



移动阅读

赵伟策, 祝新友, 王书来, 等, 2023. 云南会泽铅锌矿灯影组矿石硫、铅同位素组成及找矿意义[J]. 沉积与特提斯地质, 43(1): 156–167. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.10004](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.10004)

ZHAO W C, ZHU X Y, WANG S L, et al., 2023. Sulfur and lead isotopic compositions of ores from the Dengying Formation and their prospecting implications in the Huize Pb–Zn deposit, Yunnan Province[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(1): 156–167. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.10004](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.10004)

云南会泽铅锌矿灯影组矿石硫、铅同位素组成及找矿意义

赵伟策¹, 祝新友^{1,2}, 王书来¹, 蒋斌斌², 刘 孜¹, 管育春¹

(1. 北京矿产地质研究院有限责任公司, 北京 100012; 2. 中色紫金地质勘查(北京)有限责任公司, 北京 100012)

摘要: 会泽超大型铅锌矿床位于川滇黔铅锌成矿带的核心部位, 矿体主要赋存于下石炭统大埔组白云岩中, 少量产于上泥盆统宰格组白云岩中, 近年来在深部上震旦统灯影组白云岩中新发现了铅锌矿化线索。本文在详细的野外地质调查与矿相学显微观察的基础上, 针对灯影组矿石开展了系统的硫化物微区 LA-MC-ICP-MS 原位硫、铅同位素分析。结果表明, 灯影组矿石的硫同位素值集中于 $-29.6‰$ ~ $-22.2‰$ 和 $+6.3‰$ ~ $+18.8‰$ 两个变化范围, 表明硫主要来自碳酸盐岩地层中海相硫酸盐的热化学还原反应, 少量由细菌化学还原反应生成。灯影组矿石的铅同位素比值 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别介于 18.480~18.909、15.714~15.747、38.427~38.959, 暗示铅为单一来源或混合较为均一的多源, 并具有壳源特征。综合前人研究成果及成矿地质与地球化学特征, 本文认为, 会泽铅锌矿床应归属于 MVT 矿床。灯影组矿石的硫、铅同位素组成特征指示会泽铅锌矿床在“新层位”灯影组具有较好的找矿潜力。

关键词: LA-MC-ICP-MS; 硫、铅同位素组成; 灯影组; 会泽铅锌矿; “新层位”找矿

中图分类号: P618.42; P618.43

文献标识码: A

Sulfur and lead isotopic compositions of ores from the Dengying Formation and their prospecting implications in the Huize Pb–Zn deposit, Yunnan Province

ZHAO Weice¹, ZHU Xinyou^{1,2}, WANG Shulai¹, JIANG Binbin², LIU Zi¹, GUAN Yuchun¹

(1. Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Co., Ltd., Beijing 100012, China; 2. Sino-Zijin Resource Ltd., Beijing 100012, China)

Abstract: The giant Huize lead-zinc deposit is situated at the core area of the Sichuan-Yunnan-Guizhou lead-zinc metallogenic province. The mineralization is mostly hosted in the dolomite of the Lower Carboniferous Dapu Formation and minor orebodies occur in the dolomite of the Upper Devonian Zaige Formation. The mineralization has been newly discovered in the dolomite of the Upper Sinian Dengying Formation. In this paper, on the basis of detailed field investigation and microscopic observation on ore minerals, we conducted systematic LA–MC–ICP–MS sulfur and lead isotopic analyses on sulfides from ores hosted in the Dengying Formation. The $\delta^{34}\text{S}$ values of the sulfides have two variation ranges, which are $-29.6‰$ ~ $-22.2‰$ and $+6.3‰$ ~ $+18.8‰$, respectively. The results indicate that most of the sulfur was sourced from thermal reduction of marine sulfates in the carbonates, and a little of the sulfur was generated from bacterial sulfate reduction. The ratios of $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vary in narrow ranges of 18.480~18.909, 15.714~15.747, 38.427~38.959, respectively, which suggests a single source or multiple sources with

收稿日期: 2022-07-11; 改回日期: 2022-07-26; 责任编辑: 黄春梅; 科学编辑: 张向飞

作者简介: 赵伟策 (1991—), 男, 博士, 主要从事矿床学研究; E-mail: zhaoweice2008@163.com

资助项目: 中铜矿产资源有限公司重点科技计划项目 (编号: 2004YZKC006)

homogeneous mixing and an upper crust source for the lead. In combination with previous studies, and geological and geochemical characteristics, we suggest that the Huize lead-zinc deposit should be assigned as a MVT deposit. The ores hosted in the Dengying Formation imply a good prospecting potential in the Dengying Formation.

Key words: LA-MC-ICP-MS; S-Pb isotopic compositions; Dengying Formation; Huize lead-zinc deposit; "New formation" prospecting

0 引言

川滇黔铅锌成矿带地处扬子地块西南部(图 1a), 产出有会泽、天宝山、大梁子、猪拱塘等多个大型—超大型铅锌矿床以及数百个中型—小型矿床或矿点(图 1b), 累计探明铅锌储量超过 2000 万吨, 并伴生有大量的银以及锗、镉、镓、铊等稀散金属资源, 是我国重要的铅锌多金属生产基地(柳贺昌和林文达, 1999; Zhou et al., 2018; 韩润生等, 2022)。这些铅锌矿床主要产于震旦系至二叠系台地相碳酸盐岩建造中, 其中, 上震旦统灯影组、上泥盆统宰格组、下石炭统大埔组、上石炭统黄龙组、中二叠世栖霞茅口组等是区域铅锌矿床的主要含矿层位, “多层位”成矿是川滇黔铅锌成矿带的最典型特征之一(张长青, 2008)。

会泽超大型铅锌矿床位于川滇黔铅锌成矿带的核心部位(图 1b), 铅锌储量大(> 700 万吨)、矿石平均品位高(25%~35%)、伴生有用金属元素多(银、锗、镉等), 是区域规模最大、最为典型的碳酸盐岩容矿铅锌矿床之一(Han et al., 2007; 韩润生等, 2012)。长期以来, 有关会泽及川滇黔地区的铅锌矿床的成因类型备受争议, 先后存在“岩浆热液”说(谢家荣, 1963)、“沉积”说(张位及, 1984)、“沉积-改造”说(陈士杰, 1984)、“沉积-成岩期后热液改造-叠加”说(陈进, 1993)、“沉积-改造-后成”说(柳贺昌和林文达, 1999)、“MVT 成因”说(Zhou et al., 2001; 张长青, 2008)与“构造-流体贯入成矿”说(会泽型; HZT; 韩润生等, 2012)等观点。另外, 尽管在前期理论研究的基础上, 矿山勘查与找矿工作不断取得新进展, 但是作为已持续开采约七十年之久的老矿山, 资源枯竭的难题已日益凸显, 新的勘查思路与找矿方向亟待突破。会泽铅锌矿床具有明显的“多层位”成矿特征, 矿体主要赋存于下石炭统大埔组、上泥盆统宰格组中, 近年来, 在矿床深部灯影组白云岩中也发现了重要的铅锌矿化线索。因此, 灯影组矿石为确定会泽铅锌矿床的成因及建立“新层位”找矿的新思路提供了理

想的研究对象。本文在前人研究基础上, 通过详细的野外地质调查与系统的矿相学显微观察, 针对会泽铅锌矿床深部灯影组矿石开展了硫化物微区 LA-ICP-MS 原位硫、铅同位素分析, 并综合前人研究成果, 揭示灯影组矿石的成矿物质来源、找矿潜力以及矿床成因与机制等问题, 为会泽铅锌矿床的“新层位”找矿提供研究基础与理论指导。

1 区域地质背景

川滇黔铅锌成矿带位于扬子地台西南部(图 1a), 主要发育两层古老基底, 下部是太古代—古元古代深变质结晶基底, 上部是由中元古代陆源碎屑岩夹碳酸盐岩与新元古代早期中-基性火山-沉积岩系构成的褶皱基底(江新胜等, 2020)。沉积盖层包括震旦系—志留系海相碎屑岩夹碳酸盐岩建造、泥盆系—中三叠统海相碳酸盐岩夹碎屑岩与少量火山岩以及上三叠统—第四系陆相沉积序列(张国伟等, 2013; 申滔等, 2019)。上震旦统一中二叠统台地相碳酸盐岩建造是川滇黔交界地带的铅锌矿床的重要含矿岩系(柳贺昌和林文达, 1999)。区域构造以近 NE—SW 向褶冲带与近 N—S 向、近 NW—SE 向走滑剪切构造带等三组构造体系为典型特征(图 1b; 韩润生等, 2022; 尹福光等, 2021a)。近 NE—SW 向褶冲带主要有 5 条, 自北西向南东依次包括: 巧家—曲靖断裂带、鲁甸—盐津断裂带、会泽—彝良断裂带、东川—镇雄断裂带、寻甸—宣威断裂带; 近 N—S 向走滑剪切构造带以安宁河断裂带、小江断裂带为代表, 表现为大规模左旋剪切变形; 近 NW—SE 向走滑断裂带主要是紫云—垭都断裂带, 对两侧的地层和构造具有明显的控制作用(尹福光等, 2021b; 张志超等, 2020)。区域岩浆岩主要形成于元古代, 分布于其西缘一线, 记录了早前寒武纪的多块体、多时期陆壳拼贴与增生事件(尹福光等, 2012)。显生宙岩浆活动甚微, 仅有晚二叠世因地幔柱活动而导致的裂谷环境下的峨眉山大陆溢流玄武岩喷发事件(图 1b; 徐义刚和钟孙霖, 2001)。

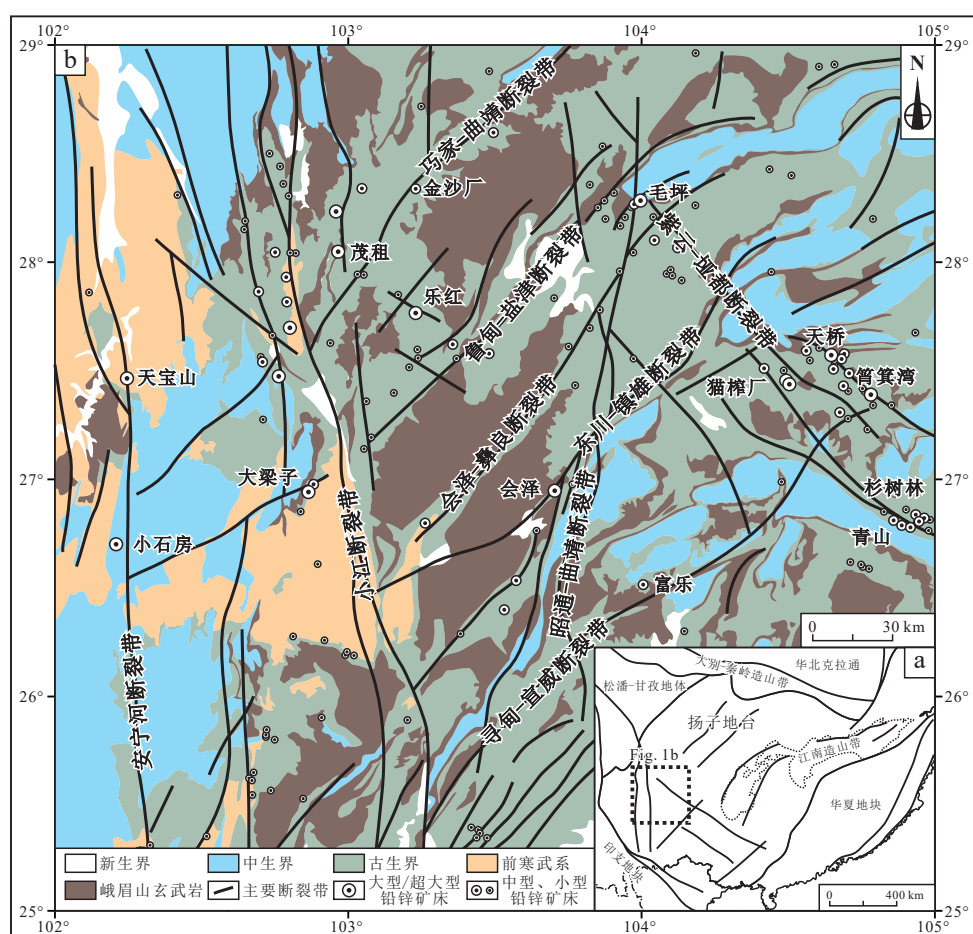


图1 川滇黔铅锌成矿带大地构造位置图(a)与区域地质简图(b)(据 Zhao et al., 2022 修改)

Fig. 1 Tectonic location (a) and simplified geological map (b) of the Sichuan-Yunnan-Guizhou lead-zinc province (modified after Zhao et al., 2022)

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质概况

会泽铅锌矿床主要分为矿山厂与麒麟厂两个独立矿段, 累计已探明的铅锌储量约 700 万吨, 矿石平均品位大于 25%(图 2; Han et al., 2007)。矿区出露地层自底部至顶部依次包括: 上震旦统灯影组细晶白云岩, 下寒武统筇竹寺组炭质泥质页岩、粉砂岩, 中泥盆统海口组中细粒石英砂岩、粉砂岩, 上泥盆统宰格组细晶白云岩, 下石炭统梓潼组结晶灰岩, 下石炭统大铺组中-粗晶白云岩, 上石炭统黄龙组生物碎屑灰岩、鲕状灰岩、白云质灰岩, 上石炭统一下二叠统马平组紫红色角砾状灰岩夹泥页岩, 中一下二叠统梁山组细粒石英砂岩、粉砂岩夹页岩、炭质页岩, 中二叠统阳新组厚层状灰岩, 上二叠统峨眉山玄武岩等(图 3)。灯影组与筇竹寺组之间及筇竹寺组与上古生界之间为假整合接触关

系, 上古生界各组之间为整合接触关系, 峨眉山玄武岩呈喷发不整合覆盖在上古生界之上。下石炭统大铺组为主要含矿层位, 次为上泥盆统宰格组, 上震旦统灯影组中也赋存有少量铅锌矿体。矿区构造格局以 NE—SW 向褶冲构造为主, 包括 NE—SW 向矿山厂逆断层、NE—SW 向矿山厂背斜与 NNE—SSW 向麒麟厂逆断层等, 自南东向北西的逆冲作用将灯影组至阳新组推覆至矿区西北侧的峨眉山玄武岩之上; 次为 NW—SE 向断层, 主要表现为左行走滑活动或正向滑动, 轻微错断 NE—SW 向褶冲构造; 近 N—S 向断层以东头断裂为代表, 将地层与近 NE—SW 向褶冲构造右行切错(图 2)。

2.2 矿化与蚀变特征

铅锌矿体主要赋存于下石炭统大铺组中上部的粗晶白云岩中, 少数赋存于上泥盆统宰格组上部白云岩中, 近来在上震旦统灯影组白云岩中也发现

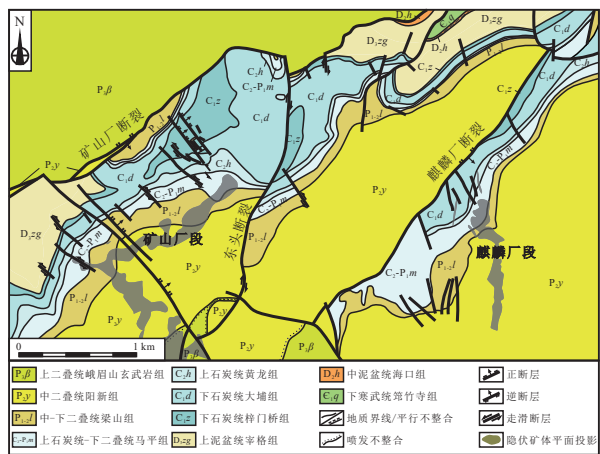


图2 会泽铅锌矿床地质图(据 Han et al., 2007 修改)

Fig. 2 Geological map of the Huize lead-zinc deposit (modified after Han et al., 2007)

有小规模铅锌矿体。矿体分别就位于矿山厂断裂和麒麟厂断裂的上盘,严格受控于NE—SW向层间破碎带,具有显著的“层控”特征,产状与NE—SW向层间破碎带以及围岩地层的产状基本一致,走向NE20°~30°,倾向SE,倾角50°~70°。矿体顶、底板与围岩界线清楚,平面上呈“似层状”、透镜状、囊状和脉状;剖面上呈“阶梯状”,表现为透镜体形态。矿体具有走向延伸大于倾向延长、产状较陡(倾角大于50°)、空间上“缓宽陡窄”的特征(Han et al., 2007)。

灯影组矿石与大埔组矿石、宰格组矿石具有相似的蚀变与矿化特征,矿石矿物组合较为简单,主要包括闪锌矿、方铅矿、黄铁矿(图4)。矿石构造有块状、角砾状、团块状、脉状以及浸染状等(图4a、b、c、d)。矿石结构以结晶结构、交代结构为主,主要包括半自形—自形结构(图4e)、它形结构(图4f)、交代残余结构(图4g、h、i)等。脉石矿物以白云石(50%~55%)、方解石(42%~47%)为主,含有很少量的石英(3%;图4k)。热液蚀变表现为碳酸盐岩溶解、交代、重结晶与热液角砾岩化,发育溶解坍塌角砾岩、白云石化与方解石化等现象(图4b、c)。在野外地质调查与矿相学显微观察的基础上,根据矿物共生组合、相互穿插关系与生成顺序等证据,将热液成矿作用划分为三个阶段:(1)早阶段为暗黄色细粒黄铁矿+白云石阶段,暗黄色、细粒黄铁矿往往构成致密粒状集合体(图4e);(2)主阶段为深色闪锌矿+方铅矿+亮黄色粗粒黄铁矿+白云石阶段(II),闪锌矿颜色较深,透射单偏光

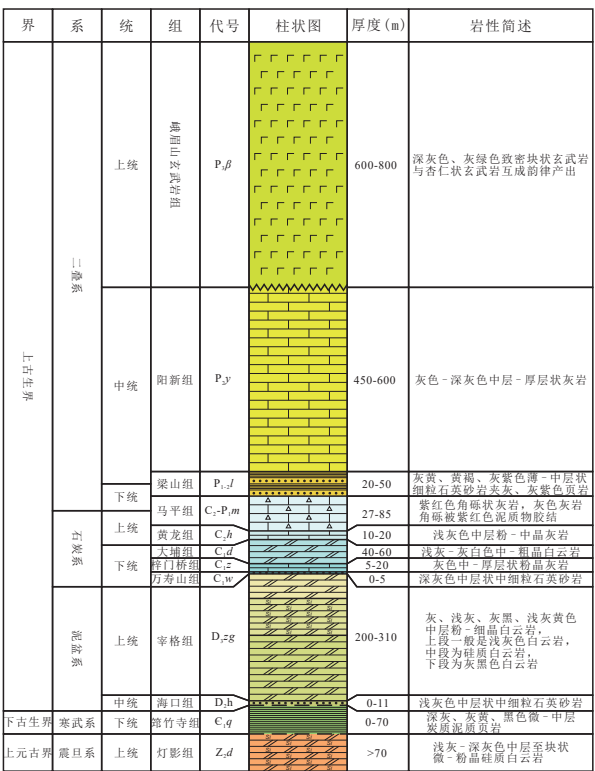


图3 会泽铅锌矿床地层柱状图(据柳贺昌和林文达, 1999 修改)

Fig. 3 Stratigraphical column of the Huize lead-zinc deposit (modified after Liu and Lin, 1999)

下呈红褐色、深棕色、红棕色、黄棕色、棕色等(图4j),方铅矿与闪锌矿共生,且普遍交代早阶段细粒黄铁矿(图4g、h、i);(3)晚阶段为浅色闪锌矿+方铅矿+方解石阶段,黄铁矿基本不发育,闪锌矿颜色较浅,呈浅黄色至半透明状(图4d)。此外,晚阶段形成的厚大的热液方解石块体常见覆于铅锌矿体的顶部之上,构成所谓“雪顶”构造(图4l; Leach et al., 2005)。

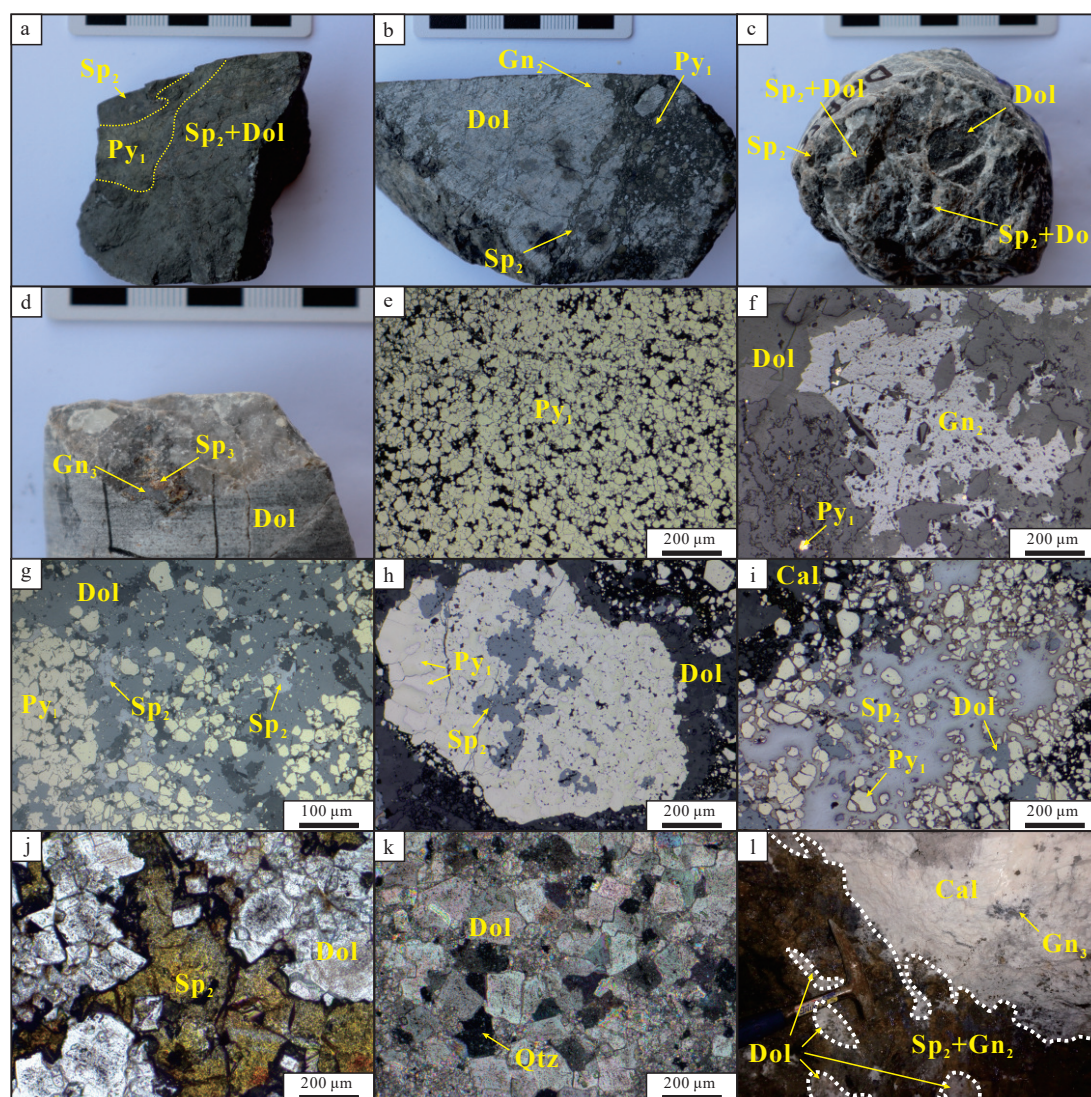
3 样品采集与分析方法

在会泽铅锌矿床采集了5件灯影组铅锌矿石,主要是块状、角砾状、脉状矿石,将矿石样品磨制成探针片并进行岩、矿相学显微观察,在此基础上,挑选代表性的金属矿物并圈定适当的硫化物测点,开展硫化物微区LA-MC-ICP-MS法原位硫、铅同位素分析。

3 样品采集与分析方法

硫同位素分析在国家地质实验测试中心完成,仪器为J200飞秒激光剥蚀系统与Neptune Plus多接收电感耦合等离子体质谱仪。激光剥蚀系统采用氦气作为载气,分析采用线模式,激光束斑为

硫同位素分析在国家地质实验测试中心完成,仪器为J200飞秒激光剥蚀系统与Neptune Plus多接收电感耦合等离子体质谱仪。激光剥蚀系统采用氦气作为载气,分析采用线模式,激光束斑为



a. 块状矿石；b. 角砾状、浸染状、脉状矿石；c. 脉状矿石；d. 团块状矿石；e. 细粒半自形-自形黄铁矿；f. 粗粒它形方铅矿；g~i. 闪锌矿交代细粒黄铁矿；j. 不同颜色闪锌矿；k. 热液白云石与石英；l. 雪顶构造；Sp—闪锌矿；Gn—方铅矿；Py—黄铁矿；Dol—白云石；Cal—方解石；Qtz—石英。

图4 会泽铅锌矿床典型矿化特征 (e~i 为反射光显微照片；j 为透射单偏光显微照片；k 为透射正交偏光显微照片)

Fig. 4 Photographs and microphotographs of the ores from the Huize lead-zinc deposit (Figures e~j are microphotographs under reflection light. Figure j are microphotographs under plane-polarized light. Figure k are microphotographs under cross-polarized light)

20 $\mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$, 脉冲频率为 4~6 Hz, 能量密度固定为 1.02 J/m²。实验过程中, 每个测点的分析时间为 75 s, 包括空白背景采集 15 s、样品连续剥蚀采集 45 s、停止剥蚀后继续吹扫清洗进样系统 15 s。黄铁矿与闪锌矿测点分别使用 JX 与 NBS123 作为标样并进行数据校正 (Crowe and Vaughan, 1996), 测试精度优于 $\pm 0.2\%$, 分析误差以 1σ 给出。

铅同位素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成, 仪器为 Geolas HD 飞秒激光剥蚀系统与

Neptune Plus 多接收电感耦合等离子体质谱仪。激光剥蚀系统使用氦气作为载气 (600 ml/min), 激光束斑的大小和剥蚀频率分别为 90~160 μm 和 8 Hz, 激光能量强度为 10 J/cm²。闪锌矿标样 Sph-HYLM 作为外标用以监控分析精密度和准确度, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 与 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% (2σ)。数据处理采用专业同位素数据处理软件 “Iso-Compass” 完成 (Zhang et al., 2020)。详细的仪器操作条件和

分析测试方法见 Zhang et al.(2016)。

4 分析结果

4.1 硫同位素组成

本文针对会泽铅锌矿床 5 件灯影组矿石样品中的黄铁矿与闪锌矿分别完成了 18 个与 25 个测点的分析,其中,有 4 个黄铁矿测点与 1 个闪锌矿测点未获得有效数据,分析结果列于表 1。灯影组矿石中,阶段 I 黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值存在两个变化范围,一组为正值(12 个测点),样品为块状与脉状铅锌矿石, $\delta^{34}\text{S}$ 值比较集中,介于+13.9‰~+16.1‰之间,均值 15.3‰,极差 2.2‰;一组为负值(2 个测点), $\delta^{34}\text{S}$ 值分别是-29.6‰、-22.2‰,均值-25.9‰,极差 7.4‰。闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较大,介于

表 1 会泽铅锌矿床灯影组矿石硫同位素分析结果表

Table 1 Analytical results of the sulfur isotopic composition of the sulfides from the Huize lead-zinc deposit

样品编号	测点号	阶段	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)	1 σ (‰)
DHB02	DHB02-PY1	I	细粒黄铁矿	+15.8	0.2
	DHB02-PY2	I	细粒黄铁矿	+16.0	0.2
	DHB02-PY3	I	细粒黄铁矿	+16.1	0.2
	DHB02-PY4	I	细粒黄铁矿	+16.1	0.2
	DHB02-PY5	I	细粒黄铁矿	+13.3	0.2
	DHB02-PY6	I	细粒黄铁矿	+15.4	0.2
	DHB02-PY7	I	细粒黄铁矿	+13.9	0.2
	DHB02-SP1	III	半透明闪锌矿	+18.8	0.2
	DHB02-SP2	III	半透明闪锌矿	+17.1	0.2
	DHB02-SP3	II	黄棕色闪锌矿	+16.0	0.2
DHB05	DHB05-PY1	I	细粒黄铁矿	+16.1	0.2
	DHB05-PY4	I	细粒黄铁矿	+15.4	0.2
	DHB05-PY5	I	细粒黄铁矿	+15.3	0.2
	DHB05-PY6	I	细粒黄铁矿	+14.3	0.2
	DHB05-PY7	I	细粒黄铁矿	+15.3	0.2
	DHB05-SP1	III	半透明闪锌矿	+14.6	0.2
	DHB05-SP2	III	浅黄色闪锌矿	+16.8	0.2
	DHB05-SP3	III	半透明闪锌矿	+16.1	0.2
	DHB05-SP4	III	半透明闪锌矿	+14.5	0.2
	DHB05-SP5	II	黄棕色闪锌矿	+14.1	0.2
DHB56	DHB56-SP1	II	透明闪锌矿	+13.9	0.2
	DHB56-SP2	II	浅黄色-半透明闪锌矿	+10.0	0.2
	DHB56-SP3	II	浅黄色-半透明闪锌矿	+12.1	0.2
	DHB56-SP4	II	浅黄色-半透明闪锌矿	+12.5	0.2
	DHB56-SP5	II	浅黄色-半透明闪锌矿	+13.9	0.2
	DHB56-SP6	II	浅黄色-半透明闪锌矿	+14.6	0.2
DHB57	DHB57-PY1	I	浅黄色-半透明闪锌矿	+13.8	0.2
	DHB57-PY3	I	细粒黄铁矿	-22.2	0.2
	DHB57-SP1	II	细粒黄铁矿	-29.6	0.2
	DHB57-SP2	II	红褐色闪锌矿	+14.3	0.2
DHB60	DHB60-SP1	III	红褐闪锌矿	+16.0	0.2
	DHB60-SP2	III	半透明闪锌矿	+10.8	0.2
	DHB60-SP3	III	半透明闪锌矿	+10.5	0.2
	DHB60-SP4	II	浅黄色闪锌矿	+11.1	0.2
	DHB60-SP5	II	黄棕色闪锌矿	+6.3	0.2
	DHB60-SP6	II	黄棕色闪锌矿	+10.2	0.2
		II	黄棕色闪锌矿	+7.7	0.2

+6.3‰~+18.8‰之间, 均值 13.4‰, 极差 12.5‰; 其中, 阶段 II 深色类闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值的范围为+6.3‰至+16.0‰, 均值 12.7‰, 极差 9.7‰; 阶段 III 浅色类闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值的范围为+10.0‰至+18.8‰, 均值 13.9‰, 极差 8.8‰, 相比阶段 II 深色类闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值总体上偏高。

4.2 铅同位素组成

本文针对会泽铅锌矿床 3 件灯影组矿石样品中的黄铁矿与方铅矿分别完成了 7 个与 3 个测点的分析, 其中 4 个黄铁矿测点因激光打穿矿物而获得无效数据, 分析结果见表 2。灯影组矿石中, 阶段 I 细粒黄铁矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围分别为 18.480~18.909、15.714~15.737、38.427~38.917, 均值分别为 18.624、15.728、38.751, 极差分别为 0.429、0.023、0.490。3 个黄铁矿测点的铅同位素 μ 值介于 9.64~9.72 之间。阶段 II 铅锌矿石中方铅矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围分别为 18.610~18.742、15.739~15.747、38.930~38.959, 均值分别为 18.671、15.744、38.947, 极差分别为 0.132、0.008、0.029。3 个方铅矿测点的铅同位素 μ 值均为 9.72。

5 讨论

5.1 硫的来源及其还原机制

热液矿床中硫化物主要有三种硫的来源: (1)幔源硫, $\delta^{34}\text{S}$ 值接近于零, 呈塔式分布; (2)壳源硫, $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较大, 海水或海相硫酸盐富集重硫, 生物成因的硫富集轻硫; (3)混合硫, 具有混合 $\delta^{34}\text{S}$ 值的特征 (Ohmoto, 1972)。低氧逸度条件下, 热液流体中的硫以 HS^- 、 S^{2-} 的形式存在, 沉淀

出的硫化物以黄铁矿为主, $\delta^{34}\text{S}$ 值与热液流体的总硫同位素值接近; 高氧逸度条件下, 还原态的硫将转化为 SO_4^{2-} 而形成富集 ^{34}S 的硫酸盐, 使热液流体中亏损 ^{34}S , 沉淀出的硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值低于热液流体的总硫同位素值 (Ohmoto and Goldhaber, 1997)。灯影组矿物组合以黄铁矿、闪锌矿、方铅矿为主, 几乎不存在硫酸盐矿物, 说明硫化物沉淀时热液流体处于较低氧逸度的状态, 硫主要以 HS^- 、 S^{2-} 的形式存在, 总硫同位素值 ($\delta^{34}\text{S}_{\text{ss}}$) 近似于硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值。本文分析显示, 灯影组矿石中的黄铁矿与闪锌矿具有宽泛的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围 (-29.6‰~+18.8‰), 均值为 11.9‰, 可近似作为热液流体的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{ss}}$ 值。显然, 灯影组矿石中的总硫同位素值远高于幔源硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值, 且不存在与幔源硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值相近的样品, 说明灯影组矿石中的硫不来源于地幔 (图 5)。因此, 矿区北西侧广泛出露的峨眉山玄武岩并非灯影组矿石中硫的来源。

已有研究表明, 会泽铅锌矿床的大埔组与宰格组矿石中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于+4.3‰~+23.5‰, 硫主要来源于碳酸盐岩地层中海相硫酸盐的还原 (韩润生等, 2001; 李文博等, 2006; 王磊等, 2016; 任顺利等, 2018; Meng et al., 2019)。本次针对灯影组矿石中黄铁矿与闪锌矿的微区 LA-MC-ICP-MS 原位硫同位素分析表明, 多数样品的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{硫化物}}$ 为正值 (36 个测点), 介于+6.3‰~+18.8‰; 其中, 成矿早、中、晚阶段硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{硫化物}}$ 的变化范围分别为 +13.3‰~+16.1‰、+6.3‰~+16.0‰、+10.0‰~+18.8‰, 均显示富集重硫的特征, 且与大埔组及宰格组矿石的硫同位素组成特征相似, 因此, 灯影组矿石中的硫也很可能来源于碳酸盐岩地层中富含海相

表 2 会泽铅锌矿床灯影组矿石铅同位素分析结果表

Table 2 Analytical results of the lead isotopic composition of the sulfides from the Huize lead-zinc deposit

样品编号	DHB02		DHB60			
测点号	DHB02-03(Py)	DHB02-04(Py)	DHB60-1(Py)	DHB60-1(Gn)	DHB60-2(Gn)	DHB60-3(Gn)
成矿阶段	I	I	I	II	II	II
测试矿物	细粒黄铁矿	细粒黄铁矿	细粒黄铁矿	粗粒方铅矿	粗粒方铅矿	粗粒方铅矿
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	38.917	38.909	38.427	38.93	38.952	38.959
2 σ	0.006	0.007	0.01	0.007	0.009	0.008
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	15.737	15.734	15.714	15.739	15.747	15.747
2 σ	0.002	0.002	0.004	0.002	0.002	0.002
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	18.483	18.48	18.909	18.61	18.701	18.702
2 σ	0.002	0.002	0.005	0.003	0.003	0.003
μ	9.72	9.72	9.64	9.72	9.72	9.72

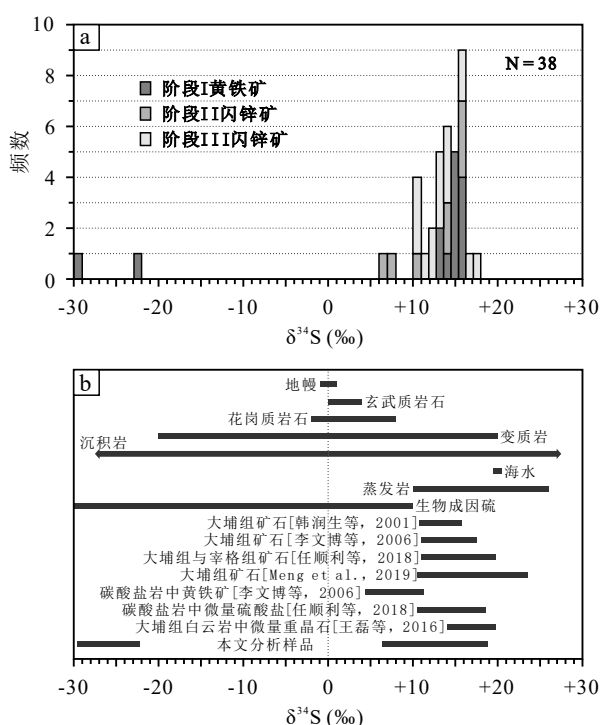


图5 会泽铅锌矿床硫同位素组成直方图(a)及其与不同储库(Hoefs, 2018)与前人发表的硫同位素组成对比(b)
Fig. 5 Histogram of the sulfur isotopic composition of the sulfides from the Huize lead-zinc deposit (a) and comparison with the sulfur isotopic composition from different sulfur sources (Hoefs, 2018) and previous data (b)

硫酸盐的蒸发岩层。此外,成矿早阶段黄铁矿还具有负的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(2个测点),分别为 -29.6‰ 、 -22.2‰ ,显著亏损 ^{34}S ,表明还可能存在少量生物成因的硫(图5)。研究表明,硫酸盐的还原机制主要有两种,一种是细菌还原机制(BSR),只能在温度小于 120℃ 的条件下发生,产生的还原性硫数量有限且 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围大;另一种是热化学还原机制(TSR),主要发生在温度大于 175℃ 的条件下,能够形成大量还原性硫且 $\delta^{34}\text{S}$ 值相对稳定(Ohmoto, 1986)。方铅矿-闪锌矿的硫同位素热力学平衡温度计算表明,会泽铅锌矿床的成矿温度介于 $170\sim 300\text{℃}$,属中—低温范畴(李文博等, 2006; 任顺利等, 2018; Meng et al., 2019)。但流体包裹体显微测温分析表明,会泽铅锌矿床的成矿温度范围较大,闪锌矿中流体包裹体的均一温度较高,多数集中在为 $126\sim 250\text{℃}$ (韩润生等, 2001, 2016; 张艳等, 2017; 王健等, 2018);白云石中流体包裹体的均一温度偏低,介于 $86\sim 163\text{℃}$ (张艳等, 2017)。显然,会泽铅锌矿床的成矿温度条件以及灯影组矿石多

数富集重硫的特征表明,TSR对热液流体中还原性硫的生成具有主导作用。少量白云石中流体包裹体具有低于 120℃ 的均一温度,为BSR的发生提供了客观的温度条件,成矿早阶段黄铁矿具有负的硫同位素值,表明BSR很可能发生于成矿早阶段,低温条件致使BSR发生并为灯影组矿石中硫化物(主要是黄铁矿)的沉淀提供了微量还原性硫。

5.2 铅的来源

矿石中的硫化物通常富集放射性铅并亏损铀、钍,在流体运移和硫化物沉淀过程中,铀、钍因衰变而形成的放射性铅往往非常低微,因此,成矿过程中硫化物的铅同位素组成的变化可忽略不计,因而能够较好地反映出初始成矿流体的铅同位素组成,是示踪金属矿床成矿物质来源的良好对象(Zartman and Doe, 1981)。会泽灯影组矿石中,黄铁矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围分别为 $18.480\sim 18.909$ 、 $15.714\sim 15.737$ 、 $38.427\sim 38.917$,极差分别为 0.429 、 0.023 、 0.490 ;方铅矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围分别为 $18.610\sim 18.742$ 、 $15.739\sim 15.747$ 、 $38.930\sim 38.959$,极差分别为 0.132 、 0.008 、 0.029 。铅同位素组成变化范围均较为集中,暗示铅为单一源区或混合较为均一的多个源区。根据 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}-^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}-^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解(图6),除1个测点外,其余所有测点的铅同位素比值投点呈较好的线性关系,暗示灯影组矿石中的铅可能为混合来源(Franklin et al., 1983)。在铅构造模式图中(图6),所有测点的数据均位于上地壳与造山带的平均演化线附近,暗示灯影组矿石中的铅很可能主要来源于上地壳,并存在少量造山带铅的混入。所有样品的 μ 值介于 $9.64\sim 9.72$ 之间,略高于上地壳的 μ 值(9.58),也暗示铅很可能主要来源于上地壳。前人研究表明,大埔组与宰格组矿石中硫化物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值的分别介于 $18.251\sim 18.530$ 、 $15.663\sim 15.855$ 、 $38.487\sim 39.433$,不同时代的碳酸盐岩建造以及新元古界昆阳群碎屑岩系是大埔组与宰格组矿石中铅的主要来源(Zhou et al., 2001; 李文博等, 2006; Bao et al., 2017)。本次分析获得灯影组矿石中硫化物的铅同位素比值与大埔组与宰格组矿石中硫化物的铅同位素组成特征基本一致,暗示灯影组矿石与后两者很可能具有相似的铅的来源。因此,对比前人研究成果,本文认为,会泽铅锌矿床灯影组矿石中铅的来源主要以震

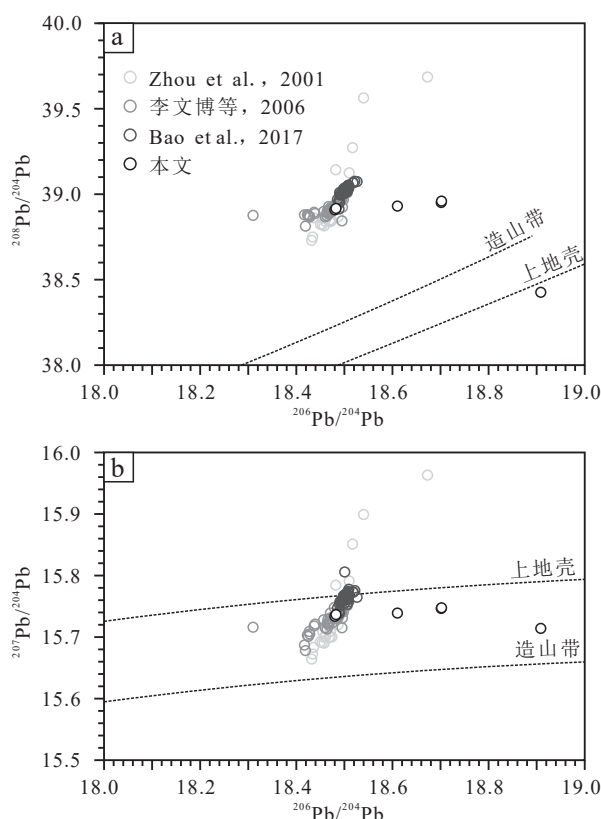


图6 会泽铅锌矿床铅同位素构造模式图(底图据 Zartman and Doe, 1981)

Fig. 6 Diagram of the lead isotopic composition of the sulfides from the Huize lead-zinc deposit (modified after Zartman and Doe, 1981)

旦纪—二叠纪碳酸盐岩与元古代古老基底岩石为主。

5.3 矿床成因

会泽铅锌矿床的成因类型历来存在多种观点,主要争议在于其是否在属于 MVT 矿床(Zhou et al., 2001; 张长青, 2008; 韩润生等, 2012)。本文研究表明,会泽铅锌矿床与 MVT 矿床的基本地质与地球化学特征存在诸多相似之处。从成矿基本地质特征角度来看,会泽铅锌矿床的容矿层位为下石炭统大埔组、上泥盆统宰格组与上震旦统灯影组白云岩;矿体主要产于层间破碎带内,具“层控”特征;矿物组合以闪锌矿、方铅矿、黄铁矿以及白云石、方解石为主;矿石构造多为块状、角砾状、脉状、浸染状等类型,显示交代碳酸盐岩与沿开放空间充填的特征;热液蚀变主要是白云石化、方解石化以及溶解坍塌角砾岩等,表现为碳酸盐岩的溶解、交代、重结晶与热液角砾岩化作用;另外,在部分地段还可以观察到厚层热液方解石块体覆盖在铅锌矿体之上,构成典型 MVT 矿床常有的“雪顶构造”

(图 41)。上述成矿地质特征显然与典型 MVT 铅锌矿床的基本特征一致(Leach et al., 2005)。从矿床地球化学特征方面来看,首先,会泽铅锌矿床的成矿流体具有较大的温度、盐度范围,显微测温分析获得不同热液矿物中流体包裹体的均一温度最低可达 86 °C,最高甚至超过 300 °C,盐度也从 0.5% 至 32.8% 不等(韩润生等, 2001, 2016; 张艳等, 2017; 王健等, 2018)。但是,多数温度、盐度分别集中于 120~240 °C、10%~25%,符合典型 MVT 铅锌矿床的中-低温、中-低盐度的流体特征(50~250 °C、10%~30%; 张长青等, 2009)。其次,矿石硫、铅同位素组成特征表明,成矿物质主要来源于上地壳,以震旦系—二叠系海相碳酸盐岩与元古界基底岩石为主;矿石锶同位素比值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7109 \sim 0.7180$)特征指示锶具有壳源特征,主要来自基底岩石,且与峨眉山玄武岩无关(Zhou et al., 2001);锌同位素研究表明,矿石锌同位素组成特征与古海洋碳酸盐岩相符,暗示不同时代的海相碳酸盐岩是锌的来源(吴越, 2013)。因此,会泽铅锌矿床的硫、铅、锶、锌等同位素组成特征也与典型 MVT 铅锌矿床基本一致(Leach et al., 2005)。硫化物微量元素原位分析也表明,会泽铅锌矿床的硫化物中的微量元素组成特征与 MVT 矿床较为一致,不同于 SEDEX 矿床、VMS 矿床、IOCG 矿床、斑岩型铜矿床等(Meng et al., 2019)。因此,综合分析成矿地质与地球化学特征,本文认为,会泽铅锌矿床应归于 MVT 矿床。

5.4 对“新层位”找矿的启示

大量矿床实例研究表明,全球 MVT 矿床往往发育于一套特定的岩性组合中,其容矿岩石主要是台地相碳酸盐岩建造,下部常常是具有良好透水性的砂岩,上部为不透水的泥质岩系(甄世民等, 2013)。当一个地区出现多个相似的岩性组合时,在同一地质背景下,不同层位的碳酸盐岩建造就都具备了 MVT 铅锌矿化的客观条件,因此,“多层位”矿化成为 MVT 铅锌矿床的典型特征之一(Leach et al., 2005)。川滇黔铅锌成矿带发育多个 MVT 铅锌矿化的有利岩性组合,自下而上依次包括南沱组砂砾岩+灯影组白云岩+上寒武统筇竹寺组泥质粉砂岩、中泥盆统砂岩+上泥盆统宰格组白云岩+下石炭统万寿山组底部泥质页岩、下石炭统万寿山组中上部砂岩与粉砂岩+下石炭统梓潼组—上石炭统黄龙组碳酸盐岩+上石炭统—下二叠

统马平组泥质灰岩与泥岩、下—中二叠统梁山组砂岩+中二叠统阳新组+下三叠统飞仙关组泥岩等。因此,理论上,灯影组、宰格组、梓门桥组、大埔组、黄龙组、阳新组等层位均有可能发生 MVT 铅锌矿化。实际情况也是如此,在震旦系至二叠系台地相碳酸盐岩建造中产出了数百个大小不一、规模不一的铅锌矿床,例如:四川天宝山与大梁子以及云南茂租、巧家、乐红等矿床均产于上震旦统灯影组中,云南毛坪矿床主要赋存于上泥盆统宰格组与上石炭统黄龙组中,贵州天桥、杉树林、筲箕湾矿床的含矿地层分别为下石炭统梓门桥组与大埔组、上石炭统黄龙组、中二叠统阳新组(Zhou et al., 2018; 韩润生等, 2022)。显然,“多层位”成矿也是川滇黔铅锌成矿带的最典型特征之一。会泽铅锌矿床与其所处的川滇黔铅锌成矿带具有相似的地质背景、地层格架以及特定的岩性组合,在大埔组粗晶白云岩中发生了大规模 MVT 铅锌矿化,宰格组白云岩中也赋存有少量铅锌矿体。理论上,灯影组作为区域 MVT 铅锌矿化的基础含矿层位,也有可能发生铅锌矿化,近年来在灯影组白云岩中发现的重要矿化线索印证了这一观点。同时,本文针对灯影组矿石的硫、铅同位素分析表明,灯影组矿石与大埔组、宰格组矿石具有相似的硫、铅同位素组成特征,暗示三者具有相同的成矿物质来源,基底岩石与海相碳酸盐岩是 MVT 铅锌矿化的主要贡献者。因此,结合成矿地质特征与硫、铅同位素分析,本文认为,会泽铅锌矿床深部灯影组具有良好的找矿潜力,值得进一步探索并开展探矿工作。

6 结论

(1)会泽铅锌矿床灯影组矿石的硫同位素值存在两个变化范围,分别为 -29.6% ~ -22.2% 、 $+6.3\%$ ~ $+18.8\%$,表明灯影组矿石中的硫主要来源于碳酸盐岩地层中的海相硫酸盐,TSR 为还原性硫形成的主要机制,BSR 则产生了微量的还原性硫。

(2)灯影组矿石的铅同位素比值 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别介于 $18.480\sim 18.909$ 、 $15.714\sim 15.747$ 、 $38.427\sim 38.959$,暗示铅为单一来源或混合较为均一的多源;铅构造模式图解及相关参数指示铅源为壳源,源区为元古界基底岩石与震旦系—二叠系碳酸盐岩。

(3)会泽铅锌矿床与典型 MVT 矿床具有相似

的成矿地质特征与矿床地球化学特征,应归为 MVT 矿床一类;灯影组矿石与大埔组、宰格组矿石具有相同的成矿物质来源,表明灯影组具有良好的找矿潜力。

致谢: 野外地质工作得到了相关矿企的各级领导与一线地质工作者的大力支持;硫、铅同位素分析分别得到了国家地质实验测试中心李超副研究员、武汉上谱分析科技有限责任公司指导与帮助;审稿人提出了宝贵的修改意见和建议,在此一并表示衷心的感谢。

References

- Bao Z W, Li Q, Wang C Y, 2017. Metal source of giant Huize Zn-Pb deposit in SW China: New constraints from in situ Pb isotopic compositions of galena[J]. *Ore Geology Reviews*, 91: 824–836.
- Chen J, 1993. Discussion on genesis of Pb-Zn sulfide ores from Qilinchang deposit[J]. *Geological Exploration for Non-ferrous Metals*, 2 (2): 85–89 (in Chinese).
- Chen S J. 1986. Research on the genesis of lead-zinc ore-deposit in Western Guizhou and Northeastern Yunnan[J]. *Geology of Guizhou*, 8 (3): 41–48 (in Chinese with English abstract).
- Crowe D E, Vaughan R G, 1996. Characterization and use of isotopically homogeneous standards for in situ laser microprobe analysis of $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ ratios[J]. *American Mineralogist*, 81 (1-2): 187–193.
- Franklin J M, Roscoe S M, Loveridge W D, et al., 1983. Lead isotope studies in Superior and Southern provinces[J]. *Geological Survey of Canada, Bulletin*, 351: 1–35.
- Han R S, Hu Y Z, Wang X K, et al., 2012. Mineralization model of rich Ge-Ag-bearing Zn-Pb polymetallic deposit concentrated district in northeastern Yunnan, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86: 280–294 (in Chinese with English abstract).
- Han R S, Li B, Ni P, et al., 2016. Infrared micro-thermometry of fluid inclusion in sphalerite and geological significance of Huize super-large Zn-Pb-(Ge-Ag) deposit, Yunnan Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46 (1): 91–104 (in Chinese with English abstract).
- Han R S, Liu C Q, Huang Z L, et al., 2001. Genesis modeling of Huize lead-zinc ore deposit in Yunnan[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 21: 674–680 (in Chinese with English abstract).
- Han R S, Wang P, Zhang Y, et al., 2022. New research progresses of metallogenic theory for Zn-Pb-(Ag-Ge) deposits in the Sichuan-Yunnan-Guizhou Triangle (SYGT) area, Southwestern Tethys[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96 (2): 554–573 (in Chinese with English abstract).

- Han R S, Liu C Q, Huang Z L, et al., 2007. Geological features and origin of the Huize carbonate-hosted Zn-Pb- (Ag) district, Yunnan, South China[J]. *Oré Geology Reviews*, 31: 360–383.
- Hoefs J, 2018. Stable isotope geochemistry, 8th edition[M]. Berlin: Springer, 1–437.
- Jiang X S, Cui X Z, Zhuo J W, et al., 2020. New evidence for the opening time of the Neoproterozoic Kangdian rift basin, western Yangtze Block, South China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40 (3) : 31–37 (in Chinese with English abstract).
- Leach D L, Sangster D F, Kelley K D, et al., 2005. Sediment-hosted lead-zinc deposits: A global perspective[J]. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume: 561–608.
- Li W B, Huang Z L, Zhang G, 2006. Sources of the ore metals of the Huize ore field in Yunnan Province: constraints from Pb, S, C, H, O and Sr isotope geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (10) , 2567–2580 (in Chinese with English abstract).
- Liu H C, Lin W D, 1999. Study on the law of Pb-Zn-Ag ore deposit in Northeast Yunnan, China[M]. Kunming: Yunnan University Press, 1–468 (in Chinese).
- Meng Y M, Hu R Z, Huang X W, et al., 2019. The origin of the carbonate-hosted Huize Zn-Pb-Ag deposit, Yunnan Province, SW China: Constraints from the trace element and sulfur isotopic compositions of pyrite[J]. *Mineralogy and Petrology*, 113: 369–391.
- Ohmoto H, Goldhaber M B, 1997. Sulfur and carbon isotopes. In: Barnes H L ed, *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 3rd Edition[C]. New York: Wiley, 517–611.
- Ohmoto H, 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 67 (5) : 551–578.
- Ohmoto H, 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 16 (1) : 491–559.
- Ren S L, Li Y H, Zeng P S, et al., 2018. Effect of sulfate evaporate salt layer in mineralization of the Huize and Maoping lead-zinc deposits in Yunnan: Evidence from sulfur isotope[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92: 1041–1055 (in Chinese with English abstract).
- Shen T, Yang B, Lin J, et al., 2019. Sequence stratigraphy and sedimentary facies of the Middle to Lower Triassic strata in the Wumeng mountain area, Yunnan: A case study of the Yiliang region[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 39 (3) : 21–32 (in Chinese with English abstract).
- Wang J, Zhang J, Zhong W B, et al., 2018. Sources of ore-forming fluids from Tianbaoshan and Huize Pb-Zn deposits in Yunnan-Sichuan-Guizhou region, Southwest China: Evidence from fluid inclusions and He-Ar isotopes[J]. *Earth Sciences*, 43 (6) , 2076–2099.
- Wang L, Han R S, Zhang Y, et al., 2016. Sulfur Isotopic Geochemistry of the Huize Pb-Zn Ore Field in Yunnan Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35 (6) : 1248–1257 (in Chinese with English abstract).
- Wu Y, 2013. The age and ore-forming process of MVT deposits in the boundary area of Sichuan-Yunnan-Guizhou provinces, Southwest China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 1–167 (in Chinese with English abstract).
- Xie J R, 1963. Discussion on metallogeny[M]. Beijing: Academic Journal Publishing House, 1–50 (in Chinese).
- Xu Y G, Zhong S L, 2001. The Emeishan Large Igneous Province: Evidence for mantle plume activity and melting conditions[J]. *Geochimica*, 30 (1) : 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Yin F G, Sun Z M, Ren G M, et al., 2012. Geological record of Paleoproterozoic and Mesoproterozoic orogenesis in the western margin of Upper Yangtze Block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86 (12) : 1917–1932 (in Chinese with English abstract).
- Yin F G, Pan G T, Sun Z M, 2021a. Genesis and evolution of the structural systems during the Cenozoic in the Sanjiang orogenic belt, Southwest China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41 (2) : 265–282 (in Chinese with English abstract).
- Yin F G, Tan Y, Xu B, 2021b. Cenozoic strike slip orogeny in Sanjiang area, Southwestern China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41 (1) : 1–14 (in Chinese with English abstract).
- Zhang G W, Guo A L, Wang Y J, et al., 2013. Tectonics of South China continent and its implications[J]. *Science China: Earth Sciences*, 56: 1804–1828 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W J, 1984. Discussion on genesis and forming law of Pb-Zn deposits in Northeast Yunnan[J]. *Geology and Prospecting*, 7: 11–16 (in Chinese).
- Zhang W, Hu Z C, Liu Y S, 2020. Iso-Compass: new freeware software for isotopic data reduction of LA-MC-ICP-MS[J]. *Journal of Analytical Atom Spectrometry*, 35: 1087–1096.
- Zhang W, Hu Z C, Gunther 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[J]. *Analytica Chimica Acta*, 948: 9–18.
- Zhang Y, Han R S, Wei P T, et al., 2017. Fluid inclusion characteristics and physiochemical conditions of the Kuangshanchang Pb-Zn deposit, Huize, Yunnan Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 47 (3) : 719–733 (in Chinese with English abstract).
- Zartman R E, Doe B R, 1981. Plumbo-tectonics: The model[J]. *Tectonophysics*, 75 (1-2) : 135–162.
- Zhang C Q, Yu J J, Mao J W, et al., 2009. Advances in the study of Mississippi Valley-type deposits[J]. *Mineral Deposits*, 28 (2) : 195–210 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C Q, 2008. The genetic model of Mississippi Valley-type deposits in the boundary area of Sichuan, Yunnan and Guizhou provinces, China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1–167 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Wang Y W, Li D D, et al., 2020. Wall rock alteration and

- its metallogenic relationship with gold of Baiyun gold deposit in Liaodong peninsula, North China Craton. *Journal of Earth Science*, 45 (11): 3900–3912 (in Chinese with English abstract).
- Zhao W C, Jiang B B, Zhu X Y, et al., 2022. Metallogenesis of the giant Maoping carbonate-hosted lead –zinc deposit, southwestern Yangtze Craton: New insights from structural geology and whole-rock geochemistry[J]. *Geological Journal*, 57: 2235 – 2254.
- Zhen S M, Zhu X Y, Li Y S, et al., 2013. A tentative discussion on Mississippi Valley-type deposits[J]. *Mineral Deposits*, 32 (2): 367 – 379 (in Chinese with English abstract).
- Zhou C X, Wei C S, Guo J Y, et al., 2001. The source of metals in the Qilinchang Zn –Pb deposit, northeastern Yunnan, China: Pb–Sr isotope constrains[J]. *Economic Geology*, 96: 583 – 598.
- Zhou J X, Xiang Z Z, Zhou M F, et al., 2018. The giant Upper Yangtze Pb–Zn Province in SW China: Reviews, new advances and a new genetic model[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 154: 280 – 315.
- ### 附中文参考文献
- 陈进. 1993. 麒麟厂铅锌硫化矿床成因及成矿模式探讨[J]. 有色金属矿床与勘查, 2 (2): 85–89.
- 陈士杰. 1984. 黔西滇东北铅锌矿床的沉积成因探讨[J]. 贵州地质, 8 (3): 56–62.
- 韩润生, 胡煜昭, 王学琨, 等. 2012. 滇东北富锗银铅锌多金属矿集区矿床模型[J]. *地质学报*, 86: 280 – 294.
- 韩润生, 李波, 倪培, 等. 2016. 闪锌矿流体包裹体显微红外测温及其矿床成因意义——以云南会泽超大型富锗银铅锌矿床为例[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 46 (1): 91 – 104.
- 韩润生, 刘丛强, 黄智龙, 等. 2001. 论云南会泽富铅锌矿床成矿模式[J]. *矿物学报*, 21, 674–680.
- 韩润生, 吴鹏, 张艳, 等. 2022. 西南特提斯川滇黔成矿区富锗铅锌矿床成矿理论研究新进展[J]. *地质学报*, 96 (2): 554 – 573.
- 江新胜, 崔晓庄, 卓皆文, 等. 2020. 华南扬子陆块西缘新元古代康滇裂谷盆地开启时间新证据[J]. *沉积与特提斯地质*, 40 (3): 31 – 37.
- 李文博, 黄智龙, 张冠. 2006. 云南会泽铅锌矿田成矿物质来源: Pb、S、C、H、O、Sr 同位素制约[J]. *岩石学报*, 22 (10): 2567–2580.
- 柳贺昌, 林文达. 1999. 滇东北铅锌银矿床规律研究[M]. 昆明: 云南大学出版社, 1–468.
- 任顺利, 李延河, 曾普胜, 等. 2018. 膏盐层在云南会泽和毛坪铅锌矿成矿中的作用: 硫同位素证据[J]. *地质学报*, 92: 1041 – 1055.
- 申滔, 杨斌, 蔺吉庆, 等. 2019. 云南乌蒙山区中下三叠统层序地层与沉积相研究——以彝良地区为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 39 (3): 21 – 32.
- 王健, 张均, 仲文斌, 等. 2018. 川滇黔地区天宝山、会泽铅锌矿床成矿流体来源初探: 来自流体包裹体及氩氦同位素的证据[J]. *地球科学*, 43 (6): 2076–2099.
- 王磊, 韩润生, 张艳, 等. 2016. 云南会泽铅锌矿田硫同位素研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 35 (6): 1248 – 1257.
- 吴越. 2013. 川滇黔地区 MVT 铅锌矿床大规模成矿作用的时代与机制[D]. 北京: 中国地质大学, 1–167.
- 谢家荣. 1963. 论矿床的分类[M]. 北京: 科学出版社, 1–50.
- 徐义刚, 钟孙霖. 2001. 峨眉山大火成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件[J]. *地球化学*, 30 (1): 1 – 9.
- 尹福光, 孙志明, 任光明, 等. 2012. 上扬子陆块西南缘早—中元古代造山运动的地质记录[J]. *地质学报*, 86 (12): 1917 – 1932.
- 尹福光, 潘桂棠, 孙志明. 2021a. 西南三江构造体系及演化、成因[J]. *沉积与特提斯地质*, 41 (2): 265 – 282.
- 尹福光, 唐渊, 徐波. 2021b. 西南三江地区新生代走滑造山[J]. *沉积与特提斯地质*, 41 (1): 1 – 14.
- 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 2013. 中国华南大陆构造与问题[J]. *中国科学: 地球科学*, 43: 1553–1582.
- 张位及. 1984. 试论滇东北铅锌矿床的沉积成因和成矿规律[J]. *地质与勘探*, 7: 13–18.
- 张艳, 韩润生, 魏平堂, 等. 2017. 云南会泽矿山厂铅锌矿床流体包裹体特征及成矿物理化学条件[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 47 (3): 719 – 733.
- 张长青, 余金杰, 毛景文, 等. 2009. 密西西比型 (MVT) 铅锌矿床研究进展[J]. *矿床地质*, 28 (2): 195 – 210.
- 张长青. 2008. 中国川滇黔交界地区密西西比河谷型 (MVT) 铅锌矿床成矿模型[D]. 北京: 中国地质科学院, 1–167.
- 张志超, 王玉往, 李德东, 等. 2020. 辽宁白云金矿床围岩蚀变作用及其与金的成矿关系[J]. *地球科学*, 45 (11): 3900–3912.
- 甄世民, 祝新友, 李永胜, 等. 2013. 关于密西西比河谷型 (MVT) 铅锌矿床的一些探讨[J]. *矿床地质*, 32 (2): 367 – 379.