

广西平天山岩浆热液成矿系统分带及成矿模式综述

刘敏强^{1*}, 崔敏利²

¹桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

²中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京

收稿日期: 2026年4月8日; 录用日期: 2026年5月11日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

平天山-龙山矿田作为钦杭成矿带南段典型金多金属矿集区, 远端金矿成因长期存在造山型与岩浆热液型争议, 现有研究多聚焦单一矿床, 缺乏成矿系统层面的整合分析。针对这一议题, 本文在系统梳理矿床地质特征、流体包裹体及稳定同位素证据的基础上, 对该区成矿系统的时空结构与动力学机制进行了综合评述。本研究确立了该区为受燕山期中酸性岩浆驱动的巨大岩浆热液成矿系统, 在空间上呈现严格的向心式分带规律: 内带(龙头山)发育斑岩-隐爆角砾岩型Au-Cu矿化, 中带(砷矿沟)发育层状矽卡岩型Pb-Zn矿化, 外带(六梅)发育受构造控制的微细浸染状Au-As矿化。成矿流体演化轨迹表明, 内带的流体减压沸腾(相分离)与外带的流体混合/硫化作用是驱动差异化成矿的关键机制。本文建立了该区成矿系统的“套叠”演化模式, 指出岩浆流体超压释放与区域构造剥蚀共同制约了矿床的定位, 据此预测, 内带岩体深部的斑岩型铜(钼)矿与外带主构造深部的隐伏高品位金矿是未来找矿突破的关键方向。

关键词

岩浆热液成矿系统, 空间分带, 成矿模式

A Review on Zonation and Metallogenic Model of the Magmatic-Hydrothermal Ore-Forming System in the Pingtian Mountain, Guangxi

Minqiang Liu^{1*}, Minli Cui²

¹College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

²Command Center for Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Beijing

*通讯作者。

Abstract

The Pingtian Mountain-Longshan Mountain ore field, as a typical gold polymetallic concentration area in the southern segment of the Qinzhou-Hangzhou metallogenic belt, has long been debated regarding the genesis of distal gold deposits between orogenic-type and magmatic-hydrothermal type. Existing studies mostly focus on individual deposits and lack an integrated analysis at the ore-forming system scale. To address this issue, based on a systematic review of deposit geological characteristics, fluid inclusion and stable isotope evidence, this paper comprehensively evaluates the spatiotemporal structure and dynamic mechanisms of the ore-forming system in this area. This study establishes that the area represents a giant magmatic-hydrothermal ore-forming system driven by Yanshanian intermediate-acidic magmatism, exhibiting a strict concentric zoning pattern in space: the inner zone (Longtoushan) hosts porphyry and cryptoexplosive breccia-type Au-Cu mineralization, the intermediate zone (Shenkuanggou) hosts stratiform skarn-type Pb-Zn mineralization, and the outer zone (Liumei) hosts structurally controlled micro-disseminated Au-As mineralization. The evolution trajectory of ore-forming fluids indicates that fluid decompression boiling (phase separation) in the inner zone and fluid mixing/sulfidation in the outer zone are the key mechanisms driving differential mineralization. This paper establishes a “nested” evolution model for the ore-forming system in this area, pointing out that the overpressure release of magmatic fluids and regional tectonic denudation jointly constrain the localization of ore deposits. Accordingly, it is predicted that the deep porphyry Cu (Mo) deposit beneath the inner zone intrusion and the concealed high-grade gold deposit in the deep part of the main structure in the outer zone are key directions for future breakthrough in mineral exploration.

Keywords

Magmatic-Hydrothermal Ore-Forming System, Spatial Zonation, Metallogenic Model

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

1.1. 选题背景与科学问题

广西大瑶山隆起区地处钦 - 杭成矿带南段,是我国著名的金多金属成矿集中区。区内矿床星罗棋布,类型多样,既发育有与次火山岩密切相关的龙头山金矿,也发育有受断裂构造严格控制的六梅、白沙等微细浸染状金矿。然而,长期以来关于该区(特别是远离岩体的远端金矿)的成因类型存在着显著的学术分歧:一种观点强调构造与变质作用的控制,将其归为造山型(变质热液型)金矿;另一种观点则主张其与燕山期大规模岩浆活动有关,属于岩浆热液型矿床。这种成因认识的对立,直接导致了深部找矿方向的模糊——如果是造山型,应聚焦于韧性剪切带的深部延申;如果是岩浆热液型,则应关注岩体周围的分带性及深部斑岩体。

以往的研究工作多侧重于对单一矿床的独立剖析,缺乏将不同类型的矿床置于统一的“成矿系统”框架下进行整体性的对比与综合研究。鉴于此,本文选取大瑶山隆起西南缘最具代表性的“平天山 - 龙

山矿田”为研究对象,以 Sillitoe (2010)的斑岩-浅成低温热液成矿系统理论为指导,试图通过流体包裹体、同位素地球化学及矿床地质特征的系统综述,厘定该区矿床的空间分带规律与成因联系[1]。这不仅有助于解决区域矿床成因的长期争议,更能为深部寻找隐伏斑岩型铜矿及盲矿体提供坚实的理论支撑。

1.2. 国内外研究现状及评述

在岩浆热液成矿理论方面,国际学术界已建立了成熟的斑岩-矽卡岩-浅成低温热液成矿系统模型。Sillitoe (2010)及 Einaudi (2003)等学者的经典工作揭示,从斑岩体中心向外,金属元素通常呈现“Cu-Au-Zn-Pb-As”的连续分带,流体性质也随之发生从高温高盐度向低温低盐度的演变。这一理论为识别和解剖大型多金属矿田提供了宏观的成矿格架。

具体到平天山-龙山地区,在矿床地质研究方面:韦子任和傅勇(2013)对龙山金矿田的矿床成因进行分析,认为该区金矿受近南北向断裂构造控制,成矿物质来源于深部,属中低温构造蚀变热液型金矿床[2]。李忠阳(2008)对山花金矿的研究表明,该矿床成矿温度 $160^{\circ}\text{C}\sim 240^{\circ}\text{C}$,成矿压力 $220\times 10^5\text{ Pa}$,成矿深度约 0.70 km ,属低温热液矿床[3]。贺战朋(2010)及申硕果等(2012)对福六岭、六梅金矿的研究揭示了Au与As的强正相关关系,建立了矿床的原生晕轴向分带序列[4][5]。陈港等(2022)对新民铜矿的流体包裹体研究表明,成矿流体属中高温($151^{\circ}\text{C}\sim 374^{\circ}\text{C}$)、中盐度体系,H-O-S同位素指示成矿流体主要源自岩浆热液[6]。

在成矿系统整体认识方面,陈懋弘等(2015,2016)提出平天山地区可能存在统一的岩浆热液成矿系统,围绕大平天山岩体由内向外依次发育斑岩型金铜矿→矽卡岩型银铅锌矿→低温热液型金矿的矿化分带[7]。韦子任和傅勇(2013)指出,该区金多金属矿床具有共同的物质来源,是寒武系及其下部地层发生重熔作用形成含矿岩浆,在燕山晚期岩浆侵入过程中伴随气化-热液成矿作用,在不同构造-岩性部位形成不同类型矿床组合的产物。

然而,综合分析已有成果可以发现,现有研究仍存在“碎片化”的不足:缺乏对内带(龙头山)与外带(六梅)流体演化轨迹的系统对比,导致二者之间的成因联系尚未得到地球化学证据的有效约束;此外,对于矿床垂直分带与水平分带的耦合机制探讨亦不够深入。这些科学缺陷正是本文拟重点突破的研究内容。

2. 区域地质背景

2.1. 地层系统与赋矿围岩

研究区位于华南褶皱系与扬子地块结合部位的软-杭成矿带南段,隶属于大瑶山隆起西南缘。该区经历了加里东期、印支期及燕山期等多期构造-岩浆热事件的叠加改造,其中燕山期(白垩纪)是区域内最强烈的岩浆活动与成矿高峰期。在古太平洋板块俯冲后的岩石圈伸展-减薄地球动力学背景下,深部大规模中酸性岩浆的上涌与侵位,不仅为成矿提供了成矿物质来源,更提供了成矿系统的热动力。

区域出露地层主要包括寒武系与泥盆系,二者呈角度不整合接触,构成了成矿系统的基底与盖层。寒武系(C)主要由变质砂岩、板岩、千枚岩组成,其中夹有的硅质岩及灰岩透镜体具有重要的成矿意义,特别是寒武系黄洞口组(Ch),其富含金、砷、锑等成矿元素的地球化学背景,以及岩性差异导致的层间破碎带发育,使其成为区内最重要的赋矿围岩。泥盆系(D)则主要分布于复背斜两翼,为一套紫红色砂砾岩及碳酸盐岩沉积,作为成矿后的盖层,对盲矿体的保存起到了关键的保护作用。

2.2. 构造格架与岩浆岩

区内岩浆岩分布广泛,类型多样,以大平天山岩体、龙头山岩体及外围岩脉为代表,空间上严格受北北西向及近南北向断裂控制,共同构成了统一的岩浆热液成矿系统。

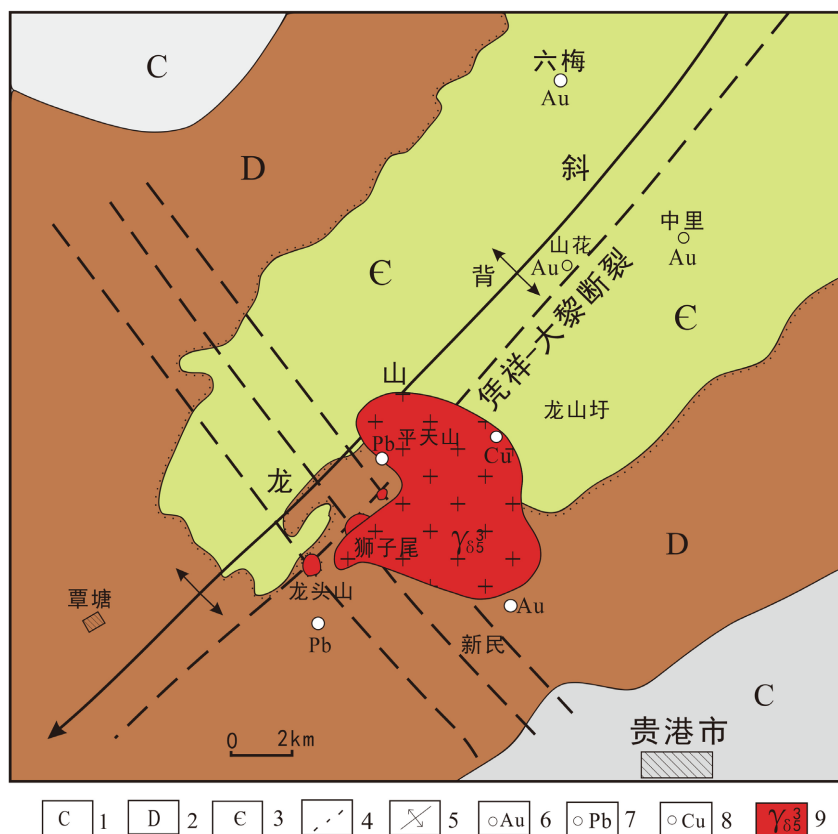
大平天山岩体是该区出露规模最大的侵入体,呈岩株状侵位于寒武系及泥盆系中,出露面积约 29 km²,具明显岩相分带特征:核部为细粒花岗闪长岩,边部为黑云母正长花岗斑岩。锆石 U-Pb 定年结果集中于 96~97 Ma,表明其形成于燕山晚期[8] [9]。龙头山岩体位于其西南侧约 500 m 处,呈岩筒状产出,具典型次火山岩特征,由内向外依次为花岗斑岩、流纹斑岩和隐爆角砾岩,成岩时代集中于 91~103 Ma [10]。此外,矿区范围内还发育大量沿断裂充填的花岗斑岩脉、霏细斑岩脉等,其成岩时代与主岩体相近,应为同一岩浆系统晚阶段派生的产物。上述岩体的具体年龄数据汇总(见表 1)。

Table 1. Summary of magmatic rock and deposit ages in the Dapingshan area
表 1. 大平天山地区岩浆岩和矿床年龄汇总

岩体名称	岩性	测年方法	年龄(Ma)	数据来源
大平天山岩体	花岗闪长岩	SHRIMP	96.5 ± 0.7	王成辉, 2011
	黑云母二长花岗岩		96.91 ± 0.28	课题组未发表数据
	黑云母正长花岗斑岩		96.3 ± 1.6	葛锐, 2019
	黑云母二长花岗岩	LA-ICP-MS	96.2 ± 2.9	
	花岗闪长岩		96.2 ± 0.4	段瑞春等, 2011
	花岗斑岩	全岩 K-Ar	96.0	黄民智等, 1999
龙头山岩体	花岗斑岩	LA-ICP-MS	91.0 ± 4.5	葛锐, 2019
		SHRIMP	100.3 ± 1.4	陈富文等, 2008
	流纹斑岩	LA-ICP-MS	94.7 ± 2.3	葛锐, 2019
		SHRIMP	102.8 ± 1.6	陈富文等, 2008
头闸 - 砷矿沟岩脉	花岗斑岩	LA-ICP-MS	96.35 ± 0.54	葛锐, 2019
六梅岩脉	花岗斑岩	LA-ICP-MS	89.8 ± 3.8	
平天山钼矿化	辉钼矿	Re-Os	96.8 ± 1.9	王成辉等, 2012
新民铜矿化岩体	花岗闪长岩	LA-ICP-MS	96.2 ± 0.4	段瑞春等, 2011
福六岭金矿岩体	花岗斑岩脉	LA-ICP-MS	89.8 ± 3.8	葛锐, 2019

区内褶皱构造主要表现为龙山鼻状背斜在矿区的倾伏端部位。该背斜呈北东向展布,核部由寒武系紧密褶皱基底构成,两翼不对称,反映多期构造叠加(如图 1)。矿区内的盖层泥盆系莲花山组呈平缓单斜产出,局部发育的层间挠曲在一定程度上增强了岩层的破碎程度,为矿液局部富集创造了空间条件,但总体而言,褶皱本身并非主要的容矿构造。

相较之下,断裂构造是矿区控岩控矿的主导因素。矿区断裂系统发育,按展布方向可划分为北西向、南北向、北东向及东西向四组,这些断裂既是岩浆上升的通道,也是成矿物质运移与沉淀的主要场所。北西向断裂是矿区规模最大、控矿作用最显著的一组断裂。该组断裂走向 310°至 340°,倾向南西,倾角 80°至 85°,延伸长度 200 至千余米,切割泥盆系莲花山组及火山 - 次火山岩体边部,向深部延伸切穿寒武系(如图 1)。



1-石炭系, 2-泥盆系, 3-寒武系, 4-区域断裂, 5-背斜, 6-金矿点, 7-铅矿点, 8-铜矿点, 9-花岗斑岩。

Figure 1. Schematic tectonic outline map of the Pingtian Mountain Area [9]

图 1. 平天山地区构造纲要略图[9]

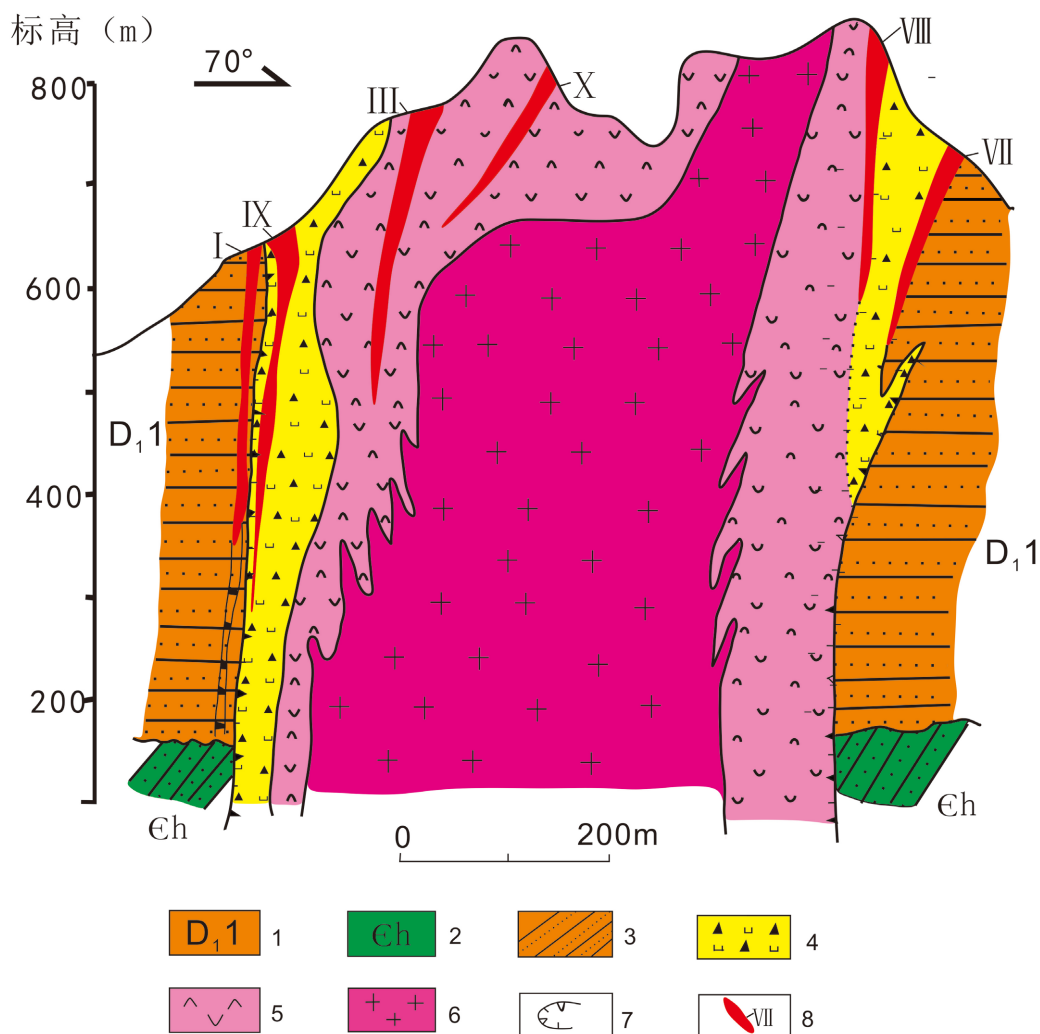
3. 平天山地区典型矿床及特征

3.1. 龙头山次火山 - 斑岩型金铜矿床

龙头山金矿床位于龙山复背斜西南倾伏端, 是成矿系统的热源中心和流体发源地, 该矿床属于典型的次火山 - 斑岩型及隐爆角砾岩型复合矿床。

矿床产于燕山期陆相中心式火山机构的根部(火山颈相)。受后期剥蚀影响, 现存岩体主要为次火山岩穹窿, 由早期流纹斑岩和晚期花岗斑岩组成。锆石 U-Pb 定年结果表明, 流纹斑岩形成于 102.8 ± 1.6 Ma, 花岗斑岩形成于 100.3 ± 1.4 Ma, 二者均属燕山晚期岩浆活动的产物[11] [12]。矿床的核心控矿构造为一个直立的隐爆角砾岩筒(图 2)。该角砾岩筒的形成与岩浆上侵过程中的压力骤降有关: 当富含挥发分的岩浆上升至浅部时, 因围岩压力降低发生隐爆作用, 产生大量角砾并形成破碎空间。角砾成分复杂, 以流纹斑岩及寒武系砂泥岩为主, 胶结物为含矿热液矿物(石英、黄铁矿)及岩粉。这一构造既是流体运移的通道, 也是矿质沉淀的有利空间。

矿化与蚀变特征矿化显示出强烈的多阶段叠加特征。主体矿化为隐爆角砾岩型, 金主要富集于角砾岩筒的硅质 - 硫化物胶结物中, 常形成高品位富矿包(局部 Au 30~50 g/t) [13]。在次火山岩体顶部及接触带, 发育密集的网脉状和细脉浸染状矿化, 指示了流体在压力骤降导致的沸腾环境下快速沉淀的机制。围岩蚀变强烈且分带明显, 由中心向外依次发育: 钾化(少量)强硅化 - 绢云母化青磐岩化。



1-莲花山组, 2-黄洞口组, 3-砂岩, 4-角砾熔岩、隐爆角砾岩, 5-流纹斑岩, 6-花岗斑岩, 7-火山机构边界, 8-金矿体及编号。

Figure 2. Schematic section of the Longtoushan gold deposit subvolcanic pipe [9]

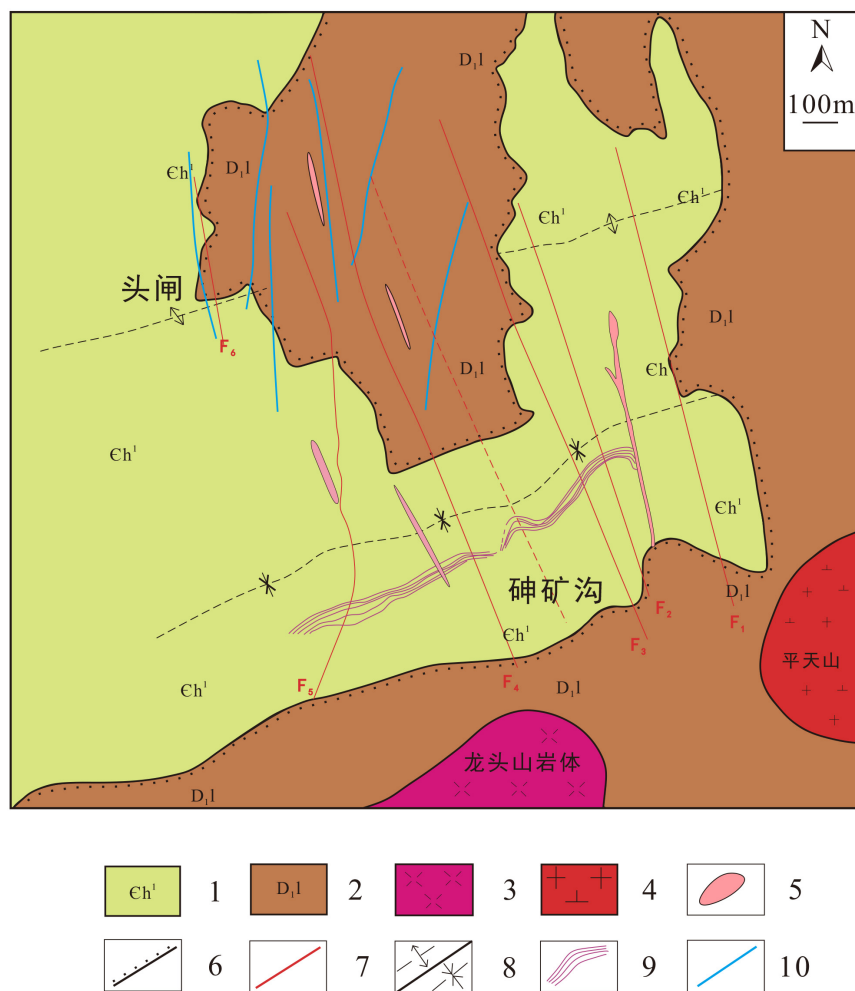
图 2. 龙头山金矿次火山岩筒剖面示意图[9]

3.2. 砷矿沟层状矽卡岩型铅锌银矿床

在距离岩浆中心北侧约 2~4 km 处, 成矿元素组合由 Au-Cu 演变为 Pb-Zn-Ag, 形成了以砷矿沟为代表的铅锌银多金属矿床。该带处于成矿系统的过渡位置, 受地层岩性与构造的双重控制。

控矿因素: 寒武系黄洞口组(Ch)中发育的灰岩透镜体及钙质泥岩层为主要的控矿因素。这些碳酸盐岩层化学性质活泼, 在与酸性热液接触时发生强烈的水-岩反应, 导致流体 pH 值升高, 进而触发金属络合物分解与硫化物沉淀[14]。这一过程在成矿系统中构成了典型的“地球化学障”, 使得 Pb、Zn、Ag 等中温元素在此带优先富集。区域构造方面, 北北西向断裂系统不仅为流体运移提供了通道, 其派生的层间破碎带更创造了矿质沉淀的有利空间, 控制了矿体的最终就位, 具体(如图 3)。

矿化特征: 矿体呈层状、似层状顺层产出, 与围岩产状一致。矿石矿物以方铅矿、闪锌矿为主, 伴生银矿物。围岩蚀变发育典型的矽卡岩化(石榴子石、透辉石)及大理岩化, 表现出远端接触交代矽卡岩的地质特征。



1-下泥盆统莲花山组, 2-寒武系黄洞口组下段, 3-龙头山岩体, 4-岩脉, 5-角度不整合界线, 6-成矿后断层破碎带, 7-断层(脉状矿化体), 8-复式背斜/向斜轴迹, 9-层状矿体。

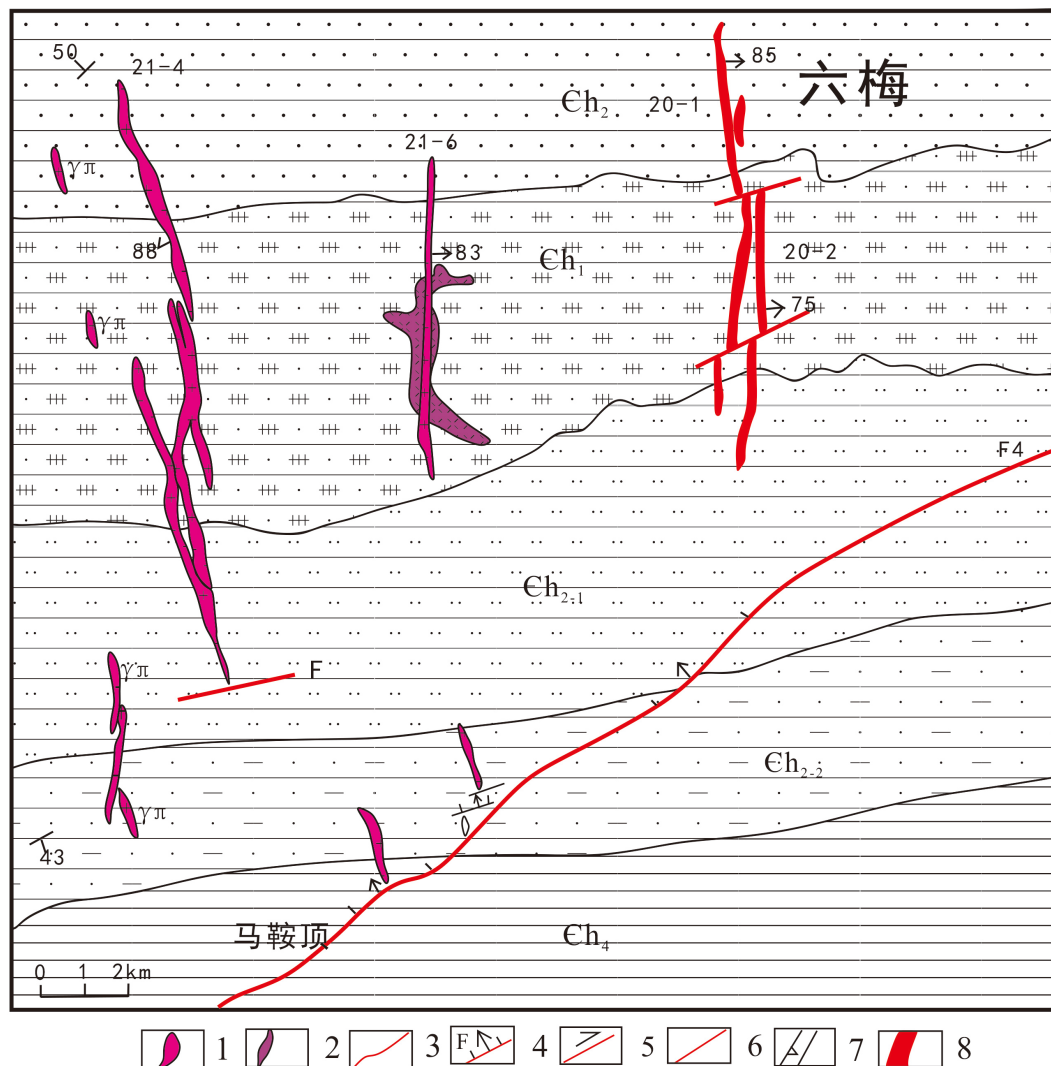
Figure 3. Simplified regional geological map of Shenkuangou [10]

图 3. 砷矿沟地质区域简图[10]

3.3. 六梅微细浸染状金砷矿床

控矿因素：构造位置与控矿因素六梅矿床坐落于龙山复背斜核部，其形成与分布严格受区域性北北西向断裂破碎带及其次级裂隙的控制。该断裂带走向介于 $310^{\circ}\sim 330^{\circ}$ 之间，倾向南西，倾向角在 $75^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 范围内，延伸长度约 2.5 km，破碎带宽度为 5~20 m，既作为成矿流体的运移通道，又为矿质沉淀提供了充足的容矿空间。矿床围岩为寒武系黄洞口组下段浊积碎屑岩，岩性以粉砂岩、泥质粉砂岩为主，该套地层仅作为物理容矿介质，并未向成矿过程提供矿物质来源(图 4)。

矿化特征：该矿床矿化类型为类卡林式微细浸染型金矿，矿体沿断裂破碎带呈脉状、透镜状展布，与围岩之间无明显截然界线，呈渐变过渡关系。金元素主要以不可见态形式赋存于细粒含砷黄铁矿及针状毒砂的晶格内部，偶尔可见纳米级自然金包裹体[15]。金矿品位整体处于 0.5~3 g/t 区间，局部富矿段品位可突破 10 g/t。矿石矿物组成以黄铁矿、毒砂为主，伴生少量辉锑矿、闪锌矿；脉石矿物则主要为石英、绢云母、高岭石。围岩蚀变主要表现为硅化、黄铁矿化、毒砂化及绢云母化，蚀变分带现象不明显，且蚀变强度与金矿化程度呈正相关关系。



1-花岗斑岩, 2-流纹斑岩, 3-地质界线, 4-断层, 5-实测正断层, 6-实测平移断层, 7-性质不明断层, 8-层状金矿体。

Figure 4. Simplified geological map of the Liumei gold mining area [2]

图 4. 六梅矿区金矿地质简图[2]

3.4. 新村微细浸染状金矿床

控矿因素：构造上，矿体严格受北北西向断裂控制，该组断裂在矿区呈成群成组平行带状排列，矿脉间距 30~70 m，大致等间距出现(如图 5)。断裂破碎带既是成矿流体的运移通道，也是矿质沉淀的直接空间，矿体赋存于破碎带内的压碎岩中，呈脉状产出。岩浆活动方面，矿区虽仅见少数花岗斑岩脉出露，但区域上的燕山晚期大平天山花岗闪长岩 - 黑云母花岗岩复式岩体(年龄 95 Ma)为成矿提供了热动力，促使地层中的金在热液作用下活化、迁移，并在断裂带膨大、拐弯、分支复合等有利部位富集成矿[16]。

矿化特征：矿体沿北北西向断裂破碎带呈脉状产出，倾向 230°~260°，倾角 75°~87°，长度 200~570 m，厚度 0.50~3.06 m，金品位 1.22×10^{-6} ~ 8.30×10^{-6} ，矿石矿物以毒砂、黄铁矿、褐铁矿、自然金为主，脉石矿物为石英、绢云母、白云石、方解石。金主要以细粒自然金形式被毒砂包裹，而非独立产出，围岩蚀变以硅化、绢云母化、碳酸盐化、黄铁矿化、毒砂化为主，蚀变强度与矿化程度呈正相关，反映成矿流体与围岩发生了强烈的水 - 岩反应[21]。上述特征与区内典型卡林型金矿一致，也为深部找矿提供了依据。

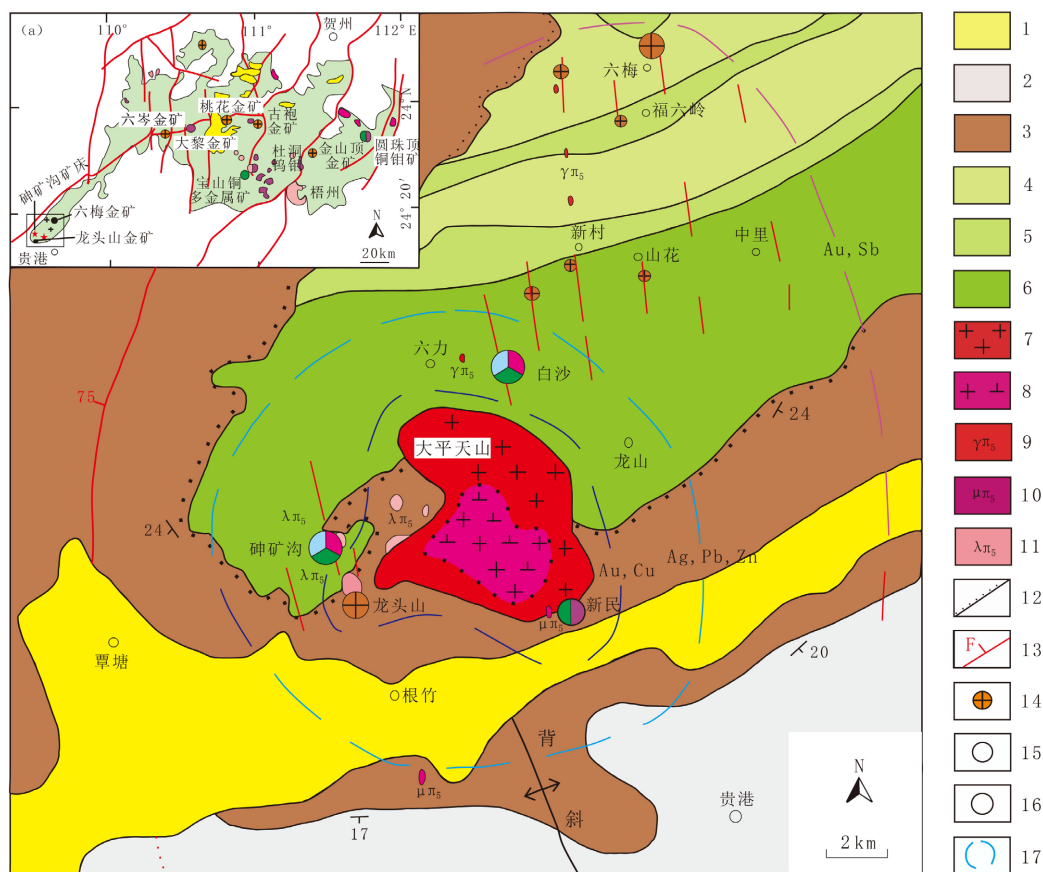
Table 2. Comparison of characteristics of typical deposits in the dapingshan magmatic-hydrothermal mineralization system [17]-[23]
表 2. 大平天山岩浆热液成矿系统典型矿床特征对比表[17]-[23]

矿床名称	矿床成因	矿物组合	成矿流体 物理化学条件	同位素 地球化学特征	成矿 元素	资料来源
龙头山 金矿	次火山岩型金矿、 斑岩型	Py-Ccp-St-Mo	主成矿阶段中温 (320°C~180°C), 中高盐度(u(NaCl _{eq}) = 30%~40%), 中等密度 (0.9~1.1 g/cm ³), 成矿深度在 427~1152 m	成矿流体以岩 浆热液为主, 越往外以大气 降水为主; 成 矿物质来源于 岩浆	Au、 Cu、Ag (W, Sn, Bi)	谢抢司等, 1993; 李忠阳, 2008; 王成辉, 2011; 胡理等, 2015
龙头山 铜矿	次火山-斑岩型	Ccp-Py	隐伏矿体, 成矿与燕 山晚期岩浆活动有 关, 400 m 标高以下黄 铁矿化岩体接触构造 带为主要找矿标志	主要来自岩浆 水; 成矿物质 为岩浆来源	Cu	刘延清等, 2020
新民铜矿	矽卡岩型-热液脉型	Ccp-Sp-Gn-Py-Po-Apy	金属硫化物阶段均一 温度为 151°C~374°C, 中盐度(u(NaCl _{eq}) = 2.6%~9.3%)	矿流体以岩浆 热液为主, 后 期有大气降水 的加入; 成矿物质来 源于岩浆	Cu、 Pb、 Zn	陈港等, 2022
砷矿沟 矿床	矽卡岩型-热液脉型	Ccp-Po Sp-Gn-Py-Apy-St	主成矿阶段流体包裹 体均一温度峰值 270°C~370°C, 中高盐度(u(NaCl _{eq}) = 2.9%~22.2%)	主要来自岩浆 水; 成矿物质 为岩浆来源	Ag、 Pb、 Zn	李忠阳, 2008; 葛锐, 2019
六梅金矿	远端热液脉型金矿	Py-Apy-St	主成矿阶段温度平均 为 181°C, 平均 盐度 u(NaCl _{eq}) 为 9.4%, 密度为 0.946 g/cm ³ , 显示 成矿流体为低温、 低盐度、低密度流体	成矿流体与岩 浆热液有关, 且后期有大气 降水混入; 成 矿物质来源于 岩浆	Au、 Sb	朱桂田, 2002; 贺战朋, 2010; 叶荣, 2012; 韦任, 2013; 陈港等, 2020
白沙银铅 锌矿	破碎带蚀变岩型	Py-Gn-Sp	中低温热液成矿, 与燕山晚期岩浆活动 有关; 矿体受北北西 向断裂控制, 成矿 流体以岩浆水为主, 后期有大气降水混入	成矿物质来源 于深部岩浆, 硫同位素组成 显示岩浆硫特 征	Ag、 Pb、 Zn	韦子任等, 2013; 唐睿等, 2013;
山花金矿	破碎带蚀变岩型	Py	成矿温度 160°C~240°C, 成矿压 力 220 × 10 ⁵ Pa (约 22 MPa), 成矿 深度约 0.70 km; 属低温热液矿床	与隐伏岩体有 关, 成矿流体 与龙山、龙头 山金矿相似, 具岩浆热液特 征	Au	李忠阳, 2008

续表

福六岭 金矿	卡林型	Apy-Py	成矿温度	成矿物质与区	Au、 As	贺战朋, 2010; 申硕果等, 2012
			140℃~200℃, 属低温 热液; 主成矿阶段均 一温度集中于 140℃~200℃, 盐度较 低(一般 < 10%), 成矿 流体属中低温、低盐 度体系; Au 与 As 强 正相关, As 为 Au 的 主要指示元素	域地层有关, 稀土元素配分 模式显示矿石 与围岩具有同 源性		

注: Po-磁黄铁矿; Py-黄铁矿; Ccp-黄铜矿; Sp-闪锌矿; Gn-方铅矿; Apy-毒砂; St-辉锑矿; Mo-辉钼矿。



1-第四系, 2-石炭系三叠系, 3-泥盆系, 4-寒武系黄洞口组下段, 5-寒武系黄洞口组中段, 6-寒武系黄洞口组上段, 7-山期花岗岩, 8-燕山期花岗闪长岩, 9-燕山期花岗岩岩脉, 10-燕山期霏细斑岩脉, 11-燕山期流纹斑岩, 12-地层不整合界限, 13-断层, 14-金矿床, 15-银铅锌矿床, 16-铜多金属矿床, 17-矿化分带。

Figure 6. Simplified distribution map of mineral deposits in the Pingtian mountain area [6]

图 6. 平天山地区矿床分布简图[6]

上述分带的确立基于以下系统对比: 成矿温度从内带高温向中带中温再向外带低温递降, 与金属络合物稳定性随温度变化的实验结果一致; 成矿流体来源从内带岩浆水主导向外带大气降水主导过渡, 反映流体运移过程中与浅层水体的混合程度逐渐增强; 成矿元素组合从内带 Au-Cu 向外带 Au-As-Sb 演化, 指示成矿环境氧逸度、硫逸度及 pH 值的系统变化。

4.2. 矿床分带特征及成因机制的讨论

内带紧邻岩浆房,成矿流体的温压条件受岩浆热液直接控制。包裹体测温显示均一温度 320℃~180℃、盐度 30%~40%, 早阶段石英脉中富气相包裹体与含子矿物多相包裹体共存且均一方式相反, 指示流体曾发生强烈沸腾, 这是内带形成高品位 Au-Cu 矿化的关键机制。

中带位于岩浆中心北侧 2~4 km, 流体已脱离岩浆房直接控制, 进入与围岩相互作用的过渡域。以砷矿沟为例, 寒武系黄洞口组的灰岩透镜体及钙质泥岩层构成化学屏障: 酸性含矿热液沿层间破碎带运移时, 与碳酸盐岩发生中和反应, 流体 pH 值升高, 导致 Pb、Zn、Ag 等金属络合物分解沉淀。

外带距岩浆中心逾 5 km, 位于龙山复背斜核部及翼部, 流体演化为开放体系, 与大气降水大规模混合。从内带到外带, 均一温度与盐度同步下降, 反映深部岩浆流体在长距离运移中与浅层大气降水混合。

可见, 内带、中带、外带分别由三种不同机制驱动: 构造减压引发的流体沸腾(内带)、水-岩反应(中带)、流体混合与还原性地球化学障(外带)。这种机制差异导致同一岩浆热液系统在不同空间位置形成不同类型的矿床。成矿元素的分带性与上述机制存在内在联系: Cu、Au 在沸腾条件下优先沉淀, 富集于内带; Pb、Zn、Ag 对 pH 值变化敏感, 在水-岩反应界面沉淀, 富集于中带; Au、As、Sb 在还原条件下最为稳定, 在流体混合界面沉淀, 富集于外带。温度、pH 值、氧逸度的递变构成了金属元素分带沉淀的内在控制因素。

5. 讨论

关于平天山地区矿床的成因类型, 尤其是远离岩浆中心的六梅、新村等微细浸染状金矿, 学术界长期存在两种对立观点。持造山型模型者认为, 矿体受北北西向断裂控制, 赋矿围岩为寒武系浅变质碎屑岩, 金以微细浸染状赋存于毒砂和黄铁矿中, 成矿温度较低(140℃~200℃), 这些特征与典型造山型金矿相似。第二种观点即本文主张岩浆热液模型: 区内断裂构造系统具有统一的控矿效应, 同时控制了内带次火山岩体、中带矽卡岩矿床及外带金矿的定位与展布, 龙头山发育的隐爆角砾岩筒, 更是直接记录了岩浆流体超压释放的动力学过程; 时间维度上, 区域加里东期变质年龄(约 440 Ma)与本区成矿年龄(约 100 Ma)相差超过 3 亿年, 二者在时间上完全解耦, 直接排除了加里东期变质流体参与成矿的可能; 温度条件上, 本区成矿温度远低于造山型金矿对应的绿片岩相变质温度, 从而完美匹配岩浆热液从岩浆中心向外围运移过程中的冷却演化路径。

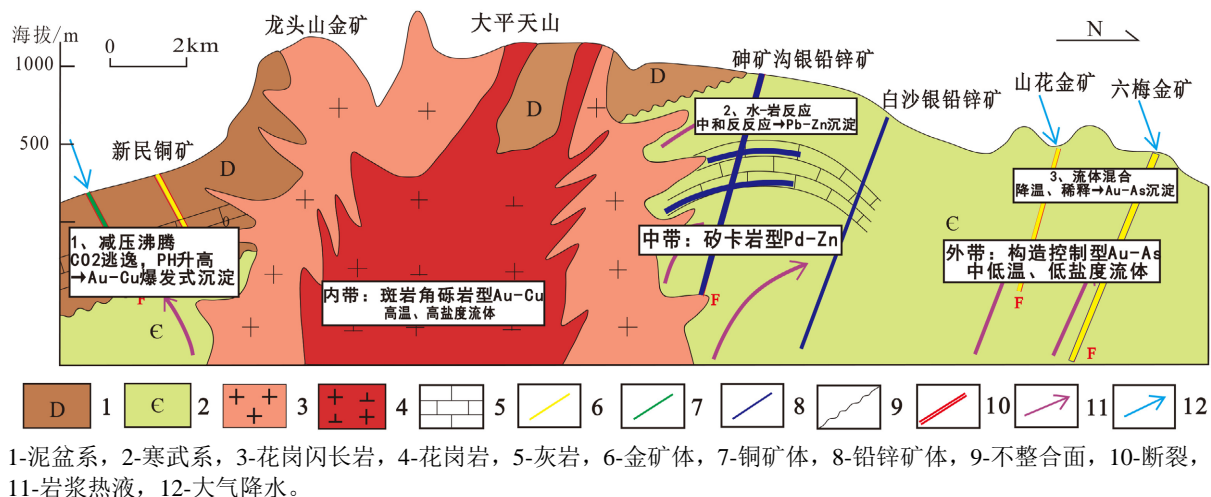


Figure 7. Schematic diagram of the magmatic hydrothermal metallogenic model in the Dapingtian mountain area [6]
 图 7. 大平天山岩浆热液成矿模式图[6]

基于上述分析, 岩浆热液系统模型相较于造山型模型具有明显的综合优势。如图 7 直观展示了该模型的流体演化与金属分带机制: 深部岩浆房出溶的高温、高盐度流体在内带因构造减压发生沸腾, CO_2 、 H_2S 等酸性挥发分逸出导致 pH 升高, 促使 Au-Cu 发生爆发式沉淀, 形成龙头山斑岩-角砾岩型矿化; 流体向外迁移至中带(2~4 km), 与寒武系灰岩夹层发生水-岩中和反应, pH 进一步升高, Pb、Zn、Ag 等中温元素沉淀, 形成砷矿沟矽卡岩型矿化; 至外带(>5 km), 流体与大气降水大规模混合, 温度降至 $140^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$ 、盐度低于 10%, 并因围岩中的还原硫而发生硫化反应, 最终以微细浸染形式沉淀 Au-As, 形成六梅、新村等卡林型金矿。这一完整的演化路径统一解释了从内带到外带在空间分布、成矿时代、流体性质及元素组合上的系统性变化, 而成山型模型难以说明为何远离岩体的金矿反而与岩体具有相同成矿时代和同位素特征。此外, 该模型已成功指导发现砷矿沟西部新矿段, 显示出较强的勘查预测能力。

尽管如此, 本文仍存在若干不足: 外带金矿(如六梅、新村)缺乏直接的成矿年龄数据, 目前仅通过岩脉年龄间接推断; 远端流体混合过程中岩浆贡献与地层贡献的定量比例尚未厘清; 深部隐伏斑岩体的地球物理证据尚不充分。后续研究若能获得外带金矿的可靠成矿年龄, 并开展系统的流体包裹体气相成分及高精度同位素(如 He-Ar)示踪, 以及实施深部钻探验证斑岩型矿化存在, 将有力验证岩浆热液模型的正确性, 并为区域找矿提供更坚实的理论依据。

参考文献

- [1] Sillitoe, R.H. (2010) Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, **105**, 3-41.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- [2] 韦子任, 傅勇. 广西贵港龙山金矿田的矿床成因分析[J]. 矿产与地质, 2013, 27(5): 388-392.
- [3] 李忠阳. 贵港市山花金矿床外围找矿前景探讨[J]. 南方国土资源, 2008(11): 31-33.
- [4] 贺战朋. 广西贵港福六岭金矿床地质地球化学特征研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2010.
- [5] 申硕果, 叶荣, 王勇. 广西贵港六梅金原生晕及深部找矿[J]. 现代地质, 2012, 26(5): 1086-1094.
- [6] 陈港, 陈懋弘, 李杨林, 王昱, 吴启强. 广西贵港新民铜多金属矿床成矿机制研究[J]. 矿床地质, 2022, 41(3): 506-526.
- [7] 陈懋弘, 李忠阳, 李青, 韦子任, 黄宏伟, 张志强, 肖柳阳. 初论广西大瑶山地区多期次花岗质岩浆活动与成矿系列[J]. 地学前缘, 2015, 22(2): 41-53.
- [8] 陈懋弘, 李忠阳, 韦子任, 郭申祥, 杨拓, 傅勇, 吴启强. 广西贵港大平天山岩浆热液成矿系统[C]//第十三届全国矿床会议论文集. 2016: 45-46.
- [9] 王成辉. 广西龙头山金矿区成矿模式及成矿预测[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质科学院, 2011.
- [10] 葛锐. 广西贵港市头闸银铅锌矿床地质特征和成因研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- [11] 陈富文, 李华芹, 梅玉萍. 广西龙头山斑岩型金矿成岩成矿锆石 SHRIMP-U-Pb 年代学研究[J]. 地质学报, 2008, 82(7): 921-926.
- [12] 段瑞春, 凌文黎, 李青, 陈子万, 杨红梅, 刘立芬. 华南燕山晚期构造-岩浆事件与成矿作用——来自广西大瑶山龙头山金矿床的地球化学约束[J]. 地质学报, 2011, 85(10): 1644-1658.
- [13] 黄民智, 陈伟十, 李蔚铮, 许仿实, 李先粤. 广西龙头山次火山-隐爆角砾岩型金矿床[J]. 地球学报, 1999, 20(1): 39-46.
- [14] 陈港, 陈懋弘, 葛锐, 郭申祥, 吴启强. 广西贵港砷矿沟银铅锌矿床控矿因素分析及成矿预测[J]. 大地构造与成矿学, 2022, 46(4): 662-676.
- [15] 叶荣, 王勇, 马丽红, 崔常红. 广西贵港六梅金矿地球化学研究[J]. 现代地质, 2012, 26(5): 1058-1064.
- [16] 华二, 唐林静, 肖德长, 岑志辉. 广西贵港新村金矿地球化学特征及深部找矿前景[J]. 矿产与地质, 2018, 32(5): 927-933, 942.
- [17] 王成辉, 王登红, 李华芹, 康先济, 唐菊兴, 刘善宝. 广西大瑶山隆起西南部平天山辉钼矿 Re-Os 测年及其地质意义[J]. 矿床地质, 2012, 31(S1): 605-606.
- [18] 谢抡司, 孙邦东. 广西贵港市龙头山火山-次火山岩型金矿床地质特征[J]. 广西地质, 1993(4): 27-42.

- [19] 胡理芳, 赖健清, 钱丽华, 陶诗龙. 广西龙头山金矿床流体包裹体特征及矿床成因简析[J]. 矿物学报, 2015, 35(S1): 581.
- [20] 刘延清, 幸福生, 汤静如, 李廖辉, 黄冲. 广西贵港市龙头山铜矿特征及找矿标志[J]. 云南地质, 2020, 39(2): 193-197.
- [21] 朱桂田. 广西龙头山金矿床地质特征及成因研究[J]. 矿产与地质, 2002, 16(5): 266-272.
- [22] 汤睿, 钱晶. 广西贵港白沙金矿床地质特征及深部找矿远景分析[J]. 中国矿业, 2013, 22(4): 54-58.
- [23] 陈港, 陈懋弘, 马克忠, 葛锐, 郭申祥, 吴启强, 原其生. 广西贵港六梅金矿的成因类型及找矿意义[J]. 黄金科学技术, 2020, 28(4): 479-496.