

豫西银家沟杂岩体年代学、地球化学和岩石成因^{*}

李铁刚¹ 武广^{2**} 陈毓川³ 李宗彦⁴ 杨鑫生⁴ 乔翠杰⁴LI TieGang¹, WU Guang^{2**}, CHEN YuChuan³, LI ZongYan⁴, YANG XinSheng⁴ and QIAO CuiJie⁴

1. 中国地质大学地球科学与资源学院 北京 100083

2. 中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点开放实验室 北京 100037

3. 中国地质科学院 北京 100037

4. 河南省灵宝市金源矿业有限责任公司 灵宝 472500

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Land and Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

4. Henan Lingbao Jinyuan Mining Limited Liability Company, Lingbao 472500, China

2012-09-20 收稿, 2012-12-10 改回.

Li TG, Wu G, Chen YC, Li ZY, Yang XS and Qiao CJ. 2013. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Yinjiagou complex in western Henan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 46–66

Abstract The Yinjiagou complex, located in Lingbao City, western Henan Province, is mainly composed of monzogranite porphyry, K-feldspar granite porphyry and quartz diorite porphyry, with minor granodiorite and diorite porphyry dykes, which is closely related to the Yinjiagou porphyry-skarn pyrite-polymetallic deposit. The monzogranite porphyry, K-feldspar granite porphyry and granodiorite porphyry yielded zircon SHRIMP U-Pb ages of 147.5 ± 2.1 Ma, 147.8 ± 1.6 Ma and 142.0 ± 2.0 Ma, respectively, indicating that the Yinjiagou complex formed during the transition from Jurassic to Cretaceous. Both the monzogranite porphyry and K-feldspar granite porphyry have high contents of SiO_2 (65.17% ~ 73.94%), Al_2O_3 (13.53% ~ 15.96%) and K_2O (5.03% ~ 9.89%, mostly > 6.0%), but low contents of Na_2O (0.24% ~ 1.86%, mostly < 1.0%), Fe_2O_3 (0.82% ~ 3.71%), FeO (0.02% ~ 1.62%), MgO (0.23% ~ 1.47%, mostly < 1.0%) and CaO (0.08% ~ 1.98%, mostly < 0.4%). They have high aluminum saturation index (1.18 ~ 2.04, all > 1.1) and have been altered. The REE contents range from 71.38×10^{-6} to 276.4×10^{-6} , with mediately negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.57 \sim 0.88$) and strong REE fractionation ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 6.93 \sim 30.09$). The Yinjiagou complex is characterized by low Sr ($104 \times 10^{-6} \sim 461 \times 10^{-6}$, generally < 300×10^{-6}) and Yb contents ($0.90 \times 10^{-6} \sim 2.10 \times 10^{-6}$, mostly < 1.9×10^{-6}). The complex is enriched in Rb, Ba, Th, U, K, La, Ce, Nd, Hf and Zr, but strongly depleted in Sr, P and Ti, with moderate depletion of Nb and Ta. The geochemical signatures above are similar to those of post-collisional granitoids, suggesting that the Yinjiagou complex can be classified into the group of post-collisional granites. The complex has initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of 0.7069 ~ 0.7091 (mostly < 0.7085), $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values of -14.99 to -10.57, $t_{\text{DM1(Nd)}}$ of 1.41 ~ 1.76 Ga and $t_{\text{DM2(Nd)}}$ of 1.51 ~ 1.81 Ga, respectively. The $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios of K-feldspar range 17.376 ~ 17.628, 15.455 ~ 15.502 and 37.867 ~ 38.090, respectively. The Nd-Sr-Pb isotope systematics suggests that the Yinjiagou complex most likely originated from partial melting of a mixed source composed of the Kuanping, Erlangping and Taihua groups. The complex formed in a transitional tectonic setting from nearly EW-trending to nearly NNE-trending structures during the Late Jurassic-Early Cretaceous. The tectonic transition resulted in decompression in the East Qinling area, accommodating large-scale partial melting of the lower crust, including the formation of the Yinjiagou complex.

Key words Zircon SHRIMP U-Pb dating; Element geochemistry; Sr-Nd-Pb isotopes; Petrogenesis; Yinjiagou complex; East Qinling molybdenum ore belt

* 本文受国家自然科学基金项目(41172081)和河南省灵宝市金源矿业有限责任公司博士后科研项目(200906001)联合资助。

第一作者简介: 李铁刚,男,1985年生,硕士生,矿床学专业,E-mail: litiegang2008@yahoo.com.cn

** 通讯作者: 武广,男,1965年生,博士,研究员,矿床学和地球化学专业,E-mail: wuguang65@163.com

摘 要 银家沟杂岩体位于河南省灵宝市, 主要岩石类型为二长花岗斑岩、钾长花岗斑岩和石英闪长斑岩, 并有少量呈脉状产出的花岗闪长斑岩及闪长玢岩。该杂岩体是银家沟硫铁多金属矿床的成矿母岩。杂岩体的元素地球化学和锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究结果表明, 银家沟杂岩体二长花岗斑岩、钾长花岗斑岩和花岗闪长斑岩的侵位年龄分别为 147.5 ± 2.1 Ma、 147.8 ± 1.6 Ma 和 142.0 ± 2.0 Ma, 为晚侏罗世-早白垩世的产物。二长花岗斑岩和钾长花岗斑岩具有高的 SiO_2 (65.17% ~ 73.94%) 和 Al_2O_3 含量 (13.53% ~ 15.96%)、非常高的 K_2O 含量 (5.03% ~ 9.89%, 多数大于 6.0%), 但具有低的 Na_2O (0.24% ~ 1.86%, 多数小于 1.0%)、 Fe_2O_3 (0.82% ~ 3.71%)、 FeO (0.02% ~ 1.62%)、 MgO (0.23% ~ 1.47%, 多数小于 1.0%) 和 CaO 含量 (0.08% ~ 1.98%, 多数小于 0.4%), 铝指数 (ASI) 为 1.18 ~ 2.04, 全部大于 1.1, 应为热液蚀变引起。杂岩体的稀土元素总量介于 71.38×10^{-6} ~ 276.4×10^{-6} , 具有中等-微弱的 Eu 负异常 (δEu 介于 0.57 ~ 0.88), 稀土元素分馏强烈, 其 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 介于 6.93 ~ 30.1 之间, 为轻稀土富集型。岩石具有低 Sr (104×10^{-6} ~ 461×10^{-6} , 多数 $< 300 \times 10^{-6}$) 和 Yb 含量 (0.90×10^{-6} ~ 2.10×10^{-6} , 绝大多数 $< 1.9 \times 10^{-6}$)。在原始地幔标准化的微量元素蜘蛛网图中, 银家沟杂岩体富集 Rb、Ba、Th、U、K、La、Ce、Nd、Hf、Zr 等, 强烈亏损 Sr、P、Ti 等, 具有中等 Nb、Ta 亏损。主量、稀土和微量元素特征表明, 岩石具后碰撞花岗岩类的地球化学特征, 属后碰撞花岗岩。杂岩体的锆初始比值 (I_{Sr}) 为 0.7069 ~ 0.7091, 多数 < 0.7085 , $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -14.99 ~ -10.57, 亏损地幔单阶段 Nd 模式年龄为 1.41 ~ 1.76 Ga, 两阶段 Nd 模式年龄为 1.51 ~ 1.81 Ga; 钾长石 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围分别为 17.376 ~ 17.628、15.455 ~ 15.502 和 37.867 ~ 38.090, Nd、Sr 和 Pb 同位素组成指示银家沟杂岩体最可能源自宽坪群、二郎坪群和太华群的混合物。银家沟杂岩体形成于晚侏罗世-早白垩世期间的 EW 向构造体制向 NNE 向构造体制转换环境, 构造体制转换使东秦岭地区处于减压环境, 下地壳大规模部分熔融, 导致银家沟杂岩体形成。

关键词 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄; 元素地球化学; Sr-Nd-Pb 同位素; 岩石成因; 银家沟杂岩体; 东秦岭钼矿带

中图法分类号 P588.13; P597.3

东秦岭钼矿带北以三宝断裂为界, 南至商丹断裂, 西起陕西省洛南县的金堆城矿床, 东至河南省镇平县的秋树湾矿床。目前已发现金堆城、南泥湖、三道庄、上房沟、夜长坪、鱼池岭、东沟 7 个超大型钼(钨)矿床和黄龙铺、石家湾、雷门沟 3 个大型钼矿床以及秋树湾等 10 余个中型铜钼矿床(图 1), 钼金属储量已达 5×10^6 吨以上, 超过美国西部的 Climax-Henderson 斑岩钼矿带, 成为世界第一大钼矿带(李诺等, 2007; Mao *et al.*, 2008, 2011)。前人对东秦岭钼矿的矿床类型、成岩成矿时代、岩石成因及成岩成矿动力学背景进行了广泛的研究, 共识钼矿床类型有斑岩型、斑岩-矽卡岩型、矽卡岩型、碳酸岩脉型、热液脉型, 以前两者为主(胡受奚等, 1988; 陈毓川等, 1994; 陈衍景等, 2000; 李永峰等, 2005; Chen *et al.*, 2007; 李诺等, 2007; 李厚民等, 2008; 黄典豪等, 2009; 毛景文等, 2009)。矿床的成矿时代可以划分为: (1) 古元古代晚期-中元古代早期(1875 ~ 1686 Ma)、(2) 加里东期(约 429 Ma)、(3) 印支期(233 ~ 210 Ma)、(4) 燕山早期(156 ~ 132 Ma, 即侏罗纪-白垩纪之交)和(5) 燕山中晚期(128 ~ 107 Ma, 即早白垩世中晚期)等 5 个时期(李诺等, 2007; Mao *et al.*, 2008, 2011; Li *et al.*, 2011 及其文中的参考文献), 但大型、超大型矿床均形成于燕山期。成矿岩体时代集中于 158 ~ 136 Ma(毛景文等, 2005; 付治国等, 2007; 朱赖民等, 2008; 包志伟等, 2009; 焦建刚等, 2009; 赵海杰等, 2010; Li *et al.*, 2012a, b) 和 115 ~ 110 Ma(叶会寿等, 2006, 2008; 付治国等, 2007; 戴宝章等, 2009; 黄凡等, 2009; 杨晓勇等, 2010)。

尽管东秦岭地区地质研究程度总体较高, 但对中生代含矿斑岩成因、源区性质及成岩成矿构造背景仍存在较大争议。关于岩体成因及源区, 存在如下 3 种观点: (1) 区内深源

浅成岩体(李胜荣, 1994; 魏庆国等, 2009) (2) 源区可能为秦岭造山带基底物质(陈衍景和郭抗衡, 1993); (3) 包志伟等(2009)通过对南泥湖-上房沟成矿花岗斑岩的研究认为其源区为扬子克拉通北缘中生代向华北克拉通 A 型俯冲的地壳物质。关于成岩成矿的构造背景, 主要有 3 种观点: (1) 成岩成矿作用发生于大陆内部的挤压环境, 含矿岩体为同熔型花岗岩(胡受奚等, 1998); (2) 成矿岩体主要为 A 型俯冲产生的陆壳重熔型或碰撞型花岗岩, 成岩成矿作用发生在碰撞造山过程的挤压-伸展转变期, 并伴随岩石圈拆沉、减薄、造山带垮塌和断陷盆地发育等地质事件(陈衍景和富士谷, 1992; 陈衍景等, 2000; Li *et al.*, 2001; Chen *et al.*, 2004, 2009; 李诺等, 2007); (3) 成岩成矿作用发生在造山作用后的构造体制大转折晚期和岩石圈大规模快速减薄阶段(毛景文等, 2005; 李永峰等, 2005)。

银家沟矿床位于河南省西部, 是东秦岭钼矿带典型矿床之一, 也是河南省最大的硫铁多金属矿床。该矿床以硫铁储量巨大、及共/伴生元素复杂区别于区内其他以钼为主的矿床。但长期以来, 该矿床的研究一直未得到应有的重视, 除少量的矿床地质特征描述及矿床成因分析外(徐国凤, 1985; 陈衍景和郭抗衡, 1993; 颜正信等, 2007; 张孝民等, 2008), 尚未开展系统的研究工作。鉴于此, 本文选取银家沟矿床的成矿母岩——银家沟杂岩体为研究对象, 对其开展了系统的岩石地球化学、SHRIMP 锆石 U-Pb 定年和 Sr、Nd、Pb 同位素研究, 目的是查明银家沟杂岩体侵位时代、岩石成因和源区性质, 探讨其形成的地球动力学背景, 为东秦岭钼矿带中生代岩体成因和成岩成矿构造背景提供新的约束。

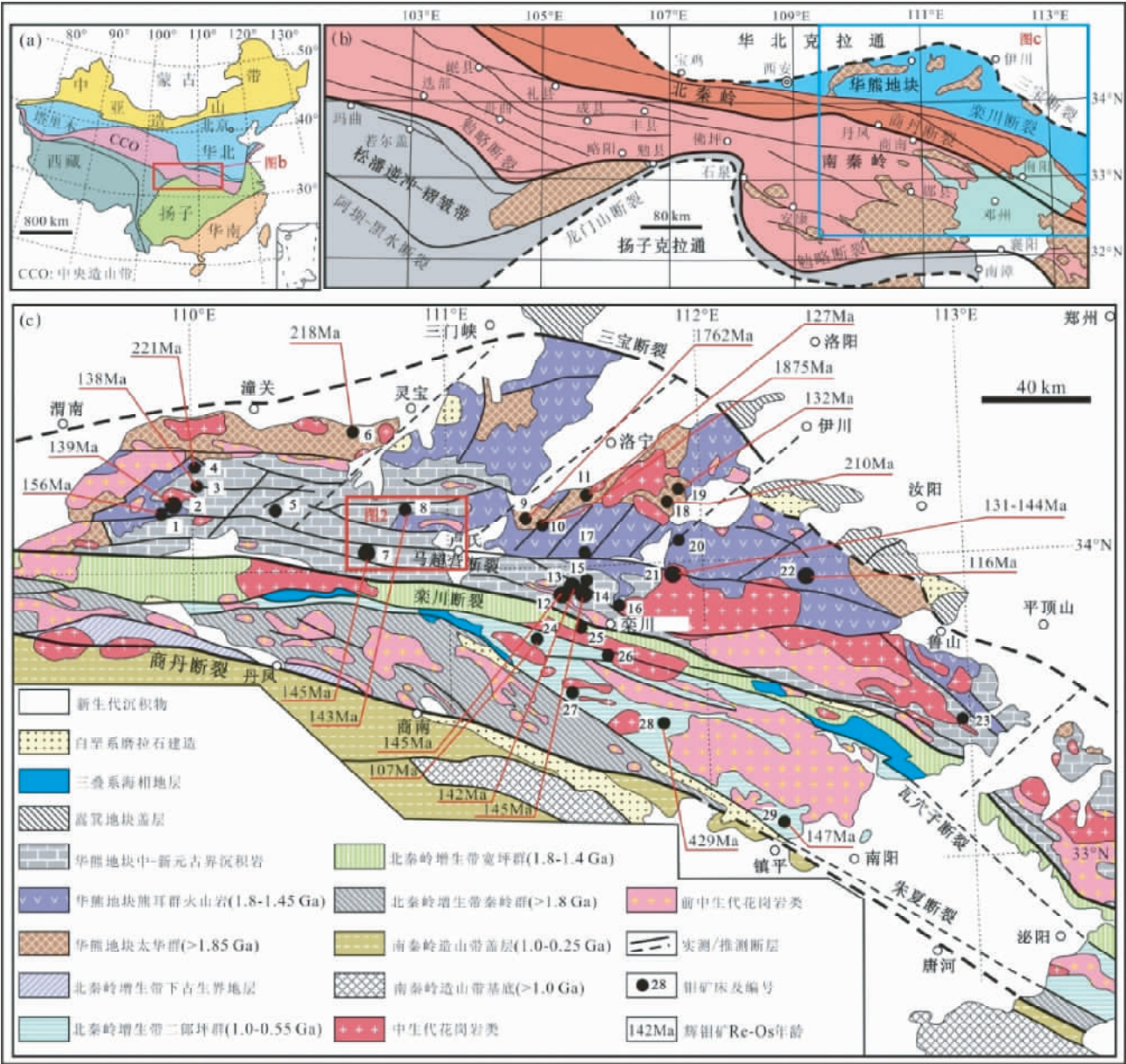


图1 东秦岭钼矿带地质、矿产略图(据李诺等 2007; Deng *et al.* 2012 资料修改)

矿床编号: 1-八里坡; 2-金堆城; 3-石家湾; 4-黄龙铺; 5-木龙沟; 6-大湖; 7-夜长坪; 8-银家沟; 9-寨凹; 10-龙门店; 11-沙坡岭; 12-上房沟; 13-南泥湖; 14-三道庄; 15-马圈; 16-竹园沟; 17-石瑶沟; 18-黄水庵; 19-雷门沟; 20-纸房; 21-鱼池岭; 22-东沟; 23-土门; 24-南沟; 25-石宝沟; 26-石门沟; 27-太平镇; 28-银洞沟; 29-秋树湾

Fig.1 Sketch geological map of the East Qinling Mo belt , showing locations and ore-forming ages of major Mo deposits (modified after Li *et al.* ,2007; Deng *et al.* ,2012)

Names of numbered deposits: 1-Balipo; 2-Jinduicheng; 3-Shijiawan; 4-Huanglongpu; 5-Mulonggou; 6-Dahu; 7-Yechangping; 8-Yinjiagou; 9-Zhaiwa; 10-Longmendian; 11-Shapoling; 12-Shangfanggou; 13-Nannihu; 14-Sandaozhuang; 15-Majuan; 16-Zhuyuangou; 17-Shiyaogou; 18-Huangshui'an; 19-Leimengou; 20-Zhifang; 21-Yuchiling; 22-Donggou; 23-Tumen; 24-Nangou; 25-Shibaogou; 26-Shimengou; 27-Taipingzhen; 28-Yindonggou; 29-Qiushuwan

1 区域地质背景

银家沟杂岩体位于银家沟-夜长坪构造-岩浆岩带的北

端,属东秦岭崤山山脉。区域上出露的地层有中元古界熊耳群、中-新元古界官道口群、栾川群和陶湾群及新生界沉积物(魏庆国等,2009)。熊耳群中基性-中酸性火山岩分布在研究区东北部,构成华熊地块早期次活动型盖层;官道口群广

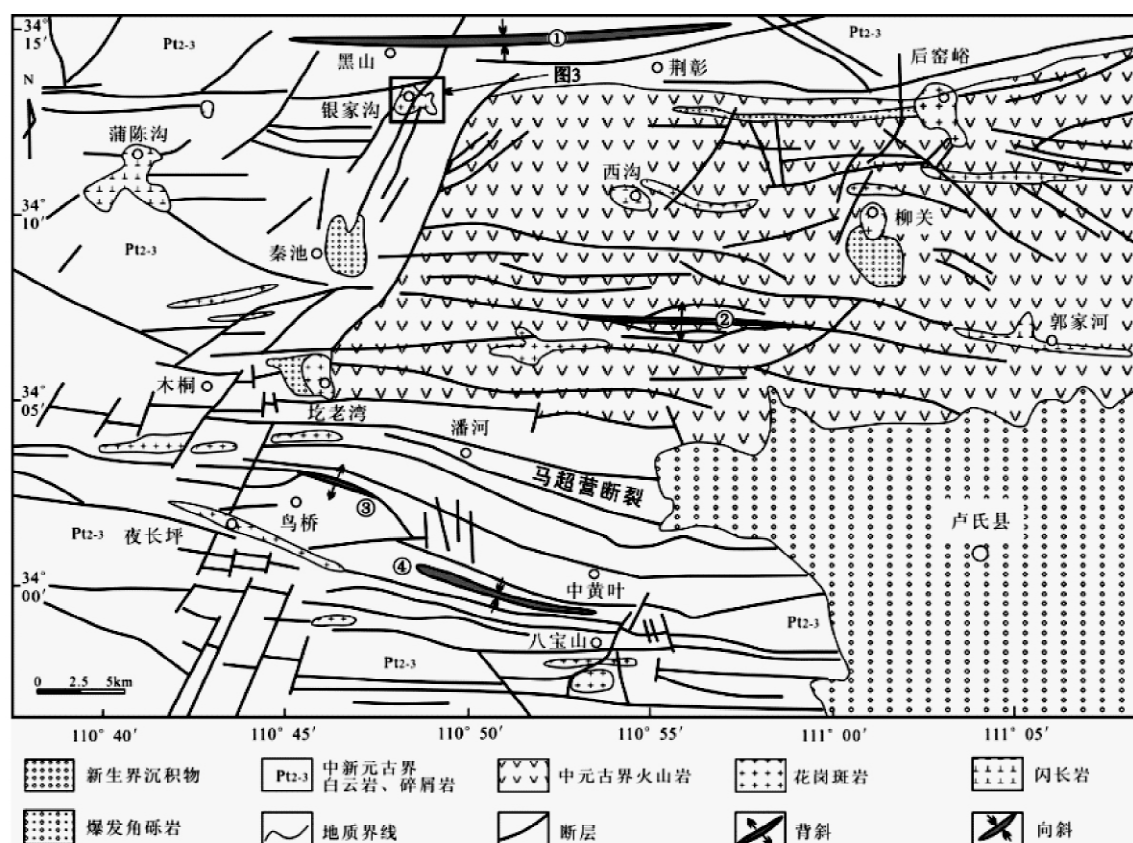


图2 银家沟地区区域地质图(据河南省地质矿产厅第一地质大队,1996^①资料改编)

褶皱编号: ①-柳关向斜; ②-将军山背斜; ③-鸟桥背斜; ④-中黄叶向斜

Fig. 2 Geological map of the Yinjiagou area

Folds number: ①-Liuguan syncline; ②-Jiangjunshan anticline; ③-Niaoqiao anticline; ④-Zhonghuangye syncline

泛分布于研究区西部和南部,为滨海相碎屑岩-碳酸盐岩建造,属于典型的华北地台盖层沉积;栾川群和陶湾群零星分布于研究区南部和西南部,为泥质、白云质胶结的冰碛砾岩、泥硅质冰碛砾岩及含冰碛砾石的砂质页岩夹粉砂岩;新生代沉积物主要分布于卢氏盆地内(图2)。

区域褶皱构造以近EW向和NWW向为主,自北而南分别为杜关向斜、将军山背斜、鸟桥背斜和中黄叶向斜。断裂构造以NWW向构造为主,并叠加NE-NNE向构造(黄典豪等,1994)。NWW向的栾川断裂从研究区外围南部通过,是华北克拉通与秦岭造山带的分界断裂;NWW向的马超营断裂横贯研究区,该断裂是华北克拉通内部的一条长期活动的区域性断裂,对区内钼、铅、锌矿床具有重要的控制作用(图1c和图2)。NE-NNE向断裂主要是银家沟-夜长坪断裂和后窑峪-八宝山断裂。

区内岩浆活动主要为印支-燕山期,以酸性侵入岩及次火山岩为主。除少量深成岩体外(如蒲陈沟闪长岩体),多数为浅成、超浅成岩体,如银家沟、圪老湾、夜长坪、八宝山岩体等,部分岩体具有隐爆特征,如秦池、柳关岩体。其中,燕

山期深源浅成斑岩体与本区钼多金属矿化关系最为密切。

2 银家沟矿床和岩体地质特征

银家沟矿床位于河南省灵宝市南40km处的银家沟地区,是一个以硫铁矿为主的多金属矿床,共、伴生有铁、铜、钼、金、铅、锌、银等多种矿产。其中,硫铁矿储量4880.9万吨,平均品位20.32%,达大型规模;褐铁矿1169万吨,平均品位35.43%;磁铁矿184万吨,平均品位32.28%;菱铁矿187.9万吨,平均品位31.33%;铜储量12.2万吨,平均品位0.46%;钼储量5363吨,平均品位0.096%;铅1.4万吨,平均品位0.59%;锌5.9万吨,平均品位1.94%;伴生原生金2.0吨,平均品位0.67g/t,氧化带金2.9吨,品位高于硫铁矿中的伴生金,最高品位为8.74g/t;银33.5吨,平均品位12.7g/t(河南省地质矿产厅第一地质大队,1996)。地表除了出露少量的铅、锌矿脉和铁帽外(图3a),主要矿体均产于地表100m以下,为一隐伏矿床。在平面上,钼矿体呈近等轴

① 河南省地质矿产厅第一地质大队. 1996. 河南省灵宝市银家沟矿区I、II、III、IV号矿体硫铁矿勘探地质报告. 1-171

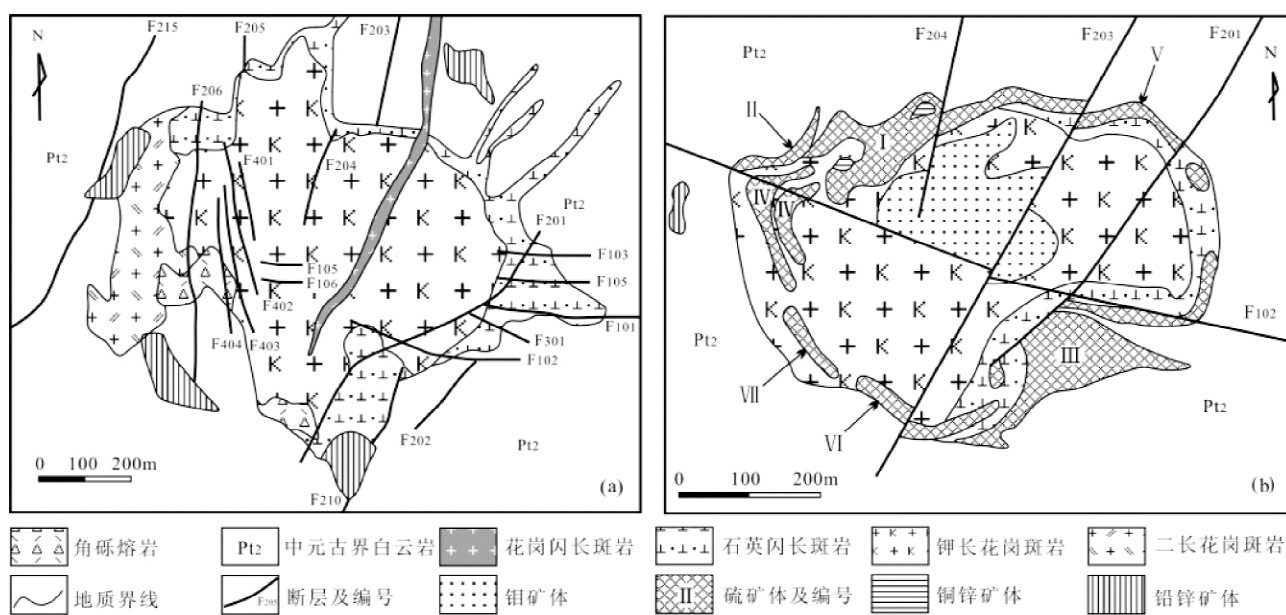


图3 银家沟矿床地质图(a)及600m标高矿体分布图(b)(据河南省地质矿产厅第一地质大队,1996资料改编)

Fig.3 Geological maps of the Yinjiagou deposit at surface (a) and at level of 600m elevation (b)

状产于钾长花岗斑岩体的中心,硫矿体、铁矿体(主要分布于750m标高以上,图3b中未见)、铜矿体构成围绕母岩的空心环带,铅矿体则主要产于白云岩地层中(图3b)。矿化类型有3种:(1)斑岩型:产于杂岩体内部,以钼矿化为主;(2)矽卡岩型:产于杂岩体与白云岩地层接触带及其附近,以硫铁矿化、磁铁矿化、铜矿化为主;(3)热液脉型:产于白云岩地层中,以铅矿化为主。

银家沟杂岩体为银家沟矿床的成矿母岩,呈近等轴状产出,出露面积约0.6km²。该杂岩体主要岩石类型为二长花岗斑岩、钾长花岗斑岩和石英闪长斑岩,此外尚见花岗闪长斑岩脉和闪长玢岩脉(图3a)。其中,闪长玢岩脉出于花岗闪长斑岩脉的两侧,宽约1~2m,与花岗闪长斑岩脉共生同一岩脉中,为其边缘相。因其规模小,图3a中未显示。

二长花岗斑岩主要分布于矿区西部。岩石呈斑状结构,斑晶为斜长石、钾长石、石英和少量黑云母,斑晶含量占岩石总量的56%(图4a)。斜长石自形-半自形板状,大小0.4×1.2mm~1.5×3mm,含量约12%,几乎全部绢云母化,隐约可见聚片双晶;钾长石他形粒状,大小0.5~2.5mm,最大可达4mm,含量约20%,表面微弱粘土化、绢云母化及碳酸盐化,见钾长石包含自形斜长石现象;石英他形粒状,大小多为0.8~3mm,含量约23%,部分颗粒具熔蚀现象(图4a);黑云母半自形-自形片状,大小0.2~1.2mm,含量约1%,周围因蚀变析出铁质矿物。基质具隐晶质结构,主要由长英质矿物组成,含量约42%,绢云母化现象普遍。副矿物为榍石和锆石,含量约2%。

钾长花岗斑岩 银家沟杂岩体的主体,分布于矿区中部。岩石呈斑状结构,斑晶主要为钾长石和石英(图4b),并有少量斜长石和黑云母,斑晶含量约占岩石总量的40%。钾长石

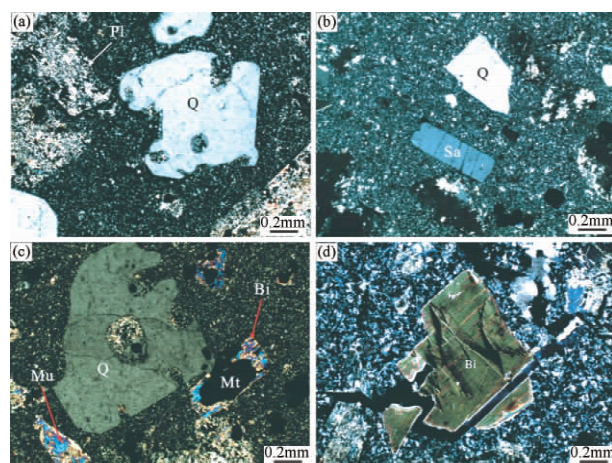


图4 银家沟杂岩体显微照片

(a) 二长花岗斑岩,斜长石斑晶绢云母化,石英斑晶呈港湾状;(b) 钾长花岗斑岩,见石英和透长石斑晶;(c) 石英闪长斑岩,见石英和黑云母斑晶,石英斑晶溶蚀呈港湾状,黑云母白云母化并析出磁铁矿;(d) 花岗闪长斑岩,见黑云母斑晶破碎并被扭折。Bi-黑云母;Mt-磁铁矿;Mu-白云母;Pl-斜长石;Q-石英;Sa-透长石

Fig.4 Photomicrographs showing the petrology of the Yinjiagou complex (polarized light)

(a) monzogranite porphyry, showing plagioclase and quartz phenocrysts replaced by sericite; (b) K-feldspar granite porphyry, showing sanidine and quartz phenocrysts; (c) quartz diorite porphyry, showing harbor-shaped quartz phenocrysts, and biotite phenocrysts replaced by muscovite and magnetite; (d) granodiorite porphyry, showing broken and kinked biotite phenocryst. Bi-biotite; Mt-magnetite; Mu-muscovite; Pl-plagioclase; Q-quartz; Sa-sanidine

主要为透长石,呈自形-半自形板状,大小 $0.2 \times 0.4 \text{ mm} \sim 1.2 \times 2 \text{ mm}$,含量约25%;斜长石半自形板状,大小 $0.4 \times 0.6 \text{ mm} \sim 0.8 \times 2 \text{ mm}$,含量5%,大多绢云母化,隐约可见聚片双晶;石英他形粒状,大小 $0.4 \sim 2 \text{ mm}$,含量约9%,熔蚀现象明显;黑云母半自形-自形片状,大小 $0.1 \sim 0.4 \text{ mm}$,含量约1%,多发生白云母化,并伴随铁质矿物的析出。基质具隐晶质结构,主要由长英质矿物组成,含量约60%(图4b)。副矿物主要为金红石和锆石,其次为榍石和磷灰石。

石英闪长斑岩 分布于矿区北部、东部和东南部边缘。岩石呈斑状结构,斑晶主要为斜长石和石英,并有少量钾长石、黑云母和角闪石(图4c),斑晶含量约占岩石总量的54%。斜长石自形-半自形板状,大小 $0.2 \times 0.4 \text{ mm} \sim 2 \times 4 \text{ mm}$,最大者 $5 \times 9 \text{ mm}$,含量约38%,大多发生微弱的绢云母化、碳酸盐化,聚片双晶清晰可见,裂纹也较发育;钾长石斑晶最大可达7mm,可包含自形斜长石,含量3%;石英他形粒状,大小多为 $0.4 \sim 1.6 \text{ mm}$,含量约6%,具熔蚀和嵌晶结构;黑云母半自形-自形片状,大小 $0.2 \sim 0.8 \text{ mm}$,含量约5%,多发生白云母化,并析出铁质;角闪石半自形长柱状,大小 $0.4 \sim 0.9 \text{ mm}$,含量约2%(图4c)。基质具隐晶质结构,主要由长英质矿物组成,含量约45%。副矿物为金红石、锆石、榍石和磷灰石。

花岗闪长斑岩 呈岩脉产出,走向NNE,在其两侧逐渐过渡为闪长玢岩。岩石具斑状结构,斑晶主要为石英、斜长石、钾长石、黑云母及少量角闪石,斑晶含量约占岩石总量的32%。斜长石斑晶呈他形-半自形板状,大小 $0.3 \sim 1.6 \text{ mm}$,

个别达到3mm,含量约占矿物总量的14%,具聚片双晶和环带状构造,大部分晶体裂纹发育,并被绢云母细脉充填;钾长石他形-半自形板状,大小 $0.8 \sim 2 \text{ mm}$,个别可达 $3.5 \times 7 \text{ mm}$,含量约占矿物总量的5%,表面干净;石英他形粒状-浑圆状,表面干净,大小多为 $1.2 \sim 2.0 \text{ mm}$,占矿物总量的8%,裂纹发育,并被绢云母细脉充填;黑云母半自形-自形片状,大小 $0.4 \sim 1.8 \text{ mm}$,含量约占矿物总量的5%左右,浅黄色-褐绿色,完全解理,平行消光,部分颗粒破碎,发育曲折现象(图4d)。基质隐晶-显微晶质结构,主要为长英质组分,含量约65%,绢云母化现象普遍,局部可见碳酸盐化。

3 样品和分析方法

本次对来自银家沟杂岩体不同岩性的30件样品进行了主量、稀土和微量元素分析,并对其中的15件样品进行了全岩Sr、Nd同位素分析,12件样品进行了钾长石Pb同位素分析。对1件二长花岗斑岩样品(样品LY3-11)、1件钾长花岗斑岩样品(样品LY6-8)和1件花岗闪长斑岩样品(样品LH1-2)进行了锆石SHRIMP U-Pb定年。

主量、稀土和微量元素测试由国土资源部廊坊地球物理地球化学勘查研究所完成。其中全岩主量元素采用XRF分析,稀土和微量元素采用ICP-MS分析。主量元素分析精度优于3%,稀土和微量元素分析精度优于5%。

Sr、Nd同位素在中国科学院广州地球化学研究所超净

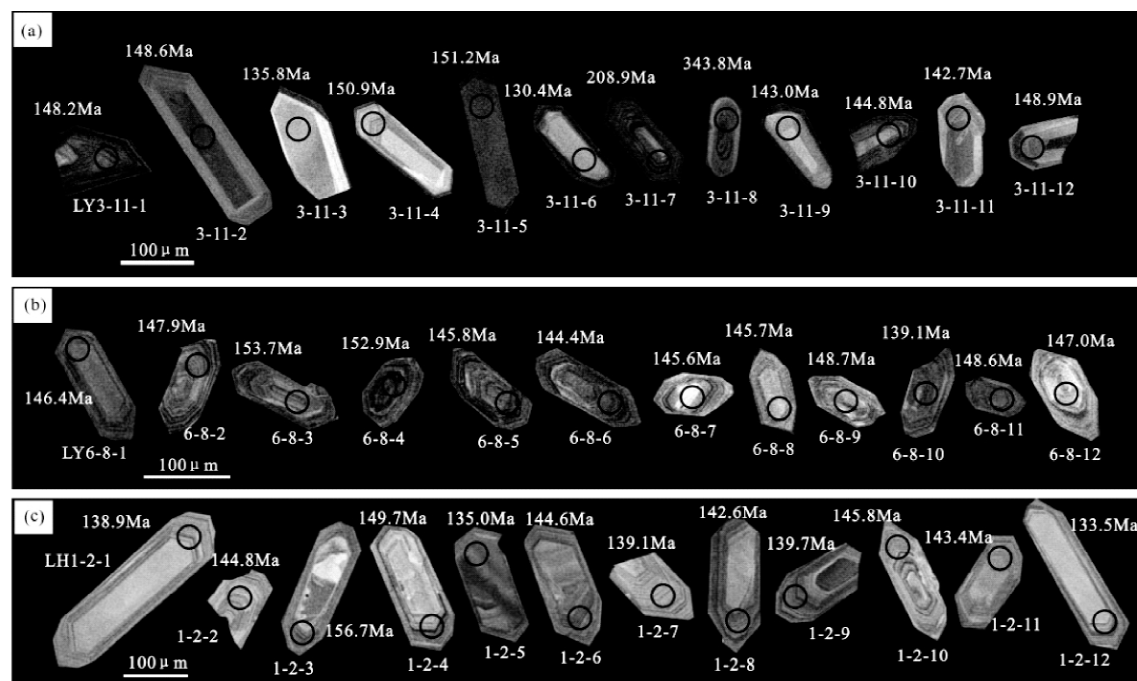


图5 银家沟杂岩体锆石的形态及分析点位图

Fig. 5 Representative cathodoluminescence (CL) images of zircons from the Yinjiagou complex, showing U-Pb analytical spots and corresponding ages

表1 银家沟杂岩体锆石 SHRIMP U-Pb 分析结果

Table 1 Zircon SHRIMP U-Pb dating results of the Yinjiagou complex

测点号	$^{206}\text{Pb}^c$ (%)	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ 年龄 (Ma)	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\pm\%$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$	$\pm\%$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\pm\%$
样品 LY3-11													
LY3-11-1	0.35	894	235	0.27	17.9	148.2	± 2.6	0.0487	2.4	0.1563	3.0	0.02326	1.8
LY3-11-2	0.94	309	337	1.12	6.26	148.6	± 3.0	0.0468	9.8	0.150	10.0	0.02332	2.0
LY3-11-3	0.79	262	459	1.81	4.83	135.8	± 2.9	0.0524	9.7	0.154	10.0	0.02130	2.2
LY3-11-4	0.48	260	258	1.03	5.31	150.9	± 3.5	0.0523	5.3	0.1709	5.8	0.02368	2.4
LY3-11-5	0.16	1665	496	0.31	34.0	151.2	± 2.7	0.0524	3.4	0.1716	3.9	0.02374	1.8
LY3-11-6	0.52	190	129	0.70	3.36	130.4	± 2.9	0.0498	8.1	0.140	8.4	0.02044	2.2
LY3-11-7	3.53	1334	617	0.48	39.1	208.9	± 3.7	0.0479	7.3	0.217	7.5	0.03294	1.8
LY3-11-8	1.72	599	67	0.12	28.7	343.8	± 6.5	0.0511	6.3	0.386	6.6	0.0548	2.0
LY3-11-9	1.44	206	227	1.14	4.03	143.0	± 3.0	0.0533	12	0.165	12	0.02244	2.1
LY3-11-10	0.87	499	397	0.82	9.82	144.8	± 2.8	0.0485	6.2	0.1518	6.5	0.02272	2.0
LY3-11-11	6.71	200	254	1.31	4.13	142.7	± 3.6	0.063	28	0.194	28	0.02239	2.5
LY3-11-12	0.86	716	486	0.70	14.5	148.9	± 3.0	0.0474	5.1	0.1528	5.5	0.02336	2.0
样品 LY6-8													
LY6-8-1	0.98	408	264	0.67	8.13	146.4	± 2.7	0.0473	7.1	0.150	7.4	0.02297	1.9
LY6-8-2	1.53	522	345	0.68	10.6	147.9	± 2.7	0.0482	7.2	0.154	7.4	0.02320	1.8
LY6-8-3	0.85	548	461	0.87	11.5	153.7	± 2.8	0.0486	5.5	0.1618	5.8	0.02413	1.8
LY6-8-4	0.40	1058	469	0.46	21.9	152.9	± 2.8	0.0485	3.0	0.1604	3.5	0.02400	1.9
LY6-8-5	0.51	827	615	0.77	16.3	145.8	± 2.6	0.0472	3.6	0.1488	4.0	0.02288	1.8
LY6-8-6	0.34	438	320	0.76	8.55	144.4	± 2.7	0.0480	4.6	0.1501	4.9	0.02266	1.9
LY6-8-7	0.20	483	315	0.67	9.49	145.6	± 2.7	0.0475	3.5	0.1497	4.0	0.02284	1.8
LY6-8-8	0.46	468	386	0.85	9.24	145.7	± 2.7	0.0503	4.3	0.1585	4.7	0.02286	1.9
LY6-8-9	0.54	497	231	0.48	10.00	148.7	± 2.7	0.0490	3.8	0.1578	4.2	0.02333	1.8
LY6-8-10	0.14	574	495	0.89	10.8	139.1	± 2.5	0.0487	2.9	0.1465	3.4	0.02181	1.8
LY6-8-11	0.40	437	308	0.73	8.78	148.6	± 2.7	0.0492	4.1	0.1582	4.5	0.02332	1.9
LY6-8-12	0.83	575	436	0.78	11.5	147.0	± 2.6	0.0462	3.8	0.1469	4.2	0.02306	1.8
样品 LH1-2													
LH1-2-1	0.39	490	158	0.33	9.21	138.9	± 2.8	0.0483	2.5	0.1450	3.2	0.02178	2.0
LH1-2-2	0.28	747	377	0.52	14.6	144.8	± 2.6	0.0493	2.3	0.1545	2.9	0.02272	1.8
LH1-2-3	0.71	665	282	0.44	14.1	156.7	± 2.8	0.0502	3.9	0.1703	4.3	0.02461	1.8
LH1-2-4	4.31	2276	1154	0.52	48.0	149.7	± 2.6	0.0495	6.9	0.160	7.1	0.02350	1.8
LH1-2-5	0.54	1055	276	0.27	19.3	135.0	± 2.4	0.0471	3.6	0.1374	4.0	0.02117	1.8
LH1-2-6	0.54	811	247	0.31	15.9	144.6	± 2.8	0.0470	3.0	0.1469	3.6	0.02268	2.0
LH1-2-7	0.81	679	340	0.52	12.8	139.1	± 2.5	0.0485	5.3	0.1459	5.6	0.02181	1.8
LH1-2-8	0.25	1244	511	0.42	24.0	142.6	± 2.6	0.0490	2.1	0.1511	2.8	0.02237	1.8
LH1-2-9	0.51	706	253	0.37	13.3	139.7	± 2.5	0.0466	4.3	0.1408	4.7	0.02191	1.8
LH1-2-10	0.68	1188	589	0.51	23.5	145.8	± 2.5	0.0485	3.5	0.1530	3.9	0.02287	1.8
LH1-2-11	0.90	480	158	0.34	9.36	143.4	± 2.7	0.0470	6.0	0.1458	6.3	0.02250	1.9
LH1-2-12	0.79	502	168	0.35	9.09	133.5	± 8.0	0.0486	6.0	0.140	8.5	0.0209	6.0

注: Pb^c 和 Pb^* 分别为普通和放射成因 Pb。标准的误差是 0.75%, 普通 Pb 用测量的 ^{204}Pb 校正

实验室进行前处理, Sr 和 REE 分离采用 AG50-8X 离子交换柱, 分别收集 Sr 和 REE 解析液; REE 的分离采用 HDEHP 交换柱, 收集 Nd 解析液。测试在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成, 所用实验仪器为 VG Axiom HR-MC-ICP-MS, Sr 和 Nd 同位素比值用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 作质量分馏校正。实验室对 Sr 标样 NIST SRM 987 测定结果为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710255 \pm 15(2\sigma)$, 对 Nd 标

样 Shin-Etsu JNd-I 测定结果为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512121 \pm 9(2\sigma)$ 。 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的测试精度优于 2% 和 0.5%。

Pb 同位素测试在核工业北京地质研究院分析测试中心完成。首先称取适量样品放入聚四氟乙烯坩埚中, 加入氢氟酸中溶样。样品分解后, 将其蒸干, 再加入盐酸溶解, 蒸干, 加入 0.5N HBr 溶液溶解样品进行铅的分离。然后将溶解的样品溶液倒入预先处理好的强碱性阴离子交换树脂中进行

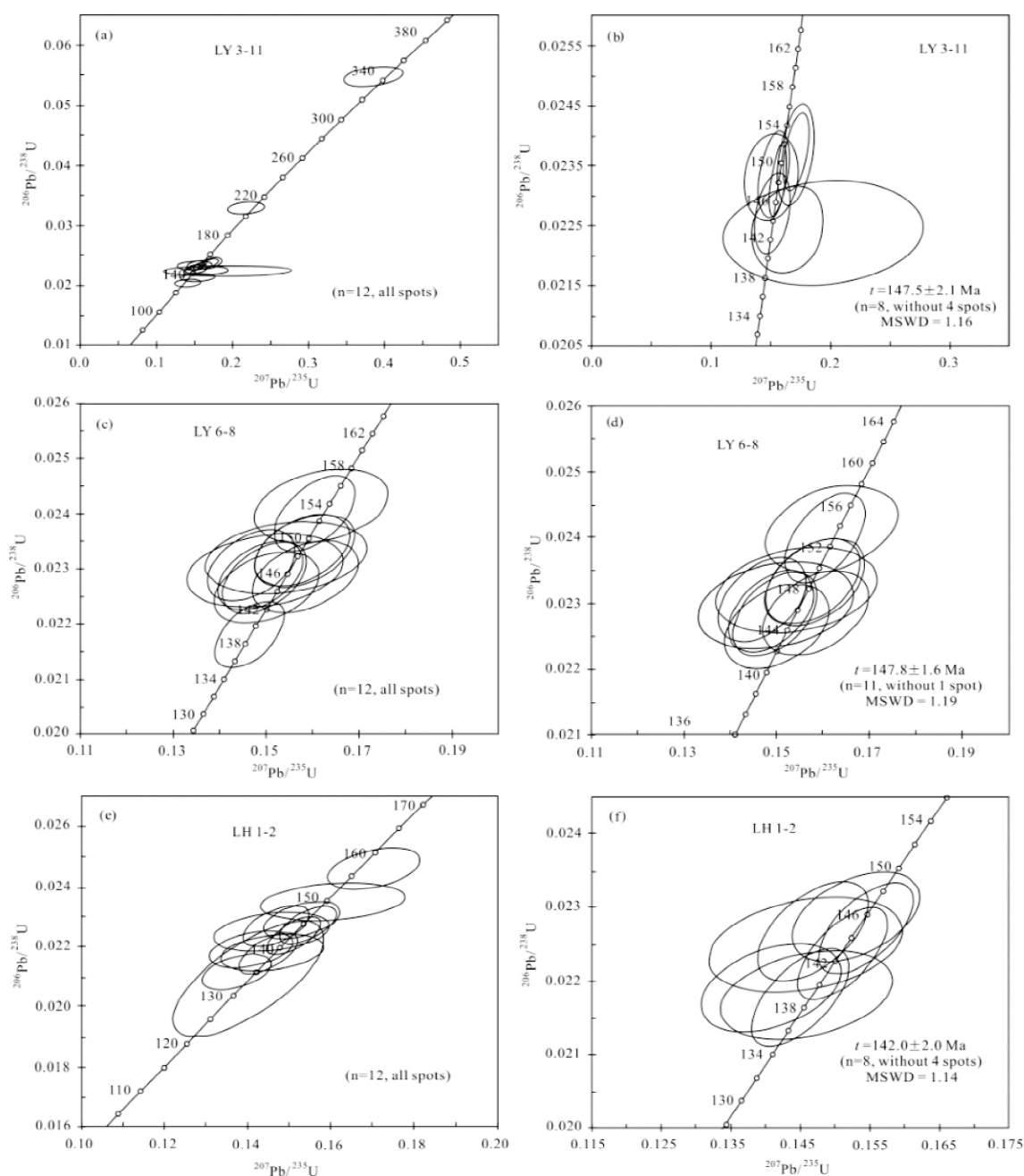


图6 银家沟杂岩体锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 U-Pb concordia diagrams for the Yinjiagou complex

铅的分离,用 0.5N HBr 溶液淋洗树脂,再用 2N HCl 溶液淋洗树脂,最后用 6N HCl 溶液解脱,将解脱溶液蒸干备质谱测定。最后用热表面电离质谱法进行铅同位素测量,仪器型号为 ISOPROBE-T,该仪器对 $1\mu\text{g}$ 的 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 测量精度优于 0.005%。

锆石由廊坊诚信地质服务公司通过常规的重液和磁选进行初选,然后在双目镜下挑出晶形和透明度较好的锆石,将锆石置于环氧树脂中,磨制约一半大小,使锆石内部暴露,用于阴极发光和 SHRIMP U-Pb 分析。锆石阴极发光在中国

地质科学院地质研究所电子探针研究室完成,锆石 SHRIMP U-Pb 定年在中国地质科学院地质研究所 SHRIMP II 上完成,样品分析流程及原理参见 Williams (1998)。应用 RSES 参考锆石 TEM (417Ma) 进行元素间的分馏校正,应用 SL13 (年龄为 572Ma, U 含量 238×10^{-6}) 标定样品的 U、Th 和 Pb 含量。数据处理采用 Ludwig SQUID 1.0 及 ISOPLT 3.0 程序 (Ludwig, 2001)。应用实测 ^{204}Pb 校正锆石中的普通铅,采用年龄为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。

4 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄

在双目镜下观察,二长花岗岩样品 LY3-11 中锆石呈淡黄色,透明,少数含包体,柱状,大小 $100 \sim 200 \mu\text{m}$,长宽比 $1.5 \sim 2$,个别达 4,部分晶体锥面发育;钾长花岗岩样品 LY6-8 中锆石呈淡黄色,透明,无包体,柱状,柱体发育,大小 $60 \sim 150 \mu\text{m}$,长宽比 $2 \sim 4$,多数晶体锥面发育;花岗闪长斑岩样品 LH1-2 中锆石呈无色,透明,少数含包体,柱状,柱体发育,大小 $130 \sim 240 \mu\text{m}$,长宽比 $2 \sim 4$,部分晶体锥面发育。上述 3 件样品的阴极发光图像都显示出典型的岩浆韵律环带和明暗相间的条带结构(图 5a-c),属于岩浆结晶的产物。

银家沟杂岩体 3 件样品的锆石 SHRIMP 分析结果见表 1。样品 LY3-11、LY6-8 和 LH1-2 的锆石 Th/U 比值分别介于 $0.12 \sim 1.81$ 、 $0.46 \sim 0.89$ 和 $0.27 \sim 0.52$ 之间,与典型的岩浆成因锆石的 Th/U 比值一致(Williams *et al.*, 1996)。结合其 CL 图像特征,认为这些锆石均为岩浆成因。在一致曲线图(图 6a)中,样品 LY3-11 的 12 个数据点全部落在谐和线上,除了 2 个点外(点 LY3-11-7 和 LY3-11-8,为捕获锆石),其他点集中分布(图 6a),进一步剔除 2 个年龄较小的点(点 LY3-11-3 和 LY3-11-6),剩余 8 粒锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $147.5 \pm 2.1 \text{ Ma}$, MSWD = 1.16(图 6b),代表了二长花岗斑岩的结晶年龄。在一致曲线图(图 6c)中,样品 LY6-8 的 12 个分析点集中分布,剔除 1 个年龄较小的点(点 LY6-8-10),剩余 11 粒锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $147.8 \pm 1.6 \text{ Ma}$, MSWD = 1.19(图 6d),该年龄代表了银家沟钾长花岗斑岩的结晶年龄。在一致曲线图(图 6e)中,花岗闪长斑岩样品 LH1-2 的 12 个分析点较为集中,进一步剔除 2 个年龄较大的点(点 LH1-2-3 和 LH1-2-4,为捕获锆石)和 2 个年龄较小的点(点 LH1-2-5 和 LH1-2-12),剩余 8 粒锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $142.0 \pm 2.0 \text{ Ma}$, MSWD = 1.14(图 6f),该年龄代表了银家沟花岗闪长斑岩的结晶年龄。

银家沟杂岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果表明,二长花岗斑岩和钾长花岗斑岩的形成年龄在误差范围内一致,均形成于约 148 Ma ,而呈脉状产出的花岗闪长斑岩略晚于上述岩体,形成于 142 Ma 期间。总之,银家沟杂岩体形成于晚侏罗世末期-早白垩世初期。

5 元素地球化学特征

银家沟杂岩体主量、微量和稀土元素分析结果见表 2。尽管取样中尽量选取新鲜、蚀变微弱的岩石,但该杂岩体普遍存在绢云母化、白云母化、粘土化,导致主量元素分析结果中烧失量较高。

5.1 主量元素特征

二长花岗斑岩样品的 SiO_2 含量为 $69.26\% \sim 73.94\%$,

Al_2O_3 含量为 $13.53\% \sim 15.34\%$, Fe_2O_3 含量($0.85\% \sim 3.71\%$)高于 FeO 含量($0.02\% \sim 0.68\%$),岩石具有低的 MgO ($0.24\% \sim 1.15\%$, 多数小于 1.0%)、 CaO ($0.08\% \sim 1.98\%$, 多数小于 0.2%)和 Na_2O 含量($0.24\% \sim 1.86\%$, 多数小于 1.0%),而具有非常高的 K_2O 含量($5.03\% \sim 8.96\%$, 多数大于 6.0%),其 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值低($0.03 \sim 0.37$), $\text{Mg}^\#$ 值变化较大($19 \sim 50$),铝指数(ASI)为 $1.24 \sim 2.04$,全部大于 1.1,应为热液蚀变引起。

钾长花岗斑岩样品的 SiO_2 含量为 $65.17\% \sim 73.48\%$, Al_2O_3 含量为 $13.73\% \sim 15.96\%$, Fe_2O_3 含量($0.82\% \sim 3.57\%$)高于 FeO 含量($0.09\% \sim 1.62\%$),岩石具有低的 MgO ($0.23\% \sim 1.47\%$, 多数小于 1.0%)、 CaO ($0.22\% \sim 0.34\%$)和 Na_2O 含量($0.40\% \sim 0.63\%$),而具有非常高的 K_2O 含量($6.03\% \sim 9.89\%$),其 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值低($0.05 \sim 0.08$), $\text{Mg}^\#$ 值变化较大($13 \sim 49$),铝指数(ASI)为 $1.18 \sim 1.99$ 。

花岗闪长斑岩样品的 SiO_2 含量为 $66.29\% \sim 68.98\%$, Al_2O_3 含量为 $14.50\% \sim 14.90\%$, Fe_2O_3 含量($1.56\% \sim 2.16\%$)高于 FeO 含量($1.07\% \sim 1.57\%$), MgO 含量为 $0.94\% \sim 1.38\%$, CaO 含量为 $2.53\% \sim 3.63\%$, Na_2O 含量为 $1.68\% \sim 2.65\%$, K_2O 含量为 $3.91\% \sim 5.20\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为 $0.32 \sim 0.62$, $\text{Mg}^\#$ 值为 $38 \sim 44$, 铝指数(ASI)为 $0.96 \sim 1.13$, 绝大多数样品小于 1.1。

在 R1-R2 分类图解中,二长花岗斑岩样品主要落入二长花岗岩与正长花岗岩区域,极个别点投入花岗闪长岩、碱性花岗岩区域;钾长花岗斑岩全部投入正长花岗岩区域;花岗闪长斑岩样品全部落入花岗闪长岩区域(图 7)。

5.2 稀土元素特征

由表 2 可知,二长花岗斑岩稀土元素总量介于 $144.1 \times 10^{-6} \sim 243.6 \times 10^{-6}$; Yb 含量低,为 $0.90 \times 10^{-6} \sim 1.55 \times 10^{-6}$ 。在球粒陨石标准化的稀土元素配分图解中可见,样品普遍具有轻稀土富集、重稀土亏损的特征,其 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 $16.1 \sim 24.9$; Eu 负异常中等-微弱($\delta\text{Eu} = 0.57 \sim 0.83$)(图 8a)。

钾长花岗斑岩的稀土总量为 $71.38 \times 10^{-6} \sim 276.4 \times 10^{-6}$, Yb 含量低,为 $1.09 \times 10^{-6} \sim 1.94 \times 10^{-6}$ 。球粒陨石标准化的稀土元素配分曲线为轻稀土富集的右倾式,轻、重稀土分异较强,其 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 $6.9 \sim 30.1$; 样品具有弱的 Eu 负异常($\delta\text{Eu} = 0.66 \sim 0.88$)(图 8c)。

花岗闪长斑岩的稀土总量为 $155.4 \times 10^{-6} \sim 222.5 \times 10^{-6}$ 之间, Yb 含量较低,为 $1.56 \times 10^{-6} \sim 2.10 \times 10^{-6}$ 。球粒陨石标准化的稀土元素配分曲线为轻稀土富集的右倾式,其 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 介于 $13.2 \sim 17.6$ 之间, Eu 异常微弱($\delta\text{Eu} = 0.78 \sim 0.86$)(图 8e)。

5.3 微量元素特征

据表 2 可知,二长花岗斑岩具有较低的 Sr 含量($104 \times$

表2 银家沟杂岩体主量(wt%)、稀土和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 2 Contents of oxides (wt%) and REE and trace elements ($\times 10^{-6}$) of the Yinjiagou complex

样品号	LY3-4	LY3-5	LY3-7	LY3-8	LY3-9	LY3-10	LY3-11	LY7-1	LY7-2	LY7-3	LY7-4	LY10-8	LY10-9	LY10-10	LY10-11
岩石类型	二长花岗斑岩														
SiO ₂	71.43	71.21	70.68	70.73	69.26	70.40	71.59	73.47	73.11	73.06	73.11	73.94	71.84	72.08	71.94
TiO ₂	0.30	0.29	0.28	0.29	0.28	0.29	0.30	0.26	0.28	0.26	0.27	0.29	0.31	0.32	0.26
Al ₂ O ₃	13.80	13.90	14.24	13.65	14.23	14.84	14.05	14.39	14.01	15.34	14.37	13.53	14.60	15.04	14.37
Fe ₂ O ₃	3.71	3.09	2.69	2.04	1.71	3.33	2.60	0.83	1.80	0.85	1.02	1.27	2.15	1.17	1.41
FeO	0.33	0.37	0.44	0.68	0.53	0.28	0.45	0.29	0.04	0.07	0.11	0.02	0.04	0.07	0.11
MnO	0.01	0.01	0.01	0.36	0.22	0.01	0.02	0.06	0.45	0.05	0.07	0.01	0.04	0.01	0.04
MgO	0.49	0.47	0.43	0.71	1.15	0.45	0.52	0.32	0.41	0.28	0.34	0.47	0.61	0.64	0.24
CaO	0.14	0.16	0.13	0.81	1.98	0.17	0.25	1.27	0.18	1.35	1.55	0.08	0.34	0.33	0.09
Na ₂ O	0.24	0.28	0.41	0.31	0.31	0.23	0.31	1.86	0.40	1.64	1.77	0.24	0.26	0.58	0.38
K ₂ O	5.64	6.73	6.98	6.73	6.85	6.55	6.95	5.03	6.68	5.08	5.09	7.52	6.68	6.77	8.96
P ₂ O ₅	0.13	0.15	0.12	0.14	0.13	0.14	0.14	0.13	0.13	0.12	0.13	0.09	0.15	0.14	0.07
LOI	3.75	3.23	3.45	3.38	3.23	3.27	2.86	1.92	2.35	1.85	2.34	2.39	2.87	2.72	1.96
Total	99.95	99.89	99.87	99.82	99.88	99.97	100.03	99.83	99.83	99.95	100.18	99.84	99.87	99.87	99.83
Na ₂ O/ K ₂ O	0.04	0.04	0.06	0.05	0.05	0.03	0.04	0.37	0.06	0.32	0.35	0.03	0.04	0.09	0.04
A/CNK	2.04	1.73	1.68	1.47	1.24	1.91	1.66	1.33	1.71	1.44	1.28	1.56	1.77	1.70	1.37
Mg [#]	19	21	21	33	50	20	25	35	31	37	37	42	36	50	24
La	35.9	53.3	35.7	43.0	40.3	41.1	43.0	37.7	31.5	36.1	34.9	33.8	32.2	32.7	31.9
Ce	76.1	117.8	79.9	86.9	83.8	88.0	102	74.6	67.2	72.1	74.9	74.9	69.1	70.3	69.1
Pr	8.47	12.14	8.98	9.69	9.18	9.59	10.58	8.27	7.35	7.96	7.99	8.78	7.96	7.86	7.24
Nd	29.1	40.8	32.1	33.3	31.9	33.0	36.9	28.1	25.4	26.8	27.9	30.0	27.7	27.0	24.9
Sm	4.27	6.10	5.02	4.96	4.84	4.97	5.69	4.13	3.80	3.99	4.36	4.24	4.11	3.89	3.71
Eu	0.73	1.18	1.06	0.92	1.04	1.03	1.21	0.92	0.74	0.89	1.05	0.99	0.89	0.84	0.82
Gd	3.41	4.71	4.00	3.82	3.83	3.87	4.09	3.31	3.02	3.25	3.12	2.82	3.18	2.85	2.98
Tb	0.45	0.65	0.57	0.54	0.55	0.54	0.52	0.48	0.41	0.47	0.42	0.33	0.45	0.38	0.40
Dy	2.25	3.03	2.74	2.67	2.76	2.55	2.89	2.40	1.94	2.32	2.34	1.40	2.16	1.70	1.97
Ho	0.40	0.52	0.49	0.46	0.49	0.46	0.51	0.43	0.34	0.41	0.41	0.24	0.37	0.28	0.35
Er	1.15	1.42	1.31	1.32	1.37	1.22	1.48	1.20	0.96	1.15	1.25	0.70	1.03	0.79	0.97
Tm	0.19	0.23	0.23	0.22	0.24	0.21	0.22	0.20	0.17	0.19	0.18	0.13	0.18	0.13	0.17
Yb	1.30	1.50	1.50	1.42	1.55	1.34	1.51	1.34	1.13	1.26	1.28	0.92	1.16	0.90	1.21
Lu	0.22	0.24	0.23	0.24	0.25	0.21	0.25	0.22	0.18	0.19	0.20	0.15	0.19	0.15	0.20
ΣREE	163.9	243.6	173.8	189.5	182.1	188.1	211.1	163.3	144.1	157.0	160.3	159.4	150.7	149.7	146.0
Eu/Eu*	0.57	0.65	0.70	0.63	0.71	0.69	0.73	0.74	0.65	0.73	0.83	0.83	0.72	0.74	0.73
(La/Yb) _N	18.61	24.01	16.08	20.39	17.50	20.71	19.15	19.00	18.76	19.27	18.37	24.86	18.72	24.55	17.82
Sr	106	119	138	107	134	107	104	246	137	244	264	178	119	122	200
Rb	266	305	292	290	285	288	310	249	304	241	240	299	323	355	353
Ba	1789	2038	2214	1849	1869	1917	2131	1659	1745	1692	2213	2064	2059	1739	2380
Th	23.2	27.0	19.1	25.0	22.7	23.9	24.4	22.5	23.5	23.4	20.2	27.1	24.7	25.3	24.0
Nb	25.6	25.8	26.1	25.4	23.5	25.7	27.5	25.5	25.2	25.1	26.7	20.3	27.0	26.7	24.3
Zr	192	205	203	204	194	199	192	193	203	176	181	200	208	219	187
Cs	14.2	14.5	15.6	16.7	16.6	13.7	13.8	6.4	8.5	6.3	6.0	5.5	6.3	6.2	3.5
Ga	37.9	29.8	27.0	22.3	20.0	26.8		20.6	21.1	19.8		22.2	21.2	21.9	21.4
Hf	7.14	7.66	6.95	7.71	7.33	7.00	6.86	7.44	7.79	6.09	6.77	7.49	7.18	7.09	7.11
Sc	3.1	3.2	3.3	3.1	3.0	3.1	2.9	2.9	2.7	2.8	2.5	2.7	3.5	3.6	2.8
Cr	9.52	6.38	9.71	8.48	8.67	8.00	10.1	17.1	6.00	20.2	10.8	8.48	7.62	8.95	9.81
V	28.2	26.2	23.3	23.8	29.8	22.0	24.6	29.6	20.4	27.1	29.5	25.4	33.4	30.4	25.7
Ni	3.0	2.2	2.5	2.1	2.4	2.1	2.7	2.0	1.8	1.8	2.3	1.5	2.1	1.6	1.7
U	3.18	2.55	3.91	3.18	3.36	2.73	2.57	4.82	3.45	4.27	4.62	2.82	4.82	4.45	4.09
Y	12.6	15.7	14.7	14.1	14.8	13.4	15.2	12.8	10.0	12.5	12.0	7.3	10.6	7.8	10.6
Ta	1.83	1.86	1.83	1.84	1.73	1.81	1.87	1.85	1.84	1.90	1.86	1.44	1.86	1.86	1.75
Sr/Y	8.40	7.60	9.35	7.60	9.08	7.98	6.86	19.20	13.66	19.54	21.99	24.44	11.21	15.60	18.91

续表 2

Continued Table 2

样品号	LY6-1	LY6-2	LY6-3	LY6-4	LY6-5	LY6-6	LY6-7	LY6-8	LY9-1	LY9-2	LH1-1	LH1-2	LH1-3	LH1-4	LY16-7
岩石类型	钾长花岗斑岩										花岗闪长斑岩				
SiO ₂	65.93	65.17	68.59	70.19	67.25	67.22	66.77	69.11	73.48	71.52	66.73	67.13	67.79	68.98	66.29
TiO ₂	0.38	0.45	0.44	0.41	0.46	0.44	0.40	0.45	0.30	0.29	0.40	0.41	0.42	0.32	0.38
Al ₂ O ₃	14.31	15.77	15.96	15.14	15.34	15.50	13.73	14.75	14.98	14.92	14.90	14.50	14.54	14.59	14.45
Fe ₂ O ₃	2.85	3.28	2.00	1.41	3.40	2.76	3.57	0.86	0.89	0.82	2.16	1.96	2.02	1.83	1.56
FeO	1.06	0.81	0.49	0.15	0.19	1.22	1.04	1.62	0.09	0.53	1.07	1.32	1.29	1.10	1.57
MnO	0.09	0.11	0.05	0.01	0.18	0.15	0.10	0.18	0.03	0.03	0.09	0.10	0.09	0.06	0.08
MgO	1.47	1.06	0.33	0.23	0.27	0.32	1.45	0.63	0.35	0.69	1.04	1.38	1.25	0.94	1.10
CaO	0.24	0.29	0.26	0.23	0.34	0.30	0.27	0.31	0.22	0.24	3.63	3.16	2.75	2.53	3.14
Na ₂ O	0.61	0.53	0.56	0.63	0.50	0.45	0.44	0.61	0.40	0.52	2.65	2.31	1.98	2.35	1.68
K ₂ O	9.89	8.68	7.82	7.88	6.52	6.03	8.26	8.08	6.42	7.49	4.25	3.91	4.30	4.76	5.20
P ₂ O ₅	0.22	0.28	0.26	0.23	0.27	0.25	0.24	0.25	0.15	0.14	0.21	0.20	0.22	0.18	0.21
LOI	2.83	3.43	3.17	3.30	5.16	5.28	3.59	2.91	2.59	2.69	2.78	3.70	3.16	2.21	4.31
Total	99.88	99.87	99.94	99.80	99.87	99.91	99.87	99.76	99.89	99.88	99.91	100.06	99.82	99.85	99.97
Na ₂ O/K ₂ O	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.07	0.05	0.08	0.06	0.07	0.62	0.59	0.46	0.49	0.32
A/CNK	1.18	1.46	1.62	1.52	1.81	1.99	1.35	1.43	1.87	1.59	0.96	1.05	1.13	1.07	1.03
Mg [#]	42	33	20	22	13	13	38	32	41	49	38	44	42	38	40
La	12.3	22.0	45.4	36.7	53.5	60.2	20.8	19.7	50.1	34.3	48.2	34.7	35.6	30.9	50.9
Ce	29.9	50.6	101	82.9	117	130	44.4	56.5	102	68.1	94.3	80.7	73.5	71.1	101
Pr	3.78	6.02	10.82	8.78	12.76	13.67	5.20	6.29	11.02	8.06	10.71	9.22	8.47	8.16	11.12
Nd	14.3	22.5	37.7	31.2	44.7	47.9	19.1	23.6	36.4	27.6	38.4	33.4	31.0	29.0	38.4
Sm	2.44	3.52	5.97	4.76	6.74	7.36	3.08	4.11	5.15	4.01	6.17	5.43	4.89	4.43	5.61
Eu	0.67	0.80	1.60	1.17	1.36	1.45	0.76	1.08	1.11	0.88	1.46	1.38	1.19	1.14	1.37
Gd	2.28	3.01	4.93	3.79	5.44	5.80	2.62	3.48	3.76	3.12	5.01	4.07	4.16	3.63	4.70
Tb	0.39	0.44	0.74	0.54	0.74	0.81	0.40	0.55	0.50	0.43	0.75	0.57	0.59	0.52	0.66
Dy	2.20	2.42	3.95	2.69	3.68	3.93	2.22	3.33	2.20	1.99	3.79	3.17	3.08	2.70	3.45
Ho	0.43	0.44	0.72	0.48	0.63	0.68	0.41	0.64	0.37	0.35	0.71	0.59	0.59	0.49	0.62
Er	1.18	1.17	1.87	1.28	1.61	1.81	1.09	1.85	1.00	0.92	1.97	1.76	1.67	1.37	1.77
Tm	0.18	0.19	0.32	0.21	0.26	0.30	0.17	0.26	0.17	0.16	0.34	0.25	0.27	0.23	0.31
Yb	1.20	1.14	1.94	1.32	1.56	1.81	1.09	1.66	1.12	1.10	2.10	1.72	1.81	1.56	1.96
Lu	0.18	0.17	0.27	0.20	0.22	0.25	0.17	0.25	0.19	0.18	0.32	0.27	0.27	0.24	0.29
ΣREE	71.38	114.4	217.6	176.0	250.6	276.4	101.4	123.3	215.4	151.2	214.3	177.2	167.1	155.4	222.5
Eu/Eu*	0.86	0.73	0.88	0.82	0.66	0.66	0.80	0.85	0.74	0.73	0.78	0.86	0.79	0.85	0.79
(La/Yb) _N	6.93	13.00	15.81	18.76	23.09	22.48	12.81	7.99	30.09	20.95	15.44	13.60	13.23	13.34	17.55
Sr	241	202	180	240	205	210	169	193	135	195	461	380	309	404	328
Rb	281	247	209	195	165	158	263	198	323	333	179	176	188	177	226
Ba	2820	2624	2054	2531	2295	2250	1784	2445	1653	1981	2087	1982	1730	2538	1889
Th	19.5	21.1	19.9	20.4	24.0	23.4	20.7	22.9	26.2	27.0	20.0	24.6	20.3	18.4	23.1
Nb	7.82	9.05	9.21	7.49	10.0	10.0	9.30	11.7	27.8	28.1	27.1	28.5	25.4	19.2	24.4
Zr	213	240	251	244	266	255	227	200	217	202	225	220	233	203	232
Cs	1.70	1.70	2.2	1.4	1.8	2.2	1.9	1.4	6.7	8.2	39.6	25.0	33.9	29.6	16.7
Ga	17.0	18.1	17.2	19.0	20.6	20.4	20.4		23.1	21.7	20.4		19.7	19.3	19.9
Hf	7.52	8.66	8.02	7.75	9.35	8.11	8.20	7.42	7.89	6.97	6.92	7.41	6.89	5.88	7.71
Sc	3.8	3.6	2.9	2.0	3.5	3.4	4.0	3.0	2.5	3.2	4.1	4.5	4.7	3.4	4.3
Cr	9.05	11.5	6.38	9.81	9.14	8.48	6.48	8.0	4.86	8.38	11.8	9.5	8.38	12.4	6.76
V	37.3	38.8	36.8	32.0	41.0	36.5	39.0	33.4	29.4	25.2	39.4	40.3	44.0	32.9	40.2
Ni	6.4	7.5	6.9	3.9	17.2	13.3	9.2	7.6	1.8	2.7	2.4	2.8	2.6	2.3	2.7
U	4.09	3.82	6.73	5.00	3.64	4.09	4.18	4.18	4.18	4.36	6.09	6.38	5.64	5.36	5.55
Y	13.5	13.6	19.0	13.5	18.0	19.9	12.6	18.9	9.1	9.1	20.0	16.2	16.5	13.9	18.1
Ta	0.53	0.65	0.65	0.52	0.70	0.68	0.65	0.80	1.98	2.02	1.79	1.75	1.61	1.32	1.57
Sr/Y	17.87	14.82	9.48	17.79	11.41	10.56	13.40	10.18	14.82	21.37	23.07	23.38	18.70	29.06	18.14

表 3 银家沟杂岩体 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 3 Sr-Nd isotopic data of the Yinjiagou complex

样品号	岩性	Rb($\times 10^{-6}$)	Sr($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	1 σ	I_{Sr}	1 σ	$\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$
LY3-4	二长花岗斑岩	266	106	7.266	0.722242	7	0.707007	7	38.12
LY3-5		305	119	7.421	0.723091	12	0.707531	12	45.55
LY3-10		288	107	7.793	0.723217	8	0.706876	8	36.26
LY3-11		310	104	8.631	0.726234	10	0.708138	10	54.17
LY7-1		249	246	2.931	0.714325	11	0.708180	11	54.77
LY7-4	钾长花岗斑岩	240	264	2.632	0.713793	9	0.708274	9	56.10
LY10-8		299	178	4.864	0.718887	6	0.708821	6	63.83
LY10-10		355	122	8.425	0.726146	8	0.708708	8	62.24
LY6-1		281	241	3.376	0.714721	7	0.707628	7	46.94
LY6-6		158	210	2.179	0.712258	11	0.707681	11	47.69
LY6-7	花岗闪长斑岩	263	169	4.506	0.716900	9	0.707433	9	44.17
LY6-8		198	193	2.971	0.714268	6	0.708027	6	52.60
LY9-1		323	135	6.928	0.722795	7	0.708270	7	56.04
LH1-2		176	380	1.341	0.711775	4	0.709068	4	67.29
LH1-4		177	404	1.269	0.711179	11	0.708618	11	60.90

样品号	Sm($\times 10^{-6}$)	Nd($\times 10^{-6}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	1 σ	($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) _i	1 σ	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$
LY3-4	4.27	29.1	0.08877	0.511946	6	0.511860	6	-11.47	1467	1573
LY3-5	6.10	40.8	0.09045	0.511872	5	0.511785	5	-12.95	1577	1674
LY3-10	4.97	33.0	0.09112	0.511943	7	0.511855	7	-11.57	1498	1580
LY3-11	5.69	36.9	0.09329	0.511957	6	0.511867	6	-11.34	1508	1564
LY7-1	4.13	28.1	0.08892	0.511969	5	0.511883	5	-11.03	1440	1543
LY7-4	4.36	27.9	0.09454	0.511998	6	0.511907	6	-10.57	1471	1511
LY10-8	4.24	30.0	0.08551	0.511963	7	0.511882	7	-11.10	1409	1547
LY10-10	3.89	27.0	0.08716	0.511960	5	0.511877	5	-11.19	1431	1553
LY6-1	2.44	14.3	0.1032	0.511951	5	0.511851	5	-11.64	1651	1585
LY6-6	7.36	47.9	0.09296	0.511996	5	0.511906	5	-10.57	1454	1512
LY6-7	3.08	19.1	0.09756	0.511970	6	0.511876	6	-11.16	1546	1552
LY6-8	4.11	23.6	0.1054	0.511974	6	0.511872	6	-11.23	1651	1557
LY9-1	5.15	36.4	0.08560	0.511962	6	0.511879	6	-11.10	1411	1548
LH1-2	5.43	33.4	0.09836	0.511813	5	0.511722	5	-14.32	1762	1763
LH1-4	4.43	28.9	0.09274	0.511773	5	0.511687	5	-14.99	1731	1809

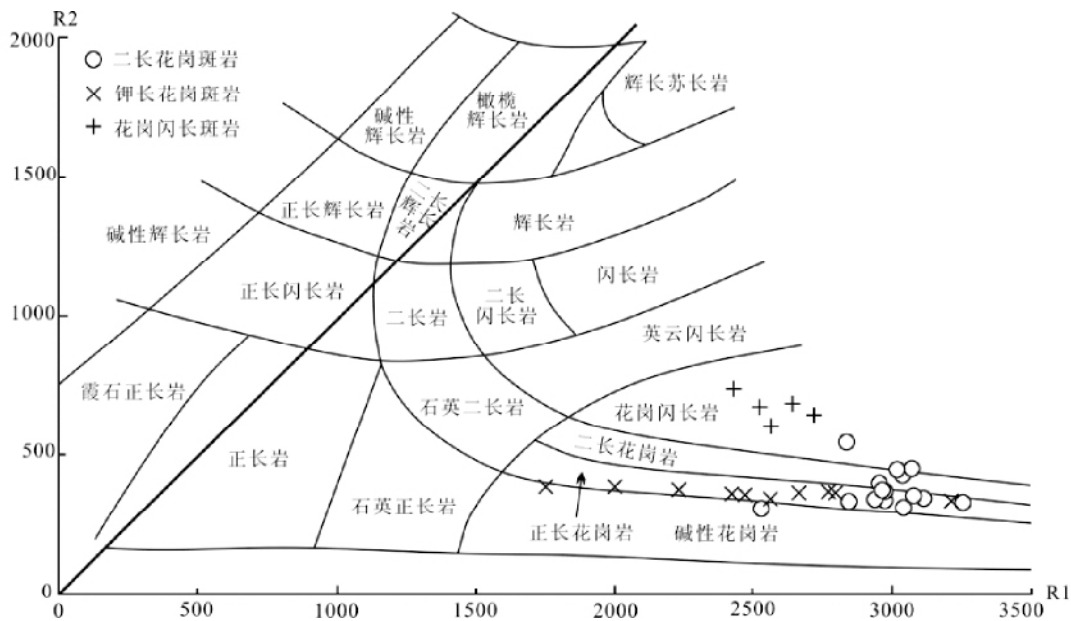


图 7 银家沟杂岩体的 R1-R2 分类图解(底图据 De la Roche *et al.*, 1980)

Fig. 7 R1-R2 Diagram for the Yinjiagou complex , showing petrographic classification (after De la Roche *et al.* , 1980)

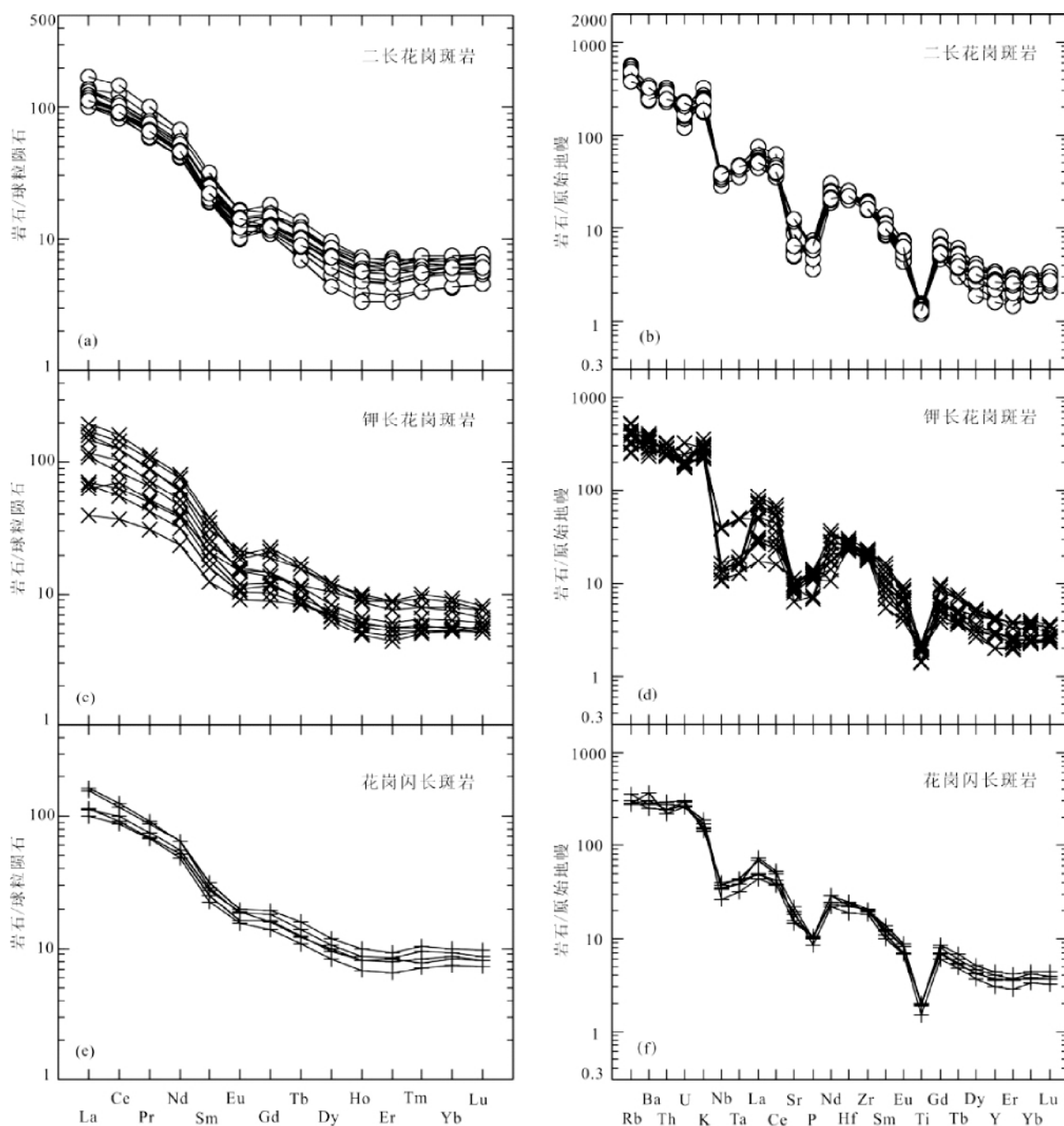


图8 银家沟杂岩体稀土元素配分曲线(a、c 和 e) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b、d 和 f) (标准化值分别采用 Boynton, 1984; McDonough *et al.*, 1992)

Fig.8 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element patterns for the Yinjiagou complex (Data of chondrite and primitive mantle after Boynton (1984) and McDonough *et al.* (1992) , respectively)

$10^{-6} \sim 264 \times 10^{-6}$), Y 含量为 $7.3 \times 10^{-6} \sim 15.7 \times 10^{-6}$, Sr/Y 值为 $6.86 \sim 24.44$ 之间, 绝大多数大于 10。Cr、Ni 含量较低(分别为 $6.00 \times 10^{-6} \sim 20.2 \times 10^{-6}$ 和 $1.5 \times 10^{-6} \sim 3.0 \times 10^{-6}$)。在原始地幔标准化的微量元素蜘蛛网图上(图 8b), 样品富集 Rb、Ba、Th、U、K、La、Ce、Nd、Hf、Zr, 强烈亏损 Sr、P、Ti 等, 具有弱的 Nb、Ta 亏损。

钾长花岗斑岩具有较低的 Sr 含量($135 \times 10^{-6} \sim 241 \times 10^{-6}$), Y 含量为 $9.1 \times 10^{-6} \sim 19.9 \times 10^{-6}$, Sr/Y 值为 $9.48 \sim 21.37$ 。Cr、Ni 含量较低(分别为 $4.86 \times 10^{-6} \sim 11.5 \times 10^{-6}$ 和 $1.8 \times 10^{-6} \sim 17.2 \times 10^{-6}$)。在原始地幔标准化的微量元素蜘蛛网图上(图 8d), 样品富集 Rb、Ba、Th、U、K、La、Ce、Nd、Hf、Zr 等, 强烈亏损 Nb、Ta、Sr、P、Ti 等。

表4 银家沟杂岩体钾长石 Pb 同位素分析结果

Table 4 Pb isotopic data of the Yinjiagou complex

样品号	岩性	测试对象	时代(Ma)	铅同位素比值			μ	ω
				²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb		
LY3-4	二长花岗斑岩	钾长石	147.5	17.493 ± 2	15.502 ± 2	37.960 ± 5	9.39	38.92
LY3-10			147.5	17.520 ± 2	15.472 ± 2	37.997 ± 5	9.32	38.61
LY3-11			147.5	17.514 ± 3	15.477 ± 2	38.005 ± 6	9.33	38.74
LY7-4			147.5	17.573 ± 2	15.477 ± 1	38.007 ± 4	9.33	38.37
LY10-8			147.5	17.532 ± 2	15.469 ± 2	37.955 ± 4	9.32	38.32
LY10-10	钾长花岗斑岩		145.6	17.591 ± 1	15.480 ± 1	38.008 ± 3	9.33	38.29
LY6-1			147.8	17.561 ± 1	15.477 ± 1	38.024 ± 3	9.33	38.53
LY6-6			147.8	17.567 ± 1	15.483 ± 1	38.001 ± 3	9.34	38.44
LY6-7			147.8	17.599 ± 3	15.478 ± 2	38.046 ± 6	9.32	38.40
LY6-8			147.8	17.628 ± 3	15.491 ± 2	38.090 ± 6	9.35	38.54
LY9-1			147.8	17.537 ± 2	15.477 ± 2	38.007 ± 4	9.33	38.60
LH1-4			花岗闪长斑岩	142	17.376 ± 3	15.455 ± 2	37.867 ± 6	9.31

花岗闪长斑岩的 Sr 含量为 $309 \times 10^{-6} \sim 461 \times 10^{-6}$, Y 含量为 $13.9 \times 10^{-6} \sim 20.0 \times 10^{-6}$, Sr/Y 值为 18.14 ~ 29.06 之间, Cr 含量为 $8.38 \times 10^{-6} \sim 12.4 \times 10^{-6}$, Ni 含量为 $2.3 \times 10^{-6} \sim 2.8 \times 10^{-6}$ 。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图上(图 8f) 样品富集 Rb、Ba、Th、U、K、La、Ce、Nd、Hf、Zr, 强烈亏损 Sr、P、Ti, 而 Nb、Ta 弱亏损。

6 同位素地球化学特征

6.1 锶、钕同位素特征

银家沟杂岩体 Sr-Nd 同位素分析结果列于表 3。

二长花岗斑岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值 (I_{Sr}) 为 0.706876 ~ 0.708821, 多数小于 0.708500; $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -12.95 ~ -10.57, 相应的单阶段 Nd 模式年龄为 1.41 ~ 1.58 Ga, 两阶段 Nd 模式年龄为 1.51 ~ 1.67 Ga。

钾长花岗斑岩的 I_{Sr} 为 0.707433 ~ 0.708270; $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -11.64 ~ -10.57, 相应的单阶段 Nd 模式年龄为 1.41 ~ 1.65 Ga, 两阶段 Nd 模式年龄为 1.51 ~ 1.59 Ga。

花岗闪长斑岩的 I_{Sr} 为 0.708618 ~ 0.709068; $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -14.99 ~ -14.32, 相应的单阶段 Nd 模式年龄为 1.73 ~ 1.76 Ga, 两阶段 Nd 模式年龄为 1.76 ~ 1.81 Ga。

总体上, 银家沟杂岩体具有较高的 Sr 初始值, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 均小于 -10, 普遍具有中元古代的 Nd 模式年龄。其中, 二长花岗斑岩和钾长花岗斑岩二者具有相似的 Sr-Nd 同位素组成, 而花岗闪长斑岩具有较前两者更高的 I_{Sr} 和两阶段 Nd 模式年龄、更低的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 。

6.2 铅同位素特征

一般来说, 钾长石中 U 和 Th 含量甚微, 形成后由 U 和 Th 衰变产生的放射成因铅可忽略不计, 因此可采用钾长石的铅同位素组成代表成岩时的铅同位素组成。本文对银家

沟杂岩体的 12 件钾长石样品进行了铅同位素测试, 结果见表 4。

6 件二长花岗斑岩样品的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 17.493 ~ 17.591, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.469 ~ 15.502, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 37.955 ~ 38.008, μ 为 9.32 ~ 9.39, ω 为 38.29 ~ 38.92。

5 件钾长花岗斑岩样品的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 17.537 ~ 17.628, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.477 ~ 15.491, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.001 ~ 38.090, μ 为 9.32 ~ 9.35, ω 为 38.40 ~ 38.60。

一件花岗闪长斑岩样品的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 17.376, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.455, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 37.867, μ 为 9.31, ω 为 38.78。

总体上, 银家沟杂岩体具有较高的放射成因铅组分, 而非放射成因 ^{204}Pb 含量较低。

7 讨论

7.1 成岩构造背景

银家沟杂岩体主要岩石类型为二长花岗斑岩、钾长花岗斑岩, 属高钾钙碱性岩系, 野外和镜下均未见到原生白云母, 与后碰撞阶段形成的富钾钙碱性花岗岩类 (KCG) 岩石组合 (Liégeois *et al.*, 1998; Sylvester, 1998) 相一致, 也与前人总结的东秦岭钨矿带含钨岩体的总体特征 (陈衍景等, 2000; Li *et al.*, 2001; Chen *et al.*, 2007) 相一致。杂岩体亏损重稀土元素, Yb 含量偏低, 而稀土分馏程度偏高, 明显区别于典型岛弧、山弧环境下的中酸性火成岩 (岛弧英安岩的平均 Yb 含量为 4.4×10^{-6} , Martin *et al.*, 2005), 而与泛非期后碰撞花岗岩 (Liégeois *et al.*, 1998) 相似。微量元素汤氏蛛网图上岩石明显富集 LILE, 亏损 Nb、Ta、Sr、P 和 Ti 等元素, 显示后碰撞高钾钙碱性 I 型花岗岩微量元素特征 (Küster and Harms, 1998)。在花岗岩类的微量元素 Sr-Yb 判别图 (图 9a) 中, 样品投影点基本上都落入低 Sr、低 Yb 型花岗岩区 (II 区), 与张旗等 (2008) 的喜马拉雅型花岗岩特征一致, 暗

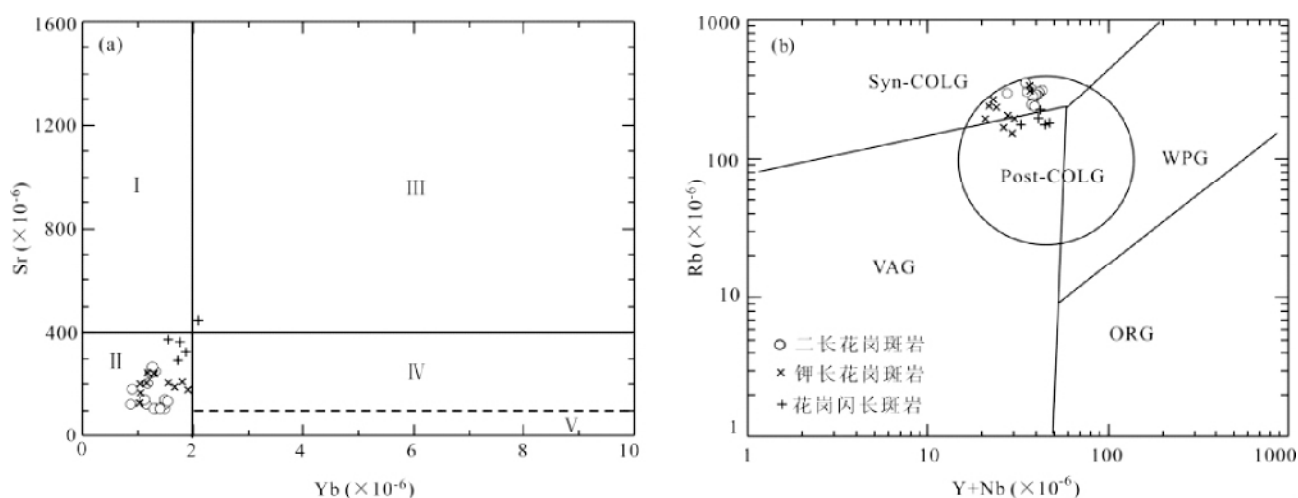


图9 银家沟杂岩体 Sr-Yb (a, 底图据张旗等, 2008) 和 Rb-Y + Nb (b, 底图据 Pearce, 1996) 判别图

I-高 Sr 低 Yb 型花岗岩(埃达克型); II-低 Sr 低 Yb 型花岗岩(喜马拉雅型花岗岩); III-高 Sr 高 Yb 型花岗岩; IV-低 Sr 高 Yb 型花岗岩(闽浙型花岗岩); V-非常低 Sr 高 Yb 型花岗岩(南岭型花岗岩). ORG-洋中脊花岗岩; post-COLG-后碰撞花岗岩; syn-COLG-同碰撞花岗岩; VAG-火山弧花岗岩; WPG-板内花岗岩

Fig. 9 Diagrams of Sr versus Yb (a, after Zhang *et al.*, 2008) and Rb versus Y + Nb (b, after Pearce, 1996) for the Yinjiagou complex

I-high-Sr and low-Yb granites (adakite); II-low-Sr and low-Yb granites (Himalayan-type granites); III-high-Sr and high-Yb granites; IV-low-Sr and high-Yb granites (Minzhe-type granites); V-very low-Sr and high-Yb granites (Nanling-type granites). ORG-oceanic ridge granites; post-COLG-post-collisional granites; syn-COLG-syn-collisional granites; VAG-volcanic arc granites; WPG-within-plate granites

示岩石形成于较深的环境。前人对东秦岭地区地球物理探测及对晚侏罗世-早白垩世深源浅成斑岩体中深源基性包体的温度压力条件计算证明,这些深源浅成花岗岩形成深度 >30km(王晓霞等, 1986),而东秦岭莫霍面的最小深度为 39km(胡受奚等, 1988; 陈衍景和富士谷, 1992; 卢欣祥等, 2002),因此可以推断,岩浆形成深度位于下地壳,这与我们认为银家沟杂岩体形成于较深环境相一致。在 Rb-Yb + Ta 判别图(图 9b)中,样品投影点全部落入 post-COLG 区,即后碰撞花岗岩区,暗示岩石形成于挤压体制向伸展体制转换背景。

总之,银家沟杂岩体的源区位于下地壳。侏罗纪-白垩纪之交,中国东部发生了构造体制的大转换,由近 EW 向构造体制转换为受古太平洋板块向欧亚板块之下俯冲控制的 NE-NNE 向构造体制,正是这次构造体制转换,使东秦岭地区处于减压环境,减压引起下地壳物质的部分熔融,形成了银家沟杂岩体。

7.2 成岩物质来源和岩石成因

一些研究者认为东秦岭钼矿带深源浅成岩体来自太华群的部分熔融,并有少量地幔物质参与(李胜荣, 1994; 魏庆国等, 2009);但陈衍景和郭抗衡(1993)认为这些成矿岩体的源区可能来自秦岭造山带基底物质;包志伟等(2009)认为南泥湖-上房沟成矿花岗岩斑岩的源区物质为扬子克拉通北缘中生代向华北克拉通 A 型俯冲的地壳物质在后碰撞伸展构

造环境下部分熔融的产物。

本文获得银家沟杂岩体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值 (I_{Sr}) 为 0.706876 ~ 0.709068,绝大多数样品的 I_{Sr} 值小于 0.708500; $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -14.99 ~ -10.57,相应的两阶段 Nd 模式年龄为 1.51 ~ 1.81 Ga; 其 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 17.376 ~ 17.628, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.455 ~ 15.502, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 37.867 ~ 38.090。二长花岗岩斑岩和钾长花岗岩斑岩的 Sr-Nd-Pb 同位素组成基本一致,但花岗闪长斑岩较前两者具有更高的 I_{Sr} 值和更大的两阶段 Nd 模式年龄,而其 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 Pb 同位素组成明显降低。

纵观银家沟及其邻区,可能作为物源区的地质体包括:太华群、熊耳群、栾川-官道口群、秦岭群、宽坪群、二郎坪群及下伏地幔。

我们利用已有太华群(栾世伟等, 1985; 倪智勇等, 2009; Huang *et al.*, 2010, 2012)、熊耳群(赵太平, 2000; He *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2010)、栾川-官道口群(祁进平等, 2006; 张宗清等, 2006)、秦岭群(张宗清等, 1994)、宽坪群(张宗清等, 2006; 闫全人等, 2008)和二郎坪群(孙卫东等, 1996; 张宗清等, 2006; 徐勇航等, 2009)的 Sr-Nd 同位素数据,选取其中 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 低比值样品进行反算($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值大的样品在测试过程中的微小误差将会引起 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的较大变化, Han *et al.*, 1997; Jahn *et al.*, 2000; Wu *et al.*, 2002; 另外,反算年龄的误差对 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 低比值样品初始 Sr 值影响不大,但高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的样品,回归误差较大,参考性较低,吴福元等, 1999),发现当 $t = 145\text{Ma}$ 时(银家沟杂岩

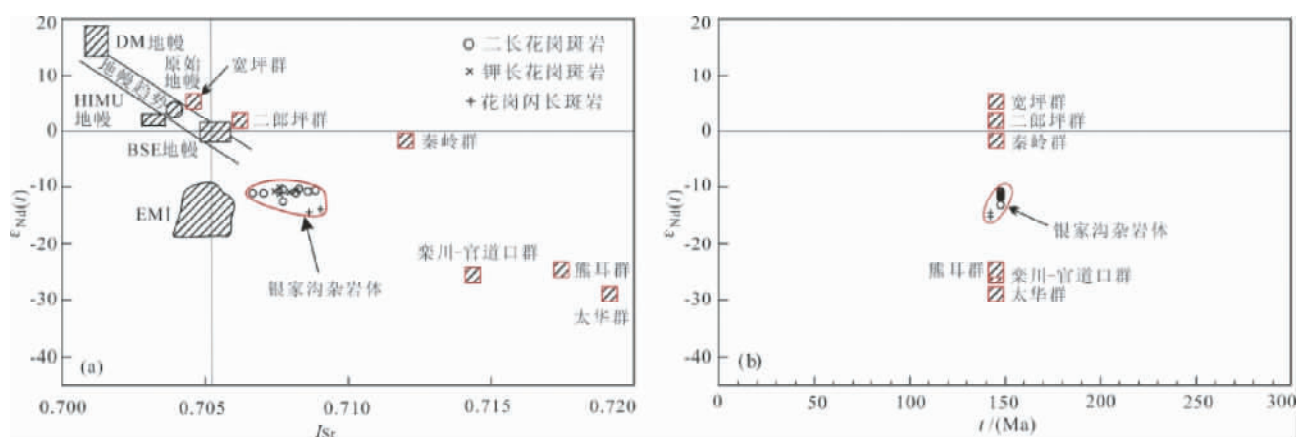


图 10 银家沟杂岩体 Sr-Nd 同位素关系图解

(a) $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. I_{Sr} 关系图; (b) $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. t 关系图. DM、EM1、EM2、HIMU、BSE 和原始地幔为 Hart (1984) 与 Zindler and Hart (1986) 定义的地幔端元. 图中同时呈现了太华群 (6 件 Sr、30 件 Nd 同位素数据)、熊耳群 (18 件 Sr、34 件 Nd 同位素数据)、栾川-官道口群 (3 件 Sr、2 件 Nd 同位素数据)、秦岭群 (10 件 Sr、13 件 Nd 同位素数据)、宽坪群 (22 件 Sr、17 件 Nd 同位素数据) 和二郎坪群 (27 件 Sr、61 件 Nd 同位素数据) Sr-Nd 同位素各自的平均值位置. 其 I_{Sr} 和 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值计算采用 $t = 145$ Ma. 太华群 Sr 同位素数据引自栾世伟等 (1985) 和倪智勇等 (2009), Nd 同位素数据引自倪智勇等 (2009) 和 Huang *et al.* (2010, 2012); 熊耳群 Sr-Nd 同位素数据引自赵太平 (2000)、He *et al.* (2010) 和 Wang *et al.* (2010); 栾川-官道口群 Sr 同位素数据引自祁进平等 (2006), Nd 同位素数据引自张宗清等 (2006); 秦岭群 Sr-Nd 同位素数据引自张宗清等 (1994); 宽坪群 Sr-Nd 同位素数据引自张宗清等 (2006) 和闫全人等 (2008); 二郎坪群 Sr 同位素数据引自孙卫东等 (1996) 和张宗清等 (2006), Nd 同位素数据引自孙卫东等 (1996)、张宗清等 (2006) 和徐勇航等 (2009).

Fig. 10 Sr-Nd correlation diagrams of the Yinjiagou complex

(a) -diagram of $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. I_{Sr} ; (b) -diagram of $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. t . DM, EM1, EM2, HIMU, BSE and primary mantle are mantle endmembers defined by Hart (1984), Zindler and Hart (1986). The figure also showing average values of Sr and Nd isotopes for Taihua, Xionger, Luanchuan-Guandaokou, Qinling, Kuanping and Erlangping groups. Age calculating values of I_{Sr} and $\epsilon_{Nd}(t)$ uses 145 Ma. Taihua Group data after Luan *et al.* (1985), Ni *et al.* (2009) and Huang *et al.* (2010, 2012); Xionger Group data after Zhao (2000), He *et al.* (2010) and Wang *et al.* (2010); Luanchuan-Guandaokou Group data after Qi *et al.* (2006) and Zhang *et al.* (2006); Qinling Group data after Zhang *et al.* (1994); Kuanping Group data after Zhang *et al.* (2006) and Yan *et al.* (2008); Erlangping Group data after Sun *et al.* (1996), Zhang *et al.* (2006) and Xu *et al.* (2009).

体侵位时代), 6 件太华群样品的 I_{Sr} 变化于 0.70721 ~ 0.73305, 平均值为 0.71894, 30 件样品的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 变化于 -44.5 ~ -13.7, 平均为 -28.4; 18 件熊耳群样品的 I_{Sr} 变化于 0.71167 ~ 0.72882, 平均值为 0.71739, 34 件样品的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 变化于 -28.7 ~ -21.7, 平均为 -25.0; 3 件栾川-官道口群样品的 I_{Sr} 变化于 0.71163 ~ 0.71779, 平均值为 0.71383, 2 件样品的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 变化于 -26.2 ~ -25.6, 平均为 -25.9; 10 件秦岭群样品的 I_{Sr} 变化于 0.70755 ~ 0.72099, 平均值为 0.71205, 13 件样品的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 变化于 -6.6 ~ 5.6, 平均为 -0.7; 22 件宽坪群样品的 I_{Sr} 变化于 0.70115 ~ 0.70808, 平均值为 0.70440, 17 件样品的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 变化于 -1.2 ~ 6.7, 平均为 3.9; 27 件二郎坪群样品的 I_{Sr} 变化于 0.70053 ~ 0.70978, 平均值为 0.70617, 61 件样品的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 变化于 -3.8 ~ 6.2, 平均为 0.8. 由此可见, 太华群、熊耳群、栾川-官道口群的 I_{Sr} 值远高于银家沟杂岩体, 而其 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值又远低于银家沟杂岩体; 秦岭群的 I_{Sr} 和 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值均高于银家沟杂岩; 宽坪群和二郎坪群的 I_{Sr} 值低于银家沟杂岩体, 而其 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值又远高于银家沟杂岩体 (图 10). 因此, 太华群、熊耳群、栾川-官道口群、秦岭群、宽坪群和二郎坪群均无法单独满足银家沟杂岩的

Sr-Nd 同位素组成. 银家沟杂岩体主要由酸性的二长花岗岩和钾长花岗岩组成, 具有低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值, 且矿区未见基性-超基性岩, 地幔作为杂岩体潜在源区的可能性亦可以排除. 在 Zartman and Doe (1981) 的铅同位素组成相关图解中 (图 11), 太华群 (李英和任崔锁, 1990; 邵克忠和王宝德, 1992; 范宏瑞等, 1994; Ni *et al.*, 2012)、熊耳群 (罗铭钦等, 1992; 赵太平, 2000; 张本仁等, 2002)、地幔的 Pb 同位素组成明显低于银家沟杂岩, 而秦岭群 (胡鹏云和徐汉民, 1989; 张理刚等, 1995)、宽坪群和二郎坪群 (张宗清等, 2006) 的 Pb 同位素组成明显高于银家沟杂岩. Pb 同位素组成亦表明, 上述单元均无法单独作为银家沟杂岩体的潜在源区. 因此, 银家沟杂岩的源区只能由具较高的 I_{Sr} 和较低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 及放射成因 Pb 同位素组成的太华群、熊耳群、栾川-官道口群与具较低的 I_{Sr} 和较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 及放射成因 Pb 同位素组成的宽坪群、二郎坪群中的任何两者或多者混合和/或混染而成. 鉴于银家沟杂岩的主体二长花岗岩与钾长花岗岩具有较为一致的同位素组成, 暗示岩浆混染作用微弱, 混合作用应发生在岩浆源区. 银家沟杂岩体的 Pb 同位素组成投影点位于下地壳与造山带 Pb 演化线之间, 远离上地壳 Pb 演化

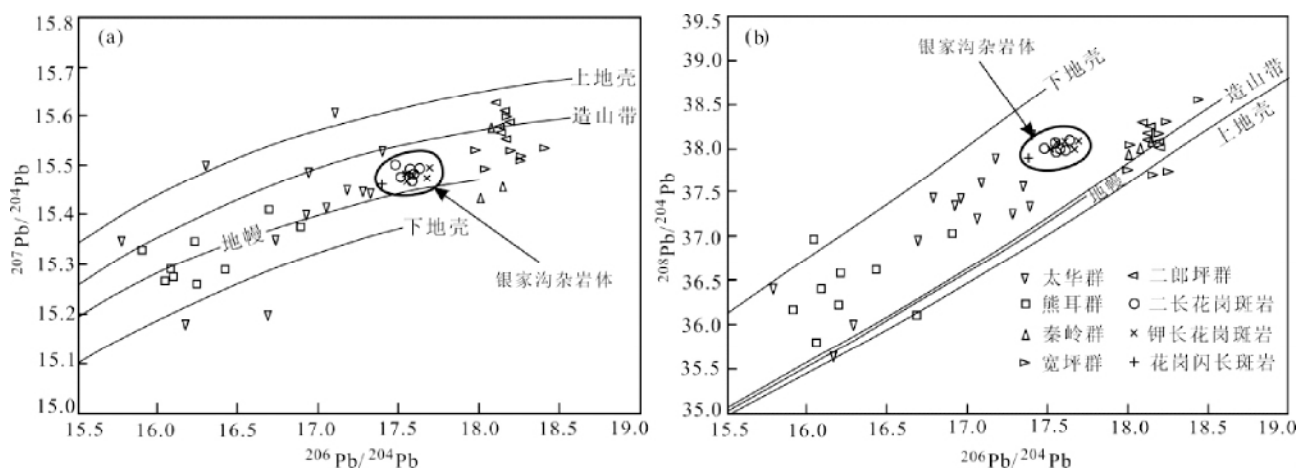


图 11 银家沟杂岩体铅同位素组成相关图解(底图据 Zartman and Doe, 1981)

图中同时呈现了太华群、熊耳群、秦岭群、宽坪群和二郎坪群铅同位素组成。太华群数据引自李英和任崔锁(1990)、邵克忠和王宝德(1992)、范宏瑞等(1994)和 Ni *et al.* (2012); 熊耳群数据引自罗铭玖等(1992)、赵太平(2000)和张本仁等(2002); 秦岭群数据引自胡鹏云和徐汉民(1989)和张理刚(1995); 宽坪群和二郎坪群数据引自张宗清等(2006)

Fig. 11 Diagrams of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a) and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b) of the Yinjiagou complex (base map after Zartman and Doe, 1981)

The figure also shows Pb isotopic compositions of the Taihua, Xiong'er, Qinling, Kuanping and Erlangping groups. Data resource: the Taihua Group after Li and Cui (1990), Shao and Wang (1992), Fan *et al.* (1994) and Ni *et al.* (2012); the Xiong'er Group after Luo *et al.* (1992), Zhao (2000) and Zhang *et al.* (2002); the Qinling Group after Hu and Xu (1989) and Zhang (1995); and the Kuanping and Erlangping Groups after Zhang *et al.* (2006)

线(图 11), 且其 μ 值($=9.31 \sim 9.39$)亦低于上地壳的 μ 值(9.58, Doe and Zartman, 1979), 表明 Pb 主要来自下地壳。因此, 可以排除处于地壳浅层次的熊耳群、栾川-官道口群作为混合端元的可能性。如此, 银家沟杂岩最可能由宽坪群、二郎坪群与太华群混合源区的部分熔融形成。

综上所述, 提出下述成岩作用模型: 中生代期间, 东秦岭发生 A 型俯冲(胡受奚等, 1988; 陈衍景和富士谷, 1992; 陈衍景等, 2000; Li *et al.*, 2001; 张国伟等, 2001), 北秦岭地体(包括宽坪群、二郎坪群)向北俯冲于华北克拉通南缘之下。在晚侏罗世-早白垩世构造体制转换过程中, 由宽坪群、二郎坪群和太华群组成的下地壳一起发生减压熔融, 形成了银家沟杂岩体主体, 稍晚形成的花岗闪长斑岩脉受到了熊耳群和/或官道口群的混染, 导致其 I_{Sr} 升高、 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值降低、Nd 模式年龄变大、放射成因 Pb 组分减少。

8 结论

(1) 银家沟杂岩体主要由二长花岗斑岩、钾长花岗斑岩组成, 并有少量的石英闪长斑岩、花岗闪长斑岩和闪长玢岩。二长花岗斑岩、钾长花岗斑岩形成于 $147.8 \pm 1.6\text{Ma} \sim 147.5 \pm 2.1\text{Ma}$ 期间; 花岗闪长斑岩形成于 $142.0 \pm 2.0\text{Ma}$ 。

(2) 银家沟杂岩体的源区成分最可能是宽坪群、二郎坪群与太华群组成的混合物。

(3) 晚侏罗世-早白垩世期间的 EW 向构造体制向 NNE

向构造体制转换过程中, 引起下地壳的减压熔融, 形成了深源浅成的银家沟杂岩体。

致谢 野外工作期间得到河南省灵宝市金源矿业有限责任公司银家沟硫铁矿李满旺矿长的大力支持; 银家沟硫铁矿周广权工程师、中国科学院地质与地球物理研究所的朱明田博士参加了部分野外工作; 金源矿业有限责任公司实验室张晓丽和中国科学院广州地球化学研究所的解洪晶博士生参加了部分室内研究工作; SHRIMP 锆石 U-Pb 定年得到了中国地质科学院地质研究所离子探针中心石玉若博士的帮助; 两位审稿人指出了文中的不足, 并提出了很好的修改意见及建议; 在此一并致以诚挚的感谢。

References

- Bao ZW, Zeng QS, Zhao TP and Yuan ZL. 2009. Geochemistry and petrogenesis of the ore-related Nannihu and Shangfanggou granite porphyries from East Qinling belt and their constraints on the molybdenum mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2523–2536 (in Chinese with English abstract)
- Boynton WV. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Elements Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63–114
- Chen YC, Wang PA, Qin KL, Zhao DY and Mao JW. 1994. Metallogenic series of main ore deposits and regional metallogeny in the Qinling area. *Mineral Deposits*, 13(4): 289–298 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ and Fu SG. 1992. *Gold Mineralization in West Henan*. Beijing:

- Seismological Press, 1–234 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ and Guo KH. 1993. Geology, geochemistry and genesis of the Yinjiagou skarn type gold deposit, Henan Province. *Mineral Deposits*, 12(3): 265–272 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Li C, Zhang J, Li Z and 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(Suppl.): 82–94
- 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, Chen HY, Zaw K, Pirajno F and Zhang ZJ. 2007. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: An overview. *Ore Geology Reviews*, 31(1–4): 139–169
- 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
- Dai BZ, Jiang SY and Wang XL. 2009. Petrogenesis of the granitic porphyry related to the giant molybdenum deposit in Donggou, Henan Province, China: Constraints from petrogeochemistry, zircon U-Pb chronology and Sr-Nd-Hf isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2889–2901 (in Chinese with English abstract)
- De la Roche H, Leterrier J, Granclaude P and Marchal M. 1980. A classification of volcanic and plutonic rocks using R_1R_2 -diagram and major-element analyses: Its relationships with current nomenclature. *Chemical Geology*, 29(1–4): 183–210
- Deng XH, Chen YJ, Santosh M and Yao JM. 2012. 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
- Doe BR and Zartman RE. 1979. Plumbotectonics: The Phanerozoic. In: Barnes HL (ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York: John Wiley, 22–70
- Fan HR, Xie YH, Zhao R and Wang YL. 1994. Stable isotope geochemistry of rocks and gold deposits in the Xiong'er shan area, western Henan Province. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 9(1): 54–64 (in Chinese with English abstract)
- Fu ZG, Jin YH, Wu F and Zhou M. 2007. Geological characteristics of host rocks of 5 mega Mo deposits in East Qinling-Dabie. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 22(4): 227–281 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, Wang SG, Jahn BM, Hong DW, Kagami H and Sun YL. 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Chemical Geology*, 138(3–4): 135–159
- Hart SR. 1984. A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle. *Nature*, 309(3571): 753–757
- He YH, Zhao GC, Sun M and Han YG. 2010. Petrogenesis and tectonic setting of volcanic rocks in the Xiaoshan and Waifangshan areas along the southern margin of the North China Craton: Constraints from bulk-rock geochemistry and Sr-Nd isotopic composition. *Lithos*, 114(1–2): 186–199
- Hu SX, Lin QL, Chen ZM and Li SM. 1998. *Geology and Metallogeny of the Collision Belt between the South China and North China Plates*. Nanjing: Nanjing University Press, 1–558 (in Chinese)
- Hu PY and Xu HM. 1989. A stable isotopic study of the Tieluzi gold-lead-zinc deposit in Shangxian County, Shaanxi. *Geology of Shaanxi*, 7(1): 56–76 (in Chinese with English abstract)
- Huang DH, Wu CY, Du AD and 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)
- Huang DH, Hou ZQ, Yang ZM, Li ZQ and Xu DX. 2009. Geological and geochemical characteristics, metallogenetic mechanism and tectonic setting of carbonatite vein-type Mo (Pb) deposits in the East Qinling molybdenum ore belt. *Acta Geologica Sinica*, 83(12): 1968–1984 (in Chinese with English abstract)
- Huang F, Luo ZH, Lu XX, Gao F, Chen BH, Yang ZF, Pan Y and Li DD. 2009. Was Donggou porphyry Mo deposit derived from Taishanmiaoh batholith? *Mineral Deposits*, 28(5): 569–584 (in Chinese with English abstract)
- Huang XL, Niu YL, Xu YG, Yang QJ and Zhong JW. 2010. Geochemistry of TTG and TTG-like gneisses from Lushan-Taihua complex in the southern North China Craton: Implications for Late Archean crustal accretion. *Precambrian Research*, 182(1–2): 43–56
- Huang XL, Wilde SA, Yang QJ and Zhong JW. 2012. Geochronology and petrogenesis of gray gneisses from the Taihua Complex at Xiong'er in the southern segment of the Trans-North China Orogen: Implications for tectonic transformation in the Early Paleoproterozoic. *Lithos*, 134–135: 236–252
- Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000. Granitoids of the central Asian orogenic belt and continental growth in the Phanerozoic. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 91(1–2): 181–193
- Jiao JG, Yuan HC, He K, Sun T, Xu G and Liu RP. 2009. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the Balipo porphyry Mo deposit in East Qinling, China, and its geological implication. *Acta Geologica Sinica*, 83(8): 1159–1166 (in Chinese with English abstract)
- Küster D and Harms U. 1998. Post-collisional potassic granitoids from the southern and northwestern parts of the Late Neoproterozoic East African Orogen: A review. *Lithos*, 45(1–4): 177–195
- Li C, Chen YJ and He SD. 2001. Age, mechanism and direction of East Qinling-Dabieshan lithosphere delamination: Petrological evidence and stipulation. *Chinese Journal of Geochemistry*, 20(1): 59–72
- Li HM, Chen YC, Ye HS, Wang DH, Guo BJ and Li YF. 2008. Mo, (W), Au, Ag, Pb, Zn minerogenetic series related to Mesozoic magmatic activities in the East Qinling-Dabie Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 82(11): 1468–1477 (in Chinese with English abstract)
- 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 N, Chen YJ, Santosh M, Yao JM, Sun YL and Li J. 2011. The 1.85Ga Mo mineralization in the Xiong'er Terrane, China: Implications for metallogeny associated with assembly of the Columbia supercontinent. *Precambrian Research*, 186(1–4): 220–232
- Li N, Chen YJ, Pirajno F, Gong HJ, Mao SD and Ni ZY. 2012a. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, trace element and Hf isotope geochemistry of the Heyu granite batholith, eastern Qinling, central China: Implications for Mesozoic tectono-magmatic evolution. *Lithos*, 142–143: 34–47
- Li N, Chen YJ, Pirajno F and Ni ZY. 2012b. Timing of the Yuchiling giant porphyry Mo system, and implications for ore genesis. *Mineralium Deposita*, doi: 10.1007/s00126-012-0441-4
- Li SR. 1994. On the affinity of Mesozoic calc-alkaline granitoids in the Luoning-Songxian area, western Henan Province. *Geological Review*, 40(6): 489–493 (in Chinese with English abstract)
- Li Y and Ren CS. 1990. The evolution of lead isotope in the southern margin of the Huabei platform. *Journal of Xi'an College of Geology*, 12(2): 1–11 (in Chinese with English abstract)
- Li YF, Mao JW, Hu HB, Guo BJ and Bai FJ. 2005. Geology, distribution, types and tectonic settings of Mesozoic molybdenum deposits in East Qinling area. *Mineral Deposits*, 22(3): 292–304 (in Chinese with English abstract)
- Liégeois JP, Navez J, Hertogen J and Black R. 1998. Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids. The use of sliding normalization. *Lithos*, 45(1–4): 1–28
- Lu XX, Yu ZP, Feng YL, Wang YT, Ma WF and Cui HF. 2002. Mineralization and tectonic setting of deep-hypabyssal granites in East Qinling Mountain. *Mineral Deposits*, 21(2): 168–178 (in

- Chinese with English abstract)
- Luan SW, Gao DC, Fang YK and Wang JF. 1985. Geochemistry of Xiaolinling gold deposits. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 5 (2): 1–118 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2001. User's Manual for Isoplot/Ex (version 2.49): A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Vol. 1a, 55
- Luo MJ, Wang HZ and Pang CA. 1992. Introduction of Gold Deposits in Henan Province. Beijing: Earthquake Publishing House, 1–423 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Zhang ZH, Li XF, Wang YT, Zhang CQ and Li YF. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169–188 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Bierlein F, Qu WJ, Du AD, Ye HS, Pirajno F, Li HM, Guo BJ and Li YF. 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the east Qinling-Dabie orogenic belt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(18): 4607–4626
- Mao JW, Ye HS, Wang RT, Dai JZ, Jian W, Xiang JF, Zhou K and Meng F. 2009. Mineral deposit model of Mesozoic porphyry Mo and vein-type Pb-Zn-Ag ore deposits in the eastern Qinling, Central China and its implication for prospecting. *Geological Bulletin of China*, 28(1): 72–79 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Pirajno F, Xiang JF, Gao JJ, Ye HS, Li YF and Guo BJ. 2011. Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt: Characteristics and tectonic settings. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 264–293
- Martin H, Smithies RH, Rapp R, Moyen JF and Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79(1–2): 1–24
- McDonough WF, Sun SS, Ringwood AE, Jagoutz E and Hofmann AW. 1992. Potassium, rubidium, and cesium in the Earth and Moon and the evolution of the mantle of the Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(3): 1001–1012
- 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
- Pearce JA. 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19(4): 120–125
- 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)
- Shao KZ and Wang BD. 1992. Characteristics of Qiyugou gold deposits and their prospecting perspective. *Journal of Hebei College of Geology*, 15(2): 105–194 (in Chinese with English abstract)
- Sun WD, Li SG, Sun Y, Zhang GW and Zhang ZQ. 1996. Geochronology and geochemistry of a lava pillow in the Erlangping Group at Xixia in the North Qinling Mountains. *Geological Review*, 42(2): 144–153 (in Chinese with English abstract)
- Sylvester PJ. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45(1–4): 29–44
- Wang XH, Jiang SY and Dai BZ. 2010. Melting of enriched Archean subcontinental lithospheric mantle: Evidence from the ca. 1760Ma volcanic rocks of the Xiong'er Group, southern margin of the North China Craton. *Precambrian Research*, 182(3): 204–216
- Wang XX, Jiang CY and An SY. 1986. The characteristics of two-pyrene granulite enclaves in the midacid porphyry bodies and their geologic significance. *Journal of Xi'an College of Geology*, (2): 16–22 (in Chinese with English abstract)
- Wei QG, Yao JM, Zhao TP, Sun YL, Li J, Yuan ZL and Qiao B. 2009. Discovery of a ~1.9Ga Mo deposit in the eastern Qinling orogen: Molybdenite Re-Os ages of the Longmenden Mo deposit in Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2747–2751 (in Chinese with English abstract)
- Williams IS, Buick IS and Cartwright I. 1996. An extended episode of Early Mesoproterozoic metamorphic fluid flow in the Reynolds Range, central Australia. *Journal of Metamorphic Geology*, 14(1): 29–47
- Williams IS. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben MA, Shanks WC III and Ridley WI (eds.). *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*. *Reviews in Economic Geology*, 7: 1–35
- Wu FY, Sun DY and Lin Q. 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 181–189 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Sun DY, Li HM, Jahn BM and Wilde S. 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1–2): 143–173
- Xu GF. 1985. Matter-forming source of the Yinjiagou molybdenum-copper-pyrite deposit in western Henan Province. *Henan Geology*, (Suppl.): 266–270 (in Chinese with English abstract)
- Xu YH, Zhao TP and Chen W. 2009. Origin of felsic volcanic rocks associated with VMS-type deposits in the Er'langping Group, East Qinling: Implications for ore-forming setting. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 399–412 (in Chinese with English abstract)
- Yan QR, Wang ZQ, Yan Z, Wang T, Chen JL, Xiang ZJ, Zhang ZQ and Jiang CF. 2008. Origin, age and tectonic implications of metamorphic rocks in the Kuanping Group of the Qinling orogenic belt, China. *Geological Bulletin of China*, 27(9): 1475–1492 (in Chinese with English abstract)
- Yan ZX, Sun WZ, Zhang NC, Zhou M and Huang ZH. 2007. Geological condition and prospecting of the Yinjiagou pyrite-polymetallic deposit in Henan Province. *Geological Survey and Research*, 30(2): 149–157 (in Chinese with English abstract)
- Yang XY, Lu XX, Du XW, Li WM, Zhang ZW and Qu WJ. 2010. Ore geochemistry, petrogenesis and metallogenic dynamics of the Nangou molybdenum district in the East Qinling Orogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 84(7): 1049–1079 (in Chinese with English abstract)
- Ye HS, Mao JW, Li YF, Guo BJ, Zhang CQ, Liu J, Yan QR and Liu GY. 2006. SHRIMP zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the superlarge Donggou porphyry Mo deposit in East Qinling, China, and its geological implication. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 1078–1088 (in Chinese with English abstract)
- Ye HS, Mao JW, Xu LG, Gao JJ, Xie GQ, Li XQ and He CF. 2008. SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry of the Taishanmiaolun Aluminous A-type granite in western Henan Province. *Geological Review*, 54(5): 699–711 (in Chinese with English abstract)
- Zartman RE and Doe BR. 1981. Plumbotectonics: The model. *Tectonophysics*, 75(1–2): 135–162
- Zhang BR, Gao S, Zhang HF and Han YW. 2002. Geochemistry of the Qinling Orogeny. Beijing: Science Press, 1–187 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC and Xiao QH. 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Geodynamics. Beijing: Science Press, 1–855 (in Chinese)
- Zhang LG. 1995. Block-Geology of Eastern Asia Lithosphere: Isotope Geochemistry and Dynamics of Upper Mantle, Basement and Granite. Beijing: Science Press, 63–73 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang YL, Jin WJ, Jia XQ and Li CD. 2008. Criteria for the recognition of pre-, syn- and post-orogenic granitic rocks. *Geological Bulletin of China*, 27(1): 1–18 (in Chinese with English abstract)
- Zhang XM, Qiao CJ, Cai XD, Zhang XD, Wang WL, Zhang CH and Zhang YH. 2008. Characteristics of Yinjiagou polymetal-pyrite deposit related to pulse magmatic intrusions in Henan, China. *Global Geology*, 27(2): 137–145 (in Chinese with English abstract)

- Zhang ZQ, Liu DY and Fu GM. 1994. Study of Isotope Geochronology of Metamorphic Stratigraphy of North Qinling. Beijing: Geological Publishing House, 1-191 (in Chinese)
- Zhang ZQ, Zhang GW, Liu DY, Wang ZQ, Tang SH and Wang JH. 2006. Isotopic Geochronology and Geochemistry of Ophiolites, Granites and Clastic Sedimentary Rocks in the Qinling Orogenic Belt. Beijing: Geological Publishing House, 1-348 (in Chinese with English abstract)
- Zhao HJ, Mao JW, Ye HS, Hou KJ and Ling HS. 2010. Chronology and petrogenesis of Shijiawan granite porphyry in Shannxi Province: Constrains from zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions. Mineral Deposits, 29(1): 143-157 (in Chinese with English abstract)
- Zhao TP. 2000. Characteristics and petrogenesis of K-rich volcanic rocks of the Xiong'er Group in the southern margin of the North China craton. Ph. D. Dissertation. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1-102 (in Chinese with English summary)
- Zhu LM, Zhang GW, Li B and Guo B. 2008. Main geological events, genetic types of metallic deposits and their geodynamical setting in the Qinling orogenic belt. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 27(4): 384-390 (in Chinese with English abstract)
- Zindler A and Hart S. 1986. Chemical geodynamics. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 14(1): 493-571
- ### 附中文参考文献
- 包志伟, 曾乔松, 赵太平, 原振雷. 2009. 东秦岭钼矿带南泥湖-上房沟花岗岩成因及其对钼成矿作用的制约. 岩石学报, 25(10): 2523-2536
- 陈毓川, 王平安, 秦可令, 赵东宏, 毛景文. 1994. 秦岭地区主要金属矿床成矿系列的划分及区域成矿规律探讨. 矿床地质, 13(4): 289-298
- 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, 郭抗衡. 1993. 河南银家沟矽卡岩型金矿的地质地球化学特征及成因. 矿床地质, 12(3): 265-272
- 陈衍景, 李超, 张静, 李震, 王海华. 2000. 秦岭钼矿带斑岩体锆氧同位素特征与岩石成因机制和类型. 中国科学(D辑), 30(增刊): 64-72
- 戴宝章, 蒋少涌, 王孝磊. 2009. 河南东沟钼矿花岗岩成因: 岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约. 岩石学报, 25(11): 2889-2901
- 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
- 付治国, 靳拥护, 吴飞, 周明. 2007. 东秦岭-大别山5个特大型钼矿床的成矿母岩地质特征分析. 地质找矿论丛, 22(4): 227-281
- 胡受奚, 林潜龙, 陈泽铭, 黎世美. 1998. 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
- 胡鹏云, 徐汉民. 1989. 商县铁炉子金铅锌矿床稳定同位素研究. 陕西地质, 17(1): 56-76
- 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 何红蓼. 1994. 东秦岭地区钼矿床的铼-钼同位素年龄及其意义. 矿床地质, 13(3): 221-230
- 黄典豪, 侯增谦, 杨志明, 李振清, 许道学. 2009. 东秦岭钼矿带内碳酸岩脉型钼(铅)矿床地质-地球化学特征、成矿机制及成矿构造背景. 地质学报, 83(12): 1968-1984
- 黄凡, 罗照华, 卢欣祥, 高飞, 陈必河, 杨宗锋, 潘颖, 李德东. 2009. 东沟含钼斑岩由太山庙岩基派生? 矿床地质, 28(5): 569-584
- 焦建刚, 袁海潮, 何克, 孙涛, 徐刚, 刘瑞平. 2009. 陕西华县八里坡钼矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义. 地质学报, 83(8): 1159-1166
- 李厚民, 陈毓川, 叶会寿, 王登红, 郭保健, 李永峰. 2008. 东秦岭-大别地区中生代与岩浆活动有关的钼(钨)金银铅锌矿床成矿系列. 地质学报, 82(11): 1468-1477
- 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(5): 186-198
- 李胜荣. 1994. 论豫西洛宁-嵩县中生代钙碱性花岗岩类的同源性. 地质论评, 40(6): 489-493
- 李英, 任崔锁. 1990. 华北地台南缘铅同位素演化. 西安地质学院学报, 12(2): 1-11
- 李永峰, 毛景文, 胡华斌, 郭保健, 白凤军. 2005. 东秦岭钼矿类型、特征、成矿时代及其地球动力学背景. 矿床地质, 22(3): 292-304
- 卢欣祥, 于在平, 冯有利, 王义天, 马维峰, 崔海峰. 2002. 东秦岭深源浅成型花岗岩的成矿作用及地质构造背景. 矿床地质, 21(2): 168-178
- 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
- 罗铭玖, 王亨治, 庞传安. 1992. 河南金矿概论. 北京: 地震出版社, 423
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景. 岩石学报, 21(1): 169-188
- 毛景文, 叶会寿, 王瑞廷, 代军治, 简伟, 向君锋, 周珂, 孟芳. 2009. 东秦岭中生代钼铅锌银多金属矿床模型及其找矿评价. 地质通报, 28(1): 72-79
- 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, 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
- 邵克忠, 王宝德. 1992. 祁雨沟地区爆破角砾岩型金矿成矿条件和找矿方向研究. 河北地质学院学报, 15(2): 105-195
- 孙卫东, 李曙光, 孙勇, 张国伟, 张宗清. 1996. 北秦岭西峡二郎坪群枕状熔岩中一个岩枕的年代学和地球化学研究. 地质论评, 42(2): 144-153
- 王晓霞, 姜常义, 安三元. 1986. 中酸性小斑岩体中二辉麻粒岩包体的特征及地质意义. 西安地质学院学报, (2): 16-22
- 魏庆国, 姚军明, 赵太平, 孙亚莉, 李晶, 原振雷, 乔波. 2009. 东秦岭发现~1.9Ga 钼矿床——河南龙门店钼矿床 Re-Os 定年. 岩石学报, 25(11): 2747-2751
- 吴福元, 孙德有, 林强. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生. 岩石学报, 15(2): 181-189
- 徐国凤. 1985. 论豫西银家沟钼-铜-硫铁矿床的物质来源. 河南地质, (增刊): 266-270
- 徐勇航, 赵太平, 陈伟. 2009. 东秦岭二郎坪群长英质火山岩成因及其对 VMS 型矿床成矿环境的制约. 岩石学报, 25(2): 399

- 412

- 闫全人, 王宗起, 闫臻, 王涛, 陈隽璐, 向忠金, 张宗清, 姜春发. 2008. 秦岭造山带宽坪群中的变铁镁质岩的成因、时代及其构造意义. 地质通报, 27(9): 1475–1492
- 颜正信, 孙卫志, 张年成, 周梅, 黄志华. 2007. 河南灵宝银家沟硫铁多金属矿床成矿地质条件及找矿方向. 地质调查与研究, 30(2): 149–157
- 杨晓勇, 卢欣祥, 杜小伟, 李文明, 张正伟, 屈文俊. 2010. 河南南沟钼矿床地球化学研究兼论东秦岭钼矿床成岩成矿动力学. 地质学报, 84(7): 1049–1079
- 叶会寿, 毛景文, 李永峰, 郭保健, 张长青, 刘珺, 闫全人, 刘国印. 2006. 东秦岭东沟超大型斑岩钼矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义. 地质学报, 80(7): 1078–1088
- 叶会寿, 毛景文, 徐林刚, 高建京, 谢桂清, 李向前, 何春芬. 2008. 豫西太山庙铝质 A 型花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征. 地质论评, 54(5): 699–711
- 张本仁, 高山, 张宏飞, 韩吟文. 2002. 秦岭造山带地球化学. 北京: 科学出版社, 1–187
- 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
- 张理刚. 1995. 东亚岩石圈块体地质——上地幔、基底和花岗岩同位素地球化学及其动力学. 北京: 科学出版社, 63–73
- 张旗, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤, 李承东. 2008. 造山前、造山和造山后花岗岩的识别. 地质通报, 27(1): 1–18
- 张孝民, 乔翠杰, 蔡晓荻, 张向东, 王温灵, 张春红, 张元厚. 2008. 河南银家沟岩浆脉动侵位多金属硫铁矿床特征. 世界地质, 27(2): 137–145
- 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, 1–191
- 张宗清, 张国伟, 刘敦一, 王宗起, 唐索寒, 王进辉. 2006. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学. 北京: 地质出版社, 1–348
- 赵海杰, 毛景文, 叶会寿, 侯可军, 梁慧山. 2010. 陕西洛南县石家湾钼矿相关花岗斑岩的年代学及岩石成因: 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素制约. 矿床地质, 29(1): 143–157
- 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研究所, 1–102
- 朱赖民, 张国伟, 李犇, 郭波. 2008. 秦岭造山带重大地质事件、矿床类型和成矿大陆动力学背景. 矿物岩石地球化学通报, 27(4): 384–390