

黔西北与黔东铅锌成矿区地质地球化学特征对比及其地质意义*

金中国^{1,4}, 郑明泓¹, 黄智龙^{2**}, 周家喜³, 胡宇思², 韦晨², 刘玲¹, 吴涛², 袁民汕¹, 吴莎⁴

(1 贵州省有色金属和核工业地质勘查局, 贵州 贵阳 550005; 2 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; 3 云南大学地球科学学院, 云南 昆明 650500; 4 贵州大学资源环境学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要 位于上扬子地台西缘成矿带东侧和东缘成矿带南段的黔西北、黔东铅锌成矿区广泛产出碳酸盐岩容矿的铅锌矿床。成矿地质及成矿作用对比研究显示, 2个成矿区铅锌矿床具有成因与岩浆岩无直接联系、赋矿层位和容矿岩性主要为碳酸盐岩, 断裂、褶皱构造和碳酸盐岩是主控因素, 成矿流体中 S 来源于海相硫酸盐热化学还原作用 (TSR)、C 主要来自海相碳酸盐岩的溶解、H₂O 主要由建造水和变质水组成, 同时有少量大气降水参与, Pb、Zn 等成矿物质主要来源于基底地层, 赋矿层位提供了部分物源, 矿石矿物组成较简单, 围岩蚀变强度较弱, 后生成矿特征明显等共性特征。也存在矿床分布分别受褶皱构造和断裂构造控制、矿体分别主要呈层状和陡倾斜脉状产出、主要伴生元素分别为 Cd-Se(局部 Ge)和普遍伴生 Ge-In-Ga-Ag、成矿时代分别集中于 510~410 Ma 和 230~190 Ma、成矿动力学背景分别为加里东期和印支晚期等显著差异。结合成矿地质背景及勘查现状分析研究, 笔者认为贵州铅锌成矿地质条件优越, 勘查和研究程度总体较低, 找矿空间和潜力大, 圈定的矿化富集区是有利的找矿远景区, 已知矿床深、边部是重要的潜在找矿靶区, 强化 MVT 成矿理论认识, 深度融合大数据挖掘技术, 集成矿床成矿模式+地球物理异常+地球化学异常为一体的找矿有效方法体系, 构建深部找矿预测模型, 加大圈定靶区的深部工程验证力度, 有望实现新的找矿突破。

关键词 地球化学; 成矿作用; 铅锌矿床; 黔西北-黔东

中图分类号: P618.42; P618.43

文献标志码: A

Comparative and geological significance on geological and geochemical characteristics of Pb and Zn mineralization in Northwest Guizhou and East Guizhou

JIN ZhongGuo^{1,4}, ZHENG MingHong¹, HUANG ZhiLong², ZHOU JiaXi³, HU YuSi², WEI Chen², LIU Ling¹, WU Tao², GUN MinShan¹ and WU Sha⁴

(1 Guizhou Nonferrous Metal and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau, Guiyang 550005, Guizhou, China; 2 Stake Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy Sciences, Guiyang 550081, Guizhou, China; 3 School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China; 4 Guizhou university Institute of Resources and Environmental Engineering, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract

Located in the eastern of the western metallogenic belt and southern parts of the eastern metallogenic belt in the Upper Yangtze platform, the lead-zinc mineralization areas in Northwest Guizhou and West Guizhou have widely produced carbonate-hosted Pb-Zn deposits. The comparative study of metallogenic geological characteristics and mineralization shows that the lead-zinc deposits in the two metallogenic areas have the common character-

* 本文得到国家自然科学基金项目(编号:U1812402)资助

第一作者简介 金中国, 男, 1965年生, 博士, 研究员, 主要从事矿产勘查与成矿预测研究。Email: gzkyjzg@sina.com

** 通讯作者 黄智龙, 男, 1967年生, 博士, 研究员, 主要从事成矿规律与成矿预测研究。Email: huangzhilong@vip.gyig.ac.cn

收稿日期 2022-09-18; 改回日期 2023-04-10。秦思婷编辑。

istics of that, no direct genetic relationship with magmatic rocks, the host strata and ore-bearing lithologies are mainly carbonate rocks, while fault & fold structures and carbonate rocks are the main controlling factors. In the ore-forming fluid, S is derived from marine sulfate thermochemical reduction (TSR), C is mainly formed by the dissolution of marine carbonate rocks, H₂O is mainly composed of water in sedimentary formation and metamorphic water, and a small amount of atmospheric precipitation is involved. Pb, Zn and other ore-forming materials are mainly derived from the basement strata and ore-bearing horizon, which provide part of the source. The mineral composition of the ore is simple, the wall rock alteration intensity is weak, and the epigenetic mineralization characteristics are obvious. In Eastern and Northwest Guizhou, there are also significant different characteristics with that fold and fault structures controlling the distribution of deposits, ore bodies being mainly layered and steep dipping veins, main associated elements Cd-Se (part Ge) and general associated elements Ge-In-Ga-Ag, metallogenic age concentrating in the periods of (510~410 Ma) and (230~192 Ma), and the metallogenic dynamic background being Caledonian and late Indosinian, respectively. From the analysis of metallogenic geological background and exploration status, it is thought that there are favour geological settings for the carbonate-hosted lead-zinc mineration in Guizhou, the exploration and research degree is generally low, and the exploration space and potential are large. The deep and lateral extension of known deposits in the two metallogenic areas and mineralization concentrated regions are important prospecting target areas. It is expected to achieve new prospecting breakthrough with strengthening the understanding of MVT metallogenic theory, deeply integrate big data mining technology, integrated ore deposit metallogenic model+geophysical anomaly+geochemical anomaly into one effective method of prospecting, construct the deep prospecting prediction model, and increase the deep engineering verification.

Key word: geochemistry, metallogenesis, lead-zinc deposits, Nortnwest Guizhou and East Guizhou

贵州省的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的结合部位,成矿区带属上扬子地台东缘成矿带南段、西缘成矿带东侧和南盘江-右江成矿区北侧(肖克炎等, 2016),成矿地质条件优越,广泛产出碳酸盐岩容矿的铅锌矿床,并沿黔东和黔西北的区域构造带成群成带展布。近10年来,在国家“358”地质找矿突破战略行动的推动下,相继在黔中普定纳雍枝和黔西北赫章猪拱塘探明了贵州第一个大型和超大型铅锌矿床,找矿取得重大突破。目前,新一轮找矿突破战略行动正在有序推进,但主要成矿区带上还有多大找矿潜力、是否存在新的找矿空间、在哪里找、能否取得新的突破?是摆在地质勘查人面前十分紧迫的现实问题。基于此,本文研究旨在探讨贵州铅锌成矿区带分布特征,对比分析黔西北、黔东地区铅锌成矿地质特征及成矿作用的异同性,进一步深化成矿理论和成矿规律认识,挖掘新的找矿信息,为实现新的找矿突破提供依据。

1 区域地质背景及典型矿床特征

1.1 区域地质背景及铅锌矿分布特征

贵州省位于江南造山带与上扬子地台接壤区

(图1a),地层自新元古界至第四系均有出露,主要由沉积岩、浅变质岩组成,岩浆岩零星产出。沉积岩中碳酸盐岩十分发育,约占贵州省总面积的61.9%。区域构造形成及演化经历了武陵—喜马拉雅的多次构造运动,其中武陵运动导致基底褶皱隆起并伴随岩浆活动,雪峰—加里东运动促进区域性普安-贵阳-松桃深大断层(F₁)、铜仁-台江-三都断层(F₂)、紫云-垭都断层(F₃)、威宁-水城断层(F₄)、威水断陷盆地及黔中古陆形成,海西运动诱发大规模的峨眉山玄武岩喷溢喷发,印支晚期的碰撞造山事件,形成一系列褶皱和断裂构造,燕山期一新构造运动产生大量浅层滑脱、逆冲推覆构造。

贵州省目前已查明铅锌矿床(点)370余处,空间上集中分布于黔西北和黔东南铅锌成矿区,赋矿地层自青白口系下江群至上古生界二叠系茅口组均有产出,黔西北地区主要为石炭系、二叠系,黔东地区主要为寒武系,其容矿岩石均以碳酸盐岩为主。黔西北地区主要分布NE向银厂坡-云炉河坝(①)、NW向带状展布的垭都-蟒洞(②)、威宁-六盘水(③)和近SN向的普安罐子窑(④)4个矿化富集区,而黔东地区主要分布镇远-都匀(⑦)、凯里-三都(⑧)、松桃-铜仁(⑨)3个铅锌矿化富集区。此外,在普定五指山背

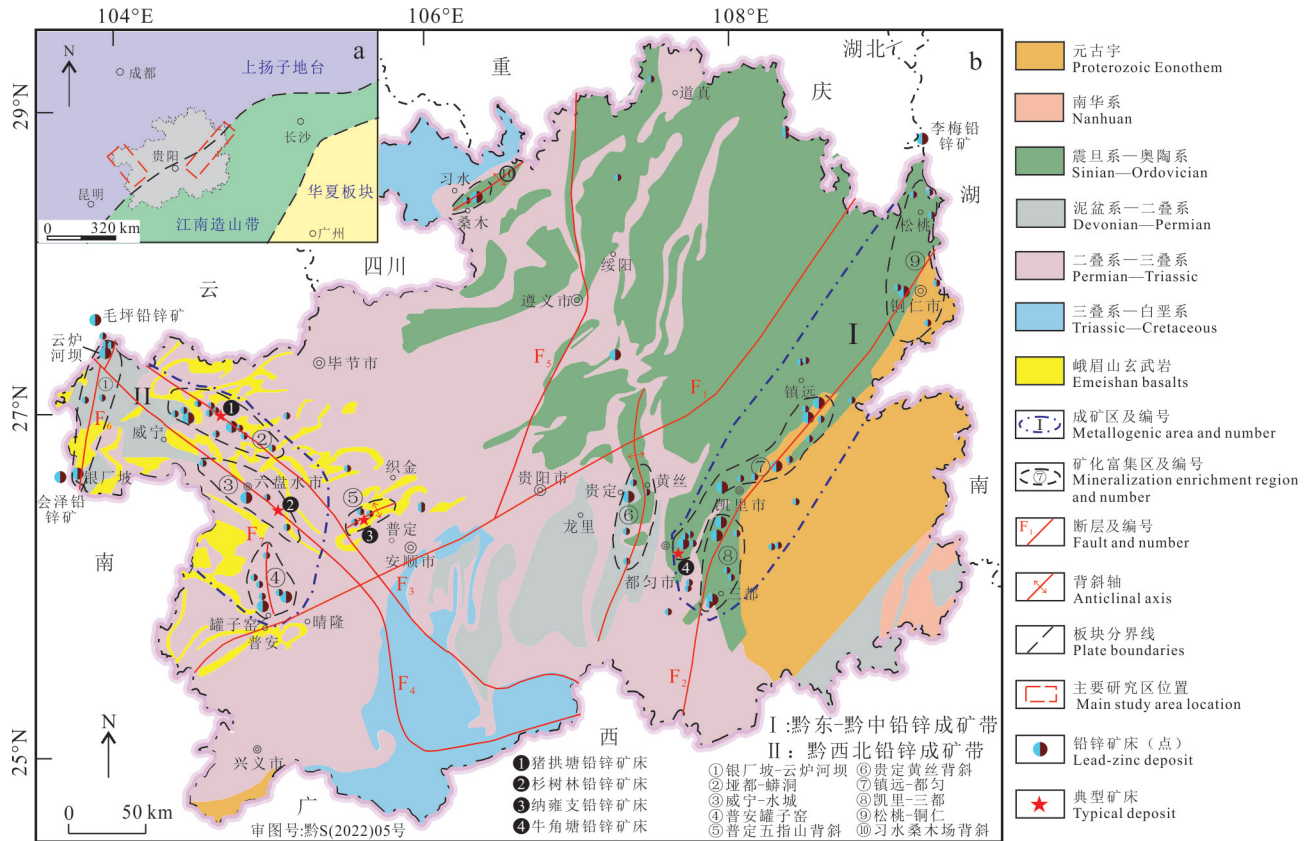


图1 贵州省大地构造位置简图(a,据贵州省地质调查院,2017)和铅锌矿床(点)分布图(b,据金中国等,2020)

Fig. 1 Geotectonic location map (a, after Guizhou Geological Survey Institute, 2017) and lead-zinc deposits distribution map (b, after Jin et al.,2020) of Guizhou Province

斜(⑤)、贵定黄丝背斜(⑥)、习水桑木场背斜(⑩)见范围较小的矿化富集区(图1b)。

1.2 典型铅锌矿床地质特征

赫章猪拱塘铅锌矿床位于垭都-麟洞断裂带中段,矿区出露志留系一二叠系,中二叠统栖霞组为主要赋矿层位,灰岩为容矿岩石,主体构造呈NW向展布,主要有 F_1 、 F_2 、 F_3 逆冲断层。铅锌矿体沿 F_1 、 F_2 断层呈脉状、透镜状产出(图2a),主矿体走向长1640 m,宽120~530 m,平均厚11.01 m,平均品位Pb 8.71%,Zn 2.81%(何良伦等,2019)。

水城杉树林铅锌矿床位于威宁-水城断裂带南东段,矿区出露石炭系一二叠系,上石炭统黄龙组为主要赋矿层位,泥晶灰岩为容矿岩石。断裂构造主要有NW向展布的 F_{11} 、 F_{30} 、 F_{49} 等高角度逆冲断层。铅锌矿体产于 F_{11} 、 F_{30} 之间的断裂带中(图2b),单个矿体呈脉状和透镜状产出,主矿体长460 m,延伸最大145 m,平均厚4.17 m,平均品位Pb 3.64%,Zn 14.98%,矿石中伴生Cd、Ge、Ga、In等稀散元素

(金中国等,2020)。

普定纳雍枝铅锌矿床位于五指山背斜北东段,矿区主要出露寒武系一二叠系,寒武系清虚洞组为赋矿层位,白云岩为容矿岩石。矿区构造主要有NE向展布的 F_1 、 F_2 、 F_7 等导矿、控矿断层。铅锌矿体呈层状、似层状、透镜状产于 F_7 下盘的清虚洞组中部的白云岩中(图2c)。主矿体走向长50~1266 m,宽30~730 m,厚0.35~21.30 m,矿石品位Zn 4%~7%,Pb 0.5%~1.0%。局部见富铅锌脉状矿体产于陡倾斜断层破碎带中(金中国等,2016; 2017)。

都匀牛角塘矿床位于王司复背斜南段,矿区出露寒武系金顶山组-娄山关组,清虚洞组为赋矿层位,白云岩为容矿岩石。铅锌矿体呈似层状、透镜状产出(图2d),主矿体长400~850 m,宽200~500 m,厚1.10~2.03 m。矿石主要含Zn,Zn品位5.85%~24.48%,Pb常为伴生组分。矿石中伴生有Cd,并见硫镉矿等独立矿物(叶霖等,2005)。

黔西北地区铅锌矿床围岩蚀变以团块状及细粒状

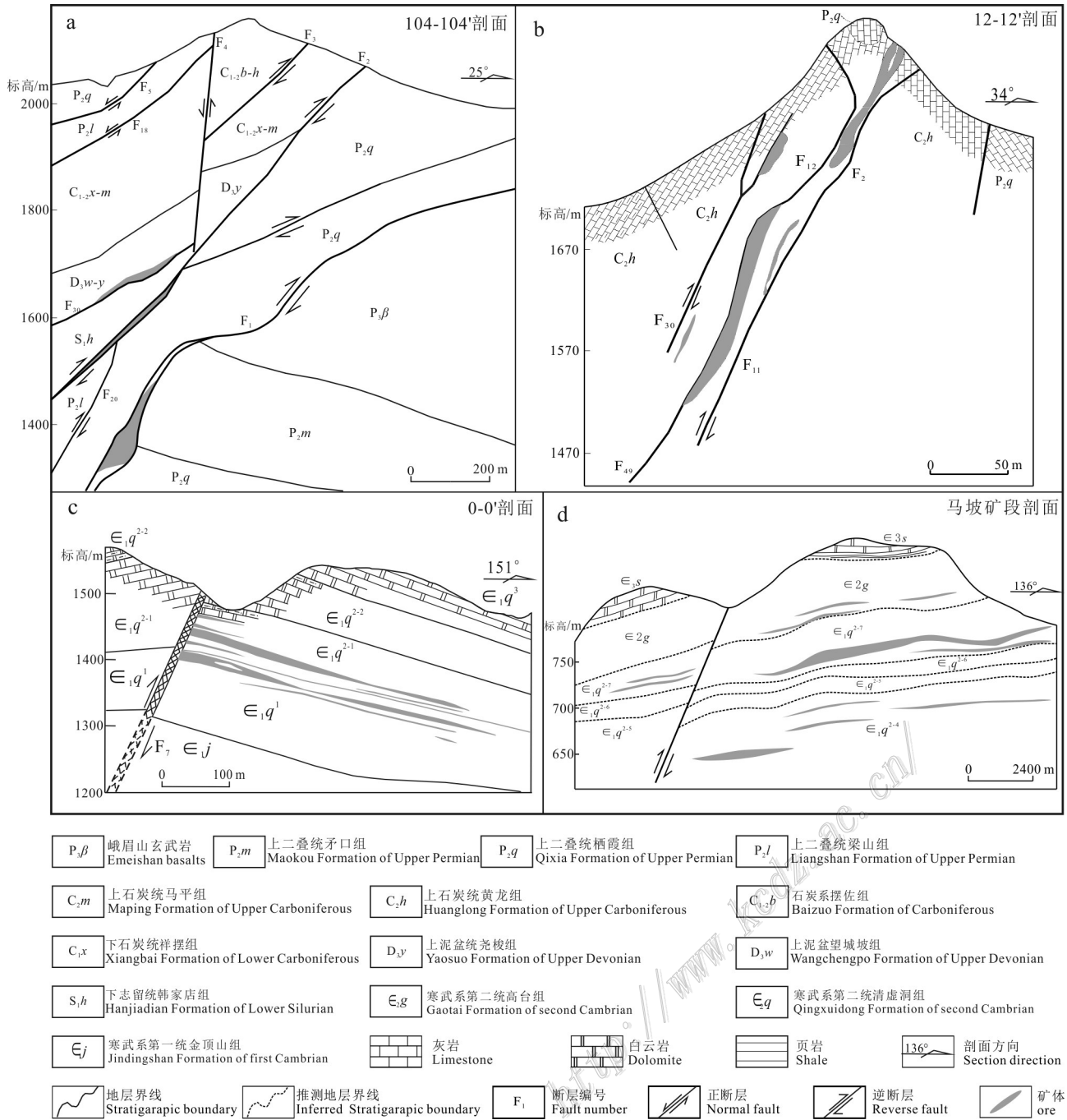


图2 典型矿床剖面图(据金中国等,2020)

a. 猪拱塘矿床; b. 杉树林矿床; c. 那雍枝矿床; d. 牛角塘矿床

Fig. 2 Geological sections of typical ore deposits (after Jin et al., 2020)

a. Zhugongtang deposit; b. Shanshulin deposit; c. Nayongzhi deposit; d. Niujiaotang deposit

黄铁矿化、网脉状方解石化和白云石化为主,其次为弱硅化,地表常见铁锰碳酸盐化、褐铁矿化。黔东地区铅锌矿床围岩蚀变主要为细脉状方解石化、细脉状及浸染状黄铁矿化,可见少量重晶石化、硅化,地表蚀变弱。

2 地质特征对比

黔西北、黔东地区铅锌成矿地质特征既具有相同性,又显示差异性。其中,相同性主要体现在:①大

地构造位置位于上扬子地台及其边缘带上,矿床成因与岩浆岩无直接联系;② 矿床主要产于碳酸盐岩台地,赋矿层位和容矿岩性主要为碳酸盐岩;③ 铅锌矿床产出均沿区域构造带成群成带展布,断裂与褶皱构造、碳酸盐岩是主控因素,后生成矿特征明显;④ 矿石矿物组成较简单,主要见方铅矿、闪锌矿、黄铁矿等金属硫化物和方解石、白云石、重晶石(少量)、石英(少量)等脉石矿物;⑤ 成矿流体中S来源于海相硫酸盐热化学还原作用(TSR)、C主要来自海相碳酸盐岩的溶解、H₂O主要由建造水和变质水组成,同时有少量大气降水参与,Pb、Zn等成矿物质主要来源于基底地层、赋矿层位提供了部分物源;

⑥ 围岩蚀变以碳酸盐化、黄铁矿化为主,强度总体较弱。

黔西北、黔东2个成矿区的成矿地质特征差异性也较明显,主要体现在成矿地质事件、动力学背景、成矿时代、矿体产出形态、关键控矿因素、共伴生元素组合等,见表1所示。

3 地球化学特征对比

3.1 成矿物质来源

3.1.1 S同位素

从表2和图3可知,黔西北与黔东(含黔中普定

表1 黔西北、黔东铅锌成矿区成矿地质特征差异性及其与典型MVT矿床对比表

Table 1 Diversity of metallogenic geological characteristics in lead-zinc metallogenic area of Northwest Guizhou and East Guizhou and comparison with typical MVT deposits

对比要素	差异性		典型MVT矿床*
	黔西北铅锌成矿区	黔东铅锌成矿区	
大地构造背景	扬子地台西南缘,印支期造山作用、古特提斯洋闭合背景	扬子地台与江南造山带接触部位,加里东期碰撞造山背景	沉积盆地边缘的抬升部位,少数与裂谷活动和造山作用有关
区域成矿带位置	上扬子地台西缘成矿带的川滇黔矿集区东侧	上扬子地台东缘成矿带的鄂西-湘西-黔东成矿带南段	沿密西西比河流域的铅锌成矿带分布
成矿动力背景	印支晚期印支与扬子板块碰撞造山作用,由挤压向伸展转换的背景	加里东期华夏板块与扬子板块碰撞造山作用裂谷拉伸背景	与海西期、喜马拉雅期碰撞造山作用及裂谷拉伸活动有关
成矿时代	晚三叠世—早侏罗世	晚寒武世—早泥盆世	元古宙—白垩纪
矿床分布特征	沿NW、NE向断裂带呈带状展布	沿NE、NNE褶皱及断裂带呈带状展布	沿造山带边缘的沉积盆地呈群产出
主要控矿因素	主断裂破碎带、次级断层破碎带及褶皱虚脱空间、碳酸盐岩	主断层旁侧的层间破碎带、蚀变白云岩、藻灰岩	断层和破碎带、溶塌角砾岩、礁组合、基底隆起、不整合面等
赋矿地层	震旦系—二叠系,主要为石炭系—二叠系	青白口系—寒武系,以寒武系清虚洞组为主	寒武系、奥陶系、泥盆系、石炭系
容矿岩石	主要为白云岩、白云质灰岩、灰岩	主要为白云岩、藻灰岩	主要为白云岩、交代灰岩、灰岩
矿体产出形态	主要呈脉状、囊状、透镜状产于断层破碎带中,少量呈层状、似层状产于断层下盘。产状常与断层产状一致	碳酸盐岩中以层状、似层状产出为主,产状常与地层产状一致。浅变质岩中主要呈以脉状、透镜状产出	以层状、似层状为主,其次为陡脉状、囊状、透镜状及溶蚀-塌陷角砾状,产状常与地层产状一致
矿体埋深	现探明的矿体埋深一般<900 m	现探明的矿体埋深一般<500 m	矿体埋深一般<600 m
矿石类型	硫化矿物为主,浅表常见氧化矿及不同氧化程度的混合矿	主要见硫化矿物,以闪锌矿为主,锌为主矿产,铅常为伴生矿产	主要见硫化矿物
矿石品位	多为富矿石,硫化矿Pb+Zn>15%,氧化矿Pb+Zn>20%	多为贫矿石,Pb+Zn为3%~5%	多为贫矿石,Pb+Zn为2%~10%
矿石结构构造	多见自形-半自形、交代残余结构,块状、网脉状、角砾状构造	主要见他形粒状、碎裂结构,浸染状、细脉状构造	主要见胶状、交代、充填等结构,块状、浸染状、脉状、角砾状构造
围岩蚀变	主要为团块状、细粒黄铁矿化,网脉状碳酸盐化,其次为弱硅化	主要为细脉状黄铁矿化和碳酸盐化,其次为重晶石化、硅化、萤石化	蚀变弱、强度低,多见碳酸盐化,其次为黄铁矿化、硅化
成矿温度	110~276°C,中低温成矿流体	91~193°C,低温成矿流体	75~170°C,低温成矿流体
成矿盐度	2.1%~22.6%,中低盐度成矿流体	0.62%~25.7%,中低盐度	15%~30%,中高盐度
伴生有益元素	普遍伴生Ge、In、Ga、Ag等	主要伴生Se、Cd,局部见Ge等	伴生Ag、Cu、Ba、Ga、Ge、In、Co、Ni等

注:典型MVT*矿床资料来源:黄智龙等,2004;金中国等,2008;张长青等,2009;胡瑞忠等,2015;Hu et al., 2021。

表2 黔东、黔西北铅锌成矿带矿床S、Pb同位素组成对比表

Table 2 Comparison of S and Pb isotopic compositions of deposits in eastern Guizhou and northwestern Guizhou lead-zinc metallogenic belts

矿床位置及名称	矿物/样品数	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	平均值/ ‰	铅同位素	平均值/样品数	资料来源
黔中纳雍枝	闪锌矿/17	+19.37~+23.40	+23.17	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.922\sim 37.979$	37.960/32	金中国等, 2016; Wei et al., 2021
	方铅矿/3	+15.94~+19.70	+18.23	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.648\sim 15.666$	15.659/32	
	黄铁矿/1	+22.60	+22.60	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.828\sim 17.860$	17.841/32	
黔东牛角塘	闪锌矿/24	+10.03~+29.81	+25.26	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.099\sim 38.651$	38.342/15	王华云等, 1993; 叶霖等, 2005
	方铅矿/6	+20.33~+32.82	+26.03	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.621\sim 15.802$	15.715/15	
	黄铁矿/8	+22.59~+25.90	+25.69	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.057\sim 18.266$	18.181/15	
黔东塘边*	闪锌矿/6	+30.00~+36.10	+32.58	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.176\sim 38.888$	38.413/7	于玉帅等, 2017
	方铅矿/5	+25.20~+28.70	+26.66	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.626\sim 15.875$	15.742/7	
	黄铁矿/1	+32.10	+32.10	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.125\sim 18.266$	18.188/7	
湘西李梅	闪锌矿/53	+24.00~+35.50	+32.43	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.383\sim 38.597$	38.502/16	胡宇思, 2020
	方铅矿/7	+19.70~+30.90	+28.14	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.645\sim 15.796$	15.754/16	
	黄铁矿/7	+29.80~+32.60	+31.56	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.001\sim 18.269$	18.198/16	
黔西北猪拱塘	闪锌矿/36	+13.8~+23.6	+15.59	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=39.061\sim 39.366$	39.227/34	Wei et al., 2021
	方铅矿/5	+12.2~+23.3	+15.41	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.757\sim 15.769$	15.763/34	
	黄铁矿/13	+12.5~+23.8	+15.57	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.566\sim 18.758$	18.666/34	
黔西北杉树林	闪锌矿/13	+17.19~+20.26	+18.79	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.302\sim 38.957$	38.573/20	Zhou et al., 2013a; 2014; 付绍洪, 2004
	方铅矿/6	+14.10~+17.09	+15.41	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.505\sim 15.874$	15.693/20	
	黄铁矿/1	+17.60	+17.60	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.362\sim 18.654$	18.513/20	
黔西北青山	闪锌矿/8	+6.78~+19.60	+16.36	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.831\sim 39.631$	39.248/12	Zhou et al., 2013b; 2018
	方铅矿/6	+11.40~+16.80	+14.60	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.701\sim 15.920$	15.801/12	
	黄铁矿/7	+10.70~+18.30	+14.81	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.591\sim 18.768$	18.641/12	
黔西北天桥	闪锌矿/11	+10.90~+14.00	+12.54	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.875\sim 39.152$	38.969/13	Han et al., 2007; Wei et al., 2021
	方铅矿/7	+8.38~+9.83	+8.84	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.708\sim 15.772$	15.734/13	
	黄铁矿/5	+12.81~+14.44	+13.30	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.481\sim 18.560$	18.520/13	
滇东北毛坪	闪锌矿/25	+13.10~+21.80	+16.68	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=39.413\sim 39.466$	39.454/13	Han et al., 2007; Wei et al., 2021
	方铅矿/6	+8.60~+19.0	+16.54	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.772\sim 15.776$	15.775/13	
	黄铁矿/3	+12.70~+17.40	+15.14	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.713\sim 18.759$	18.748/13	
滇东北麒麟厂	闪锌矿/35	+12.50~+17.70	+14.79	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.487\sim 39.433$	38.894/95	黄智龙等, 2004; Han et al., 2007
	方铅矿/13	+10.90~+14.50	+12.55	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.439\sim 15.855$	15.717/95	
	黄铁矿/16	+15.10~+17.40	+15.95	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.251\sim 18.530$	18.465/95	

注: *黔东塘边矿床Pb同位素引用相邻的卜口场矿床数据(杨红梅等, 2015)。

纳雍枝矿床)铅锌成矿区黄铁矿、闪锌矿、方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围大,分别为10.70‰~32.10‰、6.78‰~36.10‰、8.38‰~32.82‰,平均值分别为20.43‰、20.82‰、18.24‰,各矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 组成与地幔硫(0 ± 1)‰、生物成因硫(-30~10)‰(Eldridge et al., 1991)有显著差异,而具有富重硫型、地壳来源的特征,与张长青(2008)和李堃等(2018)相关研究认识一致。其中,黔西北地区铅锌矿床硫化矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 组成为6.78‰~23.80‰,与滇东北会泽、毛坪铅锌矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 组成8.60‰~21.80‰,均值10.90‰~16.68‰相似(韩润生等, 2006; Han et al., 2007; Zhou et al.,

2013a; 2013b; 2013c; 2014; He et al., 2020; Wei et al., 2021a)。黔西北的4个矿床中仅天桥矿床具有 $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$ 特征,反映矿床形成时S同位素分馏达到平衡,而其余矿床未达到平衡。鉴于该区域震旦系、寒武系和石炭系等中均有石膏、重晶石硫酸盐矿物产出,这些硫酸盐矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 组成与同时期古海水 $\delta^{34}\text{S}$ 组成基本一致(Clapool et al., 1980; 郑永飞, 2001; Yuan et al., 2013),暗示黔西北及滇东北地区铅锌成矿的硫主要来自不同赋矿层位中海相硫酸盐的热化学还原作用(TSR)(周家喜等, 2010; Yuan et al., 2013; 2017; 朱路艳等, 2016; 任

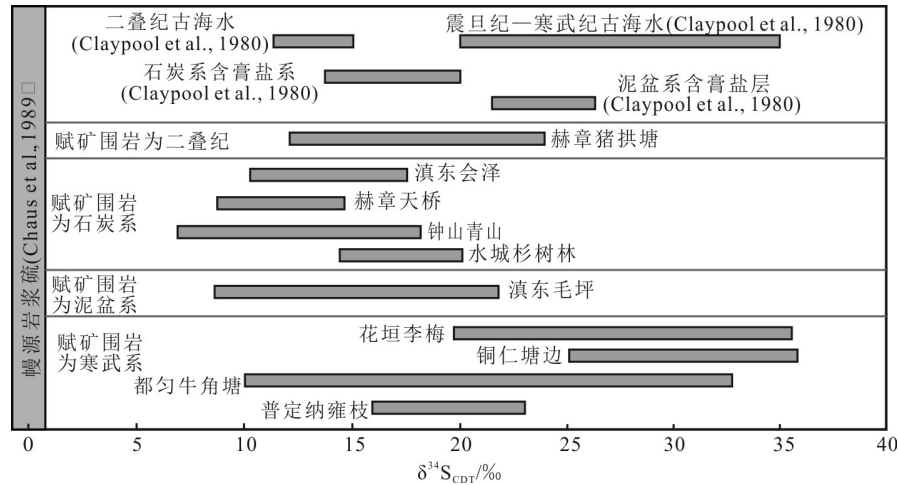


图 3 典型铅锌矿床硫同位素组成

Fig. 3 Sulfur isotopic compositions of typical lead-zinc deposits

顺利, 2018; 韦晨, 2018; Wu et al., 2021; Wei et al., 2021a)。

黔东地区铅锌矿床硫化矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 组成集中在 10.30‰~36.10‰, 相对于黔西北地区铅锌矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 含量高, 富重硫特征更加显著, 且与湘西李梅铅锌矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 (19.70‰~35.50‰, 平均 28.14‰~32.43‰) 及震旦纪、寒武纪和奥陶纪海相硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值 +17‰、+28‰ 和 +22‰ 接近, 推测该区成矿流体中的硫可能来自多个时代的地层, 也是海相硫酸盐 TSR 的产物 (Yuan et al., 2013; 2017; 蔡应雄等, 2014; 周云等, 2016; 金中国等, 2016; 胡宇思, 2020)。纳雍枝、塘边矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 组成为 $\delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$, 牛角塘矿床为 $\delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}}$, 表明这些矿床形成时, 硫同位素均未达到分馏平衡。

上述黔西北、黔东及相邻成矿区铅锌矿床中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 组成特征表明, 铅锌成矿与硫酸盐矿物关系密切, 且硫酸盐矿物存在指示成矿流体中具有较高的 $f(\text{O}_2)$, 成矿流体的 $\delta^{34}\text{S}$ 值远高于沉淀出的硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 (Ohmoto et al., 1997; 胡宇思, 2020)。

3.1.2 C、H、O 同位素

黔东地区成矿期方解石或白云石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -2.24\text{‰} \sim +1.50\text{‰}$, 平均值 +0.71‰; $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 17.09\text{‰} \sim 25.10\text{‰}$, 平均值 20.63‰, 总体显示 C、O 同位素含量相对高, 变化范围小, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值与湘西李梅矿床基本一致 (表 3, 图 4)。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值明显高于地幔值 (-7‰~-5‰) 和沉积有机物值 (-30‰~-15‰) (Hoefs, 1997), 属海相碳酸盐岩值范围 (-4.0‰~

+4.0‰) (Taylor, 1986); $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值较地幔值 (6‰~10‰) 高, 大部分落于海相碳酸盐岩区 (22‰~30‰), 少量与沉积有机物值 (24‰~30‰) (Taylor, 1967; Ohmoto, 1986)、变质水的范围 (+2‰~+25‰) 重叠 (Hoefs, 2009)。黔西北地区成矿期方解石或白云石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -7.53\text{‰} \sim +2.52\text{‰}$, 平均值 -3.87‰; $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 13.85\text{‰} \sim 26.00\text{‰}$, 平均值 18.28‰ (表 3, 图 4)。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值与地幔、海相碳酸盐岩值均有重叠; $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值显著高于地幔、大气降水值, 主要与建造水、变质水值范围重叠。

花垣李梅矿床 (周云等, 2016) 的 $\delta\text{D}_{\text{SMOW}} = -43\text{‰} \sim -26\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 0.25\text{‰} \sim 1.43\text{‰}$; 铜仁塘边矿床 (于玉帅等, 2017a) 的 $\delta\text{D}_{\text{SMOW}} = -93\text{‰} \sim -57\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 8.8\text{‰} \sim 12.7\text{‰}$; 滇东北会泽矿床的 $\delta\text{D}_{\text{SMOW}} = -59.8\text{‰} \sim -50.2\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 7.0\text{‰} \sim 8.8\text{‰}$; 毛坪矿床的 $\delta\text{D}_{\text{SMOW}} = -62\text{‰} \sim -45\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 7.9\text{‰} \sim 9.4\text{‰}$ (黄智龙等, 2004; 韩润生等, 2006; 李文博等, 2006; Han et al., 2007)。H、O 示踪结果显示, 主要与变质水范围重合, 部分紧邻大气降水线, 其中会泽铅锌矿床与变质水、岩浆水范围重合。

上述特征表明, 湘西-黔东、滇东北-黔西北地区铅锌成矿流体中 C 主要为海相碳酸盐岩的溶解提供, H_2O 主要来自建造水、变质水, 少量来自大气降水和岩浆水。其中, 黔西北地区成矿流体中部分 C 来源于地幔, 可能与该区域大面积分布玄武岩有关 (黄智龙等, 2004)。

值得注意的是, 从铜仁塘边 → 都匀牛角塘, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值呈逐渐降低趋势, 这可能是由于

表3 黔西北、黔东地区铅锌矿床成矿流体性质对比

Table 3 Comparison of ore-forming fluid properties of lead-zinc deposits in Northwest Guizhou and East Guizhou

成矿带及矿床名称	成矿温度/°C	成矿盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})/\%$	$\delta^{13}\text{C}/\%$	$\delta^{18}\text{O}/\%$	包裹体阳离子组成	包裹体阴离子组成	包裹体气相成分组成	资料来源
黔东铅锌成矿带	91~155	0.62~18.30 (9.85/13)	-0.50~-1.00 (-0.6/5)	17.6~19.6 (19.16/6)	主要见气-液两相包裹体和液相包裹体,分别占包裹体总数的90%以上和占5%左右。气-液两相包裹体中气相分数为10%~25%			a、b
都匀牛角塘	102~121	15.74~25.70 (20.72/2)	-2.24~+1.05 (-0.25/19)	17.09~23.88 (20.37/20)	$\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^{+}\text{-Mg}^{2+}\text{-K}^{+}$	$\text{SO}_4^{2-}\text{-Cl}^{-}\text{-F}^{-}$	$\text{H}_2\text{O}\text{-CO}_2\text{-CH}_4$	c、d、e
铜仁塘边	92~193	8.90~21.10 (15.4/3)	-0.50~+1.50 (+0.98/8)	21.2~25.1(22.4/8)	$\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-Na}^{+}\text{-K}^{+}$	$\text{Cl}^{-}\text{-SO}_4^{2-}\text{-F}^{-}\text{-Br}^{\text{s}}$	$\text{H}_2\text{O}\text{-CO}_2\text{-N}_2\text{-O}_2\text{-CO}$	f
湘西成矿带	185~213	16.05~21.20 (18.63/2)	-2.79~+1.11 (-0.32/13)	14.59~23.05 (20.88/13)	$\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^{+}\text{-Mg}^{2+}\text{-Li}^{+}$	$\text{Cl}^{-}\text{-SO}_4^{2-}\text{-Br}\text{-F}^{-}$	$\text{H}_2\text{O}\text{-CO}_2\text{-CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-CO}\text{-H}_2\text{S}$	g、h
赫章猪拱塘	120~240	2.1~12.9	-7.53~+1.73 (-3.85/31)	13.85~21.88 (18.11/31)	$\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-Na}^{+}$	$\text{SO}_4^{2-}\text{-Cl}^{-}$	$\text{H}_2\text{O}\text{-CO}_2\text{-H}_2$	i
黔西北铅锌成矿带	175~247	3.9~22.6 (14.25/5)	-1.4~-3.1 (-1.93/7)	18.8~20.3 (19.54/7)	$\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^{+}\text{-Mg}^{2+}\text{-K}^{+}$	$\text{SO}_4^{2-}\text{-Cl}^{-}\text{-F}^{-}$	$\text{H}_2\text{O}\text{-CO}_2\text{-CH}_4\text{-CO}\text{-N}_2\text{-H}_2$	j、k、l、m
钟山青山	110~276	6.31~10.53 (8.94/3)	-5.0~-3.90 (-4.04/5)	18.9~19.6(19.2/5)	$\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^{+}\text{-Mg}^{2+}\text{-K}^{+}$	$\text{SO}_4^{2-}\text{-Cl}^{-}\text{-F}^{-}$	$\text{H}_2\text{O}\text{-CO}_2\text{-N}_2\text{-CO}\text{-CH}_4$	n
赫章天桥	150~270	6.09~19.39 (12.38/3)	-5.3~-3.40 (-4.54/9)	14.7~19.5(17.62/9)	$\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^{+}\text{-Mg}^{2+}\text{-K}^{+}$	$\text{SO}_4^{2-}\text{-Cl}^{-}\text{-F}^{-}$	$\text{H}_2\text{O}\text{-CO}_2\text{-H}_2$	o、p、q
滇东北成矿带	123~220	3.1~11.3 (6.3/4)	-5.27~-0.76 (-3.43/10)	14.57~21.84 (18.7/10)	$\text{Na}^{+}\text{-K}^{+}\text{-Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}$	$\text{Cl}^{-}\text{-SO}_4^{2-}\text{-F}^{-}$	$\text{H}_2\text{O}\text{-CO}_2\text{-CH}_4$	r、s
会泽矿床	150~250	5.30~38.5 (14.81/15)	-3.5~-2.1 (-2.8/20)	16.8~18.6 (17.71/16)	$\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^{+}\text{-Mg}^{2+}\text{-K}^{+}\text{-Li}^{+}$	$\text{Cl}^{-}\text{-F}^{-}$	$\text{H}_2\text{O}\text{-CO}_2\text{-CO}\text{-CH}_4$	

注:(9.85/13)表示(平均值/样品数);a. 韦晨, 2018; b. 朱路艳等, 2016; c. 王华云等, 1996; d. 毛健全等, 1990; e. 叶霖等, 2005; f. 于玉师等, 2017a; g. 周云等, 2014; h. 周云等, 2016; i. Wei et al., 2021; j. 陈士杰, 1986; k. 钱建平, 2001; l. Zhou et al., 2013b; m. Zhou et al., 2018; n. Zhou et al., 2013a; o. Han et al., 2007; p. He et al., 2020; q. Wei et al., 2021; r. 黄智龙等, 2004; s. 胡瑞忠等, 2015。

在成矿过程中,从NE至SW运移的成矿热液与断裂构造的接触面积更大、时间更长,更有利于成矿过程中碳酸盐岩溶解作用(仲文斌等, 2017),这有利于形成中大型铅锌矿床。但因成矿流体迁移距离远、时间长,也可能是导致黔东地区铅锌矿化较分散,矿床品位较低的重要原因之一。

3.1.3 铅同位素特征

黔西北铅锌矿床中铅同位素组成为 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.870\sim39.480$,平均 39.193; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.755\sim15.802$,平均 15.782; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.481\sim18.758$,平均 18.642。黔东铅锌矿床中铅同位素组成为 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.922\sim38.888$,平均 38.125; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.621\sim15.875$,平均 15.683; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.828\sim18.266$,平均 17.979(表2)。对比可知,黔西北铅锌矿床铅同位素组成相对黔东铅锌矿床高,暗示其成矿流体运移过程中经历了相对富放射性的铅岩层(柳贺昌等, 1999; 黄智龙等, 2004; 周家喜等, 2010; 金中国等,

2016)。此外,从湘西李梅→黔东塘边→都匀牛角塘矿床铅同位素组成、成矿温度均呈逐渐降低趋势(表2,表3),可能是成矿流体从NE→SW的运移方向的反映。从南东杉树林、青山矿床→北西猪拱塘矿床,西边天桥矿床→东边猪拱塘矿床,成矿流体温度、盐度逐渐减低,与Zhou等(2013a; 2013b; 2013c)示踪黔西北铅锌矿床矿流体运移方向一致,暗示在猪拱塘是多方向成矿流体的聚集区,为形成超大型矿床奠定了物质基础。

由Pb演化模式图(图5)可以看出,研究区大部分样品落入上地壳Pb演化线之上,表明成矿金属物质主要来自基底岩石及赋矿地层。其中,普定纳雍枝和赫章猪拱塘铅锌矿床铅同位素组成变化范围小,数据较集中,暗示成矿物质来源单一或均一化程度高(黄智龙等, 2004);而会泽、水城杉树林铅锌矿床部分样品铅同位素组成变化大,落入下地壳与造山带演化线之间,反映成矿物质还可能来源于地幔和下地壳。

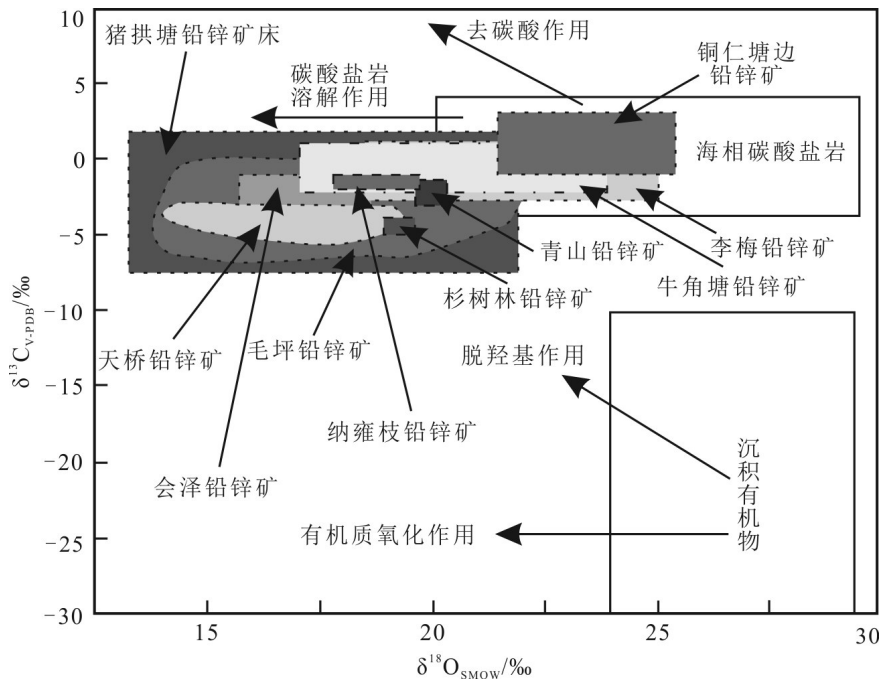


图 4 典型铅锌矿床碳、氧同位素组成示意图(据刘家军等,2004)

Fig 4 Carbon and oxygen isotopic compositions of typical lead-zinc deposits (after Liu et al.,2004)

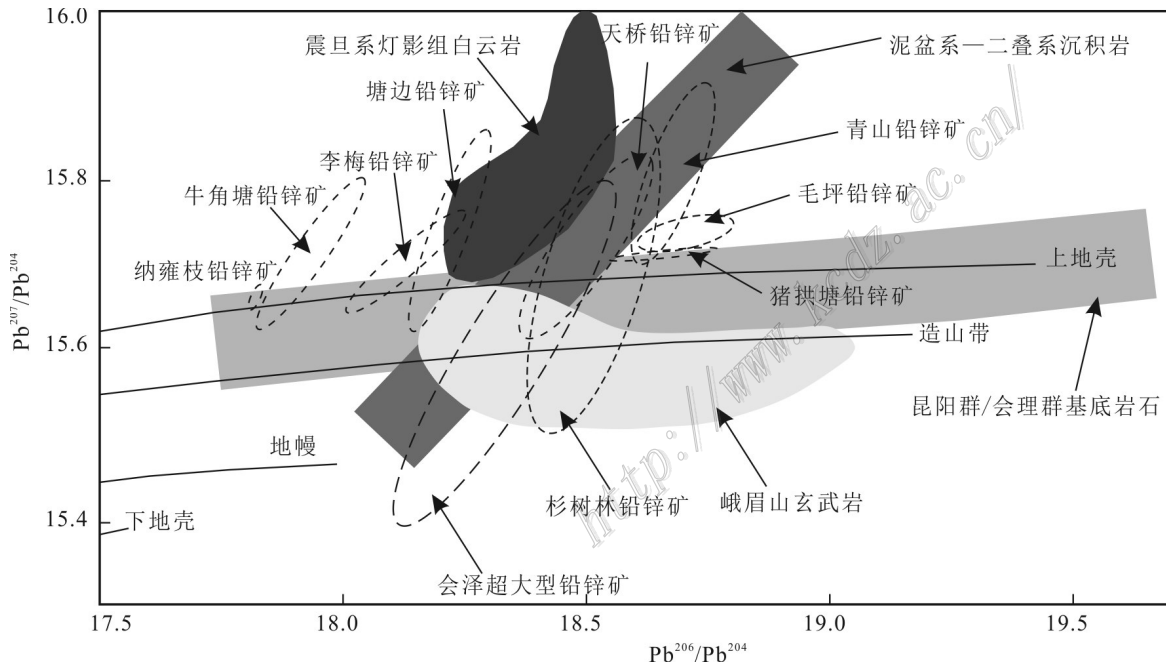


图 5 典型铅锌矿床铅同位素组成示意图(据 Zartman et al.,1981)

Fig.5 Schematic diagram of lead isotopic composition of typical lead-zinc deposits(after Zartman et al.,1981)

3.2 成矿流体性质

由表 3 可知,湘西-黔东地区铅锌矿床成矿流体温度为 91~213℃、盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 0.62%~25.7%;滇东北-黔西北地区铅锌矿床成矿流体温度为 110~

276℃、盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 2.1%~38.5%,总体变化范围均较大,反映出成矿流体既有中低温度、中低盐度性质,也有中高温度和中高盐度的流体存在。

湘西-黔东地区铅锌矿床成矿流体气相组分呈

$H_2O > CO_2 > CH_4$ 其他气体的特征,液相成分由 H_2O , 阴离子 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 F^- 、 Br^- 和阳离子 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 等组成。塘边矿床包裹体成分中 K^+/Na^+ 为 0.25~0.78, 平均 0.48, 远小于 1 (于玉帅等, 2017a), 有别于岩浆热液来源 ($K^+/Na^+ > 1$), 为典型的热卤水型 (Roedder, 1984); F^-/Cl^- 为 0.006~0.140, 平均 0.04, 与 MVT 矿床的热卤水流体相近 (F^-/Cl^- 为 0.02~0.08) (张德会, 1992), 且湘西李梅、土地坪、大石沟矿床及黔东嗅脑、卜口场、牛角塘矿床 (周云等, 2014; 李堃等, 2021) 也具有相似特征, 以此推测成矿流体为含有 Pb、Zn 等成矿元素的 Na^+ - Ca^{2+} - Cl^- - H_2O - CO_2 热卤水体系。

滇东北-黔西北地区铅锌矿床的流体包裹体气相呈 $H_2O > CO_2 > CO > N_2 > CH_4$ 组成特征, 液相成分由 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Li^+ 等阳离子和 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 F^- 等阴离子组成。会泽矿床 K^+/Na^+ 为 0.15~0.91, 平均 0.33; F^-/Cl^- 为 0.01~0.20, 平均 0.07 (Han et al., 2007; 胡瑞忠等, 2015)。青山矿床的 K^+/Na^+ 为 0.24~0.63, 平均 0.51; F^-/Cl^- 为 0.06~0.50, 平均 0.28 (钱建平等, 2001)。上述特征表明, 该区域铅锌成矿流体既有别于岩浆热液, 也有别于典型 MVT 矿床的热液, 结合 Pb 同位素特征分析认为, 成矿流体可能为 Na^+ - Ca^{2+} - Mg^{2+} - Cl^- - H_2O - CO_2 型、壳-幔混合热卤水体系。

3.3 矿床成因及成矿时代

3.3.1 矿床成因类型

SEDEX、VMS 和 MVT 是全球铅锌矿床成因主要类型, 黔西北和黔东地区铅锌矿床成矿背景及地质特征与前两者铅锌矿床成因类型有较大差异, 显然不应属于 SEDEX 和 VMS 矿床。

事实上, 黔西北地区铅锌矿床成因已有众多国内外地质专家、学者进行了广泛研究, 主要观点有层控型矿床 (唐森宁, 1984)、沉积-改造型矿床 (张位及, 1984)、MVT 矿床 (王浆臻, 2002; 张长青, 2005; 2008; 吴越, 2013; He et al., 2020; Wei et al., 2021; Wu et al., 2021)、与峨眉山玄武有关 (柳贺昌等, 1999; 黄智龙等, 2004), 也有学者确定为特殊类型, 如 HZT (会泽式) (韩润生等, 2014)、SYG (川滇黔型) (Zhou et al., 2013d)。笔者通过对滇东北-黔西北地区铅锌矿床与典型 MVT 矿床 (表 1) 研究认为, 大地构造背景、控矿因素、容矿岩性、矿物组合、围岩蚀变及流体性质、物质来源等具有相似性, 属于 MVT, 但在矿体产出形态、矿石品位、成矿温度与盐度、成矿

时代有差异。

湘西-黔东地区铅锌矿床成因类型也有不同的观点, 主要有多因复成型 (夏新阶等, 1995)、沉积型 (罗卫等, 2009)、沉积改造型 (李宗发, 1991)、扬子型 (曹亮等, 2013) 等。根据表 1 成矿地质特征对比分析可知, 湘西-黔东地区铅锌矿床与典型 MVT 铅锌矿床特征基本一致, 应属 MVT 铅锌矿床, 目前也被广大地学研究者认同 (刘文均等, 2000; 张长青, 2005; 2008; Ye et al., 2012; 周云等, 2014; 蔡应雄等, 2014; 于玉帅等, 2017b; 胡宇思, 2020; Hu et al., 2020; 李堃等, 2018; 2021)。此外, 从矿床地质特征及成因类型对比研究看, 黔中五指山铅锌矿化集中区与紧邻黔西北成矿区有较大差异, 而与黔东成矿区相似, 可能属于湘西-黔东 MVT 成矿带的西延部分。

3.3.2 成矿时代、动力学背景及成矿模式

通过 20 余年的研究, 滇东北-黔西北地区积累了丰富的年代学资料 (胡瑞忠等, 2015), 而湘西-黔东地区成矿年代学研究总体较薄弱, 获得准确可靠的年代学数据较少 (李堃等, 2021)。从表 4 看出, 滇东北-黔西北地区铅锌矿床获得的成矿年龄值均较接近, 集中分布于 230~190 Ma, 显示成矿时代为晚三叠世—早侏罗世, 成矿动力学背景为印支晚期碰撞造山伸展作用驱动成矿流体大规模运移在有利空间沉淀、富集成矿。湘西-黔东地区铅锌矿床获得的成矿年代学数据差异大、较分散 (510~410 Ma), 集中分布在 420~410 Ma (晚志留世—早泥盆世) 和 510~450 Ma (晚寒武世—中奥陶世) 2 个阶段, 反映加里东期成矿的多期多阶段性。成矿动力学背景为加里东期碰撞造山运动引发大规模流体运移至前陆盆地边缘成矿。

黔西北铅锌成矿模式: 加里东造山运动形成黔中古陆和垭都-蟒洞深大断层, 并沿古陆边缘形成相对封闭的威宁-水城断陷盆地。海西期大规模的地幔玄武岩浆的喷溢喷发作用, 巨大热能活化赋存于基底地层的 Pb、Zn 等矿质元素迁移进入以变质水为主形成的热卤水流体。印支晚期碰撞造山作用诱发垭都-蟒洞深大断层活化, 向下深切地幔, 在挤压动力向伸展转换过程中驱动深部富含 Pb、Zn 流体沿断层构造系统向上运移, 迁移至主断层破碎带、旁侧次级断裂带、层间虚脱空间与富 S 的盆地热水流体 (建造水、大气降水形成盆地流体与地层中蒸发岩发生热化学还原作用产物) 混合, 形成中-

表4 湘西-黔东-滇东北-黔西北铅锌矿床年代学成果表

Table 4 Geochronology of lead-zinc deposits in west Hunan-east Guizhou and northeast Yunnan-northwest Guizhou

成矿带及矿床名称	成矿年龄测定方法	成矿年龄/Ma	资料来源	
黔东成矿带	铜仁塘边	闪锌矿 Rb-Sr法	477±5	于玉帅等,2017b
	铜仁卜口场	闪锌矿 Rb-Sr法	(466±13)、(483±9)	杨红梅等,2015
		方解石 Sm-Nd	422±48	杨红梅等,2015
	都匀牛角塘	方铅矿、闪锌矿 Pb同位素模式年龄	466.5 ~ 506.5	王华云等,1993
		方铅矿、闪锌矿 Pb同位素模式年龄	433 ~ 510	叶霖等,2005
普定纳雍枝	闪锌矿 Rb-Sr法	458.2	王生伟等,2018	
湘西成矿带	花垣狮子山	闪锌矿 Rb-Sr法	410±12	段其发等,2014
	花垣柔先山	闪锌矿 Rb-Sr法	412±6	谭娟娟等,2018
黔西北成矿区	水城杉树林	闪锌矿 Rb-Sr法	212.7±9.5	廖开立等,2020
	钟山青山	方铅矿、闪锌矿 U-Pb法	229.9	毛健全等,1998
	赫章天桥	闪锌矿 Rb-Sr法	191.9±6.9	Zhou et al., 2013b
	威宁云炉河坝	闪锌矿 Rb-Sr法	206.2±4.9	Tang et al., 2019
	会泽铅锌矿	方解石 Sm-Nd	(225~226)±(15~38)	黄智龙等,2004;
闪锌矿 Rb-Sr		(224.8~226.0)±(1.1~6.9)	Li et al., 2007	
滇东北成矿带	彝良毛坪	闪锌矿 Rb-Sr法	202.5±8.5	Yang et al., 2019
	永善金沙厂	萤石 Sm-Nd	201.1±2.9	毛景文等,2012
		闪锌矿 Rb-Sr	199.5±4.5	毛景文等,2012
	鲁甸乐红	闪锌矿 Rb-Sr	200.9±2.3	毛景文等,2012
	巧家茂租	方解石 Sm-Nd	196±13	Zhou et al., 2013a;2013b

低温度、中-低盐度的成矿流体,物理化学条件发生急剧变化,大量 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 与 S^{2-} 结合快速沉淀成矿,快速沉淀导致成矿流体运移距离短、矿化富集集中,在断层及旁侧有利空间往往形成铅锌富矿体(图 6a)。

黔东铅锌成矿模式:加里东期造山运动促使湘西-黔中地区发生强烈的褶皱,驱动地层建造水与下渗的大气降水混合形成盆地流体,当盆地流体迁移至区域断层旁侧的层间破碎带、褶皱虚脱空间及上覆、下伏岩层渗透性差的白云岩层时,由于圈闭构造影响,盆地流体常常集聚于此。孔隙度高的白云岩有利于热流体的渗滤、水/岩反应和与硫酸盐发生热化学还原作用,形成富S的酸性流体。同时,造山作用诱发基底富Pb、Zn等成矿元素的热卤水沿区域性断裂向上运移,当2种流体在层间破碎带、褶皱虚脱空间、蚀变白云岩中混合形成低温、中-低盐度的成矿流体,物理化学条件发生变化, Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 络合物被破坏, Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 析出并与 S^{2-} 结合沉淀成矿,在断层旁侧的褶皱虚脱空间、层间破碎带及蚀变白云岩中形成层状、似层状铅锌矿体,在局部断层内形成陡倾斜的脉状矿体(图 6b)。

4 对比研究的地质意义

(1) 刻画了重大地质事件与铅锌成矿关系,初步厘定了成矿边界

黔东、黔西北地区铅锌成矿分别为加里东期、印支期地质事件的产物,现阶段研究及勘查成果显示,加里东期铅锌成矿分布范围较大,在坝都-蟒洞断裂带以东均有产出,但在其以西的贵州境内尚未发现该时期铅锌成矿证据,其原因推测为坝都-蟒洞断裂带形成与湘西-黔东地区铅锌成矿时代一致,该区域成矿流体是从NE→SW运移(前述),坝都-蟒洞断裂带可能对成矿流体起到了隔档作用所致;而在坝都-蟒洞断裂带以东,除其影响带外,在贵定竹林沟、丹寨新华等铅锌矿床发现了印支期铅锌成矿信息,故认为该断裂带可能是加里东期铅锌成矿的西部边界。

(2) 进一步明确了成因类型,提出了找矿勘查思路

典型铅锌矿床产出特征、控矿因素、成矿作用及成矿模式研究表明,黔东地区属层位控制为主的

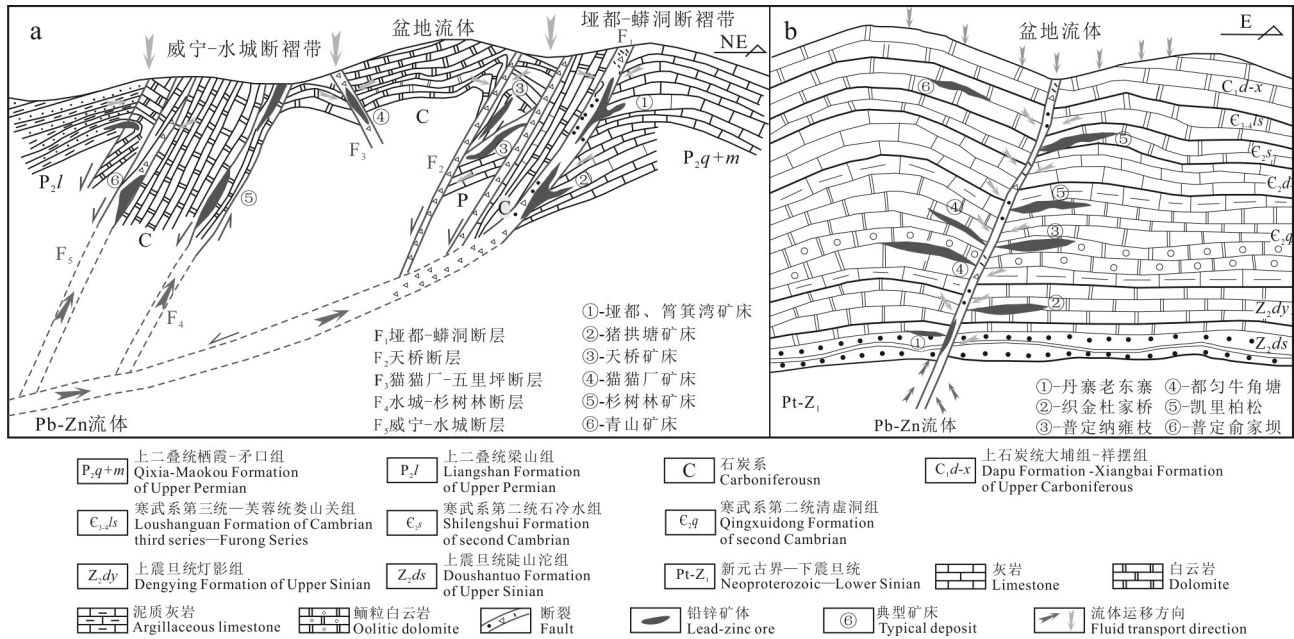


图6 黔西北铅锌成矿模式图(a,据韩润生等,2020修改)和黔东铅锌成矿模式图(b)

Fig 6 Schematic ore-forming model of the lead-zinc deposits in Northwest Guizhou Province(a, modified after Han et al., 2020) and ore-forming model of the lead-zinc deposits in East Guizhou Province(b)

MVT 铅锌矿床,而黔西北地区为陡倾斜断层控制为主的MVT 铅锌矿床。针对黔西北、黔东铅锌成矿区的不同动力学背景、不同构造体系、矿体产出特征及关键控矿因素的差异特点,提出黔西北地区开展铅锌找矿勘查应以断裂构造体系为研究对象,断裂构造带的形成与演化,导矿、容矿断层空间配置关系及成矿期构造识别,构造-岩性-矿化-蚀变-物化探异常耦合关系研究,是实现找矿新发现、新突破的关键;黔东地区应以北东向分布的背斜褶皱带和沿背斜轴向分布的导矿、控矿断裂及加里东期构造发育的寒武系清虚洞组为主要找矿地质体,主断层旁侧的层间断层、蚀变碳酸盐岩发育程度及上部页岩、泥质岩+中部白云岩、藻灰岩+下部泥质岩的有利岩性组合研究,是实现找矿取得预期效果的关键。

(3) 分析研究了两个成矿区的找矿潜力

鉴于贵州铅锌矿勘查程度低(仅极少量矿床开展过勘探工作)、勘查深度浅(大部分工程控制<500 m),尚有较大的找矿空间和潜力。近年赫章猪拱塘、普定纳雍枝找矿突破实践证明,在成矿地质条件优越的矿化富集区,加强成矿规律总结、有效找矿技术方法集成与成矿预测研究,加大找矿靶区工程验证力度,是实现找矿突破的重要途径。以此认为,圈定的矿化富集区内已知矿床的深部是重要的潜在找矿

靶区,以MVT成矿理论为指导,深度融合大数据挖掘技术,“集成矿床成矿模式+地球物理异常+地球化学异常为一体的找矿有效方法体系”,构建深部找矿预测模型,加大深部工程验证力度,有望实现新的找矿突破。

5 结论

(1) 典型矿床对比研究显示,黔西北和黔东地区铅锌成矿既具有主控因素、容矿岩性、成矿物质来源、流体来源及性质、后生成矿特征等共性特征,也存在成矿地质事件、动力学背景、成矿时代、矿体产出特征、共伴生元素组合等差异特点,进一步丰富了贵州铅锌成矿理论,为找矿勘查提供了理论指导。

(2) 黔西北铅锌成矿时代集中在200 Ma左右,为印支晚期碰撞造山作用驱动大规模流体运移在有利空间沉淀、富集成矿;黔东地区铅锌成矿时代集中于420~410 Ma和510~450 Ma两个阶段,反映加里东期成矿的多期多阶段性,成矿动力学背景与加里东期碰撞运动引发大规模流体运移作用密切相关。

(3) 黔西北、黔东成矿区工作程度低,找矿潜力大,圈定的矿化富集区是有利的远景区,已知矿床的

深、边部是重要的潜在找矿靶区,以MVT铅锌成矿理论为指导,深度融合大数据挖掘技术,“集成矿床成矿模式+地球物理异常+地球化学异常为一体的找矿有效方法体系”,构建深部找矿预测模型,加大找矿靶区深部工程验证力度,有望实现新的找矿突破。

致谢 感谢匿名审稿专家对文章修改提出的宝贵意见!

References

- Cai Y X, Yang H M, Duan R C, Lu S S, Zhang L G, Liu C P and Qiu X F. 2014. Fluid inclusions and S, Pb, C isotope geochemistry of Pb-Zn deposits hosted by Lower Cambrian western Hunan-eastern Guizhou area[J]. *Geoscience*, 28(1): 29-41(in Chinese with English abstract).
- Cao L, Duan Q F, Peng S G and Zhou Y. 2013. Metallogenic characteristics and prospecting progress of the Yangtze type lead-zinc deposit[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 29(4): 308-317 (in Chinese with English abstract).
- Chen S J. 1986. Research on the genesis of lead-zinc ore-deposits in western Guizhou and northeastern Yunnan[J]. *Geology of Guizhou*, 3(8): 211-222(in Chinese with English abstract).
- Claypool G E, Holser W T, Kaplan I R, Sakai H and Zak I. 1980. The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation[J]. *Chemical Geology*, 28: 199-260.
- Duan Q F, Cao L, Zeng J K, Zhou Y, Tang Z Y and Li K. 2014. Rb-Sr dating of sphalerites from Shizishan Pb-Zn deposit in Huayuan ore concentration area, western Hunan, and its geological significance[J]. *Earth Science*, 39(8): 977-986, 999(in Chinese with English abstract).
- Eldridge C S, Compston W, Williams I S, Harris J W and Bristow J. 1991. Isotope evidence for the involvement of recycled sediments in diamond formation[J]. *Nature*, 353: 649-665.
- Fu S H. 2004. Metallogenesis of Pb-Zn deposits and enrichment regularity of dispersed elements Cd, Ga and Ge in SW Yangtze block[D]. Supervisor: Gu X X. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology. 20-67 (in Chinese with English abstract).
- Guizhou Geological Survey. 2017. The regional geology of China, Guizhou Province[M]. Beijing: Geological Press House. 1-1098(in Chinese).
- Han R S, Chen J, Huang Z L, Ma D Y, Xue C D, Li Y, Zou H J, Li B, Hu Y Z, Ma G S, Huang D Y and Wang X K. 2006. Dynamics of tectonic ore-forming process and localization-prognosis of concealed orebodies: As exemplified by the Huize super-large Zn-Pb-(Ag-Ge) district, Yunnan[M]. Beijing: Science Press. 1-168(in Chinese).
- Han R S, Zou J X, Hu B, Hu Y Z and Xue C D. 2007. Features of fluid inclusions of sources of ore-forming fluid in the Maoping carbonate-hosted Zn-Pb(Ag-Ge) deposit, Yunnan, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2109-2118.
- Han R S, Wang F, Hu Y Z, Wang X K, Ren T, Qiu W L and Zhong K H. 2014. Metallogenic tectonic dynamics and chronology con strains on the Huize type(HZT) germanium rich silver zinc lead deposit [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 4: 758-771(in Chinese with English abstract).
- Han R S, Wang M Z, Jin Z G, Li B and Wang Z Y. 2020. Ore controlling mechanism of the NE-trending ore-forming structural system at the Zn-Pb polymetallic ore concentration area in the northwestern Guizhou[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(3): 850-868(in Chinese with English abstract).
- He L L, Zhao F, Bai G H, Jin X L, Wu D W and Wang J. 2019. Discovery and prospecting significance of Zhugongtang superlarge Pb-Zn depo-sit in Guizhou Province[J]. *Geological Survey of China*, 6(3): 29-36(in Chinese with English abstract).
- He Y F, Wu T, Huang Z L, Ye L, Deng P and Xiang Z Z. 2020. Genesis of the maoping carbonate-hosted Pb-Zn deposit, northeastern Yunnan Province, China: Evidences from geology and C-O-S-Pb isotopes[J]. *Acta Geochimica*, 39(5): 782-796.
- Hoefs J. 1997. Stable isotope geochemistry[M]. Berlin: Springer Verlag (4th ed). 65-168.
- Hu R Z, Mao J W, Hua R M and Fan W M. 2015. Intra-continental mineralization of South China Creton[M]. Beijing: Science Press. 400-603(in Chinese).
- Hu T P, Wang M F, Ding Z J, He M C, Wang Y B and Guo X N. 2017. 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*, 36(3): 623-642(in Chinese with English abstract).
- Hu Y S. 2020. The metallogenesis of Pb-Zn deposits hosted in Cambrian carbonate from western Hunan-eastern Guizhou, South China[D]. Supervisor: Ye L. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. 1-108(in Chinese with English abstract).
- Hu Y S, Ye L, Wei C, Li Z L, Huang Z L and Wang H Y. 2020. Trace elements in Sphalerite from the Dadongla Zn-Pb deposit, western Hunan-eastern Guizhou Zn-Pb metallogenic belt, South China[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 94(6): 2152-2164.
- Huang Z L, Chen J, Han R S, Li W B, Liu C Q, Zhang Z L, Ma D Y, Gao D R and Yang H L. 2004. Geochemistry and ore genesis of the Huize giant Pb-Zn deposit in Yunnan Province, China: Discussion on the relationship between the Emeishan flood basalts and Pb-Zn mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-145(in Chinese).
- Jin Z G. 2008. The ore-control factors, ore-forming regularity and forecasting of Pb-Zn deposit, in northwestern Guizhou Province[M]. Beijing: Engine Industry Press. 1-105 (in Chinese).
- Jin Z G, Zhou J X, Huang Z L, Luo K, Gao J G, Peng S, Wang B and Chen X L. 2016. Ore genesis of Nayongzhi Pb-Zn deposit, Puding City, Guizhou Province, China: Evidences from S in situ Pb isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(34): 3441-3455(in Chinese

- with English abstract).
- Jin Z G, Zhou J X, Zheng M H, Peng S, Huang Z L and Liu L. 2017. Metallogenic model of Pb-Zn deposits in Wuzhishan area, Puding City, Guizhou Province[J]. *Mineral Deposits*, 36(5): 1169-1184(in Chinese with English abstract).
- Jin Z G, Huang Z L, Zheng M H, Liu L, Zhang L W, Zeng D G, Tang Y Y and Zhou J X. 2020. Geological characteristics and ore-hosting mechanism of the carbonate-hosted type lead-zinc deposits in Guizhou Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 40 (4): 346-355(in Chinese with English abstract).
- Li K, Wu C X, Tang C Y, Duan Q F and Yu Y S. 2014. 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*, 41(5): 1608-1619 (in Chinese with English abstract).
- Li K, Tang C Y, Liu J S, Cai Y X and Liu F. 2018. Sources of metallogenic materials of Xiunao Pb-Zn deposit in eastern Guizhou: Constraints from REE and C, O, S, Pb isotope geochemistry[J]. *Journal of Guilin University Technology*, 38(3): 365-376(in Chinese with English abstract).
- Li K, Liu F, Zhao W Q, Zhao S R, Tang C Y, Duan Q F and Cao L. 2021. Metallogenic model of carbonate-hosted Pb-Zn deposits in West Hunan and East Guizhou Provinces, South China[J]. *Earth Science*, 46(4): 1151-1172(in Chinese with English abstract).
- Li W B, Huang Z L and Zhang G. 2006. Sources of the ore metals of the Huize ore field in Yunnan Province: Constraints from Pb, S, C, H, O and Sr isotope geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2567-2580 (in Chinese with English abstract).
- Li W B, Huang Z L and Yin M D. 2007. 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*, 57: 90-97.
- Li Z F. 1991. A preliminary discussion on the origin of Pb-Zn ore deposits in western Hunan and eastern Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 8 (4): 363-371(in Chinese with English abstract).
- Liao K L, Lü C L and Ma W F. 2020. The geological significance of Rb-Sr isotopic dating of sphalerite in Shanshulin Pb-Zn deposit in Guizhou[J]. *Mineral Resources and Geology*, 34(2): 273-277(in Chinese with English abstract).
- Liu H C and Lin W D. 1999. Study on the law of Pb-Zn-Ag ore deposits in northeast Yunnan, China[M]. Kunming: Yunnan University Press. 1-389(in Chinese).
- Liu J J, He M Q, Li Z M, Liu Y P, Li C Y, Zhang Q, Yang W G and Yang A P. 2004. Oxygen and carbon isotopic geochemistry of Baiyangping silver-copper polymetallic ore concentration area in Lanping basin of Yunnan Province and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 23(1): 1-10(in Chinese with English abstract).
- Liu W J and Lu J L. 2000. Characteristics of organic geochemistry of Lower Cambrian in western Hunan—organic-mineralization study on MVT lead-zinc ore deposits(Ⅲ)[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(2): 290-296(in Chinese with English abstract).
- Luo W, Yin Z, Kong L and Dai T G. 2009. 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*, 32(3): 194-202(in Chinese with English abstract).
- Mao J Q, Zhang Q H, Mao D M and Gu S Y. 1998. Tectonic evolution and Pb-Zn mineralization of Shuicheng fault subsidence[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishing Company. 104-129(in Chinese).
- Mao J W, Zhou Z H, Feng C Y, Wang Y T, Zhang C Q, Peng H J and Yu M. 2012. A preliminary study of the Triassic large-scale mineralization in China and its geodynamic setting[J]. *Geology in China*, 39(6): 1437-1471(in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H and Goldhaber M B. 1997. Sulfur and carbon isotopes[A]. In: Barnes H L, ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits (3rd Edition)*[C]. 517-611.
- Qian J P. 2001. Tectono-dynamic mineralization in Weining-Shuicheng Pb-Zn ore belt, northwestern Guizhou[J]. *Geology-Geochemistry*, 29(3): 134-139(in Chinese with English abstract).
- Ren S L, Li Y H, Zeng P S, Qiu W L, Fan C F and Hu G Y. 2018. Effect of sulfide evaporate salt layer mineralization of the Huize and Maoping Pb-Zn deposits in Yunnan: Evidence from sulfur isotope[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(5): 1041-1055(in Chinese with English abstract).
- Roedder E. 1984. Fluid inclusion[J]. *Reviews Mineral*, 12: 337-359.
- Tan J J, Liu C P, Yang H M, Cai Y X and Lu S S. 2018. Geochronology and ore-forming material source constraints for Rouxianshan Pb-Zn deposit in Huayuan ore concentration area, western Hunan[J]. *Earth Science*, 43(7): 2438-2448(in Chinese with English abstract).
- Tang S L. 1984. Characteristics and metallogenic models of strata-controlled Pb-Zn deposits in Northwest Guizhou and Northeast Yunnan[J]. *Geology and Prospecting*, 20(12): 1-8(in Chinese).
- Tang Y Y, Bi X W, Zhou J X, Liang F, Qi Y Q, Leng C B, Zhang X C and Zhang Hai. 2019. Rb-Sr isotopic age, S-Pb-Sr isotopic compositions and genesis of the ca.200 Ma Yunluheba Pb-Zn deposit in NW Guizhou Province, SW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, doi.org/j.jseas.2019, 104054.
- Taylor B E. 1986. Magmatic volatiles: Isotope variation of C, H and S reviews in mineralogy[J]. *Reviews Mineral*, 16: 185-225.
- Taylor H P, Frechen J and Degens E T. 1967. Oxygen and carbon isotope studies of carbonatites from the Laacher See district, West Germany and the Alnö district, Sweden[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(3): 407-430.
- Wang H Y, Liang F L, Zeng D Q, Wang H Y, Nie Z L, Tang J Q, Zhong J and Liao L P. 1996. Geology of lead-zinc deposits in Guizhou[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishing House. 126-158(in Chinese with English abstract).
- Wang J Z, Li C Y, Li Z Q, Li B H and Liu W Z. 2002. The comparison of Mississippi valley-type lead-zinc deposits in Southwest of China and in Mid-continent of United States[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 21(2): 127-132(in Chinese with

- English abstract).
- Wang S W, Jin C H, Zhang Y, Sun X M, Zhou Q, Liao Z W, Guo Y, Jiang X F and Wang Z Z. 2018. Sphalerites from the giant Wuzhishan Pb-Zn deposit in Guizhou: Rb-Sr dating and its geological implications[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 38(3): 77-87(in Chinese with English abstract).
- Wei C. 2020. Ore-forming fluid and ore genesis of the Nayongzhi deposit in northwestern Guizhou[D]. Supervisor: Huang Z L. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. 1-95(in Chinese with English abstract).
- Wu Y. 2013. The age and ore-forming process of MVT deposits in the boundary area of Sichuan-Yunnan-Guizhou Province, Southwest China[D]. Supervisor: Mao J W. Beijing: China University of Geosciences. 1-152(in Chinese with English abstract).
- Xia X J and Shu J W. 1995. Geologic characteristics and origin of the Limei zinc sulfide deposit[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 19(3): 197-204 (in Chinese with English abstract).
- Xiao K Y, Xiang S W, Ding J H, Zhu Y S, Ma Y B, Cong Y, Yin J N, Sun L, Chen Z H and Xi W J. 2016. Division of major mineralization belts of China, sky solid mineral resources and their mineral resource potential[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(7): 1269-1280(in Chinese with English abstract).
- Yang H M, Liu C P, Duan R C, Gu X M, Lu S S, Tan J J, Cai Y X, Zhang G L and Qiu X F. 2015. Rb-Sr and Sm-Nd isochron ages of Bokouchang Pb-Zn deposit in Tongren, Guizhou Province and their geological implication[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(5): 855-865(in Chinese with English abstract).
- Ye L, Pan Z P, Li C Y, Liu T G and Xia B. 2005. Isotopic geochemical characters in Niujiaotang Cd rich zinc deposit, Duyun, Guizhou[J]. *J. Mineral. Petrol.*, 25(2): 70-74(in Chinese with English abstract).
- Yu Y S, Guo F S, Dai P Y, Liu A S and Zhou Y. 2017a. Ore genesis of Tangbian Pb-Zn deposit in Tongren, Guizhou: Evidence from ore-forming fluids and isotopes[J]. *Mineral Deposits*, 36(2): 330-344 (in Chinese with English abstract).
- Yu Y S, Liu A S, Dai P Y, Zhao W Q, Tao M and Liu C P. 2017b. 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*, 36(5): 885-892(in Chinese with English abstract).
- Yuan S D, Chou I M, Burruss R C, Wang X L and Li J K. 2013. Disproportionation and thermochemical sulfate reduction reactions in S-H₂O-CH₄ and S-D₂O-CH₄ systems from 200 to 340°C at elevated pressures[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 118: 263-275.
- Yuan S D, Ellis E S, Chou I M and Burruss R C. 2017. Experimental investigation on thermochemical sulfate reduction in the presence of 1-pentanethiol at 200 and 250°C: Implications for in situ TSR processes occurring in some MVT deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 91: 57-65.
- Zartman R E and Doe B R. 1981. Plumbotectonics-the model[J]. *Tectonophysics*, 75(1-2): 135-162.
- Zhang C Q, Mao J W, Wu S P, Li H M, Liu F, Guo B J and Gao D R. 2005. Distribution characteristics of MVT Pb-Zn deposits in Sichuan-Yunnan-Guizhou area[J]. *Mineral Deposits*, 24(3): 336-348(in Chinese with English abstract).
- Zhang C Q. 2008. The genetic model of Mississippi Valley-type deposits in the boundary area of Sichuan, Yunnan and Guizhou Provinces[D]. Supervisor: Mao J W. Beijing: Institute of Mineral Resources Chinese Academy of Geological Sciences. 1-166(in Chinese with English abstract).
- Zhang C Q, Yu J J, Mao J W and Rui Z Y. 2009. Advances in the study of Mississippi Valley type deposits[J]. *Mineral Deposits*, 28(2): 195-210(in Chinese with English abstract).
- Zhang D H. 1992. Aqueous phase composition characteristics of mineral fluid inclusions and its significance ore genesis[J]. *Earth Science*, 11(6): 677-688(in Chinese with English abstract).
- Zhang W J. 1984. Discussion on sedimentary formation and ore-forming law of Pb-Zn deposit in Northeast Yunnan[J]. *Geology and Exploration*, (7): 11-16(in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F. 2001. Theoretical modeling of stable isotope systems and its applications to geochemistry of hydrothermal ore deposits[J]. *Mineral Deposits*, 20(1): 57-70, 85(in Chinese with English abstract).
- Zhong W B, Zhang J, Wang J C, Yang Q, Zhang Z K and Cheng Y L. 2017. A comprehensive analysis of present situation of geochemical researches on stable isotopes of Pb-Zn deposits in Sichuan-Yunnan-Guizhou area[J]. *Mineral Deposits*, 36(1): 200-218 (in Chinese with English abstract).
- Zhou J X, Huang Z L, Zhou G F, Jin Z G, Li X B, Ding W and Gu J. 2010. Sources of the ore metals of the Tianqiao Pb-Zn deposit in northwestern Guizhou Province: Constraints from S-Pb isotope and REE geochemistry[J]. *Geological Review*, 56(4): 513-524(in Chinese with English abstract).
- Zhou J X, Huang Z L, Zhou M F, Li X B and Jin Z G. 2013a. 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*, 53: 77-92.
- Zhou J X, Huang Z L, Gao J G and Yan Z F. 2013b. Geological and C-O-S-Pb-Sr isotopic constraints on the origin of the Qingshan carbonated-hosted Pb-Zn deposit, Southwest China[J]. *International Geology Reviews*, 55: 904-916.
- Zhou J X, Huang Z L and Bao G P. 2013c. Geological and sulfur-lead-strontium isotopic studies of the Shaojiwan Pb-Zn deposit, Southwest China: Implications for the origin of hydrothermal fluids[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 128: 51-61.
- Zhou J X, Huang Z L, Bao G P and Gao J G. 2013d. Sources and thermochemical sulfate reduction for reduced sulfur in the hydrothermal fluids, southeastern SYG Pb-Zn metallogenic province, SW China[J]. *Journal of Earth Science*, 24(5): 759-771.
- Zhou J X, Huang Z L, Lü Z C, Zhu X K, Gao J G and Mirnejad H. 2014. Geology, isotope geochemistry and ore genesis of the Shanshulin carbonate-hosted Pb-Zn deposit, Southwest China[J]. *Ore Geology Reviews*, 63: 209-225.

- Zhou J X, Luo K, Wang X C, Wilde S A, Wu T, Huang Z L, Cui Y L and Zhao J X. 2018. Ore genesis of the fule Pb-Zn deposit and its relationship with the Emeishan large igneous Province: Evidence from mineralogy, bulk C-O-S and in situ S-Pb isotopes[J]. *Gondwana Research*, 54: 161-179.
- Zhou Y, Duan Q F, Tang J X, Cao L, Li F, Huang H L and Gan J M. 2014. The large-scale low-temperature mineralizations of lead-zinc deposit in western Hunan, study on fluid inclusions[J]. *Geology and Exploration*, 50(3): 515-532(in Chinese with English abstract).
- Zhou Y, Duan Q F, Chen Y C, Tang J X, Cao L, Peng S G and Gan J M. 2016. 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*, 90(10): 2786-2802(in Chinese with English abstract).
- Zhu L Y, Su W C, Shen N P, Dong W D, Cai J L, Zhang Z W, Zhao H and Xie P. 2016. Fluid inclusion and sulfur isotopic studies of lead-zinc deposits, northwestern Guizhou, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(32): 3431-3440(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 蔡应雄, 杨红梅, 段瑞春, 卢山松, 张利国, 刘重芑, 邱啸飞. 2014. 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*, 28(1): 29-41.
- 曹亮, 段其发, 彭三国, 周云. 2013. 扬子型铅锌矿的成矿特征及找矿进展[J]. *华南地质与矿产*, 29(4): 308-317.
- 陈士杰. 1986. 黔西-滇东北铅锌矿床成因探讨[J]. *贵州地质*, 3(8): 211-222.
- 段其发, 曹亮, 曾健康, 周云, 汤朝阳, 李堃. 2014. 湘西花垣矿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*, 39(8): 977-986, 999.
- 付绍洪. 2004. 扬子地块西南缘铅锌成矿作用与分散元素镉镓锗富集规律(博士论文)[D]. 导师: 顾雪祥. 成都: 成都理工大学. 20-67.
- 贵州省地质调查院. 2017. 中国区域地质志·贵州志[M]. 北京: 地质出版社. 1-1098.
- 韩润生, 陈进, 黄智龙, 马德云, 薛传东, 李元, 邹海俊, 李勃, 胡煜昭, 马更生, 黄德镛, 王学琨. 2006. 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. 1-168.
- 韩润生, 王峰, 胡煜昭, 王学琨, 任涛, 邱文龙, 钟康惠. 2014. 会泽型(HZT)富锗银铅锌矿床成矿构造动力学研究及年代学约束[J]. *大地构造与成矿学*, 38(4): 758-771.
- 韩润生, 王明志, 金中国, 李波, 王子勇. 2020. 黔西北铅锌多金属矿床成矿构造体系及其控矿机制[J]. *地质学报*, 94(3): 850-868.
- 何良伦, 赵锋, 柏光辉, 金翔霖, 吴大文, 王军. 2019. 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*, 6(3): 29-36.
- 胡瑞忠, 毛景文, 华仁民, 范蔚茗. 2015. 华南陆内陆块成矿作用[M]. 北京: 科学出版社. 400-603.
- 胡太平, 王敏芳, 丁振举, 何谋恣, 王彦博, 郭晓南. 2017. 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*, 36(3): 623-624.
- 胡宇思. 2020. 湘西-黔东南地区寒武系地层铅锌成矿作用(博士论文)[D]. 导师: 叶霖. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所. 1-108.
- 黄智龙, 陈进, 韩润生, 李文博, 刘从强, 张振亮, 马德云, 高德荣, 杨海林. 2004. 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. 1-145.
- 金中国. 2008. 黔西北地区铅锌矿控矿因素、成矿规律与找矿预测[M]. 北京: 冶金工业出版社. 1-105.
- 金中国, 周家喜, 黄智龙, 罗开, 高建国, 彭松, 王兵, 陈兴龙. 2016. 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*, 32(10): 3441-3455.
- 金中国, 周家喜, 郑明泓, 彭松, 黄智龙, 刘玲. 2017. 贵州普定五指山地区铅锌矿床成矿模式[J]. *矿床地质*, 36(5): 1619-1184.
- 金中国, 黄智龙, 郑明泓, 刘玲, 张伦尉, 曾道国, 唐永永, 周家喜. 2020. 贵州碳酸盐岩型铅锌矿床地质特征与容矿机理[J]. *矿物学报*, 40(4): 346-355.
- 李堃, 吴昌雄, 汤朝阳, 段其发, 于玉帅. 2014. 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*, 41(5): 1608-1619.
- 李堃, 汤朝阳, 刘劲松, 蔡应雄, 刘飞. 2018. 黔东南桃嗅脑铅锌矿床成矿物质来源: 稀土元素与碳、氧、硫、铅同位素制约[J]. *桂林理工大学学报*, 38(3): 365-376.
- 李堃, 刘飞, 赵武强, 赵少瑞, 汤朝阳, 段其发, 曹亮. 2021. 湘西-黔东南地区碳酸盐岩容矿铅锌矿床成矿模式[J]. *地球科学*, 46(4): 1151-1172.
- 李文博, 黄智龙, 张冠. 2006. 云南会泽铅锌矿田成矿物质来源: Pb、S、C、H、O、Sr 同位素制约[J]. *岩石学报*, 22(2): 267-280.
- 李宗发. 1991. 湘西黔东南地区铅锌矿成因初步探讨[J]. *贵州地质*, 8(4): 363-371.
- 廖开立, 吕昶良, 马文富. 2020. 贵州杉树林铅锌矿床中闪锌矿 Rb-Sr 定年及其意义[J]. *矿产与地质*, 34(2): 273-277.
- 柳贺昌, 林文达. 1999. 滇东北铅锌银矿床成矿规律研究[M]. 昆明: 云南大学出版社. 1-398.
- 刘家军, 何明勤, 李志明, 刘玉平, 李朝阳, 张乾, 杨伟光, 杨爱平. 2004. 云南白秧坪银铜多金属矿床同位素组成及其意义[J]. *矿床地质*, 23(1): 1-10.
- 刘文均, 卢家烂. 2000. 湘西下寒武统有机地化特征——MVT 铅锌矿床有机成矿作用研究(III)[J]. *沉积学报*, 18(2): 290-296.
- 罗卫, 尹展, 孔令, 戴塔根. 2009. 花垣李梅铅锌矿床地质特征及矿床成因探讨[J]. *地质调查与研究*, 33(3): 194-202.
- 毛健全, 张启厚, 毛德明, 顾尚义. 1998. 水城断陷构造演化及铅锌矿研究[M]. 贵阳: 贵州科技出版社. 104-129.
- 毛景文, 周振华, 丰成友, 王义天, 张长青, 彭惠娟, 于森. 2012. 初论中国三叠纪大规模成矿作用及其动力学背景[J]. *中国地质*, 39(6): 1437-1471.
- 钱建平. 2001. 黔西北威宁-水城铅锌矿带动力成矿作用研究[J]. 地

- 质地球化学,29(3):134-139.
- 任顺利,李延河,曾普胜,邱文龙,范昌福,胡古月. 2018. 膏盐层在云南会泽和毛坪铅锌矿成矿中的作用:硫同位素证据[J]. 地质学报,92(5):1041-1055.
- 谭娟娟,刘重芑,杨红梅,蔡应雄,卢山松. 2018. 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,43(7):2438-2448.
- 唐森宁. 1984. 黔西北滇东北层控铅锌矿床特征及其成矿模式[J]. 地质与勘探,20(12):1-8.
- 王华云,梁福凉,曾鼎权,王华翊,聂筑陵,汤继庆,钟健,廖莉萍. 1996. 贵州铅锌矿地质[M]. 贵阳:贵州科技出版社. 126-158.
- 王奖臻,李朝阳,李泽琴,李葆华,刘文周. 2002. 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,21(2):127-132.
- 王生伟,金灿海,张琦,孙晓明,周清,廖震文,郭阳,蒋小芳,王子正. 2018. 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,38(3):77-87.
- 韦晨. 2018. 黔西北纳雍枝铅锌矿床成矿流体演化及矿床成因研究(硕士论文)[D]. 导师:黄智龙. 贵阳:中国科学院地球化学研究所. 1-95.
- 吴越. 2013. 川滇黔地区 MVT 铅锌矿床大规模成矿作用的年代与机制[D]. 导师:毛景文. 北京:中国地质大学. 1-152.
- 夏新阶,舒见闻. 1995. 李梅锌矿床地质特征及其成因[J]. 大地构造与成矿学,19(3):197-204.
- 肖克炎,邢树文,丁建华,朱裕生,马玉波,丛源,阴江宁,孙莉,陈郑辉,席伟杰. 2016. 全国重要固体矿产重点成矿区带划分与资源潜力特征[J]. 地质学报,90(7):1269-1280.
- 杨红梅,刘重芑,段瑞春,顾晓敏,卢山松,谭娟娟,蔡应雄,张利国,邱啸飞. 2015. 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,39(5):855-865.
- 叶霖,潘自平,李朝阳,刘铁庚,厦斌. 2005. 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,25(2):70-74.
- 于玉帅,郭福生,戴平云,刘阿睢,周云. 2017a. 贵州铜仁塘边铅锌矿床成因的流体包裹体和同位素证据[J]. 矿床地质,36(2):330-344.
- 于玉帅,刘阿睢,戴平云,赵武强,陶明,刘重芑. 2017b. 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,36(5):885-892.
- 张长青,毛景文,吴锁平,李厚民,刘峰,郭保健,高德荣. 2005. 川滇黔地区 MVT 铅锌矿床分布、特征及成因[J]. 矿床地质,24(3):336-348.
- 张长青. 2008. 中国川滇黔交界地区密西西比型(MVT)铅锌矿床成矿模型(博士论文)[D]. 导师:毛景文. 北京:中国地质科学院. 1-166.
- 张长青,余金杰,毛景文,芮宗瑶. 2009. 密西西比型(MVT)铅锌矿床研究进展[J]. 矿床地质,28(2):195-210.
- 张德会. 1992. 矿物包裹体液相成分及其矿床成因意义[J]. 地球科学,11(6):677-688.
- 张位及. 1984. 论滇东北铅锌矿床沉积成因及成矿规律[J]. 地质与勘探,(7):11-16.
- 郑永飞. 2001. 稳定同位素体系理论模式及其矿床地球化学应用[J]. 矿床地质,20(1):57-70.
- 仲文斌,张均,王建川,杨青,张哲坤,程元路. 2017. 滇黔地区铅锌矿床稳定同位素地球化学研究现状综合分析[J]. 矿床地质,36(1):200-218.
- 周家喜,黄智龙,周国富,金中国,李晓彪,丁伟,谷静. 2010. 黔西北赫章天桥铅锌矿床成矿物质来源:S、Pb 同位素和 REE 制约[J]. 地质论评,56(4):513-524.
- 周云,段其发,唐菊兴,曹亮,李芳,黄惠兰,甘金木. 2014. 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,50(3):515-532.
- 周云,段其发,陈毓川,唐菊兴,曹亮,彭三国,甘金木. 2016. 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,90(10):2786-2802.
- 朱路艳,苏文超,沈能平,董文斗,蔡佳丽,张张伟,赵海,谢鹏. 2016. 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,32(11):3431-3440.