

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*

唐名鹰^{1,2}, 何宗围^{1,2}, 朱德全^{1,2}, 张宇³, 高振华^{1,2}, 董振昆^{1,2}, 李小东^{1,2}

(1 山东省第八地质矿产勘查院, 山东日照 276826; 2 山东省地矿局有色金属找矿与资源评价重点实验室, 山东日照 276826; 3 河南省地质调查院, 河南郑州 450001)

摘要 柴北缘赛坝沟金矿床是青海省赛什腾山-阿尔茨托山成矿带上重要的岩金矿床, 成矿地质条件优越。矿体赋存于北西-北北西向韧-脆性断裂构造组内, 呈脉状、透镜状, 构造控矿作用明显, 矿石类型分为石英脉型和蚀变糜棱岩型。热液成矿期可划分为4个阶段: 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。文章基于各热液成矿阶段硫化物的硫、铅同位素研究, 探讨了赛坝沟金矿床成矿物质来源。研究表明, 赛坝沟金矿床矿石中硫同位素在0.50‰~3.93‰之间, 分布集中, 通过与区域矿床围岩及成矿后石英脉硫同位素值(3.7‰~4.0‰)进行比较, 认为赛坝沟金矿中的硫除来自于围岩外, 更多来自于深部的幔源流体; 铅同位素组成特征分析表明, 赛坝沟金矿床矿石铅主要来源于深部地幔与下地壳铅混合, 也有少量上地壳铅的参与, 而围岩铅主要来源于上地壳。

关键词 地球化学; 硫、铅同位素; 成矿物质来源; 赛坝沟金矿床; 柴北缘

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

S and Pb isotopic compositions in Saibagou gold deposit on north margin of Qaidam Basin: An indication to the source of metallogenic materials

TANG MingYing^{1,2}, HE ZongWei^{1,2}, ZHU DeQuan^{1,2}, ZHANG Yu³, GAO ZhenHua^{1,2},
DONG ZhenKun^{1,2} and LI XiaoDong^{1,2}

(1 No. 8 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Rizhao 276826, Shandong, China; 2 Key Laboratory of Non-ferrous Metals Mining and Resource Evaluation in Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Rizhao 276826, Shandong, China; 3 Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract

Located in the Wulan area of Qinghai Province, the Saibagou gold deposit is an important rock gold deposit in the mineralization belt of the Xishtengshan—Alzto Mountain metallogenic belt. The ore deposit is distributed in the NW-NNW trending ductile-brittle fault tectonic group, and the structure-controlling orebody is vein-like and lenticular. The ore is divided into quartz vein type and altered mylonite type. The hydrothermal mineralization period can be divided into four stages: I stage, a small amount of pyrite and smoky gray quartz, II stage, gold-pyrite-milky white quartz, III stage, polymetallic sulfide-gold-grayish to grayish brown quartz, IV stage, grayish white to pale red quartz-carbonate rocks. Sulfur and lead isotope analysis of sulfide in each hydrothermal metallogenic stage was carried out to reveal the source of the Saibagou gold deposit. The results show that the sulfur isotopes in the ore of the Saibagou gold deposit are distributed in the range of 0.50‰~3.93‰. By comparing

* 本文得到国家自然科学基金项目(编号:41973048)和山东省地矿局科技创新项目(编号:Y201924)联合资助
第一作者简介 唐名鹰,男,1990年生,工程师,从事区域地质调查与矿产勘查工作。Email:353635085@qq.com
收稿日期 2020-03-29;改回日期 2020-10-24。赵海杰编辑。

with the sulfur isotopes in the surrounding rock of the regional deposit and the post-mineralization quartz vein (3.7‰~4.0‰), the authors hold that the sulfur in the Saybagou gold deposit came more from the deep mantle source flow than from the surrounding rock. The lead isotopic composition analysis shows that the lead in the ore of the Saibagou gold deposit mainly came from the mixture of the lead in the deep mantle and the lead in the lower crust, with a small amount of lead in the upper crust, while the lead in the surrounding rock mainly came from the upper crust.

Key words: geochemistry, S-Pb isotope, ore-forming material source, Saibagou gold deposit, northern margin of Qaidam

柴北缘构造带位于中国秦祁昆造山系的中部区域,柴达木地块、全吉地块和中南祁连弧盆系以及东昆仑弧盆系的交界部位,该构造带东起沙柳河地区哇洪山-温泉断裂,向西经锡铁山、鱼卡至小赛什腾山,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; Song et al., 2014; 张建新等, 2015; Chen et al., 2018; 蔡鹏捷等, 2018)(图1a)。成矿区带划分属赛什腾山-阿尔茨托山加里东期、印支期铅、锌、金、银、钨、锡、铬、煤(铜、钴、稀土)成矿带,为青海省比较重要的内生金属成矿带,成矿条件优越,前期矿床研究主要集中在锡铁山-小赛什腾山以及沙柳河一带,先后发现并评价了锡铁山铅锌矿床、青龙滩含铜硫铁矿床、双口山铅(银)矿床、滩间山金矿床、青龙沟金矿床、鱼卡金矿床以及沙柳河南区钨锡铅多金属矿床等中大型矿床(韩生福, 2004; 曹世泰, 2013)。关于赛坝沟地区的研究较少,主要在北部糜棱岩带,先后发现了乌达热乎、赛坝沟、拓新沟以及噶顺金矿床(点),其中仅赛坝沟金矿床达到中型规模,南部糜棱岩带中发育黑山铀钍矿床、可可特沟铜矿点以及夏乌日塔铅锌多金属矿床。整体看来,赛坝沟地区矿床(点)集中产在糜棱岩带及其次级断裂中。前人关于赛坝沟成矿物质、成矿时代均进行了一定的研究。付青元等(1998)通过对赛坝沟金矿区地层、岩浆岩、构造和矿床的研究,认为矿区北侧早志留世花岗岩的侵入为成矿提供了热液来源,岩浆热液萃取滩间山群火山岩系中成矿物质组分,形成含金热液,并在北西向韧性剪切带相对张性部位沉淀成矿。张拴宏等(2001)通过对赛坝沟地区矿石及岩石硫、氢、氧、锶等同位素的组成进行研究,认为赋矿花岗质岩石为深源成因,具幔源或壳幔混合特征,成矿物质来源于深部,而成矿热液主要来自于周围的深源花岗质岩石,具混合热液的特征。丰成友等(2002)通过对

赛坝沟金矿床地质背景、地质特征及成矿时代进行研究后,认为该矿床为造山型金矿,造山碰撞作用使得来源于深部的建造水和大气降水在碰撞带和大型剪切带长距离的迁移活动,并萃取围岩的成矿元素,形成含金流体,并在构造性质转换部位沉淀成矿。

由于以上研究对赛坝沟金矿床成矿物质来源存在不同的认识,本次在收集前人资料的基础上,采集了赛坝沟金矿床不同成矿阶段矿石样品。通过与共生硫化物硫、铅同位素进行对比研究,试图进一步探讨赛坝沟金矿床成矿物质来源,为赛坝沟地区原生金矿床的找矿及勘查工作提供进一步研究的科学依据。

1 地质背景

赛坝沟金矿床位于赛什腾山-阿尔茨托山成矿带之沙柳河加里东期成矿亚带中北部,区域构造位置横跨柴北缘构造带滩间山岩浆弧、柴北缘蛇绿混杂岩带2个构造单元,区域上主要出露中元古代—古生代地层(王振强, 2017):沙柳河岩群(Pt_2S)黑云斜长片麻岩、二云斜长片麻岩、云母石英片岩以及榴辉岩透镜体,滩间山群(COT)变火山-碎屑岩组及基性-超基性蛇绿构造混杂岩,牦牛山组巨-粗粒的砾-砂级磨拉石建造。山麓及山前地带出露古近纪—第四纪半固结-松散的泥质-砂砾质沉积地层。区内岩浆岩主要分布在托莫尔日特-道希根乌兰一带,为柴北缘加里东期俯冲碰撞造山和海西期陆内岩浆活动产物,其中奥陶世英云闪长岩-花岗闪长岩-闪长岩岩石组合为赛坝沟金矿床主要赋矿围岩。受晚古生代强烈俯冲-碰撞造山影响,区内形成一系列北西西向紧密排列的左行平移-逆冲韧-脆性糜棱岩带,后期可见东北向张性断裂发育,区内金多金属矿床(点)均发育在该剪切带及其次级断裂中,显示出良好的金

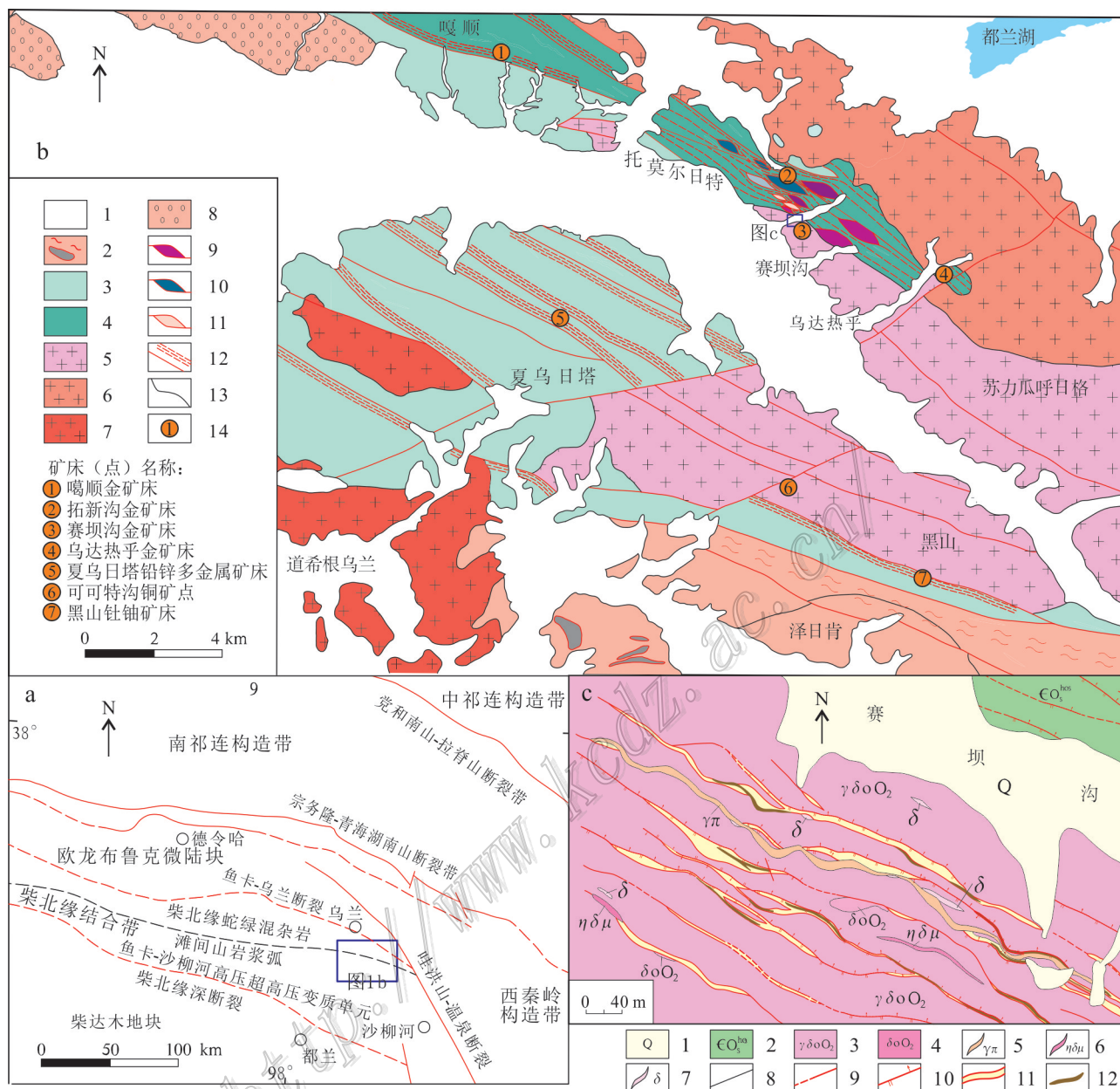


图 1 赛坝沟金矿床区域构造位置(a)、区域地质(b)和矿区地质图(c)(据唐名鹰等,2016;王振强,2017修改)

图 1b 图例:1—第四系;2—中元古代沙柳河高压-超高压变质岩;3—寒武系—奥陶系滩间山群;4—寒武系—奥陶系蛇绿混杂岩;5—中奥陶世花岗岩;6—早志留世花岗岩;7—早石炭世花岗岩;8—中晚泥盆世托牛山组;9—辉长岩岩片;10—斜长角闪岩岩片;11—变粉砂岩岩片;12—断层及糜棱岩带;13—地质界线;14—矿床(点)位置及编号

图 1c 图例:1—第四系;2—赛坝沟蛇绿混杂岩斜长角闪岩;3—英闪闪长岩;4—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—逆断层;11—碎裂岩化蚀变破碎带;12—金矿体

Fig. 1 Regional tectonic location (a), regional geology (b) and geological map (c) of the Saibagou gold deposit(modified after Tang et al., 2016; Wang, 2017)

Fig. 1b legend: 1—Quaternary; 2—Mesoproterozoic Shaliuhe high-pressure-ultrahigh-pressure metamorphic rock; 3—Cambrian—Ordovician Tanjianshan Group; 4—Cambrian—Ordovician ophiolitic melange; 5—Middle Ordovician granite; 6—Early Silurian granite; 7—Early Carboniferous granite; 8—Middle and Late Devonian Maoniushan Formation; 9—Gabbro slabs; 10—Amphibolite slabs; 11—Variable siltstone slabs; 12—Fault and mylonite zone; 13—Geological boundary; 14—Deposit (ore spot) location and serial number

Fig. 1c legend: 1—Quaternary; 2—Amphibolite of ophiolitic melange in Saibagou; 3—Tonalite; 4—Quartz diorite; 5—Granite porphyry vein; 6—Diorite porphyrite vein; 7—Diorite vein; 8—Geological boundary; 9—Fault and inferred fault; 10—Reverse fault; 11—Cataclastic alteration fracture zone; 12—Gold orebody

成矿潜力(图1b)。

赛坝沟金矿床位于青海海西州乌兰县柯柯镇东南侧,由原青海省第六地质大队发现并进行初步评价。自2012年起,山东省第八地质矿产勘查院对赛坝沟金矿深部及其外围进行勘查工作,随着矿床深部及外围找矿的突破,该矿床已达到中型规模,并具有成为大型岩金矿床的潜力。赛坝沟金矿床主要赋存于区内发育的北西-北北西向韧-脆性断裂构造组内,并严格受其控制,该断裂带密集平行展布,具有一定的斜列性,断裂面呈舒缓波状延伸(图1c),地表倾向产状多为北东向,倾角一般在 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 之间,局部近于直立,结构面性质以压性、压扭性为主,断裂形成的破碎带宽 $0.5\sim 4\text{ m}$,长 $750\sim 1500\text{ m}$ 。目前,赛坝沟及其外围金矿床共圈出5条主矿体,呈透镜状或脉状产出,局部具尖灭再现、分支复合以及膨胀夹缩等特征,各矿体规模大小不等,长 $40\sim 370.9\text{ m}$,厚度 $0.2\sim 4.99\text{ m}$ 不等,倾向延深 $66.9\sim 584.29\text{ m}$,矿石品位变化较大,部分区段明金发育,矿体产状与断裂面基本一致。矿区围岩蚀变分带不明显,其中近矿围岩以黄铁矿化、绢英岩化、硅化为主,往外依次为碳酸盐化和绿泥石化。根据蚀变特征,将矿石类型分为石英脉型和蚀变糜棱岩型两类,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、黄铁绢英岩化蚀变的构造岩类(张庆来, 2014;唐名鹰, 2017)。

本次研究根据含石英脉野外产出特征,矿物共生组合特征以及各阶段形成产物的切割、穿插和叠加改造关系等综合研究资料,将热液成矿期从早到晚划分为4个阶段: I 少量黄铁矿-烟灰色石英阶段(图2a):主要为烟灰色石英脉,少量中粗粒黄铁矿颗粒沿裂隙或岩石缝隙呈稀疏浸染状不均匀分布(图2f); II 金-黄铁矿-乳白色石英阶段:主要为乳白色粗粒石英脉夹细粒黄铁矿发育(图2b、c),该阶段矿石与I阶段矿石明显区别在于石英颗粒变粗、黄铁矿变细且局部可见自然金、碲金矿、碲金银矿以及碲铅矿的发育(图2g),黄铜矿发育较少; III 多金属硫化物-金-灰白色-灰褐色石英阶段:沿II阶段石英脉裂隙多发育(图2b),除黄铁矿外,多伴生黄铜矿等多金属硫化物脉,黄铁矿及其集合体粒径较粗,裂隙发育,表面麻点较多,呈浸染状成片分布,局部呈粗脉状(图2d),矿石裂隙以及矿物中发育较多的自然金、碲金矿、碲金银矿以及碲铅矿(图2h); IV 灰白色-浅肉红色石英-碳酸盐岩阶段:以石英脉、方解石脉为

主,呈顺层或斜切脉状穿插于上述3个阶段的石英脉中(图2a、e),脉石矿物颗粒粗,黄铁矿偶见,呈稀疏浸染状或断续脉状分布,偶见团块状粗粒方铅矿(图2i)、闪锌矿集合体发育。其中,与金形成相关的成矿阶段为I黄铁矿-烟灰色石英阶段、II黄铁矿-乳白色石英阶段、III多金属硫化物-金-灰白色-灰褐色石英阶段阶段。

2 采样及实验分析方法

本次研究采取的测试样品均为各阶段系统取样,其中I~III阶段样品为含黄铁矿等硫化物的矿石,采样件数为6件;IV阶段样品为含方铅矿石英-方解石脉和黄铁矿化碳酸盐脉,采样件数为2件。样品的粉碎、单矿物的挑选以及分析测试均在北京科荟测试技术有限公司完成,具体流程如下:首先将全岩硫、铅同位素分析样品粉碎至200目以下,在双目镜下手工挑选,使单矿物纯度达到99%以上,其中单矿物硫同位素分析样品质量为 0.1 g ,单矿物铅同位素分析样品质量在 0.25 g 。

硫同位素分析采用稳定气体同位素质谱仪MAT-253plus完成, $\delta^{34}\text{S}$ 值为测试得出的 $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ 比值经V-CDT标准化后求得,测试精度优于 0.2‰ 。铅同位素采用ThermoFisher NEPTUNE Plus多接受-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°C 的条件下用三酸将样品分解后,采用树脂交换法分离出铅(李世珍等, 2015),蒸干后进行铅同位素测定,分析精度在误差范围以内。

3 结果

3.1 硫同位素分析结果

赛坝沟金矿床硫同位素样品共8件,其中黄铁矿7件,方铅矿1件。从表1测试结果来看,黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值在I、II成矿阶段分布区间为 $2.44\text{‰}\sim 2.85\text{‰}$,平均值为 2.60‰ ,极差为 0.41‰ ,在III、IV成矿阶段分布区间为 $3.32\text{‰}\sim 3.93\text{‰}$,平均值为 3.62‰ ,极差为 0.61‰ ,方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 0.98‰ 。从上述结果可看出,I、II阶段到III、IV阶段黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 有略微的增加,根据黄铁矿硫同位素平衡分馏曲线(Ohmoto et al., 1997),随着成矿过程的持续, $\delta^{34}\text{S}$ 随着温度的降低而略微增加。而方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 0.98‰ ,明显小于黄铁矿中 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布,其原因在于方铅矿相对于

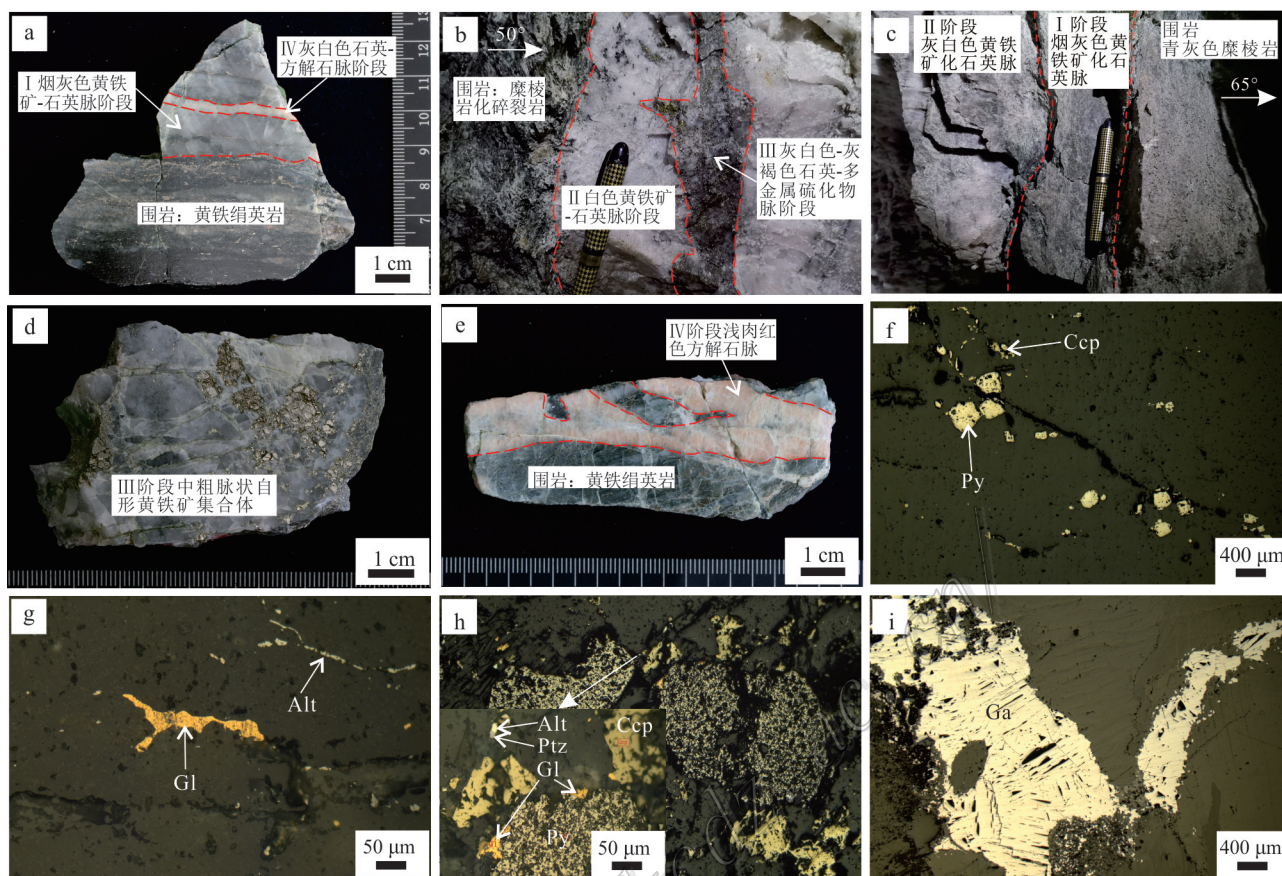


图2 赛坝沟金矿矿石的野外露头、手标本及镜下特征

a. IV阶段方解石-石英脉切入I阶段黄铁矿化石英脉;b. III阶段灰黑色多金属硫化物-石英脉沿II阶段黄铁矿-石英脉裂隙产出;c. I阶段、II阶段黄铁矿化石英脉产出状态;d. III阶段灰黑色多金属硫化物-石英脉中粗脉状自形黄铁矿集合体;e. IV阶段方解石脉侵入围岩;f. I阶段黄铁矿化石英脉中浸染状黄铁矿(Py)、黄铜矿(Ccp);g. II阶段黄铁矿化石英脉中树枝状自然金(Gl)和细脉状碲铅矿(Alt);h. III阶段矿石中黄铁矿(Py)、黄铜矿(Ccp)、自然金(Gl)、碲金银矿(Ptz)、碲铅矿(Alt)伴生;i. IV阶段方解石-石英脉中方铅矿(Ga)集合体

Py—黄铁矿;Ccp—黄铜矿;Gl—自然金;Alt—碲铅矿;Ptz—碲金银矿;Ga—方铅矿

Fig. 2 Field outcrops, hand specimens and microscopic characteristics of ore in the Saibagou gold deposit

a. The calcite quartz veins (stage IV) cutting pyritized quartz veins (stage I); b. The grayish black polymetallic sulfide-quartz vein (stage III) along the fissure of pyrite-quartz vein (stage II); c. The productive state of I and II stage pyrite quartz vein; d. The grayish black polymetallic sulfide quartz vein (stage III) with coarse veins of euhedral pyrite; e. Calcite veins (stage IV) intruding into surrounding rocks; f. Disseminated pyrite and chalcopyrite in pyrite fossil veins (stage I); g. Dendritic natural gold and veinaceous tellurite in pyritized quartz veins (stage II); h. Pyrite, chalcopyrite, native gold, petzite, altaite associated in III stage ore; i. Galena aggregate in calcite-quartz vein (stage IV)

Py—Pyrite; Ccp—Chalcopyrite; Gl—Native gold; Alt—Altaite; Ptz—Petzite; Ga—Galena

H_2S 的硫同位素平衡分馏系数($A=-0.63$)小于黄铁矿的平衡分馏系数($A=0.40$) (Ohmoto et al., 1997), 所以 $\delta^{34}S$ 值优先进入黄铁矿中, 导致IV阶段方铅矿 $\delta^{34}S$ 值明显小于同阶段的黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值。

3.2 铅同位素分析结果

选取以上黄铁矿、方铅矿金属硫化物样品进行铅同位素分析, 从表2测试结果来看, 黄铁矿样品中 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值为 17.2315~17.9231, 平均值为

17.5748, 极差为 0.6916; $^{207}Pb/^{204}Pb$ 比值为 15.3143~15.4321, 平均值为 15.3807, 极差为 0.1178; $^{208}Pb/^{204}Pb$ 比值为 37.3168~38.3150, 平均值为 37.7158, 极差为 0.9982。方铅矿样品中 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值为 18.6542, $^{207}Pb/^{204}Pb$ 比值为 15.6649, $^{208}Pb/^{204}Pb$ 比值为 39.3932。以上测试结果表明, 赛坝沟金矿主成矿期铅同位素组成较为稳定, 变化范围较小, 可代表赛坝沟金矿床金属硫化物的铅同位素特征。

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。

图3 赛坝沟金矿床成矿阶段、矿物生成顺序

Fig. 3 Mineralization stages and paragenetic sequence of minerals in the Saibagou gold deposit

表1 柴北缘构造带赛坝沟地区和滩间山地区硫化物硫同位素组成

Table 1 S isotopic composition of sulfide in Saibagou area and Tanjiangshan area on the north margin of Qaidam

区域位置	样品编号/矿床或岩性	测试矿物	$\delta^{34}S_{V-CTD}/\text{‰}$	资料来源
柴北缘构造带 赛坝沟地区	19-1b1/ I 阶段黄铁矿化石英脉	黄铁矿	2.55	本文
	19-1b2/ I 阶段黄铁矿化石英脉	黄铁矿	2.54	
	19-2b1/ II 阶段黄铁矿化石英脉	黄铁矿	2.85	
	19-2b2/ II 阶段黄铁矿化石英脉	黄铁矿	2.44	
	19-3b2/ III 阶段多金属硫化物石英脉	黄铁矿	3.32	
	19-3b3/ III 阶段多金属硫化物石英脉	黄铁矿	3.93	
	19-4b1/ IV 阶段黄铁矿化无矿碳酸盐脉	黄铁矿	3.60	
	19-4b2/ IV 阶段方铅矿化石英-方解石脉	方铅矿	0.98	
	赛坝沟金矿床	黄铁矿	0.5~1.3	
噶顺金矿床	黄铁矿	1.6~1.9		
乌达热乎金矿床	黄铁矿	1.3~3.4		
围岩及成矿后石英脉	黄铁矿	3.7~4.0		
柴北缘构造带 滩间山地区	青龙沟金矿床	黄铁矿	5.0~11.0	张延军,2017
	滩间山金矿床	黄铁矿	5.31~8.54	国家辉等,1998
	鱼卡金矿床	黄铁矿	0.5~7.4	范贤斌,2017
	双口山南金多金属矿床	黄铁矿	6.0~7.4	孟和,2017
	红柳沟金矿床	黄铁矿	3.9~4.4	张延军,2017

测试单位:北京科荟测试技术有限公司。

4 成矿物质来源讨论

4.1 硫的来源

黄铁矿等作为金矿床中常见载金硫化物,黄铁

矿晶形、颗粒大小、破碎程度等均影响矿石中金的含量分布(蔡元吉等,1993;陈光远等,1987),通过对黄铁矿等矿物中硫同位素的研究,可以用来判断矿床成矿物质来源(Ohmoto,1986; Hoefs,1997)。热液矿床中不同硫化物的硫同位素组成不仅与成矿溶液的

表2 赛坝沟金矿床铅同位素组成

Table 2 Pb isotopic composition of the Saibaigou gold deposit

样号	样品描述	分析对象	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	μ	ω	Th/U	资料来源
19-1b1	I 阶段黄铁矿化石英脉	黄铁矿	17.781	15.427	37.874	9.19	36.05	3.8	本文
19-1b2	I 阶段黄铁矿化石英脉	黄铁矿	17.923	15.432	38.315	9.19	37.15	3.91	
19-2b1	II 阶段黄铁矿化石英脉	黄铁矿	17.564	15.402	37.625	9.17	35.99	3.8	
19-2b2	II 阶段黄铁矿化石英脉	黄铁矿	17.641	15.408	37.830	9.17	36.48	3.85	
19-3b2	III 阶段多金属硫化物石英脉	黄铁矿	17.456	15.349	37.630	9.08	36.14	3.85	
19-3b3	III 阶段多金属硫化物石英脉	黄铁矿	17.426	15.332	37.420	9.05	35.23	3.77	
19-4b1	IV 阶段黄铁矿化无矿碳酸盐脉	黄铁矿	17.231	15.314	37.317	9.05	35.77	3.83	
19-4b2	IV 阶段方铅矿化石英-方解石脉	方铅矿	18.654	15.665	39.393	9.57	39.64	4.01	
980831-2	赛坝沟 II 号带矿石	黄铁矿	17.781	15.430	37.735	9.2	35.48	3.73	
980726-2	绿泥石化闪长岩	全岩	18.687	15.662	38.966	9.56	37.72	3.82	
980726-3	花岗闪长岩	全岩	18.386	15.632	38.304	9.53	36.39	3.7	
980726-4	英云闪长岩	全岩	18.490	15.706	38.757	9.66	38.38	3.85	

测试单位:北京科荟测试技术有限公司。Pb 同位素参数使用 GeoKit 软件(路远发, 2004)计算。

硫同位素组成、成矿温度有关,而且与成矿溶液的 pH 值、氧逸度以及离子强度等相关,同时受矿物形成体系的开放或封闭性质所控制(蔡元吉等,1993; Ohmoto, 1972)。在高温($t > 400^\circ\text{C}$)条件下,热液体系中硫主要为 H_2S 和 SO_2 , 热液全硫的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 值为 H_2S 和 SO_2 中的 $\delta^{34}\text{S}$ 值两者相加,中低温($t < 350^\circ\text{C}$)条件下,热液体系中硫以硫酸盐和 H_2S 为主(郑永飞等, 2000)。另外,在高氧逸度条件下形成的硫化物比热液的 $\delta^{34}\text{S}$ 值要小得多,因此,在低的 pH 和氧逸度条件下,热液体系以 H_2S 为主时,热液的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 值与金属硫化物中 $\delta^{34}\text{S}$ 值相近(吴永乐等, 1987; 郑永飞等, 2000)。赛坝沟金矿床中金属矿物组合较为简单,仅发育黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、磁铁矿和少量碲化物等,硫酸盐类矿物未见,说明矿床是在低氧逸度条件下形成的,并且矿床金属硫化物共生组合、围岩蚀变特征以及张拴宏等(2001)流体包裹体测温数据均指示热液体系为中低温环境,通过上述分析,表明成矿热液体系中的硫以 H_2S 为主,成矿流体中的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}} \approx \delta^{34}\text{S}_{\text{金属硫化物}}$ (吴永乐等, 1987; 郑永飞等, 2000)。

自然界中硫同位素以幔源硫($\delta^{34}\text{S}$ 值约 3‰) (Ohmoto, 1986)、海水硫($\delta^{34}\text{S}$ 值约 20‰)以及沉积物还原硫为主(Rollinson, 1993)。赛坝沟金矿床硫同位素组成频率直方图中,硫同位素值集中分布(图 5),综合张拴宏等(2001)所测数据,赛坝沟及周边金矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 0.50‰~3.93‰ 之间,区域矿床围岩及成矿后石英脉 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 3.7‰~4.0‰ (张拴宏等, 2001),上述数据中赛坝沟及周边金矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值除包含区域

矿床围岩及成矿后石英脉外,更多接近于原始地幔来源的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(约 3‰),说明赛坝沟金矿中的硫除来自于围岩外,更多来自于深部的幔源流体。

同时,在柴北缘构造带范围内,滩间山地区金矿床硫同位素组成范围在 0.5‰~11‰ 之间(张延军, 2017; 国家辉等, 1998; 范贤斌, 2017; 孟和, 2017),对比赛坝沟地区来看,整体具更大的正值,刘嘉等(2019)在研究中指出,以上矿床硫同位素数值主要落在造山型金矿范围内,推测成矿流体在上升过程中与通道围岩发生了水岩相互作用,导致硫同位素数值升高,这在一方面指示了上述矿床为造山型金矿床。综合以上证据,赛坝沟地区矿床中的硫在 0.50‰~3.93‰ 之间分布,峰值集中在原始地幔值的 3‰ 左右,与柴北缘西部滩间山地区金矿床中偏大的硫同位素数值不一致,可推断赛坝沟金矿床中硫主要来自于深源,上升过程中围岩水岩作用对硫同位素的影响小。

4.2 铅的来源

铅同位素地球化学研究除适用于相对封闭体系的锆石 U-Th-Pb 测年外,在岩浆岩壳幔演化及相互作用、示踪矿床成矿物质来源等方面也具有重要的意义(Bernd, 1987; Macfarlane et al., 1990; 梁细荣等, 1999)。赛坝沟金矿床矿石具相对集中的铅同位素组成,变化范围很小,说明矿石具有相对稳定的铅来源。铅同位素组成分析表中可看出,8 件黄铁矿铅同位素样品 μ 值分布在 9.05~9.19,位于原始地幔 μ 值(8.92)和上地壳铅(9.58)之间(Zartman et al., 1981; 吴开兴等, 2002), ω 值分布在 35.23~36.48,平均值为

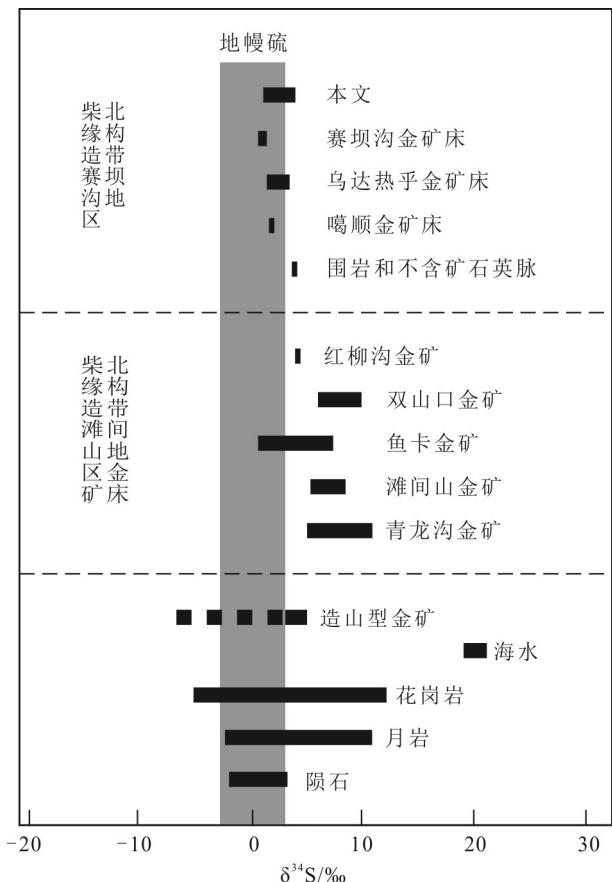


图4 柴北缘构造带赛坝沟地区和滩间山地区矿床硫同位素组成分布图

Fig. 4 Distribution of S isotopic composition of the deposits in Saibagou area and Tanjiangshan area on the north margin of Qaidam

35.25, 位于地幔 ω 值(31.84)和地壳 ω 值(36.84)之间 (Doe et al.,1979), 同时在晚期第IV阶段1件方铅矿

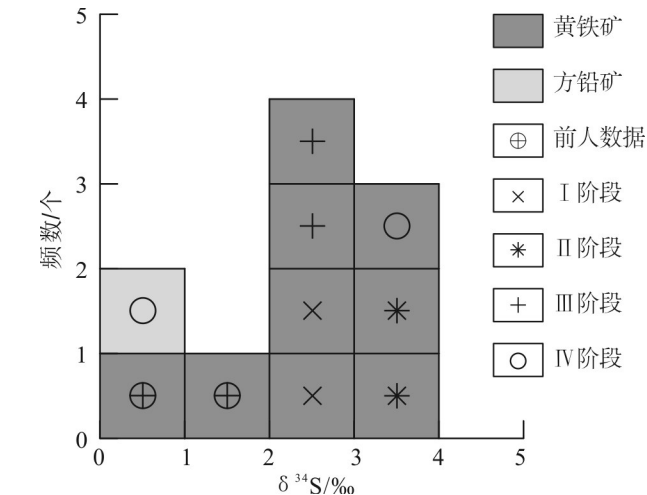
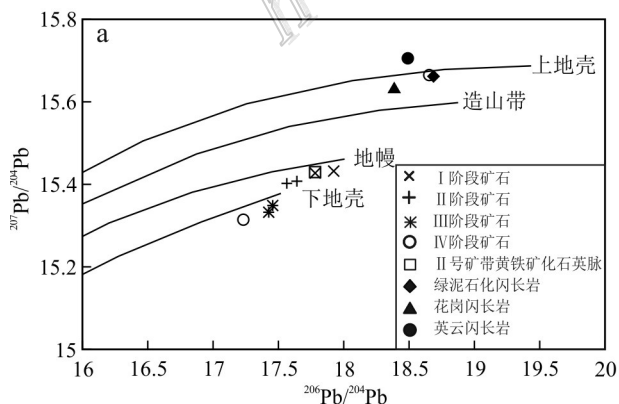


图5 赛坝沟金矿床硫同位素分布直方图(部分数据引自张拴宏等,2001)

Fig. 5 Histogram of S isotope distribution of the Saibagou gold deposit(Partial data after Zhang et al., 2001)

中 μ 值为9.57,接近于上地壳铅(9.58)数值(Zartman et al.,1981; 吴开兴等, 2002), ω 值为39.64, 高于地壳 ω 值(36.84) (Doe et al.,1979); 对张拴宏等(2001)获得的赛坝沟金矿床3件围岩铅同位素样品铅同位素数据进行分析, 围岩铅 μ 值分布在9.53~9.66之间, 与上地壳铅 μ 值相当, ω 值分布在36.39~38.38之间, 平均值36.39, 略小于上地壳铅 ω 值。

在铅同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造演化模式图解(图6a)中, 赛坝沟金矿矿石黄铁矿铅同位素样品主要分布在地幔铅和下地壳铅之间, 方铅矿铅同位素样品分布在上地壳铅演化线上, 围岩铅同位素样品在上地壳铅演化线附近;

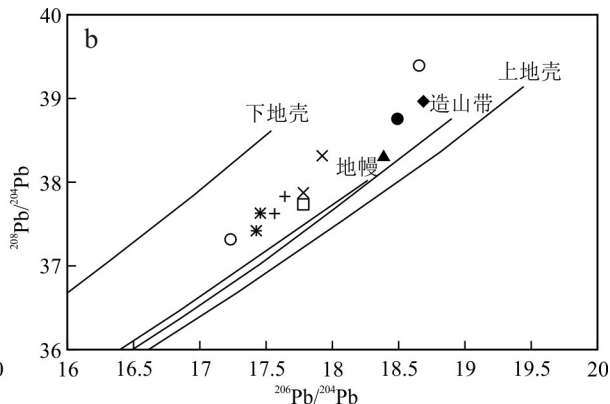


图6 赛坝沟金矿床铅同位素构造演化模式图解(据 Zartman et al., 1981)

Fig. 6 Pb isotope structural evolution pattern diagram of the Saibagou gold deposit (after Zartman et al., 1981)

在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造演化模式图解(图6b)中,赛坝沟金矿矿石铅同位素样品集中分布在地幔铅和下地壳铅之间,而围岩铅同位素样品在上地壳铅演化线左右分布。

综合赛坝沟金矿床铅同位素结果及分析,推断赛坝沟金矿床矿石铅主要来源于深部地幔与下地壳铅混合,也有少量上地壳铅的参与,而围岩铅主要来源于上地壳。

5 结 论

(1) 本次研究中赛坝沟金矿床成矿黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布在2.44‰~3.93‰之间,分布集中,结合区域矿床中的 $\delta^{34}\text{S}$ 值的分布范围(0.50‰~3.93‰)以及区域矿床围岩及成矿后石英脉的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(3.7‰~4.0‰),认为赛坝沟金矿中的硫除来自于围岩外,更多来自于深部的幔源流体。

(2) 铅同位素组成特征分析表明,赛坝沟金矿床矿石铅主要来源于深部地幔与下地壳铅混合,也有少量上地壳铅的参与,而围岩铅主要来源于上地壳。

致 谢 野外工作得到赛坝沟金矿王勇矿长的大力支持,采样及样品的制备得到国土资源部武汉矿产资源监督检测中心(湖北省地质实验测试中心)潘诗洋工程师的帮助,在矿床研究及数据分析过程中与河南省地质调查局张宇博士进行了充分的讨论,在此一并表示感谢!

References

Bernd K. 1987. Single-zircon evaporation combined with Pb^+ emitter bedding for $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -age investigations using thermal ion mass spectrometry, and implications to zirconology[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 96(1):63-71.

Cai P J, Xu R K, Zheng Y Y, Chen X, Liu J and Yu J Z. 2018. From oceanic subduction to continental collision in North Qaidam: Evidence from Kaipingou orogenic M-type peridotite[J]. *Journal of Earth Science*, 43(8): 2875-2892(in Chinese with English abstract).

Cai Y J and Zhou M. 1993. Crystalomorphological characteristics of pyrite in hydrothermal gold deposit: An experimental study[J]. *Science in China (Series B)*, 23(9): 972-978(in Chinese with English abstract).

Cao S T. 2013. Multiple geological information integration and target area optimization report of 1:50 000 ore transfer in Saiba Gul-Alto Mountain mineral resource prospect area in Qinghai Province[R]. The 4th Institute of Geology and Mineral Exploration of Qinghai Province. 136-186(in Chinese).

Chen G Y, Sun D S, Zhang L, Zang W S, Wang J and Lu A H. 1987. Morphogenesis of pyrite[J]. *Geoscience*, 1(1): 60-76(in Chinese with English abstract).

Chen X, Xu R K, Schertl H P and Zheng Y Y. 2018. Eclogite-facies metamorphism in impure marble from North Qaidam Orogenic belt: Geodynamic implications for early Paleozoic continental-arc collision[J]. *Lithos*, 310-311:201-224.

Doe B R and Zartman R E. 1979. Plutotectonics, the Phanerozoic In: Barnes H L., ed. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits 2nd Edition*[C]. New York: Wiley. 22-70.

Fan X B. 2017. A discussion on genesis of Yuqia gold deposit deposit in Dachaidan of Qinghai Province(Master's thesis)[D]. Supervisor: Zheng Y Y. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).

Feng C Y, Zhang D Q, Li D X and Chui Y H. 2002. Geological characteristics and ore-forming age of Saibagou gold deposit, Qinghai Province[J]. *Mineral Deposits*, 21(1):45-52(in Chinese with English abstract).

Fu Q Y and Li B L. 1998. Metallogenetic features and ore-controlling conditions of Saibagou gold deposit, Qinghai[J]. *Geology of Qinghai*, 7(1): 43-49 (in Chinese with English abstract).

Guo J H and Chen S W. 1998. Origin of the ore-forming matter of Tanjianshan gold field, Qinghai Province[J]. *Journal of Precious metallic geology*, 7(3):189-204(in Chinese with English abstract).

Han S F. 2004. The third round of metallogenic prospect regionalization and prospecting target area prediction in Qinghai Province[R]. Department of Land and Resources of Qinghai Province. 127-132 (in Chinese).

Hoefs J. 1997. *Stable isotope geochemistry*[C]. 4th Edition. Berlin: Springer. 199-201

Li S Z, Ma J X, Zhu X K and Tang S H. 2015. Pb isotopic fractionation during the ion exchange process and the modification of purification methods for isotope determination by MC-ICPMS[J]. *Acta Petrologica et Minerologica*, 34(5): 785-792(in Chinese with English abstract).

Liang X R, Li X H, Liu Y K, Liu Y and Wang G L. 1999. Simultaneous determination of U-Pb ages and trace elements in single zircon by using LAM-ICP-MS[J]. *Rock and Mineral analysis*, 18(4): 253-258(in Chinese with English abstract).

Liu J, Cai P J, Du W Y, Zeng X H and Wu B. 2019. Geology, Ore-forming characteristics and metallogenic age of orogenic gold deposits in the Northern northern Qaidam[J/OL]. *Geology in China*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20191205.1640.002.html> (in Chinese with English abstract).

Lu S N, Chen Z H, Li H K, Hao G J, Zhou H Y and Xiang Z Q. 2004. Late Mesoproterozoic-Early Neoproterozoic evolution of the Qin-

- ling orogen[J]. Geological Bulletin of China, 23(2): 107-112(in Chinese with English abstract).
- Lu S N, Wang H C, Li H K, Yuan G B, Xin H T and Zheng J K. 2002. Redefinition of the "Dakendaban Group" on the northern margin of the Qaidam basin[J]. Geological Bulletin of China, 21(1):19-23 (in Chinese with English abstract).
- Macfarlane AW, Marcent P, LeHuray A P and Petersen U. 1990. Lead isotope province of the central Andes iron ores and crustal rocks[J]. Econ. Geol., 85(8):1857-1880.
- Meng H. 2017. The genesis study of South of Shuangkoushan silver-lead-gold deposit, Qinghai Province(Master's thesis)[D]. Supervisor: Zheng Y Y. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H and Goldhaber M B. 1997. Sulfur and carbon isotopes[A]. In Barnes H L. ed. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits (3rd Edition)[C]. New York: John Wiley and Sons. 517-611.
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. Econ. Geol., 67(5):551-578.
- Ohmoto H. 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 16(1): 491-559.
- Rollinson H R. 1993. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation[M]. New York: John Wiley and Sons Inc. 1-34.
- Song S G, Niu Y L, Su L, Zhang C and Zhang L F. 2014. Continental orogenesis from ocean subduction, continent collision/subduction, to orogen collapse, and orogen recycling: The example of the North Qaidam UHPM belt, NW China[J]. Earth Science Reviews, 129: 59-84.
- Tang M Y, Peng Y H, Zhu D Q, Li S K and Tian M. 2016. Characteristics of primary haloes of the IV-3 vein and deep orebody prediction of the Saibagou gold deposit in Qinghai Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 40(3): 475-481(in Chinese with English abstract).
- Tang M Y. 2017. Gold polymetallic ore survey report on the periphery of Saibagou gold mine in Wulan County, Qinghai Province[R]. The 8th Institute of Geology and Mineral Exploration of Shandong Province. 64-87(in Chinese).
- Wang Z Q. 2017. 1: 50 000 regional geological and mineral survey of J47E020009 and J47E020010 in Saibagou area, Wulan County, Qinghai Province[R]. The First Geological and Mineral Resources Survey Institute of Henan Geological and Mineral Exploration and Development Bureau. 24-145(in Chinese).
- Wu K X, Hu R Z, Bi X W, Peng J T and Tang Q L. 2002. Ore lead isotopes as a tracer for ore-forming material sources: A review[J]. Geology Geochemistry, 30(3): 73-81(in Chinese with English abstract).
- Wu Y L, Mei Y W, Liu P C, Cai C L and Lu T Y. 1987. Geology of the Xihuashan tungsten ore field[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-280(in Chinese).
- Zartman R E and Doe B R. 1981. Plumbotectonics: The model[J]. Tectonophysics, 75(1):135-162.
- Zhang J X, Yu S Y, Li Y S, Yu X X, Lin Y H and Mao X H. 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(in Chinese with English abstract).
- Zhang Q L. 2014. Production and exploration report of Saibagou gold Mine in Wulan County, Qinghai Province[R]. The 8th Institute of Geology and Mineral Exploration of Shandong Province, 46-72(in Chinese).
- Zhang S H, Zhou X Q, Tian X J and Song Y G. 2001. Stable isotopic composition and its geological significance in Tomorite gold deposit, Wulan County, Qinghai Province[J]. Geology and Prospecting, 37(5):10-14(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y J. 2017. Study on the Metallogenesis of Endogenous Metallic deposits in Tanjianshan Area in Qinghai Province (Doctoral dissertation)[D]. Dissertation Supervisor: Sun F Y. Changchun: Jinlin University (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F and Chen J F. 2000. Stable isotope geochemistry[M]. Beijing: Science Press. 153-270(in Chinese).

附中文参考文献

- 蔡鹏捷, 许荣科, 郑有业, 陈鑫, 刘嘉, 俞军真. 2018. 柴北缘从大洋俯冲到陆陆碰撞: 来自开屏构造山带M型橄榄岩的证据[J]. 地球科学, 43(8): 2875-2892.
- 蔡元吉, 周茂. 1993. 金矿床黄铁矿晶形标型特征实验研究[J]. 中国科学(B 辑), 23(9): 972-978.
- 曹世泰. 2013. 青海省赛坝沟——阿尔茨托山矿产资源远景区1:5万矿调多元地质信息集成与靶区优选报告[R]. 青海省第四地质矿产勘查院, 136-186.
- 陈光远, 孙岱生, 张立, 臧维生, 王健, 鲁安怀. 1987. 黄铁矿成因形态学[J]. 现代地质, 1(1):60-76.
- 范贤斌. 2017. 青海省大柴旦镇鱼卡金矿成因探讨(硕士论文)[D]. 导师: 郑有业. 北京: 中国地质大学.
- 丰成友, 张德全, 李大新, 崔艳合. 2002. 青海赛坝沟金矿地质特征及成矿时代[J]. 矿床地质, 21(1):45-52.
- 付青元, 李宝林. 1998. 赛坝沟金矿成矿特征及控矿条件[J]. 青海地质, 7(1): 43-49.
- 国家辉, 陈树旺. 1998. 滩间山金矿田成矿物质来源探讨[J]. 贵金属地质, 7(3):29-44.
- 韩生福. 2004. 青海省第三轮成矿远景区划研究及找矿靶区预测[R]. 青海省国土资源厅. 127-132.
- 李世珍, 马健雄, 朱祥坤, 唐素寒. 2015. 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, 34(5):785-792.
- 梁细荣, 李献华, 刘永康, 刘颖, 王甘霖. 1999. 激光探针等离子体质谱同时测定锆石微区铀-铅年龄及微量元素[J]. 岩矿测试, 18(4):253-258.
- 刘嘉, 蔡鹏捷, 杜文洋, 曾小华, 吴兵. 2019. 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/OL]. 中国地质. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20191205.1640.002.html>.

- 陆松年, 陈志宏, 李怀坤, 郝国杰, 周红英, 相振群. 2004. 秦岭造山带中-新元古代(早期)地质演化[J]. 地质通报, 23(2):107-112.
- 陆松年, 王惠初, 李怀坤, 袁桂邦, 辛后田, 郑健康. 2002. 柴达木盆地北缘“达肯大坂群”的再厘定[J]. 地质通报, 21(1):19-23.
- 孟和. 2017. 青海省大柴旦双口山南银铅金矿床成因研究(硕士论文)[D]. 导师:郑有业. 北京:中国地质大学.
- 唐名鹰, 彭永和, 朱德全, 李书凯, 田孟. 2016. 青海赛坝沟金矿床IV-3号矿体原生晕特征与深部预测[J]. 物探与化探, 40(3): 475-481.
- 唐名鹰. 2017. 青海省乌兰县赛坝沟金矿外围金多金属矿普查报告[R]. 山东省第八地质矿产勘查院. 64-87.
- 王振强. 2017. 青海省乌兰县赛坝沟地区J47E020009、J47E020010两幅1:5万区域地质矿产调查[R]. 河南省地质矿产勘查开发局第一地质矿产调查院. 24-145.
- 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 唐群力. 2002. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J]. 地质地球化学, 30(3):73-81.
- 吴永乐, 梅勇文, 刘鹏程, 蔡常良, 卢同衍. 1987. 西华山钨矿地质[M]. 北京:地质出版社. 1-280.
- 张建新, 于胜尧, 李云帅, 喻星星, 林宜慧, 毛小红. 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.
- 张庆来. 2014. 青海省乌兰县赛坝沟金矿生产探矿报告[R]. 山东省第八地质矿产勘查院. 46-72.
- 张拴宏, 周显强, 田晓娟, 宋有贵. 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.
- 张延军. 2017. 青海省滩间山地区内生金属矿产成矿作用研究(博士学位论文)[D]. 导师:孙丰月. 长春:吉林大学.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京:科学出版社. 153-270.

<http://www.kcdz.ac.cn/>