

河南省栾川县西沟铅锌银矿床单矿物铷-锶同位素组成特征*

祁进平^{1,3} 宋要武⁴ 李双庆² 陈福坤²

QI JinPing^{1,3}, SONG YaoWu⁴, LI ShuangQing² and CHEN FuKun²

1. 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

2. 中国科学技术大学中科院壳幔物质与环境重点实验室, 合肥 230026

3. 北京大学造山带与地壳演化实验室, 北京 100871

4. 河南省地质调查院, 郑州 450007

1. Key Laboratory for Metallogenic Dynamics, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Material and Environment, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

3. Laboratory of Orogen and Crust Evolution, Peking University, Beijing 100871, China

4. Henan Bureau of Geological Survey, Zhengzhou, 450007, China

2009-07-19 收稿, 2009-10-19 改回.

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

Abstract The Xigou Pb-Zn-Ag deposit in Luanchuan, Henan Province is located north of the Luanchuan fault which occurs along the southern margin of the North China Craton. This deposit is of stratabound and hosted in Neoproterozoic carbonate strata and was considered as Neoproterozoic SEDEX-type deposit. The paragenesis, from early to late ore stage, includes: fine-grained pyrite, coarse-grained pyrite-sphalerite-dolomite-quartz assemblage, polymetallic sulfides-dolomite-quartz assemblage, and pyrite-quartz-carbonate assemblage, respectively. In this study, the single-grain Rb-Sr analytical technique is employed on sulfides and biotite to date the Pb-Zn-Ag mineralization of the deposit. Five biotite grains from a host-rock calcic two-mica schist sample yield a Rb-Sr isochron age of 366.0 ± 10 Ma, which is interpreted as metamorphic time of the host rocks. Field observations show that mineralization most probably postdated the metamorphism of the host rocks, as pyrite-bearing carbonates or sphalerite veinlets crosscut the schistosity or band of the metamorphic rocks and the orebodies did not undergo regional metamorphism. Considering that the tectonic deformation, massive granitic magmatism and mineralizations of Mo, Pb, Zn and Ag cluster in the period of 156 ~ 134 Ma with a peak at 138 Ma in the adjacent areas, it is reasonable to assume that the Xigou Pb-Zn-Ag deposit formed at ca. 138 Ma. Fine-grained pyrite of the early ore stage, coarse-grained pyrite and sphalerite of the main ore stage fail to give reasonable Rb-Sr isochron ages, probably due to overprint of later hydrothermal processes. Five fine-grained pyrite grains of the early ore stage give low $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ values (the initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values at 138Ma) of 0.7100 ~ 0.7151, with an average of 0.7127, slightly higher than those of late Jurassic to early Cretaceous intermediate-felsic porphyries and granite plutons, significantly lower than those of the Archean Taihua Group (metamorphic basement rocks), the Mesoproterozoic Xiong'er Group (andesitic volcanic rocks), and overlying schists of Meso-Neoproterozoic Luanchuan and Guandaokou groups, but close to those of hosting marble of the Luanchuan Group, indicating that metamorphic devolatilization of carbonate rocks and magmatic fluids are possible sources of ore fluids. In contrast, sulfides in main ore stages show higher and variable radiogenic Sr isotope contents; fourteen coarse-grained pyrite grains show $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ values of 0.7152 ~ 0.7344, with an average of 0.7247. Thirteen sphalerite grains give $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ values between 0.7108 ~ 0.7398, with an average of 0.7283. These $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ values are significantly higher than those of late Jurassic to early Cretaceous intermediate-felsic porphyries and granite plutons but close to or lower than those of the Taihua Group, the Xiong'er Group, and the Luanchuan and Guandaokou groups. Thus, it can be deduced that the early ore stage was probably dominated by metamorphic or magmatic fluids, and in the main ore stage, involvement of the overlying

* 本文得到国家 973 项目 2006CB403500, 国家自然科学基金项目(编号 40702013, 40730421, 40425006), 中国博士后科学基金(编号 20060400768)和中国科学院百人计划项目(编号 ZX 创 303)资助
第一作者简介: 祁进平, 男, 1976 年生, 博士后, 矿床学专业, E-mail: pingjinqi@sina.com

strata (the Luanchuan Group) was significant, through water-rock interaction and/or input of meteoric or formation water.

Key words Xigou Pb-Zn-Ag deposit; Single-grain Rb-Sr dating; Sulfide; Sr isotope

摘要 河南栾川西沟铅锌银矿床位于华北克拉通南缘栾川断裂北侧,为赋存于中-晚元古代浅变质碳酸盐建造中的层控矿床,被认为是晚元古代的热液沉积型矿床。从成矿早阶段至晚阶段,矿物共生组合依次为:细粒黄铁矿-粗粒黄铁矿-闪锌矿-白云石-石英组合、多金属硫化物-白云石-石英组合、黄铁矿-石英-碳酸盐组合。本文对其矿石硫化物和黑云母进行了单颗粒矿物 Rb-Sr 同位素分析和研究。1 件赋矿钙质二云片岩样品的 5 个黑云母颗粒样品给出 Rb-Sr 等时线年龄为 366.0 ± 10 Ma,代表赋矿围岩的区域变质年龄。由于黄铁矿-碳酸盐细脉切穿了钙质二云片岩的片理,闪锌矿细脉切穿大理岩条带,矿体未遭受区域变质作用,可推断矿化发生于 366Ma 之后。考虑到区域内的构造变形事件和大规模花岗岩类侵入和成矿作用的年龄数据集中在 156 ~ 134 Ma,峰值在 138 Ma 左右,认为西沟铅锌银矿床形成于晚侏罗世-早白垩世。5 件成矿早阶段细粒黄铁矿具有较低的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值(按 138Ma 计算的铷同位素初始比值),变化范围为 0.7100 ~ 0.7151,平均 0.7127,该值略高于晚侏罗-早白垩斑岩类和花岗岩基,明显低于太古代太华群变质基底、中元古代熊耳群安山质火山盖层和中-晚元古代栾川群和官道口群的片岩地层,但与赋矿围岩栾川群大理岩地层接近,表明碳酸盐地层变质脱水和晚侏罗-早白垩岩浆岩均有可能为早阶段成矿提供成矿流体。相比之下,主成矿阶段硫化物则更加富含放射成因铷:14 个主成矿阶段粗粒黄铁矿测点的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值范围为 0.7152 ~ 0.7344,平均 0.7247,13 个闪锌矿测点的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值范围为 0.7108 ~ 0.7398,平均 0.7283,这些硫化物 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值接近于或低于太古宙太华群、中元古代熊耳群和中-晚元古代官道口群和栾川群,表明这些地层的铷都有可能混入成矿流体。因此,上述研究表明成矿早阶段流体主要为壳源岩石的变质脱水流体或燕山期岩浆热液,而在主成矿阶段,通过水岩相互作用与浅源循环的大气水或建造水的混入,浅部盖层栾川群地层的成分较多地加入了成矿系统。

关键词 西沟铅锌银矿床;单颗粒矿物 Rb-Sr 定年;硫化物;铷同位素

中图法分类号 P618.4; P618.52; P578.2; P597.3

自 1999 年国土资源大调查实施以来,东秦岭卢氏-栾川地区陆续发现了一批大型、超大型脉状和层控铅锌银矿床(简称卢-栾铅锌银矿田),如栾川冷水北沟、百炉沟、赤土店西沟等(吕文德和孙卫志,2004;燕长海,2004;祁进平等,2006,2007;陈衍景,2006),全区预测铅锌资源量达 2000 万吨,银资源量 1.9 万吨(地质勘查导报 2006 年 9 月 7 日第一版),充分显示了本区脉状和层控铅锌银矿床的巨大经济价值和潜力。关于层控矿床成因,主要有两种观点:一种认为这些矿床形成于燕山期,属于岩浆热液型(吕文德和孙卫志,2004);另一类强调矿床层控特征,认为矿床主要形成于中-晚元古代,成因类型包括热液沉积型、密西西比河谷型或沉积-叠加改造型(燕长海,2004;严海麒等,2007)。然而,由于该类矿床勘探开发程度较低,而且缺乏矿床地质、成矿流体和成矿时代等方面的系统研究工作,使得这些认识均缺少足够而有力的证据支持。

西沟铅锌银矿床是栾川地区层控矿床的典型代表,矿床赋存于栾川群煤窑沟组碎屑岩与碳酸盐转换部位,主要矿体呈似层状,附近有桶柱状矿体与之相连,被前人认为是典型的热液沉积型(刘国印等,2007)或沉积-叠加改造型矿床(严海麒等,2007),然而前人和我们的研究均未发现确凿的同生成矿证据,如与成矿关系密切的热液沉积岩、反映同生成因的矿石结构和构造等;另外,该矿床矿石和脉石矿物主要为硫化物、白云石、方解石和石英等矿物,极少发育云母类等适于精确定年的矿物,成矿年龄测定难度很大,也制约了该矿床成因的深入研究。关于成矿流体和成矿物质来源,前人也做了初步研究(刘国印等,2007),如西沟矿床 S130 脉两件石英样品的 δD 值为 $-76.8\text{‰} \sim -62.1\text{‰}$ 和 $\delta^{18}O$ 为

$-4.62\text{‰} \sim -2.71\text{‰}$,显示为大气水或建造水的特征;5 件矿石硫化物样品铅同位素数据总体显示为下地壳来源特征;4 件硫化物样品的 $\delta^{34}S$ 变化于 $3.1\text{‰} \sim 6.9\text{‰}$,与岩浆体系硫同位素特征相似;由于目前矿床同位素数据较少,且缺乏系统性,很难准确示踪成矿流体和成矿物质的来源和演化。矿床流体包裹体研究(祁进平,2009)表明主成矿阶段流体富含 CO_2 ,盐度变化大,且发育含 NaCl 子晶的高盐度包裹体,具有岩浆流体或变质流体特征,这些与热液沉积型、密西西比河谷型矿床流体特征差别很大。针对西沟铅锌银矿床成因研究中存在的问题,本研究系统采集了该矿床的矿石和相关围岩标本,重点采用单颗粒矿物 Rb-Sr 同位素测试技术进行系统的铷同位素研究,以期解决该矿床成矿时代、成矿流体性质和演化等关键问题,为该区铅锌银矿床的地质勘查评价提供科学依据。

铷-铷同位素体系既可获得成矿年龄,也可示踪成矿物质和流体的来源。一些学者已经尝试应用热液成因的金属硫化物铷同位素体系研究,例如, Nakai *et al.* (1990, 1993) 曾利用闪锌矿铷同位素测试获得了密西西比河谷型铅锌矿床的成矿年龄, Yang and Zhou (2001) 采用黄铁矿亚样品(即同一样品不同部位的黄铁矿)铷同位素研究获得了胶东一些金矿床的成矿年龄;更多学者利用硫化物等热液矿物的铷同位素比值探讨了成矿物质和流体的来源(Chen *et al.*, 2009; 祁进平等, 2006; 张莉等, 2009; 倪智勇等, 2009)。近年,铷同位素测试技术快速发展,实现了实验流程的超低本底(5 ~ 6 pg),提高了测试精度(陈福坤等, 2005; Li *et al.*, 2006),使单颗粒矿物样品铷同位素研究成为可能。

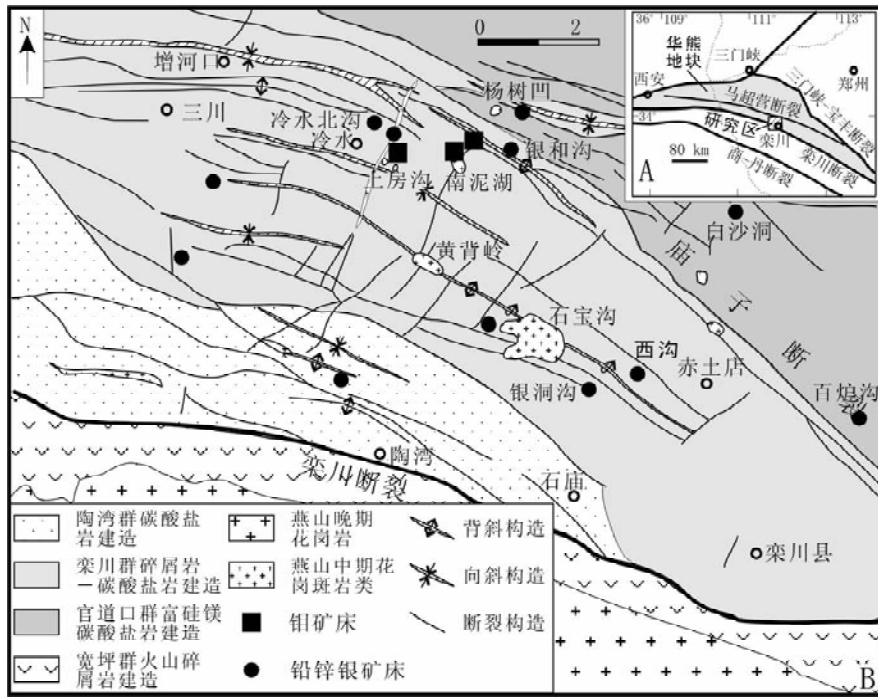


图1 河南栾川铅锌银矿田地质简图(根据燕长海,2004 和叶会寿等,2006,综合修改)

Fig.1 Geological sketch map of the Pb-Zn-Ag ore field in Luanchuan, Henan (modified after Yan, 2004 and Ye *et al.*, 2006)

本研究采用单颗粒矿物 Rb-Sr 同位素技术测试了西沟铅锌银矿床黄铁矿、闪锌矿和黑云母等单矿物的铷、锶同位素组成,依此对成矿年龄进行限定,对成矿流体和/或成矿物质来源进行探讨。

1 地质背景和矿床地质

河南卢-栾铅锌银矿田位于华北克拉通南缘华熊地块南部,而华熊地块以发育结晶基底太华超群为标志(陈衍景和富士谷,1992)。太华超群为中-高级变质建造,包括下部背斜群绿岩带(>2.6 Ga)和中部荡洋河群绿岩带(2.55 ~ 2.3 Ga),主要由角闪岩相和麻粒岩相岩石组成;上部水滴沟群孔达岩系(2.3 ~ 2.2 Ga),主要由石墨片岩、大理岩和条带状铁建造等构成(胡受奚等,1988;陈衍景等,1988;Chen and Zhao,1997;Chen *et al.*,2004)。太华超群之上发育的盖层自下而上依次为熊耳群、官道口群、栾川群等。熊耳群是以未变质或浅变质的玄武岩、安山岩类为主,并含有英安岩-流纹岩的双峰式火山岩建造,角度不整合于变质结晶基底之上,单颗粒锆石 U-Pb 年龄数据在 1.80 ~ 1.75Ga 间(胡受奚等,1988;赵太平等,2001,2007),其南界为栾川断裂。官道口群、栾川群和陶湾群分布于马超营断裂南侧,是卢栾矿田出露的主要地层(图1)。官道口群和栾川群的原岩建造为含碳质的碳酸盐-碎屑岩-硅质岩建造,形成于 1.4 ~ 0.8Ga,经历了绿片岩相的变质作用(河南省地质矿产局,1989;胡受奚等,1988;陈衍景等,2003)。陶湾群碎屑岩-碳酸盐沉积

建造,其时代和构造环境尚有分歧(胡受奚等,1988;张宗清等,1994;Wang *et al.*,2008),可能形成于新元古代-早古生代,沿栾川断裂带发育。卢-栾矿田以南,即栾川断裂以南,发育中元古代宽坪群变质火山-沉积岩系,并含蛇绿岩,被认为是 1.85 ~ 1.4 Ga 期间的蛇绿混杂带(胡受奚等,1988;陈衍景等,1992)。矿区主构造线为 NWW 向,包括一系列向南逆冲的推覆断层和轴面向北陡倾的倒转褶皱。NNE-NE 向断裂局部发育,常叠加于 NWW 向构造之上(燕长海,2004)(图1)。区内发育上房沟、南泥湖、石宝沟等燕山期斑状花岗岩、斑状黑云母花岗岩闪长岩(胡受奚等,1988;徐兆文等,2000),单个岩体面积通常 < 1 km²,多伴随斑岩-夕卡岩型钼矿床或矿化,形成著名的栾川钼矿田。多数学者认为这些斑岩体属同熔型或 I 型,成因与 A 型俯冲有关(胡受奚等,1988;李泽九等,1994;陈岳龙和张本仁,1994),Chen *et al.*(2000,2007)和李诺等(2007)认为它们是中生代 A 型俯冲导致的陆壳重熔所致。

栾川西沟铅锌银矿床位于南泥湖钼矿田南侧,黄背岭-石宝沟背斜北东翼,矿体赋存于栾川群煤窑沟组中段地层中,岩性主要为白云石大理岩,局部夹二云大理岩、钙质二云片岩等。矿区主要矿化带是 S130 和 S139,资源量分别达到大型和中型规模。其中,S130-1 矿体储量规模最大,呈似层状、脉状,局部为透镜状;矿体倾向 35°左右,倾角 30 ~ 70°,矿体局部弯曲褶皱处产状变化大;矿体长 1100 m,厚度 1.0 ~ 2.9 m,平均 1.80 m,控制最大延深 390 m(图2)。

主要矿石矿物为黄铁矿、方铅矿、闪锌矿,含少量黄铜矿

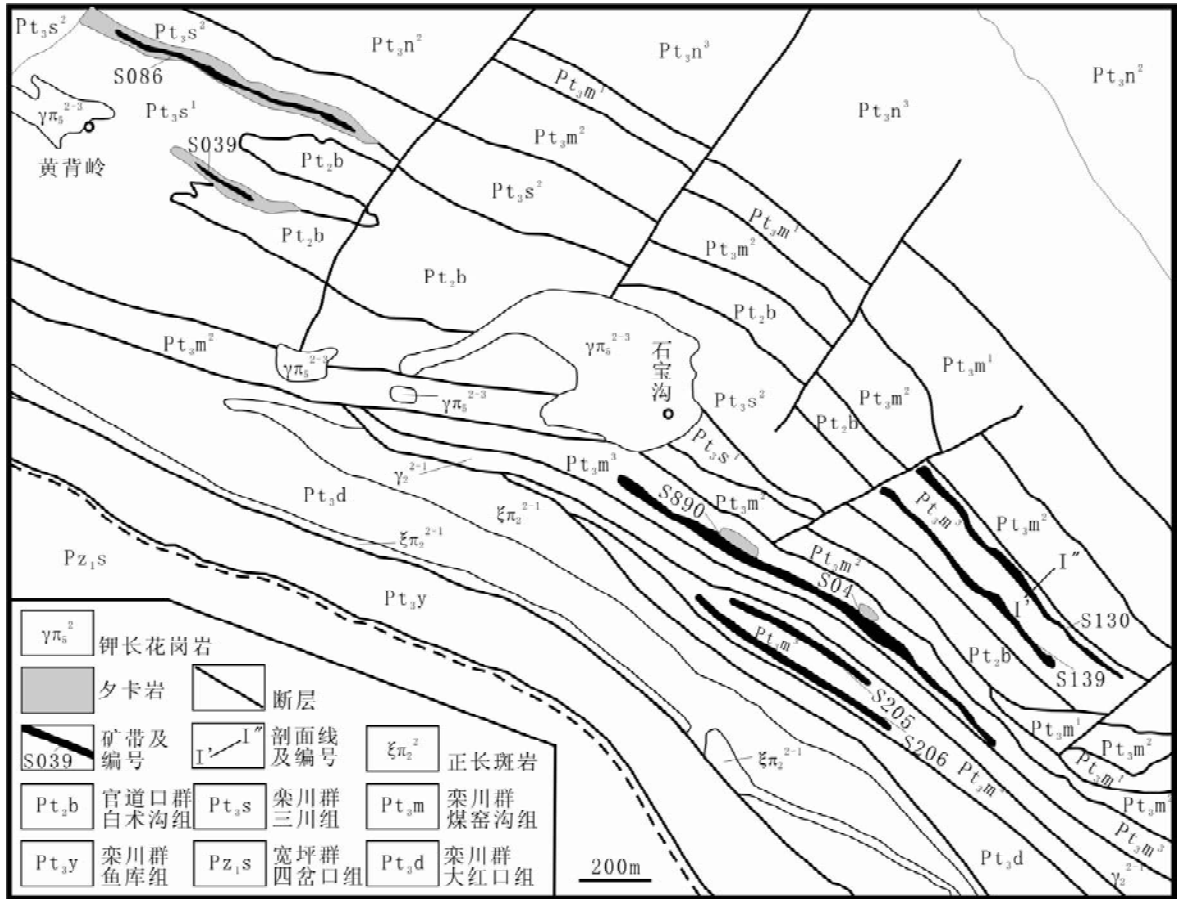


图2 河南栾川赤土店铅锌银矿区地质简图(引自刘国印等,2007)

Fig.2 Geological map of Chitudian Pb-Zn-Ag deposit (Liu *et al.*, 2007)

和毒砂,脉石矿物以白云石和石英为主。成矿过程大致可分为4个阶段,即细粒黄铁矿阶段、闪锌矿-白云石阶段、多金属硫化物阶段和石英-碳酸盐阶段。细粒黄铁矿阶段主要见于深部,由细粒黄铁矿构成,呈致密块状,裂隙常被晚阶段石英和硫化物脉所充填,局部还发育晶洞,晶洞内生长晚期形成的粗粒黄铁矿和石英晶簇,该阶段脉石矿物难见。闪锌矿-白云石阶段主要矿物组合为黄铁矿-闪锌矿-白云石(石英),局部为黄铁矿-白云石-石英组合,显微镜下可见少量闪锌矿包体。多金属硫化物阶段矿物组合为方铅矿-闪锌矿-黄铁矿-白云石-石英,但矿石矿物组成变化较大,如可见闪锌矿-石英、方铅矿-方解石等不同矿物组合。矿石组构与赋矿空间的开阔程度关系密切,开放空间中矿石常呈晶簇状构造,矿物呈粗粒、自形结构;而相对狭小空间中矿石多呈脉状、网状、浸染状构造,矿物细粒半自形-他形结构,显示充填作用是最重要的成矿方式。

2 样品地质与测试

测试样品均采自S130号脉S130-1矿体。样品XG-se为控矿断裂上盘钙质二云片岩;样品XG4为成矿早阶段细粒

黄铁矿样品,致密块状,黄铁矿含量大于90%,其余为充填于黄铁矿颗粒间的石英;黄铁矿颗粒大多数呈他形-半自形粒状,部分可达自形,可见极少量五角十二面体状自形晶体,粒径集中在0.1~0.6mm。XG6为主成矿阶段样品,主要由白云石、闪锌矿和少量黄铁矿组成,闪锌矿呈他形。XG7为主成矿阶段样品,以富含粗粒黄铁矿为特点,可见黄铁矿+石英+碳酸盐组合胶结早期细粒黄铁矿团块;其中,粗粒黄铁矿呈半自形粒状,粒径多数在1~6mm之间,围绕细粒黄铁矿生长(图3a,b)。

测试工作在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室完成。在玛瑙钵中将样品碎至60~80目,在双目镜下挑选单矿物颗粒,去除杂质,使其纯度大于99%。熔样和Rb-Sr化学分离工作在装备有达到百级洁净度操作台的超净化学实验室中进行。同位素比值测试在高精度固体热电离质谱计IsoProbe-T上进行,仪器参数详见文献(陈福坤等,2005; Li *et al.*, 2006, 2008; Chen *et al.*, 2009)。实验所用的酸试剂均经过双瓶二次亚沸蒸馏纯化,经Millipore-E水纯化系统的纯化H₂O为18.2MΩ,其Sr本底小于0.2pg/ml。采用300μl的Spec-Sr特效交换树脂和3N的硝酸(HNO₃)进行Rb和Sr分离纯化,可最大限度地提高样

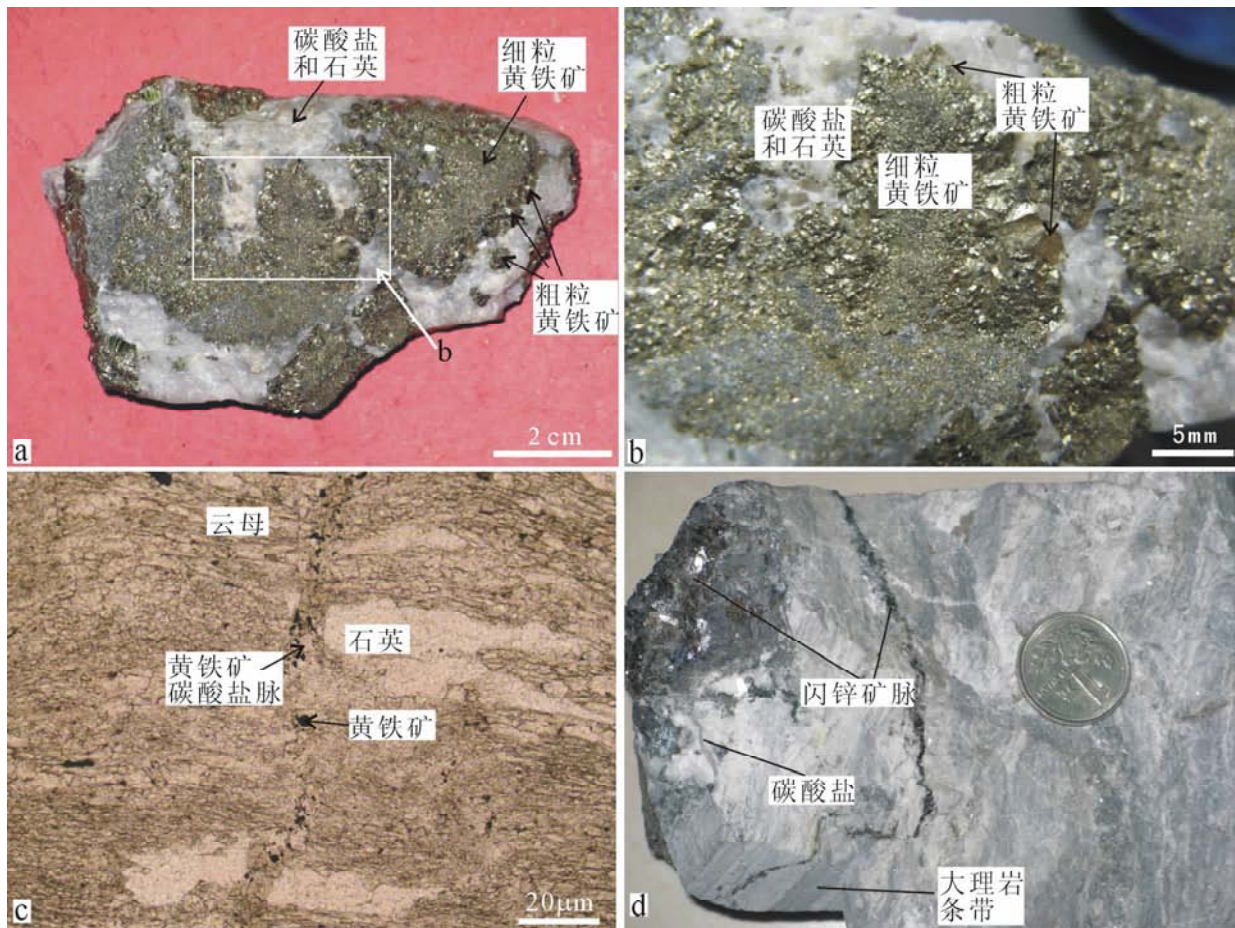


图3 西沟矿床黄铁矿及 Pb-Zn-Ag 矿脉穿插关系；a：早阶段黄铁矿角砾被晚阶段白云石和石英胶结；b：主成矿阶段粗粒黄铁矿围绕早阶段细粒黄铁矿生长；c：黄铁矿-碳酸盐脉切穿赋矿的钙质二云片岩的片理(单偏光)；d：未变形的闪锌矿细脉切穿大理岩条带

Fig.3 Pyrite and crosscutting relationships of Pb-Zn-Ag mineralization in the Xigou deposit; a: early ore stage pyrite breccias cemented by later dolomite and quartz; b: coarse-grained pyrite circling around early stage fine-grained pyrite; c: a pyrite-carbonate veinlet crosscutting host-rock two-mica schist; d: an undeformed sphalerite veinlet crosscutting bands of marble

品回收率,全流程 Rb 和 Sr 本底低达 5~6 pg,具体步骤详见文献(Li *et al.*, 2006, 2008)。

3 结果及其地质意义

经本底和稀释剂扣除后的测量结果列于表 1,等时线年龄计算采用 Isoplot 软件(Ludwig, 2000)。等时线回归计算时,⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 比值采用 4% 误差,Sr 同位素比值采用 0.03% 误差。样品 XG-se 的 4 个黑云母测点构成的等时线年龄为 366.0 ± 10 Ma (图 4a),MSWD 值为 1.3。在挑选 S1, S6 和 S7 颗粒样品时,发现黑云母颗粒表面附着有碳酸盐矿物,为沿裂隙贯入的后期碳酸盐(图 3c),虽已经过酸洗处理,但三个颗粒数据均位于前述等时线下方且偏离较远,显示出相对较低的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值,可能表明三个颗粒样品中仍残留有后期碳酸盐,S4 测点 Sr 含量很高,达 410ppm,显然也为碳酸盐脉

所致,因此这四个测点数据未参与等时线计算。样品 XG4 的 5 个细粒黄铁矿测点,样品 XG7 的 14 个粗粒黄铁矿测点和样品 XG6 的 13 个闪锌矿测点数据均较分散,不能构成有效的等时线(图 4b)。绝大多数闪锌矿数据点的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值明显高于细粒黄铁矿,形成两个截然不同的范围;粗粒黄铁矿数据点介于二者之间,较离散,但多数靠近闪锌矿数据范围,少数接近细粒黄铁矿(图 4b)。

样品 XG-se 为赋矿断裂上盘钙质二云片岩中黑云母,其 Rb-Sr 等时线年龄可解释为赋矿围岩区域变质年龄,与北秦岭造山带普遍经历了古生代中期的区域变质事件相一致(张寿广等,1991; 刘国惠等,1993)。野外和显微镜研究均表明,矿体未遭受区域变质作用影响,矿石结构和矿物均无受变质改造的迹象;另外,还可见黄铁矿-碳酸盐细脉切穿了钙质二云片岩片理(图 3c),或闪锌矿脉切穿大理岩条带,且闪锌矿脉本身无变质和变形现象(图 3d)。这些特征证明成矿作用

表1 西沟 S130 号脉黑云母、黄铁矿和闪锌矿单颗粒 Rb-Sr 分析结果

Table 1 Rr-Sr isotopic analyses for single-grain biotite, pyrite and sphalerite minerals of the No. S130 vein in the Xigou Pb-Zn-Ag deposit

样品号	测试对象	测试号	Rb ($\mu\text{g/g}$)	Sr ($\mu\text{g/g}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	I_{Sr} (138Ma)	误差 (2s)
XG-se	黑云母	S1	1476	5.040	1524	8.86872		0.00492
XG-se	黑云母	S2	1512	31.46	148.0	1.36990		0.00008
XG-se	黑云母	S3	1995	136.2	43.59	0.99810		0.00009
XG-se	黑云母	S4	1507	410.8	10.75	0.83295		0.00004
XG-se	黑云母	S5	2042	176.8	34.22	0.95397		0.00004
XG-se	黑云母	S6	1735	132.2	38.78	0.92745		0.00009
XG-se	黑云母	S7	5483	28.93	731.4	4.11867		0.00041
XG-se	黑云母	S8	4228	21.55	794.6	4.79409		0.00062
XG4	细粒黄铁矿	G1	0.16	1.39	0.328	0.71064	0.71000	0.00015
XG4	细粒黄铁矿	G2	0.55	1.14	1.393	0.71785	0.71512	0.00014
XG4	细粒黄铁矿	G3	1.32	1.23	3.114	0.71604	0.70993	0.00019
XG4	细粒黄铁矿	G5	1.15	1.60	2.088	0.71804	0.71394	0.00013
XG4	细粒黄铁矿	G6	0.77	1.68	1.337	0.71709	0.71446	0.00019
平均		N = 5				0.71593	0.71269	
XG7	粗粒黄铁矿	G7	0.34	5.00	0.200	0.72519	0.72480	0.00002
XG7	粗粒黄铁矿	G8	0.83	5.13	0.466	0.72841	0.72749	0.00003
XG7	粗粒黄铁矿	G9	0.52	2.77	0.540	0.72791	0.72685	0.00002
XG7	粗粒黄铁矿	G10	0.31	0.37	2.479	0.73507	0.73021	0.00011
XG7	粗粒黄铁矿	G11	0.68	1.41	1.396	0.72799	0.72525	0.00013
XG7	粗粒黄铁矿	G12	0.33	0.39	2.428	0.72966	0.72489	0.00020
XG7	粗粒黄铁矿	G19	0.02	0.02	3.022	0.72117	0.71524	0.00010
XG7	粗粒黄铁矿	G20	0.01	0.01	2.664	0.72788	0.72265	0.00019
XG7	粗粒黄铁矿	G21	0.01	0.01	3.753	0.73517	0.72780	0.00040
XG7	粗粒黄铁矿	G22	0.16	0.05	8.519	0.73372	0.71701	0.00037
XG7	粗粒黄铁矿	G23	0.02	0.02	2.843	0.73406	0.72848	0.00007
XG7	粗粒黄铁矿	G24	0.01	0.03	1.369	0.71934	0.71665	0.00007
XG7	粗粒黄铁矿	G25	0.02	0.02	3.203	0.74067	0.73439	0.00015
XG7	粗粒黄铁矿	G26	0.02	0.06	1.113	0.71800	0.71582	0.00007
平均		N = 14				0.72887	0.72466	
XG6	闪锌矿	g13	0.34	0.31	3.199	0.73837	0.73210	0.00012
XG6	闪锌矿	g14	0.84	1.71	1.428	0.73371	0.73091	0.00005
XG6	闪锌矿	g15	0.82	1.83	1.294	0.73020	0.72766	0.00019
XG6	闪锌矿	g16	0.65	1.15	1.651	0.73079	0.72755	0.00012
XG6	闪锌矿	g17	0.28	0.46	1.788	0.73055	0.72704	0.00008
XG6	闪锌矿	g27	0.04	0.06	1.893	0.71447	0.71076	0.00006
XG6	闪锌矿	g28	0.05	0.03	4.990	0.75813	0.74834	0.00038
XG6	闪锌矿	g29	0.01	0.12	0.311	0.72956	0.72895	0.00015
XG6	闪锌矿	g30	0.02	0.04	1.643	0.73165	0.72842	0.00015
XG6	闪锌矿	g31	0.02	0.02	3.103	0.74593	0.73984	0.00037
XG6	闪锌矿	g32	0.02	0.01	3.956	0.73787	0.73011	0.00037
XG6	闪锌矿	g33	0.01	0.08	0.382	0.72882	0.72807	0.00036
XG6	闪锌矿	g34	0.06	0.12	1.395	0.73081	0.72807	0.00007
平均		N = 13				0.73391	0.72829	

注: 样品 XG7 中的 G22 测点和 XG6 中的 g28 测点具有很高的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值, 导致了较大的 I_{Sr} (138Ma) 计算误差, 未参与平均值计算

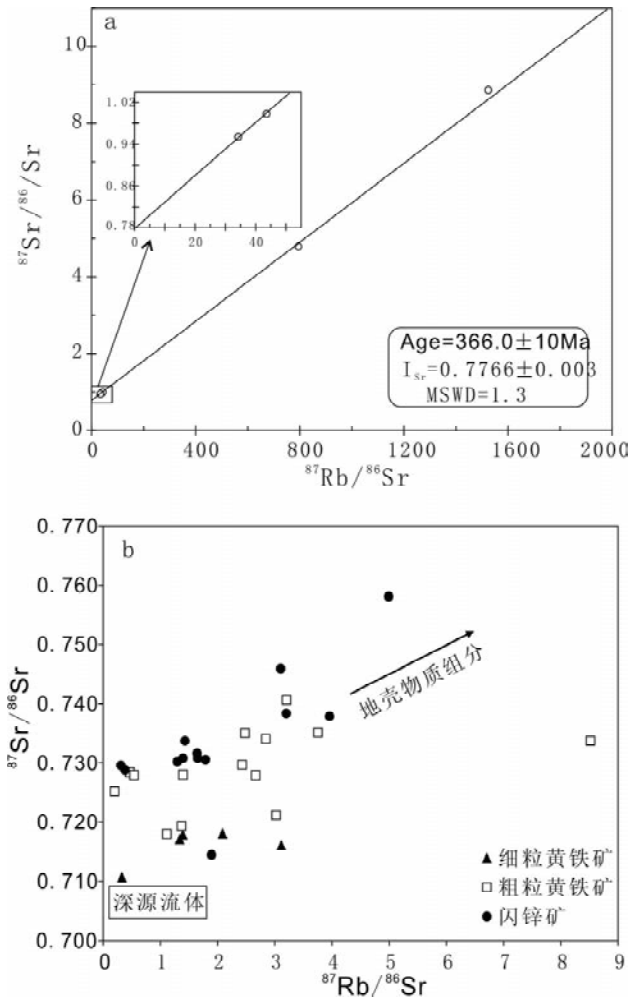


图4 西沟铅-锌-银矿床单颗粒矿物 Rb-Sr 同位素组成；(a) 赋矿片岩黑云母 Rb-Sr 等时线；(b) 矿石黄铁矿和闪锌矿 Rb-Sr 同位素组成

Fig. 4 Rb-Sr isotopic composition of single-grain minerals of the Xigou Pb-Zn-Ag deposit; (a) Rb-Sr isochron of biotite from ore-hosting schist; (b) Rb-Sr isotopic composition of pyrite and sphalerite

应晚于 $366.0 \pm 10\text{Ma}$ 。已有成岩和成矿年龄资料表明，东秦岭北部晚古生代岩浆活动和成矿作用较弱，中生代（特别是燕山期）花岗岩浆侵入和流体成矿作用强烈而普遍，东秦岭铅矿带成岩成矿年龄集中在 $156 \sim 134\text{Ma}$ （胡受奚等，1988；黄典豪等，1994；李永峰等，2004；李诺等，2007），豫西金矿床主体形成于侏罗纪-白垩纪之交（陈衍景和富士谷，1992；Chen, 1998；Li *et al.*, 2002；祁进平等，2005，2006），而毗邻西沟矿床的冷水北沟脉状铅锌银矿床的石英流体包裹体氩-氩年龄 $137.87 \pm 0.39\text{Ma}$ （燕长海，2004），因此，本文认为西沟铅锌银矿床也形成于同一成矿事件，即 138Ma 左右。

黄铁矿和闪锌矿样品数据点较分散，不能构成等时线。样品 XG4 为早阶段黄铁矿，颗粒细小，呈他形、半自形，反映黄铁矿结晶空间局限或结晶时间较短，不利于同位素体系平

衡；另外，矿体中局部可见早阶段黄铁矿团块被晚阶段矿化胶结或脉状穿插。因此，早阶段矿体不同部位很可能不同程度地遭受了后期热液作用的叠加。样品 XG7 中粗粒黄铁矿围绕早阶段细粒黄铁矿生长（图 3b），颗粒内常见早阶段细粒黄铁矿和石英包体。例如，g7 测点粗粒黄铁矿颗粒未溶尽，残留部分为石英 + 细粒黄铁矿组合，表明粗粒黄铁矿代表两个阶段矿化的叠加，其同位素组成也因此可能是两阶段流体的混合结果（图 4b）。样品 XG6 的闪锌矿颗粒裂隙中或表面溶蚀孔中常充填有碳酸盐矿物、石英和少量黄铁矿晶体等，可能也已经遭受后期热液活动的改造。上述表明，黄铁矿和闪锌矿的 Rb 和 Sr 同位素组成变化较大，主要原因可能是遭受后期热液活动的叠加改造。

虽然不同阶段硫化物未能给出有效的 Rb-Sr 等时线年龄，但其锶同位素比值仍然显示了重要的信息，可对矿床成因进一步约束。由于 Rb 和 Sr 不能进入硫化物晶格，仅能赋存于硫化物的包体矿物或流体包裹体中（陈光远等，1989；李华芹等，1993；Barton and Hallbauer, 1996；Lüders and Ziemann, 1999），而包体矿物通常为云母、长石等热液矿物（Han *et al.*, 2007），因此，硫化物的锶同位素组成可反映沉淀硫化物的流体特征。由于锶同位素属于重同位素，同位素分馏作用不明显，因此锶同位素是示踪成矿流体或物质来源的重要指示剂（Pettke and Diamond, 1997；祁进平等，2006）。

参考冷水北沟脉状铅锌银矿床的石英流体包裹体氩-氩年龄 $137.87 \pm 0.39\text{Ma}$ （燕长海，2004），假设 138Ma 为西沟铅锌银矿床的形成年龄，将各阶段硫化物锶同位素进行放射成因锶扣除，所得锶同位素初始值结果列于表 1。

由于多数硫化物 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 偏高 (>1)，可能会导致较大的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 误差（Jahn *et al.*, 2000；Chen and Arakawa 2005），并影响示踪结果，因此，非常有必要对高 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 导致的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 误差进行评估。对 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 误差进行计算并绘制了 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ vs. $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 相关图（图 5），发现 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 误差随 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 增大而增大，但除去两个 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值最高的点外，多数数据在误差范围内是一致的，因此可以用 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 进行源区示踪。

按 138Ma 计算，成矿早阶段细粒黄铁矿具有较低的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值（即 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值），范围为 $0.7100 \sim 0.7151$ ，平均 0.7127 ；相比早阶段，成矿主阶段硫化物 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值明显增高，且变化范围较大，粗粒黄铁矿的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值范围为 $0.7152 \sim 0.7344$ ，平均 0.7247 ；闪锌矿的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值为 $0.7108 \sim 0.7398$ ，平均 0.7283 。各成矿阶段硫化物的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值普遍高于 0.7100 ，成矿流体锶来源可能为壳源或富集地幔；主成矿阶段硫化物的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值高于早阶段，表明成矿流体和/或成矿物质源区更富集放射成因锶，应为地壳浅部的沉积物，可能主要来自赋矿围岩地层；两阶段矿化叠加部位的粗粒黄铁矿的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值介于两阶段硫化物 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值之间（图 3b，图 6），反映两种流体叠加成矿的特点。导致前述硫化物锶同位素特征的可能原因有两种：（1）成矿早阶段与主

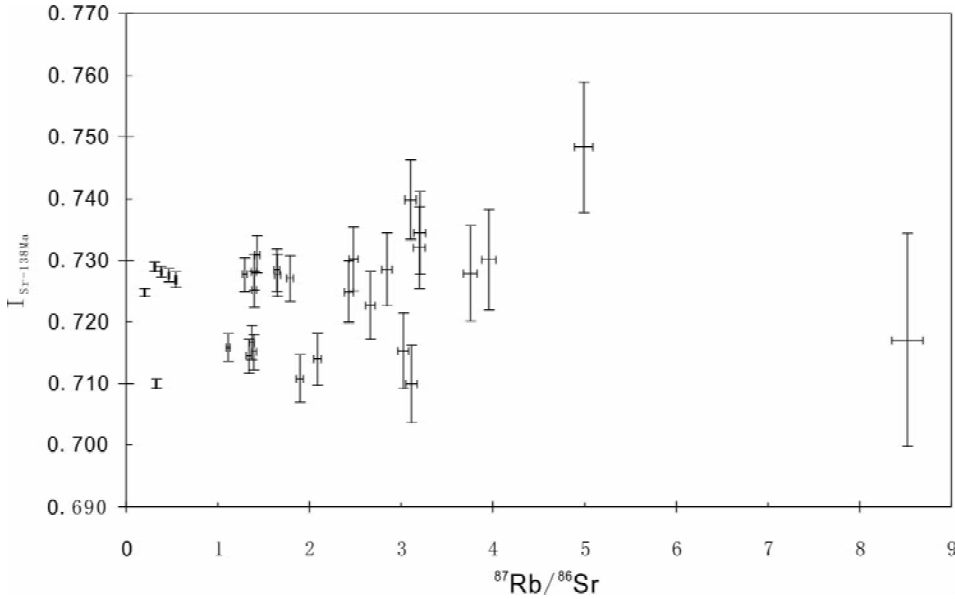


图5 西沟矿床矿石硫化物 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ vs. $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 相关图 ($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 误差按 2%)

Fig. 5 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} \sim I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ plots for sulfides from the Xigou deposit (supposing the error of $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ less than 2%)

阶段矿化具有不同性质或来源的流体；(2)成矿作用由同一种流体所致,随着流体与围岩相互作用的进行,流体系统的锶同位素比值升高。对于第一种可能,流体包裹体研究已初步证实早阶段深源含 CO_2 的中-高盐度流体和晚阶段浅源富水低盐度流体的存在和混合的可能性(祁进平,2009),氢氧同位素证据也显示了大气水或建造水的存在(刘国印等,2007),但仍需查明晚阶段流体是否曾与具有较高的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值的围岩发生过充分的水-岩相互作用。对于第二种可能,要求赋矿围岩必须具有较高的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值,而围岩栾川群恰好具有最高的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值(图6),随着成矿作用的进行,其围岩中的锶可逐渐影响成矿系统。总之,无论哪种可能,围岩地层可能都影响了流体的锶同位素组成。

成矿早阶段围岩蚀变较弱、矿物颗粒细小,表明矿物沉淀速度较快或沉淀空间较为局限,流体与围岩之间相互作用较弱,加之矿石矿物均为贫锶矿物,因此按 138Ma 计算的黄铁矿初始锶同位素组成能够代表流体的锶同位素特征,并接近流体源区的锶同位素特征。如此以来,早阶段黄铁矿锶同位素特征就成为探讨成矿系统起因和流体来源的关键,对比早阶段黄铁矿与相关地质体的锶同位素地球化学特征是揭示矿床成因的必须。成矿主阶段矿物颗粒较粗大,矿化伴随较强的碳酸盐蚀变,表明矿物沉淀速度较慢且空间开阔,流体与流经的碳酸盐地层之间的水-岩作用较强,因此,主成矿阶段硫化物锶同位素组成可能受围岩地层影响较大,反映的是初始成矿流体和流经地层的混合特征。

矿田内石宝沟、南泥湖等燕山期斑岩体 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₁ 值为 0.7047 ~ 0.7098(胡受奚等,1988; Chen *et al.*, 2000),东秦岭晚侏罗-早白垩花岗岩基的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₁ 值为 0.7050 ~ 0.7100(Chen *et al.*, 2000),这些岩体同位素年龄接近

138Ma,其 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₁ 值可视为 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$,它们均略低于西沟矿床早阶段硫化物的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值,但考虑到本区基底和盖层岩石均具有较高的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值,岩浆流体与流经围岩发生水岩作用后也可能产生与早阶段硫化物锶同位素特征相似的流体。因此,不能排除岩浆热液参与成矿的可能。

花岗岩类岩浆主要产生于下地壳甚或地幔,花岗岩类的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值应不低于源区下地壳或地幔的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值,如此以来,我们可以推断矿田乃至整个东秦岭的下地壳或地幔在 138Ma 时的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值应为 0.7050 ~ 0.7100 或更低。那么,138Ma 左右来自东秦岭下地壳或地幔的流体的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值也应为 0.7050 ~ 0.7100 或更低,远低于西沟矿床成矿流体系统的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值。因此,以地幔流体或来自下地壳流体为主导的流体难以解释西沟矿床硫化物锶同位素特征。

栾川群和官道口群地层的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值为 0.7118 ~ 0.8355,平均 0.7612($n = 15$),其中的大理岩类 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值较低,为 0.7121 ~ 0.7178,片岩类 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值较高(图6);熊耳群火山岩的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值为 0.7117 ~ 0.7649($n = 13$);基底太华超群的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值为 0.7072 ~ 0.8085,平均 0.7553($n = 12$)(图6)。上述地层构成了矿田的上地壳岩石,由其通过变质脱水、熔融而形成的流体或花岗岩类应该具有较高的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值,即 0.7072 ~ 0.8335。显然,上述上地壳岩石的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值覆盖了西沟矿床硫化物的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值(0.7100 ~ 0.7483),可以满足成矿物质和流体源区的要求。再考虑到矿体直接围岩主要为大理岩类,而大理岩类的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值与早阶段黄铁矿样品的 $I_{\text{Sr}-138\text{Ma}}$ 值最接近(表1),因此,赋矿围岩或类似岩石建造变质脱水很可能为成矿系统提供了成矿流体和物质。

关于矿田乃至东秦岭上地壳岩石在 138Ma 左右发生变

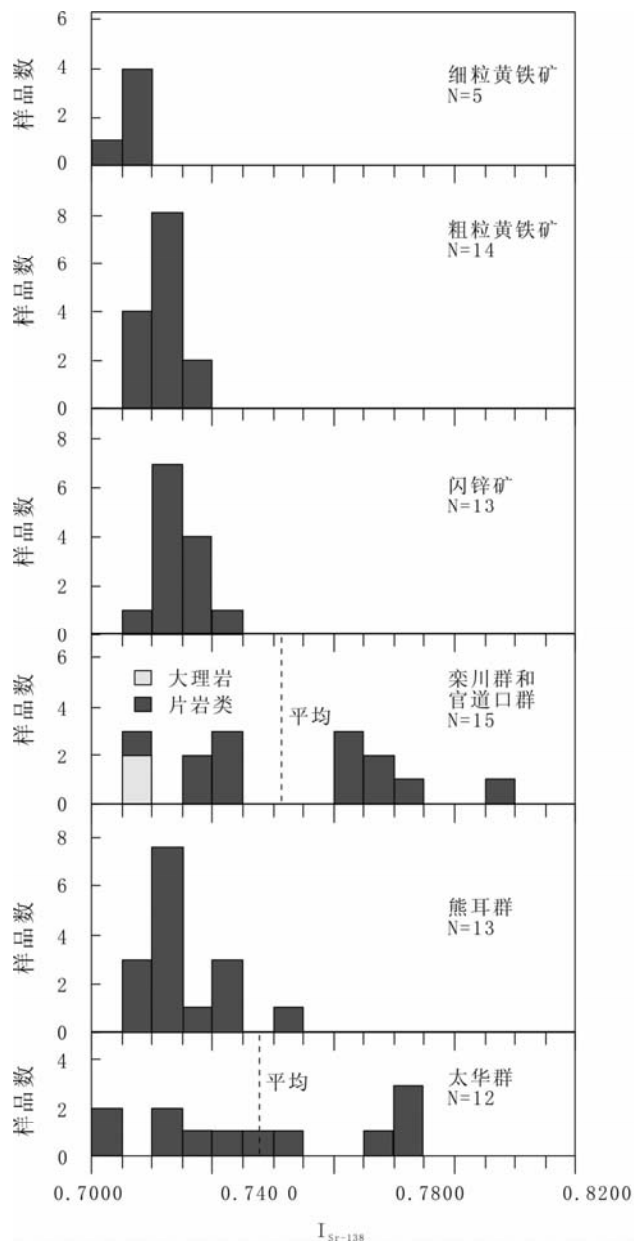


图6 西沟铅锌银矿床成矿流体和相关岩石初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值直方图

太华群、熊耳群以及官道口群和栾川群的原始数据分别引自栾世伟等(1985)、赵太平(2000)和祁进平(2006)

Fig. 6 Histogram of initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of ore fluids and associated rocks in the Xigou Pb-Zn-Ag deposit

Data of Taihua Group, Xionger Group and Guandaokou and Luanchuan Groups are cited from Luan Shiwei *et al.* (1985), Zhao Taiping (2000) and Qi Jinping (2006), respectively.

质脱水作用的构造机理和证据,前人已经进行了大量讨论和例证(胡受奚等,1988;陈衍景和富士谷,1992;Chen *et al.*, 2000, 2004;张国伟等,2001;张静等,2004, 2006),本文不再重复论述。

综上所述,西沟铅锌银矿床成矿早阶段可能主要来自上

地壳物质的变质脱水作用或岩浆热液,晚阶段可能有大气水或地层建造水的参与,流体与浅部盖层相互作用可能导致成矿主阶段硫化物铷同位素比值高于早阶段。

4 结论

(1)西沟铅锌银矿床赋矿的钙质二云片岩中片理化黑云母的Rb-Sr等时线年龄为 366.0 ± 10 Ma,反映了围岩区域变质年龄;鉴于矿床无遭受区域变质作用迹象,且矿化细脉切穿了钙质二云片岩中的片理和大理岩条带,可确定成矿应晚于 366.0 ± 10 Ma。

(2)西沟矿床硫化物 $I_{\text{Sr-138Ma}}$ 值总体大于0.710,从早到晚增高,指示成矿物质和流体主要为壳源,成矿系统受赋矿围岩地层的影响逐步增强。

(3)西沟矿床早阶段成矿流体可能主要来自上地壳地层变质脱水流体或岩浆热液,晚阶段可能有大气水或地层建造水的参与,成矿流体与浅部盖层相互作用导致成矿主阶段硫化物铷同位素比值高于早阶段硫化物。

致谢 研究工作得到陈衍景和阎国翰教授指导,野外考察得到孙卫志和刘国印高级工程师的热情帮助,包志伟研究员对论文修改提出了宝贵建议,肖平女士在实验过程中给予大力支持,特此致谢。

References

- Barton ES, Hallbauer DK. 1996. Trace-element and U-Pb isotope compositions of pyrite types in the Proterozoic Black Reef, Transvaal Sequence, South Africa: Implications on genesis and age. *Chemical Geology*, 133: 173–199
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Henan Province. 1989. *Regional Geology of Henan Province*. Beijing: Geological Publishing House, 772 (in Chinese with English abstract)
- Chen B, Arakawa Y. 2005. Elemental and Nd-Sr isotopic geochemistry of granitoids from the West Junggar foldbelt (NW China), with implications for Phanerozoic continental growth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(5), 1307–1320
- Chen F, Li QL, Li CF, Li XH, Wang XL, Wang F. 2005. Prospect of high precision mass spectrometer in isotope geochemistry. *Earth Science – Journal of China University of Geosciences*, 30(6): 639–645 (in Chinese with English abstract)
- Chen F, Zhu XY, Wang W, Wang F, Pham T-H, Siebel W. 2009. Single-grain detrital muscovite Rb-Sr isotopic composition as an indicator of provenance for the Carboniferous sedimentary rocks in northern Dabie, China. *Geochemical Journal*, 43: 257–273
- Chen GY, Sun DS, Shao W, 1989. *Genetic Mineralogy of Gold Deposits in Jiaodong Region with Emphasis on Gold Prospecting*. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1–452 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Chen HY, Zaw K, Pirajno F, Zhang ZJ. 2007. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: an overview. *Ore Geology Reviews*, 31: 139–169

- Chen YJ, Fu SG, Hu SX. 1988. The main element character and its significance of different type greenstone belts in south margin of North-China platform. *J. Nanjing University (Earth sciences)*, (1): 70–83 (in Chinese)
- Chen YJ, Fu SG, Qiang LZ. 1992. The tectonic environment for the formation of the Xiong'er Group and the Xiyanghe Group. *Geological Review*, 38(4): 325–333 (in Chinese)
- Chen YJ, Fu SG. 1992. Gold Mineralization in West Henan, China. Beijing: Seismological Press, 234 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Li C, Zhang J, Li Z, Wang HH. 2000. Sr and O isotopic characteristics of porphyries in the Qinling molybdenum deposit belt and their implication to genetic mechanism and type. *Science in China Series D*, 43(Supp.): 82–94
- 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, 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, 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: 551–568 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Zhao YC. 1997. Geochemical characteristics and evolution of REE in the Early Precambrian sediments: evidences from the southern margin of the North China craton, Episodes, 20(2): 109–116
- Chen YJ. 1998. Fluidization model for continental collision in special reference to study on ore-forming fluid of gold deposits in the eastern Qinling mountains, China. *Progress in Natural Sciences*, 8(4): 385–393
- Chen YJ. 2006. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential. *Geology in China*, 33(6): 1181–1196 (in Chinese with English abstract)
- Chen YL, Zhang BR. 1994. Pb, Sr and Nd isotope geochemistry of Yanshanian and granitoids on southern margin of North China Craton in Western Henan Province. *Earth Science – Journal of China University of Geosciences*, 19(3): 375–382 (in Chinese with English abstract)
- Han YG, Li XH, Zhang SH, Zhang YH and Chen FK. 2007. Single grain Rb-Sr dating of euhedral and cataclastic pyrite from the Qiyugou gold deposit in western Henan, central China. *Chinese Science Bulletin*, 52(13): 1820–1826
- Hu SX, Lin QL, Chen ZM, Li SM. 1988. *Geology and Metallogeny of the Collision Belt Between North China and South China Plates*. Nanjing: Nanjing University Press, 558 (in Chinese)
- Huang DH, Wu CY, Du AD, He HL. 1994. Re-Os isotope ages of molybdenum deposits in east Qinling and their significance. *Mineral Deposits*, 13(3): 221–230 (in Chinese with English abstract)
- Jahn BM, Wu F, and Chen B. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Trans. R. Soc. Edinburgh Earth Sci.*, 91, 181–193
- Li HQ. 1993. The study of fluid inclusion chronology of hydrothermal deposits and its geological application. Beijing: Geological Publishing House, 126 (in Chinese)
- Li N, Chen YJ, Zhang H, Zhao TP, Deng XH, Wang Y and Ni ZY. 2007. Molybdenum deposits in East Qinling. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 186–198 (in Chinese with English abstract)
- Li QL, Chen F, Wang XL, Li XH and Li CF. 2006. Ultra-low procedural blank and the single-grain mica Rb-Sr isochron dating. *Chinese Science Bulletin*, 50(24): 2861–2865
- Li QL, Chen F, Yang JH, Fan HR. 2008. Single grain pyrite Rb-Sr dating of the Linglong gold deposit, eastern Shandong, China. *Ore Geology Reviews*. 34: 263–270
- Li QZ, Chen YJ, Zhong ZQ, Li WL, Li SR, Guo XD, Jin BY. 2002. Ar-Ar dating on metallogenesis of the Dongchunag gold deposit, Xiaoqinling area, China. *Acta Geol. Sin.*, 76(4): 483–493
- Li YF, Wang CQ, Bai FJ, Song YL. 2004. Re-Os isotopic ages of Mo deposits in East Qinling and their geodynamic settings. *Mineral Resources and Geology*, 18(6): 571–578 (in Chinese with English abstract)
- Li ZJ, Luo TC, Zhang BR. 1994. Geochemical characteristics and spatial compositional variation of Yanshanian intraplate granite – Porphyries on southern margin of North China craton. *Earth Science – Journal of China University of Geosciences*, 19(3): 383–389 (in Chinese with English abstract)
- Liu GH, Zhang SG, You ZD, Suo ST, Zhang GW *et al.* 1993. Metamorphic history of main metamorphic complexes in the Qinling orogenic belt. Beijing: Geological Publishing House, 190 (in Chinese)
- Liu GY, Yan CH, Song YW, Duan SG. 2007. Characteristics and genesis of Chitudian lead-zinc deposits in Luanchuan County. *Geological Survey and Research*, 30(4): 263–270 (in Chinese with English abstract)
- Lu WD, Sun WZ. 2004. Metallogenic condition of lead and zinc deposit in Lushi-Luanchuan terrain. *Mineral Resources and Geology*, 106(18): 507–516 (in Chinese with English abstract)
- Luan SW, Cao DC, Fang YK, Wang JY. 1985. Geochemistry of Xiaoqinling gold deposits. *Minerals and Rocks*, 5(2): 118 (in Chinese with English abstract)
- Lüders V, Ziemann M. 1999. Possibilities and limits of infrared light microthermometry applied to studies of pyrite-hosted fluid inclusions. *Chemical Geology*, 154: 169–178
- Ludwig KR. 2000. *Users Manual for Isoplot/Ex: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley, CA, USA, 53
- Nakai S, Halliday A N, Kesler S E, Jones H D. 1990. Rb-Sr dating of sphalerites from Tennessee and the genesis of Mississippi Valley type ore deposits. *Nature*, 346: 354–347
- Nakai S, Halliday AN, Kesler SE, *et al.* 1993. Rb-Sr dating of sphalerites from Mississippi Valley Type (MVT) ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 417–427
- 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)
- Pettke T, Diamond LW. 1997. Oligocene gold quartz veins at Brusson, NW Alps; Sr Isotopes trace the source of ore-bearing fluid to over a 10-km depth. *Economic geology*, 92(4): 389–406
- 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. Sr-isotope constraint on the origin of the Xiaoqinling gold field. *Acta Petrologica Sinica*, 22

- (10): 2543–2550 (in Chinese with English abstract)
- Qi JP, Zhang J, and Tang GJ. 2005. Carbon and oxygen isotope composition of the Meso-Neoproterozoic strata south of the Xiong'er terrane: evidence of the CMF model. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1365–1372 (in Chinese with English abstract)
- Qi JP. 2006. *Geology, Geochemistry and Genesis of Vein-Type Lead-zinc-silver Deposits in Luanchuan, Henan*. [Doctoral thesis]. Beijing: Peking University, 1–25 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZQ, Gao LD, Wang T, Jiang CF. 2008. Microfossils from the siltstones and muddy slates: Constraint on the age of the Taowan Group in the Northern Qinling Orogenic Belt, Central China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51(2): 172–180
- Xu ZW, Lu XC, Yang RY, Xie XJ, Ren QJ. 2000. Geochemistry and metallogenesis of the Shangfang porphyry molybdenum deposit in Luanchuan, Henan. *Geology and Prospecting*, 36(1): 14–16 (in Chinese with English abstract)
- Yan CH. 2004. *Study on Inner Structure of Lead-Zinc-Silver Mineralization System in Eastern Qinling*. Beijing: Geological Publishing House, 144 (in Chinese with English abstract)
- Yan HQ, Pei YH, Song YW, Yun H. 2007. Geological characteristics of stratiform lead-zinc-silver deposit in Xigou, Luanchuan, Henan province and its genesis. *Mineral Resources and Geology*, 21(3): 245–250 (in Chinese with English abstract)
- Yang JH, Zhou X H. 2001. Rb-Sr, Sm-Nd, and Pb isotope systematics of pyrite: Implications for the age and genesis of lode gold deposits. *Geology*, 29(8): 711–714
- Ye HS, Mao JW, Li YF *et al.* 2006. Characteristics and metallogenic mechanism of Mo-W and Pb-Zn-Ag deposits in Nannihu ore field, Western Henan Province. *Geoscience*, 20(1): 165–174 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC, Xiao QH. 2001. *Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics*. Beijing: Science Press, 855 (in Chinese)
- Zhang J, Chen YJ, Chen HY, Wan SQ, Zhang G and Wang JM. 2006. Isotope geochemistry of the Yindongpo gold deposit, Tongbai County, Henan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2551–2560 (in Chinese with English abstract)
- Zhang J, Chen YJ, Li GP, Li ZL and 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 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 SG, Wan YS, Liu GH, Cong RX, Zhao ZR. 1991. *Metamorphic Geology of the Kuanping group in the Northern QinLing Mountains*. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 119 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZQ, Liu DY and Fu GM. 1994. *Geochronology of the Metamorphic Strata in the North Qinling*. Beijing: Geological Publishing House, 191 (in Chinese)
- Zhao TP, Xu YH, Zhai MG. 2007. Petrogenesis and tectonic setting of the Paleoproterozoic Xiong'er Group in the southern part of the North China Craton: a Review. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 191–206 (in Chinese with English abstract)
- Zhao TP, Zhou MF, Jin CW, Guan H, Li HM. 2001. Discussion on age of the Xiong'er Group in southern margin of north China craton. *Chinese Journal of Geology*, 36(3): 326–334 (in Chinese with English abstract)
- Zhao TP. 2000. *Petrology and Geochemistry of the Proterozoic Volcanic Rocks of the Xiong'er Group in the Southern Margin of the North China Craton*. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, CAS, 1–102 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈福坤, 李秋立, 李潮峰, 等. 2005. 高精度质谱计在同位素地球化学的应用前景. *地球科学*, 30(6): 639–645
- 陈光远, 孙岱生, 邵伟. 1989. *胶东金矿床成因矿物学与找矿*. 重庆: 重庆大学出版社, 1–452
- 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
- 陈衍景, 富士谷, 胡受奚. 1988. 华北地台南缘不同类型绿岩带的主要元素特征及意义. *南京大学学报地学版*, (1): 70–83
- 陈衍景, 富士谷, 强立志. 1992. 评熊耳群和西阳河群形成的构造背景. *地质论评*, 38(4): 325–333
- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律. 北京: 地震出版社, 234
- 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
- 陈岳龙, 张本仁. 1994. 华北克拉通南缘豫西燕山期花岗岩类的 Pb, Sr, Nd 同位素地球化学特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 19(3): 375–382
- 河南省地质矿产局. 1989. *河南省区域地质志*. 北京: 地质出版社, 772
- 胡受奚, 林潜龙, 陈泽铭, 黎世美. 1988. 华北与华南古板块拼合带地质与成矿. 南京: 南京大学出版社, 558
- 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 何红蓼. 1994. 东秦岭地区钼矿床的铷-锶同位素年龄及其意义. *矿床地质*, 13(3): 221–230
- 李华芹, 刘家齐, 魏林. 1993. 热液矿床流体包裹体年代学研究及其地质应用. 地质出版社, 1–126
- 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
- 李永峰, 王春秋, 白风军, 宋艳玲. 2004. 东秦岭钼矿 Re-Os 同位素年龄及其成矿动力学背景. *矿产与地质*, 18(6): 571–578
- 李泽九, 骆庭川, 张本仁. 1994. 华北地台南缘燕山期板内花岗岩类地球化学特征及成分空间变化规律. *地球科学——中国地质大学学报*, 19(3): 383–389
- 刘国惠, 张寿广, 游振东, 索书田, 张国伟等. 1993. 秦岭造山带主要变质岩群及变质演化. 地质出版社, 190
- 刘国印, 燕长海, 宋要武, 段士刚. 2007. 河南栾川赤土店铅锌矿床特征及成因探讨. *地质调查与研究*, 30(4): 263–270
- 吕文德, 孙卫志. 2004. 卢氏-栾川地体铅锌矿成矿地质条件分析及找矿远景. *矿产与地质*, 106(18): 507–516
- 栾世伟, 曹殿春, 方耀奎, 王嘉运. 1985. 小秦岭金矿床地球化学. *矿物岩石*, 5(2): 1–118
- 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锶钨铅同位素约束. *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铍同位素约束. 岩石学报, 22: 2543-2550
- 祁进平, 张静, 唐国军. 2005. 熊耳地体南侧中晚元古代地层碳氧同位素组成: CMF 模式的证据. 岩石学报, 21(5): 1365-1372
- 祁进平. 2006. 河南栾川地区脉状铅锌银矿床地质地球化学特征及成因(博士论文). 北京: 北京大学, 1-125
- 祁进平. 2009. 河南栾川西沟铅锌银矿床流体包裹体及铷同位素研究(博士后研究报告). 广州, 中国科学院广州地球化学研究所, 1-62
- 徐兆文, 陆现彩, 杨荣勇等. 2000. 河南省栾川县上房斑岩钨矿床地质地球化学特征及成因. 地质与勘探, 36(1): 14-16
- 严海麒, 裴玉华, 宋要武, 云辉. 2007. 河南栾川西沟层状铅-锌-银矿床地质特征及成因探讨. 矿产与地质, 21(3): 245-250
- 燕长海. 2004. 东秦岭铅锌银成矿系统内部结构. 北京: 地质出版社, 144
- 叶会寿, 毛景文, 李永峰, 燕长海, 郭保健, 赵财胜, 何春芬, 郑榕芬, 陈莉. 2006. 豫西南泥湖矿田钨钼及铅锌银矿床地质特征及其成矿机理探讨. 现代地质, 20(1): 165-174
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉(主编). 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 855
- 张静, 陈衍景, 陈华勇, 万守全, 张冠, 王建明. 2006. 河南省桐柏县银洞坡金矿床同位素地球化学. 岩石学报, 22(10): 2551-2560
- 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
- 张莉, 杨荣生, 毛世东, 鲁颖淮, 秦艳, 刘红杰. 2009. 阳山金矿床铷铅同位素组成特征与成矿物质来源. 岩石学报, 25(11): 2811-2822
- 张寿广, 万渝生, 刘国惠, 丛日祥, 赵子然. 1991. 北秦岭宽坪群变质地质. 北京科学技术出版社, 119
- 张宗清, 刘敦一, 付国民. 1994. 北秦岭变质地层同位素年代研究. 北京: 地质出版社, 191
- 赵太平, 徐勇航, 翟明国. 2007. 华北陆块南部元古宙熊耳群火山岩的成因与构造环境: 事实与争议. 高校地质学报, 13(2): 191-206
- 赵太平, 周美夫, 金成伟, 关鸿, 李惠民. 2001. 华北陆块南缘熊耳群形成时代讨论. 地质科学, 36(3): 326-334
- 赵太平. 2000. 华北陆块南缘元古宙熊耳群钾质火山岩特征与成因(博士学位论文). 北京: 中国科学院地质与地球物理所, 1-102