

文章编号: 1000-4734(2017)06-0709-07

黔东成矿带铅锌成矿作用刍议

叶霖¹, 胡宇思^{1,2}, 杨松平³, 韦晨^{1,2}, 杨兴玉³, 李珍立^{1,2}, 安琦³, 卢贤达³

(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 一〇四地质大队, 贵州 都匀 558003)

摘要: 铅锌属于紧缺资源之一,“湘西—黔东铅锌成矿带”是我国重要铅锌成矿带之一,贵州境内部分称为“黔东成矿带”,该区铅锌矿床(点)分布广泛,具有成群成带分布等特征。由于相关地质地球化学研究相对薄弱,黔东地区铅锌地质勘探进展缓慢,并未像湘西地区一样取得重大突破。本文通过总结“黔东成矿带”内铅锌成矿作用地质与地球化学特征,探讨该区存在的诸多科学研究薄弱环节,结合 MVT 铅锌矿床研究现状,提出该区铅锌成矿作用与 MVT 矿床基本一致,是国内研究 MVT 铅锌矿床理想基地,采用原位分析等先进测试技术,加强矿床地质地球化学特征对比、成矿物质来源、成矿流体和同位素定年等研究,以揭示各矿区与区域成矿流体系统的性质及其演化,建立合理成矿模式及与研究区构造和古油藏演化的关系,并探讨其形成的动力学背景,不仅突出黔东 MVT 铅锌成矿作用特色,从而促进 MVT 铅锌成矿作用和分散元素超常富集理论发展,更重要的是可为拓宽黔东地区铅锌找矿思路提供理论依据。

关键词: 铅锌成矿作用; MVT 铅锌矿床; 研究现状; 黔东成矿带; 湘西—黔东铅锌成矿带

中图分类号: P618.41

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2018.38.246

作者简介: 叶霖,男,1968 年生,研究员,矿床地球化学专业. E-mail: yelin@vip.gyig.ac.cn

A discussion on the Pb-Zn mineralization of the Qiandong metallogenic belt

YE Lin^{1*}, HU Yu-si^{1,2}, YANG Song-ping³, WEI Chen^{1,2}, YANG Xing-yu³, LI Zhen-li^{1,2}, AN Qi³, LU Mao-da³

(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. No. 104 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Duyun 558003, China)

Abstract: Lead and zinc mineral resources are among mostly short resources in China. The “Xiangxi-Qiandong Pb-Zn metallogenic belt” is an important Pb-Zn belt in China. Its part in Guizhou Province is called the “Qiandong metallogenic belt” in which Pb-Zn deposits (mineral occurrences) are widely distributed in clusters and zones. Due to limited researches on relevant geology and geochemistry, the Pb-Zn geological exploration in the Qiandong district is far away to the great success of the Pb-Zn exploration in the Xiangxi district. In the paper, we have summarized geological and geochemical characteristics of the Pb-Zn mineralization in the “Qiandong metallogenic belt” and discussed deficiencies of scientific researches on the Pb-Zn mineralization in this district. Combined with the research actualities of MVT Pb-Zn deposits, it is proposed that characteristics of the Pb-Zn mineralization in the Qiandong district are in accordance with those of MVT deposits, and the Qiandong district is an ideal area for studying MVT deposits in China. Moreover, the in-situ analytical techniques are applied to strengthen the comparison of geological and geochemical characteristics of the deposits, the studies of ore-forming material sources, ore-forming fluid sources, and isotopic dating, in order to reveal the nature and evolution of ore-forming fluids systems in each deposit and in the district, to establish a reasonable metallogenic model, to clarify the relationship between the regional structure and the evolution of fossil oil reservoir, and to discuss the geodynamic background of the Pb-Zn metallogeny in the Qiandong metallogenic belt. This study has not

收稿日期: 2018-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 41173063; 41430315); 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); 973 计划项目(编号: 2014CB440900); 贵州省地矿局科研项目(编号: 2017[4]; 2016[40]; 2016[09])

only highlighted the features of the MVT Pb-Zn mineralization in the Qiandong district, thus to promote the development of theories regarding to the MVT Pb-Zn mineralization and the super-enrichment of disperse elements, but also has provided fundamental theoretical basis for widening the thought of the Pb-Zn prospecting in the Qiandong district.

Keywords: Pb-Zn mineralization; MVT Pb-Zn deposits; Research status; the Qiandong metallogenic belt; the Xiangxi—Qiandong Pb-Zn metallogenic belt

矿产资源可持续发展是经济增长、国家安全和提高工业竞争力的重要保障。铅锌是我国优势矿种,但近几十年的大量开采,我国铅锌资源保有储量迅速下降,其中铅和锌的储量分别以每年 1.18%和 1.36%的幅度递减,目前,我国铅锌可供规划利用矿区的保证年限仅有 8 年,近一半大中型矿山资源面临枯竭,而发现和开采比逐年下降,导致我国正在逐渐失去铅锌资源在全球的优势地位,铅锌成已成为我国紧缺资源^[1-4],近十年消耗量居世界首位,对外依存度已高达 25%以上,寻找大矿和富矿是我国铅锌地质研究的迫切任务。“黔东铅锌成矿带”位于扬子地台东南缘,是“湘西—黔东铅锌成矿带”的重要组成部分^[5-9],近年在湘西地区铅锌地质勘探取得巨大突破,有望成为世界级铅锌资源基地^[10-11],显示该成矿带带具有良好找矿前景^[12-14]。然而近年来成矿带内的黔东地区铅锌地质勘探进展相对缓慢,相关地质地球化学研究不足是其主要因素之一,本文拟通过区域成矿作用及规律对比总结,为该区铅锌成矿作用提供相关地质地球化学依据。

1 区域铅锌矿化特征

“黔东铅锌成矿带”位于扬子地台东南缘,是“湘西—黔东铅锌成矿带”的重要组成部分^[5-9]。“湘西—黔东铅锌成矿带”目前已发现大小不等铅锌矿床(点)数十个,由北向南依次分布有湘西龙山矿田^[15]、保靖敖溪矿田^[12]、花垣鱼塘矿田、凤凰茶田矿田和黔东松桃盘石、松桃县嗅脑、铜仁卜口塘、万山、玉屏县茅坡、镇远县竹坪和涌溪、施秉县翁西、凯里市叶巴洞、龙井街和柏松^[16]、丹寨县摆泥等铅锌矿床、最南可延伸至都匀牛角塘矿床^[17],其中铅锌矿床(点)具有成带和成群(范围达数万 km²)产出特点^[15],虽然矿石品位相对较低,但其矿物组成简单,矿石入选品位低,易开采和选冶^[7],越来越受到广大地质工作者关注^[8-9]。特别是近年来,在该成矿带的湘西地区地质勘探取得了重大突破,新获得铅锌资源储量已超过 1000×10⁷ kg,远景储量超过 2000×10⁷ kg,有望成为世界级铅锌资源基地^[10-11]。而黔东松桃地区此类铅锌矿的资源储量初步估算也已超过 100×10⁷ kg^[18]。可见,“湘西—黔东铅锌成矿带”具有良好找矿前景^[12-14]。事实上,“湘西—黔东该成矿带”内铅锌矿床与区域侵入岩并无关系,且具有以下地质地球化学特征:

1) 区域构造背景相似,均产于扬子地台西南缘古生代大型沉积盆地中;矿体形态呈层状、似层状,与围岩产状基本一致;矿石结构构造以晶粒结构、交代填隙结构、环状结构为主,浸染状、斑块状和网脉状常见;围岩蚀变以方解石化、白云石化、硅化为主,部分具重晶石化、黄铁矿化、萤石化。矿石矿物组成简单,有用元素以 Zn 为主, Pb 次之,且富集 Cd (Ge) 等分散元素贫 In、Co、Mn 等微量元素,如牛角塘矿床^[19]中闪锌矿以浅色为主,多为浅(米)黄色-无色,其中 Fe 含量多低于 3000×10⁻⁶, LA-ICPMS 测试结果表明其中 Cd 含量多大于 8000×10⁻⁶^[20]。

2) 赋矿围岩为寒武系—奥陶系白云岩及灰岩,其中以下寒武统清虚洞为主,其次为高台组,如湘西花垣鱼塘^[21]、贵州松桃盘石^[8]、凯里龙井街和松柏—都匀牛角塘一带^[22]等矿床赋矿围岩为下寒武统清虚洞组含藻白云岩及礁灰岩,凤凰矿田内铅锌矿床赋矿围岩为中寒武统敖溪组白云岩,而龙山矿田其赋矿围岩为下奥陶统南津关组生物碎屑灰岩^[7]。

3) 尽管本成矿带内成矿流体地球化学研究较薄弱,但有限的资料表明该类矿床成矿流体具有低温

和高盐度特征, 一般成矿温度多集中在 110~130 °C 范围内, 成矿流体盐度多大于 10%。如贵州都匀牛角塘矿床成矿温度在 101~172 °C 之间, 成矿流体盐度在 11.0%~15.9% 之间 (平均为 13.6%)^[23]; 湘西花垣李梅矿床成矿温度在 99~192 °C 之间, 成矿流体盐度平均为 26.0%^[24]; 凤凰矿田内铅锌矿床成矿温度为 109~173 °C^[25]。

4) 矿床中硫化物富集重硫同位素, 其 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 +11‰~+31‰ 之间, 多数大于 +20‰, 接近前寒武纪—奥陶纪古海水硫同位素值。如牛角塘矿床、花垣鱼塘李梅矿床、凤凰矿田、龙山矿田中硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别在 +22‰~+30‰^[26]、+24‰~+30‰^[24]、+23‰ (仅 1 个数据)^[27] 和 +11‰~+15‰^[15] 之间。

5) 铅锌矿化与古油藏关系密切, 湘西黔东地区铅锌矿床和古油藏位于上扬子地块东南缘, 雪峰隆起西缘, 矿床及矿区外围常分布共生的固体沥青, 大部分属于后生-储层沥青 (古油藏破坏后的产物), 如花垣矿区的沥青以细粒状、鳞片状充填于矿石的晶间孔隙或裂缝中, 并与闪锌矿、方铅矿共生, 外围沥青多充填于石英-重晶石脉的晶洞中或断裂带中^[28], 凤凰、龙山等矿田也与此类似^[24,29]; 都匀—凯里铅锌矿床 (点) 的分布与麻江古油藏的一部分重叠^[30], 其中牛角塘矿区赋矿地层中有大量干沥青产出^[17,31], 凯里松柏矿床也如此^[16]; 湘西凤凰—黔东松桃—铜仁铅锌矿床 (点) 位于铜仁—万山古油藏中, 赋矿地层中分布较多干沥青^[18,32]。

可见, 湘西—黔东铅锌成矿带铅锌矿床与典型 MVT 型铅锌矿床地质地球化学特征^[33-34] 极其相似, 因此, 对其矿床成因观点已从早期“沉积-叠加改造”^[5-6] 逐渐转变为“MVT”^[7,29,35], 正是由于这种认识上的转变, 极大地促进了湘西地区的铅锌矿地质勘探进程, 并取得了非常显著的找矿效果。

2 黔东铅锌成矿作用研究薄弱环节

我国关于 MVT 铅锌矿研究主要集中在川滇黔铅锌成矿区^[1-2,36-37], 而湘西—黔东铅锌成矿带的地质地球化学研究相对滞后, 特别是黔东地区, 前人的研究主要集中在矿床地质特征^[5-6,10,16,21-22,24,38-39]、地层沉积相^[8-9,40] 和找矿勘探^[7,13-15,27,41-43] 等方面, 在以下方面的研究还十分薄弱:

1) 成矿流体 对于 MVT 这类低温热液矿床而言, 流体包裹体的温压数据是研究成矿系统的基础, 也是地球化学分析的基本方法。然而, 该成矿带内铅锌矿床多数成矿温度根据闪锌矿颜色初步判断成矿流体属于低温, 部分矿床成矿温度根据与闪锌矿共生方解石均一测温获得、少量是通过硫化物对硫同位素计算获得^[5,25]。此外, 部分矿床成矿流体盐度是通过方解石、重晶石和方铅矿包裹体成分计算获得^[25]。可见, 该成矿带内铅锌矿床缺失精细和详实均一测温及盐度数据, 且绝大部分矿床和古油气藏在流体包裹体成分 (特别是成矿元素等)、H、O 和 C 同位素方面基本是空白^[44-45], 这对于认识区域铅锌成矿流体性质、来源、演化和成矿物理化学条件是远远不够的。

2) 矿床地球化学特征和成矿物质来源 对于该区铅锌矿床地球化学特征和成矿物质来源是基于传统硫化物硫、铅等同位素^[5, 26, 39, 44] 和成矿元素背景丰度^[22, 43] 研究获得的, 不仅数据有限, 且缺少该类矿床地球化学特征共性与差异的系统总结与对比, 传统方法所获得数据仅是不同硫化物混合值, 其微量元素和同位素组成并不能真实代表该类矿床的地球化学特征, 因此, 相关认识的依据不足。

3) 成矿时代 尽管地质研究者都认为本成矿带内铅锌矿床成矿时代属于加里东晚期, 除卜口场和大碛喇^[46] 外, 目前已有年代学的认识是根据铅同位素模式年龄进行推断的^[5-6,24], 其可信度较低, 缺少精确同位素成矿年代学数据, 铅锌成矿作用与区域地质构造演化史响应等动力学背景认识尚无实际地球化学依据。

4) 铅锌矿化与古油气藏关系 本矿带内多数矿床中都残留有机质活动的痕迹, 铅锌成矿作用与古油气藏之间的紧密关系也是不争的事实, 已有的研究已初步揭示了该区古油气藏的形成、演化和破坏历史^[29,47-49], 但油田卤水在铅锌成矿作用过程中扮演的角色和影响因素依然缺少实际地球化学证据, 无法确定盆地内流体运移方向是否决定了油气和铅锌矿床的定位与空间分布规律。

5) 区域矿床地质与矿床地球化学对比 比较矿床学是研究和认识区域成矿规律的重要手段之一^[50], 目前, 湘西地区已经积累了较多地质地球化学研究成果^[21,39,51], 初步对该类型矿床成矿规律和找矿标志进行了总结^[7,35], 并建立了相关成矿模式^[42], 在此基础上该区铅锌矿资源勘查取得了重大突破。而同一成矿带内的黔东地区尽管有相似成矿地质背景, 但相关地质和地球化学研究非常薄弱, 仅对牛角塘^[17,19,23]有较系统的地质地球化学研究, 不利于总结区域铅锌成矿规律和控矿因素, 对其铅锌成矿作用依然停留在广义的层控矿床或喷流沉积认识上^[22,43,52-53], 目前所发现的最大矿床也仅为中型(牛角塘矿床)。黔东地区是否也能如湘西地区一样在铅锌找矿方面有突破呢? 这需要对区域成矿作用及规律系统总结与对比, 提高相关成矿理论认识才能达到。

3 MVT 铅锌矿研究现状

全球大部分重要铅锌矿床多属于以沉积岩为赋矿围岩的铅锌矿床^[34,54], 除 SEDEX 型外, MVT 铅锌矿床是世界上铅锌矿床最重要矿床类型, 其矿床数和储量分别占超大型铅锌矿床数和储量的 24% 和 23%^[55], 因此, MVT 铅锌矿床长期是国际地质研究的热点之一, 近年来在成矿物质来源、成矿流体运移和沉淀机制、年代厘定以及矿床形成地球动力学背景等方面取得了诸多重要进展: ①提出该类矿床主要分布在造山带的前陆盆地、逆冲推覆带等构造挤压环境, 少数产于陆内伸展环境, 改变了 MVT 矿床与板块构造无关的观点^[56-58]; ②流体包裹体研究揭示该类型矿床成矿流体具有盆地卤水特征, 卤水源自近地表蒸发海水或围岩蒸发盐, 其成矿流体温度介于 90~150 °C 之间, 盐度在 10%~30% 之间, 同位素资料反映铅来自地壳岩石, 而硫来自地壳岩石或沉积物中残留的硫酸盐, 成矿流体驱动机制包括构造挤压和重力驱动 2 种^[56,59]; ③单期热液活动可能持续几千到几万年, 而整个矿床形成可能持续几到十几百万年^[33]; ④成矿物质沉淀机制主要有 3 种: 流体混合^[60]、硫酸盐还原和还原硫机制^[61], 不同成矿环境可能受不同机制控制^[62]; ⑤有机质在 MVT 型铅锌矿成矿作用过程中扮演了极其重要作用^[34], 油气和有机质为金属成矿提供了硫源和还原剂^[63-67], 发现热液流体与有机质热成熟度存在着密切关系, 热液流体与有机质相互作用可能产生的瞬间微孔隙是晚期硫化物-闪锌矿充填有利场所^[68]; ⑥铅锌矿床的精确定年一直是地质学中的一大难题, 基于一些新放射性同位素测年和古地磁测年技术广泛应用, 获得了大量成矿年龄数据, 包括 Rb-Sr 年龄^[69-71]、伊利石 K-Ar 年龄^[72]、成矿期方解石 Sm-Nd 年龄^[73-75]、U-Pb 和 Th-Pb 年龄^[76]、成矿期萤石 U-Pb 和 Th-Pb 年龄^[74]等, 统计结果表明 MVT 矿床主要形成在显生宙石炭纪—早三叠纪和白垩纪—第三纪 2 个时期, 与地球演化史上全球尺度的板块会聚时间密切相关^[34]。值得一提的是, 已有研究表明沥青在 Pb、Zn 等成矿元素的迁移和富集过程以及金属沉积矿藏的形成中起着重要作用^[34], 而沥青作为烃源岩中有机质演变的产物, 主要由有机质组成, 在其形成过程中 Re 和 Os 可随着烃源岩中有机质进入沥青, 使得 Re-Os 同位素体系在沥青中的应用成为可能, 已开始被用于 MVT 铅锌矿床和古油藏研究^[77-78]。

上述研究成果极大地推动了该学科的发展, 但是, 关于 MVT 矿床的研究依然存在较多有待深入的关键科学问题, 特别是, 已有的研究表明, 不同矿集区之间存在一定差异, 目前尚无一种模式能解释所有 MVT 矿床的形成过程, 每种流体运移机制仅能解释少数几个代表性矿床^[79]。此外, MVT 铅锌矿床形成温度较低, 矿物之间共生包裹现象非常普遍, 常规单矿物挑选分析测试只能得到混合物信息, 所获数据变化范围极大, 因而得到多种不确定性的认识。

近年来, LA-ICPMS 与 Mapping^[20,80-81]和离子探针^[82]等原位分析测试开始运用于金属矿床地球化学研究, 更真实地揭示了各类矿床不同硫化物微量元素组成差异、赋存状态、蕴含的地球化学信息和硫同位素组成, 但相关研究尚起步, 不同类型矿床硫化物微量元素组成特征差异仍需大量数据充实, 特别是 MVT 型铅锌矿床, 目前仅少量数据表明这类矿床中闪锌矿富 Cd (Ge) 贫 Fe、In、Co、Mn^[80-81], 而方铅矿和黄铁矿等硫化物依然缺少实际数据。尽管 MVT 铅锌矿床中硫等同位素研究积累了丰硕的成果^[34], 但相关认识仅基于传统方法获得的闪锌矿+方铅矿+黄铁矿混合数据, 这类矿床硫同位素组成是

否与其赋矿地层时代古海水硫同位素组成一致还有待进一步证实(如笔者近期对川滇黔铅锌矿集区富乐矿床离子探针的研究结果表明,该矿床闪锌矿硫同位素组成主要集中在18‰~22‰之间,远高于赋矿地层二叠纪海相硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,这与传统方法获得硫同位素组成明显不同)。此外,常规成矿流体成分是通过群体包裹体和拉曼半定量获得,缺少成矿元素等关键准确信息,致使相关研究无法深入。LA-ICPMS是近年来成矿流体研究的新技术^[83],通过对MVT型矿床应用,获得该类型矿床存在不同来源和化学性质盆地流体的参与等诸多新认识^[84-86],可以预见,随着该方法在MVT铅锌矿床成矿流体研究中广泛应用,精细刻划该类热液系统中成矿流体与成矿物质的来源、运移、沉淀及富集等地球化学过程将变为现实。

近年来,我国铅锌矿成矿理论研究进展较为缓慢,这主要与大多数铅锌矿床成矿时代、成矿物质来源、成矿流体演化和成矿机制等方面存在较大的不确定性有关,导致划分矿床成因类型、区域成矿规律及模式等方面研究存在明显不足^[1],特别是关于MVT铅锌矿床方面研究,许多矿床依然沿用广义的层控矿床来定义,常与SEDEX型矿床混淆。目前,国内MVT铅锌矿床研究主要集中在川滇黔铅锌矿集区^[37],但该矿集区在成矿温度相对较高、矿体多呈巨厚脉状产出、矿石品位高等地质特征方面与典型MVT矿床存在较大差异^[37,87],而“黔东铅锌成矿带”内铅锌矿床却与典型MVT矿床具有一致的地质和地球化学特征,是我国研究MVT铅锌矿床的理想区域。

4 总结

综上所述,黔东地区是我国西南“湘西—黔东MVT铅锌成矿带”重要组成部分,具有良好找矿潜力,上述学科发展趋势和研究区铅锌成矿作用特征与研究现状,均启发我们应该重视该区铅锌矿床地质地球化学研究。通过矿床地质地球化学特征对比、成矿物质来源、成矿流体和同位素定年等研究,揭示各矿区与区域成矿流体系统的性质及其演化,建立合理成矿模式及与研究区构造和古油藏演化的关系,并探讨其形成的动力学背景,不仅符合学科发展趋势,更重要的是突出黔东MVT铅锌成矿作用特色,从而为MVT铅锌矿成矿理论发展、拓宽黔东地区该类型矿床找矿思路做出实际贡献。此外,MVT铅锌矿床中Cd、Ge、Tl等稀散元素强烈富集^[54,88],深入研究也将认识和了解其中稀散元素的分布和富集规律,不仅增加矿山经济效益,而且也将推动稀散元素成矿理论的发展。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张长青, 吴越, 王登红, 等. 中国铅锌矿床成矿规律概要[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2252-2268.
- [3] US Geological Survey. Mineral commodity summaries (Zn and Pb) [M]. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/>, 2014: 186-187(zinc); 90-91 (lead).
- [4] 印建平, 谭钢, 杨云松. 中国铅锌资源储备现状及勘查开发对策探讨[J]. 中国有色金属通报, 2015, (12): 79-81.
- [5] 李宗发. 湘西黔东地区铅锌矿成因初步探讨[J]. 贵州地质, 1991, 8(4): 363-371.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 汤朝阳, 邓峰, 李莹, 等. 湘西—黔东地区寒武系清虚洞组地层特征及铅锌成矿关系[J]. 中国地质, 2012, 39(4): 1034-1041.
- [9] 汤朝阳, 邓峰, 李莹, 等. 湘西—黔东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.
- [10] 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.
- [11] 周怀龙, 姚祖星. 湘西千万吨铅锌矿勘探始末[J]. 国土资源导报, 2012, 9(6): 30-32.
- [12] 杨绍祥. 湘西铅锌矿找矿前景分析[J]. 湖南地质, 2003, 22(2): 107-111.
- [13] 邓毅, 王常微, 郭晓芳. 黔东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.
- [14] 李莹, 刘凯, 汤朝阳, 等. 湘西黔东地区Zn地球化学块体特征及资源潜力估算[J]. 中国地质, 2013, 40(4): 1270-1277.
- [15] 陈明辉, 孙际茂, 付益平, 等. 湘西龙山铅锌矿带地质地球化学及其找矿前景[J]. 资源环境与工程, 2008, 22(2): 151-158.
- [16] 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.

- [17] Ye L, Cook N J, Liu T G, et al. The Niujiaotang Cd-rich zinc deposit, Duyun, Guizhou Province, Southwest China: ore genesis and mechanisms of cadmium concentration [J]. *Mineralium Deposita*, 2012, 47: 683-700.
- [18] 贵州省地质调查院. 贵州省资源接替区选区评价专题研究报告[D]. 2009.
- [19] 刘铁庚, 叶霖. 都匀牛角塘大型独立镉矿床的地质地球化学特征[J]. 矿物学报, 2000, 20(3): 279-285.
- [20] Ye L, Cook N J, Ciobanu CL, et al. Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: a LA-ICPMS study [J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 39: 188-217.
- [21] 劳可通. 湖南花垣县渔塘铅锌矿床地质地球化学特征及成矿富集规律[M]. 湖南地质新进展. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1996.
- [22] 陈国勇, 安琦, 范玉梅. 黔东地区铅锌矿地质特征及成矿作用分析[J]. 贵州地质, 2005, 22(4): 252-259.
- [23] 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.
- [24] 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(6): 27-35.
- [25] 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.
- [26] 叶霖, 潘自平, 李朝阳, 等. 贵州都匀牛角塘富镉锌矿同位素地球化学研究[J]. 矿物岩石, 2005, 25(2): 70-74.
- [27] 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.
- [28] 刘文均, 郑荣才, 李元林, 等. 花垣铅锌矿床中沥青的初步研究—MVT 铅锌矿床有机地化研究(I)[J]. 沉积学报, 1999, 17(1): 19-23.
- [29] 刘文均, 卢家烂. 湘西下寒武统有机地化特征—MVT 铅锌矿床有机质成矿作用研究(III)[J]. 沉积学报, 2000, 18(2): 290-296.
- [30] 张渠, 腾格尔, 张志荣, 等. 凯里—麻江地区油苗与固体沥青的油源分析[J]. 地质学报, 2007, 81(8): 1118-1124.
- [31] 刘劲松, 马昌前, 王世明, 等. 麻江古油藏原生水晶中固体沥青包裹体的发现及地质意义[J]. 地质科技情报, 2009, 28(6): 39-44+50.
- [32] 顾雪祥, 章永梅, 李葆华, 等. 沉积盆地中金属成矿与油气成藏的耦合关系[J]. 地学前缘, 2010, 17(2): 83-105.
- [33] Leach D L, Bradley D C, Lewchuk M, et al. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits through geological time: Implications from recent age-dating research [J]. *Mineralium Deposita*, 2001, 36: 711-740.
- [34] Leach D L, Sangster D F, Kelley K D, et al. Sediment-hosted lead-zinc deposits: A global perspective [J]. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 2005, 561-607.
- [35] 钟九思, 毛昌明. 湘西北密西西比河谷型铅锌矿床特征及成矿机制探讨[J]. 国土资源导刊, 2007, 4(6): 52-56.
- [36] 王奖臻, 李朝阳, 李泽琴, 等. 川、滇、黔交界地区密西西比河谷型铅锌矿床与美国同类矿床的对比[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2002, 21(2): 127-132.
- [37] Zhou J, Huang Z, Zhou M, 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.
- [38] 王华云. 贵州铅锌矿的地球化学特征[J]. 贵州地质, 1993, 23(4): 274-289.
- [39] 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, 32(3): 194-202.
- [40] 蒲心纯, 周浩达, 王熙林, 等. 中国南方前寒武纪岩相古地理与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [41] 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[R]. 湖南省地矿局 405 队报告, 2003.
- [42] 夏新阶, 付胜云. 湘西北铅锌矿床成矿模式[J]. 有色金属(矿山部分), 2010, 62(2): 35-38+66.
- [43] 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.
- [44] 蔡应雄, 杨红梅, 段瑞春, 等. 湘西—黔东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.
- [45] 李莹, 吴昌雄, 汤朝阳, 等. 湘西黔东地区铅锌矿床 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.
- [46] 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.
- [47] 胡煜昭, 韩润生, 毛小贤. 黔东地区下古生界地层中金属成矿与油气成藏的关系[J]. 地质与勘探, 2007, 43(5): 51-56.
- [48] 向才富, 汤良杰, 金之钧, 等. 麻江古油藏缘露露头层序地层与南海相油气藏保存条件[J]. 地质学报, 2008, 82(3): 346-352.
- [49] 陈玲, 马昌前, 凌文黎, 等. 中国南方存在印支期的油气藏—Re-Os 同位素体系的制约[J]. 地质科技情报, 2010, 29(2): 95-99.
- [50] 涂光炽, 李朝阳. 浅谈比较矿床学[J]. 地球化学, 2006, 35(1): 1-5.
- [51] 刘文均, 郑荣才. 花垣铅锌矿床包裹体气相组份研究—MVT 矿床有机成矿作用研究(II)[J]. 沉积学报, 1999, 17(4): 608-614.
- [52] 陈国勇. 黔南台陷碳酸盐型铅锌矿床成矿条件及找矿模型[J]. 贵州地质, 2002, 19(1): 20-26.
- [53] 陈国勇, 王砚耕, 邹建波, 等. 论贵州省铅锌矿床的分类[J]. 贵州地质, 2011, 28(2): 92-98.
- [54] 涂光炽. 从一个侧面看矿床事业的发展—若干重要矿床领域的新进展及找矿思维的开拓[J]. 矿床地质, 2002, 21(2): 97-105.
- [55] 戴自希. 世界铅锌资源的分布、类型和勘查准则[J]. 世界有色金属, 2005, (3): 15-23+6.
- [56] Leach D L, Sangster D F. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits, in: *Mineral Deposit Modeling* (eds. R.V. Kirkham, W.D. Sinclair, R.I. Thorpe, and J.M. Duke) [J]. *Geological Association of Canada, Spec. Papers*, 1993, 40: 289-314.
- [57] Bradley D C, Leach D L. Tectonic controls of Mississippi Valley-type lead-zinc mineralization in orogenic forelands [J]. *Mineralium Deposita*, 2003, 38: 652-667.
- [58] Bradley D C, Leach D L, Symons D, et al. Reply to discussion on "Tectonic controls of Mississippi Valley-type lead-zinc mineralization in orogenic forelands" by Kesler S E, Christensen J T, Hagni R D, Heijlen W, Kyle J R, Misra K C, Muchez P and Voo R van der[J]. *Mineralium Deposita*, 2004, 39: 515-519.
- [59] Basuki N I, Spooner E T C. A review of fluid inclusion temperatures and salinities in Mississippi Valley-type Zn-Pb deposits: Identifying

- thresholds for metal transport [J]. *Exploration and Mining Geology*, 2004, 11(1-4): 1-17.
- [60] Merce C, Carlos A, Esteve C. Hydrothermal mixing, carbonate dissolution and sulfide precipitation in Mississippi Valley-type deposit [J]. *Mineralium Deposita*, 2004, 39: 344-357.
- [61] Spirakis C S, Allen V H. Local heat, thermal convection of basinal brines and genesis of lead-zinc deposits of the Upper Mississippi Valley district [J]. *Institution of Mining and Metallurgy, Transactions, Section B: Applied Earth Science*, 1993, 102: 201-202.
- [62] Emsbo P. Gold in SEDEX deposits [J]. *Soc Econ Geo Rev*, 2000, 13: 427-437.
- [63] Machel H G. Bacterial and thermochemical sulfite reduction in diagenetic settings: old and new insights [J]. *Sedimentary Geology*, 2001, 140(1/2): 143-175.
- [64] Wallace M W, Middleton H A, John B, et al. Hydrocarbons and Mississippi Valley-type sulfides in the Devonian reef complexes of the eastern Lennard shelf, Canning basin, Western Australia. Keep M, Moss S. The sedimentary Basins of Western Australia 3. Proceeding of the West Australian Basins Symposium, Perth [J]. *Petroleum Exploration Society of Australia*, 2002, 795-778.
- [65] Desrocher S, Hutcheon I, Kirste D, et al. Constraints on the generation of H₂S and CO₂ in the subsurface Triassic, Alberta basin, Canada [J]. *Chemical Geology*, 2004, 204(3/4): 237-254.
- [66] Huston D L, Stevens B, Southgate P N. Australian Zn-Pb-Ag ore-forming systems: A review and analysis [J]. *Economic Geology*, 2006, 101: 1117-1157.
- [67] Anderson G M. The mixing hypothesis and the origin of Mississippi Valley-type ore deposits [J]. *Economic Geology*, 2008, 103: 1683-1690.
- [68] Southgate P N, Kyser TK, Scott DL, et al. A basin system and fluid-flow analysis of the Zn-Pb-Ag Mount Isa-type deposits of Northern Australia: Identifying metal source, basinal brine reservoirs, times of fluid expulsion, and organic matter reactions [J]. *Econ Geol*, 2006, 101(6): 1103-1115.
- [69] Brannon J C, Podosek F A, McLimans R K. A Permian Rb-Sr age for sphalerite from the Upper Mississippi Valley zinc-lead district, southwest Wisconsin [J]. *Nature*, 1992, 356: 509-511.
- [70] Nakai S, Halliday A N, Kesler S E, et al. Rb-Sr dating of sphalerites from Mississippi Valley-type (MVT) ore deposits [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1993, 57: 417-427.
- [71] Christensen J N, Halliday A N, Vearncombe J R. 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]. *Eco Geo.*, 1995, 90: 877-884.
- [72] 张长青, 毛景文, 刘峰, 等. 云南会泽铅锌矿床粘土矿物 K-Ar 测年及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2005, 24(3): 317-325.
- [73] Chesley J T, Halliday A N, Kyser T K. Direct dating of Mississippi Valley-type mineralization: use of Sm-Nd in fluorite [J]. *Econ Geo.*, 1994, 89: 1192-1199.
- [74] Leach D L, Premo W R, Lewchuk M T. Evidence for Mississippi Valley-type lead-zinc mineralization in the Cevennes region, southern France, during Pyrenees Orogeny [J]. *Mineral deposits at the beginning of the 21st century*, 6 Balkema, Rotterdam: 2001, 157-160.
- [75] Zhou J, Huang Z, Yan Z. 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.
- [76] Brannon J C, Cole S C, Podosek F A. Th-Pb and U-Pb dating of ore-stage calcite and Paleozoic fluid flow [J]. *Science*, 1996, 271: 491-493.
- [77] Selby D, Creaser R A, Dewing K, et al. Evaluation of bitumen as a ¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os geochronometer for hydrocarbon maturation and migration: A case study from the Polaris MVT deposit. Canada [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 235 (1-2) : 1-15.
- [78] 李超, 屈文俊, 王登红, 等. 沥青样品铼-钨同位素分析溶解实验研究[J]. *岩矿测试*, 2011, 30(6): 688-694.
- [79] 张长青, 余金杰, 毛景文, 等. 密西西比型(MVT)铅锌矿床研究进展[J]. *矿床地质*, 2009, 28(2): 195-210.
- [80] Cook N J, Ciobanu C L, Pring A. Trace and minor elements in sphalerite: a LA-ICPMS study [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 2009, 73, 4761-4791.
- [81] George Luke, Cook NJ, Ciobanu L, et al. Trace and minor elements in galena: a reconnaissance LA-ICP-MS study [J]. *American Mineralogist*, 2005, 100: 248-269.
- [82] Zhang J, Lin Y, Yang W. Improved precision and spatial resolution of sulfur isotope analysis using Nano SIMS [J]. *J Anal At Spectrom*, 2014, 29: 1934-1943.
- [83] 付乐兵, 魏俊浩, 张道涵, 等. 单个流体包裹体成分 LA-ICPMS 分析与矿床学应用进展[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, (10): 3832-3840.
- [84] Stoffell B, Appold M S, Wilkinson J J. Geochemistry and evolution of Mississippi Valley-Type mineralizing brines from the Tri-State and Northern Arkansas districts determined by LA-ICP-MS microanalysis of fluid inclusions [J]. *Economic Geology*, 2008, 103(7): 1411-1435
- [85] Appold M S, Wenz Z J. Composition of ore fluid inclusions from the Viburnum Trend, Southeast Missouri District, United States: Implications for transport and precipitation mechanisms [J]. *Economic Geology*, 2011, 106(1): 55-78.
- [86] Wenz Z J, Appold M S, Shelton K L. Geochemistry of Mississippi Valley-Type mineralizing fluids of the Ozark Plateau: A regional synthesis [J]. *American Journal of Science*, 2012, 312(1): 22-80.
- [87] Zhou J X, Xiang Z Z, Zhou M F. 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.
- [88] 涂光炽等. 分散元素地球化学及成矿机制[M]. 北京: 地质出版社, 2003.