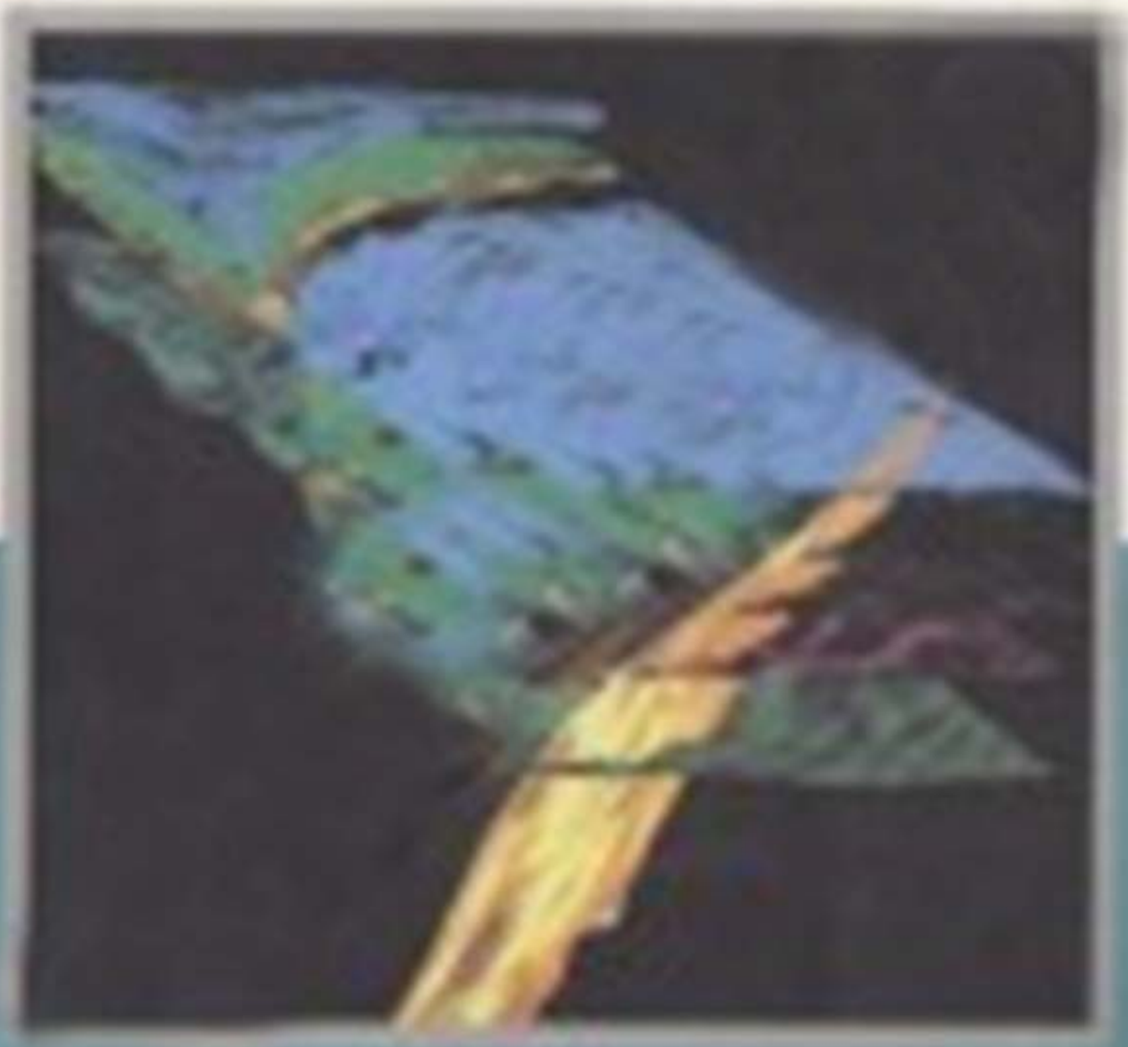
隐伏矿体定位预测方法

——以脉状金矿为例

张旬 著



地质出版社

前　言

恩格斯说："一门科学的科学性，就在于其预测未知的准确性。"当前，随着找矿主体对象的转变，隐伏矿预测问题已成为当代成矿学和成矿预测学的科学前沿和研究重点，其预测的准确度和可靠性已成为衡量和反映人类对隐伏矿认识能力和预测水平的重要标志。尤其是对资源开发利用率较高的工业发达国家和地区，隐伏矿预测问题实质上已转化成为能否利用科技进步为工业体系和资源经济可持续发展提供技术支撑和资源保证的重大社会经济问题。

因此，国内外矿产勘查界对隐伏矿定位预测的理论与方法研究都予以极大的关注与重视。例如，西方国家于1992年创刊的《不可再生资源》将"如何有效提高预测成果的准确性和可靠性"作为研讨的主题之一；1993年，美国国家研究委员会提出的《固体地球科学与社会》关于优先研究主题中明确提出"研制确定非再生资源位置和范围的动力学方法、物理学方法和化学方法"，并指出"正确描述和模拟成矿过程，并提高预测可能位置的能力，应是21世纪地学发展的主要方向之一"。1993年4月，在有31个国家和地区参加的美国"丹佛会议"上，众多学者形成的共识是："今后矿产预测的精度需进一步提高，深度将进一步加大，未来矿产探采的主体对象亦将转向埋深较大的隐伏矿。而未来矿产勘查的成功率将取决于综合因素，首先是预测选区的准确性，这将很大程度上取决于各类矿床模型的研制、使用和完善，取决于成矿理论和预测方法的创新与发展。"美国学者S. S. 亚当斯等（1993）以卡林型金矿为例，提出了隐伏矿预测的"资料—过程—准则"模型的思路与方法，导致了在已知矿带深部及外围找矿的重大突破。法国学者C. Castaing等（1994）开始研讨流变不均一性和力学不变性在脉状矿床定位中的作用。原苏联则在大力发展成矿建造分析方法进行区域成矿远景预测评价的同时，于90年代初先后创造性地提出了"系统勘查"、"局部预测"、"立体填图"、"目标预测"和"预测普查组合"等新思路和新方法。俄罗斯学者奥斯特洛夫斯基等（1993）提出了不受专家先验论影响，以自组织系统处理各种资料，提取有效信息的"目的预测"新技术，导致在多年使用常规找矿方法找矿效果欠佳的矿化勘查区取得了找矿新突破。对比分析可以发现，尽管其侧重点有所不同，但其共性特征是在预测对象、预测尺度和预测精度上都显示出以局部化、具体化、精细化、精确化的大比例尺隐伏矿体定位预测的发展趋向。

国内近10年来，在成矿理论和预测理论研究方面亦取得了长足的进展。成矿系列理论、"三源"成矿理论、科学找矿理论、地质异常理论和综合信息预测理论等已被广泛接受和广为应用。特别是以现代成矿理论和计算技术为支撑的定量预测理论更是取得了较为显著的进展。例如赵鹏大的"科学找矿与地质异常理论"，王世称的"综合信息预测理论"，朱章森的"无模型求异预测理论"等研究即可大致反映我国学者在这一领域为适应新一轮矿产勘查形势需要而进行的卓有成效的探索与实践。在脉状金矿隐伏矿体定位预测方面，范永香和张均等（1991）提出了应用成矿场理论和矿化时空结构分析方法进行隐伏矿体定位预

测的基本思路，认为成矿场是成矿物质存在形式及本质属性的综合体现，工业矿体常常产出于成矿场的某些特定部位，其空间定位与场结构变异有密切的内在成生联系和对应匹配关系，具有相应的时空构型和特征参数。分析、厘定成矿场的时空结构特征，可以有效地进行找矿靶区优选和隐伏矿体定位预测。

从总体上看，我国隐伏矿定位预测研究的理论进展明显领先于方法进展。由于缺乏与预测理论相匹配的科学预测方法，致使理论研究与找矿实践彼此脱节，在成果转化方面，成效不甚明显。尤其是在利用高新技术方法和组合预测方法提取和优化多元信息、强化微弱信息、揭示和利用隐蔽信息和深层次信息方面，在有效提高预测成果可靠性和准确性方面，在利用定量预测方法和现代高新技术实现找矿突破而取得找矿实效方面都尚存在着明显的不足，使得数学地质方法和高新技术方法的应用长期处于“锦上添花”的“点缀”地位和“先进与实用”的两难状态。这种预测方法研究滞后于预测理论研究的现状，严重地制约着研究成果的转化与应用，导致了预测成果务虚多，务实少，因成果验证成功率低，风险大而被大量束之高阁的状况。这些都使得以局部化、具体化、精细化、精确化为特征的隐伏矿体定位预测研究不仅十分必要和迫切，而且具有极为重要的科学价值和现实意义。

“工欲善其事，必先利其器”。隐伏矿体定位预测是一项兼具科研与生产双重性质的高难度、强探索、大风险的成矿预测工作。在进行隐伏矿体定位预测的过程中，我们将面临大量的、复杂的科学问题；但最核心的关键科学问题是“机理、规律、信息、方法”的探索与研究，即：要想有效提高隐伏矿体定位预测的可靠性和准确性，必须进行预测思路、预测方法的优化和创新。基于上述认识，按照“有限目标、重点深入、揭示规律、探索方法”的研究原则，笔者以研究基础较好，实用价值较大的热液脉状金矿（被认为是当今世界上经济价值最大的四类金属矿床之一，其它三类为斑岩型铜（钼）矿床，块状硫化物矿床和密西西比型铅锌矿床）为对象，进行了“隐伏矿体定位预测的组合预测方法”的探索与研究。其基本出发点和预期目标是针对隐伏矿体定位预测中的几个关键科学问题，探讨脉状金矿在成矿作用过程中矿体空间定位的热力学体制及动力学机制，矿体空间定位机理及定位规律的厘定与表征方法，多元预测信息的有效提取与优化方法，高精度预测模型与组合预测方法。进而依据脉状金矿成矿机理及定位规律的相似性，矿化结构、异常结构、信息结构的同型性，提出并构建隐伏矿体定位预测的方法体系，并结合实例剖析，验证其方法体系的先进性、实效性和普适性。

本项研究的主体思路是以赵鹏大院士提出的地质异常预测理论和组合创新概念为指导，按照地质异常致矿→构造物质组合控矿→物化探异常示矿→综合信息和组合方法找矿的研究思路，采用以结构分析方法为主导的“多重场（异常场、矿化场、构造物理化学场）结构分析＋多参数矢量逼近”的组合预测方法，由局部致矿异常分析→矿致异常筛选→组合异常结构分析及其与矿体定位的空间耦合关系厘定→关键预测信息提取及高精度预测模型构建→多参数矢量逼近隐伏矿体定位预测。为验证所获认识及相关方法的有效性，笔者结合相关科研课题，在胶东地区的焦家、河东、灵山沟、金牛山、望儿山等金矿和黄陵地区的茅坪、石板溪金矿进行了以隐伏矿体定位预测为目的的科研实践，取得了较为显著的地质找矿效果和社会经济效益。研究工作先后得到原国家黄金局地质科研基金（93—35）、地矿行业科学基金（9523）、国家计委科技找矿专项（JG947110）、国家教委博士点基金（96049117）、国家自然科学基金（497721691）和国土资源部百名跨世纪科技人才基金

的资助。

科学源于实践而始于问题，并随着研究法所取得的成就而发展。尽管笔者围绕隐伏矿体定位预测这一前沿课题中的几个关键科学问题进行了初步的探索，在矿体空间定位机理及定位规律的厘定与表征，多元预测信息的有效提取与优化，高精度预测模型和隐伏矿体定位预测的组合预测方法体系构建等方面取得了一些初步认识，但远不能说上述问题已经解决。笔者通过上述研究所获得的切身感受是“科学有着永无止境的前沿”；科研也是一门“遗憾”的艺术。笔者在完成这部论著的过程中，才发现研究中尚存在着许多的不足，这也将有利促使笔者在今后的研究工作中做更深入的思考和更细致的探索。同时，笔者也深知，要在如此有限的篇幅内构建系统的隐伏矿体定位预测方法体系，其难度是可想而知的。但之所以感到力有不逮而又勉为其难，其重要意义就在于，笔者认为要想高起点地开展此项研究工作，首先必须完整地明确和把握开展隐伏矿体定位预测所要探讨和解决的关键科学问题和构建具组合创新意义的方法体系框架。因为，任何系统框架的构建都会有助于激发人们的想像力、创造力和预见力。而关键科学问题的明晰和组合创新概念的形成将为我们深化隐伏矿体定位预测问题的研究提供一种崭新的思维方式和方法。正如美国未来学家阿尔温·托夫勒所说，“当代一系列重大突破常常不是来自孤立的单项技术，而是来自并列的几项技术或其组合”。

限于笔者的能力和水平，书中肯定存在诸多不足，敬请各位专家及同行批评指正。

作 者

1999 年

目　录

前　言

第一章　隐伏矿体定位预测的方法学基础及方法论 …… (1)

第一节　大思路、小尺度、高精度——隐伏矿体定位预测的方法学基础 …… (1)

第二节　成矿分析——隐伏矿体定位预测的方法论 …… (2)

第三节　结构分析——隐伏矿体定位预测的有效途径 …… (3)

第四节　组合预测方法——隐伏矿体定位预测的新工具 …… (4)

第二章　矿体空间定位机理的热力学研究 …… (7)

第一节　温度冷却是矿质沉淀的最有效机制 …… (7)

第二节　压力减小引起矿物溶解度减小和矿质沉淀 …… (7)

第三节　水-岩交换反应对矿质沉淀具有重要意义 …… (8)

第四节　缓冲效应对矿质沉淀的制约作用 …… (8)

第五节　流体的混合作用可能是矿质聚集、沉淀的主要机理之一 …… (9)

第六节　脉状金矿成矿体系中的自组织现象初步研究 …… (9)

第七节　矿体空间定位机理的实例剖析 …… (10)

第三章　矿体空间定位机理的成矿动力学分析 …… (14)

第一节　矿体定位过程的构造动力学分析 …… (14)

第二节　矿体空间定位机理的成矿动力学分析 …… (17)

第三节　减压扩容控矿理论及其对矿体空间定位机制的初步解释 …… (21)

第四节　小结 …… (24)

第四章　控矿断裂的几何学和运动学分析 …… (26)

第一节　控矿断裂的几何学分析 …… (26)

第二节　控矿断裂的运动学分析 …… (30)

第三节　矿体空间定位规律的厘定与表征——实例剖析 …… (32)

第五章　成矿场矿化时空结构分析 …… (40)

第一节　成矿场矿化时空结构分析的要义 …… (40)

第二节　金矿化的时间结构分析 …… (40)

第三节　金矿化的空间结构分析 …… (45)

第六章　多元预测信息的有效提取与优化 …… (59)

第一节　引言 …… (59)

第二节　预测信息提取与优化的基本问题 …… (60)

第三节　预测信息的有效提取 …… (63)

第四节　预测信息的初步优化 …… (65)

第七章　高精度预测模型的初步构建 …… (70)

第一节　引言 …… (70)
第二节　基本思路 …… (70)
第三节　高精度预测模型的构建方法 …… (71)
第四节　脉状金矿隐伏矿体定位预测模型的初步构建 …… (74)
第五节　问题讨论 …… (78)
第八章　多参数矢量逼近预测法 …… (80)
第一节　应用远程扩散元素指示深部金矿化 …… (80)
第二节　以成矿指示元素的空间分带特征参数为找矿度量 …… (82)
第三节　以矿化元素组合特征参数接近矿化中心 …… (82)
第四节　应用近矿综合分带指标参数接近隐伏矿体 …… (84)
第五节　用分带指数等值线圈定深部金矿体（柱） …… (85)
第六节　利用贯通矿物标型特征的垂向变化预测隐伏矿体 …… (86)
第九章　控矿构造几何预测法 …… (89)
第一节　引言 …… (89)
第二节　控矿断面几何形态和容矿空间的厘定 …… (89)
第三节　控矿断面几何形态模拟方法 …… (91)
第四节　应用实例简介 …… (91)
第十章　成矿构造物理化学场结构预测法 …… (94)
第一节　引言 …… (94)
第二节　成矿构造应力场结构分析 …… (94)
第三节　激电异常场结构分析 …… (97)
第四节　原生晕异常场结构分析 …… (99)
第五节　河东金矿成矿构造物理化学场结构分析 …… (101)
第六节　河东金矿深部及外围隐伏矿体定位预测 …… (104)
第十一章　全书总结与研究展望 …… (108)
第一节　全书总结 …… (108)
第二节　研究展望 …… (112)
致　谢 …… (114)
参考文献 …… (115)
英文摘要 …… (123)

CONTENTS

FOREWORD

1. METHODOLOGICAL BASIS AND METHODOLOGIES OF FORECASTING OF CONCEALED OREBODY LOCATION ····· (1)
   - 1.1 Methodological Basis of Concealed Orebody Location Forecasting: Grand Scopes, Minor Scale, and High Precision ····· (1)
   - 1.2 Methodologies of Concealed Orebody Location Forecasting: Metallogenic Analysis ····· (2)
   - 1.3 Effective Routes of Concealed Orebody Location Forecasting: Structural Analysis ····· (3)
   - 1.4 New Approaches of Concealed Orebody Location Forecasting: Combinatorial Forecasting ····· (7)
2. THERMODYNAMICAL STUDIES ON THE MECHANISM OF OREBODY SPACIAL LOCATION ····· (7)
   - 2.1 Drop of Temperature Is the Most Effective Mechanism of Mineral's Depositing ····· (7)
   - 2.2 Drop of Pressure Results in the Decrease of Mineral's Solubility and Finally the Mineral's Depositing ····· (7)
   - 2.3 Water-Rock Exchange Reaction Contributes Heavily to Mineral's Depositing ····· (8)
   - 2.4 Buffer Effect's Constrains on Mineral's Depositing ····· (8)
   - 2.5 Fluid Mixture: Possibly One of the Main Mechanisms of Mineral's Concentration and Depositing ····· (9)
   - 2.6 A Preliminary Study on Self-organization Phenominum in Vein-like Gold Metallogenic System ····· (9)
   - 2.7 Practical Example Analysis on Orebody's Spacial Location Mechanism ····· (10)
3. METALLOGENODYNAMICAL ANALYSIS ON MECHANISM OF OREBODY' S SPACIAL LOCATION ····· (14)
   - 3.1 Structural-dynamic Analysis on Orebody's Location Process ····· (14)
   - 3.2 Metallogenodynamical Analysis on Orebody's Location Mechanism ····· (17)
   - 3.3 Ore-controlling Theory of Pressure-Drop and Space-Expansion and Its Preliminary Explanations on Orebody's Spacial Location Mechanism ····· (21)
   - 3.4 Conclusion Remarks ····· (24)
4. GEOMETRICAL AND DYNAMICAL ANALYSIS ON ORE-CONTROLLING

FRACTURES ..... (26)
4.1 Geometrical Analysis on Ore-controlling Fractures ..... (26)
4.2 Dynamical Analysis on Ore-controlling Fractures ..... (30)
4.3 A Practical Example Analysis: Determination and Manifestation of Orebody Spacial Location Regularities ..... (32)
5. TEMPORAL-SPACIAL STRUCTURE ANALYSIS OF MINERALIZATION IN METALLOGENIC FIELD ..... (40)
5.1 Significance of Temporal-spacial Structure Analysis of Mineralization in Metallogenic Field ..... (40)
5.2 Temporal Structure Analysis of Gold Mineralization ..... (40)
5.3 Spacial Structure Analysis of Gold Mineralization ..... (45)
6. EFFECTIVE EXTRACTION AND OPTIMIZATION OF MULTIVARIATE FORECASTING INFORMATION ..... (59)
6.1 Introduction ..... (59)
6.2 Foundamental Problems of Ferecasting Information's Extraction and Optimization ..... (60)
6.3 Effective Extraction of Forecasting Information ..... (63)
6.4 Preliminary Optimization of Forecasting Information ..... (65)
7. A PRIMARY CONSTRUCTION OF HIGH PRECISION FORECASTING MODEL ..... (70)
7.1 Introduction ..... (70)
7.2 Outlines of the Construction ..... (70)
7.3 Construction Methods of High Precision Forecasting Model ..... (71)
7.4 A Primary Construction of Location Forecasting Model of Vein-like Concealed Gold Drebody ..... (74)
7.5 Discussions ..... (78)
8. MULTIPARAMETER VECTOR APPROXIMATION FORECASTING METHOD ..... (80)
8.1 Using Long-distance Diffusive Elements to Indicate Deep Gold Mineralization ..... (80)
8.2 Using Spacial Zonation Characteristic Parameters of Metallogenic Indicator Elements As Measurement of Prospecting ..... (82)
8.3 Using Combinatorial Characteristic Parameters of Metallogenic Elements to Approximate Mineralization Center ..... (82)
8.4 Using Near-ore Comprehensive Zonation Parameters to Approximate Concealed Orebody ..... (84)
8.5 Using Zonation Parameter Contour to Enclose Deep Concealed Orebody (Ore Cloumn) ..... (85)
8.6 Using Vertical Variation of Going-through Mineral's Typomorphic

Characteristics to Forecast Concealed Orebody ..... (86)
9. ORE-CONTROLLING STRUCTURE'S GEOMETRIC FORECASTING METHOD ..... (89)
9.1 Introduction ..... (89)
9.2 Geometric Shapes of Ore-controlling Section and Determination of Ore-hosting Space ..... (89)
9.3 Geometric Simulation of Ore-controlling Sections ..... (91)
9.4 Introduction to Practical Examples ..... (91)
10. METALLOGENIC TECTONO-PHYSICOCHEMICAL FIELD STRUCTURE FORECASTING METHOD ..... (94)
10.1 Introduction ..... (94)
10.2 Structure Analysis of Metallogenic Tectonic Stress Field ..... (94)
10.3 Structure Analysis of Induced Polarization Anomaly Field ..... (97)
10.4 Structure Analysis of Primary Halo Anomaly Field ..... (99)
10.5 Metallogenic Tectono-Physicochemical Field Structure Analysis of Hedong Gold Deposit ..... (101)
10.6 Concealed Orebody Location Forecasting in Deep and Periphery of Hedong Gold Deposit ..... (104)
11. AN OVERALL SUMMARY AND FUTURE RESEARCH ..... (108)
11.1 An Overall Summary ..... (108)
11.2 Future Research ..... (112)
ACKNOWLEDGEMENT ..... (114)
REFERENCES ..... (115)
ABSTRACT IN ENGLISH ..... (123)

第一章　隐伏矿体定位预测的方法学基础及方法论

第一节　大思路、小尺度、高精度——隐伏矿体定位预测的方法学基础

众所周知，新一轮矿产勘查工作仍将以已知的重要成矿区（带）为主要对象。而在这些研究程度较高的已知成矿区（带）内，要想取得新的找矿突破，就必须探索和运用新的观念和理论，采用新的技术和方法，取得新的信息和认识，形成新的思路和途径。因为，国内外一些地质找矿工作的重大突破，特别是一些大型、巨大型矿床的发现实例告诉我们，每一种新思路、新途径、新方法的应用，都可能导致矿产勘查在新的基础上再次开始，并常常意味着又一批新矿床被发现。

隐伏矿体定位预测是一项涉及面广、难度大、要求高的综合性研究工作。迄今，预测的思路和途径还不够成熟，预测的方法也在不断探索和完善之中。隐伏矿体定位预测的重要特点是大思路、小尺度、高精度。这应成为隐伏矿体定位预测方法研究的方法学基础。为此，开展隐伏矿体定位预测研究，要求树立“系统-整体观”、“时空-结构观”和“层次-对应观”。隐伏矿体定位预测作为一项极为复杂的思维活动，是一个具有综合性、多维性、动态性的思维过程。这种高级的理性思维活动贯穿于整个预测活动的始终。实践证明，隐伏矿预测的每一步都离不开理论思维的指导，有效而先进的地质思维途径与方法可扩大我们的思维视域，优化我们的思维导向。

唯物论的根本点，就是认识事物一定要从客观实际出发，而不能靠主观臆想。辩证法告诉我们应该如何抓住关键，认识事物的本质与发展的规律。毛泽东同志说：“‘实事’就是客观存在着的一切事物，‘是’就是事物的内部联系，即规律性，‘求’就是我们去研究。”实践证明，在新一轮矿产勘查工作中，仅有技术能力和处理信息的能力是远远不够的，计算机正在越来越多地为我们做这些事情。当今，某一领域的领先人物常常是既能够预见到趋势、探测出隐含的模式，研究出解决复杂问题的创新方法，又能保持吸取和解释日益增多的复杂信息的必要技能，并能跨学科汲取知识和提出问题。而那些仅有技术能力的勘查人员则只能重复过去的行为和思维方式，很少有新发现。显然，培育和训练导致预测成功的思维方式极为重要。

对此，国外一些著名矿产勘查学家都曾给予高度的重视和精辟的论述。S. 里克斯和 R. 亨利发表了“运用思维能力求得发现——你的头脑是否为成功勘查进行了训练?”的著名讲演，指出勘查是注重实效和创造性的一种奇妙结合。当代最成功的勘查地质学家之一——R. 伍德尔近来强调指出：“勘查的成功特别取决于两种技能：观察和解释。勘查，不管是老式的找矿还是现代科学勘查，都得靠看，用各种可能得到的手段去‘看’。有的人看是看

了，但没有看到，或者也看到了，但不了解或者不理解观察结果的意义，即缺乏解释技能。矿床发现者可以是首次看到找矿线索的人，但更可能是别人看到的他也看到了，而别人没有想到的他却想到了。”华莱士·普特曾指出：“想像力是成功的找油工作者不可缺少的品格。……发现必须仰赖我们思想上的形象化——想像力。”帕克·迪基说：“我们一般用旧思想在新地方发现石油，有时也用新思想在老地方发现石油，而很少用旧思想在老地方发现大量石油。过去我们不止一次认为石油找完了，实际上只是我们的思想贫乏而已。”西方勘查哲学亦认为，在“思路、资金、机遇”勘查三要素中，思路对勘查成果的获得起着首要的作用。以上列举的认识，虽不全面，但启示我们：①成矿预测是经过认真分析和充分实施的创造性思维的结果；②预测评价应当始终着眼于“新”字，无论是关于新靶区或是老靶区上的新想法；③隐伏矿体定位预测的主要着眼点应该是重新考虑老靶区的再认识和再评价；④任何系统性思维框架的构建在一定程度上都有助于激发想像力、创造力和预见力；⑤很多脉状金矿区的勘查史都表明，矿体（脉）是成群出现的，在有限的面积内往往会集中多条矿脉和多个矿体，它们规模不等，深浅不一。即使已经详细勘查的老矿区，如果改变找矿思路或者采用新的预测方法，仍然会有新的发现。

第二节　成矿分析——隐伏矿体定位预测的方法论

在矿产勘查领域内的每一位勘查者，在自己的有限实践空间内都能够对具体勘查对象有所认识而形成经验思维；但经验思维只能认识简单的、个别的事物和现象，不能揭示和认识成矿的本质规律。成矿作用的复杂性和矿产勘查的风险性要求人们去更深刻地揭示和认识成矿规律，由经验思维走向公理思维，以集中体现和反映找矿经验，从经验思维的具体性上升为抽象思维的普遍性。公理思维虽在一定程度上揭示和反映了成矿客体的本质特征，但仍远远满足不了现代矿产勘查中隐伏矿预测对思维形式的需求。尤其是当前，随着找矿主体对象由地表矿、浅部矿、易识别矿向隐伏矿、深部矿、难识别矿的逐步转变，现代矿产勘查的难度、广度和深度日趋增大，急需人们的分析思路从传统的经验思维、公理思维走向辩证思维、系统思维和创造性思维，并在思维方式的变革中探索隐伏矿预测的新思路、新途径、新方法。

培根曾指出：“科学就是用理性的方法去整理感性的材料”。恩格斯亦指出：“一个民族要想站在科学的最高峰，就一刻也不能没有理论思维。”成矿分析就是指对成矿过程、成矿机理及其形成环境、控矿条件、矿化信息及矿化时空结构特征的系统解析与研究，它不仅是探索和揭示矿体定位规律的最基本途径，亦是开展隐伏矿体定位预测的最主要方法。

成矿分析是一个借助科学概念，运用理性方法整理感性材料，以揭示成矿现象本质，反映成矿时空规律的动态认识过程。它贯穿于成矿预测和勘查评价的始终，是研究成矿规律，进行成矿预测的最基本途径和最有效的方法。大量的矿产勘查实践证明，科学的成矿预测实质上是在正确的成矿分析基础上的合理推断。预测水平的高低和预测效果的优劣，在很大程度上取决于成矿分析的深入程度；而对矿体定位规律的认识深度和隐伏矿体定位预测的准确程度，在很大程度上取决于成矿分析思路、途径、方法的正确性和有效性。

成矿分析是一项探索性、技艺性很强的研究工作。探索性表现为：成矿分析常常是在成矿信息不完整和不确定条件下的解析与研究，故结论具有明显的不确定特点。技艺性表

现为：对分析思路、途径、方法的选择与应用，就像使用同样原材料进行生产的工人会因技艺差别而制造出不同质量的工件一样。不同的预测者运用相同的资料对同一对象进行成矿分析时，会因分析思路、途径、方法的不同而获得大相径庭的认识与结论。因此，成矿分析过程实质上是一个资料、信息与思路、途径、方法相结合的过程。其中，资料、信息是基础和前提，思路、途径、方法的选择、应用则是核心与关键。正确掌握思维规律，运用先进的思维方式和分析方法，可以有效地提高成矿分析的能力和水平。

科学的成矿分析，以揭示成矿规律的本质属性为目的。成矿作用过程及矿化产物空间展布的系统性、结构性、整体性、自组织性和层次性特征是成矿分析的最主要内容，并构成成矿分析的认识观和方法论。科学的成矿分析要求透过复杂纷纭的成矿现象和矿化信息，揭示出成矿作用内在的本质规律和有效的预测评价标志。成矿分析的作用与意义具体表现为：①区分事物的真象与假象，撇开事物外部的、非本质的联系，让其内部的、本质的联系和过程暴露出来；②撇开与找矿无关的内容，抛开次要的过程和干扰因素，从纯粹的形态和结构上考察其演化过程和展布规律；③区分基础的东西和派生的东西，深入事物的内层，把决定事物性质的、隐蔽的本质属性抽象出来；④从成矿客体的本质特性出发，将其各种属性和关系综合起来，从系统整体性、时空结构性、等级层次性等方面揭示和厘定成矿系统完整的、本质的规律，以指导隐伏矿体定位预测实践。

第三节　结构分析——隐伏矿体定位预测的有效途径

结构性和同型性是系统科学的两个基本概念，也是预测学中认识外拓和方法普适的理论基础。结构性意味着构成统一成矿系统的诸要素之间相互关系的总和或统一。同型性则是指各种不同成因的热液脉状矿床由成矿机理的相似性而导致在结构上或形式上的一致性或相似性。同型性并不是指各种系统的表面类似性或外在类似性，而是指其内在规律性的形式一致性或结构类似性。系统科学的研究表明，存在着适用于各种不同系统的一般概念、一般原理和一般定律，不论这些系统的组元及其相互关系的具体特性如何。在不同的系统个体之间、不同的系统类型之间及不同的系统层次之间，都存在着某种同型性。因此，系统的同型性不仅是系统科学的主要研究对象，而且又是系统方法赖以成立的依据。

隐伏矿体定位预测，作为一个复杂的系统工程，其科学内涵涉及到系统学、运筹学、控制论和信息论的诸多方面。其核心是树立系统思维和整体观念，采用从整体到局部的结构分析方法，从定性到定量的综合集成方法。隐伏矿体定位预测中的结构分析，是指以地质异常理论和成矿构造物理化学场理论为指导，以成矿场矿化时空结构分析和综合异常结构分析为途径，以隐伏矿体定位预测为目标的有效预测方法。其主要特点是把矿体的形成与分布作为一个构造物理化学综合成矿系统，具有相应的系统组合异常和与矿体空间定位呈现对应耦合关系的空间结构特征。为此，从统一成矿——异常场角度综合考虑其矿致地质异常结构、物性异常结构、物质异常结构及物理化学环境异常结构及其对应耦合特征，结合隐伏矿体定位预测的立体化要求，进行地、物　化预测信息的有效提取和有机关联，使所获关键预测信息具有穿透性和集成性特征。

成矿系统的复杂性和预测目标的精确性，要求隐伏矿体定位预测必须多方位、立体化地去研究矿致异常场、成矿构造物理化学场和矿化场的精细结构特征，并揭示其与矿体空

间定位的对应耦合关系。采用复杂预测对象研究的结构分析方法，可以使矿体定位规律研究进一步客观化、系统化和科学化，因为预测对象的结构性是客观存在的。根据预测者对预测对象的内部组成、外部环境、信息显示及其相互关系的认识程度，可对预测对象进行结构划分。在此基础上，对预测对象的内部组成及外部环境进行解剖，考查诸因素与成矿的相关程度，达到把握矿体分布特点及定位规律的目的。从精确尺度上观察和刻画出预测对象的结构性特征，这就是预测对象结构分析的基本含义。

要在错综复杂的成矿现象中，总结出反映成矿本质的规律性，是一项难度较大的工作。然而，结构分析法可为此研究提供有力的手段。通过空间结构分析和时间结构分析对各控矿因素进行研究，分析各种地质构造要素与金矿化的成生联系，特别是查明各要素对矿化局部富集的控制，把握矿体的空间定位规律。通过信息结构分析，总结各种矿化显示的结构规律性，可以提高对各种信息的有效提取和优化能力。成矿系统的时间结构、空间结构、信息结构、异常结构及其多重异常场、矿化场结构的空间耦合关系构成隐伏矿体定位预测中结构分析方法的具体内涵。实践证明，多重场结构分析是隐伏矿体定位预测的有效途径。

第四节　组合预测方法——隐伏矿体定位预测的新工具

预测方法是指人们在成矿预测研究中，针对预测对象和目标任务，为达到某种预测目的所采用的手段或工具。其具有以下特点：首先，预测方法和预测对象及预测目的是紧密联系在一起的。因为成矿预测是一个观测、分析、推理、判断的系统过程，因此其用于不同阶段的预测方法应是一个关联组合。其次，预测方法与预测理论之间有着极为密切的内在联系。在一定意义上，可以把预测方法理解为预测理论的实际应用，因为任何预测方法都是以一定的预测理论为依托的；而任何预测理论又都应具有方法论功能，都可以在一定的条件下转化为预测方法。另外，预测方法也是预测工作者从事成矿预测研究与实践的经验总结与智慧结晶，具有源于实践，服务于实践，并在实践中检验、修正、完善与发展的实践—认识特征。

上述成矿预测方法的多方面涵义和实质，决定了对其开展研究的多方面重要意义。特别是在随着找矿主体对象发生转变，找矿难度和找矿风险日益增大和为保证我国经济可持续发展而急需开展隐伏矿预测的新形势下，开展以隐伏矿体定位预测方法为重点的探索与研究，对于有效提高预测成果的可靠性与准确度，促进成矿预测学发展和提高预测找矿实效都具积极的作用。在新一轮矿产勘查工作中，只有掌握和运用科学的预测方法，才能在成矿预测实践中取得好的预测效果，实现新的找矿突破。大量的找矿实践证明，成矿预测，尤其是隐伏矿体定位预测是一项探索性、创造性劳动，比其它研究工作更需要讲究方法。正确的预测方法，可以使人们更好地发挥创造才能，顺利地到达成功的彼岸；而错误的预测方法，则会使人误入歧途，劳而无功。培根早就指出“跛足而不迷路能赶过虽健步如飞但误入歧途的人。”巴甫洛夫曾有一句至理名言，“科学是随着研究法所获得的成就而前进的。”

选择恰当的预测方法是提高隐伏矿预测结果可靠性和准确度的关键。各种预测方法都是试图从控制矿体形成与分布的诸多因素中的某一个或几个侧面来预测隐伏矿体的存在及

产出的具体位置。每种预测方法都各有其特点和应用条件，因此方法的选择与组合就显得尤为重要。

首先强调的是组合创新的高度分析和认识隐伏矿体定位预测的方法选择与应用问题。因为从根本意义上讲，组合创新首先是一种思想方法而不是一种拿来就能用的简单技术。科学技术发展到今天，重大的原理性的创新已不多见，而综合型的创新却日趋增多。例如，美国阿波罗登月飞船总设计师韦伯曾说："阿波罗登月船所使用的没有一项是新技术，都是现成技术，关键在于系统地综合。"未来学家阿尔温·托夫勒也指出，"当代的一系列重大突破常常不是来自孤立的单项技术，而是来自并列的几项技术或其组合"。笔者认为，组合创新概念的形成将为我们提供一种崭新的创新思维方式和方法。组合创新的两个技术关键：一是要寻求和选择最优的组合要素；二是要研究和确定最佳的组合结构。

当前，随着预测对象复杂性程度的增强，预测方法研究与应用的整体化趋势日益明显，主要表现为：①不同学科之间在预测方法上的相互移植；②多种预测方法之间的彼此渗透；③各种预测方法的综合运用；④定量预测方法的广泛应用；⑤组合预测方法的迅速发展。笔者根据隐伏矿体定位预测的探索与实践，提出了组合预测法的新概念。所谓组合预测法，是指针对隐伏矿体定位预测这一矿产勘查中的关键技术问题，根据预测对象和目标要求提出最优方法组合角度，将两种或两种以上的预测方法进行整合性重组，以获取具有统一整体功能的预测效果，组合预测法不等同于目前常说的综合信息预测法和地、物、化、遥综合勘查技术，其内涵是系统思维方法及最优化理论方法的应用，即针对解决待定的关键问题，选择最有效的预测方法组合。这种"组合预测方法"的探索与应用反映着预测方法领域的思维创新、理论创新和技术创新趋势。菊池诚博士曾指出，"创新有两条途径：第一是全新的发现；第二是把已知原理或方法进行组合"。笔者认为，自觉地选择和应用组合预测方法，可以产生整体大于部分之和的新效果。因此，与其说它是一种新的方法，不如说它是一种新的概念、新的思路。

组合预测法的构建思路为：首先把预测对象在理性上抽象化，找出能反映预测对象的本质，或找出达到目标所要解决的关键科学问题，并注意到有助于问题解决的启示，从而形成系统观点和组合方法。组合预测法具有以下特点：①综合性。任何方法都具有优点和不足，把两种以上预测方法进行整合性重组，可形成功能互补；②相关性。预测对象、目标的同一性使之在信息提取、目的物逼近方面具内在相关性；③功能性。以已有方法及原理为基础，通过选择与组合，创造出新的功能和效益；④组合形式的多样性。组合预测法对所组合方法的数目没有限制，组合形式也多种多样，既可以是方法的直观组合，亦可以是方法原理的组合或性能的组合。应该强调的是，本书所指组合预测方法的含义，决不是将早为人们所熟知的预测方法简单地套合或叠置，而是将矿体空间定位机理、定位规律的厘定与表征、预测信息的提取与优化等隐伏矿体定位预测中关键技术问题的研究提高到一个新的高度，从整体、动态、多学科交叉渗透和互补的角度进行定性、定量，以至三维立体上的定位预测。它不仅涉及到具体预测方法的选择、组合与优化问题，而且更重要的是需要在思维方式上进行组合创新的深入探索。这种在组合创新思维方式指导下构成的组合预测方法可同时集聚多种单一预测方法的优点，并有助于多预测信息的有机关联，优选关键信息，强化微弱信息，衍生新信息和发掘深层次信息，从而使其预测精度明显优于单一预测方法，有效提高了隐伏矿体定位预测的可靠性和准确度。

隐伏矿体定位预测涉及到从矿体定位机理的分析到定位规律的厘定，从多源预测信息的有效提取到关键性预测标志的优化，从高精度预测模型的建立到最优预测方法的选择，从具体靶位的优选到验证工程的布置，是一项难度大、探索性强的复杂系统工程。因此，必须采用组合创新思维和组合预测方法，才有可能取得满意的预测效果。

第二章　矿体空间定位机理的热力学研究

矿体定位机理研究的实质就是对矿质局部沉淀、富集机制的研究。金属从各种流体中沉淀、富集、形成矿体的机制，历来都是成矿学研究中的一个重要基础问题，也是当前成矿流体研究中的一个热点问题。近年来，由于测试技术、实验手段的进步，计算机模拟技术及其与常规实验方法的结合，为热液矿床成矿流体中的元素迁移形式、矿质沉淀机理等研究提供了更多的数据和成果。本章主要对脉状金矿成矿流体中的矿质沉淀机理的热力学体制进行初步的分析与研究。

第一节　温度冷却是矿质沉淀的最有效机制

对于金属矿物的沉淀，Barnes 曾总结了三种机理：①冷却；②配合物配位体浓度的降低；③As^{2-}增大。具体对于热液脉状金矿成矿流体中的两种主要配合物（氯化物配合物和硫化物配合物），引起矿质沉淀的原因既有相同之处又有不同之处。相同之处表现为：稀释、降温及降压同时引起两种配合物失稳解离，并造成矿物的沉淀；而引起矿物沉淀的不同之处表现为：对氯化物配合物是$+\Delta m_s^{2-}$、$-\Delta O_2$和$+\Delta pH$；对硫化物配合物是$-\Delta m_s^{2-}$、$+\Delta O_2$和$-\Delta pH$。其中，降温对矿质沉淀的效应是第一位的。

研究表明，除少数矿物外，绝大多数金属矿物，特别是硫化物的溶解度在高温下增大，因而温度降低会导致溶解度降低；假如溶液达到饱和，还可以造成矿质的沉淀。据 Crerar 等的研究，当成矿温度从 350℃降至 250℃时，Cu 的溶解度降低 2 个数量级，Fe 的溶解度降低 1 个数量级；研究表明，由于平衡常数（$\lg K$）随温度由 350℃降至 200℃而减小，主成矿元素 Au、Ag 等从成矿流体中沉淀出来。

但是，研究亦表明，温度对矿质溶解度的影响情况比较复杂，并不呈现一种简单的线性关系。对热液脉状金矿中沸腾作用的计算机模拟显示，在许多情况下，温度冷却仅产生黄铁矿和石英的沉淀，而不导致黄铜矿、闪锌矿和方铅矿的沉淀。原因是单纯的温度下降会导致某些酸的分解，增加了H^+的活度，降低了 pH 值，使金属的某些配合物在流体中更趋稳定。因此，有两个因素可限制因温度降低而形成矿质沉淀的效应：①因温度降低引起溶解度减小而产生矿质沉淀的前提是，成矿流体中成矿物质必须达到饱和；②成矿流体的温度要能够在较局部范围和较短距离内有较大幅度的下降；否则，只能在较大范围或较长距离内形成稀疏散布的矿化。所以，尽管温度变化可能是造成矿质沉淀和矿体定位的最有效机制，但在多数情况下，需要与其它机制有机地匹配才能形成工业矿体。

第二节　压力减小引起矿物溶解度减小和矿质沉淀

压力减小会引起矿物溶解度的变化，在多数情况下能导致矿质沉淀。因压力减小引起

的等温沸腾是许多金属矿物沉淀的重要机制。沸腾引起矿质沉淀的主要原因是成矿流体中气体的分离散失，即 H_2O、CO_2、H_2S 等逸离进入气相。这一方面导致流体中金属浓度增大，另一方面，H_2S 等的逸离造成流体 pH 值增大和还原 S 浓度增大，与同时产生的降温冷却作用等一起造成矿质的沉淀。研究表明，沸腾主要发生在 300℃左右，最初 5%的流体转化为蒸汽就会引起大多数金属元素沉淀，矿物的沉淀顺序为氧化物、简单金属硫化物、多金属硫化物、碳酸盐。这在大多数热液脉状金矿床中广为见及，具有普遍性规律。所以，降压沸腾作用是热液脉状金矿床中矿质沉淀的主要原因之一。但研究亦发现，沸腾作用大多只产生在一个小体积范围内，形成的矿化具有品位高、强度大、范围小、规模小的特点。另外，沸腾作用持续时间短，大致为 $5\times10^3\sim5\times10^4$ a，与一般含矿热液演化成矿的时间 $10^5\sim10^6$ a 相比要短得多，所以沸腾作用主要见于中小规模的脉型金矿床，而对大型、特大型热液金矿床的形成机制的影响有限。

第三节　水-岩交换反应对矿质沉淀具有重要意义

研究表明，随温度降低，从岩浆中分异出的成矿流体、富含成矿组分及像 HCl 这样的酸性组分，具有相当的酸度。而几乎所有像下列矿石矿物的沉淀反应：

$$FeCl_n^{2-n}+2H_2S+\frac{1}{2}O_2\longrightarrow FeS_2+2H_2+H_2O+nCl^- \qquad (1)$$

不仅产生酸，并且溶液的高酸度也驱使反应向左进行。由该反应可见，欲使矿质产生沉淀，必须有一些能排除冷却流体酸度的机制才行，而正是水-岩交换反应（近矿围岩蚀变）较好地解决了这一问题。

许多围岩蚀变反应，实际上是一种开放体系下的水-岩交换反应，它通过热液交代反应消耗 H^+，从而降低了热液的酸度。例如，热液脉状金矿中广泛发育的硅酸盐蚀变的钾长石—绢云母—高岭石，其反应为：

$$3KAlSi_3O_8+2H^+\rightleftharpoons KAl_2AlSi_3O_{10}(OH)_2+2K^++6SiO_2 \qquad (2)$$

$$2KAl_2AlSi_3O_{10}(OH)_2+2H^++3H_2O\rightleftharpoons 3Al_2Si_2O_5(OH)_4+2K^+ \qquad (3)$$

水-岩交换反应主要通过两种途径促使矿质的沉淀：①围岩矿物与成矿流体相互作用（近矿围岩蚀变），使 pH 值升高，驱动类似（1）式的反应向右进行；②通过其它一些物理化学参数的改变使矿质产生沉淀，如反应（1），降低温度和氯化物的活度，增加氧逸度或 H_2S 的浓度都能引起矿质的沉淀，而这两种情况都能形成矿物的交代结构。在各种成因的热液脉状金矿床中，几乎都毫无例外地广泛发育有近矿围岩蚀变，广为见及这种交代结构。因此，水-岩交换反应是引起矿质沉淀的重要机理之一。

第四节　缓冲效应对矿质沉淀的制约作用

缓冲效应引起单位 pH 值改变的酸或碱的增值或引起氧化还原电位改变的氧逸度的变化。缓冲效应对于矿质沉淀是一个潜在而重要的制约机制。Brimhall 等曾以三个缓冲剂的实例来说明其在矿质沉淀中的作用：①在中到高温条件下，与长英质侵入体有关的富 NaCl 成矿流体缓冲能力较弱，因而在岩体内及其附近迅速沉淀出 Cu、Mo 及其它硫化物；②碳酸

盐岩台地内的成矿流体被 H_2CO_3-HCO_3 共轭酸高度缓冲，这可以解释 MVT 矿床中成矿流体远距离迁移而不沉淀的原因；③加热到 200℃以上的海水具有非常强的缓冲能力，这是在大洋中脊扩张中心循环的热液系统为什么能有效地从洋壳中淋滤金属并带至上部的主要原因，也是许多块状硫化物矿床中矿质沉淀的可能原因之一。对 Au 的硫化物配合物的实验表明，引起 Au 从硫化物配合物中沉淀的原因主要为：①氧化还原反应；②液相中硫活度的降低。但近期研究表明，除氧化状态由黄铁矿-磁黄铁矿缓冲，$pH=pK_{H_2S}$的环境中，Au 的溶解度随温度升高而稳定增大外，在其它几种缓冲体系中，Au 的沉淀机制比较复杂。

第五节　流体的混合作用可能是矿质聚集、沉淀的主要机理之一

与沸腾作用相比，流体的混合作用在成矿物质沉淀中的重要作用越来越为人们所认识。混合作用在各类热液矿床的形成中都起着重要作用，而对脉状金矿而言，其对矿脉中工业矿体的定位机理研究亦具重要意义。初步的研究表明，混合作用导致矿质沉淀的主要机制为：①降温冷却。当热的上升溶液与冷的地表附近的水体相混合时，促使成矿流体的温度降低而造成矿质的沉淀；②稀释效应。相对纯的水与盐度高的水混合，使热液系统的配位基浓度降低，驱动类似（1）式的反应向右进行，造成硫化物的沉淀。混合作用还可以通过提高氧逸度和 pH 值，产生还原作用以及导致流体的不混溶作用引起矿质的沉淀。

第六节　脉状金矿成矿体系中的自组织现象初步研究

矿体在成矿系统中的定位机理是一个极为复杂的自然过程，其发生于特定的构造物理化学条件下。矿质的聚集与定位具有一定的热力学和动力学机制。按照耗散结构理论，在开放体系远离平衡态的条件下，当体系参量达到并超过某一阈值时，体系通过与外界交换能量与质量，形成和维系一种新的稳定的有序结构。产生这种有序态的过程称为非平衡体系的自组织。因此，自组织是指在没有外界干预情况下，在开放的极端远离平衡态的体系中出现的由非模式态转变为模式态的自动过程。涨落、失稳和突变是自组织的直接起因，涨落触发了耗散结构，失稳为耗散结构的产生提供了条件，突变是矿质沉淀和矿体定位的重要原因。

由于热液成矿体系中的自组织现象十分复杂，涉及到非平衡热力学理论和动力学系统分析方法。本书重点探讨和解决以下四个问题，即定态的稳定性判据，分支解的出现，涨落的动力学，演化的动力学。成矿动力系统分析理论针对一切以时间为变量的演化体系，认为在给定的初始条件和边界条件下，成矿体系将遵循一定的运动规律演化。该运动规律可由一组微分方程加以描述，如动力体系的连续性方程、运动方程、热传导方程、扩散方程、体系状态方程等。这种成矿动力系统分析理论，主要用于研究成矿动力系统在不同初始条件下的平衡状态、平衡态失稳、周期性振荡的发生、自组织现象的形成，以及各种运动状态彼此适应和相互联系的方式。这将有助于从深层次上揭示和厘定矿质沉淀、聚集及矿体定位、矿化分带等一系列自组织成矿现象的形成机理和规律。

开展矿体定位过程中的自组织现象研究具有十分重要的意义。长期以来，对热液成矿

体系中的非线性特征重视不够，因此，对于成矿过程多限于描述现象，总结统计规律，提出定性解释和假说。而借助于非平衡热力学和动力学方法，可以使我们对矿质沉淀机理的认识更加深入、细致，并从定性认识走向精确的计算模拟，为深入认识和解决矿体定位机理及定位规律等关键问题开创出一条新的途径。其次，以往分析成矿过程时，对各种参量和机制之间的联系重视不够，对各种现象的作用之间的制约、反馈、耦合关系认识不足，将一些相互影响、相互制约的现象割裂，使得对成矿过程的认识简单化，阻碍了对成矿规律的本质揭示和深层次认识。此外，成矿过程的自组织现象研究将把矿体定位机理和定位规律的探索建立在当代自然科学的最新研究成果之上，使得矿体定位机理和定位规律的研究与成矿动力学、构造物理化学、涨落理论、耗散结构理论、协同理论等紧密结合，为深化成矿过程和矿体定位机理认识，加速学科发展开辟了广阔的前景。

开展脉状金矿成矿过程及矿体定位机理中的自组织现象研究，应充分关注以下几个问题：

（1）根据非平衡热力学和成矿动力学的基本方法，分析脉状金矿床成矿过程中可能出现的主要反馈机制，重点是研究使成矿物质局部富集的定位机制。

（2）揭示和认识成矿体系中自组织现象的发育程度、时空结构、产状样式及其与矿体空间定位的对应耦合关系。

（3）分析成矿构造物理化学环境对成矿体系自组织特征的影响。金矿体形成本身是一个概率极低的自然过程，其定位过程是通过反馈而增强的使金等成矿元素富集的涨落现象。成矿构造物理化学场结构变异对造成涨落、滞流和定位有重要影响。

热液成矿体系自组织现象的研究关系到矿体空间定位机理和定位规律的揭示能否取得突破性进展，关系到能否对矿体定位规律做出更深刻的解释，并在隐伏矿体定位预测中取得找矿实效。可以预言，成矿过程的自组织现象研究将成为21世纪成矿学和成矿预测学研究的重点和前沿，并成为揭示和厘定矿体定位机理的最有效途径。

第七节　矿体空间定位机理的实例剖析

一、矿体定位的热力学条件

本次研究工作中，笔者对湖北茅坪金矿的石英、黄铁矿等矿物包裹体成分、热力学参数进行了测定和计算（表2-1、2-2）。矿物包裹体测温和矿物对硫同位素交换平衡温度均表明，该矿床的成矿温度应属中低温热液型。以1号矿体为代表的金矿体成矿温度区间为150～340℃，多介于250℃左右，在垂向上具有深部高、浅部低的变化特征。以石英、黄铁矿爆裂温度所做之成矿温度等值线图表明，其较高温度中心及其异常结构形态样式与已知矿体的空间展布相吻合。根据CO_2-H_2O体系中CO_2浓度与温度和压力的关系，测得成矿时的压力值为110×10^5～370×10^5 Pa范围内，成矿压力变化极差达260×10^5 Pa，说明成矿过程中曾产生过显著的压力释放效应。当成矿热液在全开放状态下产生沸腾时，流体蒸汽压等于外压。茅坪金矿成矿热液沸腾温度为330℃左右，矿液含盐度为5%左右，将其投影在Na-Cl-H_2O体系沸腾曲线图上，可求得沸腾蒸汽压为140×10^5 Pa。根据花岗质岩石平均密度换算，本矿体形成深度不超过1.5～2 km，具有中浅成特点。

表 2-1　茅坪金矿爆裂法温度测定值

测定矿物	样品数	温度变化范围/℃	平均温度/℃
闪锌矿	13	331～220	302
方铅矿	5	334～285	315
黄铁矿	20	320～230	282
石英	46	328～216	310
方解石	8	260～162	196

表 2-2　茅坪金矿硫同位素交换平衡温度

矿体号	矿物名称	$\delta^{34}S/‰$		$\frac{A\text{值}}{10^6}$	温度/℃
		闪锌矿	方铅矿		
Ⅰ	中粗粒多金属矿石	5.80	2.71	0.8	236
Ⅱ	含金黄铁矿矿石	方铅矿	黄铁矿		
		2.81	1.98		
Ⅳ	含金多金属矿石	5.66	2.99	0.8	275

二、热液爆破沸腾定位机制

除温度、压力特征外，茅坪金矿还具有明显的热液沸腾定位标志，如：①石英中典型的沸腾包裹体群；②矿物中富含 CO_2 等气相包裹体；③矿体中上部围岩具典型酸性蚀变；④具沸腾定位的矿化分带特征：Cu、Pb、Zn 矿化主要富集于 527 m 标高以下，而 Au、Ag 则集中分布于 604～728 m 标高内，480 m 标高以下矿化明显减弱。为此，笔者认为热液爆破沸腾、构造局部扩容、压力骤然释放而导致的滞流淀集是茅坪金矿脉内工业矿体定位的主要机制。

1. 影响金等成矿元素活化抑或沉淀的主要热力学因素

胡尊国等（1995）所做 Au 等成矿元素溶解度及溶存形式分布的实验研究表明，在相对贫硫、氯离子活度（a_{Cl^-}）中等具氧化性的酸性溶液中，Au 等以低氯配合物 $AuCl_2^-$ 形式为主进行活化迁移，故可以下列方程来表征含矿流体在控矿断裂中的活化迁移及沉淀富集机制。

$$Au+2Cl^-+H^++\frac{1}{4}O_2 \rightleftharpoons AuCl_2^-+\frac{1}{2}H_2O$$

$$\lg a_{AuCl_2^-}=\lg K_{p,r(1)}+2\lg a_{Cl^-}+\frac{1}{4}\lg f_{O_2}-pH \qquad (1)$$

$$Au+2Cl^-+H^++\frac{1}{4}O_2 \rightleftharpoons AuCl_2^-+\frac{1}{2}H_2O$$

$$\lg a_{AuCl_2^-}=\lg K_{p,r(2)}+2\lg a_{Cl^-}+\frac{1}{4}\lg f_{O_2}-pH \qquad (2)$$

每一反应式的物态平衡方程按下列公式计算：

$$\Delta G_{t,p} = \Delta H^\circ - t\Delta S^\circ + \int_{298}^{t} \Delta C_p dt - t\Delta\int_{298}^{t} (\Delta C_p/t)d_t + \Delta nRt\lg p \quad (3)$$

$$RT\ln K_{p,t} = -\Delta G_{t,p} \quad (4)$$

式中：$\Delta G_{t,p}$为 t、p 条件下反应的自由焓变；ΔH°、ΔS°分别为反应的标准焓变与熵变，ΔC_p为反应的等压摩尔热容的变化；Δn 为反应气体物质摩尔分数的变化；$K_{t,p}$为反应平衡常数。

通过由矿物包裹体成分及 t、p 参数测定所做的计算即可求得不同阶段 Au 及相关成矿元素的有效活化度（表 2-3）。结果表明，300℃以上含矿热液的活化度完全可以为成矿提供足够的物质浓度。显然，在一定温度条件下，E_h、pH 值、a_{Cl^-}及 f_{O_2}的变化是导致 Au 及相关成矿元素活化迁移或聚集定位成矿的主导热力学因素。

表 2-3　茅坪金矿 Au 氯配合物活度计算

对数活度值	定位成矿期		
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
$\lg a_{AuCl}$	−3.20	−6.50	−6.50

2. 构造扩容及压力释放效应导致热力学参数的变化

E_h：有关压力释放效应的实验研究表明，一定温度下由构造扩容而引起的压力释放将使各项热力学参数，尤其是 E_h、pH 值发生明显变化，从而导致成矿系统的卸载。如在 $SO_4^{2-} + 2C_{(固)} \longrightarrow S^{2-} + 2CO_{2(气)}$体系中，在正常温压梯度场中，随着 t、p 的降低，则伴随有氧化环境的发育。但是，在由相对封闭转变为相对开放的压力释放体系，如热液沸腾体系中，虽温度无显著变化，但压力骤然释放可导致还原环境的产生，因 $a_{S^{2-}}$增高而使金属元素以硫化物形式沉淀成矿。

pH：a_{Cl^-}电介质电离常数的实验测定与热力学计算表明，电介质的离解常数受控于温度与压力。温度升高，离解常数减小；压力效应则反之，压力降低，离解常数减小，离子间缔合增强，从而导致成矿介质 pH 值明显变化。温度、压力及介质离解常数三者的相互制约关系可用下式（Haymob，1980）表示：

$$-\lg K_{t,p} = (298/t) \cdot pK^\circ + (72600/at)\,|Z_i Z_j|\left(\frac{1}{\varepsilon_{t,p}} - 0.0128\right)$$

式中：$K_{t,p}$指 t、p 条件下的离解常数；K°为标准条件下的离解常数；a 为质点间距；Z_i、Z_j分别为正负离子的电荷数；$\varepsilon_{t,p}$为 t、p 条件下的介电常数。

对于成矿热液中两个重要基本组分碳酸和盐酸离解常数的研究表明，对于氯化物溶液来说，中低温时压力变化无明显影响。高温时 pH 值将随压力的减小而升高，同时导致溶液中 a_{Cl^-}降低，温度越高，变化越明显，并有一个高 a_{Cl^-}的酸性区间。该区间随压力升高将向高温方向移动。显然，这个酸性区间就是金属以氯配合物形式活化迁移的稳定区间。而碳酸溶液则相反，高温时压力变化对溶液无明显影响，中低温时压力减小将因碳酸离解度减小而使溶液 pH 值升高，显然它将是中低温条件下导致金属氯配合物解离而产生沉淀聚集的主要因素。

3. 热液爆破沸腾导致矿质定位成矿：当成矿热液沿构造裂隙迁移，因过饱和蒸汽压而引起围岩爆裂时，将因压力骤然释放而造成减压沸腾。其结果是：①沸腾是一个热力学条

件急剧变化的绝热过程，将出现气液两相共存，挥发分如CO_2等的迅速逸出，使液相pH值急剧增高、矿化度亦相应升高；②压力释放导致电介质离解度下降而使a_{Cl^-}减小；③成矿体系由氧化向还原环境演化、$a_{S^{2-}}$升高；④逸出的气相组分冷凝成低温酸性溶液，使围岩产生绢云母化、高岭土化等酸性蚀变并消耗溶液中的H^+，进一步使pH值升高。其综合效应是有关金属配合物稳定性显著下降，成矿物质，尤其是Au、Ag在沸腾部位迅速产生沉淀而定位成矿。因此，Au、Ag矿化集中在一定标高，即沸腾面波动范围内；而Pb、Zn、Cu等硫化物亦主要富集于沸腾面上下。当成矿热液进入构造扩容空间，因局部压力释放，即可使$a_{S^{2-}}$升高而引起富金硫化物的富集定位。

第三章　矿体空间定位机理的成矿动力学分析

成矿作用是各种转变过程和输运过程的耦合，热液脉状金矿的成矿系统和构造物理化学体系可视为一个具有体积 V 和边界 Ω 的开放体系。而成矿作用中最重要的转变过程是化学反应，最重要的输运过程是成矿流体的迁移，其构成了成矿作用的主要动力学特征，反映了成矿作用的动力学机制及其与矿化时间演化和空间展布之间的内在联系。由此构建了对热液脉状金矿具普适性的成矿动力学模型，以表征其流体和介质的动力学参数和定位机理及其动力学过程的相似性。这种由相似动力学机制组构对相似动力系统的认识，为我们探索具普适性研究途径和预测方法提供了可靠的方法学基础。

第一节　矿化定位过程的构造动力学分析

金成矿过程中断裂活动的动力学状态控制着矿液的迁移、热液成矿体系的热力学性质和所携带矿质的沉淀反应。这些控制关系可以通过矿体的空间分布、产状、矿石的矿物组合和结构构造进行观测和分析。

一、矿液上侵的驱动机制

矿液在地壳中的流动基本上有两种方式：一是沿断裂裂隙流动，二是沿岩石的孔隙流动。而断裂的裂隙度一般均大于围岩中的孔隙度。因此当岩石中断裂裂隙发育时，矿液总是趋向于沿断裂裂隙流动，即使在孔隙度较大的岩石中也是如此。所以本书着重讨论断裂构造对矿液流动的驱动机制。

矿液在断裂裂隙中运移的原因，一方面是由于矿液内高温气体所具有的内压力有上升的趋势，另一方面是由于构造应力的驱动作用引起的。这两种机制往往是同时存在共同作用。而在不同时期形成的控矿断裂中二者所起作用的大小又有所差异，在成矿前断裂中前者处于支配地位，在成矿期的构造中以哪种机制为主，又取决于应力状态。在压性状态下矿液的运移受构造应力的影响往往比张性状态下构造应力的影响要大。在后一种情况下，热液内压力的作用往往更为显著。

根据分子热力学原理，在热液体积一定时，内压力的大小主要取决于温度的大小，内压力与温度成正比。在深部通常温度较高，相应内压力较大，而浅部温度较低，内压力较小。而矿液总是由高压区向低压区运移，所以在许多热液脉状矿床中，矿液总是由深部向浅部运移。但是我们知道由于岩石静水压力的存在，热液向上运移过程中需要克服上覆的静水压力，只有内压力大于上覆静水压力时才能向上运移。但由于岩石的静水压力又是不均匀的，从而引起压力差的不均一性，通常在断裂部位存在有较大的压力差，由此导致了矿液向断裂带的运移，并在局部扩容部位压力差减小的情况下使矿液聚集。主要表现为控

矿断裂破碎带中构造岩带、次级断裂及节理密集带和断裂的启张部位，尤其不同方向断裂的交汇部位常常是矿液集聚地段，在此成矿热液往往形成涡流，从而形成矿柱或富矿体。

例如，位于焦家金矿田内的新城金矿，经钻探控制的工业矿体斜深达 1500 m，加上矿体头尾部延伸的非工业矿体部分，以及原生晕和蚀变带计算在内，整个矿化范围的斜深可达 3000 m 以上。该矿处于焦家主断裂中，据地球物理资料，该断裂深度可达 20 km 左右。假设矿液从 7～10 km 深部上侵，根据地深增压率计算其岩石围压为 189～270 MPa，而胶东金矿实测成矿压力为 10～50 MPa。巨大的压力梯度是本区非岩浆源成矿热液大规模长距离迁移上侵的主要驱动力，而其构造动力学条件是区域性右行走滑构造产生的地壳浅部张性断裂的负压空间。因此，“地震泵吸模式”可合理地解释胶东地区矿液上侵输运的动力学机制。同时当热液进入到容矿断裂空间内，由于迅速减压，矿液沸腾致使矿质沉淀。由此证明该区深断裂为导矿构造，其中浅部的张扭性活动叠加地段可以赋存富矿体，并主要在原经强烈挤压破碎的围岩中又受蚀变矿化叠加的热液脉状蚀变岩型金矿。

二、构造热液活动的脉动规律与差应力值测定

矿脉的宏观分布，以及矿石和矿物的结构构造包含丰富的构造和热液活动的动力学信息。根据矿石和蚀变矿物同位素年龄资料，胶东地区脉状金矿主体形成于 120～46 Ma，其间构造和热液活动呈多期脉动式发展。通过该区多处典型脉状矿床的对比观察，发现有类似的演化规律，即普遍具有前述的内生热液成矿期四阶段演化的时间结构模式。这种多期重复的构造张裂、角砾化、热液充填胶结和矿石组合的单向演变是各种热液脉状金矿床形成中具有普遍意义的规律，其实质是构造应力的多次脉动式释放与成矿热液随温度、压力下降，及与围岩反应过程中成矿物质的分异沉淀作用复合的结果。几次脉动应力释放集中地段在空间上的演变也有一定的规律性。

应用石英位错密度显微构造测量法测定河东金矿控矿断裂活动期的应力强度：在透射电子显微镜下观察并统计经减薄处理的微薄片中石英位错线条长度和结点数，应用 Wearthers 公式计算差应力 $\Delta\sigma$ 值。赵伦山等（1996）对胶东玲珑金矿的四个成矿阶段的构造差应力值测定（图 3-1），反映了胶东地区金成矿过程中构造热液脉动演化的总体特征。由图可见本区 NE—NNE 向张扭性含矿断裂活动差应力值为 120～40 MPa，从空间和时间上 $\Delta\sigma$ 值波动极大；从第 Ⅰ—Ⅳ 阶段 $\Delta\sigma$ 平均值和波动幅度总体上呈减弱的趋势，曲线反映了成矿构造应力释放强度减弱的总体趋势。这在控矿作用上具有重要意义，即在成矿晚期构造活动变弱，类似于地震活动的余震，只在前期已形成矿脉且相对脆弱地段发育，是形成有裂隙金叠加的富矿石的有利构造条件。

三、断裂张扭活动的动力学状态

现代构造地质学确认，断裂构造活动过程可区分为活跃期和亚稳期两个阶段，相当于灾变和渐变两种活动状态。根据含金矿脉的产状、形态和矿石结构构造特征，可将胶东地区脉状金矿的含矿张扭性断裂活动划分为以下两种动力学状态：

（1）脆性破裂阶段，即断裂活跃期。由于构造应力的强烈释放，使原为完整的岩石或原为压性的结构面，突发性破裂张开，差应力值达 70～120 MPa。本阶段构造变形表现为岩石的碎裂和形成断层角砾。热液活动的特点是：由于浅中部张剪裂隙迅速形成扩容空间，

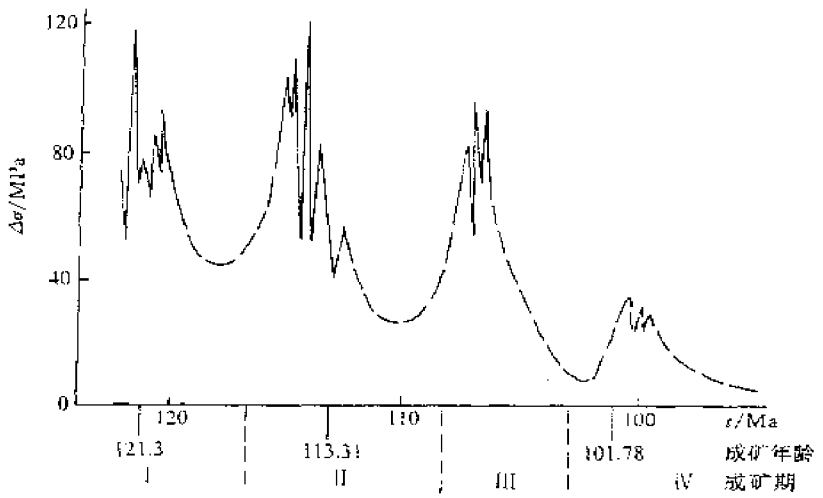


图 3-1　玲珑金矿石英位错密度法测定构造差应力曲线

（据赵伦山，1996）

（图中圆点为平均值）

造成瞬时负压。“泵吸”深部成矿溶液上侵，充填沉淀并胶结断层角砾，形成细粒乳白色石英及块状矿石等高过饱和度快速结晶的结构构造。

（2）脆性扩容阶段，为构造亚稳期。破裂后的裂隙由于应力持续释放，使它持续缓慢地扩容。由于应力强度的不均匀性，造成局部膨大的透镜状裂隙或矿脉。脆性扩容阶段对热液活动的作用是继续吸引矿液上侵，矿质在裂隙中缓慢结晶，形成粗颗粒具较完好晶形的矿石，如梳状石英、斑杂状矿石等。热液矿脉中广泛发育的晶洞构造证明裂隙的张开速率大于矿液补给充填速率。

四、断裂构造动力学条件对矿体定位的控制

构造动力学与成矿地球化学的研究相结合有助于深入认识矿体定位的条件。构造动力学环境对矿体定位的制约关系可从其对热液成矿反应体系的作用进行分析。

根据胶东地区脉状金矿床中矿石、脉石、蚀变矿物组合以及流体包裹体成分分析，可以建立该区金矿成矿作用的主要化学反应，并构成一个能代表该区成矿组分和热力学性质特征的反应体系。其具体可包含下列三种类型的反应：

1. 成矿反应

$$SiO_2 \cdot 2H_2O = SiO_2 + 2H_2O \tag{1}$$

$$[Me(HS)_3]^- = MeS + 2HS^- + H^+ \tag{2}$$

$$[Au(HS)_3]^- + Fe^{2+} = Au + FeS_2^- + 2H^+ \tag{3}$$

$$[Au(HS)_2]^- + \frac{1}{2}H_2O = Au + \frac{1}{4}O_2 + 2HS^- + H^+ \tag{4}$$

2. 控制反应

$$H_2O\ (l) = H_2O\ (g) \tag{5}$$

$$CO_2\ (s) = CO_2\ (g) \quad (6)$$

$$H_2S\ (s) = H_2S\ (g) \quad (7)$$

3. 缓冲控制反应

$$Pl + K^+ + H^+ = Ser + SiO_2 + Ca^{2+} + Na^+ \quad (8)$$

$$Kf + H^+ = Ser + 2SiO_2 + K^+ \quad (9)$$

$$Bi + Fe^{2+} + H^+ = Chl + SiO_2 + K^+ + H_2O \quad (10)$$

$$Ser + H^+ = CaO + K^+ \quad (11)$$

式中：Me＝Fe、Pb、Zn、Cu 等；Pl＝斜长石；Kf＝钾长石；Ser＝绢云母；Bi＝黑云母；Chl＝绿泥石；CaO＝高岭石；l 示液相；g 示气相；s 为溶解态。

以上三类共 11 组反应是该区金矿成矿作用中具有代表性的主导化学反应。当成矿热液处于不同的构造裂隙条件时，三类反应表现出各自反应的性质和强度，因而促成了成矿物质的迁移和沉淀。其中控制反应，即热液挥发相在体系中的状态对影响反应体系的总体性质和矿质的迁移具有非常重要的意义。

当成矿热液上侵到容矿构造空间，即浅部张扭性裂隙中时，在脆性破裂阶段由于张裂隙的扩容和负压状态，热液的温度和压力陡然下降，反应（5）～（7）强烈向右移动：H_2O 沸腾，CO_2、H_2S 气化逸出，即发生热液爆破沸腾作用。其结果导致在 t、p 降低的环境下，使热液 pH 值增高，反应（2）～（4）平衡向右移动，导致金及硫化物矿物沉淀析出，石英也因溶解度下降而沉淀晶出。为了保证成矿反应持续进行，要求不断移去由于成矿反应给体系增加的 H^+，促进热液对围岩的水解交代反应，即反应（8）～（11）有助于消耗体系中的 H^+，促进成矿反应的持续进行。围岩蚀变反应与成矿反应平行共生，既有助于成矿反应快速进行，又可制约成矿元素高度富集，亦即一种控制反应。

综上所述，热液成矿体系是一种主要由三类化学反应构成的复杂的热动力体系。体系的状态和反应进行的方向和强度受构造动力学条件控制。体系中挥发相的气-液平衡反应是连接构造环境与成矿元素富集、分散的杠杆。

第二节　矿体空间定位机理的成矿动力学分析

脉状金矿床具有开放体系成矿特征，成矿体系的开放性对矿质的活化，矿液的形成、运移和沉淀起着重要作用。

一、开放体系下成矿物质的活化

由构造活动产生的机械能转变成热能对成矿物质的活化起着极为重要作用。因为构造活动实际上是应力不断释放的过程，机械能由此转变为热能，产生剪切热及局部地热梯度异常。成矿实验表明温度是控制成矿物质活化的重要因素，温度升高往往导致金等成矿物质的活化，而过去在讨论构造控矿作用时，只是认为构造为成矿热液的运移提供了通道和富集空间，忽视了构造活动对成矿物质活化所起的驱动作用。构造活动引起成矿物质活化在深部构造层次的韧性剪切过程中表现尤为突出。据何绍勋等（1994）研究，剪切应变可产生足以使地壳岩石局部熔融的效应，甚至达到产生花岗岩浆的熔融温度，并可由此导致大量硅质析出，在广泛的水-岩交换反应过程中形成含金石英脉和蚀变岩。在研究焦家断裂

控矿作用时对成矿期断裂带的构造活动产生的能量进行计算，结果表明由构造活动产生的热能可达 5.47738×10^{17}J，可使 2.15857×10^{9} m³ 岩石升温 100℃。根据 Hegleson（1986）金溶解的热力学模型可知，体系内温度升高 100℃，将会使金的溶解度增加近两个数量级。邱玉民等（1989）在对破头青断裂构造地球化学研究中同样发现断裂活动对金等成矿物质的活化有重要作用。

二、开放体系与矿液的形成

1. 控矿断裂构造地球化学分析表明，Cu、Pb、Zn、Au、Ag 等主要成矿元素，在断裂作用下容易发生活化迁移并向断裂带中聚集。根据晶体缺陷理论及构造应力实验结果（戴塔根，1990），造岩矿物内部和岩石孔隙中的成矿元素在构造应力、特别是剪应力作用下可以发生迁移与分异。Boyle（1979）研究指出，断裂作用中成矿流体组分（SiO_2、CO_2、H_2O、S、Cu、Pb、Zn、Au、Ag 等）呈离子、分子、原子等状态沿着固体介质（矿物晶格）或流体介质从围岩向断裂带的扩张空间迁移，当矿物晶格受到剪切时，迁移速度可大大提高。

2. 水是岩石中最活跃的组分，在挤压中最易从岩石和矿物中排出向低压带迁移并经构造增温变成热液。断裂（特别是深大断裂）形成的开放环境导致了大气降水深循环加热（岩浆活动提供了大量的热源），并且挤压与增温可使硫化物、卤化物分别析出 H_2S、HCl，形成热卤水，不断淬取围岩中的成矿元素，形成卤素和氧硫配合物。

3. 在断裂作用形成的开放环境中，硅是最活跃的造岩组分之一，压应力作用能提高硅的扩散速度，在动力作用下，硅可溶于热水溶液中，SiO_2 的溶解度随温度增高而增高，随压力增高而迅速增大，而溶有 SiO_2 的热液更有利于成矿元素的溶解。

4. 据最近实验研究（樊文苓，1994），元素 Fe 在 Au 的溶解、迁移、沉淀过程中起了重要的作用。而 Fe 在构造作用下容易活化且以 $FeCl^{+}$、$FeCl_2^{0}$、$FeCl_3^{-}$ 等形式溶于热液中。Au 的溶解度与溶液中 $FeCl_3$ 的含量成正比。实验表明，KCl 溶液中，$FeCl_3$ 的存在可使 Au 的溶解量提高几百倍。

$$Au+3Fe^{3+}+4Cl^{-}\longrightarrow AuCl_4^{-}+3Fe^{2+}$$

反应达平衡时溶液中金氯配合物的浓度为：

$$\lg\left[AuCl_4^{-}\right]=\lg K+4\lg\left[Cl^{-}\right]+3\lg\frac{\left[Fe^{3+}\right]}{\left[Fe^{2+}\right]}$$

由上式看出，增大 Fe^{3+} 浓度，可提高 Au 的溶解量，而 Fe^{2+} 增大，可促使 Au 沉淀，这也可解释 Au 矿床中为什么常伴有黄铁矿化。

综合上述，成矿期的强烈构造活动所形成的开放体系，一方面导致了岩浆的侵入，并分异出部分岩浆热液及矿质；另一方面导致大气降水深循环加热，并活化、溶解围岩（矿源层）中的成矿元素 Au、Ag、Cu、Pb、Zn 等，与岩浆期后热液一起形成混合源热卤水含矿流体。

三、成矿热液的运移

根据破裂介质渗流理论，从有限域矿质守恒定律出发，可推导出简化的矿液运移方程：

$$\operatorname{div}\left(K\cdot\nabla H\right)=a\frac{\partial}{\partial t}\left(H\right)\qquad(1)$$

式中：K 为介质流通系数；a 为介质压缩系数。H 和 a 与应力场特征有关，K 是岩石变形强度的函数，在动态应力场中，K 值由下式给出：

$$K=K_0\ [a\cdot\exp\ (\sigma-\sigma_0)] \tag{2}$$

K_0 可由样品直接测出，$\sigma-\sigma_0$ 为应力差。

对于裂隙性（断裂）介质边界有：

$$v_i=-K/\mu\cdot\frac{\partial p}{\partial i}=-\frac{K_0 a}{\mu}\exp\ (\sigma-\sigma_0)\ \cdot\frac{\partial p}{\partial i} \tag{3}$$

式中：μ 为矿液粘度；p 为矿液内压力；v 为矿液流速。

（3）式表明，在构造应力驱动下，沿开放的断裂构造带将有持续的热液流动。

控矿构造（断裂）驱动成矿流体运移主要有两种动力学模式（图 3-2）：

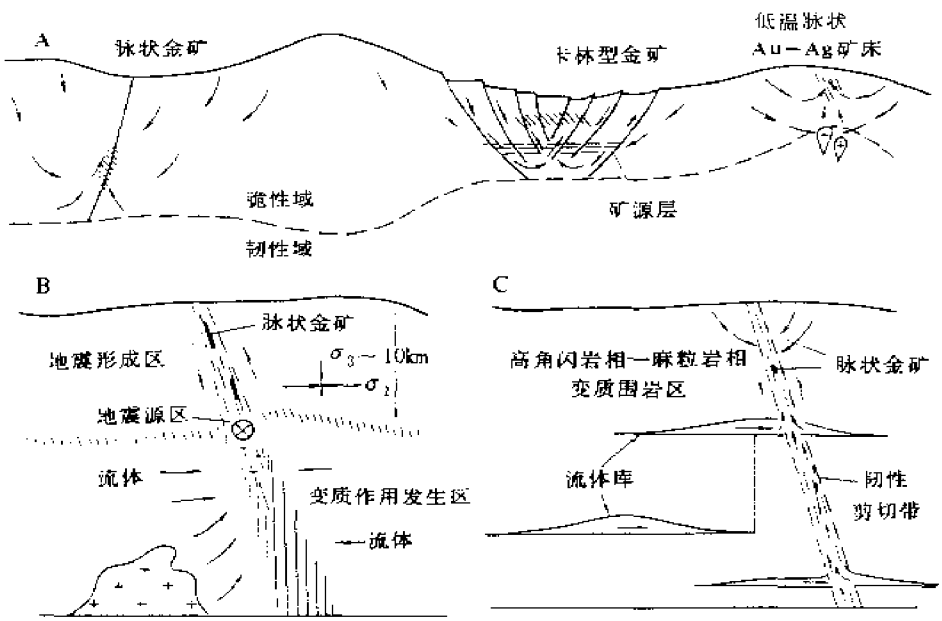


图 3-2　控矿断裂中成矿流体运移的动力学模式

（A. 据 Nesbitt，1988 资料修编；B. 引自 Sibson，1988；C. 据王安建，1996）

（1）断层阀模式

早期断裂在后期流体压力超过静水压力时活化，活化的断裂导致剪应力释放，压应力减小，高压流体急剧排入断裂带及断裂带附近的扩容空间，由于流体压力降低导致矿质沉淀成矿。

（2）地震泵模式

断裂活动时，由于体系的开放和扩容空间的产生，使断裂带内岩石孔隙升高，孔隙流体压力降低，导致断裂带下部及周围的流体在压力差驱动下进入扩容空间，扩容空间就像压力泵一样虹吸汲取成矿流体，其是成矿期含矿流体运移的主要动力学模式。

四、成矿热液的沉淀与矿体定位

引起含矿热液沉淀为矿石的主要原因，是成矿物理化学条件（如温度、压力、pH、E_h、

组分逸度和活度等）的变化，导致成矿元素的配合物分解和溶解度降低而发生沉淀反应。在开放体系中，由于与外部系统不断发生物质交换，如围岩蚀变作用就是一种明显水-岩反应的物质交换过程。其必将导致热液体系平衡条件的破坏，从而引起物理化学条件的变化和沉淀反应的发生。

含矿流体从流体源地运移到开放体系的构造扩容空间，显然有一个较大的压力降低，它可引起流体相的分离和矿液物理化学条件的改变，从而导致金属矿物的沉淀：①压力降低，溶液的氧化还原电位会发生明显变化，使高氧化态的 S^{4+}、S^{6+} 还原成 S^{2-}，从而使溶液的 S^{2-} 显著增高，导致 Cu、Pb、Zn、Fe 等元素呈硫化物沉淀。②压力降低可使溶液 pH 值升高，影响成矿溶液的 pH 值的反应主要是对 H^+ 的缔合和离解反应，压力的变化会影响成矿溶液中缔合、离解 H^+ 反应的平衡常数，也就会影响 pH 值：

$$\Delta Z_t=\Delta Z^0+\int_{p_1}^{p_2}\Delta v^0 \mathrm{d}p=\Delta Z^0+\Delta v^0\ (p_2-p_1) \tag{4}$$

式中 Δv^0 为负值，显然压力降低时 ΔZ_t 增大，pH 值也增高。热液中 Pb、Zn、Au、Ag、Cu 等元素随 pH 值增高，配合物分解，溶解度显著降低，从而引起矿质沉淀。

溶有 SiO_2 的热液有利于成矿元素的溶解，特别是 SiO_2 胶体对金属配合物有保护作用。而 SiO_2 溶解度随压力降低将显著减小。因此随着压力降低和 SiO_2 的沉淀，会导致 Cu、Pb、Zn、Au、Ag 等金属矿物的沉淀。

构造破碎或扩容空间的孔隙度明显高于其围岩，是高孔隙度扰动区，同时构造通过岩性也是有利的物理化学扰动区。上述开放体系的构造作用和岩性条件及物理化学环境变异的耦合可以引起成矿体系的不均匀性和非线性扰动，从而导致成矿流体的大量汇聚和矿体的定位。

因此，开放体系的产生是矿液的沉淀和矿体定位的先决条件。构造活动和构造地球化学作用是引起开放体系产生的主要动力，因而也就决定着矿液沉淀和矿体的定位。脉状金矿中主要表现为以下几点：

1. 流体沿断裂（或裂隙）为主要通道从高应力区流向低应力区，由于构造减压、应力释放，导致流体沸腾，包裹体分析表明主要成矿期发生了热液沸腾。沸腾使热液中的一些气体逸出而导致开放体系的产生，如：

$$HCO_3^- + H^+ \longrightarrow CO_2\uparrow + H_2O$$

$$HS^- + H^+ \longrightarrow H_2S\uparrow$$

很显然，由于气体的逸出降低了溶液 H^+ 的浓度，使热液 pH 值升高，而热液中 Pb、Zn、Cu、Au、Ag 等元素随 pH 值升高，配合物分解溶解度将显著降低，从而引起成矿元素沉淀。另外流体沸腾也使水蒸汽不断挥发发生脱水作用，引起 Cu、Pb、Zn、Au、Ag 等成矿元素沉淀成矿。

2. 断裂构造的还原作用。许多压性或压扭性断裂处于相对还原环境，有利于 C 的活动，C 的加入可使氧化态的 S^{4+}、S^{6+} 还原成 S^{2-}：

$$2C + SO_4^{2-} \longrightarrow S^{2-} + 2CO_2\uparrow$$

S^{2-} 再与金属离子化合而形成硫化物沉淀下来：

$$Me^{2+} + S^{2-} \longrightarrow MeS$$

断裂构造的还原作用还使 Fe^{3+} 还原成 Fe^{2+}，从前式中可看出溶液中 Fe^{2+} 的增加将导致

Au 的沉淀，使之金矿化中常伴有黄铁矿化。

3. 断裂带的硅化作用。Si 是亲断裂的元素之一，含矿断裂带（特别是硅化断裂带）中 SiO_2 大幅度聚集。SiO_2 的沉淀：

$$SiO_4^{2-} + 4H^+ \longrightarrow SiO_2 + 2H_2O$$

消耗溶液中的 H^+ 而使其 pH 上升，会导致金属的沉淀。如前所述，Au 在热液中的溶解量与 SiO_2 的溶解量成正比，随大量 SiO_2 沉淀，Au 也发生沉淀（或同时沉淀），这就是 Au 矿床产于石英脉和硅化带中的重要原因。因此硅化是找 Au 的构造地球化学标志之一。

结论：开放体系的产生对脉状金矿矿体形成与定位具有重要意义：①通过矿质的活化、矿液的形成和迁移，为成矿提供充足的物质来源；②是矿液沉淀和矿体形成的重要条件。控矿断裂构造活动对脉状金矿的形成起了决定性作用，构造减压区是有利的矿体定位场所。

第三节　减压扩容控矿理论及其对矿体空间定位机制的初步解释

一、矿体空间定位的主要减压扩容部位

对各类受断裂构造控制的热液脉状矿床来说，开放系统比封闭系统更有利于成矿。实践也证实，在一个矿田或矿床范围内，矿体常常赋存于构造破碎较强烈的部位。这就提示我们，成矿的最有利部位是在成矿期构造应力场中相对低压的构造启张扩容部位。笔者称之为减压扩容部位控矿。

矿体的形成必须要求含矿热液向某一局部地段发生汇聚，成矿流体汇聚成矿的有利部位是构造作用过程中产生的扩容空间。例如胶东地区成矿期构造变形以压扭性逆冲断裂作用为主，控矿构造也以断裂最为重要。压扭性断裂作用在胶东地区产生的低压扩容空间主要有四种样式（图 3-3）。

（1）断裂通过的岩性不同时，断裂面产状会产生较大变化，断裂两盘岩石沿不规则的断裂面滑动时，将在断裂拐弯部位（产状变化处）形成扩容空间。

（2）两组方向不同的断裂相交时，在交叉处形成扩容空间。

（3）X 剪节理（可发展为 X 剪断裂）的两组剪切面分别错动时，在交叉处形成扩容空间。

（4）断层逆冲过程中可造成下盘岩石以层间滑脱面为界发生差异运动而形成扩容空间，靠近断层处扩容空间最宽，远离断裂逐渐减小尖灭。

二、控矿构造减压扩容部位的形成机制

一般在压扭性断裂形成初期，都是先以张性微裂隙开始，这些裂隙大多呈雁行排列。随着构造作用的加强和岩石变形的加大，雁行张裂隙不断扩展并增值或转向，最后贯通形成主断裂，雁行张裂隙之间的“墙壁”在变形过程中被旋转进而剪断。断裂的宽度决定于单个张裂隙的长度及其与主断面的夹角，夹角越大，断裂带宽度越大，断裂带中雁行裂隙之间“墙壁”在断层活动中被碾碎，组成构造破碎带（减压扩容部位）。断裂活动初期，断裂带内物质粗糙，断裂两壁不平直，断裂活动的阻力较大，如果这时断裂停止活动，并且以

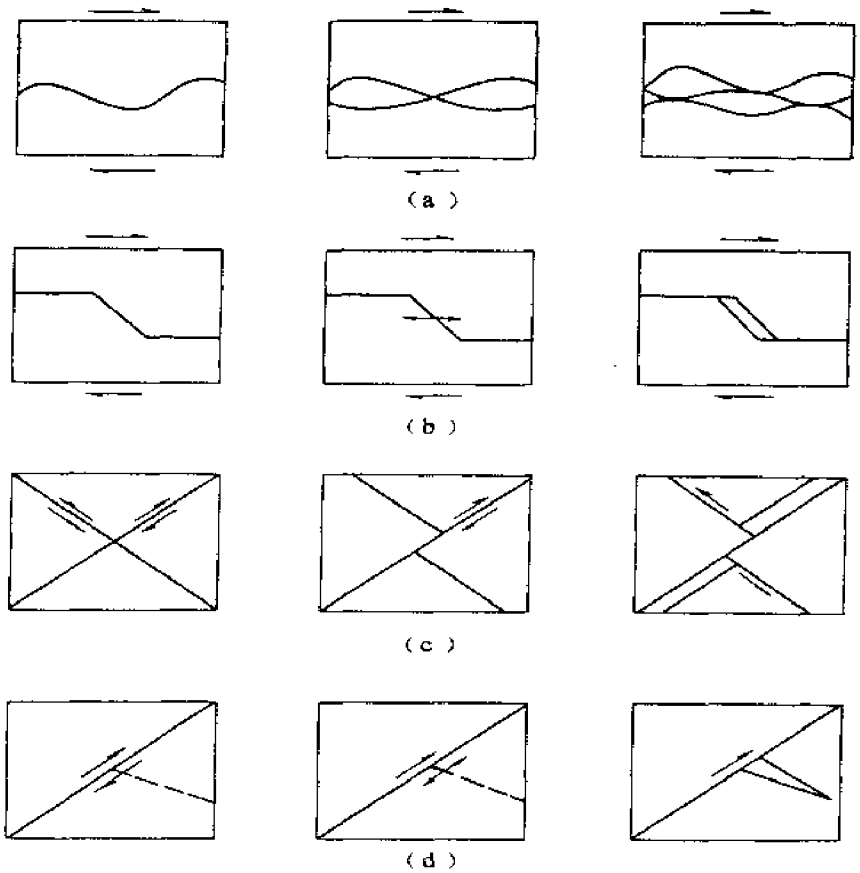


图 3-3　胶东地区控矿断裂作用形成扩容空间的模式

后也无大的活动，我们在断裂中减压扩容部位所看到的构造岩就大多是角砾岩。如果断裂继续活动，则断裂带内物质粒度就逐渐变细，这时在减压扩容部位见到的就有碎裂岩、糜棱岩、断层泥甚至千糜岩等粒度较细的构造岩。

一般来说，控矿断裂活动中，断裂上、下盘相对凸出部位相接触易形成局部启张空间（减压扩容带）；上、下盘相对一凹一凸相接触则易产生挤压破碎带。但是随着断层继续活动，挤压破碎带和减压扩容带都可在原来基础上继续扩展规模。在此情况下，局部启张空间相对于挤压破碎带而言，是相对开放的低压环境，因而常常成为有利容矿部位（图 3-4）。

控矿构造减压扩容控矿理论强调有关构造动力作用激发元素活化、驱动矿液运移和影响矿质沉淀和聚集，强调成矿热液的迁移和汇聚受构造应力场的控制。在此理论基础上，尝试应用构造应力场数值模拟、光弹模拟等方法探讨控矿构造的低应力域，可以有效预测成矿的有利部位。

三、流动——反应的非线性反馈与聚流定位作用

工业矿体的形成要求成矿流体（成矿物质）向某一有利的局部地段发生汇聚和沉淀作用。这种成矿流体向某一局部地段汇聚成矿的控制机理，近年来已成为矿床学和矿床地球化学研究的前沿与热点问题。笔者认为，成矿作用由物理化学转变（包括化学转变——化学反应和物理转变——相转变）、输运（包括质量迁移、能量输运和动量传递等）、流变和

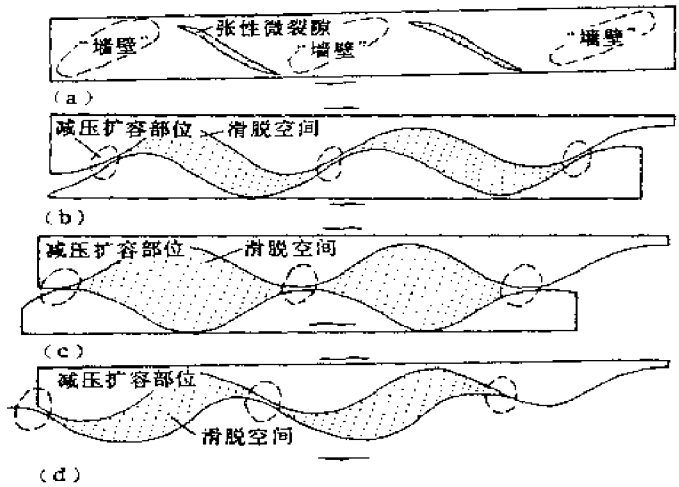


图 3-4　控矿断层中减压扩容部位的形成机制

a—断裂形成开始，出现雁行状张性微裂隙和"墙壁"；b—断裂发展过程中，形成反 S 形滑脱空间和减压扩容带；c—断裂发展过程中，形成串珠状滑脱空间和启张扩容部位；d—断裂发展过程中，形成 S 形启张空间和减压扩容部位

断裂破碎等多种类型、多种性质的动力学过程所组成，并普遍具有非线性动力学机制。热液脉状金矿床中矿体的形成是由于含矿流体在破裂空间中流动与矿质溶解-沉淀反应的耦合，而工业矿体的空间定位则是由成矿作用过程中成矿动力学系统失稳及非线性反馈产生的聚流作用而造成。即当成矿流体在构造空间中流动时，将会随着其物理化学条件和矿质地球化学习性的差异发生多种矿质的"卸载"和沉淀反应，从而形成一个运动的反应前锋，并由于反应-输运的自反馈，促进成矿物质向某一有利的局部地段（多为减压扩容部位）发生汇聚性集中"卸载"和沉淀富集，笔者称这一成矿动力过程为"聚流定位作用"。

四、矿体空间定位机理的耗散结构分析

脉状金矿成矿系统作为一个开放的成矿构造物理化学体系，在未受到来自环境的扰动之前处于初始非平衡定态。当成矿体系与成矿环境之间产生能量与物质交换时，则成矿体系内部发生各种非线性的不可逆过程和随机涨落。此时，成矿体系的成矿动力学行为受"控制参量"的控制。当控制参量达到临界值时，成矿体系被推移至远离平衡态，涨落增大，驱动状态参量的平均值使子系统发生协调一致的运动，成矿体系由于能量耗散而发生自组织并形成新的有序结构——耗散结构。因此，在开放体系内所形成的，具有一定成分和结构的任何成矿作用过程的最终产物都体现着某种特定的耗散结构。图 3-5 概要表示了热液脉状金矿床中成矿作用耗散结构的形成过程。

对成矿作用进行非线性成矿动力学分析的中心问题是着重研究各种成矿地球化学体系的稳定性及其对于体系内、外各种扰动的动力学响应。成矿地球化学体系一般均属于开放的物理化学体系，体系与其环境之间经常发生物质和能量交换。成矿作用发生于有界介质，由于介质施加于体系的边界条件或约束，往往使体系不能达到平衡状态。但未受约束组分

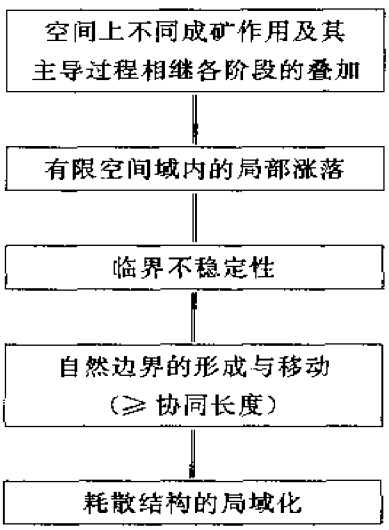


图 3-5　热液脉状金矿床成矿作用耗散结构的形成过程

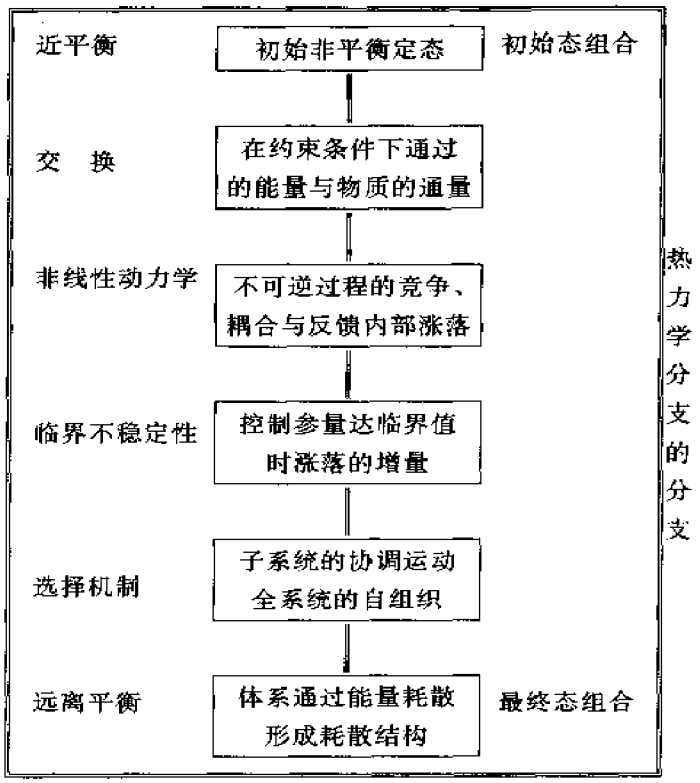


图 3-6　热液脉状金矿矿体定位的耗散结构机理

的通量可趋于零，而能量耗散速率与熵产生速率达到极小（但不为零），此时体系的状态变量将不随时间变化，体系处于一种“非平衡定态”。根据耗散结构理论，矿体的空间定位实质上就是非平衡定态失稳并转变为新的有序结构（耗散结构）——成矿状态的条件与机制问题。因而可以将成矿状态（耗散结构）的形成在数学上归结为成矿作用动力学方程的稳定性和分支求解问题。但这种分支理论还只能对成矿状态的产生作唯象的、宏观的解释，指出矿体空间定位的临界条件。要从根本上阐明矿体定位的机理，就需要将着眼点放在成矿状态的转变上，因为在非平衡定态失稳的转变点上，成矿系统将遵循随机动力学定律，因此，必须进一步应用“涨落理论”对成矿状态的转变做微观上的解释，以深化对矿体定位机理的认识。

图 3-6 概略地表示了应用耗散结构理论对脉状金矿矿体定位机理的初步分析，其基本认识是：空间上成矿作用与其主导过程的相继各阶段的叠加，引起成矿体系有限空间域内的局部涨落。当控制参量达到临界值时，涨落增强，定态失稳，长程时-空相关与协同长度的出现导致耗散结构的局域化和矿质局部富集及矿体的空间定位。

第四节　小　　结

1. 成矿动力学分析是深入认识矿体空间定位机理的有效途径。本章从成矿物质迁移和能量传递的动态过程上研究矿体的定位机理，综合分析热液成矿作用中构造动力学条件对

矿质输运和成矿反应体系的控制机制，以阐明矿体定位的动力学机制。并强调从典型矿床矿化产物的实际观测中提取成矿动力学信息，开拓出根据矿区实际观测，研究矿体空间定位的成矿动力学新途径。

2. 根据典型矿物组合、水-岩反应和流体包裹体成分，建立了热液脉状金矿床的成矿反应体系。提出热液脉状金矿成矿作用作为一种物质能量开放的，受构造活动强烈扰动的多级分水-岩反应体系由控制反应、成矿反应和缓冲控制反应三类构成。其中由体系中 H_2O、CO_2 和 H_2S 等挥发相的状态变化构成的控制反应，其方向和强度敏感地受制于成矿构造动力学条件，同时又在总体上影响反应的状态和性质，并制约着成矿元素的迁移、沉淀、富集和定位，具有重要的成矿、控矿意义。

3. 从成矿动力学角度，成矿流体上侵、输运、沉淀的驱动和定位机制可归纳为：岩浆期后气液的热-构造驱动机制、下渗流体的对流循环驱动机制和构造扩容滞流的“泵吸”定位机制。而成矿流体的输运过程亦可相应划分为以下动力学阶段：①在导矿构造裂隙中的“泵吸”上侵运移，形成矿脉；②在迁移过程中通过多孔介质的渗滤、扩散和水-岩交换反应，形成原生晕异常和近矿围岩蚀变；③容矿断裂中的减压扩容和爆破沸腾、脉动充填和局部沉淀富集。

4. 控矿构造的每期脉动均存在两种动力学状态或阶段：即脆性破裂和韧脆性扩张。其对成矿反应体系有截然不同的制约作用，在容矿断裂的脆性破碎阶段，由于减压扩容和泵吸驱动，热液快速上侵，并发生沸腾作用，体系处于强烈非平衡态，矿质迅速沉淀，形成沸腾包裹体群和块状矿石；在韧脆性扩张阶段，矿质在接近平衡态体系中缓慢反应和沉淀，形成粗晶结构矿石。在这两种动力学状态下，成矿体系以不同机理控制矿质的富集和矿体的定位。因此，可以认为成矿反应体系的热力学演化与有利的构造动力学状态的耦合，是控制矿体空间定位的主要机理，这种热力学条件与动力学状态耦合控矿机制，对我们认识热液脉状矿床中矿体的空间定位机理具有普遍性意义。

第四章　控矿断裂的几何学和运动学分析

控矿断裂的几何学和运动学研究，一直是成矿构造学研究的重点，近年来取得了大量的专题研究成果。但关于利用控矿断裂的几何学、运动学分析和构造几何方法来厘定和表征矿化局部富集机理及矿体空间定位规律的研究，虽有所涉及但尚不够深入。因此，成为亟待进一步深入探讨的问题之一。针对这一问题，本章运用现代构造观和解析方法论，以控矿断裂几何学和运动学分析为途径，结合金牛山、茅坪、河东等典型脉状金矿的实例剖析，从平面、剖面和三维空间解析控矿断裂的几何结构和运动学特征及其对矿化局部富集规律的控制作用，以期能为矿体空间定位规律的厘定与表征探索出一种有效途径和方法。

第一节　控矿断裂的几何学分析

控矿断裂几何学分析的内容包括：①构造形体的解析；②构造位体的解析；③构造样式的解析；④构造变形结构的解析。其基本方法是以矿区地表和坑道的地质观测及填图为途径，查明控矿构造的几何形态及结构特征，探索控矿构造内部结构要素及几何规律，建立控矿构造的几何结构样式，揭示控矿构造产状特征与矿体空间展布之间的内在成生联系和对应耦合关系，从而成为厘定和表征矿体空间定位规律的有效途径和方法。应该强调的是，控矿构造几何学分析中，形、位、样的全面几何解析是三个相互关联，不可或缺的有机整体。如果说控矿构造形体和位态的解析目的在于研究控矿构造的空间形态、分布范围、排列方式、发育状况与矿体空间关系，则控矿构造样式和变形强度的解析就主要是加深对控矿构造几何性质、变形机制与矿体产出样式、定位机制之间内在关系的认识，并为进行控矿构造的运动学和动力学分析奠定基础。因为经验证明，控矿构造的几何学特征及内部构造要素的几何结构样式，是其物质运动方式的综合反映。因此，运动学、动力学分析的正确程度，取决于几何学分析提供的资料的精确程度和完整程度。

一、平面结构分析

控矿断裂在平面上的几何轮廓主要是由一条主断面或多条主断面的弧形弯曲及其派生的分支断裂所组成。其运动学特征投影到平面上则只有左旋和右旋扭动之分（包括扭性、压扭性和张扭性断层）。因此，本书以几何学上的单断面和双断面结构为主体分别论述。

1. 单断面结构

控矿断层的单个主断面几何结构是脉状金矿中最常见、最简单的平面几何形式之一，以其沿走向的波曲状变化和折线状弯曲延伸为主要特征。

（1）几何学分类

根据单断面几何结构的规律性变化特征，可将其分为三种类型：即A型结构；B型结构；C型结构（图4-1）。

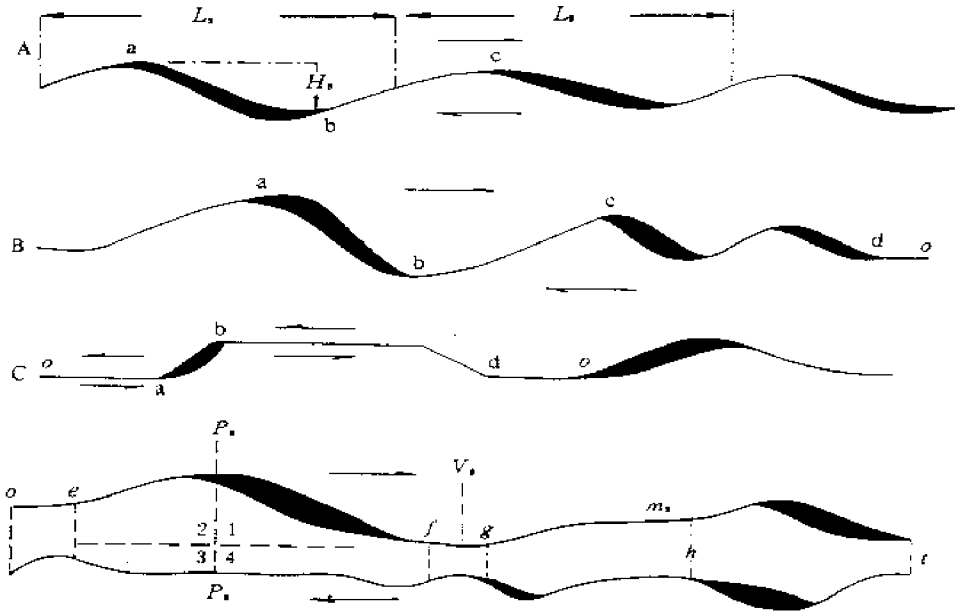


图 4-1　控矿断层平面几何结构图解

A、B、C、D 分别是 A 型、B 型、C 型和 D 型几何结构图解（说明见正文）

L_s—走向波长；H_s—走向波幅；ab 段—有利于成矿的敛散型扭断层；bc 段—敛集型扭断层；do 段—平行型扭断层；P_s—走向波峰；V_s—走向波谷；m_s—平均走向段

（2）运动学分类

控矿断层根据其相对运动方式可分为三类：即平行型、聚敛型和离散型扭断层(Lowell，1985)。平行型扭断层是指断层一盘相对于另一盘作平行扭动（图 4-1C 中 oa 段）；聚敛型扭断层是指断层在扭动过程中还受到挤压分量的作用（图 4-1A 中的 bc 段）；离散型扭断层是指断层扭动过程中还受拉张应力分量的作用（图 4-1 中的 ab 段），这种扭断层最有利于矿体局部富集。

（3）矿化富集规律

从几何结构特征分析，平面上控矿断层沿走向发生弯曲的部位有利于矿化富集。结合运动学分析，则是弧形弯曲的一翼，即离散型扭断层（局部引张部位）有利于矿化富集，而聚敛型扭断层（局部挤压部位），则不利于富集成矿（图 4-1）。根据 A 型结构的似等距性和 B 型结构波长、波幅的趋势性变化规律，可以预测沿走向未知矿体的位置和规模。

2. 双断面结构

脉状金矿控矿断裂的平面复断面结构以近似平行的两条主断面最为常见，它可以是上述三种单断面之间任两者的组合。这种双断面结构是由于断层带多个扩展变形中心，或是主断面形成后其从属 P、R 断裂联合扩展变形的结果（图 4-2）。如图 4-2A 所示，在主断面 M 形成后，其 P、R、T 断裂的联合扩展交切形成一个新的波状断面，与扩展变形的主断面一起组合成双断面结构（图 4-1D）。这种情况下，单断面的局部几何形态变化是次要的，而其组合形式则是主要的，因此本书将其基本形式概括为 D 型结构（图 4-1D）。其重要特征

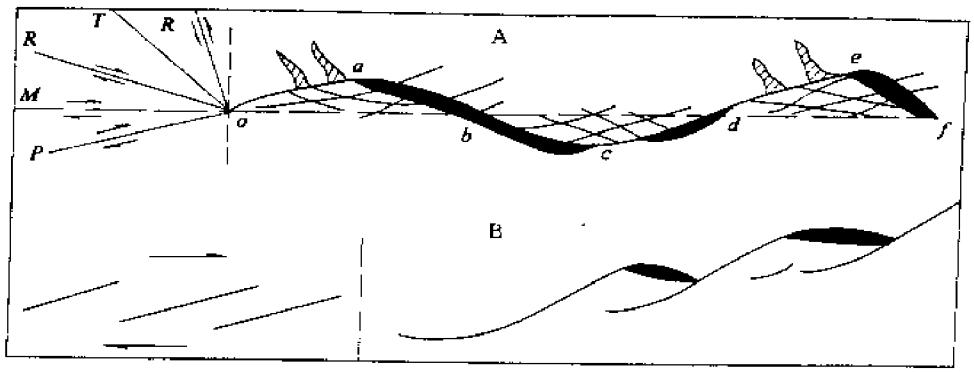


图 4-2　波状断层形成过程图解

A—由 P、R、T 断裂的联合扩展交切形成的波状断层；B—由岩桥断层扩展联合形成的波状断层

是两个主断面都可能发生弯曲，但并不一定同步。如果将断裂带变宽的弧顶称为走向上的波峰（用 P_s 表示），而把断裂带变窄的弧顶称为波谷（用 V_s 表示），则在两断面分别向外扩展的波峰处，最有利于富集成矿（图 4-1D，hi 段）；而在单断面的弧形扩展波峰处也有利于成矿富集（图 4-1D，ef 段），用波峰脊线和断裂带平均宽度等分线（图 4-1D、P_s P'_s 和其互垂线），将此扩展域分成四个象限，则在第Ⅰ象限最有利于矿化富集，Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ象限依序次之。在双断面扩展的双波谷地段（图 4-1D、fg 段），则最不利于矿化富集，即使控矿断裂带内矿化均匀分布，在此位置往往也无明显矿化富集现象；而在单断面波谷处（图 4-1D，oe 段），也不利于矿化富集，这种变形结构控制的矿化富集规律在茅坪金矿区十分明显。在胶东、小秦岭等脉状金矿集中区内亦极为常见。

二、剖面结构分析

将控矿断裂剖面形态变化和运动学特征分析与矿体定位规律研究相结合，进行深部隐伏矿体定位预测，仍是目前控矿构造研究与应用的难题之一，需要不断深入探讨。本书根据脉状金矿控矿断裂剖面几何结构和运动学特征的组合控矿规律分析，将其剖面控矿结构概括为三类 8 种样式的组合（图 4-3）。

Ⅰ类：逆断层类，是指剖面上断层上盘位移分量相对向上的各种控矿断层。在控矿断面产状由陡变缓的缓倾角处形成局部引张空间，易于富集成矿。根据双断面结构的产状组合，又可分为三种样式：

Ⅰ$_a$ 型：只有上断面发生波状变化，在其缓倾角处易于富集成矿（图 4-3Ⅰ$_a$），下断面无波状变化；

Ⅰ$_b$ 型：在下断面产状变缓处，局部富集成矿（图 4-3Ⅰ$_b$），上断面无波状变化；

Ⅰ$_c$ 型：上、下断面都发生波状变化，其缓倾角地段有利于富集成矿（图 4-3Ⅰ$_c$）。

Ⅱ类：正断层类，是指剖面上断层上盘位移分量相对向下的各种控矿断层。在控矿断面由缓变陡的陡倾角部位形成局部扩张空间，易于富集成矿。同逆断层一样，依其双断面结构的产状组合也可分为Ⅱ$_a$、Ⅱ$_b$、Ⅱ$_c$ 三种样式（图 4-3Ⅱ$_a$、Ⅱ$_b$、Ⅱ$_c$）。

Ⅲ类：复合断层类，主要指控矿断面局部出现反倾向的变化，形成正、逆复合断层。根

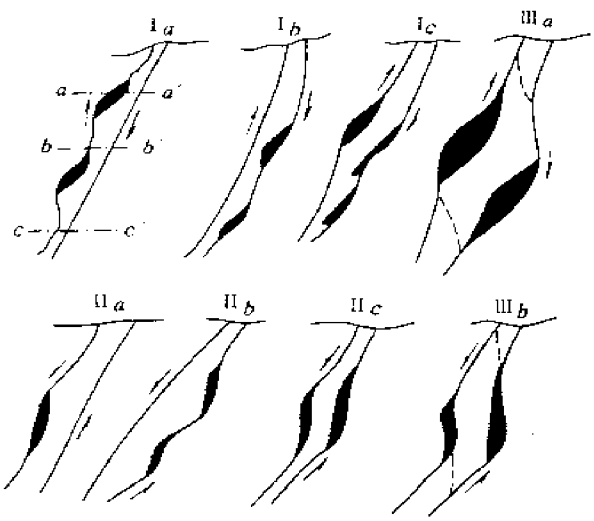


图 4-3　控矿断层剖面几何结构类型

据运动学特征又可分为两种样式：

Ⅲ$_a$型：主体表现为逆断层，局部呈正断层，在其产状由陡变缓的部位形成局部引张空间，易于局部富集成矿（图 4-3Ⅲ$_a$）；

Ⅲ$_b$型：主体表现为正断层，局部呈逆断层，在其产状发生反向陡倾的部位有利于富集成矿（图 4-3Ⅲ$_b$）。

这 8 种样式的控矿断层剖面结构是脉状金矿中最常见的剖面控矿形式。

探讨波状断面控矿规律至关重要的另一个问题是其剖面上波长的确定。对于层状岩石则可根据其不同岩性层的厚度确定断面发生折射的波长；对于均质性岩石则需要进行统计分析和自相似性分析来确定其波长：即对不同高程控矿断层剖面的几何形态进行仔细观测、统计，寻找其趋势性变化规律和自相似结构规律。如图 4-3Ⅰ$_a$所示，在其 a—a'露头剖面上，分布有微波曲到主波曲的渐变关系，而在 b—b'平硐剖面只见到其微波曲段，根据两剖面上微波曲的结构相似性，则可预测 b—b'剖面下部很快会出现主波曲。一旦这种预测得到证实，则在 c—c'剖面的微波曲段下部也有主波曲出现。然后可根据这个剖面的预测结果和统计波长，预测另一剖面的深部含矿性。这种集统计分析、趋势性分析和自相似性分析为一体的累集式几何解析方法，是厘定和表征矿体定位机理、定位规律和进行深部隐伏矿体定位预测的有效途径之一。

三、空间结构分析

矿体是三维实体，要讨论其形态和富集规律必然涉及到平、剖面的组合分析。为了叙述方便，本书将控矿断层在走向上的波峰（断层变宽处）、波谷（断层变窄处）及其未变化的总体走向分别用 P_s、V_s 和 m_s 表示（图 4-1D），相应在倾向上的波峰、波谷及其平均倾向段分别用 P_d、V_d、m_d 表示，则在空间上它们之间存在下列四种主要组合样式（图 4-4）：

（1）走向波峰 P_s＋倾向波峰 P_d，形成空间上最有利的矿化富集部位（图 4-4a）。P_s 和 P_d 既可以是横跨叠加，也可以是斜跨叠加，前者控制断层面上的陡倾矿体；后者则控制侧伏矿体，且比前者更普遍。

（2）P_s＋m_d 或 P_d＋m_s，形成空间上相对有利的矿化富集部位（图 4-4b）。

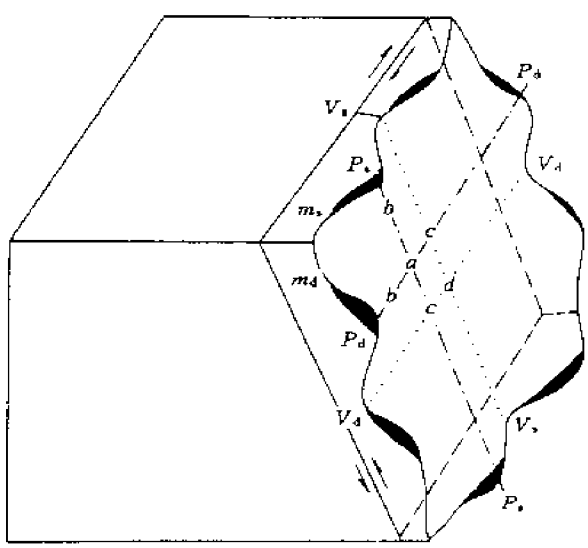


图 4-4　控矿断层波状结构控矿规律图解示意

(3) P_s+V_d 或 P_d+V_s，即走向波峰与倾向波谷叠加或倾向波峰与走向波谷叠加，形成空间上相对较差的矿化富集地段（图 4-4c），多控制不连续零星小矿体。

(4) V_s+V_d，即走向波谷叠加倾向波谷，这是空间上最不利矿化富集的地段（图 4-4d）。即使在整个控矿断裂带普遍矿化的情况下，此地段也不会出现矿化富集，而常常是形成一些挤压片理。

笔者认为，热液脉状金矿中矿体的空间定位规律虽然十分复杂，但从控矿构造几何学和运动学上分析，基本上服从上述规律（图 4-4）。要正确认识控制断裂的这种控矿规律，首先要准确理解、提炼、测量控矿断裂在平、剖面上的几何学要素和运动学要素。其次是要对这些要素进行不同尺度的统计分析，探讨自相似性和趋势性变化规律。最后依据控矿构造的空间几何结构分析便可进行矿体空间定位机理和定位规律的厘定与表征。

第二节　控矿断裂的运动学分析

如上所述，脉内矿体的空间分布受控矿断面复杂的几何要素和变形结构所控制，而控矿断面波状构造成因及矿体空间就位机制与控矿断裂活动演化及成矿演化规律亦密切相关。

例如，根据金牛山金矿地表地质调查和坑道构造地球化学填图初步查明，矿区内主要控矿断裂在成矿前已经形成，并伴随成矿过程而长期发育，在成矿后又有活动，虽然控矿断裂多期活动以继承性为主，但又具有一定的差异性。具体表现为由于不同期次的构造活动性质不同，因而不同期次的构造形变特征亦有所差异，后期构造活动的踪迹不完全重合着先成构造的踪迹。矿区内成矿前构造活动为压扭性质，表现为控矿断裂具有较普遍而又较复杂的舒缓波状特征和比较明显的压扭性结构面，断层泥普遍发育，在断裂构造的部分地段还保留有被热液蚀变重新固结的成矿前断层泥和清晰的断层面。成矿期断裂活动总体上表现为叠加剪切、局部引张性质，矿液沿局部引张空间充填，在石英脉壁常发育有大量同期生长擦痕，成矿后断裂活动又转化为压扭性质，造成部分矿体和成矿期岩脉的挤压破碎、以及许多新鲜的断层泥、擦痕和压扭性结构面。根据各种构造形迹所反映的力学性质以及断裂与矿化、蚀变、脉岩的时空关系，可将金牛山金矿区的断裂活动分为三期 7 个阶段，但对矿体空间定位具控制作用的仅为成矿前和成矿期构造。

一、成矿前断裂活动对矿体空间定位的控制

据现今存留的成矿前构造形迹分析，矿区内成矿前的断裂活动可细分为两次。第一次主压应力 σ_1 方向为 110°～290°左右，在此构造应力场作用下，产生了 NE—NNE 向压扭性断裂，断裂活动近于逆冲性质；第二次主压应力 σ_1 方向为 100°～280°左右，矿区内 NE—NNE 向断裂产生右行斜冲活动，此外，还产生一些 NE—NNE 向压扭性分支断裂。成矿前的这两次压扭性活动，使主要控矿断裂在平、剖面上产生了普遍的舒缓波状特征。

为了分析控矿断层面上这种复杂的波状起伏的成因，可以用一矢量 OM 来表示主压应力 σ_1，O 为三维坐标系的原点，M 为 σ_1 作用于断层面上的一点（图 4-5），则有：

$$r=OM=(X、Y、Z)=X_i+Y_j+Z_k$$

式中，i、j、k 分别为 X 轴、Y 轴、Z 轴的正向单位矢量。

当 σ_1 方向与控矿断层面走向近于垂直，且与倾向成钝角相交时，Y 轴上的基本矢量 $j=0$，此时断层遭受挤压，断裂活动大致呈逆冲运动，在挤压作用下所形成的控矿断层面波状构造垂直于运动方向 α，大致呈水平展布；当 σ_1 方向与断层产状斜交，且交角大于临界剪切角 α_2 时，此时断层同时受到挤压和剪切，即垂直于断裂面的分力 X_i 使断层面遭到挤压，在断裂面内的合力 b 使断层产生剪切滑动，所形成的断层面波状构造与 b 垂直，区内控矿断裂构造的性质和状态与此类似。

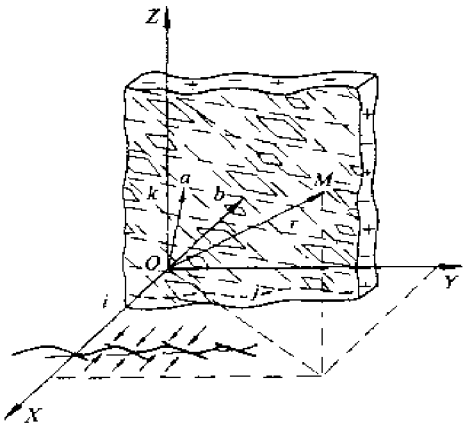


图 4-5　控矿断面叠加波状起伏构造成因分析示意图

图中“+”号代表波谷，“—”号代表波峰

这样的两次压扭性活动所形成的两种波状构造在断层面上产生了叠加，其中，波峰加波峰形成叠加波峰，波谷加波谷形成叠加波谷，波峰加波谷使断层面凸起和凹陷相互抵消，变得平直或只残留小的波状起伏。这种叠加形式类似于兰姆赛（1990）所提出的叠加褶皱的第一类型。当然，断层面的舒缓波状起伏远不及褶皱的起伏那样大，但性质是类似的，且对于脉状矿床而言，控矿断层面的微小起伏都足以造成有利于矿液充填的局部引张空间。

从以上分析可见，成矿前断裂活动对矿体空间定位的控制主要在于：①由于主要控矿断裂在成矿前为压扭性质，不利于岩脉和矿脉充填，只有在成矿期断裂活动性质发生改变，特别是在部分地段发生张性或张扭性改变，才能形成岩脉和矿脉充填的有利构造条件；②由于成矿前压扭性两次活动的主压应力 σ_1 方向略有不同，控矿断裂分别产生逆冲及斜冲运动，相应在断层面上形成两种波状构造形迹，并且彼此叠加。这种断层面波状构造的叠加形式，对本区石英脉型金矿的矿体空间定位形式起着重要的奠基作用。

二、成矿期断裂活动对矿体空间定位的控制

矿区内主要控矿断裂在成矿期的活动以叠加剪切、局部引张为特征。同时，由于控矿断裂的阶段性发育和含矿热液的间歇性上升，因而造成多阶段以叠加充填方式为主的矿化特点。根据坑道构造-矿物学填图所划分的内生热液期四个矿化阶段均受成矿期控矿断裂的继承性脉动所控制。

根据各种构造形迹（岩脉、矿脉锯齿边，扭曲边，共轭剪裂，同期生长擦痕等）进行应力分析结果表明，成矿期构造应力场主压应力方向 σ_1 总体上为 NE—SW 方向，但略有摆动。其中，第Ⅰ次活动以平移右行剪切为主，略显斜冲，第Ⅱ次活动以左旋剪切为主，上盘斜落，第Ⅲ次活动近于正断，第Ⅳ次活动以左旋剪切为主，故相应第Ⅰ阶段石英脉常呈右行雁列状展布，第Ⅱ阶段黄铁矿脉则呈左行雁列状或侧羽状分布。

在野外观察的基础上，对多阶段叠加矿化所形成的金品位混合总体进行逐步筛分分析结果表明，矿化的发育广度（即相对比例）随阶段演化而减弱，而含金品位则逐渐升高，其原因与成矿溶液中硅金分离顺序有关，硅化偏于较早阶段析出，而金则富集在剩余的成矿溶液中。然而，计算结果表明，使有用组分相对集中成矿的矿化强度一般都以第Ⅱ阶段为

最大，第Ⅲ、Ⅰ、Ⅳ阶段顺序次之，即灰白色石英-黄铁矿阶段为主成矿阶段。实践证明，第Ⅰ阶段为分散矿化，石英脉分布虽广，但金品位很低，一般难于单独形成工业矿体；第Ⅱ阶段为分阶段集中矿化，凡有第Ⅱ阶段矿化叠加地段，一般都能形成较好的工业矿体；第Ⅲ阶段为局部富集矿化，常在个别有利部位叠加形成富矿柱；第Ⅳ阶段分布极其局限，因此矿化强度一般最小。

根据以上分析，可见成矿期断裂活动对矿体定位的控制作用主要有以下三点：①成矿期构造应力场主压应力 σ_1 方向总体上为 NE—SW，与矿区内主要控矿断裂的走向夹角较小，因而有利于产生叠加剪切活动。但由于主要控矿断裂在平、剖面上具有舒缓波状特征，断裂产状在不同地段有所变化，因而在叠加剪切过程中将产生局部挤压与局部引张以似等距分段、分带特征，形成断裂分布的成矿构造圈闭；②由于成矿期控矿断裂活动以继承性脉动为主，因而决定了多阶段矿化以叠加方式为主，脉动活动的总趋势是强度逐渐减弱，因而矿化是部分叠加、分段富集的；③主成矿阶段的出现以及在时间上与其相对应的控矿断裂活动的性质，对工业矿体的形成及其空间定位特征具有极其重要的意义。控矿断面波状起伏的波峰左（SW）下半部富矿，主要由于主成矿阶段控矿断层呈左旋活动，造成波峰的左（SW）下半部局部引张，第Ⅱ、Ⅲ阶段矿液随之充填所致。

第三节　矿体空间定位规律的厘定与表征——实例剖析

金牛山金矿地处胶东金矿化集中区内牟（平）-乳（山）成矿带的中部，具体受控于金牛山主断裂，是区内颇具代表性的热液脉状金矿床。对这样一个濒临停采闭坑的危机矿山进行以寻找新的隐伏矿体为主要对象的矿体定位预测工作，具有一定的理论和实际意义。该矿床中矿体的产出、分布与定位都严格受断裂构造控制，控矿断裂的多期次继承性活动及性质转换和空间叠加造成了控矿断面的波状起伏，而控矿断面的波状起伏又制约着工业矿体的空间产出，控矿断面的波长幅度和起伏部位则具体控制了工业矿体的空间定位。因此，有效预测工业矿体在矿脉中产出位置的关键是查明控矿断面在平、剖面上的起伏部位和变化幅度。具体工作采用成矿场矿化时空结构分析方法和控矿构造几何方法——在系统的坑道构造-矿物学填图和控矿断裂构造-地球化学填图基础上，选择主要控矿因素和相关矿化参数做为变量，借助计算机模拟技术，用平、剖面图或纵投影图的形式将控矿断面的几何形态及其起伏波长和相应矿化参数的结构耦合关系予以形象的刻划与揭示，以具体分析和厘定其对成矿溶液通、阻、集、散活动和矿体空间定位的控制规律，指示成矿的有利部位，指导隐伏矿体定位预测，取得了良好的找矿效果。

一、构造几何方法的基本原理及思路

构造几何方法的萌芽见于 Л. А. 舍赫特曼的热液矿床构造预测图，这种预测图主要是对控矿构造界面采用等值线投影，基本上用定性加定量方法进行。构造几何方法的基本原理是采用数学几何方法对主要控矿构造界面进行形态模拟和空间定位，然后，根据模拟所得的构造几何参数对容矿构造及矿体空间定位规律进行厘定和表征，并在变量具有代表性、控矿构造界面具有连续性的条件下进行矿床深部、边部隐伏矿体定位预测。

1. 控矿构造界面的空间定位

在控矿构造界面比较规则的情况下（本书主要指控矿断裂构造的底、顶板），常采用直角坐标系统下的趋势-剩余分析。其产状定位模型如下：

当控矿构造界面由规则网格观测点所控制时，

$$X_i=X_0\ (I-1)\ -\mathrm{d}X$$
$$Y_i=Y_0\ (I-1)\ -\mathrm{d}Y$$
$$Z_i=f\ (X_i,\ Y_i)$$
$$(X_i,\ Y_i,\ Z_i)\ \in Gm$$

当控矿构造界面由不规则的观测点所控制时，

$$X_i=X_0+\Delta X_i$$
$$Y_i=Y_0+\Delta Y_i$$
$$Z_i=f\ (X_i,\ Y_i)$$
$$(X_i,\ Y_i,\ Z_i)\ \in Gm$$

式中，i 为观测点号，$i=1,\ 2,\ \cdots,\ n$；X_0、Y_0 为控矿构造界面的初始控制位置；$\mathrm{d}X$、$\mathrm{d}Y$ 为规则网格观测点沿 X 轴和 Y 轴的单坐标增量；I 为相应的步数；ΔX_i、ΔY_i 为不规则网格的观测点自起始点沿 X 轴和 Y 轴的坐标增量；$(X_i,\ Y_i,\ Z_i)$ 为任一观测点的三维坐标，它隶属于控矿构造界面域 Gm；$f\ (X_i,\ Y_i)$ 为多项式函数，二维趋势多项式函数为：

$$Z_i=b_0+b_1X_i+b_2X_i^2+b_3X_i^2+b_4X_iY_i+b_5Y_i^2+\cdots$$

式中，b_0、b_1、b_2，…为待求系数；X_i 为第 i 点的横坐标值；Y_i 为第 i 点的纵坐标值；Z_i 为第 i 点的垂直坐标值（对水平投影图）或水平坐标值（对纵垂投影图）的趋势值。

趋势-剩余分析给出：　　$Z_i=Z_i+E_i$

上述多项式函数将观测值 Z_i 分解为趋势值 Z_i 和剩余值 E_i 两部分，Z_i 反映控矿构造界面空间的总体趋势，E_i 则反映控矿构造界面空间的局部变化。若采用前置投影面，当 $E_i>0$ 时，反映控矿构造界面下凹，呈波谷状；当 $E_i<0$ 时，则反映控矿构造界面上凸，呈波峰状。实际上，对于比较规则的控矿构造界面，其一次趋势分析的拟合度即可达到 80%～90% 以上。

2. 矿体的空间定位

在控矿构造界面上附加对此界面进行分析后的趋势值等值线或剩余值等值线，可称为构造几何界面。矿体的空间定位即可在构造几何界面上进行，主要根据模拟获得的构造几何参数定位。主要的构造几何参数有：①矿体赋存的等值线区间（h_1，h_2）：受控矿构造界面控制的矿体往往受特定的构造部位所控制。例如，大多数热液脉状金矿床中的矿体，往往受控矿断面波状起伏的波峰（或波谷）部位、断裂拐弯部位、分支复合部位控制。通过对已知矿体在构造几何界面上的趋势值或剩余值等值线区间的研究，可以查明矿化富集段或工业矿体空间就位的最有利构造部位、分布区间及大致规模，并作为矿床边部、深部隐伏矿体定位预测的重要地质几何参数之一；②负（或正）剩余值等值线中心距离（d）：受控矿构造界面的凹凸部位或起伏部位控制的矿体往往呈现一定规律的断续分布，断续的距离及分布的规律则可以通过构造几何界面上负（或正）剩余值等值线的中心距离来反映。例如，金牛山成矿带上的金矿床（点），在构造几何界面上负剩余值的中心距离 d 为 500～700 m，而 3# 矿体的控矿断裂剩余值中心距离 d 为 60～70 m，与控矿构造界面内的主要工业矿

体的间距基本相等，并且具有似等距分布的规律。因此，根据控矿构造几何界面上负（或正）剩余值等值线中心的距离，可以基本揭示和厘定受其控制的矿体或工业矿化地段的间距、变化和规律，为矿床深部、边部隐伏矿体的定位预测提供重要的地质几何参数；③趋势-剩余等值线的延展方向及剩余值等值线中心联线的方向和角度（α，θ）：往往反映控矿构造界面上容矿构造的延展方向及矿体或矿化富集段的侧伏方向和侧伏角度。

二、控矿断面几何形态对矿体空间定位的控制

1. 主要容矿构造类型及几何结构特征

金牛山矿区含矿石英脉内的工业矿体主要受以下三种容矿构造类型所控制：①控矿断层面波状起伏的波峰部位；②“Y”形构造的交汇部位；③两组断裂或裂隙“X”形交叉部位。

为了探索控矿断层面波状起伏的结构规律，笔者在坑道系统观测和对比分析的基础上采用二元高次多项式 $Z(X、Y)=Z(X、Y)+\varepsilon(X、Y)$，对控矿断层面进行了趋势面拟合，并着重对一次趋势分析的剩余值进行了分析。断层面趋势分析的原理如图 4-6 所示，其中 Z 为观察值，$\hat{Z}$ 为趋势值，ε 为剩余值。参与趋势面分析的观测点为 106 个，分布较均匀。控矿断层的一次趋势拟合度在 90%以上，说明控矿断层面在整体上较规则，因而其一次趋势面分析的剩余值可以看作是剔除了区域性分量以后的局部性分量，它明显地反映了局部异常，其中的负异常区（相当于断层面波状起伏的波峰区）与几个主要矿柱的位置基本吻合，并且其他的工业矿体也基本上都在这些负值区（波峰）所影响的范围之内，它们控制了脉内工业矿体的分布，形成了一个脉内矿化富集带，其下面出现了一个由正值区（相当于波谷）所控制的矿化减弱带。此外，控矿断层面波状起伏的波峰联线（负值区中心的联线）都由控矿断层的北东上端向南西深部侧伏，侧伏角 28°～45°，反映了脉内矿体向南西侧伏的规律。另外，还反映了另一种构造样式，即负值区（波峰）和正值区（波谷）的中心联线也向南西侧伏，侧伏角为 20°～30°，它与脉内单个大矿体的侧伏方向和侧伏角度基本一致，反映了控矿断层面现今的形态可能是两期波状构造叠加后的复杂形态，控制大矿体的波峰实际上是一种叠加峰，由这些叠加峰所控制的富矿柱大致呈一种似等距分布。

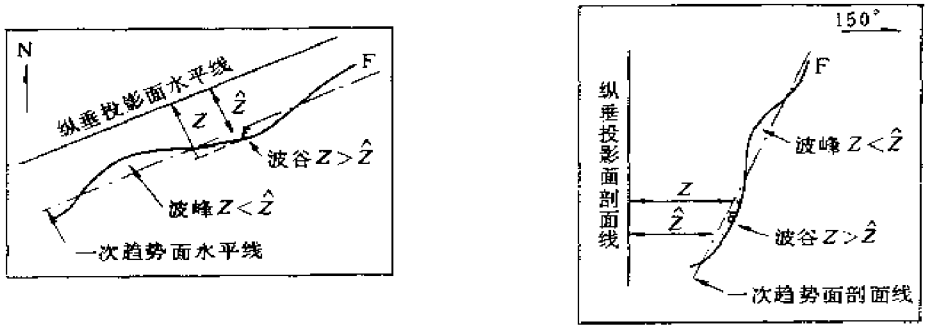


图 4-6　控矿断裂断层面趋势分析原理示意图

2. 与成矿有关的地质参数及矿化结构定量分析

定量分析断裂控矿规律是成矿构造研究的发展趋势，亦是揭示矿体空间定位规律的关键。为了定量研究金牛山断裂控矿规律，在野外取得大量第一手数据的基础上，运用统计分析方法并借助计算机处理，得出了与成矿有关的地质参数及矿化结构定量分析结果。同时，与野外地质研究结果相互印证，较好地揭示和厘定了金牛山断裂控矿特征及矿体定位规律。

(1) 参数选择及其数据结构特征

参数的选择直接影响分析的内容。为了解控矿断裂的断面形态变化，定量总结与成矿有关的地质参数的结构规律及矿化特征的空间特点，依据矿山资料，选取了与成矿有关的几个主要地质参数，即控矿断裂上、下断面（即含金石英脉的顶板和底板）距参考面水平距离（x_1、x_2）、石英脉水平厚度（x_3）、煌斑岩水平厚度（x_4）、矿体水平厚度（x_5）、硫品位（x_6）、金品位（x_7）和线金属量（$x_8=x_5\cdot x_7$），而且按 15 m 间隔等距在 15 m、45 m、75 m 和 110 m 中段地质图上取得了各点上述参数的具体值。

这些参数都与矿体的形成与分布存在着程度不等的相关关系(表 4-1)，其中 x_1、x_2、x_3、x_4、x_5 为单峰，x_6、x_8 为二峰，x_7 为三峰（每峰基本上对应一个成矿阶段）。同时，做多参数直方图（图 4-7）发现，这些参数均服从正态分布，且周期性不明显。为了解各参数整体和局部的空间变化，选择了多项式趋势分析和剩余分析。

表 4-1 各参数线性相关矩阵

地质参数	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
x_1	1	0.87	−0.20	−0.01	−0.15	0.17	−0.001	0.0098
x_2	0.87	1	0.23	0.06	0.05	0.18	0.07	0.14
x_3	−0.20	0.23	1	0.27	0.32	0.05	0.08	0.17
x_4	−0.01	0.06	0.27	1	0.04	0.02	0.27	0.29
x_5	−0.15	0.05	0.32	0.04	1	0.30	0.13	0.59
x_6	0.17	0.18	0.05	0.02	0.30	1	0.58	0.65
x_7	−0.001	0.07	0.08	0.27	0.13	0.58	1	0.83
x_8	0.098	0.14	0.17	0.29	0.59	0.65	0.83	1

(2) 与成矿有关的地质参数和矿化特征的空间结构规律

与成矿有关的地质参数和矿化特征的空间结构规律是断裂控矿规律的具体反映。总结这些参数的整体和局部变化规律可以更好地探讨和研究矿体的空间定位规律（图 4-8）。①控矿断裂上断面、下断面距参考面水平距离（x_1、x_2），从趋势图（图 4-8A）上，可以很清楚地发现，自北至南，自下至上，x_1、x_2 均有增大趋势。同时，结合 x_1、x_2 的剩余等值线图（图 4-8B），则又可发现 x_1、x_2 沿控矿断裂走向有“+”、“−”相间规律，说明控矿断裂上、下断面在横向上有自北至南、纵向上有自下至上偏离所取参考面愈远，且呈舒缓波状弯曲变化的空间结构规律，即反映控矿断裂大致呈一“瓦”形，而“瓦”形内部又有次级的隆起与凹陷，最大弯曲部位大致在 75～45 m 左右；②石英脉水平厚度（x_3）有自北至

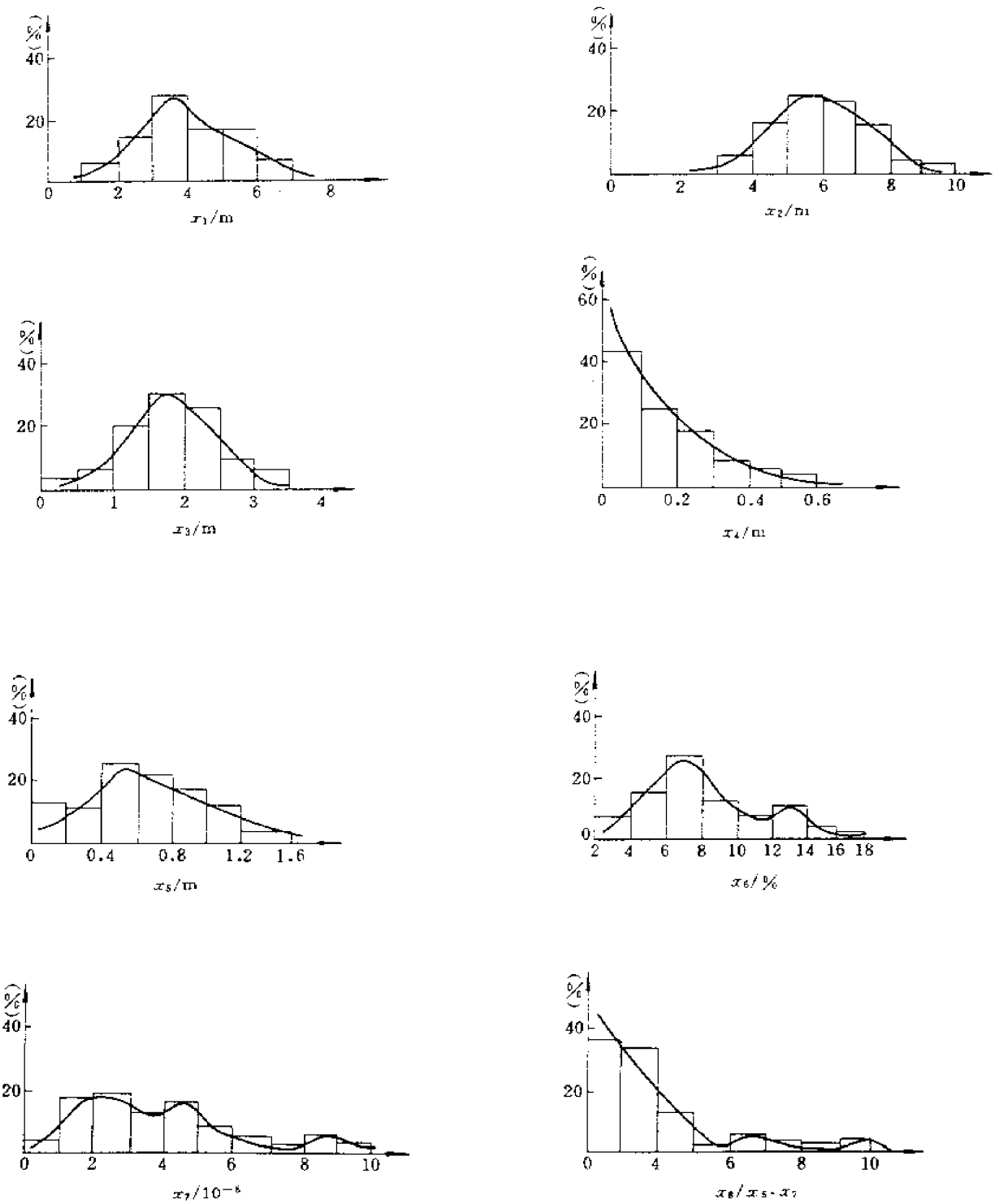


图 4-7　与成矿有关地质矿化参数的数据分布直方图

南减小、45～75 m 中段最大的空间结构规律（图 4-8C），而且沿矿体走向，其剩余值呈“＋”、“－”相间分布（图 4-8D），说明石英脉水平厚度不均一，沿其走向厚、薄相间产出，中间呈逐渐过渡关系，75～45 m 中段最厚；③煌斑岩水平厚度（x_4）自北至南有增大趋势，

且在 45～75 m 中段最厚（图 4-8E），剩余分析结果反映出煌斑岩沿其走向呈厚、薄相间分布（图 4-8F）；④硫品位（x_6），3#矿体硫品位南端高于北端，且以 45～75 m 中段最高，沿矿体走向高低起伏较大（图 4-8G、图 4-8H）；⑤反映矿体特征的地质参数主要有矿体水平厚度（x_5）、金品位（x_7）和线金属量（$x_8=x_5\cdot x_7$），它们在空间上变化特征明显，说明矿化特征也具有良好的空间结构规律。从 x_5、x_7、x_8 的趋势分析（图 4-8L）和剩余分析（图 4-8I）来看，3#矿体南端金品位明显高于北端，矿体厚度和线金属量也具有南高北低的趋势，而且金品位、矿体水平厚度和线金属量都是以 45～75 m 中段为最大，沿其走向“+”、“－”相间分布，充分说明了矿化空间分布的不均匀性，具有水平方向自北至南增强，垂向上中部（45～75 m）最强，并且沿走向和倾向矿化强度起伏较大的空间结构特点。

（3）与成矿有关的地质参数和矿化结构的空间耦合关系

为了从系统整体角度探讨金牛山矿区的矿体定位规律，将与成矿有关的地质参数和矿化特征的空间结构规律进行对比研究，发现两者关系密切。①对比控矿断裂上、下断面与矿化结构，发现上、下断面距参考面水平距离剩余值的“+”、“－”过渡部位往往是金品位、矿体厚度的“+”值区，说明这些部位矿化较强，而这些部位又恰恰是控矿断裂产状变化部位，产生局部启张空间。因此，控矿断面形态对矿体定位的控制明显。一般地，在断裂走向、倾向上，其产状变化部位常有较好的矿化富集；②石英脉水平厚度沿其走向厚、薄相间产出，叠加金品位后发现两者“+”值区并不完全耦合，而是在石英脉水平厚度“+”、“－”过渡部位为金品位的“+”值区，亦即矿化较强部位往往不是石英脉最厚部位，也不是石英脉最薄部位，而是在其间过渡部位；③从煌斑岩水平厚度和硫品位的趋势分析来看，有自北至南逐渐增大，垂向上以

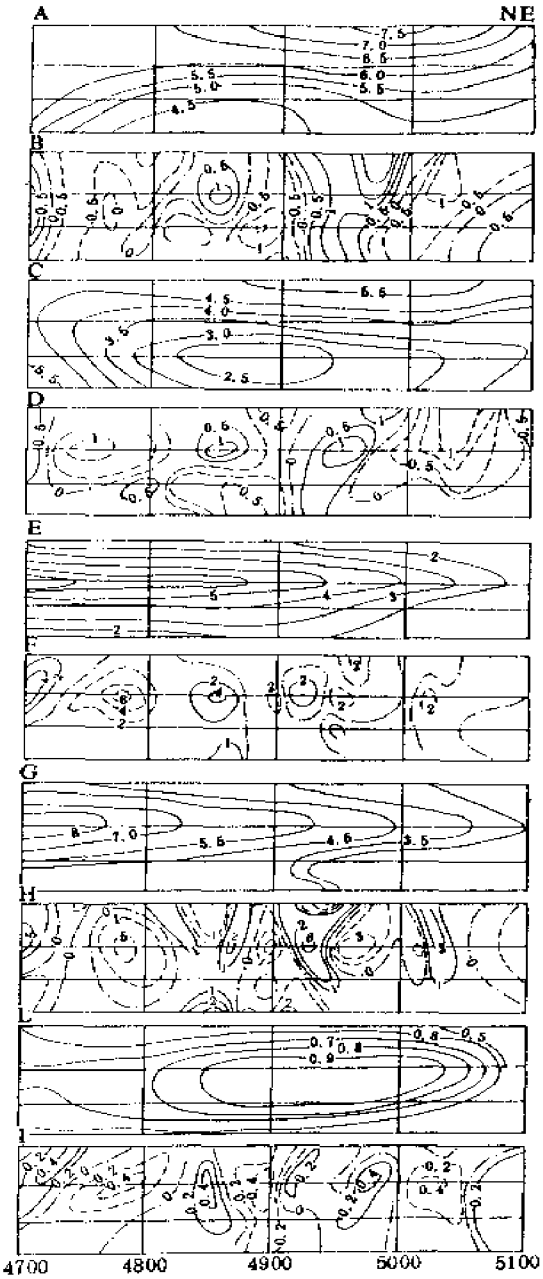


图 4-8　与成矿有关的地质参数和矿化特征的空间变化规律

A—控矿断裂上断面产状的三次趋势图；B—控矿断裂上断面产状的三次趋势剩余图；C—控矿断裂下断面产状的三次趋势图；D—控矿断裂下断面产状的三次趋势剩余图；E—品位×厚度的三次趋势图；F—品位×厚度的三次趋势剩余图；G—3#矿体金品位的三次趋势图；H—3#矿体金品位的三次趋势剩余图；L—3#矿体水平厚度的三次趋势图；I—3#矿体水平厚度的三次趋势剩余图

45～75 m 中段最大的空间结构规律，而反映矿化特征的金品位、矿体水平厚度、线金属量也具有类似变化趋势，而且它们的剩余值分析结果亦表明，其“＋”值区基本相互重合，因此说明煌斑岩水平厚度、硫品位与金矿化呈正相关关系，即在煌斑岩发育、多金属硫化物集中的部位往往是金矿化的富集部位。

综合上述，充分表明了与成矿有关的地质参数对矿体空间定位的影响和控制。因此，通过对这些参数的结构分析与研究，可以有效厘定和表征矿体的空间定位规律，并直接指导隐伏矿体的定位预测。

三、矿体空间定位规律及产状模式

1. 金矿体空间定位的一般规律

矿体的空间定位规律及其产状模式一直是笔者探索与研究的重点。经过近三年的工作，笔者认为，金牛山矿区内矿体的空间定位规律可概括为：含矿石英脉沿走向、倾向比较连续，但工业矿体在矿脉中断续分布，并且形态复杂、大小各异，矿体或矿柱在平、剖面上呈透镜状、豆荚状、雁行状，在纵投影图上为漏斗状、透镜状和不规则饼状。经综合研究发现，含矿石英脉中工业矿体的空间定位主要受控矿断层面波状起伏的波峰部位，“Y”、“X”型断裂交汇部位，断裂叠加复合部位，总体压扭性断裂的局部启张部位和控矿断裂的产状变化部位所控制。这些有利的控矿构造部位确定了矿区内大多数工业矿体的空间定位。考察对比发现，矿带内邓格庄、腊子巷、金牛山、福禄地、金青顶等众多脉金矿床中金矿体的空间产出无一不受控矿断面波状起伏的波峰控制，即控矿断裂的局部启张部位控制了脉内工业矿体的空间分布与定位，并在剖面上形成了相应的第一、二矿化富集带和其间的矿化减弱带。

两个控矿断层面波状起伏的波峰连线（负值区的中心连线）反映了矿体的侧伏方向及侧伏角度。经过对比研究发现，矿带内主、次级断裂中金矿体的侧伏方向随控矿断裂的产状不同而有所不同，即主断裂中矿体向南西侧伏（腊子巷、小肖家、金牛山），侧伏角大，近直立，但次级断裂中的金矿体多向北东侧伏（邓格庄、黄瓜岭、婆婆顶），即矿脉向东倾则向南侧伏，向西倾则向北侧伏。这种矿体的侧伏规律对深部地质探矿工程布置具有十分重要的指导意义。

2. 金矿体空间定位的产状模式

根据实际调查和定性定量模拟所反映的控矿断层面波状起伏形态及其两种不同的、相互叠加的样式，以及矿带内和单个矿床中工业矿体和矿化富集中心的空间展布样式及其侧伏规律，笔者初步提出并建立了本矿带的矿体空间定位产状模式，以便能较贴切、客观地模拟和反映金矿体的空间定位规律（图 4-9）。这种矿体空间定位样式可归纳为“一脉二带三段”产状模式，即一脉是指严格受断裂控制的含金石英脉，二带是指受控矿断裂波状起伏的波峰、波谷控制的矿化富集带和矿化减弱带（同一富集带内矿体的产出具有似等距性和似等深性），三段是指受叠加波峰、过渡带和叠加波谷控制的大矿、零星小矿和无矿三种地段。在矿化富集带中有大矿和小矿地段之分，在矿化减弱带中有零星小矿和无矿地段之别。

虽然自然界控矿因素复杂多变，使矿体的空间分布和形态产状不会那样规则和整齐一致，但目前看来，“一脉二带三段”的产状模式可能是热液脉状金矿矿体空间定位的一种非

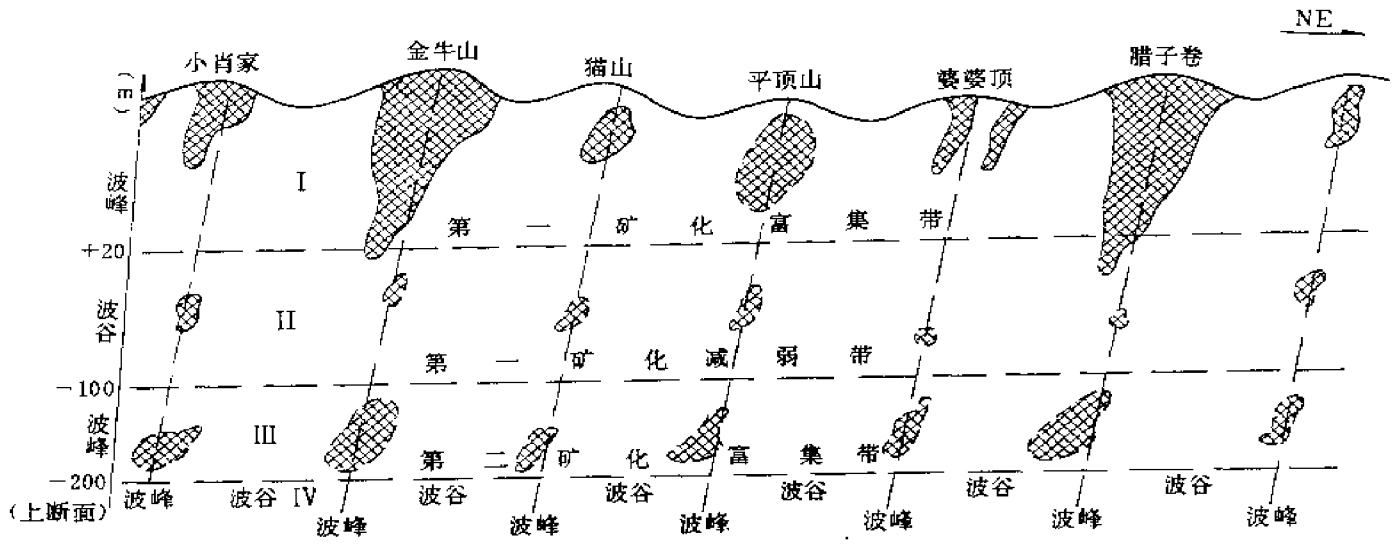


图 4-9　金牛山矿带矿体空间定位产状模式图

常重要的形式，并具有一定的普遍性和可借鉴性。例如，胶东地区玲珑、望儿山、河东、黄埠岭金矿；黄陵地区茅坪、石板溪金矿和小秦岭地区文峪、枪马、东闯金矿的研究成果，已为这一规律性认识提供了有力的佐证。进一步研究和阐明这种矿体空间定位规律，对于该类型金矿床的隐伏矿体定位预测，具有一定的理论意义和实际意义。

第五章　成矿场矿化时空结构分析

第一节　成矿场矿化时空结构分析的要义

辩证法认为，时间和空间是物质世界存在的基本形式，自然界中的一切客观存在都是时间和空间的函数。成矿作用的发展变化，是成矿物质的运动（活化、迁移、富集），它既不能脱离时间，又不能超越空间。从总体上说，成矿作用在时间上是连续的，在空间上是有序的，并具有一定的时间结构和空间结构。因此，时空观是成矿预测学的最重要思维形式，时空结构分析是揭示和厘定矿体定位规律的最有效方法。正如贝塔朗菲指出，“在既定的环境下，如果我们知道系统所含的部分之总和以及要素之间的联系的总和，系统的行为就可以从其部分的行为中推演出来”。现代成矿学的发展，特别是成矿系统、成矿系列、成矿体系和成矿模型等概念的发展，日益证明了这个结论，从而使结构分析日趋重要。

成矿场矿化时空结构分析，从某种意义上讲也是成矿系统分析，它可以更深刻地揭示预测客体的内在本质。时间结构的动态分析，可以反映事物的发展过程，从而客观地探索其发展规律；空间结构的精细分析，可以揭示矿体的定位规律而使预测具有更高的信度和精度。结构性是成矿场与异常场的基本特征。成矿场与异常场精细结构分析是厘定和表征矿体空间定位规律的最有效途径。成矿作用和定位过程作为一个局域化成矿系统而具有相应的整体性、结构性特征。利用成矿场和异常场的精细结构分析，可以有效揭示和厘定其与矿体空间定位的对应耦合关系，是进行隐伏矿体定位预测的一个最有效方法。

例如，物、化探异常作为隐伏矿预测的重要标志早已被广泛应用于矿产勘查。但以往异常分析与评价的重点大多集中异常本身强度、面积、组合、分带等方面，而对异常系统的整体性、结构性，特别是其精细结构特征重视不够。笔者认为，物、化探异常实质上是地质异常成矿场的地球物理或地球化学响应。尽管由于物、化探异常形成机理的复杂性、等效性而常常造成信息的多解性和认识的不确定性，但矿致异常结构却与矿体之间存在内在成生联系和对应耦合关系。实现隐伏矿体定位预测的技术关键之一就是有效识别成矿场矿化时空结构和地、化、物异常场结构对隐伏矿体产出与分布特征的综合响应。

第二节　金矿化的时间结构分析

所谓矿化的时间结构，是指成矿演化与地质构造演化的关系和成矿热液本身演化的多阶段性特征及其相互关系。从系统分析角度出发，研究和探讨金矿化的时间结构特征，必须从地质成矿演化过程的整体分析和含矿热液自身演化的矿化阶段划分入手，这是研究矿化时空结构的基础性工作。通过对胶东地区若干典型脉状金矿床的重点剖析，结合其它矿化集中地区脉状金矿床（点）的对比考察，笔者发现脉状金矿的内生热液成矿系统具有大

致相似的成矿演化过程和时间结构特征，尤其是在与矿质聚集、矿体定位密切相关的微观结构特征上具有惊人的相似性。所谓成矿演化的微观结构是指成矿期含矿热液演化的多阶段性及其相互关系。根据各阶段金矿化之间的相互关系和组构特征，对胶东地区脉状金矿床的内生热液期金矿化的成矿过程及其结构特征进行了专题研究。将本区内生热液期金矿化的成矿过程划分为以下四个矿化阶段，即Ⅰ．微量金-黄铁矿-石英阶段；Ⅱ．金-石英-黄铁矿阶段；Ⅲ．金-石英-多金属硫化物阶段；Ⅳ．少量金-黄铁矿-石英-碳酸盐阶段。划分的主要依据为：宏观证据包括不同阶段矿化之间的穿插、包裹、胶结关系，各阶段矿化的矿物共生组合特征和空间产出特征；微观证据包括各矿化阶段皆有生成的贯通性矿物（石英、黄铁矿及金矿物）的标型特征，金矿石或主要载金矿物（黄铁矿）的含金性，矿石中金的赋存状态、成矿温度、包裹体成分及硫、铅、氢、氧同位素组成及铅同位素模式年龄；统计证据包括金品位概率分布型式的统计特征（图 5-1）和混合总体的筛分结果（表 5-1）。各阶段矿化的主要特征见表 5-2。此外，不同矿化阶段的贯通性矿物（石英、黄铁矿）具有不同的标型特征（表 5-3、5-4）。

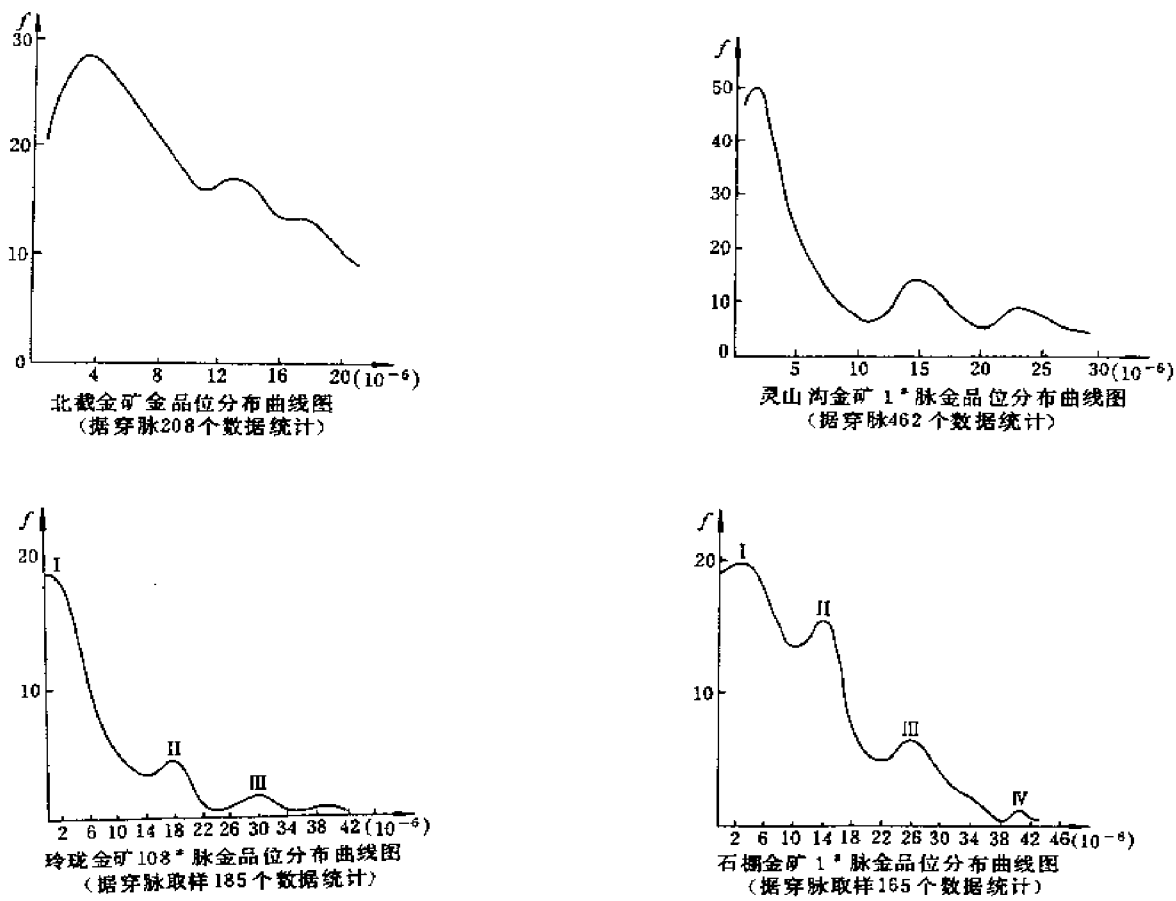


图 5-1　胶东地区部分金矿床中金品位分布特征

与前人有关资料对比分析可见，胶东地区内生热液期金矿化的不同矿化阶段具有不同的矿化特征，相同的矿化阶段则显示共同的矿化特征，成矿具有统一的时间演化过程。具

表 5-1　灵山沟金矿 I 号脉金品位的混合总体筛分结果

结果 / 矿化阶段	+8～+47 m 中段混合总体的筛分		−20～−50 m 中段混合总体的筛分		−80 m 中段混合总体的筛分		−115 m 中段混合总体的筛分	
	所占比例 %	w(Au)/10^{-6}	所占比例 %	w(Au)/10^{-6}	所占比例 %	w(Au)/10^{-6}	所占比例 %	w(Au)/10^{-6}
I	34	1.12	72	0.73	32	0.18	49	0.12
II	30	6.2	19	3.09	40	0.171	40	0.55
III	36	31.50	9	11.03	28	9.42	11	5.75
IV	0	无资料	0	无资料	0	无资料	0	无资料

表 5-2　内生热液期金矿阶段及其主要矿化特征一览表

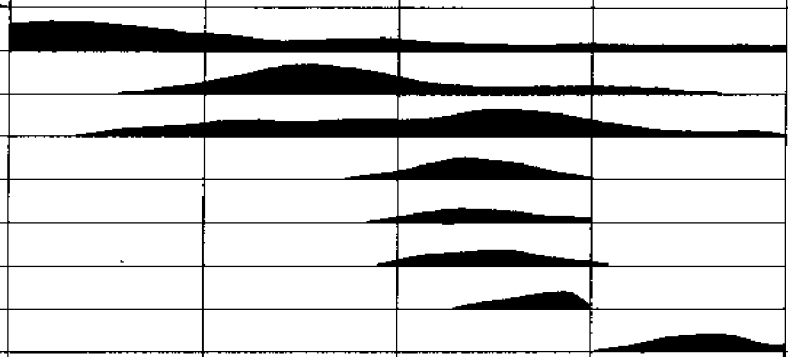
矿化特征 / 矿化阶段		I	II	III	IV	备注
主要矿物	石英					宽度表示相对含量，对金有放大
	黄铁矿					
	银金矿					
	黄铜矿					
	方铅矿					
	闪锌矿					
	磁黄铁矿					
	方解石					
矿石结构		中粗粒自形晶	半自形—它形	自形—半自形粒状	中细粒自形晶	
矿石构造		斑点状、斑杂状	致密状、脉状、网脉状、浸染状	细脉状、斑杂状、块状、角砾状	砂包状、细脉状、团块状、星点浸染状	
矿石类型		黄铁矿型	黄铁矿型	多金属型	碳酸盐型	
成矿温度 ℃	均一法 t	325	280	245	170	
	爆裂法 t	350	298	260	210	
石英氧同位素组成 $\delta^{18}O$/‰		12.48	10.48	9.32	—	
黄铁矿硫同位素组成 $\delta^{34}S$/‰		7.12	7.89	8.39	5.37	
铅模式年龄 t/Ma		915.97	892.69	862.81	687.55	
矿化强度（相对）		弱	强	较强	弱	
矿化广度（相对）		很广	广	局部富集	零星少见	
分布特征（相对）		矿脉上部	中上部—中部	中部—中下部	下部	
主要围岩蚀变		硅化、绢英岩化	黄铁绢英岩化	黄铁绢英岩化	碳酸盐化物	
热电系数/($\mu V \cdot ℃^{-1}$)		−322.9 −22.9～−575.9	206.0 −121.7～−360.2	−175.9 −125.3～−294.0	+161.4 +26.5～+541.0	
金的主要赋存方式		包体金	裂隙金（晶微金）	晶隙金	晶隙金（包体金）	
工业意义（相对）		不具独立工业意义或构成贫矿石	工业矿石	与 I 叠加构成富矿柱	贫矿石或不具独立工业意义	

表 5-3　不同矿化阶段黄铁矿的主要标型特征

主要标型特征 \ 矿化阶段			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	附　录
形态特征	晶　形		以立方体及聚形自形晶为主，偶见五角十二面体	以立方体及聚形半自形晶为主，少见完整晶形	以中细粒自形—半自形晶为主，可见完好晶形	细粒半自形晶为主，可见自形晶、它形晶	
	粒　度		颗粒粗大，一般为 3～10 mm	颗粒一般在 0.5～5 mm	颗粒一般在 0.5～3 mm	颗粒一般＜2 mm	
	自形程度		自　形	它　形	自形—半自形—它形	自　形	
	碎裂特征		晶面条纹发育	碎裂状，多裂开面	可见晶面条纹	—	
颜　色			浅黄白色	黄白色—铜黄色	绿黄色、灰黑色	浅黄白色	
光　泽			强金属光泽	金属光泽	弱金属光泽	金属光泽	
晶胞参数	晶胞参数/nm		0.5417	0.5414	0.5416	0.5416	标准黄铁矿 0.5417
	面网间距 nm	D_{111}	0.3123	0.31213	0.3126	0.3126	0.3128
		D_{200}	0.2705	0.2704	0.2706	0.2707	0.2709
		D_{210}	0.2419	0.2419	0.2420	0.2421	0.2423
		D_{211}	0.2209	0.2208	0.2210	0.2210	0.2212
		D_{220}	0.1914	0.1913	0.1914	0.1914	0.1916
		D_{311}	0.1633	0.1632	0.1633	0.1633	0.1633
		D_{222}	0.1563	0.1562	—	0.1563	0.1564
		D_{230}	0.1502	0.1510	0.1502	0.1502	0.1502
		D_{321}	0.1447	0.1447	0.1447	0.144	0.1445
热电系数 α ($\mu V \cdot ℃^{-1}$)	范围值		−22.9～−575.9	−121.7～−360.2	−125.3～−294.0	−33.7～−409.6	
	平均值		−322.9	−206.0	−175.9	−231.3	
红外光谱吸收特征	吸收峰值/cm^{-1}		407　340	407　340	407　340	407　340	407　340
	吸收率/%		44.7　3.8	26.8　6.9	22.9　6.8	61.0　9.5	51.6　13.3
	光密度		0.355　0.02	0.789　0.111	0.784　0.116	0.987　0.271	0.40　0.095
	相对光密度		17.75	7.11	6.76	13.34	4.21
爆烈温度 t/℃			355 230～380	298 210～350	260 196～315	165	
同位素特征	$\delta^{34}S$/‰		7.12	7.89	8.39	5.37	
	Pb-Pb 法模式年龄/Ma		915.97	892.69	862.81	687.55	
共生矿物			乳白色石英	灰白色石英	烟灰色石英及 Cu、Pb、Zn 硫化物	灰白色石英及方解石	
产出状态			整个矿脉中都可见及，但主要分布于上、边部第 1 阶段石英中	呈较规则脉状、透镜状，分布于矿脉中、上部	呈不规则脉状、团块状产出，分布于矿脉（体）中、下部	仅见于矿脉深部，与方解石、石英一起呈浸染状、细脉状	
含金性/10^{-6}			20.63	123.85	191.74	57.87	

注：红外光谱由测试中心张保民测定；热电系数由湖北地质实验研究中心测定；晶胞系数由测试中心沈宝明测定；含金性由河南地勘局实验室测定；S、Pb 同位素由宜昌地质矿产研究所刘焰、韩友科测定。

表 5-4　不同矿化阶段石英的主要标型特征

标型特征 \ 矿化阶段		I	II	III	IV	备注
形态特征	晶形	粒状	粒、柱状	柱状	粒状	
	粒度	粗粒	中细粒	细粒	中粒	
	自形程度	自形	半自形—它形	它形	自形	
光性特征	颜色	乳白色	灰白色	烟灰色	灰白色	
	光泽	油脂光泽	珍珠光泽	油脂光泽	玻璃光泽	
	透明度	透明—半透明	不透明—半透明	不透明	不透明	
	消光性	正常消光	波状消光	波状消光	正常消光	
红外光谱吸收特征	一般特征	吸收曲线形态大致相似，类似于三方晶系石英谱线，但峰均较尖锐，且参差不齐				标准石英
	波数/cm^{-1}	462 782 513 800	462 782 513 800	462 782 513 800	462 782 513 800	462 782 513 800
	吸收率/%	61.2 61.3 55.5 64.3	62.0 57.5 53.5 62.9	45.7 38.5 32.5 40.5	64.8 55.1 51.7 60.7	56.7 40.8 35.1 43.8
	光密率	1.233 0.780 0.661 0.863	1.127 0.632 0.618 0.777	0.478 0.265 0.774 0.281	0.949 1.407 0.483 0.615	0.475 0.271 0.228 0.934
	相对光密度	1.865 0.903	1.825 0.813	0.617 0.941	1.964 2.291	2.088 0.291
包裹体特征	形态及大小/μm	椭圆状、棒状 4～15	菱形、不规则多边形 <10	菱形、纺锤形 3～8	椭圆状、短柱状 <3	
	素描图（40×）					
	气液比	5～30	10～15	5～10	10～20	
	均一温度/（℃）	325	280	245	170	
共生矿物		主要与星点状自形黄铁矿共生	主要与块状、碎裂状黄铁矿共生	主要与细粒粉末状黄铁矿及Cu、Pb、Zn多金属硫化物共生	主要与方解石共生	
产出状态		整个矿脉中都可见及，但主要产于矿脉的上、边部	多见于矿体中、上部，呈细粒、浸染状分布于致密块状黄铁矿中	多分布于矿体中、下部，与多金属硫化物组成对称带状或呈粒状产出	仅见于矿体下部，与方解石等密切共生	
氧同位素特征 $\delta^{18}O_{矿物}$/‰		12.48	10.48	9.32	—	

注：红外光谱由本校测试中心张保民完成；$\delta^{18}O_{矿物}$由宜昌地质矿产研究所张汉申完成。

体表现为：①成矿期构造活动的脉动性决定了含矿热液及其成矿过程的多阶段性，而成矿期构造的继承性则造成了多阶段矿化空间上的叠加富集。这在同一类型矿化的不同矿床中

皆可见及，是区内热液期成矿演化的基本特点之一；②不同矿床中相同矿化阶段的矿化特征基本类似，其在野外宏观的穿插、包裹关系，室内微观的矿物标型特征以及金品位的统计分布特征和混合总体筛分结果上显示明显的相似性，从而佐证了区域范围内热液期金矿化四个阶段划分方案的科学性及普适性；③在内生热液期金矿化的成矿阶段中，普遍以第Ⅱ、Ⅲ阶段为主成矿阶段。各成矿阶段的成矿意义一般表现为：矿化广度以第Ⅰ矿化阶段为最，它从整体上框定了金矿化的空间展布范围；矿化强度以第Ⅱ矿化阶段为最，该阶段黄铁矿含量多且普遍含金，是区内所有工业金矿体的主要组成部分，亦是区域性的主成矿阶段；第Ⅲ矿化阶段含金富但分布局限，在第Ⅲ矿化阶段与第Ⅱ矿化阶段叠加部分常常构成金矿化的局部富集地段（图 5-2）；第Ⅳ矿化阶段空间分布更为局限，在几个矿区的品位筛分图上几乎没有显示，野外观测主要见于金矿体尾部，是矿化趋于结束的宏观标志；④不同矿床中矿石矿物与不同矿化阶段的对应关系及其演化特征显示统一性，即从早到晚，从第Ⅰ矿化阶段到第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ矿化阶段，矿石的矿物组合从简单到复杂，皆显示从以氧化物（石英）为主演化到以单一硫化物（黄铁矿）为主，进而以复硫化物（黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、磁黄铁矿等）为主，最后以碳酸盐组合结束的演化趋势，反映出成矿溶液及其成矿演化过程的统一性特点；⑤据对不同矿床中石英、黄铁矿的包裹体温度、压力、盐度、成分测定结果（图 5-3）的综合整理与分析，区内金矿化形成的成矿物理化学条件从早到晚为：成矿温度变化于 390～160℃范围之内，总体显示中温热液成矿特征。各矿化阶段的成矿温度之间既显示部分重叠特征，又显示总体上的降温趋势。矿石稀土和包裹体成分及盐度测定结果表明，区内不同矿床的成矿热液成分具相似的组成和特定的同源继承性演化特征。矿液都属于重 CO_3^- 型，但各个成矿阶段的总矿化度不同，硫、氧同位素组成亦呈现有规律的变化（表 5-2），即从早到晚，$\delta^{34}S$（‰）从 7.12（Ⅰ）、7.89（Ⅱ）、8.39（Ⅲ）到 5.37（Ⅳ）；$\delta^{18}O_{H_2O}$（‰）从 12.48（Ⅰ）、10.48（Ⅱ）到 9.32（Ⅲ），总体反映出主成矿阶段后成矿溶液的碱性增强，硫逸度降低的趋势。

第三节　金矿化的空间结构分析

查明金矿体的空间定位规律是隐伏矿体定位预测的核心问题，而研究金矿化的空间结构特征则是揭示矿体空间定位规律的最有效途径。该部分重点讨论金矿化在空间展布上的层次性结构特征。

一、脉状金矿化系统的多层次空间定位体制

矿化空间定位体制，是矿化空间结构研究的重点之一，亦是近年来国内外矿产勘查界共同关注的前沿与热点。笔者以大量的室内外研究为基础，从系统分析角度，探索建立了胶东地区金成矿带、矿田、矿床乃至矿体的空间定位体制，以期能对深入认识矿体定位规律和指导该矿化集中区的新一轮和成矿预测工作有所裨益。

1. 金矿带的空间定位体制

在深入研究控矿条件及矿化分布特点的基础上，采用地质异常结构分析方法和成矿场矿化空间结构分析方法可初步总结出招莱金矿带的空间定位体制为“三带一圈一层”。所谓“三带”指两类花岗岩的接触带、栖霞复背斜带、北东向断裂破碎带，“一圈”为重熔花岗

岩在交代花岗岩中形成的热晕圈，“一层”指蓬夼组矿源层。

2. 金矿田的空间定位体制

以招莱金矿带为例，金矿田的产出主要受控矿断裂系和不同地质体接触带控制，矿田的延伸方向与控矿断裂系的总体走向一致，可归结为“一系一带”的空间定位体制。这里“一系”指一系列倾向相同的控矿断裂构造，如三山岛矿田、灵-北矿田、玲珑矿田由一系列倾向南东的断裂构造控制，控制焦家矿田的是一系列倾向北西的断裂构造。“一带”是指不同地质体的接触带，如玲珑岩体与上庄岩体、北截岩体、双目顶岩体的接触带，玲珑岩体与胶东群地层的接触带等。

3. 金矿床（点）的空间定位体制

对金矿床（点）来说，其产出位置受上述控矿断裂系中成矿时的局部引张地段的控制。并显示“横向成带”或“行列成阵”的结构规律。如焦家金矿田内，焦家断裂带上的焦家金矿在横向上与望儿山断裂上的望儿山金矿对应，它们都在一个横向带上；北边的新城金矿与河东金矿同在另一横向矿带上。玲珑等金矿田也具有这种结构规律。可以利用这种定位体制有效地指导隐伏矿预测。如灵-北金矿田，属于同一横向带的有灵山沟与前孙家，魏家沟与洼孙家，北截与小董家，除了小董家以外都已发现金矿，所以小董家应该是寻找隐伏矿的远景地段。

4. 金矿体的空间定位体制

本区的脉状金矿依其成矿特征可分为三类：焦家式、玲珑式及灵山沟式。它们都严格受断裂构造控制。工业矿体在断裂中断续分布、错落有序。控矿断裂的多次继承性叠加活动控制了断面的起伏，而断面的起伏又控制了工业矿体的产出。通过对焦家、新城、河东、河西和望儿山等矿区的控矿断裂面地质研究和趋势分析，并综合分析各种资料，认为这些矿区控矿断裂面的起伏主要受两次构造活动的影响，两次构造活动的波峰与波峰叠加处，断面上凸，这是工业矿体的主要产出部位；波峰与波谷叠加部位，起伏不明显，矿化不强；波谷与波谷叠加部位形成下凹，矿化最差。因此，控矿断裂面起伏的幅度、位置控制了工业矿体的空间定位。“一脉二带三段”的矿体空间产状模式可以较贴切地刻划和反映其空间定位体制，并对热液脉状金矿具有普适性。

二、金矿化空间定位体制的地质异常控制

经分析发现，这种金矿化空间域上的多层次系统定位体制明显受控于相应层次的地质异常。例如，该区金矿化空间展布上一个显而易见的特征就是局域化丛聚。具体表现为金矿床（点）在空间上成群成带集中产出。

分析金矿化空间局域化丛聚的主要控制因素，考虑到前人曾集中从断裂构造异常控矿角度对本区金矿化空间域上的局域化丛聚问题进行过一定程度的专门研究和讨论，本书不再予以赘述。而重点提出并讨论对本区金矿床（点）空间不均匀分布和局域化丛聚起重要控制作用的另一重要地质异常类型——不同地质体接触带构造异常及其与断裂构造异常的复合控矿作用。提出这一新的致矿地质异常类型是基于以下地质事实：

1. 不同地质体接触带构造对区域性控矿断裂空间展布的制约

例如：三山岛断裂主要沿袭玲珑花岗岩与胶东群地层接触带发育；焦家-新城断裂大部分地段沿袭玲珑花岗岩与胶东群地层接触带发育，其次级的河东-上庄断裂沿袭玲珑花岗岩

与郭家岭花岗闪长岩的接触带发育；灵（山）-双（目顶）断裂部分沿袭玲珑花岗岩与郭家岭花岗闪长岩的接触带发育（在中段沿袭玲珑花岗岩与北截岩体的接触带发育，在东段沿袭玲珑花岗岩与双目顶岩体的接触带发育）；招（远）-平（度）断裂北东段（破头青一带）沿袭玲珑花岗岩与滦家河花岗岩的接触带发育，中段及南西段沿袭玲珑花岗岩与胶东群地层的接触带发育；马（家窑）-上（庄头）断裂沿袭胶东群地层中黑云斜长片麻岩与斜长角闪岩的接触带发育。

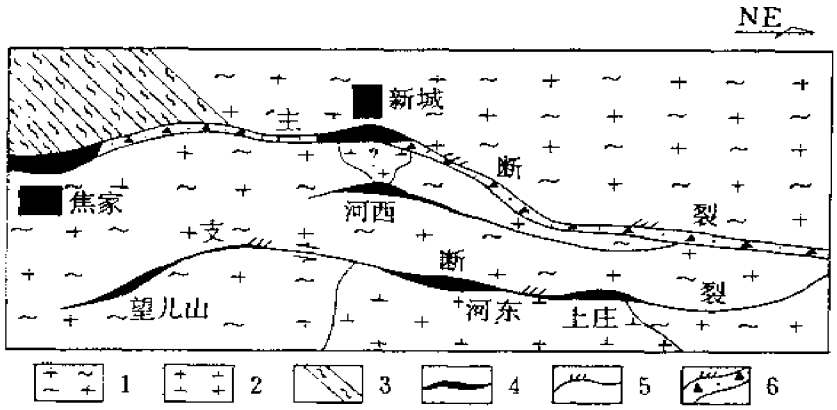


图 5-2　焦家金矿田示意图

1—玲珑花岗岩；2—郭家岭花岗闪长岩；3—胶东群变质岩；4—金矿；5—分支断裂带；6—主断裂带

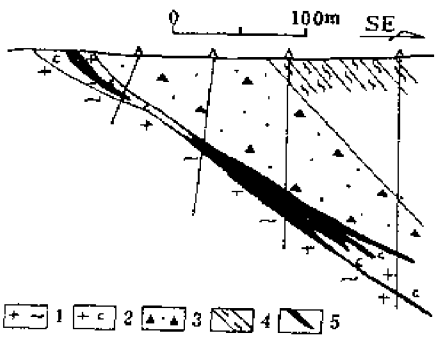


图 5-3　夏甸金矿 465 线地质剖面图

1—玲珑花岗岩；2—碎裂岩；3—碎裂花岗岩；4—胶东群变质岩；5—金矿体

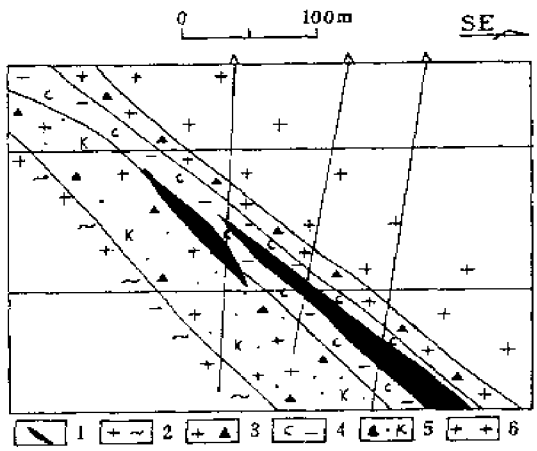


图 5-4　罗峰金矿 13 线地质剖面图

1—工业矿体；2—玲珑花岗岩；3—碎裂状花岗岩；4—绢英岩体碎裂岩；5—硅化、钾化花岗岩；6—郭家岭花岗岩

2. 对金矿床（点）空间展布的控制作用

区域范围内的众多金矿床（点）的空间分布大多集中在不同地质体接触带处或位于其附近，受不同地质体接触带及沿袭该接触带成生的断裂构造的联合制约。具体表现为：新

城、河西、河东、上庄、洼孙家等金矿床（点），均产于玲珑花岗岩与郭家岭花岗闪长岩（上庄岩体）的接触带附近，其中河东、上庄金矿床直接产于两者接触带上（图 5-2）；三山岛、焦家、姜家窑、夏甸等金矿床（点）均产于胶东群地层与玲珑花岗岩的接触带部位（图 5-3）；罗峰金矿床产于玲珑花岗岩与滦家河花岗岩的接触带上（图 5-4）；北截、金岭、官庄、西岭上、水口、杜家集等金矿床（点）均产于玲珑花岗岩与郭家岭花岗闪长岩（北截岩体）的接触带部位；孤山唐家、马鞍石、石棚、纪山、横沟、山前季家等金矿床（点）均产于玲珑花岗岩与郭家岭花岗闪长岩（双目顶岩体）的接触带部位；马家窑金矿产于胶东群变质地层内的黑云斜长片麻岩与斜长角闪岩的接触带部位。

上述大量地质事实表明，金矿床（点）在空间展布上受不同地质体接触带构造异常及沿袭该接触带成生的断裂构造异常联合控制的认识在胶东地区具有一定的普遍性，可作为预测找矿的重要地质异常预测准则。对这种不同地质体接触带异常控断、控矿问题的较合理解释是：①不同地质体的接触带为一构造薄弱带，在区域构造应力作用下，易沿其发育形成一系列规模较大的压扭性断裂，并成为低温、低压、低位能扩容区，对赋存于含矿溶液中的成矿物质具有一定的汲取聚集功能（虹吸聚矿）；②不同地质体的接触带为一有利矿质沉淀富集的成矿地球化学异常界面（亦称地球化学障），该部位由于成矿物理化学条件的差异较大，常造成成矿物理化学环境和成矿热液系统的不稳定而有利于矿质的沉淀富集；③金矿床（点）多发育于玲珑花岗岩岩体与其它地质体的接触带部位，表明玲珑花岗岩为本区金成矿的赋矿主岩。

三、金矿化空间展布的似等距性结构特征

似等距性是脉状金矿化空间结构的又一重要特征，其主要表现为控矿断裂构造的多层次似等距分布和金矿化的多层次似等距产出。

1. 控矿断裂构造的多层次似等距展布特征及其对成矿的控制

多层次的构造似等距性是指区域范围内控制金矿带断裂构造之间的似等距性，矿带内控制矿床的断裂构造或成矿有利部位的似等距性和矿区内控制矿脉、矿体以至矿化富集中心的断裂构造及构造有利部位的似等距性。受上述多级别控矿断裂构造控制的矿带、矿床（点）、矿体以至矿化富集中心，亦显示相应的多层次似等距展布特征。在胶东地区具体表现为：

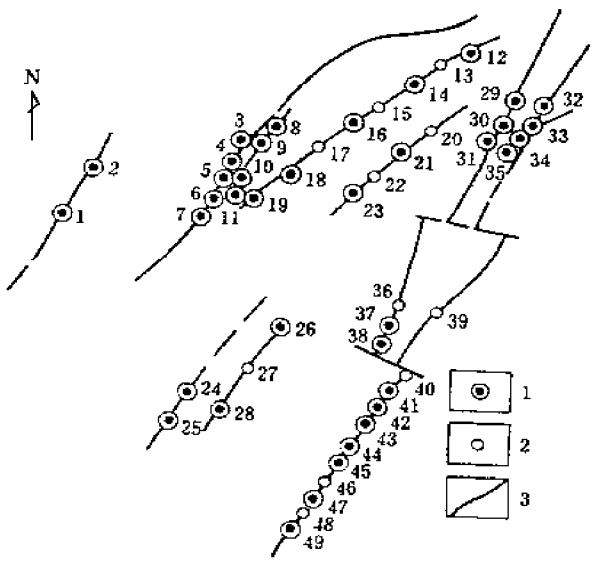
（1）矿带的似等距性

首先，区域上几条北东向的主控矿断裂在空间上呈现出似等距性展布的特点，控制了相应矿带的似等距性产出。按区域范围内主要控矿断裂及其所控金矿床（点）空间展布的相对集中性，可将本区金矿化的产出划分为数条矿带，这些矿带在空间展布上以 5～7 km 的间距显示大致的等距性特征（图 5-5）。另外，据对焦家金矿田矿化似等距性研究发现，矿田内三个主要的北东向矿带呈“递变”等距分布，即从北西往南东，矿带间距越来越大，呈现递增趋势，如焦家-新城矿带与河东-上庄含矿带相距 1.5 km 左右，河东-上庄矿带与洼孙家-金华山矿带相距 2 km 左右，洼孙家-金华山矿带与灵山沟-双目顶矿带相距 2.5 km 左右，各矿带之间的递增值为 0.5 km。

（2）矿床（点）的似等距性

本区各主要矿带范围内金矿床（点）的似等距产出特征亦较为明显，但各矿带内矿床

（点）之间的间距有所不同。具体认识是，焦（家）-新（城）矿带上自北而南发育有新城、红布、焦家、马塘、寺庄5个金矿床，其间距大致为2 km（图5-5中3～7），灵（山沟）-双（目顶）矿带上自南而北发育有黄埠岭、灵山沟、魏家沟、北截、战家、马鞍石、纪山、石棚等金矿床(点)，其间距大约为3.5 km（图5-5中12～19），玲（珑）-罗（峰）-大（尹格庄）-夏（甸）矿带西南段的大尹格庄到下庄之间依次发育有大尹格庄、曹家洼、姜家窑、夏甸、张格庄、北泊、下庄等矿床(点)，考虑尚待进一步勘查评价的留仙庄、萌山矿点，其间距大致为2.5～3 km（图5-5中41～49）。③矿脉（体）及矿化富集中心的似等距性：具体到某一矿区，矿脉、矿体以及矿化富集中心之间都存在着似等距展布的结构特征(图5-6)。据统计，规模较大的矿脉之间的距离为100～150 m，垂直相距150～200 m，规模较小的矿体之间，水平相距100～150 m，垂直相距50～100 m。根据对玲珑西山108号矿脉、灵山沟1号、5号矿脉和黄埠岭7号、10号矿脉所做矿体（柱）圈定和品位、厚度等值线图的结构特征显示，矿脉内的矿体和金矿化富集中心都显示一定的似等距展布特征，其水平相距100～150 m左右，垂直相距50～80 m左右。


N
1
2
3
1
2
3
1
2
3

同一性质的断裂，但在相隔一定距离之外，该应力分量没有降低，且还会升高，因此，还可能再次发生断裂。从定性方面来讲，这就会导致断裂常呈一定的似等距性。至于似等距间距的大小，则可能受许多因素控制，如岩石的均质性、地应力大小、性质等。造成脉状金矿化系统多层次似等距展布的主要原因是控矿断裂构造的多层次似等距展布。因为构造是控制脉状金矿床（体、点、矿化富集中心等）产出与分布的最主要因素，所以控矿构造的多层次似等距展布是导致金矿化多层次似等距分布的主要原因，而产生断裂构造似等距性的主要原因则是赋矿花岗质岩石的均质性特征和构造应力的波状传输（汇集与释放）特点的辩证统一。

四、矿化场空间的精细结构分析

为了有效地揭示和厘定矿脉内矿体的空间产出样式和定位规律，笔者以湖北茅坪金矿为例，考虑充分利用矿山已有勘、采资料中的金品位和厚度数据，采用空间结构分析方法，查明矿化场空间的精细结构特征。该方法主要由以下几个工序构成：①对矿山原始资料进行收集、整理和分析评价，确定与资料信息可吻合的研究范围；②计算和确定相关品位、厚度参量的分级与取值；③绘制能反映和识别矿体形态产状特征的品位、厚度等值线；④揭示金矿体空间产出样式、定位规律及其与主要控矿断层结构的对应耦合关系；⑤建立矿体空间定位产状模式和关键性预测评价标志。

1. 金品位空间结构特征的统计分析

经对矿山主要开采对象 1 号脉 1900 多个金品位数据的统计分析发现，沿脉金品位呈锯齿形跳跃，604 中段以上品位波动幅度高于 604 中段以下，根据 1 号脉不同中段金品位的变异性分析，726 中段金品位极差为 0.01 到 201.5×10^{-6}，波动幅度最大，变异系数达到 459.89%。从 800 m 中段至 480 m 中段，金的最高品位和平均品位呈下降趋势，品位极差减小，变异系数逐渐变小，表明从矿脉上部中段到下部中段金矿化逐渐趋于均匀稳定，金的矿化强度降低，但矿化连续性变好（图 5-7、表 5-5）。

表 5-5　1 号脉不同中段金品位变异性统计表

平硐海拔标高/m	800	773	726	655	604	527	480
极小值	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.20
极大值	90.25	57.94	201.51	53.34	36.50	28.35	4.01
平均值	7.32	4.24	6.00	3.19	3.52	3.71	1.49
金属量	691.74	667.80	1491.0	1276.0	193.9	1038.8	74.50
变异系数/%	314.67	279.63	459.89	236.78	201.58	149.57	92.23

注：①极值＝样长×品位均值；②金属量＝开采总脉长×均值；③变异系数＝均值＋标准差。

由金的加权品位等值线分析发现，金矿化在空间上的分布是极不均匀的。在已开采的各中段中，主要有四个金的浓集中心或富矿柱，第Ⅰ浓集中心位于 800 m 标高的第 8～10 勘探线，加权品位大于 50×10^{-6}，品位较高，但规模和延深较小；第Ⅱ、Ⅲ浓集中心以第 2 勘探线为中心，纵向再现，规模较大，第Ⅱ浓集中心向下未完全封口，527 中段沿脉向 317°左右方向掘进，估计在第 2 勘探线附近还可以见到此富集中心。第Ⅳ浓集中心位于第 5～9 勘

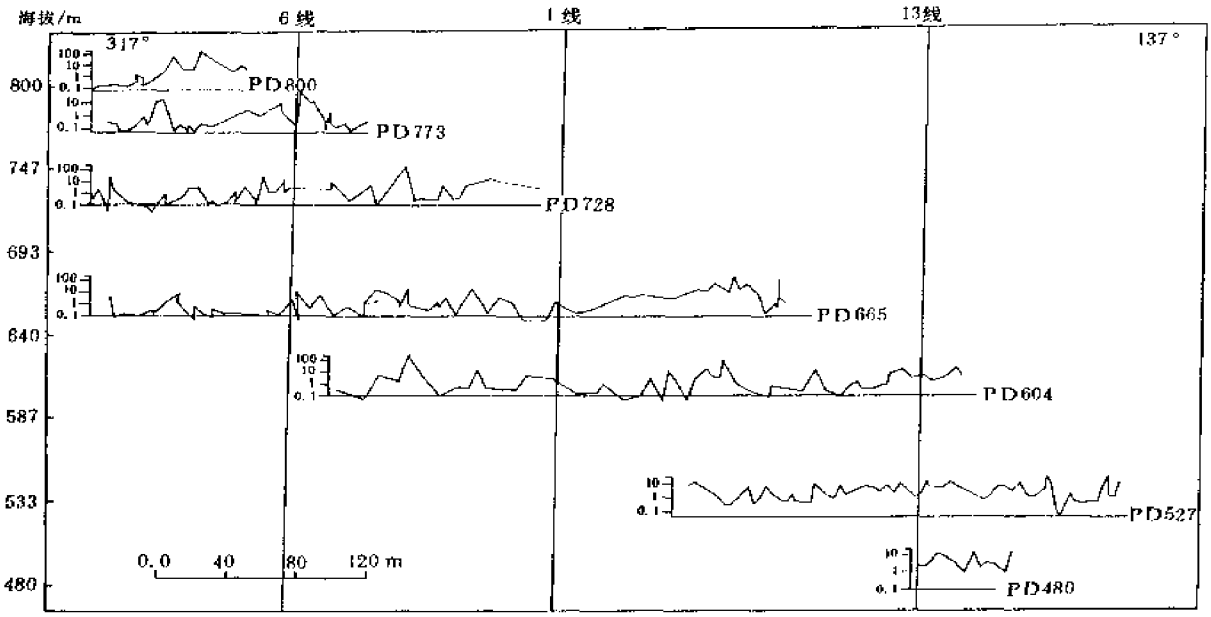


图 5-7　茅坪金矿 1 号脉不同中段金品位联合剖面图

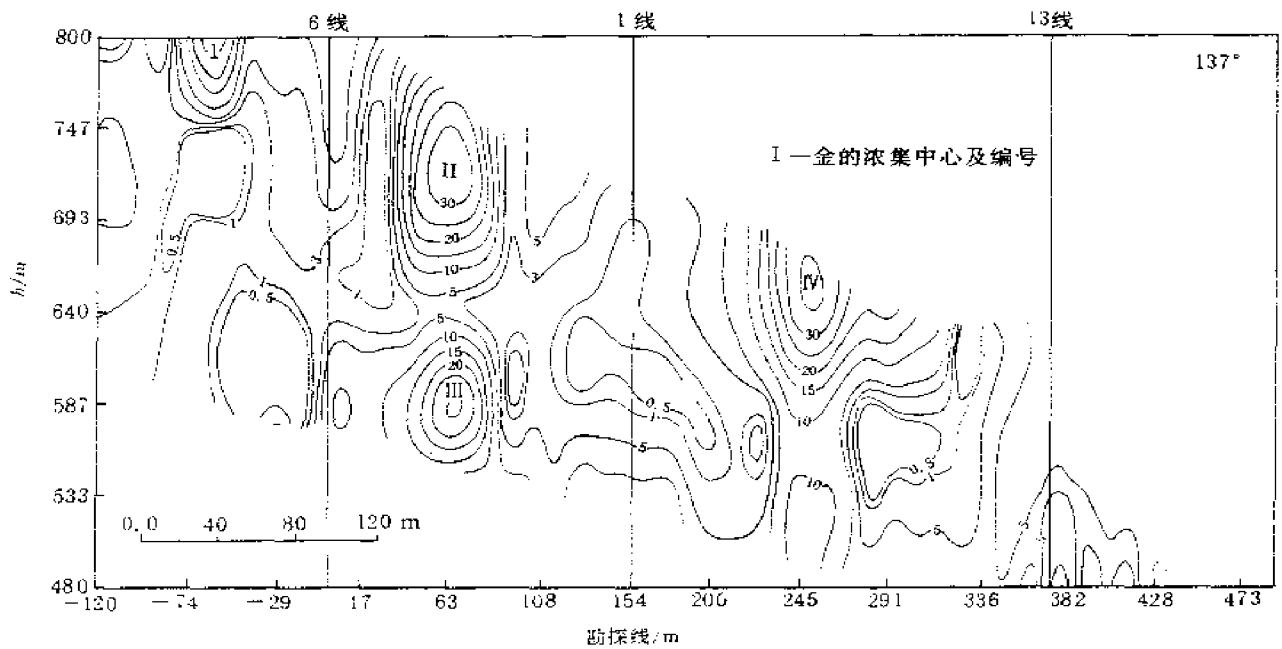


图 5-8　茅坪金矿 1 号脉金加权品位等值线图

横坐标以第 6 勘探线为 0，用距离（m）度量，137°方向为正，317°方向为负

探线一带规模较大，向深部有减弱再现的趋势，480 m 中段向 317°左右方向掘进，预计可以在第 5～9 勘探线之间再见富矿段。

由金品位结构分析（图 5-7、图 5-8）发现，茅坪金矿的金品位空间结构总体表现为多

中心富集，似等距展布，向南东侧伏方向和延深方向有近似等间距的矿化富集段尖灭再现，第 6、1、13 勘探线和 655 m 标高侧伏方向为金矿化的减弱带，这种富集、贫化相间的空间结构主要受到控矿断裂在空间上的相对挤压和启张部位的制约。因此，查明控矿断裂构造在空间上的变形特征和几何结构规律，对指导隐伏矿体定位预测有重要的现实意义。

其他矿脉金品位变化及 Au/Ag 比值见表 5-6。由表 5-6 可见，同一中段不同矿脉的 Au/Ag 比值差异不大，在 1.0～1.5 之间，表明具有相近的成矿构造物理化学条件和成因机理。各支脉金的品位比较高，是扩大矿山找矿远景，增加可采储量不可忽视的探采对象。

表 5-6　527 中段不同矿脉中金品位变化及 Au/Ag 比值对比表

参数 / 矿脉号	Au 最小品位 10^{-6}	Au 最高品位 10^{-6}	平均品位 10^{-6}	变异系数 %	Ag 平均品位 10^{-6}	Au/Ag	样品数
1	0.04	26.49	4.53	123.05	3.97	1.141	158
6	0.16	183.38	30.05	141.42	29.097	1.033	48
11	0.53	166.39	41.15	109.82	26.89	1.530	69
20	0.17	133.58	38.09	111.26	29.74	1.281	41
29	0.29	45.96	12.11	105.81	11.21	1.080	55

2. 金矿脉厚度变化特征与金品位的关系

茅坪金矿矿脉厚度的空间变化特征见图 5-9，变化趋势见图 5-10 和图 5-11。图 5-9 为各垂直 1 号矿脉刻槽采样点厚度 $L=\sum_{i=1}^{n} l_i$ 的等值线图，由图可见矿脉厚度的空间结构以厚度小、变化大为特征。常见脉厚在 0.n～1.0 m 之间，沿走向和垂向厚度变化均较大，总体

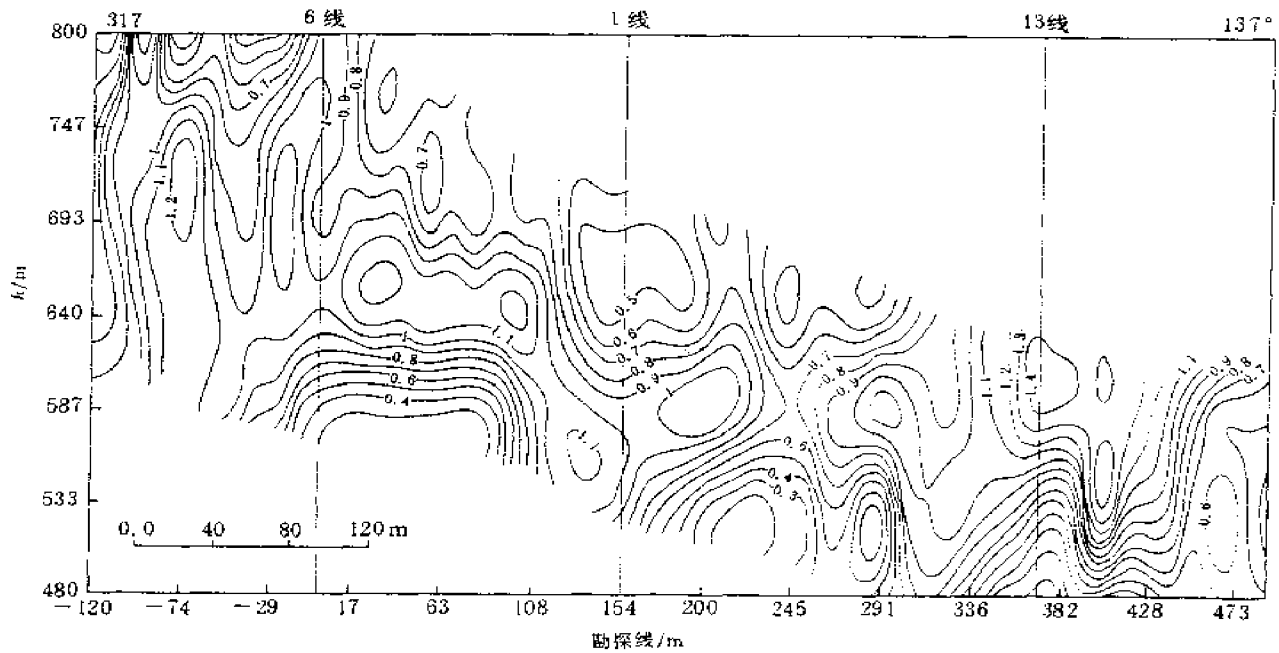


图 5-9　茅坪金矿 1 号脉厚度（m）等值线图

表现为第 6、1、13 勘探线一带和 655 m 中段侧伏方向脉体厚度相对增大，脉厚三次趋势面清晰地反映了含金矿脉的空间结构特征和变化趋势（图 5-10），三次多项式趋势面分析剩余异常相对较高（图 5-11）。第 8、2、9 勘探线近地表处有三个厚度减薄中心，第 6、5、13 勘

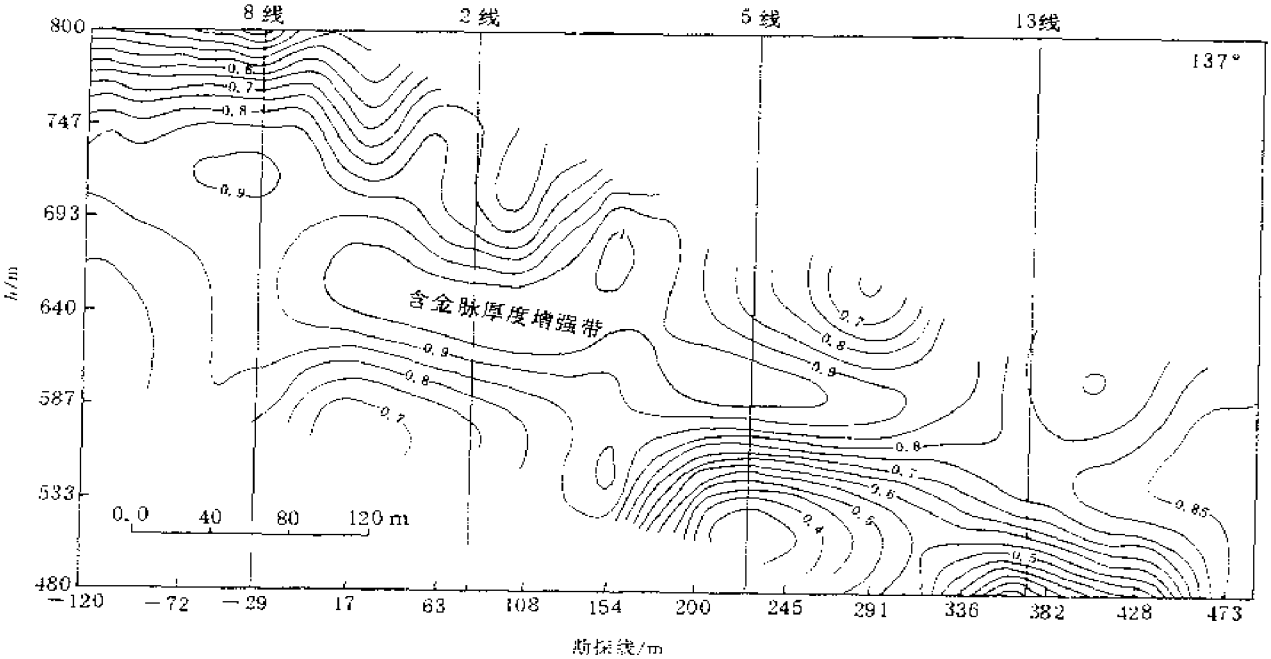


图 5-10　茅坪金矿 1 号脉厚度三次趋势分析等值线图

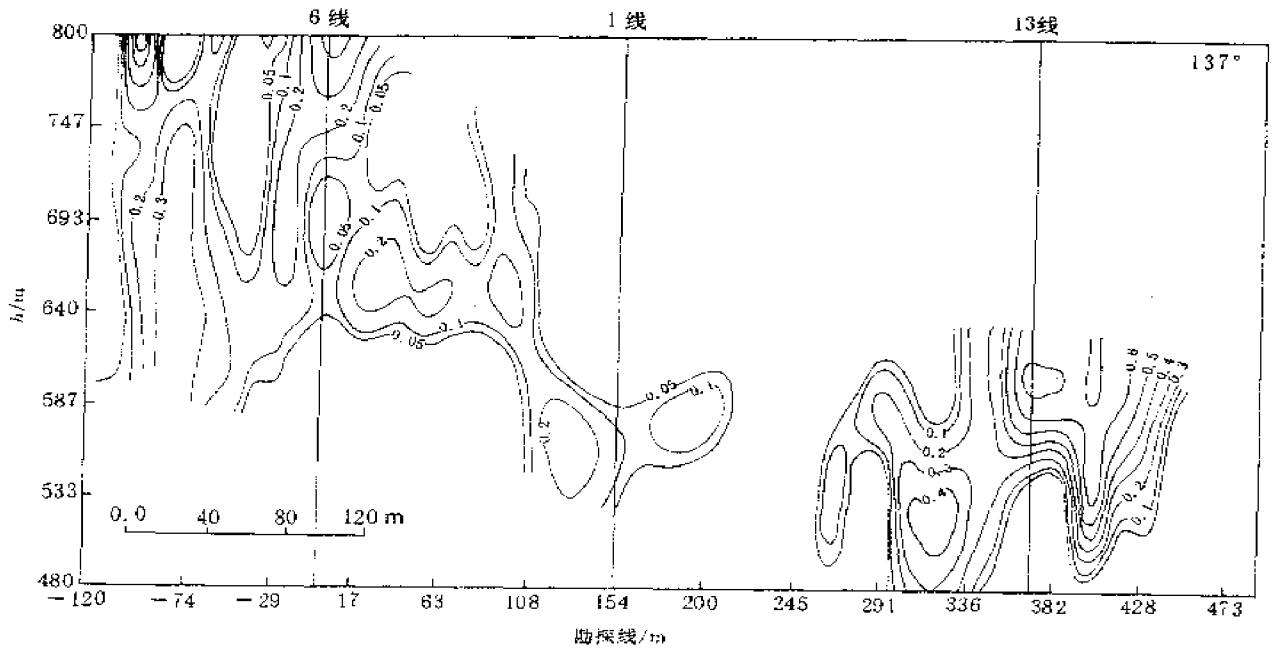


图 5-11　茅坪金矿 1 号脉厚度三次趋势分析剩余值等值线图

探线的下部中段出现三个减薄中心，580 m 标高的南东侧伏方向为矿脉厚度增大趋势方向，对比金平均品位三次趋势面结构（图 5-12）可知，厚度减薄中心对应金的浓集中心，相反厚度增大部位则是金品位减弱部位。这表明金的平均品位随脉体厚度的增大而变低，矿化

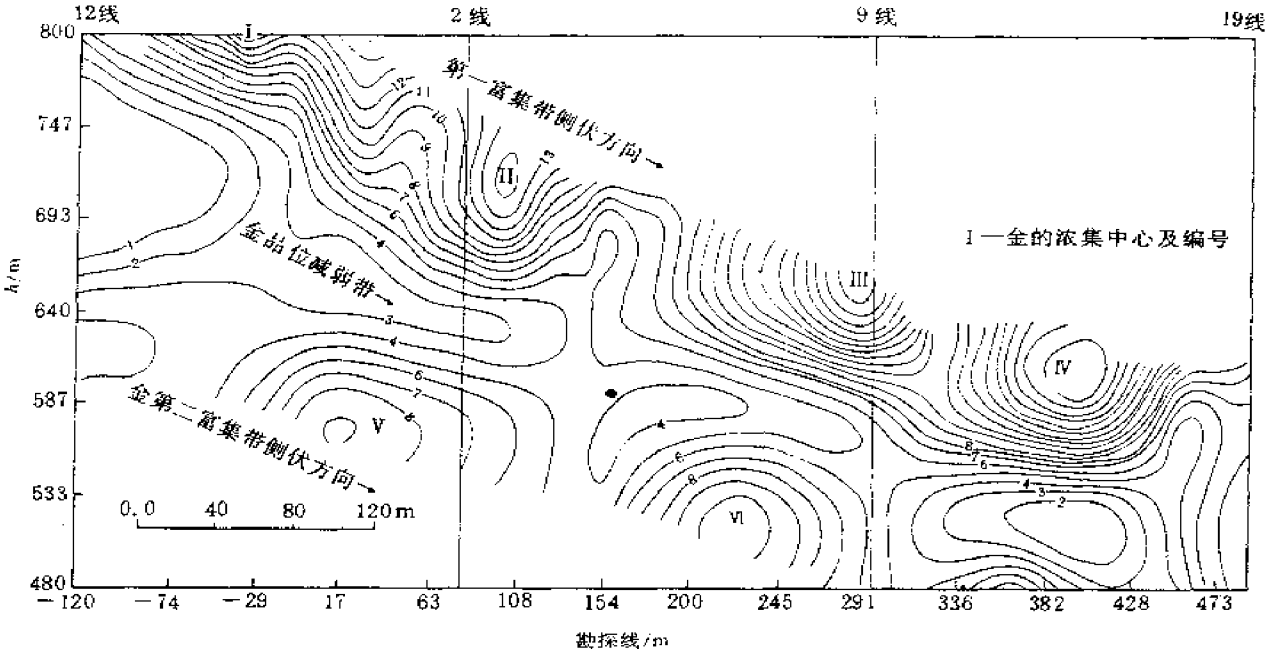


图 5-12　茅坪金矿 1 号脉金的加权平均品位三次趋势分析等值线图

富集中心多产于脉体厚、薄变异部位，增加开采厚度会使金的平均品位降低。这反映出茅坪金矿成矿作用以充填作用为主，交代作用较弱的成矿特征。

3. 金矿体的空间定位规律

茅坪金矿 1 号脉为矿区内延伸最长和延深最大的主矿脉。金的加权品位三次趋势面分析剩余异常结构反映出金矿化具有 5 个浓集中心（图 5-10）或富矿柱。5 个浓集中心的矿化强度沿侧伏方向依次减弱，但矿化规模有增大的趋势，其中Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ号浓集中心在深部未完全封口，可进一步探采。从金的加权品位三次趋势面分析可见，金矿化沿侧伏方向有两个富集段，第一富集段位于近地表浅部，沿侧伏方向已有三个浓集中心，金品位的变化趋势有侧伏增强特征。第二富集段从 604 m 中段至 480 m 中段的侧伏方向也出现三个浓集中心，金品位变化趋势也是增强的。金的线金属量（金的平均品位×脉厚）三次趋势面更清晰地反映出金矿化沿侧伏方向的延伸增强趋势（图 5-11）。这反映茅坪金矿今后的远景找矿方向除应对分支矿脉加强探矿外，沿主矿脉 1 号的侧伏方向及延深方向均有一定的找矿远景，并且在 604 m 中段以下有金的平均品位减小而金矿化呈均匀、稳定、连续性变好的趋势。由此可获得如下结论性认识：

（1）茅坪金矿含金石英脉的产出虽严格受断裂构造所控制，然而工业矿化地段（特别是矿柱）往往只出现于断裂中的一定部位。因而在一矿脉中常常存在着若干并不连续的工业矿段，即工业矿化局部化问题。通过金品位和矿脉（体）厚度的空间结构分析，可有效

揭示和厘定工业矿体的空间定位规律，这是实施矿区深部预测的技术关键和有效途径。

（2）金品位空间结构样式显示，本区金矿化从目前探采深度向下，经过弱矿化段之后，可能出现一个新的矿化富集地段，并依其梯形侧伏规律，向南东偏移，这一认识已为矿山

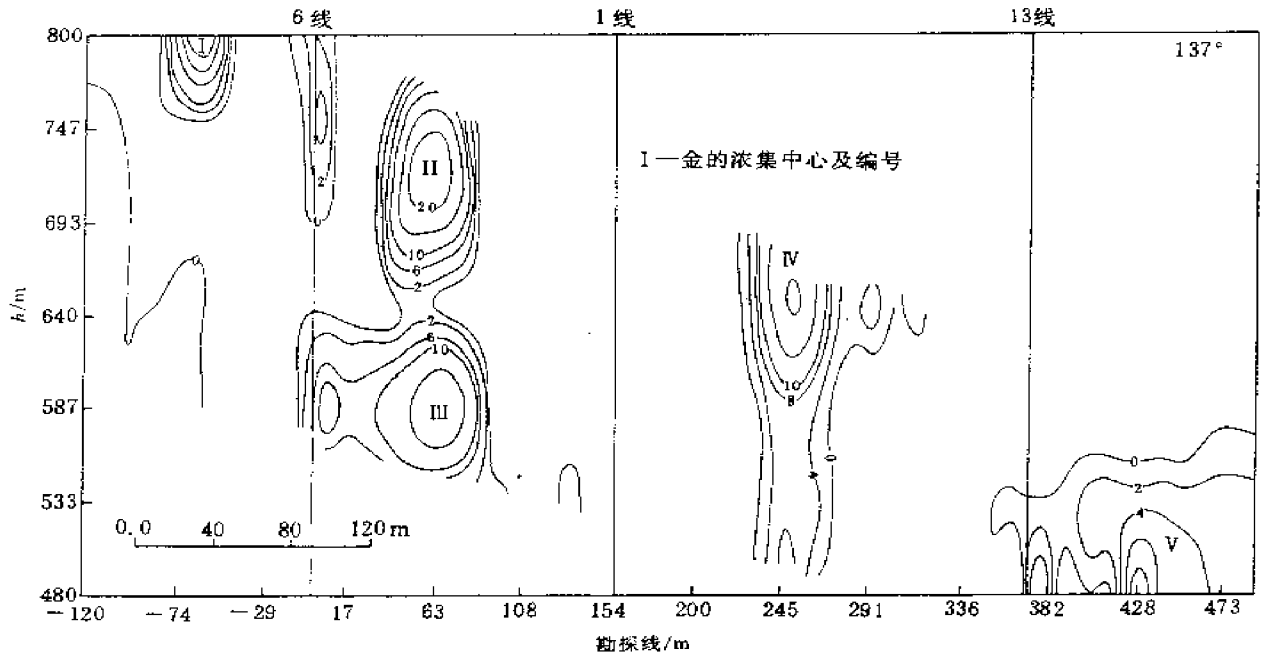


图 5-13　茅坪金矿 1 号脉金加权品位三次趋势分析剩余值等值线图

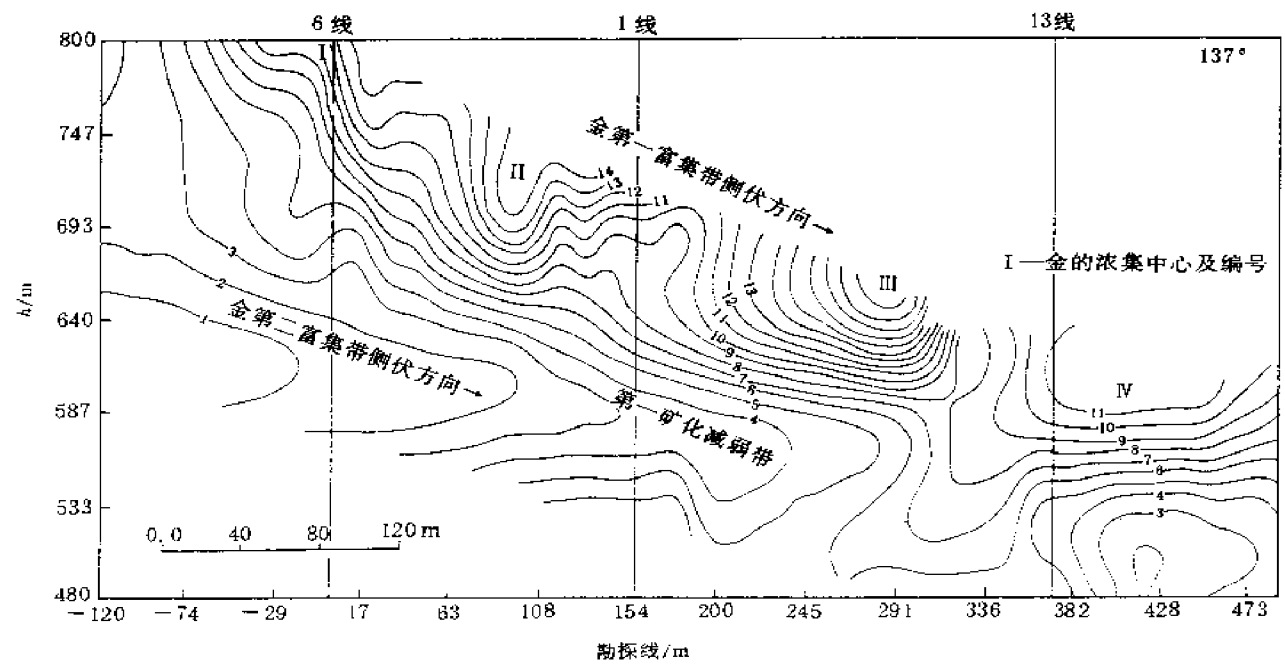


图 5-14　茅坪金矿 1 号脉金的线金属量［品位（10^{-6}）×厚度（m）］三次趋势分析等值线图

生产探矿工程所验证。

(3) 矿山勘查的具体实践表明，揭示并查明金矿化的空间定位及不均匀分布规律是矿山地质研究的核心问题，亦是矿山深部及外围隐伏矿预测的主要依据。而利用勘、采过程中所获取的金品位、厚度数据研究矿化场的精细空间结构特征则是揭示矿化空间展布和定位规律的最有效途径之一。

(4) 矿化场空间精细结构分析方法充分结合矿山生产实际，经济、简便且易操作，对各类受断裂构造控制的热液脉状金、多金属矿床已有地质资料的二次开发和信息提取具有普遍适用性。

五、成矿物理化学参数的空间结构分析

1. 热晕及盐晕的空间结构分析

通过胶东典型脉状金矿之一的玲珑金矿 108 脉进行包裹体热晕、盐晕和 CO_2/H_2O 等值线结构分析来厘定和表征成矿热液的运移方向和矿体侧伏方向，取得了较好的效果。其具体做法是采用矿脉中 I 阶段石英的 54 个爆裂温度 (t_0) 数据做矿脉纵投影面热晕结构图(图 5-15)，显示矿液的运移方向为由 NE 深部向 SW 浅部，最小热梯度可达 13℃/100 m。这与国外某些典型含金石英脉型金矿热梯度为 10～20℃/100 m 的认识相一致。采用 32 个第 I 阶段石英的包裹体盐度数据做矿脉纵投影面盐度等值线图(图 5-16)，显示结果与热晕结构相似，并呈现高值区与低值区似等距相间分布的结构特征。

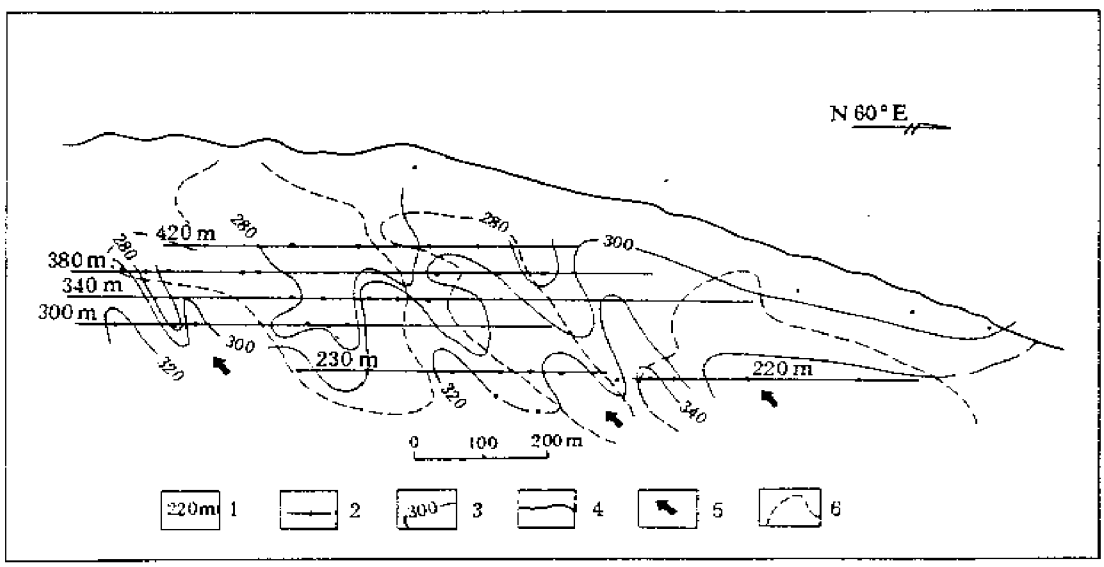


图 5-15 玲珑金矿 108 号脉纵投影面石英热晕结构图

1—中段标高；2—坑道及取样位置；3—等温线及温度 (℃)；4—地形线；5—矿液流动方向；6—富矿体投影及编号

2. CO_2/H_2O 比值及结构对矿液流向的指示意义

CO_2 是天然热液体系中最主要的组分之一，特别是对于大多产于花岗-绿岩地体中的脉状金矿物来说，流体包裹体富含 CO_2 是其最重要特征之一 (Roedder，1989；Colvine，

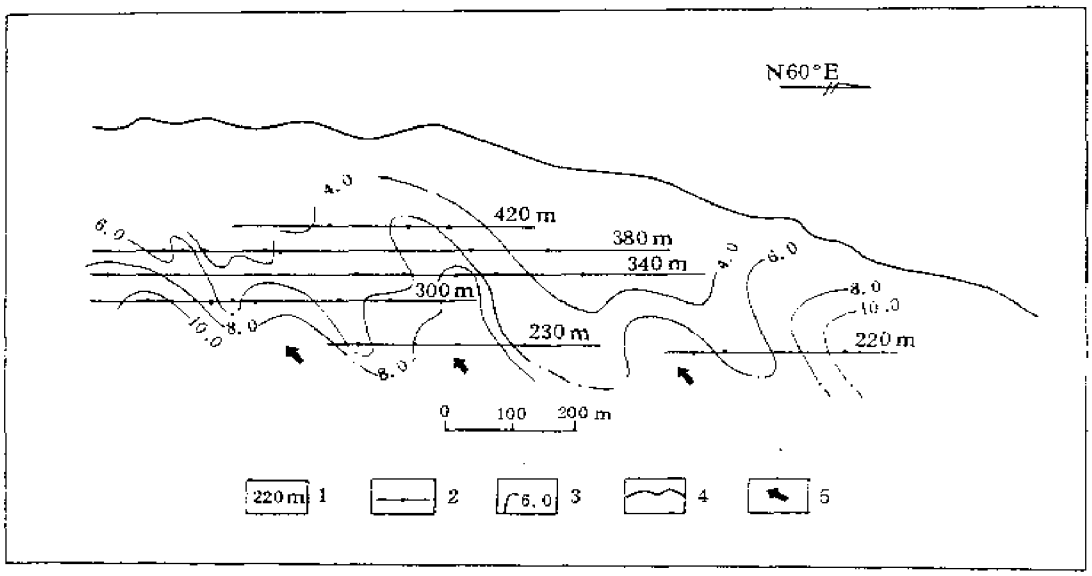


图 5-16　玲珑金矿 108 号脉纵投影面石英盐晕结构图

1—中段标高；2—坑道及取样位置；3—等盐度线及盐度值（%）；4—地表投影；5—矿液流向

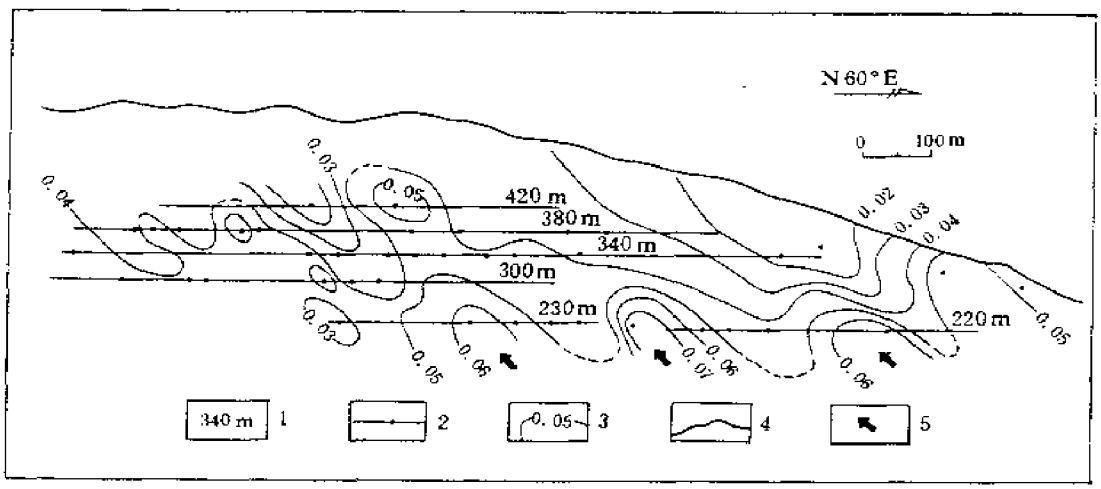


图 5-17　玲珑金矿 108 号脉纵投影面石英包裹体 CO_2/H_2O 等值线图

1—坑道标高（m）；2—取样位置（47 个样）；3—CO_2/H_2O 等值线及数值（摩尔数比），点划线为推测等值线；4—地表投影线；5—矿液流向

1994）。矿液中的 CO_2 不仅影响成矿物理化学条件，而且对矿液的迁移，矿质的沉淀和矿体的定位具有重要的制约作用，因而成矿流体中 CO_2 含量的高低与矿化的强弱有着一定的内在联系，CO_2/H_2O 高的部位往往是金矿化富集的有利部位。所以，CO_2/H_2O 比值变化及其结构特征可做为指示矿液运移方向和成矿有利部位的有效标志。

热液脉状金矿床包裹体成分研究表明，大部分矿液体系较接近于 H_2O-NaCl-CO_2 体系。

形成于地壳深处的富含 CO_2 的流体沿着断裂裂隙向地壳浅部或构造减压带运移时，随着 t、p 的降低，溶解于热液中的 CO_2 不断逸出，CO_2/H_2O 逐渐降低，形成了控矿断裂内矿液 CO_2/H_2O 的浓度梯度，从而指示矿液的运动方向是从高 CO_2/H_2O 地段向低 CO_2/H_2O 地段。利用胶东玲珑金矿 108 脉中 I 阶段石英流体包裹体的 CO_2/H_2O（摩尔数比值）等值线图给出了控矿断裂内含金石英脉中金矿体的投影（图 5-17）。由图可见，在每个矿体的中心部位，CO_2/H_2O 值较低，而在无矿间隔地段，CO_2/H_2O 相对较高。这说明 CO_2/H_2O 较低（压力较低）的部位与控矿断裂内减压扩容带（有利的成矿地段）重合，而 CO_2/H_2O 较高部位（压力较大）则是构造紧闭部位。图中所指出的矿液运动方向与前述热晕和前人研究的 Ag/Au、Pb/Zn 比值等值线（刘石年等，1987）的结果一致，即矿液来自矿脉的 NE 深部，矿体定位于减压沸腾部位。

第六章　多元预测信息的有效提取与优化

每一类矿床，甚至每一个矿床，都具有丰富的成矿信息和特征的预测标志。一般在系统研究和综合分析成矿地质、地球物理、地球化学资料的基础上，经过有效提取与优化，有可能识别主要控矿因素和关键预测标志，并将其转化为隐伏矿预测的关键预测信息和组合预测参数，构建高精度预测模型，为隐伏矿体定位预测提供科学依据。所有这一切都涉及到地、物、化资料处理分析过程中对多元预测信息的有效提取与优化问题。

第一节　引　　言

一个隐伏矿体的发现，往往由一组成矿信息决定。这些信息的直观体现，就是预测标志。预测信息是指显示矿体存在或可能存在的各种地质现象以及关于预测目的物或目标物的地质、地球物理、地球化学的辨识特征。根据这些现象和特征，能够指示地质体的含矿性，能够在空间上以一定概率圈定有利含矿地段，判断隐伏矿体的具体产出部位和形态产状。因此，提取和优化后的预测信息，最终应具备以下预测功能：

（1）判别地质体有矿、无矿——筛选有利找矿靶区的能力；

（2）指示矿体所在部位、埋深和受剥蚀程度的能力——进行隐伏矿体定位预测的能力；

（3）判断矿化富集程度和矿体规模、形态和产状的能力。

所以，关键预测信息是在对控矿条件、成矿规律作深入系统研究后提取并建立的。它是隐伏矿体定位预测的基础。预测信息的有效提取与优化是成矿预测的一个重要环节，是取得找矿突破的关键问题之一。它既需要在控矿地质条件和地、物、化异常结构分析基础上进行，又要求在预测信息优化基础上建立高精度预测模型，再应用模型类比预测隐伏矿体。

预测信息按实用性可分为直接信息和间接信息。按信息的学科属性分为：地质信息、地球物理信息、地球化学信息。另外，在信息的提取和优化过程中按信息的构成分为：一次信息、二次信息和组合信息。

提取和优化预测信息，应遵循下述原则：

（1）准确性或有效性。就是应在一定置信度下，较为准确地反映成矿信息。同时，要求资料、数据可靠；

（2）相关性。提取的关键预测信息要和隐伏矿体定位预测密切相关；

（3）对应性。预测信息和预测对象之间，尺度要对应匹配。同时，要注意对应的工作精度和对应方法手段，使提取和优化后的信息具有可比性；

（4）独立性。在一个模型中，各预测信息之间彼此应具有相对独立性，避免一项主要信息和其关联的派生信息混合使用，影响预测效果；

（5）实用性。一般提取的预测信息要注意简单实用，具较普遍的实用意义和推广价值，

即目前生产单位有条件能通过常规方法手段获得的。高耗费获得的信息，只有具有独到的指示意义时，才有实用价值。

预测信息有效提取的途径，概括说是要准确提取一次信息，认真发掘二次信息，努力探索深层次信息和组合信息。由于一个矿体的定位机理及定位规律，受多种因素控制而极为复杂，因而反映成矿信息的将是一个庞大数据集。研究人员只有在掌握成矿规律基础上选取有效方法，才可能从数据集中将成矿信息有效识别和提取出来。具体思路是：

（1）准确提取一次信息

对直接提取的初始信息，首先要进行认真的鉴别和判别，要求原始资料可靠，数据有效，准确性高。如对地质信息，在成矿条件深入研究和综合分析后，从地质异常致矿与控矿角度确定成矿的主导因素或关键因素以及控矿的必要条件，然后从中提取直接和间接的异常组合信息。

（2）认真发掘二次信息

为了扩大、强化和突出关键预测信息，对提取的一次信息进行数据处理、转换而获得效果更佳、更直观的新信息，即二次预测信息。

（3）努力探索深层次信息和组合信息

应用一次信息或二次信息进行累加或累乘等形式的关联分析或组合分析，从而获得具有强化或特殊指示意义的新信息。如常用矿体前缘指示元素和尾部指示元素的比值，判断矿体出露部位或遭受的剥蚀程度等。

预测信息有效提取方法是从对多元预测信息的科学分类入手，通过类比、综合、归纳以获得更直观、有效的预测信息。其具体研究方法为：①信息的分级分类；②信息的归纳；③信息的推理；④信息的统计分析；⑤信息的综合。

第二节　预测信息提取与优化的基本问题

一、信息场和信息的多重中介、损失与失真

任何物质都具有反映它直接存在的物质场，同时又具有这一事物所携带的信息所形成的信息场。每一种信息场只能反映、传递事物的某一方面特征。因此每一具体信息场对事物的某一方面是真实反映，但对事物总体却是某种失真和歪曲。只有信息的集合才能反映事物的真貌。单一信息场的过滤作用产生信息的第一次失真和损失。信息通过工具仪器接收、测量、显示。工具仪器的精度不高加上环境的干扰造成信息的第二次失真和损失。人们所获得的信息都由感官接收并经过大脑中枢加工处理，人类自身感官的局限性和不同个体之间的差异性将产生信息的第三次失真和损失。认识的主体对接收到的信息进行综合分析形成事物的概念规律所构建的客观对象，又依后天形成的知识结构和思维模式的不同，与预测对象的真貌有一定的差异。这是信息的第四种失真原因。由此可以看出，一个客观事物和认识之间存在着以上多重中介。一个正确认识的获得需要对多方面的信息进行综合，需要认识过程的多次反复，并克服来自环境的干扰和自身的局限，尽量减少信息的失真和损失，才能逐步逼近真实。了解这一过程的复杂性有助于对预测信息的有效提取与优化。

成矿系统特征值属于深层次结构信息，具有显著的预测评价意义。例如成矿过程动力

学分析可有效认识矿体空间定位机理；成矿系统中矿化场结构分析有助于揭示场结构与矿体展布的对应耦合关系和产状样式，从而可以借助构造几何方法和数值结构模拟方法实现矿体定位规律的厘定与表征；通过成矿系统多参数特征值的趋势分析，可进行有效的矢量逼近和隐伏矿体定位预测。

二、预测信息和预测目标

在预测工作中，预测者所关注的是具有指示意义和预测功能的信息，并将之统称为预测信息。按其特点及作用，又可分为：

1. 事实性信息

它反映地质体客观存在的本质（原始）属性，按使用程度和地质数据的特点又可分为：①描述型，它仅是对客观地质体的描述性记录，是取得其它信息的源泉；②加工型，应用科学的分析、类比、综合、归纳等逻辑推理对描述型信息进行科学加工后获得的比描述型信息更深层次的信息。

2. 预测性信息

它是指从地质体尚未观察到（或揭露到）的而仅根据描述型和加工型信息推断的某些地质体可能存在及其相应属性的信息，可指示或识别某些隐伏矿床（体）的成矿条件或赋存部位。它可以是数据形式，也可以是资料或数据加工后的相关参数。

地质数据（或资料）经科学方法加工才有可能获得预测信息。当对矿床直接观察时，获取的描述型信息可称成矿信息，但它对成矿预测和靶区优选来说意义不是很直接，甚至不起作用。追其原因有二：①信息不完善，夹有干扰或假信息，信息的纯度不够；②可能是压制对成矿起决定作用的某些信息。前者用矿与非矿信息的区分来解决，达到“纯化”成矿信息的目的；后者用“强化”或优化来解决。预测信息的提取和优化对隐伏矿体定位预测具有决定性的意义。

进行多元预测信息的有效提取与优化，其实际意义有以下几点：

（1）按预测目的从成矿信息中提取预测信息，可将庞大的原始数据“浓缩”到与找矿有关的状态。利用预测信息，预测找矿人员可以直观分析，对成矿的优劣作出正确判断，提高对地质资料的响应速率。

（2）有效区分矿与非矿信息，衡量信息加工质量是地质资料使用有效性的手段。

（3）作为找矿靶区优选和隐伏矿体定位预测的前提和依据，否则找矿靶区优选无法实施，同时也达不到隐伏矿体定位预测的目的。

预测信息提取与优化主要是围绕预测目标与人、成矿信息、技术方法之间的关系来进行的，而人的经验和知识、人的创造性思维能力、人对成矿信息的分析和判断能力是至关重要的。在上述关系中，信息的提取与优化方法不能取代人的作用，而是以某种形式加强人的作用，有效的预测信息提取与优化方法有助于提高成矿预测成果的可靠性和准确性。

隐伏矿体定位预测属于目标性预测。因为隐伏矿体定位预测有明确的目标，所以相应的预测信息必须与预测目标的要求相一致。就预测信息自身而言，它涉及到多元地学数据、多因素控矿条件、多变量组合的“三多”事实。提取与优化过程中，对与预测目标不一致的预测信息需要剔除。将包含有不一致成分的成矿信息，称为“干扰”，需进行“剔除”处理，对“干扰”作合理地剔除或有限的控制；对一些成矿信息较为隐蔽，显示性不强的信

息，则要进行“强化”处理，突出这类成矿信息与目标的一致性。

三、信息提取与优化的一般方法

预测信息的提取与优化，主要涉及到对多元预测信息的定性、定量分析和如何从所获取到的分析资料、数据中进一步提取关键性预测信息和深层次预测信息。就是要求通过严密的野外观测和室内测试，严格的逻辑分析与推理，对多元信息去伪存真，去粗取精，由此及彼，由表及里，揭示预测对象内部各部分之间及其与外部环境之间的相互关系和内在联系，确定由成矿作用产生的异常特征、时空结构和因果关系，形成规律性认识。多元预测信息优化和深层次预测信息提取的基本前提是，信息资料要丰富全面，观测要客观求实，实验要重复可比，结论要逻辑明确。

如前所述，在预测中预测者关注的是具有预测功能的成矿信息和控矿因素。预测信息的提取与优化就是针对预测对象和预测目标，在多元预测信息中进行关键性预测信息的有效筛选和最佳组合，或者说是最大限度地剔除非本质信息和无预测意义信息，以突出有效信息和本质信息。所以预测信息的提取与优化过程是一个充满辩证分析和创造性思维的动态趋优过程。因为所有信息都是预测对象发出的信号，从这众多的信息中提取最有效信息，即相当于在不确定性中得到确定性，在可选择对象中做出选择，符合熵函数概率公式 $H=-\sum_{i=1}^{n}P_iL_gP_i$（$n$ 为选择对象数目，P_i 为对象被选中的概率）。这一过程实质是一个辩证分析的过程。

多元预测信息优化和深层次预测信息提取方法，从一般方法论角度，就其在隐伏矿体定位预测中的作用而言，主要分为两类，即处理多元预测信息的方法和获取深层次预测信息的方法，它们之间又有着极为密切的内在联系。一般而言，处理信息的方法包括经典的逻辑分析方法、数理统计方法、系统关联方法等。而获取信息的方法则有一系列从简单到复杂，从低级到高级的认识发展过程，从肉眼观察到仪器分析，从直接观测到仪器模拟，从物理模拟到数学模拟。其与科学认知心理活动密切联系，并与科学思维方式直接相联。实践证明，不论采用何种分析方法，其分析过程中都应紧密关联预测信息的有效提取和优化。特别是在完成了对原始信息、数据的定性与定量分析之后，其分析和认识过程往往并没有完结。如何从所取得的分析数据和资料信息中进一步提取有关预测对象的深层次信息，建立关键性预测标志和高精度预测模型，是提高隐伏矿体定位预测精度的一个关键问题。

在成矿信息的分析过程中，我们将面对的是大量的、复杂的实际现象，从不同角度和不同尺度去预测和衡量这些复杂的实际现象时，可以得到大量离散或连续的信息。这些信息实际上从不同角度反映了被预测对象的现象或状况。根据“随机性原理”和“约束性原理”可知，这些现象或状态的单个出现具有随机性和多解性，但所有这些现象或状态的出现又都受到一定条件的制约，而这些条件实际上是系统本质的必然表现。因此，如何才能从大量离散或连续的随机变量的分析中找出成矿系统中预测目标的特有本质信息和标志信息，并对其进行关联分析与集约化处理，应当是多元预测信息提取与优化方法所要研究和解决的技术关键。

第三节　预测信息的有效提取

一、多元预测信息提取的特点

对多元预测信息进行加工、处理、优化和深层次信息有效提取，是开展隐伏矿体定位预测研究中的关键问题。对多元预测信息进行加工、处理和优化的主要目标是从内容非常丰富的多元信息中提取与具体预测对象及预测目标有关的预测信息，并进行有机关联与综合解释。多元预测信息加工处理的内容和方法与具体信息和要解决的问题有关。不同的信息处理的方法不一样，同一信息因为用以解决的问题不同处理的方法也不一样。但是，其发展趋势则是一致的，即充分利用现代计算技术，从多种信息中提取解决某个特定问题所含信息量最大的综合信息和关键信息。就隐伏矿体定位预测而言，则应重点研究能够直接指示隐伏矿体存在及其产状特征的关键组合信息。这些关键组合信息不仅可由物化探局部异常组成，而且可由地质和物化探的局部异常综合组成。建立关键组合信息其实质就是将地质、物探和化探信息在高水平上综合，隐伏矿体定位预测中的信息提取、分析与优化要体现目标性和目的性，更侧重于微观信息的精细结构研究，多元信息的集约化研究和深层次预测信息的有效提取。

依靠来自矿床（体）的地质、物探或化探找矿信息（局部异常）进行预测和找矿，是由于人们对许多有用矿物组成的矿体物性及化学习性均已熟知，并从矿物学和矿床学的知识方面，认为这些矿物所组成矿体的物理性质和化学性质不因矿床成因不同而有大的差异。因此在根据局部异常进行隐伏矿预测时可以较少顾及区域地质条件，有时可不囿于某一地区已认识到的矿体定位规律。最典型的例子是热液脉状金矿，常根据重、磁、激电局部异常寻找覆盖区的隐伏断裂，进而根据发育较强而且组合元素完整的金异常寻找隐伏金矿床（体）时，可不必先系统研究成矿、控矿地质条件，就可以作出有否隐伏含矿断裂和隐伏矿（化）体存在的预测。虽然在一定情况下，根据局部异常预测隐伏矿体可以奏效，但解释异常时出现多解性却难以避免。因此，物、化探异常结合地质异常作出综合解释和进行隐伏矿体定位预测是提高预测可靠性的必要前提。更为重要的是，在相当多的情况下，物探、化探都可能得到来自隐伏矿床（体）的深层次信息。因此在隐伏矿体定位预测中既要尽可能地提取直接找矿信息，更要充分发掘和利用深层次信息，使之有机关联并进行多种异常精细结构的对应耦合分析和深层次预测信息的有效提取，这应成为一条原则得到重视和体现。

二、关键性预测信息的有效提取

一般情况下，预测的成败决定于有效信息量的多少和以有效信息为基础建立的预测准则是否可靠、实用。所谓可靠、实用就是这些准则是否真正反映了矿体存在的客观规律性，是否把握了反映矿体存在的关键特征标志。

隐伏矿体定位预测为多元预测信息的有效提取确定了目标和范围，而有效预测信息的提取又为高精度预测模型能较真实地反映预测对象提供了具体参数。

这里所指的关键性预测信息，它所代表的是成矿空间存在的特定限制条件。具体是指：①它表示矿化产出的位置和范围；②代表特定的成矿信息，可以是矿体赋存地段的异常信

息，也可以是各类地质资料中含矿信息的综合参数；③预测信息所包含的成矿信息是经过浓缩和“纯化”以后的数值；④其值可以通过某种方式进行优化。一般是指优化后的信息。

用于隐伏矿体定位预测的关键性预测信息可以是定性的也可以是定量的；有些属事实型信息，有的属衍生型信息，有的是描述型的地质概念，有的则是数据处理后的特征参数。它与通常在矿床统计预测中使用的地质变量有所差异。具体表现为预测信息代表的空间范围是确定的。隐伏矿体定位预测中使用的关键性预测信息、相应的取值必须要在特定条件的前提下描述矿体赋存的控矿条件、成矿作用、矿化富集强度和四维空间结构的变化。关键性预测信息提取的优劣、取值的合理性、信息场结构与矿体空间定位规律的吻合程度将直接关系到隐伏矿体定位预测的实际效果。

关键性预测信息提取的效果决定于两个根本因素，一是所用的实际资料；二是所选用的方法。预测者都希望既能有效应用各种地质资料，又能最大限度地突出关键预测信息，实现关键性预测信息的有效提取。在预测工作中，一旦研究区段确定以后，研究区的成矿地质特征主要由反映地质背景和成矿条件的不同信息参数来体现。反之，信息参数的选取将直接关系到信息提取的实际效果。在实际操作过程中，要用尽可能少的预测参数最大限度反映隐伏矿体存在的信息。这些组成了关键性预测信息提取与优化问题的理论依据。

三、深层次预测信息的有效提取

深层次预测信息提取是隐伏矿体定位预测研究的深层次问题。众所周知，预测信息是从地质资料、图像和数据分析中获得和认识到的。在预测信息提取过程中，成矿预测人员面对的是数据、资料、图像组合，使用的也是处理后的数据组合。通常数据本身并不告诉我们什么，但对数据进行处理后，数据集发生分解、用更简化的形式显示出来，将矿与非矿信息区分开来，从中领悟到主要成矿规律和关键控矿因素。数据组合的分解，首先要直观地、简单地、准确地显示成矿信息。选用较好的显示方法，除反映数据结构的一般特征外，还要指示包含的深层次信息的丰富程度，它使预测人员更易于判断，从而从成矿信息的实际资料中形成成矿过程中矿体定位的概念，进行隐伏矿体定位预测和找矿靶区优选。至于能够深入到预测的哪一个层次，取决于数据组合的内涵和成矿预测人员的分析判断能力。

笔者认为现在积累的丰富地、物、化数据中，大量的成矿信息尚未充分地提取出来。一个地区，一个成矿带内每次地质找矿的突破都伴随着地质数据的新认识和信息提取新方法的出现。从这里又反过来启发我们，对现有的数据集要作全面处理，从中识别和提取深层次成矿信息，可促进隐伏矿体的寻找和发现。较为合理的途径是成矿预测人员在掌握成矿规律的基础上，选取有效的方法从对数据集的关联分析中将深层次预测信息识别和提取出来。有了这一步才能深入到更高层次的内涵中去。工作做好了，有可能使关键预测信息的厘定和隐伏矿体定位预测工作取得较好的效果。对此，国内外虽已开始关注，但迄今尚无大的突破。本书亦仅仅是提出这一问题，旨在抛砖引玉。

四、预测信息的有效提取方法

按照多元预测信息集成的特点，可从单方面到多方面逐步提取有效预测信息。目前常用的主要方法是：①信息归纳法；②信息推理法；③信息统计法。但上述提取预测信息的方法在一定程度上都带有片面性。信息归纳法适用于已知区同类型矿化的相似类比，但该

方法往往忽视特殊地质条件和隐蔽预测信息。信息推理法由于对成矿主导因素和矿床成因认识不一致，导致信息推理取得的结论有时不能完全被人们接受。至于信息统计法获得的预测信息，物化探异常的一次信息必须结合二次信息，才能提高预测的可信度。尤其是提取深层次预测信息时，影响因素太多，由各类异常推断地质体的形态、产状及埋深的方法也还有待改进。

根据笔者的研究实践，结合脉状金矿隐伏矿体定位预测的特点与要求，在具体预测工作中可综合采用目标物模型类比法、目标物标志信息统计法和目标物异常结构推断法进行多元预测信息的有效提取。

（1）目标物模型类比法

主要是对成矿模式、成矿理论和物化探资料进行综合分析和模式类比。根据在已知矿床上目标物（矿体）的地质-地球物理-地球化学产状模型所建立的预测准则进行预测信息的有效提取。这种预测准则实际是由已知到未知的类比，类比的内容主要是关键控矿因素和矿体定位规律，也可以是建立在产状模型基础上的关键特征标志的类比，还可以是各种信息图像结构特征的类比。

（2）目标物标志信息统计法

主要是根据已知矿体中具有稳定性的各类标志信息进行统计分析和有效提取。首先在已知目标物（矿体）及无矿地段上取得有关的关键标志信息（重要的地质、地球物理、地球化学标志信息），而后将它们与目标物进行统计分析，找出各标志信息与目标物之间的内在相关性，尤其是找出最能反映目标物存在的“特征标志信息”，从而建立起这类目标物的综合信息和关键信息预测准则。这些准则可以是定性的，亦可以是定量的。预测准则按统计原理建立，能更好的实现物探、化探、地质标志信息的综合，也能更好的反映标志信息与目标物之间的结构特征和统计规律。

（3）目标物异常结构推断法

主要是对可能由目标物（矿体或矿化体）引起的矿致异常信息，按照矿体的物性特征及地球化学特征作出是否由矿引起的解释和推断，进而对反映隐伏矿体的位置、埋深、形态和产状的关键性信息进行有效提取。其基础是由于目标物组成的矿体的物性特征、化学特征和结构特征的相对稳定。如前所述为了解决解释推断的多解性，必须结合局部地质异常结构分析和综合异常精细结构分析进行综合预测信息的有效提取。

第四节　预测信息的初步优化

一、多元预测信息优化的意义

在一定的条件下，矿与非矿之间存在某种程度的差异，这种差异给地质找矿人员提供了识别预测信息的地质前提。在成矿预测工作中，一旦预测的目标确定，在规定的预测范围内都存在特定的成矿地质环境和关键的成矿预测标志。有些标志的存在是预测的基础，它指示隐伏矿体的发现；但另一些信息却不一定是预测的必备基础，其可能会使预测工作引向歧途。从根本上讲，预测信息有机关联与优化的意义在于：

（1）应用信息论的基本原理和运筹学的有效思路，引入综合评判方法，减小预测信息

的随机性和预测参数的模糊性，为高精度预测模型构建提供坚实的信息基础。

（2）将地质数据的多维空间减少到最低维数，而使人的头脑可以加工和反馈；将庞杂的数据减少到仅用有限参数作为关键预测标志；还可将多类地质数据（地、物、化）综合起来，采用综合参数作为预测评价标志。

（3）捕捉与成矿关系较为密切的隐蔽信息。

（4）突出预测目标的“个性”，提高对矿体定位规律、异常结构特征同预测目标对应匹配的认识程度。

（5）提高成矿预测成果的可靠性和准确度。

二、预测信息优化的基本要求

预测信息优化的基本要求是以选择具代表性的关键性信息为核心内容。具体可概括为：

1. 明确预测信息优化的目的

在标定的有限范围内已知矿体及其成因类型的信息是可以获得的，优化就是利用这些信息的成矿有利度分别与已知模型进行拟合，求得各预测信息的优选参数及某些相应的序次。这样在一个预测范围内每一预测信息可以都排出相应的序次。据此为隐伏矿体定位预测提供“最佳标志信息”或“最佳标志信息组合”。

2. 优化需要满足的地质前提

掌握每类矿体赋存的异常结构、矿化结构、信息结构规律和主要控制因素，使成矿预测人员据此有意识地构建最佳预测模型，特别是从成矿信息向预测信息，从成因模型向勘查模型进行转换时应注重向有利发现隐伏矿体的方向转换，使模型突出一些重要的预测信息，实现信息优化的具体目标。

3. 注重信息优化中的主观能动作用

提出和探讨这一问题是基于目前进行多元预测信息优化的最有效方法是从定性到定量的综合集成方法。即注重采用科学理论、经验知识和专家判断力相结合。这一方法就其实质而言，是将专家经验、数据和信息与计算机有机结合，将各种科学理论和人的经验知识有机结合，构成一个先进、实用、可操作的方法系统，以充分发挥其整体优势和综合优势。其具有以下特点：

（1）它是以专家解决问题为目标，通过预测者的经验来实现多元预测信息的优化工作。即专家借用所提供的多元预测信息把多学科综合起来，对预测区范围内的矿化类型、控矿因素、找矿标志和矿体产出的空间位置进行整体性研究并作出经验的判断，确定优化的具体预测信息及其组合。

（2）针对成矿系统的复杂性，把科学理论与经验知识结合起来，避免预测信息关联与优化过程中常见的两类错误，即：①漏掉有效信息；②错将非矿信息作为矿致信息，错将次要信息视为关键信息。

（3）提高数学模型和矿体空间定位产状模型之间的匹配程度。目前两者之间的不协调性有以下原因：①定位机理及定位规律的复杂性和数学模型的逻辑性之间缺少有机的联系；②较难建立统一的类比前提，特别像已知矿体的产状模式与预测区段内控制程度过低的两者差异不是能在成矿预测工作中运用信息优化方法解决的；③数学模型的严密性对使用的地质前提要求过高而难以满足，可能会得到不符合客观规律的结果。预测者主观能动作用

可使它们之间的差距缩小，通过关键控矿条件的探索、筛选和逼近，初步满足模型的边界条件，使优选结果与矿体定位规律较吻合。

（4）有意识地干预预测模型的构成，对模型中使用的参数作适当地强化和朝有利提高预测精度的方向转化，使信息优化的效果进一步提高。

三、预测信息的优化途径与方法

1. 预测信息优化的途径

多元预测信息的有机关联与优化是以地质认识为前提，通过对地质、地球物理、地球化学资料的综合分析和解释，提取与隐伏矿体有关的关键有效信息，建立高精度预测模型来完成的。它着眼于关键控矿地质条件的分析和关键找矿标志的研究，以计算机为工具，以数学模型为手段，充分开发各类地质矿产资料中所蕴涵的有效预测信息，进行隐伏矿体定位预测。多元预测信息的有机关联与优化能够最大限度地利用已有信息资料，全面准确地反映隐伏矿体的产出样式和定位规律。

进行多元预测信息优化应注重加强矿化信息精细结构分析，所谓矿化信息精细结构分析主要是对各种与矿体空间定位有关的信息进行详细剖析和可靠性、代表性分析和评价，从而达到矿化信息系统化和矿化系统（预测对象）信息化。已知典型脉状金矿床的综合信息结构分析表明，一定类型和结构水平的信息特征能较形象、客观地反映出矿化结构水平特征，并显示一定的对应耦合关系。

探索和研究多元预测信息的优化和深层次预测信息的提取，应在注重应用综合方法获取综合信息的基础上，应用经典多元统计分析方法对所获地、物、化、矿资料进行二次开发和线性组合，以提取有效预测信息；应用灰色系统理论中的灰色关联方法（数列预测、区间预测、拓扑预测、灰序列累加生成和灰关联分析等），有效提取、筛选、处理和利用有效预测信息，在信息不完全或不确定情况下提高预测成果准确度与可靠性。并以矿化信息的有机关联和有效传递为基础，以升华的距离为量度，以矢量动态逼近为途径，采用拓扑空间的领域接近和灰关联空间有序建模等方法，通过建立因素、标志、品位、厚度等多参数的灰关联空间及生成计算，实现多元信息的优化和深层次预测信息的有效提取。

2. 预测信息优化的方法—— 参数综合评判

在预测信息优化工作中，可以用数学地质和有关学科的理论对预测信息进行识别、强化和浓缩，达到优化的目的。也可以应用基础学科的基本原理，对某一特征（或称参数）进行深入探索，阐明它同矿体的确定性关系，将这些参数综合起来对隐伏矿体的推断解释作出合理而有根据的结论，达到优化的目的。本书应用参数综合评判方法对热液脉状金矿构造地球化学的原生晕综合参数的单一特征和综合特征进行了关联分析与优化。

勘查实践表明，国内外研究的热液脉金矿数千个原生晕异常中几乎所有的矿体上部都有原生晕异常。但却发现，具原生晕异常的地段不一定能形成有工业意义的矿体。因此，如何对原生晕异常进行优化处理并有效地评价异常的含矿性就成为十分重要的问题。针对这一问题，探索性采用原生晕异常结构的优化处理方法，也可称之为原生异常参数的综合评判法（见第八章）。

其基本思路是凡理论上能够形成某种原生地球化学异常的矿体都可以应用原生晕异常结构参数综合评判法进行预测信息的优化和隐伏矿体定位预测。这种预测信息优化方法从

总体上讲仍属已知单元（矿床、矿体或矿点）与被优选信息的相似类比和相关分析。由于优选涉及到对预测信息的更深层次的认识，与传统预测方法有较大的异同点。其相同点表现在使用的经验模型、理论模型和数学模型是相同的，数据处理使用的原始资料是一样的。差异点在于：

（1）优化方法重点是对成矿信息的再处理，而传统成矿预测很少触及这个信息分析中的关键问题。由此可知，预测信息的优化方法是从更深的层次上探索预测信息有效提取的技术方法问题，更强调优化理论的应用。

（2）使用优化方法的目的在于最大限度地提高信息与模型之间的拟合程度，常用一些特定指标来衡量，如回归分析、复相关系数、趋势面分析的拟合度；另一些模型则是在充分掌握构成模型的各类变量组合并明确地质意义的基础上，使其变量组合标志向有利于模型特征方向转换，反映模型对成矿意义的有利信息，弥补成矿预测中某些方法未作这种考虑的缺陷。

（3）信息优化的主观作用在整个过程中都起重要的作用，成矿信息的识别、预测参数的选择，高精度预测模型的构建、信息叠合关联与优化结果的地质解释等都渗透着主观作用的加入，而目前有些定量预测方法中则缺少上述各环节上某些强烈的主观作用的加入。

四、预测信息优化的实施步骤

预测信息优化的具体实施涉及到信息审定、方法选择、计算和综合归纳及最优提取等步骤（图 6-1）。

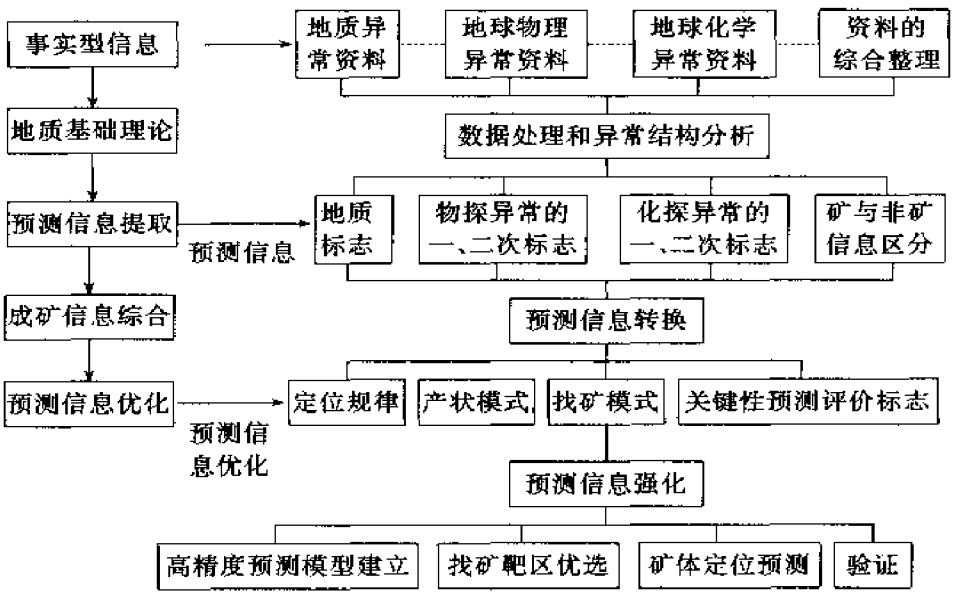


图 6-1　多元预测信息提取与优化框图

另外，就是优化方法的选择。因为预测信息优化方法是建立在信息关联与强化的理论和相应的方法基础之上的。这里所指的信息强化实际上就是成矿信息的合理关联，它可以将同类相同量纲的成矿信息累加或累乘求得强化后的信息量值；也可以用某种参数（例如

因子分析结果求得的因子得分或因子载荷）应用多维空间几何图形之间的联接关系，对某些维（与成矿信息有关）在空间上的绝对值作为具体参数转化为预测信息的量值，当然还可采用其它的原理求取预测区信息的或计算求取量值的方法都属预测信息的优化方法。信息优化的实质是借用有效的优化方法再现预测区范围内成矿信息集的客观实际，但它已不是原始“信息集”的状态，它已经不像原始信息集那样与预测对象（已知矿体）发生直接的，但却是离散的关系，而且大大缩小了与预测对象的差异。

总之，无论属何种情况，信息优化必须以矿体空间定位规律认识为前提，针对性地选择合理的方法，不能期望用数学模型解决预测信息优化中的全部问题。它涉及到预测理论模型、经验模型及统计模型等方面的问题，在实际工作中要注重三者的有机结合。

第七章　高精度预测模型的初步构建

第一节　引　　言

在科学研究中，人们创造了模型方法，即通过构建模型来表征研究对象，并通过不断修正和改善模型使之逐步逼近实际的研究对象。这种模型方法，目前在研究复杂系统的工作中得到了普遍而有效的应用。其有助于我们从整体上、动态上，从各种结构的相互关联上去刻划和把握一个复杂系统。实践证明，只要按照一定研究目的所构建的理论模型能够反映系统的有关本质属性和内在规律性，它就具有科学解释和科学预见的功能。人们就可能通过模型解释系统特征，预测系统变化趋势。模型研究方法因为体现“多种概念和方法相互冲击与汇合”被认为是现代科学方法的核心（霍利斯特等，1988）。

笔者认为，模型作为研究复杂系统的有效办法，其核心问题或关键性步骤就是如何对所研究的对象系统建立起比较适合的科学模型——对地学而言，主要是建立半经验、半理论的模型，即采用定性与定量相结合的综合集成方法。因为复杂现象的规律可以是简单的，而这些规律的合成，也可以是简单的。多元信息是复杂的，但多元信息科学合成的规律可以是简单的，而且又是深层次的，因为其经过“理性的优化”。

第二节　基 本 思 路

模型是指一个由多个数据或信息构成的结构框架和概念、成因的内在联系。高精度预测模型是指具有高精度的时空结构框架，能反映局部异常精细结构特征，可对多元预测信息进行有效提取和集约化分析预测找矿模型。对脉状金矿来说，其应具备的第一个特征就是矿质、流体、动力和空间的有机关联和对应匹配；第二个特征是地质异常场、物化探异常场、构造物理化学场结构与矿体产出样式及定位规律的对应耦合。为此，构造高精度预测模型的主体思路是引入“场”理论和“场结构分析”方法，从统一成矿场角度将地、物、化异常有机关联和对应耦合，借助场结构分析方法解析异常场精细结构特征及其矿化场结构的对应匹配和耦合关系，揭示和厘定多元组合异常结构与矿化作用轨迹、成矿过程、定位机理、产状样式和定位规律，建立可有效指导隐伏矿体定位预测的矿体空间定位产状模式和关键预测评价标志。其主导方法是用结构分析方法、构造几何方法、数值结构模拟方法和图示技术揭示矿化空间结构和矿体空间定位规律。笔者认为：成矿构造应力场结构分析，成矿地球物理异常场结构分析、成矿地球化学异常场结构分析和成矿场矿化时空结构分析可系统耦合为综合异常场（统一场）。即在研究思路上，根据需要与可能，我们既可以将成矿场解析为不同异常场进行精细结构分析，亦可将不同异常场耦合为统一成矿场进行整体结构分析，揭示和厘定场结构中变异部位——失稳、扩容、滞流、淀积部位，这些部

位常常是矿体赋存的最有利地段。

第三节　高精度预测模型的构建方法

采用“场理论→场结构→场分析→场模拟”方法，将异常结构、矿化结构、信息结构进行耦合分析，并与关键预测信息提取与优化相匹配和深化后的表达方式就是高精度预测模型的建立。

一、高精度预测模型的描述内容

对于热液脉状金矿的隐伏矿体定位预测而言，其高精度预测模型的描述内容包括：

1. 矿脉（体）地质-地球物理场结构特征

（1）预测目标物的局部地质异常特征；

（2）矿床内岩石物性参数的分级；

（3）物理场及物探异常场结构特征（强度及形态等）；

（4）干扰因素及其影响；

（5）与成矿有密切联系的断裂构造在覆盖条件下呈现的地球物理异常结构的解释和推断。

2. 矿脉（体）地球化学场异常结构特征

（1）成矿元素和指示元素种类；

（2）化探原生晕或次生晕的组合关系及其元素分带性；

（3）矿体的头晕、矿体晕和尾晕元素的种类、组合及空间变化特征；

（4）同类矿体在不同埋深条件下成矿元素或指示元素的异常结构特征及其变化规律；

（5）同类矿体的地化异常在覆盖和出露条件下的结构推断与解释。

3. 地质、地球物理、地球化学综合异常结构模型

（1）地质异常和物化探异常参数的空间结构特征，可用几何结构及物性结构图表征；

（2）与目标物的对应耦合关系。

4. 矿体不同剥蚀面上的地、物、化异常场的组合结构特征。

5. 矿体上干扰场或消除情况下的地球物理场、地球化学场的异常结构特征。

6. 隐伏矿体定位预测的关键预测标志或最佳预测标志组合。

通过建立上述综合异常结构模型，从复杂的成矿现象中概括出关键性的预测评价标志，并展示它们之间的相互关联。高精度预测模型是在典型矿床研究的基础上建立的，无论在异常组合特征方面，还是在时、空结构方面都应具有足够的代表性。模型中描述矿体产出的主要控制因素及其一些关键性的预测标志，是本类矿床的有效识别标志，利用这些标志能转化为导致隐伏矿体发现的直接或间接信息，用矿体产状模型或异常结构模型的形式表达出来。据此其在指导隐伏矿体定位预测中具有以下作用：

（1）高精度预测模型以成矿模式的“代表性”和精细结构分析为基础，它为矿体空间定位规律研究提供直观的模拟对象，帮助预测人员把注意力集中到与隐伏矿体有关的关键性地质特征上，而预测人员应用相似类比方法，有可能较正确地圈定找矿靶区，提高隐伏矿体预测的可靠性和精确性。

（2）高精度预测模型的代表性和外推性特点，揭示了导致隐伏矿体发现的关键性预测标志。根据矿体不同埋深情况下这些标志的特征，可以有效推断隐伏矿体在三维空间的展布及有关参数，使找矿和勘探人员知道被寻找对象所揭露的地质现象属矿体的哪个部位，进而预测未知地段。

（3）有助于制定合理的勘查战略和提出最佳预测方法组合，为预测工作提供科学理论依据，提高隐伏矿预测的科学性和实效性。

二、预测对象的精细结构分析

预测对象的精细结构分析是建立高精度预测模型的主要途径之一，亦是深入了解和掌握成矿系统内部要素、外部环境及其相互关系的关键。预测对象的结构性是客观存在的，但必须通过研究者的观察研究才能揭示出来。这种揭示反映了预测者对预测对象内部组成、外部环境、矿化显示及其相互关系的认识程度。同时，也与研究者所采用的观察尺度和精度对等。以隐伏矿体为预测对象的结构分析是建立在精细结构划分的基础上的，可从不同侧面对预测对象的内部组成及外部环境进行剖析，考查诸因素与成矿的相关程度，达到把握矿化空间结构特征及定位规律的目的。高精度预测模型构建的实质就是从较精确尺度上观察和刻画出预测对象的结构性特征，从而揭示和掌握矿体分布样式及规律性。

预测对象的精细结构分析应贯穿于预测对象研究和隐伏矿体定位预测的始终。精细结构分析的内容通常是十分丰富的。总结笔者在胶东地区工作的体会，认为若要从整体上把握预测对象的精细结构特征及定位规律，应该进行矿化系统的空间结构、时间结构和信息结构三大方面的分析，从而使预测对象有序化。空间结构分析主要是解析不同结构水平成矿单元的控矿构造要素与成矿的空间关系及其内在联系，从而总结出矿体的空间展布特点及其定位规律。招莱地区经过成矿带、矿田、矿床、矿体及富矿柱等不同层次的空间结构分析后表明，不同层次等级的控矿规律，共同组成了一个相互联系和相互制约的有机整体。其中空间结构分析是时间结构分析的基础。信息结构分析主要是对各种与矿化有关的信息进行可靠性和代表性分析评价，从而达到矿化信息系统化和矿化系统信息化。各种矿化信息的结构分析表明，某一等级的成矿单元与各种矿化信息是相对应的。一定类型和结构水平的信息系统反映了预测对象的一个重要侧面，各种矿化体的空间展布及定位与局部地质异常场及构造物理化学场结构变异特征显示较明显的对应耦合关系。

三、综合模型标志集合

综合模型标志集合是指在分析地质、地球物理、地球化学异常结构之间相关关系基础上提取的能表征综合模型特性的信息总和，并表述为这些信息在空间上的变化规律和信息不同组合的特点。在构成综合模型标志集合时，应该指出以下几点：

（1）侧重于考虑反映模型某一特征的一组信息构成的综合专用标志，并注意某一信息在信息的不同组合中的不同作用。

（2）在力图寻求信息与模型特征内在联系的基础上提取“理论”标志的同时，注意吸收以往成功经验给出的“自然”标志。

（3）不过分地强调依赖现有的数学方法去实现标志集合中信息数目的“极小化”，而更注重标志集合中信息组合的优化问题。后者是在引入了技术上可行和经济上合理的因素后

实现的。

（4）为建立一个对预测隐伏矿体有较高分辨能力和较大可信程度的预测模型，还必须进一步分析对成矿不利的环境或无矿空间的标志，从而获得使信息的某种组合与模型的某一特征间存在充要统计关系的有效标志。

图 7-1 给出了综合模型标志集合的构成。图中的近程、中程和远程标志是分别用于深剥蚀（或出露）、中等剥蚀和浅剥蚀（或未剥蚀）条件下的标志。几何标志是指模型中矿体或异常物性体空间位置、规模、形态和产状等参数。

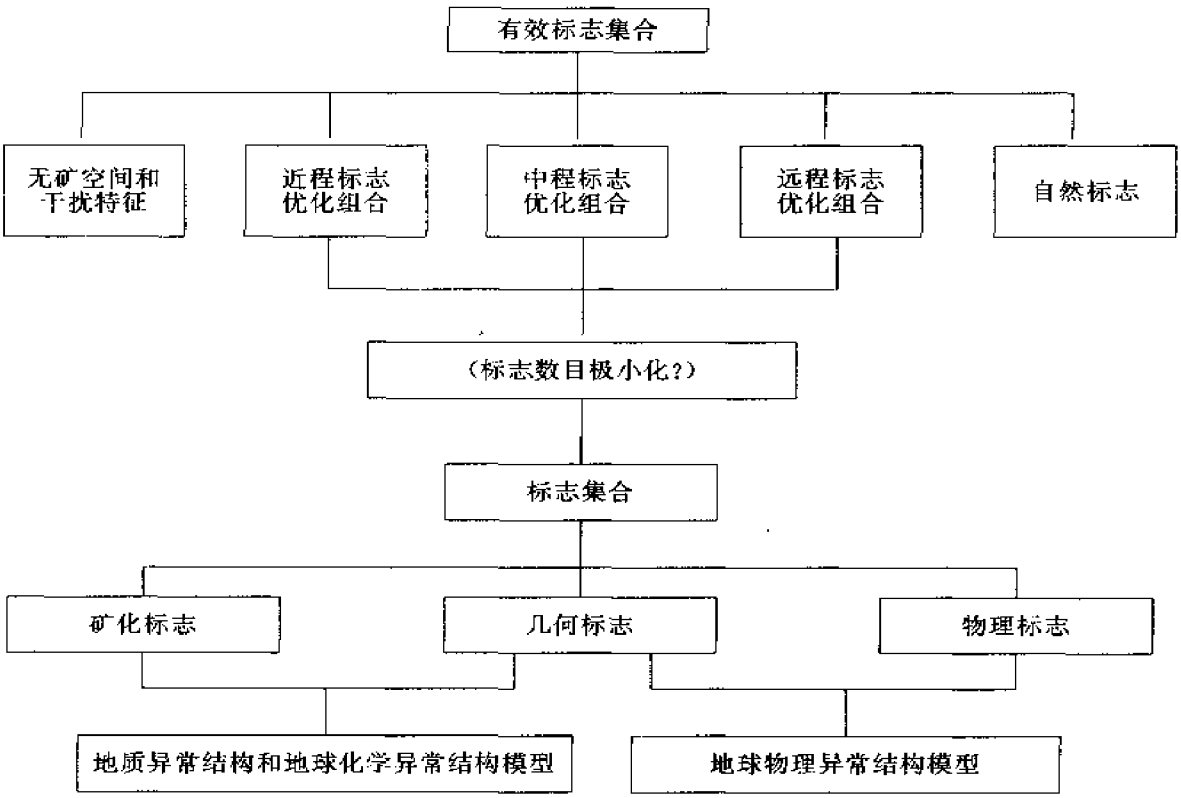


图 7-1 综合模型标志集合构成框图

应该指出，综合标志集合的形成和有效标志集合的提取，是高精度预测模型研究中关键而复杂的问题，它将直接影响模型的分辨能力和利用模型进行隐伏矿体定位预测和评价的可靠程度。但这一课题至今尚处在探索阶段，并在很大程度上受着发现这些标志的方法技术的制约和依赖于经验。

四、地质-地球物理-地球化学异常结构模型

地质-地球物理-地球化学异常结构模型是预测目标物（隐伏矿体）及其周围地质、地球物理、地球化学异常综合在一体的结构图式或有效方式。它主要是对矿体空间位置的变化及其相应地球物理场和地球化学场的综合表达形式，原则上不涉及矿体形成的内在机制和成因上的相互制约。地质-地球物理-地球化学异常结构模型是发挥系统分析优势，将地球物理和地球化学异常结构分析与地质异常结构分析有机结合为一体，解决隐伏矿预测中的矿

与非矿异常、矿体定量参数推断和估算问题，以减少预测风险、提高找矿效益。建立地质-地球物理-地球化学异常结构模型涉及的内容较为广泛，本书仅择其与脉状金矿隐伏矿体定位预测密切联系的关键内容予以表征。

一个完备的地质-地球物理-地球化学异常结构模型包括发现矿体的关键标志，参数的定量数值、合理的勘查方法和工艺流程，直接指导隐伏矿体定位预测工作的进行。据此它应包括以下基本要素：

（1）矿体空间定位产状模式，一般用已知矿床中的典型矿脉作为建模的基本对象；

（2）勘查的目的物或目标物的岩、矿石物性参数；

（3）地质-地球物理-地球化学异常特征，大体指异常组合、强度、形态及其相应的定量参数；

（4）干扰因素及其影响程度；

（5）某些隐伏矿体之上盖层或覆盖物的地球物理和地球化学场异常结构的推断结果或演绎解释；

（6）相对于矿体不同标高的各类地球物理异常和地球化学异常结构的特征参数值；

（7）干扰体的影响及干扰场的剔除途径及剔除后的“真实”场结构的描述；

（8）表达方式，通常情况下用图形、表格、文字叙述，其中的图形包括矿体空间定位产状模式图、典型剖面图、异常结构图等。

从隐伏矿体定位预测的基本要求导出地质-地球物理-地球化学异常结构模型的内涵包括以下几方面：

（1）在目标物（或目的物）确定的前提下，具有矿与非矿异常的区分能力；

（2）在浩翰资料上具有成矿信息、找矿标志和有关参数的高度浓缩能力，能用最关键的特征参数扼要表达预测对象的三度空间位置及结构特征；

（3）在当前场理论—场结构—场分析—场模拟水平的前提下，将地球物理场和地球化学场异常结构的多解性降到最低，用量化参数限定关键指标的阀值，促使异常解释精确化。

（4）应用逐步逼近的原则依次缩小预测对象的范围，最终实现隐伏矿体的定位预测。

第四节　脉状金矿隐伏矿体定位预测模型的初步构建

一、思路与方法

据研究，热液脉状金矿床中矿体的空间产状特征可表征为：

（1）空间上矿脉具有延伸远、延深大，且延深往往大于延长的特点，矿脉中的矿体亦有延深大于延长的特征；

（2）矿脉中常发育有多个矿体，矿体多沿一定方向和角度向深部呈斜列侧伏展布；

（3）控矿断面产状变化部位和波状结构面变异部位常常是矿体产出部位；

（4）局部异常结构、成矿构造物理化学场结构和成矿场矿化时空结构之间具有密切的内在成生联系，并与矿体空间定位规律具有一定的对应耦合关系。

在缺乏深部地质资料情况下开展深部隐伏矿体定位预测模型构建的有效途径是，对矿脉上部已有勘采资料进行详细的分析研究和充分的信息提取，从中优选出最佳预测信息和

关键预测标志，查明各种预测信息的空间结构规律，并对相关矢量参数做有限的趋势外推。根据各种矿致异常结构特征，成矿构造物理化学场结构特征，成矿场矿化时空结构特征与矿体空间定位的内在成生联系和对应耦合关系，建立高精度定位预测模型，对深部隐伏矿体做出定位预测和定量评价。其中最有效的预测信息参数为：①激电异常的精细结构及特征参量；②原生晕异常结构及产状模式；③控矿断面的几何结构参数；④矿化厚度、品位的空间结构特征及变化趋势。对上述关键性预测参数的表征方法为：①过取样点的水平、垂直剖面上，构造物理化学参量变化及其相关性，用以表征矿体的物性差异和原生晕结构特征；②过取样点的水平、垂直剖面上，矿脉底板距基准面的距离及其斜面投影，用以表征控矿断面的波状变化及其几何特征；③过取样点的水平、垂直剖面上，矿脉（体）厚度、品位参量变化特征及其相关性，用以表征矿体厚度、矿化品位的空间结构性及矿体产出样式和定位规律；④综合上述相关参数构建矿体空间定位产状模式和高精度预测模型（图 7-2）。

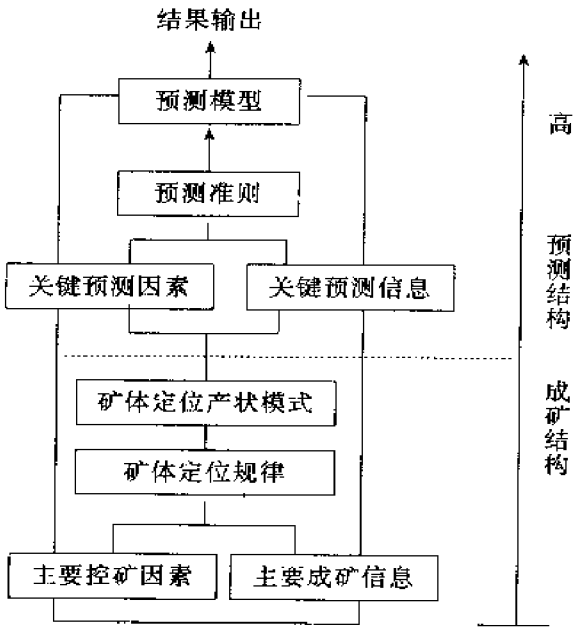


图 7-2　高精度预测模型构建框图

二、异常结构特征研究

1. 地质异常结构特征

脉状金矿隐伏矿体定位预测模型的地质异常结构特征，突出了控矿断裂构造变形结构对矿体空间分布规律的控制。这种受构造变形结构控制的矿化结构表现为浅部为张扭裂隙控制的脉状矿体、产状较陡，规模不大；深部为受韧-脆性剪切构造节理带控制的微细裂隙蚀变岩型矿体，产状较缓，规模较大。矿体周围，发育着程度不同的近矿围岩蚀变。

2. 地球物理异常结构特征

脉状金矿隐伏矿体定位预测模型的地球物理异常结构特征表现为，在每一矿体周围的有限空间内，均发育着性质相同的物性异常变化空间。根据实测模型归纳，大体上可划分为两类异常结构：①第一类为浅部产出脉状矿体，具有典型的“三高一低”异常结构模式；②第二类是细脉网脉状矿体，其异常结构显示为规模大，产状缓，电阻率、极化率显示中强异常特征。例如，根据焦家金矿中矿体的激电异常结构特征，可建立其异常结构与隐伏矿体空间定位的耦合关系及产状模式（图 7-3）。该模式显示，对应各已知矿体均有局部激电异常发育，η_s 峰值一般对应 ρ_s 低阻段中的局部小高阻异常，激电异常中心一般与矿体顶部对应，异常轴向与矿体走向基本一致。

3. 地球化学异常结构特征

脉状金矿隐伏矿体定位预测模型的地球化学异常结构特征表现为，特征元素组合以矿体为中心的局部浓集空间以及原生晕异常结构的水平、垂向分带性。

例如：胶东脉状金矿中矿体定位的关键预测信息是原生晕地球化学异常结构，激电异常结构和控矿断面的形态几何结构。根据原生晕异常结构信息可有效预测隐伏矿体的可能赋存部位及已采矿体的剥采程度，由此可建立脉状金矿隐伏矿体定位预测的异常结构模型。

平面上：

（1）Au、Ag、Pb、Zn、Cu 等元素相套合的高强度异常，往往指示有露头矿或浅部矿体的存在；

（2）Au 异常为弱异常，但存在 As、Sb、Hg 的强异常，同时有 Pb、Zn、Cu、Ag 的弱异常套合产出时，往往指示半隐伏、隐伏矿体的存在；

（3）发育 F、B、I、Hg 等线性异常，并有 Au、Ag 等串珠状异常存在时，往往指示含矿断裂构造的展布及隐伏矿体的存在。

垂向上：

（1）Au、Sb、As、Hg（Ag）为隐伏矿体前缘指示异常；

（2）Se、Te、Cu、Pb、Zn 为矿体中部异常；

（3）Mn、Zn 为矿体尾部指示异常；

（4）F、I、Hg、As 组合异常可作为矿上远程指示异常。

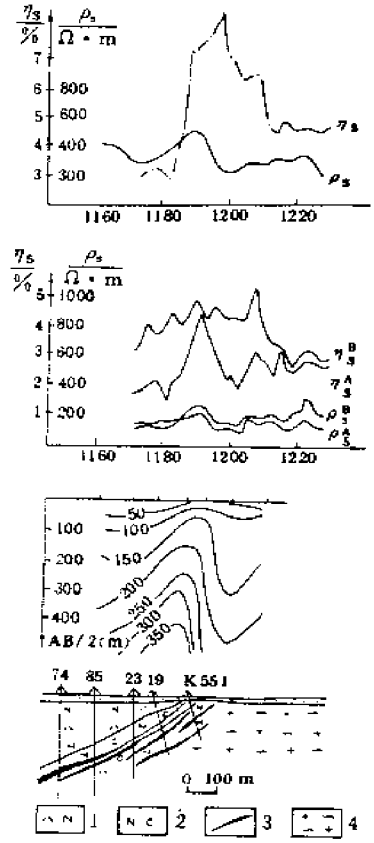


图 7-3　焦家金矿 901 线激电异常结构剖面图

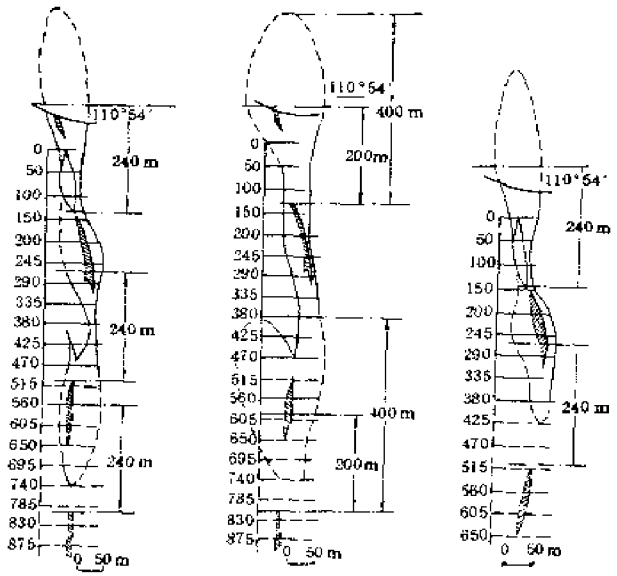
1—胶东群斜长角闪岩；2—蚀变带；3—矿体；4—花岗质岩石

中间梯度：$AB=100$ m，$MN=20$ m，点距＝20 m

联合剖面：$AO=150$ m，$MN=20$ m，点距＝20 m

依此综合异常结构模型，在某脉状金矿 2～4 线之间出现结构样式的异常状况，即 As、Hg 位于组合异常下部，推测深部存在隐伏矿体。为此，开展以 F、Hg 异常结构分析为途径的深部成矿预测（图 7-4）。图 7-4 为 Hg 异常结构样式，其反映 Hg 异常结构与矿体的关系。根据已知矿体离 Hg 异常中心的垂直距离为 240 m。假设同一成矿系统内的成矿构造物理化学条件基本相同，则从已知主矿体 1、2、3 号脉周围 Hg 异常中心向下 240 m 左右也应出现一个隐伏矿体，据此所做的隐伏矿体定位预测，经工程验证见到了工业矿体（图 7-5）。并由此预测模型结合剖面上 Hg 异常的串珠状结构特征，又开展了新一轮深部隐伏矿体定位预测。

脉状金矿产状模型的三种异常结构特征，较好地体现了矿体空间分布规律的综合概括（表 7-1）。三者之间的相关性极为密切，特别是从垂向变化规律角度，综合分析三种异常结构特征及相关性，可有效指导隐伏矿体的定位预测。



7-4　根据汞的原生晕异常结构模型进行的深部预测

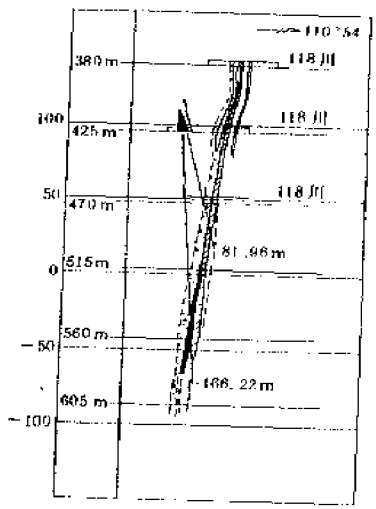


图 7-5　钻探验证剖面图

表 7-1　脉状金矿矿体定位预测模型综合表

模型层次选择	空间结构层次选择	矿　　体	矿床—矿脉—工业矿体
	时间结构层次选择	内生热液成矿期	多阶段矿化的空间叠向、定向演化
矿体层次的预测因素和标志	构造局部化因素	控矿断裂的波状起伏、局部启张，及其它方向次级断裂组合	
	原生晕标志	痕金异常的峰值区间，卤素异常范围	
	成矿物理化学标志	成矿温度等值线-包裹体的爆裂温度反映的热晕特征	
	矿物标型标志	黄铁矿热电系数的垂直分带序列，提供深部矿化存在的信息	
		石英热释光特征说明金矿化与热释光强度有正相关关系	
	矿化指标元素标志	矿化指示元素组合为 Au、Ag、As、Pb、Zn、Cu 等；根据矿化指示元素与 Au 相关系数的变化规律，指导深部预测	
	元素对比值标志	Ag/Au 比值垂向上、水平上的变化具有趋势性；元素对 Ag×100/Pb>>8，Ag×100/Zn>>4 判断剥蚀深度	
预测模型	预测准则	四　标　志　准　则 (1) 物性异常（激电）标志　(3) 控矿断面形态几何标志 (2) 原生晕异常标志　(4) 矿化场空间结构标志	
	预测手段	(1) 开展构造局部化特征专题研究和控矿构造几何分析	
		(2) 采用激电异常结构分析、剖面原生晕、矿物标型等手段，进行矿体产出样式、定位规律研究	
	预测方法	多参数矢量逼近法、控矿构造几何法和成矿构造物理化学场结构预测法	

第五节　问题讨论

（1）模型方法在隐伏矿体定位预测中具有极为重要的地位和作用。因为隐伏矿体定位预测所寻求的目标物不仅是有待探索的，而且是信息不充分的。而模型技术可作为类比预测的有效方法。“模型”实质是对场结构的厘定和表征。因为从系统论角度，模型是关系的各种表达形式。建立模型需要从过程和状态两个方面去寻求和揭示各要素之间的关系。人们从对象的现实观测中获得概念，形成认识，再将认识用某种信息载体予以表征，即为模型。值得注意的是，依据信息可以经过加工衍生新信息的观点，在模型和认识之间有着密切的关系，即人们常常“用模型研究问题”。因此，可以把模型理解为概念集合（信息）的表达系统，也可以说，模型是思维系统形式的外在表现。根据模型分类，本书所建高精度预测模型属于热液脉状金矿的精细结构模型。其充分考虑到同类型金矿的矿致异常结构，成矿场矿化结构和构造物理化学场结构的同型性和定位机理、定位规律及主要控矿因素的相似性，主要从形态、结构、信息角度予以精确的厘定与表征，而较少从成因角度导入复杂性。

（2）高精度预测模型的建立主要是以矿体空间定位机理及定位规律的厘定与表征，关键性、深层次预测信息的有效提取与优化、多重异常场、矿化场的精细结构分析为基础，构建三维空间上的地、物、化“三位一体”综合异常显示及矿体产状样式，具有预测指示功能的隐伏矿体勘查模型。模型的核心是确定矿致异常的物性体、成矿元素及多重特征参数之间的内在成生联系和空间结构关系。为此，要克服以往那种异常-矿体的简单模型（或经验的或概念的）的束缚，而以物性体和多参数为纽带，建立异常—物性体—矢量参数—预测目的物之间的确切对应关系。为隐伏矿体定位预测提供有效指南和工具。多重场精细结构分析可有效揭示矿体空间定位规律，为高精度预测模型构建提供详尽而扎实的基础资料，为深部隐伏矿预测提供较为具体的科学依据。另外，需要强调指出，高精度预测模型的构建是一个逐步完善，动态趋优的过程，在建模型过程中可以根据新信息、新参数的获取与新认识的形成，不断修正和完善矿体地质-几何模型。

（3）本书所指高精度具有相对意义。正如 R. E. 贝尔曼和 J. A. 哥根在强调构建高精度系统模型时所指出：“要想确切地描述和表征任何现实的物理状态，事实上是办不到的，这是一个公认的并经过检验的事实。因此，这种描述和表征的主要问题是，减少必然会有的不确切性，使它达到无关紧要的程度。为了把整个问题描述得确切，我们必须在准确和简明之间寻求平衡，既减少复杂性而又不过于简单化。”“描述和表征的部分不确切并不一定是坏事，相反，它能用较少的代价传递足够的信息，并能对复杂事物作出高效率的判断和处理。”这也许是我们构建高精度预测模型中应持有辩证思维。从此角度，高精度预测模型既可以是基于已知矿体的地质地球化学异常，地质地球物理异常或其它特征参数响应的经验产状模型，亦可以是基于成矿地质演化来描述矿体响应的成矿作用概念模型。但更多的则是经验模型与概念模型的交叉与结合。例如脉状金矿的高精度预测模型即包含融合了地球物理异常信息、地球化学异常信息（经验模型）和构造几何控矿模型（概念模型），二者彼此关联，构成一个统一的预测模型整体，从而大大提高了利用模型指导隐伏矿体定位预测的信度和精度。

综上述可获如下结论：①高精度预测模型主要表现为经验模型与概念模型的交叉与结合；②高精度预测模型的构建，有助于矿体定位规律和关键预测信息的有机关联与展示，并可为隐伏矿体定位预测提供有效指南和工具；③作为隐伏矿体定位预测的一种有效方法，高精度预测模型的构建与应用，可提高预测成果的信度和精度。

第八章　多参数矢量逼近预测法

场，从数学意义上讲，是指在某一空间（场空间）中展布的某个量（场量），或者说场空间中每一点均有一场量与之对应。当场量为标量、矢量或张量时，便分别有标量场、矢量场或张量场。矿化场作为局域内的构造物理化学异常场，其具有一定的时空结构特征并与矿体的空间定位具对应耦合关系。以异常场的多参数矢量特征为研究途径，进行深部隐伏矿体的空间逼近，是一种具有较高信度和精度、行之有效的隐伏矿体定位预测方法。本次研究工作中，主要采用金矿化场中微量元素特征参数做为近矿矢量逼近隐伏矿体。具体选择的矢量参数为：

第一节　应用远程扩散元素指示深部金矿化

脉状金矿的原生晕研究表明，不论具体地质条件和矿液成分的变化如何明显，原生晕最主要的共同特征是成矿溶液运移方向上的明显分带性。通常，近矿空间部位（轴向、纵向、横向）上都具有其特征性的指示元素（组合）。例如，可将热液脉状金矿床的化探异常晕中成矿元素按其距矿体的相对位置划分为内带、中带和外带三组元素。许多矿床的测试结果证明，形成脉状金矿原生晕外带的元素为 Hg、Tl、S、Br、I、Sb、B、F、Cl 和 As 等，它们远离矿体向上迁移比其它元素更远，往往成为矿体以上晕的主要组分。图 8-1 给出一个典型含金石英脉的内生晕结构分带。明显可见 As 和 Hg 晕均处于内生晕的中至外带，异常可远离矿体 200～300 m 以上。陡倾斜矿脉原生晕的轴向延展比横向扩散要大，易挥发元素晕比其它元素分散晕都宽广。对陡倾斜热液脉状金矿体而言，从上到下基本上符合以下通常的分带模式：Ba—(Sb、As、Hg)—Cd—Ag—Pb—Zn—Au—Cu—Bi—Ni—Co—Mo—U—Sn—Se—W。可见，Sb、As、Hg 等元素一般均属于金矿体的矿上元素之列。卤族元素在内生作用中参与成矿物质的运移和沉淀过程，是在围岩中广泛分散的元素，因此成为一般热液矿化组合元素，挥发组分的高含量是矿化的先决条件，易挥发元素具有穿透力强、适于远程迁移的特点，对指示深部金矿化最为有效。像 Hg、S、As、B、Sb 等元素可以从金矿化中心迁移很远，通常沿含金矿体的倾斜方向上出现更大的浓集，并且常有宽阔的侧向晕。它们以远比成矿元素异常为大的规模和穿透主要成矿元素所不能渗透的岩石的巨大优越性，同一般指标元素相区别。它具有扩大找矿范围和提高预测深度的双重优势，因

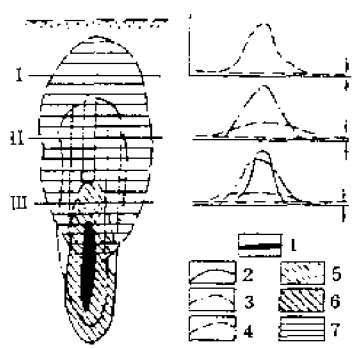


图 8-1　热液脉状金矿原生晕结构示意图

1—矿体；2—晕内带组分界线；3—晕中带组分界线；4—晕外带组分界线；5—内带组分晕范围；6—中带组分晕范围；7　外带组分晕范围，Ⅰ～Ⅲ—侵蚀截面

此它不仅只是在实际上同矿床直接指示元素一起应用，而且已经有必要和可能独立地进行化探测量，测汞、测砷等方法的广泛应用就是证明。在隐伏矿体定位预测中，应用远程指示元素作为找矿矢量有利于：

(1) 指示深部矿体

远程指示元素可以自矿体向上扩散数百米，适合于在地表或浅部评价隐伏矿体。其侧向扩散也比一般成矿元素更为宽广，便于圈定矿体分布范围和逐级接近矿体。

(2) 识别矿致异常和非矿异常

与金矿化有成因联系的 I 和 Hg 主要呈活性状态赋存于异常晕中，背景和异常晕地段中的 Hg 和 I 的水溶性部分含量有很大差别。在异常晕地段上，基岩中 Hg 的水溶性部分可占 50%～80%，而在背景地段仅占 20%。在背景基岩水淬取物中仅可提取 I 总含量的 5%～10%，而在异常晕地段上可提取出的 I 达 100%。因此，查明异常中的活性 I 和 Hg 的含量可作为筛选异常的有效准则。异常中水溶性 I、Hg 含量高证明是矿致异常。

(3) 区分矿体晕与无矿断裂异常

无矿断裂带中一般不存在（或不明显）矿上元素，而与矿体晕有关时则其含量明显较高，利用组合晕比值则差别将更大。在无矿构造异常中远程指示元素与成矿指示元素的比值系数要比矿体中的同一系数高出一个数量级。据此，可以区分与矿体有关的异常和与构造断裂有关的异常。

(4) 判定侵蚀截面深度

由于远程分散元素含量随深度的增加呈规律性减少，而成矿有关元素含量随深度增加呈规律性增大，可以利用已查明的轴向分带性，以远程扩散元素为分子的预测评价系数（以平均含量或线金属量计）随深度增加而变化来确定异常的截面深度。在热液脉状金矿床上这一地球化学系数值显得十分稳定，有助于准确地确定晕的矿上截面、矿脉（体）上部截面、中部截面和下部截面，其组合晕比值可差别一个数量级，用它来推断矿体截面深度比较可靠。

As、Hg、Sb 等元素是脉状金矿原生晕中最具普遍指示意义的指示元素。众多的研究实例证明，易挥发元素晕尽管扩散到离矿体较远距离，但却因而成为指示深部隐伏矿体的最有效指示元素。例如，焦家金矿田内的河东金矿床，含金矿脉的延续性相当好，近矿围岩蚀变发育，金矿化和黄铁绢英岩化强度随深度的增大而减小。岩石微量元素地球化学晕发育良好且具分带性，As、Ba、Au、Sb 和 Rb 晕与金矿化有关。频率分布检验表明，这些元素在地表含量并不高，随深度增大其相对富集程度没有发生明显改变，但在不同中段仍可见微小变化，蚀变强度随深度的增大而减弱并伴随着 As、Au 和 Sb 富集作用的相对减弱，Ba 和 Rb 值没有变化或稍有增高。在这些和金矿化相关性较好的指示元素中，除了 Au 本身和碱土金属 Ba 以外，全都是易挥发性元素。特别要着重指出的是，在地表大间距（300 m）采样的情况下，其它元素的含量只能在少数几个样品中检测到，因此不能取得有系统的分带模式结构样式，而惟独 As 却表现出明显的异常规模，且与金矿化结构具良好吻合。在地表，As 异常值圈出了矿区外围的找矿靶区，并可用$>20\times10^{-6}$的异常值标识深入围岩达 150 m 的隐伏矿化段，用 5×10^{-6}的较小 As 异常值圈定距矿体外 300 m 远的广阔地段。显然，该矿区的找矿实践证明，对地表采样以圈定深部隐伏矿体和矿化地段来说，易挥发元素，尤其是 As 是最有效的指示元素。

第二节　以成矿指示元素的空间分带特征参数为找矿度量

根据热液脉状金矿的原生晕成晕机理及产状特征的不同，原生晕中微量元素有轴向、纵向和横向分带的三维空间产状模式。其中轴向和纵向分带主要是沿矿液运移方向上的元素分带，实质上反映了矿液运移过程中元素的沉淀分带。横向分带是元素的浓度扩散分带，反映原生晕在垂直矿体方向上的宽度差别。脉状金矿中成矿元素的横向分带取决于矿体中元素的含量、围岩中的元素含量以及元素的迁移能力，或取决于成矿溶液和围岩孔隙溶液中元素的浓度梯度及元素本身的地球化学习性。

近矿原生晕中微量元素的空间分带特征参数，可以作为隐伏矿体定位预测的有效找矿矢量，解决以下预测评价问题：

（1）确定矿化的空间结构特征，建立矿体异常结构模型；

（2）根据以平均背景含量为单位表示的指示元素平均含量值建立成矿元素组合分带序列，分析判定逼近隐伏矿体的程度；

（3）根据成矿指示元素相对含量最大值的分布特征和变化趋势，作为近矿矢量预测隐伏矿体的可能位置及产状特征。为此可以运用确定原生晕分带的各种矿床地球化学方法，如衬度系数法、分带指数法、组合晕异常结构分析法等。

第三节　以矿化元素组合特征参数接近矿化中心

脉状金矿中的矿体晕特征大多受赋矿构造的控制，呈现一定的形态产状特征和元素组合特征。例如，茅坪金矿 L_6 线各元素原生晕形态及异常结构显示。由图 8-2 可见由于各元素之间地球化学性质的差异，不同元素的异常中心及异常梯度具有明显的结构差异。在横向上 Au、Ag、Te 异常晕与矿体最为吻合，但含量梯度较大，异常范围狭小。其它元素异常除个别与矿体局部吻合外，一般异常中心均偏离矿体（10～40 m），但异常范围较大（半径 50～70 m）。分析单元素地球化学晕结构表明，与矿体吻合程度较好的个别元素异常范围过小，不能在找矿中充分发挥其影响，而异常范围较大的一些元素其中心又都偏离矿体，不能作为可靠的近矿矢量。因而，矿体原生晕中元素分带序列的研究对接近矿化中心的度量便显得异常重要。根据指示元素空间分布形态，按从矿体到围岩方向由内向外距离远近排列，直观上判定横向分布以 Au、Ag、Cu、Te、Pb、Zn、Co 等元素异常位置靠近矿体，可为近矿指示元素，Bi、Hg、Ni、As、Se、Sb 等为远矿指示元素。按近矿到远矿的分带序列大致上可排列为 Au、Ag、Te-Pb、Zn、Cu-Co、Hg、Bi-As、Ni-Se、Sb。

鉴于原生晕中不同指示元素在空间分布上既相互分离形成分带，又互相叠加融为整体，反映了元素之间具有一定的相关组合规律。利用多变量统计分析技术研究元素间相关组合特征，根据矿床地球化学测试数据的 R 型聚类分析和 R 型因子分析可获得不同指示元素组合形式。茅坪矿区的矿化组合元素为 Au、Ag、Te、Pb、Zn、As、Cu，其它各种相关组合元素为：Cu、Co、Bi、Hg、Sb、Bi 等。通过对 46 个样品的多元逐步回归分析结果，得到金与各相关元素的相关关系的综合指数，F_1 因子组合的回归方程为：

$$Au=0.032Ag+7.6\times10^{-4}Pb+1.0\times10^{-4}Zn-4.2\times10^{-4}Co+0.02Te+0.078Bi$$

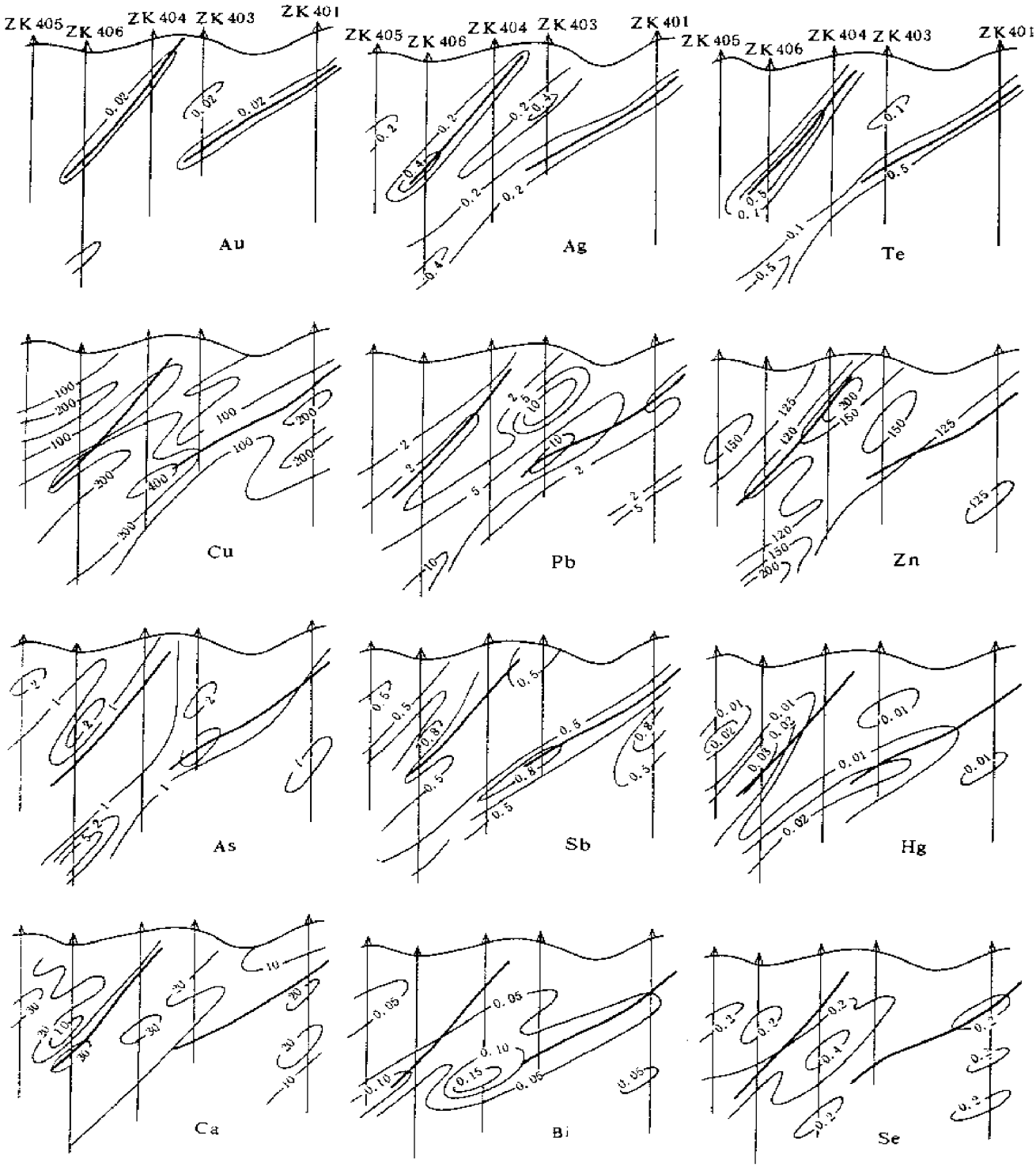


图 8-2　茅坪金矿 L_6 线原生晕异常剖面等值线图

经计算回归式复相关系数为 0.932，金的最大相关系数为 0.887。根据方程计算金回归值做 L_6 线剖面图（图 8-3），显示矿化组合异常结构特征，可见金回归值 Au>8 的异常区段与矿体产出部位吻合良好；构成范围较大的各级异常晕围绕金矿体，具有很好的近矿指示作用。计算结果表明，在正交因子解的 F_1 或 F_2 因子轴上，矿化元素组合具最大载荷，样品在 F_1 和 F_2 因子轴上的因子得分在空间上能构成与矿体形态基本吻合的因子得分异常区（图 8-4）。因此，金矿化的因子计算参数可以作为预测矿化中心的近矿矢量。

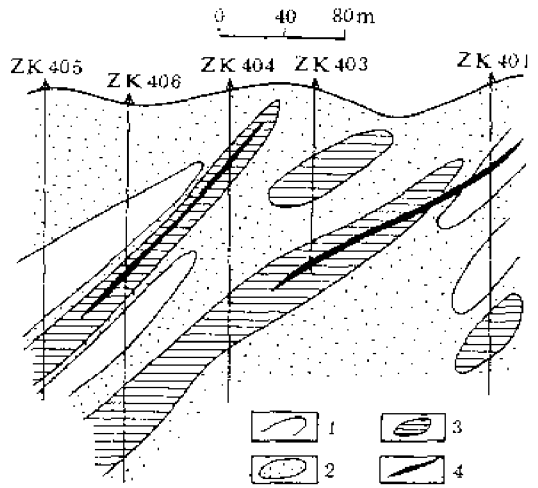


图 8-3 茅坪金矿 L_6 线金回归异常结构图

1—Au<0；2—0≤Au<8；3—Au≥8；4—矿体

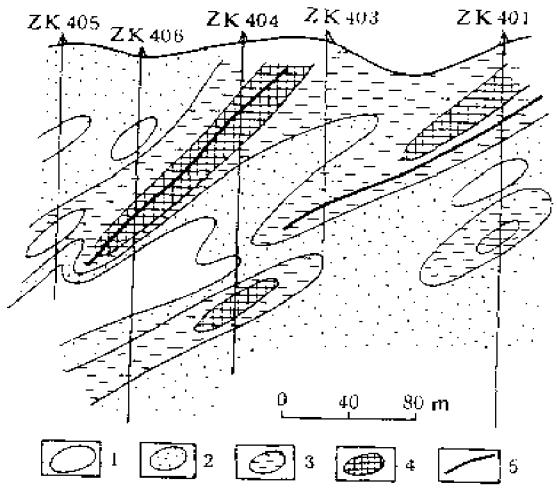


图 8-4 茅坪金矿 L_6 线因子得分异常结构图

$F_2=0.59Au+0.51Ag+0.85Cu-0.61Pb-0.98Zn+0.08Co+0.18Ni+0.13Hg+0.13Se-0.14As-0.72Sb$

1—$F_2\leqslant -1$；2—$(-1)<F_2\leqslant 0$；3—$0<F_2\leqslant 1$；4—$F_2>1$；5—矿体

第四节 应用近矿综合分带指标参数接近隐伏矿体

在研究脉状金矿的矿床地球化学特征的基础上，根据成矿过程中近矿空间上近矿交代晕、矿床矿物晕和元素原生晕的空间组合关系及变化规律，提出并建立了横向和轴向接近隐伏矿体的综合分带指标参数，提高了预测隐伏矿体的准确度和可靠性。

研究表明，产于胶东、黄陵、小秦岭金矿化集中区再生花岗质岩体中的脉状金矿床大多具有近矿空间上的交代蚀变晕、矿床矿物晕和元素异常晕发育。根据这种原生异常晕、矿床矿物晕和近矿交代晕的空间结构特征，利用综合指标可以判定可能含矿或不含矿地段。例如，在河东金矿原生晕中，Au、As、Bi 表现最为明显，其次为 Ag、Cu、Pb、Zn，它们都属于带入元素。带出元素主要为 Ba、Sr、V、Co，前两种元素在矿上带形成强度较弱的晕，后两种元素被置换到含矿构造的侧翼部位。从异常区段的中心向边缘，原生晕的形态与强度都有很大变化。在中心部位发育有立体型晕，实际上已完全充满近矿空间；在中间带发育着线型晕，平均占有 50%的空间；在外带出现点状局部异常，占有围岩体积 5%～10%

左右。各带元素组合（分别为 As-Au-Bi，As-Au-Ag，Au-Mo-W）的平均含量都有相应的变化。矿床轴向分带序列（从上到下）为：Ba—Pb—Ag—Au—As—Bi—Cu—Co—V—Mo。变化最鲜明的轴向分带系数对矿脉为$\frac{Ba^2}{Co \cdot Mo}$，对矿柱为$\frac{Ag \cdot Pb}{Mo^2}$和$\frac{Ag \cdot Pb}{W^2}$。作为矿化规模评价用强度系数，对矿床范围内大部分含矿地段为$\frac{As \cdot Bi}{Co \cdot V}$，对各个矿柱为$\frac{As \cdot Bi}{V^2}$。依据综合晕的带状分布特征可建立脉状金矿隐伏矿体定位预测的精细结构模型。

第五节　用分带指数等值线圈定深部金矿体（柱）

研究表明，在热液脉状金矿床形成过程中，金及其伴生元素随成矿溶液的上升运移通道呈有规律的带状结构，参与成矿作用的元素（组合）的（相对）最高含量沿着热液流入矿石沉淀区的方向呈有序的排列。单向递减的分带指数在金矿体轴部数值最小，朝矿体旁侧方向上分带指数值增大，在纵向平面的某个水平上，沿着与溶液运移方向正交的线，分带指数值为常数，或者具有非常接近的数值。如此，便可以依照纵剖面上分带指数等值线的舌状突起形式勾画出金矿体（柱）的轮廓。方法是对已开拓坑道和勘探钻孔进行化探取样，分析金及其伴生元素的含量及变化情况，建立成矿元素分带指数序列及相应的分带指数比值等值线纵剖面图，揭示矿体（柱）的空间展布样式及变化趋势，对深部隐伏矿体做出定位预测。

胶东地区脉状金矿的原生晕分带结构研究表明，正确地划分出成矿阶段金的直接伴生元素，查明其在成矿流体运移方向上的分布，对开展隐伏矿体定位预测尤为重要。伴生元素的性状会因其它矿石沉淀阶段产物的叠加而复杂化，剔除掉那些强烈地参加其它阶段成矿作用的元素，就可以查明金矿化阶段的直接伴生元素。如此便不难发现，这些不受外加因素影响的原生晕分带结构大致与矿液运移和矿体侧伏相一致。

图 8-5 是河东金矿矿体分带指数等值线图。分带指数等值线由深部向地表呈舌状突起，反映出工业矿体的分布轮廓。分带指数最低的中心部分的轴向与矿柱的侧伏相一致，而其分布中心部位与矿柱中心部位相一致。

总之，利用分带指数等值线所反映的矢量变化特征和结构样式，可以有效指示矿体位置、形态和产状，指导深部隐伏矿体（柱）的定位预测。亦可有效判别已采矿体的相对见

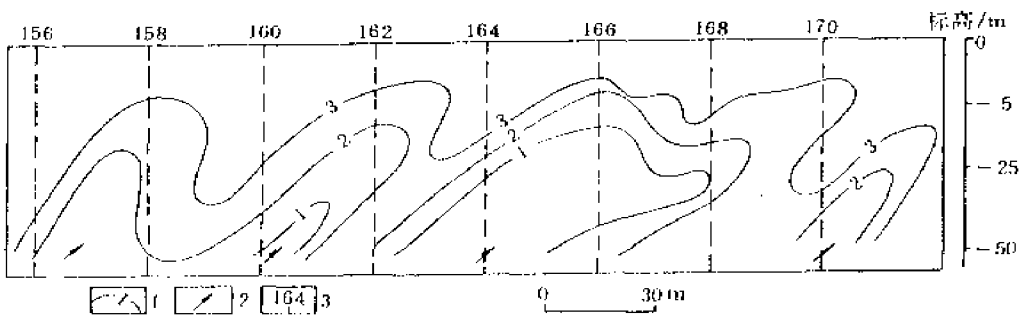


图 8-5　河东金矿 Pb/Zn 比值等值线图

1—Pb/Zn 比值；2—矿体侧伏方向；3—勘探线及编号

矿深度，预测深部矿化前景。同时还可用于研究和厘定成矿流体运移方向等，是一种极为有效的预测方法，并对热液脉状金及多金属矿床的隐伏矿体定位预测具普适性。

第六节　利用贯通矿物标型特征的垂向变化预测隐伏矿体

在脉状金矿中，黄铁矿和石英作为两种普遍发育并具贯通性的特征矿物，其标型特征的垂向变化规律可作为矢量参数被有效应用于深部隐伏矿体定位预测和找矿远景评价。本次研究工作重点探讨了黄铁矿的形态标型和热电动势标型垂向变化特征及其在隐伏矿体定位预测中的应用。

一、形态标型的垂向变化规律

脉金矿床中黄铁矿的晶体形态随深度的加大而呈有规律的变化。一般在矿体上部多以八面体为主，矿体中部含有各种形态的晶体及其聚形（如八面体和五角十二面体），矿体下部则以立方体为主。根据笔者对焦家金矿田中黄铁矿的详细研究，发现该矿田范围内含金黄铁矿的形态标型在垂向上呈现较明显的规律性变化。在矿体顶部大多为八面体，往下依次为八面体与立方体聚形，八面体与五角十二面体聚形，五角十二面体、五角十二面体与立方体聚形。其中在立方体与八面体聚形，五角十二面体与立方体聚形中，立方体所占比例是随着矿物的深度而加大的，在矿体尾部其所占面积比可达 8.3。黄铁矿标型的变化梯度与矿体的规模呈正比。大型矿体比中小型矿体的黄铁矿标型变化梯度要大得多。例如，对灵山沟金矿含金黄铁矿（2082 粒）形态标型统计表明，矿体上部以｛210｝晶形为主，下部则依次为｛100｝、｛210｝＋｛100｝、｛210｝＋｛100｝＋｛111｝晶形为主（表 8-1）。

表 8-1　灵山沟金矿 5# 脉黄铁矿形态标型的垂向变化规律（$n=2082$）

产出位置		中段	形态标型晶形统计/%			
			｛100｝	｛210｝	｛210｝＋｛100｝	｛210｝＋｛100｝＋｛111｝
浅部	上　部	＋19	15.00	30.00	25.00	12.50
	下　部	－50	15.22	13.04	26.09	30.44
深部	上　部	－115	16.88	45.56	24.68	5.19
	下　部	－210	24.24	18.18	39.40	18.18

二、热电动势的垂向变化规律

脉状金矿床中黄铁矿热电动势值亦在垂向空间上显示出较明显的带状结构特征。据对胶东、小秦岭、黄陵脉状金矿化集中区内 21 个矿床中已有相关资料的统计分析表明，在矿体上部多为空穴导电型，矿体中部多为混合导电型，而在矿体尾部则多为电子导电型。其中混合导电型的黄铁矿常常聚集在矿体最富的部位。这种贯通矿物热电动势值在垂向空间

上的有序变化，可作为一种有效的近矿矢量参数，被用于已采矿脉的深部隐伏矿体定位预测。例如，对灵山沟金矿的含金黄铁矿（38 件样品，1764 粒黄铁矿）热电动势研究发现，其热电动势值的空间结构性十分清晰。

将 1、2、3 号矿体的热电动势，按其补偿值分为四种类型：电子型（n）$V_{np}<-10$ mV；空穴-电子型（p-n）V_{np}为$-1\sim-10$ mV；电子-空穴型（n-p）V_{np}为$+1\sim+10$ mV，空穴型（p）$V_{np}>10$ mV，不同类型的V_{np}值是根据大数定律统计确定的。图 8-6 可以清楚地看出，矿体中黄铁矿的导电型变化呈现结构性和规律性。即在矿体上部为空穴导电型黄铁矿，沿矿体的倾斜及两侧为 p 型导电至（n-p）型，然后为（p-n）型所代替，而矿体尖灭处，具有（p-n）型为 n 型所代替的特征。

进一步研究发现，黄铁矿的热电性与含金量有着密切关系。电子导电型黄铁矿含金量小于 0.1 假定单位，空穴型或电子-空穴型黄铁矿，含金量大于 1 假定单位（图 8-6 等浓度线）。在 1 号矿体中（图 8-6A），空穴电子-空穴型导电性黄铁矿分布范围内，含金量为 0.5 假定单位的等浓度线开始偏离；2 号矿体（图 8-6B）中，空穴导电型黄铁矿的导电场内，金的等浓度＞0.5 假定单位；3 号矿体（图 8-6C）中也同样显示了金的高含量与空穴导电型和电子-空穴导电型黄铁矿有关。

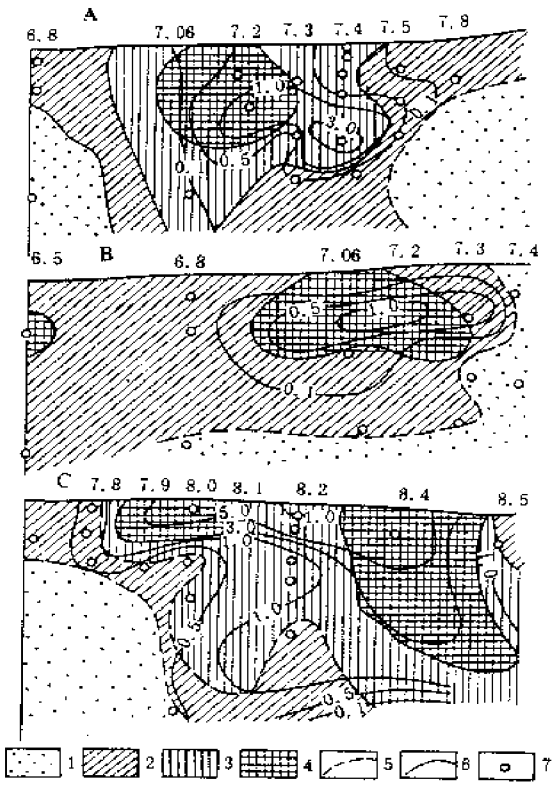


图 8-6　黄铁矿的热电性和含金性关系

A、B、C 相应为 1、2、3 号矿体黄铁矿热电动势的类型：1—电子型（n）；2—空穴-电子型（p-n）；3—电子-空穴型（n-p）；4—空穴型（p）；5—不同类型热电动势场界限；6—金浓度等值线；7—矿体垂直投影面上的钻孔见矿位置

三、标型特征值做为矢量参数用于隐伏矿体定位预测

含金黄铁矿的晶形、物理、化学标型都是成矿作用的直观反映，可作为成矿时不同部位物理化学条件（t、p、E_h、pH、组分、硫逸度等）参数用于隐伏矿预测研究。特别是根据含金黄铁矿标型特征的垂向变化规律，进行预测区段的构造-矿物学填图，可有效指导隐伏矿体定位预测。例如，据统计胶东地区脉状金矿体顶部黄铁矿晶形为八面体→中上部为八面体与立方体聚形→中下部为八面体与五角十二面体聚形、五角十二面体与立方体聚形。在预测工作中发现有反常现象，例如新城矿区－133 m 中段黄铁矿八面体占 92%的比率，应为矿体头部标志，但在上部水平巷道－70 m 中段，矿体中的黄铁矿为五角十二面体、立方体与五角十二面体聚形占有较大比率，表明为中、下部矿体特征。经－95 m 坑道观察验证，确有逆断层将矿体错动，由此发现被错失的矿体，扩大了找矿远景，并推测深部可寻找隐伏矿体。在找矿实践中发现，当缺少黄铁矿八面体的晶形时，常暗示着矿体的头部已

被剥蚀。例如对黄埠岭金矿体中黄铁矿标型值的垂向变化作详细研究，并与玲珑西山、东山矿区主要成矿阶段黄铁矿标型值进行对比（表 8-2）发现，黄埠岭矿区的黄铁矿具有浅部矿体的标型，而西山矿区的黄铁矿为深部矿体的标型特征，东山则居两者之间。因此，推测目前正在开采的黄埠岭矿区是矿体的浅部，大部矿体还埋藏于地下 。又如笔者运用黄铁矿热电场结构变化规律与组分含量变化特征，成功地对黄陵地区茅坪金矿 1# 脉的深部隐伏矿体进行了定位预测。该矿脉的 1 号矿体，空穴-电子型热电场分布于 7～9 线剖面之间，因为缺乏空穴型热电场，电子-空穴型热电场的强度及范围也不大，所以深部找矿远景不甚理想。2 号矿体在 6～10 线剖面之间，空穴-电子型黄铁矿已逐渐被电子型黄铁矿所取代，推测向深部金矿体将趋于尖灭。3 号矿体在 7～9 线剖面间为电子导电型黄铁矿所圈定，因此找矿前景不佳，但在 11～13 线剖面之间，大部分处于空穴导电型和电子-空穴导电型黄铁矿的热电场范围之内，是找矿的有利地段。经工程验证见到了工业矿体。

表 8-2　黄埠岭金矿与玲珑金矿西山、东山矿区的黄铁矿标型对比

矿区	形态标型				成分标型				晶胞参数 $\frac{a_0}{nm}$	$\frac{\delta^{34}S}{‰}$	爆裂温度 ℃
	$\frac{\{210\}}{\%}$	$\frac{\{100\}+\{210\}}{\%}$	$\frac{\{100\}}{\%}$	$\frac{\{100\}+\{111\}+\{210\}}{\%}$	$\frac{Co}{10^{-6}}$	$\frac{Ni}{10^{-6}}$	Co/Ni	Fe/S			
黄埠岭	30.10	27.55	17.35	14.80	359.9	86.3	4.17	0.4898	0.54184	7.8	210～292
东山					310.0	60.2	3.88	0.5064	0.54167	6.9	
西山	3.3	23.0	42.6	8.2	55.4	37.6	1.47	0.5004	0.54168	6.6	180～346

对上述各类近矿矢量参数有效应用的关键是揭示并掌握各种矢量参数的异常晕结构特征、变化规律及其与金矿化结构特征和金矿体分布的对应耦合关系。

第九章　控矿构造几何预测法

第一节　引　　言

众所周知，控矿断裂构造是脉状金矿床的最主要控矿因素。对于一条容矿断裂而言，矿体空间定位预测问题实质上是最有利容矿空间的厘定问题，而容矿空间又主要受控矿断裂面几何形态和成矿期容矿断裂的运动方式控制。通过控矿断裂几何学和运动学分析可以有效揭示和厘定矿体的空间定位规律。但是，深部隐伏矿体定位预测工作除了需要掌握控矿断面形态的控矿规律外，还必须对控矿断面向深部的延伸情况和产状特征做出分析预测，而目前的定性分析无法满足这一要求。尤其是对波状断裂波形参数（如振幅、波长）和断裂剪切位移量与容矿空间的定量关系很少有人论及。在研究中引入波形函数和控矿构造几何分析，可以从理论上较好地解决这个问题。

第二节　控矿断面几何形态和容矿空间的厘定

如前所述，绝大部分容矿断裂的断面呈舒缓波状，而容矿断裂在成矿期的活动，除极少数倾角很陡的断裂可能表现为张剪性特征外，绝大部分表现为断裂两盘间的相对剪切滑动，只是由于具体构造应力场的差异滑动方向不同而已。因而容矿空间受控矿断裂断面波形和滑动方向二者的联合控制。

如图 9-1 所示，设控矿断裂上盘剪切指向为 X 轴，断裂面总体产状的垂向为 Y 轴，用函数 $y_1 = A\sin\frac{2\pi}{l}x$ 来近似地描述断裂面在运动方向剖面上的波形。其中 A 为振幅，l 为波长。设断裂剪切位移量为 a，即上盘沿 x 方向位移距离 a。此时，由于控矿断面的波状变化，在不同部位其受力状况是不同的。一些地段为压缩区，岩石发生挤压变形，另一些地段为扩容区，成为容矿空间。分围岩可压缩和不可压缩两种情况分别讨论了容矿空间的发育特点。

1. 围岩可压缩情况下的容矿空间厘定

设压缩区①中岩石的重叠可能通过变形来调整。此时断裂上盘为

$$y_2 = A\sin\frac{2\pi}{l}(x-a)$$

如图 9-1 中虚线所示。由此形成的虚脱空间可用函数

$$\mathrm{d}(x) = y_2 - y_1 = A\sin\frac{2\pi}{l}(x-a) - A\sin\frac{2\pi}{l}x$$

来描述，如图 9-1 中的阴影区②所示，这就相当于野外所见第 I 阶段乳白色石英脉的产出位置和形态。理论上厚度最大值（D_1）和扩容空间的连续延伸长度（L_1）分别为（推导从略）

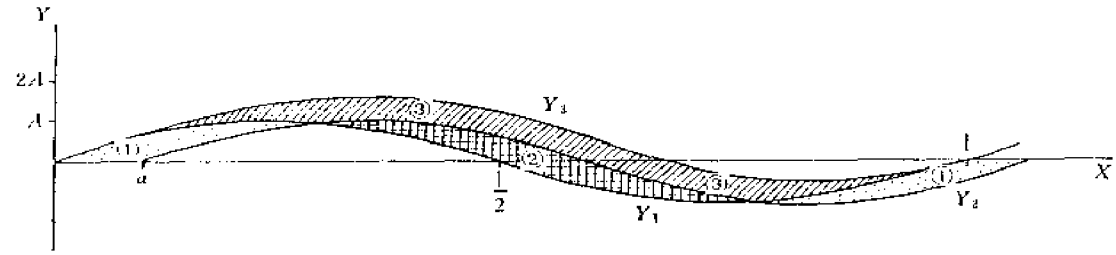


图 9-1　控矿断面波形、剪切位移与容矿空间关系示意图

①压缩区；②可压缩时扩容区；②+③不可压缩时扩容区

$$D_1 \approx A\sin\frac{2\pi}{l}a \tag{1}$$

$$L_1 \approx \frac{1}{2} \tag{2}$$

2. 围岩不可压缩情况下的容矿空间厘定

这种情况下，假定围岩不发生大的变形。此时上盘必定向 Y 方向运动来进行动力调整，运动量为

$$y_0 \approx A\sin\frac{2\pi}{l}a$$

上盘可用函数

$$y_3 = A\sin\frac{2\pi}{l}(x-a) + A\sin\frac{2\pi}{l}a$$

来描述，由此形成的扩容空间可用函数 d（x）$=y_3-y_1$ 来描述，如图 9-1 中的阴影区②+③所示。此时，厚度最大值（D_2）和扩容空间的连续延伸长度（L_2）分别为（推导从略）

$$D_2 \approx A\sin\frac{2\pi}{l}a \tag{3}$$

$$L_2 \approx l - 2a \tag{4}$$

实际情况是 a 和 l 相比一般是很小的。控矿断裂两盘剪切运动时，两盘之间的压剪性滑动接触部分（压缩区）既不是完全不可压缩，也不是完全可压缩重叠的，而是介于二者之间。在减压部位，围岩还会发生弹性扩容，占据一定的空间，因而实际提供矿质沉淀的扩容空间介于上述两组公式之间。典型矿床资料的对比研究结果显示，实际情况更接近于式（3）或式（4）。因为，通常两盘断面之间还发育厚度不等的糜棱岩带、碎裂岩带，在减压部位，它们会通过增大空隙度而扩容，从而使虚脱空间减小。有时甚至不发育虚脱空间，而形成网脉状、细脉浸染状矿石。

尽管如此，上述两组公式仍可为我们提供一些极为有价值的数量关系：①振幅与容矿空间厚度成正比。②在一定范围内（$a<1/4$），位移量大时，容矿空间厚度也大。③波长对容矿空间的连续性影响最大，即波长与矿体长度基本上成正比。由此得出结论：振幅大、波长大、成矿期剪切位移量大的容矿断裂，才可能形成较大规模的虚脱空间供热液流通和成矿物质沉淀，才能形成富大矿体。对胶东和黄陵地区不同矿脉控矿断裂的对比研究证实了上述认识。

第三节　控矿断面几何形态模拟方法

利用矿山勘探和采矿生产中积累的大量地质数据，运用构造几何分析和统计分析方法，以容矿断裂底板标高的一次趋势面来描述控矿断裂的总体产状，用一次趋势剩余的投影（纵投影或水平投影）等值线图来直观地描述控矿断裂面的波形特征。前面例举的金牛山矿区金矿控矿断面几何特征及有关波形参数（见图 4-8）就是通过上述方法制图而求得的。在编绘控矿断面形态投影图的基础上，可以与之相对应，编绘相同比例尺的矿体厚度、金品位、石英脉厚度、线金属量等参量的等值线投影图，用以分析各参量之间，尤其是它们与控矿断面波形之间的空间结构耦合关系，从而查明断面形态的控矿规律。

查明了控矿断面几何形态控矿规律，对进行深部隐伏矿体定位预测只能算完成了第一步的工作。只有知道了控矿断面向深部的变化情况，才能运用类比法和趋势外推法进行隐伏矿体定位预测。问题在于，预测通常是在没有深部探矿工程控制的条件下进行的，因而解决问题的焦点集中在对深部控矿断裂面几何形态的预测上。笔者认为在该领域内的研究工作，应尽量避开地质体的复杂动力学计算，而主要通过几何统计学的途径，根据矿脉已控制地段的地质勘探数据，首先模拟出控矿断面的波形函数，然后利用该函数对深部或走向上一定范围内的控矿断面结构变化进行趋势预测，并编制能反映控矿断面几何形态的断面波形预测图，进而根据已知矿段的控矿断裂面波形控矿规律进行隐伏矿体定位预测。

如果控矿断裂面向深部一定范围内延伸是连续的，即没有显著的成矿后断裂切错，则可以用该函数求得控矿断面在深部的波形位置及产状，并用投影等值线图表示出来。实际工作中，深部各点函数值计算和制图可通过计算机完成。获得了深部控矿断裂面波形预测图，即可根据控矿断面波形控矿规律进行深部隐伏矿体的定位预测。

第四节　应用实例简介

目前，上述方法已经在胶东地区金牛山金矿、黄埠岭金矿和望儿山金矿的隐伏矿体定位预测得到应用。对金牛山金矿 3 号脉深部工程系统控制的地段（长 2100 m）进行了控矿断裂面几何形态模拟，并进行了走向上的控矿断裂面形态预测和深部隐伏矿体定位预测（图 4-8）。对黄埠岭金矿 7 号脉工程控制的地段（长 1600 m）进行了控矿断裂面几何形态模拟，并进行了深部控矿断裂面几何形态预测和隐伏矿体定位预测。预测结果已为矿山生产部门验证。这里仅就控矿断裂几何形态控矿规律与断面形态模拟情况做一简介。图 9-2 是黄埠岭金矿 7 号脉控矿断面形态纵投影等值线图。尽管形态较为复杂，仍可看出，主凸起部位呈近水平分布，其上明显叠加了一组向 SW 侧伏的凸凹变化，主凸起段在东端分为上、下两支。图 9-3 是矿体厚度分布情况，不难发现，厚度中心均位于主凸起带脊线的下方，且位于凸起中心的右下方，另在东段下分支凸起部位有一厚度中心分布。图 9-4 是金品位的空间分布情况，品位富集中心均分布在主凸起脊线的下方，且位于凸起中心的右下方和左下方向凹陷区的过渡部位。野外对容矿断裂活动历史的研究表明，在金的主要沉淀阶段——石英-黄铁矿阶段，断裂活动以左行斜滑为主，这就决定了金的富集部位在主凸起段的下方向凹陷段的过渡部位。对矿脉品位、厚度的空间结构（图 9-3、9-4）分析表明，除了凸起

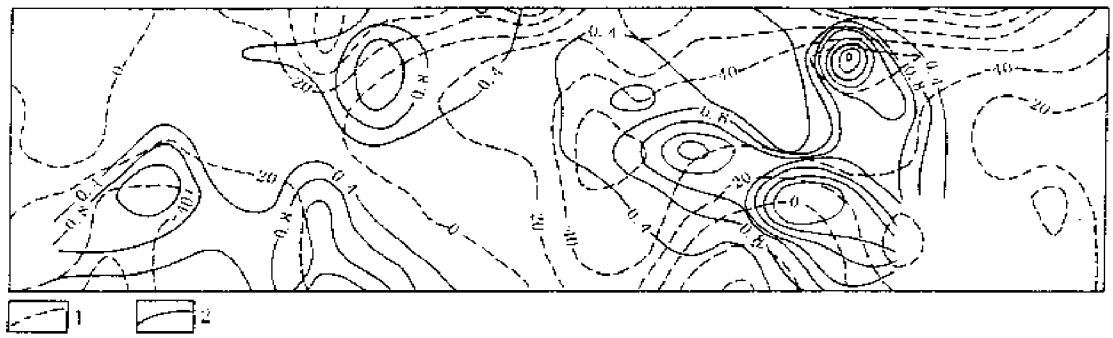


图 9-2　黄埠岭金矿 7 号脉石英脉厚度与控矿断面形态关系图

1—断面趋势值；2—石英脉厚度（m）

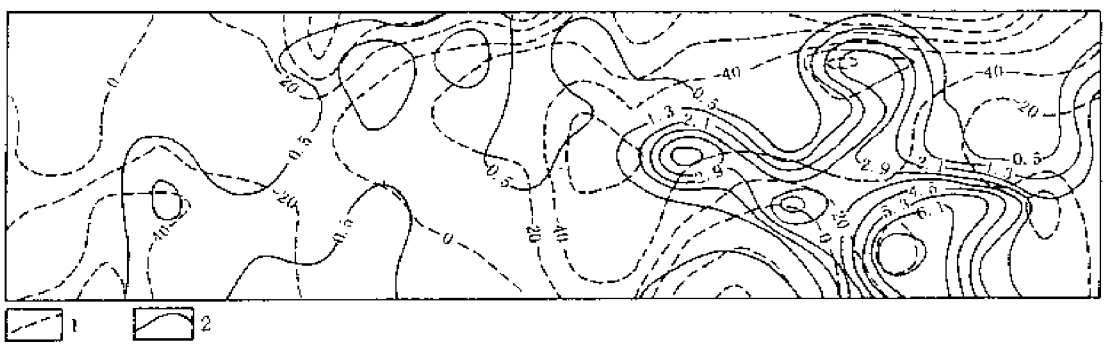


图 9-3　黄埠岭金矿 7 号脉矿体厚度和控矿断面形态关系图

1—断面趋势值；2—矿体厚度（m）

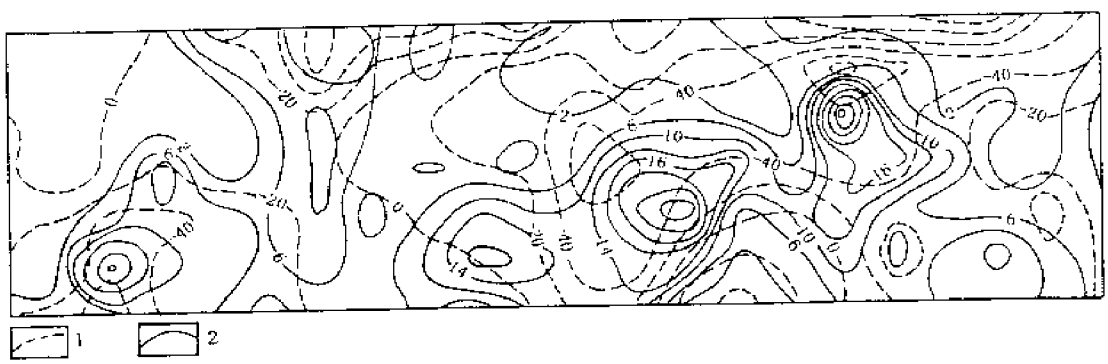


图 9-4　黄埠岭金矿 7 号脉金品位和控矿断面形态关系图

1—断面趋势值；2—金品位（10^{-6}）

段下方的厚度中心之外，凸起带上方向凹陷带的过渡部位也可形成较厚的石英脉，但金品位相对较低。总之，通过成矿期各成矿阶段容矿断裂时间结构的研究，结合上述制图方法的综合分析，可以有效查明断裂面波形控矿特征和矿体空间定位规律。在查明断裂面波形控矿规律的基础上，进行了控矿断裂面波形模拟、波形预测和隐伏矿体定位预测。经工程验证取得了较好的找矿效果。

第十章　成矿构造物理化学场结构预测法

第一节　引　　言

成矿构造物理化学场结构预测法是笔者根据近年来的隐伏矿体定位预测实践提出的一种新的隐伏矿体定位预测方法。其方法学基础是国内外新近发展起来的“构造-物性-物质组合控矿”理论。主要指矿体的形成与分布、形态与产状无一不受地、物、化诸要素的综合控制。在矿体的形成与定位过程中，成矿构造应力场、地球物理异常场、地球化学异常场作为一个彼此相关的统一整体，控制着矿体的空间定位规律并显示出结构与信息的对应耦合关系。应用成矿构造物理化学场结构分析方法，可以有效地揭示和厘定成矿系统的矿化结构、异常结构、信息结构及矿体空间定位规律，建立高精度预测模型，指导隐伏矿体定位预测。进行成矿构造物理化学场结构分析的基本思路是，成矿构造物理化学场是成矿物质存在的本质属性和表现形式，并呈现明显的多参数性（如构造应力、电磁性、元素含量、成矿流体及成矿环境的物理化学参数——温度、压力、浓度、逸度、酸碱度、氧化还原电位等）、结构性和矢量性。工业矿体的形成、分布与定位与成矿构造物理化学场结构密切相关，并显示出良好的对应耦合关系。利用上述特征和关系，可以有效查明矿体的展布样式和定位规律，进行信度和精度较高的找矿靶区优选和隐伏矿体定位预测。本书仅以胶东地区的河东金矿为例予以介绍。

第二节　成矿构造应力场结构分析

一、控矿断面结构形态

河东-望儿山断裂在河东矿段的结构形态可根据地表观测、钻孔资料、各中段平面图作出主断面斜面水平投影图表现出来。图中可见断裂面平均走向NE53°，平均倾角37°。详细工作区+27～－50 m中段，断裂面等值线不规则，密度不均一，反映了断面不平整，沿走向、倾向均发生变化，呈波状起伏。波峰（高值区）、波谷（低值区）之脊线向SW侧伏，侧伏角约50°～60°，最高值与最低值差为21.5 m（水平距离），求得垂直差距为13 m。

二、应力场结构分析

河东-望儿山断裂带在成矿期已处于近地表浅构造层次。受区域构造活动的影响，在成矿前、成矿期和成矿后表现为不同的力学性质。对－25 m中段166线成矿前共轭节理（被第Ⅰ阶段矿化切割）赤平投影分析，求得σ_1：340°∠4°，σ_2：230°∠80°，σ_3：70°∠90°。表

明主断裂成矿前为左行压扭性。通过测量成矿期第Ⅱ阶段节理（往往充填有黄铁矿脉、黄铁矿石英脉以及节理绢英岩化、赤铁矿化等），求得成矿期应力场。对河东金矿－5 m、－25 m、－50 m 中段应力场分析（图 10-1）结果表明，主压应力轨迹为 NEE 向，与焦家主断裂呈小角度斜交。此外主断裂及其次级断裂在成矿期表现的特征指示控矿断裂成矿期为张性，其中成矿期主断裂为右行张扭性。成矿后断裂活动使成矿期形成的蚀变岩石、矿石等破碎。

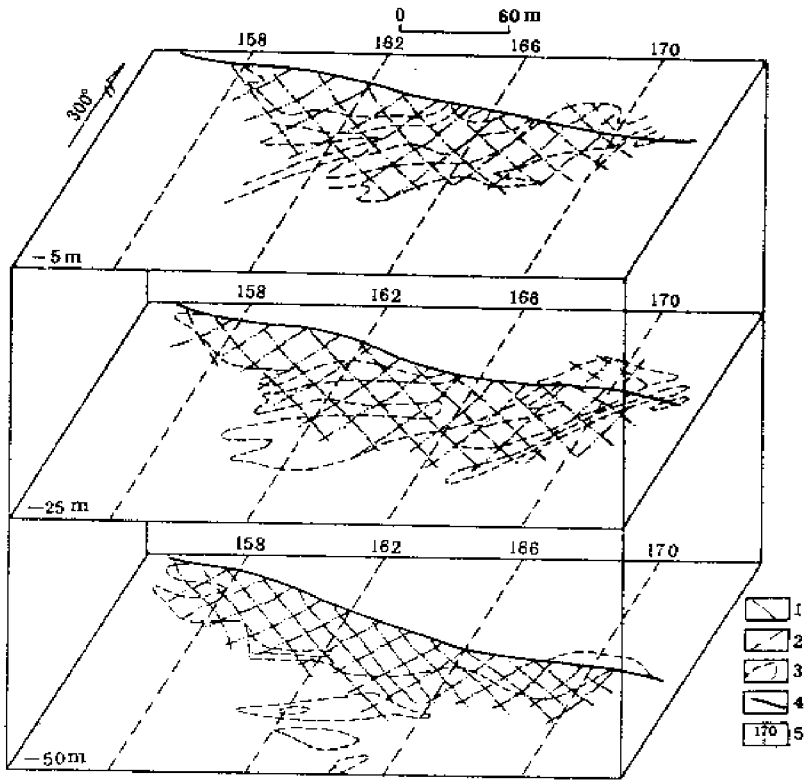


图 10-1　河东金矿成矿期（Ⅰ）应力场主应力轨迹联合中段图

1—主压应力轨迹；2—主张应力轨迹；3—矿体界线；4—主断裂；5—勘探线及编号

三、矿体定位与构造应力场结构的空间耦合关系

矿区内矿体的赋存部位同控矿断裂的应力场结构有关，矿体都赋存在断裂走向偏东部位，如河东金矿段的控矿断裂平均走向 NE 为 53°。此外断裂沿倾向也有波状起伏，矿体赋存于断裂倾角较陡处。这些部位恰好是成矿期断裂右行张扭活动产生的局部引张地段。

统计分析矿化强度（品位×厚度）与主断面应力结构关系可知：①控矿断裂高低起伏、变化复杂处矿化强度大，往往有富矿体产出（158～186，168～171 线）；②主断面等值线拐点附近（凸起与下凹交界处）矿石量小；③矿体总体侧伏方向为 SW，侧伏角为 50°～60°，与主断面波峰、波谷之脊线侧伏方向一致；④矿化强度高值区与低值区呈椭圆形串珠状分布，串珠连线有两个侧伏方向，一个向 SW 侧伏，侧伏角为 50°～60°，另一个向 NE 侧伏，

侧伏角为40°～50°；⑤主断面等值线的正值区下凹部位和负值区上凸部位矿石品位高，矿化强度大。

总之，控制河东金矿的构造是复杂多样的，成矿构造应力场的结构变化控制了金矿体在控矿断裂中的位置；而次级断裂、愈合断裂和控矿节理裂隙则直接控制了矿体的形态、富矿柱的分布以及金品位的变化（图 10-2）。

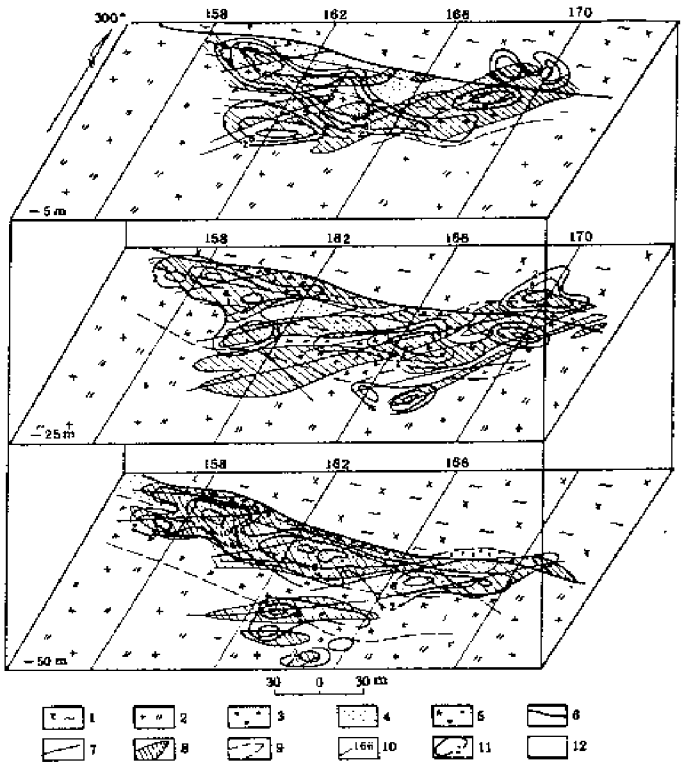


图 10-2　河东金矿矿体分布与节理频率、次级断裂关系图

1—黑云母花岗岩；2—花岗闪长岩；3—黄铁绢英岩；4—黄铁绢英岩化及绢英岩化；5—钾化；6—主断层；7—次级断裂；8—金矿体；9—岩性界线；10—勘探线及编号；11—节理频率等值线；12—中段标高

主断面上、下盘发育许多派生次级断裂，在平面上、剖面上表现为次级断裂与主断裂斜交。河东金矿－5 m，－25 m，－50 m，－80 m 到－110 m 主要发育 NE 向次级断裂，其次为近 EW 向、NW 向和 NNE 向。次级断裂倾角一般较陡，如－25 m 中段 161 线主巷附近的次级控矿断裂，产状 283°∠79°，内部金品位 3.45×10^{-6}，两侧金品位明显降低。从中段地质平面图（图 10-3）及金品位等值线图上分析可知，次级断裂控制了矿体的形态、产状和金品位等值线的形态。次级断裂交汇部位和分枝复合部位往往是富矿柱存在的部位。控矿断面产状与断层面平均产状一致的参考斜面之间的距离最小部位，是矿化最富的部位，也是矿体所在部位。对控矿断面形态与矿体分布作图亦显示对应耦合关系。产生这种现象的原因是矿体多定位在成矿期为低压扩容部位。

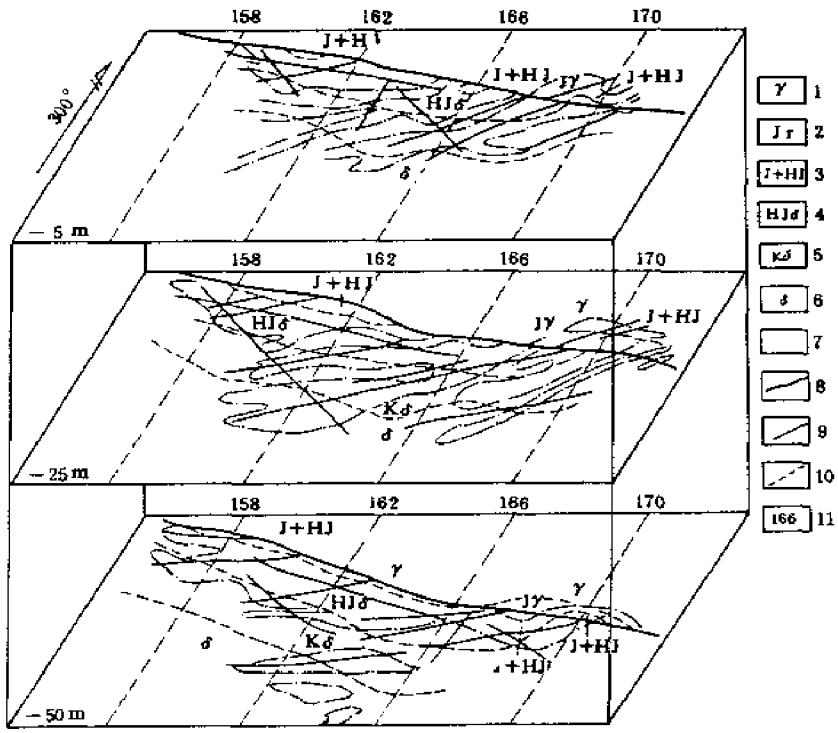


图 10-3　河东金矿联合中段图

1—玲珑型花岗岩；2—绢英岩化花岗岩；3—绢英岩及黄铁绢英岩；4—黄铁绢英岩化花岗岩；5—钾化花岗闪长岩；6—花岗闪长岩；7—主断层；8—次级断层；9—矿体界线；10—岩性界线；11—勘探线

第三节　激电异常场结构分析

脉状金矿所具有的两个最显著特点一是严格受断裂构造控制，二是金矿体与硫化物关系密切。这为激电异常找金提供了有利的物性前提。几乎所有的脉状金矿均有较好的激电异常反映。深入剖析矿致激电异常的结构特征，可有效指导隐伏矿体定位预测。例如，在焦家金矿田内，视极化率（η_s）正常背景值低而平稳，一般为3%～3.5%，在第四系覆盖区，背景值有所下降，一般3.5%以上即可认为是异常。η_s异常峰值大多为5%～8%，很少超过10%（非矿异常除外），为低缓激电场的特征。根据中梯装置η_s曲线（AB=600 m，MN=20 m）统计，在焦家断裂构造带及其与次级断裂交汇部位共获得的7个见矿激电异常中，各异常视极化率最大值分别为：新城4.8%、焦家5.29%、马塘5.28%、望儿山16.3%、河东4.85%、东季4.87%、寺庄4.68%。当AB间距由600 m增大到1000 m时，η_s极大值明显增大。例如，焦家异常极大值由5.29%增大到8.4%；新城异常极大值由4.8%增大到6.6%。由此可见，激电场异常结构分析可以有效地查明隐伏含金硫化物富集带，但场的强度与测量装置的布置有直接关系。据研究焦家金矿田位置激电异常场的结构特征（图10-4）总体表现为：

1. 沿走向两端强度高，中间低。即：西南段焦家、寺庄、马塘、望儿山一带和北东段

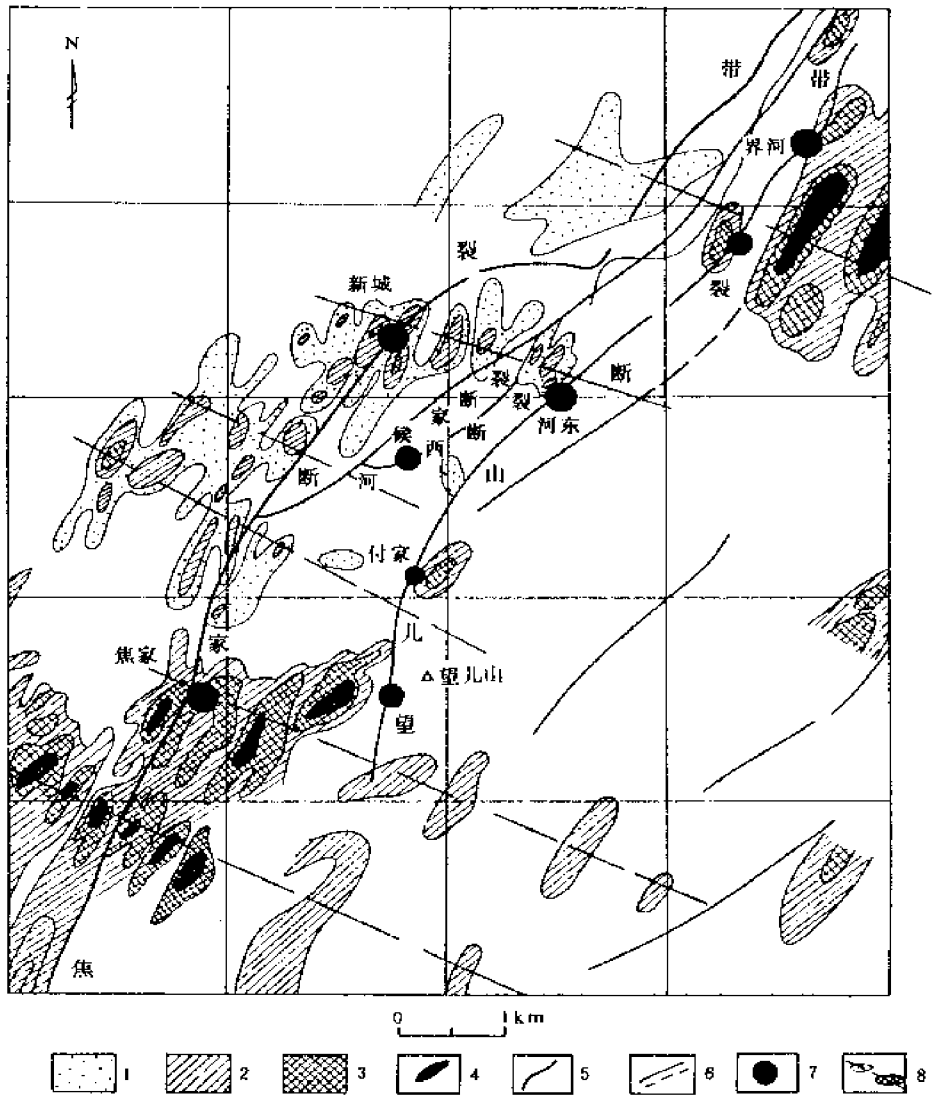


图 10-4　焦家金矿田激电场的异常结构特征

（数据来源于山东物探队）

1—激电异常 η_s>3.5%；2—激电异常 η_s>4.0%；3—激电异常 η_s>4.5%；4—激电异常 η_s>5.0%；5—主断裂；6—次级断裂；7—金矿床；8—线性串珠结构

的界河、陈家一带激电场强度明显的高于中段新城、河东、河西、红布一带，在相同的测量装置（AB=600 m，MN=20 m）的条件下，前者强度高（异常 η_s 为 4%～8%）、规模大，后者场强相对低缓（异常 η_s 为 3.5%～4.5%）、规模小。因此，在预测工作中要区别对待，特别不能忽视弱小异常。

2. 激电异常场沿成矿断裂构造的展布方向，呈不等距的线性串珠状分布，表明了含金硫化物沿走向的不连续性和垂直走向的多层性。同时，也显示出垂直北东走向有一组隐伏的北西向断裂构造，构成不等距的网格状构造格架，控制了金矿床（体）的空间定位体制。这一认识对隐伏矿体的空间定位预测有着重要的意义。

3. 激电异常的出现，无论大小均对应于断裂构造蚀变带，即严格受成矿断裂构造的控制。

4. 激电异常在平面上呈串珠状分布于相应构造蚀变带的上盘。同时也显示了多个含金硫化物体水平叠加的程度，对深部隐伏矿和旁侧隐伏矿预测有重要的指示意义。

从激电异常结构特征分析，焦家金矿田从北东（界河）到南西（马塘）其异常叠加呈增强的趋势。因此，应加强新城、河东至焦家、望儿山一带的旁侧平行隐伏矿体的预测找矿工作。

第四节　原生晕异常场结构分析

研究已知矿体不同截面的地球化学异常结构特征和关键预测标志，是评价深部找矿远景、寻找隐伏矿体和指导外围预测的关键。就河东金矿而言，尽管成矿过程是多阶段性的，而且有空间叠加的影响。但仍以第Ⅱ、Ⅲ阶段矿化为主导，矿体中元素组合、矿物组合、元素浓度梯度的变化与特定的温度和压力等条件相关，它们都是时间和空间的函数。

从不同截面各元素的线金属量：

$$Pl\ (m \cdot \%) = (\sum C_i/n) \times l$$

式中：C_i 为第 i 个元素的含量；l 为晕长度；n 为样点数的变化规律可以看出低温元素 Hg、As 组合富集于矿体上部，中温元素 Cu、Pb、Ag、Au、Zn、Bi 等主要聚集于矿体的中部或中上部，中—高温元素 Co、Ni、Cr 组合则聚集于矿体的中下部。自上而下有较好的连续性和稳定性，矿体中部未见缺失、突变和头、尾晕明显叠加现象。

统计表明，矿体上部的特征元素组合为：Hg、Zn、V、Mg、Rb、Cs、Ba、Mo、W、Sr；矿体中部为：Cr、Au、Ag、Cu、Pb、Bi、Be、Mn；下部为：Co、Ni、Ca、K、Na、Fe、S。在此基础上利用 A. B. 格里戈良（1979）分带指数法求得元素的轴向分带结构，实质上是依据各指示元素最大值所处空间位置的不同，通过计算在一定截面上某一元素金属含量与所有指示元素金属含量总和的比值，确定元素的浓度分带序列。也就是把不同标高的水平截面视为矿体的分割段，按分带指数

$$(D_{ij}) = X_{ij}/\sum X_{ij}$$

式中：X_{ij} 为 i 中段 j 元素的金属量；$\sum X_{ij}$ 为中段所有元素金属量总和。计算出 j 元素在 i 中段上的分带指数规律。由分带指数和变异性指数以及梯度差确定元素的浓度分带。计算所确定的河东金矿主构造矿化带中金矿体的分带结构自上而下为：Zn→Hg→Cs→Rb→Ba→Pb→W→Mo→Mg→Sr→As→Bi→Fe→Cu→Ag→Ca→Mn→Be→Au→Ni→K→Na→Co→S→Li。用 E. M. 克维雅特科夫斯基（1978）提出的金属量梯度（Gr）及梯度递增顺序确定的分带序列（Ni）与分带指数法进行了部分元素计算对比（表 10-1），金属量梯度（Gr）确定为：Zn→Hg→Pb→Bi→As→Cu→Au；分带序列（Ni）确定为：Zn→Hg→Pb→As→Bi→Cu→Au；分带指数法确定的分带为：Zn→Hg→Pb→As→Bi→Cu→Au。尽管个别元素前后顺序有调位差异，但总的序列是一致的，最后厘定了河东金矿床的原生晕垂向结构特征和原生晕异常结构模式（图 10-5）。该模式表明，金矿床中元素的分配、分布、迁移、沉淀规律不仅与矿床成因、成矿作用过程有关，还与其具体所处部位的温度、压力等物理化

学条件及导矿构造、围岩性质等成矿环境有关。经对比焦家金矿田内几个典型脉状金矿床的主要成矿元素的原生晕异常结构特征（表 10-2）发现，相同成因、相同地质环境和不同环境、不同成因、相同围岩条件形成的脉状金矿床，其原生晕异常场的空间结构显现一定的同型性。

依据上述特征元素组合的原生晕异常结构特征，可以有效指导隐伏矿体定位预测。例

表 10-1　河东金矿床金属量梯度 *Gr* 及 *Gr* 递增序确定的分带序列号 *Ni*

元素 / 区段	Au	Cu	Pb	Zn	As	Bi	Hg
地表—Ⅰ中段	0.597 / 4	0.444 / 2	0.456 / 3	0.498 / 7	1.010 / 5	0.176 / 1	2.569 / 6
地表—Ⅰ中段	0.093 / 1	0.197 / 2	0.844 / 4	3.978 / 6	1.901 / 5	0.249 / 3	11.91 / 7
地表—Ⅱ中段	0.085 / 1	1.004 / 2	2.634 / 5	14.21 / 7	2.329 / 4	1.558 / 3	2.911 / 6
地表—Ⅳ中段	0.056 / 1	0.374 / 3	1.952 / 6	8.8644 / 7	1.075 / 4	0.174 / 2	1.472 / 5
Ⅰ—Ⅱ中段	0.155 / 1	0.443 / 2	1.856 / 5	0.799 / 3	1.894 / 6	1.413 / 4	4.636 / 7
Ⅰ—Ⅱ中段	0.142 / 1	2.261 / 3	5.793 / 6	2.853 / 5	2.308 / 4	8.841 / 7	1.133 / 2
Ⅰ—Ⅳ中段	0.093 / 1	0.842 / 3	4.293 / 7	1.780 / 6	1.056 / 5	0.987 / 4	0.573 / 2
Ⅱ—Ⅱ中段	0.913 / 2	5.109 / 6	3.121 / 4	3.573 / 5	1.219 / 3	6.258 / 7	0.244 / 1
Ⅱ—Ⅳ中段	0.601 / 3	1.902 / 5	2.313 / 7	2.23 / 6	0.560 / 2	0.699 / 4	0.124 / 1
Ⅱ—Ⅳ中段	0.658 / 6	0.372 / 2	0.741 / 7	0.624 / 5	0.462 / 3	0.112 / 1	0.506 / 4
$\frac{\sum Gr/n}{\sum Ni}$	0.339 / 21	1.295 / 30	2.413 / 54	4.389 / 57	1.383 / 41	2.046 / 36	2.608 / 41

表 10-2　焦家金矿田某些金矿床原生晕异常结构对比

矿床名称	上/下盘围岩	控矿构造	轴向分带（自上而下）	来　源
焦家金矿	胶东群地层/黑云母花岗岩	焦家主断裂	（Cu Zn Ag Se）—Au—Pb—Te—（As Sb）	朱太天（1985）
新城金矿	黑云母花岗岩/花岗闪长岩	焦家主断裂	（Ag Au Cu Sb Bi Te）—（As Pb Mo）—（Ba Se）—（Co Mn Zn Ni）	朱作山（1988）
河东金矿	黑云母花岗岩/花岗闪长岩	河东-望儿山次级断裂	Zn—Hg—Ba—Pb—W—Mo—Sr—As—Bi—Cu—Ag—Au—Ni—K—Na—Co—S	本　书

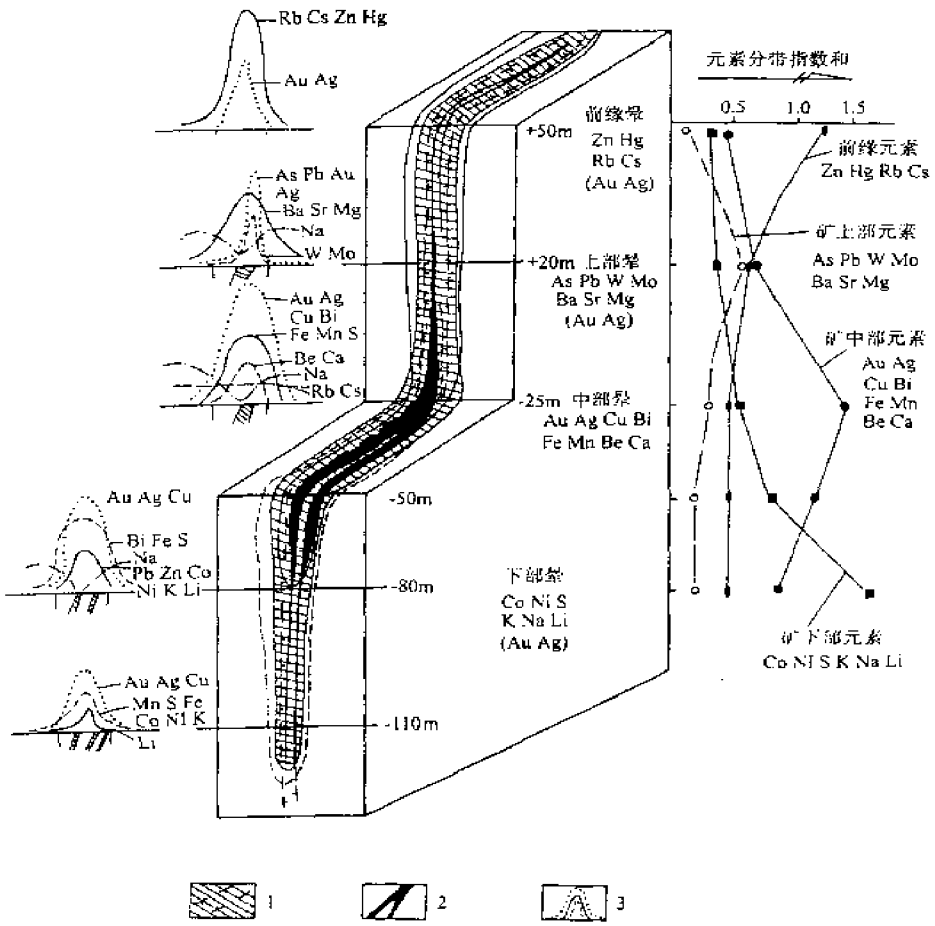


图 10-5　河东金矿原生晕异常结构模式

1—断裂蚀变岩带；2—金矿体；3—原生晕异常结构示意图

如，依据特征元素的组合特征及原生晕结构特征分析，河东金矿特征元素没有明显的缺失与叠加，异常（特别是 Au、Bi、Ag、Fe、S、K、Na 等）强度大，有较好的连续性，向下变宽，随着钾化蚀变带向下的增强和增宽，Au 晕明显加宽。表明主采矿体还有一定的延深，但呈“根须”状分散，造成矿化面积大，平均品位降低的趋势。

第五节　河东金矿成矿构造物理化学场结构分析

河东金矿床产于河东-望儿山断裂构造蚀变带中，上下盘围岩分别为黑云母花岗岩和似斑状花岗闪长岩，由于含矿断裂蚀变带上盘围岩为弱磁性体，下盘围岩为磁性体，正负磁场和重力异常的梯级结构有效地指示了隐伏含矿断裂蚀变带的存在（图 10-6、10-7），梯级带上的磁场差值大于 40 nT。尽管矿体有一定的隐伏深度，但在构造蚀变带上方仍有较强的次生金异常和壤中汞气异常，极大值分别为 65×10^{-9}和 2.25×10^{-9}。激电异常在无矿构造蚀变带上方为低背景场，异常极大值出现在隐伏矿体的顶部。依据成矿构造物理化学场的

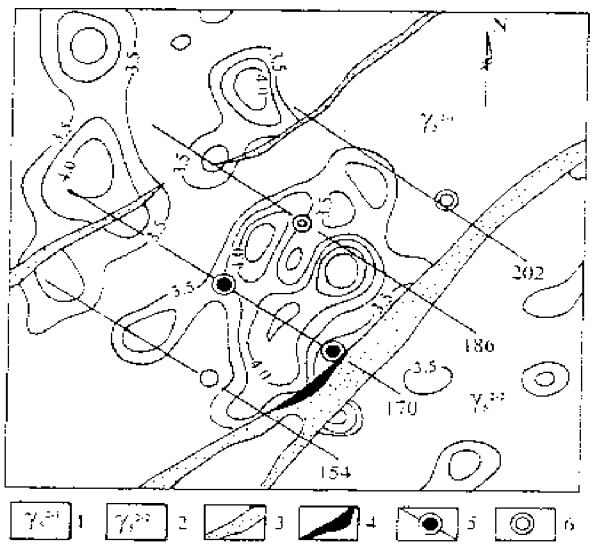


图 10-6　河东金矿激电异常平面结构

1—黑云母花岗岩；2—花岗闪长岩；3—蚀变带；4—金矿体；5—勘探线及见矿钻孔；6—未见矿钻孔

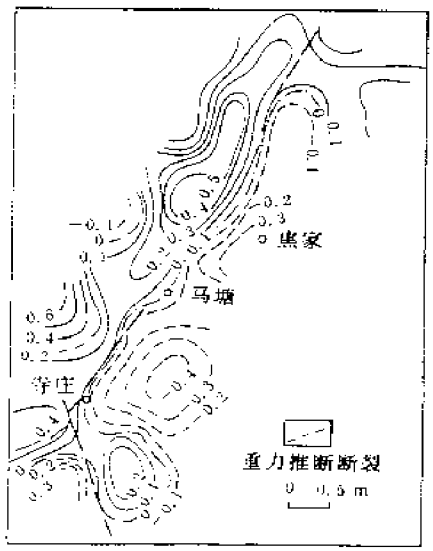


图 10-7　焦家金矿重力异常平面结构

结构分析原理，可以利用磁场和重力场的梯级结构、激电场和化学场的极值，结合控矿断裂的地质构造异常变异部位大致预测隐伏矿体的空间位置、埋藏深度和产状特征，达到定位预测的效果。

例如：河东金矿 160 线金、汞异常极大值和控矿断裂带上磁场极小值到激电异常中心的水平距离（d）为 140 m，控矿断裂面倾角为 35°，大致求出地表到矿体的垂直深度 $h=d\times\tan\alpha=140\times\tan35°=98$ m，实际见矿深度为 90 m。隐伏斜深 $=h/\sin\alpha=98/\sin35°=170.8$ m，实际斜深为 165 m。由此可以说明利用成矿构造物理化学场的精细结构分析进行隐伏矿体定位预测，可以获得较高信度和精度的预测成果。

又如，河东金矿床平面激电异常场的结构特征呈不规则状，长轴延伸方向与控矿断裂构造带平行，视极化率（η_s）为 3.5%～4.5%，属于低缓场（图 10-6）。沿控矿断裂构造倾斜的北西方向具有多峰结构，表明主

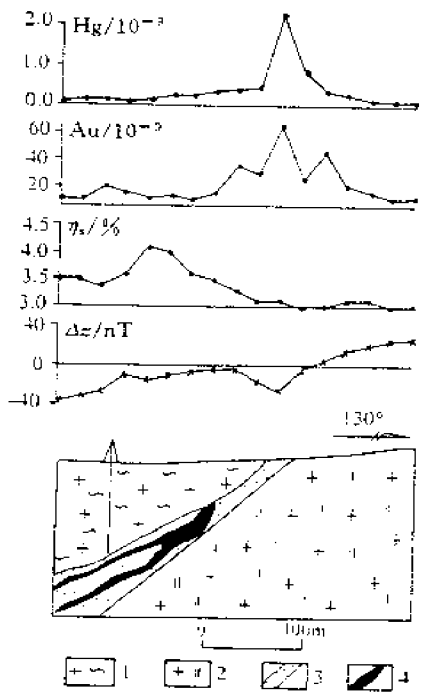


图 10-8　河东金矿 160 线构造物理化学场结构特征

1—黑云母花岗岩；2—似斑状花岗闪长岩；3—构造蚀变岩带；4—金矿体

矿体旁侧有多条近平行的含金硫化物体叠加，是深部隐伏矿体预测找矿的重要标志，提示应注意与主断裂面平行的下盘次级含矿断裂蚀变带内寻找隐伏矿体的可能性。

激电异常在南西方向（154～178 线）靠近控矿主断裂带，北东方向（178～194 线）相对远离控矿主断裂带，依据剖面成矿构造物理化学场结构分析（图 10-8）表明，向北东方向矿体隐伏斜深越来越大。因此，应加强北东方向的深部探矿工作。从金元素的异常场结构也可以看出，河东金矿深部找矿应注重旁侧平行隐伏矿体和北东侧伏向隐伏矿体的找寻，这与激电异常场结构指示的找矿方向相一致。这种成矿构造物理化学场结构特征亦可见于相邻的新城特大型脉状金矿床（图 10-9）。又如望儿山金矿形成较强的激电异常场，视极化率（η_s）极大值为 6%，并有很强的 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Bi、Hg 等地球化学顶部异常。激电场和地球化学场均表现为南东陡，北西缓，异常向北西发育的特征，有效地指示了金矿体向北西倾斜的特征。其成矿构造物理化学场结构特征可以 38 线为例（图 9-10），由图可见，在控矿断裂蚀变带上方为负磁场，断裂带的两侧围岩为正磁场，磁场结构对成矿构造带有明显的指示。由于望儿山金矿上部以石英脉型矿化为主，有一定的氧化深度，过氧化带后激电场明显增强，视极化率（η_s）极大值达到 10%，并且异常在倾斜方向上呈双峰结构，显示了深部隐伏矿体的叠加。在近地表，金矿体具有脉幅窄、产状陡、品位高的特点，因此，地球化学 Au、Cu、Bi 等元素表现为窄而强的顶部异常，其中 Au 异常极大值大于 2×10^{-6}，Cu 大于 500×10^{-6}。利用磁异常的极小值和地球化学异常的极大值与激电异常极大值之间的距离，结合矿脉的地表产状，可以近似定量的计算出氧化带的延深以及隐伏矿体的定位预测。

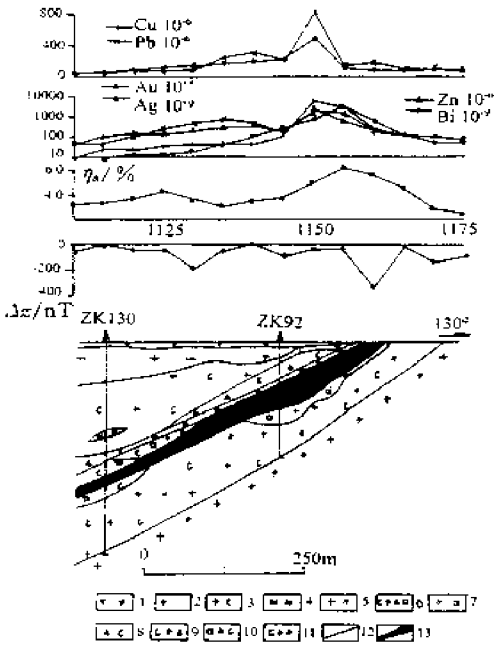


图 10-9　新城金矿 183 线构造物理化学剖面

1—第四系；2—黑云母花岗岩；3—绢英岩化花岗岩；4—斜长角闪岩；5—花岗闪长岩；6—黄铁绢英岩化碎裂岩；7—黄铁绢英岩化闪长岩；8—绢英岩质碎裂岩；9—绢英岩化碎裂岩；10—黄铁绢英岩化碎裂岩；11—绢英岩化闪长岩；12—断层；13—金矿体

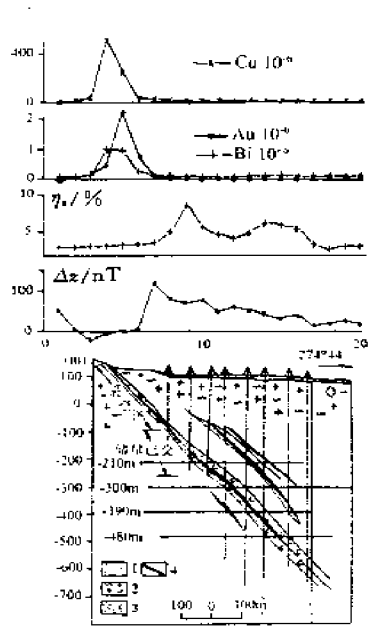


图 10-10　望儿山金矿 38 线构造物理化学剖面

1—第四系；2—黑云母花岗岩；3—望儿山断裂构造蚀变带；4—金矿体；5—金矿平均品位及平均厚度

第六节　河东金矿深部及外围隐伏矿体定位预测

一、矿区外围隐伏矿找矿靶区优选

根据笔者对河东金矿及其所在焦家金矿田成矿构造物理化学场结构特征及其与矿体空间定位规律之间对应耦合关系的分析，在河东金矿外围初步优选了以下三个有利的隐伏矿找矿靶区。

1. 陈家村西侧、西沟李家西北侧找矿靶区

该靶区面积约 1 km^2，中心距陈家村 300 m，距西沟李家约 800 m，具体位于河东-望儿山控矿断裂带的下盘。区内发育有花岗岩和花岗闪长岩岩体及绢英岩化碎裂岩带。并发育有找金综合预测评价参数 M_j 异常，中心强度 7.1；尚有激电异常发育和 Te（max＝0.29×10^{-6}）、Na（max＝0.25×10^{-6}）异常位于两侧。M_j 异常处 Na 相对偏低，K 异常（max＝2.6×10^{-6}）和 Hg 异常（0.052×10^{-6}）相对稍高，另有 Bi（max＝1.255×10^{-6}）和 Li（max＝0.29×10^{-6}）异常。另外，靶区位于低频航电异常所反映的隐伏断裂构造复合部位，并根据 K、Na 异常在 M_j、Au 异常的两侧高、中间低及 Li 异常的结构特征分析，推断具有埋深相对较浅的隐伏金矿（化）体。建议在该靶区进行详细地面查证基础上，采用 80×20 网度的地质、物化探工程，以进一步查明隐伏矿（化）体的具体位置、规模、产状及其工业价值。

2. 龙埠找矿靶区

该找矿靶区基本横跨龙埠村，面积约 1.2 km^2，具体位于焦家-新城控矿断裂带的下盘，走向近 NW 向，为花岗岩与花岗闪长岩的接触带部位。靶区内发育有强度为 2.8 的 M_j 异常，激电异常和 Te（max＝0.24×10^{-6}）、Bi（max＝0.55×10^{-6}）、K（max＝2.0×10^{-6}）、Li 组合异常。推测本区内可能存在一个规模较大的隐伏金矿（化）体。建议在此靶区范围内进一步开展 80×20 网度的地、物、化综合评价，在剖析地、物、化异常结构基础上，运用轻型山地工程（槽、浅井等）予以适当揭露，以尽快查明隐伏矿（化）体的具体赋存部位和形态、规模及产状。

3. 东李家西北找矿靶区

该靶区位于东李家村西北，面积约 1.8 km^2，区内有找金综合预测评价参数 M_j＝1.5，另外还有激电异常和次生晕异常。多种异常均发育于胶东群地层与花岗岩体接触带上的构造蚀变带（地质异常）中，具体位于焦家-新城控矿断裂带上盘。

二、矿区深部隐伏矿体定位预测

依据对河东金矿地探和生产过程中所积累资料的收集与整理，采用成矿构造物理化学场结构分析方法，控矿构造几何分析方法和计算机数据处理方法分别统计了不同工程（探槽、钻孔、坑道等）控制处断裂面的三维坐标、矿体平均品位、厚度、品位×厚度，经计算机处理形成垂直纵投影等值线图（图 10-11）。

由图 10-11 可以看出，主矿体在空间上有两个富矿柱，第Ⅰ富矿柱位于近地表至－50 m 标高，155～166 线之间；第Ⅱ富矿柱出现在－110～－250 m 标高，166～174 线之间。金的

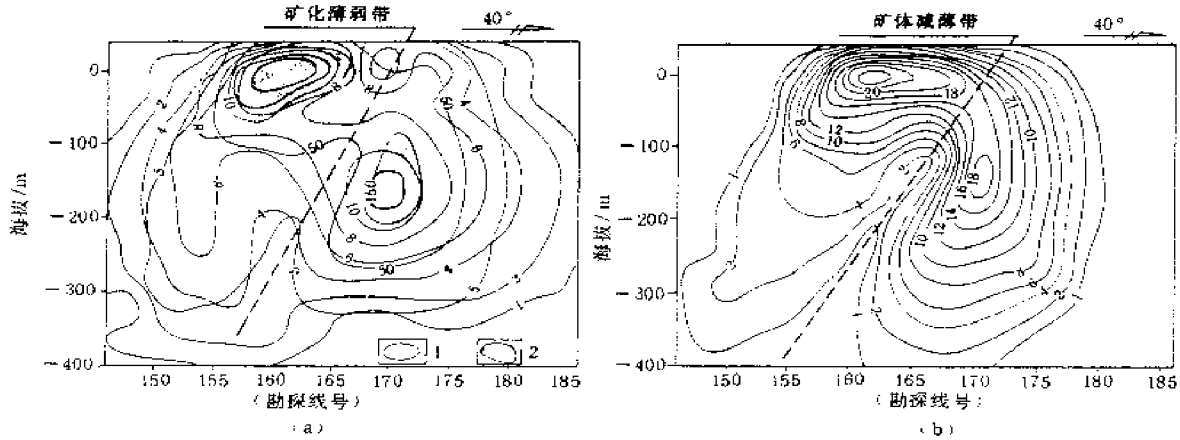


图 10-11　河东金矿矿体品位、厚度、面金属量空间结构

1　金的平均品位；2　面金属量［矿体长（m）×宽（m）×金的平均品位（10^{-6}）］

平均品位均大于 10×10^{-6}（图 10-11a）。这两个富矿柱所处的空间位置正好对应于矿体的两个加厚部位（图 10-11b）。所以，也是矿石量最大的两个部位。面金属量［矿体的长度（m）×厚度（m）×金的平均品位（10^{-6}），单位：$10^{-6}\cdot m^2$］的高值区与金的高浓集区对应。两个富矿柱相连部位既是矿体减薄部位，又是金矿化的薄弱带。除了两个富矿中心外，总体表现为从上到下矿体长度增大、厚度变薄、矿化强度减弱，在 300 m 以下逐渐尖灭。

深部－110～－300 m 标高的 165～176 线应有一个隐伏富矿柱出现（图 10-11），156～164 线是一个矿化薄弱带。通过少数钻孔资料得出－250～－50 m 范围内控矿主断面仍呈波状起伏，反映这一区域内仍可能有隐伏矿体存在。－150～－50 m 控矿断裂的凸、凹部位向南西侧伏。因此，这一地段应注意沿南西侧伏方向找矿。此外，在 180 线的北东方向仍有较强的激电异常，反映这一地段下部可能有隐伏矿体存在，同时亦应加强北东方向深部隐伏矿体的地质探矿工作。

更深部（>－300 m）矿体预测：受脆性断裂控制的脉状矿化往下必然会趋于尖灭。但拆离断层下部矿化遍及整个糜棱岩带，因为拆离断层形成时倾角较缓，矿化基本不受深度控制。

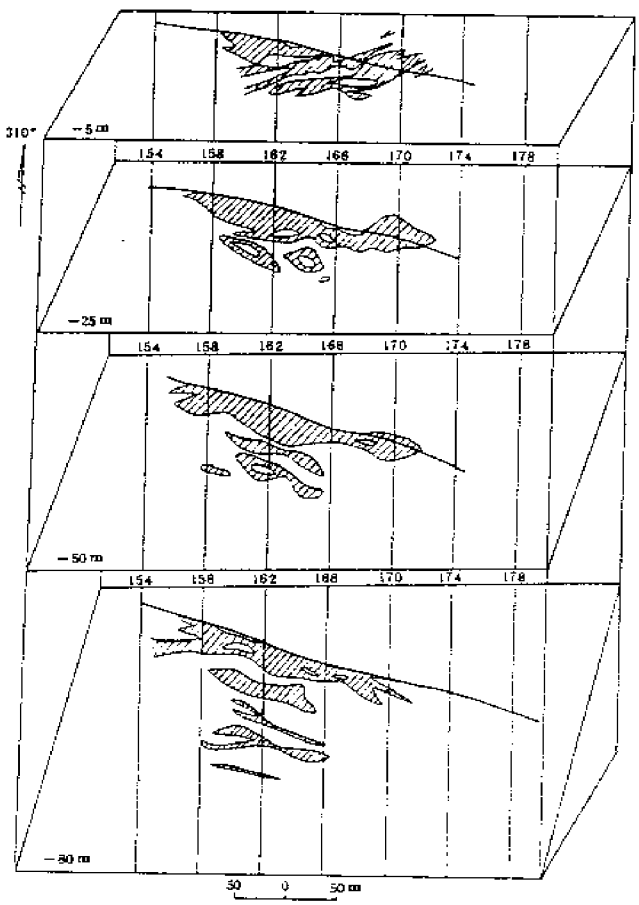


图 10-12　河东金矿－5 m～－80 m 标高矿体联合中段图

根据这一规律，河东金矿深部可能有早期成矿的面积大，品位低且稳定地受糜棱岩带控制的金矿体。矿体可能延伸至与焦家断裂交汇部位，近期在164线附近布钻，－300 m以下已发现厚约15 m，金的品位为（6～7）$\times 10^{-6}$的金矿脉，证明深部仍然有矿。

河东金矿深部另一值得注意的找矿方向是主矿体下盘的平行隐伏小矿体，从－5 m到－80 m标高，旁侧平行小矿体呈增加的趋势出现（图10-12）。使得从－5 m中段至－110 m中段实际采矿总厚度呈明显增加趋势，比钻孔控制的厚度明显增大（图10-11）。这应是深部（－110 m以下）预测找矿、扩大储量的重要方向。

采用控矿构造几何分析方法，以河东金矿154线为0点，采用104个控制点，一次趋势面分析拟合度为98.5%（图10-13）。金矿体分布在主断面凹凸变化的过渡地带，在158～165线的0～120 m之间矿体宽厚，总体向SW侧伏。此外沿NE侧伏方向控矿主断面出现波谷，对应产出上盘品位较高的矿体。这一点与新城金矿类似，后者在深部也出现一个NE侧伏的分支矿体。

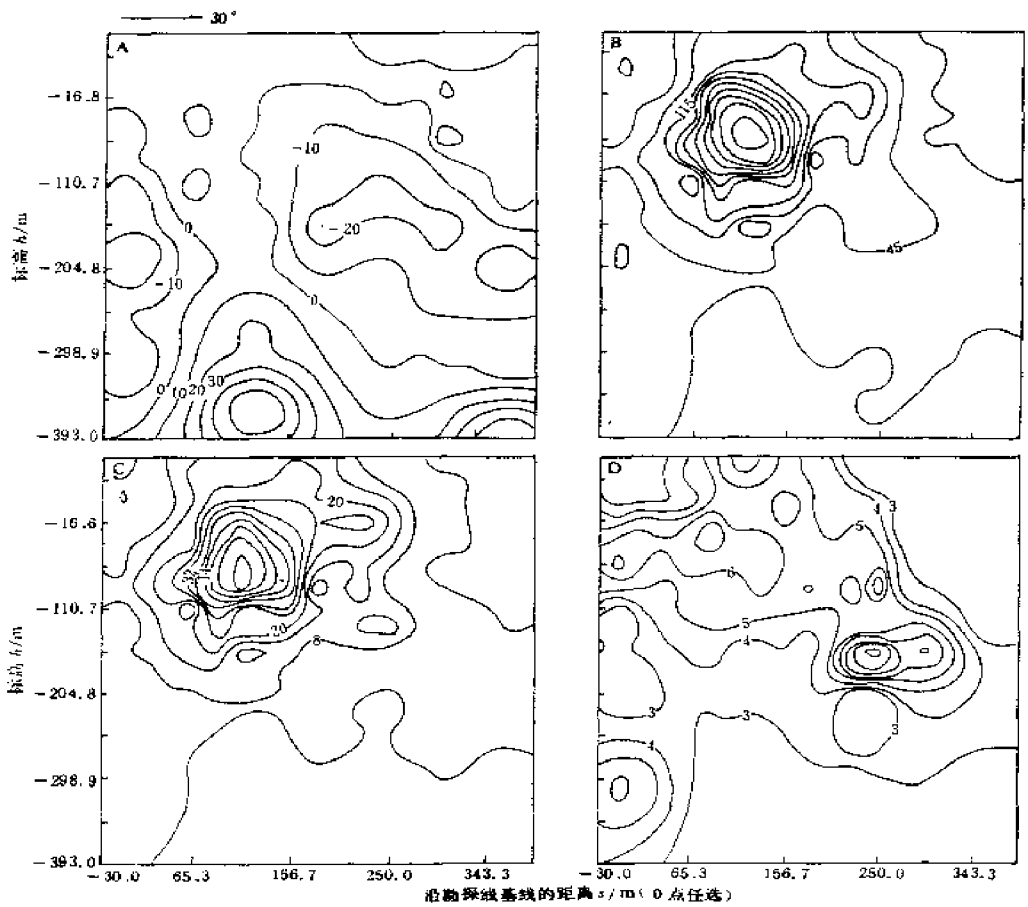


图10-13　河东金矿控矿断面形态模拟及深部隐伏矿体预测图

A—断裂面一次趋势剩余值等值线图；B—矿体品位（10^{-6}）×厚度等值线图（m）；C—矿体厚度等值线图（m）；D—矿体品位等值线图（10^{-6}）

总之，河东金矿矿体产出于控矿断面波峰、波谷过渡地带的下盘和波谷的上盘。注意到矿体的侧伏规律，154 线（横坐标为零）—310 m 又可能出现金矿化的相对富集中心（图 10-13），且该中心位于控矿断面凹凸变化的过渡地带，所以沿侧伏方向 154 线以南—290 m 以下，可能还有隐伏矿体，今后找矿工作中应予以重视。

第十一章　全书总结与研究展望

第一节　全书总结

本书围绕隐伏矿体定位预测方法这一学科前沿课题进行了一些定性与定量的探索性研究。主要工作与进展可概括如下：

一、在组合创新和方法体系构建方面

1. 系统提出了开展隐伏矿体定位预测研究应重点探讨和解决的三大关键科学问题，并针对相关科学问题进行了研究思路、途径、方法的探索。指出进行隐伏矿体定位预测的重要地质基础是三维空间上揭示和厘定矿体的空间定位机理和定位规律，并进行多元预测信息的有效提取与优化。为此，既要研究矿体的空间定位机理，又要刻划矿体的空间定位规律；既要探讨理论问题，又要解决方法问题。

（1）探索和研究了矿体空间定位机理、定位规律及其厘定与表征方法。主要研究进展为：提出并探讨了应用成矿动力学和成矿热力学方法研究和揭示矿体空间定位机理；应用成矿场矿化时空结构分析方法，控矿构造几何解析方法，数值结构模拟方法和计算机图示技术揭示和厘定矿体空间规律的基本原理和工作思路。例如，解析主要控矿断裂构造界面的几何特征，定量分析与成矿有关的地质-地球物理-地球化学参数及矿化参数的空间结构特征及其与控矿界面的空间耦合关系，建立旨在反映矿体空间定位规律的三维立体产状模式等。

（2）探索和研究了多元预测信息的有效提取与优化方法。主要研究进展为：提出并探讨了在注重应用综合方法获取综合信息的基础上，应用经典多元统计分析方法对所获地、物、化、矿资料进行二次开发和线性组合，以提取有效预测信息；应用关联分析方法，探讨了如何有效提取、筛选、处理和利用有效预测信息，怎样在信息不完全或不确定情况下提高预测成果准确度与可靠性等问题。并以矿化信息的有机关联和有效传递为基础，以升华的距离为量度，以整个动态逼近为核心，采用拓扑空间的邻域接近和灰关联空间有序建模等途径，通过建立因素、标志、品位、厚度等多参数关联空间及生成计算，初步实现了多源预测信息的有效提取与优化。

（3）探索和研究了隐伏矿体定位预测的高精度预测模型和组合预测方法。主要研究进展为：从矿致地、物、化异常场、矿化场和成矿构造物理化学场的精细结构分析入手，根据其空间结构与矿体定位之间的对应耦合关系，提出了建立高精度的时空结构框架和信息集约化模型。采用多参数矢量逼近方法，控矿构造几何模拟方法和成矿构造物理化学场结构分析方法进行隐伏矿体定位预测的工作思路和方法体系。

2. 采用地质异常理论和构造物理化学场结构分析方法，进行了成矿构造物理化学场结

构特征的探索性研究。通过对矿致地质异常结构，重、磁、电异常结构，构造地球化学异常结构的综合分析和多源预测信息的有效提取与优化，初步实现了深层次预测信息提取和高精度预测模型建立。并依据成矿构造物理化学场宏、微观结构特征，结合预测实践，探索性提出了脉状金矿隐伏矿体定位预测的最佳方法组合为："成矿构造物理化学结构分析法＋控矿构造几何法＋多参数矢量逼近法"。其方法基础可概括为，在地质异常场结构特征与成矿场矿化时空结构特征及矿体空间定位规律具内在成生联系和对应耦合关系的理论认识指导下，按照"地质异常致矿→局部异常控矿→矿致异常筛选→异常结构分析→异常结构与矿体定位耦合关系厘定→多参数矢量逼近"的主导思路，采用场结构分析的主导方法，利用地、物、化组合异常结构分析，成矿场矿化时空结构分析，成矿构造物理化学场结构分析，控矿构造几何结构分析和多参数矢量逼近的组合预测方法，进行了隐伏矿体定位预测的探索与实践。

这种从组合创新角度提出并构建的脉状金矿隐伏矿体定位预测方法体系，避开了热液脉状金矿研究中的成因不确定性问题，而主要从惟像分析角度，侧重于控矿构造与矿体定位的几何形态分析，多重异常场和矿化场的空间结构分析及多种特征参数的矢量逼近分析。其方法学意义在于热液脉状金矿床虽然成因各不相同，但成矿机理相似并具有大致相同的成矿动力学过程、矿化时空结构特征和异常信息显示。这种不涉及矿床成因的结构分析方法，将研究重点集中于脉状金矿的成矿机理的相似性，异常结构、矿化结构、信息结构的同型性，从而使预测方法具有普适性。实践证明，这种"结构分析方法"既可有效地揭示和厘定矿体空间定位规律，又可以较深入、精确地厘定和表征多重异常场、信息场与矿化场的空间结构特征和对应耦合关系，具有较高的预测信度和精度。另外，这种预测方法的普适性还在于它可以视不同预测对象的尺度及精度要求而变换结构参量与矢量标度，从而适用于矿柱、矿体、矿床、矿田级别的隐伏矿定位预测和靶区优选。通过在胶东地区和黄陵地区的预测找矿实践佐证了其在研究途径、预测方法上的普适性。

二、矿体空间定位机理及定位规律的厘定与表征方面

从物质迁移和能量传递的动态进程上研究脉状金矿的成矿作用，综合分析了热液成矿作用中构造动力学环境对矿液输运和成矿反应体系的控制机理，以此探讨了成矿元素富集定位的条件和过程。强调从典型矿床（脉）矿化产物的实际观测中提取成矿动力学信息，并探索相应的厘定与表征方法，经过对胶东地区焦家、玲珑、河东、金牛山、望儿山、灵山沟金矿床和黄陵地区茅坪、石板溪金矿床的剖析式研究，取得了以下主要进展：

1. 从理论分析角度，根据对热液脉状金矿的成矿作用过程、成矿作用热力学及动力学的系统分析，指出矿体空间定位是一个囿于有界介质内的局域化耗散结构，应用非线性科学的涨落涌动和扩容滞流的局域化理论和矿床地球化学方法、矿化时空结构方法及控矿构造几何学方法可以有效厘定和表征矿体空间定位机理及定位规律。从技术方法角度，指出绝大多数热液脉状金矿床中矿体的产出、分布与定位都严格受断裂构造控制。控矿断裂的多期次继承性活动及其性质转换和空间叠加造成了控矿断面的波状起伏，而控矿断面的产状起伏又制约着矿体的空间产出，控矿断面的波长幅度和起伏部位控制着大多数矿体的空间定位。因此，有效预测矿体在矿脉中产出位置的关键是查明矿化时空结构与控矿构造几何特征及其对应耦合关系。应用矿化结构分析方法、构造几何解析方法、数值结构模拟方

法和计算机图示技术可以将控矿断面的几何形态及其与矿化参数的结构耦合关系予以较准确的厘定与表征，从而揭示和查明矿体空间定位规律。

2. 通过对控矿断裂的变形结构及空间几何结构分析，揭示和厘定了其对矿液运移、矿质聚集和矿体定位的控制作用及对应匹配关系，结合局部矿致地物化异常的精细结构分析，成矿构造物理化学场结构分析和成矿场矿化时空结构分析等途径，初步揭示和厘定了脉状金矿成矿系统的结构特征和矿体定位规律。在静态结构和结构变化研究的基础上，引入成矿作用过程的动力学和热力学分析，为深入揭示和认识矿化系统的演化、协同、变化规律及矿体空间定位机理提供了有效途径。

3. 根据矿物组合及流体包裹体成分和成矿构造物理化学参数，初步建立了热液脉状金矿由控制反应、成矿反应和缓冲反应三类构成的成矿反应体系。指出由体系中的 H_2O、CO_2 和 H_2S 等挥发相的状态变化构成的控制反应，其方向和强度敏感地受制于构造动力学条件，同时又在总体上影响反应的状态和性质，并制约成矿元素的迁移、沉淀、富集和定位。并由此证明热液脉状金矿的成矿作用实质上是一种物质能量开放的，受构造强烈扰动的多组分水-岩反应体系。脉状金矿的矿体空间定位机制可表征为三种地质概念模型。即①岩浆期后热液的热-构造综合驱动机制；②控矿构造“低压扩容泵吸”定位机制；③下渗流体的对流循环沉淀机制。脉状金矿的矿体空间定位则可受这三种机制的综合制约。含矿热液的定位过程可以划分为以下几个动力学阶段：①在导矿构造裂隙中的“泵吸”上侵迁移；②在容矿断裂中的扩容沸腾和脉状充填；③在围岩多孔介质中的渗滤-扩散，形成原生晕异常，或在局部启张部位浓集、滞流，沉淀、富集，形成矿体。建立旨在反映矿体空间定位规律的高精度产状模型须以矿体空间定位机理的成矿动力学分析为依据。

4. 通过影响成矿反应体系性质和状态而控制矿化局部富集和矿体空间定位的认识，应用成矿场矿化时空结构方法和控矿构造几何学、动力学解析方法，揭示了每期控矿构造脉动过程都存在两种动力学状态，即脆性破裂和韧脆性扩张。其对成矿反应体系具有截然不同的制约作用：在容矿断裂的脆性破裂阶段，由于减压扩容和泵吸驱动，含矿热液快速上侵，并发生沸腾作用，体系处于强烈的非平衡状态，矿质迅速结晶，形成块状脉体构造及沸腾包裹体群。在韧脆性扩张阶段，矿质在接近平衡体系中缓慢反应，并沉淀出粗晶结构的矿石。在这两种动力学状态下，体系以不同机制约束矿质的分异和富集。而成矿反应体系的热力学演化与有利成矿构造动力学条件的对应耦合，是控制矿化局部富集及矿体空间定位的主要机制。这种热力学与动力学耦合控矿机制对揭示和认识热液脉状金矿矿体空间定位机理和定位规律具普遍性意义。

通过本书以上初步而系统的研究工作，笔者在应用成矿体系热力学和成矿作用动力学方法揭示和研究热液脉状金矿矿体空间定位机理方面；应用现代构造解析方法进行控矿构造几何学、运动学和动力学分析，控矿断面几何参数测定和数值结构模拟方面；应用结构分析方法和构造几何方法进行矿化时空结构分析，地、物、化组合异常结构分析，矿体定位规律厘定与表征及矿体定位产状模式构建方面；应用关联分析方法进行多源预测信息有效提取与优化方面取得了一些初步的研究成果，提出并初步构建了隐伏矿体定位预测的组合预测方法体系，在一定程度上促进了成矿规律学和成矿预测学的发展。

三、本书的特色与创新之处

1. 主要特色

（1）本书的主要特色体现为对预测对象尺度、精度上的具体化、精细化。针对多因素控制下成矿系统的复杂性和单一方法的局限性、多解性，从组合创新角度，采用组合预测方法建立高精度隐伏矿体定位预测模型、解析矿致异常结构与矿体定位之间的对应耦合关系。探索并建立集地质异常致矿、综合信息找矿、空间结构分析技术和数据处理方法为一体的组合预测方法，可对多元预测信息进行有效提取与优化，建立地、物、化综合异常结构模型，实现深层次信息提取，新信息衍生和弱信息强化。并可同时集聚多种单一预测方法的优点，使预测成果精确度和可靠性明显提高。

（2）本课题既直接涉及现代成矿学领域研究的最基础问题（矿体定位机理、定位规律及其厘定与表征方法），又涉及当前成矿预测学领域中亟待解决的最关键问题（预测信息的有效提取及优化、隐伏矿体定位预测方法等），是一个具有重要理论意义和重大实用价值的前沿探索性课题。笔者提出的由矿体空间定位机理分析→空间定位规律厘定与表征→预测信息提取与优化→高精度预测模型构建→组合预测方法的研究思路将现代成矿理论研究中的最基础问题和成矿预测研究中的最关键问题有机关联，既探索理论问题，又研究方法问题，能较好地体现课题的前沿性、创新性和实用性。

（3）应用先进的系统思维方式和结构分析方法，以揭示和研究热液脉状金矿床中矿化时空结构的同型性特征和定位机理、定位规律的相似性特征为基础，探索建立先进、实用、有效的隐伏矿体定位预测方法体系，属于当代应用地学领域的关键技术问题。其研究成果有可能为成矿预测学开辟新的研究方向，并为面向经济建设主战场提供理论研究与勘查实践相结合的“最佳接口”。

2. 主要创新

（1）从认识论角度，探索性提出了开展隐伏矿体定位预测应重点研究与解决的三个关键科学问题，即“矿体定位机理和定位规律的厘定与表征；多元预测信息的有效提取与优化；高精度预测模型与组合预测方法”。从而有助于深化这一前沿课题的研究。

（2）采用组合创新的科学思维法则，以探索和解决隐伏矿体定位预测的三个关键科学问题为主导，提出并构建了隐伏矿体定位预测的组合预测方法的系统框架，从而有效地促进了成矿预测方法体系的研究进展。因为，任何系统框架的构建都在一定程度上有助于激发人们的想像力、创造力和预见力。

（3）进行了“成矿构造物理化学场结构预测法”、“多参数矢量逼近预测法”和“成矿场矿化时空结构分析法”的探索与应用。其中由笔者探索提出并加以应用的“成矿构造物理化学场结构预测”方法及其研究成果，在1997年12月5日由国家计委国土司和地质矿产部科技司主持的“金矿重点矿化区带隐伏矿找矿方法和预测”项目成果鉴定验收会上，得到了郭文魁、李廷栋、宋叔和、陈毓川、马宗晋、欧阳自远、叶大年院士等组成的专家鉴定委员会的充分肯定与好评。

（4）本书所采用的地质异常致矿--组合异常示矿—矿致异常筛选—异常结构分析—关键信息提取—高精度预测模型构建—预测方法组合—多参数矢量逼近和成矿构造物理化学场结构预测”的研究思路、途径、方法，可成为具普适性的隐伏矿体定位预测方法而广泛

应用于其它类型矿床的隐伏矿体定位预测。

第二节　研究展望

1. 矿化系统的成矿动力学分析和预测对象的多重场结构分析是研究和查明矿体空间定位机理和定位规律，并对其进行厘定与表征的有效途径；组合异常分析、组合信息提取、高精度预测模型建立和组合预测方法的应用，有助于提高隐伏矿体定位预测的可靠性和准确性。本书针对隐伏矿体定位预测方法研究所做的一些探索性工作，主要是对关键科学问题的提出和方法体系框架的初步构建，对这一兼具科研、生产双重特征的复杂性问题研究仅仅是一个开端，还有大量的问题值得深入探索。特别是复杂性理论和高新技术方法在隐伏矿体定位预测中的应用，将为该问题的深入研究展现良好的发展前景。

2. 未来隐伏矿体定位预测方法的探索与研究将从方法学角度形成三个主要研究方向，即线性统计预测学研究、成矿系统动力学研究和应用复杂性科学的非线性预测方法研究。矿床学领域和矿床地球化学领域开展的成矿作用发生、成矿作用过程、成矿作用热力学、成矿作用动力学和成矿流体系统等前沿性研究和现代测试技术、计算技术和图示技术的发展将为深入分析、揭示、厘定和表征矿体定位机理和定位规律提供理论和技术支持。

3. 在具体预测方法研究方面，今后的研究趋势是继续深入探索：①基于目标物模型类比预测的组合预测方法；②基于目标物标志信息统计预测的组合预测方法；③基于目标物异常结构推断及矢量逼近预测的组合预测方法。同时，加强应用混沌动力学和分形几何学方法，多元信息计算机处理技术，人工神经网络信息分析和空间信息合成等高新技术方法，进行隐伏矿体定位预测的探索和实践。并注重从建立高精度时空框架和信息集约化方法角度，提取微观隐蔽信息和深层次信息，以揭示成矿场空间精细结构特征和建立高精度预测模型为途径，进一步完善隐伏矿体定位预测方法体系，提高隐伏矿体定位预测的信度和精度。

4. 注重提高预测主体对预测客体的认识能力和预见能力，大力倡导科学预测思维方法的研究。大量的预测找矿实践已经证明，重大找矿突破不仅有赖于勘查技术方法的发展，而且有赖于找矿思路和思维方法的优化与创新。本书虽对隐伏矿体定位预测方法研究的方法学基础和方法论问题进行了初步探索，指出了辩证思维、系统分析和组合创新在隐伏矿体定位预测中的重要作用。但预测主体对机理、规律、信息、方法的主观能动作用是一个极为复杂的科学问题，因此，对于如何有效提高预测主体对预测客体的认识能力和预见能力问题仍有大量工作要做。

5. 经验模型与概念模型、定性预测方法和定量预测方法都可以有选择地适用于隐伏矿体定位预测，但其相互间的有机匹配、交叉融合及综合集成仍是一个亟待深入探讨的问题。本书仅从“组合创新和提高结论信度”的角度提出了定性与定量相结合的组合预测方法，作为一种新的研究思路，更加深入的研究尚有待于以后的继续。

总之，21 世纪对资源勘查领域而言，将是一个面对困难和克服困难的时代。可以预言，已成为 20 世纪末成矿预测学研究前沿的隐伏矿定位预测问题，也必将成为 21 世纪初成矿预测学的研究重点。因为随着我国市场经济体制的运行和资源经济发展的需求，将使得科学研究与经济建设的结合，理论探索与找矿实践的结合更趋密切。科学源于实践而始于问

题并直接服务于国民经济主战场，将成为科研工作者的共同认识和行为准则。因此，尽管本书所做研究可能是初步的，所获认识可能是肤浅的，但好在其课题源于找矿实践并提出了相应的关键科学问题，所获认识可以直接服务于勘查实践并能很快为实践所检验。初生之婴，其形虽丑，但却充满生机。笔者相信，隐伏矿体定位预测问题的研究必将为愈来愈多的专家学者所关注，并可能在新的世纪，新的千年到来之际，取得重大的研究进展和突破。

致　　谢

本论著是在导师赵鹏大院士的精心指导下完成的。从论著选题、初稿审改以至到笔者的学术成长，无处不凝聚着导师的心血。导师严谨的治学态度、富于哲理的启迪、渊博精深的学识和悔人不倦、言传身教的师长风范，都使笔者受益匪浅。在此，谨向我最敬重的导师致以最衷心的感谢和最崇高的敬意！

在课题研究和论著完成过程中，笔者曾得到过许多专家学者的关心与指教，他们是中国科学院李廷栋院士、郭文魁院士、宋叔和院士、常印佛院士和翟裕生院士，中国工程院陈毓川院士和汤中立院士；国际矿床成因协会主席裴荣富教授，中国地质大学（北京）石准立教授、莫宣学教授、吴淦国教授，中国地质大学（武汉）范永香教授、卢作祥教授、姚书振教授、李紫金教授、熊鹏飞教授、张武雪教授、吕贻峰教授，中国地质信息研究院肖庆辉教授，长春科技大学王世称教授、范继璋教授，姚凤良教授，南京大学胡受奚教授，成都理工学院朱章森教授，中南工业大学刘石年教授，东北大学杨敏之教授、金成洙教授，武汉大学陈抗生教授、刘传铁博士，华中理工大学岳超源教授、齐欢教授，天津地质矿产研究所沈保丰研究员，湖北地矿局刘源骏教授、薛迪康教授等；还得到过许多同学、同事的支持与帮助，他们是陈守余副教授、吴树仁研究员、曹新志副教授、曹志敏教授、吕古贤研究员、李晓波研究员、王安建教授、李德威教授等。在此，笔者谨向上述专家、学者、同学、同事致以衷心的感谢！

另外，笔者还要感谢原国家黄金局地矿办、国家计委国土地区司、地质行业科技发展基金委员会、国家教委博士学科点专项科研基金办公室和国家自然科学基金委员会对本项研究工作的支持和资助。

参 考 文 献

1. A. C. 科尔文著，张秋明译. 加拿大安大略省太古宙岩金矿床的构造环境. 国外地质科技，1990 (1).

2. B. N. 埃森劳尔著，王文珍译. 西澳大利亚大规模的剪切带及其对太古代金矿化的意义. 世界地质，1992 (1).

3. Bonnemaison, M., 1986, "含金石英脉"是含金剪切带的一种特殊情况. Chron. rech. min. 482, 55～65. 国外地质科技，1987 (6).

4. Caneron. E. M., 1989, 由深部韧性剪切带氧化变质作用衍生金：理论模式. J. Chemical Explor. 31 (2). 地质科技情报，1990 (1).

5. Kerrich. R. and Fyfe, N. S., 1988, 耶洛奈夫剪切带中的脉金矿床. Contribution to the National Terrritorries, 3: 41～51，地质科技译丛，1989 (3).

6. R. P 福斯特，林强摘译. 金矿预测的新进展，国外地质科技. 1991 (2).

7. R. Woodall，成功勘探矿床中的经验和概念. 地质科学译丛. 1995 (1).

8. 马启波，杨廷栋，庞庆邦等. 桐柏-大别地区金矿成矿条件及成矿预测. 中国地质大学出版社，1996.

9. 中国科学院《复杂性研究》编委会. 复杂性研究. 科学出版社，1993.

10. 中国科学院矿床地球化学开放实验室. 矿床地球化学研究. 地震出版社，1994.

11. 孔庆存. 山东招掖金矿带若干地质问题的讨论. 金银矿产选集，1989 (11).

12. 王义为. 金矿矿源层与矿源层中金的丰度和活动. 地质与勘探，1992 (4).

13. 王义文，胶东地区金矿床铅同位素组成、成矿物质来源和成矿时代研究. 贵金属地质，1988 (3～4).

14. 王子潮，王亚南. 构造变形与热液成矿. 地质学报，1988 (2).

15. 王有志. 我国内生金矿床的成矿模式. 地质与勘探，1989 (7).

16. 王秀璋，程景平，张宝贵等. 中国改造型金矿床的地球化学. 科学出版社，1992.

17. 王秀璋，程景平. 国内外太古宙中金矿床的地质及地球化学特征对比兼成因分析. 地球化学，1994 (3).

18. 王定国，张宪儒，华西霞，李克寒，吴启明，盛荣先. 河南小秦岭金矿主要控矿条件及盲矿预测. 中国金矿主要类型区域成矿条件文集. 地质出版社，1989.

19. 王家枢，周玉泉，孙永键. 引进、吸收、创新——近 20 年我国引进国外地质新理论情况的调查与分析. 中国地质矿产信息研究院，1992.

20. 王振宇，张宝华，屈奋雄. 与韧-脆性剪切带有关的五龙金矿成矿分析. 地质与勘探，1989 (8).

21. 王鹤年，汪耀. 山东焦家金矿床的成因探讨. 地质论评，1991 (3).

22. 王鹤年等. 华夏地块韧性剪切带型金矿地质. 科学出版社，1992.

23. 邓军等. 胶东西北部构造体系及金成矿动力学. 地质出版社，1996.

24. 韦永福，吕英杰等. 中国金矿床. 地震出版社，1994.

25. 韦永福，孙培基. 当代中国金矿地质. 地质出版社，1996.

26. 卢冰等. 胶北金矿的围岩蚀变及碱交代成矿模式. 南京大学学报，1992 (3).

27. 卢作祥等. 山东招掖金矿带的构造-岩浆控制. 地球科学，1987 (6).

28. 卢作祥等. 胶东焦家金矿田断裂控矿特征及矿化富集规律. 中国金矿主要类型区域成矿条件论文集 (5). 地质出版社，1988.

29. 卢焕章，李秉伦，沈昆等. 包裹体地球化学. 地质出版社，1990.

30. 田兴有，刘长春. 地质学科资助格局与"九五"资助初步设想. 地球科学进展，1995 (1).

31. 石准立，谢广东. 内蒙武川后石花-东伙房两类金矿床的地质特征和成矿预测. 现代地质，1993 (增刊).

32. 任启江等. 陕西金堆城斑岩钼矿成矿过程中热及流体传输的计算模拟. 矿床地质，1994 (1).

33. 刘石年. 山东玲珑式金矿床矿体空间定位形式及其形成机制探讨. 地球科学，1984 (4).

34. 刘石年. 山东玲珑金矿控矿断裂地球化学初步研究. 地球科学，1987 (1).

35. 刘石年. 成矿预测学. 中南工业大学出版社，1993.

36. 刘劲鸿. 论太古宙含金剪切带的成矿机制。长春地质学院学报，1991 (2).

37. 刘连登. 论中国最主要脉状金矿的成因. 长春地质学院学报，1987 (4).

38. 刘连登，姚凤良，卿敏等. 中国金矿与韧性剪切带. 金银矿产选集，1991 (16).

39. 刘英俊等. 金的地球化学. 科学出版社，1991.

40. 刘鹏鄂. 断裂构造对石英脉型金矿的控制作用. 世界地质，1987 (2).

41. 华仁民. 流体在金属矿床形成过程中的作用和意义——水-岩反应研究进展系列评述. 南京大学学报，1993 (3).

42. 吕古贤，孔庆存. 胶东玲珑-焦家式金矿地质. 科学出版社，1993.

43. 吕古贤. 构造物理化学的研究与应用. 中国地质，1997 (9).

44. 孙丰月，石准立，冯本智. 胶东金矿地质及幔源 C-H-O 流体成岩成矿. 吉林人民出版社，1995.

45. 孙丰月. 试论幔源 C-H-O 流体与大陆板内某些地质作用. 地学前缘，1995 (1-2).

46. 孙丰月. 胶东中新生代区域构造演化与成矿. 长春地质学院学报，1994 (4).

47. 孙殿卿等. 隐伏矿床预测. 地质出版社，1987.

48. 安家桐. 山东牟平-乳山地区金矿控矿条件的研究. 中国金矿主要类型区域成矿条件文集(5). 地质出版社，1988.

49. 朱志澄. 构造地质学的新进展及新构造观. 地质科技情报，1988 (1).

50. 朱泰山. 国外金矿地质与勘探的研究现状和发展趋势. 地质与勘探，1987 (1).

51. 朱裕生等. 金银矿预测. 地质出版社，1997.

52. 许顺山等. 山东文登金矿成矿动力学研究. 矿床地质，1997 (3).

53. 何知礼、徐九华、杨振林. 小秦岭东闯金矿成矿物理化学条件初步研究. 国际金矿地质与勘探学术会议论文集. 东北工学院出版社，1989.

54. 何绍勋等. 韧性剪切带与成矿. 地质出版社，1996.

55. 吴冲龙等. 地质矿产点源信息系统设计原理及应用. 中国地质大学出版社，1996.

56. 吴学益等. 构造地球化学高温高压模拟实验及其初步结果. 大地构造与成矿学，1994 (3).

57. 吴承栋. 矿床模式研究使用现状和动向. 地质科技参考资料. 地矿部情报所，1988 (12).

58. 吴虹等. "三隐"预测的信息可视化提取. 桂林工学院学报，1996 (2).

59. 岑傅雄等. 中条山胡篦型铜矿成矿规律及勘查模型系统. 中国地质大学出版社，1993.

60. 张守韵. 武灵山韧性剪切带型金矿成矿体系. 南京大学学报，1992 (3).

61. 张明儒，谭凯旋. 开放体系成矿作用非线性动力学研究. 中国矿物学岩石学地球化学研究新进展，兰州大学出版社，1994.

62. 张贻侠. 矿床模型导论. 地震出版社，1993.

63. 张理刚、陈振胜，刘敬秀. 焦家式金矿水-岩交换作用——成矿流体氢氧同位素组成研究. 矿床地质，1994 (4).

64. 张景廉等. 模式识别与成矿预测 I -Cora-3 方法及其在花岗岩型铀矿预测中的应用. 华东地质学院学报，1989 (3).

65. 张湘炳等. 构造与金成矿规律. 地质出版社，1994.

66. 李人树. 成矿系统分析的理论与实践. 地质出版社，1996.

67. 李兆龙，杨敏之等著. 胶东金矿床地质地球化学. 天津科学技术出版社，1993.

68. 李先福等. 剥离断层及其热液成矿作用. 地质与勘探，1991 (1).

69. 李治平. 胶东乳山金矿床成因. 矿床地质，1992 (2).

70. 李洪志，杨泓清. 金矿找矿与系统工程. 系统工程，1994 (12).

71. 李洪志，杨泓清. 金矿找矿研究中的两种新对策. 河北地质学院学报，1994 (5).

72. 李洪志，杨泓清. 黄金矿山深部及外围地质找矿的新对策. 矿山地质，1995 (1).

73. 李惠. 石英脉和蚀变岩型金矿床地球化学异常模式. 科学出版社，1991.

74. 李惠等. 山东牟平-乳山金矿带石英脉深部含（金）矿性的地球化学预测标志. 地质找矿论丛，1988 (4).

75. 李献华. "煌斑岩"与金矿的实际观察与理论评述. 地质论评，1995 (3).

76. 李德威. 剪切带型金矿床的动力成矿机理. 黄金，1993 (10).

77. 杨士望，侯建琪，郭百创. 胶东半岛东部金矿地质. 青岛海洋大学出版社，1993.

78. 杨士望，徐景奎，赵伦山等. 胶东金矿成因及其同位素地球化学演化. 现代地质，1993 (4).

79. 杨敏之，黄国君. 胶东乳山唐家沟金矿地球化学研究. 地质找矿论丛，1992 (2).
80. 沈保丰，骆辉，李俊健等. 华北陆台太古宙花岗-绿岩地体中金矿床类型和演化：国际金矿地质与勘探学术会议论文集. 东北工学院出版社，1989.
81. 肖庆辉. 当代地质科学前沿——我国值得重视的前沿研究领域. 中国地质大学出版社，1993.
82. 肖庆辉等. 中国地质科学近期发展战略的思考. 中国地质大学出版社，1991.
83. 谷超豪. 非线性科学的崛起. 科技日报，1991. 12. 8.
84. 邵世才，何绍勋. 太古宙含金石英脉金矿床的构造定位. 地质与勘探，1991 (7).
85. 邵世才，何绍勋. 剪切带型金矿床中含金石英脉的一种可能成生机制. 大地构造与成矿学，1994 (2).
86. 邵世才. 试论韧性剪切作用与金的成矿. 贵金属地质，1996 (2).
87. 邵世才等. 小秦岭脉型金矿床容矿断裂及石英脉形成机制的探讨. 地质找矿论丛，1993 (2).
88. 陈永清，王世称. 成矿系列综合信息统计预测研究. 中国数学地质 (6). 地质出版社，1995.
89. 陈光远等. 成因矿物学与找矿矿物学. 重庆出版社，1987.
90. 陈光远等. 胶东灵山沟金矿成因矿物学. 中国地质大学出版社，1995.
91. 陈国达. 成矿构造研究法. 地质出版社，1978.
92. 陈衍景. 中国绿岩带型金矿的成矿地球动力学背景和成矿模式. 第五届全国矿床会议论文集. 地质出版社，1993.
93. 陈衍景，富士谷. 豫西金矿成矿规律. 地震出版社，1992.
94. 单文琅等. 大陆韧性伸展构造系统解析纲要. 地球科学，1991 (5).
95. 单文琅等. 构造变形分析的理论、方法和实践. 中国地质大学出版社，1991.
96. 周乃武. 脉状金矿床定位成矿预测基本原理. 贵金属地质，1995 (3).
97. 周世泰. 再论华北地台老变质岩中金矿成因特征. 地质与勘探，1993 (8).
98. 周宏坤等. 金属矿床大比例尺定量预测. 地质出版社，1993.
99. 周昌忠. 科学思维学. 上海人民出版社，1987.
100. 国家自然科学基金委员会. 自然科学发展战略研究报告——地质科学. 科学出版社，1991.
101. 孟良义. 花岗岩与成矿. 科学出版社，1993.
102. 季克俭，吴学汉，张国炳. 热液矿床的矿源、水源和热源及矿床分布规律. 北京科学技术出版社，1991.
103. 季海章等. 胶东地区煌斑岩与金矿关系初探. 地质与勘探. 1992 (2).
104. 岳石，马瑞. 实验岩石变形与构造成岩成矿. 吉林大学出版社，1990.
105. 於崇文. 地球化学动力学体系. 现代地质，1989 (3).
106. 於崇文. 地球化学系统的复杂性探索. 地球科学，1994 (3).
107. 於崇文. 地球科学中的一些科学思想与哲学观点. 地球科学，1992 (增刊).
108. 於崇文. 成矿作用与耗散结构. 地质学报，1987 (4).
109. 於崇文，蒋耀淞. 云南个旧成矿区锡石-硫化物矿床原生金属分带形成的动力学机制. 地质学报，1990 (3).
110. 易顺民，唐辉明. 滑坡分维特征及其预测意义. 工程地质学报，1994 (2).
111. 林均堂. 对鲁东大地构造单元划分的建议. 山东地质，1991 (1).
112. 林景仟等. 胶辽半岛中生代花岗岩. 科学出版社，1992.
113. 欧阳宗圻，李惠. 刘汉忠等. 典型有色金属矿床地球化学异常模式. 科学出版社，1990.
114. 罗天明. 脉岩与热液脉状金矿化的时空伴生及其地质意义. 矿产与地质，1992 (2).
115. 罗铭玖等. 河南金矿地质概论. 地震出版社，1992.
116. 罗镇宽、关康. 中国东部金矿床铅同位素特征及其地质和成因意义. 矿床地质与矿床地球化研究新进展. 兰州大学出版社，1990.
117. 罗镇宽、关康、苗来成. 中国绿岩型金矿床的进展与展望. 第五届全国矿床会议论文集. 地质出版社，1993.
118. 姚凤良. 我国北东部金矿化集中区的成矿特征及找矿模式. 第二届金矿学术讨论会文集. 地质出版社，1989.
119. 胡惠民. 大比例尺成矿预测方法. 地质出版社，1995.
120. 费琪等. 成油体系分析与模拟. 中国地质大学出版社，1997.
121. 赵伦山等. 试论胶东区域地壳演化与金矿成矿作用关系. 现代地质，1993 (增刊).
122. 赵鹏大，方增. 关于地学发展的若干问题. 中国地质，1997 (10).

123. 赵鹏大，王京贵，饶明辉等. 中国地质异常. 地球科学，1995 (2).

124. 赵鹏大，池顺都. 初论地质异常，地球科学，1991 (3).

125. 赵鹏大，池顺都，陈永清. 查明地质异常，成矿预测的基础. 高校地质学报，1996 (2).

126. 赵鹏大，周有武等. 金矿化变异的数学地质研究. 中国地质大学出版社，1992.

127. 赵鹏大，孟宪国. 地质异常与矿床预测. 地球科学，1993 (1).

128. 赵鹏大，孟宪国. 地质学的定量化问题. 地球科学，1992 (17) (增刊).

129. 赵鹏大. 试论地质体数学特征. 地球科学，1982，7 (1).

130. 赵鹏大，胡旺亮，李紫金. 矿床统计预测. 地质出版社，1983.

131. 郝柏林. 世界是必然的还是偶然的——混沌现象的启示. 科学，1991 (9).

132. 骆万成，伍勤生. 应用蚀变矿物测定胶东金矿的年龄. 科学通报，1987 (16).

133. 倪师军. 小秦岭中基性岩脉与金矿成因关系新模式. 西南交通大学出版社，1994.

134. 倪师军等. 中基性脉岩对金矿成矿的贡献——以小秦岭金矿区为例. 成都理工学院学报，1994 (3).

135. 姬金生. 小秦岭西段金矿床氢氧同位素及流体包裹体特征. 矿床地质，1991 (1).

136. 徐九华，何知礼，谢玉玲. 绿岩型金矿床成矿流体的地球化学. 地质出版社，1996.

137. 徐九华，杨先光. 成矿流体中的 CO_2 及其对矿液流向的指示. 矿床地质与矿床地球化学研究新进展. 兰州大学出版社，1990.

138. 徐九华. 玲珑金矿床成矿流体的物理化学. 矿床地质，1992 (3).

139. 徐红，方磊. 山东金青顶金矿床的氢、氧同位素和流体包裹体地球化学研究. 南京大学学报 (地球科学)，1994 (5).

140. 徐克勤等. 与金矿有关的花岗岩石地球化学特征. 桂林冶金地质学院学报，1992 (1).

141. 徐金方等. 胶北地块与金矿有关的花岗岩类研究. 山东地质，1989 (2).

142. 晁援，卫旭震. 陕西小秦岭金矿控矿条件及脉体评价标志. 中国金矿主要类型区域成矿条件文集 (3). 地质出版社，1989.

143. 晏同珍，殷坤龙. 滑坡系统静动态规律及斜坡不稳定性时空定量预测. 地球科学，1989 (2).

144. 涂光炽. 一些金矿床地质问题的讨论. 地质找矿论丛，1988 (1).

145. 秦四清，张倬元，王士天. 非线性工程地质学导引. 西南交通大学出版社，1994.

146. 秦四清，张倬元，王士天. 滑坡时间预测的非线性动力学方法. 水文地质工程地质，1993 (5).

147. 聂凤军，裴荣富. 热液金矿床成矿机理. 地质科技情报，1991 (1).

148. 郭光裕，孔庆存，林卓虹等. 脉状金矿床深部大比例尺统计预测初探. 中国地质大学出版社，1989.

149. 银剑钊. 韧性剪切带型金矿成矿特征研究现状. 地质科技情报，1993 (2).

150. 黄德业. 胶东金矿成矿系列的硫同位素特征. 矿床地质，1994 (4).

151. 彭少梅，何绍勋. 粤北新洲推覆构造外来系统中的石英脉及其与金矿化的关系. 地质找矿论丛，1992 (4).

152. 裴有守等. 山东招远-掖县地区金矿区域成矿条件. 辽宁科学技术出版社，1988.

153. 鲍征宇. 地质过程动力学体系研究层次及认识论. 地球科学，1994 (3).

154. 鲍征宇. 垂直裂隙中热驱动流体的发生和稳定性及其热液成矿作用意义. 地球科学，1992 (增刊).

155. 熊鹏飞等. 中国若干主要类型铜矿床勘查模式. 中国地质大学出版社，1995.

156. 翟裕生. 成矿系列研究问题. 现代地质，1992 (3).

157. 翟裕生，姚书振，崔彬等. 成矿系列研究. 中国地质大学出版社，1996.

158. 翟裕生等. 关于成矿系列的结构. 地球科学，1987 (4).

159. 滕培道. 招掖地区控制金矿床的三个基础地质问题. 山东地质，1985 (2).

160. 薛迪康，葛宗侠，张宏泰等. 鄂东南铜金矿床成矿模式与找矿模型. 中国地质大学出版社，1997.

161. Ansdell, KM, and Kyser, TK, Mesothermal gold mineralization in Proterozoic green stone belt, Western Flin Flon domain, Saskatchewen, Canada; Econ. Geol., 1992, 87, P. 1496~1524.

162. B. Bolviken, The fractal nature of geochemical iandscapes, Journal of Geochemical exploration, 1992 (43).

163. Baker, Localization of sulfides by a hornblende-biotite alteration system at the Eloise Cu-Au deposit, Cloncurry District, NW Queensland, 1994.

164. Barley M E, Eisenlohr B, Groves, D I, Perring, C S, Vearncombe, J R. Late Archean convergent margin tectonics and gold mineralization: a new look at the Norseman-Wiluna Belt, Western Australia. Geolgoy 1989, 17: 826～829.

165. Barly M E, Groves D I. Supercontinent cycles and the distribution of metal deposits through time. Geology, 1992, 20: 291～294.

166. Barnes S J. Partitioning of the platinum group elements and gold between silicate and sulfide magmas in the Munni Complex, Western Australia. Geochim. Cosmochim. Acta, 1993, 57: 1277～1290.

167. Barnicoat A C, Fare R J, Groves D I et al. Synmetamorphic lode-gold deposits in high-grade Archaean settings, Geology, 1991, 19: 921～926.

168. Barnicoat A C, et al. Synmetamorphic lode-gold deposits in high-grade Archean settings. Geology, 1991: 921～924.

169. Bezmen, N I, et al. Distribution of Pd, Rh, Ru, Os Ir and Au between sulfide and silicate melts. Geochim. Cosmochim. Acta, 1994, 1251～1260.

170. Boyle R W. The Geochemisty of Gold and its Deposits. Geol. Surv. Canada Bull., 1979, 576～584.

171. Broman C, Billstron, K, Gustavsson, K, and Fallick, AE, Fluid inclusion, stable isotopes and gold deposition at Bjorkdal, northern Sweden; Miner. Deposita, 1994, 29, 139～149.

172. Cathles, LM, Oxygen isotope alteration in Noranda mining district, Abitibi Greenstone belt, Quebec: Econ. Geol., 1993, 88, 1483～1511.

173. Channer, DM DeR. and Spooner, ETC. Combined gas and ion chromatographic analysis of fluid inclusions in quartz from the Hollinger-McIntyre and Kerr Addison-Chesterville Archean Au-quartz vein systems (abst.): PACROFI N, 1992, Program and Abstracts, P. 22.

174. Chatterjee A K, Kontak D J, and Smith P K. Gold and tin metallogeny within the lower Paleozoic Meguma Terrene of Nova Scotia, Canada: Isotopic Constraints for source resevoirs (ext. abst.): Conf. on mineral deposit modelling in relation to crustal reservior of the ore-forming elements, Keyworth, UK, 22～23, April, 1992, abst, Vol., R. P. Foster.

175. Chi, G C, Guha, J, Riverin, G, and Trusdel, F. Examination of an enigmatic flat gold-quartz vein deposit in the Abitibi greenstone belt-A fluid inclusion approach (abst): PACROFI N, 1992, Program and Abstracts, P. 23.

176. Colvine A C. An empirical model for the formation of Archean gold deposits: products of final cratonization of Superior Province, Canada, Economic Geology Monograph, 1988, 6: 37～53.

177. Colvine A C, Fyon J A, Heather K B, Marmont S, Smith P M, and Troop D G. Archean lode gold deposits in Ontario: Ontario Geologyical Survey, Miscellaneous Paper 1988, 139, 210.

178. Colvine A. C. An empirical model for the formation of Archean gold deposits: Products of final cratonization of the Superior Province, Canada: Econ. Geol., Mono. 1989, 6, 37～51.

179. Cooke D R, McPhail D C, Bloom M S. Epithermal gold mineralization, Acupan, Baguio district, Philippines: geology, mineralization, alteration, and the thermochemical environment of ore deposition, Econ. Geol., 1996, 91: 243～272.

180. Cox S F, Etheridge M A, Wall, V J. Fluid pressure regines and fluid dynamic during deformation of low-grade metamorphic tezzanes implications for genesis of mesothermal gold deposits. Nuna conference on greenstone gold and crustal evolution, VAL D 'Or, may, 1990, 46～53.

181. Craw D, Koons P O. Tetonically induced hydrothermall activity and gold mineralization adjacent to major fault zones. In: Keays, R. Ramsay, R Groves, D (eds) The Geolgoy of Gold Depsits Econ Geol Monog 1989, 6: 463～470.

182. Craw, D, Teagle: D. A. H, and Belocky, Fluid immiscibility in late-Alpine gold-bearing veins, Eastern and Northesten European Alps: Miner. Deposita, 1993, 28, 28～31.

183. Davis D W, and Smith, P M. Archean gold Mineralization in Wabigoon subprovince, a product of crust accretion; evidence form U-Pb geochronology in the Lake of the Woods area, Superior Province, Canada J Geol. 1991, 99: 337～353.

184. De Verie P, Harris and Guocheng Pan. Subdividing consistent geologic areas by ralative exceptionalness of additional information: Methods and case study. Economic geology. 1990 (35).

185. Dee S J, and Roberts S. Late-Kinematic gold mineralization during regional uplift and the role of nitrogen: An example from the La Codosera area, W. Spain; Mineral Mag., 1993, 57, 437～450.

186. Dening D. Catastrophic release of heat and fluid flow in the continental crust Geology. 1992, 20: 83～86.

187. Donald A. Singer. Basic concepts in three part quantitative assessments of undiscovered mineral resources. Nonrenewable resources. 1993 (2).

188. Elder D, Cashman, S. M. Tectonic control and fluid evolution in the Quartz Hill, California, Lode Gold Deposits. Econ. Geol., 1992, 87: 1795～1813.

189. Firdaous K, Boullier A M, and Robert F. Fluid inclusions and fault-value model in the Sigma mine (Abitibi, Quebec, Canada) (abst.): Terra abst., EUG VI meeting, 1993, Strasburg, 456～457.

190. Fisher A T, et al. Relation between permeability and effective stress along a plate-boundary fault, Barbados accretionary complex. Geology, 1996, 24: 307～310.

191. Foster R P, Piper D P. Archean lode gold deposits in Africa: crustal setting, metallogenesis and cratonization. Ore Geology Reviews, 1993, 8 (3, 4): 303～347.

192. Francois Robert. Greenstone Gold and Crustal Evolution. Geoscience Canada, 1992, 18: 83～87.

193. G P, Landis and A H, Hofstra. Fluid inclusion gas chemistry as a potential mineral exploration tool: case studies from Grecde. Journal of Geochemical Exploration, 1991, 42: 25～59.

194. Gebre-Mariam M, Groves D I, McNaughton N J. Archean Au-Ag mineralization at Racetrack, near Kalgoorlie, Western Australia; a high crustal-level expression of the Archean composite lode-gold system. Mineral. Deposita, 1993, 28: 375～387.

195. Gebre-Mariam M, Hagemann S G, Gorves D I. A classification scheme for epigentic Archean lode-gold deposits. Mineral Deposita, 1995, (5): 408～410.

196. Gebre-Mariam M, Groves D I, Ho, S. E., McNaughton, N J, and Vearcombe, J R. The Archean lode-gold deposit at Racerrack, near kalgoorlie, Western Australia: A transiton mesothermal-epithermal hydrothermal system (ext. abst.); in M. Dagel and J. L. Leroy, eds., SGA: A. A. Balkema, Rotterdam, 1991, 61～664.

197. Groves D I. The crustal continuum model for late-Archean lode-gold deposits of the Yilgarn Block, Western Australia. Mineral Deposita, 1993, (6): 366～374.

198. Hagemann S G, Brown P E, and Walde, D. H. G. Thin-skinned thrust mineralization in the Brasilia fold belt: The example of the old Luziania gold deposit; Mineral Deposita, 1992, 27, 293～303.

199. Haynes D W, Cross K C, Bills R T, Reed M H. Olympic Dam ore genesis: a fluid-mixing model, Econ. Geol., 1995, 90: 281～307.

200. Hedenquist J W, et al. Geology, geochemistry and origion of hig sulfidization Cu-Au mineralization in the Nansatsu District, Japan. Econ. Geol., 1994 (89), 1～30.

201. Ho, S E, Grvoes, D I, McNaughton, N J, and Mikucki E J, The source of ore fluids and solutes in Archaean lode-gold deposits of western Australia: J. Volcanology and Geothermal Research, 1992, 50, 173～196.

202. Hoffman P F. On accretion of granite-greenstone Terranes. Nuna conference on greenstone gold and cursial evolution, VAL D'Or, May 1990, 13～31.

203. Holyland P, Ridley J R, Vearncombe J R. Stress mapping technology (STM TM). Geofluids '93, 1993. 272～275.

204. Huston D et al. Isotope mapping around the Kidd creed deposit, Ontario: application to exploration and comparison with other geochemical indicators. Explor. Mining Geol., 1995, 4: 175～185.

205. Hutchinson R W. A multi-stage, multi-process genetic hypothesis for greenstone-hosted gold lodes. Ore Geology Rseviews, 1993, 8 (3, 4): 349～382.

206. Hutchinson R W. Metallogeny of Precambrian gold deposits: space and time relationships. Economic Geology, 1988, (6): 1287～1288.

207. Hutchinson R W. Metallogeny of Precambrian gold deposits: space and time relationships. Economic Geology, 1987, (8): 1993～2007.

208. K, surya Prakash et al. Scheelite as a prospecting tool for gold in Ramagiri greenstone belt. Andhra Pradesh. India. Journal of Geochemical Exploration, 1989, 31: 307～317.

209. Kerrich R, Kyser T K. 100 Ma timing paradox of Archean gold, Abitibi greenstone belt (Canada): New evidence from U-Pb and Pb-Pb evaporation ages of hydrothermal zircons. Geolgy, 1994, 22: 1131～1134.

210. Kerrich R, Wyman D A. Geodynamic setting of mesothermal gold deposits: an association with accretionary tectonic regimes. Geology, 1990, 18: 882～885.

211. Kerrich R, Cassidy K F. Temporal relationships of lode gold mineralization to accretion, magmatism, metamorphism and deformation-Archean to present: a review. Ore Geology Reviews, 1994, (4): 263～310.

212. Kerrich R. Perspectives on genetic models for lode gold deposits. Mineral Deposita, 1993, (6): 362～365.

213. Kerrich R, and King R. Characteristics of hydrothermal zircon and baddeleyite in Val d' or mesothermal gold deposits: Age of primary gold mineralixation versus secondary fluid resetting events (abst.): GAC/AGC MAC/AMC Joint Annual meeting, Prog. and Abst., 1993, A52.

214. Kerrick D M, Caldeira K. Paleoatmospheric consequences of CO_2 released during early Cenozoic regional metamorphism in the Tethyan oregon. Chemical Geology, 1993, 108: 201～230.

215. Koons P O, Craw D. Gold mineralinzation as a consequence of continental collision: an example from the Southern Alps, New Zealand. Earth Planet Sci Letters. 1991, 103: 1～9.

216. Krupp R E, Seward T M. Transport and deposition of metals in the Rotokawa Geothermal system, New Zealand. Mineralium Deposita, 1990, 25: 73～81.

217. Lawrence S R, and J. Parnell et al. Geofluids'23, Contributions to an International Confernece on fluid evoloution migration and interaction in rocks, 1993.

218. Magoon L B, Dow W G. The petroleum system from source to trap. AAPG Memoir, 1994, 60: 3～24.

219. Magoon L. B. The petroleum system-status of research and methods. USGS Bulletin, 1992, 2007: 98.

220. Manu J. Gold deposits of Birimian Greenstone belt in Ghana: Hydrothermal alteration and thermodynamics, 1993, Branschweiger Geol. McNaughton, N. J., Grbre-Mariam, M., Golding, S. D., Groves, D. I., Hagemann, S. G. and Hronsky, H. M. A., stable isotope evidence for multiple sources of components in lode-gole deposits of the Eastern Goldfield Province, Western Australia (abst.): Geol. Soc. Australia Abstracts, 1992 (32), 81～82.

221. Matthäi S K, Fisher G. Quantitative modeling of fault-fluid discharge and fault-dilation-induced fluid—pressure variations in the seismogenic zone. Geology, 1996, 24: 183～186.

222. Mikucki E J, Ridleg J R. The hydrothermal fluid of Archean lode-gold deposits at different metamorphic grades: Compositional constraints form ore and wallrock alteration assemblages, Mineral Deposita, 1993, 28: 469～481.

223. Nadeau S, Phillipot P, Pineau F. Fluid inclusion and mineral isotopic compositions (H-C-O) in eclogitic rocks as tracers of local fluid migration during high pressure metamorphism. Earth and planetary Science Letters, 1993, 114: 431～448.

224. Nesbitt B E. Gold deposit continuum: A genetic model for lode Au mineralization in the continental crust. Geology, 1992, 16: 1044～1048.

225. Nesbitt B E, Murowchick J B, Muehlenbachs K. Dual origins of lode gold deposits in Canadian Cordillera. Geology, 1986, 14: 506～509.

226. New method of regional exploration for blind minerlization: application in the USSR. Journal of Geochemical exploration, 1992, 43: 157～166.

227. Nigel J Cook, Scott A Wood. Transport and fixation of Au, Pt and Pb around the lacsheen Cu-Ni-PGE occurrence in Quebec Canada. Journal of Geochemical Exploration, 1992, 46: 187～228.

228. Ohlander B, Markkla, Alteration associated with the gold-bearing quartz veins at Middagsberget, northern Sweden: Mineral Deposita, 1994, 29, 120～127.

229. Ojala V J, Ridley J R, Gorves D I, et al. The Granny Smith gold deposit: the role of heterogeneous strss distri-

bution at an irregular granitoid contact in a greenschist facies terrane. Mineral Deposita [WTBZ], 1993, 28 (6): 409～419.

230. Pan, Yuanming and Fleet, M E. Calc-silicate alteration in the Hemlo gold deposit, Ontario: Mineral assemblages, P-T-X constraints, and significance; Econ. Geol., 1992, 87, 1104～1120.

231. Perrodon A, Petroleum systems: models and applications. Journal of Petroleum Geology, 1992, 15 (3): 319～326.

232. Pirajno F. Hydrothermal Mineral Deposits. Heidelberg, Berlin; Springer-Verlag, 1992.

233. Powell R, Will T M, and Phillips, G N. Metamorphism in Archean greenstone belt: Caculated fluid compositions and implications for gold mineralization. J Metamorphic Geol. 1991, 9: 141～150.

234. Ridley J R. The relations between mean rock stress and fluid flow in the crust: with reference to vein-and lode-style gold deposits. Ore Geology Reviews, 1993, 8 (1, 2): 23～37.

235. Robert F, Brown A C. Archean gold-bearing quartz veins at the Sigma mine, Abitibi greenstone belt, Quebec; Part I. Geologic relations and formation of the vein system, Economic Geology, 1986, 81: 578～592.

236. Robert F, Phillips, G N, and Kesler, S E. Greenstone gold and crustal evolution; scope and resuts of the conference. Nuna conference on greenstone gold and crustal evolution, VAL D'Or, May. 1990, 2～7.

237. Rock N M S, Groves D I. Can lamprophyres resolve the genetic controversy over mesothermal gold deposit? Geology, 1988, 16: 538～541.

238. Rock N M S, Groves D I. Do lamprophyres carry gold as welll as diamond? Nature, 1988, 332: 253～255.

239. Screaton E J, et al. Permeabilities, fluid pressure, and flow rates in the Barbados Ridge complex, Journal of Geophysical Research, 1990, 95: 8997～9007.

240. Sibson R H, Robert F, Poulsen H. High angle faults, fluid pressure cycling and mesothermal gold-quartzdeposits. Geology, 1988, 16: 551～555.

241. Sibson R H, Robert, F, Poulsen, K H. High-angle reverse faults, fluid pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. GEOLOGY. 1988, 16: 551～555.

242. Solid-earth Sciences and Socity, National Research Council, National Academy Press, 1993.

243. Stuwe K, et al. On the timing relationship between fluid production and metamorphism in metamorphic piles; some implictions for the origin of post-metamorphic gold mineralisation. Earth and planetary Science Letters, 1993, 114: 417～430.

244. Tobin H J, et al. Fluid pressure in the frontal thrust of the Oregon accretionary prism; Experimental constrains. Geology, 1994, 979～982.

245. Use of fluid inclusion gas survey for the assessment of lode deposit (with reference to gold and tungesten deposit). Jaurnal of Geochemical exploration, 1991, 42: 33～142.

246. Wyman D A, Kerrich R. Alkaline magmatism, major structures, and gold deposits; implications for greenstone belt gold metallogeny, Economic Geology, 1988, 83: 451～458.

247. Wyman D A, Kerrich, R. Alkaline magmatism, major structures, and gold deposits; implications for greenstone belt gold metallogent Econ Geol. 1988, 83: 451～458.

Abstract

The dissertation deals with the research on the theory and method for the forecasting of the concealed orebody location, using the hydrothermal-vein-like gold deposit as an example. This dissertation contains the following five parts: introduction, determination and characterization of the orebody space location mechanism and principle, effective selection and optimization of the multivariate forecasting information, combinatorial method for the forecasting of the concealed orebody location, and conclusion and prospect.

In the introduction part, are presented the scientific significance of the dissertation statement, the current research trend around the globe of the forecasting of the concealed deposit, the key scientific issues and the major research points.

Chapter 1 focuses on the methodological foundation and methodology for the forecasting of the concealed orebody location.

"The Determination and Characterization of Orebody Space Location Mechanism and Location Principle" is described in Chapters 2, 3, 4, and 5. Chapter 2 addresses the preliminary discussion of the thermodynamic system for the space location mechanism of the vein-like gold deposit in terms of temperature cooling, pressure reduction, water-rock reaction, buffer effect, fluid mixture, metallogenic system self-organization. Chapter 3 describes, in terms of dynamic process of the metallogenic material migration and energy transmission, the research into the orebody space location mechanism, and elaborates the controlling effect of the structural dynamic conditions that occur in the hydrothermal mineralization both on the metallogenic material transportation and on metallogenic reaction system. In this way, can be revealed the dynamic mechanism of the orebody space location. Furthermore, this chapter groups, in terms of the metallogenic dynamics, the upper intrusion, transportation, precipitation, and location mechanism of the metallogenic fluid into the structural-thermally driven mechanism and structural dilatant boiling "pump suction" stagnant location mechanism. Chapter 4 proposes a structural geometrical method featured by the statistical analysis, trend analysis, and self-similar analysis. This method can be used for the determination and characterization of the orebody space location principle. Such a method is established on the modern structural geometric and kinematic theory and method, on the geometric and kinematic characterization and ore-control principle of the analytic ore-control structure, especially on the geometrical structure of the ore-control fracture and its effect on the control of the orebody space location. The effectiveness of this method has been strengthened by the exemplified analysis of the Jinniushan gold deposit, Shandong for the determination and characterization of the orebody location principle. Chapter 5 is devoted to the metallogenic field time-space structural analytical method for the determination and characterization of the orebody space location principle. This method is based on the unified metallogenic system, consisting of the time continuity of

the mineralization and the space order of the metallogenic distribution, with its certain time-space structural feature. The effectiveness of this method is shown in the preliminary discussion of the multi-layer space location system and time-space structural feature of the vein-like gold metallogenic system controlled by the geological anomaly in the northwestern Jiaodong peninsula.

"The Effective Selection and Optimization of Multivariate Forecasting Information" is presented in Chapters 6 and 7. Chapter 6 focuses on the principle, train of thought, and method for the effective selection of the multivariate forecasting information and the corresponding deep-layer information, and on the application of the combination of the characteristic information, key information and effective forecasting information to the forecasting of the concealed orebody location. Some of the basic issues concerning the selection and optimization of the forecasting information are also dealt with in this chapter. In addition, this chapter touches on the significance, requirement, and principle of the optimization of the multivariate forecasting information in terms of the organic association between and optimization of multivariate forecasting information. Then this chapter concludes that the comprehensive forecasting parameters and key forecasting markers can be used to identify effectively the metallogenic and non-metallogenic information, to capture the hidden information, to intensify the weak information and to derive new forecasting information. During the optimization of the multivariate forecasting information, the geological premises should be satisfied, and workers' initiative should be given full display to. Chapter 7 establishes the high-precision forecasting model using "field theory-field structure-field analysis-field simulation" method. The construction of the high-precision forecasting model is to match the coupling analysis of the anomalous structure, metallogenic structure, information structure with the selection and optimization of the key forecasting information, so that the best pattern can be formed. The involved technological key issues are concerned with the analysis of the fine structures both of the geological, geophysical exploration, and geochemical exploration anomalous fields and of the metallogenic field of the forecasting target; with the construction of the orebody space location occurrence of the same forecasting target.

"The Combinatorial Method for Forecasting of Concealed Orebody Location" is elaborated in Chapters 8, 9, 10. Chapter 8 describes, in terms of the multiparameters, structural and vector features of the metallogenic field, the multiparameter-and-vector approximation forecasting method. With this method the characteristic parameter of the metallogenic indicator element can serve as the measurement of the prospecting. The remote indicators can be applied to the identification of the deep gold mineralization. The combinatorial characteristic vectors of the metallogenic elements can be used for the approximation of the mineralization center. The comprehensive vector parameters obtained near the deposit can be applied to the approximation of the concealed orebody. Finally, the characteristic numerical contour lines can be used for the enclosure of the deep concealed orebody (or ore

column). Chapter 9 introduces the application of the ore-control structural geometrical method to the forecasting of the concealed orebody location. This application is viewed from the selection of the geometrical parameters of the major geological structures, from the determination of the ore-control section geometrical morphology and the host space, and from the mathematical simulation. Chapter 10 presents the application of the metallogenic tectono-physicochemical field structure to the forecasting of the concealed orebody location. This application is methodologically based on the "structure-physical property-material combinatorial ore control" theory. This method is demonstrated in the Hedong gold deposit, Shandong, a typical vein-like gold deposit. In this gold deposit, the combinatorial structural analysis has been made in terms of the stress field structure, induced polarization anomaly field structure, primary halo anomalous field structure, and metallogenic tectono-physicochemical field structure. The optimized prospecting targets in the periphery of the deposit have been chosen. Finally, the forecasting of the deep concealed orebody location has been exemplified for further analysis.

Chapter 11 summarizes the whole dissertation, and outlines some problems to be further dealt with.

Key Words: Vein-like gold deposit, concealed orebody, location mechanism, location principle, location forecasting, structural analysis, information optimization, and combinatorial method.