

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2018.04.003

白银厂铜多金属矿田地球化学研究进展

郭凯凤¹, 陈守余^{1,2}

(1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074;

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 白银厂铜多金属矿田是上世纪五十年代初期在我国西部发现并勘探成功的大型铜矿区。随着现代测试分析技术的进步, 矿床地球化学研究取得明显进展。本文主要论述了其中的几个方面, 包括微量元素地球化学、矿床同位素地球化学、成矿年代学等方面的某些研究进展。

关键词: 铜多金属矿床; 微量元素地球化学; 矿床同位素地球化学; 成矿年代学; 白银厂; 甘肃省

中图分类号: P618. **文献标识码:** A

0 引言

白银厂铜多金属矿田是五十年代初期在我国西部发现并勘探成功的大型铜矿床。在该矿床研究过程中, 前人对白银厂铜多金属矿田各矿床^[1-11]以及矿区火山岩^[12-17]的地质地球化学特征进行了大量研究, 总结出各种成矿模型^[7,18-19], 并对矿床成因^[20-21]和成矿物质来源^[22-23]进行了讨论, 以及同位素组成特征^[24-25]和年代学的研究^[26-29]。本文将重点对白银厂铜多金属矿田进行分析研究, 总结其地球化学特征, 说明其研究进程。

1 矿床地质特征

白银厂铜多金属矿田以火焰山、折腰山、小铁山、铜厂沟及四个圈共五个大中型矿床以及诸多矿化点构成(图1)。块状硫化物矿体多数赋存于寒武奥陶纪的细碧岩($M\beta_3$)-石英角斑岩($M\pi_1$)内。海相灰岩和放射虫硅质岩出现在此岩系中, 可见枕状

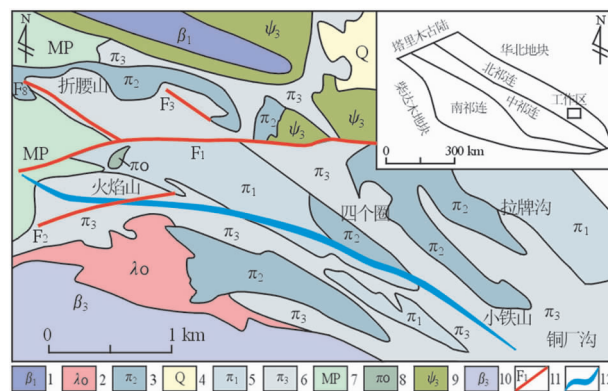


图1 白银厂矿田地质简图

(据甘肃有色勘探院资料, 修编)

Fig. 1 Simplified geological map of the Baiyinchang ore field

1. 玄武岩; 2. 辉长岩; 3. 石英角斑凝灰熔岩;
4. 第四系黄土; 5. 石英角斑岩; 6. 石英角斑凝灰岩;
7. 千枚岩; 8. 石英钠长斑岩; 9. 中基性凝灰岩;
10. 基性凝灰岩; 11. 断裂及编号; 12. 背斜

构造, 岩石为钙碱性系列, 偏碱性。本区主要矿床基本情况, 如表1所述。

1.1 矿体特征

收稿日期: 2017-08-14; 改回日期: 2017-10-29; 责任编辑: 王传泰

基金项目: 中国地质调查局科研项目“甘肃省白银厂影响找矿突破的关键地质问题及找矿预测研究”(编号: 12120114050101)资助。

作者简介: 郭凯凤(1993—), 女, 硕士研究生, 矿产资源普查与勘探方向。通信地址: 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, 中国地质大学(武汉)资源学院; 邮政编码: 430074; E-mail: 1094726740@qq.com

通信作者: 陈守余(1956—), 男, 教授, 博导, 长期从事矿产综合勘查与定量评价的教学与科研工作。通信地址: 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, 中国地质大学(武汉)资源学院; 邮政编码: 430074; E-mail: 45321870@qq.com

表 1 白银厂矿田主要矿床特征

Table 1 Characteristics of main ore deposits in Baiyinchang ore field

矿床名称	主金属组合	含矿岩系特征	矿体产出层位	矿石类型	成矿环境
折腰山 火焰山 铜厂沟	Cu-Zn	细碧-石英角斑岩系,夹少量千枚岩,大理岩,硅质岩	石英角斑凝灰岩中或与基性岩过渡层位	块状矿石,浸染状矿石,角砾状矿石,网脉状矿石,条带状矿石	近火山通道
小铁山 四个圈	Zn-Pb-Cu-Ag-Au	细碧-石英角斑岩系夹沉积岩或与沉积岩互层	石英角斑凝灰岩顶部或酸性火山碎屑岩与沉积岩过渡层位	块状矿石,浸染状矿石,条带状矿石	远离火山通道的海底洼地
石青硐	Zn-Pb-Cu-(Ag)				

陆源岛弧

折腰山、火焰山、铜厂沟为铜-锌型矿床,属于白银厂矿田的主要部分。在该矿田中,折腰山矿床为产出规模最大,其铜的金属储量占整个矿田 1/2 以上。赋矿岩层为石英角斑凝灰岩($M\pi_3$),部分可见沉积夹层,矿体形态为似层状、透镜状。总体上,矿体和围岩属于整合接触关系,NWW 向延伸,往 SW 方向陡倾。矿体的上部主要是块状、层状的矿体,形成于海底环境,由含矿热液的沉积作用所致;但矿体的下部主要是浸染状、网脉状矿体,为含矿热液与形成于海底的火山碎屑岩发生交代作用的产物。在折腰山矿床中发现有一个热液通道,同现代的黑烟筒相似,是一个呈近似直立柱状的磁黄铁矿体,可见环状矿物分带。此外,在折腰山矿床四周,不仅发现侵入的次火山岩相,还常见角砾、集块岩,而且由中心往四周,可见集块和角砾逐渐减少、粒度变细,表现了古火山中心的特点,说明该种类型的矿床属于近火山通道相。

小铁山、四个圈属于锌-铅-铜-银-金型矿床。赋矿层位为石英角斑凝灰岩和沉积岩之间的过渡部位,矿体和围岩属于整合关系,呈层状以及似层状;与折腰山不同,在矿体四周少见角砾岩以及集块岩,说明该矿体在形成过程中处于远离火山口的位置。小铁山矿床产在中寒武统白银厂群第二岩组的石英角斑凝灰岩($M\pi_3$)内,在矿体的上方可见绿泥石片岩以及绿泥石岩,起到了很好的盖层作用;矿体的下方是石英钠长斑岩($M\pi_{1a}$),呈淡肉红色。由于层间破碎带的影响,形成的矿体多为大的似层状以及透镜状,少数沿裂隙充填,生成板状矿体,见分叉、重合、变大、缩小、尖灭、重现等情况,层位相对稳定,而形状有较大改变。

1.2 矿石特征

矿石矿物成分类型多样,大体上有原生带、次生富集带和氧化带三类矿物。当前所知矿物超过 60 余种,有近 40 种矿物为次生带、氧化带矿物,比较多见的有 20 多种。矿石构造表现为以块状、浸染状、次块状、角砾状、条带状、纹层状以及条纹状为主,之

后可见破碎角砾状、揉皱状、网脉状等。矿石结构表现为以揉皱、共边、变质、压碎、交代、自形以及半自形为主。

1.3 围岩蚀变

白银厂区域的围岩蚀变特别常见,发育于火山岩以及次火山杂岩中。靠近矿体蚀变类型主要包括黄铁矿化、硅化和绢云母化;远离矿体蚀变普遍见于基性火山岩内,包括绢云母化、绿泥石化、铁白云岩化和碳酸盐化。最主要的蚀变作用包括黄铁矿化、硅化、绢云母化和绿泥石化,而绿泥石化和成矿关系联系最紧密。

2 矿床地球化学研究现状及进展

2.1 矿床地球化学研究现状

随着分析测试技术的不断进步,地球化学的研究被越来越多应用到矿床研究当中。当前,对矿床地球化学的研究,不仅有矿床,还向矿产资源开发利用以及矿床的环境质量维护转换;不仅研究矿床形成、成矿模式,并向矿床时空分布特征、成矿动力学和成矿机理的研究转换。由研究宏观、浅层、单一矿床向研究微观(例如:单矿物、流体包裹体和纳米级微粒)、深层、成矿区带乃至全球的成矿作用背景转换;由研究常见成矿元素、物质组分和矿床规模向研究稀有分散成矿元素、生物有机质流体成矿作用以及超大型矿床转换;研究手段则是更加利用成矿过程数字动态模拟、3S、计算机和高新分析测试^[30]。

在研究白银厂铜多金属矿田过程中,用到较多的是对矿床中火山岩以及其他岩石的地球化学特征分析以及同位素定年。

2.2 矿床地球化学研究进展

2.2.1 微量元素地球化学研究

(1) 微量元素

宋学信等^[4]通过对比白银厂矿田 Zn-Pb-Cu 矿石、Cu 矿石和黄铁矿矿石的微量元素含量平均值与

日本黑矿石^[31],以及大西洋中脊、东太平洋隆起和马里亚纳弧后现代火山成因块状硫化物矿石的微量元素数据^[32]发现,白银地区各种矿石 $w(\text{Pb})/w(\text{Zn})$ 的值,同日本黑矿石以及马里亚纳矿床主岩是海底弧后火山岩相似;与现代海底火山岩为主岩矿床相比,具有相对高 Se 含量和相对低 $w(\text{S})/w(\text{Se})$ 值。此外,白银厂矿田 Zn-Pb-Cu 矿石(大致相当于黑矿)有着相对高 Au 含量和 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 值;具有最高砷含量,这与其中有毒砂及砷黝铜矿等含砷矿物有关;具有高铋含量,铋含量相对高,且 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值相对高。

傅鹏等^[17]将小铁山—铜厂沟地区酸性火山岩、折—火地区酸性火山岩和白银厂基性火山岩作微量元素原始地幔标准化蛛网图(图2)。发现酸性火山岩表现为总体上富集 Pb、Th 和 U,部分富集 Ba、K,部分亏损 Sr,极度亏损 Ti(图2a、2b),这一特点与火山弧岩浆大离子亲石元素(LILE)富集、高场强元素(HISF)亏损相吻合。折—火地区酸性火山岩同小铁山—铜厂沟地区酸性火山岩相比较 Sr 亏损相对弱,高场强元素含量也相对低一些,该特征表明它们并不由同一岩浆作用演化而来,也许为不同源区或者不同期次产物。该区基性火山岩蛛网图分配曲线与酸性火山岩组合整体类似(图2c),总体富集 Ba、K、U、Th、Pb,明显亏损 Ti,显示其形成与板块俯冲作用有关。Ba、Th 的富集主要来源于地壳物质的混染。该区所有火山岩都富集有成矿元素 Pb,这一特征表明该区火山岩为后期的热液叠加改造矿床提供了充足的物源。

(2) 稀土元素

白银厂地区有很多人对该区稀土元素做过研究,其中蒋心明等^[2]对该区的细碧岩类、石英角斑岩

类以及沉积岩系的稀土元素做了详细研究。1) 细碧岩类:强烈硅化的细碧凝灰岩,稀土总量最低,可能与硅化有关。富钾细碧岩稀土总量最大,可能与钾化有关。除次侵入的细碧斑岩稀土模式表现为较平坦、 $w(\text{Sm})/w(\text{Nd})$ 值较高(0.33)外,其它均为 $w(\Sigma\text{Ce})/w(\Sigma\text{Y}) > 1$ 、 $w(\text{Sm})/w(\text{Nd}) < 0.33$ 。富钾细碧岩 $w(\text{Eu})/w(\text{Eu}^*)$ 值略小于1,其余 $w(\text{Eu})/w(\text{Eu}^*)$ 值均大于1。因此,该区细碧岩的稀土元素地球化学特征基本为富 Eu、富轻稀土型、稀土标准化模式基本一致(图3),表明物质来源为壳幔混合型,其成因具有相似性。2) 石英角斑岩类:稀土总量为 $w(\Sigma\text{REE}) = 57.51 \times 10^{-16} \sim 101.65 \times 10^{-16}$,以次侵入岩的石英钠长斑岩的稀土总量最低,石英角斑集块岩总量最高。 $w(\Sigma\text{Ce})/w(\Sigma\text{Y})$ 值均大于1,说明轻稀土高于重稀土。 $w(\text{Sm})/w(\text{Nd}) < 0.33$,反映物质来源于壳幔混合层中。 $w(\text{Eu})/w(\text{Eu}^*)$ 值除石英钠长斑岩为1.39、石英角斑集块岩为1.33外,其余皆接近1,为 Eu 亏损的轻稀土富集型,稀土标准化模式基本一致(图4),表明物质来源和成因的相似性。石英角斑岩类稀土元素特征与细碧岩类相比,二者较为相似,且又时空上较为密切,表明成因上的紧密联系。但是,稀土配分模式亦有差异,即石英角斑岩类最后几个重稀土有抬高趋势,这种差异可能与岩浆分异演化有关。

傅鹏等^[17]通过研究白银厂地区酸性火山岩(只分析石英角斑凝灰岩和酸性集块),发现该区酸性火山岩存在两类完全不一样稀土分配模式。一种是产在折—火地区的酸性火山岩,其稀土元素总量低,与具有较高稀土元素含量的地壳重熔型酸性火山岩明显不同;在稀土配分模式曲线图(图5a)上表现为右倾的半弧型,负锆异常表明,折—火地区酸性火山岩

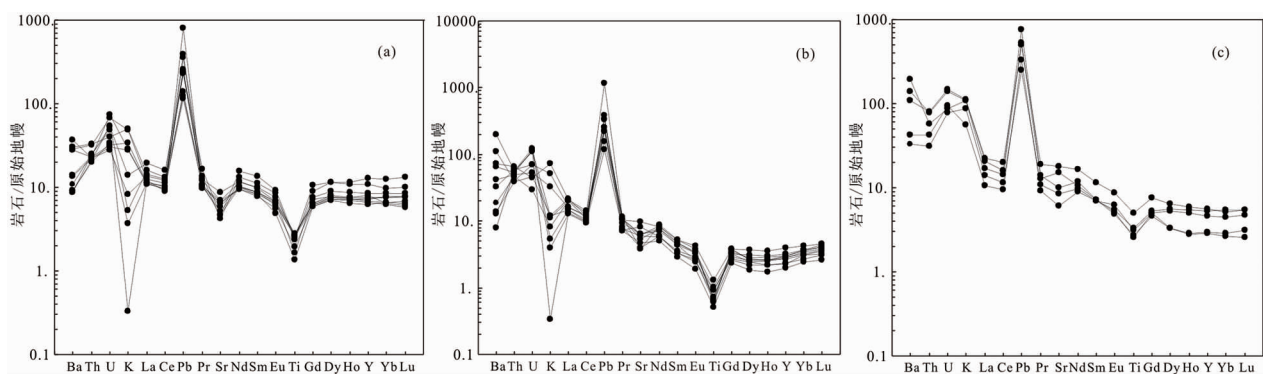


图2 白银厂矿田火山岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(标准化值据 Sun et al,1989)

Fig. 2 Normalized primitive mantle trace element spider diagram of volcanic rocks in Baiyinchang ore field

(a) 小铁—铜厂地区酸性火山岩;(b) 折—火地区酸性火山岩;(c) 白银厂基性火山岩

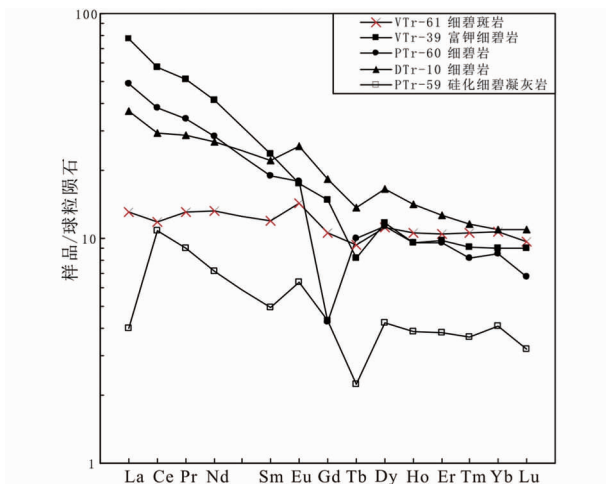


图3 西细碧岩类球粒陨石标准化稀土配分模式图

Fig. 3 Normalized REE patterns of spilitite

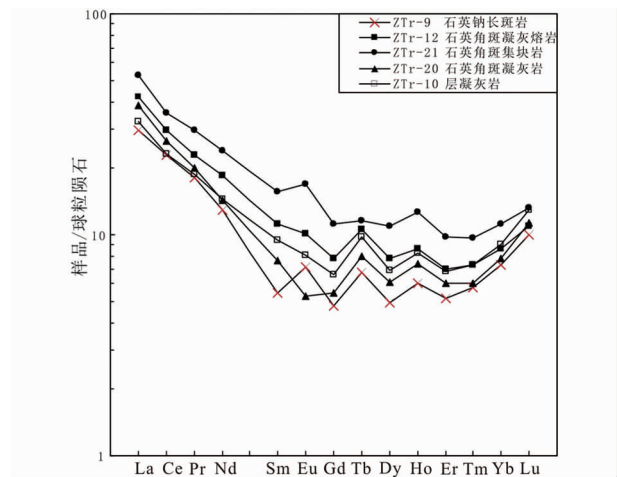


图4 石英角斑岩类球粒陨石标准化稀土配分模式图

Fig. 4 Normalized REE patterns of quartz keratophyre

很大可能是由地幔部分熔融形成的。另一种则是分布在小铁山—铜厂一带的酸性火山岩,在稀土配分模式曲线图(图 5b)上表现为平坦型,明显区别于折-火地区的酸性火山岩,表明它们的源区是有区别的,更加显示折-火与小铁山—铜厂沟火山岩为不同源区分异的产物。

沉积岩系方面,蒋心明等^[2]研究了千枚岩(MP)、硅质岩(GT)和大理岩(ML)三种岩石的稀土元素特征。千枚岩、硅质岩稀土总量相差较为悬殊,但稀土标准化模式均为 Eu 亏损的轻稀土富集型(图 6、图 7)。 $w(\Sigma\text{Ce})/w(\Sigma\text{Y}) > 1$,轻稀土是重稀土的 3 倍以上。 $w(\text{Eu})/w(\text{Eu}^*) < 1$, $w(\text{Sm})/w(\text{Nd}) < 0.33$,说明属于沉积岩类,物质来源于壳层。其与本区火山岩系的稀土特征差异较大,反映成

因也不一样;稀土平均丰度与晚太古代沉积岩平均稀土型式极为类似。样品 ZrT-27 的 Tm、Yb、Lu 含量有些升高,可能是火山凝灰质增加所致。

大理岩的样品分别采自二道湾、石青洞和石灰厂,它们的稀土丰度及标准化模式差别较大(图 8)。大理岩的 $w(\Sigma\text{REE})_{\text{二道湾}} > w(\Sigma\text{REE})_{\text{石青洞}} > w(\Sigma\text{REE})_{\text{石灰厂}}$,大理岩的纯度石灰厂 > 石青洞 > 二道湾,其表明稀土总量与纯度成反相关关系。虽然上述三地区的稀土元素丰度变化较大,但其 $w(\Sigma\text{Ce})/w(\Sigma\text{Y})$ 、 $w(\text{Sm})/w(\text{Nd})$ 、 $w(\text{Eu})/w(\text{Eu}^*)$ 值较为近似,表明它们在物质来源及形成原因方面可能存在某种关系。二道湾不纯大理岩与二道湾、白银厂细碧岩的稀土模式及各种参数相近,推断不纯大理岩可能含有较多的细碧凝灰质成分。

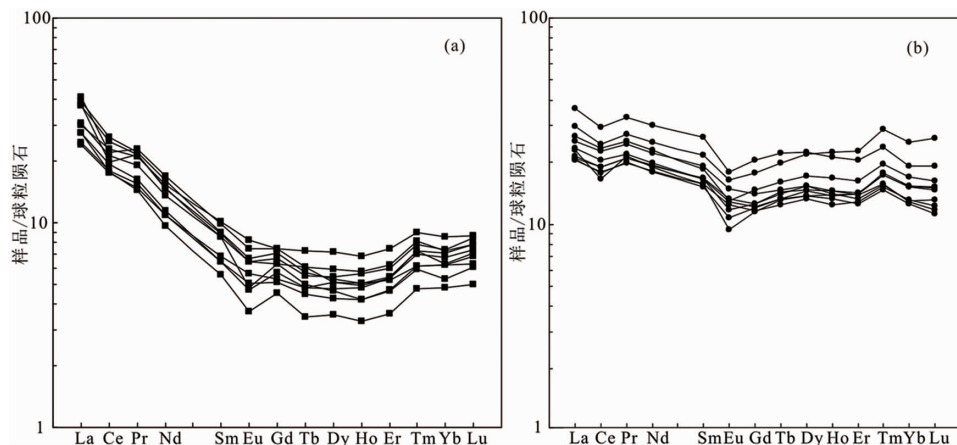


图5 酸性火山岩稀土元素配分模式图

Fig. 5 REE patterns of acid volcanic rock

(a)折-火地区酸性火山岩;(b)小铁山—铜厂沟地区酸性火山岩

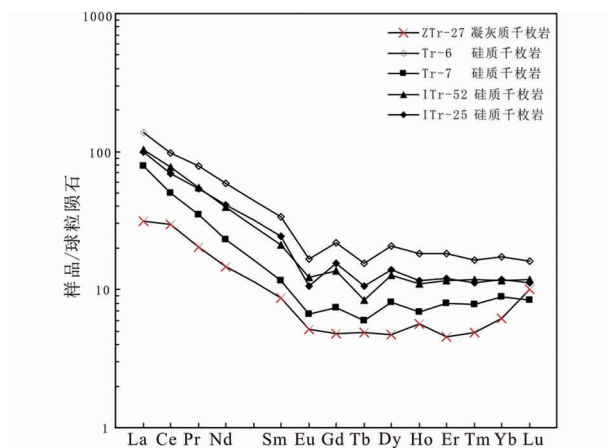


图 6 千枚岩球粒陨石标准化稀土配分模式图

Fig. 6 Normalized REE patterns of phyllite

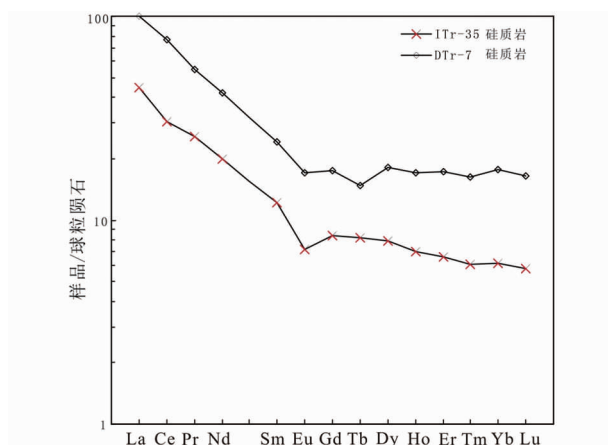


图 7 硅质岩球粒陨石标准化稀土配分模式图

Fig. 7 Normalized chondrite REE patterns of siliceous rocks

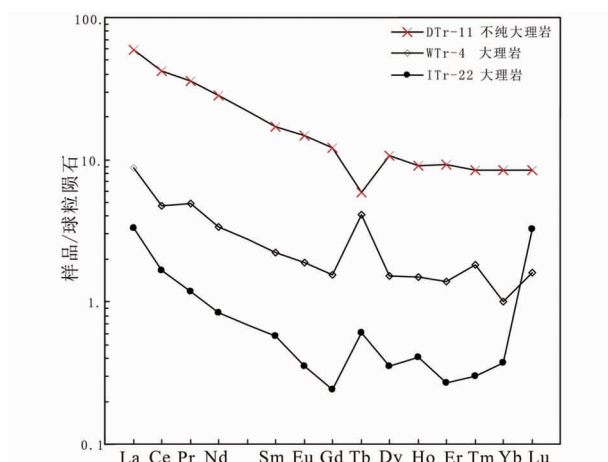


图 8 大理岩球粒陨石标准化稀土配分模式图

Fig. 8 Normalized chondrite REE patterns of marble

稀土元素地球化学特征。折-5 为折腰山矿床含铜黄铁矿矿石,呈网脉状出现,脉石矿物主要为石英,结晶颗粒较粗;火-6 为火焰山矿床,具韵律条带的铜-锌矿石类型;625-6 为小铁山矿床 625 中段的矿体,为块状铅锌铜矿石类型。从三个矿石样稀土标准化模式图(图 9)可见,火焰山与小铁山矿床呈现 Eu 无亏损轻稀土富集类型,而折腰山矿床呈现 Eu 亏损重稀土富集类型,表明其成因方面存在着差异。反映了矿床形成不同的环境,前二者为火山热液(或热泉)喷出海底,形成于火山湖和火山洼地之中,偏于外生成矿特点,而富集轻稀土;后者为含矿火山热液未喷出到海底,在其洋壳上部交代,偏于内生成因的特点,而富集重稀土。这与矿石类型、矿床成因是一致的。

将矿石与上述各种岩石类型的稀土特征进行比较,火焰山、小铁山矿床稀土元素特征与石英角斑岩系相似,表明物质来源及成因的密切联系;折腰山矿石不同于石英角斑岩系稀土元素配分模式,重稀土大于轻稀土,可能含矿热液偏于内生成因,并受火山口控制是一致的。

宋学信等^[4]测定了折腰山、小铁山块状矿石的稀土元素含量,并分析含矿火山岩系和矿石的成因关系。图 10 是白银厂地区细碧-角斑岩与块状矿石的标准化稀土配分模式图。

白银厂地区各种矿石稀土配分模式与该处细碧-角斑岩类相类似,显示出成岩与成矿物质来源相一致,然而各种矿石与不同矿床间却有着一定差别。小铁山黄铁矿石和锌-铅-铜矿石的稀土配分模式相较而言更加类似,但与折腰山两种块状矿石存在区别;小铁山黄铁矿石可见显著铕正异常,而折腰山块状 Zn-Pb-Cu 矿石却显铕负异常。折腰山两种矿石稀土配分模式也存在差异,含铜黄铁矿石 HREE 呈现富集,对比而言形成时期较晚的黄铜矿石 LREE 呈现富集,表明在演化进程期间的成矿流体 LREE、HREE 出现过分馏。

2.2.2 矿床同位素地球化学研究

(1) 硫、铅同位素

宋志高^[20]发现,白银厂地区不同类型矿石黄铁矿的硫同位素在构成和变化上有所差异;这种不同变化当与黄铁矿的不同世代形成有关。白银厂矿区硫同位素的组成与变化,基本上可与日本的卡鲁克(Kuroko)型矿床相对比^[33]。小铁山矿床方铅矿的铅同位素测定显示,属正常的、单阶段演化类型;在 $Pb^{207}/Pb^{204}-Pb^{206}/Pb^{204}$ 、 $Pb^{208}/Pb^{204}-Pb^{206}/Pb^{204}$

此外,蒋心明等^[2]分析了该区三个矿床矿石的

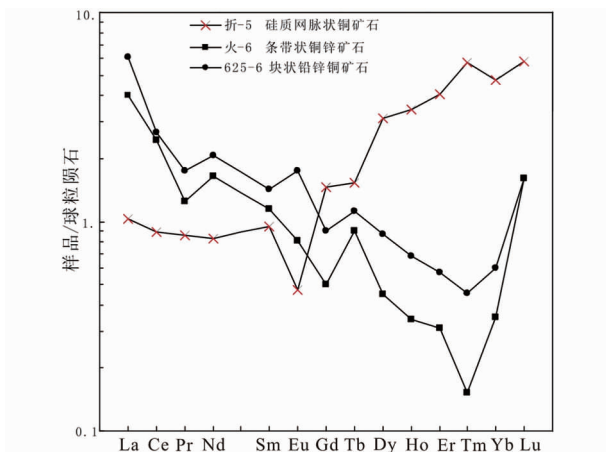


图9 矿石球粒陨石标准化稀土配分模式图

Fig. 9 Normalized chondrite REE patterns of ores

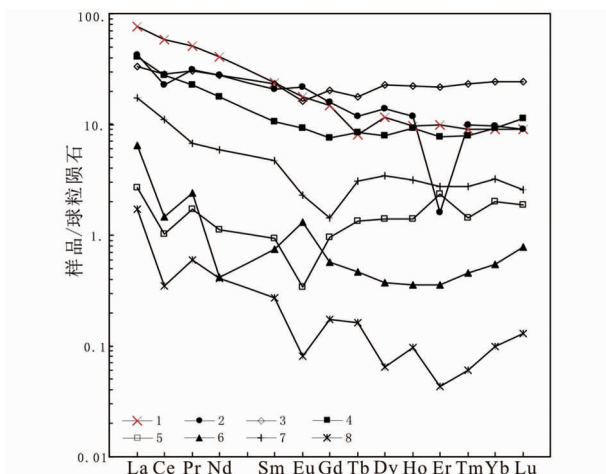


图10 白银厂矿田岩石、矿石球粒陨石标准化稀土配分模式图

Fig. 10 Normalized chondrite REE patterns of rocks and ores from Baiyinchang ore field

1. 富钾细碧岩; 2. 细碧岩; 3. 角斑岩; 4. 石英角斑质凝灰岩;
5. 折腰山块状含铜黄铁矿石; 6. 小铁山块状黄铁矿石;
7. 折腰山块状黄铜矿石; 8. 小铁山块状 Zn-Pb-Cu 矿石

对应坐标图(图11)中,该矿床的Pb同位素组成上,与单阶段演化增长曲线很接近,与世界上大多数块状硫化物矿床相一致。硫、铅同位素数据表明,成矿物质来自下部地壳或者地幔;结合铅同位素年龄值与含火山岩系时代间关系,成矿作用与主要火山作用同期,属整个火山作用过程的一部分。

在Boe BR和Zatman RE铅同位素构造环境图(图12)中,矿石Pb同位素大多数位于靠近下地壳Pb演化曲线位置,少数位于地幔曲线同上地壳曲线中间,显示成矿物质主要通过岩浆活动源于下部地壳,小部分则来自上地壳。岩石Pb大多数位

于地幔Pb同位素演化曲线同上地壳Pb同位素演化曲线中间,说明火山岩中Pb来源复杂,矿石中Pb与火山岩中Pb来源不一致性表明成矿物质不是从火山岩中淋滤而来^[24]。

李双文等^[25]综合研究了边千韬^[34]、郭介人等^[35]以及岳东生^[36]文章中的白银厂矿区矿石硫同位素资料以及矿物对(黄铁矿和闪锌矿)计算结果后认为,白银厂矿区含矿火山岩的 $\delta(^{34}\text{S}_{\text{ss}})$ 值约为 $+3.68 \times 10^{-3}$,稍高于幔源硫的 $\delta(^{34}\text{S})$ 值^[37]和火成岩中原生硫化物的 $\delta(^{34}\text{S})$ 值,小于大陆壳 $\delta(^{34}\text{S})$ 值^[38],而远小于海水 $\delta(^{34}\text{S})$ 值^[39]。其特点显示白银厂矿区的硫主要来自幔源岩浆,而且发生过陆壳硫的混染作用。矿体内硫化物的硫同位素 $\delta(^{34}\text{S})$ 值略大于围岩 $\delta(^{34}\text{S})$ 值;由平均值可以看出,以矿体为中心向外, $\delta(^{34}\text{S})$ 值总体趋势是降低的;而在矿体与非含矿流纹岩之间的剪切带流纹岩中 $\delta(^{34}\text{S})$ 表现为低谷,形成“凹”形分配模式,说明在后期韧性剪切作用下产生的流体萃取含矿围岩(剪切带流纹岩)中的硫对形成硫化物矿床的贡献明显。

李双文等^[25]在王兴安^[24]研究基础上,对白银厂铜矿矿石铅同位素、围岩铅同位素组成进行了分析,从图13中的矿石和含矿流纹岩中铅同位素特征不难看出,矿石铅和含矿围岩铅有相同的初始来源:地幔和上地壳。结合含矿流纹岩为含铁镁质下地壳发生部分熔融、岩浆作用的产物推测,早期形成这种铁镁质下地壳的岩浆源区应是亏损的地幔;后期俯冲作用下,镁铁质下地壳岩浆底侵作用部分熔融,产生酸性岩浆,形成该区含矿流纹岩,并于岩浆演化期间经历过上地壳混染。

(2) 氢、氧同位素

矿石脉石英中的流体包裹体 $\delta(\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}) = -71 \times 10^{-3} \sim -95 \times 10^{-3}$, $\delta(^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}) = -0.09 \times 10^{-3} \sim +8.70 \times 10^{-3}$ 。将所有氢、氧同位素数据投点于不同环境水的 $\delta\text{D}-\delta(^{18}\text{O})$ 图解(图14)中,多数落在建造水(代表和其他来源水的混合或与围岩间的同位素发生了交换作用^[39])区域及附近,反映大气降水和围岩同位素之间发生交换作用或大气降水和变质水发生混合作用;少数接近岩浆水区域,说明另一部分水体来源于下地壳部分熔融的岩浆热液^[25]。

2.2.3 成矿年代学研究

1950年以前,通过大区域比较把白银厂的含矿火山岩系时代定成中泥盆世^[1]或者泥盆纪。此后,随着白银矿田勘探采矿活跃和研究程度进一步加深,以及大量同位素测年的开展,令矿床形成时代的

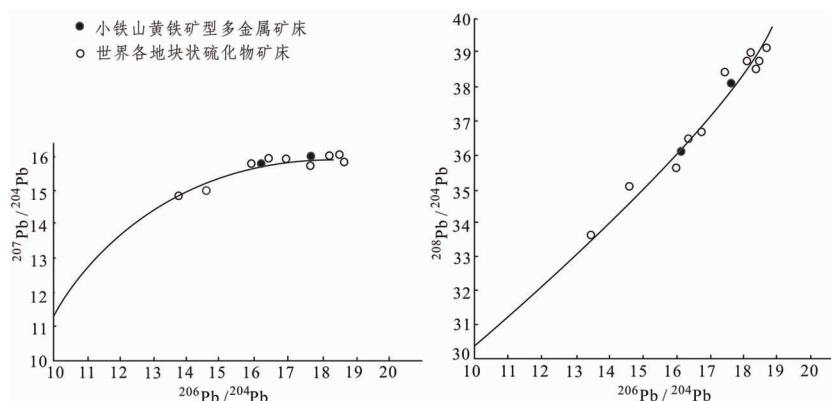


图 11 小铁山矿床铅同位素组成坐标图

Fig. 11 Composition diagram of lead isotope in Xiaotieshan deposit

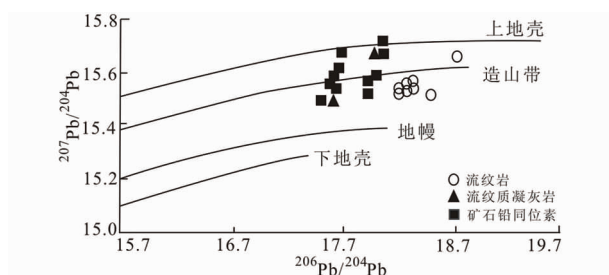


图 12 铅同位素构造演化图

Fig. 12 Tectonic evolution diagram of lead isotopes

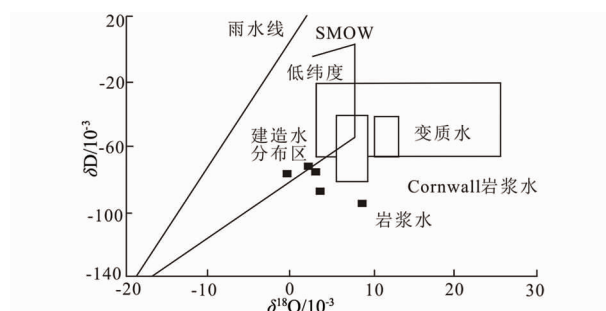
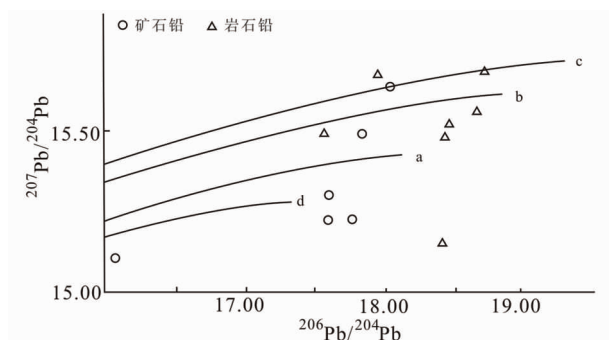
图 14 不同环境水的 $\delta D-\delta(^{18}O)$ 投影图解Fig. 14 $\delta D-\delta(^{18}O)$ Projection of water in different environments

图 13 白银厂铜矿铅同位素组成图

Fig. 13 Composition diagram of lead isotope of in Baiyinchang Cu deposit

a. 上地幔铅演化曲线; b. 造山带铅演化曲线;
c. 上地壳铅演化曲线; d. 下地壳铅演化曲线

研究结果取得很大突破。

尹观等^[26]运用锆石 U-Pb 方法对白银地区进行了同位素定年,同时用全岩 Rb-Sr 等时线方法为辅助比较研究。火焰山(HYS-1)、小铁山(XTS-2b)样品都采于矿体边部石英角斑凝灰岩($M\pi_3$)中(有学者认为该套岩层和矿化之间联系紧密),它们锆石

U-Pb 年龄分别是 440 Ma 和 446 Ma(图 15、图 16),属于加里东时期。在 1990 年时,加拿大地调所专家就于该区折腰山矿坑同矿床形成原因密切的石英角斑凝灰岩($M\pi_3$)内取样,测得锆石 U-Pb 年龄是 446 Ma(甘肃地矿局地矿处提供),两者的测试结果相同。小铁山次火山岩样品(XTS-2a)的锆石群平均年龄为 353.5 Ma。在黑石山见黑云母斜长花岗岩与围岩(即火山沉积岩)为侵入接触关系,在岩体边部发现捕虏体,表明岩体形成时代显然比围岩要晚;在岩体东部取样(HSS-7),其锆石平均年龄是 399.6 Ma,全岩 Rb-Sr 等时线年龄是 388.5 Ma,两种定年方法测试的结果相近,从而确定黑石山岩体形成时代——泥盆纪。

何世平等^[28]对白银厂矿床含矿围岩,即变石英角斑岩采用多个样品精细 U-Pb 同位素定年,数据显示,白银厂矿床的含矿围岩里变石英角斑岩以及糜棱岩化石英角斑岩的形成年龄分别为 $467.3 \text{ Ma} \pm 2.9 \text{ Ma}$ 和 $467.1 \text{ Ma} \pm 2.2 \text{ Ma}$,属中奥陶世时期;

反映变质年龄一组十分相近的数据是 $414.2 \text{ Ma} \pm 2.7 \text{ Ma}$ 及 $412.6 \text{ Ma} \pm 2.1 \text{ Ma}$, 属于早泥盆世早期。糜棱岩化石英角斑岩, 取样于韧性剪切带内, 反映出 $435.9 \text{ Ma} \pm 3.6 \text{ Ma}$ 构造事件年龄, 但韧性剪切带之外的变石英角斑岩则没反映该年龄数值。结合前人研究成果, 并考虑祁连地块和阿拉善地块之间发生斜向碰撞导致大规模的挤压转换, 使北祁连南部出现大规模的右行韧性剪切构造运动。故 $435.9 \text{ Ma} \pm 3.6 \text{ Ma}$ 应该是白银厂矿区韧性剪切构造作用产生的时间, 属于早志留世晚期。

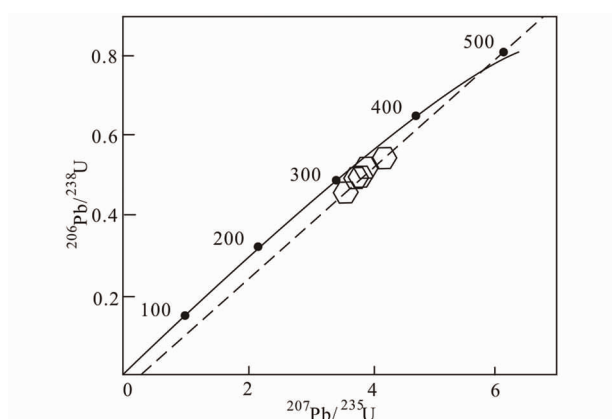


图 15 火焰山(HYS-1)含矿石英角斑凝灰岩
锆石 U-Pb 一致曲线图

Fig. 15 The zircon U-Pb concordant curve for sample HYS-1 of Ore bearing quartz-keratophyre-tuff from Huoyanshan area

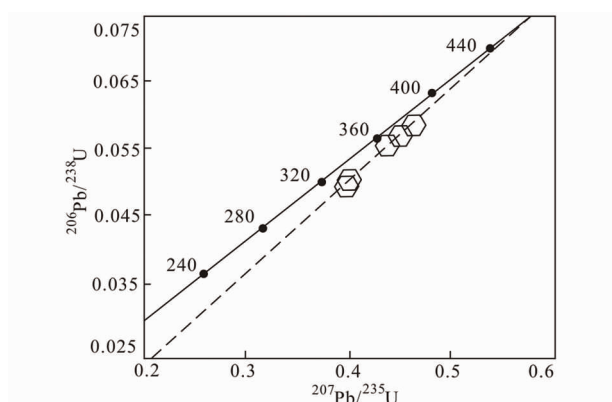


图 16 小铁山(XTS-2b)含矿石英角斑凝灰岩
锆石 U-Pb 一致曲线图

Fig. 16 The zircon U-Pb concordant curve for sample XT-S2b of Ore-bearing quartz-keratophyre-tuff from Xiaotieshan area

3 存在的问题及研究展望

在对白银厂铜多金属矿田研究取得一定进展的同时, 也存在一些问题需要深入探讨:

(1) 白银厂矿田成矿元素来源问题。尽管大多数学者认为白银厂矿区成矿元素源于酸性火山岩^[13,22,35-36], 但也有学者认为白银厂矿床成矿金属元素可能来自于岩浆流体与循环热液流体混合之后, Cu、Zn、Fe 等金属元素大部分来自岩浆流体, 而 Pb 则是循环热液流体则经陆壳物质与大洋沉积物里淋滤得到^[23]。

(2) 矿床产状是否变动存在争议。有人认为白银厂矿田各矿床的矿体均受不同的火山机构控制, 而且火山机构未受后期构造破坏, 保持直立^[5,7,40-41]。有人认为, 折腰山筒状矿体为经过地壳运动导致早期层状矿体发生改造变形后的形态^[6]。还有人认为, 白银厂矿田产于一个复式背斜构造内, 折腰山矿床所在位置为背斜北翼, 已发生倒转^[3,8,20,42]。

(3) 各矿床成矿元素分带机理依旧有很大争议。白银厂铜多金属矿田成矿元素大多都有分带现象出现, 呈现水平与垂直两种类型。很多学者对该区成矿元素进行研究, 都未能很好地解释各矿床成矿元素水平分带和垂分带的原因。

未来在进行矿床地球化学工作时, 需注意以下方面内容:

(1) 金属元素富集机理研究: 可以进一步探索成矿流体来源、大陆构造运动、基底成矿元素构成特点、特殊态成矿物质及基础地质等诸多方面。

(2) 流体成矿系统与成矿作用: 研究成矿流体运移过程中产生的物理、化学以及时空等变化情况及地球化学作用, 查清流体成矿系统的结构、类型以及演变规律。加强对深部流体成矿及地球内部流体成矿动力学的探索研究工作。

(3) 成矿的地球化学动力学及热力学。包括矿区形成的地球化学动力学背景、大陆深部结构、成矿体系时空演化特征、成矿系统动力学、成矿谱系及成矿多样性、流体运移对矿床规模以及品位的影响等方面内容。

参考文献:

- [1] 宋叔和. 对祁连山黄铁矿型铜矿地质的一些补充意见[J]. 地质学报, 1957, 37(1): 57-79.
- [2] 蒋心明, 丛桂新. 白银厂中部成矿带稀土元素地球化学特征的研究[J]. 地质找矿论丛, 1986, 1(3): 68-79.
- [3] 郭介人. 白银厂矿田黄铁矿型铜-多金属矿床的地质特征及成矿条件分析[J]. 西北地质学, 1992, 3(2): 83-96.
- [4] 宋学信, 张景凯, 徐庆生, 等. 白银厂铜多金属矿田微量元素和稀土元素地球化学研究[J]. 矿床地质, 1993, 2(4): 308-317.
- [5] 任有祥, 彭礼贵, 李智佩, 等. 白银矿田折腰山大型古火山及其在成矿作用中的地位[J]. 西北地质科学, 1995, 16(1): 39-49.
- [6] 劳雄, 张肇新. 白银厂铜-多金属矿床折腰山筒状矿体的形成[J]. 地球学报, 1996, 17(1): 78-84.
- [7] 彭礼贵, 李向民, 任有祥, 等. 甘肃白银厂折腰山矿床成矿规律及深部找矿研究[J]. 西北地质科学, 1998, 19(1): 1-51.
- [8] 张国旭, 赵磊, 何彦彬, 等. 白银厂折腰山—火焰山矿床控矿构造条件及成矿规律[J]. 甘肃地质, 2012, 21(1): 27-35.
- [9] 杜泽忠, 叶天竺, 庞振山, 等. 甘肃白银厂铜多金属矿田折腰山矿床含铁硅质岩地球化学特征及其找矿意义[J]. 地质通报, 2014, 33(6): 924-932.
- [10] 应立娟, 陈毓川, 王登红, 等. 中国铜矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2216-2226.
- [11] 张长青, 吴越, 王登红, 等. 中国铅锌矿床成矿规律概要[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2252-2268.
- [12] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 祁连-秦岭山系海相火山岩[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991: 3-280.
- [13] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山海相火山岩岩石成因[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 3-144.
- [14] 夏林圻, 夏祖春, 任有祥, 等. 祁连山及邻区火山作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1-150.
- [15] 郭原生, 王金荣, 谢宪丽, 等. 白银厂矿田早中寒武世火山岩地球化学及成因分析[J]. 岩石学报, 2000, 16(3): 337-344.
- [16] 王金荣, 郭原生, 翟新伟, 等. 甘肃白银厂矿田早—中寒武世火山岩形成的构造环境[J]. 高校地质学报, 2003, 9(1): 89-98.
- [17] 傅鹏, 陈守余, 赵江南, 等. 甘肃白银厂铜多金属矿田岩石地球化学特征及地质意义[J]. 地质与勘探, 2016, 52(1): 14-24.
- [18] 张洪培, 刘继顺, 方维萱, 等. 甘肃白银折腰山型和石青铜型块状硫化物矿床综合信息找矿模型研究[J]. 矿床地质, 2003, 22(4): 408-414.
- [19] 毛景文, 张作衡, 裴荣富. 中国矿床模型概论[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 191-194.
- [20] 宋志高. 白银厂块状硫化物矿床的形成环境及其成因意义[J]. 地质论评, 1982, 28(4): 335-343.
- [21] 黄玉春. 白银厂块状硫化物矿床成因及其研究进展[J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所刊, 1991(31): 43-54.
- [22] 蒋敬业, 李方林, 王苹, 等. 北祁连山火山成因块状硫化物矿床的金属来源研究[J]. 地质科技情报, 1999, 18(2): 57-61.
- [23] 王焰, 张旗, 许荣华, 等. 北祁连白银矿田火山成因块状硫化物矿床成矿金属来源讨论[J]. 地质科技情报, 2001, 20(4): 46-50.
- [24] 王兴安. 甘肃白银厂铜矿田硫铅同位素地球化学研究[J]. 西北地质, 1999, 32(1): 18-23.
- [25] 李双文, 王金荣, 刘洛夫, 等. 白银厂矿田同位素特征及其流体成矿作用研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2004, 40(6): 92-95.
- [26] 尹观, 张树发, 范良明, 等. 甘肃白银金属硫化物矿床及其矿区主要地质事件的同位素地质年代学研究[J]. 地质地球化学, 1998(1): 6-14.
- [27] 闫秋实, 尹观. 甘肃白银厂矿田锆石红外光谱特征和地质年龄估测[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(1): 52-56.
- [28] 何世平, 王洪亮, 陈隽璐, 等. 甘肃白银矿田变酸性火山岩锆石 LA-ICP-MS 测年——白银式状硫化物矿床形成时代新证据[J]. 矿床地质, 2006, 25(4): 401-411.
- [29] 杜泽忠. 甘肃白银厂铜多金属矿田成矿作用研究[M]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014: 49-89.
- [30] 王瑞廷, 毛景文, 王东生, 等. 金属矿床地球化学的研究前沿[C]//中国有色金属学会第五届学术年会论文集, 2003: 63-65.
- [31] Shimazaki Y. Ore minerals of the kuroko-type deposits[C]// Ishihara ed. Geology of Kuroko deposits. Tokyo: The Society of Mining Geologists of Japan, 1974: 311-322.
- [32] Hannington M D, Hcrzig P M, Scott S D. Auriferous hydrothermal precipitates on the modern seafloor [C]// Foster R P ed. Gold metallogeny and exploration, 1990: 249-282.
- [33] Horikoshi E and Shikazono N. Sub-type and their characteristics of kuroko-type of deposits [J]. Mining Geology, 1978, 28(2): 267.
- [34] 边千韬. 白银厂矿田地质构造及成矿模式[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
- [35] 郭介人, 任秉琛, 黄玉春, 等. 西北海相火山岩地区块状硫化物矿床[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1994.
- [36] 岳东生. 白银厂硫化物矿床形成的物理化学条件及矿床成因[J]. 地质与勘探, 1991, 27(3): 1-8.
- [37] Chaussidon M, Lorand J P. Sulphur isotope composition of orogenic spinel lherzolite massifs from Ariege (Pyrenees N E, France): An ion microprobe study [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1990, 54(10): 2835-2846.
- [38] Chaussidon M, Albareda F, Sheppard S M F. Sulphur isotope variation in the mantle from microprobe analysis of micro-sulphide inclusion [J]. Earth Planet Sci Lett, 1989, 92: 144-156.
- [39] Hugh R R. 岩石地球化学. 杨学明, 杨晓勇, 陈双喜 译[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2000.
- [40] 赵生贵. 白银火山穹隆构造特征及隐伏矿预测[J]. 甘肃地质学报, 1998, 7(2): 63-71.
- [41] 李向民, 彭礼贵, 任有祥. 白银厂式块状硫化物矿床找矿突破的反思[J]. 西北地质, 2003, 36(2): 77-82.
- [42] 高兆奎, 陈守宇, 韩要权, 等. 甘肃省白银矿田火山岩型铜多金属矿床找矿方向探讨[J]. 甘肃地质, 2009, 18(3): 1-5.

Progress of geochemical research in Baiyinchang Cu-polymetallic ore field

GUO Kaifeng¹, CHEN Shouyu^{1,2}

(1. *Faculty of Earth resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;*

2. *State Key Laboratory of Geology Processes and Mineral Resources,
China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*)

Abstract: The Baiyinchang Cu-polymetallic ore field is a large copper ore area discovered in the West China. It has been successfully explored in the early 50s of last century. With development of modern test and analysis technology, remarkable progress has been made in the study of the geochemistry of ore deposits there. This paper discusses mainly research progress of the aspects including trace element geochemistry, isotope geochemistry of ore deposits, metallogenic geochronology etc.

Key Words: Cu-polymetallic deposits; trace element geochemistry; isotope geochemistry of ore deposits; metallogenic geochronology; Baiyinchang; Gansu province