

河南银洞沟造山型银矿床碳硫铅同位素地球化学*

张静¹ 杨艳^{1,2} 胡海珠³ 王志光³ 李国平³ 李忠烈³

ZHANG Jing¹, YANG Yan^{1,2}, HU HaiZhu³, WANG ZhiGuang³, LI GuoPing³ and LI ZhongLie³

1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

2. 中国科学院广州地球化学研究所 成矿动力学重点实验室, 广州 510640

3. 河南省有色金属地质勘查总院, 郑州 450052

1. State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. KLMD, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

3. Henan Institute of Nonferrous Metal Exploration, Zhengzhou, 450052, China

2009-07-10 收稿, 2009-09-22 改回.

Zhang J, Yang Y, Hu HZ, Wang ZG, Li GP and Li ZL. 2009. C-S-Pb isotope geochemistry of the Yindonggou orogenic-type silver deposit in Henan province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11):2833–2842

Abstract The Yindonggou silver (poly-metals) deposit, a large fault-controlled lode deposit in Neixiang County, Henan province, occurs in the Erlangping Terrane, northern East Qinling Orogen. The host-rocks are the lava-clastic assemblage of Erlangping Group. The occurrences of ore bodies were controlled by the subsidiary fault of Zhu-Xia fault and located in the faulted structure belt. All of the characteristics of the ore texture, mineral assemblage, the type and zonation of wall-rock alternation are similar to those of the orogenic-type gold deposits as summarized by previous studies, which suggests it to be a typical orogenic-type silver deposit. The $\delta^{34}\text{S}$ values of the ore minerals are, +4.7 ~ +8.1‰, higher than those of organic matter and magmatic rock. The $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ values of its ore-fluids vary from -0.2 to +0.9‰, which is consistent with marine carbonate and higher than all of other geologic bodies. The ore minerals have a uniform lead isotope compositions, with $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.2026 \sim 18.4462$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.5835 \sim 15.7739$, and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.5478 \sim 39.0890$, indicating the richness in U-radioactive Pb and little lack of Th-radioactive Pb. The C-S-Pb isotope geochemistry suggests that the sedimentary formation of carbonate-clastic rock with sedimentary sulfate interbed was the most ideal source that provided the ore-forming fluid and materials to the Yindonggou deposit. This paper deduced that the metallogenic materials and fluids were mainly sourced from the Erlangping and Qinling groups, especially the Yanlinggou Formation of Qinling Group that consists of carbonate strata. During the collisional orogenesis process of the North and South China Cratons in Mesozoic, the Qinling Group northward underthrust and located beneath the Erlangping terrane along the Zhu-Xia fault, and provided lots of ore-forming materials and fluid to the Yindonggou deposit via metamorphic dehydration. In the north of Zhu-Xia fault, there were the Yindonggou Ag deposit, Xuyaogou Au deposit, Songduo buried granite pluton, Luanchuan porphyry Mo ore belt in turn, and such zonation is totally consistent with the Tectonic Model of Collisional Orogeny, Metallogeny and Fluid Flow (CMF model), which proves not only the CMF model is scientific and applicative but also the isotope geochemistry is effective to trace the source of metallogenic material and fluid. Additionally the discovery and study result of the Yindonggou Ag deposit approve the forecast is right that there was the Sangping – Miping – Xuyaogou Cu-Au-Pb-Zn-Ag ore belt in the north of Zhu-Xia fault, thus this belt should be a key area in silver poly-metals exploration.

Key words Yindonggou Ag-dominated poly-metallic deposit; Orogenic-type Ag deposit; Isotope geochemistry; CMF model; Qinling Orogen

摘要 河南内乡县银洞沟大型脉状银多金属矿床产于北秦岭造山带朱夏断裂北侧的二郎坪地体内,含矿围岩是二郎坪群火山岩-碎屑岩建造,矿体定位于断裂构造带内,产状受断裂构造控制,矿石结构、矿物组合、围岩蚀变类型和分带等地质特

* 本研究得到了国家重点基础研究发展规划项目(2006CB403506 课题),国家自然科学基金项目(40502012,40425006)、高等学校学科创新引智计划(B07011)以及地质过程与矿产资源国家重点实验室开放基金(GPMR200835)的资助。

第一作者简介:张静,女,1977年生,博士,副教授,主要从事矿床地球化学研究, E-mail: zhangjing@cugb.edu.cn

征均与典型造山型金矿一致,应属造山型银矿。矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 介于 $+4.7 \sim +8.1\%$, 高于有机物和岩浆岩。流体包裹体中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 $-0.2 \sim +0.9\%$, 与海相碳酸盐一致, 高于其它所有地质体。矿石硫化物 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.2026 \sim 18.4462$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.5835 \sim 15.7739$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.5478 \sim 39.0890$, 显示铀铅富集, 钍铅微弱亏损。这些同位素地球化学特征均指示夹杂沉积硫酸盐的碳酸盐-碎屑岩沉积建造是最为理想的物源, 对比研究东秦岭北坡相关地质单元, 认为成矿物质和流体主要来自二郎坪群和秦岭群, 尤其是雁岭沟组含碳酸盐岩地层对于成矿流体和物质的贡献不可替代。中生代华北与华南板块碰撞造山过程中, 秦岭群沿朱夏断裂向北陆内俯冲到二郎坪地体之下, 并通过俯冲变质脱水而为银洞沟矿床的形成提供了大量成矿物质和流体。朱夏断裂北侧依次出现银洞沟银矿、许瑶沟金矿、松坪隐伏花岗岩基、栗川斑岩钼矿带, 构造-成岩-成矿空间格局与 CMF 模式(碰撞造山成岩成矿和流体作用模式)完全一致, 证明了 CMF 模式的科学性和普适性和同位素示踪成矿物质和流体来源的有效性。银洞沟矿床的发现和研究成果证实了前人预测的朱夏断裂北侧“桑坪-米坪-许瑶沟铜金铅锌银等多金属矿化带”的客观存在, 该带应作为银金多金属矿床勘查的重点区带。

关键词 银洞沟银多金属矿床; 造山型银矿; 同位素地球化学; CMF 模式; 秦岭造山带

中图法分类号 P597; P618.52

1 引言

20 世纪最后 10 年, 地质学家发现世界范围的大量脉状金矿床, 尤其是世界级的金矿省, 主要形成于造山作用的挤压向伸展转变期(Kerrich and Cassidy, 1994; Kerrich *et al.*, 2000; Goldfarb *et al.*, 2001; 陈衍景和富士谷, 1992; 陈衍景等, 2007), 因而提出了造山型金矿的概念(Groves *et al.*, 1998), 旨在强化对造山作用与成矿作用之关系的研究和认识。目前, 俯冲型造山过程中的造山型金矿成矿模式(Goldfarb *et al.*, 1989; Kerrich, 1999)和碰撞型造山过程中的造山型金矿成矿模式(陈衍景和富士谷, 1992; Chen, 1998; Chen *et al.*, 2004)被相继提出, 并且得到了广泛的关注和应用。

按照造山型金矿成矿模式, 无论是洋壳俯冲体制还是大陆碰撞体制, 在金元素活化-迁移-成矿的同时, 银、铅-锌、汞-铋等元素也同样可以活化-迁移-成矿, 自然可以形成造山型的银矿、铅锌矿、铜矿、钼矿乃至铋矿等矿床(陈衍景, 2006), 但迄今国际上缺乏此类研究报道, 只有我国学者报道了此类矿床的存在(祁进平等, 2007, 2009; 李文博等, 2007, 2008; 邓小华等, 2008; 倪智勇等, 2008, 2009; 李诺等, 2007, 2008)。然而, 造山型矿床普遍性与否? 其回答不仅可以检验造山型金矿成矿构造模式的科学性, 而且可以拓宽造山带地区(尤其是造山型金矿集中区)银、铅锌、铜、钼、汞-铋等矿床的勘查、预测思路和视野, 因此非常值得探索。

同位素地球化学是示踪成矿流体和物质来源, 确定矿床成因的重要依据(Faure, 1986)。然而, 一些学者(如 Hagemann and Cassidy, 2000; Kerrich *et al.*, 2000)提出, 由于流体/岩石相互作用的复杂性, 导致了矿床同位素组成的复杂多变, 矿床同位素地球化学特征不能示踪成矿流体和物质的来源, 尤其不能区分变质流体和岩浆流体。与此同时, 另一些学者不但认为同位素是成矿流体和物质来源的有效指示剂, 而且通过对比成矿流体或矿石与矿区地质体同位

素组成的差异和相似性, 明确辨别了矿床的成因, 甚至为一些成矿模式或观点寻求到排他性的依据(如 Chen *et al.*, 2000, 2001, 2005a, b, 2006, 2008, 2009; Pettke *et al.*, 1999, 2000; Li *et al.*, 2007; 陈衍景等, 2003; 倪智勇等, 2009; 祁进平等, 2006, 2009; 李文博等, 2006; 张莉等, 2009)。那么, 同位素地球化学理论和方法对于复杂流体成矿系统, 究竟有效, 还是无能为力?

带着上述 2 个重要科学问题, 本文以北秦岭二郎坪地体中的银洞沟大型银多金属矿床为研究对象, 介绍铅、碳、硫同位素地球化学研究结果, 以及据其获得的关于成矿物质来源的认识。

2 地质背景

银洞沟银-金多金属矿区位于秦岭构造带二郎坪地体东段(图 1)。二郎坪地体近东西向展布, 南以朱阳关-夏馆断裂(即朱夏断裂)为界, 以大面积发育二郎坪群中低级变质岩系为特征, 其南发育中高级变质的秦岭群; 北以瓦穴子断裂为界, 其北发育宽坪群蛇绿岩套和陶湾群碳酸盐-碎屑岩系。

二郎坪群的形成时代尚有争议, 但已有同位素年龄分布在 1050~400Ma 之间, 由于遭受了较强的加里东期变形和变质, 并被加里东期晚期和海西期花岗岩类侵入, 因此被确定为加里东期构造层(胡受奚等, 1988; 陈衍景和富士谷, 1992)。二郎坪群主要由中低级变质的角闪岩、斜长角闪岩、绿泥片岩、黑云片岩、大理岩等组成, 局部可见含十字石、蓝晶石、红柱石和矽线石或石墨的片岩。原岩为海相火山岩-沉积岩系, 其中, 火山岩以中基性-酸性火山岩建造为主, 以含枕状构造的细碧角斑岩为特征, 被习称为二郎坪蛇绿岩套; 沉积岩以碎屑岩为主, 并以富铝和富碳质沉积物为特征, 被习称为小寨复理石建造。原岩发育在晚元古代-早古生代弧后盆地环境, 也称二郎坪弧后盆地(胡受奚等, 1988; 陈衍景和富士谷, 1992; 张本仁等, 2000)。

二郎坪弧后盆地闭合于早古生代末期的加里东运动中,

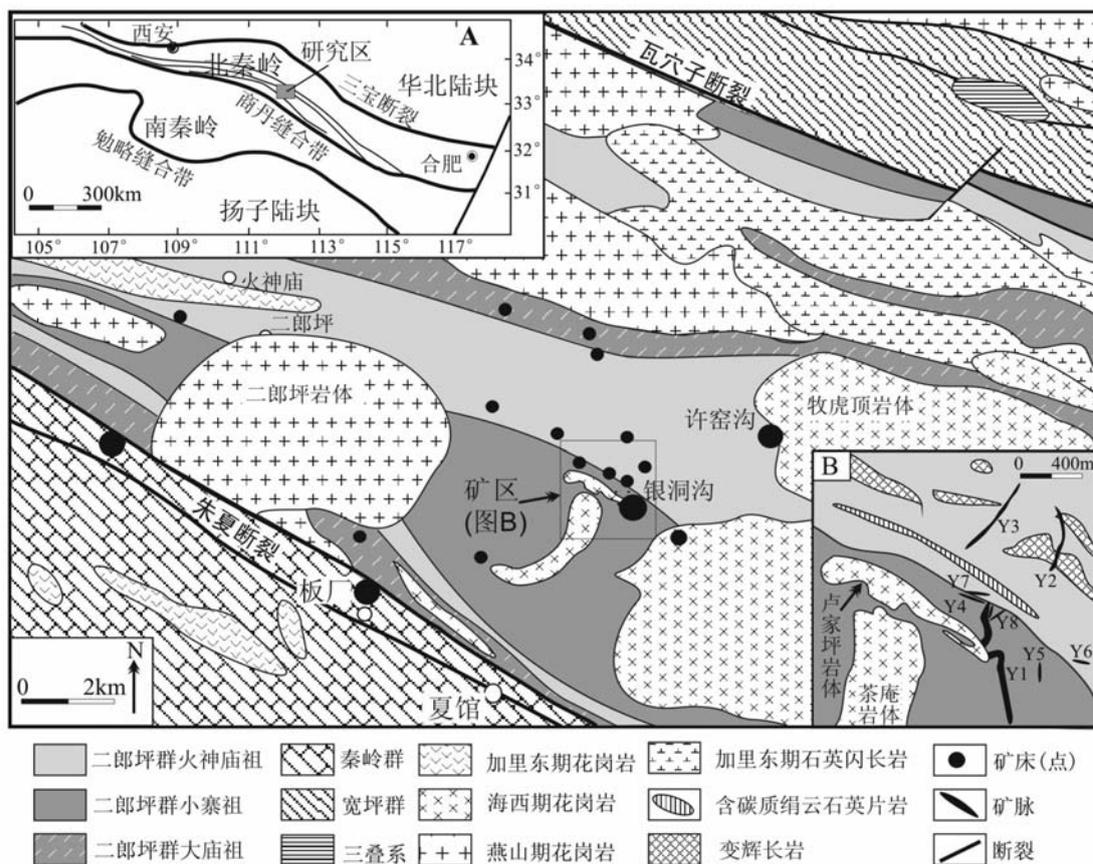


图1 银洞沟银矿区域地质

图A-秦岭造山带构造框架(据 Zhang *et al.*, 1996, 简化); 图B-矿区主要矿脉分布(据河南省有色地质勘查院, 2001^①, 修改)

Fig.1 Regional geology of the Yindonggou deposit

Fig.1A showing the tectonic framework of the Qinling Orogen (simplified after Zhang *et al.*, 1996); Fig.1B showing the distribution of main ore-bodies of the Yindonggou deposit (modified after Henan Geological Survey for Non-ferrous Metals, 2001^①)

具体表现为中秦岭岛弧地体与华北古陆块的碰撞(胡受奚等, 1988; 陈衍景等, 2003), 二郎坪群普遍遭受变形和变质, 并被加里东晚期花岗岩浆侵入(如五朵山岩基)。其后, 由于沿勉略缝合带的洋壳向北俯冲, 二郎坪地体发育少量晚古生代的花岗岩类。中生代华北与华南古板块的碰撞(印支-燕山运动), 二郎坪地体再度变形和变质, 被大量花岗质岩浆(如银洞沟矿区北侧的松垛隐伏岩体)侵入破坏, 并且伴随了强烈的金、银、铅、锌、汞、锑等元素矿化(陈衍景和富士谷, 1992), 银洞沟银多金属矿床就是此间形成的矿例之一。在新生代的喜山运动过程中, 虽然二郎坪地体受到欧亚大陆板块与印度次大陆、太平洋板块相互作用的影响(胡受奚等, 1988), 使得断裂构造体系复杂化, 但并没有发生明显的变质、变形和岩浆作用, 以及相关的成矿作用。

3 矿床地质

银洞沟银多金属矿床产于朱夏断裂北侧二郎坪群的小寨复理石建造中, 主要围岩是绢云母石英片岩、黑云母石英片岩, 次为黑云母花岗岩。矿区北侧存在松垛隐伏花岗岩体, 矿体受断裂构造控制, 产状与断裂构造一致, 主要呈薄脉状, 规模较大且矿化较好者有 8 条(图 1B)。其中, Y1、Y2、Y3 矿脉规模较大, 地表控制长度均大于 1200m(河南有色地质勘查院, 2001), 矿石品位高, 构成工业矿体。

Y1 号脉的矿体产于蚀变构造破碎带中, 呈似层状, 平均厚度 1.18m, 产状 $270 \sim 310^\circ \angle 30^\circ$, 矿体向深部有变陡趋势。在水平断面上, 矿体以含银多金属硫化物石英脉为中心, 石英脉宽度为 0.2 ~ 1.2m, 向两侧变为含银多金属硫化物的黄铁绢云英岩化蚀变岩带, 蚀变带发育宽度为 10 ~ 30m。在垂向上, 石英脉在浅部发育较好, 向深部逐渐变窄直至尖灭, 过渡为蚀变岩破碎带。

①河南省有色地质勘查院. 2001. 河南内乡-南召地区银铜铅矿资源评价项目设计书. 郑州: 未刊资料, 1-43

据河南省有色地质勘查院(2001)^① 勘查,银洞沟矿床为一个银多金属矿床,其中银储量达3000吨。主要矿石类型为石英脉型和蚀变岩型,主要矿石构造有块状、浸染状、网状,其银品位分别为2420.36~6477.21g/t,528.63~1242.74g/t,63.22~314.25g/t。金品位变化较大,平均为4.65~10.47g/t;铅品位平均为0.58~3.63%;锌品位平均为0.76~4.93%。

常见矿石矿物主要有:银金矿、辉银矿、自然金、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿;脉石矿物主要有:石英、长石、绢云母、绿泥石、方解石等。围岩蚀变主要为硅化和黄铁绢英岩化。围岩蚀变侧向分带清楚,中心为石英脉或交代石英岩,向外依次为高硫化物绢英岩化,低硫化物绢英岩化,绢云母-绿泥石化,碳酸盐化,未蚀变或弱蚀变围岩。蚀变岩型矿石与蚀变围岩的界线不清楚,依靠化学分析确定边界。在垂向上,近地表或地表常有明显的碳酸盐化,矿石矿物以黄铁矿为主,方铅矿次之,闪锌矿较少;矿体中深部的硫化物以方铅矿、闪锌矿为主,碳酸盐化弱。薄片显微镜研究显示,石英脉中的石英矿物多遭受应力变形,边缘细粒化现象常见,且常常伴随细小鳞片状绢云母集合体发育;浸染于石英脉中的微细网脉状硫化物和碳酸盐网脉则没有显示应力变形现象,碳酸盐细脉常具有梳状构造(详见张静等,2004);以上表明,流体交代和成矿作用的多阶段特征,早期伴随于挤压应力作用,晚期伴随于伸展引张过程;流体是贯入含矿构造并造成交代蚀变矿化的,即流体并非原位生成,而是外来的。

上述银洞沟银多金属矿床的地质特征与世界造山型金矿(Groves *et al.*, 1998; Kerrich *et al.*, 2000; Hagemann and Cassidy, 2000; Fan *et al.*, 2003; 陈衍景等, 2007)和河南铁炉坪造山型银矿(Chen *et al.*, 2005)的特征一致,表明银洞沟矿床是造山型银矿的又一典型实例(详见张静等,2004)。

4 碳硫铅同位素与成矿物质来源

4.1 样品与测试

研究样品主要采自Y1和Y3矿脉。Y1矿脉的矿石以浸染状银金多金属硫化物石英脉型为主,Y3以块状银金多金

属硫化物石英脉为主。采样时注重了样品对于标高、成矿期次的代表性。用尖嘴钳或切割机从标本上取下不同阶段的矿物集合体,然后经捣碎、筛分、淘洗和双目镜挑选,获得0.1~0.5mm粒径的纯净单矿物样品。为消除与石英共生的硫化物连晶,将石英单矿物置入用60~80℃的稀硝酸溶液浸泡12小时,然后用去离子水冲洗,并以超声波离心仪清除杂质,重复去离子水冲洗和超声波离心处理6次,直至WFX-110原子吸收光谱仪显示淋液不含离子,最后经烘干得到可供分析的石英单矿物样品。

除标注引用外,本文的样品测试均在国土资源部同位素地球化学开放实验室完成,分析方法已由丁悌平(1988)详细介绍。石英包裹体CO₂采用爆裂释放、液氮-酒精(-70℃)收集冷凝纯化法制备。硫化物硫同位素分析步骤是,首先用氧化铜在1150℃条件将硫化物的硫氧化为SO₂,然后将释放的SO₂用液氮冻入样品管并纯化,获得质谱分析的SO₂。对于硫化物铅同位素分析,首先用HNO₃-HF混合溶液溶解硫化物,用过阴离子交换树脂提取Pb,以硅胶做发射剂,用单铷带在MAT261热离子质谱仪上测试铅同位素组成。硫、碳同位素组成用MAT251EM气体质谱仪测试,分别以CDT和PDB为标准报出δ³⁴S和δ¹³C,测试精度均为±0.2‰。铅同位素标样为NBS981,²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb和²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb的分析精度在2σ水平上分别为0.1%、0.09%和0.30%。

4.2 碳同位素

流体包裹体中CO₂的δ¹³C_{PDB}列于表2。除成矿晚阶段的1件样品为-0.2‰外,其余7件中早期样品的CO₂的δ¹³C_{PDB}全为正值,介于0.1‰~0.9‰;根据郑永飞和陈江峰(2000)提供的公式计算得到银洞沟银矿床流体δ¹³C_{SC}值介于0.1~0.9‰(张静等,2005)。这与各类地质体的δ¹³C_{PDB}(有机质-27‰(Schidlowski, 1998),大气CO₂为-7‰~-11‰,淡水CO₂为-9‰~-20‰,岩浆系统为-3‰~-30‰(Hoefs, 1997),地壳总碳为-7‰(Faure, 1986),地幔总碳为-5‰~-7‰,海相碳酸盐为-3‰~+2‰(Hoefs, 1997))

表1 银洞沟银矿床矿脉特征一览表

Table 1 List of the characteristics of the ore-bearing lodes in the Yindonggou Ag deposit

矿脉	长(m)	厚(m)	矿脉产状	Ag(g/t)	Au(g/t)	Pb(%)	Zn(%)	直接含矿围岩
Y1	1800	0.5~1.7	270°~319°∠16°~40°	80~446	3.0~19.5	1.65	1.15	绢云片岩及花岗岩
Y2	1200	0.3~1.5	270°~310°∠15°~38°	60~320	2.4~21.2	0.58	0.19	变细碧岩
Y3	1600	0.8~1.4	260°~310°∠36°~54°	70~235	1.6~2.1	7.37	3.31	变细碧岩
Y4	280	0.5~0.9	225°~245°∠30°~50°	6~21	0.3~1.9	5.70	6.44	绢云片岩
Y5	360	0.3~0.7	260°~290°∠50°~70°	≤5	0.2~0.25			绢云片岩
Y6	150	0.4~1.0	220°~205°∠15°~30°	5~349	0.3~6.0			变细碧岩
Y7	280	0.2~0.7	280°~290°∠20°~30°	2.5~5.6	0.3~1.0			绢云片岩
Y8	500	2.0~4.0	144°~155°∠60°~65°	~5	0.2~0.3			绢云片岩

注:据河南省有色地质勘查院(2001)^①和王志光等(2003)综合整理。

①河南省有色地质勘查院. 2001. 河南内乡-南召地区银铜铅矿资源评价项目设计书. 郑州:未刊资料, 1-43

表2 石英包裹体 CO₂ 以及秦岭群地层的碳同位素组成(‰)
Table2 C isotope composition of CO₂ in the fluid inclusions of quartz and Qinling group

样品号	采样位置	产状	成矿阶段	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)
流体包裹体				
YDG-13	Y3 脉 760m 中段	早阶段石英脉	早	0.1
YDG-14	Y3 脉 760m 中段	含矿石英脉	中	0.9
YDG-17	Y3 脉 760m 中段	晚阶段石英脉	晚	-0.2
YDG-4-1	Y1 脉 810m 中段	含矿石英脉	早	0.2
YDG-4-2	Y1 脉 810m 中段	含矿石英脉	早	0.3
YDG-3	Y1 脉 810m 中段	下盘蚀变岩	早-中	0.1
YDG-31	900m 中段	矿石	中	0.2
YDG-32	900m 中段	矿石	中	0.4
地层	秦岭群雁岭沟组 大理岩			3.6

对比表明,银洞沟银多金属矿床成矿流体 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 接近于海相碳酸盐,明显高于其他各类地质体,表明成矿流体应主要来自海相碳酸盐地层的变质脱气。这一特点与熊耳、山地区的铁炉坪银矿(Chen *et al.*, 2005)情况类似。

该矿床主成矿阶段流体包裹体均一温度主要介于 270 ~ 370℃,假设成矿流体来自碳酸盐在 360 ~ 400℃ 的变质脱水,则碳同位素在 CO₂-方解石体系间达到交换平衡时的 $10^3 \ln \alpha_{\text{CO}_2-\text{方解石}} = 2.6 \sim 2.7$ (魏菊英和王王玉, 1988),据此求得原岩碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{方解石}}$ 为 $-2.6\text{‰} \sim -1.8\text{‰}$ 。因此,除海相碳酸盐之外,没有其它可能的碳源能够满足成矿流体 $\delta^{13}\text{C}$ 的要求,成矿流体只能源于海相碳酸盐地层的变质脱水-脱气作用。

银洞沟矿床赋矿地层为二郎坪群,并以小寨组复理石建

造为主。关于小寨复理石建造,虽然前人曾报道含有碳酸盐夹层,但作者在对矿区小寨组的考察和黑烟镇一带小寨组地层剖面的实测过程中,未见碳酸盐地层存在。因此,由于缺乏碳酸盐地层,赋矿围岩二郎坪群很难作为成矿流体的主要来源。但是,矿区以南分布的秦岭群雁岭沟组(图 1)大理岩建造的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $+3.6\text{‰}$ (表 3),满足成矿流体碳同位素组成的要求。因此本文倾向于认为雁岭沟组为该矿床成矿流体的主要源区。

4.3 硫同位素

银洞沟矿床 11 件硫化物样品 $\delta^{34}\text{S}$ 变化于 $4.7 \sim 8.1\text{‰}$ (表 3),极差仅为 3.4‰ ,平均值为 6.4‰ 。其中,黄铁矿、闪锌矿和方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值分别为 7.3‰ 、 6.7‰ 和 5.1‰ ,完全吻合于平衡分馏体系硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 递减顺序,即共生硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值按硫酸盐→辉钼矿→黄铁矿→磁黄铁矿和闪锌矿→黄铜矿→方铅矿的顺序递减(张理刚, 1985),表明银洞沟矿床主要硫化物沉淀于同一物理化学体系,且不同矿物相之间的硫同位素分馏基本达到了平衡。

研究(Hoefs, 1997; Ohmoto and Rye, 1979)表明,当 f_{O_2} 较低时,流体中硫主要以 HS^- 、 S^{2-} 存在,所沉淀的黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 与整个流体的 $\delta^{34}\text{S}$ 相近;当 f_{O_2} 较高时,发生富³⁴S 的硫酸盐沉淀,使流体系统和与之平衡的硫化物亏损³⁴S,即黄铁矿等硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 低于整个体系的 $\delta^{34}\text{S}$ 。总之,硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 不会高于流体系统总硫的初始 $\delta^{34}\text{S}$ 。鉴于银洞沟矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 均为正值,介于 $+4.7 \sim +8.1\text{‰}$,初始流体系统的 $\delta^{34}\text{S}$ 应为较高的正值。如此高的正值难以直接来自有机硫($\delta^{34}\text{S}$ 为很低的负值)、地幔硫或岩浆($\delta^{34}\text{S} = 0 \sim +2\text{‰}$),最大可能来自含沉积硫酸盐(海相沉积物或蒸发岩)的岩石建造变质脱水,或其与其它硫源(如岩浆或地幔硫,甚至有机硫)的混合、再平衡作用。

表3 银洞沟矿床单矿物硫铅同位素组成

Table 3 S-Pb isotope composition of ore minerals from the Yindonggou Ag deposit

采样位置	样品号	硫化物	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	μ^*	ω^*	模式年龄 (Ma) *	$\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$
810m-Y1	YDG-4-2	黄铁矿	18.2594	15.5872	38.5478	9.47	39.16	268.4	7.6
810m-Y1	YDG-4-2	方铅矿	18.3339	15.6669	38.7800	9.62	40.54	311.3	5.7
810m-Y1	YDG-3	黄铁矿	18.4462	15.7739	39.0890	9.82	42.32	358.2	8.1
760m-Y3	YDG-12	闪锌矿	18.2026	15.5675	38.4917	9.44	39.06	285.5	6.2
760m-Y3	YDG-12	方铅矿	18.3433	15.6697	38.8124	9.62	40.64	308.0	5.3
760m-Y3	YDG-15	闪锌矿	18.2558	15.5995	38.5780	9.49	39.44	286.0	6.9
760m-Y3	YDG-16	闪锌矿	18.3882	15.7307	38.9430	9.74	41.58	348.4	7.0
900m	YDG-30	方铅矿	18.3494	15.6571	38.7979	9.60	40.41	288.6	4.7
900m	YDG-30	黄铁矿	18.2651	15.5835	38.5690	9.46	39.18	259.7	7.6
900m	YDG-32	方铅矿	18.3503	15.6619	38.7879	9.61	40.41	293.7	4.8
900m	YDG-32	黄铁矿	18.3477	15.6549	38.7716	9.59	40.29	287.1	5.9

注:加*者表示据朱炳泉(1998)提供的公式计算获得。

显然,硫同位素研究所揭示的物源性质与碳同位素研究的结果一致,均要求碳酸盐建造的存在,因为硫酸盐沉积总是发生在碳酸盐沉积之后的更高盐度的蒸发盆地。就缺乏碳酸盐地层的二郎坪群火山-沉积岩建造而言,含有沉积硫酸盐夹层的可能性较小,因此难以成为成矿物质和流体的主要源区。同样道理,二郎坪地体内的各类岩浆岩以及下伏的地幔和下地壳,也不能独立作为银洞沟矿床成矿物质和流体的主要源区。如此,可能性较大的只有秦岭群地层。

4.4 铅同位素

银洞沟矿床不同标高、不同矿脉的硫化物单矿物的铅同位素比值没有明显差别(表3),显示其铅源的统一性,即不同矿脉的成矿物质来源一致。

矿石铅 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.2026 \sim 18.4462$,均高于 18.000; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.5835 \sim 15.7739$,大于 15.300; 显示铀铅富集明显。 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.5478 \sim 39.089$,总体略低于 39.000,显示钍铅微弱亏损。矿石铅 μ 值介于 9.43 ~ 9.82,明显高于正常铅 μ 值范围(8.686 ~ 9.238); 而 ω 值介于 39.06 ~ 42.32,也高于正常铅 ω 值(35.55 \pm 0.59)。以上表明,该矿床铅源物质成熟度较高,且相对富集铀铅,具有上地壳或沉积物的特点。

用 Holmes-Houtermans 法(H-H 模式)(转引自朱炳泉等,1998),通过线性内插法计算得到矿床的铅模式年龄为 259.7Ma ~ 358.2Ma(表3)。因为黄铁矿、方铅矿等硫化物中基本不含 U、Th 等放射性成因铅的母体放射性元素,硫化物一旦结晶形成,其铅同位素比值基本保持不变,因此矿石铅同位素比值的高低主要取决于成矿流体系统,即取决于提供成矿流体的铅源、参与水岩相互作用的赋矿围岩和流体运移通

道。显然,成矿流体的源区、运移通道围岩和赋矿围岩一定早于矿床形成,这就决定了铅模式年龄一般大于实际成矿年龄。据此认为,银洞沟矿床应形成在 259Ma 之后的中生代,与秦岭地区金、钼等矿床成矿时代大体相当。

在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上(图2A)可以看出:所有样品落在造山带演化线附近、或造山带和上地壳演化线之间并且靠近甚或在上地壳演化线上,同样表明银洞沟矿床的矿石铅来自较高成熟度的物源区,总体相当于上地壳物质。在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图(图2B)中,所有铅同位素点均位于造山带演化线和下地壳演化线之间,并靠近造山带演化线,这类现象通常被解释为亏损钍的下地壳与富集钍的上地壳混合或相互作用的产物(Doe *et al.*, 1979)。由于银洞沟矿床铀铅富集、钍铅相对亏损的铅同位素特征,认为通常富铀铅而贫钍铅的化学沉积物(如碳酸盐、硅质盐)可能提供了较多的成矿物质。

为进一步确定银洞沟很多金属矿床矿石的铅源区,作者将研究区矿体及有关地质体的铅同位素共同投图(图2),可以发现:现今二郎坪群地层的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值均高于矿石的对应值,卢家坪岩体的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值高于矿石的对应值,而 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值与矿石相当,但二郎坪岩体、牧虎顶岩体钾长石的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值以及秦岭群地层的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值总体低于矿石硫化物。考虑到成岩/成矿后钾长石/矿石铅中没有放射成因铅的再积累,而岩体/地层中却仍有放射成因铅的积累,因此岩体/地层的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值理应与其中的钾长石/矿石硫化物相当或略高。基于此,从铅的来源考虑,可以判断二郎坪群地层的贡献是不可缺少的,

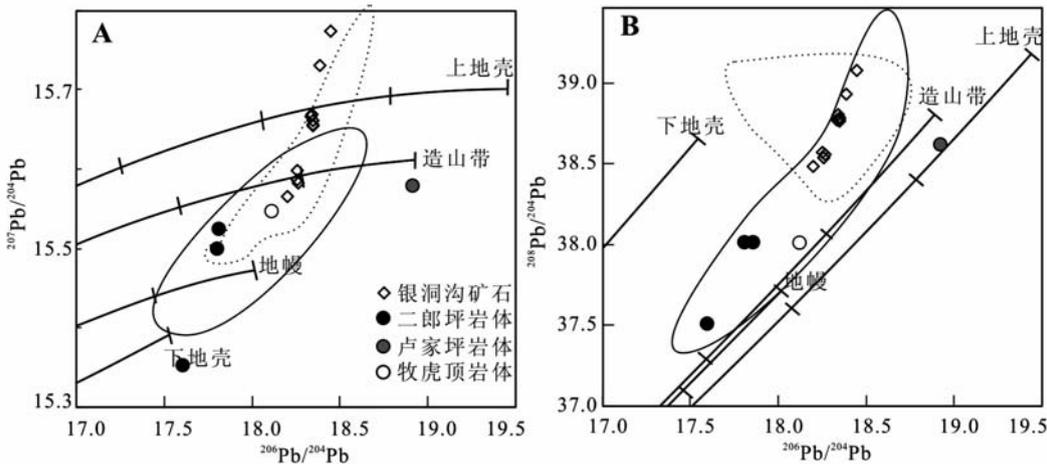


图2 银洞沟矿床铅同位素模式图

底图据 Zartman and Doe(1981),虚线圈闭现今二郎坪群地层全岩铅同位素范围,实线圈闭现今秦岭群地层全岩铅同位素范围,确定上述虚线、实线圈闭范围的数据来自表4。

Fig.2 The plumbotectonic model for the Yindonggou deposit

The base map is adopted from Zartman and Doe (1981). Dashed lines enclose present Pb isotopic ranges for the Erlangping group and real lines enclose present Pb isotopic ranges for the Qinling group. The data are listed in Table 4.

表4 东秦岭地区部分地层和岩体的铅同位素组成

Table 4 Lead isotope composition of the Erlangping and Qinling groups and granitic plutons in East Qinling Mountains

样品号	岩性	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	资料来源
二郎坪群	DM-1 大庙组	17.7698	15.4943	39.1305	本文
	H-2 火神庙组细碧岩	18.2605	15.6178	38.3759	本文
	H-4 火神庙组角斑岩	18.1768	15.6071	38.4481	本文
	X-1 小寨组云母片岩	18.6692	15.8019	39.0809	本文
	YDG-1 小寨组 变玄武岩(3)	18.2991 18.233	15.6282 15.542	38.2846 38.460	本文 张本仁等,2002
秦岭群	BC-14 雁岭组大理岩	17.4942	15.4051	37.3787	本文
	SCG-1 石槽沟组	17.7813	15.4629	38.0525	本文
	S-1 石槽沟组片麻岩 长英质片麻岩(9) 角闪岩(4) 大理岩黄铁矿(4)	18.6083	15.6369	39.4180	本文
		18.114	15.601	38.343	Zhang <i>et al.</i> , 1997
		18.483	15.624	38.359	Zhang <i>et al.</i> , 1997
		18.312	15.571	38.168	张本仁等,2002
	二郎坪群岩体	黑云母花岗岩的钾长石	17.840	15.502	37.991
黑云母花岗岩的钾长石		17.865	15.520	38.006	Zhang <i>et al.</i> , 1997
黑云母花岗岩的钾长石		17.581	15.345	37.506	Zhang <i>et al.</i> , 1997
牧虎顶岩体	二长花岗岩的钾长石	18.105	15.549	38.073	Zhang <i>et al.</i> , 1997
卢家坪岩体	花岗岩	18.9723	15.5813	38.5923	本文

不排除秦岭群和卢家坪岩体也提供部分铅的可能,但可以排除二郎坪岩体和牧虎顶岩体的参与。

综合上述 C-S-Pb 同位素特征,可获得以下认识:(1)含碳酸盐等化学沉积物的沉积建造是该矿床有利的流体及物源区;(2)二郎坪群地层必定为成矿提供了铅等成矿物质;(3)秦岭群地层必定是银洞沟矿床成矿物质和流体的最重要源区之一,决定了矿床的 C、S 同位素组成。

5 成矿过程分析

硫碳铅同位素研究证明了秦岭群和二郎坪群地层是形成银洞沟矿床的不可或缺的物质基础,接下来就进一步分析其提供成矿物质和流体的地球动力学机制。

陈衍景和富士谷(1992)对东秦岭金矿成矿规律的研究以及张本仁等(2000)对秦岭造山带演化的地球化学研究,均得出了在中生代华北与华南板块碰撞过程中,秦岭群沿朱夏断裂陆内俯冲到二郎坪地体之下的结论。根据建立的碰撞造山成岩成矿和流体作用模式(简称 CMF 或 CPMF 模式),陈衍景和富士谷(1992,第 184-185 页)预测朱夏断裂北侧的夏馆地区存在“桑坪-米坪-许瑶沟铜金铅锌银等多金属矿化带”,而银洞沟 Ag-Pb-Zn-Au 矿床的新发现(王志光等,2001)无疑证实了预测的准确性和 CMF 模式的实用性。因

此,我们可借用 CMF 模式探讨秦岭群提供成矿物质和流体来源的动力学机制。

秦岭群沿朱夏断裂带向北 A 型俯冲到银洞沟矿区之下(图 3),并在二郎坪地体之下发生变质脱水形成成矿流体,成矿流体产生后向上运移并聚集于含矿构造带,在含矿构造带发生水岩反应而成矿。当秦岭群发生 A 型俯冲并变质脱水时,其碳酸盐地层变质可以释放具有高 $\delta^{13}\text{C}$ 的 CO_2 而进入流体;其可能夹带的硫酸盐分解、还原而使成矿流体系统的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{S}}$ 较高;二郎坪群(及部分秦岭群)的沉积物活化而提供符合银洞沟矿床铅同位素特征的矿石铅。

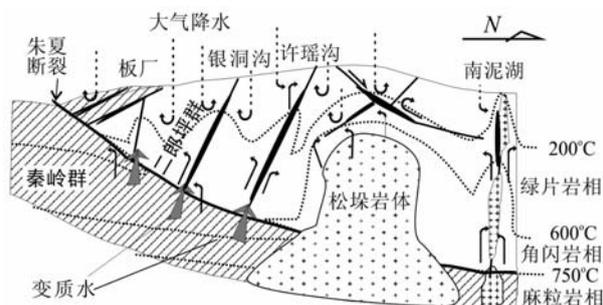


图3 银洞沟银多金属矿床成矿构造模式

Fig. 3 Tectonic-metallogenic model for the Yindonggou Deposit

在成矿空间上,银洞沟银多金属矿区南距朱夏断裂带 7~10km,北距许瑶沟金矿 1~2km,恰恰位于陈衍景和富士谷(1992)确定的朱夏断裂北侧“桑坪-米坪-许瑶沟铜金铅锌银等多金属矿化带”的核心地带,相当于 CMF 模式的脉状热液矿床带(D带);矿区以北 3~4km 处存在隐伏的松垛岩体和其它中生代花岗岩可作为板片进一步俯冲的变质-部分熔融产物,相当于 CMF 模式的花岗岩带(G带);更北的栾川斑岩钼矿带,则对应于 CMF 模式的斑岩及浆控矿床(矽卡岩型-斑岩型-爆破角砾岩型-浅成低温热液型)带(P带)。该构造-岩石-矿床的空间分带特点与理论推导的 CMF 模式空间分带规律十分吻合,反映了 CMF 模式的科学性、银洞沟银多金属矿床同位素地球化学研究结果的可靠性、以及同位素作为成矿物质和流体来源示踪剂的有效性。

值得补充的是,朱夏断裂北侧的岩石、矿床分带现象并非初次报道,马超营断裂北侧熊耳地体内依次分布铁炉坪银多金属矿床-上宫金矿床、花山花岗岩带和祁雨沟-雷门沟斑岩型-爆破角砾岩型金钼矿带(陈衍景等,2003);东准噶尔地区卡拉麦里断裂北侧依次出现苦水-清水-老鸦泉金矿带、红土井-老鸦泉花岗岩带、阿拉比也斯套-库普-拉铁斯斑岩型 Au-Cu-Mo 矿床和矿化异常带(Chen, 1997);等等,很多碰撞造山带地区可以见到此类构造-岩石-矿床的空间配置现象,显示了该分带现象的普遍性。

6 结论

(1) 银洞沟矿床的地质特征与世界范围的造山型金矿和河南铁炉坪造山型银多金属矿床的地质特征完全一致,应为造山型银多金属矿床,是造山型银矿的又一实例。

(2) 银洞沟矿床硫、碳、铅同位素地球化学特征揭示了成矿物质和流体主要来自二郎坪群和秦岭群,尤其是雁岭沟组含碳酸盐岩地层对于成矿流体和物质的贡献不可或缺,有力地证实了前人关于秦岭群沿朱夏断裂向北 A 型俯冲到二郎坪地体之下的推论。

(3) 银洞沟矿床的地质地球化学特征以及朱夏断裂北侧依次发育银洞沟银多金属矿床、许瑶沟金矿、松垛隐伏花岗岩基、栾川斑岩钼矿带的成岩成矿格局与 CMF 模式十分吻合,证明了 CMF 模式的科学性和普适性。

(4) 银洞沟银矿的发现和研究表明了关于“朱夏断裂北侧祁子堂-板厂-夏馆-桑坪-双槐树-官坡 Au-Ag-Cu-Pb-Zn-Hg-Sb 成矿带”预测的准确性,表明该带应作为银金多金属矿床勘查的重点区带,同时显示了科研与找矿实践相结合的重要意义。

致谢 野外工作得到了孙肇钧、彭启鸣、王保良、姚公一等河南有色地勘局和国土资源部地调局的领导指导并大力支持,李键工程师帮助分选了单矿物,祁进平、杨永、唐国军等博士参与了部分研究工作,特致谢意。

References

- Chen HY, Bao JX, Zhang ZJ, Liu YL, Ni P and Ling HF. 2000. Isotope indication to source of ore materials and fluids of the Wangfeng gold deposit in Tianshan; a case study of metallogenesis during collisional orogenesis. *Science in China, Series D*, 43 (supplement): 156 - 166
- Chen HY, Chen YJ, Liu YL. 2001. Metallogenesis of the Ertix gold belt, Xinjiang and its relationship to Central Asia-type orogenesis. *Science in China Series D*, 44(3): 245 - 255.
- Chen YJ, Pirajno F, Qi JP, Li J, Wang HH. 2006. Ore geology, fluid geochemistry and genesis of the Shangong gold deposit, eastern Qinling Orogen, China. *Resource Geology*, 56(2): 99 - 116.
- Chen YJ and Fu SG. 1992. Gold Mineralization in West Henan, China. Beijing: Chinese Seismological Press, 1 - 234 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ. 1997. Mineralization during collisional orogenesis and its control of the distribution of gold deposits in Junggar mountains, Xinjiang, China. *Acta Geologica Sinica*, 71(1): 69 - 79
- Chen YJ. 2006. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential. *Geology in China*, 33, 1181 - 1196 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Ni P, Fan HR, Pirajno F, Lai Y, Su WC, Zhang H. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2085 - 2108 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Pirajno F, Qi JP. 2005a. Origin of gold metallogeny and sources of ore-forming fluids, in the Jiaodong province, eastern China. *International Geology Review*, 47:530 - 549.
- Chen YJ, Pirajno F and Sui YH. 2005b. Geology and D-O-C isotope systematics of the Tieluping silver deposit, Henan, China; Implications for ore genesis. *Acta Geologica Sinica*, 79: 106 - 119
- Chen YJ, Pirajno F, Li N, Guo DS, and Lai Y. 2009. Isotope systematics and fluid inclusion studies of the Qiyugou breccia pipe-hosted gold deposit, Qinling orogen, Henan province, China; implications for ore genesis. *Ore Geology Reviews*, 35: 245 - 261.
- Chen YJ, Pirajno F, Qi JP. 2008. The Shangong Gold Deposit, Eastern Qinling Orogen, China; Isotope Geochemistry and Implications for Ore Genesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33: 252 - 266
- Chen YJ, Pirajno F, Sui YH. 2004. Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit, Henan, China; A case study of orogenic silver deposits and related tectonic setting. *Mineralium Deposita*, 39: 560 - 575.
- Chen YJ, Sui YH and Pirajno F. 2003. Exclusive evidences for CMF model and a case of orogenic silver deposits; Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit, east Qinling orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 551 - 568 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ. 1998. Fluidization model for continental collision in special reference to study on oreforming fluid of gold deposits in the eastern Qinling mountains, China. *Progress in Natural Sciences*, 8(4):385 - 393.
- Deng XH, Li WB, Li N, Mei M, Zhang Y, 2008. Study of fluid inclusions and genesis of the Zhifang Mo deposit in Songxian county, Henan province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 2133 - 2148 (in Chinese with English abstract)
- Ding TP. 1988. Stable Isotope Studies on Several Typical Deposits in China. Beijing: Beijing Science & Technology Publishing House, 1 - 71 (in Chinese with English abstract)
- Doe BR, Zartman RE. 1979. Plumbotectonics, the Phanerozoic. In: Barnes HL (ed.), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits (Second Edition)*. New York: Wiley Interscience, Chap 2, 22 - 70
- Fan HR, Zhai MG, Xie YH, Yang JH. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China. *Mineralium Deposita*, 2003, 38:

739 - 750

- Faure G. 1986. Principles of Isotope Geology (Second Edition). New York: John Wiley & Sons, 1 - 589
- Goldfarb RJ, Groves DI, Cardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time; a global synthesis. *Ore Geology Review*, 18: 1 - 75
- Goldfarb RJ, Leach DL, Rose SC, Landis GP. 1989. Fluid inclusion geochemistry of gold-bearing quartz veins of the Juneau gold belt, southeastern Alaska; Implications for ore genesis. *Economic Geology Monograph*, 6: 363 - 375
- Groves DI, Goldfarb RJ, Gebre-Mariam M *et al.* 1998. Orogenic gold deposits; a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Review*, 13: 7 - 27
- Hagemann SG and Cassidy KF, 2000. Archean orogenic lode gold deposits. *SEG Reviews* 13: 9 - 68
- Hoefs J. 1997. Stable Isotope Geochemistry (3rd Edition). Springer-Verlag, Berlin, 1 - 201
- Hu SX, Lin QL, Chen ZM and Li SM. 1988. Geology and Metallogeny of the Collision Belt Between North China Plates. Nanjing: Nanjing University Press, 1 - 558 (in Chinese)
- Kerrick R and Cassidy KF. 1994. Temporal relationships of lode gold mineralization to accretion, magmatism, metamorphism and deformation—Archean to present; A review. *Ore Geology Reviews*, 9(4): 263 - 310
- Kerrick R, Goldfarb RJ, Groves DI, Garwin S and Jia Y. 2000. The characteristics, origins and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces. *Science in China (D)* 43(supp.): 1 - 68
- Kerrick R. 1999. Nature's gold factory. *Science*, 284(5423): 2101 - 2102
- Li N, Chen YJ, Zhang H, Zhao TP, Deng XH, Wang Y, Ni ZY, 2007. Molybdenum deposits in East Qinling. *Earth Science Frontiers*, 14: 186 - 198. (in Chinese with English abstract)
- Li N, Sun YL, Li J, Xue LW and Li WB. 2008. The molybdenite ReOs isotope age of the Dahu AuMo deposit, Xiaolinling and the Indosinian mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 24: 810 - 816 (in Chinese with English abstract)
- Li WB, Huang ZL, Zhang G. 2006. Sources of the ore metals of the Huize ore field in Yunnan province: constraints from Pb, S, C, H, O and Sr isotope geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 2567 - 2580 (in Chinese with English abstract)
- Li WB, Lai Y, Wang BG. 2007. Fluid inclusion study of the Bainaimiao Cu-Au deposit in Inner Mongolia, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23: 2165 - 2176 (in Chinese with English abstract)
- Li WB, Huang ZL, Yin MD. 2007. Isotope geochemistry of the Huize Zn-Pb ore field, Yunnan Province, Southwestern China: Implication for the sources of ore fluid and metals. *Geochemical Journal*, 47(1): 65 - 81
- Li WB, Chen YJ, Lai Y and Ji JQ. 2008. Metallogenic time and tectonic setting of the Bainaimiao Cu-Au deposit, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 890 - 898 (in Chinese with English abstract)
- Ni ZY, Li N, Guan SJ, Zhang H, Xue LW. 2008. Characteristics of fluid inclusions and ore genesis of the Dahu Au-Mo deposit in the Xiaolinling gold field, Henan province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 2058 - 2068 (in Chinese with English abstract)
- Ni ZY, Li N, Zhang H and Xue LW. 2009. Pb-Sr-Nd isotope constraints on the source of ore-forming elements of the Dahu Au-Mo deposit, Henan province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2823 - 2832 (in Chinese with English abstract)
- Ohmoto H, Rye RO. 1979. Isotopes of sulphur and carbon. In: Barnes HL (ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York: John Wiley, 509 - 567
- Pettke T, Diamond LW, Kramers JD. 2000. Mesothermal gold lodes in the north-western Alps; A review of genetic constraints from radiogenic isotopes. *Eur. J. Mineral.* 12: 213 - 230
- Pettke T, Diamond LW, Villa IM. 1999. Mesothermal gold veins and metamorphic devolatilisation in the NW Alps. *Geology*, 27: 641 - 644
- Qi JP, Chen YJ, Ni P, Lai Y, Ding JY, Song YW and Tang GJ. 2007. Fluid inclusion constraints on the origin of the Lengshuibigou Pb-Zn-Ag deposit, Henan province. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2119 - 2130 (in Chinese with English abstract)
- Qi JP, LAI Y, Ren KX and Tang GJ. 2006. The Sr-isotope constraint on the origin of the Xiaolinling gold field. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 2543 - 2550 (in Chinese with English abstract)
- Qi JP, Song YW, Li SQ, Chen FK. 2009. Single-grain Rb-Sr isotopic composition of the Xigou Pb-Zn-Ag deposit, Luanchuan, Henan province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2843 - 2854 (in Chinese with English abstract)
- Schidlowski M. 1998. Beginning of terrestrial life: problems of the early record and implications for extraterrestrial scenarios. *Instruments, Methods, and Missions for Astrobiology*, SPIE, 3441: 149 - 157
- Wang ZG, Liu XD, Zhang ZB, Zhang YL and Xiang SH. 2001. Metallogenic environment and prospecting potential of silver-polymetallic deposit in Erlangping terrane in East Qinling. *Chinese Geology*, 28(7): 32 - 36 (in Chinese)
- Wang ZG, Xiang SH, Liu XD, Zhang ZB. 2003. Geological character of Yindonggou large scale silver and gold polymetallic deposit in Henan Province and it's discovery process and geological signification. *Mineral Resources and Geology*, 17(supp.): 365 - 368 (in Chinese)
- Wei JY, Wang GY. 1988. Isotope geochemistry. Beijing: Geological Publishing House. 1 - 166 (in Chinese)
- Zartman RE, Doe BR. 1981. Plumbotectonics - the model. *Tectonophysics*, 75: 135 - 162
- Zhang BR, Gao S and Zhang HF. 2002. Geochemistry of Qinling orogenic belt. Beijing: Science Press, 1 - 87 (in Chinese)
- Zhang BR, Zhang HF, Han YW. 2000. Geochemical division and tectonic framework of East Qinling. *Geology of Anhui*, 10(3): 209 - 211 (in Chinese)
- Zhang GW, Meng QR, Yu ZP, Sun Y, Zhou DW, Guo AL. 1996. Orogenic processes and dynamics of the Qinling. *Science in China (D)*. 39: 225 - 234
- Zhang HF, Gao S, Zhang BR, Luo TC and Lin WL. 1997. Pb isotopes of granitoids suggests Devonian accretion of Yangtze (South China) craton to North China craton. *Geology*. 25(11): 1015 - 1018
- Zhang J, Chen YJ, Li GP, Li ZL, Wang ZG. 2004. Characteristics of ore geology and fluid inclusion of the Yindonggou silver deposit, Neixiang county, Henan province: implication for metallogenic type. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(3): 55 - 64 (in Chinese with English abstract)
- Zhang J, Yan GP, Ye L, Li GP, Li ZL and Wang ZG. 2005. The C-H-O isotope systematics of the Yindonggou Ag-dominated poly-metals deposit in the Neixiang county, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1359 - 1364 (in Chinese with English abstract)
- Zhang L, Yang RS, Mao SD, Lu YH, Qin Y and Liu HJ. 2009. Sr and Pb isotopic feature and ore-forming material source of the Yangshan gold deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2811 - 2822 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LG. 1985. Geological application for the stable isotope; the hydrothermal mineralization of metal activation and it's prospectation. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Publishing House, 1 - 267 (in Chinese with English abstract)
- Zhen YF, Chen JF. 2000. Stable isotope geochemistry. Beijing: Science Press, 1 - 316 (in Chinese)
- Zhu BQ. 1998. Isotope system theory in earth science and application. Beijing: Science Press, 1 - 330 (in Chinese)

附中文参考文献

- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律. 北京: 地震出版社, 1 - 234
- 陈衍景, 倪培, 范洪瑞, F Pirajno, 赖勇, 苏文超, 张辉, 2007. 不同类型热液金矿床的流体包裹体特征. *岩石学报*, 23(9): 2085 -

- 2108.
- 陈衍景, 隋颖慧, Pirajno F. 2003. CMF 模式的排他性依据和造山型银矿实例: 东秦岭铁炉坪银矿同位素地球化学. 岩石学报, 19(3): 551-568
- 陈衍景. 2006. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力. 中国地质, 33: 1181-1196
- 邓小华, 李文博, 李诺, 糜梅, 张颖. 2008. 河南嵩县纸房铅矿床流体包裹体研究及矿床成因. 岩石学报, 24(9): 2133-2148.
- 丁梯平. 1988. 中国若干典型矿床的稳定同位素研究. 北京: 北京科学技术出版社, 1-71
- 胡受奚, 林潜龙, 陈泽铭. 1988. 华北与华南古板块拼合带地质和成矿. 南京: 南京大学出版社, 1-558
- 李诺, 陈衍景, 张辉, 赵太平, 邓小华, 王运, 倪智勇. 2007. 东秦岭斑岩钼矿带的地质特征和成矿构造背景. 地学前缘, 14: 186-198.
- 李诺, 孙亚莉, 李晶, 薛良伟, 李文博. 2008. 小秦岭大湖金钼矿床辉钼矿铼钨同位素年龄及印支期成矿事件. 岩石学报, 24: 810-816.
- 李文博, 黄智龙, 张冠. 2006. 云南会泽铅锌矿田成矿物质来源: Pb、S、C、H、O、Sr 同位素制约. 岩石学报, 22: 2567-2580
- 李文博, 赖勇, 王保国. 2007. 内蒙古白乃庙铜金矿床流体包裹体研究. 岩石学报, 23: 2165-2176
- 李文博, 陈衍景, 赖勇, 季建清. 2008. 内蒙古白乃庙铜金矿床的成矿时间和成矿构造背景. 岩石学报, 24(4): 890-898
- 倪智勇, 李诺, 管申进, 张辉, 薛良伟. 2008. 河南小秦岭金矿田大湖金-钼矿床流体包裹体特征及矿床成因. 岩石学报, 24(9): 2058-2068.
- 倪智勇, 李诺, 张辉, 薛良伟. 2009. 河南大湖金钼矿床成矿物质来源的铼钨铅同位素约束. 岩石学报, 25(11): 2823-2832
- 祁进平, 陈衍景, 倪培, 赖勇, 丁俊英, 宋要武, 唐国军. 2007. 河南冷水北沟铅锌银矿床流体包裹体研究及矿床成因. 岩石学报, 23(9): 2119-2130.
- 祁进平, 赖勇, 任康绪, 唐国军. 2006. 小秦岭金矿田成因的铼同位素约束. 岩石学报, 22: 2543-2550.
- 祁进平, 宋要武, 李双庆, 陈福坤. 2009. 河南省栾川县西沟铅锌银矿床铷-锶同位素研究. 岩石学报, 25(11): 2843-2854
- 王志光, 刘新东, 张振邦, 张瑜麟, 向世红. 2001. 东秦岭二郎坪地体银多金属矿床成矿环境与找矿前景. 中国地质, 28(7): 32-36
- 王志光, 向世红, 刘新东, 张振邦. 2003. 河南内乡县银洞沟大型银金多金属矿床地质特征、发现过程及其地质意义. 矿产与地质, 17(增刊): 365-368
- 魏菊英, 王关玉. 1988. 同位素地球化学. 北京: 地质出版社. 1-166
- 张本仁, 高山, 张宏飞. 2002. 秦岭造山带地球化学. 北京: 科学出版社, 1-87
- 张本仁, 张宏飞, 韩吟文. 2000. 东秦岭地球化学分区与构造格局. 安徽地质, 10(3): 209-211
- 张静, 陈衍景, 李国平, 李忠烈, 王志光. 2004. 河南内乡县银洞沟银矿地质和流体包裹体特征及成因类型. 矿物岩石, 24(3): 55-64
- 张静, 燕光谱, 叶霖, 李国平, 李忠烈, 王志光. 2005. 河南内乡县银洞沟银多金属矿床碳-氢-氧同位素地球化学. 岩石学报, 21(5): 1359-1364
- 张莉, 杨荣生, 毛世东, 鲁颖淮, 秦艳, 刘红杰. 2009. 阳山金矿床铼铅同位素地球化学与成矿物质来源. 岩石学报, 25(11): 2811-2822
- 张理刚. 1985. 稳定同位素在地质科学中的应用——金属活化热液成矿作用及找矿. 西安: 陕西科学技术出版社, 1-267
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学. 北京: 科学出版社, 1-316
- 朱炳泉. 1998. 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. 北京: 科学出版社, 1-330