

南秦岭郧西-旬阳地区铅锌矿床成因：原位 U-Pb 定年、S-Pb 同位素和闪锌矿微量元素的制约

廖旺^{1,2}, 杨良哲^{1,2*}, 赵璧^{1,2}, 李姜丽^{1,2}, 李乐^{1,2}, 刘述德^{1,2}

1. 湖北省地质科学研究所, 湖北武汉, 430034

1. Hubei Institute of Geosciences, Wuhan 430034, China

2. 资源与生态环境地质湖北省重点实验室, 湖北武汉, 430034

2. Hubei Key Laboratory of Resources and Eco-Environment Geology, Wuhan 430034, China

摘要: 为研究南秦岭震旦系-下古生界沉积地层中铅锌矿床的成因。本文对不同赋矿地层中的锡洞沟、银洞凹和关子沟矿床开展了矿床地质特征、碳酸盐 U-Pb 定年、闪锌矿微量元素和硫化物 S-Pb 同位素分析。本次研究获得银洞凹矿床与闪锌矿共生热液碳酸盐 U-Pb 年龄为 $456\pm 24\text{Ma}$, 与扬子北缘 MVT 矿床的成矿时代相近。锡洞沟矿床闪锌矿含有较高的 Ga 和 Cd, 银洞凹矿床闪锌矿含有较高的 Ge 和 Cd, 闪锌矿微量元素温度计指示两个矿床分别形成于约 218°C 和 137°C , 而关子沟矿床闪锌矿含有较高的 Fe 和 Co, 闪锌矿微量元素温度计指示其形成于较高的温度, 约为 291°C 。三个矿床硫化物具有富集重 S 同位素和高放射成因铅同位素特征, 指示成矿物质来源于震旦系-下古生界海相沉积岩。综合认为锡洞沟和银洞凹矿床为 MVT 矿床, 而关子沟矿床为 SEDEX 型矿床, 南秦岭郧西-旬阳地区铅锌矿床具有多成因的特点。

关键词: 南秦岭, 铅锌矿床, 矿床成因, 闪锌矿微量元素, 硫-铅同位素

中图分类号: P611

收稿日期: 2025-11-5

The origin of Pb-Zn deposits in Yunxi-Xunyang district, South Qinling: Constrains from *in situ* U-Pb dating, S-Pb isotopes and sphalerite trace elements

Abstract: In order to investigate the genesis of lead-zinc deposits hosted in the Sinian-Lower

基金项目: 湖北地质科技专项: 湖北郧西西部古生代铅锌多金属矿找矿潜力研究 (KJ2025-2)
作者简介: 廖旺 (1994-), 男, 博士, 工程师, 主要从事成矿理论与找矿勘查研究, ORCID: 0009-0001-1204-396X, E-mail: liao-wang@cug.edu.cn

*通讯作者: 杨良哲 (1981-), 男, 高级工程师, 主要从事成矿理论与找矿勘查研究, ORCID: 0009-0003-5790-5396, E-mail: Yangliangzhe@126.com

Paleozoic sedimentary strata of South Qinling, this study conducted deposit geology, carbonate U-Pb dating, sphalerite trace elemental analyses, and sulfides S-Pb isotopic analyses for the Xidonggou, Yindongao, and Guanzigou deposits hosted in different strata. The U-Pb age of carbonates from the Yindongao deposit was determined to be 456 ± 24 Ma, which is similar to the mineralization age of MVT deposits on the Northern margin of the Yangtze Block. Sphalerite from the Xidonggou deposit contains high Ge and Cd contents, sphalerite from the Yindongao deposit contains high Ge and Cd contents, the sphalerite trace element geothermometer indicates mineralization temperatures of approximately 218°C and 137°C , respectively. While sphalerite from the Guanzigou deposit contains high Fe and Co contents, the sphalerite trace element geothermometer indicates a mineralization temperature of approximately 291°C . The sulfides from the three deposits are characterized by enriched heavy sulfur isotopes and highly radiogenic lead isotopes, indicating that the ore-forming materials were derived from Sinian-Lower Paleozoic marine sedimentary rocks. Overall, it is concluded that the Xidonggou and Yindongao deposits are MVT deposits, while the Guanzigou deposit is a SEDEX deposit. The lead-zinc deposits in the Yunxi-Xunyang district of the South Qinling exhibit multi-genetic characteristics.

Key words: South Qinling, Pb-Zn deposit, Ore genesis, sphalerite trace elements, S-Pb isotopes

引言

南秦岭铅锌成矿带是我国重要的铅锌成矿带之一，自西向东划分为西成矿集区、凤太矿集区、山柞矿集区和镇旬矿集区，产出有厂坝-李家沟、郭家沟、八方山-三里河、邓家山、洛坝等超大型-大型矿床，这些矿床赋存在泥盆系沉积地层中，前人对这些矿床做了大量系统的研究，对这些矿床成因还存在着较大的分歧，总体有以下三个观点：喷流沉积（SEDEX）-（改造）（祁思敬和李英，1993；王集磊等，1996；Ma et al., 2004）、密西西比河谷型（MVT）（Leach and Song, 2019）和与三叠纪岩浆-变质活动有关（Hu et al., 2015；魏然等，2022；王义天等，2021）。扬子北缘与南秦岭地体以巴山-襄州-广济断裂为界，产出有马元、冰洞山、沐浴河和凹子岗等赋存在震旦系沉积地层中的铅锌矿，前人研究一致认为这些矿床为 MVT 矿床（李智明，2007；颜代蓉等 2010；段其发，2014；曹亮等 2015；2016）。湖北郧西-陕西旬阳地区位于南秦岭铅锌成矿带东段镇旬矿集区东南缘，南与扬子北缘相邻，该地区除了产出赋存在泥盆系沉积地层中的铅锌矿床外，还产出十余个赋存在志留系地层中的铅锌矿

床, 包括关子沟、南沙沟、泗人沟和黄石板等矿床(薛春纪等, 2005), 并且在震旦系和寒武-奥陶系碳酸盐岩沉积地层中发现了锡洞沟和银洞凹矿床, 显示该地区铅锌矿床具有多个赋矿层位的特点。相比于南秦岭泥盆系沉积地层中和扬子北缘震旦系沉积地层中的铅锌矿床, 对这些赋存在震旦系-下古生界地层中铅锌矿床的成因研究还较为薄弱, 制约了对区域成矿规律的认识及进一步的找矿工作。本文通过对该地区分别赋存在震旦系、寒武-奥陶系和志留系沉积地层中的锡洞沟、银洞凹和关子沟矿床开展矿床地质特征、方解石 U-Pb 定年、闪锌矿微量元素和硫化物 S-Pb 同位素分析研究, 揭示其矿床成因, 并与南秦岭铅锌成矿带赋存在泥盆系地层中铅锌矿床和扬子北缘赋存在震旦系地层中的铅锌矿进行综合对比研究, 完善区域成矿规律, 为区域找矿提供科学的指导。

1 区域地质背景

湖北郧西-陕西旬阳地区位于秦岭造山带的东段南缘(图 1a 和 1b)。秦岭造山带是我国中央造山带的重要组成部分, 是华北、秦岭微板块和扬子板块沿商丹和勉略缝合带经多期次俯冲-碰撞造山及陆内造山作用形成的复合造山带, 是我国重要的多金属成矿带(张国伟等, 1995; 朱赖民等, 2008; Dong and Santosh, 2016)。秦岭造山带以商丹缝合带为界划分为北秦岭和南秦岭, 北以洛南-栾川断裂与华北板块相邻, 南以勉略-巴山-襄州-广济断裂与扬子板块相邻(图 1a, Dong and Santosh, 2016)。秦岭造山带主要经历了三大演化发展阶段: (1) 太古代-新元古代基底形成阶段, 形成了太华群、秦岭群、陡岭群和崆岭群等基底地层; (2) 新元古代-中生代洋-陆俯冲到陆-陆碰撞造山板块构造演化阶段, 包括了新元古代晚期至早中泥盆世商丹洋的打开与消亡和晚古生代至三叠纪勉略洋的打开与消亡, 直至中三叠世完成全面陆-陆碰撞造山, 在三叠纪至侏罗纪中晚期经历了碰撞后伸展垮塌阶段; (3) 中-新生代陆内构造演化阶段, 华北板块沿灵宝-鲁山-舞阳断裂向南俯冲, 造成主造山期后隆升, 在勉略带前形成前陆冲断带, 大巴山地区发育强烈的逆冲推覆构造(张国伟等, 1995; 2019; Dong and Santosh, 2016)。

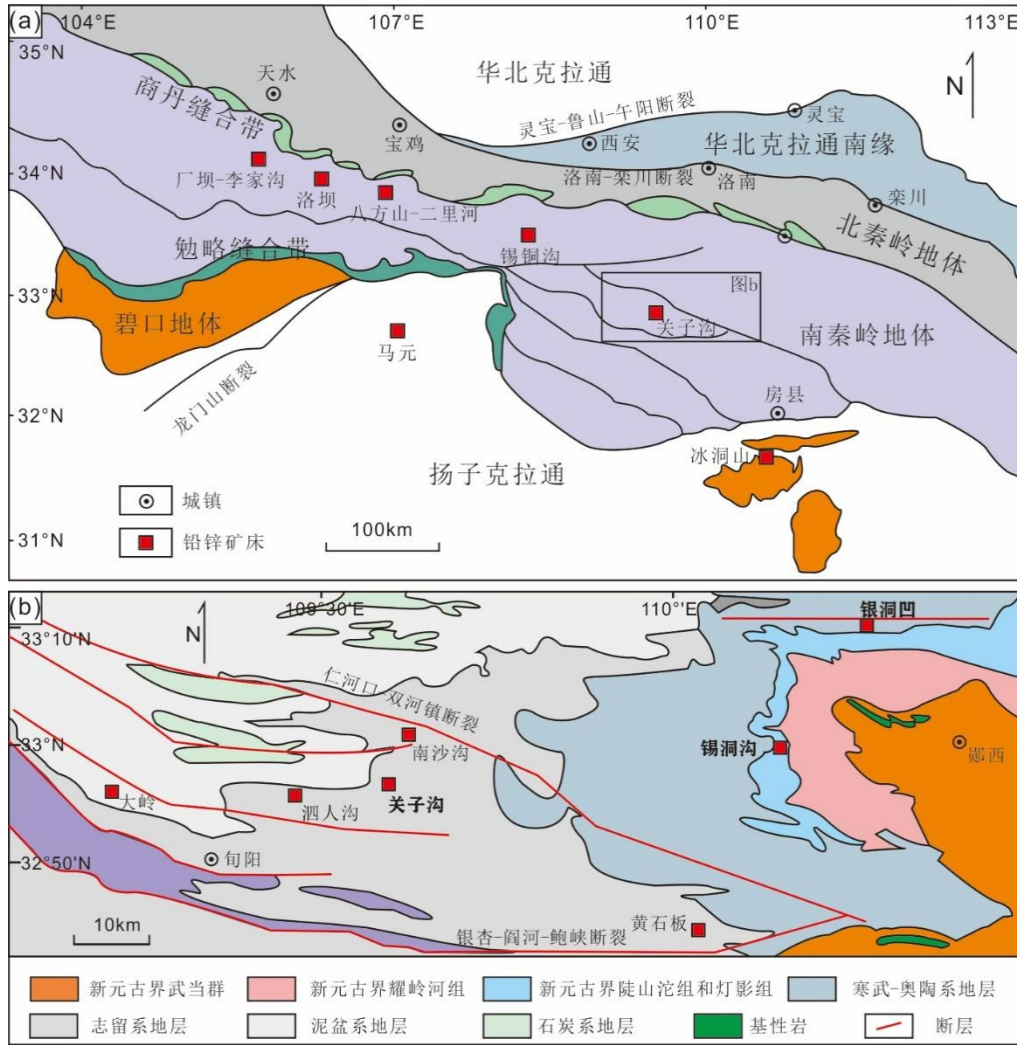


图1 (a) 秦岭造山带构造分区及代表性铅锌矿床分布图 (修编自 Dong and Santosh, 2016); (b) 南秦岭镇旬盆地地质图 (修编自薛春纪等, 2005)

Figure 1 (a) Tectonic districts and distribution of representative Pb-Zn deposits in the Qinling orogenic belt (modified from Dong and Santosh, 2016); (b) Regional geological map of Zhenxun Basin, South Qinling (modified from Xue et al., 2005)

南秦岭构造带, 又称秦岭微板块, 根据基底属性和古生代地层发育特征, 大致以徽成盆地、宁陕断裂为界划分为东秦岭和西秦岭 (冯益民等, 2003)。研究区位于南秦岭东段南缘, 根据构造演化阶段, 地层建造由太古代-中新元古代结晶基底、震旦纪-早古生代被动陆缘沉积岩系和晚古生代-中三叠世陆表海沉积岩系组成 (图 1a 和 1b)。太古代-古元古代变质结晶基底主要包括佛坪岩群、长角坝群和陡岭岩群, 主要由片麻岩和石英岩组成, 中-新元古代过渡性基底有武当岩群和耀岭河组, 主要由变火山岩组成。震旦系沉积了陡山沱组和灯影

组碎屑岩和碳酸盐岩，寒武-奥陶系是一套以黑色板岩为主的细碎屑地层，志留系广泛出露于镇安-板岩断裂以南，以泥质碎屑岩为主。晚古生代-中三叠世南秦岭沉积岩系受早古生代扩张裂陷及碱性超镁铁质杂岩侵位的影响，旬阳-留坝以南形成构造隆起带，缺失中志留世以上地层，而旬阳-留坝以北至商丹缝合带以南地区形成了晚古生代沉降带，形成巨量海相碎屑岩和碳酸盐岩。研究区构造格架以印支期碰撞造山作用和燕山期陆内造山作用形成的逆冲推覆构造体系为主，自北向南为镇安-板岩断裂、两郧断裂、仁和口-双河镇-白河断裂、银杏-阎河-鲍峡断裂。研究区岩浆岩不发育，仅有少量早古生代辉绿岩、辉长岩产出(图 1b)。

2 矿床地质特征

锡洞沟矿床和银洞凹矿床分布于湖北省郧西县，位于武当隆起西北缘，矿体呈层状分别赋存在震旦系灯影组和寒武-奥陶系石翁子组白云岩中(图 1b; 马翠萍等, 2015)。锡洞沟矿床围岩发育广泛的角砾岩化, 表现为白云石重结晶, 主要的围岩蚀变为碳酸盐化(图 2a)。锡洞沟矿床主要的矿石类型为块状和角砾状矿石, 主要的矿石矿物为闪锌矿、方铅矿和黄铁矿, 主要的脉石矿物为碳酸盐矿物, 含少量石英(图 2b-c)。银洞凹矿床围岩也发生强烈的角砾岩化, 角砾为地层白云岩, 基质主要为闪锌矿和碳酸盐矿物(图 2d)。银洞凹矿床主要的矿石类型为浸染状和致密浸染状矿石(图 2e), 主要的矿石矿物为闪锌矿, 含少量的方铅矿和黄铁矿, 主要的脉石矿物为碳酸盐矿物, 含少量石英(图 2f), 主要的围岩蚀变为碳酸盐化和硅化(图 2g-h)。银洞凹矿床致密浸染状矿石中发育深色和浅色闪锌矿(图 2i)。

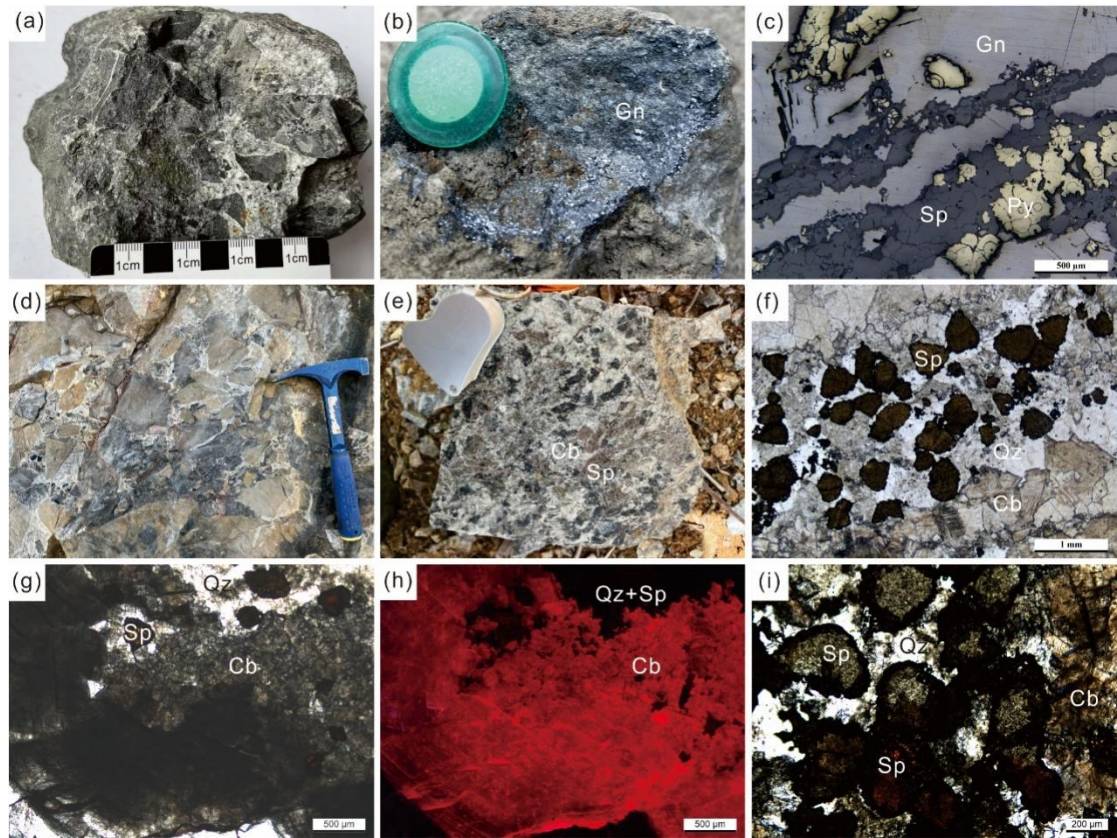


图 2 湖北郧西锡洞沟和银洞凹矿床矿床地质特征

Fig. 3 Geological characteristic of Xidonggou and Yindonggao deposit in Yunxi, Hubei

(a) 锡洞沟矿床围岩发生角砾岩化；(b) 锡洞沟矿床块状矿石；(c) 锡洞沟矿床主要矿物镜下照片；(d) 银洞凹矿床围岩发生强烈角砾岩化；(e) 银洞凹矿床浸染状矿石；(f) 银洞凹矿床浸染状矿石主要矿物组合；(g) 镜下照片和(h) 冷阴极发光图像显示银洞凹矿床发育硅化和碳酸盐化；(i) 银洞凹矿床深色和浅色闪锌矿。Gn: 方铅矿；Sp: 闪锌矿；Cb: 碳酸盐矿物；Qz: 石英；Py: 黄铁矿

关子沟矿床分布于陕西省旬阳市，位于镇旬盆地中部，与南沙沟、泗人沟和黄石板等矿床构成镇旬盆地赋存在志留系地层中的铅锌成矿带（图 1b；薛春纪等，2005）。矿体主要呈层状产出在志留系梅子垭组粉砂质千枚岩中，主要的围岩蚀变为硅化和绢云母化，碳酸盐化蚀变不发育（图 3；吴欢欢等，2022）。关子沟矿床主要的矿石类型为致密块状、条带状和脉状，主要的矿石矿物为闪锌矿和方铅矿，含少量黄铁矿，主要的脉石矿物为石英，含少量碳酸盐矿物（图 3c-d）。

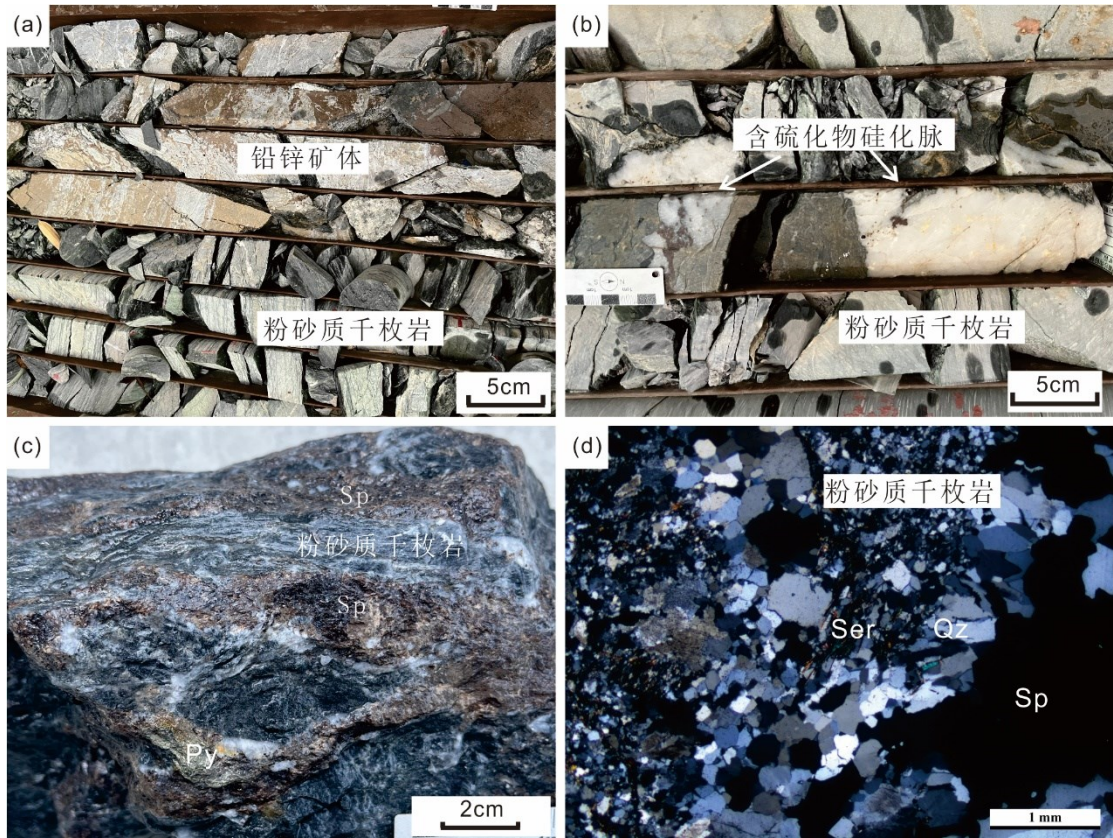


图 3 陕西旬阳关子沟矿床矿床地质特征

Fig. 3 Geological characteristic of Guanzigou deposit in Xunyang, Shaanxi

(a) 矿体呈层状产出在梅子垭组粉砂质千枚岩中； (b) 矿体中发育硅化脉； (c) 闪锌矿呈层状产出在粉砂质千枚岩中，接触面发育硅化蚀变； (d) 显微镜下照片显示闪锌矿与围岩粉砂质千枚岩接触面发育硅化和绢云母化。Sp: 闪锌矿； Qz: 石英； Gn: 方铅矿

3 样品与分析

本次研究对与闪锌矿共生的碳酸盐矿物开展了原位 U-Pb 定年分析，分析测试在四川创源微谱科技有限责任公司完成。本文选取了锡洞沟、银洞凹和关子沟矿床典型矿石样品中的闪锌矿、方铅矿和黄铁矿开展了闪锌矿微量元素、闪锌矿和黄铁矿硫同位素以及方铅矿铅同位素分析，分析测试均在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。

3.1 碳酸盐矿物原位 U-Pb 定年

碳酸盐矿物原位 U-Pb 定年分析仪器由 RESolution LR 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统和 Thermo iCAP TQ 等离子质谱组成。本次采用的激光束斑和剥蚀频率分别为 120 μm 和 15

Hz, 分析时间为 60 s。本次测试以 NIST 614 为主标, 每 7 个测试样品间插一组主标, 校准碳酸盐标样和测试样品的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值、 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 比值和仪器漂移状况(Woodhead and Hergt, 2001), 不进行深度分馏校正。用方解石标样 AHX-1d ($238.23 \pm 0.87\text{Ma}$, Nguyen et al., 2019)校正测试样品的 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 比值。本次实验以 Duff Brown Tank ($64.0 \pm 0.7\text{Ma}$, Hill et al., 2016)为副标, 监控数据质量, 数据处理利用 IOLITE 完成。

3.2 闪锌矿微量元素分析

闪锌矿微量元素分析仪器由 GeolasPro 激光剥蚀系统和 Agilent7700e 等离子体质谱组成, 激光剥蚀中采用氦气作为载气、氩气作为补偿气以调节灵敏度, 本次采用的激光束斑和剥蚀频率分别为 $32\ \mu\text{m}$ 和 5 Hz, 分析时间为 80 s, 包括 20 s 背景采集时间和 60 s 样品采集时间, 数据处理采用 NIST 610 和 NIST 612 进行多外标无内标校正, MASS-1 作为监控标样检验数据的可靠性, 每分析 6 个样品数据分析一组标样, 数据处理通过 ICPMSDataCal 完成 (Liu et al., 2008)。

3.3 闪锌矿和黄铁矿原位 S 同位素分析

闪锌矿和黄铁矿原位 S 同位素分析仪器由 GeoLas HD 激光剥蚀系统和 Neptune Plus 多接收等离子体质谱组成, 激光剥蚀中采用氦气作为载气, 本次采用的激光束斑和剥蚀频率分别为 $44\ \mu\text{m}$ 和 2 Hz, 分析时间为 90 s, 包括 15 s 背景采集时间、60 s 样品采集时间以及 15 s 清洗时间。黄铁矿硫同位素分析采用 PPP-1 为校正标样, 内部标样 SP-Py-01 作为监控标样, 每 6 个测试样品分析一组标样, 本次实验获得的 SP-Py-01 硫同位素值为 $1.94 \pm 0.07\ ‰$, 与通过 TIMS 测试值一致。闪锌矿硫同位素分析采用 NBS123 为校正标样, LI-SP-01 作为监控标样, 每 6 个测试样品分析一组标样, 本次实验获得的 LI-SP-01 硫同位素值为 $6.37 \pm 0.06\ ‰$, 与通过 TIMS 测试值一致。

3.4 方铅矿原位 Pb 同位素

方铅矿原位 Pb 同位素分析仪器由 GeoLas HD 激光剥蚀系统和 Neptune Plus 多接收等离子体质谱组成, 激光剥蚀中采用氦气作为载气, 本次采用的激光束斑和剥蚀频率分别为 $16\ \mu\text{m}$ 和 1 Hz, 分析时间为 60 s, 包括 20 s 背景采集时间、40 s 样品采集时间。分析采用 Sph-HYLM 为校正标样, PY-3 作为监控标样。

4 测试结果

4.1 碳酸盐矿物 U-Pb 年龄

研究的锡洞沟、银洞凹和关子沟三个矿床中, 仅银洞凹矿床浸染状矿石中碳酸盐矿物具

有较高的 U 含量（附表 1），获得了测试结果。显微镜下照片显示，热液碳酸盐矿物与深色闪锌矿紧密共生，相比于围岩碳酸盐矿物颗粒，与闪锌矿共生的热液碳酸盐矿物颗粒明显较细，与闪锌矿共同交代围岩地层，具有明显的后生成因（图 4a），另外，冷阴极发光图像显示热液碳酸盐矿物颗粒具有均一的内部结构（图 4b），因此热液碳酸盐矿物的定年结果能代表该矿床的形成年龄，本次研究获得银洞凹矿床与闪锌矿共生热液碳酸盐矿物 U-Pb 年龄为 456 ± 24 Ma（图 4c），略晚于赋矿地层时代。

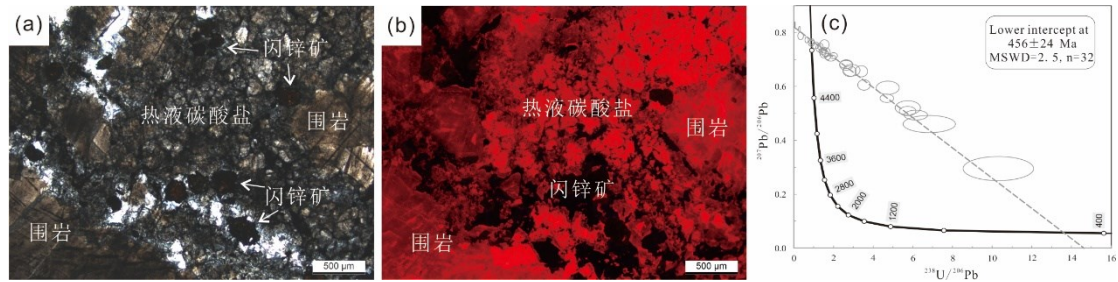


图 4 银洞凹矿床热液碳酸盐矿物与闪锌矿共生关系及 Tera-Wasserburg 图解

Fig. 4 Relationship with sphalerite and Tera-Wasserburg plot of hydrothermal carbonate from Yindongao deposit

4.2 闪锌矿微量元素特征

LA-ICP-MS 分析结果显示三个矿床闪锌矿具有不同的微量元素组成（图 5；附表 2）。锡洞沟矿床闪锌矿含有最高的 Ga 含量（21.0-39.6 ppm），银洞凹深色和浅色闪锌矿及关子沟脉状和块状闪锌矿中 Ga 含量较低，分别为 0.3-71.5 ppm、1.7-20.1 ppm、0.4-1.5 ppm 和 6.5-14.0 ppm（图 5a）。锡洞沟、银洞凹深色和浅色闪锌矿及关子沟脉状和块状闪锌矿中均含有较低的 In 含量，分别为 0.8-1.4 ppm、0.1-0.8 ppm、0.4-0.8 ppm、1.0-1.3 ppm、0.3-2.5 ppm（图 5b）。银洞凹矿床闪锌矿含有最高的 Ge、Cd、Cu 和 Ag 含量（图 5c-f），而关子沟矿床脉状和块状闪锌矿含有最高的 Co 和 Fe 含量（图 5g）。锡洞沟闪锌矿、银洞凹深色和浅色闪锌矿及关子沟脉状和块状闪锌矿中 Ge 含量分别为 0.4-1.8 ppm、188-1036 ppm、23.6-53.2 ppm、0.3-1.0 ppm 和 0.1-0.9 ppm，Cd 含量分别为 1739-2501 ppm、4149-5219 ppm、3999-5358 ppm、1435-1539 ppm 和 1282-1358 ppm，Cu 含量分别为 20.0-50.4 ppm、114-1205 ppm、5.5-23.1 ppm、9.1-164 ppm 和 14.9-24.8 ppm，Ag 含量分别为 0.1-1.4 ppm、234-1133 ppm、0.6-24.8 ppm、1.8-6.9 ppm 和 5.0-11.9 ppm，Co 分别为 b.d.l-0.03 ppm、0.11-0.25 ppm、0.14-0.25 ppm、62.6-73.6 ppm 和 68.6-75.9 ppm，Fe 含量分别为 3409-5600 ppm、1061-1379 ppm、985-1435 ppm、50304-54414 ppm 和 58801-65688 ppm（附表 2）。

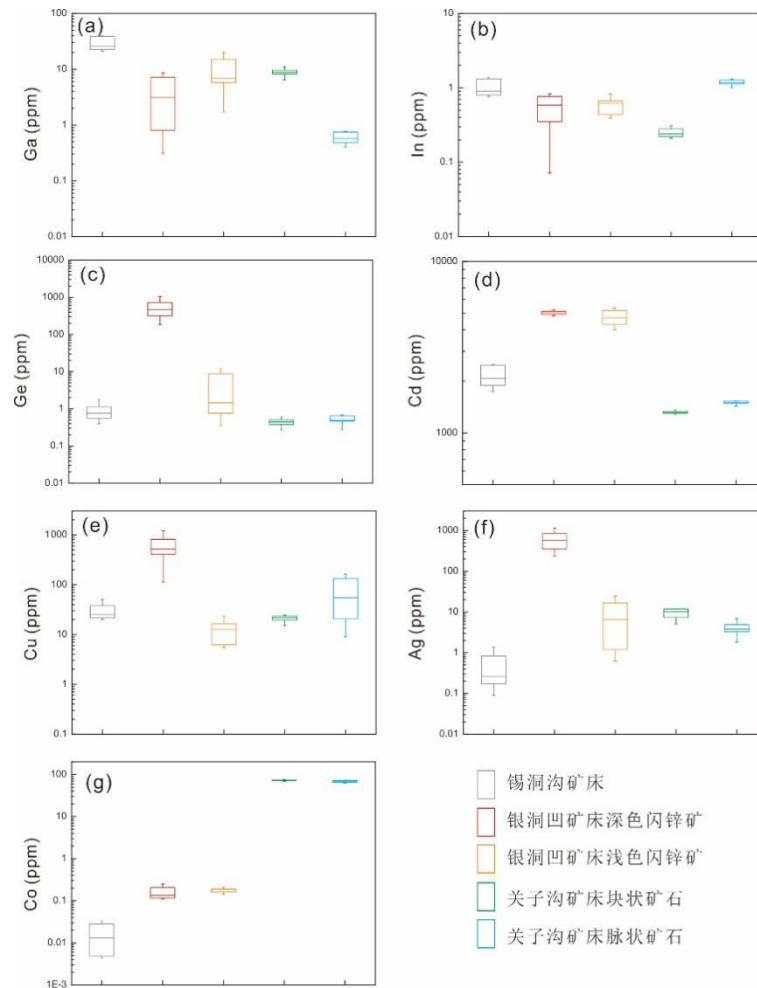


图 5 锡洞沟矿床、银洞凹矿床和关子矿床闪锌矿中微量元素含量

Fig.5 Contents of trace elements in sphalerite from Xidonggou, Yindonggao, and Guanzigou deposit

4.3 硫化物 S 同位素组成

LA-MC-ICP-MS 硫同位素分析结果显示锡洞沟、银洞凹和关子沟矿床硫化物具有不同的硫同位素组成，单个矿床中黄铁矿和闪锌矿具有一致的硫同位素组成。锡洞沟、银洞凹和关子沟矿床黄铁矿的 S 同位素组成分别为 6.5~9.1 ‰、23.3~28.5 ‰和 6.6~8.6 ‰，三个矿床闪锌矿的 S 同位素组成分别为 9.2~9.7 ‰、20.8~21.4 ‰和 6.9~12.2 ‰（附表 3）。

4.4 方铅矿 Pb 同位素组成

锡洞沟、银洞凹和关子沟矿床方铅矿均具有高放射成因铅同位素组成， $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别为 18.039~18.044、18.323~18.329 和 18.133~18.140， $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别为 15.663~15.669、15.642~15.649 和 15.652~15.660， $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别为 38.062~38.080、38.031~38.050 和 38.536~38.562（附表 4）。

5 讨论

5.1 成矿时代

前人对扬子北缘和南秦岭成矿带铅锌矿床形成时代开展了闪锌矿 Rb-Sr 和碳酸盐 Sm-Nb 同位素定年。对于扬子北缘赋存在震旦系地层中的矿床, 获得马元矿床的闪锌矿 Rb-Sr 年龄为 486Ma(李智明, 2007), 凹子岗矿床闪锌矿 Rb-Sr 年龄为 $431\pm 13\text{Ma}$ (曹亮等, 2015), 冰洞山矿床闪锌矿 Rb-Sr 年龄为 $508\pm 11\text{Ma}$ (曹亮等, 2016), 表明扬子北缘赋存在震旦系地层中铅锌矿床主要形成于早古生代。本次研究获得赋存寒武系-奥陶系地层中锡洞沟矿床与闪锌矿共生热液碳酸盐矿物 U-Pb 年龄为 $456\pm 24\text{Ma}$ (图 4), 在该时期, 南秦岭是扬子板块北缘的一部分, 因此, 扬子北缘和南秦岭赋存在震旦纪-奥陶纪地层中的铅锌矿形成于早古生代, 处于扬子北缘伸展的构造背景下(张国伟等, 1995; 2019; Dong and Santosh, 2016)。对于南秦岭赋存在泥盆纪地层中的矿床, 前人对厂坝-李家沟矿床开展硫化物 Rb-Sr 定年, 分别获得 $389\pm 14\text{Ma}$ 和 $222.3\pm 2.2\text{Ma}$ (Ma et al., 2004; Hu et al., 2015), 表明成矿作用发生于晚古生代或三叠纪, 形成于扬子北缘持续伸展背景下或扬子与华北碰撞的构造背景下。因此, 南秦岭地体中赋存在不同时代地层中的铅锌矿形成于不同时代, 是秦岭造山带长期构造演化历史的产物(张国伟等, 2019)。

5.2 成矿温度和闪锌矿中稀散金属替代机制

前人研究表明, 沉积岩容矿的铅锌矿床形成于不同的温度, 其闪锌矿通常差异性富集 Cd、Ge、Ga、In 和 Co 等稀散金属(Leach et al., 2010; Frenzel et al., 2016; 刘英超等, 2022; 陈忠元等, 2025; 李占轲等, 2025), Frenzel et al. (2016)通过统计不同矿床类型流体包裹体均一温度和闪锌矿微量元素, 建立了闪锌矿微量元素温度计: $T(^{\circ}\text{C}) = -(54.4\pm 7.3) \times \text{PC1}^* + (208\pm 10)$, 其中 $\text{PC1}^* = \ln(m(\text{Ga})^{0.22} \times m(\text{Ge})^{0.22} \times m(\text{Fe})^{-0.37} \times m(\text{Mn})^{-0.2} \times m(\text{In})^{-0.11})$, $m(\text{Ga})$ 、 $m(\text{Ge})$ 、 $m(\text{Mn})$ 和 $m(\text{In})$ 的单位为 ppm, $m(\text{Fe})$ 的单位为 wt.%。闪锌矿微量元素温度计计算结果指示锡洞沟和银洞凹矿床形成于相对较低的温度下, 分别为 $212\sim 230^{\circ}\text{C}$ 和 $60\sim 179^{\circ}\text{C}$, 平均温度分别为 218°C ($n=11$) 和 137°C ($n=19$), 关子沟矿床形成于相对较高的温度 ($268\sim 317^{\circ}\text{C}$) 条件下, 平均温度为 291°C ($n=20$), 该计算结果与闪锌矿共生石英中流体包裹体均一温度 ($215\sim 393^{\circ}\text{C}$) 一致(吴欢欢等, 2022)。本次研究的三个矿床中, 闪锌矿富集不同的稀散金属和微量元素含量, 银洞凹矿床闪锌矿含有较高的 Cd、Ge 稀散金属含量和较高的 Cu、Ag 含量, 锡洞沟矿床闪锌矿含有较高的 Ga 和 Cd 稀散金属含量, 而关子沟矿床闪锌矿含有较高的 Co 稀散金属含量和较高的 Fe 含量(图 5)。前人研究表明, 闪锌

矿中稀散金属主要以类质同象的形式赋存在闪锌矿晶格中（Frenzel et al., 2016; 刘英超等, 2022; 李占轲等, 2025）。Cd 的替代方式还存在争议, 有学者认为直接与闪锌矿中的 Zn 发生替代, 也有学者认为 Cd 与闪锌矿中的 Fe 发生替代关系（刘铁庚等, 2010）, 本次研究三个矿床, 单个矿床中闪锌矿中 Cd 与 Zn 呈负相关关系（图 6a）, 而 Cd 与 Fe 呈正相关关系（图 6b）, 表明三个矿床中闪锌矿中 Cd 直接与 Zn 发生替代, 同时, 关子沟矿床闪锌矿具有最高的 Fe 含量和最低的 Cd 含量, 而银洞凹矿床闪锌矿具有最低的 Fe 含量和最高的 Cd 含量, 暗示闪锌矿中过高的 Fe 含量可能不利于 Cd 进入闪锌矿晶格（刘铁庚等, 2010; 刘英超等, 2022）。Ge 直接与 Zn 或者与 Cu 和 Ag 共同替代 Zn（李占轲等, 2025）, 关子沟和银洞凹矿床闪锌矿 Ge 位于 $(\text{Ge}/\text{Ag})_{\text{mol}}=1/2$ 以上（图 6c）, Ge 位于 $(\text{Ge}/\text{Cu})_{\text{mol}}=1/2$ 线上或以下（图 6d）, 指示关子沟和银洞凹矿床 Ge 与 Cu 和 Ag 共同替代闪锌矿中的 Zn, Cu 还参与了其他稀散元素的替代。Ga 主要与 Cu 或 Ag 共同替代闪锌矿中的 Zn, 三个矿床中 Ga 与 Ag 没有呈现正相关关系（图 6e）, 而关子沟矿床 Ga 与 Cu 位于 $(\text{Ga}/\text{Cu})_{\text{mol}}=1$ 线上（图 6f）, 指示 Ga 主要与 Cu 共同替代闪锌矿中的 Zn。

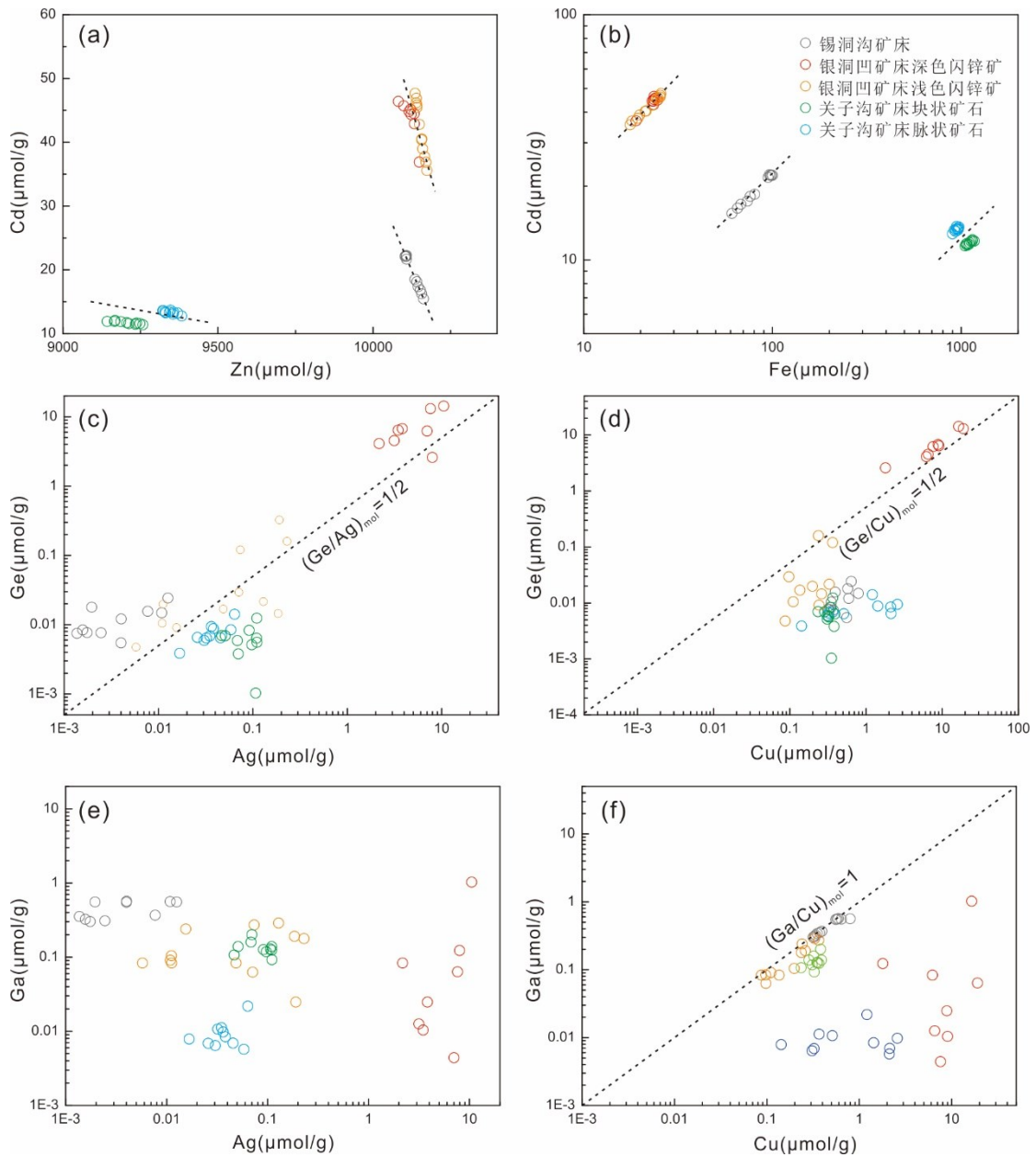


图 6 锡洞沟矿床、银洞凹矿床和关子矿床闪锌矿中元素关系

Fig.6 Relationship of elements in sphalerite from Xidonggou, Yindonggao, and Guanzigou deposit

5.3 成矿物质来源

锡洞沟、银洞凹和关子沟矿床矿石矿物主要为闪锌矿、方铅矿和黄铁矿，脉石矿物主要为石英或碳酸盐矿物，几乎不含硫酸盐矿物，表明成矿时流体中的硫以还原硫 (H_2S) 的形式存在，由于硫化物与 H_2S 之间的分馏系数较小 (Ohmoto, 1979)，因此三个矿床硫化物的硫同位素可以代表成矿流体的硫同位素组成。本次研究获得锡洞沟、银洞凹和关子沟矿床硫化物 S 同位素组成分别为 6.5~9.7‰、20.8~28.5‰和 6.6~12.2‰，总体上，与南秦岭和扬子北缘赋存在沉积岩中铅锌矿床硫化物的硫同位素组成范围一致 (图 7; 祁思敬和李英, 1993;

Ma et al., 2004; 李智明, 2007; 谭满堂, 2009; 颜代蓉等, 2010; 段其发, 2014), 具有富集重硫的特征 (>6‰), 明显高于岩浆硫同位素组成范围 (图 7; Ohmoto, 1979), 并且三个矿区皆没有岩浆岩的报道, 指示三个矿床的硫皆来源于海相沉积岩。另外, 三个矿床硫化物的硫同位素组成也具有一定差异, 银洞凹矿床硫化物具有最高的硫同位素值 (20.8~28.5‰), 而锡洞沟矿床和关子沟矿床具有相对较低的硫同位素组成, 相比震旦系-志留纪海相硫酸盐硫同位素组成 (25-30‰, Claypool et al., 1980) 和泥盆纪海相硫酸盐硫同位素组成 (15-25‰, Claypool et al., 1980), 三个矿床硫化物硫同位素发生了不同程度的分馏, 表明存在不同程度热化学还原作用或生物还原作用, 其中生物还原作用可导致较大的同位素分馏 (Machel et al., 1995)。本次研究通过闪锌矿微量元素温度计获得锡洞沟和关子沟矿床的成矿温度分别为约 218°C 和 291°C, 明显高于细菌还原作用的条件 (<80°C), 表明三个矿床硫化物硫同位素组成差异主要受控于海相硫酸盐不同程度的热化学还原作用。热化学还原作用受温度和体系封闭-开放等条件的控制, 而成矿温度相对较低的银洞凹矿床硫化物具有相对较高的硫同位素组成, 因此温度不是导致三个矿床不同程度热化学还原作用的主要因素, 而封闭体系的热化学还原作用可导致硫化物具有接近源区海相硫酸盐的硫同位素组成, 符合银洞凹矿床硫同位素组成与震旦系-志留纪海相硫酸盐硫同位素组成相近的特征, 指示银洞凹矿床硫化物是震旦系-志留纪海相硫酸盐在封闭体系下热化学还原的产物。而在成矿温度条件下, 热化学还原作用可产生约 10-15‰ 的分馏 (Machel et al., 1995), 符合锡洞沟和关子沟矿床的硫同位素组成特征。因此, 本文认为三个矿床硫皆来源于海相硫酸盐, 不同矿床硫化物硫同位素组成差异指示了海相硫酸盐不同程度的热化学还原作用。由于南秦岭和扬子北缘沉积岩容矿铅锌矿床硫化物具有与锡洞沟、银洞凹和关子沟硫化物相似的硫同位素组成范围和差异特征, 表明硫可能具有相似的来源。

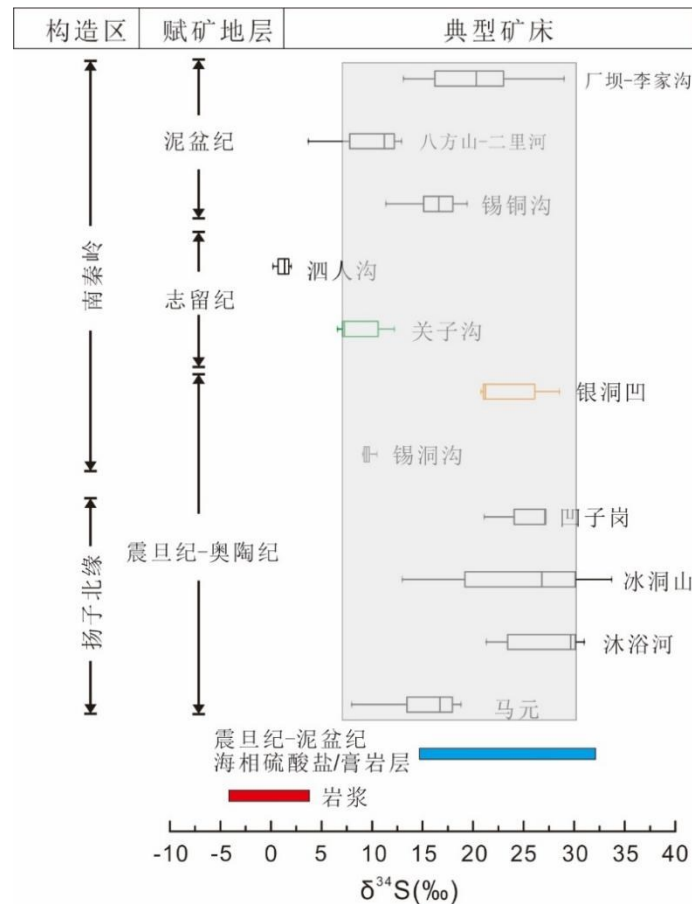


图 7 南秦岭及扬子北缘典型铅锌矿床硫同位素组成

数据来源：震旦纪-泥盆纪海相硫酸盐/膏岩层（Claypool et al., 1980），岩浆（Ohmoto, 1979），南秦岭铅锌矿床（祁思敬和李英, 1993；Ma et al., 2004），扬子北缘铅锌矿床（李智明, 2007；谭满堂, 2009；颜代蓉等, 2010；段其发, 2014）

Fig.7 Sulfur isotope composition of typical Pb-Zn deposit in South Qinling and North Yangtze
Data source: Sinian-Devonian marine sulfate/evaporite (Claypool et al., 1980), magma (Ohmoto, 1979), Pb-Zn deposits of South Qinling (Qi and Li, 1993; Ma et al., 2004), Pb-Zn deposits of North Yangtze (Li, 2007; Tan, 2009; Yan et al., 2010; Duan, 2014)

锡洞沟、银洞凹和关子沟矿床方铅矿 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 18.039~18.044、18.323~18.329 和 18.133~18.140， $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 15.663~15.669、15.642~15.649 和 15.652~15.660， $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 38.062~38.080、38.031~38.050 和 38.536~38.562，三个矿床闪锌矿具有相似且高放射成因铅同位素组成，在铅构造图解上靠近上地壳和造山带的范围（图 8；Zartman and Doe, 1981），通过与镇旬盆地前寒武系基底武当群和耀岭河组及震旦系-泥盆纪沉积盖层铅同位素组成对比（张宏飞等, 1996；朱华平, 2004；李智明, 2007；王涛等, 2008；Zhou

et al., 2015), 三个矿床铅同位素组成明显不同于前寒武结晶基底而与震旦纪-早古生代沉积盖层铅同位素组成一致, 指示三个矿床成矿物质皆来源于震旦系-古生代下伏或围岩沉积地层。虽然南秦岭和扬子北缘铅锌矿床赋存在不同地层中, 形成于不同时代, 具有不同成矿温度, 但硫化物 S-Pb 同位素一致表明, 成矿物质皆来源于震旦纪-古生代下伏或围岩沉积地层, 硫主要来源于地层中海相硫酸盐 (图 7 和 8)。

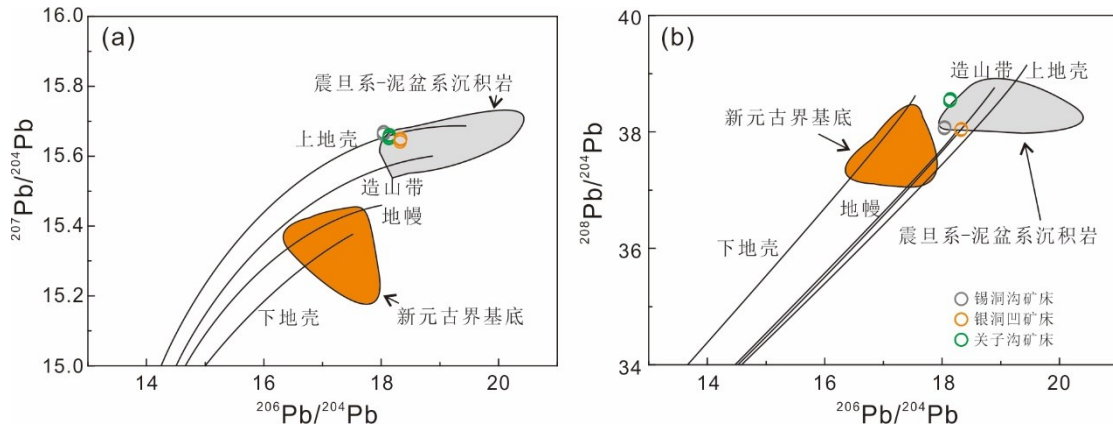


图 8 锡洞沟矿床、银洞凹矿床和关子矿床方铅矿铅同位素组成图解

数据来源: 新元古界基底 (张宏飞等, 1996), 震旦系-泥盆系沉积岩 (朱华平, 2004; 李智明, 2007; 王涛等, 2008; Zhou et al., 2015)

Fig.8 Pb isotopes of galena from Xidonggou, Yindongao, and Guanzigou deposit

Data source: Neoproterozoic basement (Zhang et al., 1996), Sinian-Devonian sedimentary rocks (Zhu et al., 2004; Li, 2007; Wang et al., 2008; Zhou et al., 2015)

5.4 矿床成因

密西西比河谷型 (MVT) 型矿床和喷流沉积 (SEDEX) 型矿床是两类最主要的沉积岩容矿铅锌矿床, 与岩浆无明显成因联系, 其中 MVT 矿床是典型的后生矿床, 这类矿床主要赋存在碳酸盐岩中, 主要矿物是闪锌矿、方铅矿、黄铁矿和碳酸盐矿物, 硫化物主要以交代碳酸盐岩的形式出现, 主要的热液蚀变过程为白云岩化、围岩溶解和角砾岩化, 成矿温度相对较低 (约 70~180°C), 金属和硫来源于上地壳, 而 SEDEX 型矿床主要赋存在细碎屑岩中, 矿体主要呈层状, 矿石主要呈纹层状, 成矿温度相对较高 (70~290°C) (Leach et al., 2005; 2010)。由于成矿流体成分和温度的不同, 两类矿床闪锌矿也通常具有不同的微量元素特征, MVT 矿床中闪锌矿通常含有较高的 Ga、Ge 和 Cd 等含量, 而 SEDEX 矿床中闪锌矿通常含有较高的 Co、Fe 等含量 (Frenzel et al., 2016; 刘英超等, 2022; 陈忠元

等, 2025)。湖北郧西地区锡洞沟和银洞凹矿床赋存在震旦系-奥陶系碳酸盐岩地层中, 两个矿区均发育大量的岩溶角砾岩(图 2a 和 2d), 矿石主要是浸染状矿石和角砾状矿石, 闪锌矿和方铅矿具有明显的交代结构(图 2c-f), 银洞凹矿床与闪锌矿共生热液碳酸盐矿物定年表明矿床形成时代晚于地层时代, 具有明显的后生成因特征。锡洞沟矿床闪锌矿含有较高的 Ga 和 Cd 含量, 银洞凹矿床闪锌矿含有较高的 Ge 和 Cd 含量, 与 MVT 矿床闪锌矿中微量元素特征相似, 闪锌矿微量元素温度计显示两个矿床形成温度较低, 分别约为 218°C 和 137°C, 与 MVT 矿床形成温度一致, S-Pb 同位素表明硫来源于海相沉积岩的热化学还原作用, 成矿物质来源于上地壳, 与 MVT 矿床金属和硫来源一致, 因此, 锡洞沟和银洞凹矿床在矿床地质特征、闪锌矿微量元素特征、成矿温度和成矿物质来源方面均具有与 MVT 矿床一致的特征 (Leach et al., 2005; 2010; Leach and Song, 2019), 表明这两个矿床为 MVT 矿床, 与扬子北缘马元、沐浴河、冰洞山和凹子岗矿床成因相同, 且这些矿床形成时代相近, 均主要形成于早古生代, 此时, 南秦岭是扬子北缘的一部分, 处于扬子北缘被动大陆伸展背景下。陕西关子沟矿床赋存在志留纪粉砂质千枚岩中, 矿体呈层状, 与地层整合接触(图 3, 吴欢欢等, 2022), 围岩蚀变主要是硅化并发育硅化脉(图 3b-d), 地质特征与赋存在泥盆纪碳酸盐岩-碎屑岩中的铅锌矿床相似, 并且在志留纪梅子垭组发育热水沉积岩(薛春纪等, 2005), 与 SEDEX 型矿床地质特征一致。关子沟矿床闪锌矿中含有较高的 Fe 和 Co 含量, 与 SEDEX 型矿床闪锌矿微量元素特征相似(Frenzel et al., 2016; 刘英超等, 2022), 闪锌矿微量元素温度计显示该矿床形成温度较高, 约为 291°C, 明显高于湖北郧西锡洞沟和银洞凹矿床, 与 SEDEX 型矿床成矿温度相似, 成矿物质和硫来源于上地壳, 因此, 矿床地质特征、闪锌矿微量元素、成矿温度一致表明关子沟矿床属于 SEDEX 矿床(Leach et al., 2005; 2010; 刘英超等, 2022)。Leach and Song (2019)综述中国铅锌矿床提到 SEDEX 与 MVT 矿床在成矿过程和成矿物质来源方面具有相似性, 并建议将铅锌矿床按构造背景和赋矿围岩差异划分为碎屑岩赋矿铅锌矿床(CD)和与碳酸盐岩赋矿铅锌矿床(MVT), 本次研究也表明锡洞沟矿床、银洞凹矿床和关子矿床具有一致的成矿物质来源, 硫主要来源于海相硫酸盐不同程度热化学还原过程, 但锡洞沟矿床和银洞凹矿与关子沟矿床在矿床地质特征、闪锌矿微量元素特征以及成矿温度上具有明显的差异。本次研究表明, 南秦岭湖北郧西-陕西旬阳地区沉积岩容矿铅锌矿床具有多成因和多期次成矿的特点, 是该地区长期构造演化的结果, 既形成了类似于扬子北缘马元、冰洞山等赋存在震旦系-奥陶系地层中的 MVT 铅锌矿床, 也产出有赋存在志留系-泥盆系地层中的 SEDEX 矿床。

6 结论

(1) 银洞凹矿床与闪锌矿共生热液碳酸盐 U-Pb 年龄为 $456\pm 24\text{Ma}$, 表明该矿床形成于早古生代, 与扬子北缘 MVT 矿床形成时代相近, 是该地区处于扬子北缘被动大陆边缘伸展背景下的产物。

(2) 锡洞沟矿床和银洞凹矿床闪锌矿分别含有较高的 Ga、Ge 含量和 Ge、Cd 含量, 与 MVT 矿床闪锌矿中微量元素特征相似, 两个矿床中, Ga 主要与 Cu 共同替代闪锌矿中的 Zn, Ge 主要与 Cu 和 Ag 共同替代闪锌矿中的 Zn, Cd 直接替代闪锌矿中的 Zn, 而关子沟矿床闪锌矿含有较高的 Fe 和 Co 含量, 与 SEDEX 型矿床闪锌矿微量元素特征相似, 闪锌矿微量元素温度计指示锡洞沟、银洞凹和关子沟矿床分别形成于约 218°C 、 137°C 和 291°C 。

(3) 锡洞沟、银洞凹和关子沟矿床硫化物 S-Pb 同位素组成表明三个矿床硫皆来源于海相沉积岩, 成矿物质皆来源于震旦系-泥盆系下伏沉积盖层或围岩。

(4) 综合研究表明, 南秦岭郧西-旬阳地区赋存在震旦系-奥陶系地层中的锡洞沟和银洞凹矿床为 MVT 矿床, 赋存在志留系地层中的关子沟矿床为 SEDEX 矿床, 南秦岭湖北郧西-陕西旬阳地区铅锌成矿作用具有多成因特点。

致谢

感谢陕西地矿第一地质队有限公司地质工作者在关子沟野外的帮助。编委和两位匿名审稿人对初稿提出了建设性的意见, 在此致以衷心感谢!

作者贡献度说明:

作者 1: 野外考察、数据处理、论文撰写、论文修改、项目支持

作者 2: 论文撰写、论文修改

作者 3-4: 论文修改

作者 5-6: 野外考察

参考文献:

- Cao, L., Duan, Q.F., Zhou, Y., 2015. Rb-Sr Dating of Sphalerites from the Aozigang Zinc Deposit in Hubei Province and Its Geological Significance. *Geology in China*, 42(1):235-247 (in Chinese with English abstract).
- Cao, L., Duan, Q.F., Zhang, Q.X., et al., 2016. Rb-Sr Dating of Sphalerites from the Bingdongshan Pb-Zn Deposit in the Northern Margin of the Yangtze Block and Its Geological Significance. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(6):1280-1289 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z.Y., Ren, T., Zhao, D., 2025. TPE-SVM Model and SHAP Analysis to Identify Pb-Zn Deposit Types Based on Sphalerite Trace Elements. *Earth Science*, 50(11): 4355-4369. doi: 10.3799/dqkx.2025.136
- Claypool, G.E., Holser, W.T., Kaplan, I.R., Sakai, H., and Zak, I., 1980, The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation: *Chemical Geology*, v. 28, p. 199–260. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(80\)90047-9](https://doi.org/10.1016/0009-2541(80)90047-9)
- Dong, Y.P., Santosh M., 2016. Tectonic Architecture and Multiple Orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China. *Gondwana Research*, 29: 1-40. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.06.009>
- Duan, Q.F., 2014. The Research of the Metallogenic Regularity of Stratabound Zinc-Lead Deposits from Sinian-Cambrian in the Western Hunan and Eastern Hubei (Dissertation). China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese with English abstract).
- Feng, Y.M., Cao, X.Z., Zhang, E.P., et al., 2003. Tectonic Evolution Framework and Nature of the West Qinling Orogenic Belt, *Northwestern Geology*, 36(1):1-10 (in Chinese with English abstract).
- Frenzel, M., Hirsch, T., Gutzmer, J., 2016. Gallium, germanium, indium, and other trace and minor elements in sphalerite as a function of deposit type—A meta-analysis. *Ore Geology Reviews*, 2016, 76: 52-78. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.12.017>
- Hill, C.A., Polyak, V.J., Asmerom, Y., et al., 2016. Constraints on a Late Cretaceous Uplift, Denudation, and Incision of the Grand Canyon Region, Southwestern Colorado Plateau, Usa, From U-Pb Dating of Lacustrine Limestone. *Tectonics*, 35: 896-906. <https://doi.org/10.1002/2016TC004166>

- Hu, Q.Q., Wang, Y.T., Mao, J.W., et al., 2015. Timing of the Formation of the Changba–Lijiagou Pb–Zn Ore Deposit, Gansu Province, China: Evidence from Rb–Sr Isotopic Dating of Sulfides. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103: 350-359. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2014.10.021>
- Leach, D.L., Sangster, D.F., Kelley, K.D., et al., 2005. Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposits: A Global Perspective. *Society of Economic Geologists*. <https://doi.org/10.5382/AV100.18>.
- Leach, D.L., Bradley, D.C., Huston, D., et al., 2010. Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposits in Earth History. *Economic Geology*, 105: 593-625. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.593>
- Leach, D.L., Song, Y.C., 2019. Chapter 9 Sediment-Hosted Zinc-Lead and Copper Deposits in China. *Society of Economic Geologists*. <https://doi.org/10.5382/SP.22.09>.
- Li, Z.K., 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 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.157>
- Li, Z.M., 2007. The Study in Mineralization of Zinc-Lead Deposit and Prospecting Direction in Northern Margin and Surrounding Area of Yangtze Platform, China (Dissertation). Chang' an University (in Chinese with English abstract)
- Liu, T.G., Ye, L., Zhou, J.X., et al., 2010. Cd Primarily Isomorphously Replaces Fe but not Zn in Sphalerite. *Acta Mineralogica Sinica*, 30(2):179-184 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2010.02.004>
- Liu, Y.C., Hou, Z.Q., Yue, L.L., et al., 2022. Critical Metals in Sediment-Hosted Pb-Zn Deposits in China. *Chinese Science Bulletin*, 67(4):406-424 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.1360/TB-2021-0838>
- Liu, Y.S., Hu, Z.C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257: 34-43. <https://doi.org/10.1360/TB-2021-0838>
- Ma, C.P., Chen, C.J., He, H.T., et al., 2012. Geological Characteristics and Prospecting Potential of Yingdongao Zinc Deposit of Yunxi County, Hubei Province. *Resources Environment & Engineering*, 29(1):16-19 (in Chinese with English abstract).
- Ma, G.L., Beaudoin, G., Qi, S.J., et al., 2004. Geology and Geochemistry of the Changba Sedex Pb-Zn Deposit, Qinling Orogenic Belt, China. *Mineralium deposita*, 39: 380-395. <https://doi.org/10.1360/TB-2021-0838>

- Machel, H. G., Krouse, H. R., Sassen, R., 1995. Products and distinguishing criteria of bacterial and thermochemical sulfate reduction. *Applied Geochemistry*, 10(4): 373-389. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(95\)00008-8](https://doi.org/10.1016/0883-2927(95)00008-8)
- Nguyen, A.D., Feng, Y.X., Cheng, T., et al., 2019. LA-(MC)-ICPMS U-Pb Geochronology: Potential Calcite Reference Materials. *Goldschmidt Barc.*
- Ohmoto, H., 1979. Isotopes of Sulfur and Carbon. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 509-567.
- Qi, S.J., Li, Y., 1993. The Devonian Lead-Zinc Mineralisation Zone of the Qinling Mountains. Geological Press, Beijing (in Chinese).
- Tan, M.T., 2009. Research for Ore-Forming Material Source of Layer-Controlled Lead-Zinc Deposits in Western Hubei (Dissertation). China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese with English abstract).
- Wang, J.L., He, B.C., Li, J.Z., et al., 1996. Qinling-type lead-zinc deposits in China. Geological Publishing House (in Chinese).
- Wang, T., Huang, J.P., Gao, Y.B., 2008. Mineralization of Pb-Zn deposits in Lower Paleozoic in Xunyang basin, South Qinling. *Northwestern Geology*, 41(4):93-103 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.T., Mao, J.W., Hu, Q.Q., et al., 2021. Characteristics and Metallogeny of Triassic Polymetallic Mineralization in Xicheng and Fengtai Ore Cluster Zones, West Qinling, China and Their Implications for Prospecting Targets. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 43(3):409-435 (in Chinese with English abstract).
- Wei, R., Wang, Y.T., Mei, Y.X., et al. 2022. Genesis and Metallogenic Background of Changba-Lijiagou Giant Pb-Zn Deposit in Gansu Province: Evidence from Geology, Geochemistry and ^{40}Ar - ^{39}Ar Geochronology. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 52(04): 1107-1126 (in Chinese with English Abstract). <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20210362>
- Woodhead, J.D., Hergt, J.M., 2001. Strontium, Neodymium and Lead Isotope Analyses of Nist Glass Certified Reference Materials: SRM 610, 612, 614. *Geostandards Newsletter*, 25: 261-266.
- Wu, H.H., Huang, H., Gao, Y.B., et al., 2022. Genesis of Guanzigou lead-zinc deposit in South Qinling: Evidence from fluid inclusions and H-O-S-Pb isotopes. *Mineral Deposits*, 41(6):1200-

1216 (in Chinese with English abstract).

Xue, C.J., Liu, S.W., Feng, Y.Z., et al., 2005. Geochemistry of Hydrothermal Sedimentary Mineralization in the Lower Paleozoic of the Xunyang Basin, South Qinling, China. *Geological Bulletin of China*, 24(10):927-934 (in Chinese with English abstract).

Yan, D.R., Zhu, J.M., Zhang, H.J., et al., 2010. Geological and Geochemical Characteristics of Bindongshan Pb-Zn Ore Deposit on Northern Margin of Yangtze Landmass. *Geological Science and Technology Information*, 29(6):35-40 (in Chinese with English abstract).

Zartman, R.E., Doe, B.R., 1981. Plumbotectonics—the Model. *Tectonophysics*, 75: 135-162.

Zhang, G.W., Zhang, Z.Q., Dong, Y.P., 1995. Tectonic Properties of Major Structural Stratigraphic Units in the Qinling Orogenic Belt and Their Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 11(02): 101- 114 (in Chinese with English Abstract).

Zhang, G.W., Guo, A.L., Dong, Y.P., et al., 2019. Rethinking of the Qinling Orogen. *Journal of Geomechanics*, 25(5):746-768 (in Chinese with English abstract).

Zhang, H.F., Ouyang, J.P., Ling, W.N., et al., 1996. Tectonic Division of Douling Massif of East Qinling by Pb Isotopic Compositional Characteristics. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 21(5):487-490 (in Chinese with English abstract).

Zhu, H.P., 2004. Geology and Geochemistry for Copper and Zinc Deposits of Zhashui-Shanyang Area-the Importance of Epigenetic Mineralization (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).

Zhu, L.M., Zhang, G.W., Li, B., et al., 2008. Major Geological Events, Deposit Types, and Metallogenic Tectonic Background of the Qinling Orogenic Belt. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(04): 384-390 (in Chinese with English Abstract).

附中文参考文献:

曹亮, 段其发, 周云, 2015. 湖北凹子岗锌矿床Rb-Sr同位素测年及其地质意义. *中国地质*, 42(1):235-247.

曹亮, 段其发, 张权绪, 等, 2016. 扬子陆块北缘冰洞山铅锌矿床闪锌矿Rb-Sr定年及其地质意义. *矿物岩石地球化学通报*, 35(6):1280-1289.

陈忠元, 任涛, 赵冻, 2025. 基于TPE-SVM模型和SHAP解释的闪锌矿微量元素特征识别铅锌矿床类型. *地球科学*, 50(11): 4355-4369.

- 段其发, 2014. 湘西—鄂西地区震旦系—寒武系层控铅锌矿成矿规律研究(博士学位论文). 中国地质大学(武汉).
- 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 等, 2003. 西秦岭造山带的演化、构造格局和性质. 西北地质, 36(1):1-10.
- 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(6):2083-2106.
- 李智明, 2007. 扬子北缘及周边地区铅锌成矿作用与找矿方向研究(博士学位论文). 长安大学.
- 刘铁庚, 叶霖, 周家喜, 等, 2010. 闪锌矿中的Cd主要类质同象置换Fe而不是Zn. 矿物学报, 30(2):179-184.
- 刘英超, 侯增谦, 岳龙, 等, 2022. 中国沉积岩容矿铅锌矿床中的关键金属. 科学通报, 67(4):406-424.
- 马翠萍, 陈长江, 何洪涛, 等, 2015. 湖北省郧西县银洞凹锌矿床地质特征及找矿前景. 资源环境与工程, 29(1):16-19.
- 祁思敬, 李英, 1993. 秦岭泥盆系铅锌成矿带. 地质出版社.
- 谭满堂, 2009. 鄂西地区层控型铅锌矿床成矿物质来源研究(博士学位论文). 中国地质大学(武汉).
- 王集磊, 何伯樾, 李健中, 等, 1996. 中国秦岭型铅锌矿床. 地质出版社.
- 王涛, 黄建平, 高永宝, 等, 2008. 南秦岭旬阳盆地下古生界铅锌成矿作用. 西北地质, 41(4):93-103.
- 王义天, 毛景文, 胡乔青, 等, 2021. 西秦岭西成和风太矿集区三叠纪多金属成矿作用特征、规律及找矿方向. 地球科学与环境学报, 43(3):409-435.
- 魏然, 王义天, 梅燕雄, 等, 2022. 甘肃厂坝—李家沟超大型铅锌矿床成因与成矿背景——矿床地质、矿物元素地球化学和 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素年代学证据. 吉林大学学报(地球科学版), 52(04):1107-1126.
- 吴欢欢, 黄河, 高永宝, 等, 2022. 南秦岭关子沟铅锌矿床成因: 流体包裹体和H-O-S-Pb同位素证据. 矿床地质, 41(6):1200-1216.
- 薛春纪, 刘淑文, 冯永忠, 等, 2005. 南秦岭旬阳盆地下古生界热水沉积成矿地球化学. 地质通报, 24(10):927-934.
- 颜代蓉, 祝敬明, 张汉金, 等, 2010. 扬子地块北缘冰洞山铅锌矿床地质及地球化学特征.

地质科技情报, 29(6):35-40.

张国伟, 张宗清, 董云鹏, 1995. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义. 岩石学报, 11(02): 101-114.

张国伟, 郭安林, 董云鹏, 等, 2019. 关于秦岭造山带. 地质力学学报, 25(5):746-768.

张宏飞, 欧阳建平, 凌文黎, 等, 1996. 从Pb同位素组成特征论东秦岭陡岭块体的构造归属. 地球科学, 21(5):487-490.

朱华平, 2004. 柞山地区铜锌多金属矿床地质—地球化学—后生成矿作用的重要性(博士学位论文). 中国地质科学院.

朱赖民, 张国伟, 李焱, 等, 2008. 秦岭造山带重大地质事件、矿床类型和成矿大陆动力学背景. 矿物岩石地球化学通报, 27(04): 384-390.