

内蒙古东乌旗阿尔哈达铅-锌-银矿床 硫和铅同位素研究

张万益¹, 聂凤军¹, 刘妍¹, 江思宏¹,
徐智², 胡朋¹, 赖新荣¹, 皮晓东³

1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037

2. 内蒙古阿尔哈达矿冶有限责任公司, 内蒙古 东乌珠穆沁旗 026300

3. 内蒙古自治区锡林郭勒盟国土资源局, 内蒙古 锡林浩特 026000

摘要:阿尔哈达铅-锌-银矿床是近年来在内蒙古东乌珠穆沁旗境内发现的一处大型铅-锌-银矿床, 其产出环境和形成机理为国内外矿床学家所关注。对该矿床代表性岩(矿)石样品进行了硫和铅同位素分析, 并对其变化规律和成因意义进行了讨论。研究表明, 围岩和矿石中硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 1.2‰~8.6‰, 具有混源硫特征。根据共生硫化物对所确定的温度表明, 该矿床的形成可划分为高温和中-低温两个阶段。17 件矿石硫化物样品 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围分别为 18.153~18.431, 15.370~15.602 和 37.653~38.213, 其平均值分别为 18.271, 15.464 和 37.873; 3 件围岩硫化物样品 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围分别为 18.281~18.293, 15.470~15.484 和 37.874~37.909, 平均值分别为 18.288, 15.477 和 37.893。硫和铅同位素研究结果表明, 阿尔哈达铅-锌-银矿床成矿物质分别来自泥盆系火山-沉积岩和印支期花岗岩。

关键词:硫-铅同位素; 铅-锌-银矿床; 矿床成因; 阿尔哈达; 内蒙古

中图分类号: P611.1; P618.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5888(2007)05-0868-10

Studies on Sulfur and Lead Isotope of the Arehada Pb - Zn - Ag Deposit, Dong Ujmqqin Qi(County), Inner Mongolia

ZHANG Wan-yi¹, NIE Feng-jun¹, LIU Yan¹, JIANG Si-hong¹,
XU Zhi², HU Peng¹, LAI Xin-rong¹, PI Xiao-dong³

1. Institute of Mineral Resources, Beijing 100037, China

2. Dong Ujmqqin Qi Arehada Mining Co. Ltd, Inner Mongolia 026300, China

3. Xilinhot Land and Resource Bureau, Inner Mongolia 026000, China

Abstract: Located at easternmost part of the Early Paleozoic tectono-magmatic belt of the Chaganobo-Aououte-Chaobuleng along the southern edge of the Siberian plate, the newly discovered Arehada deposit is a large-scale Pb-Zn deposit occurring in the central-eastern Inner Mongolian Autonomous Region. We present 20 new sulfur and lead isotope data of wall rock and orebodies. The sulfur isotope compositions of wall rock are similar to those of orebodies. The $\delta^{34}\text{S}$ values vary from 1.2‰ to 8.6‰. The sulfur isotope compositions show different sources. The temperatures calculated from sulfide-paras show

收稿日期: 2007-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(40573025)

作者简介: 张万益(1974-), 男, 安徽宿松人, 博士研究生, 主要从事地质找矿及矿床学研究, E-mail: zhwy26225@sina.com

通讯联系人: 聂凤军(1956-), 男, 河北邯郸人, 研究员, 博士生导师, 从事金属矿床地质和地球化学研究, Tel: 010-68999042-9033, E-mail: nfjj@mx.cei.gov.cn.

high temperature stage and medium-low temperature stage. The $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios of 17 sulfide samples of orebodies vary in ranges of 18.153–18.431, 15.370–15.602 and 37.653–38.213, with the average values of 18.271, 15.464 and 37.873, respectively. The $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios of 3 sulfide samples of wall rock vary in ranges of 18.281–18.293, 15.470–15.484 and 37.874–37.909, with the average values of 18.288, 15.477 and 37.893, respectively. The lead isotope compositions are similar to those of biotite granite and metasandstone from Chaobuleng skarn iron-polymetallic deposit. It indicates that the sources of lead is wall rock and Indosinian granite.

Key words: sulfur and lead isotope; Pb–Zn–Ag deposit; genesis; Arehada; Inner Mongolia

0 前言

阿尔哈达铅-锌-银矿床是中国冶金地质勘查工程总局第一地质勘查院(以下简称冶勘院)近几年来在内蒙古中东部找到的一处大型铅-锌-银矿床。该矿床位于内蒙古东乌珠穆沁旗政府所在地乌里雅斯太镇北东方向 185 km, 地理位置为东经 $118^{\circ}58'00''$ ~ $119^{\circ}01'30''$ 和北纬 $46^{\circ}24'30''$ ~ $46^{\circ}27'00''$ 处。矿区所在地属蒙古高原, 海拔高度为 922~1 045 m。

早在 20 世纪 70 年代, 原内蒙古自治区区域地质测量队在进行 1:20 万区域地质调查时, 发现该区的粉砂质板岩和凝灰岩中的铜、铅和锌含量较高, 并将其确定为一处重要的铜-铅-锌异常。尽管在此之后有许多专家学者在本区进行过零星的地质找矿和科学研究工作, 但是系统的找矿勘查工作始于 1996 年。1996~2005 年间, 冶勘院地质人员在该区进行过系统的区域地质调查与找矿勘探工作, 截至 2005 年底, 冶勘院在阿尔哈达 I 号矿带的 7—39 线地段内发现工业矿体 50 个, 并且对其中的 47 个矿体进行过储量计算, 先后提交铅+锌 57.16 万 t 和银 630 t, 此外锡、镓、锗、铟和金等也可作为伴生组分回收。目前, I 号矿带 7 线以西 800 m, 39 线以东 1 500 m、II 号带和 III 号带仅进行了普查工作, 部分钻孔已见到矿体, 预计通过进一步工作有望获得铅锌资源/储量 100 万 t, 银 1 000 t^①。本文在前人的工作基础上, 对阿尔哈达矿床代表性铅-锌-银矿体、容矿围岩硫化物样品进行了硫和铅同位素测定, 并且对该矿床的成矿环境、物质来源和演化过程进行探讨, 为在本区寻找类似矿床提供借鉴。

1 成矿地质背景

阿尔哈达铅-锌-银矿床位于西伯利亚板块东南缘查干敖包—奥尤特—朝不楞早古生代构造-岩浆岩带, 其东侧就是西伯利亚板块与华北地台的对接

带——贺根山—索伦山深断裂^②。区域范围内出露的地层有中奥陶统、上志留统、泥盆系、下二叠统、侏罗系和白垩系火山-沉积岩以及第三系和第四系沉积物。其中, 上泥盆统安格尔音乌拉组分布面积较广, 在吉林宝力格—额仁高毕—满都胡宝力格和安格尔音乌拉一带呈北东—南西向带状展布, 岩性组合为砂岩、粉砂岩、板岩和火山碎屑岩, 为本区重要的容矿围岩。

区内岩浆岩分布广泛, 其中以海西期和燕山期花岗岩最为发育并且与金属矿床具有密切的空间分布关系^[1~4]。印支期侵入岩仅在阿尔哈达北东分布, 主要岩性为细粒黑云母花岗岩和中粗粒花岗岩。相比之下, 燕山期岩浆活动在本区表现的最为强烈, 代表性侵入岩主要为深成相的富钾、碱性偏高的钙碱性花岗岩类。火山岩往往在空间上与同期同源侵入岩相伴产出, 岩浆活动具有多期多阶段活动特征^[5]。

区内主干断裂为北东向贺根山—索伦山深断裂和查干敖包—东乌旗深大断裂(亦称宝力格—五叉沟断裂)。阿尔哈达北东向压扭性断层破碎带为规模最大的次级构造, 并且与铅-锌矿化带具有密切的空间分布关系。另外, 古生界火山-沉积岩地层中北东向复式背斜和复式向斜构造亦比较发育, 其中个别向斜的翼部就是赋矿的有利部位。

2 矿床地质特征

阿尔哈达矿区范围内出露的地层主要有上泥盆统安格尔音乌拉组 and 上侏罗统布拉根哈达组火山-

① 陈军峰, 刘本浩, 高云桥, 等. 内蒙古东乌旗阿尔哈达银铅锌多金属矿勘查进展. “十五”重要地质科技成果暨重大找矿成果交流会材料二, 2006: 63.

② 聂凤军, 江思宏, 白大明, 等. 中蒙边境中东段我国一侧(北山和二连—东乌旗地区)铜金银矿床成矿规律与找矿方向. 内部资料, 2006.

沉积岩以及第三系和第四系沉积物(图 1)。上泥盆统安格尔音乌拉组火山-沉积岩分布广泛^①, 代表性岩石类型为细砂岩、含碳质细砂岩、泥质板岩、硅质板岩、粉砂质硅板岩、凝灰岩、安山岩、安山质晶屑凝灰岩、流纹质凝灰岩、安山岩和泥质板岩等。地层总体呈北东走向($70^{\circ}\pm$), 倾向北西, 倾角 $35^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 。上侏罗统布拉根哈达组火山-沉积岩地层主要为砾岩、含砾流纹凝灰岩和流纹岩。受区域主干断裂多期次活动的影响, 矿区范围内北东东向、北西向和南北向断裂十分发育, 并且与铅-锌-银矿体具密切空间分布关系, 部分断裂为重要的导矿和容矿构造。迄今为止, 在阿尔哈达地区先后发现和圈定 3 条矿脉带(I、II 和 III, 图 1)^[6,7], 矿脉带长为 1 600~3 500 m, 宽 100~600 m 不等, 总体走向 305° , 倾向南西, 倾角 $25^{\circ}\sim 55^{\circ}$, 其中 I 号矿脉带以矿体产出规模大、矿体分布数量多、矿脉密集和矿体品位富为特征。I 号矿脉带主要由 50 条矿体组成, 其中 I-1、I-2、I-3、I-4 和 I-5 矿体以产出规模大和矿石品位富为特点。单个矿体走向延伸为 550~

780 m 不等, 真厚度为 1.98~4.60 m, 最厚者为 21.45 m, 倾向延深 360~655 m。矿体总体走向 310° , 倾向南西, 倾角 $18^{\circ}\sim 52^{\circ}$, 呈近平行产出, 似层状、脉状。矿体在走向上和倾向上都表现出波状起伏的特征, 部分矿体在走向上有尖灭再现、倾向上分支复合等现象。

代表性矿石样品中主要金属矿物为方铅矿、闪锌矿和黄铁矿, 次要矿物有毒砂、磁黄铁矿、黄铜矿、辉铜矿、辉银矿和自然银。另外, 在地表处还可见到有褐铁矿、软锰矿、黄钾铁矾、孔雀石和含铅-锌氧化物; 脉石矿物有绿泥石、石英、高岭石、叶腊石、绢云母、方解石、铁白云石和萤石以及粘土类矿物。硫化物矿石中常见有晶粒结构(自形、半自形和它形粒状)、包晶结构、交代残余结构和碎裂结构以及固溶体分离结构等。矿石构造主要有块状构造、角砾状构造、浸染状构造、脉状构造和条带状构造等。矿石中铅质量分数为 $1.62\%\sim 3.12\%$, 平均值为 2.12% , 最高值为 11.39% ; 锌为 $2.88\%\sim 3.63\%$, 平均值为 3.06% , 最高值为 19.53% ; 银为 51.66%



图 1 阿尔哈达铅-锌-银矿床地质简图(根据脚注②改编)

Fig. 1 Schematic geological map of the Arehada lead-zinc-silver deposit (Modified after footnote②)

1. 第四系; 2. 上侏罗统布拉根哈达组火山-沉积岩; 3. 上泥盆统安格尔音乌拉组上部岩性段; 4. 上泥盆统安格尔音乌拉组中部岩性段; 5. 上泥盆统安格尔音乌拉组下部岩性段; 6. 含矿片理化带; 7. 不整合面; 8. 实测/推测断层; 9. 铅-锌-银矿段(矿体); 10. 古板块缝合线; 11. 前寒武纪中间地块; 12. 矿区位置

① 中国冶金地质勘查工程总局第一地质勘查院. 内蒙古自治区东乌珠沁穆旗阿尔哈达矿区 I 号带 7-39 线铅锌矿详查报告. 2005: 1-103.

② 聂风军, 江思宏, 白大明, 等. 中蒙边境中东段我国一侧(北山和二连-东乌旗地区)铜金银矿床成矿规律与找矿方向. 内部资料, 2006.

$10^{-6} \sim 73.18 \times 10^{-6}$, 平均值为 64.13×10^{-6} , 最高值为 327×10^{-6} 。除银、铅和锌外, 伴生有用组分还有铜、锡、金、锑、铋、硫、砷、镓、铟和镉等^①。

受同成矿期和成矿期后多期次热液活动影响, 阿尔哈达矿区范围内各岩体(层)发育不同程度的热液蚀变作用, 其中以近矿体围岩蚀变最为明显。尽管各热液蚀变带的界限很难确定, 但是从矿体中心向外, 热液蚀变具有一定的分带性。它们依次为硅化→碳酸盐化→萤石化→绢云母化→绿帘石+绿泥石化→滑石化→高岭石化, 其中萤石化和碳酸盐化与铅-锌矿化具有密切成因联系。

3 硫和铅同位素

3.1 样品及测试方法

本次研究主要对阿尔哈达矿区范围内的矿体及近矿围岩中的金属硫化物进行硫和铅同位素测定。所测样品除 TW1 号采自探槽外, 其余均采自 I 号矿脉带平硐。硫化物采用常规分离技术进行分选。

金属硫化物的硫同位素样品分析由中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室完成, 以 Cu_2O 做氧化剂制备测试样品, 用 MAT-251 质谱仪测定, 采用 VCDT 国际标准, 分析精度好于 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

铅同位素样品分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心进行。样品先用三酸分解, 然后用树脂交换法分离出铅, 蒸干后进行同位素测定。所用仪器为热离子质谱计 MAT-261, 分析精度对 $1 \mu\text{g}$ 铅含量其 $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 低于 0.05% , $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 一般不大于 0.005% , 对国际标样 NBS981 的测试结果为 0.01% 。

3.2 硫同位素

阿尔哈达铅-锌-银矿床 20 件硫化物(黄铁矿、方铅矿、闪锌矿和毒砂)样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $1.2\text{‰} \sim 8.6\text{‰}$, 平均为 6.03‰ 。在所分析的 20 件硫化物样品中, 6 件黄铁矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $6.1\text{‰} \sim 8.6\text{‰}$, 平均为 7.1‰ ; 5 件闪锌矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $5.5\text{‰} \sim 7.5\text{‰}$, 平均为 6.8‰ ; 3 件毒砂样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $6.4\text{‰} \sim 6.8\text{‰}$, 平均为 6.6‰ ; 6 件方铅矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $1.2\text{‰} \sim 4.7\text{‰}$, 平均为 4‰ (表 1)。在硫同位素组成频率直方图上(图 2), 其分布呈双峰式特征, 一个峰值在 $+4\text{‰} \sim +5\text{‰}$ 内, 另一个峰值在 $+6\text{‰} \sim +8\text{‰}$ 内, 说明矿床硫源具有混合来源特征。尽管上述 4 种硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布范围存在有明显重叠之处, 但是从整体上看, 它们完全符合在成矿体系平衡条件

下, 硫化物中 $\delta^{34}\text{S}$ 的富集顺序, 即 $^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > ^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > ^{34}\text{S}_{\text{毒砂}} > ^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$, 表明从早期高温热液阶段到晚期低温热液阶段硫化物按顺序结晶, ^{34}S 值逐渐降低。

表 1 阿尔哈达铅-锌-银矿床硫化物硫同位素组成

Table 1 Sulfur isotope compositions of sulfide separates from the Arehada Pb-Zn-Ag deposit, Inner Mongolia

序号	样品编号	岩(矿)石	所测矿物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
1	TW1	铅-锌-银矿石	方铅矿	1.2
2	TW4	铅-锌-银矿石	方铅矿	4.7
3	TW7	铅-锌-银矿石	方铅矿	5.3
4	TW8	铅-锌-银矿石	方铅矿	3.9
5	TW9	铅-锌-银矿石	方铅矿	4.2
6	TW11	铅-锌-银矿石	方铅矿	4.7
7	TW7	铅-锌-银矿石	闪锌矿	6.9
8	TW8	铅-锌-银矿石	闪锌矿	5.5
9	TW9	铅-锌-银矿石	闪锌矿	7.5
10	TW10	铅-锌-银矿石	闪锌矿	7.4
11	TW11	铅-锌-银矿石	闪锌矿	7
12	TW2	泥质板岩	黄铁矿	8.6
13	TW3	泥质板岩	黄铁矿	7
14	TW5	板岩	黄铁矿	7.2
15	TW8	铅-锌-银矿石	黄铁矿	6.1
16	TW9	铅-锌-银矿石	黄铁矿	6.6
17	TW10	铅-锌-银矿石	黄铁矿	7
18	TW4	铅-锌-银矿石	毒砂	6.8
19	TW 7	铅-锌-银矿石	毒砂	6.6
20	TW11	铅-锌-银矿石	毒砂	6.4

中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室分析结果

根据阿尔哈达矿床中铅-锌-银矿石的矿物共生结构关系, 并且结合所获取的闪锌矿、方铅矿和黄铁矿硫同位素数据, 计算了共生硫化物结晶沉淀时的温度(表 2)。

表 2 给出了 4 件铅-锌-银矿石方铅矿-闪锌矿硫同位素温度计数值和 1 件铅-锌-银矿石黄铁矿-方铅矿硫同位素温度计数值。由表 2 不难看出, 在

① 中国冶金地质勘查工程总局第一地质勘查院. 内蒙古自治区东乌珠沁旗阿尔哈达矿区 I 号带 7-39 线铅锌矿详查报告. 2005: 1-103.

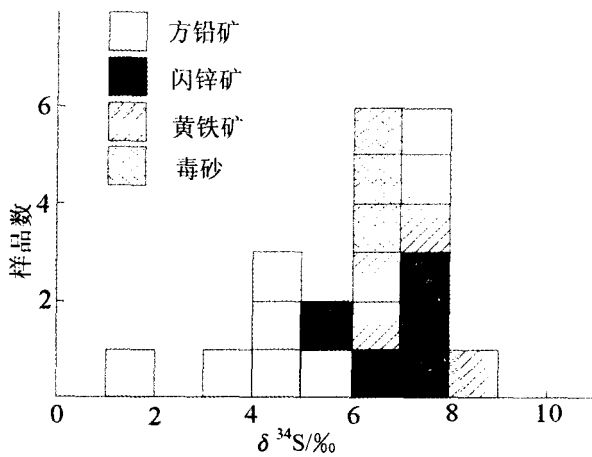


图 2 阿尔哈达铅-锌-银矿床硫同位素组成直方图
Fig. 2 The histogram of the sulfur isotopic compositions in the Arehada Pb - Zn - Ag deposit

表 2 阿尔哈达铅-锌-银矿床硫同位素地质温度
Table 2 Sulfur isotope geo-thermometer of sulfide separates from the Arehada Pb - Zn - Ag deposit, Inner Mongolia

序号	样品号	含硫矿物对 $\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	$\Delta\delta^{34}\text{S}$ $/\text{‰}$	平衡温度 $/\text{℃}$	矿物组合、 采样位置
1	TW7	6.9(Sp) 5.3(Gn)	1.6	398.83	竖井 1—沿脉 2 铅锌银矿石
2	TW8	5.5(Sp) 3.9(Gn)	1.6	398.83	竖井 1—沿脉 2 铅锌银矿石
3	TW9	7.5(Sp) 4.2(Gn)	3.3	194.76	竖井 1—穿脉 3 铅锌银矿石
4	TW11	7.0(Sp) 4.7(Gn)	2.3	287.32	竖井 1—穿脉 3 铅锌银矿石
5	TW8	6.1(Py) 3.9(Gn)	2.2	407.79	竖井 1—沿脉 2 铅锌银矿石

Py. 黄铁矿; Sp. 闪锌矿; Gn. 方铅矿; 计算时所采用的分馏方程据 Ohmoto 等^[8]; 闪锌矿-方铅矿矿物对为 $\delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}} = (1.01 \pm 0.04) \times 10^5 / T^2$; 黄铁矿-方铅矿矿物对为 $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}} = (0.85 \pm 0.03) \times 10^5 / T^2$

早期形成的铅-锌-银矿石中,无论是根据闪锌矿与方铅矿硫同位素数据所获温度值,还是采用黄铁矿-方铅矿数据所获温度值,它们均在 350℃ 以上,分别为 399℃ 和 407℃,反映了阿尔哈达矿床早期铅-锌-银成矿作用与以岩浆水为主的混合热液流体活动有关,属高温热液流体活动产物。相比之下,中期和晚期铅-锌-银矿石中闪锌矿-方铅矿硫同位素温度计

值分别为 287℃ 和 194℃,暗示了该矿床中、晚期铅-锌-银成矿作用与混源热液流体活动有关,属中-低温热液活动的产物。

由于矿石中金属硫化物主要为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿和毒砂,未见硫酸盐矿物。硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值能代表成矿流体的全部硫同位素组成^[9],即 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}} \approx \delta^{34}\text{S}_{\text{硫化物}}$,因此,矿石中硫化物的硫同位素组成就可以用来示踪成矿流体中硫的来源。前人研究结果表明,在成矿热液流体演化过程中,如若流体中硫的浓度超过金属元素含量 ($M_{\text{H}_2\text{S}} > M_{\Sigma\text{金属元素}}$) 时,方铅矿与闪锌矿可能会同时发生沉淀^[8,10,11]。从理论上讲,这两种硫化物的硫同位素分馏效应可能会达到某种程度的平衡,也就是说闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值大于方铅矿,并且与流体中 H_2S 的硫同位素值相似,它们之间的关系可表述为 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} \approx \delta^{34}\text{S}_{\text{ZnS}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{PbS}}$ 。与上述情况相反,如若流体中金属元素含量大于硫的浓度 ($M_{\text{H}_2\text{S}} < M_{\Sigma\text{金属元素}}$),那么,尽管方铅矿与闪锌矿有可能同时沉淀,但是两者之间就不一定存在着平衡同位素分馏,此时,方铅矿、闪锌矿和 H_2S 的硫同位素数值关系式可表述为 $\delta^{34}\text{S}_{\text{ZnS}} \approx \delta^{34}\text{S}_{\text{PbS}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 。从理论上讲,检验方铅矿与闪锌矿是否达到过同位素平衡的方法很简单,那就是对共生的方铅矿和闪锌矿进行硫同位素分析,并且根据所获硫同位素数据计算它们的形成温度,如果所获温度值与成矿温度(多根据流体包裹体测量数据确定)相近,那么就说明它们的形成过程中曾达到过同位素平衡,否则,就表明它们没有达到过平衡。从阿尔哈达矿床方铅矿-闪锌矿硫同位素数据及计算的温度值来看,一部分样品计算的温度值与成矿温度值相似,另外一些样品计算的温度值与成矿温度值相差较大,暗示了成矿流体复杂的演化历史。矿相学和矿物学研究结果表明,在阿尔哈达矿床的早期成矿阶段,流体中金属元素浓度大于 H_2S 浓度,因此,方铅矿、闪锌矿和 H_2S 的 $\delta^{34}\text{S}$ 值大体相似。成矿作用晚期,随着大量金属元素的析出,流体中 H_2S 含量骤然升高,此时,闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值要远高于方铅矿,并且与流体中 H_2S 的 $\delta^{34}\text{S}$ 值大体相似。

一般讲,在热液金属矿床形成过程中的初期阶段,如若成矿体系的温度为 300~400℃,那么方铅矿(或黄铁矿)的 $\delta^{34}\text{S}$ 值将会略高于流体中的 H_2S 值,因此,在还原环境中,方铅矿(或黄铁矿)的 $\delta^{34}\text{S}$ 值可以近似地视为成矿流体的全硫值($\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$)。考虑到阿尔哈达矿床存在下述几方面特征:(1)在成矿作

用早期阶段,主要产出的矿物有方铅矿、闪锌矿和毒砂;(2)所有6件方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值与甘肃白银厂火山成因铜多金属矿床(4.08‰)和内蒙古别鲁乌图火山成因铜-硫多金属矿床(4.2‰) $\delta^{34}\text{S}$ 平均值相近^[12];(3)6件方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值完全可与岩浆热液金属矿床,特别是斑岩型矿床硫化物值相对比^[10,11];(4)方铅矿、闪锌矿、黄铁矿和毒砂样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于花岗岩类侵入岩硫化物最低值(1.8‰)和变质砂岩硫化物最高值(10.8‰)之间,笔者认为,阿尔哈达铅-锌-银矿床成矿作用早期阶段形成的硫化物,其物质来源与深源(幔源?)岩浆热液活动有关,而中和晚期阶段产出的硫化物则是岩浆热液对容矿围岩进行蚀变交代或与大气降水相混合的产物。随着铅-锌-银成矿作用的延续和成矿流体中大量大气降水的混入,各类硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值也将会有不同程度的升高。从阿尔哈达铅-锌-银矿床硫化物的硫同位素分析数据可以初步判断,该矿床的成矿流体具有明显的混源特征。早期成矿阶段,成矿热液流体很可能以岩浆热液为主,中和晚期成矿阶段,成矿热液流体以大气降水或加热的混合水为主,硫分别来自岩浆热液、沉积岩地层和大气降水。

3.2 铅同位素

表3中列出的结果表明,阿尔哈达铅-锌-银矿床矿石硫化物和围岩硫化物都富含放射性成因铅。17件矿石硫化物样品(方铅矿、闪锌矿、黄铁矿和毒砂) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为18.153~18.431,平均为18.271; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为15.370~15.602,平均为15.464; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为37.653~38.213,平均为37.873。3件围岩硫化物样品(黄铁矿) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为18.281~18.293,平均为18.288; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为15.470~15.484,平均为15.477; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为37.874~37.909,平均为37.893。从硫化物种类上看,6件黄铁矿样品 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为18.153~18.293,平均为18.229; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为15.37~15.489,平均为15.428; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为37.653~37.909,平均为37.782。尽管黄铁矿样品铅同位素比值变化范围与其它硫化物存在一定的重叠区段,但是铅同位素3种比值的平均值均低于该矿床硫化物样品的相应平均值。5件闪锌矿样品 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为18.174~18.431,平均为18.261; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为15.384~15.602,平均为15.456; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比

值为37.972~38.213,平均为37.855。与前述黄铁矿样品一样,所有5件闪锌矿样品铅同位素的3种比值的平均值均低于该矿床硫化物样品的相应平均值。6件方铅矿样品 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围为18.187~18.415,平均为18.303; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为15.391~15.593,平均为15.490; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为37.693~38.211,平均为37.937。相比之下,所有6件方铅矿样品铅同位素的3种比值的平均值均高于该矿床硫化物样品的相应平均值。3件毒砂样品 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为18.258~18.427,平均为18.327; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为15.454~15.594,平均为15.509; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为37.842~38.191,平均为37.977。所有3件毒砂样品铅同位素的3种比值的平均值均高于该矿床硫化物样品的相应平均值。

在本次研究过程中未能直接从阿尔哈达铅-锌-银矿区获取花岗岩体硫化物样品及相关铅同位素数据,为方便对比研究,可将该矿床西北侧35 km处朝不楞地区岩(体)层铅同位素数据作为“参考资料”,进而讨论成岩(矿)物质来源问题。上述做法的主要依据有以下4点:(1)阿尔哈达与朝不楞地区均属同一大地构造单元,成岩(矿)环境极为相似,岩体(层)铀和钍背景含量大体相同;(2)两个地区岩体(层)岩性组合、岩相学特点、形成时代和地球化学特点完全可以对比;(3)两个地区岩体(层)内所赋存的金属矿床类型、元素组合和地质-地球化学特点十分相似;(4)阿尔哈达铅-锌-银矿床与朝不楞铁多金属矿床硫化物铅同位素比值变化范围相互重叠。朝不楞变质砂岩和黑云母花岗岩铅同位素分析数据见表3。表中数据表明,朝不楞铁多金属矿床变质砂岩 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 平均比值分别为18.498、15.710和38.113;黑云母花岗岩 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 平均比值分别为18.080、15.292和37.500。

尽管在本次研究过程中,所测的4种硫化物样品的铅同位素比值在变化范围上存在一定程度的重叠,但是从黄铁矿经闪锌矿和方铅矿到毒砂, ^{207}Pb 、 ^{207}Pb 和 ^{208}Pb 含量呈明显增高的趋势。铅同位素比值的上述变化特点与硫化物中 $\delta^{34}\text{S}$ 的富集顺序($\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{毒砂}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$)恰好相反,也就是说,随着硫化物中 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 和 ^{208}Pb

表 3 阿尔哈达、朝不楞硫化物铅同位素组成
Table 3 Lead isotope compositions of sulfide separates from Archada and Chaobuleng deposits

矿床	样品编号	采样位置、岩性	测试对象	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	资料来源
阿尔哈达	TW1	TC29 块状方铅矿矿石	方铅矿	37.954	15.499	18.316	本文
	TW4		方铅矿	37.899	15.479	18.295	本文
	TW7		方铅矿	37.693	15.391	18.19	本文
	TW8		方铅矿	38.161	15.585	18.415	本文
	TW9	竖井 1—沿脉 2 矿石	方铅矿	37.705	15.393	18.187	本文
	TW11		方铅矿	38.211	15.593	18.415	本文
	TW7		闪锌矿	37.672	15.385	18.187	本文
	TW8	竖井 1—穿脉 3 矿石	闪锌矿	37.673	15.384	18.174	本文
	TW9		闪锌矿	37.755	15.409	18.198	本文
	TW10		闪锌矿	38.213	15.602	18.431	本文
	TW11	竖井 1—沿脉 2 矿石	闪锌矿	37.962	15.5	18.317	本文
	TW4		毒砂	37.842	15.454	18.258	本文
	TW7		毒砂	37.898	15.48	18.297	本文
	TW11	竖井 1—穿脉 3 矿石	毒砂	38.191	15.594	18.427	本文
	TW8		黄铁矿	37.673	15.37	18.153	本文
	TW9		黄铁矿	37.689	15.387	18.181	本文
	TW10	竖井 1—沿脉 2 矿石	黄铁矿	37.653	15.379	18.174	本文
	TW2		黄铁矿	37.874	15.47	18.281	本文
	TW3		黄铁矿	37.909	15.484	18.293	本文
	TW5	竖井 1—穿脉 2 板岩	黄铁矿	37.896	15.478	18.291	本文
朝不楞	CBLQ09	变质砂岩	黄铁矿	38.103	15.703	18.495	①
	CBLQ10		黄铁矿	38.122	15.716	18.501	①
	CBLQ13	黑云母花岗岩	黄铁矿	37.502	15.301	18.124	①
	CBLQ12		黄铁矿	37.5	15.298	18.12	①
	CBLQ11		辉钼矿	37.498	15.278	17.996	①

核工业北京地质研究院分析测试研究中心分析结果;①聂凤军,江思宏,白大明,等.中蒙边境中东段我国一侧(北山和二边—东乌旗地区)铜金银矿床成矿规律与找矿方向.内部资料,2006.

含量的增高, $\delta^{34}\text{S}$ 含量则呈现出逐步降低的趋向。导致这种规律性变化的原因可能是随着早期高温到晚期低温结晶的过程中,硫化物混入围岩中的铅逐渐增多。结合阿尔哈达矿石和围岩硫化物以及朝不楞变质砂岩和黑云母花岗岩硫化物铅同位素组成特征不难看出,无论是 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 还是 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的平均值都存在朝不楞黑云母花岗岩 < 阿尔哈达矿石 < 阿尔哈达板岩 < 朝不楞变质砂岩的特征。根据上述简要讨论,可将朝不楞地区黑云母花岗岩和变质砂岩硫化物铅同位素数据分别投绘在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图(图 3a)和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图(图 3b)中,其分布范围分别位于阿

尔哈达矿床硫化物区的底部和顶部。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图(图 3a)中,所有铅-锌-银矿石、板岩、黑云母花岗岩和变质砂岩硫化物数据点呈线性排列。需要提及的是,无论在图 3a 中,还是在图 3b 中,铅-锌-银矿石硫化物样品均投绘在黑云母花岗岩与变质砂岩硫化物区之间,阿尔哈达矿石与板岩具有较大重叠,反映了成矿物质来源于花岗岩类侵入岩体和变质沉积岩地层的成因联系。铅同位素比值变化范围与阿尔哈达矿床东部 35 km 处的朝不楞铁多金属矿床十分相似,暗示了它们的物源具有相当的一致性,同时,也反映了区域岩体(层)铀和钍丰度值以及相同构造-岩浆活动事件对各金属矿床

硫化物铀-钍-铅同位素体系的影响。

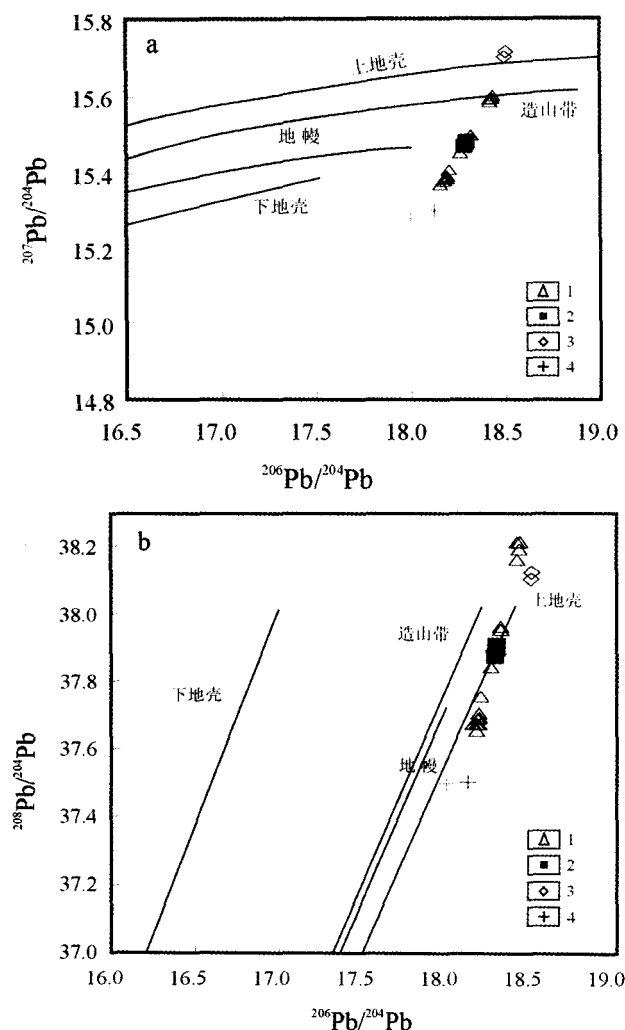


图3 阿尔哈达铅-锌-银矿床矿石硫化物 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a)和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b)图解 (原图据文献[13])

Fig. 3 Plot of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a) and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b) of sulfide from Alhada Pb - Zn - Ag deposit

1. 阿尔哈达矿床铅-锌-银矿石硫化物; 2. 阿尔哈达矿床板岩硫化物; 3. 朝不楞地区变质砂岩硫化物; 4. 朝不楞地区黑云母花岗岩硫化物

通常情况下,金属矿床铅同位素示踪研究的目的是,确定铅及有关成矿组分的来源(幔源、壳源或壳-幔混合源),此外,查明铅同位素演化历史和影响铅同位素组成变化的地质因素,将有助于了解金属矿床的形成过程,并且可为构建找矿模型提供理论依据^[14~18]。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图(图3a)中,除2件闪锌矿样品数据点落在造山带铅演化线

上,其余硫化物样品数据点均投射到地幔与下地壳铅演化线之间,暗示了阿尔哈达矿床成矿(岩)物质的混源成因,即在成矿作用过程中,深源(幔源?)岩浆与壳源岩(体)层以不同方式,发生过某种程度的混合作用。在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图(图3b)上,黑云母花岗岩和变质砂岩硫化物放射性成因铅含量分别低于和高于铅-锌-银矿石硫化物,其中黑云母花岗岩硫化物样品位于高放射性成因铅一侧,而变质砂岩硫化物样品则位于高放射性成因铅一端,同样为阿尔哈达矿床成矿物质的混源成因假设提供了依据。

陈好寿等^[15]认为,金属矿床或岩体(层)铅同位素变化除了受岩(矿)石形成时代和物质源区制约外,还与其本身的铀和钍含量有关。如果铀丰度值高于钍,那么 ^{206}Pb 和 ^{207}Pb 含量就相应地高于 ^{208}Pb ,反之, ^{208}Pb 含量则高于 ^{206}Pb 和 ^{207}Pb 。尽管在铅-锌-银矿石和变质砂岩地层中尚未发现独立的铀和钍矿物,但是部分岩(矿)石样品较高的铀和钍含量暗示了部分成岩(矿)物质来自较高的铀和钍源区。根据所获硫化物铅同位素数据,并且结合其它地质证据,笔者认为阿尔哈达矿床是深源岩浆喷溢或侵位活动中,含铀、钍、铅、锌和其它元素成矿流体与古陆壳岩层(沉积岩?)相互作用的结果。从黑云母花岗岩硫化物经铅-锌-银矿石硫化物到变质砂岩硫化物,放射性成因铅含量呈逐渐增高趋势,反映了花岗岩类成岩作用、容矿围岩热液蚀变效应与铅-锌-银矿床成矿作用是一个连续和统一的过程,三者为同源继承演化关系。

4 矿床成因讨论和初步结论

阿尔哈达及邻区经历了加里东期、海西期和印支期构造旋回,与之相对应的是西伯利亚板块、古蒙古洋壳和华北陆台之间的长时期和多阶段俯冲-碰撞作用。强烈的构造-岩浆活动不仅形成了广泛分布的火成岩,同时,也造就了本区极为复杂的褶皱和断裂构造^[19~21]。晚古生代早期,海西期造山作用致使本区发生近南北向挤压和东西向拉张构造运动,进而在西伯利亚板块东南缘(包括阿尔哈达及邻区)形成一系列规模大小不等和形态各异的裂陷盆地和隆起区。在阿尔哈达及邻区一带的晚古生代裂陷槽内,晚泥盆世火山-沉积作用不仅形成很厚(大于1500 m)的火山-沉积岩层,同时,也产出一系列铅-锌-银矿化体。研究结果表明,该区晚泥盆世金属成

矿作用是整个地区地壳演化的重要组成部分,是火山-沉积作用的继续和发展^[3,5]。在阿尔哈达铅-锌-银矿床成矿作用早期,随着海陆相火山活动和沉积作用的交替进行,部分铅、锌、银、硫和铅及其它成矿组分可随火山碎屑、火山灰和热液流体进入特定的盆地,并且可以直接沉淀下来。它们要么形成具有工业价值的铅-锌-银矿石,要么形成铅-锌-银矿胚(或矿源层)。一般来讲,此阶段形成的矿体多以层状、似层状和透镜状为特点,矿石的 $Cu/(Cu + Pb + Zn)$ 比值明显高于脉状铅-锌-银矿体。

需要指出的是,在上述成矿作用进行的同时或稍晚阶段,花岗岩类岩浆的侵位活动同样为铅-锌-银矿床的形成提供了物质、动力和热力来源,这一推论基于以下几个地质事实:(1)阿尔哈达矿床产出在安儿基乌拉似斑状黑云母花岗岩的外接触带;(2)容矿围岩存在各种类型的角岩;(3)中高温热液蚀变矿物(石英、绢云母等)分布广泛。

综合性对比研究结果表明,阿尔哈达及邻区印支期花岗岩类侵入岩分布广泛,并且与铜、铅、锌、银和金矿床(点)具有密切的时空分布关系。关于这套花岗岩类侵入岩与阿尔哈达铅-锌-银矿床的成因联系,笔者分析如下。

当花岗质深熔岩浆(安儿基乌拉似斑状黑云母花岗岩的成岩岩浆)沿有利构造部位上侵时,岩浆体系自身的结晶分异作用可促使大量挥发性组分(CO_2 、F、Cl、 H_2O)、 SiO_2 、 K_2O 和部分金属元素在岩浆房顶部或旁侧发生富集作用,进而形成含矿高侵位花岗岩株或岩脉群。在构造薄弱地带,含矿富挥发性组分流体可沿特定构造部位运移,并且在岩体外接触带形成铅-锌-银矿体。因此,铅-锌-银成矿作用是晚古生代—早中生代构造-岩浆活动的重要组成部分,是中酸性岩浆作用的继续和发展。另外,在岩浆上升侵位过程中,岩浆冷凝收缩可产生大量张裂隙(或原生节理),在岩体与围岩接触带上,这种构造特征尤为明显,特别是受岩浆期后多期次构造叠加作用影响,这种张裂构造系统就更为发育,为含矿热液流体上升和沉淀富集创造了有利条件。

在含矿热液流体演化的早期阶段,金属元素可与各种不同类型的阴离子团结合形成含水的稳定络合物,并且通过岩层体粒间孔隙或原生冷凝细微裂隙进行扩散与运移,进而在构造有利地段沉淀形成各种铅-锌-银矿石。鉴于在此阶段大气降水量和围岩组分含量较低,因此,铅-锌-银矿石硫化物的 $\delta^{34}S$

值与以岩浆水为主的混源流体相似。随着成矿作用时间的推移和成矿体系的开放,大量大气降水和围岩组分将会参加到成矿热液系中来,并且与以岩浆水为主的含矿流体混合,进而形成以大气降水和围岩组分为主的混源流体。由此所形成的铅-锌-银矿石,它们的硫和铅同位素组分便接近于未蚀变的变质砂岩。另外,混合热液流体对容矿围岩的交代蚀变作用可导致大量镁铁质矿物解体,释放出来的铁、镁、钛、铅、锌、银和其它金属元素可同热液流体中的挥发性组分形成黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、石英、绢云母和绿泥石。蚀变沉积岩与其新鲜原岩样品在主元素和微量元素含量上的差异^①即是很好的例证。当含矿热液流体沿特定构造破碎带上升到近地表处时,成矿体系温度和压力的骤然降低,特别是 f_{O_2} 的明显增高和 pH 值的大幅度降低可导致热液体系的不平衡,进而在岩体与围岩的外接触带上形成具有工业价值的铅-锌-银矿体。阿尔哈达铅-锌-银矿床形成之后,部分矿体长期裸露地表,接受风化淋滤,黄铁矿和其它硫化物的分解可形成规模大小不等的铁帽,为综合性矿产资源潜力调查与评价提供了有效的找矿标志。

综上所述,阿尔哈达铅-锌-银矿床是一处与印支期中酸性岩浆活动有关的中温热液金属矿床。该矿床周围印支期中酸性火成岩(侵入岩和火山岩)分布广泛,其产出环境和岩相学特征与阿尔哈达矿区范围内的中酸性火成岩相似,并且存在一大批铅-锌-银矿化点或异常区(带),是进行铅-锌-银矿床找矿勘查的有利地段。

在野外工作期间得到中国冶金地质勘查工程总局第一地质勘查院徐智高级工程师、高云桥高级工程师、张奇高级工程师和张宇工程师的热情帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献(References):

- [1] 洪大卫,王式洗,谢锡林,等.试析地幔来源物质成矿域——以中亚造山带为例[J].矿床地质,2003,22(1):41-55.
HONG Da-wei, WANG Shi-guang, XIE Xi-lin, et al. Metallogenic province derived from mantle sources: A case study of central Asian orogenic belt[J]. Mineral

^① 中国冶金地质勘查工程总局第一地质勘查院.内蒙古自治区东乌珠沁旗阿尔哈达矿区 I 号带 7-39 线铅锌矿详查报告. 2005:1-103.

- Deposits, 2003, **22**(1):41-55.
- [2] 聂凤军,江思宏,张义,等.中蒙边境及邻区斑岩型铜矿床地质特征及成因[J].矿床地质,2004, **23**(2):176-189.
- NIE Feng-jun, JIANG Si-hong, ZHANG Yi, et al. Geological features and origin of porphyry copper deposits in China-Mongolia border region and its neighboring area[J]. Mineral Deposits, 2004, **23**(2):176-189.
- [3] 金岩,刘玉堂,谢玉玲.内蒙古东乌旗地区岩浆活动与多金属成矿的关系[J].华南地质与矿产,2005(1):8-12.
- JIN Yan, LIU Yu-tang, XIE Yu-ling. Relationship between magmatism and polymetal mineralization in Dongwuqi area, Inner Mongolia [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2005(1): 8-12.
- [4] 赵一鸣,王大畏,张德全,等.内蒙古东南部铜多金属成矿地质条件及找矿模式[M].北京:地震出版社,1994:1-234.
- ZHAO Yi-ming, WANG Da-wei, ZHANG De-quan. Geological setting and exploration model for the polymetallic deposits occurring in the southeastern part of Inner Mongolia [M]. Beijing: Seismologic Publishing House, 1994:1-234.
- [5] 王建平.内蒙古东乌旗铜、银多金属成矿带成矿类型分析[J].矿产与地质,2003, **17**(2):132-135.
- WANG Jian-ping. Metallogeny of Dongwu Banner copper and silver polymetallic ore zone of Inner Mongolia [J]. Mineral Resources and Geology, 2003, **17**(2):132-135.
- [6] 高群学,钱明.内蒙古东乌旗阿尔哈达银铅锌矿区地质、物化探特征及其找矿意义[J].地质找矿论丛,2005, **20**(增刊):95-99.
- GAO Qun-xue, QIAN Ming. Geological, geo-physical and geo-chemical exploration characteristics and their ore-searching significance in Arehada Ag-Pb-Zn camp, Dong Ujimqin Banner [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources, 2005, **20**(Sup.):95-99.
- [7] 夏广清.内蒙古东乌旗地区土壤地球化学测量及找矿效果[J].矿产与地质,2005, **19**(6):634-639.
- XIA Guang-qing. Soil geochemical exploration and its effect in Dongwuqi, Nei Mongolia [J]. Mineral Resources and Geology, 2005, **19**(6):634-639.
- [8] Ohmoto H, Rye R O. Isotopes of sulfur and carbon [C]//Barnes H L. Geochemistry of hydrothermal ore deposits. New York: John Wiley and Sons, 1979:509-567.
- [9] Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits [J]. Econ Geol, 1972, **67**:551-579.
- [10] Bohlke J K, Coveney R M Jr, Rye R O, et al. Stable isotope investigations of gold quartz veins at the Oriental mine, Alleghany district, California, U S [J]. Geological Survey Open-File Report, 1988, 88-279:1-24.
- [11] Taylor B E. Stable isotope geochemistry of ore-forming fluid [J]. Mineralogical Association of Canada Short Course Handbook, 1987, **13**:337-445.
- [12] 聂凤军,裴荣富,吴良士,等.内蒙古白乃庙地区岩浆活动与金属成矿作用[M].北京:北京科学技术出版社,1993:1-239.
- NIE Feng-jun, PEI Rong-fu, WU Liang-shi, et al. Magmatic activity and metallogeny of the Bainaimiao district, Inner Mongolia, People's Republic of China [M]. Beijing: Beijing Science & Technology Press, 1993:1-239.
- [13] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics—the model [J]. Tectonophysics, 1981, **75**:135-162.
- [14] 雷新勇.粤东锡多金属矿床稳定同位素地球化学研究[J].矿床地质,1994, **13**(4):322-330.
- LEI Xin-yong. Stable isotope geochemical studies of tin-polymetallic deposits in Eastern Guangdong [J]. Mineral Deposits, 1994, **13**(4):322-330.
- [15] 陈好寿,冉崇英.康滇地轴铜矿床同位素地球化学[M].北京:地质出版社,1992:1-135.
- CHEN Hao-shou, RAN Chong-ying. Isotope geochemistry of copper deposits in Kang-Dian axis [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992:1-135.
- [16] 张乾,潘家永,邵树勋.中国某些金属矿床矿石铅来源的铅同位素诠释[J].地球化学,2000, **29**(3):231-238.
- ZHANG Qian, PAN Jia-yong, SHAO Shu-xun. An interpretation of ore lead sources from lead isotopic compositions of some ore deposits in China [J]. Geochimica, 2000, **29**(3):231-238.
- [17] Zartman R E, Haines S M. The plumbotectonic model for Pb-isotope systematics among major terrestrial reservoir—A case for bi-directional transport. Geochim [J]. Cosmochim Acta, 1988, **52**:1327-1339.

助于丰富现代成矿学的知识,同时也有助于开阔找矿思路。据西藏地矿局多吉院士介绍,在西藏西南部拉昂错—王曲工布一带已经发现有大型规模的热泉型金矿^①,证明在西南部地区寻找热泉型矿床具有良好的前景。同时,还应综合考虑 Li、Cs、B、Be 等稀有元素。

5 结 论

四川西部巴塘县的热坑和理塘县的热水塘两处热泉群均伴随有金的矿化,属现代热泉成矿^[7]。泉华沉积物的地球化学特征表明成矿物质可能来自于附近隐伏的花岗岩体, Li、Be 等亲花岗岩元素可以作为找矿标志。地表有矿化的热泉其深部很可能也正在发生成矿作用,应该引起注意并进一步勘查,同时在区域上应开展现代热水成矿作用的专项调查和研究。另外,陆相热泉沉积物的地球化学特征可能与海相热水沉积物有所不同,如硅铝质地壳物质的加入而富集 Al 等。

参考文献(References):

- [1] 王登红,付小方,应汉龙. 四川西部现代热泉型金矿化的发现和初步研究[J]. 地质论评, 2003, **49**(3): 311 - 315.
WANG Deng-hong, FU Xiao-fang, YING Han-long. The discovery and study of gold mineralization related to modern hot springs in western Sichuan Province[J].
- [2] 黎彤,倪守斌. 中国大陆岩石圈的化学元素丰度[J]. 地质与勘探, 1997, **33**(1): 31 - 35.
LI Tong, NI Shou-bin. Element contents of Chinese continental lithosphere[J]. Geology and Exploration, 1997, **33**(1): 31 - 35.
- [3] Rona P A. Hydrothermal mineralization of oceanic ridges[J]. Canadian Mineralogy, 1988, **26**(3): 447 - 465.
- [4] Adachi M, Yamamoto K, Suigiski R. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the Northern Pacific: their geological significance as indication of ocean ridge activity[J]. Sedimentary Geology, 1986, **47**(1/2): 125 - 148.
- [5] Yamamoto K. Geochemical characteristics and deposition environment of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimena terranes[J]. Sedimentary Geology, 1987, **52**: 65 - 108.
- [6] 孙培基,韦永福. 当代中国金矿地质[M]. 北京:地震出版社, 1996: 363.
SUN Pei-ji, WEI Yong-fu. Gold geology of modern China[M]. Beijing: Seismological Publishing House, 1996: 363.
- [7] 王登红,陈毓川,徐珏,等. 中国新生代成矿作用[M]. 北京:地质出版社, 2005.
WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan, XU Jue, et al. Cenozoic mineralization in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 853.
- [18] Doe B R, Stacey J S. The application of lead isotopes to the problems of ore genesis and ore prospect evaluation: A review[J]. Economic Geology, 1974, **69**: 757 - 767.
- [19] 洪大卫,王式洸,谢锡林,等. 兴蒙造山带正 $\epsilon(\text{Nd}, t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长[J]. 地学前缘, 2000, **7**(2): 441 - 456.
HONG Da-Wei, WANG Shi-guang, XIE Xi-lin, et al. Genesis of positive $\epsilon(\text{Nd}, t)$ granitoids in the Da Hinggan Mts. - Mongolia orogenic belt and growth continental crust[J]. Earth Science Frontiers, 2000, **7**(2): 441 - 456.
- [20] 李述靖,张维杰,耿明山,等. 蒙古弧形地质构造特征及形成演化概论[M]. 北京:地质出版社, 1998: 104, 111 - 112.
LI Shu-jing, ZHANG Wei-jie, GENG Ming-shan, et al. Introduction to geology of Mongolian arc tectonic and its evolution[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 104, 111 - 112.
- [21] Xiao Wen-jiao, Windley B F, Hao Jie, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. Tectonics, 2003, **22**(6): 1 - 20.

① 多吉,温春齐. 雅鲁藏布江缝合带西段矿产资源潜力浅析. 2003.

