

赋存于斑岩体的中硫型浅成低温热液银铅锌矿床：以华北南缘老里湾矿床为例

李晓明^{1,2}, 李占轲^{1*}, 李超³, 王振强⁴, 周俊杰¹, 张谦朔¹, 熊胜克⁵

1. 中国地质大学（武汉）资源学院，湖北武汉，430074
2. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所，天津，300309
3. 中国地质调查局国家地质实验测试中心，北京，100037
4. 河南省第一地质矿产调查院有限公司，河南洛阳，471023
5. 河南省孚光矿业有限公司，河南郑州，450007

摘要 赋存于斑岩体的银铅锌矿床作为一类具有特殊产状的银铅锌矿床，往往存在较大的成因类型争议。该产状的银铅锌矿床通常被认为是斑岩型矿床或浅成低温热液矿床，而这两种矿床类型在成矿模式上具有显著差别。为了加深对赋存于斑岩体内银铅锌矿床的成因认识，指导找矿勘查工作，本文选取华北南缘崮山地区老里湾矿床作为研究对象，重点对花岗斑岩体与围岩接触带蚀变、斑岩体内及角砾岩内银铅锌矿化特征进行了系统刻画，并结合流体包裹体显微测温、硫-铅同位素分析以及同位素定年等方法以确定其成因类型。老里湾矿床主要矿体赋存于花岗斑岩体内，并受断裂构造控制。野外观察显示，花岗斑岩体和围岩熊耳群地层接触带部位仅发育少量石英—黄铁矿和方解石—黄铁矿细脉，未见银铅锌矿化。老里湾矿床银铅锌矿化主要表现为赋存于切穿斑岩体的断裂构造带内的断裂带矿化，其次为在斑岩体周边爆破角砾岩中少量角砾状矿化。流体包裹体研究表明两种银铅锌矿化的成矿流体主要为 NaCl-H₂O 体系，测温结果显示这两种矿化主成矿阶段的均一温度和盐度的平均值分别为 240℃, 6.8 wt.% NaCl eqv. 和 279℃, 9.0 wt.% NaCl eqv., 表现为中低温、中低盐度的流体特征。断裂带矿化各成矿阶段的硫同位素组成变化较小， $\delta^{34}\text{S}$ 值集中于 0~5‰；角砾状矿化 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 0.4‰~2.7‰，表明两种类型矿化的硫主要来自岩浆热液。断裂带矿化和角砾状矿化铅同位素变化范围较小，且分布相对集中，表明两种矿化形式成矿物质来源相似，均具有深部来源的特点。断裂带矿化绢云母原位 Rb-Sr 同位素等时线年龄和含辉钼矿全岩 Re-Os 同位素等时线年龄分别为 $127.1\pm 2.5\text{ Ma}$ 和 $129.5\pm 2.8\text{ Ma}$ ，与斑岩体成岩年龄较为一致。上述研究表明老里湾矿床的成矿作用虽与早白垩世的岩浆活动密切相关，但其地质特征表明银铅锌成矿作用晚于斑岩体成岩作用，其矿化特征符合中硫型浅成低温热液矿床而非斑岩型矿床。老里湾花岗斑岩体并非成矿母岩，形成该矿床的岩体应位于深部，且在深部有寻找斑岩型钼矿床的潜力。老里湾矿床的成因研究表明，赋矿围岩为斑岩体这一特征并不是确定银铅锌矿床类型的关键要素，应结合矿床地质特征和相关地球化学等证据进行综合判定。

基金项目：国家自然科学基金项目（Nos. 41772074, 42572109），湖北省自然科学基金计划项目资助（2025AFA032）

作者简介：李晓明（1992-），男，博士，矿物学、岩石学、矿床学专业。ORCID: 0000-0002-0164-0996. E-mail: lixm2020@cug.edu.cn

***通讯作者：**李占轲（1985-），男，教授，主要从事矿床地质与矿产勘查研究。ORCID: 0000-0002-4213-3894. E-mail: lizk@cug.edu.cn

关键词：斑岩体；中硫型浅成低温热液矿床；银铅锌矿床；华北南缘；老里湾矿床

中图分类号：P611

收稿日期：2026-2-8

Porphyry-hosted Intermediate-sulfidation Epithermal Ag-Pb-Zn Deposit: A Case Study of the Laoliwan Deposit, Southern Margin of the North China Craton

Li Xiaoming^{1,2}, Li Zhanke^{1*}, Li Chao³, Wang Zhenqiang⁴, Zhou Junjie¹, Zhang Qianshuo¹, Xiong Shengke⁵

1. *School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China*

2. *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, China Academy of Geological Sciences, Tianjin 300309, China*

3. *National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China*

4. *Henan First Geology and Mineral Survey Institute Co., Ltd., Luoyang, 471023, China*

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

Abstract: Porphyry-hosted Ag-Pb-Zn deposits, as a type of Ag-Pb-Zn deposits with the distinctive occurrence, are commonly controversial regarding their deposit types. Such deposits are generally classified as porphyry deposits or epithermal deposits. However, these two deposit types are largely different in their metallogenic models. To improve the insight into the genesis of porphyry-hosted deposits and provide guidance for the deposit exploration, the Laoliwan deposit in the Xiaoshan district of the southern margin of the North China Craton is chosen as a case study. This paper aims to determine the deposit type, based on the systematic geological investigation of the mineralized alteration at the contact zone between the granite porphyry and the strata of the Xiong'er group, as well as the Ag-Pb-Zn mineralization within the granite porphyry and the breccia bodies. These observations are integrated with fluid inclusion microthermometry, sulfur and lead isotope analyses, and isotopic geochronology to constrain the genetic type of the deposit. The orebodies at Laoliwan are mainly hosted in the granite porphyry and controlled by the regional faults. Field work show that the mineralization in the contact zone is limited to sparse quartz-pyrite and calcite-pyrite veinlets, without Ag-Pb-Zn mineralization observed. In contrast, Ag-Pb-Zn mineralization in the Laoliwan deposit mainly is developed in the faults that cut through the granite porphyry, referred to as fracture-zone-type mineralization in this paper, and a small amount of breccia-type mineralization is locally occurred in the blasted breccias surrounding the granite porphyry. Fluid inclusion studies indicate that the ore-forming fluid of the two types of the Ag-Pb-Zn mineralization are NaCl-H₂O system. The results of microthermometry show that the average homogenization temperatures and the salinities of the fracture-zone-type and breccia-type mineralization are 240°C, 6.8 wt.% NaCl eqv. and 279°C, 9.0 wt.% NaCl eqv., respectively, indicating the ore-forming fluids are of medium- to low-temperature and medium- to low-salinity. S isotopic compositions of different stages within the fracture-zone-type mineralization show limited variation, with

$\delta^{34}\text{S}$ values clustering between 0 and 5‰, whereas those of breccia-type mineralization range from 0.4‰ to 2.7‰. These sulfur isotope data suggest that the ore-forming materials of both mineralization types were derived from magmatic–hydrothermal fluids. Pb isotopic compositions of the fracture-zone-type and breccia-type mineralization display narrow ranges and relatively concentrated distributions, implying similar sources of ore-forming materials which are derived from the deep mantle. The in-situ sericite Rb-Sr isotopic isochron age and whole-rock molybdenite Re-Os isotopic isochron age from the fracture-zone-type mineralization are 127.1 ± 2.5 Ma and 129.5 ± 2.8 Ma, respectively, which are approximately consistent with the emplacement age of the granite porphyry. Although the Ag-Pb-Zn mineralization in the Laoliwan deposit is closely related to Early Cretaceous magmatic activities in the region, its geological characteristics suggest that the Ag-Pb-Zn mineralization postdates the emplacement of the granite porphyry. The analysis results above show that the deposit should be classified as an intermediate-sulfidation epithermal deposit rather than a porphyry deposit. Therefore, this study proposes that the Laoliwan granite porphyry is not the metallogenic rock. The intrusion responsible for the Ag-Pb-Zn mineralization is likely located at depth, implying the potential to find porphyry Mo deposit in the deeper area. The genetic study of the Laoliwan deposit further demonstrates that a Ag-Pb-Zn deposit hosted within a porphyry alone is not a key factor for classifying the Ag-Pb-Zn deposit. The deposit type should be determined by a comprehensive assessment of geological characteristics and relevant geochemical evidence.

Key words: Porphyry; Intermediate-sulfidation epithermal deposit; Ag-Pb-Zn deposit; Southern margin of the North China Craton; The Laoliwan deposit

赋存于斑岩体内的银铅锌矿床虽然在世界范围内产出数量有限，但其矿床成因往往具有较大争议。该产状类型的银铅锌矿床由于与斑岩体密切的空间关系因而常被认为是斑岩型矿床，如江西冷水坑矿床（孟祥金等，2009），内蒙古花脑特矿床、1017 高地矿床（Jiang et al., 2022），山西支家地矿床深部的铅锌银矿化（张会琼等，2025），以及位于河南崤山地区的老里湾矿床及其北部中河矿床（Jiang et al., 2022; 秦克章等，2025）等。“斑岩型银矿”这一概念近年来也被不同学者相继提出，被认为是一种被忽视的银矿类型（Graybeal and Vikre, 2010; 回凯旋等，2021; 秦克章等，2025）。然而，在目前报道的此类矿床中，仅有冷水坑矿床被普遍认为是较为典型的斑岩型银矿。其余大多数矿床虽然在成因上与岩浆热液活动密切相关，但由于其多受断裂构造控制，且成矿流体温度、盐度相对较低，因而也多被划分为浅成低温热液矿床，被认为是斑岩型成矿系统的浅部矿化表现（例如花脑特矿床，王银宏等，2026; 张翊卓等，2026; 中河矿床，Xu et al., 2022）。上述研究表明，对于赋存于斑岩体内的这类特殊产状银铅锌矿床的成因认识仍较为缺乏，从而在一定程度上制约了相关矿床找矿勘查工作的开展。

华北克拉通南缘发育有大量的银铅锌矿床，已经探明的矿床有数十个，这些矿床主要分布在熊耳山、外方山、栾川等地区，其中熊耳山地区下峪矿田为区域内最大的银矿集中区，探明银金属储量已超过 5000 吨，铅锌资源量 100 余万吨（柳玉虎等，2015）。随着近年来崤山地区老里湾、中河两个大型银铅锌矿床勘探工作的开展，该区域也成为华北克拉通南缘重要的银资源集中区。目前研究表明，华北克拉通南缘的银铅锌矿床主要有以下两种类型：一类是围绕含钼矿斑岩体并在其外围呈似层状或脉状产出的银铅锌矿床，相关研究表明该类矿床与其矿田内的斑岩型钼矿为同一岩浆热液活动的产物，如栾川地区内在南泥湖斑岩型钼矿外围产出的冷水北沟矿床（Li et al., 2023）。该类矿床由于其成矿特征及其与成矿斑岩体密切的成因关系，被认为是浅成低温热液矿床，是斑岩型矿床系统的远端表现（Cao et al., 2015; Li et al., 2017, 2023; Jin et al., 2019）。另一类矿床主要分布于熊耳山地区，矿体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和熊耳群火山岩。该类矿床所在矿田内一般没有花岗斑岩体出露，或是出露的斑岩体并没有发生矿化作用。目前研究对于该类矿床成因仍存在争议：部分学者认为该类矿床的成矿流体具有变质流体的特征，成矿作用与岩浆活动关系不大（隋颖慧等，2000; 陈衍景等，2003; Li et al., 2013）；但近年来的研究表明这些矿床成矿物质和成矿流体来源与岩浆热液密切相关，成矿作用与区域内早白垩世的岩浆活动密切相关，按照其矿物共生组合和围岩蚀变特征被划分为中硫型浅成低温热液矿床（Tian et al., 2023; Xu et al., 2023）。

老里湾银铅锌矿床位于华北克拉通南缘崤山地区东部，是该地区近年来发现的大型银铅锌矿床。由于老里湾矿床主要矿体赋存于老里湾花岗斑岩体内，因此银铅锌矿化与岩体的成因关系一直是该矿床研究的焦点问题。有部分学者认为该矿床与花岗斑岩具有紧密的成因关系，认为该矿床为斑岩型矿床（李铭等，2016; 梁新辉等，2018; 简新玲等，2018）。也有研究通过稳定同位素和流体包裹体等方法对成矿流体和物质来源进行揭示，认为该矿床为岩浆期后的中低温热液型矿床，成矿与赋矿的花岗斑岩体具有密切的成因联系（常云真等，2018）。还有学者认为该矿床主要受到断裂构造控制，是浅成低温热液银铅锌矿床，老里湾花岗斑岩与成矿并无成因联系，成矿岩体应位于矿床深

部（李红松等，2016；李晓明等，2019）。除了矿床的成因争议外，前人对于该矿床地质特征的刻画仍相对薄弱，对成矿年代学的研究也较为缺乏。因此，本文通过详细的基础地质及矿相学研究，并结合硫、铅同位素测试，流体包裹体显微测温以及成矿年代学研究，探究成矿物质来源和成矿流体特征，确定成矿年龄，厘定矿床成因类型，为赋存于斑岩体内的银铅锌矿床的成因类型划分及其找矿勘查工作提供理论支持。

1 区域地质背景

华北克拉通南缘处于华北克拉通和秦岭造山带之间，北以三门峡—鲁山断裂为界，南以洛南—栾川断裂为界紧临秦岭造山带（图 1A）。该区域的大地构造演化主要分为两个阶段。以中生代为分界，此前华北克拉通南缘属于华北克拉通的组成部分，经历了类似华北克拉通的构造演化，中生代后的演化与秦岭造山带密切相关。具体表现为，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（翟明国，2010；徐书奎，2024）。新元古代—中三叠世是以现代板块构造体制为基本特征的构造演化（张国伟等，2001）。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。晚中生代由于古太平洋板块的俯冲及回撤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）。因此，华北克拉通南缘同时具有华北克拉通的地壳结构和秦岭造山带的构造演化特征。

崤山地区位于华北克拉通南缘中部，其北东侧以三门峡—鲁山断裂为界，西北侧为灵宝—三门峡断陷盆地与小秦岭地区相隔，东南侧为卢氏—洛宁断陷盆地与熊耳山地区相接（图 1B）。新太古界太华群构成区域内古老的结晶基底，盖层由下至上分别为熊耳群、官道口群、汝阳群、白垩系、古近系和新近系及第四系。崤山地区内断裂十分发育，按照展布方向可分为北东向、近东西向、近南北向、北北西向，各个方向的断裂相互切穿。其中北东向和近东西向断裂较为发育，规模较大，往往造成地层的重复出现或缺失，对崤山地区内的地层明显有控制作用。多期次的断裂在不同程度上控制着崤山地区内的岩浆作用和成矿作用。崤山地区自新太古代至中生代均有岩浆活动。新太古代岩浆活动主要为变质 TTG 岩系和变质二长花岗岩系和基性岩脉。中元古代主要为中基性—中酸性火山喷发活动形成的熊耳群火山岩。崤山地区内可见较多的燕山期中酸性小岩体，岩性主要为二长花岗斑岩、花岗闪长岩和花岗斑岩等，这些岩体与崤山地区内的成矿作用密切相关（徐书奎，2024）。前人研究表明，燕山期中酸性岩体集中于 135~128 Ma（胡浩等，2011；卢仁等，2014；李晓明等，2019；齐楠等，2019），且地球化学特征较为类似（李磊等，2013）。具体表现为这些岩体均富集轻稀土元素，亏损重稀土元素，Y、Yb 含量较低，Eu 负异常不明显，推测为华北克拉通南缘加厚下地壳部分熔融的产物（李磊等，2013；齐楠等，2019）。

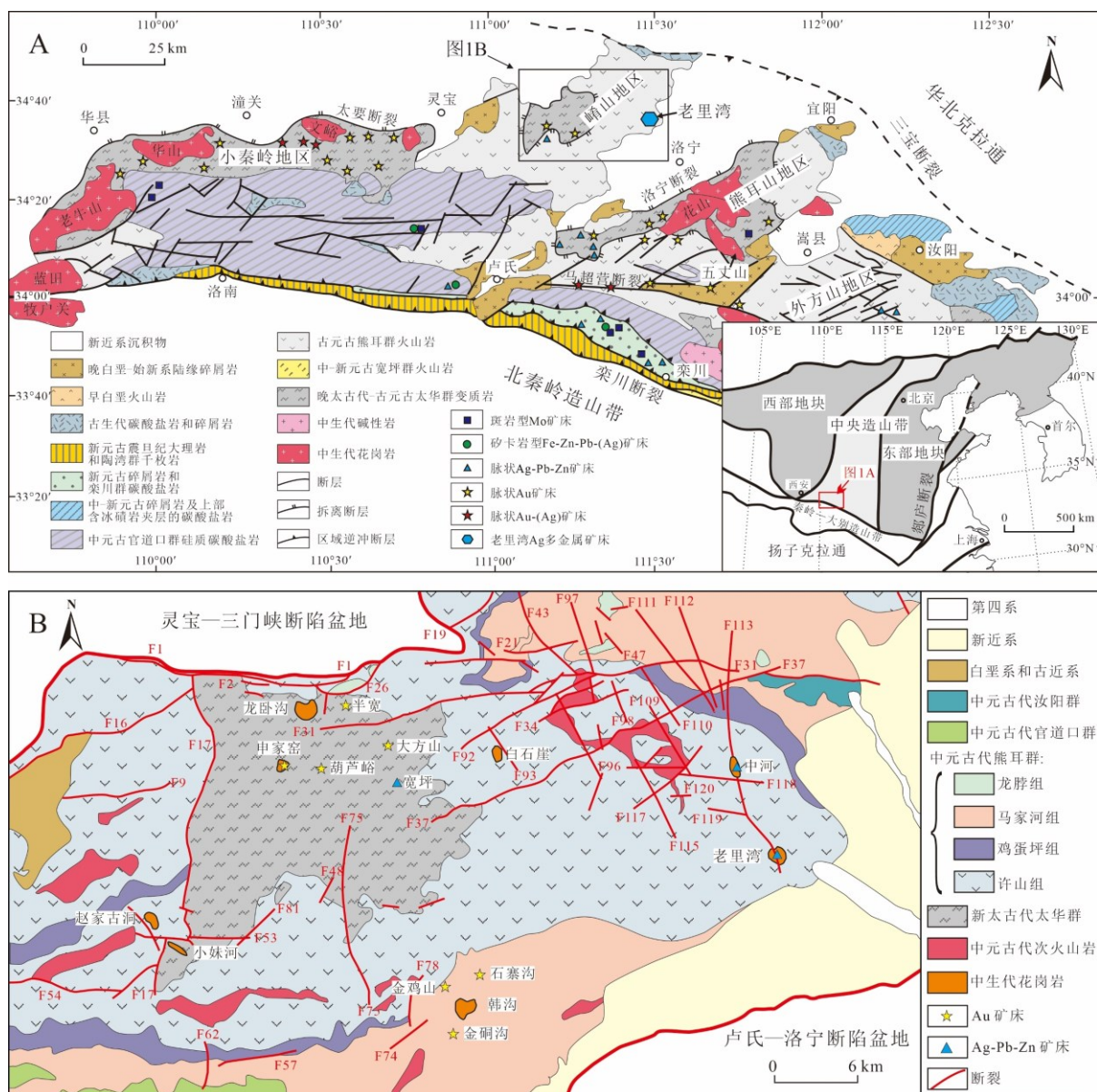


图 1 A. 华北克拉通南缘地质简图 (据 Li et al., 2013 修改); B. 崤山地区地质简图 (据朱静, 2015 修改)

Fig.1 A. The simplified geological map of the southern margin of North China Craton (modified from Li et al., 2013); B. The simplified geological map of the Xiaoshan district (modified from Zhu, 2015)

2 矿区地质

老里湾银铅锌矿床位于崤山地区东部 (图 1A)。矿区主要出露熊耳群许山组火山岩 (Pt_2x)，上部多被第四系黄土覆盖 (图 2A)。熊耳群火山岩在矿区内走向南西，倾向南东，倾角 $29 \sim 34^\circ$ ，局部倾角为 15° 左右。岩性以安山岩为主，可见有杏仁状安山岩以及少量流纹岩。

矿区内断裂构造发育，可分为北西向、北东向和南北向三组，其中以北西向的 F1 断裂规模最大，是本区最为重要的控岩、控矿及赋矿构造 (图 2A)。F1 断裂位于矿区中部，切穿老里湾花岗斑岩体，并延伸至矿区外。该断裂是崤山地区东宋—老里湾—官前—留沟断裂 (F113) 在矿区内的延续，F113 断裂自南部老里湾岩体延伸至北部的中河堤岩体，控制了老里湾、中河两个大型银铅锌矿床的产出。F1 断裂总体产状为 $40 \sim 50^\circ \cap 50 \sim 70^\circ$ ，在矿区内控制长度超过 2500 m。该断裂早期为压扭性

运动，晚期转变为张性断裂，提供了良好的赋矿空间。该断裂西北段最窄处约 80 m，中部岩体附近宽度为 150~230 m，东南段宽度可达 400~500 m。南北向的 F2 断裂展布于矿区的北部，切穿老里湾岩体，并被 F1 断裂截断，产状 $260^{\circ}\square 75^{\circ}\sim 85^{\circ}$ ，断裂带宽 0.5~1.0 m，长约 560 m。北东向的 F3 断裂位于矿区中东部，出露长度约 200~300 m，产状为 $110^{\circ}\sim 135^{\circ}\square 60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ，该断裂为压扭性的正断层，西南部被 F1 切穿。

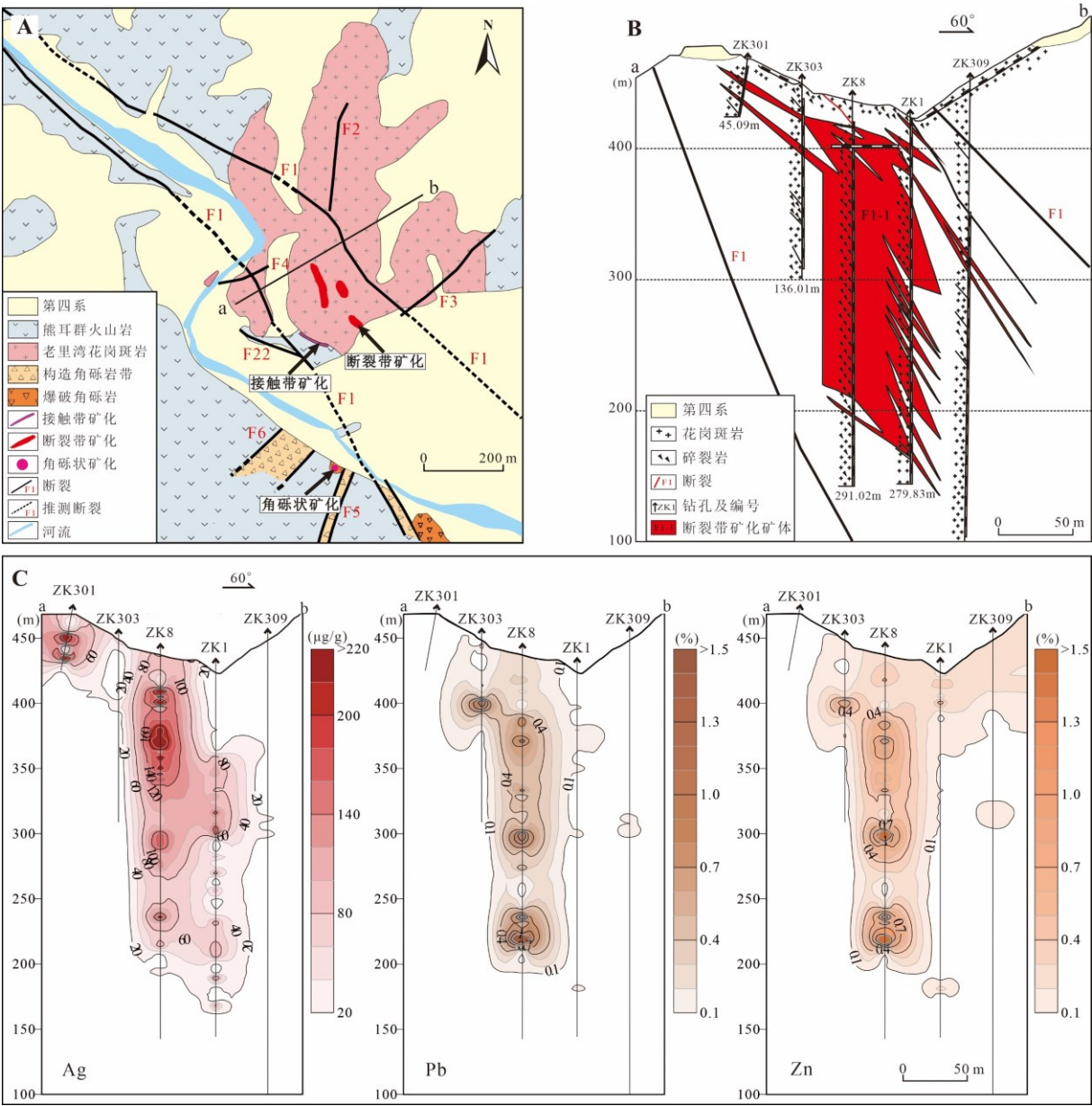


图2 A. 老里湾银铅锌矿床地质简图（据河南省地质矿产勘查开发局第一地质勘察院，2015 修改）；B. 老里湾矿床 a-b 勘探线剖面图（a-b 勘探线位置见图 2A）；C. a-b 勘探线剖面图对应 Ag、Pb、Zn 等品位线图

Fig.2 A. The simplified geological map of the Laoliwan Ag-Pb-Zn deposit (modified from No. 1 Institute of Geological & Mineral Resources Survey of Henan Province, 2015); B. Geological section along a-b exploration line of the Laoliwan deposit (the location of a-b exploration line shown in the Fig.2B); C. Grade contour maps of Ag, Pb and Zn, corresponding to the geological section along a-b exploration line

老里湾花岗斑岩体为矿区内最为主要的岩浆岩，同时也是老里湾银铅锌矿床最为主要的赋矿岩

体。该岩体侵位于熊耳群许山组安山岩中，部分被第四系覆盖，地表出露约 0.5 km²，东西宽约 580 m，南北长约 800 m，长轴方向为近北西向，长约 1000 m，垂向上呈向北东倾斜的歪斜筒状。老里湾花岗斑岩体由于受矿化影响程度不同，发育不同程度的围岩蚀变。离矿体较远的岩体呈灰白色，局部存在黏土化蚀变。矿化相对较弱的岩体呈现钾长石化，岩体显为红褐色（附图 1A-B）。受矿化影响较强的岩体呈现绢云母化，显灰绿色（附图 1B）。另外，在老里湾岩体中可见被包裹的暗色包体，暗色矿物较多，显示中基性的特征。暗色包体与花岗岩体界线截然（附图 1C）。手标本中可见明显绢云母化蚀变穿插钾化蚀变的现象，且在绢云母化蚀变的岩体中可见较多的浸染状自形黄铁矿颗粒（附图 1D）。老里湾花岗斑岩体为斑状结构，块状构造。斑晶主要为石英、钾长石、黑云母、角闪石等，含量约为 20~40%，其中钾长石和石英是最主要的矿物斑晶（附图 1E-F）。已有众多学者对老里湾花岗斑岩体开展了系统的地球化学研究（王利功等，2017；王哲等，2018；李晓明等，2019）。不同学者的锆石 U-Pb 定年结果显示岩体的成岩年龄介于 137 ~ 129 Ma（王哲等，2018；李晓明等，2019；梁涛等，2026），表明该岩体成岩时代为早白垩世。地球化学结果显示，该岩体整体表现为高硅、富碱、准铝质—弱过铝质的特点，富集轻稀土元素，亏损重稀土元素，富集 Rb、Ba、Sr、Pb 等大离子亲石元素，亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素，且具有弱的负 Eu 异常，和较高的 Sr/Y 比值，具有 I 型花岗岩的特征（李晓明等，2019）。结合锆石 Hf 同位素等结果认为，老里湾花岗斑岩体源区主要为古老地壳，古老地壳的部分熔融与幔源岩浆的混合是该岩体形成的主要机制，岩体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（王哲等，2018；李晓明等，2019）。

3 矿化特征

老里湾矿床存在三种矿化形式，分别为产出老里湾花岗斑岩和熊耳群地层接触带部位的接触带矿化，主要产出 F1 断裂带中的断裂带矿化，以及产出爆破角砾岩中的角砾状矿化。其中，断裂带矿化为老里湾矿床主要的银铅锌矿化类型，其次为角砾状矿化。接触带矿化中未见有银铅锌的产出。

3.1 接触带矿化特征

在老里湾花岗斑岩和熊耳群安山岩的接触带部位，两种岩性的分界线较为截然（图 3A）。花岗斑岩一侧未见矿化现象，仅在熊耳群一侧可见少量矿化与蚀变。按照接触带矿化中矿脉的穿插顺序及其矿物特征，该类型矿化可划分两个阶段：（1）石英脉阶段（I 阶段）：该阶段矿化形式主要表现为较多的石英—黄铁矿细脉穿插熊耳群安山岩。受热液蚀变作用，石英—黄铁矿细脉周围的安山岩颜色相对较浅。（2）方解石脉阶段（II 阶段）：该阶段以方解石—黄铁矿脉为主要表现形式。手标本中可见方解石—黄铁矿脉切穿熊耳群安山岩及石英—黄铁矿细脉的现象（图 3A-C）。手标本及 μ XRF 面扫均显示石英—黄铁矿细脉和方解石—黄铁矿脉中的黄铁矿主要呈细粒状（图 3D-F）。镜下可见黄铁矿呈自形—半自形粒状结构呈脉状分布（图 3G-H），鲜见有黄铜矿和斑铜矿颗粒（图 3I）。具体矿物生成顺序如图 4 所示。接触带矿化中未发现银铅锌矿化。该类型矿化应形成于老里湾花岗斑岩侵位于熊耳群安山岩的岩浆作用过程中，早于断裂带矿化和角砾状矿化的形成时间。

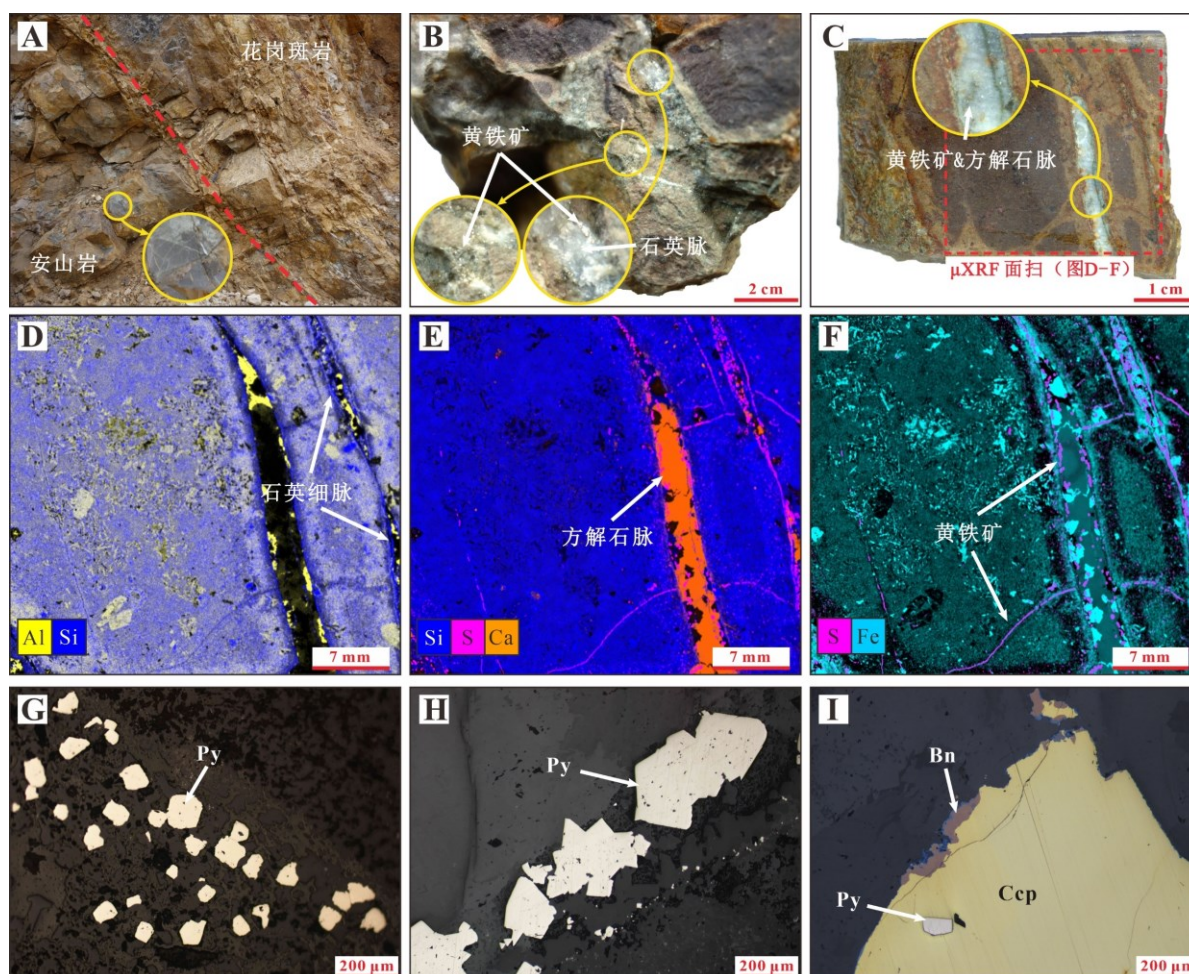


图3 接触带矿化野外产状及典型矿石矿物特征照片

Fig.3 Photographs of field occurrences, typical specimens and minerals from the contact-zone mineralization

A. 老里湾花岗斑岩与熊耳群安山岩分界处。B~C. 接触带矿化手标本照片；D~F. 典型手标本（图3C）的 μ XRF面扫；G~I. 镜下矿物特征。Py. 黄铁矿；Ccp. 黄铜矿；Bn. 斑铜矿

3.2 断裂带矿化特征

断裂带矿化是老里湾矿床最为主要的矿化形式。该类型矿化提交(333)以上银金属量 1961.21t, 铅金属量 10.23×10^4 t, 锌金属量 5.67×10^4 t, 矿石中银、铅、锌的平均品位分别为 159.67 g/t, 1.21%和 0.67% (简新玲等, 2018)。断裂带矿化共圈定有 20 个矿体, 除 F1-1 矿体少量出露地表外, 其余矿体均为隐伏矿体。矿体主要受 F1 断裂及其次级断裂控制, 呈透镜状、囊状、似层状、脉状等, 其中 F1 断裂带控制了 10 个矿体。矿体的主要赋矿围岩为老里湾花岗斑岩, 少部分矿体赋存于熊耳群安山岩中。矿体整体走向为西北, 与 F1 断裂破碎带走向相同, 倾向北东。F1-1 矿体为断裂带矿化中最大矿体, 其矿石量为断裂带矿化总矿石量的 88%, 银金属量为断裂带矿化总体的 92%。矿体呈厚大的囊状, 具有明显的分支复合特征。该矿体总体产状为 $60^\circ \square 60^\circ$, 控制走向长度约 495 m, 最大控制深度约 480 m, 最大厚度可达约 140 m, 平均厚度为 10.5 m。矿体厚大部位向周边快速过渡为较薄部位, 整体上呈现出“中间厚、边缘薄; 中上部厚、下部较薄”的特征 (图 2B)。F1-1 矿体 Ag 平均品位 163.42 g/t, Pb 平均品位 0.84 %, Zn 平均品位 0.51 % (河南省地质矿产勘查开发局第一地质勘查

院，2015）。等品位图显示，Pb、Zn 品位的变化较为一致，Ag 品位中心往往不与 Pb、Zn 品位中心重合，多分布于 Pb、Zn 品位中心的浅部及边部（图 2C）。其余各矿体规模相对较小，形态较为简单，多呈透镜状或脉状展布。断裂带矿化近地表的部分可见次生氧化的现象，主要表现为褐铁矿化、赤铁矿化、铁锰矿化等蚀变，不具有经济价值。

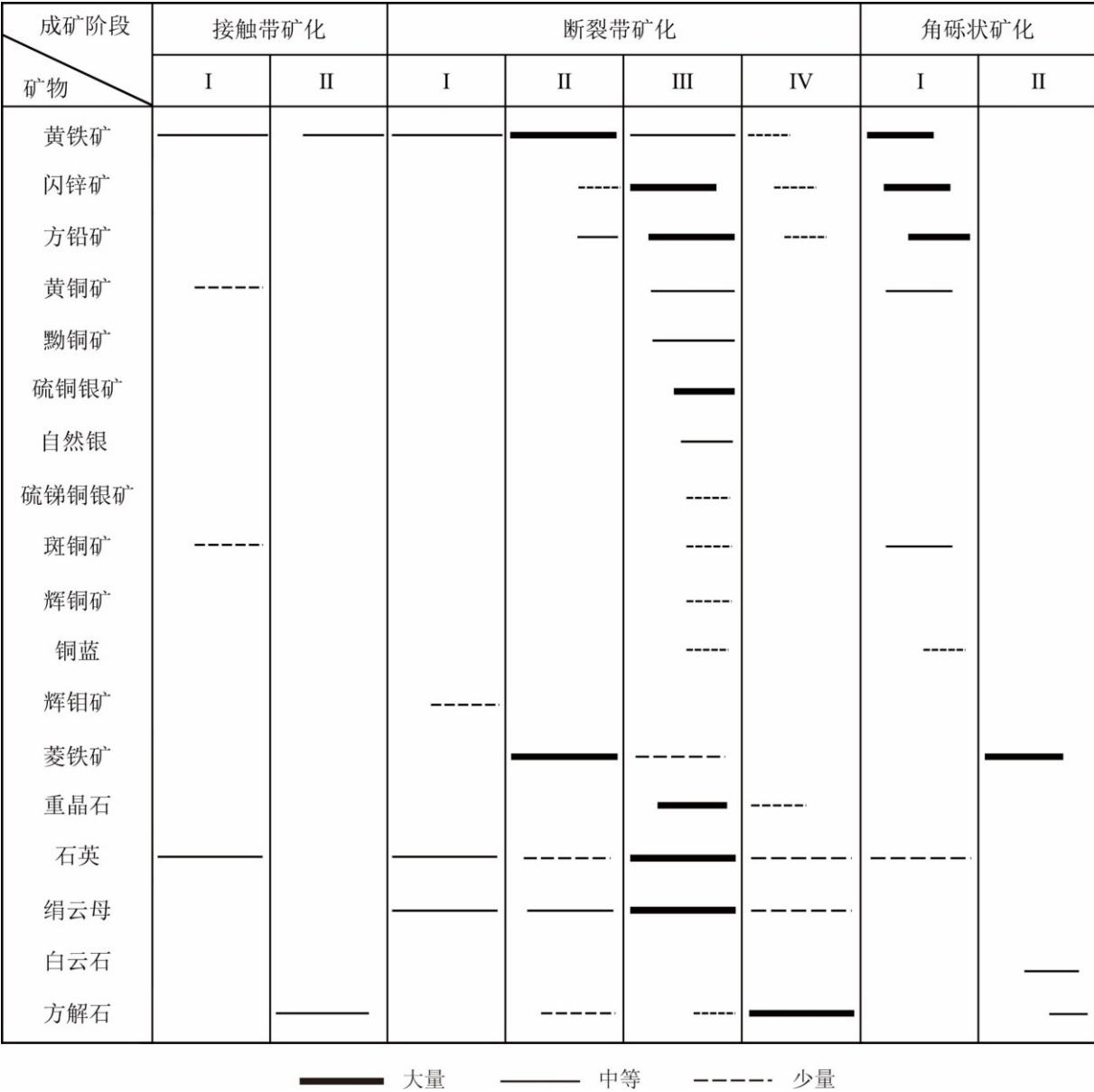


图 4 老里湾矿床不同矿化形式的矿物生成顺序图

Fig.4 Paragenetic sequence from different mineralization types of the Laoliwan deposit

断裂带矿化矿石类型以脉状和浸染状为主，同时可见大量微细脉状矿石。脉状矿石主要以闪锌矿和方铅矿为主（图 5A-B），局部可见大量重晶石与金属硫化物共生（图 5C）。矿石中闪锌矿以深色闪锌矿为主，具有明显的环带特征（图 5D）。该类型矿石中可见有菱铁矿脉被后期铅锌矿脉穿插、交代的现象（图 5E-F）。浸染状矿石的主要组成矿物同样以闪锌矿、方铅矿、黄铁矿等金属硫化物为主，该类型矿石可见明显的硅化和绢云母化蚀变分带，其中矿化集中的区域具有较为强烈的硅化，闪锌矿也以深色闪锌矿为主（图 5G）。μXRF 面扫结果表明，脉状矿石闪锌矿中的 Fe 含量整体较

高，并且闪锌矿的环带也主要是由于其中 Fe 含量的差异造成的。具体表现为闪锌矿中 Fe 含量越高，闪锌矿颜色越深，对应 Zn 的含量越低（图 5H-J）。除此之外，围岩中也见有少量的呈浸染状分布的闪锌矿颗粒。浸染状矿石中的闪锌矿同样富含 Fe（图 5K-L），并且在硅化的区域中明显具有更多的黄铁矿颗粒。相对而言，绢云母化的围岩中仅有少量的黄铁矿、闪锌矿和方铅矿，但具有较多的呈浸染状分布的菱铁矿颗粒（图 5K、M）。

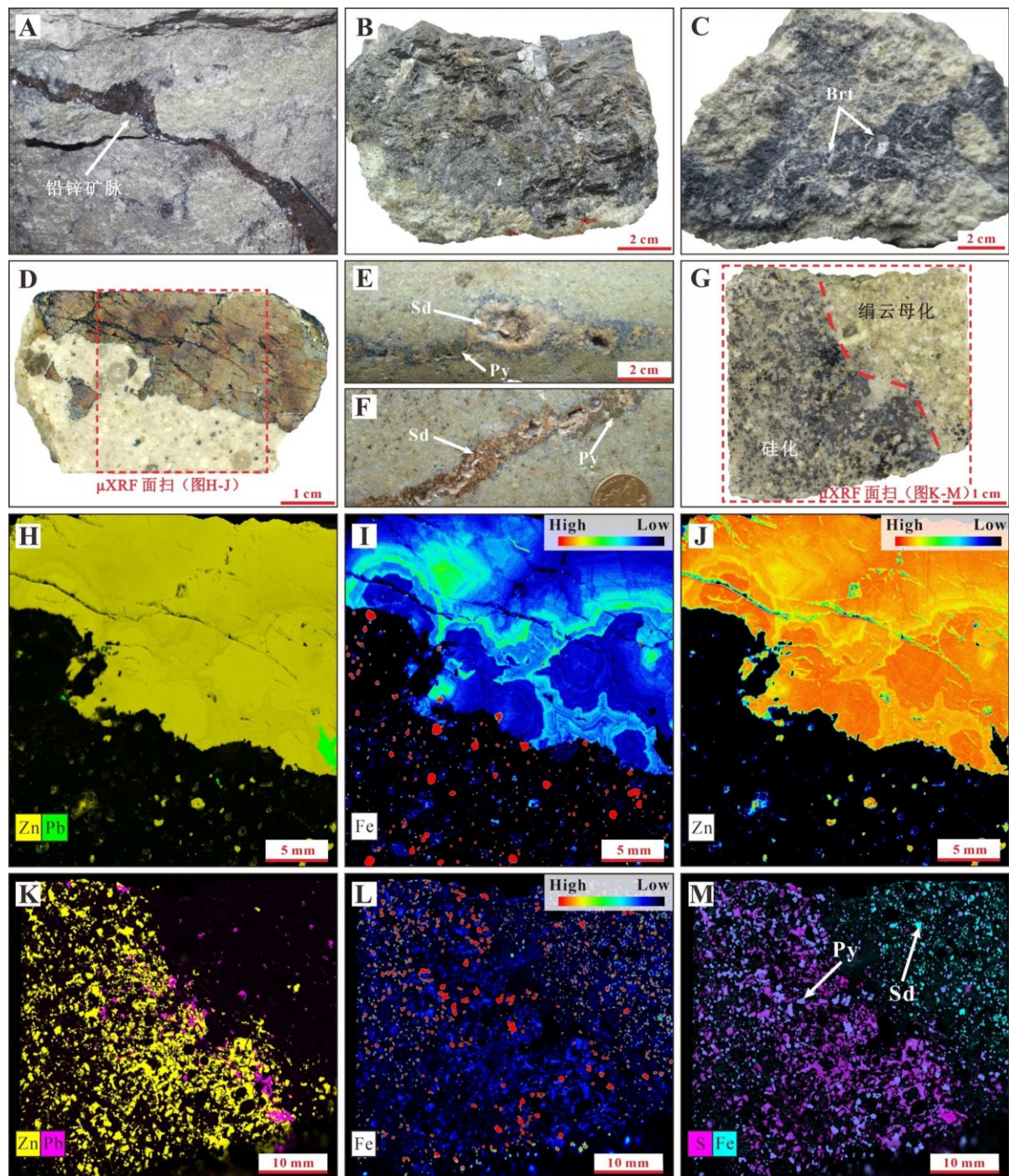


图 5 老里湾矿床断裂带矿化典型矿石矿物照片

Fig.5 Photographs of typical specimens and minerals from fracture-zone-type mineralization in the Laolilwan deposit
A. 铅锌矿脉及其周围浸染状铅锌矿化；B~D. 脉状矿石，以闪锌矿、方铅矿为主要矿物，局部可见重晶石，闪锌矿可见明显环带；E~F. 菱铁矿脉，可见被后期铅锌矿脉穿插；G. 浸染状矿石；H~J. 典型脉状矿石（图 5D）的

μXRF 面扫；K~M. 典型浸染状矿石（图 5G）的 μXRF 面扫. Brt. 重晶石；Sd. 菱铁矿；Py. 黄铁矿.

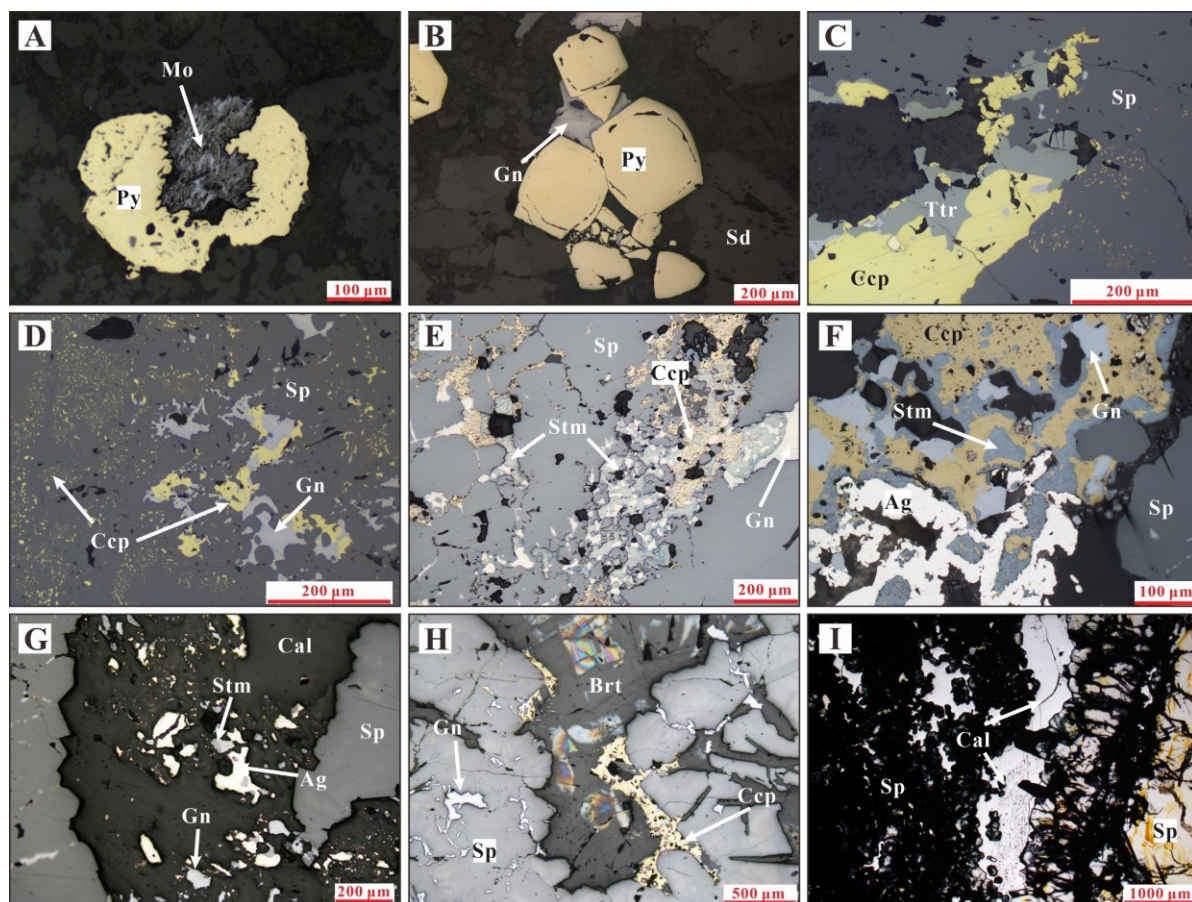


图 6 老里湾矿床断裂带矿化镜下照片

Fig.6 Photomicrographs of fracture-zone-type mineralization in the Laoliwan deposit

A. 辉钼矿交代黄铁矿颗粒；B. 具有环带的自形黄铁矿颗粒；C. 黝铜矿与黄铜矿、闪锌矿等矿物共生；D. 闪锌矿内黄铜矿“病毒”以及与闪锌矿、方铅矿共生的半自形—它形粒状黄铜矿；E. 硫铜银矿与方铅矿、黄铜矿共生；F. 自然银与硫铜银矿共生；G. 自然银被包裹于方解石脉中；H. 重晶石与闪锌矿共生并被方铅矿交代；I. 方解石交代闪锌矿. Py. 黄铁矿；Mo. 辉钼矿；Sd. 菱铁矿；Gn. 方铅矿；Ccp. 黄铜矿；Ttr. 黝铜矿；Sp. 闪锌矿；Stm. 硫铜银矿；Ag. 自然银；Cal. 方解石；Brt. 重晶石

断裂带矿化成矿期由早到晚可划分为四个成矿阶段：（1）石英—黄铁矿阶段（I 阶段）：该阶段以赋存于绢云母化、硅化老里湾花岗斑岩中的浸染状自形黄铁矿颗粒为特征（图 5I、L）。黄铁矿在越靠近矿化的区域分布越密集，周围往往共生有自形—半自形的石英颗粒。该阶段内还可见少量呈浸染状分布的辉钼矿颗粒，部分辉钼矿颗粒交代较早形成的黄铁矿颗粒（图 6A）。（2）菱铁矿—黄铁矿阶段（II 阶段）：该阶段以菱铁矿脉及浸染状的菱铁矿为主要特征，菱铁矿脉内多包裹有较大的具有环带的、呈自形—半自形状的黄铁矿颗粒及少量方铅矿、闪锌矿等金属硫化物（图 5E-F；图 6B）。菱铁矿脉粗细不一，多被主成矿阶段的铅锌矿脉穿插（图 5E）。（3）石英—多金属硫化物阶段（III 阶段）：该阶段为主成矿阶段，产出有大量的金属硫化物并富含银矿物。金属硫化物主要为黄铁矿、闪锌矿、方铅矿，其次为黝铜矿、黄铜矿等（图 6C），并可见有少量的铜蓝、斑铜矿

等矿物。闪锌矿除可见有明显颜色不同的环带外,另可见有部分闪锌矿内包裹有呈“病毒”状分布的黄铜矿颗粒(图 6D)。银矿物主要以硫铜银矿和自然银的形式存在,其次可见少量硫锑铜银矿等银矿物。硫铜银矿多与方铅矿、黄铜矿共生,可见与方铅矿的交代残余结构(图 6E)。自然银多与硫铜银矿共生(图 6F),也可见部分自然银被包裹于后期的方解石脉中(图 6G)。重晶石也是该阶段的主要矿物之一,晶体形状呈长柱状、针状。该矿物主要与闪锌矿共生,并被方铅矿交代(图 6H)。在手标本及镜下观察中发现,在重晶石富集的矿石中往往可见较多的银矿物。(4)方解石—石英阶段(IV 阶段):该阶段成矿作用较弱。主要表现为方解石—石英呈脉状穿插、交代早期的金属硫化物(图 6G、I)。不同成矿阶段具体的矿物生成顺序如图 4 所示。断裂带矿化围岩蚀变主要为硅化、绢云母化、高岭土化、重晶石化、碳酸盐化、钾长石化等。其中硅化、绢云母化、高岭土化、重晶石化与成矿关系密切。

3.3 角砾状矿化特征

角砾状矿化主要产于矿区南部和西部的爆破角砾岩中。本次研究中的角砾岩矿化样品主要采自矿区南部的 5 号爆破角砾岩体中。该矿体 Pb 品位集中在 1.5~4%, Zn 品位集中在 0.6~3.25%, Ag、Au 局部可达边界品位(丁培超等, 2020)。角砾主要为老里湾花岗斑岩角砾和熊耳群安山岩角砾(图 7A-B),其中安山岩角砾可见受热液蚀变影响在角砾的边缘形成蚀变圈(图 7A、C)。角砾多呈未磨圆的棱角状,部分角砾可见磨圆现象,呈次圆状。角砾大小不一,多介于 0.5~5 cm。角砾胶结物主要为碳酸盐矿物,以菱铁矿为主,另可见少量白云石、方解石(图 7D-E)。μXRF 面扫结果也显示角砾胶结物以菱铁矿为主,表现为 Fe 含量较高。胶结物核部的碳酸盐中 Fe 含量相对较低, Ca 含量相对较高(图 7F),表明胶结物从边部到核部由菱铁矿逐渐转变为白云石和方解石。角砾状矿化的矿石中方铅矿和闪锌矿为主要的金属硫化物。这些金属硫化物主要赋存于碳酸盐胶结物中,且在不同矿石中含量差别较大。矿石中金属矿物多呈网脉状或星点状,且多沿着角砾周围分布(图 7C-E、G-H)。

基于上文描述的矿石产状及矿物组合特征,角砾状矿化的成矿期可分为两个成矿阶段:(1)多金属硫化物阶段(I 阶段):该阶段是角砾状矿化主要的铅锌成矿阶段,金属矿物以闪锌矿和方铅矿为主,多被晚阶段碳酸盐胶结物交代(图 7D-E)。除闪锌矿、方铅矿外,还可见有较多的以黄铜矿、斑铜矿为主的含铜金属硫化物(图 7I-K)。黄铜矿多呈“病毒”状分布于闪锌矿中(图 7I),或以它形粒状结构分布于闪锌矿、方铅矿中(图 7J)。部分黄铜矿呈细长条带状间隔分布于斑铜矿中(图 7J)。斑铜矿主要呈它形粒状结构分布于闪锌矿、方铅矿中(图 7J-K),也可见少量斑铜矿呈乳浊状被包裹于闪锌矿内。黄铁矿也是角砾状矿化中较为常见的金属硫化物,主要为自形—半自形粒状结构(图 7I、K)。部分黄铁矿颗粒内可见白铁矿与之共生。除上述矿物之外,角砾状矿化中还赋存有少量的赤铁矿(图 7J)、铜蓝(图 7K)、蓝辉铜矿等。(2)碳酸盐阶段(II 阶段):该阶段主要发育菱铁矿、白云石和方解石等碳酸盐矿物,其中菱铁矿含量较高,可达 80%以上。白云石和方解石多被菱铁矿包裹,发育于菱铁矿的核部(图 7D-E)。角砾状矿化具体的矿物生成顺序如图 4 所示。需要说明的是,虽然图 4 中角砾状矿化列于断裂带矿化右侧,但目前没有证据表明这两种矿化形成的先后关系。除此之外,在角砾状矿化中并未发现有独立的银矿物,也未见到明显的围岩蚀变

现象。

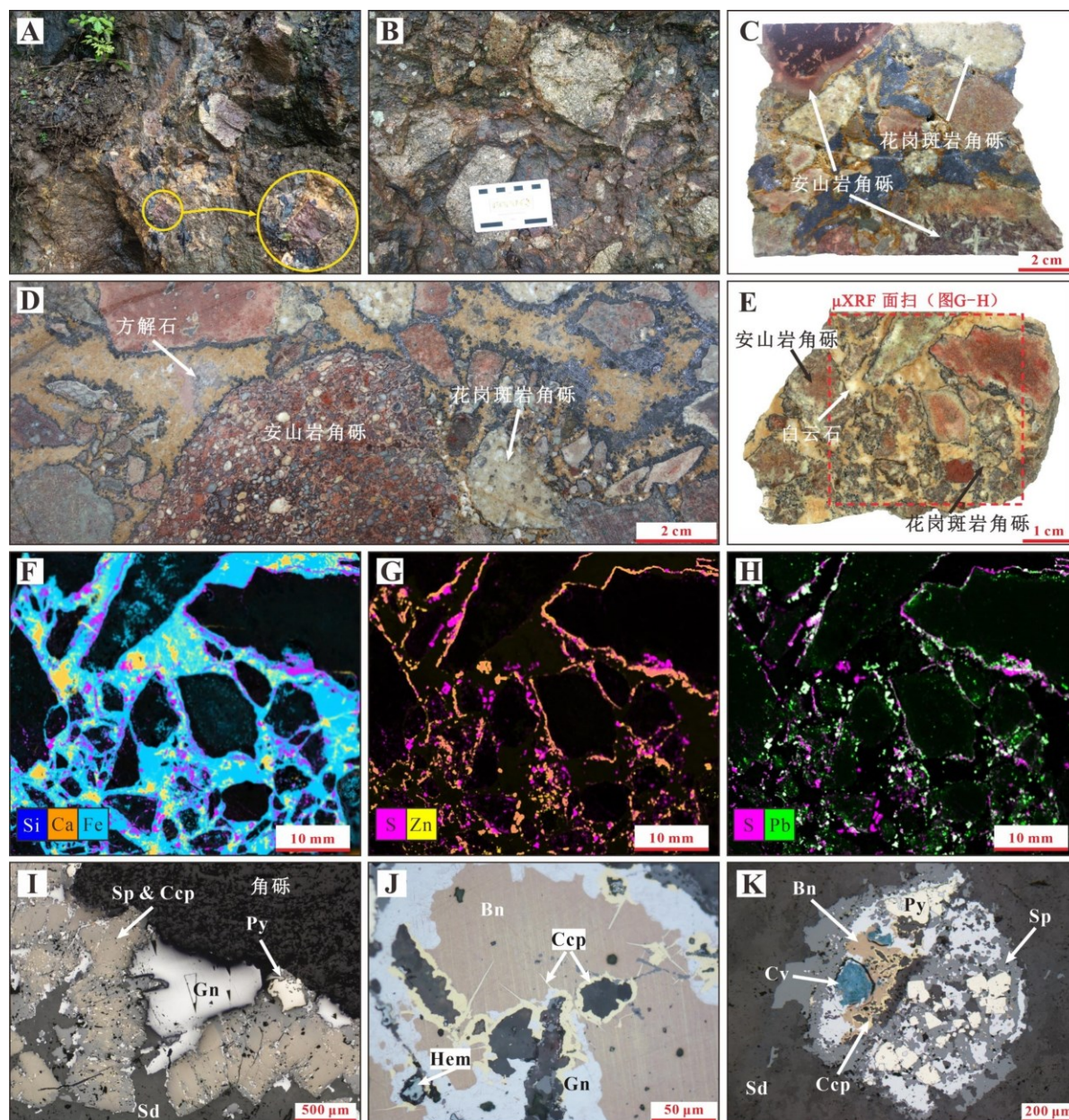


图 7 老里湾矿床角砾状矿化典型矿石矿物及镜下照片

Fig.7 Photographs of typical specimens and minerals and reflected-light photomicrographs from breccia-type mineralization in the Laoliwan deposit

A~B. 角砾状矿化野外照片；C~E. 角砾状矿化典型矿石；F~H. 典型手标本（图 7E）的 μ XRF 面扫；I~K. 镜下矿物照片。Sp. 闪锌矿；Ccp. 黄铜矿；Sd. 菱铁矿；Bn. 斑铜矿；Gn. 方铅矿；Hem. 赤铁矿；Cv. 铜蓝。

4 实验样品及分析方法

4.1 高性能微区 X 射线荧光光谱仪 (μ XRF) 元素面扫描

μ XRF 元素面扫描分析在中国地质大学（武汉）资源学院实验中心完成，使用的仪器为德国布鲁克（Bruker）公司生产的 M4 Tornado 型高性能微区 X 射线荧光光谱仪 (μ XRF)。该仪器配置 Rh 靶显微 X 射线光管和两个 30 mm^2 硅漂移探测器（SDD），能量分辨率 $<145\text{ eV}@300\text{ kcps}$ 。利用多导毛细管聚焦镜将 X 射线束斑聚焦在 $17\text{ }\mu\text{m}$ ，从而获得极佳的空间分辨率，进行高精度的点扫描、线

扫描、面扫描、相分析和定量分析。一次最大成像面积：200 mm×160 mm。测试样品在真空环境中进行，样品仓真空度为 20 mbar，实验过程中工作电压设定为 50kV，电流为 600 μ A，束斑直径为 17 μ m，测试步长为 20 μ m，单点停留时间为 5 ms/像素点。

4.2 流体包裹体显微测温

流体包裹体显微测温于中国地质大学（武汉）地质过程与成矿预测全国重点实验室流体包裹体实验室完成。所用显微镜为日本 Olympus 生产的 BX53 显微镜。显微冷热台为英国生产的 Linkam THMSG600 冷热测温台，所用测温台加热—制冷范围为-195 至 600 $^{\circ}$ C。通过测量合成流体包裹体中纯水（0 $^{\circ}$ C）、纯 CO₂（-56.6 $^{\circ}$ C）和重铬酸钾（398 $^{\circ}$ C）的熔点对加热台进行校准。流体包裹体在降温过程中相变温度的测量精度为 $\pm 0.1^{\circ}$ C，在 100 至 600 $^{\circ}$ C 范围内的测量精度约为 $\pm 2^{\circ}$ C。尽管在所选流体包裹体中可能会含有一些 CO₂，但是在实际测温过程中，并没有发现有液相 CO₂ 出现的现象，因此本文在显微测温中假定流体包裹体中的 CO₂ 含量较少可以忽略不计，流体包裹体的盐度根据冰点温度计算（Bodnar, 1993）。

4.3 LA-MC-ICP-MS 硫同位素和铅同位素

LA-MC-ICP-MS 硫同位素测试在中国地质大学（武汉）地质过程与成矿预测全国重点实验室完成。硫同位素分析使用 Nu Plasma II 多接收等离子体质谱仪（MC-ICP-MS）与 Resonetics-S155 型 193 nm ArF 激光剥蚀系统联用，对标准抛光薄片中的硫化物和硫酸盐矿物进行原位分析。实验过程中，激光束斑为 33 μ m，激光能量密度和剥蚀速率分别为 3 J/cm² 和 8 Hz，剥蚀时间设置不少于 40 秒。分析过程中采用标准-样品交替校正（SSB）方法来测定样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值。由于未观察到明显的基体效应，所有硫化物样品均采用 WS-1 进行校正（Zhu et al., 2017）。重晶石样品采用 YF-1 进行校正。详细的分析条件和方法参见 Zhu et al.（2016, 2017）。真实的硫同位素比值通过对两个相邻标准分析结果所计算的仪器质量偏差进行线性插值校正获得。本研究中外精度为 0.4‰（2SD），长期实验结果显示 $\delta^{34}\text{S}$ 的外部精度为 0.15 ~ 0.45‰（2SD），分析准确度为 0.15‰。

LA-MC-ICP-MS 原位硫化物铅同位素测试在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。激光剥蚀系统为 Geolas HD（Coherent，德国），MC-ICP-MS 为 Neptune Plus（Thermo Fisher Scientific，德国）。激光剥蚀系统使用氦气作为载气。分析采用单点模式，激光的束斑大小和剥蚀频率根据样品的 Pb 信号强度调节，一般为 44-90 μ m 和 4-10 Hz。激光能量密度固定在~5.0 J/cm²。采用两个硫化物标样 MASS-1（USGS 标样）和 Sph-HYLM（闪锌矿，实验室内部标样）确定 Tl 和 Pb 的质量分馏关系，得到一个优化的且基体匹配的 ²⁰⁵Tl/²⁰³Tl 比值对硫化物样品 Pb 同位素进行校正分析。闪锌矿标样 Sph-HYLM 作为外标监控分析测试的精密度和准确度，²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb，²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 和 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 的长期测试准确度一般优于 $\pm 0.2\%$ ，外部精度优于 0.4‰（2 σ ）。详细的仪器操作条件和分析测试方法可以参考 Zhang et al.（2016）。全部分析数据采用专业同位素数据处理软件“Iso-Compass”进行数据处理（Zhang et al., 2020）。

4.4 同位素年代学

4.4.1 绢云母 LA-ICP-MS Rb-Sr 同位素定年

选取断裂带矿化中与闪锌矿、方铅矿、黄铁矿等金属硫化物共生的绢云母进行 LA-ICP-MS 原位

Rb-Sr 同位素定年（附图 2A-D），同时选取与闪锌矿、方铅矿、绢云母共生的少量磷灰石颗粒进行测试（附图 2E-H）。绢云母 LA-ICP-MS Rb-Sr 同位素定年测试在广州市拓岩检测技术有限公司完成。采用 NWR 193nm ArF 准分子激光烧蚀系统与 iCAP TQ 00108 多重四级杆质谱仪联用，在广州拓岩分析技术有限公司进行了绢云母的 Rb-Sr 原位测年。烧蚀在高纯度的 He 气体环境中进行，然后与 Ar 气体混合，然后将样品引入 ICP-MS 测试。反应气体 N₂O 用于抑制荷质比相同的元素干扰：N₂O 是一种高效的反应气体，能够与 Sr⁺ 反应生成 SrO⁺ 离子，但与 Rb⁺ 不反应。在烧蚀 BHVO-2G 和 Mica-Mg 的同时，采取增加反应池中 N₂O 的流速并监测 Sr⁺ 和 SrO⁺ 的灵敏度的方法来优化反应速率。在 25 ~ 27 % 的流量（0.25 ~ 0.27 ml·min⁻¹ 的 N₂O）下，SrO⁺ 信号在 Rb⁺ 信号中无显著损失而达到最大。在测量样品之前，将 N₂O 连接到 iCAP TQ 中的第 4 质量流量控制器，并以 25% 的流量（0.25 ml·min⁻¹ 的 N₂O）清洗管线 2 小时以保持稳定。这一过程冲洗气体杂质并使系统饱和，可最大限度地减少由于反应速率变化引起的漂移。然后通过线扫描方式烧蚀 NIST SRM 610（光斑尺寸 30 μm；脉冲重复频率 10 Hz；能量密度 ~ 3.5 J·cm⁻²）。每次分析包括 30 s 背景采集，120 s 烧蚀和 30 s 冲洗。停留时间为 50 ms，用于分析 Sr 的质量和数量偏移同位素（⁸⁶Sr, ⁸⁷Sr 和 ⁸⁸Sr, ⁸⁶Sr¹⁶O, ⁸⁷Sr¹⁶O 和 ⁸⁸Sr¹⁶O）和 ⁸⁵Rb。分析样品时典型的激光设置为光斑尺寸 110 μm、~3.5 J·cm⁻² 和 8 Hz 脉冲重复。详细的仪器和分析条件按照 Gorjovsky and Alard（2020）与 Wang et al.（2022）所描述的方法设置。原始数据离线导出，整个数据处理过程使用内部 Excel 宏程序进行。

4.4.2 含辉钼矿全岩 Re-Os 同位素定年

辉钼矿主要以浸染状集合体形式产出于断裂带矿化中的绢云母化花岗斑岩中（图 6A），交代相对较早形成的浸染状黄铁矿颗粒。由于辉钼矿颗粒较小且分散，不易于单矿物挑选，因此本文选取了 5 件含辉钼矿的样品进行 Re-Os 定年。实验前需将所选样品研磨至 100 ~ 200 目。后续实验于国家地质实验测试中心完成，具体过程如下：（1）样品溶解：将含辉钼矿全岩样品分别称量后置于 Carius 管底部，放入液氮和乙醇混合冷浴中冷冻至粘稠状。随后加入事先稀释好的准确称取的 ¹⁸⁵Re 和 ¹⁹⁰Os 混合标准溶液（3 mL 10 mol/L HCl），再加入 5 mL 6 mol/L HNO₃ 和 1 mL 30% H₂O₂。待样品冻实后，用火焰封管，在 220 °C 下加热 24 小时以完成样品溶解。溶解完成后全岩样品中可见白色不溶沉淀。

（2）Os 分离（蒸馏法）：将 Carius 管内溶液转入蒸馏瓶，连接蒸馏装置。用放置于冰水浴中的比色管（含 5 mL 超纯水）吸收蒸出的 OsO₄，微沸加热 30 分钟。所得水相可直接用于 ICP-MS 测定 Os 同位素比值。蒸馏残液保留用于后续 Re 分离。（3）Re 分离（丙酮萃取法）：将残液蒸干后，加入 10 mL 5 mol/L NaOH 溶液使介质碱化，再加入 10 mL 丙酮，振荡萃取 1 分钟并离心 10 分钟。取上层丙酮相于 Teflon 烧杯中，在 80 °C 下蒸干，最终用 Milli-Q 水定容至 30 mL 供后续测量。（4）使用 ICP-MS 测定同位素比值。通过 ¹⁸⁷Re/¹⁸⁵Re 计算 Re 含量，¹⁸⁷Os/¹⁹⁰Os 与 ¹⁹²Os/¹⁹⁰Os 计算 Os 含量，并根据 ¹⁸⁷Re/¹⁸⁷Os 比值计算含辉钼矿全岩的 Re-Os 等时线年龄（刘舒波等，2012；曲焕春等，2015）。

5 分析结果

5.1 流体包裹体分析结果

5.1.1 流体包裹体岩相学

为了揭示老里湾矿床不同矿化类型的成矿流体特征，本次分析对断裂带矿化中菱铁矿—黄铁矿

阶段（II 阶段）中的菱铁矿，石英—多金属硫化物阶段（III 阶段）中的闪锌矿，方解石—石英阶段（IV 阶段）中的方解石，以及角砾状矿化中多金属硫化物阶段（I 阶段）的闪锌矿进行流体包裹体研究。

断裂带矿化 II 阶段中菱铁矿内的流体包裹体主要为富液两相包裹体，另可见少量纯液相流体包裹体。菱铁矿中的流体包裹体以负晶形、多边形、不规则状为主（图 8A-B），长轴一般为 $4\sim 20\ \mu\text{m}$ 不等。富液两相包裹体中气相部分在室温下约占总体积的 $5\sim 30\%$ 。III 阶段中由深到浅不同颜色的闪锌矿内均赋存有流体包裹体，且其中的流体包裹体同样以富液两相包裹体为主，形态主要呈现为负晶形、长条状、浑圆状、不规则状等，长轴大小一般为 $5\sim 20\ \mu\text{m}$ ，最大可达 $50\ \mu\text{m}$ （图 8C-F）。该阶段内闪锌矿中流体包裹体的分布和形态受限于闪锌矿的生长环带或解理，表明这些流体包裹体为原生或假次生成因（图 8D-E）。IV 阶段中方解石内的流体包裹体也以富液两相包裹体为主，其形态主要为多边形、负晶形，长轴大小一般为 $6\sim 50\ \mu\text{m}$ （图 8G）。方解石中的流体包裹体多呈独立分布，而不是以流体包裹体群的形式存在。

由于角砾状矿化 I 阶段中的闪锌矿多赋存有黄铜矿、斑铜矿等细小的矿物包裹体，因此仅在部分较为纯净的闪锌矿中可以观察到流体包裹体（图 8H-I）。角砾状矿化闪锌矿中的流体包裹体主要为富液两相包裹体，寄主闪锌矿颜色主要为橙黄—黄白色。流体包裹体形态主要为负晶形、四边行、浑圆状等，长轴大小多介于 $4\sim 20\ \mu\text{m}$ 。

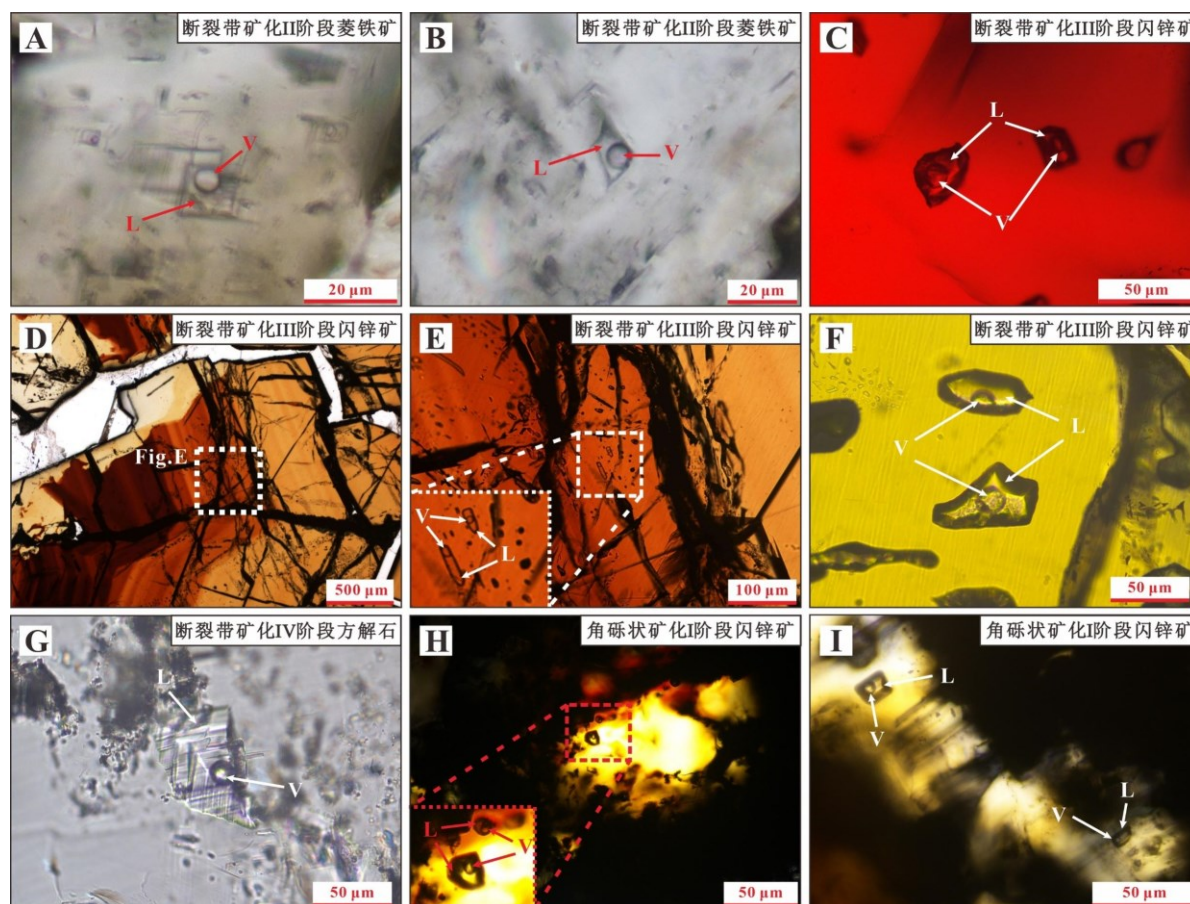


图 8 断裂带矿化及角砾状矿化不同矿物中流体包裹体显微照片

Fig.8 Photomicrographs of fluid inclusions in different minerals from fracture-zone type mineralization and breccia-type

A~B. 断裂带矿化菱铁矿中的流体包裹体；C~F. 断裂带矿化不同颜色闪锌矿中的流体包裹体；G. 断裂带矿化方解石中的流体包裹体；H~I. 角砾状矿化闪锌矿中的流体包裹体。V：气相；L：液相

5.1.2 流体包裹体显微测温

本次实验选取原生及假次生流体包裹体，除断裂带矿化 IV 阶段中的方解石外，其余矿物中的流体包裹体按照流体包裹体组合（FIA）进行显微测温。一个流体包裹体组合指同时被捕获的一组流体包裹体，其同时性根据岩相学特征进行判断。通过测试流体包裹体组合获得的均一温度、盐度等数值以平均值用于统计和分析。方解石中的流体包裹体以单个包裹体进行显微测温。不同矿物中的流体包裹体的均一温度和盐度的测试结果见图 9 和附表 1。

显微测温结果显示，断裂带矿化 II 阶段中菱铁矿的 12 个流体包裹体组合的均一温度介于 209 ~ 272°C，平均值为 250°C；盐度介于 7.1 ~ 12.1 wt.% NaCl eqv.，平均值为 9.7 wt.% NaCl eqv.。III 阶段中闪锌矿的 6 个流体包裹体组合的均一温度介于 204 ~ 273°C，平均值为 240°C；盐度介于 4.2 ~ 9.5 wt.% NaCl eqv.，平均值为 6.8 wt.% NaCl eqv.。IV 阶段中方解石的 13 个流体包裹体的均一温度介于 103 ~ 163°C，平均值为 141°C；盐度的变化范围为 1.1 ~ 4.9 wt.% NaCl eqv.，平均值为 2.7 wt.% NaCl eqv.。角砾状矿化 I 阶段中闪锌矿的 8 个流体包裹体组合的均一温度介于 239 ~ 308°C，平均值为 279°C；盐度介于 6.7 ~ 11.4 wt.% NaCl eqv.，平均值为 9.0 wt.% NaCl eqv.。

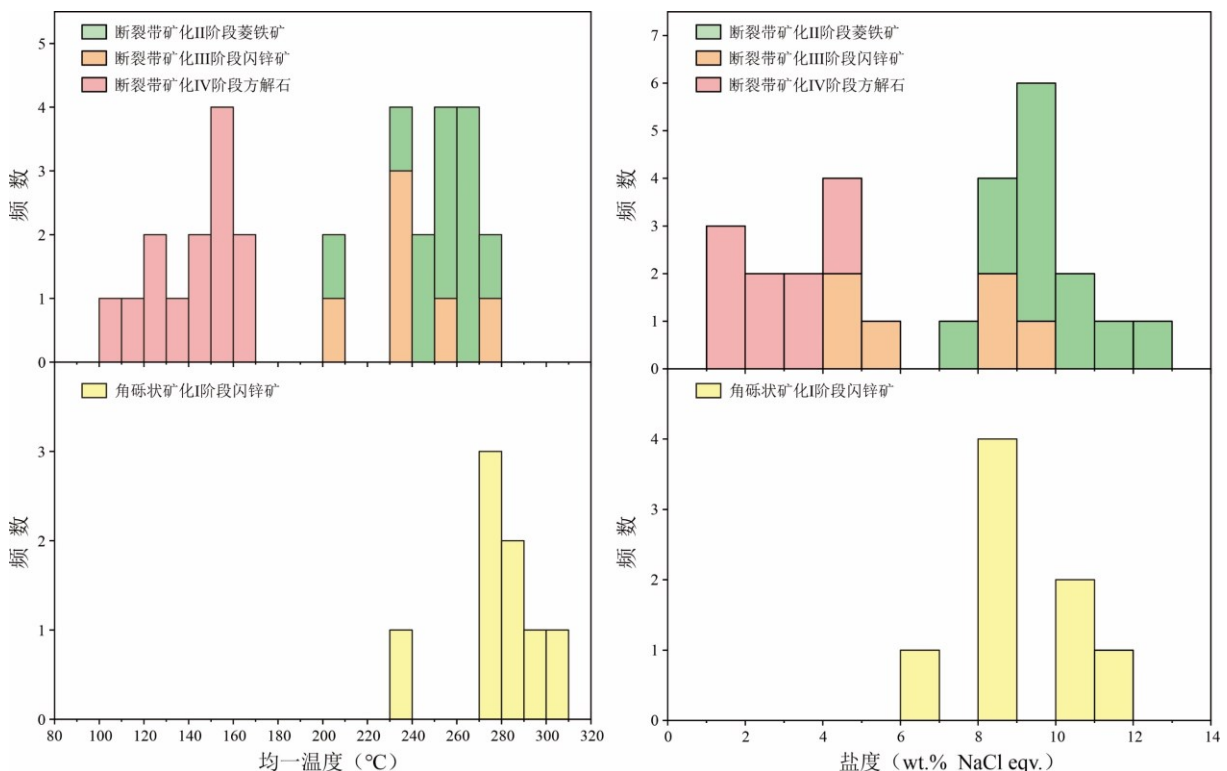


图9 流体包裹体显微测温结果柱状图

Fig.9 Histogram of microthermometric results of fluid inclusions

5.2 同位素特征

5.2.1 硫同位素

本文选取了接触带矿化中的黄铁矿颗粒，断裂带矿化石英—黄铁矿阶段（I 阶段）、菱铁矿—黄

铁矿阶段（II 阶段）和石英—多金属硫化物阶段（III 阶段）以及角砾状矿化多金属硫化物阶段（I 阶段）中的金属硫化物，以及断裂带矿化 III 阶段的重晶石进行硫同位素测试，分析矿物包括黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黝铜矿和重晶石。具体分析结果见图 10A 和附表 2。接触带矿化中 9 个黄铁矿分析点的 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 2.0~2.8‰，平均值为 2.3‰。断裂带矿化 I 阶段 9 个金属硫化物分析点的 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 1.7~5.1‰，平均值为 2.7‰。II 阶段 15 个金属硫化物分析点的 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 -0.2~2.5‰，平均值为 1.1‰。III 阶段 17 个金属硫化物分析点的 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 1.6~5.3‰，平均值为 3.1‰；9 个重晶石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值的范围为 10.9~12.2‰，平均值为 11.5‰。角砾状矿化 I 阶段的 18 个金属硫化物分析点的 $\delta^{34}\text{S}$ 值的范围为 0.4~2.7‰，平均值为 1.7‰。

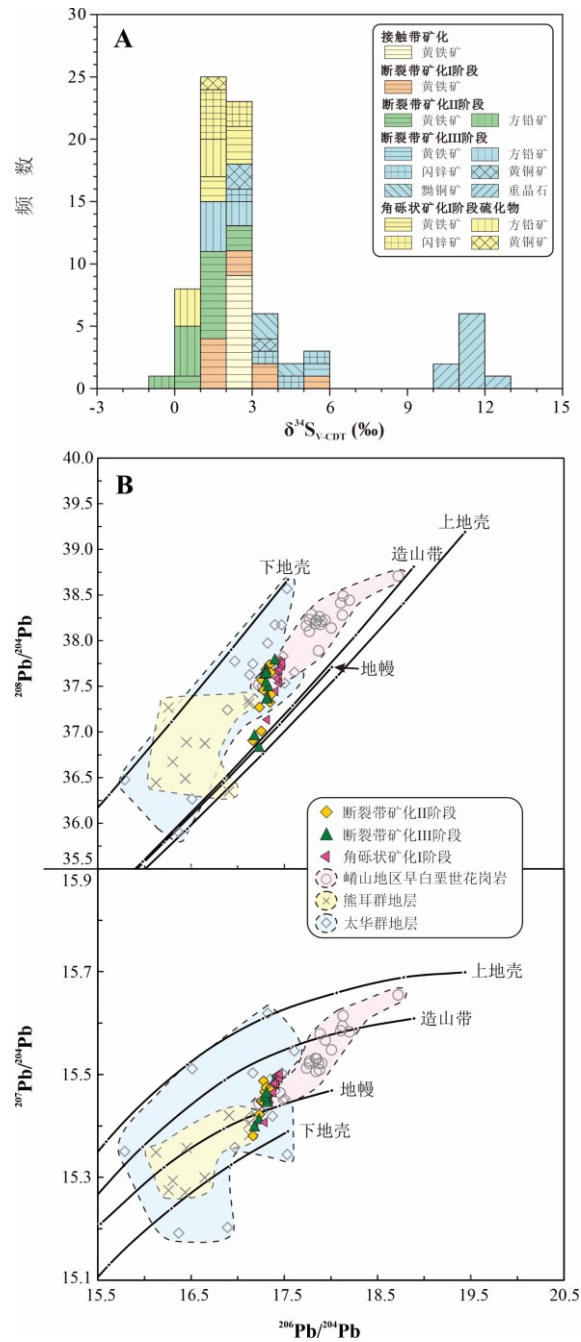


图 10 老里湾矿床不同矿化硫 (A)、铅 (B) 同位素结果

Fig.10 Sulfur (A) and lead (B) isotope compositions of different mineralization types at the Laoliwan deposit

5.2.2 铅同位素

本文铅同位素测试选取了断裂带矿化 II 阶段和 III 阶段中的方铅矿, 以及角砾状矿化 I 阶段中的方铅矿。具体分析结果见附表 3。断裂带矿化 II 阶段方铅矿 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的值范围分别为 17.181~17.400, 15.401~15.491, 36.840~37.801。III 阶段方铅矿 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的值范围分别为 17.163~17.361, 15.382~15.488, 36.906~37.737。角砾状矿化方铅矿 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的值范围分别为 17.291~17.456, 15.407~15.482, 37.132~37.776。测试结果表明断裂带矿化和角砾状矿化之间以及断裂带矿化不同成矿阶段的铅同位素组成分布相对集中, 无明显区别 (图 10B)。

5.3 绢云母原位 Rb-Sr 同位素定年

绢云母原位 Rb-Sr 同位素测试结果可以获得一条较好的等时线, 等时线年龄为 $127.1 \pm 2.5 \text{ Ma}$ ($n = 66$, $\text{MSWD} = 0.58$), 初始的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.7045 ± 0.0014 (图 11A)。绢云母 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值介于 9.93~101.32 之间, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 范围为 0.727~0.882。5 个磷灰石测点的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.0005~0.1823, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的结果为 0.702~0.704, 具体分析结果见附表 4。

5.4 含辉钼矿全岩 Re-Os 同位素定年

样品测试结果如附表 5 所示。样品 Re 含量为 2.361~17.91 ng/g, 平均值为 13.32 ng/g; 普通 Os 含量为 0.0010~0.0108 ng/g, 平均值为 0.0034 ng/g; ^{187}Re 含量为 1.1484~19.64 ng/g, 平均值为 8.374 ng/g; ^{187}Os 含量为 0.0034~0.0425 ng/g, 平均值为 0.0183 ng/g。模式年龄为 $129.6 \pm 1.5 \text{ Ma}$ 至 $135.4 \pm 1.4 \text{ Ma}$ 。使用 Isoplot 4.15 软件 (Ludwig, 2012) 对定年结果进行投图, 结果显示 5 件样品可以获得一条较好的等时线, 等时线年龄为 $129.5 \pm 2.8 \text{ Ma}$, 加权平均年龄为 $131.8 \pm 2.7 \text{ Ma}$ (图 11B)。

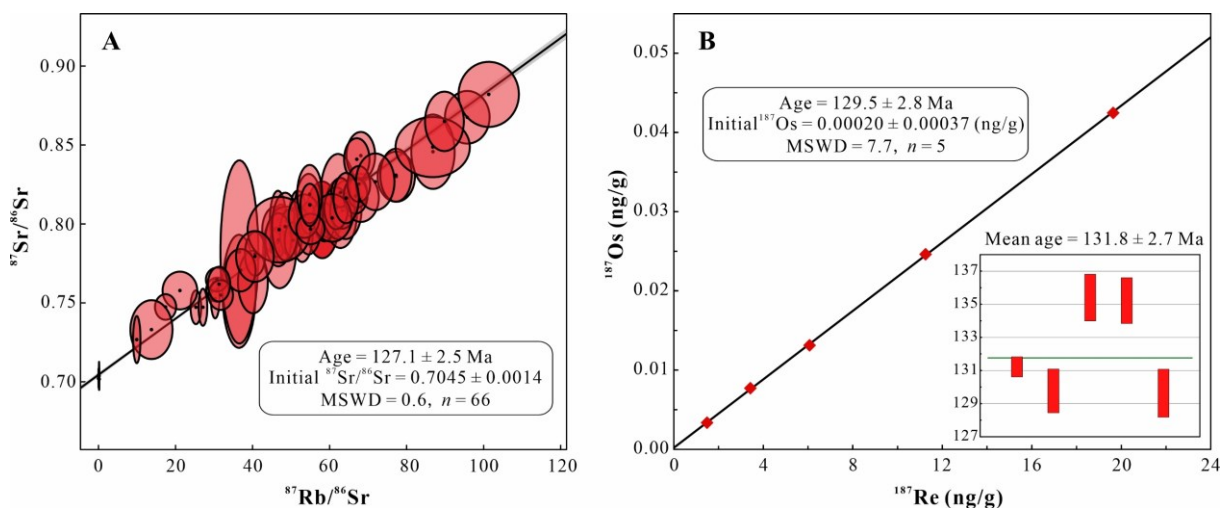


图 11 绢云母原位 Rb-Sr 等时线年龄 (A) 和含辉钼矿全岩 Re-Os 同位素定年结果 (B)

Fig.11. In-situ sericite Rb-Sr isochron age of (A) and whole-rock molybdenite Re-Os isotopic dating results (B)

6 讨论

6.1 成矿流体特征

为了探究老里湾矿床的成矿流体特征, 本文对断裂带矿化从早到晚不同成矿阶段的流体包裹体

和角砾状矿化中的流体包裹体进行岩相学观察及显微测温。镜下观察表明，老里湾矿床这两种矿化类型的流体包裹体均以富液两相为主，并且在实际测温过程中并未观察到有液相 CO_2 出现的现象，因此认为成矿流体主要为 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系。显微测温结果表明，断裂带矿化和角砾状矿化的成矿流体整体上均显示出中低温、中低盐度的特征，与斑岩型矿床高温、高盐度的流体特征区别明显。其中角砾状矿化的均一温度相对较高，平均值为 279°C 。断裂带矿化内，流体包裹体的均一温度和盐度的平均值从 II 阶段的 250°C ，9.7 wt.% NaCl eqv. 依次降低至 III 阶段的 240°C ，6.8 wt.% NaCl eqv. ，以及 IV 阶段的 141°C ，2.7 wt.% NaCl eqv. ，II 阶段和 III 阶段分别为成矿的早期阶段和银铅锌矿化的主要阶段，因此成矿流体的温度和盐度均有所降低，但幅度不大。IV 阶段时成矿流体中大量的银铅锌已沉淀成矿，因此从 III 阶段到 IV 阶段成矿流体温度和盐度的大幅降低意味着在成矿晚期可能有大气降水的混入，这与其他学者通过 H-O 同位素得到的结论一致 (Xue et al., 2025)。综上，断裂带矿化流体包裹体显微测温结果暗示成矿流体的降温和混合可能是金属矿物沉淀的主要机制。

6.2 成矿物质来源

黄铁矿是老里湾花岗斑岩与熊耳群安山岩接触带部位最为主要的金属硫化物，因此黄铁矿的硫同位素组成代表了形成接触带矿化的成矿热液中的硫同位素组成。黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 的平均值为 2.3‰，显示为岩浆热液来源。由于接触带矿化附近无任何银铅锌矿化，因此认为该矿化的形成是老里湾花岗斑岩体侵位于熊耳群地层时演化后期出溶的热液所导致的。

老里湾矿床断裂带矿化的 I 和 II 阶段未产出硫酸盐矿物，因此这两个阶段硫化物的硫同位素值（平均值分别为 2.7‰和 1.1‰）可以代表成矿流体中的总硫同位素组成。由于断裂带矿化 III 阶段中闪锌矿、方铅矿等硫化物与重晶石共生，并且通过硫酸盐-硫化物之间的硫同位素平衡常数计算出的温度远高于实际的成矿温度 ($>600^\circ\text{C}$)，说明该阶段硫化物和重晶石之间未达到硫同位素平衡。因此，该阶段硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 和重晶石的 $\delta^{34}\text{S}$ 均不能代表成矿流体中的总硫同位素组成，也无法通过硫同位素的平衡常数计算出总硫同位素组成。依据硫同位素分馏理论，III 阶段成矿流体中的总硫同位素组成遵循如下等式：

$$\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}} = \delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} \times R/(R+1) + \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}} \times 1/(R+1)$$

其中 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 代表总硫值， $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 为硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值， $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}}$ 为硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 值，R 为硫化物和硫酸盐的摩尔比值。该等式表明，断裂带矿化 III 阶段中成矿流体的总硫同位素组成应介于 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 和 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}}$ 之间。由于 III 阶段中金属硫化物大量产出，而重晶石仅在局部发育，说明 R 值较大。因此虽然该阶段的 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 应略大于 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ ，但 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 可近似代表该阶段的总硫同位素组成，即该阶段的硫同位素组成介于 1.6 ~ 5.3‰，平均值为 3.1‰。

角砾状矿化中没有发现有硫酸盐矿物与硫化物共生的现象，因此角砾状矿化硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值可代表成矿流体中的硫同位素组成。分析结果显示，角砾状矿化 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 0.4 ~ 2.7‰，平均值为 1.7‰。上述结果表明，断裂带矿化及角砾状矿化的硫同位素组成与岩浆热液端元的硫同位素结果一致 ($0 \pm 5\text{‰}$, Ohmoto and Goldhaber, 1997)。同时，矿床成矿温度明显高于细菌硫酸盐还原温度 ($<110^\circ\text{C}$, Jørgensen et al., 1992)，且矿区内无富含有机质的沉积地层发育，排除了硫来源于细菌硫酸盐还原作用与热化学硫酸盐还原作用的可能 (Ohmoto and Goldhaber, 1997)，因此硫同位素结果指示硫的来

源主要为岩浆热液。

铅同位素同样是示踪成矿物质来源的重要手段。测试结果显示,断裂带矿化 II 阶段和 III 阶段以及角砾状矿化的铅同位素组成分布相对集中,表明断裂带矿化内不同的成矿阶段及角砾状矿化的成矿物质来源类似。在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的图解中,上述铅同位素投图大多数位于下地壳铅至造山带铅之间,且跨越地幔铅,并且 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解中铅同位素投点集中在地幔铅附近,这些特征表明矿石的铅具有深部来源的特点,但有壳源物质的混染(图 10B)。铅同位素图解中还对比了太华群、熊耳群及崤山地区燕山期花岗岩体的铅同位素组成。结果表明老里湾矿床不同矿化形式的铅同位素投点分布在太华群投影的区域内,并与崤山地区燕山期花岗岩铅同位素分布的区域有部分重合(图 10B)。由此推测矿床成矿流体经过太华群变质基底时应受到了改造,且可能与崤山地区部分燕山期花岗岩体有相似的物质来源。

6.3 成矿时代

本文通过绢云母原位 Rb-Sr 同位素定年及含辉钼矿全岩 Re-Os 同位素定年来确定断裂带矿化的成矿年龄。绢云母 Rb-Sr 体系的封闭温度介于 $300\sim 500^{\circ}\text{C}$ (Chiaradia et al., 2013),其温度高于本文及前人获得的流体包裹体均一温度(常云真等, 2018),因此可以认为绢云母原位 Rb-Sr 定年结果可代表绢云母的形成年龄。断裂带矿化中的绢云母为热液蚀变的产物,且与方铅矿、闪锌矿、黄铁矿等金属硫化物共生,据此可认为绢云母原位 Rb-Sr 同位素定年得到的等时线年龄 $127.1\pm 2.5\text{ Ma}$ 可代表成矿年龄。含辉钼矿全岩 Re-Os 定年虽然测点较少,MSWD 值相对较大,但其等时线年龄 ($129.5\pm 2.8\text{ Ma}$) 与绢云母 Rb-Sr 等时线定年结果在误差范围内一致。因此,可以认为老里湾银铅锌矿床断裂带矿化的成矿年龄约为 128 Ma 。角砾状矿化虽然由于定年矿物的限制无法获取其成矿年龄,但是在很多矿床尤其是在斑岩型的成矿系统中,赋存于断裂带中的矿化与角砾状矿化均是同一成矿事件的产物。如在西藏的邦铺矿床中,其中的断裂带中的脉状矿化与角砾状矿化成矿年龄近似(分别为 $14.3\pm 5.5\text{ Ma}$ 和 $12.3\pm 4.6\text{ Ma}$),成因上均与深部的斑岩型 Mo-Cu 矿相关(Zuo et al., 2025)。西藏纳如松多铅锌矿床的隐爆角砾岩型矿化和赋存于断裂中的脉状矿化也被认为属于同一个与岩浆作用有关的铅锌成矿系统(刘英超等, 2015)。上文中的硫、铅同位素分析也表明老里湾矿床的断裂带矿化和角砾状矿化成矿物质来源相同,因此本文认为老里湾矿床两种矿化属于同一成矿作用的产物,成矿年龄均约为 128 Ma 。该成矿年龄在误差范围内与老里湾花岗斑岩成岩年龄基本一致($137\sim 129\text{ Ma}$, 王哲等, 2018; 李晓明等, 2019; 梁涛等, 2026),但由于老里湾矿床主要矿化受切穿花岗斑岩体的 F1 断裂构造带控制,成矿时代应略晚于成岩年龄。

6.4 矿床成因类型及找矿指示

由于赋存于斑岩体内的银铅锌矿床往往与岩浆活动具有密切的成因联系,成矿物质与流体来源也与岩浆热液相关,因而该类矿床一般被划分为斑岩型矿床或浅成低温热液矿床(e.g., 冷水坑矿床; 花脑特矿床)。虽然这两种类型的矿床均与岩浆作用相关,但斑岩体在成矿中的作用存在明显差别。“斑岩型矿床”意味着斑岩体为成矿母岩,通常是矿床的成矿金属和热液的直接来源(Sillitoe, 2010)。“浅成低温热液矿床”表明赋矿斑岩体可能仅与矿床存在空间关系,成矿母岩应位于矿床的深部或核部(Sillitoe and Hedenquist, 2005; 宋国学等, 2018)。因此,赋矿围岩为斑岩体这一特征并不能作为判

定矿床类型的关键要素，把握“斑岩型”和“浅成低温热液”这两种矿床类型的根本区别才是判定矿床类型的主要因素。

以老里湾矿床为例，对于斑岩型矿床而言，矿化应主要发育在成矿岩体与围岩的内外接触带中（Sillitoe, 2010）。然而，老里湾花岗斑岩体与熊耳群安山岩的接触部位仅发育有石英—黄铁矿细脉及方解石—黄铁矿细脉，并未见有银铅锌矿化。而以断裂带矿化为代表的主要矿体受控于 F1 断裂构造及其次级断裂，矿体产状也与断裂走向基本一致。此外，斑岩型矿床的围岩蚀变应为从成矿岩体中心向外表现出不同的蚀变分带（Sillitoe, 2010；杨航等，2023），而老里湾矿床明显呈现出从矿化中心向外蚀变程度逐渐减弱的现象，具体表现为靠近矿体的岩体部分呈现出硅化、绢云母化等蚀变特征，离矿体较远的岩体蚀变较弱，甚至部分岩体没有表现出明显的蚀变现象。从成矿流体角度来看，老里湾花岗斑岩体表现出流体沸腾的现象，即在石英斑晶中发现含子晶的包裹体与富气相的包裹体共生的现象（常云真等，2018）。然而，老里湾矿床中的流体包裹体则以富液两相为主，成矿流体表现为中低温、中低盐度的特征。因此，本文认为老里湾矿床虽然赋存于花岗斑岩体内，但并不是斑岩型矿床。虽然本文定年结果显示老里湾矿床成矿与花岗斑岩成岩年龄相近，但断裂带矿化矿体受控于断裂构造、角砾状矿化中多见有花岗斑岩角砾等现象均表明实际成矿年龄应小于成岩年龄。

结合矿床地质特征及实验分析，老里湾矿床成矿特征符合中硫型浅成低温热液矿床的成矿特征（表 1），该矿床成矿类型应为中硫型浅成低温热液矿床。具体表现为：（1）矿床以银铅锌矿化为主，矿化类型以断裂带矿化为主，另有少量角砾状矿化，断裂带矿化的矿体主要受断裂构造控制；（2）金属矿物呈现出以闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黝铜矿为典型特征的中硫化矿物共生组合；（3）碳酸盐矿物（菱铁矿、白云石、方解石等）以脉状或浸染状形式在矿床中广泛发育，另外矿床局部还产出有重晶石等硫酸盐矿物；（4）围岩蚀变以绢云母化、硅化、高岭土化为主，呈现出酸性蚀变的特征；（5）主成矿阶段的成矿流体温度介于 200~300℃之间，盐度主要范围为 4~12 wt.% NaCl eqv.，表现出浅成低温热液矿床的流体特征；（6）硫-铅同位素指示成矿物质来自深源岩浆。

表 1 中硫型浅成低温热液矿床、下峪矿田银铅锌矿床与老里湾矿床特征对比
Table 1 Comparison of metallogenic characteristics of intermediate-sulfidation epithermal deposits, Ag-Pb-Zn deposits in the Xiayu ore field and the Laoliwan deposit

	中硫型浅成低温热液矿床特征	下峪矿田中硫型浅成低温热液矿床地质特征	老里湾矿床地质特征
构造环境	挤压岛弧环境和陆内伸展环境	陆内伸展环境	陆内伸展环境
矿化类型	脉状、网脉状、角砾状、浸染状	脉状、网脉状	脉状、角砾状
矿石矿物	黄铁矿、含 Au、Ag 的硫化物和硫盐矿物、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黝铜矿—砷黝铜矿	黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、含银黝铜矿、硫锑铜银矿	黄铁矿、硫铜银矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黝铜矿
脉石矿物	石英、含锰碳酸盐、局部发育重晶石	石英、菱铁矿、铁白云石、方解石	石英、菱铁矿、局部发育重晶石

围岩蚀变	绢云母、伊利石、绿帘石、高岭土、碳酸盐	绢云母、伊利石、碳酸盐、高岭土、绿泥石	绢云母、高岭土、碳酸盐
主要成矿金属	Ag-Au, Zn, Pb, Cu	Ag, Au, Zn, Pb	Ag, Zn, Pb
硫化物含量	5 ~ 20 vol%	5 ~ 60 vol%	约 5 ~ 50 vol%
成矿流体温度	200 ~ 370°C	约 120 ~ 350°C	断裂带矿化主成矿阶段： 204 ~ 273°C； 角砾状矿化：239 ~ 308°C
成矿流体盐度	0 ~ 23 wt.% NaCl eqv.	约 1.5 ~ 18 wt.% NaCl eqv.	断裂带矿化主成矿阶段： 4.2 ~ 9.5 wt.% NaCl eqv.； 角砾状矿化：6.7 ~ 11.4 wt.% NaCl eqv.
成矿年龄	—	约 123 ~ 147 Ma	约 128Ma
参考文献	Hedenquist et al., 2000； Sillitoe and Hedenquist, 2005；宋国学等， 2018； Tian et al., 2023	Li et al., 2013； Tian et al., 2023；毛景文等，2006；高 建京等，2010	本文

除了老里湾矿床外，目前研究表明华北克拉通南缘在 145 ~ 115 Ma 存在一期广泛的银铅锌成矿作用，并且这一期成矿作用的时间与华北克拉通南缘早白垩世岩浆活动时间相吻合（Gao and Zhao, 2017；李占轺等，2025）。虽然部分矿床成因类型存在争议，但多数研究表明这些矿床均为浅成低温热液型铅锌多金属矿床，成矿均与早白垩世的岩浆活动相关（Cao et al., 2015；Zhao et al., 2018）。这些浅成低温热液型矿床一般位于成矿岩体的外围或浅部，如栾川地区的冷水北沟矿床（Cao et al., 2015；Li et al., 2023）；外方山地区的王坪西沟矿床（Jin et al., 2019）和老代仗沟矿床（Li et al., 2021）；熊耳山地区的沙沟矿床等（Tian et al., 2023）。其中熊耳山地区下峪矿田的沙沟、铁炉坪等银铅锌矿床按照其金属矿物的硫化状态及矿床地质特征已被划分为中硫型浅成低温热液矿床（Tian et al., 2023；Chang et al., 2024）。通过系统的地质特征对比可见，老里湾矿床与下峪矿田的中硫型浅成低温热液矿床在成矿构造背景、矿化特征、成矿流体特征及成矿年代等方面均存在显著共性（表 1）。因此本文认为老里湾矿床应是华北克拉通南缘早白垩世浅成低温热液银铅锌成矿作用在崞山地区的具体表现，成矿作用同样与区域内早白垩世的岩浆活动相关。

结合前文分析，老里湾矿床成矿模式如下：老里湾花岗斑岩于早白垩世侵位于熊耳群地层中，岩体侵位后期出溶的热液流体在花岗斑岩体与熊耳群地层的接触部位形成接触带矿化（图 12A）。而后岩体被矿区内的 F1 断裂切穿，来源于深部岩浆作用形成的成矿流体沿着断裂上升到地表浅部，由于温度、压力的降低以及大气降水的混入等因素，成矿元素在地表浅部沉淀，形成断裂带矿化，并在矿体周围形成相应的围岩蚀变（图 12B）。与断裂带矿化形成相近时间，在老里湾岩体西部、南部形成数个爆破角砾岩体，其中部分角砾岩体中铅、锌、银等金属元素的含量达到工业或边界品位，形成角砾状矿化（图 12C）。矿化形成后可能由于风化剥蚀作用，花岗斑岩体和矿体部分出露地表，

并且在地表可见有褐铁矿化等氧化蚀变（图 12D）。综上所述，对于老里湾矿床而言，老里湾花岗斑岩体仅与矿床存在空间关系，并非成矿母岩，形成该矿床的岩体应位于深部。换言之，老里湾矿床的断裂带矿化和角砾状矿化，以及老里湾花岗斑岩体均可能是深部岩体的产物。结合斑岩型成矿系统理论以及近年来发表的物化探数据，老里湾矿床的深部具有较大的寻找斑岩型矿床的潜力（林成贵等，2020；贾慧敏等，2024）。

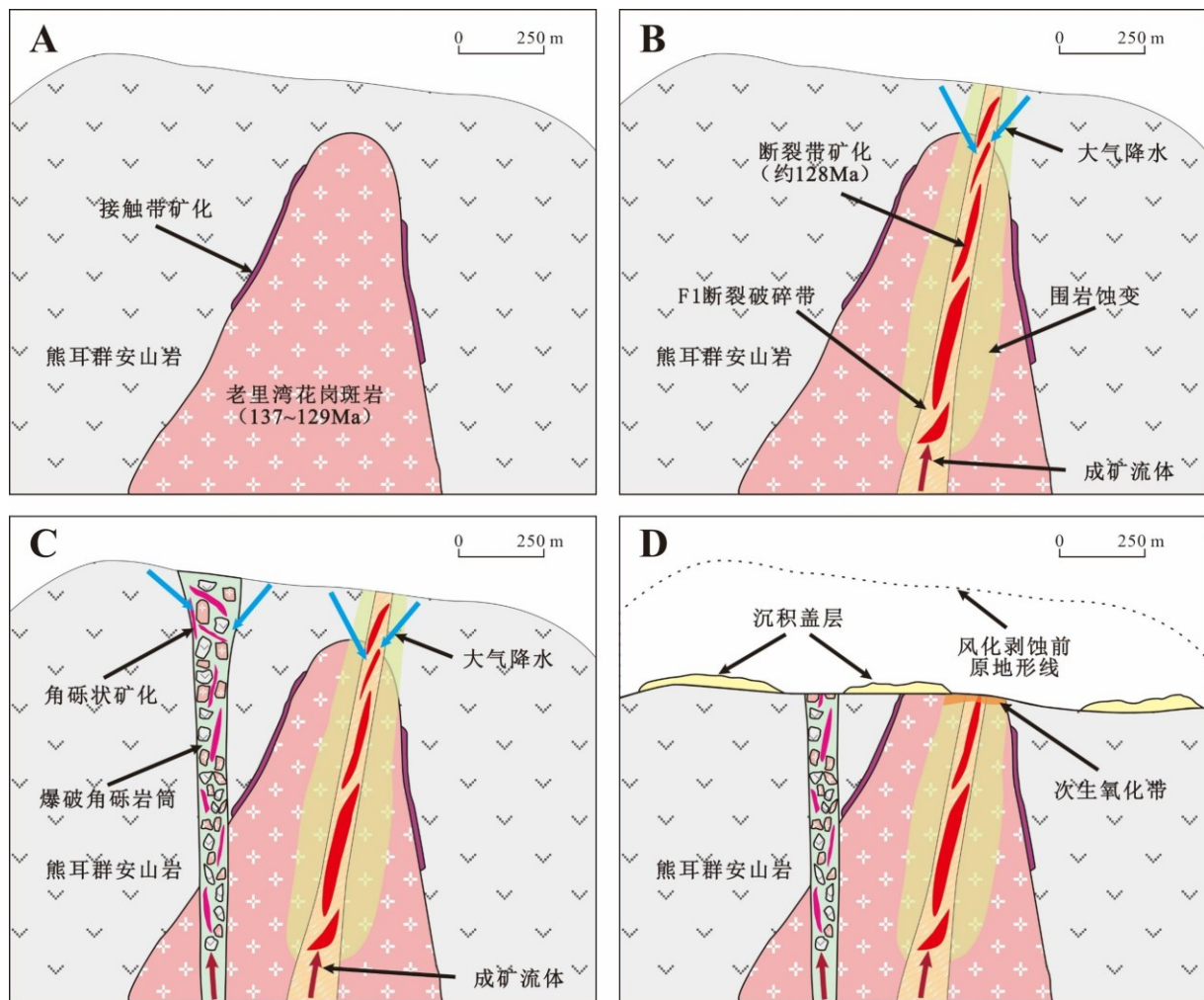


图 12 崂山老里湾矿床成矿模式图

Fig.12. A proposed metallogenic model of the Laoliwan deposit in the Xiaoshan district

A. 老里湾花岗斑岩侵位于熊耳群安山岩后形成接触带矿化；B. 成矿流体沿着断裂带上升在地表浅部形成断裂带矿化；C. 与断裂带矿化形成的同时，爆破角砾岩筒中形成角砾状矿化；D. 矿化形成后的风化剥蚀现象

7 结论

(1) 赋存于斑岩体中的银铅锌矿床类型主要为斑岩型矿床或浅成低温热液矿床，但赋矿围岩为斑岩体这一特征并不能作为判定矿床类型的关键要素。

(2) 老里湾银铅锌矿床以断裂带矿化为主，其次可见少量角砾状矿化。断裂带矿化矿体主要赋存于老里湾花岗斑岩中，并受断裂构造控制。角砾状矿化中角砾的岩性主要为花岗斑岩及安山岩，

胶结物为以菱铁矿为主的碳酸盐矿物。

(3) 老里湾矿床断裂带矿化和角砾状矿化的成矿物质来源和成矿流体特征类似。硫-铅同位素测试结果表明这两种矿化成矿物质均来自深部的岩浆热液。流体包裹体测试结果表明断裂带矿化和角砾状矿化成矿流体均为 NaCl-H₂O 体系, 成矿流体表现出中低温、中低盐度的特征。

(4) 断裂带矿化绢云母原位 Rb-Sr 同位素等时线年龄和含辉钼矿全岩 Re-Os 同位素等时线年龄分别为 127.1±2.5 Ma 和 129.5±2.8 Ma, 指示矿床成矿年龄约为 128Ma。

(5) 老里湾银铅锌矿床应为中硫型浅成低温热液矿床, 成矿作用与早白垩世的岩浆活动密切相关。老里湾花岗斑岩并不是成矿母岩, 该矿床也并非斑岩型矿床。形成该矿床的岩体应位于深部, 并且深部有寻找斑岩型矿床的潜力。

致谢: 对老里湾矿床开展野外地质调查工作中得到了河南省第一地质矿产调查院有限公司李红松教授级高工、梁新辉高级工程师的帮助, 中国地质大学(武汉) 昌佳教授和俎波副研究员分别指导了流体包裹体显微测温和 μ XRF 实验分析工作, 广州市拓岩检测技术有限公司初高彬博士指导了绢云母 LA-ICP-MS Rb-Sr 同位素定年工作, 编委和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!

References

- Bodnar, R. J., 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683-684. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90378-A](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90378-A)
- Cao, H. W., Zhang, S. T., Santosh, M., et al., 2015. The Luanchuan Mo-W-Pb-Zn-Ag Magmatic-hydrothermal System in the East Qinling Metallogenic Belt, China: Constrains on Metallogenesis from C-H-O-S-Pb Isotope Compositions and Rb-Sr Isochron Ages. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 751-780. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.06.005>
- Chang, C., Xiao, K., Feng, G., et al., 2024. Reactive Transport Numerical Modeling of Intermediate Sulfidation Epithermal deposit: A case study of Haopinggou Ag-Au-Pb-Zn Deposit, Henan Province, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 263: 107500. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107500>
- Chang, Y., Pei, H., Fan, H., et al., 2018. Fluid Inclusion Study and Isotopic Characteristics of Laoliwan Ag-Pb-Zn Deposit in Western Henan Province. *Mineral Deposits*, 37(02): 246-268. <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2018.02.003> (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y., Sui, Y., Pirajno, F., 2003. Exclusive Evidences for CMF Model and a Case of Orogenic Silver Deposits: Isotope Geochemistry of the Tieluping Silver Deposit, East Qinling Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 551-568. (in Chinese with English abstract).
- Chiaradia, M., Schaltegger, U., Spikings, R., et al., 2013. How Accurately Can We Date the Duration of Magmatic-Hydrothermal Events in Porphyry Systems?—An Invited Paper. *Economic Geology*, 108(4): 565-584. <https://doi.org/10.2113/econgeo.108.4.565>
- Ding, P., Hu, Y., Liu, Y., et al., 2020. Discovery and Prospecting Significance of Explosive Breccia Type Mineralization in Laoliwan Ag-Pb-Zn Mining Area, Western Henan Province. *World Geology*, 39(2): 322-331. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-5589.2020.02.007> (in Chinese with English abstract).
- Gao, J., Mao J., Ye, H., et al., 2010. Geology and Ore-forming Fluid of Silver-lead-zinc Lode Deposit of Shagou, Western Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 740-756. (in Chinese with English abstract).

- Gao, X. and Zhao, T., 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>
- Gorojovsky, L. and Alard, O., 2020. Optimisation of Laser and Mass Spectrometer Parameters for the In Situ Analysis of Rb/Sr Ratios by LA-ICP-MS/MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 35(10): 2322-2336. <https://doi.org/10.1039/D0JA00308E>
- Graybeal, F. T. and Vikre, P. G., 2010. A Review of Silver-rich Mineral Deposits and Their Metallogeny. In: Goldfarb R. J., Marsh E. E., Monecke T., eds., *The Challenge of Finding New Mineral Resources: Global Metallogeny, Innovative Exploration, and New Discoveries*, Society of Economic Geologists, 15 (1): 85-117. <https://doi.org/10.5382/SP.15.1.07>
- Hedenquist, J. W., Arribas R., A., Gonzalez-Urien, E., 2000. Exploration for Epithermal Gold Deposits. In: Hagemann S. G., Brown P. E., eds. *Gold in 2000*, Society of Economic Geologists, 13: 245-277. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.07>
- Hu, H., Li, J., Deng, X., 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(06): 979-1001. <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2011.06.002> (in Chinese with English abstract).
- Hui, K., Qin, K., Han, R., et al., 2021. Magmatic-hydrothermal Silver Deposits, Argentiferous Provinces and the Main Controlling Factors of Formation. *Acta Petrologica Sinica*, 37(8): 2502-2520. <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2021.08.15> (in Chinese with English abstract).
- Jia, H., Zhou, X., Wang, X., et al., 2024. Three-dimensional Visualization and Deep Prospecting Prediction of the Silver Polymetallic Ore Concentration Area in the Eastern Xiaoshan, Henan Province. *Mineral Exploration*, 15(02): 292-302. <https://doi.org/10.20008/j.kckc.202402012> (in Chinese with English abstract).
- Jian, X., Peng, Y., Li, H., et al., 2018. Geological Characteristics and Prospecting Direction of Laoliwan Silver Deposit in Luoning County and Zhongying Lead Deposit in Song County in Western Henan Province. *Modern Mining*, 34(01): 1-9. (in Chinese with English abstract).
- Jiang, B., Wang, D. H., Chen, Y. C., et al., 2022. Classification, Metallogenesis and Exploration of Silver Deposits in Daxing'anling of Inner Mongolia and its Adjacent Areas. *China Geology*, 5(4): 595-613. <https://doi.org/10.31035/cg2022005>
- Jin, C., Chen, W. T., Gao, X. Y., et al., 2019. Origin of the Wangpingxigou Pb-Zn Deposit in East Qinling Orogenic Belt, China: Distal Response to the Giant Donggou porphyry Mo System? *Ore Geology Reviews*, 109: 101-116. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.04.005>
- Jørgensen, B. B., Isaksen, M. F., Jannasch, H. W., 1992. Bacterial Sulfate Reduction Above 100°C in Deep-Sea Hydrothermal Vent Sediments. *Science*, 258(5089): 1756-1757. <https://doi.org/10.1126/science.258.5089.1756>
- Li, H., Liang, X., Xiong, S., 2016. The Ore-controlling Factors and Characteristics of the Laoliwan Ag Deposit in Henan Province. *Nonferrous Metals Abstract*, 31(01): 42-43. <https://doi.org/10.19534/j.cnki.zyxxycg.2016.01.023> (in Chinese).
- Li, L., Sun, W., Meng, X., 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(08): 2635-2652. (in Chinese with English abstract).
- Li, M., Huang, C., Fan, G., 2016. Ore Fabric Characteristics and Silver Occurrence State of the Laoliwan Porphyry Silver Deposit. *Modern Mining*, 32(09): 141-144. (in Chinese with English abstract).
- Li, S., Hart, S. R., Zheng, S., 1989. Timing of Collision between the North and South China Blocks—The Sm-Nd

- Isotopic Age Evidence. *Science in China Series B-Chemistry, Life Sciences & Earth Sciences (in Chinese)*, 19(3): 312-319. (in Chinese).
- Li, X., Li, Z., Xiong, S., et al., 2019. 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. *Journal of Earth Science*, 44(01): 69-87. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.147> (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>
- Li, Z. K., Li, J. W., Zhao, X. F., et al., 2013. 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, Z. K., Wang, C., Wang, Z. Q., et al., 2023. A Giant Porphyry-skarn-epithermal Mo-W-Cu-Zn-Pb-Ag Metallogenic System in the Nannihu Ore Field, Southern North China Craton: Constraints from New Geochronological and Pyrite Geochemical Data. *Ore Geology Reviews*, 163: 105792. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105792>
- Li, Z., Hu, J., Zhang, J., et al., 2025. Distribution and Resources of Dispersed Metals in Pb-Zn Deposits of Qinling Orogenic Belt. *Earth Science*, 50(6): 2083-2106. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.157> (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Li, X., Jin, X., et al., 2021. Age and Genesis of the Laodaizhanggou Pb-Zn-Ag Deposit in the Fudian Ore Field, Southern North China Craton: Implications for Regional Mineral Prospecting. *Journal of Earth Science*, 32(1): 195-207. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1093-4>
- Liang, T., Lu, R., Liu, X., et al., 2026. Zircon age spectrum of the Laoliwan granitic porphyritic intrusive in the Xiao Mountain, western Henan Province: Indicator of magma/fluid mixing and activation under the background of regional lithosphere delamination. *Geological Bulletin of China*, 45(1): 190-208. (in Chinese with English abstract).
- Liang, X., Jiang, Z., Shao, A., et al., 2018. Geological Characteristics and Metallogenic Model of Laoliwan Rock Mass in Henan. *Mineral Resources and Geology*, 32(01): 90-96. (in Chinese with English abstract).
- Lin, C., Cheng, Z., Pang, Z., et al., 2020. Primary Halo Characteristics and Prediction of Deep Ore Body in the Laoliwan Ag-Pb-Zn Deposit, Henan Province. *Mineral Exploration*, 11(01): 53-64. (in Chinese with English abstract).
- Liu, S., Li, C., Cen, K., et al., 2012. Re-Os Dating for Molybdenite-bearing Rock Samples: Application in Dazhuangke Molybdenum Deposit in Beijing. *Geoscience*, 26(02): 254-260. (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Ji, X., Hou, Z., et al., 2015. The Establishment of an Independent Pb-Zn Mineralization System related to Magmatism: A Case Study of the Narusongduo Pb-Zn Deposit in Tibet. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(04): 539-556. (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Liu, Q., Wang, Y., 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(04): 364-370. (in Chinese with English abstract).
- Lu, R., Liang, T., Lu, 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(03): 756-772. (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 2012. User's Manual for Isoplot Version 3.75—4.15: A Geochronological Toolkit for Microsoft

Excel. *Berkeley Geochronological Center Special Publication*: 5.

- 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(04): 359-368. <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2006.04.002> (in Chinese with English abstract).
- Meng, X., Hou, Z., Dong, G., 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).
- Ohmoto, H. and Goldhaber, M. B., 1997. Sulfur and carbon isotopes. In: Barnes H. L., ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits (3rd ed.)*. Wiley, New York, 517-611.
- Qi, N., Chen, Y., Wang, P., et al., 2019. Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of Houhe Granite in the Xiaoshan Area, Southern North China Craton and their Implication for Regional Metallogenic Potential. *Earth Science Frontiers*, 26(05): 206-221. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2019.9.17> (in Chinese with English abstract).
- Qu, H., Zhou, L., Yang, Z., 2015. Dating of Molybdenite-bearing Rock in the Zhushahong Deposit of Dexing and its Geological Significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(04): 517-525. (in Chinese with English abstract).
- Qin, K., Han, R., Hui, K., et al., 2025. Types, Spatial-temporal Distribution and Exploration Potential of Silver Deposits in China. *Acta Petrologica Sinica*, 41(2): 383-415. <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2025.02.03> (in Chinese with English abstract).
- Sillitoe, R. H., 2010. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105(1): 3-41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Sillitoe, R. H. and Hedenquist, J. W., 2005. Linkages between Volcanotectonic Settings, Ore-fluid Compositions, and Epithermal Precious Metal Deposits. In: Simmons S. F., Graham I., eds., *Volcanic, Geothermal, and Ore-Forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes within the Earth*, Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado, USA, 10: 315-343. <https://doi.org/10.5382/SP.10.16>
- Song, G., Qin, K., Li, G., et al., 2018. Basic Characteristics and Research Progresses of Intermediate Sulfidation Type Epithermal Gold Poly-metallic Deposits, and Prospects. *Acta Petrologica Sinica*, 34(03): 748-762. (in Chinese with English abstract).
- Sui, Y., Wang, H., Gao, X., et al., 2000. Study on Ore-forming Fluids of the Tieluping Silver Deposit in Henan Province and its Illustration for Magmatism-mineralization and Fluid Action Models in Collisional Orogeny. *Science in China Series D-Earth Sciences (in Chinese)*, 30(S1): 82-90. <https://doi.org/10.1360/zd2000-30-S1-82> (in Chinese with English abstract).
- Tian, Y., Mao, J., Jian, W., et al., 2023. Recognition of the Xiayu Intermediate-Sulfidation Epithermal Ag-Pb-Zn-Au(-Cu) Mineralization in the East Qinling Polymetallic Ore Belt, China: Constraints from Geology and Geochronology. *Ore Geology Reviews*, 156: 105398. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105398>
- Wang, C., Alard, O., Lai, Y. J., et al., 2022. Advances in In-Situ Rb-Sr Dating using LA-ICP-MS/MS: Applications to Igneous Rocks of all Ages and to the Identification of Unrecognized Metamorphic Events. *Chemical Geology*, 610: 121073. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.121073>
- Wang, L., Wang, Q., Chang, Y., et al., 2017. Rock Mass Dating, Geochemical Characteristics and Metallogenic Role of Laoliwan Granite in Xiaoshan Area, West He'nan Province. *Geological Bulletin of China*, 36(7): 1242-1250. (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Wang K., Liu J., et al., 2026. Geological Characteristics and Mineralization of Silver-lead-zinc Polymetallic Deposits in the Southwestern Section of the Great Xing'an Range. *Earth Science Frontiers*,

- 33(03): 285-305. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2025.1.62> (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z., Chang, Y., Li, C., et al., 2018. Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of Laoliwan Intrusion in Eastern Xiaoshan, Henan Province. *Mineral Deposits*, 37(02): 269-289. <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2018.02.004> (in Chinese with English abstract).
- Xu, S., 2024. Exploration of the Geological Structural Evolution Process and Mineralization in the Xiaoshan Area. *Mineral Resources and Geology*, 38(05): 932-938. <https://doi.org/10.19856/j.cnki.issn.1001-5663.2024.05.010> (in Chinese with English abstract).
- Xu, J., Ma, C., Yin, S., et al., 2022. Geology, Mineralogy, and Isotopic Characteristics of the Zhonghe Ag-Pb-Zn Deposit, Western Henan Province, Central China. *Journal of Earth Science*, 33(1): 177-192. <https://doi.org/10.1007/s12583-021-1544-6>
- Xu, J., Zhang, Y., Li, K., et al., 2023. The Ore Genesis of the Shagou Ag-Pb-Zn Deposit in the Southern North China Craton: Constraints from He-Ar-Pb Isotopes and Trace Element Compositions of Sphalerite. *Ore Geology Reviews*, 163: 105765. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105765>
- Xue, J., Pang, Z., Chen, H., et al., 2025. Genesis of the Laoliwan Ag-Pb-Zn Deposit, Southern Margin of the North China Craton, China: Constrained by C-H-O-S-Pb Isotopes and Sulfide Rb-Sr Geochronology. *Minerals*, 15(11): 1122. <https://doi.org/10.3390/min15111122>
- Yang, H., Qin, K., Wu, P., et al., 2023. Tectonic Setting, Mineralization and Ore-controlling Factors of Porphyry Cu-Mo-Au Deposits. *Mineral Deposits*, 42(01): 128-156. <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2023.01.009> (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M., 2010. Tectonic Evolution and Metallogenesis of North China Craton. *Mineral Deposits*, 29(01): 24-36. <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2010.01.006> (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G., Meng, Q., Yu, Z., et al., 1996. Orogenic Process and Dynamic Characteristics of the Qinling Orogenic Belt. *Science in China Series D-Earth Sciences (in Chinese)*, 26(3): 193-200. <https://doi.org/10.1360/zd1996-26-3-193> (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G., Zhang, B., Yuan, X., et al., 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Science Press, Beijing. (in Chinese).
- Zhang, H., Wang, J., Wang, Y., et al., 2025. Geological Characteristics and Mineralization of Zhijiadi Pb-Zn-Ag Deposit, Shanxi Province, China. *Mineral Exploration*, 16(05): 1043-1053. <https://doi.org/10.20008/j.kckc.202505009> (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W., Hu, Z., Günther, D., et al., 2016. Direct Lead Isotope Analysis in Hg-rich Sulfides by LA-MC-ICP-MS with a Gas Exchange Device and Matrix-Matched Calibration. *Analytica Chimica Acta*, 948: 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2016.10.040>
- Zhang, W., Hu, Z., Liu, Y., 2020. Iso-Compass: New Freeware Software for Isotopic Data Reduction of LA-MC-ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 35(6): 1087-1096. <https://doi.org/10.1039/D0JA00084A>
- Zhang, Y., Zhang, H., Li P., et al., 2026. In Situ Trace Element Compositions of Sulfides in the Huanaote Ag-Pb-Zn Deposit in Inner Mongolia and their Geological Implications. *Earth Science Frontiers*, 26(03): 145-162. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2025.1.13> (in Chinese with English abstract).
- Zhao, T., Meng, L., Gao, X., et al., 2018. Late Mesozoic Felsic Magmatism and Mo-Au-Pb-Zn Mineralization in the Southern Margin of the North China Craton: A Review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 161: 103-121. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.04.020>
- Zhu, J., 2015. Geological characteristics of polymetallic mineralization and optimizing target areas in the Eastern Xiaoshan, Henan province (Dissertation). China University of Geosciences (Beijing), Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R., Chen, L., Wu, F., et al., 2011. Timing, Scale and Mechanism of the Destruction of the North China Craton.

- Science China Earth Sciences (in Chinese)*, 41(5): 583-592. <https://doi.org/10.1360/zd-2011-41-5-583> (in Chinese).
- Zhu, Z. Y., Cook, N. J., Yang, T., et al., 2016. Mapping of Sulfur Isotopes and Trace Elements in Sulfides by LA-(MC)-ICP-MS: Potential Analytical Problems, Improvements and Implications. *Minerals*, 6(4): 110. <https://doi.org/10.3390/min6040110>
- Zhu, Z. Y., Jiang, S. Y., Ciobanu, C. L., et al., 2017. Sulfur Isotope Fractionation in Pyrite during Laser Ablation: Implications for Laser Ablation Multiple Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Mapping. *Chemical Geology*, 450: 223-234. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.12.037>
- Zuo, J., Xie, G., Chang, Z., et al., 2026. Geology and Geochronology of the Bangpu Porphyry-skarn-epithermal Mo-Cu-Zn-Pb-Ag Deposit in the Gangdese Metallogenic Belt, Tibet. *Mineralium Deposita*, 61(1): 1-23. <https://doi.org/10.1007/s00126-025-01374-8>

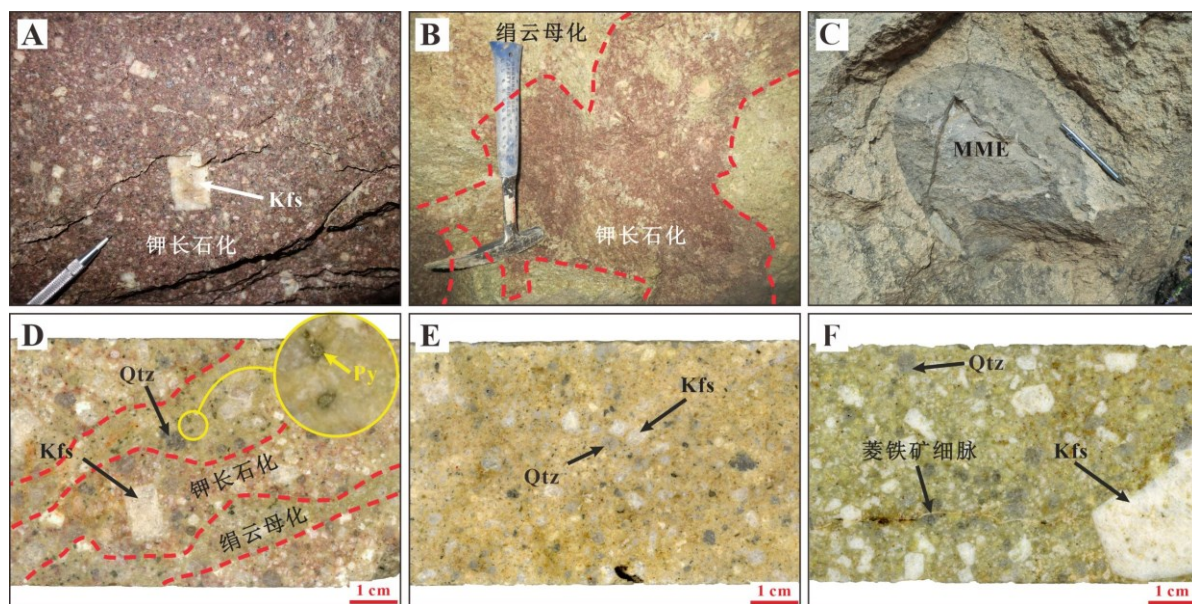
中文参考文献

- 常云真, 裴海洋, 范海洋, 等, 2018. 豫西老里湾银铅锌矿床流体包裹体和同位素特征及其地质意义. *矿床地质*, 37(02): 246-268. <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2018.02.003>
- 陈衍景, 隋颖慧, Pirajno, F., 2003. CMF模式的排他性依据和造山型银矿实例: 东秦岭铁炉坪银矿同位素地球化学. *岩石学报*, 19(3): 551-568.
- 翟明国, 2010. 华北克拉通的形成演化与成矿作用. *矿床地质*, 29(01): 24-36. <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2010.01.006>
- 丁培超, 胡亚净, 刘燕青, 等, 2020. 爆破角砾岩型矿化在豫西老里湾银铅锌矿区的发现及其找矿意义. *世界地质*, 39(2): 322-331. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-5589.2020.02.007>
- 高建京, 毛景文, 叶会寿, 等, 2010. 豫西沙沟脉状Ag-Pb-Zn矿床地质特征和成矿流体研究. *岩石学报*, 26(03): 740-756.
- 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(06): 979-1001. <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2011.06.002>
- 回凯旋, 秦克章, 韩日, 等, 2021. 岩浆热液型银矿床、银矿省及形成的控制因素. *岩石学报*, 37(8): 2502-2520. <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2021.08.15>
- 贾慧敏, 周学明, 王潇洒, 等, 2024. 河南省崤山东部银多金属矿集区深部三维可视化找矿预测. *矿产勘查*, 15(02): 292-302. <https://doi.org/10.20008/j.kckc.202402012>
- 简新玲, 彭翼, 李华, 等, 2018. 豫西洛宁县老里湾银矿和嵩县中营铅矿地质特征及找矿方向. *现代矿业*, 34(01): 1-9.
- 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(01): 42-43. <https://doi.org/10.19534/j.cnki.zyxygc.2016.01.023>
- 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(08): 2635-2652.
- 李铭, 黄诚, 樊光明, 2016. 老李湾斑岩型银矿床矿石组构特征与银赋存状态. *现代矿业*, 32(09): 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-钕同位素年龄证据. *中国科学(B辑:化学、生命科学、地学)*, 19(3): 312-319.
- 李晓明, 李占轲, 熊胜克, 等, 2019. 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. *地球科学*, 44(01): 69-87. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.147>
- 李占轲, 胡佳, 张君, 等, 2025. 秦岭造山带铅锌矿床中稀散金属分布规律与资源评价. *地球科学*, 50(06): 2083-2106. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.157>
- 梁涛, 卢仁, 刘小丽, 等, 2026. 豫西崤山老里湾花岗岩斑岩的锆石年龄谱: 岩石圈拆沉背景下岩浆/流体混合活化的指示. *地质通报*, 45(1): 190-208.

- 梁新辉, 蒋智宇, 邵爱东, 等, 2018. 河南老李湾岩体地质特征及成矿模式. 矿产与地质, 32(01): 90-96.
- 林成贵, 程志中, 庞振山, 等, 2020. 河南老里湾银铅锌矿床原生晕分带特征及深部矿体预测. 矿产勘查, 11(01): 53-64.
- 刘舒波, 李超, 岑况, 等, 2012. 含辉钼矿全岩样品Re-Os同位素定年研究:在北京大庄科钼矿床中的应用. 现代地质, 26(02): 254-260.
- 刘英超, 纪现华, 侯增谦, 等, 2015. 一个与岩浆作用有关的独立铅锌成矿系统的建立——以西藏纳如松多铅锌矿床为例. 岩石矿物学杂志, 34(04): 539-556.
- 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(04): 364-370.
- 卢仁, 梁涛, 卢欣祥, 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(03): 756-772.
- 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(04): 359-368. <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2006.04.002>
- 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.
- 齐楠, 陈衍景, 王玘, 等, 2019. 华北克拉通南缘崤山地区后河岩体锆石U-Pb年代学、地球化学特征及对区域成矿潜力的启示. 地学前缘, 26(05): 206-221. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2019.9.17>
- 秦克章, 韩日, 回凯旋, 等, 2025. 中国银矿床类型、时空分布与找矿远景. 岩石学报, 41(2): 383-415. <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2025.02.03>
- 曲焕春, 周利敏, 杨志明, 2015. 德兴朱砂红矿床含辉钼矿岩石样品Re-Os定年及地质意义. 岩石矿物学杂志, 34(04): 517-525.
- 宋国学, 秦克章, 李光明, 等, 2018. 中硫型浅成低温热液金多金属矿床基本特征、研究进展与展望. 岩石学报, 34(03): 748-762.
- 隋颖慧, 王海华, 高秀丽, 等, 2000. 河南铁炉坪银矿成矿流体研究及其对碰撞造山成岩成矿与流体作用模式例证. 中国科学(D辑:地球科学), 30(S1): 82-90. <https://doi.org/10.1360/zd2000-30-S1-82>
- 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.
- 王银宏, 王康, 刘家军, 等, 2026. 大兴安岭西南段银铅锌多金属矿床地质特征与成矿作用. 地学前缘, 33(03): 285-305. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2025.1.62>
- 王哲, 常云真, 李重阳, 等, 2018. 河南省崤山东部老里湾岩体年代学、地球化学及岩石成因. 矿床地质, 37(02): 269-289. <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2018.02.004>
- 徐书奎, 2024. 崤山地区地质构造演化过程与成矿作用探讨. 矿产与地质, 38(05): 932-938. <https://doi.org/10.19856/j.cnki.issn.1001-5663.2024.05.010>
- 杨航, 秦克章, 吴鹏, 等, 2023. 斑岩铜-钼-金矿床: 构造环境、成矿作用与控制因素. 矿床地质, 42(01): 128-156. <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2023.01.009>
- 张国伟, 孟庆任, 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:地球科学), 26(3): 193-200. <https://doi.org/10.1360/zd1996-26-3-193>
- 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.
- 张会琼, 王京彬, 王玉往, 等, 2025. 山西支家地银铅锌矿床地质特征与矿化分带. 矿产勘查, 16(05): 1043-1053. <https://doi.org/10.20008/j.kckc.202505009>
- 张翊卓, 张红雨, 李腾, 等, 2026. 内蒙古花脑特银铅锌矿床硫化物原位微区微量元素组成及对成矿作用的启示意义. 地学前缘, 33(03): 145-162. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2025.1.13>
- 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 (北京).

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: 地球科学, 41(5): 583-592. <https://doi.org/10.1360/zd-2011-41-5-583>

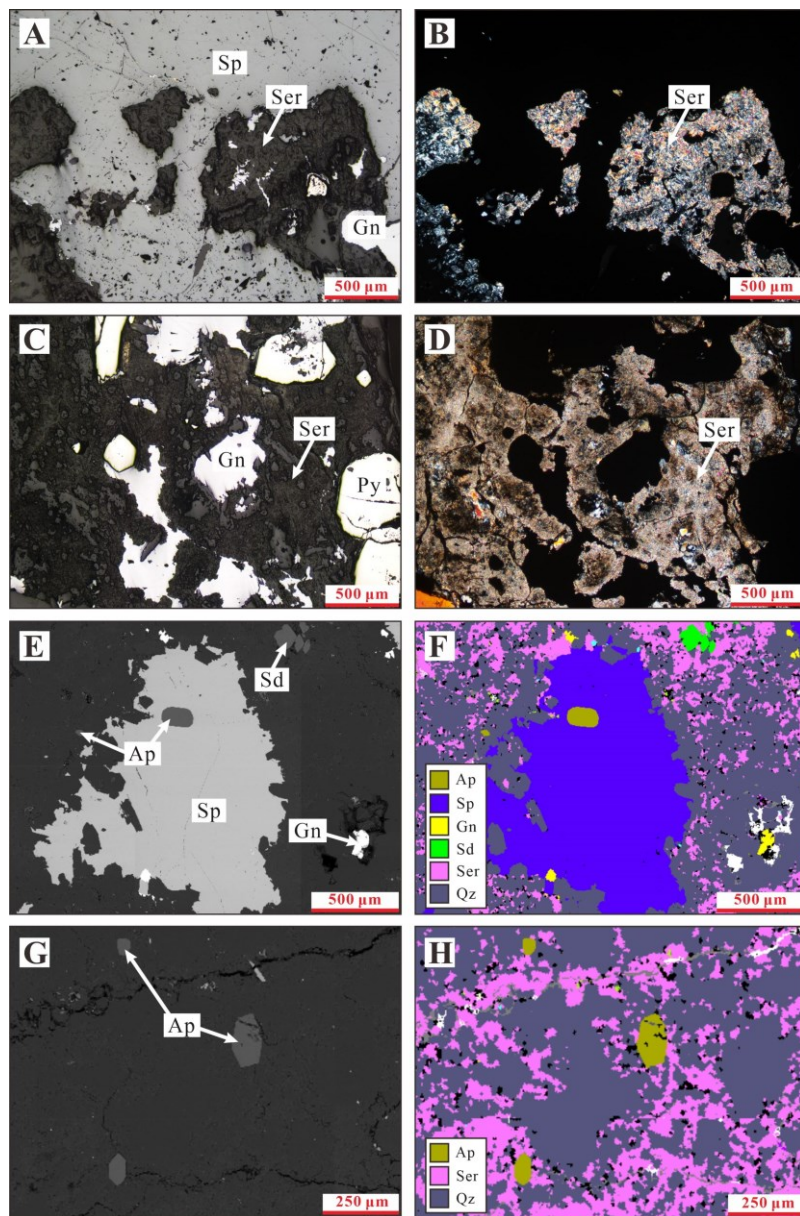
附图图名



附图 1 老里湾花岗斑岩岩相学特征

Appendix Fig. 1 Petrographic characteristics of the Laoliwan granite porphyry

A. 钾长石化花岗斑岩; B. 花岗斑岩中绢云母化蚀变交代早期钾长石化蚀变; C. 花岗斑岩 中的暗色包体; D. 花岗斑岩中的钾长石斑晶和石英斑晶; E. 花岗斑岩中绢云母化蚀变交代 早期钾长石化蚀变, 绢云母化蚀变中多分布有浸染状黄铁矿; F. 后期菱铁矿脉切穿花岗斑岩. Kfs. 钾长石; MME. 镁铁质暗色包体; Qtz. 石英; Py. 黄铁矿



附图 2 与铅锌矿化共生的绢云母镜下照片 (A-D) 以及和硫化物与绢云母共生的磷灰石背散射照片和对应的 TIMA 照片 (E-H)

Appendix Fig. 2 Photomicrographs of sericite associated with Pb-Zn mineralization (A-D), and BSE images and corresponding TIMA images of apatite intergrown with sulfides and sericite (E-H)

Sp. 闪锌矿; Ser. 绢云母; Gn. 方铅矿; Py. 黄铁矿; Ap. 磷灰石; Sd. 菱铁矿; Qz. 石英