

文章编号: 1000-4734(2020)04-0341-05

贵州碳酸盐岩型铅锌矿床: 问题与进展

黄智龙¹, 金中国^{2*}, 唐永永¹, 周家喜³, 刘玲²

(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. 贵州省有色金属和核工业地质
勘查局, 贵州 贵阳 550005; 3. 云南大学 地球科学学院, 云南 昆明 650500)

密西西比河谷型 (Mississippi Valley-type, MVT) 铅锌矿床, 是铅锌矿床主要成因类型之一, 这种类型铅锌矿床提供了全球约 27% 的 Pb+Zn 资源量^[1], 其主要特征是容矿岩石为碳酸盐岩^[2-3]。因此, 碳酸盐岩型铅锌矿床成矿和找矿是国际矿床学长期研究热点^[4]。贵州是全球喀斯特最为发育地区之一^[5], 区内广泛分布的碳酸盐岩型铅锌矿床 (点) 形成的成矿区带是我国华南低温成矿域的重要组成部分^[6], Pb、Zn 也是贵州省重要的优势矿产和许多贫困地区的支柱产业^[4]。什么条件下在贵州喀斯特地区形成如此多的碳酸盐岩型铅锌矿床 (点), 备受关注^[4]。为此, 在 NSFC-贵州喀斯特科学研究中心项目“我国西南 (贵州) 喀斯特地区特色矿产成矿理论及综合利用” (2019.01.01—2023.12.31, 批准号: U1812402, 首席科学家: 胡瑞忠研究员) 中设置课题“碳酸盐岩型铅锌矿床成矿过程与预测” (负责人: 金中国研究员), 对“贵州喀斯特地区碳酸盐岩型铅锌矿床成矿背景、过程和预测”存在的主要科学问题进行研究。本专辑刊出 20 篇论文, 从不同角度展示了本课题的最新研究进展。

1 主要科学问题

贵州喀斯特地区的碳酸盐岩型铅锌矿床集中分布于 2 个成矿区, 即黔西北铅锌成矿区和黔东南铅锌成矿区^[7-8], 前者是位于扬子地块西南缘的川滇黔接壤铅锌矿集区的重要组成部分, 后者是位于扬子地块东南缘的鄂西-湘西-黔东铅锌成矿带的重要组成部分。前人对贵州碳酸盐岩型铅锌矿床 (尤其是黔西北铅锌成矿区) 做了大量研究工作 (文献[7-8]及相关文献), 在成矿年代与成矿背景、矿床地质与主控因素、成矿机制与成矿模式、成矿规律与找矿预测等诸多方面都取得了新的认识, 但在成矿背景、过程和预测研究中还存在许多尚待解决的科学问题。本课题拟解决的主要科学问题如下:

1) 碳酸盐岩型铅锌矿床碳酸盐岩与成矿的内在联系 碳酸盐岩型铅锌矿床占贵州查明铅锌矿产地的 82%, 探明资源量占总量的 90% 以上^[4], 黔西北成矿区赋矿围岩主要是石炭—二叠系的白云岩^[7], 黔东南成矿区的赋矿围岩主要是寒武系白云岩和白云质灰岩^[8]。这种类型铅锌矿床赋矿围岩为何选择碳酸盐岩? 碳酸盐岩如何参与成矿作用? 碳酸盐岩与构造体系和成矿流体存在何种成因联系? ……是未解决的重要科学问题。包括 MVT 铅锌矿床在内的碳酸盐岩型铅锌矿床, 全球广泛分布, 这种类型铅锌矿床碳酸盐岩在成矿过程中作用, 前人很少研究, 很有特色。揭示该问题, 可为国际铅锌矿床成矿理论发展做出重要贡献。

2) 碳酸盐岩型铅锌矿床“构造-岩性-流体”的耦合关系 贵州碳酸盐岩型铅锌矿床为典型后生矿床, 其形成与重大地质事件的动力学背景有关得到了广泛认可^[6], 由于这类矿床常缺乏适合的定年矿物和方法, 成矿年龄谱系还有待采用更精确、更适用的定年方法加以限定, 成矿动力学背景有待更可靠厘定。此外, 对本区构造的控矿规律及其对成矿的驱动过程等的认识基本还停留在宏观判断上, 区域

收稿日期: 2020-06-22 doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2020.40.025

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: U1812402; 41430315)

第一作者: 黄智龙, 男, 1967 年生, 研究员, 主要从事成矿规律与成矿预测研究. E-mail: huangzhilong@vip.gyig.ac.cn

* 通讯作者, E-mail: gzkjygz@sina.com

构造的时空配置、成矿构造体系、深部构造特征和成矿构造动力学过程的研究还非常薄弱,构造与赋矿碳酸盐岩和成矿流体间具有何种耦合关系,亟待加强研究。事实上,两个明显不同的碳酸盐岩型铅锌成矿系统,形成的矿床都在贵州喀斯特地区广泛分布,其成矿背景和过程的差异,也很有特色。揭示这些问题,对丰富我国铅锌成矿理论具有重要意义。

3) 碳酸盐岩型铅锌矿床成矿预测的方法体系 贵州喀斯特地区大地构造位置位于特提斯—喜马拉雅与滨太平洋两大全球巨型构造域结合部位,成矿条件优越。黔西北铅锌成矿区内许多矿床(点)地质、地球化学特征可与川滇黔接壤铅锌矿集区内的会泽、毛坪、茂租、天宝山、大梁子等大型-超大型矿床对比^[9],显示具有巨大的找矿潜力,近年来区内也相继发现纳雍枝^[10]和猪拱塘^[11]等大型-超大型矿床,成矿区是否还有更多、更大的找矿突破,值得深入研究。黔东南铅锌成矿区内许多矿床(点)地质、地球化学特征可与鄂西—湘西—黔东铅锌成矿带内的花垣矿田李梅、鱼塘、大脑坡等大型-超大型矿床对比^[12],同样显示具有巨大的找矿潜力,成矿区是否能实现大型-超大型矿床的找矿突破,是极为关注的科学问题。因此,经济有效的提取贵州碳酸盐岩型铅锌矿床深部隐伏矿的地表弱矿化信息、揭示深部成矿规律、建立深部成矿模型和找矿模型、实现成矿理论和勘查方法的集成创新,既瞄准矿床学前沿、又面向国家需求。

2 主要研究进展

从本专辑刊出的 20 篇论文看,贵州碳酸盐岩型铅锌矿床在成矿过程和成矿预测两方面都取得了新的研究进展。

2.1 成矿过程

金中国等^[4]通过贵州碳酸盐岩型铅锌矿床地质特征分析对比,认为矿床为 MVT 铅锌矿床;结合已有地球化学研究成果,初步剖析了碳酸盐岩的形成、特性及其与铅锌成矿的内在联系,认为碳酸盐岩具有含水丰富、孔隙度大、脆性好、地球化学性质活泼、易热解等特点,为热液的溶蚀作用、水岩反应及成矿流体的迁移、矿质的沉淀提供有利的存储空间;指出成矿流体在碳酸盐岩中的迁移和成矿,受构造发育程度、流体组成及来源、水/岩反应、流体混合作用等多种因素控制。

何志威等^[13]通过黔西北成矿区 7 个典型铅锌矿床的控矿岩性组合与构造样式分析,厘定出 2 种控矿岩性组合和 4 种构造控矿样式,分别是碳质页岩+碳酸盐岩+碳质页岩组合和碳质页岩+含碳质泥质碳酸盐岩组合,张性断裂-背斜、断裂复合空间、逆断裂纵向羽状节理和平行次级断裂构造控矿样式;同时总结了“流体—构造组合导入—岩性组合圈闭”的成矿过程,深化了对矿体就位机制的认识。

垭都—蟒洞构造带是黔西北铅锌成矿区重要成矿带,近年来发现的纳雍枝大型铅锌矿床紧邻该成矿带南东端东侧^[10]、猪拱塘超大型铅锌矿床位于该成矿带北西端^[11]。蔡国盛等^[14]通过对比区内铅锌矿体的产出特征及其就位空间,初步总结出成矿规律和找矿标志,发现区内大部分铅锌矿床(点)成群成带分布在垭都—蟒洞主干断裂平面距离小于 1 km 范围之内,主干断裂和前峰“冲-褶”体系及次级断裂带为成矿有利地段,其中“褶皱+轴向断层”、“主干断裂+同向次级断裂”、“层间断裂、破碎带、溶洞”等构造体系控制了矿体的产出;此外,区内铅锌矿体主要产于主断裂破碎带内及其下盘,受硅钙界面控制明显,主要赋存于靠碳酸盐岩一侧,“高碳泥质挤压蚀变带”和“铁锰碳酸盐化”是区内铅锌矿体主要的近矿围岩蚀变。

纳雍枝铅锌矿床位于贵州中部五指山背斜南东翼,是贵州省境内发现的第一个大型铅锌矿床^[10]。张克学等^[15]利用矿床勘探和开发的最新地质资料,从成矿背景、构造、地层、岩性和岩相等方面分析了成矿地质条件,结果表明:五指山背斜控制了矿床的分布,区内与该背斜轴向近于平行的深断裂为成矿流体运移提供了有利通道,构造破碎带和地层层间破碎带为成矿提供了良好空间;赋矿地层下寒武统清虚洞组中的白云岩和泥质白云岩为重要赋矿岩性,有利矿化富集的地段是洼地微相、滩丘微相和过渡微相的急变带,沉积微相变化营造了良好的成矿环境。韦晨等^[16]总结了五指山铅锌矿床最新

研究成果, 成矿与扬子板块和华夏板块碰撞引发的陆内造山事件有关, 成矿物质主要来源于变质基底, 成矿流体具有“多来源”特征, 主要为低温、中高盐度的卤水, 矿床成因类型属 MVT 型铅锌矿床; 通过比较矿床学研究, 发现五指山铅锌矿床与川滇黔接壤铅锌矿集区典型矿床地质、地球化学特征差异明显, 与湘西—黔东铅锌成矿带内典型矿床地质、地球化学特征相似, 认为其成矿区带归属为鄂西—湘西—黔东铅锌成矿带。

方解石是碳酸盐岩型铅锌矿床的主要脉石矿物之一, 其形成贯穿整个成矿过程, 记录了成矿流体与演化等方面的重要信息^[17]。唐永永等^[18]分析了黔东南卜口场、嗅脑和克麻等铅锌矿床成矿期热液方解石稀土元素(REE)组成, 发现其REE含量和配分模式与赋矿围岩下寒武统清虚洞组海相碳酸盐岩相似, 认为成矿流体主要来源于赋矿地层; 同时发现黔东铅锌矿床成矿期方解石REE地球化学特征与湘西花垣地区大型-超大型铅锌矿床成矿早期方解石相似, 而花垣晚期方解石REE含量明显升高, 认为成矿流体演化过程中来自下伏地层的富REE流体的加入可能是形成大型-超大型矿床的关键。胡宇思等^[19]分析了湘西花垣矿田李梅、鱼塘等大型—超大型铅锌矿床不同成矿阶段热液方解石REE组成, 发现成矿早、晚两阶段方解石REE地球化学特征与赋矿围岩下寒武统清虚洞组海相碳酸盐岩相似, 认为这两阶段的成矿流体主要由赋矿地层提供; 主成矿阶段方解石明显富集REE, 暗示成矿流体应有来自下伏地层以及基底岩石相对富集REE的流体加入, 这种流体可能携带了大量的Pb、Zn成矿物质; 不同成矿阶段方解石REE地球化学的差异指示成矿环境由相对还原向相对氧化演化。

震旦系陡山沱组是鄂西—湘西—黔东铅锌成矿带鄂西成矿区重要的赋矿层位之一^[12]。徐阳东等^[20]对黔东南赋存于陡山沱组碳酸盐岩中的老东寨铅锌矿床进行了闪锌矿微量元素以及闪锌矿、容矿白云岩和围岩地层REE分析, 结果表明: 闪锌矿中Cu、Ga、Cd、Sb等元素均有不同程度的富集, 含量变化主要受Zn含量控制; 闪锌矿REE地球化学特征与容矿白云岩相似, 成矿物质部分来源于赋矿陡山沱组地层; 闪锌矿REE配分模式出现Eu异常变化, 成矿环境经历了从氧化到还原的过程。黄林等^[21]对黔东南天柱大河边重晶石矿下部赋存于陡山沱组碳酸盐岩中的云洞铅锌矿床进行了矿床地质、矿物学、微量(包括REE)元素和硫同位素组成研究, 结果显示: 铅锌成矿过程中发生热液活化和元素迁移, 具有热液成矿作用特点; 矿石REE配分曲线与围岩相似, 成矿物质来自褶皱基底及下伏陡山沱组地层; 闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值明显低于大河边重晶石, 也相对低于早寒武世海水, 成矿过程中的 H_2S 可能来自震旦纪—早寒武世古海水硫酸盐还原。

在川滇黔接壤铅锌矿集区和鄂西—湘西—黔东铅锌成矿带很少发现赋存于基底中的铅锌矿床^[9]。潘萍和常河^[22]对赋存于中-新元古代昆阳群黑山组泥质白云岩中的云南东川大笑铅锌矿床进行了矿床地质和S-Pb同位素地球化学研究, 查明矿床具有后生热液成矿的特征, 揭示成矿流体中离子态硫可能来源于赋矿地层和上覆地层中硫的混合、热化学硫酸盐还原作用(TSR)在还原态硫离子形成过程扮演重要角色, 成矿金属主要来自赋矿地层浅变质岩, 认为深循环流体在赋矿围岩中卸载与流体混合有关。

硫化物微量元素研究在矿床成因类型划分、成矿流体来源与演化、成矿预测信息提取以及伴生关键金属分布与赋存状态等方面得到广泛应用^[23-24]。张馨玉等^[25]对黔西北凉水沟铅锌矿床中的黄铁矿和闪锌矿进行了电子探针分析, 发现热液改造的沉积成因黄铁矿和热液成因黄铁矿均相对富Pb、Zn、Co、Ni、As、Mo, 贫Au、Ag、Sb等微量元素, 闪锌矿相对富Cu、Fe、Cd、Pb、Ga等微量元素; 查明Co、Ni、Mo、Pb、As等微量元素可能以类质同象或矿物包体的形式赋存于金属硫化物之中; 认为矿床形成于中低温环境, 属沉积-改造型铅锌矿床。吴涛等^[26]对鄂西—湘西—黔东铅锌成矿带中湘西花垣矿田内新发现的大脑坡超大型铅锌矿床成矿期黄铁矿进行了LA-ICP-MS原位测试和元素Mapping分析, 结果表明: 本区黄铁矿相对富集Co、Ni、As、Mn、Cu、Pb和Zn等元素, 其中Co、As、Ni、Sb和Ge等元素主要是以类质同象的方式赋存于黄铁矿的晶格之中, 大部分的Zn和Pb分别以闪锌矿微米级包裹体和方铅矿微/纳米级包裹体的形式赋存于黄铁矿中, 而Cd、Mn和Cu、Ag则以类质同像的方式分别赋存于闪锌矿和方铅矿的晶格中; 矿床地质特征及黄铁矿Co/Ni、Zn/Ni和Cu/Ni等判别矿床为MVT型铅锌矿床。

扬子陆块周缘许多铅锌矿床富含 Ge、Cd 等多种分散元素,其分布规律、富集机理、赋存状态和综合利用长期是研究热点^[27-28]。潘萍和常河^[29]利用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)分析了黔西北板桥铅锌矿床主成矿阶段硫化物中稀散元素含量, Ga、Ge、Se、Cd 和 In 等主要富集在闪锌矿之中, Tl 在闪锌矿和方铅矿中的含量明显高于黄铁矿; 这些元素可能不是直接置换 Zn 进入闪锌矿晶格, 而是与 Fe 一起共同置换 Zn 进入闪锌矿晶格中, 代表了一种新的闪锌矿中稀散元素替代方式; 矿床属于以碳酸盐岩为容矿围岩的后生低温热液矿床, 是流体-构造耦合成矿作用的产物。吴昌雄等^[30]根据黔西北天桥铅锌矿床黄铁矿、闪锌矿和方铅矿中分散元素 Tl 的含量, 发现 Tl 在方铅矿中明显富集; 根据矿石中方铅矿的相对含量, 估算其 Tl 含量接近综合利用最低指标; 结合矿床成矿流体演化及 Tl、Pb、Zn 地球化学性质, 认为 Tl 在演化晚期的成矿流体中相对富集, 流体中的 Tl 以类质同象形式替代方铅矿中的 Pb。

2.2 成矿预测

曾道国等^[31]查明了黔西北垭都一麟洞逆冲断层对水潮堡一白马厂地区铅锌矿床(点)的控矿特征, 矿体主要产于断层下盘及其破碎带内, 矿体与断层垂距 0~200 m 范围是最有利赋矿空间, 断层产状由陡变缓、破碎带由窄变宽、次级断层和褶皱发育地段是铅锌富集重要地段; 认为垭都一麟洞断裂带尚有较大找矿空间, 现有矿床(点)深部与边部、断层下盘 400 m 范围内应是今后地质勘探重点区域, 多层次赋矿特征在地质勘探中不应忽视; 垭都一麟洞断裂带东南部的亮岩一窝棚地段与北西部猪拱塘超大型矿床的成矿地质条件相似, 是有望新发现中-大型矿床的靶区。

黔西北铅锌矿与铁矿空间共生, 两者可能存在密切成因联系^[32]。李波等^[33]研究了垭都一麟洞成矿带内小河边铁多金属矿床构造特征及其构造控矿规律, 采用构造地球化学方法进行了找矿预测, 结果显示: 矿区 NW 向断裂多为垭都一麟洞断裂的次级断裂, 近 SN 向断裂与 NE 向断裂共同控制着矿化、蚀变空间展布, 近 SN 向与 NE 向断裂的交汇地段是成矿的有利部位; 断裂构造岩元素可分为铅锌等中温成矿元素组合、白云石化蚀变元素组合、低温成矿元素组合和地层主微量元素组合; 成矿流体运移方向为 SN 向断裂内由 N 向 S 运移、NE 向断裂内自 NE 向 SW 运移; 圈定了 4 个找矿靶区。

卢卯等^[34]根据时间域激发极化法测深的理论, 认为在使用大功率、合适的装置和延时等参数条件与深部隐伏盲矿耦合较好的情况下, 可以发现大于 300 m 深部铅锌矿致异常; 在黔西北洗线沟已知铅锌矿体上开展了不同装置、不同供电周期的大功率激发极化法测深试验, 结果表明: 采用加密等比装置测量方式, 选择合适的极距, 在采用供电周期为 32 s, 延时为 200 ms, 采样宽度 200 ms 时, 可以发现较好的深部铅锌矿异常, 等比对称四极测深 $MN/AB=1/10$, 取深度校正系数为 0.41 进行反演, 可以准确确定异常位置, 值得在该区推广使用。

郑明泓等^[35]在黔西北杉树林、洗线沟和青山铅锌矿床开展了土壤吸附烃和地电提取法等深穿透地球化学勘查, 发现甲烷、乙烷、丙烷、乙烯等有机烃异常和地电提取离子 Pb、Zn、As、Sb 和 Hg 异常与深部隐伏铅锌矿体具有明显的对应关系, 在青山矿床外围利用地电提取法成功预测了深部隐伏矿体, 有机烃异常也为杉树林矿床下一步找矿指明了方向。

黔中五指山地区纳雍枝大型铅锌矿床的发现, 改写了贵州省没有大型铅锌矿床的历史, 2012-2015 年通过评审备案 Pb+Zn 资源量 170.86 万 t^[10]。王兵等^[10]在总结该矿床成矿背景和地质特征基础上, 详细介绍了矿床的发现和探明过程、总结了找矿过程中的经验教训, 对五指山地区以及区域同类型铅锌矿床找矿有重要借鉴作用。矿床从发现矿化线索到探明, 耗时约 60 年, 大体经历了 3 个阶段: 第一, 地表调查, 发现矿化线索; 第二, 地质测量、面上矿点调查、工程验证发现断裂型小矿体; 第三, 转变找矿思路, 探明了全隐伏、产出稳定、规模大的层控铅锌矿体。认为理论研究、注重细节、突破常规、方法正确、资金保障是取得重大找矿突破的关键。

黔西北猪拱塘铅锌矿床是贵州省发现的第一个超大型铅锌矿床, 填补了贵州省没有超大型铅锌矿床的空白, 目前探明 Pb+Zn 资源量 327.44 万 t^[11]。何良伦等^[11]介绍了猪拱塘超大型铅锌矿床的发现过

程, 同时总结了该矿床的找矿启示: 1) 矿区深部找矿勘查应重视区域成矿规律及控矿因素的研究, 突破传统认识的束缚, 转变找矿思路, 提出新的找矿思路和设想, 是取得找矿突破的关键。2) 强调科研工作找矿突破中的指导作用, 通过成矿地质背景分析, 评价矿床找矿潜力; 通过成矿作用研究, 查明控制矿床的主控因素; 通过矿区控矿构造解析及含矿性分析, 建立地质找矿预测模型, 预测矿化体空间分布位置; 深部钻孔验证, 实现找矿突破关键技术创新。3) 地质找矿工作与地质研究平行进行, 互相促进, 是改变区内传统找矿认识的关键; 高素质的地质找矿研究团队是实现找矿突破的基本保障。

参考文献:

- [1] Leach D L, Bradley D C, Huston D, et al. Sediment-hosted lead-zinc deposits in Earth history[J]. *Economic Geology*, 2010, 105: 593-625.
- [2] Leach D L, Sangster D F. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits. Geological Association of Canada Special Paper, 1993, 40: 289-314.
- [3] 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*, 2010, 36(8): 711-740.
- [4] 金中国, 黄智龙, 郑明泓, 等. 贵州碳酸盐岩容矿型铅锌矿床地质特征及容矿机理[J]. *矿物学报*, 2020, 40(4): 346-355.
- [5] 邓晓红, 毕坤. 贵州省喀斯特地貌分布面积及分布特征分析[J]. *贵州地质*, 2004, 21(3): 191-193+177.
- [6] Hu R Z, Fu S L, Huang Y, et al. The giant South China Mesozoic low-temperature metallogenic domain: Reviews and a new geodynamic model[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 137: 9-34.
- [7] Zhou J X, Xiang Z Z, Zhou M F, et al. The giant Upper Yangtze Pb-Zn province in SW China: Reviews, new advances and a new genetic model[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 154: 280-315.
- [8] 叶霖, 胡宇思, 杨松平, 等. 黔东成矿带铅锌成矿作用刍议[J]. *矿物学报*, 2018, 38(6): 709-715.
- [9] 黄智龙, 周家喜, 金中国, 等. 川滇黔相邻铅锌矿集区典型矿床成矿作用[M]//胡瑞忠, 毛景文, 华仁民, 等. 华南陆块陆内成矿作用. 北京: 科学出版社, 2014: 400-473.
- [10] 王兵, 朱尤青, 林贵生, 等. 纳雍枝铅锌矿床——贵州第一个大型铅锌矿床的发现和探明过程[J]. *矿物学报*, 2020, 40(4): 518-522.
- [11] 何良伦, 吴大文, 王军, 等. 贵州第一个超大型铅锌矿床——黔西北猪拱塘铅锌矿床: 发现与启示[J]. *矿物学报*, 2020, 40(4): 523-528.
- [12] 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(武汉) 博士学位论文, 2014.
- [13] 何志威, 李泽琴, 陈军, 等. 黔西北铅锌矿床成矿岩性组合与构造控矿样式[J]. *矿物学报*, 2020, 40(4): 367-375.
- [14] 蔡国盛, 袁民汕, 杜藹, 等. 黔西北都一蟒洞铅锌成矿带铅锌产出特征与控矿因素[J]. *矿物学报*, 2020, 40(4): 376-384.
- [15] 张克学, 苏翠兰, 唐永永, 等. 贵州纳雍枝大型铅锌矿床成矿地质条件分析[J]. *矿物学报*, 2020, 40(4): 385-393.
- [16] 韦晨, 叶霖, 黄智龙, 等. 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[J]. *矿物学报*, 2020, 40(4): 394-403.
- [17] Huang Z L, Li X B, Zhou M F, Li W B, Jin Z G. REE and C-O isotopic geochemistry of calcites from the world-class Huize Pb-Zn deposits, Yunnan, China: Implications for the ore Genesis. *Acta Geological Sinica*, 2010, 84(3): 597-613.
- [18] 唐永永, 张克学, 田亚江, 等. 黔东铅锌矿床方解石稀土元素组成与矿床成因[J]. *矿物学报*, 2020, 40(4): 356-366.
- [19] 胡宇思, 叶霖, 韦晨, 等. 湘西花垣矿田热液方解石稀土元素地球化学[J]. *矿物学报*, 2020, 40(4): 441-449.
- [20] 徐阳东, 田亚江, 郑禄林, 等. 贵州丹寨老寨铅锌矿床微量和稀土元素地球化学[J]. *矿物学报*, 2020, 40(4): 450-457.
- [21] 黄林, 刘灵, 文星桥, 等. 贵州天柱云洞铅锌矿床地质地球化学特征[J]. *矿物学报*, 2020, 40(4): 458-465.
- [22] 潘萍, 常河. 云南东川大笑铅锌矿床成矿物质来源: S 和 Pb 同位素制约[J]. *矿物学报*, 2020, 40(4): 466-474.
- [23] Cook N J, Ciobanu C L, Pring A, et al. Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73: 4761-4791.
- [24] 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: 188-217.
- [25] 张馨玉, 王新富, 李波, 等. 黔西北矿集区凉水沟铅锌矿床硫化物电子探针分析[J]. *矿物学报*, 2020, 40(4): 418-429.
- [26] 吴涛, 黄智龙, 向震中, 等. 湘西大脑坡超大型铅锌矿床黄铁矿原位微量元素研究[J]. *矿物学报*, 2020, 40(4): 430-440.
- [27] 温汉捷, 周正兵, 朱传威, 等. 稀散金属超常富集的主要科学问题[J]. *岩石学报*, 2019, 35(11): 3271-3291.
- [28] 吴越, 孔志岗, 陈懋弘, 等. 扬子板块周缘 MVT 型铅锌矿床闪锌矿微量元素组成特征与指示意义: LA-ICPMS 研究[J]. *岩石学报*, 2019, 35(11): 3443-3460.
- [29] 潘萍, 常河. 贵州板桥铅锌矿床硫化物稀散元素富集特征与地质意义[J]. *矿物学报*, 2020, 40(4): 404-411.
- [30] 吴昌雄, 何玉瑶, 张嘉玮, 等. 黔西北天桥铅锌矿床中的铈(Tl) [J]. *矿物学报*, 2020, 40(4): 412-417.
- [31] 曾道国, 蔡国盛, 杜藹, 等. 黔西北水潮堡-白马厂地区都一蟒洞断层对铅锌成矿的空间控制[J]. *矿物学报*, 2020, 40(4): 475-482.
- [32] 陈大. 扬子地台西缘铅锌矿床分布规律及矿源层探讨[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015, 45(5): 1365-1383.
- [33] 李波, 杨懿霆, 韩润生, 等. 黔西北小河边铁多金属矿床构造特征与找矿预测[J]. *矿物学报*, 2020, 40(4): 483-501.
- [34] 卢卯, 黄凯, 蒋海民, 等. 激发极化法在黔西北洗线沟铅锌矿床找矿中的应用[J]. *矿物学报*, 2020, 40(4): 502-509.
- [35] 郑明泓, 金中国, 刘玲, 等. 深穿透地球化学在黔西北隐伏铅锌矿找矿中的应用[J]. *矿物学报*, 2020, 40(4): 510-517.