

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.147



华北南缘老里湾银铅锌矿床矿化特征和 岩体地球化学特征:对矿床成因的指示

李晓明¹, 李占轲^{1*}, 熊胜克², 高 凯³, 昌 佳¹, 李建威^{1,4}

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 河南省孚光矿业有限公司, 河南郑州 450007

3. 河南省地矿局第一地质矿产调查院, 河南洛阳 471023

4. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 老里湾银铅锌矿床位于华北克拉通南缘崤山断隆带内, 是崤山地区首次发现的大型矿床。其矿体主要赋存于老里湾花岗岩体内, 同时受断裂构造控制, 与区域银铅锌矿床的地质特征明显不同。矿床地质研究表明, 老里湾银铅锌成矿作用可分为热液期和表生期, 其中热液期又可分为4个成矿阶段: 石英—菱铁矿阶段、石英—黄铁矿阶段、石英—多金属硫化物阶段和石英—重晶石—方解石阶段。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 两件老里湾花岗岩样品的成岩年龄分别为 129.0 ± 1.7 Ma、 129.0 ± 1.1 Ma。岩石地球化学分析表明, 该岩体具有高硅、富碱、准铝质—弱过铝质的特点, 富集 LREE、Rb、Ba、Sr、Pb 等大离子亲石元素, 亏损 HREE、Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素, 具有弱的负 Eu 异常。综合分析表明, 老里湾花岗岩体与区域同时期岩体具有相似的地球化学特征, 它们的侵位可能与中国东部中生代构造大转折及岩石圈减薄相关。结合矿化特征及区域成岩成矿年代学数据, 认为老里湾银铅锌矿床成矿时代应稍晚于花岗岩, 二者并没有直接的成因联系, 但可能为同一深部岩浆房活动的产物。崤山地区断裂带和岩体交汇处是寻找银铅锌矿床的有利部位, 这一认识得到了近期老里湾北部中河地区的银铅锌勘查工作的验证。同小秦岭、熊耳山地区相比, 崤山地区整体剥蚀较浅, 老里湾银铅锌矿体深部还具有寻找斑岩型钼矿床的潜力。

关键词: 崤山地区; 老里湾; 银铅锌矿床; 矿床成因; 找矿意义; 地球化学。

中图分类号: P611

文章编号: 1000-2383(2019)01-069-19

收稿日期: 2018-09-20

Mineralization Characteristics of the Laoliwan Ag-Pb-Zn Deposit and Geochemical Features of the Ore-Bearing Granite Porphyry in the Southern North China Craton: Implications for Ore Genesis

Li Xiaoming¹, Li Zhanke^{1*}, Xiong Shengke², Gao Kai³, Chang Jia¹, Li Jianwei^{1,4}

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Fuguang Mining Co. Ltd. of Henan Province, Zhengzhou 450007, China

3. No.1 Institute of Geological & Mineral Resources Survey of Henan Province, Luoyang 471023, China

4. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The newly discovered Laoliwan large Ag-Pb-Zn deposit is located in the Xiaoshan district, southern margin of North China Craton, which is different from other types of Ag-Pb-Zn deposit in the area since the ore bodies are mainly hosted in the Laoliwan granite porphyry and controlled by the regional faults. The mineralization could be subdivided into two periods: the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41772074, 41402066, 91514303); 国家重点研发计划项目 (No. 2016YFC0600104).

作者简介: 李晓明 (1992-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业. ORCID: 0000-0002-0164-0996. E-mail: krkr-005@163.com

*** 通讯作者:** 李占轲, E-mail: lizk@cug.edu.cn

引用格式: 李晓明, 李占轲, 熊胜克, 等, 2019. 华北克拉通南缘崤山地区老里湾银铅锌矿床地质成因和找矿意义. 地球科学, 44(1): 69-87.

hydrothermal period and the supergene period. The hydrothermal period consists of four stages: the quartz-siderite stage, the quartz-pyrite stage, the quartz-polymetallic sulfide stage, and the quartz-carbonate stage. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of two samples from the Laoliwan granite porphyry are 129.0 ± 1.7 Ma and 129.0 ± 1.1 Ma, respectively, indicating the granite porphyry intruded during Early Cretaceous. Based on the rock geochemical analysis, the granite porphyry is characterized by high silicon, high alkali, and weak peraluminous. The REE and trace elements characteristics display enrichment of large ion lithophile elements (LREE, Rb, Ba, Sr, Pb) and depletion of high-field elements (HREE, Nb, Ta, Ti, P) and moderately negative anomaly of Eu. These features are similar with other Early Cretaceous granites in the area, indicating the magmatic activities are probably related to contemporaneous tectonic transition and lithosphere thinning in eastern China. Based on mineralization characteristics and regional geochronological data, it is supposed that the Ag-Pb-Zn mineralization formed later than the granite porphyry and they have no direct genetic relationships. However, they may be the products of activities of the same deep magma chamber. This study of the Laoliwan Ag-Pb-Zn deposit suggests that the superposition of faults and granite rocks could be the prospective places for exploring Ag-Pb-Zn deposits in the Xiaoshan district, which is confirmed by the recent prospecting work at Zhonghe which is in north of Laoliwan. Compared with Xiaolinling and Xiong'ershan area, the exhumation of the Xiaoshan area is quite shallower. It is potential to find porphyry molybdenum deposit under the Ag-Pb-Zn ore bodies of Laoliwan.

Key words: Xiaoshan district; Laoliwan; Ag-Pb-Zn deposit; ore genesis; ore prospecting; geochemistry.

华北克拉通南缘是我国重要的多金属矿产资源产地,传统优势矿种主要为金和钼,如小秦岭、熊耳山金矿集中区(Mao *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2012a, 2012b; 毕诗健等, 2016),以及栾川、外方山钼矿集中区等(叶会寿, 2006; Mao *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2017).近年来随着地质工作的深入开展,华北南缘逐渐成为我国重要的银资源产地,已探明矿床数十个,其中熊耳山地区下峪矿田为区域内最大的银矿集中区,累计探明银资源量 5 000 余吨,铅锌资源量 100 余万吨(毛景文等, 2006; 柳玉虎等, 2015).已有研究表明,华北克拉通南缘银铅锌矿床可分为两类.一类主要围绕含钼矿斑岩体呈似层状或脉状产出的银铅锌矿床;相关流体包裹体及同位素研究表明该类矿床与矿田内的斑岩型钼矿为同一岩浆—热液活动的产物(毛景文等, 2009; 叶会寿等, 2010; Li *et al.*, 2017),如骆驼山矿床(杨晨英等, 2016)、冷水北沟矿床(李占轲, 2013)、三元沟矿床(Li *et al.*, 2017)等.另一类银铅锌矿床主要受断裂构造带控制并呈脉状产出,赋矿围岩主要为太华群变质岩及熊耳群安山岩;此类矿床矿区内一般无花岗岩体出露,或出露的花岗岩体没有发生矿化.目前该类矿床的成因还存在争论,陈衍景等(2003)通过对铁炉坪矿床成矿流体及同位素地球化学的研究,从成矿物质及成矿流体来源等方面,认为该类矿床形成于华北与扬子板块碰撞造山过程中,应属于造山型银铅锌矿床(Chen *et al.*, 2004).毛景文等(2006)和高建京等(2011)通过对沙沟和铁炉坪两个矿床蚀变矿物绢云母 ^{40}Ar — ^{39}Ar 同位素测年研究,认为矿床形成时代与区域内斑岩岩浆—热液活动形成

的 Mo-Pb-Zn-Ag 成矿系列时间较为一致,提出这些银铅锌矿床应为岩浆热液脉型,受控于华北克拉通晚中生代岩石圈减薄的构造背景.

老里湾银铅锌矿床是华北克拉通南缘新发现的大型银多金属矿床(李红松等, 2016),它的发现结束了崤山地区无大矿的历史,被中国地质学会评为“2015 年度十大地质找矿成果”(引自 <http://www.geosociety.org.cn/>).该矿床初步探明—180 m 标高以上银资源量 2 065 t,铅+锌资源量 17×10^4 t,伴生金资源量 2.4 t(河南省地质矿产勘查开发局第一地质勘查院, 2015,河南省洛宁县老里湾银矿勘探报告);部分钻孔并未完全控制住矿体,矿区深部还有很大的找矿潜力.与上述区域其他银铅锌矿床不同,老里湾矿床主要矿体产于花岗斑岩体内,后者热液蚀变较为发育,据此被认为是斑岩型银矿床(李铭等, 2016).而李红松等(2016)则认为该矿床主要矿体受 NW 向断裂带控制,应属于构造蚀变岩型热液脉状矿床.老里湾矿床勘探发现至今,前人开展了一些矿床地质特征和成矿地质背景的研究(李红松等, 2016; 李铭等, 2016),但缺乏对成岩成矿特征和相互关系的系统研究.本文拟在详细研究老里湾银铅锌矿床矿化蚀变特征以及花岗斑岩体年代学和地球化学特征的基础上,探讨成岩成矿活动的关系以及矿床成因,进而为崤山地区银铅锌矿床勘探工作提供一定的理论指导.

1 区域地质背景

华北克拉通南缘北以三门峡—鲁山断裂为界,

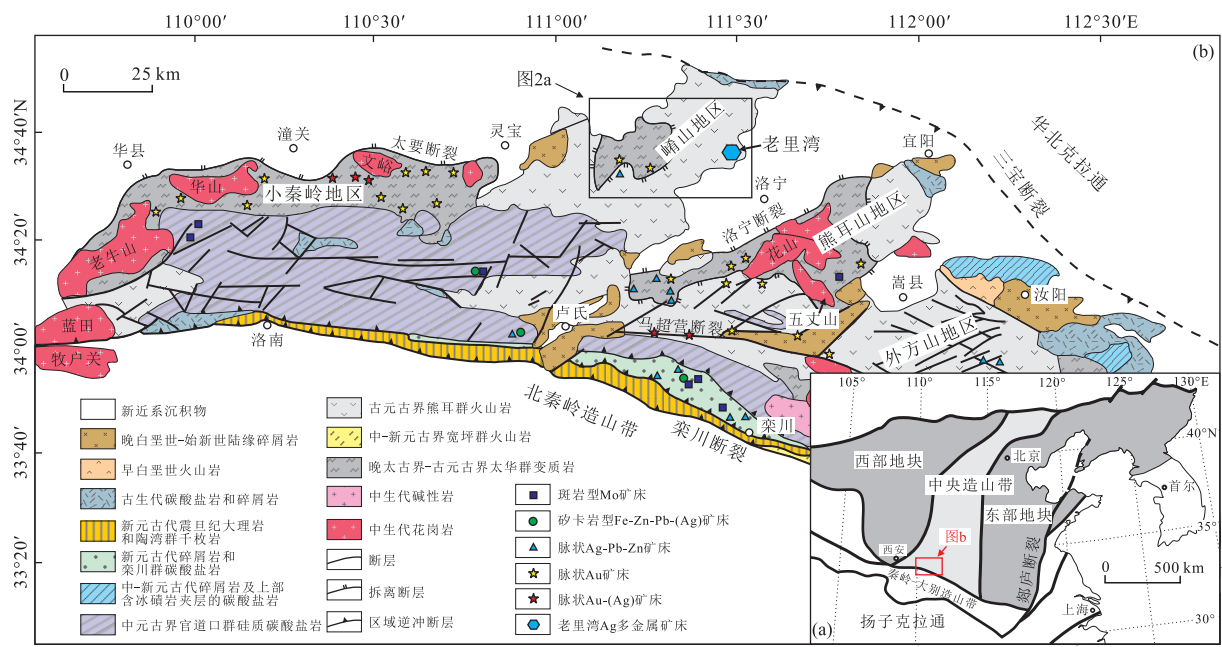


图 1 华北克拉通南缘地质矿产简图

Fig.1 The simplified geological map of the southern margin of North China Craton

据 Mao *et al.* (2010) 修改

其南以洛南—栾川断裂为界紧临秦岭造山带(图1)。该地区于古元古代形成统一结晶基底,中元古代—新元古代为伸展裂谷并卷入被动大陆边缘演化。新元古代—中三叠世为以现代板块构造体制为基本特征的构造演化(张国伟等, 2001),具体表现为:新元古代华北克拉通南缘是与古秦岭洋邻接的被动大陆边缘;早古生代由于古秦岭洋扩张和向北方向俯冲导致华北克拉通南缘转变为活动大陆边缘;晚古生代华北板块和扬子板块逐渐靠拢,秦岭进入全面陆陆碰撞造山阶段(张国伟等, 1996)。进入三叠纪中晚期后,华北克拉通南缘与扬子克拉通完成陆陆碰撞拼合(李曙光等, 1989),转入陆内构造演化阶段。早白垩世由于太平洋板块的俯冲作用导致了包括华北克拉通南缘在内的华北克拉通岩石圈破坏和减薄,其峰期为 125 Ma 左右(朱日祥等, 2011)。

崤山地区处于华北克拉通南缘中部(图1),其北东侧以三门峡—鲁山断裂为界,北西侧为三门峡—灵宝断陷盆地与小秦岭相隔,东南部为卢氏—洛宁断陷盆地与熊耳山相接。区内出露地层主要为太古宇—古元古界太华群和中元古界熊耳群,其次为古元古界铁洞沟组、中元古界官道口群和汝阳群(图2a)。太华群变质岩系主要分布在张村断裂(F1)以南,龙卧沟至小妹河一带,岩性主要由混合岩化黑云斜长片麻岩、斜长角闪片岩、绿泥片岩、绢云石英片岩等组成,其内赋存多个小型金矿床。古元古界铁

铜沟组出露面积有限,与下部的太华群以拆离断层带相隔,岩性主要为石英片岩。熊耳群火山岩系在区域内广泛分布,岩性主要为安山岩、杏仁状安山岩、英安岩、流纹岩等,区域内熊耳群由下而上为许山组、鸡蛋坪组、马家河组、龙脖组。官道口群主要为一套浅海沉积的镁质碳酸盐岩夹滨海碎屑岩组合,在区内出露较少,主要分布于崤山西南部。汝阳群为一套砾岩、砂岩、泥岩组合,以平行不整合覆于马家河组之上。

崤山地区自太古宙至中生代均有岩浆活动。太古宙岩浆活动主要为 TTG 岩系及钾质花岗岩系,构成晚太古代—古元古代结晶基底;中元古代主要为中基性—中酸性火山喷发形成的熊耳群火山岩,还分布有少量中元古代辉绿岩、闪长岩等浅成侵入岩。此外还有少量新元古代闪长岩、古生代闪长岩以及燕山期中酸性岩浆小岩体。燕山期中酸性小岩体主要岩性为花岗斑岩、二长花岗斑岩、斑状花岗闪长岩等,包括龙卧沟岩体、后河岩体、小妹河岩体、白石崖岩体、韩沟岩体、后瑶峪岩体、柳关岩体等(图2a),锆石 U-Pb 年龄显示这些岩体主要形成于早白垩世(胡浩等, 2011; Liang *et al.*, 2013; 卢仁等, 2013, 2014; 梁涛和卢仁, 2015)。

区内断裂比较发育,根据展布方向分为近南北向、近东西向、北北西向和北东向。其中北东向断裂及近东西向断裂十分发育,规模较大,往往造成地层的缺失或重复出现,对区域内地层有明显的控制作

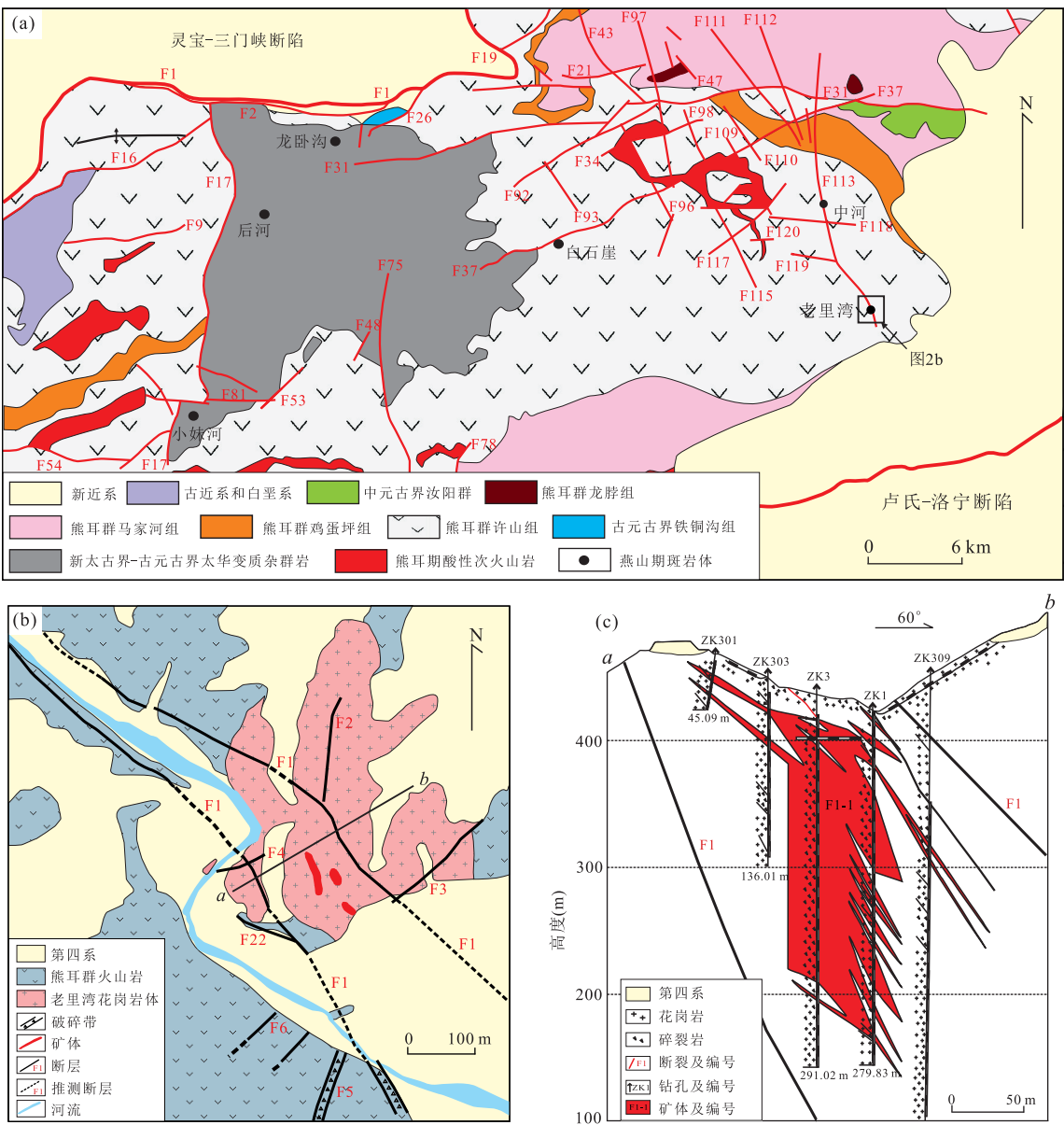


图 2 嵕山地区地质构造简图(a);老里湾银铅锌矿床矿区地质图(b);老里湾矿床 3 号勘探线剖面(c)

Fig.2 Simplified geological and structural map of the Xiaoshan district (a); geological map of the Laoliwan Ag-Pb-Zn deposit (b); No.3 exploration line in Laoliwan deposit (c)

图 a 据朱静(2015)修改;图 b 据河南省地质矿产勘查开发局第一地质勘查院,2015,河南省洛宁县老里湾银矿勘探报告修改;图 c 位置见图 2b 中 ab

用.北北西向及近南北向断裂较发育,规模较小,仅有个别断裂规模较大,如控制老里湾岩体及中河岩体的 F113 断裂.区内矿床类型较多,嵕山地区主要为规模较小的金矿床和少数的银铅锌矿床,如石寨沟金矿、半宽金矿、葫芦峪金矿、申家窑金矿、老里湾银铅锌矿床等.

2 矿区地质

矿区内地层主要为中元古代熊耳群许山组中

段、下段的火山岩和第四系粘土覆盖物(图 2b).许山组下段主要为灰绿色安山岩、杏仁斑状安山岩夹玄武安山岩以及玄武岩,中段主要为杏仁状安山岩、杏仁斑状安山岩及灰绿色安山岩,以发育杏仁状安山岩为特征,另有少量的流纹岩.

矿区内断裂构造发育,主要为北西、北东、南北向 3 组构造破碎蚀变带.其中主要断裂为 F1、F2、F3 (图 2b).北西向 F1 断裂规模最大,具有先压后张扭的多期活动特点,并切穿老里湾岩体,是矿区内主要的控矿、赋矿构造.F1 断裂总体产状 $40\sim 50^{\circ}\angle 50\sim$

70°,长度大于 2 500 m,表现为北西较窄、南东较宽,最窄处 80 m,最宽处 400~500 m.F1 断裂为区域 F113 断裂在矿区的延续(图 2a),该断裂从老里湾岩体一直延伸到中河岩体,并控制了中河银铅锌矿床的产出.近南北向断裂数量不多,最主要的为 F2 断裂,该断裂位于矿区中北部,并被 F1 断裂切断,产状为 260~270°∠75~85°,断裂带宽 0.5~1.0 m.北西向断裂规模较小、数量较多,其中 F3 断裂规模较大,位于矿区中东部,出露长度 200~300 m,产状为 110~135°∠60~80°,为压扭性正断层,断面呈舒缓波状.

矿区内岩浆岩主要为老里湾花岗斑岩,出露面积 0.25 km²,平面上南北长 800 余米,东西宽 570 余米.岩体侵位于熊耳群许山组中段安山岩,部分被第四系覆盖.在老里湾斑岩体与熊耳群安山岩相接触的部位存在较弱的蚀变作用,主要表现为靠近岩体的安山岩中多见有宽度在 0.2~1.0 cm 的石英—黄铁矿细脉充填,岩石断裂面上还可见有较稠密、浸染状黄铁矿细粒.主要金属矿物为黄铁矿,其他硫化物基本不发育.

花岗斑岩斑晶主要为钾长石、石英,少量为黑云母、角闪石.斑晶含量为 15%~35%,粒径大小为 0.5~10.0 mm,个别可达 20~30 mm.钾长石斑晶自形,颗粒大小为 0.2~2.0 cm 不等,因高岭土化常呈白色.镜下可见简单双晶,内部有较多的不规则裂纹,并常见钾长石的振荡环带(图 3a).石英为半自形

粒状或近圆形,烟灰色,粒径在 3~8 mm 不等.镜下可见石英多溶蚀成为浑圆状和港湾状,存在暗色反应边,表明较强的蚀变特征,内部多有不规则的裂纹,另外可见石英的巨斑(图 3b).此外,在花岗斑岩中还发现了暗色包体,包体形态一般为椭球形,粒径一般为 4~10 cm 不等.暗色包体岩性为微细粒黑云母石英二长闪长岩,暗色矿物以黑云母为主,含量约为 40%,另外长石含量约为 40%,石英约为 10%,方解石约为 10%.

花岗斑岩内部整体蚀变较强,相对较破碎.其中无矿化的花岗斑岩为灰白色,局部可见低温黏土化蚀变;矿化较弱的钾化花岗斑岩呈红色;含矿或与矿化存在紧密联系的花岗斑岩均发生了绢云母化而呈绿色.在蚀变较弱的岩体中部分黑云母基本上完好,可见明显浅绿—墨绿色多色性以及一组极完全解理.而绢云母化花岗斑岩中多数黑云母受到强烈蚀变,多保留晶型,但是内部被方解石、绢云母、长石、不透明铁质矿物等替代,仅部分或边部存留有黑云母(图 3c).这种样品中角闪石也遭受严重蚀变,除了个别角闪石颗粒可见两组解理外,其余均被蚀变成为绢云母、方解石、石英及铁质矿物的细小颗粒,但保留角闪石的晶型,包括菱形、近菱形的六边形等(图 3d).

3 矿床地质特征

3.1 矿体特征

矿区目前一共圈定了 20 个矿体,位于花岗斑岩的蚀变矿化带中,多呈囊状、不规则脉状、透镜状等形态产出.F1 断裂带内圈定了 10 个矿体,其中 F1-1 为主要矿体(图 2c),占总矿石资源储量的 88%,银金属量的 92%.矿体主要位于 F1 构造蚀变带的底部,厚大矿体部位达到蚀变带中上部,边部为厚大部位的自然延伸.矿体总体倾向 60°,倾角 60°,矿体控制长度 495 m,控制最大深度 480 m.矿体最大厚度 140 m,平均厚度 10.5 m,总体为厚大的囊状,分支复合现象明显.在矿体厚大部位往往以银矿石为主、银品位较高,在较薄的部位铅锌矿石较多、铅锌品位相对较高.银铅锌平均品位分别为 $Ag=224.80\times 10^{-6}$ 、 $Pb=0.07\%$ 和 $Zn=0.08\%$,总体表现为厚大部位品位高,较薄部位品位相对较低,产状上表现为中间品位高,两侧品位低.矿石主要为浸染状矿石,并且有许多细脉状的矿石杂乱分布.其他矿体规模较小,多呈脉状、似层状、透镜状,矿体形态简单,产

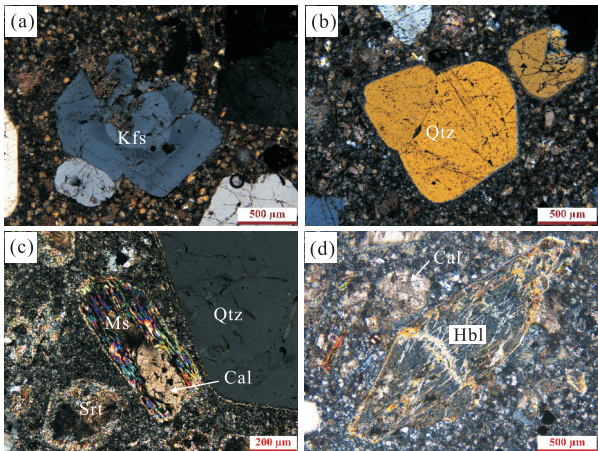


图 3 老里湾花岗斑岩显微镜下特征

Fig.3 Photomicrographs of the Laoliwan granite porphyry
a.具振荡环带的钾长石斑晶;b.浑圆状石英斑晶;c.黑云母斑晶被白云母及方解石交代;d.蚀变角闪石残余,仍可见两组解理,蚀变矿物为绢云母集合体;Kfs.钾长石;Qtz.石英;Ms.白云母;Srt.绢云母;Cal.方解石;Hbl.普通角闪石

状类似。矿体与围岩多呈渐变关系,仅有少数矿体与围岩边界清晰。矿体围岩主要为绢英岩化的花岗斑岩,局部延伸至斑岩体外的熊耳山安山岩内。近地表矿体出现褐铁矿化、锰矿化等风化、氧化矿物,并不具备开采价值。

3.2 矿石特征

3.2.1 矿石类型及矿物组合 结合矿石产状以及主要的矿物组合特征,将老里湾矿床的矿石划分为以下类型:(1)块状方铅矿矿石(图 4a);呈细粒集合体发育,形成致密块状,硫化物主要为方铅矿,含少量闪锌矿,多见有后期方解石胶结。(2)浸染状多金属硫化物矿石(图 4b);矿石中含有多种硫化物:闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、菱铁矿,少量黄铜矿。(3)网脉状铅锌银矿矿石(图 4c);是老里湾矿床重要的矿石类型,硫化物以方铅矿为主,闪锌矿次之,含有少量菱铁矿、黄铁矿、黄铜矿、重晶石等,除此之外可见有自然银(图 4d)和其他银矿物(见后文)。

3.2.2 主要矿物特征 闪锌矿:均质,半透明,呈浅黄色、浅褐色或者深褐色,手标本下可见不同颜色的闪锌矿所形成的环带,透射光下也多见闪锌矿呈不同颜色交替出现,以深褐色闪锌矿为主。闪锌矿主要有 3 种产状:(1)呈脉状、条带状穿插在围岩中,浅褐色、深褐色闪锌矿相间可见,部分细脉也会与方铅矿细脉共生;(2)以自形、粗晶集合体形式产出,颜色为深褐色;(3)呈浸染状与方铅矿共生,一般颗粒较小,为他形粒状结构。其中浸染状的闪锌矿最为普遍。另外在矿化强烈的部位常见钾长石被闪锌矿及少量方

铅矿交代,仅保留原有晶型,并且镜下普遍存在黄铜矿呈乳浊状分布在闪锌矿中(图 5a)。

方铅矿:为铅灰色金属光泽,镜下可见黑三角孔的显著特征,多呈他形粒状结构。有 3 种产状:(1)呈团块状,自形的粗晶形式产出;(2)呈块矿或稠密浸染状细粒方铅矿形式,浅黄色的闪锌矿在该类型方铅矿中较多;(3)呈脉状、条带状穿插在围岩中,其中部分与闪锌矿脉共生。镜下多见内部包裹浑圆状的黝铜矿、被强烈交代的黄铁矿等。

黄铁矿:黄铁矿是矿区内含量较多的金属矿物,常以五角十二面体、自形一半自形立方晶和他形晶形式出现,粒度大小不等。黄铁矿按照形成前后顺序可大体分为两种,一是发育在主成矿阶段之前较自形粗粒黄铁矿;二是主成矿阶段黄铁矿,该阶段黄铁矿与铅锌矿形成基本同期,多被方铅矿、闪锌矿交代成网脉状结构(图 5b);有少量黄铁矿呈不规则脉状穿插在闪锌矿中,或者被黄铜矿包裹呈草莓状(图 5c)。黄铁矿在靠近铅锌矿脉等矿化较强的位置可见环带,其边部的环带内部包裹有方铅矿、闪锌矿(图 5d)。

银矿物:银矿物在浸染状多金属硫化物矿石以及块状方铅矿矿石中较发育,形成多种独立的银矿物。手标本上常见自然银,尤其在矿化强烈的地区,多呈细小颗粒状赋存于多金属硫化物的表面。独立的银矿物主要有自然银、硫铜银矿、辉铜银矿、硫锑铜银矿和含银黝铜矿等。其中较常见的为硫铜银矿、辉铜银矿,在矿化强烈区域常见自然银。自然银反射色呈亮白色微带乳黄色,一般呈半自形—他形粒状结构,往往被硫铜银矿和辉铜银矿呈镶边状包裹,向外为方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等金属硫化物。硫铜银矿呈多种形式存在,一是呈竹叶状与辉铜矿构成不混溶连晶(图 5g),二是与黄铜矿呈固溶体出溶结构(图 5e,图 5h),三是为镶边状包裹自然银,四是呈他形粒状结构交代周围的黄铜矿、黝铜矿等(图 5f)。辉铜银矿与自然银关系密切,如上所述,一般与硫铜银矿一起以镶边状包裹自然银(图 5i)。矿石中有少量硫锑铜银矿,一般交代周围的黝铜矿。

3.3 围岩蚀变

矿床的围岩蚀变主要受 F1 断裂及其次级构造控制,蚀变带的宽度受矿体形态与围岩类型影响;囊状、透镜状矿体蚀变带较宽,可达 100 m 以上,脉状矿体蚀变带较窄,一般为 5~20 m;围岩以花岗斑岩的蚀变带厚度较大,安山岩厚度相对较小。围岩蚀变主要类型为硅化、钾长石化、绢云母化、碳酸盐化等。蚀变有较明显分带,从矿脉中心向外,依次为硅化、

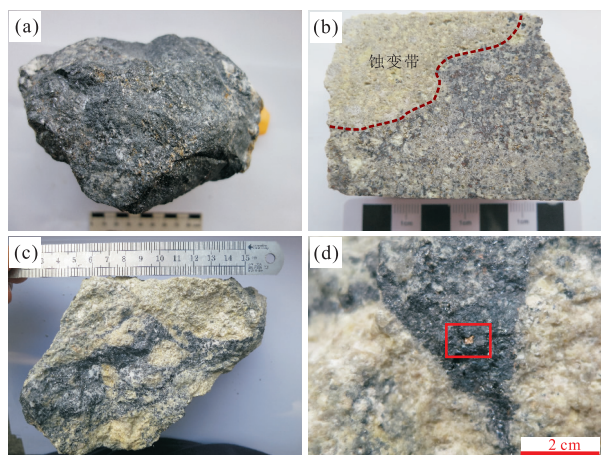


图 4 老里湾矿床典型矿石特征

Fig.4 Characteristics of typical ores in the Laoliwan deposit
a.致密块状银铅锌矿石;b.浸染状银铅锌矿石;c.网脉状银铅锌矿石;
d.铅锌矿石中的自然银

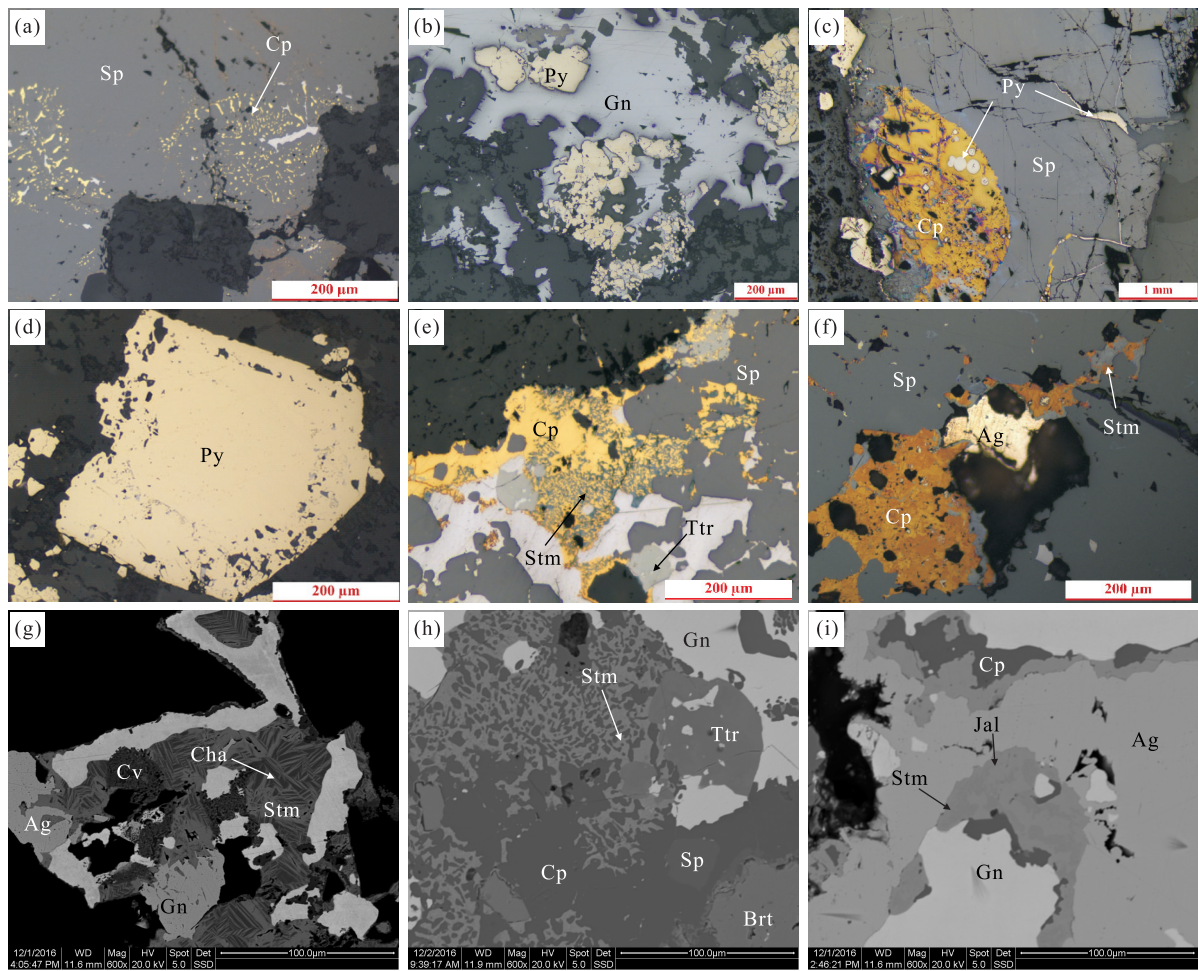


图 5 银铅锌矿石矿物组成及结构特征

Fig.5 Minerals and structures of the Ag-Pb-Zn ores

a~f 是反光显微镜照片,g~i 是扫描电子显微镜照片.a.黄铁矿和闪锌矿呈固溶体出溶结构;b.黄铁矿被方铅矿交代;c.黄铜矿包裹黄铁矿及脉状黄铁矿;d.黄铁矿环带,边部环带内包裹铅锌矿;e.黄铜矿和硫铜银矿的出溶结构;f.硫铜银矿交代周围的黄铜矿以及自然银;g.辉铜矿和硫铜银矿呈竹节状;h.黄铜矿与硫铜银矿呈固溶体出溶结构;i.辉铜矿及硫铜银矿呈镶边状包裹自然银.Ag.自然银;Stm.硫铜银矿;Gn.方铅矿;Sp.闪锌矿;Ttr.黝铜矿;Cp.黄铜矿;Py.黄铁矿;Cv.铜蓝;Cha.辉铜矿;Brt.重晶石;Jal.辉铜银矿

绢云母化、钾长石化等.矿化强烈区域往往具有明显的硅化.赋矿的花岗斑岩发生不同程度的绢云母化,主要交代岩石中的黑云母、角闪石、钾长石等.绢云母化愈发育,矿化程度愈高.矿化微弱区域的围岩一般可见钾长石化,岩石整体呈红色.围岩中的长石普遍发生高岭土化,但保留长石的晶形.部分碳酸盐化的产物一般呈集合体形式出现在矿脉内部或者边部,蚀变矿物一般为方解石.另外靠近地表的岩石由于风化淋滤作用会发生褐铁矿化及铁锰矿化.

3.4 成矿期成矿阶段

基于野外地质调查以及镜下光薄片鉴定,老里湾银铅锌成矿作用从早到晚可分为以下 4 个阶段(图 6):石英—菱铁矿阶段(I)、石英—黄铁矿阶段(II)、石英—多金属硫化物阶段(III)、石英—重晶

石—方解石阶段(IV).各成矿阶段特征分述如下.

石英—菱铁矿阶段(I):该阶段以菱铁矿脉的出现为特征,代表成矿作用的开始,矿脉宽窄不一,内部多见有大小不一的不规则状孔洞,也多见细粒自形的黄铁矿颗粒.菱铁矿脉周围多被后期的方铅矿及闪锌矿包围,且常受到铅锌矿物的交代使矿脉周边呈锯齿状甚至孤岛状.

石英—黄铁矿阶段(II):该阶段以赋矿围岩以及矿石中的浸染状较自形的黄铁矿颗粒为特征,越靠近矿化强烈的区域黄铁矿颗粒越大和密集,且该阶段的黄铁矿内部多见环带.该阶段伴随着少量的闪锌矿及方铅矿的沉淀.

石英—多金属硫化物阶段(III):该阶段表现为大量的方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿等多种金属

成矿阶段	I	II	III	IV
菱铁矿	————	-----	-----	
闪锌矿	-----	————	————	
方铅矿	-----	————	————	
黄铁矿	-----	————	————	-----
黄铜矿		-----	————	
黝铜矿		-----	————	
自然银			-----	
硫铜银矿			-----	
辉铜银矿			-----	
硫锑铜银矿			-----	
辉铜矿			-----	
石英	————	————	————	————
绢云母	————	————	————	-----
重晶石			————	
方解石			-----	————

————

主要

————

次要

微量

图 6 热液期成矿阶段及矿物生成顺序

Fig.6 Stages of hydrothermal mineralization and corresponding mineral sequences

硫化物的沉淀,与石英和银矿物等构成浸染状和脉状.该阶段还多见重晶石呈针状、长条状穿插于闪锌矿中,或被其他脉状硫化物穿插.在矿化围岩蚀变强烈的地区,矿石常呈块状、稠密浸染状,矿物颗粒一般较小.该阶段黄铁矿一般呈细粒状,发育于铅锌矿颗粒间,被方铅矿交代呈网脉状构造;也可见存在于闪锌矿中的黄铁矿细脉以及被黄铜矿包裹的浑圆状黄铁矿,以区别于早阶段的黄铁矿.闪锌矿形成稍早于方铅矿,并可见铅锌矿交代早阶段自形的黄铁矿颗粒.主要的矿物组合为方铅矿—闪锌矿—黄铁矿—黝铜矿—黄铜矿—银矿物—石英—重晶石.银矿物一般是被周围的金属硫化物交代,呈不规则状,金属硫化物富集的位置银矿物也相对富集.

石英—重晶石—方解石阶段(IV):该阶段成矿作用较弱,是热液成矿作用的最后阶段.主要的矿物组合为石英—重晶石—方解石,表现为石英、重晶石和方解石呈脉状穿插早期早阶段矿脉,或呈晶簇状分布于脉状中部裂隙内.镜下也可见重晶石和方解石呈脉状穿插、切割早期的铅锌矿.该阶段矿化微弱,有微量的金属硫化物的沉淀.

4 分析方法和结果

4.1 样品和分析方法

用于老里湾斑岩体锆石 U-Pb 定年和微量元素含量测试的两个岩石样品分别采自岩体新鲜露头(LLW-1)以及钻孔 ZK1203(LLW-138)的 345 m 处.锆石阴极发光图像拍摄和锆石 U-Pb 同位素测试工作在武汉上谱分析科技有限责任公司完成,详细的仪器参数和分析流程见 Zong *et al.*(2017).斑岩体主量和微量元素的样品为取自露头、坑道、钻孔等不同位置相对新鲜的花岗斑岩,分析测试在广州澳实分析检测有限公司完成.全岩主量元素测试采用 X 射线荧光光谱法(XRF)完成,精度优于 1%;微量元素采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行分析,精度优于 5%,含量极少($<10^{-8}$)的元素精度优于 10%.

4.2 锆石定年结果

样品 LLW-1 进行了 20 个锆石测点,其中 08、14、15 三个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 1 711 ~ 1 775 Ma 不等,测点 02、05、06、09、11、12、13、16、17 偏离谐和线,因而未在年龄计算中考虑.剩余 8 个测点均符合年龄计算要求(附表 1), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为

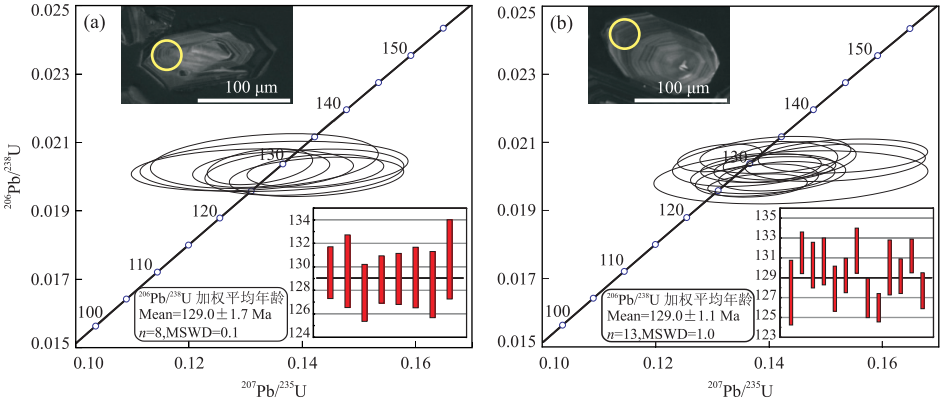


图 7 老里湾花岗斑岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig.7 Zircon U-Pb concordia diagram for the Laoliwan granite porphyry

a.样品 LLW-01;b.样品 LLW-138

128~131 Ma, 加权平均年龄为 129.0 ± 1.7 Ma (MSWD=0.1)(图 7a). 样品 LLW-138 进行了 20 个锆石测点(附表 1), 其中测点 09 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 1 824 Ma, 测点 02、03、05、07、12、19 偏离谐和线, 故在年龄计算中未考虑. 其余测点均接近或位于谐和线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 126~132 Ma, 加权平均年龄为 129.0 ± 1.1 Ma (MSWD=1.0)(图 7b).

4.3 全岩主量元素特征

老里湾花岗斑岩体 9 件样品的主量元素分析结果列于附表 2. 其中 SiO_2 的含量为 64.84%~66.97%; Al_2O_3 含量介于 14.46%~15.06%; $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 5.69\% \sim 8.65\%$; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 7.34 \sim 13.83$, 显示富钾特征; MgO 、 TiO_2 、 P_2O_5 的含量变化范围分别为 0.50%~0.86%、0.28%~0.32% 和 0.10%~0.16%(表 2). $\text{Mg}^\#$ 为 43~57 ($\text{Mg}^\#$ 计算公式: $\text{Mg}^\# = (\text{MgO}/40) \times 100 / ((\text{MgO}/40) + (\text{TFeO}/72))$), 平均值为 50. 在图 8a 中, 样品点主要位于钾玄

岩系列范围内. 里特曼指数 σ 值为 1.48~3.29, 均显示为钙碱性系列岩石特征, 因而岩石为钾玄岩—钙碱性岩系列. $\text{A}/\text{CNK} = 0.84 \sim 1.28$, 除了 1 个样品为准铝质外, 其余主要为弱的过铝质系列(图 8b).

4.5 全岩微量元素和稀土元素特征

老里湾花岗斑岩体微量元素和稀土元素分析结果列于附表 3. 微量元素表现出低 Y ($9.6 \times 10^{-6} \sim 13.1 \times 10^{-6}$, 平均 11.0×10^{-6})、Yb ($0.93 \times 10^{-6} \sim 1.26 \times 10^{-6}$, 平均 1.07×10^{-6}) 和高 Sr ($348 \times 10^{-6} \sim 464 \times 10^{-6}$, 多大于 400×10^{-6} , 平均 418×10^{-6}) 的特点. 老里湾岩体富集大离子亲石元素, 如 Rb 含量为 $124.3 \times 10^{-6} \sim 190.5 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $10.65 \times 10^{-6} \sim 20.90 \times 10^{-6}$; 亏损高场强元素 Nb、Ta. 在微量元素蛛网图上显示为 Nb、Ta、Zr、P、Ti 的负异常, 以及 Rb、Ba、U、Pb 的富集, 表现出高场强元素的集体亏损与大离子亲石元素的相对富集(图 8c).

稀土元素总量介于 $179.07 \times 10^{-6} \sim 212.62 \times$

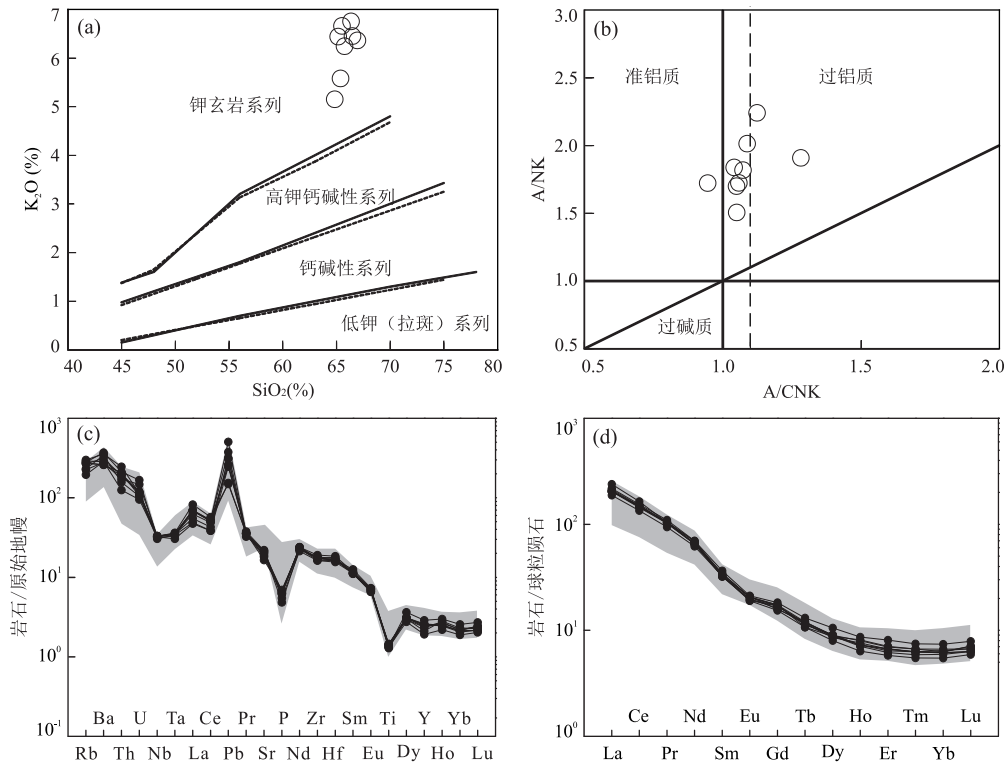


图 8 老里湾花岗斑岩 SiO_2 - K_2O 图解(a)以及 A/CNK - A/NK 图解(b);老里湾花岗斑岩和崂山及周围地区其他花岗岩体(阴影区域)的微量元素原始地幔标准化蛛网图(c)和稀土元素配分模式(d)

Fig.8 SiO_2 - K_2O (a) and A/CNK - A/NK (b) diagrams of the Laoliwan granite porphyry; primitive mantle normalized spider diagrams (c) and chondrite-normalized REE patterns (d) for the Laoliwan granite porphyry and Xiaoshan and its adjacent area (shadow area in the figures c and d), respectively

图 a,b 底图据 Peccerillo and Taylor(1976)、Rickwood(1989); 标准化值据 Sun and McDonough(1989), 数据来源据肖鸿等(2012); 李磊等(2013)、聂政融等(2015)

10^{-6} , 岩体各样品 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 29.43 \sim 39.04$ 。在稀土元素球粒陨石标准化图上岩体的不同样品曲线相似, 总体上曲线右倾, 轻稀土元素富集、重稀土元素亏损(图 8d), 各样品稀土元素标准化曲线近于平行的特征表明它们应具有同源性。岩体 Eu 异常为 $0.80 \sim 0.92$, 显示出弱的负异常, 表明在岩浆演化中无明显的斜长石分异结晶。

5 讨论

5.1 成岩与成矿时代

老里湾勘探报告(河南省地质矿产勘查开发局第一地质勘查院, 2015, 河南省洛宁县老里湾银矿勘探报告)和王利功等(2017)报道了老里湾岩体全岩 Rb-Sr 同位素年龄为 $188 \pm 12 \text{ Ma}$ 和 $149 \pm 11 \text{ Ma}$ 。由于 Rb-Sr 法测年易受到后期地质作用的影响, 因此对于蚀变较为强烈的老里湾岩体, 全岩 Rb-Sr 法获得的年龄并不能反映真实的成岩年龄。通常锆石 U-Pb 体系被认为具有较高的封闭温度和相对较稳定的物理化学性质, 其数据更能够准确反映岩浆岩的成岩年龄。本文中老里湾岩体的定年样品 LLW-01 和 LLW-138 为花岗斑岩, 获得的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 $129.0 \pm 1.7 \text{ Ma}$ ($n = 8$, $\text{MSWD} = 0.1$) 和 $129.0 \pm 1.1 \text{ Ma}$ ($n = 13$, $\text{MSWD} = 1.0$)。锆石 CL 图像显示典型的岩浆锆石特征(图 7), 且所有测点的 Th/U 比值均大于 0.1, 因此所测年龄可以代表老里湾岩体的侵入年龄, 表明老里湾岩体的形成时代为 129 Ma 左右。

除了老里湾岩体外, 崤山地区还发育多个小型花岗岩体, 其中北部的后河岩体锆石 U-Pb 年龄为 $128 \pm 1 \text{ Ma}$ (卢仁等, 2013); 小妹河岩体锆石 U-Pb 年龄为 $131.5 \pm 0.9 \text{ Ma}$ (梁涛和卢仁, 2015); 龙卧沟岩体测定年龄为 $128 \pm 1 \text{ Ma}$ (卢仁等, 2014); 距离龙卧沟东约 16 km 的白石崖岩体年龄为 $135 \pm 3 \text{ Ma}$ (Liang *et al.*, 2013); 崤山南部的后瑶峪岩体以及柳关岩体锆石 U-Pb 年龄分别为 $131 \pm 1 \text{ Ma}$ 和 $132 \pm 1 \text{ Ma}$ (胡浩等, 2011)。结合本文得到的老里湾岩体的年龄 129 Ma, 可认为崤山地区在 130 Ma 前后出现了大规模的深部岩浆活动, 已出露的众多小型岩体均为该期岩浆活动的产物。

事实上, 整个华北克拉通南缘在早白垩世出现了大规模的岩浆活动(图 1 和图 9)。例如崤山西侧的小秦岭地区同样发育有花岗岩岩体, 不同学者对于文峪、娘娘山岩体的锆石 U-Pb 定年均表明它们形

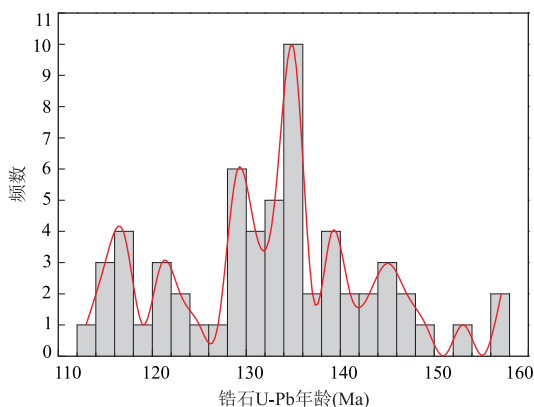


图 9 华北克拉通南缘早白垩世岩浆岩锆石 U-Pb 年龄分布
Fig.9 Zircon U-Pb age histograms of the Early Cretaceous magmatic rocks in the southern of the North China Craton

数据来源: 李永峰等(2006)、叶会寿(2006)、郭波等(2009)、姚军明等(2009)、Mao *et al.* (2010)、高昕宇等(2010, 2012)、焦建刚等(2010)、王义天等(2010)、胡浩等(2011)、齐秋菊等(2012)、向君峰等(2012)、肖娥等(2012)、Li *et al.* (2013a)、Liang *et al.* (2013)、程知言等(2013)、李占轲(2013)、卢仁等(2013, 2014)、齐玥(2014)、梁涛等(2014, 2015)、聂政融等(2015)、Wang *et al.* (2016)、曹晶等(2016)

成于早白垩世, 其年龄分别为 138 ~ 135 Ma 和 142 ~ 139 Ma (Mao *et al.*, 2010; 王义天等, 2010; 高昕宇等, 2012; Li *et al.*, 2012b)。崤山东侧的熊耳山也存在时代相近的花岗岩岩浆活动, 例如前人对于花山岩体的锆石 U-Pb 定年结果为 132 ~ 128 Ma (Mao *et al.*, 2010; 聂政融等, 2015); 沙沟—龙门店银多金属矿集区内的蒿坪沟花岗斑岩的锆石 U-Pb 定年结果为 $133.5 \pm 1.4 \text{ Ma}$ (叶会寿, 2006)、 $135.4 \pm 1.9 \text{ Ma}$ (李占轲, 2013) 以及 $130.5 \pm 1.1 \text{ Ma}$ (梁涛等, 2015); 雷门沟含钼矿花岗斑岩的锆石 U-Pb 年龄为 $136.2 \pm 1.5 \text{ Ma}$ (李永峰等, 2006)。外方山地区出露的合峪和太山庙两个花岗岩基的锆石 U-Pb 年龄分别为 148 ~ 127 Ma 和 125 ~ 115 Ma (Mao *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2012c; Gao *et al.*, 2014); 东沟花岗斑岩体的成岩年龄为 $117.8 \pm 0.9 \text{ Ma}$ (Li *et al.*, 2017)。以上结果显示, 华北克拉通南缘在早白垩世存在非常强烈的一期中酸性岩浆岩活动(叶会寿, 2006; Mao *et al.*, 2010), 老里湾岩体也应是早白垩世这一期岩浆岩活动的产物。

结合老里湾岩体的成岩年龄与崤山地区及相邻地区多金属矿床现有年龄数据, 可大致限定老里湾矿床的成矿年龄。由于老里湾银铅锌矿体产于花岗斑岩体内, 因此岩体年龄 129 Ma 基本代表了成矿年龄的上限。崤山地区柳树沟石英脉型金矿中石英和方铅矿流体包裹体⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄分别为

130.6±2.6 Ma 和 127.8±2.8 Ma(朱嘉伟等, 1999). 崂山东部下峪矿田中银铅锌矿床的成矿年龄集中在 147~135 Ma, 如铁炉坪矿床近矿蚀变绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年得到的年龄为 134.6±1.2 Ma(高建京等, 2011), 蒿坪沟矿床的近矿绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄为 134.9±0.8 Ma(叶会寿, 2006), 沙沟矿床的蚀变铬云母和绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄位于 147~140 Ma(毛景文等, 2006; Li *et al.*, 2013b). 崂山南部南泥湖矿田斑岩体及钼多金属矿床的形成年龄集中于 145~137 Ma, 如南泥湖成矿花岗斑岩体锆石 U-Pb 定年为 144.9±1.6 Ma(李占轲, 2013), 南泥湖斑岩钼矿床辉钼矿 Re-Os 年龄为 145~142 Ma(李永峰等, 2003; 李占轲, 2013); 矿田西北部冷水北沟铅锌银矿床形成时代较晚, 其石英流体包裹体⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄为 137.9±0.4 Ma(Wang *et al.*, 2013). 综上, 崂山及邻区钼多金属矿床集中形成于早白垩世. 由此推测老里湾银铅锌矿床的成矿年龄应在早白垩世, 稍晚于老里湾岩体侵位年龄 129 Ma.

5.2 岩石成因类型及构造背景

依据岩浆源区的性质, 将花岗岩分为 I 型、S 型、A 型和 M 型. 已有研究显示, I 型花岗岩含有角闪石, A/CNK<1.1, 矿物组合以黑云母、普通角闪石、榍石、磁铁矿等为特征(Chappell and White, 1974; 吴福元等, 2007). 地球化学特征分析显示, 老里湾花岗斑岩绝大多数样品 A/CNK<1.1(图 8b), 具有准铝质—弱过铝质的特点, 并且岩体含有较多的黑云母及角闪石, 没有典型的过铝质矿物, 符合 I 型花岗岩的特征. 结合崂山地区其他早白垩世中酸性岩体年龄和地球化学数据(李磊等, 2013), 笔者认为老里湾岩体应为 I 型花岗岩, 与华北克拉通南

缘同期花岗岩类岩体相似(Mao *et al.*, 2010; Gao and Zhao, 2017).

老里湾岩体所处的华北克拉通南缘在中生代岩浆活动频繁且强烈, 晚侏罗世至早白垩世花岗岩广泛发育(图 9). 目前越来越多的研究表明, 华北克拉通南缘晚侏罗世至早白垩世岩浆活动与华北东部中生代构造转折及岩石圈减薄相关(Mao *et al.*, 2010; 胡浩等, 2011; Li *et al.*, 2012b; 李占轲, 2013; Gao and Zhao, 2017). 翟明国(2010)认为华北东部早白垩世有一期幔源+壳源+壳幔混合的岩浆, 既有大岩基又有小岩体以及次火山岩体的发育, 与华北克拉通南缘的岩浆活动具有时间上的耦合性. Gao and Zhao(2017)发现华北克拉通南缘以 127 Ma 为分界存在 158~128 Ma 和 126~112 Ma 两期花岗岩, 早期发育 I 型花岗岩而在晚期则发育 A 型和高分异花岗岩. 微量元素和稀土元素的测试和分析结果显示, 老里湾岩体富集 LREE、Rb、Ba、Sr、Pb 等大离子亲石元素, 亏损 HREE、Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素, Y 和 Yb 等重稀土元素含量较低且具有弱的负 Eu 异常. 这些地球化学特征不仅与崂山地区的后河岩体、小妹河岩体、龙卧沟岩体等燕山期花岗岩体类似(图 8c 和 8d; 李磊等, 2013; 卢仁等, 2014; 梁涛和卢仁, 2015), 也与华北克拉通南缘 158~128 Ma 的 I 型花岗质岩石类似(图 10; Gao and Zhao, 2017). 老里湾岩体的微量元素特征则明显不同于区域上稍晚(126~112 Ma)的 A 型花岗岩(图 10), A 型花岗岩主要表现为轻稀土较富集, 重稀土略亏损, Eu 负异常明显, Ba 和 Sr 元素含量相对较低, Yb 和 Y 元素含量相对较高等(Gao and Zhao, 2017). 因此, 老里湾岩体与区域上早期阶段

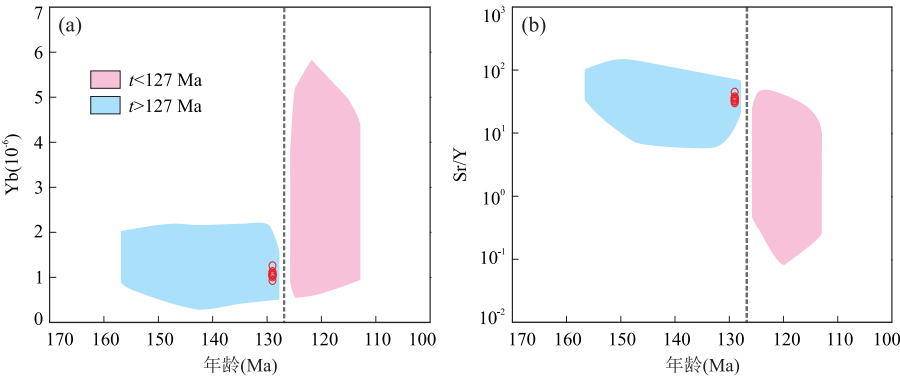


图 10 老里湾花岗斑岩体与华北克拉通南缘晚中生代花岗岩 Yb(a)及 Sr/Y(b)的特征
Fig.10 The characteristic of Yb (a) and Sr/Y (b) in Laoliwan granite porphyry and Late Mesozoic granitoids in the southern margin of the North China Craton
底图据 Gao and Zhao(2017)修改; 红色圆圈代表老里湾斑岩体数据; 蓝色和红色区域代表华北克拉通晚中生代花岗岩数据的范围

(158~128 Ma)的花岗质岩石相似,且明显区别于晚期阶段(126~112 Ma)的岩浆活动,暗示老里湾岩体与华北克拉通南缘早期阶段的花岗质岩石具有相同的构造背景,并且物源也有很大的相似性.Gao and Zhao(2017)提出 127 Ma 前后为华北南缘区域构造体制转变的关键时期,具体表现为增厚的地壳在约 130~110 Ma 开始全面减薄(毛景文等, 2003; 叶会寿等, 2006),这一转变应与中国东部这一时期构造转折和岩石圈伸展减薄密切相关,可能是古太平洋板块向西俯冲及回撤所造成的(Li *et al.*, 2012a; Gao and Zhao, 2017).因此,结合老里湾岩体的地球化学特征以及成岩年龄,可认为老里湾岩体应为华北克拉通东部中生代构造大转折和岩石圈减薄时期的产物.

5.3 成岩成矿关系与矿床成因

地质及矿化特征研究表明,老里湾银铅锌矿床的矿体主要分布于燕山期老里湾花岗斑岩内的断裂破碎带中,表明矿床与岩体在空间上有密切联系.前人认为老里湾银铅锌矿床与含矿斑岩体具有成因关系,该矿床为斑岩型银铅锌矿床(李铭等, 2016).本文通过详细的野外观察和室内研究认为,老里湾并非斑岩型银铅锌矿床,主要原因如下:(1)斑岩型矿床矿化和蚀变一般集中于斑岩体中上部及与围岩接触部位,但老里湾矿床主要矿体位于斑岩体内部的断裂构造带及其次级构造中,局部矿体赋存于延伸至熊耳群安山岩内的断裂构造带中;(2)斑岩体内远离断裂带的岩石银铅锌矿化较弱,甚至没有发生蚀变;(3)斑岩体与熊耳群的接触带发育有少量石英—黄铁矿细脉,笔者推测为斑岩体侵位时的岩浆热液活动所引起的.但接触带仅有弱的黄铁矿化,未见银铅锌矿化;(4)老里湾银铅锌矿床的特征,包括中低温的围岩蚀变(硅化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化等)、中低温的矿石矿物共生组合与浅成低温热液银铅锌矿床的特征基本一致,而与斑岩型矿床中高温矿物组合和围岩蚀变的特征不符;(5)老里湾西北部的中河地区受同一断裂带 F113 控制,并且沿断裂构造带发育有大量银铅锌矿化及硅化、绢云母化等蚀变(曾威等, 2017),暗示区域断裂对银铅锌成矿的主导控矿作用.因此,尽管老里湾岩体与银铅锌矿体在空间上有密切关系,但老里湾岩体并不是成矿母岩,与矿体没有直接的成因关系,但是不能排除成矿作用与更深部的岩浆活动相关.

迄今为止,世界上并没有公认的斑岩型银铅锌矿床,这可能与银、铅、锌元素富集的物化条件和沉

淀机制有关(Seward, 1976, 1984; Ruaya and Seward, 1986).但越来越多的研究表明,银多金属矿床与岩浆活动有密切的关系(Cunningham *et al.*, 1996; Cheilletz *et al.*, 2002; Catchpole *et al.*, 2011).如南美洲科迪勒拉地区,银多金属矿床主要产于破火山口边缘,围岩以流纹岩、安山岩、粗安岩为主,成矿金属组合多为 Ag-Au、Ag-Sn、Ag-Pb-Zn(Cu).这类矿床往往不是单独存在,其下部可以发育岩浆热液型 Sn 矿床、斑岩型 Cu-(Au)矿床等(Kamenov *et al.*, 2002; Bendezú and Fontbote, 2009),并且银多金属矿床与下部侵入岩及斑岩型矿床具有密切的成因联系(Rice *et al.*, 2005; Baumgartner *et al.*, 2009; Catchpole *et al.*, 2015).我国大型银多金属矿床集中于大兴安岭(欧阳荷根, 2013; 吴冠斌等, 2013)、武夷山(左力艳, 2008; 卢燃等, 2012)、三江(朱维光等, 2002; 李艳军等, 2012)等地区,这些地区银多金属矿床的成矿作用也被认为与岩浆热液活动相关(孟祥金等, 2009; 欧阳荷根等, 2016; Liu *et al.*, 2016).华北克拉通南缘与岩浆活动相关的银铅锌矿床则一般位于斑岩体外围断裂破碎带内,与斑岩体中心钼(钨)矿床构成一个成矿系列(叶会寿等, 2010; 李占轲, 2013; Li *et al.*, 2017).老里湾矿床银铅锌矿体主要赋存于斑岩体内构造蚀变带中,局部延伸到围岩熊耳群安山岩中,与南泥湖、东沟等斑岩钼矿床外围银铅锌矿脉在矿体产状和形态方面有所差异,但二者在围岩蚀变类型、矿石类型、矿物组合等方面较为相似.另一方面,老里湾矿床与熊耳山下峪矿田银铅锌矿床有显著差别,具体表现在后者矿体赋矿围岩为古老的太华群变质岩,矿体产于大规模 NNE 向断裂构造带内,成矿流体以变质流体为主,与中生代岩浆岩空间关系较弱,被认为是造山型银铅锌矿床(陈衍景等, 2003; Chen *et al.*, 2004).综上,老里湾矿床既非斑岩型矿床,也非造山型矿床.老里湾银铅锌矿体受断裂构造控制并主要产于花岗斑岩体内,矿石矿物以方铅矿、闪锌矿以及银矿物等中低温矿物组合为主,笔者推测其应为与岩浆活动有关的浅成低温热液型银铅锌矿床.出露的老里湾花岗斑岩体为银铅锌矿体提供了赋矿空间,但它并非成矿母岩,形成老里湾矿床的岩浆活动可能位于更深部.但深部岩浆活动如何影响成矿,是否区别于区域已知的银铅锌矿床,还需要进一步展开系统和深入的研究.

5.4 找矿指示意义

华北克拉通南缘长期以金、钼资源作为勘查及

研究的重点,这两个矿种研究程度较高(Mao *et al.*, 2002, 2008; Li *et al.*, 2012a, 2012b).随着近年来地质找矿工作的深入开展,华北克拉通南缘先后探明了一批银铅锌矿床,对于银铅锌矿床的研究也不断深入.这些银铅锌矿床主要可分为两类,一是以下峪矿田铁炉坪、沙沟为代表的受断裂构造控制、呈脉状产出的矿床,赋矿围岩为太华群变质岩(Chen *et al.*, 2004; 毛景文等, 2006; Li *et al.*, 2013b);另一类为与岩浆热液活动相关的位于斑岩体外围的矽卡岩型、热液脉型银铅锌矿床(叶会寿等, 2010; Li *et al.*, 2017).

而位于崤山地区的老里湾矿床,其银铅锌矿体主要分布于花岗斑岩体内,矿体形态同时受区域NW向断裂带控制,这一地质特征与上述华北克拉通南缘两个类型银铅锌矿床不同.老里湾银铅锌矿床不仅成矿类型特殊,而且是崤山地区目前探明的首个大型金属矿床,它的发现对今后崤山地区乃至华北克拉通南缘在寻找银多金属矿床方面都具有重要的意义.与老里湾银铅锌矿床相距不远的、由区域内同一断裂构造控制的中河银铅锌矿床也显示类似的矿化特征,即矿体严格受断裂构造控制,且在花岗斑岩体中发育较强的蚀变和一定程度的矿化(曾威等, 2017).因此在崤山地区开展银铅锌矿床找矿时,首先应重视区域内断裂发育的地区,尤其是花岗斑岩体叠加出现的地区,具有进一步的找矿前景;其次,矿体及围岩普遍具有较强的绢云母化、黄铁矿化、碳酸盐化等围岩蚀变特征,这些蚀变同样是重要的找矿标志.

同小秦岭和熊耳山地区相比,崤山地区整体剥蚀程度较低,变质核杂岩构造中部的花岗岩基还未出露到地表(图1).地球物理资料也指示崤山地区在太华群变质基底之下有一规模同小秦岭文峪岩体相当的隐伏花岗岩体(陈铁华等, 1997).崤山地区金属矿床同小秦岭和熊耳山地区相比数量偏少、规模较小,可能与其剥蚀程度较浅有关,也间接说明崤山地区深部还有较大的找矿潜力.上文研究表明,老里湾银铅锌矿床与岩浆活动关系密切,笔者推测其为浅成低温热液型矿床,形成老里湾矿床的岩浆热液可能来源于深部.老里湾矿床与南泥湖、东沟等超大型斑岩钼矿床外围银铅锌矿脉具有一定的相似性,可能为 Mo-Fe-Ag-Pb-Zn 成矿系列(毛景文等, 2009; 李占轲, 2013)的外部端元.根据区域已建立的斑岩钼矿床—矽卡岩硫铁铅锌矿床—热液脉型铅锌银矿床的成矿模型(毛景文等, 2009; Li *et al.*,

2017),老里湾银铅锌矿床深部也有寻找斑岩型钼矿床的潜力.矿山最近的深部探矿工程揭露到少量辉钼矿,从侧面证实矿山深部的找矿潜力.

6 结论

(1)老里湾银铅锌矿床主要矿体赋存在花岗斑岩体内,同时受区域断裂控制.其成矿作用可划分为4个成矿阶段,依次为石英—菱铁矿阶段;石英—黄铁矿阶段;石英—多金属硫化物阶段;石英—重晶石—方解石阶段.其中银矿化主要集中在石英—多金属硫化物阶段.

(2)老里湾花岗斑岩两个样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 129.0 ± 1.7 Ma (MSWD=0.1) 和 129.0 ± 1.1 Ma (MSWD=1.0),表明老里湾花岗斑岩形成于早白垩世 129 Ma 左右.

(3)老里湾花岗斑岩具有富硅、富碱、弱过铝质的特点.稀土元素标准化曲线右倾,具有弱的 Eu 负异常;微量元素以富集 Rb、Ba、U、Sr、Pb 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素为特征.这些地球化学特征与区域上同时期其他花岗岩相似,表明该区域晚中生代花岗岩具有相同的源区.综合分析表明老里湾岩体可能与中国东部中生代构造转折及岩石圈减薄有关.

(4)由成岩成矿空间关系和矿化蚀变特征笔者推测老里湾矿床银铅锌矿体与老里湾斑岩体没有直接的成因联系,该矿床不是斑岩型银矿床.老里湾斑岩体与银铅锌矿体并非“母子关系”,应为“兄弟关系”,可能受控于同一深部岩浆房的岩浆作用.综合分析,推测老里湾银铅锌矿床为受断裂控制的浅成低温热液矿床.

(5)老里湾银铅锌矿床对崤山地区乃至华北克拉通南缘寻找类似矿床具有重要意义,即重视区域断裂与花岗斑岩体侵位的叠加区域,并且注意相应的围岩蚀变.崤山地区整体剥蚀深度较浅,在老里湾银铅锌矿床的深部还具有寻找斑岩型钼矿的潜力.

致谢:野外工作得到河南省地矿局第一地质矿产调查院李红松教授级高工、梁新辉工程师和老里湾矿山姚胜工程师的热情帮助,研究生林祖苇参加了部分野外工作,两名审稿人对论文初稿提出了建设性意见,在此一并致以衷心感谢!

附补充信息表见: <http://www.earth-science.net/WebPage/view.aspx?id=20190117061535.pdf>

References

- Baumgartner, R., Fontbote, L., Spikings, R., et al., 2009. Bracketing the Age of Magmatic-Hydrothermal Activity at the Cerro de Pasco Epithermal Polymetallic Deposit, Central Peru: A U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Study. *Economic Geology*, 104(4): 479—504. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.4.479>
- Bendezú, R., Fontbote, L., 2009. Cordilleran Epithermal Cu-Zn-Pb-(Au-Ag) Mineralization in the Colquijirca District, Central Peru: Deposit-Scale Mineralogical Patterns. *Economic Geology*, 104(7): 905—944. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.7.905>
- Bi, S.J., Li, Z.K., Tang, K.F., et al., 2016. LA-ICP-MS In Situ Trace Element Analysis of Pyrite from Dongtongyu Gold Deposit and Its Metallogenic Significance, Xiaoqinling Gold District. *Earth Science*, 41(7): 1121—1140 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.093>
- Cao, J., Ye, H.S., Chen, X.D., et al., 2016. Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Hf Isotopic Compositions of Granite Porphyry in Leimengou Mo Deposit, Western Henan Province. *Mineral Deposits*, 35(4): 677—695 (in Chinese with English abstract).
- Catchpole, H., Kouzmanov, K., Bendezú, A., et al., 2015. Timing of Porphyry (Cu-Mo) and Base Metal (Zn-Pb-Ag-Cu) Mineralisation in a Magmatic-Hydrothermal System—Morococha District, Peru. *Mineralium Deposita*, 50(8): 895—922. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0564-x>
- Catchpole, H., Kouzmanov, K., Fontboté, L., et al., 2011. Fluid Evolution in Zoned Cordilleran Polymetallic Veins—Insights from Microthermometry and LA-ICP-MS of Fluid Inclusions. *Chemical Geology*, 281(3—4): 293—304. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.12.016>
- Chappell, B.W., White, A.J.R., 1974. Two Contrasting Granite Types. *Pacific Geology*, 8: 173—174.
- Cheilletz, A., Levresse, G., Gasquet, D., et al., 2002. The Giant Imiter Silver Deposit: Neoproterozoic Epithermal Mineralization in the Anti-Atlas, Morocco. *Mineralium Deposita*, 37(8): 772—781. <https://doi.org/10.1007/s00126-002-0317-0>
- Chen, T. H., Zhao, B. J., Zhang, T. Y., et al., 1997. A Buried Granitic Mass and Its Prospecting for Gold Deposits in Xiaoshan Region, Henan Province. *Henan Geology*, 15(1): 11—18 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. J., Pirajno, F., Sui, Y. H., 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. <https://doi.org/10.1007/s00126-004-0429-9>
- Chen, Y. J., Sui, Y. H., Franco, P., 2003. Exclusive Evidences for CMF Model and a Case of Orogenic Silver Deposits: Isotope Geochemistry of the Tieluping Silver Deposit, East Qinling Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 551—568 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Z. Y., Hu, J., Jiang, S. Y., et al., 2013. Zircon U-Pb Dating and Hf Isotopes of the Granites Related to Yuchiling Mo Deposit in Songxian County and Their Constraints on the Metallogenetic Age. *Geological Journal of China Universities*, 19(3): 403—414 (in Chinese with English abstract).
- Cunningham, C. G., Zartman, R. E., McKee, E. H., et al., 1996. The Age and Thermal History of Cerro Rico de Potosi, Bolivia. *Mineralium Deposita*, 31(5): 374—385. <https://doi.org/10.1007/s001260050045>
- Gao, J. J., Mao, J. W., Chen, M. H., et al., 2011. Vein Structure Analysis and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating of Sericite from Sub-Ore Altered Rocks in the Tieluping Large-Size Ag-Pb Deposit of Western Henan Province. *Acta Geologica Sinica*, 85(7): 1172—1187 (in Chinese with English abstract).
- Gao, X. Y., Zhao, T. P., 2017. Late Mesozoic Magmatism and Tectonic Evolution in the Southern Margin of the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 60(11): 1959—1975. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-9069-0>
- Gao, X. Y., Zhao, T. P., Bao, Z. W., et al., 2014. Petrogenesis of the Early Cretaceous Intermediate and Felsic Intrusions at the Southern Margin of the North China Craton: Implications for Crust-Mantle Interaction. *Lithos*, 206—207: 65—78. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.07.019>
- Gao, X. Y., Zhao, T. P., Gao, J. F., et al., 2012. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages, Hf Isotopic Composition and Geochemistry of Adakitic Granites in the Xiaoqinling Region, the South Margin of the North China Block. *Geochimica*, 41(4): 303—325 (in Chinese with English abstract).
- Gao, X. Y., Zhao, T. P., Yuan, Z. L., et al., 2010. Geochemistry and Petrogenesis of the Heyu Batholith in the Southern Margin of the North China Block. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3485—3506 (in Chinese with English abstract).
- Guo, B., Zhu, L. R., Li, B., et al., 2009. Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Composition of the Huashan and Heyu Granite Plutons at the Southern Margin of North China Craton: Implications for Geodynamic Setting. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 265—281 (in Chinese with English abstract).
- Hu, H., Li, J. W., Deng, X. D., et al., 2011. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Granitoid Intrusions Related to Iron-Copper Polymetallic Deposits in Luonan-Lushi Area of

- Southern North China Craton and Its Geological Implications, *Mineral Deposits*, 30 (6): 979—1001 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, J. G., Tang, Z. L., Qian, Z. Z., et al., 2010. Metallogenic Mechanism, Magma Source and Zircon U-Pb Age of Jinduicheng Granitic Porphyry, East Qinling, *Earth Science*, 35 (6): 1011—1022 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2010.114>
- Kamenov, G., Macfarlane, A. W., Riciputi, L., 2002. Sources of Lead in the San Cristobal, Pulacayo, and Potosi Mining Districts, Bolivia, and a Reevaluation of Regional Ore Lead Isotope Provinces. *Economic Geology*, 97 (3): 573—592. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.3.573>
- Li, H. S., Liang, X. H., Xiong, S. K., et al., 2016. The Ore-Controlling Factors and Characteristics of the Laoliwan Ag Deposit in Henan Province. *Nonferrous Metal Abstract*, 31 (1): 42—43 (in Chinese).
- Li, J. W., Bi, S. J., Selby, D., et al., 2012a. Giant Mesozoic Gold Provinces Related to the Destruction of the North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 349—350: 26—37. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.06.058>
- Li, J. W., Li, Z. K., Zhou, M. F., et al., 2012b. The Early Cretaceous Yangzhaiyu Lode Gold Deposit, North China Craton: A Link between Craton Reactivation and Gold Veining. *Economic Geology*, 107 (1): 43—79. <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.1.43>
- Li, N., Chen, Y. J., Pirajno, F., et al., 2012c. 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. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.02.013>
- Li, L., Sun, W. Z., Meng, X. F., et al., 2013. Geochemical and Sr-Nd-Pb Isotopic Characteristics of the Granitoids of Xiaoshan Mountain Area on the Southern Margin of North China Block and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (8): 2635—3652 (in Chinese with English abstract).
- Li, M., Huang, C., Fan, G. M., 2016. Ore Fabric Characteristics and Silver Occurrence State of the Laoliwan Porphyry Silver Deposit. *Modern Mining*, 32 (9): 141—144 (in Chinese with English abstract).
- Li, N., Chen, Y. J., Pirajno, F., et al., 2013a. Timing of the Yuchiling Giant Porphyry Mo System, and Implications for Ore Genesis. *Mineralium Deposita*, 48 (4): 505—524. <https://doi.org/10.1007/s00126-012-0441-4>
- Li, Z. K., Li, J. W., Zhao, X. F., et al., 2013b. Crustal-Extension Ag-Pb-Zn Veins in the Xiong'ershan District, Southern North China Craton: Constraints from the Shagou Deposit. *Economic Geology*, 108 (7): 1703—1729. <https://doi.org/10.2113/econgeo.108.7.1703>
- Li, S. G., Hart, S. R., Zheng, S. G., et al., 1989. Timing of Collision between the North and South China Blocks—The Sm-Nd Isotopic Age Evidence. *Science in China (Series B)*, 19 (3): 312—319 (in Chinese).
- Li, Y. F., Mao, J. W., Bai, F. J., et al., 2003. Re-Os Isotopic Dating of Molybdenites in the Nannihu Molybdenum (Tungsten) Orefield in the Eastern Qinling and Its Geological Significance. *Geological Review*, 49 (6): 652—659 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. F., Mao, J. W., Liu, D. Y., et al., 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).
- Li, Y. J., Wei, J. H., Li, H., et al., 2012. Xiasai Silver Polymetallic Deposit in the Northern Margin of Sanjiang Metallogenic Belt: The Hydrothermal Vein Type Deposit in Early Cretaceous. *Mineral Deposits*, 31 (S1): 995—996 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. K., 2013. Metallogenesis of the Silver-Lead-Zinc Deposits along the Southern Margin of the North China Craton (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. K., Bi, S. J., Li, J. W., et al., 2017. Distal Pb-Zn-Ag Veins Associated with the World-Class Donggou Porphyry Mo Deposit, Southern North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 82: 232—251. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.12.001>
- Liang, T., Bai, F. J., Lu, R., et al., 2013. LA-ICP-MS Zircons Dating of Baishiya Body in Xiao Mountain, Western Henan Province, and Its Geologic Implications. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 87 (Z1): 722—725.
- Liang, T., Bai, F. J., Luo, Z. H., et al., 2014. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating and Its Geological Implications of Banzhusi Granitic Porphyry in Xiongershan of Western Henan Province. *Northwestern Geology*, 47 (2): 41—50 (in Chinese with English abstract).
- Liang, T., Lu, R., 2015. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating, Geochemical Features and Geological Implications of Xiaomeihe Rock Mass in Xiaoshan Mountain, Western Henan Province. *Geological Bulletin of China*, 34 (8): 1526—1540 (in Chinese with English abstract).
- Liang, T., Lu, R., Luo, Z. H., et al., 2015. LA-ICP-MS U-Pb Ages of Zircons from Haopinggou Biotite Granite Por-

- phyry in Xiong'er Mountain, Western Henan Province, and Its Geologic Implications. *Geological Review*, 61 (4): 901—912 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. F., Jiang, S. H., Bagas, L., 2016. The Genesis of Metal Zonation in the Weilasituo and Bairendaba Ag-Zn-Pb-Cu-(Sn-W) Deposits in the Shallow Part of a Porphyry Sn-W-Rb System, Inner Mongolia, China. *Ore Geology Reviews*, 75: 150—173. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.12.006>
- Liu, Y. H., Liu, Q. Q., Wang, Y. Z., et al., 2015. Analysis of Ore-Controlling Structures and Prospecting Predicting of the Shagou Pb-Zn-Ag Deposit in the Western Henan Province. *Mineral Exploration*, 6 (4): 364—370 (in Chinese with English abstract).
- Lu, R., Liang, T., Lu, X. X., et al., 2013. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Houhe Granite and Its Geologic Implication in Xiao Mountain, Western Henan Province. *Geological Survey and Research*, 36 (4): 263—270 (in Chinese with English abstract).
- Lu, R., Liang, T., Lu, X. X., et al., 2014. Geochronology and Geochemical Features of Longwogou Granite in Xiaoshan Mountain, Western Henan Province, and Their Geological Implications. *Geology in China*, 41 (3): 756—772 (in Chinese with English abstract).
- Lu, R., Mao, J. W., Gao, J. J., et al., 2012. Geological Characteristics and Occurrence of Silver in Xiabao Ag-Pb-Zn Deposit, Lengshuikeng Ore Field, Jiangxi Province, East China. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (1): 105—121 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Goldfarb, R., Zhang, Z. W., et al., 2002. Gold Deposits in the Xiaoqinling-Xiong'ershan Region, Qinling Mountains, Central China. *Mineralium Deposita*, 37 (3—4): 306—325. <https://doi.org/10.1007/s00126-001-0248-1>
- Mao, J. W., Xie, G. Q., Bierlein, F., et al., 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. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.06.027>
- Mao, J. W., Xie, G. Q., Pirajno, F., et al., 2010. Late Jurassic-Early Cretaceous Granitoid Magmatism in Eastern Qinling, Central-Eastern China: SHRIMP Zircon U-Pb Ages and Tectonic Implications. *Australian Journal of Earth Sciences*, 57 (1): 51—78. <https://doi.org/10.1080/08120090903416203>
- Mao, J. W., Ye, H. S., Wang, R. T., et al., 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, J. W., Zhang, Z. H., Yu, J. J., et al., 2003. Geodynamic Settings of Mesozoic Large-Scale Mineralization in North China and Adjacent Areas-Implication from the Highly Precise and Accurate Ages of Metal Deposits. *Science in China (Series D)*, 33 (4): 289—299 (in Chinese).
- Mao, J. W., Zheng, R. F., Ye, H. S., et al., 2006. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating of Fuchsite and Sericite from Altered Rocks Close to Ore Veins in Shagou Large-Size Ag-Pb-Zn Deposit of Xiong'ershan Area, Western Henan Province, and Its Significance. *Mineral Deposits*, 25 (4): 359—368 (in Chinese with English abstract).
- Meng, X. J., Hou, Z. Q., Dong, G. Y., et al., 2009. Geological Characteristics and Mineralization Timing of the Lengshuikeng Porphyry Pb-Zn-Ag Deposit, Jiangxi Province. *Acta Geologica Sinica*, 83 (12): 1951—1967 (in Chinese with English abstract).
- Nie, Z. R., Wang, X. X., Ke, C. H., et al., 2015. Age, Geochemistry and Petrogenesis of Huashan Granitoid Pluton on the Southern Margin of the North China Block. *Geological Bulletin of China*, 34 (8): 1502—1516 (in Chinese with English abstract).
- Ouyang, H. G., 2013. Metallogenesis of Bairendaba-Weilasituo Silver-Polytmetallic Deposit and Its Geodynamic Setting, in the Southern Segment of Great Xing'an Range, NE China (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Ouyang, H. G., Li, R. H., Zhou, Z. H., 2016. The Jurassic Mineralization of the Shuangjianzisha Ag-Polymetallic Deposit and Its Significance in Prospecting; Evidence from Geochronology. *Acta Geologica Sinica*, 90 (8): 1835—1845 (in Chinese with English abstract).
- Peccherillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58 (1): 63—81. <https://doi.org/10.1007/bf00384745>
- Qi, Q. J., Wang, X. X., Ke, C. H., et al., 2012. Geochronology and Origin of the Laoniushan Complex in the Southern Margin of North China Block and Their Implications: New Evidences from Zircon Dating, Hf Isotopes and Geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (1): 279—301 (in Chinese with English abstract).
- Qi, Y., 2014. Petrogenesis of Laojunshan and Taishanmiao Granite Plutons in Eastern Qinling, Central China (Dissertation). University of Science and Technology of China, Hefei (in Chinese with English abstract).
- Rice, C. M., Steele, G. B., Barfod, D. N., et al., 2005. Duration of

- Magmatic, Hydrothermal and Supergene Activity at Cerro Rico de Potosi, Bolivia, *Economic Geology*, 100(8): 1647—1656. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.8.1647>
- Rickwood, P. C., 1989. Boundary Lines within Petrologic Diagrams Which Use Oxides of Major and Minor Elements, *Lithos*, 22(4): 247—263. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(89\)90028-5](https://doi.org/10.1016/0024-4937(89)90028-5)
- Ruaya, J. R., Seward, T. M., 1986. The Stability of Chlorozinc(II) Complexes in Hydrothermal Solutions up to 350 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(5): 651—661. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(86\)90343-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(86)90343-1)
- Seward, T. M., 1976. The Stability of Chloride Complexes of Silver in Hydrothermal Solutions up to 350 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40(11): 1329—1341. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(76\)90122-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(76)90122-8)
- Seward, T. M., 1984. The Formation of Lead(II) Chloride Complexes to 300 °C: A Spectrophotometric Study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(1): 121—134. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90354-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90354-5)
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Wang, C. M., Chen, L., Bagas, L., et al., 2016. Characterization and Origin of the Taishanmiao Aluminous A-Type Granites: Implications for Early Cretaceous Lithospheric Thinning at the Southern Margin of the North China Craton. *International Journal of Earth Sciences*, 105(5): 1563—1589. <https://doi.org/10.1007/s00531-015-1269-9>
- Wang, C. M., He, X. Y., Yan, C. H., et al., 2013. Ore Geology, and H, O, S, Pb, Ar Isotopic Constraints on the Genesis of the Lengshuibigou Pb-Zn-Ag Deposit, China. *Geosciences Journal*, 17(2): 197—210. <https://doi.org/10.1007/s12303-013-0011-5>
- Wang, L. G., Wang, Q. M., Chang, Y. Z., et al., 2017. Rock Mass Dating, Geochemical Characteristics and Metallogenic Role of Laoliwan Granite in Xiaoshan Area, West Henan Province. *Geological Bulletin of China*, 36(7): 1242—1250 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. T., Ye, H. S., Ye, A. W., et al., 2010. Zircon SHRIMP U-Pb Ages and Their Significances of the Wenyu and Niangniangshan Granitic Plutons in the Xiaoqinling Area, Central China. *Chinese Journal of Geology*, 45(1): 167—180 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Li, X. H., Yang, J. H., et al., 2007. Discussion on the Petrogenesis of Granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217—1238 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G. B., Liu, J. M., Zeng, Q. D., et al., 2013. Metallogenic Age of Shuangjianzishan Pb-Zn-Ag Deposit in Da Hinggan Mountain, Inner Mongolia. *Acta Mineralogica Sinica*, 33(S2): 619 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, J. F., Mao, J. W., Pei, R. F., et al., 2012. New Geochronological Data of Granites and Ores from the Nannihu-Sandaozhuang Mo(W) Deposit. *Geology in China*, 39(2): 458—473 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, E., Hu, J., Zhang, Z. Z., et al., 2012. Petrogeochemistry, Zircon U-Pb Dating and Lu-Hf Isotopi Compositions of the Haoping and Jinshanmiao Granites from the Huashan Complex Batholith in Eastern Qinling Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 4031—4046 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, H., Wei, J. H., Tan, J., et al., 2012. Geochemistry of the Early Cretaceous Acidic Intrusions in Xiaoqinling, Central China: Constraints on Tectonic Setting. *Geological Science and Technology Information*, 31(3): 39—48 (in Chinese with English abstract).
- Yang, C. Y., Ye, H. S., Xiang, J. F., et al., 2016. Rb-Sr Isochron Age of Sulfide Minerals in Luotuoshan Pyrite-Poly-metallic Deposit of Western Henan Province and Its Geological Significance. *Mineral Deposit*, 35(3): 573—590 (in Chinese with English abstract).
- Yao, J. M., Zhao, T. P., Li, J., et al., 2009. Molybdenite Re-Os Age 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).
- Ye, H. S., 2006. The Mesozoic Tectonic Evolution and Pb-Zn-Ag Metallogeny In the South Margin of North China Craton (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Ye, H. S., Mao, J. W., He, C. F., et al., 2010. Mineralization Age and Geological Characteristics of Veined Pb-Zn Deposits and Porphyry Mo Deposits of Fudian Ore-Concentrated District in Henan Province. *Mineral Deposits*, 29(S1): 537—538 (in Chinese).
- Ye, H. S., Mao, J. W., Li, Y. F., et al., 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).
- Zeng, W., Chang, Y. Z., Sima, X. Z., et al., 2017. Zircon U-Pb Dating of Granite Porphyry in Zhonghe Silver Polymetallic Deposit and Its Geological Implication, Xiaoshan Area in Henan Province. *Geological Survey and Research*, 40(2): 81—88 (in Chinese with English abstract).

- Zhai, M. G., 2010. Tectonic Evolution and Metallogenesis of North China Craton, *Mineral Deposits*, 29(1): 24–36 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. W., Zhang, B. R., Yu, Z. P., et al., 1996. Orogenic Process and Dynamic Characteristics of the Qinling Orogenic Belt, *Science in China (Series D)*, 26(3): 193–200 (in Chinese).
- Zhang, G. W., Zhang, B. R., Yuan, X. C., et al., 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics, Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhu, J., 2015. Geological Characteristics of Polymetallic Mineralization and Optimizing Target Areas in the Eastern Xiaoshan, Henan Province (Dissertation), China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhu, J. W., Zhang, T. Y., Xue, L. W., 1999. Determination of the Ore-Forming Age of Gold Deposits in Xiaoshan, Western Henan and Its Geological Significance, *Geological Review*, 45(4): 418–422 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R. X., Chen, L., Wu, F. Y., et al., 2011. Timing, Scale and Mechanism of the Destruction of the North China Craton, *Science in China (Series D)*, 41(5): 583–592 (in Chinese).
- Zhu, W. G., Li, C. Y., Deng, H. L., et al., 2002. Modes of Occurrence of Silver in Gacun Silver-Polymetallic Massive Sulfide Deposit, *Mineral Deposit*, 21(4): 399–407 (in Chinese with English abstract).
- Zong, K. Q., Klemd, R., Yuan, Y., et al., 2017. The Assembly of Rodinia: The Correlation of Early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) High-Grade Metamorphism and Continental Arc Formation in the Southern Beishan Orogen, Southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB), *Precambrian Research*, 290: 32–48. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.12.010>
- Zuo, L. Y., 2008. Research on Mineralization of the Lengshuikeng Porphyry Silver-Lead-Zinc Deposit in Jiangxi Province, China (Dissertation), Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 毕诗健, 李占轲, 唐克非, 等, 2016. 小秦岭东桐峪金矿床黄铁矿 LA-ICP-MS 微量元素特征及其成矿意义, *地球科学*, 41(7): 1121–1140.
- 曹晶, 叶会寿, 陈小丹, 等, 2016. 豫西雷门沟钼矿区花岗斑岩年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究, *矿床地质*, 35(4): 677–695.
- 陈铁华, 赵保军, 张天义, 等, 1997. 崤山地区隐伏花岗岩体及其找金前景, *河南地质*, 15(1): 11–18.
- 陈衍景, 隋颖慧, Franco, P., 2003. CMF 模式的排他性依据和造山型银矿实例: 东秦岭铁炉坪银矿同位素地球化学, *岩石学报*, 19(3): 551–568.
- 程知言, 胡建, 蒋少涌, 等, 2013. 河南鱼池岭钼矿有关花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素研究及其对成矿时代的制约, *高校地质学报*, 19(3): 403–414.
- 高建京, 毛景文, 陈懋弘, 等, 2011. 豫西铁炉坪银铅矿床矿脉构造解析及近矿蚀变岩绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄测定, *地质学报*, 85(7): 1172–1187.
- 高昕宇, 赵太平, 高剑峰, 等, 2012. 华北陆块南缘小秦岭地区早白垩世埃达克质花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和元素地球化学特征, *地球化学*, 41(4): 303–325.
- 高昕宇, 赵太平, 原振雷, 等, 2010. 华北陆块南缘中生代合峪花岗岩的地球化学特征与成因, *岩石学报*, 26(12): 3485–3506.
- 郭波, 朱赖民, 李犇, 等, 2009. 华北陆块南缘华山和合峪花岗岩岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成与成岩动力学背景, *岩石学报*, 25(2): 265–281.
- 胡浩, 李建威, 邓晓东, 2011. 洛南—卢氏地区与铁铜多金属矿床有关的中酸性侵入岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义, *矿床地质*, 30(6): 979–1001.
- 焦建刚, 汤中立, 钱壮志, 等, 2010. 东秦岭金堆城花岗斑岩体的锆石 U-Pb 年龄、物质来源及成矿机制, *地球科学*, 35(6): 1011–1022.
- 李红松, 梁新辉, 熊胜克, 等, 2016. 河南省老里湾银矿地质特征及控矿因素分析, *有色金属文摘*, 31(1): 42–43.
- 李磊, 孙卫志, 孟宪锋, 等, 2013. 华北陆块南缘崤山地区燕山期花岗岩类地球化学、Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义, *岩石学报*, 29(8): 2635–2652.
- 李铭, 黄诚, 樊光明, 2016. 老李湾斑岩型银矿床矿石结构特征与银赋存状态, *现代矿业*, 32(9): 141–144.
- 李曙光, Hart, S. R., 郑双根, 等, 1989. 中国华北、华南陆块碰撞时代的钐—铽同位素年龄证据, *中国科学(B 辑)*, 19(3): 312–319.
- 李艳军, 魏俊浩, 李欢, 等, 2012. 三江成矿带中北段夏塞银铅锌多金属矿床: 早白垩世热液脉型矿床, *矿床地质*, 31(S1): 995–996.
- 李永峰, 毛景文, 白凤军, 等, 2003. 东秦岭南泥湖钼(钨)矿田 Re-Os 同位素年龄及其地质意义, *地质论评*, 49(6): 652–659.
- 李永峰, 毛景文, 刘敦一, 等, 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.
- 李占轲, 2013. 华北克拉通南缘中生代银—铅—锌矿床成矿作用研究(博士学位论文), 武汉: 中国地质大学.
- 梁涛, 白凤军, 罗照华, 等, 2014. 豫西熊耳山斑竹寺花岗斑岩岩体锆石 U-Pb 定年及地质意义, *西北地质*, 47(2): 41–50.
- 梁涛, 卢仁, 2015. 豫西崤山小妹河岩体 LA-ICP-MS 锆石

- U-Pb定年、地球化学特征及地质意义.地质通报,34(8): 1526—1540.
- 梁涛,卢仁,罗照华,等,2015.豫西熊耳山蒿坪沟黑云母花岗岩斑岩的锆石 LA-ICP-MSU-Pb 年龄及其地质意义.地质论评,61(4): 901—912.
- 柳玉虎,刘清泉,王永争,等,2015.豫西沙沟银铅锌矿床构造控矿分析及找矿预测.矿产勘查,6(4): 364—370.
- 卢燃,毛景文,高建京,等,2012.江西冷水坑矿田下鲍 Ag-Pb-Zn 矿床地质特征及银的赋存状态研究.岩石学报,28(1): 105—121.
- 卢仁,梁涛,卢兴祥,等,2013.豫西崤山后河岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义.地质调查与研究,36(4): 263—270.
- 卢仁,梁涛,卢兴祥,等,2014.豫西崤山龙卧沟岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义.中国地质,41(3): 756—772.
- 毛景文,叶会寿,王瑞廷,等,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.
- 毛景文,张作衡,余金杰,等,2003.华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学—背景:从金属矿床年龄精测得到启示.中国科学(D辑),33(4): 289—299.
- 毛景文,郑榕芬,叶会寿,等,2006.豫西熊耳山地区沙沟银铅锌矿床成矿的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其地质意义.矿床地质,25(4): 359—368.
- 孟祥金,侯增谦,董光裕,等,2009.江西冷水坑斑岩型铅锌银矿床地质特征、热液蚀变与成矿时限.地质学报,83(12): 1951—1967.
- 聂政融,王晓霞,柯昌辉,等,2015.华北地块南缘花山、五丈山岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因.地质通报,34(8): 1502—1516.
- 欧阳荷根,2013.大兴安岭南段拜仁达坝—维拉斯托银多金属矿床成矿作用及动力学背景(博士学位论文).北京:中国地质大学.
- 欧阳荷根,李睿华,周振华,2016.内蒙古双尖子山银多金属矿床侏罗纪成矿的年代学证据及其找矿意义.地质学报,90(8): 1835—1845.
- 齐秋菊,王晓霞,柯昌辉,等,2012.华北地块南缘老牛山杂岩体时代、成因及地质意义——锆石年龄、Hf 同位素和地球化学新证据.岩石学报,28(1): 279—301.
- 齐玥,2014.东秦岭地区晚中生代老君山岩体和太山庙岩体成因(硕士学位论文).合肥:中国科学技术大学.
- 王利功,王全明,常云真,等,2017.豫西崤山老里湾岩体年代学、地球化学特征及其成矿作用.地质通报,36(7): 1242—1250.
- 王义天,叶会寿,叶安旺,等,2010.小秦岭文峪和娘娘山花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义.地质科学,45(1): 167—180.
- 吴福元,李献华,杨进辉,等,2007.花岗岩成因研究的若干问题.岩石学报,23(6): 1217—1238.
- 吴冠斌,刘建明,曾庆栋,等,2013.内蒙古大兴安岭双尖子山铅锌银矿床成矿年龄.矿物学报,33(S2): 619.
- 向君峰,毛景文,裴荣富,等,2012.南泥湖—三道庄钼(钨)矿的成岩成矿年龄新数据及其地质意义.中国地质,39(2): 458—473.
- 肖娥,胡建,张遵忠,等,2012.东秦岭花山复式岩基中蒿坪与金山庙花岗岩体岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素组成.岩石学报,28(12): 4031—4046.
- 肖鸿,魏俊浩,谭俊,等,2012.小秦岭地区早白垩世酸性侵入岩地球化学特征及构造环境.地质科技情报,31(3): 39—48.
- 杨晨英,叶会寿,向君峰,等,2016.豫西骆驼山多金属硫铁矿床硫化物 Rb-Sr 等时线年龄及其地质意义.矿床地质,35(3): 573—590.
- 姚军明,赵太平,李晶,等,2009.河南祁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.
- 叶会寿,2006.华北陆块南缘中生代构造演化与铅锌银成矿作用(博士学位论文).北京:中国地质科学院.
- 叶会寿,毛景文,何春芬,等,2010.河南付店矿集区斑岩钼矿和脉状铅锌矿地质特征与成矿时代.矿床地质,29(S1): 537—538.
- 叶会寿,毛景文,李永峰,等,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.
- 曾威,常云真,司马献章,等,2017.河南省崤山地区中河银多金属矿床花岗岩斑岩体形成时代及其地质意义.地质调查与研究,40(2): 81—88.
- 翟明国,2010.华北克拉通的形成演化与成矿作用.矿床地质,29(1): 24—36.
- 张国伟,张本仁,于在平,等,1996.秦岭造山带的造山过程及其动力学特征.中国科学(D辑),26(3): 193—200.
- 张国伟,张本仁,袁学诚,等,2001.秦岭造山带与大陆动力学.北京:科学出版社.
- 朱嘉伟,张天义,薛良伟,1999.豫西崤山地区金矿成矿年龄的测定及其意义.地质论评,45(4): 418—422.
- 朱静,2015.河南省崤山东部多金属成矿地质特征及找矿靶区优选(硕士学位论文).北京:中国地质大学.
- 朱日祥,陈凌,吴福元,等,2011.华北克拉通破坏的时间、范围与机制.中国科学(D辑),41(5): 583—592.
- 朱维光,李朝阳,邓海琳,等,2002.呷村银多金属块状硫化物矿床银的赋存状态.矿床地质,21(4): 399—407.
- 左力艳,2008.江西冷水坑斑岩型银铅锌矿床成矿作用研究(博士学位论文).北京:中国地质科学院.