



引文格式: 薛仲凯, 范堡程, 李航, 等. 西秦岭早子沟金矿床金赋存状态、成矿物质来源及矿床成因探讨[J]. 西北地质, 2026, 59(1): 44-59. DOI: 10.12401/j.nwg.2025047

Citation: XUE Zhongkai, FAN Baocheng, LI Hang, et al. Discussion on Gold Occurrence State, Metallogenic Material Source and Genesis of the Zaozigou Gold Deposit in West Qinling Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(1): 44-59. DOI: 10.12401/j.nwg.2025047

西秦岭早子沟金矿床金赋存状态、成矿物质来源及矿床成因探讨

薛仲凯^{1,2,3}, 范堡程^{1,2,4,*}, 李航^{1,2}, 严康^{1,2}, 葛战林^{1,2,3}, 栾晓刚⁵, 黄豪擎^{6,7}

(1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100; 2. 中国地质调查局金矿勘查技术创新中心, 陕西 西安 710100; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 4. 西北大学, 陕西 西安 710054; 5. 甘肃省合作早子沟金矿有限责任公司, 青海 合作 747000; 6. 中国地质调查局军民融合地质调查中心, 四川 成都 610036; 7. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610036)

摘要: 早子沟金矿位于西秦岭造山带西段三叠纪陆内裂陷盆地, 杂恰勒布-早子沟断裂和桑曲-地娄塘断裂之间。前人将早子沟金矿床划分为两期四阶段, 笔者重点对热液成矿期黄铁矿-毒砂-石英(Ⅱ)阶段硫化物进行电子探针分析, 矿区内构造主要有 NE、NW、近 EW 和近 SN 向 4 组, 其中以 NE 和 NW 向为主。野外穿切现象表明, NE 向成矿带晚于 NW 向, 通过镜下观察发现Ⅱ阶段存在两个亚类, 一类为多孔半自形黄铁矿(Ⅱ₁), 另一类为平整自形黄铁矿(Ⅱ₂), 针对Ⅱ阶段两个亚类黄铁矿开展原位硫和 LA-ICP-MS 微量元素实验。研究结果显示, 黄铁矿均为贫铁贫硫的含砷黄铁矿。Ⅱ₁ 阶段 As 含量少于Ⅱ₂ 阶段, 主成矿期Ⅱ₁ 阶段黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{v-CDT}}$ 值为 $-9.92\text{‰} \sim -14.00\text{‰}$, Ⅱ₂ 阶段黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{v-CDT}}$ 值为 $-15.58\text{‰} \sim -23.46\text{‰}$, $\delta^{34}\text{S}_{\text{v-CDT}}$ 数值变化范围均较大, 成矿物质可能先由沉积源和岩浆源为主, 后期加入少量变质源。黄铁矿微量数据显示, 随着主成矿期Ⅱ₁ 向Ⅱ₂ 成矿演化过程中, Au 的赋存形式由 Au^+ 至 Au^0 呈逐渐过渡趋势, 亲 Fe、Cu 元素的 Co、Ni、As 元素变化呈下降趋势, 成矿元素中 Cu、Pb、Zn、Ag 元素变化呈上升趋势; Co-Ni 二元判别图指示成矿后期热液占比增多, Co-Ni-As 投图显示两亚类黄铁矿均位于卡林型、浅成热液型与岩浆热液型的结合区, 表明早子沟金矿为多期次成因。综合矿床地质、地球化学特征, 认为早子沟金矿床成因类型属于岩浆期后热液型金矿。

关键词: LA-ICP-MS; 电子探针; 黄铁矿; 早子沟金矿; 微量元素

中图分类号: P611.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)01-0044-16

Discussion on Gold Occurrence State, Metallogenic Material Source and Genesis of the Zaozigou Gold Deposit in West Qinling Orogenic Belt

收稿日期: 2024-02-05; 修回日期: 2025-03-26; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20220975、ZD20220318、DD20230379), 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2023-JC-QN-0284)联合资助。

作者简介: 薛仲凯(1992-), 男, 工程师, 主要从事矿床学与矿床地球化学研究工作。E-mail: 18789411649@163.com。

* 通讯作者: 范堡程(1983-), 男, 正高级工程师, 主要从事矿产地质调查与找矿预测工作。E-mail: 690454106@qq.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

XUE Zhongkai^{1,2,3}, FAN Baocheng^{1,2,4,*}, LI Hang^{1,2}, YAN Kang^{1,2}, GE Zhanlin^{1,2,3}, LUAN Xiaogang⁵, HUANG Haoqing^{6,7}

(1. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 2. Technology Innovation Center for Gold Mine Exploration, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 3. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 4. Northwest University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 5. Gansu Province Hezuo Zaozigou Gold Mine Co., Ltd, Hezuo 747000, Qinghai, China; 6. Military and Civil Integration Geological Survey Center of China Geological Survey, Chengdu 610036, Sichuan, China; 7. School of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610036, Sichuan, China)

Abstract: The Zaozigou gold deposit is located in the Triassic intracontinental rift basin at the western part of the West Qinling orogenic belt, between the Zacailebu-Zaozigou fault and the Sangqu-Diluotang fault. The Zaozigou gold deposit has been divided into two periods and four stages, the electron probe analysis is focused on the sulfide in the pyrite - arsenopyrite - quartz (II) stage during the hydrothermal mineralization stage in this paper. There are mainly four groups of structures in the mine, such as NE, NW, near EW and near SN trending, among which NE and NW trending are the main ones. There were two types of sulfide assemblage in stage II, one is porous hemidiomorphic pyrite (II₁), the other is flat idiomorphic pyrite (II₂). In situ sulfur and LA-ICP-MS trace element experiments were carried out for the two subclasses in stage II. The results showed that the pyrite is arsenic-containing pyrite with poor iron and sulfur. The $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ of pyrite in II₁ stage is $-9.92\text{‰} \sim -14.00\text{‰}$, the $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ of pyrite in II₂ stage is $-15.58\text{‰} \sim -23.46\text{‰}$, and the $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ value of pyrite in II₂ stage is larger. The ore-forming materials may be mainly sedimentary and magmatic sources at first, with a small amount of metamorphic sources added later. The trace data of pyrite show that the occurrence form of Au shows a gradual transition trend from Au^+ to Au^0 , the changes of Co, Ni and As elements in iron and copper elements show a downward trend, and the changes of Cu, Pb, Zn and Ag elements in metallogenic elements show an upward trend. The Co-Ni binary discriminant map indicates that the proportion of hydrothermal deposits increased in the later ore-forming period, and the Co-Ni-As map shows that the two subpyrites are located in the combination area of Carlin type, epithermal type and magmatic hydrothermal type, indicating that the Zaozigou gold deposit has multi-stage genesis. Based on the geological and geochemical characteristics of the deposit, it is considered that the Zaozigou gold deposit belongs to the post-magmatic hydrothermal type.

Keywords: LA-ICP-MS; EPMA; pyrite; Zaozigou gold deposit; trace element

早子沟金矿床位于甘肃省甘南藏族自治州合作市境内, 距离合作市 10 km, 为招金矿业股份有限公司所有, 属西秦岭成矿带夏河-西和-凤县-黄柏塬成矿亚带, 是区内超大型金矿(包含格晏昂矿段)。前人对其成矿物质、成矿流体、岩石地球化学等方面开展了大量研究, 但矿床类型一直存在争议, 如造山型金矿(李杰美等, 2014; 第鹏飞, 2019; 刘东晓等, 2019; Qiu et al., 2020; 董子良等, 2024)、与还原侵入体有关的金矿(Sui et al., 2020)、浅成低温热液型金矿(姜琪等, 2010; 刘晓林, 2011; Tang et al., 2019)、类卡林型金矿(曹晓峰等, 2012)、斑岩型矿床(刘勇等, 2012)、岩浆期后热液型矿床(陈瑞莉等, 2018)。笔者通过对主成矿期 II 阶段两种亚类硫化物开展岩相学观察、电子探针、原

位硫及微量元素分析, 对两种类型硫化物岩相学特征、金赋存状态、元素相关性、成矿物质来源开展研究, 以期查明早子沟金矿床主成矿期 II 阶段成矿物质演变特征, 结合前人研究进展, 明确早子沟金矿床成因类型。

1 区域背景

早子沟金矿床大地构造位置位于西秦岭造山带的西北部, 处在华北板块和扬子板块的结合部位, 区域控断裂主要为夏河-合作断裂带和桑科南-格里那断裂带, 两断裂带之间可见麦来梁-早仁道、扎油乡-早子沟、桑曲-地娄塘、拉贡玛-纳合迦 4 条 NW

向次级主干断裂,深大断裂为导矿构造,次级主干断裂为容矿构造,区域岩浆活动较频繁,岩脉主要发育在岩体及围岩裂隙中,展布方向有 NE、NW、近 EW 和近 SN 向 4 组,以 NE 和 NW 向为主,其余两组次之(赵积珍等, 2013; 陈国忠等, 2013; 薛仲凯等, 2021),部分学者根据构造走向和相互切割关系,推测早期以 NW 向断裂为主,NE 向次之(梁志录等, 2013; 陈国忠等, 2015; 陈瑞莉等, 2018)。钱建平等(2018)通过综合分析中三叠世以来矿区及区域构造、岩浆、热液成矿作用等地质事件的相互关系,提出 NE 向“多”字型横张断裂构造形成最早,NW-NWW 向“X”型共轭压剪性断裂构造形成最晚。韦良喜等(2016)通过对早子沟金矿床构造应力场分析提出

NE 向构造早于 NW 向,分别对应印支中期和印支晚期,区域上三叠系中岩浆热液型和变质碎屑岩型矿床整体呈 NW 向展布,受区域大断裂控制,区域成矿条件优越,现已发现多个大中型金矿床。研究区出露晚古生代—中生代,其中晚古生代(C、P)分布在夏河—合作断裂以北,主要为一套砂板岩夹砾屑灰岩组成的滨浅海相沉积。三叠系主要分布在夏河—合作断裂以南,可分为下三叠统果木沟组、江里沟组,中—上三叠统大河坝组,总体上为一套砂板岩互层半深海斜坡相浊流沉积。岩浆活动强烈,北部有德合日二长花岗岩、三索玛花岗闪长岩、德乌鲁花岗闪长岩、美武花岗闪长岩等大小岩株 10 余处,一起组成了 NW 向岩浆弧(图 1)。

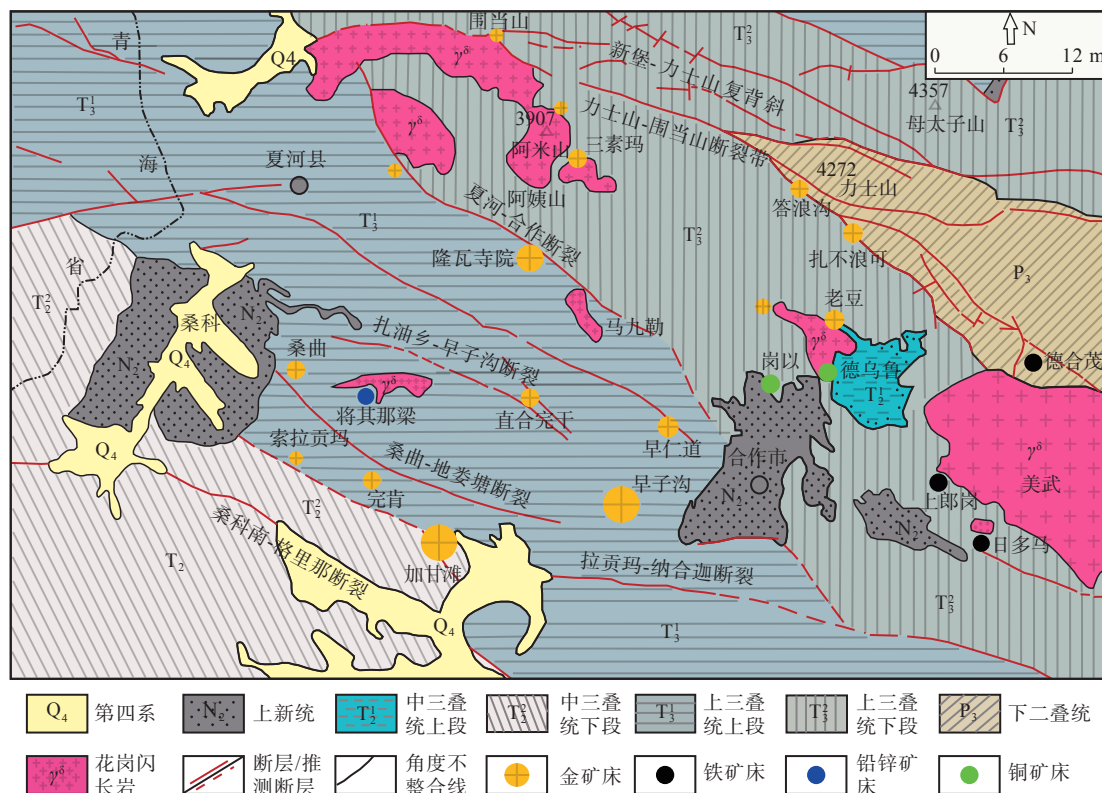


图 1 早子沟金矿床区域地质图(据第鹏飞, 2019 修改)

Fig. 1 Regional geological map of the Zaozigou gold deposit

早子沟金矿床位于新堡-力士山复背斜南西翼,总体为单斜构造,矿区主要出露下三叠系江里沟组一段和第四系,其中下三叠统江里沟组一段岩性为深灰-灰绿色硅质板岩、灰褐-灰绿色薄-厚层岩屑长石细砂岩夹粉砂质板岩、泥质板岩等,金矿主要赋存于条带状硅质板岩、泥质板岩及粉砂质板岩中,第四系发育于山间沟谷,受岩浆侵入和断层的影响,地层产状混

乱,但总体呈近 SN 向展布,倾向西,倾角普遍较陡。矿区断裂构造发育且呈现多期次现象,前人按照展布规律及矿体特征,将断裂构造划分为 NW、NE、NS、NWW、NNE 向构造,其中 NE 和近 NS 向规模最大,NE、NW、NWW 和近 NS 向断裂为主要的控矿构造。

围岩蚀变主要有硅化、黄铁矿化、赤-褐铁矿化、碳酸盐化、绢云母化、绿泥石化、高岭土化等,其中硅

化、黄铁矿化、赤铁矿化与金成矿关系最为密切。矿区内岩浆岩主要为花岗斑岩、闪长玢岩等侵入岩,类型多样且出露面积广泛,其产出明显受断裂构造控制作用影响,单体规模不大,主要呈NE向和NNE向条带状展布,在矿区西部可见近SN向展布岩体,NW向岩体出露面积很小。大多数矿体受NE、NW和近SN向断裂构造控制,根据矿化带的空间展布特点及组合样式可将矿区划分为西矿段和东矿段。西矿段主要矿化带展布方向为近SN向,代表性矿体有Au29、

Au30、Au31等。东矿段是矿区最主要的矿化带,展布方向NE,代表性矿体有Au1、Au9、Au15等。东矿段深部还存在一组NW向缓倾角的隐伏矿体,其代表性矿体有M4、M5、M6等,缓倾角矿体与NE向矿体斜交(图2)。矿石自然类型主要为赤褐铁矿化硅化碎裂砂质板岩型、毒砂化黄铁矿化辉锑矿化碎裂脉岩型、赤褐铁矿化硅化角砾岩型、方解石石英脉型、毒砂化黄铁矿化辉锑矿化碎裂砂质板岩型和褐铁矿化脉岩型金矿石(图3)。

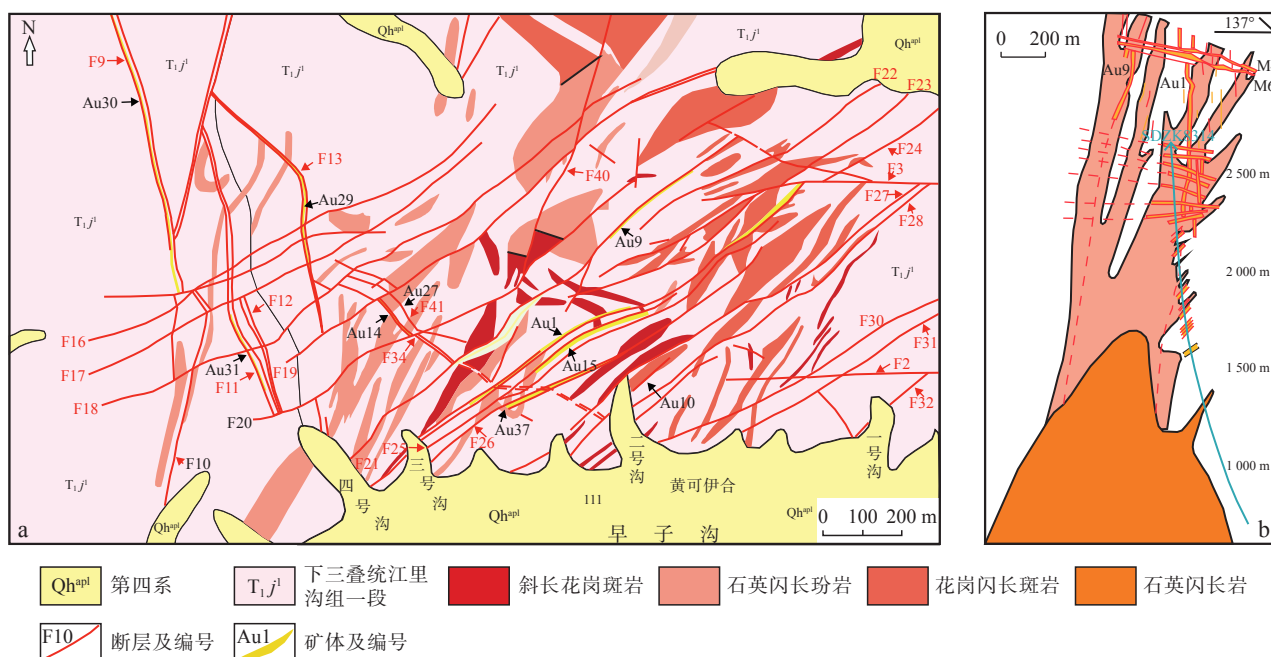


图2 早子沟金矿床矿区地质图(据韦良喜, 2016 修改)

Fig. 2 Geological map of the Zaozigou gold deposit

在控矿构造叠加部位,矿体品位及规模更好。本矿区载金矿物主要为黄铁矿、毒砂、褐铁矿及辉锑矿,刘东晓等(2019)根据热液脉穿插关系及矿物的共生关系,将早子沟金矿床热液成矿过程划分为4个阶段:(I)石英-黄铁矿化阶段,为矿床的早期成矿阶段;(II)黄铁矿-毒砂-石英阶段,为主要的金富集成矿阶段;(III)辉锑矿-石英-方解石阶段,为另一金富集成矿阶段;(IV)石英-方解石阶段,与金成矿关系较弱。本次选择I~III成矿阶段样品进行镜下观察,I成矿阶段主要为自形黄铁矿,未见其他载金矿物,II阶段为黄铁矿-毒砂-石英阶段,黄铁矿颗粒内部孔洞较为发育,推测因沸腾作用导致,根据黄铁矿及毒砂共生关系及矿物形态特征,将II阶段分为两个亚阶段(II₁、II₂),其中II₁成矿阶段矿物主要为黄铁矿及毒砂,黄铁矿

自形程度减弱,孔洞发育,毒砂自形程度较好,可见黄铁矿颗粒中包含毒砂及两者呈交代溶蚀结构共生,II₂成矿阶段矿物主要为黄铁矿,毒砂含量减少,黄铁矿中包含有少量毒砂,矿物表面平整,呈自形-半自形,表明II₂成矿阶段受到区域动力变质作用,III成矿阶段主要以辉锑矿为主,在裂隙处可见少量的黄铁矿和毒砂,均呈他形分布(图4)。

2 研究方法

本次样品选取Au1矿体矿石,针对主成矿期II阶段NW向矿带中含矿蚀变板岩和石英闪长玢岩采集样品进行观察分析,岩石薄片矿物学观察在中国地质调查局西安矿产资源调查中心完成,探针片磨制由河

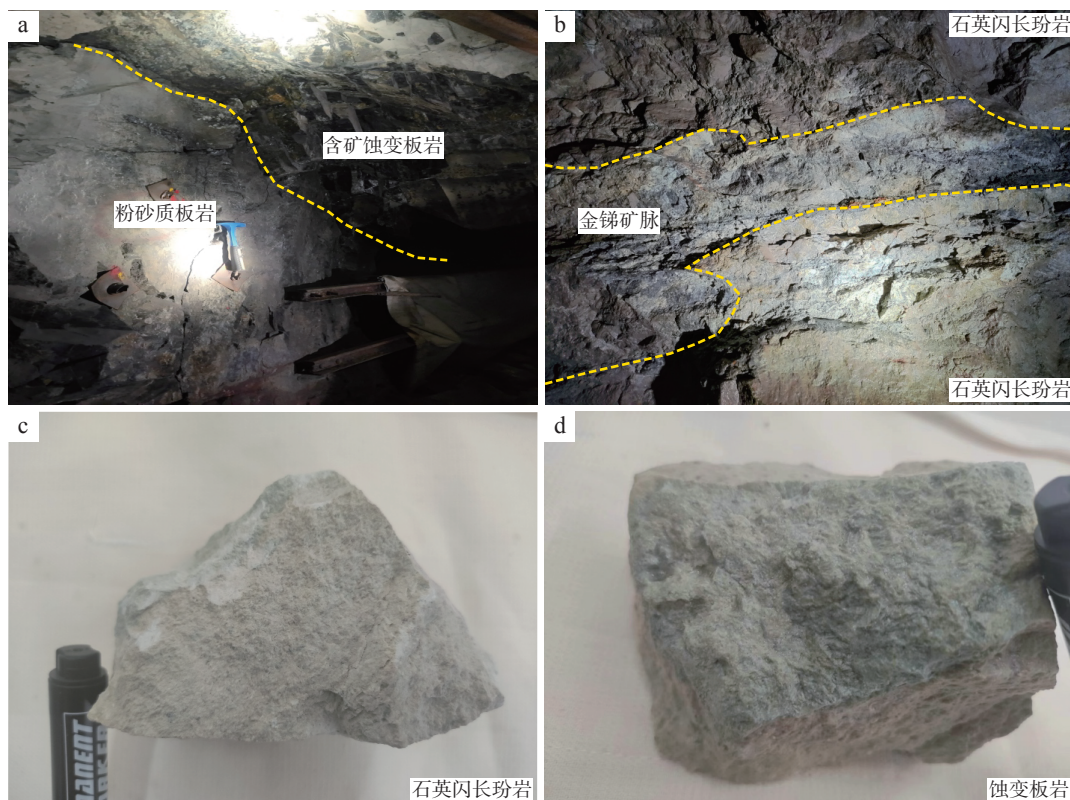


图3 早子沟金矿床典型野外及手标本照片

Fig. 3 Typical field and hand specimen photos of Zaozigou gold mine

北省地质测绘院岩矿实验测试中心完成, 硫化物背散射成像及电子探针在长安大学成矿作用及动力学实验室完成, LA-ICP-MS 硫化物微区原位硫同位素及微量元素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行。

利用日本电子 JXA—8100 型电子探针对所制的黄铁矿探针片样进行背散射成像和定量成分分析, 共分析 16 种元素。分析时电子探针的加速电压为 15 KV, 探针工作电流约为 20 na, 束斑聚焦, 电子束斑直径为 5.0 μm , 测试标准为 GB/T 15074-2008。硫同位素分析采用激光剥蚀-多接收等离子体质谱法。激光剥蚀系统是 193 nm 准分子激光剥蚀系统 (RESOLUTION M-50, ASI), 包含一台 193 nm ArF 准分子激光器, 测试 S 同位素时使用的激光能量密度 (fluence) 为 3.6 J/cm^2 , 频率 (frequency) 为 3 Hz, 剥蚀斑束 (spot size) 为 25~37 μm , 剥蚀方式为单点剥蚀, 载气为高纯氮气 (280 mL/min), 补充气体为 Ar, 一般为 0.86 L/min。测试过程中使用的数据校正方法为“标准-样品-标准”交叉测试 (SSB), 测试过程中选择黄铁矿 (Py-4, $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}} = 1.7 \pm 0.3\text{‰}$) 基体作为标准样品, 为监控数据的准确性, 会每隔 8 个样品插入测试一对实验室内标。

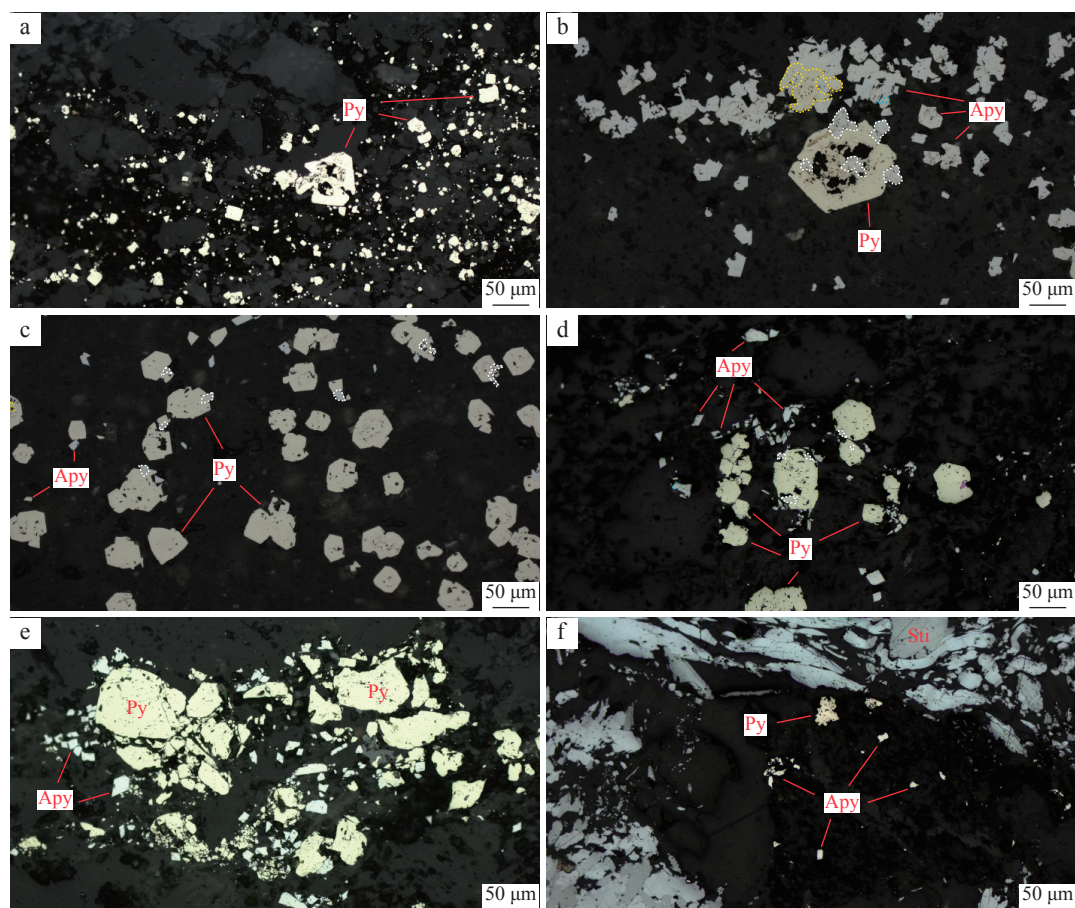
3 研究结果

3.1 电子探针 EPMA/BSE 分析

本次工作选取成矿期 II 阶段 NW 向断裂中金矿石中黄铁矿、毒砂及 III 阶段辉锑矿进行电子探针实验 (表 1)。

黄铁矿: II₁ 阶段为多孔他形黄铁矿, 5 个测点 Au 含量在检测限以上, 为 0.003%~0.083%, 平均为 0.046%; As 含量为 0.572%~5.083%, 平均为 2.505%; Sb 含量为 0.007%~0.072%, 平均为 0.034%; Cu 含量较低, 平均为 0.013%; Fe 含量平均为 45.17%; S 含量平均为 50.08%, 与黄铁矿理论值 (Fe: 46.55%, S: 53.45%, S/Fe=2) 相比轻微贫铁贫硫。结合 As 含量较高, 认为黄铁矿主要为含砷黄铁矿 (表 1)。黄铁矿颗粒 Au 含量显示, 由核部至边部 Au 含量呈增长趋势, 且毒砂呈他形细碎状充填于黄铁矿颗粒中 (图 5a)。

II₂ 阶段为自形-半自形黄铁矿, 6 个测点中 Au 含量在检测限以上, 为 0.005%~0.089%, 平均为 0.042%; As 含量为 0.355%~2.386%, 平均为 1.447%; Sb 含量为 0.002%~0.043%, 平均为 0.024%; Cu 含量较低, 平



a. I 自形黄铁矿成矿阶段; b、c. II₁ 孔洞黄铁矿与毒砂呈交代溶蚀结构共生矿阶段; d、e. II₂ 自形-半自形黄铁矿与毒砂独立共生矿阶段; f. III 辉锑矿-黄铁矿成矿阶段; 白色虚线为毒砂(Apy); 黄色虚线为黄铁矿(Py)和辉锑矿(Sti)

图4 早子沟金矿床 I ~ III 成矿阶段镜下照片

Fig. 4 Microscopic photos of I ~ III mineralization stages of Zaozigou gold deposit

均为 0.039%; Fe 含量平均为 45.54%; S 含量平均为 51.98%; Fe、S 含量较 NW 向高; As 含量减少, 这与镜下观察到的毒砂矿物减少相符, 但仍为贫铁贫硫。中黄铁矿颗粒 Au 含量显示, 由核部至边部呈低-高-低的趋势, 毒砂呈块状充填于黄铁矿裂隙中(图 5b)。

III 阶段黄铁矿可见明显增生环带, 2 个测点 Au 含量均低于检测限; As 含量平均值为 4.275%; Sb 含量平均值为 0.077%; Cu 含量平均值为 0.022%; Fe 含量平均值为 43.164%; S 含量平均值为 49.757%; Fe、S 含量较 II 阶段低, 但 As、Sb 含量较高。

毒砂: II₁ 阶段 12 个测点中 Au 含量在检测限以上的有 4 个, 为 0.011%~0.042%, 平均为 0.032%; As 含量为 35.048%~44.897%, 平均为 41.560%; Sb 含量为 0.019%~0.439%, 平均为 0.200%; Cu 含量较低, 平均为 0.034%; Fe 含量平均为 35.192%; S 含量平均为 22.734%。

II₂ 阶段 9 个测点中 Au 含量在检测限以上的有 1 个, 平均为 0.047%; As 含量为 42.035%~45.587%, 平均为 44.122%; Sb 含量为 0.008%~0.411%, 平均为 0.148%; Cu 含量较低, 平均为 0.017%; Fe 含量平均为 34.853%; S 含量平均为 20.948%。

III 阶段 3 个测点 Au 含量高于检测限以上的有 1 个, 数值为 0.060%; As 含量平均为 43.367%; Sb 含量平均为 0.139%; Cu 含量平均为 0.013%; Fe 含量平均为 34.566%; S 含量平均为 22.344%。

辉锑矿: 仅在 III 阶段中发现, 3 个测点中 Au 含量在检测限以上的有 1 个, 平均为 0.038%; As 含量为 0.134%~0.267%, 平均为 0.200%; Sb 含量为 72.001%~72.472%, 平均为 72.195%; Cu 含量均低于检测值; Fe 含量平均为 0.058%; S 含量平均为 27.256%。

3.2 原位硫同位素

主成矿期 II₁ 阶段黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 -9.92‰~

表 1 早子沟金矿床主要金属硫化物电子探针分析结果(%)

Tab. 1 Electron probe analysis results of main metal sulfide in Zaozigou gold deposit (%)

成矿阶段	No.	As	Au	Co	Te	Bi	S	Pb	Ag	Sb	Mo	Fe	Cu	Zn	Ni	Total	矿物
II ₁ 阶段	1	3.537	—	0.034	—	0.008	49.465	0.128	—	0.049	1.121	45.095	—	—	0.061	99.498	黄铁矿
	2	0.905	0.003	0.046	0.065	—	50.984	—	0.019	0.072	0.186	45.767	—	0.040	0.023	98.11	黄铁矿
	3	2.861	0.083	0.031	0.004	—	49.082	0.02	—	—	0.258	45.036	0.020	0.027	—	97.422	黄铁矿
	4	5.083	0.024	0.041	—	—	47.692	—	0.022	0.016	0.284	44.387	—	—	—	97.549	黄铁矿
	5	3.142	0.050	0.037	—	0.394	49.851	0.167	0.006	0.007	0.48	44.068	0.004	—	0.026	98.232	黄铁矿
	6	1.624	—	0.021	0.004	—	51.137	—	—	0.031	0.314	45.176	0.009	0.040	—	98.356	黄铁矿
	7	2.239	—	0.056	—	0.029	51.333	0.059	0.019	0.054	0.192	45.531	—	0.025	—	99.537	黄铁矿
	8	3.207	—	0.003	—	0.272	48.172	0.109	0	0.009	0.734	44.907	—	0.034	—	97.447	黄铁矿
	9	0.572	—	0.045	—	0.227	51.975	0.019	—	—	0.255	46.004	0.018	—	0.008	99.123	黄铁矿
	10	1.883	0.069	0.036	—	0.264	51.126	—	—	—	0.716	45.752	0	0.042	0.045	99.933	黄铁矿
	11	44.777	—	0.014	0.008	0.214	20.462	—	0.041	0.031	0.328	34.553	0.045	—	—	100.473	毒砂
	12	42.704	—	0.014	0.053	0.156	21.864	0.208	—	0.272	—	34.746	—	0.037	0.042	100.096	毒砂
	13	43.019	0.034	0.003	—	—	21.165	0.081	0.009	0.192	0.548	35.418	—	0.005	0.028	100.502	毒砂
	14	43.069	—	0.076	—	—	21.895	0.115	0.003	0.073	0.097	35.612	0.046	0.079	0.081	101.146	毒砂
	15	44.346	0.042	0.028	—	0.268	19.653	0.128	—	—	0.286	34.325	0.018	0.017	—	99.111	毒砂
	16	44.897	—	0.021	—	—	19.771	0.012	0.067	0.019	0.322	34.122	—	—	0.007	99.238	毒砂
	17	38.093	—	0.013	—	0.303	25.535	0.034	—	0.161	0.095	35.719	—	0.014	0.045	100.012	毒砂
	18	41.336	0.042	0.012	—	—	22.131	0.046	0.015	0.184	0.187	34.45	—	0.017	—	98.42	毒砂
	19	35.048	0.011	0.022	—	0.202	29.629	—	—	0.347	0.154	36.82	—	—	0.047	102.28	毒砂
	20	40.008	—	0.024	—	—	24.57	0.160	—	0.20	—	36.021	—	0.034	—	101.017	毒砂
	21	40.87	—	0.032	—	0.082	23.081	0.057	0.018	0.283	0.103	35.636	0.028	—	0.006	100.196	毒砂
	22	40.551	—	0.016	—	0.004	23.057	—	0.03	0.439	—	34.883	—	0.024	—	99.004	毒砂
II ₂ 阶段	23	1.05	0.014	0.024	—	—	51.891	—	—	0.022	0.522	45.566	—	—	0.018	99.107	黄铁矿
	24	1.386	—	0.024	0.022	—	51.792	0.146	—	0.002	0.273	45.218	0.031	0.080	0.017	98.991	黄铁矿
	25	0.355	0.064	0.045	—	0.025	52.764	0.116	—	0.016	0.606	45.678	0.062	0.059	0.021	99.84	黄铁矿
	26	1.612	0.089	0.05	0.056	—	51.748	—	—	0	0.215	45.105	0.044	—	0.003	98.922	黄铁矿
	27	2.386	0.005	0.034	—	0.080	51.907	—	—	0.020	0.367	45.36	0.038	—	—	100.197	黄铁矿
	28	1.911	—	0.033	0.004	0.029	51.598	0.127	—	0.031	0.663	46.008	0.011	0.025	0.064	100.504	黄铁矿
	29	1.740	0.043	0.061	—	—	51.478	—	0.057	0.034	0.372	45.387	0.009	—	0.033	99.214	黄铁矿
	30	1.987	—	0.022	—	—	51.09	—	—	—	0.489	45.279	0.056	—	—	98.923	黄铁矿
	31	1.007	0.035	0.046	0.009	—	52.633	—	—	0.043	0.671	45.969	0.062	—	0.002	100.477	黄铁矿
	32	1.032	—	0.027	0.013	—	52.934	—	0.025	—	0.272	45.875	0	—	0.02	100.198	黄铁矿
	33	44.668	—	0.036	—	—	20.932	—	0.035	0.029	0.146	34.373	0.013	0.052	—	100.284	毒砂
	34	42.035	0.047	0.027	0.032	0.117	21.318	0.207	0.029	0.163	0.353	34.993	0.021	—	—	99.342	毒砂
	35	42.494	—	0.003	—	—	21.833	—	—	0.291	0.63	34.647	—	0.070	0.007	99.975	毒砂
	36	45.854	—	0.002	—	—	20.045	0.163	0.012	0.008	0.252	35.767	—	—	—	102.103	毒砂
	37	44.621	—	0.041	—	—	20.251	0.081	—	0.017	—	33.412	—	0.003	—	98.426	毒砂
	38	45.233	—	0.028	0.036	—	20.573	0.105	—	0.067	0.265	34.519	—	0.003	—	100.829	毒砂
	39	45.587	—	0.024	0.028	—	20.221	0.058	—	0.027	0.231	35.099	—	0.020	—	101.295	毒砂
	40	43.414	—	0.045	—	—	21.212	—	—	0.411	—	35.616	—	—	0.004	100.702	毒砂
	41	43.193	—	0.064	0.008	—	22.149	0.012	—	0.320	0.422	35.249	—	—	0.024	101.441	毒砂
III阶段	42	2.647	—	0.024	—	0.071	51.396	0.069	—	0.052	—	43.693	0.022	—	0.038	98.012	黄铁矿
	43	5.902	—	0.037	—	—	48.118	0.020	0.051	0.101	0.516	42.635	—	0.117	0.042	97.539	黄铁矿
	44	41.576	—	0.016	—	—	23.997	—	0.018	0.139	0.028	35.921	—	0.032	—	101.727	毒砂
	45	42.291	0.060	0.004	0.012	—	20.97	—	0.044	0.086	0.444	33.659	—	0.023	0.037	97.630	毒砂
	46	46.235	—	0.020	0.008	—	22.066	—	0.009	0.193	0.39	34.117	0.013	—	—	103.051	毒砂
	47	0.134	—	0.011	—	0.113	27.287	0.029	—	72.001	0.666	0.02	—	—	—	100.261	辉锑矿
	48	0.200	—	—	—	0.058	27.313	—	0.029	72.472	0.075	0.004	—	—	0.003	100.154	辉锑矿
	49	0.267	0.038	0.004	—	—	27.167	0.019	—	72.112	0.679	0.149	—	0.075	—	100.51	辉锑矿

注：“—”为低于检出限。

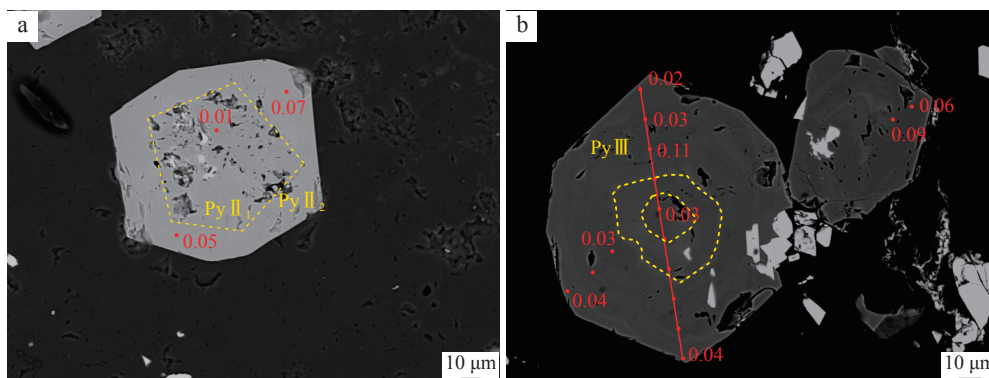


图5 早子沟金矿 II 阶段黄铁矿 BSE 照片

Fig. 5 BSE photos of pyrite in Stage II of Zaozigou gold mine

-14.00‰, 平均为-11.96‰; 极差为 0.27‰~0.28‰, 平均为 0.27‰。毒砂 $\delta^{34}\text{S}_{\text{v-CDT}}$ 值为-12.11‰~-17.59‰, 平均为-14.38‰; 极差为 1.21‰~1.63‰, 平均为 1.47‰。主成矿期 II₂ 阶段黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{v-CDT}}$ 值为-15.58‰~-23.46‰, 平均为-19.42‰; 极差为 0.25‰~1.38‰, 平均为 0.42‰。III 阶段毒砂 $\delta^{34}\text{S}_{\text{v-CDT}}$ 值为-12.01‰~-13.70‰, 平均为-12.78‰; 极差为 0.26‰~0.28‰, 平均为 0.27‰。辉锑矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{v-CDT}}$ 值为-12.87‰~-13.53‰, 平均为-13.23‰; 极差为 0.16‰~0.17‰, 平均值为 0.16‰。II₁ 阶段黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{v-CDT}}$ 值均大于 II₂ 阶段黄铁

矿, III 阶段毒砂 $\delta^{34}\text{S}_{\text{v-CDT}}$ 略微大于 II₁ 阶段, III 阶段辉锑矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{v-CDT}}$ 值与该阶段毒砂基本一致(表 2)。点位选择方面, II₁ 阶段黄铁矿、毒砂点位均选择自形程度较好的矿物, II₂ 阶段黄铁矿点位均选择被毒砂交代后残留的黄铁矿, III 阶段毒砂、辉锑矿均选择自形程度较好的矿物(图 6)。

3.3 LA-ICP-MS 微量元素点分析

通过系统采集岩矿石样品, 在详细研究岩相学的基础上, 对理想金矿不同阶段黄铁矿中的金、亲铁元素、亲硫元素及成矿元素原位微区微量元素进行分

表 2 早子沟金矿床不同成矿阶段硫同位素组成

Tab. 2 Sulfur isotopic compositions in different mineralization stages of Zaozigou gold deposit

样品编号	矿物名称	矿物特征	$\delta^{34}\text{S}_{\text{v-CDT}}/\text{‰}$	误差(‰)	成矿阶段
ZZG-03-PY01	黄铁矿	未碎裂自形	-9.92	0.27	II ₁
ZZG-03-PY02	黄铁矿	未碎裂自形	-14.00	0.28	
ZZG-03DS01	毒砂	未碎裂自形	-12.11	1.46	
ZZG-03DS02	毒砂	未碎裂自形	-13.88	1.63	
ZZG-03DS03	毒砂	未碎裂自形	-13.53	1.21	
ZZG-03DS04	毒砂	未碎裂自形	-17.59	1.55	
ZZG-03DS05	毒砂	未碎裂自形	-14.78	1.49	II ₂
ZZG-04-PY01	黄铁矿	弱碎裂自形	-15.58	0.29	
ZZG-04-PY02	黄铁矿	弱碎裂自形	-17.13	0.30	
ZZG-04-PY03	黄铁矿	碎裂自形	-20.23	0.28	
ZZG-04-PY04	黄铁矿	碎裂自形	-20.49	0.26	
ZZG-04-PY05	黄铁矿	碎裂自形	-23.46	1.38	
ZZG-04-PY06	黄铁矿	弱碎裂自形	-18.32	0.29	
ZZG-04-PY07	黄铁矿	弱碎裂自形	-18.08	0.29	
ZZG-04-PY08	黄铁矿	弱碎裂自形	-22.04	0.25	
ZZG-05DS01	毒砂	未碎裂自形	-13.70	0.26	III
ZZG-05DS02	毒砂	未碎裂自形	-12.01	0.27	
ZZG-05DS03	毒砂	未碎裂自形	-12.63	0.28	
ZZG-05-Sb01	辉锑矿	未碎裂自形	-13.41	0.16	
ZZG-05-Sb02	辉锑矿	未碎裂自形	-13.13	0.16	
ZZG-05-Sb03	辉锑矿	未碎裂自形	-12.87	0.16	
ZZG-05-Sb04	辉锑矿	未碎裂自形	-13.53	0.17	

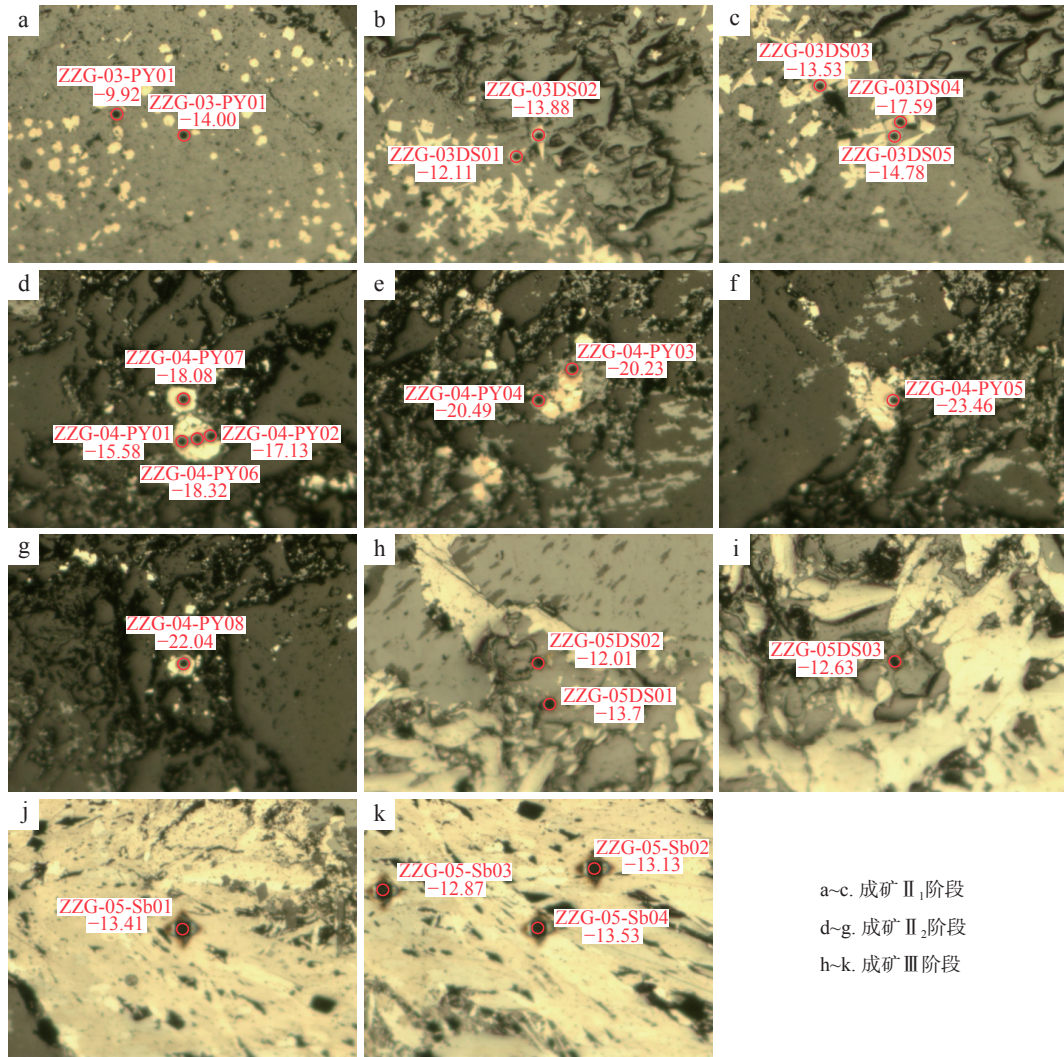


图6 早子沟金矿床黄铁矿原位硫照片

Fig. 6 In-situ sulfur photos of pyrite in Zaozigou gold deposit

析(表 3, 图 7)。亲 Fe、Cu 元素 (Co, Ni, As) 和成矿元素 (Au, Cu, Pb, Zn, Ag, Sb) 质量分数均在检测限以上, II 阶段黄铁矿以 Py II 表示, 其余阶段黄铁矿以此类推。

统计结果表明, Py II 中整体微量元素除 Ag, Bi, V 含量较低外, 其余元素含量均较高, 大部分数值低于 10×10^{-6} , Py II₁ 中 As 的含量最高, 介于 $29\ 123.53 \times 10^{-6} \sim 53\ 092.70 \times 10^{-6}$, 平均值为 $37\ 077.12 \times 10^{-6}$, 其次为 Sb, 介于 $293.90 \times 10^{-6} \sim 2\ 381.67 \times 10^{-6}$, 平均值为 $1\ 319.41 \times 10^{-6}$, Co 的含量为 $7.91 \times 10^{-6} \sim 332.96 \times 10^{-6}$, 平均值为 153.72×10^{-6} , Ni 的含量为 $29.45 \times 10^{-6} \sim 678.21 \times 10^{-6}$, 平均值为 230.79×10^{-6} , Co/Ni 值为 $0.27 \sim 1.44$, 平均为 0.73, Au 的含量为 $17.17 \times 10^{-6} \sim 155.34 \times 10^{-6}$, 平均值为 67.64×10^{-6} 。Py II₂ 中微量元素 Ag、Pb、Cu、Zn、Ti 含量高于 Py II₁, 其余元素含量均较低, As 的含量最高, 介于 $5\ 396.73$

$\times 10^{-6} \sim 53\ 966.87 \times 10^{-6}$, 平均值为 $24\ 529.79 \times 10^{-6}$, Co 的含量为 $13.35 \times 10^{-6} \sim 248.14 \times 10^{-6}$, 平均值为 78.32×10^{-6} , Ti 的含量为 $37.15 \times 10^{-6} \sim 4\ 382.39 \times 10^{-6}$, 平均值为 $1\ 998.92 \times 10^{-6}$, Sb 的含量为 $30.87 \times 10^{-6} \sim 1\ 556.37 \times 10^{-6}$, 平均值为 518.28×10^{-6} , Pb 的含量为 $4.05 \times 10^{-6} \sim 253.65 \times 10^{-6}$, 平均值为 51.93×10^{-6} , Cu 的含量为 $21.77 \times 10^{-6} \sim 139.62 \times 10^{-6}$, 平均值为 72.19×10^{-6} , Ni 的含量为 $20.32 \times 10^{-6} \sim 218.71 \times 10^{-6}$, 平均值为 65.00×10^{-6} , Co/Ni 值为 $0.62 \sim 1.75$, 平均为 1.10, Au 的含量为 $2.34 \times 10^{-6} \sim 31.88 \times 10^{-6}$, 平均值为 18.50×10^{-6} 。早子沟金矿床箱分析结果显示, 从 Py II₁ 到 Py II₂ 阶段 Au、Sb、As、Bi、Co、Ni、V 等成矿元素均为减少趋势, Au 含量的减少是因为 Py II₁ 阶段早于 Py II₂, 经受两期成矿阶段叠加的结果, 亲铁、铜元素中 Co、Ni、As 元素变化呈下降趋势, 成矿元素中 Cu、Pb、Zn、Ag 元素变化呈上升趋势(图 7)。

表 3 早子沟金矿床黄铁矿 LA-ICP-MS 微量元素(10^{-6})特征

Tab. 3 LA-ICP-MS trace element (10^{-6}) characteristics of pyrite in Zaozigou gold deposit

类型	样品编号	Au	Ag	Sb	As	Pb	Bi	Cu	Zn	Co	Ni	Ti	V	Co/Ni
Py II ₁	ZZG-03-01	88.42	0.55	1 237.23	39 726.75	19.08	13.46	5.92	3.14	236.46	164.47	65.18	16.75	1.44
	ZZG-03-02	17.17	1.07	293.90	29 123.53	53.34	3.91	105.27	255.19	41.95	53.01	424.97	4.77	0.79
	ZZG-03-03	23.16	2.12	375.51	45 973.90	50.91	5.54	48.37	1.38	63.69	90.85	897.18	8.50	0.70
	ZZG-03-04	57.68	0.58	2 196.52	45 833.80	49.02	5.08	24.34	0.85	7.91	29.45	8.85	1.90	0.27
	ZZG-03-05	86.65	0.36	1 478.13	46 580.37	35.12	14.32	10.70	0.92	66.83	95.03	14.48	3.38	0.70
	ZZG-03-06	45.38	0.45	864.17	46 879.97	32.60	25.60	5.41	3.31	214.81	224.40	1 083.03	31.50	0.96
	ZZG-03-07	67.29	0.51	2 381.67	42 444.70	40.82	11.24	64.15	3.38	265.14	510.91	757.98	26.71	0.52
	ZZG-03-08	155.34	0.22	1 728.16	53 092.70	9.01	0.64	12.24	0.71	332.96	678.21	5 209.79	54.62	0.49
Py II ₂	ZZG-04-01	15.17	0.80	287.61	18 124.47	18.49	1.94	40.12	0.21	50.58	43.13	82.03	1.42	1.17
	ZZG-04-02	11.49	28.07	1 556.37	5 396.73	253.65	0.66	139.62	1.14	248.14	218.71	37.15	1.84	1.13
	ZZG-04-03	8.64	0.64	412.30	53 966.87	22.43	0.58	44.90	72.63	168.72	96.18	4 382.39	32.40	1.75
	ZZG-04-04	2.34	0.15	30.87	12 100.59	4.05	0.11	21.77	0.35	13.35	21.68	682.33	10.03	0.62
	ZZG-04-05	25.69	1.51	199.01	23 617.14	20.55	1.84	103.18	45.53	40.71	29.82	2 634.14	8.65	1.36
	ZZG-04-06	31.88	0.98	362.78	19 986.79	41.53	1.46	79.78	149.31	40.50	38.14	3 373.50	36.60	1.06
	ZZG-04-07	29.47	1.55	1 178.63	46 427.66	29.62	0.89	41.91	41.49	49.28	52.04	2 064.23	4.19	0.95
	ZZG-04-08	23.31	0.81	118.67	16 618.10	25.12	1.56	106.27	36.27	15.29	20.32	2 735.61	29.82	0.75

注: “-” 为低于检测值。

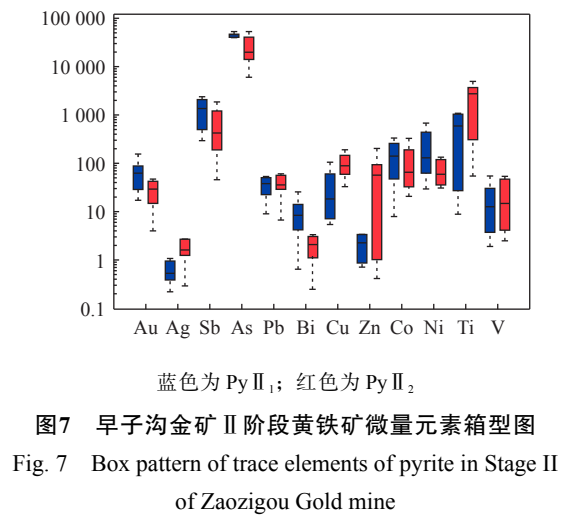


图7 早子沟金矿 II 阶段黄铁矿微量元素箱型图

Fig. 7 Box pattern of trace elements of pyrite in Stage II of Zaozigou Gold mine

4 讨论

4.1 金赋存状态

金的赋存状态研究为金的矿化过程提供了直接证据,对金矿床成矿作用研究具有重要意义(张燕等, 2022; 冯岳川等, 2023)。根据粒径的大小可以将金分为明金($>0.2\text{ mm}$)、显微金($0.2\sim0.2\text{ mm}$)和超显微金

($<0.2\text{ }\mu\text{m}$),其中明金、显微金通常为可见金,超显微金通常为不可见金(Cook, 1990; 马建秦等, 1999; 徐万臣等, 2011)。国内外学者对微细浸染型金矿金的赋存状态已做了较为深入的研究,总结了微细浸染型金矿金赋存状态特征。研究发现黄铁矿中金有两种赋存形式(韦龙明等, 1995; Simon et al., 1999; Reich et al., 2005)。第一种是化学结合态金 Au^+ ,该形式中金以 Au^+ 形式进入黄铁矿中,占据黄铁矿晶格位置(Greg et al., 1993; Fleet et al., 1997; Simon et al., 1999; Palenik et al., 2004);第二种是 Au^0 ,以独立矿物形式赋存(Radtke et al., 1972; Wells et al., 1973; 叶先贤等, 1991; 孙振亚等 1993)。

根据二者摩尔质量百分比制作含砷黄铁矿金溶解度曲线图可知,主成矿期的黄铁矿位于曲线两侧(图 7a),指示主成矿期 II₁ 阶段金主要以 Au^+ 超显微的形式赋存在黄铁矿中, II₂ 阶段金主要以 Au^0 的状态赋存于黄铁矿中,随着主成矿期 II₁ 向 II₂ 成矿演化过程中, Au 的赋存形式由 Au^+ 至 Au^0 呈逐渐过渡趋势。

4.2 成矿流体微量元素组成及性质

对黄铁矿中各微量元素的相关性进行分析,可以有效地判断微量元素进入黄铁矿的形式(曾庆栋等,

2007; 毛先成等, 2018; 邱志伟等, 2022)。金和黄铁矿中其他微量元素之间的关系(图 8)。Ag 与 Au 在两个成矿阶段显示出较好的正相关性(图 9a), 其中 Py II₂ 阶段比 Py II₁ 阶段相关性更强; Au 与 Sb 之间有较好的正相关性(图 9b); Au、As 之间存在较好的正相关(图 9c), 从黄铁矿微量元素观察, 从 II₁ 阶段至 II₂ 阶段随着 Au 含量的减少, As 含量在逐渐减少, 结合黄铁矿形态及金赋存状态特征, 推测 Au 在强烈的热液活动情况下, 从晶格中析出, 以 Au⁰ 的状态赋存在裂隙中, As 为低温成矿元素, 通常在低温成因的黄铁矿中富集 (Zhao et al., 2021; 肖为等, 2022), Py II₂ 具有相对较低的 As 含量, 表明其结晶温度相对较高; Au 和 Pb 之间的相关性(图 9d)较弱于 Au 和 Bi 之间的相关性(图 9e); Ag 和 Pb 之间的相关性较弱(图 9f)。Ag 与 Au 良好的相关性表明 Ag 可能以银金矿的形式赋存与黄铁矿中。Pb 与 Au 的正相关可能表明强烈的水岩反应可能会促使 Au 的沉淀富集, 有利于 Au 的富集, Py II₂ 中 Pb 与 Au 相关性较 Py II₁ 强, 表明 Py II₂ 阶段水岩反应强烈。Au 与 Ag、Sb、As、Pb、Bi 成正相关性, 指示在结晶沉淀过程中, Ag、Sb、As、Pb、Bi 等微量元素以不同的形式进入主矿物颗粒之中。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, Co 的溶解度就会出现明显降低。从 Py II₁ 到 Py II₂, 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。此外, As 浓度与形成温度的关系表明 ($C_{As} = 0.4785 \cdot e^{-0.0143T}$), 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)。Py II₁ 的 As 含量高于 Py II₂, 表明 Py II₁ 的形成温度高于 Py II₂, 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 Py II₁ 沉淀消耗了流体中大量的 As, 即使温度降低也会使得 Py II₂

中的 As 含量降低。

4.3 黄铁矿成因

Co 和 Ni 是黄铁矿中常见的微量元素, 其相对质量分数在判断黄铁矿的形成环境具有重要意义 (陈原林, 2021; 辛明宇等, 2025)。根据不同成因黄铁矿的 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 统计分析提出的不同成因黄铁矿图解, 用以判断黄铁矿成因 (Bralia et al., 1979; 凡韬等, 2025): $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 小于 1.00 的一般为沉积成因黄铁矿; $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 为 1.17~5.00 的为热液成因; 火山成因黄铁矿 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 为 5.00~50.00。II 阶段黄铁矿 Co-Ni 二元判别图投点位于 1.00 附近, 表明 II 阶段两期亚阶段的黄铁矿中矿物成分来自地层和深部热液的混合来源(图 7b)。

4.4 成矿物质来源

硫是 Au 的良好沉淀元素, 同时也是 Au 低温搬运的重要载体之一, 因此, 研究硫的来源对研究成矿物质来源和矿质的运移有重要的意义。目前很多学者已对早子沟金矿床的成矿物质来源进行探究, 主要分为以下 3 种观点: ①主要来源于岩浆 (姜琪等, 2010)。②主要来源于地层 (曹晓峰等, 2012)。③前期为岩浆源, 后期加入变质源 (李康宁等, 2014; 刘东晓等, 2019), 本次原位硫选取早子沟金矿主成矿阶段 (II、III) 黄铁矿、毒砂、辉锑矿进行实验, 对于成矿物质来源研究具有很好的指示意义。相关数据显示, 主成矿期 II₁ 阶段黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 -9.92‰~-14.00‰, 毒砂 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 -12.11‰~-17.59‰, 主成矿期 II₂ 阶段黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 -15.58‰~-23.46‰, S 同位素数值随着成矿演化而变小。前人将成矿物质来源按 S 同位素数值划分为中酸性岩 (-10‰~10‰)、变质岩 (-20‰~20‰) 和沉积岩 (-10‰~-50‰) (侯广顺等, 2003)。西秦岭地区泥盆系黑色页岩和粉砂岩中沉积

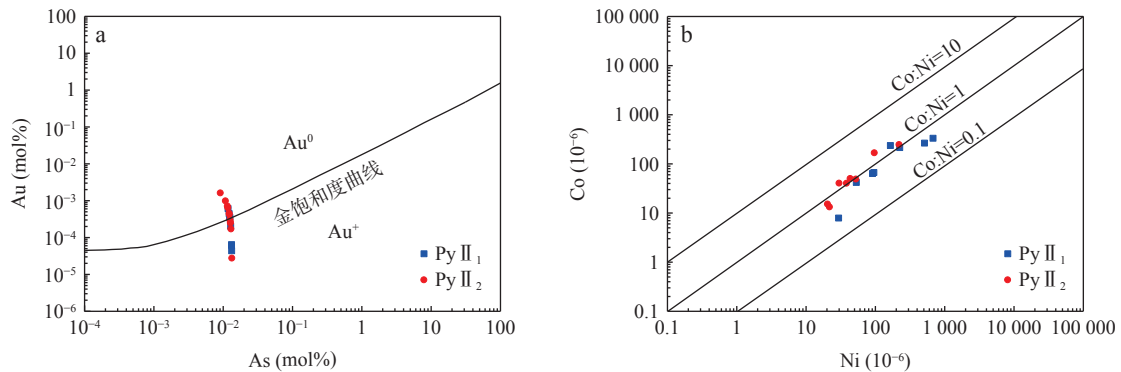


图8 早子沟金矿床黄铁矿 Au-As 曲线图(a; 底图据 Reich et al., 2005)、Co-Ni 二元判别图(b)

Fig. 8 (a) Au-As curve of pyrite, (b) Co-Ni binary discriminant diagram of pyrite in gold deposit Zaozigou gold deposit

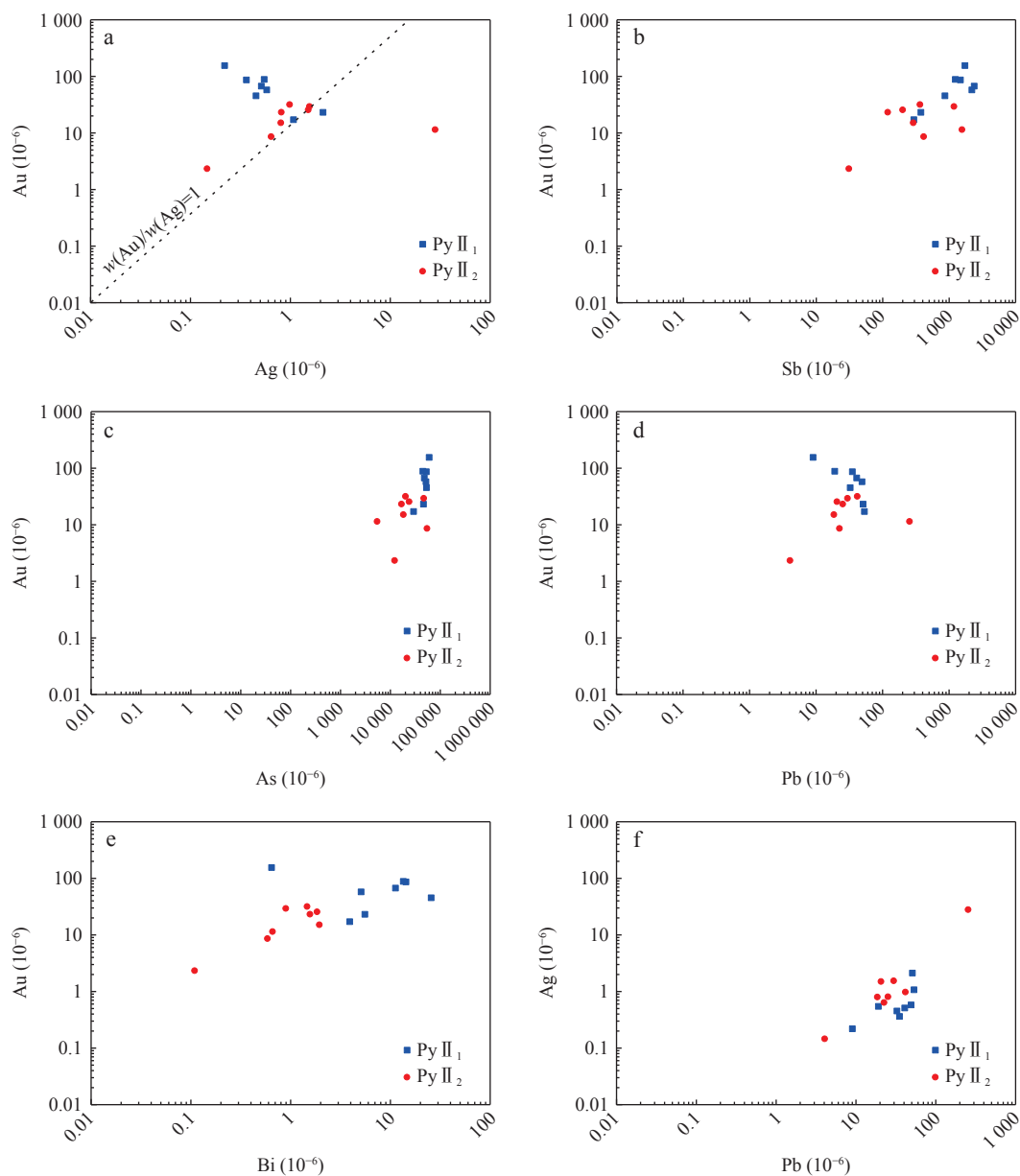


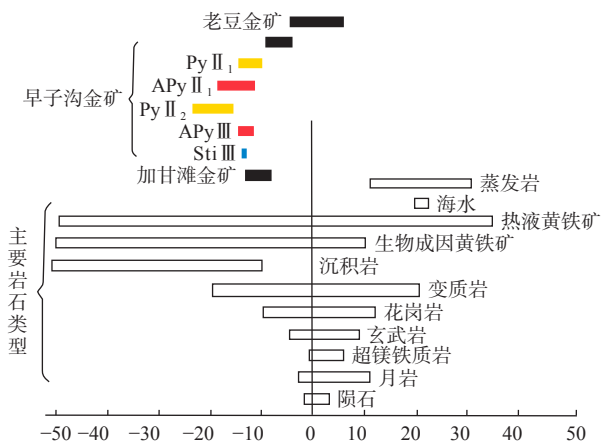
图9 早子沟金矿床元素相关性图

Fig. 9 Element correlation diagram of Zaozigou gold deposit

成因黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-27.1\text{‰} \sim -7.6\text{‰}$ (Chen et al., 2015), 结合早子沟金矿深部石英闪长玢岩岩体的发现, 认为 II 阶段深部岩浆在上升过程中分异出处于高温临界状态的含矿气水热液, 沿断裂构造向上运移, 在经过深部泥盆系含矿层中萃取地层中金, 以络合物形式运移沉淀富集。随着岩浆热液温度等物理化学条件的变化, 其载金能力逐渐减弱, 结合 II₂ 阶段与江里沟组黑色页岩中成岩期黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值接近 (Du et al., 2020), 推测后期通过淋溶、渗滤作用摄取三叠系矿源层中成矿物质, 形成含矿气水热液, 在温压及不同性质流体混环境中发生金沉淀和富集 (图 10)。

4.5 矿床成因类型

根据岩浆的演化过程, 在正岩浆阶段以及处于过渡情况的伟晶作用阶段 (或称残余岩浆作用阶段) 之后所分泌出来的含矿气水溶液形成的矿床, 称为岩浆期后矿床。前人根据不同成因类型矿床中黄铁矿的 Co、Ni 和 As 质量分数确立 Co-Ni-As 三角图解。其中, I 区域代表浅成低温热液型和岩浆热液型, II 区域代表卡林型, III 区域代表变质热液型; 浅成热液型与岩浆热液型主要热液来源是岩浆水与和部分大气水的混合, 变质热液型主要热液来源是建造水和变质水, 卡林型是由地热异常或深部岩浆提供热源, 加热

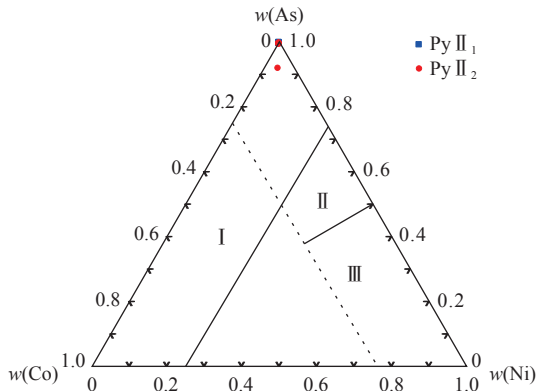


数据据李康宁等, 2023; 底图据侯广顺等, 2003

图10 早子沟金矿与西秦岭地区典型金矿床、主要岩石类型硫同位素分布对比图

Fig. 10 Comparison of sulfur isotope distribution between Zaozigou gold deposit and typical gold deposits and main rock types in West Qinling area

大气水和建造水淋滤上部地壳含金建造形成的矿床(严育通等, 2012; 林祖苇等, 2019)。早子沟金矿成矿期黄铁矿投点落入 I 区域与 II 区域, 表明成矿热液为岩浆水、建造水和大气水的混合来源(图 11), 指示其具有富 As, 贫 Co、Ni 的特点, 这与钻探工程在深部发现的石英闪长玢岩岩体现象一致, 前人开展的氢氧同位素及 Pb 同位素同样证明成矿作用与岩浆活动关系密切(Tang et al., 2019; 陈瑞莉等, 2018), 笔者通过对 Py II 两期亚阶段黄铁矿开展岩相学观察、电子探针、原位硫及微量元素分析, 结合前人研究成果, 推测成矿过程为, 在 II 阶段深部岩浆在上升过程中分异出



I. 浅成热液型与岩浆热液型集中区; II. 卡林型集中区;
III. 变质热液型集中区

图11 早子沟金矿床黄铁矿 Co-Ni-As 图解
(底图据严育通等, 2012)

Fig. 11 Co-Ni-As diagram of pyrite in Zaozigou gold deposit

于高温临界状态的含矿气水热液, 沿断裂构造向上运移, 在经过深部泥盆系含矿层中萃取地层中金, 以络合物形式运移沉淀富集成矿。随着岩浆热液温度等物理化学条件的变化, 其载金能力逐渐减弱, 通过淋溶、渗滤作用摄取三叠系矿源层中成矿物质形成含矿气水热液, 在温压及不同性质流体混合的前提下, 使金发生沉淀和富集。结合以上认识, 认为早子沟金矿床为岩浆期后热液型金矿。

5 结论

(1)早子沟金矿主成矿期 II₁ 阶段金主要以 Au⁺ 的超显微状态赋存在黄铁矿中, II₂ 阶段金主要以 Au⁰ 的状态赋存在黄铁矿中, 随着成矿演化, Au 的赋存状态逐渐从 Au⁺ 转化为 Au⁰。

(2)早子沟金矿床黄铁矿 LA-ICP-MS 微量元素数据显示, II 阶段不同成矿元素相关性差异较大, 表明流体来源复杂, Co-Ni 含量比值表明早子沟金矿 II₁ 阶段成矿过程中有地层物质加入成矿热液。

(3)Co-Ni-As 图解显示早子沟金矿床成因为混合来源, 金矿主成矿期成矿物质主要来源于地层, 区域变质作用促使地层中成矿物质迁移至成矿流体中沿构造向上运移, 晚期岩浆热液使成矿物质再富集形成矿床, 早子沟金矿床为岩浆期后热液型金矿。

致谢: 甘肃省合作早子沟金矿有限责任公司栾晓刚总经理及地质工作人员在野外工作中提供了大量的帮助, 审稿人对文章提出了宝贵意见, 在此一并致谢。

利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献 (References):

曹晓峰, Mohamed Lamine Salifou Sanogo, 吕新彪, 等. 甘肃早子沟金矿床成矿过程分析——来自矿床地质特征、金的赋存状态及稳定同位素证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(4): 1039-1054.

CAO Xiaofeng, Mohamed Lamine Salifou Sanogo, LV Xinbiao, et al. Ore-Forming Process of the Zaozigou Gold Deposit: Constraints from Geological Characteristics, Gold Occurrence and

- Stable Isotope Compositions[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(4): 1039–1054.
- 陈国忠, 梁志录, 麻红顺, 等. 甘肃省合作市早子沟金矿床地质模型的建立及资源总量估算[J]. 西北地质, 2013, 46(4): 173–181.
- CHEN Guozhong, LIANG Zhilu, MA Hongshun, et al. The Establishment of Geological Model and Totalresources Estimate of the Zaozigou Gold Deposit, Hezuo, Gansu Province[J]. North-western Geology, 2013, 46(4): 173–181.
- 陈国忠, 梁志录, 王建龙, 等. 甘肃合作早子沟金矿床品位变化规律及特征探讨[J]. 矿床地质, 2015, 34(1): 149–162.
- CHEN Guozhong, LIANG Zhilu, WANG Jianlong, et al. Grade variation regularity and characteristics of Zaozigou gold deposit in Hezuo Town, Gansu Province[J]. Mineral Deposits, 2015, 34(1): 149–162.
- 陈瑞莉, 陈正乐, 伍俊杰, 等. 甘肃合作早子沟金矿床流体包裹体及硫铅同位素特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(1): 87–104.
- CHEN Ruili, CHEN Zhengle, WU Junjie, et al. Fluid inclusions and S-Pb isotopes in Zaozigou gold deposit, Hezuo in Gansu Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, 48(1): 87–104.
- 陈原林, 李欢, 郑朝阳, 等. 吉林海沟金矿床成因及找矿勘查模式: 黄铁矿 LA-ICP-MS 微量元素及硫同位素证据[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(9): 2990–3002.
- CHEN Yuanlin, LI Huan, ZHENG Chaoyang, et al. Genesis and ore prospecting model of Haigou gold deposit in Jilin Province: evidence from LA-ICP-MS trace element and sulfur isotopic analysis of pyrite[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2021, 52(9): 2990–3002.
- 第鹏飞. 西秦岭夏河-合作早子沟金矿床地球化学特征及成矿机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- DI Pengfei. Geochemistry and ore-forming mechanism on Zaozigou gold deposit in Xiahe-Hezuo, West Qinling, China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- 董子良, 胡新露. 早子沟金矿黄铁矿原位微量元素和硫同位素特征对矿床成因的指示[J]. 地球科学, 2024, 49(12): 4385–4403.
- DONG Ziliang, HU Xinlu. In Situ Trace Elements and Sulfur Isotope Analysis of Pyrite from Zaozigou Gold Deposit: Implications for Ore Genesis[J]. Earth Science, 2024, 49(12): 4385–4403.
- 凡韬, 赖翔, 程文斌, 等. 四川丹巴独狼沟金矿成因矿物学及指针矿物学特征[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 209–224.
- FAN Tao, LAI Xiang, CHENG Wenbin, et al. Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy of the Dulanggou Gold Deposit in Danba, Sichuan Province[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 209–224.
- 冯岳川, 邓军, 于皓丞, 等. 胶东玲珑金矿田金的赋存状态及其对成矿过程的指示意义[J]. 岩石学报, 2023, 39(2): 377–392.
- FENG Yuechuan, DENG Jun, YU Haocheng, et al. Gold occurrence and its indicative significance to mineralization process in Linglong gold district, Jiaodong gold province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2023, 39(2): 377–392.
- 侯广顺, 韩吟文, 曲军锋. 秦岭-大别造山带地壳化学结构研究[J]. 地球化学, 2003(3): 230–238.
- HOU Guangshun, HAN Yinwen, QU Junfeng. Research of continental crust chemical texture of Qinling-Dabie orogenic belt[J]. Geochimica, 2003(3): 230–238.
- 姜琪, 王荣超. 甘肃枣子沟金矿床形成环境及矿床成因[J]. 黄金科学技术, 2010, 18(4): 37–40.
- JIANG Qi, WANG Rongchao. Deposit Formation Environment and Genesis of Zaozigou Gold Deposit in Hezuo, Gansu Province[J]. Gold Science and Technology, 2010, 18(4): 37–40.
- 李杰美, 王美娟, 李光琪. 甘肃早子沟金矿床地质地球化学特征[J]. 矿床地质, 2014, 33(S1): 17–18.
- LI Jiemei, WANG Meijuan, LI Guangqi. Geological and geochemical characteristics of Zaozigou gold deposit in Gansu Province[J]. Mineral Deposits, 2014, 33(S1): 17–18.
- 李康宁, 金鼎国, 蔡龙, 等. 早子沟金矿黄铁矿标型特征及其地质意义[J]. 甘肃地质, 2014, 23(2): 33–40.
- LI Kangning, JIN Dingguo, CAI Long, et al. Typomorphism and its geological significance of pyrite in Zaozigou gold deposit[J]. Gansu Geology, 2014, 23(2): 33–40.
- 李康宁, 张江苏, 徐进, 等. 西秦岭甘南加滩金矿床流体包裹体及氢-氧-硫-铅同位素特征[J]. 地质通报, 2023, 42(6): 941–952.
- LI Kangning, ZHANG Jiangsu, XU Jin, et al. Characteristics of Fluid Inclusions and H-O-S-Pb Isotopic from the Jiagantan Gold Deposit, Gannan, West Qinling[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(6): 941–952.
- 梁志录, 陈国忠, 王建龙, 等. 早子沟金矿成矿过程中的元素迁移规律及金富集机制探讨[J]. 甘肃地质, 2013, 22(3): 35–40.
- LIANG Zhilu, CHEN Guozhong, WANG Jianlong, et al. Element migration and gold enrichment mechanism of mineralization in Zaozigou gold deposit[J]. Gansu Geology, 2013, 22(3): 35–40.
- 林祖苇, 赵新福, 熊乐, 等. 胶东三山岛金矿床黄铁矿原位微区微量元素特征及对矿床成因的指示[J]. 地球科学进展, 2019, 34(4): 399–413.
- LIN Zuwei, ZHAO Xinfu, XIONG Le, et al. In-situ Trace Element Analysis Characteristics of Pyrite in Sanshandao Gold Deposit in Jiaodong Peninsula: Implications for Ore Genesis[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(4): 399–413.
- 刘东晓, 第鹏飞, 张鑫, 等. 甘肃早子沟金矿床成因—来自流

- 体包裹体及 H-O-S 同位素的证据[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, 55(2): 168-175.
- LIU Dongxiao, DI Pengfei, ZHANG Xin, et al. Genesis of the Zaozigou gold deposit in Gansu Province: evidences from fluid inclusions and H-O-S isotopes[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2019, 55(2): 168-175.
- 刘晓林. 甘肃枣子沟金矿床地质特征及成因分析[J]. 甘肃地质, 2011, 20(1): 52-56.
- LIU Xiaolin. Geology and metallogenesis of Zaozigou gold deposit in Gansu[J]. Gansu Geology, 2011, 20(1): 52-56.
- 刘勇, 刘云华, 董福辰, 等. 甘肃枣子沟金矿床成矿时代精确测定及其地质意义[J]. 黄金, 2012, 33(11): 10-17.
- LIU Yong, LIU Yunhua, DONG Fuchen, et al. Accurate dating of mineralogenetic epoch and its geological significance in Zaozigou gold deposit, Gansu province[J]. Gold, 2012, 33(11): 10-17.
- 马建秦, 李朝阳, 温汉捷. 不可见金赋存状态研究现状[J]. 矿物学报, 1999(3): 335-342.
- MA Jianqin, LI Chaoyang, WEN Hanjie. The status quo of research on the occurrence of invisible gold[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1999(3): 335-342.
- 毛先成, 潘敏, 刘占坤, 等. 西天山阿希金矿床黄铁矿微量元素 LA-ICP-MS 原位测试及其指示意义[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(5): 1148-1159.
- MAO Xiancheng, PAN Min, LIU Zhankun, et al. LA-ICP-MS trace element analysis of pyrite from Axi gold deposit in western Tianshan and its significance[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2018, 49(5): 1148-1159.
- 钱建平, 符有江, 周永宁, 等. 内蒙古额济纳旗老硐沟金多金属矿区成矿构造系统解析和构造控矿规律[J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42(6): 1046-1063.
- QIAN Jianping, FU Youjiang, ZHOU Yongning, et al. Analysis of the Metallogenic Structure System and the Regularities of Tectonic Ore Control of the Laodonggou Gold Polymetallic Mining Area, Ejinaqi, Inner Mongolia[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2018, 42(6): 1046-1063.
- 邱志伟, 李占轲, 袁中正. 胶东三山岛金矿床黄铁矿显微结构和微量元素特征: 对金富集机制的指示[J]. 地球科学, 2022, 47(1): 290-308.
- QIU Zhiwei, LI Zhanke, YUAN Zhongzheng. Microstructure and Trace Elements of Pyrite from Sanshandao Gold Deposit in Jiaodong District: Implications for Mechanism of Gold Enrichment[J]. Earth Science, 2022, 47(1): 290-308.
- 孙振亚, 刘永康. 卡林型金矿超显微金的分析电镜研究[J]. 电子显微学报, 1993, (2): 186.
- SUN Zhenya, LIU Yongkang. Electron microscope study on the analysis of ultramicroscopic gold in Carlin-type gold deposits[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 1993, (2): 186.
- 韦良喜. 甘肃省早子沟金矿床构造演化与成矿[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- WEI Liangxi. Tectonic Evolution and Mineralization of the Zaozigou Gold Deposit, Gansu Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- 韦龙明, 刘鸾玲. 中国卡林型金矿床金的赋存状态研究[J]. 地质与勘探, 1995(6): 31-35.
- WEI Longming, LIU Luanling. Gold occurrence state of carlin-type gold deposits in China[J]. Geology and Prospecting, 1995(6): 31-35.
- 肖为, 范洪海, 庞雅庆, 等. 粤北东坑铀矿床黄铁矿 LA-ICP-MS 微量元素特征及其意义[J]. 铀矿地质, 2022, 38(3): 475-486.
- XIAO Wei, FAN Honghai, PANG Yaqing, et al. Characteristics and Significance of LA-ICP-MS Trace Elements in Pyrite From Dongkeng Uranium Deposit, Northern Guangdong[J]. Uranium Geology, 2022, 38(3): 475-486.
- 徐万臣, 牛娜, 张明仁. 辽宁夹山金铜矿区金的赋存状态研究[J]. 黄金, 2011, 32(4): 18-21.
- XU Wanchen, NIU Na, ZHANG Mingren. Study on the occurrence state of gold in Jiashan gold-copper mining area, Liaoning[J]. Gold, 2011, 32(4): 18-21.
- 辛明宇, 刘丽, 盛渊明, 等. 东秦岭北岭金矿床黄铁矿标型特征及成矿指示意义[J]. 西北地质, 2025, 58(5): 75-86.
- XIN Mingyu, LIU Li, SHENG Yuanming, et al. Typomorphic Characteristics and Metallogenic Indicative Significance of Pyrite in Beiling Gold Deposit, East Qinling[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(5): 75-86.
- 薛仲凯, 李朋伟, 常铭, 等. 西秦岭寨上卡林型金矿南矿段综合找矿模型及地质意义[J]. 西北地质, 2021, 54(3): 174-187.
- XUE Zhongkai, LI Pengwei, CHANG Ming, et al. Comprehensive Prospecting Model and the Geological Significance for Zhaishang Carlin-Type Gold Deposit in West Qinling[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(3): 174-187.
- 严育通, 李胜荣, 贾宝剑, 等. 中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析[J]. 地学前缘, 2012, 19(4): 214-226.
- YAN Yutong, LI Shengrong, JIA Baojian, et al. Composition typomorphic characteristics and statistic analysis of pyrite in gold deposits of different genetic types[J]. Geoscience Frontiers, 2012, 19(4): 214-226.
- 叶先贤, 孙振亚, 陈全, 等. 超微金赋存状态的研究[J]. 黄金, 1991, (7): 1-5.
- YE Xianxian, SUN Zhenya, CHEN Tong, et al. Study on the occurrence of ultramicro gold in ore[J]. Gold, 1991, (7): 1-5.
- 曾庆栋, 刘铁兵, 沈远超, 等. 阿尔泰东南缘布尔根地区造山带型金矿床硫铅同位素特征及地质意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(8): 2017-2025.

- ZENG Qingdong, LIU Tiebing, SHEN Yuanchao, et al. Geochemical features of sulfur and lead isotopes and their geological implications for orogenic gold deposits in Buerger area, southeastern margin of the Altay Mountain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(8): 2017–2025.
- 张燕, 李引, 尹鑫, 等. 四川大渡河流域偏岩子金矿床地质特征及金的赋存状态[J]. *矿产综合利用*, 2022, 6(1): 42–47.
- ZHANG Yan, LI Yin, YIN Xin, et al. Geological Characteristics and Occurrence of Pianyanzi Au Deposit in Daduhe Basin, Sichuan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022, 6(1): 42–47.
- 赵积珍, 陈国忠, 梁志录, 等. 早子沟金矿体及地球化学特征[J]. *甘肃地质*, 2013, 22(2): 38–43.
- ZHAO Jizhen, CHEN Guozhong, LIANG Zhilu, et al. Ore-body geochemical features of Zaozigou gold deposit[J]. *Gansu Geology*, 2013, 22(2): 38–43.
- Bralia A, Sabatini G, Troja F. A revaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems[J]. *Mineralium Deposita*, 1979, 14(3): 353–374.
- Chen L, Li X H, Li J W, et al. Extreme Variation of Sulfur Isotopic Compositions in Pyrite from the Qiuling Sediment-Hosted Gold Deposit, West Qinling Orogen, Central China: an In Situ SIMS Study with Implications for the Source of Sulfur[J]. *Mineralium Deposita*, 2015, 50(6): 643–656.
- Cook N J. Concentration of invisible gold in common sulfides[J]. *Canadian Mineralogist*, 1990, 28(1): 1–16.
- Deditius A P, Reich M, Kesler S E, et al. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 140: 644–670.
- Du B S, Shen J F, Santosh M, et al. Textural, compositional and isotopic characteristics of pyrite from the Zaozigou gold deposit in West Qinling, China: Implications for gold metallogeny[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 130: 103917.
- Fleet M E, Mumin A H. Gold-bearing arsenian pyrite and marcasite and arsenopyrite from Carlin Trend gold deposits and laboratory synthesis[J]. *American Mineralogist*, 1997, 82(1–2): 182–193.
- Greg B A, Stephen L C, Stephen E K. Gold and arsenic in iron sulfides from sediment-hosted disseminated gold deposits: implications for depositional processes[J]. *Economic Geology*, 1993, 88(1): 171–185.
- Palenik C S, Utsunomiya S, Reich M, et al. "Invisible" gold revealed: Direct imaging of gold nanoparticles in a Carlin-type deposit[J]. *American Mineralogist*, 2004, 89(10): 1359–1366.
- Pokrovski G S, Borisova A Y, Bychkov A Y. Speciation and Transport of Metals and Metalloids in Geological Vapors[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2013, 76(1): 165–218.
- Qiu K F, Yu H C, Deng J, et al. The giant Zaozigou Au-Sb deposit in West Qinling, China: magmatic- or metamorphic-hydrothermal origin?[J]. *Mineralium Deposita*, 2020(18): 1–18.
- Radtke A, Heropoulos C, Fabbi B, et al. Data on major and minor elements in host rocks and ores, Carlin gold deposit, Nevada[J]. *Economic Geology*, 1972, 67(7): 975–978.
- Reich M, Kesler S, Utsunomiya, et al. Solubility of gold in arsenian pyrite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(11): 2781–2796.
- Simon G, Huang H, Penner-Hahn J E, et al. Oxidation state of gold and arsenic in gold-bearing arsenian pyrite[J]. *American Mineralogist*, 1999, 84(7–8): 1071–1079.
- Simon G, Kesler S, Chrysosoulis S. Geochemistry and textures of gold-bearing arsenian pyrite, Twin Creeks, Nevada; implications for deposition of gold in carlin-type deposits[J]. *Economic Geology*, 1999, 94(3): 405–422.
- Sui J X, Li J W, Hofstra A H, et al. Genesis of the Zaozigou Gold Deposit, West Qinling Orogen, China: Constraints from Sulfide Trace Element and Stable Isotope Geochemistry[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 122: 103477.
- Tang Q Y, Di P F, Yu M, et al. Mineralogy and Geochemistry of Pyrite and Arsenopyrite from the Zaozigou Gold Deposit in West Qinling Orogenic Belt, Central China: Implications for Ore Genesis[J]. *Resource Geology*, 2019, 69(3): 314–332.
- Wells J D, Mullens T E. Gold-bearing arsenian pyrite determined by microprobe analyses, Cortez and Carlin gold mines, Nevada[J]. *Economic Geology*, 1973, 68(2): 187–201.
- Zhao Z X, Wei J H, Liang S N, et al. Sulfide remobilization and trace element redistribution during metamorphism and deformation at the Xitieshan Pb-Zn deposit, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 136: 104–170.