

广西矽卡岩型铅锌矿成矿规律

张学娇

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2023年1月5日; 录用日期: 2023年2月13日; 发布日期: 2023年2月21日

摘要

广西是中国重要有色金属基地之一, 位于古中国构造域南端, 铅锌矿产资源十分丰富。广西矽卡岩型铅锌矿床成矿时代以燕山晚期为主, 且分布较广; 区域内铅锌矿床的空间分布主要与构造活动及岩浆岩有关, 其中铅锌矿床的成矿岩体与区域性断裂构造关系更加密切。区内大型矽卡岩型铅锌矿床主要成矿于泥盆系中, 以燕山期为主要成矿期。本文对广西区内主要矽卡岩型铅锌矿床进行了整理分析, 总结了广西铅锌矿空间分布及成矿规律, 通过S、Pb同位素探讨了矿床的主要成矿物质来源于壳源, 且与岩浆作用关系密切对区内下一步找矿具有指导意义。

关键词

广西矽卡岩型铅锌矿床, 成矿时代, 空间分布, 物质来源

Metallogenic Regularity of Skarn Type Lead-Zinc Deposit in Guangxi

Xuejiao Zhang

School of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Jan. 5th, 2023; accepted: Feb. 13th, 2023; published: Feb. 21st, 2023

Abstract

Guangxi is one of the important nonferrous metal bases in China, located at the southern end of the ancient Chinese tectonic domain, with abundant lead and zinc mineral resources. The metallogenic age of the skarn type lead-zinc deposit in Guangxi is mainly in late Yanshanian and widely distributed. The spatial distribution of lead-zinc deposits in the region is mainly related to tectonic activities and magmatic rocks, and the ore-forming rock mass of lead-zinc deposits is more closely related to regional fault structures. The large skarn type Pb-Zn deposit in this area is mainly formed

in Devonian system with Yanshanian as the main metallogenic period. In this paper, the main skarn-type lead-zinc deposits in Guangxi are analyzed, and the spatial distribution and metallogenic regularity of the lead-zinc deposits in Guangxi are summarized. Through S and Pb isotopes, it is discussed that the main ore-forming materials of the deposits come from the crust source, and are closely related to magmatism, which has guiding significance for the next prospecting in the area.

Keywords

Guangxi Skarn Type Lead-Zinc Deposit, Mineralogenetic Epoch, Spatial Distribution, Material Source

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

铅锌是国家发展不可或缺矿产资源，主要用于机械工业、军事工业、冶金工业、轻工业、化学工业、电气工业、冶金工业和医药业等领域。我国铅锌矿资源储备丰富，分布较为广泛，除澳大利亚和美国外，居世界第三位。截至 2015 年底，中国铅锌矿的查明资源储量分别为 7766.9 万 t、14985.2 万 t [1]。中国的铅锌矿床类型较多，资源储量相对集中，从矿床富集程度来看，主要集中分布于三江、西延部分、扬子地台周缘、大兴安岭区带以及南岭秦岭 - 祁连山、冈底斯及其内蒙古狼山 - 渣尔泰等区内；从省份上来看，主要集中于广西、广东、甘肃、湖南、云南、四川、蒙古等省(区) [2]。同时铅锌矿还具有成矿物质成分复杂、富矿少而贫矿多、单一组分少而共生组分多等特征。

广西是铅锌矿的重要产地之一，也是世界上重要的铅锌矿聚集地。我国广西地区铅锌矿床的形成与其地质特征有密切的关系，主要分布于来宾市、梧州市、桂林市和河池市等地区，保有铅锌矿矿产资源的储量矿产地 60 处左右，锌矿产地约有 14 处，铅矿产地约有 3 处。对于广西区内的铅锌多金属矿床前人已经进行了大量的研究，得出矿床是以多成因及围岩为主要分类因素，将铅锌矿床分为与热(卤)水成矿有关的系列组合、岩浆成矿有关的系列组合 2 个矿床类型及相应的 10 个矿床成矿系列[3]；矽卡岩型铅锌矿床为主要矿床之一，并取得了矿床的成矿物质来源、矿化特征以及成矿年龄等研究成果。本文通过对前人的研究资料进行整体的整理分析，对区内矽卡岩型铅锌矿床的成矿规律及成矿特征进行了总结与归纳，进一步明确了我国广西地区各区域矽卡岩型铅锌矿成矿的地质特征及成矿规律，对后续的找矿工作有重要意义。

2. 成矿地质背景

广西地质构造位于华南板块南端，滨西太平洋活化带中段，滨东印度洋活化带中段。华南是我国已探明多金属储量最丰富的地区，金、铅 - 锌储量较大，且矿产的成矿时代以为中生代主[4]。广西莫霍面埋深呈西北深东南浅特征，深度 29~43 km，布格重力异常值为 $-35 \times 10^{-5} \sim -150 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ，反映陆壳自北西向东南逐步拼贴的特点。可识别的地壳运动有 20 多次，其中构造运动以四堡运动、加里东运动、东吴运动、印支运动、燕山运动及喜马拉雅运动为主，分别形成了扬子板块东南缘古陆区、华夏板块北缘云开古陆区、桂中 - 桂东加里东褶皱区、晚二叠世早期隆起剥蚀区、桂西印支褶皱区、钦杭带广西部分、桂东南岩浆岩带及现代广西山地[5]。区内各时代地层发育齐全，从中元界到第四系地层可划分为 12 个系及 2 个岩群，其中，地层自中元古代至第三纪可划分为 132 个岩石地层单位。前寒武系多出露于桂北及

桂东南地区，下古生界分布以桂南、桂东北和桂东地区为主，其中分布最广的为寒武系[6]。

深大断裂多出露于桂北古地块及其周边、云开古陆北西侧，呈北北东向、北东向；多期活动，控制了晚古生代桂中、桂东北、扬子板块东南缘及华夏板块北缘一带的沉积相和沉积盆地演化；区内地壳经历了元古代 - 早古生代地槽、晚古生代 - 中三叠世准地台和晚三叠世 - 第四纪大陆边缘活动带三大发展阶段，形成了不同形态、方向、规模的断裂、褶皱等构造[6]。各阶段的岩浆 - 热液 - 构造作用，形成了各类热液、岩浆等矿床，是广西形成不同成矿系列和矿床类型的根本原因[7]。

3. 广西铅锌矿的资源情况

我国广西铅锌矿资源较丰富，矿产保有资源储量约 60 多处，锌矿产地 14 处，铅矿产地 3 处，主要分布于河池市、梧州市、来宾市和桂林市，不同地质时期形成的铅锌矿床类型和规模各不相同，其中以中生代燕山期最为重要。不同地质时期形成的铅锌矿床类型和规模各不相同，其中成矿期以中生代燕山期为主。广西铅锌矿矿床集中分布于桂北、桂东北和桂东南地区。经统计，广西区内主要探明的铅锌矿床(点)约 10 个左右，包括 1 个大型、1 个中型及小型矿床(表 1)。

Table 1. List of main skarn type lead-zinc deposits in Guangxi

表 1. 广西主要矽卡岩型铅锌矿床一览表

序号	矿床名称	Pb		Zn		矿床规模	勘查程度
		资源量/万 t	品位/%	资源量/万 t	品位/%		
1	大厂铜坑铜锌矿	0	/	77.79	2.75	大型	勘探
2	佛子冲石门 - 刀支口铅锌矿段	21.11	/	25.04	/	中型	勘探
3	佛子冲铅锌矿区六塘矿段	7.46	/	6.73	/	小型	勘探
4	佛子冲河三牛卫坑口铅锌矿	4.41	2.82	4.21	2.69	小型	勘探
5	佛子冲河三勒寨坑口铅锌矿区	4.99	2.27	6.03	2.48	小型	勘探
6	诚谏铅锌矿	3.89	/	3.56	/	小型	勘探
7	龙湾矿段铅锌矿	3.97	/	2.49	/	小型	勘探
8	佛子冲大罗坪铅锌矿区矿段	1.92	/	3.47	/	小型	勘探
9	岑溪市凤凰冲铅锌矿	1.29	2.22	1.17	2.02	小型	勘探

注：“/”未收集到相关资料。

4. 矽卡岩型铅锌矿床的主要成因类型特征

矽卡岩矿床属于接触交代型矿床，是在酸性 - 中酸性侵入岩类与碳酸盐类岩石的接触带上或其附近，由含矿气水热液交代作用而形成的矿床。此类矿床中，发育有由石榴子石(钙铝榴石 - 钙铁榴石)、辉石(透辉石 - 钙铁辉石)及其他钙、镁、铁、铝的硅酸盐矿物组成的矽卡岩，矿体在空间、时间和成因上与矽卡岩有密切的联系

根据分析资料显示，广西地区矽卡岩型铅锌矿矿床成矿作用以多期、多阶段、多成因特点，矿体具有显著的分带性分布特征，主要分布于花岗闪长岩、花岗岩及斑岩矿段。矿床一般都分布于一定的构造单元上，且矿床的形成受一定的地层层位岩浆岩及构造等因素影响，因此在时间和空间上都具有一定的规律性。

广西矽卡岩型铅锌矿床主要分布在桂北、桂东及桂东南一带，主要有佛子冲、牛卫、勒寨、凤凰岭

等中小型铅锌矿床。广西区内此类铅锌矿床主要出露下古生界奥陶系及志留系地层，成矿时代主要为燕山期。矿产产出位置多与侵入体接触带存在一定距离，或在岩株附近，或在岩墙附近，也有少数直接产在接触带上。矿床多产于酸性-中酸性侵入体外接触带之矽卡岩及矽卡岩化大理岩中，多发育在花岗(斑)岩接触带处的透闪石-透辉石矽卡岩中，为中温透闪石-透辉石矽卡岩矿床。矿体常叠加于矽卡岩之上，或是超出矽卡岩的范围而产于围岩之中，热液多次活动的现象明显；常成群出现，一个矿区往往由十几个、几十个乃至百余个组成，其产状形态受接触带产状形态控制，一般呈层状、脉状、似层状、透镜状分布。围岩蚀变类型丰富且强烈，热液蚀变常见于沿岩体接触带成层部位，主要有大理岩化、方解石化、透辉石化、硅化、绿帘石化以及绿泥石化等。矿石类型主要为硫化矿石，矿石中金属矿物以黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿为主；脉石矿物以斜长石和石英为主，钾长石、黑云母、绢云母、角闪石、绿泥石、绿帘石等次之。变质矿物以透闪石-透辉石组合为特征。矿石构造特征多以块状构造、斑杂状构造、浸染状构造和脉状构造等为主。矿床一般具有显著的分带特征，从侵入岩体至大理岩接触带，矽卡岩及矿物颜色、类型都有明显变化[8]-[13]。矿石的结构以自形、半自形结构为主，其次为它形粒状结构，部分为交代溶蚀结构、交代残余结构、固溶体分离结构和压碎结构等。前人研究通过大量研究得知矿床成因与岩浆热液作用有关[14]，矽卡岩中的含水矿物和无水矿物均来自高温、高盐度的岩浆流体，至石英-硫化物阶段有低温、低盐度的大气降水混入。一般认为矽卡岩的形成温度在 300℃~800℃，金属矿物形成温度约在 300~500℃。S-Pb 同位素指示岩浆为此类铅锌矿床的直接成矿物质来源，并为矿体提供含矿热液流体，也有地层水的加入。矿床的成矿过程具有明显的多期性和多阶段性，主要有沉积成岩期和岩浆热液成矿期；划分为四个成矿阶段，分别为：① 干矽卡岩阶段，② 早期硫化物阶段，③ 晚期硫化物阶段，④ 石英-方解石阶段[13][15][16][17][18][19]。

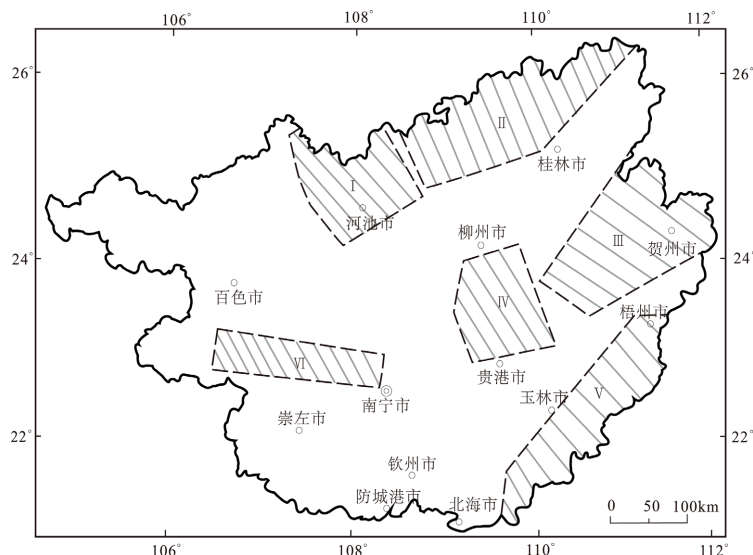
5. 空间时间分布规律

广西有色金属矿产空间分布具有明显的区域性特征，矿床一般集中分布在一定的范围内，形成矿化集中区，即成矿区带。广西铅锌矿床比较集中于桂北及桂中，主要分布在南丹-河池，环江-融安及武宣-象州地区，其次分布在桂东北阳朔，桂东贺县，桂东南岑溪等地。且区内铅锌矿床分布主要与岩浆热液和层控有关，主要分布于以下几个矿带中：Ⅰ-丹池成矿带；Ⅱ-桂北成矿带；Ⅲ-桂中、桂东北成矿带；Ⅳ-大瑶山成矿带；Ⅴ-西大明山成矿带；Ⅵ-云开大山成矿带。矽卡岩铅锌矿床主要分布于云开大山成矿带该成矿带在大地构造位置上与云开隆起区吻合，NE 向陆川-岑溪和博白-梧州两条深大断裂，贯穿本区。本区岩浆活动强烈，并以燕山期中酸性岩浆岩出露最广。以佛子冲和东桃铅锌矿床为代表的铅-锌矿床产于志留系中，矿床中仍保留有明显的热水沉积成矿迹象[5][20][21](图 1)，主要成矿期都为燕山期。

6. 矿床成矿物质来源

6.1. S 同位素

根据矿床中硫同位素的组成，可以分析矿床中硫的来源，进而探讨矿床的成因。通过前人的研究表明，Chaussidon 等(1989)认为幔源岩浆硫为 0‰或接近于 0‰ [22]，Rollinson 等(1993)认为沉积物中还原硫 < 0‰ [23]，Claypool 等(1980)研究表明寒武纪-三叠纪海水硫酸盐 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 15‰~35‰ [24]之间，Ohomoto and Gold-haber(1997)得出花岗岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值主要介于(5‰~15‰) [25]之间、Chaussidon and Lorand (1990)得出陨硫石 $\delta^{34}\text{S}$ 值主要介于-3‰~3‰ [26]之间。本文通过前人的研究结果总结了广西矽卡岩型铅锌矿床 S 同位素组成进行了总结(表 2)，由表可以看出矿床 S 同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿 > $\delta^{34}\text{S}$ 闪锌矿 > $\delta^{34}\text{S}$ 方铅矿，表明矿物之间的 S 同位素基本上达到分馏平衡， $\delta^{34}\text{S}$ ‰ 主要集中于 0.1‰~4.3‰之间，指示矿化剂 S 主要来自于矿区内的中酸性岩浆岩体系。



I——丹池成矿带, II——桂北成矿带, III——桂东北成矿带, IV——大瑶山成矿带, V——云开大山成矿带, VI——西大明山成矿带。

Figure 1. Distribution map of main lead-zinc metallogenic areas in Guangxi (modified by Yang Bin *et al.* [21], 2007)
图 1. 广西铅锌主要成矿区分布图(据杨斌等[21], 2007 修改)

Table 2. S isotopic composition of skarn type lead-zinc deposit in Guangxi
表 2. 广西矽卡岩型铅锌矿床 S 同位素组成

样品号	采样位置	测试对象	$\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$	文献
F065	古益矿区 100 中段 201 号矿脉	闪锌矿	2.9	
G05-2	古益矿区 100 中段 206 号矿体	闪锌矿	3	
F057	古益矿区 100 中段 102 号矿脉	黄铁矿	4.3	
F026-1	古益矿区 180 中段 38 号矿脉	闪锌矿	2.3	付伟等(2013)
F020	古益矿区 180 中段 40 号矿脉	闪锌矿	3	
H096	勒寨矿段 150 中段 4 号矿体	方铅矿	2.9	
F042	古益矿区 138 中段 201 号矿脉	闪锌矿	3.6	
SM-1	石门块状矿石	方铅矿	2.4	
SM-2	石门块状矿石	方铅矿	3.6	
SM-5	石门块状矿石	方铅矿	3	
SM-6	石门块状矿石	方铅矿	3.7	
SM-8	石门块状矿石	方铅矿	2.4	徐海(1996)
SM-9	石门浸染矿石	方铅矿	3.2	
44583	刀支浸染矿石	黄铁矿	2.9	
T8	佛子冲块状矿石	闪锌矿	3.8	
T44	佛子冲块状矿石	黄铜矿	3.4	

Continued

T98	佛子冲浸染矿石	方铅矿	0.8	
T1121	水滴脉状矿石	方铅矿	2.2	
T1122	水滴脉状矿石	闪锌矿	3.8	徐海(1996)
T121	水滴块状矿石	闪锌矿	0.2	
T143	牛卫块状矿石	闪锌矿	3.4	
T146	牛卫块状矿石	黄铁矿	2.5	
L-3	拉么 530 中段 0 矿体	矿体	0.1	
L-7	拉么 500 中段 3 矿体	矿体	0.5	
L-11	拉么 530 中段 5 矿体	矿体	1.6	陈毓川等(1993)
L-12	拉么 30 中段 1 矿体	矿体	0.4	
L-20	拉么 500 中段	矿体	2.5	

6.2. Pb 同位素

本文收集了前人关于广西矽卡岩型铅锌矿床铅的铅同位素的数据, Deo 和 Zartman [27] (1981)在研究了世界上大量铅同位素数据的基础上, 根据同位素比值投影点的分布特征与不同地质单元平均演化曲线的关系判断成矿物质来源的方法。根据前人研究数据进行投图, 在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上(图 2), 矽卡岩型铅锌矿床样品的投点主要落在上地壳, 部分落在上地壳与造山带增长曲线之间。在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上(图 2), 样品投影点大部分位于下地壳与造山带增长曲线之间, 样品投点有线性关系, 由此推测广西矽卡岩型铅锌矿床的铅主要为壳源铅, 但也有幔源铅的加入。

在铅同位素 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 成因分类图中[28], 矿石铅大部分投影点主要落入上地壳铅的范围内(图 3), 由此可综合推测广西铅锌矿床的成矿物质主要来源于壳源, 且与岩浆作用有密切的关系。

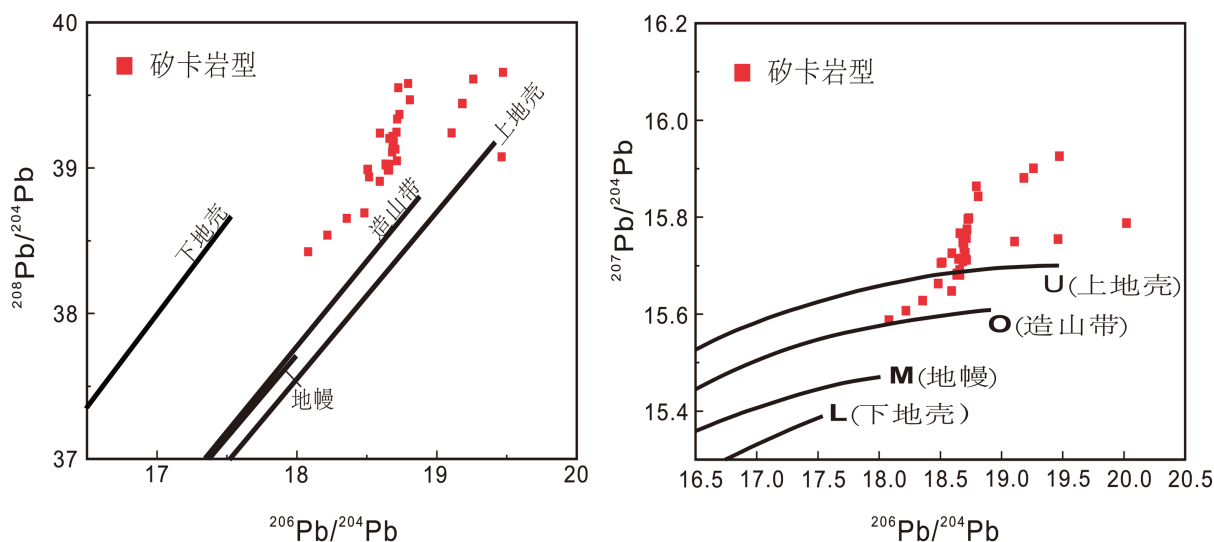
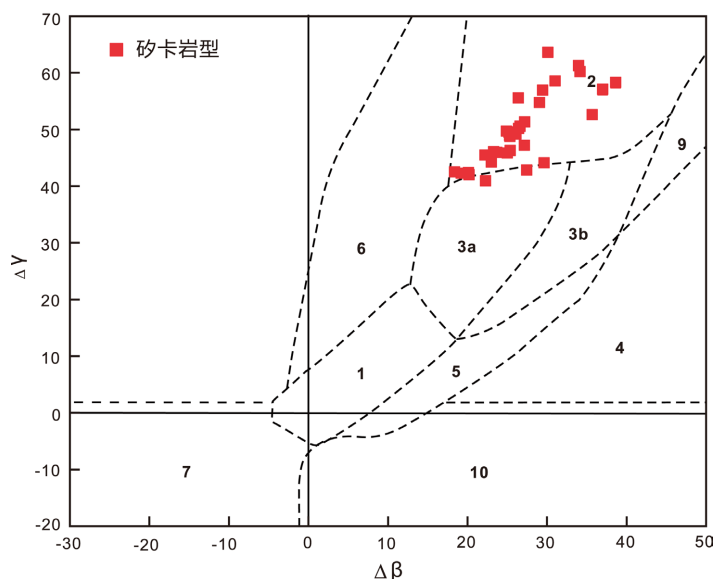


Figure 2. Diagram of Pb isotopic composition of skarn type lead-zinc deposit in Guangxi [27]

图 2. 广西矽卡岩型铅锌矿床铅同位素组成图解[27]



1——地幔铅源；2——上地壳铅源；3——上地壳与地幔混合的俯冲带铅(3a.岩浆作用；3b.沉积作用)；4——化学沉积铅；5——海底热水作用铅；6——中深变质作用铅；7——深变质下地壳铅；8——造山带铅；9——古老页岩上地壳铅；10——退变质铅。

Figure 3. Genetic classification diagram of Pb isotope $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ in skarn type lead-zinc deposit, Guangxi Province [28]

图 3. 广西矽卡岩型铅锌矿床铅同位素 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因分类图解[28]

7. 结论

1) 广西铅锌矿资源较丰富，矽卡岩型铅锌矿床与区域性构造和岩浆岩关系密切，具有极大的找矿潜力。

2) 矽卡岩型铅锌矿床主要分布在桂东南地区以燕山晚期为主要成矿时期，大型矿床主要形成于燕山期，显示广西区内燕山期成矿作用最为强烈。

3) S、Pb 同位素指示了广西铅锌矿床的主要物质主要来源于壳源且与岩浆作用关系密切。

参考文献

- [1] 唐攀科, 王春艳, 梅友松, 等. 中国铅锌矿产资源成矿特征与资源潜力评价[J]. 地学前缘, 2018, 25(3): 31-49.
- [2] 田尤, 刘廷, 曾祥婷, 等. 我国锌资源产业形势及对策建议[J]. 现代矿业, 2015, 31(4): 5-9.
- [3] 林孝先, 侯中健. 试论中国铅锌矿矿床类型划分[J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34(1): 8-14.
- [4] 楚克磊. 广东圆珠顶斑岩型铜钼矿床成岩成矿作用研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质科学院, 2013.
- [5] 林建辉, 罗允义, 树皋, 等. 广西区域成矿规律综述及成矿系列划分[J]. 矿床地质, 2015, 34(6): 1270-1294.
- [6] 胡鹏飞, 蔡明海, 肖俊杰, 等. 广西钨钼矿成矿规律[J]. 矿产勘查, 2021, 12(8): 1705-1715.
- [7] 闫蒲北. 广西地区铅锌矿地质特征及找矿前景分析[J]. 世界有色金属, 2018(15): 82-83.
- [8] 褚培强. 广西铅锌矿矿床类型及找矿远景[J]. 广西地质, 1992(1): 1-11.
- [9] 王春惠, 张振贤. 广西矽卡岩矿床[J]. 南方国土资源, 2005(2): 38-39.
- [10] 梁婷, 王登红, 蔡明海, 陈振宇, 郭春丽, 黄惠民. 广西大厂锡多金属矿床 S、Pb 同位素组成对成矿物质来源的示踪[J]. 地质学报, 2008(7): 967-977.
- [11] 杨贺. 大兴安岭得尔布干成矿带北段矽卡岩-热液脉型铅锌矿床成矿作用研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [12] 许凌霄, 许虹, 徐净, 等. 矽卡岩矿床研究现状与进展[J]. 中国矿业, 2017, 26(5): 154-161.

- [13] 雷蕴芬, 张德全. 矽卡岩型闪锌矿的标型特征和形成条件[J]. 华东地质学院学报, 1991(2): 127-133.
- [14] 付伟, 柴明春, 杨启军, 韦龙明, 黄小荣, 冯经平. 广西佛子冲大型铅锌多金属矿床的成因: 流体包裹体和 H-O-S-Pb 同位素地球化学约束[J]. 岩石学报, 2013, 29(12): 4136-4150.
- [15] 熊险峰. 广西佛子冲铅锌矿床地球化学特征[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2013.
- [16] 谢小明, 何幸儒, 杨栋. 广西佛子冲矿田龙湾铅锌矿床地质特征及找矿标志[J]. 价值工程, 2014, 33(21): 322-323.
- [17] Xu, J., *et al.* (2016) Alteration and Mineralization at the Zhibula Cu Skarn Deposit, Gangdese Belt, Tibet. *Ore Geology Reviews*, **75**, 304-326. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.11.028>
- [18] 罗卫. 广西大厂锡多金属矿田分散元素矿床地球化学研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [19] 梁婷, 王登红, 蔡明海, 陈振宇, 郭春丽, 黄惠民. 广西大厂锡多金属矿床 S、Pb 同位素组成对成矿物质来源的示踪[J]. 地质学报, 2008(7): 967-977.
- [20] 肖来庚, 高建会. 广西有色金属成矿系列与成矿区带分析[J]. 有色金属文摘, 2015, 30(5): 28-29.
- [21] 杨斌, 彭省临, 李水如, 张起钻. 广西有色金属成矿系列与成矿区带[J]. 矿产与地质, 2007(1): 8-11.
- [22] Chaussidon, M., Albarède, F. and Sheppard, S.M. (1989) Sulphur Isotope Variations in the Mantle from Ion Microprobe Analyses of Micro-Sulphide Inclusions. *Earth and Planetary Science Letters*, **92**, 144-156. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(89\)90042-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(89)90042-3)
- [23] Massey, N. (1994) Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **21**, 439-441. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(95\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0098-3004(95)90001-2)
- [24] Claypool, G.E., Holser, W.T., Kaplan, I.R., *et al.* (1980) The Age Curves of Sulfur and Oxygen Isotopes in Marine Sulfate and Their Mutual Interpretation. *Chemical Geology*, **28**, 199-260. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(80\)90047-9](https://doi.org/10.1016/0009-2541(80)90047-9)
- [25] Ohmoto, H. (1997) Sulfur and Carbon Isotopes. In: Barnes, H.L., Ed., *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, John Wiley and Sons, New York, 517-612.
- [26] Chaussidon, M. and Lorand, J. (1990) Sulphur Isotope Composition of Orogenic Spinel Lherzolite Massifs from Ariège (North-Eastern Pyrenees, France): An Ion Microprobe Study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **54**, 2835-2846. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90018-G](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90018-G)
- [27] Zartman, R. and Doe, B. (1981) Plumbotectonics—The Model. *Tectonophysics*, **75**, 135-162. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90213-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90213-4)
- [28] 朱炳泉. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社, 1998.