

广西盘龙铅锌矿床地质地球化学特征及找矿意义

林 峥

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年3月30日; 录用日期: 2026年5月19日; 发布日期: 2026年5月28日

摘 要

盘龙铅锌矿位于广西武宣县境内, 是钦杭成矿带南段的重要铅锌矿床。本文在系统收集前人研究资料的基础上, 综述了盘龙铅锌矿床的地球化学特征, 包括元素地球化学、稀土元素、硫同位素、流体包裹体及有机质地球化学等方面, 分析了这些地球化学特征对成矿作用的指示意义, 探讨了该矿床的找矿标志和找矿方向。研究表明, 盘龙铅锌矿床具有典型的喷流沉积型矿床地球化学特征, 稀土元素呈轻稀土富集型, 硫同位素组成接近同期海水硫酸盐, 流体包裹体显示中低温、中低盐度特征, 有机质参与了成矿作用; 矿床后期经历了一定程度的热液改造; 地球化学异常组合可作为该区铅锌矿找矿的重要标志, 矿区深部及外围地区具有较好的找矿潜力。

关键词

盘龙铅锌矿, 化学特征, 微量元素, 硫同位素, 找矿标志

Geological and Geochemical Characteristics and Prospecting Significance of Panlong Lead-Zinc Deposit in Guangxi

Zheng Lin

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

Received: March 30, 2026; accepted: May 19, 2026; published: May 28, 2026

Abstract

The Panlong lead-zinc deposit is located in Wuxuan County, Guangxi Province, and is one of the important lead-zinc deposits in the southern section of the Qinzhou-Hangzhou metallogenic belt.

Based on systematic collection of previous research data, this paper reviews the geochemical characteristics of the Panlong lead-zinc deposit, including element geochemistry, rare earth elements, sulfur isotopes, fluid inclusions and organic matter geochemistry, analyzes the indicative significance of these geochemical characteristics for mineralization, and discusses the prospecting indicators and directions of the deposit. The results show that the Panlong lead-zinc deposit has typical geochemical characteristics of exhalative sedimentary deposits, with light rare earth enrichment, sulfur isotope composition close to contemporaneous seawater sulfate, fluid inclusions showing medium-low temperature and medium-low salinity characteristics, and organic matter participating in mineralization. The deposit experienced hydrothermal transformation in the later stage. The geochemical anomaly combination can be used as an important indicator for lead-zinc prospecting in this area, and the deep and peripheral areas of the mining area have good prospecting potential.

Keywords

Panlong Lead-Zinc Deposit, Geochemical Characteristics, Trace Elements, Sulfur Isotopes, Exploration Criteria

Copyright © 2026 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

钦杭成矿带是我国华南地区重要的多金属成矿带之一,呈北东向展布,横跨广西、广东、湖南、江西等省级行政区,带内铅锌矿产资源丰富,是近年来地质找矿的重点区域[1]。该成矿带南段位于广西中部地区,发育有盘龙、朋村、古立等多个铅锌矿床(点),成矿地质条件优越,找矿潜力较大[2]。

盘龙铅锌矿位于广西武宣县境内,地处钦杭成矿带南段的大瑶山成矿带中,是该区较为典型的铅锌矿床之一。自发现以来,众多学者对盘龙铅锌矿开展了大量研究工作,在矿床地质特征、地球化学特征、成矿时代、矿床成因等方面取得了丰富的认识[3]-[6]。梁国宝等[7]对盘龙铅锌矿的地质特征和找矿方向进行了研究;薛静等[8][9]通过稀土元素和硫同位素分析,探讨了矿床的喷流沉积成矿作用;许晓杰[10]系统研究了矿床的地质地球化学特征;牛佳等[11]对流体包裹体特征进行了详细分析;安鹏鑫等[12][13]研究了有机质在成矿过程中的作用;汪劲草等[14]提出了层控同生角砾岩控矿的新认识;罗林菊[15]结合野外调查和矿物 XRD 衍射分析,系统研究了矿床的地质特征和控矿因素;张学琳等[16]对矿区硫化物进行了电子探针分析,从矿物化学角度探讨了矿床成因。这些研究为认识盘龙铅锌矿床的成矿作用和指导找矿工作提供了重要依据。

地球化学特征是研究矿床成因、判别成矿类型、指导找矿勘查的重要手段。值得注意的是,目前关于盘龙铅锌矿的成因类型尚存在较大分歧,主要有喷流沉积型(SEDEX)、沉积改造型和密西西比河谷型(MVT)等不同认识。本文在前人研究基础上,系统梳理盘龙铅锌矿床的地球化学特征,着重对比分析不同成因模式下各类地球化学证据的适用性和局限性,探讨地球化学找矿标志和找矿方向,以为该区铅锌矿的成因研究和进一步勘查工作提供参考。

2. 矿床地质概况

2.1. 区域地质背景

盘龙铅锌矿位于扬子板块与华夏板块的结合部位,地处钦杭成矿带南段。区域上出露地层主要有泥

盆系、石炭系、二叠系等，其中泥盆系地层发育较为完整，是区域内重要的赋矿层位[17]。泥盆系地层岩性以碳酸盐岩为主，包括灰岩、白云岩、泥质灰岩等，沉积厚度大，分布稳定。

区域构造以北东向和北西向断裂为主，褶皱构造发育，形成了一系列背斜和向斜构造。北东向构造与区域构造线方向一致，控制了地层的展布和矿床的分布；北西向构造多为张性或张扭性断裂，切割北东向构造，对成矿流体的运移和矿体的形成具有重要控制作用[7]。

区域岩浆活动相对较弱，主要为燕山期花岗岩类侵入体，分布于矿区外围。这些岩浆岩对成矿作用的影响尚存在争议，部分学者认为其可能提供了部分成矿热源或活化了地层中的成矿物质[10]。

2.2. 矿区地层

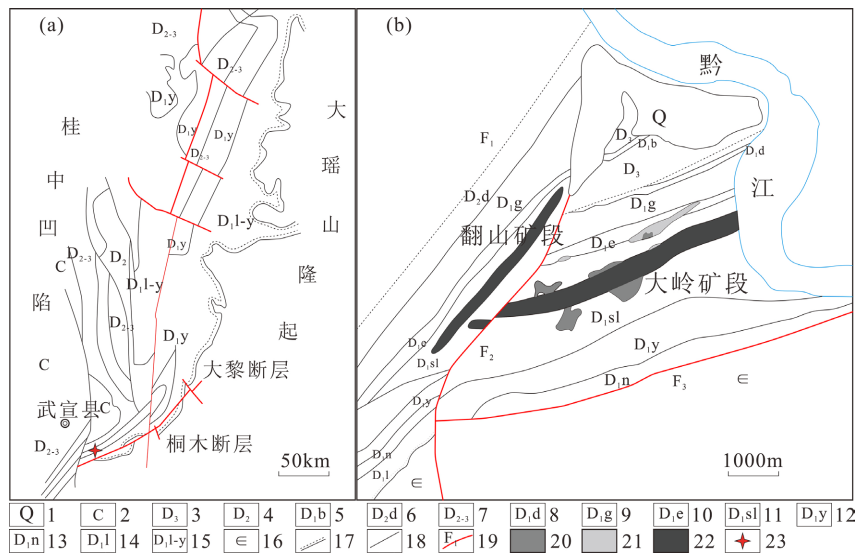
矿区出露地层主要为泥盆系中统榴江组(D₂l)，该组地层是盘龙铅锌矿的主要赋矿层位。榴江组岩性以白云岩、灰岩为主，夹有泥质白云岩、泥岩等，厚度一般为 200~400 m [18]。根据岩性组合特征，可将榴江组自下而上分为三段：

下段(D₂l¹)：以灰色中厚层状白云岩为主，夹薄层泥质白云岩，局部见灰岩透镜体，厚度约 80~120 m。该段白云岩结晶程度较高，孔隙度相对较低。

中段(D₂l²)：以灰白色厚层状白云岩为主，局部发育角砾状白云岩，是主要的赋矿层段，厚度约 100~180 m。该段白云岩发育程度高，白云石化作用强烈，孔隙度较大，为成矿流体的运移和矿质沉淀提供了有利空间[18]。角砾状白云岩的发育可能与同生断裂活动或海底喷流作用有关[14]。

上段(D₂l³)：以灰色薄-中层状泥质白云岩、白云质灰岩为主，夹泥岩，厚度约 60~100 m。该段泥质含量较高，渗透性较差，对矿体起到一定的封闭作用。

矿体主要赋存于榴江组中段的白云岩和角砾状白云岩中，与围岩产状基本一致，呈层状、似层状产出，显示出明显的层控特征[7] (图 1)。



1-第四系；2-石炭系；3-上泥盆统；4-中泥盆统；5-中泥盆统巴漆组；6-中泥盆统东岗岭组；7-泥盆系中统和上统；8-下泥盆统大乐组；9-下泥盆统官桥组；10-下泥盆统二塘组；11-下泥盆统上伦组；12-下泥盆统郁江组；13-下泥盆统那高岭组；14-下泥盆统莲花山组；15-下泥盆统莲花-郁江阶；16-寒武系；17-不整合界线；18-地质界线；19-断层及编号；20-重晶石；21-铁锰堆积层；22-铅锌矿体；23-矿区位置。

Figure 1. Regional geological map (a) and simplified geological map of the mining area (b) of the Panlong Pb-Zn deposit (modified according to [11])

图 1. 盘龙铅锌矿区域地质图(a)和矿区地质简图(b) (据[11]修改)

2.3. 矿区构造

矿区构造以褶皱和断裂为主，对矿体的形成和分布具有明显的控制作用。

褶皱构造：矿区发育有盘龙背斜，轴向北东，两翼地层倾角 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ ，背斜核部出露榴江组地层。矿体主要分布于背斜核部及两翼，呈层状、似层状沿地层产出[7]。背斜构造不仅控制了地层的展布，也为成矿流体的汇聚提供了有利的构造空间。

断裂构造：矿区断裂构造较为发育，主要有北东向、北西向和近东西向三组。北东向断裂与区域构造方向一致，规模较大，对矿体具有一定的破坏和改造作用；北西向断裂多为张性或张扭性断裂，是成矿流体运移的重要通道，与成矿关系最为密切；近东西向断裂规模较小，对矿体的影响相对较弱[18]。部分断裂带内见有铅锌矿化，表明断裂构造在成矿过程中起到了导矿和容矿的作用。

2.4. 矿体及矿石特征

盘龙铅锌矿目前已发现多个矿体，主要矿体呈层状、似层状产出，严格受地层层位控制。矿体总体走向北东，倾向南东，倾角 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ，与围岩产状基本一致。罗林菊[15]指出，矿体主体部位发育在层间破碎带中，矿体规模最大真厚度达 24.49 m，最小厚度仅 0.9 m，平均厚度为 10.13 m。目前盘龙铅锌矿有大岭矿段和翻山矿段两个已知矿段，其中大岭矿段为主要采矿段，地表矿化带长约 3600 m，宽 10~70 m，2 号矿体是矿区的主要矿体，产矿资源总量占矿区的 95% 以上[15]。

根据矿石结构构造和矿物组合特征，矿石类型主要有块状矿石、浸染状矿石和角砾状矿石三种。块状矿石呈致密块状，金属矿物含量高，多见于矿体中心部位；浸染状矿石是矿区最主要的矿石类型，金属矿物呈浸染状分布于白云岩中；角砾状矿石呈角砾状构造，角砾由白云岩组成，胶结物为硫化物，主要分布于角砾岩发育地段[17] (图 2)。

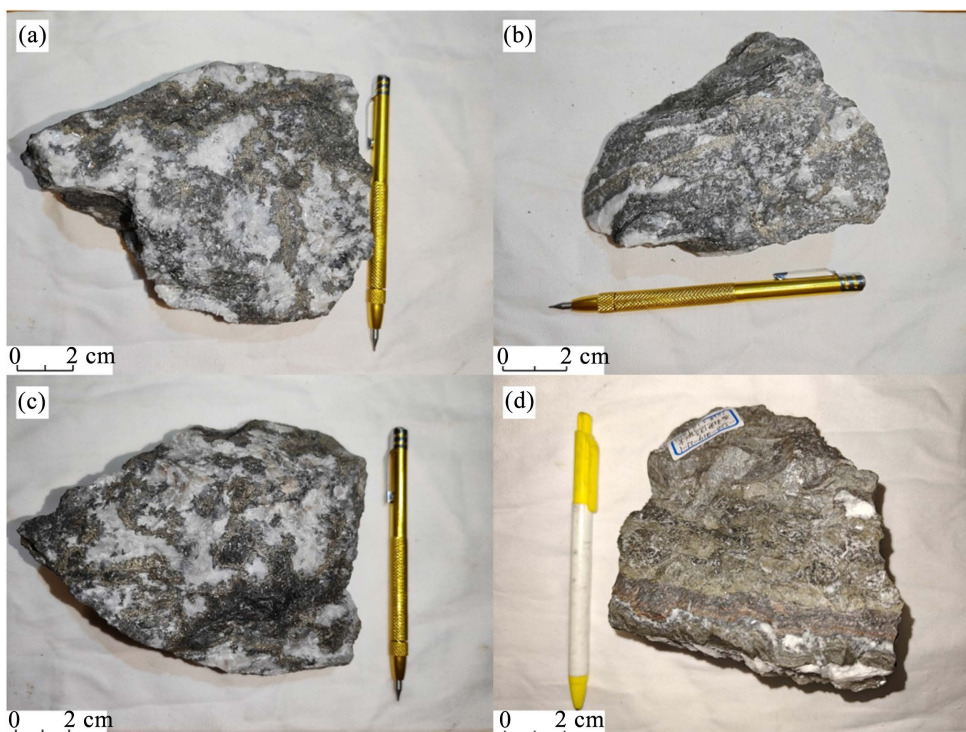


Figure 2. Characteristics of the Panlong Pb-Zn deposit (Photographed by the author of this article)
图 2. 盘龙铅锌矿矿石特征(本文作者摄)

矿石矿物组成较为简单,金属矿物主要有闪锌矿、方铅矿、黄铁矿,次为黄铜矿、磁黄铁矿等;脉石矿物以白云石、方解石为主,次有石英、重晶石等。闪锌矿和方铅矿是主要的工业矿物,多呈他形粒状、半自形粒状集合体产出[8]。值得注意的是,本区铅锌矿与重晶石紧密嵌生[15],矿石中见方铅矿交代溶蚀黄铁矿、闪锌矿交代晚期黄铁矿等多期次穿插关系[16]。矿石中 Pb 平均品位为 1.51%, Zn 平均品位为 5.13% [16],伴生 Ag 含量为 50~200 g/t,具有一定的综合利用价值[7]。围岩蚀变主要有白云石化、硅化、黄铁矿化和重晶石化等,局部可见方解石化。白云石化是矿区最为普遍的围岩蚀变类型,与成矿关系密切,蚀变强度与矿化强度呈正相关[10]。张学琳等[16]观察到白云石化主要分布于铅锌矿体内部及两侧,蚀变作用产生的硅化使得矿体围岩致密坚硬,与远围岩有明显区别。罗林菊[15]指出,铅锌矿化的富集程度与白云岩厚度呈线性相关。

3. 地球化学特征

3.1. 元素地球化学特征

盘龙铅锌矿矿石中主要有用元素为 Pb、Zn,伴生有 Ag、Cd 等元素。薛静等[8]对矿石进行了系统的元素地球化学分析,结果显示矿石中 Pb + Zn 平均品位可达 8% 以上,Ag 含量一般为 50~200 g/t, Cd 含量与 Zn 含量呈明显正相关关系。

矿石微量元素组合特征明显,富集 Pb、Zn、Ag、Cd、Ba 等元素,亏损 Cu、Ni、Co 等元素。付松武[4]的研究表明,矿石中 Ba 含量较高,一般为 $500\sim 2000 \times 10^{-6}$,与矿区重晶石的发育有关,指示成矿流体可能具有较高的硫酸盐含量。元素相关性分析表明,Pb 与 Ag 呈明显正相关($r = 0.85$),Zn 与 Cd 呈正相关($r = 0.78$),反映了这些元素在成矿过程中具有相似的地球化学行为[4]。

围岩蚀变岩石的元素地球化学特征也具有一定的指示意义。许晓杰[10]的研究显示,白云石化蚀变岩石中 Pb、Zn 等成矿元素含量明显高于未蚀变岩石,表明白云石化作用对成矿元素的富集具有重要作用。蚀变岩石中 Fe、Mn 含量也有所升高,可能与热液活动有关。

张学琳等[16]对矿区不同中段的闪锌矿、方铅矿和黄铁矿进行了电子探针分析,获得了硫化物矿物的化学组成数据。结果显示,闪锌矿中 Zn 平均含量为 64.40%, S 平均含量为 32.13%,相对于理论值(Zn 67.10%, S 32.90%)呈锌亏损、硫亏损特征;方铅矿中 Pb 平均含量为 85.95%, S 平均含量为 12.59%,相对于理论值(Pb 86.60%, S 13.40%)表现出 Pb、S 亏损的特征;黄铁矿中 Fe 平均含量为 46.52%, S 平均含量为 51.63%,表现出硫亏损的特征。张学琳等[16]认为,这些矿物在流体迁移和沉淀结晶过程中可能被其他化学性质相近的物质替代,发生了一定程度的类质同象。

3.2. 稀土元素特征

稀土元素(REE)是示踪成矿物质来源和成矿流体性质的重要地球化学指标。薛静等[8]对盘龙铅锌矿矿石和围岩进行了系统的稀土元素分析,采集了不同类型的矿石样品和围岩样品,利用 ICP-MS 方法测定了稀土元素含量。

研究结果显示,矿石稀土元素总量(ΣREE)为 $20\sim 80 \times 10^{-6}$,平均约 45×10^{-6} ,低于围岩白云石的稀土元素总量($\Sigma\text{REE} = 40\sim 120 \times 10^{-6}$,平均约 75×10^{-6})。薛静等[8]认为,这种差异表明成矿过程中稀土元素发生了一定程度的淋滤迁移。

稀土元素配分模式方面,薛静等[8]的研究表明,矿石稀土元素配分曲线呈轻稀土富集型, $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 值为 3~8,平均约 5.2,轻重稀土分馏明显。 δEu 值为 0.8~1.2,平均约 0.95,总体呈弱负异常至无异常。这种稀土元素配分模式与海底热水沉积物的稀土元素特征相似。

值得注意的是,矿石与围岩的稀土元素配分曲线形态基本一致,两者曲线近乎平行。薛静等[8]据此

认为,成矿物质可能主要来源于赋矿地层,成矿流体在运移过程中萃取了围岩中的成矿元素。这一特征为矿床的喷流沉积成因提供了地球化学证据。

将盘龙铅锌矿的稀土元素特征与国内外同类矿床进行对比,可以发现:典型 SEDEX 矿床通常表现出明显的负 Eu 异常和极低的 ΣREE ,而典型 MVT 矿床的稀土元素总量通常更低,且 Eu 异常不明显。盘龙矿床 δEu 值为 0.8~1.2,介于两者之间,这种过渡性特征可能反映了多阶段成矿流体的叠加效应。

3.3. 硫同位素特征

硫同位素是研究成矿物质来源和成矿环境的重要指标。多位学者对盘龙铅锌矿硫化物进行了硫同位素测试分析。

李衡等[19]采集了矿区不同矿体的硫化物样品,包括黄铁矿、闪锌矿和方铅矿,利用 MAT-253 气体同位素质谱仪测定了硫同位素组成。测试结果显示,矿石硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较窄,主要集中在+8‰至+18‰之间,平均值约为+12‰。其中,黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为+10‰至+16‰,闪锌矿为+9‰至+15‰,方铅矿为+8‰至+14‰。

薛静等[9]也对盘龙铅锌矿进行了硫同位素研究,获得了相似的结果。他们的研究表明,硫同位素组成较为均一, $\delta^{34}\text{S}$ 值集中分布,表明成矿流体中的硫具有相对稳定的来源。

关于硫的来源,李衡等[19]指出, $\delta^{34}\text{S}$ 值总体偏正,接近于泥盆纪海水硫酸盐的硫同位素组成(+15‰至+25‰),表明成矿流体中的硫可能主要来源于海水硫酸盐的还原作用。部分样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值略低于同期海水硫酸盐,薛静等[9]认为这可能与深部岩浆硫或地层中有机质参与硫的还原作用有关。

从硫同位素角度对比不同矿床类型:SEDEX 矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较大,且多为正值,反映海水硫酸盐还原的特征;MVT 矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值也多为正值,但变化范围相对较窄,且更接近围岩中蒸发岩的硫同位素组成。盘龙矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值(+8‰至+18‰)较为集中,变化范围窄,这一特征与 MVT 矿床更为接近;但其数值接近同期海水硫酸盐,又与 SEDEX 矿床的硫源特征相似。因此,仅凭硫同位素特征难以明确区分盘龙矿床的成因类型。

硫同位素特征指示盘龙铅锌矿可能形成于海底或近海底的还原环境,与喷流沉积型矿床的成因特征相吻合[9][19]。

3.4. 流体包裹体特征

流体包裹体研究是了解成矿流体性质和成矿物理化学条件的重要手段。牛佳等[11]对盘龙铅锌矿石英、方解石中的流体包裹体进行了系统研究,采用冷热台技术测定了包裹体的均一温度和冰点温度。

牛佳等[11]的研究表明,流体包裹体类型主要有气液两相包裹体和纯液相包裹体,以气液两相包裹体为主。包裹体形态多为椭圆形、不规则形,大小一般为 5~15 μm 。气液比变化范围为 5%~20%,多数集中在 10%左右。

显微测温结果显示,流体包裹体均一温度为 120℃~260℃,主要集中在 150℃~220℃,平均约 180℃,属于中低温成矿流体。冰点温度为-2.5℃至-8.5℃,根据冰点温度计算得到的盐度(NaCl)为 4%~12%,平均约 8%,为中低盐度流体[11]。

牛佳等[11]进一步计算了成矿流体的密度和成矿压力,结果显示成矿流体密度为 0.85~1.05 g/cm^3 ,成矿压力估算为 20~60 MPa,对应成矿深度约 200~600 m,表明矿床形成于浅成环境。牛佳等[11]认为,流体包裹体特征表明盘龙铅锌矿成矿流体具有中低温、中低盐度的特点,与典型的喷流沉积型矿床成矿流体性质相似,但后期可能经历了一定程度的热液改造作用。张学琳等[16]通过闪锌矿中的 Fe 含量和 Zn/Fe 比值进一步限定了成矿温度,其闪锌矿 Zn/Fe 比值为 166.13,Fe 平均含量为 1.31%,反映闪锌矿产出于

中-浅成低温环境(低于 150°C), 与流体包裹体研究结果基本一致。

3.5. 有机质地球化学特征

有机质在某些铅锌矿床的成矿过程中可能起到重要作用。安鹏鑫等[12][13]对盘龙铅锌矿床赋矿地层中的有机质进行了系统研究, 采用有机碳分析、镜质体反射率测定、有机质显微组分鉴定等方法, 探讨了有机质与成矿作用的关系。

安鹏鑫[12]的研究表明, 盘龙铅锌矿赋矿地层榴江组白云岩中普遍含有有机质, 有机碳含量为 0.1%~0.8%, 平均约 0.35%。有机质类型以腐泥型为主, 镜质体反射率(R_o)为 1.2%~2.1%, 表明有机质已达到成熟-高成熟阶段。

显微镜下观察显示, 有机质多呈分散状、团块状分布于白云岩中, 部分有机质与硫化物矿物共生, 甚至被硫化物包裹。安鹏鑫等[13]认为, 这种共生关系表明有机质可能参与了成矿作用。

关于有机质的成矿作用, 安鹏鑫等[12][13]提出, 有机质在成矿过程中可能发挥了以下作用: 1) 有机质的还原作用促进了硫酸盐的还原, 为硫化物的沉淀提供了还原硫; 2) 有机质可能作为络合剂, 参与了成矿元素的迁移和富集; 3) 有机质的存在可能改变了局部的氧化还原环境, 有利于金属硫化物的沉淀。

这些研究表明, 有机质在盘龙铅锌矿的成矿过程中可能起到了一定的作用, 为认识矿床成因提供了新的视角[12][13]。

4. 地球化学特征的成矿指示

4.1. 喷流沉积的地球化学证据

前人研究从多个地球化学角度探讨了盘龙铅锌矿的喷流沉积成因特征。

从矿体产状和矿石结构构造来看, 矿体呈层状、似层状产出, 严格受地层层位控制, 与围岩产状一致, 部分矿石具有纹层状、条带状构造, 这些特征指示矿床可能具有同生沉积成因[7][14]。

稀土元素地球化学特征方面, 薛静等[8]指出, 矿石稀土元素配分模式呈轻稀土富集型, δEu 呈弱负异常至无异常, 与海底热水沉积物的稀土元素特征相似。矿石与围岩的稀土元素配分曲线形态基本一致, 表明成矿物质可能主要来源于赋矿地层。

硫同位素特征也为喷流沉积成因提供了证据。李衡等[19]和薛静等[9]的研究均表明, 矿石硫化物的 $\delta^{34}S$ 值接近同期海水硫酸盐的硫同位素组成, 指示成矿流体与海水有关, 硫可能主要来源于海水硫酸盐的还原作用。

此外, 汪劲草等[14]在矿区发现了同生角砾岩, 认为这可能与海底喷流活动有关, 为矿床的喷流沉积成因提供了地质证据。

4.2. 热液改造作用的地球化学表现

虽然盘龙铅锌矿具有喷流沉积成因的特征, 但多位学者的研究也显示矿床后期经历了一定程度的热液改造作用。

流体包裹体特征方面, 牛佳等[11]观察到流体包裹体均一温度变化范围较大(120°C~260°C), 表明可能存在多期成矿流体活动。部分包裹体的均一温度较高, 可能指示后期热液活动的存在。

矿石结构构造方面, 部分矿石呈脉状、网脉状产出, 穿插于层状矿体中, 付松武[4]认为这可能是后期热液改造的结果。矿石中见有多期次的硫化物穿插关系, 也指示了多期成矿作用的存在。

断裂构造对矿体的控制和改造作用也表明热液活动的参与。罗永恩[17]指出, 北西向断裂不仅是成矿

流体的运移通道,也对早期形成的矿体进行了改造,部分断裂带内的矿化可能与热液活动有关。罗林菊[15]通过 XRD 粉晶衍射实验发现,围岩中含有少量软锰矿和羟钒石等氧化矿物,认为盘龙矿区除了原生沉积作用之外,还存在后期氧化作用。张学琳等[16]对黄铁矿的电子探针分析也显示,黄铁矿 S/Fe 值为 1.93,表现出富铁贫硫的特征,指示黄铁矿成因具有多样性,包括热液成因和沉积成因。

白云石化蚀变的强烈发育也可能与热液活动有关。许浩天等[20]研究了盘龙矿区白云岩的成因机制,认为部分白云岩可能是热液交代作用的产物,这种白云石化作用为后期成矿流体的运移提供了有利条件。

综合来看,盘龙铅锌矿可能经历了喷流沉积和热液改造两个主要成矿阶段[4][10]。

4.3. 成矿模式初步认识

基于前人的地球化学研究成果,可以对盘龙铅锌矿的成矿过程进行初步认识。

薛静等[8][9]认为,泥盆纪时期,研究区处于浅海-半深海沉积环境,榴江组碳酸盐岩地层沉积。在沉积过程中,深部热液沿同生断裂上涌至海底或近海底,与海水混合发生物理化学反应,导致成矿元素沉淀,形成层状、似层状矿体。这一阶段可能是矿床形成的主要时期。

许晓杰[10]指出,沉积物固结成岩过程中,早期形成的矿体可能发生了一定程度的重结晶和再分配。白云石化作用在此阶段较为强烈,为后期成矿流体的运移提供了有利的孔隙空间。

罗永恩[21]认为,燕山期构造-岩浆活动可能使区域热流值升高,激活了地层中的成矿物质,形成热液流体。热液沿断裂构造运移,对早期形成的矿体进行叠加改造,形成脉状、网脉状矿体,使矿石品位得到进一步富集。

需要指出的是,关于盘龙铅锌矿的成矿模式和矿床类型,目前存在两种主要观点,即喷流沉积型(SEDEX)和密西西比河谷型(MVT),两者的争论焦点在于成矿作用是以同生沉积为主还是以后期热液充填交代为主。

支持 SEDEX 成因的证据主要包括:1) 矿体呈层状、似层状产出,严格受地层层位控制,具有明显的同生沉积特征[8][14];2) 稀土元素呈轻稀土富集型, δEu 呈弱负异常,与典型 SEDEX 矿床的稀土配分模式相似[8];3) 硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值(+8‰至+18‰)接近泥盆纪海水硫酸盐组成,指示硫源主要来自海水硫酸盐的细菌还原作用[9][19];4) 矿区发育同生角砾岩,可能为海底喷流通道的产物[14];5) 有机质参与成矿,符合 SEDEX 矿床中有机质还原硫酸盐的成矿机制[12][13]。

然而,部分地球化学证据也支持 MVT 成因的解释:1) 张学琳等[16]通过电子探针分析发现,黄铁矿 Co/Ni 比值小于 1,这一特征通常指示低温热液成因而非火山喷流成因;2) 闪锌矿 Zn/Fe 比值高达 166.13,Fe 平均含量仅 1.31%,反映成矿温度低于 150℃,与 MVT 矿床的低温成矿特征一致[16];3) 流体包裹体均一温度主峰值 150℃~220℃、盐度 4%~12%,虽然与 SEDEX 矿床有一定重叠,但也落入 MVT 矿床的温度-盐度范围[11];4) 罗林菊[15]指出矿体主要发育在层间破碎带中,矿石以充填-交代结构为主,这些特征更符合后期热液充填交代的 MVT 成矿模式。

综合分析认为,盘龙铅锌矿床的成因可能具有多阶段、多成因叠加的特点。矿体的层控特征、硫同位素组成和有机质参与成矿等证据表明,早期可能存在与海底热液活动相关的同生沉积成矿作用;而矿石的充填-交代结构、低温矿物化学特征以及脉状矿体的发育,则指示后期经历了显著的热液改造甚至再富集作用。因此,盘龙铅锌矿床可能属于“沉积-改造型”矿床,即早期以喷流沉积作用为主形成初始矿源层,后期在构造-热液作用下发生活化迁移和再富集。这一认识兼顾了两种成因模式的合理证据,也解释了矿床中同时存在同生沉积和后期热液两类矿化特征的现象[4][9][14]-[16][21]。未来需要通过更精确的成矿年代学研究(如 Rb-Sr 等时线、Re-Os 定年等)和 Pb 同位素示踪来进一步厘定不同阶段成矿作用的贡献。

5. 找矿意义

5.1. 地球化学找矿标志

基于盘龙铅锌矿的地球化学特征研究，可以总结出以下地球化学找矿标志。

矿物化学标志：张学琳等[16]的电子探针分析表明，闪锌矿 Zn/Fe 比值可作为判断成矿温度的指标，Zn/Fe > 100 指示低温成矿环境(<150℃)，Zn/Fe 介于 10~100 为中温环境，Zn/Fe < 10 为高温环境。盘龙矿床闪锌矿 Zn/Fe 比值为 166.13，指示低温成矿环境。黄铁矿 Co/Ni < 1 指示沉积成因。上述矿物化学指标可作为判断矿床成因类型和评价矿化条件的辅助标志[16]。

元素地球化学标志：土壤地球化学测量中 Pb、Zn、Ag、Cd 元素组合异常是寻找铅锌矿的重要标志。付松武[4]指出，Ba 元素异常也具有一定的指示意义，因为矿区重晶石较为发育。岩石地球化学分析中，白云石化蚀变岩石的 Pb、Zn 含量异常可作为近矿标志[10]。

稀土元素标志：薛静等[8]的研究表明，具有轻稀土富集、 δEu 弱负异常至无异常特征的岩石可能与成矿作用有关。稀土元素总量相对降低的白云岩可能经历了成矿流体的淋滤作用。

硫同位素标志： $\delta^{34}\text{S}$ 值在+8‰至+18‰范围内的硫化物矿化可能指示喷流沉积型铅锌矿化[9] [19]。

蚀变矿物标志：白云石化、硅化、黄铁矿化等蚀变现象是重要的找矿标志。许晓杰[10]强调，白云石化蚀变强度与矿化强度呈正相关，强白云石化地段是找矿的有利部位。

5.2. 找矿方向

基于盘龙铅锌矿的成矿规律和地球化学特征，可以提出以下找矿方向。

矿体深部延伸：梁国宝等[7]指出，已知矿体多为浅部开采，深部勘查程度较低。根据矿体产状和地层延伸情况，矿体向深部应有较大的延伸空间。地球化学特征表明矿床形成深度较浅，深部可能还有矿体赋存，是近期找矿工作的重点方向。

矿体侧翼延伸：王立佳等[2]认为，沿矿体走向和倾向的侧翼延伸部位，特别是榴江组中段白云岩发育且构造条件有利的地段，具有较好的找矿潜力。

外围同层位找矿：廖海志等[22]指出，在矿区外围，凡是出露榴江组中段白云岩且具有相似地质构造背景的地区，均可作为找矿靶区。盘龙-朋村-古立一带榴江组地层连续分布，成矿地质条件相似，具有寻找同类型矿床的良好前景。

断裂构造控矿地段：丁伟等[18]建议，沿北西向断裂构造及其交汇部位开展找矿工作，特别是断裂与榴江组中段白云岩交汇部位，可能发现新的矿体或富矿段。

地球化学异常晕找矿：综合前人地球化学研究成果，盘龙铅锌矿的地球化学异常晕具有明显的分带特征。近矿围岩以 Pb、Zn、Ba 异常为核心，外围依次出现 Ag、Cd 弱异常晕和 Fe、Mn 背景晕。在勘查工作中，应重点关注 Pb-Zn-Ba 组合异常与白云石化蚀变叠合的区段，这类区段往往指示深部或隐伏矿体的存在。此外，白云岩厚度与铅锌矿化富集程度呈线性相关[15]，因此白云岩厚度变化也可作为评价矿化前景的间接指标。

5.3. 找矿建议

综合前人研究成果，对该区铅锌矿找矿工作提出以下建议。

加强地球化学勘查：开展系统的土壤地球化学测量和岩石地球化学分析，圈定 Pb、Zn、Ag、Cd、Ba 等元素的异常区，作为进一步工作的靶区[4]。

重视地层和岩性标志：以榴江组中段白云岩为重点勘查层位，特别关注角砾状白云岩和强白云石化地段[7] [14]。

注重构造控矿作用：加强对北西向断裂构造的研究，特别是断裂交汇部位和断裂与有利层位交汇部位[18]。

开展深部勘查：利用物探、化探等手段，加强对已知矿体深部的勘查工作，评价深部找矿潜力[7]。

区域对比研究：加强盘龙矿床与朋村、古立等矿床的对比研究，总结区域成矿规律，指导区域找矿工作[2] [22]。

综合勘查技术方法：鉴于盘龙铅锌矿床可能具有多阶段成矿叠加的特点，建议在勘查中综合运用地质、地球化学、地球物理等多种方法。地球化学方面，应重点开展 1:10,000 土壤地球化学测量，选用 Pb、Zn、Ag、Cd、Ba 等元素作为指示元素，配合岩石地球化学剖面测量。在已知矿化带外围，可利用重力测量圈定白云岩体的空间展布，结合激电测量探测深部硫化物矿体[7] [18]。

Table 1. Summary of geochemical prospecting indicators of Panlong lead-zinc deposit

表 1. 盘龙铅锌矿床地球化学找矿标志总结表

类型	找矿标志	矿化指示值	判别意义	参考文献
元素地球化学	Pb-Zn-Ag-Cd 元素组合异常	Pb + Zn > 8%, Ag 50~200 g/t	直接指示铅锌矿体， Ag 与 Pb 正相关可指示富矿段	[4] [7]
元素地球化学	Ba 元素异常	Ba 500~2000 × 10 ⁻⁶	指示重晶石发育， 反映成矿流体富硫酸盐， 是喷流沉积成矿的间接标志	[4]
稀土元素	轻稀土富集型	(La/Yb) _n = 3~8	轻重稀土分馏明显， 指示成矿流体与围岩发生了 充分的水-岩反应	[8]
稀土元素	δEu 弱负异常至无异常	δEu = 0.8~1.2	区别于岩浆热液矿床的强负 Eu 异常， 指示中低温还原环境成矿	[8]
硫同位素	δ ³⁴ S 值偏正	+8‰至+18‰	接近同期海水硫酸盐组成， 指示硫源以海水硫酸盐细菌还原为主	[9] [19]
流体包裹体	中低温特征	均一温度 150℃~220℃	排除高温岩浆热液成因， 指示浅成-中低温成矿环境	[11]
流体包裹体	中低盐度特征	盐度 4%~12%	区别于高盐度岩浆流体， 盆地卤水或改造型热液参与成矿	[11]
蚀变矿物	白云石化	强度与矿化呈正相关	白云石化是最重要的近矿蚀变， 蚀变强度可直接指示矿体位置	[10]
蚀变矿物	黄铁矿化、硅化	近矿蚀变	黄铁矿化指示还原环境， 硅化指示热液通道， 两者叠加为有利矿化部位	[10]
岩性标志	角砾状白云岩	富矿体指示	可能为同生断裂或喷流通道产物， 角砾岩发育地段常伴随高品位矿化	[14]
矿物化学	闪锌矿 Zn/Fe 比值	Zn/Fe = 166.13	Zn/Fe > 100 指示低温成矿(<150℃)， 与 MVT 矿床特征一致	[16]
矿物化学	黄铁矿 Co/Ni 比值	Co/Ni < 1	Co/Ni < 1 指示沉积成因， 1~5 为热液成因，>5 为火山喷气成因	[16]
岩性标志	白云岩厚度	与矿化线性正相关	白云岩越厚矿化富集程度越高， 可作为评价矿化前景的间接指标	[15]

5.4. 地球化学找矿标志总结

通过对盘龙铅锌矿床地球化学特征的综合分析, 得出以下主要认识:

1) 盘龙铅锌矿赋存于泥盆系榴江组中段白云岩地层中, 矿体呈层状、似层状产出, 受地层、岩性和构造联合控制。

2) 矿床具有典型的地球化学特征: 矿石富集 Pb、Zn、Ag、Cd 等元素; 稀土元素呈轻稀土富集型, δEu 呈弱负异常至无异常; 硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值为+8‰至+18‰, 接近同期海水硫酸盐组成; 流体包裹体显示成矿流体具有中低温、中低盐度特征; 有机质可能参与了成矿作用。

3) 地球化学特征指示盘龙铅锌矿可能具有喷流沉积成因, 后期经历了一定程度的热液改造作用。

4) Pb、Zn、Ag、Cd、Ba 元素组合异常, 白云石化蚀变, 以及特定的稀土元素和硫同位素特征可作为该区铅锌矿找矿的重要地球化学标志。

5) 矿区深部及侧翼延伸、外围同层位地段、断裂构造控矿部位是今后找矿工作的重点方向, 该区具有较好的找矿潜力。

6) 盘龙铅锌矿床的地球化学特征同时具有 SEDEX 和 MVT 两类矿床的某些特征, 表明矿床成因可能具有多阶段叠加的特点。综合分析认为, 矿床可能属于“沉积-改造型”, 即早期喷流沉积形成矿源层, 后期热液活动对其进行改造富集。未来需加强成矿年代学和同位素示踪研究, 进一步厘定不同阶段成矿作用的贡献。

综合前人研究成果, 盘龙铅锌矿床主要地球化学找矿标志总结如表 1。

参考文献

- [1] 郑义, 余盼, 王岳军, 等. 粤西-桂东四套成矿系统地质特征、成因类型及构造启示[J]. 岩石学报, 2017, 33(3): 682-694.
- [2] 王立佳, 幸福生. 广西大瑶山成矿带盘龙-朋村铅锌矿特征及找矿远景[J]. 云南地质, 2017, 36(3): 375-380.
- [3] 梁国宝, 胡明安, 杨振. 广西朋村-盘龙铅锌矿地球化学特征及矿床成因[J]. 桂林理工大学学报, 2015, 35(3): 437-444.
- [4] 付松武. 广西盘龙铅锌矿床地球化学特征及矿床成因研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [5] 饶涛. 广西盘龙铅锌矿床地球化学特征及矿床成因探究[J]. 世界有色金属, 2017(9): 70+72.
- [6] 徐述腾, 周永章, 郑义, 等. 钦杭成矿带南段盘龙铅锌矿成矿体系环境分析——来自矿石组构的限定[J]. 地质与勘探, 2018, 54(4): 674-688.
- [7] 梁国宝 廖开立. 广西武宣县盘龙铅锌矿地质特征及找矿方向[J]. 南方国土资源, 2003(2): 26-9.
- [8] 薛静, 戴塔根, 付松武. 广西武宣县盘龙铅锌矿床成矿地球化学特征[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(2): 533-545.
- [9] 薛静, 戴塔根, 付松武, 等. 广西武宣盘龙铅锌矿喷流沉积成矿作用: 稀土元素和硫同位素证据[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(3): 394-403.
- [10] 许晓杰. 广西盘龙铅锌矿床地质地球化学特征及矿床成因[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2024.
- [11] 牛佳, 郑义, 周永章, 等. 桂中盘龙铅锌矿流体包裹体特征及其对钦杭成矿带热水喷流-改造成矿作用的指示[J]. 岩石学报, 2017, 33(3): 753-766.
- [12] 安鹏鑫. 广西盘龙铅锌矿床有机质成矿作用研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2019.
- [13] 安鹏鑫, 汤静如, 曾南石, 等. 广西盘龙铅锌矿床赋矿地层有机质特征与成矿作用关系探讨[J]. 桂林理工大学学报, 2020, 40(1): 36-46.
- [14] 汪劲草, 汤静如, 曾南石, 等. 层控同生角砾岩控制的大型铅锌矿床——广西盘龙铅锌矿床成因新认识[J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34(4): 804.
- [15] 罗林菊. 广西盘龙铅锌矿地质特征及控矿因素[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(7): 699-708.

-
- [16] 张学琳, 幸福生, 罗林菊. 广西盘龙铅锌矿床硫化物电子探针分析及指示意义[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(4): 511-520.
- [17] 罗永恩. 广西武宣县盘龙铅锌矿床地质特征及控矿因素分析[J]. 地质与资源, 2009, 18(3): 183-188+196.
- [18] 丁伟, 王涛. 广西武宣县盘龙矿区铅锌矿地质特征及找矿标志分析研究[J]. 矿物学报, 2015, 35(S1): 847-848.
- [19] 李蘅, 徐文炘, 李毅. 广西盘龙铅锌矿床成因硫同位素证据[J]. 矿物学报, 2011, 31(S1): 604.
- [20] 许浩天. 广西盘龙铅锌矿区白云岩的成因机制及其与成矿关系研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2019.
- [21] 罗永恩. 盘龙铅锌矿床成因及成矿模式[J]. 有色金属(矿山部分), 2009, 61(3): 32-35.
- [22] 廖海志, 莫福超. 武宣县盘龙-古立-朋村铅锌矿地质特征及成矿远景分析[J]. 低碳世界, 2013(22): 114-116.