的多元回归模型虽然是具有随机起伏的统计模型，但正如斯瓦札切(1975 年)所指出的，它本质上是确定性的模型。

(3)矿体形成过程数学模型。是在地质概念模型指导下，通过矿体形成过程的数学模拟而建立起来的数学模型。这类模型可能是随机的，也可能是确定性的。

(4)矿体空间分布模型。分两种形式：1)把矿体看作矿床空间上随机分布的点。在已知平均点密度的条件下，用相应的统计模型拟合单位面积内矿体数的概率分布。2)当矿体空间分布具有明显的方向性和规律性时，可以用多项式数学模型拟合矿体空间分布趋势。

(5)矿体定位标志空间变化模型。矿体定位标志多种多样。包括地球化学标志(指示元素及其比值)，地球物理标志(激发极化法、电测深法、联合剖面法)，成因矿物学标志(黄铁矿晶形，石英热发光，矿物包裹体)等。根据上述标志与空间坐标的函数关系，模拟矿体定位标志空间变化模型。

(6)矿体值概率分布模型。表征各种矿体值如矿体规模、矿体厚度、矿石品位、矿石储量、金属储量、矿产价值等的统计分布特征。具有法则性质，用于矿产资源估计和矿体定位预测。

4.3.2.2 矿产资源潜力评价

矿产资源潜力评价是矿体定量定位预测的一项重要内容。该工作以已知矿床特征值(储量、产量、矿产价值、品位、矿化面积或体积)及评价区地质、地球化学特征为依据，应用一定的数学方法，对矿产资源总量进行估计。结合矿物原料的质量和经济因素，从找矿效益、经济价值和风险大小及其对近期、中期、长期的供应保证程度等，做出综合评价。因此，矿产资源潜力评价是进一步预测和找矿决策的重要依据。

4.3.2.3 成矿或找矿的概率估计

进行成矿或找矿的概率估计时，首先利用一组已知矿体或已知含矿单元，应用一定的方法，建立含矿概率估计模型，对预测区进行成矿或找矿概率估计。应用的方法有含矿概率回归估计，贝叶斯准则下的判别分析，条件概率分析，镶嵌模型估计矿床产出概率法等。用已知资料建立概率估计模型时，对于因变量，已知含矿单元赋值为1，已知无矿单元赋值为0。这样，应用建立的概率估计模型对未知单元预测时，得到的估计值介于1和0之间。

4.3.2.4 定量类比

定量类比法是数学地质应用最广泛的方法。在脉状金矿床深部大比例尺统计预测中，着重进行矿体形成环境的模式识别。

常用的定量类比法有特征分析法，欧氏距离分析法、判别分析法、相关分析法、因子分析法、对应分析法、聚类分析法、模糊聚类分析法、非线性映象分析法、假设检验、方差分析等。

4.3.2.5 统计决策

在脉状金矿床深部大比例尺统计预测中，经常需要引入某种统计决策的最优准则。例如，矿体定量定位预测工作的总体决策，就以“最少漏失矿体和最大限度地缩小矿体有利赋存空间”为准则，预测中应用的判别分析法，就是以“最大分离原则”（费歇准则）或“误判平均损失最小原则”（贝叶斯准则）建立模型来完成研究对象间的分类的。在找矿统计决策中，则通过含矿概率、开发成本、期望价值等的综合分析，依照某个最优化准则（如等可能性准则，最大最小准则，折中准则，期望值准则，最大可能性准则等），对进一步工作部署做出决策。

4.3.3 脉状金矿床深部大比例尺统计预测的工作步骤

统计预测的工作步骤如下：

（1）提出工作任务。包括预测范围和深度。所欲达到的目标和预测比例尺。

（2）收集资料。包括已知资料的收集和野外地质观测、取样，以及室内实验室研究、测试、综合分析等。重点收集矿田范围内与预测对象同类型矿床中矿体特征、分布规律及其成生的控制因素。包括地质、物、化探资料与数据，有关的图件，详查及勘探报告，各种专题研究报告及论文等。

（3）开展以控矿地质条件为重点的矿床地质、地球化学、矿物学、数学地质学研究，建立矿体形成地质概念模型。

（4）对矿体生成的必要控制因素进行专门性的研究，绘制与预测比例尺相同的综合信息图。

（5）对原始资料和数据进行质量评价和预处理。

（6）依据实际情况，确定预测途径和最佳研究方案。

（7）选定控制区并进行详细研究，确定最佳控矿地质标志组合，建立多种预测数学模型。

（8）建立矿产资源量评价模型，进行矿产资源总量估计及资源潜力评价。

（9）研究矿体成生控制因素的空间变化规律（或趋势），并依据这种规律（或趋势）将标志向深部推测。

（10）应用数学模型对深部预测区进行统计预测。

（11）对预测出的矿体有利赋存空间进行地质、地球化学分析，进一步对矿体定位。指出找矿概率、丢矿风险系数及出错率。

（12）通过含矿概率、开发成本、期望价值等的综合分析，依照一定的最优化准则，对预测

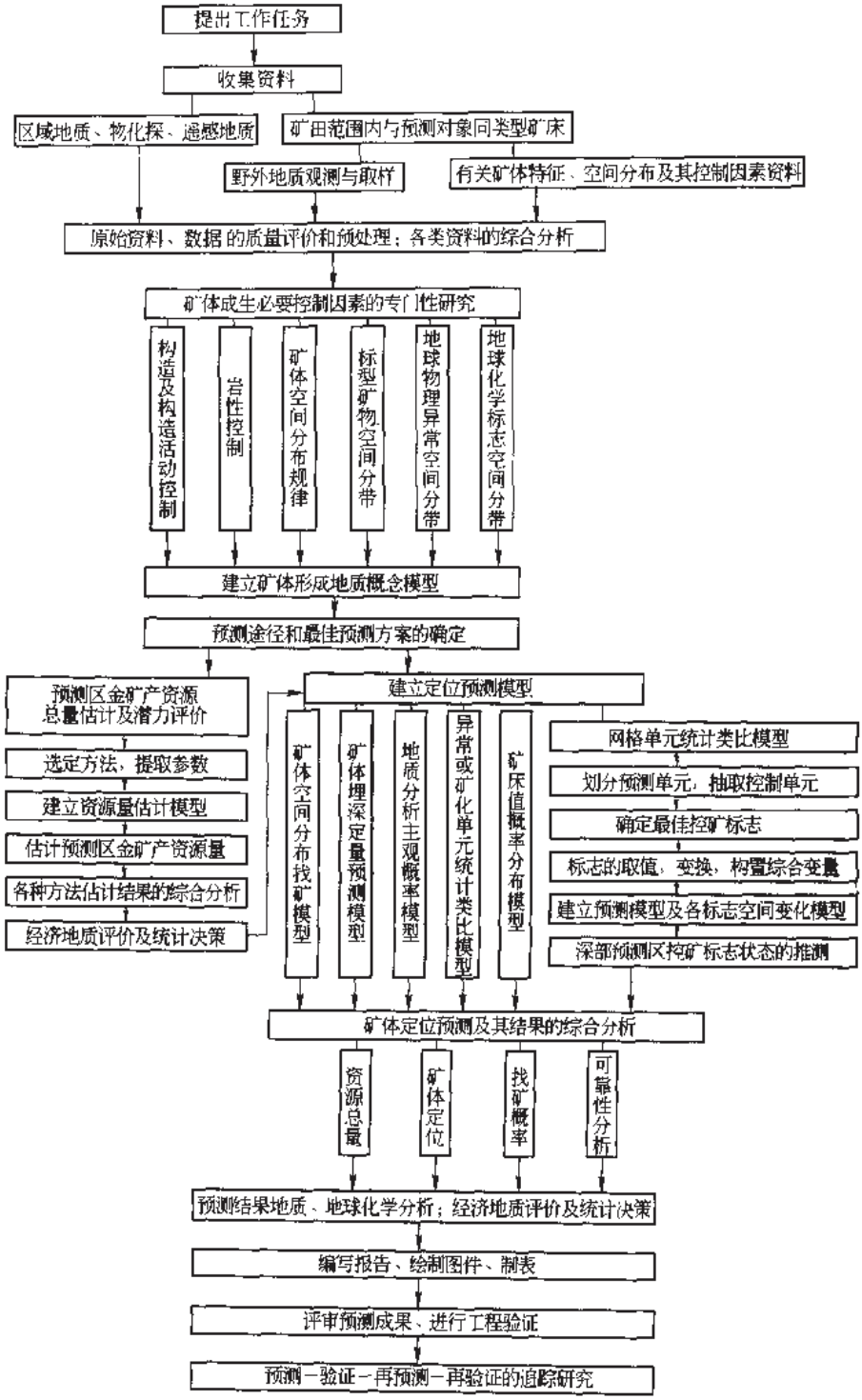


图 4-1　脉状金矿床深部大比例尺统计预测工作流程图

的矿体有利赋存空间做出是否进一步工程验证的决策。包括预测的有望区有无必要开发，有望区的优劣排队。建议的工程位置等。

(13)编写预测报告

预测报告包括正文、附图及附件。文字报告包括：

1)预测的目的、任务；

2)资料和数据水平，工作条件和方法的选择依据；

3)工作量及资金开支情况；

4)矿体形成地质概念模型；

5)预测区金矿产资源总量估计及潜力评价；

6)矿体定位预测及预测结果的可靠性评价；

7)预测矿体有利赋存空间的地质、地球化学分析；含矿概率、开发成本、期望价值等综合评价。做出进一步工作建议；

8)结束语。包括对地质问题的新认识，方法研究和经验教训等。

(14)预测成果的审查及工程验证。

(15)工程验证结果的分析，修正标志状态后，进行第二次预测，提出新的矿体定位方案。

(16)审查新的矿体定位方案，进行工程验证。

预测工作流程见图 4-1。

5 建立成矿模式

脉状金矿床深部大比例尺统计预测，是对矿体的定量定位预测。所建立的成矿模式，必须能反映矿体的形成机制、矿体的控制因素、矿体的空间分布特征等。可根据具体条件，建立地质成因概念模型、控矿因素模型、空间几何模型、空间分布模型等。

5.1 金沉淀富集成矿的理论分析

5.1.1 含金热液是一种过压流体

众所周知，地下深处的含金热液，在长期的演化过程中，不断地得到地下深处热源的补给，使流体内能不断地增加。因静水压力随深度的增长速度比静岩压力随深度的增长速度小得多。在准封闭条件下，抑制了热液沸腾汽化作用的发生，使含金热液成为过压流体。

5.1.2 金硫氢化物络合物是金在热液中迁移最重要的存在形式

大量实验数据表明，在中低温条件下，金以硫氢化物络合物的形式迁移。在自然界中，热液多显示弱酸性—弱碱性，因而，多数情况下，金以$[Au(HS)_2]^-$形式存在。

5.1.3 促使金硫氢化物络合物解体的异常事件导致金沉淀

受金的地球化学性质所制约，金硫氢化物络合物的解体，使络合物状态的金离子转化为金原子。金原子在水溶液中几乎不溶解，在热液中哪怕只有很微少的一点儿金，也会迅速沉淀下来。络合物的解体势必会使金发生沉淀。以下因素能使金硫氢化物络合物解体：

(1)构造因素。局部空间上发生的构造活动，是一种地质异常事件。使围岩在某些方向上发生破裂，形成减压空间。当环境压力等于或低于过压热液的内压时，热液就会发生沸腾。在该方向上，水力压裂作用扩大了围岩的破裂面积和破裂幅度，形成大大小小的裂隙。裂隙形成的瞬间成为减压空间。沸腾是一种汽化过程，热液汽化时体积增大100～1000倍，从而产生强大的扩容作用，导致水热爆炸事件的发生。由于是过压热液因环境压力的突然降低而发生的沸腾，因而是一种不平衡条件下的绝热降温过程。会使热液中那些具有高能量的组分如CO_2、H_2S、N_2、H_2、CH_4、NH_3、B、F_2、Cl_2、Br_2、I_2、Hg、Sb、As，以及那些具有高能的水分子等，迅速转化为蒸气向减压空间(裂隙、孔隙)逃逸。这些逃逸的物质在热液中所占比例大小，除受它们在热液中的含量控制外，还受热液过压程度和环境减压幅度的控制。从布朗 K L(1986年)对新西兰的布罗德兰兹和卡韦劳地热田深部热液所做的沸腾实验结果可见，经两次减压沸腾，使39.98%的热液汽化逃逸。另据布坎南 L J(1981年)，在瓜那华托矿区，沸腾使该区热液逸失大约24%。

大量高能组分的逃逸，使剩余热液的温度和压力下降。例如，上述新西兰地热田热液沸腾实验结果，第一次沸腾，热液温度从260℃降低到185℃，压力从3.5～4MPa降低到1.1MPa；第二次沸腾，热液温度从185℃降低到98℃，压力从1.1MPa降低到0.1～0.5MPa。温度和压力的下降，使金络合物在热液中的溶解度降低，有利于金沉淀。

二氧化碳及其盐类都是弱电解质，起酸性缓冲剂作用，控制pH值的变化。化合价不同的碳化合物相互间关系，决定着热液氧化还原电位的大小。因而控制了所有变价元素的行

为。其中包括决定成矿作用发育程度的硫化物硫、硫盐硫与氧活度的相互关系。由下列反应式：

$$HCO_3^- + H^+ \longrightarrow CO_2(蒸气) + H_2O$$

$$HS^- + H^+ \longrightarrow H_2S(蒸气)$$

可见，大量 CO_2 和 H_2S 转入气相逃逸，使剩余热液的 pH 值增高。上述新西兰地热田地下热液的沸腾实验结果表明，第一次沸腾使热液 pH 值从 6.26 升高到 7.85；第二次沸腾使 pH 值从 7.85 升高到 8.44。德拉蒙德 S E 和大本洋(1978 年)的实验资料表明，含 0.1mol CO_2 (液体)的 NaCl 溶液，在 250℃时，若有 3%的溶液变为蒸气相，就会使 pH 值升高一个单位。热液 pH 值的升高，提高了金络合物在热液中的溶解度，这似乎不利于金的沉淀，而实际上是，H_2S 的大量逃逸，从物质基础上断绝了 $[Au(HS)_2]^-$ 形成的可能性，pH 值的变化对于极少量的 $[Au(HS)_2]^-$ 来说，其影响显然是无足轻重的。

热液中高能水分子的大量汽化逃逸，使剩余热液的含盐度大幅度增高。例如，上述新西兰地热田地下热液经两次沸腾后，剩余热液的 ω(含盐度)从 0.87%升高到 1.45%。热液含盐度的大幅度提高，有利于金的沉淀。

CO_2、CH_4、SO_2、H_2S 等的汽化热不同，在沸腾汽化过程中，CH_4 和 H_2S 分配到蒸气相的速率分别大于 CO_2 和 SO_2 分配到蒸气相的速率。因而沸腾会使剩余热液中的 CO_2/CH_4 和 SO_2/H_2S 增大，导致热液氧逸度的升高。有利于金的沉淀。

H_2S 的大规模逃逸使下列化学反应式的平衡向左方移动：

$$Au(固) + H_2S + HS^- \rightleftharpoons [Au(HS)_2]^- + H^+$$

导致 $[Au(HS)_2]^-$ 的大量解体，使金发生大规模的沉淀。例如，上述新西兰地热田地下热液的沸腾实验，经两次沸腾后，剩余热液的 H_2S 含量(0.7×10^{-4}mol/kg)仅为沸腾前含量(1.9×10^{-3}mol/kg)的 14.21%。两次沸腾结果，使剩余溶液的金含量从沸腾前的 1.64ng/g 降低到 0.06ng/g。从而使热液中 97.8%的金沉淀下来。

突然出现的任意大小的裂隙，对于过压热液而言，都是减压空间。这势必会在局部空间发生沸腾而使一定量的 $[Au(HS)_2]^-$ 解体，使金在裂隙中沉淀下来。裂隙旁侧的围岩则不发生金矿化。这可能是热液型金矿体中金含量变化极大的主要原因。

由于金在矿液中的含量很低($n\times10^{-2}\sim n\times10$ng/g)，热液经一次沸腾，即使所有的金都沉淀下来，在绝对数量上也是极少的。要形成具有工业意义的金矿石必须反复多次地发生"沸腾－金大量沉淀"作用才行。这就要求在一个成矿期中发生频繁多次的构造活动，形成无数次的减压空间。因而，频繁多次的构造活动是矿体成生的重要控制因素之一。对腾冲热海金矿化区含金硅质岩脉中的硅质角砾岩研究结果表明，具有 2 次水热爆炸显示的岩石，金平均含量为 0.0473μg/g。具有 3 次水热爆炸显示的岩石，金平均含量为 0.0962μg/g。具有 4 次水热爆炸显示的岩石，金平均含量为 0.1714μg/g。具有 5 次水热爆炸显示的岩石，金平均含量为 0.311μg/g。具有 6 次水热爆炸显示的岩石，金平均含量为 0.7652μg/g。随沸腾次数的增多，金含量具有平稳上升趋势。图 5-1 表示硅质角砾岩金含量与沸腾次数的关系。从图可以看出，金含量与沸腾次数之间存在指数分布关系。经变换后，计算两者之间的相关系数为 0.9966。当自由度 $f=3$，信度 $\alpha=0.05$ 时，检验临界值 $r_\alpha=0.8783$。表明金含量对数值与沸腾次数密切相关。以沸腾次数为自变量，金含量的对数值为因变量进行

线性回归分析，得回归模型：

$$Au = e^{(-4.4143+0.674N)} \tag{5-1}$$

式中　N——沸腾次数。

对回归模型进行差异显著性检验，得 $F=444.1$。当第一自由度为 1，第二自由度为 3，信度为 0.05 时，检验临界值 $F_\alpha=5.54$。差异极为显著。表明用该模型计算金含量，能够得到较客观的结果。进一步做区间估计，得 $\delta=0.1012$。则金含量的自然对数值在区间 $(-4.6167+0.674N, -4.2119+0.674N)$ 内取值概率为 95%。用该模型计算结果表明，沸腾 10 次使金沉淀累积的金品位达到 10.23μg/g。

沸腾后剩余热液的温度和压力大幅度降低，对于近于二氧化硅饱和溶液来说，是重要的沉淀因素。例如，新西兰某地热田地下热液温度 260℃，压力 3.5～4MPa，二氧化硅含量 552μg/g。经计算，相应压力下，260℃时，二氧化硅在热液中的溶解度为 536μg/g。基本上属于二氧化硅饱和溶液。经两次沸腾后，剩余热液温度下降到 98℃，压力降至 0.1～0.5MPa，二氧化硅含量为 920μg/g。而此时二氧化硅在热液中的溶解度下降到 18μg/g。这种突如其来的变化，会使热液中 98.06% 的二氧化硅迅速沉淀下来。金和二氧化硅的沉淀机制虽然不同，但它们都是因同一空间上的热液发生沸腾而大规模沉淀的。这可能是热液型金矿床总是伴随有大量二氧化硅矿物的主要原因。

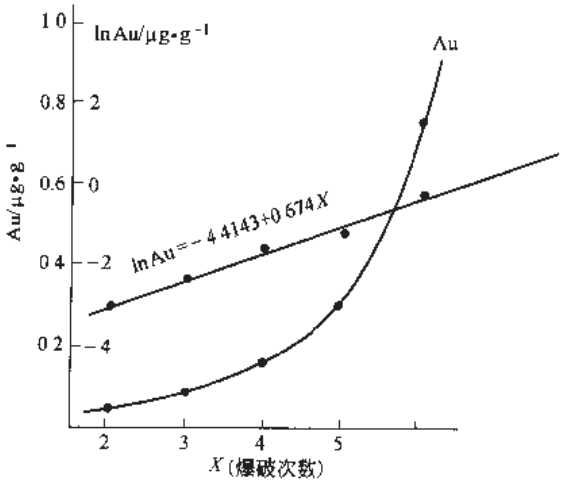


图 5-1　硅质角砾岩金含量与沸腾次数关系图

(2)围岩因素。热液与围岩接触时，两者之间会发生物质交换反应。当围岩含有丰富的 Fe、Mn、Ca、Mg 时，这些化学组分会与热液中的 H_2S、CO_2、S、As 等相结合，形成难溶的碳酸盐类、绿泥石、黄铁矿、毒砂等。H_2S、CO_2、S、As 等是组成易溶的金络合物的配位基，热液中这些组分的大量消耗，势必导致金络合物的解体，使金从热液中迅速沉淀下来。

若围岩含有较高的碳质，碳质对含金热液的还原作用，会使金从离子状态还原成原子状态而发生沉淀。

综上所述，热液在正常的迁移循环中，若遇到富含 Fe、Mn、Mg、Ca 及碳质的岩石，并且热液与围岩有足够大的接触空间时，会导致金络合物解体，使金沉淀富集成矿。

5.2　描述性模型

5.2.1　中温热液充填型金矿床(以胶东地区金矿为例)

矿体名称　产于石英脉或绢英岩带中的金矿体。

矿床地质环境

成矿母体　含金石英脉；含金绢英岩化花岗岩带

成矿物理化学环境

成矿温度　200～320℃

成矿压力　5～23.3MPa

热液酸碱度　pH=6.16～6.61

围岩条件　绢英岩化花岗岩。局部中基性变质火山岩,中基性脉岩。构造岩类——碎裂岩、糜棱岩、断层泥。

控矿构造　矿化期内频繁的断裂构造活动。3级断裂构造控制金矿脉的产出。断裂构造中的减压空间——压扭性断裂中的局部张扭带和碎裂带,构造交切复合部位,构造与各类地质界面交切复合部位,次级张裂隙等控制矿体的产状、形态和规模。

矿体空间分带规律　在矿脉中沿一定方向和角度向下多层等间距侧列式分布。

矿体形态　透镜体状、豆荚状、脉状、不规则状。

矿体产状　沿一定方向和角度侧伏,延深大于延长,边幕式排列。

矿石类型　含金黄铁矿石英,含金石英黄铁矿,含金块状黄铁矿,含金石英多金属硫化物,细脉网脉浸染状石英黄铁矿,细脉网脉浸染状石英多金属硫化物。

金属矿物　银金矿、自然金、金银矿、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、磁黄铁矿,少量毒砂、斜方辉铅铋矿、辉铜矿、黝铜矿、自然银、白然铜、硒银矿、磁铁矿。

非金属矿物　石英、绢云母、方解石、钾长石、绿泥石。

结构构造　致密块状构造,条带状构造,细脉网脉状构造,细粒浸染状构造,角砾状构造,全自形晶粒状结构,半自形晶粒状结构,它形晶粒状结构,骸晶结构,碎斑结构,反应边结构,包含结构。

成矿元素　Au、Ag

伴生元素　As、Sb、Bi、Hg、Cu、Pb、Zn、Se、Te、W、Mo、Mn、Fe、Co、Ni、Ba

最佳元素组合

第1阶段　Au-Ag-W

第2阶段　Au-Ag-Bi-Te

第3阶段　(1)Au-Ag-Cu-Bi-As-Se

(2)Au-Ag-Cu-Pb-As-Bi-W-Zn

矿体地球化学原生晕

侧向晕

上盘晕(自矿体顶板向上)

Te、Ag、Cu、Au、As、Mn(0～1.26m)—Te、Ag、Cu、Au、As(1.26～1.35m)—Te、Ag、Cu、Au(1.35～1.61m)—Te、Ag、Cu(1.61～2.28m)—Te、Ag(2.28～3.77m)—Te(3.77～4.74m)

下盘晕(自矿体底板向下)

Ag、Cu、Mn、Au、As、Te(0～3.23m)—Ag、Cu、Mn、Au(4～11m)—Ag、Cu、Mn(11～12m)Ag、Cu(13m)

垂向晕

矿体上部晕(自矿体向上)

Cu、As、Ag、Au、Te、Mn(0～95m)—Cu、As、Ag、Au、Te(95～290m)—Cu、As、Ag(290～314m)—Cu(314～1200m)

矿体下部晕(自矿体向下)

Cu、Te、As、Ag(0～10m)—Cu、Te(13～64m)—Cu(64～630m)

围岩蚀变　绢英岩化、硅化、钾化、碳酸盐化、绿泥石化、黄铁矿化。

5.2.2　热泉型金矿床(以腾冲地区金矿为例)

矿体名称　产于硅质岩脉中的金矿体。

矿床地质环境

成矿母体　3级浅成热液循环系统。

成矿环境

热液作用深度　地下2000m至地表。

热液温度范围　50～800℃

矿体赋存深度　沸腾面及其以上150m范围。

成矿温度　300～50℃

成矿母体分带　自上而下。

A:热泉。包括温泉、喷气孔、放热地面、泉华、水热爆炸坑及角砾。位于地表。

B:上循环作用带。位于地表以下至200～1000m深处。

a. 硅帽。位于泉华以下至潜水面范围。

b. 冷水与热液混合带、顶界距地表数米至百余米深处,厚数米到数十米。

c. 酸淋滤作用蚀变带。位于近地表至沸腾面范围。

d. 硅质岩带。位于潜水面至沸腾面以下100～200m范围。

e. 沸腾面。位于地下200～1000m范围内的任何空间。

f. 沸腾作用带。顶界在沸腾面以上100～150m处。底板在沸腾面以下150～200m处。

C:下循环作用带。顶界在200～1000m深处,底界在2000～3000m深处。

围岩条件　高岭石化岩石、青盘岩化岩石。

控矿构造　热泉发育期内频繁的断裂构造活动,断裂构造交切复合部位。断裂与各类地质界面交切复合部位。

矿体空间分布规律　长期发育的大型温泉以下一定深度上呈扁漏斗状分布。

矿体形态　脉状、蘑菇状、透镜状、不规则状。

矿石类型　含金细脉网脉浸染硅质矿石,含金角砾状硅质矿石。

矿石矿物　银金矿、自然金、深红银矿、淡红银矿、辉银矿。

脉石矿物　硅质矿物(石英、蛋白石、玉髓)、冰长石、绢云母、黄铁矿、白铁矿、方解石、重晶石、萤石、绿泥石。

结构构造　角砾状构造、脉状穿插构造、细脉网脉浸染构造,壳状结构、胶体结构、梳状结构、孔隙充填结构。

成矿元素　Au、Ag

伴生元素　As、Sb、Hg、Tl、Bi、Pb、Zn、Cu、Se、Te、W、Sn、V、Th、Nb、Ta、B、Y、La、Ce、F、Ba

最佳元素组合　Au、Ag、As、Sb、Hg、Tl

最佳元素垂直分带(自上而下)

Tl→Sb→Hg→As→Ag、Au

围岩蚀变　硅化、高岭石化、伊利石化、蒙脱石化、伊利石-蒙脱石不规则间层矿物化、明

矾石化、沸石化。

5.3 空间几何模型(以腾冲地区金矿为例)

5.3.1 热泉型金矿床的空间结构

5.3.1.1 垂向分带(自上而下)

(1)热泉;

(2)围岩强烈硅化带——硅帽;

(3)地下冷水与热液混合带;

(4)酸淋滤作用蚀变带;

(5)硅质岩带;

(6)沸腾带;

(7)下循环作用带。

5.3.1.2 水平分带(自中心向两侧)

(1)硅质岩带;

(2)围岩强烈硅化带;

(3)酸淋滤作用蚀变带。

金、银矿体即赋存于硅质岩带下段,沸腾带的上半部。

5.3.1.3 热泉

位于地表,包括温泉、喷气孔、放热地面、泉华(硅质泉华、钙质泉华、钙硅质泉华、盐华、硫华),水热爆炸坑及水热爆炸角砾岩等。

温泉水的水化学类型以 HCO_3-Na 型、$ClHCO_3$-Na 型、HCO_3SiO_4-Na 型为主。如果温泉水以 $ClHCO_3$-Na 型为主,泉水中有异常含量的 Au、Ag、As、Sb、Hg、Tl,其下面有可能存在金银矿体。

硅质泉华由蛋白石、玉髓、石英组成,有时有浸染状白铁矿、黄铁矿与之伴生,在有些矿区还见有沥青铀矿、铀石与之伴生。钙质泉华主要由方解石构成,具梳状、胶体状结构。盐华主要由石膏、毛矾石组成,有时有水碱、四水白铁矾、针铁矾、芒硝、石盐等矿物。硫华则由自然硫组成。

在泉口及其附近经常发生水热爆炸,形成爆炸坑和爆炸角砾岩。角砾岩的角砾有反复多次爆炸破碎的特点,胶结物为二氧化硅。自泉口向周围,角砾岩层厚度很快变薄并消失。角砾也有变小的趋势。

如果泉华的成分以硅华为主,有多次"爆炸-破碎-硅质胶结"现象,又有金银及其伴生组分的异常含量时,其下面很可能有金矿体存在。

5.3.1.4 围岩强烈硅化带(硅帽)

位于温泉和泉华的下面,底界为地下水潜水面,一般数米到百余米。该带裂隙十分发育,它们是地下热液向上迁移的流通孔道,流通孔道延伸到地表即为温泉的喷水喉道。因热液的流通孔道十分密集,这个带中热液与围岩间反应十分强烈,岩石中的长石、云母等全部为二氧化硅交代。矿物组合以二氧化硅矿物为主(蛋白石、玉髓为主,石英次之),少量高岭石、伊利石,还有一定数量的白铁矿、黄铁矿。围岩强烈硅化带的突出特点是热液流通孔道的自封闭作用。流通孔道中流动的热液,因温度、压力的大幅度降低,导致二氧化硅的沉淀,

二氧化硅矿物沿流通孔道壁向中心生长，逐渐把孔道堵塞，使热液无法流动。此时，该带上面与之连通的温泉变成了干泉，泉华的沉淀作用被迫停止，这就是浅成热液循环系统特有的自封闭现象。这一阶段，下部热液与围岩有更长时间的接触，水-岩间反应更加充分，有利于热液萃取围岩中的成矿物质。深部热能通过传导方式向热液补给，使热液能量大量积聚，温度增高，压力增大，成为过压流体。当外部某个异常事件（例如断裂构造活动）发生，自封闭的流通孔道破裂，导致过压流体沸腾。突然发生的扩容作用会引起水热爆炸，形成大量水热爆炸角砾岩，也形成大量裂隙和孔洞，每个裂隙都是一个减压空间，高温高压的热液与蒸气一起迅速向裂隙和孔洞流动。该带上部的温泉喷水喉道也会裂开，干涸的泉坑重新流出泉水，泉华沉淀作用也得到恢复。“沸腾-自封闭”作用的反复进行，一方面使热液迁移循环作用经久不息，另一方面会导致金银的大量沉淀，富集成矿。

围岩强烈硅化带一般宽数十到数百米，向两边逐渐过渡为酸淋滤作用蚀变带。

如果围岩强烈硅化带中发育大量水热爆炸角砾岩，角砾具有多次“破碎-胶结”的特点，并且含有异常含量的金银及其伴生组分，其下面有可能发现金矿体。

5.3.1.5 地下冷水与热液混合带

位于围岩强烈硅化带以下，硅质岩带的最上端，厚数米到数十米，是地下冷水与热液发生混合的空间。因热液具有高温、高压、高碱质、高矿化度、高 pH 值、低 *Eh* 值特点，在这种介质环境中，金的硫氢化物络合物具有较高的溶解度；而地下冷水的性质与之相反，具有低温、低压、低矿化度、低 pH 值、高 *Eh* 值特点。大量冷水的混合，必然导致热液性质的改变，使二氧化硅和金等在热液中变得不稳定而发生沉淀，形成具有异常含量金的细粒状、粉状、凝絮状二氧化硅矿物集合体。有时可见到其他矿物如白铁矿、黄铁矿、方解石、辉锑矿等。

如果在该带上发现金银的异常含量，在其下部有可能发现金矿体。

5.3.1.6 酸淋滤作用蚀变带

酸淋滤作用蚀变带分布的范围最广。在垂直空间上，自硅帽顶板至地下深处的沸腾面以上，包括围岩强烈硅化带、冷水与热液混合带、硅质岩带、沸腾带等空间，都发育有酸淋滤作用蚀变岩，厚度 200～700m。在水平方向上，以硅质岩脉或强硅化岩带为中心，酸淋滤作用蚀变岩大面积分布于它们的两侧。面积一般数百平方米，最大可达数平方千米。该带由高岭石、伊利石、伊利石-蒙脱石不规则间层矿物、沸石、明矾石、蒙脱石、二氧化硅矿物等组成。沿断裂构造带向两侧，蚀变矿物组合有分带现象。例如，热海地区，沿黄瓜箐—硫磺塘南北向断裂破碎带，二氧化硅矿物、明矾石、高岭石最发育，向断裂带两侧，上列矿物减少，伊利石、伊利石-蒙脱石不规则间层矿物逐渐增多。

酸淋滤作用蚀变带中的蚀变矿物，是深部热液不断发生沸腾，包括水蒸气在内的大量气态物质向上逃逸，弥漫于岩层的裂隙和孔隙中，遇冷凝结成溶液后，由于氧化作用，使 S^{2+} 转变为 S^{6+}，形成硫酸，使溶液呈强酸性，与围岩发生反应，不同程度地淋滤围岩中物质而形成的。热液沸腾次数多，规模大，热液中 CO_2、H_2S 含量高时，才能形成规模大的酸淋滤作用蚀变岩带。而这些条件对金的富集成矿是不可缺少的。因此，大规模的酸淋滤作用蚀变岩带往往指示较大的金矿床存在。

5.3.1.7 硅质岩带

硅质岩带分布在潜水面以下至沸腾带底界之间的广大空间上，厚度 300～500m。由密集分布的硅质岩脉、细脉、网脉组成。矿物成分以二氧化硅矿物（蛋白石、玉髓、石英）为主，

少量白铁矿、黄铁矿、方解石、伊利石、绢云母、冰长石、绿泥石、萤石。自上而下，二氧化硅矿物中的蛋白石经玉髓向石英过渡。伊利石向绢云母、绿泥石过渡。白铁矿向黄铁矿过渡。冰长石多数出现在下部靠沸腾面的地方。

在硅质岩带上段，已经有较多的金发生沉淀，但富集成矿石的仅占一小部分。例如热海地区的硅质岩带上段，金含量为 0.015～3.25μg/g、平均 0.225μg/g，见到的最大值 4.65μg/g。品位 1μg/g 以上的矿石仅占 13.1%。

富矿体位于硅质岩带的下段，沸腾面以上附近空间。在那里有自然金、银金矿、深红银矿、淡红银矿、辉银矿的富集。脉石矿物则以石英、绢云母、冰长石、绿泥石为主。矿体由网脉状、细脉状、脉状、角砾状矿石组成。矿石具有角砾状结构、条带状结构、不规则脉状穿插结构。

5.3.1.8　沸腾带

布坎南 L J(1981 年)给出的沸腾面平均深度为 350m，沸腾面上下大约 150m 范围(相当于地表以下 200～500m)为沸腾带。带内自下而上，热液因沸腾而逸失的各种挥发分(包括水蒸气)数量增多、pH 值增高，氧逸度增大，盐度增高。与之相对应，自下而上形成贱金属矿石(位于沸腾面下部)、银矿石(位于沸腾面附近)、金矿石为主(位于沸腾面以上，沸腾带的上部)的矿石空间分带。经研究，腾冲地区的沸腾面位置较深，为 610m。

金矿化与热液的沸腾作用有关，并且沸腾次数愈多，规模愈大，愈能够形成富矿石。对热海地区硅质岩带上段的硅质角砾岩取样研究结果表明，岩石中金含量与岩石因热液沸腾

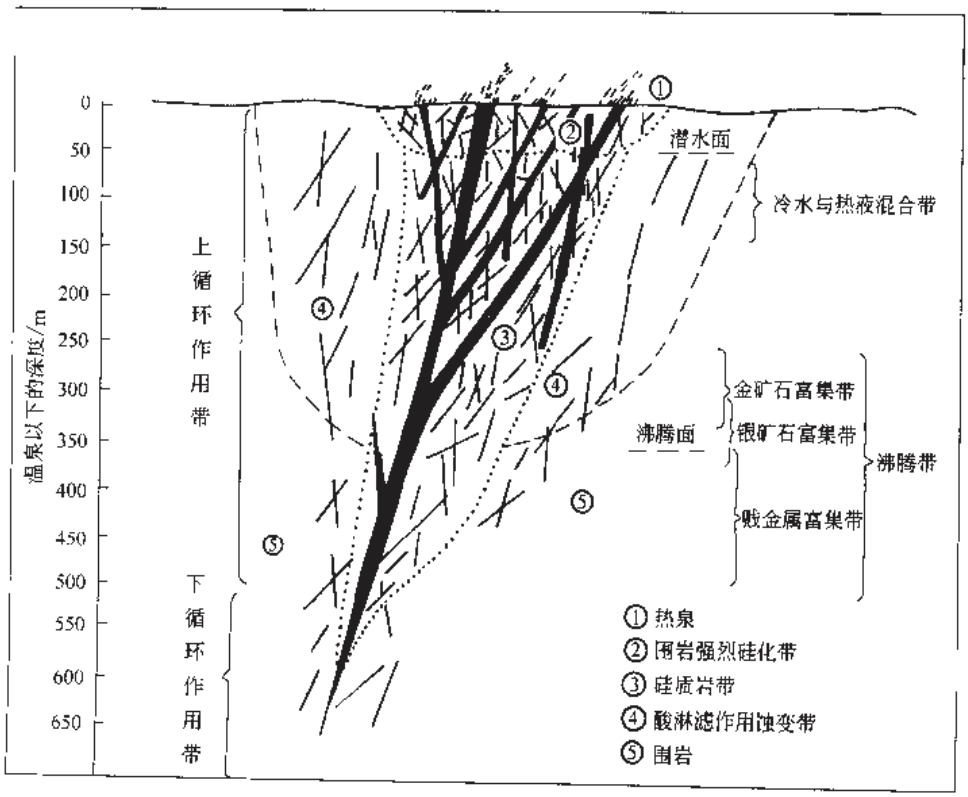


图 5-2　热泉型金矿床空间几何(理想)模式图

而破碎的次数之间,存在指数分布关系。经计算,岩石中金含量的自然对数值随着岩石破裂次数的增加,以斜率 0.674 的速度增长。按该增长速度计算,一块岩石"破裂-胶结"7 次后即可富集成品位 1.35μg/g 的矿石。"破裂-胶结"12 次,即可成为品位近 40μg/g 的富矿石。

5.3.1.9 地球化学特征

热泉型金矿床的最佳标志元素组合为 Au、Ag、As、Sb、Hg、Tl。

自上而下的垂直空间分带序列为:

Tl→Sb→Hg→As→Ag、Au

5.3.2 空间几何模型图

图 5-2 描绘了热泉型金矿床空间几何模型。值得一提的是,给出的模型是一种在时间上和空间上理想化了的分带。实际情况要复杂得多。大多数情况下,分带是不清楚的,各带出现的深度也是不固定的,这里只是采用了出现较多的一种。

5.4 构造-围岩异常模型

成矿理论指出,热液循环系统中突然出现减压空间,会使过压热液发生沸腾,引起金络合物解体,使金沉淀下来。还指出,仅当减压空间反复不断地出现时,才有可能形成工业金矿体。因而,频繁的构造活动是热液型金矿体生成的必要条件之一。成矿理论还指出,热液成矿作用的主要特点之一是热液与围岩之间发生的物质交换反应。那些导致热液中金络合物解体,使金沉淀的异常围岩环境是热液型金矿体生成的重要条件之一。

5.4.1 构造异常

我们所指的构造异常有两个内容,其一是同一空间上频繁不断发生的构造活动。其二是构造活动作用空间上重复出现微张裂隙的地段。只有重复出现减压空间的地方,才可能有金矿体存在。

5.4.1.1 频繁发生的断裂构造活动

频繁不断发生的断裂构造活动,有成矿前、成矿时、成矿后之分。三者在时间上、空间就位上、活动性质上具有频繁、间断、继承,从早到晚依次减弱等特点。其中,直接控制矿体生成的是成矿时的断裂构造活动,它的发育程度、活动次数、形成的裂隙性质、复杂程度等,对矿体的成生至关重要。一般情况下,构造活动发育、活动次数频繁,在一定的空间上重复生成张裂隙等,对成矿有利。成矿时的构造活动一般 5~10 次或更多(舍赫特曼 Ⅱ A 等,1979 年)。活动强度虽然没有成矿前的大,但每次活动都改变构造裂隙空间内部结构,形成新的张裂隙和挤压空间。突然发生的减压空间,势必导致含金过压热液的沸腾。H_2S、HS^-的大量逸失,促使金络合物解体,使金沉淀富集。这种构造活动有下列特点:

(1)发育的时间长,在空间就位上具有多次、间断、继承等特点。

(2)断裂构造规模大,波及范围广,发育从大到小多序次的断裂构造裂隙。断裂带上发育各种相互叠加的构造岩类。

(3)断裂带显示多阶段矿化,裂隙充填物具有多种多样的结构构造和复杂的矿物组合。

(4)具有明显的重复断裂特征。

1)在矿脉和层间剥离的微张开地段,发育空洞和矿物充填,具壳状构造。

2)脉体和围岩角砾化,角砾被新的矿物胶结。

3)矿石及围岩的片理化和碎裂化，矿物粒内破裂和粒间变形。

4)形成某些矿物的强烈堆积，堆积体有多次构造活动显示——矿物和矿石以及胶结脉体的多次被磨碎和破碎、胶结。同一空间上多阶段标志元素和矿物的叠加。

5.4.1.2 断裂构造活动空间上局部频繁张裂带

该带是矿化期中经常出现微张裂隙的减压空间。它的出现与否，决定于围岩性质和引起围岩发生变形的动力场特征。构造分析中的变形椭球体理论指出，在挤压力作用下，围岩在一定方向上有可能产生压裂隙、张裂隙、扭裂隙。在似均质的围岩中，几乎只发生裂隙变形，即首先产生逆断层和逆掩断层，而后产生斜向平移断层和张性断层。所产生的第一个平移断层，最终会发育成逆断层和逆掩断层。逆断层走向与断裂构造总体方向一致。断层面呈波状，在倾斜较缓的地段，断层发生微张开。在平移断层形成过程中，应力在水平方向上起作用，其主要释放方向是断裂构造的走向方向。平移断层面比较平坦，但也有微波状起伏的表面，在弯曲地段有比较小的错动和微张开。上述不同性质断层的微张开地段，都是矿体赋存的有利空间。

在裂隙重新张开的条件下，平移错动对成矿十分有利。此时，围岩遭受强烈变形，使脆性围岩产生羽毛状张裂隙，特别是在减压较大的上盘或下盘，羽状裂隙十分发育，极有利于成矿，在该处形成厚大的矿体。

在挤压作用下，非均质围岩的变形沿已有的裂隙和断层面、矿脉与围岩接触面、地层不整合面，不同地质体接触界面等发生，使构造方向发生改变，形成更为复杂的挤压面和张裂面。

在构造作用下，矿脉(矿床)中的下列空间位置最容易产生减压空间：

(1)构造结构面呈波状起伏的断裂上，产状变化大的部位。这是因为在构造作用下，沿着弯曲或不规则裂隙、断裂或剪切带两盘发生走向滑动或倾向滑动，在产状变化大的部位最容易产生张开裂隙和不连续的空洞。这种减压空间一般呈透镜状，沿倾向方向往往延伸很长。

在成分和结构相对均匀的围岩条件下，波状结构面的波峰、波谷、过渡带等在空间上呈有规律的重复分布。相应的张开裂隙和不连续的空洞也呈有规律的重复分布。

在成分和结构不均匀的围岩条件下，沿断裂裂隙分布的张开面的发育程度，决定于围岩性质及其与变位方向的关系。当正断层通过时，脆性岩层产生大量张性裂隙，而塑性岩层只产生压性裂隙。逆断层通过时，塑性岩层产生一些不太发育的张裂隙，而脆性岩层只产生压性裂隙。位于塑性岩层之间的薄层脆性岩层会发生强烈破碎，见图 5-3。

上述减压空间是金矿体最有利的赋存场所之一。招掖金矿化带上的石英脉型金矿床，都发育充填于这种空间的金矿体，金矿体一般呈透镜体状，延深往往大于延长。因为矿脉赋存在成分和结构相对均匀的花岗岩体中，矿脉中的多个矿体按一定方向和角度向下等间距侧列式分布。

(2)断裂和(或)剪切带的交切处或连接处。这种空间因不同方向、产状断裂构造的相互“撕扯”，最容易产生张裂隙。也容易导致岩石破碎，产生角砾岩化带，以及扭曲、拖曳、挤压和碎裂带。这种张开带和具有巨大表面积的破碎带的产生，为热液活动提供减压空间。这种减压空间沿走向延伸长度有限，但沿倾向方向延伸很远。

(3)断裂构造裂隙与地质界面交切或复合处。地质界面包括岩体与地层的接触面；

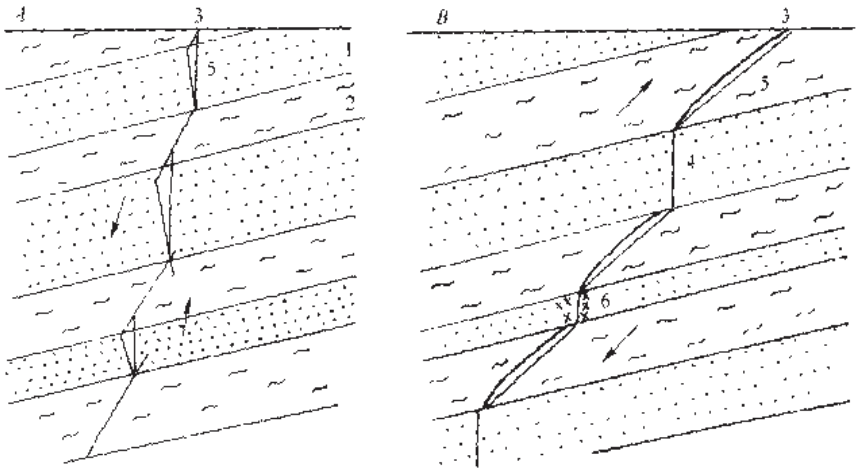


图 5-3　不同性质岩层中的断裂裂隙

1—脆性岩层；2—塑性岩层；3—断层；4—压性裂隙；5—张性裂隙；6—破碎带

不同岩体之间的接触面；不同时代地层的不整合面；岩脉与围岩之间的接触面；矿脉与包括岩脉在内的围岩之间的接触面；断层泥与其上、下构造岩带之间的接触面。由于界面两侧地质体成分、结构、物理性质等有较大的差异，断裂构造裂隙与之交切或复合时，在界面处及其附近，最容易发生拉伸、滑动、扭曲、拖曳，形成张裂隙和角砾岩化带，是良好的减压空间。

(4)石英脉的局部膨大部位，是石英脉生成时断裂构造局部微张地段。经继承性断裂构造作用，在该处最容易产生滑动、剪切和张裂，形成良好的减压空间。

与上述各种微张开裂隙的产生条件相对应，形成 3 种类型的减压空间，即沿走向延长的、沿倾向延长的、斜向的减压空间。它们的组合导致微张地段的弯曲和分叉，形成不同形态的矿体，如在单个或近于平行的断裂弯曲部位形成脉状和(或)透镜体状矿体；在近于平行断裂之间的岩块中，发育雁行状排列的矿体和横向的由网脉状矿石组成的矿体等。

5.4.2　围岩异常

我们所指的围岩异常是局部空间上受断裂构造作用的，岩石成分与热液作用后，能导致热液中金络合物大规模解体的围岩，如前面述及的中性、基性、超基性岩，含碳质高的岩石，富含铁的岩石，碳酸盐岩等。这些岩石中的 Fe、Ca、Mg、Mn 等和热液中的 CO_2、H_2S、S、As 相结合，形成难溶的碳酸盐类、绿泥石、黄铁矿、毒砂。CO_2、H_2S、S、As 的大量消耗，导致金络合物的解体，使金沉淀下来。碳质对含金热液的还原作用，使金从离子状态还原成原子状态而沉淀。碳酸盐对热液起中和作用，会大幅度地改变热液的酸碱度，使碱性热液向酸性热液转化，从而大大降低金硫氢化物络合物的溶解度，使金沉淀下来。

上述有利于金沉淀富集的围岩环境，必须受断裂构造作用才能成为围岩异常。只有断裂构造作用于这种围岩，才能通过构造裂隙使热液迁移到这类岩石中，与之接触并发生物质交换反应。只有断裂构造作用于这种围岩，使岩石破碎，产生大量裂隙和孔隙，才能增加热液与这类岩石的接触面积，使热液与围岩发生充分的物质交换反应，才能较大幅度地改变热液性质，促使金沉淀富集成矿。

综上所述，将控矿的构造-围岩异常模型归纳成图 5-4。

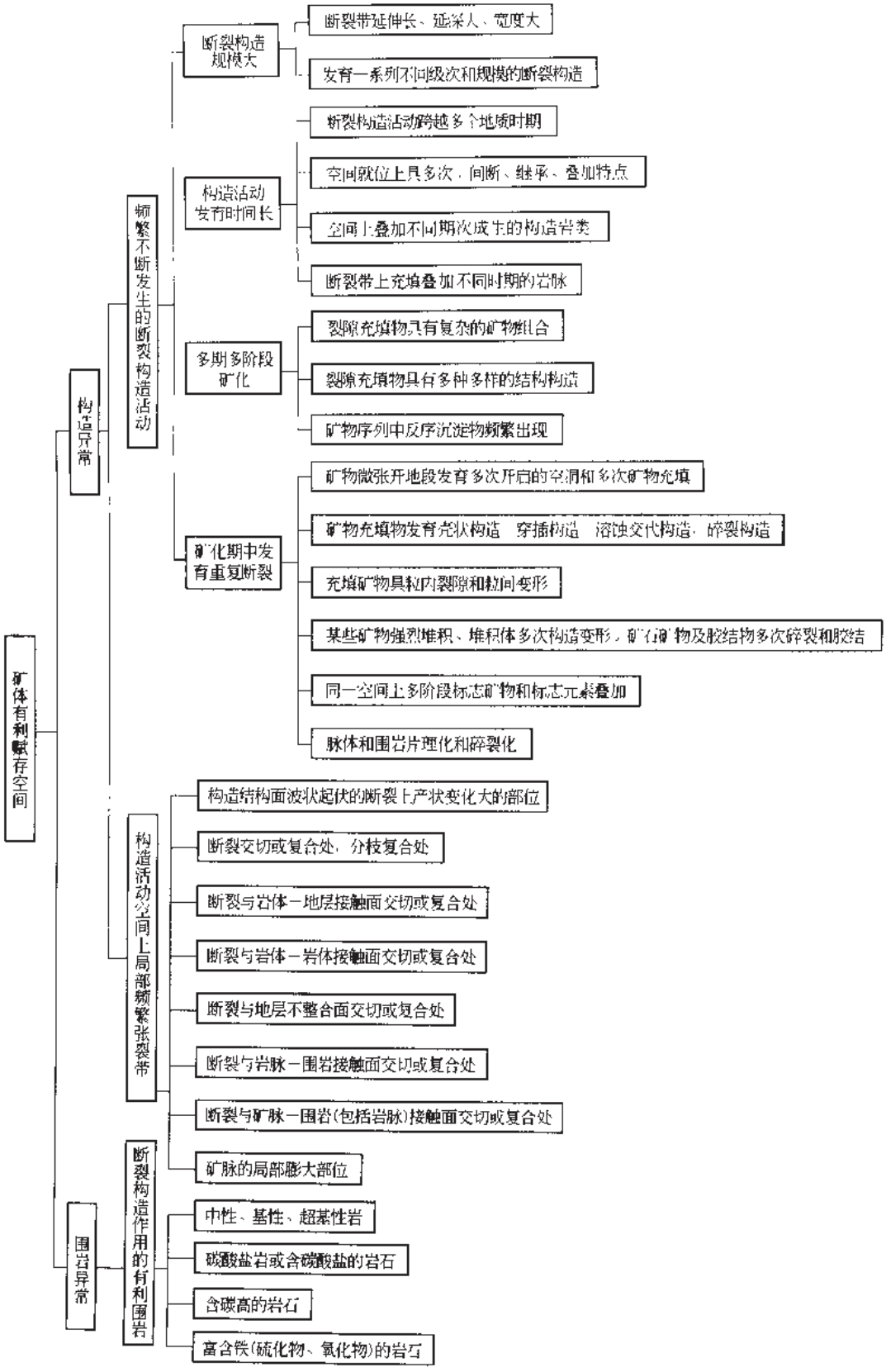


图 5-4　控矿的构造-围岩异常模式框图

6 金矿产资源总量估计及评价

6.1 金矿产资源总量估计方法

对任何一个评价区的矿床统计预测，都要解决好两个问题。其一是该区有没有矿产资源潜力，若有，有多少？值不值得进一步开发？其二是该区的潜力资源量集中分布在哪些空间部位？前者是定量问题，后者是定位问题。并且前一项工作是开展后一项工作的前提条件。这是因为如果一个评价区没有资源潜力，或者潜力资源量不多，进一步开发在经济上不合算，就没有必要进一步对该区进行预测了。资源和储量是两个不同的概念，资源指地壳内部和表面天然形成的固、液、气态物质的富集体。从数量和形态上看，它们现在或将来有可能成为有经济价值的开采对象。储量是指具有现行开采价值的、已查明的那部分矿产资源。两者之间的差别在于，储量是通过勘探工程（槽探、井探、钻探、坑探）揭露，查明矿体的各种标志值（几何形态、矿石品位、矿石体重、矿体体积），应用一定的方法计算出来的，具有现行开采价值的数值，又依其可能出现的误差大小分成若干个等级。资源则是在矿体的各种标志值未知情况下，依据资源量与控矿地质标志之间的关系推断得到的数值，依其产出的概率大小来评价它的可靠性。由于是大比例尺的矿床统计预测，所用的地质和矿产资料及数据水平较高，对估计的精度要求也较高。在这一点上有别于大区域的矿产资源总量估计工作。矿产资源总量估计方法有体积估计法、矿石品位-矿床规模经验估计法、齐波夫分布律法、矿产值历史资料估计模型法等。

6.1.1 体积估计法

在大比例尺矿床统计预测的矿产资源总量估计中，应用最广的方法是体积估计法。即设法求出预测区矿体体积，矿石平均体重，矿石平均品位，用下列数学模型计算预测区的金矿产资源总量：

$$A = VDC \tag{6-1}$$

式中，A 为预测区金矿产资源总量；V 为预测区矿体体积累积值；D 为矿石平均体重；C 为矿石金平均品位。

以实例说明体积估计法。

6.1.1.1 108 矿脉深部预测区金矿产资源总量估计

108 矿脉是玲珑金矿田中规模最大的一条矿脉，出露长度 5300m。矿脉在地表最高标高 604m，据钻孔揭露，-200m 标高处仍有矿化。F_{108} 断裂构造严格控制着 108 矿脉的产状和形态，走向 NE50°～80°，倾向 NW，倾角 35°～75°。断裂面总体具有压扭性结构面特征，在空间上呈舒缓波状，在产状变化大的部位发育张裂隙。断裂构造具有多次活动特点，在同一个空间上，不但会出现压性结构面和相应的构造岩，而且还出现扭裂面、张裂面和相应的构造岩类。随构造裂隙性质不同，矿脉在空间上分枝复合、尖灭再现、膨缩交替及侧列现象十分普遍。

矿脉由含金黄铁矿石英和含金黄铁矿化绢英岩构成。围岩是花岗岩。矿脉厚度0.01～10 余 m，平均 0.76m。矿脉中金分布极不均匀，含量一般为 0.09～108.31μg/g，平均

3.6μg/g,最高 438.61μg/g。在张裂隙发育处,矿脉膨大部位,构造交切复合部位形成金矿体,矿体由含金黄铁矿石英和含金石英多金属硫化物构成,呈透镜体状、豆荚状、脉状断续分布,厚 0.8～5.8m。沿走向和倾向长 10～100m,一般延深大于延长。矿石平均品位 15.03μg/g。在 190m 标高以上,矿脉已被揭露开采,采获黄金 12t。

A 深部预测区矿化强度分析

为估计深部预测区金矿产资源总量,必须评价深部预测区的矿化强度。和上部已经揭露的空间相比,深部预测区必属于下列 3 种矿化特征之一:

(1)矿化逐渐增强;

(2)矿化逐渐减弱;

(3)矿化和上部相似。

在缺乏深部地质资料情况下,为查明深部预测区的矿化强度,需对上部已知资料进行详细研究,从中提取最佳空间变化标志,查明它们的空间变化规律,并把这种规律向深部推测,从而对深部预测区矿化强度做出推断。由于断裂构造对矿脉的严格控制作用,矿体一般产在一定的构造结构面上,在那里矿脉厚度和金品位大幅度地增高。因此,对下列空间变化标志进行趋势面分析,目的是查明标志值的空间变化规律。它包括:(1)矿脉波状分布特征;(2)矿脉水平宽度空间变化特征;(3)金品位空间变化特征。

趋势面分析具有分解叠加在一起的区域规律性变化,局部规律性变化、随机性变化的功能,即应用一定的数学方法提炼出一个数学面来描述数据中规律性的变化趋势,表征标志的空间变化规律性。具体做法如下:

在上部控制区,抽取 2889 个矿脉底板至基准面距离值进行趋势面分析,以便了解构造面的空间分布特征。5 次趋势面拟合度为 70.44%。从图 2-1 可见,矿脉底板距基准面距离在空间上展示出 1 级和 2 级两级波状分布规律。我们把它们分别称作 1 级和 2 级构造结构面。1 级构造结构面在控制区表现为 2 谷 1 峰的变化格局。从东北向西南,大致沿 65°～70°角向下呈谷—峰—谷规律变化。2 级构造结构面是 1 级构造结构面内部的波状变化。比较明显的变化方向有两组,一组自西南向东北,大致沿 26°角向下呈峰—谷—峰变化。另一组大致自上而下呈谷—峰—谷变化。

构造结构面向下方和向东西两侧变化平稳,不见有收敛的趋势。从 1 级构造结构面的变化趋势看,研究区西南部向下将主要表现为 1 级谷,到 0m 标高有可能过渡为 1 级峰。中部向下将从 1 级峰过渡为 1 级谷。东北部向下仍是 1 级谷,到 50m 标高有可能过渡为 1 级峰。

在上部控制区,对 2410 个经对数变换的金品位数据进行趋势面分析。4 次趋势面的拟合度为 61%。从图 2-1 可见,金在上部控制区发育两个富集中心,它们位于控制区西南部的中上方和东北部。中部则发育一个贫化带。金品位向东西两侧和向下方变化平稳,没有收敛的趋势。从品位值的变化趋势看,在研究区的西南部和中部,向深部有可能出现金的富集。东北部的下方将出现金的贫化带。

在上部控制区,对 2889 个经对数变换的矿脉水平宽度数据进行趋势面分析。5 次趋势面的拟合度为 76.45%,从图 2-1 可见,矿脉水平宽度在控制区具有按厚薄相间分布的分带性。即从东北向西南,沿 65°～70°角向下,呈矿脉较厚带—矿脉较薄带—矿脉较厚带变化。此外,在每个带内,沿长轴方向也有相对厚薄的变化。

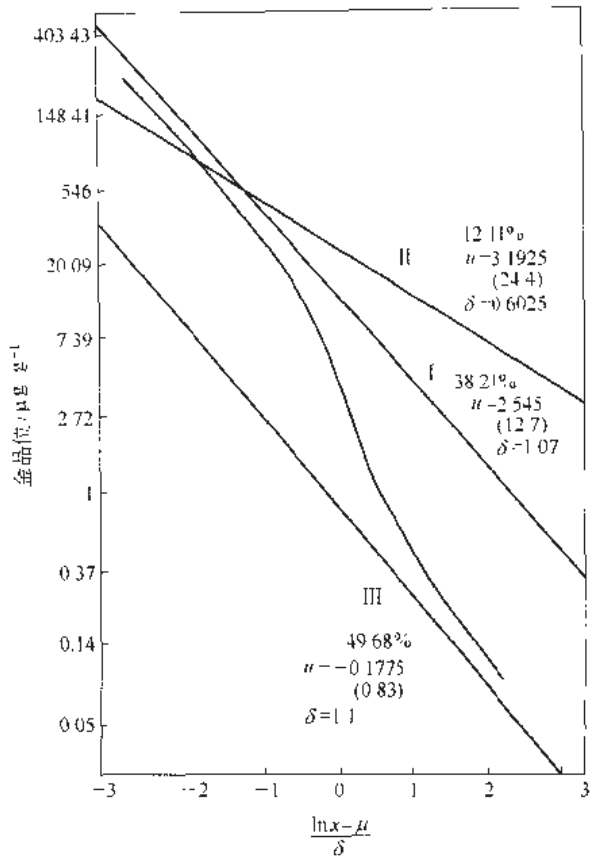


图 6-1　108 矿脉金品位混合分布总体筛分结果图

矿脉水平宽度向东西两侧和向下方变化平稳，不见有收敛的趋势。从变化趋势看，研究区西南向深部有可能出现矿脉较薄带。中部向下有可能出现矿脉较厚带。

此外，108 矿脉的走向方差、倾角方差、金的线金属量、充填脉体与蚀变围岩间线金属量比值等空间变化标志，向深部也表现出稳定周期性的变化特征，见图 2-2。

综上所述，108 矿脉与矿化有关的空间变化标志具有向深部平稳周期性变化规律，不见有收敛的趋势。最佳空间变化标志均按一定的方向和角度在空间上周期性变化。并且，1 级构造结构面的谷—峰—谷变化，金的富集—贫化—富集变化，矿脉水平宽度的较厚—较薄—较厚变化等，在空间上具有一一对应的相关关系。之所以如此，是因为金矿化严格受断裂构造控制，使构造结构面、金品位、矿脉水平宽度在成分和结构相对均匀的花岗岩中有规律地分布而造成的。上述变化规律表明，108 矿脉深部有和上部相似的成矿环境，不但有富集成矿体的可能性，而且具有和上部相同的矿化特征和矿化强度。

B　金矿产资源总量估计

对 108 矿脉深部预测区金矿产资源总量估计，属于精度很高的 E 级储量估计范畴。为达此目的，必须估计出：(1)预测区的面积；(2)矿体在矿脉中所占体积百分比；(3)矿体平均厚度；(4)矿石平均体重；(5)矿石金平均品位。上列参数在储量计算中是通过工程控制抽样计算得到的。但对地质情况不明的深部预测区而言，只能通过一定的空间成矿模式及有关标志的变化规律进行估计。

对于热液充填型金矿床而言，可以把矿脉看作一个独立的矿化空间。矿脉厚度、矿石品位以及它们的乘积在空间上必然遵从某种分布律。可通过矿脉厚度、矿石品位及它们的乘积等实测数据的统计分布特征研究，来估计上述标志满足工业指标那部分在矿脉中出现的概率，以及它们的平均数。从而解决矿脉平均厚度、矿石平均品位、$m \cdot g \cdot t^{-1}$值及矿体在矿脉中所占百分数等。

(1)金品位统计分布特征。为研究108矿脉金品位统计分布特征，在上部控制区抽取刻槽取样样品化学分析数据4268个。金品位在不大于0.01～438.61μg/g范围内变化。对其进行自然对数变换后，按对数值0.3448间隔把数据分成26组，统计各组样品的频数、频率、累积概率。把累积概率表示在正态概率纸上，它们表现为1条曲线。表明金品位是多个矿化阶段叠加的混合分布总体。按辛格莱A J的方法对其筛分，得到3个对数正态分布总体，见表6-1。

表6-1　108矿脉金品位统计分布特征及筛分结果表

组中值/μg·g⁻¹	总体Ⅰ累积概率		总体Ⅱ累积概率		总体Ⅲ累积概率		混合总体频数	混合总体频率	混合总体累积概率	
	理论值	在混合总体中的值	理论值	在混合总体中的值	理论值	在混合总体中的值			实测值	理论值
398.42	0.0006	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1	0.0002	0.0002	0.0002
227.01	0.0036	0.0014	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	5	0.0012	0.0014	0.0014
185.23	0.0062	0.0024	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	4	0.0009	0.0023	0.0024
131.21	0.0147	0.0056	0.0026	0.0003	0.0000	0.0000	14	0.0033	0.0056	0.0059
92.94	0.0317	0.0121	0.0131	0.0016	0.0000	0.0000	26	0.0061	0.0117	0.0137
65.84	0.0624	0.0239	0.0449	0.0060	0.0000	0.0000	70	0.0164	0.0281	0.0298
46.64	0.1126	0.0430	0.1404	0.0170	0.0001	0.0000	137	0.0321	0.0602	0.0600
33.04	0.1866	0.0713	0.3063	0.0371	0.0004	0.0002	201	0.0471	0.1073	0.1086
23.40	0.2850	0.1089	0.5263	0.0637	0.0012	0.0006	283	0.0663	0.1736	0.1732
16.58	0.4029	0.1540	0.7383	0.0894	0.0033	0.0017	292	0.0684	0.2420	0.2450
11.74	0.5305	0.2027	0.8870	0.1074	0.0082	0.0041	309	0.0724	0.3144	0.3142
8.32	0.6549	0.2502	0.9627	0.1166	0.0184	0.0092	243	0.0569	0.3714	0.3760
5.89	0.7645	0.2921	0.9907	0.1200	0.0381	0.0189	262	0.0614	0.4328	0.4310
4.17	0.8515	0.3254	0.9983	0.1209	0.0721	0.0358	210	0.0492	0.4820	0.4821
2.96	0.9139	0.3492	0.9997	0.1211	0.1257	0.0625	225	0.0527	0.5347	0.5327
2.09	0.9543	0.3646	1.0000	0.1211	0.2024	0.1005	197	0.0462	0.5808	0.5863
1.48	0.9778	0.3736	1.0000	0.1211	0.3015	0.1498	227	0.0532	0.6340	0.6445
1.05	0.9902	0.3783	1.0000	0.1211	0.4181	0.2078	274	0.0642	0.6982	0.7072
0.74	0.9960	0.3806	1.0000	0.1211	0.5426	0.2696	272	0.0637	0.7619	0.7712
0.53	0.9985	0.3815	1.0000	0.1211	0.6630	0.3294	331	0.0776	0.8395	0.8320
0.37	0.9995	0.3819	1.0000	0.1211	0.7685	0.3818	197	0.0462	0.8857	0.8848
0.26	0.9999	0.3820	1.0000	0.1211	0.8525	0.4235	190	0.0445	0.9302	0.9267
0.19	1.0000	0.3821	1.0000	0.1211	0.9132	0.4537	116	0.0272	0.9574	0.9569
0.13	1.0000	0.3821	1.0000	0.1211	0.9530	0.4734	133	0.0312	0.9885	0.9760
0.09	1.0000	0.3821	1.0000	0.1211	0.9766	0.4852	15	0.0004	0.9920	0.9884
0.01	1.0000	0.3821	1.0000	0.1211	1.0000	0.4968	14	0.0080	1.0000	1.0000

把它们按比例复合成混合分布总体后，从图6-1可见，在正态概率纸上混合分布总体累积概率实测值和混合分布总体累积概率理论曲线紧密伴随。表明筛分出的3个对数正态分布总体是客观的。其中，分布总体Ⅰ在混合分布总体中占38.21%，几何平均值12.7μg/g，

密度分布函数为：

$$P_1(u)=\frac{1}{1.07\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u-2.545}{1.07}\right)^2\right] \qquad (u=\ln x) \tag{6-2}$$

分布总体Ⅱ在混合分布总体中占12.11%，几何平均值24.4μg/g，密度分布函数为：

$$P_2(u)=\frac{1}{0.6025\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u-3.1905}{0.6025}\right)^2\right] \qquad (u=\ln x) \tag{6-3}$$

分布总体Ⅲ在混合分布总体中占49.68%，几何平均值0.83μg/g，密度分布函数为：

$$P_3(u)=\frac{1}{1.1\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u+0.1775}{1.1}\right)^2\right] \qquad (u=\ln x) \tag{6-4}$$

据矿石矿物组合特征、金及其伴生元素地球化学特征研究发现，第Ⅲ分布总体表征第1阶段金矿化。在该阶段中，金矿化在空间上比较普遍，但富集程度低，金品位变化大，一般为0.09～7.56μg/g，平均为0.83μg/g，最高为22.7μg/g。3μg/g以上的在该阶段矿化中占12.3%，在矿床中占6.11%。提供的金矿产资源量占矿床金资源总量的11.52%。

第Ⅰ分布总体表征第2阶段金矿化。该阶段矿化在空间上的分布范围比第1阶段小，但富集程度很高，金品位变化也很大，一般为1.5～108.31μg/g，平均12.74μg/g，最高为315.8μg/g。3μg/g以上的在该阶段矿化中占91.18%，在矿床中占34.84%。提供的金矿产资源量占矿床金资源总量的65.66%，是最重要的金矿化阶段。

第Ⅱ分布总体表征第3阶段金矿化。该阶段金矿化仅在矿脉的局部空间上发生。但富集程度很高，金品位变化较小，一般为7.3～81.25μg/g，平均24.4μg/g，最高148.4μg/g。3μg/g以上的在该阶段矿化中占99.97%，在矿床中占12.11%。提供的金矿产资源量占矿床金资源总量的22.82%。

按各阶段矿化在矿床中出现的概率计算，矿脉中金品位3μg/g以上的占53.06%。

为计算矿床中3μg/g以上金矿石平均品位，对3个矿化阶段3μg/g以上那部分金品位分别按一定间隔分组，求出每个分组在矿床中出现的概率，用概率加权平均的方法计算矿石金平均品位。表6-2列出了各分组的概率，经计算得金矿石平均品位为15.0293μg/g。

表6-2　108矿脉三个矿化阶段3μg/g以上的金品位分组概率表

顺序号	第一阶段			第二阶段			第三阶段		
	组间(对数值)①	组中值(对数值)①	组间概率	组间(对数值)①	组中值(对数值)①	组间概率	组间(对数值)①	组中值(对数值)①	组间概率
1	1.0986～1.3010	1.1998	0.0336	1.0986～1.5642	1.3314	0.0915	1.0986～1.4887	1.2937	0.0019
2	1.3010～1.5034	1.4022	0.0262	1.5642～2.0298	1.7970	0.1350	1.4887～1.8788	1.6838	0.4123
3	1.5034～1.7058	1.6046	0.0198	2.0298～2.4954	2.2627	0.1668	1.8788～2.2689	2.0739	0.0481
4	1.7058～1.9082	1.8070	0.0144	2.4954～2.9610	2.7283	0.1698	2.2689～2.6590	2.4640	0.1252
5	1.9082～2.1106	2.0094	0.0102	2.9610～3.4266	2.1939	0.1437	2.6590～3.0491	2.8541	0.2181
6	2.1106～2.3130	2.2118	0.0070	3.4266～3.8922	3.6595	0.1010	3.0491～3.4392	3.2442	0.2529
7	2.3130～2.5154	2.4142	0.0047	3.8922～4.3578	4.1251	0.0589	3.4392～3.8293	3.6343	0.1958
8	2.5154～2.7178	2.6166	0.0028	4.3578～4.8234	4.5907	0.0285	3.8293～4.2194	4.0244	0.1011
9	2.7178～2.9202	2.8190	0.0019	4.8234～5.2890	5.0563	0.0114	4.2194～4.6095	4.4145	0.0349
10	2.9202～3.1226	3.0214	0.0011	5.2890～5.7546	5.5219	0.0039	4.6095～4 9996	4.8046	0.0080

①均为自然对数值。

(2)矿脉水平宽度统计分布特征。为估计108矿脉金矿体的平均厚度,在上部控制区抽取矿脉水平宽度数据(在各中段按5m间隔实测)2889个。经研究,其中的421个在0～0.1m区间呈均匀分布,概率密度函数为:

$$f(x)=\begin{cases}0.0024 & 0<x\leqslant 0.1\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{6-5}$$

剩余的样品共2468个,占样品总数的85.43%。水平宽度在0.1～9.6m范围内变化。经过对数变换后,按对数值0.3871间隔把样品分为10组。统计各组样品的频数、频率、累积概率。把累积概率表示在正态概率纸上,它们表现为1条曲线,表明矿脉水平宽度是一个混合分布总体。经筛分得到2个对数正态分布总体,见表6-3,图6-2。其中,分布总体Ⅰ在混合分布总体中占59%,几何平均值0.55m,密度分布函数为:

$$P_1(u)=\frac{1}{0.805\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{u+0.601}{0.805}\right)^2\right\}\quad(u=\ln x) \tag{6-6}$$

该分布总体表征的矿脉水平宽度一般0.11～2.74m,最宽13.72m。0.8m以上的在该分布总体中占31.94%,在矿脉中占16.1%。

分布总体Ⅱ在混合分布总体中占41%,几何平均值1.37m,密度分布函数为:

$$P_2(u)=\frac{1}{0.479\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{u-0.313}{0.479}\right)^2\right\}\quad(u=\ln x) \tag{6-7}$$

表6-3 108矿脉水平宽度统计分布特征及筛分结果表

组中值/m	总体Ⅰ累积概率		总体Ⅱ累积概率		混合总体频数	混合总体频率	混合总体累积概率	
	理论值	在混合总体中的值	理论值	在混合总体中的值			实测值	理论值
0.20	0.1043	0.0615	0.0000	0.0000	152	0.0622	0.0622	0.0615
0.36	0.2951	0.1741	0.0025	0.0010	269	0.1101	0.1723	0.1751
0.53	0.4763	0.2810	0.0229	0.0094	279	0.1142	0.2865	0.2904
0.78	0.6665	0.3933	0.1180	0.0484	330	0.1351	0.4216	0.4416
1.14	0.8189	0.4832	0.3545	0.1453	433	0.1772	0.5989	0.6285
1.68	0.9181	0.5417	0.6669	0.2734	532	0.2178	0.8166	0.8151
2.48	0.9695	0.5720	0.8924	0.3659	295	0.1207	0.9374	0.9379
3.65	0.9907	0.5845	0.9797	0.4017	118	0.0483	0.9857	0.9862
5.37	0.9977	0.5886	0.9979	0.4091	27	0.0111	0.9967	0.9978
7.91	0.9995	0.5897	0.9999	0.4099	8	0.0033	1.0000	0.9997
≥0.8	0.3194	0.1884	0.8685	0.3561	–	–	–	–

该分布总体表征的矿脉水平宽度一般0.52～3.56m,最宽9.29m。0.8m以上的在该分布总体中占86.85%,在矿脉中占30.42%。

按两个分布总体在矿脉中出现的概率计算,矿脉水平宽度大于0.8m的在矿脉中占46.52%。

为计算0.8m以上矿脉水平宽度的平均值,分别把两个分布总体中大于0.8m的矿脉水平宽度按一定间隔分组,依各分组区间出现概率进行加权平均。表6-4列出了不同水平宽

度区间在两个分布总体中的区间概率，经计算，不小于 0.8m 的矿脉水平宽度平均值为 1.4355m。按矿脉平均倾角 55°对其进行校正，矿脉平均厚度为 1.1759m。

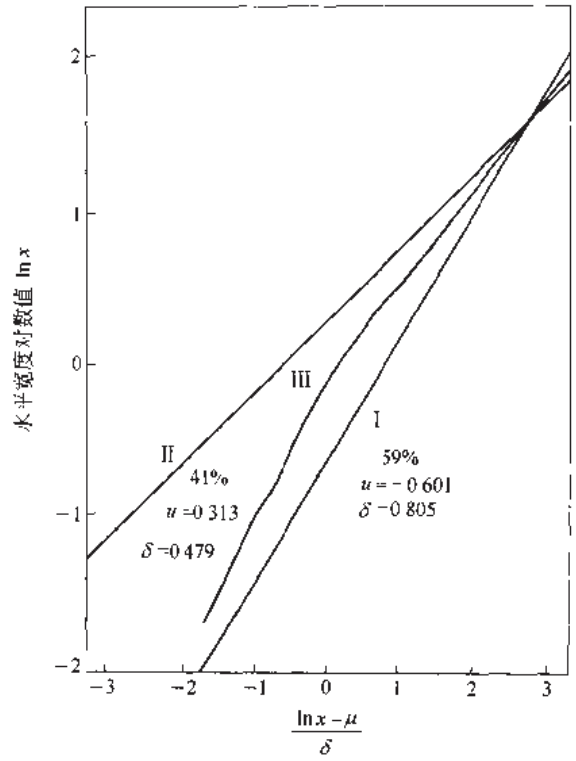


图 6-2　108 矿脉水平宽度混合分布总体筛分结果图

表 6-4　108 矿脉≥0.8m 的水平宽度分组区间概率表

顺序号	总体 Ⅰ			总体 Ⅱ		
	分组区间(对数值)①	组中值(对数值)①	区间概率	分组区间(对数值)①	组中值(对数值)①	区间概率
1	-0.2231～0.0611	-0.0810	0.1140	-0.2231～0.0221	0.1005	0.1403
2	0.0611～0.3453	0.2032	0.0855	0.0221～0.2673	0.1447	0.1902
3	0.3453～0.6295	0 4876	0.0567	0.2673～0.5125	0.3899	0.1995
4	0.6295～0.9137	0.7716	0.0332	0.5125～0.7577	0.6351	0.1619
5	0.9137～1.1979	1.0558	0.0172	0.7577～1.0029	0.8803	0.1017
6	1.1979～1.4821	1.3400	0.0079	1.0029～1.2481	1.1255	0.0494
7	1.4821～1.7663	1.6242	0.0032	1.2481～1.4933	1 3707	0.0186
8	1.7663～2.0505	1.9084	0.0011	1.4933～1.7385	1.6159	0.0054
9	2.0505～2.3347	2.1926	0.0004	1.7385～1.9837	1.8611	0.0012
10	2.3347～2.6189	2.4768	0.0001	1.9837～2.2289	2.1063	0.0002

①均为自然对数值。

(3)金($m \cdot g \cdot t^{-1}$)值统计分布特征。把上部控制区按 10m×12.21m 规格划分研究单元 3873 个。在矿体所在空间上抽取 82 个单元，依

$$H = C \times L \tag{6-8}$$

式中，C 为单元内金平均品位；L 为单元内矿体平均厚度。

计算单元 $m\cdot g\cdot t^{-1}$ 值。该数值一般在 2.1911～160.8771$m\cdot g\cdot t^{-1}$ 范围内变化。对其进行自然对数变换后，按对数值 0.2148 间隔把它们分成 10 组。计算各组频数、频率、累积概率。把累积概率表示在正态概率纸上，从图 6-3、图 6-4 可见，单元 $m\cdot g\cdot t^{-1}$ 值遵从对数正态分布。用图解法求得几何平均值为 14.1824$m\cdot g\cdot t^{-1}$，对数值均方差为 0.938，密度分布函数为：

$$P(u)=\frac{1}{0.938\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u-2.652}{0.938}\right)^2\right] \quad (u=\ln x) \qquad (6\text{-}9)$$

经计算，大于 2.4$m\cdot g\cdot t^{-1}$ 的占 97.09%，概率加权平均值为 15.15$m\cdot g\cdot t^{-1}$。该数值实际上是矿体厚度和矿石品位乘积的平均值。

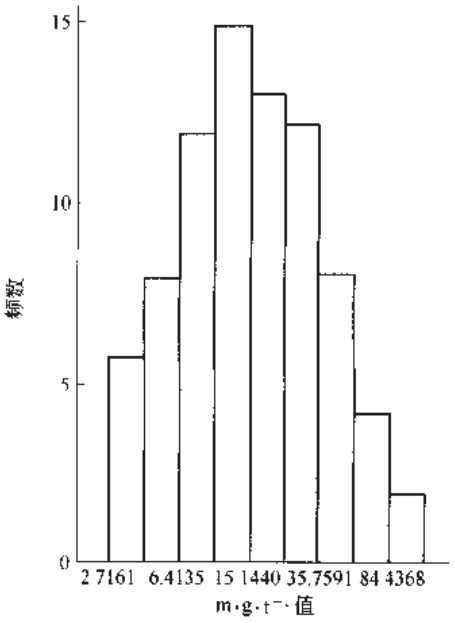


图 6-3　108 矿脉金($m\cdot g\cdot t^{-1}$)值频数分布图

(4)研究区矿脉面积。在基准面上计算，研究区总面积为 939388.76m^2。其中，上部控制区面积为 429593.24m^2，深部预测区面积为509795.52m^2。但是，108 矿脉是一个舒缓波状分布的脉体，实际面积比在平面图上计算出来的大。为求得研究范围内矿脉的真实面积，在上部控制区做矿脉底板距基准面距离平面等值线图，在图的垂向上切取 34 条剖面。在水平方向上切取 8 条剖面，测量曲线长度和直线长度。进一步计算曲线长度与直线长度的比值，用垂直方向剖面比值平均数和水平方向剖面比值平均数的乘积表征面积校正系数。

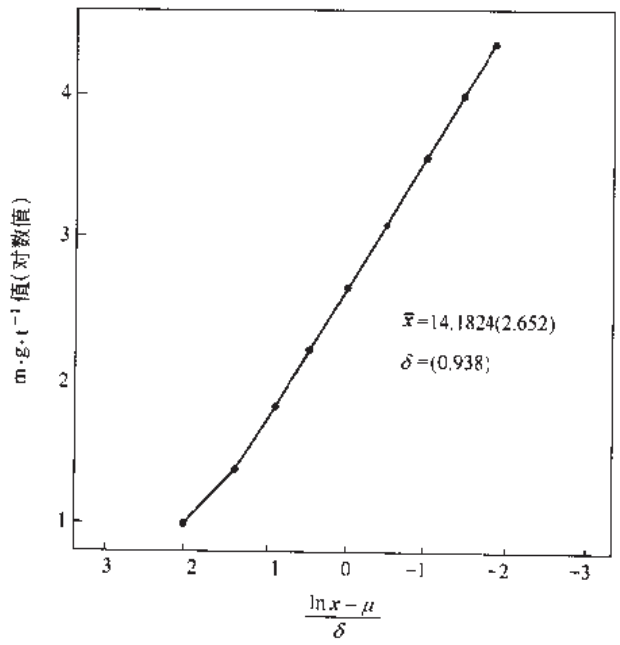


图 6-4　108 矿脉金矿体 $m\cdot g\cdot t^{-1}$ 值累积概率曲线图

经计算，垂直剖面曲线长度与直线长度比值平均数为1.0811；水平剖面曲线长度与直线长度比值平均数为1.0134；面积校正系数为1.1009。

校正后的研究区矿脉总面积为1034173.092m^2，上部控制区矿脉面积为472939.204m^2，深部预测区矿脉面积为561233.888m^2。

(5)矿体在矿脉中所占体积分数。在矿脉中，可按金品位和矿脉厚度的组合关系分为下列几类：

1)矿石品位≥3μg/g，矿脉厚度≥0.8m。

2)矿石品位≥3μg/g，矿脉厚度<0.8m，品位×厚度≥2.4m·g·t^{-1}。

3)矿石品位≥3μg/g，矿脉厚度<0.8m，品位×厚度<2.4m·g·t^{-1}。

4)矿石品位<3μg/g。

在金矿产资源总量估计中，把上列1)、2)两类矿石构成的地质体看作矿体，把其中金的数量作为金矿产资源量。这样，可把估计矿体在矿脉中所占比例分解为：1)估计矿石品位≥3μg/g，矿脉厚度≥0.8m的矿体在矿脉中所占百分数；2)估计矿石品位≥3μg/g，矿脉厚度<0.8m，品位×厚度≥2.4m·g·t^{-1}的矿体在矿脉中所占百分数两部分。为此，在上部控制区随机抽取品位≥3μg/g或厚度≥0.8m的样品463个。统计结果如下：

1)矿石品位≥3μg/g的400个。其中厚度≥0.8m的319个；厚度<0.8m，品位×厚度≥2.4m·g·t^{-1}的72个，品位×厚度<2.4m·g·t^{-1}的9个。

2)矿脉厚度≥0.8m的382个。其中品位≥3μg/g的319个；品位<3μg/g的63个。

根据上列统计结果，结合品位≥3μg/g的样品和厚度≥0.8m的样品在矿脉中所占百分数，对品位≥3μg/g，厚度≥0.8m的矿体在矿脉中所占百分数估计于下：

1)品位≥3μg/g的在矿脉中占53.06%，其中厚度≥0.8m的占79.75%。所以，品位≥3μg/g，厚度≥0.8m的矿体在矿脉中占42.32%。厚度<0.8m，但品位×厚度≥2.4m·g·t^{-1}的占18%。所以，品位≥3μg/g，厚度<0.8m，品位×厚度≥2.4m·g·t^{-1}的矿体在矿脉中占9.55%，进一步统计计算出该类矿石平均品位为19.2007μg/g，矿体平均厚度为0.4562m。

2)厚度≥0.8m的在矿脉中占46.04%，其中品位≥3μg/g的占83.51%。所以，品位≥3μg/g，厚度≥0.8m的矿体在矿脉中占38.45%。

(6)研究区金矿产资源总量估计。用下列两种模型估计金矿产资源量：

$$A = S \times D \times (P_1 \times L_1 \times C_1 + P_2 \times L_2 \times C_2) \tag{6-10}$$

$$A = S \times D \times H \times (P_1 + P_2) \tag{6-11}$$

模型中各项的含义及数值列于表6-5。

表6-5 金矿产资源总量估计模型参数一览表

项目		意义	数值
S	S_1	上部控制区面积，m^2	472939.204
	S_2	深部预测区面积，m^2	561233.888
P_1	P'_1	以品位为主体估计的品位≥3μg/g，厚度≥0.8m的矿体在矿脉中所占百分数，%	42.32
	H'_1	以厚度为主体估计的品位≥3μg/g，厚度≥0.8m的矿体在矿脉中所占百分数，%	38.45

续表 6-5

项　目	意　　义	数　值
P_2	品位≥3μg/g,厚度<0.8m,品位×厚度≥2.4m·g·t^{-1}的矿体在矿脉中所占百分数,%	9.55
L_1	品位≥3μg/g,厚度≥0.8m的矿体平均厚度,m	1.1759
L_2	品位≥3μg/g,厚度<0.8m,品位×厚度≥2.4m·g·t^{-1}的矿体平均厚度,m	0.4562
C_1	品位≥3μg/g,厚度≥0.8m的矿体中矿石平均品位,μg·g^{-1}	15.0293
C_2	品位≥3μg/g,厚度<0.8m,品位×厚度≥2.4m·g·t^{-1}的矿体中矿石平均品位,μg·g^{-1}	19.2007
H	大于2.4m·g·t^{-1}的矿石概率加权平均值,m·g·t^{-1}	15.15
D	金矿石平均体重,t·m^{-3}	3.17

1)上部控制区金矿产资源量。依据模型式(6-10)计算得金矿产资源量:

$A_1=12.4671$t　(P'_1参加计算)

$A_2=11.4417$t　(P''_1参加计算)

依据模型式(6-11)计算得金矿产资源量:

$A_3=11.7813$t　(P'_1参加计算)

$A_4=10.9023$t　(P''_1参加计算)

上列4个金矿产资源量的估计值比较接近,平均数为11.6481t,变异系数为0.6551。

上部控制区内已知金矿储量为11.9547t。上列金矿产资源量估计值比地质估计的金矿储量少0.3066t,两者的相对误差为-2.63%。表明用上述方法估计该区金矿产资源量能够得到令人满意的结果。

2)深部预测区金矿产资源总量估计。根据模型式(6-10)计算得金矿产资源量:

$A_1=14.7946$t　(P'_1参加计算)

$A_2=13.5778$t　(P''_1参加计算)

根据模型式(6-11)计算得金矿产资源量:

$A_3=13.9808$t　(P'_1参加计算)

$A_4=12.9377$t　(P''_1参加计算)

上列4个金矿产资源量估计值的平均值为13.8227t,变异系数0.7773。综上所述,深部预测区金矿产资源量估计值为13.8t。数学地质估计值和地质估计值间相对误差仅为-2.63%,表明深部预测区有较大的找矿潜力。

6.1.1.2　105矿床深部及外围金矿产资源总量估计

105矿床位于玲珑金矿田北部边缘,玲珑断裂带主断裂东侧。在地表为一个矿化蚀变带。受主干断裂F_{105}及其次级断裂构造控制,呈NE向延伸。出露长度1040m。产状和形态严格受断裂构造控制,在空间上呈舒缓波状。走向NE30°~70°,倾向NW,倾角65°~87°。随断裂构造裂隙性质和发育程度的不同,矿脉在空间上分支复合、尖灭再现,以及膨缩交替变化等十分明显。

矿化带由单个矿脉或包含有两条以上矿脉的脉带构成。围岩为玲珑花岗岩,发育较多的煌斑岩、辉绿岩和闪长玢岩。

矿化带水平宽度8~56m,矿脉由黄铁矿化绢英岩、绢英岩化花岗岩、绢英岩、黄铁矿化绢英岩化花岗岩、红化花岗岩,以及穿插于其中的黄铁矿石英、不纯硅铁质岩、白色质纯石英

组成。下列岩石能够富集成品位≥1μg/g 的金矿石：

岩石名称	矿石品位 /μg·g^{-1}	在岩石中比例 /%	在矿石中比例 /%
黄铁矿石英	10.27	55.88	17.43
不纯硫铁质岩	4.94	45.45	13.76
黄铁矿化绢英岩	2.88	13.36	46.79
绢英岩	2.78	8.27	10.09
红化绢英岩化花岗岩	3.11	5	0.92
绢英岩化花岗岩	1.73	2.45	7.34
黄铁矿化绢英岩化花岗岩	1.33	3.88	3.62

矿石平均体重 2.818t/m^3，金平均品位为 6.45μg/g。经野外及室内地质、地球化学、数学地质研究，矿床具有和前述 108 矿床相同的矿化期、矿化阶段和矿化特征。

105 矿床所在面积不足 0.27km^2 的地段上，分布 101、102、103、104、105、106、110、113、114、119 等大小矿脉 24 条。呈向南西方向撒开的带状密集分布。为评价 105 矿床深部及外围找矿远景，对该区总长 1524m 的 51 个探槽进行修测，对 24 个浅井、老硐进行素描。还测制总长 6505m 的 7 条地质剖面。它们基本上控制了 105 矿床及其外围的矿脉露头。把该区矿脉分布最密集的地段圈出，作为外围找矿远景评价地区，其长轴北东向，长 1560m；短轴南北向，长 560m，呈面积 772818m^2 的不规则多边形。其中，地表为 220m 标高者占 9.71%，面积为 75040.6m^2。地表为 240m 标高者占 11.12%，面积为 85937.36m^2。地表为 260m 标高者占 18.07%，面积为 139648.21m^2。地表为 280m 标高者占 25.29%，面积为 195445.67m^2。地表为 300m 标高者占 11.61%，面积为 91269.81m^2。地表为 320m 标高者占 24%，面积为 185476.32m^2。

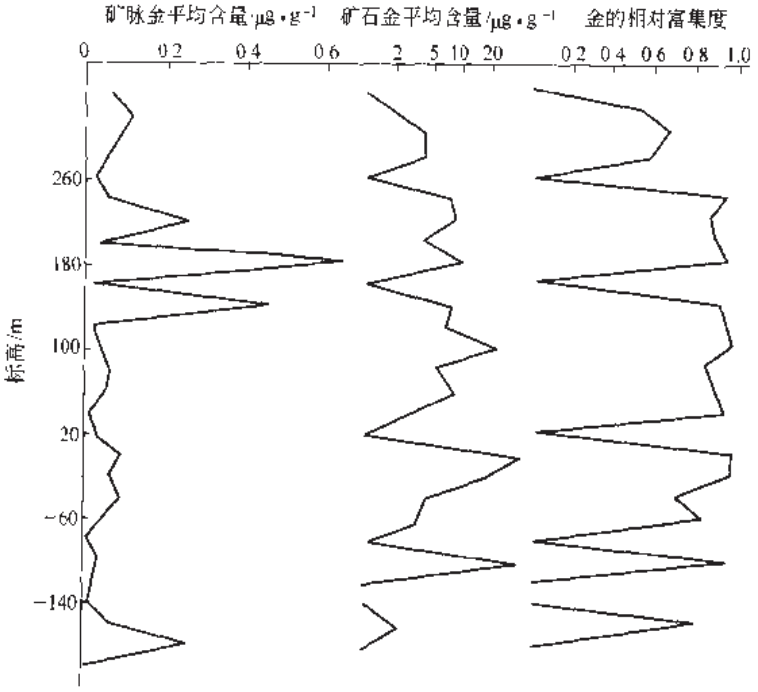


图 6-5　105 矿床及其外围垂直空间上金的富集特征

A　金在垂直空间上的变化规律

对槽探、井探、坑探、钻探等揭露的不同标高矿脉宽度和样品金品位进行统计分析。从图 6-5 可见，-180m 标高处仍有蚀变岩和金矿化作用。在 -100～+320m 标高范围内，有 3 个较好的富集带。它们的标高是 180～249m，40～140m，-60～0m。各富集带之间由一垂向长度 20m 的无矿带相隔。金在各个富集带上的相对富集度较高，并且在垂向上变化不大。矿化在 -100m 标高以下明显变弱，表现为富集带变薄，无矿间隔增大，矿石金品位降低等。从图 6-6 可见，矿脉和岩脉水平宽度自上而下有逐渐变窄的趋势。

B　金品位统计分布特征

为求出研究区各矿脉中矿石的平均品位，把 105 矿床及其外围看作一个独立的矿化空间。收集工程揭露的刻槽样品金品位数据 1278 个。其中，448 个品位 < 0.0018μg/g的属于第 1 期矿化产物，其余 830 个样品属于第 2 期矿化产物。应用辛格莱 A J 的方法，对表征第 2 期矿化的样品进行统计分布特征研究。金品位在 0.0018～89.4μg/g 间变化。对其进行自然对数变换后，按对数值 0.8533 间隔把数据分成 12 组。统计各组样品的频数、频率、累积概率，把累积概率表示在正态概率纸上，它们表现为一条曲线。表明金品位包含了多个阶段的矿化特征。经筛分得到 3 个对数正态分布总体，见表 6-6。把 3 个单一分布总体按比例复合成混合分布总体后，在正态概率纸上，混合分布总体累积概率实测值紧紧依傍在混合分布总体理论分布曲线附近，见图 6-7。两者的平均绝对误差为 1.48%，平均相对误差 -2.75%。表明筛分出的 3 个对数正态分布总体是客观的。分布总体Ⅰ在混合分布总体中占 27.43%，几何平均值1.95μg/g，密度分布函数为：

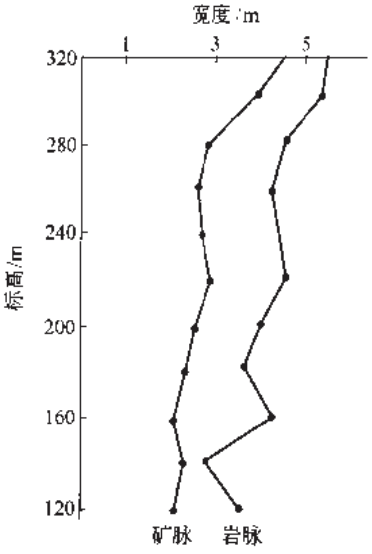


图 6-6　垂直方向上矿脉、岩脉宽度变化曲线

$$P_1(u)=\frac{1}{1.91\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{u-0.67}{1.91}\right)^2\right\}\quad(u=\ln x)\tag{6-12}$$

分布总体Ⅱ在混合分布总体中占 53.5%，几何平均值 0.53μg/g，密度分布函数为：

$$P_2(u)=\frac{1}{0.73\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{u+0.63}{0.73}\right)^2\right\}\quad(u=\ln x)\tag{6-13}$$

分布总体Ⅲ在混合分布总体中占 19.07%，几何平均值 0.1010μg/g，密度分布函数为：

$$P_3(u)=\frac{1}{1.7725\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{u+2.2925}{1.7725}\right)^2\right\}\quad(u=\ln x)\tag{6-14}$$

据矿石矿物组合特征、金及其伴生元素地球化学特征研究发现，第Ⅱ分布总体表征第 1 阶段金矿化。在该阶段中，金矿化在空间上比较普遍，但富集程度低，金品位变化亦较小。一般为 0.12～2.29μg/g，最高 4.76μg/g。2μg/g 以上的在该阶段中占 3.42%，在矿床中占 1.73%。提供的金矿产资源量占矿床资源总量的 10.54%。

表 6-6　105 矿床及其外围金品位对数值筛分结果表

分项	含量范围/μg·g⁻¹	组中值		频数	累积频率 f_0	Ⅰ（占 27.43%）		Ⅱ（占 53.5%）		Ⅲ（占 19.07%）		混合总体概率理论值 f	f_0-f	$\frac{f_0-f}{f}$
		含量/μg·g⁻¹	对数值			概率	在混合总体中概率	概率	在混合总体中概率	概率	在混合总体中概率			
1	>33.1577	50 8017	3.9279	11	0.0133	0.0440	0.0121	0.0000	0 0000	0.0001	0.0000	0.0121	0.0012	0.0992
2	14.6417～33.1577	21 6417	3 0746	12	0.0277	0.1040	0.0285	0.0000	0 0000	0.0012	0.0002	0.0287	-0 0010	-0.0348
3	6.0174～14 6417	9.2194	2 2213	26	0.0590	0.2084	0 0572	0.0000	0.0000	0 0054	0.0010	0.0582	0.0008	0.0137
4	2.5634～6.0174	3.9275	1.3680	34	0 1000	0 3574	0.0980	0.0031	0 0017	0.0194	0.0037	0.1034	-0.0034	-0.0329
5	1 0920～2.5634	1.6731	0.5147	68	0.1819	0.5324	0.1460	0.0584	0.0312	0.0565	0.0108	0.1880	-0.0061	-0.0324
6	0 4652～1 0920	0.7128	- 0.3386	157	0.3711	0.7013	0.1924	0.3449	0.1845	0.1352	0.0258	0.4027	-0.0316	-0.0785
7	0.1982～0 4652	0.3036	-1.1919	225	0.6422	0 8352	0.2291	0.7793	0.4169	0.2670	0.0509	0.6969	-0.0547	-0.0785
8	0.0844～0.1982	0.1293	- 2.0452	121	0 7880	0.9224	0.2530	0.9734	0.5208	0.4443	0.0847	0.8585	-0.0705	-0.0821
9	0.0360～0.0844	0.0551	-2.8966	112	0.9229	0.9692	0.2658	0.9990	0.5345	0 6332	0.1208	0.9211	0.0018	0.0020
10	0.0153～0.0360	0.0235	-3.7519	27	0.9554	0.9897	0.2715	1.0000	0.5350	0.7948	0 1516	0.9581	-0.0027	-0.0028
11	0.0043～0 0153	0 01	-4.6052	22	0.9819	0 9971	0.2735	1.0000	0.5350	0.9032	0.1722	0.9807	0.0012	0.0012
12	<0.0043	0 002	- 6.2146	15	1.0000	1.0000	0.2743	1.0000	0.5350	0.9865	0.1881	0.9974	0.0026	0.0026

第Ⅰ分布总体表征第 2 阶段金矿化。该阶段矿化仅在矿脉的局部空间上发生。但富集程度较高，金品位变化较大。一般为 0.04～89.12μg/g，最高可达 601.8μg/g。2μg/g 以上的在该阶段矿化中占 49.52%，在矿床中占 13.58%。提供的金矿产资源量占矿床资源总量的 83.38%。

第Ⅲ分布总体表征第 3 阶段金矿化。该阶段矿化仅在矿脉的局部空间上发生。富集程度不高，但品位变化极大。一般为 0.0029～3.4991μg/g，最高 20.59μg/g。2μg/g 以上的在该阶段中占 4.6%，在矿床中仅占 0.88%。提供的金矿产资源量仅占矿床资源总量的 5.39%。

为计算 2μg/g 以上金矿石平均品位，对 3 个矿化阶段 2μg/g 以上那部分金品位按一定间隔分组，计算各组数据在矿床中出现的概率，用概率加权平均的办法计算矿石金平均品位。表

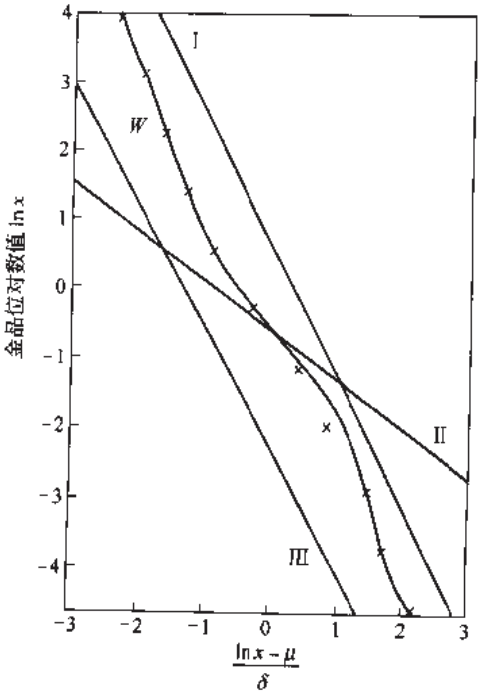


图 6-7　105 矿床及其外围金品位筛分结果图

6-7 列出了计算结果。表明，105 矿床及其外围各矿脉中金矿石占 16.29%，矿石金平均品位 7.5512μg/g。

表 6-7　105 矿床及其外围矿石金品位概率加权平均值计算结果

分组	含量间隔 /μg·g^{-1}	组中值	概　率	计　算　结　果
1	2～3.5	2.6459	0.0516	
2	3.5～5	4.1833	0.0226	
3	5～7.5	6.1239	0.0211	$n = 10$
4	7.5～10	8.6599	0.0127	
5	10～20	14.1427	0.0239	$\sum p\ln Au = 0.3291$
6	20～35	26.4565	0.0129	$\sum p = 0.1629$
7	35～50	41.8336	0.0057	$\sum p\ln Au/\sum p = 2.0217$
8	50～75	61.2400	0.0046	$Au = 7.5512$
9	75～100	86.6000	0.0023	
10	>100	141.4152	0.0054	

C　矿脉累积宽度所占比例

因矿脉水平宽度在垂直空间上自上而下有变窄的趋势，在估计矿脉水平宽度时，必须考虑这一因素的影响。为此，根据已有的槽探、坑探、钻探资料，在 7 线至 20 线，长 800m、宽 710m，面积 568000m^2，320～120m 标高范围内，以 20m 间隔做矿脉分布平面图。在图上以 100m 间隔切割剖面，在剖面上统计矿脉的水平宽度，计算矿脉的平均累积宽度和平均累积宽度所占的比例。计算结果列于表 6-8。如果把 320m 标高看作地表高度，从图 6-8 不难看出，矿脉平均累积宽度在评价区所占比例自地表向深部呈线性分布。以深度为自变量 X，矿脉平均累积宽度所占比例为因变量 Y 做相关分析，得相关系数 $\gamma = -0.7229$。当信度 $\alpha = 0.05$，自由度 $f = 9$ 时，检验临界值 $\gamma_\alpha = 0.6021$。表明矿脉累积宽度所占比例随深度呈线性递减。经一元回归分析，得线性方程：

$$Y = 3.041 - 0.0069X \qquad (6\text{-}15)$$

$U = 2.0966$　$Q = 1.9174$　$F = 9.8505$　$\delta = 0.4616$

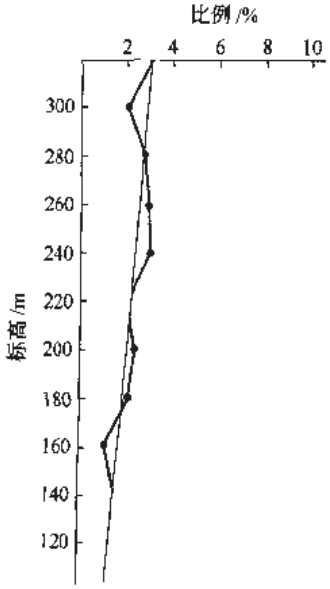


图 6-8　矿脉宽度所占比例在垂向上呈线性分布

当信度 $\alpha = 0.05$，第 1 自由度 $f_1 = 1$，第 2 自由度 $f_2 = 9$ 时，检验临界值 $F_\alpha = 5.12$。表明上列模型具有显著意义。可以用它来估计评价区不同深度矿脉累积宽度所占比例。估计出的 Y 值在区间 $(2.0178 - 0.0069X, 3.9642 - 0.0069X)$ 内取值概率为 95%。

模型式(6-15)表明，当把 320m 标高当作地表，矿脉累积宽度所占比例向深部以斜率 0.0069 的速度递减，用该模型计算 320～120m 标高范围不同深度矿脉累积宽度所占比例，

从表 6-8 可见，计算出来的数值与实测值接近，相对误差总和为 -0.023，平均相对误差为 -0.0021。

表 6-8　矿脉累积宽度、宽度所占比例垂向变化

顺序号	标高/m	以 320m 标高为地表的深度/m	8 条线矿脉累积条数	8 条线矿脉累积宽度/m	矿脉平均累积宽度/m	矿脉宽在研究区中所占比例 P_i/%	数学模型计算的值 P/%	$\frac{P_0-P}{P}$
1	320	0	38	180	22.5	3.1690	3.0410	0.0421
2	300	20	29	113.5	14.1875	1.9982	2.9028	-0.3116
3	280	40	54	158.5	19.8125	2.7905	2.7647	0.0093
4	260	60	64	170	21.2500	2.9930	2.6266	0.1395
5	240	80	64	176	22.0000	3.0986	2.4885	0.2452
6	220	100	44	130	16.2500	2.2887	2.3503	-0.0262
7	200	120	58	146	18.2500	2.5704	2.2122	0.1619
8	180	140	55	128.5	16.0625	2.2623	2.0741	0.0907
9	160	160	35	74	9.2500	1.3028	1.936	-0.3271
10	140	180	45	102.5	12.8125	1.8046	1.7979	0.0038
11	120	200	42	89.5	11.1875	1.5757	1.6597	-0.0506

表 6-9　不同深度矿脉累积宽度计算结果

标高/m	深度/m	矿脉宽所占比例/%	标高/m	深度/m	矿脉宽所占比例/%	标高/m	深度/m	矿脉宽所占比例/%
320	0	3.041	160	160	1.9360	0	320	0.8310
300	20	2.9028	140	180	1.7979	-20	340	0.6929
280	40	2.7647	120	200	1.6597	-40	360	0.5547
260	60	2.6266	100	220	1.5216	-60	380	0.4166
240	80	2.4885	80	240	1.3835	-80	400	0.2785
220	100	2.3503	60	260	1.2454	-100	420	0.1404
200	120	2.2122	40	280	1.1072	-120	440	0.0022
180	140	2.0741	20	300	0.9691	-120.32	440.32	0.0000

表 6-9 列出了用式(6-15)计算的不同深度矿脉累积宽度所占比例，不难看出，随着深度的加大，矿脉累积宽度逐渐变小，在 -120.32m(平均数)标高处尖灭。因此，我们在 -120m 标高以上的空间估计金矿产资源量。但因地表地形起伏不平，估计资源量时，需要按不同标高分块进行计算。为此求出下列几种矿脉累积宽度所占比例：

范　　围	矿脉累积宽度平均比例/%
-120～220m 标高	1.1763
-120～240m 标高	1.2454
-120～260m 标高	1.3144
-120～280m 标高	1.3835
-120～300m 标高	1.4525
-120～320m 标高	1.5216

D 矿脉平均体重的计算

为计算矿石的平均体重，收集了30个矿石体重测量数据进行统计分析。结果表明，该区金矿石体重一般在2.3926～3.2434t/m^{3}范围内变化。平均值为2.818t/m^3，最高达3.4561t/m^3。

E 工业矿石在品位不小于2μg/g样品中所占比例

前面已经计算出，该区矿脉中金品位不小于2μg/g的矿石占16.29%，其中大部分为工业矿石，少部分为厚度小、目前尚不能利用的非工业矿石。在估计金矿产资源量时，需要把这一部分剔除掉。为此，收集了152个矿体厚度和品位数据进行综合分析。经统计，矿石品位≥2μg/g，厚度≥0.6m、以及厚度<0.6m，但m·g·t^{-1}值≥1.2的工业矿石共131个。m·g·t^{-1}值的变化范围为1.2～30.86，几何平均值为4.7275m·g·t^{-1}。矿石品位≥2μg/g，厚度<0.6m，m·g·t^{-1}值<1.2的非工业矿石21个，m·g·t^{-1}值的变化范围为0.25～1.19，几何平均值为0.5871m·g·t^{-1}。品位≥2μg/g的非工业矿石所占百分数为：

21÷(21+131)=0.1382，品位≥2μg/g的工业矿石所含金属量在≥2μg/g样品中的质量分数为：

$$4.7275\times0.8618\div(4.7275\times0.8618+0.5871\times0.1382)=0.9805$$

F 金矿产资源总量估计

由于不同深度矿脉累积宽度不同，需要按320m、300m、280m、260m、240m、220m地表标高分块进行计算。数学模型为：

$$A_i = SP_{i1}L_iP_{i2}PDCQ\times10^{-6} \tag{6-16}$$

式中，A_i为i块段的金矿产资源量，t；P_{i1}为i块段出露面积所占比例；S为研究区总面积(772818m^2)；L_i为i块段中矿脉的垂直延深，m；P_{i2}为i块段矿脉累积宽度所占比例的平均值；P为品位≥2μg/g的矿石在矿脉中所占比例(0.1629)；D为矿石平均体重(2.818t/m^3)；C为矿石平均品位(7.5512μg/g)；Q为工业矿石在矿体中的质量分数(0.9805)。

因S、P、D、C、Q为常数，可把式(6-16)简化成下列形式：

$$A_i = 2.6267L_iP_{i1}P_{i2} \tag{6-17}$$

L_i、P_{i1}、P_{i2}的数值列于表6-10。经计算各块段的金矿产资源量如下：

地表标高/m	金矿产资源量/t
220	1.0200
240	1.3095
260	2.3707
280	3.6788
300	1.8924
320	4.2205

表6-10 不同块段参数一览表

块 段	地表标高/m	L_i/m	P_{i1}/m	P_{i2}/m
1	220	340	0.0971	1.1763×10^{-2}
2	240	360	0.1112	1.2454×10^{-2}
3	260	380	0.1807	1.3144×10^{-2}
4	280	400	0.2529	1.3845×10^{-2}
5	300	420	0.1181	1.4525×10^{-2}
6	320	440	0.2400	1.5216×10^{-2}

该区金矿产资源总量为 14.4920t。除去上部已采矿量和保有储量，深部有潜力资源量 4.2t。

如果在垂直空间上把研究区划分成若干个面积为 $1km^2$，垂直深度为 40m 的块段，利用式(6-17)计算各块段金矿产资源量。从表(6-11)可以看出，面积 $1km^2$，垂深 40m 的块段，金矿产资源量随深度的增加，相邻块段间以 0.3755t 的速度递减。计算块段金资源量与标高之间的相关系数，得 $\gamma=1.0000$，进一步进行回归分析，得下列回归方程：

$$A=1.1299+0.0094X \tag{6-18}$$

用式(6-18)计算各个标高块段的金矿产资源量，从表 6-11 可见，其数值与用式(6-17)计算出的金矿产资源量基本一致，相对误差累积值仅 0.0001，平均相对误差 0.0000。式(6-18)计算结果表明，-120.35m 标高处的块段金矿产资源量为 0.0000。这一结果与用式(6-15)计算的矿脉尖灭深度一致。

表 6-11　不同深度面积 $1km^2$，垂深 40m 的块段金矿产资源量

分组	垂向范围/m	组中值/m	资源量/t		$\frac{A_1-A_2}{A_2}$
			式(6-7)计算的值 A_1	式(6-8)计算的值 A_2	
1	-120～-80	-100	0.1911	0.1911	0.0000
2	-80～-40	-60	0.5666	0.5666	0.0000
3	-40～0	-20	0.9421	0.9421	0.0000
4	0～40	20	1.3176	1.3176	-0.0001
5	40～80	60	1.6933	1.6932	0.0001
6	80～120	100	2.0688	2.0688	0.0000
7	120～160	140	2.4443	2.4443	0.0000
8	160～200	180	2.8198	2.8198	0.0000

6.1.1.3　10 号脉群深部金矿产资源总量估计

10 号脉群位于玲珑金矿田东部，九曲—大开头一带。出露标高 250～280m，目前已经控制到 -70m 标高范围，由 4 号、52 号、47 号、47 支号、48 号、18 号、10 号、50 号等矿脉及其支脉组成。因受玲珑和破头青两条 2 级断裂构造的联合控制，矿脉具有追踪 NE 向、NNE 向、NEE 向多组断裂裂隙特点。在空间上，各矿脉时而远离，时而贴进、交切、复合，产状要素和矿化要素变化极大。为开展 -70～-800m 标高所在空间的矿体定量定位预测，首先应用体积估计法进行金矿产资源量估计。

A　矿石含平均品位

在储量计算中，矿石金平均品位是通过工程控制抽样计算得到的。但对地质情况不明的深部预测区而言，只能通过一定的空间分布模型进行估计。对于热液型金矿床而言，可以把 10 号脉群看作一个独立的矿化空间。矿石金品位在空间分布上必然遵从某种分布律。如能模拟出金品位的统计分布模型，依照模型就能求出矿石金品位数值区间在分布模型中所占百分率，用概率加权平均的方法即能计算出矿石金平均品位。

(1)矿化体金品位统计分布特征。为研究 10 号脉群金的统计分布特征，在预测区内，255～-70m 标高间的 9 个中段 900 余幅 1∶200 地质平面图上，收集金品位数据 22621 个。

金品位变化范围 0.02～402 μg/g,最高 1194 μg/g。对其进行自然对数变换,变换后的数据在 −3.9120～5.9965 间变化。取对数值分组间隔 0.5553,共分 15 组。计算各组的组中值、频数、频率、累积频率并作图。累积频率在正态概率纸上表现为一条曲线(图 6-9)。因此,确知它是一个混合分布总体,用辛格莱的方法筛分,得到 3 个对数正态分布总体,见表 6-12。把各单一分布总体复合成混合分布总体后,在概率纸上,混合分布总体累积概率实测值和混合分布总体累积概率理论分布曲线紧密伴随,见图 6-9,表明筛分出的 3 个对数正态分布总体是客观的。其中,分布总体Ⅰ在混合分布总体中占 32.22%,几何平均值 8.07 μg/g,密度分布函数为:

$$P_1(u)=\frac{1}{1.5063\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{u-2.0876}{1.5063}\right)^2\right\}\quad(u=\ln x)\tag{6-19}$$

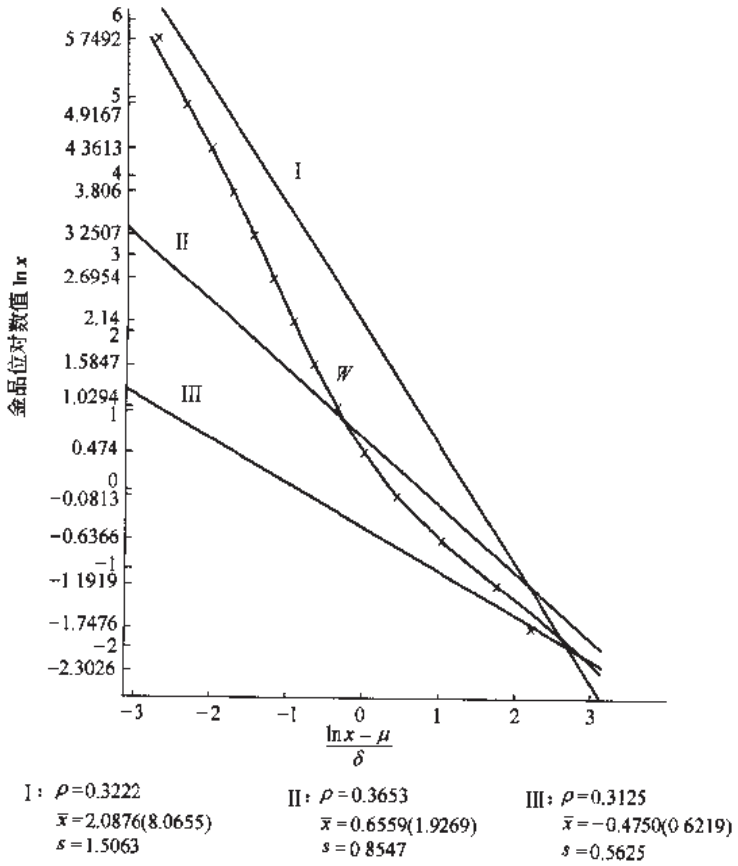


图 6-9 预测区金品位混合分布总体筛分结果

Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ—筛分出的单一分布总体累积概率曲线;

W—混合分布总体累积概率理论分布曲线;

×—混合分布总体累积概率实测值

分布总体Ⅱ在混合分布总体中占 36.53%,几何平均值 1.93 μg/g,密度分布函数为:

$$P_2(u)=\frac{1}{0.8547\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{u-0.6559}{0.8547}\right)^2\right\}\quad(u=\ln x)\tag{6-20}$$

分布总体Ⅲ在混合分布总体中占 31.25%,几何平均值 0.62 μg/g,密度分布函数为:

$$P_3(u)=\frac{1}{0.5625\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u+0.4750}{0.5625}\right)^2\right]\quad(u=\ln x)\tag{6-21}$$

据矿石矿物组合特征，金及其伴生元素地球化学特征研究发现，第Ⅲ分布总体表征第1阶段金矿化。在该阶段中，金矿化富集程度低，金品位变化不大，一般为0.2～1.92 μg/g，最高3.36 μg/g。3 μg/g以上的在该阶段矿化中占0.26%，在矿床中仅占0.08%。提供的金矿产资源量占矿床金资源总量的0.25%，意义不大。

第Ⅰ分布总体表征第2阶段金矿化，在该阶段中，金富集程度很高，金品位变化较大，一般为0.4～164 μg/g，最高739.9 μg/g。3 μg/g以上的在该阶段矿化中占74.43%，在矿床中占23.98%。提供的金矿产资源量占矿床金资源总量的70.87%，是最重要的金矿化阶段。

表6-12 预测区金品位统计分布特征及筛分结果

组中值/μg·g⁻¹	频数	频率	混合分布总体累积概率		分布总体Ⅰ累积概率		分布总体Ⅱ累积概率		分布总体Ⅲ累积概率	
			实测值	理论值	理论值	在混合分布总体中的值	理论值	在混合分布总体中的值	理论值	在混合分布总体中的值
314.0812	78	0.0034	0.0034	0.0024	0.0075	0.0024	0 0000	0.0000	0.0000	0.0000
136.5460	139	0.0061	0.0096	0.0097	0.0302	0.0097	0.0000	0 0000	0.0000	0.0000
78 3617	272	0.0120	0.0216	0.0211	0.0656	0.0211	0.0000	0 0000	0.0000	0.0000
44.9706	449	0.0198	0 0415	0.0409	0 1269	0.0409	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
25.8079	681	0 0301	0.0716	0.0713	0.2200	0.0709	0.0012	0.0004	0.0000	0.0000
14 8108	902	0.0399	0.1114	0.1137	0.3433	0.1106	0 0085	0.0031	0.0000	0.0000
8.4997	1361	0.0602	0.1716	0.1717	0.4861	0 1566	0.0413	0.0151	0.0000	0.0000
4.8778	1846	0.0816	0.2532	0 2539	0.6308	0.2032	0.1386	0.0506	0.0001	0.0000
2.7993	2525	0.1116	0 3648	0.3666	0.7588	0.2445	0.3311	0.1210	0.0037	0.0012
1.6065	3188	0.1409	0.5058	0.5041	0.8580	0.2764	0.5843	0.2134	0.0458	0.0143
0 9219	3565	0.1576	0.6634	0.6681	0.9251	0.2981	0.8058	0.2944	0.2420	0.0756
0.5291	4255	0.1881	0.8515	0.8439	0.9647	0.3108	0.9348	0.3415	0.6131	0.1916
0.3036	2432	0 1075	0.9590	0 9581	0.9853	0.3175	0.9847	0.3597	0.8988	0.2809
0.1743	597	0.0264	0.9854	0 9936	0.9945	0.3204	0.9975	0.3644	0.9881	0.3088
0.1000	331	0.0146	1 0000	0.9991	0.9982	0.3216	0.9997	0.3652	0.9994	0.3123

第Ⅱ分布总体表征第3阶段金矿化，在该阶段中，金品位变化幅度不大，一般为0.35～10.65μg/g，最高25.03 μg/g。3 μg/g以上的在该阶段矿化中占30.33%，在矿床中占11.08%，提供的金矿产资源量占矿床金资源总量的28.88%，是较重要的金矿化阶段。

(2)不同矿脉金矿化强度对比。在矿化体的不同空间上，金矿化强度不同，反映在组成矿化体的各个矿脉上，金品位统计分布特征是不一样的。为评价矿脉的矿化强度，本书作者创建了区间概率解析法，该方法借助于矿化体金品位统计分布模型，对矿脉金品位进行分解，解析出各矿脉金品位统计分布模型。具体做法是：以金品位分组区间为单位，把矿化体各单一分布总体在混合分布总体中的区间概率变换成相对百分率 $P_i(i=1,2,3)$。将矿脉金品位数据按矿化体的分组方式分组，统计各组的频数，计算频率 $Q_j(j=1,2,\cdots,15)$。$P_{ij}Q_j$ 即表征矿脉第 i 个单一分布总体的第 j 个分组区间在混合分布总体中的概率。$\sum_j P_{ij}Q_j$ 表征分布总体 i 在混合分布总体中所占比例。$P_{ij}Q_j/\sum P_{ij}Q_j$ 表征分布总体 i 在第 j 个分组区间上的概率。以单

一分布总体在各分组区间上的区间概率为权值，求出平均数，均方差。用下列数学模型对其进行正态分布的偏度、峰度检验：

$$q_1 = \left| \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^3}{\sqrt{6n}S^3} \right| \tag{6-22}$$

$$q_2 = \left| \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^4}{\sqrt{24n}S^4} - 3 \right| \tag{6-23}$$

当 q_1 和 q_2 均小于 3 时，确认该分布总体遵从正态分布。可以用上述 2 参数模拟矿脉某个单一分布总体的数学模型。

为比较各矿脉之间矿化强度的相对大小，作者在此给出一个称之为“金品位区间概率差加权值代数和”的参数。即以矿化体在混合分布总体和各单一分布总体的区间概率为参照值，分别计算矿脉金品位混合分布总体和各单一分布总体区间概率与矿化体相应的区间概率之差后，乘以该区间金品位的组中值，得金品位区间概率差加权值。把各分组的金品位区间概率差加权值累加，即为金品位区间概率差加权值代数和。该参数表征矿脉矿化强度的相对大小。

为对比各矿脉的矿化强度，用上列方法模拟出各矿脉金品位统计分布模型。表 6-13 列出了矿脉的矿化标志值和矿化指数。其中，P_1 是分布总体Ⅰ在混合分布总体中所占比例，因为该总体表征该区最重要的第 2 阶段金矿化，所占比例愈大，矿化强度愈高。$\bar{x}_1$ 是分布

表 6-13　各矿脉矿化标志值、矿化指数对比

项目	4 号	52 号	47 号	47 支号	48 号	18 号	10 号	50 号
P_1	0.2876	0.3283	0.3173	0.3450	0.2973	0.3774	0.2738	0.2984
f_1	7	3	4	2	6	1	8	5
$\bar{x}_1$	5.1966	6.6081	5.8002	6.5673	5.2846	7.7835	4.6955	4.5718
f_1	6	2	4	3	5	1	7	8
$\sum \Delta_1$	-2.8775	5.9653	0.6703	1.3392	-1.5843	5.5443	-1.8020	-6.2989
f_1	7	1	4	3	5	2	6	8
t_1	0.6448	0.6901	0.6568	0.7030	0.6471	0.7375	0.6105	0.6197
f_1	6	3	4	2	5	1	8	7
$\bar{x}_2$	1.3793	1.3995	1.3940	1.5510	1.4043	1.6137	1.2896	1.4960
f_1	7	5	6	2	4	1	8	3
$\sum \Delta_2$	-0.1734	-0.0386	-0.0717	0.0285	-0.0607	0.1650	-0.1708	0.0305
f_1	8	4	6	3	5	1	7	2
t_2	0.1826	0.1967	0.1995	0.2164	0.1974	0.2270	0.1738	0.2133
f_1	7	6	4	2	5	1	8	3
$\sum \Delta_0$	-1.6373	-1.1172	-0.0826	0.7512	-1.1451	2.9295	-1.5894	-2.4262
f_1	7	2	4	3	5	1	6	8
t_0	0.2529	0.2962	0.2800	0.3242	0.2639	0.3629	0.2294	0.2663
f_1	7	2	4	3	5	1	6	8
$\sum f_1$	62	29	40	22	46	10	66	49
A_j	0.8086	0.9105	0.8765	0.9321	0.8580	0.9691	0.7963	0.8488
f_j	7	3	4	2	5	1	8	6

总体Ⅰ平均品位，数值愈大，矿化强度愈高。$\sum \Delta_1$ 是分布总体Ⅰ的金品位区间概率差加权值代数和，为正值并且数值较大时，表明以高品位为主，矿化强度相对高。反之，表明以低品位为主，矿化强度相对低。t_1 是分布总体Ⅰ中金品位 3μg/g 以上的样品所占百分率，数值愈高，矿化强度愈高。$\bar{x}_2$ 是分布总体Ⅱ的平均品位，地质意义与 $\bar{x}_1$ 相同。$\sum \Delta_2$ 是分布总体Ⅱ的金品位区间概率差加权值代数和，地质意义与 $\sum \Delta_1$ 相同。t_2 是分布总体Ⅱ中金品位 3μg/g 以上的样品所占百分率，地质意义和 t_1 一样。t_0 是混合分布总体中金品位 3μg/g 以上的样品所占百分率，地质意义和 t_1 相同。$\sum \Delta_0$ 是混合分布总体的金品位区间概率差加权值代数和，地质意义与 $\sum \Delta_1$ 相同。f_i 是依矿化标志 i 所反映的各矿脉矿化强度由高到低按自然数从小到大排序。$A_j = 1 - \sum_i f_{ij} / \sum_j \sum_i f_{ij}$，是矿脉 j 的矿化指数，它是多个矿化标志的综合评价标志，数值愈大，矿脉矿化强度愈高。f_j 是根据矿化指数对矿脉矿化强度由高到低进行的排队。从表 6-13 不难看出，矿脉矿化强度由高到低排列顺序为：①18 号矿脉，②47 支号矿脉，③52 号矿脉，④47 号矿脉，⑤48 号矿脉，⑥50 号矿脉，⑦4 号矿脉，⑧10 号矿脉。

(3)矿化体金矿化强度垂向变化特征。为探求金矿化在垂直空间上的变化特征，在 255m 标高与 −70m 标高之间已知的 9 个中段上，分别进行金品位统计分布特征研究，用区间概率解析法模拟出 9 个中段上金的统计分布模型。表 6-14 列出各中段的矿化标志和矿化指数。不难看出，矿脉所处的垂向空间不同，矿化强度也不一样。矿化指数从 250m 标高到 210m 标高急剧下降，向下到 −30m 标高线性上升，矿化指数与高程间相关系数高达 −0.9842、斜率为 −0.0007、截距为 0.9384。再向下到 −70m 标高又呈下降趋势。但无论怎样变化，自上而下，总体上略呈上升趋势。见图 6-10。从图 6-11 可见，矿石金品位自上而下有变高的趋势，图 6-12 是矿脉含矿率、含脉率垂向变化曲线，自上而下它们变化很大，但总体有变大的趋势。图 6-13 表示 48 号矿脉、47 支号矿脉以及预测区矿化体中矿石所占比例在 250m 标高到 −790m 标高间的变化(−70m 标高以下的信息是用波的分解与合成技术估计出来的)。可以看出，有的矿脉如 47 支号矿脉的矿石所占比例自上而下变大。有的矿脉如 48 号矿脉的矿石所占比例自上而下变小，但总趋势自上而下变大。以上图表提供的信息表明，预测区自上而下金矿化强度变化很大，但总体趋势是增大的。但也有与上述结论相矛盾的一些事实，如图 6-14 所示，自上而下矿脉累加长度、矿体累加长度和石英脉累加长度的绝对数量大幅度减少。与之相呼应，工程控制的数量也大幅度减少。对这一现象可有两方面的解释，其一是客观上自上而下矿化强度大幅度降低。其二是下部坑探工程是根据钻探结果布置的，大幅度减少了坑道探矿工程数量。这样一方面会因探矿的不充分而丢失一部分矿体。另一方面坑探工程是围绕已知矿体开拓的，揭露的矿脉与矿体数量比例和上部中段的相比要大得多，造成下部矿化强度比上部高的假象。为此在估计深部预测区金矿产资源量时，以自上而下矿化强度在局部空间变化很大，但总体上基本一致为假设

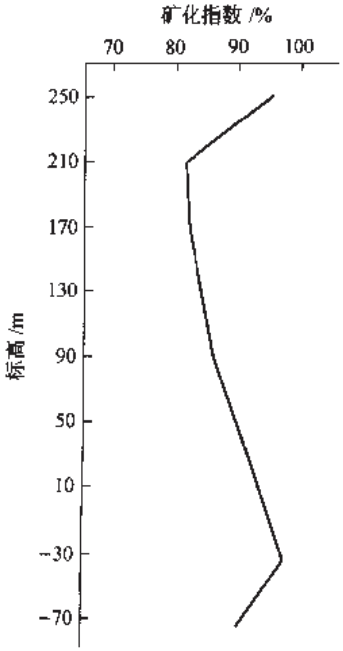


图 6-10　上部已知区矿化指数垂向变化曲线

前提,用上部矿化体矿石金平均品位进行深部预测区金矿产资源量的估计。

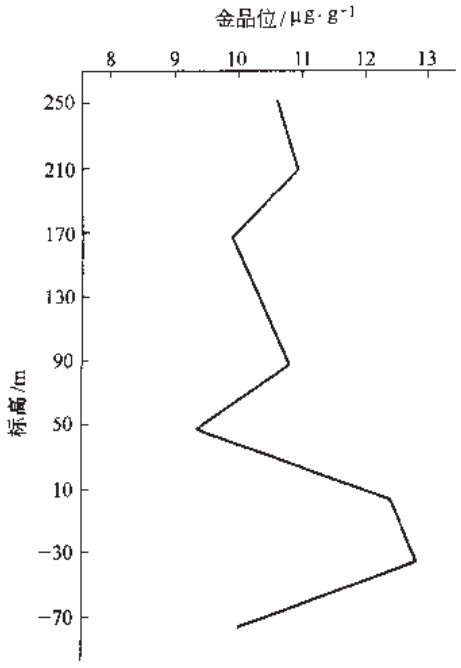


图 6-11　上部已知区矿石平均品位垂向变化曲线

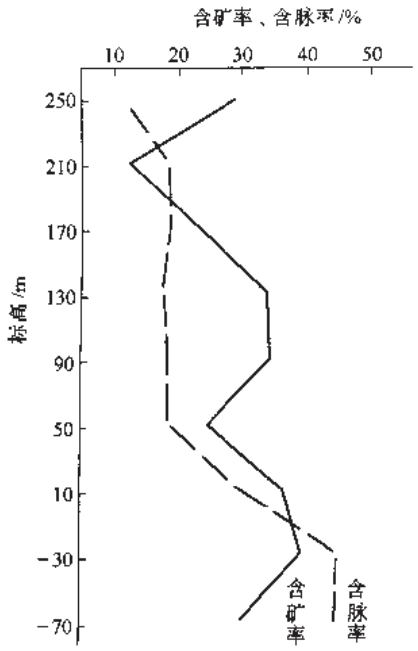


图 6-12　上部已知区含矿率、含脉率垂向变化曲线

表 6-14　上部已知区各中段矿化标志值、矿化指数对比

项目	255m	206m	170m	130m	90m	50m	10m	−30m	−70m
P_1	0.3917	0.2999	0.2902	0.3061	0.3182	0.3454	0.3879	0.4056	0.3415
f_i	2	8	9	7	6	3	5	1	4
$\bar{x}_1$	6.6519	4.9918	5.1526	5.9739	6.4302	6.0775	8.6998	9.3073	6.4521
f_i	3	9	8	7	5	6	2	1	4
$\sum \Delta_1$	0.0795	−1.3685	−1.3538	0.3314	1.6379	−3.2204	8.3667	8.9193	−0.5527
f_i	5	8	7	4	3	9	2	1	6
t_1	0.7091	0.6179	0.6385	0.6768	0.6951	0.7026	0.7613	0.7783	0.7081
f_i	3	9	8	7	6	5	2	1	4
$\bar{x}_2$	1.7506	1.3279	1.3788	1.4154	1.4252	1.6182	1.6067	1.6285	1.5148
f_i	1	9	8	7	6	3	4	2	5
$\sum \Delta_2$	0.4488	−0.1151	−0.1075	−0.0999	−0.0963	0.1705	0.1615	0.2127	−0.0021
f_i	1	9	8	7	6	3	4	2	5
t_2	0.2825	0.1961	0.1912	0.1838	0.1794	0.2287	0.2225	0.2288	0.1916
f_i	1	5	7	8	9	3	4	2	6
$\sum \Delta_0$	1.2247	−1.7524	−1.1715	−0.3549	0.3132	−0.7531	4.3058	5.0108	0.0496
f_i	3	9	8	6	4	7	2	1	5
t_0	0.3802	0.2911	0.2886	0.3258	0.3479	0.3702	0.4447	0.4659	0.3755
f_i	3	8	9	7	6	5	2	1	4
$\sum f_i$	22	74	72	60	51	44	27	12	43
A	0.9457	0.8173	0.8222	0.8519	0.8741	0.8914	0.9333	0.9704	0.8938

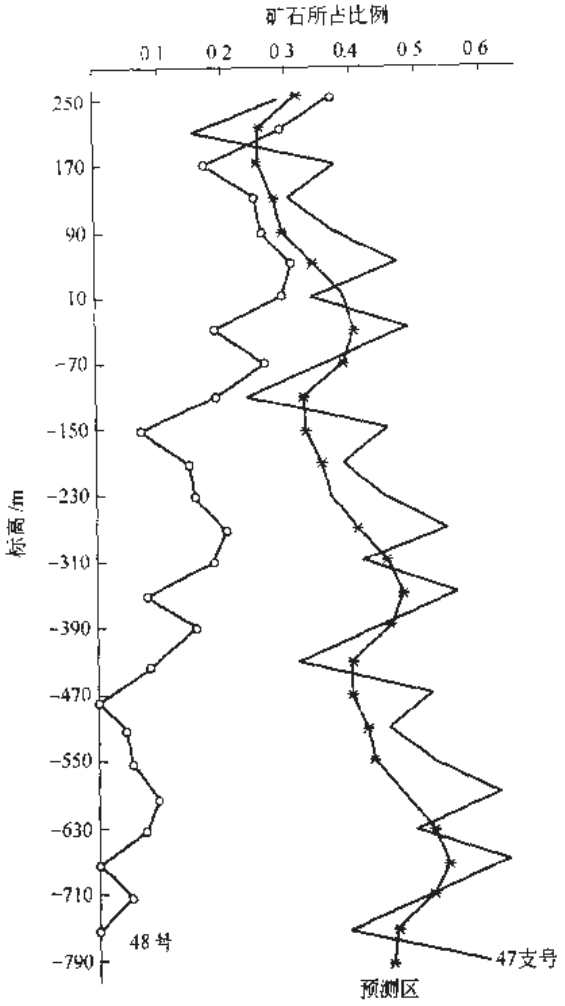


图 6-13　矿脉中矿石所占比例垂向变化曲线

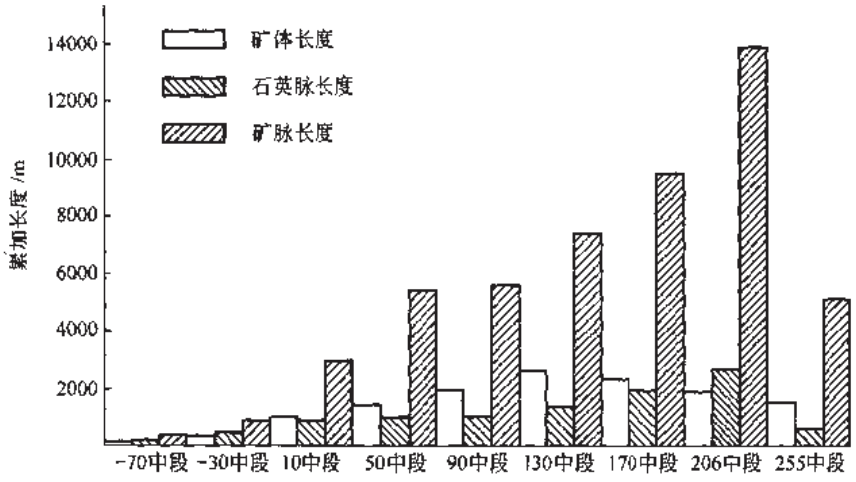


图 6-14　上部已知区工程控制的矿脉、矿体、石英脉累加长度直方图

(4)矿石金平均品位。按各阶段矿化在矿床中出现的概率计算,矿脉中金品位 3μg/g 以上的占 35.13%。

为求得矿床矿石金平均品位,首先把 3 个矿化阶段 3μg/g 以上那部分样品的金品位,以对数值 0.4948 为间隔分成 10 组,根据金品位概率分布模型求出每个分组在矿床中出现的概率,用概率加权平均的方法计算矿石金平均品位。表 6-15 列出了各分组在各矿化阶段中出现的概率。经计算得矿石金平均品位为 11.0023μg/g。因而决定,进行金矿产资源总量估计时,以 11μg/g 作为金矿石平均品位。

表 6-15 预测区 3μg/g 以上样品金品位分组区间概率

分组	金品位分组间隔(对数值)	组中值(对数值)	区间概率			
			第 1 阶段	第 2 阶段	第 3 阶段	矿床
1	1.0986~1.5935	1.3461	0.0025	0.1158	0.1669	0.0991
2	1.5935~2.0884	1.8409	0.0001	0.1287	0.0895	0.0742
3	2.0884~2.5833	2.3358	0.0000	0.1288	0.0348	0.0542
4	2.5833~3.0781	2.8307	0.0000	0.1156	0.0098	0.0408
5	3.0781~3.5730	3.3256	0.0000	0.0934	0.0020	0.0308
6	3.5730~4.0679	3.8205	0.0000	0.0677	0.0003	0.0219
7	4.0679~4.5628	4.3153	0.0000	0.0441	0.0000	0.0142
8	4.5628~5.0577	4.8100	0.0000	0.0259	0.0000	0.0083
9	5.0577~5.5525	5.3051	0.0000	0.0136	0.0000	0.0044
10	5.5525~6.0475	5.8002	0.0000	0.0107	0.0000	0.0034

B 矿体体积

在矿产资源总量估计中,矿体体积是通过矿体在矿化体(矿脉)中所占比例求出的。因而首先应求出矿化体体积和矿体在矿化体中所占体积百分率。

(1)矿化体体积。众所周知,10 号脉群由 10 余条产状变异极大的矿脉组成。它们时而远离,时而贴近,时而交切复合在一起,在空间上构成了一个大的矿化体。但不管怎样变化,大多数矿脉总体走向为 NE,趋近于基线延伸方向 43°41′。并且所有矿脉都具有陡倾斜特征。因而估计矿化体体积时,以 10~100 线间的基线长度 1800m 为矿化体的长度,以各矿脉在勘探线剖面上的水平宽度累加值为矿化体宽度,以 270m 标高到 -810m 标高之间的垂直间隔 1080m 为矿化体的高度。其中,-90m~-810m 标高处预测区各矿脉的水平宽度是用波的分解与合成技术求出来的,该技术将在第 7 章中详细介绍,在此不作赘述。

因各点矿脉水平宽度累加值差别较大,具体计算时,围绕各点把矿化体划分成长 50m、高 40m、宽为该点矿脉水平宽度累加值的长方体(单元)972 个,先算出每个立方体的体积,然后相加求出矿化体的体积。表 6-16、表 6-17、表 6-18 依次列出上部已知区(270~-90m 标高)、上部预测区(-90~-330m 标高)、深部预测区(-330~-810m 标高)所含立方体中心点的矿脉水平宽度累加值。经计算,研究区矿化体体积为 45046720m^3。其中,上部已知区矿化体体积为 15847100m^3;上部预测区体积为 9979120m^3;深部预测区体积为 19220500m^3。

表 6-16　上部已知区(270 ～ －90m 标高)单元中心点矿脉水平宽度累加值一览表

勘探线号	水平宽度累加值/m									勘探线号	水平宽度累加值/m								
	250中段	210中段	170中段	130中段	90中段	50中段	10中段	－30中段	－70中段		250中段	210中段	170中段	130中段	90中段	50中段	10中段	－30中段	－70中段
10	18.0	21.6	39.0	19.8	21.2	26.2	18.8	26.8	12.3	5	24.4	29.6	50.2	51.6	53.4	46.6	24.1	21.4	16.4
12.5	17.5	21.6	47.2	32.1	23.0	36.4	20.7	27.1	13.3	57.5	31.8	45.9	44.3	23.4	38.0	35.5	25.8	26.4	20.8
15	11.3	19.9	41.5	22.4	20.0	24.7	22.1	33.5	11.9	60	72.3	55.6	56.1	33.3	54.8	51.9	19.6	42.9	31.6
17.5	18.6	32.2	46.6	16.6	20 8	21.5	17.6	27.6	11.8	62.5	38.9	34.4	22.3	29.2	39.8	35.3	26.2	24.7	28.4
20	30.9	40.0	43.8	26.0	25 4	30.1	20.9	20.3	11.1	65	26.5	31.5	15.7	19.3	24.5	16.9	20.0	14.0	15.2
22.5	31.3	37.9	16.4	23.3	34 1	22.1	21.3	9.2	12.7	67.5	18.4	29.4	21.2	38.9	40.9	24.9	12.8	17.0	11.1
25	19.6	14.3	13.9	18.8	28.9	19.0	12.0	15.6	14.5	70	22.7	42.9	27.2	22.4	54.7	28.1	10.9	17.1	9.2
27.5	23.7	17.1	16.2	21.2	21.3	13.7	14.3	16.0	14.3	72.5	15.9	28.4	29.7	34.0	56.9	21.5	9.0	20.0	5.0
30	17.1	16.4	10.5	13.5	22.9	22.1	14.1	15.0	15.7	75	16.8	25.0	15.5	16.0	34.9	17.5	8.9	13.5	8.2
32.5	20.4	17.9	20.6	18.4	28.1	25.4	12.0	12.9	12.1	77.5	19.5	32.3	11.5	16.3	38.7	25.4	13.0	17.3	12.5
35	52.8	31.9	27.5	29.4	34.8	22.9	15.8	12.7	14.2	80	16.8	32.6	18.7	14.8	25.5	14.8	12.0	17.1	9.2
37.5	21.4	21.7	21.4	18.4	31.2	23.4	9.3	16.4	10.5	82.5	8.5	23.7	12.1	16.2	33.1	19.5	19.6	18.2	11.5
40	16.9	14.0	16.4	12.2	22.3	20.0	10.6	15.0	14.4	85	8.6	16.6	19.3	22.7	26.5	17.4	25.5	27.0	17.5
42.5	22.2	14.1	21.4	23.6	25.4	24.7	9.7	23.9	19.7	87.5	13.1	22.8	16.9	17.2	24.2	21.7	31.1	30.3	32.0
45	28.7	16.1	29.7	36.7	37.7	19.7	7.8	27.7	15.8	90	22.0	30.0	42.6	35.2	32.1	24.2	18.7	28.2	26.1
47.5	18.5	18.8	42.7	37.8	41.2	26.6	11.2	25.9	10.6	92.5	22.8	17.1	38.0	41.4	34.5	31 0	16.5	23.7	25.0
50	20.3	21.6	52.5	26.1	29.1	33.8	11.0	17.7	13.9	95	32.6	33.8	34.8	45.0	38.8	28.2	23.3	19.5	26.8
52.5	16.8	23.1	23.7	25.4	42.3	37.5	20.0	20.3	22.7	97.5	27.8	18.4	42.1	68.3	42.1	20.7	23.9	27.7	25.1

表 6-17　上部预测区(－90～－330m 标高)单元中心点矿脉水平宽度累加值一览表

勘探线号	水平宽度累加值/m						勘探线号	水平宽度累加值/m					
	－110标高	－150标高	－190标高	－230标高	－270标高	－310标高		－110标高	－150标高	－190标高	－230标高	－270标高	－310标高
10	19.56	40.3	15.59	18.96	27.13	21.44	55	20.61	39.51	43.35	50.29	48.47	20.96
12.5	20.07	41.68	30.47	28.33	29.58	24.17	57.5	35.03	33.00	23.87	33.67	25.61	21.38
15	19 13	41.09	23.47	26.77	23.39	28.82	60	13.07	19.37	12.53	36.64	27.99	11.15
17.5	16.56	33.09	13.85	17.54	17.96	21.08	62.5	24.43	16.02	21.61	39.99	33.12	23.36
20	16.89	27.06	14.10	16.99	16.16	8.67	65	20.77	15.15	19.55	16.35	15.53	20.56
22.5	18.01	5.86	15.20	13.69	12.00	13.59	67.5	25.88	16.71	13.21	43.21	27.68	14.96
25	19.11	11.01	18.53	32.34	15.95	8.45	70	26.60	12.79	15.50	38.37	18.84	4.79
27.5	12.07	11.14	13.54	13.68	9.29	9.19	72.5	15.49	16.21	22.62	43.14	13.44	3.18
30	13.63	9.35	14.32	28.56	25.84	13.85	75	16.46	7.03	8.25	27.50	9.74	2.85
32.5	14.13	11.52	9.00	21.02	18.99	8.54	77.5	21.55	5.88	8.43	28.36	22.21	5.11
35	16.79	16.31	19.26	19.31	16.26	5.13	80	24.35	10.63	8.68	26.79	8.47	8.96
37.5	12.57	17.12	11.46	20.60	18.13	5.50	82.5	27.50	18.92	20.00	36.93	26.43	20.18
40	11.55	14.25	9.76	19.91	21.05	8.27	85	30.29	32.77	28.38	36.72	31.09	39.17
42.5	9.68	14.31	16.75	28.06	16.41	8.32	87.5	44.24	44.82	45.03	42.60	44.38	58.35
45	7.78	19.71	27.12	30.96	6.79	8.71	90	33.83	46.41	39.03	38.55	30.17	25.45
47.5	10.69	32.87	27.94	29.95	17.11	8.39	92.5	23.96	39.96	43.29	37.12	36.87	23.94
50	12.65	46.02	17.66	24.07	36.30	9.58	95	36.44	29.07	37.60	33.07	29.39	27.01
52 5	29.14	31.81	35.40	54.21	48.58	30.78	97.5	22.27	37.46	62.46	38.26	30.72	25.43

表 6-18　深部预测区(－330～－810m 标高)单元中心点矿脉水平宽度累加值一览表

勘探线号	水平宽度累加值/m											
	－350m 标高	－390m 标高	－430m 标高	－470m 标高	－510m 标高	－550m 标高	590m 标高	－630m 标高	－670m 标高	－710m 标高	－750m 标高	－790m 标高
10	19.10	13.26	18.12	32.77	17.97	18.35	25.82	20.92	18.87	16.97	17.61	25.22
12.5	24.78	17.57	23.68	39.50	27.52	30.94	31.76	32.49	30.54	23.38	27.65	32.58
15	32.09	14.41	23.29	41.48	26.04	28.09	25.51	32.88	27.59	15.65	27.64	35.46
17.5	20.15	12.65	16 54	21.49	14.57	20.05	17.41	20.02	18.81	15.19	18.68	20.16
20	5.97	8.73	7.06	12.12	14.80	14.96	10.61	5.73	4.58	7.01	6.32	1.89
22.5	5.80	7.47	8.76	4.65	9.96	10.18	9.35	10.94	4.39	6.05	7.94	4.52
25	12.41	10.00	14.55	9.46	15.46	25.42	15.11	8.74	10.08	9.38	11.98	9.89
27.5	9.61	8.60	8.31	7.42	11.24	12.22	8.22	8.72	8.74	7.36	7.86	7.6
30	17.33	16.01	17.20	13.45	16.90	31.48	25.34	16.98	20.40	19.96	21.56	18.40
32.5	7.18	9.98	11.65	7.88	8.10	17.16	18.70	9.40	7.74	10.82	9.65	5.89
35	6.76	6.70	2.64	14.71	21.39	21.78	15.14	5.26	5.15	6.83	2.77	13.12
37.5	9.35	6.29	8.95	18.95	10.24	17.39	15.62	5.68	7.74	6.46	7.73	17.73
40	12.76	11.91	10.8	13.83	9.28	17.83	18.72	7.52	11.42	10.87	11.17	13.40
42.5	12.35	13.07	10.24	9.95	13.06	25.31	14.94	9.47	15.06	12.33	11.36	11.39
45	18.75	11.74	10.13	13.90	19.48	22.92	9.03	11.58	17.85	12.39	13.49	13.44
47.5	17.38	9.35	8.98	24.04	23.48	28.33	13.47	8.47	14.37	9.40	9.36	17.03
50	10.33	14.17	9.67	36.79	14.66	24.54	36.46	11.98	8.97	15.85	11.18	29.85
52.5	28.47	42.19	46.58	42.39	52.28	62.70	53.36	47.94	45.32	57.07	60.49	57.59
55	21.02	24.50	25.63	37.16	38.08	45.41	55.13	24.25	31.14	33.25	33.39	35.51
57.5	24.37	18.43	34.74	28.74	19.87	31.23	23.10	20.36	24.35	22.39	32.48	31.13
60	19.14	20.36	5.89	13.17	9.74	25.04	23.18	7.73	13.21	12.95	5.20	9.59
62.5	20.68	31.04	14.59	19.18	21.48	28.78	31.18	20.68	15.49	19.12	19.87	22.75
65	16.04	15.05	20.01	20.00	21.07	21.47	21.27	25.04	21.93	20.99	25.80	26.72
67.5	15.48	17.09	26.61	16.61	16.71	42.74	30.93	18.51	18.71	20.64	30.18	28.29
70	10.00	6.18	11.38	7.66	11.39	23.16	9.79	5.02	7.54	6.12	4.74	5.21
72.5	11.94	2.90	7.76	12.31	13.26	29.85	9.54	2.12	8.04	1.83	5.34	8.40
75	7.09	3.52	10.97	3.16	10.66	22.65	8.39	3.18	6.89	3.78	9.14	3.15
77.5	11.43	8.20	12.99	5.32	6.58	21.24	8.56	7.84	10.16	7.87	9.72	5.91
80	12.66	8.18	17.63	7.69	8.88	20.69	8.71	9.18	13.21	8.41	15.45	8.70
82 5	22.73	17.18	30.04	25.67	26.61	38.49	33.30	29.66	29.61	24.06	35.48	32.57
85	40.59	30.34	43.85	46.36	49.98	53.77	44.68	52.77	54.16	44.34	53.73	59.96
87.5	59.87	53.67	65.69	67.01	74.86	74.02	67.54	80.5	83.34	77.16	86.68	90.52
90	31.95	33.42	37.59	50 23	45.33	50.21	41.83	37.44	45.72	49.40	46.98	54.05
92.5	30.08	34.98	34.18	42.25	45.15	44.01	47.75	35.01	39.52	46.04	45.23	79.57
95	22.76	32.90	43.43	34.54	37.11	40.52	41.14	30.07	31.76	41.68	50.96	43.55
97.5	38.22	35.11	28.23	43.95	63.54	41.95	42.37	37.10	46.13	46.76	39.95	53.01

(2)矿体在矿化体中所占比例和矿体体积。据矿化体金品位统计分布模型式(6-19)、式(6-20),第2矿化阶段产物在矿化体中占32.22%。在该阶段中,金品位3μg/g以上的占74.43%。第2矿化阶段3μg/g以上的金矿资源在矿化体中占23.98%。第3矿化阶段产物在矿化体中占31.25%。在该阶段中,金品位3μg/g以上的占30.33%。第3矿化阶段3μg/g以上的金矿资源在矿化体中占11.08%。因而,矿化体中金品位3μg/g以上的金矿资源占35.06%。

计算矿体在矿化体中所占比例时,必须剔除金品位3μg/g以上,但矿体厚度小于0.8m,$m \cdot g \cdot t^{-1}$值小于2.4的那部分样品。为此,对4693个金品位3μg/g以上的样品进行统计,表6-19依次列出金品位不小于3μg/g,矿体厚度不小于0.8m(*A*),金品位不小于3μg/g,矿体厚度小于0.8m,但$m \cdot g \cdot t^{-1}$值不小于2.4(*B*);金品位不小于3μg/g,矿体厚度小于0.8m,$m \cdot g \cdot t^{-1}$值小于2.4(*C*)三者的频数和频率。不难看出,*A* + *B* 两类的频率值在81.85%~91.97%范围变化,平均值为84.51%,均方差为3.04%,变异系数仅为0.0360。表明 *A* + *B* 在垂向上变化不大。

表6-19 3 μg/g以上的金矿石样品频数、频率表

中段	频数①				频率①			
	A	*B*	*C*	∑	*A*	*B*	*C*	*A* + *B*
255	202	163	57	422	0.4787	0.3863	0.1351	0.8649
206	276	232	107	615	0.4488	0.3772	0.1740	0.8260
170	420	307	146	873	0.4811	0.3517	0.1672	0.8328
130	409	237	106	752	0.5439	0.3152	0.1410	0.8590
90	357	299	112	768	0.4648	0.3893	0.1458	0.8542
50	250	149	81	480	0.5208	0.3104	0.1688	0.8313
10	138	135	48	321	0.4299	0.4206	0.1495	0.8508
-30	131	131	59	325	0.4031	0.4154	0.1815	0.8185
-70	74	52	11	137	0.5401	0.3796	0.0803	0.9197
∑	2257	1709	727	平均值	0.4809	0.3642	0.1549	0.8451

①频数 *A*:金品位≥3μg/g,厚度≥0.8m;*B*:金品位≥3μg/g,厚度<0.8m,$m \cdot g \cdot t^{-1}$值≥2.4;*C*:金品位≥3μg/g,厚度<0.8m,$m \cdot g \cdot t^{-1}$值<2.4。

经进一步计算,矿体在矿化体中所占体积百分率为29.63%。矿体体积为13347343.14m^3,其中,上部已知区矿体体积4695495.73m^3,上部预测区矿体体积2956813.26m^3,深部预测区矿体体积5695034.15m^3。

C 矿石平均体重

为计算矿石平均体重,在研究区范围内,收集金矿石小块体重实测数据54件。最小值为2.5t/m^3,最大值为4.15t/m^3,平均值为2.7659t/m^3,均方差为0.3406t/m^3,变异系数仅为0.1231,见表6-20。进行计算时,取矿石体重值2.77t/m^3。

表 6-20　金矿石小块体重一览表

序号	矿石名称	体重/t·m^{-3}	序号	矿石名称	体重/t·m^{-3}	序号	矿石名称	体重/t·m^{-3}
1	黄铁绢英岩化花岗岩	2.64	19	黄铁绢英岩	2.5	37	黄铁绢英岩	2.70
2	黄铁绢英岩化花岗岩	2.71	20	黄铁绢英岩化花岗岩	2.56	38	黄铁绢英岩	3.88
3	黄铁绢英岩	2.75	21	绢英岩化花岗岩	2.76	39	黄铁绢英岩	2.74
4	黄铁绢英岩	2.80	22	绢英岩化花岗岩	2.53	40	黄铁矿	4.05
5	黄铁绢英岩	3.05	23	绢英岩化花岗岩	2.56	41	黄铁矿	4.15
6	黄铁绢英岩	2.77	24	绢英岩化花岗岩	2.58	42	黄铁矿石英	2.73
7	黄铁绢英岩	2.72	25	绢英岩化花岗岩	3.29	43	黄铁矿石英	2.65
8	黄铁绢英岩	2.64	26	黄铁绢英岩	2.68	44	石英黄铁矿	2.67
9	黄铁绢英岩	2 59	27	黄铁绢英岩	2.65	45	黄铁矿石英	2.61
10	黄铁绢英岩	2.89	28	碎裂花岗岩	2.61	46	含黄铁矿石英	2.65
11	黄铁绢英岩化花岗岩	2.81	29	碎裂状花岗岩	2.62	47	含黄铁矿石英	2.55
12	黄铁绢英岩	2.51	30	黄铁绢英岩化花岗岩	2.61	48	黄铁矿石英方解石	2.70
13	黄铁绢英岩	3.15	31	黄铁绢英岩	2.66	49	黄铁矿石英方解石	2.71
14	黄铁绢英岩	2 64	32	黄铁绢英岩	2.64	50	石英方解石	2.71
15	黄铁绢英岩化花岗岩	2.62	33	黄铁绢英岩	2.66	51	黄铁矿石英方解石	2.73
16	黄铁绢英岩化花岗岩	2.57	34	黄铁绢英岩	2.65	52	石英方解石	2.71
17	黄铁绢英岩	2.63	35	黄铁绢英岩	2.78	53	黄铁矿石英方解石	2.72
18	黄铁绢英岩	2.65	36	黄铁绢英岩	2.69	54	黄铁矿石英	2.53

D　金矿产资源总量

我们开展矿产资源总量估计的目的，是为了指导当前的深部探矿工作，最理想的是能求出一个接近地质储量的量。为此，我们对矿产资源总量估计模型式(6-1)进行了改造，即在该模型中增加一个称作有效探矿指数的乘子。该乘子参加计算后，去掉常规资源量中那些没有现行开采价值，而将来有可能成为有经济价值的开采对象，使我们得到的矿产资源量接近于地质储量。该参数是一个经验值，在玲珑金矿田，其数值为 0.3125。

经计算，研究区金矿产资源总量为 127.09t。其中，上部已知区(270～－90m 标高)为 44.71t，上部预测区(－90～－330m标高)为 28.15t，深部预测区(－330～－810m 标高)为 54.23t。

金矿产资源量在空间上分布不均匀。图 6-15 表示不同勘探线所在空间的金矿产资源量。不难看出，从南西到北东，沿基线方向，金矿产资源量呈高—低相间分布，金矿资源相对富集的空间依次为 11～16 线；50～64 线及 83 线以西。从南西到北东，金矿产资源量有减少的趋势。

在垂直空间上，金矿产资源也呈高—低相间分布。金矿资源相对富集的空间标高范围依次为 250～34m；－130～－270m；－470～－606m；－750m 以下，见图 6-16。

6.1.1.4　热海矿床金矿产资源量估计

热海是一个 3 级浅成热液循环系统，面积为 7.2km^2。地处大盈江弧形构造带向东南突出地带外缘的第三纪断陷盆地中。基底岩系为燕山期黑云母花岗岩，出露地层以中新统南

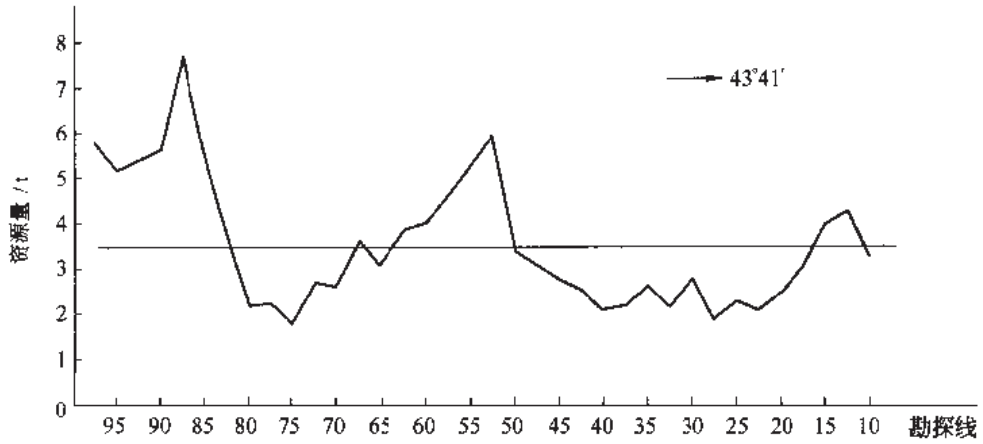


图 6-15　沿基线方向资源量变化曲线

林组花岗质沙砾岩为主。中新统和燕山期花岗岩是浅成热液循环系统的围岩。因地处大盈江弧形构造带由南北向西南的转折部位，构造活动强烈频繁。不但发育近南北向的背斜构造，而且以黄瓜箐—硫磺塘南北向主断裂构造为中心，向东西两侧发育大量南北向、北东向、北西向断裂构造，致使该区岩层遭受挤压变形。岩石破碎、裂隙纵横，成为地壳薄弱带和构造频繁活动带。

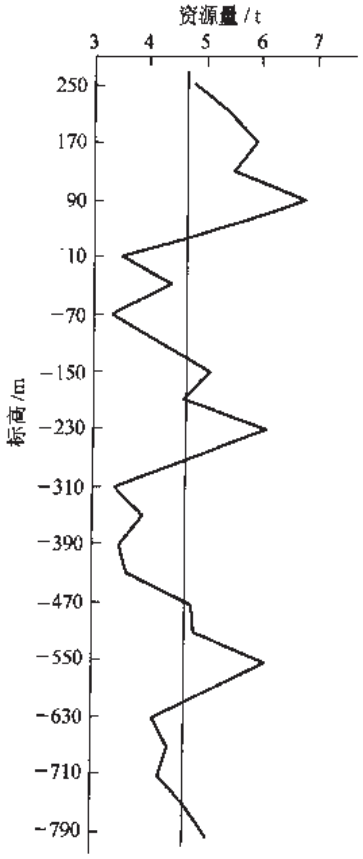


图 6-16　资源量垂向变化曲线

沿断裂发育大量热泉。热泉群由高温沸泉、高温温泉、中温温泉、低温温泉，放热地面、喷气孔、钙质泉华、硅质泉华、硫质泉华、盐华、水热爆炸角砾岩和水热爆炸坑组成。温泉水温度 42～102℃，深部热液温度 185.7～342.3℃。热液总盐量 2.34～9.63g/L。泉水以下围岩发生强烈酸淋滤作用，发育高岭石化、伊利石化和硅化。并发育脉状、网脉状硅质岩。温泉水和各类热液作用产物中发育热泉型金矿床特有的地球化学标志组合：Au、Ag、As、Sb、Hg、Tl，以及特征的垂直分带（自上而下）：

Tl—Sb—Hg—As—Au、Ag

金及其伴生元素在热液作用产物中呈对数正态分布。金含量较高，温泉水中为 0.01～0.16ng/g，平均 0.0624ng/g，高出世界温泉水的 4.2 倍。泉华为 0.001～0.63μg/g，平均 0.0161μg/g，最高 7.16μg/g。泉底沉积物为0.004～0.17μg/g，平均 0.0155μg/g。酸淋滤作用蚀变岩为 0.001～1.73μg/g，平均 0.0425μg/g。经计算 1μg/g 以上的占3.59%。硅质岩带上部包括人们通常说的硅帽，金含量为 0.003～4.65μg/g，平均 0.2225μg/g，1μg/g 以上的占 13.1%。银含量也很高，温泉水为 0.01～1ng/g，泉华 0.01～6.02μg/g，泉底沉积物 0.086～3μg/g；酸淋滤作用蚀变岩为 0.001～92.1μg/g，硅质岩带上部 0.001～54.5μg/g。表明热海 3 级浅成热液循环系统具有强烈的贵金属矿化。

经统计该区热液主流通孔道及其周围脉状、网脉状裂隙(包括所有温泉和干泉)的分布面积约占系统总面积的0.8%。根据热泉型金矿成矿模式(见第5章),设每次发生沸腾的热液层厚度为0.1km,深部热液金平均含量为0.2398ng/g。因热液总盐量不高,设其比重为1t/m^3。据布朗K L1986年在新西兰奥哈阿基地热井进行的"热液中金的沉淀作用"实验研究结果,经两次沸腾,热液中金有97.8%沉淀下来。因而经一次沸腾,热液中金有48.9%沉淀下来。这样就可以估算出热海3级浅成热液循环系统1次沸腾沉淀出来的金总量。

野外地质证据表明,腾冲浅成热液循环系统至少经历了80万年的发育时间。据史料记载,1512~1983年,该区至少发生4.7级以上地震88次,即在该区发生4.7级以上地震的平均时间间隔为5.3637年。80万年共发生4.7级以上地震149152次。把它作为该区浅成热液循环系统发育期间深部热液沸腾总次数,这样就能估计出热海热泉型金矿沉淀的金总量。

上部硅质岩带金含量统计分布模型表明,金含量为1μg/g以上的样品占13.1%,矿石金平均品位2.0627μg/g,非矿石金平均品位0.1673μg/g。矿石中的金占沉淀金总量的65.02%。因而可用下列模型估计热海3级浅成热液循环系统的金矿产资源量:

$$A = SHDPCKFL \tag{6-24}$$

式中,A为金矿产资源量估计值,t;S为3级浅成热液循环系统的面积(7.2km^2);H为沸腾热液的厚度(0.1km);D为热液的密度;P为热液主流通孔道及其周围脉状、网脉状裂隙所占面积百分数(0.8%);C为深部热液金的平均含量(0.2398ng/g);K为1次沸腾热液沉淀的金所占比例(48.9%);F为构成矿石的金占沉淀金总量的质量分数(65.02%);L为沸腾次数(149152次)。

经计算,热海浅成热液循环系统有金矿产资源总量65.5t。

6.1.2 矿石品位-矿床规模经验估计法

该方法是对一定类型金矿床矿石品位与矿石量或金属量之间存在的数量关系进行统计提炼,建立矿石品位-矿床规模经验模型。如果掌握了矿床的矿石品位,就可以用该模型估计矿床的远景储量。

图6-17是根据19个热泉型金矿床矿石品位-矿石量关系做出的矿石品位-矿床规模经验模型。不难看出,当矿石品位为1~2μg/g时,矿床金储量在5~15t范围内变化。矿石品位为2~4μg/g时,矿床有以下3种不同规模:(1)5~20t;(2)(100±10)t;(3)300~600t。上述差异显然是矿化范围大小造成的。根据热泉型金矿成矿模式,我们设定矿体垂向长度为150m,矿石体重为2.6t/m^3,矿化范围(面积)和矿体水平面积的比值为100。当品位为2~4μg/g时,储量为5~20t的金矿床,矿化面积为0.64~2.56km^2;储量为(100±10)t的金矿床,矿化面积为11.54~14.1km^2;储量为300~600t的金矿床,矿化面积为38.46~76.92km^2。(2)金属储量为(100±10)t,矿化面积2.88~3.53km^2。当矿石品位为4~8μg/g时,有两种不同的规模:(1)金属储量为20~50t,其矿化面积为1.28~3.21km^2;(2)金属储量为(100±10)t,其矿化面积为5.77~7.05km^2。当矿石品位为8~16μg/g时,也有两种不同的规模:(1)金属储量为10~15t,矿化面积为0.32~0.48km^2。(2)金属储量为(100±10)t,矿化面积2.88~3.53km^2。当矿石品位大于50μg/g时,往往形成金属储量大于100t的矿床。

综上所述,把上列规律归纳成品位-矿量估计模型:

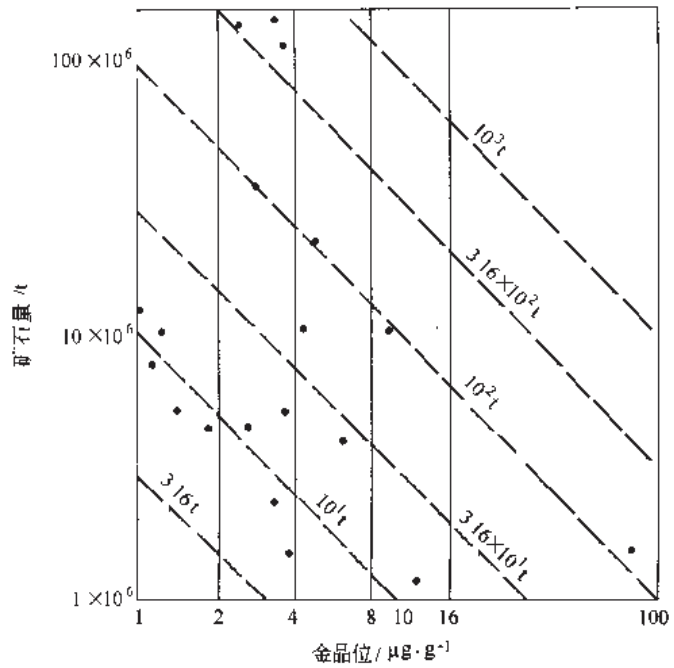


图 6-17　热泉型金矿床矿石品位－矿石量－金属储量关系模型

$$f(x)=\begin{cases}10\sim15\text{t} & x=1\sim2\mu\text{g/g}\\ 5\sim20\text{t} & x=2\sim4\mu\text{g/g};\text{矿化面积 }0.64\sim2.56\text{km}^2\\ (100\pm10)\text{t} & x=2\sim4\mu\text{g/g};\text{矿化面积 }11.56\sim14.10\text{km}^2\\ 300\sim600\text{t} & x=2\sim4\mu\text{g/g};\text{矿化面积 }38.46\sim76.92\text{km}^2\\ 20\sim50\text{t} & x=4\sim8\mu\text{g/g};\text{矿化面积 }1.28\sim3.21\text{km}^2\\ (100\pm10)\text{t} & x=4\sim8\mu\text{g/g};\text{矿化面积 }5.77\sim7.05\text{km}^2\\ 10\sim15\text{t} & x=8\sim16\mu\text{g/g};\text{矿化面积 }0.32\sim0.48\text{km}^2\\ (100\pm10)\text{t} & x=8\sim16\mu\text{g/g};\text{矿化面积 }2.88\sim3.53\text{km}^2\\ >100\text{t} & x>50\mu\text{g/g}\end{cases}\qquad(6\text{-}25)$$

应用该模型估计热海浅成热液循环系统的金矿产资源量。热海的矿化面积为 7.2km^2，矿石平均品位为 2.063μg/g。根据模型，金矿产资源量应是 5～20t 和(100±10)t 之间的某个数字。根据该模型约定的条件，矿石分布空间垂直长度为 150m，矿化面积为系统的 1%，矿石体重为 2.6t/m^3，因面进一步计算出热海的金矿产资源量 57.9t。与用体积法估计的金矿产资源量相近。

6.1.3　齐波夫分布律估计法

1949 年，美国哈佛大学语言学和心理学教授齐波夫对英语单词出现的频率进行研究。他把单词出现的次数从大到小按自然数依次排列后，发现单词出现的频率值和等级值的乘积接近于 1 个常数。即 $R\times F=K$(R 是等级值，F 是频率值，K 是常数)。于是提出齐波夫定律。其内容是："最大数值与次大数值的 2 倍一样大，而与第 3 位数值的 3 倍一样大，……，以此类推"。在后来的实践中，人们发现许多国家城市的分布，各党派人数的多少，细菌群体大小等，都服从齐波夫分布律。1977 年，澳大利亚地质学家罗兰兹 N J 首次应用

齐波夫分布律预测铜、金等矿产资源量，获得了成功。

齐波夫定律是帕雷托分布的一种极限情况，是描述某些离散型变量的一种概率分布模型。数学模型为：

$$F_1R_1 = F_2R_2 = \cdots = F_nR_n = K \tag{6-26}$$

式中，F_i 为研究对象的取值；R_i 为研究对象的秩，用自然对数表示；K 为常数。

由式(6-26)得：

$$F_1 = 2F_2 = 3F_3 = \cdots = nF_n = K \tag{6-27}$$

可见，当 $R=1$ 时，研究对象有最大值 K。并且，只要求出 K 值，其他的值将分别为 $\frac{K}{2}$，$\frac{K}{3}$，…，$\frac{K}{n}$。所以，模拟齐波夫分布律是从求解 K 值入手的。下面以玲珑金矿田 51 矿脉的金矿产资源量估计为例，说明齐波夫分布律的模拟方法。

51 号脉长 2200m，宽 5～15m，由含金黄铁矿石英组成。其中，发育许多透镜体状矿体。表 6-21 列出了矿脉上部 7 个矿体的地质储量。模拟齐波夫分布律时，首先确定最佳齐波夫系列。过程如下：

表 6-21　51 号矿脉上的矿体储量表

编号	矿体名称	金属量/kg	编号	矿体名称	金属量/kg
Fa	KA	175.02	Fe	KE	5.03
Fb	KB	112.72	Ff	KF	4.24
Fc	KC	64.48	Fg	KG	2.99
Fd	KD	40.79			

(1)以表 6-21 中最大 1 个矿体(KA)的储量为除数，除每个矿体的储量，得齐波夫系列基础分量 P_0：

$$P_0(i) = \frac{F_i}{F_a} \quad (i = a,b,c,d,e,f,g) \tag{6-28}$$

分别得 1，0.644，0.3684，0.2331，0.0287，0.0242，0.0171。

(2)用自然数 1，2，…作乘子(秩)，乘每个矿体的齐波夫系列基础分量 P_0，得齐波夫系列分量：

$$P_{ij} = P_0(i)R_j \qquad (i = a,b,\cdots,g;\ j = 1,2,\cdots) \tag{6-29}$$

不难看出，齐波夫模型中的最大值 K，相当于 $R=1$ 时的齐波夫系列分量。

(3)在各矿体中找出数值接近整数值的齐波夫系列分量。接近相同整数值的齐波夫系列分量构成标准齐波夫系列。从表 6-22 可见，51 矿脉上部构成 6 个满足上述条件的标准齐波夫系列。分别计算每个标准齐波夫系列的平均值、均方差、变异系数、平均值与相应整数间差值的绝对值。表 6-23 列出了 6 个标准齐波夫系列及其数学特征值。

(4)分别对 6 个标准齐波夫系列的均方差、变异系数、平均值与相应整数间差值的绝对值等从大到小排队，并按自然数顺序赋值。设该值为 q。依

$$Z_i = \frac{1}{MN}\sum_{j=1}^{N} q_{ij} \qquad (i = 1,2,\cdots,n) \tag{6-30}$$

式中，Z_i 为第 i 个标准齐波夫系列相对接近度；M 为标准齐波夫系列的个数。本例中 $M=6$；N 为标准齐波夫系列的数学特征个数，本例中 $N=3$。

计算各标准齐波夫系列的相对接近度。具有最大相对接近度的为最佳标准齐波夫系列。

从表 6-23 可见，秩为 11－17－30－47－383－455－643 的标准齐波夫系列的相对接近度高达 89%。因此该系列为最佳标准齐波夫系列。系列中的秩就是相应矿体在矿脉诸矿体中从大到小按自然数排队的等级值。

表 6-22　齐波夫系列分量计算结果表

R	P_0R	R	P_0R	R	P_0R	R	P_0R	R	P_0R	R	P_0R	R	P_0R
1	1	1	0.6440	1	0.3684	1	0.2331	1	0.0287	1	0.0242	1	0.0171
2	2	2	1.2880	2	0.7368	2	0.4662	2	0.0574	2	0.0484	2	0.0342
3	3	3	1.9320										
4	4			5	1.8420	9	2.0979	70	2.0090	83	2.0086	117	2.0007
5	5	6	3.8640										
6	6	7	4.5080	11	4.0524	17	3.9627	139	3.9893	165	3.9930	234	4.0014
7	7	8	5.1520										
8	8	9	5.7960	14	5.1576	21	4.8951	174	4.9938	207	5.0094	292	4.9932
9	9	10	6.4400	15	5.5260	22	5.1282	175	5.0225	208	5.0336	293	5.0103
10	10	11	7.0840										
11	11			19	6.9996	30	6.9930	244	7.0028	289	6.9938	409	6.9939
12	12	14	9.0160										
13	13	15	9.6600	24	8.8416	39	9.0909	314	9.0118	372	9.0024	526	8.9946
14	14	16	10.3040	25	9.2100	40	9.3240	315	9.0405	373	9.0266	527	9.0117
15	15	17	10.9480										
16	16	18	11.8920	30	11.0520	47	10.9557	383	10.9921	455	11.0110	643	10.9953
17	17	19	12.2360	31	11.4204	48	11.1888	384	11.0208	456	11.0352	644	11.0124

表 6-23　齐波夫系列及其数学特征值对比表

顺序号		齐　波　夫　系　列	$\overline{X}$	S	C	$\lvert\overline{X}-n\rvert$	Z
1	P	2－1.9320－1.8420　2.0979－2.0090－2.0086－2.0007	1.9843	0.0792	0.0399	0.0157	0.33
	R	2－3－5－9－70－83－117					
2	P	4－3.8640－4.0524－3.9627－3.9893－3.9930－4.0014	3.9840	0.0579	0.0145	0.0196	0.50
	R	4－6－11－17　139－165　234					
3	P	5－5.1520－5.1576－4.8951－4.9938－5.0094－4.9932	5.0287	0.0943	0.0187	0.0287	0.22
	R	5－8－14－21－174－207－292					
4	P	7－7.0840－6.9996－6.9930－7.0028－6.9938－6.9939	7.0096	0.0330	0.0047	0.0096	0.83
	R	7－11－19－30－244－289－409					
5	P	9－9.0160－8.8416－9.0909－9.0118－9.0024－8.9946	8.9939	0.0747	0.0083	0.0062	0.72
	R	9－14－24－39－314－372－526					
6	P	11－10.9480－11.0520－10.9557－10.9921－11.0110－10.9953	10.9934	0.0384	0.0032	0.0066	0.89
	R	11－17－30－47－383－455－643					

(5)按每个已知矿体的储量和秩依式(6-26)计算 K 值，得：$Ka=1925.2$；$Kb=1916.24$；$Ke=1934.1$；$Kd=1917.13$；$Ke=1926.49$；$Kf=1929.2$；$Kg=1922.4$。

(6)进一步计算上列各 K 值的平均值，得 $\overline{K}=1924.4$；均方差 $S=6.4$；变异系数 $C=0.0034$。均方差和变异系数都很小。表明用不同矿体求出的 K 值十分接近。因此，确定51矿脉中最大的一个矿体储量 $F_1=1924.4$kg。

(7)表6-24列出了51矿脉7个已知矿体的储量和用齐波夫分布模型估计的资源量，两者十分接近，总体相对误差仅 -0.0019。表明用该模型估计矿脉资源量能够取得客观的效果。

表6-24 估计的各矿体资源量与储量对比表

顺序号	矿体名称	秩	资源量 B/kg	储量 A /kg	$\frac{B-A}{A}$
1	KA	11	174.95	175.02	−0.0004
2	KB	17	113.20	112.72	0.0043
3	KC	30	64.15	64.48	−0.0051
4	KD	47	40.94	40.79	0.0037
5	KE	383	5.02	5.03	−0.0020
6	KF	455	4.23	4.24	−0.0024
7	KG	643	2.99	2.99	0.0000
	$\sum$		402.49	402.28	0.0019

(8)按 $\frac{K}{R}$ 依次计算 $R=1,2,3,\cdots$ 的各矿体资源量估计值。图6-18绘出了51矿脉矿体资源量齐波夫分布特征线和19个100kg以上的矿体在该特征线上的位置。

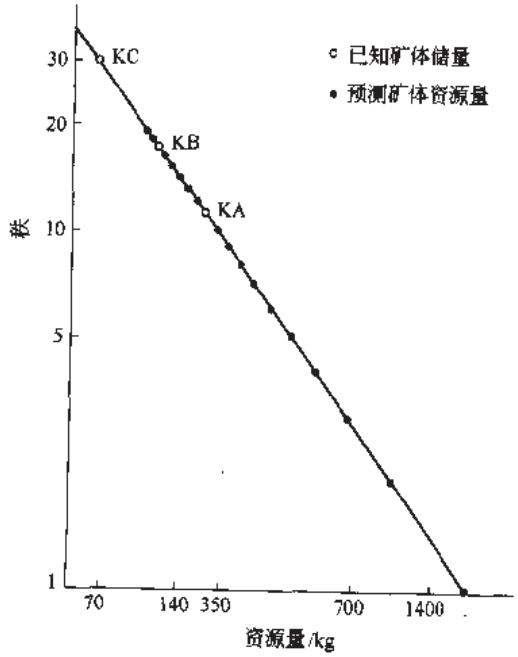


图6-18 51号矿脉矿体资源量齐波夫分布特征线

(9)如果把 R 看作连续的数,可把齐波夫表达式 $\frac{K}{R}$ 看作概率密度函数,则它的分布函数:

$$\int \frac{K}{R}dR = K\ln R + C \tag{6-31}$$

式中,K 为最大的一个矿体资源量;R 为矿体资源量的秩;C 为积分常数。

不难看出,式 6-31 是布拉德福特定律的数学表达式。将其改写成:

$$K\ln R + C = K + \frac{K}{2} + \frac{K}{3} + \cdots + \frac{K}{R}$$

$$\therefore \quad \ln R + C' = 1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{R}$$

$$C' = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \cdots + \frac{1}{R} - \ln R \tag{6-32}$$

可以事先根据 R 的具体数值计算出 C' 并制表,见表 6-25。此时,只要知道最大一个矿体的资源量,即可求出由大到小顺序排列的 R 个矿体的资源总量:

$$Q = K(\ln R + C') \tag{6-33}$$

本例中 $K = 1924.4$kg,资源量 100kg 以上的矿体 19 个,即 $R = 19$。此时,$C' = 0.6033$。代入式(6-33),得 100kg 以上矿体的资源总量 $Q = 6827.2$kg。

表 6-25 与秩(1~60)对应的 C′值

R	C′	R	C′	R	C′	R	C′	R	C′
1	1	13	0.6152	25	0.5971	37	0.5907	49	0.5874
2	0.8069	14	0.6125	26	0.5963	38	0.5903	50	0.5872
3	0.7347	15	0.6102	27	0.5956	39	0.5900	51	0.5870
4	0.6970	16	0.6081	28	0.5950	40	0.5897	52	0.5868
5	0.6739	17	0.6063	29	0.5944	41	0.5894	53	0.5866
6	0.6582	18	0.6047	30	0.5938	42	0.5891	54	0.5864
7	0.6469	19	0.6033	31	0.5933	43	0.5888	55	0.5863
8	0.6384	20	0.6020	32	0.5928	44	0.5885	56	0.5861
9	0.6317	21	0.6008	33	0.5923	45	0.5883	57	0.5860
10	0.6264	22	0.5998	34	0.5918	46	0.5880	58	0.5858
11	0.6220	23	0.5988	35	0.5914	47	0.5878	59	0.5857
12	0.6183	24	0.5979	36	0.5910	48	0.5876	60	0.5855

(10)上部开采(包括剥蚀掉的)和保有储量 3500kg。因此,该矿脉深部有潜力资源量 3327.2kg。

6.1.4 矿产值历史资料估计法

该方法是一种根据金矿产值,如累积储量、年生产量(金属量或矿石量)等历史资料,提炼矿产值与相对年代之间函数关系,建立数学模型,用以估计未来矿产资源量的方法。该方法考虑的只是矿山开发的历史资料,与地质条件无关。对一些已知金矿床统计分析发现,在一定的历史时期,黄金年产量(或累积产量)、累积储量等与相应年代的对数值之间存在线性

相关关系。兹举例说明之。

(1)河北某金矿 1980～1984 年黄金产量列于表 6-26,若将年代减去 1979 后取对数,相对年代对数值与黄金年产量之间的相关系数高达 0.9960($\gamma_{0.05}(3)=0.8783$)。因此,可把黄金年产量看作相对年代对数值的函数。经一元回归,得下列数学模型:

$$\hat{A}=470.5125+77.0745\ln(t-1979) \tag{6-34}$$

表 6-26 列出了用模型式(6-34)估计的各年代黄金产量及它们与实际产量的相对误差。可以看出,两者十分接近,平均相对误差仅为 0.004%。

(2)表 6-27 是山东某金矿 1961～1984 年金矿累积储量的历史资料,若将年代减去 1959 后取对数,相对年代对数值与累积储量之间相关系数高达 0.9550($\gamma_{0.05}(17)=0.4555$),因此,该矿床的黄金年累积储量可用下列数学模型来估计:

$$\hat{Q}=10063.8785+16142.8734\ln(t-1959) \tag{6-35}$$

用式(6-35)估计各年代黄金累积储量并与实际累积储量对比,从表 6-27 可以看出,两者的差别很小,平均相对误差仅为 -0.61%。

表 6-26 河北某金矿生产历史资料与估值对比

年度	金产量 A /kg	金产量估计值 $\hat{A}$/kg	$\frac{A-\hat{A}}{\hat{A}}$
1980	466.55	470.51	0.0084
1981	528.76	523.94	-0.0092
1982	559.86	555.19	-0.0084
1983	575.41	577.36	0.0034
1984	590.97	594.56	0.0060

表 6-27 山东某金矿累积探明储量与估值对比

年度	累积储量 Q /kg	累积储量估计值 $\hat{Q}$/kg	$\frac{\hat{Q}-Q}{\hat{Q}}$	年度	累积储量 Q /kg	累积储量估计值 $\hat{Q}$/kg	$\frac{\hat{Q}-Q}{\hat{Q}}$
1961	27936	21253	-0.3144	1975	52780	54821	0.0372
1964	36023	36045	0.0006	1976	53685	55800	0.0379
1965	38737	38988	0.0064	1977	55800	56722	0.0163
1966	41329	41476	0.0036	1979	59242	58424	-0.0140
1967	42064	43632	0.0359	1980	61037	59211	-0.0308
1968	42080	45533	0.0758	1981	62719	59962	-0.0460
1970	44852	48772	0.0804	1982	64260	60680	-0.0590
1971	45989	50177	0.0835	1983	65889	61367	-0.0737
1972	47460	51470	0.0779	1984	67170	62026	-0.0829
1974	51089	53780	0.0500				

综上所述,在一定的历史时期内,金矿产值与相对年代之间存在下列关系:

$$\hat{Q}=a+b\ln(t-c) \tag{6-36}$$

式中,$\hat{Q}$为某个年代金矿产估计值;t 为年代;c 为经验常数;a 为截距;b 为斜率。

a、b 为待定系数，由实际的矿产值历史资料求得。参考统计的初始年代确定 C 值。

实例：表 6-28 列出了灵山沟金矿 1974～1981 年期间，每年的累积探明储量。用实际资料求解式 6-36 中的待定系数 a、b 及常数 C，得下列回归方程式：

$$\hat{Q} = -2242.5331 + 6176.3226 \ln(t - 1972) \tag{6-37}$$

用式(6-37)估计的各年代累计探明储量，以及它们与实际数据的比较列于表 6-28，其平均相对误差为 -4.50%。用该模型预测 1983 年的累积探明储量为 12568kg，与当年实际累积探明储量 12044kg 相比，相对误差仅为 4.17%。表明该模型具有实用价值。

表 6-28　灵山沟金矿累积探明储量与估值对比

年度	储量 Q /kg	储量估计值 $\hat{Q}$ /kg	$\frac{\hat{Q}-Q}{\hat{Q}}$
1974	3322	2039	-0.6296
1975	3876	4543	0.1468
1976	4284	6319	0.3221
1977	8117	7698	-0.0544
1979	10497	9776	-0.0737
1980	10817	10601	-0.0204
1981	11391	11328	-0.0055

6.2　预测区进一步找矿工作的统计决策

为减少风险，应通过经济价值、找矿效益和开发风险等方面的分析，对预测区进一步找矿工作作出统计决策。影响决策的关键因素是成本、找矿概率、期望价值。仅当期望价值大于最低期望价值时，才能开展进一步的探矿工作。最低期望价值通常用开发成本与找矿概率的商来表征。如果找矿概率为 1%，则对于 10 万元的勘探费用，寻找的目标至少应具有现值 1000 万元。找矿概率更低时，预测目标的现值应更高，或是找矿成本必须更低才可进行。例如，本章第一节对 108 矿脉深部预测区矿产资源总量估计结果表明，在 0～200m 标高范围，具有潜力资源量 13.8t。根据矿体空间分布找矿模型和单元含矿性评判模型对深部矿体定位预测结果布置勘探工程，勘探成本为 3 000 万元。找矿概率为 38.45%，因而最低期望价值为 7802 万元。开采损失率 16%，由此损失金资源量 2.21t。有效矿石金属量 11.59t。选冶总回收率为 93%，可回收金属量 10.78t。矿石平均品位 15μg/g，开采贫化率 13%，入选矿石金平均品位 13.05μg/g。每吨矿石采选冶成本 350 元。则总成本费28912万元。黄金现价 74.5 元/g，则现值为 51399 万元。矿石期望价值 19763 万元，纯收入期望值 16763 万元。大大超过最低期望价值。为此，找矿工作决策为“开展深部探矿工作可行”。

对 105 矿脉 0m 标高以上空间开展金矿产资源总量估计结果表明，该空间尚有潜力资源量 2.4t。根据单元含矿性评判模型对深部矿体定位预测结果，按勘探线间距 50m 布置钻探工程，勘探成本 118 万元。找矿概率为 16.21%，因而，最低期望价值为 728 万元。因矿体规模很小(矿体平均长度 7.6m，矿体长度＜10m 的占 77.27%)，用 50m 间距控制时，会有 69.6% 的矿体丢失。按预测的丢矿风险系数和钻探揭露中的矿体丢失率计，勘探获得的金矿产资源量仅有 0.73t。开采损失率 20%，由此损失的金矿产资源量 0.146t，有效矿石金属

量0.584t。选冶总回收率93%，可回收金属0.5431t。矿石平均品位7.55μg/g，开采贫化率为23%，入选矿石金品位5.81μg/g。每吨矿石采选冶成本费350元，则总成本费为3269.7万元。黄金现价74.5元/g，则现值为776万元。矿石期望价值127万元，纯收入期望值9万元。这类矿床矿体规模小且变化大、矿石品位低且变化很大，钻探揭露见矿效果很差，纯收入期望值低于临界值。因此，没有必要开展进一步的勘探工作。建议由地方采用自上而下循序渐进，边探边采的方法小规模开发。

7 矿体定位预测方法

矿体定位预测是对矿床及其外围深部矿体赋存空间位置的估计，属于三维空间上进行的立体预测。是在深部预测空间地质情况不确知情况下进行的预测工作。只能根据地表及近地表处各种工程揭露的地质现象，以及地质现象显现的空间分布规律向深部推测。因地质作用及其结果的不确定性，地质现象的出现与否是不确定的，地质现象显现的空间变化规律也是不确定的。因此，矿体定位预测是一种在不确定条件下进行的统计决策工作。大体上可分为3个途径。第1个途径是对上部工程揭露的大量地质现象进行详细系统的研究，从中提取与矿体的成生关系密切，并对矿与非矿具有区分能力的地质因素作为控矿地质标志。依据控矿地质标志对矿体指示作用的方向与大小，建立地质空间含矿性评判数学模型来进行矿体定位预测。应用的方法是异常地质环境类比法。包括三方面的内容：一是应用上部已知资料建立单元含矿性评判数学模型。二是把控矿地质标志与空间坐标联系起来，找出控矿地质标志值与空间坐标间的函数关系，通过上部已知资料的处理，模拟控矿地质标志垂向空间分布模型，用该模型推断深部预测空间的地质环境。三是应用单元含矿性评判数学模型对深部预测区推断的地质环境进行评判，那些致矿的异常地质环境所在空间，即为矿体可能赋存的空间。该方法的优点是能够全面地评价深部预测区的每个空间，关键技术是模拟的控矿地质标志空间分布模型和单元含矿性评判模型必须符合客观实际，并保证较高的精确度，因而必须保证上部已知资料的真实、客观性，系统完整性。应用该方法还有两个前提条件：一是上部已知资料必须完整，在空间上有一定的规模。二是深部预测区在矿体成因类型、形态类型、构造控制特征诸方面，与上部已知区具有一定的相似性。如果上部资料不完整，或控制的深度很小，就无法模拟控矿地质标志空间分布模型；矿体成因类型、形态类型、构造控制等如果有较大的改变，上、下地质环境就失去了可比性，因而就无法应用该方法进行矿体定位预测了。

深部矿体定位预测第2个途径是在上部直接提取深部矿体的指示标志，利用矿体指示标志值与空间坐标之间的某种函数关系，建立矿体指示标志的空间分布模型，用指示标志值推测矿体可能的空间位置。应用的方法是空间分带模型法。该方法的优点是简单快速。关键技术是建立指示标志空间分布模型。选定的指示标志与空间坐标之间必须有严密的函数关系。用于建模的样品应保证有足够的数量。样品代表的垂直深度应保证有较大的规模。所建立的指示标志空间分布模型必须满足一定的精确度，并且有较大的延伸性。该方法要求实地取样测量，如果上部坑道坍塌堵死，或者全部采空，无法进行实地取样与测量，就无法应用该方法进行预测。另外，深部矿体指示标志在矿脉中不是随处都有的，它的存在与否具有随机性，因而在实地取样与观测中，需要保证一定的取样密度与数量。

第3个途径是对各类典型金矿床进行详细系统的研究，建立不同类型金矿床模型。通过预测区地质特征与各类矿床模型的相似性类比来实现矿体定位预测。应用的方法是矿床模型法。应用该方法的先决条件是，首先建立一套矿床模型，作为对比的依据，通过预测对象各方面特征与矿床模型的相似性类比来确定矿体空间位置。

在实际工作中,应根据具体的矿床特征、控矿因素、资料状况、工作条件等,选择一定的途径与方法进行预测。

7.1 异常地质环境类比法

对一个矿床而言,不可能处处有矿,矿体只出现在那些有利于有用组分大量堆积的异常地质环境中。因而可把矿体定位预测看作异常地质环境的定位预测。具体作法是把研究区划分成一定形状和大小的单元,以上部控制区已知的矿化特征和地质因素为基础资料,用统计分析方法探寻各地质因素与矿体之间的关系。从中提炼与矿关系密切,并对矿与非矿具有区分能力的地质因素作控矿地质标志。根据控矿地质标志对矿体指示作用的方向和大小,建立单元含矿性评判数学模型。研究控矿地质标志的空间变化规律,用这种规律预测各控矿地质标志在深部预测区各空间部位的状态。以此为基础,用单元含矿性评判数学模型,评判深部预测区各空间部位的含矿性,对预测含矿单元作出合理的地质解释,并依此估计深部矿体有利的赋存空间。兹以山东玲珑金矿田 105 矿床和 10 号脉群为例说明之。

7.1.1 105 矿床深部矿体定位预测

105 矿床的地质特征在第六章中已经作了介绍,在此不再赘述。深部矿体定位预测主要包括以下几方面工作。

7.1.1.1 预测范围、预测单元的划分

A 确定预测范围

根据 105 矿床的矿化特征,资料条件,将预测范围控制在 15 勘探线与 16 勘探线之间,垂向 -10~270m 标高范围。水平长度 810m,垂直深度 280m。预测比例尺 1:1000。

B 研究方法和途径

采用单元评价法,以及从已知到未知类比的研究途径,应用多种数学地质方法,建立多个数学模型,对预测单元含矿性进行评判,根据评判结果确定成矿远景区段。

C 划分预测单元

因预测对象是二向延长为主的脉状体,在划分预测单元时,采用降维的方法,把矿脉厚度(或水平宽度)转化为空间变化标志,与其他地质标志一起置于延长和延深构成的二维坐标系中。为此,在空间上设置一个方位角 54°,倾向北西,倾角 75°,过 220m 标高勘探基线的平面。在该平面上,以水平间隔 10m,垂直间隔 20m 划分研究单元共 1134 个,包括 60 个已知含矿单元,58 个已知不含矿单元,1016 个预测单元。

7.1.1.2 控矿地质标志的确定、取值

A 控矿地质标志

对围岩条件属于成分和结构相对均匀的 105 矿床而言,因断裂构造对矿体具有严格的控制作用,矿体定位预测标志,实质上是一组反映断裂构造作用特征的标志组合。依据资料情况,确定出下列 27 个标志。

N_1	矿带顶板距基准面距离(m)	(实测)
N_2	矿带底板距基准面距离(m)	(实测)
N_3	岩脉距矿带顶板距离(m)	(实测)

N_4	岩脉距矿带底板距离(m)	(实测)
N_5	岩脉位于矿带内(m)	(实测)
N_6	岩脉与矿带交角指向北东(m)	(实测)
N_7	岩脉与矿带交角指向南西(m)	(实测)
N_8	岩脉与矿脉交角指向北东(m)	(实测)
N_9	岩脉与矿脉交角指向南西(m)	(实测)
N_{10}	矿带内矿脉条数	(实测)
N_{11}	矿脉累积宽度(m)	(实测)
N_{12}	矿带内裂隙条数	(实测)
N_{13}	矿带内矿脉呈单脉	(实测)
N_{14}	矿带内矿脉呈平行多脉	(实测)
N_{15}	矿带内矿脉交切呈 X 型	(实测)
N_{16}	矿带内矿脉交切呈 Y 型	(实测)
N_{17}	矿带上盘矿脉条数	(实测)
N_{18}	矿带下盘矿脉条数	(实测)
N_{19}	矿带上盘裂隙条数	(实测)
N_{20}	矿带下盘裂隙条数	(实测)
N_{21}	矿带宽度(m) $N_{21}=\lvert N_2-N_1\rvert$	
N_{22}	矿带中心线距基准面距离(m) $N_{22}=(N_1+N_2)/2$	
N_{23}	矿带走向方位角 $N_{23}=54^\circ+\arctan[(N_{22}^{i+1,j}-N_{22}^{i,j})/10]$	
N_{24}	矿带倾向倾角 $N_{24}=\arctan[(N_{22}^{i,j}-N_{22}^{i,j+1}+5.359)\cos(54^\circ-N_{23})]$	
N_{25}	单位矿带宽矿脉条数 $N_{25}=N_{10}/N_{21}$	
N_{26}	单位矿带宽矿脉宽度 $N_{26}=N_{11}/N_{21}$	
N_{27}	裂隙度 $N_{27}=N_{12}/N_{21}$	

为测量标志值,以 15、7、0、4、8、12、16 勘探线地质剖面图(1∶1000)为依据,以 120m 标高为起点,以 20m 间隔向上截取 8 个平面。以基准面在各平面上的交线为基准线,在平面图上测量和计算各标志值。标志值分两种:一种是有具体数字的值,另一种为二态变量。经测量和计算,共取得 17496 个数据。

B 控矿地质标志的筛选

(1)初步筛选。测取标志值后,对每个标志进行初步分析,把那些在各单元中数值变化不大,即对矿与非矿没有辨别能力的标志去掉。经统计,N_{13}、N_{14}、N_{15}、N_{16}变异系数分别为 0.0498、0.0498、0.0352、0.1749,因而把它们剔除掉。

(2)控矿地质标志的进一步筛选——条件概率比分析。最佳控矿地质标志必须同时具备以下两个条件:

1)该标志与矿的关系十分密切,即该标志存在时,矿体出现的概率大。

2)该标志对矿与非矿有较高的分辨能力,即该标志存在条件下的含矿概率,比该标志不出现条件下的含矿概率高。

为此,以标志状态出现条件下含矿概率 P_x,标志状态不出现条件下含矿概率 P_0,和它

们的比值 $q=P_x/P_0$ 来筛选控矿地质标志。具体作法是，抽取 60 个已知含矿单元，58 个已知不含矿单元。对于每个含有具体数据的地质标志，根据具体情况划分若干个数值区间(标志状态)，对每个数值区间分别统计：1)既无该标志状态出现，又无矿出现的频数 f_a；2)有该标志状态出现，但无矿出现的频数 f_b；3)有该标志状态出现，又有矿出现的频数 f_c；4)无该标志状态出现，但有矿出现的频数 f_d。对于具有二态变量的地质标志，可直接统计上列各种标志出现的频数。之后依下列数学模型计算 P_x、P_0、q。

$$P_x=f_c/(f_b+f_c) \tag{7-1}$$

$$P_0=f_a/(f_a+f_d) \tag{7-2}$$

$$q=P_x/P_0 \tag{7-3}$$

表 7-1 列出了 23 个地质标志各状态的 P_x、P_0、q 计算结果。根据地质认识，对标志的筛选作如下规定。

表 7-1　地质标志状态 P_x、P_0、q 计算结果　　(m)

标志	状态	P_x	P_0	q	标志	状态	P_x	P_0	q
N_1	>40	0	0.5357	0	N_{12}	2	0.5484	0.4943	1.1095
	30～40	0.7273	0.4729	1.5379		3	0.5741	0.4531	1.2669
	20～30	0.5070	0.5091	0.9960		4	0.3	0.5510	0.5444
	10～20	0.3667	0.5291	0.6930		5	0.4545	0.5140	0.8843
	-5～10	0.76	0.4894	1.5530		6	0.5	0.5086	0.9831
	-15～-5	0.5	0.5088	0.9828	N_{17}	<3	0.4576	0.5254	0.871
	<-15	0	0.5357	0		3～4	0.4571	0.4731	0.9662
N_2	>60	0.1667	0.5204	0.3203		5～6	0.8462	0.4667	1.8132
	50～60	0.9048	0.4698	1.9260		>6	0.5	0.5091	0.9821
	40～50	0.5125	0.5064	1.0120	N_{18}	0	0.5	0.5192	0.963
	30～40	0.3	0.5278	0.5684		1～2	0.5192	0.5	1.0385
	20～30	0.9412	0.9749	1.9819	N_{19}	<7	0.4886	0.515	0.9487
	<20	0.25	0.5207	0.4801		7～10	0.3	0.5177	0.5795
N_3	>40	0.383	0.516	0.7421		>10	0.7222	0.4908	1.4714
	30～40	0.5	0.5098	0.9808	N_{20}	0	0.569	0.45	1.2644
	20～30	0.6042	0.4429	1.3642		1～2	0.5	0.5156	0.9697
	<20	0.5	0.5098	0.9806		>2	0	0.5357	0
N_4	>140	0.5268	0.1667	3.1607	N_{21}	>27	0.1724	0.5556	0.3103
	<140	0.1667	0.5268	0.3164		24～27	0.7719	0.4579	1.6858
N_5		0.2927	0.6234	0.4695		21～24	0.4776	0.5157	0.9262
N_6		0	0.5128	0		18～21	0.7143	0.4754	1.5025
N_7		0.6364	0.4953	1.2847		<18	0.1961	0.5327	0.3681
N_8		0.4074	0.5385	0.7566	N_{22}	>50	0.0909	0.5289	0.1719
N_9		0.3793	0.5506	0.6890		40～50	0.7931	0.4686	1.6925
N_{10}	2	0.44	0.5588	0.7874		30～40	0.5125	0.5064	1.012
	3	0.5932	0.4237	1.4		20～30	0.3448	0.5314	0.6489
	4	0.3333	0.5229	0.6374		5～20	0.8261	0.4864	1.6984
N_{11}	>12	0.1818	0.519	0.3504		<5	0.1818	0.5244	0.3467
	10～12	0.7045	0.4635	1.5199	N_{23}	>54°	0.35	0.5287	0.6620
	7～10	0.4722	0.5244	0.9005		52°～54°	0.7273	0.4860	1.4962
	6～7	0.8571	0.4865	1.7619		48°～52°	0.5294	0.5068	1.0445
	<6	0	0.5357	0		42°～48°	0.4762	0.5128	0.9286

续表 7-1

标志	状态	P_x	P_0	q	标志	状态	P_x	P_0	q
N_{23}	40°～42°	0.7143	0.4808	1.4857	N_{26}	>0.58	0.4	0.5158	0.7754
	38°～40°	0.5714	0.5	1.1429		0.56～0.58	0.7273	0.4583	1.5868
	36°～38°	0.6667	0.4742	1.4058		0.5～0.56	0.5246	0.5051	1.0385
	<36°	0.3	0.5177	0.5790		0.44～0.5	0.4655	0.5169	0.9006
N_{24}	>78°	0.4262	0.5207	0.8186		0.42～0.44	0.6875	0.4804	1.4311
	74°～78°	0.5122	0.5294	0.9675		<0.42	0.4471	0.5111	0.8747
	70°～74°	0.4419	0.5706	0.7743	N_{27}	>0.16	0.3692	0.5398	0.684
	<70°	0.8462	0.4888	1.7311		0.12～0.16	0.6316	0.45	1.4035
N_{25}	>0.14	0.3488	0.4183	0.8339		0.08～0.12	0.25	0.5175	0.4831
	0.1～0.14	0.6344	0.4266	1.4872		<0.08	0.125	0.5464	0.2331
	<0.1	0.2143	0.5206	0.4116					

1)当地质标志或地质标志中的某些状态 $P_x>0.55$,并且 $q>1.35$ 时,为最佳控矿地质标志,予以保留。

2)不具备上列条件的剔除。

根据上列规定共确定出 14 个最佳控矿地质标志:

N_1 矿带顶板距基准面距离/m

30～40	$P_x=0.7273$	$P_0=0.4729$	$q=1.5379$
-5～10	$P_x=0.76$	$P_0=0.4894$	$q=1.5530$
其他	$P_x=0.4215$	$P_0=0.5213$	$q=0.8086$

N_2 矿带底板距基准面距离/m

50～60	$P_x=0.9048$	$P_0=0.4698$	$q=1.9260$
20～30	$P_x=0.9412$	$P_0=0.4749$	$q=1.9819$
其他	$P_x=0.4141$	$P_0=0.5199$	$q=0.7965$

N_3 岩脉距矿带顶板距离/m

20～30	$P_x=0.6042$	$P_0=0.4429$	$q=1.3642$
其他	$P_x=0.4304$	$P_0=0.5148$	$q=0.8361$

N_{10} 矿带内矿脉条数

3 条以上	$P_x=0.5932$	$P_0=0.4237$	$q=1.4$
其他	$P_x=0.4237$	$P_0=0.5367$	$q=0.7895$

N_{11} 矿脉累积宽度/m

11～12	$P_x=0.7045$	$P_0=0.4635$	$q=1.5199$
6～7	$P_x=0.8571$	$P_0=0.4865$	$q=1.7619$
其他	$P_x=0.424$	$P_0=0.5235$	$q=0.8099$

N_{17} 矿带上盘矿脉条数

5～6	$P_x=0.8462$	$P_0=0.4667$	$q=1.8132$
其他	$P_x=0.4608$	$P_0=0.5079$	$q=0.9072$

N_{19} 矿带上盘裂隙条数

≥10	$P_x=0.7222$	$P_0=0.4908$	$q=1.4714$
<10	$P_x=0.4694$	$P_0=0.648$	$q=0.7244$

N_{21} 矿带宽度/m

	24～27	$P_x=0.7719$	$P_0=0.4579$	$q=1.6858$
	18～21	$P_x=0.7143$	$P_0=0.4754$	$q=1.5025$
	其他	$P_x=0.3197$	$P_0-0.5326$	$q=0.6003$
N_{22}	矿带中心线距基准面距离/m			
	40～50	$P_x=0.7931$	$P_0=0.4686$	$q=1.6925$
	5～20	$P_x=0.8261$	$P_0=0.4864$	$q=1.6984$
	其他	$P_x=0.4122$	$P_0=0.5240$	$q=0.7867$
N_{23}	矿带走向方位角			
	52°～54°	$P_x=0.7273$	$P_0=0.4860$	$q=1.4962$
	40°～42°	$P_x=0.7143$	$P_0=0.4808$	$q=1.4857$
	36°～38°	$P_x=0.6667$	$P_0=0.4742$	$q=1.4058$
	其他	$P_x=0.4339$	$P_0=0.5157$	$q=0.8512$
N_{24}	矿带倾向倾角			
	≤70°	$P_x=0.8462$	$P_0=0.4668$	$q=1.7311$
	>70°	$P_x=0.4552$	$P_0=0.5342$	$q=0.8521$
N_{25}	单位矿带宽矿脉条数			
	>0.1～0.14	$P_x=0.6344$	$P_0=0.4266$	$q=1.4872$
	其他	$P_x=0.3158$	$P_0=0.4772$	$q=1.6618$
N_{26}	单位矿带宽矿脉宽度/m			
	0.56～0.58	$P_x=0.7273$	$P_0=0.4583$	$q=1.5868$
	0.42～0.46	$P_x=0.6875$	$P_0=0.4804$	$q=1.4311$
	其他	$P_x=0.4658$	$P_0=0.5120$	$q=0.9098$
N_{27}	裂隙度			
	0.12～0.16	$P_x=0.6316$	$P_0=0.45$	$q=1.4035$
	其他	$P_x=0.3333$	$P_0=0.511$	$q=0.6276$

矿带顶板距基准面距离(N_1)、矿带底板距基准面距离(N_2)、矿带中心线距基准面距离(N_{22})等表征控矿断裂构造波状结构面空间分布特征。为此,以标志值为原始数据进行趋势面分析。该方法具有分解区域规律性变化、局部规律性变化、随机性变化三者的功能。考虑到该区三个主要矿化阶段受3组断裂构造活动联合控制。故用3次趋势面表征成矿期波状断面在空间上的分布规律。从图7-1不难看出,3种标志中,与矿最密切的标志状态,即N_1的-5～10m和30～40m;N_2的50～60m和20～30m;N_{22}的40～50m和5～20m,基本上重叠于相同的空间上,即位于波状构造结构面的波峰和峰一谷过渡带的转折部位。这里恰是裂隙变化最大,容易产生虚脱空间的部位,对矿体的生成十分有利。表明以上3种标志对矿与非矿有很好的指示作用。

矿带内矿脉条数(N_{10})、矿带上盘矿脉条数(N_{17})、矿带上盘裂隙条数(N_{19})反映矿脉所处环境断裂构造裂隙的发育程度。环境的构造裂隙越发育,对成矿愈有利。上列3种标志中与矿最密切的状态,即N_{10}的3条以上,N_{17}的5条以上,N_{19}的10条以上等均说明了这种规律。因而这3种标志对成矿有较好的指示作用。

矿脉累积宽度(N_{11})和矿带宽度(N_{21})表征第1期矿化规模的大小。用数学方法筛选出来的与矿最密切的标志状态N_{11}的10～12m和6～7m,N_{21}的24～27m和18～21m,既不是最大值,也不是极小值。进一步统计分析对比发现,上列与矿最密切的标

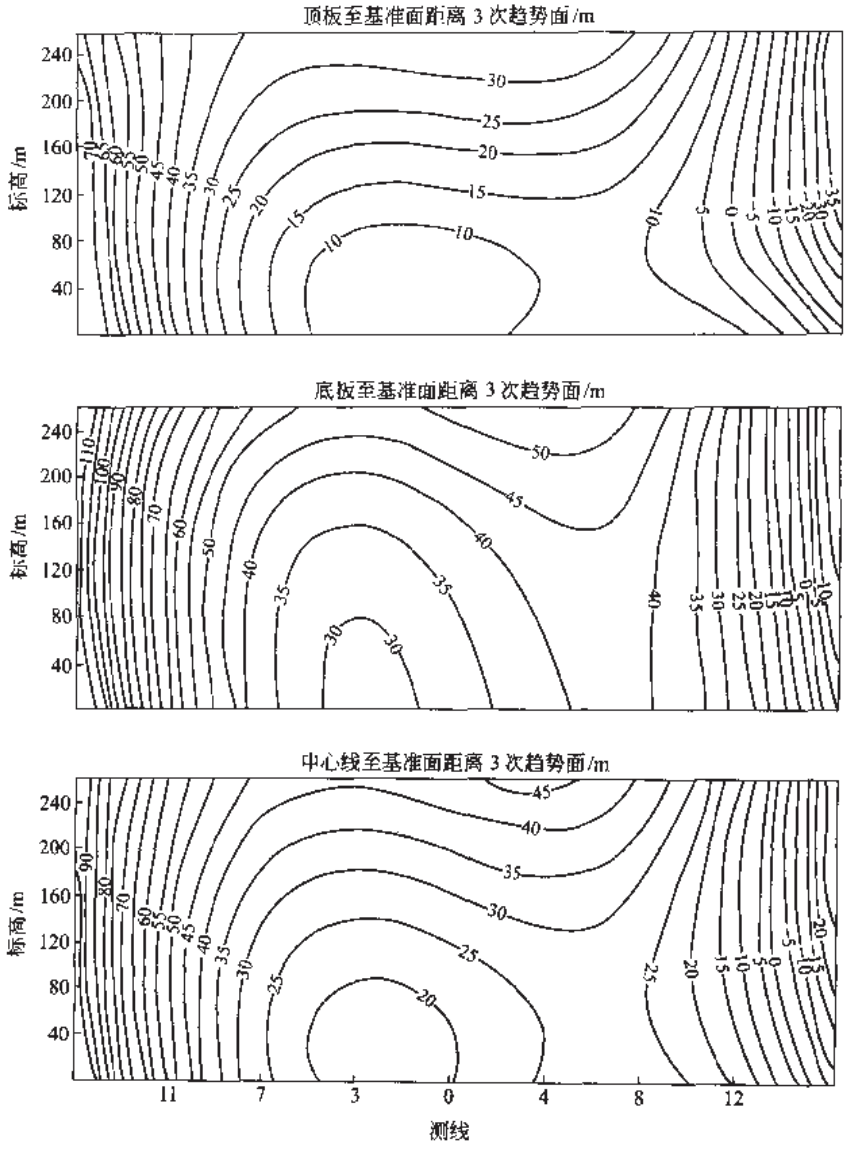


图 7-1　105 矿床空间变化标志趋势面分析结果图

志状态，主要分布在构造结构面的波峰和峰—谷过渡带上。前已述及，第 1 期矿化不能富集成工业意义的金矿石，其规模大小对矿的控制作用不明显。因而这两种标志只是间接地反映了构造结构面对矿的控制作用。

岩脉距矿带顶板距离(N_3)表征岩脉对成矿的控制作用。该标志与矿最密切的状态是 20～30m。这种状态大部分分布于构造结构面的波峰和峰—谷过渡带上。表明矿带上盘岩脉与有利构造结构面同时存在时，对成矿有利。

矿带走向方位角(N_{23})和倾向倾角(N_{24})表征断裂构造产状对成矿的控制作用。标志中与矿最密切的状态，即 N_{23}的 52°～54°，40°～42°，36°～38°；N_{24}的≤70°，与构造结构面的峰—谷过渡带空间位置相对应，并且这些数值区间的变化梯度也是最大的。表明该状态下的断裂构造裂隙对成矿十分有利。

单位矿带宽矿脉条数(N_{25})，单位矿带宽矿脉宽度(N_{26})，裂隙度(N_{27})等反映的也是构

造对成矿的控制作用。标志中与矿最密切的状态是 N_{25}的 0.1～0.14，N_{26}的 0.56～0.58 和 0.42～0.44；N_{27}的 0.12～0.16。表明，在成矿环境断裂裂隙十分发育的前提下，富集成矿体的最有利部位并不是裂隙最发育的空间，对这种现象的令人能够接受的解释可能是裂隙过多会导致矿化的分散，在总体矿化强度不大的条件下，反而不能形成工业矿石。

7.1.1.3 建立单元含矿性评判数学模型

为进一步开展预测，对各预测单元的标志值做如下变换：

Ⅰ型变量

(1)当标志状态的 $P_x \geqslant 0.55$，$q \geqslant 1.35$ 时，变换为 $(\lg P_{xi} + 0.2937)q(xi)/\max\{q(xi)\}$。该数值既表征标志状态出现条件下的含矿概率，又表征标志状态出现和不出现对指示含矿的影响。

(2)当标志状态的 $P_x < 0.55$，或 $q < 1.35$ 时变换为 0。

Ⅱ型变量

(1)当标志状态的 $P_x \geqslant 0.55$，$q \geqslant 1.35$ 时，变换为 1。

(2)标志状态的 $P_x < 0.55$，或 $q < 1.35$ 时，变换为 0。

建立数学模型时，首先将已知含矿单元和已知不含矿单元分成两类。一类为模型单元，包括 30 个已知含矿单元和 29 个已知不含矿单元，用以建立各种评判数学模型。另一类为检验单元，也包括 30 个已知含矿单元和 29 个已知不含矿单元。用以检验所建立数学模型的实用性、精确度和误差。

A 逐步回归分析

逐步回归分析是建立回归模型过程中，在已有标志基础上，进一步筛选重要标志并模拟回归模型的统计分析方法。其基本途径是采用“有进有出”的标志选入方法，同时也考虑较早进入方程式的某些标志，如果其“重要性”随后一些变量的进入而降低到检验临界值以下时，把该标志从方程式中剔除掉。最终的回归方程式仅保留最重要的几个标志。

进行时，因变量的取值规则是：已知含矿单元赋值为 1，已知不含矿单元赋值为 0。自变量选用相应标志的Ⅰ型变量，样本大小为 59，自变量数为 14。引入自变量的检验临界值和剔除自变量的检验临界值均为 2.5。计算由电子计算机完成。经 6 步回归，筛选出 5 个最重要的标志，它们是：矿带顶板距基准面距离 N_1，矿带宽度 N_{21}，矿带走向方位角 N_{23}，矿带内矿脉条数 N_{10}，矿带上盘裂隙条数 N_{19}。它们组成下列回归模型：

$$Y = -0.1014 + 3.6927N_1 + 2.8818N_{21} + 1.8103N_{23} + 4.1069N_{10} + 3.7730N_{19} \quad (7\text{-}4)$$

$$F = 11.7917$$

当信度 $\alpha = 0.05$，第 1 自由度为 5，第 2 自由度为 53 时，检验临界值 $F_\alpha = 5.39$。差异极为显著。表明该模型对矿与非矿有很高的分辨能力，用该模型计算每个模型单元的回归值，计算结果列于表 7-2。分别计算已知含矿单元和已知不含矿单元回归值的平均数、均方差，得：

$\overline{Y}$(含矿) = 0.7673；$S = 0.2641$

$\overline{Y}$(不含矿) = 0.2407；$S = 0.2431$

检验临界值 $Y_c = (0.7673 \times 30 + 0.2407 \times 29)/59 = 0.5085$。当 $Y > 0.5085$ 时，评为含矿单元，否则为不含矿单元。

用式(7-4)计算各检验单元的回归值，结果列于表 7-3。30 个已知含矿单元中，有 23 个判为含矿单元，7 个判作不含矿单元。29 个已知不含矿单元中，有 23 个判为不含矿单元，6 个判作含

矿单元,判作含矿单元的含矿概率理论值79.31%,丢矿风险系数0.2333,判错率22.03%。

表 7-2　模型单元回归值计算结果

单元号	Y		单元号	Y		单元号	Y		单元号	Y	
	已知	回归值		已知	回归值		已知	回归值		已知	回归值
15	1	0.8575	371	1	0.4368	162	0	0.1014	363	0	0.0855
51	1	0.8472	373	1	0.4368	169	0	0.1014	366	0	0.4368
55	1	0.6428	377	1	0.2899	172	0	0.4172	374	0	0.4368
102	1	0.6428	389	1	0.7008	176	0	0.4843	379	0	0.4587
177	1	0.8365	384	1	0.8877	184	0	0 2915	399	0	0.4581
179	1	0.8356	386	1	0.8877	188	0	0.1030	405	0	-0.1014
200	1	0.2915	388	1	1.0805	191	0	-0 1014	456	0	0.0587
209	1	0.8297	391	1	0.8212	193	0	-0.1014	527	0	0.3468
211	1	0.8297	393	1	0.9766	204	0	0.2915	547	0	0.4581
213	1	1.0140	395	1	0.9766	207	0	0.2915	553	0	0.0855
215	1	1.0340	507	1	0.0855	210	0	0.2499	567	0	-0.1014
217	1	0.8297	556	1	1.1635	220	0	0.5145	618	0	0.4587
222	1	0.5145	568	1	1.1635	226	0	0.7073	669	0	0.2499
225	1	0.7073	560	1	0.6040	229	0	0.2308	709	0	0.0855
232	1	0.7983	719	1	0.9766	243	0	-0.1014			

表 7-3　检验单元回归值及含矿性评判结果

单元号	回归值	含矿性		单元号	回归值	含矿性		单元号	回归值	含矿性	
		已知	评判			已知	评判			已知	评判
21	0.6428	含矿	含矿	387	1.0805	含矿	含矿	219	0.3276	不含	不含
54	0.6428	含矿	含矿	389	1.0805	含矿	含矿	224	0.7073	不含	含矿
61	0.4427	含矿	不含	392	0.9766	含矿	含矿	228	0.2308	不含	不含
132	0.8472	含矿	含矿	394	0.9766	含矿	含矿	234	0.9962	不含	含矿
178	0.8356	含矿	含矿	396	0.9766	含矿	含矿	262	0.0855	不含	不含
189	0.1030	含矿	不含	555	1.1635	含矿	含矿	364	0.0855	不含	不含
203	0.2915	含矿	不含	557	1.1635	含矿	含矿	367	0.4368	不含	不含
210	0.8297	含矿	含矿	559	0.6040	含矿	含矿	378	0.6630	不含	含矿
212	1.0340	含矿	含矿	638	0.9766	含矿	含矿	382	0.8877	不含	含矿
214	1.0340	含矿	含矿	799	0.6508	含矿	含矿	398	0.0440	不含	不含
216	0.8297	含矿	含矿	168	-0.1014	不含	不含	446	0.4368	不含	不含
221	0.0855	含矿	不含	171	0.0440	不含	不含	486	-0.1014	不含	不含
223	0.5145	含矿	含矿	174	0.4172	不含	不含	537	0.2718	不含	不含
227	0.5145	含矿	含矿	183	0.2915	不含	不含	552	0.8377	不含	含矿
370	0.2499	含矿	不含	185	0.2915	不含	不含	561	0.6040	不含	含矿
372	0.4368	含矿	不含	190	0.1030	不含	不含	608	-0.1014	不含	不含
375	0.0855	含矿	不含	192	-0.1014	不含	不含	628	-0.1014	不含	不含
380	0.8877	含矿	含矿	197	0.2915	不含	不含	699	0.0855	不含	不含
383	0.8877	含矿	含矿	206	0.2915	不含	不含	750	0.2499	不含	不含
385	0.8877	含矿	含矿	208	0.2915	不含	不含				

B 逐步判别分析

在判别模型模拟过程中，如果自变量很多，会使计算量很大，而且判别方程组阶数太高时，会引起方程解的精确度下降，甚至会因某些标志的不独立而引起计算上的困难。此外，当指示分类比较模糊的一些标志进入判别模型时，会产生干扰而影响判别效果。逐步判别分析就是在模拟判别方程式过程中，对变量逐个进行筛选，最终确定出对分类有明显指示作用的一组变量来建立判别方程式。和逐步回归分析的思路相似，逐步判别分析也采用"有进有出"的算法，通过逐步检验，最终确定出最重要的一组标志来构成判别方程式。这次建立的是贝叶斯准则下的判别模型：

$$f(L \mid Y) = \frac{q_L p_L(Y_1, Y_2, \cdots, Y_p)}{\sum_{j=1}^{m} q_j p_j(Y_1, Y_2, \cdots, Y_p)} \tag{7-5}$$

式中，$P_L(Y_1, Y_2, \cdots, Y_p)$为样品 Y 在第 L 组的概率密度；q_L 为第 L 组的先验概率，其估计值为 N_L/N。进行时，把模型单元中的 30 个已知含矿单元看作 A 组，29 个已知不含矿单元看作 B 组，每个单元包含 14 个标志的Ⅰ型变量。引入变量检验临界值和剔除变量临界值均为 2.5。计算由电子计算机完成。经 6 步，筛选出与逐步回归分析相同的 5 个重要标志。它们组成下列判别模型：

$$\begin{cases} Y(A) = -6.0558 + 5.0532N_1 + 36.9062N_{21} + 21.8794N_{23} + 84.5869N_{10} + 45.1368N_{19} \\ Y(B) = -1.1123 + 20.3791N_1 + 13.3747N_{21} + 7.0974N_{23} + 51.0511N_{10} + 14.3280N_{19} \end{cases} \tag{7-6}$$

$$F_1 = F_2 = 11.7917$$

当信度 $\alpha = 0.05$，第 1 自由度为 5，第 2 自由度为 53 时，检验临界值 $F_\alpha = 5.39$，差异极为显著。表明该模型对矿与非矿有很高的分辨能力。用式(7-6)计算每个检验单元的含矿概率，并以"取大"原则评判每个单元的含矿性，结果列于表 7-4。30 个已知含矿单元中，有 23 个判为含矿单元，7 个判作不含矿单元。29 个已知不含矿单元中，有 23 个判为不含矿单元，6 个判作含矿单元。被评为含矿单元的含矿概率理论值为 79.31%，丢矿风险系数为0.2333，判错率为 22.03%。

表 7-4 检验单元判别函数值及含矿性判别结果

单元号	后验概率	含矿性		单元号	后验概率	含矿性		单元号	后验概率	含矿性	
		判别	已知			判别	已知			判别	已知
21	0.7564	含矿	含矿	210	0.9346	含矿	含矿	370	0.8894	不含	含矿
54	0.7564	含矿	含矿	212	0.9870	含矿	含矿	372	0.6339	不含	含矿
61	0.6226	不含	含矿	214	0.9870	含矿	含矿	375	0.9383	不含	含矿
132	0.9428	含矿	含矿	216	0.9346	含矿	含矿	380	0.9582	含矿	含矿
178	0.9375	含矿	含矿	221	0.9683	不含	含矿	383	0.9582	含矿	含矿
189	0.9635	不含	含矿	223	0.5213	含矿	含矿	385	0.9582	含矿	含矿
203	0.8501	不含	含矿	227	0.5213	含矿	含矿	387	0.9910	含矿	含矿

续表 7-4

单元号	后验概率	含矿性		单元号	后验概率	含矿性		单元号	后验概率	含矿性	
		判别	已知			判别	已知			判别	已知
389	0.9910	含矿	含矿	185	0.8501	不含	不含	378	0.7856	含矿	不含
392	0.9793	含矿	含矿	190	0.9635	不含	不含	382	0.9582	含矿	不含
394	0.9793	含矿	含矿	192	0.9929	不含	不含	398	0 9772	不含	不含
396	0.9793	含矿	含矿	197	0.8501	不含	不含	446	0.6339	不含	不含
555	0.9954	含矿	含矿	206	0.8501	不含	不含	486	0.9929	不含	不含
557	0.9954	含矿	含矿	208	0.8501	不含	不含	537	0.8694	不含	不含
559	0.6935	含矿	含矿	219	0.8095	不含	不含	552	0.9385	含矿	不含
638	0.9793	含矿	含矿	224	0.8402	含矿	不含	561	0.6935	含矿	不含
799	0.7683	含矿	含矿	228	0.9030	不含	不含	608	0.9929	不含	不含
168	0.9929	不含	不含	234	0.9823	含矿	不含	629	0.9929	不含	不含
171	0.9772	不含	不含	262	0.9683	不含	不含	699	0.9683	不含	不含
174	0.6702	不含	不含	364	0.9683	不含	不含	750	0.8884	不含	不含
183	0.8501	不含	不含	367	0.6339	不含	不含				

C 费歇准则下的二组判别分析

该方法是在已知分类的前提下，判别未知样品所属类型的一种多元统计分析方法。费歇准则是一种满足两组间“最大”分离的原则。即通过对已知两组样品的数学处理，找出一个分界面来，使两组之间区别最大，两组内部离散性最小。线性判别模型为：

$$\hat{Y} = C_1 x_1 + C_2 x_2 + \cdots + C_p x_p \tag{7-7}$$

不难看出，判别模型的建立是通过求解判别系数来实现的。进行时，以模型单元中的已知含矿单元为 A 类，已知不含矿单元为 B 类，以逐步回归分析确定的 5 个标志为变量，用Ⅰ型变量计算。得下列判别方程式：

$$Y = 0.5290N_1 + 0.4128N_{21} + 0.2593N_{23} + 0.5883N_{10} + 0.5405N_{19} \tag{7-8}$$

$$Y_c = 0.0926$$

$$F = 11.7917$$

当信度 $\alpha = 0.05$，第 1 自由度为 5，第 2 自由度为 53 时，检验临界值 $F_\alpha = 2.39$，差异极显著。表明该模型对矿与非矿有较高的区分能力。因此，用式(7-8)计算每个检验单元的判别函数值，用判别临界值评判它们的含矿性。结果列于表 7-5。在 30 个已知含矿单元中，评为含矿单元的 21 个，判作不含矿单元的 9 个。29 个已知不含矿单元中，评为不含矿单元的 23 个，判作含矿单元的 6 个。被评为含矿单元的含矿概率理论值 77.78%，丢矿风险系数 0.3，判错率 25.42%。

表 7-5　检验单元二组判别函数值及含矿性评判结果

单元号	Y	含矿性		单元号	Y	含矿性		单元号	Y	含矿性	
		判别	已知			判别	已知			判别	已知
21	0.1066	含矿	含矿	389	0.1693	含矿	含矿	224	0.1158	含矿	不含
54	0.1066	含矿	含矿	392	0.1544	含矿	含矿	228	0.0476	不含	不含
61	0.0779	不含	含矿	394	0.1544	含矿	含矿	234	0.1572	含矿	不含
132	0.1359	含矿	含矿	396	0.1544	含矿	含矿	262	0.0268	不含	不含
178	0.1342	含矿	含矿	555	0.1812	含矿	含矿	364	0.0268	不含	不含
189	0.0293	不含	含矿	557	0.1812	含矿	含矿	367	0.0771	不含	不含
203	0.0563	不含	含矿	559	0.1011	含矿	含矿	378	0.1095	含矿	不含
210	0.1334	含矿	含矿	638	0.1544	含矿	含矿	382	0.1417	含矿	不含
212	0.1627	含矿	含矿	799	0.1078	含矿	含矿	398	0.0206	不含	不含
214	0.1627	含矿	含矿	168	0.0000	不含	不含	446	0.0771	含矿	不含
216	0.1334	含矿	含矿	171	0.0208	不含	不含	486	0.0000	不含	不含
221	0.0268	不含	含矿	174	0.0743	不含	不含	537	0.0535	不含	不含
223	0.0882	不含	含矿	183	0.0563	不含	不含	552	0.1345	含矿	不含
370	0.0503	不含	含矿	185	0.0563	不含	不含	561	0.1011	含矿	不含
372	0.0771	不含	含矿	190	0.0293	不含	不含	608	0.0000	不含	不含
375	0.0268	不含	含矿	192	0.0000	不含	不含	628	0.0000	不含	不含
380	0.1417	含矿	含矿	197	0.0563	不含	不含	699	0.0268	不含	不含
383	0.1417	含矿	含矿	206	0.0563	不含	不含	750	0.0503	不含	不含
385	0.1417	含矿	含矿	208	0.0563	不含	不含				
387	0.1693	含矿	含矿	219	0.0615	不含	不含				

D　欧氏距离分析法

一定的矿产资源，产生在一定的地质环境中，一定类型矿床必然有一组控矿地质标志与之伴生，控矿地质标志在含矿地区和不含矿地区往往表现为截然不同的状态。反映在数学特征上，含矿地区或不含矿地区内部，数学特征值十分接近，含矿地区与不含矿地区之间，数学特征值差异十分明显。为此，可以利用上述规律对单元含矿性进行预测。

欧氏距离分析法把 P 个互相独立的控矿地质标志看作直角坐标系的 P 个坐标轴。把含矿地区的 m 个抽样和不含矿地区 n 个抽样看作 P 维空间上 $m+n$ 个向量。因矿化强度不同，含矿地区抽样和不含矿地区抽样在坐标系中必然会各自构成不同的分布域。如果以欧氏距离

$$d_{ij}=\sqrt{\sum_{k=1}^{P}(x_{ki}-x_{kj})^2} \tag{7-9}$$

为统计量表征各个抽样之间的关系，域内各样品之间的欧氏距离必然会大大小于不同域之间样品的欧氏距离。欧氏距离分析法就是依下列模型计算待测单元与已知含矿单元集合之间的欧氏距离，以及待测单元与已知非矿单元集合之间的欧氏距离，按照一定的规则来确定

单元含矿性的。

$$\begin{cases} D_A = \dfrac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\sqrt{\sum_{i=1}^{P}(x_i - a_{ij})^2} \\ D_B = \dfrac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\sqrt{\sum_{i=1}^{P}(x_i - b_{ij})^2} \end{cases} \tag{7-10}$$

式中，D_A 为待测单元与已知含矿单元集合的欧氏距离；D_B 为待测单元与已知不含矿单元集合的欧氏距离；m 为已知含矿单元的样本大小；n 为已知不含矿单元的样本大小；P 为控矿地质标志数；x_i 为待测单元 i 标志值；a_{ij} 为已知含矿单元集合中 j 单元的 i 标志数据；b_{ij} 为已知不含矿单元集合中 j 单元的 i 标志数据。

对 105 矿床单元含矿性评判时，将模型单元中已知含矿单元作为含矿地区抽样，构成含矿单元集合 A。将已知不含矿单元作为不含矿地区抽样，构成不含矿单元集合 B。采用逐步回归分析确定的 5 个最佳控矿地质标志，数据为 1 型变量。欧氏距离评判模型为：

$$\begin{cases} D_A = \dfrac{1}{30}\sum_{j=1}^{30}\sqrt{\sum_{i=1}^{P}(x_i - a_{ij})^2} \\ D_B = \dfrac{1}{29}\sum_{j=1}^{29}\sqrt{\sum_{i=1}^{P}(x_i - b_{ij})^2} \end{cases} \tag{7-11}$$

首先计算每个模型单元相对于含矿单元集合 A，相对于不含矿单元集合 B 的欧氏距离。进一步计算已知含矿单元相对于含矿单元集合欧氏距离的平均数 $\overline{D}_{AA}$、均方差 S_{AA} 及平均数加 2 倍均方差；已知含矿单元相对于不含矿单元集合欧氏距离的平均数 $\overline{D}_{AB}$ 均方差 S_{AB} 及平均数减 2 倍均方差；已知不含矿单元与含矿单元集合欧氏距离的平均数 $\overline{D}_{BA}$、均方差 S_{BA} 及平均数与 2 倍均方差之差；已知不含矿单元与不含矿单元集合欧氏距离的平均数 $\overline{D}_{BB}$、均方差 S_{BB} 及平均数与 2 倍均方差之和。计算结果如下：

$\overline{D}_{AA}=0.1365$；　$S_{AA}=0.0258$；　$\overline{D}_{AA}+2S_{AA}=0.1881$；
$\overline{D}_{BB}=0.1159$；　$S_{BB}=0.0230$；　$\overline{D}_{BB}+2S_{BB}=0.1619$；
$\overline{D}_{AB}=0.1611$；　$S_{AB}=0.0262$；　$\overline{D}_{AB}-2S_{AB}=0.1087$；
$\overline{D}_{BA}=0.1282$；　$S_{BA}=0.0164$；　$\overline{D}_{BA}-2S_{BA}=0.0954$。

参考上列计算结果，对单元含矿性评判规则确定于下：

(1)当预测单元与集合 A 的欧氏距离小于 0.1881，并且与集合 B 欧氏距离大于 0.1619 时，评为含矿单元。

(2)若预测单元与集合 A 欧氏距离大于 0.1881，同时与集合 B 欧氏距离大于 0.1619 时，判作含矿性不明单元。

(3)其他情况判作不含矿单元，分别计算每个检验单元与集合 A、集合 B 的欧氏距离，用上列评判规则判定它们的含矿性，结果列于表 7-6。30 个已知含矿单元中，评为含矿单元的有 16 个，判作不含矿单元的 14 个。29 个已知不含矿单元中，评为不含矿单元的有 24 个，含矿性不明的 1 个，含矿单元 4 个，判作含矿单元的含矿概率理论值 80%，丢风险系数 0.4667，判错率 31.03%。

表 7-6　检验单元欧氏距离分析结果

单元号	欧氏距离		含矿性		单元号	欧氏距离		含矿性		单元号	欧氏距离		含矿性	
	对 A	对 B	评判	已知		对 A	对 B	评判	已知		对 A	对 B	评判	已知
21	0.1158	0.1476	不含	含矿	387	0.1668	0.1903	含矿	含矿	219	0.1921	0.1463	不含	不含
54	0.1158	0.1476	不含	含矿	389	0.1668	0.1903	含矿	含矿	224	0.1913	0.1698	不明	不含
61	0.1452	0.1514	不含	含矿	392	0.1189	0.1908	含矿	含矿	228	0.1665	0.1184	不含	不含
132	0.1149	0.1763	含矿	含矿	394	0.1189	0.1908	含矿	含矿	234	0.1313	0.1775	含矿	不含
178	0.1118	0.1730	含矿	含矿	396	0.1189	0.1908	含矿	含矿	262	0.1702	0.0960	不含	不含
189	0.1769	0.1368	不含	含矿	555	0.1200	0.1919	含矿	含矿	364	0.1702	0.1960	含矿	不含
203	0.1565	0.1199	不含	含矿	557	0.1200	0.1919	含矿	含矿	367	0.1382	0.1127	不含	不含
210	0.1139	0.1487	不含	含矿	559	0.1360	0.1416	不含	含矿	378	0.1468	0.1603	不含	不含
212	0.1159	0.1775	含矿	含矿	638	0.1189	0.1908	含矿	含矿	382	0.1614	0.1676	含矿	不含
214	0.1159	0.1775	含矿	含矿	799	0.1699	0.1799	含矿	含矿	398	0.1687	0.1172	不含	不含
216	0.1139	0.1487	不含	不含	168	0.1730	0.0896	不含	不含	446	0.1382	0.1127	不含	不含
221	0.1702	0.0960	不含	含矿	171	0.1687	0.1172	不含	不含	486	0.1730	0.0896	不含	不含
223	0.1892	0.1462	不含	含矿	174	0.1389	0.1401	不含	不含	537	0.1436	0.1209	不含	不含
227	0.1892	0.1462	不含	含矿	183	0.1565	0.1199	不含	不含	552	0.1686	0.1821	含矿	不含
370	0.1424	0.1159	不含	含矿	185	0.1565	0.1199	不含	不含	561	0.1360	0.1416	不含	不含
372	0.1382	0.1127	不含	含矿	190	0.1769	0.1368	不含	不含	608	0.1730	0.0896	不含	不含
375	0.1702	0.0960	不含	含矿	192	0.1730	0.0896	不含	不含	628	0.1730	0.0896	不含	不含
380	0.1614	0.1676	含矿	含矿	197	0.1565	0.1199	不含	不含	699	0.1702	0.0960	不含	不含
383	0.1614	0.1676	含矿	含矿	206	0.1565	0.1199	不含	不含	750	0.1424	0.1159	不含	不含
385	0.1614	0.1676	含矿	含矿	208	0.1565	0.1199	不含	不含					

E　特征分析法

特征分析又称决策模拟，是 1981 年联合国教科文组织在北京矿产资源评价讨论会上推荐的一种评价方法。该方法根据控矿地质标志及其与矿床的关系，计算两者的关联度，用以表征地质标志与矿床之间的密切程度。用单元所含各个地质标志的关联度和，表征单元的含矿性。根据关联度和的大小，对单元含矿性作出评价。进行时，以模型单元中的已知含矿单元为样本，以逐步回归分析确定的 5 个标志所含 9 种状态为变量，各状态的数值取Ⅱ型变量。按平方和法计算各变量的关联度，计算结果列于表 7-7。关联度和的数学模型为：

表 7-7　各标志状态的关联度

顺序号	标　志	状　态	向量长度	关联度
1	N_1	40～30m	36.9730	0.1195
2		10～－5m	25.8070	0.0834
3	N_{21}	27～24m	44.7996	0.1448
4		21～18m	41.5331	0.1341
5	N_{23}	54°～52°	15.1658	0.0490
6		42°～40°	18.4632	0.0598
7		38°～36°	30.6757	0.0992
8	N_{10}	3 条	69.1086	0.2234
9	N_{19}	11～14 条	26.7582	0.0865

$$Y = 0.1195X_1 + 0.0834X_2 + 0.1448X_3 + 0.1341X_4 + 0.0490X_5 + 0.0598X_6 + 0.0992X_7 + 0.2234X_8 + 0.0865X_9 \quad (7\text{-}12)$$

式中的 X_i 为表 7-7 中按顺序排列的标志状态值。

用式(7-12)计算各模型单元的关联度和。分别计算其中已知含矿单元、已知不含矿单元关联度和的平均数，得 $\overline{Y}$(含矿)=0.3699，$\overline{Y}$(不含矿)=0.1764。进一步计算单元含矿性评判临界值 $Y_c=0.2748$。若单元关联度和大于 0.2748，评为含矿单元，否则判作不含矿单元。

用式(7-12)计算每个检验单元的关联度和，用评判临界值评判它们的含矿性，结果列于表 7-8。在 30 个已知含矿单元中，21 个评为含矿单元，9 个判作不含矿单元。29 个已知不含矿单元中，20 个评为不含矿单元，9 个判作含矿单元。评为含矿单元的含矿概率理论值 70%，丢矿风险系数 0.3，判错率 30.51%。

表 7-8　检验单元关联度和及含矿性评判结果

单元号	关联度和	含矿性		单元号	关联度和	含矿性		单元号	关联度和	含矿性	
		评判	已知			评判	已知			评判	已知
21	0.2538	不含	含矿	387	0.5146	含矿	含矿	219	0.0865	不含	不含
54	0.2538	不含	含矿	389	0.5146	含矿	含矿	224	0.3697	含矿	不含
61	0.1941	不含	含矿	392	0.3274	含矿	含矿	228	0.3226	含矿	不含
132	0.3028	含矿	含矿	394	0.3274	含矿	含矿	234	0.4411	含矿	不含
178	0.3136	含矿	含矿	396	0.3274	含矿	含矿	262	0.2234	不含	不含
189	0.0490	不含	含矿	555	0.5509	含矿	含矿	364	0.2234	不含	不含
203	0.1195	不含	含矿	557	0.5509	含矿	含矿	367	0.3577	含矿	不含
210	0.4772	含矿	含矿	559	0.4674	含矿	含矿	378	0.4173	含矿	不含
212	0.5263	含矿	含矿	638	0.3274	含矿	含矿	382	0.4548	含矿	不含
214	0.5263	含矿	含矿	799	0.1432	不含	含矿	398	0.0992	不含	不含
216	0.4772	含矿	含矿	168	0.0000	不含	不含	446	0.3577	含矿	不含
221	0.2234	不含	含矿	171	0.0992	不含	不含	486	0.0000	不含	不含
223	0.3099	含矿	含矿	174	0.2440	不含	不含	537	0.1448	不含	不含
227	0.3099	含矿	含矿	183	0.1195	不含	不含	552	0.3666	含矿	不含
370	0.1343	不含	含矿	185	0.1195	不含	不含	561	0.4674	含矿	不含
372	0.3577	含矿	含矿	190	0.0490	不含	不含	608	0.0000	不含	不含
375	0.2234	不含	含矿	192	0.0000	不含	不含	628	0.0000	不含	不含
380	0.4548	含矿	含矿	197	0.1195	不含	不含	699	0.2234	不含	不含
383	0.4548	含矿	含矿	206	0.1195	不含	不含	750	0.1343	不含	不含
385	0.4548	含矿	含矿	208	0.1195	不含	不含				

F　综合评判

从上列 5 种方法对模型单元含矿性评判结果看，30 个已知含矿单元中，5 种方法都评为含矿单元的 15 个，占 50%。4 种方法评为含矿单元，1 种方法判作含矿性不明的单元 1 个，

占3.33%。4种方法评为含矿单元,1种方法判作不含矿单元的6个,占20%。3种方法评为含矿单元,2种方法判作不含矿单元的3个,占10%。1种方法评为含矿单元,4种方法判作不含矿单元的2个,占6.67%。5种方法全判作不含矿单元的3个,占10%。29个已知不含矿单元中,5种方法都判作不含矿单元的20个,占68.97%。4种方法评为不含矿单元,1种方法评为含矿单元的7个,占24.4%。2种方法评为不含矿单元,3种方法判作含矿单元的1个,占3.33%。1种方法评为含矿不明,4种方法判作含矿单元的1个,占3.33%。

综合分析5种方法对已知含矿单元和已知不含矿单元的评判结果,对单元含矿性综合评判准则决策于下:

(1)5种方法中,3种方法及3种以上方法评为含矿单元的为含矿单元。其中,5种方法都评为含矿单元的为1级,4种方法评为含矿单元的为2级,3种方法评为含矿单元的为3级。

(2)其他情况为不含矿单元。

用上列规定对检验单元的含矿性进行评判,结果,在30个已知含矿单元中,23个评为含矿单元,包括16个1级,3个2级和4个3级。7个判作不含矿单元。在29个已知不含矿单元中,23个评为不含矿单元,6个判作含矿单元。被评为含矿单元的含矿概率理论值79.31%,丢矿风险系数0.2333,判错率22.03%。

7.1.1.4 深部预测区最佳控矿地质标志推测

A 结构面的深部推测

前已述及,矿带顶板与基准面之间距离,矿带底板与基准面之间距离,矿带中心线与基准面之间距离的平面等值线图,反映断面上构造结构面的空间分布特征。在围岩成分和结构较均匀条件下,构造结构面的空间分布有一定规律性。如果掌握这种规律,就可以依据上部的分布特征向深部预测区推测。如前所述,一个地质数据往往是区域规律性变化、局部规律性变化、随机干扰三者综合作用的结果。其中的区域规律性变化反映构造面空间分布特征。需要通过一定的手段和方法把它提炼出来。如前所述,矿化期中的3个矿化阶段,主要受3个阶段断裂构造活动控制,断面形态是3个阶段构造活动综合作用的结果。因此,与矿最密切的矿带顶板至基准面距离的3次趋势面,能够表征矿化期中断裂构造结构面的空间分布规律。于是在资料较齐全的80m标高以上空间,分别对矿带顶板至基准面距离、矿带底板至基准面距离、矿带中心线至基准面距离进行趋势面分析。图7-1描绘了3种标志的3次趋势面,综合分析3种标志3次趋势面在空间上的变化特征,依据它们的形态变化特征和变化幅度,将趋势面向下推测到-10m标高,用推测的矿带顶板至基准面距离3次趋势值,表征深部预测区构造结构面的空间变化特征。

B 矿带宽度

用推测的矿带底板至基准面距离3次趋势值,减去推测的矿带顶板至基准面距离3次趋势值,表征深部预测区矿带宽度。

C 走向方位角

以推测的矿带中心线至基准面距离3次趋势值为基础数据,依 $N_{22} = 54^\circ + \text{arc tg}[(N_{22}^{i+1,j} - N_{22}^{i,j})/10]$ 计算深部预测区矿脉各点的走向方位角。

D 矿带内矿脉条数和矿带上盘裂隙条数

在105矿床及其外围0.27km^{2}范围内,自120m标高至260m标高,以垂直间隔20m作地质平面图,在不同标高平面图上,统计矿带内矿脉条数和矿带上盘裂隙条数。发现它们随

深度以 0.0069 的速度递减。因此，以上部实测数据和递减速度为依据，将矿带内矿脉条数和矿带上盘裂隙条数推测到深部预测区。

7.1.1.5 深部预测区单元含矿性数学地质评判

按上部控制区单元划分准则，在深部预测区划分预测单元共 1016 个，统计 5 种最佳控矿地质标志：①矿带顶板至基准面距离 N_1；②矿带宽度 N_{21}；③矿带走向方位角 N_{23}；④矿带内矿脉条数 N_{10}；⑤矿带上盘裂隙条数 N_{19}在每个预测单元中的状态。分别依式(7-4)、式(7-6)、式(7-8)、式(7-11)、式(7-12)及相应的评判准则，评判每个预测单元的含矿性。进一步开展综合评判，结果有 279 个被评为含矿单元。包括 1 级含矿单元 99 个，2 级含矿单元 132 个，3 级含矿单元 48 个。

7.1.1.6 矿体有利赋存空间划分及找矿策略

根据预测结论，预测含矿单元的空间分布特征，预测含矿单元所在空间各种控矿地质标志的发育情况，划分出 6 个矿体有利赋存空间。

矿体有利赋存空间Ⅰ位于 9～11 勘探线，200～180m 标高范围。由 8 个预测含矿单元组成，包括 4 个 1 级，3 个 2 级和 1 个 3 级。该空间是近地表处已知矿体的下延部位。所处的构造结构面位置为峰—谷过渡带的转折部位及其附近。矿带宽 18～21m，矿脉累积宽度 10～12m，矿带走向在 36°～38°和 40°～42°范围变化，单位矿带宽矿脉条数 0.1～0.14，单位矿带宽矿脉厚度 0.56～0.58m，裂隙度 0.12～0.16，成矿条件十分有利，用地球化学方法对地表样品进行的矿体定位预测结果也表明该处有矿体存在，因而有必要部署一定的工程予以验证。

矿体有利赋存空间Ⅱ位于 7～11 勘探线，60～140m 标高范围。由 26 个预测含矿单元组成，包括 1 个 1 级，23 个 2 级和 2 个 3 级。位于构造结构面峰—谷过渡带转折部位及其两侧，矿带宽 18～21m，矿带内矿脉 3 条以上。矿带走向在 36°～38°，40°～42°，52°～54°范围变化，矿带倾角小于 70°。单位矿带宽矿脉条数 0.1～0.14，单位矿带宽矿脉厚度 0.42～0.44m，裂隙度 0.12～0.16。成矿条件极为有利。用地球化学方法对地表样品进行的矿体定位预测结果，在该空间下部边缘有矿体存在，因而有必要部署一定的工程予以验证。

矿体有利赋存空间Ⅲ位于 11 勘探线及其两侧，0～100m 标高范围。为一垂向长 100m，水平方向宽 10～30m 的柱状体。由 12 个预测含矿单元组成，包括 1 个 2 级和 11 个 3 级。位于构造结构面峰—谷过渡带的转折部位及其附近。矿带宽 24～27m，矿带内矿脉 3 条以上，矿带倾角小于 70°。单位矿带宽矿脉条数 0.1～0.14，裂隙度 0.12～0.16，成矿条件有利。

矿带有利赋存空间Ⅳ位于 3～5 勘探线，60～100m 标高范围，由 7 个 2 级预测含矿单元组成，位于构造结构面峰—谷过渡带的转折部位及其附近。矿带宽 18～21m，矿带内矿脉 3 条以上，矿带走向 52°～54°。单位矿带宽矿脉条数 0.1～0.14，单位矿带宽矿脉厚度 0.4～0.44m，成矿条件十分有利。

矿体有利赋存空间Ⅴ位于 4～6 勘探线，120～160m 标高范围内，由 7 个 2 级预测含矿单元组成。为已知矿体向下延伸的空间。位于构造结构面峰—谷过渡带上，矿带宽 24～27m，矿带内矿脉 3 条以上，矿带走向方位角 52°～54°。单位矿带宽矿脉条数 0.1～0.14，单位矿带宽矿脉厚度 0.42～0.44m。成矿条件十分有利，有必要布置一定的工程验证。

矿体有利赋存空间Ⅵ位于 8～14 勘探线，0～160m 标高范围，由 71 个预测含矿单元和 3

个已知含矿单元组成，包括24个1级，47个2级。为已知矿体向下延伸的空间。位于构造结构面峰—谷过渡带的转折部位及其附近，矿脉宽24～27m，矿脉累积厚度6～7m。矿带内矿脉3条以上。矿带走向在36°～38°、40°～42°、52°～54°范围变化，矿带倾角小于70°。单位矿带宽矿脉条数0.1～0.4，裂隙度0.12～0.16。成矿条件极为有利，用地球化学方法对地表和坑道样品进行的矿体定位预测结果也认为该空间有矿体存在。因而有必要优先施工验证。

综上所述，根据矿体有利赋存空间规模，控矿地质标志有利程度，多种方法预测结论，与已知矿体空间关系等统计对比结果，上列6个矿体有利赋存空间的施工验证顺序为：

①Ⅵ； ②Ⅰ、Ⅴ； ③Ⅱ； ④Ⅲ； ⑤Ⅳ

7.1.2 10号脉群深部矿体定位预测

7.1.2.1 预测单元划分

根据上部资料的工程控制情况，按水平方向上长、宽各50m，垂直方向上深40m划分四方体单元（单元中心为勘探线、基线、中段之交点）13608个。包括上部控制区研究单元4536个，深部预测区预测单元9072个。在预测单元中，有效预测单元2612个。从上部控制区的研究单元中，抽取已知含矿单元和已知不含矿单元各120个作控制单元。其中，60个已知含矿单元和60个已知不含矿单元组成模型单元集合。另外的60个已知含矿单元和60个已知不含矿单元构成检验单元集合。

7.1.2.2 控矿地质标志的确定、筛选与取值

A 已知资料的分析与处理

矿体定位预测是在上部控制区已知资料基础上进行的。不但要求这些资料真实可靠，而且要求它们在预测区范围内系统完整齐全，能覆盖全区。为此，收集了255、206、170、130、90、50、10、－30、－70m标高上9个中段的1:1000地质平面图。11、29、35、41、47、53、59、65、71、83、89、95勘探线1:1000地质剖面图。由于该区控矿构造具有多组、多阶段活动特点，即使同一条矿脉，也是追踪多组构造裂隙形成的，产状变化极大。特别多条矿脉，在空间上时而远离，时而贴近，时而复合、交切。加上大量时隐时现的分支矿脉，给矿脉的连接造成很大困难。对资料综合分析对比后发现，不同中段地质平面图之间，不同勘探线地质剖面图之间，以及平面图与剖面图之间，在具体矿脉的连接上多有矛盾之处。为此，和玲珑金矿地质专家一起，对九曲、大开头矿脉地表露头进行系统的观测与追索，归纳出该区4号、52号、47号、52支号、48号、47支号、50号、18号、10号等主要矿脉在宏观上的空间分布特征及相互关系。在此基础上，以地质平面图上的地质现象为准，只是在平面图上缺失地质现象时，参考地质剖面图，在水平方向和垂直方向上，对矿脉进行标定、归纳与连接。考虑到分支矿脉对矿体成生的重要控制作用，对一些出露较频繁的支脉也进行了标定与连接。

在预测区范围内，由于9号、45号、2号、5号、175号、176号等矿脉无论在水平方向上，还是在垂直方向上，控制的都很少，无法进行连接。因面本次预测不包括这些矿脉。综上所述，在预测区内，共标定出4号（包括4号、6号、9支号等矿脉）、4-1号、4-2号、4-3号、52号、52支号、52支$_1$号、47号、47-1号、48号、48支号、48支$_1$号、50号、18-1号、18-2号、18-3号、47支号、10-1号、10-2号等矿脉。

B 控矿地质标志

成矿理论指出，热液循环系统中突然出现减压空间，会使过压热液发生沸腾，引起金的硫氢化物络合物解体，使金沉淀下来。还指出，仅当减压空间反复不断地出现时，才有可能

形成工业矿体。因而，频繁的构造活动，以及在空间上重复出现微张裂隙的构造形迹是热液型金矿体成生的必要条件之一。成矿理论还指出，热液成矿作用的主要特点之一是热液与围岩之间发生的物质交换反应。那些导致热液中金络合物解体，使金沉淀的异常围岩环境是热液型金矿体成生的重要条件之一。

在断裂构造作用下，矿脉中的下列空间位置最容易产生减压空间，形成金矿体：

(1)构造结构面呈波状起伏的断裂上，产状变化大的部位。这是因为在构造作用下，沿着弯曲或不规则裂隙、断裂或剪切带两盘发生定向滑动，在产状变化大的部位最容易产生张裂隙和不连续的空洞。这种减压空间一般呈透镜体状，沿倾向方向往往延伸很长。

(2)断裂和(或)剪切带的交切处或复合处。这种空间因不同方向、产状断裂构造的相互“撕扯”，最容易产生张裂隙。也容易导致岩石破碎，产生角砾岩化带，以及扭曲、拖曳、挤压和碎裂带。这种张开带和具有巨大表面积的破碎带的产生，为热液活动提供减压空间。这种减压空间沿走向延伸长度有限，但沿倾向方向延伸很远。

(3)断裂构造裂隙与地质界面交切或复合处。地质界面包括：岩体与地层的接触面；不同岩体之间的接触面；不同时代地层的不整合面；岩脉与围岩之间的接触面；矿脉与包括岩脉在内的围岩之间的接触面；断层泥与其上、下构造岩带之间的接触面。由于界面两侧地质体成分、结构、物理性质等有较大的差异，断裂构造与之交切或复合时，在界面处及其附近，最容易发生拉伸、滑动、扭曲、拖曳，形成张裂隙和角砾岩化带，是良好的聚矿场所。

(4)矿脉局部膨大部位是矿脉生成时断裂构造局部微张开地段。经继承性断裂构造作用，在该处最容易产生滑动、剪切和张裂，形成良好的减压空间，有利于矿体的成生。

与上述各种微张开裂隙的产生条件相对应，形成3种类型的减压空间，即沿走向延长的、沿倾向延长的、斜向的空间。它们的组合导致微张地段的弯曲、分叉，形成不同形态的矿体，如在单个或近于平行的断裂弯曲部位形成脉状和(或)透镜体状矿体；在近于平行断裂之间的岩块中，发育雁行状排列的矿体，以及横向的由网脉状矿石组成的矿体等。

预测区的围岩属成分和结构相对均匀的玲珑花岗岩，其中虽有胶东群地层残留体，但分布零星，其空间分布也无规律可循，并且在图上也没有反映出来，虽说是一种异常地质环境，因无法向深部推测而不能在预测中应用。因而，预测中应用的控矿地质标志，实质上是一组反映断裂构造作用特征的标志组合。表现在地质图上的是矿脉、矿脉厚度及其空间分布，矿体及其空间分布，矿脉空间组合，岩脉及其空间分布等。在预测区，岩脉对矿体有指示作用，是一种较好的找矿标志。但控制岩脉成生的断裂构造十分复杂，在标定连接它们时十分困难，加上地质图上对它们反映的不全，很难查明它们在空间上的分布规律，无法把它们向深部推测。此外，矿石品位是矿化的直接标志，如果能把它在空间上的变化规律找出来，对矿体的定位预测帮助一定很大。我们虽然在上部控制区收集了2万多个数据，但摆放在地质图上，仅覆盖了一部分空间，并且，样品在空间上分布不连续，很难发现它们在空间上的分布规律，无法用于矿体定位预测。

在地质图上比较系统的是矿脉和矿体。它们的空间分布和变异，反映了控矿断裂构造在空间上的分布、产状变化，以及多组构造贴近、叠加对矿脉产出和矿体成生的影响。矿脉水平宽度在空间上的变化，直接反映构造裂隙组合特征的变化，指示减压空间的分布特征。

为研究该区控矿断裂构造产状，在平面图上按50m间隔系统测量矿脉走向方位角，在垂向上按40m间隔系统测量矿脉倾向倾角。研究结果表明，该区构造控矿的突出特点是，

任何一条矿脉都受多组构造控制，并且在时空上，这些构造都是多阶段继承性活动的。经统计，该区主要控矿构造为 NE 向（占 56.13%），NEE 向（占 30.86%），NNE 向（占 9.39%）。还有少量 SEE 向（占 2.47%）和 NNW 向（占 1.15%）的。按同一条矿脉走向方位角出现的相对频率，可把矿脉分为以下 4 类：

（1）NE 向构造控制为主，如 4 号、47 号、10 号、52 支号等矿脉。

（2）NE 向构造控制为主，NEE 向构造控制其次，如 4-1 号、52 号、18 号、47-1 号矿脉。

（3）NE 向、NEE 向构造控制为主，如 47 支号、48 号、4-2 号、4-3 号等矿脉。

（4）NEE 向构造控制为主，NE 向构造控制其次，如 50 号、52 支$_1$ 号等矿脉。

各矿脉含矿情况不同，以走向方位角为统计量的矿脉含矿概率均在 20% 以下，多数为 10%～15%（占 57.14%），10% 以下的占 28.57%，大于 15% 的占 14.29%。各矿脉走向、方位角及含矿性列于表 7-9。

表 7-9　矿脉走向方位角及含矿性统计

矿　脉	控矿构造走向所占比例/%					平均方位角	含矿概率/%
	NE	NEE	NNE	NNW	SEE		
4 号	78.98	13.38	5.10	2.55	2.87	51°54′38″	7.96
47 号	74.93	12.09	7.33	4.03	1.83	46°49′53″	10.99
10-1 号	70.69	12.08	18.13	1.51	0.6	40°42′36″	4.53
10-2 号	74.89	9.87	14.35	0.89	0	43°01′36″	10.76
52 支号	84.88	8.14	6.98	0	0	48°29′18″	16.28
4-1 号	46.77	29.03	8.87	2.43	12.90	56°46′27″	5.65
52 号	57.90	35.76	5.06	1.27	0	52°48′58″	13.61
18-1 号	51.74	27.36	13.43	1.99	6.47	52°57′36″	12.44
18-2 号	50.54	24.46	17.93	2.72	4.35	47°16′57″	11.96
18-3 号	57.39	26.70	13.64	1.14	1.14	48°51′48″	18.18
47-1 号	60.00	35.56	4.44	0	0	55°26′39″	10.00
47 支号	45.82	47.98	3.77	0	2.43	59°09′03″	14.29
48 号	52.74	44.52	2.05	0	0.68	58°46′01″	14.38
4-2 号，4-3 号	40.74	44.44	14.81	0	0	52°24′26″	7.41
50 号	30.56	55.56	11.11	0	2.78	61°40′00″	47.22
52 支$_1$ 号	23.64	69.09	3.64	0	3.64	66°27′16″	10.91

在同一条矿脉上，倾向、倾角变化剧烈，以 SE 倾斜者居多，占 54.82%；NW 向倾斜者较少，占 45.18%。除少数矿脉平均倾角小于 60°外，绝大多数矿脉的平均倾角在 70°～80°之间，按同一条矿脉出现的倾向相对频率，分为以下 5 类：

（1）NW 倾、SE 倾均发育，如 4-1 号、47 号、52 号、10 号、18 号、47 支号、48 支号、48 支$_1$ 号等矿脉。

(2)SE 倾为主、NW 倾较发育,如 4 号、52 支$_1$号、50 号等矿脉。

(3)SE 倾为主,如 52 支号、47-1 号等矿脉。

(4)NW 倾为主,SE 倾较发育,如 47 支号、48 号等矿脉。

(5)NW 倾为主,如 4-2 号、4-3 号等矿脉。

以倾向倾角为统计量的矿脉含矿概率多数为 10%～30%(占 70.59%),大于 30% 的占 17.65%,小于 10% 的占 11.76%,见表 7-10。

表 7-10 矿脉倾向倾角及含矿性统计表

矿脉	NW 向		SE 向		含矿概率/%		
	平均倾角	相对比例/%	平均倾角	相对比例/%	NW 向	SE 向	总平均
4-1 号	74°12′00″	55.56	74°19′59″	44.44	14.67	3.33	9.63
47 号	75°15′55″	44.14	74°26′26″	55.86	15.93	20.98	18.75
52 号	75°58′03″	46.97	77°13′42″	53.03	11.61	25.14	18.97
10-1 号	74°37′46″	50	73°01′28″	50	7.41	11.11	9.26
10-2 号	75°00′00″	50.85	73°46′57″	49.15	11.76	20	15.81
18-1 号	71°18′15″	48.68	67°22′15″	51.32	8.7	26.08	17.99
18-2 号	66°25′42″	53.22	67°00′00″	46.78	23.08	23.75	23.39
18-3 号	65°35′17″	45.33	62°55′36″	54.67	39.71	31.71	35.33
48 支$_1$ 号,48 支号	59°44′12″	40.43	70°21′00″	59.57	31.58	25	27.66
4 号	77°06′36″	33.75	73°24′40″	66.25	11.01	13.08	12.38
52 支$_1$ 号	76°21′48″	34.92	75°29′16″	65.08	13.64	24.39	20.63
50 号	73°07′30″	32	56°45′52″	68	62.5	47.06	52
52 支号	78°07′30″	17.58	69°24′00″	82.42	12.5	33.33	29.67
47-1 号	—	0	54°19′32″	100	—	22.22	22.22
47 支号	71°23′33″	67.38	74°48′40″	32.62	24.2	29.05	25.85
48 号	68°03′31″	62.04	72°53′04″	37.96	35.29	26.92	32.12
4-2 号,4-3 号	68°01′08″	84.13	73°00′00″	15.87	16.98	10	15.87

构造不但控制矿脉的空间分布,也控制矿脉的厚度变化和金的富集与分散。由于预测区控矿断裂构造的多期性和复杂性,无论在水平方向上,还是在垂直方向上,矿脉水平宽度均发生剧烈的变化。膨大、收缩及尖灭再现等十分发育。经统计,预测区内各矿脉的水平宽度多在 0.1～20m 范围内变化。个别的 20m 以上。出现最多的水平宽度值为 1～5m。按水平宽度平均值划分为两组。第 1 组平均水平宽度为 2.37～4.32m,占 76.57%。它们是 4 号、47 号、52 号、52 支号、52 支$_1$号、47 支号、48 号、48 支号等矿脉。第 2 组平均水平宽度为 5.92～7.98m,占 23.43%,包括 10 号、50 号、47-1 号等矿脉。以水平宽度为统计量的矿脉含矿概率大多数在 20% 以下,见表 7-11。

表 7-11　矿脉水平宽度及含矿性一览表

矿　脉	水平宽度/m		含矿概率/%	矿　脉	水平宽度/m		含矿概率/%
	主要宽度区间	平均宽度			主要宽度区间	平均宽度	
4号	1~5	3.2	7.51	52支号	0.6~4	3.15	18.89
4-1号	1~4	3.47	7.41	52支$_1$号	1~4	2.37	13.21
47号	1~5	3.99	11.51	47支号	1~5	3.63	17.03
52号	1~7	3.71	12.50	50号	5~20	7.98	40.00
10-1号	1~7	5.94	4.94	48号	1~6	4.32	19.26
10-2号	1~8	5.92	9.61	47-1号	1~20	6.66	11.11
18-1号	1~6	4.2	11.29	4-2号,4-3号	1~4	3.15	7.94
18-2号	1~5	2.91	13.53	48支号,48支$_1$号	1~4	3.10	13.89
18-3号	1~5	3.59	20.65				

矿脉在空间上呈不规则波状分布，众多矿脉时而分散、消失，时而再现；时而远离，时而贴近、复合、交切，在空间上呈现出不同的矿脉组构，控制了矿体的成生与分布。

综上所述，矿脉走向、方位角，倾向、倾角，水平宽度，矿脉组构等，对金矿富集均有一定程度的控制作用。因而确定下列7个标志参加矿体定位预测。

(1)矿脉走向方位角；

(2)矿脉走向一级差；

(3)矿脉倾向倾角；

(4)矿脉倾角一级差；

(5)矿脉水平宽度；

(6)单元内矿脉组构特征；

(7)单元内矿脉条数。

C　控矿地质标志的筛选和取值

在上部控制区，以矿脉为研究对象，首先把走向方位角按10°间隔分组，依观测点的不同特征，统计矿脉走向方位角在各分组中出现的频数 f_1、f_2、f_3、f_4。分别用式(7-1)、式(7-2)、式(7-3)计算每个分组的 P_x、P_0、q 值。研究结果表明，无论哪条矿脉，都包括与矿体有关的数值区间和与矿体无关的数值区间两大类。与矿体有关的这类数值区间中，都包含有该数值区间出现，矿体也出现的条件概率 P_x，和该数值区间不出现，矿体出现的条件概率 P_0 两类数值。按两者的比值 q，可分为以下三类：

(1)$q<1$(占47.08%)。表明该数值区间出现，矿体也出现的概率，比该数值区间不出现，矿体出现的概率低，对矿体的指示作用不大。

(2)$1\leqslant q\leqslant 1.2$(占11.58%)。表明该数值区间出现，同时矿体也出现的概率接近或稍高于该数值区间不出现，但矿体出现的概率，对矿体的指示作用模糊。

(3)$q>1.2$(占41.35%)。表明该数值区间出现，矿体也出现的概率比该数值区间不出现，矿体出现的概率高得多，对矿体的指示作用较大。

而那些与矿体无关的数值区间，对矿体的存在与否没有指示意义。

就上述第3类而言，该数值区间出现，矿体也出现的概率绝大多数在5%～25%(占

69.81%)之间。25%～50%的占16.98%,50%～100%的占13.21%。

若以矿脉为单位进行统计,走向方位角数值区间出现,矿体也出现的概率多数低于20%(占75%)。

从表7-12可见,与矿体有关的走向方位角数值区间在各矿脉中出现的概率,最大值为97.57%,最小值18.52%,平均值80.18%。绝大多数在80%以上(占全部观测点的76.49%)。

表7-12 与矿体有关的标志状态在各个矿脉中出现的频率

矿脉	控矿标志/%					平均
	走向	走向一级差	倾角	倾角一级差	水平宽度	
4号	95.8	88.85	95.67	88.22	84.68	90.64
4-1号	41.13	28.69	81.48	45 93	74.07	54.26
4-2号+4-3号	18.52	—	69.84	50	9.52	36.97
52号	92.64	93.08	93.94	89.41	91.88	92.19
52支号	83.72	73.42	94.51	64.84	92.22	81.74
52支$_1$号	40	67.35	82.54	25.4	86.79	60.42
47号	97.57	76.72	100	66.26	92.06	86.52
47-1号	94.44	62.34	86.52	53.33	87.78	76.88
48号	97.26	92.86	100	82.03	86.67	91.76
48支号+48支$_1$号	—	—	76.76	36.17	55.56	56.16
50号	88.89	79.49	100	74	88.89	86.25
18-1号	97.01	85.42	78.84	64.84	86.56	82.53
18-2号	76.63	84.62	96.49	67.25	80	86.00
18-3号	88.07	95.12	99.93	74.51	98.06	91.14
47支号	95.96	87.15	100	88.01	93.81	92.99
10-1号	85.92	69.94	93.21	44.44	72.22	73.15
10-2号	89.24	89.5	98.72	69.06	65.5	82.40
平均	80.18	78.30	91.09	63.75	79.19	78.49

在上部控制区,以矿脉为研究对象,从SW到NE,把每个观测点的走向方位角顺序排列并用自然数编号。用$X_{i+1}-X_i$(X为走向方位角)计算各观测点的走向一级差,由于是后一点的方位角减前一点的方位角,走向一级差有正负之分。它的符号与大小表征i点到$i+1$点时,走向方位角的变化幅度和变化方向。把走向一级差按10°间隔分组,依观测点的不同特征统计走向一级差在各数值区间出现的频数f_1、f_2、f_3、f_4。分别用式(7-1)、式(7-2)、式(7-3)计算每个数值区间的P_x、P_0、q值。和走向方位角一样,无论哪条矿脉,都包括与矿体有关的数值区间和与矿体无关的数值区间两大类。与矿体有关的这类数值区间中,也都包含有该数值区间出现,矿体也出现的概率P_x,和该数值区间不出现,矿体出现的概率P_0两类数值。按两者的比值q划分,$q<1$的占45.84%;$1\leqslant q\leqslant 1.2$的占15.75%;$q>1.2$的占38.41%。

$q>1.2$ 的走向一级差数值区间出现，矿体也出现的概率，绝大多数在 5%～35% 之间变化（占 80%）。一部分在 40%～50% 之间变化（占 20%）。

以矿脉为单位进行统计，走向一级差数值区间出现，矿体也出现的概率，绝大多数在 5%～25% 之间变化（占 93.33%）。

从表 7-12 可见，与矿体有关的走向一级差数值区间在各矿脉中出现的频率，最大值 95.12%，最小值 28.69%，平均值 78.3%，绝大多数在 60%～95% 之间变化（占 93.33%）。

在上部控制区，以矿脉为研究对象，把倾向倾角按 10°间隔分组，依据观测点的不同特征统计矿脉倾向倾角在各分组中出现的频数 f_1、f_2、f_3、f_4。对每个数值区间用式(7-1)、式(7-2)、式(7-3)计算 P_x、P_0、q 值。与矿脉走向方位角一样，无论哪条矿脉，都包含与矿体有关的数值区间和与矿体无关的数值区间两类。与矿体有关的这类数值区间中，都包含有该数值区间出现，矿体也出现的概率 P_x，和该数值区间不出现，矿体出现的概率 P_0 两类数值。按两者的比值 q 划分，$q<1$ 的占 54%，$1\leqslant q\leqslant 1.2$ 的占 14%，$q>1.2$ 的占 31.99%。

$q>1.2$ 的倾向倾角数值区间出现矿体也出现的概率，大多数在 20%～50%（占 74.58%）之间变化，大于 50% 的占 16.95%，10%～20% 的占 8.47%。

以矿脉为单位统计，倾向倾角出现矿体也出现的概率，绝大多数在 10%～40% 之间（占 88.24%）。

从表 7-12 可见，与矿体有关的倾向倾角数值区间在各矿脉中出现的频率，最大值为 100%，最小值为 69.84%，平均值 91.09%。在 95%～100% 之间分布的占 66.67%，75%～90% 的占 27.78%，65%～70% 的仅占 5.56%。

在上部控制区，以矿脉为研究对象，自上而下，把每个观测点的倾向倾角顺序排列，并用自然数编号。用 $X_{i+1}-X_i$（X 为倾向倾角）计算各观测点的倾角一级差。由于是下面的点减上面点的倾角，倾角一级差有正负之分。它的大小与符号，表征 i 点到 $i+1$ 点时，倾向倾角的变化幅度和变化方向。把倾角一级差按 10°间隔分组，按观测点的不同特征，统计倾角一级差在各数值区间出现的频数 f_1、f_2、f_3、f_4。分别用式(7-1)、式(7-2)、式(7-3)计算每个数值区间的 P_x、P_0、q 值。和倾角一样，各矿脉都包含与矿体有关的数值区间和与矿体无关的数值区间两大类。在与矿体有关的数值区间中，都包含有该数值区间出现矿体也出现的概率 P_x，和该数值区间不出现，矿体出现的概率 P_0。按两者的比值 q 划分，$q<1$ 的占 34.5%，$1\leqslant q\leqslant 1.2$ 的占 9.7%，$q>1.2$ 的占 55.79%。

$q>1.2$ 这类倾角一级差出现，矿体也出现的概率，主要在 5%～50%（占 86.84%）之间变化，65%～75% 的占 4.39%，100% 的占 8.77%。

以矿脉为单位统计，倾角一级差数值区间出现矿体也出现的概率，绝大多数在 5%～30%（占 81.25%）之间变化。35%～50% 的仅占 18.75%。

从表 7-12 可见，与矿体有关的倾角一级差数值区间在各矿脉中出现的频率，最大值 89.41%，最小值 25.4%，平均值 63.75%。其中，出现频率 60%～75% 的占 41.18%，80%～90% 的占 23.54%，25%～55% 的占 35.29%。

在上部控制区，以矿脉为研究对象，把矿脉水平宽度按≤0.6m；0.6～1m；1～2m；2～3m；3～4m；4～5m；5～6m；6～7m；7～8m；8～9m；9～10m；10～15m；15～20m；20～25m；>25m 分组。按观测点的不同特征统计水平宽度在各数值区间中出现的频数 f_1、f_2、f_3、f_4。分别用式(7-1)，式(7-2)，式(7-3)计算每个数值区间的 P_x、P_0、q 值，研究结果表明，各

矿脉都包括与矿体有关的数值区间,和与矿体无关的数值区间两类。在与矿体有关的数值区间中,都包含有该数值区间出现,矿体也出现的概率 P_x;该数值区间不出现,矿体出现的概率 P_0。按两者的比值 q 划分,$q<1$ 的占 55.4%,$1\leqslant q\leqslant 1.2$ 的占 12.5%,$q>1.2$ 的占 32.1%。

$q>1.2$ 的矿脉水平宽度出现,矿体也出现的概率,绝大多数在 5%～60%(占 81.94%)之间变化。65%～70%的占 4.17%,100%的占 13.89%。

以矿脉为单位统计,矿脉水平宽度出现,矿体也出现的概率,绝大多数在 5%～25%(占 88.24%)之间变化。40%～45%和 80%～85%的各占 5.88%。

从表 7-12 可见,与矿体有关的矿脉水平宽度数值区间在各矿脉中出现的频率,最大值为 98.6%,最小值为 9.52%,平均值为 78.49%。其中,出现频率 85%～100%的占 55.56%,65%～85%的占 33.33%,低于 60%的占 11.11%。

前已述及,该区矿脉受多组构造控制,在空间上时而远离,时而贴近、交切、复合。在贴近、交切、复合处往往富集成矿体。表明矿脉在空间上的组合关系对矿体有一定的指示作用。于是,以单元为研究对象,对上部控制区的 2293 个有效单元按:(1)单元内为单脉;(2)单元内多脉平行;(3)单元内多脉交切;(4)单元内多脉平行与交切等状态进行统计分析,求出不同特征单元在矿脉组构各标志状态中出现的频数 f_1、f_2、f_3、f_4。分别用式(7-1)、式(7-2)、式(7-3)计算每个标志状态的 P_x、P_0、q 值。计算结果列于表 7-13。从表可以看出,单元内矿脉组构的各状态,与矿体之间都有一定的相关性。按标志状态出现矿体也出现的概率,与标志状态不出现矿体出现的概率两者之间的比值 q 可分为两类。其中,$q<1$ 的占 37.99%;$q>1.2$ 的占 62.02%。在 $q>1.2$ 的标志状态中,该标志状态出现矿体也出现的概率在 15.33%～25.17%间变化。

对上部控制区的 2293 个有效单元按:(1)单元内有 1 条矿脉;(2)单元内有 2 条矿脉;(3)单元内矿脉有 3 条或 3 条以上等状态进行统计分析,求出不同特征单元在矿脉条数各状态中出现的频数 f_1、f_2、f_3、f_4。分别用式(7-1),式(7-2),式(7-3)计算每个标志状态的 P_x、P_0、q 值。计算结果列于表 7-13。从表可以看出,单元内矿脉条数的各状态,与矿体之间都有一定的相关性。按标志状态出现矿体也出现的概率,与标志状态不出现矿体出现的概率两者之间的比值 q 可分为 3 类:$q<1$ 的占 53.38%,$1\leqslant q\leqslant 1.2$ 的占 33.26%,$q>1.2$ 的占 13.36%。$q>1.2$ 的标志状态出现矿体也出现的概率为 23.68%。

表 7-13　单元内矿脉组合关系条件概率分析结果

标志	标志状态①	P_x	P_0	q	标志	标志状态①	P_x	P_0	q
矿脉组构	单脉	0.0781	0.1660	0.4704	矿脉条数	1 条	0.0914	0.1668	0.5476
	多脉平行	0.1533	0.1195	1.2832		2 条	0.1387	0.1205	1.1513
	多脉交切	0.1615	0.1268	1.2737		≥3 条	0.2368	0.1095	2.1623
	多脉平行与交切	0.2517	0.1242	2.0265					

①标志状态 P_x:标志状态 x 出现时的含矿概率;P_0:标志状态 x 不出现时的含矿概率;$q=P_x/P_0$。

以上各类标志特征表明:

(1)各类地质标志的不同数值区间或状态,对矿体指示作用的方向和大小不同。因而,

可以用上列各标志来评价矿脉所在单元的含矿性。

(2)即使对矿体指示作用较大的地质标志,该标志状态出现,矿体也出现的概率也只在26%以下。用单一的地质标志进行矿体定位,不会得到好的预测效果。

(3)绝大多数矿脉中,与矿体有关的标志状态范围太大,使该标志对矿体的指示作用模糊不清。用单一的地质标志进行矿体定位,不会有好的预测效果。

综上所述,上列地质标志与矿体空间位置之间有一定的相关性。可以用来进行矿体定位预测。但不能单独使用,只能作为多元标志中的一个,参加矿体定位预测。

用矿化指数 A、B($A=P_x/P$,$B=P_0/P$,P 为矿脉的含矿概率)综合评价控矿地质标志对矿体的指示作用,统计分析结果表明,对矿体指示作用较大的矿脉标志状态,含矿指数 A 最大值 10.5,最小值 1.1945,平均值 2.1121。含矿指数 B 最大值 0.9157,最小值为 0,平均值 0.5224。两者之比值,最大者∞,最小者 1.5751。除去 8 个∞值外,平均比值为 3.5416。表明各矿脉的各类标志对矿体有一定的指示作用。为此,采用多标志、多方法综合研究途径,开展单元含矿性评价。应用的控矿地质标志为:

(1)单元中心点矿脉水平宽度;

(2)单元中心点上方倾向倾角;

(3)单元中心点下方倾向倾角;

(4)单元中心点倾角一级差;

(5)单元中心点以东走向方位角;

(6)单元中心点以西走向方位角;

(7)单元中心点走向一级差;

(8)单元内矿脉条数;

(9)单元内矿脉组构。

标志状态出现,矿体也出现的概率 P_x,和标志状态不出现,矿体出现的概率 P_0,是从两个方向衡量标志对矿体指示能力的定量标志。它们的数值可能构成下列组合关系:

$P_x=1$,$P_0=0$,$q=\infty$。表明该标志状态出现,矿体必然出现;该标志状态不出现,矿体必然不会出现。对矿体的指示作用极大。

$P_x=1$,$0<P_0<1$,$P_x>>>P_0$,$q>>>1$。表明该标志状态出现时,矿体很可能出现;该标志状态不出现时,矿体出现的可能性极小。对矿体的指示作用很大。

$0<P_x$、$P_0<1$,$P_x\gg P_0$,$q\gg1$。表明该标志状态出现,矿体出现的可能性大。该标志状态不出现,矿体出现的可能性小。对矿体有较大的指示作用。

$0<P_x$、$P_0<1$,P_x 和 P_0 接近,q 接近于 1。表明无论该标志状态出现与否,矿体都有可能出现。对矿体的指示作用模糊。

$0<P_x$、$P_0<1$,$P_x<<P_0$,$q<<1$。表明该标志状态出现,矿体出现的可能性小。该标志状态不出现,矿体出现的可能性大。对矿体的指示作用不大。

$P_x=0$,$0<P_0<1$,$q=0$。表明该标志状态出现,矿体必然不会出现,该标志状态不出现时,矿体有可能出现。对矿体有反向指示作用。

$P_x=0$,$P_0=0$。表明该标志与矿体的成生无关。因而对矿体没有指示作用。

综上所述,标志状态出现,矿体出现的概率,与该标志状态不出现,矿体出现的概率两者

之间的比值 q，其数值不同，对矿体的指示作用也不一样。可以作为控矿标志对矿体指示作用大小的综合指标。因而决定用 q 值作为指示矿体的标志值来进行矿体定位预测。

7.1.2.3 建立单元含矿性评判数学模型

建立数学模型时，首先将抽取的已知含矿单元和已知不含矿单元分成两类：一类为模型单元，包括 60 个已知含矿单元和 60 个已知不含矿单元，用以建立各种评判数学模型；另一类为检验单元，也包括 60 个已知含矿单元和 60 个已知不含矿单元，用以检验所建立的数学模型的实用性、精确度和误差。

A 单元含矿概率多元回归估计模型

用逐步回归分析方法来建立单元含矿概率多元回归模型。进行时，因变量的取值规则为：已知含矿单元赋值为 1，已知不含矿单元赋值为 0。自变量选用的标志为前面确定的 9 个标志。样本大小为 120，自变量数为 9。引入自变量和剔除自变量的检验临界值 F_α 都用 1.9666。计算由电子计算机完成。结果确定出 6 个最重要的标志：单元中心点矿脉水平宽度 X_1，单元中心点下方倾向倾角 X_2，单元中心点以东走向方位角 X_3，单元中心点以西走向方位角 X_4，单元内矿脉条数 X_5，单元内矿脉组构 X_6。它们构成下列单元含矿概率多元回归估计模型：

$$Y = 0.0308X_1 + 0.0743X_2 + 0.1495X_3 + 0.0839X_4 - 0.1311X_5 + 0.2275X_6 - 0.1593 \tag{7-13}$$

$$F = 12.0742 \qquad R = 0.6250$$

当信度 $\alpha = 0.05$，第 1 自由度为 6，第 2 自由度为 113 时，检验临界值 $F_\alpha = 2.18$，差异极为显著。当信度 $\alpha = 0.05$，自由度为 113 时，检验临界值 $R_\alpha = 0.2031$，含矿概率与各标志间密切相关。表明该模型对矿与非矿有很高的分辨能力。用该模型计算每个模型单元的回归估计值，进一步分别计算已知含矿单元和已知不含矿单元回归估计值的平均数、均方差，以及评判临界值，得：

已知含矿单元：$\bar{X}_1 = 0.6953$，$S_1 = 0.2873$

已知不含矿单元：$\bar{X}_2 = 0.3047$，$S_2 = 0.1963$

$$Y_c = \frac{1}{2}(\bar{X}_1 - 2S_1 + \bar{X}_2 + 2S_2) = 0.4090$$

当 $Y > 0.4090$ 时，判为含矿单元，否则判作不含矿单元。

用式(7-13)计算各检验单元的回归估计值。结果，60 个已知含矿单元中，45 个评为含矿，15 个判作不含矿。60 个已知不含矿单元中，有 34 个评为不含矿，26 个判作含矿。预测含矿单元含矿概率理论值 63.38%，丢矿风险系数 0.25，判错率 34.17%。

B 单元含矿性多元判别模型

应用的是费歇准则下的二组判别分析。进行时，以模型单元中的已知含矿单元为 A 类，已知不含矿单元为 B 类，以逐步回归分析确定的 6 个标志为变量来模拟判别模型。计算由电子计算机完成。得单元含矿性判别模型：

$$Y = 0.1988X_1 + 0.4798X_2 + 0.9647X_3 + 0.5414X_4 - 0.8465X_5 + 1.4682X_6 \tag{7-14}$$

$$Y_c = 4.2556$$

$$F = 12.0742$$

当信度 $\alpha = 0.05$，第 1 自由度为 6，第 2 自由度为 113 时，检验临界值 $F_\alpha = 3.9259$，差异极为

显著。表明该模型对矿与非矿有较高的区分能力。用该模型计算检验单元集合中每个单元的判别函数值,用评判临界值评判它们的含矿性。结果,在60个已知含矿单元中,有37个评为含矿,23个判作不含矿。60个已知不含矿单元中,44个评为不含矿,16个判作含矿。预测含矿单元的含矿概率理论值69.81%。丢矿风险系数0.3833,判错率32.5%。

C 单元含矿性欧氏距离评判模型

首先把模型单元中某些标志值过大的单元剔除。以45个已知含矿单元作为含矿体的异常地质环境抽样,构成含矿单元集合 A。以55个已知不含矿单元作为不含矿体的地质环境抽样,构成不含矿单元集合 B。采用逐步回归分析确定的6个最佳控矿地质标志,建立单元含矿性欧氏距离评判数学模型:

$$\begin{cases} D_A = \dfrac{1}{45}\sum_{j=1}^{45}\sqrt{\sum_{i=1}^{6}(x_i - a_{ij})^2} \\ D_B = \dfrac{1}{55}\sum_{j=1}^{55}\sqrt{\sum_{i=1}^{6}(x_i - b_{ij})^2} \end{cases} \tag{7-15}$$

用式(7-15)首先计算每个模型单元相对于含矿单元集合 A,相对于不含矿单元集合 B 的欧氏距离。进一步计算已知含矿单元相对于含矿单元集合欧氏距离的平均数 $\overline{D}_{AA}$、均方差 S_{AA};已知含矿单元相对于不含矿单元欧氏距离的平均数 $\overline{D}_{AB}$,均方差 S_{AB};已知不含矿单元与含矿单元集合欧氏距离的平均数 $\overline{D}_{BA}$,均方差 S_{BA};已知不含矿单元与不含矿单元集合欧氏距离的平均数 $\overline{D}_{BB}$,均方差 S_{BB}。计算结果如下:

$\overline{D}_{AA}=3.8710$　　$S_{AA}=1.0550$

$\overline{D}_{BA}=4.2462$　　$S_{BA}=0.5499$

$\overline{D}_{BB}=2.2956$　　$S_{BB}=0.6106$

$\overline{D}_{AB}=4.2462$　　$S_{AB}=1.9064$

进一步计算矿与非矿的参考临界值:

$$\overline{D}_{AC}=\frac{1}{2}(\overline{D}_{AA}+2S_{AA}+\overline{D}_{BA}-2S_{BA})=4.5637$$

$$\overline{D}_{BC}=\frac{1}{2}(\overline{D}_{BB}+S_{BB}+\overline{D}_{AB}-S_{AB})=2.6230$$

参考上列计算结果,以及不同性质单元所含标志值特点,对单元含矿性评判规则确定于下:

(1)当单元与含矿单元集合欧氏距离 $D_A<\overline{D}_{AC}$,且与非矿单元集合欧氏距离 $D_B\geqslant\overline{D}_{BC}$ 时,为预测含矿单元。

(2)当单元与含矿单元集合欧氏距离 $D_A\geqslant\overline{D}_{AC}$,且与非矿单元集合欧氏距离 $D_B\geqslant\overline{D}_{BC}$ 时,为预测含矿单元。

(3)其他情况为预测不含矿单元。用上列准则对模型单元进行评判。45个已知含矿单元中,35个评为含矿单元,10个判作不含矿单元。55个已知不含矿单元中,43个评为不含矿单元,12个判作含矿单元。

进一步用式(7-15)计算检验单元集合中每个单元相对于含矿单元集合欧氏距离 D_A 和相对于不含矿单元集合欧氏距离 D_B。用上列准则评判每个检验单元的含矿性。结果,60个已知含矿单元中,34个评为含矿单元,26个判作不含矿单元。60个已知不含矿单元中,

41个评为不含矿单元，19个判作含矿单元。被评为含矿单元的含矿概率理论值为64.15%，丢矿风险系数0.4333，判错率37.5%。

D 单元含矿性综合评判

以上我们用了3种方法，建立3组不同的数学模型对单元含矿性进行评判。方法不同，评判矿与非矿考虑的角度也不一样，因而评判结论不尽相同。如果大多数方法评判结论为含矿，该单元含矿的可能性会很大。反之，若大多数方法评判结论为不含矿，该单元含矿的可能性会较小。我们选择那些多数方法认为含矿的单元为预测含矿单元，找矿时把握会更大一些。从上列3种方法对模型单元含矿性评判结果看，45个已知含矿单元中，3种方法都评为含矿单元的32个，占71.11%，2种方法评为含矿单元，1种方法判作不含矿单元的8个，占17.78%。1种方法评为含矿单元，2种方法判作不含矿单元的4个，占8.89%。3种方法都判作不含矿单元的1个，占2.22%。55个已知不含矿单元中，3种方法都评为不含矿单元的36个，占65.45%。2种方法评为不含矿单元，1种方法判作含矿单元的12个，占21.82%。1种方法评为不含矿单元，2种方法判作含矿单元的3个，占5.45%。3种方法皆判作含矿单元的4个，占7.27%，见表7-14。

表7-14 模型单元含矿性综合评判结果

单元号①	评判结果②				单元号	评判结果				单元号	评判结果				单元号	评判结果			
	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4
1	A	A	A	A	26	A	A	B	A	51	A	B	B	B	76	B	B	B	B
2	A	A	A	A	27	B	B	B	B	52	B	B	B	B	77	A	B	B	B
3	A	A	A	A	28	A	A	A	A	53	B	B	A	B	78	B	B	B	B
4	A	A	A	A	29	A	A	A	A	54	A	B	B	B	79	B	B	B	B
5	A	A	B	A	30	A	A	A	A	55	A	A	A	A	80	B	B	B	B
6	A	A	A	A	31	A	A	A	A	56	A	A	A	A	81	A	A	B	A
7	A	A	A	A	32	A	A	A	A	57	B	B	B	B	82	B	B	B	B
8	A	A	A	A	33	A	A	A	A	58	B	B	B	B	83	B	B	B	B
9	A	A	A	A	34	A	B	B	B	59	B	B	B	B	84	B	B	B	B
10	A	A	A	A	35	A	A	B	A	60	B	B	B	B	85	B	B	B	B
11	A	A	A	A	36	A	A	A	A	61	A	B	A	A	86	A	A	A	A
12	A	A	A	A	37	A	A	A	A	62	B	B	B	B	87	B	B	B	B
13	A	A	B	A	38	A	A	B	A	63	B	B	B	B	88	B	B	B	B
14	A	A	A	A	39	A	A	A	A	64	B	B	A	B	89	A	B	A	A
15	A	A	B	A	40	A	B	B	B	65	B	B	B	B	90	B	B	B	B
16	A	A	A	A	41	A	A	A	A	66	A	B	B	B	91	B	B	B	B
17	B	B	A	B	42	A	A	A	A	67	B	B	A	B	92	B	B	A	B
18	A	A	A	A	43	B	B	A	B	68	B	B	B	B	93	B	B	B	B
19	A	A	A	A	44	A	A	A	A	69	B	B	B	B	94	B	B	B	B
20	A	A	A	A	45	A	A	A	A	70	B	B	A	B	95	B	B	B	B
21	A	A	A	A	46	A	A	A	A	71	B	B	B	B	96	B	B	B	B
22	A	A	A	A	47	B	B	B	B	72	A	B	B	B	97	B	B	B	B
23	A	B	A	A	48	B	B	A	B	73	B	B	B	B	98	B	B	B	B
24	A	A	A	A	49	B	B	B	B	74	B	B	B	B	99	B	B	B	B
25	A	A	B	A	50	A	B	B	B	75	B	B	B	B	100	B	B	B	B

① 1～45号为已知含矿单元，46～100号为已知不含矿单元；

②1为回归估计结果，2为判别分析结果，3为欧氏距离评判结果，4为综合评价结论；A为含矿单元，B为不含矿单元。

表 7-15　检验单元含矿性综合评判结果

单元号①	评判结果②				单元号	评判结果				单元号	评判结果				单元号	评判结果			
	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4
1	A	A	B	A	31	B	B	B	B	61	B	B	B	B	91	A	A	B	A
2	A	B	B	B	32	B	B	B	B	62	A	A	A	A	92	A	B	A	A
3	A	B	B	B	33	A	B	B	B	63	B	B	B	B	93	B	B	B	B
4	A	A	A	A	34	B	B	A	B	64	B	B	B	B	94	B	B	B	B
5	A	B	A	A	35	A	A	A	A	65	A	A	A	A	95	B	B	B	B
6	A	A	A	A	36	A	A	B	A	66	A	A	A	A	96	B	B	B	B
7	A	A	A	A	37	A	A	A	A	67	B	B	B	B	97	B	B	B	B
8	A	B	B	B	38	A	A	A	A	68	B	B	A	B	98	B	B	B	B
9	A	A	A	A	39	A	A	A	A	69	A	B	B	B	99	B	B	A	B
10	A	A	A	A	40	A	B	B	B	70	A	A	B	A	100	B	B	B	B
11	A	B	B	B	41	A	A	A	A	71	A	A	A	A	101	B	B	B	B
12	B	B	B	B	42	A	A	A	A	72	B	B	B	B	102	A	B	A	A
13	B	B	B	B	43	A	A	A	A	73	B	B	B	B	103	A	A	A	A
14	A	A	B	A	44	B	B	A	B	74	B	B	A	B	104	A	A	A	A
15	A	A	A	A	45	A	A	A	A	75	B	B	B	B	105	A	A	A	A
16	B	B	B	B	46	A	A	A	A	76	A	A	A	A	106	A	B	A	A
17	A	A	A	A	47	B	B	B	B	77	A	B	B	B	107	B	B	B	B
18	B	B	B	B	48	B	B	A	B	78	A	B	B	B	108	B	B	B	B
19	A	A	A	A	49	B	B	B	B	79	A	A	A	A	109	A	A	B	A
20	A	A	A	A	50	A	A	B	A	80	B	B	A	B	110	B	B	B	B
21	B	B	B	B	51	A	A	A	A	81	B	B	B	B	111	B	B	B	B
22	A	B	A	A	52	A	A	A	A	82	B	B	B	B	112	B	B	B	B
23	B	B	B	B	53	A	A	A	A	83	B	B	B	B	113	A	A	B	A
24	A	A	B	A	54	A	A	A	A	84	B	B	B	B	114	B	B	B	B
25	A	A	A	A	55	A	B	B	B	85	A	B	B	B	115	B	B	B	B
26	B	B	B	B	56	B	B	B	B	86	B	B	B	B	116	A	B	A	A
27	A	A	A	A	57	A	A	A	A	87	A	A	B	A	117	A	B	A	A
28	A	A	A	A	58	A	A	A	A	88	A	A	B	A	118	B	B	B	B
29	A	A	A	A	59	B	B	B	B	89	A	A	A	A	119	A	B	B	B
30	A	A	A	A	60	A	B	B	B	90	B	B	B	B	120	B	B	B	B

①1～60 号为已知含矿单元，61～120 号为已知不含矿单元；

②1 为回归估计结果，2 为判别分析结果，3 为欧氏距离评判结果，4 为综合评价结论；A 为含矿单元，B 为不含矿单元。

综合分析上列特征，对单元含矿性综合评判准则决策于下：

(1)3 种方法中，2 种和 2 种以上方法评为含矿的为含矿单元。其中，3 种方法都评为含矿的为 1 级含矿单元，2 种方法评为含矿，1 种方法判作不含矿的为 2 级含矿单元。

(2)其他情况为不含矿单元。

用上列规则对检验单元的含矿性进行评判。结果，在 60 个已知含矿单元中，36 个评为含矿单元，包括 29 个 1 级含矿单元和 7 个 2 级含矿单元。24 个判作不含矿单元。在 60 个已知不含矿单元中，39 个评为不含矿单元，21 个判作含矿单元(表 7-15)。预测含矿单元的

含矿概率理论值为63.16%，丢矿风险系数0.4，判错率37.5%。

7.1.2.4 深部预测区地质环境推测及单元含矿性评判

前已述及，在研究区范围内，270～－90m标高为上部控制区，该区的各种控矿地质标志都是通过勘探及采矿工程揭露出来的。－90～－810m标高为深部预测区，这里没有工程控制，地质环境是未知的，需要我们进行推测。为此，在波形分布理论指导下，用一维规则观测数据的傅里叶趋势面分析进行复杂波的分解与合成。由于波是沿地质作用力传递方向分布的，在分解复杂波之前，应首先确定波轴。多数情况下，波轴为一条直线。当构造和(或)地质体成分结构十分复杂时，波轴有可能为一条曲线，甚至折线。波轴确定以后，对原始观测值进行变换，使之成为沿波轴方向分布的波幅值。在此基础上，通过一维规则观测数据的调和趋势面分析，把复杂的波分解成几个单一波。进而把多个单一波合成为复杂的波。应用的数学模型为：

$$\hat{D}_i = \hat{y}_i + \hat{Z}_i/\cos(\arctan b) \tag{7-16}$$

$$\hat{Y}_i = f(x_i) \tag{7-17}$$

$$\hat{Z}_i = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{s}\left(A_n\cos\frac{n\pi x_i}{L} + B_n\sin\frac{n\pi x_i}{L}\right) \tag{7-18}$$

$$A_n = \frac{2}{N-1}\left\{\frac{Z_0 + Z_{N-1}}{2} + \sum_{i=1}^{N-2} Z_i\cos\frac{n\pi x_i}{L}\right\} \qquad n = 0,1,2,\cdots,s \tag{7-19}$$

$$B_n = \frac{2}{N-1}\sum_{i=1}^{N-2} Z_i\sin\frac{n\pi x_i}{L} \qquad n = 1,2,\cdots,s \tag{7-20}$$

$$Z_i = \cos(\arctan b)(D_i - \hat{y}_i) \tag{7-21}$$

式中，D 为观测值；x_i 为坐标值；N 为观测点数；Z 为波幅；A 为余弦系数；B 为正弦系数；L 为基本取样长度之半；S 为最大调和数；$\hat{Y}$ 为波轴估计值；b 为波轴线性方程式中的斜率(当波轴为曲线时，b 为经线性变换后直线方程中的斜率)；$\hat{D}_i$ 为观测点估计值；$\hat{Z}$ 为波幅估计值。

用波形分布模型对观测点进行估计时，会产生一定的误差。如果误差太大，就不能用该模型进行预测。为此，用拟合度：

$$C = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{m}(D_i - \hat{D}_i)^2}{\sum_{i=1}^{m}(D_i - \bar{D}_i)^2}\right] \times 100\% \tag{7-22}$$

来评价估计值 $\hat{D}$ 与观测值 D 的贴近程度。当大多数观测点的拟合度在75%以上时，就可以用波形分布模型进行预测。

具体操作时，在预测区范围内，从10线到100线，以50m间距垂直基线作剖面。在250～－70m标高间已知9个中段切割的剖面线上，测取矿脉相对于基线Ⅰ的距离和矿脉在剖面线上的水平宽度值。在此基础上进行波的分解与叠加。考虑到预测区各矿脉主要受控于NE向、NNE向、NEE向三组断裂构造，在波的分解过程中，把调和数确定为3。基本取样长度确定为320m。应用的具体模型如下：

$$\hat{D}_i = \hat{y}_i + \hat{Z}_i/\cos(\arctan b) \tag{7-23}$$

$$\hat{Y}_i = a + bx_i \tag{7-24}$$

$$\hat{Z}_t = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{3}\left(A_n\cos\frac{n\pi x_i}{160} + B_n\sin\frac{n\pi x_i}{160}\right) \tag{7-25}$$

$$A_n = \frac{1}{4}\left\{\frac{Z_0 + Z_8}{2} + \sum_{i=1}^{7} Z_i\cos\frac{n\pi x_i}{160}\right\} \qquad n = 0,1,2,3 \tag{7-26}$$

$$B_n = \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{7} Z_i\sin\frac{n\pi x_i}{160} \qquad n = 1,2,3 \tag{7-27}$$

$$Z_i = \cos(\text{arc}\tan b)(D_t - \hat{Y}_i) \tag{7-28}$$

经计算机处理，在36条剖面上得到矿脉与基线Ⅰ距离波形分布模型和矿脉水平宽度波形分布模型各333组。因数据量太大，在此仅给出95线上10条矿脉水平宽度和矿脉与基线Ⅰ距离的波形分布模型系数、拟合度，以及它们在170m中段上的观测值和估计值，见表7-16、表7-17。

表7-16　95线矿脉与基线Ⅰ距离波形分布模型系数、观测值、估计值、拟合度

矿　脉	a_0	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	170m中段距离值/m		C
								Z	$\hat{Z}$	
4号	−3.0246	−4.6922	−0.7157	0.8749	4.7907	−3.9127	0.5057	−262	−261.8	0.9966
52号	−5.0449	−10.1944	−1.9337	2.0853	6.4127	−1.3008	3.1757	−118	−120.7	0.8761
52支$_1$号	−5.6717	−8.1258	−0.8749	2.1263	3.1907	2.2165	−3.9920	−118	−114.8	0.7741
47支号	12.8445	10.2106	7.5371	13.4631	−3.6168	−2.8698	10.7723	−49	−58.6	0.6747
48号	4.3102	0.1466	1.6679	8.9080	3.4679	−6.8624	0.0367	66	66.6	0.9996
52支号	−10.6818	−12.7437	−4.3620	7.8756	15.3064	−11.6512	8.4847	3	9.2	0.8979
47-1号	−4.7883	−8.1405	0.4147	−4.1273	−1.0023	2.6893	−1.5785	3	2	0.9996
48支号	4.5878	−7.1340	3.2453	6.6347	−11.2586	6.3908	−10.5596	143	142.6	0.8761
10-1号	6.4091	11.7284	9.4059	1.7087	14.9112	−12.2806	−6 4578	315	317.3	0.9554
50号	23.4267	20.1016	12.5657	16.0397	8.0865	4.3721	−1.1363	241	231.2	0.9010

表7-17　95线矿脉水平宽度波形分布模型系数、观测值、估计值及拟合度

矿　脉	a_0	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	170m中段水平宽度值/m		C
								Z	Z	
4号	−0.1056	−1.4937	1.6250	−0.2563	−1.0656	1.8666	−0.5489	1	1.3	0.9637
52号	−0.0981	0.8592	0.3125	−0.4842	0.2012	0.8033	0.4446	2	2.4	0.8198
52支$_1$号	0.3306	1.5089	0.7500	−0.2589	1.3466	0.8167	0.9633	2	2	0.7280
47支号	−0.0897	−1.2465	−0.4624	2.5714	1.5006	−1.5965	2.0439	2	2.2	0.9431
48号	−0.5458	−0.0973	0.3875	−0.6277	−0.0524	1.0667	0.0642	1	1.6	0.6631
52支号	−0.9078	−1.5937	−0.2250	−0.3563	1.2544	0.4867	−1.4689	7	6.2	0.7078
47-1号	0.2281	0.1927	0.2748	1.6058	3.0131	−2.3614	−0.5073	7	7.2	0.9374
48支号	−0.9203	1.9437	−0.2875	−1.7687	0.8108	1.5367	1.2375	2.5	3.2	0.7773
10-1号	1.6431	0.5499	−2.1875	−1.9249	0.5343	−0.9000	−1.6657	10	10.2	0.9926
50号	−0.6412	−5.6863	0.4996	2.4389	2.6189	−6.3449	−0.4286	17	15.9	0.9730

对333个矿脉与基线Ⅰ距离波形分布模型拟合度统计计算，拟合度数值绝大多数在85%以上，最大值为99.99%，最小值为48.43%，平均值为91.10%，均方差为9.95%，变异系数0.1092。表明矿脉与基线Ⅰ距离波形分布模型可用。对333个矿脉水平宽度波形分布模型拟合度统计计算，拟合度数值绝大多数在80%以上，最大值100%，最小值36.21%，平均值83.95%，均方差12.83%，变异系数0.1528。表明矿脉水平宽度波形分布模型可用。于是，应用各类波形分布模型向深部每40m一个点进行预测，得到18条矿脉在36条剖面

上，上自 250m 标高，下至 −790m 标高各预测点的矿脉与基线 I 距离估计值和矿脉水平宽度估计值各 8910 个。前者标定控矿断裂构造形迹在空间各点上的位置，表征断裂构造的产出特征；后者估计矿脉在空间各点上的水平宽度，表征矿脉在不同空间上的发育程度。图 7-2 是预测的 95 线上矿脉空间分布特征。从图可以看出，各矿脉在垂向上追踪多组断裂构

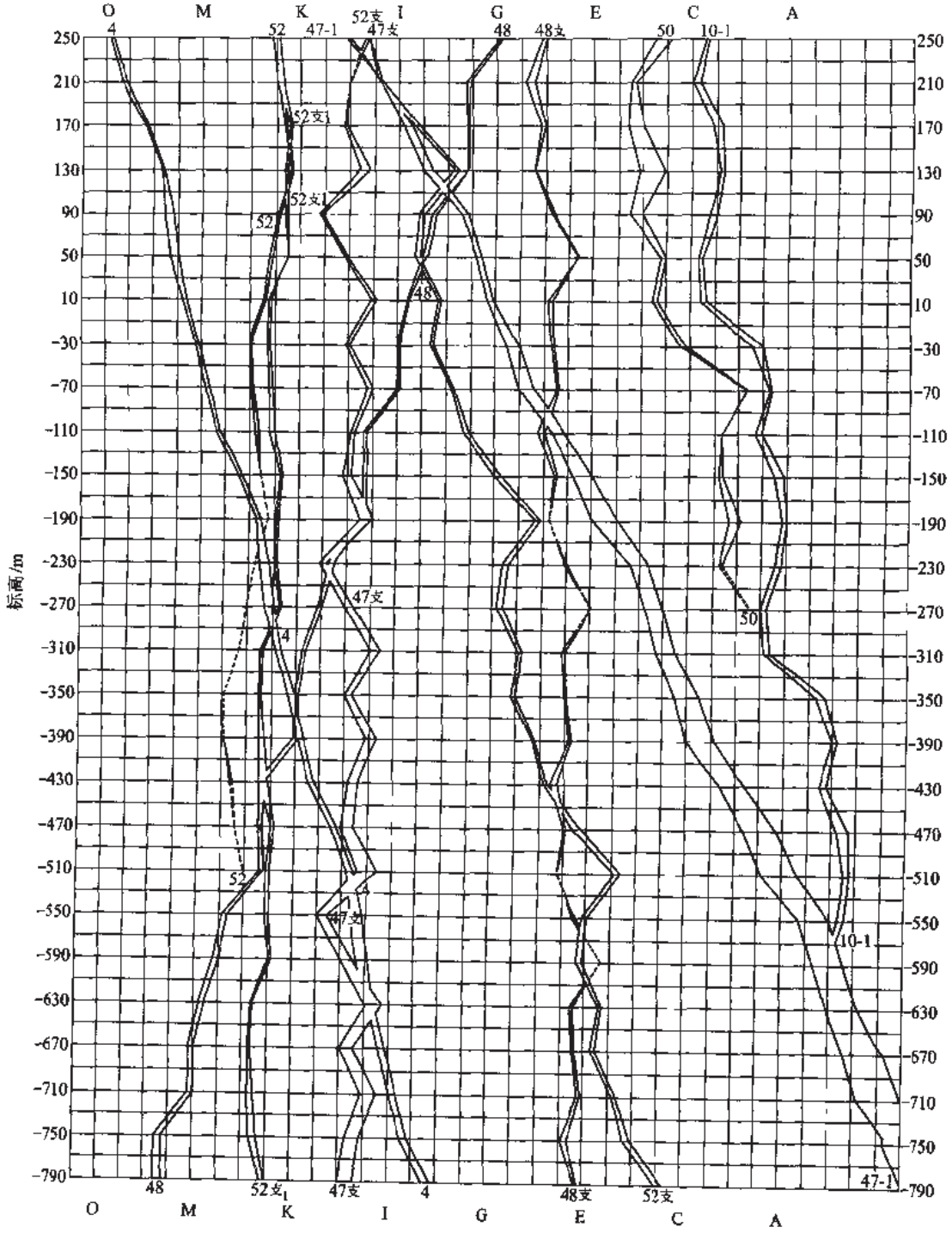


图 7-2　95 线矿脉空间分布预测剖面图

造裂隙分布。相邻各点间倾向倾角变化极大。矿脉间时而远离，时而贴近、交切、复合，在空间上形成网络。按总体产状大致分为3部分，总体倾向SE的有4号、10-1号、10-2号、47-1号、48支号、52支号等矿脉。总体倾向NW的有48号、52号等矿脉。总体产状近直立的有52支$_1$号、47号等矿脉。其中，47-1号、47支号矿脉向深部大幅度变宽。52支号、10-1号矿脉向下平稳分布，并且10-1号矿脉在－570m标高附近与47-1号矿脉复合于一起。48号、4号矿脉向深部宽度略有增加。10-2号、48支号、52号等矿脉向深部宽度迅速变窄。其中，10-2号矿脉厚度变化大，至－270m标高附近尖灭。48支号矿脉从－190m标高向下表现为尖灭再现分布特征。52号矿脉从－190m标高向下也呈尖灭再现分布特征，至－510m标高附近尖灭。图7-3是矿化体矿脉累加水平宽度等值线垂直纵投影图。可以看出，沿基线方向矿脉累加水平宽度呈宽一窄交替变化，即上部自88线以西，深部自81线以西，矿脉水平宽度累加值在20m以上。向NE，上部69～88线，深部59～81线，矿脉水平宽度累加值多数在20m以下。再向NE，上部50～69线，深部48～59线，矿脉水平宽度累加值又增大到20m以上。继续向NE，上部25～50线，深部17～48线，矿脉水平宽度累加值又降低到20m以下。到上部25线以东，深部17线以东，矿脉水平宽度累加值又增大到20m以上。从矿脉水平宽度累加值在不同空间上增厚变薄的幅度看，自SW向NE，矿脉水平宽度总体有逐渐变薄的趋势。在垂直空间上，矿脉水平宽度累加值也呈宽一窄交替变化。几个宽度较大的空间是250～50m标高；－150～－270m标高；－390～－790m标高。

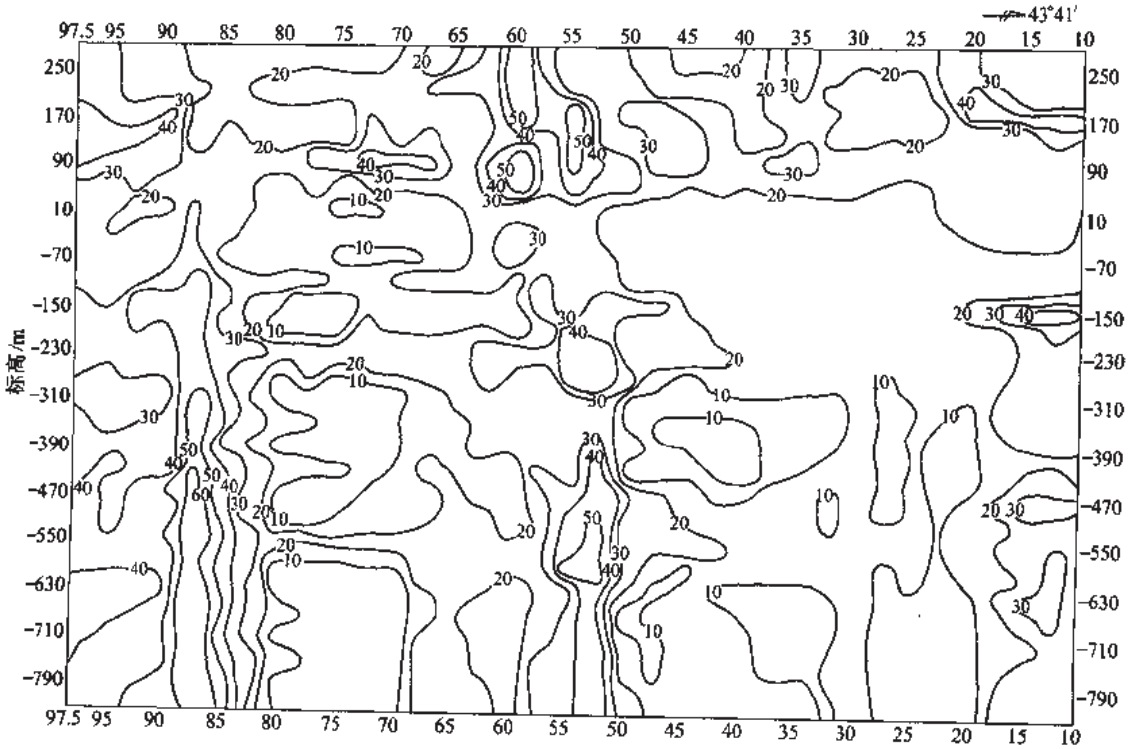


图7-3　矿脉累加宽度等值线垂直纵投影图

在深部预测区控矿断裂构造形迹和矿脉形态规模定量定位的基础上，水平方向上，自西向东按50m间隔测取各矿脉走向方位角。垂直方向上，自上而下按40m间隔测取矿脉倾向倾角。计算走向一级差和倾角一级差。进一步作36条勘探线的地质剖面图，并在每条剖面

上划分预测单元，统计单元内矿脉条数和矿脉组构。这样我们就掌握了深部预测区的地质环境。

7.1.2.5 深部预测区矿体定位预测

根据每个预测单元上矿脉水平宽度、倾向倾角、走向方位角、矿脉条数、矿脉组构等特征，给每个预测单元的各个标志赋值，应用单元含矿性回归估计模型、单元含矿性判别模型、单元含矿性欧氏距离评判模型，以及综合评判准则评价每个预测单元的含矿性。各种计算和评判由电子计算机完成。结果在2612个有效预测单元中，评出预测含矿单元572个，占总预测单元的21.9%。其中，1级含矿单元401个，占70.10%；2级含矿单元171个，占29.9%。

7.1.2.6 划分成矿远景区段

A 预测含矿单元的地质分析

预测含矿单元所处的地质环境，应该是致矿的异常地质环境。预测含矿单元的地质分析，实质上是调查该单元中致矿地质异常的发育程度，并依此对单元含矿性作进一步的评价。为此，将评出的572个预测含矿单元，以及单元包含的各条矿脉列出，综合分析水平宽度、单元中心点上部倾向倾角、单元中心点下部倾向倾角、倾角一级差、单元中心点以东走向方位角、单元中心点以西走向方位角，走向一级差等控矿标志反映的地质环境。具体作法是，把标志状态出现矿体也出现的概率 $P_x \geqslant 30\%$，或 P_x 与标志状态不出现矿体出现的概率 P_0 之比 $q > 1.2$ 的标志状态，看作是异常标志状态。当矿脉的上列7个标志中有4个或4个以上异常标志状态，并且所在单元为1级含矿单元时，为1级预测含矿脉段。有2～3个异常标志状态，且所在单元为1级含矿单元，或有4个及4个以上异常标志状态，所在单元为2级含矿单元时，为2级预测含矿脉段。有2～3个异常标志状态，且所在单元为2级含矿单元时，为3级预测含矿脉段。仅有1个异常标志状态时，为预测高矿化脉段。以单元所含的含矿脉段为计量单位，在深部预测区共预测出176个1级含矿脉段，469个2级含矿脉段，152个3级含矿脉段，179个高矿化脉段。各矿脉的预测结果如下：

4号矿脉

在12.5～95线，－90～－810m标高范围内，4号矿脉包含258个预测单元。其中有57个预测含矿脉段和30个预测高矿化脉段。在预测含矿脉段中，1级的10个，占17.54%；2级的35个，占61.4%；3级的12个，占21.05%。它们主要分布在80～95线之间和40～47.5线之间。根据脉段空间分布和组合特征，划分出3个矿体有利赋存空间。

(1)分布于90～95线，－350～－790m标高，基线 H 与基线 K 之间。由16个预测含矿脉段和2个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中，1级的占31.25%，2级的占50%，3级的占18.75%。预测含矿脉段和高矿化脉段在空间上分布不均匀。90线上，仅在－350m标高处分布。92.5线上，在－350、－430、－510、－550、－670m标高处断续分布。在95线上，上自－350m标高，下至－790m标高连续分布。在倾斜方向上，自上而下，矿体有利赋存空间逐步向SE方向转移。

此外，在90线的－370m标高附近和92线的－570m标高附近，各有1个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点。

(2)分布于80～85线，－390～－790m标高，基线 F 与基线 I 之间。由12个预测含矿脉段和4个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中，2级的占75%，3级的占25%。预测含

矿脉段和高矿化脉段在空间上分布不均匀。80线上，仅在－390～－430m、－630m标高处分布。82.5线上，集中分布于－470～－750m标高和－790m标高。至85线，集中分布于－510～－630m标高和－710～－750m标高。在倾斜方向上，自上而下，矿体有利赋存空间逐渐向SE方向转移。

此外，在85线的－760m标高附近，有1个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点。在该空间以西88线的－750m标高附近，也有一个地球化学标志空间变异模型预测的矿体见矿深度点。

(3)分布于40～50线，－470～－630m标高，基线F与基线H之间，由6个2级预测含矿脉段和3个预测高矿化脉段组成。各脉段在空间上分布不均匀。在40线上，上自－470m标高，下至－590m标高，预测含矿脉段和高矿化脉段连续分布，到42.5线则在－470～－510m标高和－630m标高上断续分布。45线没有预测含矿脉段，也没有预测高矿化脉段，47.5线和50线上，仅在－470m标高处有预测含矿脉段。

4-1号矿脉

在12.5～15线和35～62.5线，－90～－810m标高范围内，4-1号矿脉包含86个预测单元。其中有65个预测含矿脉段和13个预测高矿化脉段。在预测含矿脉段中，1级的16个，占24.62%；2级的42个，占64.62%；3级的7个，占10.77%。它们主要分布在55～60线和37.5～47.5线。根据脉段空间分布和组合特征，划分出3个矿体有利赋存空间。

(1)分布于52.5～60线，－110～－350m标高，基线K与基线M之间，由15个预测含矿脉段组成。其中，1级的占20%；2级的占73.33%；3级的占6.67%。各脉段在空间上分布不均匀。52.5线上，仅在－150m和－350m标高处分布。55线上，在－110～－150m标高和－230～－350m标高分布。57.5线上，仅在－230m和－310m标高分布。60线上，在－150～－230m标高，－310～－350m标高分布。在倾斜方向上，自上而下，矿体有利赋存空间逐渐向NW方向转移。

(2)分布于55～62.5线，－590～－790m标高，基线M与基线O之间，由8个预测含矿脉段和2个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中，1级的占37.5%，2级的占62.5%。各脉段在空间上分布不均匀。55线上，在－590～－670m标高和－750m标高分布。57.5线上，仅在－670m标高分布。60线上，在－670～－790m标高连续分布。62.5线上，仅在－670～－710m标高分布。在倾斜方向上，自上而下，矿体有利赋存空间逐渐向NW方向转移。

(3)分布于37.5～47.5线，－110～－790m标高，基线G与基线J之间，由33个预测含矿脉段和5个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中，1级的占21.21%；2级的占63.64%；3级的占15.15%。脉段在空间上分布不连续。37.5线上，分别在－150～－190m标高，－350m标高，－470～－510m标高，－790m标高断续分布。40线上，分别在－150m标高，－230～－350m标高，－430～－510m标高，－590～－630m标高，－710～－790m标高断续分布。42.5线上，在－110m标高，－190～－310m标高，－430～－550m标高，－630m标高，－750m标高断续分布。45线上，在－190－－230m标高，－350～－390m标高，－470m标高断续分布。47.5线上，仅在－350～－390m标高和－470m标高分布。在倾斜方向上，自上而下，矿体有利赋存空间逐渐向SE方向转移。

4-2号矿脉

在45～47.5线和55～60线，－90～－810m标高范围内，4-2号矿脉包含78个预测单

元。其中有19个预测含矿脉段和4个预测高矿化脉段。在预测含矿脉段中,1级的5个,占26.32%;2级的13个,占68.42%;3级的1个,占5.26%。它们主要分布在47.5线和55～60线。根据各脉段空间分布和组合特征,划分出4个矿体有利赋存空间。

(1)分布于55～60线,－110～－350m标高,基线*L*和基线*N*之间,由8个预测含矿脉段和2个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中,1级的占37.5%,2级的占62.5%。在空间分布上,自NE向SW方向,上述脉段逐渐减少。55线上,在－110～－150m标高和－230～－350m标高断续分布。57.5线上,在－190～－230m标高和－310m标高断续分布。到60线,仅在－230m标高分布。在倾斜方向上,自上而下,矿体有利赋存空间逐渐向NW方向转移。

(2)分布于55～60线,－430～－590m标高,基线*N*与基线*O*之间,由5个预测含矿脉段和1个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中,1级的占20%,2级的占80%。自SW向NE,上述脉段向深部增多。60线上,仅在－470m标高处分布一个含矿脉段。57.5线上,在－430～－470m标高有2个含矿脉段连续分布。到55线,在－470～－510m标高和－590m标高断续分布。

(3)分布于47.5线,－110～－190m标高,基线*J*与基线*K*之间,由3个预测含矿脉段组成。其中,1、2、3级含矿脉段各占33.33%。它们在47.5线上,－110～－190m标高范围连续分布。

(4)分布于45～47.5线,－430～－510m标高,基线*K*附近,由3个预测含矿脉段组成。其中,2级含矿脉段占66.67%,3级含矿脉段占33.33%。自NE向SW,上述脉段向深部发育,且在数量上有所增加。45线上,仅在－430m标高分布1个含矿脉段。至47.5线,在－470～－510m标高有2个含矿脉段连续分布。

52号矿脉

在12.5～95线,－90～－810m标高范围内,52号脉包含414个预测单元。其中有73个预测含矿脉段和12个预测高矿化脉段。在预测含矿脉段中,1级的20个,占27.4%;2级的42个,占57.42%;3级的11个,占15.18%。它们主要分布在80～95线,52.5～55线,35～45线,12.5～17.5线。根据各脉段空间分布和组合特征,划分出5个矿体有利赋存空间。

(1)分布于80－95线,－110～－430m标高,基线*I*与基线*L*之间,由17个预测含矿脉段组成。其中,1级的占29.41%,2级的占52.94%,3级的占17.65%。自SW向NE,上述脉段有向深部发展趋势。在87.5～95线,含矿脉段分布在－110～－230m标高。82.5～85线,含矿脉段分布在－150～－310m标高。到80线,含矿脉段主要分布在－390～－430m标高。在倾斜方向上,自上而下,矿体有利赋存空间逐渐向NW方向转移。

此外,在82线的－440m标高附近,有1个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点。

(2)分布于52.5～55线,－670～－790m标高,基线*H*与基线*J*之间,由6个预测含矿脉段组成。其中,1级和2级预测含矿脉段各占50%。含矿脉段在52.5线的－710m标高和－790m标高断续分布。在55线的－670～－790m标高连续分布。

(3)分布于35～45线,－110～－270m标高,基线*G*和基线*I*之间,由8个预测含矿脉段和2个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中,2级的占62.5%,3级的占37.5%。在空

间上可分为两个小区。第1小区分布在35～42.5线，－110～－150m标高范围。由5个含矿脉段组成。自SW到NE，有缓慢向深部分布趋势。第2小区分布在40～45线，－190～－270m标高范围。由4个含矿脉段组成。自SW到NE，有向深部分布趋势。

(4)分布于35～37.5线，－470～－630m标高，基线 H 与基线 K 之间，由7个预测含矿脉段和1个高矿化脉段组成。预测含矿脉段中，1级的占28.57%，2级的占71.43%。在空间分布上，可把上述脉段分为上、下两部分，上部的分布在35～37.5线，－470～－550m标高处。包括6个含矿脉段。下部的分布在35～37.5线，－630m标高处，包括2个含矿脉段。在倾斜方向上，自上而下，矿体有利赋存空间逐渐向NW方向转移。

(5)分布于15～17.5线，－550～－790m标高，基线 E 与基线 H 之间，由10个预测含矿脉段组成。其中，1级的和2级的各占50%。在17.5线，上自－550m标高，下至－790m标高，含矿脉段连续分布。而15线，仅在－670m标高和－750m标高处断续分布。在倾斜方向上，自上而下，矿体有利赋存空间缓慢向SE方向转移。

52支号矿脉

在80～95线，－90～－790m标高范围内，52支号矿脉包含110个预测单元。其中有14个预测含矿脉段和1个预测高矿化脉段。在预测含矿脉段中，1级的1个，占7.14%。2级的7个，占50%。3级的6个，占42.96%。在80～92.5线，－110～－230m标高，基线 F 和基线 H 之间，构成1个矿体有利赋存空间。该空间由9个预测含矿脉段和1个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中，2级的占44.44%，3级的占55.55%。自SW向NE，含矿脉段有向深部发育趋势。在87.5～92.5线，含矿脉段仅分布在－110～－150m标高之间。80～85线，含矿脉段则在－110～－230m标高之间连续分布。在倾斜方向上，自上而下，矿体有利赋存空间逐渐向SE方向转移。

此外，在83线的－150m标高附近，有1个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点。还有2个预测见矿深度点未落在预测含矿脉段上。1个在93线的－725m标高附近。另1个在96线的－600m标高附近。

52支$_1$号矿脉

在80～95线，－90～－810m标高范围内，52支$_1$号矿脉包含111个预测单元。其中有45个预测含矿脉段和8个预测高矿化脉段。预测含矿脉段中，1级的13个，占28.89%；2级的32个，占71.11%。根据脉段空间分布和组合特征，划分出3个矿体有利赋存空间。

(1)分布于92.5～95线，－110～－230m标高，基线 J 和基线 L 之间，由6个预测含矿脉段组成。其中，1级的占16.67%，2级的占66.67%，3级的占16.67%。含矿脉段在空间上连续分布。自SW到NE，有向深部增多的发展趋势。在倾斜方向上，自上而下，矿体有利赋存空间逐渐向NW方向转移。

(2)分布于80～85线，－150～－270m标高，基线 G 与基线 I 之间，由7个预测含矿脉段和1个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中，1级的和2级的各占42.86%，3级的占14.29%。含矿脉段在85线的－150m标高和－230m标高断续分布。在82.5线的－150～－270m标高及80线的－190～－230m标高连续分布。在倾斜方向上，自上而下，矿体有利赋存空间逐渐向SE方向转移。

(3)分布于82.5～95线，－350～－750m标高，基线 G 与基线 K 之间，由30个预测含矿脉段和3个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中，1级的占23.33%，2级的占

76.67%。各脉段在空间上分布不均匀,且有自 NE 到 SW 向深部发育的变化趋势。含矿脉段在 82.5 线的 -350～-550m 标高范围连续分布。到 85 线,仅在 -510m 标高处分布。在 87.5 线的 -350～-630m 标高范围又连续分布。到 90 线,含矿脉段在 -350～-630m 标高和 -710m 标高分布。在 92.5 线,含矿脉段在 -350m标高、-470～-590m 标高、-670～-750m 标高分段分布。到 95 线,含矿脉段仅在 -710～-750m 标高分布。在倾斜方向上,90 线以西,自上而下,矿体有利赋存空间逐渐向 SE 方向转移。90 线以东,自上而下,矿体有利赋存空间逐渐向 NW 方向转移。

47 号矿脉

在 12.5～77.5 线,-90～-810m 标高范围内,47 号矿脉包含 362 个预测单元。其中有 55 个预测含矿脉段和 15 个预测高矿化脉段。在预测含矿脉段中,1 级的 11 个,占 20%。2 级的 29 个,占 52.73%。3 级的 15 个,占 27.27%。它们主要分布在 12.5～25 线,30～42.5 线,47.5～57.5 线,70～77.5 线。根据脉段空间分布和组合特征,划分出 3 个矿体有利赋存空间。

(1)分布于 52.5～57.5 线,-430～-670m 标高,基线 *E* 与基线 *G* 之间,由 9 个预测含矿脉段组成。其中,1 级的占 44.44%,2 级的占 33.33%,3 级的占 22.22%。含矿脉段主要分布在 55 线,-430～-630m 标高和 -670m 标高。在 52.5 线,含矿脉段仅在 -550～-590m 标高分布。在 57.5 线,只在 -510m标高处有含矿脉段分布。

(2)分布于 30～42.5 线,-150～-350m 标高,基线 *G* 和基线 *I* 之间,由 7 个预测含矿脉段和 4 个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中,2 级的占 71.43%,3 级的占 28.57%。自 NE 向 SW,含矿脉段和高矿化脉段增多,并向深部发育。在 30～37.5 线,含矿脉段仅在 -110～-150m 标高处分布。在 40～42.5 线,含矿脉段则在 -150～-350m 标高范围分布。在倾斜方向上,自上而下,含矿脉段逐渐向 NW 方向转移。

(3)分布于 12.5～20 线,-150～-470m 标高,基线 *D* 与基线 *F* 之间,由 12 个预测含矿脉段和 2 个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中,1 级的占 25%,2 级的占 41.67%,3 级的占 33.33%。自 SW 向 NE,含矿脉段和高矿化脉段增多,并向深部发育。在 20 线,仅在 -150m 标高发育 1 个含矿脉段。17.5 线,含矿脉段在 -150～-190m标高和 -350m 标高断续分布。15 线,含矿脉段在 -230～-390m 标高连续分布。到 12.5 线,含矿脉段在 -190～-230m 标高、-310～-350m 标高、-430～-470m 标高断续分布。在倾斜方向上,自上而下,矿体有利赋存空间缓慢向 SE 方向转移。

47-1 号矿脉

在 75～95 线,-90～-810m 标高范围内,47-1 号矿脉包含 155 个预测单元。其中有 16 个预测含矿脉段和 2 个预测高矿化脉段。预测含矿脉段中,1 级的 3 个,占 18.75%;2 级的 9 个,占 56.25%;3 级的 4 个,占 25%。它们主要分布在 75～90 线,-110～-430m 范围。可划分为 2 个矿体有利赋存空间。

(1)分布于 75～90 线,-110～-270m 标高,基线 *A* 南东 50m 和基线 *D* 之间,由 13 个预测含矿脉段和 2 个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中,1 级的占 23.08%,2 级的占 61.54%,3 级的占 15.38%。它们主要集中分布在 80～85 线。而在 75～77.5 线和 87.5～90 线,仅在 -190m 标高附近分布。在倾斜方向上,自上而下,矿体有利赋存空间逐渐向 SE 方向转移。

(2)分布于77.5～80线，－350～－430m标高，基线A南东100～150m之间，由3个预测含矿脉段组成。其中，2级的占33.33%，3级的占66.67%。自SW到NE，含矿脉段向深部发育。在倾斜方向上，自上而下，矿体有利赋存空间向SE方向转移。

47支号矿脉

在12.5～95线，－90～－810m标高范围内，47支号矿脉包含512个预测单元。其中有99个预测含矿脉段和23个预测高矿化脉段。预测含矿脉段中，1级的26个，占26.26%；2级的47个，占47.47%；3级的26个，占26.26%。它们主要分布在70～95线，45～57.5线，32.5线。根据脉段空间分布和组合特征，划分出4个矿体有利赋存空间。

(1)分布于67.5～92.5线，－110～－270m标高，基线*C*与基线*J*之间，由16个预测含矿脉段和8个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中，1级的占37.5%；2级的占43.75%；3级的占18.75%。预测含矿脉段和高矿化脉段在空间上分布不均匀。92.5线上仅有1个含矿脉段在－110m标高处分布。90线上，含矿脉段在－110m标高和－230m标高断续分布。85～87.5线上，含矿脉段在－110m标高和－190～－230m标高断续分布。82.5线上，含矿脉段在－150m标高和－230～－270m标高断续分布。80线和75线上，含矿脉段仅在－110m标高和－230m标高处分布。77.5线上，只在－230m标高处有一个含矿脉段分布。72.5线上，含矿脉段在－150～－270m标高范围连续分布。70线上，含矿脉段在－110～－150m标高和－270m标高断续分布。67.5线上，只有一个含矿脉段在－230m标高处分布。沿走向方向，自SW向NE，矿体有利赋存空间由NW逐渐向SE方向转移。在87.5～92.5线，主要分布在基线*H*与基线*J*之间。在75～87.5线，主要分布在基线*E*与基线*H*之间。在67.5～75线，主要分布在基线*C*与基线*E*之间。在倾斜方向上，自上而下，矿体有利赋存空间由SE逐渐向NW方向转移。

此外，在该空间内及其附近，有8个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点。它们集中分布在68～74线，－110～－290m标高范围内。

(2)分布于82.5～95线，－430～－790m标高，基线*F*和基线*J*之间，由26个预测含矿脉段和3个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中，1级的占19.23%；2级的占42.31%；3级的占38.46%。它们在空间上分布比较集中。大体上可分为两段：其一分布在90～95线，－430～－710m标高空间范围。其特点是自上而下，含矿脉段断续分布。其二分布在82.5～87.5线，－550～－790m标高空间范围。其特点是自上而下含矿脉段连续分布。从总体上看，自SW到NE，含矿脉段和高矿化脉段有向深部发育趋势。沿走向方向，自SW到NE，矿体有利赋存空间逐渐向SE方向转移。在倾斜方向上，自上而下，矿体有利赋存空间向SE方向转移。

在该空间内及其附近，有5个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点。它们分布在81～86线，－530～－560m标高和－720～－770m标高，以及96线的－560m标高。

(3)分布于45～60线，－110～－350m标高，基线*B*与基线*F*之间，由21个预测含矿脉段和4个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中，1级的占42.86%；2级的占47.62%；3级的占9.52%。各脉段在空间上紧密分布。SW自60线，NE自45线，从两端向52.5线，含矿脉段数量增加，并且向深部发育。例如，60线上仅有1个含矿脉段在－110m标高处分布。到57.5线，则有3个含矿脉段在－110～－190m标高连续分布。到55线，有4个含矿

脉段在－110～－230m标高连续分布。至52.5线，有7个含矿脉段在－110～－350m标高连续分布。在47.5～50线，各有4个含矿脉段在－110～－230m标高分布。到45线，只有2个含矿脉段在－110m和－230m标高分布。在倾斜方向上，自上而下，矿体有利赋存空间逐渐向NW方向转移。

在该空间内及其附近，有4个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点。1个分布在50线－270m标高附近，1个分布在61线－135m标高附近。2个分布在54～55线，－270～－310m标高范围。

在该空间内，还有1个矿物包体信息空间变异模型预测的矿体见矿深度点，位于56线的－250m标高附近。

(4)分布于50～57.5线，－430～－790m标高，基线E和基线H之间，由13个预测含矿脉段组成。其中，1级的占23.08%；2级的占30.77%；3级的占46.15%。它们主要分布于52.5线。在57.5线，仅在－510m标高处分布一个含矿脉段。在55线，也只有2个含矿脉段断续分布在－510m标高和－590m标高处。到52.5线，则有8个含矿脉段分布在－430～－630m标高，－710m标高，－790m标高。而到50线，只有2个含矿脉段断续分布在－590m标高和－790m标高。倾斜方向上，自上而下，矿体有利赋存空间向NW方向转移。

在该空间内及其附近，有2个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点。1个在52线－630m标高附近。1个在53线－445m标高附近。

此外，还有7个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点。其中有2个落在预测含矿脉段内，它们同在72线上，1个位于－450m标高附近。1个位于－500m标高附近。其余5个不在预测含矿脉段内，但有2个分布在2号矿体有利赋存空间附近，2个分布在1号矿体有利赋存空间附近。1个位于4号矿体有利赋存空间附近。

48号矿脉

在62.5～95线，－90～－810m标高范围内，48号矿脉包含249个预测单元。其中有66个预测含矿脉段和7个预测高矿化脉段。预测含矿脉段中，1级的13个，占19.7%；2级的43个，占65.15%；3级的10个，占15.15%。根据脉段空间分布和组合特征，圈定出1个矿体有利赋存空间。位于62.5～95线，－110～－630m标高，基线C与基线L之间，由50个预测含矿脉段和5个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中，1级的12个，占24%；2级的32个，占64%；3级的6个，占12%。该空间形态很不规则，各线及各深度上，预测含矿脉段和高矿化脉段的分布变化很大。在62.5线，含矿脉段在－110～－310m标高范围连续分布。65线和70线，含矿脉段在－150m标高和－230～－270m标高断续分布。67.5线和75线，含矿脉段在－230～－270m标高连续分布。72.5线含矿脉段在－190～－270m标高连续分布。77.5线，含矿脉段在－150m标高和－230m标高断续分布。到80线，含矿脉段在－110m标高，－190～－230m标高，－630m标高分段分布。82.5线，含矿脉段在－150～－270m标高，－350～－430m标高，－510m标高，－590m标高断续分布。到85线，只有1个含矿脉段在－230m标高处分布。87.5线，含矿脉段在－190～－270m，－350～－390m标高分段分布。90线，含矿脉段在－230～－510m标高连续分布。92.5线，含矿脉段在－430～－550m标高连续分布。至95线，含矿脉段在－350～－410m标高连续分布。总分布趋势是62.5～80线，含矿脉段集中分布在－150～－270m标高范围。82.5～95线，含矿脉段集中分布在－230～－590m标高范围。沿走向方向，自SW到NE，矿体有利赋存空

间逐渐向SE方向转移。在倾斜方向上,矿体有利赋存空间在77.5～95线,自上而下向NW方向转移。在62.5～70线,自上而下又向SE方向转移。

在该空间内及其附近,有5个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点。1个在78线的－250m标高附近。2个在85～86线,－190～－200m标高范围。2个在88～89线,－285～－315m标高范围。

此外,在82～84线,－790～－800m标高范围,还有3个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点。其中的1个与预测含矿脉段重叠,另2个在预测含矿脉段附近。

18-1号矿脉

在12.5～72.5线,－90～－810m标高范围内,18-1号矿脉包含283个预测单元。其中有60个预测含矿脉段和23个预测高矿化脉段。预测含矿脉段中,1级的9个,占15%;2级的41个,占68.33%;3级的10个,占16.67%。它们主要集中分布在12.5线,20～25线,45～72.5线。根据脉段空间分布和组合特征,划分出2个矿体有利赋存空间。

(1)分布在42.5～70线,－110～－510m标高,基线*B*和基线*F*之间,由29个预测含矿脉段和9个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中,1级的占20.69%,2级的占68.97%,3级的占10.34%。该空间形态不规则,含矿脉段在其中分布不连续。从总的分布趋势看,从SW向NE,含矿脉段向深部分布的数量增加。在65～70线,含矿脉段仅在－110～－150m标高范围分布。到62.5线,含矿脉段则在－110m标高和－230～－310m标高分布。在50～60线,含矿脉段在－110～－510m标高范围断续分布。

在该空间内,有6个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点。其中3个分布在43～48线,－130～－160m标高范围。2个分布在45～47线,－220～－240m标高范围。1个分布在49线的－380m标高附近。

在该空间内,还有6个矿物包体信息空间变异模型预测的矿体见矿深度点。其中的5个集中分布在43～48线,－135～－160m标高范围内。1个分布在49线的－175m标高附近。

(2)分布于20～25线,－150～－470m标高,基线*D*与基线*F*之间,由8个预测含矿脉段和4个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中,1级的和3级的各占12.5%;2级的占75%。含矿脉段在空间上分布不连续。在20线,含矿脉段在－150～－190m标高和－270～－310m标高分段分布。在22.5线,含矿脉段在－150m标高,－270～－310m标高和－390～－470m标高分段分布。在25线,含矿脉段在－230m标高和－350m标高断续分布。沿走向方向,自SW到NE,矿体有利赋存空间逐渐向SE方向转移。

在该空间内及其附近,有5个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点。其中,2个分布在19～20线,－145～－160m标高范围;1个分布在18线的－250m标高附近;1个分布在23线的－160m标高附近;1个分布在25线的－270m标高附近。

在该空间内,还有1个矿物包体信息空间变异模型预测的矿体见矿深度点,分布在23线的－130m标高附近。

此外,在矿体有利赋存空间以外,还有7个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点和8个矿物包体信息空间变异模型预测的矿体见矿深度点。前者有3个与预测含矿脉段重叠,它们集中分布在29～33线,－125～－160m标高范围。另外3个分布在预测无矿区。1个在26线的－140m中段附近。1个在22线的－710m标高附近。1个在32线的－350m标高附近。矿物包体信息空间变异模型预测的矿体见矿深度点中,有7个分布在

预测含矿脉段内及其附近。它们集中分布在29～34线，－100～－140m标高范围。1个分布在预测无矿区，即26线的－140m标高附近。

18-2号矿脉

在12.5～60线，－90～－810m标高范围内，18-2号矿脉包含161个预测单元。其中有43个预测含矿脉段和13个预测高矿化脉段。在预测含矿脉段中，1级的5个，占11.63%；2级的25个，占58.14%；3级的13个，占30.23%。它们主要集中分布于12.5～17.5线，22.5～32.5线，45～60线。根据脉段空间分布和组合特征，划分出3个矿体有利赋存空间。

(1)分布于42.5～60线，－110～－350m标高，基线A与基线E之间，由17个预测含矿脉段和4个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中，1级的占11.7%，2级的占64.71%，3级的占23.53%。含矿脉段主要集中在各勘探线上的－110～－150m标高分布。只是在60线向下延伸到－310m标高。在55线向下延伸到－230m标高。在47.5线向下断续延伸到－350m标高。沿走向方向，自SW到NE，矿体有利赋存空间逐渐向SE方向转移。在倾斜方向上，自上而下，矿体有利赋存空间向SE方向转移。

在该空间内，有4个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点。其中的2个分布在46～47线，－190～－215m标高范围。1个分布于44线的－135m标高附近。1个分布在48线的－135m标高附近。

在该空间内，还有6个矿物包体信息空间变异模型预测的矿体见矿深度点。其中的2个集中分布在44～45线，－125～－135m标高范围。另外4个依次分布在42线的－140m标高附近，46线的－160m标高附近，48线的－125m标高附近和49线的－180m标高附近。

(2)分布于20～32.5线，－110～－150m标高，基线B与基线D之间，由6个预测含矿脉段和1个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中，2级的占33.33%，3级的占66.67%。含矿脉段在该空间内不连续，以26线为界，可分成东西两个微向SW倾伏的小空间。沿走向方向，自SW到NE，矿体有利赋存空间向NW方向转移。

在该空间内，有6个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点。5个集中分布在29～33线，－120～－165m标高范围。1个分布于26线的－135m标高附近。

在该空间内及其附近，还有9个矿物包体信息空间变异模型预测的矿体见矿深度点。

(3)分布于12.5～17.5线，－510～－670m标高，基线E和基线G之间，由7个预测含矿脉段和1个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中，1级的占14.29%；2级的占42.86%；3级的占42.86%。含矿脉段在空间上分布不连续，自上而下分成2个小空间。上面的1个分布在12.5～17.5线，－510～－590m标高，自NE向SW逐渐向深部延伸。下面的1个分布在12.5～15线，－590～－670m标高，也有自NE到SW向深部延伸的趋势。在倾斜方向上，自上而下，矿体有利赋存空间有向NW转移的趋势。

此外，在矿体有利赋存空间以外，有3个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点。其中的2个与预测含矿脉段重叠，分布在32线的－325m标高和31线的－290m标高处，另1个分布在34线的－195m标高附近。

还有1个矿物包体信息空间变异模型预测的矿体见矿深度点落在预测无矿地段。分布在35线的－210m标高附近。

18-3号矿脉

在20～60线，－90～－810m标高范围内，18-3号矿脉包含174个预测单元。其中有

30 个预测含矿脉段和 6 个预测高矿化脉段。在预测含矿脉段中,1 级的 6 个,占 20%;2 级的 16 个,占 53.33%;3 级的 8 个,占 26.67%。主要分布在 20～32.5 线和 40～55 线。根据脉段空间分布和组合特征,划分出 2 个矿体有利赋存空间。

(1)分布于 40～55 线,－110～－190m 标高,基线 *A* 与基线 *D* 之间,由 9 个预测含矿脉段和 3 个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中,1 级的占 22.22%;2 级的占 66.67%;3 级的占 11.11%。脉段在该空间内分布不连续。以 42.5 线的－110m 标高,45 线的－150m 标高,47.5 线的－150m 标高的连线为界,划分成东西两个小空间。东面的 1 个分布在 40～47.5 线,－110～－190m 标高范围。自 NE 到 SW,有向深部延伸的趋势。西面的 1 个分布在 45～55 线,－110～－150m 标高范围。也有自 NE 到 SW,向深部延伸的趋势,但不明显。沿走向方向,自 SW 向 NE,含矿脉段有向 SE 方向转移的分布趋势。在倾斜方向上,自上而下,矿体有利赋存空间逐渐向 SE 方向转移。

在该空间内,有 3 个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点。其中 1 个分布在 42 线的－130m 标高附近。1 个分布在 46 线的－210m 标高附近。1 个分布在 47 线的－130m 标高附近。还有 6 个矿物包体信息空间变异模型预测的矿体见矿深度点。其中的 3 个集中分布在 43～45 线,－130～－140m 标高范围。另外 3 个依次分布在 46 线的－160m 标高附近,48 线的－125m 标高附近和 49 线的－165m 标高附近。

(2)分布于 20～32.5 线,－110～－150m 标高,基线 *A* 与基线 *D* 之间,由 6 个预测含矿脉段组成。其中,1 级的占 16.67%,2 级的占 50%,3 级的占 33.33%。以 25 线为界,可分为东西 2 个小空间。东面的 1 个分布在 20～22.5 线,－110m 标高范围。西面的 1 个分布在 27.5～32.5 线,－110～－150m 标高范围。矿体有利赋存空间自 NE 到 SW 有向深部延伸的趋势。沿走向方向,自 SW 到 NE,有向 NW 方向转移的趋势。

在该空间及其附近,有 5 个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点。其中,2 个分布在 30～31 线,－150～－165m 标高范围;2 个分布在 33 线,－135m 标高和－160m 标高附近;1 个分布在 29 线的－115m 标高附近。

另外有 9 个矿物包体信息空间变异模型预测的矿体见矿深度点。其中,有 5 个集中分布在 31～34 线,－85～－125m 标高范围。1 个分布在 23 线的－130m 标高附近。1 个分布在 26 线的－140m 标高附近。2 个分布于 29～30 线,－140～－175m 标高范围。

此外,在矿体有利赋存空间以外,有 4 个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点。其中的 1 个与预测含矿脉段叠加,位于 49 线的－380m 标高附近。另外 3 个落在预测无矿地段,依次分布在 22 线的－710m 标高附近,27 线的－770m 标高附近,32 线的－350m 标高附近。

10-1 号矿脉

在 12.5～95 线,－90～－810m 标高范围内,10-1 号矿脉包含 263 个预测单元。其中有 111 个预测含矿脉段和 10 个高矿化脉段。在预测含矿脉段中,1 级的 29 个,占 26.13%;2 级的 66 个,占 59.46%;3 级的 16 个,占 14.41%。它们主要分布在12.5～25 线和 55～87.5 线。根据脉段空间分布和组合特征,划分出 3 个矿体有利赋存空间。

(1)分布于 50～90 线,－110～－510m 标高,基线 *B* 与基线 *E* 之间,由 45 个预测含矿脉段和 5 个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中,1 级的占 31.11%,2 级的占 53.33%,3 级的占 15.56%。含矿脉段在该空间内分布较连续。自 SW 到 NE,有向深部延伸的趋势。

如在77.5～90线，含矿脉段在－110～－190m标高范围分布。在65～75线，含矿脉段在－110～－270m标高范围分布。在55～62.5线，含矿脉段在－110～－510m标高分布。沿走向方向，从SW到NE，矿体有利赋存空间缓慢向NW方向转移，在倾斜方向上，自上而下，矿体有利赋存空间有缓慢向SE方向转移的趋势。

在该空间内，有2个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点。1个分布于83线的－205m标高附近，1个在85线的－215m标高附近。

(2)分布于67.5～85线，－350～－790m标高，基线*A*与基线*F*之间，由24个预测含矿脉段组成。其中，1级的占33.33%，2级的占62.5%，3级的占4.17%。含矿脉段在该空间内分布不连续，以－510m标高为界，可分为上下两个小空间。上面的1个分布在67.5～85线，－350～－470m标高范围，自SW到NE，有向深部延伸趋势。下面的1个分布在72.5～82.5线，550～－790m标高范围，自NE到SW，有向深部延伸趋势。沿走向方向，自SW到NE，矿体有利赋存空间逐渐向NW方向转移。在倾斜方向上，自上而下，矿体有利赋存空间向SE方向转移。

(3)分布于12.5～22.5线，－150～－310m标高，基线*E*与基线*F*之间，由13个预测含矿脉段组成。其中，1级的占38.46%，2级的占46.15%，3级的占15.38%。脉段在该空间内分布较连续，自SW向NE，有向深部延伸趋势。

10-2号矿脉

在12.5～72.5线，－90～－810m标高范围内，10-2号矿脉包含131个预测单元。其中有46个预测含矿脉段和15个预测高矿化脉段。在预测含矿脉段中，1级的14个，占30.43%；2级的28个，占60.87%；3级的4个，占8.7%。它们主要分布在12.5～20线和50～72.5线，－110～－350m标高范围。根据脉段空间分布和组合特征，划分出2个矿体有利赋存空间。

(1)分布于45～72.5线，－110～－230m标高，基线*B*和基线*E*之间，由20个预测含矿脉段和2个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中，1级的占45%，2级的占50%，3级的占5%。含矿脉段在空间上分布较连续，由SW到NE，有缓慢向深部延伸趋势。

(2)分布于12.5～20线，－150～－350m标高，基线*D*与基线*F*之间，由6个预测含矿脉段和2个预测高矿化脉段组成。预测含矿脉段中，2级的占83.33%，3级的占16.67%。含矿脉段在空间上分布不连续，自SW到NE，有向深部延伸的变化趋势。如在20线，含矿脉段分布在－150～－190m标高；在15～17.5线，含矿脉段分布在－190～－230m标高；到12.5线，含矿脉段断续分布在－190～－370m标高。

50号矿脉

由于资料所限，对50号矿脉仅控制在87.5～95线。在－90～－810m标高范围内，50号矿脉包含30个预测单元，预测结果，全部为预测不含矿脉段。但有3个地球化学标志值空间变异模型预测的矿体见矿深度点：1个分布在91线的－770m标高附近；2个分布在93线，－105m标高和－145m标高附近。另外还有2个矿物包体信息空间变异模型预测的矿体见矿深度点：1个位于93线的－120m标高附近；1个分布在95线的－155m标高附近。

B　成矿远景区段划分

前已述及，各矿脉在空间分布上，彼此间时而远离，时而贴近、交切、复合。因而，矿脉中

的矿体有利赋存空间由于矿脉的贴近、交切、复合而集中在一定的空间上，它们大小不等，形态各异，所含的矿脉种类和数量也不一样，构成矿化相对密集的成矿远景区段。经综合分析，在深部预测区，共划分出 11 个成矿远景区段。

成矿远景区段 1

分布于 45～95 线，－110～－790m 标高，基线 A 和基线 L 之间。区段内，由预测含矿脉段和预测高矿化脉段紧密连接成的矿体有利赋存空间，在走向方向上，长度一般 50～150m，平均 97m，最长可达 950m。断续分布长度最大可达 1050m。在倾向方向上，宽度一般 150～200m，平均 174m，最宽可达 250m。在垂直方向上，延深长度一般 40～200m，以 40m 者最多，平均 94m。最长可达 480m。断续延深长度最大可达 640m。包括 18-1 号、18-2号、18-3 号、10-1 号、10-2 号、47 支号、48 号、47 号、52 支号、52 支$_1$ 号、4 号等矿脉的预测含矿脉段 266 个，预测高矿化脉段 51 个。预测含矿脉段中，1 级的 76 个，占 28.57%；2 级的 151 个，占 56.77%；3 级的 39 个，占 14.66%。各矿脉的预测含矿脉段和预测高矿化脉段的空间分布位置和变化性列于表 7-18。从表可以看出，在该成矿远景区段中，以 47 支

表 7-18　成矿远景区段 1 矿化特征表

矿脉	空间位置			含矿性①				矿脉	空间位置			含矿性①			
	勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B		勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B
18-1 号	45	C—D	－150～－230	0	0	2	0	10-1 号	47.5	D—E	－390	0	1	0	0
	47.5	B—C	－150～－270	0	1	1	1		50	D—E	－110	0	1	0	0
	50	B—D	－110～－230	1	1	0	2		52.5	C—D	－110～－150	0	2	0	0
	52.5	D—F	－150～－350	2	2	0	1		55	C—D	－150～－230	1	2	0	0
	57.5	C—D	－110～－190	0	2	1	0		57.5	C—D	－110～－150	1	0	1	0
	60	C—E	－110～－350	0	3	1	0		60	C—D	－110～－350	0	3	1	0
	62.5	B—E	－110～－310	1	2	0	1		62.5	C—E	－150～－390	1	4	0	1
	65	C—D	－150	0	1	0	0		65	D—E	－150	0	1	0	0
	67.5	B—E	－110～－230	0	3	0	0		67.5	D—E	－150～－470	3	1	1	0
	70	C—D	－110	1	0	0	0		70	D—F	－110～－470	1	2	0	1
	72.5	D—E	－190～－230	0	2	0	0		72.5	D—E	－110～－270	2	1	0	1
10-2 号	45	C—D	－150～－190	0	1	0	1	18-2 号	47.5	A—C	－110～－270	0	3	1	0
	50	C—D	－110～－230	1	2	0	0		50	B—D	－110～－150	0	1	0	1
	52.5	C—D	－110～－150	0	2	0	0		52.5	D—E	－110	0	1	0	0
	55	B—D	－190～－230	2	0	0	0		55	B—D	－110～－230	2	1	0	1
	57.5	C—D	－110～－150	1	1	0	0		57.5	C	－150	0	0	1	0
	60	C—D	－150～－310	1	2	1	0		60	C—D	－150～－310	1	2	1	0
	62.5	B—C	－150～－310	1	0	0	1	18-3 号	47.5	A—B	－190	0	1	0	0
	65	C—D	－150～－470	1	2	0	0		50	B—C	－110～－150	1	1	0	0
	67.5	C—D	－110～－150	0	1	0	1		52.5	C	－150	1	0	0	0
	70	D	－110～－150	1	1	0	0		55	C—D	－110～－150	0	2	0	0
	72.5	D—E	－110～－270	2	0	1	1		57.5	C—D	－110	0	0	0	1

续表 7-18

矿脉	空间位置			含矿性				矿脉	空间位置			含矿性			
	勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B		勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B
18-3 号	60	D	-110～-150	0	0	1	1	48 号	77.5	F—G	-150～-350	0	0	2	1
47 支号	47.5	C—E	-110～-390	1	3	0	1		80	G—H	-110～-230	0	0	1	2
	50	C—D	-110～-230	1	2	0	1		82.5	G—I	-150～-590	0	4	3	2
	52.5	C—F	-110～-350	3	4	0	0		85	H	-230	1	0	0	0
	55	C—E	-110～-230	1	2	0	1		87.5	H—I	-190～-390	4	1	0	0
	57.5	C—D	-110～-190	0	1	1	1		90	H—K	-110～-510	3	6	0	0
	60	C—D	-110	1	0	0	0		92.5	I—K	-110～-550	2	3	0	0
	62.5	C—D	-190	0	0	0	1		95	I—L	-190～-430	1	1	0	2
	67.5	C	-230	0	1	0	0	47 号	70	E—F	-470	0	1	0	0
	70	D—E	-110～-470	0	0	0	3		75	F—G	-110～-230	2	0	0	0
	72.5	D—E	-150～-270	1	2	1	0		77.5	F—G	-150～-350	0	0	1	2
	75	E—F	-110～-390	0	1	0	2	52 支号	80	F—H	-110～-230	0	0	1	1
	77.5	F—G	-230	0	1	0	0		82.5	F—G	-150～-230	0	3	0	0
	80	F—G	-110～-230	0	1	0	1		85	F—H	-110～-190	0	1	1	0
	82.5	F—G	-150～-750	2	2	3	1		87.5	G—H	-110	0	0	1	0
	85	F—H	-110～-230	0	1	1	1	52 支$_1$号	80	G—H	-190～-230	0	1	0	1
	87.5	G—I	-110～-230	1	0	0	2		82.5	G—I	-150～-750	7	4	1	0
	90	H—I	-110～-230	1	0	0	1		85	G—I	-150～-230	1	1	0	0
	92.5	I—J	-110	0	1	0	0		87.5	H—J	-270～-470	1	3	0	1
	95	I—J	-190～-710	3	2	1	1		90	I—K	-270～-710	2	6	1	1
48 号	62.5	D	-110～-390	1	5	0	0		92.5	J—K	-470～-750	1	5	1	0
	65	C—E	-150～-470	0	4	0	0	4 号	82.5	F—I	-470～-710	0	4	1	1
	70	D—E	-150～-470	2	2	0	0		87.5	H—I	-430	0	0	0	1
	67.5	D—E	-230～-470	0	2	0	1		90	I—K	-270～-550	0	0	0	2
	72.5	E—F	-190～-270	0	2	1	0		95	H—K	-350～-790	4	7	1	0
	75	F—G	-270～-730	0	2	2	0								

①含矿性。A_1:1 级预测含矿脉段;A_2:2 级预测含矿脉段;A_3:3 级预测含矿脉段;B:预测高矿化脉段。

号和 48 号矿脉的矿体有利赋存空间最发育。47 支号矿脉包含 46 个预测含矿脉段和 17 个预测高矿化脉段。48 号矿脉包含 55 个预测含矿脉段和 8 个预测高矿化脉段。其次为 18-1 号、10-1 号、10-2 号、52 支$_1$ 号矿脉,它们包含的预测含矿脉段和预测高矿化脉段依次为 27 和 5,30 和 3,24 和 4,35 和 3。18-2 号、18-3 号、47 号、52 支号、4 号等矿脉分布较少。在该成矿远景区段内,可把上述矿脉包含的预测含矿脉段和预测高矿化脉段分成两组:18-1 号、18-2 号、18-3 号、10-1 号、10-2

号组成第1组，它们分布在45～72.5线，基线 A 到基线 F，－110～－290m标高范围内；48号、47号、52支号、52支$_1$号、4号等矿脉组成第2组，它们分布在67.5～95线，基线 B 到基线 L、－110～－750m标高范围。47支号矿脉则在两个组内均很发育。

从NE到SW，在倾向方向上，成矿远景区段逐渐向NW方向转移。从47.5线的基线 A 至基线 E 转移到95线的基线 H 至基线 L，见图7-4。倾斜方向上，自上而下，成矿远景区段分布空间略向NW方向转移。并且分布范围由上部的40～50m，减少到25～30m，见图7-5。在垂直方向上，自NE向SW，成矿远景区段有向深部扩大的趋势，特别是87.5线以西，成矿远景区段垂向长度扩大到400～680m，见图7-6。

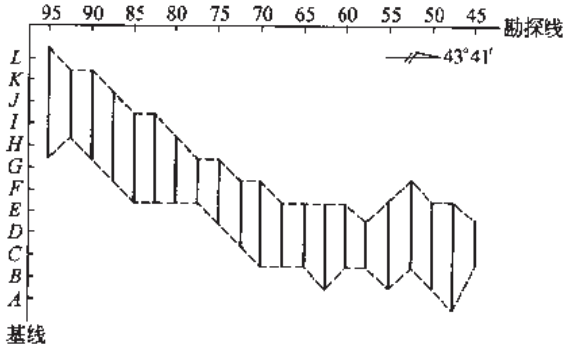


图7-4　成矿远景区段1水平投影图

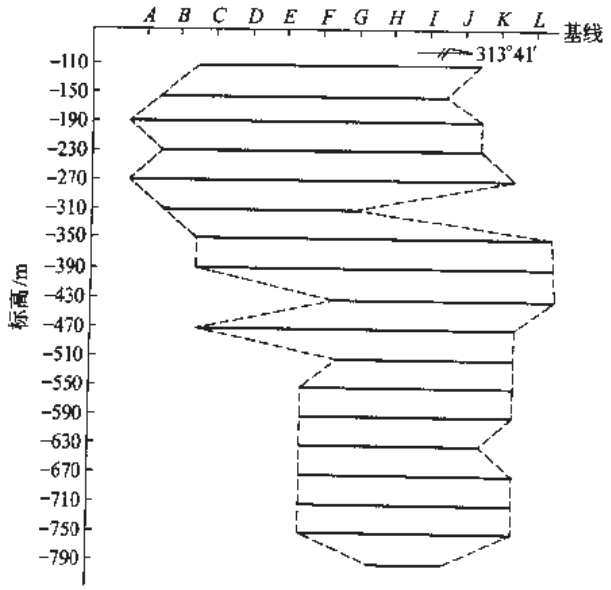


图7-5　成矿远景区段1垂直侧投影图

成矿远景区段2

分布于80～95线，－350～－790m标高，基线 F 与基线 K 之间。区段内，由预测含矿脉段和预测高矿化脉段紧密连接的矿体有利赋存空间，在走向方向上，分布长度一般30～100m，平均76m，最长可达300m。断续分布长度最大300m。在倾向方向上，宽度一般50～250m，平均141m，最宽可达292m。在垂直方向上，延深长度一般40～320m，平均204m，最

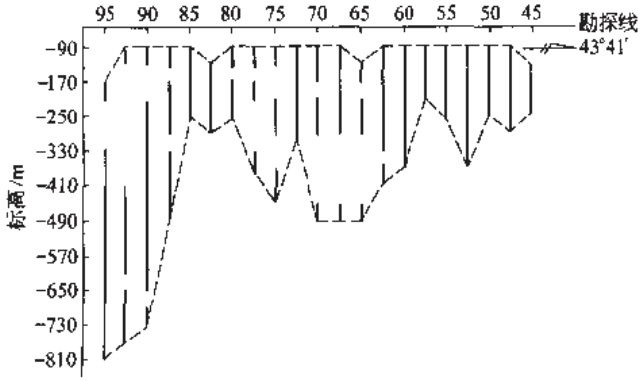


图 7-6　成矿远景区段 1 垂直纵投影图

长可达 480m。包括 4 号、47 支号、52 支$_1$ 号、52 号等矿脉的预测含矿脉段 80 个，预测高矿化脉段 11 个。预测含矿脉段中，1 级的 20 个，占 25%；2 级的 45 个，占 56.25%；3 级的 15 个，占 18.75%。各矿脉的预测含矿脉段和预测高矿化脉段的空间分布位置和变化性列于表7-19。从表可以看出，该成矿远景区段以 47 支号、4 号和 52 支$_1$ 号矿脉的矿体有利赋存空间最发育。它们包含的预测含矿脉段和预测高矿化脉段依次为 26 和 3，25 和 5，27 和 3。52 号矿脉仅在 80 线的 -390～-430m 标高处发育 2 个预测含矿脉段。

从NE 向 SW，在倾向方向上，成矿远景区段自 80～85 线向 SE 方向转移。自 85 线到 95 线又向 NW 方向偏转，见图 7-7。在倾斜方向上，自上而下，成矿远景区段稳定分布在基线 F 与基线 K 之间，向深部有向 SE 方向扩展的趋势，见图 7-8。在垂直方向上，自上而下，预测含矿脉段和预测高矿化脉段沿走向和沿倾向的连续性由差变好。在走向方向上，-330～-490m 标高范围内，连续脉段长 30～100m。-530～-770m 标高范围内，连续脉段长度增长为 50～300m。在倾向方向上，-350～-430m 标高范围内，紧密分布的脉段宽度为 50～100m。-470～-790m 标高范围内，紧密分布的脉段宽度增加到 50～250m，见图 7-9。

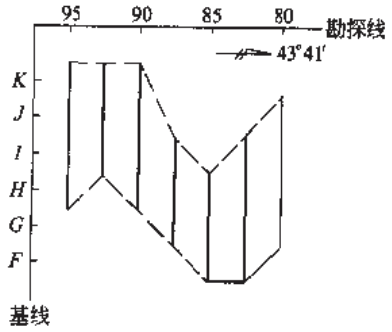


图 7-7　成矿远景区段 2 水平投影图

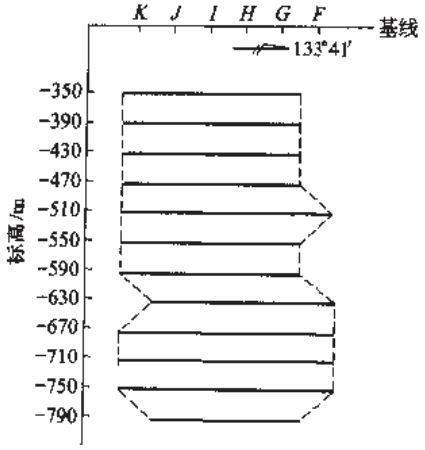


图 7-8　成矿远景区段 2 垂直侧投影图

表 7-19　成矿远景区段 2 矿化特征表

矿脉	空间位置			含矿性①				矿脉	空间位置			含矿性①			
	勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B		勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B
4 号	80	$G—I$	−390～−630	0	3	0	0	47 支号	90	$H—I$	−470～−550	0	1	1	0
	82.5	$F—I$	−470～−710	0	4	1	1		92.5	I	−430～−670	4	1	0	0
	85	$F—H$	−510～−750	0	2	1	3		95	$I—J$	−470～−710	2	2	1	1
	90	$I—J$	−350	0	0	0	1	52 支号	82.5	$G—H$	−350～−750	4	3	0	0
	92.5	I	−510～−550	1	0	1	0		85	$F—G$	−510	0	0	0	1
	95	$H—K$	−350～−790	4	7	1	0		87.5	$G—I$	−550～−790	0	3	0	1
47 支号	82.5	$F—H$	−550～−750	0	2	2	1		90	$I—K$	−270～−710	2	7	1	1
	85	$F—H$	−550～−750	0	2	2	1		92.5	$J—K$	−470～−750	1	5	1	0
	87.5	$G—I$	−550～−790	1	2	3	0	52 号	80	$I—J$	−390～−430	1	1	0	0

①含矿性。A_1:1 级预测含矿脉段;A_2:2 级预测含矿脉段;A_3:3 级预测含矿脉段;B:预测高矿化脉段。

成矿远景区段 3

分布于 82.5～90 线，−110～−350m 标高，基线 I 和基线 M 之间。区段内，由预测含矿脉段和预测高矿化脉段紧密连接的矿体有利赋存空间在走向方向上，分布长度一般 30～100m，平均 74m，最长可达 200m。断续分布长度最长可达 250m。在倾向方向上，宽度一般 100～150m，平均 117m。在垂直方向上，延深长度一般 40～80m，平均 76m，最长可达 160m。包括 52 号、4 号、52 支$_1$ 号等矿脉的预测含矿脉段 31 个，预测高矿化脉段 5 个。预测含矿脉段中，1 级的 8 个，占 25.81%；2 级的 17 个，占 54.84%；3 级的 6 个，占 19.35%。各矿脉预测含矿脉段和预测高矿化脉段的空间分布位置和变化特征列于表 7-20。从表可以看出，该成矿远景区段中，52 号矿脉的矿体有利赋存空间最发育。共包含 14 个预测含矿脉段和 2 个预测高矿化脉段。其次为 4 号和 52 支$_1$ 号矿脉，它们所含的预测含矿脉段和预测高矿化脉段依次为 10 和 2，7 和 1 。

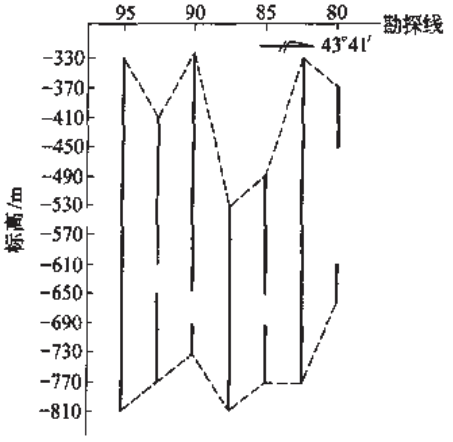


图 7-9　成矿远景区段 2 垂直纵投影图

表 7-20　成矿远景区段 3 矿化特征表

矿脉	空间位置			含矿性①				矿脉	空间位置			含矿性①			
	勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B		勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B
52 号	82.5	$I—J$	−230～−310	1	1	0	0	52 支$_1$ 号	95	$K—L$	−110～−150	0	1	1	0
	85	J	−150～−270	0	2	1	0	4 号	82.5	$I—K$	−230～−310	1	0	0	1
	87.5	$J—K$	−110～−150	1	1	0	0		85	J	−270	0	1	0	0
	90	$K—L$	−150～−190	1	0	1	0		87.5	$K—L$	−110～−150	0	2	0	0
	92.5	$K—L$	−110～−230	0	3	0	1		90	$K—L$	−150～−190	2	0	0	0
	95	$K—L$	−110～−230	1	1	0	1		92.5	$J—L$	−230～−350	0	0	1	1
52 支$_1$ 号	92.5	$J—K$	−110～−350	1	4	0	1		95	$K—M$	−150～−270	0	1	2	0

①含矿性。A_1:1 级预测含矿脉段;A_2:2 级预测含矿脉段;A_3:3 级预测含矿脉段;B:预测高矿化脉段。

从 NE 向 SW，在倾向上，成矿远景区段宽度变大并逐渐向 NW 方向转移，见图 7-10。在倾斜方向上，自上而下，成矿远景区段宽度变小并缓慢向 SE 方向转移，见图 7-11。在垂直方向上，自上而下，预测含矿脉段和预测高矿化脉段沿走向方向连续性由好变差。在 -110～-190m 标高范围，连续脉段长度多数为 50～200m。而 -230～-350m 标高范围，连续脉段长度仅为 30～50m。从 87.5 线向两端，含矿脉段向深部扩展，在垂直纵投影剖面图上，成矿远景区段呈马鞍形分布，见图 7-12。

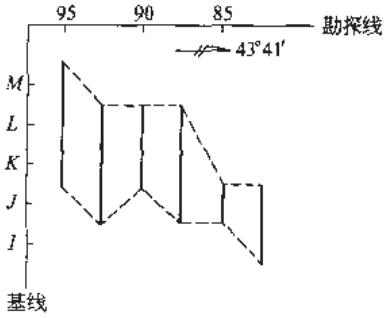


图 7-10　成矿远景区段 3 水平投影图

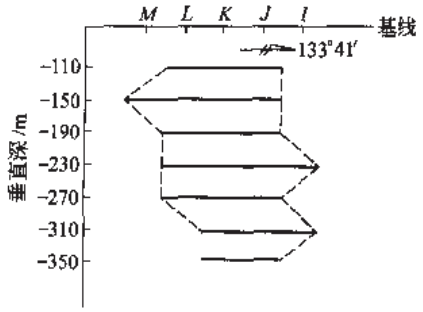


图 7-11　成矿远景区段 3 垂直侧投影图

成矿远景区段 4

分布于 75～90 线，-110～-270m标高，基线 *A* 东南 50m 与基线 *D* 之间。区段内预测含矿脉段和预测高矿化脉段紧密连接的矿体有利赋存空间，在走向方向上，长度变化不定，从 30m 到 300m 皆有，平均值为 143m。在倾向方向上，宽度一般为 100～200m，平均 157m。在垂向方向上，延深长度一般为 40～160m，平均 105m，最长 200m。包括47-1 号和 10-1 号矿脉的预测含矿脉段 27 个，预测高矿化脉段 3 个。在预测含矿脉段中，1 级的 9 个，占 33.33%；2 级的 14 个，占 51.85%；3 级的 4 个，占 14.81%。各矿脉的预测含矿脉段和预测高矿化脉段的空间分布位置和变化性列于表 7-21。从表可以看出，在该成矿远景区段中，两条矿脉的矿体有利赋存

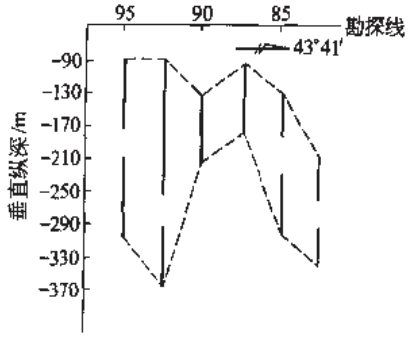


图 7-12　成矿远景区段 3 垂直纵投影图

表 7-21　成矿远景区段 4 矿化特征表

矿脉	空间位置			含矿性①				矿脉	空间位置			含矿性①			
	勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B		勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B
47-1 号	75	$B-C$	-190	0	0	0	1	10-1 号	75	$C-D$	-110～-230	2	2	0	0
	77.5	$B-C$	-190	0	1	0	0		77.5	$C-D$	-150	0	1	0	0
	80	$A-D$	-110～-230	1	3	0	0		80	C	-110～-150	0	2	0	0
	82.5	$A-B$	-110～-270	0	4	0	0		82.5	$B-C$	-110～-150	1	0	0	1
	85	$B-C$	-110～-190	2	0	0	1		85	$B-C$	-110～-190	2	1	0	0
	87.5	C	-190	0	0	1	0		87.5	$B-D$	-110～-190	1	0	1	0
	90	$C-D$	-190	0	0	1	0		90	$B-C$	-190	0	0	1	0

①含矿性。A_1：1 级预测含矿脉段；A_2：2 级预测含矿脉段；A_3：3 级预测含矿脉段；B：预测高矿化脉段。

空间均较发育。47-1 号矿脉有 13 个预测含矿脉段和 2 个预测高矿化脉段,10-1 号矿脉包含 14 个预测含矿脉段和 1 个预测高矿化脉段。

从 NE 向 SW,在倾向方向上,成矿远景区段自 75 线到 82.5 线,分布范围从 150m 扩大到 200m。并略向 SE 方向偏转。从 82.5 线到 90 线,分布范围又缩小到 100～150m。并略向 NW 方向偏转,见图 7-13。在倾斜方向上,自上而下,成矿远景区段在基线 A 东南 50m 到基线 D 之间分布,只是在 -150m 标高处向 NW 压缩到基线 B 与基线 D 之间,在 -270m 标高处又向 SE 压缩到基线 A 东南 50m 与基线 B 之间,见图 7-14。在垂直方向上,沿走向方向,从两端向 82.5 线,矿体有利赋存空间的延深长度增大,见图 7-15。

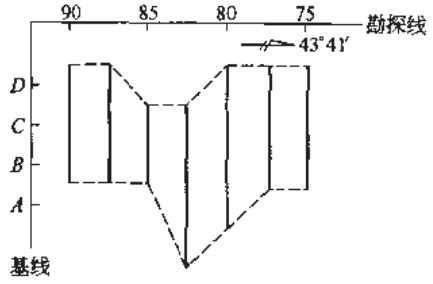


图 7-13 成矿远景区段 4 水平投影图

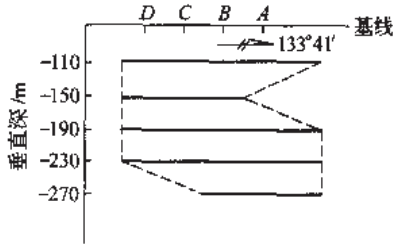


图 7-14 成矿远景区段 4 垂直侧投影图

成矿远景区段 5

区段 5 分布于 67.5～85 线,-350～-790m 标高,基线 A 和基线 F 之间。区段内由预测含矿脉段和预测高矿化脉段紧密连接的矿体有利赋存空间在走向方向上,分布长度一般 30～150m,以 30m 者居多,平均为 94m,最大长度 350m。在倾向方向上,分布宽度一般 50～150m,以 150m 者居多,平均为 125m。在垂直方向上,延深长度一般 40～120m,以 40m 者居多,平均为 59m,最长 160m。断续延深长度最大可达 480m。包括 10-1 号、48 号、47 号、47 支号、10-2 号等矿脉的预测含矿脉段 40 个,预测高矿化脉段 2 个。预测含矿脉段中,1 级的 9 个,占 22.5%;2 级的 29 个,占 72.5%;3 级的 2 个,占 5%。各矿脉的预测含矿脉段和预测高矿化脉段的空间位置和变化性列于表 7-22。从表可以看出,在该成矿远景区段中,以 10-1 号矿脉的矿体有利赋存空间最发育。共包含 27 个预测含矿脉段。在走向方向上,从 67.5～85 线均有分布。沿倾向方向,从基线 A 到基线 F 广泛分布。在垂直方向上,自 -350m 标高到 -790m 标高断续分布。其次是 48 号、47 支号、10-2 号等矿脉,它们包含的预测含矿脉段和预测高矿化脉段数依次为:4 和 1,4 和 1,4 和 0。47 号矿脉的矿体有利赋存空间仅分布在 70 线的 -470m 标高附近,基线 E 和基线 F 之间。

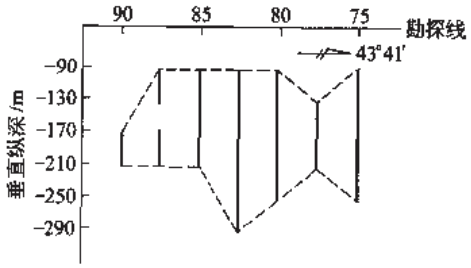


图 7-15 成矿远景区段 4 垂直纵投影图

从NE 向 SW,在倾向方向上,成矿远景区段逐渐向 SE 方向转移,见图 7-16。在倾斜方向上,自上而下,成矿远景区段略向 SE 方向偏移。并且自 -350m 标高到 -470m 标高,区段宽度从 100m 增大到 250m,而 -470～-610m 标高,区段宽度呈宽窄交替

变化。－610m 标高以下断续分布，见图 7-17。在垂直方向上，预测含矿脉段和预测高矿化脉段主要在－350～－630m 标高范围分布，但连续性差，可分成 3 个相对完整的矿体有利赋存空间。其一分布在 77.5～85 线，－350～－470m 标高，基线 B 与基线 D 之间，形态规则。其二分布在 67.5～77.5 线，－430～－510m 标高，基线 C 与基线 F 之间。形态较规则。其三分布在 72.5～85 线，－550～－630m 标高，基线 A 与基线 F 之间。形态极不规则。此外，在－710m 和 －790m 标高还有少数零星分布的矿体有利赋存空间，见图 7-18。

表 7-22　成矿远景区段 5 矿化特征表

矿脉	空间位置			含矿性①				矿脉	空间位置			含矿性①			
	勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B		勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B
10-1 号	67.5	D—E	－470	1	0	0	0	48 号	67.5	D	－470	0	0	0	1
	70	E—F	－470	0	2	0	0		70	D—E	－470	1	0	0	0
	72.5	D—F	－470～－790	0	3	0	0		72.5	E—F	－510～－790	0	3	0	0
	75	C	－470～－550	1	1	0	0	47 号	70	E—F	－470	0	1	0	0
	77.5	C—D	－390～－590	2	1	0	0	47 支号	70	D—E	－470	0	0	0	1
	80	A—C	－430～－630	0	4	0	0		72.5	D—E	－430～－790	0	4	0	0
	82.5	A—C	－350～－790	4	4	1	0	10-2 号	72.5	D—F	－430～－790	0	4	0	0
	85	A—C	－350～－630	0	2	1	0								

①含矿性。A_1：1 级预测含矿脉段；A_2：2 级预测含矿脉段；A_3：3 级预测含矿脉段；B：预测高矿化脉段。

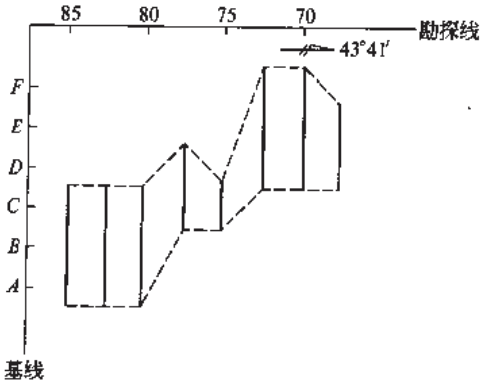


图 7-16　成矿远景区段 5 水平投影图

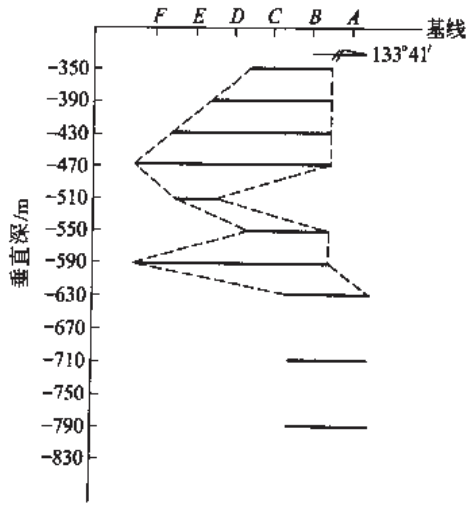


图 7-17　成矿远景区段 5 垂直侧投影图

成矿远景区段 6

区段 6 分布于 52.5～60 线，－110～－470m 标高，基线 K 和基线 N 之间。区段内由预测含矿脉段和预测高矿化脉段紧密连接的矿体有利赋存空间，在走向方向上，分布长度一般

30～100m，平均 77m，最大长度为 150m。在倾向方向上，宽度以 150m 者居多，200m 者其次，平均 163m。在垂直方向上，延深长度一般为 40～80m，平均 80m，最长 160m。包括 4-1 号、4-2 号矿脉的预测含矿脉段 23 个，预测高矿化脉段 1 个。预测含矿脉段中，1 级的 6 个，占 26.09%；2 级的 15 个，占 65.22%；3 级的 2 个，占 8.7%。其中，以 4-1 号矿脉的矿体有利赋存空间最发育，包含有 15 个预测含矿脉段。而 4-2 号矿脉仅包含 8 个预测含矿脉段和 1 个预测高矿化脉段。

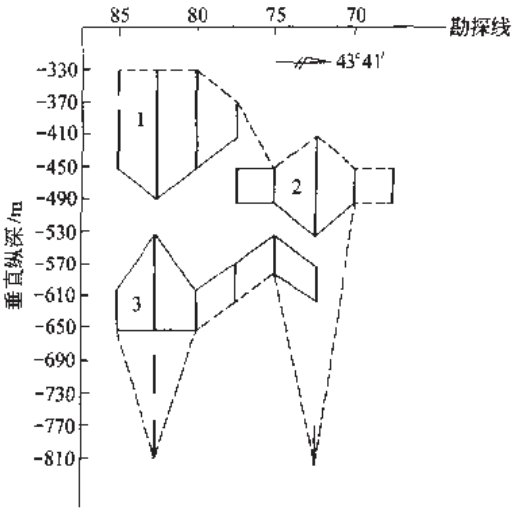


图 7-18　成矿远景区段 5 垂直纵投影图

自 NE 向 SW，在倾向方向上，成矿远景区段分布范围从 52.5 线的基线 L 至基线 M，转移到 60 线的基线 K 至基线 N，见图 7-19。在倾斜方向上，自上而下，成矿远景区段分布范围增大，并且逐渐向 NW 方向转移，见图 7-20。在垂直方向上，矿体有利赋存空间集中在 -150～-350m 标高范围分布，但连续性差，可分出 3 个相对完整的矿体有利赋存空间。其一位于 52.5～55 线，-110～-150m 标高，基线 K 与基线 L 之间。形态为一上尖下宽的楔形。其二位于 55～60 线，-150～-350m 标高，基线 L 与基线 N 之间，形态不规则。此外，在 22.5 线的 -470m 标高处还发育一个小的矿体有利赋存空间，见图 7-21。

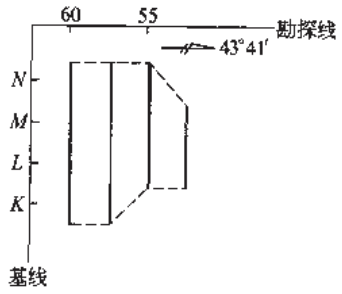


图 7-19　成矿远景区段 6 水平投影图

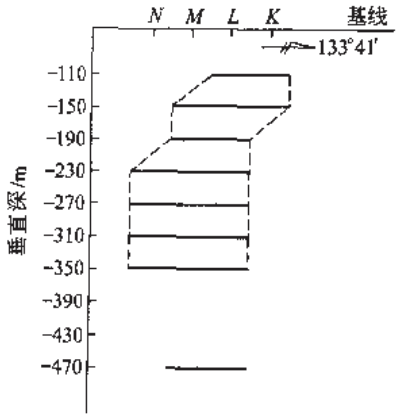


图 7-20　成矿远景区段 6 垂直侧投影图

成矿远景区段 7

区段 7 分布于 40～60 线，-110～-630m 标高，基线 A 与基线 H 之间。区段内，由预测含矿脉段和预测高矿化脉段紧密连接的矿体有利赋存空间，在走向方向上，分布长度一般 30～150m，以 30m 的居多，平均 64m。断续分布长度最长可达 400m。在倾向方向上，分布宽度一般为 100～200m，平均 172m。最宽可达 300m。在垂直方向上，延深长度一般为 40～

160m，以 40m 的居多，平均 117m，最大长度 280m。断续分布的延深长度最大可达 560m。包括 47 支号、18-1 号、18-2 号、18-3 号、10-1 号、10-2 号、47 号等矿脉的预测含矿脉段 89 个，预测高矿化脉段 13 个。在预测含矿脉段中，1 级的 22 个，占 24.72%；2 级的 45 个，占 50.56%；3 级的 22 个，占 24.72%。各矿脉预测含矿脉段和预测高矿化脉段的空间分布位置和变化性列于表 7-23。从表可以看出，在该成矿远景区段中，47 支号、18-1 号、18-2 号矿脉的矿体有利赋存空间最发育。它们包含的预测含矿脉段和预测高矿化脉段数依次为 26 和 5，17 和 3，15 和 2。其次是 18-3 号、10-1 号、10-2 号矿脉，它们的预测含矿脉段和预测高矿化脉段数依次为 7 和 3，12 和 0，10 和 0。47 号矿脉仅在 52.5 线的 -550～-590m 标高，基线 G 附近发育 2 个预测含矿脉段。

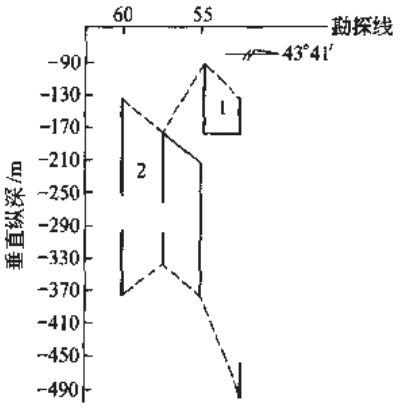


图 7-21 成矿远景区段 6 垂直纵投影图

表 7-23 成矿远景区段 7 矿化特征表

矿脉	空间位置			含矿性①				矿脉	空间位置			含矿性①			
	勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B		勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B
47 支号	40	B—C	-110	0	0	0	1	18-2 号	57.5	C	-150	0	0	1	0
	42.5	B—C	-150	0	0	0	1		60	C—D	-150～-310	1	2	1	0
	45	B—C	-110～-230	0	1	1	0	18-3 号	42.5	A—B	-150	0	0	0	1
	47.5	C—E	-110～-390	1	3	0	1		45	A—C	-110～-190	0	1	1	0
	50	F—G	-590	0	0	1	0		47.5	A—B	-190	0	1	0	0
	52.5	C—H	-110～-630	5	5	3	0		52.5	C	-150	1	0	0	0
	55	C—E	-110～-230	1	2	0	1		55	C—D	-110～-150	0	2	0	0
	57.5	C—D	-110～-190	0	1	1	1		57.5	C—D	-110	0	0	0	1
	60	C—D	-110	1	0	0	0		60	D	-110～-150	0	0	1	1
18-1 号	40	B—C	-110	0	1	0	0	10-1 号	47.5	D—E	-390	0	1	0	0
	42.5	C—D	-150	0	0	1	0		52.5	C—D	-110～-150	0	2	0	0
	47.5	B—C	-150～-270	0	2	1	1		55	C—D	-150～-230	1	2	0	0
	52.5	D—F	-150～-470	3	2	0	2		57.5	C—D	-110～-150	1	0	1	0
	57.5	C—D	-110～-190	0	2	1	0		60	C—E	-110～-350	0	2	2	0
	60	C—E	-110～-350	0	2	2	0	10-2 号	52.5	C—D	-110～-150	0	2	0	0
18-2 号	42.5	B	-150	0	0	0	1		55	B—D	-190～-230	2	0	0	0
	45	A—C	-110～-190	0	1	1	0		57.5	C—D	-110～-150	1	1	0	0
	47.5	A—C	-110～-270	0	3	1	0		60	C—D	-150～-310	1	2	1	0
	52.5	D—E	-110	0	1	0	0	47 号	52.5	G	-550～-590	1	0	1	0
	55	B—C	-110～-230	2	1	0	1								

①含矿性 A_1：1 级预测含矿脉段；A_2：2 级预测含矿脉段；A_3：3 级预测含矿脉段；B：预测高矿化脉段。

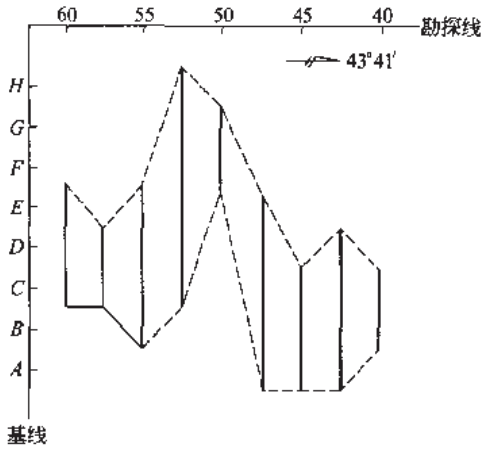


图 7-22　成矿远景区段 7 水平投影图

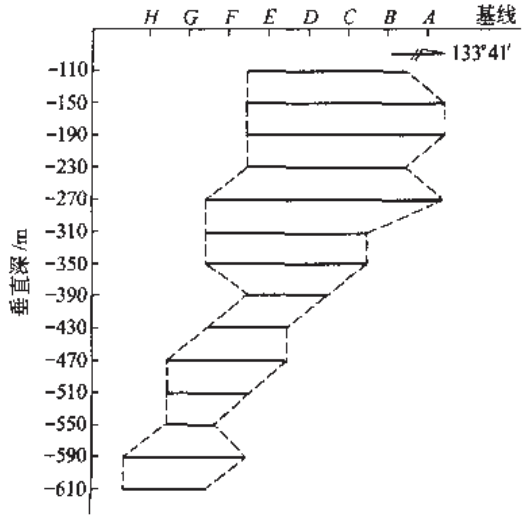


图 7-23　成矿远景区段 7 垂直侧投影图

从 NE 向 SW，在倾向方向上，成矿远景区段的分布范围，在水平投影图上呈向 SE 方向开口的 V 字形。区段自 40 线到 50 线向 NW 方向转移。从 50 线到 60 线又向 SE 方向转移，见图 7-22。在倾斜方向上，自上而下，区段分布范围由宽变窄，并逐渐向 NW 方向转移，见图 7-23。在垂直方向上，预测含矿脉段和预测高矿化脉段主要发育在 -110～-350m 标高范围内。但连续性差，可分成 3 个紧密连接的矿体有利赋存空间。其一分布在 40～47.5 线，-110～-270m 标高，基线 *A* 与基线 *E* 之间。自 NE 向 SW，延深长度逐渐增加，呈形态较规则的楔形。其二分布在 52.5～60 线，-110～-350m 标高，基线 *B* 与基线 *E* 之间。延深长度从 52.5 线到57.5 线大幅度减少，到 60 线，又大幅度增加。其三分布在 50～52.5 线，-430～-630m 标高，基线 *E* 与基线 *H* 之间，主要发育在 52.5 线，形态呈梭形。此外，在 47.5 线的 -390m 标高处尚有零星分布的矿体有利赋存空间，见图 7-24。

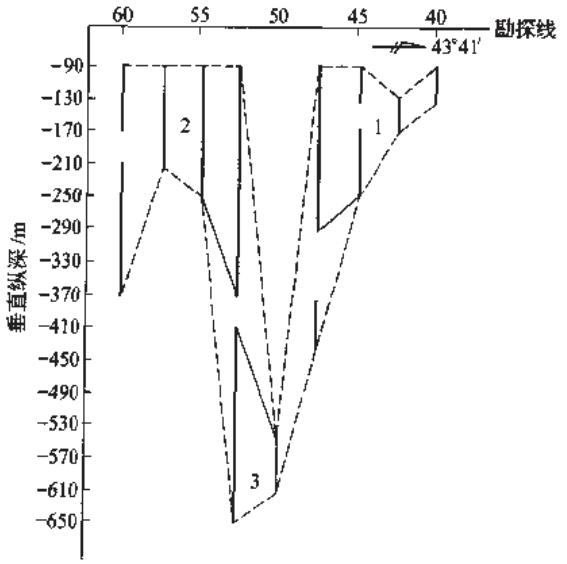


图 7-24　成矿远景区段 7 垂直纵投影图

成矿远景区段 8

区段 8 分布于 40～50 线，-390～-630m 标高，基线 *F* 与基线 *I* 之间。区段内，由预测含矿脉段和预测高矿化脉段紧密连接的矿体有利赋存空间，在走向方向上，分布长度 一般 30～50m，平均 40m。在倾向方向上，分布宽度一般 100～150m，平均 113m。在垂直方向上，延深长度一般 40～160m，平均 87m。包括 4 号、4-1 号、47 号等矿脉的预测含矿脉段 15 个，预测高矿

化脉段4个。预测含矿脉段中,1级的4个,占26.67%;2级的11个,占73.33%。各矿脉预测含矿脉段和预测高矿化脉段的空间分布位置和变化性列于表7-24。从表可以看出,该成矿区段中,4号矿脉的矿体有利赋存空间分布范围最大,也最完整。包含7个预测含矿脉段和4个预测高矿化脉段。4-1号和47号矿脉包含的预测含矿脉段分别为5个和3个。

表7-24 成矿远景区段8矿化特征表

矿脉	空间位置			含矿性①				矿脉	空间位置			含矿性①			
	勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B		勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B
4号	40	F—G	−470～−590	0	3	0	1	4-1号	42.5	G—H	−430～−630	2	3	0	0
	42.5	G—H	−390～−630	0	1	0	3	47号	47.5	H—I	−430～−590	1	1	0	0
	47.5	G—H	−470～−590	1	1	0	0		50	G	−470	0	1	0	0
	50	G—H	−470	0	1	0	1								

①含矿性。A_1:1级预测含矿脉段;A_2:2级预测含矿脉段;A_3:3级预测含矿脉段;B:预测高矿化脉段。

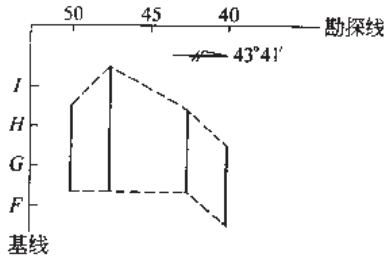


图7-25 成矿远景区段8水平投影图

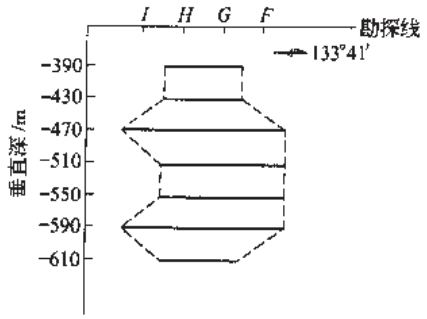


图7-26 成矿远景区段8垂直侧投影图

从NE向SW,在倾向方向上,成矿远景区段自40线到42.5线,向NW方向转移。从42.5线到47.5线,则向NW方向扩展。从47.5线到50线,分布宽度又向SE方向缩小,见图7-25。在倾向方向上,自上而下,成矿远景区段呈不规则窄宽交替变化,见图7-26。在垂直方向上,预测含矿脉段和预测高矿化脉段组成两个矿体有利赋存空间。其一分布在40～42.5线,−390～−590m标高,基线F和基线H之间。自SW向NE,有向深部延伸趋势。该空间形态完整,为一两头尖的柱状体。其二规模较小,分布于47.5～50线,−470m标高,基线G与基线I之间。为一形态规则的小柱状体。此外,在47.5线的−590m标高处,还分布有规模很小的矿体有利赋存空间,见图7-27。

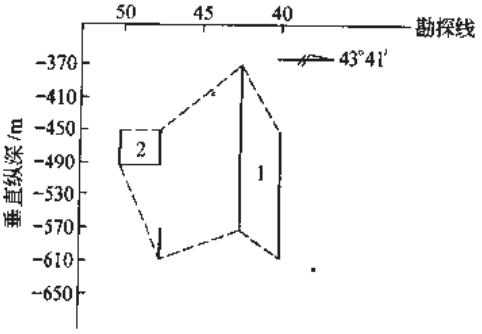


图7-27 成矿远景区段8垂直纵投影图

成矿远景区段9

区段9分布于35～42.5线,−110～−350m标高,基线G与基线I之间。区段内,由预测含矿脉段和预测高矿化脉段紧密连接的矿体有利赋存空间,在走向方向上,分布长度一般30～50m,平均43m,最长100m。在倾向方向上,分布宽度一般100～150m,平均125m。

在垂直方向上，延深长度一般 40～150m，平均 100m。包括 52 号、47 号、4 号、4-1 号等矿脉的预测含矿脉段 23 个，预测高矿化脉段 12 个。预测含矿脉段中，1 级的 1 个，占 4.35%；2 级的 15 个，占 65.22%；3 级的 7 个，占 30.43%。各矿脉预测含矿脉段和预测高矿化脉段的空间分布位置及变化性列于表 7-25。从表可以看出，该成矿远景区段中，52 号和 4-1 号矿脉的矿体有利赋存空间最发育，它们包含的预测含矿脉段和预测高矿化脉段最多。依次为 9 和 2,9 和 4。47 号矿脉和 4 号矿脉包含的预测含矿脉段和预测高矿化脉段分别为 5 和 2,4 和 0。

表 7-25　成矿远景区段 9 矿化特征表

矿脉	空间位置			含矿性①				矿脉	空间位置			含矿性①			
	勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B		勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B
52 号	35	H—I	−150～−230	0	0	2	0	47 号	42.5	H—I	−110～−270	0	2	0	2
	37.5	G—H	−110～150	0	1	1	0	4 号	37.5	H	−110	0	0	0	1
	40	H	−150～−270	0	2	0	1		40	G—H	−150	0	0	0	1
	42.5	H—I	−110～−270	0	3	0	1		42.5	G—H	−190～−310	0	0	0	2
47 号	35	G—H	−150	0	1	0	0	4-1 号	37.5	G—H	−110～−190	0	0	1	2
	37.5	G	−150	0	0	1	0		40	G—H	−150～−350	0	2	1	2
	40	G	−150	0	0	1	0		42.5	H—I	−110～−310	1	4	0	0

①含矿性。A_1：1 级预测含矿脉段；A_2：2 级预测含矿脉段；A_3：3 级预测含矿脉段；B：预测高矿化脉段。

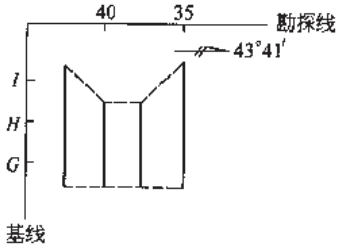


图 7-28　成矿远景区段 9 水平投影图

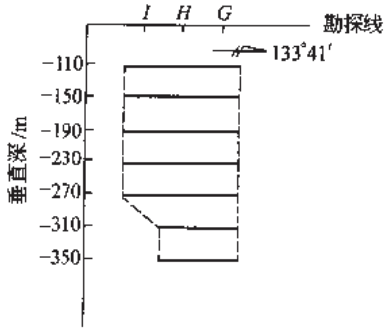


图 7-29　成矿远景区段 9 垂直侧投影图

从 NE 向 SW，在倾向方向上，成矿远景区段自 35 线到 37.5 线，分布宽度从 150m 向 SE 方向压缩到 100m。从 40 线到 42.5 线，分布宽度又从 100m 向 NW 方向扩展为 150m，见图 7-28。在倾向方向上，自 −110m 标高到 −270m 标高，区段稳定分布在基线 G 与基线 I 之间。从 −310m 标高到 −350m 标高，区段分布范围缩小到基线 G 与基线 H 之间，见图 7-29。在垂直方向上，预测含矿脉段和预测高矿化脉段紧密连接成两个矿体有利赋存空间。其一位于 35～47.5 线，−110～−230m 标高，基线 G 与基线 I 之间，形态不规则。自 SW 向 NE，有向深部延伸趋势。其二分布在 40～42.5 线，−190～−350m 标高，基线 G 与基线 I 之间。为

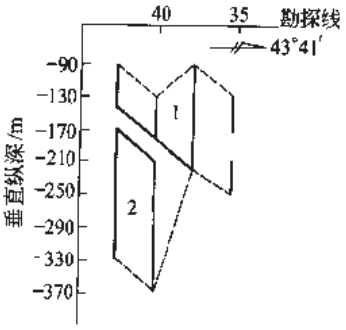


图 7-30　成矿远景区段 9 垂直纵投影图

一形态较完整的柱状体，见图 7-30。

成矿远景区段 10

区段 10 分布于 20～32.5 线，－110～－150m 标高，基线 A 与基线 D 之间。在该成矿远景区段内，由预测含矿脉段和预测高矿化脉段紧密连接成的矿体有利赋存空间，在走向方向上，分布长度一般 30～50m，平均 45m。在倾向方向上，分布宽度一般 100～150m，平均 117m。在垂直方向上，延深长度 一般 40～80m，平均 47m。包括 18-2 号、18-3 号、18-1 号、47 支号等矿脉的预测含矿脉段 13 个，预测高矿化脉段 1 个。预测含矿脉段中，1 级的 1 个，占 7.69%；2 级的 6 个，占46.15%；3 级的 6 个，占 46.15%。各矿脉预测含矿脉段、预测高矿化脉段的空间分布位置和变化性列于表 7-26。可以看出，该成矿远景区段中，18-2 号和 18-3 号两条矿脉的矿体有利赋存空间规模最大，各自含有 5 个预测含矿脉段。而 18-1 号和 47 支号矿脉的矿体有利赋存空间仅在局部地段发育。

表 7-26　成矿远景区段 10 矿化特征表

矿脉	空间位置			含矿性①				矿脉	空间位置			含矿性①			
	勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B		勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B
18-2 号	20	C—D	－110	0	0	1	0	18-3 号	22.5	C	－110	0	0	1	0
	22.5	C—D	－110	0	0	1	0		27.5	B—C	－110	0	1	0	0
	25	C—D	－150	0	0	1	0		30	A—C	－110～－150	0	2	0	0
	27.5	C—D	－110	0	1	0	0		32.5	B	－150	1	0	0	0
	32.5	B	－150	0	1	0	0	18-1 号	30	B—C	－110～－150	0	1	1	0
18-3 号	20	C—D	－110	0	0	1	0	47 支号	32.5	A—B	－150	0	0	0	1

①含矿性。A_1：1 级预测含矿脉段；A_2：2 级预测含矿脉段；A_3：3 级预测含矿脉段；B：预测高矿化脉段。

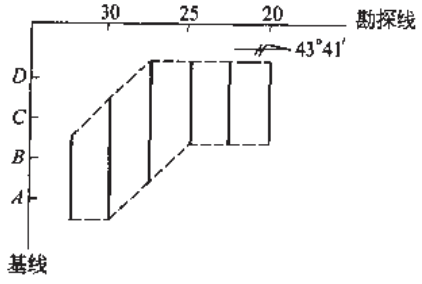


图 7-31　成矿远景区段 10 水平投影图

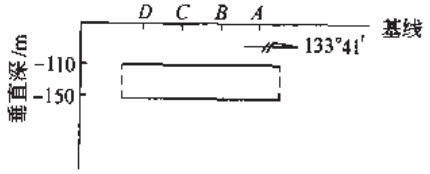


图 7-32　成矿远景区段 10 垂直侧投影图

从 NE 向 SW，在倾向方向上，20～25 线，成矿远景区段稳定分布在基线 C 和基线 D 之间。自 25 线向 SW，区段分布宽度增大，且向 SE 方向偏转，见图 7-31。在倾斜方向上，自上而下，矿体有利赋存空间平稳分布于基线 A 至基线 D 之间，见图 7-32。在垂直方向上，预测含矿脉段和预测高矿化脉段紧密连接成一个形态不规则的矿体有利赋存空间，见图 7-33。

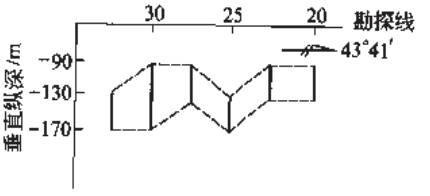


图 7-33　成矿远景区段 10 垂直纵投影图

成矿远景区段 11

区段 11 分布于 12.5～25 线，－150～－470m标高，基线 D 与基线 G 之间。区段内，由预测含矿脉段和预测高矿化脉段紧密连接而成的矿体有利赋存空间，在走向方向上，分布长度一般 30～100m，以 30m 者居多，平均 43m。在倾向方向上，分布宽度一般 100～150m，平均 133m。在垂直方向上，延深长度一般 40～120m，平均 84m，最大长度 240m。包括 47 号、52 号、10-1 号、10-2 号、18-1 号、18-2 号、4 号等矿脉的预测含矿脉段 43 个，预测高矿化脉段 6 个，预测含矿脉段中，1 级的 10 个，占 23.26%；2 级的 26 个，占 60.47%；3 级的 7 个，占 16.28%。各矿脉预测含矿脉段、预测高矿化脉段的空间分布位置和变化性列于表 7-27。从表可以看出，该成矿远景区段中，47 号和 10-1 号两条矿脉的矿体有利赋存空间最发育，包含的预测含矿脉段和预测高矿化脉段分别为 15 和 2，14 和 0。52 号、10-2 号、18-1 号、18-2 号、4 号等矿脉的预测含矿脉段和预测高矿化脉段仅在局部空间上出现。

表 7-27　成矿远景区段 11 矿化特征表

矿脉	空间位置			含矿性①				矿脉	空间位置			含矿性①			
	勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B		勘探线	基线	标高/m	A_1	A_2	A_3	B
47 号	12.5	E—F	－190～－470	2	1	3	0	10-1 号	20	E	－150～－190	2	0	0	0
	15	E—F	－230～－390	0	1	1	2		22.5	E—F	－150～－190	0	2	0	0
	17.5	D—F	－150～－470	0	4	0	0		25	E	－270	0	1	0	0
	20	F	－150	1	0	0	0	18-2 号	12.5	E—F	－310～－350	0	1	1	0
	25	D—E	－230～－270	0	2	0	0		17.5	E	－350	1	0	0	0
52 号	12.5	F—G	－150～－310	0	3	0	1	10-2 号	15	E—F	－230	0	1	0	0
	25	E—F	－230～－350	0	1	0	1		17.5	D—F	－350	0	1	0	0
4 号	12.5	F—G	－270	0	1	0	0		20	D—E	－150～－190	0	1	0	1
10-1 号	12.5	F	－190～－310	1	2	1	0	18-1 号	20	D—E	－150～－190	1	1	0	0
	15	E—F	－230～－390	1	2	1	0		22.5	E	－150	0	0	0	1
	17.5	E—F	－190	1	0	0	0		25	E—F	－230	0	1	0	0

①含矿性。A_1：1 级预测含矿脉段；A_2：2 级预测含矿脉段；A_3：3 级预测含矿脉段；B：预测高矿化脉段。

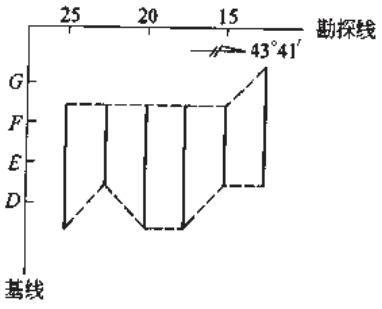


图 7-34　成矿远景区段 11 水平投影图

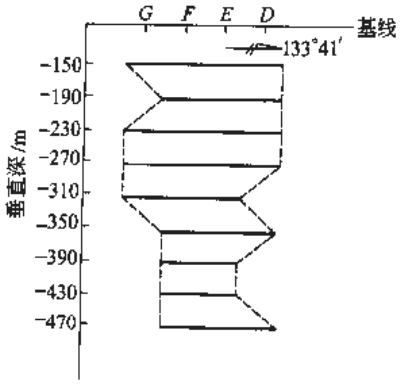


图 7-35　成矿远景区段 11 垂直侧投影图

从 NE 向 SW，在倾向方向上，成矿远景区段略向 SE 方向转移，见图7-34。在倾斜方向上，自上而下。成矿远景区段的分布宽度变小，见图7-35。在垂直方向上，预测含矿脉段和预测高矿化脉段紧密连接成 2 个较大的矿体有利赋存空间。其一位于 12.5～25 线，－150～－350m 标高，基线 D 与基线 G 之间，形态不规则。自 SW 向 NE，矿体有利赋存空间有向深部扩大趋势。其二位于 12.5～17.5 线，－350～－470m 标高，基线 D 和基线 F 之间。矿体有利赋存空间形态较规则，自 SW 向 NE，逐渐向深部延伸。延深长度也有随深度变大的趋势。此外，在 17.5 线的－470m标高，基线 D 与基线 E 之间和 25 线的－350m 标高，基线 E 和基线 F 之间，有较小规模的矿体有利赋存空间分布，见图 7-36。

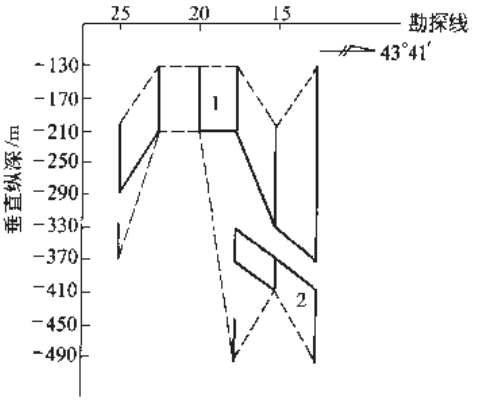


图 7-36　成矿远景区段 11 垂直纵投影图

7.1.3　讨论

以上实例说明了异常地质环境类比法在深部矿体定位预测中的实际做法。受条件所限，不可能介绍所有的具体方法。例如，在筛选变量时，仅采用了条件概率分析一种方法。实际应用中，还可选用其他一些方法，如相关分析法、秩相关分析法、秩和检验法、地质特征向量长度分析法、信息量分析法、变异序列法、主成分分析法、回归分析法、判别分析法、条件概率分析法、模糊聚类分析法、聚类分析法等。单元含矿性评判数学模型也决不仅限于例中所列的 5 种。常用的还有多元回归模型、贝叶斯准则下多组判别模型，条件概率模型、秩相关分析模型、找矿信息量分析模型、“镶嵌”模型估计矿床产出概率分析模型、聚类分析模型、逻辑斯蒂分析模型等。

异常地质环境类比法的各个环节，是在上部已知资料的基础上进行的。因而，上部资料的真实性和完整性是应用该方法进行预测成败的关键。

因工作目的不同和工作条件所限，上部已知区中较系统完整的资料，多数情况下仅限于矿脉、矿体、矿石品位等。因而，能提取的控矿地质标志，只有控矿断裂构造的产状要素和矿脉厚度、矿石品位、矿体形态规模、矿脉组构等矿化要素。而这些标志的共同特点是与金矿富集都有一定的成因联系。但示矿能力较低，对矿与非矿的辨识能力也较低。只有用多种标志、多种途径和方法进行综合预测，才能提高找矿概率，减少探矿风险。

7.2　空间分带模型法

在找矿实践过程中，发现矿脉中的金矿体按一定方向和角度向下侧列式分布。例如，山东焦家金矿床，矿体向西南方向按一定角度向下侧列分布；玲珑 108 矿床，矿体向北东方向按一定角度向下多层侧列分布。据统计，几乎所有的脉状金矿床，矿体都有这种侧列式分布特点。矿体原生晕的分带规律，在脉状金矿床中十分明显。例如，山东招掖金矿化带上的矿体原生晕，自矿体向上有 Mn→Au、Te→Ag、As→Cu 的分带规律。腾冲热泉型金矿床，自矿体向上有 Ag、Au→As→Sb→Hg→Tl 的分带规律。此外，热液矿床中矿物包裹体气态组分和矿物标型特征的空间分带现象也十分普遍。上述矿体或矿体标志值在空间上的分带规

律，为深部矿体定位预测带来了可能性。

空间分带模型法的理论基础是求异理论、空间分带理论、时空叠加理论、不确定理论。是根据客观上存在的矿体或矿体标志值在空间上表现的各种形式的分带现象，应用一定的方法，发现矿体或矿体标志值与空间坐标之间的相关关系，依此建立矿体或矿体标志值的空间分布模型，对深部矿体开展定位预测。下面我们用实例介绍矿体空间分布找矿模型法、地球化学标志值空间变异模型法、矿物包体信息空间变异模型法、黄铁矿形态标型空间变异模型法。

7.2.1 矿体空间分布找矿模型

对108矿床定位预测过程中，发现矿体按一定方向和角度侧列式分布特征。我们想，如果掌握了矿体侧列式分布规律，根据上部已知矿体赋存的空间位置，有可能预测深部矿体赋存的空间位置。因此，对108矿床上部控制区的矿体空间分布特征进行研究。考虑到金品位和矿脉厚度之间的紧密线性相关关系（$r(50)=0.7512$），出现高品位的空间往往厚度大这一特点，把高品位分布空间看作矿体赋存空间。图7-37是控制区经滑动窗平均法（窗口大小为40m×40m，步长10m）处理的金品位等值线图。可见，自西向东分布A_1—A_{19}等19个矿体。还分布B_1、B_2两个金相对富集空间。沿NE方向，按26°～27°角向下构成侧列分布的A_{11}—A_{12}—A_{15}—A_{17}—A_{18}—A_{19}、A_9—A_{10}—A_{13}—A_{15}—A_{16}—A_{18}—A_{19}、A_6—A_7—A_8—A_{10}—A_{14}—A_{16}、A_3—A_4—A_5—B_2—A_{14}、A_2—B_1等矿体系列。沿SW方向，按27°～28°角向下，构成侧列分布的A_6—A_4—A_3—A_2—A_1、A_{11}—A_9—A_7—A_6—A_5—A_4—A_2—A_1、A_{17}—A_{15}—A_{14}—B_2—B_1、A_{19}—A_{18}—A_{16}—A_{14}等矿体系列。经反复分析研究，发现108矿床矿体分布规律如下：

（1）矿体呈侧列式分布，分布方向、角度受矿脉1级构造结构面的主轴方向、角度控制。

（2）矿体的侧列式分布在空间上表现为多层特征，即矿体呈多列平行相间排布。

（3）断裂构造对矿体的严格控制作用，以及矿体侧列式分布方向、角度和矿脉1级构造结构面主轴方向、角度相吻合等表明，矿体的侧列式分布反映构造裂隙（张扭性裂隙或破碎空间）在空间上的分布规律。但是，由于构造活动的复杂性及多次叠加、围岩的不均一性，构造裂隙在空间上的分布是不确定的，导致矿体侧列式分布的不确定性。表现为列间距离不确定；列内矿体或金相对富集空间的距离不确定；矿体大小不确定；矿体出现与否不确定。因此，矿体的侧列式分布具有统计规律性，矿体在空间上的出现受概率法则所制约。

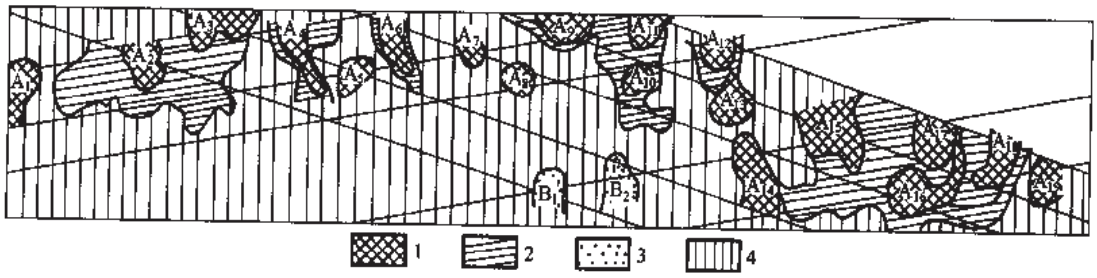


图7-37 108矿脉金矿体及金浓度中心空间分布垂直纵投影图

1—>5μg/g；2—3～5μg/g；3—1～3μg/g；4—<1μg/g

矿体在空间上侧列式分布特征，为深部矿体定位预测提供了信息。虽然矿体间距是不

确定的，但每个矿体在空间上不是一个点，而是有一定的分布范围。这就为用等间距模式发现矿体在空间上的踪迹提供了可能性。此外，矿体的多层侧列式分布特征。反映的是控矿断裂构造面的波状分布特征。波峰、波谷在三度空间上沿着断面相间出现，使矿体在 SW 方向上的分布也有一定的规律性。

对控制区已知矿体进行矿体空间分布统计分析，用多方案择优方式确定矿体空间分布找矿模型如下：

$$\begin{cases} X_n = X_0 - na\cos\alpha \\ Y_n = Y_0 - na\sin\alpha\sin\gamma \end{cases} \tag{7-29}$$

$$\begin{cases} X'_n = X_0 - nb\cos\beta \\ Y'_n = Y_0 - na\sin\beta\sin\gamma \end{cases} \tag{7-30}$$

式中，X_0 为在已知矿体上确定的水平坐标；Y_0 为在已知矿体上确定的标高；n 为以已知矿体为始点(0)对预测矿体排队的序号，$n=1,2,\cdots$；a 为 NE 向模型式(7-29)的距离参数，$a=166.9$m；b 为 SW 向模型式(7-30)的距离参数，$b=158.0$m；α 为 NE 向模型式(7-29)的角度参数，$\alpha=26°1'36''$；β 为 SW 向模型式(7-30)的角度参数，$\beta=27°37'55''$；γ 为基准面倾角，$\gamma=55°$；X_n、Y_n 为模型式(7-29)预测的第 n 个矿体上一点的坐标；X'_n、Y'_n 为模型式(7-30)预测的第 n 个矿体上一点的坐标。

为检验矿体空间分布找矿模型的精度和效果，在已知矿体上，通过多次试验确定初始点坐标(略)。应用模型式(7-29)在控制区范围预测了 26 个找矿点，其中 19 个落在已知矿体上。应用模型式(7-30)在控制区范围预测了 29 个找矿点，其中 20 个落在已知矿体上。两种模型预测的找矿点平均见矿概率 70.91%，丢矿风险系数 0.0714，出错率 29.09%。表明，上列模型有较好的找矿效果。可用于深部预测区矿体预测。值得一提的是，在上部预测区，上列模型认为有矿体，地质勘探结果认为无矿的 5 个地段，经工程验证全部见矿，已采获黄金 312.5kg。进一步用模型式(7-29)、式(7-30)向深部预测区预测，得找矿点 65 个。

7.2.2 地球化学标志值空间变异模型(以 105 矿床深部矿体定位预测为例)

脉状金矿床矿体原生晕的分带规律，使我们能够利用某些指示元素，特别是指示元素比值与空间坐标之间的函数关系，建立深部矿体定位地球化学模型，开展矿床外围找矿和深部矿体定位预测。

前已述及，105 矿床有两个矿化期，第 1 期矿化强度低，不能富集成矿体。第 2 期分 3 个矿化阶段，从整个矿化带看，第 1 阶段矿化普遍，但富集程度低，形成的矿石仅占矿床矿石总量的 10.24%。第 2 阶段矿化虽不普遍，但富集程度高，形成的矿石占矿床矿石总量的 83.38%。第 3 阶段矿化在该区不发育，但富集程度较高，形成的矿石占矿床矿石总量的 5.38%。可见，第 2 矿化阶段最重要。仅当第 2 阶段矿化发育时，才有可能形成一定规模的金矿体。因而，第 2 阶段矿化最佳地球化学标志形成的原生晕，对深部矿体定位最有意义。表 7-28 是招掖金矿化带金及其伴生元素在不同矿化期、矿化阶段中的平均浓度，以及金和其他元素的比值。不难看出，金主要在第 2 期富集成矿。在 3 个阶段中，Au、As、Bi、Te、Mn 等主要富集在第 2 阶段，第 3 阶段也有较大富集。Ag、Cu、Pb、Zn、Sb、Se 等主要富集在第 3 阶段，第 2 阶段也有一定富集。Ba 主要集中于第 1 期。W 的变化不显著。从第 1 期到第 2 期的第 3 阶段，贵金属和多金属含量总和逐渐增加，且在第 3 阶段达到最大值。金和伴生元

素比值在不同矿化期和不同矿化阶段中也表现出较大的差异，因此，可以利用元素比值识别不同期、不同阶段的矿化，以及该元素或比值相对于矿体的空间位置。

表 7-28　金及其指示元素在不同矿化期、矿化阶段中的富集特征

项目	第 1 矿化期		第 2 矿化期(质量浓度单位：$\mu g \cdot g^{-1}$)					
			第 1 阶段		第 2 阶段		第 3 阶段	
	质量浓度 /$\mu g \cdot g^{-1}$	金和该元素的比	质量浓度	金和该元素比	质量浓度	金和该元素比	质量浓度	金和该元素比
Au	0.014	1	0.138	1	18.443	1	14.471	1
Ag	0.321	0.0436	0.783	0.1762	9.057	2.0364	56.574	0.2558
Cu	28	0.0005	39	0.0035	118	0.1566	6215	0.0023
Pb	41	0.0003	50	0.0028	87	0.2117	657	0.0220
Zn	51	0.0003	33	0.0042	20	0.09361	621	0.0233
As	2.36	0.0059	1.74	0.0291	23.79	0.7751	22.59	0.6406
Sb	0.18	0.0770	0.3	0.4672	0.32	56.9583	0.97	14.9613
Bi	0.20	0.0701	0.19	0.7174	1.68	10.9780	0.76	19.0172
Te	0.22	0.0637	0.42	0.3312	2.29	8.0489	1.85	7.8382
Se	0.41	0.0339	0.36	0.3856	0.91	20.2143	1.21	11.7424
Mn	563	0.0000	704	0.0002	1071	0.0172	938	0.0154
W	0.66	0.0211	0.48	0.2902	0.45	41.4130	0.46	31.5627
Ba	71.2	0.0000	80	0.0017	78	0.2366	56	0.2597

地球化学标志值空间变异模型法的基本途径是根据最佳控矿地球化学标志及其组合与矿的密切关系，评价样品空间及深部的矿化特征。并利用指示元素或元素比值与空间坐标的函数关系，建立地球化学空间变异模型，预测深部矿体赋存的空间位置。

7.2.2.1　矿与非矿的识别模型

这类模型的功能是评价样品所处空间的含矿性。有下列 4 种实用价值比较大的数学模型：

A　不同矿化阶段元素比赋值模型

从表 7-28 可见，不同矿化阶段中，金和各指示元素间比值有较大的差异。因而可以利用元素比值判断矿化期和矿化阶段。并根据不同阶段的矿化强度，给每个矿化阶段赋值。依多种比值的赋值来评判样品所在空间的含矿性。其数学模型如下：

$$Y = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^{P} X_i \tag{7-31}$$

式中，X_i 为根据 Au/Q_i 指示的矿化阶段赋值，Q_i = Ag、As、Sb、Bi、Cu、Pb、Mn、Se、Ba。

不同矿化期、矿化阶段的赋值规定于下：

第 1 矿化期	0
第 2 矿化期	
第 1 阶段	0.1
第 2 阶段	1
第 3 阶段	0.5
第 1、3 阶段	0.3
第 2、3 阶段	0.8

不同元素比值及赋值具体划分于下：

Au/Ag＜0.1→0；　　0.1≤Au/Ag＜1→0.3；
Au/Ag≥1→1；　　Au/As＜0.01→0；
0.01≤Au/As＜0.1→0.1；　　0.1≤Au/As＜1→0.8；
Au/As≥1→1；　　Au/Sb＜0.1→0；
0.1≤Au/Sb＜5→0.1；　　5≤Au/Sb＜20→0.5；
Au/Sb≥20→1；　　Au/Bi＜0.1→0；
0.1≤Au/Bi＜5→0.1；　　Au/Bi≥5→0.8；
Au/Cu＜0.001→0；　　0.001≤Au/Cu＜0.05→0.3；
Au/Cu≥0.05→1；　　Au/Pb＜0.001→0；
0.001≤Au/Pb＜0.01→0.1；　　0.01≤Au/Pb＜0.1→0.5；
Au/Pb≥0.1→1；　　Au/Mn＜0.00005→0；
0.00005≤Au/Mn＜0.005→0.1；　　Au/Mn≥0.005→0.8；
Au/Se＜0.1→0；　　0.1≤Au/Se＜5→0.1；
5≤Au/Se＜15→0.5；　　Au/Se≥15→1；
Au/Te＜0.1→0；　　0.1≤Au/Te＜1→0.1；
Au/Te≥1→0.8；　　Au/Ba＜0.005→0；
0.005≤Au/Ba＜0.05→0.1；　　Au/Ba≥0.05→0.8；

在招掖金矿化带已知矿床和已知无矿地段上，各抽取 33 个样品。计算每个样品金与各元素的比值，按上列规定把每个比值变换成表征矿化信息的得分值。计算结果列于表 7-29 和表 7-30。应用式(7-31)计算每个样品的平均得分值。分别计算含矿样品和不含矿样品平均得分值的平均数、均方差，得：

含矿样品

$n=33$　　$\overline{Y}_1$(含矿)$=0.4867$，　　S(含矿)$=0.2689$

不含矿样品

$n=33$　　$\overline{Y}_1$(不含矿)$=0.0097$，　　S(不含矿)$=0.0190$

对两类样品进行 t 检验，得 $t=10.1649$。当信度 $\alpha=0.05$，自由度 $f=64$ 时，检验临界值 $t_\alpha=2$，两者差异极为显著，用该模型区分矿与非矿能够得到理想的评判效果。进一步按不同方式计算两组样品的区分临界值：

$$Y_{1c}^{(1)}=\frac{0.4867+0.0097}{2}=0.2482$$

$$Y_{1c}^{(2)}=\frac{0.4867\times0.2689+0.0097\times0.0190}{0.2689+0.0190}=0.4552$$

$$Y_{1c}^{(3)}=\frac{0.4867-0.2689+0.0097+0.0190}{2}=0.1233$$

结合该区矿化特征对评判规则规定于下：

$Y_1\geq0.4552$ 为 1 级含矿空间；

$0.2482\leq Y_1<0.4552$ 为 2 级含矿空间；

$0.1233<Y_1<0.2482$ 为 3 级含矿空间；

$Y_1\leq0.1233$ 为不含矿空间。

按上列规定对已知样品进行评判，从表 7-29、表 7-30 可见，33 个已知不含矿样品全部评为不含矿。33 个已知含矿样品中，18 个评为 1 级含矿，7 个评为 2 级含矿，6 个评为 3 级

含矿,2 个判作不含矿。被评为含矿的样品含矿概率理论值 100%,丢矿风险系数 0.06,判错率 3.03%。

表 7-29　已知无矿地段各样品元素比值、赋值、Y_1 值及含矿性评判结果

顺序号	项目	Au/Ag	Au/As	Au/Sb	Au/Bi	Au/Se	Au/Te	Au/Cu	Au/Pb	Au/Mn	Au/Ba	含矿性 ∑/10
1	比值	0.0085	0.0001	0.0045	0.0063	0.0006	0.0057	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	比值	0.0024	0.0015	0.0115	0.0115	0.001	0.0038	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	比值	0.0238	0.0014	0.0107	0.0034	0.003	0.0038	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	比值	0.0319	0.0014	0.0097	0.075	0.007	0.0025	0.0001	0.0001	0.0000	0.0001	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	比值	0.0128	0.0242	0.45	0.0126	0.1658	0.0485	0.0002	0.0003	0.0001	0.0001	无
	赋值	0	0.1	0.1	0	0.1	0	0	0	0.1	0	0.04
6	比值	0.012	0.0141	0.0098	0.0138	0.0035	0.006	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	比值	0.0178	0.0002	0.0143	0.0029	0.000	0.0027	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	比值	0.0199	0.0014	0.0136	0.004	0.0048	0.0038	0.0001	0.0002	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	比值	0.0836	0.0115	0.115	0.046	0.1314	0.1533	0.0018	0.0001	0.0001	0.0002	无
	赋值	0	0.1	0.1	0	0.1	0.1	0.3	0	0.1	0	0.08
10	比值	0.0302	0.01	0.0875	0.0275	0.035	0.0184	0.0005	0.0000	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01
11	比值	0.0769	0.0038	0.1286	0.2571	0.45	0.025	0.0001	0.0000	0.0000	0.0012	无
	赋值	0	0	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0.1	0.04
12	比值	0.0093	0.0029	0.0211	0.0003	0.02	0.008	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	比值	0.0154	0.0051	0.0019	0.0028	0.02	0.0067	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	比值	0.0017	0.0068	0.0208	0.001	0.055	0.055	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	比值	0.0155	0.0022	0.1125	0.0002	0.0164	0.0051	0.001	0.0014	0.0001	0.0000	无
	赋值	0	0	0.1	0	0	0	0.3	0.1	0.1	0	0.06
16	比值	0.0083	0.0017	0.0081	0.0017	0.015	0.0015	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

续表 7-29

顺序号	项目	Au/Ag	Au/As	Au/Sb	Au/Bi	Au/Se	Au/Te	Au/Cu	Au/Pb	Au/Mn	Au/Ba	含矿性 ∑/10
17	比值	0.0001	0.001	0 0068	0.0429	0.0075	0.015	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	比值	0.0009	0.0002	0.0011	0.0167	0.0025	0.005	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	比值	0.0381	0.001	0.0333	0.0068	0.018	0.0225	0.0002	0.0002	0.0001	0.0002	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0.01
20	比值	0.0024	0.0098	0.0243	0.0854	0 051	0.0255	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	比值	0.0061	0.0105	0.0931	0.0008	0.09	0.27	0.0004	0.0000	0.0000	0.0001	无
	赋值	0	0.1	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0.02
22	比值	0.0186	0.0083	0.0545	0.0052	0.24	0.24	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0	0	0.1	0.1	0	0	0	0	0.02
23	比值	0.0081	0.0004	0.0033	0.0005	0.0089	0.003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	比值	0.0005	0.0001	0.0005	0.0001	0.0007	0.0005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	比值	0.0188	0.0071	0.016	0.0291	0.0107	0.0057	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	比值	0.0056	0.0017	0.0068	0.0375	0.0075	0.0038	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	比值	0.0292	0.0032	0.0181	0.0109	0.019	0.0095	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	比值	0.0218	0.0045	0.0185	0.0089	0.012	0.008	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	比值	0.0064	0.0006	0.0029	0.0056	0.0025	0.0013	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	比值	0.0014	0.0000	0.0087	0.0000	0.0094	0.0122	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	无
	赋值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.01
31	比值	0.0057	0.0014	0.1444	0.0015	0.0072	0.026	0.0004	0.0003	0.0000	0.0000	无
	赋值	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0.01
32	比值	0.1923	0.0025	0.0217	0.0714	0.0088	0.0056	0.0003	0.0005	0.0000	0.0000	无
	赋值	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01
33	比值	0.0755	0.0048	0.8	0 0741	0.08	0.0182	0.0005	0.0001	0.0000	0.000	无
	赋值	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0.01

表 7-30　已知矿床各样品元素比值、赋值、Y_1 值及含矿性评判结果

顺序号	项目	$\frac{Au}{Ag}$	$\frac{Au}{As}$	$\frac{Au}{Sb}$	$\frac{Au}{Bi}$	$\frac{Au}{Se}$	$\frac{Au}{Te}$	$\frac{Au}{Cu}$	$\frac{Au}{Pb}$	$\frac{Au}{Mn}$	$\frac{Au}{Ba}$	含矿性 $\sum/10$
1	比值	0.1873	0.1846	2.3953	7.9231	1.4714	0.3121	0.0149	0.0028	0.0011	0.0018	2级
	赋值	0.3	0.8	0.1	0.8	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.28
2	比值	0.5636	0.0816	24.85	4.157	5.09	3.42	0.1799	0.1023	0.0531	0.1491	1级
	赋值	0.3	0.1	1	0.1	0.5	0.8	1	1	0.8	0.8	0.64
3	比值	1.6642	1.811	175.9	11.898	21.796	22.39	0.0224	0.0176	0.6422	0.0117	1级
	赋值	1	1	1	0.8	1	0.8	0.3	0.5	0.8	0.1	0.73
4	比值	2.9271	0.648	37.37	73.05	23.63	53.57	0.0776	0.0278	0.6545	0.0186	1级
	赋值	1	0.8	1	0.8	1	0.8	1	0.5	0.8	0.1	0.78
5	比值	0.091	0.0271	0.9416	25.8	6.45	1.4333	0.0315	0.0001	0.0019	0.086	2级
	赋值	0	0.1	0.1	0.8	0.5	0.8	0.3	0	0.1	0.8	0.35
6	比值	0.067	0.1697	1.4276	0.5241	1.4276	2.07	0.0188	0.0056	0.0009	0.0005	2级
	赋值	0	0.8	0.1	0.1	0.1	0.8	0.3	0.1	0.1	0.1	0.25
7	比值	0.4842	2.3246	92.98	2.2254	15.08	3.152	0.1488	0.6888	0.1717	2.2306	1级
	赋值	0.3	1	1	0.1	1	0.8	1	1	0.8	0.8	0.78
8	比值	0.4646	8.1379	29.5	9.8333	4.72	5.9	0.0037	0.0656	0.0002	0.0039	1级
	赋值	0.3	1	1	0.8	0.1	0.8	0.3	0.5	0.1	0.1	0.5
9	比值	5.5695	20.76	126.4	0.4732	25.28	0.614	0.6822	1.0745	0.1719	0.0358	1级
	赋值	1	1	1	0.1	1	0.1	1	1	0.8	0.1	0.71
10	比值	3.0405	36.06	175.8	19.81	80.36	46.88	1.2784	0.8152	0.0574	0.1758	1级
	赋值	1	1	1	0.8	1	1	1	1	0.8	0.8	0.94
11	比值	1.7005	15.47	154.7	15.47	51.57	13.75	0.126	0.0511	0.1078	0.0825	1级
	赋值	1	1	1	0.8	1	0.8	1	0.5	0.8	0.8	0.87
12	比值	0.274	0.4	1	0.3636	0.1429	0.5714	0.0154	0.006	0.0006	0.0006	3级
	赋值	0.3	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.21
13	比值	0.6479	1.5862	13.53	1.15	9.2	2.875	0.1769	0.46	0.0147	0.0023	1级
	赋值	0.3	1	0.5	0.1	0.5	0.8	1	1	0.8	0.1	0.61
14	比值	0.1974	0.0789	0.625	0.9375	0.125	0.75	0.0044	0.0002	0.0002	0.0001	无
	赋值	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0	0.1	0	0.12
15	比值	0.8899	0.194	1.94	9.7	2.7714	3.2333	0.0149	0.0081	0.001	0.0358	2级
	赋值	0.3	0.8	0.1	0.8	0.1	0.8	0.3	0.1	0.1	0.1	0.35
16	比值	0.798	0.0878	11.85	11.85	6.7714	4.74	0.0878	0.0431	0.0034	0.158	1级
	赋值	0.3	0.1	0.5	0.8	0.5	0.8	1	0.5	0.1	0.8	0.54
17	比值	2.1116	0.2754	227.7	62.1	52.55	341.6	0.2009	0.0196	0.0127	4.2694	1级
	赋值	1	0.8	1	0.8	1	0.8	1	1	0.8	0.8	0.9

续表 7-30

顺序号	项目	Au/Ag	Au/As	Au/Sb	Au/Bi	Au/Se	Au/Te	Au/Cu	Au/Pb	Au/Mn	Au/Ba	含矿性 ∑/10
18	比值	0.1352	0.0351	27.8	3.475	12.64	2.78	0.0007	0.2206	0.0232	1.1583	1级
	赋值	0.3	0.1	1	0.1	0.5	0.8	0	1	0.8	0.8	0.54
19	比值	1.5635	0.2283	438400	146.1	43.84	21.92	0.0548	1.1849	0.0038	3.1314	1级
	赋值	1	0.8	1	0.8	1	0.8	1	1	0.1	0.8	0.83
20	比值	0.2077	0.0162	0.81	0.2025	0.2314	0.405	0.0037	0.0051	0.0003	0.0002	3级
	赋值	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.1	0.1	0	0.13
21	比值	0.1839	0.0133	3.65	0.4563	1.0429	0.365	0.0178	0.0077	0.0017	0.0066	3级
	赋值	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.14
22	比值	0.1774	0.0138	0.3667	1.1	0.3143	0.55	0.0031	0.0048	0.0000	0.0002	无
	赋值	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0	0	0.12
23	比值	0.3788	0.0227	1.6667	5	0.7143	1.6667	0.0114	0.0385	0.0007	0.0114	2级
	赋值	0.3	0.1	0.1	0.8	0.1	0.8	0.3	0.5	0.1	0.1	0.32
24	比值	0.0359	0.065	1.04	2.6	1.4857	0.8667	0.0088	0.0127	0.0008	0.0076	3级
	赋值	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.5	0.1	0.1	0.15
25	比值	0.4893	0.0187	2.2826	7.5	5.25	10.5	0.0025	0.0375	0.0045	0.15	2级
	赋值	0.3	0.1	0.1	0.8	0.5	0.8	0.3	0.5	0.1	0.8	0.43
26	比值	0.4347	0.1841	60.75	81	12.15	34.71	0.0043	0.81	0.0328	0.6568	1级
	赋值	0.3	0.8	1	0.8	0.5	0.8	0.3	1	0.8	0.8	0.71
27	比值	1.0247	0.7519	9.667	40.6	22.56	40.6	0.0127	0.1845	0.0088	2.03	1级
	赋值	1	0.8	0.5	0.8	1	0.8	0.3	1	0.8	0.8	0.78
28	比值	0.2754	0.0673	7.6667	16.43	11.5	14.38	0.0015	0.0274	0.0047	0.1278	1级
	赋值	0.3	0.1	0.5	0.8	0.5	0.8	0.3	0.5	0.8	0.8	0.54
29	比值	0.5802	0.007	2.35	0.5222	1.3429	0.94	0.0053	0.0016	0.001	0.0008	3级
	赋值	0.3	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.13
30	比值	0.3434	0.0345	6.4333	2.7571	1.93	1.93	0.001	0.0327	0.0045	0.0048	2级
	赋值	0.3	0.1	0.5	0.1	0.1	0.8	0.3	0.5	0.1	0.1	0.29
31	比值	4.7561	0.0312	31.2	2.026	5.2	2.2286	0.2737	0.2364	0.0284	0.0312	1级
	赋值	1	0.1	1	0.1	0.5	0.8	1	1	0.8	0.1	0.64
32	比值	0.375	0.0136	1.5	1.5	0.8571	0.3	0.0083	0.0083	0.0009	0.0001	3级
	赋值	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0	0.13
33	比值	1.1378	0.021	24.5	1.7927	3.675	1.8375	0.4455	0.049	0.0277	0.2042	1级
	赋值	1	0.1	1	0.1	0.1	0.8	1	0.5	0.8	0.8	0.62

对105矿床及其外围各矿脉所有地表取样和坑道取样进行化学分析，计算Au与伴生元素的比值并赋值，应用式(7-31)计算每个样品的平均得分值，评判每个样品的含矿性。结果，157个样品中，1级含矿18个，2级含矿42个，3级含矿25个，不含矿72个。

B　以 Au/As、Au/Ag、Au/Pb、Ag/Pb 为标志的判别模型

从已知矿床和经工程验证确实无矿的地段分别抽取 25、31 个样品化学分析数据，计算每个样品的 Au/As、Au/Ag、Au/Pb、Ag/Pb。以已知矿床样品为含矿集合 A，已知无矿样品为无矿集合 B，对它们进行费歇准则下的二组判别分析。经计算得：

	Au/As	Au/Ag	Au/Pb	Ag/Pb
$\bar{X}_A$	3.3458	1.2912	0.3384	0.2885
S_A	8.0693	1.4204	0.5337	0.3921
$\bar{X}_B$	0.0049	0.0166	0.0157	0.0002
S_B	0.0068	0.0198	0.0263	0.0005
$D=$	(3.3409	1.2746	0.3227	0.2883)′

$$S^{-1}=\begin{bmatrix} 0.0009 & -0.0013 & 0.0026 & -0.0058 \\ -0.0013 & 0.0412 & 0.0574 & -0.0966 \\ 0.0026 & 0.0574 & 0.3079 & -0.3312 \\ -0.0058 & -0.0966 & -0.3312 & 0.7075 \end{bmatrix}$$

$$Y_2=0.0005\text{Au/As}+0.0376\text{Au/Ag}+0.0857\text{Au/Pb}-0.0454\text{Ag/Pb} \qquad (7\text{-}32)$$

用式(7-32)计算每个样品的判别函数值。分别计算 A、B 两组判别函数平均值、均方差，得 $\bar{Y}_2(A)=0.0661$，$S_A=0.0519$。$\bar{Y}_2(B)=0.002$，$S_B=0.0022$。对它们进行 t 检验，得 $t=6.8842$。当信度 $\alpha=0.05$，自由度 $f=54$ 时，检验临界值 $t_\alpha=2.01$。两组之间的判别函数值差异极大，用其评价样品的含矿性能得到客观的评判结果。依不同方式计算判别临界值：

$$Y_{2c}^{(1)}=\frac{0.0661+0.002}{2}=0.0341$$

$$Y_{2c}^{(2)}=\frac{0.0661\times 0.0519+0.002\times 0.0022}{0.0519+0.0022}=0.0635$$

$$Y_{2c}^{(3)}=\frac{0.0661-0.0519+0.002+0.0022}{2}=0.0092$$

根据样品特点对判别规则决策于下：

$Y_2\geqslant 0.0635$	1 级含矿
$0.0341\leqslant Y_2<0.0635$	2 级含矿
$0.0092<Y_2<0.0341$	3 级含矿
$Y_2\leqslant 0.0092$	不含矿

抽取 33 个已知不含矿样品和 35 个已知含矿样品做检验样品，计算每个样的 Au/As、Au/Ag、Au/Pb、Ag/Pb，以及判别函数值，计算结果列于表 7-31，用判别临界值对每个样品含矿性进行评判。从表 7-31 可见，33 个已知不含矿样品全部判作不含矿，35 个已知含矿样品中，12 个判作 1 级含矿，3 个判作 2 级含矿，16 个判作 3 级含矿，4 个判作不含矿。判作含矿的样品含矿概率理论值 100%，丢矿风险系数 0.1143，判错率 5.88%。

计算 105 矿床及其外围 157 个样品的 Au/As、Au/Ag、Au/Pb、Ag/Pb，用式(7-32)计算每个样品的判别函数值，用判别临界值对样品含矿性进行评判，结果，29 个判作 1 级含矿，20 个判作 2 级含矿，53 个判作 3 级含矿，45 个判作不含矿。

表 7-31　已知检验样品标志值，判别函数 Y_2 及含矿性评判结果

样品号	Au/As	Au/Ag	Au/Pb	Ag/Pb	Y_2	含矿性		样品号	Au/As	Au/Ag	Au/Pb	Ag/Pb	Y_2	含矿性	
						已知	判别							已知	判别
315	0.0001	0.0005	0.0056	0.0000	0.0008	无	无	112	0.0816	0.5636	0.1585	0.1023	0.0321	有	3级
317	0.0015	0.0024	0.0197	0.0000	0.0018	无	无	18	1.811	1.6641	0.0106	0.0176	0.0636	有	1级
334	0.0014	0.0238	0.0025	0.0001	0.0011	无	无	20	0.658	2.9271	0.0095	0.0278	0.1099	有	1级
1	0.0014	0.0319	0.0045	0.0001	0.0016	无	无	51	0.0271	0.091	0.0014	0.0001	0.0036	有	无
3	0.0242	0.0128	0.0226	0.0003	0.0024	无	无	87	0.1697	0.067	0.0835	0.0056	0.0095	有	3级
10	0.0014	0.0120	0.0115	0.0001	0.0014	无	无	140	2.3246	0.4842	1.4225	0.6888	0.098	有	1级
15	0.0002	0.0178	0.0046	0.0001	0.0011	无	无	142	8.1379	0.4646	0.1411	0.0656	0.0307	有	3级
5	0.0115	0.0836	0.0006	0.0000	0.0032	无	无	146	14.9756	5.5695	0.1929	1.0745	0.1847	有	1级
34	0.01	0.0302	0.0011	0.0000	0.0012	无	无	178	360577	3.0415	0.2681	0.8152	0.1183	有	1级
52	0.0098	0.0769	0.0002	0.0000	0.0029	无	无	206	15.47	1.7005	0.0301	0.0511	0.0719	有	1级
58	0.0029	0.0093	0.0148	0.0001	0.0016	无	无	209	0.4	0.274	0.0128	0.006	0.0121	有	3级
59	0.0051	0.0154	0.0025	0.0000	0.0008	无	无	350	1.5862	0.6479	0.71	0.46	0.0651	有	1级
63	0.0068	0.0017	0.0188	0.0000	0.0017	无	无	351	0.0769	0.1974	0.0008	0.0002	0.0075	有	无
75	0.0022	0.0155	0.0896	0.0014	0.0082	无	无	377	0.194	0.8899	0.0091	0.0081	0.034	有	3级
89	0.0017	0.0083	0.0042	0.0000	0.0007	无	无	380	0.0878	0.798	0.054	0.0431	0.0327	有	3级
131	0.0022	0.0009	0.0923	0.0001	0.0084	无	无	386	0.2754	2.1116	0.4828	1.0196	0.0746	有	1级
158	0.0001	0.0381	0.0039	0.0002	0.0018	无	无	389	0.0351	0.1352	1.6317	0.2206	0.1349	有	1级
164	0.0098	0.0024	0.0006	0.0000	0.0001	无	无	390	0.2283	1.5635	0.7578	1.1849	0.0701	有	1级
189	0.0105	0.0061	0.0035	0.0000	0.0005	无	无	385	0.0162	0.2077	0.0244	0.0051	0.0097	有	3级
201	0.0083	0.0186	0.0003	0.0000	0.0007	无	无	398	0.0133	0.1839	0.0418	0.0077	0.0102	有	3级
223	0.0004	0.0081	0.0046	0.0000	0.0007	无	无	401	0.0138	0.1774	0.027	0.0048	0.0088	有	无
224	0.0001	0.0005	0.0083	0.0000	0.0007	无	无	402	0.0227	0.3768	0.1015	0.0385	0.0212	有	3级
248	0.0071	0.0188	0.0041	0.0001	0.0011	无	无	410	0.065	0.0359	0.3415	0.0127	0.0301	有	3级
249	0.0017	0.0056	0.0047	0.0000	0.0006	无	无	411	0.0187	0.4893	0.0766	0.0375	0.0233	有	3级
260	0.0032	0.0292	0.0048	0.0001	0.0015	无	无	412	0.1841	0.4347	1.8633	0.81	0.1393	有	1级
263	0.0006	0.0064	0.0015	0.0000	0.0004	无	无	425	0.7519	1.0247	0.1728	0.1845	0.047	有	2级
305	0.0000	0.0014	0.0086	0.0000	0.0008	无	无	426	0.0673	0.2754	0.0994	0.0274	0.0177	有	3级
307	0.0014	0.0057	0.0479	0.0003	0.0043	无	无	431	0.007	0.5802	0.0028	0.0016	0.022	有	3级
23	0.0025	0.1923	0.0024	0.0005	0.0074	无	无	432	0.0345	0.3434	0.0953	0.0327	0.0196	有	3级
123	0.1379	0.0755	0.0001	0.0001	0.0008	无	无	433	0.0312	4.7561	0.0497	0.2364	0.1724	有	1级
24	0.0001	0.002	0.0116	0.000	0.0011	无	无	434	0.0136	0.375	0.0222	0.0083	0.0156	有	3级
130	0.029	0.0014	0.0806	0.0024	0.0069	无	无	435	0.021	1.1378	0.0431	0.049	0.0443	有	2级
261	0.0038	0.0182	0.0014	0.0000	0.0008	无	无	4101	0.065	0.0371	0.3534	0.0127	0.0311	有	3级
105	0.1873	0.1873	0.0149	0.0028	0.0083	有	无	4251	0.7519	1.0679	0.1801	0.1845	0.046	有	2级

C 地球化学标志值分割类比法

矿与非矿是两种性质不同的地质体。表现在控矿地球化学标志值上，两者有很大的差别，如果将混杂于一起的两种地质体按控矿地球化学标志值大小排列，两种不同性质地质体一定会各自集中于一定的数值区间内。因而必然有一个数值点把它们一分为二。地球化学标志值分割类比法就是应用一定的数学方法，首先提炼最能表征矿化的一组综合地球化学标志，按"组内差别最小，组间差别极大"的分割原则，对综合地球化学标志值进行分割。和已知含矿样品分割在一起的，属于含矿样品的可能性必然很大。

(1)综合地球化学标志的提炼。为提炼受金矿化作用制约的一组地球化学标志，对招掖金矿化带上 129 个矿点 435 个样品的 Au、Ag、As、Sb、Bi、Se、Te、W、Cu、Pb、Mn、Ba 等元素化学分析数据进行主成分分析。

主成分分析是因子分析方法的一种，能够把多次地质作用叠加在一起的一组变量表征值提炼、归纳成少数几个综合因子，每个综合因子和其内部的变量之间，存在线性相关关系。在地质问题上，综合因子往往是一定地质作用(例如矿化作用)的表征。因此，该方法具有筛选多变量混合分布总体的功能。

对上述 435 个地球化学标志数据进行对数变换后，开展主成分分析。计算由电子计算机完成。表 7-32 列出了方差极大正交旋转后的因子载荷，不难看出，第 12 综合因子表征了

表 7-32 方差极大正交旋转后的因子载荷

元素	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}	F_{11}	F_{12}
Au	0.0554	-0.0854	-0.1023	-0.0442	0.0914	0.1486	-0.1672	-0.2266	0.1459	-0.2104	0.2279	0.8600
Ag	0.5337	-0.1063	-0.1806	-0.0011	0.1670	0.1792	-0.2424	-0.2378	0.3337	-0.1883	0.3487	0.5033
As	0.0485	-0.1536	-0.1398	0.0061	0.2035	0.0779	-0.1700	-0.0609	0.0668	-0.9016	0.1293	0.2009
Sb	0.0382	-0.0189	-0.0548	0.0295	0.9502	-0.0381	-0.0795	-0.0667	0.1581	-0.1738	0.1286	0.0870
Bi	0.0563	0.0036	-0.1114	-0.0769	0.0882	-0.0779	-0.9117	-0.1880	0.1735	-0.1651	0.1149	0.1660
Se	0.0411	-0.0659	-0.9422	-0.0370	0.0556	-0.0379	-0.1007	-0.2354	0.0513	-0.1240	0.0067	0.0966
Te	0.0578	-0.0371	-0.2820	-0.0686	0.0766	-0.0593	-0.1984	-0.8918	0.0961	-0.06	0.0657	0.2253
W	-0.0168	0.0941	-0.0348	-0.0378	0.0339	-0.9792	-0.0614	-0.0438	-0.0096	0.0617	-0.0850	-0.1072
Cu	0.0724	-0.143	-0.1006	0.0505	0.1587	0.1156	-0.1223	-0.0644	0.2499	-0.1367	0.8729	0.2466
Pb	0.0609	0.0161	-0.0491	0.0038	0.1644	0.0079	-0.1596	-0.0836	0.9318	-0.0576	0.2060	0.1419
Mn	-0.0006	0.0174	0.0324	0.9946	0.0258	0.0358	0.0590	0.0448	0.0035	-0.0040	0.0333	-0.0279
Ba	-0.0233	0.9770	0.0596	0.0186	-0.0182	-0.0946	-0.0011	0.0310	0.0092	0.1200	-0.1049	-0.0705

第 2、3 阶段的最佳地球化学标志组合(Au-Ag-Bi-Te；Au - Ag - Cu-Pb-As-Bi-W)，因而确定综合因子 F_{12}为类比的综合地球化学标志。其因子计量模型为：

$$F_{12}=1.4341\ln Au-0.0074\ln Ag-0.2049\ln As-0.0075\ln Sb-0.1963\ln Bi-0.008\ln Se-0.2716\ln Te+0.2079\ln W-0.2512\ln Cu-0.0646\ln Pb+0.052\ln Mn+0.0271\ln Ba \quad (7\text{-}33)$$

(2)地球化学标志值的计算和分割：

用式(7-33)计算 435 个样品的 F_{12}因子计量值，最小值为 -2.5533，最大值为 2.5597。将它们从小到大顺序排列后，根据组内差别最小，组间差别极大的分割原则，首先把数据分割成 8 组。各组的数值范围、样品数、因子计量平均值、均方差及 t 检验值列于表 7-33。

表 7-33　F_{12}因子得分分组及 t 检验结果

分组号	因子得分范围	n	$\overline{F}_{12}$	S_{F12}	t	t_a	差异显著性
1	< -1.5037	36	-1.8166	0.6830			
					3.9354	1.995	显著
2	-1 5307～ 1.0194	39	-1.1131	0.3517			
					3.2317	1.989	显著
3	-1 0194～-0.5081	54	-0.7343	0.1188			
					20.3088	1.97	极显著
4	-0.5081～0.0032	74	-0.2325	0.1505			
					20.7586	1.97	极显著
5	0 0032～0.7702	130	0 3547	0.2151			
					15.2688	1.97	极显著
6	0.7702～1.0258	38	0.8967	0.0764			
					14.0710	1.996	极显著
7	1 0258～1.5371	39	1.2547	0.1375			
					12.0477	2.000	极显著
8	>1.5371	25	1.8381	0.2497			

从样品含矿性评价而论，其结论只能是含矿和不含矿。并且，对于一个具体的样品而言，两者必居其一。为确定最佳分割点，对所分的 8 个组进行多方案组合，得 7 种不同形式的二分割。依下列模型计算各分割形式的组间离差平方和 S_A，组内离差平方和 Se，检验值 F：

$$S_A = \sum_{i=1}^{2} n_i (\overline{X}_i - \overline{X})^2 \tag{7-34}$$

$$S_e = \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \overline{X}_i)^2 \tag{7-35}$$

$$F = S_A (n - m) / [S_e (m - 1)] \tag{7-36}$$

式中，$m = 2$；$N = n_1 + n_2 = 486$；$\overline{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} X_i$；$\overline{X}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}$。

计算结果见表 7-34，不难看出，(1～4)，(5～8)的分割形式，组间离差平方和最大，组内离差平方和最小。差异显著性检验值高达 1106.8。因而确定 4、5 组间的分界点 0.0032 为含矿与不含矿样品 F_{12}因子计量最佳分割点。当样品的因子计量值大于 0.0032 时为含矿样品，否则为不含矿样品。

对其中 7 个已知矿床的 65 个样品评判结果进行统计，61 个评为含矿样品，4 个判作不含矿样品。

表 7-34　不同分割形式方差分析结果

序号	分割形式	S_4	S_0	F	F_a
1	(1)，(2～8)	132.6230	294.8540	194.7599	
2	(1～2)，(3～8)	196.4783	175.1474	485.7245	
3	(1～3)，(4～8)	252.1011	119.5206	913.3135	
4	(1～4)，(5～8)	267.1181	104.5036	1106.7762	3.865
5	(1～5)，(6～8)	205,7690	165.8527	537.2114	
6	(1～6)，(7～8)	160.1711	211.4506	327.9920	
7	(1～7)，(8)	87.5204	284.1013	133.3902	

进一步用该模型计算检验样品中 33 个已知不含矿样品和 35 个已知含矿样品的 F_{12}计

量值，用分割点上的数值评判它们的含矿性，结果列于表 7-35。从表可以看出，33 个已知不含矿样品全部判为不含矿，35 个已知含矿样品中，34 个判为含矿，1 个判为不含矿。根据检验样品和参加建立模型的已知含矿样品计算，评为含矿样品的含矿概率理论值 100%，丢矿风险系数 0.05，判错率 3.76%。

表 7-35　已知检验样品综合因子 F_{12} 及含矿性评判结果

样品号	F_{12}	含矿性		样品号	F_{12}	含矿性		样品号	F_{12}	含矿性	
		已知	判别			已知	判别			已知	判别
315	-1.3203	无	无	249	-1.1751	无	无	351	0.7115	有	有
317	-1.1905	无	无	260	-0.7433	无	无	377	1.0228	有	有
334	-1.2230	无	无	263	-1.6738	无	无	380	1.1753	有	有
1	-1.3696	无	无	305	-2.1047	无	无	386	2.2646	有	有
3	-0.7112	无	无	307	-0.8008	无	无	389	0.0005	有	无
10	-1.3945	无	无	23	-0.7354	无	无	390	1 6197	有	有
15	-1.7033	无	无	123	-1.8671	无	无	395	0.4787	有	有
5	-0.1589	无	无	24	-1.1106	无	无	398	0.2883	有	有
34	-0.613	无	无	130	-1.2424	无	无	401	0.5603	有	有
52	-0.7956	无	无	261	-0.7826	无	无	402	0.8172	有	有
58	-1.1338	无	无	105	1.1431	有	有	410	0.7176	有	有
59	-0.8515	无	无	112	1.0528	有	有	411	0.7985	有	有
63	-1.272	无	无	18	1.3860	有	有	412	1.2765	有	有
75	-0.9635	无	无	20	2.1540	有	有	425	1.5339	有	有
89	-0.8689	无	无	51	0.8784	有	有	426	0.6195	有	有
131	-1.6363	无	无	87	1.2463	有	有	431	0.0876	有	有
158	-1.4781	无	无	140	1.2153	有	有	432	0.1968	有	有
164	-1.251	无	无	142	1.5997	有	有	433	0.8242	有	有
189	-0.4339	无	无	146	1.8550	有	有	434	0.5416	有	有
201	-0.7174	无	无	178	2.5597	有	有	435	0.6945	有	有
223	-1.5177	无	无	206	1.8116	有	有	4101	0.7176	有	有
224	-2.1948	无	无	209	0.8776	有	有	4251	1.5339	有	有
248	-0.6781	无	无	350	1.5583	有	有				

计算 105 矿床及其外围所采样品的综合因子计量 F_{12}，用分割临界值评判每个样品的含矿性。结果有 112 个判作含矿，42 个判作不含矿。

D　以 Au、Au/Ag、F_{12} 为标志的判别模型

从已知矿床 55 矿脉、108 矿脉、56 矿脉、52 矿脉、九曲矿床中抽取 30 个样品组成有找矿远景的样品集合 A。在招掖金矿化带上抽取经工程验证确实无矿的 11 个矿点 21 个样品，组成无找矿远景的样品集合 B。把 A、B 看作含矿性截然相反的两种地质体，由它们组成模型样品来建立判别模型。所用的变量为：①金含量($\mu g/g$)；②Au/Ag；③综合因子 F_{12}。

各样品的标志值列于表 7-36。经计算得：

$$D=(14.2228 \quad 0.7109 \quad 1.9306)'$$

$$S^{-1}=\begin{pmatrix} 0.0001 & -0.0007 & -0.0007 \\ -0.0007 & 0.0458 & -0.0054 \\ -0.0007 & -0.0054 & 0.0388 \end{pmatrix}$$

表 7-36　模型样品 A、B 二集合判别函数及找矿远景评判结果

集合	矿　点	样品号	Au /μg·g^{-1}	Au/Ag	F_{12}	Y	找矿远景	
							已知	预测
A	55 号矿脉	377	0.97	0.8899	1.0228	0.0741	有	1 级
		378	0.19	0.4043	0.8982	0.0603	有	1 级
		379	0.25	0.3846	0.6903	0.0472	有	1 级
		381	0.079	0.0374	0.1355	0.0088	有	2 级
		382	0.58	0.617	0.9143	0.064	有	1 级
		384	14.29	1.4191	2.3311	0.1631	有	1 级
		385	14.82	1.6522	1.3417	0.1053	有	1 级
		386	68.31	2.1116	2.2646	0.1757	有	1 级
		387	21.68	0.5111	1.0871	0.0764	有	1 级
		388	3.06	0.0952	1.0494	0.0661	有	1 级
		390	43.84	1.5635	1.6197	0.1257	有	1 级
	108 脉	407	28.1	0.0487	1.021	0.0728	有	1 级
		408	26.5	0.6812	1.0498	0.077	有	1 级
		409	58.5	0.3013	0.9191	0.069	有	1 级
		410	0.52	0.0359	0.7176	0.0446	有	1 级
		411	5.25	0.4893	0.7985	0.056	有	1 级
		412	24.3	0.4347	1.2765	0.0875	有	1 级
		417	0.9	0.0908	0.0669	0.0054	有	2 级
		418	1.29	0.2810	0.9638	0.0629	有	1 级
		419	0.077	0.0636	0.0097	0.0014	有	2 级
		421	13.2	0.4574	0.9752	0.0636	有	1 级
		422	26	0.0835	1.0613	0.0701	有	1 级
		423	2.64	0.0761	0.5551	0.0354	有	1 级
		424	18.7	0.9791	1.4116	0.1017	有	1 级
		425	20.3	1.0247	1.5339	0.1101	有	1 级
	56 矿脉	431	0.47	0 5802	0.0876	0.0127	有	2 级
	52 矿脉	432	1.93	0 3434	0.1968	0.0167	有	1 级
	九曲矿脉	433	15.6	4.7561	0.8242	0 1124	有	1 级
		434	0.3	0.357	0.5416	0.0380	有	1 级
		435	14.7	1 1378	0.6945	0.0591	有	1 级

续表 7-36

集合	矿 点	样品号	Au /μg·g⁻¹	Au/Ag	F_{12}	$\hat{Y}$	找矿远景	
							已知	预测
B	83 号	1	0.003	0.0319	−1.3696	−0.0837	无	无
		2	0.093	0.0182	−0.2427	−0.0147	无	无
		3	0.063	0.0128	−0 7112	−0.0435	无	无
	85 号	10	0.004	0.012	−1.3945	−0.0855	无	无
	122 号	15	0 003	0.0178	−1 7033	−0.1044	无	无
	70 号	22	0.008	0.127	−0.5059	−0.0295	无	无
		23	0.005	0.1923	−0.7354	−0.0428	无	无
		24	0.003	0.0199	−1.1106	−0.0680	无	无
	2 号	52	0.09	0.0769	−0.7956	−0.0479	无	无
		54	0.024	0.0003	−1.9208	−0.1180	无	无
	42 号	62	0.019	0.0116	−0.8381	−0.0513	无	无
		63	0.011	0.0017	−1.2720	−0.0780	无	无
		64	0.016	0.0018	−0.3147	−0.0193	无	无
	129 号	128	0.006	0.0191	−0.7114	−0.0435	无	无
		129	0.006	0.0583	−0.8784	−0.0532	无	无
		130	0.003	0.0001	−1.2424	−0.0763	无	无
	130 号	131	0.001	0.0009	−1.6363	−0.1005	无	无
	45 号	161	0.036	0.016	−0.8894	−0.0544	无	无
	9 号	162	0.042	0.0178	0.8913	−0.0545	无	无
		164	0.0051	0.0024	−1.25	−0.0768	无	无
	11 号	165	0.023	0.0752	−0.4875	−0.029	无	无

依 $C = DS^{-1}$计算判别系数，得判别模型：

$$\hat{Y}_3 = 0.0001\mathrm{Au} + 0.0125\mathrm{Au/Ag} + 0.0641F_{12} \tag{7-37}$$

用式(7-37)计算 A、B 两集合各样品的判别函数值，结果列于表 7-36。其中，已知有找矿远景样品集合 A 的判别函数平均值 $\overline{Y}(A) = 0.0689$，均方差 $S(A) = 0.0422$。已知无找矿远景样品集合 B 的判别函数平均值 $\overline{Y}(B) = -0.0607$，均方差 $S(B) = 0.0282$。两者的检验值 $t = 12.27$。当信度 $\alpha = 0.05$，自由度 $f = 49$ 时，检验临界值 $t_\alpha = 2.01$。差异极显著。表明判别模型对矿与非矿有很高的分辨能力。进一步计算判别临界值：

$$Y_{3c}^{(1)} = \frac{\overline{Y}(A) - 2S(A) + \overline{Y}(B) + 2S(B)}{2} = -0.0099$$

$$Y_{3c}^{(2)} = \frac{N_A\overline{Y}(A) + N_B\overline{Y}(B)}{N_A + N_B} = 0.0155$$

若以 $Y_{3c}^{(1)}$为判别临界值，集合 A 的全部样品判作有找矿远景样品。集合 B 的全部样品评为无找矿远景样品。若以 $Y_{3c}^{(2)}$为判别临界值，集合 A 中有 26 个判作有找矿远景样品，4 个判作无找矿远景样品。集合 B 全部评为无找矿远景样品。据此，对样品找矿远景评价

准则规定于下：

(1) $\hat{Y}_i>0.0155$ 判作 1 级找矿远景样品；(2) $-0.0099<\hat{Y}_i\leqslant 0.0155$ 判作 2 级找矿远景样品；(3) $\hat{Y}_i\leqslant -0.0099$ 判作无找矿远景样品。

用模型(7-37)计算检验样品集合中 70 个已知有找矿远景样品和 50 个已知无找矿远景样品的判别函数值。用判别临界值评价它们的找矿远景。结果，已知矿床样品中，有 57 个判为 1 级找矿远景样品，12 个判为 2 级找矿远景样品，1 个判作无找矿远景样品。已知不含矿样品中，有 46 个判作无找矿远景样品，4 个判作有找矿远景样品。预测为有找矿远景样品的找矿概率理论值 94.52%，丢矿风险系数 0.0143，判错率 4.17%。

用式(7-37)计算 105 矿床及其外围对矿脉所采样品的判别函数值，用判别临界值评价它们的含矿性。结果，157 个样品中，判作 1 级含矿的 109 个，判作 2 级含矿的 24 个，判作不含矿的 24 个。

E　综合评判

用 4 种方法对模型样品含矿性评判结果列于表 7-37。30 个已知不含矿样品中，4 种方

表 7-37　已知样品综合评判结果

样品号	Y_1	Y_2	Y_3	F_{12}	综合评判	样品号	Y_1	Y_2	Y_3	F_{12}	综合评判
315	无	无	无	无	无	305	无	无	无	无	无
317	无	无	无	无	无	307	无	无	无	无	无
334	无	无	无	无	无	23	无	无	无	无	无
1	无	无	无	无	无	123	无	无	无	无	无
3	无	无	无	无	无	105	2 级	无	1 级	有	4 级
10	无	无	无	无	无	112	1 级	3 级	1 级	有	3 级
15	无	无	无	无	无	18	1 级	1 级	1 级	有	1 级
5	无	无	无	无	无	20	1 级	1 级	1 级	有	1 级
34	无	无	无	无	无	51	2 级	无	1 级	有	4 级
52	无	无	无	无	无	87	2 级	3 级	1 级	有	3 级
58	无	无	无	无	无	140	1 级	1 级	1 级	有	1 级
59	无	无	无	无	无	142	1 级	3 级	1 级	有	3 级
63	无	无	无	无	无	146	1 级	1 级	1 级	有	1 级
75	无	无	无	无	无	178	1 级	1 级	1 级	有	1 级
89	无	无	无	无	无	206	1 级	1 级	1 级	有	1 级
131	无	无	无	无	无	209	3 级	3 级	1 级	有	3 级
158	无	无	无	无	无	350	1 级	1 级	1 级	有	1 级
164	无	无	无	无	无	351	无	无	1 级	有	无
189	无	无	无	无	无	377	2 级	3 级	1 级	有	3 级
201	无	无	无	无	无	380	1 级	3 级	1 级	有	3 级
223	无	无	无	无	无	386	1 级	1 级	1 级	有	1 级
224	无	无	无	无	无	389	1 级	1 级	2 级	无	4 级
248	无	无	无	无	无	390	1 级	1 级	1 级	有	1 级
249	无	无	无	无	无	395	3 级	3 级	1 级	有	3 级
260	无	无	无	无	无	398	3 级	3 级	1 级	有	3 级
263	无	无	无	无	无	401	无	无	1 级	有	无
402	2 级	3 级	1 级	有	3 级	431	3 级	3 级	2 级	有	3 级
410	3 级	3 级	1 级	有	3 级	432	2 级	3 级	1 级	有	3 级
411	2 级	3 级	1 级	有	3 级	433	1 级	1 级	1 级	有	1 级
412	1 级	1 级	1 级	有	1 级	434	3 级	3 级	1 级	有	3 级
425	1 级	2 级	1 级	有	2 级	435	1 级	2 级	1 级	有	2 级
426	1 级	3 级	1 级	有	3 级						

法皆判为不含矿。33 个已知含矿样品中,4 种方法都评为含矿的 28 个,占 84.85%。3 种方法评为含矿,1 种方法判作不含矿的 3 个,占 9.09%。2 种方法评为含矿,2 种方法判作不含矿的 2 个,占 6.06%。为此规定综合评判准则于下:

(1)4 种模型评判结果中,3 种以上评为含矿的判作含矿样品,否则为不含矿样品。

(2)3 种模型判为含矿,1 种模型评为不含矿的判作 4 级含矿样品。

(3)4 种模型全部判为含矿的样品中,3 种模型判为 1 级,1 种模型评为含矿的为 1 级含矿样品;2 种模型评为 1 级,1 种模型评为 2 级,1 种模型评为含矿的为 2 级含矿样品;其余为 3 级含矿样品。

用上列评判准则确定的含矿样品,含矿概率理论值 100%,丢矿风险系数 0.0606,判错率 3.17%。

根据综合评判规则对 105 矿床及其外围各样品的含矿性进行评判。在 157 个样品中,判作 1 级含矿的 13 个,占 8.28%;判作 2 级含矿的 20 个,占 20.7%;判作 3 级含矿的 46 个,占 24.3%;判作 4 级含矿的 29 个,占 18.47%;判作不含矿的 49 个,占 31.21%。各矿脉地表样品的含矿情况见表 7-38。

表 7-38 105 矿床及其外围各矿脉含矿性对比

矿脉	1 级含矿		2 级含矿		3 级含矿		4 级含矿		无 矿	
	样数	比例	样数	比例	样数	比例	样数	比例	样数	比例
101	1	0.1250	0	0	1	0.1250	2	0.25	4	0.50
102	0	0	1	0.0833	3	0.25	3	0.25	5	0.4167
103	1	0.1429	0	0	1	0.1429	0	0	5	0.7143
104	0	0	1	0.0714	3	0.2143	5	0.3571	5	0.3571
113	2	0.1538	3	0.2308	5	0.3846	1	0.0769	2	0.1538
114	0	0	0	0	5	0.6250	3	0.3750	0	0
106	1	0.0833	3	0.25	1	0.0833	2	0.1667	5	0.4167
119	1	0.0769	1	0.0769	4	0.3077	5	0.3846	2	0.1538
110	1	0.0769	2	0.1538	4	0.3077	2	0.1538	4	0.3077
105	6	0.1053	9	0.1579	19	0.3333	6	0.1053	17	0.2982

7.2.2.2 *样品相对于矿体空间位置估计模型*

由于地质作用的长期性和复杂性,各种地质现象都是多期、多阶段地质因素综合作用的结果。我们在野外采取的每个样品,也是多次地质作用产物叠加的结果。虽说是一块岩石,如果处理得当,会使我们应用不同的方法,从中提炼出不同矿化时间、不同矿化作用或不同深度矿体的多种信息,基于这一认识,可以根据标志元素的空间分带规律,建立矿体空间位置估计模型来预测含矿样品空间相对于矿体的位置,即回答样品点是在矿体之上、之中,还是矿体之下,如果在矿体之上,见矿深度又有多大等问题。

A *矿体上、下部晕判别模型*

如果把含矿样品中的地球化学标志看作矿体在某一空间位置上的原生晕,可以根据矿体原生晕在不同空间上的分带特征,建立矿体上部晕和矿体下部晕的区分模型。为此,收集玲珑金矿田 52 脉 83 剖面。在剖面上抽取 19 个已知矿体上部晕样品,11 个已知矿体下部晕样品,把它们看作 A、B 两个总体,以该类型矿体原生晕分带模型(图 2-8)为依据,以 Au、Ag、As、Te、Cu、Mn 为评判标志来模拟判别模型。得下列线性判别方程式:

$$\hat{Y}=0.0685\ln(\mathrm{AgAs})-0.0182\ln(\mathrm{AuTe})-0.0203\ln\mathrm{Cu}-0.1046\ln\mathrm{Mn} \qquad (7\text{-}38)$$

$$Y_c=-0.4960$$

$F=8.4210$ ·

当信度 $\alpha=0.05$，第 1 自由度 $f_1=4$，第 2 自由度 $f_2=25$ 时，检验临界值 $F_\alpha=2.76$。差异极为显著。表明用该模型对矿体上部晕和矿体下部晕有较高的区分能力。

用式(7-38)对玲珑金矿田上的 52、56、58、47 矿脉，以及望儿山矿床的已知矿体上部晕 6 个剖面和已知矿体下部晕 5 个剖面的 144 个样品，及各剖面中不同变量几何平均值进行评

表 7-39　已知矿体上部晕、下部晕判别分析结果

矿脉	样号	$\hat{Y}$	位置	
			已知	判别
52 号 400m 标高	38	−0.394	上	上
	39	−0.442	上	上
	40	−0.491	上	上
	41	−0.327	上	上
	42	−0.387	上	上
	43	−0.380	上	上
	44	−0.366	上	上
	45	−0.280	上	上
	46	−0.471	上	上
	47	−0.308	上	上
	48	−0.212	上	上
	49	−0.494	上	上
	平均	−0.379	上	上
52 号 225m 标高	101	−0.60	上	下
	102	−0.312	上	上
	103	−0.406	上	上
	104	−0.380	上	上
	105	−0.462	上	上
	106	−0.382	上	上
	107	−0.408	上	上
	108	−0.443	上	上
	平均	−0.385	上	上
52 号 −135m 标高	26	−0.605	下	下
	27	−0.551	下	下
	28	−0.551	下	下
	13	−0.601	下	下
	14	−0.637	下	下
	15	−0.554	下	下
	29	−0.622	下	下
	16	−0.505	下	下
	18	−0.504	下	下
	30	−0.651	下	下
	31	−0.691	下	下
	平均	−0.588	下	下
52 号 +47 号 400m 标高	17	−0.484	上	上
	18	−0.489	上	上
	19	−0.244	上	上
	20	−0.301	上	上
	21	−0.334	上	上
	43	−0.134	上	上
+52 号 +47 号 400m 标高	23	−0.29	上	上
	24	−0.193	上	上
	26	−0.322	上	上
	27	−0.535	上	下
	28	−0.231	上	上
	29	−0.224	上	上
	30	−0.431	上	上
	31	−0.215	上	上
	32	−0.208	上	上
	33	−0.372	上	上
	34	−0.398	上	上
	35	−0.414	上	上
	36	−0.535	上	下
	平均	−0.360	上	上
52 号 63 剖面 225m 标高	109	−0.537	上	下
	110	−0.650	上	下
	111	−0.396	上	上
	113	−0.347	上	上
	114	−0.444	上	上
	115	−0.427	上	上
	116	−0.424	上	上
	117	−0.356	上	上
	118	−0.243	上	上
	119	−0.155	上	上
	120	−0.226	上	上
	122	−0.334	上	上
	123	−0.211	上	上
	124	−0.123	上	上
	125	−0.145	上	上
	126	−0.224	上	上
	127	−0.281	上	上
	128	−0.219	上	上
	130	−0.269	上	上
	131	−0.237	上	上
	132	−0.321	上	上
	133	−0.288	上	上
	134	−0.323	上	上
	135	−0.303	上	上
	136	−0.360	上	上
	137	−0.498	上	下
47 号 110m 标高	138	−0.380	上	上
	平均	−0.323	上	上
	11	−0.611	下	下
	12	−0.650	下	下
	37	−0.612	下	下
	38	−0.369	下	上
	39	−0.341	下	上
	40	−0.522	下	下
	13	−0.551	下	下
	平均	−0.522	下	下
56 号 +58 号 370m 标高	32	−0.629	上	下
	33	−0.446	上	上
	34	−0.046	上	上
	35	−0.417	上	上
	36	−0.489	上	上
	37	−0.127	上	上
	38	−0.572	上	下
	39	−0.418	上	上
	40	−0.276	上	上
	41	−0.447	上	上
	42	−0.560	上	下
	43	−0.521	上	下
	44	−0.533	上	下
	平均	−0.426	上	上
56 号 +58 号 −120m ～ −160m 标高	97	−0.623	下	下
	98	−0.629	下	下
	99	−0.665	下	下
	100	−0.692	下	下
	101	−0.689	下	下
	102	−0.660	下	下
	103	−0.837	下	下
	104	−0.519	下	下
	105	−0.659	下	下
	106	−0.690	下	下
	107	−0.688	下	下
	108	−0.718	下	下
	109	−0.691	下	下
	110	−0.804	下	下
	平均	−0.683	下	下
	35	−0.330	上	上
望儿山矿床 102m 标高	36	−0.364	上	上
	37	−0.306	上	上
	38	−0.488	上	上
	39	−0.500	上	下
	40	−0.500	上	下
	41	−0.495	上	上
	平均	−0.426	上	上
望儿山矿床 −215m 标高	46	−0.648	下	下
	47	−0.689	下	下
	48	−0.557	下	下
	50	−0.648	下	下
	51	−0.577	下	下
	52	−0.708	下	下
	53	−0.685	下	下
	54	−0.771	下	下
	55	−0.718	下	下
	56	−0.757	下	下
	57	−0.757	下	下
	58	−0.588	下	下
	59	−0.520	下	下
	60	−0.589	下	下
	61	−0.629	下	下
	62	−0.718	下	下
	63	−0.569	下	下
	64	−0.509	下	下
	65	−0.602	下	下
	平均	−0.608	下	下
52 号 −140m 标高	45	−0.539	下	下
	46	−0.449	下	上
	47	−0.535	下	下
	48	−0.406	下	上
	49	−0.575	下	下
	50	−0.429	下	上
	51	−0.698	下	下
	52	−0.523	下	下
	平均	−0.518	下	下

判。结果判对 138 个，判错 17 个，按剖面计算，判错率为 0% ～35.71%，平均判错率 10.97%，见表 7-39。该模型适用于矿体以上和矿体以下样品的判别。对矿体之中的样品判别会出现较大的误差。

表 7-40　105 矿床及其外围含矿样品相对于矿体空间位置各种方法估计结果

矿脉	样号	Y	B_1 /m	B_2 /m	综合评判 相对矿体位置	综合评判 预测见矿深度/m
101	1	下	372.1	-41.4	上部②	327
	115	上	214.7	-4.3	上部①	214.7
	117	下	827.5	120.5	矿下	
	4	下	1293	-101.7	中部②	
102	10	上	1332	167.0	矿上④	
	11	上	386.5	-2.1	顶部①	386.0
	12	上	55	77.2	上部①	55～77
	104	上	26	-110.2	中部①	26
	106	下	360.8	7.7	顶部②	360.8
	109	下	795.9	21.5	顶部②	
	110	下	1414	30.9	矿下	
103	105	下	156.1	35.4	矿上③	35.4 和 156.1
	107	上	85.1	-174.3	矿上③	85.1
104	21	上	173.8	-16.9	上部①	173.8
	23	下	982.2	33.9	矿下	
	65	下	311.8	-6.7	上部②	311.8
	108	下	660.6	35.9	矿下	
	24	下	876.2	-60.1	中部②	
	25	上	104.5	78.8	矿上①	78.8～104.5
	112	下	853.1	61.1	矿下	
	26	上	74.5	-34.5	上部①	74.5
	114	下	643.5	78.4	矿下	
113	30	上	43.3	-35.6	上部①	43.3
	128	下	212.7	87.3	矿上③	87.3 和 212.7
	129	上	91	-194.2	矿上①	91
	130	上	59.8	35.0	矿上①	35～59.8
	132	上	103.8	74.2	矿上①	74.2～103.8
	133	上	675.6	82.3	矿上③	82.3
	137	上	29.4	-74.5	中部①	29.4
	138	上	270.9	53.5	矿上①	53.5 和 270.9
	141	上	409.9	-7.0	顶部①	409.9
	142	下	2912	87.9	矿下	
114	65	下	311.8	-6.7	上部②	311.8
	127	上	96.5	-5.0	顶部①	96.5
	135	上	54.6	-20.4	上部①	54.6
	136	上	51.8	-62.7	中部①	51.8
	140	上	53.5	-48.5	上部①	53.5
	131	上	34.9	-31.9	上部①	34.9
	134	上	199.5	-3.4	顶部①	199.5
	139	上	153.5	118.5	矿上④	118.5～153.5
	126	上	147.6	57.6	矿上①	57.5～147.6
106	35	下	96.3	-9.6	顶部②	96.3
106	36	上	80.5	-57.0	中部①	80.5
	40	上	127.8	149.7	矿上③	127.8
	52	下	117.7	97.0	矿上③	97～117.7
	59	下	57.3	-133.4	下部②	57.3
	63	上	21.5	-48.5	上部①	21.5
	51	上	71.9	-17.3	上部①	71.9
119	50	下	180.9	-129.7	下部②	180.9
	88	上	162.9	84.5	矿上①	84.5 和 162.9
	96	上	82.2	102.5	矿上③	82.2～102.5
	122	下	65.3	43.1	矿上③	43.1～65.3
	123	下	270.9	29.7	矿上③	29.7 和 270.9
	125	上	73	58.6	矿上①	58.6～73
	90	上	67.6	5.5	顶部①	67.6
	89	上	26.5	23.7	矿上①	23.7～26.9
	91	下	293.4	164.9	矿下	
	92	下	326.4	32.1	矿上③	32.1 和 326.4
	93	下	700.6	143.2	矿下	
110	43	上	30.5	78.8	矿上①	30.5～78.8
	55	上	20.2	151.1	矿上③	20.2
	58	下	382.6	96.4	矿上③	96.4 和 382.6
	94	上	149.2	68.7	矿上①	68.7 和 149.2
	95	上	64.2	89.0	矿上①	64.2～89
	118	下	150.9	8.4	顶部③	150.9
	119	上	30.6	-139.8	下部①	30.6
	120	下	30.1	-42.0	上部②	30.1
	121	上	97.5	37.6	矿上①	37.6～97.5
105	32	上	507	137.5	矿上④	137.5
	33	上	91	59.4	矿上①	59.4～91
	34	上	134.5	-149.3	底部①	134.5
	37	上	261.7	-20.4	上部①	261.7
	39	上	20442	-62.4	中部②	
	41	上	54.6	56.2	矿上①	54.6～56.2
	46	上	83.8	-81.7	中部①	83.8
	47	下	65.3	36.6	矿上③	26.6～65.3
	48	上	92.2	81.0	矿上①	810～92.2
	49	上	108.9	-4.7	顶部①	108.9
	66	下	538.4	73.0	矿下	
	77	下	53.9	45.7	矿上③	45.7～53.9
	78	上	122.5	64.9	矿上①	64.9 和 122.5
	79	上	52.1	-120.5	下部①	52.1
	82	下	205.5	65.4	矿上③	65.4 和 205.5
	83	上	287.7	72.7	矿上①	72.7 和 287.2

续表 7-40

矿脉	样号	Y	B_1 /m	B_2 /m	综合评判 相对矿体位置	综合评判 预测见矿深度/m	矿脉	样号	Y	B_1 /m	B_2 /m	综合评判 相对矿体位置	综合评判 预测见矿深度/m
105	84	下	303.8	109.0	矿下		105	155	上	124.7	-17.4	矿上①	124.7
	86	下	152.5	41.1	矿上③	41.1 和 152.5		156	上	145.2	-108.7	下部②	145.20
	97	下	283.7	-46.3	上部②	283.7		157	上	1160	-101.2	中部②	
	98	下	292.7	-89.1	上部②	292.7		146	上	62.9	-0.9	顶部①	62.9
	99	下	339.6	76.4	矿上③	76.4 和 339.6		147	上	20.9	-134.0	下部②	20.9
	100	下	64	29.5	矿上③	29.5~64		148	上	8.4	-121.9	下部①	8.4
	103	下	215.2	-154.2	下部②	215.2		149	上	662.8	-139.8	下部②	
	80	上	70.2	34.7	矿上①	34.7~70.2		150	上	14	66.4	矿上①	14 和 66.4
	81	下	800.5	3.2	顶部②			151	上	33.3	6.3	矿上①	6.3~33.3
	143	上	13.2	8.2	顶部①			152	下	716.2	-2.0	顶部②	
	144	上	13.4	-137.6	下部①	13.4		153	下	2630	16.2	顶部②	
	145	上	328.7	55.8	矿上	55.8 和 328.7		154	上	406.2	-318.7	矿上①	406.2

①~④为置信度由高到低的次序。

用式(7-38)计算 105 矿床及其外围含矿样品的判别函数值,用判别临界值评判各样品相对于矿体的位置。表 7-40 列出了评判结果。其中,位于矿体上部的样品 66 个,位于矿体下部的样品 40 个。位于矿体上部的样品中,9 个为 1 级含矿,12 个为 2 级含矿,31 个为 3 级含矿,14 个为 4 级含矿。

B 见矿深度估计模型 H_1

在 105 矿床及其外围的矿脉中,收集 9 个已知见矿深度的样品,以 Sb/As 为标志,首先进行相关分析。从图 7-38 可见,Sb/As 与见矿深度呈线性分布。计算它们之间的相关系数,得 $\gamma=0.9874$。当信度 $\alpha=0.05$,自由度 $f=7$ 时,检验临界值 $\gamma_\alpha=0.67$。表明两者紧密相关。进一步以 Sb/As 为自变量,以见矿深度 H_1 为因变量,模拟一元回归方程式,得:

$$H_1=1.0418+179.8851\mathrm{Sb/As}\times10^2 \tag{7-39}$$

$$U=26216.1$$

$$Q=672.8$$

$$F=272.8$$

$$\delta=9.8037$$

当信度 $\alpha=0.05$,第 1 自由度 $f_1=1$,第 2 自由度 $f_2=7$ 时,检验临界值 $F_\alpha=5.59$。差异极为显著。用该模型估计见矿深度能够取得客观的效果。估计的见矿深度在区间($-18.5656+179.8851\mathrm{Sb/As}\times10^2$, $20.6492+179.8851\mathrm{Sb/As}\times10^2$)内取值概率为 95%。

用式(7-39)计算各个抽样的见矿深度。从表 7-41 可见,见矿深度估计值与实测值很接近。平均相对误差为 -7.59%,最大绝对误差 16.21m,平均绝对误差 6.87m。

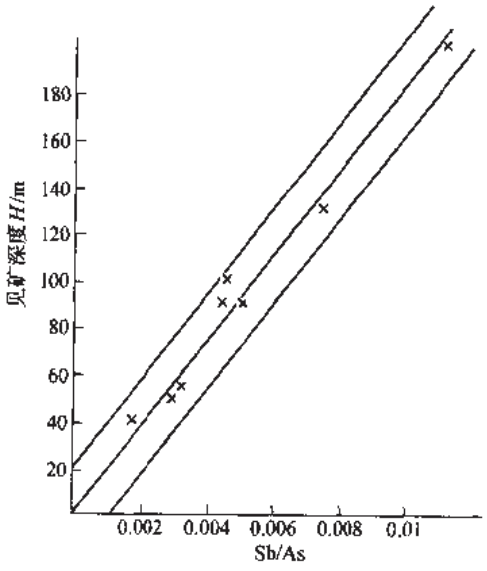


图 7-38 Sb/As 与见矿深度相关关系图

表 7-41　见矿深度实测值与理论值比较

顺序号	样品号	$\frac{Sb}{As}$	见矿深度/m		$\frac{H_1-H_1'}{H_1'}$
			实测值 H_1	理论值 H_1'	
1	31	123.33×10^{-4}	200	201.91	-0.0094
2	33	50.00×10^{-4}	90	90.98	-0.0108
3	34	74.19×10^{-4}	130	134.50	-0.0334
4	36	44.17×10^{-4}	90	80.50	0.1180
5	41	29.75×10^{-4}	50	54.56	-0.0836
6	45	31.91×10^{-4}	55	58.44	-0.0589
7	46	46.00×10^{-4}	100	83.79	0.1935
8	151	17.93×10^{-4}	40	33.30	0.2014
9	150	7.22×10^{-4}	0	14.03	-1.0000

该模型适用于矿体 40m 以上样品见矿深度的估计。考虑到研究区深部矿化特点，当见矿深度小于 440m 时可信，大于 440m 时仅具参考意义。

用式(7-39)计算 105 矿床及其外围 108 个含矿样品的见矿深度，结果列于表 7-40。其中，见矿深度小于 440m 的 85 个，占 78.7%。

C　见矿深度估计模型 H_2

在样品中，有一部分是取自矿体内部或矿体之上、之下近矿空间的。用式(7-38)和式(7-39)进行评判会出现较大的误差。因而以东风矿床 40 号剖面主矿体不同部位的样品为主。配合 105 矿床的一些已知矿体上样品，以 AsSb/(AuAg)的对数值为标志，对样品空间位置与标志值进行统计分析。该矿体垂向长度 150m。样品主要取自矿体顶、底板，矿体上部、中部、下部，以及矿体以上近矿位置。从图 7-39 可见，ln(AsSb) - ln(AuAg) 与样品相对于矿体空间位置之间呈线性分布。两者间的相关系数 $\gamma=0.9978$。当信度 $\alpha=0.05$，自由度 $f=6$ 时，检验临界值 $\gamma_\alpha=0.71$。两者密切相关。以 lnAs + lnSb - lnAu - lnAg 为自变量，以样品相对于矿体空间位置为因变量，模拟一元回归方程，得：

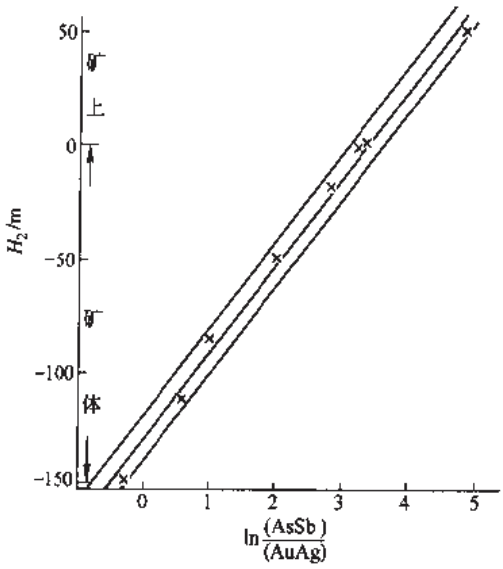


图 7-39　ln(As Sb)/(Ag Au)与样品距矿体相对距离相关关系图

$$H_2 = -129.6069 + 38.8291\ \ln As(+\ln Sb - \ln Au - \ln Ag) \tag{7-40}$$

$$U = 30163.055$$

$$Q = 123.98$$

$$F = 1459.7$$

$$\delta = 4.5457$$

当信度 $\alpha=0.05$，第 1 自由度为 1，第 2 自由度为 6 时，检验临界值 $F_\alpha=5.99$，差异十分显著。用该模型估计样品相对于矿体的空间位置，会得到客观的结果。估计出的样品相对于矿体空间位置在区间（$-138.6988+38.8291\ln[AsSb/(AuAg)]$，$-120.9155+38.8291\ln[AsSb/(AuAg)]$）内取值概率为 95%。

用式(7-40)计算每个抽样相对于矿体的空间位置，计算结果见表 7-42。计算出的估计值与实测值十分接近。平均相对误差为 -0.2788，最大绝对误差 6.2m，平均绝对误差 3.3m。该模型适用于矿体内部和矿体附近 100m 范围内样品相对于矿体空间位置的估计。对距离矿体较远的样品估计会出现较大的误差。

表 7-42　样品与矿体相对位置实测值与理论值比较

样　号	$\frac{As\ Sb}{Au\ Ag}$	$\ln\frac{As\ Sb}{Au\ Ag}$	相对矿体部位	相对深度/m		$\frac{H_1-H_2'}{H_2'}$
				实测值 H_1	计算值 H_2	
41	119.67	4.7824	矿体以上	50	56.2	-0.1103
49	22.25	3.2289	矿体顶板	0	-4.2	-1.0000
D_{01}	27.70	3.3214	矿体顶板	0	-0.6	-1.0000
37	16.91	2.8280	矿体上部	-18	-19.8	-0.0909
D_{02}	7.57	2.0242	矿体上部	-50	-51.0	-0.0196
D_{03}	2.74	1.0081	矿体中部	-85*	-90.5	-0.0608
156	1.71	0.5392	矿体下部	-110	-108.7	0.012
D_{04}	0.72	-0.3285	矿体底板	-148	-142.4	0.0313

用式(7-40)计算 105 矿床及其外围含矿样品相对于矿体的空间距离。计算结果见表 7-40。其中，位于矿体内部的样品 44 个，占 40.7%；位于矿体以上的样品中，包括距离小于 100m 的 50 个，占 46.3%。距离大于 100m 的 10 个，占 9.26%，位于矿体以下的样品 4 个，占 3.7%。

D　综合评判

上述 3 个位置估计模型从不同角度评价样品相对于矿体的位置，因抽样条件所限，每个模型都有一定的误差和局限性。加之地质作用、地质现象、地质问题本身的随机性，3 种模型估计的样品位置具有不确定性。因而需要结合野外地质特征、权衡 3 种模型的应用条件和估计结果进行综合评判。表 7-40 列出了综合评判结果。其中样品所在空间本身为矿体，并且其下方一定深度上有 1 层矿体的 39 个，占 36.11%。样品所在空间本身为矿体的 12 个，占 11.11%。样品所在空间不含矿，但下部一定深度上有 1 层矿体的 25 个，占23.15%；一定深度上有 2 层矿体的 18 个，占16.67%；下部一定深度上有矿体，但不能确定具体深度的 2 个，占 1.85%；样品所在空间不含矿，下部也不含矿的 12 个，占 11.11%。

进一步按 3 种模型评判结果对综合评判结论的可信度作如下分级：

(1)3 种模型均认为样品空间下部一定深度上有矿体存在，或 1 种模型判定样品空间为矿体，另 2 种模型认为样品空间以下一定深度上有矿体存在的为 1 级。

(2)样品空间本身为矿体，或第 1 种模型认为下部不含矿，第 2 种模型认为下部一定深度上有矿体存在的为 2 级。

(3)除 1 级和 2 级外，综合评判结果为样品空间下部一定深度上有矿体存在的为 3 级。

(4)综合评判为深部有矿体存在,但无具体深度的为4级。

根据上列规定对105矿床及其外围含矿样品进行分级,结果见表7-40。101矿脉4个含矿样品中,1级的1个,2级的2个,等外的1个;102矿脉7个含矿样品中,1级的3个,2级的2个,4级的1个,等外的1个;103矿脉2个含矿样品皆为3级;104矿脉9个含矿样品中,1级的3个,2级的2个,等外的4个;113矿脉11个含矿样品中,1级的7个,2级的1个,3级的2个,等外的1个;114矿脉8个含矿样品中,1级的7个,3级的1个;106矿脉7个含矿样品中,1级的3个,2级的2个,3级的2个;119矿脉11个含矿样品中,1级的4个,2级的1个,3级的4个,等外的2个;110矿脉9个含矿样品中,1级的5个,2级的1个,3级的3个;105矿脉25个含矿样品中,1级的11个,2级的5个,3级的6个,4级的1个,等外的2个。

E 105矿床及其外围各矿脉找矿远景对比

为定量评价105矿床及其外围各矿脉的找矿远景,以矿脉出露长度、矿脉地表取样提供的矿化强度信息,样品相对于矿体空间位置信息为对比标志。首先给各个标志赋值于下:

(1)矿脉出露长度 I:

矿脉	长度	赋值
101	569	2
102	620	2
103	660	2
104	380	1
113	550	2
114	560	2
106	920	3
119	500	2
110	510	2
105	1040	3

(2)矿化强度 j:

含矿性分级 j_1	赋值
1级含矿	4
2级含矿	3
3级含矿	2
4级含矿	1
不含矿	0

矿脉中含矿样品所占比例 j_2:

101矿脉

1级	3级	4级	不含矿
0.125	0.125	0.25	0.5

102矿脉

2级	3级	4级	不含矿
0.0833	0.25	0.25	0.4167

103矿脉

1级	3级	不含矿
0.1429	0.1429	0.7143

104 矿脉

3 级	4 级	不含矿
0.2308	0.3846	0.3846

113 矿脉

1 级	2 级	3 级	4 级	不含矿
0.1667	0.25	0.3333	0.0823	0.1667

114 矿脉

2 级	3 级	4 级	不含矿
0.1111	0.5556	0.3333	0

106 矿脉

1 级	2 级	3 级	4 级	不含矿
0.0833	0.25	0.0833	0.1667	0.4167

119 矿脉

1 级	2 级	3 级	4 级	不含矿
0.0769	0.0769	0.3077	0.3843	0.1538

110 矿脉

1 级	2 级	3 级	4 级	不含矿
0.0769	0.1538	0.3077	0.1538	0.3077

105 矿脉

1 级	2 级	3 级	4 级	不含矿
0.1053	0.1579	0.3333	0.1053	0.2982

(3)样品相对于矿体空间位置信息可信度分级 K：

分级	赋值
1 级	2
2 级	1.5
3 级	1
4 级	0.5
等外	0

每个矿脉按下列模型计算找矿远景指数 B：

$$B = I\left(\sum_{\alpha=1}^{m} J_{1\alpha}J_{2\alpha}\right)\left(\frac{1}{n}\sum_{\beta=1}^{n} K_{\beta}\right) \tag{7-41}$$

$$Q_i = \frac{B_i}{\max\{B_i\}} \tag{7-42}$$

不难理解，Q 值愈大，矿脉的找矿远景愈好，因而根据 Q 值把研究区矿脉的找矿远景分为下列 2 级

名次	1 级找矿远景矿脉	Q
1-1	105 矿脉	1
1-2	113 矿脉	0.8874
1-3	106 矿脉	0.8547
1-4	114 矿脉	0.8343

2级找矿远景矿脉

2-1	110矿脉	0.6343
2-2	119矿脉	0.4833
2-3	102矿脉	0.3474
2-4	101矿脉	0.3200
2-5	103矿脉	0.2195
2-6	104矿脉	0.1015

各矿脉及预测含矿样品的空间位置见附图(略)

7.2.3 矿物包体信息空间变异模型(以10号脉群深部矿体定位预测为例)

前已述及,地下深处的热液是一种过压流体。局部空间上发生的构造活动,是一种异常地质事件。使围岩在某些方向上发生破裂,形成减压空间。当环境压力等于或低于热液内压时,热液会发生沸腾。热液中那些具有高能量的水分子和挥发分 CO_2、H_2S、N_2、H_2、CH_4、NH_3、B、F_2、Cl_2、Br_2、I_2、Hg、Sb、As 等迅速向减压空间迁移。H_2S 的大量逃逸,导致 $[Au(HS)_2]^-$ 的大量解体,使金迅速沉淀富集成矿体。

那些迅速逃逸的挥发分沿裂隙迁移过程中,依据自身的地球化学性质,或与围岩发生化学反应,或被围岩物质吸附,或被正在结晶的矿物"捕获"成包体,按一定数量或比例驻留于矿体以上的各个空间上。因而,它们是深部矿体的指示剂。如果我们能够在矿脉或围岩中发现它们,并且能够揭示它们的某些性状或数量与空间坐标的函数关系,就有可能使我们依此预测深部矿体赋存的位置。

表 7-43 矿物包体 CO_2 空间变异模型估计的见矿深度

顺序号	样品号	D_{H_2O}	D_{CO_2}	D_{CO_2}/D_{H_2O}	H_3	见矿标高/m	见矿单元
1	H18-23	2.51	0.94	0.37	69.6	-140	50150040
2	H18-26	2.50	0.87	0.35	78.1	-148	55145040
3	H18-29	2.95	1.11	0.38	65.6	-136	65135040
4	H18-30	6.43	1.92	0.30	102.3	-172	65135044
5	H18-31	3.03	1.59	0.52	22.1	-92	60135036
6	H18-32	3.76	2.13	0.57	11.2	-82	60130032
7	H18-33-1	2.07	0.83	0.40	57.9	-128	65130036
8	H18-33-2	4.75	2.20	0.46	38.1	-108	60130036
9	H18-43	2.59	0.95	0.37	69.6	-140	65110040
10	H18-44	2.74	1.03	0.38	65.6	-136	65105040
11	H18-45	5.36	2.13	0.40	57.9	-128	60105036
12	H18-46	4.90	1.55	0.32	92.1	162	65105040
13	H18-48	2.18	0.88	0.40	57.9	-128	60100036
14	H18-49	1.77	0.52	0.29	107.6	-178	60095044
15	H48-88	1.80	0.61	0.34	82.6	-153	35020040
16	H48-86	1.75	0.46	0.26	126.9	-197	35025044
17	H47支-56中	1.52	0.28	0.18	181.6	-252	50085052
18	H-10-50-95	4.85	0.98	0.20	165.9	-156	65005040
19	H-10-50-93	2.84	0.71	0.25	131.2	-122	70010036
20	H-10-50-98	1.49	0.38	0.26	125.0	-115	70000036
21	H13-18	2.51	0.35	0.14	216.9	-287	45160052

CO_2 是热液中最常见的一种挥发性物质，当热液沸腾时，会有大量 CO_2 汽化并和其他物质一起沿裂隙向上逃逸。而矿物包体中的 CO_2，就是被迅速结晶的矿物"捕获"的挥发分中的一种。事实表明，金矿体及其以上空间的矿脉中，石英包体经常发育气态 CO_2。并且，随着远离金矿体，石英包体中气态 CO_2 的数量逐渐减少。因而，有可能用石英包体中 CO_2 数量变化来估计见矿深度。因受取样条件的限制，本次预测中，仅在 18 号矿脉、50 号矿脉、48 号矿脉、13 号矿脉、47 支号矿脉采集了 23 个含有第 2 矿化阶段石英的样品，用红外光谱法测定第 2 矿化阶段石英包裹体中 H_2O 和 CO_2 的相对光密度 D_{H_2O}、D_{CO_2}。用 D_{CO_2}/D_{H_2O} 表征气态 CO_2 的相对浓度。用下列经验模型估计见矿深度：

$$H_3 = \exp(6.0685 - 3.6105\ D_{CO_2}/D_{H_2O}) - 44 \tag{7-43}$$

用式(7-43)估计各取样空间的见矿深度。从表 7-43 可见，在 18 号矿脉采取的 16 个样品中，有 8 个指示 23、26、29、33、43、44、45、48 等勘探线上，-120～-150m 标高有可能见到矿体。有 3 个指示 31、32、33 勘探线上，-80～-110m 标高有可能见到矿体。有 3 个指示 30、46、49 勘探线上，-160～-180m 标高有可能见到矿体。48 号矿脉上采取的两个样品指示 86.88 勘探线上，-150～-200m 标高有可能见到矿体。50 号矿脉上采取的 3 个样品，指示 93、95、98 勘探线上，-110～-160m 标高有可能见到矿体。在 56 勘探线上采取的 47 支号矿脉样品，指示 -252m 标高有可能见到矿体。在 18 勘探线上采取的 13 号矿脉样品，指示 -287m 标高有可能见到矿体。

7.2.4 黄铁矿形态标型空间变异模型

黄铁矿是金矿床中广泛而常见的矿物，研究黄铁矿的形态学对金矿的寻找有重要意义。国内外学者的大量研究成果表明，与金矿化关系密切的黄铁矿形态标型是五角十二面体{210}、八面体{111}、立方体{100}和它们之间的聚形晶体。这些形态标型出现与否和出现的数量多少，反映矿体成生时含金热液所处的物理化学环境。因矿体的不同空间位置上，成矿时的物理化学环境不同，黄铁矿的形态标型及其数量也不一样。任英忱(1985～1997 年)在招掖金矿化带上，对该区金矿床的黄铁矿形态标型特征进行了系统的研究后指出：该区金矿床中最重要的第 2 矿化阶段形成的黄铁矿形态标型，在空间上的分布规律是矿体头部黄铁矿为八面体(o){111}。往下为立方体与八面体聚形(ao){100+111}。再往下为五角十二面体与八面体聚形(eo){210+111}。矿体中部为五角十二面体(e){210}。矿体下部为立方体(a){100}和五角十二面体与立方体聚形(ea){210+100}，愈往下聚形中立方体的比例愈大。据此，我们建立下列一组黄铁矿形态标型空间变异模型，用以评判样品空间相对于矿体的位置：

$$X_1 = [N(o) + N(ao) + N(eo) + N(eao)]/N(e) \tag{7-44}$$

$$X_2 = [N(o) + N(ao) + N(eo) + N(eao)]/[N(a) + N(ae)] \tag{7-45}$$

$$X_3 = N(e)/[N(a) + N(ae)] \tag{7-46}$$

受采样条件所限，本次预测中，仅在 18 号矿脉，47 支号矿脉、50 号矿脉、48 号矿脉、13 号矿脉上采集了 24 个含有第 2 矿化阶段结晶的黄铁矿样品，开展黄铁矿形态学研究。即将各样品第 2 矿化阶段的黄铁矿挑出，经破碎、分离、过筛(45～60 目间)后，随机抽取一定数量的单矿物(最少 100 粒，最多 505 粒，平均 217 粒)，在立体显微镜下鉴别黄铁矿的八面体(o)、立方体(a)、五角十二面体(e)、八面体与立方体聚形(ao)、八面体与五角十二面体聚形

(oe)、八面体与立方体、五角十二面体聚形(aoe)、立方体与五角十二面体聚形(ae)等，并统计各形态标型的数量。用式(7-44)、式(7-45)、式(7-46)等黄铁矿形态标型空间变异模型计算各样品的判别函数值，根据三种判别函数值之间的数量关系，估计各样品空间相对于矿体的位置。表7-44列出了评判结果。其中，18号矿脉上，处于矿体上部的是23、34、45、46、48勘探线在－70m中段的样品空间。处于矿体中上部的是32、33、44、49勘探线在－70m中段的样品空间。处于矿体中部的是25、29、31、43勘探线在－70m中段的样品空间。处于矿体中下部的是26、30、35勘探线在－70m中段的样品空间。48号矿脉上两个采自86、88勘探线－70m中段的样品所处空间位于矿体的中上部。47支号矿脉上采自56勘探线－70m中段的样品和13号矿脉上采自18勘探线－70m中段的样品，所处空间也位于矿体的中上部。50号矿脉上采自93、95勘探线10m中段的样品，所处空间位于矿体的上部。采自98勘探线10m中段的样品，所处空间位于矿体中部。

表7-44　黄铁矿形态标型空间变异模型估计的样品空间位置

样品号	形态标型①数(N)							位置评估函数			位置
	a	o	e	ao	ae	oe	aoe	Z_1	Z_2	Z_3	
K18-23	22	0	21	170	6	0	0	8.0952	6.0714	0.75	上
K18-25	0	0	190	25	11	0	8	0.1737	3	17.2727	中
K18-26	70	0	150	20	6	0	5	0.1667	0.3289	1.9737	中下
K18-29	80	0	195	9	0	4	0	0.0667	0.1625	2.4375	中
K18-30	100	0	200	10	30	5	0	0.075	0.1154	1.5385	中下
K18-31	7	0	186	5	2	0	0	0.0269	0.5556	20.6667	中
K18-32	40	2	330	90	18	22	3	0.3545	2.0172	5.6897	中上
K18-33-1	25	1	120	70	0	5	0	0.6333	3.04	4.8	中上
K18-33-2	30	0	190	125	0	5	5	0.7105	4.5	6.3333	中上
K18-34	61	0	1	240	4	0	4	244	3.7538	0.0154	顶
K18-35	60	0	80	20	0	0	0	0.25	0.3333	1.3333	中下
K18-43	20	0	170	10	15	15	0	0.1471	0.7143	4.8571	中
K18-44	5	0	75	60	50	25	5	1.2	1.6364	1.3636	中上
K18-45	5	0	10	125	17	0	7	13.2	6	0.4545	上
K18-46	5	0	30	250	5	0	10	8.6667	26	3	上
K18-48	8	0	10	101	0	1	0	10.2	12.75	1.25	上
K18-49	5	10	80	50	4	90	0	1.875	16.6667	8.8889	中上
K48-86	60	0	0	40	0	0	0	—	0.6667	0	中上
K48-88	90	0	6	4	0	0	0	0.6667	0.0444	0.0667	中上
K47支-56	70	0	0	40	0	5	0	—	0.6429	0	中上
K13-18	95	0	0	10	0	0	0	—	0.4211	0	中上
K-10-50-93	30	0	10	60	0	0	0	6	2	0.3333	上
K-10-50-95	20	0	0	80	0	0	0	—	4	0	上
K-10-50-98	40	0	145	20	20	4	4	0.1931	0.4667	2.4167	中

①形态标型中：a—立方体；o—八面体；e—五角十二面体；ao—立方体与八面体聚形；ae—立方体与五角十二面体聚形；oe—八面体与五角十二面体聚形；aoe—立方体、八面体、五角十二面体聚形。

7.3 矿床模型法

矿床模型法的理论基础是:“一定类型的矿床具有一定的特点,并赋存于一定的地质构造环境中。矿体则位于矿床空间结构的一定位置上”。该方法把矿床模型作为预测和找矿的“标样”,通过评价区地质特征与矿床模型的相似性类比来进行定量、定位预测。

应用矿床模型法开展矿产资源评价和预测工作,包括下列三方面内容:

(1)建立矿床模型;

(2)评价区与矿床模型相似性类比;

(3)矿体定量、定位预测。

矿床模型是对一定类型矿床的矿体和矿产特征、围岩条件、成矿因素、成矿机理、成矿过程,以及矿床所处的三维地质构造环境的一种概括。是地质工作者对一系列同类型已知矿床开展以控矿地质条件为重点的矿床特征及成因研究成果加以综合和提炼而建立起来的。矿床模型是应用矿床模型法对评价区进行预测时赖以类比的依据。不但能为地质类比或地质研究开拓思路,而且对一定类型矿床而言,能够指出哪些地质、物理、化学资料和数据,对矿石的产出是至关重要的。在一个具体的区域地质构造环境中,能指出应当找什么矿和到哪里去找。使人们在繁杂的地质、物探、化探、遥感地质资料和数据的“海洋”中,比较顺利地找到有用的找矿信息,看到前人可能没有看到的东西。想到前人从未想到的问题。并鼓励人们去做前人不敢做的事。

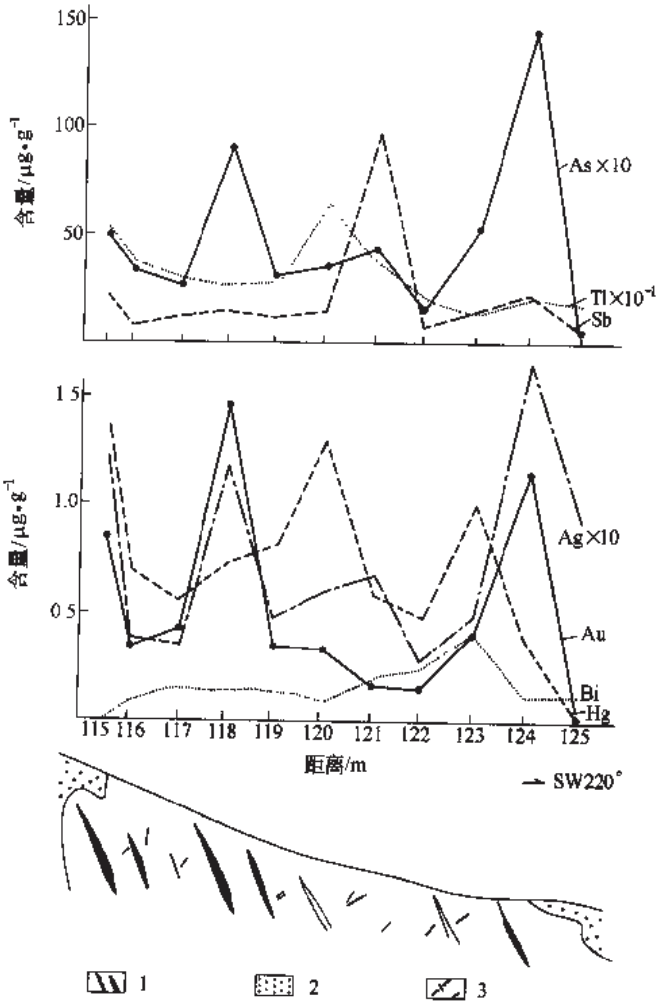


图 7-40 沟东南壁硅化带地质地球化学纵剖面图

1—黄铁矿、白铁矿化硅质岩脉;2—高岭石化花岗质碎岩;3—硅质岩

在矿体定位预测工作中,应用较多的是空间几何模型。根据预测对象空间各部分地质现象与矿床模型各部分的相似性类比,预测矿体的空间位置。具体作法举例说明于下。

7.3.1 以热泉型金矿床空间几何模型为依据的矿体定位预测

硫磺矿沟金矿位于热海3级浅成热液循环系统中部,硫磺塘村东300m处,沿NE向和SN向断裂分

布。NE 长 400m，NW 宽 140m，面积 56000m^2。区内发育 NE 向和 SN 向两组断裂。在热液作用下，沿断裂带发育大量现代热泉和古热泉，黄铁矿白铁矿硅质岩脉、细脉、网脉。四周围岩经酸淋滤作用，变成了伊利石化、伊利石-蒙脱石不规则间层矿物化、高岭石化、硅化岩石。因地下热液活动正在进行，在北部正在发生强烈的塌陷和滑坡。使原来的山坡变成局部发育的沟谷地形，沟宽 20～30m，长 250m，随着地层的不断塌陷，沟长逐年增加。图 7-40 是沟东南壁剥离出来的黄铁矿白铁矿硅质岩脉。NE-SW 向延伸，产状 305°∠64°。该脉向 NE 方向延伸到北面的山顶，向 SW 一直延伸到澡塘河南岸的山上，出露长度 600m、宽 1.5～4.6m。由白铁矿黄铁矿硅质岩、硅质岩组成。硅质岩中有大量表明多次水热爆炸的角砾岩。还有大量热液迁移循环的流通孔洞。该岩脉构成热泉型金矿床垂向分带中硅质岩带的上部。图 7-41 是沟西北壁剥离出来的一个地质剖面，以酸淋滤作用蚀变岩为主，穿插大量硅质岩脉、细脉和网脉。其中较大的1条硅质岩脉近SN向延伸，产状近直立。由硅质岩

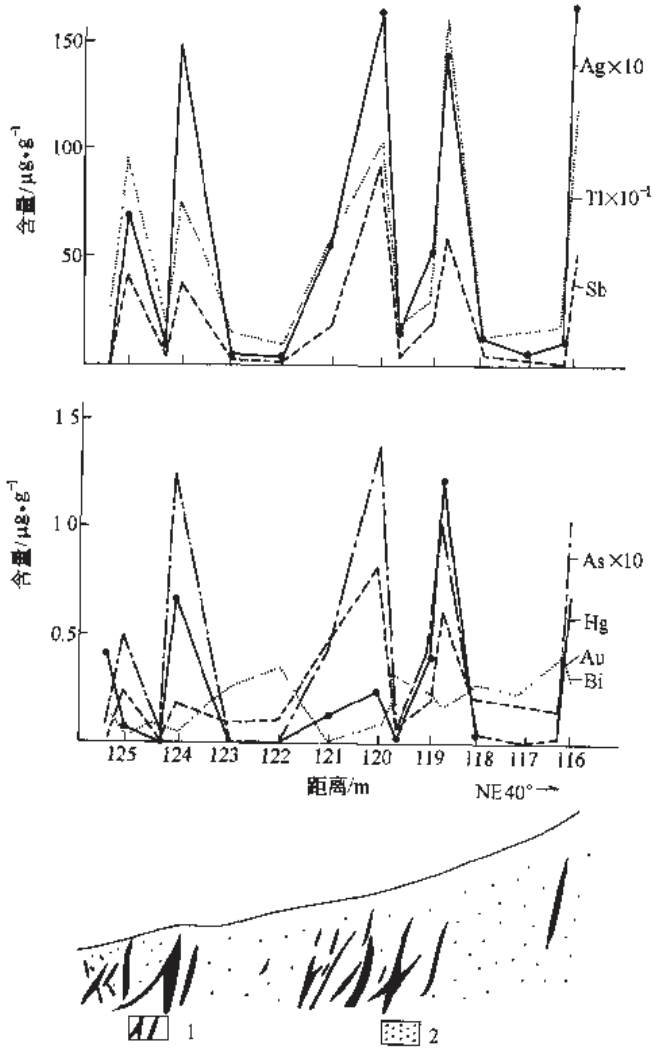


图 7-41　沟西北壁水热蚀变带地质地球化学纵剖面图

1—黄铁矿、白铁矿化硅质岩脉；2—高岭石化花岗质碎岩

(以蛋白石为主)组成,含少量白铁矿和黄铁矿(图 7-42)。该脉在近沟口处与 NE 向黄铁矿白铁矿硅质岩脉交切,向南一直延伸到澡塘河南岸山上,出露长度 250m、宽 15～65cm。向上变窄,到山脊上与一现代热泉相通。该剖面构成热泉型金矿床垂向分带的围岩强烈硅化带。上述露头发育大量裂隙,从中喷出以 H_2S 为主的气体,沿沟壁沉淀大量自然硫。为预测深部矿体的位置,将硫磺矿沟处出露的各种地质现象,与热泉型金矿床空间几何模型进行相似性类比。

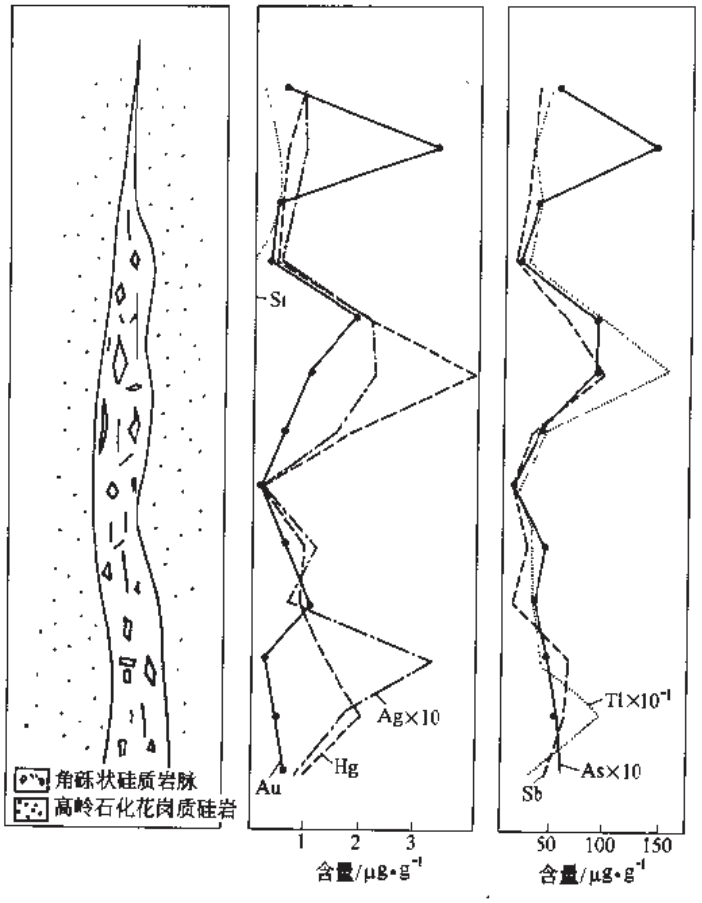


图 7-42　硫磺矿沟西北壁硅质岩脉化学组分垂向变化图

矿床模型	硫磺矿沟金矿
一、热泉	
1. 发育温泉	有热泉出露 发育温泉
水化学类型:$ClHCO_3$-Na 型	水化学类型 $ClHCO_3$-Na 型为主
有异常含量的 Au 和伴生元素	元素　质量分数/ng·g⁻¹　富集系数 Au　0.0624　5.2 Ag　0.4938　1.8 As　218　83.9 Sb　10.9　51.2 Hg　0.5　3.3 Tl　4.3　–
2. 发育硅质泉华	发育硅质泉华

有异常含量的 Au 和伴生元素。

元素	含量/μg·g^{-1}	富集系数
Au	0.0158	11.3
Ag	0.2389	3.5
As	31.87	6.4
Sb	4.67	4.1
Hg	0.2432	2.8
Tl	2.62	2.2

3.发育水热爆炸坑和角砾岩

发育水热爆炸角砾岩

二、围岩强烈硅化带厚数米到百余米，发育细脉网脉状硅质岩。有大量水热爆炸角砾岩。角砾有多次"破碎-胶结"现象。

有异常含量的 Au 及伴生元素。

发育 20m 厚的围岩强烈硅化带。发育大量细脉网脉状硅质岩，含白铁矿硅质岩。有大量水热爆炸角砾。角砾反复"破碎-胶结"4～8 次。

元素	含量/μg·g^{-1}	富集系数
Au	0.0161	11.5
Ag	0.3344	4.9
As	49.28	9.9
Sb	7.85	6.9
Hg	0.33	3.7
Tl	3.54	3

三、酸淋滤作用蚀变带面积数百米^{2}到数千米^2，厚200～700m。发育高岭石、伊利石、伊利石-蒙脱石不规则间层矿物、沸石、明矾石、蒙脱石、二氧化硅矿物。

有时有异常含量的 Au 及伴生元素。

发育酸淋滤蚀变带，面积 7.2km^2，厚 600m。发育高岭石、伊利石、伊利石-蒙脱石不规则间层矿物、二氧化硅矿物、蒙脱石，有异常含量的 Au 及伴生元素。

元素	含量/μg·g^{-1}	富集系数
Au	0.0425	30.4
Ag	0.4695	6.8
As	77.57	15.5
Sb	5.11	4.5
Hg	0.5	5.7
Tl	2.14	1.8

四、硅质岩带

厚 300m～1000m。由密集分布的硅质岩脉、细脉、网脉组成，由硅质矿物(蛋白石、玉髓、石英)及少量白铁矿、黄铁矿、方解石、伊利石、绢云母、冰长石、绿泥石、萤石组成。在上段已有较多的 Au 发生沉淀，但富集成矿的比例很小。富矿体位于下段，距地表 100～880m 深处。

发育硅质岩带上段。

经计算，整个硅质岩带厚约 680m。上段由密集分布的硅质岩脉、细脉、网脉组成。由蛋白石、玉髓及少量白铁矿、黄铁矿、伊利石及少量的冰长石组成。强烈金矿化，品位大于 1μg/g 的矿石仅占 13.1%。

元素	含量/μg·g^{-1}	富集系数
Au	0.2225	158.9
Ag	3.2655	47.6
As	219.01	43.9
Sb	11.99	10.5
Hg	0.66	7.5
Tl	3.24	2.7

五、沸腾面

深度自泉口以下 200～1000m，平均 350m。

经计算沸腾面深度为 610m。

上列对比表明，硫磺矿沟金矿与热泉型金矿床空间几何模型的上部各带具有一一对应的相似关系。为定量评估该区地质特征与模型的吻合程度，按控矿地质标志对矿指示作用的大小，给每个地质特征规定一个相对权系数，我们称之为矿化指数(k)。一个典型的热泉型金矿床的矿化指数总和为1。具体评估时，统计该区的每个地质特征值(x)，该特征存在时，其值为1，否则为0。依下列数学模型计算该区地质特征与模型的吻合度 I：

$$I = k_1x_1 + k_2x_2 + \cdots + k_px_p \tag{7-47}$$

各控矿地质标志的矿化指数和硫磺矿沟的地质特征值列于表7-45。经计算，该区地质

表7-45　热泉型金矿床地质特征矿化指数及评价区特征值

矿床地质特征	矿化指数	特征值	矿床地质特征	矿化指数	特征值
热泉			围岩强烈硅化带		
温泉			水热爆炸角砾	0.07	1
高温沸泉	0.0115	1	多次爆破显示	0.08	1
高温温泉	0.0023	1	Au异常	0.05	1
中温温泉	0.0011	0	Ag异常	0.01	1
低温温泉	0.0001	0	As异常	0.01	1
HCO_3SiO_4-CaMgNa型	0.0003	0	Sb异常	0.01	1
HCO_3SiO_4-Na型	0.0003	0	Hg异常	0.01	1
HCO_3-CaMgNa型(低盐度)	0.0003	0	Tl异常	0.01	1
HCO_3-Na型(低盐度)	0.0003	0	酸淋滤作用蚀变带		
HCO_3-Na型(高盐度)	0.0005	1	小于100m²	0.0001	0
HCO_3-CaMgNa型(高盐度)	0.0005	0	数百平方米	0.03	1
$ClHCO_3$-Na型	0.0105	1	数平方千米	0.0699	0
HCO_3SO_4-Na型	0.0021	1	高岭石化	0.0091	1
SO_4SiO_4-Na型	0.0021	0	伊利石化	0.0045	1
SO_4-KNa型	0.0021	0	伊利石－蒙脱石间层矿物化	0.0045	1
Cl-KNa型	0.0021	0	沸石化	0.0045	0
Au异常	0.0175	1	明矾石化	0.0091	0
Ag异常	0.0035	0	蒙脱石化	0.0045	1
As异常	0.0035	1	二氧化硅矿物化	0.0136	1
Sb异常	0.0035	1	Au异常	0.05	1
Hg异常	0.0035	1	Ag异常	0.01	1
Tl异常	0.0035	0	As异常	0.01	1
泉华			Sb异常	0.01	1
硅华	0.0175	1	Hg异常	0.01	1
钙华	0.0002	0	Tl异常	0.01	0
钙硅华	0.0018	0	硅质岩带		
硫华	0.0053	1	水热爆炸角砾岩	0.05	1
盐华	0.0053	1	多次爆破显示	0.05	1
Au异常	0.02	1	细脉网脉状硅质岩	0.05	1
Ag异常	0.004	1	有用金属矿物	0.05	0
As异常	0.004	1	Au异常	0.025	1
Sb异常	0.004	1	Ag异常	0.005	1
Hg异常	0.004	0	As异常	0.005	1
Tl异常	0.004	0	Sb异常	0.005	1
水热爆炸现象	0.07	1	Hg异常	0.005	1
放热地面	0.04	1	Tl异常	0.005	0

特征与热泉型金矿床模式的吻合度高达 0.8212。所揭露的各带都发现有金矿化显示。特别是硅质岩带上段,已经赋存 13.1% 的金矿石。因而,深部很可能发育有金矿体。据古泉华高程与硫磺矿沟高程对比,结合全区地貌特征,热泉发育过程中,剥蚀深度 103m。矿脉产状为 305°∠64°。沸腾面深度 610m。按矿床模型,矿体顶板位于沸腾面以上 80～150m 处。经计算,矿体顶板应在泉口以下斜深 460～530m 处。于是设置钻孔位置在硫磺塘村 SE135° 方向 450m 处,见矿深度 310～375m。

7.3.2 以构造－围岩异常模型为依据的矿体定位预测

以构造－围岩异常模型为依据,在预测区三度空间范围内,进行含矿构造和含矿岩石预测图的编制,根据致矿异常构造和致矿异常岩石(层)及其组合的空间分布,开展深部矿体定位预测,也会得到较好的找矿效果。

所谓致矿构造异常,表现在控矿的断裂构造波状断面上,就是局部产状变化大的部位。例如,招掖金矿化带上的金矿床,工业矿体多数产在沿走向和倾向断面波状弯曲的波峰向波谷过渡部位。由于围岩是成分和结构相对均匀的花岗岩,上述波状断面的波峰、波谷在空间上发生规律性的重复。掌握了断面波状分布规律,并把这种规律向深部预测,就有可能实现上述致矿异常构造在深部预测区的定位。研究断面波状分布规律的方法有:与控矿断裂构造活动次数相匹配的趋势面分析;突出主要控矿构造的剩余分析;应用波的叠加与分解原理,模拟断面波形函数等。确定了断面波状分布规律后,即可根据具体的控矿断裂构造产状和规模,将这种规律推测到深部预测区去。

断裂交切或复合处,分枝复合处,往往是工业矿体赋存的空间,因而,是重要的致矿构造异常。必须在查明主要控矿断裂构造在空间上分布规律的同时,查明有可能在局部空间上与主要控矿断裂构造交切或复合的断裂构造的空间分布规律,把二者在局部空间上的交切或复合部位预测出来。此外,应详细研究主要控矿断裂构造的次级构造,查明它们的空间分布规律,把分枝复合的局部空间预测出来。

断裂与各种地质界面的交切复合部位是重要的致矿构造异常之一。在查明控矿断裂构造空间分布规律的同时,要查明各种地质界面的空间分布规律。把控矿断裂构造与各种地质界面的交切复合部位预测出来。

致矿岩石异常指的是那些与热液进行强烈的物质交换反应,使热液发生大幅度变质,导致金大规模沉淀富集的岩石。如中性、基性、超基性岩,碳酸盐岩或含碳酸盐岩石、含碳高的岩石、含铁高的岩石等。必须在查明控矿断裂构造空间分布规律的同时,查明各种围岩的规模、产状及空间分布规律。把控矿断裂构造通过的上述控矿岩石在深部预测区的空间位置预测出来。

在开展上述各种致矿构造-围岩异常预测的同时,必须对上部已知资料进行研究,查明各种致矿构造-围岩异常对矿指示作用的大小,建立含矿性评判数学模型,对深部预测区进行定量预测。最后确定深部矿体可能的空间位置。

7.4 小　　结

由于地质作用的复杂性和预测工作条件的局限性,用上述各种方法进行深部矿体定位预测,其结论都是不确定的,受概率法则所制约。最好在条件允许下,开展多种方法的预测,对多种方法预测结果综合分析后,得出的预测结论会更加符合客观实际。此外,现有的资料

和数据，在绝大多数情况下，不能满足定量定位预测的需要。如果野外工作条件和经济条件允许，最好能开展以深部定位预测为目的的大比例尺地质、地球化学、地球物理研究。取得比较完整的地质、地球化学、地球物理信息后，开展综合定位预测，一定会得到令人满意的效果。

8 跟踪预测

前已述及，深部矿体定位预测，是在预测区地质情况不确知条件下进行的，只能通过上部地质资料的研究，找出有用组分及其控制因素的空间分布规律向深部推测这一途径来完成。因此，只有同时满足下列条件时，才能取得较好的预测效果。

(1)对矿床有用组分及其控制因素空间变化规律的认识正确无误。

(2)依据有用组分及其控制因素空间变化规律在深部预测区推测的各种标志状态符合客观实际。

(3)依据上部资料模拟的各种评价模型不但能反映客观地质规律，并且能用于对深部预测区的评价。

在矿床勘探中，由于工作目的的单一性和工程揭露的局限性，积累的地质资料和数据很难满足各类矿床值及其控制因素空间分布规律研究的需要。加之预测工作条件的局限性，无法补充更多的有关信息，很难满足上述条件。从另一个角度分析，即使上部资料比较充分，也难以满足上述条件。其原因是：

(1)地质作用的极端复杂性及同一空间上多期、多阶段矿化的叠加，使有用组分及其控制因素各种状态在空间上出现与否，成为随机事件。用这种信息得到的空间分布规律，只是一种统计规律。因而，用该规律在深部预测区推测的各种标志状态也是随机事件。用该标志确定的矿体定位空间，只不过是一种矿体出现可能性较大的空间。

(2)和任何一种规律性的事物一样，地质规律在空间上也存在大小级别问题。以控制矿脉产出的波状断而为例，如图 8-1 所示，波状断面在空间展布上有不同的级别，高序次的波 $A-B$，包含 $A-a$、$a-b$、$b-c$、$c-d$、$d-B$ 等低序次的波。由于工程揭露的局限性，在多数情况下，我们研究得到的仅限于高序次波某一段中(例如波峰)低序次波状分布的控矿规律。用这种规律预测高序次波另一段(如波谷)空间的含矿性，就不会得到理想的预测效果。而高序次的波状分布特征及其控矿规律需要更多的工程揭露后才能确定。

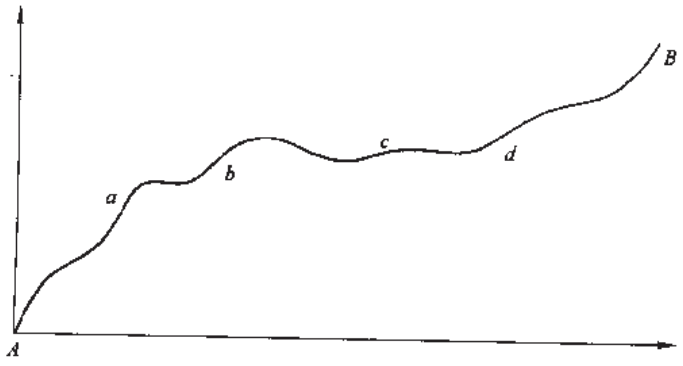


图 8-1 多级波状断面分布示意图

(3)向深部预测区推测的各种矿产值和空间变化标志，推测的依据虽然充分可靠，因条

件所限，只能进行主观推测，各种标志的变化幅度很难掌握，标志状态在空间上的定位不可避免地会出现误差。用这种推测的资料进行矿体定位预测，误差一定很大。



图 8-2　108 矿脉深部预测区成矿远景区划垂直纵投影图

1—控制区；2—预测区；3—已知含矿单元；4—已知无矿单元；5—预测一级含矿单元；6—预测二级含矿单元；7—预测找矿点；8—已知矿体边界

综上所述，通过一次预测，很难达到矿体定位目的。应把深部矿体定位预测看作一项不断深化的跟踪找矿研究。根据初始预测结论，进行工程验证，用验证所获深部预测区地质资料，检验各种推测标志的合理性，并以其为依据，重新对深部预测区的标志进行推测。在此基础上，重新开展定位预测。若深部预测区的地质特征变化剧烈，与上部规律相差很大时，应及时调整预测方案，建立新预测模型开展矿体定位预测。对深部预测区多次“预测－验证－修正预测方案－再验证”后，必然会取得好的找矿效果。

图 8-2 是 1988 年时我们对 108 矿床深部 0～320m 标高范围矿体定位预测的初步方案。因预测由几家分头进行，预测的结论不尽一致，生产部门综合考虑各家的预测结论，共施工了 31 个验证钻孔。其中，15 个打在我们预测结论中的无矿区。16 个打在我们预测结论中的含矿地段。此外，还在我们指出的含矿地段开拓了一段水平坑道，控制了 3 个样。验证结果如下：

(1)在我们预测为含矿地段的 16 个钻孔和 3 个坑道取样中，金品位大于 3μg/g 的 5 个，1～3μg/g 的 3 个。金品位大于 3μg/g 的占 26.32%，大于 1μg/g 的占 42.11%。

(2)在我们预测为不含矿地段的 15 个钻孔取样中，金品位 1～3μg/g 的 1 个，占 6.67%。

(3)若以金品位 1μg/g 为边界品位，预测结论的见矿率为 42.11%，丢矿风险系数 0.1111，判错率为 35.29%。

从钻孔揭露的情况看，深部预测区的地质特征，和我们原来设想的相比，有一定的变化。

(1)大裂隙减少，小裂隙增多。表现在矿化上，大的石英脉减少，石英细脉、网脉增多。矿石由石英脉型为主逐渐过渡为细脉网脉浸染型为主。

(2)矿化绢英岩厚度 0.21～28.8m，平均 2.48m。目前揭露的最大厚度 14m。金品位 0.01～81.49μg/g，几何平均值 0.29μg/g。目前见到的最高品位 26.61μg/g。平均品位×平均厚度＝0.7319m·g·t^{-1}。与上部(1.2478m·g·t^{-1})相比，矿化强度和规模有所降低。

(3)实际见矿率(42.11%)和丢矿风险系数(0.1111),比用上部控制区已知资料统计出来的见矿率(77.68%)和丢矿风险系数(0.1714)低,也说明深部预测区的矿化规模和矿化强度有所下降。

(4)实际见矿率的降低和判错率的提高,表明一次预测很难达到矿体定位目的。有必要利用验证工程揭露的深部预测区地质及矿化信息,重新推测深部预测区的地质环境。用单元含矿性评判模型,对深部矿体重新定位。

深部预测区的矿化体已由石英脉型为主过渡为细脉网脉浸染型为主,原含义是石英脉水平宽度的矿化标志——矿脉水平宽度,在深部矿体定位预测中,已无实用价值。因而,利用(1)金品位4次趋势值;(2)矿脉构造结构面两类标志,重新建立单元含矿性评判模型,在深部预测区开展矿体定位预测。新建立的模型有:

(1)特征分析模型——关联度和单元含矿性评判模型:

$$D=0.0679x_1+0.3971x_2+x_3+0.223x_4+0.3249x_5+0.1417x_6+0.8405x_7+0.697x_8+0.7595x_9+0.3012x_{10} \tag{8-1}$$

式中,x_1 为金品位趋势值$\leqslant 6\mu g/g$;x_2 为金品位趋势值 $6\sim 12\mu g/g$;x_3 为金品位趋势值$>12\mu g/g$;x_4 为1级波峰中的2级波峰;x_5 为1级波峰中的2级波谷;x_6 为1级波谷中的2级波峰;x_7 为1级波谷中的2级波谷;x_8 为NE向矿体空间分布找矿模型预测的矿体有利赋存空间;x_9 为NW向矿体空间分布找矿模型预测的矿体有利赋存空间;x_{10}为矿体空间分布找矿模型预测的无矿空间。对该模型进行矿与非矿差异显著性检验,得 $t=7.27$,大大高于检验临界值($t_a=1.97$)。评判临界值 $K=1.7927$。$D>K$ 时为含矿单元,$D\leqslant K$ 时为不含矿单元。

经检验,预测含矿单元的含矿概率理论值70.3%,丢矿风险系数0.2204,判错率27.49%。

(2)"镶嵌模型"估计矿床产出概率分析模型—概率比和单元含矿性评判模型:

$$Q=0.075x_1+0.9466x_2+2.6455x_3+1.3398x_4+0.4478x_5+1.6074x_6+1.5933x_7 \tag{8-2}$$

式中,$x_1\sim x_7$ 与模型式(8-1)中的标志状态 $x_1\sim x_7$ 相同。对该模型进行矿与非矿差异显著性检验,得 $t=9.75$,高于检验临界值($t_a=1.97$)。单元含矿性评判临界值 $K=2.6060$。$Q>K$ 时为含矿单元,$Q\leqslant K$ 时为不含矿单元。

经检验,预测为含矿单元的含矿概率理论值84.82%,丢矿风险系数0.3439,判错率23.03%。

(3)找矿信息量分析模型——信息量和单元含矿性评判模型:

$$I=-1.0107x_1-0.0158x_2+0.1992x_3+0.112x_4-0.2398x_5+0.1919x_6+0.103x_7 \tag{8-3}$$

式中 $x_1\sim x_7$ 与模型式(8-1)中的标志状态 $x_1\sim x_7$ 相同。对该模型进行矿与非矿差异显著性检验,得 $t=9.02$,高于检验临界值($t_a=1.97$)。单元含矿性评判临界值 $K=-0.0719$。$I>K$ 时为含矿单元,$I\leqslant K$ 时为不含矿单元。

经检验,预测为含矿单元的含矿概率理论值为72.65%,丢矿风险系数0.0939,判 错率34.2%。

(4)条件概率分析模型—条件概率单元含矿性评判模型:

$$\begin{cases} P(A\,|\,00)=15.38\% \\ P(A\,|\,01)=41.86\% \\ P(A\,|\,10)=64.29\% \\ P(A\,|\,11)=85.45\% \end{cases} \tag{8-4}$$

标志1为金品位4次趋势值。趋势值>12μg/g时，标志状态为1，趋势值为其他值时，标志状态为0。标志2为构造结构面。当结构面为峰—峰、谷—峰、谷—谷时，标志状态为1。结构面为峰—谷时，标志状态为0。

单元含矿性评判临界值 $K=75\%$。当条件概率≤75%时为不含矿单元，>75%时为含矿单元。

经检验，预测为含矿单元的含矿概率理论值86.65%，丢矿风险系数0.4653，判错率27.38%。

(5)多元回归分析模型——单元含矿性概率回归估计模型：

$$y=4.4882x_1+3.5774x_2-0.3636 \tag{8-5}$$

式中，x_1 为金品位4次趋势值的矿化指数。趋势值≤6μg/g时，矿化指数为0.0063；趋势值6～12μg/g时，矿化指数为0.0789；趋势值>12μg/g时，矿化指数为0.2205。x_2 为构造结构面的矿化指数：峰—峰为0.1117；峰—谷为0.0373；谷—峰为0.1340，谷—谷为0.1328。

对该模型进行矿与非矿差异显著性检验，得 $F=127.18$，$F_1=164.03$，$F_2=34.14$，都大大高于检验临界值。单元含矿性评判临界值 $K=70\%$。$y>K$ 时为含矿单元，$y\leqslant K$ 时为不含矿单元。

经检验，预测为含矿单元的含矿概率理论值84.82%，丢矿风险系数0.3429。判错率23.02%。

(6)费歇准则下多元判别模型：

$$y=0.1123x_1+0.0698x_2 \tag{8-6}$$

式中 x_1、x_2——与模型式(8-5)中的 x_1、x_2 相同。

对该模型进行矿与非矿差异显著性检验，得 $F=48.24$。大大高于检验临界值。单元含矿性判别临界值 $y_c=0.0198$。当 $y>y_c$ 时为含矿单元，$y\leqslant y_c$ 时为不含矿单元。

经检验，预测为含矿单元的含矿概率理论值84.82%，丢矿风险系数0.3429，判错率23.02%。

(7)贝叶斯准则下多元判别模型：

$$\begin{cases} P(A\mid x)=\dfrac{Q_A}{\sum\limits_i Q_i} \\ P(B\mid x)=\dfrac{Q_B}{\sum\limits_i Q_i} \\ P(?\mid x)=\max\{P(A\mid x),P(B\mid x)\} \end{cases} \tag{8-7}$$

$$Q_A=\exp[-9.6873+23.8936x_1+50.51x_2] \tag{8-8}$$

$$Q_B=\exp[-3.2802+5.723x_1+39.1938x_2] \tag{8-9}$$

式中，$x=(x_1,x_2)$ 与模型式(8-5)中的 x_1、x_2 相同。

经检验，预测为含矿单元的含矿概率理论值84.82%，丢矿风险系数0.3429，判错率

23.02%。

(8)综合评判:综合分析上述7种评判模型的评判结果,在82个已知含矿单元中,7种方法都评为含矿的42个。6种方法评为含矿,1种方法判为不含矿的14个。2种方法评为含矿,5种方法判为不含矿的13个。1种方法评为含矿,6种方法判为不含矿的6个。7种方法皆判为不含矿的7个。在82个已知不含矿单元中,7种方法皆评为不含矿的45个。6种方法评为不含矿,1种方法判为含矿的15个。5种方法评为不含矿,2种方法判为含矿的9个。2种方法评为不含矿,5种方法判为含矿的1个。1种方法评为不含矿,6种方法判为含矿的6个。7种方法皆判为含矿的6个。为尽可能地保证工程探矿的不落空,对单元含矿性评判准则规定于下:

1)7种方法皆判为含矿单元的为预测含矿单元。

2)其他情况为预测不含矿单元。

用上列7种模型对检验单元含矿性进行评判,综合分析7种方法的评判结果,并依上述准则对单元含矿性评判。结果,245个已知含矿单元中,121个被评为含矿单元,124个被判作不含矿单元。85个已知不含矿单元中,有79个被评为不含矿单元,6个被判作含矿单元。预测为含矿单元的含矿概率理论值87.49%,丢矿风险系数0.5061,判错率28.84%。

将深部预测区所有验证工程揭露的矿脉地质特征表示在垂直纵投影图上,结合上部控制区金品位4次趋势值和矿脉底板距基准面距离的空间分布规律,推测深部预测区各个空间上金品位4次趋势值和矿脉底板距基准面距离。图8-3和图8-4是深部预测区金品位4次趋势值和矿脉底板距基准面距离主观推测结果。从图可以看出,金品位4次趋势值与上一次的推测结果基本一致。包括上部控制区在内,自上而下,金品位4次趋势值等值线表现为高—低—高3个1级波形。在深部预测区1级高品位波形内,自西向东,发育高—低—高—低—高2级波形。而1级低品位波形自西向东则表现为低—高—低—高—低2级波形。矿脉底板距基准面距离与上一次的推断结果相比,总的分布趋势基本一致,但具体构造结构面的分布范围有所改变。包括上部控制区在内,自北东向南西,矿脉底板距基准面距离等值线,表现为波谷—波峰—波谷3个1级构造结构面的波形。与上一次的推测结果相比,在深部预测区波峰占据的空间更大。在深部预测区的1级波谷内,由南西向北东方向自上而下,发育波谷—波峰—波谷2级构造结构面。1级波峰内则主要发育1个2级波峰。

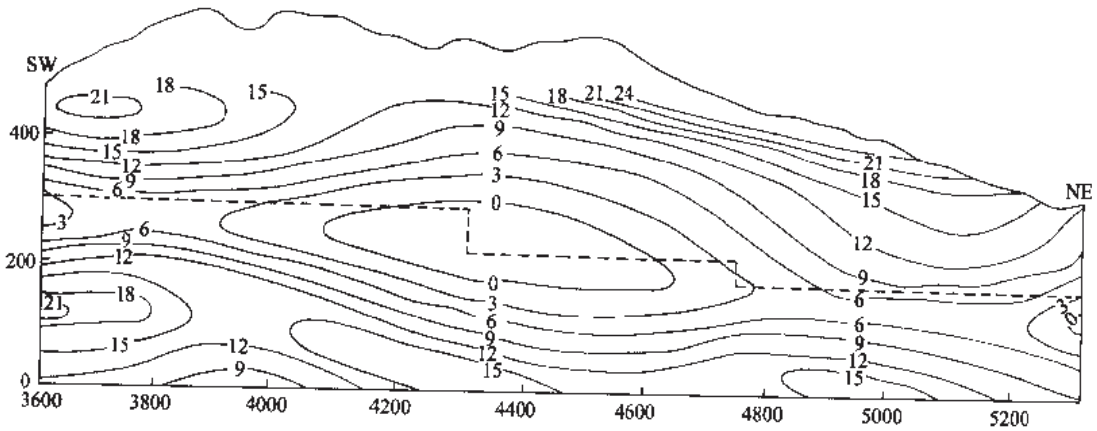


图8-3 108矿脉深部预测区金品位四次趋势面主观推断垂直纵投影图(μg/g)

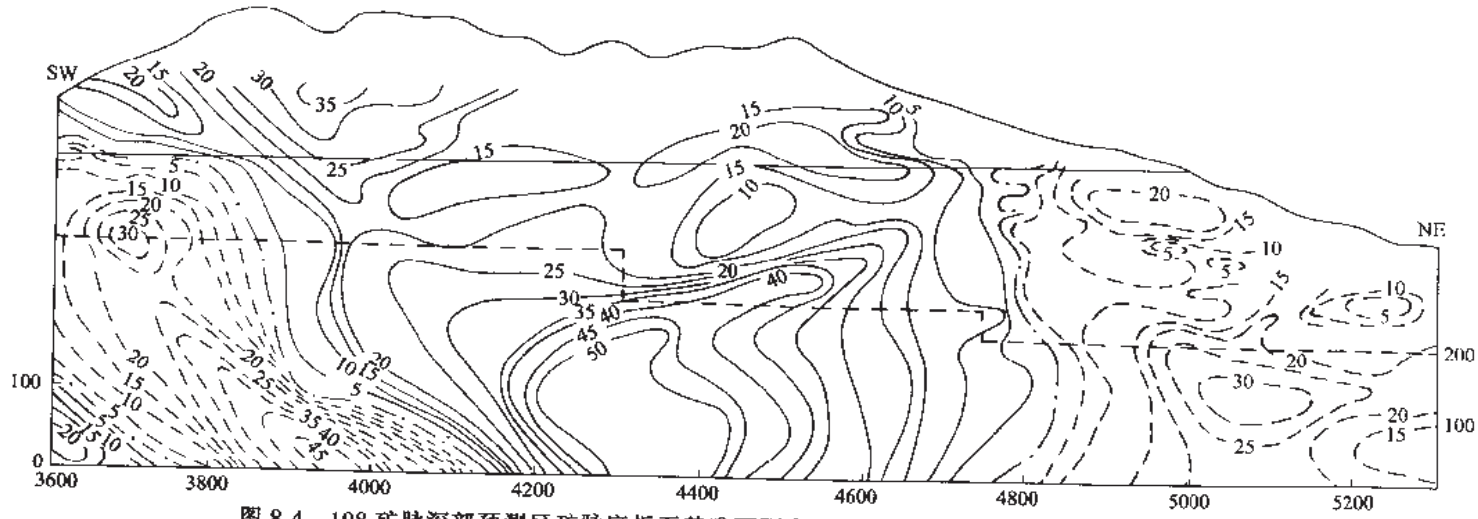


图 8-4　108 矿脉深部预测区矿脉底板至基准面距离空间变化主观推断垂直纵投影图(m)

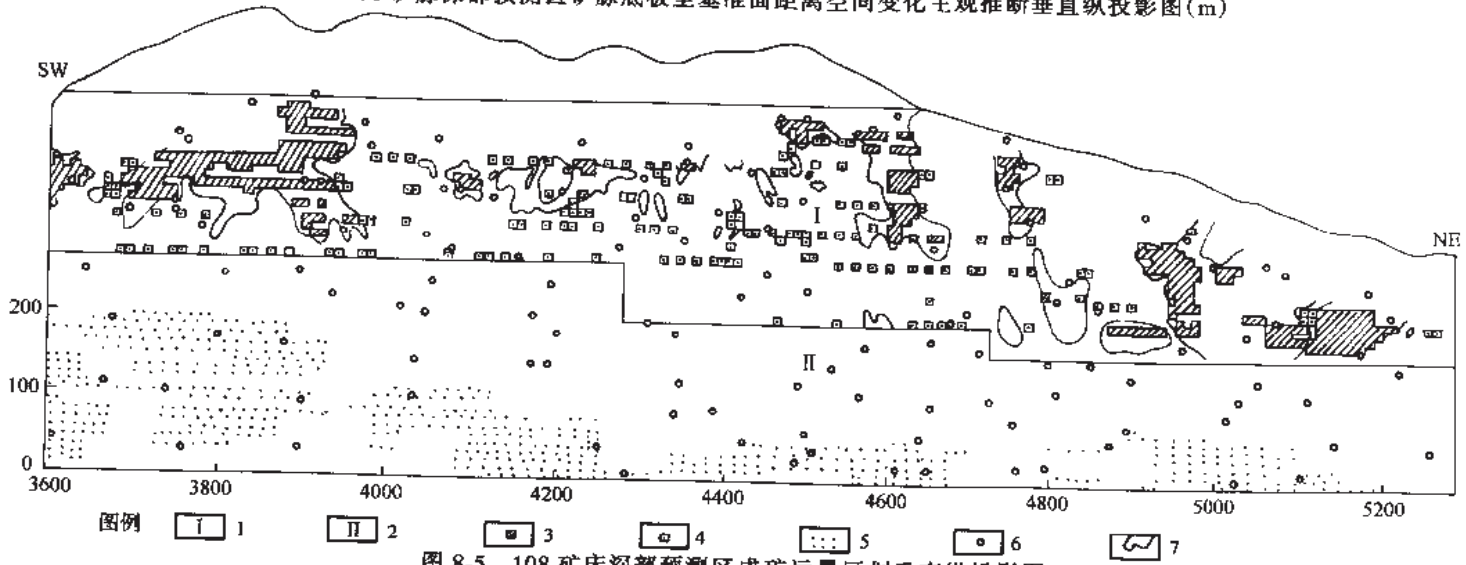


图 8-5　108 矿床深部预测区成矿远景区划垂直纵投影图

1—控制区;2—预测区;3—已知含矿单元;4—已知无矿单元;5—预测含矿单元;6—预测找矿点;7—矿体边界

将上述标志数量化后，以原来划分的单元为单位取值。用式(8-1)至式(8-9)七种单元含矿性评判模型评判深部预测区4106个单元的含矿性。结果，特征分析模型预测出1866个含矿单元。预测的含矿单元在预测区内集中成多个大小不等的透镜体状地段，从南西向北东按26°～29°角向下断续分布，构成多条互相平行的带。在东部和西部，透镜体状地段互相连接，组成预测含矿单元密集区。

信息量和单元含矿性评判模型共预测出2564个含矿单元，它们在深部预测区的下部，自水平坐标3600的0～210m标高范围，向水平坐标5200的0～80m标高范围，集中成带分布。

条件概率单元含矿性评判模型共预测出1201个含矿单元。它们在深部预测区中部和下部集中成带分布。

概率比和单元含矿性评判模型、单元含矿性回归估计模型、费歇准则下多元判别模型、贝叶斯准则下多元判别模型等的预测结论相同，共预测出1481个含矿单元。预测含矿单元在深部预测区中部和下部集中成带分布。并且自南西向北东含矿单元逐渐减少，到水平坐标5200处尖灭。

图8-5是7种方法综合评判结果，共预测出1063个含矿单元。它们主要分布在深部预测区的中部和下部，并且集中分布成5个透镜体状矿体有利赋存空间，即(1)水平坐标3600～3675，26～148m标高范围，位于1级波峰与1级波谷的过渡带上，金品位4次趋势值1级高品位波形分布范围的2级高品位波形中；(2)水平坐标3642～3892，43～209m标高范围，位于1级波谷分布范围的2级波谷中，金品位4次趋势值1级高品位波形分布范围的2级高品位波形中；(3)水平坐标3983～4233，0～109m标高范围，为一向北东倾伏的透镜体，位于1级波峰与1级波谷的过渡带上，金品位4次趋势值1级高品位波形分布范围的2级高品位波形中；(4)水平坐标4317～4629，0～48m标高范围，位于1级波峰的翼部，金品位趋势值1级高品位波形分布范围的2级高品位波形中；(5)水平坐标4867～5108，0～61m标高范围，位于1级波谷分布范围的2级波峰中，金品位4次趋势值1级高品位波形分布范围的2级高品位波形分布范围中。

参 考 文 献

1 姚凤良等.胶东西北部脉状金矿.吉林:吉林科学技术出版社,1990
2 李惠.石英脉和蚀变岩型金矿床地球化学异常模式.北京:科学技术出版社,1991
3 郭光裕、侯宗林等.热泉型金矿床成矿模式及成矿远景评价.天津:天津科学技术出版社,1993
4 罗镇宽、关康等.中国金矿床概论.天津:天津科学技术出版社,1993
5 郭光裕等.山东招掖金矿带原生金矿化地球化学特征数学地质研究.地质找矿论丛,1989,4(1)
6 李惠等.大型、特大型金矿盲矿预测的原生叠加晕模型.北京:冶金工业出版社,1998
7 王金明.我国大型、特大型金矿床的找矿前景,中国数学地质 8.北京:地质出版社,1997
8 林卓虹.招掖金矿带金矿成矿模式及资源总量评价.全国地方金矿地质学术交流会论文集.北京:原子能出版社,1991
9 徐国才.成矿预测在实践中的应用.全国地方金矿地质学术交流会论文集.北京:原子能出版社,1991
10 郭光裕等.脉状金矿床深部大比例尺统计预测初探.武汉:中国地质大学出版社,1989
11 于崇文等.地质与化探工作中的多元分析.北京:冶金工业出版社,1960
12 赵鹏大等.地质勘探中的统计分析.武汉:中国地质大学出版社,1990
13 赵鹏大等.矿床统计预测.北京:地质出版社,1983
14 王学仁.地质数据的多变量统计分析.北京:科学出版社,1982
15 辛格莱 A J.概率图在矿床勘探中的应用.赵鹏大等译.北京:地质出版社,1976
16 侯景儒、郭光裕.矿床统计预测及地质统计学的理论与应用.北京:冶金工业出版社,1993
17 卢作详等.成矿规律和成矿预测学.武汉:中国地质大学出版社,1989
18 邓少汉.复杂矿床杨氏推断法的应用及其找矿效果与经济效益.中国数学地质 4.北京:地质出版社,1993
19 邓少汉等.模式识别方法在矿体立体预测中的应用.中国数学地质 4.北京:地质出版社,1993
20 王世称等.大比例尺综合信息成矿定量预测的几个问题.中国数学地质 4.北京:地质出版社,1993
21 赵鹏大等.初论地质异常.地球科学.中国地质大学学报,1991,(3)
22 李紫金.浅论求异理论及其应用.中国数学地质 4.北京:地质出版社,1993
23 赵鹏大等.查明地质异常:成矿预测的基础.高校地质学报,1996,(2):360~373
24 陈永清、赵鹏大.地质异常单元的基本特点及划分方法.中国数学地质 8.北京:地质出版社,1997
25 赵鹏大等.地质异常:矿体定位预测的基本途径.地球科学,1998,23(2)
26 郭光裕.脉状金矿床危机矿山深部预测问题.中国数学地质 4.北京:地质出版社,1993
27 林卓虹.金矿勘查中钻探结果的不确定性及解决办法.中国数学地质 4.北京:地质出版社,1993
28 胡光道.深部推断的离散型综合模式剖面法.中国数学地质 4.北京:地质出版社,1993
29 姜明辉等.利用欧氏距离法估算金属矿产的远景储量.中国数学地质 4.北京:地质出版社,1993
30 傅水兴.中大比例尺矿产统计预测中几个问题的讨论.中国数学地质 4.北京:地质出版社,1993
31 檀国平等.通化西江金矿化区大比例尺定量预测.中国数学地质 4.北京:地质出版社,1993
32 周宏坤等.金属矿床大比例尺定量预测.北京:地质出版社,1993
33 朱裕生.矿产资源评价方法导论.北京:地质出版社,1984
34 赵鹏大.矿床统计预测的理论与实践.地球科学.武汉:中国地质大学出版社,1983
35 郭光裕等.齐波夫分布律及其在金矿资源预测中的应用.全国地方金矿地质学术交流会论文集.北京:原子能出版社,1991
36 郭光裕等.矿床统计预测工作中的条件概率法.地质与勘探.1988(5)
37 郭光裕.地质工作中一种新的模糊聚类分析方法.地质找矿论丛,1986(4)
38 刘承祚等.矿产预测的数学方法.北京:地质出版社,1989

39 贺钟雄.模糊数学及其应用.天津:天津科技出版社,1983
40 董文泉等.数量化理论及其应用.吉林:吉林人民出版社,1979
41 李万亨、杨昌明.地质技术经济学.北京:地质出版社,1987
42 金友渔、赵鹏大.三维成矿地质环境模拟的准则与方法.中国数学地质 6.北京:地质出版社,1995
43 刘承祚等.复杂矿体的三维数学模拟及其地质意义.中国数学地质 8.北京:地质出版社,1997
44 郭光裕等.欧氏距离分析法.中国数学地质 5.北京:地质出版社,1994
45 郭光裕等.脉状金矿床深部大比例尺统计预测的理论基础.中国数学地质 6.北京:地质出版社,1995
46 刘承祚.数学地质在 1994～1996 年期间的主要进展.中国数学地质 8.北京:地质出版社,1993
47 Guangyu Guo,Junling Zhang. Mathematical geology study on geochemical features of the primary Au mineralization in Zhaoye gold belt, Shandong province. 15 届国际勘查地球化学讨论会(15th IGES)论文集 , 1991
48 Barnes H L. Geochemistry of hydrothermal ore deposits. Second Edition,1979
49 Moritz R P and Crocket J H. Hydrothermal wall-rock alteration and formation of the gold bearing quartz-fuchsite vein at the Dome mine, Timmins, Ontario Canada, Econ Geol, 1991,86(3): 620～643
50 Gammons C H Chemical mobility of gold in the porphyry-epithermal environment. Economic Geology, 1997, 92(1):45～59
51 Hedenquist J W, Lowenstern JB. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. Nature, 1994,370:519～527
52 White N C. Epithemal environment and styles of mineralization variations and their causes and guidelines for exploration. Journal of Geochemical Exploration. 1990,36:445～474
53 Ripley B D. Spatial statistics. Wiley, New York. 1981.
54 Isaaks E H. and Srivastava RM. Applied Geostatisties. Oxford University press. Qxford. 1989
55 Fairwether R. Gold in Australia. Australia Gem and Treasure Hunter. 1986, 111:11～12