

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.290



新疆东天山小石头泉地区琼库都克银多金属矿床成矿流体特征及其地质意义

于明杰^{1,2}, 王玉往¹, 毛启贵^{1*}, 王京彬¹, 张锐³, 程奋维⁴, 付王伟⁵

1. 北京矿产地质研究院, 北京 100012
2. 中国科学院地球化学研究所, 贵州贵阳 550081
3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083
4. 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局七〇四队, 新疆哈密 839005
5. 哈密市安全生产监督管理局, 新疆哈密 839000

摘要: 琼库都克银多金属矿床位于新疆哈密地区的小石头泉矿区中部, 是矿区目前为止最大的银多金属矿床, 目前人们对该矿床的成矿机制研究有待深入。在详细矿床地质特征的研究基础上, 开展了石英流体包裹体显微测温分析、群体包裹体的气液相成分分析以及稳定同位素(H、O 同位素)分析。结果显示, 琼库都克矿床的原生石英流体包裹体类型主要为富液相的水溶液包裹体, 个体较小; 成矿早期阶段(I 阶段)流体包裹体的均一温度变化于 152~280 °C, 盐度 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eqv}})$ 变化范围为 2.73%~13.50%; 主成矿阶段(II 阶段)流体包裹体的均一温度变化范围为 131~261 °C, 盐度 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eqv}})$ 变化范围为 0.35%~9.59%, 总体表现出中一低温、中一低盐度的成矿流体特征, 从 I 阶段到 II 阶段, 成矿流体的均一温度和盐度均有所降低, 表明温度和盐度的降低可能为金属沉淀的成矿机制。流体包裹体的气相成分中绝大部分为 H₂O, 其次含有一定的 CO₂, 并含有少量 N₂ 以及 CH₄ 和 C₂H₆ 等还原性气体; 液相成分中阳离子主要为 Na⁺、K⁺, 阴离子以 Cl⁻ 占绝大多数, 部分含 SO₄²⁻, 表明琼库都克矿床的成矿流体富含挥发分, 为 H₂O-NaCl 型热液体系。主成矿阶段包裹体的 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值范围为 -89.5‰~-85.1‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 -8.671‰~-5.94‰。结合包裹体成分分析, 显示矿床主成矿阶段的成矿热液为大气降水与岩浆水的混合来源。矿床地质特征、流体包裹体的研究结果以及氢氧同位素特征显示, 琼库都克矿床为浅成低温热液型矿床。

关键词: 地球化学; 流体包裹体; 氢、氧同位素; 琼库都克银多金属矿床; 东天山。

中图分类号: P597; P611

文章编号: 1000-2383(2018)09-3100-12

收稿日期: 2018-01-13

Characteristics of Ore-Forming Fluids and Their Geological Significance of Qiongkuduke Ag-Polymetallic Deposit in the Xiaoshitouquan Area of Eastern Tianshan Mountains, Xinjiang

Yu Mingjie^{1,2}, Wang Yuwang¹, Mao Qigui^{1*}, Wang Jingbin¹, Zhang Rui³, Cheng Fenwei⁴, Fu Wangwei⁵

1. Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China
2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China
3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
4. No.704 Geological Party, Xinjiang Geological Exploration Bureau for Nonferrous Metals, Hami 839005, China
5. Hami Administration of Work Safety, Hami 839000, China

Abstract: Qiongkuduke Ag-polymetallic deposit is located in the central Xiaoshitouquan area, eastern of the Harlik arc. The

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2017YFC0601201-2); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(No.2014CB440803); 中国地质调查局基础性公益性矿产地质调查项目(No.DD20160071)。

作者简介: 于明杰(1988-), 男, 博士后, 主要从事地质学、同位素地球化学以及岩石地球化学方面的工作。ORCID: 0000-0002-0787-5497。

E-mail: sfyumingjie@foxmail.com

* 通讯作者: 毛启贵, E-mail: qg_mao@sina.cn

引用格式: 于明杰, 王玉往, 毛启贵, 等, 2018. 新疆东天山小石头泉地区琼库都克银多金属矿床成矿流体特征及其地质意义. 地球科学, 43(9): 3100-3111.

Qiongkuduke deposit is the largest Ag-polymetallic deposit in the Xiaoshitouquan area. However, the mineralization mechanism of the deposit needs to be further studied. This paper focuses on the study of the homogenization temperature and the hydrogen and oxygen isotopic compositions of the fluid inclusions of the Qiongkuduke deposit based on the previous researches, to discuss the features of ore-forming fluids source. It is found by systematically petrographic observations that fluid inclusions are mainly small, sparse, and aqueous. The homogenization temperature of fluid inclusions ranges from 152 to 280 °C and the salinity ranges from 2.73% to 13.50% NaCleqv in the early stage of mineralization (stage I), and the homogenization temperature of fluid inclusions ranges from 131 to 261 °C and the salinity ranges from 0.35% to 9.59% NaCleqv in the main stage of mineralization (stage II), indicating that the homogenization temperature and salinity of the ore-forming fluid decrease from the early stage to the main stage of mineralization. The ore-forming fluid belongs to the H₂O-NaCl system with the gas phase mainly composed of H₂O together with minor CO₂ and N₂, while the liquid phase is mainly composed of Na⁺, K⁺, Cl⁻ together with minor SO₄²⁻. The hydrogen and oxygen isotopic compositions of fluid inclusions of the Qiongkuduke deposit show that the δD_{H₂O} value varies from -89.5‰ to -85.1‰ whereas the δ¹⁸O_{H₂O} value varies from -8.671‰ to -5.94‰. Combined with the inclusion composition analysis, the ore-forming fluid of the Qiongkuduke deposit is the mixture of magmatic water and atmospheric water. Regarding the regional tectonic setting, geological characteristics of the deposit, the features of ore-forming fluids and the characteristics of isotope analysis, we conclude that the Qiongkuduke Ag-polymetallic deposit belongs to the epithermal deposit.

Key words: geochemistry; fluid inclusions; hydrogen-oxygen isotope; Qiongkuduke Ag-polymetallic deposit; eastern Tianshan.

小石头泉地区位于新疆东天山哈尔里克岛弧带的东段(曹福根等,2006;靳刘圆等,2013;汪晓伟等,2015),近年来随着新疆维吾尔自治区有色地质勘查局 704 队勘查工作的深入进行,取得了一系列的丰硕找矿成果,相继发现了多个矿床(点)(方同辉等,2002;万博等,2006;张锐等,2017),如铜山北铜矿床、琼库都克银多金属矿床、铜山银多金属矿床、黄草沟银多金属矿床以及白尖山铅锌矿床,成矿地质条件优越,显示出良好的找矿前景。

琼库都克银多金属矿床是新疆维吾尔自治区有色地质勘查局 704 队于 2011 年发现的银多金属矿床,为小石头泉地区目前为止最大的银多金属矿床,银储量已达中型规模(300 t)。前人对其成矿时代及岩石地球化学特征进行了相关研究(张锐等,2017),在成矿地质背景及矿床成因类型方面进行探讨,取得了一些成果,但在成矿流体特征方面并未有相关研究报道。

本文在详细矿床地质特征研究基础上,开展了石英流体包裹体显微测温分析、群体包裹体的气液相成分分析以及稳定同位素(H、O 同位素)分析,揭示成矿流体的特征和来源,为琼库都克银多金属矿床的成因研究提供流体方面的理论依据,并为探讨琼库都克银多金属矿床的成矿作用以及总结小石头泉铜银多金属矿区的成矿规律提供新证据。

1 区域地质特征

小石头泉地区位于新疆哈密东北 200 km 的沁

城地区(图 1 和图 2a),20 世纪 90 年代新疆维吾尔自治区有色地质勘查局 704 队对该区域进行了 1:5 万的区域化探工作,通过一系列的地质工作发现了 Cu、Zn、Pb、Ag、Au、Fe 等矿化点(图 2b;吉蕴生,1994;王旭东,1994)。随着勘查工作的深入,前人在小石头泉矿区内发现了数个铜银多金属矿床/点,受当时地质工作条件的限制,只对其进行了成矿地质条件的初步探讨(丁玉学,1994;郭德英,1995;方同辉等,2002;万博等,2006)和相关矿床类型的探讨(莫江平等,2001;秦克章等,2003)。

小石头泉矿区主要发育下石炭统雅满苏组(C_{1y})火山岩、火山碎屑岩(图 2a),区内火山喷发作用强烈,以裂隙式线状火山机构内的中心式喷发为特点,古火山机构发育。其火山喷发厚度大、旋回多、分异作用明显,以海陆交互相、陆相中性—酸性喷发为主,由凝灰岩—凝灰质砾岩—凝灰质砂岩建造组成,上部主要为灰色厚层状块状凝灰岩、凝灰质砂岩及砾岩等;下部主要是由黄绿色—灰绿色薄层状凝灰岩、凝灰质砂岩及黄绿色凝灰质细砂岩夹砂砾岩等组成(方同辉等,2002;万博等,2006)。

小石头泉矿区大地构造归属于大南湖岛弧带东段(图 1),经历了多期构造作用后,形成了以逆冲断层为主,紧闭、线状和倒转褶皱为特征的区域构造格架。断层以北西和北东向为主,其中区域大断裂的北西向次级断裂以及与矿区内与之平行的断裂,是主要的控岩控矿断裂。矿区东西走向线性紧闭褶皱发育,由两个次一级背斜和向斜组成,背斜向东倾伏,叠加有火山穹隆和断裂构造,为主要的控矿构造(图 2a)。

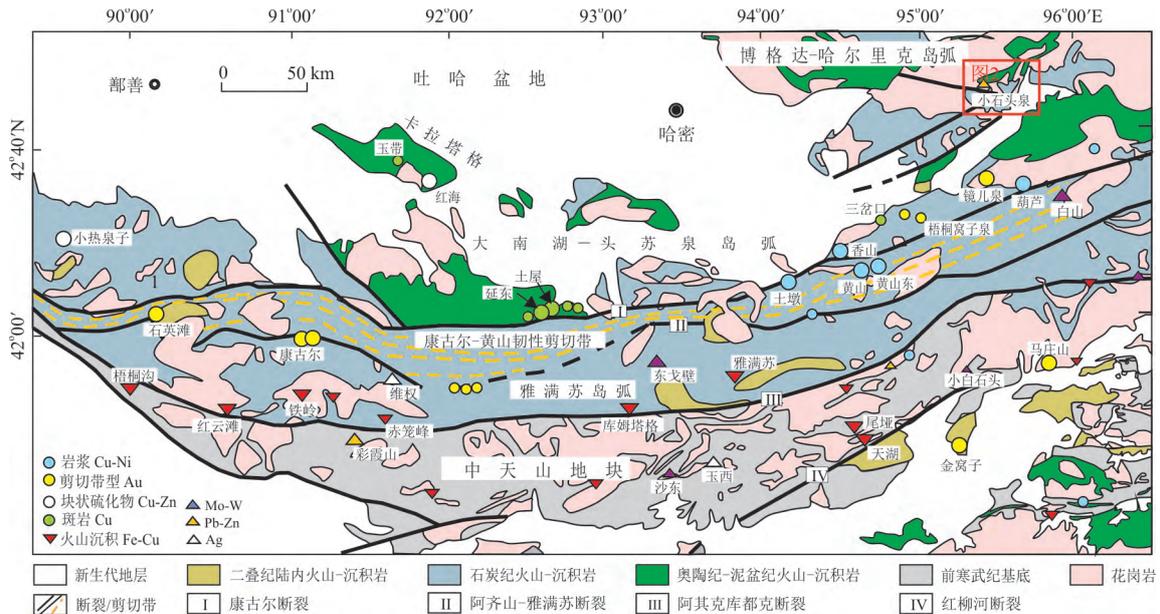


图 1 东天山区域地质简图

Fig.1 Geological sketch of tectonic outline of the eastern Tianshan area

据王京彬等(2006)

小石头泉矿区内的晚古生代石炭纪岩浆活动较为强烈,侵入岩分布范围较为广泛,且岩性种类繁多,以浅成中-酸性的侵入岩最为发育.最明显的为分布于矿床西部、北部和南部的黑云母花岗岩、钾长花岗岩和花岗斑岩杂岩体(张锐等,2017);其次,在矿区内发育了大量的中酸性次火山岩脉,部分斑岩脉与区内的银铜矿化关系密切,如琼库都克银多金属矿床、铜山东和黄草沟银矿床内发育的英安斑岩、闪长玢岩和花岗斑岩(图 2b).

小石头泉矿区矿化作用发育,到目前为止已发现了 3 个铜矿床(点),3 个银矿床,1 个铅锌矿床(图 2b).铜矿床主要分布于小石头泉铜山矿区,包括西段、北段、东段 3 个矿床(点);银矿床主要位于矿区南部,分别为琼库都克银多金属矿床、铜山银矿床和黄草沟银矿床;矿区东部还有白尖山矽卡岩型铅锌矿床,其中琼库都克银多金属矿床已达中型银矿床规模(300 t).

2 矿床地质特征

琼库都克银多金属矿床位于小石头泉矿区中部,矿区内主要出露地层为下石炭统雅满苏组(C_{1y}),为一套海陆交互相火山岩-火山碎屑岩建造,主要岩性为中酸性晶屑凝灰岩夹少量薄层灰岩(图 3).矿区内的火山岩为典型的岛弧火山岩,属钙

碱性系列,具有高 $\epsilon_{Nd}(t)$ 和低初始 Sr 的同位素地球化学特征(万博等,2006).

矿区内岩浆岩较为发育,主要分布于矿区的西部、北部、南部,主要岩性为黑云母花岗岩、钾长花岗岩和花岗斑岩杂岩体,北部的钾长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 314.3 ± 1.5 Ma,属晚石炭世早期,南部的花岗斑岩杂岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 320 ± 2.8 Ma,属早石炭世晚期(张锐等,2017);其次,在矿区内还发育了大量的中酸性次火山岩岩脉,与区内的铜银矿化关系密切,如闪长玢岩脉、花岗斑岩脉等,其中黄草沟矿床内的闪长玢岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 312.1 ± 1.7 Ma(张锐等,2017).

矿区内发育褶皱构造,琼库都克银多金属矿床产于近东西向的背斜核部,沿背斜轴部发育次级断裂和裂隙(图 3).次级断裂、裂隙大致可分为两组,即平行于背斜轴部呈近东西走向/北西西向的一组 and 斜交背斜轴部呈南北向延伸的一组.南北向断裂基本控制了小石头泉矿区内铜、银多金属矿体的空间展布,沿断裂带地表往往形成褐黄色、灰白色蚀变带,蚀变带内普遍发育碳酸盐化、硅化、锰矿化、粘土化等,而近东西向断裂被次火山岩脉侵入,从构造特征来看这两组断裂是同一期次构造作用的产物.

琼库都克银多金属矿床的矿体主要沿近南北向的断裂和裂隙发育,矿体为半隐伏矿体,产于背斜核

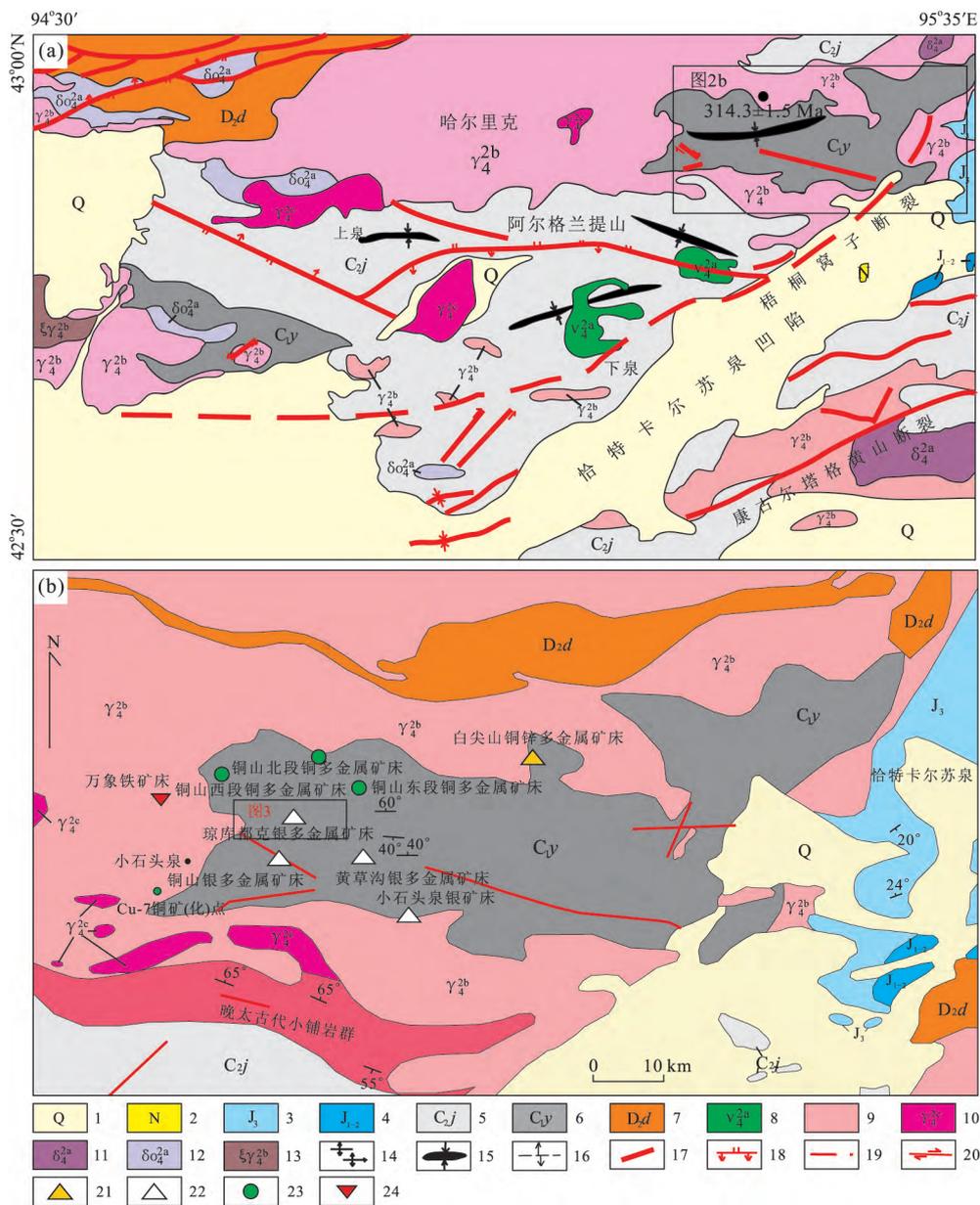


图 2 小石头泉地区区域地质图(a)和小石头泉矿区地质图(b)

Fig.2 Geological sketch of Xiaoshitouquan region (a) and the Xiaoshitouquan deposit (b)

1.第四纪沉积;2.红色岩性建造;3.石炭纪上亚层:类磨拉石建造.4.石炭纪下亚层:含煤建造;5.上石炭统海相火山碎屑岩建造;6.下石炭统海相火山碎屑岩建造;7.中泥盆统头苏泉组:凝灰质砂岩、粉砂岩、砂砾岩、钙质砂岩、砾岩及硅质岩、霏细岩、杏仁状玄武岩;8.石炭纪辉长岩;9.石炭纪花岗岩;10.石炭纪钾质花岗岩;11.石炭纪闪长岩;12.石英闪长岩;13.钾长花岗岩;14.背斜;15.向斜;16.隐伏向斜;17.区域大断裂;18.逆断层;19.推测断层;20.平推断层;21.铅锌矿床(点);22.银矿床(点);23.铜矿床(点);24.铁矿床(点)

部两侧,在地表可分为南北两段(图 3)。北矿段位于褶皱北翼,矿体有两条呈“X/人”型交叉的矿脉组成,受硅化破碎带的控制断续延伸。矿体主要以透镜状和细脉/网脉状为主,主矿脉在南北向上长约 200 m。钻孔工程显示深部为硅化破碎带,但局部富集成矿,形成了多个单独的相对富集的矿脉。矿体受硅化破碎带的控制断续延伸,总体走向近南北,宽 1.2~12.0 m 不等,平均厚度 3.93 m,主要以透镜状

和细脉/网脉状产出为特征,矿体倾向南东,倾角多在 50°~80°之间(图 4 和图 5)。笔者在矿床深处发现了多条脉状的铜铅锌矿体(图 5),伴生银。

银多金属矿化多伴有孔雀石化、硬锰矿化、软锰矿化、硅化、碳酸盐化,围岩蚀变组合主要为低温蚀变矿物,如梳状石英、方解石、绿帘石和绿泥石等(图 4 和图 5)。带状硅化主要发生在破碎带及两侧围岩中(图 4,图 6a~6c),一般呈细脉/网脉状、透镜状,

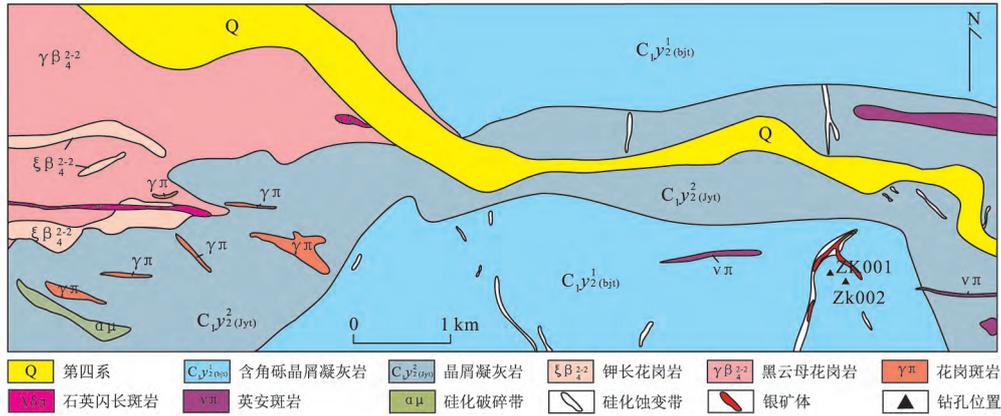


图 3 琼库都克银多金属矿床矿区地质简图

Fig.3 Geological sketch of the Qiongkuduke Ag-polymetallic deposit

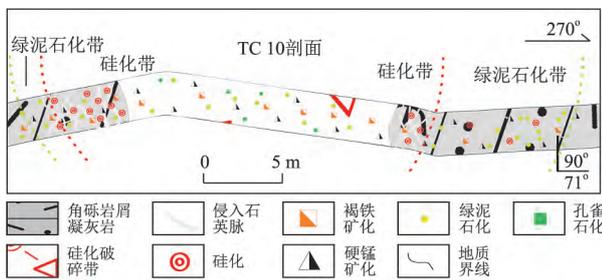


图 4 琼库都克矿床 10 号槽探剖面

Fig.4 Trenching profiles along line No.10 of the Qiongkuduke deposit

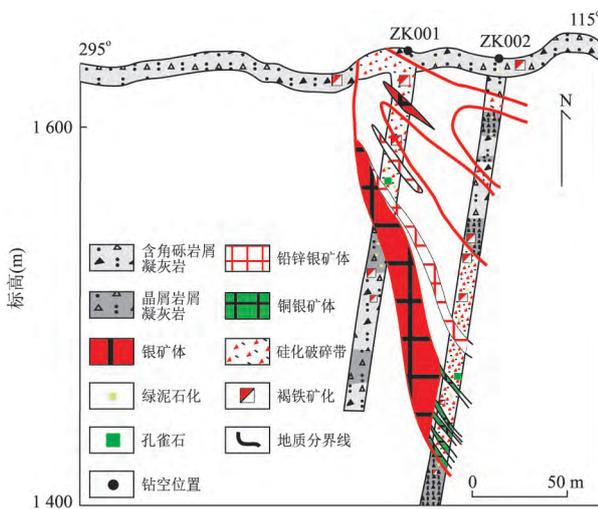


图 5 琼库都克矿床 0 号勘探线钻孔剖面

Fig.5 Exploration profiles along line No.0 of the Qiongkuduke deposit

据张锐等(2017)

这种硅化作用与银矿化作用密切相关,另一种重要的围岩蚀变为方解石化,呈方解石石英脉产出.硅化破碎带中发育有石英晶芽,并有薄膜状及粉末状的

硬锰矿和软锰矿(图 6e),矿体深部发生石英硫化物脉状银铜铅锌矿化.

矿石中金属矿物组合以黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿及辉银矿等为主,脉石矿物主要为石英、方解石和长石等(图 6).其中,黄铁矿:多呈半自形—自形,颗粒较小,基本上在 0.05 mm 左右,偶见较大者粒径在 0.4~0.7 mm(图 7b).方铅矿:多为他形,粒径多小于 0.02 mm,偶见粗者粒径约为 0.150 mm × 0.075 mm,与其他硫化物及脉石矿物嵌生,且大多分布于其他硫化物的边部或石英间隙,有部分交代闪锌矿(图 7a,7c~7f).闪锌矿:多呈他形粒状,颗粒较细,粗者约为 0.075 mm,多与黄铜矿和方铅矿等共生(图 7a~7f).钻孔中所见集合体颜色变化较大,有褐红色、锡白色、黄褐色等,星点状、团块状的多金属硫化物集合体多以脉状产出.

结合野外地质特征、矿物相互穿插关系、矿石结构构造特征,以及室内显微镜下各矿物共生组合和先后关系,笔者将琼库都克银多金属矿床的成矿阶段划分为 3 个阶段:石英阶段(I 阶段):成矿早阶段,该阶段矿化作用较弱,硫化物种类比较单一,主要形成了少量自形—半自形的黄铁矿,脉石矿物主要是石英(图 6a~6d);石英硫化物阶段(II 阶段):主成矿阶段,该阶段矿化作用强烈,硫化物种类较多,包括有黄铜矿、闪锌矿、黝铜矿、方铅矿以及辉银矿等,脉石矿物以石英为主(图 6f,图 7);石英—碳酸盐阶段(III 阶段):成矿晚阶段,该阶段主要形成的是石英、方解石等矿物,同时有少量黄铁矿(部分被氧化成褐铁矿).

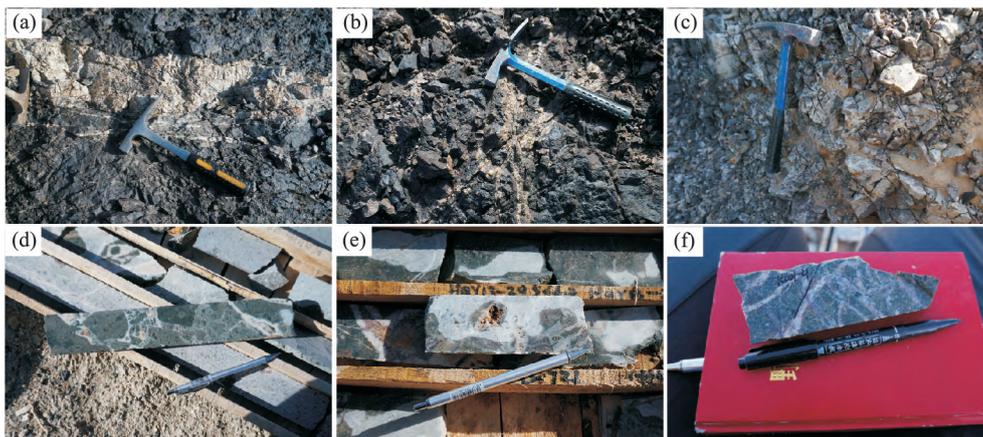


图 6 琼库都克矿床围岩及矿化照片

Fig.6 Field photos of the Qiongkuduke Ag-polymetallic deposit mineralization and host rocks

a.成矿早阶段的梳状石英脉;b.成矿早阶段的细粒石英脉;c.成矿早阶段的硅化蚀变带;d.成矿早阶段的热液石英脉;e.石英脉中的晶洞构造;f.主成矿阶段的网脉状石英脉

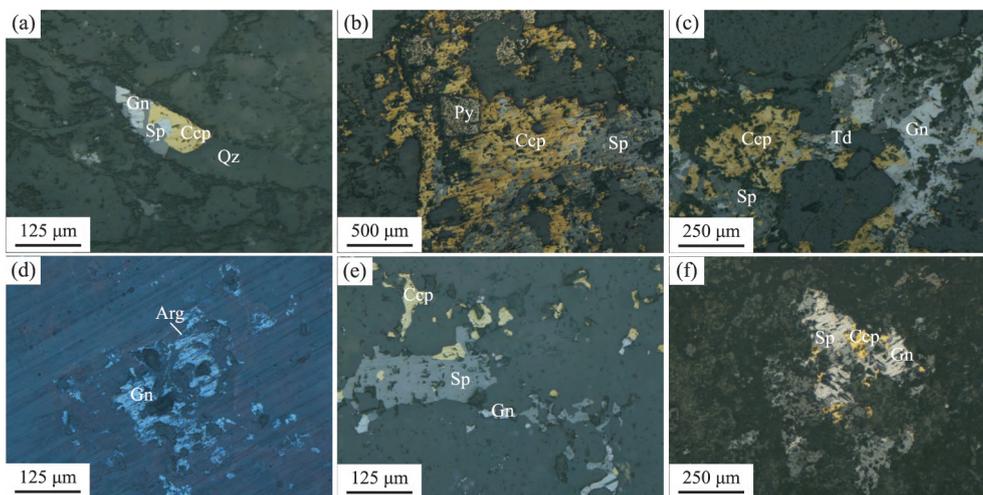


图 7 琼库都克矿床金属矿物组合显微照片

Fig.7 Photomicrographs of the Qiongkuduke deposit ore textures and mineral assemblage

a.含黄铜矿、闪锌矿和方铅矿石英脉;b.呈自形一半自形结构的黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿共生;c.黄铜矿、闪锌矿、黝铜矿和方铅矿共生;d.辉银矿分布于方铅矿的边部;e.闪锌矿、黄铜矿和方铅矿共生;f.黄铜矿、闪锌矿和方铅矿共生.Ccp.黄铜矿;Py.黄铁矿;Sp.闪锌矿;Gn.方铅矿;Td.黝铜矿;Arg.辉银矿;Qz.石英

3 流体包裹体特征

3.1 样品特征与测试方法

本次研究所采样品来自琼库都克银多金属矿床 0 号勘探线钻孔岩心(图 5)。

流体包裹体显微测温分析的样品采自不同位置的含少量褐铁矿和黄铁矿的石英脉和含较多金属硫化物的石英脉,代表琼库都克银多金属矿床的前两个成矿阶段(即 I、II 阶段)。先由廊坊岩拓地质服务有限公司将样品磨制成双面抛光的包裹体片(厚约 0.2 mm),进行仔细的包裹体显微岩相学研究,然

后选择具有典型性的包裹体片用于系统的显微测温分析。

流体包裹体的显微测温分析在北京矿产地质研究院的流体包裹体实验室完成,所用仪器为英国 Linkam THMS600 型冷热台,测试温度范围是 -196~600 °C。测试过程中参照冷冻—加热法(Wilkinson, 2001)来记录相变温度点。显微测温过程中,测试包裹体均一温度时的升温速率一般为 2~5 °C/min,最后冰晶消失时的升温速率为 0.1~0.2 °C/min,利用流体包裹体计算程序 MacFlincon(Brown and Hagemann, 1995)对测试结果进行数据处理。

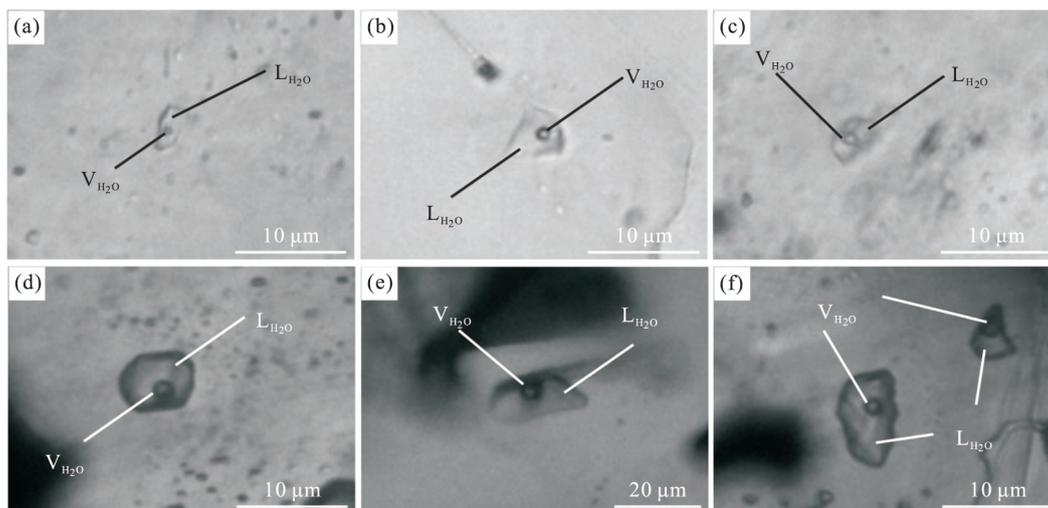


图 8 琼库都克矿床包裹体显微照片

Fig.8 Photomicrographs of the Qiongkuduke fluid inclusions (FIs)

L_{H₂O}-液相; V_{H₂O}-气相

根据 H₂O-NaCl 体系中的盐度-冰点公式(Hall *et al.*, 1988)求得包裹体的盐度.

流体包裹体的群体包裹体成分分析样品主要采自琼库都克矿床 ZK001 钻孔中的 II 阶段的含硫化物石英脉.石英单矿物的挑选工作由廊坊岩拓地质服务有限公司来完成,分析测试工作由中国科学院地质与地球物理研究所完成.流体包裹体的气相成分测定的最低检出限为 1×10^{-6} ,所用仪器为 RG202 四极质谱(QMS).流体包裹体液相成分的测定方法为加热爆裂法,所使用的 Shimadzu HIC6A 型离子色谱仪的最低检出限:阴离子为 1×10^{-9} ,阳离子为 1×10^{-6} (朱和平和王莉娟,2001).

流体包裹体的氢、氧同位素分析样品主要采自琼库都克矿床 ZK001 钻孔中的 II 阶段的含硫化物石英脉,分析测试工作在核工业北京地质研究院地质测试分析中心完成.流体包裹体氢同位素分析测试方法为爆裂法取水,铬法制氢(万德芳等,2005),爆裂温度为 550 °C;氧同位素分析测试采用 BrF₅ 法.氢、氧同位素测定使用 MAT253 质谱计,氢、氧同位素使用的国际标准为 SMOW.氧同位素分析精度为 $\pm 0.2\%$,氢同位素分析精度为 $\pm 2\%$.氧同位素测定的是石英中的氧同位素,石英与水的氧同位素平衡公式采用 Sharp *et al.* (2016) 总结的公式计算得出.

3.2 流体包裹体岩相学

系统的流体包裹体显微岩相学观察显示,琼库都克银多金属矿床的含硫化物石英脉中的流体包裹体类型较为简单,在室温下,根据前人提出的流体包

裹体的相态分类方案(Roedder, 1984),笔者将琼库都克银多金属矿床的流体包裹体类型分为两类(图 8),现分述如下.

I 型:纯液相包裹体,大小为 $1 \sim 3 \mu\text{m}$,以长条状和不规则状为主,数量较多,多沿裂隙分布,多为次生包裹体.

II 型:富液相的水溶液两相包裹体,气液比为 3%~25%.依据包裹体成因类型(卢焕章等,2004),可分为原生两相包裹体(II a 型)和次生两相包裹体(II b 型).II a 型:气液比为 5%~25%,大小为 $5 \sim 15 \mu\text{m}$,主要呈扁圆状产出,多孤立分布(图 8).II b 型:气液比较小,为 3%~10%,大小大多在 $5 \mu\text{m}$ 以下,常成串珠状和线状分布,为典型的次生包裹体.

岩相学观察结果显示,成矿阶段的 I 阶段与 II 阶段的包裹体类型并无明显的区别, I 阶段的 I 型包裹体比例较 II 阶段更高,数量上 II 阶段的流体包裹体更为发育(图 8).

3.3 流体包裹体显微测温

笔者在详细岩相学观察基础上,对琼库都克矿床石英中富液相水溶液包裹体(II a 型)进行了显微测温研究.测温结果显示(表 1), I 阶段石英流体包裹体的冰点温度为 $-6.5 \sim -1.6 \text{ } ^\circ\text{C}$,平均值为 $-3.9 \text{ } ^\circ\text{C}$,均一温度为 $152 \sim 280 \text{ } ^\circ\text{C}$ (图 9),平均值为 $207 \text{ } ^\circ\text{C}$. II 阶段石英流体包裹体的冰点温度为 $-6.40 \sim -0.35 \text{ } ^\circ\text{C}$,均一温度为 $131 \sim 261 \text{ } ^\circ\text{C}$ (图 9),平均值为 $178 \text{ } ^\circ\text{C}$,利用 Hall *et al.* (1988) 总结的公式将冰点温度换算成流体的盐度, I 阶段石英流体包裹体的盐度 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eqv}})$ 和 II 阶段石英流体包裹

表 1 琼库都克银多金属矿床流体包裹体显微测温结果

Table 1 Microthermometric data of fluid inclusions of the Qiongkuduke Ag-polymetallic deposit

成矿阶段	样号	均一温度(°C)	盐度(% NaCleqv)
I 阶段	ZK002-1	160.2~280.1	2.73~9.86
	ZK002-19	151.6~261.5	5.41~13.50
	ZK001-9	154.9~200.8	1.90~4.80
	ZK001-11	131.0~217.3	1.05~9.59
II 阶段	ZK001-12	139.9~201.0	0.35~3.71
	ZK001-17	172.4~245.9	5.26~6.30
	ZK001-22	150.3~201.6	2.73~5.11

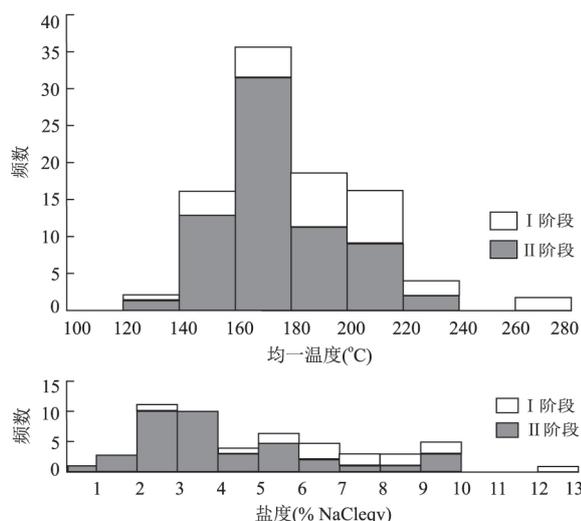


图 9 琼库都克矿床石英中流体包裹体均一温度和盐度直方图

Fig.9 Histogram of homogenization temperature and salinity for fluid inclusions in quartz from Qiongkuduke deposit

体盐度 ω (NaCleqv) 分别为 2.73% ~ 13.50% 和 0.35% ~ 9.59%。

3.4 流体包裹体成分分析

本次测试分析工作,选择了 3 件采自琼库都克矿床的 ZK001 钻孔中的 II 阶段的含硫化物石英脉样品进行群体包裹体成分分析.流体包裹体气相成分分析结果和液相成分分析结果分别见表 2 和表 3.琼库都克矿床石英流体包裹体的气相成分(表 2)中绝大部分为 H₂O,其次含有一定量的 CO₂,并含有少量 N₂、CH₄ 和 C₂H₆ 等还原性气体;液相成分(表 3)较为简单,阳离子主要为 Na⁺、K⁺,阴离子以 Cl⁻ 占绝大多数,有一个样品中含 SO₄²⁻,F⁻、Mg²⁺、Ca²⁺ 未检测出,Na⁺/K⁺ 比值有 1 个样品小于 1,2 个样品大于 1.

3.5 流体包裹体氢、氧同位素特征

本次研究挑选了 3 件琼库都克矿床 II 阶段的石

表 2 琼库都克矿床石英流体包裹体气相成分分析结果(%)

Table 2 Gas components of fluid inclusions from the Qiongkuduke deposit (%)

样品编号	H ₂ O	N ₂	Ar*	O ₂
ZK001-4	99.27	0.021 662 75	0.028 677	—
ZK001-5	99.28	0.031 649 76	0.015 749	—
ZK001-14	99.18	0.043 067 22	0.025 500	—

样品编号	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	H ₂ S
ZK001-4	0.536 165	0.039 630	0.102 370	—
ZK001-5	0.615 792	0.030 311	0.025 134	—
ZK001-14	0.676 944	0.044 980	0.029 509	—

注:“—”表示未检出;“*”表示参考值.

表 3 琼库都克矿床石英流体包裹体液相成分分析结果(10⁻⁶)

Table 3 Liquid components of fluid inclusions from the Qiongkuduke deposit (10⁻⁶)

样品编号	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
ZK001-4	—	0.345	2.400	0.825	1.290	—	—
ZK001-5	—	2.080	—	1.740	0.801	—	—
ZK001-14	—	1.540	—	1.130	0.978	—	—

注:“—”表示未检出.

表 4 琼库都克矿床石英流体包裹体的氢氧同位素测试结果

Table 4 Hydrogen and oxygen isotope data of fluid inclusions from the Qiongkuduke deposit

样品编号	矿物	$\delta^{18}O_{v-SMOW}$ (‰)	δD_{v-SMOW} (‰)	$\delta^{18}O_{H_2O-SMOW}$ (‰)	T(°C)
ZK001-23	石英	7.5	-89.538	-5.994	176
ZK001-5	石英	5.5	-85.156	-8.671	170
ZK001-14	石英	5.2	-85.738	-8.339	175

英单矿物样品进行氢—氧同位素分析测定,结果显示(表 4),琼库都克矿床含矿热液中 δD_{v-SMOW} 值范围为 -85.156‰ ~ -89.538‰,平均值为 -86.810‰, $\delta^{18}O_{v-SMOW}$ 范围为 5.2‰ ~ 7.5‰,平均值为 6.1‰.利用石英—水分馏方程公式 $10^3 \ln \alpha_{quartz-H_2O} = 4.20 \times 10^6 / T^2 - 3.30 \times 10^3 / T$ (Sharp *et al.*, 2016),计算出流体的 $\delta^{18}O_{H_2O-SMOW}$ 值为 -8.671‰ ~ -5.994‰,平均值为 -7.668‰.

4 讨论

4.1 成矿流体的特征

琼库都克矿床的石英流体包裹体以富液相的水溶液包裹体为主,缺乏水—二氧化碳包裹体(即含 CO₂ 三相包裹体),成矿阶段的 I 阶段与 II 阶段的包裹体类型并无明显的区别, I 阶段的 I 型包裹体比例较 II 阶段更高.主成矿阶段(II 阶段)的石英流

体包裹体的液相成分分析结果(表 3)显示,阳离子富含 Na^+ 、 K^+ , Na^+/K^+ 比值中两个样品略大于 1, 一个样品略小于 1, 总体呈现出 $\text{Na}^+ > \text{K}^+$ 的特征; 未检测出其他阳离子. 阴离子中富含 Cl^- , 有一个样品检测出 SO_4^{2-} , 2 个样品未检测出 SO_4^{2-} , 总体呈现 $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ 的特征, 因此笔者认为, 琼库都克银多金属矿床的成矿流体属于 H_2O - NaCl 热液体系. 流体包裹体的气相成分以 H_2O 为主, 其次为 CO_2 , 再次为 N_2 , 并含有少量 CH_4 、 C_2H_6 等还原性气体, 表明主成矿阶段成矿流体富含一定挥发分.

琼库都克矿床含银多金属石英脉 II 阶段的包裹体均一温度范围变化较大 ($131\sim 261\text{ }^\circ\text{C}$), 总体温度略低于 I 阶段石英脉包裹体均一温度 ($152\sim 280\text{ }^\circ\text{C}$); II 阶段包裹体盐度变化范围也较大 ($0.35\%\sim 9.59\%$), 但总体盐度略低于 I 阶段的包裹体的盐度变化范围 ($2.73\%\sim 13.50\%$). 显微测温研究结果表明, 琼库都克矿床的成矿流体属于中—低温度和中—低盐度的成矿流体, 从成矿早阶段 (I 阶段) 到主成矿阶段 (II 阶段), 流体均一温度和盐度均有所降低.

琼库都克矿床的流体包裹体的均一温度集中在 $140\sim 220\text{ }^\circ\text{C}$, 盐度 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eqv}})$ 集中在 $2\%\sim 6\%$, 琼库都克矿床的数据投点在图 10 中, 绝大部分落入浅成低温热液型矿床区域内. 综合包裹体显微岩相学观察、显微测温研究结果以及群体包裹体的成分分析, 结果表明琼库都克矿床的成矿流体性质可能为浅成低温热液流体性质 (Turner *et al.*, 2001; Williams-Jones and Heinrich, 2005; Heinrich, 2007).

4.2 成矿流体来源

流体包裹体液相组分中的离子和离子团, 如

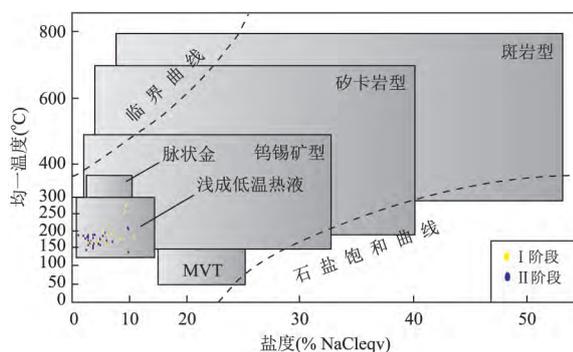


图 10 琼库都克矿床石英流体包裹体均一温度—盐度与不同类型矿床包裹体的均一温度—盐度对比

Fig. 10 Comparison between temperature-salinity of inclusions of the Qiongzuduke deposit and that of inclusions in different types of ore deposits

底图据 Wilkinson(2001)

Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等, 是成矿流体极为重要的组成部分, 成矿物质来源不同对液相组分含量会产生重要影响 (Roedder, 1979), 王莉娟等 (2009) 指出, Na^+/K^+ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 、 F^-/Cl^- 等离子个数比值可以反映成矿流体来源差异. 成矿热液来源可以通过流体包裹体的 F^-/Cl^- 比值和 Na^+/K^+ 比值来判别 (Roedder, 1984; 张德会, 1992), 并总结出: $\text{Na}^+/\text{K}^+ < 2$ 和 $\text{F}^-/\text{Cl}^- > 1$ 为壳源岩浆流体, $\text{Na}^+/\text{K}^+ > 10$ 和 $\text{F}^-/\text{Cl}^- < 1$ 为来自幔源岩浆流体或变质流体. 琼库都克矿床主成矿阶段石英流体包裹体中富含 Na^+ 、 K^+ 等阳离子和 Cl^- 等阴离子, 未检测出 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 F^- , 分析测试结果显示 F^-/Cl^- 的比值较低, 可能体现了地下热卤水或大气水成因 (卢焕章等, 1990), 结合流体包裹体显微测温分析, 笔者认为琼库都克矿床成矿流体可能为大气水成因; Na^+/K^+ 的比值较低, 表明岩浆水可能参与了矿床成矿作用 (Roedder, 1984; 张德会, 1992; 熊索菲等, 2016), 因此琼库都克矿床的成矿流体具有混合来源.

依据前人的研究成果, 成矿热液体系中水的来源可以采用热液矿物流体包裹体中水的氢氧同位素组成特征进行判别 (张理刚, 1985; 郑永飞和陈江峰, 2000), 琼库都克矿床主成矿阶段 (II 阶段) 流体包裹体中 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O-SMOW}}$ 值的变化范围为 $-89.538\%\sim -85.156\%$, $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O-SMOW}}$ 值变化于 $-8.671\%\sim -5.994\%$, 与标准岩浆水 δD 变化范围 $-80\%\sim -40\%$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 变化范围 $5.5\%\sim 9.5\%$ (Taylor, 1979; Ohmoto, 1986; Sheppard, 1986) 相比, 琼库都克矿床成矿流体的 δD 接近于岩浆水范围, 这可能是因为采用包裹体爆裂法测试的氢同位素存在次生包裹体成分干扰, 因此其 δD 值接近岩浆范围, 而氧同位素值不存在次生包裹体的干扰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 表现出了显著偏离岩浆水范围的现象. 在图 11 上, 琼库都克矿床主成矿阶段 (II 阶段) 的样品投影点分布于大气降水与热液水范围内, 靠近大气降水线一侧而偏离岩浆水范围, 指示主成矿阶段 (II 阶段) 成矿流体为大气降水与岩浆水的混合.

4.3 矿床成因类型

琼库都克银多金属矿床位于小石头泉矿区中部, 产自一套石炭纪的海陆交互的火山岩中 (图 3), 矿体以脉状为主 (图 5, 图 6), 可见石英的梳状构造、晶洞构造等 (图 6), 与银矿化关系密切的硅化蚀变带在地表均有出露. 围岩蚀变以发育硅化、碳酸盐化、青磐岩化等低温蚀变矿物为主要特征, 显微测温研究同时显示包裹体以发育中低温度、中低盐度的

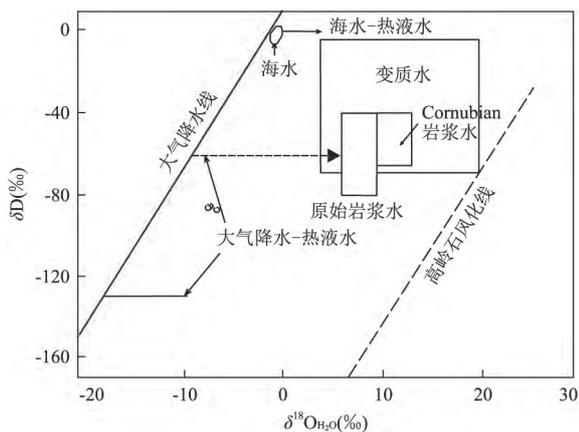


图 11 琼库都克矿床成矿流体的 $\delta D-\delta^{18} O_{H_2O}$ 图解

Fig. 11 $\delta D-\delta^{18} O_{H_2O}$ diagram of fluid inclusions from the Qiongkuduke deposit

据 Taylor(1979, 1997)、Ohmoto(1986)、Sheppard(1986)、Hedenquist *et al.*(1994)、Nesbitt(1996)

富液两相包裹体为特征,反映出琼库都克矿床的成矿温度较低;包裹体成分分析显示成矿流体属于 $H_2O-NaCl$ 型热液流体,并富含一定的挥发分。从琼库都克矿床的成矿地质特征、成矿流体特征来看,其均与浅成低温热液型成矿系统(Cooke and Simmons, 2000; Hedenquist *et al.*, 2000; Gemmell *et al.*, 2004; Bethke *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2012) 的特征相一致。

前人对流体包裹体和稳定同位素(H、O、S、Pb等)的研究表明,浅成低温热液型矿床的成矿流体组成主要以大气降水为主,岩浆水或变质水的加入尚有异议,不过岩浆热液的参与对成矿元素的运移起到重要作用(Sillitoe, 1997; Scott and Watanabe, 1998; Cooke and Simmons, 2000; Cooke and McPhail, 2001; Sun *et al.*, 2004; Heinrich, 2005, 2007; 周向斌等, 2016)。琼库都克矿床的群体包裹体成分分析及氢氧同位素分析结果显示,成矿流体为大气降水与岩浆水的混合流体,以大气降水为主,岩浆水对成矿作用起到了重要作用,张锐等(2017)对矿区内成矿地质体的相关研究结果也证明了这一点。

综合琼库都克矿床的地质特征、成矿流体性质和成矿流体来源等研究结果,笔者认为琼库都克矿床为浅成低温热液型矿床。

5 结论

(1) 琼库都克矿床的原生石英流体包裹体类型

主要为富液相的水溶液包裹体,个体较小;成矿早阶段(I阶段)流体包裹体的均一温度变化范围为 $152\sim 280\text{ }^\circ\text{C}$,盐度 $\omega(NaCl_{eqv})$ 变化范围为 $2.73\%\sim 13.50\%$,主成矿阶段(II阶段)流体包裹体的均一温度变化范围为 $131\sim 261\text{ }^\circ\text{C}$,盐度 $\omega(NaCl_{eqv})$ 变化范围为 $0.35\%\sim 9.59\%$,总体表现出中一低温、中一低盐度的成矿流体特征。

(2) 主成矿阶段流体包裹体的气液相成分显示成矿流体属于 $H_2O-NaCl$ 型热液体系,结合氢氧同位素特征分析,显示成矿热液为大气降水与岩浆水的混合来源。

(3) 结合琼库都克矿床的地质特征、成矿流体性质和成矿流体来源等研究成果,笔者认为琼库都克矿床为浅成低温热液型矿床。

References

- Bethke, P.M., Rye, R.O., Stoffregen, R.E., et al., 2005. Evolution of the Magmatic-Hydrothermal Acid-Sulfate System at Summitville, Colorado: Integration of Geological, Stable-Isotope, and Fluid-Inclusion Evidence. *Chemical Geology*, 215(1-4): 281-315. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.041>
- Brown, P.E., Hagemann, S.G., 1995. MacFlinCor and Its Application to Fluids in Archean Lode-Gold Deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(19): 3943-3952. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00254-w](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00254-w)
- Cao, F.G., Tu, Q.J., Zhang, X.M., et al., 2006. Preliminary Determination of the Early Paleozoic Magmatic Arc in the Karlik Mountains, East Tianshan, Xinjiang, China-Evidence from Zircon SHRIMP U-Pb Dating of Granite Bodies in the Tashuihe Area. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 923-927 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y.J., Pirajno, F., Wu, G., et al., 2012. Epithermal Deposits in North Xinjiang, NW China. *International Journal of Earth Sciences*, 101(4): 889-917. <https://doi.org/10.1007/s00531-011-0689-4>
- Cooke, D.R., McPhail, D.C., 2001. Epithermal Au-Ag-Te Mineralization, Acupan, Baguio District, Philippines: Numerical Simulations of Mineral Deposition. *Economic Geology*, 96(1): 109-131. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.1.109>
- Cooke, D.R., Simmons, S.F., 2000. Characteristics and Genesis of Epithermal Gold Deposits. *Reviews in Economic Geology*, 13(12): 221-244.
- Ding, Y.X., 1994. The Geological Characteristics and Prospecting in the District I Tongshan Ore Deposit, the Xinjiang Uygur Autonomous Region. *Geological Explo-*

- ration for Non-Ferrous Metals, 3(2): 77–82 (in Chinese with English abstract).
- Fang, T. H., Qin, K. Z., Wang, S. L., et al., 2002. Geological Characteristics and Exploration Prospect of Copper and Multi-Metal Deposits in Xiaoshitouquan District, Eastern Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 20(4): 371–374 (in Chinese with English abstract).
- Gemmell, J. B., Sharpe, R., Jonasson, I. R., et al., 2004. Sulfur Isotope Evidence for Magmatic Contributions to Submarine and Subaerial Gold Mineralization: Conical Seamount and the Ladolam Gold Deposit, Papua New Guinea. *Economic Geology*, 99(8): 1711–1725. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.99.8.1711>
- Guo, D. Y., 1995. Metallogenic Geologic Setting of the Xiaoshitouquan District in the Eastern Xinjiang. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals*, 4(4): 212–218 (in Chinese).
- Hall, D. L., Sterner, S. M., Bodnar, R. J., 1988. Freezing Point Depression of NaCl-KCl-H₂O Solutions. *Economic Geology*, 83(1): 197–202. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.1.197>
- Hedenquist, J. W., Arribas, A., Gonzalez-Urien, E., 2000. Exploration for Epithermal Gold Deposits. *Reviews in Economic Geology*, 13(2): 45–77.
- Hedenquist, J. W., Lowenstern, J. B., 1994. The Role of Magmas in the Formation of Hydrothermal Ore Deposits. *Nature*, 370(6490): 519–527. <https://doi.org/10.1038/370519a0>
- Heinrich, C. A., 2005. The Physical and Chemical Evolution of Low-Salinity Magmatic Fluids at the Porphyry to Epithermal Transition: A Thermodynamic Study. *Mineralium Deposita*, 39(8): 864–889. <https://doi.org/10.1007/s00126-004-0461-9>
- Heinrich, C. A., 2007. Fluid-Fluid Interactions in Magmatic-Hydrothermal Ore Formation. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 65(1): 363–387. <https://doi.org/10.2138/rmg.2007.65.11>
- Ji, Y. S., 1994. Primary Halo Geochemical Characteristics of the District I Tongshan in Xiaoshitouquan. *Mineral Resources and Geology*, 43(8): 373–379 (in Chinese).
- Jin, L. Y., Zhang, J., Zhu, Z. X., et al., 2013. The Geologic Character and Tectonic Significance of Paleozoic Volcanic Rocks in the Harlik Mountains, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 31(3): 173–179 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H. Z., Fan, H. R., Ni, P., et al., 2004. Fluid Inclusion. Science Press, Beijing, 406–419 (in Chinese).
- Lu, H. Z., Li, B. L., Wei, J. X., 1990. Fluid Inclusion Geochemistry. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Mo, J. P., Sha, Y. K., Wang, X. D., et al., 2001. Study on Geological and Geochemical Characteristics and Genesis of Tongshan Copper Polymetallic Deposit, Xinjiang. *Mineral Resources and Geology*, 15(3): 162–166 (in Chinese with English abstract).
- Nesbitt, B. E., 1996. Applications of Oxygen and Hydrogen Isotopes to Exploration for Hydrothermal Mineralization. *SEG Newsletter*, 27: 1–13.
- Ohmoto, H., 1986. Stable Isotope Geochemistry of Ore Deposits. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 16(1): 491–559.
- Qin, K. Z., Peng, X. M., San, J. Z., et al., 2003. Types of Major Ore Deposits, Division of Metallogenic Belts in Eastern Tianshan, and Discrimination of Potential Prospects of Cu, Au, Ni Mineralization. *Xinjiang Geology*, 21(2): 143–150 (in Chinese with English abstract).
- Roedder, E., 1979. In Physics and Chemistry of the Earth. Pergamas Press, Oxford, 9–35.
- Roedder, E., 1984. Fluid Inclusions. In: Ribbe, P. H., ed., Reviews in Mineralogy. Mineralogical Society of America, Washington D.C..
- Scott, A. M., Watanabe, Y., 1998. “Extreme Boiling” Model for Variable Salinity of the Hokko Low-Sulfidation Epithermal Au Prospect, Southwestern Hokkaido, Japan. *Mineralium Deposita*, 33(6): 568–578. <https://doi.org/10.1007/s001260050173>
- Sharp, Z. D., Gibbons, J. A., Maltsev, O., et al., 2016. A Calibration of the Triple Oxygen Isotope Fractionation in the SiO₂-H₂O System and Applications to Natural Samples. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 186: 105–119. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.04.047>
- Sheppard, S. M. F., 1986. Characterization and Isotopic Variations in Natural Waters. *Reviews in Mineralogy*, 16: 165–183.
- Sillitoe, R. H., 1997. Characteristics and Controls of the Largest Porphyry Copper-Gold and Epithermal Gold Deposits in the Circum-Pacific Region. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44(3): 373–388. <https://doi.org/10.1080/08120099708728318>
- Sun, W. D., Arculus, R. J., Kamenetsky, V. S., et al., 2004. Release of Gold-Bearing Fluids in Convergent Margin Magmas Prompted by Magnetite Crystallization. *Nature*, 431(7011): 975–978. <https://doi.org/10.1038/nature02972>
- Taylor, H. P., 1979. Oxygen and Hydrogen Isotope Relationships in Hydrothermal Mineral Deposits. In: Barnes, H. L., ed., Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. John Wiley & Sons, New York.
- Taylor, H. P., 1997. Oxygen and Hydrogen Isotope Relation-

- ships in Hydrothermal Mineral Deposits. In: Barnes, H. L., ed., *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. John Wiley & Sons, New York.
- Turner, W., Richards, J., Nesbitt, B., et al., 2001. Proterozoic Low-Sulfidation Epithermal Au-Ag Mineralization in the Mallery Lake Area, Nunavut, Canada. *Mineralium Deposita*, 36(5): 442–457. <https://doi.org/10.1007/s001260100181>
- Wan, B., Zhang, L. C., Xu, X. W., et al., 2006. Geochemical Characteristics of Volcanic, Sub-Volcanic Rocks in Xiaoshitouquan Copper Polymetallic Deposit, Eastern Tianshan, and Its Metallogenic Setting. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2711–2718 (in Chinese with English abstract).
- Wan, D. F., Fan, T. Y., Tian, S. H., 2005. The Chromium Analytical Technique for Hydrogen Isotopes. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(Suppl.): 35–38 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. B., Wang, Y. W., He, Z. J., 2006. Ore Deposits as a Guide to the Tectonic Evolution in the East Tianshan Mountains, NW China. *Geology in China*, 33(3): 461–469 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. J., Peng, Z. G., Zhu, X. Y., et al., 2009. Source and Evolution of Ore Fluid of the Xitieshan Sedimentary Exhaleative Lead Zinc System, Qinghai Province; Evidence from Fluid Inclusion and Isotope Geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 3007–3015 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. D., 1994. Analysis of volcanogenic mineralization of Tongshan Copper Polymetallic Deposits. *Mineral Resources and Geology*, 8(5): 383–387 (in Chinese).
- Wang, X. W., Xu, X. Y., Ma, Z. P., et al., 2015. Geochemistry and Tectonic Setting of the Early Carboniferous Volcanic Rocks in the Eastern Section of the Bogda Orogenic Belt in Xinjiang. *Geology and Exploration*, 51(1): 108–122 (in Chinese with English abstract).
- Wilkinson, J. J., 2001. Fluid Inclusions in Hydrothermal Ore Deposits. *Lithos*, 55(1–4): 229–272. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5)
- Williams-Jones, A. E., Heinrich, C. A., 2005. Vapor Transport of Metals and the Formation of Magmatic-Hydrothermal Ore Deposit. *Economic Geology*, 100(7): 1287–1312. <https://doi.org/10.2113/100.7.1287>
- Xiong, S. F., Yao, S. Z., Gong, Y. J., et al., 2016. Ore-Forming Fluid and Thermochemical Sulfate Reduction in the Wusihe Lead-Zinc Deposit, Sichuan Province, China. *Earth Science*, 41(1): 105–120 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.008>
- Zhang, D. H., 1992. Aqueous Phase Composition Characteristic of Mineral Fluid Inclusions and Its Significance in Orogenesis. *Earth Science*, 17(6): 677–688 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. G., 1985. The Application of the Stable Isotope to Geology, the Hydrothermal Mineralization of Metal Activation and Its Prospecting. Shannxi Science and Technology Press, Xi'an (in Chinese).
- Zhang, R., Mao, Q. G., Yu, M. J., et al., 2017. Geochemical Characteristics and Zircon U-Pb Ages of the Magmatite in the Qiongdokuke Ag-Pb-Zn Polymetallic Deposit of Xinjiang. *Geology and Exploration*, 53(2): 270–282 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. F., Chen, J. F., 2000. Stable Isotope Geochemistry. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhou, X. B., Li, J. F., Wang, K. Y., et al., 2016. Geochemical Characteristics of Ore-Forming Fluid in Huanggoushan Gold Deposit, Jilin Province. *Earth Science*, 41(1): 121–130 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.009>
- Zhu, H. P., Wang, L. J., 2001. Determining Gaseous Composition of Fluid Inclusions with Quadrupole Mass Spectrometer. *Science in China (Series D)*, 31(7): 586–590 (in Chinese).

附中文参考文献

- 曹福根, 涂其军, 张晓梅, 等, 2006. 哈尔里克山早古生代岩浆弧的初步确定——来自塔水河一带花岗质岩体锆石 SHRIMP U-Pb 测年的证据. *地质通报*, 25(8): 923–927.
- 丁玉学, 1994. 论新疆铜山 I 区地质特征及找矿方向. *有色金属矿产与勘查*, 3(2): 77–82.
- 方同辉, 秦克章, 王书来, 等, 2002. 新疆小石头泉铜多金属矿床地质特征、找矿前景. *新疆地质*, 20(4): 371–374.
- 郭德英, 1995. 浅析新疆东部小石头泉地区成矿地质条件. *有色金属矿产与勘查*, 4(4): 212–218.
- 吉蕴生, 1994. 小石头泉铜山 I 区原生晕地球化学特征的研究. *矿产与地质*, 43(8): 373–379.
- 靳刘圆, 张济, 朱志新, 等, 2013. 哈尔里克山古生代火山岩地质特征及构造意义. *新疆地质*, 31(3): 173–179.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等, 2004. 流体包裹体. 北京: 科学出版社, 406–419.
- 卢焕章, 李秉伦, 魏家秀, 1990. 包裹体地球化学. 北京: 地质出版社.
- 莫江平, 依沙克, 王旭东, 等, 2001. 新疆铜山铜多金属矿床地质地球化学特征及成因研究. *矿产与地质*, 15(3): 162–166.

(下转 3125 页)

- 邓霜岭,2011.新疆哈巴河玛尔卡库里韧性剪切带与金矿成矿作用研究(硕士学位论文).成都:成都理工大学,16-29.
- 董永观,2000.新疆阿尔泰金矿断裂构造控矿规律研究.火山地质与矿产,21(1): 41-46.
- 赖勇,1995.阴极发光技术在成岩成矿作用研究中的应用.北京大学学报(自然科学版),31(5): 631-638.
- 李光明,沈远超,刘铁兵,等,2007.新疆阿尔泰南缘托库孜巴依金矿成矿演化:石英脉系、同位素地球化学及其 Ar-Ar 年代学证据.矿床地质,26(1): 15-32.
- 李艳青,余振兵,马昌前,2011.石英 SEM-CL 微结构及其在岩石学中的应用.地球科学进展,26(3): 325-331.
- 李永,周刚,柴凤梅,2012.阿尔泰南缘哈巴河岩体 LA-ICP-MS 锆石定年及地质意义.新疆地质,30(2): 146-151.
- 芮行健,朱韶华,刘抗娟,1993.新疆阿尔泰原生金矿基本特征及区域成矿模式.地质论评,39(2): 138-148.
- 单立华,2008.新疆阿希勒金矿床控矿规律与找矿方向研究(博士学位论文).北京:北京科技大学,77-80.
- 田晓云,肖国莲,2007.新疆哈巴河县托库孜巴依金矿地质特征及成因浅析.新疆地质,25(3): 258-262.
- 卫晓峰,徐九华,阴元军,等,2011.新疆阿希勒金矿床成矿流体特征.有色金属(矿山部分),63(4): 29-35.
- 徐九华,谢玉玲,丁汝福,等,2007.CO₂-CH₄ 流体与金成矿作用:以阿尔泰山南缘和穆龙套金矿为例.岩石学报,23(4): 2026-2032.
- 徐九华,张国瑞,谢玉玲,等,2009.阿尔泰山南缘赛都金矿床的构造-成矿流体及其演化.岩石矿物学杂志,28(2): 141-151.
- 张国瑞,2007.阿尔泰赛都金矿成矿流体特征和矿床地球化学(博士学位论文).北京:北京科技大学,25-32.
- 张理刚,刘敬秀,周环波,等,1990.石英-水-盐体系氧同位素分馏作用.矿床地质,9(2): 158-166.

(上接 3111 页)

- 秦克章,彭晓明,三金柱,等,2003.东天山主要矿床类型、成矿区带划分与成矿远景区优选.新疆地质,21(2): 143-150.
- 万博,张连昌,徐兴旺,等,2006.东天山小石头泉铜多金属矿区火山岩-一次火山岩地球化学与成矿构造背景.岩石学报,22(11): 2711-2718.
- 万德芳,樊天义,田世洪,2005.用金属铬法分析微量水和有机质氢同位素组成.地球学报,26(增刊): 35-38.
- 王京彬,王玉往,何志军,2006.东天山大地构造演化的成矿示踪.中国地质,33(3): 461-469.
- 王莉娟,彭志刚,祝新友,等,2009.青海省锡铁山 Sedex 型铅锌矿床成矿流体来源及演化:流体包裹体及同位素地球化学证据.岩石学报,25(11): 3007-3015.
- 王旭东,1994.铜山铜多金属矿床火山成矿作用浅析.矿产与地质,8(5): 383-387.
- 汪晓伟,徐学义,马中平,等,2015.博格达造山带东段早石炭世火山岩地球化学特征及构造属性.地质与勘探,51(1): 108-122.
- 熊索菲,姚书振,宫勇军,等,2016.四川乌斯河铅锌矿床成矿流体特征及 TSR 作用初探.地球科学,41(1): 105-120.
- 张德会,1992.矿物包裹体液相成分特征及其矿床成因意义.地球科学,17(6): 677-688.
- 张理刚,1985.稳定同位素在地质科学中的应用.西安:陕西科学技术出版社.
- 张锐,毛启贵,于明杰,等,2017.新疆琼库都克 Ag-Pb-Zn 多金属矿区岩浆岩地球化学特征及锆石 U-Pb 年龄研究.地质与勘探,53(2): 270-282.
- 郑永飞,陈江峰,2000.稳定同位素地球化学.北京:科学出版社.
- 周向斌,李剑锋,王可勇,等,2016.吉林荒沟山金矿床成矿流体特征.地球科学,41(1): 121-130.
- 朱和平,王莉娟,2001.四极质谱测定流体包裹体中的气相成分.中国科学(D辑),31(7): 586-590.