1735132

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 山西省灵丘县支家地铅锌银矿地质地球化学特征及成因研究

学 科、专 业 国土资源信息工程

研究生姓名 覃娴瑟

导师姓名及专业技术职称 吴堑虹 教授

Y1718759

分类号 VDC_____ 密级_____

硕士学位论文

山西省灵丘县支家地铅锌银矿地质地球化学特征及成因研究

The geological-geochemical characteristics and metallogeny of Zhijiadi Pb-Zn-Ag deposit , Lingqiu, Shanxi

作 者 姓 名： 覃娴瑟
学 科 专 业： 国土资源与信息工程
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 [illegible]

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：覃娴瑟　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：覃娴瑟　导师签名 吴[illegible]　日期：2010年5月25日

摘 要

基于全国危机矿山接替资源找矿项目管理办公室 2008 年批准立项的“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，本文对支家地铅锌银矿开展了矿床宏观地质特征、显微特征、地球化学（稀土元素、微量元素、稳定同位素）特征研究，对支家地矿的断裂热液充填型和隐爆角砾岩型矿体进行了研究和对比，探讨了该矿的成矿物质来源和成因，为进一步认识浅成热液多金属矿床的成矿规律及建立矿床成矿模型提供了有益的实例。

主要取得的成果和认识如下：

（1）对支家地铅锌银矿区进行了野外调查，通过不同中段及钻孔所揭露的地质现象，开展了矿床宏观特征比较，划分出断裂热液充填型、隐爆角砾岩型两种主要矿体类型，比较了两类矿体的形态及空间分布特点。

（2）对两类矿体的微观特征、地球化学特征进行了比较，通过显微岩石学分析及 X-射线衍射分析，发现两类矿体在矿石矿物组成及结构构造等方面存在明显区别，进一步证实了二者分类的正确。

（3）发现矿区存在不同期次的矿化。利用 ICP-MS、电子探针及扫描电镜能谱仪进行不同期次硫化物主要元素含量的原位分析，既从微观角度证实了二者的差别，也在该矿第一次提出了多期次成矿的认识，为扩大矿山资源提供了有效的理论依据。

（4）尝试性利用隐爆角砾岩胶结物中的单颗粒锆石进行 U-Pb 法定年，确定了其成矿时代（129~144Ma）。

（5）对成矿母岩开展了地球化学研究，石英斑岩的主量元素、稀土元素和微量元素分析结果显示其主要特征与 S 型花岗岩相似；Pb 同位素、$\delta^{18}O$、δD 及 Lu-Hf 同位素分析结果表明该区岩浆岩的主要源区为下地壳，且混有幔源物质，为成矿模型的建立提供了依据。

关键词：支家地铅锌银矿，矿体类型，成矿时代，成矿物质来源，矿床成因

ABSTRACT

Based on the project of "Metallogenic regularity and prediction of Zhijiadi Pb-Zn-Ag deposit in Lingqiu, Shanxi" that National crisismine exploration project management office approved in 2008. As in-depth understanding of epithermal polymetallic mineralization and the establishment of deposit model, this thesis researched on geological characteristics, micro characteristics, and geochemical characteristics (REE, trace elements and stable isotopes), contrasted Faulted hydrothermal filling-type and Cryptoexplosive breccia-type ore-bodies, and studied the sources and metallogeny of Zhijiadi Pb-Zn-Ag deposit.

The major achievements as follows:

(1)Carried out field investigation of Zhijiadi Pb-Zn-Ag deposit, by observing the geological phenomena of sublevel and drilling, divided two main ore-body types: Faulted hydrothermal filling-type and Cryptoexplosive breccia-type ore-bodies, compared their shape and spatial distribution.

(2)Microscopic characteristics and geochemical characteristics of the two types of ore-body were compared by analyzing rock microstructure and X-ray diffraction, it showed that composition, texture and structure of the two ore-bodies of were significantly different. It confirmed the correct classification from the micro point of view between the two.

(3) Carried out element content analysis of different sulfide by ICP-MS, Microscope, SEM and EDS, the results showed that there were at least two periods of mineralization in this district, provided an effective theory for the expansion of mine.

(4)Attempt of using U-Pb zircon ages in the cryptoexplosive breccia cement, confirmed its metallogenic epoch (129~144Ma).

(5)Geochemistry study was carried out on ore-forming rock, the major elements, REE and trace element analysis of quartz porphyry showed that the main features were similar with the S-type granite. Pb isotopes, $\delta^{18}O$, δD, and Lu-Hf isotope analysis showed that the main source area of magmatic rocks was lower crust, and mantle materials mixed.

KEY WORDS: Zhijiadi Pb-Zn-Ag deposit, ore-body type, metallogenic epoch, sources of ore, metallogeny

目 录

第一章 绪 论 1
1.1 选题来源、目的及研究意义 1
1.1.1 选题来源 1
1.1.2 选题目的及研究意义 1
1.1.3 主要完成的工作量 1
1.2 国内外研究现状 2
1.2.1 矿床学研究 2
1.2.2 成矿系列研究 4
1.2.3 成矿信息的研究方法 4
1.3 研究思路、主要研究内容、方法及技术线路 6
1.3.1 研究思路 6
1.3.2 主要研究内容 7
1.3.3 研究方法及技术线路 8
第二章 区域地质背景 10
2.1 晋东北中生代多金属矿成矿活动特点 10
2.1.1 晋东北地区多金属矿分布 10
2.1.2 矿化有关的燕山期岩浆岩 11
2.1.3 控矿构造 11
2.1.4 矿化分带特点 11
2.2 支家地矿区域地质特征 13
2.2.1 地层 13
2.2.2 燕山期岩浆岩 13
2.2.3 构造 14
2.2.4 区域中生代多金属矿产 16
2.2.5 区域硫同位素及铅同位素地球化学特征 17
第三章 矿床地质特征 18
3.1 矿区地质概况 18
3.1.1 地层 18
3.1.2 岩浆岩 18
3.1.3 构造 18
3.1.4 矿体类型划分 18

3.2 隐爆角砾岩型矿体主要特征 18
3.2.1 矿体空间分布及形态特征 18
3.2.2 矿物成分、结构构造及其空间分布特征 21
3.2.3 矿体地球化学特征 24
3.3 断裂热液充填型矿体主要特征 25
3.3.1 矿体空间分布及形态特征 25
3.3.2 矿物成分、结构构造及其空间分布特征 34
3.3.3 矿体地球化学特征 35
3.4 矿化蚀变特征 38
第四章 岩石学及其地球化学特征 39
4.1 岩石学特征 39
4.1.1 矿物组成特征 39
4.1.2 岩石结构构造特征 40
4.1.3 岩石学特征的变化 42
4.2 岩石地球化学特征 42
4.2.1 主量元素 43
4.2.2 稀土元素特征 44
4.2.3 微量元素特征 47
第五章 矿床成因探讨 49
5.1 成矿时代及期次分析 49
5.1.1 隐爆角砾岩胶结物的锆石年龄 49
5.1.2 矿体结构构造分析对成矿期次的约束 51
5.1.3 电子探针结果分析 54
5.2 成矿物质来源分析 56
5.2.1 与矿化相关岩浆岩的源区 56
5.2.2 同位素对物质来源的示踪 57
第六章 结论 61
6.1 主要结论 61
6.2 主要创新点 61
6.3 不足之处 62
参考文献 63
致谢 68
附图 70

第一章 绪 论

1.1 选题来源、目的及研究意义

1.1.1 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，基于《山西省灵丘县支家地铅锌银矿接替资源勘查》前期工作的有效进展，由全国危机矿山接替资源找矿项目管理办公室2008年批准立项（国土资发[2008]14号，危矿办技发[2008]2号文件），对山西省灵丘县支家地铅锌银矿进行了系统研究。

1.1.2 选题目的及研究意义

早自五十年代，太白维山一带的地质普查工作中就发现了支家地铅锌矿[1]，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，如张北廷等[2]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提供了有益的积累，但限于之前的工程进展，前人对该矿的成矿规律和成矿模型认识不足，即矿床内不同类型矿床的成因联系、不同矿床特征差异的机制、矿床有益元素分带的空间分布规律及原因、流体来源及运移方向等问题都未得到很好的解决。针对已有的工作成果，以成矿系统及叠加成矿理论为学术指导思想，以地质、地球化学为主要研究方法，围绕矿床物质来源、矿体物质组成特征、成矿构造及物化条件、蚀变分带机制等主题开展开作，拟从成矿系列角度开展矿床的成矿学研究，最终建立包括成矿条件、成矿物质等多因素控制的矿床成矿模型，总结成矿规律，为成矿预测提供依据。成矿规律和成矿模型问题的存在制约了矿山深/边部增加资源量有效工作靶区的选择，对减少勘探风险，提高勘探效益均有积极的意义，同时可加深对区域成矿带控矿规律的认识。

1.1.3 主要完成的工作量

根据项目研究要求，工作主要分文献及野外调查、测试分析、综合分析三方面开展，见表1.1。

1）野外调查

项目分别于2008年和2009年开展了两次野外调查工作，累计野外工作时间为45天，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，观察点 194 个，采集样品 186 个。

2）测试工作

分别利用显微镜、微束分析、X-射线衍射、X-射线荧光、化学分析、ICP-MS 等技术方法，对本次工作采集的样品开展了矿石、岩石特征、地球化学特征、成矿时代等方面的分析和测试工作，完成的工作量见表 1.2。

表 1.1 实物工作量一览表

工作内容统计	数量	备　注
观察点数（个）	194	
观察剖面长度（m）	8500m	
观察钻孔（m）	2021.5	6 个
X-射线荧光实地量测（点）	10	每点 12 个元素
样品采集数量（个）	186	
单矿物挑选（个）	12	
光片磨制数	20	
薄片磨制数	50	
样品加工数量	120	

表 1.2　分析测试工作量一览表

项目	微量元素分析项数	稀土元素分析项数	常量元素分析项数	光片鉴定数	薄片鉴定数
样品数	27	27	15	20	50
项目数	21	15	14		
项目	X－射线衍射分析	扫描电镜	电子探针	Pb 同位素	U-Pb 年龄
样品数	16	5	12	9	3
项目数		8	12	1	2
项目	包裹体测温	石英氢氧同位素分析			
样品数	2	2			
项目数	4	2			

1.2 国内外研究现状

成矿规律及成矿模型研究是矿床学的主要内容，也是矿床学研究中永远的热点，及涉及学科领域极为广泛。结合主要开展支家地矿地质、地球化学特征及成因研究的任务，重点从矿床学、成矿系列、成矿研究方法三个方面进行国内外研究现状的了解，简述如下：

1.2.1 矿床学研究

矿床学已形成了较完整的理论体系[3]，目前人们关注的方面主要有矿床多成因理论、板块构造与区域成矿规律、矿床模型研究、超大型矿床研究、海洋现代热液成矿作用、成矿年代研究、成矿演化过程等。其中矿床分类、矿床成因研究（以成矿物质来源及成矿期次为主）是本次工作的重点，主要阐述这两方面的研究现状。

1）矿床类型

依据不同的分类原则，可将矿床划分为很多类型，根据形成环境和成矿温度，

支家地矿属于次火山岩浅成低温热液矿床，所以重点介绍次火山岩浅成低温热液型矿床的研究现状。浅成低温（Epithermal）的概念由 Lindgren[4]创用，专指产于陆相火山岩或与陆相火山岩有关的形成深度浅于 1.5km、温度为 50~200℃的热液矿床。随着研究实例的增加，很多学者[5-9]将浅成低温热液型成矿系统的深度上限提高到 2km，温度上限放宽至 320℃。国内已有不少学者对其做过研究，如其物质来源的研究，陈衍景等[10]总结了不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征，认为浅成低温热液矿床的成矿流体活动主要由岩浆驱动，即不同比例的岩浆热液和大气降水热液[11]；特别是不少学者都研究过中低温浅成热液型铅、锌、银、金、铜矿的矿床地质特征、成因模型[12-20]及与斑岩的关系[21-24]，如祁进平等从矿石矿物组合、构造位置、围岩、与成矿有关的岩浆岩等方面总结了华北北缘浅成低温热液矿床的地质特征，并利用氢氧同位素分析了其成矿流体性质、硫铅同位素分析了其成矿物质来源，进而总结出了成岩成矿构造环境和模式，这些研究方法及理论为本文提供了很多可以借鉴的认识与经验。

2）成矿物质来源

成矿物质来源是矿床成因的基本要素，一般可分为来自上地幔和下地壳、地壳硅铝层、地壳上部岩石及地表岩石四大类。目前普遍采用同位素、矿物气液包体、成岩成矿试验等方法对其进行研究，且关于成矿物质是多源的观点已获得比较普遍的支持[25]。如毛德宝等[26]研究了铅同位素特征对华北北缘中段铅锌银矿床物质来源的制约，发现四类矿床具有不用的铅同位素组成特征，得出了该区矿床具有多期、多成因的特点；又如张宇航[27]利用岩石化学、$^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始值(Sr_I)与年龄(t)的关系、氧同位素、TiO_2-MnO-Na_2O 的关系研究了华北地块含金碱性岩浆的源区、原岩和成岩环境。总之，研究矿质来源要综合运用各种地质、地球化学方法，将矿质、流体及热源结合考虑，在研究工作中具体复分析。

3）多期成矿

多期、多阶段成矿现象也是矿床成因研究的一个热点，同一成集区多期次叠加成矿往往是特定形成时代和系列成矿演化过程的结果。如杨立强[28]对胶东金矿成矿“多源、多期叠加，时-空集中，规模巨大”显著特征分析，明确提出胶东矿集区至少存在 130—110 Ma 左右的金矿化和 90—80 Ma 左右的金-银-多金属矿化两期金矿化。正是基于这种时间演化与成矿阶段性相关的事实，可将矿床多阶段成矿现象上升为叠加成矿系列模型，使认识不只是简单地停留在成矿阶段划分的表征上，取得了很好的找矿成果。

陈毓川也明确提出了中国成矿体系的概念，认为成矿体系显示成矿具有明显的阶段性、多期叠加[29]，尽管人们常对矿床多期次的成矿特征有足够的认识，但将其上升为成矿学理论，并以此分析矿床成矿模式，为成矿预测提供理论依据，还有待

进一步研究工作。

1.2.2 成矿系列研究

成矿系列研究是目前成矿学研究中的热点领域之一，是矿床地质学科中研究区域成矿规律的一种学术思想，用系统论、活动论观点研究在地质历史发展各阶段、各特定地质构造环境中成矿作用的过程及形成的矿床组合自然体。其研究对象是时空域中矿床的自然体及其时空结构、形成地质构造环境、形成过程、演化规律以及矿床自然体之间存在的各种关系。通过对这些客观规律的研究、探索和掌握，应用于指导区域找矿，提高找矿效率，并在此过程中进一步提高对成矿规律的认识[30-31]。

1）区域成矿系列

目前人们一方面关注利用区域成矿系列理论开展成矿预测，Atapoura 基于成矿系列观点，在深入分析 Sarcheshmeh 斑岩铜矿的基础上，对伊朗中部岩浆-火山弧带及 Sarcheshmeh 斑岩铜矿附近的成矿远景进行了成功预测[32]。同时关注区域成矿系列中引入时间坐标，我国重点基础研究发展规划（973）项目"印度与亚洲大陆主碰撞带成矿作用"就把主要成矿系统的时空结构与主要矿床类型作为项目的重要内容之一。多角度约束成矿系列也正为人们所重视，如翟裕生则提出从矿区地球化学异常系列、蚀变类型系列等角度开展矿床成矿系列研究，建立矿体-矿床-矿田不同级次的成矿系列，有效地扩展了成矿预测空间[33]。

2）成矿系列类型的认识

人们通过工作已系统总结出一定范围内不同矿种和不同类型的矿床在共生组合，成矿元素及蚀变分带性的规律，归纳出成矿系列种类，如方维萱[34]总结出小秦岭地区 Au-Mo-Ag-Bi-W-Fe、个旧锡多金属—钨、斑岩—矽卡岩—浅成低温热液 Cu-Au-Mo-Ag-Pb-Zn 等成矿系列模式，斑岩铜矿系统高部位发育浅成热液贵金属矿脉现象为认识斑岩系统的成矿系列空间分布规律和金矿的发现提供了理论支持[35]。Cu-Mo-Pb-Zn-Ag-Au 成矿系列的提出更具有深入探讨热液矿床成矿作用的动力学和开展矿产资源评价的重要意义[36]。

1.2.3 成矿信息的研究方法

目前开展矿床研究的方法涉及方方面面，包括地质学方法、地球化学法、物化探方法、遥感法及多元综合分析方法。其中，地质学方法是最基本的成矿信息研究方法，包括查明矿床的构造及矿体产状，即矿体及围岩的组成、形态、产状、断层、裂隙和孔隙发育程度等；研究矿床的物质成分；探明矿床的表生变化特征及其环境影响等。近年来，人们更多的着眼于多种信息的堆砌，在成矿理论的指导下，实现对各种技术手段（如地质、地球化学、地球物理、遥感等手段）所获信息的成矿内在联系的挖掘。本文着重在地球化学及综合信息分析方面开展成矿信息的研究工作，

主要阐述这两方面的研究现状。

1）地球化学方法

同位素及微量元素分析方法是常用的地球化学分析方法，在对成矿物质来源示踪、矿体类型的判别、成矿过程反演等方面起到了日益重要的作用。

（1）与成矿有关的同位素定年对象集中于对单矿物的年龄测定，如 Nakai 等用 Rb-Sr 法测定闪锌矿年龄，Chesley 用 Sm-Nd 法测定萤石年龄。近年来，同位素定年技术有了新的拓展，如 Re–Os 同位素方法已开始应用于约束成矿物质来源及成矿时代[37]；借助系列同位素热年代学方法，通过成矿岩体冷却速率的比较进行岩体成矿潜力的评价，如 Brent 利用锆石的 U-Pb 体系、磷灰石（U-Th）/He 体系的同位素年龄及封闭温度对印尼 Batu Hijau 铜矿区中有矿及无矿岩体进行了冷却速率的比较，显示了冷却速率与成矿的相关关系。

同位素体系分馏特征已在成矿学研究中得到了应用，如人们利用菱铁矿的 Sr 同位素特征划分出形成碳酸盐化的岩浆、海水混合热液及大气降水与围岩经过充分相互作用后的低温热液，支持了成矿物质来源及成矿热液类型的确认[38]。

（2）单矿物微量元素分析已成为开展成矿介质及环境特征比较的主要手段，如闪锌矿微量元素及比值（如 Zn/Cd）特征反映成矿环境中硫的下降趋势；含铜矿物的 $\delta^{65}Cu$ 被用于分析铜物质来源的均一性，Michigan 热液铜矿 $\delta^{65}Cu$ 稍大于 0.1‰，且分布狭窄，表明铜物质源自同一热液系统[39]。湘西沃溪 W-Sb-Au 矿床中白钨矿的 Nd-Sr-Pb 同位素分析，含金石英脉中黄铁矿、蚀变围岩及区域板溪群板岩等 Pb 同位素比值及闪锌矿的 Sr 同位素特征的比较，示踪了成矿流体的多来源，分别为板溪群下伏成熟陆壳、深部花岗质岩浆、浅部赋矿围岩等源区，成矿流体演化过程与不同矿种成矿间的对应关系说明 W-Sb-Au 成矿是中生代陆内碰撞造山体制下不同期次的流体演化和叠加作用的结果[40]。

2）综合信息分析

综合信息分析是成矿学的重点领域，是指综合运用地质学、地球化学、地球物理、遥感等研究方法来分析矿床成因、成矿规律，总结成矿模型。近年来，我国在综合应用新技术、新方法方面有了较大进步，如利用遥感、成岩成矿作用演化等查明地球化学特征与含矿性参数；借助野外物理仪器测试数据，利用判别造岩元素的常量组分来找矿等。微观方面，采用电子计算机控制的高灵敏度、高分辨率、自动化仪器分析来代替传统化学分析，岩矿鉴定上的微区微量细微结构分析，及测定天然同位素(包括惰性气体)和稀土元素以解决与成矿作用有关的问题，如用 He^3/He^4 比值变化来辨别火山岩是否来自地幔，用 Lu^{176}/Hf^{176} 衰变反应结合 Sm-Na 同位素研究玄武岩来源，用 Be^{10} 同位素研究岛弧俯冲沉积物的复循环，O 同位素检测来源于地幔的大陆岩浆岩中地壳物质的混染程度，用 H 同位素研究太古代中流动物质的性质

和形成环境，用 Ar^{40}~Ar^{39} 直接测定黄铁矿矿石年龄等等。本文主要将矿石微观分析、元素及同位素分析结合起来探讨矿体特征，以下对这两方面的研究现状进行阐述。

（1）微观及精细分析信息对成矿作用的示踪是成矿学领域的主要关注领域之一。人们从矿石等不均匀组成集合体介质中获取成矿信息转变为更注意从单矿物、单个流体包裹体等介质中提取成矿信息，更使介质示踪意义更为明确。

（2）原位分析、高精度测试技术的应用得到了人们的积极响应：人们利用激光原位技术更精细地反映成矿信息，提高了微观信息的示踪意义，Ulrich 采用激光 ICP-MS 获取流体包裹体、硫化物的微量元素、硫同位素及铅同位素的综合信息，确认了 Au-Cu 矿化期流体富 As、Sb、Cu，且 Cu 含量高于黄铁矿矿化期流体的特征，证实矿床的两次成矿作用；硫化物 Pb 同位素的分析表明 Au，Cu 源自 Morgan 地区的侵入体和特定层位的火山岩[41]。激光原位技术对毒砂的硫同位素分析[42]，解决了块状矿石和含金闪锌矿石英脉矿石是否具有同源特征以及是否是同一成矿活动的同期产物问题。

元素地球化学信息可确定成岩母岩的构造背景，如 Hezarkhani 利用 Y, Zr, Nb 等不活泼元素分馏来示踪控/成矿岩体的形成过程[43]；埃达克岩体对成矿的影响作用已是近年来人们关注的重点之一[44]。利用 LILE(大离子亲石元素)、轻稀土元素、HFSE(高场强元素)特征及 Zr/Al，Ti/Al 等参数判断钾质火山岩的板内、大陆弧、后碰撞弧、始大洋弧和晚大洋弧等五种构造类型，并认识其成矿专属性，如斑岩 Cu-Au 矿床、低温热液陆相火山岩型 Au 及 Au-Cu 矿床主要局限于晚大洋弧、大陆弧和后碰撞弧中之钾质火山岩系中[45]。

（3）同位素与其它特征的综合运用帮助人们更全面的认识成矿过程，如利用流体包裹体、稳定及放射性同位素方法示踪流体的特征及来源，进而解决了 Hellyer 的 Zn–Pb–Cu 矿床的形成机制[46]；Hurai 用流体包裹体中卤水的显微热特征及微量元素和碳、氧同位素间的相关关系（P–T–X–$\delta^{13}C$–$\delta^{18}O$）综合分析，成功地反演了成矿过程中温度、压力及组分及其来源的变化[47]。

（4）同一成矿区内不同类型矿床的地质、岩石和矿物化学多角度特征综合对比研究仍是人们了解不同类型矿床的成因联系的主要手段，并通过之实现对成矿富集区成矿模型的把握[48]。

1.3 研究思路、主要研究内容、方法及技术线路

1.3.1 研究思路

以构造演化理论及多因复成成矿理论为指导思想，以矿床特征为依据，地球化学、矿床学、构造地质学、综合分析为手段，建立包括成矿系列、矿化分带、物质来源、控矿因素的成矿模型。

在对已有工作资料、数据、认识成果的理解及分析基础上，围绕成矿条件主题目开展详尽矿床特征野外调查，以地球化学、同位素、矿物学为特征研究方法，以微量元素、同位素、流体包裹体显微热分析、X-射线衍射、显微微区分析等分析技术为手段，探讨成矿特征，进行成矿因素及内在成因联系综合分析，进而建立成矿模型，总结成矿规律，为成矿预测提供依据。

1.3.2 主要研究内容

1）文献研究

对华北北缘、晋东北及支家地矿区以往的地质资料进行了研究，并查阅了大量关于次火山岩型低温热液矿床地质、地球化学特征、成矿规律及矿床成因研究的文献，为本此工作提供了借鉴。

2）区域成矿背景分析

通过收集和分析区域大地构造背景资料及适当的野外调查，实现从区域成矿区带背景认识的基础上，认识矿床的成矿环境及演化，掌握矿床的总体性质以作为研究成矿模型的基础。

3）矿床地质及地球化学分析

（1）矿体类型的划分及特征分析

根据主要控矿条件及矿体特点进行矿体类型划分及特征分析，在矿体主要存在断裂热液充填型及隐爆角砾岩型两种主要类型的初步认识基础上，对其空间分布、围岩接触关系及接触带特征、矿石结构构造、矿物组合、微量元素、同位素组成等特征进行深入认识。

（2）不同类型矿体成因及相关关系分析

基于不同类型矿床特征、蚀变特征、微量元素及同位素组成等分析，探讨其形成条件、物质来源、成矿过程，分析不同类型矿床间的成因联系，建立成矿系列。

（3）蚀变分带及空间展布分析

基于蚀变分带应有的完整性与空间分布对称性的规律性，对现有成矿区与蚀变系统的空间关系进行分析，确定已勘探支家地矿与成矿系列模式的应对关系，为成矿预测提供依据。

4）矿床成因研究

（1）控矿岩体的源区及与蚀变、矿体联系分析，包括：石英斑岩定年分析，以确定成矿时代下限；石英斑岩元素地球化学分析，以实现对石英斑岩源区分析及约束；比较岩体、蚀变、矿体的微量元素变化差异，以确定彼此间的组分分布特征对成因示踪及彼此间的成因联系。

（2）成矿物质来源分析，包括：流体来源及运移方向分析，以 1 号、2 号、4 号、6 号等矿体为对象，开展垂直及平面蚀变类型、矿物组合、元素组合、流体温

度变化等特征分带规律的分析；通过不同类型矿体间及相关介质间的微量元素、同位素等特征的示踪，进行成矿物质来源分析。

（3）成矿时代及期次分析

进行矿物同位素定年分析，确定成矿时代，结合石英斑岩的年龄数据，分析其区域构造背景，进而约束成矿时代；同时通过不同类型矿体的特征、物质来源、控矿因素、定位模式特征差异分析，以及其空间展布特点，主要控矿因素的组合关系分析，以认识该矿的主要成矿期次，如为多次成矿，则进一步认识不同期成矿的差异。

1.3.3 研究方法及技术线路

1）现有资料分析

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

（1）区域实地调查

基于对区域地质资料分析的基础上，对支家地矿附近的小青沟矿、下庄等地斑岩体以及NE向成矿带进行实地地质调查，掌握区域成矿特点及控矿条件。

（2）矿床特征调查

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开展沿走向及倾向矿体分布特征、矿石类型、矿物组合、蚀变类型、围岩及接触带等特征的调查，采集相关样品，掌握各类矿体的基本特征及相关关系。

（3）分带规律调查

分别对不同类型矿体及石英斑岩开展成矿元素及蚀变垂直及水平分带调查，主要进行银、铅、锌、铜、金成矿元素及指示元素、蚀变组合垂直及水平分带分析样品采集及特征调查。重点选择1号、4号、6号矿体开展沿走向和倾向调查。

（4）控矿构造特征调查

主要选择F2及与之走向相同，倾向相反断层进行沿走向及倾向方向的构造特征调查、样品采集及岩体界面特征调查。

（5）控矿岩体源区调查

对支家地矿区的石英斑岩进行源区约束调查及采集样品。进行微量元素、同位素、稀土元素及成岩年龄分析。

3）室内分析

（1）元素及同位素分析

采用X-衍射、扫描电镜、能谱、电子探针、X-荧光光谱、原子吸收及ICP-MS开展样品元素含量及同位素组成分析。

（2）矿物学、岩石学特征分析

采用显微矿相学、岩石学、电子探针、X-衍射方法开展不同类型矿体的矿石矿物组合类型、结构构造及相关关系分析。

（3）流体包裹体分析

采用包裹体显微热分析方法开展流体包裹体均一温度、盐度测定。

（4）年龄分析

采用同位素定年方法对蚀变岩及矿石进行定年分析。

（5）地球化学特征对比分析

采用元素地球化学方法,包括常量、微量元素、稀土元素分析法进行控矿岩体源区分析以及岩体、蚀变、矿体的对比分析。

第二章 区域地质背景

支家地矿位于华北地台北缘中段晋东北燕山期 Au、Ag、Pb、Zn 成矿带（图 2.1），初步统计该带内发育大、中、小型铅锌银矿床 80 余处，其中大型矿床 5 处、中型 26 处，不同规模的 Pb、Zn、Ag 地球化学异常 180 余处[48-51]。

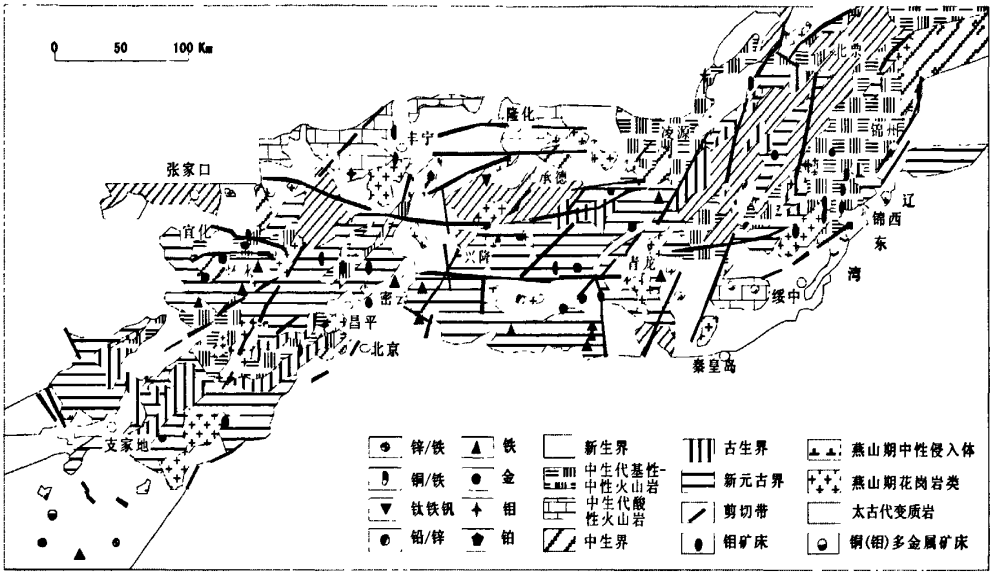


图 2.1 区域矿床分布图（据代军治等，2006 修改）

2.1 晋东北中生代多金属矿成矿活动特点

晋东北多金属成矿带位于华北地块多金属成矿带北缘南侧，与华北地块北缘 EW 走向多金属成矿带斜交，由北向南呈现了由 NE 向转为 EW 向，再转为 NE 向的分布特点。岩浆是成矿物质的主要物源，接触带、断裂构造等为成矿物质的主要聚集空间。该成矿区大地构造位置属于燕山台褶皱带南西端区域，区内北西向断裂极为发育，侵入岩、喷出岩的分布明显受北东东和北西向两组断裂的联合控制。已有研究显示成矿区内的中生代多金属矿床与燕山台皱带基底关系不密切，而与中生代构造岩浆活动密切相关。

2.1.1 晋东北地区多金属矿分布

图 2.2 显示，晋东北多金属成矿带内的矿床沿灵丘—繁峙—代县（赵北—大鹿沟断裂带）呈 NE 向分布，该带亦为 NE 向构造岩浆带，带内 NE 向断裂和花岗岩发育。已有资料反映带内分布有铜、钼、铅锌、银、金、锰等多金属矿床。从北东向南西，分布有白北堡铅锌矿、小彦铜多金属矿、太那水金矿、王安镇铜矿、镰把岭铅锌银矿、支家地银矿、硐沟锰银矿、小青沟—流沙沟锰银矿、野窝窑银矿、义兴寨金矿、东泽沟银铅锌矿，灵丘是带内成矿最为密集的区域，由于带内矿床规模多为中、小型，前人总体重视及研究程度相对较低。

2.1.2 矿化有关的燕山期岩浆岩

区内与矿化有关的燕山期岩浆岩岩体出露有 60 余处，岩体个数和出露面积约占山西省岩浆岩的 80%[52]，已有的年龄值多为 K-Ar 年龄，为 120~185Ma；Rb-Sr 年龄值涉及支家地、小彦、义兴寨、铁瓦殿、刁泉、耿庄、岔口等岩体，为 130.6~186.3Ma。这些年龄数据说明晋东北地区与多金属成矿有关的岩浆活动时代为燕山期晚期。带内几乎所有的多金属矿床都分布于燕山期浅成相侵入岩、火山岩中及岩体与围岩的接触带，岩体和接触带也是区内矿床最重要的控矿因素。前人的工作表明，燕山期岩浆壳源型的酸性系列岩体与成矿关系并不密切，只有过渡型壳幔同熔型中酸性岩体与成矿密切相关[53]。此类岩体主要受 NW 向张性断裂的控制，在支家地、小青沟、硐沟、上庄、下庄、刁泉、耿庄、繁峙一带均有出露，同时伴随有相应的铜、金、铅锌等多金属矿床，较与多金属矿无关的岩浆岩偏碱性和中性；与矿化直接有关的岩体多为浅成相，岩性为花岗闪长斑岩、石英斑岩、花岗斑岩，总体具有富硅、富碱、稀土总量较低、富轻稀土、$^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始比值较低（小于 0.7058）特点。

2.1.3 控矿构造

晋东北地区的控矿构造主要为隐爆角砾岩体、斑岩体与围岩接触带、断裂三种。

晋东北成矿带内出露的一系列与燕山期富碱的酸性、中酸性浅成相—次火山相有成因联系的爆破角砾岩，它们是带内成矿非常有利的控矿构造，耿庄金银矿、支家地铅锌银矿就分布于隐爆角砾岩体中或其附近，其少数矿体呈脉状穿插于隐爆角砾岩与围岩的接触带中，说明矿化总体晚于隐爆作用。

斑岩体与围岩的接触带是区内矿体的主要分布地带，其中刁泉银铜矿的矿体均分布于花岗斑岩与大理岩的接触带，尽管支家地、峒沟、小青沟等矿床的矿体虽然直接受断裂控制，但这些断裂无例外地处于斑岩体与围岩的接触带范围，离开接触带矿化程度下降；与矿有关的接触带对围岩岩性并无选择，赋矿接触带岩性可为白云岩或火山岩，而接触带的蚀变根据岩性有矽卡岩蚀变和硅化、绢云母化蚀变等，接触带构造是矿化的空间载体，同时应是找矿的远景靶区。

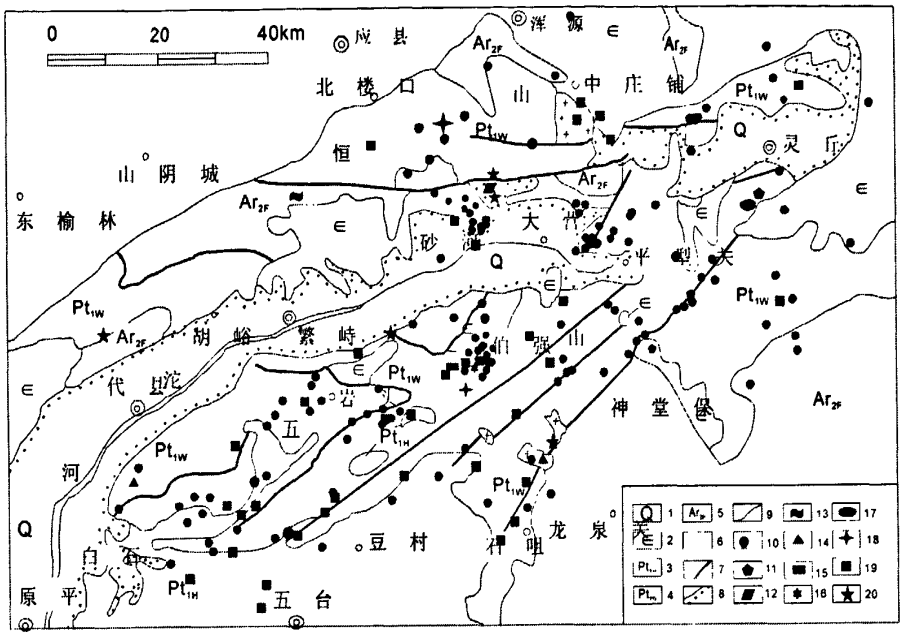
NE 向的断裂岩浆带控制了成矿带分布，NE 与 NW 向断裂的交汇处为导岩、控岩构造，控制了与成矿关系密切的小型岩体的侵入定位及多金属矿床的定位，导岩、控岩断裂和浅成岩体侵入过程中形成的次级断裂和裂隙则控制了多金属矿体的分布。由于区内的控矿裂隙既有受区域构造控制的断裂，也有受岩体侵入或火山机构控制的裂隙，导致区内矿体的分布方向多样。

2.1.4 矿化分带特点

晋东北燕山期岩浆活动有关的多金属成矿带显示了成矿的分带特征：

区内各矿床的成矿元素显示了高温到低温的水平分带特点，从高温到低温为

Cu、Au-Pb、Zn 、Ag-Ag、Mn；灵丘县太那水金多金属矿床为从接触带向围岩，矿化分带显示为 Mo-Cu、Au-Pb、Zn、Ag；刁泉银铜矿的 Cu、Au 主要集中在接触带附近，Ag 则主要分布在接触带以外的空间；洞沟锰银矿的 Ag 矿体分布于岩体及其火山岩围岩中，银锰矿体均分布于岩体外围的高于庄组白云岩层内。



1-第四系；2-寒武系；3-下元古界滹沱群；4-下元古界五台群；5-上太古界阜平群及恒山杂岩；6-燕山期花岗岩；7-剪切带；8-不整合界面；9-地质界线；10-金矿；11-铅、锌、银矿；12-钼矿；13-钛矿；14-镍矿；15-钴矿；16-银铜；17-银锰矿；18-铅矿；19-铜矿；20-铬矿。

图 2.2 晋东北地区多金属成矿带（据山西省矿产分布图修改）

区域成矿的垂直分带，由深到浅表现为 Cu、Fe-Cu、Au、Ag、Fe-Ag、Pb、Zn-Au、Ag、Pb、Zn、Mn。即岩相深度大时形成铁（铜）矿，岩相较浅时（花岗斑岩），形成铜金、银、铁等多金属矿床；岩相更浅（隐爆作用地带）时形成银、铅锌矿，或金、铅锌矿床；岩相最浅时（火山口、颈相）形成金、银、铅锌、锰矿床。

区内不同的矿床的元素分带特征可能并不完整，可能只出现元素分带序列中的某一段，如灵丘县太那水金多金属矿床，水平分带表现为从接触带(矿化中心)向岩体或围岩(边缘)，矿化为 Mo-Cu、Au-Pb、Zn、Ag，矿化的垂直分带表现为由浅部到深部渐变为 Pb、Zn、Ag-Cu、Au-Mo。刁泉银铜矿 Cu、Au 主要集中在接触带附近，Ag 从接触带到外围则广泛分布；铜沟锰银矿则表现出 Ag 矿体分布于岩体其接触带附近的白旗组火山岩中，而银锰矿体均分布在远离岩体的白云岩中。总之晋东北地区矿床普遍存在与岩体相关的分带现象，可总结为由岩体到围岩（水平及垂直方向），由深到浅元素分带规律为：Cu、Fe（Mo）-Cu、Au、Ag、Fe-Ag、Pb、Zn-Au、Ag、Pb、Zn、Mn，矿种则是深部以铜铁金为主，中部以银铅锌为主，浅部以银铅锌锰为主，有时可伴有金。这种分布格局与成矿时期的区域温度场温度由岩体向外

（包括水平和垂直方向）由最高变为最低，温度变化率由最大变为最小的温度分布格局一致，对其的认识则特别有利于判断某一矿床保存程度以及成矿预测的把握。例如区域内的次火山岩（斑岩）与碳酸盐岩接触时形成矽卡岩型铜、金、银、铅等矿产，如太那水金矿、后峪斑岩型钼矿、刁泉铜金矿等，但支家地石英斑岩与白云岩的接触带不出现矽卡岩化，白云岩只表现为退色化，并未发生大理岩化，说明现有矿体剥蚀浅，深部矿化应该保存完好，其深部和边部仍应有较好的成矿远景。

2.2 支家地矿区域地质特征

支家地位于太白维山银锰矿田，区域内的矿床均处于燕山期太白维山火山盆地内，并主要集中分布于盆地的北西侏罗系与上元古界长城系高于庄组白云岩接触带（图 2.3）。矿田内主要分布有硐沟银、锰矿床、小青沟银锰矿、支家地铅锌银矿等矿床[54-58]。

2.2.1 地层

相关报告已对区内出露的各时代地层进行了详细叙述，工作中观察到银铅锌锰多金属矿床或矿点主要分布于燕山期中酸性岩浆岩株与侏罗系火山岩地层或新元古界地层的接触带，未显示明显的地层成矿专属性特征，因此仅对能反映大地构造意义的地层进行简述。

太古界五台群片岩、片麻岩和沉积变质岩为本区的基底地层，区内出露元古界长城系高于庄组、蓟县系迷雾山组、青白口系景儿峪组、古生代寒武纪、奥陶纪地层，其碳酸盐岩性说明该区从元古界至奥陶纪均处于海相沉积环境。区内出露的石炭纪和二叠纪地层的砂岩、泥岩及煤等岩性说明该区在石炭纪已演化为陆相环境，区内早侏罗纪地层的岩性主要为火山角砾岩和熔岩，但邻区出露侏罗系永定庄组、大同组、云岗组、天池河组等河湖相碎屑岩系、湖沼交互相含煤层的碎屑岩系建造，表明该区的火山喷发发生于陆相环境，为陆相喷发。地层岩性分析表明该区至少在石炭纪就演变为陆相环境，并在侏罗纪时已成为成熟的陆相区域，主要发育伸展型断陷盆地和与之耦合的山地，因此可以认为燕山运动时期，该区处于被动大陆板块的环境。

2.2.2 燕山期岩浆岩

区域内出露有太古界变质石英闪长岩、变辉绿岩，元古代吕梁晚期的花岗岩以及伟晶岩和辉绿岩脉零星分布。

区内主要发育晚侏罗世早期的白旗期和张家口期火山岩，二者均为陆相火山岩。白旗期火山岩主要为中(基)性—中酸性偏碱性岩，岩性为安粗岩类和粗面岩；张家口期火山岩主要以酸性为主，岩性为流纹质火山岩[59]，主要为火山碎屑岩，熔岩不到 10%，说明形成火山岩的岩浆富含挥发份。矿体附近出露的白旗期火山岩，矿体

侵入于火山岩中，说明成矿时代为白旗期火山活动与张家口期火山活动期间。已有的火山岩岩石主量、微量、稀土、地球化学分析结果表明，白旗组时期的岩浆岩为钙碱系列中性岩类，张家口组时期的岩浆岩为钙性—钙碱系列酸性岩类，白旗组的火山岩及相应时期的侵入岩的物源为下陆地壳物质与地幔物质的混合；张家口组时期的岩浆岩源岩为部分熔融的地壳物质，这种由早到晚岩性由中性向酸性的演变，由相对偏基性和碱性向酸性演变，显示了大地构造背景由深部过程演变为浅部过程，伸展强度由强变弱。

区内中深成相侵入岩不发育，仅分布于马圈一带，呈岩株产出，为花岗岩。区内浅成、超浅成相岩浆岩却较为发育，主要有花岗斑岩和石英斑岩，并以石英斑岩为主，二者形成时代相同，均侵入于白旗期和张家口期火山岩中，其中花岗斑岩呈岩墙分布于区域北东的下车河一带；石英斑岩在主要分布区域北西的支家地、小青沟、洞沟、上庄、下庄一带，呈岩株状、岩枝状产出，矿区的NW端深部出露碱性长石英斑岩，在其旁侧分布系列排列的角砾状石英斑岩（超浅成相的隐爆角砾岩），成矿物质及熔岩物质呈胶结物对角砾进行胶结。石英斑岩、碱性长石石英斑岩和隐爆角砾岩均被细粒石英斑岩岩脉穿插。矿区的侵入岩岩性特征和穿插关系说明区内在燕山期有两次以上岩浆活动，岩体侵位于近地表，岩浆富含挥发份，侵位时矿区地壳圈闭程度较高。

火山岩地层层序显示白旗组岩石的形成早于张家口组，但本区尚无火山岩同位素年龄数据，根据石英斑岩侵入于凝灰角砾岩特点，石英斑岩成岩同位素年龄数据可对白旗组火山岩年龄的上限进行约束，由于成矿物质呈胶结物胶结隐爆角砾岩中的石英斑岩角砾，因此开展了对胶结物进行同位素定年的工作，实现了对火山岩年龄的相对更准确的约束和对成矿年龄良好的约束。

2.2.3 构造

区内主要发育NE向和NW向两组断层，同方向的断层的形成时代可分别追溯至燕山期和燕山期前。

NW向断层：

盆地内燕山期及其它的断层不发育，仅有盆地北西部位发育两条NW向断层，分别为三神庙—上庄断层和三神庙西断层。位于北部的三神庙—上庄断层倾向SW，倾角陡，为80°，为正断层，同时显示右行特征；南部三神庙西断层倾向NE，倾角缓，角度为30°，显示左行，断层切割了晚侏罗世地层，其活动时间晚于北东向断层。

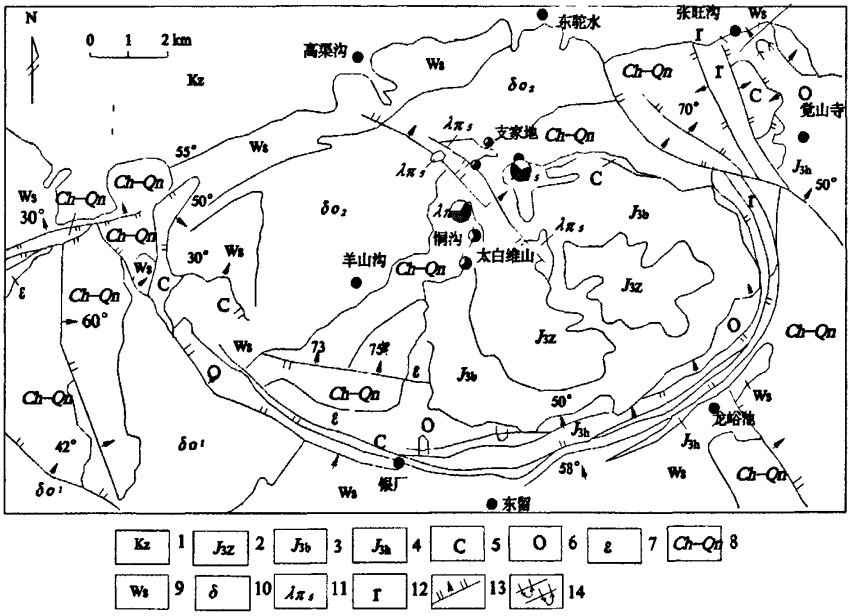
盆地北东、南西、南东周边也分别发育NW走向断层，其倾向NE，倾角陡，为56°~ 85°，也均为正断层，主要切割了晚元古代长城系和寒武系、奥陶系、新元古代蓟县系地层，其活动时代应早于中生代。

NE 向断层：

区内最为发育的是沿盆地南东接触带发育的系列 NE 走向，NW 倾向，陡倾角（多超过 60 度）的断层带，靠近盆地中心的断裂为逆断层，表现为奥陶系、石碳系地层超覆于晚侏罗世地层，因而该类断裂的主活动时代为燕山运动时期，是晚侏罗世晚期或早白垩世时期的产物；而靠近盆地外缘的断层为正断层，断层切割了寒武系、奥陶系地层，显示了中生代仰冲，新生代下滑的特点。

盆地北西部周边也发育 NE 向正断层，断层走向 NE，倾向 SE，倾角为 50°~60°，断层分布于老地层中，其下盘为新太古界五台期的变质石英闪长岩，上盘为新太古界五台群的庄旺组黑云斜长片麻岩类，其活动时代早于中生代。

总之，区域断层主要分为 NE 向和 NW 向两组，太白维山盆地外围发育的 NE 和 NW 向断裂均为正断层，其活动时代早于中生代，而太白维山中生代火山盆地所在地可能是此类断层的交汇处，目前所见盆地外围的这两组断裂可能只是此类断裂的残留断层。



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 2.3 支家地铅锌银矿区域地质图（据曹国雄 2006 年修改）

盆地内也同样发育 NE 和 NW 向断裂，二者应为同期断裂，该时代的断裂主要受燕山运动时期大构造活动背景控制，分布于盆地南东部位的 NE 向断裂，表现为压剪性的逆断层，而分布于盆地北西部位的 NW 向断层为正断层。据此可以认为，盆地内的 NE 向压性断层及推覆体形成时相应产生了 NW 向张剪性断裂，而且 NW 向断裂较 NE 向断层略有滞后，成为了成矿空间。

由前所述，太白维山地区的基底构造以区域性 NE 向褶皱和断裂为特征，而这种褶皱及相应的纵向断裂控制了区域内 NE 向相间盆地的发育，而盆地与褶皱隆起的交界处的深部仍可能有中生代的多金属矿分布，太白维山银锰矿田分布于 NE 向褶皱的倾伏端部位，因此认为 NE 向褶皱倾伏端有利于多金属矿的形成。

2.2.4 区域中生代多金属矿产

支家地铅锌银矿只是太白维山银锰矿田中众多银多金属矿床（点）之一。区内的中生代矿床主要有十八盘铅、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等，均分布于太白维山火山盆地的西北角，并与燕山期的石英斑岩和花岗斑岩密切相关。

小青沟、流砂沟银锰矿多金属矿体分别受燕山期次火山岩相的石英斑岩和花岗斑岩的控制，矿床分布于次火山岩与围岩的接触带和 SN 向压剪性和 NW 向张剪性构造破碎带，根据其围岩的不同，划分为两种类型矿体，一种分布于元古界含燧石条带白云质灰岩和白云岩及石英斑岩的接触带，一种分布于元古界碳酸盐岩及太古界片麻岩的接触带，它们均受近 SN 向压剪性构造破碎带控制，倾向 E，倾角 45°~60°，矿体呈似层状、透镜状，为以银为主的矿化，靠近石英斑岩体，多为单独的银矿体，靠近白云岩则为银锰矿化，矿体在垂向上具有深部 Pb、Zn 品位高于浅部的变化规律[60]。主要矿石类型有石英斑岩自然银矿石、银锰铅锌矿石、银铅锌矿石、锰矿石，原生矿石构造以角砾状为主，硫化物热液成矿阶段包括黄铁矿、银多金属硫化物阶段、碳酸盐阶段。矿区蚀变，以中低温热液蚀变为主。

流砂沟银锰矿多金属矿出露于小青沟矿的北部，矿床分布于元古界碳酸盐岩及太古界片麻岩的接触带，矿体与小青沟一样分布于破碎带内，东倾，倾角 45°~60°，主要矿体为银锰铅锌矿石组成的综合矿体。

硐沟银锰矿分布于小青沟银锰矿的南部，成矿特征与支家地铅锌银矿相似，主要受 NW 向和 SN 向断裂和 NW-SE 向展布的燕山期石英斑岩的控制，矿体呈似层状、透镜状沿构造破碎带分布，石英斑岩体内的矿体为银矿体，SN 向破碎带内为银锰矿体，矿体东倾，倾角 41~60°，主要矿石有银矿石、银锰铅锌矿石，矿石主要有角砾状构造、次有脉状、网脉状构造、稀疏浸染状、块状构造，蚀变也以中低温热液蚀变为主。

支家地矿床的总体特征与上述矿床相似，将在以下的章节详细叙述。

尽管太白维山火山盆地内的中生代多金属矿床数量众多，但总体都表现出矿床受燕山期浅成相和次火山岩相的石英斑岩和断裂和的控制，其中支家地和硐沟矿受 NW 向断裂控制，流砂沟矿和小青沟矿受 SN 向断裂控制；显示了矿化集中，矿种相同、形态相近、特征类似、矿物沉淀在隐爆作用之后、成因相同及剥蚀深度小的共同特点，因此矿田内的多金属矿床彼此之间是有成因联系的中低温热液矿床，现

在出露的部位是成矿较浅的矿体，其中流砂及硐沟矿床出露的部位较支家地和小青沟更浅，此其深部应有较好的成矿远景。

2.2.5 区域硫同位素及铅同位素地球化学特征

已有的硫同位素数据（表 2.1）显示太白维山银锰矿田中生代铅锌银矿成矿物质及成矿流体主要来源于岩浆；太古代及元古代的铅锌银矿的来源相对复杂，与其继承了初始矿化时的壳源外生沉积物(太古代结晶基底源)并叠加了中生代壳幔过渡同熔型中酸性次火山岩浆物源有关[61]。

表 2.1 太白维山银锰矿田铅锌矿床的硫同位素组成

矿床类型	矿床	样品	样数	$\delta^{31}S$ ‰	$\delta^{34}S$ ‰	资料来源
与中生代火山-斑岩浆活动系统有关的热液型矿床	支家地		24	−0.6～9.6(+3.45)		
	上碌碡湾		5	−4.3～1.3(−0.58)		
	北岔沟门		8	0.2～5.2(+2.94)		
	姑子沟		48	−0.6～8.0(+3.9)		
	牛圈营房		24	−2.9～5.2(+4.25)		
	蘑菇峪		2	−5.5～8.2(+6.8)		
	刁泉银铜矿	硫化物	19		-0.5～5.7(+3.36)	李兆龙(1994)
	支家地银矿	硫化物	18		0.6～9.6(+3.45)	李兆龙(1994)
	小青沟银锰多金属矿	硫化物	13		1.3～7.0(+3.98)	余成杰(1996)
	硐沟锰银矿	矿石	14		-1.5～3.3(+0.64)	李生元(2000)

太白维山银锰矿田的铅同位素特征如表 2.2，说明中生代铅锌银矿床有较低的 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 值和 μ 值，构造铅同位素投影图中其投影点分布范围广，穿越了四条演化线[62]，同样反映出中生代铅锌银矿物质的多源性，其物源包括地壳和地幔的混源，不同源物质存在比例的差异。

表 2.2 太白维山银锰矿田的铅同位素组成

矿床类型	矿床	样数	样品	$^{206}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{204}Pb$	$^{208}Pb/^{205Pb}$	资源来源
与中生代火山、次火山岩浆活动有关的浅成低温热液型	相广	1		16.731	15.324	36.845	
	满汉土	9		17.034	15.342	37.297	
	小扣花营	1		17.154	15.346	37.394	
	彭家沟	3		16.889	15.164	37.017	
	支家地	9		15.544	15.242	36.690	毛德宝(2001)
	北岔沟门	9		16.895	15.291	37.111	
与中生代浅成岩浆侵入活动有关的热液型	姑子沟	8		16.367	15.183	36.396	
	牛圈营房	7		17.190	15.525	37.889	
	蘑菇峪	1		17.570	15.470	37.760	
	刁泉银铜矿	11		16.843	15.229	36.968	李兆龙(1994)
	支家地银矿	9	硫化物	16.544	15.242	36.660	
	小青沟银锰多金属矿	5		16.702	15.627	37.192	余成杰(1996)

第三章 矿床地质特征

3.1 矿区地质概况

支家地铅锌银矿床位于太白维山破火山口构造的北侧，矿区内地层以长城系碳酸盐建造和中生代侏罗系相火山岩为主，矿体赋存在次火山岩和隐爆角砾岩中，受火山口构造控制。

3.1.1 地层

矿区北部和西部主要出露元古界长城系高于庄组（Chg）白云岩。北东部出露元古界蓟县系雾迷山组（Jxw）白云岩，局部夹砂岩；元古界青白口系长龙山-景儿峪组（Qnc-j）角砾岩，夹石英砂岩；古生界寒武系徐庄组（∈xz）页岩、粉砂岩。矿区南部及东部主要分布中生界侏罗系火山岩，其中包括白旗组（J_3b^2）熔岩及张家口组（J_3zh）火山碎屑岩。

3.1.2 岩浆岩

矿区内主要出露五台期变质石英闪长岩、燕山期次火山岩和隐爆角砾岩体。其中，次火山岩主要为石英斑岩，其与隐爆角砾岩的分布和产出特征和成矿关系密切。

3.1.3 构造

矿区处于太白维山火山洼地，断裂构造十分发育，空间展布与区域构造相吻合。本区燕山运动晚期主要表现为北西-南东方向的水平挤压，这一应力作用使区内出现了大量的北西和北东向的两组共轭扭裂面，前者为断面北东倾斜的右行平移或右移正断层；后者以断面向西倾斜的左行平移断层为多。矿区断裂构造据其展布方向可分三组，以北西向最为发育，次为北东向和南北向[1]。

3.1.4 矿体类型划分

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，且调查了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、围岩等特征，将该区矿体划分为断裂热液充填型、隐爆角砾岩型两种主要类型，其主要特征见 3.2 和 3.3 部分的描述。

3.2 隐爆角砾岩型矿体主要特征

3.2.1 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 号及 12 号矿体为代表，主要分布于矿区中部

（图 3.1），沿 F2 断层两侧分布，并主要分布在 F2 断层下盘，呈北西西—南东东展部，同时受石英斑岩与凝灰角砾岩接触带的控制，地表出露长度约 750m，宽 40-120m。矿体沿 NW 方向分布在走向 NW、倾向 NE 和 SW 的两组断裂热液充填型矿体中间，将此类各个矿体联成一整体进行空间分布规律的初步分析后认为，矿体的分布具有空间上的等距性，相间距离约为 1.5 线，但邻近 4 号矿体的 3 号勘探线附近并不发育隐爆角砾岩矿体，可能与该处不存在石英斑岩有关。

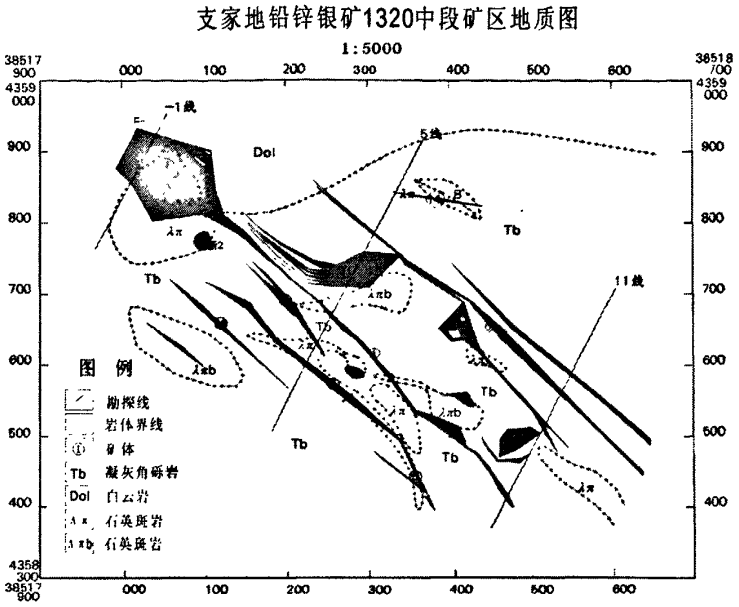


图 3.1 支家地铅锌银矿 1320 中段矿区地质图

以下主要针对矿体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。

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。在 1320 中段显示出良好的平面分带性（图 3.2），由 SW 至 NE，第一带为浸染状细脉蚀变带，

带宽约 3.5 米，主要表现为岩石中发育线型裂隙；第二带为矿化蚀变隐爆角砾岩带，带宽 4 米，又可细分为棱角状角砾带及磨圆状角砾带；第三带为矿化角砾岩带，带宽 2 米；第四带为矿化碎裂角砾岩带，带宽 2.5 米，张开度较大的裂隙为纯方铅矿充填，而闭合度高的裂隙则只表现为沿裂隙的硅化；第五带为细脉硅化带，带宽 5 米，为一组线脉蚀变带，未见明显矿化，表现出以矿化最强处为中心，两侧矿化及蚀变变弱，同时显示了不对称的特点，剖面 NW 端浸染状细脉蚀变带中的线性裂隙中有方铅矿等硫化物充填，而 SE 端沿线性裂隙出现硅化。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。

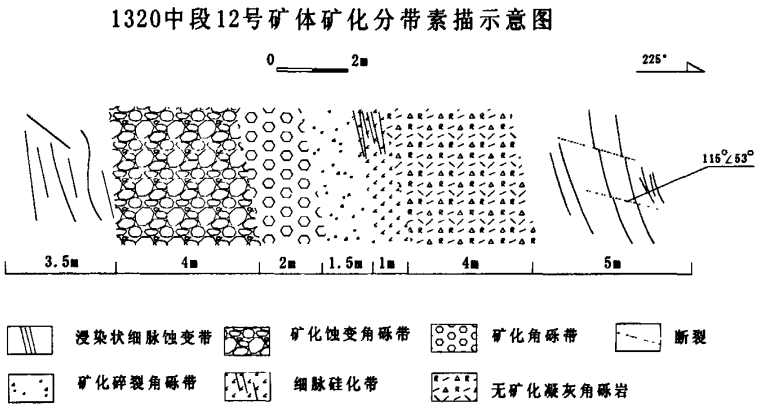


图 3.2 1320 中段 10.5 线 12 号矿体矿化分带图

垂直方向上，同样显示出矿化分带性（图 3.3），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。

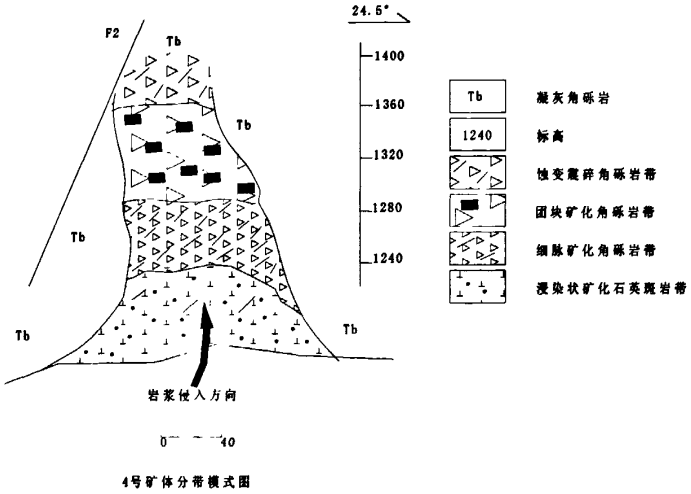


图 3.3 4 号矿体分带模式图

3.2.2 矿物成分、结构构造及其空间分布特征

1）矿物成分及结构构造特征

支家地矿区的隐爆角砾岩型矿体的角砾以石英斑岩为主，并有凝灰角砾岩、白云岩、火山角砾岩、片麻岩和硫化物矿化角砾、铁闪锌矿角砾，胶结物主要为硫化物、长英质熔岩、热液蚀变石英、方解石、绢云母等。显示隐爆角砾岩型矿体的成矿发生于火山岩形成之后，同时也晚于石英斑岩。

显微镜下观察到的主要矿物成分为石英、长石（钾长石为主，少量斜长石）、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、方解石、白云石等，次要矿物包括白云母、绢云母、黑云母、绿泥石等，极少见到银矿物。通过 X 射线衍射分析（表 3.1）确认隐爆角砾岩型矿体矿石样品的脉石矿物主要为石英、绿泥石，金属矿物主要为黄铁矿、闪锌矿、方铅矿。大量富钾的钾长石、白云母及绢云母等矿物的出现，说明成矿与钾化有关。

矿区矿石的结构、构造具有多样性，主要有自形—半自形粒状、它形粒状、碎裂结构，角砾构造、浸染状构造及细脉构造。隐爆角砾岩型矿体主要为角砾构造，角砾形态多种，一种为棱角状可拼接角砾（照片 3.1），另一种为次磨圆—磨圆状角砾（照片 3.2），成分主要为石英斑岩、火山角砾岩、白云岩和硫化物矿化角砾，角砾间充填方铅矿、闪锌矿等硫化物。

矿区矿石中值得注意的特征之一是可以反映成矿世代信息的金属矿物的结构构造，如闪锌矿分为两种，一种为被基质溶蚀的闪锌矿，含 3%~40%的乳滴黄铜矿，常与石英或方解石或绢云母或它们的集合体共生；一种基本不含乳滴状黄铜矿的闪锌矿，与黄铁矿共生，并溶蚀黄铁矿，部分受硅化的影响颜色由棕黄退色至无色。黄铁矿也可分为两种，一种为星点状，大小 20μm-80μm，呈浸染状分布于基质中；一种主要呈团块状，与闪锌矿共生，粒径较粗，约 100μm～800μm。方铅矿也可分为两种，一种含杂质较多，被闪锌矿溶蚀；另一种较纯净，呈脉状，常与其它硫化物、石英、绢云母共生。基于此，重点对可以反映矿物形成次序、成矿环境特点等意义的结构、构造进行观察，结果简述如下：

（1）自形晶与它形晶结构：普遍存在，但矿区一种矿物可表现出不同的晶形，这种差异可能与不同世代相关，如星点状黄铁矿为早期黄铁矿（照片 3.3），自形程度高、粒径较粗的黄铁矿为晚期黄铁矿（照片 3.4）。

（2）黄铜矿乳滴结构：黄铜矿以乳滴状、叶片状或条纹状分布于闪锌矿中（照片 3.5），闪锌矿中乳滴状黄铜矿含量为 1~5%，部分可达 40%。

（3）交代骸晶结构：如方铅矿被石英、白云母溶蚀交代为骸晶（照片 3.6）。

（4）港湾状结构：普遍发育，较早期的方铅矿多为闪锌矿等溶蚀呈不规则港湾状（照片 3.7）。

（5）角砾构造：隐爆角砾岩型矿体最主要的构造，常见的由不同角砾组成的角砾构造有：矿化岩石角砾、碳酸盐岩角砾、黄铁矿角砾、闪锌矿角砾、石英、闪锌矿角砾等。

这些角砾有较好的成因指示意义，如矿化岩石角砾中可见硅化凝灰角砾岩边缘为晚期棕黄色闪锌矿、方铅矿围绕（照片 3.8）；碳酸盐岩角砾为棱角状，其中可有硫化物沿微细裂隙分布，或者为黄铁矿所包围（照片 3.9），说明黄铁矿对角砾进行了交代溶蚀；黄铁矿角砾主要为棱角状，角砾可达 2cm，并为闪锌矿、方铅矿胶结；闪锌矿角砾为方铅矿溶蚀。这些角砾具有可拼和复原性，其成因意义体现在，成矿晚于火山活动，同时显示了正常的矿物结晶顺序，即黄铁矿→闪锌矿→方铅矿。石英、闪锌矿角砾（照片 3.10）中的石英为硅化产物，为等粒集合体，与闪锌矿共生，角砾边缘为蚀变绢云母所包围，胶结物除了石英、绢云母外，还出现碳酸盐、方铅矿、闪锌矿，说明早期闪锌矿形成角砾后，再出现新的闪锌矿化和方铅矿化，显示了角砾与矿化胶结物两期矿化。方解石、硫化物集合体角砾（照片 3.11）为浑圆状，方铅矿边缘为方解石溶蚀，角砾边缘分布的星点黄铁矿（照片 3.12）形成不完整的环圈，角砾为含星点状黄铁矿的长英质物胶结，说明硫化物角砾岩形成后，矿区还存在后期的黄铁矿化及岩浆活动。

（6）溶蚀构造：普遍发育，如闪锌矿溶蚀黄铁矿，使黄铁矿成为港湾状残留体；矿区还见一些与正常结晶次序不一致的现象，如方铅矿“核”、闪锌矿“幔”的核-幔构造（照片 3.13）。

（7）细脉构造：矿区见不规则闪锌矿、黄铁矿细脉，脉体延伸短，脉壁不平直，脉内充填物分段富集。显微镜下观察到方铅矿细脉穿切黄铁矿、闪锌矿角砾，脉中的方铅矿及闪锌矿较角砾中的方铅矿、闪锌矿纯净（照片 3.14）。

（8）环带及核环构造：表现为次棱角状的矿化角砾发育多层环带构造（照片 3.15-照片 3.16-照片 3.17-照片 3.13），核为方铅矿、黄铁矿、闪锌矿，向外分别出现闪锌矿+黄铁矿+方解石环、方铅矿+石英环、闪锌矿+石英环，这种多层环带现象，特别是硫化物的交替出现说明了成矿过程的多阶段性或振荡性。

2）矿物组成、结构构造空间分布特征

由边缘向内部、由上至下，隐爆角砾岩型矿体显示出矿化分带特点，其矿物组合也相应显示了从上到下、由外到里为方铅矿—（铁）闪锌矿—黄铜矿化的由较低温度到较高温度的变化，越接近矿体中心，闪锌矿含量增多，并可出现黄铜矿。根据硫化物的结晶温度差异以及与岩浆岩温度场空间分布格局的对应关系，可以提供矿体出露位置的信息，当揭露的地质体显示为硅化碎裂岩或硅化细脉，或主要为方铅矿矿化时，可以认为揭露的部位尚处于矿体的边缘或顶部，向下矿化将增强；如果揭露矿体的矿石以闪锌矿为主，并出现黄铜矿，则矿化向上延伸的可能性更大。

表 3.1 山西灵丘支家地银铅锌矿 X 射线衍射分析

样品编号	采样位置	样品描述	结果(%)										
			石英	黄铁矿	闪锌矿	方铅矿	钾长石	白云母	白云石	方解石	绿泥石	斜锆石	多硅锂云母
0506-3	1320 中段-0.5 线 1 号矿体	石英斑岩	8.46	7.42			59.68	24.44					
0502-19	ZK4203　98.5m	石英斑岩	7.8	5.22			69.1	17.88					
0502-26	ZK4203　155.2m	石英斑岩	7.85	3.89			73.39	14.87					
0503-1	1360 中段 5 线 4 号矿体	石英斑岩	7.73	5.2	2.34		66	18.25	0.48				
0504-5	1280 中段 5.5 线 4 号矿体	石英斑岩	3.97	1.98	5.04	0.06	46.37	41.49	1.09				
0504-1	1280 中段 9 线 2 号矿体	石英斑岩	4.52	1.57		1.29	87.7	4.92					
0507-7	1320 中段 9 线 1 号矿体	石英斑岩	4.88	4.69			32.98	6.75		50.7			
0502-10	ZK8205　136.5m	凝灰角砾岩	33.73	19.11		0.61	34.12	9.43				3	
0505-7	1320 中段 11 线 1 号矿体	凝灰角砾岩	9.41	4.58			35.34	47.19		3.48			
0502-32	ZK4203　259.5m	4 号矿体矿石	6.52	56.32	26.39	6.88					3.89		
0512-4	ZK8207　270.4m	6 号矿体矿石	5.39	30.7	50.14	13.77							
0502-33	ZK4203　278m	白云岩	4.7		0.31			56.34	32.68	5.97			
0512-8	ZK8207　430m	白云岩	1.49	2.63	0.26				95.62				
0503-14	1360 中段 0.8 线新 1 号矿体	隐爆角砾岩	11.33	4.07			57.35	19.7		7.55			
0506-5	1320 中段 0 线 1 号矿体	隐晶质岩	5.6	41.76		2.17	2.19	43.17					5.11

单一的隐爆角砾岩型矿体显示构造空间上的变化，以矿化最强处为中心，在中心处矿石以角砾构造为主，角砾成份主要为石英斑岩，且角砾磨圆度较高，向外角砾磨圆度下降，逐渐过渡至未发生位移的碎裂角砾，并可出现凝灰角砾岩等其它岩性角砾。胶结物由硫化物变化为硅化石英、绢云母等。矿区从 NW 向 SE，隐爆角砾岩显示角砾特征的变化，角砾大小由 NW 向 SE 逐渐下降，NW 端角砾大小一般小于 20cm，而向 SE 至 10 线坑道揭露出的角砾的明显增大，粒度不但可超过 20cm，最大可达分米至米级。

3.2.3 矿体地球化学特征

1）稀土元素与微量元素特征

由表 3.2、图 3.4 可知，隐爆角砾岩型矿石的稀土元素总量明显低于石英斑岩、凝灰角砾岩及隐爆角砾岩胶结物（详见 4.2.2），其稀土总量（ΣREE）为 9.51ppm，轻重稀土比值(LREE/HREE)为 4.64，La/ Yb 值为 9.19，Eu 负异常较明显(δEu=0.69)，显示轻稀土的轻微富集，其配分模式均为右倾型。

从原始地幔标准化图（图 3.5）上可以看出，隐爆角砾岩型矿石显示出 V、Rb、Zr、Ba、Ta 不同程度的正异常及 Ti、Ni、Ge、Sr、Nb 的负异常。

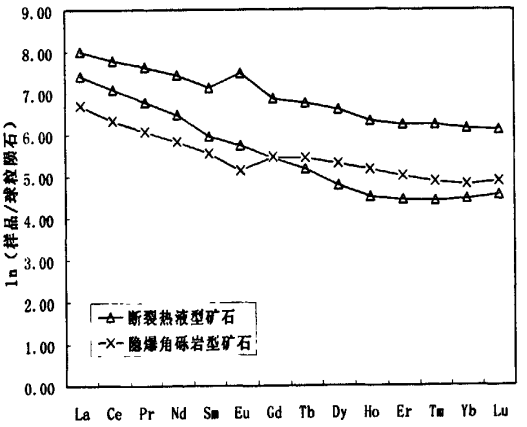


图 3.4 矿石稀土元素球粒陨石标准化分布型式图

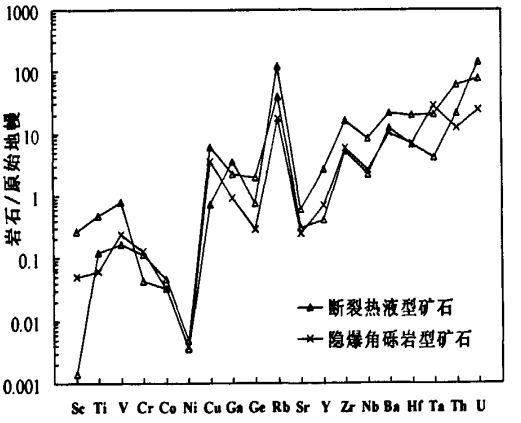


图 3.5 矿石微量元素原始地幔标准化蛛网图

注：为了突出矿石与岩石稀土元素分布的区别，在稀土元素球粒陨石标准化分布型式图中对矿石样品的数据作“原始值×100”处理。

2）微束分析

（1）硫化物中元素的含量特点

利用电子探针、扫描电镜能谱仪对隐爆角砾岩型矿体的主要硫化物进行了元素含量分析（表 3.3），分析结果处理为蛛网图（图 3.6）。结果显示从黄铁矿→闪锌矿→方铅矿，Ag 含量略显下降趋势（黄铁矿的 9 个测点有 6 个测点含 Ag，含量 0~0.236%；闪锌矿的 7 个测点有 1 个测点含 Ag，含量 0~0.014%；方铅矿的 11 个测点有 2 个含 Ag，含量 0~0.025%）；Sb、Sn 含量显示从方铅矿→黄铁矿→闪锌矿递

减的规律（方铅矿 11 个测点有 6 个测点含 Sb，含量 0~0.045%；黄铁矿的 9 个测点有 8 个测点含 Sb，含量 0~0.04%；闪锌矿的 7 个测点有 4 个测点含 Sb，含量 0~0.023%；方铅矿的 11 个测点中 4 个含 Sn，含量 0~0.047%；黄铁矿的 9 个测点有 4 个含 Sn，含量 0~0.033%；闪锌矿的 7 个测点有 2 个含 Sn，含量 0~0.027%），且部分黄铁矿、方铅矿中的 Sn 含量高于 Zn、Cu；Cu 在闪锌矿中含量（0~0.267%）最高，方铅矿中含量（0~0.071%）最低。

（2）硫化物中相关元素的空间分布规律

采用微束分析方法对硫化物单矿物进行相关元素含量分析，获得其在水平及垂直方向的变化特点。样品分别取自 ZK4204 号钻孔的 58.3m、ZK4203 号钻孔的 283m 及 1360 中段 5.5 线（4 号矿体）、ZK8205 号钻孔的 144.8m（6 号矿体）处：

方铅矿：同一中段，Ag、Co 含量从 NW-SE 总体增加，Cr、Sn 元素含量减少，Fe、Sb 元素变化不大；同一勘探线，深部 Cu、Fe、Cr、Sn、Sb 含量较浅部高，Co 含量较浅部少。

闪锌矿：同一中段，只有 4 线浅部样品含 Ag，NW 和 SE 端都不含 Ag，Fe、Cr 元素从 NW 到 SE 含量增加，Pb 略趋向分布于 NW 端；同一勘探线，Fe、Ni、Cu、Co 多分布于深部，Sn、Sb 元素则略趋向分布于浅部。

黄铁矿：同一中段，Pb 从 NW 到 SE 含量增加；同一勘探线，Ag 富集在海拔较高处，而 Cu、Sn、Zn、Cr 则趋向富集于海拔较低处；Co、Sb 含量变化不大，没有明显规律。

就 Ag 含量的空间分布规律而言，矿区 4 号勘探线钻孔样品中硫化物的 Ag 含量为 0~0.049%；1360 中段 5.5 号勘探线测点普遍含 Ag，为 0~0.039%，偶见含量较高点，达 0.236%；8 号勘探线钻孔的 Ag 含量为 0~0.035%。总体反映出，从 NW—SE，隐爆角砾岩型矿体硫化物中的银含量逐渐减少，银的富集由 NW 向 SE 倾伏，且海拔较高处富 Ag。

3.3 断裂热液充填型矿体主要特征

3.3.1 矿体空间分布及形态特征

断裂热液充填型矿体主要为 1 号、5 号、6 号及 9 号矿体。矿体总体走向为 115°~125°，倾向 SW、NE，倾角 65°~70°。F2 断层上盘的矿体与 F2 断层的产状近似，多倾向 SW，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。

1 号矿体：为矿区最主要的断裂热液充填型矿体，赋存于 F_2 断裂带中，-2 号勘探线至 12 号勘探线工程对其进行了有效控制，控制矿体长 510m，延深大于 700m，矿体沿走向和倾向呈舒缓波状分布，在 NW 端的-2 线至 2 线处，1 号矿体并不仅仅分布在 F2 断裂带中，在其旁侧白云岩与凝灰角砾岩的接触带处出现走向近 NNW 的矿体（新 I 号矿体），它们呈平行脉状分布，成组出现（图 3.7），与 F2 断层走向斜交，倾角较大，一般不小于 80°，出露宽度可达 1.2 米。该矿体对围岩无选择性，与围岩呈断层接触，如沿其走向围岩可由白云岩变为凝灰角砾岩，或变为石英斑岩及火山角砾岩。矿体在垂直方向具有向下脉幅变宽、规模加大的特点。矿物组成以黄铁矿、方铅矿、闪锌矿为主。

断裂热液充填型矿体可细分为三类，一类与 F2 断裂有关，该类矿体矿化以方铅矿化和闪锌矿化为主，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的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；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，深入了解其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。

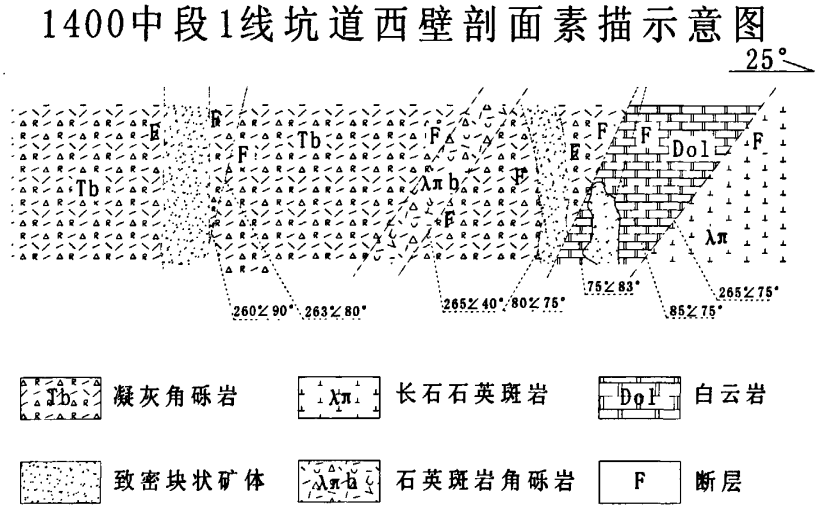


图 3.7 1400 中段裂隙热液充填型矿体成组出现及产状素描示意图

综上，隐爆角砾岩型矿体与断裂热液充填型矿体在空间分布、形态上的差异说明，这两类矿体受到不同成矿机制、控矿构造的控制，反映出支家地矿床是基于岩浆期后热液的两种矿床成矿作用而形成。

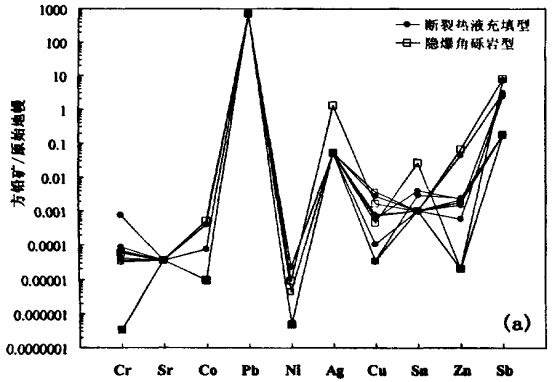
表 3.2 山西灵丘支家地银铅锌矿微量元素及稀土元素分析表（$\times 10^{-6}$）

样品描述	样号	Sc	Ti	V	Cr	Co	Ni	Cu	Ga	Ge	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Hf	Ta	Th	U
4 号矿体矿石	0502-32	0.86	90.77	19.34	385.30	3.39	8.36	101.20	3.57	0.39	13.07	6.79	2.36	48.91	1.47	57.31	1.95	0.71	0.80	0.50
6 号矿体矿石	0512-4	0.02	187.80	14.01	344.20	4.96	10.24	173.50	8.74	2.61	30.05	8.74	1.40	44.33	1.28	68.68	1.86	0.11	1.39	2.99
6 号矿体矿石	0512-5	4.50	707.60	65.00	128.20	3.51	7.63	21.18	13.78	0.99	92.04	16.63	9.33	134.60	4.66	119.00	5.65	0.53	3.87	1.63
石英斑岩	0502-19	3.29	764.40	13.23	394.70	4.32	14.43	25.64	26.73	1.38	507.60	69.33	9.32	424.30	21.00	406.40	18.89	1.05	15.70	4.78
	0502-26	3.40	663.30	12.69	131.90	3.22	9.13	22.71	23.85	1.10	469.60	53.10	9.09	340.00	21.07	518.90	16.90	0.92	16.60	5.03
	0502-24	5.12	890.50	12.57	738.50	6.43	15.37	24.93	32.11	1.73	476.70	39.55	12.14	508.20	23.40	605.90	27.97	0.94	21.78	5.76
	0504-5	6.77	2354.40	34.67	34.94	10.71	54.65	20.31	26.68	0.72	538.40	64.07	11.23	637.10	16.02	840.60	24.28	0.36	15.21	4.87
	0503-1	2.57	736.50	10.26	69.22	4.52	12.63	20.42	23.55	1.26	575.10	51.54	7.77	406.00	18.96	652.30	19.42	0.79	15.93	4.91
	0506-3	3.86	1524.30	20.56	207.10	5.70	10.36	21.64	21.64	1.52	476.80	48.45	9.36	452.40	21.01	1212.70	16.26	0.97	17.80	7.11
	0507-4	5.39	2485.60	34.09	47.14	4.76	6.96	10.65	27.77	1.52	541.30	77.32	10.60	489.60	18.71	730.10	20.67	0.75	13.80	4.17
	0507-7	2.98	756.80	9.34	152.00	3.33	9.42	25.93	21.52	1.63	532.10	41.51	7.19	353.40	16.25	356.90	17.31	1.43	16.03	4.82
	0503-12	3.58	1432.20	19.47	14.45	5.62	9.88	14.01	21.10	1.00	599.40	58.44	8.79	445.20	23.33	1013.60	20.40	1.22	17.83	5.72
	0504-1	2.47	579.90	12.46	64.33	10.14	88.06	33.45	12.36	0.86	294.70	32.46	4.51	200.70	10.91	472.10	10.62	0.37	9.58	2.95
	0506-9	6.54	2105.30	39.45	50.95	7.59	10.54	52.96	29.78	1.51	415.40	70.40	10.99	398.50	15.75	691.90	16.59	0.59	11.86	4.36
	0506-10	3.64	1620.40	26.71	161.60	9.06	11.45	40.72	18.01	1.77	281.40	52.37	7.54	348.20	12.80	592.50	14.42	0.67	9.79	3.52
	0501-19	6.17	1866.60	46.89	188.60	9.79	12.73	71.61	30.83	2.03	399.00	49.99	9.12	392.40	12.72	598.20	16.00	0.49	11.84	3.90
	0502-10	4.73	1807.60	30.84	553.40	8.40	15.03	100.50	19.00	1.82	409.50	53.67	8.56	417.80	11.95	730.60	14.51	0.50	13.37	4.92
凝灰角砾岩	0502-5	4.88	1629.10	50.03	52.61	5.85	9.71	77.16	18.55	1.47	265.30	41.26	7.89	365.10	13.34	557.50	14.85	0.77	9.57	3.62
	0502-15	4.63	1681.50	27.06	103.60	6.70	10.60	22.01	18.87	1.25	382.40	114.10	8.46	374.30	12.50	925.10	13.29	0.72	12.61	2.92
	0502-17	5.81	1947.50	28.18	105.60	4.88	9.36	12.56	23.05	1.42	438.20	57.10	8.47	388.80	16.62	549.10	15.50	0.62	13.58	3.94
	0505-7	6.83	2583.30	43.19	1398.50	12.78	23.33	17.82	25.05	2.14	535.40	64.19	11.06	482.40	18.00	563.10	18.82	0.75	12.33	4.90
隐爆角砾岩	0503-14	3.65	1449.90	20.24	112.10	4.52	8.61	10.68	21.40	1.57	507.50	53.16	8.65	384.20	22.19	1030.70	18.35	0.73	17.04	5.95

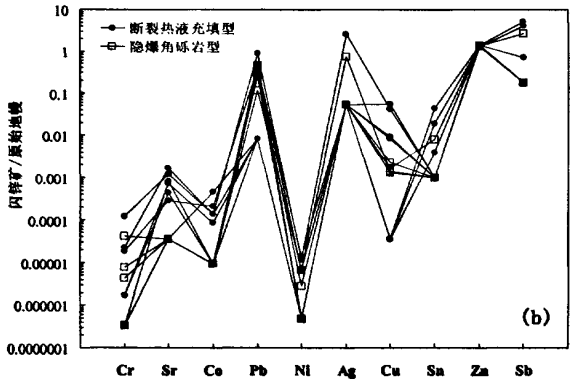
样品描述	样号	Sc	Ti	V	Cr	Co	Ni	Cu	Ga	Ge	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Hf	Ta	Th	U
角砾胶结物	0504-7	5.56	2752.10	40.68	1267.60	12.26	21.62	26.72	20.35	2.17	499.00	79.45	10.20	564.10	13.59	1114.90	19.54	0.78	7.07	21.88
白云岩	0512-8	1.76	145.60	17.98	320.10	4.02	12.93	6.31	1.80	0.22	14.66	29.42	2.03	42.98	1.36	74.91	1.32	0.09	0.80	1.95
	0502-28	0.18	125.80	7.31	356.60	2.80	9.80	12.63	1.79	1.25	11.30	110.10	1.96	34.25	1.64	74.77	1.18	0.27	0.70	0.56
	0502-33	0.39	200.40	8.78	200.20	3.50	11.34	12.73	2.24	1.44	25.69	166.70	3.31	41.66	1.58	114.80	1.65	0.11	1.00	0.75
隐晶质岩	0506-5	4.69	1898.40	20.35	62.42	5.26	8.23	75.46	29.29	1.40	470.70	16.85	10.45	412.50	31.80	385.30	21.49	1.53	27.02	8.72

样品描述	样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE/HREE	La/Yb	δEu	δCe
4 号矿体矿石	0502-32	1.93	3.41	0.41	1.58	0.39	0.10	0.48	0.09	0.51	0.10	0.25	0.03	0.21	0.03	9.51	4.64	9.36	0.69	0.89
6 号矿体矿石	0512-4	3.91	7.25	0.83	3.01	0.59	0.18	0.47	0.07	0.30	0.05	0.14	0.02	0.15	0.02	17.01	12.89	26.61	1.01	0.94
6 号矿体矿石	0512-5	7.03	14.74	1.96	7.87	1.90	1.03	1.97	0.32	1.90	0.31	0.85	0.13	0.80	0.12	40.94	5.39	8.78	1.61	0.96
石英斑岩	0502-19	24.29	49.05	5.89	20.13	3.79	0.48	2.83	0.35	1.60	0.27	0.73	0.11	0.75	0.12	110.39	15.33	32.21	0.43	0.97
	0502-26	18.30	38.80	4.64	16.09	3.05	0.22	2.15	0.31	1.65	0.30	0.82	0.13	0.81	0.12	87.38	12.91	22.68	0.25	1.01
	0502-24	22.60	45.45	5.48	19.30	3.81	0.30	2.88	0.42	2.26	0.40	1.06	0.17	1.10	0.19	105.40	11.45	20.58	0.26	0.97
	0504-5	36.86	70.40	8.36	29.08	5.00	0.79	3.47	0.40	2.00	0.36	1.03	0.16	0.98	0.16	159.05	17.58	37.61	0.55	0.94
	0503-1	31.07	56.40	6.60	22.22	3.76	0.57	2.43	0.29	1.46	0.26	0.74	0.12	0.78	0.12	126.80	19.49	39.83	0.54	0.92
	0506-3	37.81	67.90	7.49	24.70	3.85	0.65	2.69	0.31	1.64	0.29	0.84	0.14	0.94	0.15	149.40	20.35	40.14	0.59	0.93
	0507-4	37.26	69.30	8.04	28.48	4.66	1.03	3.27	0.41	2.08	0.36	1.00	0.15	0.96	0.16	157.14	17.76	38.65	0.76	0.94
	0507-7	25.06	48.40	5.63	18.94	3.26	0.49	2.30	0.29	1.41	0.25	0.70	0.10	0.71	0.12	107.65	17.34	35.50	0.52	0.96
	0503-12	36.04	63.70	6.80	22.07	3.30	0.60	2.52	0.30	1.54	0.29	0.87	0.14	0.97	0.17	139.31	19.49	37.08	0.61	0.93
	0504-1	18.77	31.19	3.69	12.92	2.21	0.36	1.58	0.20	0.94	0.16	0.44	0.07	0.45	0.07	73.05	17.71	41.90	0.57	0.86
	0506-9	31.33	59.86	7.27	25.42	4.26	1.03	3.22	0.43	2.13	0.36	0.99	0.15	0.96	0.15	137.56	15.40	32.74	0.81	0.94
	0506-10	32.70	60.25	6.98	23.52	3.90	0.91	2.83	0.32	1.44	0.24	0.64	0.10	0.63	0.11	134.58	20.32	51.74	0.80	0.93
凝灰角砾岩	0501-19	29.69	57.54	6.92	24.19	4.10	0.74	3.00	0.36	1.72	0.31	0.85	0.12	0.79	0.14	130.46	16.91	37.53	0.62	0.95
	0502-10	24.17	45.92	5.50	19.58	3.31	0.81	2.46	0.31	1.63	0.28	0.81	0.12	0.82	0.12	105.85	15.14	29.44	0.83	0.94

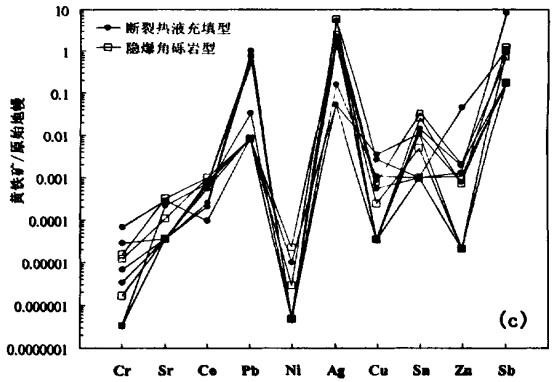
样品描述	样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE/HREE	La/Yb	δEu	δCe
凝灰角砾岩	0502-5	22.61	42.56	5.01	17.56	3.03	0.69	2.21	0.29	1.44	0.27	0.75	0.12	0.79	0.13	97.44	15.28	28.62	0.78	0.94
	0502-15	39.62	69.98	7.87	26.49	4.19	0.99	3.06	0.33	1.60	0.25	0.71	0.10	0.65	0.11	155.96	21.89	60.77	0.81	0.91
	0502-17	38.01	69.42	7.87	26.90	4.28	1.14	2.95	0.34	1.62	0.27	0.83	0.11	0.78	0.12	154.64	21.02	48.54	0.93	0.93
	0505-7	31.59	60.51	7.13	25.22	4.26	0.99	3.20	0.40	2.03	0.35	0.95	0.15	0.97	0.15	137.89	15.83	32.67	0.78	0.95
隐爆角砾岩	0503-14	37.86	68.27	7.60	24.51	3.79	0.59	2.64	0.30	1.62	0.30	0.81	0.14	0.91	0.15	149.48	20.78	41.65	0.54	0.93
角砾胶结物	0504-7	38.99	72.51	8.50	29.29	4.75	1.14	3.65	0.45	2.09	0.35	0.89	0.13	0.87	0.14	163.75	18.11	44.92	0.80	0.93
	0512-8	3.10	5.13	0.60	2.08	0.37	0.14	0.36	0.05	0.28	0.06	0.16	0.02	0.16	0.03	12.51	10.35	19.99	1.13	0.86
白云岩	0502-28	3.89	7.12	0.84	3.09	0.56	0.43	0.47	0.07	0.34	0.06	0.16	0.02	0.15	0.02	17.22	12.30	26.48	2.47	0.92
	0502-33	5.22	9.09	1.13	4.11	0.81	0.36	0.78	0.11	0.61	0.10	0.27	0.04	0.22	0.03	22.89	9.59	24.28	1.38	0.88
隐晶质岩	0506-5	51.91	91.58	10.12	32.79	4.88	1.29	3.45	0.39	1.89	0.34	0.94	0.17	1.21	0.20	201.15	22.43	42.87	0.91	0.92



a.方铅矿元素原始地幔标准化蛛网图



b.闪锌矿元素原始地幔标准化蛛网图



c.黄铁矿元素原始地幔标准化蛛网图

图 3.6 矿石硫化物元素原始地幔标准化蛛网图

表 3.3 山西灵丘支家地银铅锌矿电子探针及能谱分析表（$\times 10^{-2}$）

类型	方法	样号	测点	点性	Cr	Sr	Fe	S	Co	Pb	Ni	Ag	Cu	Sn	Zn	Sb	In	Total
断裂热液充填型矿体	电子探针	0503-13	3-13-1-1	方铅矿	0.098	-	0.024	13.362	-	85.82	-	-	0.108	-	-	-		99.408
			3-13-1-2		0.268	-	0.056	12.813	0.025	84.46	0.009	-	0.09	0.018	2.463	0.017		100.22
			3-13-2-2		0.118	-	-	13.537	0.033	85.97	0.064	-	-	0.044	0.087	-		99.848
			3-13-2-3		0.263	-	0.143	13.183	-	86.02	-	-	0.027	-	1.123	0.029		100.79
		0506-21	6-21-1-1		0.21	-	0.018	12.785	-	82.39	-	-	-	-	-	0.042		95.449
			6-21-1-3		0.023	-	0.086	13.479	0.02	87.01	-	-	0.07	0.006	0.03	-		100.73
			6-21-1-6		0.041	-	-	13.38	0.033	86.6	-	-	0.027	-	0.11	-		100.19
		0507-22	7-22-2-1		0.125	-	0.072	13.658	0.008	85.38	-	-	0.082	-	0.028	0.014		99.371
			7-22-2-2		0.132	-	0.121	13.57	-	86.49	0.045	-	-	-	-	-		100.35
			7-22-2-5		0.125	-	-	12.524	-	84.71	-	-	-	0.016	3.308	0.043		100.72
		0502-14	2-14-1-3		-	-	0.164	13.29	0.042	85.88	0.047	-	0.003	-	0.105	-		99.529
			2-14-2-2		0.279	-	0.06	13.284	-	85.91	-	-	-	-	0.06	-		99.596
			2-14-2-4		0.194	-	0.101	12.874	-	81.76	-	-	0.259	-	4.802	-		99.987
			2-14-3-2		0.15	-	0.065	13.402	-	85.63	-	-	0.02	0.004	0.018	0.004		99.296
		0506-11	6-11-1		0.109	-	0.025	13.455	-	86.13	-	-	0.023	0.001	0.074	0.017		99.833
		0507-8	7-8-2-1		2.288	-	0.045	12.782	-	84.39	-	-	0.018	0.004	0.111	-		99.633
		0505-9	5-9-1-3		0.189	-	0.07	13.815	-	86.69	-	-	-	0.003	0.116	-		100.88
			5-9-1-4		0.123	-	-	13.611	-	87.15	-	-	-	0.051	0.064	-		101
			5-9-2-2		0.257	-	0.272	13.508	-	85.44	0.031	-	-	-	-	-		99.508
			5-9-2-4		0.235	-	0.029	12.93	-	84.36	-	-	0.023	-	2.888	0.084		100.55
	能谱	0503-13	3131_1				0.86			94.23		0.62	-	-	2.65	1.64	-	100
			3132_2				1.42			91.97		-	1.66	-	3.93	1.03	-	100.01
			3132_4				1.32			90.31		-	1.75	1.21	2.15	2.48	0.79	100.01
			3133_1				1.57			90.72		0.63	1.37	-	4.36	1.36	-	100.01
		0507-22	0722-13				0.72	21.57		39.68		1.54	0.68	0.99	32.06	1.24	1.53	100.01
			0722-31				0.65			97.53		-	0.67	0.29	0.53	0.33	-	100
			0722-41				0.48			97.98		-	-	-	1.54	-	-	100
			0722-42				0.45			94.51		1.56	0.38	1.37	0.74	0.6	0.38	99.99
			0722-43				0.33			97.52		0.45	0.4	-	0.39	0.6	0.31	100
		0502-14	2141_2				0.86			95.96		0.76	-	0.44	-	0.95	1.04	100.01
			2141_5				2.77			86.61		-	-	0.87	7.28	1.63	0.83	99.99
			2141_7				1.82			91.59		-	-	-	5.61	-	0.98	100

类型	方法	样号	测点	点性	Cr	Sr	Fe	S	Co	Pb	Ni	Ag	Cu	Sn	Zn	Sb	In	Total
断裂热液充填型矿体	能谱	0505-9	591-4				0.48			89.9		1.83	-	2.16	0.92	2.65	2.05	99.99
			592-1				2.16			87.95		1.47	2.24	0.62	2.13	2.13	1.3	100
			592-2				0.97			93.1		1.35	-	1.88	2.71	-	-	100.01
		0502-21	0221-1				0.87			98.06		-	0.48	-	0.58	-	-	99.99
			0221-21				0.88			98.12		-	0.57	-	0.43	-	-	100
			0221-22				0.6			96.71		0.79	0.67	0.21	0.64	-	0.39	100.01
			0221-24				0.73			89.2		-	0.95	-	9.12	-	-	100
			0221-31				0.59			94.08		-	0.78	-	4.2	0.35	-	100
			0221-32				0.63			98.59		-	0.19	-	0.6	-	-	100.01
			0221-33	方铅矿			0.55			96.5		-	0.53	-	2.42	-	-	100
隐爆角砾岩型矿体	电子探针	0501-4	1-4-2-1		-	-	0.005	13.505	-	86.6	0.009	-	-	-	0.089	-		100.21
			1-4-2-2		0.043	-	0.022	13.406	0.03	86.8	-	-	0.04	-	0.104	0.016		100.46
		0502-35	2-35-1-2		-	-	0.019	13.51	-	86.6	-	-	0.013	0.027	-	-		100.17
			2-35-2-2		0.408	-	0.714	13.119	-	82.97	-	-	0.025	-	2.888	-		100.12
			2-35-2-4		0.118	-	0.345	13.23	-	85.3	-	-	-	0.007	0.161	0.019		99.179
		0503-4	3-4-1-1		0.082	-	0.04	13.271	-	87.49	-	-	0.023	-	-	-		100.91
			3-4-1-4		0.177	-	0.145	12.439	0.053	84.58	0.019	0.025	0.048	-	3.231	0.045		100.76
			3-4-2-1		0.08	-	-	13.508	0.069	86.31	0.036	0.013	-	-	-	0.029		100.05
		0502-9	2-9-2		0.263	-	0.153	12.871	-	84.7	-	-	0.02	-	2.227	0.017		100.25
			2-9-3		0.077	-	0.028	13.975	-	86.53	-	-	0.071	0.008	-	0.007		100.7
			2-9-6		0.093	-	0.305	12.905	-	83.47	-	-	-	0.047	3.658	-		100.48
		0503-13	3-13-1-3		0.023	-	1.261	33.297	-	0.054	-	-	0.048	0.008	64.63	-		99.319
			3-13-2-1		-	-	1.781	33.427	-	0.22	0.028	-	0.134	-	64.67	0.035		100.3
断裂热液充填型矿体		0506-21	6-21-1-7		0.005	0.02	0.862	33.593	0.009	-	-	-	0.232	-	64.97	0.029		99.717
		0507-22	7-22-1-2		0.066	0.047	0.146	33.652	0.014	-	-	-	-	0.004	66.18	-		100.11
			7-22-2-3		-	0.036	0.192	33.91	0.037	-	-	-	0.021	0.016	65.36	0.002		99.573
		0502-14	2-14-1-5	闪锌矿	0.056	0.008	2.574	34.402	0.022	0.046	0.014	-	-	0.019	63.19	-		100.33
			2-14-2-6		0.003	0.018	2.541	34.633	0.026	-	-	-	0.257	-	63.36	-		100.84
			2-14-3-1		0.02	-	3.025	34.149	-	-	0.002	-	-	0.005	63.51	-		100.71
			2-14-3-3		0.048	-	1.499	33.743	0.005	-	0.008	-	0.048	0.022	64.31	0.004		99.686
		0506-11	6-11-2		0.235	-	1.377	33.648	0.033	-	-	-	-	-	64.39	0.023		99.703
			6-11-4		0.357	0.034	1.978	33.48	0.014	0.106	0.025	0.049	1.181	-	63.17	-		100.39
		0507-8	7-8-1-3		-	-	1.633	33.031	0.048	-	-	-	-	0.043	65.45	0.004		100.21
			7-8-2-4		0.02	-	1.204	33.23	0.01	-	-	0.329	0.148	0.064	65.49	-		100.49

类型	方法	样号	测点	点性	Cr	Sr	Fe	S	Co	Pb	Ni	Ag	Cu	Sn	Zn	Sb	In	Total
断裂热液充填型矿体	电子探针	0505-9	5-9-1-2	闪锌矿	-	0.023	3.678	33.683	-	-	-	-	1.532	0.001	61.41	-		100.32
			5-9-2-3		0.005	0.012	3.688	34.01	-	0.044	-	-	1.281	0.001	61.78	-		100.82
	能谱	0503-13	3132_3				2.9	28.68				2.19	4.04	1.97	55.17	2.58	2.47	100
			3131_3				2.13	29.39				2.15	2.45	2.39	57.71	1.96	1.82	100
			3133_3				3.27	32.27				0.66	-	0.74	60.44	0.97	1.66	100.01
		0507-22	0722-11				0.5	32.56				0.37	0.62	0.44	64.81	0.2	0.49	99.99
			0722-32				1.06	33.24				1.1	0.91	0.62	60.9	0.91	1.27	100.01
			0722-44				0.51	32.8				0.48	0.56	0.48	64	0.33	0.83	99.99
		0502-14	2141_1				5.42	30.27				0.94	-	-	60.6	1.3	1.47	100
		0505-9	591-1				4.22	30.67				-	4.39	-	60.72	-	-	100
			592-3				3.78	29.26				1.84	2.49	1.95	57.12	1.98	1.58	100
		0502-21	0221-3				2.02	33.44				0.16	0.96	0.33	62.12	0.21	0.75	99.99
隐爆角砾岩型矿体		0501-4	1-4-1-1		0.124	-	2.377	34.089	-	0.014	0.014	0.014	0.04	-	63.53	0.015		100.22
			1-4-2-3		0.041	-	2.81	33.826	-	0.042	-	-	0.027	0.027	63.84	-		100.62
		0502-35	2-35-1-3		0.013	-	6.016	34.308	-	0.034	0.006	-	0.065	-	60.06	-		100.5
			2-35-2-1		-	-	5.65	33.635	0.019	-	0.024	-	0.086	-	59.7	0.008		99.125
		0503-4	3-4-1-2		-	-	2.239	33.727	-	0.03	-	-	0.038	-	63.56	-		99.592
			3-4-2-2		0.056	-	1.704	33.125	0.027	0.042	-	-	-	0.05	64.27	0.018		99.29
		0502-9	2-9-1		0.005	0.012	5.485	34.151	-	0.053	0.029	-	0.267	-	60.49	0.023		100.51
断裂热液充填型矿体	电子探针	0503-13	3-13-1-4	黄铁矿	0.047	0.009	45.411	54.379	0.103	-	0.006	0.109	-	0.001	0.052	-		100.12
		0506-21	6-21-1-2		0.02	-	45.723	53.251	0.059	-	0.021	-	0.101	0.011	0.038	-		99.224
			6-21-1-4		0.631	0.006	45.649	53.289	0.032	-	-	-	0.05	-	0.126	-		99.783
			6-21-1-5		0.144	0.001	46.297	53.145	0.057	-	0.037	-	-	-	-	-		99.681
		0502-14	2-14-1-1		-	-	46.947	53.479	0.059	0.004	-	0.043	-	0.014	0.096	-		100.64
			2-14-1-2		0.01	0.023	45.516	53.589	0.03	-	-	0.035	0.094	0.001	0.093	-		99.391
			2-14-2-1		0.015	-	45.992	54.722	0.085	0.002	0.014	0.016	0.043	-	0.014	-		100.9
			2-14-2-3		-	-	45.518	54.496	0.051	-	-	0.031	0.061	-	0.297	0.032		100.49
			2-14-3-4		0.022	0.002	46.068	53.041	0.059	-	0.031	0.056	-	0.016	0.123	-		99.418
		0506-11	6-11-3		0.087	-	46.579	53.712	0.071	0.065	-	-	-	0.011	-	-		100.53
		0507-8	7-8-1-1		0.02	-	46.537	53.222	0.046	-	-	-	-	-	0.882	-		100.71
		0507-8	7-8-1-2		0.204	0.008	46.274	52.669	0.01	-	-	0.031	-	-	-	-		99.196
		0505-9	5-9-2-1		-	0.006	46.885	53.436	0.077	0.092	-	0.003	0.031	-	-	-		100.53

类型	方法	样号	测点	点性	Cr	Sr	Fe	S	Co	Pb	Ni	Ag	Cu	Sn	Zn	Sb	In	Total
断裂热液充填型矿体	能谱	0502-14	2141_3	黄铁矿			44.84	50.14				0.99	-	1.05	-	1.33	1.65	100
			2141_4				41.62	47.73				2.08	-	1.34	2.27	2.38	2.58	100
		0502-21	0221-4				44.72	52.58				0.24	0.51	0.26	0.67	0.47	0.55	100
			0221-23				43.3	52.76				0.64	0.68	0.43	0.89	0.65	0.66	100.01
		0507-22	0722-12				42.72	52.07				0.99	0.58	0.61	0.93	0.76	1.34	100
			0722-21				44.67	53.44				-	0.59	-	0.95	-	0.34	99.99
			0722-33				44.26	52.09				0.25	0.65	0.34	1.28	0.44	0.68	99.99
		0505-9	592-4				41.67	49.73				1.41	-	1.64	1.44	2.74	1.37	100
隐爆角砾岩型矿体	电子探针	0501-4	1-4-1-2		0.032	0.007	46.284	52.398	0.092	-	0.014	-	0.072	-	1.67	0.006		100.58
			1-4-2-5		0.037	0.003	46.686	53.777	0.107	-	-	0.028	-	0.026	0.036	0.007		100.71
		0502-35	2-35-1-1		-	-	45.715	53.425	0.087	-	-	0.049	0.022	0.033	0.101	0.004		99.436
			2-35-2-3	黄铁矿	0.198	0.002	46.242	53.159	0.069	0.041	-	-	-	0.029	0.107	0.04		99.887
		0503-4	3-4-1-3		-	-	45.309	53.885	0.073	0.027	-	0.039	-	-	-	-		99.333
			3-4-2-3		-	-	45.427	53.055	0.093	0.002	0.047	0.236	-	-	0.757	0.009		99.626
			3-4-2-4		0.005	-	45.779	53.138	0.077	-	0.047	0.031	0.007	0.005	-	0.006		99.095
		0502-9	2-9-4		0.025	0.001	46.127	53.509	0.067	-	-	-	-	-	0.035	0.017		99.781
			2-9-7		-	-	44.885	52.794	0.022	0.087	-	0.035	0.016	-	2.256	0.006		100.1

注：表格空白处表示未测该元素含量，“-”表示该元素超出仪器检出限。

3.3.2 矿物成分、结构构造及其空间分布特征

1）矿物成分及结构构造特征

断裂热液充填型矿体的矿物组成较简单，根据野外调查、显微镜观察及X射线衍射（表3.1）分析确认，主要金属矿物为黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿，银矿物少见，仅在1320中段4号勘探线附近的F2断层样品中，利用X-射线衍射分析测出含量为37.83%的脆硫锑银铅矿；脉石矿物为石英、钾长石、斜长石、方解石、白云石、白云母、绢云母、黑云母、绿泥石等。

断裂热液充填型矿体的主要结构为自形—半自形粒状、碎裂结构、交代港湾状结构，偶见他形粒状结构，以及黄铜矿的乳滴结构，主要结构与隐爆角砾岩相似；该类矿体发育致密块状、条带状、脉状、角砾状等构造。

与隐爆角砾岩型矿体相似，断裂热液充填型矿体的金属矿物也具有可以反映矿化次序、成矿环境等意义的结构、构造：如闪锌矿可分为两种，一种含乳滴状黄铜矿（3%~15%），黄铜矿粒径可达 10μm，闪锌矿常被基质溶蚀交代；一种基本不含乳滴状黄铜矿的闪锌矿，呈脉状穿插于矿石中。黄铁矿则主要呈星点状分布于基质中，部分与其它硫化物构成角砾，且硅化强烈处黄铁矿含量增加，粒径加大。方铅矿则普遍较纯净，以脉状为主，部分形成矿化角砾，常被绢云母、硅化石英集合体及方解石交代溶蚀。该类矿体较典型的结构构造描述如下：

（1）自形晶与它形晶结构：与隐爆角砾岩型相似，除了闪锌矿、方铅矿、黄铁矿呈自形晶外，方解石也可以呈它形晶及自形晶。

（2）交代骸晶结构：常见绢云母集合体交代钾长石斑晶（照片3.18）。

（3）港湾状结构：普遍发育，如较早期的方铅矿多为闪锌矿、岩浆基质、或方解石溶蚀呈不规则港湾状（照片3.19）和火焰状。

（4）碎裂结构：如黄铁矿碎裂后基本无位移（照片3.20），裂隙中有方铅矿、黄铜矿、闪锌矿充填胶结；1号矿体中的碎粒岩团块中只含星点黄铁矿、闪锌矿，穿插其中的硫化物脉中无黄铁矿，只有石英、闪锌矿、方铅矿（照片3.21），说明发生碎裂时，黄铁矿与早期闪锌矿已结晶成矿，闪锌矿及方铅矿脉形成于碎裂作用后。

（5）黄铜矿乳滴结构：黄铜矿可呈乳滴状分布于闪锌矿中，含量为3%~20%，如乳滴状黄铜矿呈不规则团块，或沿闪锌矿晶格规则分布（照片3.22）。

（6）溶蚀构造：如闪锌矿溶蚀包裹方铅矿，使之为孤岛状（照片3.23），溶蚀黄铁矿，使黄铁矿成为港湾状残留体，或形成筛孔构造（照片3.24）；方铅矿溶蚀闪锌矿和黄铁矿，使闪锌矿呈孤岛港湾状，黄铁矿为浑圆状、岛状，或其边缘呈筛孔构造（照片3.25）。这种关系显示矿区应有两阶段的方铅矿和闪锌矿。

（7）包裹构造：区内主要的包裹构造为闪锌矿包裹黄铁矿、方铅矿，方铅矿包裹黄铁矿，黄铁矿包裹硅化石英，被硫化物包裹的硅化石英说明成矿早期区内存在

硅化；但硅化石英包裹方解石、绢云母包裹黄铁矿（照片 3.26）、黄铁矿和硅化石英间出现自形晶、纯净方解石的现象显示了早期方解石—硅化石英—晚期方解石—黄铁矿—绢云母的结晶顺序。

（8）脉状构造：断裂热液型矿体的细脉构造分为两种，一种为普通细脉，如闪锌矿呈细脉沿黄铁矿裂隙分布，方铅矿细脉穿切含乳滴黄铜的闪锌矿；另一种细脉穿切特定角砾或早期硫化物脉，具有划分成矿期次意义，如方铅矿、闪锌矿细脉穿切黄铁矿闪锌矿矿化角砾（照片 3.27），角砾中无方铅矿，二者均为长英质基质物溶蚀，说明角砾形成时无方铅矿晶出，而细脉中的金属矿物以方铅矿为主，说明黄铁矿闪锌矿矿化后，受构造影响形成相应角砾，期后再有方铅矿和闪锌矿化。

（9）叠覆构造：晚期方铅矿叠覆于早期方铅矿之上（照片 3.25），并可见晚期方铅矿较早期的纯净。

（10）角砾构造：断裂热液型矿体也发育一定的角砾构造，如石英斑岩角砾为黄铁矿、闪锌矿胶结，角砾仍具有可拼接性（照片 3.28）；石英脉在断裂（F2）作用下形成角砾（照片 3.29），角砾略有磨圆，并为黄铁矿、闪锌矿、方铅矿胶结，也说明早期硅化的存在。

2）矿物、结构构造空间分布特征

矿区 NW 端与 SE 端都有星点状黄铁矿化，但 SE 端的黄铁矿相对自形程度高、粒径较大，且在硅化作用较强烈的部位黄铁矿粒径更大、自形程度更好；

矿区 NW 端的闪锌矿基本上都含乳滴状黄铜矿，SE 端则较少含乳滴状黄铜矿，观察到闪锌矿脉中闪锌矿含乳滴黄铜矿，而脉壁的闪锌矿则不含黄铜矿，似乎证实了含乳滴黄铜矿闪锌矿形成于较高温度环境；闪锌矿多产在石英、绢云母、方解石较多的部位；

矿区中部的方铅矿主要呈脉状分布、较纯净，溶蚀自形黄铁矿、闪锌矿，并被石英、方解石等溶蚀，当发育方解石、绢云母脉时，方铅矿的颗粒更大、更纯净；NW 端与 SE 端可见含杂质较多的方铅矿，它们溶蚀闪锌矿，且被纯净的方铅矿溶蚀。

综上，隐爆角砾岩型矿体矿石发育角砾构造，且矿物的溶蚀、交代现象普遍，显示出经历了相对高温的热液活动；而断裂热液型矿体矿石中常见的硫化物或岩石角砾碎裂结构，致密块状、条带状构造，显示了成矿热液分异良好及具有充填成因特点，且变形条带构造反映了其受到后期断裂构造活动影响。两类矿体矿石结构构造特征都提供了矿区 NW 端成矿温度高于 SE 端的信息，它们之间的差异除了证实二者分类的正确外，还说明二者存在成矿机制及时期的差异。

3.3.3 矿体地球化学特征

1）稀土元素与微量元素特征

断裂热液充填型矿体的稀土总量(∑REE=17.01~40.94ppm)、轻重稀土比值

（LREE/HREE=5.39~12.89）、δEu（1.01~1.61）、δCe（0.94~0.96）均大于隐爆角砾岩型矿体（表 3.2），La/ Yb 值（8.79~26.07）也较高，Eu 表现为正异常和无异常（δEu=1.01~1.61），显示了差异明显的特点，稀土配分图（图 3.4）为富轻稀土、稍具 Eu 正异常的右倾型配分模式。

断裂热液充填型矿体与隐爆角砾岩型矿体矿石的 Co、Ni 含量相差不大（Co 3.387~4.959ppm；Ni 7.632~10.24ppm）；而 Sc、Ti、Cu 含量相差较大，且断裂热液充填型矿石本身的这三个元素含量差别也较大。从原始地幔标准化图（图 3.5）上可以看出，断裂热液充填型矿石显示出 Ti、V、Rb、Zr、Ba 不同程度的正异常及 Ta、Ni、Ge、Sr、Nb 的负异常。

2）微束分析

（1）硫化物中元素的含量特点

利用电子探针、扫描电镜能谱仪对断裂热液型矿体的主要硫化物进行了元素含量分析（表 3.3），分析结果处理为蛛网图（图 3.6）。结果显示，从黄铁矿→闪锌矿→方铅矿，Ag 含量整体呈下降的趋势（黄铁矿的 22 个测点有 16 个测点含 Ag，含量 0~2.08%；闪锌矿的 25 个测点有 11 个测点含 Ag，含量 0~2.19%；方铅矿的 43 个测点有 10 个含 Ag，含量 0~1.83%），这与矿石 Ag 含量与方铅矿含量呈正比关系相矛盾，其原因是微束分析的结果代表的是矿物中晶格或粒径极小范畴的元素含量，而非独立银矿物，而方铅矿富银的机制是由于其中含有较其它硫化物更多的独立银矿物。结合由黄铁矿→闪锌矿→方铅矿，结晶温度下降的事实，可以知道高温下银趋于分散。Sn 含量则略显示出从闪锌矿→方铅矿→黄铁矿递减的规律（闪锌矿的 25 个测点有 18 个含 Sn，含量 0~2.39%；方铅矿的 43 个测点有 19 个含 Sn，含量 0~2.16%；黄铁矿的 22 个测点有 13 个含 Sn，含量 0~1.64%），Sb 含量在各硫化物中相差不大；（黄铁矿的 22 个测点有 9 个测点含 Sb，含量 0~2.74%；闪锌矿的 25 个测点有 15 个测点含 Sb，含量 0~2.58%；方铅矿的 43 个测点有 22 个测点含 Sb，含量 0~2.65%）；Cu 在闪锌矿中含量（0~4.39%）最高，黄铁矿中含量（0~0.68%）最低。

（2）硫化物中相关元素的空间分布规律

分析样品取自不同的海拔、不同的勘探线，包括 1550 中段 2 线 2092 采场（1 号矿体）、1360 中段 0.8 线（新 I 号矿体）、1320 中段 4 线（8 号矿体）、1320 中段 6 线（9 号矿体）及 1320 中段 9.5 线（1 号矿体），ZK4203 钻孔的 81m（6 号矿体）、ZK0201 钻孔（孔深 105m，1 号矿体）等地段，其硫化物中的相关元素含量也显示一定的水平及垂直方向的空间变化特征。断裂热液充填型矿石中变化与隐爆角砾岩矿石的硫化物中相关元素的空间分布特征比较结果，可为确定断裂热液充填型矿与隐爆角砾岩型矿成因机制上的差别提供依据，其结果显示如下：

方铅矿：同一中段，由 NW-SE，Cr 含量总体显示为增加，但在 1320 中段 6 号

勘探线附近出现一个最高值，Co 含量减少；海拔高处 Zn、Cr 含量总体较高，Fe、Sn、Sb 含量总体较低。

闪锌矿：同一中段，Ag、Cr、Sn 主要在矿区中部 4 号及 6 号勘探线附近富集，向 NW、SE 两端贫化，Fe、Cu 含量则从 NW-SE 增加，Co、Sb 含量逐渐减少；海拔高处 Cr、Sr 含量较高，Fe、Cu、Ni、Sb 含量较少。

黄铁矿：同一中段，从 NW-SE，Ag、Cr、Cu 元素总体呈现减少的趋势，Zn 元素在 NW 和 SE 端的含量都较低，而在 6 号勘探线附近则出现一最高值；海拔较高处，Ag 较富集，Cr、Co、Pb、Zn 含量则较少。

黄铜矿：水平方向，Ag 主要富集在 4 号及 6 号勘探线附近，NW 和 SE 端含量极少，Cr、Ni 含量则从 NW-SE 逐渐减少；Cr、Ni 趋向深部富集。

以上全部硫化物中银的空间分布显示，从 NW 到 SE，Ag 含量逐渐减少，且趋向富集于海拔高处，如 1360 中段 0.8 线测点的 Ag 含量为 0~2.19%，而 ZK0201 钻孔 105m 处样品中 Ag 含量极少；1550 中段 2 线 Ag 含量为 0~1.84%；1320 中段 4 线 Ag 含量为 0~0.049%，ZK4203 钻孔 Ag 含量为 0~0.056%；1320 中段 6 线 Ag 含量普遍为 0~0.031%，偶见含量较高的测点，为 0.329%；1320 中段 9.5 线 Ag 含量 0~0.003%。

以上测试数据说明，各硫化物中 Ag、Sn、Sb、Cu 等元素的含量空间变化不尽相同，方铅矿中其它元素主要在深部分布，闪锌矿中亲铁元素在深部分布，亲硫元素在浅部分布，黄铁矿中除 Ag 外，其它元素多趋于在深部分布。硫化物中元素的空间分布差异的原因与硫化物结晶温度和成矿温度场空间分布格局有关，一方面同种矿物在较高温度结晶时，所含杂质元素偏高，同时不同硫化物的适宜结晶温度的差异，使不同硫化物显示了杂质元素含量不同的空间分布，结果形成了深部（温度较高）硫化物中其它元素相对集中的格局。

硫化物中其它元素空间分布格局一方面说明其杂质元素含量的比较可以提供成矿温度相对高低的信息，同时显示 Ag 元素趋于在浅部（低温）地带富集，SE 端的方铅矿中相对富 Ag 说明该处的方铅矿是结晶温度较高方铅矿，因此提供了深部仍有成矿空间的信息。

综上，稀土元素方面，断裂热液充填型矿体的稀土元素配分模式一方面显示了与隐爆角砾岩型矿体的差异，另一方面其本身也存在差异，深部样品 Eu 正异常较明显，配分模式与白云岩的相近；浅部样品 $\delta Eu \cong 1$，其配分模式界于隐爆角砾岩型和断裂热液充填型矿体之间。两者稀土元素的差异暗示不同类型矿体的物质来源可能存在差异，同时说明同为断裂热液充填型矿体，但浅部样品代表了岩浆热液作用的结果，深部样品代表了岩浆热液与围岩发生水—岩反应成矿的结果，说明成矿可能存在两种机制。

微量元素方面，隐爆角砾岩型矿体和断裂热液充填型矿体的 Co、Ni 含量相差不大，且都显示出 V、Rb、Zr、Ba 不同程度的正异常及 Ni、Ge、Sr、Nb 的负异常；而 Sc、Ti、Cu 含量相差较大，且断裂热液充填型矿体本身这三个元素含量差别也较大。同样说明了断裂热液充填型矿体的成矿机制与隐爆角砾岩型矿体相比较复杂。

3.4 矿化蚀变特征

支家地矿区围岩蚀变较为强烈，前人总结其常见蚀变类型有碳酸盐化、绢云母化、硅化、泥化、钾化、黄铁矿化、绿泥石、叶腊石化等中低温蚀变，其中泥化是表生作用产物。本次工作中采用 X 射线衍射方法对 16 个各类样品进行了分析，结果显示样品中绢云母含量较多、且不含叶腊石，尽管叶腊石与绢云母外观特征相近，但 X-射线衍射分析中未测出叶腊石的事实值得人们对矿区蚀变类型进行重新认识。因此认为矿区的蚀变有钾化（绢云母化）、硅化、黄铁矿化、绿泥石化、碳酸盐化，其中与矿化关系最密切的是硅化、绢云母化和碳酸盐化。

硅化在矿体附近的围岩中较为常见，主要表现为岩石颜色加深（照片 3.30），或是沿裂隙出现硅化深色带，显微镜下为细颗粒石英集合体；矿区的硅化作用强度有限，如凝灰角砾岩中胶结物因硅化而呈深色，而角砾未发生硅化现象，硅化也基本不以石英脉形式出现，只在断裂的局部地方观察到少量延伸仅数十厘米的石英脉。

绢云母化的分布范围更广，说明矿区有较广泛的钾化，钾化的另一种表现形式是元古代和太古代变质岩中出现的钾长石化。

黄铁矿化则多呈细粒浸染状分布于石英斑岩和凝灰角砾岩中，常是矿化带和近矿围岩的标志。

碳酸盐化多发生在矿体中，以方解石化为主，但脉状方解石并不发育，在局部地段的矿体内部出现少量延伸很短、宽度小于十厘米的方解石脉，显示其蚀变程度较弱的特点。

尽管矿床中分布较大规模的白云岩，但在白云岩与石英斑岩或凝灰角砾岩接触带中并未出现大规模的碳酸盐化蚀变，说明围岩白云岩中的物质并未发生蚀变扰动，进而可知，白云岩不是矿床的成因因素。

综上所述，支家地银铅锌矿可分为断裂热液充填型及隐爆角砾岩型两类矿体，二者的空间分布、形态特征、矿物成分及结构构造都存在明显差异。

第四章 岩石学及其地球化学特征

为了确定成矿物质来源、探讨矿床成因，对区内各类岩石进行了岩石学及地球化学特征分析。

4.1 岩石学特征

矿区岩石主要为石英斑岩、凝灰角砾岩、隐爆角砾岩、白云岩及碎粒岩，按成分、形成方式，石英斑岩又包括钾长石石英斑岩、石英斑岩及细粒石英斑岩；隐爆角砾岩按角砾成分、角砾的位移程度和形成方式又可分为石英斑岩角砾岩、复成分角砾岩及碎裂石英斑岩；碎粒岩分布不广，只在 F2 断裂中可见，但与矿化关系密切，前人对其没有明确认识，因此也对之进行了分析。对不同的岩石主要开展了矿物组成、结构构造及其特征变化的探讨工作。

4.1.1 矿物组成特征

根据野外调查及前人资料的总结，该区岩石的矿物成分主要为石英、钾长石、方解石、绢云母、黑云母、黄铁矿、闪锌矿及方铅矿。本次工作分别对这五类岩石进行了显微镜观察及 X-射线衍射分析，结果如下（表 3.1）：

石英斑岩矿物成分主要为石英、钾长石、绢云母、方解石、白云石，金属矿物主要有黄铁矿、闪锌矿、方铅矿，非造岩矿物的存在说明矿区的石英斑岩大多经历了热液蚀变，在 1320 中段 4 线半的挤压变形石英斑岩中测出含脆硫锑银铅矿（37.83%），同样说明石英斑岩形成后受构造影响而发生矿物组成的改变。

凝灰角砾岩的矿物成分主要为石英、钾长石、绢云母、方解石，金属矿物主要为黄铁矿、方铅矿，在 ZK8205 号钻孔 136.5m 的凝灰角砾岩中含有斜锆石。

隐爆角砾岩的矿物成分为石英、钾长石、绢云母、方解石，金属矿物主要为黄铁矿。

白云岩的矿物成分为白云石、石英、方解石、绢云母，金属矿物主要为黄铁矿和闪锌矿。

碎粒岩的矿物成分主要为石英、钾长石、绢云母、多硅锂云母，金属矿物主要为黄铁矿和方铅矿。

总的来说，矿区岩石种类差异明显，但主要矿物成分基本相同，均含有石英、钾长石、绢云母，金属矿物多为黄铁矿、闪锌矿、方铅矿。矿区各类岩石的矿物组成特点说明：

1）矿区岩石均受到成矿作用的影响，各类岩石均含硫化物金属矿物，说明成矿对岩性无选择，矿区的各类岩石均可成为矿体的赋存载体。石英斑岩中含有方解石、白云石，金属矿物一方面说明石英斑岩已受到了成矿作用的影响，同时从矿物学的角度证明成矿晚于石英斑岩。

2）岩石中均含有钾长石，但未见斜长石，同时还发育白(绢)云母，由于钾长石化和白云母化均为含钾矿物，说明矿区的岩浆及热液蚀变具有偏碱性的特点，其蚀变为钾化。

3）岩石中黄铁矿含量为 0.48%~56.32%，从北向南总体是减少的，其他矿物没有明显的空间规律；1320 中段 4 线半 F2 断层中挤压变形的石英斑岩含银矿物（脆硫锑银铅矿，含量 37.83%），说明 4 线 F2 断层附近是银的富集地带；方解石仅在南东端（1320 中段 9 线、11 线）样品中测出（3.48%~50.7%），野外在其它地方也见方解石，但相对于通常意义上的多金属矿床，其碳酸盐含量偏少；尽管矿区有大面积的白云岩出露，但未见热液蚀变白云石脉分布，除白云岩以外，其它岩石中的白云石含量（0.48%~1.09%）也不高，说明成矿过程中热液作用未对围岩白云岩产生明显的交代或其它影响，从另一个侧面说明矿区的成矿主要是岩浆热液作用的结果，同时热液温度较低。

4.1.2 岩石结构构造特征

矿区岩石的结构构造前人已有较详细的描述和介绍，因此工作中在对岩石的一般结构构造特征进行观察的基础上，主要对前人未曾关注的结构构造或具有特别地质意义的结构构造进行了重点观察和分析。

矿区石英斑岩可分为钾长石石英斑岩、石英斑岩及细粒石英斑岩三种，总体的结构构造特征相似，大多数为灰绿色，具斑状结构，块状构造，斑晶主要为石英、长石，基质为隐晶质，但岩石粒度存在差别，其中钾长石石英斑岩粒径最大，斑晶可达 5mm，且粒径分布均匀；石英斑岩的粒度变细，斑晶大小为 1mm~3mm；晚期细粒石英斑岩粒度最细，斑晶粒径普遍小于 1mm。显微镜观察显示，石英斑岩的石英斑晶多为浑圆状、长石斑晶为板状，热液蚀变矿物可溶蚀并交代斑晶，使之成骸晶结构；部分石英斑岩还含少量晶屑，晶屑结构的存在说明石英斑岩成岩斑晶矿物发生过爆裂，是岩体有隐爆作用发生的证据。基质主要为霏细结构的长英质、星点状黄铁矿以及少量脱玻化形成的放射状玉髓，局部硅化，说明基质岩浆中富含成矿物质，当基质形成时黄铁矿化亦开始，为主要成矿阶段的前奏。岩石中发育脉状构造，表现为不规则张性微裂隙穿切斑晶，裂隙内黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿等金属矿物，与岩石中发育冷却形成的收缩裂隙中同样也充填金属矿物，特别是 1280 和 1240 中段石英斑岩中出现稀疏细脉浸染状构造，说明石英斑岩冷却成岩过程就开始成矿；石英斑岩中发育条带构造（照片 4.1），表现为富绢云母条带和贫绢云母条带的相间排列，条带彼此平行，反映了石英斑岩岩浆经历了充分的分异。

矿区凝灰角砾岩为灰—深灰色，具角砾结构，碎裂结构，块状构造，角砾成分复杂，主要由石英斑岩、燧石、白云岩、安山岩、片麻岩、流纹岩、细晶花岗岩、霏细岩、硫化物等角砾组成，角砾含量 30%~60%，呈次棱角状、次圆状，少量呈浑

圆状，粒径一般 0.5-1cm，大者达 10-15cm，胶结物为凝灰质、硅质及后期的含矿物质。显微镜下观察到石英、长石晶屑，硅化细粒石英集合体，胶结物主要为霏细结构的长英质凝灰物和岩浆混合物、绢云母、方解石、火山灰、黄铁矿、闪锌矿等金属矿物；金属矿物具有两期性特点，一种呈矿化角砾，显示了早期性，一种呈脉状穿切早期的矿化角砾，或呈星点状、浸染状分布于胶结物中，其形成时间晚于角砾状硫化物；岩石发育溶蚀交代结构，热液蚀变形成的石英、绢云母化及碳酸盐矿物常溶蚀各硫化物，这种溶蚀显示了与通常硫化物多金属矿床硅化早于硫化物发生特点有所不同。碳酸盐也分两种：一种为主要的，呈它形晶、杂质多并有纹层构造，被胶结物溶蚀为残留或港湾状，并与星点黄铁矿和闪锌矿共生；为自形晶，可偶见与硅化石英共生，并见晚期方解石细脉穿切早期方解石，显示了两次碳酸盐化。绢云母多为不规则状细脉状或零星状散布在胶结物中。

矿区的隐爆角砾岩为深灰色，角砾成分主要为石英斑岩、凝灰角砾岩角砾、另有少量安山岩、片麻岩、变质石英砂岩、白云岩角砾等基底岩石碎屑。角砾大小不等，砾径一般 0.5cm～1cm，大者达 10cm～15cm，有的可达数十厘米，最大可达 1 米左右。角砾可为不规则的棱角状、次棱角状，或次圆状、浑圆状；前人曾将隐爆角砾岩分为震裂石英斑岩、震碎石英斑岩角砾岩、爆破石英斑岩角砾岩、爆破凝灰角砾岩，各岩性间呈渐变过渡关系。震裂和震碎石英斑岩中的角砾为原地隐爆形成的角砾，即碎裂石英斑岩角砾，角砾无位移，空隙小，矿化较弱，或只是发生沿角砾边缘的蚀变（照片 4.2）；爆破石英斑岩角砾岩中的角砾是发生了位移的角砾，除了石英 角砾间隔大，矿化较强（照片 4.3），显然爆破角砾岩是隐爆作用发生的中心地带，而震裂、震碎角砾岩是隐爆作用的影响带。胶结物主要为与角砾成分相同的岩粉、岩屑、火山灰、熔浆和后期的热液矿物质及热液蚀变的石英，分别为黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿或者它们的组合。钾长石石英斑岩角砾也为硫化物胶结，显示钾长石石英斑岩也发生了隐爆作用。显微镜观察了该区隐爆角砾岩的角砾胶结物成分除了上述物质外，还发育石英及方解石，说明矿化与热液蚀变的密切相关。由于矿化与隐爆角砾岩胶结物在时空上较角砾有更为接近的关系，因此可以设想利用胶结物进行同位素定年。

该区的白云岩有深色、浅色之分（照片 4.4），浅色的白云岩分布在矿体附近，深色的白云岩距矿体相对较远。显微镜观察显示，两种白云岩的矿物成分主要为白云石、石英、方解石、绢云母及少量黄铁矿、闪锌矿，具有相似特点，二者矿物结晶程度变化不大，非金属矿物粒度为 0.05mm~0.4mm，金属矿物大小为 0.1mm~2mm。二者的区别只在于近矿化的褪色白云岩较发育裂隙，裂隙内多充填绢云母、石英等，而离矿化较远的白云岩为均匀的粒屑结构，基本不发育裂隙。白云岩的结构构造特征说明，矿区的热液只对原始白云岩产生了退色作用，说明作用于白云岩裂隙中的

热液温度较低，同时蚀变作用时白云岩自身的温度也很低，导致白云岩不发生矽卡岩化，也不发生大理岩化，只有很弱的碳酸盐化或退色化，因此白云岩与成矿热液不发生交换反应，对成矿也不起成因作用，只应视为一种有利的赋矿空间。

4.1.3 岩石学特征的变化

矿区岩石的矿物特征、结构构造特征随空间的变化规律，对该区的热液蚀变、成矿期次和成矿环境起到了示踪作用。

石英斑岩和隐爆角砾岩主要的岩石学特征的空间变异特点体现在：

1)组成变异:角砾的岩性变异表现在矿区 NW 端的隐爆角砾岩角砾组分单一(如 1320 中段-1.5 线)，角砾全部为钾长石石英斑岩，向 SE 角砾为复成分角砾，如 1320 中段 9 线一带的角砾除了钾长石石英斑岩角砾以外，还出现蚀变安山岩、石英斑岩、白云岩、燧石等。胶结物变异则表现为 NW 端的胶结物以长英质熔岩为主，向 SE 逐渐变为凝灰质。

2）结构构造变异：NW 端 0 号—2 号勘探线一带出露的石英斑岩和钾长石石英斑岩，结晶较粗，斑晶可达 5mm，而且粒径分布均匀；向 SE 方向，石英斑岩的粒度变细，斑晶粒度由 3mm 逐渐变为 1mm 左右，基质粒度更细，且钾长石石英斑岩的结晶粒度下降。岩体类型及岩石结晶程度由 NW 端向 SE 端的区域变化，说明 NW 端岩体侵位较高，或是剥蚀程度较大。NW 端隐爆角砾岩中的角砾大小一般 1-5cm，大者 10cm，SE 端复成分角砾岩粒径一般 0.5-1cm，大者达 10-15cm，有的可达数十厘米直至 1 米。

矿区的 NW，如 4 线处石英斑岩发育条带构造（照片 4.5），其倾角由 10 度到 45 度，但 SE 处的石英斑岩则未观察到这种条带构造。由照片可知这种条带构造的成因为岩浆分异或流动，而非构造作用所致，因此由 NW 石英斑岩发育条带构造，而 SE 不发育的事实可以认为 NW 的岩浆有较好的流动性，冷却较慢，因此可以认为矿区 NW 处的石英斑岩或代表了较中心石英斑岩体。

以上石英斑岩和隐爆角砾岩的这种变化特征说明岩浆活动及成矿时 NW 端的应为于远离火山口顶部盖层的较深部位，而 SE 端处于距顶部盖层的较近或是岩体与围岩的接触带附近部位，由此说明，矿区隐伏岩体具有区域上由 NW 向 SE 埋深加大的分布特点。

4.2 岩石地球化学特征

主要进行了石英斑岩、隐爆角砾岩胶结物的主量元素及石英斑岩、凝灰角砾岩、隐爆角砾岩胶结物、白云岩及碎粒岩的微量元素地球化学分析，通过元素组成进行其物质来源及形成背景的约束，结果如表 3.2。

4.2.1 主量元素

1）样品选取及分析方法

样品主要为岩浆岩岩石（石英斑岩及隐爆角砾岩长英质熔岩胶结物），还选取了矿体附近的白云岩样品，样品分布标高为1280米－1360米，水平分布范围为0号勘探线至8号勘探线。

主量元素测定采用X荧光光谱仪及硅酸盐全岩分析相结合的方法，分别在中南大学地学院X荧光实验室及长沙矿冶研究院完成。

2）石英斑岩主量元素特征

矿区石英斑岩的SiO_2含量为62.71%~72.34%，平均含量为68.13%，K_2O含量为5.74%~9.49%，Na_2O含量为0.1%~2.80%，全碱（K_2O+Na_2O）含量平均值7.97%，具有高钾（K_2O> Na_2O），高硅、低钛(TiO_2=0.10%~0.35%，平均值为0.19%)特征。CIPW标准矿物计算结果显示，Qz一般高于15%，最高可达39.94%，An、Ab较少（0.15%~1.73%），Or平均含量为45.01%，刚玉标准分子（C-norm）>1%，岩石分异指数普遍大于80。利用CIPW计算结果，进行QAPF图投影（图4.1），投影结果显示矿区的石英斑岩主要落入英云闪长岩、斜长花岗岩区，反映岩性较为均一。

在SiO_2-AR图解中，样品主要落入碱性岩区（图4.2）；在K_2O-SiO_2图解中，全部落入钾玄岩系列（图4.3）；A/CNK值平均1.51，为过铝质系列岩类（图4.4），且属于典型的S型花岗岩（图4.5），反映了成岩物质源于相对富钾的壳源。

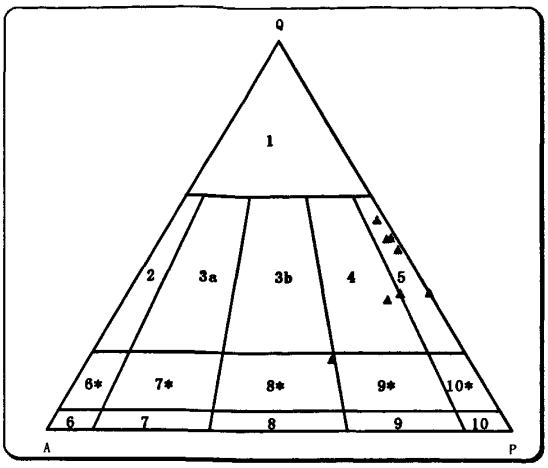
3）隐爆角砾岩胶结物主量元素特征

隐爆角砾岩的化学成分受角砾种类、含量变化的影响，难以获得岩石有效的化学组成，而其胶结物不含角砾，组成均匀，因此通过胶结物的化学组成可以挖掘到其岩浆组成及物源的有效信息。由于隐爆角砾岩中胶结物与角砾在物理上难以分离，只获得一个理想的胶结物样品，尽管样品太少，但仍可提供较角砾岩更为准确的岩浆组成信息，其主量元素含量见表3.2。

由表3.2可知，隐爆角砾岩胶结物的主量元素特征与石英斑岩相当，反映从石英斑岩到胶结物是同一幕岩浆活动的产物。

4）白云岩主量元素特征

对矿体附近的两个白云岩样品进行了主量元素分析。白云岩的MgO含量为11.42%~20.06%，CaO含量为21.70%~28.20%，Al_2O_3、K_2O含量较低（Al_2O_3 1.09%~1.18%；K_2O 0.21%~0.38%），SiO_2含量变化较大（2.66%~34.25%），其中SiO_2含量为2.66%的白云岩分布在8线深部（ZK8207，430m深处），含量为34.25%的白云岩分布在4线（ZK4203，278m深处），显示4线处的白云岩发生了较强的硅化蚀变，说明矿区NW部的蚀变明显较强，分布也较浅，而矿区的钾化对白云岩未产生明显的影响。



1－富石英花岗岩；2－碱长花岗岩；3a－花岗岩；3b－花岗岩(二长花岗岩)；4－花岗闪长岩；5－英云闪长岩、斜长花岗岩；6*－碱长石英正长岩；7*－石英正长岩；8*－石英二长岩；9*－石英二长闪长岩；10*-石英闪长岩、石英辉长岩、石英斜长岩；6－碱长正长岩；7-正长岩；8-二长岩；9-二长闪长岩、二长辉岩；10-闪长岩、辉长岩、斜长岩。

图4.1 花岗岩 Q-A-P 分类图

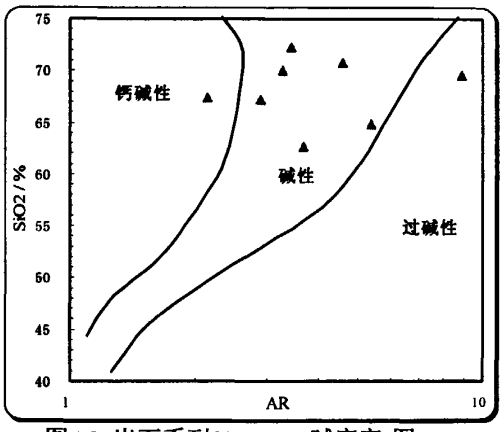


图4.2 岩石系列SiO_2-AR(碱度率)图

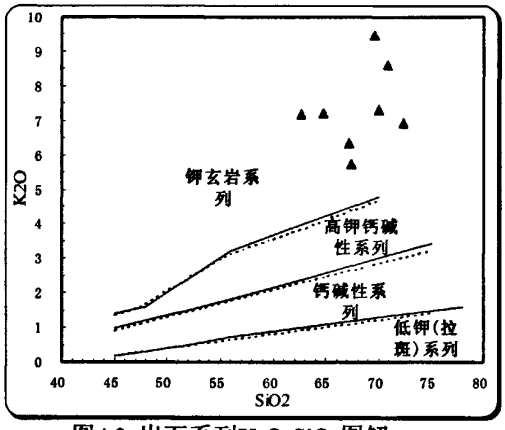


图4.3 岩石系列K_2O-SiO_2图解

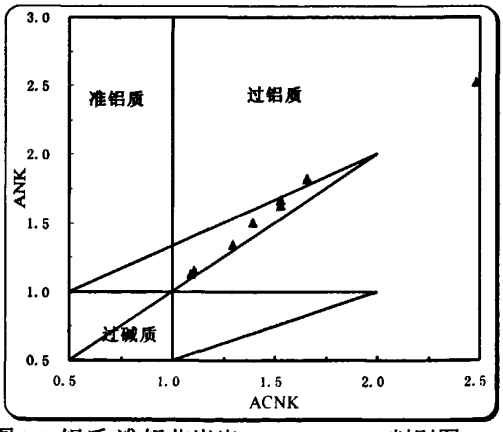


图4.4 铝质-准铝花岗岩A/NK-A/KNC判别图

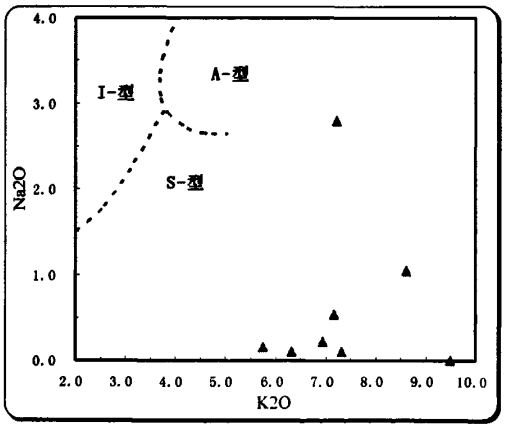


图4.5 花岗岩成因系列Na2O-K2O图(Collis等,1982)

4.2.2 稀土元素特征

样品主要为岩浆岩岩石（石英斑岩、凝灰角砾岩隐爆角砾岩）及白云岩，还选取了两类矿体的矿石样品，以了解不同岩石及矿石与岩石的稀土元素分布的差异，除了获得相关的物源信息外，还试图通过稀土元素的配分比较两类不同的矿体，为

分析和确定二者的成因提供依据。样品分布标高为 1280m－1360m，水平分布范围为 0 号勘探线至 11 号勘探线。

稀土元素测定采用质谱仪分析，在中国科学院广州地球化学研究所完成。

1）稀土元素总体特征

矿区岩石的稀土总量（ΣREE）变化于 12.51~163.75ppm 之间，轻重稀土比值（LREE/HREE）变化于 9.59~21.89，具有轻稀土中等富集特征。图 4.6～图 4.9 显示出相同岩性的样品具有相似的右倾型稀土元素配分模式，配分曲线集中度较高。

与中国酸性岩及中国花岗岩（据鄢明才和迟清华（1997），鄢明才等（1996），Yan and Chi(2005)）稀土元素丰度比较，矿区的岩浆岩稀土元素组成与中国酸性岩相当，较中国花岗岩低。石英斑岩、凝灰角砾岩、隐爆角砾岩胶结物彼此间的稀土元素特征相似，LREE/HREE 为 15.28~21.89，La/Yb 为 2.85~4.68，δEu=0.54~0.93，为弱 Eu 负异常，配分曲线均为右倾型，说明它们具有相似的物质来源和成岩过程。

白云岩的稀土元素特征与石英斑岩、凝灰角砾岩、隐爆角砾岩的胶结物有较大的差别，LREE/HREE 仅为 4.64~12.89， La/Yb 为 1.53~1.99，明显低于岩浆成因的岩石，其 Eu 也表现为不同程度的正异常。

岩浆岩类岩石与白云岩在稀土元素特征上的差异为确定成矿控制因素提供了比较标识。

2）石英斑岩的稀土元素特征

矿区石英斑岩的稀土总量（ΣREE）最低为 73.05ppm，最高为 159.05ppm，轻稀土元素富集，LREE/HREE 比值为 15.40~20.32，配分曲线呈右倾式，δEu 为 0.52~0.81，Eu 呈不同程度的负异常（图 4.6）。

矿石的稀土元素组成特征在第三章已描述，石英斑岩与隐爆角砾岩型矿石的稀土元素特征基本一致，都呈 Eu 负异常，区别在于石英斑岩的稀土元素配分曲线右倾趋势较隐爆角砾岩型矿石的稀土元素配分曲线明显，即石英斑岩较富轻稀土；而石英斑岩与断裂热液充填型矿石的稀土元素特征则有明显区别，主要表现在 Eu 异常方面，断裂热液充填型矿石无 Eu 异常或 Eu 呈正异常，显示了隐爆角砾岩型矿体和断裂热液充填型矿体在物源上的差异。

3）凝灰角砾岩稀土元素特征

凝灰角砾岩的稀土总量（ΣREE）变化于 97.44~155.96ppm，LREE/HREE 比值为 15.14~21.89，其稀土元素配分模式为富集轻稀土的右倾型曲线，δEu 为 0.62~0.93，Eu 为弱负异常（图 4.7）。

凝灰角砾岩与隐爆角砾岩型矿石的稀土元素组成及变化趋势相当，区别在于隐爆角砾岩型矿石的 Eu 负异常更明显，原因可能在于凝灰角砾岩的角砾中有沉积岩，而隐爆角砾岩型矿石主要为岩浆成因。

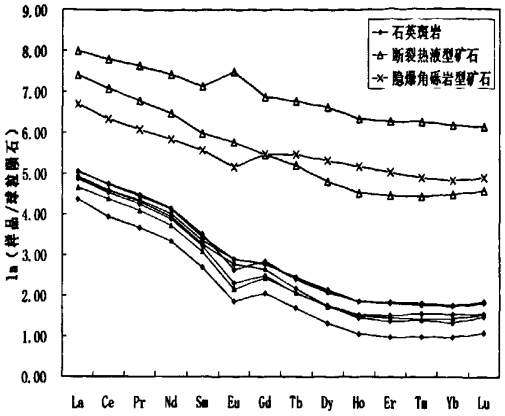


图 4.6 石英斑岩与矿石稀土元素球粒陨石标准化分布型式图

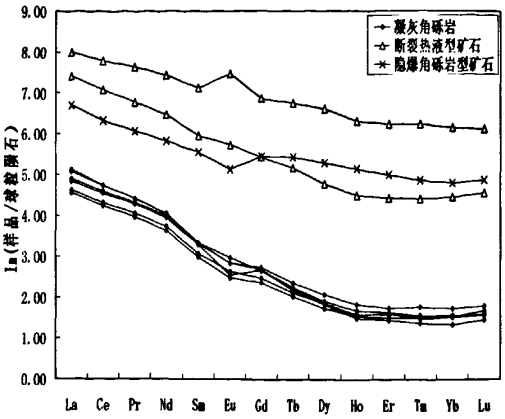


图 4.7 凝灰角砾岩与矿石稀土元素球粒陨石标准化分布型式图

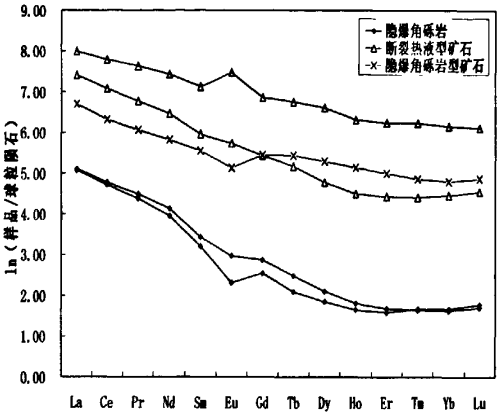


图 4.8 隐爆角砾岩与矿石稀土元素球粒陨石分布型式图

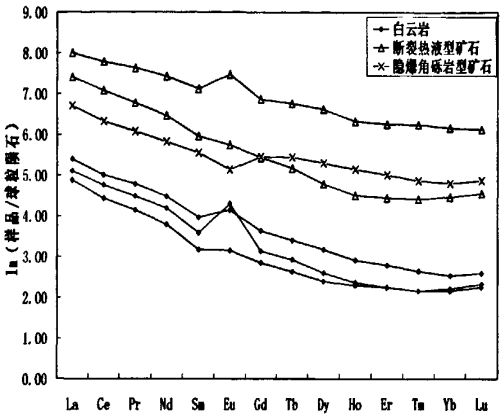


图 4.9 白云岩与矿石稀土元素球粒标准化陨石标准化分布型式图

注：为了突出矿石与岩石稀土元素分布的区别，在稀土元素球粒陨石标准化分布型式图中对矿石样品的数据作"原始值×100"处理，对白云岩样品的数据作"原始值×10"处理。

4）隐爆角砾岩胶结物稀土元素组成

隐爆角砾岩胶结物的稀土总量 ΣREE= 149.48~163.75ppm，LREE/HREE 比值为 18.11~20.78，富集轻稀土，稀土元素配分曲线为右倾型，δEu 为 0.54~0.8（图 4.8）。矿区 NW 端的隐爆角砾岩胶结物为较明显的 Eu 负异常，往南的隐爆角砾岩胶结物表现为 Eu 负异常程度减弱。

隐爆角砾岩胶结物与隐爆角砾岩型矿石的稀土元素特征基本一致；与断裂热液充填型矿石的区别主要表现在 Eu 异常，隐爆角砾岩胶结物表现为 Eu 负异常，而断裂热液充填型矿石表现为 Eu 正异常。

5）白云岩的稀土元素特征

白云岩的稀土总量 ΣREE=12.51~22.89ppm，LREE/HREE 比值为 9.59~12.3，较富集轻稀土，稀土元素配分曲线也为右倾型（图 4.9），但 δEu 为 1.13~2.47，Eu 呈正异常，但不同样品 Eu 异常程度存在差别，三个样品分别分布在 8 线 ZK8207，孔深 430m、4 线 ZK4203，孔深 205m 及 ZK4203，孔深 278m 处，其中 4 线 ZK4203，孔深 205m 处的白云岩样品 Eu 正异常最显著。

8 线 ZK8207，孔深 368.6m 处的断裂热液充填型矿石的稀土元素组成与白云岩的组成相似，都表现为 Eu 正异常，说明矿区 SE 处 8 线深部矿体与白云岩有相当密切的关系。

以上数据显示石英斑岩、凝灰角砾岩及隐爆角砾岩胶结物的稀土元素组成特征基本一致，说明这三类物质具有相似的物源，是同一大地构造背景下的产物；白云岩样品的稀土元素分布显示了不同程度的 Eu 正异常，其它组分与石英斑岩、凝灰角砾岩及隐爆角砾岩胶结物的差异不明显，这种现象反映白云岩或多或少受到了岩浆热液作用的影响。隐爆角砾岩型矿石（矿石的稀土元素分析详见第三章）与石英斑岩、凝灰角砾岩及隐爆角砾岩胶结物显示了非常相似的稀土元素分布，证实了隐爆角砾岩型矿体的物质源于岩浆岩；断裂热液充填型矿石与这三种岩浆岩岩石的稀土元素分布在 Eu 异常上有较明显的差别，深部的断裂热液充填型矿石与白云岩的稀土元素特征较相近，而浅部的其它断裂热液充填型矿石的微量元素分布特征更接近岩浆岩，说明断裂热液充填型矿体有的物源及成因机制更为复杂。

4.2.3 微量元素特征

为了进一步了解不同类型矿体及其与进行了稀土元素分析的样品进行微量元素分析，分析方法及仪器与稀土元素的分析相同。

1）岩浆岩微量元素组成

岩浆岩类岩石（石英斑岩、凝灰角砾岩及隐爆角砾岩胶结物）Cr、Ni、Ga、Rb、Zr、Hf 高于酸性岩元素丰度值（据应用地球化学元素丰度数据手册，2007 年），具有较高的大离子亲石元素含量（Rb 为 265.3~599.4ppm；Ba 为 356.9~1212.7ppm），但 Sr 含量较低（32.46~114.1ppm），Rb/Sr 比值大于 1.0（3.35~12.82），而 Rb/Ba 比值普遍小于 1（0.39~1.49）；高场强元素（HSPE）含量相对较低，仅 Zr 和 Nb 含量较高（Zr 为 200.7~637.1ppm；Nb 为 10.91~23.33ppm）。

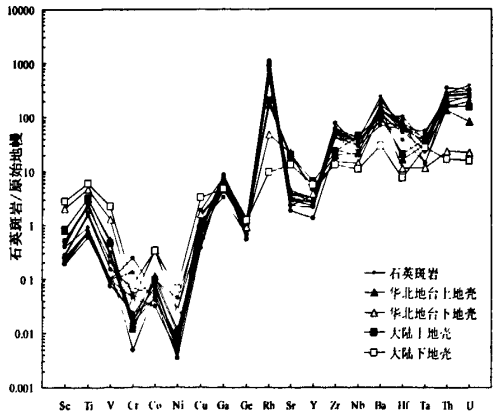


图 4.10 石英斑岩微量元素原始地幔标准化蛛网图

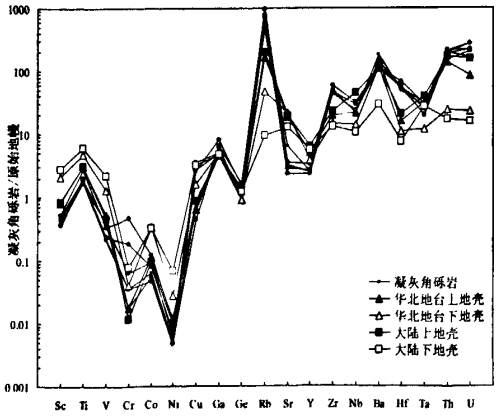


图 4.11 凝灰角砾岩微量元素原始地幔标准化蛛网图

原始地幔标准化图（图 4.10～图 4.12）显示 Ti、Ga、Rb、Zr、Ba 正异常，Ni、Ge、Sr、Nb、Ta 负异常，V、Cu 和 Hf 无明显亏损，且三类岩浆岩的微量元素组成与地壳微量元素组成相近，表明物源以壳源为主。

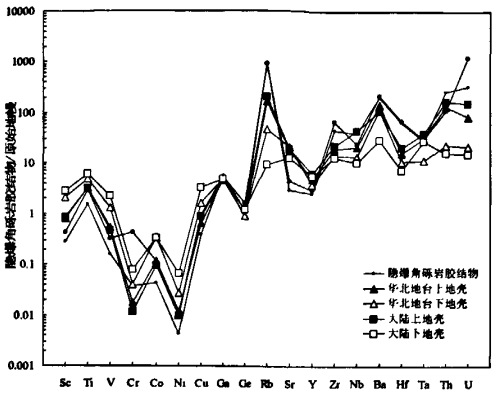


图 4.12 隐爆角砾岩胶结物微量元素原始地幔标准化蛛网图

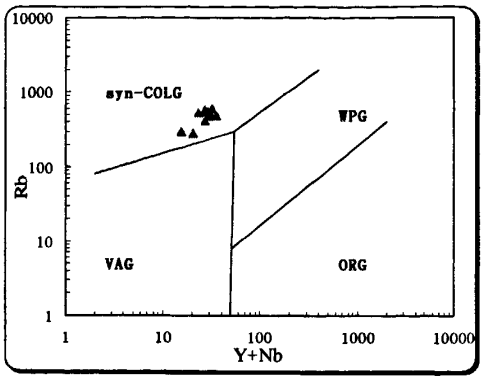


图 4.13 花岗岩构造环境 Rb—Y+Nb 判别图

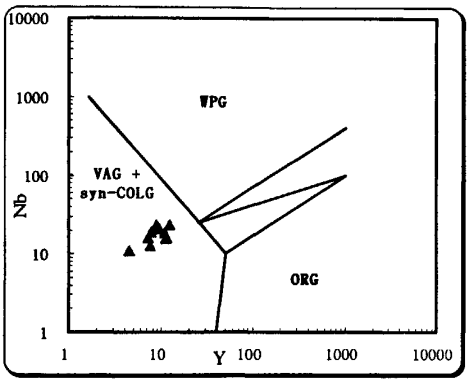


图 4.14 花岗岩构造环境 Y—Nb 判别图

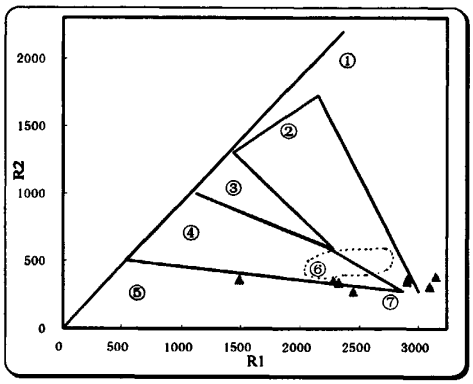


图 4.15 Batchelor R2—R1 花岗岩成因分类图

注：VAG:火山弧花岗岩；syn-COLG:同碰撞花岗岩；WPG:板内花岗岩；ORG:洋中脊花岗岩。
①地幔斜长花岗岩；②破坏性活动板块边缘(板块碰撞前)花岗岩；③板块碰撞后隆起期花岗岩；④晚造期花岗岩；⑤非造山区 A 型花岗岩；⑥同碰撞(S 型)花岗岩；⑦造山期后 A 型花岗岩。

在 Rb-Y+Nb(图 4.13)和 Y-Nb（图 4.14）构造判别图解中，所有样品落入同碰撞花岗岩区域。在 R_1-R_2（图 4.15）图解中，样品主要落在同碰撞（S 型）花岗岩区周围，表现出了同碰撞造山花岗岩特点。

2）白云岩微量元素分析

白云岩样品的微量元素含量差别不大，有意义的是白云岩与矿石的微量元素特征比较，由矿石微量元素原始地幔标准化图（图 3.4），可知断裂热液充填型与隐爆角砾岩型矿石微量元素的总体分布特征与白云岩的相似，且 ZK8207 孔 368.6m 深处的断裂热液充填型矿石微量元素特征与白云岩更接近，都显示出明显的 Rb、Zr、Ba 正异常及 Ni、Y、Nb 负异常，这与稀土元素表现出来的规律一致，进一步说明矿区有的断裂热液充填型矿与白云岩有物源的相关性。

第五章 矿床成因探讨

区域成矿背景、矿床地质特征、地球化学特征的相关信息及数据为探讨矿床成因提供了很好的依据，以下从成矿时代及成矿物质来源方面探讨矿床成因。

5.1 成矿时代及期次分析

5.1.1 隐爆角砾岩胶结物的锆石年龄

成矿时代及期次是建立成矿模型的重要要素，而成矿绝对年龄的确定一直是矿床学研究的难点[63]。前人获得了支家地矿床石英斑岩 Rb-Sr 等时线 156Ma 年龄，但未对隐爆角砾岩成矿年龄开展工作，为此本次工作对隐爆角砾岩胶结物的单颗粒锆石进行了 U-Pb 法定年。

1）样品采集及分析条件

由于隐爆角砾岩或隐爆角砾岩型矿体中具有外来角砾，难以用之进行常规的年龄或相关化学成分分析，同时硫化物以角砾的胶结物形式存在，因此设计了以隐爆角砾岩的胶结物为样品，进行相关年龄分析，其结果将是隐爆角砾岩的成岩年龄，同时与成矿年龄一致。

用于锆石定年的样品为矿区不同地段隐爆角砾岩的胶结物的混合样，其中 0503-14 取自 1360 中段 0.8 线，0504-7 取自 1320 中段 9 线，0512-14 取自矿石堆。锆石在进行年龄分析前，进行阴极发光（CL）分析，以确定锆石的性质和进行年龄测定的颗粒及部位。阴极发光和锆石 U-Pb 同位素分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。

2）测试结果

锆石 CL 图像如图 5.3 所示，隐爆角砾岩胶结物锆石除一颗锆石（图 5.3 CL2-18）具有浑圆状的核外，其余锆石结晶较好，呈典型的长柱状晶形，典型的岩浆震荡环带，为岩浆成因锆石。

共完成 19 颗锆石 20 个点的 LA-ICP-MS 定年分析测试，列于表 5.3。由结果可知，锆石的 Th/U 值在 0.6~2.2 之间，均大于 0.1，同样说明样品锆石为岩浆型锆石。

3）数据处理

采用 ISOPLOT/Ex(ver3.7)程序对锆石进行 $^{206}Pb/^{238}U$-$^{207}Pb/^{235}U$ 谐和曲线的投影（图 5.4）和 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄的计算（图 5.5）。在谐和图上，20 个锆石数据点均位于 U-Pb 谐和线上。

4）数据分析

由表 5.3 可知，18 颗锆石的年龄值为 129~144Ma，有一颗锆石的年龄为 2473Ma，从锆石的阴极发光图像（图 5.3）可知，这应是一颗继承锆石，因为其内部为浑圆状锆石核，而边部为韵律环带，2473Ma 年龄数据为锆石核所有。因此该锆石其及年龄

值代表了岩浆侵位过程中从下地壳基底中捕获的古元古代锆石及其原始年龄，同时说明矿区岩浆组成中包含有重熔的地壳物质。

其它岩浆锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 的加权平均年龄为 136.0±2.4 Ma(MSWD=7.8)(图 5.5)，表明隐爆角砾岩形成年龄为早白垩世早期，同时也说明隐爆角砾型矿的成矿时代为早白垩世早期。

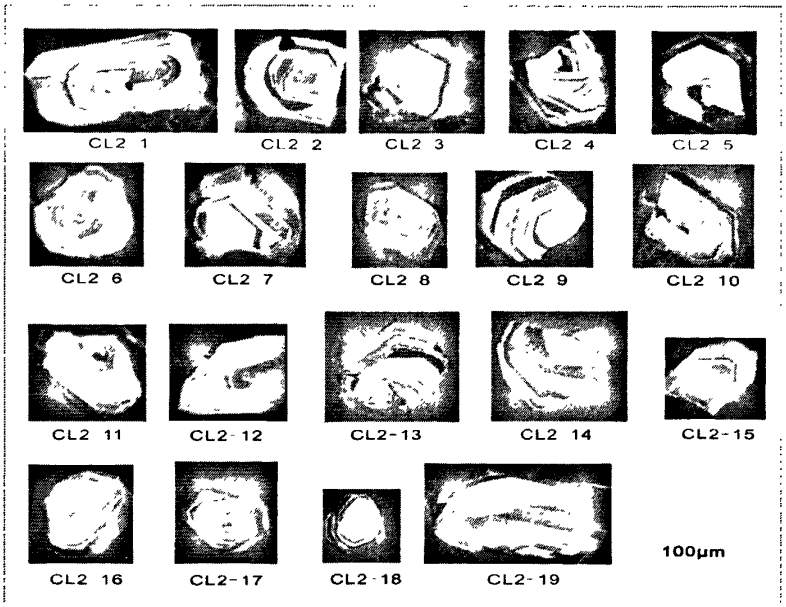


图 5.3 锆石阴极发光（CL）图像

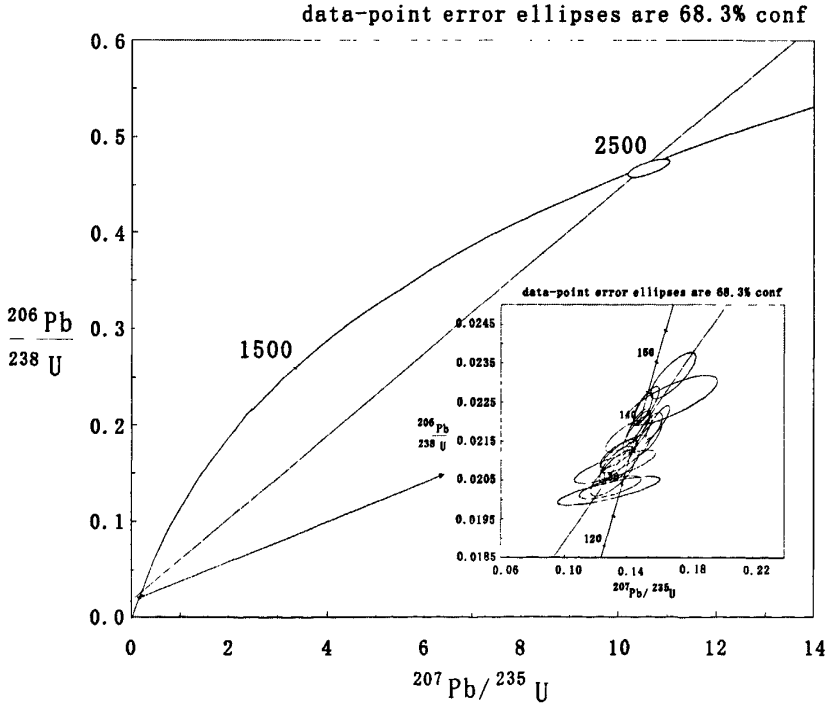


图 5.4 隐爆角砾岩胶结物的锆石 U-Pb 年龄谐和图

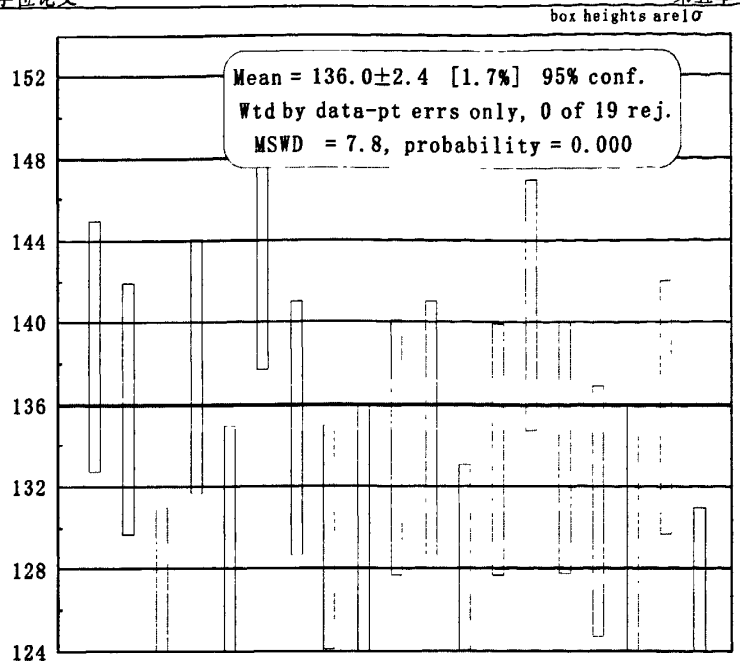


图 5.5 隐爆角砾岩胶结物的锆石 U-Pb 年龄加权平均图

5.1.2 矿体结构构造分析对成矿期次的约束

前人将支家地矿的硫化物成矿阶段划分为三个阶段，从早到晚分别为黄铁矿阶段（成矿温度 250℃~335℃）、银—多金属硫化物阶段（成矿温度 180℃~250℃）和银-多金属硫化物-碳酸盐阶段（成矿温度 130℃~240℃）。它们是同一次成矿过程中热液连续演化的产物，其间不存在成矿作用的间断。但本次工作中观察到的地质现象反映矿区成矿的阶段性具有叠加或间断性特点，如矿石中出现早期硫化物角砾、矿石被硫化物脉状穿切构造，显微镜下也观察到同一样品中的同种矿物发育不同的显微特征，它们在产出特点、形态、结构构造等方面普遍存在差异，它们具有成矿期次的示踪意义[64-65]。

矿化角砾构造：矿区凝灰角砾岩是矿体的主要围岩，但其中发育矿化角砾，如 ZK8205 号钻孔揭露了两层矿化凝灰角砾岩，其中均发育棱角状铁闪锌矿和黄铁矿角砾（照片 5.2），角砾还为后期硫化物细脉穿切或为后期黄铁矿包裹。区内还可见方铅矿角砾为富黄铁矿基质包裹（照片 5.3），说明矿区存在较早期的方铅矿及较晚期的黄铁矿。

脉状构造：沿裂隙分布的方铅矿、闪锌矿脉体穿切早期硫化物矿石，如 ZK8207 号钻孔中早期富黄铁矿矿体倾角为 50 度左右，而穿切矿体的方铅矿脉产状近于垂直（照片 5.4）。显微镜下同样观察到方铅矿细脉穿切黄铁矿、闪锌矿角砾，脉中的方铅矿及闪锌矿较角砾中的方铅矿、闪锌矿纯净（照片 5.5），镜下还观察到方铅矿、闪锌矿微脉穿切热液蚀变方解石（照片 5.6）。

表 5.3 隐爆角砾岩胶结物的锆石测定结果

样品点号	含量/μg•g-1			同位素比值±1σ					年龄值及相应误差/Ma		
	Pb	Th	U	$^{232}Th/^{238}U$	$^{207}Pb/^{206}Pb±1\sigma$	$^{207}Pb/^{235}U±1\sigma$	$^{206}Pb/^{238}U±1\sigma$	$^{208}Pb/^{232}Th±1\sigma$	$^{207}Pb/^{235}U±1\sigma$	$^{206}Pb/^{238}U±1\sigma$	$^{208}Pb/^{232}Th±1\sigma$
0503-14-M -2	4.9	140	196	0.7	0.0494±0.0017	0.1531±0.0051	0.0225±0.0003	0.0078±0.0002	145±5	143±2	156±3
0503-14-M -6	4.5	194	168	1.1	0.0489±0.0017	0.1477±0.0050	0.0219±0.0003	0.0075±0.0001	140±4	140±2	150±3
0503-14-M -7	53.4	831	598	1.4	0.0461±0.0078	0.1284±0.0215	0.0202±0.0002	0.0108±0.0008	123±19	129±2	217±16
0503-14-M -8	13.7	593	518	1.2	0.0490±0.0014	0.1509±0.0042	0.0223±0.0003	0.0070±0.0001	143±4	142±2	141±2
0503-14-M-10	16.0	207	210	1.0	0.0461±0.0060	0.1323±0.0173	0.0209±0.0003	0.0128±0.0011	126±15	133±2	258±22
0503-14-M-13	3.1	77	120	0.6	0.0532±0.0031	0.1699±0.0097	0.0232±0.0004	0.0087±0.0003	159±8	148±2	175±6
0503-14-M-15	9.1	339	358	0.9	0.0514±0.0019	0.1544±0.0057	0.0218±0.0003	0.0074±0.0002	146±5	139±2	150±3
0503-14-M-16	4.6	154	181	0.9	0.0470±0.0031	0.1349±0.0087	0.0209±0.0003	0.0066±0.0001	129±8	133±2	134±2
0503-14-M-17	18.1	391	377	1.0	0.0461±0.0028	0.1344±0.0080	0.0212±0.0002	0.0090±0.0005	128±7	135±1	182±10
0503-14-M-18	5.4	251	208	1.2	0.0518±0.0021	0.1539±0.0060	0.0216±0.0003	0.0068±0.0001	145±5	138±2	137±3
0503-14-M-20	12.7	583	480	1.2	0.0490±0.0018	0.1475±0.0054	0.0219±0.0003	0.0070±0.0001	140±5	139±2	141±3
0503-14-M-21	5.1	223	170	1.3	0.0461±0.0034	0.1307±0.0093	0.0206±0.0003	0.0067±0.0002	125±8	131±2	135±4
0503-14-M-22	119.0	155	214	0.7	0.1646±0.0046	10.6117±0.2650	0.4676±0.0058	0.1299±0.0015	2490±23	2473±25	2469±27
0503-14-M-24	20.1	898	696	1.3	0.0468±0.0031	0.1394±0.0091	0.0216±0.0003	0.0069±0.0001	132±8	138±2	139±2
0503-14-M-25	3.9	109	128	0.9	0.0543±0.0063	0.1685±0.0193	0.0225±0.0004	0.0070±0.0001	158±17	144±3	142±2
0503-14-M-27	4.2	166	168	1.0	0.0491±0.0021	0.1470±0.0062	0.0217±0.0003	0.0070±0.0002	139±5	138±2	141±3
0503-14-M-28	3.4	151	131	1.1	0.0476±0.0038	0.1388±0.0108	0.0212±0.0003	0.0067±0.0001	132±10	135±2	135±2
0503-14-M-31	11.2	358	451	0.8	0.0461±0.0025	0.1330±0.0070	0.0210±0.0003	0.0067±0.0002	127±6	134±2	136±3
0503-14-M-34	26.6	1817	820	2.2	0.0528±0.0016	0.1599±0.0047	0.0220±0.0003	0.0074±0.0002	151±4	140±2	149±3
0503-14-M-35	82.5	1545	1295	1.2	0.0461±0.0048	0.1289±0.0134	0.0203±0.0002	0.0091±0.0008	123±12	130±1	183±16

表5.4 隐爆角砾岩胶结物锆石原位Lu-Hf 同位素分析测试结果

样品点号	T(Ma)	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$\varepsilon_{Hf}(0)$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	T_{DM1}(Ma)	T_{DM2}(Ma)	$f_{Lu/Hf}$
0503-14-M -2	143	0.012496	0.000539	0.282185	0.000021	-20.8	-17.7	1486	1890	-0.98
0503-14-M -6	140	0.017709	0.000706	0.282123	0.000020	-23.0	-19.9	1578	2002	-0.98
0503-14-M -7	129	0.025506	0.000964	0.282063	0.000026	-25.1	-22.3	1672	2114	-0.97
0503-14-M -8	142	0.022746	0.000917	0.282045	0.000021	-25.7	-22.7	1695	2142	-0.97
0503-14-M -13	148	0.021989	0.000909	0.282015	0.000024	-26.8	-23.6	1736	2194	-0.97
0503-14-M -15	139	0.013342	0.000537	0.282029	0.000021	-26.3	-23.3	1700	2170	-0.98
0503-14-M -16	133	0.018071	0.000766	0.282043	0.000022	-25.8	-22.9	1691	2147	-0.98
0503-14-M -17	135	0.020239	0.000832	0.282097	0.000025	-23.9	-21.0	1619	2051	-0.97
0503-14-M -18	138	0.017012	0.000665	0.282171	0.000025	-21.3	-18.3	1510	1917	-0.98
0503-14-M -20	139	0.023788	0.000968	0.282129	0.000024	-22.7	-19.8	1581	1993	-0.97
0503-14-M -21	131	0.018856	0.000718	0.281895	0.000028	-31.0	-28.2	1892	2411	-0.98
0503-14-M -24	138	0.020729	0.000872	0.282015	0.000034	-26.8	-23.8	1734	2196	-0.97
0503-14-M -25	144	0.026522	0.001128	0.282047	0.000034	-25.6	-22.6	1701	2139	-0.97
0503-14-M -27	138	0.011893	0.000471	0.282071	0.000034	-24.8	-21.8	1640	2095	-0.99
0503-14-M -28	135	0.020479	0.000798	0.281893	0.000025	-31.1	-28.2	1899	2414	-0.98
0503-14-M -31	144	0.012369	0.000528	0.282051	0.000030	-25.5	-22.4	1669	2129	-0.98

注：$\varepsilon_{Hf(0)} = (((^{176}Hf/^{177}Hf)_S/(^{176}Hf/^{177}Hf)_{CHUR,0}-1)\times 10000$;

$\varepsilon_{Hf(t)} = (((^{176}Hf/^{177}Hf)_S-(^{176}Lu/^{177}Hf)_S\times(e^{\lambda t}-1))/((^{176}Hf/^{177}Hf)_{CHUR,0}-(^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR}\times(e^{\lambda t}-1))-1)\times 10000$;

$T_{DM1} = 1/\lambda\times\ln(1+((^{176}Hf/^{177}Hf)_S-(^{176}Hf/^{177}Hf)_{DM})/((^{176}Lu/^{177}Hf)_S-(^{176}Lu/^{177}Hf)_{DM}))$; $T_{DM2} = T_{DM1} - (T_{DM1} - t)((f_{cc} - f_s)/(f_{cc} - f_{DM}))$;

$f_i = (^{176}Lu/^{177}Hf)_i/(^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR}-1$。

其中，$(^{176}Lu/^{177}Hf)_S$ 和$(^{176}Hf/^{177}Hf)_S$ 为样品测定值，$(^{176}Lu/^{177}Hf)$mean crust=0.015 ,$(^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR} = 0.0332$, $(^{176}Hf/^{177}Hf)_{CHUR,0} = 0.282772$; $(^{176}Lu/^{177}Hf)_{DM} = 0.0384$, $(^{176}Hf/^{177}Hf)_{DM} = 0.28325$. f_{cc}=(0.015/0.0331)-1=-0.5482, f_s, f_{DM}= (0.0384/0.0332)-1=0.1566 分别为大陆地壳、样品和亏损地幔的 $f_{Lu/Hf}$。t 为样品形成年龄，$\lambda = 1.867\times10^{-11}$ year^{-1}(Scherer et al.2001)。计算中采用硅铝质地壳的 $f_{L/H}$= -0.72。

溶蚀结构：区内除了发育与矿物正常结晶顺序一致的溶蚀结构，如方铅矿溶蚀或包裹黄铁矿、闪锌矿；还普遍发育违反通常结晶次序的溶蚀结构，如早期方铅矿被闪锌矿溶蚀呈港湾状、孤岛状（照片 5.7）、被石英和绢云母溶蚀呈骸晶状（照片 5.8）的现象。还观察到透明、纯净的晚期闪锌矿脉溶蚀含较多乳滴状黄铜矿的早期闪锌矿（照片 5.9）。

矿物世代结构：矿石中硫化物、碳酸盐矿物的世代结构特征较为明显，主要表现在：

矿石中发育含乳滴状黄铜矿闪锌矿和纯净闪锌矿两种，前者多与黄铁矿伴生，或分布于黄铁矿的边缘，亦可为角砾，并含较多杂质，并可为纯净闪锌矿细脉穿切（照片 5.9）。

显微镜下观察到两种特征差异明显的黄铁矿，一种为粒径较大的黄铁矿（照片 5.10），具碎裂结构，并为闪锌矿、方铅矿胶结；一种为粒径较小的自形晶（照片 5.11）黄铁矿，呈星点状分布在石英斑岩或脉石中，含粒径较大黄铁矿闪锌矿细脉穿切了含小粒径黄铁矿的围岩，反映了两种黄铁矿的非共生关系。

区内也发育两种方铅矿。照片 5.12 显示两种方铅矿与同一闪锌矿颗粒的接触，晚期方铅矿在接触带处溶蚀闪锌矿，使闪锌矿呈港湾状，早期方铅矿与闪锌矿间未发生明显溶蚀。

矿区发育两种热液蚀变方解石，一种杂质含量较高，粒径较小，常与石英、绢云母及细粒黄铁矿伴生（照片 5.13）；一种较为纯净，粒径较大，常与较自形石英、颗粒较大的黄铁矿伴生（照片 5.14）。

环带构造：矿石中发育环带构造。照片 5.10 显示了由两期闪锌矿所构成的“核环”构造，“核”的闪锌矿已为基质溶蚀，但“环”中的闪锌矿保留完整，“核环”之间分布石英脉石。照片 5. 15 及 5.16 的多层环带构造中重复出现相间分布的方铅矿和闪锌矿环带，且各环带之间为交代溶蚀关系，内环为方铅矿+黄铁矿（微量）+闪锌矿（微量），中环为闪锌矿+黄铁矿+方解石（照片 5.15），外环为方铅矿+石英组合，最外环为闪锌矿+石英（照片 5.16），其排列顺序说明区内存在晚于方铅矿的闪锌矿。

一次成矿期内，矿物正常的结晶顺序为闪锌矿—方铅矿—方解石，而区内出现的方铅矿、闪锌矿微脉穿切热液蚀变方解石，晚期热液方解石脉穿切早期蚀变方解石，方铅矿“核”、闪锌矿“幔”的核-幔构造以及方铅矿为闪锌矿所溶蚀等现象显示了与正常结晶次序不一致的特征，这些现象无法为一次成矿进行合理解释。因此认为上述的矿石结构构造显示了矿区成矿具有多期次的特点，即早期硫化物形成后，矿区再次发生了构造成矿活动，新的成矿热液进入矿区，形成二次成矿。

5.1.3 电子探针结果分析

同一次成矿过程形成的矿物，应该具有相似的元素含量分布模式，而矿区断裂

热液充填型和隐爆角砾岩型矿体的元素含量分布存在差异，且两类矿体各自还可细分为贫 Ag 和富 Ag 的矿体，因此对不同类型矿体及具有不同成矿期次特点的硫化物开展了元素含量的原位分析，分析结果列于表 3.3。

1）矿体的电子探针结果分析

断裂热液充填型方铅矿的 Ag 含量(0~0.63%)较隐爆角砾岩型方铅矿(0~1.56%)稍低，Sb、Zn、Cu、Fe 的分布范围也相对较窄，分别为 0~0.6%， 0.064~0.74%，0~0.4%，0~0.45%，隐爆角砾岩型方铅矿 Sb、Zn、Cu、Fe 含量分别为 0~2.48%、0~3.23%，0.02~1.75%，0.04~1.57%；断裂热液充填型闪锌矿的 Ag 含量分布为 0~0.37%，较隐爆角砾岩型闪锌矿（0~2.91%）稍低，其余元素的分布无明显规律；断裂热液充填型黄铁矿的 Ag 含量为 0~0.24%，In 为 0~0.55%，Sn 为 0~0.26%，Sb 为 0~0.47%，总体比隐爆角砾岩型矿体黄铁矿（Ag 为 0~2.08%，In 为 0~2.58%，Sn 为 0~1.34%，Sb 为 0~2.38%）低。

断裂热液充填型方铅矿、闪锌矿和黄铁矿中的 Ag 含量较隐爆角砾岩型稍低，且方铅矿和黄铁矿中的其它元素也显示出主要富集在隐爆角砾岩矿体中的趋势。两类矿体在微观地球化学上的差别，反映出隐爆角砾岩型矿体的物质来源、形成环境及过程相对更有利于矿化，而断裂热液充填型矿体的形成则相对复杂，可能是不同的成矿物质来源或成矿机制相互作用的结果，这与 3.2 节、3.3 节中探讨矿体稀土元素和微量元素得出的结论相符。

2）不同成矿期次硫化物的电子探针结果分析

如前所述，矿区存在分属不同成矿期次的硫化物，分别对不同成矿期次的硫化物进行电子探针分析，以获得更多成矿期次的信息。

（1）被闪锌矿溶蚀（照片 5.17）、含杂质较多的方铅矿（照片 5.18）Ag 含量（0.025~1.56%）比溶蚀闪锌矿、纯净的方铅矿（照片 5.19）Ag 含量（0~0.45%）高；

（2）含乳滴黄铜矿的闪锌矿（照片 5.19）Ag（0.014~2.19%）、In（0~2.47%）、Sn（0~1.97%）、Sb（0~2.58%）含量相对于不含乳滴黄铜矿的纯净闪锌矿（照片 5.20）Ag（0~0.16%）、In（0~0.75%）、Sn（0~0.33%）、Sb（0~0.21%）稍高；

（3）小粒径黄铁矿（照片 5.21）Ag(0.056~2.08%)、In(0~2.58%)、Sn(0~1.34%)、Sb（0~2.38%）、Zn（0.123~2.27%）含量比较大粒径的自形黄铁矿（照片 5.20）Ag（0~0.24%）、In（0~0.55%）、Sn（0~0.26%）、Sb（0~0.47%）、Zn（0.038~1.67%）稍高。

原位分析表明：晚期方铅矿的银含量极低；晚期闪锌矿、黄铁矿相对于早期闪锌矿、黄铁矿其银、锡、锑、铟等元素的含量也低。这种元素的分布显示早期成矿阶段的硫化物较富银和其它元素，晚期硫化物则与之相反，其形成机制应是早期成矿热液温度高，热液进入近地表时快速冷却，分异差，导致形成的硫化物杂质含量

高。尽管不同期硫化物中相关元素含量差别不显著，但这种差别具有趋势性，基于5.2.2所述，早、晚期成矿间存在构造间断，因此，硫化物元素组成的趋势差异证实了区内存在成矿环境和物质来源不同的不同成矿期，这种认识为矿床成因机制及成矿预测提供了基础依据，与区内存在贫银矿体的现象相吻合。

5.2 成矿物质来源分析

5.2.1 与矿化相关岩浆岩的源区

与矿化相关的岩浆岩主要有石英斑岩、隐爆角砾岩、凝灰角砾岩。石英斑岩是矿床的成矿母岩，隐爆角砾岩和凝灰角砾岩是矿体的主要赋存岩体，第四章的地球化学数据对石英斑岩的源区进行了示踪，石英斑岩的K_2O含量为5.74%~9.49%，Na_2O含量为0.1%~2.8%，含铝指数A/CNK在1.09~2.499之间，平均为1.51，含碱指数K/(K+Na)比值在0.72~1之间，平均0.93，依含铝指数A/CNK>1.10、K/(K+Na)>0.45为"S"型的标准，显示石英斑岩应属于S型。

矿区石英斑岩的稀土总量最低为73.05ppm，最高为159.05ppm，轻稀土元素富集，LREE/HREE比值为15.40~20.32，配分曲线呈右倾式，δEu为0.52~0.81，Eu呈不同程度的负异常；凝灰角砾岩的稀土总量变化于97.44~155.96ppm，LREE/HREE比值为15.14~21.89，δEu为0.62~0.93；隐爆角砾岩胶结物的稀土总量为149.48~163.75ppm，LREE/HREE比值为18.11~20.78，δEu为0.54~0.8。已有资料对I型和S型花岗岩的稀土元素特征进行了归纳：I型花岗岩稀土元素总量变化范围小，一般在140×10^{-6}-300×10^{-6}，LREE/HREE在3~20间，La/Yb一般在15~60间，Eu亏损较小，δEu在0~0.6间；S型花岗岩稀土元素总量变化范围大，LREE/HREE在1~2间，La/Yb一般在1.5~20间，δEu在0.5~1.0间。矿区三类与岩浆作用有关的岩石的稀土元素分布具有较强的相似性，说明它们极可能源自同一源区；都显示轻稀土元素显著富集，Eu负异常较明显，表明岩体分异作用较强。但它们与典型I型和S型花岗岩相比，则有不同的特点，其稀土总量低于I型花岗岩，LREE/HREE值属于I型花岗岩范畴，Eu亏损，但δEu的低值处于I型花岗岩的范畴，高值则处于S型花岗岩范畴，因此认为石英斑岩难以简单地将之归划于典型的I型或S型岩石。

微量元素方面，矿区三类岩浆岩明显富集大离子亲石元素（LILE），即亲地壳元素Nb、Rb、Ba相对富集；高场强元素（HFSE）含量相对低，即亲地幔元素含量较低，Rb/Sr比值大于1.0，但Zr和Nb这两种高场强元素含量较高（Zr为200.7~637.1ppm；Nb为10.91~23.33ppm），表明物源以壳源为主，且混有幔源物质。

如5.2所述，隐爆角砾岩胶结物中锆石中出现继承锆石，其U-Pb年龄为2473Ma，可以认为中生代岩浆中具有下地壳古元古代基底岩石组分，说明有下地壳的熔融和加入。锆石的Hf同位素特征显示其主要源区为古地壳，而非亏损地幔源区。

前人获得的支家地石英斑岩 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始值的值 0.7058，对比上地幔 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始平均值 0.7037、地壳平均值 0.719，同熔型花岗岩的 0.705~0.709、陆壳改造型花岗岩的 0.709~0.741 的值域，支家地石英斑岩可划归于同熔型成因类型。

石英斑岩的地球化学特征显示了支家地石英斑岩的主量元素、稀土元素、微量元素和同位素对源区示踪的差别，主量元素、稀土元素、微量元素主要显示了 S 型花岗岩类的特点，而同位素地球化学分析则主要表现出壳幔混源的特征，显示了岩浆类型的复杂性。多方面的地球化学特征均示踪岩浆中包含了下地壳的组分，结合本地区大地构造背景的分析（第 2 章）认为矿区中生代的岩浆岩为同碰撞花岗岩类岩石，其主要源区为下地壳的变质基底，且混有幔源物质。

5.2.2 同位素对物质来源的示踪

1）Pb 同位素

（1）样品的选择和分析方法

铅同位素测试样品涵盖了矿区两种矿体类型的主要矿体（1 号、2 号、4 号、12 号、新 1 号、新 2 号）矿石或矿化岩石中的方铅矿，共 9 件，采样范围为标高 1280—1550m，水平方向 0 号勘探线—10 号勘探线。

显微镜下人工挑选出各矿体矿石或矿化岩石中的方铅矿，用以测定铅同位素组成。铅同位素测定在地质矿产部宜昌地质矿产研究所固体质谱仪上完成。

（2）方铅矿的铅同位素组成

表 5.1 山西灵丘支家地铅锌银矿矿石方铅矿铅同位素年龄测定

样号	同位素比值			表面年龄（Ma）	Φ 值	μ 值	Th/U
	$^{206}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{204}Pb$	$^{208}Pb/^{204}Pb$				
0322-4	16.464±0.005	15.161±0.005	36.416±0.010	1078	0.68	8.88	3.8
0323-2-1	16.388±0.004	15.117±0.004	36.249±0.010	1086	0.681	8.8	3.75
0507-22	16.598±0.002	15.150±0.003	36.628±0.007	966	0.666	8.82	3.83
0505-9	16.480±0.002	15.221±0.003	36.518±0.008	1130	0.687	9	3.86
0331-2-2	16.489±0.007	15.219±0.005	36.526±0.015	1121	0.686	9	3.86
0503-13	16.511±0.005	15.194±0.004	36.471±0.010	1079	0.68	8.94	3.81
0410-2-2	16.533±0.005	15.265±0.004	36.829±0.007	1138	0.688	9.09	4
0503-4	16.454±0.004	15.160±0.005	36.382±0.013	1084	0.681	8.88	3.79
0323-1-4	16.454±0.002	15.179±0.002	36.396±0.009	1104	0.684	8.92	3.8

铅同位素是示踪成矿物质来源的重要手段之一。矿区方铅矿的铅同位素组成分析结果如表（表 5.1），由表可知，该区方铅矿的 $N(^{206}Pb)/N(^{204}Pb)$ 为 16.388±0.004~16.598±0.004 、 $N(^{207}Pb)/N(^{204}Pb)$ 为 15.150±0.003~15.265±0.004 ，$N(^{208}Pb)/N(^{204}Pb)$为 36.249±0.010 ~36.829±0.007，且 $N(^{206}Pb)/N(^{204}Pb)$ 的最大差值为 0.21±0.004，$N(^{207}Pb)/N(^{204}Pb)$ 的最大差值为 0.115±0.004，$N(^{208}Pb)/N(^{204}Pb)$的最大差值为 0.58±0.004。通过计算得出特征参数 μ、ω、ω(Th)/ ω(U)的值，分别是 8.80~9.09、

34.12~37.56、3.75~4，结果显示方铅矿的铅同位素值很近似，组成较均一，反映了该区方铅矿应该具有相同的成矿物质来源，同时也说明不同类型的矿体应为同一成矿背景下的产物。

（3）铅同位素构造模式

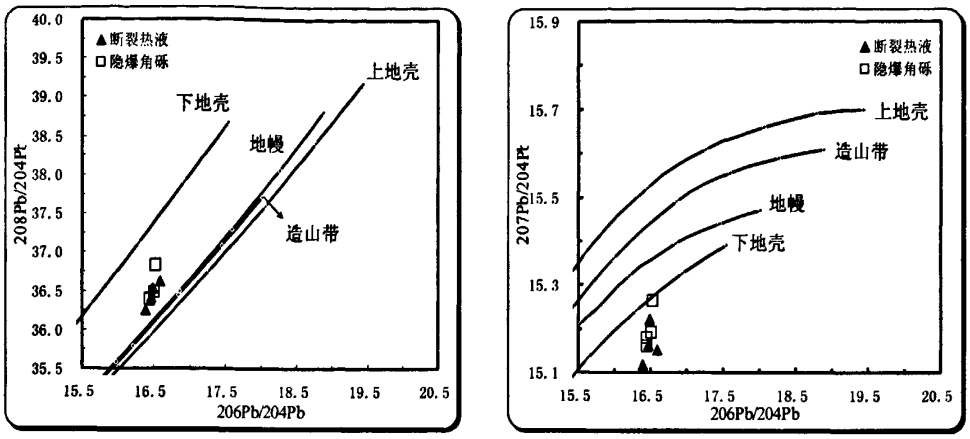


图 5.1 铅同位素构造模式图

铅同位素构造模式图（图 5.1）中不同类型矿体的投影点非常集中，同样显示了两类矿体在物质来源和成矿大地构造背景的一致性。$N(^{208}Pb)/N(^{204}Pb)$-$N(^{206}Pb)/N(^{204}Pb)$的铅同位素构造模式图中的投影点落在下地壳与地幔演化曲线之间（图 5.1 左），$N(^{207}Pb)/N(^{204}Pb)$-$N(^{206}Pb)/N(^{204}Pb)$ 构造模式图中的投影点落在下地壳增长线附近（图 5.1 右），表明了铅的源区以下地壳为主，混有地幔来源。方铅矿 μ 值变化于 8.80~9.09，同样显示铅为壳幔混合铅；ω(Th)/ ω(U)相对均一，为 3.75~4，也反映出铅为壳幔混合铅。

本次工作不仅对不同类型矿体方铅矿的铅同位素组成进行了分析，还收集了石英斑岩全岩铅同位素数据。石英斑岩全岩 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 为 16.98，$^{207}Pb/^{204}Pb$ 为 15.50，$^{208}Pb/^{204}Pb$ 为 36.55，其特征参数 μ 为 9.06，ω 为 35.59，Th/U 3.18；矿石铅同位素组成与石英斑岩的相比较，不但组成相似，源区特征参数也相似，Th/U 值偏高，说明它们之间的铅同位素总体存在共同来源，但石英斑岩较矿石相对更接近于造山带铅同位素演化曲线。由于石英斑岩形成时代早于成矿时代，区域大地构造分析显示区域的构造环境从侏罗纪向白垩纪逐渐向更张性演变，因此石英斑岩与矿石铅同位素特征的微小差异表明二者形成于相同的燕山活动阶段，但可能分属于不同的演化时期，成矿形成于相对晚期的张性背景，二者的物源均包括了下地壳成份，只是存在比例上的微小差别[66]。

2）氢氧同位素

（1）氢氧同位素组成

矿区石英脉不发育，且杂质含量较高，仅在 1320 中段 4 号勘探线 F2 断层附近

发现有脉宽小于 10cm，延长小于 1m 的张性石英脉，只获得了此处及 4 线 ZK4204 号钻孔的两个石英脉样品用于氢氧同位素组成分析。

氢氧同位素分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成，分析仪器为 MAT-253 型稳定同位素质谱仪，采用天然水中氢同位素锌还原法、硅酸盐及氧化物矿物氧同位素组成的五氟化溴法测定。结果见表 5.2，可知，石英的 $\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ 值为 7.5‰~8.7‰；$\delta D_{V\text{-}SMOW}$ 值为-79.7‰~-90.9‰。

表 5.2 山西支家地铅锌银矿区石英氢氧同位素测定

样品号	采样位置	$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ (‰)	$\delta D_{V\text{-}SMOW}$(‰)
0507-2	1320 中段 4 线半 F2 断层	7.5	-90.9
0501-10	ZK4204　305.9m	8.7	-79.7

（2）氢氧同位素组成的示踪意义

据 Taylor 等(1984)研究，幔源岩浆(M)的 $\delta^{18}O$‰=5.5~5.7；又据吴利仁(1985)的研究，我国幔壳混源岩浆(Mc)与壳源岩浆(C)的 $\delta^{18}O$‰分界值约在 10‰处，因此，可以用 $\delta^{18}O$‰值把岩浆物质来源分为如下三种：幔源型(M)：$\delta^{18}O$‰<5.5；幔壳混源型(Mc)：$\delta^{18}O$‰=5.5~10；壳源型(C)：$\delta^{18}O$‰>10。因为矿区石英 $\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ 值为 7.5‰~8.7‰，所以该区岩浆属于幔壳混源型。

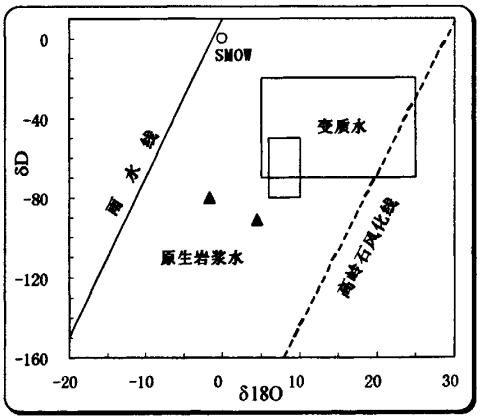


图 5.2 δD-$\delta^{18}O$ 水关系图

根据单样品测定的石英的 $\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ 值，采用石英分馏方程 $1000\ln \alpha_{石英\text{-}水} = -3.40+3.38\times10^6/T^2$，结合所测石英均一化温度（130.5~148.9℃，平均 141.2℃），可换算出与石英氧同位素交换平衡时流体包裹体水的 $\delta^{18}O$ 值，为-1.7‰~4.5‰。将石英流体包裹体中水的 $\delta D_{V\text{-}SMOW}$ 值和计算获得的 $\delta^{18}O$ 水值投影到 δD-$\delta^{18}O$ 水关系图解中，可以看出，该矿床成矿流体的投影点分布比较集中，都落在原生岩浆水区域内（图 5.2）。由于样品均取自断裂热液充填型矿体，说明其成矿热液源于岩浆水，其成矿与岩浆活动有更密切关系。

3）隐爆角砾岩胶结物锆石 Lu-Hf 同位素

锆石原位 Lu-Hf 同位素测定采用 Nu Plasma HR(Wrexham,UK) 多接收电感耦

合等离子体质谱仪完成(MC-ICP-MS)，采用由 ComPex102 Excime 激光器(工作物质 ArF，波长 193 nm)组成的激光剥蚀系统进行锆石剥蚀，氦气为剥蚀物质的载气，激光斑束直径为 44μm，频率为 10 Hz，激光能量为 90 mJ。

单颗粒锆石 Hf 同位素组成是示踪源区的方法之一，在测定锆石年龄的同时，采用原位激光剥蚀法对相同的锆石进行了 Hf 同位素组成测定，以约束隐爆角砾岩胶结物的物源背景，其组成和相关参数计算结果列于表 5.4。

结果显示，fLu/Hf 平均值为-0.98，小于镁铁质地壳的 fLu/Hf (−0.34)[67]和硅铝质地壳的 fLu/Hf (−0.72) [68]，故采用硅铝质大陆地壳的 fLu/Hf 计算隐爆角砾岩胶结物锆石的 εHf(t)和 TDM2[69]。锆石的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ =0.000471～0.001128，小于 0.002，说明锆石形成后只有较少放射成因 Hf 的积累。

锆石 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 的变化范围为 0.281893～0.282185，说明 Hf 同位素组成均一；εHf(t)值分布范围为–17.7～–28.2，平均为–22.4，研究表明，如果锆石 εHf(t)<0，则表明没有新生地壳生长，岩浆主要源自单一源区[70-71]；εHf(t)-t 图中（图 5.6）的所有样品分析点均远离亏损地幔线和球粒陨石线，分布在地壳演化线之间，说明该区岩体主要源区为古地壳，而非亏损地幔源区，岩浆形成的主要机制为陆-陆碰撞造山导致陆壳加厚，先存古老地壳部分熔融。

锆石的 Hf 二阶段模式年龄 TDM2 连续分布，变化为 1890～2414Ma,平均值为 2125Ma，该模式年龄与锆石 U-Pb 年龄中 2473Ma 吻合度较高，进一步说明该区岩体成岩物质主要来自古元古代地壳物质的熔融。

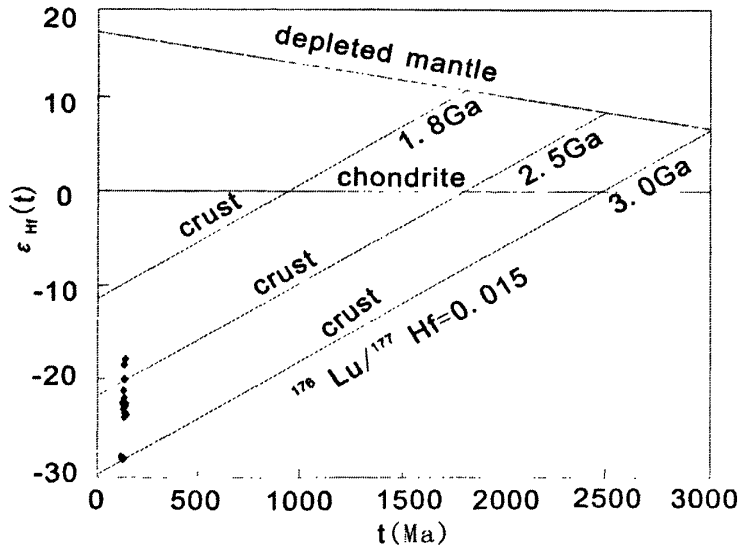


图 5.6 隐爆角砾岩胶结物中锆石的 εHf(t)-t 图解

第六章 结论

6.1 主要结论

基于上述工作，得出以下结论和认识：

1.支家地铅锌银矿存在两种矿体类型，即断裂热液充填型矿体和隐爆角砾岩型矿体。

2.两类矿体的地质特征存在差异，主要表现在控矿构造体系、控矿岩体、空间展布、矿石类型、矿物组合、蚀变类型、围岩等方面。这些认识为全面了解矿床成因和找矿途径的确定提供了基础依据。

3.该矿存在两期成矿。基于显微镜观察、X-射线衍射分析、ICP-MS 及能谱、电子探针原位分析，发现断裂热液充填型和隐爆角砾岩型矿体微观特征的差异除了证实二者分类的正确外，还反映出区内至少存在两期成矿，且断裂热液充填型矿体的成矿机制较复杂。

4.支家地矿的成矿时代为 136Ma。利用 LA-ICP-MS 测试，对隐爆角砾岩胶结物的单颗粒锆石进行了 U-Pb 法定年分析，表明隐爆角砾岩形成年龄为早白垩世早期，同时也说明隐爆角砾型矿的成矿时代为早白垩世早期。

5.成矿母岩源区为壳幔混合源。对矿区的岩浆岩类岩石，特别是石英斑岩进行了主量元素、稀土元素和微量元素分析，且对不同类型矿体方铅矿 Pb 同位素组成，隐爆角砾岩胶结物锆石的 Lu-Hf 同位素及矿区石英脉 $\delta^{18}O$、δD 进行了分析，发现支家地石英斑岩的主量元素、稀土元素、微量元素主要显示了 S 型花岗岩类的特点，而同位素地球化学特征则主要表现出壳幔混源的特征，显示出该区岩浆类型的复杂性。多方面的地球化学特征均示踪岩浆中包含了下地壳的组分，结合大地构造背景分析认为矿区中生代的岩浆岩为同碰撞花岗岩类岩石，其主要源区为下地壳的变质基底，且混有幔源物质。

6.2 主要创新点

1.对该矿提出了有益的新认识，认为矿床可分为断裂热液充填型和隐爆角砾岩型两类矿体，较之前人认为该矿为隐爆角砾岩型多金属热液矿床及矿床由隐爆角砾岩型矿体、断裂热液充填型矿体、接触带型矿体组成的认识，更有利于该矿成矿规律及成矿模型的把握；同时提出了存在二次成矿的认识，为该矿规模的扩大提供了理论依据。

2.在该矿探索性采用显微构造与地球化学相结合的方法确认了矿区二次成矿事实。

3.探索性以隐爆角砾岩的胶结物为载体，确定成矿年代。

6.3 不足之处

由于本人知识水平有限，很多深层次的知识尚不能深刻认识。另外，一些测试分析数据还不是很充分，如前人工作提及矿区存在叶腊石，但本次X-射线衍射分析的样品中未检测出含叶腊石，其原因有待分析；又如石英斑岩样品的主量元素、稀土元素、微量元素分析数据主要显示了S型花岗岩类的特点，而同位素地球化学分析（铅同位素、氢氧同位素及镥铪同位素）则主要表现出壳幔混源的特征，这种矛盾尚未有充足的证据进行合理解释，期望能在以后的工作中更全面的研究该区的成矿物质来源。

参考文献

[1] 冶金部第三地质勘查局312队. 山西省灵丘县高家庄乡支家地银矿勘探地质报告[R], 1993.

[2] 张北廷, 李占新, 刘凤歧等. 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.

[3]翟裕生.矿床学的百年回顾与发展趋势[J].地球科学进展,2001,16(5):719~725.

[4] Lindgren W. Mineral Deposits(4th Edition). New York:: Mc Graw Hill, 1933.

[5]Berger BR and Henley RW. Advances in the understanding of epithermal gold-silver deposits, with special reference to the western United States[J]. Economic Geology Monograph, 1989, 6: 405~423.

[6] Hedenquist JW, Arribas A, and Reynolds TJ. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines[J]. Economic Geology, 1998, 93 (4): 373~404.

[7]Groves DI, Goldfarb RJ, Gebre-Mariam M, etal. Orogenic Au deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other Au deposit types[J]. Ore Geology Reviews, 1998, 13: 7~27.

[8] Kerrich R, Goldfarb RJ, Groves DI, etal. The characteristics, origins and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces[J]. Science in China Series D, 2000, 43 (supp): 1~68.

[9]White NC, Epithermal Gold Deposits. Society of Economic Geologists Beijing Gold Workshop, 2003, 118p.

[10] 陈衍景, 倪培, 范宏瑞等. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. 岩石学报, 2007, 23 (9): 2085~2108.

[11] Heinrich CA. Fluid-fluid interactions in magmatic-hydrothermal ore formation[J]. Rev Miner. Geochem, 2007, 65: 363~387.

[12] 解成波, 刘明. 查干布拉根银铅锌(金)矿床地质特征及成因类型[J]. 世界地质, 2001, 20 (1): 25~29.

[13]毛爱生, 邢琳. 得耳布尔银铅锌矿床地质特征及找矿标志[J]. 吉林地质, 2007, 26 (3): 18~21.

[14] 李久明, 巩恩普. 冀北丰宁银(金)矿床地质、地球化学特征及成因[J]. 地质找矿论丛, 2006, 21 (4): 241~247.

[15]李兆龙, 张连营. 山西省支家地银矿地质特征及矿床成因[J]. 矿床地质, 1992, 11 (4): 315~324.

[16] 李振祥, 谢振玉. 内蒙古西乌珠穆沁旗花敖包特银铅锌矿矿床地质特征及成

因初探[J]. 地质与资源，2008，17（4）：277~290.

[17] 张志辉，乐小横. 银山铜铅锌矿床成因探讨及找矿方向[J]. 有色矿山，2000，29（3）：1~4.

[18] 周辉能. 周宁芹溪铅锌银矿床地质特征与成因初探[J]. 福建地质，2004，1（24）：19~24.

[19] 祁进平，陈衍景，李强之. 华北克拉通北缘浅成低温热液矿床：时空分布和构造环境[J]. 矿物岩石，2004，24（3）：82~92.

[20] 李兆龙，张连营，骆华宝. 晋东北地区中生代次火山岩及金银成矿作用地球化学. 地质找矿论丛[J]，1995，10（1）：1~8.

[21] 冯建忠，王京彬，梅友松. 论中国火山次火山岩—斑岩金银矿成矿系列[J]. 地质与勘探，2000年5月，36（3）：1~4.

[22] 杨建国，马中平. 北祁连山与斑岩有关的碲金型金矿床地质特征和成因模型[J]. 西北地质，2002，35（2）：24~33.

[23] 黄仁生. 福建紫金山矿田火成岩系列与浅成地温热液－斑岩铜金银成矿系统[J]. 地质力学学报，2008，14（1）：74~86.

[24] 马芳，蒋少涌. 与陆相火山岩有关的铁、铜、金矿床成矿地质特征及矿床成因[J]. 地质找矿论丛，2005，20（4）：233~241.

[25] 翟裕生. 矿床学的研究现状和展望[J]. 地球科学，1981，2：133~143.

[26] 毛德宝，钟长汀，陈志宏等. 铅同位素特征对成矿物质来源的制约－以华北地块北缘中段铅锌银矿床为例[J]. 前寒武纪研究进展，2001，24（4）：193~200.

[27] 张宇航. 华北地块含金碱性岩浆源区及其物质来源研究[J]. 黄金，2002，23（1）：4~9.

[28] 杨立强，邓军，葛良胜等. 胶东金矿成矿时代和矿床成因研究述评[J]. 自然科学进展，2006，16（7）：797~802.

[29] 陈毓川，王登红，徐志刚等. 对中国成矿体系的初步探讨[J]. 矿床地质，2006，25（2）：155~163.

[30] 陈毓川. 矿床的成矿系列研究现状与趋势[J]. 地质与勘探，1997，33（1）：21~25.

[31] 陈毓川，裴荣富，王登红. 三论矿床的成矿系列问题[J]. 地质学报，2006，80（10）：1501~1508.

[32] Habibeh Atapoura and Alijan Aftabib. The geochemistry of gossans associated with Sarcheshmeh porphyry copper deposit，Rafsanjan，Kerman，Iran：Implications for exploration and the environment[J]. Journal of Geochemical Exploration，2007，93（1）：47~65.

[33] 翟裕生. 走向21世纪的矿床学[J]. 矿床地质，2001，20（1）：10~14.

[34] 方维萱，徐国端. 勘查地球化学主要新进展与今后的重要发展领域[J]. 矿产与地质，2005，19（6）：599~605.

[35] 吕志成，戴自希，蔺志永等. 危机矿山接替资源找矿勘查相关成矿理论与技术方法[J]. 资源开发，2005，7（3）：80~83.

[36] 毛德宝，赵更新，席忠等. Cu-Mo-Pb-Zn-Ag-Au成矿系统的地质特征及其研究意义[J]. 地质调查与研究，2003，26（4）：213~220.

[37] O.Cardon，L.Reisberg，A.S.Andre-Mayer，et al. Re–Os isotope systematics：Sources and age of epithermal and porphyry copper ore deposits[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta，2006，70（18）：1~82.

[38]F.Castorina and U. Masi. Sr-isotopic composition of siderite for assessing the origin of mineralizing fluids: the case study from the Jebel Awam deposit (Central Morocco) [J]. Ore Geology Reviews, 2000，17（1-2）：83~89.

[39] Peter B. Larson，Kierran Maher，Frank C. Ramos，et al. Copper isotope ratios in magmatic and hydrothermal ore-forming environments[J]. Chemical Geology，2003，201（3-4）：337~350.

[40] 彭渤，Robert FREI，涂湘林. 湘西沃溪W-Sb-Au矿床白钨矿Nd-Sr-Pb同位素对成矿流体的示踪[J]. 地质学报，2006，80（4）：561~570.

[41] T. Ulrich，S.D.Golding，B.S.Kamber，et al. Different mineralization styles in a volcanic-hosted ore deposit：the fluid and isotopic signatures of the Mt Morgan Au–Cu deposit，Australia[J]. Ore Geology Reviews，2003，22（1-2）：61~90.

[42] Thomas Wagner，Adrian J. Boyce，Erik Jonsson，et al. Laser microprobe sulphur isotope analysis of arsenopyrite：experimental calibration and application to the Boliden Au–Cu–As massive sulphide deposit[J]. Ore Geology Reviews，2004，25（3~4）：311~325.

[43] Ardeshir Hezarkhani. Petrology of the intrusive rocks within the Sungun Porphyry Copper Deposit，Azerbaijan，Iran[J]. Journal of Asian Earth Sciences，2006，27（3）：326~340.

[44] Anastassia Yu. Borisova，Michel Pichavant，Mireille Polvé，et al. Trace element geochemistry of the 1991 Mt. Pinatubo silicic melts，Philippines：Implications for ore-forming potential of adakitic magmatism[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta，2006，70（14）：3702~3716.

[45] 涂光炽. 过去20年矿床事业发展的概略回顾[J]. 矿床地质，2001，20（1）：1~9.

[46]F.Castorina and U. Masi. Sr-isotopic composition of siderite for assessing the origin of mineralizing fluids: the case study from the Jebel Awam deposit (Central Morocco) [J]. Ore Geology Reviews, 2000, 17 (1~2): 83~89.

[47] V. Hurai, E. Harová, M. Huraiová, et al. Origin of siderite veins in the Western Carpathians: I. P–T–X–δ13C–δ18O relations in ore-forming brines of the Rudany deposits[J]. Ore Geology Reviews, 2002, 21 (1~2): 67~101.

[48] Lena Virgínia Soares Monteiro, Jorge Silva Bettencourt, Caetano Juliani, et al. Geology, petrography and mineral chemistry of the Vazante non-sulfide and Ambrósia and Fagundes sulfide-rich carbonate-hosted Zn-(Pb) deposits, Minas Gerais, Brazil[J]. Ore Geology Reviews, 2006, 28 (2): 201~234.

[49] 武铁山，徐朝雷，徐有华等. 山西省区域地质志. 北京地质出版社，1989.

[50]毛德宝，钟长汀，陈志宏等. 华北地块北缘中段铅锌银矿床成矿作用讨论[J]. 前寒武纪研究进展，2002，25(2)：105~112.

[51] 陈昌勇，李守义，范继璋等. 华北地块北缘金银铜铅锌成矿系列综合信息找矿模型[J]. World Geology，1999，18(1)：25~31.

[52] 陈昌勇，李守义，范继璋等. 华北地块北缘 AuAgCuPbZn 成矿规律[J]. 长春科技大学学报，1999，29(3)：227~231.

[53] 周绍芝. 晋东北地区银(金)矿成矿特征及远景浅析[J]. 地质与勘探，1999，35 (3)：6~8.

[54] 李生元，李兆龙，林建阳等. 晋东北次火山岩型银锰金矿[J]. 中国地质大学出版社，2000，武汉.

[55]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.

[56] 李兆龙，张连营. 山西省刁泉银铜矿床地质特征及成因机制[J]. 矿床地质，1999，18(1)：11~21.

[57] 李树臣，周利霞. 山西省灵丘县支家地铅锌银矿床地质特征及成矿预测[J]. 地质与勘探，2008，44(3)：18~21.

[58] 张北廷，李占新，刘凤歧. 山西灵丘支家地银矿地质特征[J]. 华北地质矿产杂志，1995，2：257~268.

[59]李兆龙，唐耀林. 山西省支家地银矿地质特征及矿床成因[J]. 矿床地质，1992，4：315~324.

[60] 张连营，李兆龙，樊秉鸿等. 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.

[61]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.

[62] 李兆龙，张连营，骆华宝. 晋北火山岩型金银矿床同位素地球化学特征[J]. 地球学报，1994，1（2）：145~151.

[63] 毛景文，张作衡，余金杰等. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景：从金属矿床年龄精测得到启示. 中国科学（D辑），2003，33（4）：289~299.

[64] 黄耀平，马义泰. 广西龙山金矿田黄铁矿特征及成因[J]. 南方国土资源，2008：46~48.

[65] 朱文凤，杨国高，张芳. 广西龙头山金矿床矿石显微结构构造和金矿物成分特征[J]. 矿产与地质，2007，21(2)：192~195.

[66] 毛德宝，钟长汀，陈志宏等. 铅同位素特征对成矿物质来源的制约—以华北地块北缘中段铅锌银矿床为例[J]. 前寒武纪研究进展，2001，24(4)：193~200.

[67]Vervoort J D，Blicher-Toft J. Evolution of the depleted mantle：Hf isotope evidence from juvenile rocks through time[J]. Geochim Cosmochim Acta，1999，63：533~556.

[68]Amelin Y，Lee D C，Halliday A N. Early-middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains[J]. Geochim Cosmochim Acta，2000，64：4205~4225.

[69] 吴福元，李献华，郑永飞等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学作用[J]. 岩石学报，2007，23(2)：185~220.

[70] Rudnick R L. Making continental crust[J]. Nature，1995，378：571~577.

[71] Hawkesworth C J，Kemp A I S. Evolution of the continental crust[J]. Nature，2006，443：811~817.

致谢

三年的研究生生涯接近尾声，在我的论文即将完成之际，首先我要对我敬爱的导师吴堑虹教授致以最由衷的感谢。从我踏入中南，一路走来，都离不开吴老师的指导和照顾，吴老师不仅在学术上给予我悉心指导，同时还在我的生活上、工作上提供了很多很多帮助。本论文从立意到编写、修改、定稿，每一点收获、每一个成果都凝聚着吴老师的无私奉献。吴堑虹老师严谨的治学态度，渊博的科研知识和丰富的人生阅历都令我受益匪浅。在此，向三年来培养和关怀我的导师吴堑虹教授致以崇高的敬意和诚挚的感谢！

感谢地学与环境工程学院的各位领导、老师给予我的关怀和帮助，尤其是胡祥昭教授、邵拥军教授、谷湘平教授、孔华教授等，他们在课题研究中给予了我莫大的帮助，在此对各位老师表示感谢！

感谢我的同门——孟玉婷、姜建，以及我的师弟师妹们——刘容秀、庞慧、蒋春明、易洪波、吴伟。他们在我的论文写作过程中提供了很多帮助，短暂的时光，却建立了深厚的情谊，这也是我研究生生涯中一个宝贵的收获！

特别感谢我远在家乡的父母！多年来一直给予我的照顾和支持，让我一路顺利的完成学业。

再次向所有给予我帮助的老师和朋友们表示感谢，向在百忙之中抽出时间评阅本论文、参加答辩的各位专家教授表示诚挚的谢意！

攻读硕士学位期间与专业相关的成果及发表的学术论文

一、攻读硕士学位期间发表的学术论文及相关成果

1、山西灵丘支家地铅锌银矿矿石微观特征对成矿期次的示踪初探，大地构造与成矿学，第一作者。

2、青海省柴达木循环经济试验区大柴旦工业园区规划，第三章“大柴旦工业园区矿产资源支撑状况”，2008年11月。

二、攻读硕士学位期间参加的科研项目

1、国家自然科学基金“全国危机矿山接替资源专题项目”（2008年5月至今）

项目描述：山西省灵丘县支家地铅锌银矿成矿规律及预测研究（硕士论文）

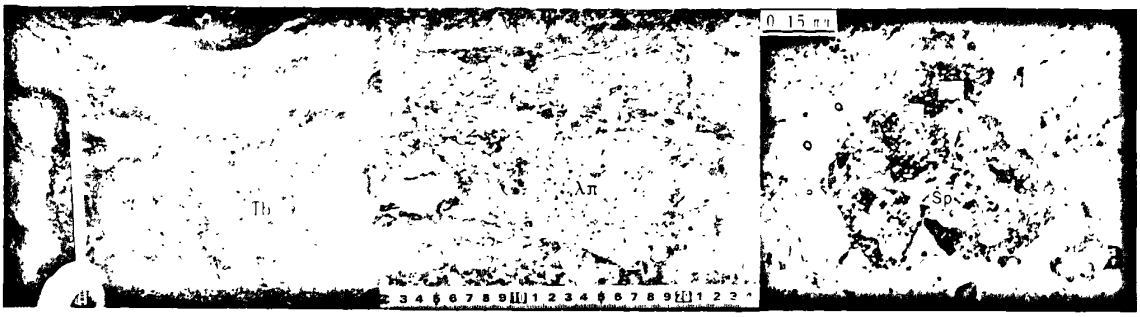
2、广西平果铝土矿（2008年3月～2008年10月）

项目描述：广西平果铝土矿成矿规律及预测研究

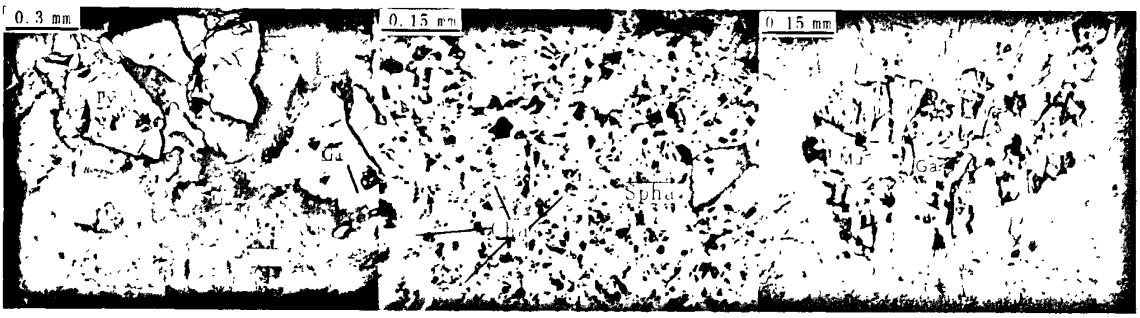
3、青海省柴达木循环经济试验区大柴旦工业园区规划（2008年3月～2009年3月）

项目描述：大柴旦工业园区矿产资源支撑状况评价

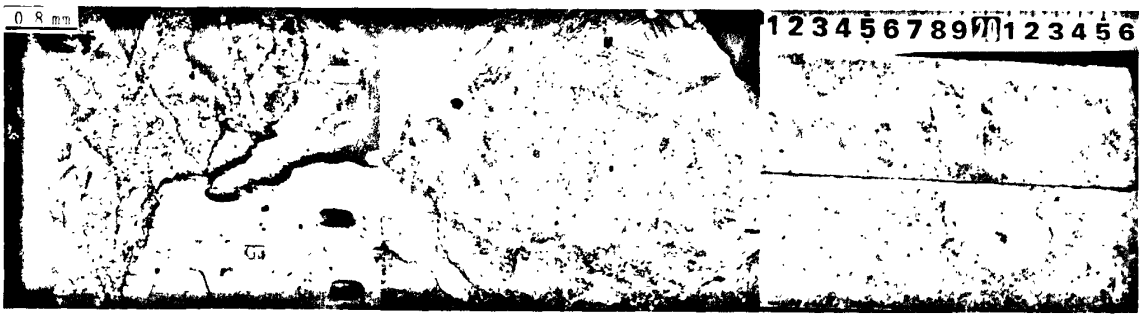
附图



照片 3.1 可拼接角砾　　照片 3.2 次磨圆—磨圆状角砾　　照片 3.3 星点状黄铁矿



照片 3.4 粒径较粗的黄铁矿　　照片 3.5 闪锌矿中的黄铜矿　　照片 3.6 方铅矿被石英、白云母溶蚀交代为骸晶



照片 3.7 早期方铅矿为闪锌矿溶蚀呈港湾状　　照片 3.8 矿化胶结的岩石角砾　　照片 3.9 碳酸盐岩角砾



照片 3.10 石英、闪锌矿角砾　　照片 3.11 集合体角砾　　照片 3.12 星点状黄铁矿胶结角砾



照片 3.13 方铅矿“核”、闪锌矿“幔”的核-幔构造

照片 3.14 脉中的闪锌矿及角砾中的闪锌矿

照片 3.15 方铅矿+黄铁矿+闪锌矿角砾核



照片 3.16 闪锌矿+黄铁矿+方解石内环带

照片 3.17 方铅矿+石英环外环带

照片 3.18 绢云母交代钾长石斑晶并伴有矿化



照片 3.19 方铅矿被溶蚀呈港湾状

照片 3.20 黄铁矿碎裂后基本无位移

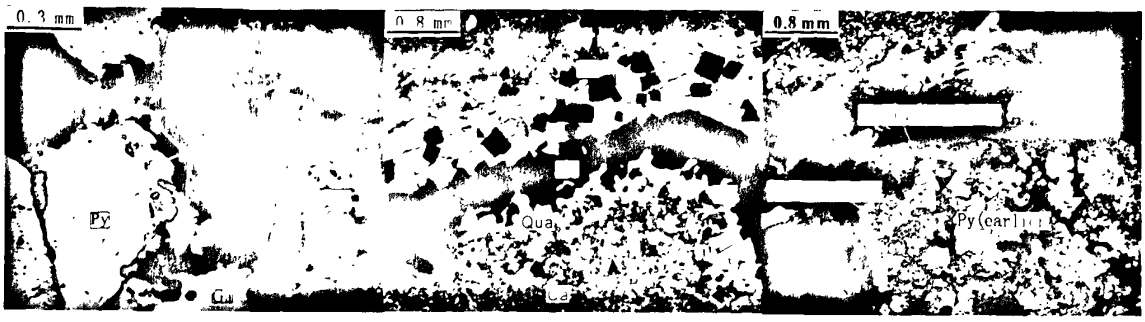
照片 3.21 碎粒岩中的硫化物脉



照片 3.22 黄铜矿沿闪锌矿晶格规则分布

照片 3.23 闪锌矿溶蚀包裹方铅矿

照片 3.24 黄铁矿被溶蚀形成筛孔构造



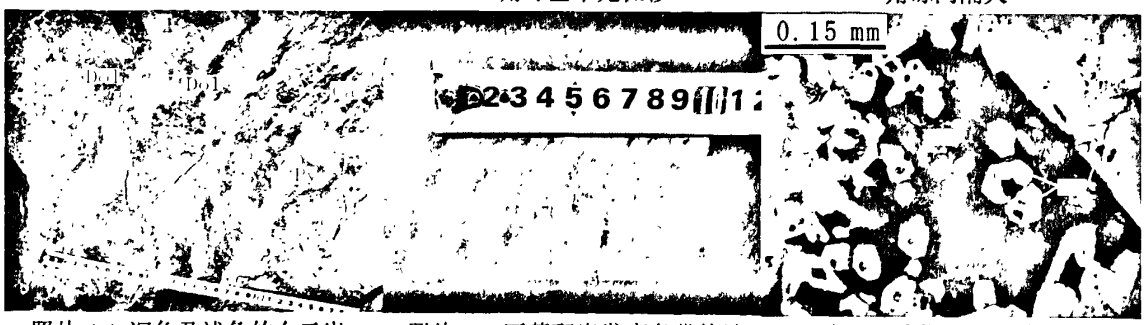
照片 3.25 黄铁矿被方铅矿溶蚀边缘呈筛孔构造　照片 3.26 石英包裹方解石，绢云母包裹黄铁矿　照片 3.27 黄铁矿闪锌矿集合体矿化角砾



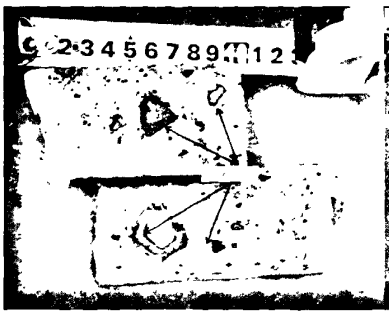
照片 3.28 石英斑岩角砾可拼接　照片 3.29 石英脉及石英团块　照片 3.30 矿体围岩硅化



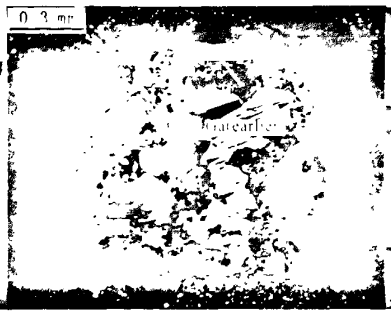
照片 4.1 石英斑岩的条带构造　照片 4.2 碎裂石英斑岩角砾，角砾基本无位移　照片 4.3 爆破石英斑岩角砾，角砾间隔大



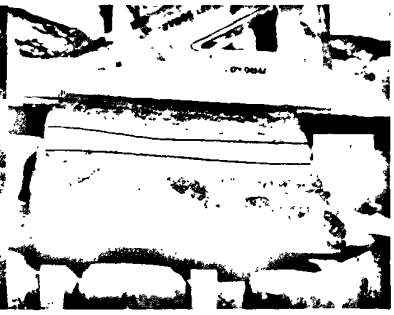
照片 4.4 深色及浅色的白云岩　照片 4.5 石英斑岩发育条带构造　照片 5.1 硅化石英溶蚀闪锌矿



照片 5.2 凝灰角砾岩中矿化角砾



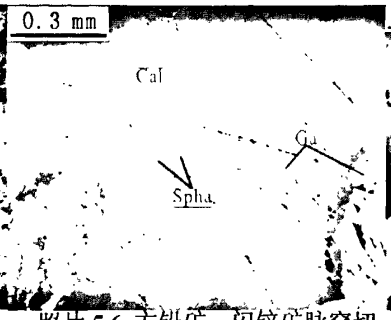
照片 5.3 方铅矿角砾为富黄铁矿基质包裹



照片 5.4 穿切矿体的方铅矿脉产状近于垂直



照片 5.5 脉中的闪锌矿及角砾中的闪锌矿



照片 5.6 方铅矿、闪锌矿脉穿切热液蚀变方解石



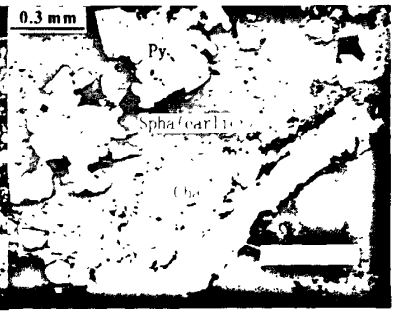
照片 5.7 早期方铅矿被闪锌矿溶蚀



照片 5.8 方铅矿被绢云母溶蚀呈骸晶状



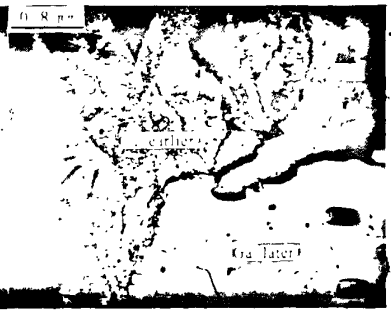
照片 5.9 早期及晚期闪锌矿



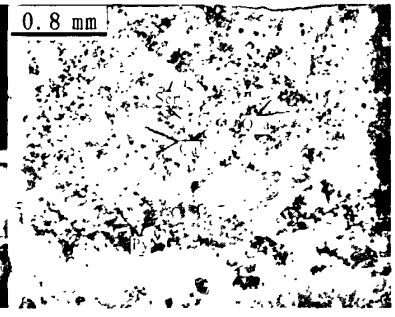
照片 5.10 粒径较大的黄铁矿



照片 5.11 星点状黄铁矿



照片 5.12 两种方铅矿与同一闪锌矿颗粒的接触



照片 5.13 杂质含量较高的方解石