1734996

分类号 密级

UDC 编号

中南大學

CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

硕士学位论文

论文题目：山西支家地铅锌银矿区成矿信息提取及成矿预测

学科、专业：构造地质

研究生姓名：孟玉婷

导师姓名及专业技术职务：吴堑虹 教授

Y1718623

分类号 VDC_____ 密级_____

硕士学位论文

山西支家地铅锌银矿区成矿信息提取及成矿预测

Extraction of metallogenic significance and prediction of Pb-Zn-Ag deposit in Zhijiadi, Shanxi

作 者 姓 名： 孟玉婷
学 科 专 业： 构造地质
学院（系、所）：地学与环境工程学院
指 导 教 师： 吴堑虹

论文答辩日期 2010.5.25. 答辩委员会主席 邵拥军

中 南 大 学
2010年5月

原创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了论文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中南大学或其他单位的学位或证书而使用过的材料。与我共同工作的同志对本研究所作的贡献均已在论文中作了明确的说明。

作者签名：[signature]　日期：2010 年 5 月 25 日

学位论文版权使用授权书

本人了解中南大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文并根据国家或湖南省有关部门规定送交学位论文，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以采用复印、缩印或其它手段保存学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并通过网络向社会公众提供信息服务。

作者签名：[signature]　导师签名 [signature]　日期：2010 年 5 月 25 日

摘 要

本文在研究分析矿体和控矿因素综合基础上，采用 GIS、三维可视化、地统计学、证据权重法等方法，总结找矿标志和成矿规律，预测矿体赋存的空间，为矿山勘查工程部署提供依据。论文的研究成果与创新认识主要体现在以下几个方面：

1）分析了已有的地质资料，总结了支家地矿区地质背景、矿床特征，成矿规律及找矿模式。

2）根据区内钻孔样品 Ag、Pb、Zn 品位数据，借助 ArcGIS 中地统计学模块，对区内 Ag、Pb、Zn 元素的空间分布结构特征进行定量描述。根据品位数据空间结构模型特征进行最优空间插值处理，总结出品位变量空间分布格局和趋势，判断区内最佳成矿位置。

3）利用 Surpac 软件，构建了支家地铅锌银矿床矿体及石英斑岩体和断层等主要控矿地质体的三维实体模型，实现了矿体、岩体、断层形态、产状及勘探控制程度的真三维显示。在三维可视环境下，分析了矿体与各成矿地质要素之间的关系，总结了区内控矿规律。

4）探索性地将证据权模型法引入到矿山成矿预测工作中。通过点阵化将矿体离散，解决了证据权模型成矿预测中参考矿体需为点型图层的技术要求。已知矿体与成矿高概率区有很高的吻合度，证明了证据权法在大比例尺矿山进行成矿预测的可行性。

5）在深入理解山西支家地矿区成矿特征基础上，点阵化处理矿体层，优化提取了 1320 中段地层、线性构造，矿体和岩石界限等致矿证据层，计算了控矿因子与成矿之间的相关度，定量分析了地质条件对矿体的影响力和控制度，从而有效促进了矿体预测从定性向定量的转变，并以直观图形方式表达了成矿高概率区。

6）基于上述结果对支家地矿区成矿有望区进行了探讨，并据此划分出成矿有望区。

关键词：支家地铅锌银矿床，成矿预测，地统计学，三维建模，证据权法

ABSTRACT

On the use of GIS, 3D-visualization, geostatistics and WofE method to summarize the ore prospecting signs and laws. And then author discussed the prospecting direction of ZhiJiadi ore section. The main research findings and new viewpoints achieved in this paper are as follows:

1) The metalloginic geological regularities is summarized by analyzing the regional metalloginic background and geological characters of the study area.

2) Ag,Pb,Zn elements contour maps were provided by Geostatistics. The further analyzing shows the best location where are the orebody occured.

3) Through 3D modeling software Surpac, builds the 3D visualization entity model of the orebody ,rock,fault geometry and the exploration progress. The 3D model can visual display the spreading regularity of the strata and orebody.

4) Exploratory to use the weight of evidence(WofE) method into the mine ore prediction work, solve the problem that the modle required for the point-based layer by discreting the ore .The result shows that the model is adapted to the geological phenomena,it is fully proved that the WofE can be applied into mineralization forecasting of the mine effectively. This research is valuable for the exploration and application of ore prediction on mine.

5) Spatial data of strata, structure and ore is extracted from the study area. Spatial association between evidences and Mineralization is analysed and contrasts are calculated.seven evidences appropriate to the model are finally selected and converted into binary patterns, such as the strata unit, strata boundary of Quartz porphyry, proximity to NE trending structure features F2. Posterior probability of each cell which reflects degrees of Mineralization is calculated.

6) Based on the results of study, author discussed the prospecting direction.

Key Words: Pb-Zn-Ag deposit of Zhijiadi, ore-forming prediction, Geostatistics, 3D modeling, weight of evidence

目 录

摘 要 I
ABSTRACT II
目 录 i
0 绪论 1
0.1 选题来源、研究目的及内容 1
0.1.1 选题来源 1
0.1.2 研究目的及内容 1
0.1.3 研究意义 1
0.2 支家地铅锌银矿床研究状况 2
0.2.1 支家地铅锌银矿床研究状况 2
0.2.2 存在问题 3
0.3 研究领域现状分析 3
0.3.1 成矿预测研究现状与发展趋势 3
0.3.2 地质体三维建模 4
0.3.3 证据权成矿预测方法与应用 4
0.3.4 地统计学模块应用 5
0.4 研究方法与技术路线 6
0.5 完成的工作量 6
0.6 主要研究成果与认识 7
0.7 论文创新点 8
第 1 章 地质背景 10
1.1 区域地质 10
1.2 支家地矿区地质 11
1.2.1 地层 11
1.2.2 构造 11
1.2.3 岩浆岩 11
第 2 章 矿床简要特征 13
2.1 矿床规模 13
2.2 矿床主要围岩空间分布 13
2.3 矿体特征 14
2.2.1 隐爆角砾岩型矿体矿体空间分布及形态特征 14
2.2.2 断裂热液充填型矿体空间分布及形态特征 15
第 3 章 矿区成矿元素空间分布格局分析 17
3.1 数据分布 17
3.2 数据处理及分析方法 17
3.2.1 数据处理 17
3.2.2 分析方法 19
3.3 成矿元素的空间分布格局 20
第 4 章 地质体三维空间分布规律 24
4.1 Surpac 平台 24
4.2 地质数据库的建立 24

4.2.1 数据处理 25
4.2.2 数据库的建立 26
4.3 实体建模 28
4.3.1 模型参数 29
4.3.2 数据处理 29
4.3.3 实体联结 29
4.4 基于三维实体模型地质体 30
4.4.1 矿床空间分布特征分析 30
4.4.2 矿体及控矿地质因素空间关系分析 35
第5章 矿区控矿因素与证据权法分析 38
5.1 成矿证据模型 38
5.2 数据组织 40
5.2.1 数据库建立 40
5.2.2 证据层选择 40
5.3 模型建立 41
5.3.1 证据图层与矿化点的空间相关分析 41
5.3.2 确定成矿预测专题证据层及权值计算 46
5.3.3 成矿预测模拟 47
第6章 成矿预测 51
6.1 找矿标志 51
6.2 矿区预测区 51
第7章 结论 53
参考文献 53
致谢 60
攻读学位期间的主要研究成果 61

0 绪论

0.1 选题来源、研究目的及内容

0.1.1 选题来源

本论文选题结合导师“山西省灵丘县支家地铅锌银矿成矿规律及预测” 专题研究项目（国土资发[2008]14号，危矿办技发[2008]2号文件，中南大学、冶金地质总局第三地质勘查院、晋银公司联合承担）开展，针对矿区尚未系统地对地质和地球化学数据开展成矿意义分析的问题，以挖掘地质信息成矿意义为切入点开展山西省灵丘县支家地铅锌银矿的成矿预测研究。

0.1.2 研究目的及内容

目的：基于支家地铅锌银矿化为主的构造控矿地质条件和综合找矿标志，挖掘地质信息的成矿意义，开展矿区深部及边部的成矿预测。

研究内容：收集和分析区域大地构造背景和矿山地质资料及适当的野外调查，在对地质和控矿信息的提取和优化的基础上，应用地统计学、三维可视化、证据权重法等信息综合技术手段实现成矿预测。

1）矿区内铅锌银元素分布格局的确定

分析钻孔铅锌银元素分布特征，利用地统计学分析方法，借助GIS软件平台地统计模块建立Ag，Pb，Zn三种元素的品位空间分布模型。分析Ag，Pb，Zn的空间分布结构特征，探索其空间分布规律，为成矿预测提供支持。

2）地质体三维建模

分析Surpac矿山三维软件的实体模型的建模方法和流程，确定构建支家地铅锌银矿区地质体的实体模型的方法，并根据地质学原理对复杂地质体（分支复合体、不规则体、矿体封闭与尖灭），构建支家地矿区的矿体、岩体，断层面三维实体模型。

3）基于地质三维地质体模型分布特征分析

在三维可视环境下，结合地质学原理对已建的三维模型，进行分析，直观把握区内地质体的空间分布规律及控矿特征分析；分别对断裂热液充填型矿体及隐爆角砾岩型矿体的空间分布、及其围岩接触关系及接触带特征等进行讨论。

4）证据权模型法在矿山进行成矿预测中的适应性探讨

分析证据权法在矿山成矿预测工作中的可行性，研究证据权模型法应用于矿山成矿预测的原理和流程，讨论矿体面状图层向点状图层转换的方法及其合理性。

5）控矿因子分析和确定

以1320中段为工作空间，选取符合条件的独立性控矿因子，优化提取地层、线性构造，矿体和岩石界限等致矿证据层，分析了各证据层与矿体分布的空间相关性，定量计算了各证据层对矿化影响的对比值，解释各证据与成矿有利的相关程度，进而定量确定了该矿区各控矿因子对成矿有利程度。

6）成矿预测

通过成矿元素空间分布，地质体三维可视化模拟，控矿因子的证据权法的分析，挖掘矿山地质信息的成矿指示意义，对成矿有望区进行讨论。

0.1.3 研究意义

1）基于信息分析方法对支家地矿区潜在资源潜力进行客观科学评估，寻求低风险找矿路径。

2）首次在支家地矿区建立地质体三维可视化模型，探寻支家地矿区地质体空间分布特征；尝试性地将证据权模型方法引入小范围矿区的成矿预测工作中，有效直观地把握矿体空间分布规律，对小范围矿区成矿预测方法和手段进行有效探索。

0.2 支家地铅锌银矿床研究状况

0.2.1 支家地铅锌银矿床研究状况

自五十年代，太白维山一带的地质普查工作中发现了支家地铅锌矿，在七十年代末期证实为银矿床。自八十年代初至八十年代末，冶金工业部第三地质勘查局先后多次以支家地为中心开展地质勘查工作，分别进行了1：5000化探次生晕工作，探槽施工，取样分析等工作，基本查明了区内矿体分布范围，矿体产状，形态及矿石类型等，并提交了勘探报告。

已有的资源勘探工作在有效提高矿山活力的同时，也形成了对该矿控矿规律较深的认识，如1991年9月由冶金工业部第三地质勘查局地研所，天津地质研究院矿床室和三一二队提交《山西省灵丘县支家地银矿床地质特征、成矿模式及找矿远景》专题研究报告以及张北廷等[1]，曾对支家地铅锌银矿的地质特征进行了系统总结，总结出断裂、石英斑岩接触带、岩枝、隐爆角砾岩筒、火山口外接触带控矿及矿体分布具有等距性规律的控矿规律等。所有这些已取得的成果为深入认识该矿的成矿规律及成矿模型提供了有益的积累。

近几年来山西晋银公司及其所属矿山地质队以及冶金地质总局第三地质勘查院、中南大学等院校和科研院所，为解决支家地铅锌银矿区目前出现的资源危机问题，分别在支家地矿区及其周边做了大量地质理论研究或科研找矿工作，获得了丰富的科研成果[2-3]。

多年的勘探及研究工作积累下了大量的地质信息和数据。

0.2.2 存在问题

尽管前人清楚地认识了支家地铅锌银矿的区域构造位置，但对其区域构造和成矿背景未能进行认识和分析，而认识和分析成矿大地构造背景是建立成矿模式的基础，并可从区域大地构造背景约束研究区的成矿条件，把握成矿的可能性。同时，基于技术、设备等客观条件的限制，其研究工作中也提出了新的问题，如认识支家地铅锌银矿成矿规律和成矿模型是有待解决的重要问题之一。问题主要集中表现在以下几个方面：

1）前人针对地质体和成矿元素含量只做了简单的定性描述，未对地质体和化学元素的空间分布进行定量分析和总结。

2）多年来支家地铅锌银矿床研究依赖于传统简单类比方法，单纯的依照找矿标志建立找矿模型，在综合信息提取及综合找矿方面明显不足，成矿预测技术上局限于传统的方法，没有大的突破。

针对现有工作的不足，本文在前人工作基础上，将地学领域中的新思路、新方法（地统计学，证据权重法，三维可视手段）引入支家地矿区，挖掘多类地学数据的成矿信息，强化了信息的综合利用，并开展成矿预测。

0.3 研究领域现状分析

0.3.1 成矿预测研究现状与发展趋势

成矿预测是一项集地质学、矿床学、遥感地质学及数字地质等学科为一体的繁杂的系统工程，具有极强的综合性，探索性和实践性[4]。迄今为止，国内外专家提出的成矿预测理论和方法已达数百种：专家预测模型法、数学模型预测法、定性预测法、时间序列预测法、定量预测及概率预测法、多元统计预测法和主观评价法[5-8]；在我国，赵鹏大提出了资源潜力评价方法、成矿远景区评价方法、地质标志评价方法[9-11]；朱裕生提出非地质标志评价法、简单地质标志评价法、成因地质模型评价法等[12]，以及卢作祥等人提出的归纳法、类比法、统计分析法及综合法等。这些成矿预测理论对于实际找矿有很强的指导意义。

在成矿预测方法上，模型法一直是矿床预测的主流方法，主要有数学模型、地质模型、综合模型等。在预测工作中常常通过与矿床模型的类比，可以圈定与模型地质特征相近的找矿靶区；基于勘察数据研究区域矿床与多元地质找矿信息间的关系建立起来的多元信息模型，可以实现对成矿规律和资源潜力的定量或定性估计[13-15]；矿床数学模型则基于计算机将地质中描述的各种复杂关系转化为矿床模型的数字化规则，通过模型推理和数据融合实现地质评价条件，并进一步做出靶区预测[16-17]。

在成矿预测的手段方面，随着遥感，GIS、三维可视化等技术的不断发展，

它们已成功有效地应用于矿产预测工作中[18]。随着数字地质的发展，各种数理统计方法和技术也被应用到地质勘探中，如贝叶斯律、最大似然分类、因子分析法和模糊聚类法等[19-20]。

0.3.2 地质体三维建模

地质体三维可视化建模技术是地质学研究的前沿课题之一，以可视化技术为基础，探索地质问题、资源量计算、采矿设计、重建和虚拟探矿工程等。在成矿预测方面，以控矿因素为核心，充分利用了真三维地理信息系统技术，建立三维地质体模型，很好地揭示地质体(包括：地层岩性、地质构造、矿体等)的空间分布特征及相关关系。

80年代末，由于计算机技术的发展使得三维数据处理和表达取得了突破，诞生了三维可视化建模软件，使三维地学建模(3D Geoscience Modeling)成为可能[21-26]。随着三维地学建模理论的推进和市场需求增长，商业化的三维地学建模软件应运而生，其中著名的商用矿业软件主要有加拿大Kirkham Geosystems公司的MicroLynx+系统[27]、澳大利亚Surpac Minex公司的SurpacVision系统[28-29]、澳大利亚Micromine公司的MicroMine系统[30]、美国Dynamic Graphics公司的EarthVision[31]等。到目前为止，我国对三维地学建模理论和方法方面的研究还不够系统，缺乏真正商业化的具有自主知识产权的三维矿业软件[32-36]。

目前各国地质学家都在进行地学三维建模研究并取得可靠的研究成果[37-45]，在我国，以陈述彭院士、龚建华、吴冲龙、刘燕君、吴健生等为代表的中国地学研究专家们，为中国的三维可视建模方面做了大量的研究开发[46-49]。中国地质大学、中南大学、东北大学、武汉大学、中国有色金属工业等院校、科研院所及工业部门也通过引进国外先进的软件技术，在地质、矿产、物化探等领域进行二次开发[50-56]， 为我国的三维可视建模事业做出了突破性的贡献。中南大学戴塔根、毛先成等人基于矿床三维数学模型，建立了隐伏矿体立体定量预测的理论和方法[57-60]。

国内外三维可视化技术在矿业领域中得到了广泛的应用与扩展。利用该项技术可构建地质模型、矿体形态模型、进行资源量计算和采矿模型设计，指导矿区深部的找矿预测[61-62]，减少矿产资源勘查风险，如国家有色金属工业局已有效地利用三维可视技术为青海某铅锌矿建立了地质体三维形态模型、空间数据库，并进行了资源量的计算和采矿设计工作。

0.3.3 证据权成矿预测方法与应用

证据权成矿预测模型（Weights of Evidence Mode）法由加拿大数学地质学家Agterberg[63] 最早提出。证据权模型是基于贝叶斯律的数理统计方法，1988年，Bonham-Carter[64]等首次将证据权模型应用于NOVA SCOTIA成矿预测，并逐步

完善使之成为成矿预测领域的主流方法[65-69]，美国，加拿大，澳大利亚等国成功将二值证据权应用于成矿预测，并取得良好效果，加拿大地质调查局基于该法构建了多元信息综合评价系统[70]； Boleneus和Raines等根据该预测模型在华盛顿州东北地区有效的开展了基于Arc-WofE系统的热液金矿的成矿远景区的圈定工作[71]等。澳大利亚地质调查局也建立了基于的证据权模型勘察系统，同样承袭了由已知矿床点推未知勘探区的概念和经验。

近年来基于GIS平台的技术发展，证据权证模型在矿产资源预测领域被广泛应用。胡光道开发了也是基于证据权重模型原理的金属矿产资源评价的MORPAS分析系统；同样，由地科院肖克炎博士领导开发的MRAS矿产资源评价系统[72]，也是基于该模型原理的，中国地质矿产信息研究院与四川地质勘察开发局开发的矿产资源区域评价方法（AMS-GIS）等。这些技术已成功运用于我国的找矿事业中，指导矿区的找矿预测[73-78]。

尽管目前证据权模型在成矿预测方面已得到了广泛的应用，但工作集中于小比例尺范围的区域性研究，矿床被抽象为点，在区域范围内通过已知矿床点对未知勘探区的成矿可能进行预测。但在大比例尺范围的矿床使用证据权法进行成矿预测分析却没有涉及过，本文尝试性的将证据权模型引入支家地铅锌银矿床的成矿潜力区预测中，并证明了该法的可行性。

0.3.4 地统计学模块应用

法国地质学家G.Matheron于1962年创立地统计学（Geostatistics）[79]。地统计学是以区域化变量理论（Regionalized variable theory）为基础，以半方差函数为方法，分析矿床的空间结构。它不仅能够解释元素变量在空间上的分布、变异和相关特征，而且可以通过分析解释地质作用对元素空间分布的影响。地统计学在许多领域得到了广泛的应用[80-83]，同时该法被证明是分析元素空间分布特征及变异规律的最为有效的方法之一[84-85]。

以往地统学局限于单纯的数字规律，受技术的限制难以实现统计结果的空间展示，制约了人们利用之建立分布模型直观观察。GIS技术的发展填补了这方面的空白，现今地理信息系统重要组成部分就包括了地统计学模块。地统计学模块完美结合了统计学，地质数学和计算机图形学等学科，成为地勘工作分析主流工具之一。它以空间内插方法，将离散点的测量数据转换为连续的数据曲面，以描述变量在空间上的分布变化模式[86]。

其中美国ESRI公司的ArcGIS9系列软件的地统计分析模块Geostatistical Analyst在地统计学与GIS之间架起了一座桥梁，该分析模块实现了GIS数据的空间结构分析和空间统计表面建模与误差评价[87]。Geostatistics Analyst集成包括三个方面：以实际勘探剖面图为底图，存储岩性、地层、矿体等空间数据；通

过调用地统计分析模型程序进行函数计算；将研究区域内的地统分析计算结果以等值线形式在地图上显示和输出。系统实现了数据管理、查询、编辑、趋势面分析、输出等需要。

在我国，地统计学已广泛运用于地质勘探领域中[88-90]。借助地统计学模块，地质工作中的数据可绘制成图形，直观反映区域变化情况和趋势，结合宏观地质特征，总结成矿规律，进行深部预测。

0.4 研究方法与技术路线

以支家地铅锌银矿矿体、控矿岩石、构造为工作对象，以“山西省灵丘县支家地铅锌银矿接替资源勘查”项目及矿山生产所获成矿信息为基础，以成矿大地构造背景—控矿因素特征及作用—矿化格局—成矿规律及模型—靶区预测为主线，基于野外调查、测试工作结果、矿床特征、控矿岩体、构造作用分析，利用地学统计学分析方法、三维可视化技术、证据权重法开展有望靶区的预测工作。

工作采用的基本方法有：文献及实地调查法、对比分析法、综合评价法。其过程包括：

1）采用文献调查法，了解成矿预测研究的现状，实现对矿床地质特征的把握。包括区域地质、矿床特征、地层、岩体、构造等控矿因素、品位及空间变化信息的收集、整理、分析，形成对矿床整体特征的基本认识；

2）实地地质调查

分别对断裂热液充填型及隐爆角砾岩型两种主要类型矿体分布特征、围岩及接触带等特征进行调查，掌握各类矿体的基本特征及相关关系；

3）室内分析工作

①数据处理：修正矿区内的矢量化数据，并附加相应的数据属性，建立属性库，对矿区收集到的资料进行二次信息提取和优化；

②分析方法：借助地学统计学模块把握区内化学元素异常的空间分布，了解成矿空间分布规律；通过证据权重法将控矿因子叠加，量化各控矿因子与矿体间的有利度，了解控矿因子对成矿的影响作用；采用Surpac平台对已有地质资料进行地质体三维建模，针对矿化区进行地层、围岩、构造与成矿关系等方面的分析讨论；

③综合分析方法：基于成矿预测理论，以野外调查及分析测试所获的信息及数据为依据，结合上述分析方法所得结果，进行综合分析，确定有利的控矿因素组合，进行成矿有望区的预测和圈定，并提出下一步工作方向。

0.5 完成的工作量

自2008年4月至今，笔者作为主要成员，先后两次同课题研究组成员一起前往山西灵丘支家地铅锌银矿集区进行实地调研，累计工作时间超过45天；室内工作分三阶段进行，先后开展了资料收集、综合分析研究和论文编写等工作。

1）资料收集：结合课题研究的内容，根据论文的创新点，检索查阅并综合分析了与研究区相关的国内外研究文献、论文、专著等100多篇(份、部)，并协同导师安排制定了详细的野外、室内工作计划。

表 1-1 实物工作量一览表

工作内容统计	单位	数量	备　　注
野外及井下调研	天	45	
观察点数	个	194	
观察剖面长度	m	8500	
观察钻孔	m	2021.5	6 个钻孔
钻孔化学异常数据提取	个	423	30 个钻孔
元素空间分布格局图	张	9	分别为 Ag、Pb、Zn 元素在三维空间的展布趋势
岩体三维模型	个	3	分别为石英斑岩，凝灰角砾岩，白云岩
矿体三维模型	个	10	分别为 1，2，3，4，5，6，8，9，10，12 号矿体
证据权模型数据预处理	机时	40	
数据分析和数据成图	机时	500	

2）野外工作阶段：具体工作包括勘探线剖面图统计分析、地表构造调研、井下地质现象的观测采样以及与成矿有关的重要钻孔的编录和采样，主要围绕矿体空间分布、结构构造、分带现象、控矿因素等开展详尽的实地调查，调查范围包括矿区已开放的全部中段（分别为1280中段，1320中段，1360中段，1400中段，1550中段）和矿区周边地区，通过详细的野外工作调查及初步分析取得了一些有意义的认识，同时对矿区的基础地质问题提出了新看法，具体工作量见表0-1。

3）综合分析研究和论文撰写阶段：主要开展了成矿区地球化学数理统计、Surpac软件三维制图、证据权法的应用分析、石英斑岩成矿有利带空间展布特征及空间定位预测等方面的研究，在此基础上完成了本论文的撰写。

0.6 主要研究成果与认识

论文以支家地铅锌银矿区成矿研究中存在的问题和不足为切入点，引入元素化学异常空间展布特征、地质体三维可视化、证据权重法成矿预测理论等方法，对支家地矿区的矿体及控矿因素的空间展布、形态等进行深入研究，通过控矿信

息的空间综合分析进行了成矿预测，提出成矿有望区。论文的研究成果与创新认识主要体现在以下几个方面：

1）据支家地钻孔化验元素化学异常空间分布，借助地学统计学模块，对区内 Ag、Pb、Zn 元素的空间分布结构特征进行定量描述，在此基础上根据空间结构模型的特征进行最优的空间插值，进一步探索元素变量的元素空间分布格局和展布趋势，判断区内最佳成矿指示位置；

2）通过三维建模软件Surpac建立区内钻孔数据库，对0号勘探线到12号勘探线间的石英斑岩体、矿体进行了实体建模，直观展示了矿体及地层的展布规律，研究了支家地矿区的实体模型之间的空间展布关系，研究发现隐爆角砾岩矿体分布规律与石英斑岩分布具有一致性，总体沿石英斑岩接触带或凹陷带呈等距柱状分布；断裂热液填充型矿体以沿F2断层分布的矿体中的1号主矿体分布，伴以5，8，10号矿体，受平行于F2断层的次级断裂控制；由1号矿体向上盘方向依次排列的是5，8，10号矿体，其矿体连续性依次下降，规模变小，显示了矿化由下盘向上盘方向变弱的特性；

3） 探索性地将该法引入到工作程度高的矿山成矿预测工作中。通过点阵化处理，尝试性地离散矿体和地质体，选取了符合条件的独立性控矿因子致矿证据层；分析了各证据层与矿体分布的空间相关性，定量确定了该矿区各控矿因子对成矿的有利程度，获得了断裂热液型矿体和隐爆角砾岩型矿体的成矿后验概率，并通过图形方式直观表达了成矿高概率区的空间分布，已知矿体与成矿高概率区有很高的吻合度，说明该方法在大比列尺矿山应用具有可行性；

0.7 论文创新点

1）证据权模型在大比例尺范围矿床的应用

本文尝试性地将证据权重法引入到大比列尺范围矿区成矿预测工作中。通过点阵化处理的方法尝试性地将矿体离散为点阵，解决了证据权法用于参考的矿体图层需为点型图层的问题。

本文选取了符合条件的独立性控矿因子，并分析了各证据层与矿体分布的空间相关性，定量计算了各证据层对矿化影响的对比值，使任意空间位置可能发生矿化的概率的计算成为可能，解释了各证据与成矿有利的相关程度，进而定量确定了该矿区各控矿因子对成矿有利程度，获得了断裂热液型矿体和隐爆角砾岩型矿体的成矿后验概率，并通过图形方式直观表达了成矿高概率区的空间分布，已知矿体与成矿高概率区有很高的吻合度，说明该方法在大比列尺范围矿区应用具有可行性。

2）6号矿体提出新的认识

总结分析了在钻孔和井下看到的地质现象，认为前人对于区内6号矿体的划分和圈定存在问题，本文认为6号矿体可能是两种不同类型矿体，在矿区的NW端和SE端的6号矿体分布凝灰角砾岩和白云岩接触带，为断裂热液充填型矿体；而其SW端矿体赋存在石英斑岩中，NE端的矿体赋存于石英斑岩界线凹陷处，因此认为6号矿体为若干断裂热液充填型矿体和柱状隐爆角砾岩型矿体组成。

对6号矿体的新发现不仅扩大了矿山的资源量，同时特别有助于更全面认识该矿的成因，如隐爆角砾岩型矿体分布位置向北推移，提供了北部有可能发现更多隐爆角砾岩型矿体的信息。

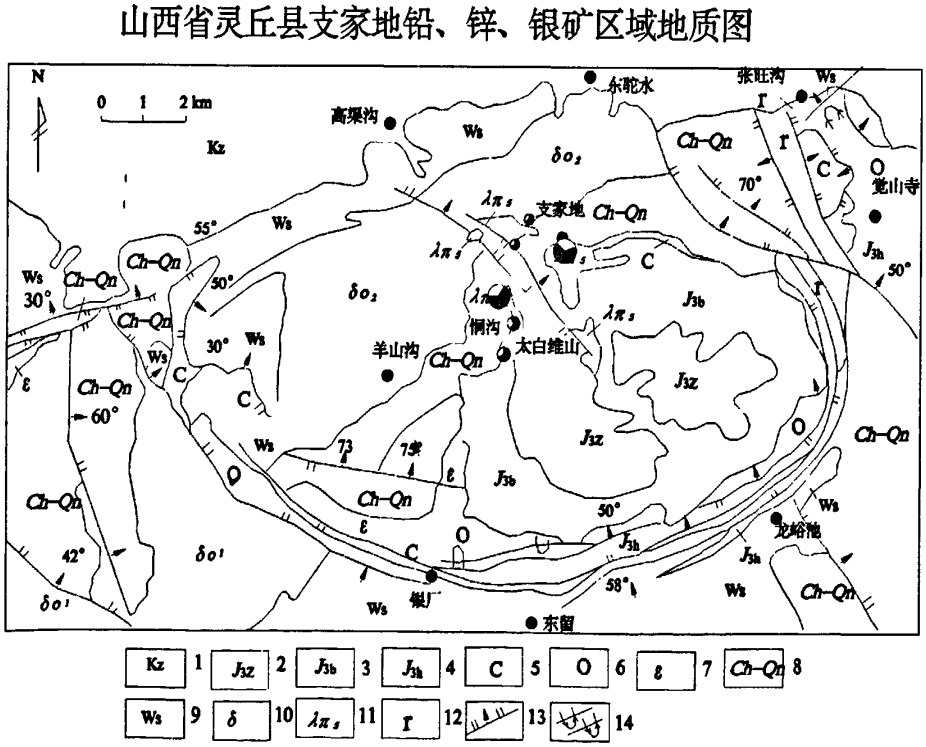
第1章 地质背景

1.1 区域地质

支家地铅锌银矿区位于华北地台北缘，燕山断块涞源块隆与五台块隆过渡带，太白维山环形构造带的北部[91-96]。

地层：矿区内出露太古界五台超群、元古界长城系高于庄组、蓟县系雾迷山组、青白口系长龙山组—景儿峪组、古生界寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、中生界侏罗系及新生界第三系、第四系等。

构造：区域基底构造为北东向褶皱和断裂，盖层构造为燕山期的太白维山环形构造，北东向、北西向、北北西向和近南北向四组断裂。图1-1所显示的两个环形影象中，较大的与火山岩分布吻合，较小的被酸性次火山岩充填。具有较好的区域成矿地质条件。



1-新生界 2-侏罗系上统张家口组 3-侏罗系上统白旗组 4-侏罗系上统后城组 5-石炭系 6-奥陶系 7-寒武系 8-长城系-青白口组 9-五台群变质岩 10-变质石英闪长岩 11-石英斑岩 12-花岗岩 13-正断层 14-同斜向斜及背斜

图1-1 支家地矿的大地构造位置示意图(据祁进平等，2004修改)

岩浆岩：区内主要有太古界变质石英闪长岩、变辉绿岩；元古代吕梁晚期花岗岩、伟晶岩和辉绿岩脉；中生代燕山期中酸性岩主要以花岗斑岩、花岗闪长玢岩为主，多为复合小型岩株岩体，与区域内金、银多金属矿床有成因联系。

矿产：支家地铅锌银矿区外围矿产地(点)，主要有十八盘铅、锌、银矿段、山神庙—马坡银锰矿带、上庄银矿点、小青沟—流沙沟银锰矿、硐沟银锰矿及野里银矿点[3]。

1.2 支家地矿区地质

1.2.1 地层

矿区主要出露元古界长城系高于庄组四段、中生界侏罗系白旗组二段；高于庄组四段仅在矿区北部少量出露，但在各中段石门中常见(分布在F1断层下盘)，为燧石泥晶白云岩、含屑白云岩和白云质页岩，倾向南东，倾角27°-45°，偶见0.3m—2m厚含锰矿层，白旗组二段分布在矿区北东部，主要赋存于F2断层底盘，底部为安山角砾岩，上部为火山角砾岩。

1.2.2 构造

断裂构造发育，北西向最发育，分别为F2、F3、F5、F7、F13；次为北东向和南北向，北东向断层为F1、F10、F11；南北向断层为F4、F8、F9、F12。三条断层主要特征如下：

F1断层：位于矿区北部，总体走向近东西，东端为北东向，延长约1800m，倾向南东，倾角62°-80°；西段被F2断层切断，为张剪性断层，上盘为火山角砾岩，下盘为白云岩，推测与F2断层有关。

F2断层：位于矿区中部，横贯全区，倾向南西，倾角50°-70°，属压扭性断层，沿走向呈舒缓波状，长约1300m，破碎带宽2m-3m，由断层泥、断层角砾组成，角砾成分主要为石英斑岩和凝灰角砾岩。断层上盘为石英斑岩角砾岩和凝灰角砾岩，下盘为火山角砾岩、石英斑岩及隐爆角砾岩，成矿前和成矿期都有活动；1360、1320中段见F2断层的派生次级断裂，分布于0-2、6线及8-9线附近，与F2断层在平面上构成Y形，是有利成矿地段，F2断层对矿体有明显的控制作用。

F3断层：位于矿区南西，北北西—南南东向展布，长约1500m，倾向南东，倾角50°-70°，为张扭性断层，上盘为含燧石条带白云岩，下盘为石英斑岩。断层破碎带宽约2m，见有绢云母化、碳酸盐化、黄铁矿化及闪锌矿化。

1.2.3 岩浆岩

矿区出露有五台期变质石英闪长岩、燕山期次火山相石英斑岩及隐爆角砾岩。

石英斑岩为灰白色，斑状结构，块状构造，浅部发育气孔—杏仁状构造，充填有石英、方解石及黄铁矿等。石英斑岩可分为两期，主体石英斑岩呈岩株产出，与成矿关系密切，后期石英斑岩呈脉状沿裂隙侵入，也有矿化及矿体存在。

隐爆角砾岩是矿区主要的容矿岩石，分布于矿区中部，呈北西西—南东东展布，严格受F2断裂带控制，地表出露长度约750m，宽40m-120m，呈不规则状、透镜状，可分为石英斑岩角砾岩和凝灰角砾岩，地表F2东端以凝灰角砾岩为主，西端以石英斑岩角砾岩为主。

第2章 矿床简要特征

2.1 矿床规模

区内矿床以隐伏矿体为主，矿体赋存于2-12号勘探线之间，1188-1740m标高范围内。已控制矿体总长为500m，延伸420m，矿体最大厚度为73m，平均厚度8.75m。已获得334银矿石量400.5993万吨，银金属储量1109.67吨，平均品位277g/t；铅金属储量30126.63吨，平均品位0.75%；锌金属储量29688.81吨，平均品位0.74%。区内矿体圈定包括1，2，3，4，5，6，8，9，10，12号矿体。其中1号矿体为主矿体，此矿床为大型铅锌银矿床。

2.2 矿床主要围岩空间分布

矿区的矿体围岩主要为凝灰角砾岩、石英斑岩及白云岩。

矿区矿体可分布于矿区出露的全部岩石中，矿体的分布对围岩没有选择性，但石英斑岩可以为隐爆角砾岩型矿体和部分热液充填型矿体的围岩，凝灰角砾岩、石英斑岩及白云岩均可为热液充填型矿体围岩，但在矿区NW端，白云岩可成为矿化隐爆角砾岩的围岩，显示矿体类型对围岩无明显选择性特点。深部局部地段的石英斑岩本身成为矿体，矿石呈浸染状构造，为斑岩型矿体，因此其围岩亦为石英斑岩。

石英斑岩基本沿F2断层两盘呈NW向串珠状分布，石英斑岩分为S和N两部分，中间与F2断层和凝灰角砾岩相隔，其围岩以凝灰角砾岩为主，南部石英斑岩出露面积较北部大，北部和南部石英斑岩中的凝灰角砾岩出露事实，说明F2断层最终表现出逆断层性质，导致北部（下盘）下降，被剥蚀量相对南部小，石英斑岩呈支脉状，南部（上盘）上升，总体剥蚀量大于北部，石英斑岩岩枝被剥蚀，石英斑岩总体性保存较好。石英斑岩的三维实体模型较好地展示了南部和北部石英斑岩的空间关系。

基于勘探线剖面图，根据探矿工程对不同海拔高度石英斑岩的揭露情况，采用ArcGIS软件形成不同海拔石英斑岩平面分布图（图1-3），由于控制数据仍偏少，其分布平面图只是斑岩空间分布的粗略反映，但仍显示其垂向的变化。

矿区南部的石英斑岩在矿区范围内显示了由浅向深规模变小的特点，说明岩体具有向SW倾斜的特征。

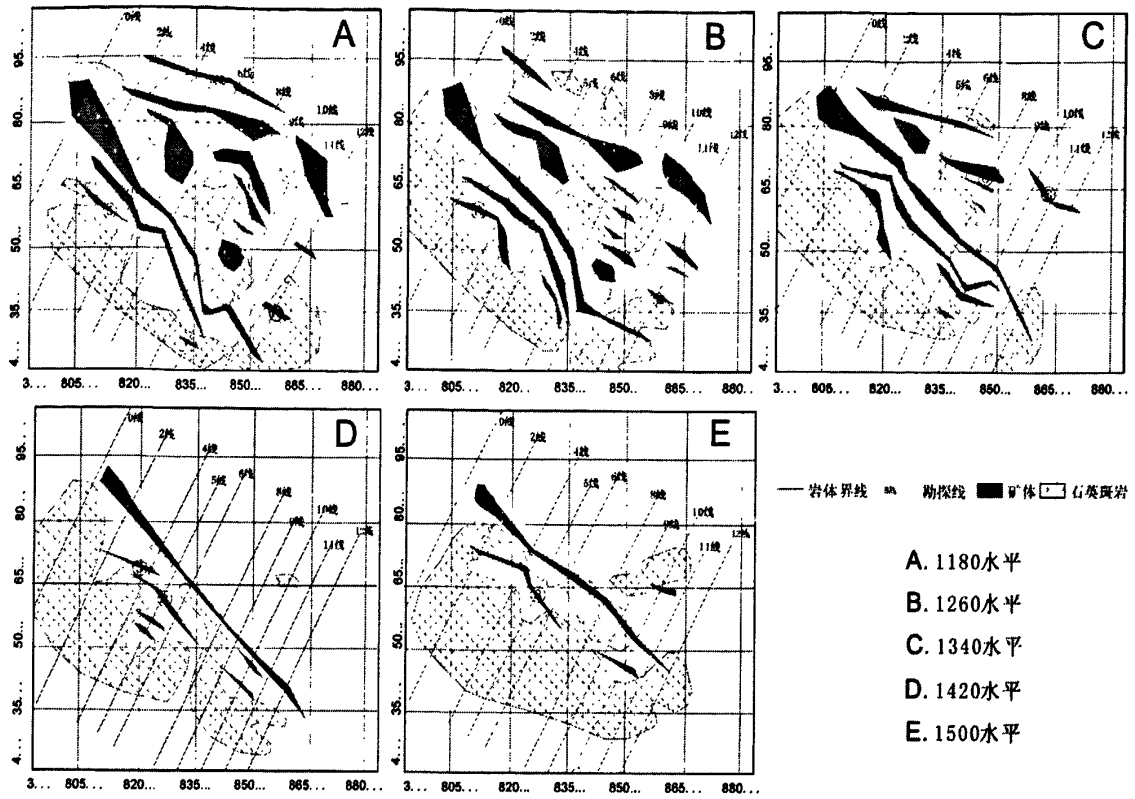


图 1-3 不同海拔（1180—1500 米）石英斑岩分布略图

地表地形地质图和图1.3结合分析结果显示，北部石英斑岩向深部出现较多的岩枝，但到1180水平分枝数量下降，反映北部岩体在垂向上为树形形态，推测更深部部位为隐伏的石英斑岩岩株，现有石英斑岩岩枝向深部延伸将会消失并入该石英斑岩岩株，同时石英斑岩在深部逐渐向北部扩展。

2.3 矿体特征

在深入了解支家地矿山已取得的生产勘探成果及相关地质信息的前提下，对矿区全部矿体进行了地质调查，重点调查范围包括1号、2号、4号、5号、6号、8号、9号、12号矿体、新I号矿体及新II号矿体，特别是对1号、6号矿体沿走向进行了追索调查，对其它矿体进行了穿脉调查，且调查了1号、2号、4号、6号矿体不同中段和钻孔的垂向特征变化，形成了对矿区总体特征的认识，根据各个矿体构造体系、控矿岩体、空间展布、矿石类型、矿物组合、蚀变类型及围岩等特征，将该区矿体划分为断层热液充填型和隐爆角砾岩型两种主要类型。

2.2.1 隐爆角砾岩型矿体矿体空间分布及形态特征

隐爆角砾岩型矿体主要以2号、4号、12号及新II号矿体为代表，主要分布于矿区中部，沿F2断层两侧分布。 本文主要针对具有成因意义的空间分布及形态

特征进行描述：

2号矿体：分布于F2断裂下盘，赋存于石英斑岩角砾岩及凝灰角砾岩接触带中，空间形态呈柱状，与围岩无明显界限，矿化类型为角砾、网脉状裂隙多金属硫化物充填型，1320中段的2号矿体边部以硅化为主，基本无矿化，矿化角砾的胶结物主要为方铅矿；1280中段则出现方铅矿和闪锌矿组合，显示垂向上的硫化物组成的变化，即向深部闪锌矿含量增多。据此，笔者认为矿体向下延伸规模不大。

4号矿体：赋存于F2下盘，位于纯石英斑岩（无长石）与凝灰角砾岩接触界线处的凝灰角砾岩中，走向与F2断裂大致平行排列，倾向SE。该矿体在垂直方向上显示了明显的分带性，在1360中段为蚀变震碎角砾带，矿石多为块状、团块浸染状方铅矿；1360-1320中段为团块状矿化角砾带，在矿体中有不规则纯闪锌矿脉穿插；1320-1280中段为主要的富矿带；1280中段主要见浸染状黄铁矿及方铅矿、闪锌矿细脉。

12号矿体：分布于F2断层下盘，呈柱状，倾向SE，矿体赋存于凝灰角砾岩中，被两条NE向断裂控制（40°/310°∠87°，40°/310°∠75°），沿NE向断裂分布。NW的角砾带显示了位移，角砾为棱角状或磨圆状，胶结物为蚀变的熔岩和硫化物，SE侧的角砾基本不发生位移，具可拼接性，其不规则裂隙中为硫化物充填，闭合度高的裂隙则只出现硅化。

垂直方向上，从上到下为弱矿化蚀变震碎角砾岩带—团块矿化角砾岩带—细脉矿化角砾岩带—浸染状矿化石英斑岩带。

新II号矿体：分布于F2断层上盘，柱状，赋存于凝灰角砾岩中。矿化主要为闪锌矿、黄铁矿、方铅矿。

2.2.2 断裂热液充填型矿体空间分布及形态特征

矿区的断裂热液充填型矿体主要为1号、5号、6号及8号矿体。矿体总体走向为115°～125°，倾向SW、NE倾角65°～70°。F2断层上盘的矿体多倾向SW，与F2断层的产状近似，其下盘的矿体多倾向北东，二者倾角接近，都为60°～70°左右，在NW端的矿体走向为NNW，倾向近于直立。断裂热液充填型矿体的形态特征与隐爆角砾岩型矿体有明显差别，主要为脉状、似层状，主要发育细脉状、条带状、致密块状构造，显示了明显的热液沿裂隙充填的特征，矿化主要硫化物为黄铁矿、方铅矿、闪锌矿。

断裂热液充填型矿体可细分为三类，一类与F2断裂有关，1号、5号和8号矿体是沿F2断裂系充填的矿体，该类矿体矿化以方铅矿化和闪锌矿化为主，1号矿体矿石发育与断裂走向一致的条带构造，发育石英斑岩角砾、矿化碎粉岩团块显示了矿体成矿时及成矿后经历了断裂构造活动的影响；二类是分布在F2断裂下

盘，走向近NNW的矿体，主要分布在矿区的NW端，定义为新1号矿体；三类是走向与F2平行，倾向与之相反的6号矿体。二、三类矿体的共同特点是分布在白云岩与凝灰角砾岩或石英斑岩的接触带，矿体为数条平行矿脉组成，矿化以富黄铁矿为特征。认识这种差异说明它们的成矿机制可能存在差异，深入了解成矿机制的差异对全面认识支家地矿体的成因有积极的意义。

第3章 矿区成矿元素空间分布格局分析

传统统计学在地质研究应用中通常采用均值、方差等参数来表征地质数据特征，却无法反映数据的空间变化特征，如空间局部数据变化模式及特定方向的变化等，而这些特征对地质体研究往往极为重要。为了更好地揭示支家地矿体空间分布的变化特征，开展了成矿元素空间分布规律的探讨，实现对元素含量3个维度的空间分布可视。以统计数学和计算机图形学相结合的方法，借助ArcGIS地统计学模块（Geostatistics Analyst），实现对支家地铅锌银矿勘探成果数据空间分布特征的把握。

3.1 数据分布

工作中的矿体元素含量数据来源于支家地矿区钻探取样化验结果，采用已有的二、四、五、六、八、九，十一号勘探的钻孔（表3-1）数据进行分析，其范围基本覆盖了整个矿区。

表3-1 实验数据表

剖面线	钻孔
2	ZK2201、ZK2202；
4	ZK4201、ZK4202、ZK4203、 ZK4202、ZK4206；
5	ZK5201、ZK5202；
6	ZK6201、ZK6202、ZK6203、ZK6204、ZK6205、ZK6206、ZK6301、ZK6302
8	ZK8201、ZK8202、ZK8203、ZK8204、ZK8205
9	ZK9201、ZK9202、ZK9204；
10	ZK1031、ZK1032；
11	ZK1121、ZK1122、ZK1123；

3.2 数据处理及分析方法

3.2.1 数据处理

为了掌握成矿元素的空间分布规律，试图利用已有样品数据形成矿区元素等值线图。但现有数据存在三个方面的不足：a，数据量少；b，样品非规则网格状分布，为沿勘探线剖面非等距排布；c，数据值变异大，同时数据本身还存在人为录入错误。为了解决这些问题，对数据样本进行以下处理：

1）样品坐标值计算

由于现有钻孔样品只有采样深度而没有相应的坐标，因而计算样品坐标。

根据钻孔开孔纬度X，开孔高程Z，勘探线方位A，开孔倾角B，以及各样品钻取深度H，采用以下公式得出各样品的Xn、Yn、Zn坐标。

$$Xn = X \pm \cos A \times (\cos B \times H) \qquad \text{公式（3-1）}$$

$$Yn = Y + \sin A \times H \qquad \text{公式（3-2）}$$

$$Zn = Z + \cos B \times H \qquad \text{公式（3-3）}$$

2）异常值剔除

在Excel中采用格鲁布斯法[97]对异常数据进行剔除：

- 首先把各原始Excel表中Ag元素提出进行数据格式整理，其次直接得出Ag品位的算术平均值（$\overline{X}$），并得出标准偏差（S）；
- 求出算数平均值（$\overline{X}$）与Ag化验数据(x)的差值$(\overline{X}-x)$；
- G值=$(\overline{X}-x)/S$；
- 所得出的G值与G值检验临界表（当a= 0.01时）中的临界值进行比较，凡G值大于表中对应临界值的数据均应舍去，不能参与统计计算。

通过以上操作，顺利剔除数据中Ag的异常值，使其精度能够得到较大程度的提高。同理可做Pb，Zn异常值剔除。

3）元素含量概率分布类型的判定

统计规律表明，样品化学元素的分布特征是由样品中元素品位的概率分布类型确定的。判别分布类型的方法有很多， ArcGIS的地学统计模块中的Explore Data菜单中提供了多种分析工具，这些工具主要通过生成各种视图，进行交互性分析。如直方图、QQ plot图及协方差图等。但由于本次数据样本数太大，软件自身的数据分析界限模糊使之无法清晰的表明数据分布的特点，因此借助于SPSS统计工具探索其数据分布类型，采用Q－Q概率图进行分布类型的判别。

SPSS软件中的Q- Q概率图（ Q － Q Plot）是由变量分布累计比与某个分布累计比形成检验变量分布的图形[98]。我们主要对样品Ag，Pb，Zn品位数据进行正态分布(Normal) 与对数正态分布(Lognormal) 进行判定，其过程为：

(1) 把整理后的Ag品位数据导入SPSS，选择“Graphs”→ “Q－Q”， 在Q－Q Plots (Q -Q概率图) 对话框中分别选择Normal (正态分布) 与Lognormal (对数正态分布)， 绘制出Q- Q图。图3-1显示的是Pb，Zn，Ag元素数据的Q-Q对数转正态分布图。

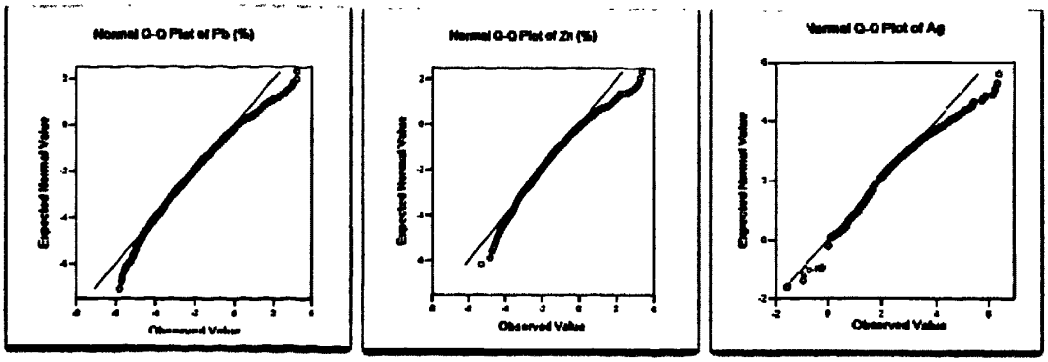


图 3-1，Pb（%），Zn（%），Ag（g/t）元素含量QQ正态分布图

从图3-1中看出，样品Ag，Pb，Zn含量分布近似成一条直线(对角线)，说明Ag，Pb，Zn的元素含量值经自然对数转换后，其分布类型为正态分布，由于Kriging方法对正态分布数据的预测精度较高，因此，在本次地统分析中选择Kriging法。

4）数据空间分布趋势特征检验

采用ArcGIS地统计学模块进行样品品位空间分布趋势特征分析，结果如图3-2。

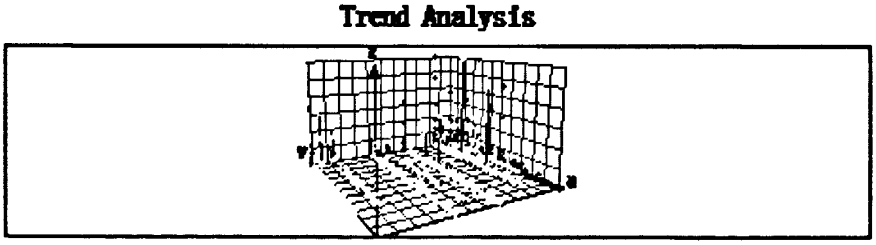


图 3-2，Ag（g/t）的空间趋势分析图

图中蓝线表示样品Ag品位沿北西方向分布的趋势，在该方面上Ag品位含量分布趋势基本呈水平状，只有少量的样品点为异常，说明Ag品位含量沿北西方向基本为均匀分布；绿线表示南东方向上Ag品位的分布趋势，也基本呈水平，因此可认为北西方向和南东方向Ag品位分布均匀。采用相同方法方便、快捷地确定Pb，Zn品位的空间分布趋势同样基本呈水平状。

3.2.2 分析方法

1）插值方法

由于研究区样品空间分布不均匀，采用插值法确定未知点的元素含量。地统计学模块Geostatistics Analyst提供数种插值方法，如IDW（反距离加权插值法），拉格朗日插值，Kriging里格插值法等，其中Kriging方法是比

较常用的空间分析插值方法。根据前文对矿区样品含量的分析结果，选用Kriging法对该区元素分布进行插值计算，实现了区内元素分布特征的直观观测。

2）优化

因为样品点源自钻孔，而同一钻孔样品在垂直方向的分布不离散，因而需要对Kriging插值法计算结果进行优化。其主要过程是：1）将全部样品点数以五个百分点为步阶试验进行搜索试验，发现20%，15%的样品搜索范围无法满足插值优化，而5%的样品搜索范围其计算量又过大速度慢，而10%的样品搜索点数既能满足插值优化又避免了计算量的冗杂；2）进行邻域搜索，以样品点为圆心，向其半径方向的邻域进行相邻样品点的搜索；3）对相邻样品点的含量值进行比较，采用ArcGIS中地统计模块中的判断模型对相邻样品点的元素含量差异进行判断，如果差异在模型允许范围内，则该相邻样品点的含量值可归属于同一级别范畴。

3）元素空间分布模型

将各勘探线样品点投影到互相垂直的三个标准面，以从三维角度建立矿区Ag，Pb，Zn品位的空间分布模型，更全面和直观地认识矿化分布格局。由水平面（XY平面）可以获得元素含量的水平方向的空间分布模型；平行于勘探线剖面（YZ平面）可以获得元素含量的平行于勘探线剖面方向的空间分布模型；平行于F2断层走向剖面（XZ平面）可以获得元素含量的平行于F2断层走向剖面方向的空间分布模型；将钻孔样品点投影至这三个平面，并分别在标准面上获得元素含量分布模型，这种模型虽然不反映元素空间的真实位置，但反映元素含量空间分布特征，不会形成点的人为强化。结果图3-3 Ag，Pb，Zn元素含量在标准面上的分布图。

3.3 成矿元素的空间分布格局

建立平行勘探线、水平垂直和纵向垂直的三个标准面组成的坐标系统，将各勘探线样品点投影到三个标准面，即可从三维角度建立矿区Ag，Pb，Zn品位的空间分布模型，全面认识矿化分布格局。由于标准面是投影面，样品的投影点与实际样点位置存在差异，但仍能反映元素含量空间分布特征，不会形成点的人为强化，图3-3 是Ag，Pb，Zn元素含量在标准面上的分布图。由图3-3可知：

1）Ag元素含量的空间分布特点

图3-3（A）显示了平行于F2的标准面上Ag元素含量分布，Ag主要分布于矿区上部，并向SE侧伏，在矿区的NW端，Ag元素呈连续状分布，在SE方向Ag

含量呈连续性下降趋势，但在SE的深部仍有高含量区出现。

图3-3（B）为Ag元素含量在平行于勘探线剖面的标准面上的分布图，图中显示：Ag元素高含量主要分布在F2中及其上盘，其下盘连续性不好。Ag元素含量的分布显示有三个高含量区域，区域一出现在矿区的SW，显示由浅到深向北的倾伏；区域二分布在矿区的中部，显示Ag元素在矿区上部富集；区域三出现在矿区的NE，Ag元素的富集连续性较差。图3-3（B）下方Ag元素含量低的区域与石英斑岩分布区重叠，Ag元素含量高值区沿NE-SW方向呈不连续分布；Ag元素的高值区区限于石英斑岩上方，由浅到深呈近垂直状的串珠带状分布，其分布模式与侵入岩体形成的锥状断裂系统的分布样式接近，可能暗示Ag为沿石英斑岩侵入体侵入过程中形成的一系列锥形破裂面分段富集沉淀成矿。根据锥形破裂面系统的分布模式，可以认为在矿区的NE部位可能还存在类似的Ag元素富集区。

图3-3（C）是Ag元素含量在水平标准面的分布图，显示Ag元素的富集主要集中于矿区的中部偏SE，Ag元素的空间分布模式可分为三种，一种为集中于矿区中南部的团块状富集区，应是目前矿区的主矿带的反映；一种为位于矿区S部的几个离散分布的小规模团块，其中在SW部有三个团块相对集中，且其范围相对较大，说明在2-4线的SW深部可能有Ag元素含量的高值区；第三种为沿F1断裂近E－W向的带状富集区，该富集区说明沿F1断裂同样应有Ag元素的富集，可能存在有意义的银矿体。由于该图反映了深部Ag元素含量的信息，因此可以认为NE向及SW向的深部存在一个以上的更高Ag含量的高值区。

2）Pb元素含量的空间分布特点

图3-3（D）为Pb元素含量在平行于F2的标准面上的分布图，图中显示，Pb元素主要富集分布在矿区的下部，由NW向SE端其含量富集区呈递增趋势，且位置明显低于Ag元素的富集区。

图3-3（E）为Pb元素含量在平行于勘探线剖面的标准面上的分布图，图中显示Pb元素主要富集分布在F2的下盘，矿区的NE部。Pb元素富集区从SW向NE方向表现出由浅至深的趋向，可以认为在矿区的NE深部还存在Pb的高含量富集区。

图3-3（F）为Pb元素含量在水平标准面的分布图，显示Pb元素的富集主要集中于矿区的N部，同时Pb元素的空间分布可分为三种，一种为NW-SE的带状，应是目前矿区的主矿带的反映；一种为矿区N部的近E-W向的带状富集区；第三种为矿区NE的高值区，其含量较高，是有意义的高Pb元素富集区，由于该图包含了深部Pb元素含量的信息，因此可以认为NE部的深部存在一个以上的更高Pb元素含量的富集区。

3）Zn元素含量的空间分布

图3-3（G）为Zn元素含量在平行于F2的标准面上的分布图，图中显示，Zn主要富集分布在矿区的下部，由NW向SE端其含量富集区呈递增趋势，其分布样式与Pb的分布样式基本相同。

图3-3（H）为Zn元素含量在平行于勘探线剖面的标准面上的分布图，图中显示Zn主要富集分布在F2中及其下盘，矿区的NE部。Zn元素高含量富集区从SW向NE方向表现出由浅至深分布的趋向，同样可以认为NE深部很可能存在Zn元素的高含量富集区。

图3-3（I）为Zn元素含量在水平标准面的分布图，显示Zn的富集主要集中于矿区的N部，分布格局与Pb元素的分布基本相同。

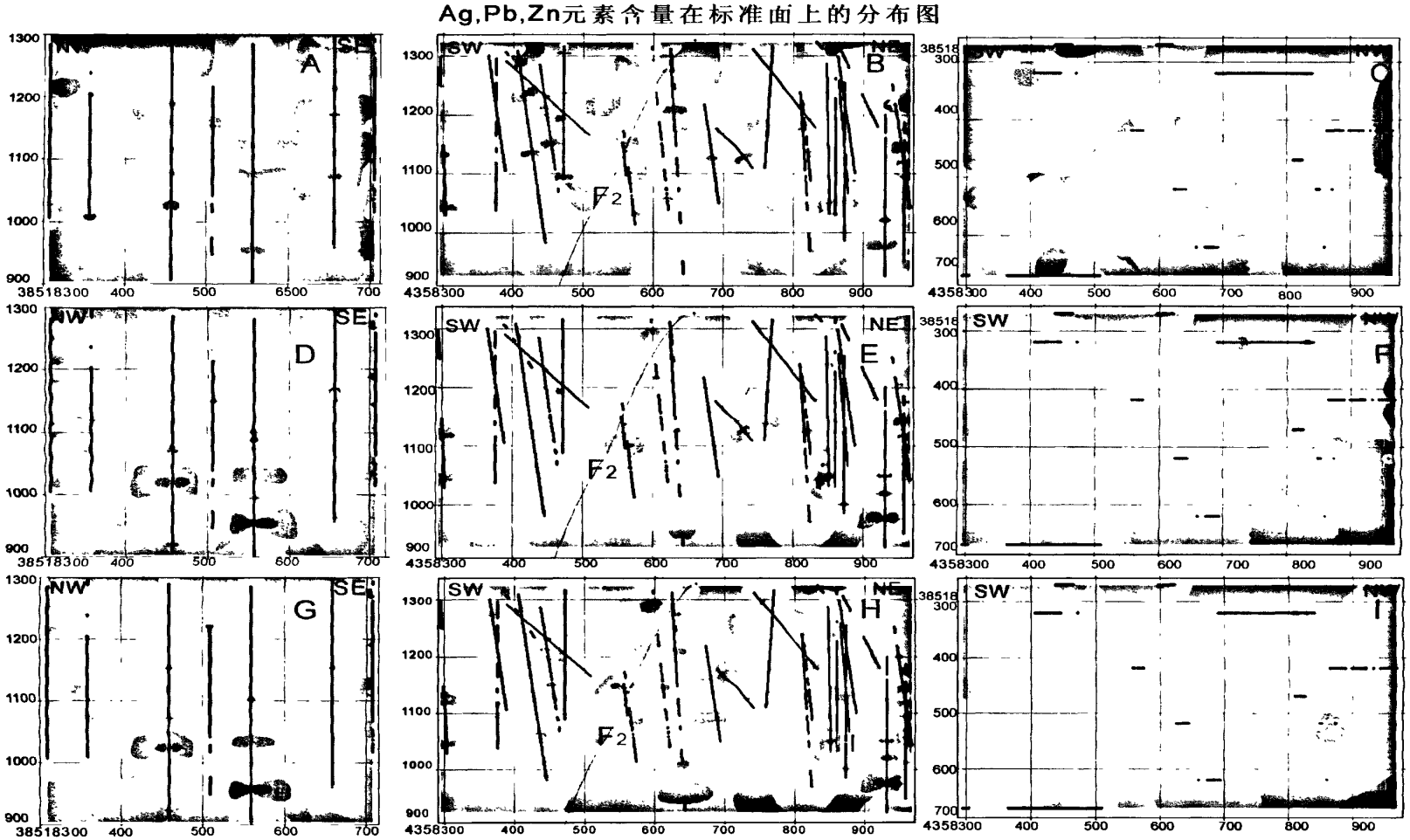


图 3-3 Ag，Pb，Zn 含量在标准面上的分布图（颜色由深至浅表示元素含量由高至低）

A，B，C 分别为 Ag 元素含量在 XZ 平面，YZ 平面，XY 标准面上的分布图

D，E，F 分别为 Pb 元素含量在 XZ 平面，YZ 平面，XY 平面投影后分布图；G，H，I 分别为 Zn 元素含量在 XZ 平面，YZ 平面，XY 平面投影后分布

第4章 地质体三维空间分布规律

收集了支家地矿区勘探阶段积累下来的地质钻探和剖面图资料，采用地质体三维可视化建模技术，基于Surpac矿山三维软件，建立了支家地矿山三维矿床模型。在可视化环境下，分析了矿体特征及其与各成矿地质要素之间的关系，为矿山接替资源勘查提供找矿信息。

4.1 Surpac平台

数字化矿床是数字化矿山的重要组成部分，矿床矿体三维实体的建立是其核心。数字化矿床不仅可以真实呈现地质体的空间赋存形态，还能够便捷、准确地剖切、编辑、输出各类地质剖面图，分割、报告地质储量等。为矿山的实际生产提供很好的依据，并指导矿山下一步生产计划。当前流行的三维矿山软件有：SURPAC，DATAMINE，MICROMINE等。

在比较了几个三维实体软件后，项目选取了SURPAAC 矿山三维软件。SURPAC具有功能强大的图形绘制及显示功能，并且采用了三维图形可视化仿真、数据插值拟合、剖分和消隐等技术，可以使人们根据自己的需求进行多形式的图形观察和变换，对矿床成因研究和采矿设计非常有用；软件还包含地质数据库、钻孔编录、数据分析工具的建模和等高线的绘制、块模型、断层建模等核心功能；在建立矿体实体模型方面，可以实现在勘探线剖面之间可以添加曲线的控制线或控制点，以使所得的实体模型更符合客观实际，足以满足项目中关于地质建模、实现矿体三维表达的要求。另外该软件的数据开放性好，对图形格式的兼容性强，可直接调用Autocad， Arcinfo及Mapinfo的图形及属性，矿区提供的MapGIS数据可通过MapGIS自带转换器方便地转换为CAD数据，满足为软件直接调用要求。

本文利用SURPAAC MINEX GROUP的Surpac vision6.0版本制作灵丘支家地矿山地质体三维实体模型，进而为探讨该地主要矿体在空间上的分布特征，及各矿体与地质体之间的依存关系，为研究矿床成因提供了证据。

4.2 地质数据库的建立

建立地质数据库所需的地质资料的完整性和准确性直接关系到矿区模型研究的效果。因此在建模前对基础地质信息整理分析，并在整理结果基础上进行数据录入、检查，最终完成地质数据库的建立过程。

矿区的主要地质信息是大钻孔信息和坑道信息，但由于资料收集有限，这里的矿区地质数据库只建立了钻孔信息数据库，其数据包括工程测量数据、样品取

样位置、样品化验数据及岩性数据，这些信息的整理建库，最终为矿体估值服务。

在实际的钻孔整理及钻孔的三维化显示过程中，发现钻孔的X，Y坐标与1320中段图中位置有误。

4.2.1 数据处理

1）钻孔数据分析

本次研究收集到支家地矿区野外编录系统一套，其中钻孔数据42个，矿山地勘资料图（平面，剖面图）计：平面图6张，剖面图10张。其中钻孔数据包括钻孔的位置、钻进方向、取样结果及岩性等信息。具体的分为以下四类：

①钻孔的孔口信息，包括孔口坐标X，Y，Z，开始日期和结束日期，终孔深度，钻孔规格，施工设备，施工单位及人员；

②钻孔侧斜信息：测点位置，方位，倾角；

③岩性信息：钻进的岩层、岩性及相应代码、文字描述，岩层的起点和终点，还包括矿化带的情况，柱状岩性符号图或素描图等；

④取样信息：岩芯采取率，取样位置，取样化验结果，样长等。

2）钻孔数据处理

根据建立地质数据库的数据格式要求及研究需求，对excel文件格式的钻孔数据进行了如下处理：

①删除没有化验信息的钻孔；

②将所有钻孔名设为大写；

③修正钻孔数据中人为错误，如：钻孔深度小于终孔深度，从始深度小于或等于终孔深度，规范了数据录入时中英文和半圆角造成的数据格式问题等；

④给钻孔岩性赋值（A为凝灰角砾岩层、B石英斑岩、C为矿层、D为白云岩、P为破碎带、S为片麻岩）；

⑤校验样品化验元素Ag，Pb，Zn的品位数据，剔出异常值。以上就完成了三维地质数据库的数据准备工作。

3）数据结构

综合Surpac软件所需地质数据库的结构要求和当前支家地铅锌银矿的实际情况，收集到了该矿区的探矿工程资料；分析、汇总和必要的规范后，利用钻孔勘探数据构建 “支家地钻孔数据库” 的地质数据库文件，数据库建立流程如图4-1所示。

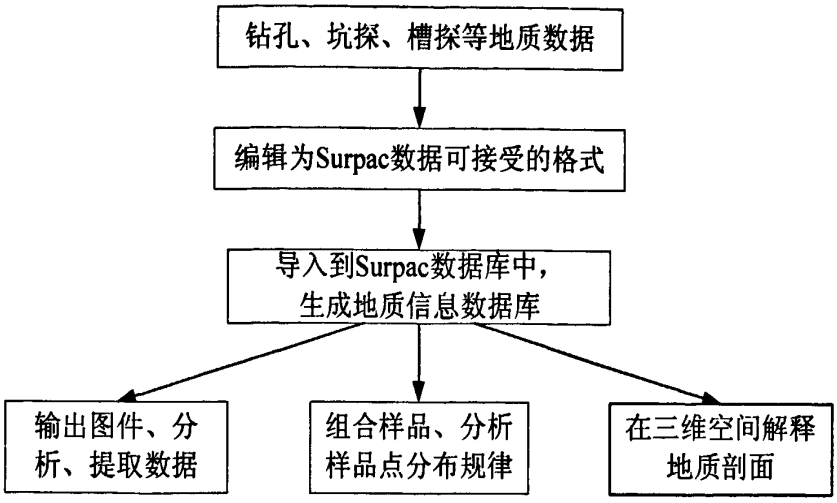


图 4-1 surpac 建立地质数据库流程图（据 Surpac 培训教程）

并将样品对应的三维坐标（X，Y及高程坐标Z）和属性（工程号、样长、侧斜、化验数据、地层信息等）等数据整理置放于分离的4个自由表：钻孔表（Collar table），测斜表（Survey），岩性表（Geology table），化验表（Sample table），分别记录了探矿工程的空口位置、钻孔侧斜、样品分析数据及岩性位置。各表字段见图4-1。

各表之间内容上是独立的，但逻辑上相互关联，并通过“钻孔代号”建立联系。在给定工程的开口坐标和测斜数据情况下，即可在三维空间确定该位置地质体的品位、岩性、坐标等情况。这样可利用二维表进行地质数据的描述，为数据库处理做前期准备。

表 4-1 surpac 地质数据库各表字段图

表名	字段
钻孔表 /Collar	钻孔代号（hole_id）、Y 坐标、X 坐标、Z 坐标、孔深（Depth）
测斜表/ Survey	钻孔代号（hole_id）、据孔口的距离、倾角、方位角
岩性表/ Geology	钻孔代号（hole_id）、样品段起点、样品段终点、岩石类型
化验表/ Sample	钻孔代号（hole_id）、样品编号、取样始终位、Ag，Pb，Zn 品位

4.2.2 数据库的建立

利用收集到的10个勘探工程的42个钻孔数据，分别在《支家地银矿ZK**钻孔偏曲坐标计算表》中读取开孔位置，终孔深度，方位角，倾角等数据，结合《支家地银矿**中段ZK**号钻孔地质综合整理表》中读取岩性及样品化验品位数据。

钻孔定位、测量、编录、取样数据分列于相应的表，符合矿山实际工作流程，以下列出部分数据结构图：

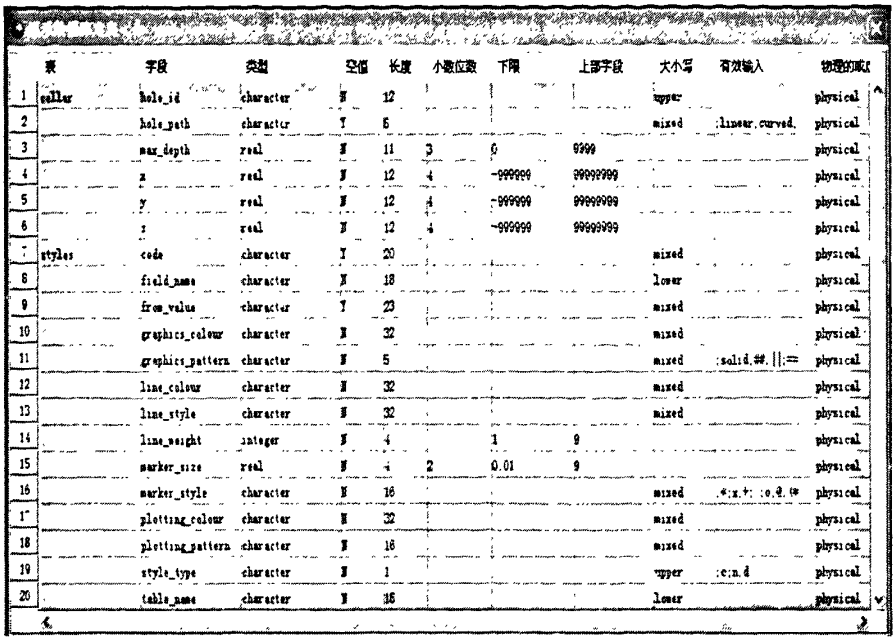


	表	字段	类型	空值	长度	小数位数	下限	上限字段	大小写	有效输入	物理的或逻
1	collar	hole_id	character	N	12				upper		physical
2		hole_path	character	Y	6				mixed	:linear,curved,	physical
3		max_depth	real	N	11	3	0	9999			physical
4		x	real	N	12	4	-999999	99999999			physical
5		y	real	N	12	4	-999999	99999999			physical
6		z	real	N	12	4	-999999	99999999			physical
7	styles	code	character	Y	20				mixed		physical
8		field_name	character	N	18				lower		physical
9		from_value	character	Y	23				mixed		physical
10		graphics_colour	character	N	32				mixed		physical
11		graphics_pattern	character	N	5				mixed	:solid,##,||,==	physical
12		line_colour	character	N	32				mixed		physical
13		line_style	character	N	32				mixed		physical
14		line_weight	integer	N	4		1	9			physical
15		marker_size	real	N	4	2	0.01	9			physical
16		marker_style	character	N	16				mixed	.+:x,*: :o,@,#	physical
17		plotting_colour	character	N	32				mixed		physical
18		plotting_pattern	character	N	16				mixed		physical
19		style_type	character	N	1				upper	:c:n,d	physical
20		table_name	character	N	16				lower		physical

图4-2 支家地矿区地质数据库数据结构图

创建表之后，将钻孔表数据格式转换为用逗号分隔的EXCEL(CSV)文件，并将之导入至access数据库中。最后按Surpac数据结构要求导入至Surpac，导入过程中软件自动生成错误报告，根据报告中指出的错误的字段和记录号，即时修改错误数据。以下四张表为四号勘探线钻孔部分整理结果

表 4-2 4 号勘探线钻孔表

钻孔代号	Y	X	Z	总长
ZK4201	4358179.00	38518623.00	1331.99	289.55
ZK4202	4358179.00	38518623.00	1331.99	411.05
ZK4203	4358284.00	38518847.00	1327.00	296.18
ZK4204	4358297.88	38518873.59	1331.06	345.30
ZK4204A	4358297.88	38518873.59	1331.06	176.40
ZK4206	4358328.00	38518958.40	1331.10	381.10
ZK4207	4358572.24	38518572.24	1330.14	391.10

表 4-3 4 号勘探线钻孔测斜表

钻孔代号	距孔口长度	倾角	方位角
ZK4201	0.00	-85.00	24.00
ZK4201	50.80	-85.00	25.00
ZK4201	96.90	-86.00	26.00
……	……	……	……

表 4-4 4号勘探线钻孔岩性表

钻孔代号	从	至	岩性
ZK4201	0	32.2	A
ZK4201	32.2	35.2	C
ZK4201	35.2	49.2	A
ZK4201	49.2	50.2	C
ZK4201	50.2	52.2	A
……	……	……	……

表 4-5 4号勘探线钻孔化验表

钻孔代号	从	到	Ag	Pb	Zn
ZK4201	77.90	78.90	0.50	0.51	0.65
ZK4201	212.60	213.60	1.00	0.10	0.37
ZK4202	311.60	312.60	1.00	0.08	0.13
ZK4203	247.00	248.10	1.00	0.20	0.01
……	……	……	……	……	……

数据导入后，可实现对钻孔的三维可视化操作，查看钻孔形迹（图4-3）、显示各钻孔的样品分布（图4-4）、某元素的品位分布、制定地质代码的颜色、样品数据查询等功能。

其中样品数据查询功能可在工作中方便查询任意钻孔，或者某个探矿工程某一空间位置的取样化验品位，并可以作任意约束条件的筛选；同理，也可方便查询任意剖面、中段或者任意矿体产状、空间分布和厚度、品位等资料数据。

4.3 实体建模

通过对矿体三维实体建模，可以在三维可视环境下更直观了解矿体、地质体的形态及空间分布等特征，更全面地了解矿体与地质体的空间关系。建立三维地质实体模型的方法主要有以下几种：

1）面模型：地质界面形态复杂多变，因此只能近似采用一系列的三角面表示曲面。这种面模型可以进行表面渲染、剖面切割、快速三维显示等操作。

2）实体模型：即为体的边界模型，通常由数个面模型组合而成。采用一系列的三角面根据实体轮廓的多边形线串（.str）构成的实体“壳”，实为一个空心体，这种模型可以进行体积估算。

3）块体模型：块体模型是指把地质体或矿体划分为一系列的长方体单元，近似地表示地质体或矿体，每个长方体单元都有相应的属性表示地质体或矿体内部某一位置的内部性质。由于单元块切割有一定误差，可以通过减小模块来降低误差，但模块越小，其数量越多，将会影响运算速度。

4）网格模型：网格模型是指把平面区域划分为一系列的矩形网格，每个网格点的平面坐标是一定的，只需对网格点的属性赋值即可（如高程、品位、岩性等等）。这种模型可快速生成等值线图，有序的面模型，也可通过积分法进行体积运算，但有一定的边界误差。

本次实体建模数据源自支家地10条勘探线剖面图及相应钻孔数据，其中矿体可分为隐爆角砾岩型和断层热液充填型。根据支家地矿区的实际情况以及各建模方法的特点，确定以下建模方案：

岩体模型：采用实体模型；

矿体模型：采用实体，块体模型；

以各勘探线剖面为基准，并通过以下操作获得矿体/地质体实体模型

4.3.1 模型参数

利用Surpac软件建立矿区的钻孔三维模型、三维地层实体模型、矿体实体模型以及钻孔中各元素采样分析结果建立的元素组合矿化异常的三维块体模型，在此基础上对矿体进行空间分析和品位赋值计算。

在上文中已建立的地质数据库的数据支持下，以矿区内0到12号剖面线间范围为研究区界，其地域范围为：X坐标范围38517950－38518750，Y坐标范围4358000－4359050，高程坐标Z坐标为750－1950m。

4.3.2 数据处理

基于前人在矿山生产中的原始资料的积累和分析，本文建立的地层和矿体实体模型主要采用勘探线剖面图的矿体模型构建，具体操作如下：①将该矿体各勘探线剖面的Mapgis图件进行坐标转换，使图形坐标和大地实际坐标相符合，并使得面域边界闭合；②利用MapGIS自带的文件转换器将矿山提供的MapGIS图件转换为.dxf格式文件；③结合矿区地质地形图在Surpac中进行三维坐标空间数据转换，提取各勘探线剖面的同编号矿体及同类型岩体边界分别形成线文件。

本次重点对0，2，4，5，6，8，10，11，12号剖面图的数据进行转换处理，完成了支家地各勘探线剖面矿体（0，2，3，4，5，6，8，9，10，12号矿体）边界线，石英斑岩边界线，白云岩边界线及凝灰角砾岩边界线的提取转换工作。

4.3.3 实体联结

首先完成区内0，2，3，4，5，6，8，9，10，12号矿体，石英斑岩，白云岩及凝灰角砾岩边界线的提取转换。

在SURPAC VISION环境下，通过2D线转换功能实现二维坐标向三维坐标的转换，按照地质规律，适当添加线或点，采用三角网连接法形成矿体实体模型。对于2，3，4，9，12号独立的柱状矿体，按照内插或外延的规则尖灭矿体。

利用SURPAC平台的“实体验证”功能检验已建成的实体模型的正确性；通过

检验后再对不同的矿体模型施以不同的颜色进行标识。通过地质数据库，将矿区的地形、钻孔、测斜、品位等数据与矿体实体模型进行集成，其结果如图4-3～4-11所示。

4.4 基于三维实体模型地质体

本文首次将支家地铅锌银矿的控矿石英斑岩岩体和矿体采用三维实体模型进行了直观表达，客观地展示了矿体和岩体的空间形态及空间分布，其结果证实了地质认识，即矿区的矿体可分为断裂热液充填型板状矿体和隐爆角砾岩型柱状矿体。其中断裂热液充填型矿体又分为走向相同、倾向相反的两种矿体，一种为沿F2断层分布的板状矿体组合，一种为岩性接触带型附近相互平行的薄板状矿体组合。矿体三维模型较原有二维图形更直观，并可随意选择观察角度，直观呈现不同视角的矿体形态。前人对矿体的规模及其长度、厚度和延深等数据已进行了详尽的描述，但无法从不同的视角对矿体和岩体的形态及空间分布进行观察，因此本次工作主要借助矿体三维实体模型对矿体的特征进行更深入分析，得出了新的认识：

4.4.1 矿床空间分布特征分析

1）矿床总体模型分析

据图4-3并结合前人的观点认为，断裂热液型矿6号矿体和沿F2断层的板状矿体走向一致，但倾向相反，构成如图4-3中所示的“入”字型结构，隐爆角砾岩型矿体赋存于“入”字型下方，这种格局与岩浆侵入体侵入过程中形成的“锥形”断裂系格局相似。

由图4-10和图4-4）可知：断裂热液型矿体多分布于石英斑岩与围岩的交界处，如沿F2断层的板状矿体分布于北部石英斑岩体南侧的构造破碎带（F2）及其次级裂隙中；6号矿体沿石英斑岩与白云岩接触带界线分布，同时石英斑岩与6号体呈参差交叉关系，表现了与1号矿体不同的特点，这种格局一方面似乎不能佐证6号矿体连续性，另一方面则暗示6号矿体在成因机制上与1号矿体可能存在差异。

隐爆角砾岩型矿分布于南、北两石英斑岩体与凝灰角砾岩的接触带中，F2沿该接触带发育。

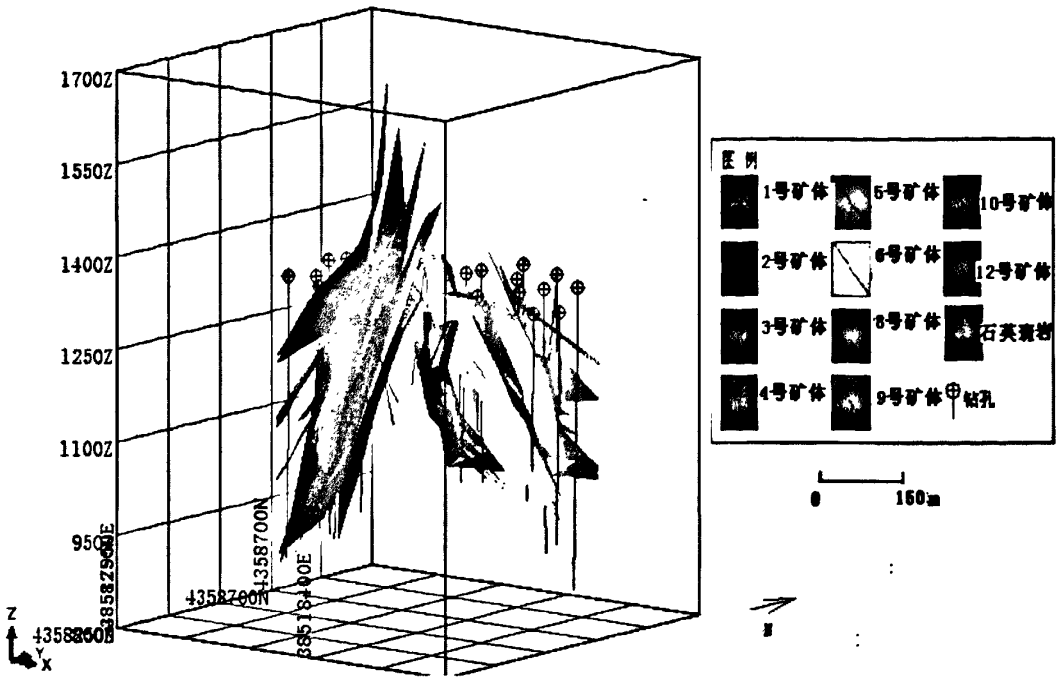


图 4-3 矿体分布综合三维图

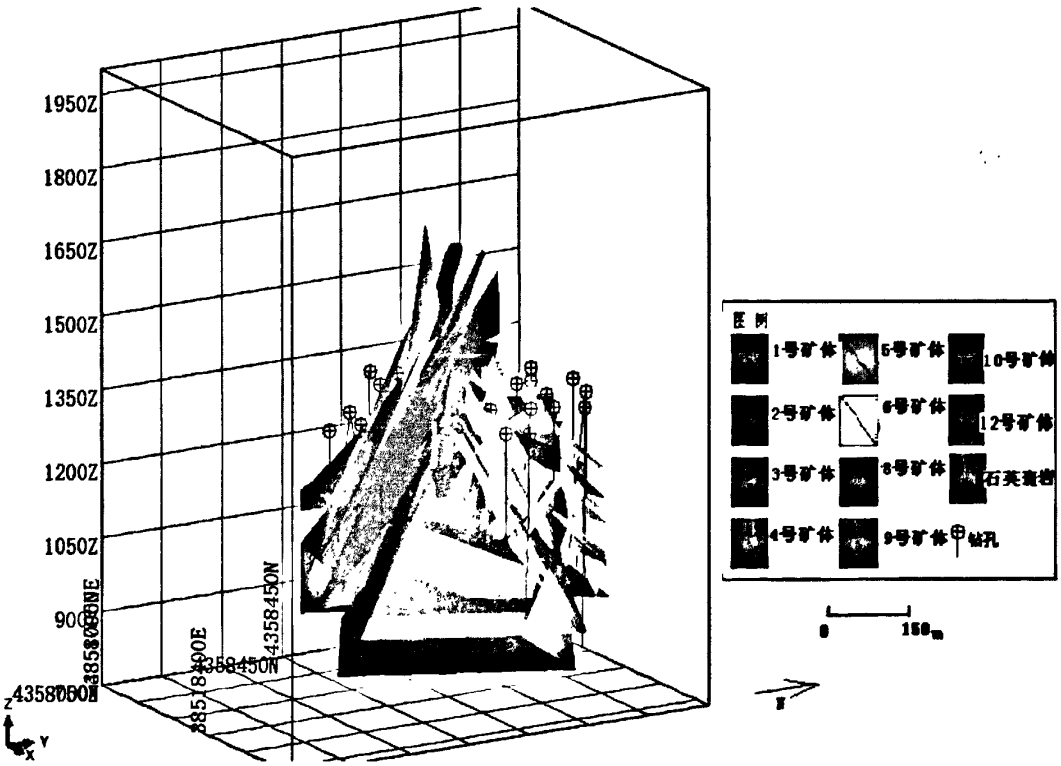


图 4-4 矿体和北部石英斑岩空间位置图

2）断裂热液充填型矿体模型特征

断裂热液充填型矿体的主要代表为沿F2断层分布1号主矿体，伴以与之平行的5，8，10号矿体，它们受平行于F2断层的断裂控制。1，5，8号矿体走向在7～10线处均表现了改变；1号矿体上盘方向依次排列5，8，10号矿体，矿体连续性依次下降，规模变小，显示了矿化由下盘向上盘方向变弱的特性；这些特征说明1，5，8，10号矿体为同一组矿体，受裂隙控制，其中1号矿体的赋存空间为F2主断层，而其它矿体的赋存空间为与其平行的裂隙（图4-5）；由于该组矿体的分布范围不大，同时矿化规模呈急速减小变化，因此可以认为断裂为浅部脆性断裂，矿液温度较低或是快速冷却，矿液与围岩缺少足够的反应时间，因而矿体主要表现为充填状，这两方面的特征都说明成矿作用应发生在浅部。

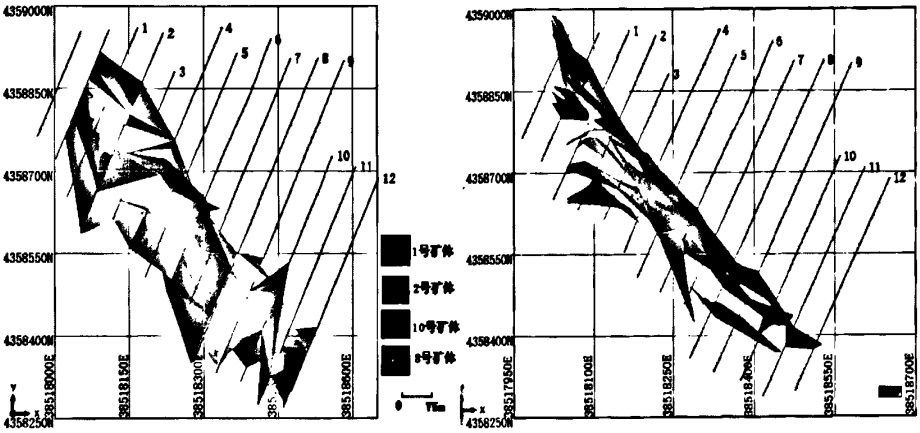


图 4-5 沿 F2 断层分布矿体的三维模型图

矿体的三维实现模型更准确地体现了矿体空间形态及分布方面的规律和变化，1号矿体（图4-6）在NW端显示出矿体的分枝，矿体沿走向呈波状起伏延伸，在3线，4线，6线，8线，9线，11线处均有不同程度的转向，其中0线～3线，6线～8线，9线～11线转向一致，结合样品化验结果可知这几个转向处地段的元素含量偏高，显示这种转向造成了矿体元素含量的分段富集，转向部位为成矿有利空间。根据上述规律，笔者认为在矿区东南端，距12线100m左右沿NW走向设孔应有收益。

另外，这种规律具有从NW端到SE端逐渐弱化的趋向，分析其原因可能为以下两点：一是确实存在由NW端到SE端的成矿弱化；二是工程在10线以后钻进深度不够，未探及SE端深部矿体。

1号矿的实体模型还显示矿体尽管总体倾向一致，但由浅到深部沿倾向同样存在波状起伏变化。

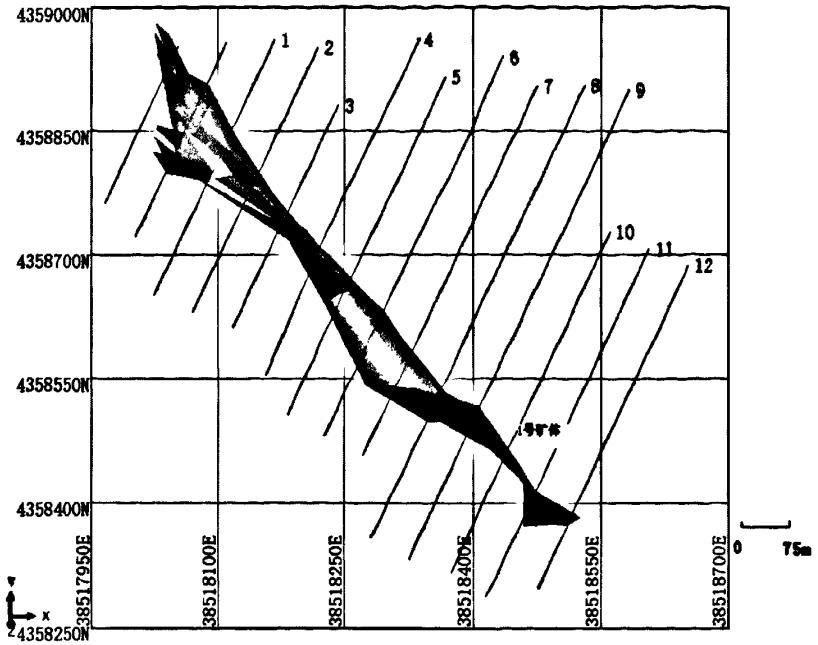


图 4-6　1 号矿体三维模型俯视观测图

图4-7显示的是一号矿体纵向三维图，1号矿体最浅见矿位置为1550m，最深位置为900m，从NW端向SE端其见矿位置各有高低，4线，9线，11线见矿位置较浅，结合石英斑岩位置分布可以认为矿体分布位置的高低态势与石英斑岩界线位置有关。在石英斑岩的突起面，矿体出露位置偏高，如2～4线；而石英斑岩的低落面，矿体位置向下延伸深度大，但出露位置相对突起面的矿体出露位置低。

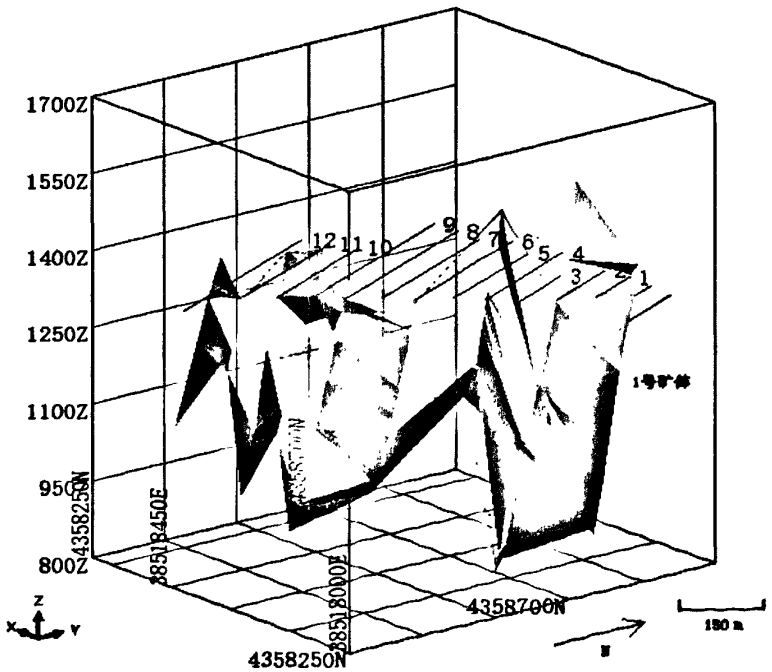


图 4-7　1 号矿体纵向观察图

3）6号矿体三维实体模型特征

6号矿体的发现是矿区勘探的新成果，认为它可代表分布于接触带的薄板状矿体，具有与1号矿体走向相同，但倾向相反的特点。其三维实体模型特征（图4-8）。与石英斑岩呈参差交叉状似乎影响了6号矿体的连续性。同时8线1320中段处观察到矿体发育明显的角砾构造，胶结物为方铅矿等硫化物，具有与隐爆角砾岩型矿体相似的特点。2线钻孔所见的白云岩中的6号矿体则显示为以黄铁矿为主的致密块状矿体，同时存在数条矿体。因此6号矿体沿走向应划分为两种不同类型矿体，如图4-8显示在矿区的NW端（位置1）和SE端（位置3）的6号矿体分布于凝灰角砾岩和白云岩接触带型，为断裂热液充填型矿体；位置2处的6号矿体存在于石英斑岩界线凹陷处，位置4处的6号矿体赋存在石英斑岩中，它们都为隐爆角砾岩型矿体，因此认为6号矿体为若干断裂热液充填型矿体和柱状隐爆角砾岩型矿体组成。对6号矿体的新发现不仅扩大了矿山的资源量，同时特别有助于更全面认识该矿的成因，如隐爆角砾岩型矿体分布位置向北推移，提供了北部有可能发现更多隐爆角砾岩型矿体的信息。

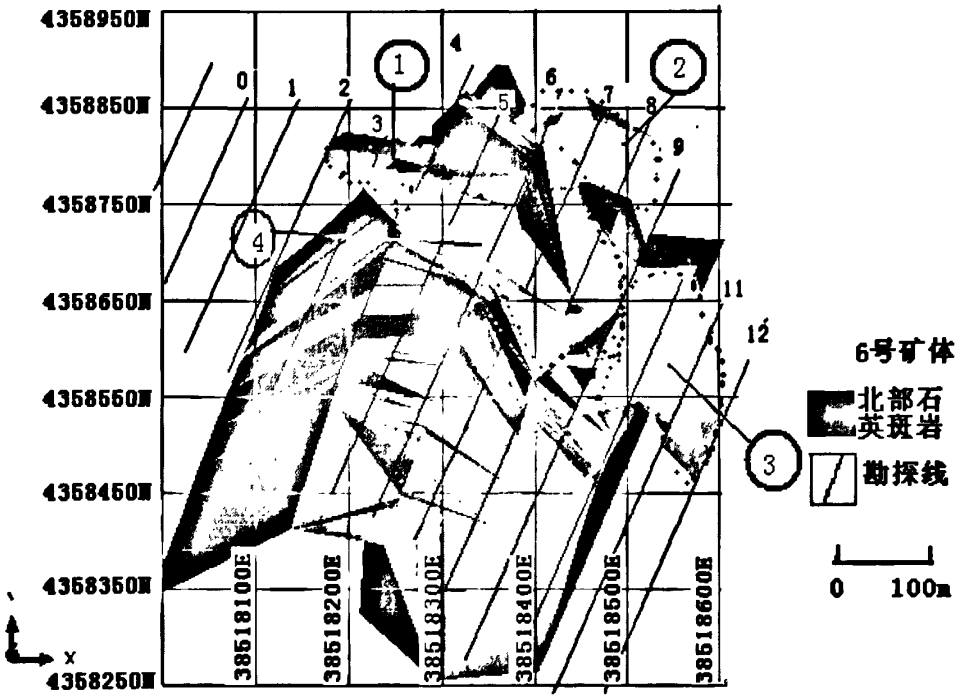


图4-8　北部石英斑岩和6号矿体空间关系图

4）隐爆角砾岩型矿体三维实体模型特征

2，3，4，9，12号矿体为隐爆角砾岩型矿体，如图4-9所示，它们呈柱状，并且以非对称间隔方式沿F2断层上下盘排列，矿体间距70m～100m不等。从矿体规模来看，断层下盘矿化规模相对较大，由此可推断在F2两侧间隔寻找，尤其在下盘处，应可见柱状矿体的存在。

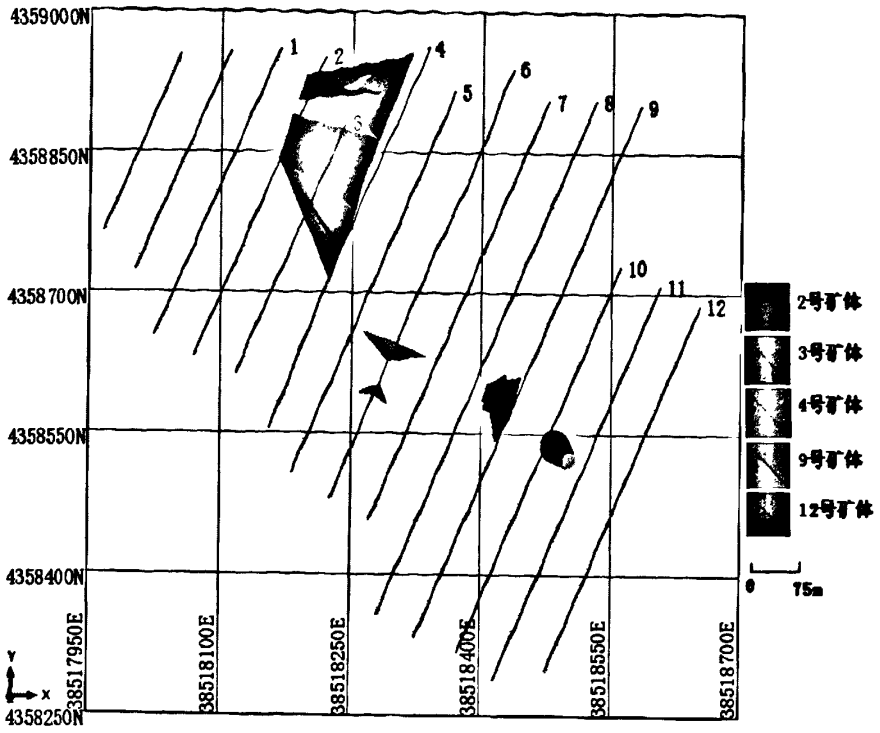


图4-9　隐爆角砾岩型矿体空间位置关系图

4.4.2 矿体及控矿地质因素空间关系分析

为了更清楚了解矿体与石英斑岩和控矿断层F2间的紧密的关系，建立石英斑岩、控矿断裂与矿体的空间关系三维模型。

从图4-10可以看出，该区的石英斑岩明显为断裂分割为南，北，中三部分，其中位于矿区南部的石英斑岩规模较大，位于中部和北部两块石英斑岩的上方；中部石英斑岩规模最小，呈板状位于北部岩体之上，推断为构造活动形成的石英斑岩岩体剥落体，显然这种现象说明石英斑岩形成后，矿区有过较强的断裂活动。矿区对F2断裂的控矿已有明确的认识，但未曾认识到F2断层南部（下盘）也存在一条与F2断层平面的断裂，该断裂与F2断裂有相同的产状，同样穿切了石英斑岩，因此其成矿潜力值得进一步探讨。

为了更好地了解断裂与矿体的空间关系，将石英斑岩、断裂和矿体进行叠加，其结果如图4-11，该图显示现有断裂热液充填型矿体未严格沿南北两石英斑岩体间接触界线分布，而总体沿断裂分布，暗示该类型矿体应该形成于石英斑岩之后。

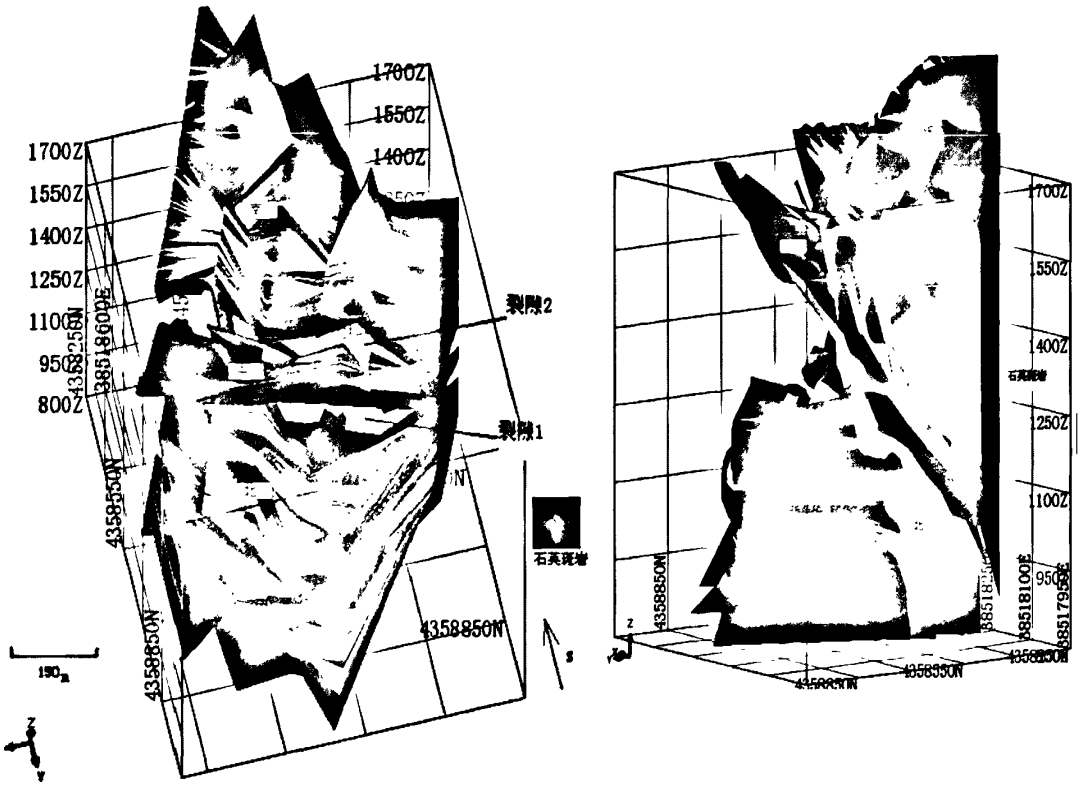


图 4-10　石英斑岩及控矿断层空间关系

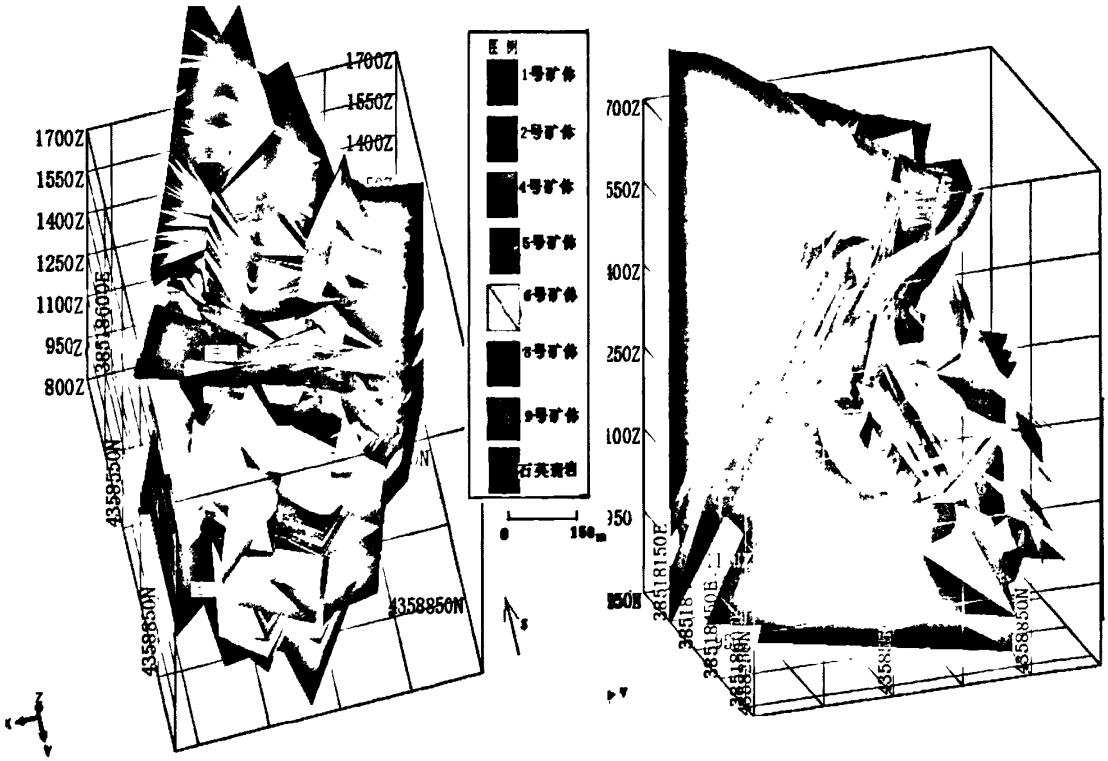


图 4-11　石英斑岩、断层及矿体空间关系

在三维环境下观察到石英斑岩岩体接触界面上存在一些明显的凹陷和突起。图4-12（A）、（B）显示出北部石英斑岩体存在3处明显凹陷，图4-12（A）的观察角度为由SE～NW，所见为石英斑岩体的SE部；图4-12（B）的观测角度为由NW～SE，所见为石英斑岩体的NW部。研究发现，石英斑岩凹陷处是有利的赋矿空间，以6号矿体为例，图4-12（A）叠加6号矿体后形成图4-12（C），图4-12（B）叠加6号矿体后形成图4-12（D）。图4-12（C）和（D）显示了矿体主要分布在石英斑岩的凹陷处，图中所示凹陷与矿体赋存位置有密切关系，通过对比这几处的钻孔化验结果，矿体或品位较高的矿段大多赋存在石英斑岩凹陷处。因此石英斑岩凹陷带为找矿的重要标志。

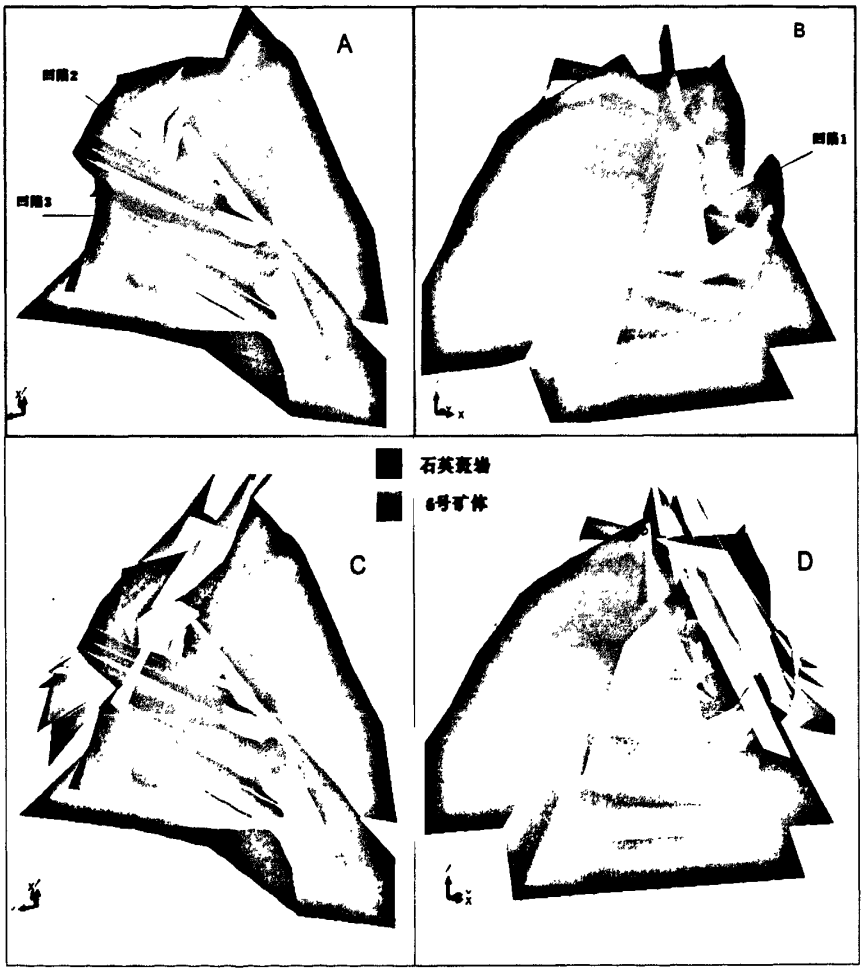


图 4-12　石英斑岩凹陷带与矿体空间关系

第5章 矿区控矿因素与证据权法分析

1320中段是支家地矿区工作资料、地质特征分布集中的中段，选取1320中段作为成矿特征的分析对象，有益于对整个矿区的把握。在深入理解山西支家地矿区成矿特征基础上，通过点阵化处理矿体，优化提取了1320中段地层、线性构造，矿体和岩石界限等致矿证据层；以10m×10 m为网格单元对各证据层进行网格化处理；分析了各证据层与矿体分布的空间相关性，定量计算了各单元中各证据层对矿化影响的对比值。该值为矿化的概率计算的变量，这使对任意空间位置可能发生矿化的概率进行定量计算成为可能，进而可定量估算各控矿因子对成矿有利程度，分别获得了断裂热液型矿体和隐爆角砾岩型矿体的成矿后验概率，并通过图形方式直观表达了成矿高概率区的空间分布。

5.1 成矿证据模型

通过对前人工作中所应用的证据权数学模型的总结，本文梳理了证据权模型的计算流程，包括图层选择，证据层网格化处理，先验概率计算，权重计算以及成矿（后验）概率计算。

1）图层选择：划定研究工作区，选取对成矿有利的控矿因子专题图层、矿点图层。在证据层选择过程中，尽量选择相互独立的证据层。

2）网格化处理：分别对研究区A、矿点图层进行网格化处理，使之离散为不连续的若干单元格（本文选取10m×10m），并进行图层叠加。

3）先验概率计算：先验概率为研究区中矿床（点）所占单元格数与研究区总单元格数之比，计算公式为（5-1）。证据权法往往应用于小比例尺大范围矿区预测，其矿床被抽象为点，本文首次将证据权法运用于大比例尺小范围的矿山成矿预测，为满足证据权模型的图形需求，将矿体离散为10m×10 m规格的点阵，$N(D)$表示矿体的离散单元格数。则有先验概率计算公式：

$$P(D)=N(D)/N(A) \qquad \text{公式（5-1）}$$

$$P(B)=N(B)/N(A) \qquad \text{公式（5-2）}$$

P（D）矿体存在的先验概率；P（B）证据权层的先验概率；N（D）为矿床（点）所占单元格数，$N(A)$为研究区总的单元格数，N（B）为证据因子所占单元格数量

权重计算：定义正负权重分别是W^+和W^-，权重可通过似然比进行计算，公式（5-3）和（5-4）。证据存在和不存在的单元个数分别定义为$N\{B\}$和$N\{\overline{B}\}$，$N(\overline{D})$表示未出现矿体单元格数，则有证据图层的证据权重公式（5-3），（5-4）：

$$W^{+}=\ln\frac{P(B|D)}{P(B|\overline{D})}=\ln\frac{N(B\cap D)/N(D)}{N(B\cap\overline{D})/N(\overline{D})}$$ 公式(5-3)

$$W^{-}=\ln\frac{P(\overline{B}|D)}{P(\overline{B}|\overline{D})}=\ln\frac{N(\overline{B}\cap D)/N(D)}{N(\overline{B}\cap\overline{D})/N(\overline{D})}$$ 公式(5-4)

矿体图层与证据图层相关性计算：矿体图层与证据图层的相关性越大越好，证据图层同矿体图层的相关性用对比值（C）表示，其计算公式为（5-5）

$$C(contrasts)=W^{+}-W^{-}$$ 公式(5-5)

$C>0$表明矿体图层与证据图层为正相关，即证据图层的存在有利于矿化的发生；$C<0$表明负相关，即证据图层的不存在有利化矿体的发生，$C=0$表明不相关，即证据存在与否对矿化没有影响。

采用缓冲区分析操作方法来确定控矿因子对矿化的控制范围。但在大多数情况下，需要依靠专家的经验来人为确定缓冲区的大小，主观选择性较强。作者尝试采用标准化C确定最优切值，该值作为缓冲区范围，标准化C的计算公式为5-6

$$Stud(C)=C/\sqrt{S^{2}(w^{+})+S^{2}(w^{-})}$$ 公式(5-6)

其中$S^{2}(w^{+})+S^{2}(w^{-})$为权重方差，计算公式为（5-7）：

$$S^{2}(w^{+})=\frac{1}{N(B\cap D)}+\frac{1}{N(B\cap\overline{D})}$$ 公式(5-7)

$$S^{2}(w^{-})=\frac{1}{N(\overline{B}\cap D)}+\frac{1}{N(\overline{B}\cap\overline{D})}$$ 公式(5-8)

$stud(C)$的统计学含义是对C的显著性检验，取显著性水平 $\alpha=0.05$，则认为，当$stud(C)$最大时，表明当前切值优于其它切值。

成矿（后验）概率计算：在先验概率计算后，进行成矿（后验）概率计算。为使得模型简化，将先验概率转化为几率：

$$O_{先验}\{D\}=\frac{P\{D\}}{1-P\{D\}}=\frac{N\{D\}/N\{T\}}{1-N\{D\}/N\{T\}}$$ 公式(5-9)

则有自然对数后验似然比：

$$\ln O_{后验}(D|B_1^{k}B_2^{k}\cdots B_n^{k})]=\sum_{j=0}^{n}W_j+\ln O_{先验}(D)$$ 公式(5-10)

其中，n为证据层数，K为第j个证据层的存在状态，则成矿（后验）概率可表达为公式（5-11）

$$P_{后验}(D|B_1^kB_2^k\cdots B_n^k)=\frac{O_{后验}(D|B_1^kB_2^k\cdots B_n^k)]}{1+O_{后验}(D|B_1^kB_2^k\cdots B_n^k)]} \quad 式(5\text{-}11)$$

5.2 数据组织

5.2.1 数据库建立

1）地质数据库

在已有的数字化地质图基础上，利用MAPGIS图形编辑功能进行数据整理，对地层、构造、岩浆岩、矿体等进行分层处理；整理图内各地质要素属性数据，建立山西支家地矿区1：1000地质数据库。

2）品位数据库

利用矿区20个水平小钻和刻槽样品品位数据建立数据库。

3）矿体数据库

利用MAPGIS的属性管理功能输入各矿体的属性数据，建立了支家地矿区矿体数据库。

通过MapGIS中比例尺转换功能，将以上数据转换至1：1000比例尺，并储存在MAPGIS地图库中；通过投影变换将各数据图层统一为高斯坐标系。

5.2.2 证据层选择

根据支家地铅锌银矿区的认识，结合前人的工作成果，认为该区的主要控矿因素取决于断裂构造、石英斑岩接触带、地层岩性及地球化学异常，分别从前述所建立的三个数据库中提取地层岩性组合、线形断裂构造、点形断裂构造交叉点、石英斑岩接触带、Ag品位、Pb品位、Zn品位证据层专题图件。

各证据的数据来源及处理如表5-1所示。

表 5-1 证据图层的数据源及处理后证据层图件

证据描述	原始数据格式	处理后的证据层图件
研究区	MapGIS 的区文件	ArcGIS raster (10m×10m)
断裂构造交叉点	ArcGIS 的点文件	ArcGIS raster (10m×10m)
断裂热液充填型矿	MapGIS 的区文件	ArcGIS raster (10m×10m)
隐爆角砾岩型矿	MapGIS 的区文件	ArcGIS raster (10m×10m)
地层岩性组合	MapGIS 的区文件	ArcGIS raster (10m×10m)
地层界线	MapGIS 的线文件	界线缓冲区 ArcGIS raster (10m×10m)
断裂构造	MapGIS 的线文件	断层缓冲区 ArcGIS raster (10m×10m)
钻孔化学元素	钻孔属性数据	等值线缓冲 ArcGISraster(10m×10m)

以5m为步阶，分别选用5m×5m，10m×10m，15m×15m，20m×20m网格化图层，经试验发现15m×15m，20m×20m网格无法细分控矿因子，而5m×5m的格网划分虽

细，但导致计算量增大，因此最终确定研究区网格大小为10m×10m。

1）地层岩性组合证据层

该区内显示成矿围岩类型为白云岩、石英斑岩、石英斑岩角砾岩、凝灰角砾岩和火山角砾岩等，将石英斑岩和石英斑岩角砾岩作为一类岩石进行圈定。

2）矿体证据层

分别对断裂热液充填型和隐爆角砾岩型型矿体进行控矿因素分析，提取1号，8号，6号，10 号，5号断裂热液充填型矿体和新1号，12号，2号，4号隐爆角砾型矿体图层。利用ArcGIS形成的10m×10m点阵文件，通过该点阵文件与原矿体图层叠加相切，使矿体离散为点阵，并保留了其原有的全部信息。

3）断裂缓冲区证据层

分别对矿区内的F1，F2，F3三条断裂带进行缓冲区分析和证据权法优选，进行缓冲区分析，获得多个缓冲区参数，定义对矿化目标影响最大参数，最终形成最优评价图层。

4）石英斑岩接触带证据层

对岩性接触界线进行与断裂缓冲区图层相同的处理，形成接触带最优评价图层。

5）铅锌银品位证据层

各元素品位图层通过克里金插值法形成铅锌银元素品位等值线证据层，并通过缓冲区操作分析元素影响范围。

将以上各证据层转换为Grid格式文件。

5.3 模型建立

5.3.1 证据图层与矿化点的空间相关分析

研究区中已知矿体中断裂热液充填型矿占有258个单元格，隐爆角砾型矿占63个单元格，研究区面积为0.56 km^2，其$N(A)$ 为5600个单元格。

1）岩性与矿体的空间关系

基于研究区的地层地质图，在ArcGIS中提取了各不同的岩性地层单元，包括白云岩、石英斑岩和凝灰角砾岩，分别对隐爆角砾岩型矿和断裂热液充填型矿进行权重及对比值的计算，如表5-2所示。

表5-2和表5-3为研究区内两类矿体与各岩性地层单元之间定量的空间关系，从表5-2中可以明显看出，63个隐爆角砾岩型矿单元格中多达37个分布在凝灰角砾岩和白云岩中，其C值却小于0，显然对成矿贡献甚微。而石英斑岩$stud(C)$高达9.4653，表明石英斑岩与隐爆角砾岩型矿的生成强烈正相关，这也比较符合实际观测到的现象。

表5-2 不同岩性权重及对比值计算

岩性	$N(B)$	$N(B\cap D)$	W^+	$s(W^+)$	W	$s(W)$	C	$stud(C)$
岩性+隐爆角砾岩型矿								
白云岩	964	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
凝灰角砾岩	4249	37	-0.2525	0.0273	0.5450	0.0392	-0.7975	-3.0930
石英斑岩	367	26	2.0171	0.0418	-0.4687	0.0272	2.4858	9.4653
火山角砾岩	20	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
岩性+断裂热液充填型矿								
白云岩	964	32	0.1468	0.0325	0.0090	0.0064	0.1378	0.6982
凝灰角砾岩	4249	146	0.0033	0.0071	0.0262	0.0216	-0.0229	-0.1350
石英斑岩	367	80	2.0861	0.0258	-0.2376	0.0071	2.3238	12.8071
火山角砾岩	20	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

表中258个构造类矿体单元格，在三类岩体中集中分布在凝灰角砾岩中，但凝灰角砾岩C为-0.0229，呈现负相关，可知这两种岩性无益于断裂热液充填型矿的形成；白云岩与断裂热液充填型矿的相关系数虽然较低仅有0.1378，但表现了二者的正相关性，表示白云岩有成矿可能性，这一点在岩芯观察中也得到了证实，可成为下一步找矿重点；另外石英斑岩与矿体成正相关，即在岩性图层中石英斑岩为有利证据层。

2）断裂构造与矿体的空间关系

表5-3 三组断裂构造界线缓冲区权重对断裂热液充填型矿的对比值计算

范围m	$N(B)$	$N(B\cap D)$	W^+	$s(W^+)$	W	$s(W)$	C	$stud(C)$
F1+断裂热液充填型矿								
10	234	35	1.2924	0.1833	-0.1078	0.0684	1.4003	7.1573
20	376	53	1.2230	0.1482	-0.1676	0.0713	1.3906	8.4566
30	532	66	1.0759	0.1315	-0.2042	0.0736	1.2801	8.4940
40	680	74	0.9276	0.1231	-0.2176	0.0751	1.1452	7.9387
50	867	89	0.8623	0.1119	-0.2657	0.0783	1.1280	8.2579
>50	5600	258	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
F2+断裂热液充填型矿								
10	293	63	1.7355	0.1422	-0.2360	0.0730	1.9714	12.3346
20	448	84	1.5641	0.1210	-0.3233	0.0771	1.8874	13.1501
30	679	108	1.3651	0.1049	-0.4293	0.0829	1.7944	13.4170
40	830	116	1.2131	0.1001	-0.4537	0.0852	1.6668	12.6796
50	1081	132	1.0578	0.0929	-0.5211	0.0904	1.5789	12.1836
>50	5600	258	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
F3+断裂热液充填型矿								
10	190	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20	299	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
>20	5600	258	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

由表5-3可知，F1的缓冲随距离参数的增大，图层与断裂热液充填型矿的关系渐趋紧密，在距离参数为20-30m时，相关系数也达到了最大，此后随缓冲区范围增加，相关度逐渐降低，因此区距离参数为30m制作的缓冲区图层更为合理；随缓冲范围增大，F2缓冲图层与断裂热液充填型矿的关系亲密度逐渐增高，其中缓冲距离参数为10m时，C值为最大，随后又逐步回落，同时缓冲参数为30m时，$stud(C)$最大，指示距F2为30m缓冲区内图层与断裂热液充填型矿的强烈相关。而超过30m以上的距离范围内，则F2的控矿能力减弱；因此取距离参数为30m制作的缓冲区图层更为合理。数据显示F3与矿体生成无关。

表 5-4 三组断裂构造界线缓冲区权重及对隐爆角砾岩型矿的对比值计算

范围m	$N(B)$	$N(B\cap D)$	W^+	$s(W^+)$	W^-	$s(W^-)$	C	$stud(C)$
F1+隐爆角砾岩型矿								
10	234	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20	376	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30	532	1	-1.7987	1.0009	0.0848	0.1278	-1.8835	-1.8666
40	680	3	-0.9430	0.5786	0.0816	0.1299	-1.0246	-1.7278
50	867	7	-0.3349	0.3795	0.0510	0.1344	-0.3860	-0.9587
>50	5600	63	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
F2+隐爆角砾岩型矿								
10	293	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20	448	1	-1.6265	1.0011	0.0682	0.1278	-1.6947	-1.6791
30	679	13	0.5397	0.2800	-0.1030	0.1421	0.6427	2.0464
40	830	21	0.8248	0.2210	-0.2475	0.1550	1.0723	3.9722
50	1081	36	1.1078	0.1695	-0.6381	0.1930	1.7460	6.7964
>50	5600	63	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
F3+隐爆角砾岩型矿								
10	190	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20	299	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
>20	5600	63	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

由表5-4可知，F1和隐爆角砾岩型矿呈明显的负相关性，随缓冲距离参数的增大，图层与断裂热液充填型矿的负相关性渐降，也就是说隐爆角砾岩型矿的形成于F1无益；随着缓冲距离参数的增大，F2与隐爆角砾岩型矿的相关度由负相关转变为$stud(C)$达6.7964的高度相关，表示隐爆角砾岩型矿的形成受F2的影响但要与之离开一定的距离。数据显示，当缓冲距离参数为20m开始，F2表现出了对隐爆角砾岩型矿的影响，随缓冲区范围增加，当缓冲距离参数为50m时，相关度达到最大，此后相关度为0。因此取距离参数为50m制作的缓冲区图层更为合理。数据显示F3与矿体生成无关。

3）石英斑岩界线与矿体的空间关系

据1320中段石英斑岩界线图层建立面向矿化目标的缓冲区的计算结果。利用ArcGIS的缓冲分析功能，取缓冲半径间隔10m对线性图层进行缓冲操作。由计算结果表5-5可见，当缓冲区距离参数为50m时，图层与目标的相关系数C值最大为1.7412，但同时考虑到C的标准差，当缓冲区距离参数达到30m的时候$stud(C)$为最大10.4753，具有最大显著性。因此区距离参数为30m制作的缓冲区图层更为合理。

表5-5 石英斑岩界线缓冲区权重及对比值计算

范围m	$N(B)$	$N(B\cap D)$	W^+	$s(W^+)$	W	$s(W)$	C	$stud(C)$
石英斑岩界线+隐爆角砾岩型矿								
10	980	99	0.8445	0.1060	-0.3038	0.0807	1.1483	8.6190
20	1461	133	0.7293	0.0909	-0.4388	0.0908	1.1681	9.0883
30	1968	175	0.7035	0.0792	-0.7252	0.1110	1.4287	10.4753
40	2376	196	0.6214	0.0746	-0.9014	0.1282	1.5229	10.2657
50	2869	219	0.5372	0.0703	-1.2041	0.1613	1.7412	9.8966
>50	5600	258	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
石英斑岩界线+断裂热液充填型矿								
10	980	17	0.4392	0.2447	-0.1234	0.1482	0.5627	1.9671
20	1461	32	0.6771	0.1787	-0.4106	0.1803	1.0877	4.2845
30	1968	50	0.8291	0.1433	-1.1529	0.2778	1.9820	6.3403
40	2376	61	0.8398	0.1297	-2.9085	0.7073	3.7483	5.2124
>40	2869	63	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

表5-5石英斑岩界线与断裂热液充填型矿中，所有的W^+均为正值，W^-均为负值，这表明矿化与石英斑岩岩体接触界线为正相关关系，在缓冲区内断裂热液充填型矿出现的机会随缓冲区范围的增大，呈现增大再下降的过程，至缓冲距离参数达到30m时，其相关度达到最大，40m以后相关度为0。

4）断裂交叉点与矿体的空间关系

表5-6 断裂交叉点缓冲区权重及对比值计算

范围	$N(B)$	$N(B\cap D)$	W^+	$s(W^+)$	W	$s(W)$	C	$stud(C)$
断裂交叉点+断裂热液充填型矿								
10	717	95	1.1513	0.1102	-0.3354	0.0797	1.4868	10.9365
20	329	33	0.8365	0.1835	-0.0799	0.0681	0.9164	4.6811
30	363	42	0.9966	0.1641	-0.1157	0.0695	1.1123	6.2422
40	293	21	0.4691	0.2265	-0.0326	0.0665	0.5018	2.1258
50	379	23	0.2910	0.2151	-0.0244	0.0668	0.3154	1.4000
>50	5600	63	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

根据研究区资料，提取F1，F2两条断裂交汇点两个，对之进行距离参数为10

的缓冲区操作，由计算结果表5-6可见，当缓冲区距离参数为10m时，图层与目标的相关系数C值最大为1.4868，同时$stud(C)$为10.9365，表现出强烈相关度。因此取距离参数为10m制作的缓冲区图层更为合理。

3）元素与矿体的空间关系

根据研究区1320中段提供的穿脉取样化验结果和水平小钻孔取样分析结果，形成了Ag、Pb、Zn元素异常证据层。

表5-7 元素缓冲区权重对断裂热液充填型矿对比值计算

范围m	$N(B)$	$N(B\cap D)$	W^+	$s(W^+)$	W^-	$s(W^-)$	C	$stud(C)$
zn+断裂热液充填型矿								
10	880	102	0.9986	0.1053	-0.3457	0.0814	1.3443	10.0994
20	1217	133	0.9323	0.0919	-0.4978	0.0907	1.4302	11.0750
30	1547	164	0.8983	0.0826	-0.7101	0.1044	1.6083	12.0849
40	1799	189	0.8882	0.0769	-0.9602	0.1215	1.8484	12.8554
50	2120	219	0.8693	0.0714	-1.4496	0.1610	2.3189	13.1654
51	5600	258	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
pb+断裂热液充填型矿								
10	1233	144	1.0072	0.0887	-0.5888	0.0949	1.5960	12.2878
20	1763	178	0.8438	0.0790	-0.8190	0.1130	1.6628	12.0584
30	2295	205	0.7085	0.0732	-1.0863	0.1385	1.7948	11.4592
40	2671	227	0.6540	0.0694	-1.5074	0.1806	2.1613	11.1734
50	3032	240	0.5765	0.0673	-1.9231	0.2365	2.4996	10.1646
51	5600	258	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ag+断裂热液充填型矿								
10	1587	181	0.9804	0.0790	-0.9037	0.1151	1.8841	13.5003
20	1932	210	0.9263	0.0731	-1.2926	0.1453	2.2189	13.6429
30	2242	228	0.8519	0.0699	-1.6785	0.1834	2.5304	12.8934
40	2491	237	0.7780	0.0683	-1.9604	0.2190	2.7384	11.9391
50	2780	245	0.6937	0.0669	-2.3445	0.2780	3.0382	10.6258
>50	5600	258	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

由表5-7可知，Zn和断裂热液充填型矿呈明显的相关性，随缓冲距离参数的增大至50时，图层与断裂热液充填型的相关性系数最大为2.3189，Pb，Ag与Zn相似，在距离参数为50m时，相关系数为最大，但$stud(C)$在距离参数为10时表现了强烈相关性。由此可确定分别以50m，10m，10m为缓冲距离。

由表5-8可知，Zn和隐爆类矿体呈明显的相关性，随缓冲距离参数的增大至40时，图层与隐爆角砾岩型矿的相关性系数最大为2.3189，但$stud(C)$在距离参数为10时表现了强烈相关性。Pb在距离参数为50m时，相关系数为最大，但$stud(C)$在距离参数为10时表现了强烈相关性。与Pb相似，Ag和隐爆角砾岩型矿的相关性

也在距离参数为10时达到最大。由此可确定这三种元素与隐爆角砾岩型矿成矿的图层制作分别以10，20，20为缓冲距离。

表 5-8 元素缓冲区权重对隐爆角砾岩型矿的对比值计算

范围m	N(B)	N(B∩D)	W^+	$s(W^+)$	W^-	$s(W^-)$	C	stud(C)
zn+隐爆角砾岩型矿								
10	880	39	1.4050	0.1638	-0.8003	0.2046	2.2054	8.4135
20	1217	46	1.2391	0.1503	-1.0723	0.2430	2.3114	8.0893
30	1547	55	1.1755	0.1373	-1.7497	0.3539	2.9253	7.7061
40	1799	61	1.1265	0.1303	-3.0733	0.7073	4.1997	5.8395
50	2120	63	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
>50	5600	63	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
pb+隐爆角砾岩型矿								
10	1233	37	1.0003	0.1669	-0.6417	0.1967	1.6419	6.3645
20	1763	50	0.9421	0.1435	-1.2080	0.2778	2.1501	6.8765
30	2295	59	0.8412	0.1319	-2.2396	0.5003	3.0808	5.9544
40	2671	62	0.7365	0.1285	-3.5060	1.0002	4.2425	4.2072
50	3032	63	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
>50	5600	63	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ag+隐爆角砾岩型矿								
10	1587	40	0.8359	0.0257	-0.6800	0.0437	1.5158	5.7547
20	1932	50	0.8549	0.0205	-1.1628	0.0772	2.0178	6.4544
30	2242	55	0.7968	0.0186	-1.5612	0.1253	2.3580	6.2151
40	2491	60	0.7756	0.0171	-2.4664	0.3337	3.2420	5.4742
>50	5600	63	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

5.3.2 确定成矿预测专题证据层及权值计算

综上所述，提取各控矿因素与成矿相关度最高的图层为成矿预测专题证据层，并确定各证据层间的相互独立性。最终选择进入证据权成矿预测模型的专题证据层如下表：

表 5-9 最终有利证据层专题

证据图层	数据格式	缓冲距离（m）	
		断裂热液型	隐爆角砾型
Ag 元素	Grid	20	20
Pb 元素	Grid	10	20
Zn 元素	Grid	50	10
F1	Grid	30	无
F2	Grid	30	50
石英斑岩界限	Grid	30	20
岩性	Grid	无	无
断裂交叉点	Grid	10	无

由于地质要素间往往具有一定相关性，可能会影响到成矿有利度的计算出现偏差，因此证据权模型要求各证据图层间满足条件独立性检验，表格中的数值表示证据因子关于矿点间的条件独立检验概率值，数值越小，表示两相交专题间相对于矿点分布的条件独立性越好。

表 5-10 有利证据层间独立性检验计算结果

证据层	F1	F2	F3	Pb 异常	Ag 异常	Zn 异常	断裂交叉点	斑岩界线
岩性	0.00	0.00	0.00	0.57	0.70	0.00	0.00	0.51
F1		0.00	0.00	0.06	0.09	0.18	0.00	0.44
F2			0.00	0.08	0.00	0.40	0.00	0.15
F3				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb 异常					0.00	0.00	0.00	0.01
Ag 异常						0.00	0.00	0.00
Zn 异常							0.00	0.00
断裂交叉点								0.16

结果表明在显著性水平为0.25的情况下，可知岩性证据层与Pb，Ag，石英斑岩界限的相关性偏大，应剔除。其余7个证据层之间的相关性都很小，满足条件独立性，均可以参与后验概率计算。

证据权成矿预测模型中所选择的专题证据层基本吻合区域地质事实，能够客观反映区域矿体控矿因素，可以作为有利成矿证据层进行成矿预测模拟。

5.3.3 成矿预测模拟

以优选的成矿有利证据图层为依据，进行矿区各预测单元的成矿有利度（成矿后验概率值）计算，并对计算结果进行分析。

图5-1，5-2分别为区内断裂热液充填型矿和隐爆角砾岩型矿体的后验概率图。实际矿体图与概率图的叠加比较结果显示实际矿体与后验概率高值区相吻合。以后验概率为标准进行后验概率等级划分， 后验概率大于0.75为A级区，是成矿有利的高概率区；后验概率为0.55-0.75的区域为B级区；后验概率在0.3-0.55的区域为C级区，显然由A级-C级，成矿可能性下降。图5-1显示了断裂热液充填型矿的后验概率特点：

1）断裂热液充填型矿的后验概率沿F2分布，有三个相间排列的A级区，现有矿体均分布在A级区内，A级区的分布范围明显大于现有矿体分布区，因此后验概率高值对矿体的指示作用有效。由于该区的分布与现有矿体分布为重叠关系，而且区内并无独立于现有矿体的新区存在，说明在矿区现有范围内发现新的断裂热液充填型矿体的概率较小。

2）由于区内NW端与SE端尚无数据，因此未能对其的后验概率进行计算，但根据A级区沿F2断裂有近等距分布的特点，认为NW端和SE端是寻找断裂热液型矿

的可能区域。

3）NW端（0-2号勘探线）的A级区连续性最好，规模大最大；中部区（4-6号勘探线）次之；SE端（7-12号勘探线）区连续性相对较差。由此可推断在现在坑道控制水平，沿F2走向，由NW端至SE端，成矿呈递减态势；但SE端存在的高成矿概率可能指示其深部仍是成矿的有利地区，而现有钻孔或是终孔位置较浅，或是终孔于距石英斑岩体界线的30m的凝灰角砾岩中，该位置的角砾岩已显示了少量星点状铅锌矿化，说明其深部仍存在成矿的可能。

4）区内C1，C2（图5.1）成矿远景区不与现有矿体重叠，并独立于A级区及B级区。C2区分布于6号勘探线，为等轴状，C4区与沿F2分布的B区相连，它们都是成矿有利区，这两个区已为工程所控制，C2区（1100米以下）和C4区深部（900m）均已见矿，该事实表明对成矿概率相对较低的区仍具有较好的成矿指示作用。

C1区分布于2号与4号勘探线之间，并处于白云岩与凝灰角砾岩的接触带，二者为断层（F1）接触关系，断层下盘为白云岩，上盘为凝灰角砾岩，凝灰角砾岩硅化蚀变呈深灰色，在F1断层下盘出现深灰色硅化角砾石英斑岩小岩枝（隐爆角砾岩），与白云岩呈侵入接触，白云岩褪色或重结晶，反映该处存在热液及蚀变作用的影响，上盘的凝灰角砾岩中也有方铅、闪锌矿化，认为该处是成矿有利区。

C3区形态为港湾状，其N部与4号矿体重叠，但其S部接近F2的区段的走向与F2呈锐角相交，走向为NWW，该后概率区可能与F2断裂的次级裂隙有关，结合2号勘探线以北，1号矿体下盘，出现走向为NNW断裂热液充填型矿体的事实，认为该处应是断裂热液充填型矿体的可能存在区。

C2及C4区已见矿的事实说明证据权预测的有效性，因此认为C1及C3区是成矿有利区，尤其这两区深部赋矿可能性极高。

5）6号矿体分布区的后验概率图显示为一系列分散排列的团块，未见高概率区的连续线性展布，因此认为6号矿体的连续性还有待研究，本文认为6号矿体可能为若干矿体组成。

由图5.2对隐爆角砾岩型矿体的后概率特点分析如下：

1）隐爆角砾岩型矿的后验概率高值区呈孤立不连续状间隔地分布在F2断裂两侧，其形态为近短轴状；

2）图5.2显示，沿F2两侧间隔分布八个A级区，现有矿体均分布在该区内，其中A0，A1，A5，A6区分别对应新1号矿体，4号矿体，2号矿体，12号矿体，A3区为新发现的新2号矿体位置，该现象很好地说明后验概率高值区对矿体有良好的指示作用。所形成的后验概率图有四个新的后验概率高值区，分别为A2，A4，A7，A8，这四个位置处均分布有石英斑岩，由此可以推断四处是寻找新矿体的最为有利部位，结合1320水平中段面图，发现A4，A7，A8预测成矿高概率区基本分

两侧，其形态为近短轴状；

2）图5.2显示，沿F2两侧间隔分布八个A级区，现有矿体均分布在该区内，其中A0，A1，A5，A6区分别对应新1号矿体，4号矿体，2号矿体，12号矿体，A3区为新发现的新2号矿体位置，该现象很好地说明后验概率高值区对矿体有良好的指示作用。所形成的后验概率图有四个新的后验概率高值区，分别为A2，A4，A7，A8这四个位置处均分布有石英斑岩，由此可以推断四处是寻找新矿体的最为有利部位，结合1320水平中段面图，发现A4，A7，A8预测成矿高概率区基本分布在F2上盘的石英斑岩的SE边沿位置，A2则在F2下盘位置。

观察发现，A4所处位置恰为8号矿体的膨大部位，或认为4号勘探线剖面附近的8号矿体为隐爆角砾岩型矿体，但由于缺乏ZK405，ZK404的钻孔资料，因此无法准确读取该处的地质情况，但通过4号勘探线线剖面图，可知该处膨大处于两块石英斑岩边沿，为隐爆类矿体的最佳赋存地质条件；

A7范围内仅有小钻DK7071控制，但其Ag，Pb，Zn化验品位分别达到了96.75（g/t），0.72（%），2.09（%）矿化现象明显，且其处在隐爆类型矿体发育的绝佳位置；

通过9号勘探线剖面图，可知A8范围内有CM901控制，其Ag，Pb，Zn化验品位分别达到了885.22（g/t），1.29（%），0.58（%），矿化现象十分明显，且其处在隐爆类型矿体发育的绝佳位置。A2与4号矿体相连甚密，被沿F2下盘分布的石英斑岩间隔，分部于该石英斑岩的边缘位置。

3）由于区内NW端与SE端尚无数据，因此未能对其的后验概率进行计算，但根据A级区总体沿F2断裂近等距分布的特点，沿F2断裂NW端和SE端仍应有隐爆角砾岩型矿存在的可能。

4)SE端到NW端隐爆角砾岩型矿体成矿高概率区彼此间的间隔距离逐渐增大，独立性也增强，且规模也有递增趋向，这种格局指示NW方向是发现新的隐爆角砾岩型矿体的有利区域；而SE方向的F2断层两侧，也具有发现新的隐爆角砾岩型矿体的潜力，但其赋存深度明显大于NW端。

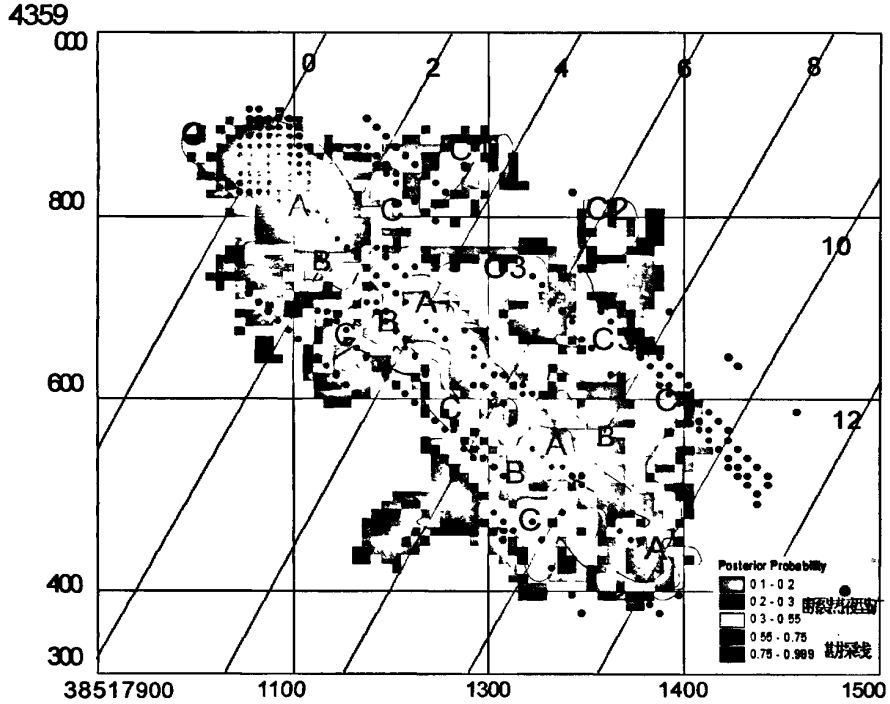


图1 断裂热液型矿后验概率图

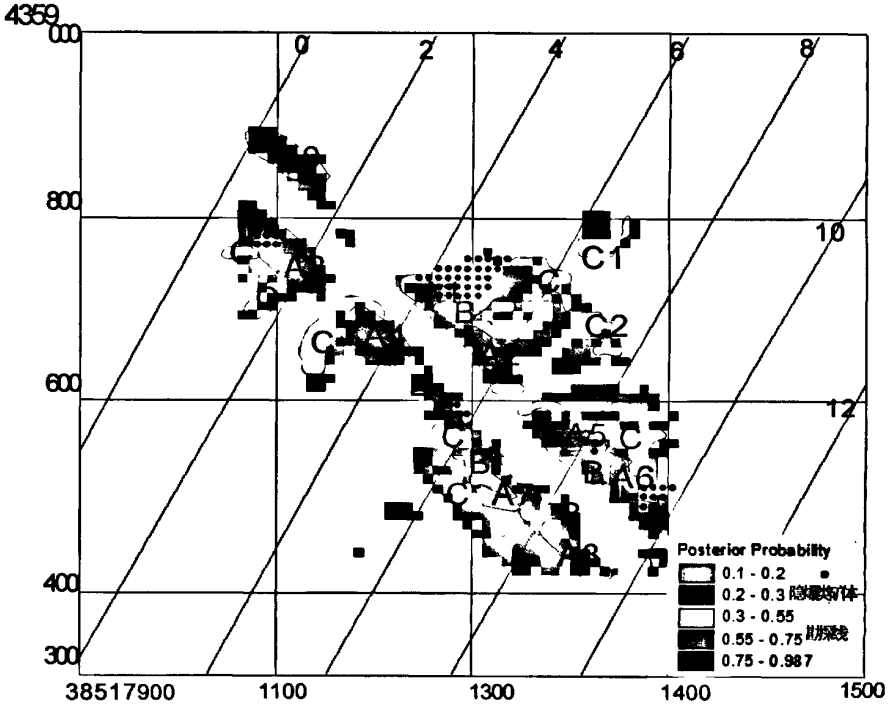


图2 隐爆型矿后验概率图

图 5-1，5-2 支家地矿区后验概率图

第6章 成矿预测

基于成矿元素空间分布、三维模型及地质体空间特征关系的分析，总结了支家地矿区成矿有利的找矿标志，并对成矿有望区进行了探讨。

6.1 找矿标志

基于地质分析、前人的工作，总结出支家地矿区找矿标志

1） 石英斑岩岩体与凝灰角砾岩的接触带：

石英斑岩岩体与凝灰角砾岩的接触带是隐爆角砾岩型矿体分布的有利空间，据表5-5分析表明，石英斑岩岩体与凝灰角砾岩的接触带附近30m到50m范围内与隐爆角砾岩型矿体相关度最高，其后表现为控矿弱化现象。

2）石英斑岩岩体凹陷处：

5.3.1中对于岩体和成矿有力度值对比得出，支家地矿区三种岩体中唯有石英斑岩与成矿相关度最大，同时参考4.4.2中矿体与控矿因素的空间关系分析认为：矿体产出部位一般在岩体的边缘、顶部或邻近的构造薄弱带，尤其是小岩枝或岩体凹陷处更是隐爆角砾岩型矿体分布的有利部位。

3）F2断层产状变化处：

F2断裂形态为波状，其走向发生变化的地段品位增高，研究发现F2这种走向的变化具规律性，因此走向发生变的部位为成矿有利空间。

4）F2断层控矿空间

随着与F2距离的增大，F2对于断裂热液充填型矿体的控矿力弱化。

隐爆类矿体的形成受F2的影响但要与之离开一定的距离。据表5-4，当缓冲距离参数为20m到50m范围内，F2表现出了与隐爆类矿体的高相关度。

5）成矿元素化学异常：

Pb、Zn元素分布格局基本一致，此二者的元素高含量的重叠区，呈小规模带状、面状分布，且Pb，Zn与隐爆角砾岩型矿体相关性高，为寻找隐爆角砾岩型矿的有利地段。

6.2 矿区预测区

综合本文总结的找矿标志，结合地质资料，对以下成矿有望区进行了讨论：

1）矿区深部成矿预测

矿区NE深部：根据地质统计结果，矿区可能存在多个矿化标高，矿区NE深部可能存在另一标高成矿空间，应有规模较大的隐伏矿体存在。Pb，Zn元素主

要富集分布在F2的下盘， Pb，Zn元素富集区从SW向NE方向表现出的侧伏趋向（据3.3），可以认为在矿区的NE深部还存在矿体的赋存区。

矿区N端深部：对6号矿体为热液充填型矿体和隐爆角砾岩型矿体组成的重新划分，将隐爆角砾岩型矿体分布的位置向北推移，据图1-3北部石英斑岩向深部出现较多的岩枝，而石英斑岩岩枝与隐爆角砾岩型矿体有指向关系，这一发现提供了北端深部（1180水平面以下）有可能发现隐爆角砾岩型矿体的参考信息。

2）矿区1320中段面成矿预测

通过空间叠加后形成支家地1320中段成矿后概率综合图（图6.1），划分A，B，C三级成矿有利区，可知：

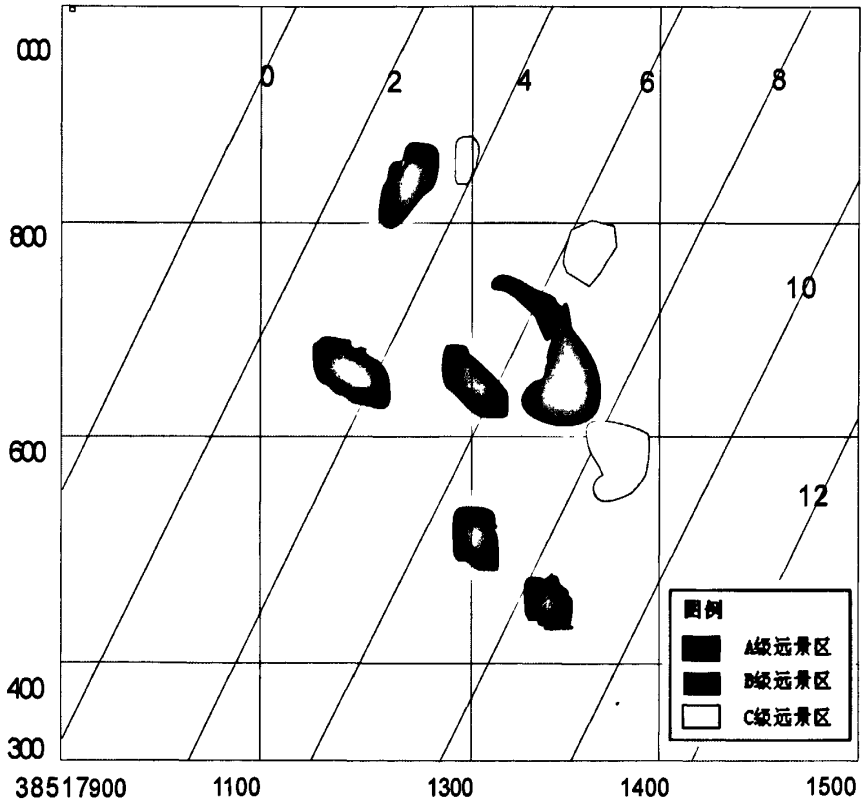


图6-1成矿预测区内后验概率图

A级区4处，它们是隐爆角砾岩型矿体的有利分布区域：间隔地分布在F2附近，与之相隔一定距离，且处在石英斑岩小岩体的边缘或凹陷位置处，同时也是Pb，Zn元素高含量分布区，因此有望在A级区找到若干柱状隐爆角砾岩型矿体；

B级区有两个，分布在3线附近、5线到8线间，应为断裂热液型矿体的有望区，其位于F2下盘处，处在F2的控矿范围内，同时也处在两条断裂交汇点影响范围内，该区的Ag元素含量高，认为该处潜在断裂热液型薄板状矿体；

C级区有三个，分布在4线、6线、9线，则是隐爆型角砾型矿体的有望区，这

第7章 结论

本论文选题结合导师“山西省灵丘县支家地铅锌银矿成矿规律及预测” 专题研究项目（国土资发[2008]14号，危矿办技发[2008]2号文件），基于地质背景、地球化学、控矿构造系统事实，借用地统计学、三维可视化、证据权模型理论等方法提取支家地成矿信息，探索支家地铅锌银矿区成矿潜力以及矿体定位预测，取得以下主要成果及认识：

1) 根据现有地质资料，分析归纳了研究区主要成矿信息（岩性组合、断裂、岩石类型等）。

2) 地统计学模块的应用很好地反映了支家地矿区Ag、Pb、Zn元素的局部变化特征及特定方向的变化特征，对研究区成矿区域进行了宏观把握。

3) 研究了三维空间数据模型在地质三维建模中的应用，采用Surpac对支家地矿体、地层和断层进行了三维实体建模，并在三维可视化环境下，分析了支家地矿体的定位规律，获得了多个控矿地质因素变量。

4) 证明了证据权模型法在矿山成矿预测工作中的可行性和适用性。定量计算了各证据层对矿化影响的对比值，定量分析了各证据与成矿有利度，直观地把握矿体空间分布规律，对矿山成矿预测方法和手段进行有效探索。

5) 基于成矿元素空间分布、三维模型及地质体空间特征关系的分析，对支家地矿区成矿有望区进行了探讨。

6) 下一步工作建议

结合支家地铅锌银矿床三维实体模型，构建该区 Ag、Pb、Zn 的品位模型，即构建三维成矿元素模型，更精确地反映区内矿化特征和趋势；

支家地铅锌银矿山的数字化的资料虽然多，但不系统，建议形成一个完备合理的数据库，以更好地服务于支家地矿区的发展，更有利于矿山的建设。

参考文献

[1] 张北廷，李占新，刘凤歧，马文忠．山西灵丘支家地银矿地质特征[J]．华北地质矿产杂志，1995，10(2)：257-268

[2] 张连营，李兆龙，樊秉鸿，唐耀林，马丽华．太白维山中生代火山岩特征及其与成矿的关系[J]．贵金属地质，1997，6（2）：101-113

[3] 高昊．山西省灵丘小青沟—流砂沟银锰多金属矿床特征及矿床成因研究[J]．地质找矿论丛，2004，19(2)：87-91

[4] 薛顺荣，胡光道，丁俊．成矿预测研究现状及发展趋势[J]．云南地质，2001，20(4)：411-416

[5] Cox D．P．The Development and use of mineral deposit models in the united statesgeological survey．geological association of Canada special page[J]，2001，S：1-15

[6] Cox D．P．，Singer D．A．Mineral Deposit Models[J].U S Geological Surcey Bulletion1693，1986，379，143-161

[7] Hodgson C．J．uses(and abuses)of ore deposit models in mineral exploration geosciences Canada[M]．1990，17

[8] K1aus J Schulz，Joseph A Briskey．A cooperative International project to assess the world undiscovered non—fuel mineral resources．Status and schedule of activities．workshop on assessment undiscovered mineral resources[P]，Beijing，china，2002，1-6

[9] 赵鹏大，孟宪国．地质异常与矿产预测[J]．地球科学．1993．18(I)：39-47

[10] 赵鹏大，陈建平，张寿庭．“三联式”成矿预测新进展[J]．地学前缘，2003，10(2)：455-463

[11] 赵鹏大，胡旺亮．李紫金．矿床统计预测[M]．北京：地质出版社．1983

[12] 朱裕生，梅燕雄．成矿模式研究的几个问题[J]．地球学报，1995

[13] 陈永清，夏庆霖．应用地质异常单元圈定矿产资源体潜在地段[J]．地球科学．1999．24(5)：459-463

[14] 曹瑜．圈定“5P”找矿地段的GIS成矿预测空间模型及其应用[J]．地球科学．1999，24(4)：409-412

[15] 王世称，陈永清．金矿综合信息成矿系列预测理论体系[J]．黄金地质．1995．1(1)：1-7

[16] 张国林，蔡宏渊．锡多金属矿床类型、成矿系列及成矿模式[J]．矿产与地质1991，(23)：229—238

[17] 邓宝兰 新疆阿尔泰成矿区大型、超大型金矿预测[D]．北京：中国地质大学，

2005
[18] 张志. 广西佛子冲铅锌矿深部找矿预测研究[D]. 北京：中国地质大学，2006
[19] 赵加凡，陈小宏. 基于灰关联分析与K—L变换的双重属性优化方法[J]. 石油地球物理勘探，2004，39(6)：661-665
[20] 邢学文，胡光道. 模糊逻辑法在秦岭一松潘成矿区金矿潜力预测中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2006，36(2)：298-304
[21] Raper J F. Key 3D modelling concepts for geoscientific analysis. In：Turner A K，eds. Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems，NATO ASI Series 354. Dordrecht：Kluwer AcademicPublishers，1992. 215-232
[22] Brunet P.3-D structures for the encoding of geometry andinternal properties. In：Turner AK，eds. Three
[23] Houlding S W. The application of new 3-D computer modelingtechniques to mining. In：Turner A K，eds. Three Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems，NATO ASI Series 354. Dordrecht：Kluwer Academic Publishers，1992. 303-325
[24] Turner A K. Applications of three-dimensional geoscientific mapping and modeling systems to hydrogeological studie. In：Turner AK，eds. Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems，NATO ASI Series 354. Dordrecht：Kluwer Academic Publishers，1992. 327-364
[25] Houlding S W. 3D geoscience modeling-computer techniques for geological characterization. Berlin：Springer-Verlag，1994. 1-309(40-42，75-77)
[26] Dimensional Modeling withGeoscientific Information Systems，NATO ASI Series 354. Dordrecht：Kluwer Academic Publishers，1992. 159-188
[27] Lynx Mining Systems. MicroLYNX，http：//www. lynxmining. com. au
[28] Surpac国际软件公司. Surpac Vision软件使用手册. 2004
[29] SurpacMinexGroup.SurpacVision.http://www.surpac.com/products /vision/index
[30] Micromine Pty Ltd. MICROMINE. http://www. microminechina. com/cpjs. htm
[31] Dynamic Graphics Inc.EarthVision.http://www.dgi. com/earthvision/index.shtml
[32] 程朋根. 地矿三维空间数据模型及相关算法研究：[D]. 武汉：武汉大学，2005
[33] 黎华. 地形与地质体三维可视化的研究与应用：[D]. 广州：中国科学院广州地球化学研究所，2006
[34] 张新宇. 地学空间三维可视化储量计算辅助分析系统关键技术的研究：[博士学位论文]. 吉林：吉林大学，2006
[35] 周杰文. 三维城市地质信息可视化研究：[D]. 吉林：华东师范大学，2006
[36] 史文中. 空间数据与空间分析不确定性原理[M]. 北京：科学出版社，2005

[37] 武强，徐华．三维地质建模与可视化方法研究［J］．中国科学((D辑，地球科学)，2004，34(2)：54-60

[38] Kavouras M, S Masry. An information system for geosciences:design considerations[J]. Proceedings of 8th International Symposium on Computer Assisted Cartography,Baltimore, MD，1987：336-345

[39]Bak P R G, Mill A J B. 3-D representation in a geoscientific resources management system for the minerals industry[J]. Three Dimensional Applications in GIS.1989:155-182.

[40]Breunig M, Bode T, Cremers A B.Implementation of elementary geometric database operations of a 3-D-GIS[J].Advances in GIS Research:Proceedings of the 6th International Symposium on Spatial Data Handling,1994:604-617.

[41]Houlding S W. 3D geoscience modeling - computer techniques for geological characterization. Berlin: Springer-Verlag, 1994. 1-309（40-42，75-77）.

[42]Turner A K. Preface. In:Turner A K, eds. Three-DimensionalModeling with Geoscientific Information Systems, NATO ASI Series 354.Dordrecht:Kluwer Academic Publishers, 1992,3-5.

[43]Turner A K. Achievements of the workshop. In:Turner A K, eds.Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems, NATO ASI Series 354. Dordrecht:Kluwer Academic Publishers, 1992,7-10.

[44] Rhind D W. Spatial data handling in the geoscience. In:TurnerA K, eds. Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems, NATO ASI Series 354. Dordrecht:Kluwer Academic Publishers,1992,13-27.

[45] 曹代勇，李青元，朱小弟等．地质构造三维可视化模型探讨．地质与勘探．2001， 37 (4)：60-62

[46] 吴健生．地质体三维可视化及空间数据探索：[D]．北京：中国科学院地理科学与资源研究所，2001

[47] 陈述彭，鲁学军，周成虎．地理信息系统导论[M]．科学出版社，1999

[48] 曾新平，吴健生，杨自安，等．三维GIS环境下的地质体可视化和特征分析[J]．地质与勘探，2005，41(1)：72-76

[49] 程朋根，龚健雅，史文中等．基于似三棱柱体的地质体三维建模与应用研究．武汉大学学报(信息科学版)，2004，29 (7)：602-607

[50] 胡金星，吴立新，高卫贞等．三维地学模拟体视化技术的应用研究．煤炭学报，1999， 24 (4)：345-349

[51] 吴立新，张瑞欣等．三维地学模拟与虚拟矿山系统．测绘学报，2002，31(1)：28-33．

[52] 陈佩佩，叶勇，张守仁．矿山工程软件Surpac Vision在煤矿中的应用．煤炭科学技术，2002， 30 (3)：4-6

[53] 李海华，张瑞新．应用Surpac软件进行露天矿采矿工程的可视化．中国矿业，2004， 13 (1)：64-65， 72

[54] 陈爱兵，秦德先，张学书等．基于MICROMINE矿床三维立体模型的应用．地质与勘探．2004， 40 (5)：77-80

[55] 曾新平，吴健生，杨自安，等．三维 GIS 环境下的地质体可视化和特征分析[J]．地质与勘探，2005，41(1)：72-76

[56] 王纯祥，白世伟，贺怀建．三维地层可视化中地质建模研究[J]．岩石力学与工程学报，2003，22(10)：1722-1726

[57] 戴塔根，毛先成．论地质体几何造型．中南工业大学学报，1997， 28 (3)：205-208．

[58] 毛先成，戴塔根．地质体几何造型应用．中南工业大学学报，1997， 28 (3)：209-211

[59] 毛先成．三维数字矿床与隐伏矿体立体定量预测研究：[D]．长沙：中南大学，2006

[60] LEMON A M. JONES N L. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections[J]. Computers& Geosciences, 2003, 29(3): 547 - 555.

[61] Marcos Avilés, Francisco Morán,Narciso García. Progressive Lower Trees of Wavelet Coefficients:Efficient Spatial and SNR Scalable Coding of 3D Models.Lecture Notes in Computèr Science. 2005，3767: 61-72.

[62] Daniel F.Huber,Nicolas Vandapel.Automatic 3D Underground Mine Mapping.Springer Tracts in Advanced Robotics.2006,497-506.

[63] Agterberg F P,Cheng Q M.Conditional independence test for weights-of-evidence modeling[J].Natural Resources Research.2002,11(4)：249-255

[64] Bonham-Carter G F,Agterberg F P. Wright D.F. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.1988,54(11):1585-1592

[65] Bonham-Carter G F.Geographic Information Systems for Geoscientists：Modelling with GIS[M]. New York：Pergamon，1994：302-329

[66] Carranza E J M. Weights of evidence modeling of mineral potential A case study using small number of prospects， Abra， Philippines[J]．Natural Resources Research． 2004，13(3)：173-187

[67] 王欣．基于GIS的证据权模型在秦岭～松潘金矿潜力预测中的应用[J]．物探化探计算技术． 2007，29(4)：350-351

[68] 李随民，姚书振，周宗桂，郝华金．基于ARCVIEW证据权重法的成矿远景

区预测-以山西旬北铅锌矿富集区为例[J]. 地质找矿论丛. 2007，22(3)：180-183

[69] Gary L. Raines，Graeme F. Bonham-Carter，Laura Kemp. Predictive Probabilistic Modeling[J]. ArcUser. April-June2000： 45-48

[70] Frederik P， Agterberg， Graeme F. Bonham-Carter. Logistic regressionand weights of evidence in mineral exploration[M]. Procedings APCOM Symposium，1999

[71] Boleneus D E， Raines G L， Causey J D，et al. Assessment method for epithermal gold deposits in northeast Washingtong State using weights-of-evidence GIS modeling[M]. U. S. GEOLOGICAL SURVEY， 2001

[72] 肖克炎，张晓华等. 成矿预测中证据权重法与信息量法及其比较[J]. 物探化探计算技术，1999，(3)

[73] 严明疆，帕拉提阿不都卡迪尔. 证据权法在成矿预测中的应用[J]. 新疆地质，2003，21(4)：491-492

[74] 范永香，阳正熙. 成矿规律与成矿预测[M]. 徐州：中国矿业大学出版社，2003

[75] 张晓军，张钧，秦举礼，张建龙. 川西北金矿的证据权模型及其预测应用[J]. 高校地质学报. 2000，6(4)：555-559

[76] 王欣. 基于GIS的证据权模型在秦岭～松潘金矿潜力预测中的应用[J]. 物探化探计算技术. 2007，29(4)：350-351

[77] 李随民，姚书振，周宗桂，郝华金. 基于ARCVIEW证据权重法的成矿远景区预测-以山西旬北铅锌矿富集区为例[J]. 地质找矿论丛. 2007， 22(3)：180-183

[78] 严冰，阳正熙，王小春. 证据权法在四川宁南地区铅锌成矿预测中的应用[J]. 世界地质. 2005， 24(3)：254-258

[79] G. Matheron. Principles of Geostatistics[J]. Economic Geology，1963. 58：1246-1266

[80] 毛竹，张世熔，李婷，黄双双，陈红琳. 铅锌矿区土壤重金属空间变异及其污染风险评价-以四川汉源富泉铅锌矿山为例[J]. 农业环境科学学报. 2007，26(2)：617-621

[81] 白晓宇，袁峰，李湘凌，周涛发，张鑫等. 铜陵矿区土壤重金属元素的空间变异及污染分析[J]. 地学前沿. 2008，15(5)：257-262

[82] 崔致远，葛淼，刘亚凤等. 基于趋势面的老年女性血红蛋白参考值地理分布规律[J]. 中国老年学杂志. 2009，29(6)：1396-1399

[83] 杨忠华，刘方，赵泽英，冯廷玺. 基于GIS和地统计学的农田土壤养分空间变异性研究[J]. 贵州农业科学2009. 37(9)：120～123

[84] 黄勇，郭庆荣，任海， 万洪富. 地统计学在土壤重金属研究中的应用及展

望[J]. 生态环境. 2004, 13(4): 681-684
[85] 李瑞萍, 王安健, 曹殿华等. 云南兰坪金顶铅锌矿区土壤中Pb分布特征. 地球学报. 2009, 30(1): 73-77
[86] 李公时, 谢国柱. 数学地质教程[M]. 中南工业大学出版社, 1989
[87] 秦涛. Geostatistics Analyst中空间内插方法的介绍[J]. 2005, 27(4): 236-238
[88] 张启厚, 顾尚义, 毛健全. 贵州水城青山铅锌矿床地球化学研究[J]. 地质地球化学. 1999, 27 (1): 15-20
[89] 苏昌学, 燕永锋, 李石磊, 宁选凤. 变异函数在兰坪铅锌矿北厂矿段中的应用[J]. 新疆地质. 2009, 27(2): 184-186
[90] 杨晓勇, 王奎仁, 孙幕蓉. 安徽沙溪斑岩铜矿床矿体空间分布的趋势面分析及其与控矿构造的关系[J]. 高校地质学报. 1996, 2(3): 274-279
[91] 刘红涛, 翟明国 , 刘建明等, 华北克拉通北缘中生代花岗岩: 从碰撞后到非造山, 岩石学报, 2002, (4): 433-448
[92] 陈毓川, 中国主要成矿区带矿产资源远景评价, [M]. 北京: 地质出版社, 1999, 1-536
[93] 陈昌勇, 华北地块北缘金、多金属成矿地质背景, 辽宁地质, 1998, (4): 241~249
[94] 毛德宝, 钟长汀, 陈志宏, 胡小蝶, 华北地块北缘中段铅锌银矿床成矿作用讨论, 2002, 25 (2): 105-112
[95] 毛景文, 王志良, 中国东部大规模成矿时限及其动力学背景的初步探讨, 矿床地质, 2000, 19 (4): 289-296
[96] 毛景文, 张作衡, 王义天, Jia Yiefei, R. Kerrich, 华北克拉通周缘中生代造山型金矿床的氮同位
[97] 王钟灵, 吴霖生, 姜妍妍. 如何选用格鲁布斯检验法的临界值[J]. 滁州师专学报. 2002, 4(1): 80-81
[98] 黄继, 许模. SPSS与Excel在表征水环境背景特征值贞德联合应用[J]. 环境科学导刊. 2008, 27(5): 79-81

致谢

回首在中南大学度过的七年时光，在这里我度过了人生最宝贵的青春岁月，从青涩懵懂中蜕变成熟，我增长的不只是年龄和知识，更是对为人之道的理解。感谢中南大学带给我的一切！

过去的的三年研究生生活是我人生中极为重要的一个阶段，在这里我的家人，老师，同学和朋友都给予了我莫大的支持和帮助，值此毕业之际，我谨向他们表示最诚挚的谢意。

感谢我的导师吴堑虹教授，她严谨细致的研学态度，独到发散的思维方式，给了我很大的影响和启发。自我跨专业学习地质科学以来，吴老师的渊博和耐心，带我融入了这个专业领域，并提供给我一个全新的地质思维和观察视角。论文从选题，研究思路和方法的确定，论文撰写直至最终定稿都倾注了吴老师大量的心血和精力。在此，对导师多年来的培养和关怀表示衷心的感谢和崇高的敬意。

在论文野外考察阶段，得到了山西大同晋银矿业有限责任公司领导以及采厂工作人员的大力支持和帮助，在此一并向他们表示感谢！

感谢中南大学地学与环境工程学院的所有老师，是他们多年来的教导和培养给了我专业知识和学科思维，是他们让我懂得一个地学人的骄傲与尊严。

感谢同门覃娴瑟，姜健几年来对我的关心和帮助，感谢地学楼418的师弟师妹刘蓉秀，庞慧，杨丽，易洪波，蒋春明，吴伟，论文撰写期间他们给予了我极大的帮助，真心的祝愿他们前程似锦，学业有成！

最后我要特别感谢父母家人在学业和生活上对我的支持和鼓励，你们是我坚持的最好动力！

攻读学位期间的主要研究成果

参与的科研项目：

2008.2-至今国家自然科学基金项目：山西支家地危机矿山接替项目
2008.6-2009.1 参与广西岩溶堆积型铝土矿矿床研究工作
2007.12-2008.1 参与长株潭湘江水环境可承载力调查报告编写工作

发表的学术论文：

[1] 孟玉婷，吴堑虹，高海燕. 证据权法在成熟矿区成矿远景预测的尝试. 南方金属： 2010 年第四期