



东昆仑西段库德尔特金多金属矿床成因探讨

张爱奎¹, 莫宣学², 张 勇¹, 钱 烨³, 刘光莲¹, 张大明¹, 刘智刚¹

(1. 青海省第三地质勘查院, 西宁 810029;

2. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083;

3. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061)

摘 要: 库德尔特金多金属矿床位于东昆仑西段卡尔却卡矿田内, 具有独特的金矿成矿特点。基于矿床特征分析、成矿阶段划分、金矿主成矿期的流体包裹体及氢、氧、硫同位素研究, 探讨矿床形成机制和矿床成因, 这不仅对区域金矿成矿规律研究具有科学价值, 而且对于促进东昆仑区域金矿勘查具有重要的实际意义。通过工作, 取得以下认识和成果: ①金矿石中流体包裹体主要是富液相两相水溶液包裹体(I 型), 少量为含 CO₂ 三相水溶液包裹体(II 型)。②金矿成矿流体具有中低温(160.7~259.9 °C)、中低盐度(3.5%~12.9%NaCl_{eqv})的特点。③成分测定显示, 成矿流体主要是 NaCl-H₂O 体系, 其次为 NaCl-CO₂-H₂O 体系。④氢、氧同位素组成分别为 $\delta D = -37\text{‰} \sim -72\text{‰}$, 平均为 -56‰ , $\delta^{18}O_{\text{Water}} = -3.3\text{‰} \sim -0.3\text{‰}$, 平均为 -2.08‰ , 说明金矿成矿流体主要为岩浆建造水和大气降水的混合; 硫同位素组成为 $\delta^{34}S = 10.5\text{‰} \sim 10.8\text{‰}$, 反映矿石中的硫来源单一, 硫主要来自岩浆热液。⑤综合分析认为, 库德尔特金多金属矿床属于接触交代-中低温热液型矿床, 成矿与花岗闪长岩密切相关, 多金属矿形成于接触交代作用; 金矿形成于石英硫化物晚期, 是花岗闪长岩岩浆期后热液活动的结果; 金矿石具有细脉浸染型特点(广义斑岩型), 该类型金矿在东昆仑西段具有优越的成矿背景, 找矿前景巨大。

关键词: 矿床成因; 接触交代-中低温热液型; 库德尔特金多金属矿; 东昆仑西段; 青海

文章编号: 1004-0609(2021)-12-3762-17

中图分类号: P611

文献标志码: A

引文格式: 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. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-35924

ZHANG Ai-kui, MO Xuan-xue, 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. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-35924

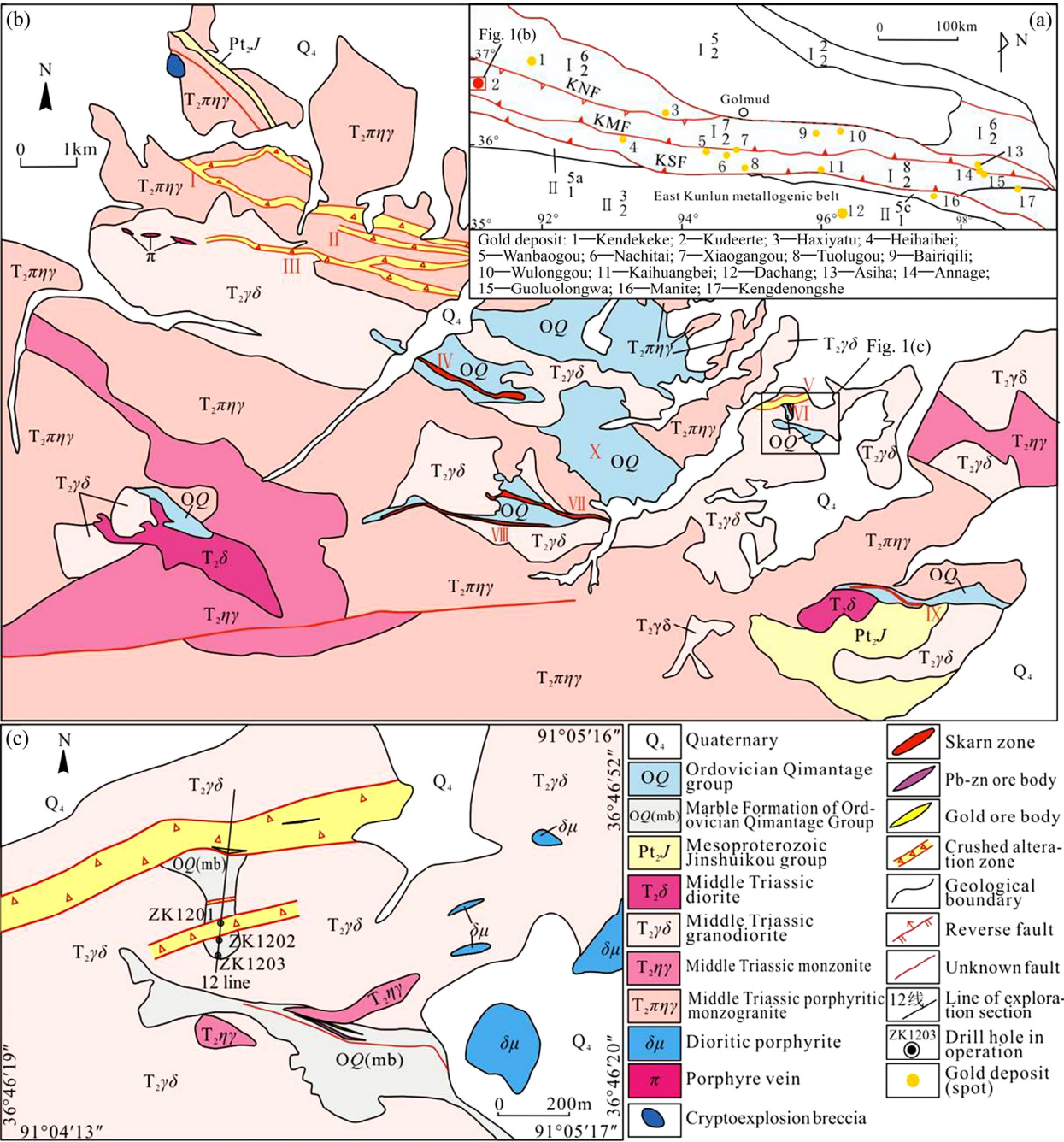
东昆仑成矿带是青海省重要的金及其他金属成矿带, 已发现三种类型金矿: 一是造山型金矿床, 为独立金矿床, 与造山作用有关, 受构造控制, 它们具有相似的地质-地球化学特征^[1-11], 该类型金矿是区域最为重要的类型, 以五龙沟、果洛龙洼、开荒北金矿床为代表; 二是喷流沉积-热液改造型多金属-金矿床, 以坑得弄舍和肯德可克矿床为代表, 早期为铅锌成矿期, 具有热水沉积成因特征, 晚期为金成矿期, 对早期的铅锌矿体有一定的叠加

改造作用, 具有热液成因特征^[12-14]; 三是矽卡岩型多金属-金矿床, 金多作为伴生或共生矿产^[15]。东昆仑东段产出有著名的五龙沟、开荒北和沟里金矿田(见图 1(a)), 东昆仑西段不仅矿床数量少, 而且矿床规模小, 特别是五龙沟向西的延伸地段还未见金矿床的报道。近年来, 本文作者在卡尔却卡矿田库德尔特矿区勘查时, 通过地表和深部系统取样分析, 发现浸染状黄铁矿化花岗闪长岩中 $Au \geq 0.1 \times 10^{-6}$, 矿化范围很大, 单个钻孔中矿化最

基金项目: 青海省科技计划资助项目(2019-ZJ-7009)

收稿日期: 2021-04-03; **修订日期:** 2021-06-02

通信作者: 张爱奎, 正高级高级工程师, 博士; 电话: 0971-6317740; E-mail: 474921988@qq.com



KNF—North East-Kunlun fault; KMF—Middle East-kunlun fault; KSF—South East-Kunlun fault; I₂²—Saishiteng mountain-Aercituo mountain orogenic subbelt; I₂⁵—Late Mesozoic-Cenozoic fault depression basin of Qaidam Basin; I₂⁶—Qimantage-Dulan orogenic subbelt; I₂⁷—North East-Kunlun magmatic arc; I₂⁸—Xueshanfeng-Burhanbudai orogenic subbelt; II₁^{5s}—Heishan-Kesheng Indosinian fold belt; II₁^{5s}—Changmahe Indosinian fold belt; II₂³—Hoh Xil-South Bayankala orogenic subbelt

图 1 库德尔特地区地质矿产图及矿区地质矿产图: (a) 区域构造单元图; (b) 库德尔特地区地质矿产图; (c) 库德尔特矿区地质矿产图

Fig. 1 Geology and mineral map of Kudeerte area and Kudeerte deposit: (a) Regional tectonic unit map; (b) Geology and mineral map of Kudeerte area; (c) Geology and mineral map of deposit

大厚度达 387.44 m, 矿化特点与以往发现的金矿具有明显的差异, 这在东昆仑地区实属罕见。

目前, 库德尔特金矿床成因研究存在该矿床是 否为新的成矿类型、矿床的发现有什么指示意义等 问题。这些问题反映了东昆仑西段金矿成矿地质条 件、矿床成因研究薄弱, 成矿规律认识不足, 找矿

前景不明,成为了制约东昆仑西段金矿找矿突破的瓶颈。鉴于上述原因,开展库德尔特金矿床特征、成矿阶段及成矿流体包裹体、氢-氧-硫同位素研究,分析矿床形成机制,探讨矿床成因,不仅能丰富东昆仑成矿带金矿类型,对提高东昆仑西段金矿成矿规律认识具有重要的科研价值,而且对于全面认识卡尔却卡矿田,甚至东昆仑成矿带矿床形成条件和成矿机制具有重要的参考价值,对于促进区域金矿勘查具有重要的实际意义。

1 区域地质

库德尔特矿床位于东昆仑成矿带西段,所处构造单元为北昆仑岩浆弧^[16]。北昆仑岩浆弧东段已发现众多造山型金矿(见图 1(a)),张德全等^[1]研究认为矿床的形成与造山作用有关,成矿主要受构造的控制,大型剪切带通常是区域控矿构造或矿田构造,大型剪切带内或大型剪切带旁侧的配套构造则是控制矿床或矿体的构造,例如,五龙沟金矿就位于 NWW 向剪切带内或其旁侧的低序次剪切带中^[4]。

库德尔特金矿床属于卡尔却卡矿田,矿田内主要出露中元古界金水口岩群、奥陶系祁漫塔格群、上三叠统鄂拉山组及第四系(见图 1(b))。区内构造以 NWW 向、NW 向断裂为主,褶皱不甚发育;NWW 向、NW 向断裂控制着地层、岩体和矿体的展布方向。区内岩浆活动频繁,侵入岩以华力西期和印支期中酸性岩为主,岩石组合主要为花岗闪长岩-似斑状二长花岗岩-二长花岗岩-花岗斑岩。矿田内斑岩型-矽卡岩型-隐爆角砾岩型铁多金属矿成矿事实清晰,北西部发现 A 区斑岩型铜矿(I、II、III 矿带)和楚阿克拉千隐爆角砾岩型铅锌矿^[17],中部和东南部发现索拉吉尔和 18 号矽卡岩型铁铜钼铅锌银矿(IV、VII~X 矿带),成矿时期属于中三叠世^[18-24]。

2 矿床地质

矿区地层主要为祁漫塔格群,呈不规则状分布,四周均被岩体侵入,形成一个孤岛状的残留体;岩性为灰白色厚层条带状大理岩、绢云石英片岩、硅质岩夹大理岩、变质砂岩(见图 1(c))。

矿区北部出露有一条 NEE 向的破碎蚀变带(V 矿带),出露长度约 0.9 km,宽度 50~150 m 不等,

倾向 SE,倾角较陡。破碎蚀变带地表较明显,带内主要岩性为碎裂蚀变花岗闪长岩,多呈角砾状;深部破碎不明显,但裂隙十分发育。

区内岩浆活动强烈,花岗闪长岩呈岩株状产出,形态呈不规则长条状,NWW 向展布。岩石整体蚀变较强,主要表现为硅化、绢云母化、绿帘石化、钾化、绿泥石化、碳酸盐化和高岭土化。岩石普遍具有黄铁矿化(见图 2(a))。蚀变矿化范围较大,长大于 1000 m,宽大于 500 m。区内零星分布二长花岗岩和闪长玢岩脉。

矿区花岗闪长岩与祁漫塔格群接触带内的矽卡岩型铜铅锌银矿中伴生或共生有金矿(VI 矿带),蚀变花岗闪长岩中产出有独立金矿(V 矿带)。矿区共圈出金或金多金属矿体 13 条,长度为 100~300 m,厚度为 1.04~31.82 m,金品位为 1.01×10^{-6} ~ 11.0×10^{-6} 。矿石类型主要有铜铅锌矿石、金矿石及金铜铅锌矿石。金铜铅锌矿石和铜铅锌矿石含矿岩性为矽卡岩,矿石矿物主要有闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、磁黄铁矿、磁铁矿、黄铜矿、毒砂等;脉石矿物主要有白云石、方解石、透辉石、硅灰石、滑石、透闪石、绿帘石、石英、斜长石等。矿石的结构主要有半自形-自形粒状结构(见图 2(b))、他形粒状结构、包含结构、固溶体分离结构、共结边结构(见图 2(c))、交代结构;矿石构造有致密块状构造、团块状构造、浸染状构造、星点状构造和脉状构造((见图 2(d)、(e))等。金矿石含矿岩性为蚀变花岗闪长岩,载金矿物主要是黄铁矿,其次为毒砂;脉石矿物主要是石英、斜长石、钾长石、角闪石等。金矿石结构以他形粒状结构、半自形粒状结构为主,矿石构造以脉状构造、浸染状构造为主。野外编录发现,黄铁矿化与硅化相伴呈脉状产出(见图 2(f)),脉频一般 10~20 条/m,最密集部位呈网脉状,脉频 40~60 条/m。结合室内分析结果,金矿化与硅化、黄铁矿化、毒砂矿化强度成正比。

结合前人研究成果^[25],根据野外观察和镜下特点,推断成矿主要经历了矽卡岩期和石英硫化物期:矽卡岩期主要形成石榴子石、透辉石、硅灰石、滑石、透闪石、绿帘石等,无石英,有少量磁铁矿;石英硫化物早期形成半自形-自形粒状、他形粒状或环边交代状黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿等。金属矿物共结边结构(见图 2(c))表明:早期黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿

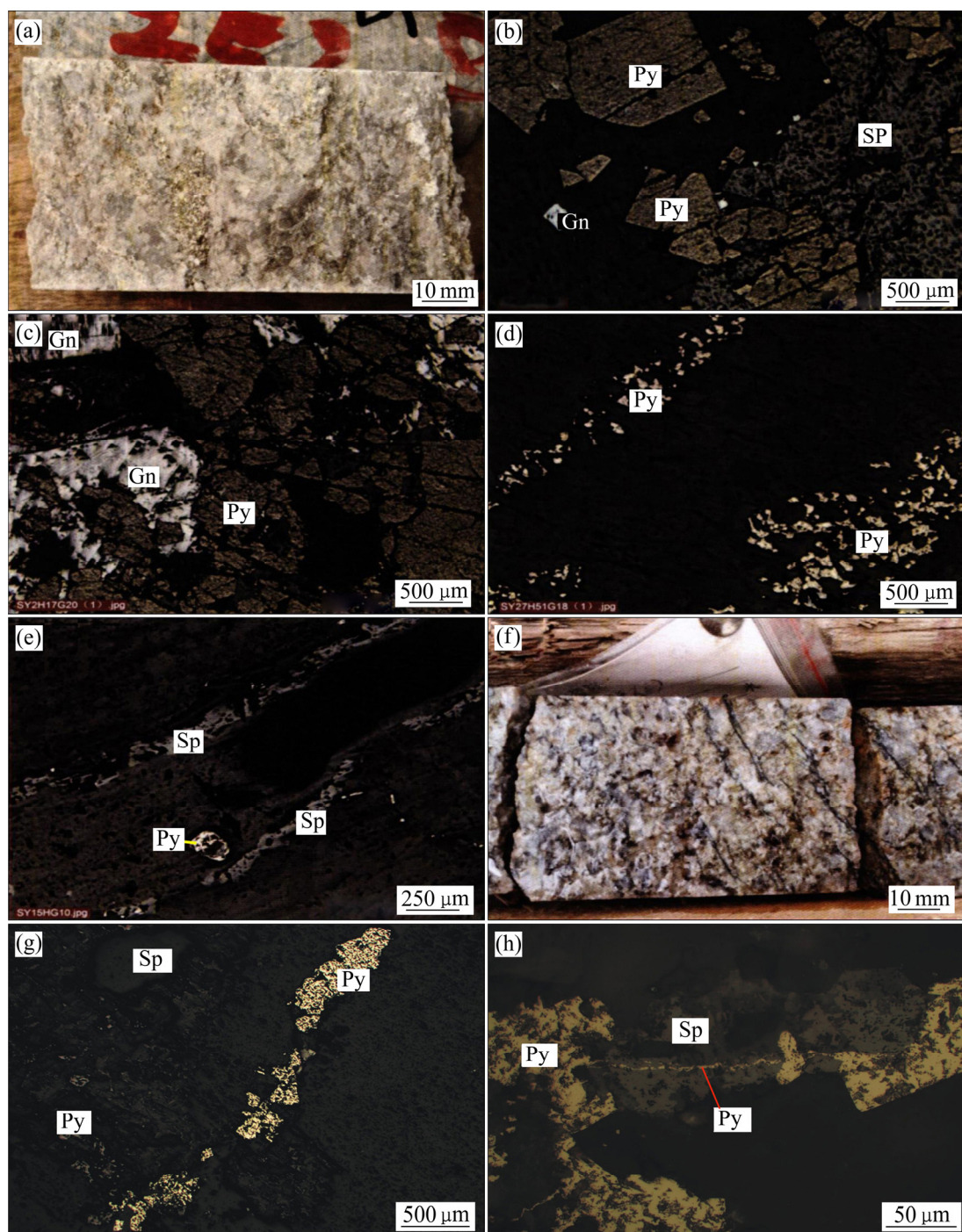


图 2 库德尔特矿床矿石特征: (a) 蚀变花岗闪长岩中的黄铁矿化; (b) 半自形-自形粒状结构(早期黄铁矿); (c) 共结边结构, 早期黄铁矿、闪锌矿、方铅矿呈共结边结构; (d) 脉状黄铁矿(晚期)矿石; (e) 脉状闪锌矿、黄铁矿(晚期)矿石; (f) 蚀变花岗闪长岩中的脉状硅化-黄铁矿化(晚期); (g) 闪锌矿交代早期黄铁矿, 石英硫化物期黄铁矿(晚期)呈脉状穿插早期矿化; (h) 石英硫化物期黄铁矿(晚期)呈脉状穿插早期闪锌矿; Py—黄铁矿; Sp—闪锌矿; Gn—方铅矿

Fig. 2 Mineral character of Kudeerte deposit: (a) Pyritization of altered granodiorites; (b) Hypidiomorphic and idiomorphic granular structure (early pyrite); (c) Eutectic curve structure, early pyrite, sphalerite and galena showing eutectic curve structure; (d) Veined pyrite (late stage) ore; (e) Veined sphalerite and pyrite (late stage) ore; (f) Veined silicification and pyritization (late stage) in altered granodiorites; (g) Sphalerite metasomatized early pyrite, late pyrite veins interspersed with early mineralization in quartz sulfide epoch; (h) Late pyrite veins interspersed with early sphalerite in quartz sulfide epoch; Py—Pyrite; Sp—Sphalerite; Gn—Galenite

等为同成矿阶段的产物,此阶段出现大量石英,并有绿泥石、方解石等生成。石英硫化物晚期形成脉状黄铁矿、脉状闪锌矿、毒砂和脉状石英、绢云母、钾长石等。金矿主要形成于石英硫化物晚期,脉状矿化叠加于石英硫化物早期矿化之上(见图 2(g)、(h))。

3 样品的采集及测试

3.1 样品采集

于淼等^[25]对卡尔却卡矿田矽卡岩矿带石榴子石、透辉石、石英和方解石内的流体包裹体开展了细致研究,但对于金矿石内流体特征目前还未开展工作。因此,本次流体包裹体与 H、O、S 同位素样品主要针对含金黄铁矿化花岗闪长岩中的硅化脉采集,采集位置为 ZK1203 钻孔(东经 91°04'31", 北纬 36°46'35")的 347.6 m、210 m、287.4 m、318 m、190 m、480 m、490 m、510 m 处,分别采集了 W2、W3、W4、W6、KC-TW1~KC-TW4 共 8 件样品(见图 3)。各样品普遍具较强的硅化、绿帘石化、钾化和高岭土化,局部具绢云母化;岩石中常见他形细粒的黄铁矿与硅化脉一同产出,脉宽多在 1~2 mm,个别脉宽可达 1 cm 以上,黄铁矿含量为 1%~3%。

3.2 流体包裹测试

进行流体包裹测试的样品共有 4 件(W2、W3、W4、W6)。在样品清洗处理后,将黄铁矿化硅化脉透明矿物样品磨制成厚度 0.3 mm、双面抛光的流体包裹体片。首先利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使用丙酮浸泡 48 h,使之与载玻片充分分离并用无水乙醇擦洗干净后晾干;流体包裹体温度成分测试均在吉林大学地球科学学院地质流体实验室完成。

测温仪器为英国 Linkam THMSG-600 型冷热台,仪器测定温度范围为-196~600 °C,测试前用人造 25%CO₂-H₂O 及纯 H₂O 包裹体(国际标样)进行了系统校正。分析精度在<31 °C 时为±0.1 °C,在>31 °C 时为±2 °C;测试过程中的升温速率一般为 0.2~5 °C/min,相转变点附近^[26](如水溶液包裹体的冰点和完全均一)的升温速率降低为 0.2 °C/min。

包裹体成分测试仪器为 Renishaw 公司生产的 In-Via-Renex 型显微共焦激光拉曼光谱仪,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,拉曼位移为 1000~4500 cm⁻¹ 全波段一次取谱峰。

3.3 氢-氧-硫同位素测试

对采集的 8 件样品均进行了氢氧同位素测试,并对其中 4 件样品(KC-TW1~KC-TW4)进行了硫同位素测试。

氢氧同位素样品的制备是对样品中的硅化脉或制造完流体包裹体片后剩余的硅化脉进行粉碎,通过双目镜下进行单矿物挑选,挑选粒径在 0.3~3 mm 的石英颗粒,石英纯度>99%。硫同位素样品的制备是对样品中黄铁矿化硅化脉进行粉碎到 250~380 μm,经过筛选洗涤,通过双目镜下进行单矿物挑选,挑选新鲜的黄铁矿颗粒研磨至<74 μm。单矿物挑选由廊坊市宏信地质勘查技术服务有限公司完成。

石英中氧同位素测试:首先将挑选好的石英单矿物破碎至<74 μm,干燥后取 10~30 mg,在 550 °C 与纯的 BrF₅ 反应提取 O₂,用组合冷阱分离 SiF₄、BrF₃ 等杂质获得纯的 O₂,将纯化后的氧气在 700 °C 铂催化作用下与碳棒逐级反应,逐一收集反应生成的 CO₂,再用同位素质谱仪(IRMS)测试。

石英中氢同位素测试:样品在石墨坩埚还原条件下燃烧(1450 °C),通过真空热爆法打开包裹体,分离获得 H₂O;将获得的 H₂O 与锌反应转化为 H₂,通过气相色谱柱集取 H₂,再用同位素质谱仪(IRMS)测试。氢、氧同位素的测定由澳实分析检测(广州)有限公司完成,氢、氧同位素采用 MAT-253 质谱计测定,氢、氧同位素采用的国际标准为 SMOW,氧同位素分析精度为±0.2‰,氢同位素分析精度为±2‰。

黄铁矿硫同位素测试:样品为硫化物矿样,以 Cu₂O 作为氧化剂制样,采用 V-CDT 国际标准;硫同位素的测定由澳实分析检测(广州)有限公司完成,测试仪器为 MAT-251 质谱仪,结果用 δ³⁴S 表示,硫同位素分析精度为±0.2‰。

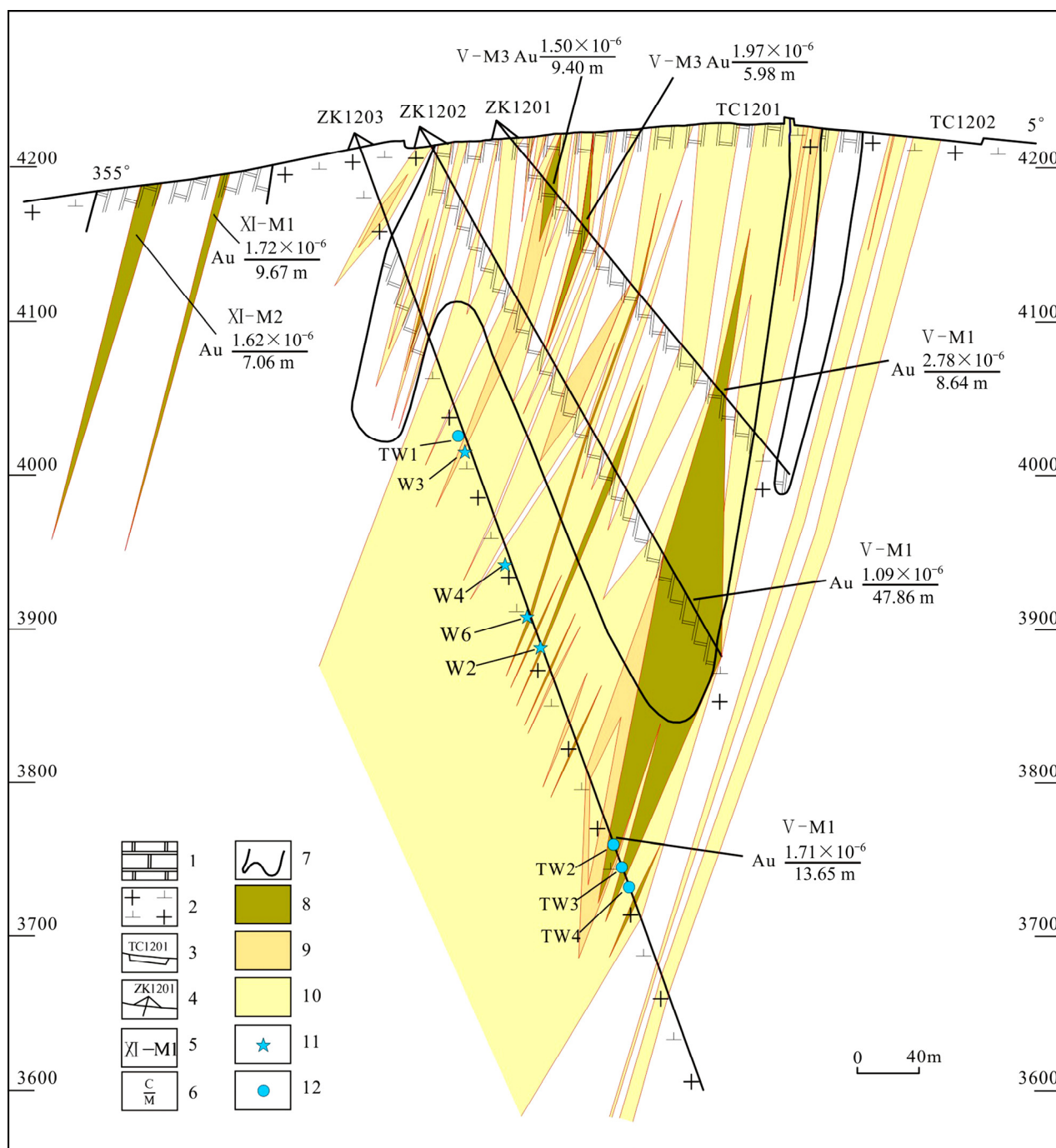


图 3 库德尔特矿区 12 勘探线剖面图及样品采集位置: 1—大理岩; 2—花岗闪长岩; 3—已施工探槽位置及编号; 4—已施工钻孔位置及编号; 5—矿体编号; 6—矿体平均品位/矿体平均厚度; 7—地质界线; 8—大于 1.0×10^{-6} ; 9— $0.5 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-6}$; 10— $0.1 \times 10^{-6} \sim 0.5 \times 10^{-6}$; 11—流体包裹体样品采样位置及编号; 12—硫同位素样品采样位置及编号

Fig. 3 Geological section along No.12 exploration line in Kudeerte deposit and samoling site: 1—Marble; 2—Granodiorite; 3—Location and number of finished trench; 4—Location and number of finished borehole; 5—Orebody number; 6—Average grade of ore body/average thickness of ore body; 7—Geological boundary; 8—Gold ore body greater than 1.0×10^{-6} ; 9—Gold mineralization body for $0.5 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-6}$; 10—Gold mineralization body for $0.1 \times 10^{-6} \sim 0.5 \times 10^{-6}$; 11—Samoling site of fluid inclusion; 12—Samoling site of sulfur isotope

4 测试结果

4.1 流体包裹体

4.1.1 流体包裹体类型

根据 ROEDDER^[27]、卢焕章等^[28]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, 矿区含金黄铁矿化花岗闪长岩硅化脉中的流体包裹体分为两种类型: 大量出现富液相两相水溶液包裹体(I型)(见图4(a)、(b)、(c)), 少量含CO₂三相水溶液包裹体(II型)(见图4(d))。

I型包裹体在石英中发育最为广泛, 包裹体大小为6~12 μm, 平均为9 μm, 气液比为20%~30%, 平均为25%(见表1); II型包裹体在石英中少量发育, 成因类型一般为原生, 包裹体较小, 不具备测试条件。

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矿脉中两种类型的流体包裹体进行了显微测温研究。I型包裹体

盐度计算采用 HALL 等^[29]提供的公式: $S(\text{NaCl}) = 0.00 + 1.78t_m - 0.0442t_m^2 + 0.000557t_m^3$ (t_m 为冰点温度, 计算时取绝对值)。测温与盐度计算结果见表1。

I型包裹体的冰点温度(t_m)范围为-8.9~-2℃, 均一温度(t_h)范围为160.7~259.9℃, 峰值区间在210~220℃; 盐度范围为3.5%~12.9%NaCl_{eqv}, 盐度范围较宽, 峰值不明显(见图5); II型包裹体因发育程度差, 包裹体较小, 本次测试未取得有效测试数据。基于流体包裹体显微测温结果, 运用 Flnacor 软件^[30]对单个流体包裹体进行密度计算, 结果显示矿区I型流体包裹体流体密度范围为0.82~0.99 g/cm³。

4.1.3 流体包裹体激光拉曼探针分析

为进一步确定包裹体的成分, 本次研究对流体包裹体进行单个包裹体激光拉曼探针成分分析。测试结果显示, I型包裹体中大部分检测到宽泛的液相H₂O包罗峰(见图6(a)~(d)), 少量包裹体为液相H₂O包罗峰和微量CO₂的特征峰(见图6(a)), 说明I型包裹体为NaCl-H₂O体系为主, 其次为NaCl-CO₂-H₂O体系。

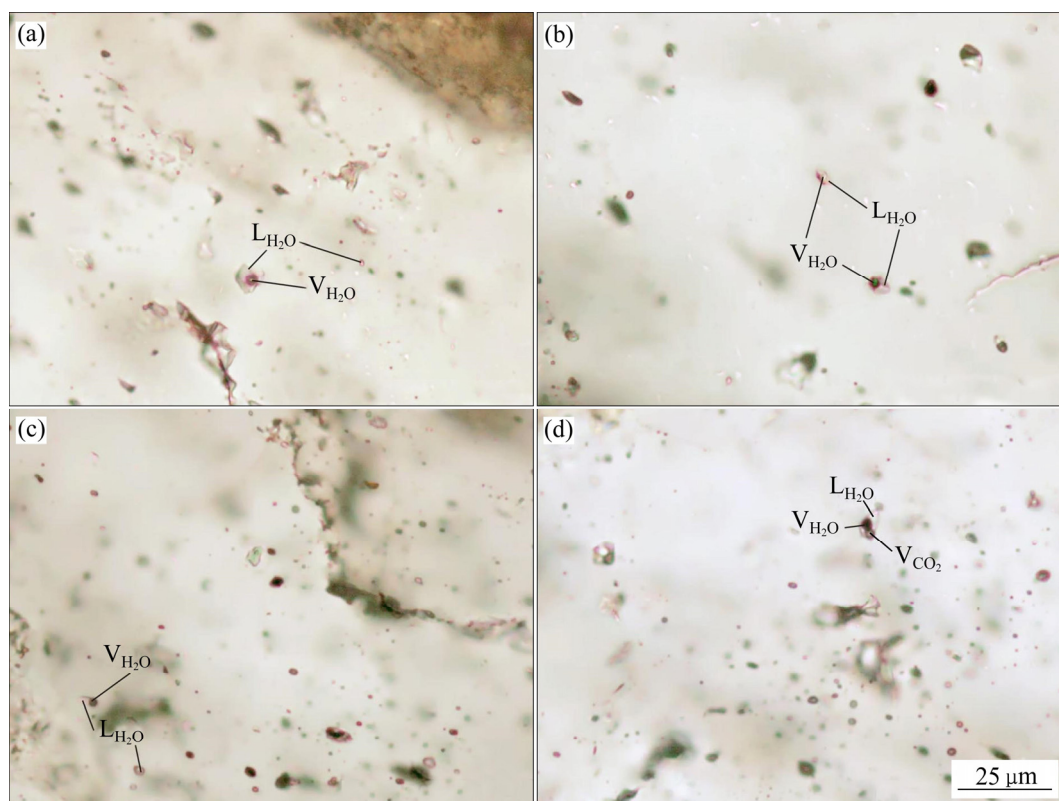


图4 库德尔特金矿石英中流体包裹体显微照片

Fig. 4 Microphotographs of fluid inclusion in quartz from Kudeerte gold ore: (a), (b), (c) I-type; (d) II-type

表 1 库德尔特矿区黄铁矿化含金花岗闪长岩硅化脉中的流体包裹体测试结果表

Table 1 Test results of fluid inclusion in silicified vein of pyritic gold-bearing granodiorite in Kudeerte mining area

IdX	Sample No.	Type	Quantity	Size/ μm	Vapor liquid ratio/%	$t_m/^{\circ}\text{C}$	$t_h/^{\circ}\text{C}$	$S(\text{NaCl})/\%$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
1	W2	I	24	6—12	20—30	−8.6—−2.2	164.4—258.2	3.8—12.5	0.82—0.99
2	W3	I	40	6—12	20—30	−8.5—−2.0	160.7—259.9	3.5—12.4	0.84—0.99
3	W4	I	32	6—12	20—30	−8.9—−2.1	161.6—259.4	3.7—12.9	0.85—0.99
4	W6	I	10	6—12	20—30	−8.5—−3.0	174—255.4	5.1—12.5	0.86—0.97

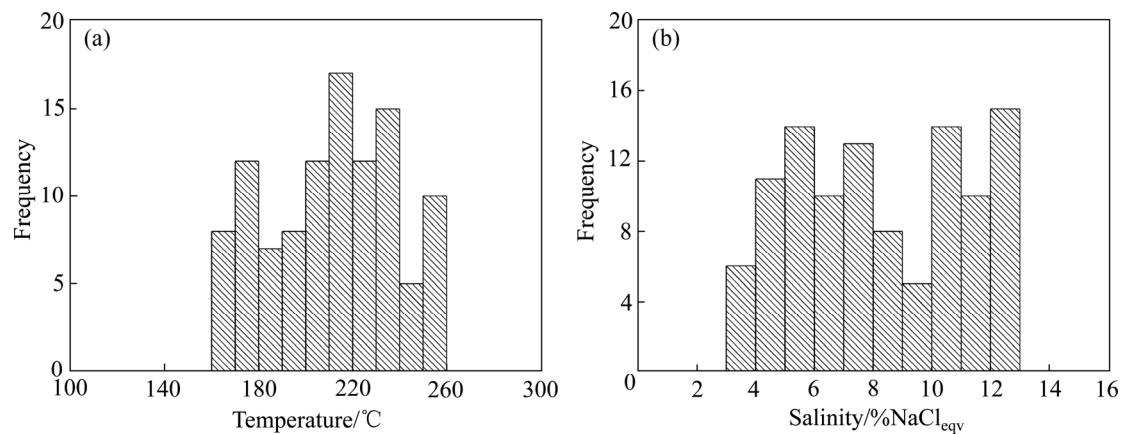


图 5 库德尔特金矿石英中 I 型流体包裹体均一温度(a)、盐度分布直方图(b)

Fig. 5 Histogram of homogenization temperature (a) and sanity (b) of I -type fluid inclusion in quartz from Kudeerte gold ore

4.2 稳定同位素地球化学特征

稳定同位素地球化学示踪是探讨成矿流体特征及成矿物质来源最为有力的工具之一,大量研究表明,矿物中氢同位素特征可以准确反映出成矿流体的来源,同时根据 H-O 同位素组成的变化可以指示成矿流体的演化过程;硫同位素则可以用于有效示踪成矿体系中金属元素的来源^[31]。

4.2.1 氢氧同位素特征

库德尔特矿区含金硅化脉中氢氧同位素组成分析结果显示, δD_{V-SMOW} 值在−37‰~−72‰之间变化(见表 2), 平均为−56‰; $\delta^{18}O_{Mineral(V-SMOW)}$ 值在 7.2‰~10.2‰ 之间变化, 平均为 8.43‰。根据 CLAYTON 等提供的计算公式: $\delta^{18}O_{Quartz}-\delta^{18}O_{Water}=3.38\times 10^6/T^2-2.90$ ^[32](公式适应的温度范围为 200~500 °C; T 为同位素平衡温度,取本次测试峰值 220 °C; $\delta^{18}O_{Mineral}$ 为实验所得石英脉中氧同位素分析结果),将计算的 $\delta^{18}O_{Water(V-SMOW)}$ 结果列入表 2。

4.2.2 硫同位素特征

库德尔特矿区含金黄铁矿硅化脉中硫同位素

组成分析结果显示, $\delta^{34}S$ 介于 10.5‰~10.8‰之间(见表 2), 变化范围很小, 反映硫来源单一。

5 讨论

5.1 成矿流体特征

库德尔特金多金属矿床矽卡岩期包裹体均一温度分布范围为 260~560 °C, 石英硫化物期方解石包裹体均一温度分为两个区间: 一个是中高温区间(140~220 °C), 另一个温度较高(大于 220 °C)^[25]。矽卡岩期和石英硫化物期石榴子石、透辉石、石英、方解石包裹体盐度分为明显的高盐度和低盐度两种流体, 石英包裹体盐度主要分布在 40.96%~44.32%NaCl_{eqv} 和 10.11%~10.49%NaCl_{eqv} 两个区间; 石榴子石和透辉石包裹体盐度较低, 平均值分别为 6.46%NaCl_{eqv} 和 6.75%NaCl_{eqv}; 方解石包裹体盐度分布在 20.67%~23.05%NaCl_{eqv} 和 0.35%~9.21%NaCl_{eqv} 两个区域, 成矿过程发生了不同程度的流体不混溶作用^[25]。本次对石英硫化物晚期含金黄铁矿硅化脉

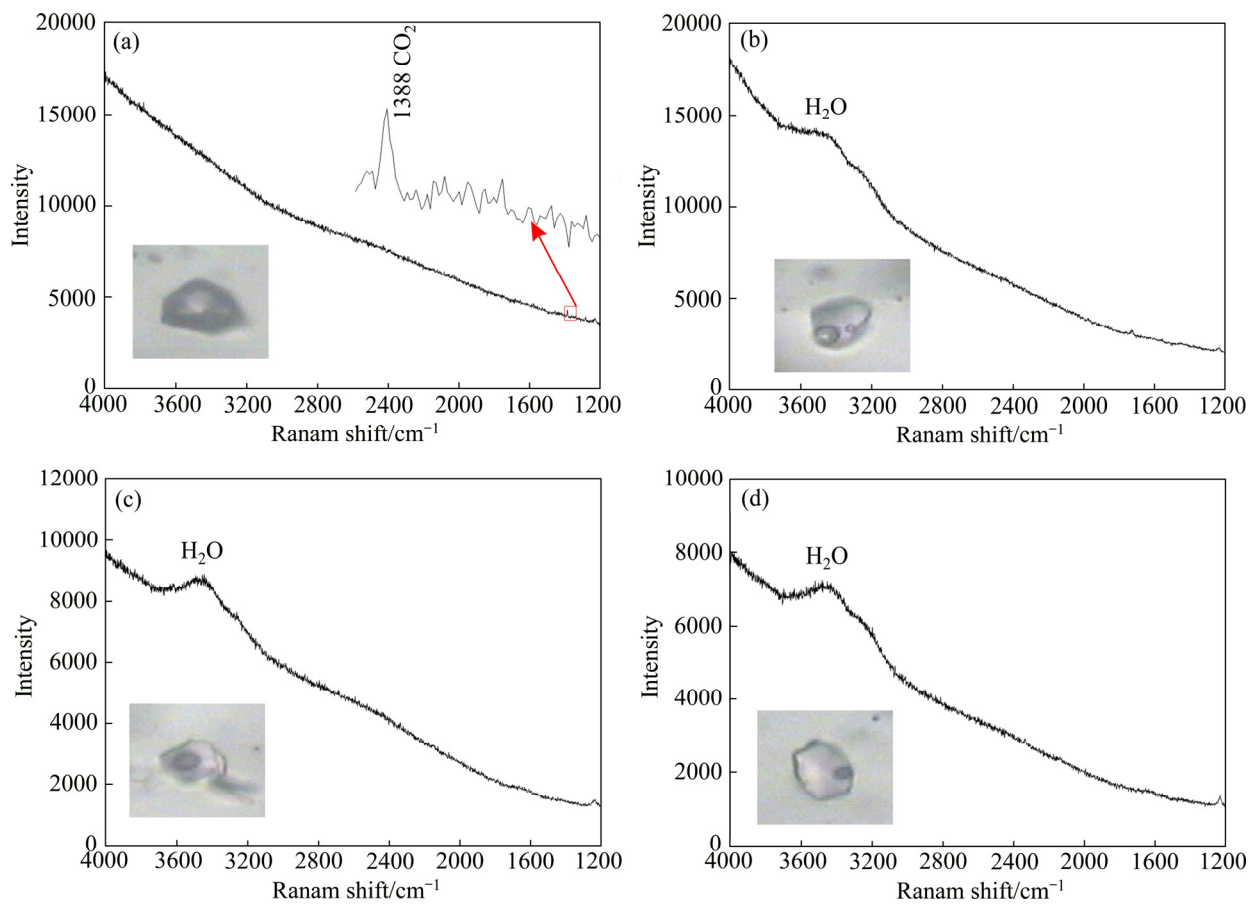


图 6 库德尔特金矿石英中流体包裹体激光拉曼探针分析

Fig. 6 Raman spectra of fluid inclusions in quartz from Kudeerte gold ore

表 2 库德尔特矿区黄铁矿化含金花岗闪长岩硅化脉中氢、氧、硫同位素分析结果

Table 2 Analysis results of H-O-S isotopes in silicified vein of pyritic gold-bearing granodiorite in Kudeerte mining area

Sample No.	Test object	$\delta D_{V-SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{\text{Quartzite}(V-SMOW)}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{\text{Water}(V-SMOW)}/\text{‰}$	$t_h/^\circ\text{C}$	Test object	$\delta^{34}S_{V-CDT}/\text{‰}$
W2	Quartzite	-51	7.7	-2.8	220		
W3	Quartzite	-37	7.8	-2.7	220		
W4	Quartzite	-42	10.2	-0.3	220		
W6	Quartzite	-48	8.0	-2.5	220		
KC-TW1	Quartzite	-68	7.2	-3.3	220	Pyrite	10.8
KC-TW2	Quartzite	-59	9.1	-1.4	220	Pyrite	10.5
KC-TW3	Quartzite	-72	9.0	-1.5	220	Pyrite	10.7
KC-TW4	Quartzite	-71	8.4	-2.1	220	Pyrite	10.8

石英中包裹体进行了测温,结果显示,包裹体均一温度分布范围为 160.7~259.9℃,峰值区间为 210~220℃,流体盐度为 3.5%~12.9%NaCl_{eqv},流体温度、盐度与方解石和部分石英包裹体温度、盐度相近。本次测试结果显示与于淼等^[25]测试的成矿流

体成分相近,从矽卡岩期、石英硫化物早期到石英硫化物晚期均为一套以 H₂O-NaCl 为主的成矿流体,属于同源流体。在显微镜下观察,石英硫化物早期黄铜矿、闪锌矿、方铅矿与半自形-自形粒状、他形粒状黄铁矿多呈共结边结构;晚期主要形成脉

状黄铁矿,不仅分布于花岗闪长岩中(见图 2(f)),也穿插于矽卡岩中(见图 2(d)),亦有少量脉状闪锌矿,闪锌中有共边结构的黄铁矿(见图 2(e))。上述表明多金属矿主要形成于石英硫化物早期,金矿主要形成于石英硫化物晚期,金的成矿与多金属成矿具有连续性,成矿流体具有连续演化的特点。

库德尔特矿区与东昆仑东段典型造山型五龙沟、果洛龙洼等金矿流体包裹体差异明显,且该矿床不具备韧性剪切变形的特点,并不具备构造控矿的特征。五龙沟金矿成矿流体发育 CO_2 型、 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型、 $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ 型,包裹体均一温度峰值达到 $260\sim 270\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $302\sim 378\text{ }^\circ\text{C}$ [33]; 果洛龙洼主成矿阶段发育水溶液- CO_2 包裹体,均一温度集中在 $276\sim 310\text{ }^\circ\text{C}$ [9-10, 34]; 库德尔特矿区金矿石成矿流体除含 CO_2 较低外,成矿温度也明显较低。以上对比可看出,库德尔特矿区矿石中石英脉多呈现水压破裂特点,并未遭受构造变形而破碎或呈现角砾状构造,这点与造山型金矿具有一定差异;与造山型金矿床以变质热液为主,标志性地发育富 CO_2 包裹体不同 [35-36], 库德尔特矿区包裹体以富液相两相水溶液包裹体为主,少含 CO_2 三相水溶液包裹体。与陈衍景等 [35-36] 划分的浅成低温热液型、微细粒浸染型(卡林型或类卡林型)、热水沉积型(VHMS 型、SEDEX 型)相比,库德尔特矿区地质背景存在较大差异,如浅成低温热液型围岩主要是火山岩或潜火山岩,微细粒浸染型围岩主要是沉积岩,热水沉积型存在热水沉积岩系。库德尔特金多金属成矿流体早期具有中高温高盐度流体特点,与浆控高温热液型相似 [35-36], 晚期金矿成矿阶段演化为中低温中低盐度流体。

5.2 成矿流体及成矿物质来源

金矿石流体氢氧同位素组成图解(见图 7)可以看出,矿化石英脉样品的氢氧同位素点落在岩浆水与大气水之间。若成矿溶液为岩浆水($\delta\text{D}_{\text{Water}}$ 为 $-80\text{‰}\sim -50\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{Water}}$ 为 $7.0\text{‰}\sim 9.5\text{‰}$ [37]), 则经过水-岩交换后的热液水氧同位素组成降低,而氢同位素应该升高或保持 [38], 故金矿含矿热液很可能是由岩浆水发展而成为成矿热液,同时也存在大量大气降水的影响。结合流体包裹体特征来看,金矿成

矿流体具有十分独特的特点,具有岩浆热液向改造热液变化且更多显示出改造热液的特征,属于一种中低温成矿流体。

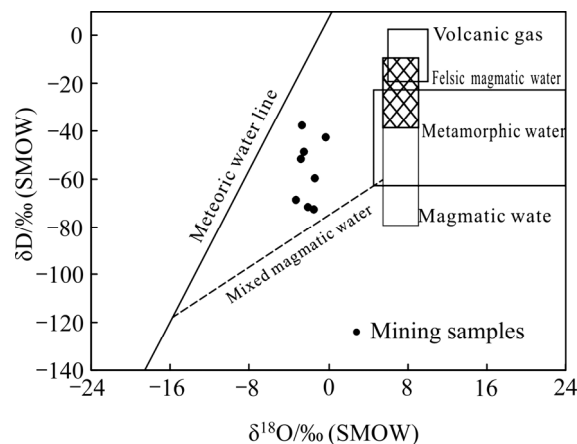


图7 库德尔特金矿石石英中流体包裹体 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{Water}}$ 图解(底图据文献[39-40])

Fig. 7 δD VS $\delta^{18}\text{O}_{\text{Water}}$ diagram of fluid inclusions in quartz from Kudeerte gold ore (Modified from Refs. [39-40])

金矿石中硫化物主要是黄铁矿,并没有见到硫酸盐矿物,依据低氧逸度下,硫在成矿流体中以 HS^- 、 S^{2-} 形式存在 [41], 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。金矿石黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 介于 $10.5\text{‰}\sim 10.8\text{‰}$ 之间,变化范围很小,反映硫来源单一,与花岗岩硫同位素组成较为一致。结合金矿石主要产于花岗闪长岩中的特点,以及矿石氢、氧同位素组成,认为矿床硫主要来自岩浆热液(见图 8)。

库德尔特矿床多金属形成阶段具有岩浆热液流体的特征,在岩浆结晶后还继续活动,参与到岩浆期后作用,与残余的岩浆期后溶液混合在一起 [25]。在石英硫化物晚期,岩浆期后热液和大气水混合,形成中低温热液,并伴随金矿成矿作用。从已有勘探资料来看,矿区岩浆期后热液活动十分强烈,主要分布于花岗闪长岩体顶部及外围。

5.3 矿床形成机制及矿床成因探讨

区域研究表明,中一晚二叠世到早三叠世 ($260\sim 240\text{ Ma}$) 布青山-阿尼玛卿洋板块向北俯冲于

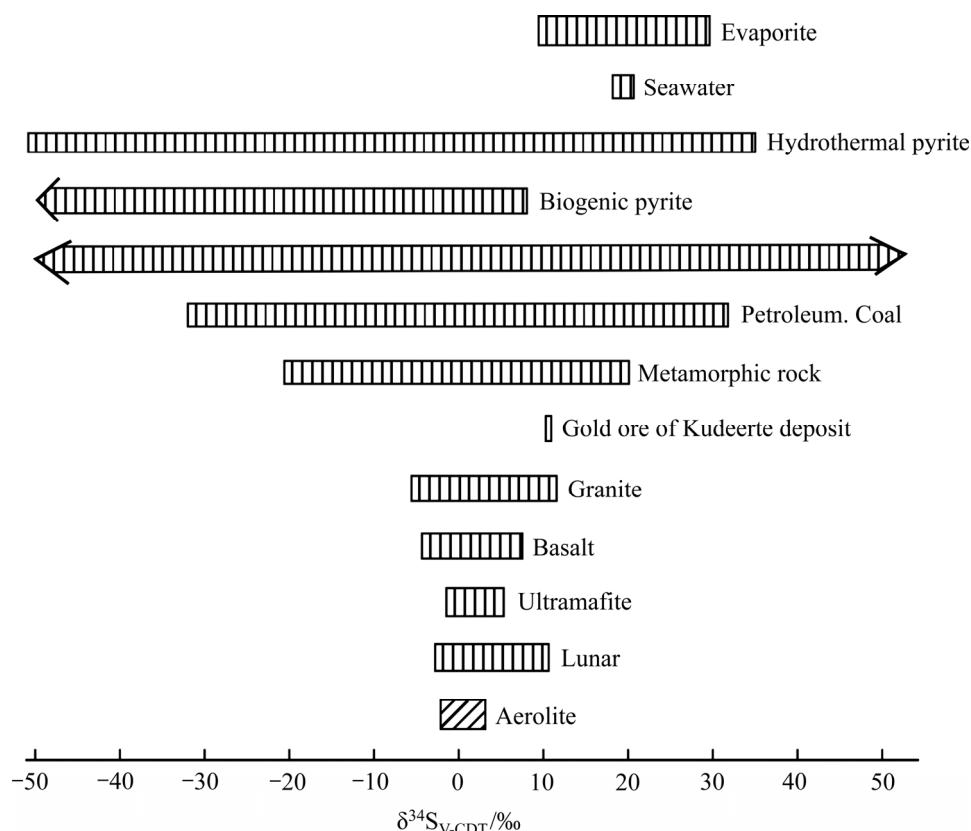


图 8 库德尔特金矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 图解

Fig. 8 $\delta^{34}\text{S}$ diagram of Kudeerte gold ore

东昆仑之下；中三叠世晚期洋盆已经闭合^[42-47]，中三叠统希里可特组与闹仓沟组微角度不整合关系代表了初始碰撞的洋陆转换构造事件^[48]；上三叠统鄂拉山组与下伏地层间的角度不整合面响应了陆-陆全面碰撞。张爱奎等^[24, 49-51]研究认为，东昆仑西段祁漫塔格地区中三叠世花岗岩既非形成于大规模俯冲环境，亦非形成于后碰撞环境，而是形成于大规模俯冲结束与全面碰撞转换的构造环境；中三叠世花岗岩广泛发育的暗色微粒包体，暗示存在广泛的壳/幔源岩浆混合作用。

库德尔特花岗闪长岩获得同位素地质年龄为 $(234.1 \pm 0.6) \sim (237 \pm 2) \text{ Ma}$ ^[18, 22]，侵入于其中的闪长玢岩同位素地质年龄为 $(232.59 \pm 0.96) \text{ Ma}$ ^[24]，均属于中三叠世，岩体壳/幔源岩浆混合作用十分明显^[22]，俯冲-碰撞转换构造背景下的壳幔相互作用是区内金多金属成矿作用的基础。中三叠世总体挤压的局部伸展环境，诱发花岗闪长岩形成和侵位，与围岩-祁漫塔格群发生接触交代形成砂卡岩。石英硫化物

早期形成多金属矿，晚期是金矿主要成矿阶段，成矿具有连续演化特征；成矿流体主要是 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系，由高温高盐度向中低温中低盐度演化；早期为岩浆建造水，晚期为岩浆建造水和大气降水的混合，成矿物质主要来自岩浆热液。区内韧性变形不发育，含金硅化脉呈现水压破裂特点，与构造控制的造山型金矿地质特征和成矿流体特征明显不同，表明构造并非库德尔特金矿形成的决定性因素。对金矿成矿阶段的绢云母进行 Ar-Ar 测试，获得坪年龄为 $(236.66 \pm 3.97) \text{ Ma}$ (青海省第三地质勘查院，学术交流)，与花岗闪长岩同位素地质年龄一致，说明金矿是花岗闪长岩岩浆期后热液的产物。微量元素含量统计表明，库德尔特矿区花岗闪长岩 Au 含量超过克拉克值 190 倍，黄铁矿化花岗闪长岩 Au 含量最大 2640×10^{-9} ，为克拉克值 2000 余倍^[24]，说明矿区花岗闪长岩具有 Au 的高背景，为成矿提供了物质基础。

综上所述，库德尔特金多金属矿床成因属于接

接触交代-中低温热液型,成矿与花岗闪长岩密切相关,多金属矿形成于接触交代作用;金矿形成于石英硫化物晚期,产于花岗闪长岩的顶部及其围岩中,是花岗闪长岩岩浆期后热液活动的结果,金矿石具有细脉浸染型特点(广义斑岩型)。

东昆仑西段,特别是祁漫塔格地区,矽卡岩型铁多金属矿具有明显的成矿优势^[52],一些矿床中伴生或共生有金矿,如哈西亚图^[15]、肯德可克^[24]、它温查汉西等矿床。然而,以往勘查主要关注了外接触带矽卡岩中的共伴生金矿,对岩体内是否存在有金矿关注不够。库德尔特金矿的发现,无疑说明东昆仑西段具有优越的金矿成矿条件和巨大的找矿潜力,今后需加强岩体内细脉浸染型金矿的勘查,特别是岩体头部热液活动强烈地段的金矿勘查。

6 结论

1) 金矿石中流体包裹体主要是富液相两相水溶液包裹体(I型),少量含CO₂三相水溶液包裹体(II型)。

2) 金矿成矿流体具有中低温(160.7~259.9℃)、中低盐度(3.5%~12.9%NaCl_{eqv})的特点。

3) 成分测定显示,金矿成矿流体主要是NaCl-H₂O体系,含微量CO₂。

4) 氢、氧同位素组成 $\delta D=-37\text{‰} \sim -72\text{‰}$,平均为 -56‰ , $\delta^{18}O_{\text{Water}}=-3.3\text{‰} \sim -0.3\text{‰}$,平均为 -2.08‰ ,说明金矿成矿流体为岩浆水和大气降水的混合;硫同位素组成 $\delta^{34}S=10.5\text{‰} \sim 10.8\text{‰}$,反映矿石中的硫来源单一,硫主要来自岩浆热液。

5) 库德尔特金多金属矿床属于接触交代-中低温热液型,花岗闪长岩与围岩接触交代形成多金属矿,岩浆期后热液活动形成金矿;该类型金矿在东昆仑西段具有优越的成矿背景,找矿前景巨大。

致谢:

野外地质工作得到了青海省第三地质勘查院卡尔却卡项目组的大力支持,样品测试得到了吉林大学地球科学学院地质流体实验室的帮助,论文初稿完成后两位匿名审稿人提出了建设性的修改意

见,青海省第三地质勘查院技术部提供了金矿成矿时代数据。在此,一并表示最诚挚的感谢!

REFERENCES

- [1] 张德全,丰成友,李大新,等.柴北缘-东昆仑地区的造山型金矿床[J].矿床地质,2001,20(2):137-146.
ZHANG De-quan, FENG Cheng-you, LI Da-xin, et al. Orogenic gold deposits in the north Qaidam and east Kunlun orogen, West China[J]. Mineral Deposits, 2001, 20(2): 137-146.
- [2] 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 De-quan, DANG Xing-yan, SHE Hong-quan, 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.
- [3] 袁万明,莫宣学,喻学惠,等.东昆仑热液金成矿带及其找矿方向[J].地质与勘探,2000,36(5):20-23.
YUAN Wan-ming, MO Xuan-xue, YU Xue-hui, et al. Gold metallogenic belts and prospecting direction in eastern Kunlun arear[J]. Geology and Prospecting, 2000, 36(5): 20-23.
- [4] 钱壮志,胡正国,李厚民,等.东昆仑中带金矿成矿特征及成矿模式[J].矿床地质,2000,19(4):315-321.
QIAN Zhuang-zhi, HU Zheng-guo, LI Hou-min, et al. Ore-forming characteristics and metallogenic model of gold deposits in the central belt of east Kunlun mountains[J]. Mineral Deposits, 2000, 19(4): 315-321.
- [5] 李厚民,沈远超,胡正国,等.青海东昆仑五龙沟金矿床成矿条件及成矿机理[J].地质与勘探,2001,37(1):65-69.
LI Hou-min, SHEN Yuan-chao, HU Zheng-guo, et al. Minerogenetic mechanism and condition of Wulong Gou gold deposit in east Kunlun mountains, Qinghai Province[J]. Geology and Prospecting, 2001, 37(1): 45-52.
- [6] 闫臻,胡正国,刘继庆,等.东昆仑开荒北金矿床地质特征及控矿条件[J].西安工程学院学报,2000,22(1):23-27.
YAN Zhen, HU Zheng-guo, LIU Ji-qing, et al. Geological characteristics and ore-control factors of Kaihuangbei gold deposit in east Kunlun mountain[J]. Journal of Xi'an

- Engineering University, 2000, 22(1): 23–27.
- [7] 丰成友, 张德全, 李大新, 等. 青海东昆仑造山型金矿硫、铅同位素地球化学[J]. 地球学报, 2003, 24(6): 593–598.
- FENG Cheng-you, ZHANG De-quan, LI Da-xin, et al. Sulfur and lead isotope geochemistry of the orogenic gold deposits in east Kunlun area, Qinghai Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2013, 24(6): 593–598.
- [8] 王冠. 青海果洛龙洼金矿床地质特征及成因探讨[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- WANG Guan. Study on geological characteristics and genesis of Guoluolongwa gold deposit in Qinghai Province[D]. Changchun: Jilin University, 2012: 1–86.
- [9] 肖晔, 丰成友, 李大新, 等. 青海省果洛龙洼金矿区年代学研究及流体包裹体特征[J]. 地质学报, 2014, 88(5): 895–902.
- XIAO Ye, FENG Cheng-you, LI Da-xin, et al. Chronology and fluid inclusions of the Guoluolongwa gold deposit in Qinghai Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(5): 895–902.
- [10] 赖健清, 鞠培姣, 周凤. 青海省果洛龙洼金矿多成因复合成矿作用[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(2): 402–414.
- LAI Jian-qing, JU Pei-jiao, 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.
- [11] 王福德, 李云平, 贾妍慧. 青海金矿成矿规律及找矿方向[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(2): 162–175.
- WANG Fu-de, LI Yun-ping, JIA Yan-hui. Metallogenic regularity and prospecting direction of gold deposits in Qinghai, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(2): 162–175.
- [12] 刘颜, 付乐兵, 王凤林, 等. 东昆仑东段坑得弄舍多金属矿床Pb-Zn与Au-Ag成矿关系研究[J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42(3): 480–493.
- LIU Yan, FU Le-bing, WANG Feng-lin, et al. Relationship between Pb-Zn and Au-Ag mineralization of Kengdenongshe polymetallic deposit in eastern segment of the eastern Kunlun[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2018, 42(3): 480–493.
- [13] 黄敏, 赖健清, 马秀兰, 等. 青海省肯德可克多金属矿床地球化学特征与成因[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9): 2659–2670.
- HUANG Min, LAI Jian-qin, MA Xiu-lan, et al. Geochemical characteristics and genesis of Kendekeke copper (gold) deposit in Qinghai Province, China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(9): 2659–2670.
- [14] 李欢, 奚小双. 青海虎头崖-肯德可克矿区地球化学特征及其喷流成矿作用[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(3): 772–783.
- LI Huan, XI Xiao-shuang. Geochemistry and sedimentary exhalative mineralization in Hutouya-Kendekeke field, Qinghai Province, China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(3): 772–783.
- [15] 南卡俄吾, 贾群子, 李金超, 等. 东昆仑哈西亚图铁多金属矿床氧、硫、铅同位素组成及对成矿物质来源的示踪[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2018, 57(4): 37–47.
- Nankha NORBU, JIA Qun-zi, LI Jin-chao, et al. Sulfur and lead isotope compositions and tracing for the sources of ore-forming materials in the Haxiyatu sharn iron-polymetallic deposit, East Kunlun[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2018, 57(4): 37–47.
- [16] 王秉璋, 罗照华, 李怀毅, 等. 东昆仑祁漫塔格走廊域晚古生代-早中生代侵入岩岩石组合及时空格架[J]. 中国地质, 2009, 36(4): 769–782.
- WANG Bing-zhang, LUO Zhao-hua, LI Huai-yi, et al. Petrotectonic assemblages and temporal-spatial framework of the Late Paleozoic-Early Mesozoic intrusions in the Qimantag Corridor of the East Kunlun belt[J]. Geology in China, 2009, 36(4): 769–782.
- [17] 张爱奎, 刘智刚, 张大明, 等. 青海祁漫塔格楚阿克拉千隐爆角砾岩型铅锌矿床成矿模式及发现意义[J]. 地质通报, 2020, 39(Z1): 319–329.
- ZHANG Ai-kui, LIU Zhi-gang, ZHANG Da-ming, et al. Metallogenic model and discovery significance of the Chuakelaqian cryptoexplosion breccia type Pb-Zn deposit in the Qimantag metallogenic belt, Qinghai Province[J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(Z1): 319–329.
- [18] 王松, 丰成友, 李世金, 等. 青海祁漫塔格卡尔却卡铜多金属矿区花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 74–84.
- WANG Song, FENG Cheng-you, LI Shi-jin, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granodiorite in the Kaerqueka polymetallic ore deposit, Qimantag Mountain, Qinghai Province, and its geological implications[J]. Geology in

- China, 2009, 36(1): 74–84.
- [19] 丰成友, 李东生, 屈文俊, 等. 青海祁漫塔格索拉吉矽卡岩型铜钼矿床辉钼矿铼-钨同位素定年及其地质意义[J]. 岩矿测试, 2009, 28(3): 223–227.
- FENG Cheng-you, LI Dong-sheng, QU Wen-jun, et al. Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Suolajier skarn-type copper-molybdenum deposit of Qimantage mountain in Qinghai Province and its geological significance[J]. Rock and Mineral Analysis, 2009, 28(3): 223–227.
- [20] 李碧乐, 孙丰月, 于晓飞, 等. 青海东昆仑卡尔却卡地区野拉塞铜矿床成因类型及成矿机制[J]. 岩石学报, 2010, 26(12): 3696–3708.
- LI Bi-le, SUN Feng-yue, YU Xiao-fei, et al. Genetic type and mineralizing mechanism of the Yelasai copper deposit in Kaerqueka area, eastern Kunlun, Qinghai Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(12): 3696–3708.
- [21] 李大新, 丰成友, 赵一鸣, 等. 青海卡而却卡铜多金属矿床蚀变矿化类型及矽卡岩矿物学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(6): 1818–1830.
- LI Da-xin, FENG Cheng-you, ZHAO Yi-ming, et al. Mineralization and alteration types and skarn mineralogy of Kaerqueka copper polymetallic deposit in Qinghai Province[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2011, 41(6): 1818–1830.
- [22] 高永宝, 李侃, 钱兵, 等. 东昆仑卡而却卡铜矿区花岗闪长岩及其暗色微粒包体成因: 锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素证据[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 646–662.
- GAO Yong-bao, LI Kan, QIAN Bing, et al. The genesis of granodiorites and dark enclaves from the Kaerqueka deposit in east Kunlun belt: Evidence from zircon U-Pb dating, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopic compositions[J]. Geology in China, 2015, 42(3): 646–662.
- [23] 赖健清, 黄敏, 宋文彬, 等. 青海卡尔却卡铜多金属矿床地球化学特征与成矿物质来源[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2015, 40(1): 1–16.
- LAI Jian-qing, HUANG Min, SONG Wei-bin, et al. Geochemical characteristics and source of ore forming materials of Kaerqueka copper polymetallic deposit in Qinghai Province, China[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(1): 1–16.
- [24] 张爱奎, 李东生, 何书跃, 等. 青海省祁漫塔格地区主要矿产成矿规律与成矿系列[M]. 北京: 地质出版社, 2017: 13–264.
- ZHANG Ai-kui, LI Dong-sheng, HE Shu-yue, et al. Metallogenic rules and series from major minerals of Qimantage area in Qinghai Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017: 13–264.
- [25] 于淼, 丰成友, 赵一鸣, 等. 青海卡而却卡铜多金属矿床流体包裹体地球化学及成因意义[J]. 地质学报, 2014, 88(5): 903–917.
- YU Miao, FENG Cheng-you, ZHAO Yi-ming, et al. Fluid inclusion geochemistry in the Kaerqueka copper polymetallic deposit, Qinghai Province and its genetic significances[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(5): 903–917.
- [26] 许庆林, 孙丰月, 张晗, 等. 山西中条山铜矿峪铜矿流体包裹体、锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(S3): 64–80.
- XU Qing-lin, SUN Feng-yue, ZHANG Han, et al. Fluid inclusions, zircon U-Pb age and Hf isotope of Tongkuangyu copper deposit in Zhongtiaoshan mountains and its geological significance, Shanxi Province, China[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2012, 42(S3): 64–80.
- [27] ROEDDER E. Fluid inclusions[J]. Reviews in Mineralogy, 1984, 12: 1–64.
- [28] 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.
- LU Huan-zhang, FAN Hong-rui, NI Pei, et al. Fluid inclusions[M]. Beijing: Science Press, 2004: 132–208.
- [29] 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.
- [30] BROWN P E. FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data[J]. American Mineralogist, 1989, 74(11/12): 1390–1393.
- [31] 王璇, 杨林, 邓军, 等. 北衙金矿多期热液成矿作用识别: 来自地质、岩相学、流体包裹体和 H-O-S 同位素证据[J]. 岩石学报, 2018, 34(5): 1299–1311.
- WANG Xuan, YANG Lin, DENG Jun, et al. Identification of multistage hydrothermal mineralizations in the Beiya gold deposit: Evidence from geology, petrography, fluid inclusion, H-O-S isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(5): 1299–1311.

- 1299–1311.
- [32] CLAYTON R N, O' NEIL J R, MAYEDA T K. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77(17): 3057–3067.
- [33] 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 De-quan, ZHANG Hui, FENG Cheng-you, et al. Fluid inclusions in orogenic gold deposits in the northern Qaidam margin-east Kunlun region[J]. *Geology in China*, 2000, 34(5): 843–854.
- [34] 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 Guang-yuan, LIU Shi-bao, QI Chang-wei, et al. Fluid inclusion characteristics of Guoluolongwa gold deposit in Qinghai[J]. *Mineral Exploration*, 2016, 7(4): 569–574.
- [35] 陈衍景. 初论浅成作用和热液矿床成因分类[J]. *地学前缘*, 2010, 17(2): 27–34.
- CHEN Yan-jing. On epizonogenism and genetic classification of hydrothermal deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(2): 27–34.
- [36] 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, 23(9): 2085–2108.
- CHEN Yan-jing, NI Pei, FAN Hong-rui, et al. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(9): 2085–2108.
- [37] 张理刚. 含矿流体(溶液)的稳定同位素组成及其研究意义[J]. *地质地球化学*, 1978, 6(11): 1–12.
- ZHANG Li-gang. The ore-bearing fluid(solution) the stable isotopic compositions and its research significance[J]. *Geochemistry*, 1978, 6(11): 1–12.
- [38] 陈振胜, 张理刚. 水/岩交换作用及其找矿[J]. *地质与勘探*, 1989, 25(2): 7–11.
- CHEN Zhen-sheng, ZHANG Li-gang. Water/rock interchange process and mineral deposit exploration[J]. *Geology and Exploration*, 1989, 25(2): 7–11.
- [39] TAYLOR H P. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. *Economic Geology*, 1974, 69(6): 843–883.
- [40] SHEPPARD S M F. The Cornubian batholith, SW England: D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ studies of kaolinite and other alteration minerals[J]. *Journal of the Geological Society*, 1977, 133(6): 573–591.
- [41] OHMOTO H, GOLDBERGER M B. Sulfur and carbon isotopes[M]. BARNES H L, ed. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York: John Wiley and Sons, 1997: 519–611.
- [42] 王永标, 黄继春, 骆满生, 等. 海西-印支早期东昆仑造山带南侧古海洋盆地的演化[J]. *地球科学*, 1997, 22(4): 369–372.
- WANG Yong-biao, HUANG Ji-chun, LUO Man-sheng, et al. PaleoOcean evolution of the southern East Kunlun orogenic belt during Hercy-Early Indosinian[J]. *Earth Science*, 1997, 22(4): 369–372.
- [43] 郭正府, 邓晋福, 许志琴, 等. 青藏东昆仑晚古生代末-中生代中酸性火成岩与陆内造山过程[J]. *现代地质*, 1998, 12(3): 344–352.
- GUO Zheng-fu, DENG Jin-fu, XU Zhi-qin, et al. Late Paleozoic-Mesozoic intracontinental orogenic process and intermediate-acidic igneous rocks from the eastern Kunlun mountains of northwestern China[J]. *Geoscience*, 1998, 12(3): 344–352.
- [44] 罗照华, 邓晋福, 曹永清, 等. 青海省东昆仑地区晚古生代-早中生代火山活动与区域构造演化[J]. *现代地质*, 1999, 13(1): 51–56.
- LUO Zhao-hua, DENG Jin-fu, CAO Yong-qing, et al. On Late Paleozoic-Early Mesozoic volcanism and regional tectonic evolution of eastern Kunlun, Qinghai Province[J]. *Geoscience*, 1999, 13(1): 51–56.
- [45] 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(3): 403–414.
- MO Xuan-xue, LUO Zhao-hua, DENG Jin-fu, et al. Granitoids and crustal growth in the east-Kunlun orogenic belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(3): 403–414.
- [46] 蔡雄飞, 罗中杰, 刘德民, 等. 东昆仑三叠系一个不可忽视的地层单位: 希里可特组[J]. *地层学杂志*, 2008, 32(4): 374–380, 456.
- CAI Xiong-fei, LUO Zhong-jie, LIU De-min, et al. The Xilikete formation: An important lithostratigraphic unit of the Triassic system in the eastern Kunlun region[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2008, 32(4): 374–380, 456.
- [47] 王秉璋, 罗照华, 吴正寿. 祁漫塔格地质走廊域古生代-

- 中生代火成岩岩石构造组合研究[M]. 北京: 地质出版社, 2014: 1-224.
- WANG Bing-zhang, LUO Zhao-hua, WU Zheng-shou. The study and investigation on the assembly and coupling petroctectonic assemblage during Paleozoic Mesozoic period at Qimantage geological corridordomain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014: 1-224.
- [48] 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等. 东昆仑东段晚古生代-中生代若干不整合面特征及其对重大构造事件的响应[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 244-254.
- LI Rui-bao, PEI Xian-zhi, LI Zuo-chen, et al. Geological characteristics of Late Palaeozoic-Mesozoic unconformities and their response to some significant tectonic events in eastern part of Eastern Kunlun[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 244-254.
- [49] 张爱奎, 莫宣学, 袁万明, 等. 东昆仑西部野马泉地区三叠纪花岗岩成因与构造背景[J]. 矿物学报, 2016, 36(2): 157-173.
- ZHANG Ai-kui, MO Xuan-xue, YUAN Wan-ming, et al. Petrogenesis and tectonic setting of Yemaquan Triassic granite from the west of the eastern Kunlun mountain range, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2016, 36(2): 157-173.
- [50] 张爱奎. 青海野马泉地区晚古生代-早中生代岩浆作用与成矿研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012: 1-155.
- ZHANG Ai-kui. Studies on late Paleozoic early Mesozoic magmatism and mineralization in Yemaquan area, Qinghai Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012: 1-155.
- [51] 张爱奎, 刘光莲, 莫宣学, 等. 青海祁漫塔格晚古生代-早中生代侵入岩构造背景与成矿关系[J]. 西北地质, 2012, 45(1): 9-19.
- ZHANG Ai-kui, LIU Guang-lian, MO Xuan-xue, et al. Relationship between tectonic settings and metallogenesis of Late Paleozoic-Early Mesozoic in trusive rock in Qimantage, Qinghai Province[J]. Northwestern Geology, 2012, 45(1): 9-19.
- [52] 张爱奎, 莫宣学, 李云平, 等. 青海西部祁漫塔格成矿带找矿新进展及其意义[J]. 地质通报, 2010, 29(7): 1062-1074.
- ZHANG Ai-kui, MO Xuan-xue, LI Yun-ping, et al. New progress and significance in the Qimantage metallogenic belt prospecting, western Qinghai, China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(7): 1062-1074.

Ore genesis of Kudeerte gold-polymetallic deposit in western part of East Kunlun

ZHANG Ai-kui¹, MO Xuan-xue², ZHANG Yong¹, QIAN Ye³, LIU Guang-lian¹, ZHANG Da-ming¹, LIU Zhi-gang¹

(1. The Third Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Xining 810029, China;

2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;

3. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: Kuderte gold-polymetallic deposit located in the Kaerqueka ore-field in the western part of East Kunlun, which has unique characteristics of gold mineralization. Based on the analysis of deposit characteristics, the classification of metallogenic stages, and the study on the fluid inclusion in the main gold metallogenic period and the H-O-S isotopes, metallogenic mechanism and origin of ore deposit have been discussed. The study is not only scientific valuable for regional gold metallogenic regularity, but also it is important practical significance for promoting gold ore exploration in East Kunlun. The following knowledge and achievements were achieved: ①Fluid inclusions in the gold-ore is mainly rich liquid two-phase aqueous inclusions(I-type), small amount of aqueous solution containing CO₂ three-phase inclusions(II); ②The ore-forming fluids has the characteristics of middle-low temperature(160.7–259.9 °C) and middle-low salinity(3.5%–12.9%NaCl_{eqv}); ③Fluid inclusion composition testing shows that the ore-forming fluid is mainly NaCl-H₂O system, followed is NaCl-CO₂-H₂O system; ④The δD_{V-SMOW} ratios are ‰–72‰, with an average of ‰ and the $\delta^{18}O_{water(V-SMOW)}$ ratios are ‰–0.3‰, with an average of ‰. The results of hydrogen and oxygen isotopes indicate that the gold ore-forming fluid is mainly mixture of magmatic water and atmospheric precipitation. The $\delta^{34}S$ ratios are 10.5‰–10.8‰, reflecting the sulfur in the ore is single source, mainly from magmatic hydrothermal; ⑤According to the comprehensive analysis, the genesis of Kudeerte gold-polymetallic deposit belongs to the contact metasomatism-medium and low temperature hydrothermal type. Metallogenesis is closely related to granodiorite. The polymetallic ore was formed by contact metasomatism and the gold ore was formed in the late quartz sulfide period, which was the result of hydrothermal activity after the magmatic period of granodiorite. The gold ore has the characteristic of veins-disseminated type (Generalized porphyry type). This type gold deposit has the superior metallogenic background and huge prospecting foreground in western part of East Kunlun.

Key words: deposit genesis; contact metasomatism-medium and low temperature hydrothermal type; Kudeerte Gold-polymetallic deposit; western part of East Kunlun; Qinghai Province

Foundation item: Project(2019-ZJ-7009) supported by the Science and Technology Plan of Qinghai Province, China

Received date: 2021-04-03; **Accepted date:** 2021-06-02

Corresponding author: ZHANG Ai-kui; Tel: +86-09716317740; E-mail: 474921988@qq.com

(编辑 何学锋)