

王喜龙, 刘家军, 翟德高, 等. 内蒙古林西边家大院银多金属矿床同位素地球化学特征及成矿物质来源探讨[J]. 中国地质, 2014, 41(4): 1288-1303.

Wang Xilong, Liu Jiajun, Zhai Degao, et al. A study of isotope geochemistry and sources of ore-forming materials of the Bianjiadayuan silver polymetallic deposit in Linxi, Inner Mongolia [J]. Geology in China, 2014, 41(4): 1288-1303(in Chinese with English abstract).

## 内蒙古林西边家大院银多金属矿床同位素地球化学特征及成矿物质来源探讨

王喜龙<sup>1,2</sup> 刘家军<sup>1</sup> 翟德高<sup>1</sup> 王建平<sup>1</sup> 张琪彬<sup>1</sup> 张安立<sup>3</sup>

(1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京100083; 2. 辽宁省地质局地震预报中心, 辽宁沈阳110000; 3. 赤峰市利拓矿业有限公司, 内蒙古赤峰024000)

**摘要:**边家大院银多金属矿床位于大兴安岭成矿带南段, 是一个典型的热液脉型银多金属矿床。基于稳定同位素C、H、O、S和放射性Pb同位素的测试和分析, 对边家大院银多金属矿床成矿流体及物质来源进行示踪。同位素测试结果表明:成矿流体中水的 $\delta D_{\text{水-SMOW}}$ 值为 $-138.5\text{‰} \sim -111.7\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水-SMOW}}$ 值为 $-8.85\text{‰} \sim -9.38\text{‰}$ , 表明成矿流体为岩浆水与大气降水的混合物。热液方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 $-7.7\text{‰} \sim -2.67\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 $-0.41\text{‰} \sim 6.03\text{‰}$ , 表明热液矿物方解石是2个阶段成矿作用的产物, 成矿早阶段流体与岩浆水特征相似, 碳主要来源于岩浆, 成矿晚阶段流体具有大气降水的特征。边家大院银多金属矿床矿石硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $0.7\text{‰} \sim 4.4\text{‰}$ , 显示银铅锌矿体的形成与岩浆作用密切相关, 硫主要来自岩浆源。矿石样品 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值介于 $38.1 \sim 38.634$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值介于 $15.518 \sim 15.681$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值介于 $18.155 \sim 18.284$ , 表明成矿与岩浆作用关系密切, 成矿流体中铅主要来自深源岩浆。成矿作用的发生是在一种总硫浓度比较低的平衡体系中进行的。边家大院银多金属矿床的成因类型属于火山-次火山热液脉状银多金属矿床。

**关键词:**同位素; 成矿物质; 边家大院银多金属矿床; 林西

**中图分类号:** P611.1; P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2014)04-1288-16

稳定同位素(C、H、O、S)示踪是揭示成矿流体来源的有效手段, 对不同成矿阶段流体进行同位素分析可追溯流体演化的具体过程和成矿机制<sup>[1]</sup>。对于铅同位素来说, 其组成除受放射性衰变和混合作用影响外, 不会在物理、化学和生物作用过程中发生变化, 即在矿质运移和沉淀过程中铅同位素组成保持不变<sup>[2]</sup>, 因此对矿床中金属硫化物进行放射性Pb同位素分析能够对成矿物质的来源提供重要约束, 因而被广泛应用于各种矿床的研究中<sup>[3-4]</sup>。近年来, 众多国内外地质学者们已成功利用同位素示踪

揭示出了多种矿床的热液来源和演化过程<sup>[5-9]</sup>。从已有成果来看, 不同成矿带内的同类型矿床, 含矿热液来源、演化过程及相关的成矿机制存在较大差异<sup>[10-11]</sup>; 而对于同一成矿带相同时期内形成的矿床, 一般具有类似的地质背景和成矿要素。因此, 对典型矿床成矿流体的剖析将有助于认识成矿带内同时期矿床流体的演化与成矿机制<sup>[8]</sup>。

大兴安岭南段位于古亚洲洋成矿带和环太平洋成矿带的交汇部位, 是中国北方一个重要的多金属成矿带, 此区域对其成矿物质来源的研究具有重

收稿日期: 2014-02-27; 改回日期: 2014-04-09

基金项目: 中国地质调查局地质矿产调查评价项目(1212011085471)、国家自然科学基金项目(40973035, 41072070, 41272110)和高等学校学科创新引智计划(B07011)联合资助。

作者简介: 王喜龙, 男, 1988年生, 硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: 546737333@qq.com。

通讯作者: 刘家军, 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 主要从事矿床学研究与教学工作; E-mail: liujiajun@cugb.edu.cn。

要意义<sup>[12]</sup>。边家大院银多金属矿床即产于该成矿带内,为近几年新发现的热液脉型银多金属矿床,前人对该矿床成因等方面的研究还相当薄弱。因此,本文利用现代测试分析技术和计算方法,对矿区稳定同位素C、H、O、S和放射性Pb同位素研究,以更全面地了解边家大院银多金属矿床成矿流体特征和成矿物质来源,为认识该矿床成因及区域多金属矿床的成矿物质来源提供参考和依据。

## 1 区域地质特征

边家大院银多金属矿床位于大兴安岭南段,内蒙古林西县城南东10 km处,地理坐标为E 118°02'38"~118°04'30",N 43°31'00"~43°32'00"。近年来,由于兴蒙地区基础地质研究和矿产调查工作加大了投入,该区新发现了一批与中酸性岩浆有成因联系的内生金属矿床,成矿元素包括Pb、Zn、Ag、Cu、Mo、Sn等多金属<sup>[9]</sup>。边家大院银多金属矿床按成矿带划分所属大兴安岭南段铅锌-银-铜-锡-铁成矿带之锡-铅锌-铜-铁成矿亚带<sup>[13]</sup>,该区域近年来以大兴安岭南段主脊产出白音诺尔Pb-Zn矿床、大井Sn-Ag-Cu-Pb-Zn多金属矿床、拜仁达坝Ag-Pb-Zn多金属矿床、黄岗梁Fe-Sn矿床等大型、超大型矿床多处,成为了中国北方一个十分重要的金属省。

边家大院矿区位于大兴安岭南段晚古生代增生造山带内,夹持于区域性大断裂西拉木伦河断裂、黄岗梁甘珠尔庙断裂、新林镇断裂和查干木伦断裂之间<sup>[14]</sup>。区内古生界以二叠系为主,其中统为林西组( $P_2l$ ),为一套河流-陆相湖泊的碎屑岩组合,并以湖泊相沉积为主,岩性主要为岩屑砂岩、板岩;下统为哲斯组( $P_2z$ ),为一套浅海相碎屑沉积岩组合,岩性主要为岩屑砂岩、粉砂质板岩;中生界以中侏罗世和晚侏罗世火山碎屑岩为主;新生界中全新统及上更新统较发育。区域断裂构造发育,NW向断裂与NE向断裂纵横交错,构成格子状。岩浆活动以燕山中晚期侵入活动最为强烈,以花岗岩类为主,该期岩浆活动与区内成矿关系最为密切。

## 2 矿床地质特征

### 2.1 矿区地质特征

矿区内出露面积最大的地层为下二叠统哲斯

组中岩段( $P_2z^2$ ),为一套浅海相沉积的灰色-灰黑色粉砂质泥质板岩、细砂质板岩、角岩化板岩、炭质板岩夹变质细砂岩(图1)。地层走向NE,倾向NW。该岩段为脉状矿体的主要赋矿围岩。区内褶皱构造不明显,断裂构造发育,可分为NW向和NE向2组,以NW向为主。这些构造为后期成矿物质的运移及容矿提供了良好的空间。矿区岩浆侵入活动强烈,主要岩体有辉长岩、隐伏石英斑岩;岩脉有花岗闪长岩、闪长岩、花岗斑岩和石英脉等。辉长岩体主要分布在矿区东部及西北部,石英斑岩体主要隐伏于矿区西部,闪长岩脉主要分布于矿西北部,其中与成矿关系最为密切的主要为辉长岩体及矿区西部的隐伏石英斑岩体。

### 2.2 矿体地质特征

边家大院热液脉型铅锌银矿体主要分布于矿区东段04~08号勘探线范围内,铅锌银矿体共生产出,矿体主要产于哲斯组泥质、硅质板岩和辉长岩体中的构造蚀变带及节理、裂隙中(图2)。矿体主要呈脉状、透镜状,走向以NW向为主,其与矿区的主断裂方向基本一致,说明矿体受断裂构造控制明显。矿体与围岩界限清楚,围岩主要为哲斯组板岩、辉长岩。围岩蚀变较强烈,其中与矿化关系最为密切的为绿泥石化、绿帘石化和硅化,靠近构造矿化蚀变带或辉长岩体内蚀变尤为强烈。

边家大院热液脉型银铅锌矿床目前发现34条矿体,共分为5个中段进行开采,但以W-1号、W-2号和W-4号规模最大(图2),3条矿体均产在辉长岩体的外接触带,矿体受断裂构造明显,呈脉状产出,矿脉长130~165 m,宽25~45 m,倾向240°~325°,倾角29°~42°,平均厚度7.35~10.57 m,平均品位铅1.71%~2.53%,锌1.95%~3.45%,银 $1.95 \times 10^{-6}$ ~ $119.2 \times 10^{-6}$ 。

矿床金属矿物组合主要为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿、黄铜矿、针硫锑铅矿等,含银矿物主要为银黝铜矿、深红银矿、辉银矿等,地表氧化带中可见褐铁矿、黄钾铁矾等。脉石矿物有石英、绿泥石、高岭土、绢云母、方解石等。矿石结构包括自形-半自形粒状结构、他形粒状结构、交代残余结构(图3-F)、碎裂结构、包含结构、揉皱结构(图3-E)、乳滴状固溶体分离结构(图3-G)、溶蚀反应边结构、岛弧港湾状结构(图3-G)等。矿石构造主要呈条带状(图3-A)、脉状(图3-B)、块状(图3-

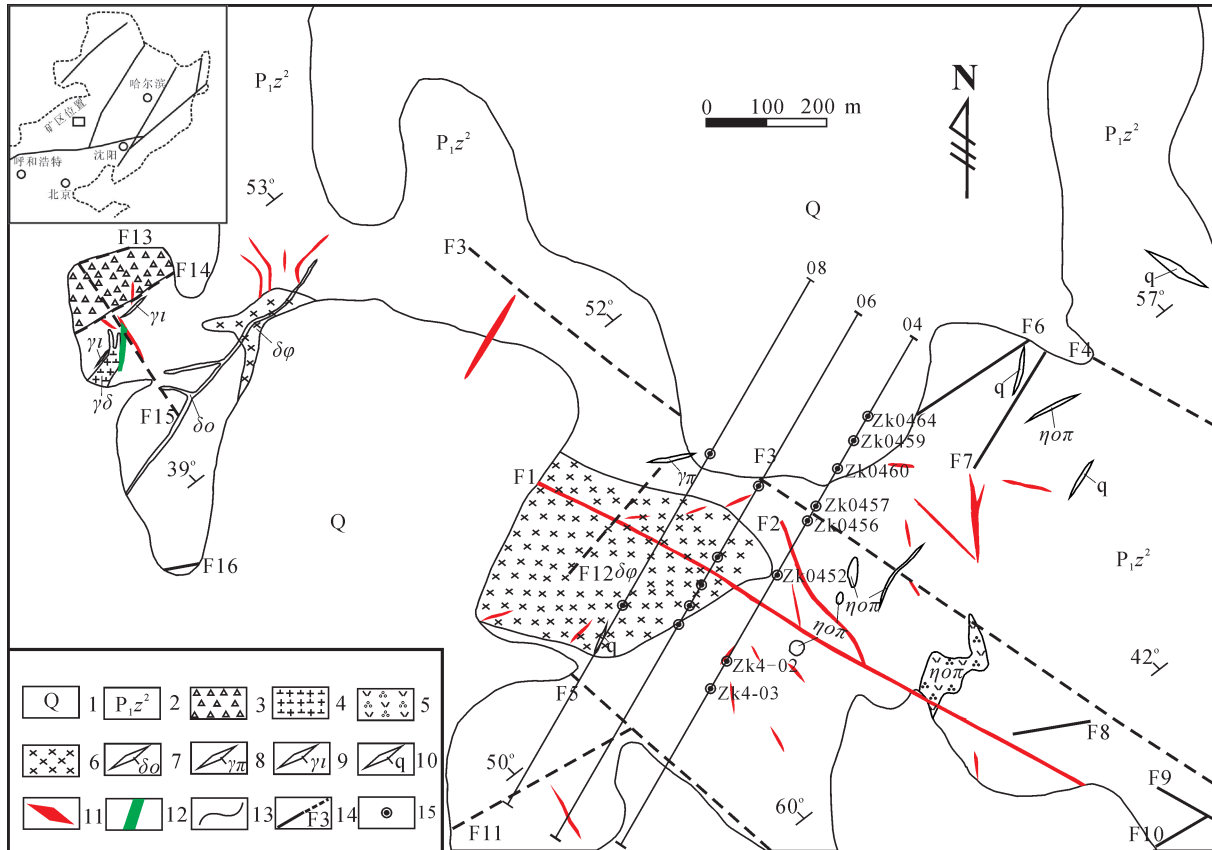


图1 边家大院银多金属矿床地质简图

1—第四系残坡积层; 2—下二叠统哲斯组中岩段; 3—隐爆角砾岩; 4—花岗闪长岩; 5—石英斑岩; 6—辉长岩; 7—闪长岩脉; 8—花岗斑岩脉; 9—花岗细晶岩脉; 10—石英脉; 11—铅锌银矿化蚀变带; 12—铜矿化蚀变带; 13—地质界线; 14—实测及推测断层; 15—钻孔位置

Fig.1 Simplified geological map of the Bianjiadayuan silver polymetallic deposit

1-Quaternary eluvium; 2-Middle segment of Lower Permian Zhesi Formation; 3-Cryptoexplosive breccias; 4-Granodiorite; 5-Quartz porphyry; 6-Gabbro; 7-Diorite dyke; 8-Granite-pophyry dyke; 9-Granitic aplite dyke; 10-Quartz vein; 11-Lead-zinc-silver mineralization and alteration zone; 12-Copper mineralization and alteration zone; 13-Geological boundary; 14-Measured and inferred fault; 15-Location of drill hole

C)、浸染状(图3-D)、角砾状构造等。

根据野外观察的矿石结构、构造和矿脉之间的穿插关系,再结合室内显微镜下矿物的共生组合及先后次序等特征,笔者将边家大院热液脉型铅锌银矿床划分为2个主要成矿期:热液成矿期和表生成矿期。热液成矿期又可划分为4个成矿阶段:黄铁矿-毒砂-石英阶段(I),该阶段主要形成少量的自形-半自形黄铁矿和毒砂,这些矿物包裹于其他硫化物或被晚期硫化物交代;多金属硫化物-石英阶段(II),该阶段为主要矿化阶段之一,以形成大量的硫化物为特征,主要以黑褐色闪锌矿、黄铜矿、磁黄铁矿为标志,并伴随有黄铁矿、方铅矿等硫化物及

少量银矿物的沉淀;含银矿物-硫盐矿物-石英阶段(III),该阶段以形成大量含银矿物和中-细粒的方铅矿为特征,是形成银矿物的主要阶段,主要矿物组合为方铅矿、细粒闪锌矿、针硫锑铅矿、深红银矿、银锑黝铜矿、黝锑银矿、石英等矿物;石英-碳酸盐阶段(IV),该阶段矿物组合单一,主要是石英、方解石和玉髓等矿物。表生氧化期主要形成氧化矿石,如铅矾、褐铁矿和孔雀石等次生氧化矿物。

### 3 样品采集与分析测试方法

本次研究的样品主要采自边家大院东区热液脉型银多金属矿床井下坑道一中段、二中段、三中

①内蒙古自治区核工业二四三大队. 林西县边家大院矿区地形地质图(1:2000). 2011.

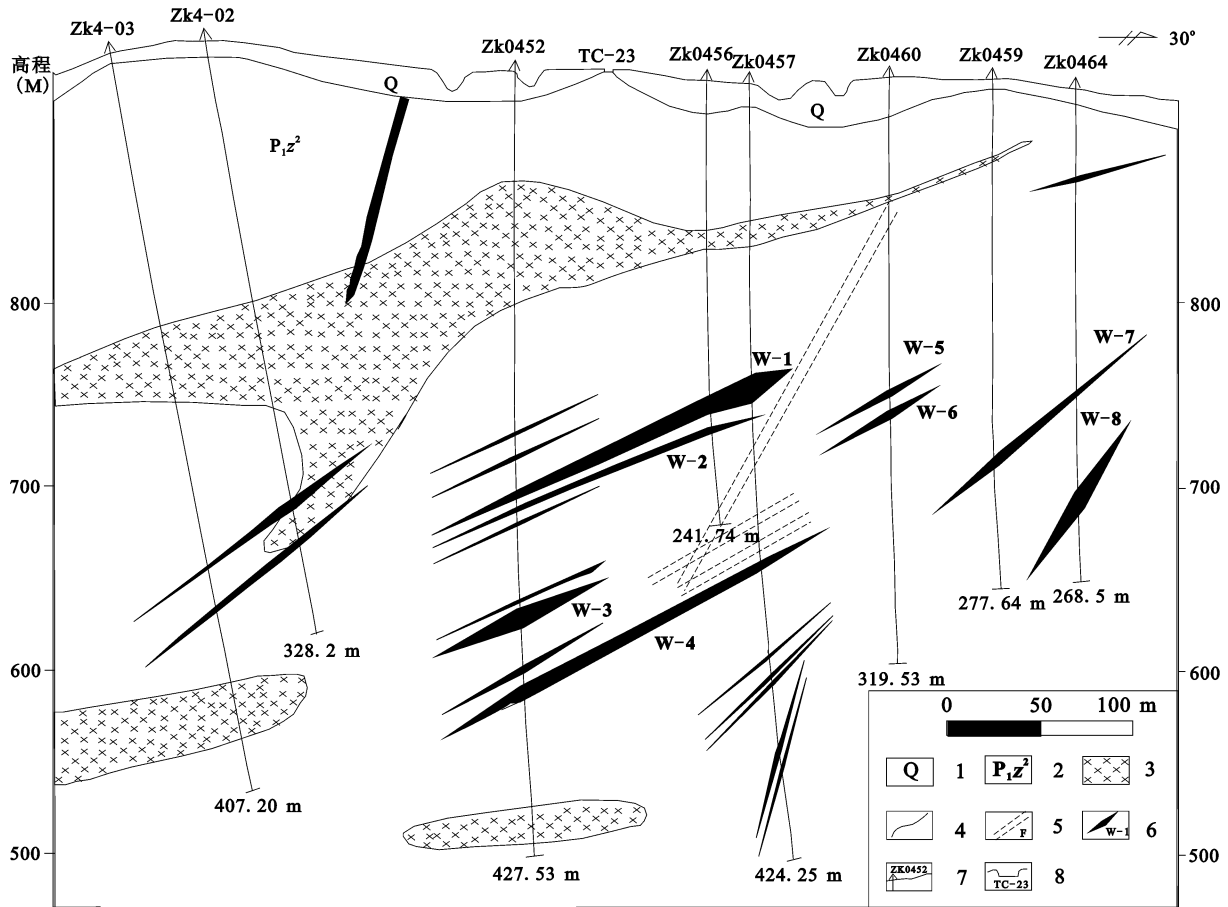


图2 边家大院银多金属矿床04号勘探线剖面图<sup>①</sup>

1—第四系;2—下二叠统哲斯组中段;3—辉长岩体;4—地质界线;5—断裂构造;6—矿体位置及编号;  
7—钻孔位置及编号;8—探槽位置及编号

Fig.2 Geological section along No. 04 exploration line of the Bianjiadayuan silver polymetallic deposit<sup>①</sup>

1-Quaternary eluvium;2-Middle segment of Lower Permian Zhesi Formation;3-Gabbro;4-Geological boundary;5-Fault;6-Orebody and its serial number;7-Drill hole and its serial number;8-Trench and its serial number

段以及五中段矿脉中,少部分样品采自岩心、矿石堆,样品较新鲜。用于测试的样品首先经过破碎至40~80目,用肉眼初选出单矿物,然后将其放在双目镜下挑纯(纯度>99%),再将其放入玛瑙研钵体中磨制200目以上,最后进行同位素测试分析。

本次对方解石的C、O同位素组成分析在中国地质大学(北京)科学研究院实验中心完成。依据方法为SY/T 5238-2008有机物和碳酸盐碳、氧同位素分析方法。将方解石粉碎至200目,低温(100~120℃)烘干,然后放入容器,注入100%纯磷酸,在50℃真空条件下反应24 h,将所得之CO<sub>2</sub>气体经简

单提纯后,在IRMS(Isoprime)同位素质谱仪上进行测试。经质量分馏校正后,数据以PDB标准给出。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}=1.03086 \delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}+30.86$ ,换算为SMOW标准。

对于H、O、S、Pb同位素组成分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。氢和氧同位素测试方法和依据分别采用DZ/T0184.13—1997《硅酸盐及氧化物矿物中氧同位素组成的五氟化溴法测定》和DZ/T0184.19—1997《水中氢同位素锌还原法测定》,所用测试仪器为Finnigan MAT-253质谱仪,仪器编号8633。硫同位素分析过程中,首先

①内蒙古自治区核工业二四三大队. 边家大院矿区04勘探线设计剖面图(1:500). 2011.



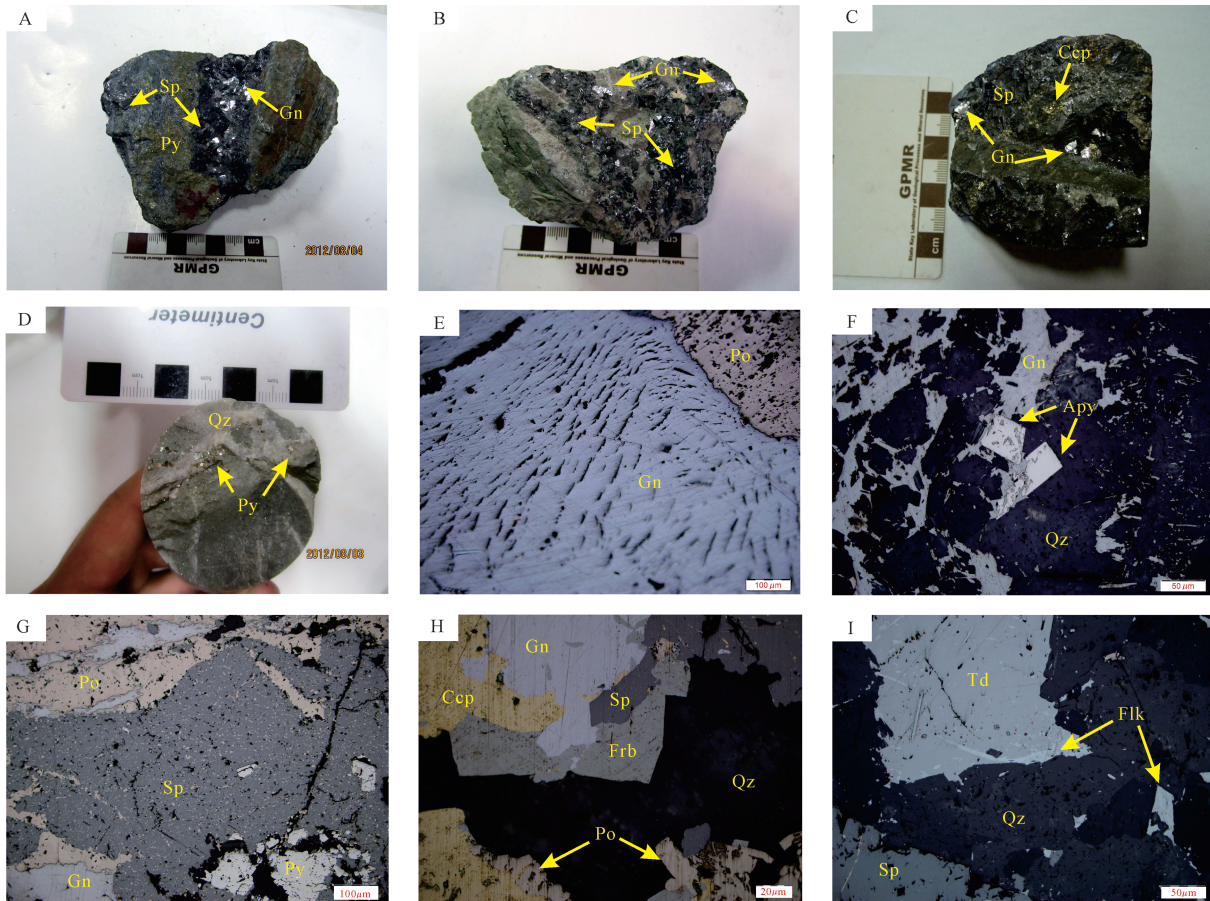


图3 矿石的矿物组成和结构构造

A—一条带状铅锌矿石;B—脉状铅锌矿石;C—块状铅锌矿石;D—浸染状黄铁矿矿石;E—方铅矿受理解理弯曲呈揉皱结构;F—自形毒砂被方铅矿交代呈骸晶结构;G—磁黄铁矿呈乳滴状分布于闪锌矿中;H—黝铜银矿交代方铅矿;I—针硫锑铅矿交代银锑黝铜矿。Sp—闪锌矿;Py—黄铁矿;Gn—方铅矿;Ccp—黄铜矿;Po—磁黄铁矿;Apy—毒砂;Frb—黝铜银矿;Flk—针硫锑铅矿;Td—银锑黝铜矿;Qz—石英

Fig. 3 Mineral compositions and structures of sulfide ores

A—Banded lead and zinc ore; B—Lead and zinc vein ore; C—Massive lead and zinc ore; D—Disseminated pyrite ore; E—Galena of ruffled texture; F—Rhombus arsenopyrite crystal replaced by galena as skeletal texture; G—Tiny drop-like pyrrhotite distributed in sphalerite as grating texture; H—Galena replaced by freibergite; I—Tetrahedrite replaced by tetrahedrite. Sp—Sphalerite; Py—Pyrite; Gn—Galena; Ccp—Chalcocopyrite; Po—Pyrrhotite; Apy—Arsenopyrite; Frb—Freibergite; Flk—Falkmanite; Td—Tetrahedrite; Qz—Quartz

将硫化物与 $\text{Cu}_2\text{O}$ 在真空状态下加热进行氧化反应,使生成的 $\text{SO}_2$ 被冷冻入样品试管,再抽走剩余的氧气和其他杂质气体,纯化 $\text{SO}_2$ ,最后在MAT-251型质谱仪上测定分析;质谱仪工作条件:加速电压约为580 V,永久磁场强度0.585 T,灯丝发射电流为 $300 \mu\text{A}$ ,分析精密度为 $\pm 0.2\%$ ,相对标准为V-CDT。样品铅同位素制备首先称取适量样品放入聚四氟乙烯坩埚中,加入纯化的HF+HCl酸溶解;之后使用强碱性阴离子交换树脂,依次加入纯化的HBr和HCl酸对铅进行分离;最后在室温 $21^\circ\text{C}$ ,相对湿度20%的条件下,根据标准GB/T17672-1999《岩

石中铅铋钨同位素测定方法》,由ISOPROBE-T热电离子质谱仪完成铅同位素比值的测定,测量精度为对 $1 \mu\text{g}$ 铅其 $^{204}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$ 低于0.005%, $^{204}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 低于0.002%, $^{204}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$ 低于0.002%。

## 4 同位素地球化学特征

### 4.1 碳、氢、氧同位素

对边家大院银多金属矿床13件热液方解石进行碳、氧同位素测试,测试结果表明(表1), $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值变化范围为 $-7.7\%$ ~ $-2.67\%$ ,平均值为 $-5.28\%$ ,极差为 $5.03\%$ ;  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 变化范围为 $-0.41\%$ ~ $6.03\%$ ,

表1 边家大院银多金属矿床方解石碳、氧同位素组成  
Table 1 Carbon and oxygen isotopic compositions of calcite from the Bianjiadayuan silver polymetallic deposit

样品编号	测试矿物	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$
BJ-06	方解石	-2.67	-23.70	6.43
BJ-11	方解石	-4.81	-28.95	1.01
BJ-49	方解石	-3.99	-27.82	2.18
BJ-21	方解石	-3.96	-30.34	-0.41
BJ-36	方解石	-3.79	-27.67	2.34
BJ12-04	方解石	-5.80	-28.42	1.56
BJ12-14	方解石	-6.11	-29.73	0.22
BJ12-19	方解石	-5.13	-28.84	1.13
BJ12-26	方解石	-5.56	-29.22	0.74
BJ12-30	方解石	-6.51	-26.72	3.32
BJ12-37	方解石	-6.88	-30.31	-0.38
BJ12-82	方解石	-7.70	-24.24	5.88
BJ12-88	方解石	-5.75	-29.64	0.31

表2 边家大院银多金属矿床氢、氧同位素组成  
Table 2 Hydrogen and oxygen isotopic compositions of the Bianjiadayuan silver polymetallic deposit

样品编号	测试矿物	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta\text{D}_{\text{水-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{水-SMOW}}/\text{‰}$
BJ-01	石英	15.1	-111.7	9.16
BJ-06	方解石	2.5	-131.7	-8.12
BJ-11	方解石	0.4	-138.5	-6.57
BJ-49	方解石	1.6	-120.9	-8.47
BJ-21-1	石英	9.8	-122.4	2.00
BJ-21-2	方解石	-1.1	-125.5	-8.07
BJ-36	方解石	0.7	-133.4	-6.27
BJ12-24	石英	13.5	-109.0	4.47
BJ12-30	石英	16.3	-128.2	9.38
BJ12-44	石英	4.3	-128.5	-8.85
BJ12-81	石英	10.0	-121.4	-5.71

平均值为1.87‰,极差为6.84‰。

对矿区11件与矿化关系密切的石英、方解石进行氢氧同位素测定,测试结果可以看出(表2)。边家大院矿床含矿热液中 $\delta\text{D}_{\text{水-SMOW}}$ 实测值为-138.5‰~-111.7‰,平均值为-124.65‰,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 为-1.1‰~16.3‰,平均值为6.65‰。采用所测得样品中的流体包裹体均一温度平均值,利用石英-水分馏方程公式 $1000\ln\alpha_{\text{石英-水}}=3.38\times 10^6/T^2-3.40(T=273^\circ\text{C})$ <sup>[15]</sup>和方解石-水分馏方程公式 $1000\ln\alpha_{\text{方解石-水}}=2.78\times 10^6/T^2-3.39(T=273^\circ\text{C})$ <sup>[16]</sup>,计算出流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水-SMOW}}$ 值为-8.85‰~9.38‰,平均值为-2.46‰。

#### 4.2 硫同位素

对边家大院15件硫化物进行了单矿物硫同位素测试分析,测试结果(表3)表明,矿床15件硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值均为正值,变化范围在0.7‰~4.4‰,平均值为2.18‰,极差为3.7‰。 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围很小,表明该矿床S具有很均一的来源。

#### 4.3 铅同位素

研究选取边家大院矿区15件金属硫化物进行了放射性Pb同位素分析并收集了相关的数据。测试结果表明,矿床铅同位素样品组成基本比较稳定,比值较均一,变化范围小,可代表边家大院热液脉型银多金属矿床金属硫化物的Pb同位素特征。19件硫化物样品的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的比值为18.155~18.284,平均值为18.1961,极差为0.129; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的比值为15.518~15.681,平均值为15.578,极差为0.163; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的比值为38.1~38.634,平均值为38.2916,极差为0.534。它们的变化率分别为

表3 边家大院银多金属矿床硫化物硫同位素组成  
Table 3 S isotopic compositions of sulfides from the Bianjiadayuan silver polymetallic deposit

序号	样品编号	测试对象	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
1	BJ-01	闪锌矿	3.2
2	BJ-04	毒砂	4.3
3	BJ-08-1	方铅矿	0.7
4	BJ-08-2	闪锌矿	1.6
5	BJ-15-1	方铅矿	1.6
6	BJ-15-2	磁黄铁矿	2.2
7	BJ-15-3	黄铜矿	1.9
8	BJ-50	方铅矿	1.5
9	BJ-52-1	方铅矿	1.1
10	BJ-52-2	闪锌矿	2.3
11	BJ-54	闪锌矿	2.6
12	BJ12-05	磁黄铁矿	1.7
13	BJ12-19	方铅矿	1.2
14	BJ12-31	毒砂	2.4
15	BJ12-40	闪锌矿	4.4

0.71%、1.05%、1.39%。所有样品分析结果见表4。

## 5 讨论

### 5.1 成矿流体性质和来源

#### 5.1.1 碳氧同位素

矿石中热液碳酸盐矿物的C、O同位素组成是示踪成矿流体来源的有效手段<sup>[18]</sup>。将边家大院铅锌银多金属矿床所有分析测试样品数据投在 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 图解中(图4),结果发现,所有样品都落在了花岗岩类源区左侧,且多数样品偏离岩浆岩区较远。

表4 边家大院银多金属矿床铅同位素组成及相关参数

Table 4 Pb isotopic compositions and related parameters of the Bianjiadayuan silver polymetallic deposit

样号编号	矿物名称	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	t/Ma	$\mu$	$\omega$	Th/U	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
BJ-01	闪锌矿 <sup>*</sup>	18.1756	15.5570	38.2056	285.0	9.40	36.45	3.75	57.73	15.12	25.62
BJ-04	毒砂	18.1772	15.5586	38.2100	286.0	9.41	36.47	3.75	57.83	15.22	25.74
BJ-08	方铅矿 <sup>*</sup>	18.1625	15.5595	38.2198	297.0	9.41	36.60	3.76	56.97	15.28	26.00
BJ-08-2	闪锌矿 <sup>*</sup>	18.1612	15.5586	38.2177	297.0	9.41	36.59	3.76	56.90	15.22	25.94
BJ-15-1	方铅矿 <sup>*</sup>	18.1740	15.5460	38.1890	272.0	9.38	36.28	3.74	57.64	14.40	25.17
BJ-15-2	磁黄铁矿 <sup>*</sup>	18.1940	15.5660	38.2540	282.0	9.42	36.63	3.76	58.80	15.71	26.92
BJ-15-3	黄铜矿 <sup>*</sup>	18.2700	15.6670	38.5940	349.0	9.61	38.59	3.89	63.23	22.30	36.04
BJ-50	方铅矿 <sup>*</sup>	18.1550	15.5210	38.1090	255.0	9.34	35.82	3.71	56.53	12.77	23.02
BJ-52-2	闪锌矿 <sup>*</sup>	18.1560	15.5180	38.1000	250.8	9.33	35.75	3.71	56.59	12.57	22.78
BJ-52-1	方铅矿 <sup>*</sup>	18.2180	15.6030	38.3700	310.0	9.49	37.33	3.81	60.20	18.12	30.03
BJ-54	闪锌矿 <sup>*</sup>	18.2260	15.6140	38.4110	317.5	9.51	37.56	3.82	60.67	18.84	31.13
BJ12-05	磁黄铁矿 <sup>*</sup>	18.2840	15.6810	38.6340	355.9	9.64	38.82	3.90	64.04	23.21	37.12
BJ12-19	方铅矿 <sup>*</sup>	18.2530	15.6440	38.5010	334.1	9.57	38.07	3.85	62.24	20.80	33.55
BJ12-31	毒砂	18.2130	15.5940	38.3750	302.7	9.47	37.29	3.81	59.91	17.53	30.16
BJ12-40	方铅矿 <sup>*</sup>	18.2080	15.5880	38.3220	299.0	9.46	37.04	3.79	59.62	17.14	28.74
KSD-15	方铅矿 <sup>*</sup>	18.1832	15.5534	38.2109	274.7	9.40	36.39	3.75	58.18	14.88	25.76
KSD-18	方铅矿 <sup>*</sup>	18.1776	15.5519	38.2065	277.0	9.39	36.39	3.75	57.85	14.79	25.64
KSD-18-1	方铅矿 <sup>*</sup>	18.1768	15.5504	38.2013	275.7	9.39	36.36	3.75	57.80	14.69	25.50
ZK1802-3	方铅矿 <sup>*</sup>	18.1605	15.5502	38.2091	287.3	9.39	36.48	3.76	56.86	14.68	25.71

注:BJ样品为本文所测;KSD及ZK数据引自文献[17]。

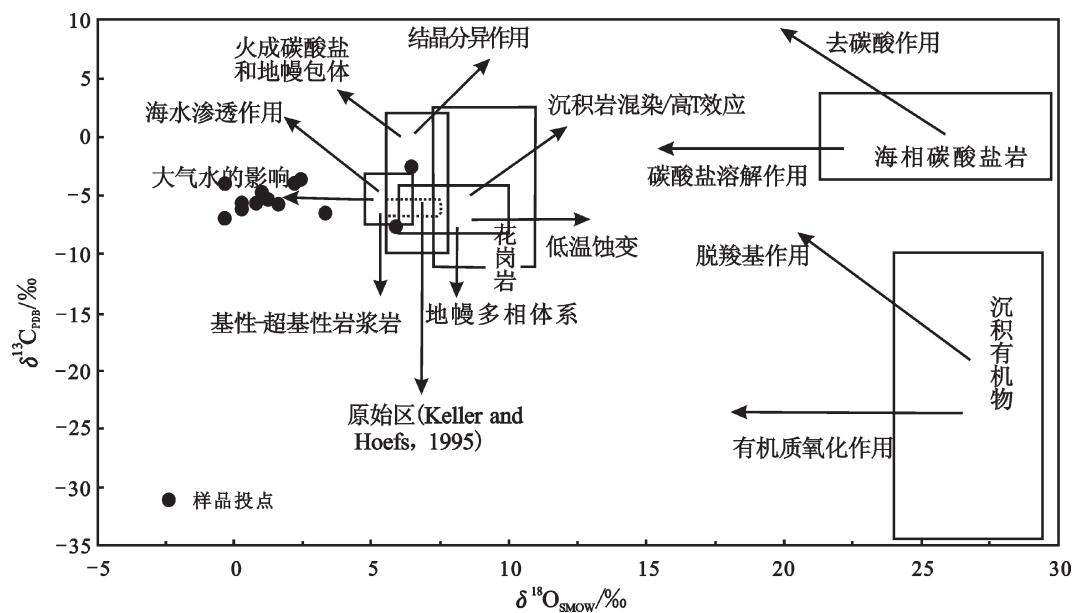


图4 边家大院银多金属矿床中方解石  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  图解(底图据文献[26]修改)

Fig. 4  $\delta^{18}\text{O}$  versus  $\delta^{13}\text{C}$  diagram of calcite from the Bianjiadayuan silver polymetallic deposit (modified after Reference [26])



根据已有研究成果表明,成矿热液系统中碳的来源归纳起来,主要有3种:①地幔射气或岩浆来源。地幔射气和岩浆来源的碳同位素组成具有一致特征,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值变化范围为 $-9\text{‰}\sim-3\text{‰}$ ,平均值为 $-5\text{‰}$ <sup>[19]</sup>;②沉积岩中碳酸盐岩的脱气或含盐卤水与泥质岩相互作用,这种来源的碳同位素组成具有重碳同位素的特征,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 的变化范围为 $-2\text{‰}\sim 3\text{‰}$ ,海相碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 大多稳定在 $0\text{‰}$ 左右<sup>[20]</sup>;③沉积岩、变质岩与火成岩中的有机碳(还原碳),有机碳一般富集 $^{12}\text{C}$ ,因而 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 组成很低,其变化范围为 $-30\text{‰}\sim-15\text{‰}$ ,平均为 $-22\text{‰}$ <sup>[21]</sup>。边家大院银多金属矿床热液方解石的碳氧同位素组成特征显示 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值变化范围为 $-7.7\text{‰}\sim-2.67\text{‰}$ ,与地幔射气和岩浆来源碳同位素组成具有一致的特征,表明矿石中方解石的碳可能主要由岩浆-地幔提供的。此外矿区的碳同位素组成与邻区敖伦花铜钼矿床( $\delta^{13}\text{C}=-5.31\text{‰}\sim-1.21\text{‰}$ )、大井铜多金属矿床( $\delta^{13}\text{C}=-9.4\text{‰}\sim-6.2\text{‰}$ )、多宝山斑岩型铜钼矿床( $\delta^{13}\text{C}=-4.5\text{‰}\sim-1.9\text{‰}$ )、铜山铜钼矿床( $\delta^{13}\text{C}=-7.3\text{‰}\sim-5.0\text{‰}$ )等矿床流体碳同位素特征基本一致<sup>[8]</sup>,亦表明该区成矿流体中碳具深部岩浆源的特征。野外钻探证明,在矿区西部确实存在隐伏石英斑岩体,进一步证明了岩浆提供了矿区碳的来源的可能。

由于矿区方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值变化范围窄( $-7.7\text{‰}\sim-2.67\text{‰}$ ),而 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值变化范围较大( $-0.41\text{‰}\sim 6.03\text{‰}$ ),因此碳、氧同位素投影点总体上呈近水平方向展布(图4)。产生这种近水平形式分布可能由2种原因所致:① $\text{CO}_2$ 的脱气作用;②流体与围岩之间的水/岩反应<sup>[22-23]</sup>。如果碳、氧同位素的分布形式是由 $\text{CO}_2$ 的脱气作用所致,则因热液流体一般以 $\text{H}_2\text{O}$ 为主, $\text{CO}_2$ 的去气对流体氧同位素的影响并不明显,而对碳同位素组成的影响是显著的<sup>[24]</sup>,而边家大院矿区的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值变化较窄。因此, $\text{CO}_2$ 的脱气作用不应是影响方解石等碳酸盐矿物沉淀的主要因素。在热液流体中,方解石的溶解度随温度的降低而升高,随压力的降低而降低<sup>[25]</sup>。在封闭体系中的单纯冷却不能使方解石从热液流体中沉淀<sup>[24]</sup>。故研究区方解石的沉淀应主要由水/岩反应和温度降低的耦合作用所致<sup>[7,26]</sup>。

从图4中可以看出,由于大多数样品落入了岩浆岩源区的左侧,而且 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值变化范围较大,其

中有2件 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为负值,显示了强烈的氧同位素交换效应,这说明成矿热液在早期碳酸盐阶段,成矿流体来源于岩浆。而在后期演化的过程中,受到大气降水的影响,成矿流体为大气降水与岩浆水的混合,与大气降水发生了强烈的氧同位素交换作用,从而使得热液方解石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 显著亏损,形成的方解石等热液矿物具有自然界中罕见的、极低的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值。这与内蒙古苏尼特左旗乌日尼图钼钨矿床具有一定的相似之处<sup>[27]</sup>。

### 5.1.2 氢-氧同位素

直接测定金矿床中矿物及矿物中包裹体的氢同位素组成及含水矿物的氧同位素组成,可以获得成矿流体氢、氧同位素组成,了解参与成矿作用中水的来源和性质<sup>[28]</sup>。近年来随着稳定同位素测试技术和精度的不断提高,这一手段已成熟应用于成矿流体来源示踪及流体演化与成矿过程的揭示。

前人研究得出岩浆水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 范围为 $5.5\text{‰}\sim 9.5\text{‰}$ , $\delta\text{D}$ 范围为 $-80\text{‰}\sim-40\text{‰}$ <sup>[29-30]</sup>,边家大院矿床含矿热液中 $\delta\text{D}_{\text{水-SMOW}}$ 的变化为 $-138.5\text{‰}\sim-111.7\text{‰}$ ,计算得出流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水-SMOW}}$ 值的变化为 $-8.85\text{‰}\sim 9.38\text{‰}$ 。可知本区成矿流体的 $\delta\text{D}$ 和多数 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 已经偏离岩浆水范围。将流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水-SMOW}}$ 和 $\delta\text{D}_{\text{水-SMOW}}$ 值投于H-O同位素图解中(图5)。流体H、O同位素数投影点远离变质水区域,更加靠近大气降水和岩浆

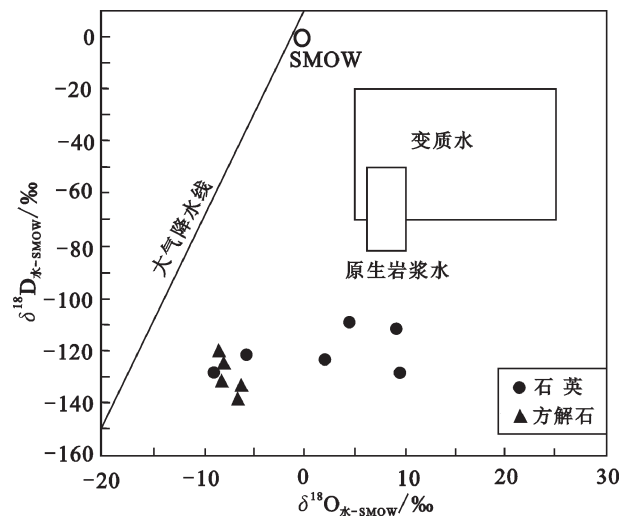


图5 边家大院银多金属矿床成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}-\delta\text{D}_{\text{水}}$ 图解  
Fig.5  $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}-\delta\text{D}_{\text{water}}$  diagram of ore-forming fluids in the Bianjiadayuan silver polymetallic deposit



水范围,指示边家大院矿床的成矿流体受到岩浆水及大气降水作用明显。由于所有样品的投点均偏离原始岩浆水区域向雨水线一侧迁移,其中 $\delta D_{\text{水-SMOW}}$ 同位素的值整体上低于原生岩浆水,表明流体出溶后就受到了大气降水的显著参与。一般认为, $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 组成的火成岩是由于大气降水与岩石的水/岩反应所造成的,由于岩浆中氢的含量一般比氧的含量低,受大气降水影响,其 $\delta D$ 值比 $\delta^{18}O$ 值更容易偏低, $\delta D$ 与 $\delta^{18}O$ 的变化与水/岩比值及作用过程有关<sup>[31]</sup>,此外还受水/岩作用的温度、主岩的氢氧同位素组成和原始水的氢氧同位素组成的影响<sup>[29-30]</sup>。结合矿区及区域地质特征,造成这一现象可能与成矿时期区域地壳浅部整体处于脆性拉张伸展有关,使得地表浅层水(如大气降水、建造水等)能够有效对流循环到地壳较深的位置,并与围岩发生充分的水/岩交换反应。前人对大兴安岭地区的银矿床进行大量研究显示,该区银矿床成矿热液的组成主要有大气降水和岩浆水两个来源,区域银矿床成矿流体早期可能以岩浆水为主,晚期银矿化阶段可能以加热补给的大气降水为主,大气降水的混入对成矿物质的聚集和沉淀也起到有利作用<sup>[8,32]</sup>。对边家大院银多金属矿床的氢氧同位素分析可以看出其特征与此相一致。

总之,通过对边家大院银多金属矿床碳、氢、氧稳定同位素的组成分析,方解石碳、氧同位素指示,热液矿物是两个阶段成矿作用的产物,成矿早阶段流体与岩浆水特征相似,碳主要来源于岩浆,成矿晚阶段流体具有大气降水的特征;石英和方解石的氢氧同位素组成表明,矿床的成矿流体来源远离变质水区域,更加靠近大气降水和岩浆水的范围,同样指示成矿流体受到大气降水和岩浆水的作用,成矿流体早期以岩浆水为主,晚期以大气降水为主,在成矿作用的晚期,矿化和蚀变作用是在水/岩比值较高的体系中发生的。

## 5.2 成矿物质来源

### 5.2.1 硫同位素

硫是成矿热液中最主要的矿化剂,硫同位素是矿床成因和成矿物理化学条件的指示剂。确定成矿流体中硫同位素组成及判断硫的来源,对于推断矿床成矿物质来源和成矿过程具有重要意义<sup>[33]</sup>。

矿床中硫同位素的组成是判断成矿物质来源

的有效途径,而确定成矿溶液的硫同位素平均组成( $\delta^{34}S_{\Sigma S}$ )是判断硫来源及硫化物沉淀环境的主要依据<sup>[34]</sup>。但在热液矿床中要准确得到成矿热液中的 $\delta^{34}S_{\Sigma S}$ 值相当不易,这是因为热液矿物的硫同位素组成不仅取决于源区物质的 $\delta^{34}S$ 值,而且还取决于含硫物质在热液中迁移的矿物沉淀时的物理化学条件<sup>[35]</sup>。由于热液成矿作用中固-液相间存在着同位素分馏效应,导致热液形成的硫化物及硫酸盐的 $\delta^{34}S$ 值一般不等于热液总的 $\delta^{34}S$ 值,而是总硫同位素组成、 $f_{O_2}$ 、pH、离子强度和温度的函数( $\delta^{34}S = f(\delta^{34}S_{\Sigma S}, f_{O_2}, pH, I, t)$ ),只有在物相组合简单且缺乏硫酸盐矿物的情况下,硫化物的 $\delta^{34}S$ 值可大致代表热液的总硫同位素组成<sup>[4,36]</sup>。对边家大院矿床的野外调研和室内镜下鉴定表明:硫化物是边家大院矿床中最主要的矿物,且所有硫化物 $\delta^{34}S$ 的值都比较接近于零,而矿床中又极少见硫酸盐类矿物,含硫矿物比较单一,因此可以直接利用硫化物的硫同位素组成近似地代替成矿流体原始硫同位素组成。

通过本次测试对矿床中各硫化物的 $\delta^{34}S$ 平均值比较,毒砂( $\delta^{34}S=2.4\text{‰} \sim 4.3\text{‰}$ ,平均值为 $3.35\text{‰}$ )>闪锌矿( $\delta^{34}S=1.6\text{‰} \sim 4.4\text{‰}$ ,平均值为 $2.82\text{‰}$ )>磁黄铁矿( $\delta^{34}S=1.7\text{‰} \sim 2.2\text{‰}$ ,平均值为 $1.95\text{‰}$ )>黄铜矿( $\delta^{34}S=1.9\text{‰}$ )>方铅矿( $\delta^{34}S=0.7\text{‰} \sim 1.6\text{‰}$ ,平均值为 $1.22\text{‰}$ ),虽然矿物之间 $\delta^{34}S$ 值局部存在重叠现象,但总体上呈逐步降低的趋势。根据矿物间S同位素的分配指示,在成矿期硫基本达到了同位素分馏平衡(硫酸盐>毒砂>闪锌矿>磁黄铁矿>黄铜矿>方铅矿)<sup>[37]</sup>。

一般 $\delta^{34}S$ 值的变化范围常被用以解释流体的来源及演化过程,若变化幅度不超过 $10\text{‰}$ ,则认为矿石中硫的来源是均一的<sup>[28]</sup>。已有资料证明,陨石S及幔源S具有较窄的 $\delta^{34}S$ 值( $\delta^{34}S=0 \pm 1\text{‰}$ ;  $\delta^{34}S=0 \sim 2\text{‰}$ )<sup>[8]</sup>。由表3可知,边家大院矿床S同位素变化范围较小,在硫同位素分布直方图上(图6),所有硫化物的 $\delta^{34}S$ 值主要变化范围为 $0.7\text{‰} \sim 4.4\text{‰}$ ,平均值为 $2.18\text{‰}$ ,峰值出现在 $1\text{‰} \sim 2\text{‰}$ ,塔式分布特征明显,与大兴安岭南段金属矿床的 $\delta^{34}S$ 值变化范围( $-6\text{‰} \sim 4\text{‰}$ )及特征相近<sup>[12]</sup>,说明边家大院矿床中硫可能来自深源岩浆。此外,区域上查干布拉银多金属矿床矿物的硫同位素 $\delta^{34}S$ 为 $-1.43\text{‰} \sim 6.71\text{‰}$ <sup>[38]</sup>,孟恩陶勒盖银多金属矿床硫化物的 $\delta^{34}S$ 为 $-1.7\text{‰} \sim$

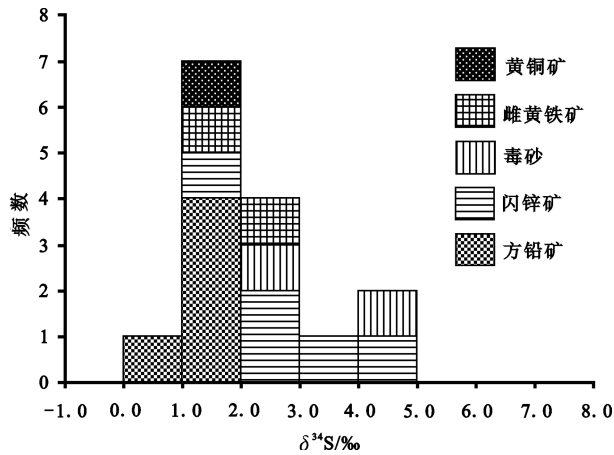


图6 边家大院银多金属矿床硫同位素分布直方图  
Fig.6 Histogram of sulfur isotope of the Bianjiadayuan silver polymetallic deposit

4.6‰<sup>[39]</sup>,白音查干银多金属矿床硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  为 1.3‰~4.8‰<sup>[40]</sup>,额仁陶勒盖银矿床硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  为 -3.96‰~4.45‰<sup>[41]</sup>,大井锡多金属矿床硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  为 -1.8‰~3.8‰<sup>[42]</sup>,这些矿床硫均来自深源岩浆。边家大院银多金属矿床矿石硫同位素组成范围与上述诸矿床相似,同样证明其硫主要来自岩浆热液。

5.2.2 铅同位素

铅同位素作为一种非常有用的地球化学示踪体系,不仅能指示地壳演化,而且也能够用来指示

成矿物质来源和矿床成因<sup>[34]</sup>。因此金属矿床中铅同位素常被用来判别与Pb关系密切的硫化物矿石中Zn、Cu、Fe、Au等成矿元素的来源<sup>[42]</sup>。

对矿区Pb同位素进行分析并收集前人数据得出,矿区铅同位素样品组成基本比较稳定,比值较均一,变化范围小,可代表边家大院热液脉型银多金属矿床金属硫化物的Pb同位素特征。在<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb-<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb和<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb-<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb图解上(图7),<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb与<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb及<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb与<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb均呈现了线性关系非常好的直线,直线方程分别为: $y=3.831x-31.417$ ,线性相关系数 $r^2=0.9623$ ; $y=1.1469x-5.2919$ ,线性相关系数 $r^2=0.9563$ ,反映了正常的放射性成因铅特征。

利用整场铅的H-H法单阶段铅演化模式计算获得的相关参数见表4,结果表明所有样品模式年龄均为正值,变化在250.8~355.9 Ma,属海西期。由于显生宙造山带铅是复杂的混合正常铅、同源铅, $\mu$ 值多有变化,因此其模式年龄不能完全定量成岩及成矿年龄,只能大致提供年龄信息供参考<sup>[43]</sup>。矿区 $\mu$ 值变化较大,变化范围为9.33~9.64,平均值为9.44; $w$ 变化范围为36.28~38.59,平均值为36.89。铅同位素源区特征值能够反映铅的来源,一般而言高 $\mu$ 值(大于9.58)的矿石铅一般来自上地壳;低 $\mu$ 值和低 $w$ 值被认为是上地幔源;低 $\mu$ 值和高 $w$ 值则是典型的地幔来源<sup>[44-45]</sup>。边家大院矿床矿石铅除2

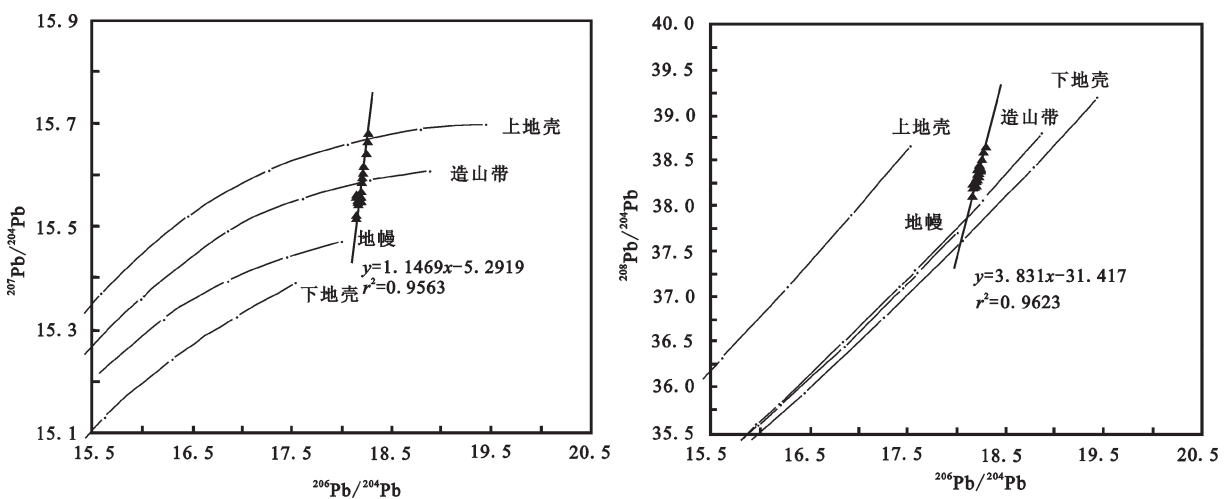


图7 边家大院银多金属矿床<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb-<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb和<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb-<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb组成图解(底图据文献[3]修改)  
Fig.7 <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb-<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb and <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb-<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb compositions of the Bianjiadayuan silver polymetallic deposit (modified after Reference [3])

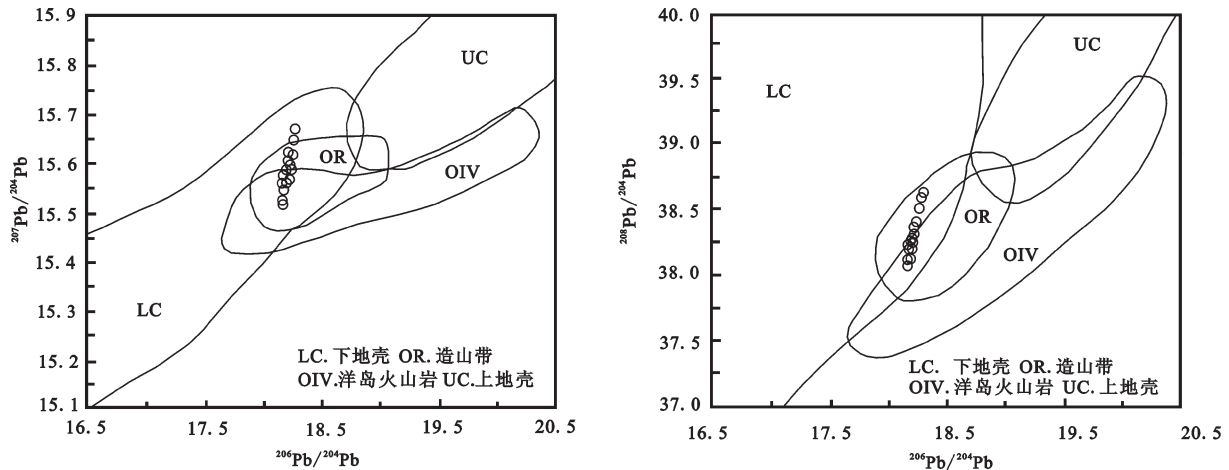


图8 边家大院银多金属矿矿石铅同位素构造环境判别图

Fig.8 Lead isotope diagram for discriminating tectonic setting of the Bianjiadayuan silver polymetallic deposit

件样品(BJ-15-3、BJ12-05)高于9.58外,其余样品均低于9.58,而矿区矿石铅同位素 $w$ 值虽变化不一(表4), $w$ 平均值略高于地壳平均值(36.84)<sup>[46]</sup>,大体具有低 $\mu$ 值和高 $w$ 值特征,基本指示了矿石铅主要来自下地壳或上地幔,并有上地壳污染的混元特征。

为了进一步探讨边家大院矿石铅的来源,将铅同位素数据投在构造环境判别图上(图8):发现所有样品点分布比较集中,绝大部分样品点落在图的下地壳和造山带的区域,另外在铅同位素的 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 成因分类图解上(图9),样点主要落在岩浆作用铅和幔源铅的范围内。张理刚等<sup>[48]</sup>根据中生代花岗岩中长石和矿石的铅同位素数据特点,将大兴安岭地块划为一个单独的铅同位素构造-地球化学省。在该地块,矿石铅与长石铅同位素比值具有相一致特征,该区中生代的长石铅来源于具有低的U-Pb和Th-Pb比值的低成熟度地壳,认为矿石铅可能与长石铅来源于同一个U-Pb系统,即说明这些矿石铅来源于中生代的岩浆。通过矿石铅同位素数据分析可知,边家大院矿区19件硫化物样品的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的比值分别为18.155~18.284、15.518~15.681和38.1~38.634,均在大兴安岭南段矿石铅同位素的变化范围内<sup>[12]</sup>,同时在上述不同图解中,铅同位素的线性分布也证明了矿区矿石铅主要来自中生代岩浆这一观点。要梅娟等<sup>[12]</sup>认为,大兴安岭南段在海西期与成矿有关的铅第一次实现壳幔分离,至中生代以来,该地区成为欧亚板块与滨太平洋大陆边缘的一部分,在太平洋板块

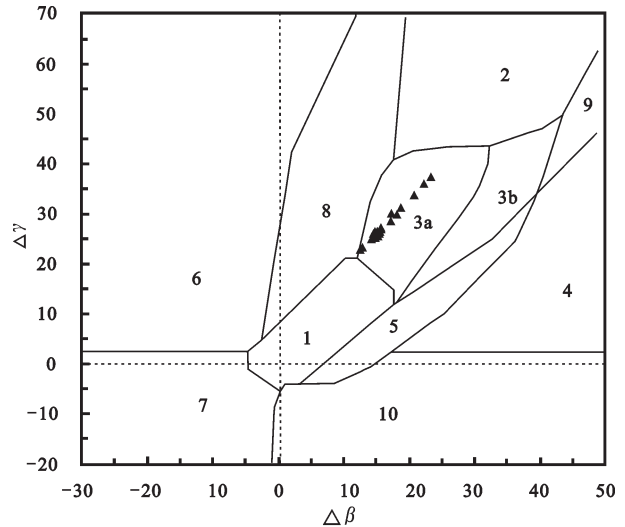


图9 边家大院银多金属矿矿石铅同位素的 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 成因分类图解(底图据文献[47]修改)

1—地幔源铅;2—上地壳铅;3—上地壳与地幔混合的俯冲带铅(3a—岩浆作用;3b—沉积作用);4—化学沉积型铅;5—海底热水作用铅;6—中深变质作用铅;7—深变质下地壳铅;8—造山带铅;9—古老页岩上地壳铅;10—退变质铅

Fig.9  $\Delta\beta-\Delta\gamma$  diagram of genetic classification by ore lead isotopes in the Bianjiadayuan silver polymetallic deposit (modified after Reference [47])

1—Mantle lead; 2—Upper crust lead; 3—Mixed lead between the upper crust and the upper mantle in the subduction zone (3a—Magmatism; 3b—Sedimentation); 4—Chemical sedimentation lead; 5—Sea floor hydrothermal deposition lead; 6—Middle-high grade metamorphism lead; 7—High-grade metamorphism lead in the lower crust; 8—Orogenic belt lead; 9—Upper crust lead of old shale; 10—Retrograde metamorphism lead

NNW向俯冲的作用下,本区再次发生成矿物质的活化、迁移、定位和富集过程。通过对矿区内隐伏的石英斑岩体及辉长岩体进行锆石测年可知,矿区



石英斑岩与辉长岩年龄分别为140 Ma(另文发表)和133 Ma,石英斑岩表明岩体均形成于早白垩世,属燕山晚期,其中石英斑岩主要来自于下地壳,辉长岩主要来自于岩石圈地幔<sup>[49]</sup>。通过对其大地构造背景进行分析,认为矿区侵入岩的形成主要与太平洋板块向西大规模俯冲所引起的伸展作用有关,并且该时期是大兴安岭南段成岩、成矿高峰期之一<sup>[49]</sup>,进一步印证了要梅娟等人的观点。因为边家大院矿区铅锌银矿体主要赋存于矿区中部构造裂隙中及矿区西北角的隐爆角砾岩中,其中隐爆角砾岩角砾主要为地层围岩以及石英斑岩,通过打钻验证,隐爆角砾岩下部存在石英斑岩体。因此基于上述分析,笔者认为矿区铅锌银矿床形成与燕山晚期的火山一次火山热液关系密切,即与矿区西部隐伏石英斑岩体关系极为密切,推断矿石铅主要来自下地壳,并受到上地壳物质的混染,同时在后期辉长岩上侵的过程中混入部分幔源铅。

总之,通过对边家大院银多金属矿床硫同位素以及放射性铅同位素的组成分析,硫同位素组成表明,成矿期硫基本达到了同位素分馏平衡, $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围很小,说明矿床S来源均一,分析得出边家大院矿床中硫可能来自深源岩浆,具有陨硫和幔源硫的特点;铅同位素指示矿石铅为正常的放射性成因铅,成矿物质与火山一次火山岩有密切的联系,结合矿床地质特征推断矿石铅主要来自下地壳,并受到上地壳物质的混染,同时在后期辉长岩上侵过程中混入部分幔源岩。结合矿区岩浆岩的活动规律及成岩、成矿时代以及矿床地质特征,我们认为成矿流体主要来源于深部的岩浆活动,特别与燕山晚期的火山一次火山热液关系密切,即与矿区西部燕山期隐伏的石英斑岩关系极为密切,此外,在流体演化过程中大气降水的加入对矿床成矿元素的聚集和沉淀也起到了一定的积极作用。

### 5.3 矿床成因类型

边家大院热液脉型银多金属矿床矿体与矿区隐伏的石英斑岩体和中酸性岩脉有着密切的联系。对矿区西部的石英斑岩体进行锆石测年,结果表明成岩作用主要发生在燕山晚期(LA-ICPMS 锆石年龄为140 Ma,另文发表),对石英斑岩体中的辉钼矿进行Re-Os测年,结果表明成矿的模式年龄也发生于燕山晚期(辉钼矿模式年龄为140 Ma,另文

发表),即成岩、成矿均发生于燕山晚期。矿床的矿石矿物主要组成为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、毒砂、黄铜矿、磁黄铁矿、辉钼矿、深红银矿以及银黝铜矿等。矿床稳定同位素及放射性铅同位素组成表明成矿流体与深部的岩浆活动密切相关,并且在成矿作用晚期存在大气降水的加入。

前人研究表明大兴安岭的主成矿期有2期,即海西期和燕山期。海西期主要形成与二叠纪火山-沉积作用有关的海底热水喷流沉积型铅锌-银-铜-锡-铁矿床和与埃达克质侵入岩有关的斑岩型铜-钼-金矿床;燕山期则主要产出与陆相火山-侵入杂岩有关的浅成热液型-斑岩型-矽卡岩型铅锌-铜-钼-锡-银-金矿床<sup>[13]</sup>。而本区地处大兴安岭南段晚古生代增生造山带,属大兴安岭南段铅锌-银-铜-锡-铁成矿带主峰的锡-铅锌-铜-铁成矿亚带<sup>[13]</sup>。区内燕山期以大规模的中酸性岩浆侵入为特征,与同时代的陆相火山岩系构成了同源、同时、异相的火山-侵入杂岩,而本区燕山期成矿与之关系最为密切。通过收集资料发现,该区域在燕山晚期发生大规模的岩浆喷发及侵入活动,形成了一系列与之有密切联系的铅锌银热液矿床,如拜仁达坝银多金属矿床<sup>[50]</sup>、维拉斯托银多金属矿床<sup>[50]</sup>、甲乌拉银多金属矿床<sup>[34]</sup>、额仁陶勒盖银矿床<sup>[51]</sup>等。矿床成矿作用的发生与深部岩浆活动密切相关,边家大院银多金属矿床的形成是来自深部岩浆流体逐渐演化的产物。因此综合矿床地质特征、成矿物质组成特征、矿床同位素地球化学特征、成岩成矿时代及区域成矿背景分析得出:边家大院银多金属矿床成因类型属于火山一次火山热液脉型银多金属矿床。

## 6 结 论

(1)边家大院银多金属矿床的赋矿围岩为下二叠统哲斯组板岩,主要矿化类型为热液脉型,矿体主要产于哲斯组泥质、硅质板岩和辉长岩体中的构造蚀变带及节理、裂隙中,铅锌银矿体共生产出。

(2)碳、氢、氧同位素测试结果表明,研究区内的热液矿物是2个阶段成矿作用的产物。早期成矿流体以岩浆水为主,后期成矿流体有大量大气降水的加入;硫同位素测试结果表明,边家大院矿床中矿石硫同位素塔式分布特征明显,具有陨硫和幔源硫的特点,说明S可能来自深源岩浆;铅同位素测



试结果表明,边家大院银多金属矿石铅为正常的放射性成因铅,并通过研究厘定矿石铅主要来自深部岩浆并有上地壳物质污染。

(3)边家大院热液脉型银多金属矿床成岩、成矿均形成于燕山晚期,矿床成矿作用与矿区石英斑岩体关系密切,边家大院银多金属矿床的形成是来自深部(幔源)岩浆流体逐渐演化的产物。综合各种因素得出:边家大院银多金属矿床成因类型属于火山-次火山热液脉型银多金属矿床。

**致谢:**野外地质工作得到了内蒙古自治区核工业二四三大队及赤峰利拓矿业有限公司工作人员的大力支持与帮助,室内工作得到了杨隆勃师兄和王晓亮等同学的帮助,审稿人及编辑部杨艳老师对论文提出许多宝贵意见,在此笔者一并致以诚挚的谢意!

#### 参考文献(References):

- [1] 倪师军, 滕彦国, 张成江, 等. 成矿流体活动的地球化学示踪研究综述[J]. 地球科学进展, 1999, 14(4): 346-352.  
Ni Shijun, Teng Yanguo, Zhang Chengjiang, et al. Review on the geochemical tracing of mineralizing fluid[J]. Advance in Earth Sciences, 1999, 14(4): 346-352 (in Chinese with English abstract).
- [2] 沈渭洲. 稳定同位素地质[M]. 北京: 原子能出版社, 1987:1-425.  
Shen Weizhou. Stable Isotope Geology[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1987: 1-300 (in Chinese with English abstract).
- [3] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics: the model[J]. Tectonophysics, 1981, 75 (1/2): 135-162.
- [4] 杜泽忠, 顾雪祥, 李关清, 等. 藏南拉木由塔梯(金)矿床S、Pb同位素组成及指示意义[J]. 现代地质, 2011, 25(5): 853-860.  
Du Zezhong, Gu Xuexiang, Li Guanqing, et al. Sulfur, lead isotope composition characteristics and the relevant instructive significance of the Lamuyouta Sb(Au) deposit, South Tibet[J]. Geoscience, 2011, 25(5): 853-860 (in Chinese with English abstract).
- [5] Ruano S M, Both R A, Golding S D. A fluid inclusion and stable isotope study of the Moonta copper-gold deposits, South Australia: evidence for fluid immiscibility in a magmatic hydrothermal system[J]. Chemical Geology, 2002, 192: 211-226.
- [6] Calagari A A. Stable isotope (S, O, H and C) studies of the phyllic and potassic- phyllic alteration zones of the porphyry copper deposit at Sungan, East Azarbaïdjan, Iiran[J]. Journal of Asian Earth Science, 2003, 21:767-780.
- [7] 刘家军, 毛光剑, 吴胜华, 等. 甘肃寨上金矿床成矿特征与形成机理[J]. 矿床地质, 2010, 29(1): 85-100.  
Liu Jiajun, Mao Guangjian, Wu Shenghua, et al. Metallogenic characteristics and formation mechanism of Zhaishang gold deposit, southern Gansu Province[J]. Mineral Deposits, 2010, 29 (1): 85-100 (in Chinese with English abstract).
- [8] 马星华, 陈斌. 大兴安岭南段敖伦花斑岩铜(钼)矿床成矿流体来源与成矿作用: 稳定同位素C、H、O、S和放射性Pb同位素约束[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(6): 1770-1783.  
Ma Xinghua, Chen Bin. The source of hydrothermal fluid and mineralization in the Aolunhua porphyry Mo-Cu deposit, Southern Da Hinggan Mountains: Constraints from stable (C, H, O and S) and radiogenic (Pb) isotopes[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(6): 1770-1783 (in Chinese with English abstract).
- [9] 胡新露, 何谋春, 姚书振. 东秦岭上宫金矿流体与成矿物质来源新认识[J]. 地质学报, 2013, 87(1): 91-100.  
Hu Xinlu, He Mouchun, Yao Shuzhen, et al. New understanding of the source of ore-forming material and fluid in the Shangong gold deposit, East Qinling[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(1): 91-100 (in Chinese with English abstract).
- [10] Selby D, Nesbitt B E, Creaser R A. Evidence for a nonmagmatic component in potassic hydrothermal fluids of porphyry Cu-Au-Mo systems, Yukon, Canada[J]. Geochemical et Cosmochimica Acta, 2001, 65(4): 571-584.
- [11] Rye R O. A review of the stable-isotope geochemistry of sulfate minerals in selected igneous environments and related hydrothermalsystems[J]. Chemical Geology, 2005, 215: 5-36.
- [12] 要梅娟, 刘家军, 翟德高, 等. 大兴安岭南段多金属成矿带硫、铅同位素组成及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(2): 362-373.  
Yao Meijuan, Liu Jiajun, Zhai Degao, et al. Sulfur and lead isotopic compositions of the polymetallic deposits in the Southern Daxing'anling: Implications for metal sources[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2012, 42(2): 362-373 (in Chinese with English abstract).
- [13] 刘建明, 张锐, 张庆洲. 大兴安岭地区的区域成矿特征[J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 269-273.  
Liu Jianming, Zhang Rui, Zhang Qingzhou. The regional metallogeny of Da Hinggan' Ling, China[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(1): 269-273 (in Chinese with English abstract).
- [14] 廖震, 王玉往, 王京彬, 等. 内蒙古大井锡多金属矿床岩脉LA-ICP-MS锆石U-Pb定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(7): 2292-2306.  
Liao Zhen, Wang Yuwang, Wang Jingbin, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of dykes of Dajing tin-polymetallic deposit, Inner Mongolia, China, and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(7): 2292-2306 (in Chinese with English abstract).
- [15] Clayton R N, Mayeda T K, Mayeda T K. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. Journal of Geophysics Research, 1972, 77: 3057-3067.
- [16] O'Neil J R, Clayton R N, Mayeda T K. Oxygen isotope

- fractionation in divalent metal carbonates[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1969, 51: 5547-5558.
- [17] 阮班晓, 吕新彪, 刘申态, 等. 内蒙古边家大院铅锌银矿床成因——来自锆石 U-Pb 年龄和多元同位素的制约[J]. *矿床地质*, 2013, 32(3): 501-524.
- Ruan Xiaoban, Lv Xinbiao, Liu Shentai, et al. Genesis of Bianjiadayuan Pb-Zn-Ag deposit in Inner Mongolia: Constraints from U-Pb dating of zircon and multi-isotope geochemistry[J]. *Mineral Deposits*, 2013, 32(3): 501-524 (in Chinese with English abstract).
- [18] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-120.
- Zheng Yongfei, Chen Jiangfeng. *Stable Isotope Geochemistry*[M]. Beijing: Science Press, 2000: 1-120 (in Chinese with English abstract).
- [19] Taylor B E. Magmatic volatiles: Isotopic variation of C, H and S[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1986, 16: 185-225.
- [20] Veizer J, Holser W T, Wilgus C K. Correlation of  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  and  $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$  secular variation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44: 579-588.
- [21] Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 1972, 67:551-578.
- [22] Zheng Y F. Carbon-oxygen isotopic covariations in hydrothermal calcite during degassing of  $\text{CO}_2$ : A quantitative evaluation and application to the Kushikino gold mining area in Japan[J]. *Mineralium Deposita*, 1990, 25: 246-250.
- [23] Zheng Y F, Hoefs J. Carbon and oxygen isotopic covariations in hydrothermal calcites[J]. *Mineralium Deposita*, 1993, 28: 79-89.
- [24] 郑永飞. 稳定同位素体系理论模型及其矿床地球化学应用[J]. *矿床地质*, 2001, 20(1): 57-70.
- Zheng Yongfei. The modeling of stable isotopic system and application for ore deposit geochemistry[J]. *Mineral Deposits*, 2001, 20(1): 57-70 (in Chinese with English abstract).
- [25] Barnes H L. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1997: 1-96.
- [26] 刘家军, 何明勤, 李志明, 等. 云南白秧坪银铜多金属矿集区碳氧同位素组成及其意义[J]. *矿床地质*, 2004, 23(1): 1-10.
- Liu Jiajun, He Mingqin, Li Zhiming, et al. Oxygen and carbon isotopic geochemistry of Baiyangping silver-copper polymetallic ore concentration area in Lanping basin of Yunnan Province and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 2004, 23(1): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- [27] 杨增海, 王建平, 刘家军, 等. 内蒙古苏尼特左旗乌日尼图钨钼矿床同位素地球化学特征[J]. *现代地质*, 2013, 27(1): 13-23.
- Yang Zenghai, Wang Jianping, Liu Jiajun, et al. Isotope geochemistry of the Wurinitu W-Mo deposit in Sunid Zuoqi, Inner Mongolia, China[J]. *Geoscience*, 2013, 27(1): 13-23 (in Chinese with English abstract).
- [28] 刘光智, 刘家军, 刘新会. 西秦岭寨上金矿床地球化学特征及成因机制研究[J]. *地质与勘探*, 2009, 45(2): 27-37.
- Liu Guangzhi, Liu Jiajun, Liu Xinhui. Geochemical characteristics and genetic model of the Zhaishang gold deposits in west Qinling [J]. *Geology and Exploration*, 2009, 45(2): 27-37 (in Chinese with English abstract).
- [29] 翟建平, 胡凯, 陆建军. 应用氢氧同位素研究矿床成因的一些问题探讨[J]. *地质科学*, 1996, 31(3): 229-237.
- Zhai Jianping, Hu Kai, Lu Jianjun. Discussions on the applications of hydrogen and oxygen isotopes to the problems of ore genesis[J]. *Science Geologica Sinica*, 1996, 31(3): 229-237 (in Chinese with English abstract).
- [30] Taylor H P. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. *Economic Geology*, 1974, 69: 843-883.
- [31] 陈岳龙, 杨忠芳, 赵志丹, 等. 同位素地质年代学与地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 1-249.
- Chen Yuelong, Yang Zhongfang, Zhao Zhidan, et al. *Isotopic Geochronology and Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 1-249(in Chinese with English abstract).
- [32] 邵军, 王世称, 马晓龙, 等. 大兴安岭北段金、多金属矿床区域成矿特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2003, 33(1): 32-36.
- Shao Jun, Wang Shicheng, Ma Xiaolong, et al. Regional metallogenic characteristics of gold and multimetal deposits in northern Daxing'anling mountain[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2003, 33(1): 32-36 (in Chinese with English abstract).
- [33] 陈永清, 黄静宁, 卢英祥, 等. 中缅毗邻区金-铅-锌-银多金属矿田元素、稳定同位素和流体包裹体地球化学[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2009, 34(4): 585-594.
- Chen Yongqing, Huang Jingning, Lu Yingxiang, et al. Geochemistry of elements, sulphur-lead isotopes and fluid inclusions from Jinla Pb-Zn-Ag polymetallic ore field at the joint area across China and Myanmar Border[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2009, 34(4): 585-594 (in Chinese with English abstract).
- [34] 翟德高, 刘家军, 王建平, 等. 内蒙古甲乌拉大型 Pb-Zn-Ag 矿床稳定同位素地球化学研究[J]. *地学前缘*, 2013, 20(2): 214-225.
- Zhai Degao, Liu Jiajun, Wang Jianping, et al. A study of stable isotope geochemistry of the Jiawula large Pb-Zn-Ag ore deposit, Inner Mongolia[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(2): 214-225 (in Chinese with English abstract).
- [35] Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 1972, 67: 551-578.
- [36] Ohmoto H. *Isotopes of sulfur and carbon* [J]. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 1979: 509-567.
- [37] 韩吟文, 马振东, 张宏飞, 等. *地球化学*[M]. 北京: 地质出版社,

- 2002: 213-259.  
Han Yinwen, Ma Zhendong, Zhang Hongfei, et al. Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 213-259 (in Chinese with English abstract).
- [38] 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.  
Xie Chengbo, Liu Ming. Geological features and genetic type of Chaganbula Ag, Pb, Zn(Au) deposit[J]. World Geology, 2001, 20(1): 25-29 (in Chinese with English abstract).
- [39] 朱笑青, 张乾, 何玉良, 等. 内蒙古孟恩陶勒盖银铅锌铜矿床成因研究[J]. 矿床地质, 2004, 23(1): 52-60.  
Zhu Xiaqing, Zhang Qian, He Liangyu, et al. Genesis of Meng'entaolegai Ag-Pb-Zn-In polymetallic deposit in Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 2004, 23(1): 52-60 (in Chinese with English abstract).
- [40] 聂凤军, 温银维, 赵元艺, 等. 内蒙古白音查干银多金属矿化区地质特征及找矿方向[J]. 矿床地质, 2007, 26(2): 213-220.  
Nie Fengjun, Wen Yinwei, Zhao Yuanyi, et al. Geological features and prospecting directions of Bayanchagan silver polymetallic mineralized area in Xi Ujmqin Banner, central-eastern Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 26(2): 213-220 (in Chinese with English abstract).
- [41] 陈祥. 内蒙古额仁陶勒盖银矿床成岩成矿模式[J]. 桂林工学院学报, 2000, 20(1): 12-20.  
Chen Xiang. Diagenetic-metallogenic model of Erentaolegai silver deposit in Inner Mongolia[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 2000, 20(1): 12-20 (in Chinese with English abstract).
- [42] 储雪蕾, 霍卫国, 张巽. 内蒙古林西县大井铜多金属矿床的硫、碳和铅同位素及成矿物质来源[J]. 岩石学报, 2002, 18(4): 566-574.  
Chu Xuelei, Huo Weiguo, Zhang Xun. S, C, and Pb isotopes and sources of metallogenetic elements of the Dajing Cu-polymetallic deposit in Linxi County, Inner Mongolia, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(4): 566-574 (in Chinese with English abstract).
- [43] 盛继福, 傅先政. 大兴安岭中段成矿环境与铜多金属矿床地质特征[M]. 北京: 地震出版社, 1999: 1-220.  
Shen Jifu, Fu Xianzheng. Metallogenetic Environment and Geological Characteristics of Copper-polymetallic Ore Deposits in Middle Part of Da Hinggan Mountains[M]. Beijing: Seismological Press, 1999: 1-220(in Chinese with English abstract).
- [44] Doe B R, Zartmen R E. Plumbotectonics, the Phanerozoic[C]//Baines H L. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. New York: Wiley Interscience, 1979, 22-70.
- [45] 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J]. 地质地球化学, 2002, 30(3): 73-81.  
Wu Kaixing, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, et al. Ore lead isotopes as a tracer for ore-forming material sources: A review[J]. Geology Geochemistry, 2002, 30(3): 73-81 (in Chinese with English abstract).
- [46] 段士刚, 薛春纪, 冯启伟, 等. 豫西南赤土店铅锌矿床地质、流体包裹体和S、Pb同位素地球化学特征[J]. 中国地质, 2011, 38(2): 427-441.  
Duan Shigang, Xue Chunji, Feng Jiawei, et al. Geology, fluid inclusions and S, Pb isotopic geochemistry of the Chitudian Pb-Zn deposit in Luanchuan, Henan Province[J]. Geology in China, 2011, 38(2): 427-441 (in Chinese with English abstract).
- [47] 朱炳泉. 地球科学中同位素体系理论与应用: 兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1-330.  
Zhu Bingquan. Theory and Application of Isotopic System in Earth Sciences: Concurrently Discussing Crust-mantle Evolution of Chinese Continent [M]. Beijing: Science Press, 1998: 1-330 (in Chinese with English abstract).
- [48] 张理刚. 东亚岩石圈块体地质[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 153-173.  
Zhang Ligang. Block Geology of East Asia Lithosphere[M]. Beijing: Science Press, 1995: 153-173 (in Chinese with English abstract).
- [49] 王喜龙, 刘家军, 翟德高, 等. 内蒙古边家大院铅锌银矿区侵入岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(4): 730-742.  
Wang Xilong, Liu Jiajun, Zhai Degao, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochemistry of the intrusive rocks from the Bianjiadayuan Pb-Zn-Ag deposit, Inner Mongolia, China and tectonic implications[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013, 37(4): 730-742 (in Chinese with English abstract).
- [50] 江思宏, 聂凤军, 刘翼飞, 等. 内蒙古拜仁达坝及维拉斯托银多金属矿床的硫和铅同位素研究[J]. 矿床地质, 2010, 28(1): 101-112.  
Jiang Sihong, Nie Fengjun, Liu Yifei, et al. Sulfur and lead isotopic compositions of Bairendaba and Weilasituo silver-polymetallic deposits, Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 2010, 28(1): 101-112 (in Chinese with English abstract).
- [51] 申伍军, 王学求, 聂兰仕. 大兴安岭成矿带大型银多金属矿区域地球化学预测指标[J]. 地学前缘, 2012, 19(3): 49-58.  
Shen Wujun, Wang Xueqiu, Nie Lanshi. Regional geochemical indicators of large-sized silver polymetallic deposits in Daxing'anling metallogenic belt[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(3): 49-58 (in Chinese with English abstract).

## A study of isotope geochemistry and sources of ore-forming materials of the Bianjiadayuan silver polymetallic deposit in Linxi, Inner Mongolia

WANG Xi-long<sup>1</sup>, LIU Jia-jun<sup>1</sup>, ZHAI De-gao<sup>1</sup>, WANG Jian-ping<sup>1</sup>,  
ZHANG Qi-bin<sup>1</sup>, ZHANG An-li<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;  
2. Lituo Mining Industry Group of Chifeng, Chifeng 024000, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** Located in the southern part of the Da Hinggan Mountains metallogenic belt, the Bianjiadayuan silver polymetallic deposit is a typical hydrothermal vein-type deposit. Stable (C, H, O and S) and radiogenic (Pb) isotopes of the Bianjiadayuan silver polymetallic deposit were analyzed with the purpose of determining the source of the ore-forming fluids and materials. The  $\delta D_{H_2O-SMOW}$  and  $\delta^{18}O_{H_2O-SMOW}$  of the ore-forming fluids are  $-138.5\text{‰}$ – $-111.7\text{‰}$ , and  $-8.85\text{‰}$ – $-9.38\text{‰}$ , respectively, showing that they came from the mixing of magmatic water and meteoric water. The  $\delta^{13}C_{PDB}$  and  $\delta^{18}O_{SMOW}$  of the hydrothermal calcite vary from  $-7.7\text{‰}$  to  $-2.67\text{‰}$  and from  $-0.41\text{‰}$  to  $6.03\text{‰}$ , respectively, indicating that the hydrothermal calcite was formed at two ore-forming stages. At the early stage, the ore-forming fluids were similar to magmatic water and the  $CO_2$  was related to the magma, whereas at the late stage, the ore-forming fluid was derived from meteoric water. The  $\delta^{34}S$  values of polymetallic ore in the Bianjiadayuan deposit range from  $0.7\text{‰}$  to  $4.4\text{‰}$ , suggesting that the formation of the Ag–Pb–Zn orebody was closely related to magmatism and the sulfur probably came from the magma source. The ratios of lead isotopes in sulfides range from 38.1 to 38.634 for  $^{208}Pb/^{204}Pb$ , 15.518 to 15.681 for  $^{207}Pb/^{204}Pb$ , and 18.155 to 18.284 for  $^{206}Pb/^{204}Pb$ , respectively, indicating that the mineralization might have been induced by the magmatism, and the lead in the deposit was mainly derived from deep-seated magmatic source. The mineralization took place in a low  $\delta^{34}S_{\Sigma S}$  and equilibrium system. The Bianjiadayuan deposit can be genetically regarded as a volcanic-subvolcanic hydrothermal vein-type silver polymetallic deposit.

**Key words:** isotope geochemistry; ore-forming material; Bianjiadayuan silver polymetallic deposit; Linxi

---

**About the first author:** WANG Xi-long, male, born in 1988, master candidate, mainly engages in the study of mineralogy, petrology and ore geology; E-mail: 546737333@qq.com.

**About the corresponding author:** LIU Jia-jun, male, born in 1963, professor, supervisor of doctor candidates, engages in study and teaching of ore geology; E-mail: liujiajun@cugb.edu.cn.