

文章编号: 1000-4734(2020)04-0394-10

# 黔西北五指山地区铅锌矿床研究新进展: 成矿带归属的启示

韦晨<sup>1,2</sup>, 叶霖<sup>1\*</sup>, 黄智龙<sup>1</sup>, 胡宇思<sup>1,2</sup>, 王浩宇<sup>1,2</sup>, 张嘉玮<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 贵州省地质矿产勘查开发局 贵州省地质调查院, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:** 黔西北成矿区为川滇黔接壤矿集区的重要组成部分之一, 但该地区以往未见有大型以上铅锌矿的报道。近些年来, 贵州科技工作者在五指山地区取得重大的找矿突破, 发现多个大中型铅锌矿床, 提交铅锌金属资源量超过 250 万吨。为了使地质工作者更好地认识该矿田铅锌矿成矿作用, 并为研究区及邻区找矿预测提供理论依据, 本文系统总结五指山地区铅锌矿近些年的研究进展, 并与川滇黔与湘西—黔东地区铅锌矿床从地质、地球化学以及成矿时代进行对比, 尝试探讨五指山地区铅锌矿成矿带归属。地质和地球化学的综合研究表明, 五指山地区的铅锌矿床的成矿物质主要来源于变质基底, 水岩反应作用致使围岩贡献了少量的成矿物质, 成矿流体具有多源性, 主要为低温、中高盐度的卤水, 可能混入少量的地层水, 矿床成因类型属于 MVT 型铅锌矿床。年代学数据揭示, 五指山地区铅锌矿成矿时代为(458.2±2.9) Ma, 可能与武夷—云开陆内造山事件有关, 暗示湘西—黔东地区同时代的铅锌成矿作用可能延伸到该地区。通过系统的地质和地球化学对比发现, 五指山矿田内铅锌矿床与川滇黔接壤地区典型的铅锌矿床存在差异明显, 而与湘西—黔东铅锌成矿带内典型矿床相似, 故暂将其划分到该成矿带。

**关键词:** 川滇黔地区; 铅锌成矿作用; 成矿物质及流体来源; 成矿时代; 矿床成因

**中图分类号:** P571; P618.4

**文献标识码:** A

**doi:** 10.16461/j.cnki.1000-4734.2020.40.028

**第一作者:** 韦晨, 男, 1992 年生, 博士研究生, 矿床地球化学专业. E-mail: Geoweichen@hotmail.com

## New advances in the study of Pb-Zn deposits in the Wuzhishan district of the northwestern Guizhou: enlightenment on the attribution of metallogenic belt

WEI Chen<sup>1,2</sup>, YE Lin<sup>1\*</sup>, HUANG Zhi-long<sup>1</sup>, HU Yu-si<sup>1,2</sup>, WANG Hao-yu<sup>1,2</sup>, ZHANG Jia-wei<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Guizhou Geological Survey, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Guiyang 550081, China)

**Abstract:** The northwestern Guizhou metallogenic zone is one of the important parts of the Sichuan-Yunnan-Guizhou (SYG) metallogenic province, though none of the large sized Pb-Zn deposit has been discovered before 2010. Recently, a breakthrough of the Pb-Zn exploration has been made in the Wuzhishan district by Guizhou geologists. Several large and/or median sized Pb-Zn deposits have been discovered in the area with over 2.50 Mt of newly increased Pb-Zn resources. In order to better understand the Pb-Zn mineralization in the Wuzhishan district and to provide a theoretical basis for ore exploration in the Wuzhishan and adjacent areas, in this paper, we have systematically reviewed recent

**收稿日期:** 2020-06-17

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (编号: 41673056; U1812402); 贵州省科学技术基金重点项目 (编号: 黔科合基础[2017]1421); 国家重点研发计划 (编号: 2017YFC0602502); 贵州省科技计划项目 (编号: 黔科合平台人才[2018]5626)

\* 通讯作者, E-mail: yelin@vip.gyg.ac.cn

advances in studies of Pb-Zn deposits in the Wuzhishan district made a comparison between Pb-Zn deposits in the the SYG and those in the Western Hunan-Eastern Guizhou (WHEG) district, China in terms of geology, geochemistry, and geochronology, and discussed the attribution of the Wuzhishan Pb-Zn metallogenic belt. Comprehensively geological and geochemical studies suggest that the ore-forming metals could be mainly derived from the metamorphic basement with a small contribution from host rocks due to the fluid-rock interaction. The ore-forming fluids could be mainly sourced from the low temperature medium-high salinity brines mixed with a small amount of formation water. All these Pb-Zn deposits should be ascribed to the MVT-type deposit. Additionally, geochronological dataset has revealed that the Pb-Zn mineralization of various deposits in the Wuzhishan, formed at  $458.2 \pm 2.9$  Ma, may be associated with the Wuyi-Yunkai intracontinental orogenic event, indicating the possible extension of the contemporary Pb-Zn mineralization in the WHEG area. By systematically geological and geochemical comparison, it is found that the characteristics of Pb-Zn deposits in the Wuzhishan orefield are similar to those of the typical deposits in the WHEG Pb-Zn metallogenic belt, but are obviously different to those of the typical Pb-Zn deposits in the SYG triangle. Therefore, the Wuzhishan orefield is temporarily assigned to the WHEG me tallogenic belt.

**Keywords:** The Sichuan-Yunnan-Guizhou district; Pb-Zn mineralization; sources of metals and ore-forming fluid; age of mineralization; ore genesis

川滇黔接壤铅锌矿集区位于扬子板块西南缘, 是西南大面积低温成矿域的重要组成部分, 在总面积约 17 万 km<sup>2</sup> 的大三角形区域内, 分布着 400 多个大、中、小型铅锌矿床、矿点和矿化点<sup>[1-3]</sup>, 累计探明的铅锌矿资源量超过 2000 万吨, 约占全国的 27%, 是我国重要的 Pb、Zn、Ag 及多种分散元素的生产基地之一<sup>[4]</sup>。目前区内已发现超大型矿床 1 处(会泽)、大型 8 处(天宝山、小石房、大梁子、毛坪、乐红、茂租、五指山和猪拱塘)<sup>[1-2,5-7]</sup>。这些矿床主要分布于滇东北和川西南地区, 黔西北地区以往未见有大型及以上规模的铅锌矿报道, 五指山铅锌矿田是该地区发现的首个大型铅锌矿床(近期发现的猪拱塘铅锌矿为第 2 处)<sup>[8-9]</sup>, 打破了以往黔西北地区难以找到大型铅锌矿的认识。该铅锌矿的发现, 不仅具有巨大的经济价值, 而且具有重要的科学研究价值。

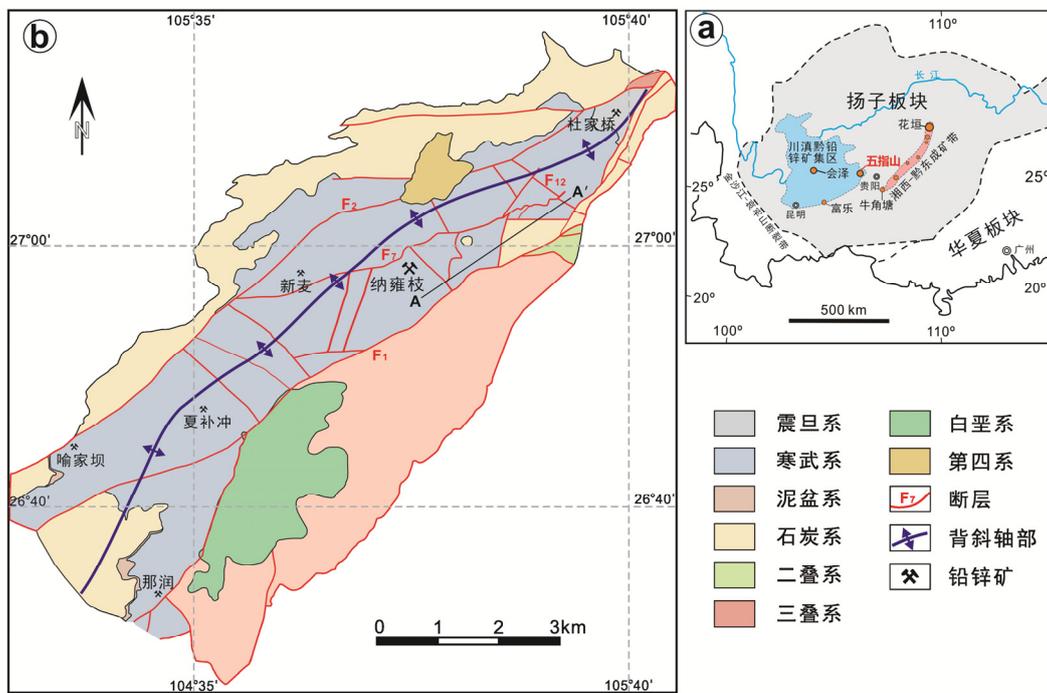


图 1 (a) 扬子地台西南缘铅锌矿床大地构造位置(据 Ye<sup>[3]</sup>修改)和 (b) 五指山地区铅锌矿分布图<sup>[9]</sup>

Fig. 1. (a) Tectonic setting of the Pb-Zn deposits in the southwestern margin of Yangtze craton and (b) the distribution of Pb-Zn deposits in the Wuzhishan district.

至目前为止,五指山地区已发现杜家桥(中型)、纳雍枝(大型)、新麦(中型)以及那润、夏补冲和喻家坝等小型矿床(点),提交的铅锌资源量超过 250 万吨(图 1<sup>[10]</sup>),其中以纳雍枝铅锌矿床规模最大,勘探程度最高,已提交的铅锌矿资源量超过 150 万吨<sup>[11]</sup>。笔者及所在课题组成员近几年来对五指山地区铅锌矿进行了系统的地质地球化学研究工作<sup>[8-9,12-13]</sup>,发现该地区铅锌矿床矿石品位较低(<15.0%),以 Zn 为主, Pb 次之,伴生有用元素(Ge、Ga 和 Cd)含量相对较低<sup>[9]</sup>,不同于川滇黔地区铅锌矿规模大、品位高和伴生有用元素多的地质特征<sup>[2]</sup>,而与湘西—黔东成矿带上一些铅锌矿(如花垣李梅、黔东牛角塘)的地质特征较为类似。为了使地质工作者更好地认识该矿田铅锌矿成矿作用,并为研究区及邻区找矿预测提供理论依据,本文通过总结前人及本课题组已发表的研究成果,系统对比五指山、川滇黔与湘西—黔东地区铅锌矿床地质、地球化学以及成矿时代,尝试探讨五指山地区铅锌矿成矿带归属。

## 1 区域和矿床地质特征

五指山矿田位于黔西北成矿区东南缘,以紫云—娅都断裂为以东,普定县城西北 44 km 处。五指山背斜是矿田内主要的褶皱,其构造方向总体呈北东 40°~50°展布,轴面倾向北西,轴向长约 14 km,宽约 5 km。该背斜轴部主要出露寒武系、石炭系地层,震旦系灯影组零星分布,两翼依次为石炭系、二叠系、三叠系和白垩系地层,背斜北西翼地层倾向 NW,倾角 3°~15°;南东翼地层倾向 SE,局部地段地层倾向 NS 或 SW,倾角 10°~25°。背斜内发育一系列近 SN、NE、EW 断裂构造,其中 NE-NNE 向 F<sub>1</sub> 和 F<sub>2</sub> 断层与背斜轴面大致平行。F<sub>1</sub> 断层,为一条区域性正断层,呈 NE 向分布于按背斜的南东翼,长约 50 km,倾向 SE,倾角 57°~60°,断层破碎带宽 10~20 m,断距近千米,SW 交于紫云—娅都区域深大断裂。F<sub>2</sub> 断层为 1 条正断层,走向 NE,倾向 SE,倾角 60°~70°,断层破碎带宽约 30 m,断距 400~700 m 不等。另外背斜内还发育一些 NW 向逆冲断层。矿(点)主要分布在背斜核部的震旦系灯影组和下寒武统清虚洞组地层中。纳雍枝为矿田内规模最大的铅锌矿床,分布于背斜南东翼矿区,本文将以此矿床为例详细介绍该矿田内矿床地质特征。

矿区出露下寒武统金顶山组泥质粉砂岩、页岩和清虚洞组白云岩、泥质白云岩,下石炭统祥摆组砂质泥岩、泥质粉砂岩夹劣质煤和大埔组白云岩和下三叠统大冶组红色细碎屑岩。依据岩性组合特征,清虚洞组可进一步分为 3 个岩性段,由下至上简述如下:第 1 段,下部为厚层含泥质白云岩,中部为灰色中至厚层颗粒白云岩、晶洞白云岩,上部为暗灰色中至厚层瘤状白云岩,为区内的主要含矿层,厚 90~130 m。第 2 段,可分为 a 层(C<sub>1</sub>q<sup>2a</sup>)为一套灰-暗灰色中厚层细晶白云岩夹瘤状白云岩,底部发育一层约 3 m 厚的薄层砂泥质白云岩,为五指山地区的主要含矿层之一,厚 60~80 m; b 层(C<sub>1</sub>q<sup>2b</sup>)为一套暗灰色厚层瘤状白云岩、中厚层细晶白云岩,底部发育一套约 4 m 厚的薄层砂泥质细晶白云岩,厚 70~90 m。第 3 段:矿区内大面积出露,为一套灰至浅灰色中厚层含泥质细晶白云岩,底部发育一套厚约 6 m 的薄层砂泥质细晶白云岩,下部为灰色中厚层细晶白云岩夹薄层砂泥质细晶白云岩,厚 140~180 m。

纳雍枝矿床由砂岩、金坡、芦茅林和玉合等 4 个矿段组成,矿段划分是探矿权设置所致。根据赋矿层位、矿体形态以及空间展布,自下而上可将矿体层状矿体划分为 I、II、III 等 3 个含矿层(图 2)以及玉合矿段的陡倾斜脉状矿体。

I 矿层:赋矿围岩为清虚洞组第 1 段瘤状白云岩,距该段地层顶部约 60 m,矿层顶、底板均为含泥质颗粒白云岩。矿体呈层状、似层状产出,与围岩产状基本一致,矿体倾向 130°~180°,倾角 8°~20°,最大厚度约 11.0 m,最小厚度约 0.5 m,平均厚度约 3.95 m, Zn 品位介于 1.04%~11.84%,平均品位 3.97%,矿体走向长伸展约 1200 m,倾向控制约 320 m,矿石中含少量细粒黄铁矿。

II 矿层:赋矿围岩主要为瘤状白云岩,矿石中可见大量细粒状黄铁矿,矿层顶板可见含炭泥质白云岩。矿体主要分布在清虚洞第 1 段顶部。矿体呈似层状产出,与 I 矿层产状基本一致,矿体倾向

130°~180°, 倾角 8°~20°; 该层矿化较为稳定, 是矿区内的主要含矿层位, 矿体走向延伸达 2725 m, 倾向宽度介于 250~775 m, 垂向厚度在 1.0~29.6 m 之间, 平均厚度约 7.12 m。矿体 Pb 品位 0.04%~4.05%, 平均品位 0.45%; Zn 品位 0.5~6.63%, 平均品位 4.03%。

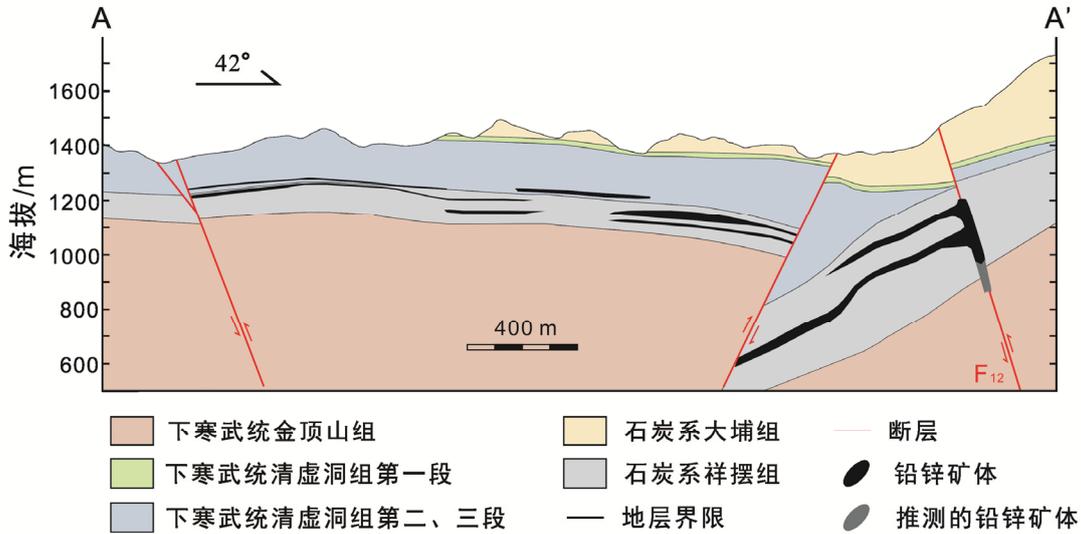


图2 纳雍枝锌铅矿床纵向剖面图 (据贵州省有色金属和核工业地质勘查局, 2012 修改)

Fig. 2. Cross section of the Nayongzhi Zn-Pb deposit (modified after Non-ferrous metals and nuclear industry geological exploration bureau of Guizhou, 2012).

III 矿层: 赋矿围岩主要为瘤状白云岩, 矿层顶、底板均为含泥质细晶白云岩。矿体主要产于清虚洞第 2 段第 1 层的暗灰色中厚层瘤状白云岩中, 距第 2 段第 1 层底部约 20 m。矿体主要呈层状产出, 与 I、II 矿层产状基本一致, 矿体最大厚度约 7.5 m, 最小厚度约 1.0 m, 平均厚度 3.47 m, Zn 品位 0.49%~4.82%, 平均品位 2.72%, 矿体走向延伸约 1200 m, 倾向延伸约 400 m。矿体倾向 130°~180°, 倾角 8°~20°, 矿化层较为稳定, 矿体走向延伸可达 2725 m, 倾向宽度介于 250~775 m, 垂向厚度在 1.0~29.6 m 之间, 平均厚度达 7.12 m。矿体 Pb 品位 0.045%~4.05%, 平均品位 0.45%, Zn 品位 0.55%~36.63%, 平均品位 4.03%。

断裂型矿体主要产于玉合矿段, 产出状态较为复杂, 主要呈陡脉状产出, 呈角砾状分布于断层破碎带中。走向控制大于 97 m, 倾向延伸 >200 m, 水平厚度在 4.0~12.0 m 之间, Zn 品位介于 6.20%~17.38% 之间, 常见团块状方铅矿与之伴生。

矿床中矿石结构构造以浸染状、斑块状和网脉状为主, 常见交代填隙结构、晶粒结构、环状结构。围岩蚀变相对较弱, 以方解石化、白云石化为主, 部分具黄铁矿化。此外, 矿床中矿石矿物组成简单, 以闪锌矿为主, 方铅矿次之, 含少量黄铁矿等硫化物, 其中有用元素以 Zn 为主, Pb 次之。

## 2 矿田近年地质地球化学研究进展

自贵州省有色金属和核工业地质勘查局地质矿产勘查院<sup>[14]</sup>在五指山地区实现重大的找矿突破以来, 众多学者在该地区陆续开展成矿物质来源、成矿年代学、成矿流体性质以及矿床成因等方面的研究工作, 为完善该地区铅锌成矿奠定了坚实的基础。下文将在成矿物质及流体来源、成矿流体性质及演化、矿床成因类型和成矿时代等方面总结该地区铅锌成矿的最新进展。

### 2.1 成矿物质和流体来源

目前绝大多数的学者认同该地区铅锌矿床的成矿物质主要来源于变质基底地层, 但对下伏地层和赋矿围岩是否贡献成矿物质存在极大分歧。金灿海等<sup>[15]</sup>通过湿化学获得 Pb 同位素组成认为下伏震旦系

地层为该地区铅锌矿成矿提供部分成矿物质。近期的原位同位素研究表明五指山地区的铅锌矿成矿物质显示明显的壳源特征。例如,金中国等<sup>[8]</sup>通过飞秒激光获得方铅矿原位 Pb 同位素组成较为均一,不同于震旦系白云岩和峨眉山玄武岩,排除了下伏地层和峨眉山玄武岩提供成矿物质的可能。但是,赋矿围岩是否提供一定量的成矿物质尚无定论。如,陈伟等<sup>[16]</sup>发现硫化物的 Pb 同位素与赋矿围岩的铅同位素相近,推测围岩可能贡献了成矿物质。Zhou<sup>[13]</sup>对纳雍枝铅锌矿不同成矿阶段的方铅矿开展详细的原位 Pb 同位素研究发现早成矿阶段的方铅矿 Pb 同位素明显低于晚阶段的方铅矿,推测晚阶段赋矿围岩的提供更高比例的成矿物质组分。但这一猜想缺少一些直接的证据。近来,笔者对采自不同位置的硫化物样品进行了原位铅同位素测试,发现 F<sub>12</sub> 断层近端具有更多放射性成因的铅同位素组成,远离 F<sub>12</sub> 断层 Pb 同位素呈降低趋势(未发表资料)。结合赋矿围岩具有更低的 Pb 同位素组成,笔者认为成矿物质主要来源于基底地层,流体上升过程与围岩发生不同程度的水岩反应,致使远离断层一侧 Pb 同位素降低。综上所述,金属成矿物质主要来源于基底地层,水岩反应使围岩是贡献了少量的成矿物质。

由于五指山地区铅锌矿不同稳定同位素组成示踪出的不同成矿流体来源,致使有关成矿流体的来源存在极大争议。大量的数据表明硫化物矿石明显富集重的硫同位素(15.94‰~25.49‰)<sup>[8,15-16]</sup>,暗示成矿流体中的还原硫主要来源于海水硫酸盐。研究区铅锌矿容矿的地层(中为一套蒸发相白云岩,含有大量的石膏、重晶石等硫酸盐矿物,厚度达上千米,且其硫同位素组成(24‰~28‰)与寒武纪同期海水硫酸盐  $\delta^{34}\text{S}$  值接近(27‰~32‰),也与硫化物的硫同位素相近。因此多数学者认为成矿流体中的硫主要来源于赋矿地层的蒸发岩或海相硫酸盐<sup>[8-9,15-16]</sup>。原生矿石中脉石矿物方解石/白云石的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  分别为-4.1‰~+0.5‰和+12.4‰~+14.1‰。在  $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$  图解上落在海相碳酸盐岩附近,不同于地幔和有机沉积岩<sup>[13]</sup>。Zhou<sup>[13]</sup>计算获得矿床的成矿流体  $\delta^{18}\text{O}$  值为(+2.3‰~+4.0‰)与变质流体的氧同位素极为相似(+2.0‰~+25.0‰)<sup>[17]</sup>,因此认为成矿流体 O 同位素来源于富集  $\delta^{18}\text{O}$  白云岩和亏损富集  $\delta^{18}\text{O}$  变质流体混合所致。韦晨等<sup>[12]</sup>通过对原生矿石中脉石矿物白云石 REE 地球化学研究也证实,纳雍枝矿床的成矿流体为混合来源。另外,还原硫主要来源于赋矿地层的蒸发岩或海相硫酸盐,而金属成矿物质来源于变质基底地层<sup>[8,13,15-16]</sup>。这些研究资料均表明,五指山地区的铅锌矿成矿流体具有“多来源”特征。

## 2.2 成矿流体性质及演化

流体包裹体是研究成矿流体性质和演化的直接手段。前人对五指山地区铅锌矿的流体包裹体开展了大量的研究,在成矿盐度、温度和成分等方面积累了丰富的资料<sup>[18-19]</sup>。近来,韦晨<sup>[12]</sup>系统的对纳雍枝铅锌矿中不同成矿阶段的流体包裹体进行细致的岩相学和显微测温研究,进一步完善了该区成矿流体的演化特征。

前人曾相继报道过五指山地区的铅锌矿的成矿流体具有中低温中低盐度的特征,主成矿阶段成矿流体的温度主要集中于 135~200 °C,盐度大多在 6.0%~15.0% NaCl<sub>eqv</sub>之间<sup>[6,18]</sup>,但也有学者获得少量闪锌矿(成矿温度>250 °C)中流体包裹体的测温数据<sup>[19]</sup>。韦晨等<sup>[12]</sup>通过对五指山地区的纳雍枝铅锌矿床进行系统的显微测温,发现不同成矿阶段的闪锌矿和白云石的形成温度均较低,主要集中于 91.1~155.2 °C,与 Wei<sup>[9]</sup>通过闪锌矿 GGIMFis 温度计计算获得成矿温度大致相似,证实了该地区铅锌矿成矿温度较低(<200 °C)。同时成矿流体的盐度较高,介于 8.95%~18.3% NaCl<sub>eqv</sub>之间,暗示纳雍枝铅锌矿成矿流体具有低温、中高盐度的卤水性质,与湘西花垣矿田李梅矿床(成矿温度介于 99~192 °C,盐度平均为 26.0% NaCl<sub>eqv</sub>)<sup>[20]</sup>和贵州都匀牛角塘铅锌矿床(成矿温度介于 101~172 °C,成矿流体盐度 11.0%~15.9% NaCl<sub>eqv</sub>)<sup>[21]</sup>极为相似。同时,成矿早阶段到晚阶段,纳雍枝铅锌矿床流体包裹体均一温度和盐度均逐渐降低。不同成矿阶段的闪锌矿流体包裹体均一温度和盐度呈现正相关( $r=0.60$ ),可能暗示整个热液成矿过程中,不同来源流体混合是硫化物沉淀的重要机制<sup>[12]</sup>。

### 2.3 矿床成因

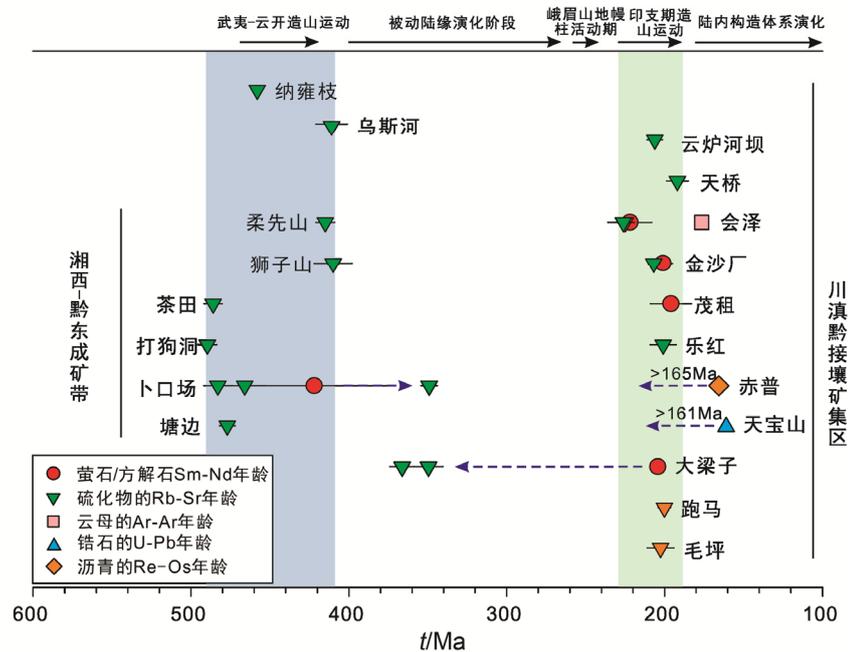
前人在五指山地区铅锌矿床地质特征、控矿因素、找矿勘探和找矿前景分析等方面取得大量的研究<sup>[6]</sup>,但在成矿作用过程和矿床成因类型存在不少争论。五指山地区的铅锌矿成因总体以后生成矿为特征,但考虑到纳雍枝铅锌矿层控特征明显,也有学者认为该矿床为喷流沉积成因。亦有学者将其归为沉积改造成因<sup>[15]</sup>。事实上五指山地区的铅锌矿除发育层状、似层状矿体外,陡倾斜状的矿体也有发育。因此,基本可以排除原生沉积成矿主导的可能。前人从地质特征、矿物组合、矿石结构等方面来看,该矿床具有类似 MVT 型矿床的特征<sup>[11]</sup>。金中国等<sup>[8]</sup>和陈伟等<sup>[16]</sup>通过控矿因素、成矿地质条件、以及稳定同位素等方面进行详细对比,认为五指山地区的铅锌矿床与典型的 MVT 型铅锌矿类似。Wei<sup>[9]</sup>通过对五指山铅锌矿的纳雍枝矿床进行细致的闪锌矿微量元素研究也获得相似的结论。纳雍枝矿床以相对富集 Cd、Ge 和 Ga, 贫 Mn、In 和 Co 为特征,与典型的 MVT 型铅锌矿相似,明显不同于 VMS、Sedex、浅成低温热液以及矽卡岩型铅锌矿床,进一步证实该地区铅锌矿属于 MVT 型铅锌矿。

### 2.4 成矿时代

放射性同位素体系定年方法是研究成矿年代学的重要方法,但由于 MVT 铅锌矿床矿物组合相对简单,矿石矿物主要包括闪锌矿、方铅矿和黄铁矿,与之共生的脉石矿物多为白云石、方解石、重晶石和萤石,而常用的定年矿物如云母、锆石、磷灰石和辉钼矿等则极少出现,因而对铅锌矿矿床的定年一直是世界性难题。Nakai<sup>[22]</sup>首次通过闪锌矿 Rb-Sr 等时线获得美国东部田纳西州 Coy mine 铅锌矿床成矿时代为(377±29) Ma,为矿床形成与晚古生代 Alleghenian 造山作用相关提供了依据。从此同位素体系限定 MVT 铅锌矿床的成矿年龄拉开了序幕,许多学者先后在“Science”“Nature”“Economic Geology”和“Geochem Cosmochem Acta”等重要刊物上发表了大量有关闪锌矿 Rb-Sr 定年、包裹体 Rb-Sr、萤石 Sm-Nd 和定年等方面的研究成果<sup>[23-33]</sup>。

近十年来,国内学者尝试对川滇黔接壤铅锌矿集区典型矿床进行了 Sm-Nd、Rb-Sr 和 K-Ar 测年工作,取得了大量的研究成果。基本厘定了该地区的铅锌矿床形成与 225~200 Ma

(图 3)对应晚印支期—早燕山期挤压转换的动力学背景。同时,一些研究认为五指山背斜-断层体系定型于燕山早期<sup>[6,34]</sup>。因此,部分学者推测五指山地区的铅锌矿形



数据来源于黄智龙等<sup>[2]</sup>; 李文博等<sup>[37-38]</sup>; Zhou<sup>[33,39-40]</sup>; Zhang<sup>[41]</sup>; 蔺志永<sup>[42]</sup>; 张云新等<sup>[43]</sup>; 王瑞<sup>[44]</sup>; 杜国民等<sup>[45]</sup>; 段其发<sup>[46]</sup>; 廖震文等<sup>[47]</sup>; 王登红等<sup>[48]</sup>; 于玉帅等<sup>[49]</sup>; 杨红梅等<sup>[50]</sup>; 谭娟娟等<sup>[51]</sup>; 王生伟等<sup>[36]</sup>; Xiong<sup>[52]</sup>; Tang<sup>[53]</sup>

图 3 湘西—黔东地区和川滇黔地区铅锌矿床的放射性同位素年龄分布图  
Fig. 3. Distribution of mineralizing ages of the Pb-Zn deposits in the WHEG and SYG districts.

成于早侏罗世, 与燕山期右江盆地的演化有关<sup>[8,13,35]</sup>。然而笔者通过详细的野外地质考察发现, NE 向的断层 ( $F_1$ 、 $F_2$  和  $F_7$ ) 及五指山背斜与燕山早期形成的构造特征基本一致, NW 向断层仅发育与寒武系地层, 且未切穿上覆石炭、二叠系地层。以含矿断层  $F_{12}$  为例, 其被 NE 向的  $F_7$  断层切割, 发生明显错动 (图 1b)。这些地质事实指示 NW 向的断层形成早于早侏罗世, 很可能为武夷—云开造山运动的产物。近来, 王生伟等<sup>[36]</sup>利用闪锌矿 Rb-Sr 等时线获得五指山地区的纳雍枝铅锌矿床的成矿时代为  $(458.2 \pm 2.9) \text{ Ma}$ , 证实了五指山地区的铅锌矿形成与武夷—云开造山运动密切相关。值得注意的是, 近来一些学者报道湘西—黔东地区一些代表性铅锌矿床的成矿时代为  $410 \sim 490 \text{ Ma}$  (图 3), 认为这些矿床武夷—云开陆内造山事件的产物。从成矿时代来讲, 五指山地区铅锌矿与湘西—黔东地区的铅锌矿受控相同的地质背景, 武夷—云开造山运动产生近 NS 向挤压应力使该地区先存 NNE 向张性断裂活化, 挤压早古生界及下伏地层产生明显的地势差, 致使区域性的大规模流体运移, 形成这些铅锌矿床。

### 3 成矿带归属探讨

#### 3.1 与川滇黔铅锌矿床对比

五指山虽位于川滇黔接壤地区的东南缘, 但该地区铅锌矿与川滇黔矿集区典型的铅锌矿床在基本地质特征, 矿石品位、成矿流体的性质、以及矿物组合等方面存在明显的差异 (表 1), 川滇黔地区铅锌矿分布于震旦系至上三叠统碳酸盐岩中, 绝大多数赋存于震旦系—二叠统白云岩地层, 矿体主要呈脉状、矿体明显受控于断层构造<sup>[54]</sup>; 3) 铅锌矿矿石品位较高 ( $10\% \sim 30\%$ ), 其中一些矿床 (如云南会泽和富乐) 的品位高达  $60\%$  以上<sup>[2]</sup>; 4) 该区铅锌矿成矿温度相对较高 (一般  $> 150 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 主要集中于  $170 \sim 270 \text{ }^\circ\text{C}$ , 而成矿流体的盐度较低, 大多在  $6.0\% \sim 13.5\% \text{ NaCl}_{\text{eqv}}$  之间, 为中低温, 中低盐度的流体<sup>[18,41]</sup>。然而, 五指山地区的铅锌矿矿体以层状、似层状为主, 与赋矿围岩下寒武统清虚洞组白云岩产状基本一致, 矿石品位一般较低 (平均 Pb+Zn 品位  $3\% \sim 6\%$ ), 最高  $< 15\%$ ; 以 Zn 为主, Pb 次之。同时该地区成矿流体为低温 ( $91.1 \sim 155.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ), 较高盐度 ( $8.95\% \sim 18.3\% \text{ NaCl}_{\text{eqv}}$ ) 为特征。

此外, Wei<sup>[9]</sup>发现五指山地区纳雍枝矿床的闪锌矿微量元素与川滇黔地区典型的铅锌矿床明显不同。如纳雍枝铅锌矿中闪锌矿中 Ag 含量极低 ( $0.9 \times 10^{-6} \sim 1.2 \times 10^{-6}$ ), 而川滇黔地区典型的铅锌矿床 (如云南会泽, 四川天宝山和大梁子, 贵州天桥) 中闪锌矿相对富集 Ag, 通常比纳雍枝铅锌矿中闪锌矿 Ag 含量高 2~3 个数量级<sup>[9]</sup>。王生伟等<sup>[36]</sup>利用闪锌矿 Rb-Sr 等时线获得五指山地区纳雍枝铅锌矿床的成矿时代为  $(458.2 \pm 2.9) \text{ Ma}$ , 与川滇黔地区典型的铅锌矿床的主体成矿时代 ( $225 \sim 200 \text{ Ma}$ ) 也明显不同。

通过对比, 五指山地区的铅锌矿与川滇黔接壤地区铅锌矿虽在矿体形态、矿石品位、成矿温度、成矿时代等方面存在明显的差异, 我们认为五指山地区的铅锌矿不具川滇黔地区典型铅锌矿床的地质地球化学特征。

#### 3.2 与湘西—黔东地区铅锌矿床对比

湘西—黔东地区铅锌矿床经过多年研究, 在矿床地质特征<sup>[6,20,55-61]</sup> (和找矿勘探<sup>[62-68]</sup>) 等方面, 积累了大量地质资料及研究成果, 这些研究表明, 该区铅锌矿床与五指山地区的铅锌矿具有相似的地质地球化学特征 (表 1):

1) 区域地质背景较为相似, 均位于扬子地台西南缘的碳酸盐岩台地。矿体主要呈层状、似层状和透镜状, 与赋矿围岩产状基本一致。矿石品位较低, 一般小于  $10\%$ 。结构构造以斑块状、网脉状和浸染状为主, 交代填隙结构、晶粒结构、环状结构常见。围岩蚀变以白云石化和方解石化为主, 部分矿区发育黄铁矿化、萤石化、重晶石化和硅化。

2) 矿石矿物组成极为简单, 有用元素主要为 Zn, 次之为 Pb, 且以富集 Cd (Ge) 贫 In、Co、Mn 等微量元素为特征, 如纳雍枝和牛角塘矿床<sup>[21]</sup>中以浅色闪锌矿为主, 手标本下多呈浅 (米) 黄色至无色, 其中 Fe 含量多低于  $1.0\%$ 。

表1 五指山地区铅锌矿床与湘西—黔东地区、川滇黔接壤地区铅锌矿床地质、地球化学特征对比  
Table 1. Comparison of geological and geochemical characteristics among Pb-Zn deposits in the WHEG, SYG, and Wuzhishan districts

	湘西—黔东地区铅锌矿	五指山地区铅锌矿	川滇黔接壤地区铅锌矿
构造背景	扬子板块东南缘与华夏板块的碰撞的前陆盆地	扬子板块东南缘与华夏板块的碰撞形成的前陆盆地边缘,	扬子克拉通西南缘, 为古老克拉通边缘
与岩浆活动的关系	与岩浆岩无成因联系	时间和空间上一般与岩浆岩没有直接联系	与峨眉山幔柱无关
成矿特征	开放充填状或热液交代, 后生特征明显	热液交代, 后生成矿	开放充填状, 后生特征明显
赋矿地层	寒武系碳酸盐岩地层为主, 少数产于奥陶系和震旦系地层	寒武系碳酸盐岩地层为主, 少数产于震旦系地层	下二叠统一震旦系地层均有分布
矿物组合	矿石矿物以闪锌矿为主, 方铅矿次之, 含少量黄铁矿, 脉石矿物主要包括方解石和白云石, 含少量重晶石、萤石和沥青	矿石矿物以闪锌矿为主、方铅矿次之、含少量黄铁矿; 脉石矿物主要为白云石和方解石, 石英在少数矿床中出现	矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿等, 脉石矿物主要为方解石、白云石、石英和重晶石, 少数矿床发育萤石、黄铜矿、黝铜矿
矿体形态	层状、似层状、脉状和网脉状, 少数呈透镜状	层状, 似层状; 局部呈现裂隙或断层充填状	似层状、筒状、脉状、少数充填于溶洞或断层
矿体规模及矿石品位	远景资源量 2000 万吨以上, Pb+Zn 品位较低, 品位一般为 3%~6%	单个矿床规模较小, 储量一般位百万吨, 但常成群成带分布, Pb+Zn 品位一般为 2%~10%	单个矿体规模较大, 可达 2 Mt, Pb+Zn 品位较高, 平均 15%~25%, 最高可达 60%
热液蚀变	方解石化, 次为黄铁矿化、萤石化、沥青化、白云石化及极少量硅化	方解石化, 白云石化, 次为黄铁矿化及极少量硅化	碳酸岩化、硅化、黄铁矿化, 部分矿床发育萤石化、重晶石化、有机质化
成矿流体	低温、中高盐度的热卤水, 温度: 95~200 °C, 盐度: 8.0% ~ 20.0% NaCleqv	低温、中高盐度的热卤水, 温度: 90~155 °C, 盐度: 9.0%~18.3% NaCleqv	中低温、中高盐度的热卤水, 温度: 150~250 °C, 盐度: 10.0% ~ 30.0% NaCleqv
硫同位素组成	$\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 22.3‰ ~ 36.1‰, 主要来源于地层硫酸盐的热化学作用	$\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 15.8~25.5‰, 主要来源于地层硫酸盐的热化学作用	$\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为-5‰ ~ 30‰, 主要来源于地层硫酸盐的热化学作用
成矿物质来源	金属主要来源于变质基底(板溪群)、下伏地层和围岩贡献少量成矿物质	金属来源于基底、下伏地层和围岩, 铅同位素呈现明显的分带性	金属主要来源于变质基底(昆阳群、会理群)、下伏地层和围岩贡献少量成矿物质
闪锌矿微量元素	富 Cd、Ge、Ga, 贫 Fe、Mn、In、Sn (Cd 含量可达~3%)	富 Cd、Ge、Ga, 贫 Fe、Mn、In、Sn (Cd 含量相对较低, 通常>0.6%, Fe 含量<3%)	富 Ga、Cd、Ge, 贫 Fe、Mn、In (Cd 含量相对较低, 通常<1%, Fe 含量 3~5%)
成矿时代	410~490 Ma	(458.2±2.9) Ma	200~225Ma

注: 资料来源于黄智龙等<sup>[2]</sup>; 张长青等<sup>[5]</sup>; 陈国勇等<sup>[6]</sup>; 韦晨等<sup>[12]</sup>; 刘文均等<sup>[69]</sup>; 叶霖等<sup>[70]</sup>; 胡宇思<sup>[71]</sup>。

3) 成矿流体均以低温和高盐度为特征, 成矿温度多集中在 110~150 °C 的范围内, 盐度多大于 10% NaCl<sub>eqv</sub>。如五指山地区的纳雍枝矿床的成矿温度介于 91.1~155.2 °C, 盐度 8.95%~18.3% NaCl<sub>eqv</sub><sup>[9]</sup>; 黔东都匀牛角塘铅锌矿床的成矿温度集中于 101~172 °C, 成矿流体盐度为 11.0%~15.9% NaCl<sub>eqv</sub> (平均 13.6% NaCl<sub>eqv</sub><sup>[21]</sup>)。

4) 成矿时代大致相似, 五指山地区铅锌矿和湘西—黔东成矿带形成于晚奥陶至早泥盆世, 与武夷云开(扬子板块和华夏板块碰撞)陆内造山事件有关。如: 五指山地区的纳雍枝矿床的形成于(458.2±2.9) Ma, 黔东铜仁卜口场铅锌矿床方解石 Sm-Nd 和闪锌矿矿物的 Rb-Sr 年龄分别为(422±48) Ma 和(466±13) Ma<sup>[50]</sup>。

可见, 五指山矿田内的铅锌矿床与湘西—黔东成矿带内的铅锌矿床的地质地球化学特征基本一致, 且两者受控于相同动力学背景, 即武夷—云开陆内造山事件。

## 4 结语

1) 五指山地区的铅锌矿床成矿物质主要来源于变质基底, 围岩贡献了少量的成矿物质, 其成矿流

体具有“多来源”，主要为低温、中高盐度的卤水，可能混入部分地层水，矿床成因类型属于 MVT 型铅锌矿床。

2) 五指山地区铅锌矿成矿时代为(458.2±2.9) Ma，与武夷—云开（扬子板块和华夏板块碰撞）陆内造山事件有关，暗示湘西—黔东地区同时代的铅锌成矿作用可能延伸到该地区。

总体而言，五指山矿田内铅锌矿床与川滇黔接壤地区典型的铅锌矿床在地质、地球化学方面差异明显，而与湘西—黔东铅锌成矿带内典型矿床相似，故暂将其划分到该成矿带。

## 参 考 文 献:

- [1] 柳贺昌, 林文达. 滇东北铅锌银矿床规律研究[M]. 昆明: 云南大学出版社, 1999.
- [2] 黄智龙, 陈进, 韩润生, 等. 云南会泽超大型铅锌矿床地球化学及成因——兼论峨眉山玄武岩与铅锌成矿的关系[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 77-118.
- [3] Ye L, Cook N J, Ciobanu C L, et al. Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: A LA-ICPMS study[J]. *Ore Geology Review*, 2011, 39(4): 188-217.
- [4] 张长青, 芮宗瑶, 陈毓川, 等. 中国铅锌矿资源潜力和主要战略接续区[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 248-272.
- [5] 张长青. 中国川滇黔交界地区密西西比型(MVT)铅锌矿床成矿模型[D]. 北京: 中国地质科学院, 2008.
- [6] 陈国勇, 王亮, 范玉梅, 等. 贵州五指山铅锌矿田深部找矿远景分析[J]. 地质与勘探, 2015, 51(5): 859-869.
- [7] 何良伦, 赵锋, 柏光辉, 等. 贵州省猪拱塘超大型铅锌矿床的发现及其找矿意义[J]. 中国地质调查, 2019, 6(3): 29-36.
- [8] 金中国, 周家喜, 黄智龙, 等. 贵州普定纳雍枝铅锌矿床成因:S 和原位 Pb 同位素证据[J]. 岩石学报, 2016, 32(11): 3441-3455.
- [9] Wei C, Huang Z L, Yan Z F, et al. Trace Element Contents in Sphalerite from the Nayongzhi Zn-Pb Deposit, Northwestern Guizhou, China[J]. *Minerals*, 2018, 8(11): 490-512. doi: 10.3390/min8110490.
- [10] 贵州省地质矿产勘查开发局 104 地质大队. 贵州省五指山地区铅锌矿整装勘查报告[R]. 104 地质大队, 2014.
- [11] 彭松, 金中国, 林贵生, 等. 贵州五指山铅锌矿区控矿因素及成矿模式研究——以纳雍枝矿床为例[J]. 矿产勘查, 2016, 7(3):463-470.
- [12] 韦晨, 严再飞, 黄智龙, 等. 黔西北纳雍枝铅锌矿床热液白云石地球化学特征及其找矿指示[J]. 矿物学报, 2018, 38(6): 666-674.
- [13] Zhou J X, Wang X C, Wilde S A, et al. New insights into the metallogeny of MVT Zn-Pb deposits: A case study from the Nayongzhi in South China, using field data, fluid compositions, and in situ S-Pbisotopes[J]. *American Mineralogist*, 2018, 103(1): 91-108.
- [14] 贵州省有色金属和核工业地质勘查局地质矿产勘查院. 贵州省普定县芦茅林、金坡铅锌矿资源储量核实及勘探报告[R]. 2012.
- [15] 金灿海, 李坤, 黄林, 等. 黔西北纳雍枝铅锌矿床硫同位素组成特征及成矿物质来源[J]. 矿物岩石, 2015, 35(3): 81-88.
- [16] 陈伟, 孔志岗, 刘凤祥, 等. 贵州纳雍枝铅锌矿床地质、地球化学及矿床成因[J]. 地质学报, 2017, 91(6): 1269-1284.
- [17] Hoefs J. Stable Isotope Geochemistry[M]. sixth edition. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. doi:10.1007/978-3-540-70708-0.
- [18] 朱路艳, 苏文超, 沈能平, 等. 黔西北地区铅锌矿床流体包裹体与硫同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 2016, 32(11): 3431-3140.
- [19] 黄林, 郭阳, 王生伟, 等. 贵州五指山特大型铅锌矿床成矿流体特征及其地质意义[J]. 矿物岩石, 2018, 38(4):41-50.
- [20] 付胜云, 彭志刚, 刘红梅. 湘西北铅锌成矿带成矿地质特征[J]. 国土资源导刊, 2006, 3(3): 99-103.
- [21] 叶霖, 刘铁庚, 邵树勋. 富镉锌矿的成矿流体地球化学研究-以贵州都匀牛角塘富镉锌矿床为例[J]. 地球化学, 2000, 29(6): 597-603.
- [22] 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.
- [23] Nakai S, Halliday A N. Rb-Sr dating of sphalerites from Mississippi Valley-Type Ore deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57: 2417-2427.
- [24] Brannon J C, Podsek F A, Mclimans R K. A Permian Rb-Sr age for sphalerite from the Upper Mississippi zinclead district, Wisconsin[J]. *Nature*, 1992, 356: 509-511.
- [25] Chesley J T, Halliday A N, Kyser T K. Direct dating of Mississippi Valley-type mineralization: Using of Sm-Nd in fluorite[J]. *Economic Geology*, 1994, 89: 1192-1199.
- [26] 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.
- [27] Christensen J N, Halliday A N, Vearncombe J R, et al. Testing models of large-scale crustal fluid flow using direct dating of sulfides:Rb-Sr evidence for early dewatering and formation of Mississippi Valley-type deposits, Canning Basin, Australia[J]. *Economic Geology*, 1995, 90: 877-884.
- [28] Jiang S Y, Slack J F, Palmer M R. Sm-Nd dating of the giant Sullivan Pb-Zn-Ag deposit, British Columbia[J]. *Geology*, 2000, 28:751-754.
- [29] Leach D L, Bradley D, Lewchuk M T, et al. Mississippi valley-type lead-zinc deposits through geological time: implications from recent age dating research[J]. *Mineralium Deposita*, 2001, 36: 711-740.
- [30] Munoz M, Premo W R. Sm-Nd dating of fluorite from the worldclassMontroc fluorite deposit, southern Massif Central, France[J]. *Mineralium Deposita*, 2005, 39: 970-975.

- [31] Uysal I T, Zhou J X, Golding SD, et al. Sm-Nd dating and rare-earth element tracing of calcite: Implications for fluid-flow events in the Bowen Basin, Australia[J]. *ChemGeol*, 2006, 238(1): 63-71.
- [32] Li W B, Huang Z L, Yin M D. Dating of the Giant Huize Zn-Pb Ore Field of Yunnan Province, Southwest China: Constraints from the Sm-Nd System in Hydrothermal Calcite[J]. *Resource Geology*, 2007, 57(1): 90-97.
- [33] Zhou J X, Huang Z L, Yan ZF. The origin of the Maozu carbonate-hosted Pb-Zn deposit, southwest China: Constrained by C-O-S-Pb isotopic compositions and Sm-Nd isotopic age[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 73: 39-47.
- [34] 吴先彪, 朱尤清, 廖树衡, 等. 五指山背斜纳雍枝铅锌矿地质特征及找矿前景分析[J]. *矿产与地质*, 2013, 27(1): 26-31.
- [35] 金中国, 周家喜, 郑明泓, 等. 贵州普定五指山地区铅锌矿床成矿模式[J]. *矿床地质*, 2017, 36(5): 1169-1184.
- [36] 王生伟, 金灿海, 张均, 等. 贵州五指山特大型铅锌矿床闪锌矿的 Rb-Sr 定年及其地质意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 2018, 38(3): 77-87.
- [37] 李文博, 黄智龙, 王银喜, 等. 会泽超大型铅锌矿田方解石 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义[J]. *地质论评*, 2004, 50(2): 189-195.
- [38] 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.
- [39] Zhou J X, Huang Z L, Zhou M F, et al. Constraints of C-O-S-Pb isotope compositions and Rb-Sr isotopic age on the origin of the Tianqiao carbonate-hosted Pb-Zn deposit, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 53:77-92.
- [40] Zhou J X, Bai J H, Huang Z L, et al. Geology, isotope geochemistry and geochronology of the Jinshachang carbonate-hosted Pb-Zn deposit, southwest China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 98: 272-284.
- [41] Zhang C Q, Wu Y, Hou L, et al. Geodynamic setting of mineralization of Mississippi Valley-type deposits in world-class Sichuan-Yunnan-Guizhou Zn-Pb triangle, southwest China: Implications from age-dating studies in the past decade and the Sm-Nd age of Jinshachangdeposit[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 103: 103-114.
- [42] 蔺志永, 王登红, 张长青. 四川宁南跑马铅锌矿床的成矿时代及其地质意义[J]. *中国地质*, 2010, 37(2): 488-494.
- [43] 张云新, 吴越, 田广, 等. 云南乐红铅锌矿床成矿时代与成矿物质来源: Rb-Sr 和 S 同位素制约[J]. *矿物学报*, 2014, 34(3):305-311.
- [44] 王瑞, 张长青, 吴越, 等. 四川天宝山铅锌矿辉绿岩脉形成时代与成矿关系探讨[J]. *矿床地质*, 2012, 31(增刊): 449-450.
- [45] 杜国民, 蔡红, 梅玉萍. 硫化物矿床中闪锌矿 Rb-Sr 等时线定年方法研究—以湘西新晃打狗洞铅锌矿床为例[J]. *华南地质与矿产*, 2012, 28(2): 175-180.
- [46] 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]. 中国地质大学(武汉), 2014.
- [47] 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.
- [48] 王登红, 李华芹, 屈文俊, 等. 全国成岩成矿年代谱系[M]. 北京: 地质出版社, 2014: 438.
- [49] 于玉帅, 刘阿唯, 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[J]. *地质通报*, 2017, (36): 885-892.
- [50] 杨红梅, 刘重芑, 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.
- [51] 谭娟娟, 刘重芑, 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.
- [52] Xiong S F, Gong Y J, Jiang S Y, et al. Ore genesis of the Wushihe carbonate-hosted Zn-Pb deposit in the Dadu River Valley district, Yangtze Block, SW China: evidence from ore geology, S-Pb isotopes, and sphalerite Rb-Sr dating[J]. *Mineralium Deposita*, 2018, 53: 967-979.
- [53] Tang Y Y, Bi X W, Zhou J X, et al. Rb-Sr isotopic age, S-Pb-Sr isotopic compositions and genesis of the ca. 200 Ma YunluhebaPb-Zn deposit in NW Guizhou Province, SW China[J]. *Journal of Asian Earth sciences*, 2019, 185:104054.
- [54] 韩润生, 陈进, 黄智龙, 等. 构造成矿动力学及隐伏矿定位预测——以云南会泽超大型铅锌(银、锗)矿床为例[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [55] 李宗发. 湘西黔东地区铅锌矿成因初探[J]. *贵州地质*, 1991, 8(4): 363-371.
- [56] 王华云. 贵州铅锌矿的地球化学特征[J]. *贵州地质*, 1993 (4): 274-289.
- [57] 王华云. 黔东铅锌矿的成矿规律及成矿模式[J]. *贵州地质*, 1996, 13(1): 7-23.
- [58] 劳可通. 湖南花垣县鱼塘铅锌矿床地质地球化学特征及成矿富集规律[M]. 湖南地学新进展. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1996.
- [59] 黄远成. 贵州凯里柏松铅锌矿地质特征及控矿地质因素初探[J]. *贵州地质*, 2003, 20(1): 35-40.
- [60] 付胜云. 湘西铅锌矿富矿成矿规律探讨[J]. *有色金属(矿山部分)*, 2011, 63(3): 27-35.
- [61] 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.
- [62] 杨绍祥, 谢小青, 龙国华. 湖南龙山-保靖铅锌矿成矿地质特征及找矿方向初步研究(湖南省地矿局四〇五队报告)[R]. 湖南省地矿局四〇五队, 2003.
- [63] 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): 92-98.
- [64] 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.
- [65] 夏新阶, 付胜云. 湘西北铅锌矿床成矿模式[J]. *有色金属*, 2010, 62(2): 35-38.
- [66] 邓毅, 王常微, 邬晓芳. 黔东南层控型铅锌矿的成矿背景及资源潜力初步估计[J]. *大科技*, 2012 (8): 243-244.
- [67] 李莹, 刘凯, 汤朝阳, 等. 湘西黔东地区 Zn 地球化学块体特征及锌资源潜力估算[J]. *中国地质*, 2013, 40(4): 1270-1277.
- [68] 杨宗文, 刘灵, 罗邦良, 等. 黔东南铅锌矿床控矿界面类型及找矿意义[J]. *云南地质*, 2014, 33(3): 302-308.
- [69] 刘文均, 郑荣才. 硫酸盐热化学还原反应与花垣铅锌矿床[J]. *中国科学(D 辑)*, 2000, 30(5): 456-464.
- [70] 叶霖, 胡宇思, 杨松平, 等. 黔东南成矿带铅锌成矿作用刍议[J]. *矿物学报*, 2018, 38(6): 679-715.
- [71] 胡宇思. 湘西-黔东南地区寒武系地层中的铅锌成矿作用[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2020.