

周 云,段其发,曹 亮,等. 湖南花垣矿集区李梅铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 定年与成矿物质示踪[J]. 地球科学与环境学报,2021,43(4):661-673.

ZHOU Yun,DUAN Qi-fa,CAO Liang,et al. Rb-Sr Dating and Ore-forming Material Tracing of Sphalerite from Limei Pb-Zn Deposit in Huayuan Ore Concentration Area of Hunan,China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2021,43(4):661-673.

DOI:10. 19814/j. jese. 2020. 08036

湖南花垣矿集区李梅铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 定年与成矿物质示踪

周 云,段其发*,曹 亮,于玉帅,甘金木

(中国地质调查局武汉地质调查中心,湖北 武汉 430205)

摘 要:李梅铅锌矿床位于扬子克拉通东南缘花垣矿集区北段,预测铅锌储量为 300×10^4 t,是该区铅锌矿床的典型代表。该矿床铅锌矿体呈层状、似层状,受地层与构造的控制,主要赋存于下寒武统清虚洞组下段第三亚段地层藻灰岩中。为获得该矿床的成矿年龄,探讨其成矿物质来源,采用闪锌矿 Rb-Sr 定年方法,对主成矿期形成的闪锌矿单矿物进行 Rb-Sr 同位素组成测定,获得的等时线年龄为 (464 ± 12) Ma(平均标准权重偏差为 0.97),成矿时代为中奥陶世,成矿早于花垣矿集区南段的狮子山铅锌矿床(成矿时间为 (410 ± 12) Ma)和柔先山铅锌矿床((412 ± 6) Ma),推断在花垣矿集区范围内发生了郁南运动和广西运动导致的两期成矿事件,整个矿集区成矿时限跨度大约为 70 Ma。李梅铅锌矿床成矿时代明显晚于赋矿地层时代,该矿床的形成可能与郁南运动形成伸展构造引起的构造热液活动有关。闪锌矿的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.709\ 56\sim 0.711\ 14$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 $0.709\ 380\pm 0.000\ 018$,成矿流体具有高于赋矿围岩的高 Sr 同位素比值,推断成矿物质应主要源自具有高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值和高 Pb、Zn 丰度的下伏寒武系石牌组 and 牛蹄塘组。

关键词:Rb-Sr 定年;成矿时代;铅锌矿床;MVT 型;成矿物质;花垣矿集区;湖南;扬子克拉通东南缘
中图分类号:P597;P611 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2021)04-0661-13

Rb-Sr Dating and Ore-forming Material Tracing of Sphalerite from Limei Pb-Zn Deposit in Huayuan Ore Concentration Area of Hunan, China

ZHOU Yun, DUAN Qi-fa*, CAO Liang, YU Yu-shuai, GAN Jin-mu

(Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China)

Abstract: Limei Pb-Zn deposit is located in the northern part of Huayuan ore concentration area, the southeastern margin of Yangtze craton with a predicted reserve of 300×10^4 t, which is the most typical Pb-Zn deposit in this area. The ore bodies in Limei Pb-Zn deposit are stratiform and stratoid, which are controlled by the strata and structures. They mainly occur in the algal limestone of the third sub-member of Lower Cambrian Qingxudong Formation. In order to obtain the metallogenic age of Limei Pb-Zn deposit and discuss the source of ore-forming materials, the isochron age of monomineral sphalerite formed in the main metallogenic period was yielded by Rb-Sr dating method. The obtained age is (464 ± 12) Ma (MSWD is 0.97). The metallogenic epoch is

收稿日期:2020-08-20;修回日期:2020-10-12 投稿网址:<http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0600205);中国地质调查局地质调查项目(DD20190811,DD20201152)

作者简介:周 云(1984-),女,安徽安庆人,助理研究员,理学博士,E-mail:zhouyun0910@163.com。

* 通讯作者:段其发(1964-),男,云南腾冲人,教授级高级工程师,理学博士,E-mail:502xaohan@163.com。

Middle Ordovician, and the mineralization is earlier than that of Shizishan Pb-Zn deposit ((410 ± 12) Ma) and Rouxianshan Pb-Zn deposit ((412 ± 6) Ma) in the southern part of Huayuan ore concentration area. It is inferred that there are two metallogenic events in Huayuan ore concentration area caused by Yunan movement and Guangxi movement. The metallogenic time span of the whole ore concentration area is about 70 Ma. The mineralization age of Limei Pb-Zn deposit is obviously later than that of the host strata; the formation may be related to the tectonic hydrothermal activity caused by the extension structure during Yunan movement. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of sphalerite ranges from 0.709 56 to 0.711 14, and the $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ is $0.709\ 380 \pm 0.000\ 018$. The ore-forming fluid has a high Sr isotope ratio, which is higher than that of the host rock. It is inferred that the ore-forming materials should mainly come from the underlying Cambrian Shipai Formation and Niutitang Formation with high $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio and high abundances of Pb and Zn.

Key words: Rb-Sr dating; metallogenic epoch; Pb-Zn deposit; MVT; ore-forming material; Huayuan ore concentration area; Hunan; the southeastern margin of Yangtze craton

0 引言

近年来,湖南花垣矿集区国家整装勘查项目找矿成果取得重大突破,铅锌矿资源前景巨大,其矿床成因或成矿模式受到广泛关注^[1]。自取得找矿突破以来,前人围绕花垣矿集区成矿背景、矿床特征、成矿时代和矿床成因等进行了系统研究^[2-30]。已有研究结果显示,花垣矿集区内铅锌矿赋矿地层岩性、矿化类型、矿物组合、围岩蚀变、成矿物质来源、成矿流体性质与来源等均与 MVT 型矿床相似。矿集区南段铅锌矿床形成于 410 Ma 左右,铅锌成矿与加里东运动密切相关^[5-6]。区内铅锌矿是较典型的产于寒武系藻灰岩地层中的似 MVT 型铅锌矿床^[2]。李梅铅锌矿床是湖南花垣矿集区的重要组成部分,是该矿集区内最早发现的铅锌矿床,尤其是该矿集区北段铅锌矿床的典型代表^[25,27-28],但长期以来一直未获得可靠的成矿年龄。成矿年代的不确定性造成对矿床成因认识的差异,导致矿集区内各铅锌矿床之间的成因联系不明,这影响了对本区成矿作用的系统认识,也制约了下一步找矿方向。

闪锌矿是铅锌矿床最主要的矿石矿物,其形成贯穿整个成矿过程。对于碳酸盐岩容矿的似 MVT 型铅锌矿床来说,闪锌矿无疑是直接获得矿床成矿年龄的理想对象。由于物理特性不同,闪锌矿 Rb/Sr 值常常明显高于方铅矿和方解石等共生组合矿物^[31-32]。国内外许多学者致力于铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 等时线定年研究。Medford 等最早于 1983 年通过对加拿大 Pine Point 铅锌矿床的研究证实,该矿床中硫化物 Sr 同位素存在均一化过程,闪锌矿

满足 Rb-Sr 等时线定年的前提条件^[33]。Nakai 等成功测定美国、加拿大和澳大利亚等地铅锌矿床的闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄,证实了闪锌矿具有较高、变化范围较大的 Rb/Sr 值,对其进行 Rb-Sr 定年获得年龄是可靠的,同时揭示 Rb/Sr 主要赋存于闪锌矿中而不是其中的流体包裹体中,残留相中 Rb/Sr 含量明显高于淋滤液^[34-38]。因此,对铅锌矿床开展 Rb-Sr 等时线定年时需对闪锌矿矿物或矿物残留相开展 Rb-Sr 同位素组成测试,而非矿物中的流体包裹体。自 2004 年开始,闪锌矿 Rb-Sr 定年技术在国内也得到了成功应用^[39]。李文博等采用闪锌矿 Rb-Sr 定年技术首次获得了云南会泽大型铅锌矿床的两组成矿年龄((225.1 ± 2.9) Ma 和 (225.9 ± 3.1) Ma),认为川滇黔成矿区内铅锌成矿作用与峨眉山玄武岩岩浆活动(250 Ma)存在成因联系^[40]。喻钢随后在辽东青城子矿田的年代学研究中得到了与矿区花岗岩锆石 U-Pb 年龄一致的闪锌矿矿物 Rb-Sr 等时线年龄^[41]。之后,国内学者陆续发表了不同成因类型铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 同位素定年技术成功应用的论文^[42-50],表明闪锌矿 Rb-Sr 定年技术日趋成熟。

对于花垣矿集区内的铅锌矿床,段其发等研究获得矿集区南段狮子山铅锌矿床和相邻的柔先山铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄分别为 (410 ± 12) Ma 和 (412 ± 6) Ma^[5,11],然而花垣矿集区面积较大(约 215 km²),成矿时间跨度不明,矿集区南段相邻的狮子山铅锌矿床和柔先山铅锌矿床在误差范围内近乎一致的成矿年龄能否代表整个铅锌矿集区的成矿时间存在疑问。基于此,本文对湖南花垣矿集区

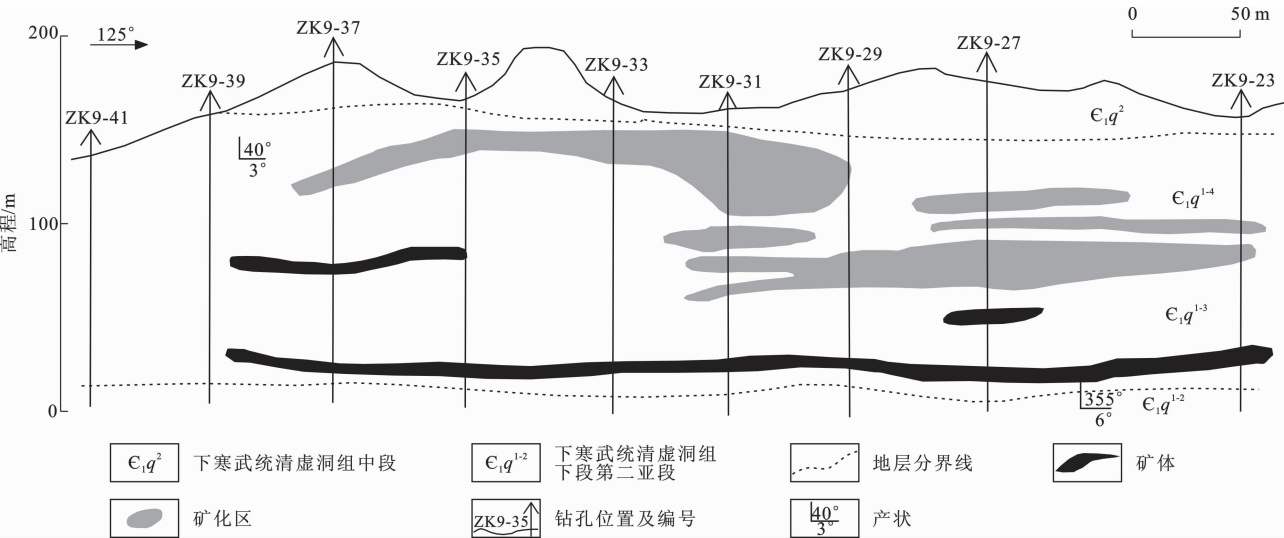
Fig. 1 Regional Tectonic Location, Geological and Mineral Maps of Huayuan Ore Concentration Area in Hunan

向湘黔断裂带中部,总体走向为 NNE 向,位于花垣—张家界深大断裂与麻栗场断裂之间(图 1),长 38 km,宽 4~16 km,面积约 215 km²[6]。矿集区内主要出露从青白口系至寒武系的一系列地层,依次为青白口系板溪群浅灰绿色粉砂质板岩、绢云母板岩,南华系大塘坡组黑色薄层状碳质泥岩,南华系南沱组灰色和深灰色厚层块状冰碛砾岩、含砾砂屑泥岩,震旦系陡山沱组深灰色厚层状粉晶白云岩与黑色薄层状碳质泥岩不等厚互层,震旦系灯影组浅灰色和灰色厚层状粉晶—细晶白云岩夹亮晶颗粒白云岩,寒武系牛蹄塘组黑色薄层状含碳泥岩,寒武系石牌组灰色薄—中厚层状粉砂质泥岩、粉砂岩夹岩屑细砂岩,寒武系清虚洞组灰色中厚层状泥质灰岩、泥晶灰岩、藻灰岩,寒武系清虚洞组白云质灰岩夹砂屑鲕粒灰岩,寒武系高台组灰白色薄—中层状粉细晶白云岩,寒武系娄山关组浅灰色和灰白色厚层块状粉细晶白云岩夹亮晶颗粒白云岩。少量主体由灰岩组成的奥陶系地层分布于矿集区西北角,第四系零

星分布于沟谷中[2]。矿集区内未见岩体出露,断裂构造和褶皱构造较发育,断裂主要为 NE、NNE 向花垣—保靖—张家界深大断裂、两河—长乐断裂和麻栗场断裂(保靖—铜仁—玉屏深大断裂东北段)(图 1)。

1.2 李梅铅锌矿床特征

下寒武统清虚洞组为李梅铅锌矿床的主要赋矿地层,在矿区内分布广泛,按其岩性特征可分为下部灰岩段和上部白云岩段,下部岩性为灰色中厚层状藻灰岩、泥质灰岩、泥晶灰岩,上部为浅灰、灰白色中厚层状白云质灰岩。灰岩段(ϵ_1q^1)分为 4 个岩性亚段,李梅矿床铅锌矿体主要赋存于清虚洞组下段第三亚段(ϵ_1q^{1-3})和第四亚段(ϵ_1q^{1-4})藻灰岩、砂屑灰岩中(图 2)。清虚洞组下伏地层为寒武系底部牛蹄塘组黑色薄层含碳泥岩和石牌组灰色薄—中厚层状粉砂质泥岩、粉砂岩夹岩屑细砂岩,上覆地层为高台组灰白色薄—中层状粉细晶白云岩和娄山关组灰白色厚层状粉细晶白云岩[6]。



图件引自文献[51],有所修改

图 2 李梅铅锌矿床第 9 勘探线矿体剖面

Fig. 2 Cross-section Along No. 9 Exploration Line in Limei Pb-Zn Deposit

主要容矿地层藻礁体一般厚度为 130~140 m,矿体主要产于容矿地层下部,次为上部。目前圈定的矿体主要有 10 个,最大者长 2 120 m,宽 100~840 m,厚 1.10~18.05 m,长轴方向为 109°~289°。矿体具有多层性,形态简单,主要呈层状、似层状、透镜状分布于矿区赋矿层第三亚段藻灰岩与第四亚段含藻砂屑灰岩地层中。单个矿体较富一端矿体与围岩界线轮廓清晰,顶部和周边多有膜状硫化物,易与围岩区分。单个矿体下部及东北部多见有高角度方解石-白云石-块状硫化物粗脉或细脉(一般宽在几

厘米以下)充填于同生或准(近)同生断裂或裂隙中。似层状矿体产状与围岩产状大致相同,均顺层产出,走向以 NE、NNE 向为主,倾向以 NW 和 SE 向为主,倾角一般为 2°~10°(图 2)。矿床规模为大型,铅锌储量达 300×10⁴ t,Zn 平均品位达 5%,Pb 品位为 0.14%~2.02%[52]。

矿石矿物成分简单,金属矿物以闪锌矿和方铅矿为主,次为黄铁矿、黄铜矿,非金属矿物主要为方解石,次为重晶石,及少量石英、白云石、萤石。矿石结构有自形和半自形粒状结构、填隙结构、交代残余

结构、莓球状结构(黄铁矿)等。矿石构造有团块状、浸染状、网脉状、细脉状、块状、角砾状。闪锌矿主要呈黄棕色、浅黄色、黄绿色片状晶形,具半金属光泽。结晶颗粒较粗大,具半自形或他形晶粒状结构,粒径

一般为 0.5~2.0 mm,以粒状或脉状集合体形式分布于矿石中,脉状闪锌矿多分布于与灰岩接触的方解石脉体边缘[图 3(a)、(b)]。方铅矿呈铅灰色,颗粒大小为 0.01~0.20mm,具半自形—他形晶颗粒

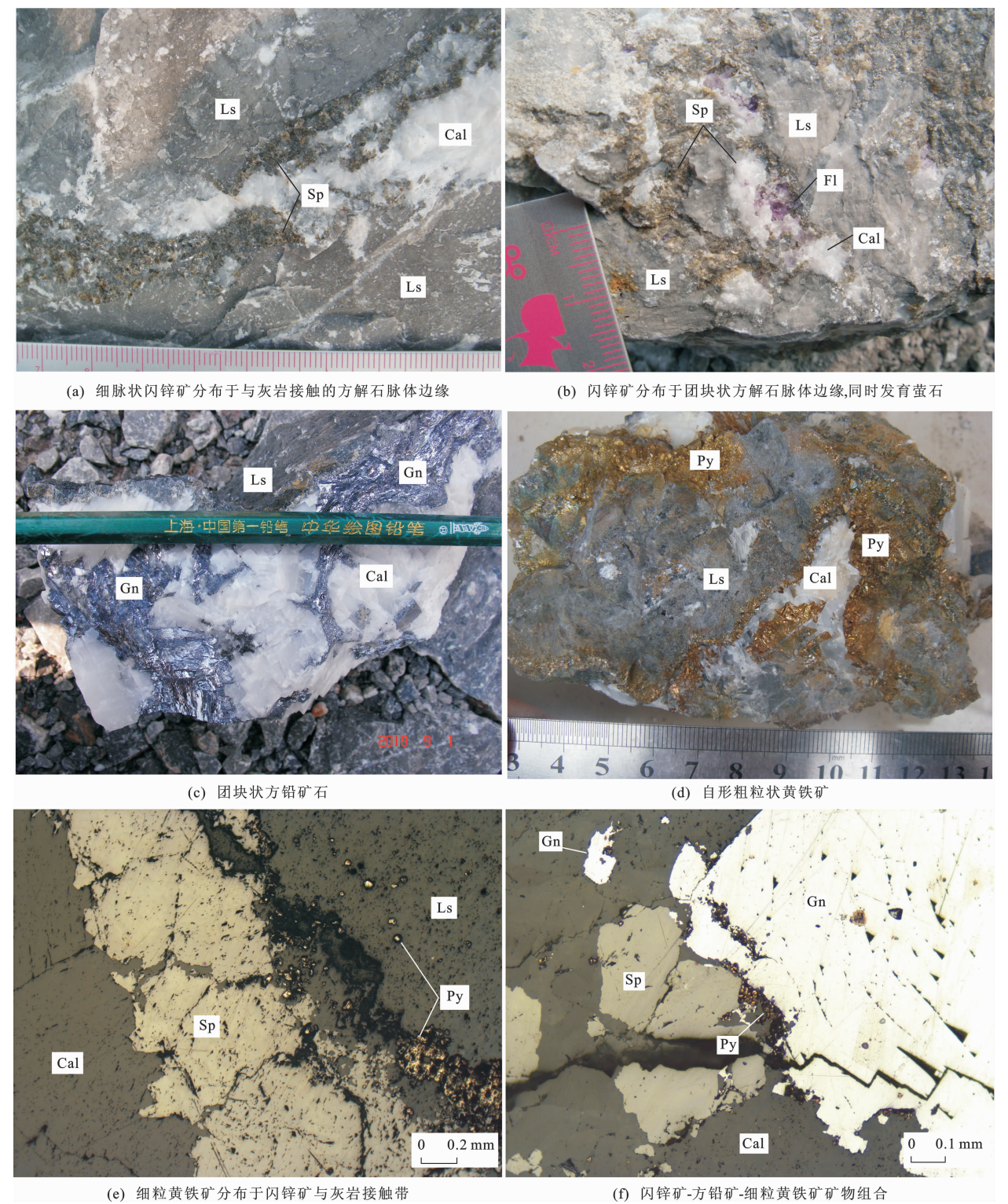
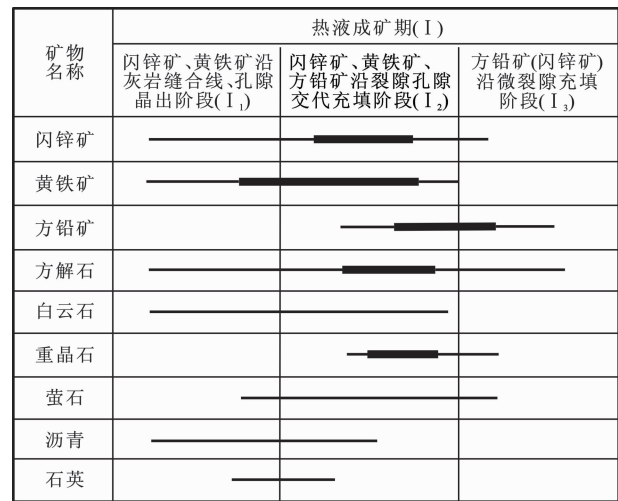


图 3 李梅铅锌矿床矿物组合特征

Fig. 3 Ore Mineral Characteristics of Limei Pb-Zn Deposit

结构,在脉石矿物中呈粗大团块状或不规则粒状分布[图 3(c)、(f)]。黄铁矿多呈细粒浸染细脉状分布于闪锌矿脉边缘[图 3(e)、(f)],有时呈粗大团块状分布于方解石脉中[图 3(d)]。围岩蚀变类型主要为方解石化,次为黄铁矿化、萤石化、白云石化、重晶石化、沥青化等,其中方解石化与矿化关系密切^[6,27]。

李梅铅锌矿床具有后期热液成矿的特点。其热液成矿作用大致划分为 3 个阶段(图 4):①闪锌矿、黄铁矿沿灰岩缝合线、孔隙晶出阶段(I₁),细粒闪锌矿、黄铁矿及沥青沿灰岩缝合线沉淀或充填灰岩孔隙,热液蚀变整体较弱,发育球粒状闪锌矿、沥青、萤石、黄铁矿;②闪锌矿、黄铁矿、方铅矿沿裂隙孔隙交代充填阶段(I₂),为矿床的主要成矿阶段,粗晶闪锌矿和方铅矿大量晶出,发育乳白色粗晶方解石化、粗晶白云石化、无色—浅紫色粗晶萤石化、晶质沥青等;③方铅矿(闪锌矿)沿微裂隙充填阶段(I₃),方铅矿(闪锌矿)沿大裂隙充填,热液蚀变减弱,发育热液碳酸盐化,少量重晶石化与萤石化^[53]。方解石化贯穿整个成矿热液阶段。



线条的粗细代表形成矿物的多少,线条的长短代表矿物延续时间的长短,线条的位置代表矿物延续的阶段位置;
图件引自文献^[53],有所修改

图 4 李梅铅锌矿床矿化阶段划分

Fig. 4 Division of Mineralization Stages
in Limei Pb-Zn Deposit

2 样品采集与分析方法

本次从湖南花垣矿集区李梅铅锌矿床中采集 7 件铅锌矿样品用于 Rb-Sr 定年。这 7 件样品均为新鲜的闪锌矿,均于矿床主要成矿阶段(即闪锌矿、黄铁矿、方铅矿沿裂隙孔隙交代充填阶段)形成,采集

于同一条似层状矿脉相邻的空间位置。矿石样品为团块状方解石化闪锌矿[图 3(b)、(e)],矿物成分简单。野外地质调查及室内镜下岩矿鉴定结果显示,主要矿物为闪锌矿,次为黄铁矿,脉石矿物主要为方解石。闪锌矿样品为同一世代、同种颜色、相同结构,以保证采集的闪锌矿样品满足 Rb-Sr 等时线定年的同时性、同源性和封闭性的前提条件。

样品分析流程如下:先将手标本用水清洗干净、风干,再粗碎,挑选干净的闪锌矿;再将样品粉碎至 0.2~0.5 mm,在双目镜下人工挑选纯净的闪锌矿单矿物样品,尽可能剔除其余杂质矿物,保证闪锌矿纯度近于 100%。样品测试方法为:①先将选纯的闪锌矿单矿物分别放入稀酸和超纯水中用超声波清洗机清洗 3~5 遍,烘干备用;②放入烘箱内,在 120℃~180℃爆裂,去除次生包裹体;③用超纯水在超声波清洗机内清洗 3~5 遍,热烤干备用;④称取适量样品置于聚四氟乙烯封闭溶样器中,加入⁸⁵Rb+⁸⁴Sr 混合稀释剂,用适量王水溶解样品,采用阳离子树脂(Dowex50×8)交换法分离和纯化 Rb、Sr;⑤用热电离质谱仪 TRITON 进行 Rb-Sr 同位素组成分析,用同位素稀释法计算样品 Rb、Sr 含量及 Sr 同位素比值。整个分析过程采用标准物质 NBS-987、NBS-607 和 GBW04411 分别对分析流程和仪器的工作状态进行监控:标准物质 NBS-987 的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.710 31±0.000 03(误差类型为 2σ),与证书推荐值(0.710 24±0.000 26,2σ)在误差范围内一致;标准物质 NBS-607 的 Rb、Sr 含量(质量分数,下同)分别为 523.60×10⁻⁶、65.54×10⁻⁶,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 1.200 50±0.000 04(2σ),与证书推荐值(Rb、Sr 含量分别为(523.90±1.01)×10⁻⁶和(65.484±0.300)×10⁻⁶,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 1.200 39±0.000 20(2σ))在误差范围内一致;标准物质 GBW04411 的 Rb、Sr 含量分别为 249.20×10⁻⁶和 158.90×10⁻⁶,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.760 05±0.000 02(2σ),与证书推荐值(Rb、Sr 含量分别为(249.47±1.04)×10⁻⁶和(158.92±0.70)×10⁻⁶,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.759 99±0.000 20(2σ))在误差范围内一致。上述特征表明测试数据可信可靠。分析方法和技术流程可参见杨红梅等已发表的相关文献^[39,54]。本次分析样品的前期制备均在净化实验室完成,全流程 Rr、Sr 空白分别为 1×10⁻¹⁰和 7×10⁻¹⁰,样品 Rr-Sr 定年测试由中国地质调查局武汉地质调查中心同位素开放研究实验室完成。

3 结果分析

湖南花垣矿集区李梅铅锌矿床 7 个闪锌矿样品 Rb-Sr 同位素分析结果见表 1。闪锌矿 Rb 含量为 $(0.153\ 8\sim 0.203\ 5)\times 10^{-6}$, Sr 含量为 $(2.198\sim 18.370)\times 10^{-6}$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.030\ 84\sim 0.266\ 90$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $(0.709\ 56\pm 0.000\ 03)\sim (0.711\ 14\pm 0.000\ 03)$ 。对样品先后进行 2 次测试,结果较吻合,验证测试仪器的稳定性和方法的可靠性。

表 1 闪锌矿 Rb-Sr 同位素分析结果

Tab. 1 Analysis Results of Rb-Sr Isotope of Sphalerite

样品编号	$w(\text{Rb})/10^{-6}$	$w(\text{Sr})/10^{-6}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值
13LM-B1	0.153 8	14.380	0.030 84	$0.709\ 59\pm 0.000\ 07$
13LM-B2	0.193 3	18.210	0.030 61	$0.709\ 57\pm 0.000\ 02$
13LM-B3	0.197 2	18.370	0.030 96	$0.709\ 56\pm 0.000\ 03$
13LM-B4	0.184 7	11.300	0.047 13	$0.709\ 69\pm 0.000\ 02$
13LM-B5	0.165 7	8.665	0.055 14	$0.709\ 77\pm 0.000\ 02$
13LM-B8	0.188 8	9.930	0.054 81	$0.709\ 75\pm 0.000\ 01$
13LM-B9	0.203 5	2.198	0.266 90	$0.711\ 14\pm 0.000\ 03$

注: $w(\cdot)$ 为元素含量;误差类型为 2σ 。

采用 Isoplot 2.49 程序对获得的李梅铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 同位素数据进行拟合处理^[55-56],获得闪锌矿 Rb-Sr 同位素等时线图(图 5)。由于样品 13LM-B1、13LM-B2、13LM-B3 的采样位置相对过于靠近,以及样品 13LM-B5、13LM-B8 的采样位置相对过于靠近,闪锌矿粒度、颜色、结构等特征基本相同,导致样品 13LM-B2、13LM-B3 与样品 13LM-B1 近乎重叠,以及样品 13LM-B5 与样品 13LM-B8 近乎重叠,其余样品分布合理。 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解(图 5)表现出良好的线性关系,计算得到的参考等时线年龄为 $(464\pm 12)\text{Ma}$ (平均标准权重偏差(MSWD)为 0.97), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 为 $0.709\ 380\pm 0.000\ 018(1\sigma)$ 。

4 讨 论

4.1 成矿时代

本次测试的闪锌矿样品采自李梅铅锌矿床同一矿体中,空间分布相对合理,且为结晶较好的团块状铅锌矿石,除更早生成的细粒黄铁矿和共生的方解石脉以外,未见后期其他矿物的穿插和交代现象,闪锌矿纯度较高,样品满足 Rb-Sr 同位素分析的基本前提。图 5 中等时线具有实际地质意义,等时线年

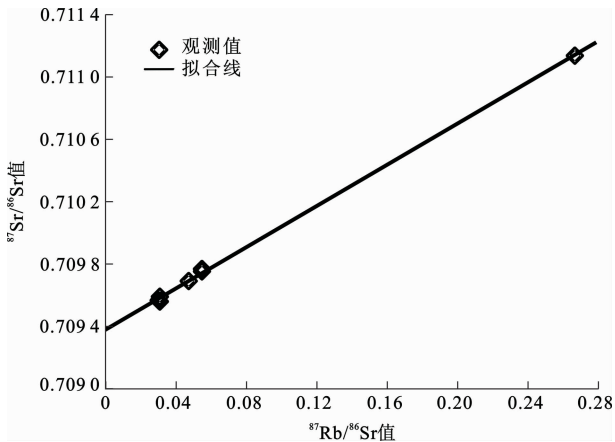


图 5 闪锌矿 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解

Fig. 5 Diagram of $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of Sphalerite

龄可代表成矿阶段的年龄,也就是说,李梅铅锌矿床的形成年龄为 $(464\pm 12)\text{Ma}$ (MSWD 值为 0.97),即为中奥陶世,其赋矿地层为寒武系清虚洞组,成矿时代明显晚于容矿地层时代。

段其发等采用全溶方法和流体包裹体淋滤法对位于李梅铅锌矿床南部且同样分布于花垣矿集区内的狮子山铅锌矿床主成矿期闪锌矿及其残渣、淋滤液进行了 Rb-Sr 同位素测定,残渣相及与之对应的矿物相共 12 个样品点计算得到的等时线年龄为 $(410\pm 12)\text{Ma}$ (MSWD 值为 2.2)^[5],此年龄可作为该矿床形成年龄,即为早泥盆世,成矿时代同样明显晚于容矿地层清虚洞组地层时代。谭娟娟等采用闪锌矿全矿物 Rb-Sr 法获得位于花垣矿集区南段与狮子山铅锌矿床相邻的柔先山铅锌矿床 Rb-Sr 等时线年龄为 $(412\pm 6)\text{Ma}$ (MSWD 值为 1.5)^[11],也为早泥盆世,明显晚于赋矿地层的时代。

同一矿集区内,北段的李梅铅锌矿床成矿年龄为 $(464\pm 12)\text{Ma}$,南段的狮子山和柔先山铅锌矿床成矿年龄为 $(410\pm 12)\text{Ma}$ 和 $(412\pm 6)\text{Ma}$,南、北段成矿年龄相差约 70 Ma。这是否与成矿流体的缓慢运移相关? 亦或是两期构造事件? 已有的花垣矿集区成矿流体及同位素研究成果显示,花垣矿集区内的大脑坡铅锌矿床方解石中流体包裹体均一温度为 $217\text{ }^{\circ}\text{C}$,李梅铅锌矿床方解石中为 $209\text{ }^{\circ}\text{C}$,耐子堡铅锌矿床方解石中为 $198\text{ }^{\circ}\text{C}$,蜂塘铅锌矿床方解石中为 $184\text{ }^{\circ}\text{C}$,大石沟铅锌矿床方解石中为 $177\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。大脑坡、李梅、耐子堡、蜂塘、大石沟铅锌矿床的成矿流体均一温度依次下降,具有由北而南降低的趋势,显示了成矿流体的大致运移方向^[2,8]。刘文均等研究证实,从花垣矿集区北段的大脑坡、李梅铅锌矿床到

南段的狮子山铅锌矿床,成矿流体的温度,成矿流体中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 等阳离子和气相成分 CO_2 、 CH_4 含量出现逐步下降的特点^[14]。C-O 同位素研究结果也证实了花垣矿集区流体大致迁移方向是由北向南,因为大脑坡、李梅、土地坪、蜂塘、大石沟、狮子山铅锌矿床中成矿期方解石 $\delta^{13}C_{PDB}$ 、 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 值表现出逐渐降低的特点^[2,9]。上述现象表明花垣矿集区流体迁移方向为由北向南^[2,8-9]。如果成矿流体在迁移和沉淀过程中依次形成花垣矿集区北段的大脑坡、李梅铅锌矿床和南段的柔先山、狮子山铅锌矿床,其成矿时代界限为 470~400 Ma,成矿时限跨度大约为 70 Ma。然而,在区域构造演化发生重大变化或转换过程中,持续长达 70 Ma 的热液成矿可能性较低,矿床形成过程中由于构造热事件的干扰,也会导致两个成矿时代差别巨大的矿床无法由同一个成矿流体演化并在不同地段沉淀。成矿流体均一温度、成分等规律性变化可能与成矿流体沉淀时的深度或花垣矿集区北段、南段铅锌矿床的剥蚀程度不同有关。

已有资料表明,湘西地区在 490~400 Ma 前后经历过一次强烈的构造-热事件,即加里东期构造事件,突出表现为震旦系一下古生界强烈褶皱与韧性剪切变形^[57]。加里东运动早期以郁南运动为主,是粤西—桂东地区寒武纪和奥陶纪地层间平行不整合所代表的上升运动,表现为 SN 向水平挤压,时限为 490~470 Ma(早—中奥陶纪)^[58]。相邻于广西地区的湘西地区在郁南运动发生以前处于扬子克拉通被动大陆边缘裂陷盆地,郁南运动导致俯冲,扬子克拉通被动大陆边缘裂陷盆地转换为前陆盆地;构造热液活动强烈,导致湖南花垣地区的第一次成矿事件,形成了花垣矿集区北段的大脑坡、李梅等铅锌矿床。随着加里东期构造事件的持续进行,到加里东运动晚期(即广西运动开始),广西运动代表了志留纪末和泥盆纪初的地壳运动事件,其运动时限为 420~410 Ma^[59-60],导致江南古陆强烈隆升,是江南古陆造山的构造变动时期。构造由伸展体制向挤压体制转换,成矿流体继续向南运移,从而形成湖南花垣地区的第二次成矿事件,形成了花垣矿集区南段的狮子山、柔先山、蜂塘、土地坪、大石沟等铅锌矿床。

4.2 成矿物质来源

$^{87}Sr/^{86}Sr$ 值是判断成岩成矿物质来源的重要指标。在研究沉积-层控矿床形成机制、碳酸盐地层中矿物和流体之间的关系等方面, Sr 同位素组成具有重要意义,是示踪成矿物质和成矿流体来源的有效

途径^[61-62]。

李梅铅锌矿床赋矿围岩下寒武统清虚洞组灰岩的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值为 0.709 00~0.709 05,平均值为 0.709 03;热液方解石的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值为 0.709 06~0.710 07,平均值为 0.709 68;闪锌矿的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值为 0.709 56~0.711 14,平均值为 0.709 87, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始值为 $0.709\,380\pm0.000\,018$ (表 2、图 5)。寒武纪海水和海相碳酸盐岩 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值约为 0.709 02^[63],李梅铅锌矿床清虚洞组灰岩的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值与同期海水的 Sr 同位素比值相当。方解石和闪锌矿的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值代表成矿流体 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值,明显高于同期海相碳酸盐岩和围岩清虚洞组灰岩的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值,从而排除了清虚洞组灰岩提供成矿物质的可能性。李梅铅锌矿床上覆地层为中寒武统高台组 and 上寒武统娄山关组,高台组岩性为薄—中层粉细晶白云岩,娄山关组岩性为厚层块状粉细晶白云岩夹亮晶颗粒白云岩,两者 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值为 0.708 85~0.709 05^[61],这些碳酸盐岩都不足以支撑成矿流体高 Sr 同位素比值的特征^[10],暗示成矿物质来源于相对富放射性成因 Sr 源区,而富放射成因 ^{87}Sr 的潜在来源多为 Rb/Sr 值较高的陆壳碎屑岩和火成硅酸盐矿物^[64]。

表 2 围岩、方解石与闪锌矿 Sr 同位素组成

Tab. 2 Sr Isotope Composition of Wall Rock, Calcites and Sphalerites

样品编号	样品类型	$^{87}Sr/^{86}Sr$ 值	数据来源
13LM-B23	灰岩	0.709 05	文献[10]
13LM-B28	灰岩	0.709 00	文献[10]
13LM-B80	灰岩	0.709 04	文献[10]
13LM-B2	方解石	0.709 70	文献[10]
13LM-B9	方解石	0.709 06	文献[10]
13LM-B11	方解石	0.710 07	文献[10]
13LM-B13	方解石	0.709 71	文献[10]
13LM-B31	方解石	0.709 86	文献[10]
13LM-B1	闪锌矿	0.709 59	本文
13LM-B2	闪锌矿	0.709 57	本文
13LM-B3	闪锌矿	0.709 56	本文
13LM-B4	闪锌矿	0.709 69	本文
13LM-B5	闪锌矿	0.709 77	本文
13LM-B8	闪锌矿	0.709 75	本文
13LM-B9	闪锌矿	0.711 14	本文

湖南花垣地区岩浆活动较弱,在花垣矿集区及其外围少见岩体出露,故由岩浆岩硅酸盐矿物提供放射成因 Sr 的可能性不大。因此,李梅铅锌矿床高 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值的成矿物质应来源于陆壳碎屑岩,其下

伏地层中南华系至寒武系牛蹄塘组的碎屑岩地层均有可能成为李梅铅锌矿床的矿源层。其中,下伏碎屑岩地层中,岩性为灰色薄—中厚层状粉砂质泥岩、粉砂岩夹岩屑细砂岩的石牌组和岩性为黑色薄层状含碳泥岩的牛蹄塘组均具有较高的 Pb、Zn 丰度^[19],石牌组的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值约为 0.709 35,牛蹄塘组的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值约为 0.709 72^[61],从而推断李梅铅锌矿床成矿物质应来源于下伏寒武系石牌组和牛蹄塘组。

相比于李梅铅锌矿床,整个花垣矿集区围岩、热液方解石及闪锌矿的 Sr 同位素组成也具有相似的特征。花垣矿集区内赋矿围岩清虚洞组灰岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.708 86~0.709 21,平均值为 0.709 04,热液方解石的 Sr 同位素比值为 0.709 06~0.710 22,闪锌矿的 Sr 同位素比值为 0.709 15~0.711 14^[10],成矿流体同样具有高于赋矿地层的 Sr 同位素组成。因此,整个花垣矿集区的成矿物质均应来源于下伏寒武系石牌组和牛蹄塘组。

5 结 语

(1)湖南花垣矿集区李梅铅锌矿床主成矿期闪锌矿的 Rb-Sr 等时线年龄为(464±12)Ma(平均标准权重偏差为 0.97),即成矿时代为中奥陶世。

(2)李梅铅锌矿床成矿物质应主要源自具有高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值的下伏寒武系石牌组和牛蹄塘组陆源碎屑岩,成矿过程中陆壳影响较为明显。

(3)花垣矿集区大面积铅锌成矿作用可能与华南地区发生的拉张断陷导致的盆地流体大规模流动有关。加里东运动早期发生的 490~470 Ma 郁南运动以及加里东运动晚期发生的 420~410 Ma 广西运动,导致了花垣矿集区的两次铅锌成矿事件。

参 考 文 献 :

References :

[1] 周 云,段其发,陈毓川,等. 湘西花垣铅锌矿田成矿物质来源的 C、O、H、S、Pb、Sr 同位素制约[J]. 地质学报,2016,90(10):2786-2802.
ZHOU Yun,DUAN Qi-fa,CHEN Yu-chuan,et al. C, O, H, S, Pb and Sr Isotope Constraints on the Metals Sources of Huayuan Pb-Zn Deposits in Western Hunan[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90 (10): 2786-2802.

[2] 周 云. 湘西花垣 MVT 型铅锌矿集区成矿作用研究[D]. 成都:成都理工大学,2017.
ZHOU Yun. Metallogenesis Study of Huayuan MVT

Type Pb-Zn Ore Concentration Area, Hunan [D]. Chengdu:Chengdu University of Technology,2017.

[3] WEI H T, XIAO K Y, SHAO Y J, et al. Modeling-based Mineral System Approach to Prospectivity Mapping of stratabound Hydrothermal Deposits: A Case Study of MVT Pb-Zn Deposits in the Huayuan Area, Northwestern Hunan Province, China [J]. Ore Geology Reviews, 2020, DOI: 10. 1016/j. oregeorev. 2020. 103368.

[4] LI N, XIAO K Y, SUN L, et al. Part I: A Resource Estimation Based on Mineral System Modeling Prospectivity Approaches and Analogical Analysis: A Case Study of the MVT Pb-Zn Deposits in Huayuan District, China [J]. Ore Geology Reviews, 2018, 101: 966-984.

[5] 段其发,曹 亮,曾健康,等. 湘西花垣矿集区狮子山铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 定年及地质意义[J]. 地球科学,2014,39(8):977-999.
DUAN Qi-fa, CAO Liang, ZENG Jian-kang, et al. Rb-Sr Dating of Sphalerites from Shizishan Pb-Zn Deposit in Huayuan Ore Concentration Area, Western Hunan, and Its Geological Significance [J]. Earth Science, 2014, 39(8): 977-999.

[6] 段其发. 湘西—鄂西地区震旦系—寒武系层控铅锌矿成矿规律研究[D]. 武汉:中国地质大学,2014.
DUAN Qi-fa. The Research of the Metallogenic Regularity of Stratabound Zinc-lead Deposits from Sinian-Cambrian in the Western Hunan and Eastern Hubei [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014.

[7] 李 堃,刘 飞,刘 凯,等. 湘西—黔东南地区铅锌矿床找矿模型与定量预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2020,50(3):825-841.
LI Kun, LIU Fei, LIU Kai, et al. Prospecting Model and Quantitative Prediction of Pb-Zn Deposits in Western Hunan and Eastern Guizhou [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(3): 825-841.

[8] 周 云,段其发,曹 亮,等. 湘西花垣地区铅锌矿床流体包裹体显微测温与特征元素测定[J]. 地球科学,2018,43(7):2465-2483.
ZHOU Yun, DUAN Qi-fa, CAO Liang, et al. Microthermometry and Characteristic Elements Determination of the Fluid Inclusions of the Huayuan Lead-zinc Deposit in Western Hunan [J]. Earth Science, 2018, 43 (7): 2465-2483.

[9] 周 云,段其发,唐菊兴,等. 湘西花垣地区铅锌矿床 C、H、O 同位素特征及其对成矿流体来源的指示[J].

- 地质通报, 2017, 36(5): 823-833.
- ZHOU Yun, DUAN Qi-fa, TANG Ju-xing, et al. Carbon Hydrogen and Oxygen Isotopes of Huayuan Pb-Zn Ore Deposits in Western Hunan and Their Implications for the Source of Ore-forming Fluid[J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(5): 823-833.
- [10] 周云, 段其发, 曹亮, 等. 湘西花垣下寒武统清虚洞组灰岩与锶同位素研究[J]. 地层学杂志, 2017, 41(3): 335-343.
- ZHOU Yun, DUAN Qi-fa, CAO Liang, et al. Strontium Isotope Compositions of the Lower Cambrian Qingxudong Formation and Pb-Zn Deposits in Huayuan, Western Hunan: Implications for Hydrothermal Mineralization[J]. Journal of Stratigraphy, 2017, 41(3): 335-343.
- [11] 谭娟娟, 刘重芃, 杨红梅, 等. 湘西花垣矿集区柔先山铅锌矿床的成矿时间和物质来源[J]. 地球科学, 2018, 43(7): 2438-2448.
- TAN Juan-juan, LIU Chong-peng, YANG Hong-mei, et al. Geochronology and Ore-forming Material Source Constraints for Rouxianshan Pb-Zn Deposit in Huayuan Ore Concentration Area, Western Hunan[J]. Earth Science, 2018, 43(7): 2438-2448.
- [12] 曹亮, 段其发, 彭三国, 等. 湘西地区铅锌矿成矿物质来源: 来自 S、Pb 同位素的证据[J]. 地质通报, 2017, 36(5): 834-845.
- CAO Liang, DUAN Qi-fa, PENG San-guo, et al. Sources of Metallogenic Materials of Lead-zinc Deposits in Western Hunan Province: Evidence from S and Pb Isotopes[J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(5): 834-845.
- [13] 周云, 段其发, 唐菊兴, 等. 湘西地区铅锌矿的大范围低温流体成矿作用: 流体包裹体研究[J]. 地质与勘探, 2014, 50(3): 515-532.
- ZHOU Yun, DUAN Qi-fa, TANG Ju-xing, et al. The Large-scale Low-temperature Mineralization of Lead-zinc Deposits in Western Hunan: Evidence from Fluid Inclusions[J]. Geology and Exploration, 2014, 50(3): 515-532.
- [14] 刘文均, 郑荣才. 花垣铅锌矿床成矿流体特征及动态[J]. 矿床地质, 2000, 19(2): 173-181.
- LIU Wen-jun, ZHENG Rong-cai. Characteristics and Movement of Ore-forming Fluids in the Huayuan Lead-zinc Deposit[J]. Mineral Deposits, 2000, 19(2): 173-181.
- [15] 杨绍祥, 劳可通. 湘西北铅锌矿床的地质特征及找矿标志[J]. 地质通报, 2007, 26(7): 899-908.
- YANG Shao-xiang, LAO Ke-tong. Geological Characteristics and Ore Indicators of Lead-zinc Deposits in Northwestern Hunan, China[J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(7): 899-908.
- [16] 杨绍祥, 劳可通. 湘西北铅锌矿床碳氢氧同位素特征及成矿环境分析[J]. 矿床地质, 2007, 26(3): 330-340.
- YANG Shao-xiang, LAO Ke-tong. A Tentative Discussion on Genesis of Lead-zinc Deposits in Northwest Hunan[J]. Mineral Deposits, 2007, 26(3): 330-340.
- [17] 匡文龙, 刘新华, 陈年生, 等. 湘西北下光荣矿区铅锌矿床主要地球化学特征[J]. 地质科学, 2008, 43(3): 685-694.
- KUANG Wen-long, LIU Xin-hua, CHEN Nian-sheng, et al. Main Geochemical Characteristics of Lead-zinc Deposits in Xiaguangrong Ore District, Northwestern Hunan[J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(3): 685-694.
- [18] 梁薇, 牟传龙, 周恩恩, 等. 湘西花垣排碧寒武系花桥组上段一车夫组沉积环境的探讨[J]. 地质论评, 2012, 58(2): 259-267.
- LIANG Wei, MOU Chuan-long, ZHOU Ken-ken, et al. A Discussion on Sedimentary Environment of the Upper Member of Huaqiao Formation-Chefu Formation of Cambrian in Paibi, Huayuan, Western Hunan[J]. Geological Review, 2012, 58(2): 259-267.
- [19] 汤朝阳, 邓峰, 李堃, 等. 湘西—黔东南地区早寒武世沉积序列及铅锌成矿制约[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(1): 111-117.
- TANG Chao-yang, DENG Feng, LI Kun, et al. Sedimentary Sequence of the Lower Cambrian Qingxudong Formation in the Western Hunan and Eastern Guizhou Provinces and Its Constrains on Lead-zinc Mineralization[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2012, 36(1): 111-117.
- [20] 蔡应雄, 杨红梅, 段瑞春, 等. 湘西—黔东南下寒武统铅锌矿床流体包裹体和硫、铅、碳同位素地球化学特征[J]. 现代地质, 2014, 28(1): 29-41.
- CAI Ying-xiong, YANG Hong-mei, DUAN Rui-chun, et al. Fluid Inclusions and S, Pb, C Isotope Geochemistry of Pb-Zn Deposits Hosted by Lower Cambrian in Western Hunan-eastern Guizhou Area[J]. Geoscience, 2014, 28(1): 29-41.
- [21] 李堃, 吴昌雄, 汤朝阳, 等. 湘西黔东南地区铅锌矿床 C、O 同位素地球化学特征及其对成矿过程的指示[J]. 中国地质, 2014, 41(5): 1608-1619.
- LI Kun, WU Chang-xiong, TANG Chao-yang, et al. Carbon and Oxygen Isotopes of Pb-Zn Ore Deposits in Western Hunan and Eastern Guizhou Provinces and

- Their Implications for the Ore-forming Process[J]. *Geology in China*, 2014, 41(5):1608-1619.
- [22] 毛党龙. 湖南省花垣县大脑坡铅锌矿地质特征及成因[J]. *现代矿业*, 2016, 32(2):90-94.
- MAO Dang-long. Geological Characteristics and Genesis of the Danaopo Pb-Zn Deposit in Huayuan County, Hunan Province[J]. *Modern Mining*, 2016, 32(2):90-94.
- [23] 彭能立, 刘伟, 梁恩云, 等. 湘西地区北洛塔和花垣铅锌矿田对比研究[J]. *地质找矿论丛*, 2016, 31(2):190-198.
- PENG Neng-li, LIU Wei, LIANG En-yun, et al. A Comparative Study of Luota and Huayuan Lead-zinc Ore Field in the Northwest Hunan Province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2016, 31(2):190-198.
- [24] 赵佳进, 许明珠, 刘建平, 等. 湘西花垣铅锌矿田的成矿构造[J]. *地质找矿论丛*, 2016, 31(3):346-354.
- ZHAO Jia-jin, XU Ming-zhu, LIU Jian-ping, et al. The Ore-forming Structural of Huayuan Lead-zinc Ore Field in Western Hunan Province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2016, 31(3):346-354.
- [25] 薛长军, 吕古贤, 高伟利, 等. 湘西花垣李梅矿田含矿层清虚洞期岩相古地理分析及成矿预测[J]. *地学前缘*, 2017, 24(2):159-175.
- XUE Chang-jun, LU Gu-xian, GAO Wei-li, et al. Lithofacies Paleogeographic Analysis of Ore-bearing Layers in Qingxudong Period and Metallogenic Prediction in Limei Ore Field in Huayuan, Western Hunan, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(2):159-175.
- [26] 王辰, 刘建朝, 张海东, 等. 湘西花垣地区奥陶—志留系沉积岩稀土元素地球化学特征及地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2017, 36(3):516-522.
- WANG Chen, LIU Jian-chao, ZHANG Hai-dong, et al. REE Geochemical Characteristics of Ordovician-Silurian Sedimentary Rock in the Huayuan Area, Hunan Province and Their Geological Significances[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2017, 36(3):516-522.
- [27] 夏新阶, 舒见闻. 李梅锌矿床地质特征及其成因[J]. *大地构造与成矿学*, 1995, 19(3):197-204.
- XIA Xin-jie, SHU Jian-wen. Geologic Characteristics and Origin of the Limei Zinc Sulfide Deposit[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 1995, 19(3):197-204.
- [28] 罗卫, 尹展, 孔令, 等. 花垣李梅铅锌矿集区地质特征及矿床成因探讨[J]. *地质调查与研究*, 2009, 33(3):194-202.
- LUO Wei, YIN Zhan, KONG Ling, et al. Discussion on the Geological Features and Genesis of the Limei Pb-Zn Ore Concentration Belt in North-western Hunan Province[J]. *Geological Survey and Research*, 2009, 33(3):194-202.
- [29] 周云, 段其发, 曹亮, 等. 湖南花垣地区铅锌矿床稀土元素地球化学特征初步研究[J]. *华南地质与矿产*, 2017, 33(3):282-292.
- ZHOU Yun, DUAN Qi-fa, CAO Liang, et al. A Preliminary Study on Rare Earth Elements Geochemical Characteristics of the Lead-zinc Deposits in Huayuan Area, Hunan Province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2017, 33(3):282-292.
- [30] 陕亮. 湘东北地区铜-铅-锌-钴多金属成矿系统[D]. 北京:中国地质大学, 2019.
- SHAN Liang. Metallogenic System of Copper-lead-zinc-cobalt Polymetallic Deposits, Northeastern Hunan Province, South China[D]. Beijing:China University of Geosciences, 2019.
- [31] MAXWELL R J. A Study of Rubidium, Strontium and Strontium Isotopes in Some Mafic and Sulfide Minerals[D]. Vancouver: The University of British Columbia, 1976.
- [32] 李文博, 黄智龙, 许德如, 等. 铅锌矿床 Rb-Sr 定年研究综述[J]. *大地构造与成矿学*, 2002, 26(4):436-441.
- LI Wen-bo, HUANG Zhi-long, XU De-ru, et al. Rb-Sr Isotopic Method on Zinc-lead Ore Deposits: A Review[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2002, 26(4):436-441.
- [33] MEDFORD G A, MAXWELL R J, RICHARD L A. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Ratio Measurements on Sulfides, Carbonates and Fluid Inclusions from Pine Point, Northwest Territories, Canada: An $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Ratio Increase Accompanying the Mineralizing Process[J]. *Economic Geology*, 1983, 78(7):1375-1378.
- [34] NAKAI S, HALLIDAY A N, KESLER S E, et al. Rb-Sr Dating of Sphalerites from Tennessee and the Genesis of Mississippi Valley Type Ore Deposits[J]. *Nature*, 1990, 346:354-357.
- [35] BRANNON J C, PODOSEK F A, MCLIMANS R K. Alleghenian Age of the Upper Mississippi Valley Zinc-lead Deposit Determined by Rb-Sr Dating of Sphalerite[J]. *Nature*, 1992, 356:509-511.
- [36] NAKAI S, HALLIDAY A N, KESLER S E, et al. Rb-Sr Dating of Sphalerites from Mississippi Valley-type (MVT) Ore Deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(2):417-427.

- [37] CHRISTENSEN J N, HALLIDAY A N, LEIGH K E, et al. Direct Dating of Sulfides by Rb-Sr: A Critical Test Using the Polaris Mississippi Valley-type Zn-Pb Deposit[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(24): 5191-5197.
- [38] CHRISTENSEN J N, HALLIDAY A N, VEARN-COMBE J R, et al. Testing Models of Large-scale Crustal Fluid Using Direct Dating of Sulfides: Rb-Sr Evidence Forearly Dewatering and Formation of Mississippi Valley-type Deposits, Canning Basin, Australia[J]. *Economic Geology*, 1995, 90(4): 877-884.
- [39] 杨红梅, 蔡红, 段瑞春, 等. 硫化物 Rb-Sr 同位素定年研究进展[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(4): 379-385.
YANG Hong-mei, CAI Hong, DUAN Rui-chun, et al. Progress in Rb-Sr Isotopic Dating of Sulfide[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(4): 379-385.
- [40] 李文博, 黄智龙, 陈进, 等. 会泽超大型铅锌矿床成矿时代研究[J]. *矿物学报*, 2004, 24(2): 112-116.
LI Wen-bo, HUANG Zhi-long, CHEN Jin, et al. Rb-Sr Dating of Mineral Assemblage from the Huize Giant Zn-Pb Deposit, Yunnan Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2004, 24(2): 112-116.
- [41] 喻钢. 辽东青城子矿田的年代学和同位素地球化学[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005.
YU Gang. The Chronology and Isotopic Geochemistry of Qingchengzi Ore Field, Eastern Liaoning [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2005.
- [42] 张长青, 李向辉, 余金杰, 等. 四川大梁子铅锌矿床单颗粒闪锌矿铷-锶测年及地质意义[J]. *地质论评*, 2008, 54(4): 532-538.
ZHANG Chang-qing, LI Xiang-hui, YU Jin-jie, et al. Rb-Sr Dating of Single Sphalerites from the Daliangzi Pb-Zn Deposit, Sichuan, and Its Geological Significances[J]. *Geological Review*, 2008, 54(4): 532-538.
- [43] 祁进平, 宋要武, 李双庆, 等. 河南省栾川县西沟铅锌银矿床单矿物铷-锶同位素组成特征[J]. *岩石学报*, 2009, 25(11): 2843-2854.
QI Jin-ping, SONG Yao-wu, LI Shuang-qing, et al. Single-grain Rb-Sr Isotopic Composition of the Xigou Pb-Zn-Ag Deposit, Luanchuan, Henan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(11): 2843-2854.
- [44] 胡乔青, 王义天, 王瑞廷, 等. 陕西省凤太矿集区二里河铅锌矿床的成矿时代: 来自闪锌矿 Rb-Sr 同位素年龄的证据[J]. *岩石学报*, 2012, 28(1): 258-266.
HU Qiao-qing, WANG Yi-tian, WANG Rui-ting, et al. Ore-forming Time of the Erlihe Pb-Zn Deposit in the Fengxian-Taibai Ore Concentration Area, Shaanxi Province: Evidence from the Rb-Sr Isotopic Dating of Sphalerites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(1): 258-266.
- [45] 廖震文, 王生伟, 孙晓明, 等. 黔东北地区 MVT 型铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 定年及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2015, 34(4): 769-785.
LIAO Zhen-wen, WANG Sheng-wei, SUN Xiao-ming, et al. Rb-Sr Dating of Sphalerites from MVT Pb-Zn Deposits in Northeastern Guizhou Province and Its Geological Implications[J]. *Mineral Deposits*, 2015, 34(4): 769-785.
- [46] 赵海杰, 余长发, 韩心巧, 等. 广东大降坪硫(铅锌)矿床岩浆热液叠加作用: 来自闪锌矿 Rb-Sr 年龄及硫同位素的证据[J]. *矿床地质*, 2016, 35(4): 795-808.
ZHAO Hai-jie, YU Zhang-fa, HAN Xin-qiao, et al. Magmatic Hydrothermal Superimposition in Dajiangping S(Pb-Zn) Deposit, Guangdong Province: Rb-Sr Isochron Age and Sulfur Isotope Evidence[J]. *Mineral Deposits*, 2016, 35(4): 795-808.
- [47] 于玉帅, 刘阿睢, 戴平云, 等. 贵州铜仁塘边铅锌矿床成矿时代和成矿物质来源: 来自 Rb-Sr 同位素测年和 S-Pb 同位素的证据[J]. *地质通报*, 2017, 36(5): 885-892.
YU Yu-shuai, LIU A-sui, DAI Ping-yun, et al. The Metallogenic Epoch and Ore-forming Material Source of the Tangbian Pb-Zn Deposit in Tongren, Guizhou Province: Evidence from Rb-Sr Dating of Sphalerites and S-Pb Isotope [J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(5): 885-892.
- [48] 王健, 张均, 张晓军, 等. 四川天宝山矿床闪锌矿 Rb-Sr 年代学、稳定同位素及地质意义[J]. *地球科学*, 2019, 44(9): 3026-3041.
WANG Jian, ZHANG Jun, ZHANG Xiao-jun, et al. Rb-Sr Geochronology, Stable Isotopic Analyses and Geological Significance of the Tianbaoshan Pb-Zn Deposit in Sichuan Province, China [J]. *Earth Science*, 2019, 44(9): 3026-3041.
- [49] 刘军港, 李子颖, 聂江涛, 等. 相山铀矿田西部地区深部多金属矿化成矿年代与成矿流体演化: Rb-Sr 同位素体系的制约[J]. *岩石学报*, 2019, 35(9): 2787-2800.
LIU Jun-gang, LI Zi-ying, NIE Jiang-tao, et al. The Timing and Ore-forming Fluid Evolution of Deep Polymetallic Mineralization in Western Xiangshan Uranium Ore Field, South China: Constraints from Rb-Sr Isotope Systematics [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(9): 2787-2800.
- [50] 侯鹤楠, 任云生, 陆思宇, 等. 吉林延边红太平铜多金

- 属矿床脉型矿化的成矿时代与构造背景[J]. 岩石学报, 2020, 36(3): 820-836.
- HOU He-nan, REN Yun-sheng, LU Si-yu, et al. Age and Tectonic Setting of Vein-type Mineralization of Hongtaiping Copper Polymetallic Deposit in Yanbian Area, Jilin Province, NE China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(3): 820-836.
- [51] 杨绍祥, 余沛然, 劳可通. 湘西北地区铅锌矿床成矿规律及找矿方向[J]. 国土资源导刊, 2006, 3(3): 92-98.
- YANG Shao-xiang, YU Pei-ran, LAO Ke-tong. Metallogenic Regularity and Prospecting Direction of Lead-zinc Deposits in Northwest Hunan[J]. Land and Resources Herald, 2006, 3(3): 92-98.
- [52] 李胜明. 湘西北花垣铅锌矿田沉积-构造控矿机理及成矿远景预测[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- LI Sheng-ming. Sedimentary Structure in Northwest Huayuan Lead-zinc Deposit in Hunan Metallogenic Mechanism and Metallogenic Prediction[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [53] 胡太平, 王敏芳, 丁振举, 等. 湘西花垣李梅铅锌矿床 C、O、S、Pb 同位素特征及成矿物质来源[J]. 矿床地质, 2017, 36(3): 623-642.
- HU Tai-ping, WANG Min-fang, DING Zhen-ju, et al. C, O, S and Pb Isotopic Characteristics and Sources of Metallogenic Materials of Limei Pb-Zn Deposit in Huayuan County, Western Hunan Province[J]. Mineral Deposits, 2017, 36(3): 623-642.
- [54] 杨红梅, 刘重芃, 段瑞春, 等. 贵州铜仁卜口场铅锌矿床 Rb-Sr 与 Sm-Nd 同位素年龄及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(5): 855-865.
- YANG Hong-mei, LIU Chong-peng, DUAN Rui-chun, et al. Rb-Sr and Sm-Nd Isochron Ages of Bokouchang Pb-Zn Deposit in Tongren, Guizhou Province and Their Geological Implication[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2015, 39(5): 855-865.
- [55] LUDWIG K R. User's Manual for Isoplot/Ex Rev. 2. 49: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [R]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2001.
- [56] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459-464.
- LU Yuan-fa. Geokit: A Geochemical Toolkit for Microsoft Excel[J]. Geochimica, 2004, 33(5): 459-464.
- [57] 舒良树. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带[J]. 高校地质学报, 2006, 12(4): 418-431.
- SHU Liang-shu. Predevonian Tectonic Evolution of South China: from Cathaysian Block to Caledonian Period Folded Orogenic Belt[J]. Geological Journal of China Universities, 2006, 12(4): 418-431.
- [58] 周恩恩, 许效松. 扬子陆块西部古隆起演化及其对郁南运动的反映[J]. 地质论评, 2016, 62(5): 1125-1133.
- ZHOU Ken-ken, XU Xiao-song. Evolution of Paleouplifts in the Western Upper Yangtze Craton and Its Reflection on Yunan Orogeny[J]. Geological Review, 2016, 62(5): 1125-1133.
- [59] 戴传固, 陈建书, 卢定彪, 等. 黔东南及邻区加里东运动的表现及地质意义[J]. 地质通报, 2010, 29(4): 530-534.
- DAI Chuan-gu, CHEN Jian-shu, LU Ding-biao, et al. Appearance and Geologic Significance of Caledonian Movement in Southeastern Guizhou, China and Its Adjacent Area[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(4): 530-534.
- [60] 周留煜. 钦杭结合带西南段区域地质演化史和成矿效应[J]. 矿物学报, 2011, 31(增1): 151-152.
- ZHOU Liu-yu. Regional Geological Evolution History and Metallogenic Effect of Southwest Qinhang Junction Zone[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011, 31(S1): 151-152.
- [61] 黄思静. 上扬子地台区晚古生代海相碳酸盐岩的碳、锶同位素研究[J]. 地质学报, 1997, 71(1): 45-53.
- HUANG Si-jing. A Study on Carbon and Strontium Isotopes of Late Paleozoic Carbonate Rocks in the Upper Yangtze Platform[J]. Acta Geologica Sinica, 1997, 71(1): 45-53.
- [62] 龚银杰, 张遵遵, 陈立波, 等. 川东南褶皱带洞岩铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 同位素测年及其构造变形时代[J]. 中国地质, 2020, 47(2): 485-496.
- GONG Yin-jie, ZHANG Zun-zun, CHEN Li-bo, et al. Sphalerite Rb-Sr Isotopic Dating of the Dongyan Pb-Zn Deposit in Southeastern Sichuan Fold Belt and Its Constraint on the Timing of Tectonic Deformation[J]. Geology in China, 2020, 47(2): 485-496.
- [63] DENISON R E, KIRKLAND D W, EVANS R. Using Strontium Isotopes to Determine the Age and Origin of Gypsum and Anhydrite Beds[J]. The Journal of Geology, 1998, 106(1): 1-18.
- [64] 曹亮, 梁玉明, 段其发, 等. 扬子陆块东南缘升天坪锌矿床地质特征、闪锌矿 Rb-Sr 定年及其地质意义[J]. 高校地质学报, 2018, 24(4): 504-515.
- CAO Liang, LIANG Yu-ming, DUAN Qi-fa, et al. Geological Characteristics and Rb-Sr Dating of Sphalerites from the Shengtianping Zinc Deposit in Southeastern Yangtze Block and Its Geological Significance[J]. Geological Journal of China Universities, 2018, 24(4): 504-515.