

doi: 10.12097/gbc.2024.02.019

# 北山造山带双尖山—狼娃山地区金矿床硫化物 硫同位素及微量元素对成矿机制的指示

张晨晓<sup>1,2</sup>, 白荣龙<sup>1,2\*</sup>, 樊炳良<sup>3</sup>, 陈雪锋<sup>1</sup>, 虎金荣<sup>4</sup>, 樊立飞<sup>4</sup>, 张跃珂<sup>4</sup>  
ZHANG Chenxiao<sup>1,2</sup>, BAI Ronglong<sup>1,2\*</sup>, FAN Bingliang<sup>3</sup>, CHEN Xuefeng<sup>1</sup>,  
HU Jinrong<sup>4</sup>, FAN Lifei<sup>4</sup>, ZHANG Yueke<sup>4</sup>

1. 天水师范学院资源与环境工程学院, 甘肃 天水 741001;
2. 自然资源部黄河上游战略性矿产资源重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
3. 紫金矿业集团西南地质勘查有限公司, 四川 成都 610057;
4. 甘肃省有色地质调查院, 甘肃 兰州 730000

1. College of Resources and Environmental Engineering, Tianshui Normal University, Tianshui 741001, Gansu, China;
2. Key Laboratory of Strategic Mineral Resources of the Upper Yellow River, Ministry of Natural Resources, Lanzhou 730000, Gansu, China;
3. Zijin Mining Group Southwest Geological Exploration Co., Ltd., Chengdu 610057, Sichuan, China;
4. Gansu Nonferrous Geological Survey Institute, Lanzhou 730000, Gansu, China

**摘要:**【研究目的】双尖山—狼娃山地区位于中亚造山带中段南缘, 北山造山带北部的明水岩浆弧地段, 目前该地区矿床成因等信息尚不明确, 厘清该地区金矿床硫化物中微量元素的赋存状态、流体性质、成矿机制, 进而指导勘查实践。【研究方法】在野外地质调查和矿相学研究的基础上, 对区域内双尖山、大红泉、狼娃山金矿床主成矿阶段的黄铁矿和黄铜矿开展 LA-ICP-MS 微量和稀土元素及硫同位素分析。【研究结果】结果表明, 双尖山—狼娃山地区金矿床的金有可见金及不可见金 2 种赋存形式, 不可见金主要以固溶体金 ( $Au^{1+}$ ) 的形式赋存于黄铁矿晶格中。 $Pb$  和  $Bi$  主要以辉铋矿或  $Bi$  以固溶体的形式存在于方铅矿包裹体中。大红泉和狼娃山矿床中  $Zn$  与  $Cd$ 、 $Pb$  与  $Sb$  之间呈正相关关系, 表明黄铁矿中存在闪锌矿、方铅矿等矿物包体。双尖山—狼娃山地区金矿床  $Nb/La$ 、 $Th/La$ 、 $Hf/Sm$  值多小于 1, 指示成矿流体中富含  $Cl^-$ ;  $Co/Ni$  的含量及比值指示成矿流体具有中低温、低盐度的特点;  $Cu/Au$  值指示成矿流体整体处于较还原的环境;  $Y/Ho$ 、 $Zr/Hf$ 、 $Nb/Ta$  值指示成矿过程存在多期次流体的叠加, 双尖山金矿床成矿晚期流体可能与大气降水相混合。双尖山、大红泉和狼娃山矿床硫化物  $\delta^{34}S$  均值分别为 2.58‰、2.07‰ 和 1.22‰, 双尖山硫同位素值变化范围相较于大红泉、狼娃山金矿床偏大, 显示岩浆硫与地层硫的混合特征, 而大红泉和狼娃山金矿床  $\delta^{34}S$  值均为极低的正值, 显示出岩浆硫的特征。【结论】综合对比野外地质特征、微量元素及硫同位素组成, 认为双尖山及狼娃山金矿床属低硫型浅成低温热液型金矿床, 大红泉金矿床为造山型金矿床, 区域成矿作用具有多期次性。

**关键词:**北山造山带; 金矿; 微量元素; 硫同位素; 矿床成因

**创新点:**厘清了双尖山—狼娃山地区金矿床黄铁矿中微量元素的赋存状态, 利用微量元素探讨了流体性质、利用硫同位素探讨了成矿物质来源等, 提出对于双尖山—狼娃山地区金矿床成矿机制的认识。

中图分类号: P618.51; P595 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)02/03-0276-22

收稿日期: 2024-02-25; 修订日期: 2024-06-22

资助项目: 甘肃省科技计划项目(重点研发计划)《北山造山带北部跃进山铜钨钼多金属矿床岩浆-热液演化与成矿耦合机制研究(编号: 23YFGA0021)》、甘肃省科技计划项目(自然科学基金)《北山造山带双尖山—狼娃山地区金矿床富集机理研究(编号: 22JR5RE199)》、自然资源部黄河上游战略性矿产资源重点实验室开放基金课题《北山造山带双尖山—红柳丘井地区岩浆-热液矿床中铜金钨富集机制研究(编号: YSMRKF202208)》

作者简介: 张晨晓(2002-), 男, 从事地理教育与矿床学研究。E-mail: zhangchenxiao1126@163.com

\* 通信作者: 白荣龙(1989-), 男, 博士, 副教授, 从事成矿作用与成矿规律研究。E-mail: baironglong@126.com

**Zhang C X, Bai R L, Fan B L, Chen X F, Hu J R, Fan L F, Zhang Y K. Sulfur isotopes and trace elements of sulfides in gold deposits in the Shuangjianshan-Langwashan area of the Beishan orogenic belt as indicators of metallogenic mechanism. Geological Bulletin of China, 2025, 44(2/3): 276–297**

**Abstract:** [Objective] The Shuangjianshan-Langwashan area is situated in the southern margin of the central segment of the Central Asian Orogenic Belt, specifically within the Mingshui magmatic arc of the northern Beishan Orogenic Belt. Currently, critical information regarding the genesis of mineral deposits in this region remains unclear. This study aims to investigate the occurrence state of trace elements in sulfides, fluid characteristics, and metallogenic mechanisms of gold deposits in the Shuangjianshan-Langwashan area, with the ultimate objective of guiding exploration practices. [Methods] Based on field geological investigations and ore microscopy studies, LA-ICP-MS analyses of trace elements, rare-earth elements, and sulfur isotopes were performed on pyrite and chalcopyrite from the main metallogenic stages of the Shuangjianshan, Dahongquan, and Langwashan gold deposits in the region. [Results] The results show that gold in the Shuangjianshan–Langwashan area gold deposits exists in two forms: visible gold and invisible gold. Invisible gold is mainly hosted in the pyrite lattice in the form of solid–solution gold ( $\text{Au}^{1+}$ ). Pb and Bi are mainly present in galena inclusions, either in the form of bismuthinite or as solid–solution Bi. In the Dahongquan and Langwashan deposits, the positive correlations between Zn and Cd, and between Pb and Sb indicate the presence of mineral inclusions such as sphalerite and galena in pyrite. The Nb/La, Th/La, and Hf/Sr values in the Shuangjianshan–Langwashan gold deposit are mostly less than 1, indicating that the ore-forming fluid is rich in  $\text{Cl}^-$ . Likewise, the content and ratio of Co and Ni indicate that the ore-forming fluid has the characteristics of medium–low temperature and low salinity. Moreover, Cu/Au indicates that the overall ore-forming fluid is in a relatively reducing environment. And the Y/Ho, Zr/Hf, and Nb/Ta values indicate the presence of multiple stages of fluid superposition in the metallogenic process. In the late metallogenic stage of the Shuangjianshan gold deposit, the fluid may have mixed with atmospheric precipitation. The average  $\delta^{34}\text{S}$  values of sulfides from the Shuangjianshan, Dahongquan, and Langwashan deposits are 2.58‰, 2.07‰, and 1.22‰ respectively. The range of sulfur isotope values of the Shuangjianshan gold deposit is larger than that of the Dahongquan and Langwashan gold deposits, indicating the mixing characteristics of magmatic sulfur and stratigraphic sulfur. The  $\delta^{34}\text{S}$  values of the Dahongquan and Langwashan gold deposits are all extremely low positive values, indicating the characteristics of magmatic sulfur. [Conclusions] Based on field geological phenomena, trace-element characteristics, and sulfur isotopes, it is considered that the Shuangjianshan and Langwashan gold deposits belong to low-sulfidation epithermal gold deposits, while the Dahongquan gold deposit is an orogenic gold deposit, and the metallogenesis in the area has multiple stages.

**Key words:** Beishan orogenic belt; gold deposit; trace elements; sulphur isotopes; genesis of deposits

**Highlights:** The occurrence state of trace elements in pyrite of gold deposits in the Shuangjianshan - Langwashan area was clarified. The fluid properties were discussed using trace element values, and the source of metalligenic materials was explored using sulfur isotopes. The understanding of the metallogenic mechanism of gold deposits in the Shuangjianshan - Langwashan area was put forward.

北山造山带地处甘肃、新疆、内蒙古三省(自治区)交界处,位于哈萨克斯坦-准噶尔板块和塔里木板块交汇部位,是中亚造山带的重要组成部分(图 1-a)。区域地质背景复杂,构造-岩浆活动强烈,是中国西部重要的金、铜、铁、镍、铅锌成矿带(毛启贵, 2008; Xiao et al., 2010; 潘小菲等, 2010; 袁伟恒等, 2020)。目前区内已发现大小矿床百余处,金矿为主攻矿种,代表性金矿床有北山北带的马庄山、狼娃山、双尖山,中带的金窝子,以及南带的小西弓、新金厂、老金厂等(图 1-b)。

前人在北山地区部分金矿床地质特征、成矿流体性质、矿床成因等研究方面取得了诸多成果(潘小菲等, 2010; 王钏屹等, 2018; 袁伟恒等, 2020),认为北山地区各类型金矿床可能经历了多次流体活动,

成矿流体挥发分主要为  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4$  体系(陈世忠等, 2000; 李新俊和刘伟, 2002; 刘伟和潘小菲, 2006),指示了北山地区金矿床复杂的成矿过程。然而,过去多数工作集中在北山中—南带,双尖山—狼娃山地区目前仅有个别成矿年龄和矿床地质特征方面的相关报道(殷伟旭, 2020; 白荣龙等, 2022),硫化物中微量元素赋存状态、成矿机制等信息尚不清楚,严重制约了区内地质找矿工作。

黄铁矿作为金矿床中最重要的载金矿物,其结构和化学成分在揭示成矿元素迁移-富集机理方面具有重要的指示意义(Deditius et al., 2011)。近年来,随着测试技术的进步,使低检测水平下同时分析单个黄铁矿颗粒内多种元素的含量成为可能(Steadman et al., 2021)。通过微区原位手段对黄铁

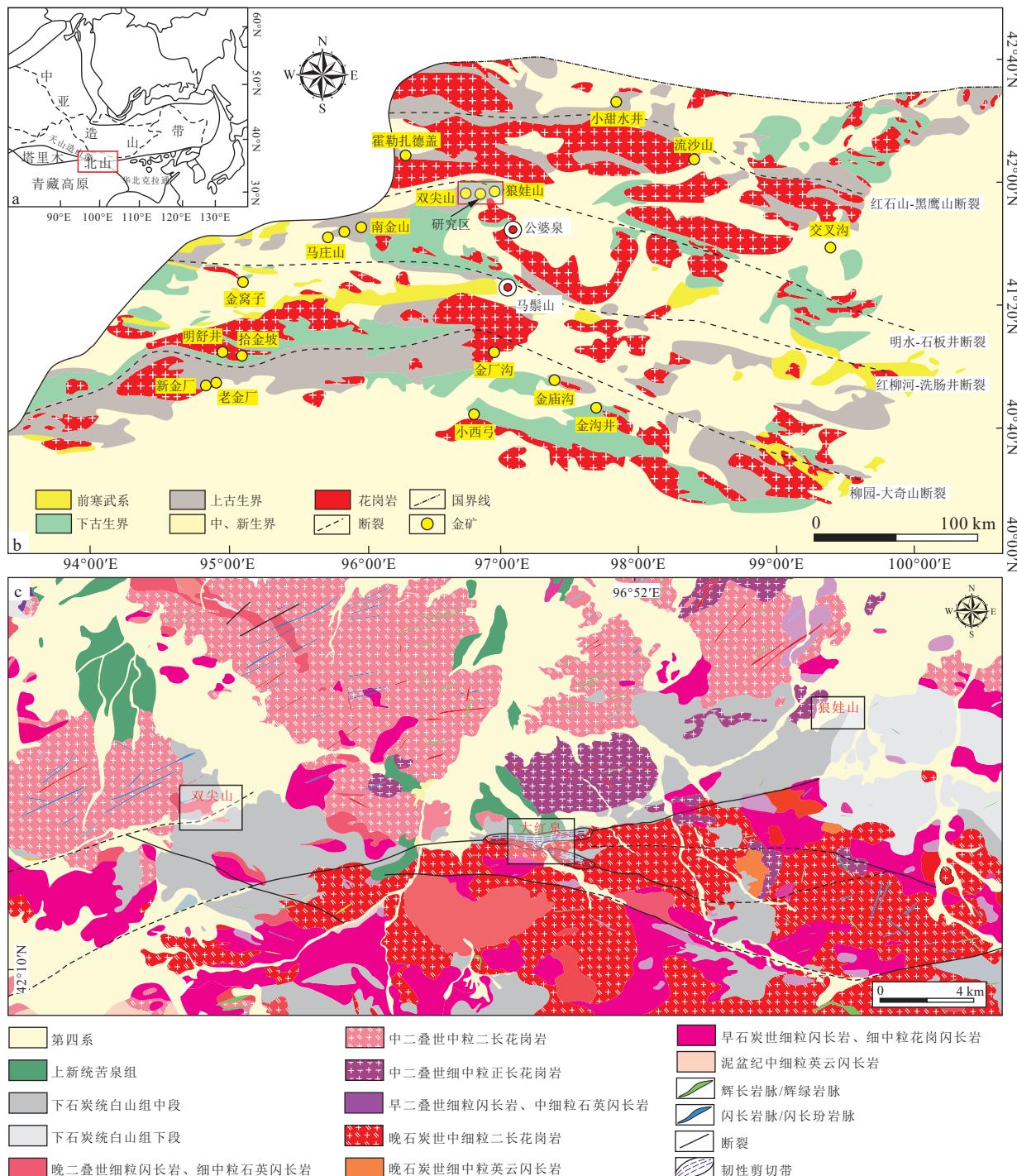


图1 北山地区大地构造位置图(a, 据 Xiao et al., 2010 修改)和北山地区区域地质图(b, 据 Zhang et al., 2012; 苗来成等, 2014; 王钏屹等, 2018 修改)及双尖山—狼娃山地区地质图(c, 据甘肃省有色地质调查院, 2019 修改)

Fig. 1 Tectonic location map of the Beishan area (a), regional geological map of the Beishan area (b) and geological map of the Shuangjianshan-Langwashan area (c)

矿微量元素含量进行分析,不仅可以探讨元素的迁移和富集规律,还可以反演成矿过程、揭示矿床成因等(Cook et al., 2009; Ulrich et al., 2011; Gregory et al., 2015; Zhang et al., 2017; Keith et al., 2022)。这种方

法被广泛应用于揭示不同类型的金矿床,如卡林型金矿床(Large et al., 2009)、浅成低温热液型金矿床(Keith et al., 2020; Ma et al., 2022)、造山型金矿床(Cook et al., 2013; Gregory et al., 2015; Wu et al.,

2019; 曹根深等, 2023)、斑岩型金矿床(Zhang et al., 2020; Keith et al., 2022)等。同时, 同位素地球化学示踪作为探讨成矿物质来源的有力工具, 亦被广泛应用于矿床学研究中(Large et al., 2009; Ubide et al., 2015; Zhu et al., 2016)。本文对双尖山—狼娃山地区硫化物的微量元素和硫同位素进行分析, 揭示微量元素赋存状态、成矿物质来源、成矿流体性质等, 提出双尖山—狼娃山地区金矿床的成矿机制, 以期为区域找矿提供依据。

## 1 区域地质背景

北山造山带位于中亚造山带中段南缘(图1-a), 地处哈萨克斯坦-准噶尔和塔里木板块交汇部位的北山古生代裂谷带(毛启贵, 2008; 肖文交等, 2008; 蔡志慧等, 2012)。区内经历了新元古代古陆块裂解、古生代岛弧和大陆弧形成、碰撞等多个阶段最终拼合, 进入陆内演化阶段后先后经历多次伸展挤压过程, 地球动力学背景十分复杂(Ao et al., 2010, 2012; Xiao et al., 2010; Pan et al., 2014; 苗来成等, 2014), 为成矿作用提供了有利条件。该区域发育一系列近东西走向的蛇绿岩带和弧形断裂, 自北向南将北山地区划分为雀儿山弧、黑鹰山弧、星星峡-旱山地块、花牛山弧和敦煌地块(图1-b)(龚全胜等, 2002; 何世平等, 2002; Clevén et al., 2015; Chen et al., 2016; 黄式庭等, 2020)。

区内出露地层以新太古界—中元古界敦煌岩群、下二叠统双堡塘组为主, 上古生界是区内重要的赋矿地层(王钏屹等, 2018; 黄式庭等, 2020)。北山地区岩浆岩发育, 岩浆活动贯穿新元古代—中生代, 以三叠纪岩浆活动最强烈, 与成矿关系最密切(王磊等, 2015; 王怀涛, 2019; 白荣龙等, 2022)。研究区双尖山—狼娃山地区位于北山北带, 大地构造位置位于天山-兴蒙造山系中西段, 额济纳-北山弧盆系的明水岩浆弧地段。区内地层较发育, 出露单元较简单, 有石炭系白山组、新近系苦泉组、第四系等。区域上主要有狼娃山-白山断裂带横穿, 该带发育一系列由断层面倾向南的逆断层和右行韧性剪切带组成的向东敞开、向西收敛的断裂束。白山组火山岩被华力西中晚期岩浆侵入分割, 呈形态各异、大小不等的残留体状产出, 空间形态上总体呈东西向带状分布(图1-c)。

## 2 矿床地质特征

### 2.1 双尖山金矿床

双尖山金矿床位于甘肃省肃北县马鬃山镇北西约40 km处。矿区中—北部出露地层主要为下石炭统白山组下亚组( $C_1bs_1^1$ ), 岩性主要为流纹岩、安山质凝灰岩。第四系广泛分布于山间沟谷中, 岩性为冲-洪积砂砾石、砂、亚砂土等。矿区东南部零星分布石炭纪辉绿玢岩。区内褶皱、断裂较发育, 包括北西向、北东向压扭性逆断层和近南北向平推断层3组断裂。矿区岩浆活动强烈, 岩浆岩发育, 主要为呈岩株状产出的石炭纪酸性侵入岩(白荣龙等, 2022), 岩性主要为钾长花岗岩。区内共圈定金矿体22条, 其中主矿体2条, 即Au3-2、Au4(图2-a); 矿体受断裂构造体系控制明显, 大部分沿 $40^\circ\sim60^\circ$ 方向展布, 赋矿围岩主要为钾长花岗岩, 次为安山质凝灰岩(图3-a, b)。矿体规模变化较大, 长 $20\sim414$  m, 宽 $0.8\sim11.5$  m, 平均厚度2.1 m; Au品位 $1.0\times10^{-6}\sim42.3\times10^{-6}$ , 平均 $5.3\times10^{-6}$ (殷伟旭, 2020)。

矿石类型主要为自然金-硫化物-构造蚀变岩型和自然金-硫化物-石英脉型。石英脉型金矿石近地表因氧化、淋滤, 黄铁矿流失, 岩石具蜂窝状构造, 金品位高(图3-e, f)。金属矿物主要为(含金)黄铁矿、黄铜矿、自然金及少量毒砂、辉锑矿、辉钼矿等, 脉石矿物主要为石英、方解石、绢云母、长石、角闪石、绿泥石等。区域变质作用不明显, 主要为浅变质作用和岩浆活动期产生的混合岩化、硅化及后期的热液变质作用。围岩蚀变主要有硅化、绢云母化、绿帘石化、绿泥石化、碳酸盐化、黄铁矿化、毒砂化等。沿断裂破碎蚀变带和岩石节理裂隙多有石英脉和石英网细脉充填, 且多为含金石英脉(图4-a~g)。黄铁矿化、毒砂矿化多呈细脉-浸染状沿围岩构造裂隙和矿化石英脉产出, 二者均为主要载金体(陈晶晶等, 2016)。

### 2.2 大红泉金矿床

大红泉金矿床出露的地层主要有: 下石炭统白山组中岩段( $C_1bs_2^1$ ), 岩性主要为安山质凝灰岩、流纹质凝灰岩、英安质凝灰岩、安山岩等; 新近系苦泉组( $N_2k$ ), 岩性主要为泥岩、砂质泥岩等; 第四系(Q), 主要为洪冲积堆积层( $Qp_3^{apl}$ )和河流冲积堆积层( $Qh^{apl}$ )。矿区构造作用强烈, 主要有韧性剪切带及其

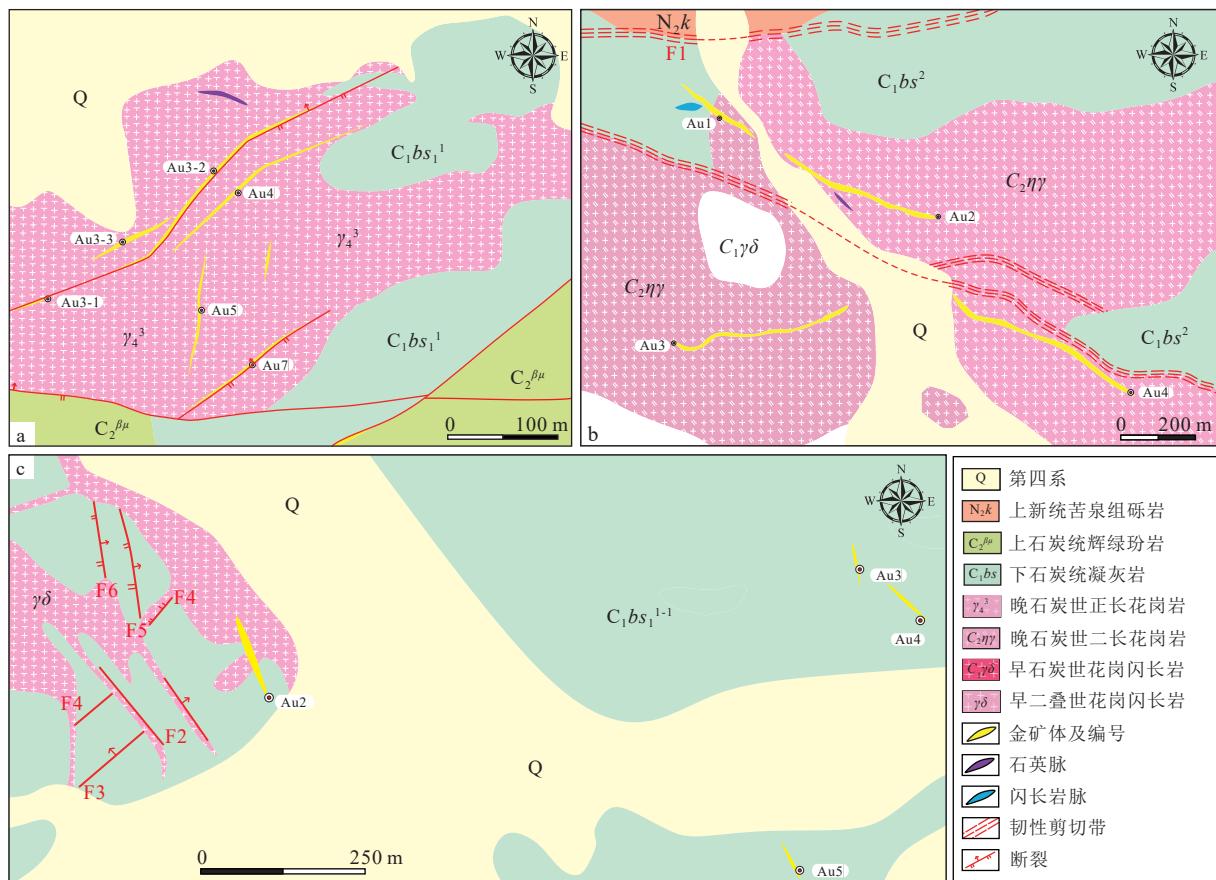


图2 双尖山(a, 据白荣龙等, 2022修改)、大红泉(b, 据甘肃省有色地质调查院, 2016修改)及狼娃山(c, 据甘肃省有色地质勘查局天水矿产勘查院, 2016修改)金矿床地质图

Fig. 2 Geological maps of Shuangjianshan (a), Dahongquan (b) and Langwashan (c) gold deposits

派生的断裂构造, 韧性剪切带发育地段岩石变质作用较强烈, 表现为碎裂岩化及糜棱岩化, 主要发育岩石类型为碎裂岩类及糜棱岩类, 金矿化带在地表的展布受韧性剪切带两侧次级断裂构造的控制(图2-b)。区内岩浆岩广布, 主要有早石炭世中细粒花岗闪长岩、晚石炭世中细粒二长花岗岩、早二叠世中粒闪长岩、中一晚二叠世中粒二长花岗岩、辉绿岩脉、闪长玢岩脉等(图3-c, d)。区内共圈定11条金矿(化)体, 矿化体长26~160 m, 平均厚度0.38~2.12 m, Au品位 $0.77\times 10^{-6}$ ~ $20.14\times 10^{-6}$ , 平均 $4.0\times 10^{-6}$ 。

矿石类型主要为石英脉型金矿石, 金属矿物主要为黄铁矿、黄铜矿等, 脉石矿物为石英、方解石、绢云母、长石、绿泥石等(图3-g, h, 图4-h, i)。区内围岩蚀变发育, 主要蚀变类型有硅化、高岭土化、绿泥石化等。

### 2.3 狼娃山金矿床

该矿床为1959年公婆泉地质队1:10万矿产普查时发现, 取名为236金矿点。矿区出露地层较

单一, 以下石炭统白山组变质火山岩为主, 岩性主要为含晶屑凝灰岩、含砂质凝灰岩、英安质凝灰岩、变质凝灰岩、含铁矽卡岩、流纹斑岩。其次为第四系松散砂砾层, 岩性主要为未胶结的砾石、细砂、砂质粘土等。矿区为一北倾单斜构造, 区内断裂构造极发育, 且对含金石英脉空间分布起严格控制作用。北西向断裂最发育, 倾向南西, 倾角在35°~40°之间, 是矿区西部矿脉的主要容矿构造(图2-c)。矿区岩浆岩较发育, 主要有花岗岩和辉绿岩。区内圈定蚀变破碎带+石英脉型银金矿化带3条, 总体产状200°~215°∠60°~85°, 矿(化)体真厚0.19~2.23 m, Au品位 $0.88\times 10^{-6}$ ~ $8.10\times 10^{-6}$ (岳强, 2021)。金矿体均为石英脉型, 直接围岩以凝灰岩为主, 次为流纹斑岩。矿化带矿化分布不均匀、不连续, 沿走向、倾向膨胀、收缩现象较明显。矿脉岩性特征为乳白色、半透明, 具晶洞构造, 褐铁矿化强烈, 并常为铁质分解物沿脉内节理面渲染呈棕褐色, 是此矿床最直接的找矿标志。

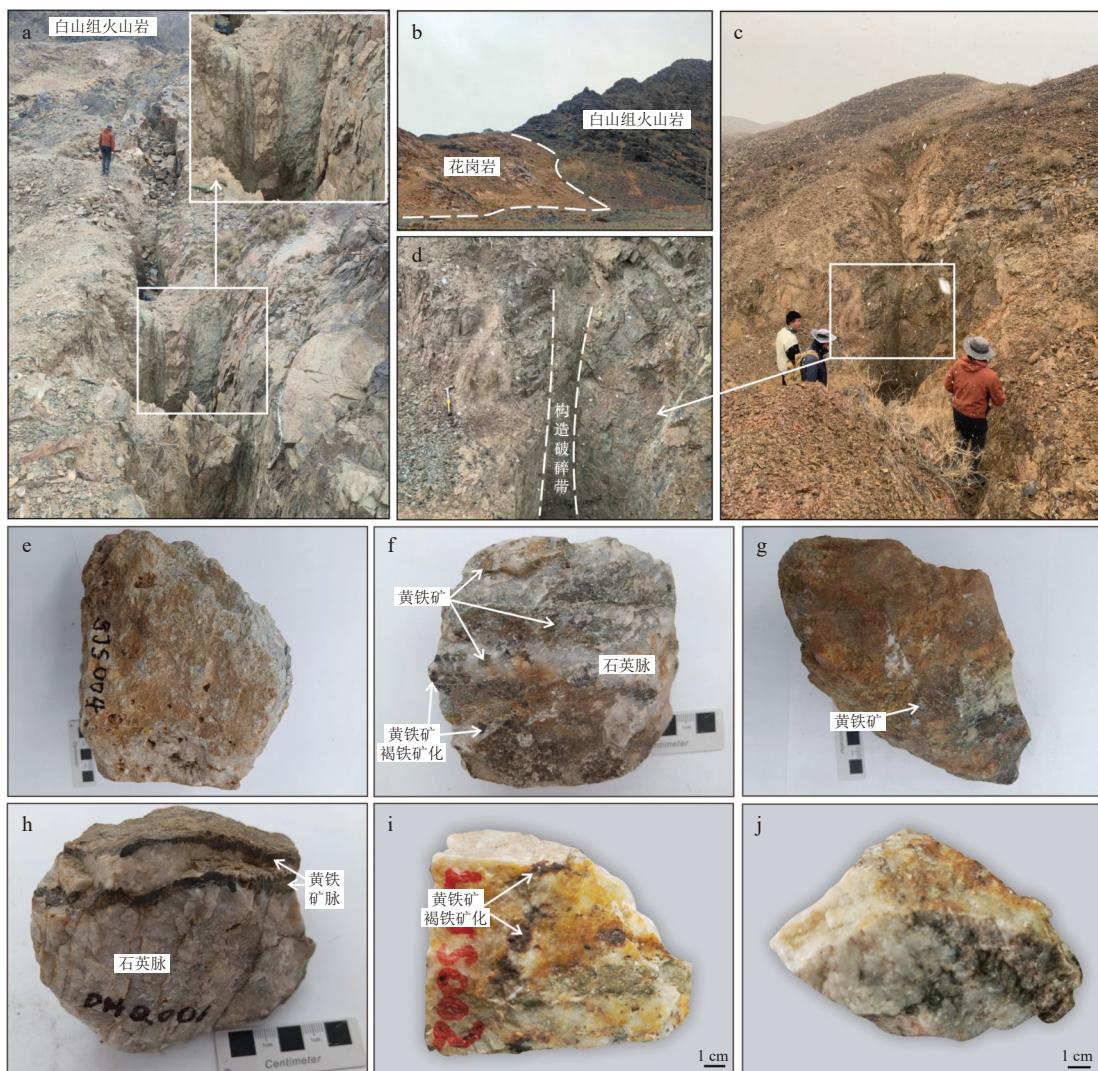


图3 双尖山—狼娃山地区野外及矿石特征照片

Fig. 3 Photos of field and ore characteristics in Shuangjiashan-Langwashan area

a—双尖山金矿区采坑, 矿体赋存于岩体与白山组火山岩接触部位靠近岩体一侧, 地层受后期岩浆改造作用明显, 绿泥石化蚀变强烈; b—双尖山金矿区花岗岩与白山组火山岩地层界线明显; c, d—大红泉金矿区采坑, 构造破碎带中黄铁矿石英脉发育, 破碎带附近见有大量韧性揉皱构造现象; e—双尖山金矿区石英脉型金矿石, 黄铁矿多已被褐铁矿化并经淋滤作用形成流失孔, 残余有少量自然金; f—双尖山金矿区石英脉型金矿石, 黄铁矿部分被褐铁矿化; g, h—大红泉石英脉型金矿石, 一类矿石中黄铁矿呈星点状分布, 另一类黄铁矿呈脉状分布, 黄铁矿大多发生褐铁矿化改造; i, j—狼娃山石英脉型金矿石, 黄铁矿多呈立方体晶形产出, 部分黄铁矿已褐铁矿化, 并在已被褐铁矿化的黄铁矿残余孔洞中见有自然金产出

矿石类型主要为石英脉型金矿石(图3-i, j)。金属矿物以自然银、自然金、黄铁矿、磁铁矿、赤铁矿为主, 黄铜矿、毒砂次之; 自然金呈粒状、枝状、片状产出, 星散状分布, 粒径1~3 mm。脉石矿物以石英为主, 方解石、绢云母次之。围岩蚀变主要有硅化、绢云母化、黄铁矿化、褐铁矿化、青磐岩化等。

### 3 样品及分析方法

为探讨双尖山—狼娃山地区金矿床成矿物质来

源及成矿流体地球化学特征, 本次选择双尖山、大红泉和狼娃山3个金矿床的主成矿阶段矿石样品为研究对象进行原位微区硫同位素分析和原位微量元素测试分析。其中双尖山矿石样品采自3号主矿体; 大红泉矿石样品具体采样位置为北纬42°13'14"、东经96°48'33"; 狼娃山矿石样品具体采样位置为北纬42°15'38"、东经97°02'01"。

LA-MC-ICP-MS原位微区硫同位素分析在北京科荟测试技术有限公司完成。分析所用仪器为

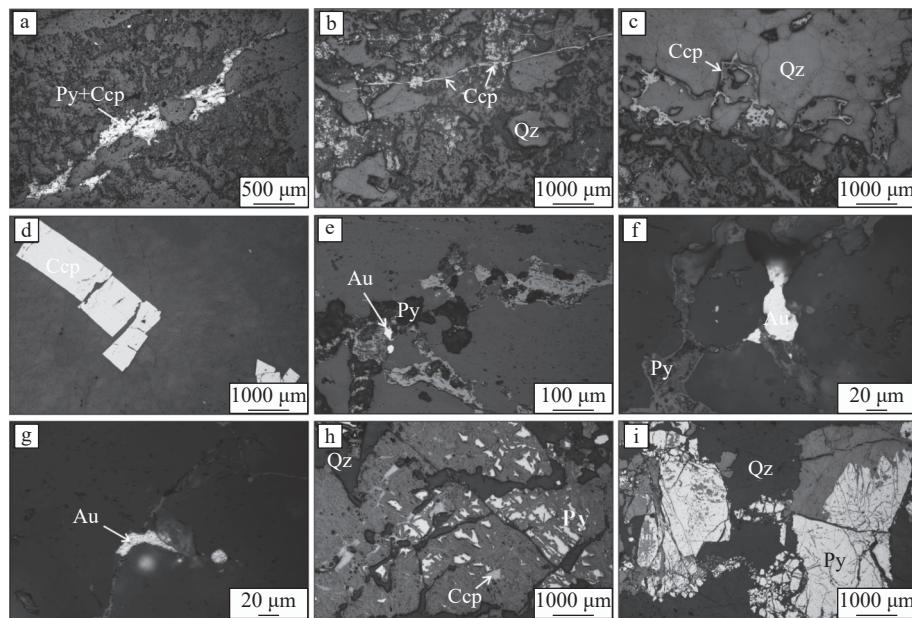


图 4 双尖山—狼娃山地区金矿床镜下显微照片

Fig. 4 Microscopic photograph of gold deposit in Shuangjianshan-Langwashan area

a~g—双尖山; h, i—大红泉。a—黄铁铜矿(孔雀石)脉贯入; b—黄铜矿明显 2 期, 晚期呈脉状贯入, 早期黄铜矿蚀变强烈; c—黄铜矿沿裂隙贯入; d—晶形完整的黄铜矿; e—金产于黄铁矿褐铁矿中; f—金产于石英裂隙中; g—金沿裂隙产出, 并见有孔雀石; h—石英脉中发育大量黄铁矿, 黄铁矿褐铁矿化, 并见有少量黄铜矿; i—石英脉中发育大量黄铁矿, 黄铁矿褐铁矿化。Py—黄铁矿; Ccp—黄铜矿; Qz—石英; Au—自然金

Thermo Scientific 公司生产的 Neptune Plus 多接收等离子体质谱仪和与之连用的 Resolution SE 193 nm 固体激光器。根据样品扫描后的照片选择合适区域, 利用激光剥蚀系统对硫化物进行剥蚀。剥蚀采用点剥蚀, 剥蚀直径在 16~100  $\mu\text{m}$  之间可调, 能量密度通常设为 7~8  $\text{J}/\text{cm}^2$ , 频率为 6~8 Hz。采用高纯 He 作为载气, 吹出剥蚀产生的气溶胶, 送入 MC-ICP-MS 进行质谱测试。 $^{32}\text{S}$  和  $^{34}\text{S}$  用法拉第杯静态同时接收, 采用的积分时间为 0.131 s, 共采集 200 组数据, 共需约 27 s。正式测试前, 以硫化物标样 balmat FeS、MXG 和 balmat ZnS 对仪器参数进行调试, 使之达到最佳状态。为减小基质效应对测试结果的影响, 分析过程中分别用与样品基质相似的硫化物为标样, 并用标准-样品-标准交叉法进行质量歧视校正, 详细参数和实验流程见文献(Zhu et al., 2017)。

硫化物的原位微量元素测试分析在科荟测试(天津)科技有限公司完成, 所用仪器为 AnalytikJena PQMS 型 ICP-MS 及与之配套的 RESOLution 193 nm 准分子激光剥蚀系统。激光剥蚀所用斑束直径为 38  $\mu\text{m}$ , 频率为 5 Hz, 能量密度约为 5  $\text{J}/\text{cm}^2$ , 以高纯度氦气为载气。测试前先用 NIST 610 进行调试

仪器, 使之达到最优状态。LA-ICP-MS 激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式, 测试过程中首先遮挡激光束进行空白背景采集 20 s, 然后进行样品连续剥蚀采集 45 s, 停止剥蚀后继续吹扫 20 s 清洗进样系统, 单点测试分析时间 85 s。每隔 10 个剥蚀点插入 1 组 NIST 610、NIST 612、BHVO-2G、BCR-2G、BIR-1G、MASS-1 对元素含量进行定量计算。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量计算)采用软件 ICPMSData Cal 完成, 详细测试方法见文献(Pearce et al., 1997; Liu et al., 2008)。

## 4 分析结果

### 4.1 硫同位素

对矿石样品的黄铁矿和黄铜矿进行 LA-MC-ICPMS 原位微区硫同位素分析, 分析结果详见表 1。研究区硫同位素组成变化范围较小, 硫化物  $\delta^{34}\text{S}$  值总体介于 0.37‰~6.28‰ 之间, 均值为 2.06‰。双尖山金矿硫化物  $\delta^{34}\text{S}$  值介于 0.37‰~6.28‰ 之间, 均值为 2.58‰( $n=16$ )。大红泉金矿硫化物  $\delta^{34}\text{S}$  值介于 1.64‰~2.53‰ 之间, 均值为 2.07‰( $n=15$ ), 其中

表1 双尖山—狼娃山地区金矿硫同位素测试结果

Table 1 Results of sulfur isotope testing of gold ores in the Shuangjianshan-Langwashan area

矿区	样品点号	矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V}-\text{CDT}}/\text{\textperthousand}$	矿区	样品点号	矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V}-\text{CDT}}/\text{\textperthousand}$
双尖山	SJS008-PY-1	黄铁矿	3.94	大红泉	DHQ006-PY-3	黄铁矿	1.65
	SJS008-PY-2	黄铁矿	3.85		DHQ006-PY-4	黄铁矿	1.8
	SJS008-PY-3	黄铁矿	6.28		DHQ006-PY-5	黄铁矿	2.00
	SJS008-PY-4	黄铁矿	5.88		均值		2.08
	SJS008-PY-5	黄铁矿	4.48		LWS001-PY-1	黄铁矿	0.94
	SJS005-PY-1	黄铁矿	1.10		LWS001-PY-2	黄铁矿	1.91
	SJS005-PY-2	黄铁矿	1.36		LWS001-PY-3	黄铁矿	2.01
	SJS005-PY-3	黄铁矿	1.23		LWS001-PY-4	黄铁矿	2.00
	SJS005-PY-4	黄铁矿	1.48		LWS001-PY-5	黄铁矿	0.7
	SJS005-PY-5	黄铁矿	1.37	狼娃山	LWS002-PY-1	黄铁矿	0.69
	SJS004-PY-1	黄铁矿	2.37		LWS002-PY-2	黄铁矿	0.59
	SJS004-PY-2	黄铁矿	1.89		LWS002-PY-3	黄铁矿	1.10
	SJS004-PY-3	黄铁矿	1.28		LWS002-PY-4	黄铁矿	1.02
	SJS004-PY-4	黄铁矿	2.73		LWS002-PY-5	黄铁矿	1.30
	SJS004-PY-5	黄铁矿	1.65	均值			1.22
均值			2.73	双尖山	SJS005-CP-1	黄铜矿	0.37
大红泉	DHQ002-PY-1	黄铁矿	2.34		DHQ002-CP-1	黄铜矿	2.14
	DHQ002-PY-2	黄铁矿	2.30		DHQ002-CP-2	黄铜矿	2.14
	DHQ002-PY-3	黄铁矿	2.27		DHQ002-CP-3	黄铜矿	1.83
	DHQ002-PY-4	黄铁矿	2.42		DHQ002-CP-4	黄铜矿	2.04
	DHQ002-PY-6	黄铁矿	2.53		DHQ002-CP-5	黄铜矿	2.11
	DHQ006-PY-1	黄铁矿	1.81	均值			2.05
	DHQ006-PY-2	黄铁矿	1.64				

黄铁矿  $\delta^{34}\text{S}$  值介于  $1.64\text{\textperthousand}$ ~ $2.53\text{\textperthousand}$  之间, 均值为  $2.08\text{\textperthousand}$  ( $n=10$ ); 黄铜矿  $\delta^{34}\text{S}$  值介于  $1.83\text{\textperthousand}$ ~ $2.14\text{\textperthousand}$  之间, 均值为  $2.05\text{\textperthousand}$  ( $n=5$ )。狼娃山金矿黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  值介于  $0.58\text{\textperthousand}$ ~ $2.01\text{\textperthousand}$  之间, 均值为  $1.22\text{\textperthousand}$  ( $n=10$ )。双尖山金矿  $\delta^{34}\text{S}$  值较大红泉和狼娃山金矿呈现较大的变化范围。

#### 4.2 微量元素

矿石中硫化物的 LA-ICP-MS 稀土元素测试结果列于表2中; 微量元素含量测试结果列于表3中。

双尖山黄铁矿轻重稀土元素比值(LREE/HREE)为  $0.13\sim 5.39$ (均值  $1.92$ ),  $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$  值为  $0.11\sim 3.02$ (均值  $1.05$ ),  $\delta\text{Eu}$  和  $\delta\text{Ce}$  值分别为  $0.04\sim 2.89$ (均值  $1.19$ ) 和  $0.23\sim 1.00$ (均值  $0.71$ )。大红泉黄铁矿 LREE/HREE 值为  $0.17\sim 4.38$ (均值  $1.09$ ),  $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$  值为  $0.52\sim 5.62$ (均值为  $1.92$ ),  $\delta\text{Eu}$  和  $\delta\text{Ce}$  值分别为  $0.24\sim$

$2.39$ (均值  $0.89$ ) 和  $0.11\sim 1.00$ (均值  $0.76$ )。狼娃山黄铁矿 LREE/HREE 值为  $0.13\sim 14.97$ (均值  $2.64$ ),  $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$  值为  $0.08\sim 0.48$ (均值  $0.26$ ),  $\delta\text{Eu}$  和  $\delta\text{Ce}$  值分别为  $0.90\sim 1.00$ (均值  $0.95$ ) 和  $0.04\sim 1.26$ (均值  $0.74$ )。3个矿床黄铁矿均显示 Ce 负异常, Eu 异常不明显。整体看, 双尖山—狼娃山地区硫化物中的稀土元素均呈现出极低的含量, 黄铁矿样品近半数的稀土元素值低于检测限。

双尖山 SJS-04 及 SJS-08 两件黄铁矿样品中, 含有较高含量的 Co、Zn 和 As, 一定含量的 Ni、Se、Cu 等, 以及少量的 Mn、Sb、Sn 等(图5)。其中 Co、Ni 含量分别为  $0.25\times 10^{-6}\sim 338.9\times 10^{-6}$ (均值  $50.49\times 10^{-6}$ ) 和  $0.24\times 10^{-6}\sim 86.85\times 10^{-6}$ (均值  $12.90\times 10^{-6}$ ), 相应的 Co/Ni 值介于  $0.22\sim 30.13$  之间(均值  $6.19$ )。Zn 含量介于  $0.02\times 10^{-6}\sim 1463\times 10^{-6}$  之间(均值  $77.85\times 10^{-6}$ ),

表2 双尖山-狼娃山地区金矿床黄铁矿稀土元素含量及特征值

Table 2 Contents and characteristic values of rare earth elements in pyrite of gold deposits in the Shuangjianshan-Langwashan area

 $10^{-6}$ 

元素	双尖山			大红泉			狼娃山		
	最大值	最小值	平均	最大值	最小值	平均	最大值	最小值	平均
La	0.027	0.005	0.011	0.095	0.000	0.024	0.014	0.001	0.005
Ce	0.048	0.002	0.011	0.230	0.000	0.028	0.011	0.000	0.003
Pr	0.008	0.000	0.004	0.034	0.000	0.006	0.008	0.000	0.004
Nd	0.051	0.001	0.022	0.156	0.001	0.027	0.039	0.002	0.019
Sm	0.065	0.004	0.027	0.045	0.003	0.013	0.077	0.014	0.030
Eu	0.016	0.001	0.007	0.020	0.001	0.005	0.013	0.001	0.006
Gd	0.037	0.000	0.024	0.073	0.001	0.022	0.058	0.003	0.020
Tb	0.003	0.000	0.001	0.013	0.000	0.003	0.004	0.000	0.002
Dy	0.024	0.001	0.012	0.074	0.001	0.017	0.018	0.006	0.011
Ho	0.007	0.000	0.002	0.017	0.000	0.003	0.006	0.001	0.003
Er	0.016	0.001	0.006	0.043	0.000	0.010	0.009	0.001	0.003
Tm	0.011	0.000	0.005	0.005	0.000	0.002	0.010	0.001	0.003
Yb	0.036	0.001	0.012	0.047	0.000	0.010	0.024	0.002	0.015
Lu	0.006	0.001	0.003	0.009	0.000	0.002	0.004	0.000	0.002
Y	0.026	0.002	0.013	0.461	0.001	0.065	0.012	0.001	0.006
ΣREE	0.152	0.021	0.083	0.829	0.005	0.100	0.114	0.018	0.061
LREE	0.115	0.006	0.051	0.564	0.001	0.060	0.102	0.004	0.035
HREE	0.064	0.005	0.032	0.265	0.004	0.040	0.087	0.004	0.026
LREE/HREE	5.393	0.125	1.919	4.383	0.165	1.088	14.972	0.127	2.637
La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	3.023	0.111	1.046	5.624	0.519	1.924	0.478	0.080	0.262
δEu	2.886	0.038	1.192	2.385	0.242	0.889	1.000	0.902	0.953
δCe	1.000	0.227	0.714	1.000	0.110	0.764	1.257	0.044	0.739

As 含量介于  $0.75 \times 10^{-6} \sim 266.1 \times 10^{-6}$  之间(均值  $34.35 \times 10^{-6}$ )。Se、Cu 含量分别为  $0.86 \times 10^{-6} \sim 15.28 \times 10^{-6}$ (均值  $7.77 \times 10^{-6}$ )和  $0.12 \times 10^{-6} \sim 73.77 \times 10^{-6}$ (均值  $5.16 \times 10^{-6}$ )。Mn、Sb 和 Sn 含量分别为  $0.03 \times 10^{-6} \sim 0.51 \times 10^{-6}$ (均值  $0.19 \times 10^{-6}$ )、 $0 \sim 0.14 \times 10^{-6}$ (均值  $0.05 \times 10^{-6}$ )和  $0 \sim 0.14 \times 10^{-6}$ (均值  $0.06 \times 10^{-6}$ )。

大红泉 DHQ-02 及 DHQ-06 两件黄铁矿样品中,含有较高含量的 Co、Ni、Cu 和 Zn,一定含量的 Mn、Se、Ag 和 As,少量 Sb、Sn 和 Au(图 5)。其中,Co、Ni 变化范围分别在  $4.15 \times 10^{-6} \sim 278.3 \times 10^{-6}$ (均值  $51.20 \times 10^{-6}$ )和  $0.31 \times 10^{-6} \sim 3270 \times 10^{-6}$ (均值  $1058 \times 10^{-6}$ )之间,相应的 Co/Ni 值介于 0.01~234.4 之间(均值 12.03)。Zn 含量介于  $0.39 \times 10^{-6} \sim 7450 \times 10^{-6}$  之间(均值  $1509 \times 10^{-6}$ );Cu 含量介于  $0.24 \times 10^{-6} \sim 4588 \times 10^{-6}$  之间(均值  $306.3 \times 10^{-6}$ )。Mn 含量介于  $0.02 \times$

$10^{-6} \sim 29.61 \times 10^{-6}$  之间(均值  $4.38 \times 10^{-6}$ ),Se 含量介于  $4.58 \times 10^{-6} \sim 44.22 \times 10^{-6}$  之间(均值  $14.52 \times 10^{-6}$ ),Ag 含量介于  $0.02 \times 10^{-6} \sim 36.59 \times 10^{-6}$  之间(均值  $4.28 \times 10^{-6}$ ),As 含量介于  $0.59 \times 10^{-6} \sim 39.11 \times 10^{-6}$  之间(均值  $6.08 \times 10^{-6}$ )。

狼娃山 LWS-01 及 LWS-02 两件黄铁矿样品中,含有较高含量的 Co、Ni 和 As,少量的 Mn、Sb、Sn、Au 等(图 5)。其中,Co、Ni 变化范围分别为  $1.30 \times 10^{-6} \sim 192.5 \times 10^{-6}$ (均值  $39.84 \times 10^{-6}$ )和  $0.40 \times 10^{-6} \sim 202.2 \times 10^{-6}$ (均值  $27.28 \times 10^{-6}$ ),对应的 Co/Ni 值在 0.12~51.17 之间(均值 14.28)。As 变化范围为  $3.52 \times 10^{-6} \sim 310.2 \times 10^{-6}$ (均值  $133.15 \times 10^{-6}$ )。Mn 含量介于  $0.08 \times 10^{-6} \sim 0.39 \times 10^{-6}$  之间(均值  $0.24 \times 10^{-6}$ ),Sb 含量介于  $0 \sim 0.11 \times 10^{-6}$  之间(均值  $0.05 \times 10^{-6}$ ),Sn 含量介于  $0.01 \times 10^{-6} \sim 2.10 \times 10^{-6}$  之间(均值  $0.47 \times 10^{-6}$ ),Au 含量介于  $0 \sim 0.15 \times 10^{-6}$  之

表3 双尖山—狼娃山地区金矿床黄铁矿微量元素含量

Table 3 Trace element content of pyrite in gold deposits in Shuangjianshan-Langwashan area  $10^{-6}$ 

矿床	编号	矿物	Mn	Co	Ni	Sb	Pb	Bi	Se	Sn	Au	Ag	Cd	In	Cu	Zn	Ge	As	Te	Tl
双尖山	SJS04-2-2-1	黄铁矿	0.25	17.51	1.55	-.	-.	0.02	10.53	0.04	0.04	0.1	0.52	0.02	0.46	0.98	3.49	116.5	9.46	-.
	SJS04-2-2-2	黄铁矿	-.	95.63	4.4	0.14	0.03	0.01	15.28	0.14	0.02	-.	0.26	-.	0.23	1.1	4.5	266.1	14.22	0.02
	SJS04-2-2-3	黄铁矿	0.16	26.03	16.72	0.09	0.02	0.01	8.72	-.	0.01	0.02	0.19	-.	-.	1.06	5	39.34	7.34	0.02
	SJS04-2-2-4	黄铁矿	-.	1.11	2.27	-.	0.05	0.27	-.	-.	0.01	0.01	0.04	0.01	-.	1.15	3.79	9.66	0.47	0
	SJS04-2-2-5	黄铁矿	-.	8.9	-.	0	0.03	-.	10.1	0	0.02	0.02	-.	-.	-.	0.1	3.97	16.06	4.01	0.03
	SJS04-2-2-6	黄铁矿	0.05	338.9	-.	0.03	0.02	0.05	5.79	0.05	0	-.	0.05	-.	0.21	1.85	4.02	62.5	1.58	-.
	SJS04-2-2-7	黄铁矿	-.	15.8	2.04	0.04	0.03	-.	12.34	-.	-.	0	-.	0	-.	0.02	3.59	7.83	0.47	-.
	SJS04-2-2-8	黄铁矿	0.26	30.71	-.	0.04	0.04	0.02	6.36	0.03	-.	0.04	-.	-.	0.27	1.69	3.86	15.42	-.	0
	SJS04-2-2-9	黄铁矿	-.	4.03	0.64	-.	-.	0.02	2.21	0.03	0.01	-.	0.24	-.	0.28	1.44	3.72	10.23	-.	-.
	SJS04-2-2-10	黄铁矿	-.	94.07	3.12	0.06	0.06	0.32	5.28	0.06	-.	1.48	-.	-.	0.27	-.	4.19	18.76	0.79	0.02
大红泉	SJS08-2-1	黄铁矿	-.	-.	-.	-.	0.04	0.05	2.36	-.	0.01	-.	-.	0	0.93	0.99	3.72	8.28	25.94	0.01
	SJS08-2-2	黄铁矿	-.	7.49	14.77	-.	0.03	0.02	-.	0.07	0	0.03	0.13	0	0.5	0.43	3.52	24.76	50.72	0.02
	SJS08-2-3	黄铁矿	0.1	141.4	86.85	0.04	0.16	0.03	-.	0.02	0.04	0	-.	0.01	0.4	0.56	4.05	13.17	20.31	0.02
	SJS08-2-4	黄铁矿	-.	4.69	4.32	-.	0.35	0.14	-.	0.07	0.04	0.01	-.	0.01	0.34	0.7	3.69	12.87	9.39	-.
	SJS08-2-5	黄铁矿	-.	0.81	2.86	0.04	0.04	-.	3.02	-.	-.	0.06	-.	-.	0.54	0.43	4.83	4.55	12.81	0.01
	SJS08-2-6	黄铁矿	0.04	0.4	-.	-.	-.	0.01	12.07	-.	-.	-.	0.16	0	0.12	0.23	4.81	0.75	10.6	-.
	SJS08-2-7	黄铁矿	0.14	0.25	0.24	0.08	3.38	0.67	-.	-.	0	0.1	-.	0.01	0.48	1	3.28	3.67	3.68	-.
	SJS08-2-8	黄铁矿	0.37	4.01	17.86	0.1	70.78	6.64	0.86	-.	0.04	16.7	-.	0.01	73.77	1.94	4.17	20.76	33.79	0.03
	SJS08-2-9	黄铁矿	0.03	45.57	15.22	0.04	0.03	0.05	13.77	0.1	-.	0.02	0.5	0.01	0.49	0.72	4.02	24.51	30.7	0
	SJS08-2-10	黄铁矿	0.51	121.9	20.62	0	6.4	2.07	-.	0.14	-.	0.19	35.65	6.01	3.34	1463	3.91	11.28	-.	-.
DHQ02-2	DHQ02-2-1	黄铁矿	0.54	7.17	117.6	-.	0.28	0.37	13.84	0.04	-.	0.02	0.06	-.	0.75	0.39	4.46	-.	0.58	0
	DHQ02-2-2	黄铁矿	2.17	4.15	70.97	0.08	5.46	17.66	7.77	8.36	0.25	0.78	22.05	31.13	38.32	2513	4.67	2.64	2.9	0.01
	DHQ02-2-3	黄铁矿	0.15	13.6	366	0.81	13.3	2.53	11.54	0.01	0.03	0.09	0.05	0	2.69	0.89	4.67	2.55	1.1	-.
	DHQ02-2-4	黄铁矿	-.	24.21	724	0.22	4.51	0.71	11.83	0.02	0.01	0.02	0.02	0	3.08	0.93	5.04	3.1	3.01	0.01
	DHQ02-2-5	黄铁矿	0.17	20.62	15.77	0.11	8.47	8.47	4.58	0.05	0.01	0.23	0.04	-.	2.13	0.75	4.24	1.83	1.44	0.01
	DHQ02-2-6	黄铁矿	-.	20.29	192.8	0.1	4.13	5.01	16.44	0.02	0.04	0.17	-.	0.01	4.68	0.96	3.91	-.	1.67	0.01
	DHQ02-2-7	黄铁矿	0.02	10.6	54.97	-.	0.02	0.13	9.45	0	-.	-.	-.	0.01	0.94	0.54	4.77	-.	0.32	0.01
	DHQ02-2-8	黄铁矿	0.03	7.74	126.5	0.17	11.69	2.22	40.48	0.02	0.03	36.59	0.16	0.01	4588	3.75	4.77	1.35	0.62	0
	DHQ02-2-9	黄铁矿	-.	73.63	0.31	0.06	0.15	0.05	11.8	-.	-.	0.04	0.02	0.01	0.24	0.86	4.74	39.11	45	0.01
	DHQ02-2-10	黄铁矿	-.	182.9	45.53	-.	-.	0	10.15	0.03	0.01	0.05	0.11	-.	5.44	1.4	4.33	6.48	4.45	0
DHQ06-2	DHQ06-2-1	黄铁矿	29.61	22.45	714.2	0.27	20.64	14.96	44.22	2.66	0.59	4.17	81.07	40.54	115.6	5247	4.2	-.	3.72	0
	DHQ06-2-2	黄铁矿	4.97	27.56	1122	0.1	2.35	7.34	13.13	0.77	0.59	0.6	44.51	10.8	40.59	3156	4.46	1.98	3.6	-.
	DHQ06-2-3	黄铁矿	4.19	39.6	1385	0.11	6.3	17.94	10.9	1.08	0.43	0.67	74.12	86.85	57.53	7450	4.18	2.05	4.48	0.01
	DHQ06-2-4	黄铁矿	0.94	39.68	2263	0.13	5.05	13.29	7.69	0.43	2.07	0.86	15.98	4.89	19.86	1186	4.28	0.59	7.67	0.01
	DHQ06-2-5	黄铁矿	1.96	101.1	1725	0.25	15.36	63.92	11.38	1.7	0.66	1.4	43.38	29.98	40.18	3307	4.59	3.74	15.82	0.01
	DHQ06-2-6	黄铁矿	17.24	278.3	1792	0.27	914.8	194.9	21.92	2.67	1.89	29.51	28.11	14.5	1158	1967	4.71	10.88	40.73	0
	DHQ06-2-7	黄铁矿	-.	17.65	2558	0.03	0.39	0.62	13.09	0.01	0.01	-.	-.	0	0.51	0.4	4.53	-.	0.53	-.
	DHQ06-2-8	黄铁矿	0.97	72.68	3270	0.04	9.96	21.67	8.13	0.01	0.05	0.36	0.15	0.01	8.73	1.94	4.76	9.87	8.84	-.
	DHQ06-2-9	黄铁矿	1.65	23.54	2079	0.29	8.03	10.92	10.19	1.36	0.94	0.58	46.55	16.48	24.54	3243	4.58	3.68	4.47	0
	DHQ06-2-10	黄铁矿	1.1	36.49	2540	0.16	10.28	35.46	11.8	0.45	0.75	0.88	28.06	7.17	12.29	2092	5.39	1.31	14.53	0.03

续表3

矿床	编号	矿物	Mn	Co	Ni	Sb	Pb	Bi	Se	Sn	Au	Ag	Cd	In	Cu	Zn	Ge	As	Te	Tl
狼娃山	LWS01-2-1	黄铁矿	0.08	12.27	2.76	-	2.2	1.35	9.24	0.04	0	-	-	-	0.89	0.71	3.63	99.8	2.45	-
	LWS01-2-2	黄铁矿	-	34.85	5.42	0.02	2.26	2.34	5.65	0.03	0.07	0.18	-	-	4.57	1.47	4.51	146.1	10.06	-
	LWS01-2-3	黄铁矿	0.13	1.43	0.95	-	0.08	0.25	10.19	0.1	-	-	0.04	-	1.73	0.17	3.71	151.9	7.09	-
	LWS01-2-4	黄铁矿	0.27	2.5	0.59	0.04	0.03	0.01	7.76	0.01	-	-	-	-	0.75	1.5	3.75	90.1	3.17	0
	LWS01-2-5	黄铁矿	0.11	21.75	1.62	0.02	1.45	1.29	12	-	-	-	0.29	-	1.45	-	3.84	3.52	0.19	0.01
	LWS01-2-6	黄铁矿	-	21.91	3.72	0.02	0.34	0.06	8.91	-	-	0.01	-	-	0.65	0.68	4.43	7.26	0.56	-
	LWS01-2-7	黄铁矿	-	24.26	202.2	-	17.61	6.76	3.27	0.06	0.04	0.53	0.11	0	1.8	-	3.9	223.4	19.78	0
	LWS01-2-8	黄铁矿	-	32.9	163.2	0.04	26.77	15.31	15.71	0.11	0.04	0.68	0.14	0	1.56	1.3	3.34	310.2	27.84	0.03
	LWS01-2-9	黄铁矿	0.29	47.66	67.36	0.11	26.55	13.9	11.7	-	0.09	0.42	-	-	4.39	0.78	3.63	182	17.13	0.06
	LWS01-2-10	黄铁矿	0.18	21.42	24.97	0.09	2.46	0.13	20.08	0.11	0.02	-	0.06	0	2.12	1	4.16	213.6	15.54	0
大红泉	LWS02-2-1	黄铁矿	-	77.12	1.64	0.03	1.76	58.32	11.54	-	0.15	0.31	-	0	5.26	0.58	4.62	11.57	32.01	0.01
	LWS02-2-2	黄铁矿	0.39	1.3	0.4	0	0.81	6.64	15.25	2.1	0.01	0.14	-	-	0.8	0.91	4.46	-	2.92	-
	LWS02-2-3	黄铁矿	-	2.28	-	0.11	1.47	1.15	19.37	0.11	0.04	0.09	-	0	4.96	1.05	3.84	-	0.65	0
	LWS02-2-4	黄铁矿	0.34	32.96	1.38	0.07	3.38	5.54	4.36	-	0.02	0.02	-	-	0.29	-	4.23	146.4	30.67	-
	LWS02-2-5	黄铁矿	-	109.1	2.29	0.07	2.54	4.29	15.77	1.76	0	0.03	-	0.01	1.94	0.51	3.4	149.2	38.35	-
	LWS02-2-6	黄铁矿	0.29	10.21	-	0.04	1.2	5.84	4.36	0.81	0	0.11	-	-	0.56	0.9	3.66	3.78	1.28	0
	LWS02-2-7	黄铁矿	0.31	76.37	3.09	-	2.11	9.38	14.07	-	0.02	0.17	0.01	0	3.2	-	4.36	199.5	67.95	-
	LWS02-2-8	黄铁矿	0.2	192.5	3.76	0.1	8.15	30.93	9.82	0.68	0.03	2.64	-	0	3.67	1.05	4.19	225.3	36.98	-
	LWS02-2-9	黄铁矿	0.28	7.89	1.53	0.02	-	0.03	18.08	-	0	0.06	0.1	-	0.51	0.36	3.9	-	0.86	0.01
	LWS02-2-10	黄铁矿	-	66.27	4	-	0.04	0.01	22.14	0.2	0.02	0.01	0.21	-	0.08	0.92	4.04	100	18.84	0.02

注:- 表示低于检测限

间(均值  $0.03 \times 10^{-6}$ )。

整体看, 大红泉的黄铁矿微量元素除 As、Te 外, 其他元素含量相较于其他 2 个矿床偏高, 双尖山金矿床黄铁矿微量元素含量相对较低(图 5)。

## 5 讨论

### 5.1 黄铁矿中微量元素及金的赋存状态

黄铁矿作为热液活动最常见的产物和载金矿物, 其中含有大量的微量元素, 主要有 3 种赋存形式: ①以固溶体形式存在于矿物晶格中; ②以纳米级的不可见包裹体存在; ③以微米级的可见包裹体存在(Large et al., 2011; 范宏瑞等, 2018)。Pb 相比于 Fe 从水溶液中沉淀的速度更快, 常以微米级或纳米级包裹体的形式存在于黄铁矿中(Koglin et al., 2010; Keith et al., 2016; 第鹏飞等, 2023)。Pb 与 Bi 在 3 个金矿床中均表现出较强的正相关性, 暗示 Pb 和 Bi 主要以辉铋矿或 Bi 以固溶体的形式存在于方铅矿包裹体中(Cook et al., 2009); Co 与 As 同样呈现正相关性, 表明 Co 主要以进入黄铁矿晶格的形式

存在。大红泉和狼娃山金矿床 Cd 与 Zn、Sb 与 Pb 均呈现较高的正相关关系, 表明 Pb、Zn、Cu 等元素主要以闪锌矿和方铅矿包体的形式存在于黄铁矿中(Voute et al., 2019)。双尖山、大红泉金矿 Ce 与 La 存在较明显的正相关关系, 暗示黄铁矿中可能有独居石的存在(图 6)。

Te 常以阴离子的形式类质同象替代 S, 其赋存形式也可用 As 含量来限定(Huston et al., 1995; Keith et al., 2018)。从图 7 可见, 多数样品投点落入溶解曲线上方, 表明 Te 主要以矿物包裹体形式存在, 少数赋存于黄铁矿晶格中(图 7-a)。当 Cu/Au>1 时, Cu 以  $\text{Cu}^{2+}$  的形式直接替代  $\text{Fe}^{2+}$  进入黄铁矿晶格, 当  $\text{Cu}/\text{Au} \approx 1$  时,  $\text{Cu}^+$  与  $\text{Au}^{3+}$  一般一同替代  $\text{Fe}^{2+}$ (Voute et al., 2019)。本文中 3 个金矿床 Cu/Au 值均大于 1, 说明 Cu 主要以  $\text{Cu}^{2+}$  替代  $\text{Fe}^{2+}$ 。

金的赋存状态主要包括可见金及不可见金 2 种。不可见金指粒度小于  $0.1 \mu\text{m}$ , 不能被扫描电镜直接检测出的次显微金, 在黄铁矿中主要以纳米金( $\text{Au}^0$ )或固溶体金( $\text{Au}^+$ )2 种形式存在(Large et al.,

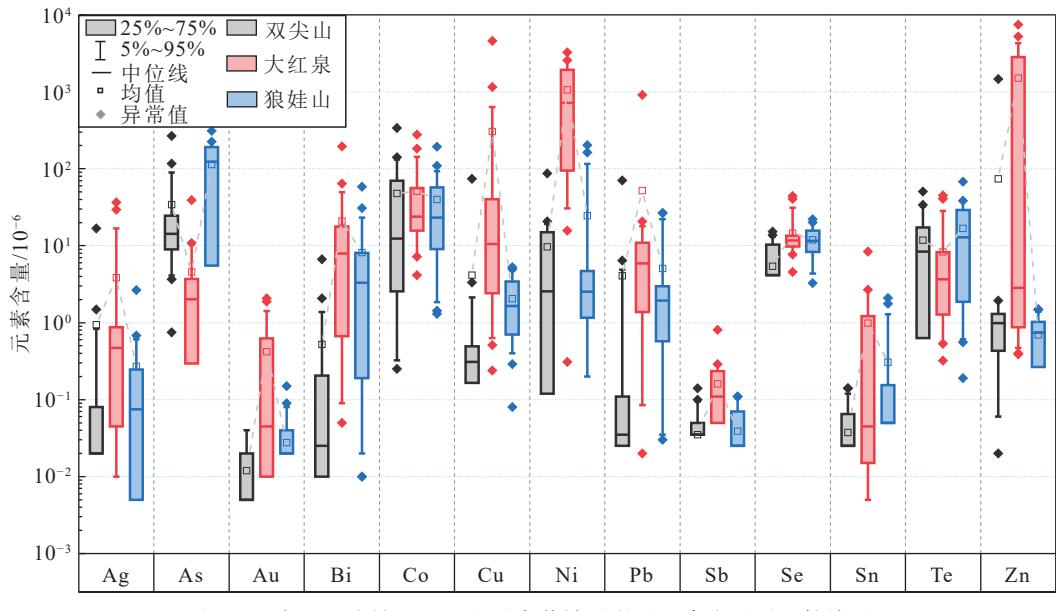


图 5 双尖山—狼娃山地区金矿床黄铁矿微量元素含量对比箱线图

Fig. 5 Boxplot comparison of trace element content in pyrite of gold deposits in the Shuangjianshan-Langwashan area

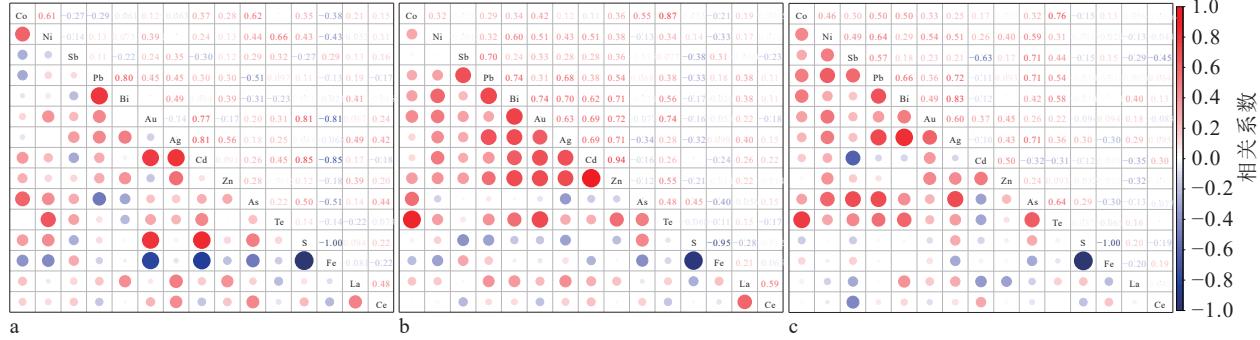


图 6 双尖山(a)、大红泉(b)和狼娃山(c)金矿床黄铁矿的微量元素相关性图解(Spearman correlation)

Fig. 6 Correlation diagrams of trace elements in pyrite from Shuangjianshan (a), Dahongquan (b), and Langwashan (c) gold deposits(Spearman correlation)

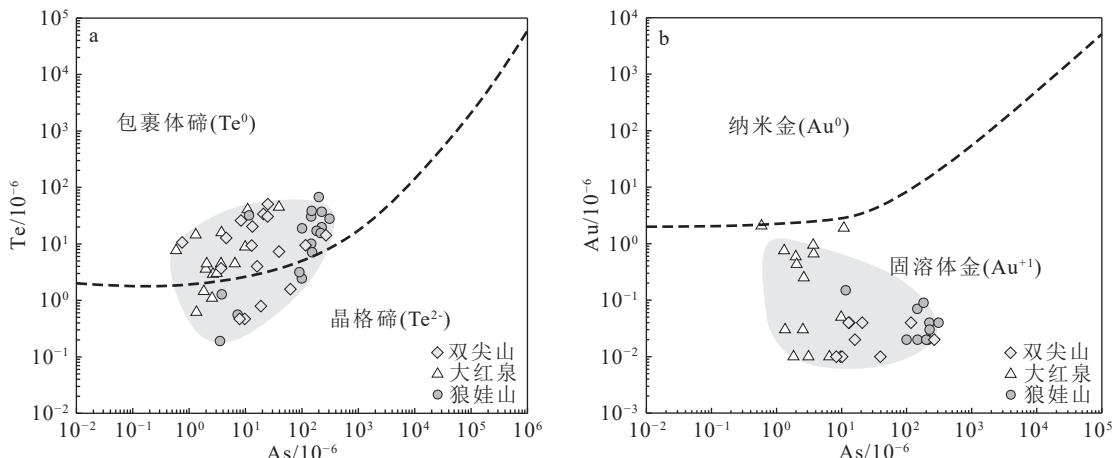


图 7 双尖山—狼娃山地区金矿床 Te 及 Au 的赋存状态判别图(Te 溶解度曲线据 Keith et al., 2018; Au 溶解度曲线据 Reich et al., 2005)

Fig. 7 Discrimination diagrams of the occurrence states of Te and Au in the gold deposits of the Shuangjianshan-Langwashan area

2009; Cook et al., 2013)。黄铁矿原位分析结果表明,本次试验样品的 Au 质量分数较低,同时显微镜下显示,双尖山和狼娃山金矿床有自然金颗粒的存在,而大红泉未见明金,表明双尖山—狼娃山地区金矿床的金有可见金及不可见金 2 种赋存形式,大红泉金矿床 Au 主要以不可见金形式存在。不可见金的赋存形式可分为超显微包裹的纳米金和固溶体金。Reich et al.(2005)发现,As 是影响 Au 赋存形式的重要因素,一般可利用 As 含量对 Au 的赋存状态进行判别(Reich et al., 2005; Deditius et al., 2014; 曹根深等, 2023)。在 As–Au 图解中,当测点落入金饱和度曲线上方时,Au 主要以纳米级自然金颗粒( $\text{Au}^0$ )形式赋存于黄铁矿中;当测点落入溶解度极限曲线下方时,Au 可能以固溶体金( $\text{Au}^{1+}$ )的形式存在。双尖山—狼娃山地区金矿床测点均落入溶解度极限曲线下方,表明不可见金主要以固溶体金( $\text{Au}^{1+}$ )的形式赋存于黄铁矿晶格中(图 7-b)。另外,在成矿流体中,低熔点亲铜元素(LMCE, 如 Bi、Te、Sb 等)能有效降低金的熔点(Tomkins et al., 2004),促使 Au 的迁移,因此可以通过探讨 Au 与这些元素的相关性来分析低熔点亲铜元素在黄铁矿内的赋存状态(曹根深等, 2023)。本文中 Au 与 LMCE 元素均呈现正相关性,暗示 LMCE 元素同样赋存于黄铁矿晶格中。

## 5.2 成矿流体性质

热液体系中稀土元素(REE)和高强度元素(HFSE)主要以包裹体的形式存在于金属硫化物中,因此受晶体结构的影响不大,这些元素可以有效反映成矿流体的特征(毕献武等, 2004; 毛光周等, 2006)。HFSE 在不同的热液体系中地球化学行为有明显差异。富 F 的热液富集 HFSE 和 LREE, Th/La、Nb/La、Hf/Sm 值一般大于 1(Keppler et al., 1996; Williams et al., 2009);富 Cl 的热液富集 LREE, Th/La、Nb/La 和 Hf/Sm 值一般小于 1(Oreskes and Einaudi, 1990)。分析结果表明,双尖山—狼娃山地区硫化物的 Nb/La、Th/La、Hf/Sm 值多小于 1,暗示成矿流体中富含  $\text{Cl}^-$ ,仅存在少量的  $\text{F}^-$ 。

黄铁矿沉淀时的物理化学条件对微量元素有重要影响,通过黄铁矿的微量元素含量可以反演成矿流体的物理化学条件及演化(Large et al., 2009; Deditius et al., 2014)。黄铁矿的 Cu/Au 值一定程度上能够反映成矿流体的氧化环境,在流体环境十分氧化的条件下,Cu/Au 值接近于 1,Au 以  $\text{Au}^{3+}+$

$\text{Cu}^+$ 的形式置换 Fe(Voute et al., 2019; 曹根深等, 2023);而流体处于相对较还原环境时,Cu/Au 值常大于 1。双尖山—狼娃山地区金矿床 Cu/Au 值均大于 1,说明成矿流体整体处于较还原环境。Fe/S 值对黄铁矿成因具有一定指示意义。沉积成因黄铁矿 Fe/S 值与理论值相近或硫含量略丰富(理论值为 0.857),内生黄铁矿型多金属矿床中的黄铁矿与理论值相比亏硫,与超基性岩有关的铜镍矿床中的黄铁矿 Fe/S 值与理论值相近(梅建明, 2000)。本文中双尖山、大红泉和狼娃山 3 个金矿床的 Fe/S 值分别为 0.91、0.87 和 0.93,均表现出亏硫特征,显示黄铁矿成因与热液活动密不可分。

Co、Ni 在黄铁矿中常以类质同象的方式替代黄铁矿晶格中的 Fe,  $\text{CoS}_2$  与  $\text{FeS}_2$  形成连续固溶体,而  $\text{NiS}_2$  和  $\text{FeS}_2$  形成不连续溶体(Vaughan and Rosso, 2006; George et al., 2018),黄铁矿沉淀时的物理化学条件的变化会导致 Co、Ni 含量的变化,使不同类型下黄铁矿的 Co/Ni 值不同,因此黄铁矿的 Co/Ni 值通常可用来判别其形成环境(Bralia et al., 1979; Roberts, 1982; Clark et al., 2004)。沉积成因的黄铁矿 Co/Ni 值通常小于 1(平均值约为 0.63),热液成因的黄铁矿 Co/Ni 值通常小于 5(平均值约为 1.7),火山成因的黄铁矿 Co/Ni 值多大于 5,通常在 5~50 之间(Bralia et al., 1979)。双尖山矿床 Co/Ni 值介于 0.22~30.13 之间,均值为 6.19;大红泉矿床 Co/Ni 值除 1 个测点异常偏高外,其他介于 0.01~4.02 之间,均值为 0.33;狼娃山矿床 Co/Ni 值介于 0.12~51.17 之间,均值为 14.28。将 3 个矿床的黄铁矿 Co、Ni 数据投图发现(图 8-a),大红泉投点多落入沉积成因区域,而双尖山及狼娃山多数投点落入  $\text{Co}/\text{Ni}>1$  的岩浆-热液作用范围,少部分落入沉积区,表现出成因较复杂的特征。在 As/Ag–Sb/Bi 判别图(图 8-b)中,投点数据均指示黄铁矿成因与岩浆/热液活动有关,远离成岩黄铁矿区域。宋学信和张景凯(1986)指出,利用黄铁矿 Co/Ni 值探讨热液矿床的成因时,表生热液或变质热液的加入都可能使黄铁矿中的微量元素值呈现出沉积成因的特征。曹根深等(2023)对典型的造山型金矿研究发现,由于造山型金矿成矿流体可能与围岩发生了强烈的水岩反应,黄铁矿 Co/Ni 值通常小于 1(0.2~1.5),这与大红泉金矿相类似。据此推测,本文中部分投点偏离热液成因区的原因可能是成矿过程中经历了不同形式

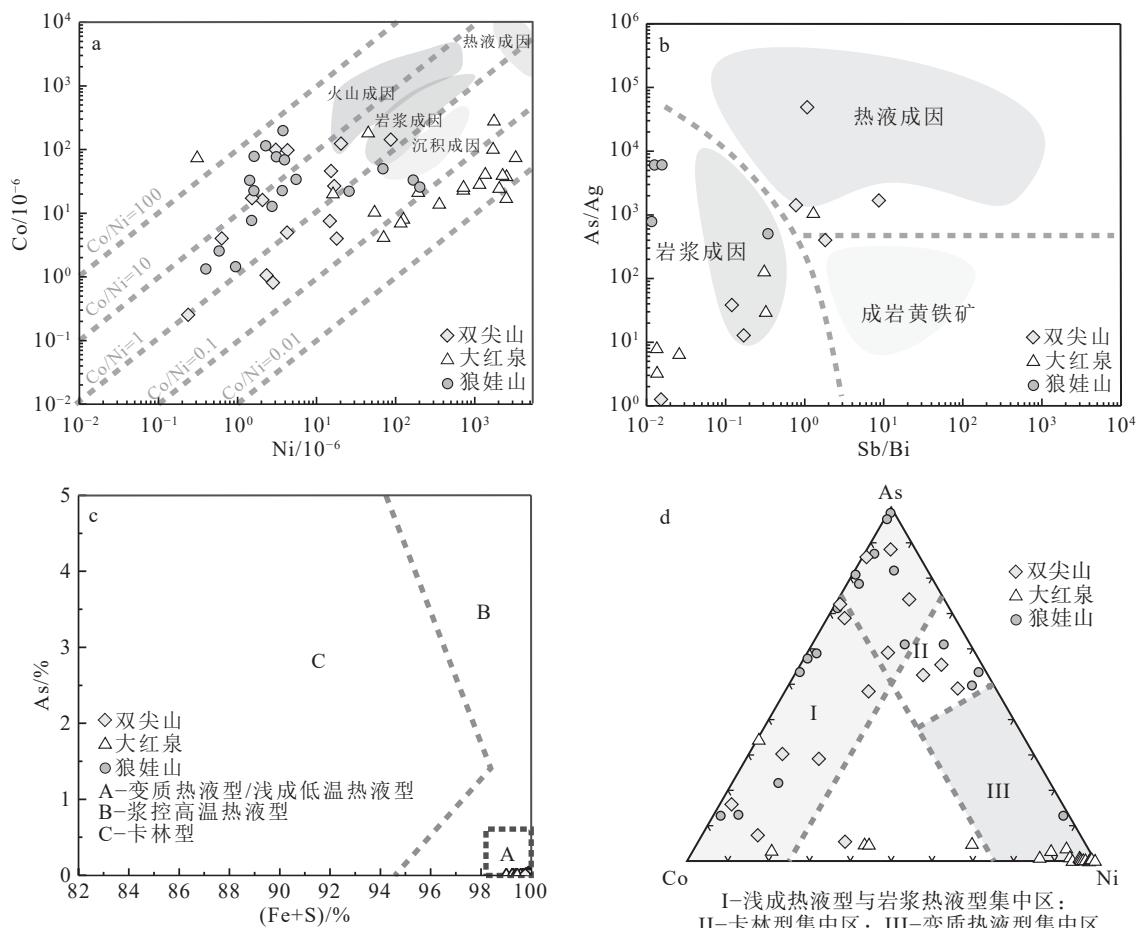


图 8 Ni–Co(a, 底图据 Bajwah et al., 1987; Brill, 1989 修改)、Sb/Bi–As/Ag(b, 底图据 Augustin et al., 2019 修改)、(Fe+S)–As(c) 及 Co–Ni–As(d)(c, d 底图据 李洪梁和李光明, 2019 修改)成因判别图

Fig. 8 Genetic identification of Ni–Co(a), Sb/Bi–As/Ag(b), (Fe+S)–As(c) and Co–Ni–As(d)

的热液演化或有不同的流体混入, 投到沉积成因区的黄铁矿可能是成矿流体与围岩发生水岩反应, 或后期受到大气降水流体的叠加改造作用影响所致。

Sn 和 Mo 通常在高温热液矿床中富集, 但在本次研究的黄铁矿中含量普遍较低, 说明成矿温度并不高。另外, 黄铁矿中的 Co 含量与温度具有正相关性(Román et al., 2019), 也可用来表征成矿温度。Co 在高温条件下相较于 Ni 优先进入黄铁矿晶格, 使得黄铁矿更富集 Co, Co 含量一般高于  $1000 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Co}/\text{Ni} > 1$ ; 低温环境下 Co 含量一般小于  $100 \times 10^{-6}$ , 且  $\text{Co}/\text{Ni} < 1$ (盛继福等, 1999; 严育通等, 2012)。整体来看, 双尖山—狼娃山地区 Co 值多小于  $100 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Co}/\text{Ni}$  值多小于 1, 同样显示结晶环境温度偏向于中低温, 结合 Cu/Au 值指示成矿流体处于还原环境, 进一步推测在热液中 Au 可能主要与  $\text{HS}^-$  结合, 以  $\text{Au}(\text{HS})_2^-$  络合物的形式迁移, 在一定条件下与其他金

属离子结合而沉淀(Su et al., 2008; Hurtig and Williams-Jones, 2014)。此外, 黄铁矿的 Co/Ni 值也受到盐度的影响。高盐度下沉淀的黄铁矿一般呈现较高的 Co/Ni 值(Keith et al., 2022; 曹根深等, 2023), 而本次较低的 Co/Ni 值指示了成矿流体的低盐度特征。前人对马庄山—狼娃山金成矿带的流体包裹体研究显示: 马庄山金矿床形成温度在 130~368°C 之间, 盐度为 0.8%~12.5%(王琦崧, 2020); 南金山形成温度在 160~240°C 之间, 盐度范围主要集中在 6%~7% 之间(曹亮等, 2011); 460 金矿主成矿阶段温度在 160~220°C 之间, 盐度多小于 10%(李雷, 2015)。不难发现区内金矿床成矿流体多呈现中低温、低盐度的特征, 双尖山—狼娃山地区金矿床成矿流体性质与区域整体背景相似。

流体沸腾是自然金的主要沉淀机制之一。沸腾会导致流体发生相分离, 大量的  $\text{H}_2\text{O}$  进入气相, 从而

使流体中的 As、Au 和 Fe 达到过饱和, 富 As 黄铁矿和自然金在液相中沉淀。As/Sb 值可以指示流体沸腾作用(Zhang et al., 2012; Chai et al., 2016)。当 As/Sb>20 时, 黄铁矿在沸腾的流体环境中沉淀; 当 As/Sb<20 时, 表示流体已经历过沸腾作用(Schaarschmidt et al., 2021)。双尖山、大红泉和狼娃山的 As/Sb 值分别为 5578、79.04 和 2310, 表明黄铁矿均在沸腾环境中沉淀。黄铁矿的 Fe/(S+As) 值与其形成深度有较好的相关性( $R^2=0.878$ )。深部、中部和浅部产出的黄铁矿 Fe/(S+As) 值分别为 0.846、0.863 和 0.926(周学武等, 2005)。区内双尖山、大红泉和狼娃山金矿的 Fe/(S+As) 值分别为 0.90、0.87 和 0.92, 暗示双尖山和狼娃山金矿体形成于中一浅部, 而大红泉矿体的形成深度相对较深。

Y-Ho、Zr-Hf 及 Nb-Ta 离子半径相似, 具有相同的价态和电荷数, 从而表现出相同或相近的地球化学性质和行为, 当它们处于同一热液体系时, 比值变化较小, 而如果受到外部体系干扰, 比值会呈现较大的变化范围(Bau et al., 1995; Yaxley et al., 1998)。双尖山—狼娃山地区的 Y/Ho(0.82~52.4)、Zr/Hf(1.3~153.6) 和 Nb/Ta(0.25~10.33) 值均呈现较大的变化范围, 暗示成矿过程中可能存在交代作用和多期次流体叠加改造。由于在许多地质过程中 Y/Ho 值一般不发生变化, 因此也常被用于成矿物质来源与演化过程的示踪指标。地球上大多数碎屑沉积岩及岩浆岩都保持着球粒陨石的 Y/Ho 值(约 28, Bau and Dulski, 1995)。在花岗岩样品中, 当 Y/Ho<28 时, 表示存在重碳酸盐络合物; 当 Y/Ho>28 时, 则通常为 F 的络合物引起, 表明有富 F 的流体参与。将本文数据与地幔、海底热液和现代海水的 Y/Ho 值(Bau et al., 1997; Bau and Dulski, 1999; Douville et al., 1999) 对比可发现(图 9), 多数样品点呈现出较低的 Y/Ho 值, 变化范围较大, 暗示成矿流体的来源并不单一, 且可能富含重碳酸盐络合物。Keith et al.(2022)指出, Se/Te 与 Se/Ge 值可以指示大气降水与岩浆热液在流体混合作用中的贡献度, 岩浆热液的混入会造成黄铁矿的 Se/Ge 值在 100 左右并且 Se/Te 值大于 50, 而大气降水的混入会导致流体温度降低, 使得黄铁矿的 Se/Ge 与 Se/Te 值降低。双尖山—狼娃山地区 Se/Ge 均值为 2.81, Se/Te 均值为 7.62, 基本可以排除岩浆热液与流体的混合作用, 表明流体多与大气降水进行混合。

综上, 双尖山—狼娃山地区金矿床成矿流体具有中低温、低盐度的特点, 成矿流体中富含 Cl<sup>-</sup>, 成矿过程存在多期次流体的叠加, 流体多与大气降水相混合。

### 5.3 成矿物质来源

硫同位素对矿物形成条件极灵敏, 常被用来示踪物质来源、分析成矿机理等。双尖山—狼娃山地区金矿床硫化物组合较简单, 未发现硫酸盐类矿物, 因此硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值大致可以代表热液总硫(Ohmoto., 1972; 陕亮等, 2009)。区域上硫化物  $\delta^{34}\text{S}$  值总体介于 0.37‰~6.28‰ 之间, 均值为 2.06‰。双尖山金矿硫化物  $\delta^{34}\text{S}$  值介于 0.37‰~6.28‰ 之间, 均值为 2.58‰( $n=16$ )。大红泉金矿硫化物  $\delta^{34}\text{S}$  值介于 1.64‰~2.53‰ 之间, 均值为 2.07‰( $n=15$ )。狼娃山金矿硫化物黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  值介于 0.58‰~2.01‰ 之间, 均值为 1.22‰( $n=10$ )(图 10-a)。不难发现硫均一化程度较高, 整体具有一致的来源, 和源于深部与岩浆有关的硫或幔源流相似( $\delta^{34}\text{S}$  值 = 0±3‰, Rollinson, 1993), 显示出岩浆硫(或地幔硫)特征(图 10-b), 双尖山相较于其他 2 个矿床硫同位素值有向高值区漂移的趋势, 暗示该矿床硫源并不单一, 可能是大气降水淋滤进了地层硫, 上述关于黄铁矿成因的分析表明, 部分黄铁矿呈现沉积成因的特征也证实了这一结论。区域上, 自西向东, 硫同位素值有逐渐减小的趋势。前人对北山地区部分典型金矿床硫同位素进行了研究(陈世忠等, 2000; 李新俊和

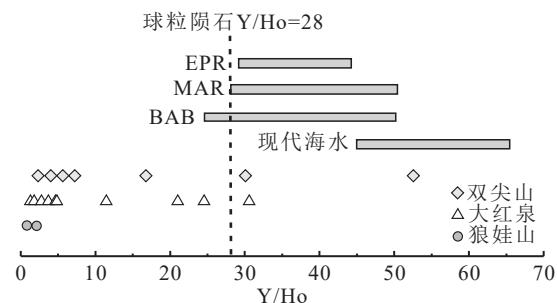


图 9 双尖山、大红泉和狼娃山金矿床黄铁矿与现代海底热液和海水的 Y/Ho 值对比图(现代海水、BAB、MAR 和 EPR 数据据 Bau et al., 1997; Bau and Dulski, 1999; Douville et al., 1999; 底图据第鹏飞等, 2023)

Fig. 9 Comparison diagram of Y/Ho ratios of pyrites from the Shuangjianshan, Dahongquan, and Langwashan gold deposits versus modern submarine hydrothermal fluids and seawater

BAB—弧后盆地; MAR—中大西洋洋脊  
EPR—东太平洋洋脊热液流体

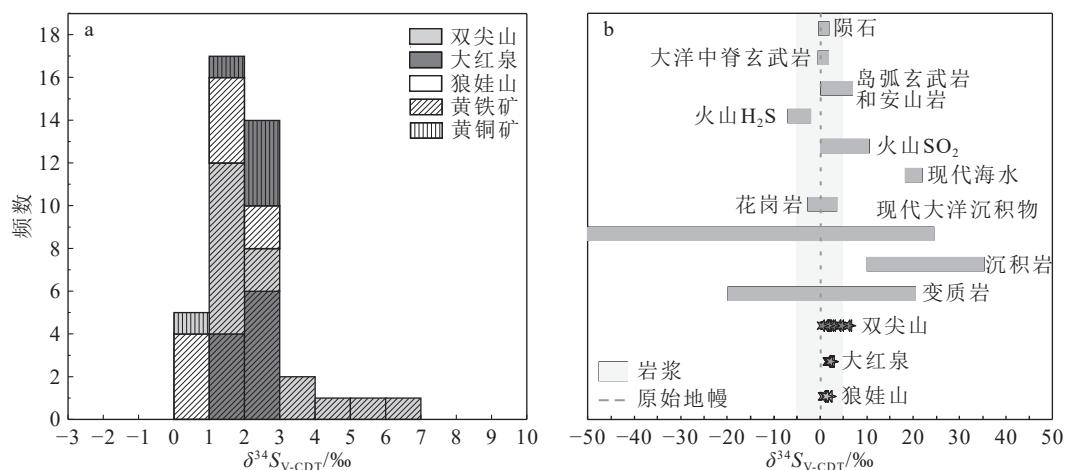


图 10 双尖山—狼娃山地区金矿床硫同位素直方图(a)及硫值对比图(b, 底图据 Hofes., 2009)

Fig. 10 Histogram of sulfur isotopes (a) and comparison diagram of sulfur values (b) of the gold deposits in the Shuangjianshan-Langwashan area

刘伟, 2002; 潘小菲等, 2010), 如马庄山金矿床( $\delta^{34}\text{S}=3.9\text{\textperthousand} \sim 6.3\text{\textperthousand}$ )、金窝子矿床( $\delta^{34}\text{S}=37.08\text{\textperthousand} \sim 38.71\text{\textperthousand}$ )、210矿床( $\delta^{34}\text{S}=5.6\text{\textperthousand} \sim 7.9\text{\textperthousand}$ )、小西弓矿床( $\delta^{34}\text{S}=6.7\text{\textperthousand} \sim 9.7\text{\textperthousand}$ )、新金场( $\delta^{34}\text{S}=-3.3\text{\textperthousand} \sim -6.3\text{\textperthousand}$ )、老金厂( $\delta^{34}\text{S}=-2.6\text{\textperthousand} \sim -4.2\text{\textperthousand}$ )等, 认为双尖山—狼娃山地区金矿床与马庄山金矿床硫值组成类似, 且成矿环境均显示还原性, 暗示二者硫源相似。综合来看, 双尖山—狼娃山地区金矿床的成矿物质来源主要为岩浆硫, 双尖山金矿区可能有地层硫的参与, 呈现混合硫特征。

#### 5.4 矿床成因及成矿机制

前述已述及, 双尖山—狼娃山地区黄铁矿成因与热液密不可分。为明确热液流体的性质, 将黄铁矿数据进行( $\text{Fe}+\text{S})/\text{As}$  和  $\text{Co-Ni-As}$  投图判别(图 8c, d)。在( $\text{Fe}+\text{S})/\text{As}$  判别图中, 投点集中落入变质热液型/浅成低温热液型区域, 暗示其成矿流体为浅成低温热液流体或变质热液流体; 而在  $\text{Co-Ni-As}$  三角判别图内, 大红泉金矿床投点集中落入变质热液集中区, 双尖山和狼娃山多数投点则集中于浅成热液型或岩浆型集中区, 暗示大红泉金矿床与造山型金矿床类似, 这也与大红泉矿区金矿体主要发育于韧性剪切带的地质特征相吻合。

通过对矿床地质的研究表明, 双尖山、狼娃山金矿床的赋矿围岩为白山组火山岩、次火山岩、花岗岩等, 金矿化与火山岩具有密切的空间关系。网脉、石英晶洞等构造指示开放空间充填特征, 热液蚀变、矿物组合等特征均与低硫型浅成低温热液矿床一致

(表 4; Sillitoe and Hedenquist, 2003)。大红泉金矿床赋矿围岩主要为花岗闪长岩和构造蚀变岩, 且位于韧性剪切带内, 金矿化带的展布受韧性剪切带两侧的次级断裂构造控制, 这与典型的造山型金矿的地质特征相吻合(Cook et al., 2013; Gregory et al., 2015)。结合矿床地质及微量元素地球化学特征, 对比典型低硫型浅成低温热液矿床与造山型金矿床(表 4), 发现双尖山、狼娃山与低硫型浅成低温热液型矿床类似, 而大红泉矿床与造山型金矿特征类似, 这也与矿床成因判别图(图 8)指示一致。综上认为, 双尖山和狼娃山金矿为低硫型浅成低温热液型矿床, 大红泉金矿为造山型金矿床。

早石炭世, 双尖山—狼娃山地区地处岛弧环境, 古天山洋俯冲, 区域发生裂隙式火山喷发活动及沉积作用, 形成厚层的火山碎屑岩(江思宏等, 2006)。晚石炭世, 哈萨克斯坦板块和西伯利亚板块相撞使东天山造山带发生强烈变形, 产生许多北西向和北东向断层, 控制了后期花岗岩侵位和矿液迁移的方向(Xiao et al., 2004, 2010; Goldfarb et al., 2014)。伴随着次火山岩侵入活动的活化、改造、富集作用和华力西晚期钾长花岗岩体的侵入活动对上覆地层的熔融、分离作用, 为金矿化提供成矿物质的同时加热并驱动了大气降水的循环, 循环的大气降水又从火山-沉积岩中萃取金或其他成矿物质(王琦崧, 2020), 形成双尖山、狼娃山等低硫型浅成低温热液矿床。碰撞晚期, 由于陆块间岛弧、增生体的存在, 碰撞过程表现为弱碰撞、强增生特征, 垂直应力转变为水平方

表 4 双尖山—狼娃山地区金矿床与其他典型金矿床特征对比

Table 4 Comparison of characteristics between gold deposits in the Shuangjianshan-Langwashan area and other typical gold deposits

对比项目	双尖山	大红泉	狼娃山	低硫型浅成 低温热液型矿床	造山型矿床
控矿构造	压扭性断裂	韧性剪切带	压扭性断裂	破火山口和火山穹丘系统,与火山活动中心的各种断裂关系密切	韧脆性剪切带、褶皱转折带等
赋矿地质体	浅变质的火山岩或钾长花岗岩	花岗闪长岩、构造蚀变岩	安山质角砾熔岩、流纹斑岩和英安质凝灰岩	中新生代陆相的钙碱性火山岩,少数为古生代	无特定的岩性,可产于各个时代的变质地体中
金属矿物	(含金)黄铁矿、黄铜矿、自然金及少量毒砂、辉锑矿和辉钼矿等	黄铁矿和黄铜矿等	以自然银、自然金、黄铁矿、褐铁矿、磁铁矿、赤铁矿为主,黄铜矿、毒砂次之	黄铁矿、自然金、银金矿、闪锌矿、方铅矿、毒砂等	以黄铁矿为主,少量自然金、黄铜矿、毒砂、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿
非金属矿物	石英、方解石、绢云母、长石、角闪石、绿泥石等	石英、方解石、绢云母、长石、绿泥石等	以石英脉为主,方解石和绢云母次之	石英、玉髓、方解石、冰长石、绢云母等	石英、铁白云石、方解石、绿泥石、斜长石、绢云母、电气石
围岩蚀变	硅化、绢云母化、绿帘石化、绿泥石化、碳酸盐化、黄铁矿化、绿泥石化、毒砂化、黄钾铁矾化等	硅化、高岭土化、绿泥石化、碳酸盐化、黄铁矿化、绿泥石化、褪色化等	硅化、绢云母化、黄铁矿化、冰长石化、硅化、绢英岩化、黄铁矿化、青磐岩化等	硅化、碳酸盐化、青磐岩化等	硅化、绿泥石化、黑云母化、钠长石化、电气石化、碳酸盐化等
流体性质	中低温、还原性、低盐度	中低温、还原性、低盐度	中低温、还原性、低盐度	100~350℃, 低温, 相对还原、近中性流体, 盐度<5%~10%	温度变化范围大(200~650℃), 还原性、近中性流体, 盐度<6%
成矿深度	较浅	较深	较浅	0.05~1.5 km	2~20 km
流体来源	大气降水为主	变质流体为主,可能混有大气降水	大气降水为主	大气降水±岩浆水	变质流体为主
物质来源	岩浆硫+地层硫	岩浆硫	岩浆硫	地层源±岩浆源	地层源±岩浆源
微量元素特征	Co/Ni=6.19( <i>n</i> =15)	Co/Ni=0.33( <i>n</i> =19)	Co/Ni=14.28( <i>n</i> =18)	Co/Ni>1	Co/Ni<0.5
资料来源	本文	本文	本文	Hedenquist et al., 2000; Simmons and Browne, 2000; Sillitoe and Hedengust, 2003.	Kerrick et al., 2000; 陈衍景等, 2007; 李洪梁和李光明, 2019

向的相对滑动,使大红泉地区韧性剪切构造发育,金矿化带与近东西向的韧性剪切带关系密切。深部经区域变质作用形成的变质流体沿通道向上运移,在脆-韧过渡带富集,上升过程中不断与大气降水相混合,温度、压力的下降导致流体沸腾及金的沉淀。

## 6 结 论

(1) 双尖山—狼娃山地区金矿床黄铁矿微量元素呈现出较高含量的 Co、Ni, 较低含量的 Mn、Sb 和 Au 等, 大红泉金矿床微量元素含量整体相比与双尖山和狼娃山矿床较高。金有可见金及不可见

金 2 种赋存形式, 大红泉金矿床 Au 主要以不可见金形式存在。不可见金主要以固溶体金(Au<sup>1+</sup>)的形式赋存于黄铁矿晶格中。Pb 和 Bi 主要在辉锑矿或 Bi 以固溶体的形式存在于方铅矿包裹体中, 大红泉和狼娃山矿床黄铁矿中存在闪锌矿、方铅矿等矿物包体, 大红泉和双尖山金矿床黄铁矿中有独居石的存在。

(2) 双尖山—狼娃山地区金矿床 Nb/La、Th/La、Hf/Sr 值多小于 1, 成矿流体中富含 Cl<sup>-</sup>, 具有中低温、低盐度的特点。黄铁矿在沸腾过程中沉淀, 成矿流体整体处于较还原的环境。成矿过程存在多期次流体的叠加, 双尖山金矿床成矿晚期流体可能与大

气降水相混合。

(3)双尖山、大红泉和狼娃山矿床硫化物硫同位素均值分别为 $2.58\text{‰}$ 、 $2.07\text{‰}$ 和 $1.22\text{‰}$ , 双尖山硫同位素值变化范围相较于大红泉、狼娃山金矿床偏大, 显示岩浆硫与地层硫的混合特征; 大红泉、狼娃山金矿床硫值均为极低的正值, 显示出岩浆硫的特征。双尖山、狼娃山金矿床属低硫型浅成低温热液型金矿床, 大红泉为造山型金矿床, 区内成矿作用具有多期次性。

**致谢:**感谢肃北县钰垠工贸有限公司在野外工作中的帮助, 以及审稿专家对本文提出的宝贵意见。

## References

- Ao S J, Xiao W J, Han C M, et al. 2010. Geochronology and geochemistry of Early Permian mafic-ultramafic complexes in the Beishan area, Xinjiang, NW China: Implications for late Paleozoic tectonic evolution of the southern Altaids[J]. *Gondwana Research*, 18(2/3): 466–478.
- Ao S J, Xiao W J, Han C M, et al. 2012. Cambrian to early Silurian ophiolite and accretionary processes in the Beishan collage, NW China: Implications for the architecture of the Southern Altaids[J]. *Geological Magazine*, 149(4): 606–625.
- Augustin, Jérôme, Damien Gaboury. 2019. Multi-stage and multi-sourced fluid and gold in the formation of orogenic gold deposits in the world-class Mana district of Burkina Faso—Revealed by LA-ICP-MS analysis of pyrites and arsenopyrites[J]. *Ore Geology Reviews*, 104: 495–521.
- Bai R L, Hu J R, Zhao F F, et al. 2022. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic characteristics and their geological significances of syenogranite in the Shuangjianshan gold deposit in the Beishan Orogenic Belt, Gansu Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 41(2): 274–286 (in Chinese with English abstract).
- Bajwah Z U, Seccombe P K, Offler R. 1987. Trace element distribution, Co: Ni ratios and genesis of the Big Cadia iron-copper deposit, New South Wales, Australia[J]. *Mineralium Deposita*, 22(4): 292–203.
- Bau M, Dulski P. 1995. Comparative study of yttrium and rare-earth element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluids[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119: 213–223.
- Bau M, Dulski P. 1999. Comparing yttrium and rare earths in hydrothermal fluids from the Mid-Atlantic Ridge: Implications for Y and REE behaviour during near-vent mixing and for the Y/Ho ratio of Proterozoic seawater[J]. *Chemical Geology*, 155(1/2): 77–90.
- Bau M, Möller P, Dulski P. 1997. Yttrium and lanthanides in eastern Mediterranean seawater and their fractionation during redox-cycling[J]. *Marine Chemistry*, 56(1/2): 123–131.
- Bi X W, Hu R Z, Peng J T, et al. 2004. REE and HFSE geochemical characteristics of pyrites in Yao'an gold deposit: Tracing ore forming fluid signatures[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, (1): 1–4 (in Chinese with English abstract).
- Bralia A, Sabatini G, Troja F. 1979. A revaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems: evidences from southern Tuscany pyritic deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 14: 353–374.
- Brill B A. 1989. Trace-element contents and partitioning of elements in ore minerals from the CSA Cu-Pb-Zn deposit, Australia, and implications for ore genesis[J]. *The Canadian Mineralogist*, 27(7): 263–274.
- Cai Z H, Xu Z Q, He B Z, et al. 2012. Age and tectonic evolution of ductile shear zones in the eastern Tianshan-Beishan orogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1875–1895 (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).
- Cao L, Xu R K, Shan L, et al. 2011. Study on fluid inclusions of Nanjinshan gold deposit of Beishan area, Gansu Province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 26(3): 249–254, 327 (in Chinese with English abstract).
- Chai P, Sun J G, Xing S W, et al. 2016. Ore geology, fluid inclusion and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology constraints on the genesis of the Yingchengzi gold deposit, southern Heilongjiang Province, NE China[J]. *Ore Geology Reviews*, 72: 1022–1036.
- Chen J J, Cui Y, Cui K. 2016. The geological characteristics and prospecting of Double Jianshan gold deposits in Gansu Province Subei County[J]. *World Nonferrous Metals*, (20): 56–58 (in Chinese with English abstract).
- Chen S Z, Zhou J Y, Gu L X, et al. 2000. Genesis of ore-forming fluids and precipitation mechanism of gold in the Mazhuangshan gold deposit, Hami, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, (3): 193–200 (in Chinese with English abstract).
- Chen S, Guo Z, Qi J, et al. 2016. Early Permian volcano-sedimentary successions, Beishan, NW China: Peperites demonstrate an evolving rift basin[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 309: 31–44.
- Chen Y J, Ni P, Fan H R, et al. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 23(9): 2085–2108 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Cleven N, Lin S, Guilmette C, et al. 2015. Petrogenesis and implications for tectonic setting of Cambrian suprasubduction-zone ophiolitic rocks in the central Beishan orogenic collage, Northwest China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 369–390.
- Cook N J, Ciobanu C L, Mao J. 2009. Textural control on gold distribution in As-free pyrite from the Dong, Huangtuliang and Hougu gold deposits, North China Craton (Hebei Province,

- China)[J]. *Chemical Geology*, 264(1/4): 101–121.
- Cook N J, Ciobanu C L, Meria D, et al. 2013. Arsenopyrite–pyrite association in an orogenic gold ore: Tracing mineralization history from textures and trace elements[J]. *Economic Geology*, 108(6): 1273–1283.
- 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.
- 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, 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.
- Di P F, Tang Q Y, Liu D X, et al. 2023. Trace element geochemistry of pyrite and its significance in the Gannan District, West Qinling: A case study from the Jiagantan and Zaozigou gold deposits[J]. *Chinese Rare Earths*, 44(4): 140–154 (in Chinese with English abstract).
- Douville E, Bienvenu P, Charlot J L, et al. 1999. Yttrium and rare earth elements in fluids from various deep-sea hydrothermal systems[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(5): 627–643.
- Fan H R, Li X H, Zuo Y B, et al. 2018. In-situ LA-(MC)-ICPMS and (Nano) SIMS trace elements and sulfur isotope analyses on sulfides and application to confine metallogenetic process of ore deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(12): 3479–3496 (in Chinese with English abstract).
- George L L, Biagioli C, D'Orazio M, et al. 2018. Textural and trace element evolution of pyrite during greenschist facies metamorphic recrystallization in the southern Apuan Alps (Tuscany, Italy): Influence on the formation of Tl-rich sulfosalt melt[J]. *Ore Geology Reviews*, 102: 59–105.
- Goldfarb R J, Taylor R D, Collins G S, et al. 2014. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia[J]. *Gondwana Research*, 25(1): 48–102.
- Gong Q S, Liu M Q, Li H L, et al. 2002. The type and basic characteristics of Beishan orogenic belt, Gansu[J]. *Northwestern Geology*, 35(3): 28–34 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- He S P, Ren B C, Yao W G, et al. 2002. The division of tectonic units of Beishan area, Gansu–Inner Mongolia[J]. *Northwestern Geology*, 35(4): 30–40 (in Chinese with English abstract).
- Hedenquist J W, Arribas R A, Gonzalez-Urion E. 2000. Exploration for epithermal gold deposits[J]. *Reviews in Economic Geology*, 13: 245–277.
- Hofes J. 2009. Stable isotope geochemistry[M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag: 48–54.
- Huang S T, Yu X F, Lü Z C, et al. 2020. Characteristics of gold-bearing minerals and compositions of In-Situ sulfur of Laojinchang gold deposit in Beishan, Gansu Province and its ore-forming implications[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 50(5): 1387–1403 (in Chinese with English abstract).
- Hurtig N C, Williams-Jones A E. 2014. An experimental study of the transport of gold through hydration of AuCl in aqueous vapour and vapour-like fluids[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 127: 305–325.
- 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<sup>34</sup>S values and implications for the source of sulfur in volcanogenic hydrothermal systems[J]. *Economic Geology*, 90(5): 1167–1196.
- Jiang S H, Nie F J, Chen W S, et al. 2006. <sup>40</sup>Ar–<sup>39</sup>Ar geochronology and fluid inclusion features of the Nanjinshan gold deposit, Beishan Mt., Gansu Province[J]. *Geological Review*, 52(2): 266–275 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Keith M, Häckel F, Haase K M, et al. 2016. Trace element systematics of pyrite from submarine hydrothermal vents[J]. *Ore Geology Reviews*, 72: 728–745.
- 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, Smith D J, Jenkin G R, 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.
- Keppler H. 1996. Constraints from partitioning experiments on the composition of subduction-zone fluids[J]. *Nature*, 380(6571): 237–240.
- Kerrick R, Goldfarb R, Groves D, et al. 2000. The characteristics, origins, and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces[J]. *Science in China*, 43: 1–68.
- Koglin N, Frimmel H E, Lawrie Minter W E, et al. 2010. Trace-element characteristics of different pyrite types in Mesoarchaean to Palaeoproterozoic placer deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 45: 259–280.
- Large R R, Bull S W, Maslenikov V V. 2011. A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits[J]. *Economic Geology*, 106(3): 331–358.
- 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*, 104(5): 635–668.
- Li H L, Li G M. 2019. Compositional characteristics of pyrite ore formed in the main metallogenic period of various types of hydrothermal gold deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 26(3): 202–210 (in Chinese with English abstract).

- Li L. 2015. Study of Deposit geology and Ore-forming Fluid in 460 gold mine, Beishan area, Gansu Province[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Li X J, Liu W. 2002. Fluid inclusion and stable isotope constraints on the genesis of the Mazhuangshan gold deposit, eastern Tianshan Mountains of China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (4): 551–558 (in Chinese with English abstract).
- Liu W, Pan X F. 2006. Study on the characteristics of ore-forming fluids of typical gold deposits in the southern metallogenetic belt of the Beishan area in Gansu and Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 171–188 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Hu Z, Gao S, et al. 2008. In-situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1/2): 34–43.
- 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.
- Mao G Z, Hua R M, Gao J F, et al. 2006. REE composition and trace element features of gold-bearing pyrite in Jinshan gold deposit, Jiangxi Province[J]. *Mineral Deposits*, (4): 412–426 (in Chinese with English abstract).
- Mao Q G. 2008. Paleozoic to Early Mesozoic Accretionary and Collisional Tectonics of the Beishan and Adjacent Area, Northwest China[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences.
- Mei J M. 2000. Chemical Typomorphic Characteristic of Pyrites from Zhilingtou Gold Deposit, Suichang, Zhejiang[J]. *Geoscience*, 14(1): 51–55 (in Chinese with English abstract).
- Miao L C, Zhu M S, Zhang F Q. 2014. Tectonic setting of Mesozoic magmatism and associated metallogenesis in Beishan area[J]. *Geology in China*, 41(4): 1190–1204 (in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 67(5): 551–578.
- Oreskes N, Einaudi M T. 1990. Origin of rare earth element-enriched hematite breccias at the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, Roxby Downs, South Australia[J]. *Economic geology*, 85(1): 1–28.
- Pan X F, Liu W. 2010. Characteristics, derivation and evolution of ore-forming fluids in typical gold deposits of the Beishan Metallogenetic Belt in Gansu-Xinjiang border area[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(4): 507–518 (in Chinese with English abstract).
- Pan X, Liu W, Hou Z. 2014. Ore-Forming Fluids as Sampled by Sulfide-and Quartz-Hosted Fluid Inclusions in the Jinwozi Lode Gold Deposit, Eastern Tianshan Mountains of China[J]. *Resource Geology*, 64(3): 183–208.
- Pearce N J G, Perkins W T, Westgate J A, et al. 1997. A Compilation of new and published major and trace element data for NIST SRM 610 and NIST SRM 612 glass reference materials[J]. *Geostand Newslett*, 21: 115–144.
- 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.
- Roberts F I. 1982. Trace element chemistry of pyrite: A useful guide to the occurrence of sulfide base metal mineralization[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 17(1): 49–62.
- Rollinson H R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation Interpretation[M]. New York: John Wiley and Sons.
- 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.
- Schaarschmidt A, Haase K M, Klemd R, et al. 2021. Boiling effects on trace element and sulfur isotope compositions of sulfides in shallow-marine hydrothermal systems: Evidence from Milos Island, Greece[J]. *Chemical Geology*, 583: 120457.
- Shan L, Zheng Y Y, Xu R K, et al. 2009. Review on sulfur isotopic tracing and hydrothermal metallogenesis[J]. *Geology and Resources*, 18(3): 197–203 (in Chinese with English abstract).
- Sheng J F, Li Y, Fan S Y. 1999. A study of minor elements in minerals from polymetallic deposits in the central part of the Da Hinggan Mountains[J]. *Mineral Deposits*, 18(2): 153–160 (in Chinese with English abstract).
- Sillitoe R H, Hedenquist J W. 2003. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits[C]//Simmons SF and Graham I. Volcanic, geothermal, and ore-forming fluids: Rulers and witnesses of processes within the Earth. Littleton, Colo, USA: Society of Economic Geologists, 10: 315–343.
- Simmons S F, Browne P R. 2000. Hydrothermal minerals and precious metals in the Broadlands-Ohaaki geothermal system: Implications for understanding low-sulfidation epithermal environments[J]. *Economic Geology*, 95(5): 971–999.
- Song X X, Zhang J K. 1986. Trace element characteristics of pyrite of various genetic types in China[C]//Collected Papers of the Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences (18). Institute of Mineral Deposits: 175–184 (in Chinese with English abstract).
- Steadman J A, Large R R, Olin P H, et al. 2021. Pyrite trace element behavior in magmatic-hydrothermal environments: An LA-ICPMS imaging study[J]. *Ore Geology Reviews*, 128: 103878.
- Su W C, Xia B, Zhang H T, et al. 2008. Visible gold in arsenian pyrite at the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China: Implications for the environment and processes of ore formation[J]. *Ore Geology Reviews*, 33(3/4): 667–679.
- Tomkins A G, Pattison D R, Zaleski E. 2004. The Hemlo gold deposit, Ontario: An example of melting and mobilization of a precious metal-sulfosalt assemblage during amphibolite facies metamorphism and deformation[J]. *Economic Geology*, 99(6): 1063–1084.
- Ubide T, McKenna C A, Chew D M, et al. 2015. High-resolution LA-ICP-MS trace element mapping of igneous minerals: In search of magma histories[J]. *Chemical Geology*, 409: 157–168.
- Ulrich T, Long D G F, Kamber B S, et al. 2011. In situ trace element and sulfur isotope analysis of pyrite in a Paleoproterozoic gold placer

- deposit, Pardo and Clement townships, Ontario, Canada[J]. *Economic Geology*, 106(4): 667–686.
- Vaughan D J, Rosso K M. 2006. Chemical bonding in sulfide minerals[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 61(1): 231–264.
- Voute F, Hagemann S G, Evans N J, et al. 2019. Sulfur isotopes, trace element, and textural analyses of pyrite, arsenopyrite and base metal sulfides associated with gold mineralization in the Pataz–Parcoy district, Peru: Implication for paragenesis, fluid source, and gold deposition mechanisms[J]. *Mineralium Deposita*, 54: 1077–1100.
- Wang C Y, Wang Q S, Shu S P, et al. 2018. Temporal and Spatial Evolution of Ore-Forming Fluid and Metallogenic Mechanism in the Jinwozi Gold Deposit, Beishan Metallogenic Belt[J]. *Earth Science*, 43(9): 3126–3140 (in Chinese with English abstract).
- Wang H T. 2019. Tectono-magma and its geological significance in the beishan area of the southern part of the Central Asian Orogenic Belt[D]. Lanzhou University, (in Chinese with English abstract).
- Wang L, Yang J G, Wang X H, et al. 2015. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating and Its Geological Implications of Yingmaotuo Granitic Rocks[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(3): 583–591 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q S. 2020. Magmatism and Mineralization of Mazhuangshan–Nanjinshan Gold Ore Belt in Eastern Tianshan Area[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Williams-Jones A E, Bowell R J, Migdisov A A. 2009. Gold in solution[J]. *Elements*, 5: 281–287.
- 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 W J, Mao Q G, Windley B F, et al. 2010. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage[J]. *American Journal of Science*, 310: 1553–1594.
- Xiao W J, Shu L S, Gao J, et al. 2008. Continental Dynamics of the Central Asian Orogenic Belt and Its Metallogeny[J]. *Xinjiang Geology*, 26(1): 4–8 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, et al. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonic of the eastern Tianshan(China): implications for the continental growth of central Asia[J]. *American Journal of Science*, 304: 370–395.
- Yan Y T, Li S R, Zhang N, et al. 2012. Composition typomorphic characteristics and statistics analysis of metallogenic pyrite in gold deposits of different genetic types[J]. *Gold*, (3): 11–16 (in Chinese with English abstract).
- Yaxley G M, Green D H, Kamenetsky V. 1998. Carbonatite metasomatism in the southeastern Australian lithosphere[J]. *Journal of Petrology*, 39(11/12): 1917–1930.
- Yin W X. 2020. The geological features of the gold deposit Shuangjianshan deposit in north of Gansu Province[J]. *World Nonferrous Metals*, (5): 116–117 (in Chinese with English abstract).
- Yuan W H, Gu X X, Zhang Y M, et al. 2020. Properties of Ore-forming Fluids and Genesis of the Xiaoxigong Gold Deposit in the Beishan Region, Gansu Province[J]. *Geoscience*, 34(3): 554 (in Chinese with English abstract).
- Yue Q. 2021. Geological characteristics and prospecting criteria of the Langwashan silver-gold deposit in Gansu Province[J]. *World Nonferrous Metals*, (4): 74–75, 78 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L, Chen H Y, Chen Y J, et al. 2012. Geology and fluid evolution of the Wangfeng orogenic-type gold deposit, Western Tian Shan, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 49: 85–95.
- Zhang Y, Hollings P, Shao Y J, et al. 2020. 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, 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.
- Zhou X W, Li S R, Lu L, et al. 2005. Research on the Composition Typomorphism of Pyrite from Longkeng Gold–Silver Mineralization District in Wuyi, Zhejiang Province, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 24(4): 317–326 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Z Y, Cook N J, Yang T, et al. 2016. Mapping of sulfur isotopes and trace elements in sulfides by LA-(MC)ICP-MS: Potential analytical problems, improvements and implications[J]. *Minerals*, 6(4): 110.
- Zhu Z Y, Jiang S Y, Ciobanu C L, et al. 2017. Sulfur isotope fractionation in pyrite during laser ablation: Implications for laser ablation multiple collector inductively coupled plasma mass spectrometry mapping[J]. *Chemical Geology*, 450: 223–234.

## 附中文参考文献

- 白荣龙, 虎金荣, 赵甫峰, 等. 2022. 甘肃北山造山带双尖山金矿区正长花岗岩锆石U-Pb年龄和Hf同位素特征及地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 41(2): 274–286.
- 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 等. 2004. 黄铁矿微量元素地球化学特征及其对成矿流体性质的指示[J]. *矿物岩石地球化学通报*, (1): 1–4.
- 蔡志慧, 许志琴, 何碧竹, 等. 2012. 东天山-北山造山带中大型韧性剪切带属性及形成演化时限与过程[J]. *岩石学报*, 28(6): 1875–1895.
- 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.
- 曹亮, 许荣科, 陕亮, 等. 2011. 甘肃北山南金山金矿床流体包裹体研究[J]. *地质找矿论丛*, 26(3): 249–254, 327.
- 陈晶晶, 崔艳, 崔凯. 2016. 甘肃省肃北县双尖山金矿地质特征及找矿远景[J]. *世界有色金属*, (20): 56–58.
- 陈世忠, 周济元, 顾连兴, 等. 2000. 新疆哈密马庄山金矿成矿流体成因及金沉淀机制的探讨[J]. *矿床地质*, (3): 193–200.
- 陈衍景, 倪培, 范洪瑞, 等. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. *岩石学报*, 23(9): 2085–2108.
- 第鹏飞, 汤庆艳, 刘东晓, 等. 2023. 西秦岭甘南地区金矿床黄铁矿微量元素地球化学特征及意义——以加甘滩和早子沟金矿为例[J]. *稀*

- 土, 44(4): 140–154.
- 范宏瑞, 李兴辉, 左亚彬, 等. 2018. LA-(MC)-ICPMS 和 (Nano) SIMS 硫化物微量元素和硫同位素原位分析与矿床形成的精细过程[J]. 岩石学报, 34(12): 3479–3496.
- 甘肃省有色地质调查院. 2016. 甘肃省肃北县大红泉东地质图[R].
- 甘肃省有色地质调查院. 2019. 甘肃省肃北县跃进山—双井子地区地质矿产图[R].
- 甘肃省有色地质勘查局天水矿产勘查院. 2016. 甘肃省肃北县狼娃山金矿地形地质图[R].
- 龚全胜, 刘明强, 李海林, 等. 2002. 甘肃北山造山带类型及基本特征[J]. 西北地质, 35(3): 28–34.
- 何世平, 任秉琛, 姚文光, 等. 2002. 甘肃内蒙古北山地区构造单元划分[J]. 西北地质, 35(4): 30–40.
- 黄式庭, 于晓飞, 吕志成, 等. 2020. 甘肃北山老金厂金矿床载金矿物特征、原位硫同位素组成及其对成矿的指示意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 50(5): 1387–1403.
- 江思宏, 聂凤军, 陈伟十, 等. 2006. 北山地区南金山金矿床的 $^{40}\text{Ar}$ – $^{39}\text{Ar}$ 同位素年代学及其流体包裹体特征[J]. 地质论评, 52(2): 266–275.
- 李洪梁, 李光明. 2019. 不同类型热液金矿床主成矿期黄铁矿成分标型特征[J]. 地学前缘, 26(3): 202–210.
- 李雷. 2015. 甘肃北山地区 460 金矿矿床地质及成矿流体研究[D]. 中国地质大学(北京) 硕士学位论文.
- 李新俊, 刘伟. 2002. 东天山马庄山金矿床流体包裹体和同位素地球化学研究及其对矿床成因的制约[J]. 岩石学报, (4): 551–558.
- 刘伟, 潘小菲. 2006. 甘新北山地区南成矿带典型金矿成矿流体特征研究[J]. 岩石学报, 22(1): 171–188.
- 毛光周, 华仁民, 高剑峰, 等. 2006. 江西金山金矿床含金黄铁矿的稀土元素和微量元素特征[J]. 矿床地质, (4): 412–426.
- 毛启贵. 2008. 北山及邻区古生代—早中生代增生与碰撞大地构造格局[D]. 中国科学院地质与地球物理研究所.
- 梅建明. 2000. 浙江遂昌治岭头金矿床黄铁矿的化学成分标型研究[J]. 现代地质, 14(1): 51–55.
- 苗来成, 朱明帅, 张福勤. 2014. 北山地区中生代岩浆活动与成矿构造背景分析[J]. 中国地质, 41(4): 1190–1204.
- 潘小菲, 刘伟. 2010. 甘肃-新疆北山成矿带典型矿床成矿流体研究进展及成矿作用探讨[J]. 地球学报, 31(4): 507–518.
- 陕亮, 郑有业, 许荣科, 等. 2009. 硫同位素示踪与热液成矿作用研究[J]. 地质与资源, 18(3): 197–203.
- 盛继福, 李岩, 范书义. 1999. 大兴安岭中段铜多金属矿床矿物微量元素研究[J]. 矿床地质, 18(2): 153–160.
- 宋学信, 张景凯. 1986. 中国各种成因黄铁矿的微量元素特征[C]//中国地质科学院矿床地质研究所文集(18). 矿床地质研究所.
- 王钏屹, 王琦崧, 疏孙平, 等. 2018. 北山成矿带金窝子金矿床成矿流体时空演化与成矿机制[J]. 地球科学, 43(9): 3126–3140.
- 王怀涛. 2019. 中亚造山带南段北山构造-岩浆作用及其地质意义的研究[D]. 兰州大学博士学位论文.
- 王磊, 杨建国, 王小红, 等. 2015. 甘肃北山营毛沱地区花岗岩类 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(3): 583–591.
- 王琦崧. 2020. 东天山地区马庄山-南金山金矿带岩浆-成矿作用[D]. 中国地质大学(北京) 博士学位论文.
- 肖文交, 舒良树, 高俊, 等. 2008. 中亚造山带大陆动力学过程与成矿作用[J]. 新疆地质, 26(1): 4–8.
- 严育通, 李胜荣, 张娜, 等. 2012. 不同成因类型金矿床成矿期黄铁矿成分成因标型特征[J]. 黄金, (3): 11–16.
- 殷伟旭. 2020. 甘肃肃北双尖山金矿床矿体地质特征[J]. 世界有色金属, (5): 116–117.
- 袁伟恒, 顾雪祥, 章永梅, 等. 2020. 甘肃北山地区小西弓金矿床成矿流体性质及矿床成因[J]. 现代地质, 34(3): 554.
- 岳强. 2021. 甘肃省狼娃山银金矿地质特征及找矿标志[J]. 世界有色金属, (4): 74–75, 78.
- 周学武, 李胜荣, 鲁力, 等. 2005. 浙江弄坑金银矿区黄铁矿成分标型研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 24(4): 317–326.