

doi: [10.12097/gbc.2023.09.023](https://doi.org/10.12097/gbc.2023.09.023)

黄铁矿微量元素对广西大瑶山金竹洲金矿床成矿作用的约束

杨晨雨^{1,2}, 张宇^{1,2*}, 王许^{1,2}, 金婷婷³, 赵廉洁^{1,2}, 沈鸿杰^{1,2}
YANG Chenyu^{1,2}, ZHANG Yu^{1,2*}, WANG Xu^{1,2}, JIN Tingting³, ZHAO Lianjie^{1,2}, SHEN Hongjie^{1,2}

1. 中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室,湖南长沙410083;

2. 中南大学地球科学与信息物理学院,湖南长沙410083;

3. 青海省地质调查院,青海西宁810012

1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;

3. Qinghai Provincial Geological Survey, Xining 810012, Qinghai, China

摘要:【研究目的】作为钦杭成矿带的重要组成部分,广西大瑶山地区发育众多金矿床,但由于成矿的精细过程、成矿物质来源等方面缺乏有效的制约,其矿床成因一直存在争议。本次以大瑶山金竹洲金矿床为研究对象,为区域金矿床成因提供约束。【研究方法】黄铁矿是热液矿床中常见的蚀变矿物,其微量元素特征能够在反演物理化学条件、制约成矿精细过程、限制矿床成因等方面发挥重要作用。通过野外地质调查,在成矿过程精细解剖的基础上,借助扫描电镜、电子探针、激光剥蚀等离子质谱仪等测试技术,开展金竹洲黄铁矿内部结构和原位微量元素研究。【研究结果】大瑶山中部的金竹洲金矿床是区内典型金矿床之一,以发育近南北向的含金石英脉为特征,其成矿过程可划分为3个阶段:(I)石英-绢云母-黄铁矿-毒砂阶段;(II)石英-自然金-多金属硫化物阶段;(III)石英-方解石-绿泥石阶段。系统的背散射图像观察发现,I阶段黄铁矿(Py1)发育明显的核-幔-边结构,II阶段多孔状和富硫化物包裹体的黄铁矿(Py2)明显交代I阶段黄铁矿幔部(Py1b)。原位微区微量元素分析显示,Py1核部(Py1a)Co、Ni、Se、Bi等元素含量较高;幔部(Py1b)富集As和Au;边部(Py1c)元素含量普遍偏低;Py2呈现出亏损Au、As的特征。从Py1a、Py1b到Py1c,Co、Ni两种微量元素含量呈下降趋势,反映温度逐渐降低,这可能是导致I阶段黄铁矿出现核-幔-边结构的主要因素;孔洞状且富含包裹体(如方铅矿、辉银矿)的Py2与Py1b的交代界线呈尖锐、突变接触,同时Py2中As、Au等微量元素显著低于Py1b,说明Py2可能是Py1b经过溶解-再沉淀形成的,该作用导致Py1b中的Au发生活化并在II阶段富集沉淀形成自然金。【结论】金竹洲黄铁矿明显富集亲岩浆元素Se($3.76 \times 10^{-6} \sim 73.3 \times 10^{-6}$,平均值 16.5×10^{-6}),结合大瑶山地区普遍发育岩浆热液成因的金矿床及深部存在巨大隐伏岩体的可能,推测金竹洲金矿床可能为岩浆热液成因。

关键词:黄铁矿;微量元素;成矿过程;金矿床;大瑶山地区;广西

创新点:以广西金竹洲金矿床为研究对象,通过黄铁矿的内部结构和化学成分反演成矿的物理化学条件变化,揭示金的沉淀富集机制,结合多方面证据限定金竹洲金矿床的矿床成因。

中图分类号:P578.2⁴92; P618.51 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2025)02/03-0259-17

Yang C Y, Zhang Y, Wang X, Jin T T, Zhao L J, Shen H J. Trace element geochemistry of pyrite from the Jinzhuzhou gold deposit in the Dayaoshan district, Qin-Hang Metallogenic Belt (South China): Implications for the metallogenesis. Geological Bulletin of China, 2025, 44(2/3): 259–275

收稿日期: 2023-09-18; 修订日期: 2024-02-03

资助项目: 湖南省科技创新计划项目《关键金属资源勘查》(编号: 2021RC4055)

作者简介: 杨晨雨(1999-),男,硕士,地质资源与地质工程专业。E-mail: 205011065@csu.edu.cn

* 通信作者: 张宇(1985-),男,博士,副教授,从事矿床学研究。E-mail: zyu2005@csu.edu.cn

Abstract: [Objective] As an important part of the Qin–Hang Metallogenic Belt, the Dayaoshan district develops abundant gold deposits. However, due to the lack of effective constraints on the ore-forming process ore source the genesis of these deposits has always been controversial. The aim of this study is to provide constraints on the deposit genesis of regional gold deposits by taking the Jinzhuzhou gold deposit in the Dayaoshan district as the study object. [Methods] Pyrite is a common mineral in hydrothermal deposits, and its trace element geochemistry can play an important role in constraints on physicochemical conditions, ore-forming process and origin of deposits. In this paper, the internal structure and in situ trace element studies of Jinzhuzhou pyrite are carried out through field geological investigations, on the basis of fine dissection of the metallogenic process, and with the help of SEM, EPMA, LA–ICP–MS and other testing techniques. [Results] The Jinzhuzhou gold deposit is one of the typical gold deposits in this district, and characterized by the NS-trending ore-bearing quartz veins. Its mineralization can be divided into three stages: (I) Quartz–sericite–pyrite–arsenopyrite stage; (II) Quartz–native gold–polymetallic sulfide stage; (III) Quartz–calcite–chlorite stage. Systematic back-scattering imaging observations revealed that the Stage I pyrite (Py1) has developed a distinct core–mantle–rim texture, while the porous Stage II pyrite (Py2) trapping some sulfide inclusions commonly replaces the mantle zone (Py1b) of Py1. In-situ LA–ICP–MS trace element analysis showed that the core zone (Py1c) of Py1 is enriched in Co, Ni, Se, and Bi. Py1b is commonly enriched in As and Au, while the rim zone of (Py1c) of Py1 is commonly depleted in trace elements. Generally, Py2 is characterized by the depletion of Au–As. Notably, the Co–Ni concentrations declines from Py1a, through Py1b, to Py1c, suggesting a gradual decreasing temperature, which may have been responsible for the core–mantle–rim texture of Py1. Moreover, the sharp and irregular contact boundary between Py2 and Py1b, abundant porosities and mineral inclusion of Py2, and the lower Au–As concentrations of Py2 than Py1b, indicate that Py2 may have been formed via dissolution and precipitation of Py1b. This process results in the remobilization of gold solid solution within Py1b and the further precipitation of visible gold in Stage II. [Conclusions] Generally, the Jinzhuzhou pyrite is obviously enriched in Se ($3.76 \sim 73.3 \times 10^{-6}$, with an average of 16.5×10^{-6}). Combining with the widespread development of magmatic–hydrothermal gold deposits, and the possible concealed magmatic pluton in the Dayaoshan district, it is inferred that the Jinzhuzhou gold deposit may have been magmatic hydrothermal origin.

Key words: pyrite; trace element; ore-forming process; Jinzhuzhou gold deposit; Dayaoshan district; Guangxi

Highlights: Taking Jinzhuzhou gold deposit as the research object, the internal structure and chemical composition of pyrite are used to invert the physicochemical conditions of mineralization, to reveal the mechanism of gold precipitation and enrichment, and to qualify the genesis of Jinzhuzhou gold deposit by combining various evidences.

黄铁矿是地壳中最常见的硫化物之一,广泛分布于各类成矿系统中,在成矿过程中发挥着微量元素“清除剂”和成矿过程“监视器”的重要作用(Reich et al., 2013; Román et al., 2019)。研究黄铁矿的物理结构、化学成分,能够为研究热液系统的演化提供关键信息(Velásquez et al., 2014; Keith et al., 2018; Román et al., 2019),进而反演精细成矿过程,并制约矿床成因(Velásquez et al., 2014; Gregory et al., 2015; Zhang et al., 2017; Keith et al., 2022)。因此,黄铁矿一直是许多金矿床成因研究的重点内容,如与岩浆相关的热液型金矿床(Feng et al., 2020)、浅层低温热液型金矿床(Keith et al., 2020; Ma et al., 2022)、造山型金矿床(Cook et al., 2013; Gregory et al., 2015; Belousov et al., 2016; Wu et al., 2019; 曹根深等, 2023)、卡林型金矿床(Large et al., 2009)、斑岩型金矿床(Zhang et al., 2020a; Keith et al., 2022)、矽卡岩型金矿床(Zhang et al., 2022)等的研究。

大瑶山地区作为钦杭成矿带的重要组成部分,是广西著名的金矿床产区,以发育大中小型金矿床(点)200余处而闻名,包括龙头山、湾岛、古袍、桃花等矿床(蔡明海和刘国庆, 2000; 朱桂田等, 2002; Zhang et al., 2014; 肖柳阳等, 2015)。该区是一个由寒武系和震旦系组成的隆起区,构造-岩浆演化复杂,成矿条件优越,前人对区内金矿床的矿床地质特征、成矿地质条件、流体物理化学条件演化、成矿物质来源等方面进行了研究并取得诸多成果(汪劲草等, 2010; 胡乔帆等, 2011; Zhang et al., 2014; Qian et al., 2019; Dang et al., 2020),但由于对成矿的精细过程、成矿物质来源等缺乏有效的制约,其矿床成因一直存在争议,主要观点包括岩浆热液成因(肖柳阳等, 2015; 李忠阳等, 2018)、变质热液-岩浆热液叠加改造而成因(赖昕等, 2017)及变质热液成因(王新宇等, 2013)。本次以大瑶山中部的金竹洲金矿床为研究对象,通过野外地质调查,在对成矿过程精细解剖的基

础上, 借助扫描电镜(SEM)、电子探针(EPMA)、激光剥蚀等离子质谱仪(LA-ICP-MS)等测试技术, 开展黄铁矿内部结构和原位微量元素研究, 查明金竹洲金矿床的成矿过程和成矿物理化学条件, 并对成矿物质来源提供约束, 综合分析其矿床成因, 为大瑶山地区金矿床成矿作用提供约束。

1 区域地质背景

大瑶山地区地处广西东部, 向东接两广交界, 向西抵于大明山, 大致呈 EW 向展布, 是钦杭成矿带的重要组成部分(图 1)。大地构造位置上, 属于南华准地台桂中-桂东台陷大瑶山凸起, 向北接桂北坳陷, 向南与云开隆起和钦防海西地槽毗邻(胡乔帆等, 2011)。区内广泛出露震旦系、寒武系、泥盆系、白垩系及古近系—新近系, 其中寒武系分布最广泛(盛志华, 2005), 是重要的赋矿地层。震旦纪—志留纪,

该区是华南地槽区的重要组成部分, 志留纪末发生强烈的加里东运动, 地层褶皱隆起, 同时发生区域变质作用, 构造上形成一系列近 EW 向紧密线性褶皱和大黎深断裂; 中三叠世末, 发生强烈的印支运动, 形成横跨褶皱叠加于加里东期褶皱之上; 燕山期, 又发生断块运动, 形成断陷盆地和少量火山盆地(陈懋弘等, 2019)。多期次构造运动导致区内岩浆活动频繁且强烈, 花岗质岩浆岩可划分为加里东期、海西期—印支期、燕山早期及燕山晚期, 单体规模较小, 呈岩株、岩脉、岩枝产出; 整个区域的岩浆岩以中酸性岩石为主, 中性岩浆岩包括石英二长岩、石英闪长岩, 酸性岩浆岩包括英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩(陈懋弘等, 2015; 秦亚等, 2015)。大瑶山地区矿产资源丰富, 铅、锌、钨、锡、金、银、铜等矿床密集成群分布, 包括龙头山、湾岛、古袍、桃花等大中小型金矿床(点)200 余处(刘国庆

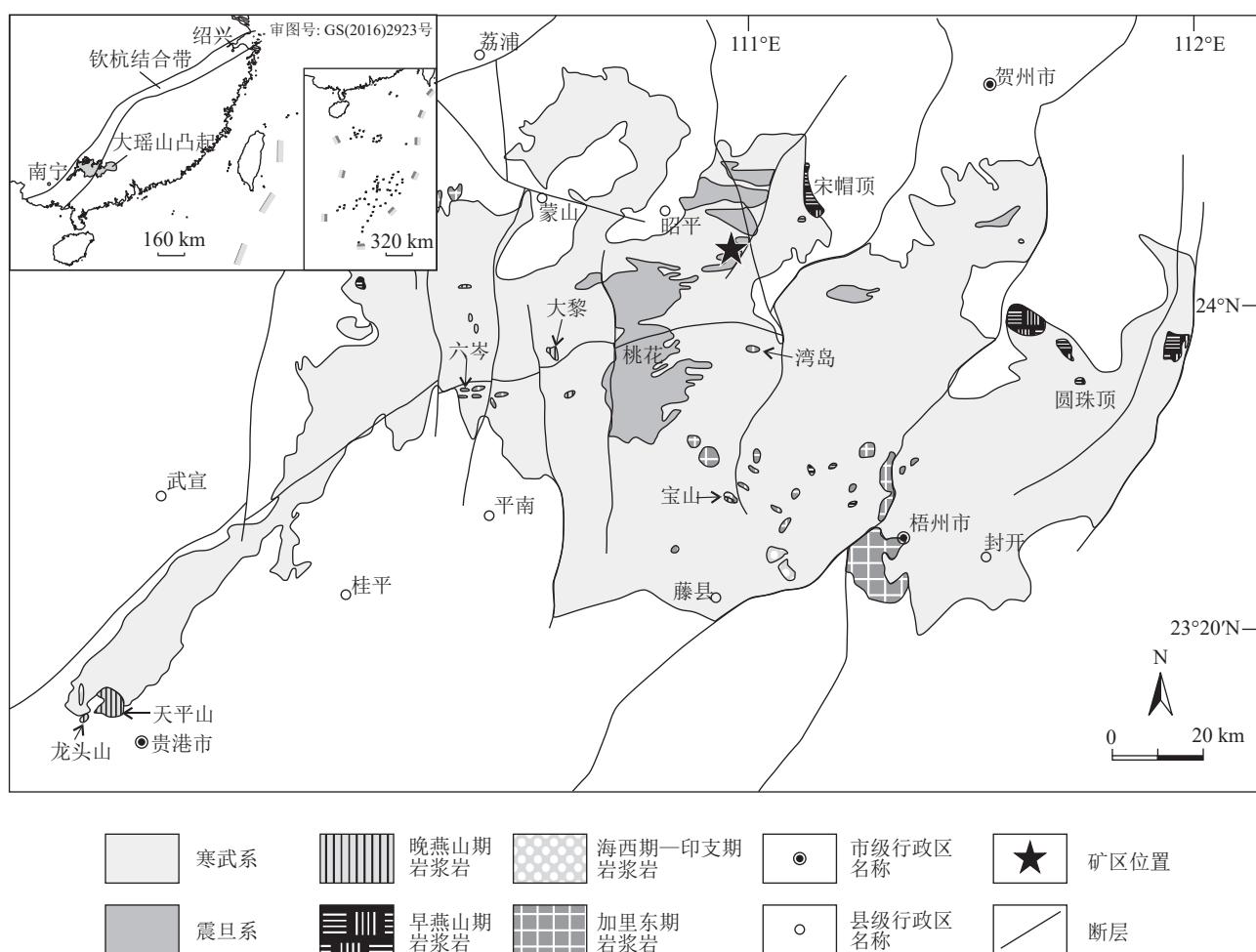


图 1 大瑶山地区地质简图(据陈懋弘等, 2015 修改)

Fig. 1 Regional geological map of the Dayaoshan district

和蔡明海, 2004; Zhang et al., 2014; 肖柳阳等, 2015; Qian et al., 2019)。

2 矿床地质特征

金竹洲金矿床位于大瑶山中部, 矿区主要出露地层为震旦系培地组, 另有寒武系小内冲组出露于矿区南部, 少量第四系出露于矿区东部(图2-a)。震旦系培地组下段以细—中粒含长石砂岩、杂砂岩、泥质砂岩为主, 上段以细—中粒砂岩、杂砂岩、粉砂岩为主, 两段均为矿区主要赋矿层位; 寒武系小内冲组下段以灰—深灰色砂岩、粉砂岩为主。矿区构造相对简单, 构造发育石柱顶背斜, 轴向近EW, 轴面近乎直立, 其核部控制了矿区大多数金矿脉展布; 断裂主要发育有NW向剪性平移—逆断层, 倾向为230°~265°, 倾角为45°~77°, 是矿区主要的容矿构造。矿区未见岩浆岩出露。

矿区共探明4个金矿体, 分别是I-1、II-1、III-1、III-2, 均分布于震旦系断层破碎带中(图2)。I-1号矿体分布于I号含金矿脉中, 严格受到NNW向断裂F₁控制, 矿体长度约300 m, 平均厚1.36 m, 厚度变化稳定; II-1号矿体分布于II号含金矿脉中, 严格受NNW向断裂F₂控制, 长度约250 m, 平均厚

1.31 m; III-1号矿体分布于III号含金矿脉中, 严格受NW向断裂F₃控制, 矿体长度约200 m, 平均厚1.40 m; III-2号矿体分布于III号含金矿脉中, 矿体长度约300 m, 平均厚3.01 m。这些矿体总体呈脉状、透镜状, 与断层产状基本相同, 沿走向和倾向具有膨大或缩小现象, 局部出现分枝、尖灭重现等现象, 连续性较好。

根据矿物共生、交代、穿插关系及矿物组合差异, 金竹洲金矿床的成矿过程可以划分为一期(成矿热液期), 共3个阶段(图3): 石英-绢云母-黄铁矿-毒砂阶段(I)、石英-自然金-多金属硫化物阶段(II)、石英-方解石-绿泥石阶段(III)。

I阶段以形成含黄铁矿、毒砂和绢云母的石英脉为特征(图4-a), 脉宽5~10 cm, 脉壁较平整, 脉中黄铁矿和毒砂颗粒呈细脉状分布(图4-b), 黄铁矿呈自形—半自形粒状结构, 少量为晶形较好的立方体或五角十二面体, 粒径50~800 μm; 毒砂(50~600 μm)为自形—半自形粒状结构(图4-b, e); 石英脉中偶见绢云母(图4-c), 围岩多发育绢英岩化蚀变, 泥质及含长石砂岩中可见黄绿色鳞片状绢云母。

II阶段以形成石英-自然金-磁黄铁矿-黄铁矿-方铅矿-闪锌矿的矿物组合为特征(图4-d~g), 并明显

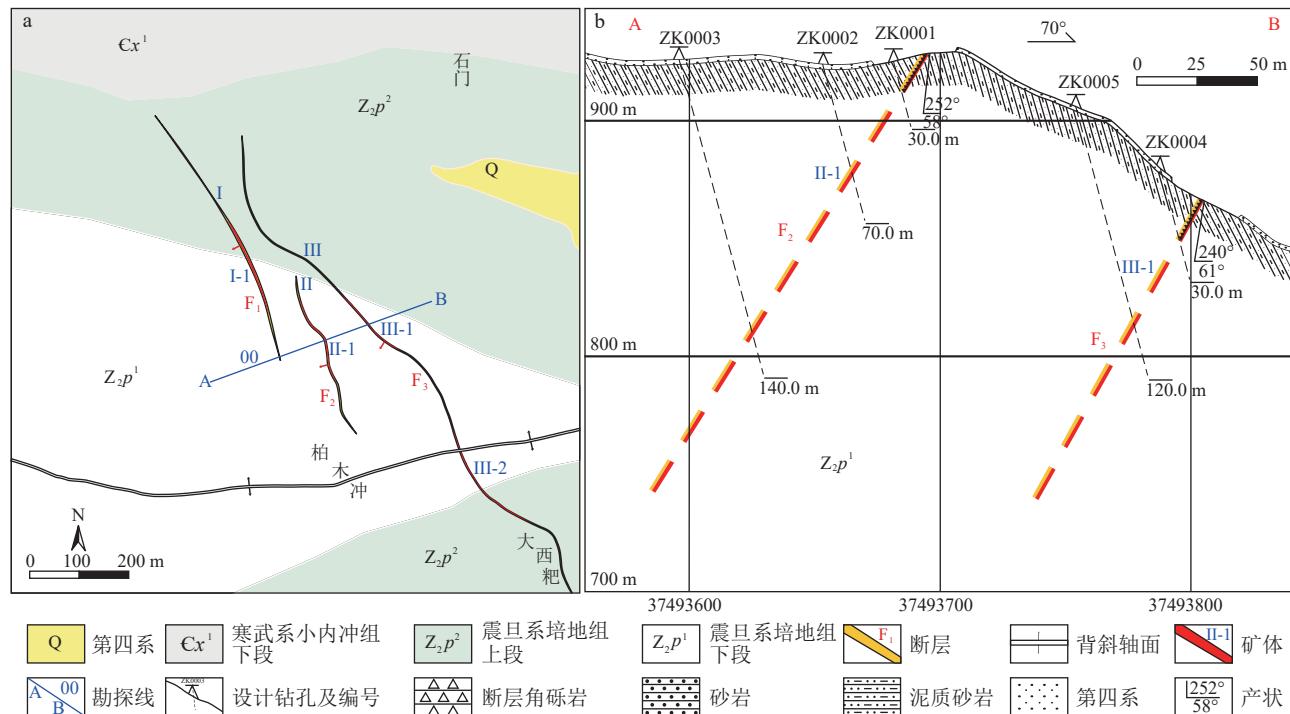


图2 金竹洲金矿床矿区地质图(a)和00号勘探线设计剖面图(b)(据广西昭平县金竹洲金矿勘查(变更)实施方案, 2017修改)

Fig. 2 Geological map of Jinzhuzhou gold deposit (a) and design section of exploration line 00 (b)

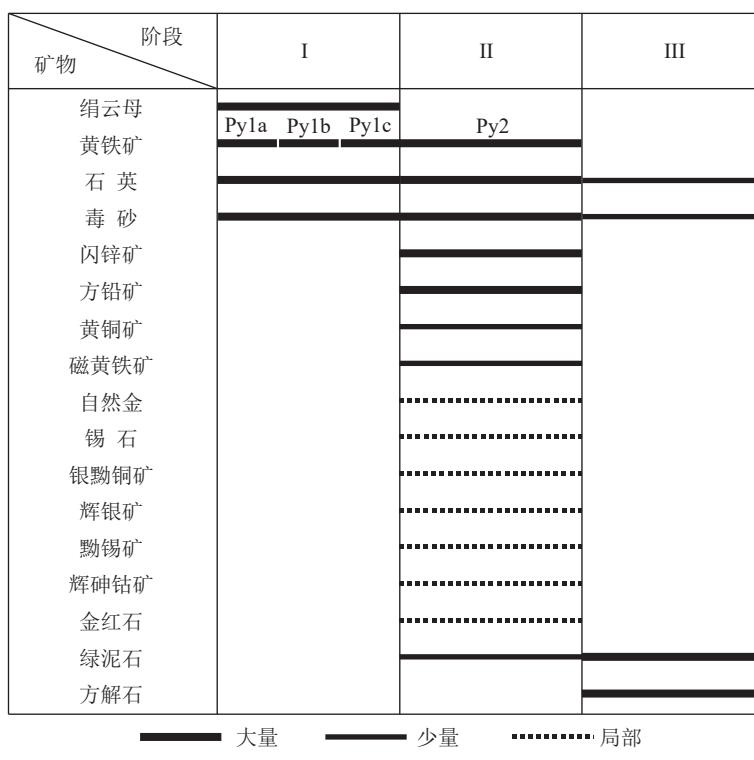


图3 金竹洲金矿床矿物共生组合

Fig. 3 Mineral paragenesis of the Jinzhuzhou gold deposit

交代 I 阶段中的黄铁矿-毒砂矿物组合。该阶段黄铁矿明显发育密集的孔洞和矿物包裹体(图 4-d); 毒砂(10~800 μm)多为半自形粒状结构和碎裂结构(图 4-f), 明显交代 I 阶段黄铁矿(图 4-f); 闪锌矿通常为他形粒状结构的大颗粒集合体(50~500 μm), 在其内部分布有大量乳滴状黄铜矿(1~10 μm), 闪锌矿与黄铜矿呈现明显的固溶体分离结构(图 4-d~f), 可见闪锌矿交代 I 阶段黄铁矿(图 4-d) 和毒砂(图 4-e); 粒径较大的方铅矿(100~500 μm)颗粒内部常见 3 组解理相交形成的典型黑三角孔, 与闪锌矿共生且交代、穿插 I 阶段黄铁矿(图 4-d, e); 自然金(5~30 μm)呈他形粒状结构, 多与磁黄铁矿(10~20 μm)共生(图 4-g); 可见呈他形粒状结构的黝锡矿(80~100 μm)、黄铜矿(20~50 μm)、辉银矿(3~5 μm)、闪锌矿(20~30 μm)、锡石(5~10 μm)、银黝铜矿(5~10 μm)共生, 并且交代 I 阶段黄铁矿(图 4-h); 局部有少量他形粒状结构的金红石(30~50 μm)与 II 阶段黄铁矿共生(图 4-i), 少量他形粒状结构的辉砷钴矿(20~50 μm)与磁黄铁矿(100~500 μm)共生(图 4-j)。围岩发育硅化蚀变, 蚀变围岩伴随有轻微褪色。

III 阶段以形成含绿泥石、石英和少量毒砂的方

解石脉为特征, 可见 III 阶段方解石脉穿切 I 阶段石英脉, 该阶段矿脉宽 5~20 cm, 脉中绿泥石呈现蠕虫状, 与石英、方解石共生(图 4-k), 局部有少量细粒毒砂(20~200 μm)与方解石共生(图 4-l)。脉侧围岩发育碳酸盐化蚀变, 表现为方解石呈粒状集合斑点浸染于脉旁围岩。

3 样品采集与分析方法

3.1 样品采集情况

在野外地质调查的基础上, 本次研究从金竹洲金矿床地下采场采集了 24 件样品并磨制光薄片, 经过反射和透射偏振光显微镜观察, 基于黄铁矿生成的成矿阶段(I 阶段和 II 阶段)及黄铁矿颗粒粒径能否开展 LA-ICP-MS 等测试来筛选 10 件(表 1)富含黄铁矿的样品, 而后开展 BSE 成像并观察黄铁矿结构, 对不同类型黄铁矿进行原位 LA-ICP-MS 微区微量元素分析, 分析其地球化学特征。

3.2 SEM-BSE 成像

SEM-BSE 成像在中南大学地球科学与信息物理学院扫描电镜实验室完成, 使用型号为日本电子 JCM-7000 的扫描电镜观察 I 阶段和 II 阶段黄铁矿, 测试开始前对光薄片抛光并作喷碳处理, 仪器工作

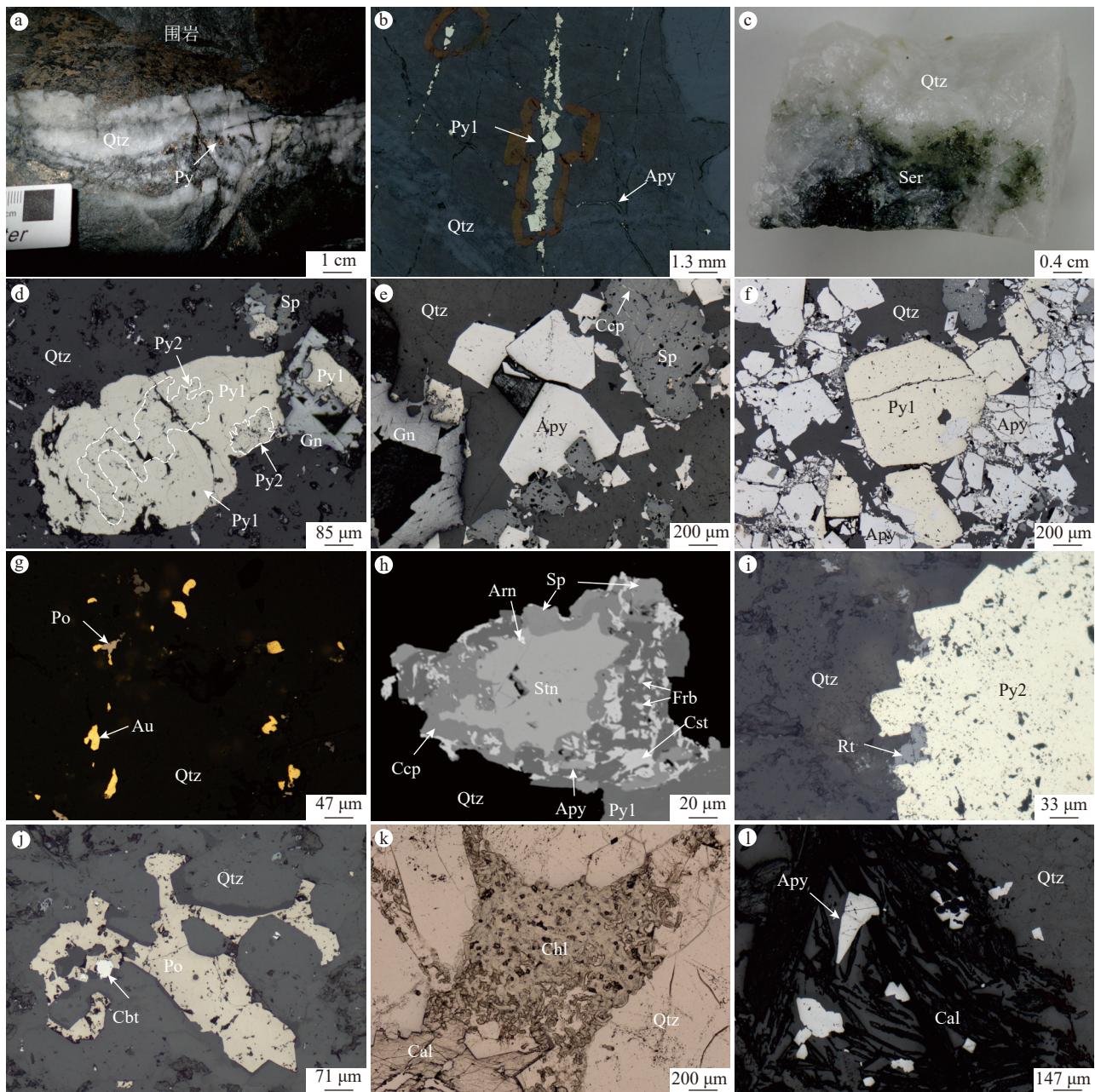


图 4 金竹洲金矿床典型地质特征照片

Fig. 4 Typical geological characteristics of the Jinzhuzhou gold deposit

a—I阶段和II阶段石英脉及脉内黄铁矿等硫化物; b—I阶段石英脉中的自形-半自形粒状结构黄铁矿(50~800 μm)和毒砂(50~100 μm); c—I阶段石英脉中的绢云母; d—II阶段黄铁矿发育更多孔洞和矿物包裹体,并明显交代I阶段黄铁矿; e—II阶段闪锌矿、方铅矿交代I阶段毒砂,闪锌矿与黄铜矿呈固溶体分离结构; f—II阶段毒砂多呈半自形粒状结构和碎裂结构,并交代I阶段黄铁矿; g—II阶段呈他形粒状结构的自然金(5~30 μm)与他形粒状结构的磁黄铁矿共生; h—II阶段呈他形粒状结构的黝锡矿、黄铜矿、辉银矿、闪锌矿、锡石、银黝铜矿共生,并交代I阶段黄铁矿(BSE); i—II阶段中金红石与黄铁矿共生; j—II阶段他形粒状结构磁黄铁矿与辉砷钴矿共生; k—III阶段石英、方解石、绿泥石共生,其中绿泥石呈蠕虫状; l—III阶段中方解石与呈他形粒状结构毒砂共生。Apy—毒砂; Arn—辉砷矿; Au—自然金; Cal—方解石; Cbt—辉砷钴矿; Ccp—黄铜矿; Chl—绿泥石; Cst—锡石; Frb—银黝铜矿; Gn—方铅矿; Po—磁黄铁矿; Py—黄铁矿; Qtz—石英; Rt—金红石; Ser—绢云母; Sp—闪锌矿; Stn—黝锡矿

电压 15 kV, WD 为 15.8 mm, 测试在高真空气环境
下进行。

3.3 EMPA 主量元素分析

黄铁矿的 EMPA 分析在广州拓岩测试技术有限

表 1 金竹洲金矿床手标本特征

Table 1 Hand specimen characteristics of the Jinzhuzhou gold deposit

序号	样品号	主要矿物组合	手标本特征	成矿阶段
1	J1-7	石英-黄铁矿	石英脉, 脉中含黄铁矿细脉	I 阶段
2	J4-2	石英-黄铁矿	石英脉, 脉中含少量黄铁矿	I 阶段
3	J5-3	石英-黄铁矿	石英脉, 脉中含黄铁矿细脉	I 阶段
4	J6-4	石英-黄铁矿	石英脉边部蚀变晕	I 阶段
5	J1-5a	石英-黄铁矿-毒砂-方铅矿-闪锌矿	石英脉及两侧蚀变带, 脉中含大量硫化物	II 阶段
6	J1-5b	石英-黄铁矿-毒砂-方铅矿-闪锌矿	石英脉及两侧蚀变带, 脉中含大量硫化物	II 阶段
7	J5-1a	石英-黄铁矿-毒砂-方铅矿-闪锌矿	石英脉, 脉中黄铁矿等多金属硫化物呈细脉状	II 阶段
8	J5-1b	石英-黄铁矿-毒砂-方铅矿-闪锌矿	石英脉, 脉中黄铁矿等多金属硫化物呈细脉状	II 阶段
9	J7-1	石英-黄铁矿-毒砂-方铅矿-闪锌矿	石英硫化物脉, 脉中含大量硫化物	II 阶段
10	J7-2	石英-黄铁矿-毒砂-方铅矿-闪锌矿	石英脉, 脉中含少量硫化物	II 阶段

公司完成, 仪器型号为 JEOL(日本电子) JXA-iSP100 型电子探针显微分析仪, 仪器工作电压 20 kV, 工作电流 20 nA, 分析束斑大小 1 μm, 标准样品为英国 MAC 矿物/金属标准和中国国家标准样品 GSB, 测试元素种类包括 Fe、Co、Ni、Cu、S、As、Sb、Ag、Pb、Au, 所有数据采用 ZAF 方法基体校正。

3.4 LA-ICP-MS 微量元素分析测试方法

黄铁矿的原位 LA-ICP-MS 微区微量元素测试在广州拓岩测试技术有限公司完成, 仪器采用的激光剥蚀系统为 New Wave Research 193 nm ArF, 与 Thermo Scientific iCap-RQ 四极杆型电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 联用。测试了黄铁矿中的 19 种同位素: ^{34}S 、 ^{55}Mn 、 ^{57}Fe 、 ^{59}Co 、 ^{60}Ni 、 ^{65}Cu 、 ^{66}Zn 、 ^{71}Ga 、 ^{72}Ge 、 ^{75}As 、 ^{82}Se 、 ^{97}Mo 、 ^{107}Ag 、 ^{121}Sb 、 ^{125}Te 、 ^{197}Au 、 ^{205}Tl 、 ^{208}Pb 、 ^{209}Bi 。准分子激光发生器产生的深紫外光束经过匀化光路聚焦于样品表面, 激光能量密度、重复频率、光斑尺寸依次为 3.0 J/cm²、6 Hz、30 μm。测试过程以氦作为载气、氩作为补充气调节灵敏度。使用玻璃标准物质 NIST SRM610 和 MASS-1 多外标校正, 同时内标 ^{57}Fe 采用 EPMA 测定数据校正, SRM612 和 GE8 作为监控样品。每个时间分辨分析数据包括 40 s 空白信号和 45 s 样品信号。数据离线处理在 IOLITE 软件中的 3D Trace Elements DRS 模式下完成。

4 测试结果

4.1 黄铁矿内部结构

在本次研究中, 选取了 10 件含较多黄铁矿的样

品 (表 1) 进行 BSE 检测成像 (图 5)。I 阶段黄铁矿 (Py1) 呈自形—半自形粒状结构, 均匀深色具有一定孔洞的部分是其核部, 围绕着核部生长、色泽表现较亮的是幔部, 在幔部外围生长的则是边部。该阶段黄铁矿的核部、幔部、边部彼此之间接触界线平整规则, 暗示其为连续生长的结果, 所以 I 阶段黄铁矿的内部结构可划分为核 (Py1a)-幔 (Py1b)-边 (Py1c) 结构。II 阶段黄铁矿 (Py2) 表现为深色, 发育密集的孔洞和矿物包裹体 (如方铅矿、辉银矿等), 明显交代 I 阶段黄铁矿的幔部 (Py1b)。Py2 与 Py1b 之间具有尖锐、突变的接触边界 (图 5)。

4.2 EPMA 主量元素特征

黄铁矿共进行了 20 个 EPMA 点分析 (元素的检出限为 0.01%), 其中 Py1a、Py1b、Py1c、Py2 分别检测 5 个点。结果表明 (表 2), Py1a、Py1b、Py1c、Py2 的 S 含量分别为 53.6%~53.8% (平均 53.75%)、52.1%~53.5% (平均 52.93%)、52.8%~54.2% (平均 53.69%)、54.0%~54.5% (平均 54.22%), Fe 含量分别为 46.1%~46.4% (平均 46.27%)、45.8%~46.3% (平均 46.02%)、46.0%~46.3% (平均 46.17%)、46.4%~46.6% (平均 46.51%)。4 种黄铁矿中, Py1b 的 As 含量显然高于其他 3 种黄铁矿。

4.3 LA-ICP-MS 微量元素特征

本次测试完成 55 个黄铁矿 LA-ICP-MS 点分析, Py1a、Py1b、Py1c 各 15 个点, Py2 为 10 个点, 测试数据见表 3。在黄铁矿测试数据的基础上, 制作了 4 种类型黄铁矿的微量元素箱线图 (图 6)。经分析, Cu、Zn、Ge、As、Ag、Sb、Au、Tl、Pb、Bi 等元素

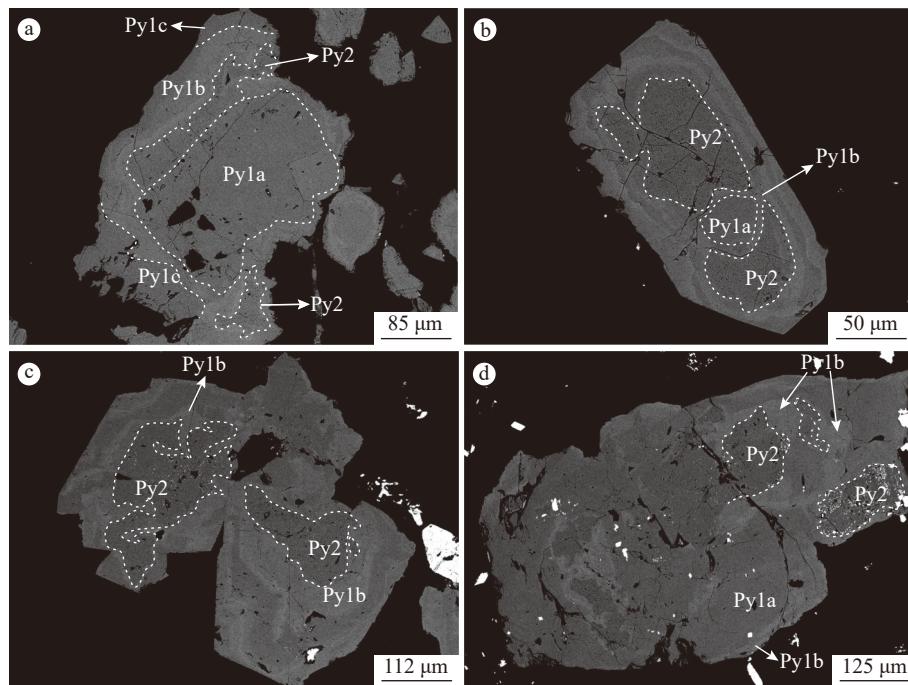


图 5 金竹洲金矿床黄铁矿典型背散射图像

Fig. 5 Representative BSE images of pyrite from the Jinzhuzhou gold deposit

a—I阶段黄铁矿发育明显的核(Py1a)-幔(Py1b)-边(Py1c)结构,Py2交代Py1b;b~d—Py2发育大量孔洞和矿物包裹体

表 2 金竹洲金矿床黄铁矿电子探针分析结果

Table 2 Electron microprobe analyses of pyrite from the Jinzhuzhou gold deposit

%

样品	黄铁矿类型	S	Fe	As	Co	Ni	Cu	Pb	Sb	Ag	Au	总量
J1-7	Py1a	53.77	46.14	0.23	-	-	-	-	-	-	0.02	100.17
J1-7	Py1a	53.69	46.20	0.25	-	-	-	-	-	-	0.04	100.18
J1-7	Py1a	53.84	46.37	0.02	-	0.07	-	0.02	-	-	-	100.32
J5-1b	Py1a	53.84	46.23	0.96	-	-	-	-	-	-	-	101.04
J5-1b	Py1a	53.62	46.40	0.64	-	-	-	-	-	-	-	100.66
J1-7	Py1b	53.12	46.13	1.48	-	-	0.01	-	-	-	-	100.74
J1-7	Py1b	52.87	45.80	1.50	-	-	-	0.04	-	-	0.02	100.23
J5-1b	Py1b	52.10	45.84	2.27	-	-	0.02	-	-	-	-	100.22
J5-1b	Py1b	53.11	46.09	1.45	-	-	0.01	-	-	-	-	100.67
J5-1b	Py1b	53.49	46.26	1.31	-	-	-	0.03	-	-	-	101.06
J1-7	Py1c	54.23	46.33	-	-	-	-	-	-	-	0.03	100.60
J1-7	Py1c	53.49	46.23	-	-	0.01	-	-	-	-	-	99.74
J1-7	Py1c	54.06	46.24	-	-	-	-	-	-	-	0.05	100.36
J1-7	Py1c	52.80	46.00	-	-	-	0.02	-	-	0.01	0.02	98.86
J1-7	Py1c	53.76	46.05	-	-	-	-	-	-	-	0.05	99.86
J5-1b	Py2	54.49	46.50	-	-	-	-	-	-	-	-	101.00
J5-1b	Py2	54.33	46.44	-	-	-	0.03	0.02	-	-	-	100.83
J5-1b	Py2	54.20	46.58	-	-	-	0.01	0.09	-	-	0.02	100.89
J5-1b	Py2	53.99	46.52	-	-	-	-	-	-	-	-	100.51
J5-1b	Py2	54.11	46.52	0.05	-	0.01	-	0.03	-	-	-	100.73

注：“-”表示低于检出限

表3 金竹洲金矿床黄铁矿微量元素含量

Table 3 Electron microprobe analyses of pyrite from the Jinzhuzhou gold deposit

 10^{-6}

类型	点号	Co	Ni	Cu	Zn	Ge	As	Se	Mo	Ag	Sb	Te	Au	Tl	Pb	Bi
Pyla	J1-7-PY1	-	3.24	0.500	-	3.98	3356	-	-	-	-	-	-	-	0.061	-
Pyla	J1-7-PY5	0.624	0.913	6.46	0.934	3.29	9587	-	-	1.05	5.84	-	4.11	0.367	18.1	0.234
Pyla	J1-7-PY9	0.104	210	5865	739	3.54	8233	-	-	26.5	6.11	-	0.261	0.053	31.2	0.554
Pyla	J1-7-PY11	0.250	38.9	1.99	7.67	2.69	10068	6.82	-	0.383	1.17	-	1.52	0.024	13.9	0.162
Pyla	J1-7-PY14	0.122	1.33	450	9.06	2.61	19613	9.04	-	13.9	45.1	-	14.0	0.430	201	0.300
Pyla	J1-7-PY19	2.66	1513	105292	8354	2.62	2639	-	-	269	21.7	-	1.53	0.171	111	0.970
Pyla	J4-2PY21	11.5	47.6	326	42.4	3.19	23884	-	-	17.8	46.1	-	2.24	0.234	89.9	0.567
Pyla	J4-2PY22	4.51	-	11.1	6.17	2.91	2828	33.9	-	3.98	37.7	-	-	0.203	73.9	0.482
Pyla	J5-1aPY25	2.29	2.44	26.2	9.60	2.62	19190	11.7	0.060	1.85	9.61	-	2.65	0.160	68.2	-
Pyla	J7-1PY31	0.157	0.804	10.0	1.47	3.00	15304	4.74	-	21.4	28.3	-	2.70	0.238	20987	0.287
Pyla	J7-1PY37	0.080	0.944	84.5	3.18	3.54	28278	38.9	-	65.5	117	-	12.1	0.324	52573	4.79
Pyla	J1-5bPY48	-	-	10.2	-	1.23	20381	15.3	0.043	0.269	0.512	-	6.18	0.052	5.85	-
Pyla	J1-5bPY49	76.0	110	9.69	2.61	3.80	25608	23.8	0.444	5.02	4.94	-	4.96	0.159	9545	0.186
Pyla	J1-5bPY54	-	2.66	2.93	1.07	2.58	735	-	-	4.67	5.86	-	0.321	0.054	13.1	-
Pyla	J1-5bPY57	-	-	5.23	0.950	2.60	7676	-	-	8.23	13.4	-	0.303	0.136	72.2	-
Pylb	J1-7-PY4	-	-	60.8	-	3.49	32623	-	-	1.42	2.36	-	7.53	0.044	16.4	0.026
Pylb	J1-7-PY12	0.143	0.715	88.6	1.50	2.95	18949	-	-	14.5	119	-	4.26	1.11	435	0.175
Pylb	J1-7-PY16	0.776	10.8	347	14.2	2.89	20160	16.2	-	8.55	23.2	-	36.8	0.599	60.2	0.070
类型	点号	Co	Ni	Cu	Zn	Ge	As	Se	Mo	Ag	Sb	Te	Au	Tl	Pb	Bi
Pylb	J7-1PY27	0.313	-	101	0.770	3.75	23947	-	-	78.3	305	-	8.50	0.525	1947	-
Pylb	J7-1PY29	-	-	131	0.699	2.88	23449	-	0.097	109	429	-	9.06	0.799	2539	-
Pylb	J7-1PY33	1.33	1.19	81.8	1.14	3.37	57128	4.82	-	69.2	301	-	3.78	0.732	1665	-
Pylb	J7-1PY38	0.167	2.08	63.7	-	3.14	18728	73.3	-	186	268	1.41	4.96	0.671	587923	51.6
Pylb	J5-1bPY41	2.72	20.6	48.6	1.57	2.79	24325	6.96	0.192	7.08	24.5	-	3.69	0.200	161	0.008
Pylb	J5-1bPY42	0.057	1.90	345	1.76	3.32	23656	6.95	0.071	16.5	72.0	-	10.8	0.430	665	0.184
Pylb	J5-1bPY45	-	-	82.3	1.96	3.18	35368	9.71	0.042	3.71	31.8	-	13.5	0.075	208	0.042
Pylb	J5-1bPY46	0.089	-	139	39.1	3.30	26071	10.0	1.23	12.8	35.6	-	12.9	0.309	414	0.077
Pylb	J1-5bPY52	-	-	13.9	-	3.37	23581	-	0.086	0.132	0.435	-	2.21	-	8.20	-
Pylb	J1-5bPY56	-	-	124	0.791	2.76	33410	-	0.057	6.79	27.4	-	7.69	0.030	130	-
Pylb	J1-5bPY58	-	-	245	0.825	3.15	50595	-	0.045	4.12	5.88	0.058	14.7	0.041	21.1	-
Pylb	J7-1@50	16.5	423	162	11.3	-	35921	-	-	146	532	-	9.74	0.863	2743	0.178
Pylc	J1-7-PY2	-	-	71.5	-	3.51	8218	-	-	1.08	9.30	-	0.937	0.042	9.05	-
Pylc	J1-7-PY3	-	-	24.1	0.696	4.35	-	-	-	2.13	15.1	-	-	0.766	6.00	-
Pylc	J1-7-PY7	-	-	28.0	-	4.31	206	-	-	2.63	7.72	-	-	0.068	1.93	-
Pylc	J1-7-PY8	-	-	1583	5.63	4.34	10649	-	0.063	17.6	32.9	-	3.06	1.46	69.3	0.040
Pylc	J1-7-PY10	-	-	56.8	-	3.16	16912	-	0.044	0.945	8.31	-	1.06	0.124	11.4	-
Pylc	J1-7-PY15	-	-	46.7	-	3.26	237	-	-	3.80	16.5	-	0.188	0.585	2.00	-
Pylc	J1-7-PY18	-	-	710	27.2	3.11	579	-	-	9.08	34.4	-	0.824	5.70	42.4	0.019
Pylc	J7-1PY26	-	-	36.3	17.0	1.32	13206	-	0.030	32.8	109	-	5.35	0.228	686	-
类型	点号	Co	Ni	Cu	Zn	Ge	As	Se	Mo	Ag	Sb	Te	Au	Tl	Pb	Bi
Pylc	J7-1PY34	0.161	-	3.47	2.84	2.72	8316	-	-	1.55	0.942	-	3.62	0.010	16.4	-
Pylc	J7-1PY36	-	-	8.27	1.08	3.26	21571	-	-	1.50	4.91	-	3.43	-	33.4	-
Pylc	J7-1PY39	-	1.97	31.3	2.10	2.82	12356	-	-	19.8	70.9	-	5.69	0.173	821	0.086

续表3

类型	点号	Co	Ni	Cu	Zn	Ge	As	Se	Mo	Ag	Sb	Te	Au	Tl	Pb	Bi
Py1c	J1-5bPY51	-	-	1.10	1.60	3.37	7206	-	-	-	-	-	0.159	-	0.701	-
Py1c	J1-5bPY55	1.94	-	34.9	7.66	3.34	56854	-	-	9.68	12.1	-	2.39	0.079	60.8	-
Py1c	J1-5a@14	-	-	3.13	-	-	7312	-	-	2.45	5.72	-	0.320	0.034	19.4	-
Py1c	J1-5a@15	-	-	5.49	-	-	19224	-	-	-	-	-	0.650	-	0.390	-
Py2	J1-7-PY6	0.690	0.799	2612	81.4	3.69	4443	-	0.051	63.9	146	-	1.06	9.86	646	0.066
Py2	J1-7-PY13	-	-	2797	875	3.63	1849	-	-	84.3	218	-	0.242	1.63	1487	0.112
Py2	J5-1aPY23	1.06	24.6	655	126	2.92	894	-	0.501	127	130	-	0.487	1.32	2550	0.558
Py2	J5-1aPY24	-	-	657	103	2.93	10590	11.6	-	82.3	223	-	0.592	0.693	11498	0.030
Py2	J7-1PY40	-	0.768	16.9	1.23	3.06	3191	-	-	20.0	61.2	-	0.067	0.375	4496	0.049
Py2	J5-1bPY43	7.02	6.81	1740	9.01	3.29	6204	9.57	0.179	21.9	9.70	-	0.592	0.099	245	0.077
Py2	J5-1bPY44	-	-	783	818	3.44	250	3.76	0.643	41.5	46.3	-	0.233	0.636	1354	-
Py2	J1-5bPY47	0.345	6.01	167	162	3.51	7572	-	-	495	138	-	0.879	1.25	1038	0.354
Py2	J1-5bPY50	-	-	113	154	2.97	1568	-	-	2.18	4.33	-	0.081	-	84.4	0.027
Py2	J1-5bPY53	-	-	914	36.1	2.56	8.77	-	-	12.8	6.80	-	-	0.006	58.4	0.028
元素平均检出限		0.098	0.806	0.827	1.43	0.696	1.56	5.97	0.125	0.049	0.238	0.510	0.051	0.008	0.071	0.016

注:“-”表示低于检出限

的含量基本都高于检测限, Co、Ni、Se、Mo 等元素高于检测限, Te 含量基本在检测限以下。不同类型黄铁矿之间微量元素含量存在较大差异。与 Py1b 相比, Py1a 具有更高的 Co(中值 0.624×10^{-6})、Ni(中值 2.96×10^{-6})、Zn(中值 3.18×10^{-6})、Se(中值 13.5×10^{-6})、Bi(中值 0.391×10^{-6}) 含量, 而 Cu(中值 10.2×10^{-6})、As(中值 10069×10^{-6})、Mo(中值 0.060×10^{-6})、Ag(中值 6.63×10^{-6})、Sb(中值 11.6×10^{-6})、Au(中值 2.66×10^{-6})、Tl(中值 0.165×10^{-6})、Pb(中值

70.2×10^{-6}) 含量偏低。值得注意的是, Py1b 中的 As(中值 24326×10^{-6}) 和 Au(中值 8.51×10^{-6}) 含量远高于其他几种类型的黄铁矿, 特别是 Py1b 的 As(中值 24326×10^{-6}) 含量高出 Py2 的 As(中值 3191×10^{-6}) 含量一个数量级, 且 Py1b 中最高的 Au(中值 8.51×10^{-6}) 含量正好对应最高的 As(中值 24326×10^{-6}) 含量。从 Py1a 到 Py2, As 含量与 Au 含量均表现为先升高后降低趋势。Py1c 中, Co(中值 0.161×10^{-6})、Mo(中值 0.044×10^{-6})、Ag(中值 2.63×10^{-6})、

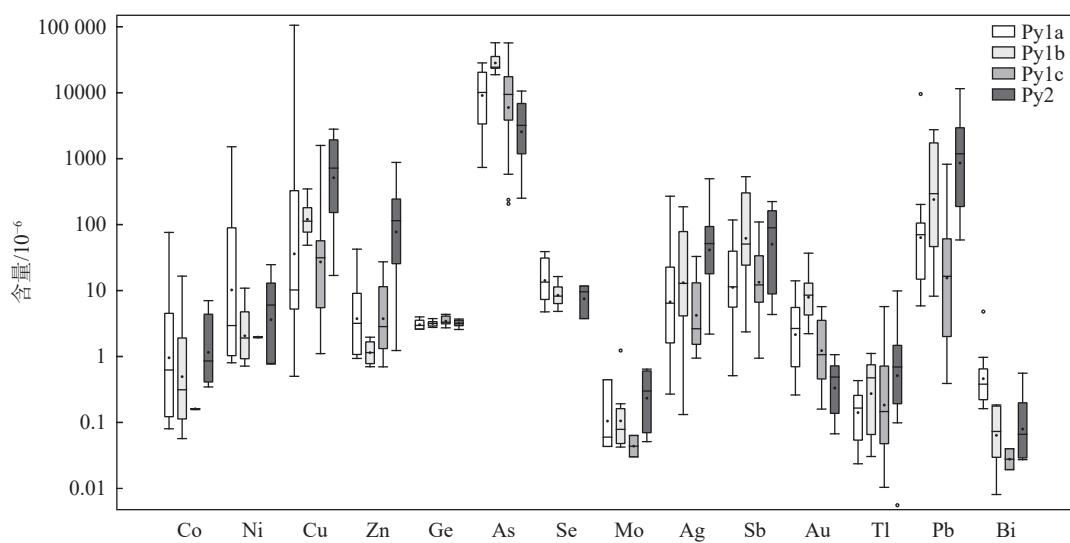


图 6 金竹洲金矿床不同类型黄铁矿微量元素箱线图

Fig. 6 Box diagram showing trace element concentrations of pyrite from the Jinzhuzhou gold deposit

Tl(中值 0.148×10^{-6})、Pb(中值 16.4×10^{-6})、Bi(中值 0.030×10^{-6}) 的含量最低; Py2 中 Co(中值 0.875×10^{-6})、Ni(中值 6.02×10^{-6})、Cu(中值 721×10^{-6})、Zn(中值 115×10^{-6})、Mo(中值 0.340×10^{-6})、Ag(中值 52.7×10^{-6})、Sb(中值 95.8×10^{-6})、Tl(中值 0.693×10^{-6})、Pb(中值 1196×10^{-6}) 含量最高。

5 讨 论

5.1 黄铁矿中微量元素的赋存状态

前人研究表明, 黄铁矿中微量元素的种类多样, 包括 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Co、Ni、As、Sb、Se、Te、Hg、Tl、Bi 等 (Reich et al., 2005; Gregory et al., 2015; Keith et al., 2020; Tan et al., 2022; Zhang et al., 2022; 李秀章等, 2022)。微量元素的赋存形式主要有 3 种: 固溶体形式、纳米级矿物包体和独立矿物包裹体 (Thomas et al., 2011; Belousov et al., 2016)。对于不同的微量元素, 其在黄铁矿中的赋存形式存在一定差异。

Co 和 Ni 一般以 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 形式进入黄铁矿晶格且不容易被释放 (Maslennikov et al., 2009), As 能够以 As^- 形式 (还原条件下) 替换四面体配位的 S^- 或以 $\text{As}^{2+/3+}$ 形式 (氧化条件下) 替换八面体配位的 Fe^{2+} 进入到黄铁矿晶格中 (Savage et al., 2000; Deditius et al., 2008)。在金竹洲黄铁矿 Py1 和 Py2 中, LA-ICP-MS 剥蚀信号曲线显示, 这 3 种微量元素的剥蚀信号均较稳定, 表现为相对平滑的曲线, 表明 Co、Ni、As 可能以固溶体形式存在于 Py1 和 Py2 的晶格中。Pb 元素因其离子半径较大, 往往不能直接进入黄铁矿晶格中, 同时 Pb 相比 Fe 更容易从流体中以金属硫化物形式沉淀, 使黄铁矿中普遍存在含 Pb 的矿物包裹体。另外, 黄铁矿中还可能存在含有 Cu、Zn、Ag、Te 等元素的矿物包裹体 (Large et al., 2009; Koglin et al., 2010)。Py1 中, Pb、Mn、Sb、Ag、Bi、Cu、Zn 剥蚀曲线起伏波动大, 还伴随出现尖峰信号, 表明这些元素可能是以矿物包裹体的形式赋存于 Py1 中 (图 7); 而在 Py2 中, Cu、Pb 的曲线起伏波动较大, 表明 Py2 中可能存在 Cu、Pb 的矿物包裹体。并且, Pb、Sb、Ag、Bi 等元素呈现一定的正相关性 (图 8), 进一步表明金竹洲黄铁矿中 Pb-Sb-Ag-Bi 矿物包体存在的可能性。

Au 与 As 存在明显的耦合关系, 固溶体 Au 的最大含量受 As 含量的控制 ($C_{\text{Au}}=0.02 C_{\text{As}} + 4 \times 10^{-5}$), 当

Au/As 摩尔比值小于 0.02 时, Au 主要以固溶体 (Au^{+1}) 形式存在, 而当 Au/As 摩尔比值大于 0.02 时, Au 则主要以纳米颗粒的形式 (Au^0) 出现 (Reich et al., 2005)。在黄铁矿 Au-As 二元图解 (图 8-a) 中, Au 与 As 表现出较弱的正相关性, 所有数据点都落入 Au 的溶解曲线下方, 表明 Au 可能以固溶体形式存在于金竹洲黄铁矿中。

5.2 金竹洲金矿床的成矿过程

金竹洲黄铁矿与石英、绿泥石、方解石等典型热液矿物共生, 说明其可能为热液成因。黄铁矿中 Co/Ni 值对指示黄铁矿成因具有重要意义 (Bralia et al., 1979; Clark et al., 2004)。沉积成因的黄铁矿 Co/Ni 值小于 2, 而热液成因的黄铁矿 Co/Ni 值通常大于 2 (Large et al., 2009, 2014; Gregory et al., 2015)。金竹洲黄铁矿的 Co/Ni 值主要介于 0.01 ~ 1.11 之间, 说明黄铁矿形成过程中通过水岩反应混入了一定量的地层物质, 这也和矿区广泛发育的绢英岩化等蚀变特征吻合。

黄铁矿的结构、化学成分和矿物组合能够为研究热液系统的演化提供关键信息, 尤其是黄铁矿及其包含的纳米颗粒中的微量元素分布能够揭示温度、pH、氧逸度、流体来源和成分的变化 (Barker et al., 2009; Deditius et al., 2011; Thomas et al., 2011; Velásquez et al., 2014; Keith et al., 2018; Román et al., 2019)。金矿床中的黄铁矿普遍发育振荡环带结构, 这通常与温度等物理化学条件和流体成分发生周期重复性变化有关 (Deditius et al., 2011; Velásquez et al., 2014)。然而, 多次热液事件导致的流体成分间歇性波动一般会造成黄铁矿分阶段沉淀, 同时具有不规则边界和交替带之间的腐蚀结构 (Barker et al., 2009)。成矿 I 阶段生成的 Py1a、Py1b、Py1c 未见这些特征, 所以排除了流体成分发生间歇性改变的情况, 而可能是物理化学条件的变化导致 I 阶段黄铁矿形成核-幔-边结构。Co 和 Ni 的溶解度与温度呈正相关, 当温度从 300°C 下降至 200°C 时, Co 的溶解度就会出现明显降低 (Migdisov et al., 2011)。从 Py1a 到 Py1c, 黄铁矿中的 Co 和 Ni 含量逐渐降低, 表明该阶段温度呈现下降趋势。另外, As 浓度与形成温度的关系表明 ($C_{\text{As}}=0.4785 \times e^{-0.0143T}$), 二者呈负相关关系, 黄铁矿中 As 含量越高, 其形成温度越低 (Pokrovski et al., 2013; Deditius et al., 2014)。Py1b 的 As 含量 (中值 24326×10^{-6}) 远高于 Py1c (中

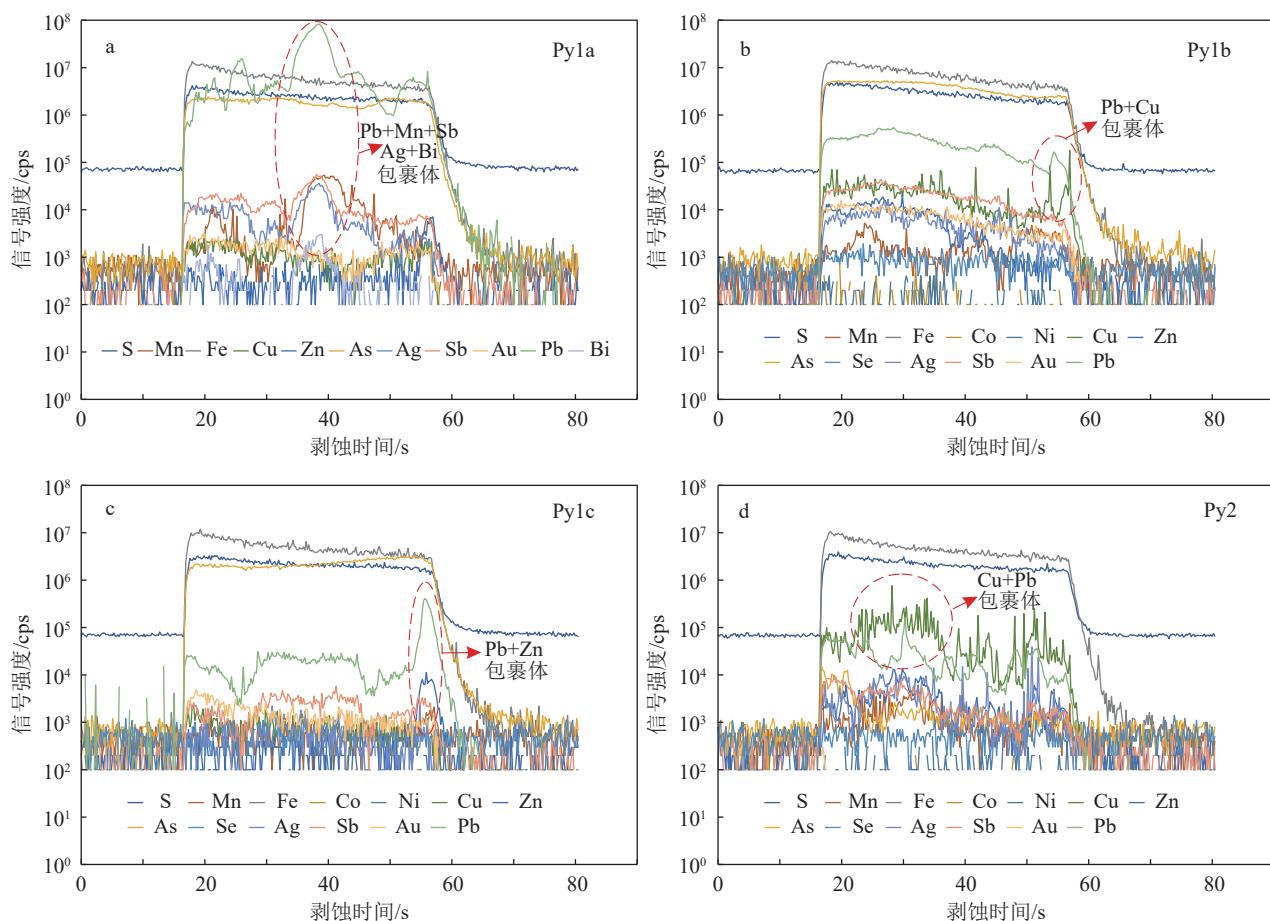


图 7 金竹洲金矿床黄铁矿剥蚀信号图

Fig. 7 Representative LA-ICP-MS time-resolved signals of pyrite from the Jinzhuzhou gold deposit

值 9483×10^{-6}), 表明 Py1c 的形成温度高于 Py1b, 与前面 Co、Ni 反演出的温度变化趋势相反, 这很可能是因为富 As 的 Py1b 沉淀消耗了流体中大量的 As, 即使温度降低也会使得 Py1c 中的 As 含量降低。pH 的升高能够促使 Pb 和 Zn 以硫化物的形式沉淀 (Kouzmanov et al., 2012), 但 Py1a 到 Py1c 的 Pb(含量先升高后降低)、Zn(含量先降低后升高) 变化趋势却相互矛盾, 同时第一阶段发育绢英岩化, 表明成矿流体处于中性—弱碱性 pH 条件且相对稳定 (陈光远等, 2004), 所以 pH 的变化可能并不是影响第一阶段黄铁矿形成核—幔—边结构的主要因素。因此, 温度的下降可能是导致第一阶段黄铁矿发育核—幔—边结构的重要因素。

相比于 Py1, Py2 明显呈多孔状特征, 而且含有大量硫化物包裹体, 可能是快速结晶或溶解—再沉淀的产物 (Simon et al., 1999; Putnis et al., 2009)。但通过快速结晶形成的黄铁矿通常为细粒集合体 (直径

为几微米), 且具有很高的微量元素含量 (Simon et al., 1999; Butler and Rickard, 2000), 这与 Py2 的低 Au 和 As 含量特征并不一致, 所以 Py2 很可能是溶解—再沉淀的产物。这也得到了其他证据的支撑, 如: ①Py2 发育大量孔洞和矿物包裹体 (如方铅矿、辉银矿); ②Py2 与 Py1b 具有尖锐、突变的接触边界; ③Py2 中 As、Au 等微量元素含量低于 Py1b。另一方面, 由于 As 的离子半径较 S 和 Fe 大, 富 As 黄铁矿晶格均存在明显的畸形, 在促使 Au 等元素进入黄铁矿晶格的同时, 也会促使后期流体对其发生溶解—再沉淀 (Blanchard et al., 2007), 进而导致 Au 的活化迁移和富集沉淀 (Sung et al., 2009; Fougerouse et al., 2017; Hastie et al., 2020)。金竹洲矿床中仅 Py1b 呈现出明显的富 As 特征 (As 含量中值 24326×10^{-6}), 同时也发生溶解—再沉淀形成 Py2, 这与金竹洲矿床中自然金和 Py2 均形成于 II 阶段的特征吻合。早期矿物的内部被交代而保留原有矿物颗粒的形状 (即: 骸

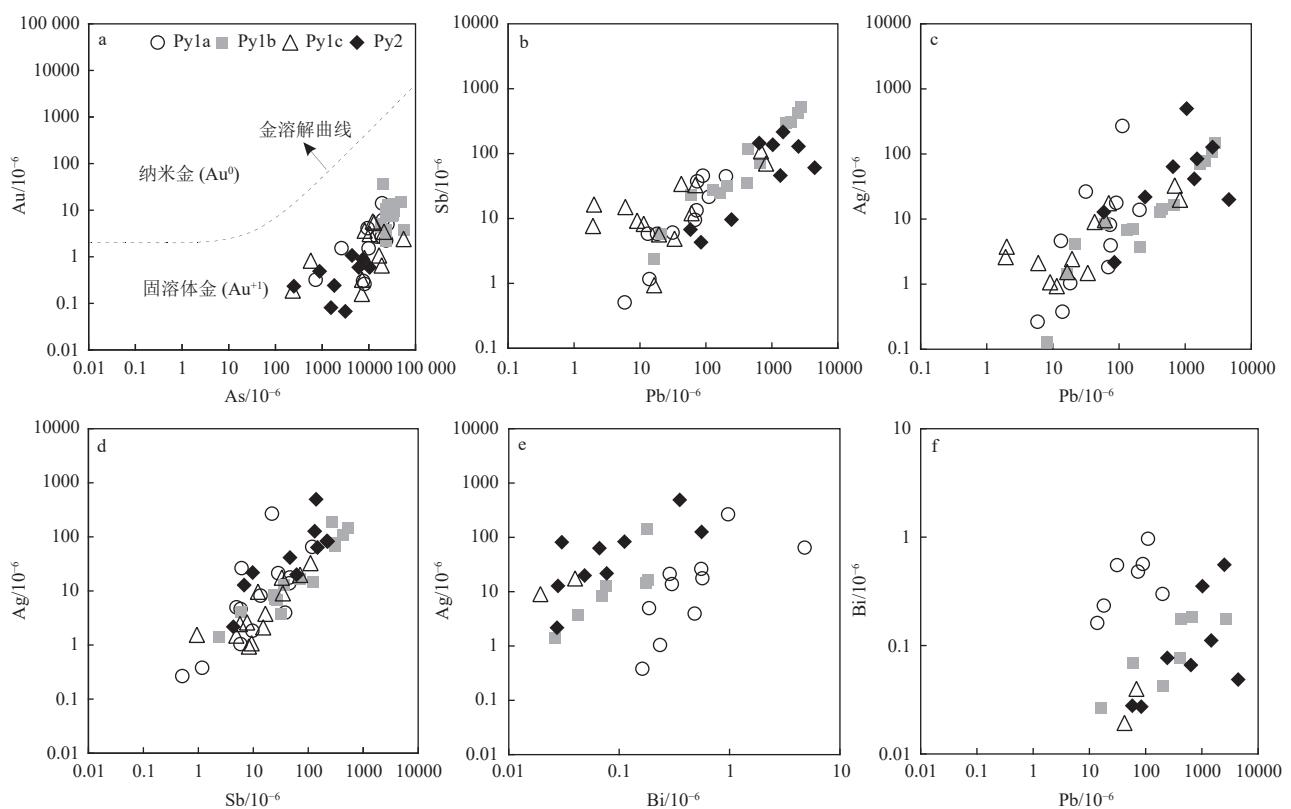


图 8 金竹洲金矿床黄铁矿微量元素二元图

Fig. 8 Binary diagrams of trace elements in the pyrite from the Jinzhuzhou gold deposit

晶结构)也较常见,如位于加拿大的 Jerome 和 Kenty 金矿床中,早阶段富 As 的 Py1 被晚阶段富含孔隙和硫化物包裹体的 Py1a 交代,在此过程(溶解-再沉淀过程)中,晚阶段 Py1a 交代了早阶段 Py1 内部,而早阶段 Py1 的外部保留了完整的晶形,同时 Au 从 Py1 中释放出来并迁移到黄铁矿外部形成自然金(Hastie et al., 2020);在澳大利亚西部的 Sunrise Dam 金矿床中,Ⅱ富金区的黄铁矿在 D_{4a} 成矿阶段发生溶解-再沉淀,导致黄铁矿颗粒富 As 的核部被含有大量毒砂包裹体及孔隙的黄铁矿交代替换,这一过程也被解释为黄铁矿中金含量升高的可能原因(Sung et al., 2009);在西秦岭地区大桥超大型金矿床中,随着 f_{O_2} 的升高,早阶段形成的 Py3 发生溶解-再沉淀形成晚阶段富含孔洞和硫化物包裹体(黄铜矿、方铅矿、毒砂等)的 Py_{4-py},而 Py3 的内部在被 Py_{4-py} 交代的同时,外部形状得到了保留(Wu et al., 2019)。热液流体的温度、氧逸度和盐度的升高等都会引起黄铁矿发生溶解-再沉淀(Hu et al., 2015; Wu et al., 2019; Ma et al., 2022)。同时,I 阶段至Ⅱ阶段,矿物组合呈现黄铁矿至黄铁矿+磁黄铁矿的转变,表

明氧逸度可能出现下降,所以 Py1b 发生溶解-再沉淀并非是氧逸度升高所致。矿区未见有明显的膏岩地层,表明成矿热液流体盐度显著升高的可能较小。Py2 中虽然呈现较多的硫化物包裹体,但 Co、Ni 元素仍以晶格赋存的形式存在且其含量较 Py1 升高,显示成矿流体温度升高的可能(Keith et al., 2022)。由此推测,成矿Ⅱ阶段有新的高温流体注入的可能,揭示高温流体注入可能是 Py1b 发生溶解-再沉淀和金活化迁移的主要控制因素。

5.3 对矿床成因的指示

大瑶山地区金矿床的成因一直存在争议,主要观点包括岩浆热液成因(肖柳阳等,2015;李忠阳等,2018)、变质热液-岩浆热液叠加改造而成因(赖昕等,2017)及变质热液成因(王新宇等,2013)。

区域内的张公岭、古里脑、龙水、吉袍、桃花、六岑等金矿床中硫化物的硫同位素具有明显的岩浆硫,显示出岩浆作用与金成矿作用的密切关系(刘腾飞,1997;王功民等,2017),而且氢氧同位素组成($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}: +2.79\% \sim +10.59\%$, $\delta\text{D}: -27.7\% \sim -98.7\%$)也进一步佐证了成矿热液以岩浆热液为主

(刘腾飞, 1997)。 $\text{Na}^+/\text{K}^+ < 1$ 一般为岩浆热液成因流体包裹体的特征, $\text{Na}^+/\text{K}^+ > 1$ 多为沉积或地下水成因特征 (Roedder, 1972; 卢焕章, 1990)。龙头山金矿床的流体包裹体 Na^+/K^+ 值为 0.14, 进一步指出区域金矿床的岩浆热液成因 (刘国庆和蔡明海, 2004)。随着研究程度的不断深入, 尤其是在取得了一系列野外地质调查成果和高精度成岩成矿年龄数据后, 越来越多的证据表明, 大瑶山地区金矿床在成因上与岩浆热液存在密切联系 (陈懋弘等, 2015; 肖柳阳等, 2015; 李忠阳等, 2018)。比如龙头山金矿床的成矿年龄 (矿化斑岩锆石 U-Pb 年龄 $96.1 \pm 3.0 \text{ Ma}$) 与区域内邻近的平天山侵入岩体的形成年龄 (锆石 U-Pb 年龄 $96.2 \pm 0.4 \text{ Ma}$) 基本一致 (段瑞春等, 2011)。

大瑶山地区岩浆岩单体规模普遍较小, 但聚集成群的规模较大, 同时物探重磁资料显示区域深部存在巨大的隐伏岩体 (曾崇义, 1996), 表明在岩体群的深部可能有一个巨型岩基, 而地表的岩脉和岩枝只是其在浅部高位侵入的呈现 (陈懋弘等, 2015)。尽管金竹洲矿区未出露岩浆岩, 但深部隐伏岩体具备为成矿作用提供物源基础和热源基础的可能。Se 是典型的亲岩浆元素 (Bralia et al., 1979; Huston et al., 1995), 金竹洲黄铁矿呈现富 Se 特征 (3.76×10^{-6} ~ 73.3×10^{-6} , 平均值 16.5×10^{-6}), 表明金竹洲矿床成矿流体可能为岩浆热液。同时, 导致 Py1b 发生溶解-再沉淀的高温流体注入也与典型的岩浆热液脉冲式出溶成矿的特征吻合 (Hedenquist et al., 1994; Zhang et al., 2020b)。此外, 金竹洲金矿床的 Ar-Ar 年龄 ($155.5 \pm 0.4 \text{ Ma}$; 未发表数据) 与区域附近的大坊-富庆-凤凰闪长岩枝群年龄 ($168.7 \sim 151 \text{ Ma}$) 基本一致 (陈懋弘等, 2015), 也与陈懋弘等 (2019) 提出的与花岗岩类有关的燕山早期 ($156 \sim 148 \text{ Ma}$) 铜钼金成矿系列对应, 揭示金竹洲金矿床可能与区域岩浆活动有关。因此, 结合大瑶山地区普遍发育岩浆热液成因的金矿床, 初步推测金竹洲金矿床可能为岩浆热液成因。

6 结 论

(1) 广西金竹洲金矿床成矿可分为 3 个阶段: (I) 石英-绢云母-黄铁矿-毒砂阶段; (II) 石英-自然金-多金属硫化物阶段; (III) 石英-方解石-绿泥石阶段。

(2) 成矿 I 阶段黄铁矿呈明显的核-幔-边结构,

其形成可能与成矿温度的逐步降低相关, 而富 As 的幔部 (Py1b) 对于 Au 的原生富集起到了重要作用。成矿 II 阶段新一期高温成矿流体的注入促进 Py1b 发生溶解-再沉淀形成 II 阶段多孔状黄铁矿 (Py2), 进而导致金的活化迁移和再富集形成可见金。

(3) 金竹洲黄铁矿明显的富 Se 特征指示, 其成矿作用可能与大瑶山地区深部隐伏岩体密切相关, 结合大瑶山地区普遍发育岩浆热液型金矿床, 初步推测金竹洲金矿床可能为岩浆热液成因。

References

- Barker S L L, Hickey K A, Cline J S, et al. 2009. Uncloaking invisible gold: Use of nanoSIMS to evaluate gold, trace elements, and sulfur isotopes in pyrite from Carlin-type gold deposits[J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 104(7): 897–904.
- Belousov I, Large R R, Meffre S, et al. 2016. Pyrite compositions from VHMS and orogenic Au deposits in the Yilgarn Craton, Western Australia: Implications for gold and copper exploration[J]. *Ore Geology Reviews*, 79: 474–499.
- Blanchard M, Alfredsson M, Brodholt J P, et al. 2007. Arsenic incorporation into FeS₂ pyrite and its influence on dissolution: A DFT study[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(3): 624–630.
- Bralia A, Sabatini G, Troja F. 1979. A revaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems[J]. *Mineralium Deposita*, 14(3): 353–374.
- Butler B I, Rickard D. 2000. Framboidal pyrite formation via the oxidation of iron (II) monosulfide by hydrogen sulphide[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(15): 2665–2672.
- Cai M H, Liu G Q. 2000. Petrogenesis and gold mineralization of silicalite from cambrian peidi formation in east Guangxi[J]. *South China Geology*, (1): 29–33 (in Chinese with English abstract).
- Cao G S, Zhang Y, Chen H Y. 2023. Trace elements in pyrite from orogenic gold deposits: Implications for metallogenetic mechanism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(8): 2330–2346 (in Chinese with English abstract).
- Chen G Y, Sun D S, Yin H A. 2004. The genetic mineralogy and prospecting mineralogy[M]. Chongqing: Chongqing Publishing & Media Co., Ltd. (in Chinese).
- Chen M H, Li Z Y, Li Q, et al. 2015. A preliminary study of multi-stage granitoids and related metallogenetic series in Dayaoshan area of Guangxi, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 41–53 (in Chinese with English abstract).
- Chen M H, Dang Y, Zhang Z Q, et al. 2019. Multi-stage magmatism and mineralization in Dayaoshan area of Guangxi[M]. Beijing: Geology Press (in Chinese).
- Clark C, Grguric B, Mumm A S. 2004. Genetic implications of pyrite

- chemistry from the Palaeoproterozoic Olary Domain and overlying Neoproterozoic Adelaidean sequences, northeastern South Australia[J]. *Ore Geology Reviews*, 25(3/4): 237–257.
- Cook J N, Ciobanu L C, Meria D, et al. 2013. Arsenopyrite–pyrite association in an orogenic gold ore: Tracing mineralization history from textures and trace elements[J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 108(6): 1273–1283.
- Dang Y, Chen M H, Mao J W, et al. 2020. Weakly fractionated I-type granitoids and their relationship to tungsten mineralization: A case study from the early Paleozoic Shangmushui deposit, Dayaoshan area, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 117: 103281.
- Deditius A P, Utsunomiya S, Renock D, et al. 2008. A proposed new type of arsenian pyrite: Composition, nanostructure and geological significance[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(12): 2919–2933.
- Deditius A P, Utsunomiya S, Reich M, et al. 2011. Trace metal nanoparticles in pyrite[J]. *Ore Geology Reviews*, 42(1): 32–46.
- Deditius A P, Reich M, Kesler S E, et al. 2014. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 140: 644–670.
- Duan R C, Ling W L, Li Q, et al. 2011. Correlations of the Late Yanshanian Tectonomagmatic Events with metallogenesis in South China: Geochemical constraints from the Longtoushan gold ore deposit of the Dayaoshan area, Guangxi Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(10): 1644–1658(in Chinese with English abstract).
- Feng Y Z, Zhang Y, Xie Y L, et al. 2020. Pyrite geochemistry metallogenetic implications of Gutaishan Au deposit in Jiangnan Orogen, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 117: 103298.
- Fougerouse D, Micklenthwaite S, Tomkins G A, et al. 2016. Gold remobilisation and formation of high grade ore shoots driven by dissolution–reprecipitation replacement and Ni substitution into auriferous arsenopyrite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 178: 143–159.
- Fougerouse D, Micklenthwaite S, Ulrich S, et al. 2017. Evidence for two stages of mineralization in West Africa’s largest gold deposit: Obuasi, Ghana[J]. *Economic Geology*, 112(1): 3–22.
- Geisler T, Schaltegger U, Tomaschek F. 2007. Re-equilibration of zircon in Aqueous fluids and melts[J]. *Elements*, 3(1): 43–50.
- Gregory D D, Large R R, Halpin J A, et al. 2015. Trace element content of sedimentary pyrite in black shales[J]. *Economic Geology*, 110(6): 1389–1410.
- Hastie C E, Kontak J D, Lafrance B. 2020. Gold remobilization: Insights from gold deposits in the Archean Swayze greenstone belt, Abitibi Subprovince, Canada[J]. *Economic Geology*, 115(2): 241–277.
- Hedenquist J W, Lowenstern J B. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits[J]. *Nature*, 370: 519–527.
- Hu H, Lentz D, Li J W, et al. 2015. Reequilibration processes in magnetite from iron skarn deposits[J]. *Economic Geology*, 110(1): 1–8.
- Hu Q F, Li Y, Hua E. 2011. Research on the ore-forming condition and mineralization laws on the gold deposit in Dayaoshan region, eastern Guangxi[J]. *Mining Technology*, 11(1): 81–83(in Chinese with English abstract).
- Huston D L, Sie S H, Suter G F, et al. 1995. Trace elements in sulfide minerals from eastern Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits; Part I, Proton microprobe analyses of pyrite, chalcopyrite, and sphalerite, and Part II, Selenium levels in pyrite; comparison with delta 34 S values and implications for the source of sulfur in volcanogenic hydrothermal systems[J]. *Economic Geology*, 90(5): 1167–1196.
- Keith M, Smith D J, Jenkin G R T, et al. 2018. A review of Te and Se systematics in hydrothermal pyrite from precious metal deposits: Insights into ore-forming processes[J]. *Ore Geology Reviews*, 96: 269–282.
- Keith M, Smith D J, Doyle K, et al. 2020. Pyrite chemistry: A new window into Au–Te ore-forming processes in alkaline epithermal districts, Cripple Creek, Colorado[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 274: 172–191.
- Keith M, Haase K M, Chivas A R, et al. 2022. Phase separation and fluid mixing revealed by trace element signatures in pyrite from porphyry systems[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 329: 185–205.
- Klose L, Keith M, Hafermaas D, et al. 2021. Trace element and isotope systematics in vent fluids and sulphides from Maka Volcano, North Eastern Lau Spreading Centre: Insights into three-component fluid mixing[J]. *Frontiers in Earth Science*, 9: 776925.
- Koglin N, Frimmel H E, Minter L W E, et al. 2010. Trace-element characteristics of different pyrite types in Mesoarchean to Palaeoproterozoic placer deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 45(3): 259–280.
- Kouzmanov K, Pokrovski G S. 2012. Hydrothermal controls on metal distribution in porphyry Cu (–Mo–Au) systems[M]. Society of Economic Geologists, Special Publication, 16: 573–618.
- Lai X, Pang B C, Li Y Q, et al. 2017. Genesis of the Wandao gold deposit in Guangxi, China: Evidences from fluid inclusions and H–O–S–Pb isotopes[J]. *Geoscience*, 31(5): 1006–1021(in Chinese with English abstract).
- Large R R, Danyushevsky L, Hollit C, et al. 2009. Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: Implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits[J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 104(5): 635–668.
- Large R R, Halpin J A, Danyushevsky L, et al. 2014. Trace element content of sedimentary pyrite as a new proxy for deep-time ocean–atmosphere evolution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 389: 209–220.
- Li X Z, Wang Y J, Li Y X, et al. 2022. Micro-geochemical characteristic of pyrites in the Heilongou gold deposit of Penghai area and its implications for ore-forming fluid, Jiaodong gold province[J]. *Geological Bulletin of China*, 41(6): 1023–1038 (in Chinese with English abstract).
- Li Z Y, Dang Y, Le X W. 2018. Caledonian quartz vein type gold mineralization in the Dayaoshan area, Guangxi: Constraint from the

- muscovite $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ dating in the Shangmushui gold deposit[J]. *Geological Journal of China Universities*, 24(5): 637–644(in Chinese with English abstract).
- Liu G Q, Cai M H. 2004. Ore-forming condition and genetic analysis on the gold deposit in Dayaoshan region, eastern Guangxi[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 23(2): 37–44(in Chinese with English abstract).
- Liu T F. 1997. Geological features and genesis of Au ore deposits in east Guangxi[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources*, 12(3): 11–23(in Chinese with English abstract).
- Lu H Z. 1990. Inclusions geochemistry[M]. Beijing: Geology Press(in Chinese).
- Ma Y, Jiang S Y, Frimmel H E, et al. 2022. In situ chemical and isotopic analyses and element mapping of multiple-generation pyrite: Evidence of episodic gold mobilization and deposition for the Qiucun epithermal gold deposit in Southeast China[J]. *American Mineralogist*, 107(6): 1133–1148.
- Maslennikov V V, Maslennikova S P, Large R R, et al. 2009. Study of trace element zonation in vent chimneys from the Silurian Yaman-Kasy volcanic-hosted massive sulfide deposit (Southern Urals, Russia) using laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICPMS)[J]. *Economic geology and the bulletin of the Society of Economic Geologists*, 104(8): 1111–1141.
- Migdisov A, Zezin D, Williams-Jones A E. 2011. An experimental study of cobalt (II) complexation in Cl^- and H_2S^- bearing hydrothermal solutions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(14): 4065–4079.
- Pokrovski G S, Borisova A Y, Bychkov A Y. 2013. Speciation and Transport of Metals and Metalloids in Geological Vapors[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 76(1): 165–218.
- Pokrovski G S, Kokh Maria A, Proux O, et al. 2019. The nature and partitioning of invisible gold in the pyrite–fluid system[J]. *Ore Geology Reviews*, 109: 545–563.
- Putnis A. 2009. Mineral replacement reactions[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 70(1): 87–124.
- Qian G, Xia F, Brugger J, et al. 2011. Replacement of pyrrhotite by pyrite and marcasite under hydrothermal conditions up to 220°C: An experimental study of reaction textures and mechanisms[J]. *American Mineralogist*, 96(11/12): 1878–1893.
- Qian L H, Lai J Q, Hu L F, et al. 2019. Geochronology and Geochemistry of the Granites from the Longtoushan Hydrothermal Gold Deposit in the Dayaoshan Area, Guangxi: Implication for Petrogenesis and Mineralization[J]. *Journal of Earth Science*, 30(2): 309–322.
- Qin Y, Zhang Q W, Kang Z Q, et al. 2015. Geochronological framework of granitoids in Dayaoshan metallogenetic belt, eastern Guangxi Province[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 45(6): 1735–1756(in Chinese with English abstract).
- Reich M, Kesler S E, Utsunomiya S, et al. 2005. Solubility of gold in arsenian pyrite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(11): 2781–2796.
- Reich M, Deditius A, Chryssoulis S, et al. 2013. Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: A SIMS/EMPA trace element study[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 104: 42–62.
- Roedder E. 1972. Barite fluid inclusion geothermometry, Cartersville Mining District, Northwest Georgia; discussion[J]. *Economic Geology*, 67(6): 821–822.
- Román N, Reich M, Leisen M, et al. 2019. Geochemical and micro-textural fingerprints of boiling in pyrite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 246: 60–85.
- Rottier B, Kouzmanov K, Wölle M, et al. 2016. Sulfide replacement processes revealed by textural and LA-ICP-MS trace element analyses: Example from the early mineralization stages at Cerro de Pasco, Peru[J]. *Economic Geology*, 111(6): 1347–1367.
- Savage K S, Tingle T N, Peggy A O, et al. 2000. Arsenic speciation in pyrite and secondary weathering phases, Mother Lode Gold District, Tuolumne County, California[J]. *Applied Geochemistry*, 15(8): 1219–1244.
- Sheng Z H. 2005. Gold metallogenetic pattern in Dayaoshan ore belt[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, B08: 61–63(in Chinese with English abstract).
- Simon G, Kesler E S, Chryssoulis S. 1999. Geochemistry and textures of gold-bearing arsenian pyrite, Twin Creeks, Nevada: Implications for deposition of gold in Carlin-type deposits[J]. *Economic Geology*, 94(3): 405–421.
- Sun P F, Wang Q F, Li H J, et al. 2020. Geology and pyrite sulfur isotopes of the Suoluogou gold deposit: Implication for crustal continuum model of orogenic gold deposit in northwestern margin of Yangtze Craton, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 122: 103487.
- Sung Y H, Brugger J, Ciobanu C L, et al. 2009. Invisible gold in arsenian pyrite and arsenopyrite from a multistage Archaean gold deposit: Sunrise Dam, Eastern Goldfields Province, Western Australia[J]. *Mineralium Deposita*, 44(7): 765–791.
- Tan H J, Shao Y J, Liu Q Q, et al. 2022. Textures, trace element geochemistry and in-situ sulfur isotopes of pyrite from the Xiaojiashan gold deposit, Jiangnan Orogen: Implications for ore genesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 144: 104843.
- Thomas H V, Large R R, Bull S W, et al. 2011. Pyrite and pyrrhotite textures and composition in sediments, laminated quartz veins, and reefs at Bendigo Gold Mine, Australia: Insights for ore genesis[J]. *Economic geology and the bulletin of the Society of Economic Geologists*, 106(1): 1–31.
- Velásquez G, Béziat D, Salvi S, et al. 2014. Formation and deformation of pyrite and implications for gold mineralization in the El Callao District, Venezuela[J]. *Economic Geology*, 109(2): 457–486.
- Wang G M, Huang C X, Wei Z R, et al. 2017. Spatial and temporal distribution of metal deposits in Dali area, Guangxi, South China[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 33(1): 47–64(in Chinese with English abstract).
- Wang J C, Hu Y H, Ye L. 2010. Metallotectonical types and indication of the gold deposits in Dayaoshan area in the east of Guangxi[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 30(4): 467–473(in Chinese with English abstract).

- Wang X Y, Liu M C, Zhou G F, et al. 2013. A correlation study of Au-polymetallic mineralization and granite-porphyry magmatism in the Xinping mining area of the Dayoshan metallogenic belt, eastern Guangxi Province[J]. *Geoscience*, 27(3): 585–592(in Chinese with English abstract).
- Wu Y F, Evans K, Li J W, et al. 2019. Metal remobilization and ore-fluid perturbation during episodic replacement of auriferous pyrite from an epizonal orogenic gold deposit[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 245: 98–117.
- Xiao L Y, Chen M H, Zhang Z Q, et al. 2015. The deposit type, mineralization age and their geological significance of the Wandao gold deposit in Zhaoping County, Guangxi Province[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 118–130 (in Chinese with English abstract).
- Zeng C Y. 1996. The relation of the feature of the deep structure to gold mineralization in the upwarping region of Dayao mountain in eastern Guangxi[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 16(3): 245–251 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y, Shao Y J, Chen H Y, et al. 2017. A hydrothermal origin for the large Xinqiao Cu-S-Fe deposit, Eastern China: Evidence from sulfide geochemistry and sulfur isotopes[J]. *Ore Geology Reviews*, 88: 534–549.
- Zhang Y, Tian J, Hollings P, et al. 2020a. Mesozoic porphyry Cu-Au mineralization and associated adakite-like magmatism in the Philippines: Insights from the giant Atlas deposit[J]. *Mineralium Deposita*, 55(5): 881–900.
- Zhang Y, Hollings P, Shao Y J, et al. 2020b. Magnetite texture and trace-element geochemistry fingerprint of pulsed mineralization in the Xinqiao Cu-Fe-Au deposit, Eastern China[J]. *American Mineralogist*, 105(11): 1712–1723.
- Zhang Y, Chen H Y, Cheng J M, et al. 2022. Pyrite geochemistry and its implications on Au-Cu skarn metallogeny: An example from the Jiguanzui deposit, Eastern China[J]. *American Mineralogist*, 107(10): 1910–1925.
- Zhang Z W, Li H, Yu B, et al. 2014. The Mineralization Age of the Gupao Gold Deposit, Guangxi[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2974(501/504): 327–330.
- Zhu G T. 2002. Study on geological character and genesis of Longtoushan gold deposit of Guangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 16(5): 266–272 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 蔡明海, 刘国庆. 2000. 桂东寒武系培地组硅质岩成因与金的富集[J]. 华南地质与矿产, (1): 29–33.
- 曹根深, 张宇, 陈华勇. 2023. 造山型金矿床黄铁矿微量元素对成矿机制的指示[J]. *岩石学报*, 39(8): 2330–2346.
- 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 2004. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社.
- 陈懋弘, 李忠阳, 李青, 等. 2015. 初论广西大瑶山地区多期次花岗岩浆活动与成矿系列[J]. 地学前缘, 22(2): 41–53.
- 陈懋弘, 党院, 张志强, 等. 2019. 广西大瑶山地区多期次岩浆活动及成矿作用[M]. 北京: 地质出版社.
- 段瑞春, 凌文黎, 李青等. 2011. 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, 85(10): 1644–1658.
- 广西壮族自治区第一地质队. 2017. 广西昭平县金竹洲金矿勘查(变更)实施方案[R].
- 胡乔帆, 李毅, 华二. 2011. 大瑶山地区金矿成矿条件及成矿规律研究[J]. *采矿技术*, 11(1): 81–83.
- 赖昕, 庞保成, 李院强, 等. 2017. 广西昭平湾岛金矿的成因: 流体包裹体和 H-O-S-Pb 同位素地球化学约束[J]. *现代地质*, 31(5): 1006–1021.
- 李秀章, 王勇军, 李衣鑫, 等. 2022. 胶东蓬莱黑岚沟金矿床黄铁矿微区地球化学特征及对成矿流体的启示[J]. 地质通报, 41(6): 1023–1038.
- 李忠阳, 党院, 乐兴文. 2018. 广西大瑶山地区加里东期石英脉型金矿: 上木水金矿白云母 Ar-Ar 年龄约束[J]. 高校地质学报, 24(5): 637–644.
- 刘国庆, 蔡明海. 2004. 桂东大瑶山地区金矿成矿条件及成因分析[J]. 地质科技情报, 23(2): 37–44.
- 刘鹏飞. 1997. 桂东金矿成矿地质特征及矿床成因[J]. 地质找矿论丛, 12(3): 11–23.
- 卢焕章. 1990. 包裹体地球化学[M]. 北京: 地质出版社.
- 秦亚, 张青伟, 康志强, 等. 2015. 桂东大瑶山成矿带花岗岩类岩石年代学格架的厘定[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 45(6): 1735–1756.
- 盛志华. 2005. 大瑶山成矿带金矿成矿规律[J]. *地质找矿论丛*, B08: 61–63.
- 汪劲草, 胡云沪, 叶琳. 2010. 桂东大瑶山地区金矿床的成矿构造类型及其成矿指示[J]. *桂林理工大学学报*, 30(4): 467–473.
- 王功民, 黄赤新, 韦子任, 等. 2017. 广西大黎地区金属矿床时空分布规律[J]. 华南地质与矿产, 33(1): 47–64.
- 王新宇, 刘名朝, 周国发, 等. 2013. 桂东大瑶山成矿带新坪矿区花岗斑岩与金多金属成矿作用关系[J]. *现代地质*, 27(3): 585–592.
- 肖柳阳, 陈懋弘, 张志强, 等. 2015. 广西昭平湾岛金矿矿床类型、成矿时代及其地质意义[J]. 地学前缘, 22(2): 118–130.
- 曾崇义. 1996. 桂东大瑶山隆起区深部构造特征与金矿成矿作用的关系[J]. 桂林工学院学报, 16(3): 245–251.
- 朱桂田. 2002. 广西龙头山金矿床地质特征及成因研究[J]. *矿产与地质*, 16(5): 266–272.