



引文格式: 苏生顺, 张勇, 林贵, 等. 柴北缘赛坝沟金矿床成因探讨: 来自流体包裹体及 H-O-S-Pb 同位素证据[J]. 西北地质, 2026, 59(1): 130–145. DOI: 10.12401/j.nwg.2024008

Citation: SU Shengshun, ZHANG Yong, LIN Gui, et al. Genesis of the Saibagou Gold Deposit in the Northern Margin of Qaidam: Evidence from Fluid Inclusions and H-O-S-Pb Isotopes[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(1): 130–145. DOI: 10.12401/j.nwg.2024008

柴北缘赛坝沟金矿床成因探讨: 来自流体包裹体及 H-O-S-Pb 同位素证据

苏生顺¹, 张勇^{1,*}, 林贵¹, 舒树兰², 刘永乐¹, 张大明¹, 刘智刚¹, 赵芙蓉¹

(1. 青海省第三地质勘查院, 青海 西宁 810029; 2. 青海省地质矿产勘查开发局, 青海 西宁 810008)

摘要: 赛坝沟金矿床位于柴北缘成矿带东端乌兰地区, 是柴北缘代表性金矿床之一, 近年来在其深部及外围找矿取得了新的突破, 但该矿床的成因机制仍有争议。笔者针对含金石英脉开展了流体包裹体和 H-O-S-Pb 同位素的研究。研究显示, 赛坝沟金矿流体包裹体主要是含 CO₂ 三相水溶液与气液两相包裹体, 包裹体均一温度主要为 200~320 °C, 盐度为 0.18% NaCl_{eqv}~14.67% NaCl_{eqv}, 流体密度为 0.67~1.13 g/cm³, 具中温、中-低盐度、低密度的特征, 属于 H₂O-NaCl-CO₂ 体系。H-O 同位素分析显示, δD_{V-SMOW} 值为 -75.1‰~-65.2‰, $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值为 2.3‰~3.3‰, 暗示岩浆水是成矿流体的主要来源, 伴有少量变质水的加入。S 同位素研究显示, 黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值为 -2.52‰~-2.61‰, 在陨硫 S 的组成范围之内, 反映出矿床的硫主要来源于幔源流体, 与岩浆活动有关。黄铁矿 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 值为 18.031 4~18.250 3, $^{207}Pb/^{204}Pb$ 值为 15.590 7~15.730 8, $^{208}Pb/^{204}Pb$ 值为 38.172 6~38.432 6, 说明 Pb 主要来源于岩浆, 可能有部分寒武系—奥陶系 Pb 的加入。根据矿床地质特征、流体包裹体及 H-O-S-Pb 同位素研究成果, 结合区域构造演化背景认为, 赛坝沟金矿床为柴达木地块与欧龙布鲁克地块陆陆碰撞形成的造山型金矿, 与矿区脉岩活动密切相关。

关键词: 流体包裹体; H-O-S-Pb 同位素; 矿床成因; 赛坝沟金矿; 柴北缘; 青海省

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)01-0130-16

Genesis of the Saibagou Gold Deposit in the Northern Margin of Qaidam: Evidence from Fluid Inclusions and H-O-S-Pb Isotopes

SU Shengshun¹, ZHANG Yong^{1,*}, LIN Gui¹, SHU Shulan², LIU Yongle¹,
ZHANG Daming¹, LIU Zhigang¹, ZHAO Furong¹

(1. The Third Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Xining 810029, Qinghai, China; 2. Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Qinghai Province, Xining 810008, Qinghai, China)

Abstract: The Saibagou gold deposit, located in the Wulan area, eastern part of the northern Qaidam metallo-

收稿日期: 2023-07-17; 修回日期: 2023-11-27; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(92062217), 青海省“昆仑英才·高端创新创业人才”项目(青地矿科[2022]32号)和“青海省乌兰县阿哈大洼地区 1:2.5 万地质矿产调查”(2022012015jc009)联合资助。

作者简介: 苏生顺(1970-), 男, 正高级工程师, 主要从事地质矿产研究工作。E-mail: qhskyss@163.com。

* 通讯作者: 张勇(1982-), 男, 高级工程师, 主要从事地质矿产研究工作。E-mail: qhskyzy@163.com。

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

genic belt, is one of the representative gold deposits in the northern Qaidam metallogenic belt. Recently, new breakthroughs have been made in prospecting at the deep and peripheral areas, but the genetic mechanism of the deposit is still controversial. Fluid inclusions and H-O-S-Pb isotopes of gold-bearing quartz veins from the Saibagou deposit are examined in this study. The results show that the fluid inclusions in the Saibagou gold deposit are mainly characterized by gas-liquid two-phase inclusions and CO₂-bearing three-phase inclusions. The homogenization temperature of the inclusions ranges from 200 °C to 320 °C, the salinity ranges from 0.18% NaCl_{eqv} to 14.67% NaCl_{eqv}, and the fluid density ranges from 0.67 g/cm³ to 1.13 g/cm³. These lines of evidence support an ore-forming fluid characterized by medium temperature, medium-low salinity and low density, and belonging to the H₂O-NaCl-CO₂ system. The δD_{V-SMOW} values are between -75.1‰ and -65.2‰, and $\delta^{18}O_{H_2O}$ values are between 2.3‰ and 3.3‰, suggesting that the ore-forming fluid is mainly derived from magmatic water with a small amount of metamorphic fluid. S isotope studies show that $\delta^{34}S$ of pyrite is between -2.52‰ and 2.61‰, which is within the composition range of meteorite S, reflecting that the sulfur in the deposit mainly comes from deep mantle, which may be related to magmatic activity. The pyrite $^{206}Pb/^{204}Pb$ ranges from 18.031 4 to 18.250 3, the $^{207}Pb/^{204}Pb$ ranges from 15.590 7 to 15.730 8, and the $^{208}Pb/^{204}Pb$ ranges from 38.172 6 to 38.432 6, indicating that Pb is mainly derived from magmas, and to a lesser extent, the Cambrian-Ordovician strata. Combined with the geological characteristics, fluid inclusions and H-O-S-Pb isotope research results, as well as the regional tectonic evolution background, it can be concluded that the Saibagou gold deposit is an orogenic gold deposit formed by continental collision between the Qaidam Block and Olongbuk Block and its genesis is closely related to the dike activities in the mining area.

Keywords: fluid inclusion; H-O-S-Pb isotope; genesis of deposit; Saibagou gold deposit; northern Qaidam; Qinghai Province

柴达木盆地北缘成矿带北侧紧邻祁连造山带, 南侧紧邻柴达木盆地(邓元良等, 2018)。柴北缘成矿带作为青海省重要的金矿集区, 成矿条件优越。自 20 世纪 80 年代以来, 金矿床勘查取得重要进展, 相继在野骆驼、红柳沟、独树沟、龙柏沟、黄绿沟、三角顶、金龙沟、青龙沟、细晶沟、拓新沟、赛坝沟等地取得找矿新发现(安生婷等, 2020; 保广普等, 2021), 使得柴北缘地区成为青海省又一重要的金矿集区。

赛坝沟金矿床位于柴北缘成矿带乌兰县柯柯镇的东南侧, 为原青海省第六地质大队首次发现并初步勘查(唐名鹰等, 2021)。2012~2020 年, 山东省第八地质矿产勘查院通过对赛坝沟金矿的深部和外围开展了勘查工作, 使赛坝沟金矿床规模达到中型, 并具有成为大型岩金矿床的潜力(唐名鹰等, 2021)。

赛坝沟前期发现的规模不大, 前期关于该矿床的研究不多(丰成友等, 2002; 张德全等, 2005), 但随着近些年来找矿的不断突破, 近年来不同学者对赛坝沟金矿又开展了较为深入的研究(唐名鹰等, 2016, 2021; 刘嘉等, 2021; 吴洪彬等, 2022; 朱德全等, 2022), 认为赛坝沟金矿床为造山型金矿。但是, 强烈造山运动引发的岩浆活动与成矿作用的关系尚不清晰, 金矿成矿流体性质、成矿物质来源尚存较大争议, 部分人认为

成矿流体主要来源于建造水和大气降水, 成矿物质来源于地层(童海奎等, 2009), 另一部分人则认为成矿物质具有幔源特征, 可能来源于岩浆活动(唐名鹰等, 2021; 吴洪彬等, 2022)。由于前人未针对赛坝沟金矿床开展流体包裹体和 H-O 同位素的研究, 成矿物质来源和成矿流体性质不明, 笔者通过收集前人资料, 开展主成矿期的石英流体包裹体和 H-O 同位素研究, 对主成矿期的黄铁矿开展了 S-Pb 同位素研究, 结合成矿背景和地质构造演化, 讨论赛坝沟金矿成矿流体的性质、成矿物质的来源及矿床成因, 建立赛坝沟金矿成矿模式, 以期对赛坝沟金矿的矿床成因和下步找矿工作提供理论依据。

1 区域地质背景

赛坝沟金矿床位于柴北缘构造带东部, 该构造带东至沙柳河地区哇洪山-温泉断裂, 经锡铁山、鱼卡至小赛什腾山, 往西被阿尔金断裂切断, 由滩间山岩浆弧、柴北缘蛇绿混杂岩带和局部发育的鱼卡-沙柳河高压-超高压变质带 3 个构造单元组成(陆松年等, 2002; 2004; 张建新等, 2015; 唐名鹰等, 2021), 赛坝沟金矿床位于滩间山岩浆弧内(图 1a)。

区域内地层主体为古元古界达肯大坂群、寒武系—奥陶系滩间山群,零星出露中—上泥盆统牦牛山组,山前、山间低洼凹地及沟谷地带为第四系沉积或堆积物(邓元良等,2018)。岩浆岩主要为奥陶纪英云闪长岩、花岗闪长岩,志留纪二长花岗岩、钾长花岗岩和少量三叠纪似斑状二长花岗岩(图1b)。

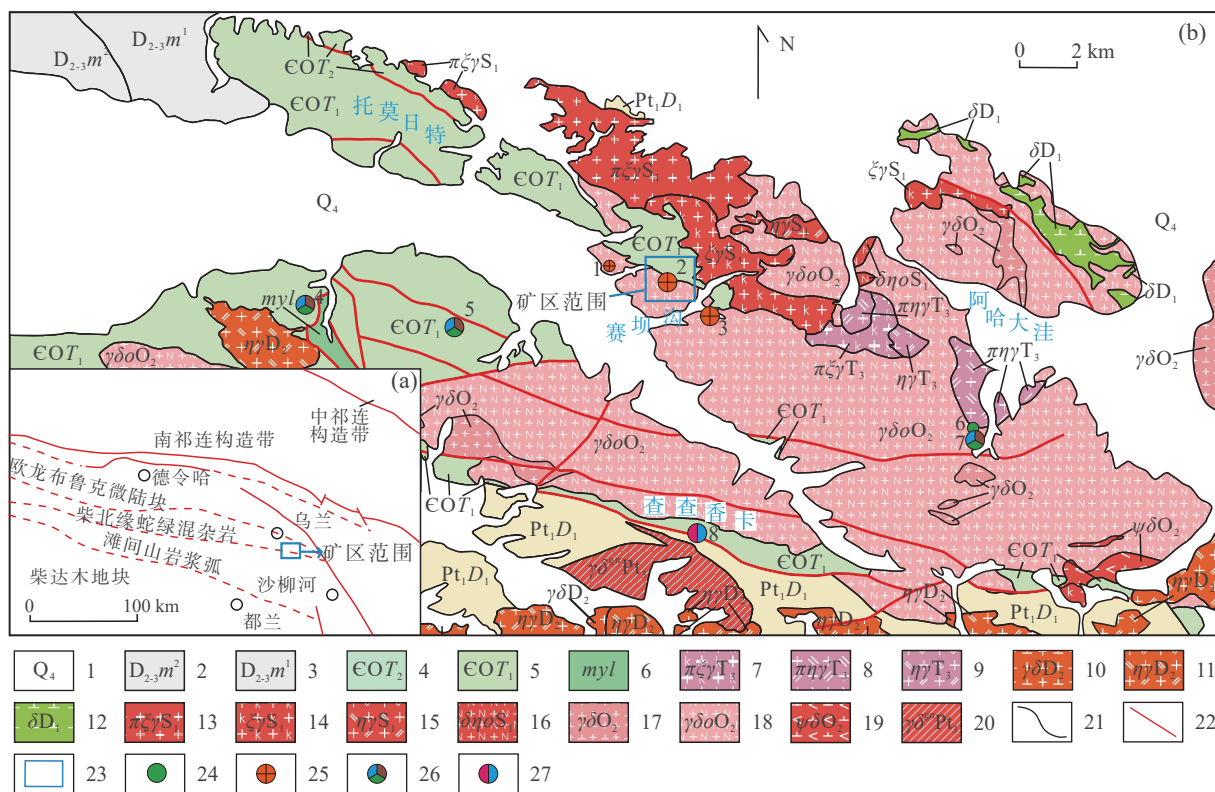
研究区大致经历以下构造演化:古元古代,欧龙布鲁克古陆块形成,在北部和南部形成达肯大坂群片麻岩;中元古代,研究区处于被动大陆边缘,出现了浅海裂陷盆地,在滩间山地区发育万洞沟群碎屑岩组、火山岩组和碳酸盐岩组,可能代表了原始特提斯洋的形成阶段(邓元良等,2018);寒武纪—奥陶纪,柴北缘洋(原特提斯洋)盆逐渐关闭,洋壳向北俯冲导致岛弧火山岩(滩间山岩群)形成;大约从中奥陶世开始,柴达木陆块向欧龙布鲁克陆块逐渐靠拢,柴北缘洋壳由南向北俯冲,在北部的欧龙布鲁克陆块一侧形成火山弧,发育一套以中基性火山岩为主,含少量细碎屑岩

(类复理石)和碳酸盐岩的火山沉积建造滩间山群(邓元良等,2018);晚奥陶世,柴北缘洋继续向北俯冲,带动柴达木陆块逐渐俯冲至欧龙布鲁克陆块之下,欧龙布鲁克陆块与柴达木陆块拼合,形成了柴北缘基本构造格架(邓元良等,2018);志留纪—泥盆纪进入陆—陆碰撞阶段和碰撞后伸展演化阶段,形成了晚泥盆世牦牛山组磨拉石建造;三叠纪进入陆内造山阶段。

2 矿床地质

2.1 地质特征

矿区出露地层为寒武系—奥陶系滩间山群火山岩组,岩性为斜长角闪片岩、绿帘绿泥片岩、蛇纹岩。侵入岩为中奥陶世灰色中细粒英云闪长岩、石英闪长岩,脉岩以灰色细粒石英闪长岩、花岗斑岩、二长闪长玢岩和浅灰色石英脉为主,脉体走向和区域构造线(NW-SE)基本一致(图2)。



1.第四系; 2.中上泥盆统牦牛山组火山岩段; 3.中上泥盆统牦牛山组碎屑岩段; 4.寒武系—奥陶系滩间山群上火山岩组; 5.寒武系—奥陶系滩间山群下火山岩组; 6.糜棱岩; 7.晚三叠世似斑状正长花岗岩; 8.晚三叠世似斑状二长花岗岩; 9.晚三叠世二长花岗岩; 10.中泥盆世花岗闪长岩; 11.中泥盆世二长花岗岩; 12.早泥盆世闪长岩; 13.早志留世似斑状正长花岗岩; 14.早志留世正长花岗岩; 15.早志留世二长花岗岩; 16.早志留世石英二长闪长岩; 17.中奥陶世花岗闪长岩; 18.中奥陶世英云闪长岩; 19.中奥陶世角闪闪长岩; 20.新元古代片麻状花岗闪长岩; 21.地质界线; 22.断层; 23.矿区范围; 24.铜矿床; 25.金矿床; 26.铜铅锌矿床; 27.铜镍矿床

图1 赛坝沟地区区域地质图

Fig. 1 Regional geological map of Saibagou area

矿区断裂构造十分发育, 以 NW-SE 向韧性断裂为主, NNW-SSE 向脆性断裂次之, 前者具多期活动特征, 断面较陡(略向南倾, 深部往北东倾), 倾角约为 50° , 力学性质多表现为压性、压扭性。构造带内岩石变形特征较强, 脆性构造带内岩石破碎严重, 局部岩石被研磨成粉末状; 韧性变形带内多见岩石具旋转碎斑、拖尾、S-C 面理的等特征, 糜棱岩带中多表现为强烈糜棱岩化, 且构造带中岩石多表现为韧性变形叠加特征, 显示出变形的多期多阶段及强度较大的特征。赛坝沟金矿床主要矿体均赋存于 NW-NNW 向的韧-脆性断裂构造内, 断裂构造密集, 断裂控制的含矿破碎蚀变带宽为 $0.5\sim 4\text{ m}$, 长度为 $750\sim 1\,500\text{ m}$, 呈近平行分布, 具有较明显的斜列式分布特征, 断裂面呈舒缓波状, 向两侧延伸(图 3), 倾向为 $17^\circ\sim 35^\circ$, 倾角为 $70^\circ\sim 86^\circ$, 压性和压扭性为主。

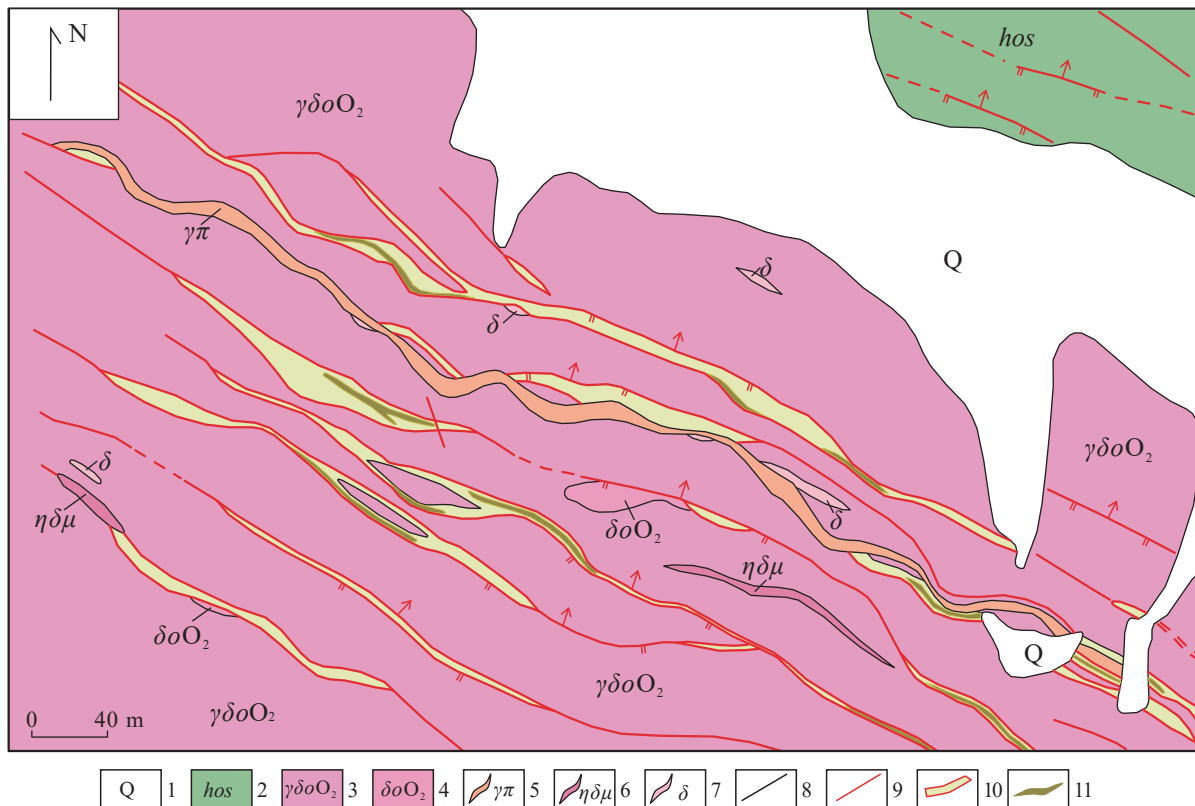
2.2 矿体特征

赛坝沟及其外围共圈出 11 条金矿体: 工业矿体 9 条(主矿体 5 条), 低品位矿体 2 条。矿体多呈透镜状或脉状产出, 长度为 $40\sim 370.9\text{ m}$, 厚度为 $0.2\sim 4.99\text{ m}$

不等, 沿倾向延深为 $66.9\sim 584.29\text{ m}$, 矿体品位变化较大, 部分地段可以见到微细粒的明金, 倾向为 $17^\circ\sim 35^\circ$, 倾角为 $70^\circ\sim 86^\circ$ 。II、III 和 IV 号矿体向深部厚度和品位具较明显变厚变富的趋势。矿区围岩蚀变分带不太明显, 一般近矿围岩以黄铁矿化、绢英岩化、钾化、硅化等矿化蚀变为主, 远离矿体一般为碳酸盐化、萤石化、绿帘石化和绿泥石化。依据矿石和围岩蚀变特征, 将矿石类型划分为石英脉型和蚀变糜棱岩型金矿石。石英脉型金矿石为含硫化物石英脉, 蚀变糜棱岩型金矿石为强烈糜棱岩化、黄铁绢英岩化和钾化蚀变的构造岩类(唐名鹰等, 2016, 2021)。

2.3 矿石特征和围岩蚀变

赛坝沟金矿床矿石主要可以分为石英脉型和蚀变糜棱岩型, 一般近地表为石英脉型, 深部为蚀变糜棱岩型, 并且近地表 Au 品位相对较低($3\sim 7\text{ g/t}$), 深部富集($5\sim 13\text{ g/t}$)。矿区金属矿物可见自然金、黄铁矿、磁铁矿、黄铜矿、银金矿、碲金银矿、碲铅矿、黄铜矿、赤铁矿、褐铁矿、方铅矿、闪锌矿和毒砂等。矿石中的金大部分以银金矿和自然金等矿物的形式赋



1.第四系; 2.寒武系—奥陶系斜长角闪片岩、绿帘绿泥片岩; 3.中奥陶世英云闪长岩; 4.中奥陶世石英闪长岩; 5.花岗斑岩脉; 6.二长闪长岩脉; 7.闪长岩脉; 8.地质界线; 9.断层及推测断层; 10.破碎蚀变带; 11.金矿体

图2 赛坝沟金矿地质简图(唐名鹰等, 2021)

Fig. 2 Geological schematic map of Saibagou gold deposit

条纹状构造、片状构造和假流动构造等; 矿石结构以碎裂结构、粒状变晶结构、鳞片结构和糜棱结构为主; 其次为交代结构、交代残留结构和包含结构等(唐名鹰等, 2016)。围岩蚀变以绢云英岩化、硅化、钾化、碳酸盐化、绿帘石化、绿泥石化及泥化为主(图4)。

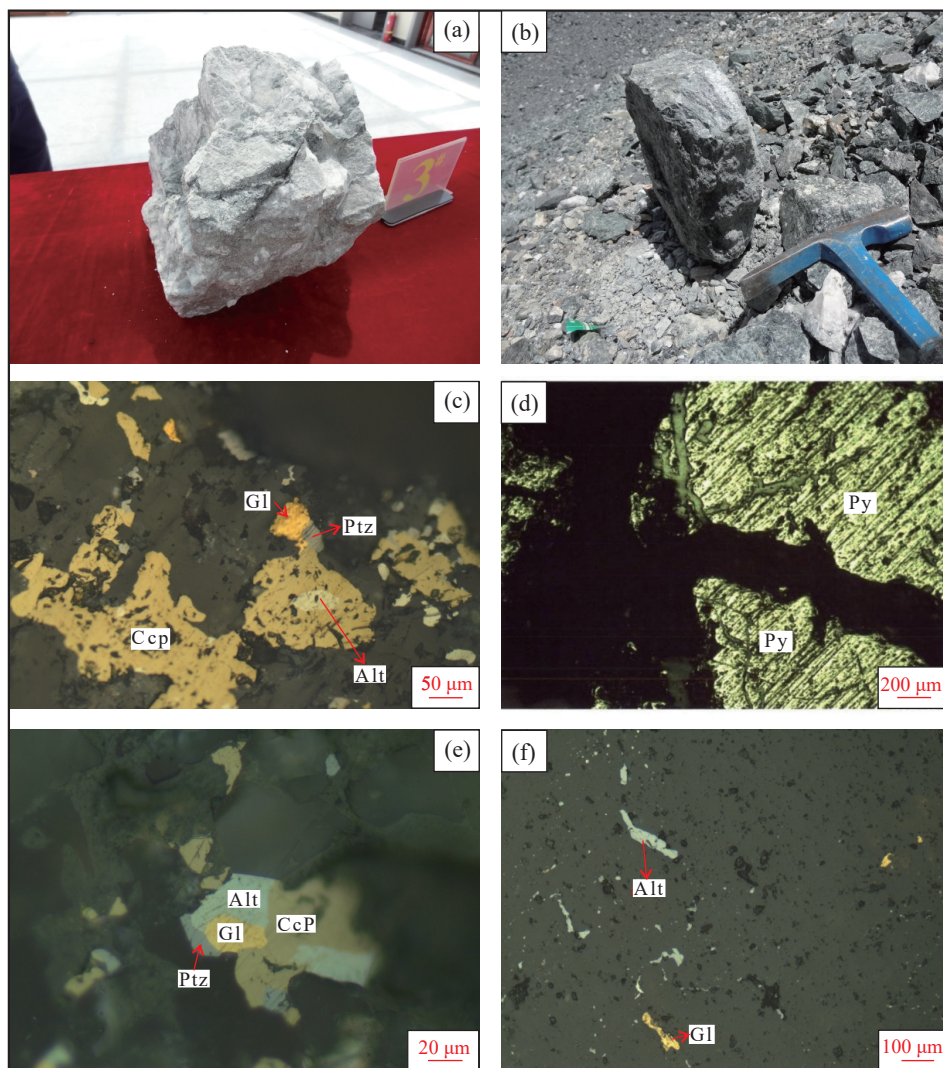
2.4 成矿期及成矿阶段

依据此次实地和镜下观察到的赛坝沟金矿床的不同期次矿物穿插关系, 结合唐名鹰等(2021)划分为4个阶段(表1)热液成矿期, 即 I 少量黄铁矿-烟灰色石英阶段、II 金-黄铁矿-乳白色石英阶段、III 多金属硫化物-金-灰白色-灰褐色石英阶段、IV 灰白色-浅肉红色石英-碳酸盐岩阶段, 其中第 III 阶段为与金矿形成关系最密切的成矿期。

3 采样及测试分析方法

3.1 样品的采集

流体包裹体和 H、O 同位素采自 VI-3 矿体中多金属硫化物-金-灰白色-灰褐色石英阶段(III)的含金石英脉, S、Pb 同位素样品也采自 VI-3 矿体中的含金黄铁矿化绢英岩, 采集位置 E 98°24'53", N 36°46'16", 深部 PD4CD1、CD12、CD13、CD15 控制的 VI-3 盲矿体, 分别位于 90 m、180 m、200 m、220 m 处, 共采集了 8 件样品(图3)。样品普遍具有较强的硅化、绿帘石化、绿泥石化、绢云母化和高岭土化, 局部具钾化, 常



a. 石英脉型金矿石; b. 蚀变糜棱岩型金矿石; c. 浸染状含金黄铜矿; d. 斑点状、星点状黄铁矿; e. 含金石英脉; f. 含金蚀变岩; Py. 黄铁矿; Alt. 碲铅矿; Ccp. 黄铜矿; PtZ. 碲金银矿; Gl. 自然金

图4 赛坝沟金矿床矿石

Fig. 4 Ore features of the Saibagou gold deposit

表 1 热液成矿期矿物生成顺序表(据唐名鹰等, 2021)

Tab. 1 Sequence of mineral generation during hydrothermal mineralization

主要矿物	区域变质期	热液成矿期				表生期
		I 烟灰色黄铁矿-石英脉阶段	II 白色黄铁矿-石英脉阶段	III 灰白色-灰褐色石英-多金属硫化物脉阶段	IV 石英-碳酸盐脉阶段	
石英		—————	—————	—————	—————	
绢云母		—————	—————	—————	—————	
方解石		-----	-----	-----	—————	
绿泥石		—————	-----	-----	-----	
黄铁矿		—————	—————	—————	-----	
黄铜矿			—————	—————		
自然金		-----	-----	-----		
碲金矿			-----	-----		
碲金银矿			-----	-----		
碲铅矿						
方铅矿				-----	-----	
闪锌矿				-----	-----	
磁铁矿	-----					
赤铁矿					-----	-----
钛铁矿			-----			
褐铁矿						—————
黄钾铁矾						—————
孔雀石						—————

注: ————— 大量出现; ———— 少量出现; ----- 偶见。

见他形细粒状黄铁矿脉产出,脉宽约为 0.5~3 mm,黄铁矿含量一般为 2%~7%,测试样品都采自主要成矿期:金属硫化物-金-灰白色-灰褐色石英阶段(Ⅲ)。

3.2 流体包裹测试

进行流体包裹体测试样品共 4 件(W2、W3、W4、W6)。清洗处理后,将黄铁矿化石英脉样品磨制为厚度 0.3 mm 双面抛光的流体包裹体片。首先用光学显微镜对流体包裹体进行观察,随后对有实验价值的流体包裹体片用丙酮浸泡 48 h(张爱奎等, 2021),使之与载玻片充分分离并使用无水乙醇将它擦洗干净后晾干,流体包裹体温度成分测试工作在山东省地质科学研究院的自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室完成。

测温仪器为英国 Linkam THMSG-600 型冷热台,仪器测定温度范围: -196~600 ℃,冷却剂为液氮,并通过人工合成包裹体(纯水包裹体冰点为 0 ℃,均一温度为 374.1 ℃,CO₂包裹体熔点为 -56.6 ℃进行温度校正(张爱奎等, 2021)。流体包裹体冰点温度误差 ±0.1 ℃,均一温度误差 ±2 ℃,测试过程的升温速率一般为 0.2~5 ℃/min,相转变点附近(如水溶液包裹体的冰点和完全均一)的升、降温速率为 1 ℃/min 以下(张爱奎等, 2021)。

包裹体成分测试仪器为 Renishaw 公司生产的 in-Via Raman 型激光共焦显微拉曼光谱仪,单个包裹体

的光源为 Spectra-Physics 氩离子激光器,波长为 514 nm Ar⁺,激光功率为 20 mw,空间分辨率为 1 μm,积分时间为 60 s(宋生琼等, 2011)。

3.3 氢-氧-硫-铅同位素测试

同位素测试之前,先将待测样品粉碎、清洗,在双目镜下仔细挑选出目标矿物(钟世华, 2018)。本次研究,挑选石英开展氢和氧同位素分析,挑选黄铁矿开展硫和铅同位素分析。用于氢同位素测试的单矿物,粉碎至 40~60 目,用于氧、硫和铅同位素分析的单矿物粉碎至 200 目以下(钟世华, 2018)。氢同位素分析采用热爆法,首先从石英样品中提取包裹体使之与金属铬在 800 ℃ 条件下反应生成 H₂,然后用质谱仪测试氢同位素(蓝廷广等, 2010)。氧同位素分析采用 BrF₅ 法,在 550~700 ℃ 条件下使石英与 BrF₅ 反应生成 O₂,再使 O₂ 与碳棒反应生成 CO₂,然后用质谱仪测定其中的 O 同位素(蓝廷广等, 2010)。硫同位素分析采用稳定气体同位素质谱仪 MAT-253plus 完成;铅同位素采用 ThermoFisher NEPTUNE Plus 多接收-电感耦合等离子质谱仪进行分析,在相对湿度和温度分别为 40% 和 20 ℃ 的条件下用三酸将样品分解后,采用树脂交换法分离出铅,蒸干后进行铅同位素测定,报道的 δ¹⁸O 和 δD 值为相对于 Vienna 标准平均海水(Vienna Standard Mean Ocean Water, V-SMOW), δ¹⁸O 测试精度优于 ± 0.2‰, δD 测试精度优于 ± 2‰(李世珍

等, 2015; 唐名鹰等, 2021)。报道的碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)则相对于国际标准物质 PDB(Pee Dee Belemnite), 测试精度优于 $\pm 0.1\text{‰}$ 。硫同位素值($\delta^{34}\text{S}$)则相对于国际标准物质 CDT(Canyon Diablo Troilite), 数据重现性优于 $\pm 0.2\text{‰}$ 。 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的测试精度均小于 0.05‰ (钟世华, 2018)。

4 分析结果

4.1 流体包裹体

4.1.1 流体包裹体类型

根据 Roedder(1984)、卢焕章等(2004)提出的流

体包裹体室温下相态分类准则及冷冻加热过程中的相态变化, 矿区含金花岗闪长岩石英脉中的流体包裹体分为气液两相包裹体(I型)和含 CO_2 三相水溶液包裹体(II型)(表 2, 图 5), 其中气液两相包裹体(I型)可进一步划分为富液相包裹体(Ia型)和富气相包裹体(Ib型)两个亚类(顾建峰, 2018; 张爱奎等, 2021)。

Ia型: 富液相气液两相包裹体。该类型包裹体在石英脉中广泛发育, 包裹体大小为 $4\sim 12\ \mu\text{m}$, 平均为 $6\ \mu\text{m}$, 气液比为 $5\%\sim 25\%$, 平均为 14% , 包裹体形态较规则, 多呈椭圆形和多边形。

Ib型: 富气相气液两相包裹体。该类型包裹体在石英脉中相对不太发育, 包裹体大小 $4\sim 9\ \mu\text{m}$, 平

表 2 赛坝沟金矿含黄铁矿石英细脉中的流体包裹体测试结果表

Tab. 2 Test results of fluid inclusions in pyrite bearing quartz veinlets in Saibagou gold mine

序号	包裹体类型	测试数	大小(μm)	气液比(%)	$T_{\text{m,CO}_2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{\text{m,cla}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{\text{h,CO}_2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	T_{m} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{h} ($^{\circ}\text{C}$)	S(wt%NaCl)	ρ (g/cm^3)
1	Ia型	89	$4\sim 12$	$5\sim 25$				$-10.7\sim -0.2$	$132.5\sim 385.1$	$0.35\sim 14.67$	$0.67\sim 1.13$
2	Ib型	22	$4\sim 9$	$50\sim 80$				$-10.6\sim -0.1$	$146.6\sim 356.6$	$0.18\sim 14.56$	$0.67\sim 1.10$
4	II型	25	$4\sim 8$	$10\sim 30$	$-62.2\sim -56.4$	$5.7\sim 8.9$	$25.6\sim 29.1$		$154.6\sim 340.7$	$2.22\sim 7.97$	$0.70\sim 1.04$

注: $T_{\text{m,CO}_2}$ - CO_2 固相熔化温度; $T_{\text{m,cla}}$ - CO_2 笼合物消失温度; $T_{\text{h,CO}_2}$ - CO_2 部分均一温度; T_{m} 冰点温度; T_{h} 完全均一温度; S.盐度; ρ 密度。

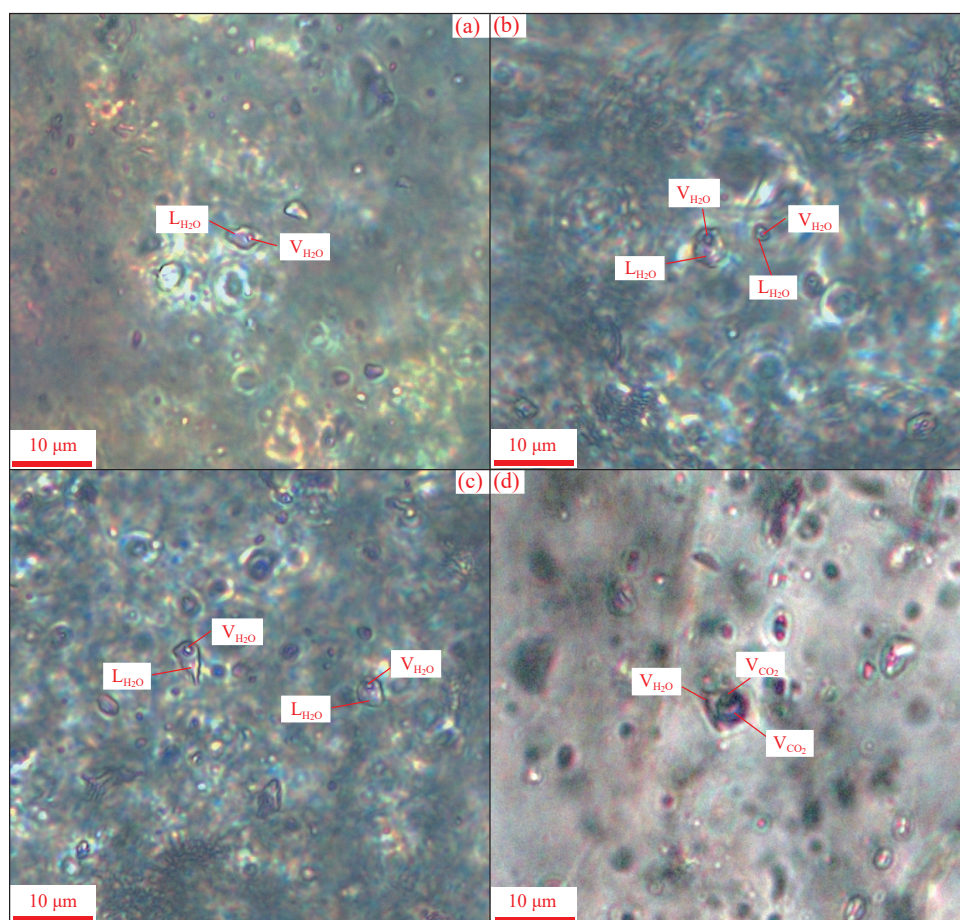


图5 赛坝沟金矿床流体包裹体特征图

Fig. 5 Fluid inclusion characteristics of Saibagou gold deposit

均 $6\ \mu\text{m}$, 气液比为 $50\%\sim 80\%$, 平均为 63% , 包裹体形态较规则, 多呈椭圆形和多边形。

II 型: 含 CO_2 三相水溶液包裹体。该类型包裹体在石英脉中相对不太发育, 包裹体大小 $4\sim 8\ \mu\text{m}$, 平均 $6\ \mu\text{m}$, 气液比为 $10\%\sim 30\%$, 平均为 19% , 包裹体形态不规则, 多呈多边形和月牙形。

4.1.2 流体包裹体显微测温

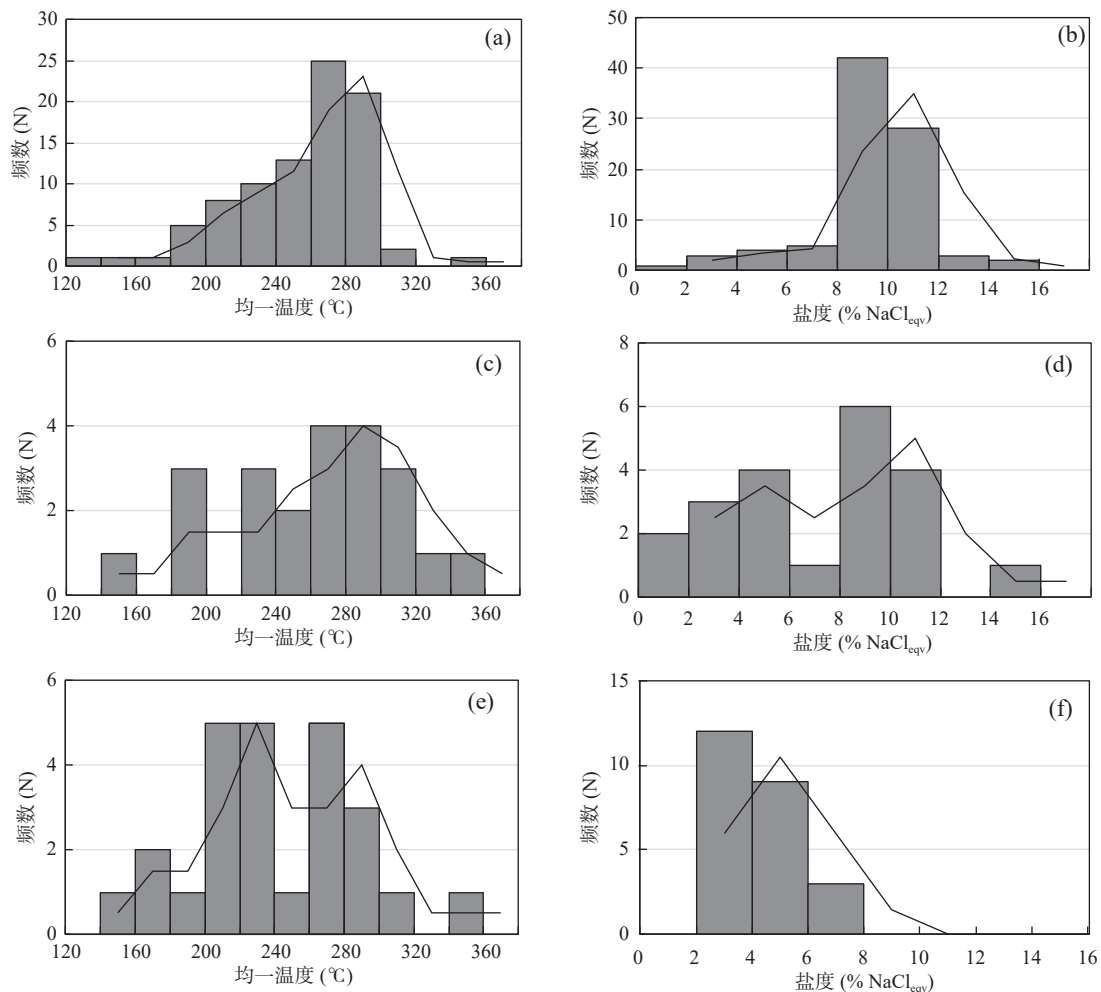
在详细的岩相学观察基础上, 对石英中 3 种类型流体包裹体均开展了显微测温研究(表 2)。

I_a 型包裹体均一温度(T_h)为 $132.5\sim 385.1\ ^\circ\text{C}$, 集中分布在 $250\sim 300\ ^\circ\text{C}$ (图 6a); 流体包裹体的冰点温度为 $-10.7\sim -0.2\ ^\circ\text{C}$, 根据 Hall et al. (1988) 提出的公式: $S(\text{NaCl})=0.00+1.78\ t_m-0.044\ 2\ t_m^2+0.000\ 557\ t_m^3$ (t_m 为冰点温度, 计算时取绝对值)(张爱奎等, 2021), 计算出流体包裹体盐度为 $0.35\%\ \text{NaCl}_{\text{eqv}}\sim 14.67\%\ \text{NaCl}_{\text{eqv}}$, 集中分布在 $8\%\ \text{NaCl}_{\text{eqv}}\sim 12\%\ \text{NaCl}_{\text{eqv}}$ (图 6b), 流体盐

度较低。根据均一温度和盐度, 应用经验公式 $\rho=a+b\ T_h+c\ T_h^2$ (a 、 b 和 c 均为无量纲参数), 获得包裹体流体密度介于 $0.67\sim 1.13\ \text{g/cm}^3$, 平均为 $0.90\ \text{g/cm}^3$, I_a 型包裹体密度较低。

I_b 型包裹体均一温度(T_h)为 $146.6\sim 356.6\ ^\circ\text{C}$, 在 $260\sim 320\ ^\circ\text{C}$ 之间出现了一个高频区域(图 6c); 流体包裹体的冰点温度(T_m)为 $-10.6\sim -0.1\ ^\circ\text{C}$ 。笔者根据盐度计算公式(Hall et al (1988): $S(\text{NaCl})=0.00+1.78\ t_m-0.044\ 2\ t_m^2+0.000\ 557\ t_m^3$ (t_m 为冰点温度, 计算时取绝对值), 计算出流体包裹体盐度为 $0.18\%\ \text{NaCl}_{\text{eqv}}\sim 14.56\%\ \text{NaCl}_{\text{eqv}}$, 相对集中分布在 $8\%\ \text{NaCl}_{\text{eqv}}\sim 12\%\ \text{NaCl}_{\text{eqv}}$ 之间(图 6d), 流体盐度较低。根据均一温度和盐度, 应用经验公式 $\rho=a+b\ T_h+c\ T_h^2$ (a 、 b 和 c 均为无量纲参数)(张爱奎等, 2021), 获得包裹体流体密度为 $0.67\sim 1.10\ \text{g/cm}^3$, 平均为 $0.86\ \text{g/cm}^3$, I_b 型包裹体密度较低。

II 型包裹体均一温度(T_h)为 $154.6\sim 340.7\ ^\circ\text{C}$, 在



a、c、e 分别为 Ia 型、Ib 型、II 型包裹体均一温度直方图; b、d、f 分别为 Ia 型、Ib 型、II 型包裹体盐度直方图

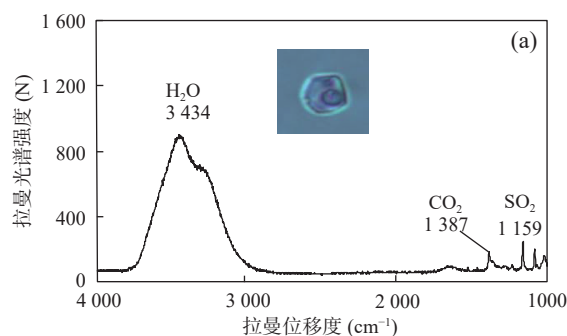
图6 赛坝沟金矿床不同类型包裹体均一温度、盐度分布直方图

Fig. 6 Histogram of homogenization temperature and salinity distribution of different types of inclusions in Saibagou gold deposit

200~240℃、260~300℃出现了两个高频区域(图6e); 流体包裹体的固态 CO₂ 初熔温度为-62.2~-56.4℃, 多低于 CO₂ 的三相点(-56.6℃), 包裹体中可能存在少量的 CH₄ 等组分; CO₂ 笼合物熔化温度为 5.7~8.9℃, 对应的盐度为 2.22% NaCl_{eqv}~7.97% NaCl_{eqv}, CO₂ 部分均一温度为 25.6~29.1℃。

4.1.3 拉曼光谱分析

为确定包裹体的成分, 对赛坝沟的流体包裹体开展了单个包裹体激光拉曼探针成分分析。结果显示,



大部分包裹体中检测到较宽泛的液相 H₂O 包罗峰(图7), 少量包裹体具液相 H₂O 包罗峰和微量 CO₂ 特征峰, 说明赛坝沟的流体包裹体主要为 NaCl-H₂O 体系, 其次为 NaCl-CO₂-H₂O 体系。

4.2 石英 H-O 同位素

赛坝沟矿区 4 件黄铁矿化石英脉中氢氧同位素分析结果(表3)显示, δD_{V-SMOW} 值为-75.1‰~-65.2‰, 平均为-70.5‰; $\delta^{18}O_{\text{石英}(V-SMOW)}$ 值为 10.42‰~11.40‰, 平均为 10.89‰; $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值为~3.3‰, 平均为 2.8‰。

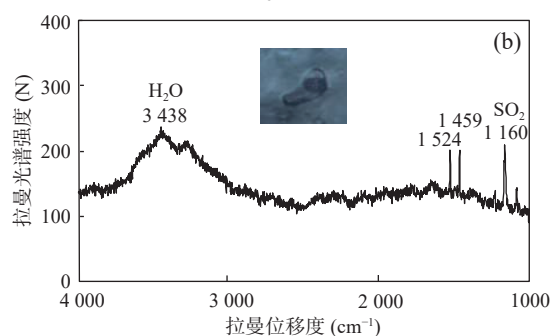


图7 流体包裹体激光拉曼光谱图

Fig. 7 Laser Raman spectra of fluid inclusions

表3 赛坝沟矿区黄铁矿化石英脉氢、氧同位素分析结果

Tab. 3 Analysis results of H-O isotopes in the pyrite quartz veins in Saibagou mining area

送样编号	测试矿物	δD_{V-SMOW} (‰)	$\delta^{18}O_{\text{Quartzite}(V-SMOW)}$ (‰)	Th (°C)	$\delta^{18}O_{H_2O}$ (‰)
SBGKS01-Z01	石英	-73.5	10.78	270	2.7
TXGSY01-Z01	石英	-68.2	11.40	270	3.3
SBGSY01	石英	-75.1	10.94	270	2.8
TXGSY01	石英	-65.2	10.42	270	2.3

注: $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值依据平衡公式 $10^3 \ln \alpha_{\text{石英-水}} = \delta^{18}O_{\text{石英}} - \delta^{18}O_{\text{水}} = 4.48 \times 10^6/T^2 - 4.77 \times 10^3/T + 1.71$ (郑永飞等, 2000), 温度采用流体包裹体均一温度主峰值 270℃。

4.3 黄铁矿 S-Pb 同位素

赛坝沟金矿床金矿矿石中硫化物主要为黄铁矿, 几乎不含硫酸盐。矿石中黄铁矿 S-Pb 同位素(表4)显示, 5 件黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 值为-2.52‰~2.61‰; 4 件黄铁矿的 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 值为 18.0314~18.2503, $^{207}Pb/^{204}Pb$ 值为 15.5907~15.7308, $^{208}Pb/^{204}Pb$ 值为 38.1726~38.4326。

5 讨论

5.1 成矿流体特征

流体是热能的载体, 也是不同形式矿质的载体 (Wilkinson, 2001), 热液矿床成矿过程实质上就是流体作用的过程(邓军等, 2000; Deng et al., 2011; 王刚等, 2017)。流体包裹体作为热液矿床研究中一项必不可

少的重要内容(卢焕章等, 2004; 陈衍景等, 2007; 钟世华等, 2015, 2017), 从一定程度上能够再现成矿时流体物理化学条件, 对矿床成因探讨具有重要启示作用。赛坝沟金矿床流体包裹体以气液两相包裹体和含 CO₂ 三相水溶液包裹体为主, 包裹体均一温度主要为 200~320℃, 盐度为 0.18% NaCl_{eqv}~14.67% NaCl_{eqv}, 流体密度为 0.67~1.13 g/cm³, 气相成分主要为 CO₂ 和 H₂O。赛坝沟金矿成矿流体总体上具有中温、中低盐度、低密度等特征, 属于 H₂O-NaCl-CO₂ 体系。

张德全等(2007)对柴北缘的滩间山、青龙山、红柳沟、红旗沟及野骆驼泉等 7 处造山型金矿床流体包裹体进行了系统研究。研究显示, 柴北缘造山型金矿流体包裹体类型主要为气液两相包裹体和含 CO₂ 三相水溶液包裹体, 含 CO₂ 三相水溶液包裹体均一温度

表 4 赛坝沟金矿硫-铅同位素分析结果表
Tab. 4 S-Pb isotope analysis results of Saibagou gold deposit

样品原号	矿物	样品描述	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}(\text{‰})$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	μ	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	Th/U
21SBG-TS01	黄铁矿	蚀变岩	-1.35	38.368 8	15.730 5	18.233 9	9.74	27.85	42.62	3.82
21SBG-TS01	黄铁矿	蚀变岩	-	38.369 7	15.730 8	18.233 6	9.74	27.87	42.65	3.82
21TME-TS01	黄铁矿	蚀变岩	-	38.172 6	15.590 7	18.031 4	9.49	18.72	37.29	3.82
21TXG-TS01	黄铁矿	蚀变岩	2.37	38.432 6	15.639 2	18.250 3	9.56	21.89	44.36	3.82
SBGSY01	黄铁矿	石英脉	2.61	-	-	-	-	-	-	-
SBGHT01	黄铁矿	石英脉	1.21	-	-	-	-	-	-	-
TXGSY01	黄铁矿	石英脉	-2.52	-	-	-	-	-	-	-

集中多为 177~311 ℃, 总体以中温为主; 气液两相包裹体均一温度跨度较大, 为 119~449 ℃, 但相对集中于 200~300 ℃, 流体包裹体盐度范围为 1.6 % NaCl_{eqv}~11.4 % NaCl_{eqv}, 成矿流体以中温中低盐度的 H₂O-CO₂-NaCl-CH₄ 流体为主。从柴北缘造山型金矿床流体包裹体特征可以看出, 赛坝沟流体包裹体无论是从包裹体类型, 还是从成矿温度、盐度及成分上看均较为相似, 可能暗示了赛坝沟金矿与柴北缘成矿带造山型金矿属于同一成矿系统。

5.2 成矿流体与成矿物质来源

$\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 体系图(图 8)显示, 赛坝沟金矿床样品投点均偏离雨水线, 位于变质水和岩浆水附近, 表明成矿流体组成可能主要为岩浆水或者变质水。考虑到矿区赋矿围岩主要为中奥陶世中酸性侵入岩, 矿体附近有大量岩脉出露。吴洪彬等(2022)获得英云闪长岩成岩年龄为(470.4±5.2)Ma; 朱德全等(2022)获得与 II、IV 矿带紧邻的花岗斑岩成岩年龄为(372.4±4.1)Ma, 并认为其与成矿关系密切, 该年龄为矿床形成的上限年龄, 而矿区变质岩仅在西北角有少量斜长角闪片岩分布(图 2)。前人对赛坝沟金矿石中的绢云母进行了 Ar-Ar 测年(丰成友等, 2002; 张德全等, 2005), 获得赛坝沟矿床的成矿年龄为 426~422 Ma。结合矿区地质特征、成岩成矿时代及区域构造演化、控矿构造系统特征(张德全等, 2007)。综合认为, 赛坝沟金矿床成矿流体可能来源于岩浆水, 少量变质水。

赛坝沟金矿床硫化物主要是黄铁矿, 没有见到硫酸盐矿物, 在低氧逸度下, 硫在成矿流体中通常以 HS⁻、S²⁻ 形式存在(Ohmoto et al., 1997), 此时形成的黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 与整个成矿流体相近, 可以近似代表热液流体的总硫同位素组成(郑永飞等, 2000; 孙升升, 2016; 张爱奎等, 2021)。自然界中硫同位素以幔源硫($\delta^{34}\text{S}$ 值为

0±3‰)、海水硫($\delta^{34}\text{S}$ 值为 20‰)和沉积物中还原硫为主(Ohmoto, 1986; Rollinson, 1993)。矿区黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为-2.52‰~2.61‰, 分布较为集中, 与 S 同位素储库(Ohmoto et al., 1979)相比, 赛坝沟金矿床成矿流体的硫同位素组成基本在陨硫组成范围之内(图 9), 说明硫主要来源于深部幔源流体。与柴北缘造山型金矿床(例如, 滩间山金矿、青龙沟金矿、红柳金矿等)相比, 赛坝沟金矿具有更低的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(图 9), 硫同位素数值升高可能是成矿流体在上升过程中与通道围岩发生了水岩相互作用导致的(刘嘉等, 2021; 唐名鹰等, 2021), 更低的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(零值附近)可能暗示了赛坝沟成矿流体主要来自岩浆热液和变质流体, 与岩浆活动关系密切。

壳源 Pb 具有高 μ 值的特征, μ 值低于 9.74 或低于 9.58 的铅分别来自下地壳或上地幔(Stacey et al., 1975; Doe et al., 1979; 朱炳泉, 1998; 吕鹏瑞等, 2015)。赛坝沟金矿床含矿石英脉 Pb 同位素组成的 μ 值为 9.49~9.74, μ 值相对集中, 其中 2 件样品为 9.74, 2 件样品低于 9.58。通常低 μ 值(7.18)一般为单阶段演化

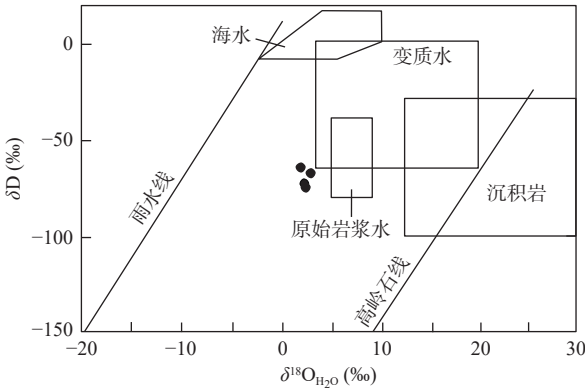


图 8 赛坝沟金矿床 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图解
Fig. 8 Diagram of $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ in Saibagou gold deposit

铅,高 μ 值(9.81)为演化铅,由地幔源转入壳层演化,受壳层物质的影响(Chen et al., 1982; 贾宝剑等, 2012)。赛坝沟金矿床 μ 值为9.49~9.74,暗示了赛坝沟金矿床Pb的来源可能为壳-幔混合来源。

在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解中(图10a),样品投影点跨越了造山带和上地壳增长曲线,同时这些投影点呈现了较好的线性关系($R^2=0.543$),这种线性关系通常被解释为Pb具有混合来源(蒋少涌等, 2006),反映出赛坝沟金矿床Pb并非单一的壳源或幔源组成。在铅同位素 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 成因分类图解中(图10b),样品全部落入了与岩浆作用相关的地壳和与地幔混合的俯冲带铅范围内,表明矿床成矿作用与岩浆作用关系密切(李丽荣, 2023),可能有少量地层铅的加入,这与利用H-O-S同位素探讨的矿床流体及物质来源相一致。

5.3 矿床成因与成矿机制

前人针对赛坝沟金矿床的成因类型已经开展了大量研究工作,其成因认识较为统一,为受构造控制的造山型金矿床(丰成友等, 2002; 张德全等, 2005; 何书跃等, 2023),与胶东主要金矿床类型一致(牛警徽等, 2023)。但矿床成矿流体与成矿物质来源还存在争议,部分人认为成矿流体主要来源于建造水和大气降水,成矿物质来源于地层(张德全等, 2005)。唐名鹰等(2021)认为成矿物质具有幔源特征,主要来源于岩浆活动。赛坝沟地区1:2.5万水系沉积物测量Au元素异常图(图11)显示:Au异常与中奥陶世英云闪长岩较为吻合,Au异常浓积区(峰值 3.950×10^{-9})与主矿体对应好,而滩间山群Au异常总体不明显,也暗示

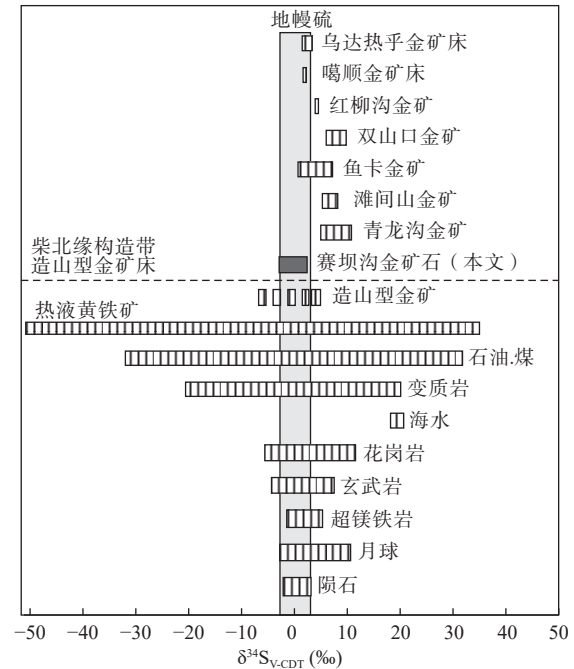
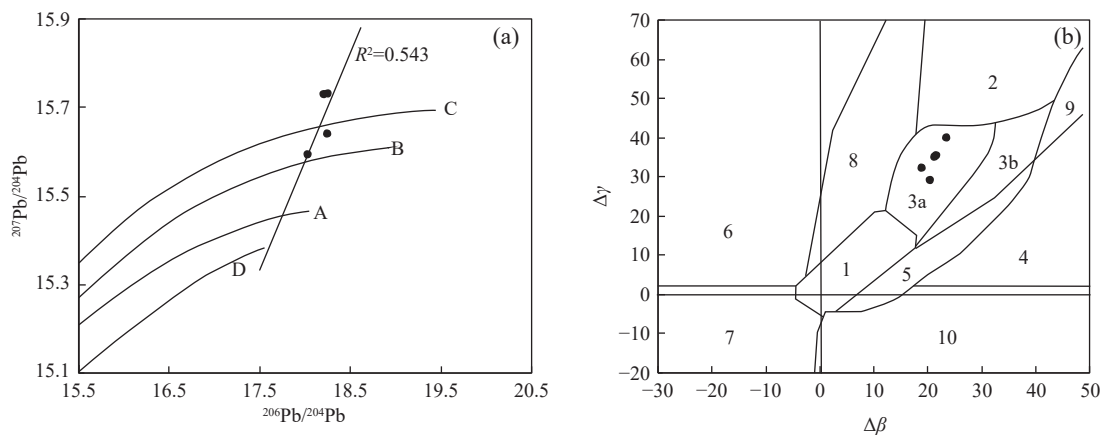


图9 赛坝沟金矿床 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 图解

Fig. 9 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ diagram of Saibagou gold deposit

了赛坝沟金矿成物质主要来源于岩浆活动。测定的流体包裹体特征和H-O-S-Pb同位素研究结果显示,成矿流体为中温、中-低盐度、低密度的 H_2O - NaCl - CO_2 流体; $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 -75.1‰ ~ -65.2‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{石英(V-SMOW)}}$ 值为 10.42‰ ~ 11.40‰ ,表明流体可能主要来源于岩浆水;S-Pb同位素特征反映成矿物质具有幔源特征,与深部岩浆关系密切。利用H-H单阶段正常铅演化模式年龄计算公式得出Pb模式年龄为449~330 Ma,



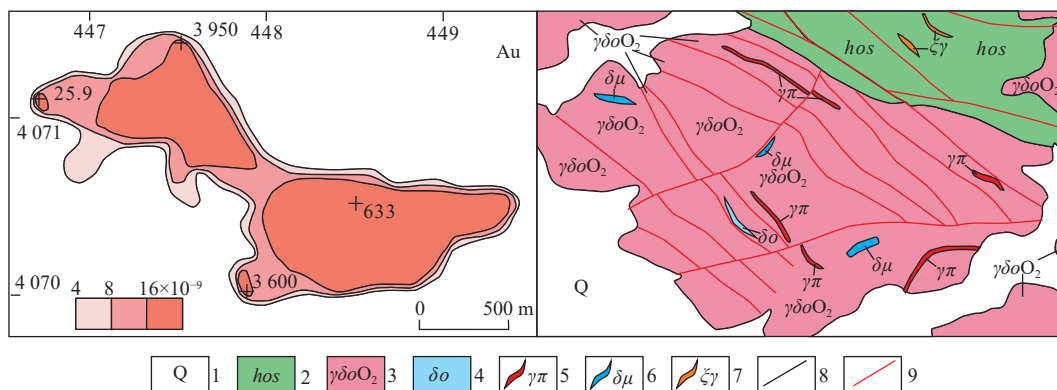
A.地幔(Mantle); B.造山带(Orogenic); C.上地壳(Upper Crust); D.下地壳(Lower Crust); 1.地幔源铅; 2.上地壳铅; 3.地壳与地幔混合的俯冲带铅(3a.岩浆作用; 3b.沉积作用); 4.化学沉积型铅; 5.海底热水作用铅; 6.中深变质作用铅; 7.深变质下地壳铅; 8.造山带铅; 9.古老页岩上地壳铅; 10.退变质铅; 底图据 Zartman et al. (1981)、朱炳泉(1998)

图10 赛坝沟金矿床Pb同位素构造模式图(a)和Pb同位素 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因分类图解(b)

Fig. 10 (a) Structural model and (b) $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ genetic classification diagrams of Pb isotope in Saibagou gold deposit

相对集中在 449~429 Ma, 这与赛坝沟金矿绢云母 Ar-Ar 测年 (426~422 Ma) (丰成友等, 2002; 张德全等, 2005) 基本吻合, 明显晚于围岩英云闪长岩的成岩年

龄 (470 Ma) (朱德全等, 2022), 花岗岩为成矿带入大量幔源成矿物质。因此, 认为赛坝沟金矿床属于造山型金矿, 与矿区的脉岩关系密切。



1.第四系; 2.滩间山群斜长角闪片岩; 3.中奥陶世英云闪长岩; 4.石英闪长岩; 5.花岗斑岩脉;
6.闪长玢岩脉; 7.正长花岗岩脉; 8.地质界线; 9.断层及推测断层

图11 赛坝沟金矿床水系沉积物测量 Au 元素异常图

Fig. 11 Au element anomaly map of stream sediment survey in Saibagou gold deposit

王秉璋等(2022)在柴北缘赛什腾地区识别出~514 Ma、485~464 Ma、444~437 Ma 等 3 期岩浆岩, 认为是原特提斯洋洋内和陆缘俯冲(514~450 Ma)以及闭合后陆陆碰撞过程(445~420 Ma)的产物。赛坝沟金矿成矿年龄为 426~422 Ma(丰成友等, 2002; 张德全等, 2005), 正好处于陆陆碰撞过程末期, 可能为碰撞的挤压环境向造山后伸展环境转变阶段。结合流体包裹体特征及 H-O-S-Pb 同位素特征, 初步推断赛坝沟金矿形成机理: 志留纪随着原特提斯洋闭合, 柴达木地块与欧龙布鲁克地块发生了挤压碰

撞(王秉璋等, 2022), 随着陆陆碰撞地壳逐渐加厚和地幔底侵引起中下地壳熔融形成的岩浆和幔源岩浆混合, 形成富含幔源成矿物质的花岗质岩浆岩, 沿俯冲-碰撞作用形成的断裂构造上升, 随着花岗质岩浆的侵入就位, 继续淋取围岩的成矿元素, 花岗质岩浆逐渐分异演化形成富 Au 的成矿流体, 成矿流体从运移势高值区流向运移势低值区, 在韧性-脆性转换部位的断裂带, 其物理化学条件发生突变, 导致成矿流体沉淀富集, 据此建立了赛坝沟金矿床的成矿模式(图 12)。

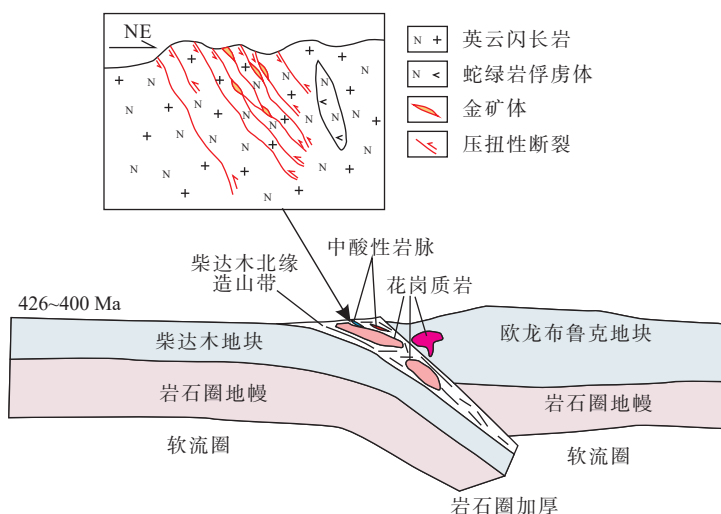


图12 赛坝沟金矿成矿模式图

Fig. 12 Ore-forming model of Saibagou gold deposit

6 结论

(1)赛坝沟金矿床成矿流体为中等温度、中-低盐度的 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2$ 流体。成矿流体可能主要来源于岩浆水,少量变质水的参与。

(2)含金石英脉中的黄铁矿 S、Pb 同位素研究显示,赛坝沟金矿床的成矿物质可能主要来源于岩浆,具幔源特征,与矿区脉岩关系密切。

(3)赛坝沟金矿为造山型金矿,为柴达木地块与欧龙布鲁克地块陆陆碰撞的产物。

致谢:在成文过程中得到中国海洋大学钟世华副教授的悉心指导,野外调研过程中得到赛坝沟矿山企业的大力帮助,在此一并感谢!

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 安生婷,李培庚,杜生鹏,等.青海柴北缘滩间山地区金龙沟金矿成矿模式总结与找矿前景分析[J].西北地质,2020,53(4):99-107.
- AN Shengting, LI Peigeng, DU Shengpeng, et al. An Analysis of Metallogenic Model and Prospecting of Jinlonggou Gold Deposit in Tanjianshan Area, Northern Margin of Qaidam Basin, Qinghai Province[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(4): 99-107.
- 保广普,张林,张海龙.青海赛什腾地区石英脉型金矿特征及找矿前景分析[J].西北地质,2021,54(1):139-146.
- BAO Guangpu, ZHANG Lin, ZHANG Hailong. Characteristics and Prospecting Potential of Quartz Vein-Type Gold Deposits in Saishiteng Area, Qinghai Province[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(1): 139-146.
- 陈衍景,倪培,范宏瑞,等.不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J].岩石学报,2007,3(9):2085-2108.
- CHEN Yanjing, NI Pei, FAN Hongrui, et al. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 3(9): 2085-2108.
- 邓军,杨立强,孙忠实等.构造体制转换与流体多层循环成矿动力学[J].地球科学,2000,25(4):397-403.
- DENG Jun, YANG Liqiang, SUN Zhongshi, et al. Ore-forming dynamics of tectonic regime transformation and multi-layer fluid circulation[J]. Earth Science, 2000, 25(4): 397-403.
- 邓元良,杨佰慧,赵呈祥,等.青海省柴北缘独树沟金矿床成矿流体特征及矿床成因[J].黄金,2018,39(11):7-13.
- DENG Yuanliang, YANG Baihui, ZHAO Chengxiang, et al. Ore-forming fluid characteristics and genesis of the Dushugou Gold Deposit in the northern margin of Qaidam Basin, Qinghai Province[J]. Gold, 2018, 39(11): 7-13.
- 丰成友,张德全,李大新,等.青海赛坝沟金矿地质特征及成矿时代[J].矿床地质,2002,21(1):45-52.
- FENG Chengyou, ZHANG Dequan, LI Daxin, et al. Geological Characteristics and Ore-forming Age of Saibagou Gold Deposit, Qinghai Province[J]. Mineral Deposits, 2002, 21(1): 45-52.
- 顾建峰.安徽省池州市马头钼矿成矿流体特征和矿床成因[D].南京:南京大学,2018:1-68.
- GU Jianfeng. The characteristics of ore-forming fluid and genesis of the Matou Mo deposit, Chizhou, Anhui[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018: 1-68.
- 何书跃,林贵,钟世华,等.造山作用孕育“青海金腰带”[J].西北地质,2023,56(6):1-16.
- HE Shuyue, LIN Gui, ZHONG Shihua, et al. Geological Characteristics and Related Mineralization of “Qinghai Gold Belt” Formed by Orogeny[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(6): 1-16.
- 贾宝剑,李胜荣,杨庆雨,等.湖北鸡笼山矽卡岩型金铜矿床铅同位素地球化学研究[J].现代地质,2012,26(3):471-477+488.
- JIA Baojian, LI Shengrong, YANG Qingyu, et al. Pb Isotope Geochemistry of the Jilongshan skarn-host Au-Cu Deposit in Hubei Province[J]. Geoscience, 2012, 26(3): 471-477+488.
- 蒋少涌,杨涛,李亮,等.大西洋洋中脊 TAG 热液区硫化物铅和硫同位素研究[J].岩石学报,2006,22(10):2597-2602.
- JIANG Shaoyong, YANG Tao, LI Liang, et al. Lead and sulfur isotopic compositions of sulfides from the TAG hydrothermal field Mid-Atlantic Ridge[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(10): 2597-2602.
- 蓝廷广,范宏瑞,胡芳芳,等.胶东石城金矿床成矿流体特征及成矿作用[J].岩石学报,2010,26(5):1512-1522.
- LAN Tingguang, FAN Hongrui, HU Fangfang, et al. Characteristics of ore-forming fluids and ore genesis in the Shicheng gold deposit, Jiadong Peninsula of eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(5): 1512-1522.
- 李丽荣.海南岛燕山晚期钼成矿作用特征[D].南昌:东华理工大学,2023:1-144.
- LI Lirong. Characteristics of molybdenum mineralization in late Yanshanian of Hainan Island--discussion on uranium mineralization potential[D]. Nanchang: Donghua University of Science and Technology, 2023: 1-144.
- 李世珍,马健雄,朱祥坤,等.离子交换分离过程中铅同位素分馏评估及针对 MC-ICPMS 铅同位素测定的分离纯化方法的修正[J].岩石矿物学杂志,2015,34(5):785-792.
- LI Shizhen, MA Jianxiong, ZHU Xiangkun, et al. Pb isotopic fractionation during the ion exchange process and the modification of purification methods for isotope determination by MC-

- ICPMS[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2015, 34(5): 785–792.
- 刘嘉, 蔡鹏捷, 曾小华, 等. 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*, 2021, 48(2): 374–387.
- LIU Jia, CAI Pengjie, ZENG Xiaohua, et al. Geology, ore-forming fluid and metallogenic age of orogenic gold deposits in the Northern Qaidam[J]. *Geology in China*, 2021, 48(2): 374–387.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004, 132–208.
- 陆松年, 王惠初, 李怀坤, 等. 柴达木盆地北缘“达肯大坂群”的再厘定[J]. *地质通报*, 2002, 21(1): 19–23.
- LU Songnian, WANG Huichu, LI Huaikun, et al. Redefinition of the “Dakendaban Group” on the northern margin of the Qaidam basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(1): 19–23.
- 陆松年, 陈志宏, 李怀坤, 等. 秦岭造山带中-新元古代(早期)地质演化[J]. *地质通报*, 2004, 23(2): 107–112.
- LU Songnian, CHEN Zhihong, LI Huaikun, et al. Late Mesoproterozoic-early Neoproterozoic evolution of the Qingling orogen[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(2): 107–112.
- 牛警徽, 田福泉, 邱敦方, 等. 山东旧店金矿床花岗岩类锆石 U-Pb 年龄及对招平断裂带南段岩浆活动规律的约束[J]. *地质通报*, 2023, 42(5): 813–827.
- NIU Jinhui, TIAN Fuquan, QIU Dunfang, et al. Zircon U-Pb age of granitoids in the Jiudian gold deposit, Shandong Province and its constraints on the magmatic activity patterns in the southern section of the Zhaoping fault[J]. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(5): 813–827.
- 吕鹏瑞, 姚文光, 吴亮, 等. 巴基斯坦西北喜马拉雅构造结科希斯坦—拉达克地体 Pb 同位素组成特征及其示踪意义[J]. *西北地质*, 2015, 48(1): 56–62.
- LÜ Pengrui, YAO Wenguang, WU Liang, et al. Lead Isotopic Compositions of the Kohistan-Ladakh Terrane in NW Himalayan Syntax, Pakistan and their Tracer Significance[J]. *Northwestern Geology*, 2015, 48(1): 56–62.
- 宋生琼, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 赣南淘锡坑钨矿床流体包裹体地球化学研究[J]. *地球化学*, 2011, 40(3): 237–248.
- SONG Shengqiong, HU Ruizhong, BI Xianwu, et al. Fluid inclusion geochemistry of the Taosikeng tungsten deposit in southern Jiangxi Province[J]. *Geochimica*, 2011, 40(3): 237–248.
- 孙升升. 新疆西天山博故图金矿床地质地球化学特征及成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016: 1–59.
- SUN Shengsheng. Geology, Geochemistry and Genesis of the Bogutu Gold Deposit, Western Tien Shan, Xinjiang[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016: 1–59.
- 唐名鹰, 董振昆, 彭永和, 等. 青海赛坝沟金矿床深部矿体地质特征及找矿远景分析[J]. *山东国土资源*, 2016, 32(4): 7–11+16.
- TANG Mingying, DONG Zhenkun, PENG Yongh, et al. Geological Characteristics and Prospecting Analysis of Deep Ore Bodies in Saibagou Gold Deposit in Qinghai Province[J]. *Shandong Land Resources*, 2016, 32(4): 7–11+16.
- 唐名鹰, 吴洪彬, 朱德全, 等. 青海省乌兰县赛坝沟金矿外围金多金属矿详查报告[R]. 青海: 乌兰县金穗农牧工商有限责任公司, 2019: 64–103.
- 唐名鹰, 何宗围, 朱德全, 等. 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*, 2021, 40(1): 117–127.
- TANG Mingying, HE Zongwei, ZHU Dequan, et al. 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*, 2021, 40(1): 117–127.
- 童海奎, 张顺桂, 许国武, 等. 乌兰县赛坝沟韧性剪切带型金矿特征及成因[J]. *西北地质*, 2009, 42(1): 88–94.
- TONG Haikui, ZHANG Shungui, XU Guowu, et al. Characteristic and genesis of ductile-shear zone related gold deposits in Saibagou of Wulan County[J]. *Northwestern Geology*, 2009, 42(1): 88–94.
- 王秉璋, 付长垒, 潘彤, 等. 柴北缘赛什腾地区早古生代岩浆活动与构造演化[J]. *岩石学报*, 2022, 38(9): 2723–2742.
- WANG Bingzhang, FU Changlei, PAN Tong, et al. Early Paleozoic magmatism in the Saishiteng area, North Qaidam and their constraint on tectonic evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(9): 2723–2742.
- 王刚, 武昱东, 贾少华, 等. 鄂西北构家河金矿床成矿流体特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 2017, 36(5): 668–680.
- WANG Gang, WU Yudong, JIA Shaohua, et al. Geochemical characteristics of ore-forming fluid in the Goujiahe gold deposit, Northwest Hubei Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2017, 36(5): 668–680.
- 吴洪彬, 王炜晓, 郑成龙, 等. 柴北缘赛坝沟金矿床中英云闪长岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. *西北地质*, 2022, 55(1): 101–113.
- WU Hongbin, WANG Weixiao, ZHENG Chenglong, et al. Zircon U-Pb age geochemical characteristics and geological significance of tonalite in saibagou gold deposit, the northern margin of Qaidam[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(1): 101–113.
- 张爱奎, 莫宣学, 张勇, 等. 东昆仑西段库德尔特金多金属矿床成因探讨[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(12): 3762–3778.
- ZHANG Aikui, MO Xuanxue, ZHANG Yong, et al. Ore genesis of Kudeerte gold-polymetallic deposit in western part of East Kunlun[J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(12): 3762–3778.
- 张德全, 党兴彦, 余宏全, 等. 柴北缘—东昆仑地区造山型金矿床的 Ar-Ar 测年及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2005, 24(2): 87–98.
- ZHANG Dequan, DANG Xingyan, SHE Hongquan, et al. Ar-Ar dating of orogenic gold deposits in northern margin of Qaidam and East Kunlun Mountains and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 2005, 24(2): 87–98.
- 张德全, 王富春, 余宏全, 等. 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*, 2007, 318(1): 92–100.
- ZHANG Dequan, WANG Fuchun, SHE Hongquan, et al. Three-order ore-controlling structural system of orogenic gold deposits

- in the northern Qaidam margin-East Kunlun region[J]. *Geology in China*, 2007, 318(1): 92-100.
- 张建新, 于胜尧, 李云帅, 等. 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*, 2015, 31(12): 3531-3554.
- ZHANG Jianxin, YU Shengyao, LI Yunshuai, et al. Subduction, accretion and closure of the Proto-Tethys Ocean: Early Paleozoic accretionary/collisional orogeny in the Altun-Qilian-North Qaidam orogenic system[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(12): 3531-3554.
- 郑永飞, 徐宝龙, 周根陶. 矿物稳定同位素地球化学研究[J]. *地学前缘*, 2000, 7(2): 299-320.
- ZHENG Yongfei, XU Baolong, ZHOU Gentao. Geochemical Studies of stable isotopes in Minerals[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(2): 299-320.
- 钟世华. 新疆维宝铜铅锌矿床成因研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2018: 1-191.
- ZHONG Shihua. Genesis of the Weibao Cu-Pb-Zn deposit in Xinjiang [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2018: 1-191.
- 钟世华, 丰成友, 任雅琼, 等. 新疆维宝砂卡岩铜铅锌矿床维西矿段成矿流体性质和来源[J]. *矿床地质*, 2017, 36(2): 483-500.
- ZHONG Shihua, FENG Chengyou, REN Yaqiong, et al. Characteristics and sources of ore-forming fluid from Weixi ore block of Weibao skarn Cu-Pb-Zn deposit, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 2017, 36(2): 483-500.
- 钟世华, 申萍, 潘鸿迪, 等. 新疆西准噶尔苏云河铅矿床成矿流体和成矿时代[J]. *岩石学报*, 2015, 31(2): 449-464.
- ZHONG Shihua, SHEN Ping, PAN Hongdi, et al. The ore-forming fluid and geochronology of the Suyunhe Mo deposit, West Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(2): 449-464.
- 朱炳泉. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社, 1998, 1-330.
- 朱德全, 唐名鹰, 丁正江, 等. 柴北缘赛坝沟金矿床花岗斑岩脉的成因及动力学背景: 来自年代学和地球化学的证据[J]. *现代地质*, 2022, 36(3): 898-910.
- ZHU Dequan, TANG Mingying, DING Zhengjiang, et al. Petrogenesis and Geodynamic Setting of Granite Porphyry Dike in Saibagou Gold Deposit, Northern Margin of Qaidam: Evidence from Geochronology and Geochemistry[J]. *Geoscience*, 2022, 36(3): 898-910.
- Chen Y W, Mao C X, Zhu B Q. Lead isotopic composition and genesis of Phanerozoic metal deposits in China[J]. *Geochemistry*, 1982, 1(2): 137-158.
- Deng J, Wang Q F, Xiao C H, et al. Tectonic-magmatic-metallogenic system, Tongling ore cluster Region, Anhui Province, China[J]. *International Geology Review*, 2011, 53 (5-6): 449-476.
- Deng J, Wang Q F, Xiao C H, et al. Tectonic-magmatic-metallogenic system, Tongling ore cluster region, Anhui Province, China[J]. *International Geology Review*, 2011, 53 (5-6): 449-476.
- Doe B R, Zartman R E. Geochemistry of hydrothermal ore deposits[M]. New York: John Wiley & Sons, 1979, 22-70.
- Hall D L, Sterner S M, Bodnar R J. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions[J]. *Economic Geology*, 1988, 83(1): 197-202.
- Ohmoto H, Rye R O. Isotopes of sulfur and carbon[A]. In: Barnes H L(Ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* Edition[M]. New York: John Wiley and Sons, 1979, 509-567.
- Ohmoto H, Goldhaber M B. Sulfur and carbon isotopes. In: Barnes H L(Ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*[M]. New York: John Wiley and Sons, 1997, 519-611.
- Ohmoto H. Stable isotope geochemistry of ore deposits[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1986, 16(1): 491-559.
- Roedder E. Fluid inclusions[J]. *Reviews in Mineralogy*, 1984, 12: 1-64.
- Rollinson H R. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1993, 1-34.
- Stacey J S, Kramers J D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two stage model[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1975, 26(6): 207-221.
- Wilkinson J J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits[J]. *Lithos*, 2001, 55 (1-4): 229-272.
- Zartman R E, Doe B R. Plumb tectonics-the model[J]. *Tectonophysics*, 1981, 75(1-2): 135-162.