

厄立特里亚 Koka 金矿床成矿流体特征 及其地质意义 *

赵 凯¹, 姚华舟¹, 王建雄¹, 向文帅¹, Ghebsha Fitwi Ghebretnsae²

(1 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205; 2 中国地质大学丝绸之路学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要 厄立特里亚 Koka 金矿床产于努比亚地盾新元古代浅变质岩系中, 矿体主要赋存于 Koka 微晶花岗岩内, 受剪切构造控制, 是在该国发现的大型造山型金矿床。矿床含金石英脉中石英中赋存的原生流体包裹体分为富 CO₂ 包裹体、CO₂-H₂O 包裹体和 H₂O 包裹体共 3 种类型, 以大量发育富 CO₂ 包裹体与 CO₂-H₂O 包裹体为特征。成矿流体具有富 CO₂、中低温 (210~360℃)、中低盐度 ($w(\text{NaCl}_{\text{eq}})=2.24\%\sim 8.51\%$) 的特征。流体中阳离子主要为 Na⁺ 与少量 K⁺, 阴离子为 Cl⁻ 与少量 SO₄²⁻, 气相成分主要为 CO₂ 与 H₂O, 基本不含其他气体组分, 流体属于 NaCl-H₂O-CO₂ 体系。成矿流体密度变化范围较大 (0.597~0.969 g/cm³), 其中高密度的富 CO₂ 包裹体捕获的最小 *P-T* 条件为 260~360℃、100~270 MPa, 形成于区域变质作用时期。成矿流体的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 范围为 -57‰~-50.1‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 范围为 1.4‰~3.2‰, 表明 Koka 金矿床成矿流体主要来源于变质热液, 并伴有大气降水的混入。成矿流体中 CO₂-H₂O 包裹体气相分数变化范围很大 (15%~80%), 与之共生的 H₂O 包裹体具有相似的盐度以及较低的均一温度, 表明初始的 CO₂-H₂O 型流体发生了不混溶作用, 导致相分离, 产生的大量富 CO₂ 流体, 并使金大量沉淀。

关键词 地球化学; 成矿流体; 流体包裹体; 不混溶; Koka 金矿; 厄立特里亚

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

Characteristics of ore-forming fluids of Koka gold deposit in Eritrea and their geological significances

ZHAO Kai¹, YAO HuaZhou¹, WANG JianXiong¹, XIANG WenShuai¹ and Ghebsha Fitwi Ghebretnsae²

(1 Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China; 2 College of Silk Road, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract

Located in the metamorphic strata of the Nubian Shield, the Koka gold deposit is a large orogenic gold deposit in Eritrea. The orebody hosts in the Koka aplitic granite, controlled by shear structure. The primary fluid inclusions in gold-bearing quartz veins can be divided into three types, i.e., extremely CO₂-rich inclusions, CO₂-H₂O inclusions and H₂O inclusions, with CO₂-rich inclusions and CO₂-H₂O inclusions being dominant. The ore-forming fluid is characterized by rich CO₂, medium-low temperature (210~360℃) and low salinity ($w(\text{NaCl}_{\text{eq}})=2.24\%\sim 8.51\%$). In the liquid phase components, the cations mainly include Na⁺ and a little K⁺, the anions contain Cl⁻ and a little SO₄²⁻, the gaseous content of the fluid inclusion is primarily CO₂ and secondly H₂O, almost without any other gaseous content, and the fluids belong to NaCl-H₂O-CO₂ system. The density of ore-forming fluid has a

* 本文受中国地质调查局项目“埃及及邻区矿产资源潜力评价”(编号: DD20160109)项目资助

第一作者简介 赵 凯, 男, 1987 年生, 博士, 工程师, 主要从事矿床学与地球化学研究。Email: 286877542@qq.com

收稿日期 2018-07-04; 改回日期 2018-09-03。赵海杰编辑。

large variation ($0.597\sim 0.969\text{ g/cm}^3$), and the trapping P - T conditions of CO_2 -rich inclusions characterized by high density can be estimated to be $260\sim 360^\circ\text{C}$ and $100\sim 270\text{ MPa}$, usually formed in regional metamorphism period. $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ of the fluid is between -57‰ and -50.1‰ , whereas $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ of the fluid is between 1.4‰ and 3.2‰ , which suggests that the source of the ore-forming fluid for Koka gold deposit came mainly from metamorphic water mixed with meteoric water. The filling degree of CO_2 - H_2O inclusions has a large variation ($15\%\sim 80\%$), and symbiotic H_2O inclusions have similar salinities and lower uniformity temperature, indicating that the original CO_2 - H_2O fluid experienced fluid immiscibility, which resulted in the phase separation that formed a mass of CO_2 -rich fluid and caused gold precipitation.

Key words: geochemistry, ore-forming fluid, fluid inclusion, immiscibility, Koka gold deposit, Eritrea

努比亚地盾位于非洲东北部,形成于泛非构造期东西冈瓦纳大陆的拼合,是冈瓦纳成矿域的重要组成部分(Kröner et al., 1990; Stern, 1994)。该区在新元古代经历了弧形列岛合并收敛,大洋闭合,之后是大陆碰撞,伴随不同的构造演化时期均发育有大量岩浆活动以及复杂的网脉状压扭性剪切带和褶皱构造(Woldehaimanot, 2000; Andersson et al., 2006; Ghebreab et al., 2009),发育大量VMS型金多金属硫化物矿床与造山型金矿床(Johnson et al., 2017),是研究东、西冈瓦纳大陆汇聚背景下的铜、金成矿作用的最佳天然实验室之一。

厄立特里亚是非洲东北部地区组成国之一,西接苏丹,南邻埃塞俄比亚,东隔红海,覆盖全国60%以上地区的基底岩石是努比亚地盾的一部分,地质成矿条件十分优良,矿业活动历史悠久,已发现有多处古代矿产开采遗迹。由于受内乱、战争、交通、物资及经济地理等因素制约,该国的地质工作难以有序进行,地质研究工作程度较低。近年来,陆续有中国、南非、印度、日本、英国、澳大利亚及加拿大的20余家矿业公司进入厄立特里亚进行矿产资源勘查和开发,总结了Bisha与Asmara 2个超大型VMS型铜、金多金属成矿带,发现了以Bisha、Koka为代表的大型VMS型铜金多金属矿床和造山型金矿床(赵孝忠等, 2012)。Koka金矿床处于Bisha-Zara铜、金成矿带中,由于发现及开发较晚,目前仅开展少量矿床地质特征方面的对比研究(向鹏等, 2013),缺乏对控矿要素、成矿流体与物质来源以及成矿机理等方面的系统研究。因此,本文通过对Koka金矿床开展流体包裹体岩相学特征、显微测温、成分及氢氧同位素等方面的研究,查明Koka金矿床成矿流体特征,分析成矿流体的来源,并探讨成矿机制,为确定其矿床成因提供新的依据。

1 区域地质背景

厄立特里亚处于非洲东北部,大地构造上位于东西冈瓦纳之间的巨大缝合带之一的东非造山带内。区内出露的地层由3部分组成:下部是前寒武系的基底岩石,之上不整合覆盖有中生界的沉积岩和古近系到第四系的火山岩和沉积岩(赵孝忠等, 2012)。据岩性及构造特征,前人将厄立特里亚新元古代基底划分为5部分:包括西部的Barka地体,主要由达角闪岩相的变沉积岩和镁铁质片岩组成;北部的Hagar地体,主要由镁铁质及长英质的变火山岩组成;中西部的Adobha Abi地体,主要由蛇绿岩及大理岩组成,其被区域北北东-南南西向主要剪切带所夹持,东边为Elababu剪切带(ESZ),西边Baden剪切带(BSZ),中部Nakfa地体,主要为绿片岩相变火山沉积岩及同碰撞到后碰撞花岗岩组成;东部的Arig地体,主要为后碰撞花岗岩和变沉积岩组成(图1a)(Teklay, 1997)。

区域构造主要以韧性剪切带、褶皱以及脆性断裂为主,主体构造方向为北北东到北北西向。其中,韧性剪切带主要发育在前寒武纪变质岩地区,以走滑型与推覆型为主,长约几十千米,宽几米至几十米。脆性断裂在新老地层中均有发育,在该区最为核心的是东非大裂谷北段及尼罗河断裂,它们控制了区域沉积建造以及构造岩浆活动。区域内出露的岩浆岩以花岗岩、花岗闪长岩和闪长岩为主,伴有细晶岩、辉绿岩及石英斑岩,均呈岩脉状产出(赵孝忠等, 2012)。

2 矿床地质特征

Koka金矿位于Nakfa地体和Adobha Abiy地体

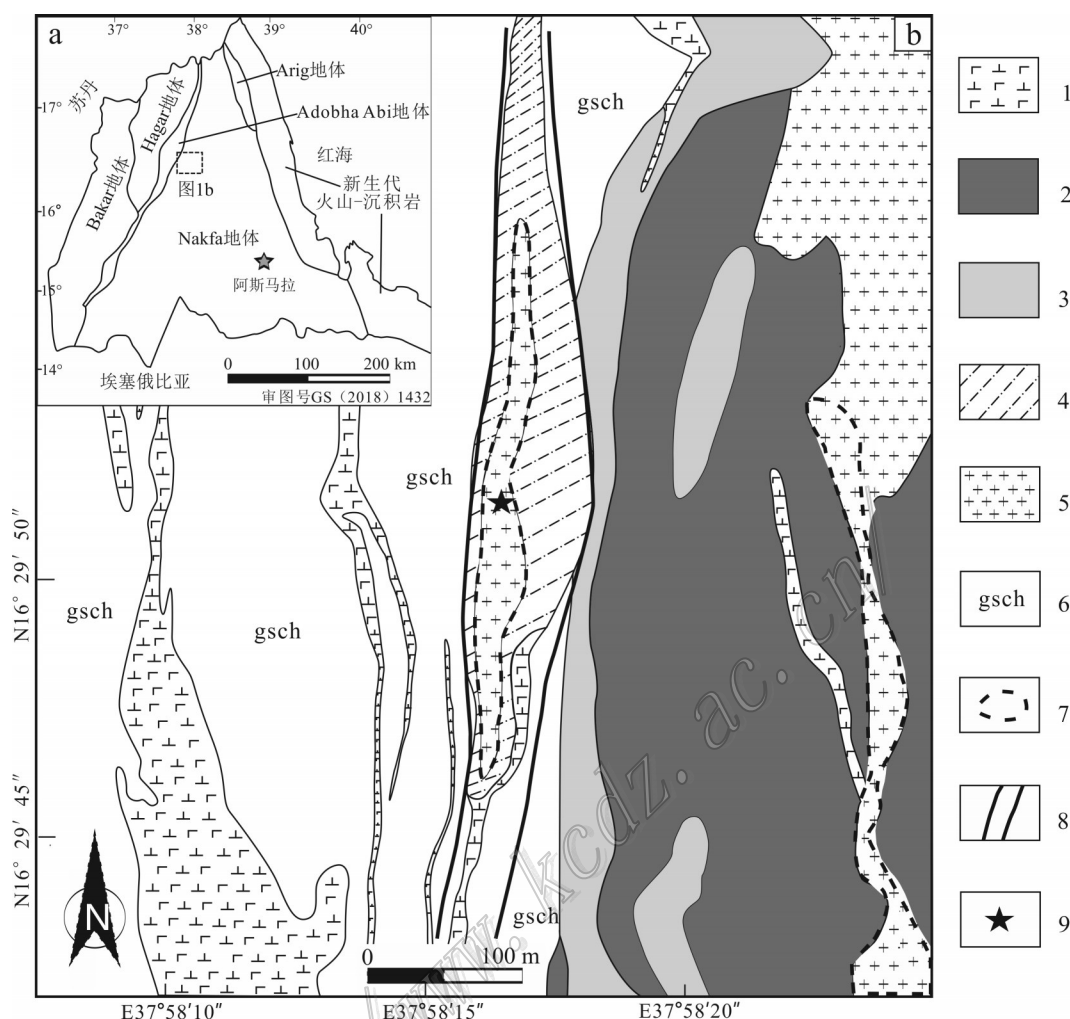


图1 Koka金矿床区域地质简图(a,据 Tekly et al., 2006)及矿床区地质图(b,据 Dean et al.,2010)

1—玄武-闪长岩;2—流纹-英安岩;3—长英质凝灰岩;4—糜棱岩;5—浅变质岩;

6—Koka花岗岩;7—金矿体;8—Elababu剪切带;9—采样位置

Fig. 1 Sketch regional geological map (a,after Tekly et al., 2006) and geological map of Koka gold deposit (b, after Dean et al.,2010)

1—Basaltic diorite; 2—Rhyolitic dacite; 3—Felsic tuff; 4—Mylonite; 5—Epimetamorphic rock;

6—Koka granite; 7—Gold orebody; 8—Elababu shear zone; 9—Sample location

之间的Elababu剪切带中一个褶曲内。矿区东部和中部出露绿片岩相变质火山岩和变质火山碎屑岩序列,由块状中性和酸性岩火山碎屑岩组成,含少量流纹岩。在西部出露变质沉积岩和变质玄武岩序列,由凝灰质硬砂岩、砂泥岩、页岩和镁铁质侵入岩组成(图1b)。该区构造以北北东到正北走向的剪切带为主,以发育一系列非对称倒转等斜褶皱及逆冲断层为特征,其中,高角度逆冲断层为矿区的主要控岩控矿构造。

矿床金矿体赋存于呈北北东向展布的透镜状

Koka花岗岩体中,呈脉状、透镜状及不规则状,主要矿化类型为石英脉型与蚀变岩型。其中,石英脉型矿化体一般发育在Koka花岗岩体内,脉体宽度不一,一般不超过2 m,延伸较短,具有膨胀收缩与分支复合的特征。蚀变岩型矿化主要发育于Koka花岗岩与变质火山沉积岩的接触带内,整个蚀变矿化带宽约50~80 m,并与石英脉矿化密切相伴产出。截止到2010年,已有钻孔控制的金矿体沿走向延伸超过650 m,平均深度超过地表以下165 m,控制的金储量约为26.13 t,平均品位约为5~6 g/t(Dean et al.,

2010)。金主要以自然金形成存在于石英脉中,含金石英脉型矿石为主要的矿石类型,矿石矿物主要为自然金、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿及少量闪锌矿,脉石矿物主要为石英、方解石和绢云母。与金矿化密切相关的蚀变类型有硅化、绢云母化、黄铁矿化以及碳酸盐化,它们在矿区内相互叠加,总体具有分带性。其中,硅化与Koka金矿床主矿化带一致;绢云母化与黄铁矿化除在矿区内分布以外,还超出了矿化带范围,形成了绢云母+黄铁矿蚀变晕边界;而碳酸盐化主要以碳酸盐脉的形成出现在围岩中,与其他蚀变相伴或单独产出。

依据野外露头、显微镜观察以及矿物共生组合,可将Koka金矿划分为早、晚2个成矿阶段(图2a、b)。早阶段以发育石英-多金属硫化物-自然金脉体为特征,为主矿化阶段(图2a)。其中,硫化物主要为

黄铁矿、黄铜矿、方铅矿以及闪锌矿。自然金呈他形粒状,一般分布于黄铁矿及石英颗粒间(图2c、e)。黄铁矿多呈集合体出现,呈半自形-立方体晶型,粒径变化较大(图2d)。方铅矿呈他形粒状,发育明显的三角形解理(图f)。黄铜矿与闪锌矿多呈固溶体结构产出,也可见集合体,偶见单个晶粒(图2g、h)。晚阶段以发育乳白色贫硫化物石英脉为特征,矿物共生组合较为简单,硫化物仅见少量他形黄铜矿与细粒黄铁矿(图2b)。

3 样品特征及分析方法

本次研究选取了6件石英脉型矿石样品,其中2件晚阶段乳白色石英脉样品采于矿体地表露头(N16°29'51", E37°58'17"),肉眼可见有零星细粒黄

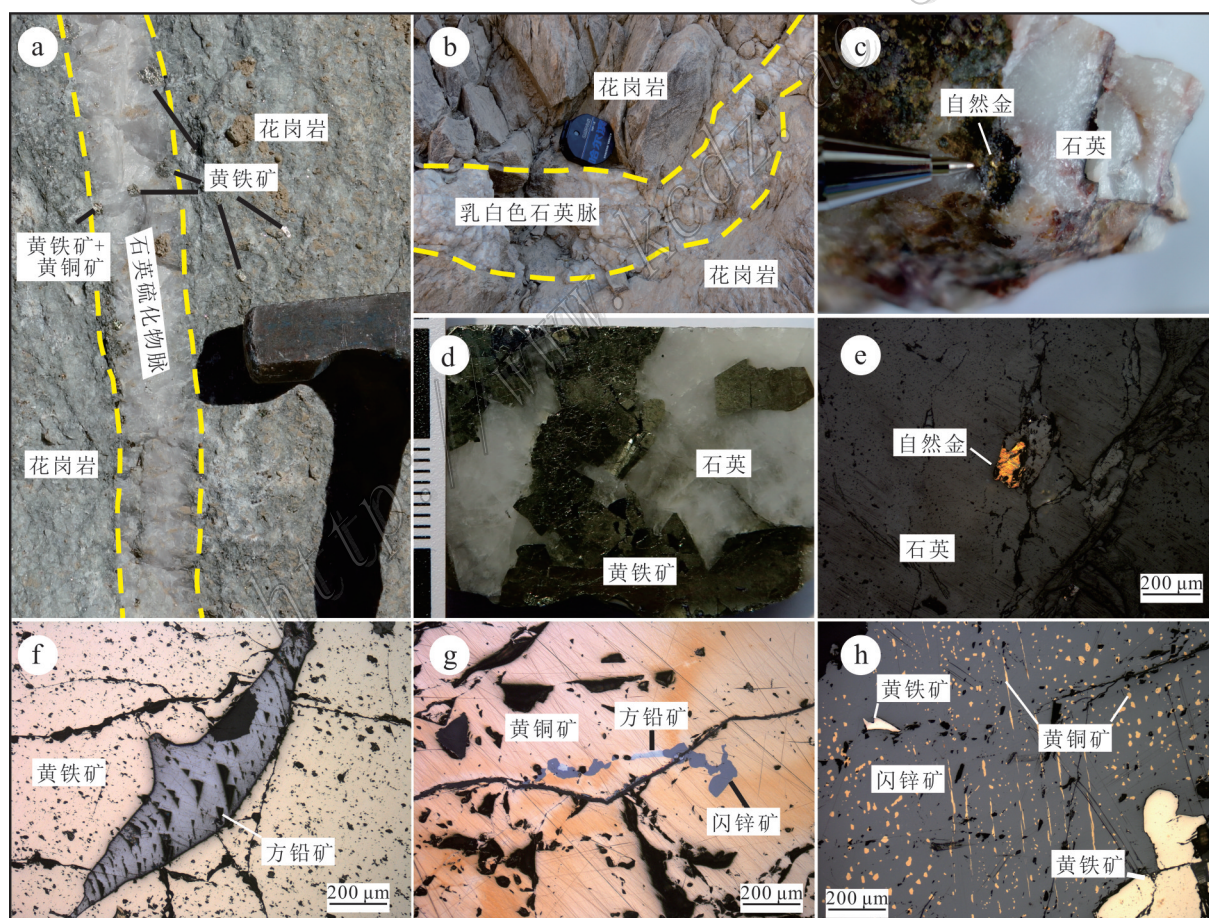


图2 Koka金矿床矿石野外、手标本及镜下照片

a. 早阶段石英硫化物脉; b. 晚阶段乳白色石英脉; c~d. 矿石手标本特征; e~h. 矿石矿物显微镜下特征

Fig. 2 Representative photographs of ores from the Koka gold deposit

a. Early stage quartz sulfide veins; b. Late stage milky quartz veins; c~d. Characteristics of hand specimens ore; e~h. Characteristic of ore minerals under the microscope

铁矿。另4件主阶段硫化物石英脉采于钻孔岩芯。将样品磨制成的包裹体片进行包裹体岩相学观察,然后选取体积较大的包裹体进行显微测温、激光拉曼光谱分析。同时,对6件样品挑选石英单矿物,进行群体包裹体气、液相成分分析以及氢氧同位素分析。

包裹体测温显微测温工作在北京科技大学资源工程系包裹体实验室完成,使用 Linkam 公司 THMS600 冷热台,测温范围为 $-196\sim+600^{\circ}\text{C}$ 。低温下,接近各相变点时升温速率控制在 $0.1\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ (CO_2 三相点、 CO_2 部分均一温度、 CO_2 笼形物溶化等);温度较高时,如包裹体完全均一温度升温速率控制在 1°C (徐九华等,2015)。

包裹体激光拉曼光谱分析与群体包裹体气、液相成分分析在国土资源部中南矿产资源监督检测中心完成,激光拉曼光谱仪器为英国雷尼绍公司生产的 Renishaw inVia,本次实验光谱范围为 $50\sim 4500\text{ cm}^{-1}$,空间分辨率为 $1\text{ }\mu\text{m}$,激光波长 514.5 nm ,功率为 30 mW 。包裹体群体液相成分中阳离子测试仪器为日立 Z-2300,阴离子所用仪器为 DIONEX ICS-3000 离子色谱仪,气相成分测试仪器为 GC-2014C 气相色谱仪,包裹体爆裂温度为 $100\sim 550^{\circ}\text{C}$,测试精度为 0.01 mg/L ($0.01\text{ }\mu\text{g/g}$)。

石英氢氧同位素分析是在核工业北京地质研究院分析测试中心完成,使用仪器为 MAT-253 稳定同位素质谱仪。天然水中氢同位素通过锌还原法测定,硅酸盐及氧化物矿物氧同位素组成通过五氟化溴法测定,分析精度为 $\delta^{18}\text{O}$ 为 0.2‰ , D/H 为 2‰ 。

4 流体包裹体研究

4.1 流体包裹体岩相学特征

Koka 金矿床流体包裹体寄主矿物主要为石英,显微镜下具有明显的波状消光特征,具一定韧脆性变形。石英中包裹体十分发育,主要为呈孤立岛状分布的原生包裹体,以及沿石英裂隙分布的次生包裹体。依据包裹体室温下的相态及加热或冷却过程中的形变特征,并结合激光拉曼测试结果,将 Koka 金矿的原生流体包裹体分为以下3类:

(1) 富 CO_2 流体包裹体 (L_{CO_2}): 在成矿主阶段石英硫化物脉中含量较多,包裹体常呈椭圆形,少量为不规则状,大小约 $6\sim 16\text{ }\mu\text{m}$ (图 3a),室温下以纯液相为主,部分可见气液两相,气相分数主要占 $5\%\sim 20\%$ 。该类包裹体主要与含 CO_2 三相包裹体 ($\text{L}_{\text{CO}_2} +$

$\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$) 共生于同一个石英颗粒中 (图 3b), 并极少出现水包裹体 ($\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$)。

(2) 含 CO_2 三相包裹体 ($\text{L}_{\text{CO}_2} + \text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$): 在各阶段中都十分常见,通常在室温下呈两相,降温过程中液相 CO_2 出现气相 CO_2 , 其气相分数差别较大,为 $15\%\sim 80\%$ 。包裹体常呈椭圆形或负晶形,大小约 $6\sim 24\text{ }\mu\text{m}$ (图 3b~d)。

(3) 水溶液包裹体 ($\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$): 该类型包裹体主要见于晚阶段乳白色石英脉中,主要为气液两相,气相分数多为 $5\%\sim 25\%$,纯液相水包裹体较少见。包裹体常呈椭圆形或不规则状,大小约 $8\sim 16\text{ }\mu\text{m}$ (图 3c、d)。

4.2 流体包裹体显微测温

对 Koka 金矿 6 件石英样品中原生包裹体进行详细测温研究,共获得 125 个较为准确的测试数据,见表 1。水溶液包裹体具有较小的气相分数,一般均一到液相,包裹体冰点 ($t_{\text{m,ice}}$) 为 $-2.8\sim -1.3^{\circ}\text{C}$,均一温度 (t_{h}) 为 $212.4\sim 288.1^{\circ}\text{C}$,峰值介于 $260\sim 280^{\circ}\text{C}$ (图 4a)。含 CO_2 三相包裹体初熔温度为 $-58.1\sim -56.6^{\circ}\text{C}$, CO_2 笼合物消失温度变化区间为 $5.3\sim 8.5^{\circ}\text{C}$ ($t_{\text{m,cla}}$), CO_2 部分均一至液相温度为 $10.6\sim 30.1^{\circ}\text{C}$,包裹体完全均一至液相的温度 (t_{h}) 为 $228\sim 366.2^{\circ}\text{C}$,峰值介于 $260\sim 300^{\circ}\text{C}$ (图 4a),少量气相分数较大包裹体均一至气相。富 CO_2 流体包裹体与含 CO_2 三相包裹体的初熔温度相近,主要集中在 -57°C 附近,说明包裹体中成分比较稳定,其他挥发分含量较低, CO_2 均一至液相温度为 $-4.9\sim 18.9^{\circ}\text{C}$,明显低于含 CO_2 三相包裹体 (表 1),且总体 CO_2 相均一温度范围较宽,说明流体密度差别较大,但同一石英颗粒中,相近的一组富 CO_2 包裹体与含 CO_2 三相包裹体的 CO_2 相均一温度变化不大。

4.3 成矿流体盐度、密度与压力

根据显微测温数据,对于含 CO_2 三相包裹体,利用 Roedder (1984) 的盐度计算公式计算出 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $2.96\%\sim 8.51\%$,平均值为 5.23% (图 4b),水包裹体盐度利用 Hall 等 (1988) 计算公式求得 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $2.24\%\sim 4.65\%$ (图 4b),表明 Koka 金矿床的成矿流体为低盐度流体。

由包裹体岩相学特征及测温可知,各石英样品中 CO_2 含量较高,主要以富 CO_2 包裹体与含 CO_2 三相包裹体为主,一般都均一至液相,利用含 CO_2 包裹体均一温度和 CO_2 相密度关系图解 (Shepherd et al., 1985),可估算出包裹体 CO_2 相密度介于 $0.597\sim$

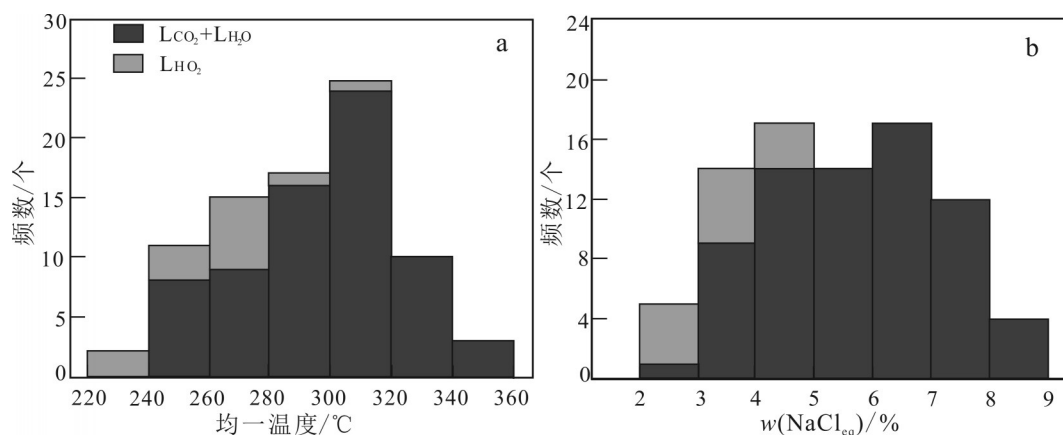


图4 Koka金矿流体包裹体均一温度与盐度直方图

Fig. 4 Homogenization temperature and salinity diagram of fluid inclusions in Koka gold deposit

0.969 g/cm³, 富CO₂包裹体密度明显高于含CO₂三相包裹体(表1)。

在同一件样品测温数据中,选取富CO₂包裹体的均一温度及其共生的含CO₂三相包裹体完全均一温度,在Van等(2001)的CO₂流体高温高压相图中投点,由此估算出富CO₂包裹体捕获的最小P-T条件为260~360°C、100~270 MPa(图5)。

4.4 单个流体包裹体激光拉曼

依据包裹体岩相学观察结果,选取直径较大

的不同类型包裹体进行激光拉曼测试分析(图6)。测试结果表明,含CO₂三相包裹体气相成分主要为CO₂和H₂O,液相水中也含有少量CO₂,包裹体基本不含其他气体组份,与测温结果基本吻合;富CO₂包裹体液相成分主要为纯CO₂,基本不含H₂O;水溶液包裹体液相成分也比较简单,主要为H₂O。

4.5 群体流体包裹体气液相成分

石英单矿物群体包裹体气液相成分分析表明,

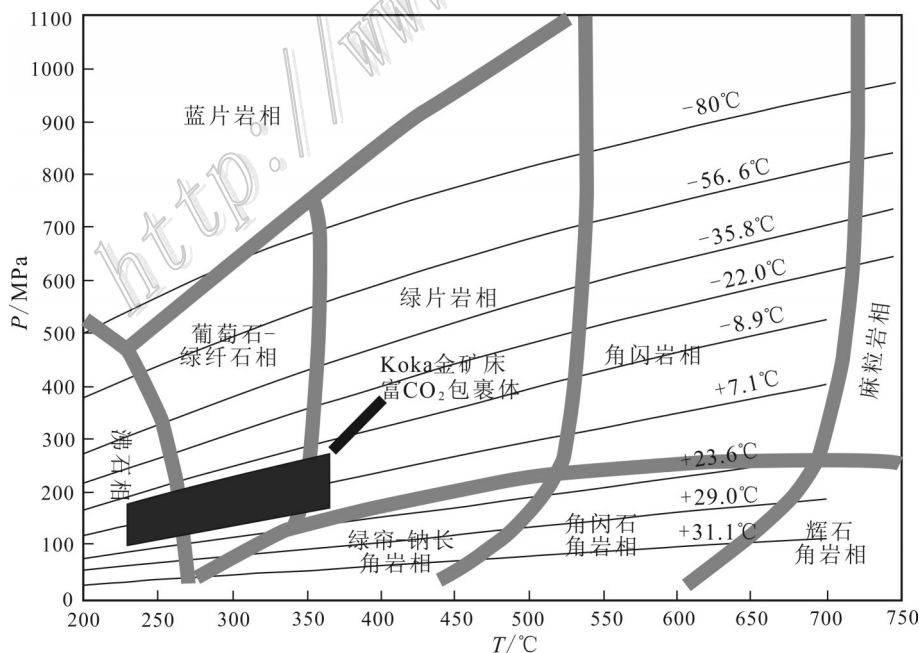


图5 Koka金矿体碳质包裹体的捕获P-T条件范围(变质相底图据Winter, 2001)

Fig. 5 The trapping P-T conditions of carbonic fluid inclusions in Koka gold deposit (phase diagram after Winter, 2001)

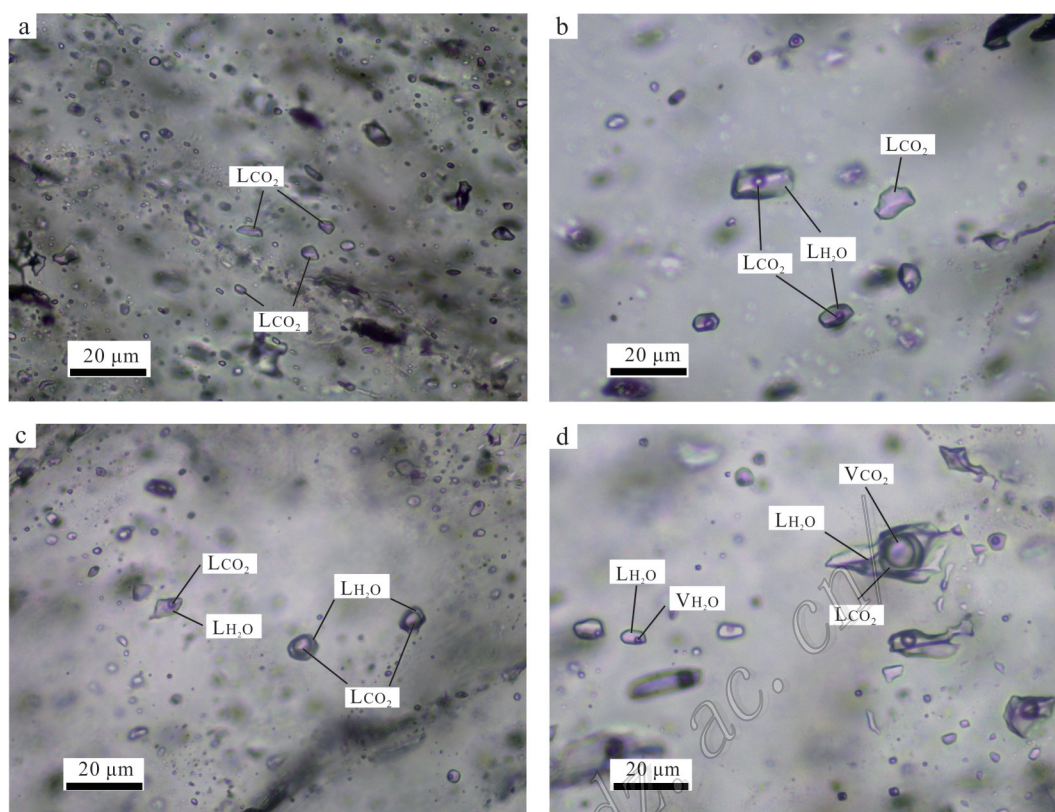


图 3 Koka 金矿床流体包裹体显微照片

a. 富 CO_2 包裹体; b. CO_2 - H_2O 包裹体与碳质包裹体; c. 大气相分数比的 CO_2 - H_2O 包裹体与 H_2O 包裹体;
d. CO_2 - H_2O 包裹体与 H_2O 包裹体

$\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$ —液相水; $\text{V}_{\text{H}_2\text{O}}$ —气相水; L_{CO_2} —液相 CO_2 ; V_{CO_2} —气相 CO_2

Fig. 3 Microphotographs of fluid inclusions in Koka gold deposit

a. CO_2 -rich inclusion; b. CO_2 - H_2O inclusion and CO_2 -rich inclusion; c. Big gas-liquid ratio values of CO_2 - H_2O inclusion and H_2O inclusion; d. CO_2 - H_2O inclusion and H_2O inclusion

$\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$ —Liquid H_2O phase; $\text{V}_{\text{H}_2\text{O}}$ —Gas H_2O phase; L_{CO_2} —Liquid CO_2 phase; V_{CO_2} —Gas CO_2 phase

表 1 Koka 金矿床流体包裹体显微测温结果及参数

Table 1 Comprehensive thermometry of fluid inclusions in Koka gold deposit

样号	样品描述	包裹体类型	大小	气相分数/%	个数/个	$t_{\text{m,CO}_2}/^\circ\text{C}$	$t_{\text{m,ice}}/^\circ\text{C}$	$t_{\text{m,clath}}/^\circ\text{C}$	$t_{\text{h,CO}_2}/^\circ\text{C}$	$t_{\text{h}}/^\circ\text{C}$	$w(\text{NaCl}_{\text{eq}})/\%$	密度/(g/cm^3)
KO-3	乳白色	L_{CO_2} - $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$, 大量	8~20	25~50	11	-57.0~-57.9		6.2~8.2	19.7~29.7	228.0~295.3	3.52~7.05	0.613~0.787
	石英脉	$\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$, 少量	8~16	5~20	6		-2.6~-1.5			220.9~288.1	2.57~4.34	
KO-7	乳白色	L_{CO_2} - $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$, 大量	8~24	25~80	11	-56.9~-57.4		6.6~8.5	18.5~29.7	231.9~318.0	2.96~7.54	0.597~0.793
	石英脉	$\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$, 少量	8~12	5~25	6		-2.8~-1.3			212.4~280.0	2.24~4.65	
KO-13	石英硫化物脉	L_{CO_2} - $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$, 大量	8~22	30~70	10	-56.9~-57.9		5.6~8.0	16.9~26.8	259.2~309.4	3.89~8.03	0.672~0.806
		L_{CO_2} , 少量	6~12	5~10	10	-56.8~-57.9			6.8~17.3			
KO-15	石英硫化物脉	L_{CO_2} - $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$, 较少	8~16	15~80	11	-56.7~-57.9		5.7~7.8	19.2~30.1	280.0~366.2	4.26~7.87	
		L_{CO_2} , 大量	8~16	5~15	9	-56.9~-58.0			-2.3~17.2			0.805~0.913
KO-16	石英硫化物脉	L_{CO_2} - $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$, 少量	6~20	30~50	14	-56.8~-58.1		5.8~7.9	19.9~29.6	235.2~295.3	4.07~7.70	
		L_{CO_2} , 大量	6~12	5~20	10	-56.7~-58.2			-4.9~18.9			0.757~0.951
KO-17	石英硫化物脉	L_{CO_2} - $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$, 少量	10~24	30~80	14	-56.6~-58.0		5.3~8.0	10.6~29.4	238.0~305.4	3.33~8.51	
		L_{CO_2} , 大量	6~14	5~20	13	-56.8~-58.0			-4.7~16.4			0.812~0.969

注: $T_{\text{m,CO}_2}$ — CO_2 初融温度; $T_{\text{m,ice}}$ —冰点温度; $t_{\text{m,clath}}$ —笼合物熔化温度; $t_{\text{h,CO}_2}$ — CO_2 部分均一温度; t_{h} —完全均一温度。

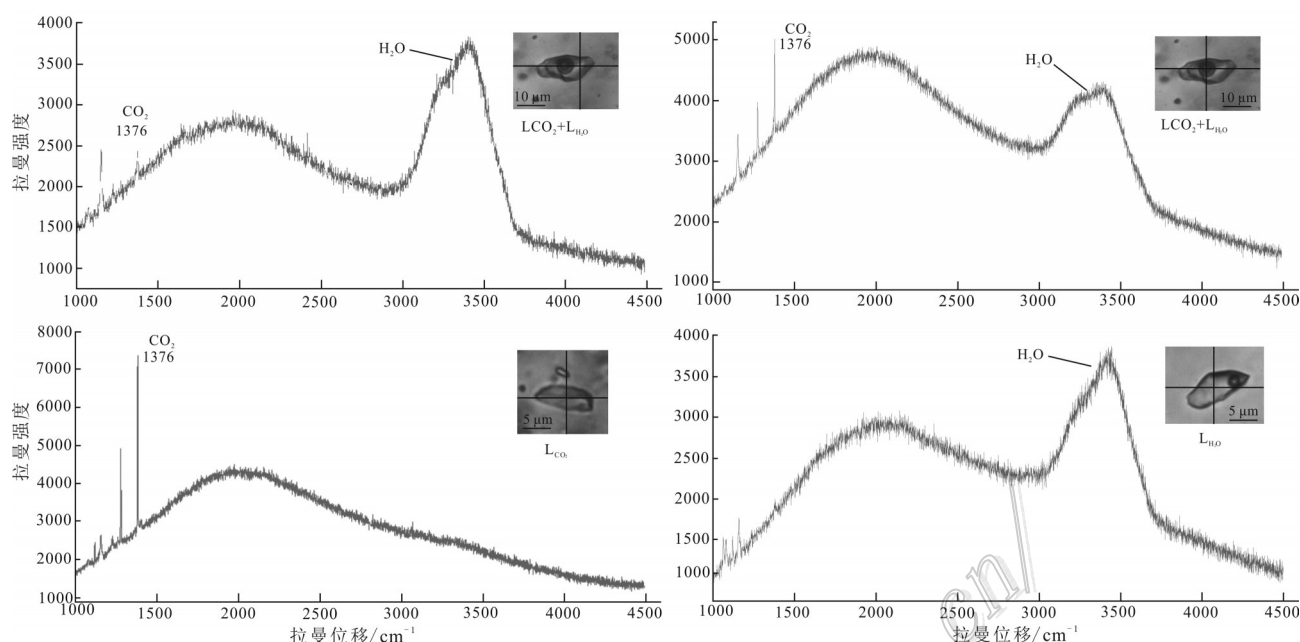


图6 Koka金矿床流体包裹体激光拉曼光谱图

Fig. 6 Laser Raman spectra of fluid inclusions in Koka gold deposit

包裹体中气相成分主要为CO₂和H₂O(表2),晚阶段乳白色石英脉中H₂O含量高于CO₂,摩尔百分含量约为75%左右,而主阶段石英硫化物脉中CO₂含量则有显著升高,摩尔百分含量最高可达51.6%。包

裹体液相阴阳离子成分显示Na⁺为流体中主要的阳离子,含量为5.22~15.06 μg/g,并含有微量的K⁺与Ca⁺,阴离子主要为Cl⁻,含量为5.99~17.71 μg/g,并含微量的SO₄²⁻,流体中的Na⁺/K⁺比值为12.75~28.96, Cl⁻/SO₄²⁻比值为11.51~53.67,流体中较高的离子浓度有利于携带更多的成矿物质(表3)。

表2 Koka金矿床流体包裹体气相成分(%)

Table 2 Chemical compositions of gases in fluid inclusions in Koka gold deposit(%)

样品号	H ₂ O/	CO ₂	CO	CH ₄	H ₂
KO-3	0.741	0.259	<0.01	<0.01	<0.01
KO-7	0.765	0.235	<0.01	<0.01	<0.01
KO-13	0.797	0.203	<0.01	<0.01	<0.01
KO-15	0.595	0.405	<0.01	<0.01	<0.01
KO-16	0.526	0.474	<0.01	<0.01	<0.01
KO-17	0.484	0.516	<0.01	<0.01	<0.01

4.6 氢、氧同位素分析

对Koka金矿6件石英单矿物样品进行了氢、氧同位素分析,测试结果列于表4。从表中可以看出,δD值为-57‰~-50.1‰,石英中的δ¹⁸O_{V-SMOW}值为9.0‰~10.8‰,且较为均一。利用成矿流体包裹体的平均均一温度和石英-水体系氧同位素平衡分馏方程δ¹⁸O_水=δ¹⁸O_{V-SMOW}-1000lnO_{石英-水}=δ¹⁸O_{V-SMOW}-3.38×10⁶T⁻²+3.40(Clayton et al., 1972),计算得到与石英达到分馏平衡的流体δ¹⁸O_水值1.4‰~3.2‰。

表3 Koka金矿床流体包裹体液相成分(w(B)/10⁻⁶)Table 3 Chemical compositions of liquid in fluid inclusions in Koka gold deposit(w(B)/10⁻⁶)

样品号	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Li ⁺	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Br
KO-3	0.47	8.06	0.08	<0.01	<0.01	<0.01	9.62	0.50	<0.01
KO-7	0.88	11.22	0.10	0.02	<0.01	<0.01	15.63	0.50	<0.01
KO-13	0.52	15.06	0.16	0.03	<0.01	<0.01	17.71	0.33	<0.01
KO-15	0.18	4.74	0.09	0.02	<0.01	<0.01	5.99	0.52	<0.01
KO-16	0.31	6.24	0.07	<0.01	<0.01	<0.01	8.36	0.48	<0.01
KO-17	<0.01	5.22	0.06	<0.01	<0.01	<0.01	6.52	0.56	<0.01

表 4 Koka 金矿床氢氧同位素组成

Table 4 oxygen and hydrogen isotopic date of Koka gold deposit

样号	样品描述	测试矿物	$\delta D_{V_smow}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{V_smow}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{H_2O}/\text{‰}$	成矿温度/ $^{\circ}\text{C}$
KO-3	乳白色石英脉	石英	-53.1	10.8	3.2	280
KO-7	乳白色石英脉	石英	-54.1	10.1	2.5	280
KO-13	石英硫化物脉	石英	-51.2	9.0	1.4	280
KO-15	石英硫化物脉	石英	-52.5	9.7	2.1	280
KO-16	石英硫化物脉	石英	-57.0	9.0	1.4	280
KO-17	石英硫化物脉	石英	-50.1	9.5	1.9	280

5 讨 论

5.1 成矿流体特征及来源

Koka 金矿床富含富 CO_2 流体包裹体,同时发育有大量 CO_2 - H_2O 包裹体及少量的盐水包裹体。成矿流体包裹体成分和成矿物理化学性质研究表明,Koka 金矿床成矿流体总体上具有中低温($210\sim 360^{\circ}\text{C}$)、中低盐度($w(\text{NaCl}_{\text{eq}})=2.24\%\sim 8.51\%$)的特征。流体中阳离子主要为 Na^+ 与少量 K^+ ,阴离子为 Cl^- 与少量 SO_4^{2-} ,气相成分主要为 CO_2 与 H_2O ,基本不含其他气体组分,流体为 $\text{NaCl-H}_2\text{O-CO}_2$ 体系。在本次研究的样品中,主阶段石英硫化物脉采自于钻孔岩芯,主要发育富 CO_2 包裹体及 CO_2 - H_2O 包裹体,基本不含盐水包裹体, CO_2 含量较高,而采于地表的晚阶段乳白色石英脉中则主要发育 CO_2 - H_2O 包裹体与盐水包裹

体,与早阶段石英硫化物脉相比 H_2O 含量更高。包裹体显微测温结果表明, CO_2 - H_2O 包裹体相比于盐水包裹体具有较高均一温度及盐度。虽然在野外未见这 2 类含金脉体直接切割关系,但上述特征均表明,主阶段石英硫化物脉中的富 CO_2 流体更接近于初始流体组成,代表主成矿阶段流体特征,而乳白色石英脉则更可能形成于流体演化晚阶段。

由氢氧同位素分析结果(表 4)可知,Koka 金矿床成矿流体 δD 范围在 $-50.1\text{‰}\sim -57\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 水范围在 $1.4\text{‰}\sim 3.2\text{‰}$,将数据投于 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}-\delta D$ 关系图(图 7)中,所有数据点比较集中,均十分靠近变质水或是岩浆水区域内,单从数据范围特征看,成矿流体可能为变质水、岩浆水与少量大气降水的混合(图 7)。一些学者通过收集总结大量金矿床包裹体成分数据,认为高 K^+/Na^+ 比值且流体盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})>30\%$ 时,可作为判别成矿流体主要为岩浆来源的辅助标志(张德会等,1998;曾国平等,2016), $(\text{F}/\text{Cl}^-)<1$ 则可能表明成矿流体中存在大气降水的加入(曹亮等,2015)。依据群体流体包裹体气液相成分分析结果,Koka 金矿床成矿流体中 $(\text{Na}^+/\text{K}^+)>1$, $(\text{F}/\text{Cl}^-)<1$,且盐度较低,不符合典型岩浆热液来源特征,暗示成矿流体更可能来源于变质热液,存在大气降水的混合。

前人研究认为,阿拉伯-努比亚地盾中石英脉型金矿床成因类型可归为造山型,金矿化主要形成于造山阶段(魏浩等,2015)。Koka 金矿床则被认为是与泛非期努比亚地盾增生造山有关的造山型金矿床(向鹏等,2013)。通常造山型金矿床具有低盐度、富 CO_2 流体的特征(Groves et al., 1998; Goldfarb et al., 2001; 陈衍景等,2007),而对于成矿流体的来源争议仍然很大(Hagemann et al., 2003; Goldfarb, 2004),鉴于成矿流体富含 CO_2 、低盐度、富还原性气体以及富重氢与重氧等特征,因此多数学者倾向于认为成矿流体来自深部地壳变质流体(Groves et al., 2003; Goldfarb et al.,

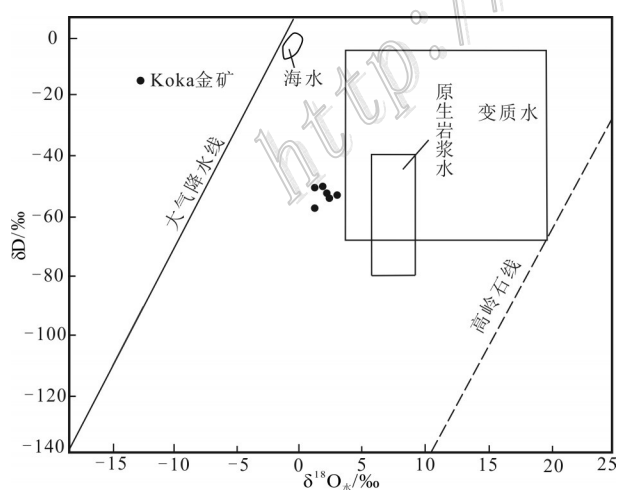


图 7 Koka 金矿床成矿流体 δD 与 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 同位素投影图
(底图据 Taylor, 1979)

Fig.7 Plot of δD versus $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ values of ore-forming fluid in Koka gold deposit (base map after Taylor, 1979)

2005)。Koka金矿床成矿流体 CO_2 含量高,盐度较低,与典型造山型金矿床流体特征类似,但 $\delta^{18}\text{O}$ 含量低于典型变质流体特征(一般为10‰~20‰),这可能是由于流体来源、运移通道的岩石地球化学性质不同,以及地表大气降水循环到深部与成矿流体混合等因素都可能使氧同位素值降低,如前寒武成矿流体 $\delta^{18}\text{O}$ 介于6‰~11‰之间(McCuaig et al., 1998),西澳Yilgarn金成矿省 $\delta^{18}\text{O}$ 值约为3‰~4‰(Hagemann et al., 1992)。此外,位于苏丹东北部,产于努比亚地盾新元古代变质岩系中的哈马迪金矿床与Koka金矿床具有相似的成矿地质特征,其被认为是受剪切带控制的变质热液造山型金矿床(李辉等,2012;徐九华等,2015),并且该矿床成矿流体中同样也存在大量的富 CO_2 流体包裹体,同类型包裹体在努比亚地盾北部埃及的Um Egat金矿和Dungash金矿也有大量出现(Zoheir et al., 2008),这类包裹体进一步说明了金矿床的形成与区域变质过程中产生的高密度 CO_2 流体有关(徐九华等,2015)。因此,Koka金矿床成矿流体主体来源于变质流体,低盐度的大气降水也可能参与其中。

5.2 矿床成矿机制探讨

目前认为造山型金矿床金的沉淀机制常见的有硫化作用、成矿流体相分离以及压力骤降等,其他还有如流体混合、酸化作用等机制(Goldfarb et al., 2005)。大量金的沉淀富集与成矿流体的物理化学条件的变化有关。Koka金矿床成矿流体中发育大量的富 CO_2 包裹体,通常与 CO_2 - H_2O 型包裹体密切共生, CO_2 - H_2O 型包裹体的 CO_2 气相分数变化范围很大(15%~80%),表明了它们可能是由流体的不混溶作用形成。 CO_2 - H_2O 型包裹体的盐度范围变化较大($w(\text{NaCl}_{\text{eq}})=2.96\%\sim 8.51\%$),与共生的水包裹体具有相似的盐度范围,说明它们两者是相关的。与水包裹体相比, CO_2 - H_2O 型流体包裹体通常显示出更高的均一温度,这通常与流体的不混溶有关(Roedder, 1984)。流体的不混溶使得初始的 CO_2 - H_2O 流体的发生相分离,形成了密度较高的富 CO_2 型包裹体,这类包裹体很可能代表了金矿化时期的原始流体(Chi et al., 2006)。对于造山型金矿床而言,成矿流体一般为 NaCl - H_2O - CO_2 体系,金通常以 $\text{Au}(\text{HS})_2$ 形式迁移(Ridley et al., 2000; Phillips et al., 2010),通过 CO_2 - H_2O 的不混溶,可以破坏成矿流体的相平衡,导致流体中金属络合物发生分解并促使金的沉淀(Coulibaly et al., 2008;唐攀等,2017)。

Koka金矿的形成与泛非努比亚地盾增生造山

有关,金矿体主要受剪切构造控制(向鹏等,2013),区域变质过程中产生的富 CO_2 的变质流体,在沿区域剪切带构造带向上运移的过程中,不断有浅部大气降水等流体的混入,并活化、萃取了大量成矿物质,由于压力的下降,原始 CO_2 - H_2O 流体中 CO_2 的溶解度降低, CO_2 与水溶液不混溶作用,导致相分离,产生的大量富 CO_2 流体与水,Koka花岗岩强烈的绢云母化蚀变使得流体中的水被大量消耗, CO_2 浓度相对增加,流体氧逸度相对升高,pH相对降低,使得载金络合物失稳,造成金的大量沉淀,同时,大量的富 CO_2 流体被捕获在石英脉中。

6 结 论

(1) Koka金矿床成矿流体包裹体主要由大量的富 CO_2 包裹体、 CO_2 - H_2O 包裹体及少量的水包裹体组成。成矿流体总体上具有富 CO_2 、中低温(210~360℃)、中低盐度($w(\text{NaCl}_{\text{eq}})=2.24\%\sim 8.51\%$)的特征,密度介于0.597~0.969 g/cm³,其中,富 CO_2 包裹体捕获的最小P-T条件为260~360℃、100~270 MPa。

(2) 流体包裹体成分研究表明,流体中阳离子主要为 Na^+ 与少量 K^+ ,阴离子为 Cl^- 与少量 SO_4^{2-} ,气相成分主要为 CO_2 与 H_2O ,基本不含其他气体组分,流体为 NaCl - H_2O - CO_2 体系。

(3) Koka金矿床以富含富 CO_2 型包裹体为特征,成矿流体的 δD 范围为-57‰~-50.1‰, $\delta^{18}\text{O}$ 水范围为1.4‰~3.2‰,结合区域典型造山型矿床成矿流体特征研究结果,认为Koka金矿床成矿流体主要来源于变质流体,并伴有大气降水的混入。

(4) 成矿流体中 CO_2 - H_2O 包裹体气相分数变化范围很大(15%~80%),且盐度范围变化也比较大,与之共生的 H_2O 包裹体具有相似的盐度以及较低的均一温度,表明初始的 CO_2 - H_2O 型流体发生了不混溶作用,成矿流体的相分离是Koka金矿床金的主要沉淀机制。

志 谢 野外工作得到了厄立特里亚Koka金矿高级地质工程师Yosief Tadesse的大力支持与帮助。同时,衷心感谢审稿专家提出的宝贵修改意见。

References

- Andersson U B, Ghebreab W and Teklay M. 2006. Crustal evolution and metamorphism in east-central Eritrea, South-East Arabian-Nu-

- bian Shield[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 44:45-65.
- Clayton J and Tretiak D N. 1972. Amine-citrate buffers for pH control in starch gel electrophoresis[J]. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 29(8): 1169-1172.
- Cao I, Duan Q F, Peng S G and Zhou Y. 2015. Characteristics of fluid inclusions in the Chanziping gold deposit in western Hunan province and their geological implications[J]. *Geology and Exploration*, 51(2): 212-224(in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Ni P, Fan H R, Prajno F, Lai Y, Su W C and Zhang H. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2085-2108(in Chinese with English abstract).
- Chi G X, Dubé B, Williamson K and Williams-Jones A E. 2006. Formation of the Campbell-Red Lake gold deposit by H₂O-poor, CO₂-dominated fluids[J]. *Mineralium Deposita*, 40(6-7):726-741.
- Coulilaly Y, Boiron M C, Cathelineau M and Kouamelan A N. 2008. Fluid immiscibility and gold deposition in the Birimian quartz veins of the Angovia deposit[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 50(2-4): 234-254.
- Dean C, David L and David G. 2010. Technical report on the Koka gold project, Eritea[R]. Chalice Gold Mines Limied.1-111.
- Ghebreab W, Reinhard O G and Semere S. 2009. Structural setting of Neoproterozoic mineralization, Asmara district, Eritrea[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 55(5): 219-35.
- Goldfarb G J, Groves D I and Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 18: 12-75.
- Goldfarb R J. 2004. The late Cretaceous Donlin Creek gold deposit, southwestern Alaska: Controls on epizonal ore formation[J]. *Econ. Geol.*, 99(4): 643-671.
- Goldfarb R, Baker T, Dube B, Grove D I, Hart C J R and Gosselin P. 2005. Distribution, character and genesis of gold deposits in metamorphic terranes[C]. In: *Economic geology 100th Anniversary volume*. Littleton: Society of Economic Geologists. 7-450.
- Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, Hagemann S G and Robert F. 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types[J]. *Ore Geology Reviews*, 13(1): 7-27.
- Groves D I, Goldfarb R J and Robert F. 2003. Gold deposits in metamorphic belts: Overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance[J]. *Econ. Geol.*, 98(1): 1-29.
- Hagemann S G, Groves D I, Ridley J R and Vearncombe J R. 1992. The Archean lode gold deposits at Wiluna, Western-Australia-High-Level Brittle-Style mineralization in a strike-slip Regime[J]. *Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 87(4): 1022-1053.
- Hagemann S G and Lüders V. 2003. *P-T-X* conditions of hydrothermal fluids and precipitation mechanism of stibnite-gold mineralization at the Wiluna lode-gold deposits, western Australia: Conventional and infrared microthermometric constraints[J]. *Mineralium Deposita*, 38(8): 936-952.
- Hall D L, Sterner S M and Bodnar R J. 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions[J]. *Econ. Geol.*, 83: 197-202.
- Johnson P R, Zoheir B A, Ghebreab W, Stern R J, Barrie C T and Hamer R D. 2017. Gold-bearing volcanogenic massive sulfides and orogenic-gold deposits in the Nubian Shield[J]. *South African Journal of Geology*, 120(1): 63-76.
- Kröner A, Eyal M and Eyal Y. 1990. Early Pan-African evolution of the basement around Elat, Israel and the Sinai Peninsula revealed by single-zircon evaporation dating and implication for crustal accretion rates[J]. *Geology*, 18(6): 545-548.
- Li H and Hu J Y. 2012. Geochemical characteristics and genesis of Hamadi gold deposit in Sudan[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 27(2): 222-226 (in Chinese with English abstract)
- McCuaig C T, Kerrich R. 1998. *P-T-t*-deformation-fluid characteristics of lode gold deposits: Evidence from alteration systematics[J]. *Ore Geology Reviews*, 12(6): 381-453.
- Phillips G N and Powell R. 2010. Formation of gold deposits: A metamorphic devolatilization model[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 28(6):689-718.
- Ridley J R and Diamond L W. 2000. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models[J]. *Reviews in Economic Geology*, 13:141-162.
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions. Review in mineralogy 12, Mineralogical Society of America[M]. Mineral Society of America, 12: 1-644.
- Shepherd T J, Rankin A H and Alderton D H M. 1985. A practical guide to fluid inclusion studies[M]. Blackie: Chapman & Hall. 1-239.
- Stern R J. 1994. Neoproterozoic (900-550 Ma) arc assembly and continental collision in the east Africa orogen : implications for the consolidation of Gondwanaland[J]. *Annual Review of Earth &*

- Planetary Sciences, 22: 319-351.
- Tang P, Chen Y C, Tang J X, Zheng W B, Leng Q F and Lin B. 2017. A study of fluid inclusions from Lakang'e porphyry Cu-Mo deposit in Tibet[J]. Mineral Deposits, 36(1): 68-82(in Chinese with English abstract).
- Taylor H P. 1979. Oxygen and hydrogen isotope relationships[A]. In: Barnes H L, ed. Geochemistry of hydrothermal ore deposits[C]. New York: John Wiley and Sons. 236-277.
- Teklay M. 1997. Petrology, geochemistry and geochronology of Neoproterozoic magmatic arc rocks from Eritrea: Implications for crustal evolution in the southern Nubian Shield[M]. Department of Mines, Eritrea Memoir no.1, 1-125.
- Teklay M. 2006. Neoproterozoic arc-back-arc system analog to modern arc-back-arc systems: Evidence from tholeiite-boninite association, serpentinite mudflows and across-arc geochemical trends in Eritrea, southern Arabian-Nubian shield[J]. Precambrian Research, 145: 81-92.
- Van den Kerkhof A and Thiéry R. 2001. Carbonic inclusions[J]. Lithos, 55(1-4): 49-68.
- Wei H, Xu J H, Wang J X, Zhang G R, Zhang H and Xu Q Y. 2015. Tectonic evolution and gold mineralization in the Arabian Nubian Shield (ANS), northeastern Africa[J]. Geology and Exploration, 51(2): 383-394(in Chinese with English abstract).
- Winter J D. 2001. An introduction to igneous and metamorphic petrology[M]. New Jersey: Prentice Hall.
- Woldehaimanot B. 2000. Tectonic setting and geochemical characteristics of Neoproterozoic volcanics and granitoids from the Adobha Belt, northern Eritrea[J]. Journal of African Earth Sciences, 30(4): 817-831.
- Xiang P and Wang J X. 2013. Ore geology character and type of Koka gold deposit, Eritrea[J]. Acta Mineralogica Sinica, (s2): 1067-1068 (in Chinese with English abstract).
- Xu J H, Wang J X, Xiang P, Li Y H, Xiao X, Zhang H and Cheng X H. 2015. Extremely CO₂-rich fluid inclusions in an orogenic gold deposit: Hamadi gold deposit of Sudan[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(4): 1040-1048(in Chinese with English abstract).
- Zeng G P, Yao S Z, He M C, Xiong S F and Chen B. 2016. Ore forming fluid and metallogenic mechanism of Tianwangtaishan gold deposit, Heilongjiang Province[J]. Mineral Deposits, 35(1): 85-102(in Chinese with English abstract).
- Zhang D H and Liu W. 1998. Fluid inclusion compositions of Au deposits and their genesis significance: The discussion on the origin of ore-forming fluid of Shibangou gold deposit, Xixia, Henan Province[J]. Geological Science and Technology Information, 17 (Supp.): 67-71(in Chinese with English abstract).
- Zhao X Z, Duan H C and Wang F X. 2012. General characteristics of geology and mineral resources in Eritrea and exploration progress[J]. Mineral Exploration, 5(3): 707-714(in Chinese with English abstract).
- Zoheir B A, El-Shazly A K, Helba H, Khalil K I and Bodnar R J. 2008. Origin and evolution of the Um Egat and Dungash orogenic gold deposits, Egyptian eastern desert: Evidence from fluid inclusions in quartz[J]. Econ. Geol., 103(2): 405-424.

附中文参考文献

- 曹亮,段其发,彭三国,周云. 2015. 雪峰山铲子坪金矿床流体包裹体特征及地质意义[J]. 地质与勘探, 51(2): 212-224.
- 陈衍景,倪培,范洪瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. 岩石学报, 23(9): 2085-2108.
- 李辉, 胡建勇. 2012. 苏丹哈马迪金矿地球化学特征及成因探讨[J]. 地质找矿论丛, 27(2): 222-226.
- 唐攀, 陈敏川, 唐菊兴, 郑文宝, 冷秋锋, 林彬. 2017. 西藏拉抗俄斑岩铜钼矿床流体包裹体研究[J]. 矿床地质, 36(1): 68-82.
- 魏浩, 徐九华, 王建雄, 张国瑞, 张辉, 徐清扬. 2015. 非洲东北部阿拉伯-努比亚地盾(ANS)构造演化与金成矿作用[J]. 地质与勘探, 51(2): 383-394.
- 向鹏, 王建雄. 2013. 厄立特里亚 Koka 金矿地质特征及矿床类型[J]. 矿物学报, (s2): 1067-1068.
- 徐九华, 王建雄, 向鹏, 李闫华, 肖星, 张辉, 成曦晖. 2015. 极富 CO₂ 流体的造山型金矿: 苏丹哈马迪金矿[J]. 岩石学报, 31(4): 1040-1048.
- 曾国平, 姚书振, 何谋春, 熊索菲, 陈斌. 2016. 黑龙江省呼玛县天望台山金矿床成矿流体特征与成矿机制研究[J]. 矿床地质, 35(1): 85-102.
- 张德会, 刘伟. 1998. 流体包裹体成分与金矿床成矿流体来源——以河南西峡石板沟金矿床为例[J]. 地质科技情报, (S1): 68-72.
- 赵孝忠, 段焕春, 王凤仙. 2012. 厄立特里亚地质矿产概况及勘查新进展. 矿产勘查, 5(3): 707-714.