

# 柴达木盆地北缘赛坝沟地区造山型金矿矿床成因：来自黄铁矿原位微量元素及硫同位素的指示

唐名鹰<sup>1,2</sup>, 丁正江<sup>1\*</sup>, 孙丽莎<sup>2</sup>, 战洪雷<sup>2</sup>, 王欣<sup>2</sup>, 朱伟<sup>2</sup>, 华磊<sup>2</sup>, 辛真<sup>2</sup>, 刘彩杰<sup>1</sup>, 孟云<sup>2</sup>, 张超<sup>2</sup>

1. 深部金矿探测大数据应用开发山东省工程研究中心, 自然资源部深部金矿勘查开采技术创新中心, 山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队, 山东 威海 264200;  
2. 山东省地质矿产勘查开发局第八地质大队, 山东省地矿局有色金属矿找矿与资源评价重点实验室, 山东 日照 276826



**摘要:**赛坝沟地区位于柴达木盆地北缘构造带东段,成矿条件优越,沿区域NNW向韧性剪切带及其次级断裂发育一系列的金矿床。在野外地质调查和矿相学研究的基础上,对区内嘎顺、拓新沟和乌达热乎金矿床主成矿阶段黄铁矿开展了微区原位S同位素和微量元素分析。结果表明,赛坝沟地区金矿床S同位素表现出相对集中的塔式分布特征,各矿床均值为 $-1.55‰\sim 3.93‰$ ,显示地幔硫、花岗岩类硫特征,与柴北缘造山型金矿S同位素组成基本一致;黄铁矿整体富含As、Co、Ni和Se元素,Au、Ag、Cu、Pb、Zn和Bi等元素相对含量较高,Au与As表现出明显的相关性,Au主要以固溶体的形式赋存在黄铁矿晶格间,Cu多以独立的元素替代Fe元素进入到黄铁矿中,矿床形成与岩浆/热液活动相关,成矿流体处于相对还原的环境。通过对赛坝沟地区金矿床控矿构造、蚀变类型、矿物组合、围岩特征以及微量元素地球化学和S同位素综合分析,将该地区金矿床划归为造山型金矿。

**关键词:**微量元素;S同位素;造山型金矿;矿床成因;赛坝沟地区;柴达木盆地北缘

中图分类号: P618.51 文献标志码: A 文章编号: 1005-2518(2026)01-0040-17 DOI: 10.11872/j.issn.1005-2518.2026.01.168  
引用格式: 唐名鹰, 丁正江, 孙丽莎, 等. 柴达木盆地北缘赛坝沟地区造山型金矿矿床成因: 来自黄铁矿原位微量元素及硫同位素的指示[J]. 黄金科学技术, 2026, 34(1): 40-56. TANG Mingying, DING Zhengjiang, SUN Lisha, et al. Genesis of Orogenic Gold Deposit in the Saibagou Area, Northern Margin of Qaidam Basin: Constraints from in Situ Trace Elements and Sulfur Isotopes of Pyrite[J]. Gold Science and Technology, 2026, 34(1): 40-56.

造山型金矿作为世界上重要的金矿类型,多形成于以挤压变形或转换变形为主的增生和碰撞造山带中,约占全球金资源量的30%(Groves et al, 1998; Goldfarb et al, 2005, 2019)。虽然造山型金矿系统在区域和矿田/矿区尺度上存在许多统一的特

征,然而,由于成矿流体和物质来源的不确定性,其成矿模式仍然存在争议。例如,关于成矿流体的来源,现有理论认为进变质过程中的变质脱挥发作用、区域变质作用、不同火成岩中含矿流体的混合以及大气降水的深层循环等均可导致金的富集

收稿日期: 2025-05-19; 修订日期: 2025-09-25

基金项目: 深部金矿探测大数据应用开发山东省工程研究中心开放课题“柴北缘赛坝沟金矿床成矿热液特征及演化”(编号: SDK202205)、国家重点研发计划“滨海地区金矿勘查评价技术与增储示范”(编号: 2023YFC2906900)、山东省重点研发计划(重大科技创新工程)“金属深部协同探测技术装备”(编号: 2023CXGC011001)和泰山学者工程(编号: tstp20240847)联合资助

作者简介: 唐名鹰(1990—),男,湖北荆州人,高级工程师,从事矿产勘查及找矿评价工作。E-mail: tangmingying2024@163.com

\*通信作者: 丁正江(1977—),男,安徽亳州人,研究员,从事区域成矿作用、成矿规律及成矿预测研究工作。E-mail: ytdzhj@126.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

(Nesbitt, 1988; Goldfarb et al, 2015; Li et al, 2015; Xu et al, 2021)。同时,虽然大部分造山型金矿赋存在区域变质带或糜棱岩带中,但成矿与构造或变质时间仍缺乏良好的约束(Goldfarb et al, 2005, 2015; Groves et al, 2020a, 2020b),在众多的造山型金矿中,金矿在成矿时间和空间上与区域长英质岩浆的作用密切相关(Goldfarb et al, 2005; Song et al, 2015),这也导致关于造山型金矿的归属也存在一定的争议。近年来,随着空间分辨率和原位微量分析技术的进步,对石英和黄铁矿中的微量元素进行详细分析成为可能(Deditius et al, 2014; Gao et al, 2022; 曹根深等, 2023)。在造山型、斑岩型、浅成热液型和卡林型等不同类型的金矿床中,金与石英和黄铁矿表现出明显的关联性(Barker et al, 2009; Deditius et al, 2014; 曹根深等, 2023),这也为金矿成矿来源及成矿流体演化研究提供了新方向。

柴达木盆地北缘(简称柴北缘)构造带位于我国秦祁昆造山系中部,柴达木地块、欧龙布鲁克微陆块、中南祁连构造带和西秦岭构造带的交界部位,呈NW-SE向条带状展布,北侧以鱼卡—乌兰断裂与欧龙布鲁克微陆块分界,南侧以柴北缘深断裂为界与柴达木地块毗邻,东侧被哇洪山—温泉断裂切断(张建新等, 2015; Chen et al, 2018),为青海省重要的Au-Pb-Zn-Mn-Cr-Au—煤—白云母—稀有金属—稀土元素等有色金属—贵金属成矿区带(王进寿等, 2022)。区域内地层发育齐全,从新太古代—古元古代的结晶基底(如达肯达坂群、金水口群)到中—新元古代的浅变质沉积盖层,再到显生宙的海相—陆相沉积地层均有出露(王进寿等, 2022)。区内岩浆活动频繁,从新太古代的基性—超基性侵入岩到古生代的花岗岩类(加里东期、华力西期),再到中生代的中酸性火山—侵入岩(燕山期),形成了多期次、多类型的岩浆岩带(宋述光等, 2013; 张建新等, 2015),尤其是华力西期和燕山期的花岗岩与区域内金、铜、钼等内生金属矿床的形成密切相关。区内构造—岩浆活动不仅为矿床的形成提供了成矿物质,还为成矿流体的运移与富集创造了通道和空间,形成了以锡铁山铅锌矿和滩间山金矿等为代表的内生金属矿床(崔艳合等, 2000; 张德全等, 2007a),其中,最发育的是与造山作用相关的金矿床(张德全, 2001, 2007b; 刘嘉等, 2021)。

前人针对柴北缘构造带中金矿床的地质特征、成矿流体和矿床成因等方面开展了系统研究,相关研究多集中于柴北缘构造带西北部滩间山和鱼卡等地区(范贤斌, 2017; 张延军, 2017; 刘嘉等, 2021),关于构造带东段赛坝沟地区的研究则相对较少(唐名鹰等, 2021; Tang et al, 2024),这在一定程度上影响了对区内矿床的认识。现有研究表明,柴北缘东段赛坝沟地区发育的金矿均分布于NWW向韧—脆性剪切带及其次级断裂中,与构造活动密切相关,但与柴北缘滩间山地区和典型造山型金矿床不同的是,除了分布在滩间山群蛇绿混杂岩带(绿片岩带)内的嘎顺、拓新沟和乌达热乎金矿床外,区内典型的赛坝沟金矿床的围岩为早奥陶世英云闪长岩,矿物组合和流体特征除表现出变质来源外,还具有一定的岩浆来源特征,这与典型的造山型金矿存在一定的差异(唐名鹰等, 2021; 王炜晓等, 2022; Tang et al, 2024)。

为此,本次研究在以往赛坝沟地区典型矿床研究的基础上,通过区内同一成矿构造带内不同围岩条件下的金矿床开展系统的地质调查和采样工作,对区内金矿床中广泛分布的黄铁矿开展硫化物的原位微量元素和S同位素分析,试图揭示该地区矿床中元素的赋存状态、成矿物质来源等信息,深化赛坝沟地区金矿床成矿机制认识,分析区内矿床成因,为后续在该地区找矿研究工作提供理论依据。

## 1 区域地质背景

赛坝沟地区地处柴北缘构造带东段[图1(a)],横跨滩间山岩浆弧和柴北缘蛇绿混杂岩2个三级构造单元。区域出露地层主要为寒武—奥陶系滩间山群增生杂岩和蛇绿混杂岩岛弧火山岩岩系,为柴北缘寒武—奥陶纪古洋盆俯冲、增生造山作用产物(曹泊等, 2019),中—晚泥盆世牦牛山组仅在西北侧局部出露,以巨粒和粗粒的砾砂级陆源磨拉石建造为主,局部夹少量英安岩或流纹岩透镜体(夏文静等, 2014)[图1(b)]。区域岩浆岩主要分布在托莫尔日特—黄德拉一带,为柴北缘加里东期俯冲碰撞造山和华力西期陆内岩浆活动侵入作用产物,主要发育有中奥陶世英云闪长岩—花岗闪长岩—闪长岩[(463.2±1.9)Ma],为消减带陆缘弧构造环境

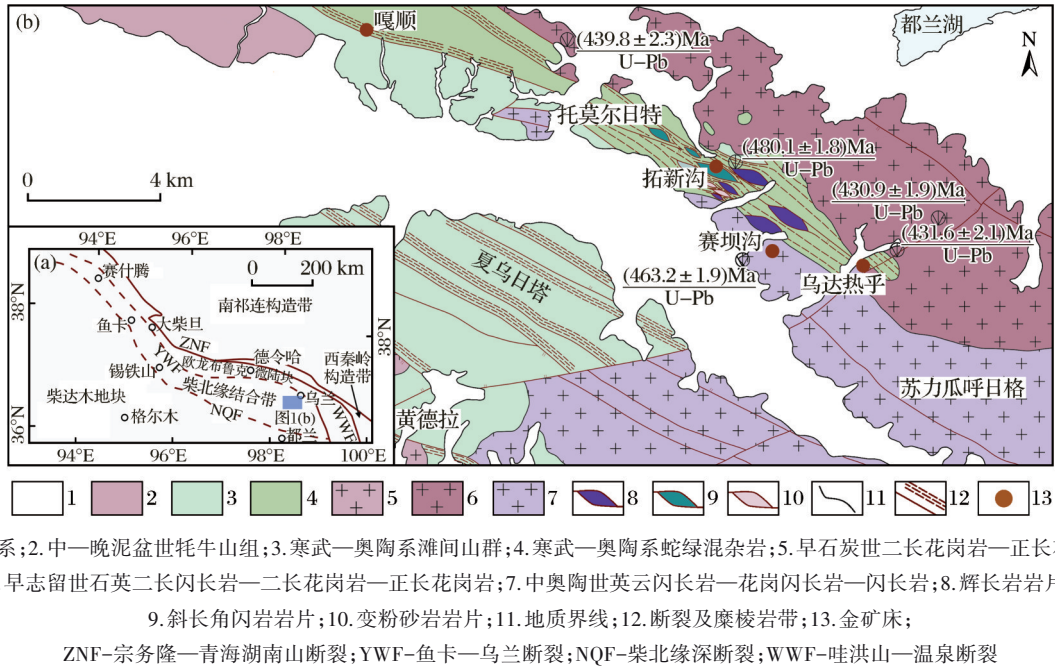


图1 赛坝沟地区区域构造位置(a)和区域地质图(b)(修改自 Tang et al, 2024)

Fig. 1 Regional tectonic location(a) and regional geology map(b) of the Saibagou area(modified after Tang et al, 2024)

产物;早志留世形成石英二长闪长岩—二长花岗岩—正长花岗岩组合[(430.9±1.9)~(439.8±2.3)Ma],为同碰撞岩浆活动产物;早石炭世则形成二长花岗岩—正长花岗岩组合[(345.7±2.7)Ma],为陆内俯冲形成的重熔型造山型花岗岩。此外,区内还发育少量火山岩,主要为寒武—奥陶纪滩间山群岛弧火山岩和蛇绿岩中的基性火山熔岩,以及少量托牛山组陆源火山岩。受晚古生代强烈俯冲—碰撞造山影响,区内形成一系列NNW向紧密排列的左行平移—逆冲—脆性糜棱岩带,后期可见NE向张性断裂发育,区内赛坝沟、拓新沟、乌达热乎和嘎顺等金矿床(点)均发育在该韧性剪切带及其次级断裂中[图1(b)]。

## 2 矿床地质特征

### 2.1 嘎顺金矿床

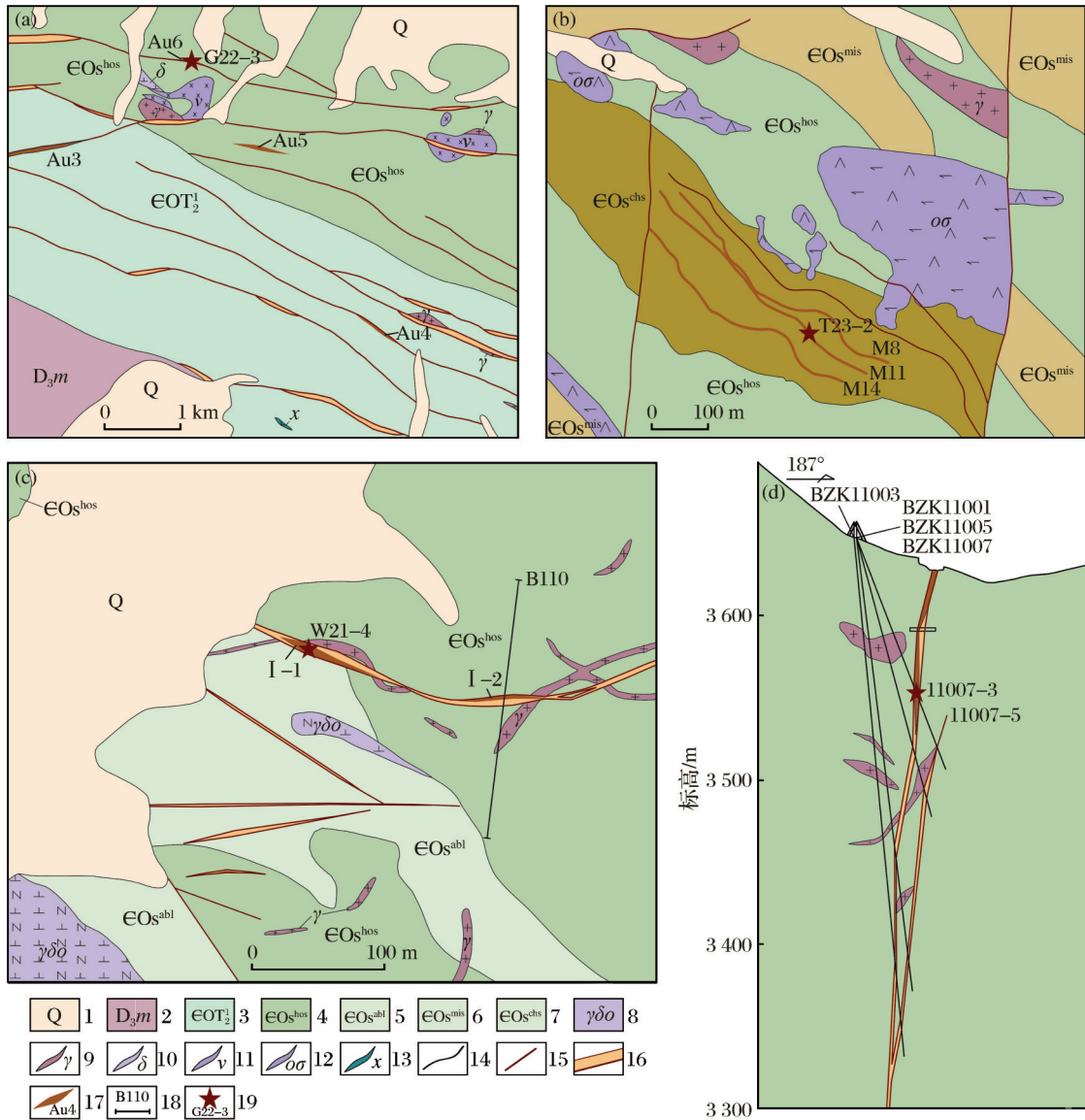
嘎顺金矿床位于赛坝沟地区西北部,区内出露地层较为简单,除了西南侧局部发育晚泥盆统托牛山组灰紫色砾岩—岩屑石英砂岩以及山麓、沟谷地段出露第四系冲洪积物外,主要发育有寒武—奥陶系赛坝沟蛇绿混杂岩斜长角闪岩组和滩间山群变基性火山碎屑岩[图2(a)]。区内断裂十分发育,形

成了横贯矿区的破碎蚀变糜棱岩带,其中以NNW向断裂最为发育,为区内金矿体主要储矿构造,同时发育少量NWW向张性正断层。区内岩浆岩发育较少,仅局部沿断裂发育花岗岩脉、闪长岩脉和辉长岩脉。

矿区共圈定金矿体8条,均为黄铁矿化石英脉,其中主矿体2条,为Au3和Au6矿体,矿体严格受断裂控制,整体呈280°~300°方向展布,局部矿体(Au3)呈SWW向分布,赋矿围岩为赛坝沟蛇绿混杂岩斜长角闪岩组。主矿体地表出露长度大于80m,宽度为0.5~2.0m,金品位为0.70×10<sup>-6</sup>~23.15×10<sup>-6</sup>,平均值为6.32×10<sup>-6</sup>。矿石类型主要为硫化物—石英脉型金矿石[图3(a)],近地表因氧化淋滤,黄铁矿多蚀变为褐铁矿[图3(b)]。原生矿石多呈灰白色,局部黄铁矿脉发育[图3(c)],矿石矿物以黄铁矿为主[图3(d)],脉石矿物主要为石英和方解石等。围岩蚀变主要有硅化、绿泥石化、绿帘石化和绢云母化等,其中硅化、绢云母化与矿化蚀变关系最为密切,局部硅化蚀变较强的岩石含金性明显偏高,绿泥石化和绿帘石化多见于近矿围岩和区域变质。

### 2.2 拓新沟金矿床

拓新沟金矿床位于赛坝沟地区中部偏北,主要



1. 第四系; 2. 牦牛山组; 3. 滩间山群变基性火山碎屑岩; 4. 滩间山群蛇绿岩斜长片岩组; 5. 滩间山群蛇绿岩角闪片岩组; 6. 滩间山群蛇绿岩云母石英片岩组; 7. 滩间山群蛇绿岩绿泥片岩组; 8. 英云闪长岩; 9. 花岗岩脉; 10. 闪长岩脉; 11. 辉长岩脉; 12. 蛇纹石化橄榄岩脉; 13. 煌斑岩脉; 14. 地质界线; 15. 断裂; 16. 构造蚀变带; 17. 金矿体及编号; 18. 地质勘查线; 19. 采样位置及编号

图2 赛坝沟地区嘎顺(a)、拓新沟(b)和乌达热乎(c)金矿床地质图及乌达热乎B110勘查线剖面图(d)

Fig. 2 Geological maps of Gashun (a), Tuoxingou (b) and Wudarehu (c) gold deposits in the Saibagou area and profile of Wudarehu B110 exploration line (d)

出露有寒武—奥陶系赛坝沟蛇绿混杂岩, 包括斜长角闪岩组、云母石英片岩组和绿泥片岩组以及蛇绿岩套中的蛇纹石化橄榄岩[图2(b)]。区内构造主要为 NWW 向密集发育的糜棱岩带和断裂组[图2(b)], 为主要的含矿构造, 同时发育少量近 SN 向的平移断层, 对主要含矿断裂起到了破坏作用。区内岩浆岩发育较少, 仅矿区北部发育少量与主要

控矿构造方向基本一致的花岗岩脉(岩株)。

矿区共圈定矿体 23 条, 矿体严格受断裂控制, 整体呈 300° 产出, 赋矿围岩为赛坝沟蛇绿混杂岩绿泥片岩组。区内主要矿体为 M8、M11 和 M14 矿体, 呈似层状产出, 其余小矿体则多以透镜状产出, 主矿体地表出露长度约为 400 m, 宽度为 0.40~4.90 m, 金品位一般为  $1.00 \times 10^{-6} \sim 24.15 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $5.28 \times 10^{-6}$ 。

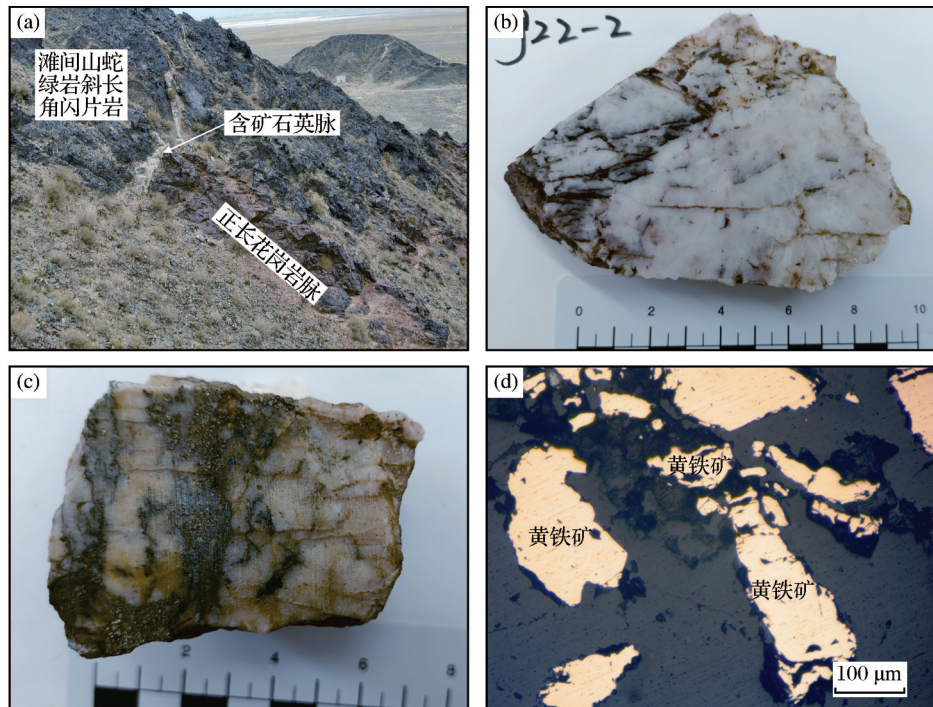


图3 嘎顺金矿床矿体野外产出(a)、矿石类型(b,c)及镜下矿物特征(d)

Fig. 3 Field production of orebody(a), ore types(b,c) and microscopic mineral characteristics(d) of the Gashun gold deposit

拓新沟金矿床矿石类型以含石英脉或硅化绿泥片岩为主[图4(a)和图4(b)],地表多氧化淋滤形成孔洞[图4(b)],矿石多呈浅绿色,矿石矿物以黄铁矿为主,沿黄铁矿外围则多有褐铁矿和钛铁矿等氧化矿物[图4(c)和图4(d)],脉石矿物则多为石英、斜长石、绿泥石和绿帘石等。围岩蚀变主要有硅化、绿泥石化和绿帘石化等,为主要矿化蚀变。

### 2.3 乌达热乎金矿床

乌达热乎金矿床位于赛坝沟地区西部,除西北部大面积出露的第四系冲洪积和风化堆积物之外,主要发育有寒武—奥陶系赛坝沟蛇绿混杂岩斜长角闪岩组和角闪片岩组[图2(c)],受区内南侧英云闪长岩和北侧二长花岗岩侵入的影响,矿区断裂发育较少,主要有近EW向含矿构造,局部发育NW向断裂。区内脉岩多为花岗岩脉。

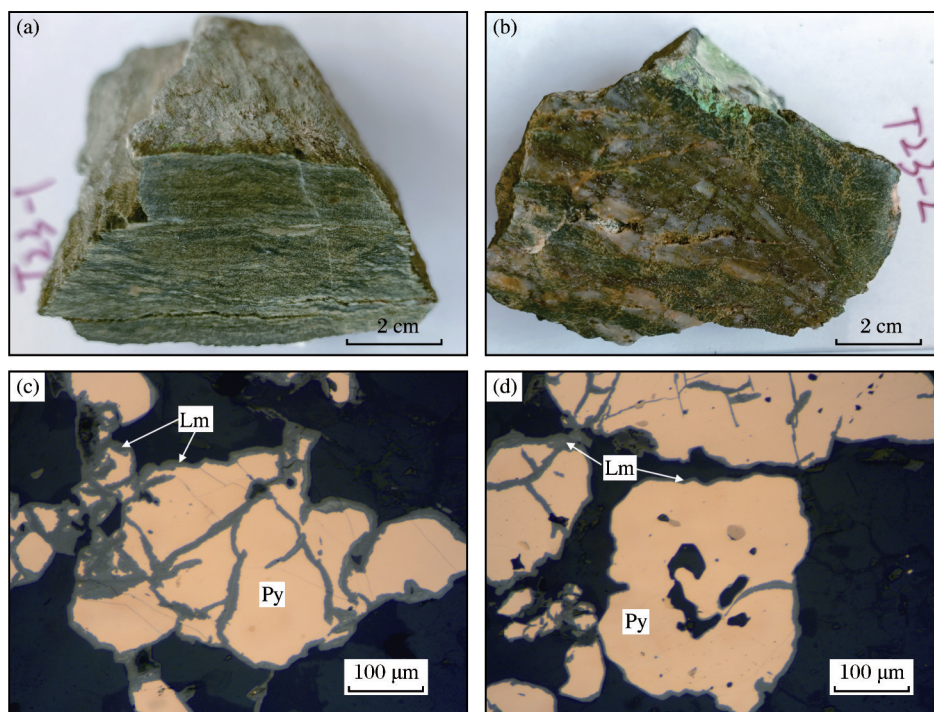
矿区仅发育2条矿体,矿体严格受断裂控制,其中I-1矿体地表走向为 $290^{\circ}$ ,I-2矿体地表走向呈EW向,根据深部工程揭露,该含矿构造内2条矿体深部合并为同一矿体,赋矿围岩为赛坝沟蛇绿混杂岩斜长角闪岩组。矿体整体呈NE向陡立

[图2(d)],矿体产状为 $195^{\circ}\sim 210^{\circ}\angle 70^{\circ}\sim 85^{\circ}$ ,矿体出露长度约为160 m,沿倾向延深长度为60~80 m,矿体平均厚度为1.50 m,平均品位为 $8.96\times 10^{-6}$ 。

矿区含矿岩石地表以黄褐色黄铁绢英岩和石英脉为主[图5(a)],深部矿石则多为黄铁矿化石英脉[图5(b)和图5(c)],矿石矿物以黄铁矿和黄铜矿为主[图5(d)和图5(e)],局部发育少量的蓝铜矿[图5(f)],脉石矿物多为石英、斜长石和绢云母等。矿体顶底板与围岩有0.3~0.5 m的褪色带,围岩蚀变主要有硅化和绢云母化等。

## 3 样品采集及分析方法

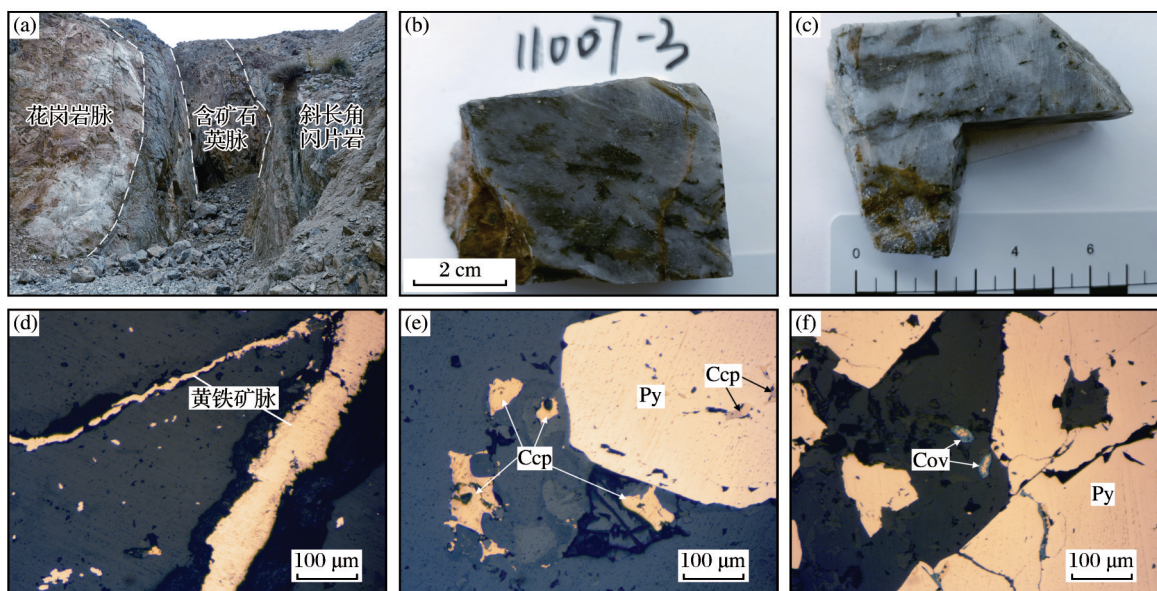
赛坝沟金矿床是区内最大的金矿床,前人针对该矿床成矿期次、成矿物质来源和矿床成因等开展了系统的研究工作(唐名鹰等,2021;Tang et al, 2024),认为该矿床为造山型金矿(Tang et al, 2024)。为探讨赛坝沟地区金矿床成矿物质来源和区域矿床成因机制,本次选取与赛坝沟金矿床处于同一韧—脆性断裂带内的嘎顺、拓新沟和乌达热乎



Py-黄铁矿; Lm-褐铁矿

图4 拓新沟金矿床矿石类型(a、b)及镜下矿物特征(c、d)

Fig. 4 Ore types (a,b) and microscopic mineral characteristics (c,d) of the Tuoxingou gold deposit



Py-黄铁矿; Ccp-黄铜矿; Cov-铜蓝

图5 乌达热乎金矿床矿体野外产出(a)、矿石类型(b、c)及镜下矿物特征(d-f)

Fig. 5 Field production of orebody (a), ore types (b,c) and microscopic mineral characteristics (d-f) of the Wudarehu gold deposit

3个金矿床开展研究工作,在野外地质调查的基础上,对主矿体围岩及矿石进行系统的光薄片鉴定、

样品采集和化学样品的分析测试工作。在光薄片鉴定的基础上,对达到金矿边界品位以上的主成矿

阶段的矿石样品中主要载金矿物黄铁矿开展原位微量分析和原位微区S同位素分析,所测试的黄铁矿均选取未发生蚀变的黄铁矿颗粒,反映了主成矿

阶段黄铁矿的特征,部分晚期细脉状分布的黄铁矿集合体及围岩中浸染状黄铁矿不进行测试分析。样品采集位置及矿石特征见表1。

表1 赛坝沟地区金矿床样品采集位置及矿石特征

Table 1 Sample collection locations and ore characteristics of gold deposits in the Saibagou area

矿床名称	矿体编号	成矿阶段	样品编号	采样位置	矿石特征
嘎顺	Au6	黄铁矿—石英阶段	G22-3	地表矿体	发育黄铁矿化石英脉,黄铁矿多呈脉状分布,局部为浸染状
拓新沟	M11	黄铁矿—石英—硅化绿泥石片岩阶段	T23-2	地表矿体	发育硅化绿泥石片岩,黄铁矿多呈浸染状和团块状分布
乌达热乎	I-2	黄铁矿—石英阶段	11007-3	ZK11007深部矿体	发育黄铁矿化石英脉,黄铁矿多呈团块状和浸染状分布,局部沿裂隙发育细脉状黄铁矿集合体
	I-2	黄铁矿—石英阶段	11007-5	部矿体	
	I-1	黄铁矿—石英阶段	W21-4	地表矿体	

黄铁矿微区原位S同位素分析工作在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行,采用LA-MC-ICP-MS对5件样品中的黄铁矿进行分析,采集了30个数据。质谱仪为英国Nu公司生产的Nu Plasma 1700高分辨率多接收等离子体质谱仪,激光剥蚀系统为澳大利亚ASI公司生产的Resonitics M50-LR准分子激光剥蚀系统。测试使用的激光能量密度为3.6 J/cm<sup>2</sup>,频率为3 Hz,剥蚀斑束为25~37 μm,剥蚀方式为单点剥蚀。数据采集为TRA模式,积分时间为0.2 s,背景采集时间为30 s,样品积分时间为50 s,吹扫时间为75 s。分析采用黄铁矿Py-4标样作为标准参考物质。详细分析方法见文献(Bao et al, 2017; Chen et al, 2017; Yuan et al, 2018)。

黄铁矿微量元素测试分析工作在北京燕都中实测试技术有限公司完成,在镜下探针片鉴定的基础上,采用美国Coherent Inc公司生产的GeoLasPro全自动版193nm ArF准分子激光剥蚀系统和美国Agilent公司生产的7700X型电感耦合等离子质谱仪,利用LA-ICP-MS对5件样品共计45个点进行了分析(其中嘎顺金矿床1件样品测试10个点,拓新沟金矿床1件样品测试15个点,乌达热乎金矿床3件样品测试20个点)。样品总采集时间为80 s,包括15~20 s空白信号、40 s的样品信号和20~25 s的冲洗时间,剥蚀直径为60 μm,具体试验条件见Liu et al(2008)。测试元素包括Fe、Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Sn、Hg、Bi、Sb、Se、Te、As、Co和Ni。元素含量处理采用标准物质(SRM610、SRM612和BCR-2G)进行多外标和单内标校正。数据离线处理采用

ICPMSDataCal 10.7完成。

## 4 分析结果

### 4.1 S同位素特征

本次原位S同位素分析结果见表2。其中,嘎顺金矿床中黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{v-CDT}}$ 值为0.45‰~0.78‰,分布较为集中,平均值为0.55‰,极差为0.33‰(n=5);拓新沟金矿床中黄铁矿均为负值, $\delta^{34}\text{S}_{\text{v-CDT}}$ 值为-1.55‰~-0.36‰,平均值为-0.76‰,极差为1.19‰(n=10);乌达热乎金矿床中黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{v-CDT}}$ 值为0.48‰~3.83‰,平均值为1.67‰,极差为3.35‰(n=17)。整体来看,赛坝沟地区金矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}_{\text{v-CDT}}$ 值明显集中,平均值为-0.76‰~1.67‰(表2),表现出相对较集中的S同位素分布特征。

### 4.2 微量元素特征

本次研究得到的各矿床黄铁矿原位微量元素分析测量结果列于表3。结合前人在赛坝沟金矿床中得到的黄铁矿原位微量元素含量分析结果(Tang et al, 2024)以及本次数据,得到各矿床微量元素含量分析对比箱线图(图6)。

由图6可以看出,除Sn和Hg元素含量均低于检出限之外,其余元素含量大部分在检出限以上,整体富含As、Co、Ni和Se元素,Au、Ag、Cu、Pb、Zn和Bi等元素相对含量较高。从赛坝沟金矿到乌达热乎金矿,再到嘎顺金矿和拓新沟金矿,黄铁矿中Au、Ag、Cu和Pb表现出明显的下降趋势,Se和Co元素则表现出逐步升高的趋势;Zn元素在赛坝沟

表2 赛坝沟地区金矿床S同位素分析结果  
Table 2 Analysis results of sulfur isotope of gold deposits in the Saibagou area

矿床名称	样品编号	矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{v-CDT}}/\text{‰}$	2SE
嘎顺金矿	G22-3-1	黄铁矿	0.45	0.27
	G22-3-2	黄铁矿	0.45	0.25
	G22-3-3	黄铁矿	0.78	0.26
	G22-3-4	黄铁矿	0.49	0.27
	G22-3-5	黄铁矿	0.56	0.24
拓新沟金矿	T23-2-1	黄铁矿	-1.11	0.10
	T23-2-2	黄铁矿	-1.55	0.10
	T23-2-3	黄铁矿	-1.17	0.10
	T23-2-4	黄铁矿	-1.09	0.09
	T23-2-5	黄铁矿	-0.42	0.11
	T23-2-6	黄铁矿	-0.41	0.10
	T23-2-7	黄铁矿	-0.36	0.11
	T23-2-8	黄铁矿	-0.41	0.10
	T23-2-9	黄铁矿	-0.70	0.10
	T23-2-10	黄铁矿	-0.40	0.10
乌达热乎金矿	11007-3-1	黄铁矿	1.73	0.24
	11007-3-2	黄铁矿	1.50	0.26
	11007-3-3	黄铁矿	0.61	0.29
	11007-3-4	黄铁矿	0.48	0.29
	11007-3-5	黄铁矿	0.77	0.26
	11007-5-1	黄铁矿	0.62	0.26
	11007-5-2	黄铁矿	1.49	0.26
	11007-5-3	黄铁矿	2.17	0.25
	11007-5-4	黄铁矿	1.03	0.29
	11007-5-5	黄铁矿	1.68	0.28
W21-4-1	W21-4-1	黄铁矿	2.01	0.31
	W21-4-2	黄铁矿	3.83	0.30
	W21-4-3	黄铁矿	2.36	0.28
	W21-4-4	黄铁矿	2.23	0.31
	W21-4-5	黄铁矿	2.49	0.25

金矿中含量最高(平均值为 $12.82 \times 10^{-6}$ ),Sb元素在乌达热乎金矿中含量最高(平均值为 $0.99 \times 10^{-6}$ ),Bi元素在拓新沟金矿中含量最低(平均值为 $0.02 \times 10^{-6}$ ),上述元素在其余各矿床中基本一致;Te元素在各矿床中含量相对较稳定,基本位于 $0.1 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-6}$ ;As元素含量在赛坝沟金矿和乌达热乎金矿中表现了相对明显的平均值高值和大跨度的元素含量区间分布,而嘎顺和拓新沟金矿床中则相对集中,拓新沟金矿As元素含量平均值较高;Co和Ni元素平均含量基本在 $10 \times 10^{-6}$ 以上,其中赛坝沟金矿Ni平均含量为 $1 \times 10^{-6}$ ,嘎顺金矿床中Co和Ni含

量最高,乌达热乎金矿床Co和Ni含量相当。相对应的Co/Ni元素比值如下:赛坝沟金矿为5.55~190.07,平均值为35.57;乌达热乎金矿为0.01~10.65,平均值为3.75;嘎顺金矿为0.38~3.27,平均值为1.18;拓新沟金矿为3.05~213.20,平均值为54.72。

## 5 讨论

### 5.1 成矿物质来源

自然界中的硫广泛分布于地球的各个圈层,不同的含硫化合物中硫的价态和化学键强弱的不同,会产生明显的S同位素分馏效应,导致各类物质S同位素的组成不一致(Ohmoto, 1979)。一般而言,自然界矿床中的硫可大致划分为3个来源,分别为地幔硫或岩浆硫、地层硫和混合硫。其中,地幔硫一般在零值附近呈塔式分布,陨石和大洋中脊玄武岩等偏基性—超基性岩石为接近0的正值,花岗岩类岩石S同位素为 $-13\text{‰} \sim 27\text{‰}$ 分布,集中分布在 $-3\text{‰} \sim 5\text{‰}$ 之间;地层硫根据其类型的不同,S同位素分布也表现出不同的规律,生物成因硫化物S同位素多为负值且变化范围较大,海水硫酸盐等形成的硫化物则表现为明显偏大的正值;混合硫中S同位素的分布多与岩浆混合的物质有关(Ohmoto, 1979)。整体来看,矿床中硫化物S同位素的组成基本反映了成矿物质的来源。

为探究赛坝沟地区成矿物质来源,在收集以往矿区S同位素分析数据的基础上,结合本次分析数据(表4),对赛坝沟地区金矿床S同位素组成进行了讨论。整体来看,赛坝沟地区金矿床表现出相对集中的S同位素分布,呈现为塔式分布特征[图7(a)],硫值为 $-1.55\text{‰} \sim 3.93\text{‰}$ ,位于地幔硫和花岗岩类S同位素组成范围内[图7(b)]。除拓新沟金矿床表现为明显的负值分布之外,其余各矿床均为0以上的正值,拓新沟金矿黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{v-CDT}}$ 值为 $-1.55 \sim -0.36$ ,平均值为 $-0.76$ ,嘎顺、乌达热乎和赛坝沟金矿均表现出较为集中的S同位素分布( $0.45\text{‰} \sim 3.93\text{‰}$ ),表明其成矿物质来源相对单一(Song et al, 2019; Tang et al, 2024)。在前述研究中,赛坝沟地区金矿床均分布于区内韧—脆性剪切带内,矿体分布严格受剪切带的控制,只是矿床所处的围岩条件不同。上述矿床中不同的S同位素分布特征,可能与围岩条件

表3 赛坝沟地区金矿床黄铁矿原位微量元素含量

Table 3 In situ trace elements content of pyrite of gold deposits in the Saibagou area ( $\times 10^{-6}$ )

矿床名称	测点编号	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Sn	Hg	Bi	Sb	Se	Te	As	Co	Ni
乌达热手 金矿	11007-5-1	0.24	2.93	8.23	8.78	0.47	0.09	0.14	0.06	9.32	23.0	2.38	193	123	165
	11007-5-2	0.03	0.00	0.18	0.17	0.40	0.08	0.12	0.07	0.05	17.0	0.15	918	545	103
	11007-5-3	0.48	0.10	2.06	2.47	0.43	0.14	0.22	3.50	0.46	9.46	2.67	759	466	65.0
	11007-5-4	0.07	0.06	0.26	0.26	0.44	0.12	0.17	0.76	0.15	7.74	0.15	1 629	1 116	110
	11007-5-5	0.18	0.04	0.57	1.05	0.34	0.28	0.23	1.18	0.72	10.0	0.57	1 662	1 097	103
	11007-5-6	0.06	0.01	3.46	9.56	0.43	0.15	0.23	1.51	1.14	11.0	0.35	1 517	1 070	106
	11007-5-7	0.04	0.01	1.03	5.13	0.42	0.10	0.13	0.25	0.84	24.0	0.11	1 878	3.16	585
	11007-5-8	0.05	0.04	1.87	3.18	0.44	0.09	0.18	0.64	0.95	9.34	0.19	984	448	102
	11007-5-9	0.02	0.01	0.24	0.15	0.34	0.10	0.19	0.01	0.15	7.28	0.06	1 433	830	100
	11007-5-10	0.09	0.02	0.72	1.04	0.62	0.11	0.20	0.69	0.14	7.09	0.28	1 138	253	158
	W21-4-1	0.02	0.07	0.43	0.27	0.52	0.05	0.35	0.23	0.19	3.65	0.27	2 592	807	785
	W21-4-2	0.42	0.04	0.77	2.07	0.63	0.11	0.33	0.20	0.50	3.20	0.36	1 616	785	438
	W21-4-3	11.0	0.44	365	14.0	1.20	0.13	0.37	0.29	19.0	2.99	0.69	22 934	250	563
	W21-4-4	0.02	0.01	0.14	0.01	0.54	0.12	0.35	0.02	0.02	5.61	0.06	469	491	499
	W21-4-5	0.03	0.01	0.17	0.02	0.64	0.09	0.34	0.09	0.03	5.11	0.10	534	458	313
	W21-4-6	0.17	0.66	24.0	2.66	2.88	0.87	1.99	1.00	0.98	9.16	1.00	626	812	452
	W21-4-7	0.43	1.64	166	3.51	9.79	0.48	0.75	3.04	1.65	20.0	1.30	2 035	733	463
	W21-4-8	0.08	0.54	11.0	1.06	1.21	0.96	1.09	0.81	0.85	7.18	0.49	800	631	199
	W21-4-9	0.06	0.18	3.66	1.30	0.43	0.10	0.19	0.41	0.28	3.47	0.14	483	585	231
	W21-4-10	0.14	0.26	10.0	1.06	8.15	0.15	0.47	0.79	0.38	5.44	0.37	1 046	551	294
嘎顺金矿	G22-3-1	0.01	-	0.20	0.04	0.39	0.12	0.17	0.05	0.03	180	0.44	3.12	950	1 680
	G22-3-2	0.02	0.01	0.11	0.01	0.43	0.17	0.21	6.03	0.02	160	4.82	3.42	1 128	719
	G22-3-3	0.01	0.01	0.07	0.01	0.41	0.16	0.21	0.04	0.02	152	0.98	9.44	1 312	3 383
	G22-3-4	0.11	0.12	40.0	0.38	0.54	0.14	0.16	17.0	0.12	171	5.96	8.74	2 466	1 954
	G22-3-5	0.01	0.55	0.34	0.18	0.37	0.08	0.09	0.23	0.02	154	0.38	3.18	1 272	1 773
	G22-3-6	0.02	-	0.07	-	0.52	0.11	0.23	0.05	0.02	175	1.03	4.67	3 346	1 880
	G22-3-7	0.10	0.39	1.56	7.31	0.75	0.09	0.13	28.0	0.84	188	9.34	286	2 722	4 131
	G22-3-8	0.06	0.14	2.24	0.86	0.60	0.16	0.22	9.38	0.19	179	3.26	22.0	2 460	3 607
	G22-3-9	0.02	-	0.06	0.01	0.42	0.13	0.22	0.38	0.02	213	1.75	4.99	1 929	2 173
	G22-3-10	0.03	0.03	1.85	0.59	0.50	0.13	0.24	5.92	0.14	171	2.48	15.0	4 155	1 271
拓新沟金矿	T23-2-1	0.01	0.02	0.22	0.19	0.33	0.15	0.15	0.15	0.02	74.5	1.06	74.9	3 435	29.8
	T23-2-2	0.04	-	0.84	0.38	1.00	0.19	0.16	0.04	0.03	274	1.18	224	1 450	114
	T23-2-3	-	-	-	0.01	1.01	-	0.13	-	0.03	231	0.08	206	1 042	342
	T23-2-4	-	0.04	0.07	0.03	1.26	-	0.22	-	0.04	156	0.35	188	1 590	111
	T23-2-5	0.01	0.01	-	0.01	1.01	0.16	0.20	-	0.01	186	0.03	210	1 987	73.5
	T23-2-7	0.01	-	0.35	0.15	1.35	-	0.22	0.03	0.05	143	0.40	197	1 552	59.0
	T23-2-8	-	0.04	-	0.01	0.90	-	0.19	-	0.04	218	0.20	183	1 848	70.5
	T23-2-9	0.02	0.02	5.91	1.00	0.75	0.18	0.14	0.11	0.03	119	1.47	444	3 618	27.8
	T23-2-12	-	-	1.16	0.33	0.08	0.12	0.33	0.02	-	178	0.95	306	2 923	70.6
	T23-2-14	-	-	-	0.07	0.44	-	0.37	0.02	0.01	134	0.35	258	2 140	204
	T23-2-15	0.09	0.04	1.79	0.49	1.05	-	0.31	0.05	-	124	0.81	453	3 691	44.3
	T23-2-17	0.02	0.02	1.15	0.32	0.61	-	0.30	0.04	0.05	138	0.79	209	2 257	62.7
	T23-2-18	-	-	0.56	0.15	1.16	0.25	0.23	0.02	0.02	144	0.41	296	2 908	44.9
	T23-2-19	-	-	0.51	0.37	1.13	-	0.31	0.04	0.05	71.6	0.45	320	3 009	14.1
	T23-2-20	-	0.01	1.24	0.15	0.58	-	0.24	-	0.02	92.6	0.09	240	1 526	93.4

注：“-”表示数值低于0.01

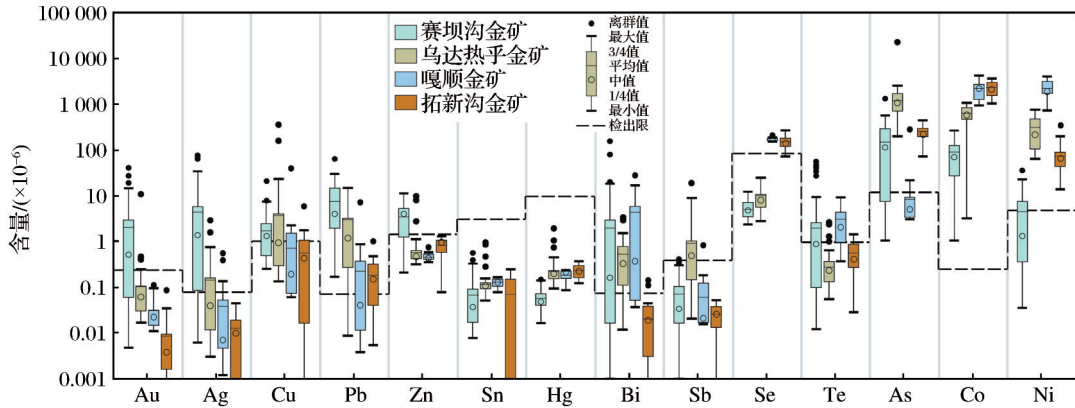


图6 赛坝沟地区金矿床黄铁矿微量元素含量对比箱线图(赛坝沟金矿数据来自 Tang et al, 2024)

Fig. 6 Boxplot comparison of trace elements content in pyrite of gold deposits in the Saibagou area (the data of Saibagou gold deposit from Tang et al, 2024)

表4 赛坝沟地区金矿床S同位素组成综合分析  
Table 4 Comprehensive analysis of sulfur isotope composition of gold deposits in the Saibagou area

矿床名称	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{v-CDT}}/\text{‰}$		资料来源
		变化范围(样品数)	平均值	
嘎顺金矿	黄铁矿	0.45~0.78(n=5)	0.55	本文
	黄铁矿	1.60~1.90(n=2)	1.75	张拴宏等, 2001
拓新沟金矿	黄铁矿	-1.55~-0.36(n=10)	-0.76	本文
乌达热乎金矿	黄铁矿	0.48~3.83(n=15)	1.67	本文
	黄铁矿	1.30~3.40(n=2)	2.35	张拴宏等, 2001
赛坝沟金矿	黄铁矿	2.32~3.93(n=6)	2.77	唐名鹰等, 2021
	黄铁矿	0.50(n=1)		张拴宏等, 2001

和构造岩浆活动相关。在各矿床的野外调查中,赛坝沟、嘎顺和乌达热乎等金矿床主成矿阶段矿石类型

均为石英脉型矿石,而拓新沟金矿床为硅化绿泥石片岩。一般而言,火山岩地层中硫化物/硫酸盐均具负值特征,因此,拓新沟金矿床中S同位素的负值分布与成矿流体和滩间山蛇绿混杂岩中火山岩地层的水岩反应相关,围岩地层中的硫化物/硫酸盐的还原导致了黄铁矿中S同位素数值的降低(Cooke et al, 2000),而其余3个矿床由于围岩(英云闪长岩和角闪斜长角闪片岩)相对不容易发生水岩反应和物质交换,使得其S同位素数值更多地反映原始成矿流体的特征,表现出相对集中的数值分布。

在柴达木盆地北缘构造带内,滩间山地区造山型金矿床S同位素组成范围为0.5‰~11.0‰(刘嘉等, 2021)。赛坝沟地区金矿床中除拓新沟金矿床

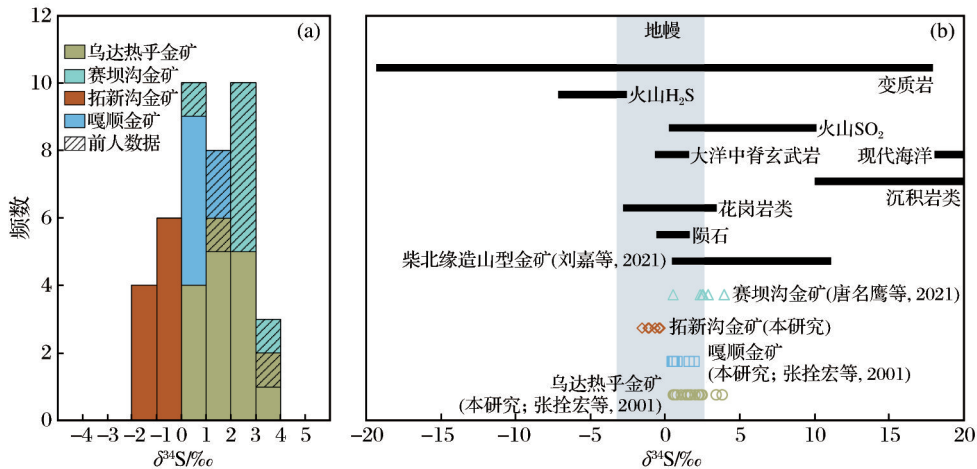


图7 赛坝沟地区金矿床S同位素直方图(a)及硫值对比图(b)(底图据 Hofes, 2009)

Fig. 7 Sulfur isotope histogram (a) and sulfur value comparison chart (b) of gold deposits in the Saibagou area (base map according to Hofes, 2009)

之外,其余各矿床S同位素分布与柴北缘造山型金矿床S同位素组成范围基本一致,但显示了较小的同位素值的分布,暗示着该地区矿床成因与柴北缘滩间山地区金矿床一致,其成矿物质来源于深源。

5.2 黄铁矿地球化学对形成环境指示作用

黄铁矿作为岩浆—热液系统中常见的产物和主要的载金矿物,含有大量的微量元素,如Au、As、Pb、Cu和Te等(Large et al, 2009; Voute et al, 2019)。在黄铁矿中,微量元素主要以固溶体、纳米颗粒和可见包裹体等3种形式赋存于其中(Cook et al, 2009; George et al, 2018; Steadman et al, 2021)。

通过对赛坝沟地区金矿床中黄铁矿微量元素的相关性热图(图8)进行分析可知,嘎顺金矿床各微量元素间多表现为正相关关系,其中Au与Cu、Zn、Bi、Te具有明显的正相关关系,与Pb、Sb、As具有较好的正相关关系,Pb、Zn、Bi、Sb、Sb、Te、As元素之间具有明显的正相关关系;拓新沟金矿床中,各元素间相关性较弱,除Cu、As元素外,Au与其他各元素均无明显的相关性,Cu、Pb、Te、As、Co和Bi元素间具有较好的相关性;乌达热乎金矿床中,Au与As、Cu、Sb具有极好的正相关关系(0.98),同时,Cu与Zn、Bi、Sb、Pb和Sb以及Sn和Hg之间具有较

好的正相关关系。整体来看,赛坝沟地区金矿床中,主要成矿元素Au与As、Cu具有较好的相关性,其余各元素中如Ag、As、Sb和Bi以及Co、Ni等元素间仅部分元素具有一定的相关性,因此,后续针对上述元素开展讨论,以探讨不同矿床的流体性质和成因机制。在各矿床中,Au与As具有明显的相关性,这与Au和As取代黄铁矿中的S进入黄铁矿密切相关,在Au-As图解[图9(a)]中,除赛坝沟金矿有少量投点位于Au溶解度饱和曲线之上外,其余各矿床投点均位于饱和曲线以下,说明赛坝沟地区金矿床中Au主要以Au-As的络合物形式存在,最终以固溶体的形式存在于黄铁矿晶格间。同时,在黄铁矿Cu-Au图解[图9(b)]中,除赛坝沟金矿之外,其余各矿床均分布于Au<sup>3+</sup>+Cu<sup>+</sup>↔2Fe<sup>2+</sup>分布线之上,说明该地区金矿床中Cu多以独立的元素替代Fe元素进入到黄铁矿中,成矿流体处于相对还原的环境,这与造山型金矿特征基本一致(Voute et al, 2019; 曹根深等, 2023)。赛坝沟金矿Au-As图解和Cu-Au图解中反映的投点位于Au溶解度饱和曲线以及Au:Cu比值在1:1左右的现象,与该矿床中自然金的发育以及金矿形成时相对开放的成矿环境相关(Tang et al, 2024)。

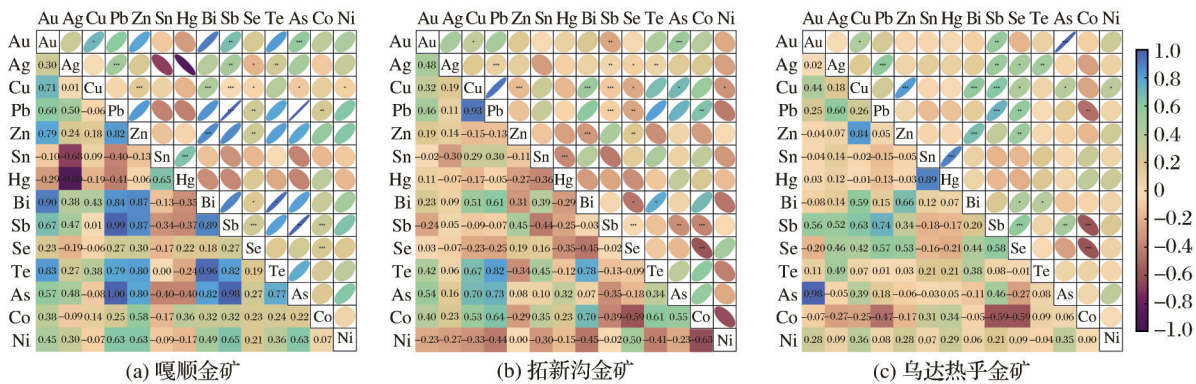


图8 赛坝沟地区金矿床黄铁矿微量元素相关性热图

Fig. 8 Correlation heat maps of trace elements of pyrite of gold deposits in the Saibagou area

矿床中黄铁矿Co和Ni元素的含量数值和Co/Ni比值通常可用于识别黄铁矿的来源(Bajwah et al, 1987; Hou et al, 2016),一般而言,同生/成岩黄铁矿中的Co/Ni比值多小于1(Koglin et al, 2010; Zhang et al, 2014; George et al, 2018),岩浆—热液成因黄铁矿的Co/Ni比值变化较大,主要以Co/Ni比值大于1为

特征(Tardani et al, 2017; Román et al, 2019)。本次研究的赛坝沟地区金矿床除嘎顺金矿床少量点位Co/Ni比值小于1以外,其余各矿床的比值基本在1以上。在黄铁矿Co-Ni判别图[图10(a)]中,嘎顺金矿床投点多落入热液成因区域,乌达热乎金矿床投点多落入岩浆成因区域,拓新沟金矿床投点位于

火山成因范围及周边,赛坝沟金矿床大部分投点位于上述成因区域之外,少部分表现出岩浆—火山成因。在As/Ag-Sb/Bi判别图解[图10(b)]中,除少量

投点位于成岩黄铁矿分布区域外,乌达热乎和拓新沟金矿基本落入热液成因区域,嘎顺和赛坝沟金矿则多位于岩浆成因区域。

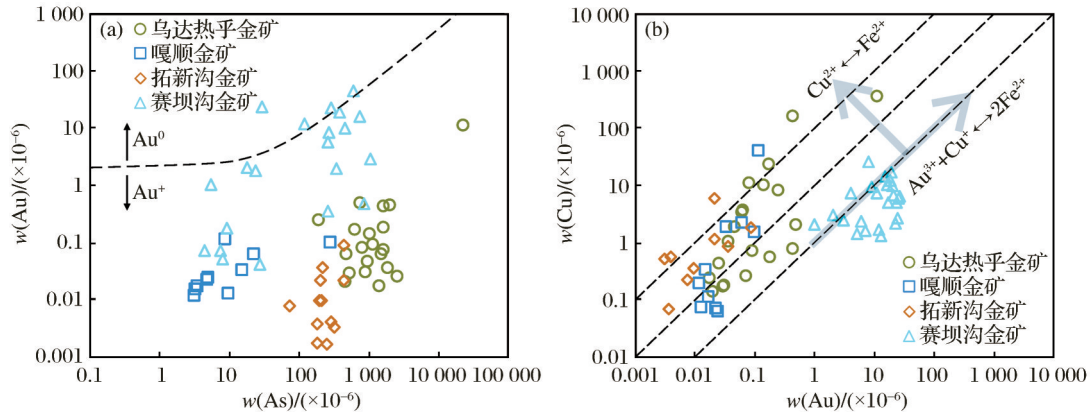


图9 赛坝沟地区金矿床 Au-As(a)和 Cu-Au(b)判别图解

Fig. 9 Discriminant diagrams of Au-As (a) and Cu-Au (b) of gold deposits in the Saibagou area

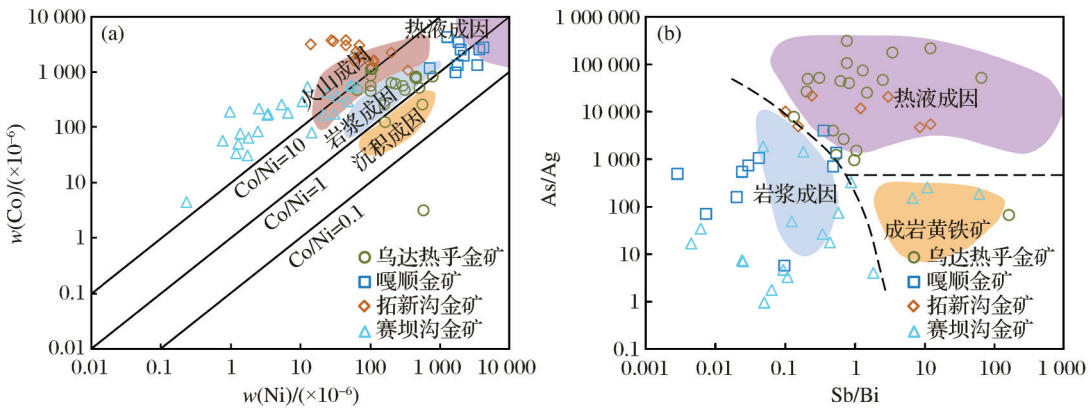


图10 赛坝沟地区金矿床 Co-Ni(a)和 As/Ag-Sb/Bi(b)判别图解

Fig. 10 Discriminant diagrams of Co-Ni (a) and As/Ag-Sb/Bi (b) of gold deposits in the Saibagou area

黄铁矿的微量元素分析显示区内矿床均与岩浆/热液相关,除拓新沟金矿床表现为明显的火山热液性质之外,其余各矿床均表现出一定的岩浆热液特征,整体表现出混合热液性质,这与前期赛坝沟金矿床成矿流体研究结果一致(Tang et al, 2024),说明除原始的变质流体外,岩浆的热液作用或与围岩的水岩反应是该混合流体形成的主要因素(宋学信等,1986)。而拓新沟金矿床围岩为赛坝沟蛇绿混杂岩绿泥片岩组,形成的矿石为硅化的绿泥片岩,可能更多地反映了围岩变质流体的特征,这也是该矿床与赛坝沟地区其他金矿床流体性质表现出差异的原因。

### 5.3 矿床成因

前述对赛坝沟地区金矿床S同位素和黄铁矿微量元素分析显示,赛坝沟地区金矿床成矿物质来源与花岗岩类和柴北缘造山型金矿分布范围一致,均来源于深源岩浆。虽然在元素的判别图解中,赛坝沟地区金矿床中大部分表现出岩浆热液的性质,但整体应以变质热液流体或混合流体为主。同时,在黄铁矿的主微量元素分布中,除乌达热乎金矿床中As出现一个高值点外(22 934×10<sup>-6</sup>),其余各金矿床中As含量均小于2 592×10<sup>-6</sup>,这也暗示矿床的变质热液/浅成低温热液特征(李洪梁等,2019)。

对赛坝沟地区各矿床地质特征(表5)的研究表明,矿床均赋存于NWW向韧性剪切带和两侧的次

表5 赛坝沟地区金矿床与典型造山型金矿床特征对比

Table 5 Comparison of characteristics between gold deposits in the Saibagou area and typical orogenic gold deposits

矿床特征	嘎顺金矿	拓新沟金矿	乌达热乎金矿	赛坝沟金矿	柴北缘造山型金矿	典型造山型金矿床
赋矿围岩	赛坝沟蛇绿混杂岩斜长角闪岩组	赛坝沟蛇绿混杂岩绿泥片岩组	赛坝沟蛇绿混杂岩斜长角闪岩组	破碎英云闪长岩体	中元古界、寒武系和奥陶系变质岩发育的剪切带	绿岩带、浊积岩等
围岩变质程度	绿片岩相	绿片岩相	绿片岩相	无	无蚀变—绿片岩相	次绿片岩相到麻粒岩相
控矿构造	脆—韧性剪切带次级构造	脆—韧性剪切带次级构造	脆—韧性剪切带次级构造	脆—韧性剪切带次级构造	脆—韧性剪切带次级构造	脆—韧性剪切带次级构造
矿体形态	脉状、透镜状	脉状、透镜状	脉状、透镜状	脉状、透镜状	细脉状—浸染状	脉状、纹层状
蚀变类型	硅化、绢英岩化	硅化、绿泥石化和绿帘石化	硅化、绢英岩化	硅化、黄铁绢英岩化、硫化、碳酸盐化	硅化、黄铁绢英岩化、绿泥石化、碳酸盐化	钾化、绢英岩化、硫化及碳酸盐化
矿物组合	黄铁矿、黄铜矿等和石英、绢云母、方解石等非金属矿物	黄铁矿、黄铜矿等和石英、方解石、绿泥石、绿帘石等非金属矿物	黄铁矿、黄铜矿等和石英、绢云母、方解石等非金属矿物	自然金、黄铁矿、黄铜矿、碲金银矿、碲铅矿、方铅矿、闪锌矿等和石英、绢云母、方解石等非金属矿物	自然金、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、磁铁矿和石英、绢云母、方解石、绿帘石、绿泥石等非金属矿物	自然金、黄铁矿和毒砂,少量黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等贱金属矿物以及石英、绢云母、方解石等非金属矿物
成矿元素组合	Au-Cu-Zn-Bi-Te	Au-As	Au-As-Cu-Zn-Bi-Sb	Au-Ag-As-Te-Cu-Pb-Zn-Bi	Au-As	Au-Ag-As-Bi-Sb-Te-W
黄铁矿微量元素特征	Sb含量最高,Co、Ni含量最高,Au与Cu、Zn、Bi、Te呈现明显的正相关关系	As含量相对较高,Au和As呈现正相关,Cu、Pb、Te、As、Co、Bi元素间呈现较好的相关性	As含量最高,Au和As呈现极好的正相关关系,Cu和Zn、Bi、Sb、Pb、Sb呈现较好的正相关关系	As含量最高,Au和Ag、Cu、Pb、Zn、Te等元素含量呈现正相关关系		As含量最高,Au和As、Bi、Te、Sb呈现正相关关系
流体性质	还原性	还原性	还原性	中低温、还原性、低盐度(156~345℃,水盐-CO <sub>2</sub> 体系,0.18%~10.24%NaCleqv)	中低温、还原性、低盐度(220~400℃,水盐-CO <sub>2</sub> -CH <sub>4</sub> 体系,1.20%~14.25%NaCleqv)	温度变化较大、还原性、低盐度(220~450℃,富CO <sub>2</sub> 、水盐-CH <sub>4</sub> -N <sub>2</sub> 体系,<10%NaCleqv)
成矿作用深度				0.96~3.43 km		2~20 km
流体来源	变质流体+岩浆流体	变质热液/浅成低温热液流体	变质流体+岩浆流体	变质流体为主,含少量岩浆流体+大气降水	变质流体为主,受到岩浆水及大气水的共同作用	变质流体为主
S同位素组成	0.45‰~0.78‰	-1.55‰~-0.36‰	0.48‰~3.83‰	0.50‰~3.93‰	0.50‰~11.00‰	5‰~12‰
物质来源	岩浆源	地层源+岩浆源	岩浆源	岩浆源	地层源±岩浆源	地层源±岩浆源
构造背景	大陆边缘俯冲增生造山	大陆边缘俯冲增生造山	大陆边缘俯冲增生造山	大陆边缘俯冲增生造山	大陆边缘俯冲增生造山+碰撞后伸展地壳减薄	大陆边缘俯冲增生造山/陆陆碰撞造山
资料来源	本文	本文	本文	Tang et al, 2024	刘嘉等, 2021	Groves et al, 1998; Goldfarb et al, 2015; 曹根深等, 2023

注:柴北缘造山型金矿包括滩间山、青龙沟和鱼卡金矿等;典型造山型金矿床包括Kalgoorlie、Val-d'Or、Ashanti和Mother lode金矿床等

级断裂中,围岩以赛坝沟蛇绿混杂岩斜长角闪岩组和绿泥片岩组为主,矿物组合和围岩蚀变特征与典

型的造山型金矿地质特征相吻合(Groves et al, 1998; Goldfarb et al, 2015)。同时,前人在对赛坝沟金矿

进行典型矿床研究时,通过流体包裹体、稳定同位素和黄铁矿微量元素分析认为,赛坝沟金矿床在赋矿围岩(英云闪长岩)上虽与典型造山带金矿床存在一定差异,但在控矿构造、蚀变类型、矿物组合、流体来源和围岩蚀变等方面与典型造山带金矿一致,并将其归为造山带型金矿(Tang et al, 2024)。通过本次研究对各矿床的微量元素地球化学和S同位素分析可知,虽然部分矿床表现出一定的岩浆热液特征,但整体上该地区的金矿床与典型的造山型金矿特征相类似(表5),因此,本研究认为该地区矿床均属造山型金矿。

## 6 结论

(1)赛坝沟地区金矿床S同位素表现出相对集中的塔式分布特征,各矿床均值为 $-1.55‰\sim 3.93‰$ ,位于地幔硫、花岗岩类S同位素组成范围内,同时与柴北缘造山型金矿S同位素组成基本一致,暗示着该地区矿床成因与柴北缘滩间山地区造山型金矿床相一致,其成矿物质来源于深源。

(2)黄铁矿微量元素特征表明,赛坝沟地区金矿床整体富含As、Co、Ni和Se元素,Au、Ag、Cu、Pb、Zn和Bi等元素相对含量较高,Au与As具有明显的相关性,Au主要以固溶体的形式赋存在黄铁矿晶格间,Cu多以独立的元素替代Fe元素进入到黄铁矿中,成矿流体处于相对还原的环境。黄铁矿微量元素分析显示赛坝沟地区金矿床均与岩浆/热液活动相关。

(3)通过对赛坝沟地区金矿床控矿构造、蚀变类型、矿物组合、围岩特征、微量元素地球化学和S同位素进行综合分析,将该地区金矿床划归为造山型金矿。

### 参考文献(References):

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): 292-300.

Bao Z A, Chen L, Zong C L, et al, 2017. Development of pressed sulfide powder tablets for in situ sulfur and lead isotope measurement using LA-MC-ICP-MS [J]. *International*

*Journal of Mass Spectrometry*, 421: 255-262.

Barker S L L, Hickey K A, Cline J S, et al, 2009. Uncloning invisible gold: use of nanosims to evaluate gold, trace elements, and sulfur isotopes in pyrite from carlin-type gold deposits [J]. *Economic Geology*, 104(7): 897-904.

Chen L, Chen K Y, Bao Z A, et al, 2017. Preparation of standards for in situ sulfur isotope measurement in sulfides using femtosecond laser ablation MC-ICP-MS [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 32(1): 107-116.

Chen X, Xu R K, Schertl H P, et al, 2018. Eclogite-facies metamorphism in impure marble from north Qaidam orogenic belt: geodynamic implications for Early Paleozoic continental-arc collision [J]. *Lithos*, 310: 201-224.

Cook N J, Ciobanu C L, Mao J W, 2009. Textural control on gold distribution in As-free pyrite from the Dongping, Huangtuliang and Hougou gold deposits, North China Craton (Hebei Province, China) [J]. *Chemical Geology*, 264 (1/2/3/4): 101-121.

Cooke D R, Bull S W, Large R R, et al, 2000. The importance of oxidized brines for the formation of Australian Proterozoic stratiform sediment-hosted Pb-Zn (sedex) deposits [J]. *Economic Geology*, 95(1): 1-18.

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.

Gao S, Zou X Y, Hofstra A H, et al, 2022. Trace elements in quartz: insights into source and fluid evolution in magmatic-hydrothermal systems [J]. *Economic Geology*, 117(6): 1415-1428.

George L L, Biagioni 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, Baker T, Dubé B, et al, 2005. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terran [M]//One Hundredth Anniversary s. <https://doi.org/10.5382/AV100.14>.

Goldfarb R J, Groves D I, 2015. Orogenic gold: common or evolving fluid and metal sources through time [J]. *Lithos*, 233: 2-26.

Goldfarb R, Qiu K F, Deng J, et al, 2019. Chapter 8 orogenic gold deposits of China [M]//Mineral deposits of China. Beijing: Society of Economic Geologists.

- Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, et al, 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types[J]. *Ore Geology Reviews*, 13(1/2/3/4/5): 7-27.
- Groves D I, Santosh M, Deng J, et al, 2020a. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration[J]. *Mineralium Deposita*, 55(2): 275-292.
- Groves D I, Santosh M, Zhang L, 2020b. A scale-integrated exploration model for orogenic gold deposits based on a mineral system approach [J]. *Geoscience Frontiers*, 11(3): 719-738.
- Hoefs J, 2009. *Stable isotope geochemistry* [M]. 6th ed. Berlin: Springer.
- Hou L, Peng H J, Ding J, et al, 2016. Textures and in situ chemical and isotopic analyses of pyrite, Huijiabao trend, Youjiang Basin, China: implications for paragenesis and source of sulfur[J]. *Economic Geology*, 111(2): 331-353.
- Koglin N, Frimmel H E, Lawrie Minter W E, et al, 2010. Trace element characteristics of different pyrite types in Mesoproterozoic to Palaeoproterozoic placer deposits [J]. *Mineralium Deposita*, 45(3): 259-280.
- 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 L, Santosh M, Li S R, 2015. The 'Jiaodong type' gold deposits: characteristics, origin and prospecting [J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 589-611.
- Liu Y S, Hu Z C, 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.
- Nesbitt B E, 1988. Gold deposit continuum: a genetic model for lode Au mineralization in the continental crust [J]. *Geology*, 16(11): 1044.
- Ohmoto H, Rye R O, 1979. *Isotopes of Sulfur and Carbon* [C]// Barnes H L (ed.). *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. 2nd Edition. New York: John Wiley.
- 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.
- Song G X, Cook N J, Wang L, et al, 2019. Gold behavior in intermediate sulfidation epithermal systems: a case study from the Zhengguang gold deposit, Heilongjiang Province, NE-China [J]. *Ore Geology Reviews*, 106: 446-462.
- Song M C, Li S Z, Santosh M, et al, 2015. Types, characteristics and metallogenesis of gold deposits in the Jiaodong Peninsula, Eastern North China Craton [J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 612-625.
- 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.
- Tang M Y, Ding Z J, Li X X, et al, 2024. Ore-forming process of the Saibagou gold deposit in the Northern Qaidam Orogen: evidence from fluid inclusions, D-O isotopes and pyrite geochemistry [J]. *Ore Geology Reviews*, 175: 106368.
- Tardani D, Reich M, Deditius A P, et al, 2017. Copper-arsenic decoupling in an active geothermal system: a link between pyrite and fluid composition [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 204: 179-204.
- 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(7): 1077-1100.
- Xu J C, Gu X X, Zhang Y M, et al, 2021. Geology, fluid inclusions, H-O isotope, and hydrothermal zircon U-Pb geochronology of the Daqingshan orogenic gold deposit in Beishan orogenic belt, Xinjiang, NW China [J]. *Mineralium Deposita*, 56(2): 325-342.
- Yuan H L, Liu X, Chen L, et al, 2018. Simultaneous measurement of sulfur and lead isotopes in sulfides using nanosecond laser ablation coupled with two multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometers [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 154: 386-396.
- Zhang J, Deng J, Chen H Y, et al, 2014. LA-ICP-MS trace element analysis of pyrite from the Chang'an gold deposit, Sanjiang region, China: implication for ore-forming process [J]. *Gondwana Research*, 26(2): 557-575.
- 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.
- Cao Genshen, Zhang Yu, Chen Huayong, 2023. Trace elements in pyrite from orogenic gold deposits: implications for metallogenic mechanism [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(8): 2330-2346.
- 曹泊, 闫臻, 付长垒, 等, 2019. 柴北缘赛坝沟增生杂岩组成与变形特征 [J]. *岩石学报*, 35(4): 1015-1032. Cao Bo,

- Yan Zhen, Fu Changlei, et al, 2019. Component and deformation of the Saibagou accretionary complex in the northern margin of the Qaidam block [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(4): 1015-1032.
- 崔艳合, 张德全, 李大新, 等, 2000. 青海滩间山金矿床地质地球化学及成因机制 [J]. *矿床地质*, 19(3): 211-221.
- Cui Yanhe, Zhang Dequan, Li Daxin, et al, 2000. Geology, geochemistry and genesis of the Tanjianshan gold deposit, Qinghai Province [J]. *Mineral Deposits*, 19(3): 211-221.
- 范贤斌, 2017. 青海省大柴旦镇鱼卡金矿成因探讨 [D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- Fan Xianbin, 2017. A discussion on genesis of Yuqia gold deposit in Da Chaidan of Qinghai Province [D]. Beijing: China University of Geosciences.
- 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.
- Li Hongliang, Li Guangming, 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.
- 刘嘉, 蔡鹏捷, 曾小华, 等, 2021. 柴达木盆地北缘造山型金矿地质、成矿流体及成矿时代特征 [J]. *中国地质*, 48(2): 374-387.
- Liu Jia, Cai Pengjie, Zeng Xiaohua, et al, 2021. Geology, ore-forming fluid and metallogenic age of orogenic gold deposits in the Northern Qaidam [J]. *Geology in China*, 48(2): 374-387.
- 宋述光, 张贵宾, 张聪, 等, 2013. 大洋俯冲和大陆碰撞的动力学过程: 北祁连—柴北缘高压—超高压变质带的岩石学制约 [J]. *科学通报*, 58(23): 2240-2245.
- Song Shuguang, Zhang Guibin, Zhang Cong, et al, 2013. Dynamic process of ocean subduction and continental collision: petrological constraints of the high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic belt in the northern Qilian-Qaidam margin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(23): 2240-2245.
- 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): 175-184.
- Song Xuexin, Zhang Jingkai, 1986. Minor elements in pyrites of various genetic types from China [C]// *Bulletin of the Institute of Mineral Deposits Chinese Academy of Geological Sciences*, (18): 175-184.
- 唐名鹰, 何宗围, 朱德全, 等, 2021. 柴北缘赛坝沟金矿床硫、铅同位素组成: 对成矿物质来源的指示 [J]. *矿床地质*, 40(1): 117-127.
- Tang Mingying, He Zongwei, Zhu Dequan, et al, 2021. S and Pb isotopic compositions in Saibagou gold deposit on north margin of Qaidam Basin: an indication to the source of metallogenic materials [J]. *Mineral Deposits*, 40(1): 117-127.
- 王进寿, 潘彤, 薛万文, 等, 2022. 青海省柴北缘成矿带区域成矿规律综述 [J]. *矿床地质*, 41(5): 917-938.
- Wang Jinshou, Pan Tong, Xue Wanwen, et al, 2022. A summary regional metallogenic regularity of northern Qaidam metallogenic belt in Qinghai Province [J]. *Mineral Deposits*, 41(5): 917-938.
- 王炜晓, 唐名鹰, 丁正江, 等, 2022. 柴北缘赛坝沟金矿深部热液蚀变作用 [J]. *地质与勘探*, 58(5): 917-928.
- Wang Weixiao, Tang Mingying, Ding Zhengjiang, et al, 2022. Deep hydrothermal alteration of the Saibagou gold deposit in the northern margin of the Qaidam Basin [J]. *Geology and Exploration*, 58(5): 917-928.
- 夏文静, 牛漫兰, 闫臻, 等, 2014. 柴北缘牦牛山地区牦牛山组沉积相组合特征 [J]. *地质学报*, 88(5): 943-955.
- Xia Wenjing, Niu Manlan, Yan Zhen, et al, 2014. Sedimentary facies of the Maoniushan Formation in Maoniushan area along the northern margin of Qaidam terrane [J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(5): 943-955.
- 张德全, 丰成友, 李大新, 等, 2001. 柴北缘—东昆仑地区的造山型金矿床 [J]. *矿床地质*, 20(2): 137-146.
- Zhang Dequan, Feng Chengyou, Li Daxin, et al, 2001. Orogenic gold deposits in the north Qaidam and east Kunlun orogen, West China [J]. *Mineral Deposits*, 20(2): 137-146.
- 张德全, 王富春, 余宏全, 等, 2007a. 柴北缘—东昆仑地区造山型金矿床的三级控矿构造系统 [J]. *中国地质*, 34(1): 92-100.
- Zhang Dequan, Wang Fuchun, She Hongquan, et al, 2007. Three-order ore-controlling structural system of orogenic gold deposits in the northern Qaidam margin-East Kunlun region [J]. *Geology in China*, 34(1): 92-100.
- 张德全, 张慧, 丰成友, 等, 2007b. 青海滩间山金矿的复合成矿作用: 来自流体包裹体方面的证据 [J]. *矿床地质*, 26(5): 519-526.
- Zhang Dequan, Zhang Hui, Feng Chengyou, et al, 2007. Multiple gold mineralization in Tanjianshan gold deposit: evidence from fluid inclusions [J]. *Mineral Deposits*, 26(5): 519-526.
- 张建新, 于胜尧, 李云帅, 等, 2015. 原特提斯洋的俯冲、增生及闭合: 阿尔金—祁连—柴北缘造山系早古生代增生/碰撞造山作用 [J]. *岩石学报*, 31(12): 3531-3554.
- Zhang Jianxin, Yu Shengyao, Li Yunshuai, et al, 2015. Subduction, accretion and closure of Proto-Tethyan Ocean: Early Paleozoic accretion/collision orogeny in the Altun-Qilian-North Qaidam orogenic system [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(12): 3531-3554.

张拴宏,周显强,田晓娟,等,2001.青海乌兰县托莫尔日特金矿区稳定同位素特征及其地质意义[J].地质与勘探, 37(5): 10-14. Zhang Shuanhong, Zhou Xianqiang, Tian Xiaojuan, et al, 2001. Stable isotopic composition and its geological significance in tomorite gold deposit, Wulan County, Qinghai Province [J]. Geology and Prospecting,

37(5):10-14.

张延军,2017.青海省滩间山地区内生金属矿产成矿作用研究[D].长春:吉林大学. Zhang Yanjun, 2017. Study on the me-tallogenesis of endogenous metallic deposits in Tanjianshan area in Qinghai Province [D]. Changchun: Jilin University.

## Genesis of Orogenic Gold Deposit in the Saibagou Area, Northern Margin of Qaidam Basin: Constraints from in Situ Trace Elements and Sulfur Isotopes of Pyrite

TANG Mingying<sup>1,2</sup>, DING Zhengjiang<sup>1</sup>, SUN Lisha<sup>2</sup>, ZHAN Honglei<sup>2</sup>, WANG Xin<sup>2</sup>, ZHU Wei<sup>2</sup>, HUA Lei<sup>2</sup>, XIN Zhen<sup>2</sup>, LIU Caijie<sup>1</sup>, MENG Yun<sup>2</sup>, ZHANG Chao<sup>2</sup>

1. Shandong Engineering Research Center of Application and Development of Big Data for Deep Gold Exploration, Ministry of Natural Resources Technology Innovation Center for Deep Gold Resources Exploration and Mining, No.6 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Weihai 264200, Shandong, China;

2. No. 8 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Key Laboratory of Nonferrous Metal Ore Exploration and Resource Evaluation of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Rizhao 276826, Shandong, China

**Abstract:** The Saibagou region is situated in the eastern segment of the tectonic belt along the northern margin of the Qaidam Basin. Within this area, a series of gold deposits have developed along the NNW-oriented ductile shear belt and its subsidiary faults. This study conducted in situ sulfur isotope and trace element analyses of pyrite from the primary ore-forming stages of the Gashun, Tuoxingou, and Wudarehu gold deposits, building upon comprehensive field geological investigations and mineralogical studies. The findings reveal that the sulfur isotopes of the gold deposits in the Saibagou area exhibit a relatively concentrated tower-type distribution, with an average range of -1.55‰ to 3.93‰. This distribution suggests characteristics indicative of both mantle-derived and granite-derived sulfur, aligning closely with the sulfur isotope composition typical of orogenic gold deposits located along the northern margin of the Qaidam Basin. The overall composition is enriched with arsenic (As), cobalt (Co), nickel (Ni), and selenium (Se), while the relative concentrations of gold (Au), silver (Ag), copper (Cu), lead (Pb), zinc (Zn), and bismuth (Bi) are notably high. A significant correlation is observed between Au and As. Gold predominantly occurs within the pyrite lattice as a solid solution, whereas copper primarily associates with pyrite as independent elements rather than substituting for iron (Fe). The ore-forming fluid is characterized by a relatively reductive environment. Through a comprehensive analysis encompassing ore-controlling structures, alteration types, mineral associations, host rock characteristics, trace element geochemistry, and sulfur isotope data, the gold deposit in the Saibagou area is classified as an orogenic gold deposit.

**Key words:** trace elements; sulfur isotope; orogenic gold deposit; deposit genesis; Saibagou area; North margin of Qaidam Basin