第 56 卷 第 6 期 2023 年(总 232 期) 西北地质

NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 56 No. 6 2023(Sum232)

DOI: 10.12401/j.nwg.2023124

东昆仑西段阿其音金矿成矿流体特征及其成因机制

孙非非,张爱奎,刘智刚,朱传宝*,刘光莲,马忠元

(青海省第三地质勘查院,青海西宁 810029)

摘 要: 阿其音金矿是东昆仑西段近年来新发现的一处金矿产地, 笔者对该矿床成矿期含黄铁矿石英细网脉型金矿石开展流体包裹体分析、石英脉中流体 H-O 同位素分析、黄铁矿及毒砂 S-Pb 同位素分析。结果显示, 包裹体均一温度为 167~356.9℃, 盐度主要为 3.21~9.99 wt% NaCl_{eqv}, 密度为 0.65~0.94 g/cm³, 成矿流体具有中温、低盐度、低密度的特征。含矿石英脉 δD_{v.SMOW} 值为 -90.3‰~-98.7‰, δ¹⁸O_{石英V.SMOW} 值为 9.4‰~11.3‰。硫化物 δ³⁴S 值为 11.6‰~13.9‰, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 值为 38.067~38.651, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 值为 15.598~15.681, ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 值为 18.122~18.553, μ值为 9.49~9.61。结合阿其音金矿成矿地质背景, 认为含矿热液为变质水与大气降水的混合, S 主要来源于动力变质作用, Pb 显示出造山带铅源的特征, 成因类型为造山型(构造蚀变岩型)金矿。
关键词:流体包裹体; H-O-S-Pb 同位素; 矿床成因; 阿其音金矿; 东昆仑; 青海省
中图分类号: P611

Analysis of the Genesis and H–O–S–Pb Isotopic Characteristics of Aqiyin Gold Deposit in the Western Section of the East Kunlun

SUN Feifei, ZHANG Aikui, LIU Zhigang, ZHU Chuanbao*, LIU Guanglian, MA Zhongyuan

(Qinghai Province third Geological Exploration Institute, Xining 810029, Qinghai, China)

Abstract: Aqiyin gold deposit is a newly discovered gold deposit in the western section of East Kunlun in recent years. In order to explore the genesis of the deposit, the characteristics of ore–forming fluid and the source of ore–forming materials, and establish the metallogenic model, the fluid inclusion analysis of pyrite bearing quartz fine mesh vein type gold ore in the metallogenic period was carried out, and the isotopic analysis of fluid H–O, pyrite and arsenopyrite S–Pb in quartz vein was carried out. The results show that the homogenization temperature of inclusions is 167~356.9°C, the salinity is mainly concentrated between 3.21~9.99 wt% NaCl_{eqv}, and the density is 0.65~0.94 g/cm³. The ore-forming fluid has the characteristics of medium temperature, low salinity and low density. The fluid inclusions in ore bearing quartz vein have δD_{v-smow} values of $-90.3 \% \sim -98.7\%$, δ^{18} O of $9.4\% \sim 11.3\%$ and δ^{34} S of $11.6 \% \sim 13.9 \%$. The Pb isotopes of Au–bearing pyrite vary from 38.067 to 38.651, from 15.598 to 15.681, and from 18.122 to 18.533 for ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb and ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb ratios, respectively. The values of μ are from 9.49 to 9.61. Combined with the geological background of the

收稿日期: 2022-04-08; 修回日期: 2023-04-10; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目:青海省科技计划资助项目:东昆仑西段金矿成矿规律及找矿突破(2019-ZJ-7009),东昆仑新类型矿产成矿规律研究 及找矿突破(青地三勘[2020]60号),青海学者专项资助项目"柴达木盆地及周缘战略性矿产成矿作用及找矿突破" (QHS201802)联合资助。

作者简介:孙非非(1986-),女,高级工程师,主要从事矿产地质研究工作。E-mail:496744575@qq.com。

^{*}通讯作者:朱传宝(1985-),男,高级工程师,主要从事矿产地质研究工作。E-mail:514001748@qq.com。

Aqiyin gold deposit, the author hold that the ore-bearing hydrothermal fluid is a mixture of metamorphic water and meteoric water, sulfur is mainly derived from dynamic metamorphism, and lead shows the characteristics of lead source in orogenic belt. The genetic type is orogenic (tectonic altered rock type) gold deposit.

Keywords: fluid inclusions; H-O-S-Pb isotope; genesis of deposit; Aqiyin gold deposit; East Kunlun; Qinghai Province

青海省东昆仑地区矿产资源种类丰富,是铁、铜、 铅、锌、金、银、镍等矿的主要富集带之一(李文渊等, 2006; 杜玉良等, 2012; 贾群子等, 2016; 张爱奎等, 2021)。 东昆仑地区金矿研究主要始于20世纪90年代之后, 多数情况是伴随着矿床的发现而开展,该地区金矿研 究及勘查多集中于东昆仑东段(五龙沟金矿田和沟里 金矿田 2 大金矿田),并且形成了大量的研究资料 (马国栋等, 2016; 胡继春等, 2017; 颜全治等, 2017; 任 光利等,2018;国显正等,2018;陈伯林,2019;程龙, 2020; 卢寅花等, 2020; 岳维好等, 2022; 谭文娟等, 2023)。但是,东昆仑西段金矿由于发现时间晚,研究 程度较低。阿其音金矿点地处东昆仑山脉西段,位于 格尔木市西南约为 500 km。该矿点是 2016 年青海省 第三地质勘查院在开展1:5万化探综合异常查证时 发现,于2017~2018年开展了预查工作。笔者在详细 的野外调研及室内研究的基础上,对阿其音含黄铁矿 石英细网脉型金矿石开展流体包裹体、H-O-S-Pb同 位素组成分析,探讨成矿流体、成矿物质来源及矿床 成因,为东昆仑成矿带金矿成矿规律研究和找矿突破 提供基础资料。

1 区域地质

阿其音金矿大地构造位于昆中岩浆弧,属东昆仑 成矿带之伯喀里克-香日德成矿亚带,岩金、铜、镍、 铅锌、银、铁是本成矿带较为重要的矿产。区域出露 主要地层有中元古界金水口岩群、下—中侏罗统大煤 沟组及上更新统冲洪积物、全新统冲洪积物。金水口 岩群作为东昆仑变质结晶基底,新元古代—新生代经 历了长期的、多旋回的构造发展演化过程,除了形成 沉积变质型及变成型铁、晶质石墨矿产外,还有一些 金、铁、铜、铅锌、银等矿产。矿区南部紧邻昆中断裂 (图 1a),向南距昆中断裂约为10 km,区域断裂以 NW、 NWW 向断裂为主,少量近 EW、NE 向断裂。区域内 深大断裂及 NW 向次级韧-脆性断裂带长期活动为金 矿形成提供了基本条件。区内岩浆活动强烈,主要有 新元古代变质侵入体、早泥盆世侵入体、早三叠侵入体及中三叠世侵入体等4个阶段的岩浆侵入活动。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质特征

矿区出露地层主要有中元古界金水口岩群、下— 中侏罗统大煤沟组和第四系(图 1b)。构造以断裂构 造为主,褶皱不发育,岩浆岩十分发育,主要为早泥盆 世侵入岩。脉岩也较发育,主要为辉绿岩脉。

金水口岩群分布于南部地区,整体呈 NW 向带状 展布。变质程度达到角闪岩相,变形强烈,多见 M 型、 V 型褶皱,整体倾向 NE。与早泥盆世似斑状石英二 长岩、花岗闪长岩等岩体呈侵入接触,局部呈断层接 触。主要岩性有含石榴子石黑云斜长片麻岩、钾长片 麻岩、二长片麻岩等。大煤沟组 NW 向带状分布,角 度不整合于金水口岩群之上。岩性主要为含砾(粉) 砂岩、含砾泥岩、长石石英砂岩及含煤层等。

矿区构造以断裂构造为主,发育1条韧性剪切带 和3条脆性断裂(图1b)。在F1和F3脆性断裂之间 存在一条宽约为400m的韧性剪切带,呈NW向展布, 浅地表岩石均表现为脆--韧性变形,深部出现韧性变 形(图2)。韧性剪切带中岩石类型主要有花岗质糜棱 岩、糜棱岩化似斑状石英二长岩。岩石结构有塑性流 变结构、"δ"旋转碎斑结构、云母鱼结构、亚颗粒结 构(图2),构造为弱定向-定向构造。受韧性剪切作用, 原岩结构、构造基本消失,变为碎斑和碎基两部分,碎 基包绕碎斑呈塑性流变特征,碎基主要为长英质矿物, 重结晶现象发育。韧性剪切带中大量发育不均匀毒 砂、黄铁矿等金属矿物,局部见方铅矿、闪锌矿,主要 分布于韧-脆性转换部位,主体呈细网脉状、脉状分布, 强变形带矿化蚀变较弱或不发育。

F1、F2、F3 为韧性剪切带两侧的脆性断裂,均为 压扭性断裂。3 条脆性断裂走向 NW 向,倾向 NE,产 状为 16°~45°∠48°~66°,断裂性质为压扭性逆断层, 北侧为断层上盘,南侧为断层下盘,F1、F2 整体切割



 第四系; 2.下—中侏罗统大煤沟组; 3.中元古界金水口岩群; 4.早泥盆世花岗闪长岩; 5.早泥盆世似斑状石英二 长岩; 6.早泥盆世花岗岩; 7.辉绿岩脉; 8.地质界线; 9.角度不整合界线; 10.脉动接触界线; 11.逆断层及断层 倾角; 12.推测断层; 13.蚀变带; 14.金矿体; 15.蚀变带编号; 16.钻孔及编号

图1 阿其音金矿大地构造位置图(a)及矿区地质矿产略图(b)

Fig. 1 (a) Geotectonic location of Aqiyin gold deposit and (b) geological and mineral map of the mining area



1. 眼球状旋转碎斑; 2. 塑性基质; 3. 碎斑; 4. 亚颗粒结构

图 2 花岗质糜棱岩照片 Fig. 2 Granitic mylonite

了早泥盆世似斑状石英二长岩及花岗闪长岩,F3切割 了金水口岩群、似斑状石英二长岩、花岗闪长岩。F1、 F2断裂形成的构造带宽为10~40m,总体表现为脆 性变形,局部有韧性变形,多形成构造角砾岩、糜棱岩 和断层破碎带,基质出现有流动现象,塑性流变较为 明显。F3断裂形成的构造带宽为 20~40 m,地表为 脆性变形,深部为塑性变形,岩性主要为糜棱岩化似 斑状石英二长岩、二长花岗岩等,发育眼球状构造、 流动构造,沿断裂有辉绿岩脉充填。3条断层带内发 育较明显的黏土化、硅化、绢云母化、绿泥石化、褐铁 矿化、黄铁矿化和毒砂矿化等。F1断裂形成了 Sb I 号蚀变带,带内发现 2条金矿化体。F2断裂控制了 Sb II 蚀变带,蚀变带沿断裂两侧分布,带内发现金矿 化体 2条及矿化线索多处。F3 断裂北部形成了 Sb II 蚀变带,带内发现金矿化体 1条。

矿区内侵入岩分布广泛,出露面积约占全区面积 约为 50%,主要为早泥盆世侵入岩,呈近 EW 向条带 状产出。岩性主要有似斑状石英二长岩、花岗闪长岩, 零星出露二长花岗岩、蚀变黑云花岗岩等。从其局部 穿插关系分析,似斑状石英二长岩侵入时间稍早。似 斑状石英二长岩主要分布于矿区中南部,呈长条状、 带状近 NW 向展布,少量呈不规则状,地表出露面积

2023年

约为 3.37 km², 与金水口岩群多呈侵入接触, 局部为断 层接触, 与上覆大煤沟组呈角度不整合接触, 与同期 花岗闪长岩、黑云母花岗岩、二长花岗岩呈脉动接触。 花岗闪长岩分布于矿区西南部, 呈带状近 EW 向展布, 地表出露面积约为 2.1 km², 侵位到金水口岩群中, 与 同期似斑状石英二长岩呈脉动侵入接触。

2.2 矿化蚀变带特征

区内发现3条金矿化蚀变带,整体呈NW 向带状 延伸, 地表主体沿脆性断裂构造两侧分布, 深部赋存 于韧性剪切带。在构造-热液作用下,成矿元素局部 富集形成矿化蚀变带,带宽为 50~90 m,追索控制长 超过2km。矿化蚀变带中多见石英脉,石英脉主要见 于西部、南部、东部发现的构造蚀变带中,按产出方 位及脉宽可分为 NW 和 NE 向石英脉 2 类。NW 向石 英脉可分为2类:一类多为细脉状、网脉状(图 3a、 图 3b), 烟灰色, 脉宽多为 1~10 mm, 密集处密度可达 1~3条/10 cm, 产状多变, 12~228°∠17~75°均有发 育,受控于NW向断裂构造,后期被次级断裂改造,沿 石英脉局部发育细粒黄铁矿和毒砂,金矿化多集中分 布于该类石英脉中,与成矿关系较为密切。另一类呈 单脉状分布,脉宽多为10~30 cm,呈灰白色,沿节理 面多发育褐铁矿化,该类石英脉中少见金矿化显示, 与成矿的关系尚不明确。NE向石英脉呈灰白色,主 要沿岩石节理面、裂隙充填分布,脉宽在数厘米到1 m不等(图 3c、图 3d),不同程度发育黄铁矿、褐铁矿 化,两侧围岩则发育较明显的绿帘石、黏土化。根据 脉体穿插关系, NE向石英脉晚于 NW 向石英脉。测 试结果显示, NE 向石英脉中基本不见金的矿化。



a、b. NW 走向细脉状石英脉; c、d. NE 走向细脉状石英脉 图 3 石英脉照片

Fig. 3 Quartz vein

SbI 矿化蚀变带分布于矿区北部, 受控于 F1 断裂, 呈条带状, 宽为 55~70 m, 整体倾向 SW, 产状为 212~276°∠54~87°, 工程控制长度超过 200 m, 两端 均被第四系覆盖。带内岩石由构造角砾岩、碎裂岩化 黑云母花岗岩、糜棱岩化似斑状石英二长岩组成,岩 石较为破碎,节理、裂隙较为发育。多见辉绿岩脉和 次级断裂构造,蚀变强烈(图4),岩石具脆性--韧性变 形。围岩蚀变主要有硅化(石英细脉、网脉)、黏土化、 绢云母化、弱绿泥石化,矿化见黄铁矿化、褐铁矿化。 SbⅡ矿化蚀变带分布于 Sb I 矿化蚀变带南侧,呈 NW 向带状展布,受控于F2断裂,带宽为70~80m,两端 均被第四系覆盖,整体延伸长度达 2.2 km,倾向 NE, 倾角为 47°~78°。带内岩石主要由糜棱岩化似斑状 石英二长岩、(碎裂岩化)似斑状石英二长岩、花岗质 糜棱岩、片麻岩、大理岩等组成,具脆性--韧性变形特 征。围岩蚀变主要有硅化、黏土化、绢云母化、绿泥 石化、绿帘石化等,矿化有弱黄铁矿化、毒砂矿化等。 SbⅢ矿化蚀变带分布于 SbⅡ矿化蚀变带南侧,呈 NW 向带状展布,受控于F3断裂,带宽为50~90m,工程 控制长度超过 600 m, 两端被第四系覆盖, 整体倾向 NE, 倾角为 65°~83°。带内岩石主要为构造角砾岩、 糜棱岩化似斑状石英二长岩,发育眼球状构造、流动 构造。围岩蚀变主要发育硅化(石英细脉、网脉)、绢 云母化(钾化)、黏土化、绿泥石化等,矿化主要发育 黄铁矿化、毒砂化、闪锌矿化等,呈细脉或网脉状分 布(图5)。



J₁₋₂dm. 下中侏罗统大煤沟组; ησπ. 似斑状石英二长岩 图 4 Sb1 矿化蚀变带照片 Fig. 4 Sb1 mineralized alteration zone

2.3 矿体特征

金矿体主要赋存于矿化蚀变带中,与区内的 NW 向脆性断裂和韧性剪切带关系密切,受 NW 向韧性剪 切带控制明显,赋矿构造为韧性剪切带脆--韧性转换 部位、脆性断裂或构造裂隙。矿体的赋矿岩石主要为 糜棱岩化或碎裂岩化褐铁矿化钾硅化花岗岩,原岩为 似斑状石英二长岩(图 6)。Sb I 矿化蚀变带中发现矿



图 5 SbⅢ矿化蚀变带内网脉状毒砂矿化、黄铁矿化网脉 状毒砂矿化、黄铁矿化照片

Fig. 5 Net vein arsenopyrite mineralization, pyritization, net vein arsenopyrite mineralization and pyritization in Sb Ⅲ mineralization alteration zone

体 2条,长为 80~160 m,真厚度为 0.9~1.26 m, Au 品 位为 0.91~1.40 g/t; Sb II 矿化蚀变带中发现矿体 2条, 长大于 80 m,真厚度为 0.47~1.29 m, Au 品位为 0.73~ 1.98 g/t; Sb III 矿化蚀变带发现金矿化体 1条。

2.4 矿石特征

区内矿石类型主要为金矿石。金属矿物含量为 2%~18%,主要有黄铁矿、毒砂(图 7)和少量方铅矿、 闪锌矿、磁铁矿和黄铜矿等。黄铁矿、毒砂作为主要 的载金矿物,金主要集中在黄铁矿及毒砂中。非金属 矿物主要有石英、长石、绢云母、绿泥石和高岭石等。 矿石结构主要有他形-半自形粒状结构、压碎结构,构 造主要有稀疏浸染状构造、细脉状构造、网脉状构造、 角砾状构造和星点状构造。



1. 似斑状石英二长岩; 2. 韧性剪切带; 3. 脆性断裂; 4. 矿体产状; 5. 勘探线方位;
6. 钻孔; 7. 矿(化)体; 8. 矿化蚀变带; 9. 金品位/厚度

图6 阿其音矿区勘探线剖面图

Fig. 6 Exploration line profile of Aqiyin mining area

2.5 围岩蚀变

围岩蚀变明显,主要有绢云母化、硅化、钾化、绿 泥石化、碳酸盐化等。钾化主要出现在糜棱岩化似斑 状石英二长岩中,呈肉红色,不规则脉状、树枝状、团 块状分布;硅化主要沿破碎带发育,呈细脉状、细网脉 状,受控于断裂构造,NW向石英脉与成矿关系密切, 局部见硅化与钾化一同产出,局部穿插钾化;绢云母 化分布不规则,部分与硅化及黄铁矿化一起构成黄铁 绢英岩化,多分布于绢云母化顶部;绿泥石化主要为 岩体中黑云母蚀变而成,分布不均匀;黏土化、碳酸盐 化主要在近地表较为发育。

2.6 成矿期及成矿阶段

根据野外观察和镜下鉴定,阿其音金矿主要经历 了2个成矿期:热液成矿期及表生风化期。其中,热



 a. 褐铁矿化、黄铁矿化金矿石; b. 黄铁矿化、毒砂矿化金矿石
(FeS₂-黄铁矿; FeSAs-毒砂); c. 毒砂(Ars)半自形晶粒(单偏光 10×2.5); d. 黄铁矿(Py)半自形晶粒(单偏光 10×2.5)

图 7 阿其音矿区矿石特征照片

Fig. 7 Ore characteristics of Aqiyin mining area

液成矿期可细分为钾硅化阶段、石英硫化物阶段和退 化蚀变阶段3个成矿阶段(图8)。钾硅化阶段主要形 成钾长石、石英,少量绿帘石;石英硫化物阶段主要形 成石英、绢云母、黄铁矿、毒砂及少量方铅矿、闪锌矿、 磁铁矿、黄铜矿等;退化蚀变阶段主要形成绿泥石、 方解石、高岭石、黏土矿物及褐铁矿等。

3 流体包裹体、同位素特征

3.1 流体包裹体特征

阿其音金矿主要赋存于以糜棱岩化似斑状石英 二长岩为原岩的蚀变带中,带内石英细脉、网脉发育。 文中研究样品采自钻孔中,4件样品均为成矿期含黄 铁矿石英细网脉型金矿石,矿石矿物成分比较简单, 主要为黄铁矿、毒砂,少量方铅矿、闪锌矿、磁铁矿、 黄铜矿等。

成矿阶段		吉 中 回 化 期		
	钾硅化阶段	石英硫化物阶段	退化蚀变阶段	表生风化期
钾长石				
石英				
绿帘石				
绢云母				
绿泥石		-		
方解石				
黏土矿物				
高岭石				
黄铁矿				
毒砂			-	
方铅矿				
闪锌矿				
磁铁矿	-			
黄铜矿	-			
褐铁矿				

图 8 阿其音金矿床成矿期成矿阶段及矿物生成顺序图

Fig. 8 Metallogenic stage and mineral formation sequence of Aqiyin gold deposit

依据包裹体成分和室温下的相态,原生和假次生 包裹体被分为3种类型:I型(含 CO₂气液两相包裹 体)、II型(含子矿物气液固三相包裹体)和III型(纯 CO₂包裹体)。而I型包裹体最为广泛(图 9),包裹体 大小为4~10 μm,平均为7 μm,气液比为20%~30%, 平均为26%。

3.2 成矿流体温度、盐度、密度

文中测试了 35 个 I 型包裹体的均一温度, 而 II 型 和 III 型包裹体由于体积过小未取得测试结果。包裹 体均一温度为 167~356.9 ℃, 集中在 190~350 ℃。流 体包裹体均一温度可分为 310~350 ℃、250~290 ℃、 190~230 ℃ 等 3 个区间(表 1, 图 10a), 可分别对应钾



图 9 阿其音金矿不同类型流体包裹体照片 Fig. 9 Photographs of different types of fluid inclusions in the

Aqiyin gold deposit

硅化、石英硫化物和退化蚀变3个成矿阶段,属于典型的中温热液成矿。

I型包裹体的冰点温度(Tm)为-6.9~-2.2 ℃,据 35个冰点温度计算出盐度为 2.06~10.37 wt% NaCl_{eqv}, 主要集中在 3.21~9.99 wt% NaCl_{eqv}(图 10b),表明阿其 音金矿的成矿流体盐度较低。

根据均一温度和盐度,应用经验公式 ρ=a+bTh+ cTh²(a、b和c均为无量纲参数)(刘斌等,1987),计算 包裹体的密度。结果表明,35个包裹体流体密度为 0.65~0.94 g/cm³,平均为 0.83 g/cm³。综上所述,阿其 音金矿成矿流体具有中温、低盐度、低密度的特征。

3.3 成矿流体 H、O 同位素组成

阿其音金矿 H、O 同位素分析结果(表 2)显示,含 矿石英脉 δD_{v-SMOW} 值为-90.3‰~-98.7‰,δ¹⁸O_{石英v-SMOW} 值为 9.4 ‰~11.3 ‰。

利用 Clayton 等(1972)提出的石英与水体系同位 素平衡方程: $\delta^{18}O_{\pi \notin v-SMOW}-\delta^{18}O_{\pi \vee v-SMOW}=3.38\times10^{6}/T^{2}-2.90$ (公式适应的温度为 200~500 °C;温度取本次流体包 裹体均一法测定值; $\delta^{18}O_{\pi \notin}$ 为实验所得石英脉中氧同 位素分析结果),获得 $\delta^{18}O$ 水_{v-SMOW} 值为1.31‰~3.48‰, 低于正常岩浆水的 $\delta^{18}O$ 水_{v-SMOW} 值(5‰~7‰)。

在 δD_{v-smow}-δ¹⁸O_{* v-smow} 图解中(图 11), 阿其音矿

表 1 阿其音金矿含黄铁矿石英细脉中的流体包裹体测试结果表

Tab. 1	Test results of fluid	inclusions ir	n pyrite bearing	quartz veinlets in	Agivin gold	deposit
140.1	rest results of fiuld	merasions n	pjine oeumg	quarte vennets m	riqijin gola	acposit

序号	样品号	包裹体 类型	测试数	大小(μm)	气液比(%)	Tm(℃)	Th(℃)	S(wt%NaCl _{eqv})	$\rho(g/cm^3)$
1	AQYZK0001-Y1	I型	8	4~8	$20 \sim 30$	$-6.2 \sim -2.2$	167~356.9	3.69~9.47	$0.67 \! \sim \! 0.95$
2	AQYZK0001-Y2	I型	11	$3 \sim 10$	$20 \sim 30$	$-6.6 \sim -1.5$	$200 \sim 348.4$	$2.56 \sim 9.99$	$0.65\!\sim\!0.94$
3	AQYZK0001-Y3	I型	6	$7\sim 10$	$20 \sim 30$	$-6.8 \sim -2$	173.9~323.3	3.37~10.24	$0.79\!\sim\!0.93$
4	AQYZK0001-Y5	I 型	10	$6\sim\!10$	$20 \sim 30$	$-6.9 \sim -1.2$	191.5~295.1	$2.06 \sim 10.37$	$0.77\!\sim\!0.91$

注:测试工作在自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室完成。



图 10 阿其音金矿流体包裹体均一温度和盐度频数直方图

Fig. 10 Frequency histogram of homogenization temperature and salinity of fluid inclusions in Aqiyin gold deposit

表 2 阿其音金矿成矿流体 H、O 同位素组成表

Tab. 2 Results of H and O isotopic composition of ore-forming fluids in Aqiyin gold deposit

样品号	测试矿物	$\delta \mathrm{D}_{\mathrm{V-SMOW}}(\ \mathrm{\%0}\)$	$\delta^{^{18}}\mathrm{O}_{^{\mathrm{T}}\!$	Th(°C)	$\delta^{^{18}}\mathrm{O}_{^{\mbox{\scriptsize \star V-SMOW}$}}$ (‰)
AQYZK001-D1	石英	-93.1	9.4	346	3.48
AQYZK001-D2	石英	-98.2	9.7	274	1.31
AQYZK001-D5	石英	-98.7	10.6	274	2.21
AQYZK001-D6	石英	-90.3	11.3	282	3.23



图 11 阿其音金矿成矿流体 δD-δ¹⁸O 图 Fig. 11 The δ D-δ¹⁸O diagram of ore-forming fluid in Aqiyin gold deposit

区 H-O 同位素测试结果投影到原生岩浆水和变质水 区域左下方,显示为一种混合流体。考虑到矿区及周 边侵入岩时代为早泥盆世,早泥盆世弱蚀变似斑状石 英二长岩 Au 元素背景值较低,而糜棱岩化强蚀变似 斑状石英二长岩 Au 元素平均含量较高,故金矿含矿 热液很可能是变质水与大气降水的混合。

3.4 硫化物 S、Pb 同位素组成

阿其音金矿矿石中硫化物为主要的含硫矿物,未 见硫酸盐,因此硫化物的S同位素组成可以近似地代 表成矿溶液总硫的S同位素组成。

阿其音金矿 S 同位素组成分析结果(表 3)显示, 硫化物 δ³⁴S 值为 11.6 ‰~13.9 ‰,均值为 12.7 ‰,极 差为 2.3 ‰,具有很大的相似性,均显示为正值。

与 S 同位素储库(Ohmoto, 1972)相比(图 12),阿 其音金矿矿石中总硫的同位素质量分数比深部岩浆 硫(0±5‰)高。通过与自然界天然物质中 S 同位素组 成的对比,矿石 S 同位素组成属于变质岩、沉积岩或 蒸发硫酸盐的范畴,考虑到矿区没有沉积岩或蒸发硫 酸盐的分布。结合矿区动力变质作用发育且与成矿 十分密切的因素,认为阿其音金矿 S 来源于动力变质

表 3 阿其音金矿 S 同位素分析结果表

Ta	b . 3		Sul	fur	isot	tope	ana	lysis	resu	lts o	of A	Aqiy	in	gol	d	dep	osi	t
----	--------------	--	-----	-----	------	------	-----	-------	------	-------	------	------	----	-----	---	-----	-----	---

样品号	矿物	样品描述	$\delta^{^{34}}{}_{^{\rm SV-CDT(\%)}}$
AQYZK001-D1	黄铁矿	石英脉	13.9
AQYZK001-D2	黄铁矿	石英脉	13.4
AQYZK001-D3	黄铁矿	石英脉	12.2
AQYZK001-D5	黄铁矿	石英脉	11.6
AQYZK001-D7	毒砂	毒砂	12.4



 图 12 阿其音金矿 S 同位素 δ³⁴S 值图解
Fig. 12 Illustration of sulfur isotope δ³⁴S value in Aqiyin gold deposit

作用,少量可能来源于围岩金水口岩群的变质岩中。

阿其音金矿 5 件金属硫化物 ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 值为 38.067 ~38.651, 均值为 38.47, 极差为 0.584; ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 值为 15.598~15.681, 均值为 15.646, 极差为 0.083; ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 值为 18.122~18.553, 均值为 18.479, 极差为 0.431; 特 征参数µ值为 9.49~9.61, 平均值为 9.55(表 4)。

μ值的变化可以反应 Pb 的不同来源。朱炳泉 (1998)研究认为壳源 Pb 具有高μ值的特征,μ值低于 9.74(Stacey et al., 1975)或低于 9.58(Doe et al., 1979) 的铅分别来自下地壳或上地幔。从 Pb 同位素源区特 征参数分析可知,本区 Pb 同位素μ值相对集中,4件 样品的μ值为 9.49~9.56,且变化范围较小,均低于 9.58,仅有1件样品μ值为 9.61,说明金矿 Pb 源主要来自深 部。在 Zartman 等(1981)的 Pb 同位素构造模式图上 (图 13),样品投影点相对集中,投影点均位于造山带 演化曲线附近,显示出造山带铅源的特征。

Tab. 4 Lead isotope analysis results of Aqiyin gold deposit											
样品原号	矿物	样品描述	208Pb/204Pb	207Pb/204Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	μ	riangle eta	$ riangle \gamma$	Th/U		
AQYZK001-D1	黄铁矿	石英脉	38.651	15.681	18.518	9.61	23.42	39.71	3.78		
AQYZK001-D2	黄铁矿	石英脉	38.067	15.598	18.122	9.49	18.91	32.08	3.73		
AQYZK001-D3	黄铁矿	石英脉	38.512	15.654	18.492	9.56	21.6	35.36	3.73		
AQYZK001-D5	黄铁矿	石英脉	38.575	15.652	18.553	9.55	21.27	35	3.73		
AOYZK001-D7	毒砂	毒砂	38.546	15.647	18.712	9.53	20.46	28.96	3.63		



阿其音金矿铅同位素分析结果表

表 4







Fig. 13 Structural model of sulfide lead isotope in Aqiyin gold deposit

根据单阶段铅演化模式,利用 Geokit 软件(路远 发,2004)计算 Pb 同位素的相关参数(表 4)。Pb 同位 素 Δβ-Δγ 成因分类图解(图 14)显示,样品点均落入 了地壳与地幔混合的俯冲带铅范围内,这一特征与 Zartman 等(1981)的铅构造模式图判别结果一致。由 此说明阿其音金矿 Pb 具有地壳与地幔混合铅的特征, 反应深源物质在成矿过程中起到了重要的作用。

4 矿床成因探讨

4.1 成矿流体演化及金沉淀机制

在热液中,金主要以二硫络合物或者氯络合物形 势迁移(Gammons et al., 1994),当温度范围在 200~ 400 ℃之间的时候,近中性到弱碱性的条件下,金是 以Au(HS)²⁻为主要运移方式,矿区中的绢云母化暗示 了近中性的 Ph 值(Mikucki, 1998),并且阿其音金矿中 的金与硫化物(黄铁矿)密切共生,说明阿其音金矿中 的金亦是以Au(HS)²的方式运移的。通过前人对东 昆仑五龙沟矿集区金矿的研究发现,存在 2 种可能的 机制导致金的络合物发生分解,即流体早期的不混溶 作用和广泛的水岩反应(张宇婷, 2018)。因此,认为

在流体早期不混溶作用过程中,H²S 会优先进入气相, 而造成其发生逃逸,打破物理化学环境,使得金发生 沉淀,到晚期温度下降,岩浆水和大气降水的混合亦 造成部分金矿质沉淀(于涛, 2022)。结合阿其音矿区 流体特征及H-O同位素特征,金矿含矿热液很可能 是变质水与大气降水的混合,成矿流体为中温、低盐 度、低密度流体,属于变质流体。这种变质流体是由 深部地幔流体在超临界和非平衡条件下向上运移,经 过地壳中浅层次韧性构造变形地段,受动力变质作用 叠加改造,逐步转变成的一种变质流体。这种变质流 体继续向上运移,在韧-脆性断裂转换部位或叠加的脆 性断裂部位,与上部大气降水混合,温度降低,导致金 矿沉淀。因此,认为阿其音金矿中金沉淀可能由早期 的流体不混溶,流体向上运移的过程中受到动力变质 作用的叠加改造后,温度下降、变质水与大气水混合 等过程导致的。

4.2 成矿物质来源

阿其音矿区容矿围岩为早泥盆世的似斑状石英 二长岩。东昆仑地区 1:50 万地球化学测量表明,华 力西期花岗闪长岩、花岗岩含金较低,为 1.26×10⁻⁹~ 1.28×10⁻⁹(罗波等, 2019)。矿区早泥盆世弱蚀变似斑 状石英二长岩 Au 元素平均含量达到 3.52×10⁻⁹, 而糜



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

图 14 阿其音金矿矿石金属硫化物 Pb 同位素 Δβ-Δγ 成因分类图解

Fig. 14 Lead isotope of metal sulfide in Aqiyin gold deposit $\Delta\beta - \Delta\gamma$ Genetic classification diagram

棱岩化强蚀变黄铁矿化似斑状石英二长岩 Au 元素平 均含量达 19.43×10⁻⁹(罗波等, 2019)。相较于糜棱岩 化强蚀变似斑状石英二长岩而言, 早泥盆世弱蚀变似 斑状石英二长岩 Au 元素背景值较低, 对金矿成矿提 供物质来源的贡献不会太大。岩石受构造剪切时, 深 部高温环境表现出韧性, 浅部低温表现出脆性。剪切 带内, 深部岩石被搓碎成糜棱岩, 非常有利于热液流 体活动, 萃取活化成矿物质。随着热液沿断裂带向上 运移, 温度逐渐降低, 矿质沉淀成矿。韧脆性过渡地 带, 正是指示高温向低温过渡的标志, 恰好是有利于 金矿沉淀的位置。表明成岩后的构造活动可能为金 矿形成提供了重要物质来源, 深部韧性剪切位置亦极 有可能为矿质来源区。

矿区出露有中元古界金水口岩群,金水口岩群是 否为金矿成矿提供了成矿物质来源还不能确定,但金 水口岩群中没有发现金矿体或矿化线索,而且根据区 域1:5万地质矿产调查报告显示,金水口岩群 Au 元 素含量最大为 3.4×10⁻⁹,平均值为 1.06×10⁻⁹(李建兵, 2017)。因此,可推断金水口岩群也不是金矿形成的 最主要物质来源。

4.3 矿床形成机制

早泥盆世时期,东昆仑地区存在大量岩浆活动, 相关地体的碰撞在这一时期已完成,区域构造体制开 始由挤压转向伸展,并且在东昆仑地区伸展作用更强 烈(刘彬等,2012;郝娜娜等,2014;张亮等,2021)。后 碰撞伸展阶段往往会引发大规模的岩浆作用(毛景文等, 2005; Pirajno, 2009)。

华力西期,古特提斯洋(昆南洋)在石炭纪打开, 二叠纪已开始向北俯冲消减,俯冲消减过程中产生强 烈的构造变形和动力变质作用,昆中区域性断裂活动 强烈,并形成一系列的大型剪切带。俯冲洋壳脱水及 富集地幔再活化形成深部流体来源。昆中断裂及大 型剪切带的强烈活动,促使深部壳幔物质交换,有用 元素沿区域性断裂或大型剪切带向上迁移。动力变 质作用促使围岩岩石脱水、脱挥发份产生变质流体, 深部流体携带有用元素加入到变质流体中形成含矿 流体。

矿区流体包裹体研究表明,存在3种类型的包裹体,除广泛发育含 CO₂ 气液两相水溶液包裹体外,还 发育含子矿物气液固三相包裹体和纯 CO₂包裹体, CO₂包裹体的标志性发育,反映与造山型金矿床以变 质热液为主的流体特征一致。包裹体均一温度亦表 明,阿其音矿区主成矿阶段成矿温度(250~290 ℃)与 东昆仑东段典型造山型金矿-五龙沟金矿(260~270 ℃ 和 302~378 ℃)(张德全等, 2007)和果洛龙洼金矿 (276~310 ℃)(赖健清等, 2016; 窦光源等, 2016)相近。

随着区域地壳不断隆升,成矿流体进入到浅部断 裂-裂隙系统中并沿其向上运移,流体运移过程中与 围岩不断发生交代作用,加之大气降水的大量混入, 引起温压等条件发生剧烈变化,造成温度迅速下降, 金等成矿物质在成矿流体中的溶解度越来越小,导致 含金络合物在相对有利构造部位,如韧性剪切带旁侧 或顶部脆性断裂、脆-韧性转换部位、裂隙等地发生 沉淀,聚集成矿。

阿其音金矿具有以下 5 个成矿特征。①矿体主 要赋存于韧性剪切带脆--韧性转换部位和旁侧脆性断 裂中,与区内的 NW 向构造关系密切。②容矿围岩为 早泥盆世的似斑状石英二长岩,对成矿没有物质来源 和热量的直接贡献,与成矿关系不密切。③围岩具有 强烈的蚀变,有钾化、硅化、绢云母化、绿泥石化、碳 酸盐化、黏土化、高岭石化等,硅化主要沿构造带发 育,呈细脉状、细网脉状,受控于断裂构造,NW 向石 英脉与成矿关系密切。④成矿流体为中高温、低盐度、 低密度流体,属于变质流体。⑤成矿物质主要来源于 深部壳幔交换作用,流体起源于俯冲洋壳脱水或富集 地幔再活化。

综上所述,阿其音金矿是受 NW 向剪切带控制,

产于脆-韧性转换部位或次级脆性断裂内的造山型 (构造蚀变岩型)金矿。

东昆仑成矿带目前已发现3种类型金矿:①造山 型金矿床,为独立金矿床,与造山作用有关,受构造控 制。②喷流沉积-热液改造型多金属-金矿床。③砂 卡岩型多金属-金矿床,金多作为伴生或共生矿产(张 爱奎等,2021)。进一步的成因讨论中还需要矿床成 矿时代,但矿区暂缺乏直接测年资料。目前东昆仑地 区已知造山型金矿床(点)成矿时代主要为202~ 242 Ma, 对应于印支期(李金超, 2017), 如五龙沟金矿 (袁万明等, 2000; 丰成友等, 2002; 张德全等, 2005; 寇 林林等,2010)、果洛龙洼金矿(肖晔等,2014)、瑙木浑 金矿(李金超, 2017)、阿斯哈金矿(李碧乐等, 2012; 岳 维好等,2017)、开荒北金矿(赵俊伟,2008)、大场金矿 (丰成友, 2002; 张德全等, 2005)等。阿其音金矿区宏 观地质推断, 控矿断裂穿切早泥盆世侵入岩, 成矿具 体晚到什么时代未知。随着阿其音及库德尔特等金 矿的发现,无疑说明东昆仑西段亦具有优越的金矿成 矿条件及巨大的找矿潜力,而造山带内韧脆性剪切带 在形成金矿中的价值需进一步重视。

5 结论

(1)金矿石中流体包裹体主要为含 CO₂ 气液两相 包裹体(I型),少量含子矿物气液固三相包裹体(Ⅱ型) 和纯 CO₂包裹体(Ⅲ型)。金矿成矿流体具有中温 (167~356.9 ℃)、低盐度(3.21~9.99 wt%NaCl_{eqv})、低 密度(0.65~0.94 g/cm³)的特点。

(2)H、O同位素组成 δD_{V-SMOW} 值为 -90.3 %~ -98.7‰, $\delta^{18}O_{\overline{a} \notin V-SMOW}$ 值为 9.4 ‰~11.3 ‰, 说明金矿 成矿流体为变质水与大气降水的混合。 $\delta^{34}S$ 值为 11.6‰~13.9‰, 反映矿石中的硫主要来源于动力变 质作用。²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 值为 38.067~38.651, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 值 为 15.598~15.681, ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 值为 18.122~18.553, μ 值 为 9.49~9.61, 显示出造山带铅源的特征。

(3)金沉淀可能是由早期的流体不混溶,流体向 上运移的过程中受到动力变质作用的叠加改造后,温 度下降、变质水与大气水混合等过程导致的。阿其音 金矿矿体产于脆--韧性转换部位或次级脆性断裂内, 成因类型为造山型(构造蚀变岩型)金矿;韧脆性剪切 带中形成的金矿在东昆仑造山带地区具有优越的成 矿背景,找矿前景巨大。

参考文献(References):

- 陈伯林. 东昆仑五龙沟金矿田地质特征与成矿地质体厘定[J]. 地质学报, 2019, 93(1): 179-196.
- CHEN Bailin. Geological characteristics of the Wulonggou gold ore field and determination of metallogenic geological bodies in East Kunlun Mountains [J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(1): 179–196.
- 程龙.青海东昆仑五龙沟矿集区红旗沟金矿地质地球化学特征 及成因研究[D].长春:吉林大学,2020.
- CHENG Long. Study on the Geological and Geochemical Characteristics and Genesis of Hongqigou Gold Deposit, Wulonggou Ore Concentration Area, East Kunlun, Qinghai Province[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- 窦光源,刘世宝,祁昌炜等.青海果洛龙洼金矿床流体包裹体研究[J].矿产勘查,2016,7(4):569-574.
- DOU Guangyuan, LIU Shibao, QI Changwei, et al. Fluid inclusion characteristics of Guoluolongwa gold deposit in Qinghai[J]. Mineral Exploration, 2016, 7(4): 569–574.
- 杜玉良, 贾群子, 韩生福, 等. 青海东昆仑成矿带中生代构造-岩 浆-成矿作用及铜金多金属找矿研究[J]. 西北地质, 2012, 45(4): 69-75.
- DU Yuliang, JIA Qunzi, HAN Shengfu, et al. Mesozoic tectono-magmatic mineralization and copper-gold poly-metallic prospecting in East Kunlun metallogenic belt of Qinghai province[J]. Northwestern Geology, 2012, 45(4): 69–75.
- 丰成友,张德全,佘宏全,等.韧性剪切构造演化及其对金成矿 的制约-以青海野骆驼泉金矿为例[J].矿床地质,2002, 21(S1):582-585.
- FENG Chengyou, ZHANG Dequan, SHE Hongquan, et al. Structural Evolution of Ductile Shear Belt and Its Constraints on Gold Mineralizations: Examplified by Yeluotuoquan Gold Deposit, Qinghai Province[J]. Mineral Deposits, 2002, 21(S1): 582–585.
- 丰成友.青海东昆仑地区的复合造山过程及造山型金矿床成矿 作用[D].北京:中国地质科学院,2002.
- FENG Chengyou. Multiple Orogenic Processes and Mineralization of Orogenic Gold Deposits in the East Kunlun Orogen, Qinghai Province[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2002.
- 国显正, 栗亚芝, 贾群子, 等. 东昆仑五龙沟金多金属矿集区晚 二叠世-三叠纪岩浆岩年代学、地球化学及其构造意义[J]. 岩石学报, 2018, 34(8): 2359-2379.
- GUO Xianzheng, LI Yazhi, JIA Qunzi, et al. Geochronology and geochemistry of the Wulonggou orefield related granites in Late Permian-Triassic East Kunlun: Implication for metallogenic tectonic [J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(8): 2359–2379.
- 郝娜娜,袁万明,张爱奎,等.东昆仑祁漫塔格晚志留世-早泥盆 世花岗岩:年代学、地球化学及形成环境[J].地质论评, 2014,60(1):201-215.

HAO Nana, YUAN Wanming, ZHANG Aikui, et al. Late Silurian to

Early Devonian Granitoids in the Qimantage Area, East Kunlun Mountains: LA-ICP-MS zircon U-Pb Ages, Geochemical Features and Geological Setting[J]. Geological review, 2014, 60(1): 201–215.

- 胡继春,陈静,何书跃,等.东昆仑五龙沟地区糜棱岩化花岗岩 年代学、岩石成因及其构造意义[J].西北地质,2017, 50(3):54-64.
- HU Jichun, CHEN Jing, HE Shuyue, et al. Geochronology and Petrogenesis of Mylonitized Granite from Wulonggou Area in East Kunlun and Its Tectonic Significance[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(3): 54–64.
- 贾群子, 杜玉良, 栗亚芝, 等. 青海省金属矿产成矿条件和成矿 预测[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- JIA Qunzi, DU Yuliang, LI Yazhi, et al. Metallogenic conditions and metallogenic prediction of Qinghai metal minerals[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- 寇林林,罗明非,钟康惠,等.青海五龙沟金矿矿集区1号韧性 剪切带 40Ar/39Ar 年龄及地质意义[J].新疆地质,2010, 28(3):330-333.
- KOU Linlin, LUO Mingfei, ZHONG Kanghui, et al. ⁴⁰Ar/³⁹Ar Dating of the I Gold-bearing shear zone on the Gold-ore collected belt of the Wulonggou, Qinghai, and its significance[J]. XinJiang Geology, 2010, 28(3): 330–333.
- 赖健清, 鞠培姣, 周凤. 青海省果洛龙洼金矿多因复成成矿作用[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(2): 402-414.
- LAI Jianqing, JU Peijiao, ZHOU Feng. Polygenetic compound mineralization of Guoluolongwa gold deposit in Qinghai Province, China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(2): 402–414.
- 李碧乐, 沈鑫, 陈广俊, 等. 青海东昆仑阿斯哈金矿 I 号脉成矿 流体地球化学特征和矿床成因[J]. 吉林大学学报(地球科 学版), 2012, 42(6): 1676-1687.
- LI Bile, SHEN Xin, CHEN Guangjun, et al. Geochemical Features of Ore-Forming Fluids and Metallogenesis of Vein I in Asiha Gold Ore Deposit, Eastern Kunlun, Qinghai Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(6): 1676–1687.
- 李建兵.青海省格尔木市雪山峰地区 1:5万 J46E022008、 J46E022009、J46E023008、J46E023009 四幅区域地质矿产 调查报告[R].青海省第三地质勘查院, 2017.
- 李金超.青海东昆仑地区金矿成矿规律及成矿预测[D].西安: 长安大学,2017.
- LI Jinchao. Metallogenic regularity and metallogenic prognosis of Gold Deposit in the East Kunlun Orogen, Qinghai Province[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- 李文渊,董福辰,姜寒冰,等.西北地区重要金属矿产成矿特征 及其找矿潜力[J].西北地质,2006,39(2):1-16.
- LI Wenyuan, DONG Fuchen, JIANG Hanbing, et al. Metallogenic characteristics and prospecting potential of important metal minerals in northwest China[J]. Northwestern Geology, 2006, 39(2): 1–16.

刘斌,段光贤.NaCl-H2O 溶液包裹体的密度式和等容式及其应

用[J]. 矿物学报, 1987, 7(4): 345-352.

- LIU Bin, DUAN Guangxian. The density and isochoric formulae for NaCl-H₂O fluid inclusions (salinity≤25%) and their applications[J]. Acta Mineralgica Sinica, 1987, 7(4); 345–352.
- 刘彬,马昌前,张金阳,等.东昆仑造山带东段早泥盆世侵入岩的成因及其对早古生代造山作用的指示[J].岩石学报,2012,28(6):1785-1807.
- LIU Bin, MA Changqian, ZHANG Jinyang, et al. Petrogenesis of Early Devonian intrusive rocks in the east part of Eastern Kunlun Orogen and implication for Early Palaeozoic orogenic processes[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(6): 1785–1807.
- 卢寅花, 王力, 盛建华, 等. 东昆仑造山带东段那更龙洼金矿区 富闪镁铁质岩形成时代、地球化学特征及其构造背景与 金矿化关系[J]. 黄金, 2020, 41(11): 5-15.
- LU Yinhua, WANG Li, SHENG Jianhua, et al. Relationship between formation age, geochemical characteristics, tectonic setting and gold mineralization of amphibole-rich mafic rocks of the Nagenglongwa Gold Deposit in the eastern part of the East Kunlun orogenic belt[J]. Gold, 2020, 41(11): 5–15.
- 路远发. Geokit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459-464.
- LU Yuanfa. GeoKit-A geochemical toolkit for Microsofe Excel[J]. Geochimica, 2004, 33(5): 459–464.
- 罗波, 乔世科, 宋小坤, 等. 青海省格尔木市阿其音浩尔嘎东金 多金属矿预查报告[R]. 青海省第三地质勘查院, 2019.
- 马国栋, 贾建团, 韩玉, 等. 青海五龙沟金矿矿床成因及成矿模 式探讨[J]. 西北地质, 2016, 49(4): 172-178.
- MA Guodong, JIA Jiantuan, HAN Yu, et al. Genesis and Metallogenic Model of the Wulonggou Gold Deposit in Qinghai Province[J]. Northwestern Geology, 2016, 49(4): 172–178.
- 毛景文,谢桂青,李晓峰,等.大陆动力学演化与成矿研究:历史 与现状-兼论华南地区在地质历史演化期间大陆增生与成 矿作用[J].矿床地质,2005,24(3):193-205.
- MAO Jingwen, XIE Guiqing, LI Xiaofeng, et al. Geodynamic process and metallogeny: History and present research trend with a special discussion on continental accretion and related metallogeny throughout geological history in South China[J]. Mineral Deposits, 2005, 24(3): 193–205.
- 任光利,梁楠,张转,等.高光谱标志性蚀变矿物组合在找矿预 测中的应用研究-以东昆仑东-西大滩一带金矿床为例[J]. 西北地质,2018,51(2):93-107.
- REN Guangli, LIANG Nan, ZHANG Zhuan, et al. Iconic Altered Mineral Assemblages on Prospecting Prediction by Hyperspectral Remote Sensing: Example from the Gold Deposits in Dongdatan and Xidatan Region of East Kunlun Mountain[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(2): 93–107.
- 谭文娟,赵国斌,魏建设,等.黄河流域矿产资源禀赋、分布规律 及开发利用潜力[J].西北地质,2023,56(2):163-174.
- TAN Wenjuan, ZHAO Guobin, WEI Jianshe, et al. Characteristics, Distribution and Utilization Potential of Mineral Resources in the Yellow River Basin[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 163–174.

- 肖晔,丰成友,李大新,等.青海省果洛龙洼金矿区年代学研究 与流体包裹体特征[J].地质学报,2014,88(5):895-902.
- XIAO Ye, FENG Chengyou, LI Daxin, et al. Chronology and Fluid Inclusions of the Guoluolongwa Gold Deposit in Qinghai Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(5): 895–902.
- 颜全治, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆中构造带沟里地区浅变质地 层碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 西北地质, 2017, 50(1): 165-181.
- YAN Quanzhi, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. Detrital Zircon U-Pb Age and Geological Significance of Metamorphic Strata at Gouli Area in the Central Tectonic Belt of East Kunlun[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(1): 165–181.
- 于涛.东昆仑五龙沟地区打柴沟金矿地质特征及矿床成因[D]. 长春:吉林大学,2022.
- YU Tao. Geological Characteristics and Genesis of the Dachaigou Gold Deposit in Wulonggou area, East Kunlun Orogenic Belt[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- 袁万明,王世成,王兰芬.东昆仑五龙沟金矿床成矿热历史的裂 变径迹热年代学证据[J].地球学报,2000,21(4):389-395.
- YUAN Wanming, WANG Shicheng, WANG Lanfen. Metallogenic Thermal Hstory of the Wulonggou Gold Deposits in East Kunlun Mountains in the Light of Fission Track Thermochronology[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2000, 21(4): 389–395.
- 岳维好,周家喜.青海东昆仑阿斯哈金矿床含金黄铁矿微量元 素地球化学特征及其地质意义[J].矿床地质,2022,41(1): 106-120.
- YUE Weihao, Zhou Jiaxi. Trace element characteristics of gold-bearing pyrite from Asiha gold deposit in East Kunlun, Qinghai Province and their geological significance [J]. Mineral Deposits, 2022, 41(1): 106–120.
- 岳维好,周家喜,高建国,等.青海都兰县阿斯哈金矿区花岗斑 岩岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素研究[J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41(4):776-789.
- YUE Weihao, ZHOU Jiaxi, GAO Jianguo, et al. Geochemistry, Zircon U-Pb Dating and Hf Isotopic Compositions of the Graniteporphyry in Asiha Gold Ore District, Dulan County, Qinghai Province[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2017, 41(4): 776–789.
- 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]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(12): 3762–3778.
- 张德全,党兴彦,佘宏全,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 Orongenic 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,张慧,丰成友,等.柴北缘-东昆仑地区造山型金矿床的 流体包裹体研究[J].中国地质,2007,34(5):843-854.
- ZHANG Dequan, ZHANG Hui, FENG Chengyou, et al. Fluid inclusions in orogenic gold deposits in the northern Qaidam margin-East Kunlun region[J]. Geology in China, 2007, 34(5): 843–854.
- 张亮,李碧乐,刘磊,等.东昆仑五龙沟地区早泥盆世双峰式侵入岩年代学、地球化学及其地质意义[J].岩石学报,2021, 37(7):2007-2028.
- ZHANG Liang, LI Bile, LIU Lei, et al. Geochronology, geochemistry and geological significance of the Early Devonian bimodal intrusive rocks in Wulonggou area, East Kunlun Orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(7): 2007–2028.
- 张宇婷.青海东昆仑中段五龙沟矿集区金矿成矿作用研究[D]. 长春:吉林大学,2018.
- ZHANG Yuting. Research on metallogenesis of gold deposits in the Wulongou Ore Concentration Area, central segment of the east Kunlun Mountains, Qinghai Province [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- 赵俊伟.青海东昆仑造山带造山型金矿床成矿系列研究[D].长春:吉林大学,2008.
- ZHAO Junwei. Study on Orogenic Gold Mettallogenic Series in Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- 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.
- ZHU Bingquan. Theory and application of isotope system in geosciences-Also on the evolution of crust and mantle in Chinese Mainland [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- Clayton R N, O' Neil J R, Mayeda T K. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. Journal of Geophysical Research, 1972, 77: 3057–3067.
- Doe B R, Zartman R E. Geochemistry of hydrothermal ore deposits [M]. New York: John Wiley & Sons, 1979: 22–70.
- Gammons C H, Williams-Jones A E, Yu Y. New data on the stability of gold (I) chloride complexes at 300°C [J]. Mineral, 1994: 309–310.
- Mikucki E J. Hydrothermal transport and depositional processes in Archean lode-gold systems: A review [J]. Ore Geology Reviews, 1998, 13(1–5): 307–321.
- Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits [J]. Economic Geology, 1972, 67: 551–578.
- Pirajno F. Hydrothermal processes and mineral systems [M]. London: Springer, 2009.
- 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.
- Zartman R Z, Doe B R. Plumbotectonic the model[J]. Tectonophysics, 1981, 75: 135–162.