

东秦岭沙沟银铅锌矿床成矿流体来源的锶同位素约束^{*}

韩金生¹ 姚军明^{1**} 邓小华²

HAN JinSheng¹, YAO JunMing^{1**} and DENG XiaoHua²

1. 中国科学院广州地球化学研究所矿物与成矿重点实验室, 广州 510640

2. 北京大学造山带与地壳演化重点实验室, 北京 100871

1. Key Lab of Mineral and Mineralization, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

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

2012-08-09 收稿, 2012-11-02 改回.

Han JS, Yao JM and Deng XH. 2013. Sr-isotope constraint on the source of the fluids forming the Shagou Ag-Pb-Zn deposit, eastern Qinling orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 18–26

Abstract The Shagou Ag-Pb-Zn deposit is a quartz-vein system hosted in amphibolites and gneisses of the Taihua Group in the Xiong'er Terrane, on the southern margin of the North China Craton. In this paper, we present the Sr isotopic data of fluid inclusions in quartz separates from the Shagou deposit, and calculate the initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios at 145Ma (i. e. $I_{\text{Sr-145}}$) when the deposit was formed. The $I_{\text{Sr-145}}$ values of eight quartz samples range from 0.72019 to 0.73096, with an average of 0.72726. Comparing with the associated lithologies in the Xiong'er Terrane and adjacent areas, it is concluded that the ore-forming fluids can not be only sourced from the Taihua Group. The possibility that Taihua Group mixed with Xiong'er Group or Yanshanian granitoids was excluded. Instead, the scenario shows that a crustal slab containing the Guandaokou and Luanchuan groups subducted northward along the Machaoying fault belts and provided the ore fluids which upwardly moved and interacted with the wallrocks to develop the Shagou Ag-Pb-Zn deposit.

Key words Sr isotope; Shagou Ag-Pb-Zn deposit; Xiong'er Terrane; A-type subduction

摘 要 沙沟银铅锌矿床位于华北克拉通南缘的熊耳地体,属于受断裂带控制的中温脉状矿床。本文对沙沟含矿石英脉流体包裹体进行了锶同位素分析,并利用前人获得的成矿年龄(145Ma)进行了返算,获得其 $I_{\text{Sr-145}}$ 变化于0.72019~0.73096之间,平均为0.72726。通过与熊耳地体及邻区相关地质体锶同位素组成对比,认为沙沟银铅锌矿的成矿流体不可能单独来自太华群,也不可能来自太华群与熊耳群或燕山期岩浆岩的混合,而可能是官道口群+栾川群经变质脱水产生的成矿流体与太华群水岩相互作用的结果。

关键词 锶同位素; 沙沟银铅锌矿床; 熊耳地体; A型俯冲

中图法分类号 P595

1 引言

熊耳地体是华北克拉通南缘的前寒武纪地体之一,也是秦岭造山带最北部的组成部分。区内发现大、中型金、银、铅

锌矿床十多处,矿化点50余个,是我国重要的金、银矿集区之一(图1)(陈衍景和富士谷,1992; Chen *et al.*, 2004, 2006, 2009; 祁进平等, 2005)。该区热液矿床多以含矿石英脉形式产出,集中分布于马超营断裂及花山杂岩之间,被称为康山-上官脉状热液矿床带(陈衍景和富士谷,1992)。前

* 本文受国家973项目(2006CB403500)和国家自然科学基金项目(40872067, 41072061, 41202050)联合资助。

第一作者简介: 韩金生,男,1985年生,博士生,矿床学专业, E-mail: hjs010051@163.com

** 通讯作者: 姚军明,男,1970年生,副研究员,矿床学专业, E-mail: yaojunming@gig.ac.cn

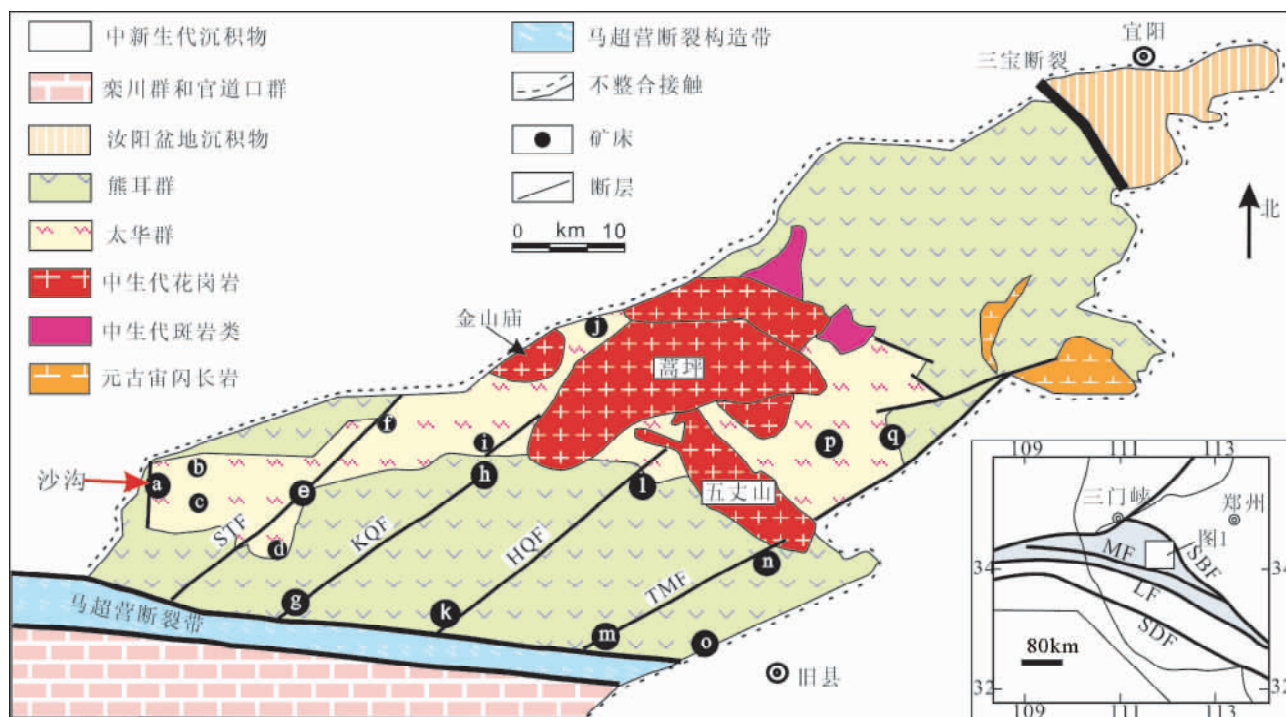


图1 熊耳地体地质和矿床分布图(据陈衍景, 2006)

断裂名称: SBF-三宝断裂; SDF-商丹断裂; MF-马超营断裂; LF-栾川断裂; STF-三门-铁炉坪断裂; KQF-康山-七里坪断裂; HQF-红庄-青岗坪断裂; TMF-陶村-马园断裂。矿床名称: a-沙沟银铅锌矿床; b-蒿坪沟银铅矿; c-寨凹钼矿; d-龙门店钼矿; e-铁炉坪银铅矿; f-小池沟金矿; g-康山金银钼矿; h-上官金矿; i-虎沟金矿; j-沙坡岭钼矿; k-红庄金矿; l-青岗坪金矿; m-潭头金矿; n-瑶沟金矿; o-前河金矿; p-雷门沟钼矿; q-祁雨沟金矿

Fig. 1 Simplified geologic map of the Xiong'er Terrane showing the distribution of ore deposits in the Xiong'er Terrane (after Chen, 2006)

Name of fault: SBF-San-bao fault; SDF-Shang-dan fault; MF-Machaoing fault; LF-Luanchuan fault; STF-Sanmen-Tieluping fault; KQF-Kangshan-Qiliping fault; HQF-Hongzhuang-Qinggangping fault; TMF-Taocun-Mayuan fault. Ore deposits: a-Shagou Ag-Pb-Zn; b-Haopinggou Ag-Pb; c-Zhaiwa Mo; d-Longmendian Mo; e-Tieluping Ag-Pb; f-Xiaochigou Au; g-Kangshan Au-Ag-Pb; h-Shangong Au; i-Hugou Au; j-Shapoling Mo; k-Hongzhuang Au; l-Qinggangping Au; m-Tantou Au; n-Yaogou Au; o-Qianhe Au; p-Leimengou Mo; q-Qiyugou Au

人已对该区金银矿床开展了大量研究, 获得了诸多重要认识(陈衍景和富士谷, 1992; 范宏瑞等, 1993, 1994; Chen *et al.*, 2004, 2006, 2009; Fan *et al.*, 2011)。但对于其成矿流体来源分歧较大, 已有观点包括: (1) 花岗岩体(范宏瑞等, 1993, 1994; 王长明等, 2006); (2) 太华群和熊耳群(任富根, 1996); (3) 地幔流体(任富根, 1996); (4) 中新元古界地层(Chen *et al.*, 2004; 祁进平等, 2005, 2006)。

沙沟银铅锌矿床是近些年由河南省有色地质勘查局、河南发恩德矿业有限公司查明的大型银铅锌矿床, 已控制矿石量 154 万吨, 银品位 767 g/t, 铅品位 13.24%, 锌品位 4.31%, 规模已达大型(郑榕芬等, 2006)。目前关于该矿床成矿流体来源的研究较少, 高建京(2007)、高建京等(2010)根据氢-氧同位素数据, 认为其成矿流体以岩浆流体为主导。但由于岩浆水与变质水范围上有着较大的重叠(Hoefs, 1997), 加之又广泛存在着水-岩相互反应使得产物更加复杂, 因此氢-氧同位素数据在区分岩浆水和变质水这个问题上仍有其不足(Kerrick *et al.*, 2000)。近年来, 部分学者开始采用锶、钕、

铅等同位素方法, 示踪成矿流体和成矿物质来源, 取得了较为理想效果(Pettke and Diamond, 1997; Jiang *et al.*, 1999; Yang and Zhou, 2001; Chen *et al.*, 2004, 2009; Barker *et al.*, 2009; 祁进平等, 2009; Ni *et al.*, 2012; Deng *et al.*, 2012b)。本文对沙沟银铅锌矿床含矿石英脉中的流体包裹体进行锶同位素测定, 并通过与熊耳地体及邻区相关地质体的锶同位素进行对比, 以限定沙沟银铅锌矿的成矿流体来源。

2 区域地质背景

沙沟矿床位于华北克拉通南缘的熊耳地体(图1)。熊耳地体北以三宝断裂为界, 南以马超营断裂为界, 是华北克拉通继小秦岭金矿田之后发现的又一金银铅锌矿集中区(杨群周等, 2004)。该区先后经历了 1850 Ma 早前寒武纪结晶基底形成、中元古代到古生代的大陆边缘增生以及中生代

扬子板块与华北板块碰撞有关的陆内挤压与伸展作用(陈衍景和富士谷, 1992)。

熊耳地体地层单元主要由变质基底太华群和熊耳群盖层组成。太华群包括背孜群(3.0~2.55Ga)、荡泽河群(2.5~2.3Ga)和水滴沟群(2.3~2.1Ga)(Chen and Zhao, 1997; Xu *et al.*, 2009), 主要岩性包括斜长角闪片麻岩、斜长角闪岩、角闪岩、黑云斜长片麻岩、变粒岩、石墨片岩、大理岩、石英岩、条带状铁建造等, 并在哥伦比亚超大陆汇聚期间(1.95~1.82Ga)经历了角闪岩相到麻粒岩相的变质作用(陈衍景和富士谷, 1992; Chen and Zhao, 1997; 陈衍景等, 2000; Rogers and Santosh, 2002; Wan *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2009; Santosh, 2010; Zhai and Santosh, 2011)。熊耳群是一套以安山岩为主的火山-沉积岩系, 主要岩性包括玄武安山岩、安山岩、英安岩、粗安岩及火山凝灰岩等(Chen *et al.*, 2008), 形成于1.80~1.75Ga(Zhao *et al.*, 2009; 赵太平等, 2004)。关于熊耳群的成因尚有分歧, 一部分人认为是古宽坪洋沿栾川断裂向北俯冲所导致的弧岩浆作用产物(陈衍景和富士谷, 1992; Zhao *et al.*, 2004, 2009; Deng *et al.*, 2012a, b); 另一部分则认为其与秦岭洋的开启有关, 是裂谷作用的产物(Kusky and Li, 2003; 赵太平等, 2004)。

熊耳地体大量发育中生代燕山期的花岗岩类, 包括花山杂岩及一系列与成矿密切相关的小斑岩体、爆破角砾岩等

(图1)。其中, 花山杂岩分布在熊耳地体的核心, 由五丈山(锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 $156.8 \pm 1.2\text{Ma}$)、蒿坪(锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 $130.7 \pm 1.4\text{Ma}$)、金山庙(锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 $132.0 \pm 1.6\text{Ma}$) 3 个大型花岗岩基组成(李永峰, 2005)。小斑岩体及爆破角砾岩等分布在花山杂岩以北, 并蕴含雷门沟斑岩钼矿和祁雨沟爆破角砾岩型金矿床(李永峰等, 2006; Chen *et al.*, 2009; 姚军明等, 2009; Fan *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2012)。区内断裂构造发育, 尤以马超营断裂最为醒目(图1)。马超营断裂呈近东西向展出, 被认为是华北与扬子板块碰撞期间倾向北的 A 型陆内俯冲带(陈衍景和富士谷, 1992) 或指向南的厚皮推覆构造带(张国伟等, 2001)。在花山杂岩南侧发育一系列次级 NE 向断裂, 近平行等距分布, 并控制了区内多数金、银矿床的产出(图1; Chen *et al.*, 2004, 2008, 2009)。

3 矿床地质特征

沙沟银铅锌矿位于河南省洛宁县, 其地理坐标范围为东经 $111^{\circ}15' \sim 111^{\circ}17'$, 北纬 $34^{\circ}09' \sim 34^{\circ}11'$ 。大地构造位置位于熊耳地体西南部(图1), 矿区出露地层主要为变质基底太华群和盖层熊耳群, 以及白垩系沉积物。矿区少见岩浆岩出露, 仅在矿区东北部发现零星出露的未矿化小型斑岩体(图2)。

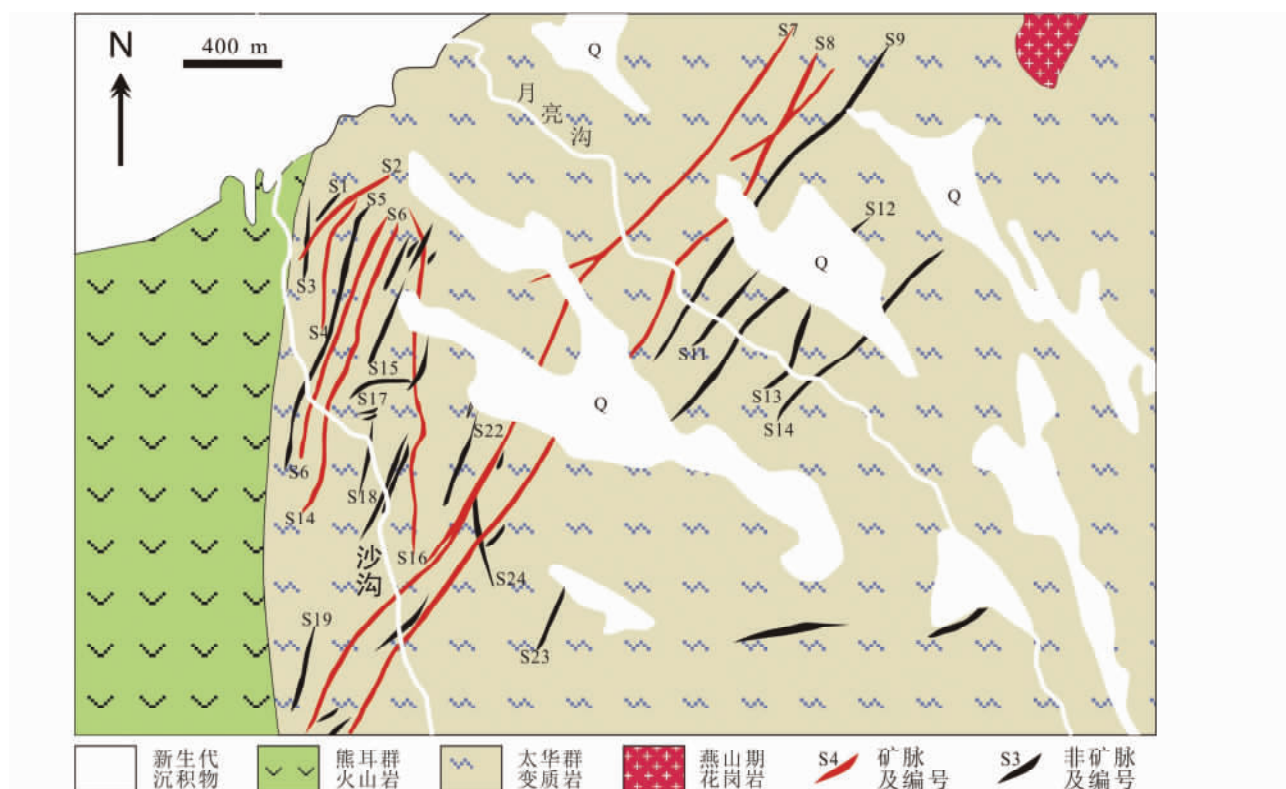


图2 沙沟银铅锌矿主要矿脉分布简图(据高建京等, 2010 修改)

Fig.2 Distribution of ore veins in the Shagou Ag-Pb-Zn deposit (modified after Gao *et al.*, 2010)

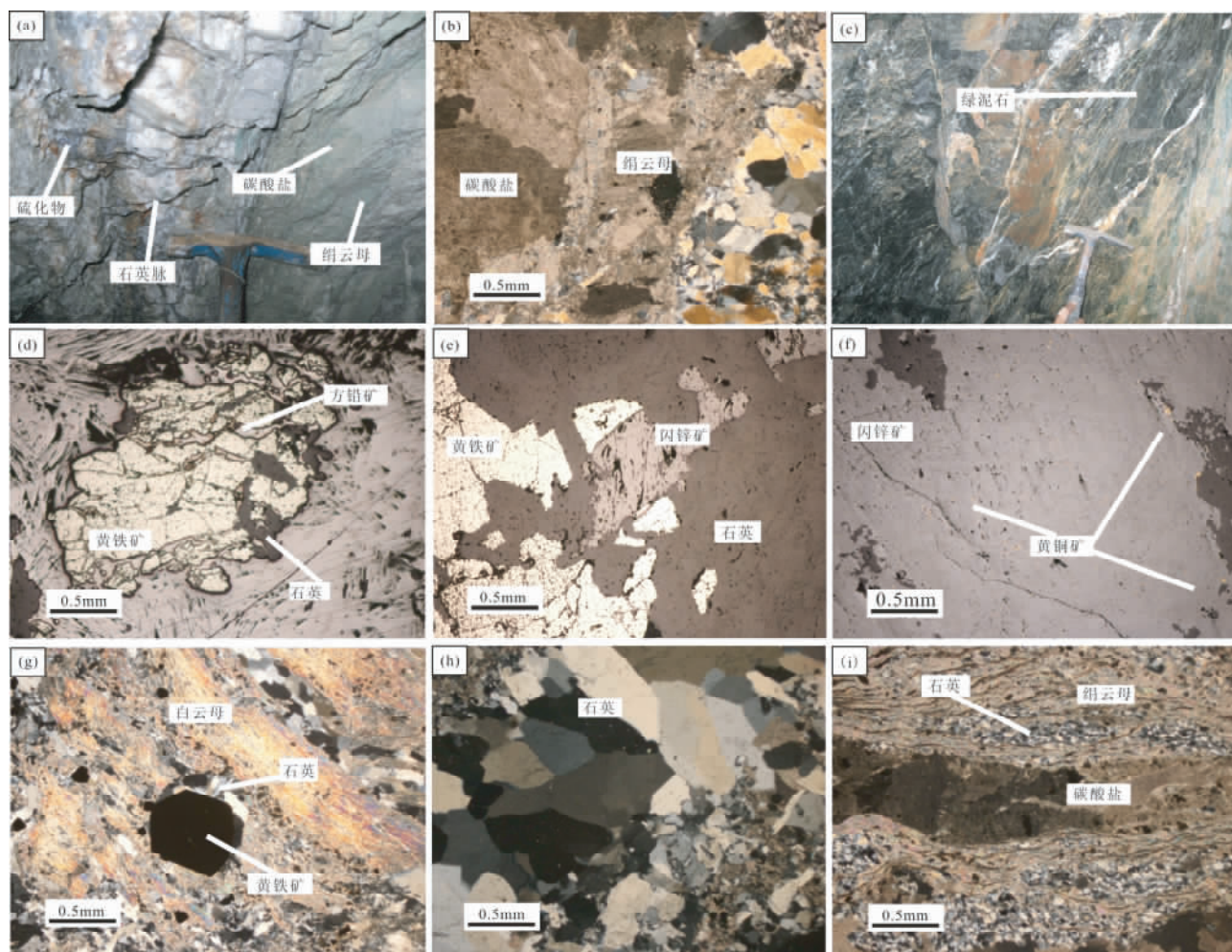


图3 沙沟 Ag-Pb-Zn 矿体及矿石显微照片

(a) -硅化-碳酸盐化-绢云母化蚀变; (b) -碳酸盐化和绢云母化蚀变共生在一起; (c) -局部见绿泥石化; (d) -方铅矿包裹黄铁矿; (e) -闪锌矿贯入黄铁矿裂隙; (f) -乳滴状黄铜矿; (g) -黄铁矿压力影构造; (h) -晚阶段梳状石英; (i) -晚阶段梳状碳酸盐

Fig. 3 Photos of outcrop and micrographs of the Shagou Ag-Pb-Zn deposit

(a) -quartz-carbonate-sericite alteration; (b) -carbonate-sericite alteration; (c) -local chlorite alteration; (d) -pyrite in galena; (e) -sphalerite in the fissure of pyrite; (f) -emulsion texture of chalcopyrite; (g) -pressure shadow of pyrite; (h) -comb structure of quartz; (i) -comb structure of carbonate

沙沟银铅锌矿赋矿地层为太华群草沟组和石板沟组,岩性为黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩、混合岩化片麻岩等。区内破碎蚀变带发育,与围岩呈断面接触,共计 20 余条,矿体呈脉状赋存于破碎蚀变带中,大致平行并近等间距分布,走向多为 NE 方向。有工业意义的矿脉包括 S2、S4、S6、S7、S8、S14、S16 等;以 S7、S8 规模最大,长可达 3000m,宽 15m (图 2)。

近矿围岩蚀变类型主要有硅化、绢云母化、碳酸盐化等,一般为以矿体为中心向两侧依次为硅化-碳酸盐化、硅化-绢云母化、硅化-碳酸盐化-绢云母化,并可见碳酸盐化与绢云母化共生在一起(图 3a, b)。矿区硅化极为普遍,主要表现为石英脉沿构造破碎带贯入,是本区最普遍的一种蚀变类型。碳酸盐化也是该矿区主要的蚀变类型,主要表现为形成一系列碳酸盐矿物,如菱铁矿、菱镁矿、方解石和含铁白云石等。

绢云母化则贯穿成矿过程始终,一般比较靠近矿脉。绿泥石化局部出现,一般与矿化无关(图 3c)。沙沟矿床的矿石矿物包括黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿及多种含银硫化物,脉石矿物包括石英、绢云母、方解石、绿泥石及碳酸盐等。矿石结构包括填隙结构、溶蚀结构、乳滴状结构、包含结构等,如方铅矿熔蚀黄铁矿、粗粒方铅矿交代黄铁矿(图 3d),闪锌矿贯入黄铁矿裂隙中(图 3e),闪锌矿包含乳滴状黄铜矿呈固溶体分离结构(图 3f)等。矿石构造包括块状、脉状、条带状等构造。

通过野外穿插关系及室内镜下观察,将沙沟银铅锌矿成矿过程大致划分为 3 个阶段:(1) 石英-黄铁矿阶段,主要形成石英、黄铁矿,偶见少量方铅矿及闪锌矿,黄铁矿可见压力影构造(图 3g);(2) 石英-多金属硫化物阶段,主成矿阶段,大量金属硫化物开始沉淀,可见方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄

表1 沙沟银铅锌矿含矿石英脉流体包裹体的锶同位素组成

Table 1 Sr isotope compositions of fluid inclusions in ore-bearing veins of the Shagou deposit

样品号	样品地质	Rb($\times 10^{-6}$)	Sr($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 1\sigma$	$I_{\text{Sr-145}}$
SG032	16 号脉中阶段石英	2.92	2.13	3.966	0.73883	± 2	0.73066
SG042	16 号脉中阶段石英	2.99	2.15	4.014	0.73745	± 6	0.72918
SG062	14 号脉中阶段石英	4.20	5.22	2.337	0.73199	± 6	0.72717
SG132	16 号脉中阶段石英	1.67	1.11	4.334	0.73989	± 3	0.73096
SG172	16 号脉早阶段石英	2.48	2.36	3.044	0.73604	± 4	0.72977
SG082	14 号脉早阶段石英	2.46	1.30	5.448	0.73684	± 4	0.72561
SG274	16 号脉中阶段石英	1.68	0.94	5.129	0.73515	± 3	0.72458
SG35	14 号脉中阶段石英	1.44	0.98	4.256	0.72896	± 3	0.72019
平均	N = 8						0.72726

注: $I_{\text{Sr-145}}$ 表示返算至 145Ma 时样品的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值

铜矿及部分银金属矿物,与绢云母化密切相关;(3) 石英-碳酸盐阶段,以发育石英及碳酸盐为特征,石英和碳酸盐均可见典型的梳状构造(图 3h,i),可见少量绢云母,此阶段热液活动趋近结束,硫化物少见。

4 样品及分析方法

本文对采自 14 号脉体和 16 号脉体的 8 件石英样品进行了锶同位素分析,主要为成矿早阶段和中阶段,镜下观察发现石英与黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等硫化物共生。手标本用水冲洗干净,粗碎,挑选干净的石英。再细碎,分选出粒度在 40~60 目的石英,清洗后,再双目镜下挑选干净的石英。

测试工作在中国地质科学院宜昌地质矿产研究所完成,所用仪器为德国产 MAT 261 质谱仪。在整个同位素分析过程中,用 NBS987 和 NBS607 标准物质对分析流程和仪器进行了监控。NBS987 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素组成的测定值为 $0.71023 \pm 54(2\sigma)$,相对于标准值 $0.71034 \pm 26(2\sigma)$ 的相对偏差小于 0.015%;NBS607 长石标准物质与样品平行测定多次的平均值为: Rb 为 524.30×10^{-6} , Sr 为 65.46×10^{-6} , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 $1.20048 \pm 52(2\sigma)$,与推荐值在测定误差范围内一致。同位素分析样品制备的全过程均在净化实验室内完成,与样品同时测定的全流程 Rb、Sr 空白本底分别为 $5 \times 10^{-10}\text{g}$ 和 $2 \times 10^{-10}\text{g}$ 。对所有样品均进行了本底校正。

5 锶同位素组成及其对成矿流体来源的约束

沙沟银铅锌矿含矿石英脉中流体包裹体的 Rb、Sr 同位素分析结果见表 1。其中 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 根据实测的元素含量和锶同位素比值计算而得。本次分析获得 8 件样品的 Rb 含量变化于 $1.444 \times 10^{-6} \sim 4.225 \times 10^{-6}$,平均 2.483×10^{-6} ; Sr 含量变化于 $0.9445 \times 10^{-6} \sim 5.224 \times 10^{-6}$,平均 2.026×10^{-6} ; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 变化于 $0.72896 \sim 0.73989$,平均 0.73564。为获得成矿时的锶同位素组成,将所获结果进行了返算。考虑到沙

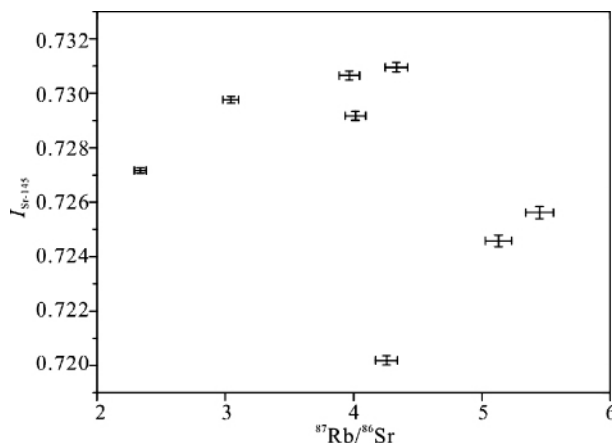


图4 沙沟银铅锌矿含矿石英脉 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ - $I_{\text{Sr-145}}$ 相关图 ($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 误差按 2%)

Fig. 4 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ vs. $I_{\text{Sr-145}}$ plots for ore fluids from the Shagou Ag-Pb-Zn deposit (supposing the error of $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ less than 2%)

沟银铅锌矿近矿蚀变岩中绢云母和铬云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄分别为 $145 \pm 1.1\text{Ma}$ 和 $147.0 \pm 1.5\text{Ma}$ (毛景文等, 2006),本文采用 145Ma 作为沙沟矿床的成矿年龄。将所得数据扣除成矿后放射成因 ^{87}Sr 的积累,即可获得成矿时(145Ma)流体的锶同位素组成,记为 $I_{\text{Sr-145}}$ 。

8 件沙沟含矿石英脉流体包裹体的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值普遍偏高(>1),这将导致所计算的中生代初始 Sr 同位素比值有较大的误差(Jahn *et al.*, 2000; Chen and Arakawa, 2005),因此我们有必要对高的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 导致的 $I_{\text{Sr-145}}$ 误差进行评估。我们对 $I_{\text{Sr-145}}$ 误差进行计算并绘制了 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ - $I_{\text{Sr-145}}$ 相关图(图 4),如图所示, $I_{\text{Sr-145}}$ 误差随 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 增大而增大,但数据在误差范围内是大体一致的,因此可以用 $I_{\text{Sr-145}}$ 进行源区示踪。如此,获得样品的 $I_{\text{Sr-145}}$ 相对集中,变化于 $0.72019 \sim 0.73096$,表明沙沟银铅锌矿成矿流体应为壳源(Chen *et al.*, 2005),而非幔源(一般低于 0.710)。

为准确探究成矿流体来源及其与赋矿地质体的关系,我

表 2 熊耳地体相关地质体的锶同位素组成

Table 2 Sr isotope compositions of geologic bodies in the Xiong'er Terrane

样品号	测试对象	Rb($\times 10^{-6}$)	Sr($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$	$I_{\text{Sr-145}}$
太华群(数据引自倪智勇等,2009; Xu <i>et al.</i> , 2009)							
DH-08-08	斜长角闪片麻岩	107	226	1.3710	0.716458		0.71363
DH-08-12	斜长角闪片麻岩	200	272	2.1292	0.716072		0.71168
DH-08-15	斜长角闪片麻岩	140	282	1.4405	0.736418		0.73345
DH-08-16	斜长角闪片麻岩	168	306	1.5926	0.733996		0.73071
ZK-628	斜长角闪片麻岩	131	379	1.0028	0.735122		0.73306
Q1	角闪岩	115	354	0.9392	0.713966		0.71203
QL0701	黑云母片麻岩	45.0	481	0.2698	0.713757		0.71320
平均	N = 7						0.72111
熊耳群(数据引自赵太平,2000)							
X-1	高钾玄武安山岩	250	249	1.0040	0.727168	± 17	0.72510
X-2	高钾玄武安山岩	218	188	1.1620	0.731116	± 40	0.72872
X-3	高钾玄武安山岩	373	181	2.0580	0.740808	± 70	0.73657
X-5	高钾玄武安山岩	339	167	2.0230	0.733532	± 40	0.72936
X-6	高钾玄武安山岩	152	173	0.8792	0.722901	± 50	0.72109
X-7	高钾玄武安山岩	213	291	0.7335	0.727601	± 80	0.72609
ZD-32	高钾玄武安山岩	243	370	0.6570	0.720915	± 27	0.71956
SY-33	高钾玄武安山岩	139	375	0.3706	0.712655	± 26	0.71189
WF-9	橄榄玄粗岩	172	243	0.7081	0.723507	± 16	0.72205
JY-11	高钾安山岩	242	276	0.8752	0.726522	± 21	0.72472
JY-5	安粗岩	333	418	0.7971	0.724808	± 28	0.72317
XS-25	流纹岩	376	110	3.4240	0.771653	± 23	0.76460
B-1	辉长岩	152	483	0.3151	0.712320	± 30	0.71167
平均	N = 13						0.72651
花山杂岩(数据引自赵太平,未发表数据)							
HP-1	蒿坪岩体	138	542	0.7381	0.708437	± 13	0.70692
HP-2	蒿坪岩体	281	205	3.9764	0.714800	± 13	0.70660
HS-1	花山岩体	199	357	1.6152	0.711413	± 13	0.70808
HS-2	花山岩体	182	762	0.6901	0.710011	± 14	0.70859
WC	五丈山岩体	129	1395	0.2671	0.707987	± 14	0.70744
WC	五丈山岩体	128	974	0.3812	0.708382	± 8	0.70760
平均	N = 6						0.70754
官道口群 + 栾川群(数据引自祁进平等,2006)							
Y02	黑云片岩	171	49.5	10.1079	0.801489	± 50	0.78066
Y03	千枚岩	172	39.0	12.9239	0.823405	± 50	0.79677
Y21	黑云大理岩	22.6	83.0	0.7884	0.713691	± 12	0.71207
L8	黑云母石英片岩	200	35.5	16.4746	0.815509	± 20	0.78155
L31	石墨二云片岩	154	37.9	11.8953	0.826730	± 50	0.80221
L32	石墨二云片岩	159	41.6	11.1438	0.803040	± 50	0.78007
L37	二云石英片岩	365	61.8	17.2059	0.782444	± 30	0.74698
L39	石英片岩	213	159	3.8845	0.754001	± 15	0.74599
L40	钙质黑云石英片岩	227	39.2	16.8676	0.767240	± 18	0.73247
L41	钙质石英片岩	130	47.9	7.8876	0.747720	± 20	0.73146
L42	弱矿化黑云石英片岩	201	61.6	9.4748	0.759172	± 20	0.73964
B26	角砾化大理岩	2.50	65.9	0.1099	0.718022	± 20	0.71780
B27	石英片岩	84.7	180	1.3640	0.714441	± 20	0.71163
B28	白云石英片岩	163	30.3	15.7725	0.866395	± 17	0.83389
B29	白云石英片岩	87.5	25.2	10.1561	0.810584	± 20	0.78965
平均	N = 15						0.76019

注: $I_{\text{Sr-145}}$ 表示返算至 145Ma 时样品的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值

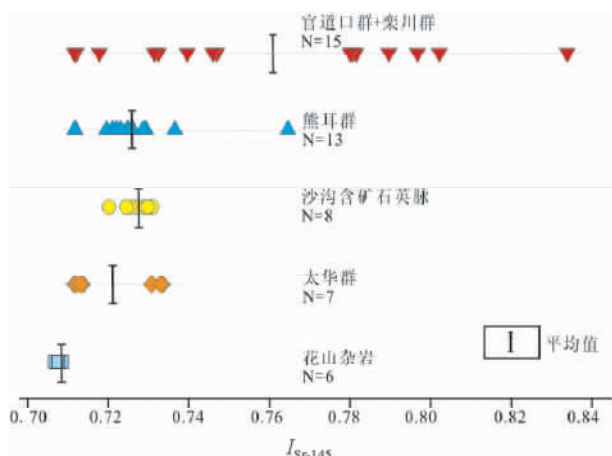


图5 沙沟银铅锌矿含矿石英脉和相关地质体 $I_{\text{Sr-145}}$ 对比图

Fig. 5 $I_{\text{Sr-145}}$ histogram of ore fluids and associated rocks in the Xiong'er Terrane

们收集了熊耳地体相关地质体的锶同位素数据,并将其返算为145Ma时的 $I_{\text{Sr-145}}$ (表2)。其中,花岗岩体的 $I_{\text{Sr-145}}$ 范围为0.70660~0.70859,平均0.70754;熊耳群的 $I_{\text{Sr-145}}$ 范围为0.71167~0.76460,平均0.72651;太华群的 $I_{\text{Sr-145}}$ 范围为0.71168~0.73345,平均0.72111。

由于熊耳地体分布着众多燕山期的岩浆岩,部分学者认为该区金银矿床成矿物质和成矿流体来自燕山期花岗质岩浆(高建京,2007;高建京等,2010),其主要依据之一就是成矿阶段石英的氢-氧同位素数据落入岩浆水和变质水附近。如果沙沟银铅锌矿的成矿流体来自于燕山期花岗岩浆,其成矿流体的锶同位素组成应该和燕山期岩浆岩相同。然而,沙沟含矿石英脉的 $I_{\text{Sr-145}}$ 变化于0.72019~0.73.960,平均0.72726;而燕山期花岗岩(花山杂岩) $I_{\text{Sr-145}}$ 变化于0.70660~0.70859,平均0.70754。由此看出,成矿流体的 $I_{\text{Sr-145}}$ (≥ 0.72019)远高于燕山期花岗岩(花山杂岩)(≤ 0.70859)(图5),表明成矿流体不可能单独来自岩浆。

当然,尚存在另外一个可能,即:初始成矿流体可能来自于岩浆,流体和围岩发生水岩反应,汲取了围岩中的锶,从而使得成矿流体的 $I_{\text{Sr-145}}$ 介于岩浆和围岩之间。事实上,本文获得含矿石英脉的 $I_{\text{Sr-145}}$ (0.72019~0.73096)落入赋矿围岩太华群的 $I_{\text{Sr-145}}$ (0.71168~0.73345)范围内,但含矿石英脉的 $I_{\text{Sr-145}}$ 平均值(0.72726)高于太华群($I_{\text{Sr-145}}$ 平均值为0.72111)。因此,沙沟矿床成矿流体也不可能来自岩浆流体与围岩太华群的混合,促使我们考虑其它来源。

沙沟银铅锌矿的赋矿围岩为太华群,本文获得含矿石英脉的 $I_{\text{Sr-145}}$ 也落入赋矿围岩太华群的 $I_{\text{Sr-145}}$ 范围内,太华群是无法排除的主要成矿物质来源之一。太华群也常常被认为是熊耳地体矿床成矿流体的来源(范宏瑞等,1993,1994;王长明等,2006)。但沙沟银铅锌矿含矿石英脉的 $I_{\text{Sr-145}}$ 平均值为0.72726,高于太华群的 $I_{\text{Sr-145}}$ 平均值0.72111,表明除太

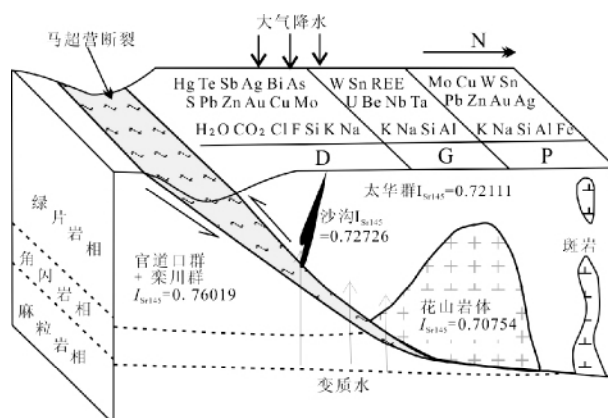


图6 沙沟银铅锌矿成矿模式图

Fig. 6 Metallogenic model for the Shagou Ag-Pb-Zn deposit

华群外,还存在另一端元的物源区,且这一端元必须具有较高含量的放射性成因Sr。区内另一重要围岩熊耳群具有相对高的 $I_{\text{Sr-145}}$,变化在0.71167~0.76460之间;虽然熊耳群普遍遭受钠长石化、绿泥石化、绿帘石化等低温热液蚀变作用(赵太平,2000),无法排除熊耳群安山岩的高 $I_{\text{Sr-145}}$ 是低温热液蚀变的结果,即便如此,熊耳群的 $I_{\text{Sr-145}}$ 平均值0.72651仍低于含矿石英脉的 $I_{\text{Sr-145}}$ 平均值0.72726,从而排除了熊耳群作为沙沟银铅锌矿另一个成矿流体来源的可能。另外,熊耳群并没有任何遭受区域变质作用的迹象,从地质上也排除了熊耳群做为沙沟银铅锌矿成矿流体来源的可能。

如此,熊耳地体内的各地质体难以满足沙沟矿床的锶同位素组成。这促使我们将眼光放宽,寻求熊耳地体之外的物源区。熊耳地体的南边界为马超营断裂,断裂以南大量发育中新元古代地层(官道口群+栾川群),且中新元古界地层的 $I_{\text{Sr-145}}$ 变化于0.71163~0.83389,平均值为0.76019,高于沙沟银铅锌矿含矿石英脉的 $I_{\text{Sr-145}}$ 平均值0.72726,满足具有较高含量的放射性成因Sr的条件。而且马超营断裂在中生代早期表现为倾向北的A型陆内俯冲带(陈衍景和富士谷,1992)或指向南的厚皮推覆构造带(张国伟等,2001),据此,我们认为,马超营断裂以南的官道口群+栾川群在中生代沿马超营断裂向北A型俯冲到熊耳地体之下,发生变质脱水产生大量具有高锶同位素组成的成矿流体,成矿流体流经赋矿围岩太华群,经水岩相互作用使成矿流体的 $I_{\text{Sr-145}}$ 有所降低,赋存于沙沟银铅锌矿的含矿石英脉中。结合其地质背景、构造环境、成矿时代等,应用CMF模式(Chen *et al.*, 2004)可以合理的解释沙沟银铅锌矿的成矿作用,其应该属于CMF模式的D带产物(图6)。

6 结论

沙沟银铅锌矿成矿时间大约在145Ma左右,利用本文获得的锶同位素比值进行返算获得沙沟银铅锌矿含矿石英脉

的 $I_{\text{Sr-445}}$ 相对集中,变化于 0.72019 ~ 0.73096,指示成矿流体为壳源。通过与熊耳地体及邻区相关地质体锶同位素的对比,认为沙沟银铅锌矿的成矿流体不可能单独来自太华群,也不可能来自太华群与熊耳群或太华群与燕山期岩浆岩的混合,而更可能是官道口群 + 栾川群在中生代沿马超营断裂向北俯冲,经变质脱水产生的成矿流体与太华群水岩相互作用的结果。

致谢 研究工作得到陈衍景教授的指导;野外工作得到河南省有色金属地质矿产局陈德杰、杨群周、王永争和梁涛博士的大力帮助以及河南发恩德矿业有限公司的支持;样品测试得到了宜昌所杨红梅教授的帮助;两位评审人提出了宝贵的修改意见;特此致谢!

References

Barker SLL, Bennett VC, Cox SF, Norman MD and Gagan MK. 2009. Sm-Nd, Sr, C and O isotope systematics in hydrothermal calcite-fluorite veins: Implications for fluid-rock reaction and geochronology. *Chemical Geology*, 268(1-2): 58-66

Chen B and 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 YJ and Fu SG. 1992. Gold Mineralization in West Henan, China. Beijing: Seismological Press, 1-234 (in Chinese)

Chen YJ and Zhao YC. 1997. Geochemical characteristics and evolution of in the Early Precambrian sediments: Evidence from the southern margin of the North China Craton. *Episodes*, 20: 109-116

Chen YJ, Liu CQ, Chen HY, Zhang ZJ and Li C. 2000. Carbon isotope geochemistry of graphite deposits ore-bearing khondalite series in North China: Implications for several geoscientific problems. *Acta Petrologica Sinica*, 16(2): 233-244 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ, Pirajno F and Sui YH. 2004. Isotope geochemistry of the Tieluping silver-lead deposit, Henan, China: A case study of orogenic silver-dominated deposits and related tectonic setting. *Mineralium Deposita*, 39(5-6): 560-575

Chen YJ, Pirajno F and Qi JP. 2005. Origin of gold metallogeny and sources of ore-forming fluids, Jiaodong province, eastern China. *International Geology Review*, 47(5): 530-549

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 YJ, Pirajno F, Qi JP, Li J and 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, Pirajno F and Qi JP. 2008. The Shangong gold deposit, eastern Qinling Orogen, China: Isotope geochemistry and implications for ore genesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(3-4): 252-266

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(2): 245-261

Deng XH, Chen YJ, Santosh M and Yao JM. 2012a. Genesis of the 1.76Ga Zhaiwa Mo-Cu and its link with the Xiong'er volcanics in the North China Craton: Implications for accretionary growth along the margin of the Columbia supercontinent. *Precambrian Research*, doi: 10.1016/j.precamres.2012.02.014

Deng XH, Chen YJ, Santosh M, Zhao GC and Yao JM. 2012b. Metallogeny during continental outgrowth in the Columbia supercontinent: Isotopic characterization of the Zhaiwa Mo-Cu system in the North China Craton. *Ore Geology Reviews*, doi: 10.1016/j.

oregeorev.2012.11.004

Fan HR, Xie YH and Wang YL. 1993. The properties of magmatic hydrothermal fluid of Huashan granitic batholith in western Henan Province and their relationship to gold mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 9(2): 136-145 (in Chinese with English abstract)

Fan HR, Xie YH, Zhao R and Wang YL. 1994. Stable isotope geochemistry of rocks and gold deposits in the Xiongershan area, western Henan Province. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 9(1): 54-64 (in Chinese with English abstract)

Fan HR, Hu FF, Wilde SA, Yang KF and Jin CW. 2011. The Qiyugou gold-bearing breccia pipes, Xiong'er shan region, central China: Fluid-inclusion and stable-isotope evidence for an origin from magmatic fluids. *International Geology Review*, 53(1): 25-45

Gao JJ. 2007. Geology and ore-forming fluid of silver-lead-zinc lode deposit of Shagou, western Henan Province. Master Degree Thesis. Beijing: Chinese University of Geosciences, 1-49 (in Chinese with English summary)

Gao JJ, Mao JW, Ye HS, Chen MH and Zheng RF. 2010. Geology and ore-forming fluid of silver-lead-zinc lode deposit of Shagou, western Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 740-756 (in Chinese with English abstract)

Hoefs J. 1997. *Stable Isotope Geochemistry*. 4th Edition. Berlin: Springer-Verlag, 1-201

Jahn B, Wu F and Chen B. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Transactions-Royal Society of Edinburgh*, 91(350): 181-194

Jiang SY, Han F, Shen JZ and Palmer MR. 1999. Chemical and Rb-Sr, Sm-Nd isotopic systematics of tourmaline from the Dachang Sn-polymetallic ore deposit, Guangxi Province, PR China. *Chemical Geology*, 157(1): 49-67

Kerrick R, Goldfarb R, Groves D, Garwin S and Jia YF. 2000. The characteristics, origins, and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces. *Science in China (Series D)*, 43(1): 1-68

Kusky TM and Li JH. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(4): 383-397

Li N, Carranza E J M, Ni ZY and Guo DS. 2012. The CO₂-rich magmatic-hydrothermal fluid of the Qiyugou breccia pipe, Henan Province, China: Implication for breccia genesis and gold mineralization. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 12(2): 147-160

Li YF. 2005. The temporal-spatial evolution of mesozoic granitoids in the Xiong'er shan area and their relationships to molybdenum-gold mineralization. Ph. D. Dissertation. Beijing: Chinese University of Geosciences, 63-68 (in Chinese with English summary)

Li YF, Mao JW, Liu DY, Wang YB, Wang ZL, Wang YT, Li XF, Zhang ZH and Guo BJ. 2006. SHRIMP zircon U-Pb and molybdenite Re-Os datings for the Leimengou porphyry molybdenum deposit, western Henan and its geological implication. *Geological Review*, 52(1): 122-131 (in Chinese with English abstract)

Mao JW, Zheng RF, Ye HS, Gao JJ and Chen W. 2006. ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of fuchsite and sericite from altered rocks close to ore veins in Shagou large-size Ag-Pb-Zn deposit of Xiong'er shan area, western Henan Province, and its significance. *Mineral Deposits*, 25(4): 359-368 (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)

Ni ZY, Chen YJ, Li N and Zhang H. 2012. Pb-Sr-Nd isotope constraints on the fluid source of the Dahu Au-Mo deposit in Qinling Orogen, central China, and implication for Triassic tectonic setting. *Ore Geology Reviews*, 46: 60-67

Pettke T and Diamond LW. 1997. Oligocene gold quartz veins at Brusson, NW Alps: Sr isotopes trace the source of ore-bearing fluid to ore a 10-km depth. *Economic Geology*, 92(4): 389-406

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, Lai Y, Ren KX and Tang GJ. 2006. Sr-isotope constraint on the origin of the Xiaolinling gold field. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (10): 2543–2550 (in Chinese with English abstract)
- Qi JP, Song YW, Li SQ and Chen FK. 2009. Single-grain Rb-Sr isotopic composition of the Xigou Pb-Zn-Ag deposit, Luchuan, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (11): 2843–2854 (in Chinese with English abstract)
- Ren FG. 1996. Ore-forming Geological Conditions and Models for Gold Exploration in the Xiongershan-Xiaoshan Area. Beijing: Geological Publishing House, 1–130 (in Chinese)
- Rogers JJW and Santosh M. 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent. *Gondwana Research*, 5(1): 5–22
- Santosh M. 2010. Assembling North China Craton within the Columbia supercontinent: The role of double-sided subduction. *Precambrian Research*, 178(1–4): 149–167
- Wang CM, Deng J and Zhang ST. 2006. Relationship between Huashan granite and gold mineralization in Xiongershan area, Henan. *Geoscience*, 20(2): 315–321 (in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Wilde SA, Liu DY, Yang CX, Song B and Yin XY. 2006. Further evidence for ~1.85Ga metamorphism in the Central Zone of the North China Craton: SHRIMP U-Pb dating of zircon from metamorphic rocks in the Lushan area, Henan Province. *Gondwana Research*, 9(1–2): 189–197
- Xu XS, Griffin WL, Ma X, O'Reilly SY, He ZY and Zhang CL. 2009. The Taihua Group on the southern margin of the North China craton: Further insights from U-Pb ages and Hf isotope compositions of zircons. *Mineralogy and Petrology*, 97(1–2): 43–59
- Yang JH and Zhou XH. 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
- Yang QZ, Peng SL, Zhang L, Zhang SW and Liu ZJ. 2004. Analysis for exploration prospecting of copper ore in the Xiong'er shan geodome of Henan Province. *Geology and Prospecting*, 40(1): 12–16 (in Chinese with English abstract)
- Yao JM, Zhao TP, Li J, Sun YL, Yuan ZL, Chen W and Han J. 2009. Molybdenite Re-Os and zircon U-Pb age and Hf isotope geochemistry of the Qiyugou gold system, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 374–384 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2004. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: Assembly, growth and breakup. *Earth-Science Reviews*, 67(1–2): 91–123
- Zhao GC, He YH and Sun M. 2009. The Xiong'er volcanic belt at the southern margin of the North China Craton: Petrographic and geochemical evidence for its outboard position in the Paleo-Mesoproterozoic Columbia Supercontinent. *Gondwana Research*, 16(2): 170–181
- Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC and Xiao QH. 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Beijing: Science Press, 1–855 (in Chinese)
- Zhai MG and Santosh M. 2011. The Early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview. *Gondwana Research*, 20(1): 6–25
- Zhao TP. 2000. The characteristic and genesis of Proterozoic potassic volcanic rock in southern margin of the North plate. Ph. D. Dissertation. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1–102 (in Chinese with English summary)
- Zhao TP, Zhai MG, Xia B, Li HM, Zhang YX and Wan YS. 2004. Study on the zircon SHRIMP ages of the Xiong'er Group volcanic rocks: Constraint on the starting time of covering strata in the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 49(22): 2342–2349 (in Chinese)
- Zheng RF, Mao JW and Gao JJ. 2006. Characteristics of sulfide and silver minerals in Shagou silver-lead-zinc deposit of Xiong'er Shan, Henan Province, and their significance. *Mineral Deposits*, 25(6): 715–726 (in Chinese with English abstract)
- 及赋矿孔达岩系碳同位素特征及有关问题讨论. *岩石学报*, 16(2): 233–244
- 陈衍景. 2006. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力. *中国地质*, 33(6): 1181–1196
- 范宏瑞, 谢奕汉, 王英兰. 1993. 豫西花山花岗岩岩浆热液的性质及与金成矿的关系. *岩石学报*, 9(2): 136–145
- 范宏瑞, 谢奕汉, 赵瑞, 王英兰. 1994. 豫西熊耳山地区岩石和金矿床稳定同位素地球化学研究. *地质找矿论丛*, 9(1): 54–64
- 高建京. 2007. 豫西沙沟脉状 Ag-Pb-Zn 矿床地质特征和成矿流体研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学, 1–49
- 高建京, 毛景文, 叶会寿, 陈懋弘, 郑榕芬. 2010. 豫西沙沟脉状 Ag-Pb-Zn 矿床地质特征和成矿流体研究. *岩石学报*, 26(3): 740–756
- 李永峰. 2005. 豫西熊耳山地区中生代花岗岩类时空演化与钼(金)成矿作用. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学, 63–68
- 李永峰, 毛景文, 刘敦一, 王彦斌, 王志良, 王义天, 李晓峰, 张作衡, 郭保健. 2006. 豫西雷门沟斑岩钼矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 测年及其地质意义. *地质论评*, 52(1): 122–131
- 毛景文, 郑榕芬, 叶会寿, 高建京, 陈文. 2006. 豫西熊耳山地区沙沟银铅锌矿床成矿的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄及其地质意义. *矿床地质*, 25(4): 359–368
- 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锆钼铅同位素约束. *岩石学报*, 25(11): 2823–2832
- 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, 赖勇, 任康绪, 唐国军. 2006. 小秦岭金矿田成因的锆同位素约束. *岩石学报*, 22(10): 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单矿物钼-锆同位素组成特征. *岩石学报*, 25(11): 2843–2854
- 任富根. 1996. 熊耳山-崤山地区金矿成矿地质条件和找矿综合评价模型. 北京: 地质出版社, 1–130
- 王长明, 邓军, 张寿庭. 2006. 河南熊耳山地区花山花岗岩与金矿化的关系. *现代地质*, 20(2): 315–321
- 杨群周, 彭省临, 张林, 张侍威, 刘中杰. 2004. 河南熊耳山地区铜矿找矿前景分析. *地质与勘探*, 40(1): 12–16
- 姚军明, 赵太平, 李晶, 孙亚莉, 原振雷, 陈伟, 韩军. 2009. 河南栾雨沟金成矿系统辉钼矿 Re-Os 年龄和锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素地球化学. *岩石学报*, 25(2): 374–384
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 1–855
- 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: 中国科学院地质地球物理研究所, 1–102
- 赵太平, 翟明国, 夏斌, 李惠民, 张毅星, 万渝生. 2004. 熊耳群火山岩锆石 SHRIMP 年代学研究: 对华北克拉通盖层发育初始时间的制约. *科学通报*, 49(22): 2342–2349
- 郑榕芬, 毛景文, 高建京. 2006. 河南熊耳山沙沟银铅锌矿床中硫化物和银矿物的矿物学特征及其意义. *矿床地质*, 25(6): 715–726

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, 刘丛强, 陈华勇, 张增杰, 李超. 2000. 中国北方石墨矿床