



引文格式: 姜海, 莫江平. 哈萨克斯坦库尕德里金矿床流体包裹体特征及矿床成因研究[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 196–208. DOI: 10.12401/j.nwg.2023182

Citation: JIANG Hai, MO Jiangping. Fluid Inclusion Studies and the Genesis of the Kugadri Gold Deposit, Kazakhstan[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 196–208. DOI: 10.12401/j.nwg.2023182

哈萨克斯坦库尕德里金矿床流体包裹体 特征及矿床成因研究

姜海^{1,2,3}, 莫江平^{1,2,3,*}

(1. 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 广西 桂林 541004; 2. 隐伏金属矿床探测工程技术研究中心, 广西 桂林 541004;
3. 成矿机理与矿产勘查行业重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 库尕德里金矿床位于哈萨克斯坦楚伊犁-天山成矿省楚伊犁成矿带之楚河-肯得克塔斯金、铅、锌、铜、钼成矿亚带, 大地构造位置属于中亚造山带之哈萨克斯坦-准噶尔板块的穆云库姆-克齐尔库姆-伊犁微板块之肯得克塔斯地块。库尕德里金矿床为该区重要的大型矿床之一, 该矿床成矿流体的研究, 对深化矿床成因认识、区域成矿规律研究和找矿勘查工作有重要的指导意义。笔者在研究区地质调查和矿床地质特征研究的基础上, 开展成矿阶段含石英脉流体包裹体岩相学、显微测温 and 激光拉曼分析。结果表明: 库尕德里金矿流体包裹体有 C、W、S 等 3 种类型; C 型包裹体完全均一温度为 278~421 °C, 盐度为 0~13.9 wt%NaCl_{eqv}; W 型包裹体完全均一温度为 119~378 °C, 盐度为 1.1~22.9 wt%NaCl_{eqv}; S 型包裹体完全均一温度为 136~327 °C, 盐度为 29.1~31.0 wt%NaCl_{eqv}。成矿压力和深度估算结果表明: 成矿压力为 95~200 MPa, 成矿深度约为 2~5 km, 成矿温度为 290~380 °C。结合矿床地质特征认为, 库尕德里金矿成矿流体具有富 CO₂、中低盐度的变质流体特征, 矿床成因为造山型金矿。

关键词: 流体包裹体; 库尕德里金矿; 造山型金矿; 哈萨克斯坦

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)03-0196-13

Fluid Inclusion Studies and the Genesis of the Kugadri Gold Deposit, Kazakhstan

JIANG Hai^{1,2,3}, MO Jiangping^{1,2,3,*}

(1. China Nonferrous Guilin Research Institute of Geology for Mineral Resources Co., Ltd., Guilin 541004, Guangxi, China; 2. Hidden Metal Deposit Exploration Engineering Technology Research Center, Guilin 541004, Guangxi, China; 3. Key Laboratory of Mineralization Mechanism and Mineral Exploration Industry, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: The Kugadri gold deposit is located in the Chuhe-Kendektas gold, lead, zinc, copper and molybdenum metallogenic subzone of the Chuhe-Kendektas gold, lead, zinc, copper and molybdenum metallogenic sub-

收稿日期: 2022-01-13; 修回日期: 2023-08-06; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 十五国家科技支撑计划重点项目“中国新疆和中亚邻国矿产资源对比研究与高效勘查技术集成”课题三“楚伊犁-西天山成矿带整体研究与勘查技术集成”(2007BAB25B03)资助。

作者简介: 姜海(1985-), 男, 工程师, 主要从事地质科研与勘查工作。E-mail: jianghai2617@163.com。

* 通讯作者: 莫江平(1962-), 男, 正高级工程师, 主要从事地质科研与勘查工作。E-mail: 787848235@qq.com。

zone of the Chuyili-Tianshan metallogenic province in Kazakhstan. The geotectonic location belongs to the Muyunkumu-Kezirkumu-Ili microplate of the Kazakhstan-Junggar plate in the Central Asian orogenic belt. The Kugadri gold deposit is one of the important large deposits in this area. The study of the ore-forming fluid of the deposit has important guiding significance for deepening the understanding of the genesis of the deposit, the study of the regional metallogenic regularity and the prospecting and exploration work. Based on the geological survey of the mining area and the study of the geological characteristics of the deposit, this paper carried out the petrography, microthermometry and laser Raman analysis of ore-bearing quartz vein fluid inclusions in the metallogenic stage. The results show that there are three types of fluid inclusions in Kugadri gold deposit: C, W and S; the complete homogenization temperature of C-type inclusions is 278~421 °C, and the salinity is 0~13.9 wt% NaCleqv. The complete homogenization temperature of W-type inclusions is 119~378 °C, and the salinity is 1.1~22.9 wt% NaCleqv. The complete homogenization temperature of S-type inclusions is 136~327 °C, and the salinity is 29.1~31.0 wt% NaCleqv. The estimation of metallogenic pressure and depth shows that the metallogenic pressure is 95~200 MPa, the metallogenic depth is about 2~5 km, and the metallogenic temperature is 290~380 °C. Combined with the geological characteristics of the deposit, it is considered that the ore-forming fluid of the Kugadri gold deposit has the characteristics of CO₂-rich, medium-low salinity metamorphic fluid, and the genesis of the deposit is orogenic gold deposit.

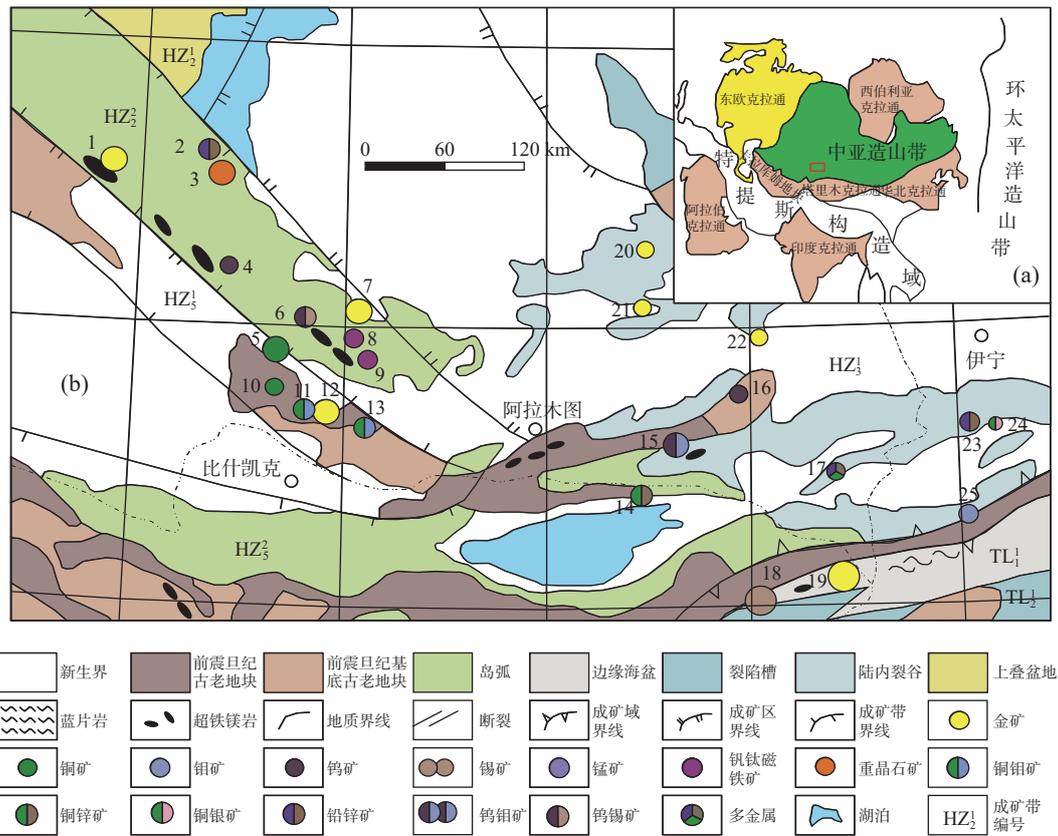
Keywords: fluid inclusion; Kugadri gold deposit; orogenic gold deposit; Kazakhstan

中亚造山带是一个庞大的造山拼接区域,它横跨于东欧(波罗地)克拉通、西伯利亚克拉通、塔里木克拉通与华北克拉通之间(肖文交等, 2019)(图 1a)。作为全球 3 个主要的成矿域之一,其覆盖范围包括哈萨克斯坦、塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦、中国的西北部地区、蒙古国及俄罗斯贝加尔湖至中国东北(高俊等, 2019)。地壳生长过程中的复杂性和独特性,使得该成矿域的地质构造格局复杂多样、矿产资源丰富(朱永峰, 2014; 黄杰等, 2018),构成世界上引人注目的金成矿带,多数学者将其称为“亚洲金腰带”,其中包含多种类型的金矿床。例如,浅成低温的热液型金矿、斑岩型金矿以及造山型金矿等(薛春纪等, 2014; 肖文交等, 2019)。中亚成矿域内产出一系列金矿床,典型的造山型金矿床代表有穆龙套金矿(Au 6 317 t)、卡尔马吉尔金矿(Au 1 400 t)、库姆托尔金矿(Au 1 100 t)等;典型的斑岩型金矿床有卡尔马吉尔金矿(Au 1 400 t)、Dal'neye(Au 400 t)、Koksai(Au 37 t)、Beskauga(Au 102 t);典型的浅成低温热液型金矿床有 Sekisovskoye(Au 108 t)(薛春纪, 2014, 2016, 2020; 吕鹏瑞, 2022)。库尕德里金矿床地理位置位于哈萨克斯坦东南部,东距阿拉木图市 170 km。从成矿区带看,库尕德里金矿床位于哈萨克斯坦楚伊犁-天山成矿省楚伊犁成矿带之楚河-肯得克塔斯金、铅、锌、铜、钼成矿亚带(图 1b)。

前人在研究区内开展了较为系统的勘查工作,初步查明矿床规模为大型,但对矿床成因尚未开展细致研究,矿床成因尚无定论。笔者在进行野外调查和样品采集的基础上,对库尕德里金矿床中两个阶段石英脉的流体包裹体进行了显微测温以及激光拉曼光谱分析,旨在揭示矿床的流体性质,并探讨成矿流体的演化规律和矿床形成原因。

1 区域地质背景

库尕德里金矿床构造位置属于中亚造山带哈萨克斯坦-准噶尔板块的穆云库姆-克齐尔库姆-伊犁微板块的肯得克塔斯地块(王广瑞, 1994; 何国琦等, 2006)。地块呈 NW 向展布,向西与楚河地块相连;北东侧与札拉伊尔-奈曼早古生代岛弧为邻;南侧为吉尔吉斯-昆格早古生代岛弧,肯得克塔斯地块内出露的最古老地层为古元古界萨雷布拉克组变粒岩、蓝晶石片麻岩和角闪岩相的深变质岩系,形成了地块的结晶基底。震旦系江布尔组为石英-长石砂岩,不整合覆于下伏地层之上。缺失寒武系。下奥陶统阿加拉塔斯组由细粒砂岩、粉砂岩、泥质页岩组成,含碳酸盐岩夹层和透镜体;中奥陶统谢尔巴克特组以石英砂岩、凝灰砂岩和泥质、钙质页岩组成,含砾岩和碳酸盐岩夹层或透镜体。缺失志留系。泥盆纪的火山岩-



1.阿克巴卡依金矿床; 2.巴鲁尔铅锌矿床; 3.奇干纳克重晶石矿床; 4.萨雷布拉克钨矿床; 5.沙德库里铜矿床; 6.库亚孜拜铅锌矿床; 7.卡巴雷金(铜)矿床; 8.蒂姆莱钨钨铁矿床; 9.阿克达拉钨钨铁矿床; 10.沙台尔科里钨矿床; 11.坎得克塔斯铜矿床; 12.库尔德里金矿床; 13.热依桑铜矿床; 14.齐纳含内赛铜锌矿床; 15.尤别列佐姆钨钨矿床; 16.包谷提钨矿床; 17.图尤克多金属矿床; 18.萨雷贾兹锡矿床; 19.库姆托尔金矿床; 20.达拉拜金矿床; 21.阿尔哈尔雷金矿床; 22.乌仁科布拉克金矿床; 23.阿尔恰勒铅锌矿床; 24.切特木斯铜钨矿床; 25.加曼台锰矿床; HZ₂. 萨雷沙甘铜、钨成矿带; HZ₂. 布鲁塔斯-热利套铅、锌、钨、锡成矿带; HZ₃. 巴尔喀什-伊犁成矿区: HZ₃. 伊犁铅、锌多金属成矿带; HZ₃. 楚河-伊赛克成矿区: HZ₃. 楚河-肯得克塔斯金、铅、锌、铜、钨成矿带; HZ₃. 伊赛克钨、锡、铅、锌多金属成矿带; TL₁. 哈尔克山金、锑成矿带; TL₂. 塔里木北缘成矿区: TL₂. 木扎尔特铜、铅、锌多金属成矿带

图1 哈萨克斯坦楚伊犁-北东天山地区地质及矿产简图(据肖文交, 2019 修改)

Fig. 1 Geological and mineral map of Chuili-Northeast Tianshan area, Kazakhstan

陆源碎屑岩直接不整合在奥陶纪地层之上, 火山岩以中性岩为主, 在地块南部酸性岩和碎屑岩明显增加。石炭纪酸性火山岩发育, 主要充填在山间或上叠盆地中。地块内侵入岩发育, 主要为中—晚奥陶世的花岗闪长岩, 其次为早—中泥盆世闪长岩、石英闪长岩和花岗闪长岩。此外, 还有少量二叠纪钾长花岗岩和白岗岩。

2 矿床地质特征

库尔德里金矿床所在的楚伊犁成矿带整体呈NNW向条带状展布, 长约为700 km, 宽约为100 km, 面积约为11万 km²。基底为元古宇, 盖层为早古生代

岛弧沉积岩、侵入岩以及晚古生代碰撞造山环境下的侵入岩, 带内构造、岩浆强烈。带内具工业意义的矿种是金、铁、铬、铜、铅、锌、钨、锡等, 从成矿时代看, 主要是加里东期(占72%), 其次为华力西期(占19%)。根据初步统计数据, 该地区共发现了56个矿床、190个矿点以及近2000个矿化点。

研究区出露地层为奥陶系, 主要分布于东部和南部, 岩性为石英砂岩、粉砂岩和板岩。早泥盆世中粒花岗闪长斑岩和少量闪长岩呈NE向岩脉侵入于该地层中。研究区的西南部为早泥盆世(海西期)石英闪长斑岩和少量辉长岩脉, 石英闪长斑岩出露面积约为0.15 km², 与奥陶系为侵入接触。金矿化主要产于石英闪长斑岩与奥陶系接触带的近岩体一侧(图2)。

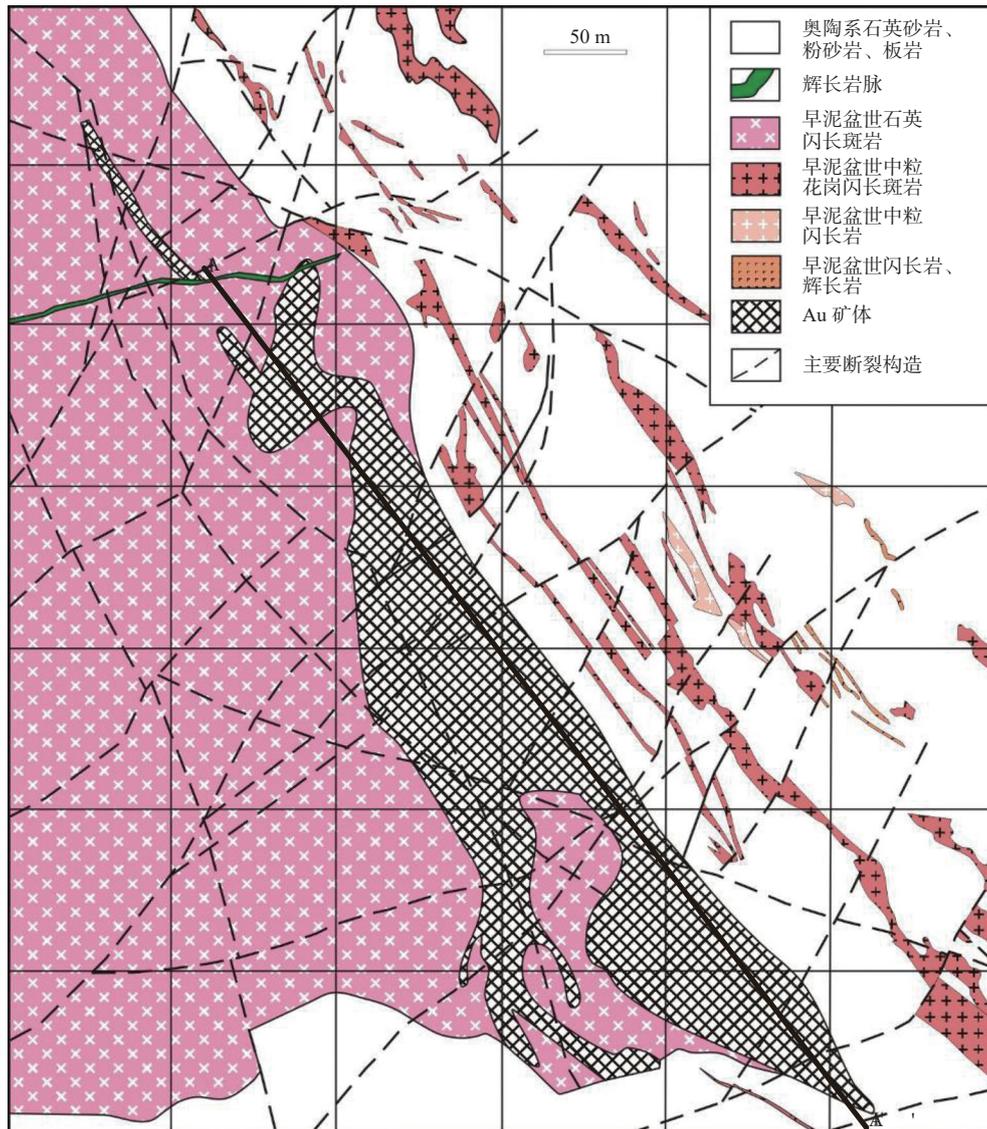


图2 哈萨克斯坦库兹德里金矿床地质图

Fig. 2 Geological map of the Kugadri gold deposit, Kazakhstan

研究区断裂构造发育,走向呈现出明显NW向和NE向特征,其次是NEE向。

研究区金矿化带长约为1000 m,宽为50~150 m,最大延深约为350 m,总体呈NW向延伸(图2、图3)。金矿体主要沿NW向断裂带分布。断裂带中充填有石英细脉(图4d),脉旁附近岩石也有矿化和蚀变(图4a、图4b)。矿体与围岩石英闪长斑岩、奥陶系没有清晰的边界,要依靠化验分析结果圈定矿体(图4c)。金呈自然金嵌布于石英脉或黄铁矿、黄铜矿的裂隙中。Au品位一般为1~5 g/t,高者达100 g/t。重要的围岩蚀变包括硅化、绢云母化、钾长石化以及黄铁矿化。金属硫化物主要为黄铁矿和黄铜矿,呈星点状散布于石英脉和脉旁的蚀变岩中。黄铁矿

含量约为3%~5%,粒径为1~3 mm,他形粒状,部分已褐铁矿化;黄铜矿含量约为1%~3%,粒径为1~2 mm,他形不规则状,部分已孔雀石化(图4c、图4d)。

3 流体包裹体研究

3.1 样品采集

本次流体包裹体样品均来自于石英脉型矿石。测试包裹体的石英与黄铜矿、黄铁矿共生。Q1为粗粒石英,晶体较大,透明度好,可见波状消光;Q2为细粒石英,透明度低于Q1。本次共计采集样品4件,从中选取了两件具备较高典型代表性的包裹体样品开展

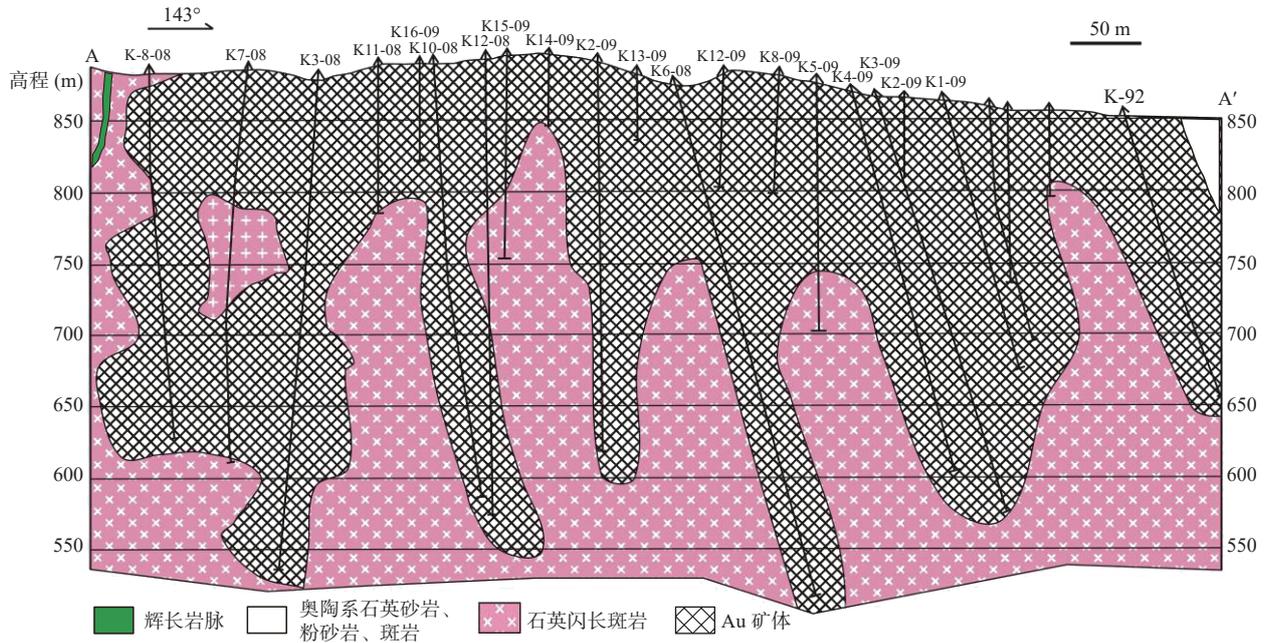
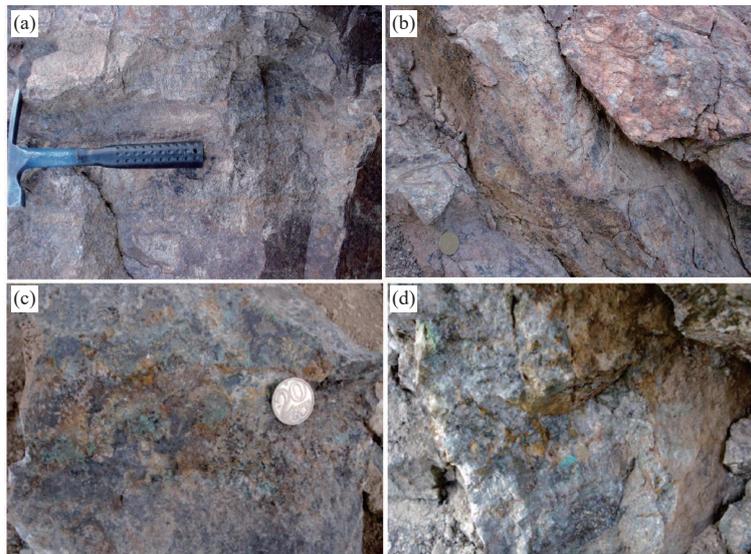


图3 哈萨克斯坦库杂德里金矿床4号矿体(南部)A-A'剖面图

Fig. 3 A-A' profile of ore body 4 (south) of the Kugadri gold deposit, Kazakhstan



a.断裂带中的硅化褐铁矿化石英闪长斑岩; b.硅化、钾化和褐铁矿化断裂破碎带; c.含孔雀石、黄铜矿、黄铁矿、褐铁矿含蚀变岩型矿石; d.含孔雀石、黄铜矿、黄铁矿含金石英脉型矿石

图4 哈萨克斯坦库杂德里金矿床矿石照片

Fig. 4 Ore photos of the Kugadri gold deposit in Kazakhstan

显微测温 and 激光拉曼光谱分析。

3.2 样品研究方法

在中国科学院广州地球化学研究所成矿动力学重点实验室完成了流体包裹体的显微测温。测试仪器为 LinkamMDS600 型冷热台, 测定温度范围为 $-196\sim 550\text{ }^{\circ}\text{C}$, 测量精度在 $-100\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上为 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。测试的升温速率为 $0.2\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,

含 CO_2 三相包裹体在其相变温度(如固态 CO_2 和笼合物熔化温度)附近升温速率降低为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。对于盐不饱和的水溶液包裹体, 基于测得的冰点温度, 利用 Bodnar(1995)提供的方程获得流体的盐度; 对于含子矿物多相包裹体, 其盐度由子矿物熔化温度使用 Hall等(1988)提供的方程确定。利用前人经验公式获得气液两相包裹体的流体密度(刘斌, 2001; 孙非非等,

2023); 由于含子矿物多相包裹体的显微测温困难, 频率直方图上的频率不能代表其在矿床中的丰度。

在中山大学测试中心完成了包裹体激光拉曼光谱分析。仪器为 RenishawSystem1000 型激光拉曼光谱仪, 使用 514 nm 氩离子激光器, 输出功率为 5 mW, 激光束斑大小约为 1 μm , 光谱扫描范围为 850~4 500 cm^{-1} , 狭缝宽度为 20 μm , 积分时间为 150 s, 拉曼峰位移精度为 $\pm 1 \text{ cm}^{-1}$, 成分相对含量最低检测限为 0.1%。

3.3 流体包裹体岩相学及显微测温

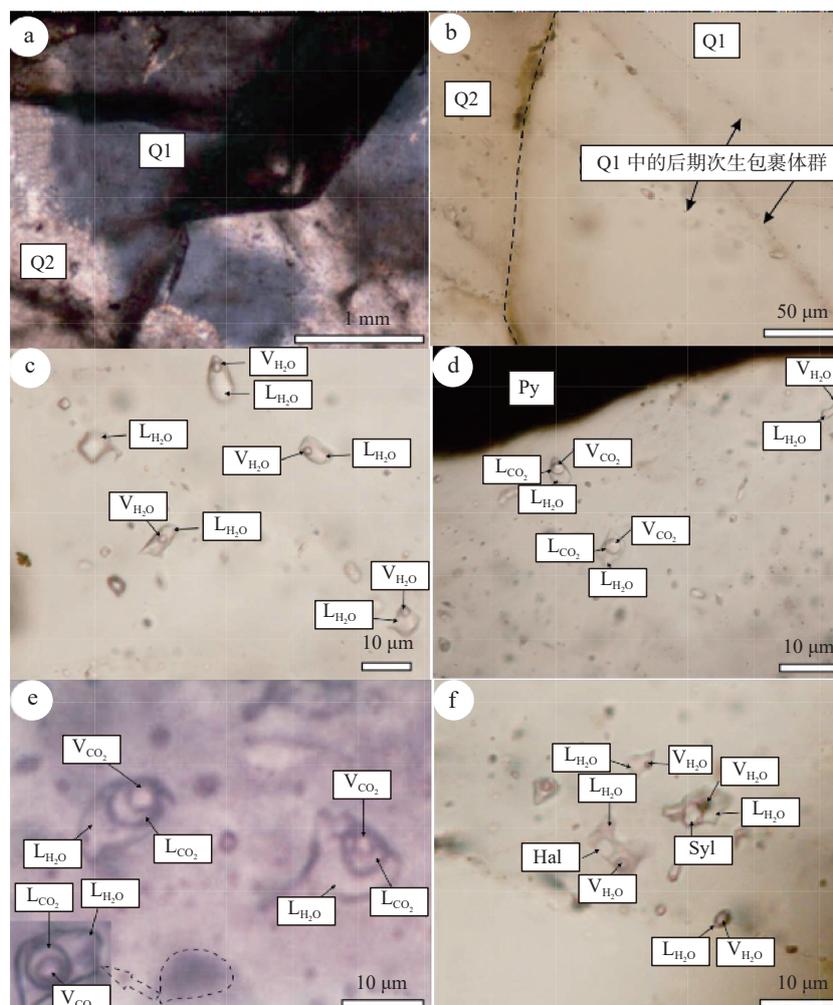
3.3.1 流体包裹体类型及特征

根据流体包裹体成分和室温下(21 $^{\circ}\text{C}$)的相态特征、包裹体加热过程中的相变和激光拉曼光谱分析结

果(陈衍景等, 2007; 卢焕章等, 2018), 本次研究将库兹德里金矿床成矿阶段石英中的包裹体分为 W、C、S 等 3 种主要类型。

通过流体包裹体的显微观测, 在 Q1 型石英脉中的硫化物附近发现大量的 CO_2 三相包裹体, 同时也发育少量两相水溶液包裹体、纯 CO_2 包裹体, 并见许多次生富水溶液包裹体(尺寸相对较小)穿插 Q₁(图 5a、图 5b), 而在 Q₂ 型石英脉中主要发育富液相包裹体和含子矿物多相包裹体。

(1) 气液富液相水溶液包裹体(W 型): 室温下(25 $^{\circ}\text{C} \pm$)由液相 H_2O 及气相 H_2O 组成, 约占包裹体总数的 30%。大小为 7~20 μm , 多数约为 10 μm , 气相占总体积的 5%~10%, 包裹体形态有椭圆形、四边形、



a. Q₁ 周围为细粒石英 Q₂, Q₁ 中可见硫化物; b. Q₁ 被 Q₂ 及后期的次生流体包裹体群穿插; c. Q₂ 中的 W 型包裹体; d 和 e. Q₁ 中 C、W 型包裹体; f. Q₁ 中共存的 W、S 型包裹体; V_{CO₂} 气相 CO_2 ; L_{CO₂} 液相 CO_2 ; V_{H₂O} 气相 H_2O ; L_{H₂O} 液相 H_2O ; Py. 黄铁矿; Hal. 石盐; Syl. 钾盐

图5 库兹德里金矿床岩相学及流体包裹体照片

Fig. 5 Petrography and fluid inclusion photos of the Kugadri gold deposit

长条形、负晶形及不规则多边形,均为富液相包裹体,主要发育于Q2中(图5c)。

(2)含CO₂三相包裹体(C型):室温下由液相水、液相CO₂和气相CO₂组成,此类包裹体约占包裹体总数的65%,其形状以椭圆形和不规则的多边形为主,大小约为5~18 μm。根据包裹体成分可以将其划分为CI亚型与Cv亚型两种子类别。CI亚型为富液相包裹体,升温时向液相均一,CO₂相占总体积的10%~50%,气相CO₂占CO₂相总体积的5%~80%,部分均一时向液相和气相均有,CI型约占该类型的70%;Cv升温时向气相均一,CO₂相占总体积的50%~80%,气相CO₂占CO₂相总体积的10%~80%,部分均一时向液相和气相均有。该类型包裹体在Q1中大量发育(图5d、图5e)。

(3)含子矿物多相包裹体(S型):这种类型的包裹体大约占总包裹体数量的5%。其中,有一到多个子矿物存在,一般是立方或正方形的石盐、圆状的钾盐以及方形的方解石(图5f)。

3.3.2 流体包裹体显微测温结果

Q1脉中主要发育C型包裹体,另有少量W型见表1。C型中有相当数量的包裹体在完全均一前就发生了爆裂,可见CO₂的含量很高(Burlinson, 1991; Mavrogenes et al., 1995; 范宏瑞等, 1998),CI亚类包裹体初熔温度为-59.7~-56.6 °C(图6),笼合物的融化温度为-6.5~9.4 °C;盐度为1.2~13.9 wt%NaCl_{eqv},平均为8.0 wt%NaCl_{eqv};部分均一温度为21.2~30.9 °C,完全均一温度为278~418 °C,主要为292~375 °C(图7);CO₂相密度为0.32~0.75 g/cm³,总密度为0.71~0.97 g/cm³;XCO₂为0.01~0.24,平均为0.13;XNaCl较低,为0~0.04,平均为0.02(图8)。Cv亚类初熔温度为-59.3~-56.6 °C(图6),笼合物的融化温度为1.9~10 °C,盐度为0~13.4 wt%NaCl_{eqv},平均为6.3 wt%NaCl_{eqv};部分均一温度为24.6~30.9 °C,完全均一温度为284~421 °C,主要为292~379 °C(图7a);CO₂相密度为0.28~0.67 g/cm³,总密度为0.53~0.86 g/cm³;XCO₂的含量为0.11~0.52,平均为0.23;XNaCl为0~0.04,平均为0.01(图8)。

表1 库尕德里金矿床显微测温结果及相关参数

Tab. 1 Microthermometry results and related parameters of the Kugadri gold deposit

阶段	类型	数量	大小 (μm)	v/tot.(%)	$\frac{\varphi(\text{CO}_2)}{\varphi(\text{CO}_2)_{\text{气}}}$ (%)	$T_{\text{m, cla}}$ (°C)	$T_{\text{m, ice}}$ (°C)	盐度 (wt%)	$T_{\text{h}}(\text{CO}_2)$ (°C)	T_{h} (°C)	ρ_{CO_2} (g/cm ³)	ρ_{Tot} (g/cm ³)
Q1	CI	79	6~20		10~50	-59.7~-56.6	1.4~9.4	1.2~13.9	21.2~30.9	278~418	0.32~0.75	0.71~0.97
					5~80							
	Cv	41	8~12		50~80	-59.3~-56.6	1.9~10	0~13.4	24.6~30.9	284~421	0.28~0.67	0.53~0.86
	W	14	6~12	10~45		-52.1~-39.2	-11.1~-0.6	1.1~15.1		298~378		0.64~0.87
Q2	W	45	5~20	5~50		-32.2~-25.6	-20.8~-0.9	1.6~22.9		119~294		0.78~1.09
	S	12	6~14	5~25				29.1~31.2		136~327		1.00~1.27

注: v/Tot.为气相充填度; $\varphi(\text{CO}_2)$ 为CO₂相占包裹体总体积的百分数; $\varphi(\text{CO}_2)_{\text{气}}$ 为气相CO₂占CO₂相总体积的百分数; $T_{\text{m, cla}}$ 为笼合物融化温度; $T_{\text{h}}(\text{CO}_2)$ 为CO₂部分均一温度; $T_{\text{m, ice}}$ 为冰点温度; T_{h} 为完全均一温度。

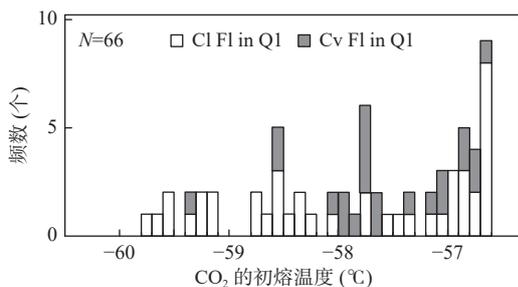
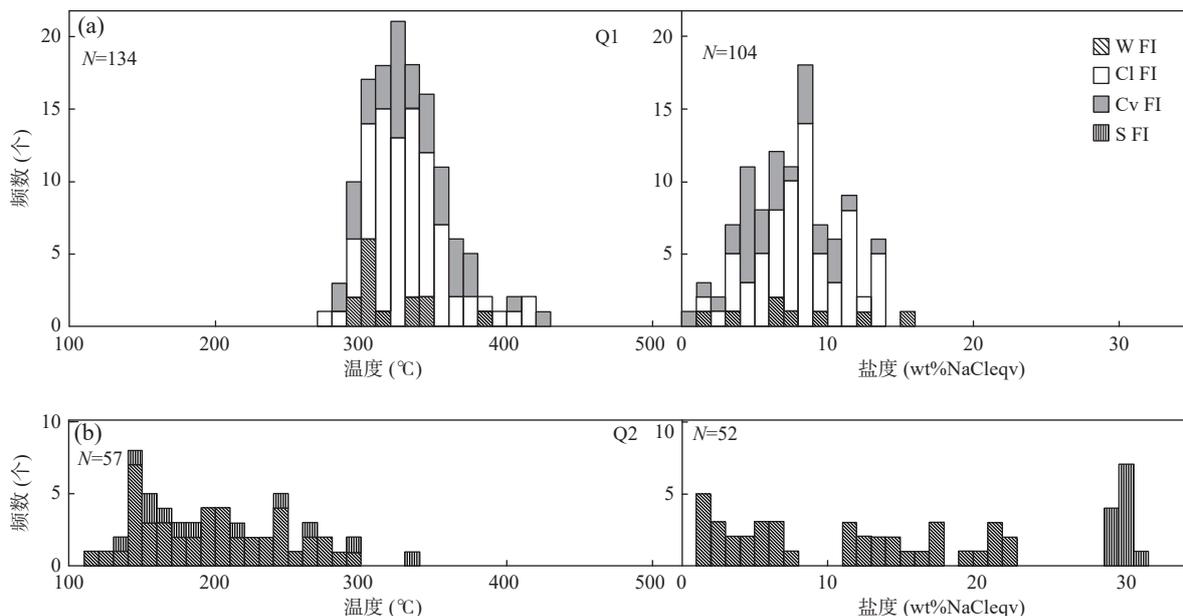


图6 库尕德里金矿床流体C型包裹体初熔温度直方图

Fig. 6 Initial melting temperature histogram of fluid C-type inclusions in Kugadri gold deposit

W型包裹体的初熔温度为-52~-39 °C,冰点温度为-11.1~-0.6 °C;盐度为1.1~15.1 wt%NaCl_{eqv},均一温度为298~378 °C;密度为0.64~0.87 g/cm³;XNaCl为0~0.05,平均为0.03(图7a、图8)。

Q2脉中发育W型包裹体和S型包裹体见表1。W型包裹体初熔温度为-32.2~-25.6 °C,冰点温度为-20.8~-0.9 °C;盐度为1.6~22.9 wt%NaCl_{eqv};个别W型包裹体初熔温度为3~9 °C,可见气相突然跳动,指示含有少量的CO₂,均一温度为119~294 °C,密度为0.78~1.09 g/cm³,XNaCl为0.01~0.08,平均为0.04



a. Q1-早阶段流体包裹体; b. Q2-晚阶段流体包裹体

图 7 库尕德里金矿床流体包裹体温度和盐度直方图

Fig. 7 Temperature and salinity histogram of fluid inclusions in Kugadri gold deposit

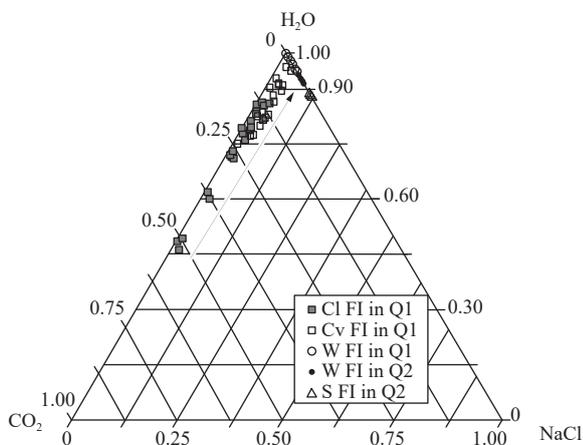


图 8 H₂O-CO₂-NaCl 体系三元相图

Fig. 8 Phase diagram of H₂O-CO₂-NaCl System

(图 7b、图 8)。

S 型包裹体子矿物熔化温度为 136~185 °C, 盐度为 29.1~31.0 wt%NaCl_{eqv}, 完全均一温度为 136~327 °C, 密度为 1.00~1.27 g/cm³, XNaCl 为 0.11~0.12, 平均为 0.12(图 7b、图 8)。

3.3.3 成矿压力和成矿深度估算

Roedder 等 (1980) 研究认为, 从均匀流体中捕获的包裹体的压力只能代表流体压力的下限, 需要进行压力校正; 但是当流体发生不混溶或沸腾作用时, 捕获的包裹体的均一压力可代表流体的形成压力, 无需校正。通过包裹体的岩相学及显微测温分析, 在含矿

石英脉(Q1)中存在 Cl、Cv 包裹体共存的包裹体组合, 且共存的各类包裹体的均一温度相近, 即为流体沸腾或不混溶作用形成的包裹体组合。因此, 利用共存的含 CO₂ 三相包裹体来计算压力, 所获得的压力可代表流体的形成压力。通过流体包裹体数据处理软件 Flincor 软件 (Brown, 1989; Brown et al., 1989) 提供的计算公式获得的均一压力如图 9 所示。

Cl 中可分为高压和低压两组包裹体: 高压组为富 CO₂ 液相(LCO₂)包裹体, 均一压力为 100~200 MPa, CO₂ 相密度为 0.52~0.75 g/cm³; 低压组为富 CO₂ 气相(VCO₂)包裹体, 均一压力为 35~90 MPa, CO₂ 相密度为 0.33~0.52 g/cm³。

Cv 中可分为高压和低压两组包裹体: 高压组为富 CO₂ 液相包裹体, 均一压力为 95~155 MPa, CO₂ 相密度为 0.55~0.65 g/cm³; Cv 型中富 CO₂ 气相包裹体, 均一压力为 16~51 MPa, CO₂ 相密度为 0.28~0.40 g/cm³。

可见, C 型中存在高压和低压两组包裹体, 表明成矿流体系统的压力一直处于临界状态, 指示流体发生了沸腾作用, 成矿发生于静岩和静水压力相互交替的过程。库尕德里金矿床发生沸腾的深度约为 5 km, 成矿深度约为 2~5 km, 成矿温度为 290~380 °C (图 9)。

3.4 流体包裹体激光拉曼光谱分析

本次对库尕德里金矿床网脉石英中的包裹体进

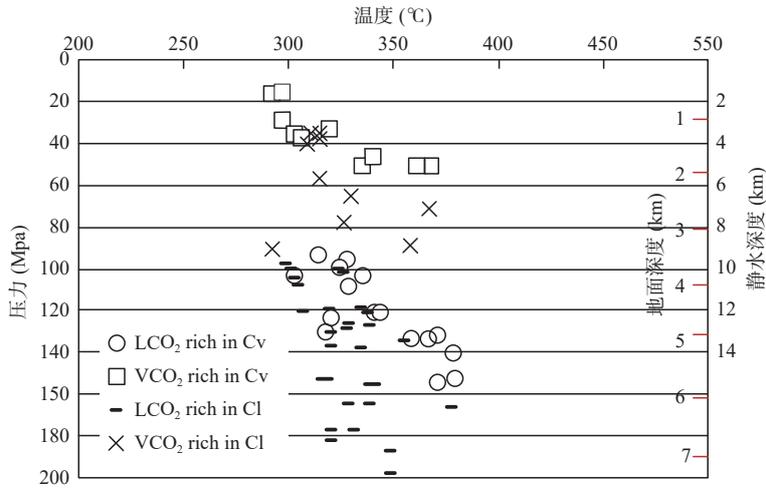


图9 库尔德里金矿床C型包裹体均一温度和均一压力关系图

Fig. 9 Relation diagram of homogenization temperature and pressure of C-type inclusions in Kugadri gold deposit

行了气相成分及子矿物成分的激光拉曼光谱峰值扫描。Q1中C型包裹体的气相成分中除含有CO₂外,还有极少量的N₂及H₂S,其特征峰值分别为1281 cm⁻¹、1388 cm⁻¹、2609 cm⁻¹和2328 cm⁻¹(图10a、图10b)。

W型包裹体除水外,还有少量的CO₂,其特征峰值为3500 cm⁻¹(图10c)。S型包裹体的子矿物除石盐、钾盐外,还含有方解石,其特征峰值为1086 cm⁻¹(图10d)。

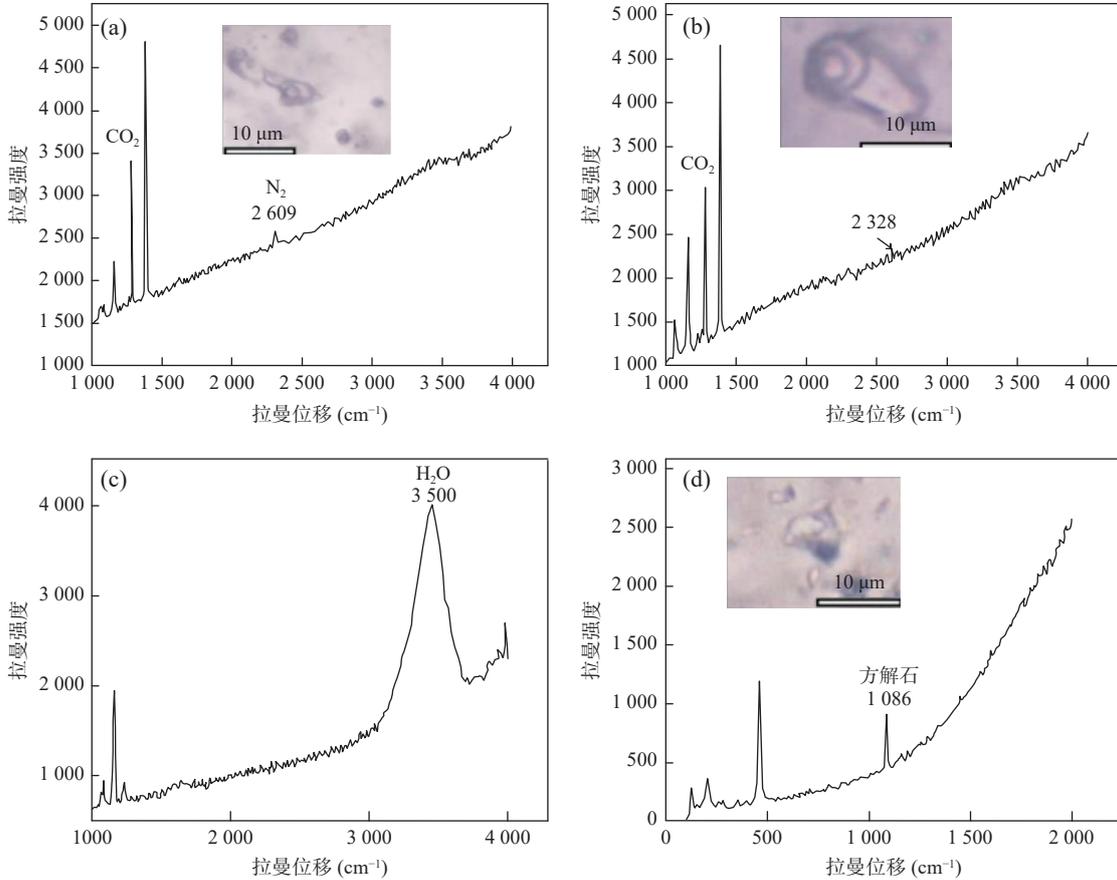


图10 库尔德里金矿床流体包裹体拉曼图

Fig. 10 Raman diagram of fluid inclusions in Kugadri gold deposit

4 讨论

4.1 流体性质及演化

Q₁ 中 C 型包裹体的初熔温度低于 CO₂ 的三相点温度, 由 Raman 分析可知, 成矿流体中除含有 CO₂ 外, 还有 H₂S、N₂ 等成分。W 型包裹体的初熔温度略大于 NaCl-CaCl₂-H₂O 体系的共结点温度 -52 °C, 表明阳离子除 Na⁺, 还含有 Ca²⁺ 等成分。由 Q₂ 中 W、S 型包裹体的初熔温度和子矿物类型, 可知阳离子成分为 Na⁺、K⁺、Ca²⁺ 等。

Q₂ 中低温盐水流体比 CO₂ 热液的形成要晚, 可能来源于: ① 岩浆分异过程中的连续释放。② 流体的沸腾作用。③ 流体的混合。Q₂ 中低温盐水热液呈次生包裹体切穿 Q₁, 其均一温度比 Q₁ 中的低很多, 盐度变化较大(图 11)。实验研究表明 CO₂ 比 H₂O 的溶解度低数十倍, 从酸性岩浆中出溶的早期热液, 由于岩浆侵位高, 压力大而富含 CO₂, 晚期出溶的热液富含盐水。因此, Q₂ 流体最可能为地下水热液与后期热液混合的结果。S 型包裹体的子矿物方解石有可能为 CO₂ 流体在温度降低时与 Ca²⁺ 反应生成。研究成果表明, 岩浆侵位的深度和压力是造成流体成分差异的原因之一。

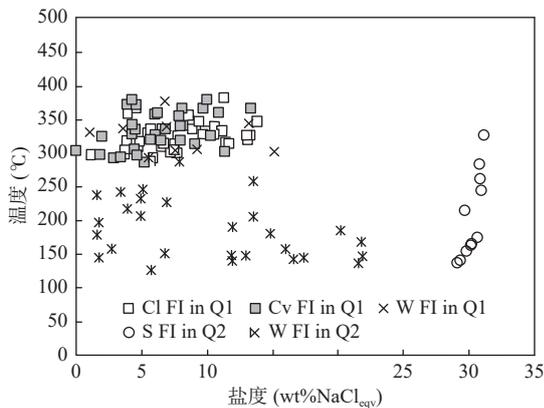


图 11 库尕德里金矿床流体包裹体温度和盐度关系图

Fig. 11 Relation diagram of temperature and salinity of fluid inclusions in Kugadri deposit

Q₁ 石英中主要发育 C 型包裹体, W 型包裹体较少, 表明初熔流体为富含 CO₂ 的碳质流体。实验研究表明, 盐的加入会极大的增加 CO₂-H₂O 体系的不混溶范围(Roedder et al., 1980), CO₂ 在盐水中的溶解度很低, 使岩浆热液早期便形成富 CO₂ 的气相与盐水溶液不混溶。Cl 和 Cv 型包裹体的均一温度几乎相近, 而 CO₂ 的含量却表现出极大的差别(图 6、图 8b), 表明

成矿流体很可能为一沸腾或不混溶流体。研究区围岩为砂岩和粉砂岩, 排除了富碳质流体来源于围岩的去碳酸盐化反应的可能, 研究区发育数条基性岩脉暗示流体来自于深部岩浆房。另外成矿流体含有 N₂ 成分也指示流体由深部地壳重熔或地幔所形成的岩浆分异形成, 实际上来自于深部岩浆的富碳质流体在斑岩型及其他与侵入体相关的矿床中大量发育。

库尕德里金矿床初始流体为从岩浆中分异出的富 CO₂ 低盐度不混溶流体, 在大约 5 km 深度, 130 MPa 时发生了沸腾作用, 相分离为富气相 Cv 型包裹体及富液相 Cl 型包裹体及少量 W 型包裹体。不混溶流体在沸腾作用后发生相分离, Cu、Au 等元素以络合物的形式易进入气相成分中, 而 Mo、Fe、Zn 和 Pb 等以 Cl 的络合物的形式更易富集于残留的高盐度流体中。当富气相流体运移到 5~2 km 深度时, 由于温度的下降, 流体与围岩发生广泛的绢英岩化, pH 值升高, 金属元素大量沉淀成矿。

4.2 CO₂ 的作用

流体包裹体研究表明, CO₂ 的存在增大了流体不混溶的温压范围, 温度越高 CO₂ 的溶解度越大, 岩浆在早期便能形成富 CO₂、H₂S 及惰性气体的气相。压力的降低会引起沸腾或气相的冒泡, 在 300~450 °C 时最强烈。库尕德里金矿床的成矿流体富含 CO₂, CO₂ 的作用主要表现在成矿物质的沉淀过程中, 在温度为 290~380 °C 时, 成矿流体发生强烈的沸腾作用, 从而使 Au 以单质或赋存于硫化物中的形式沉淀下来。

4.3 矿床成因

综合构造背景和成因, 金矿床可划分为造山型、斑岩型、浅成低温热液型、卡林型、铁氧化物型以及富金的块状硫化物型等(Kerrich et al., 2000)。Ridley 等(2000)将不同类型金矿床的成矿流体成分做了系统统计分析, 认为低盐度[ω(NaCl_{eq})6%~12%]、富含 CO₂[(x(CO₂)为 10%~50%)]的流体包裹体特征可以作为区分造山型金矿床和其他金矿床的显著特征(邱正杰等, 2015)。

文中采用 Q₁ 石英脉中的 Cl 型包裹体和 Cv 型包裹体的 XCO₂ 和 XNaCl 值进行投影, 结果显示库尕德里金矿床流体成分与造山型金矿近似(图 12)。最新研究显示, 造山型金矿床流体包裹体中 CO₂ 含量变化范围很大。但值得指出的是, 不能简单地认为具有这种特征流体的金矿床就是造山型金矿床, 如一些与侵入岩有关的金矿床的成矿流体成分和造山型金矿床

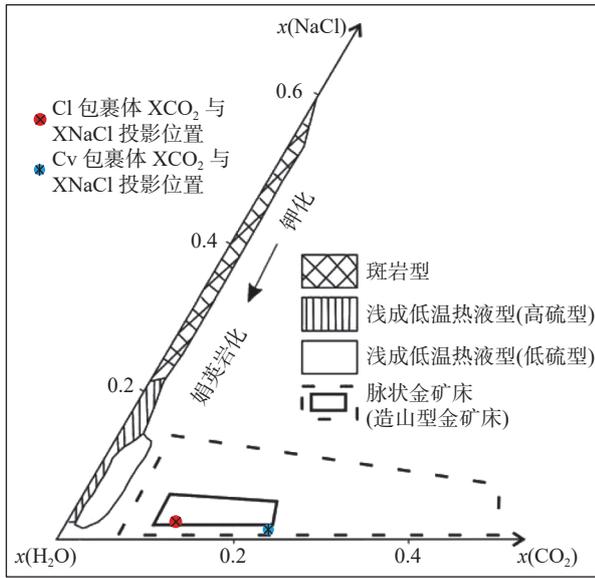


图12 造山型金矿、斑岩 Cu-Au 矿和浅成热液金矿的流体成分(底图据 Ridley et al., 2000)

Fig. 12 Ore forming fluid compositions of orogenic, porphyry and epithermal gold deposits

的流体成分极为相似。

造山型金矿是指产于区域上不同时代变质地体中,在时间和空间上与增生造山或碰撞造山密切相关,形成于汇聚板块边界上的受到韧-脆性断裂控制的脉型和浸染型金矿床系列,其具有形成时代广、成矿深度跨度大等特点(Groves et al., 1998; Kerrich et al., 2000;

Goldfarb et al., 2005; 陈衍景, 2006; Goldfarb et al., 2015; 卢焕章等, 2018; 王庆飞等, 2019; 何书跃等, 2023; 杨林等, 2023)。根据形成深度的不同,造山型金矿可分为深成(成矿深度 > 12 km、温度 > 475 °C)、中成(成矿深度 6~12 km、温度 300~475 °C)和浅成(成矿深度 < 6 km、温度为 150~300 °C)等金矿(Groves et al., 1998)。

如前所述,研究区所处的中亚成矿带位于东欧(波罗地)克拉通、西伯利亚克拉通、塔里木克拉通和华北克拉通之间的巨型造山拼贴体(肖文交等, 2019)。构造活动和沉积环境的复杂性和特殊性造就了中亚成矿带丰富的复杂多样的矿床类型。前寒武纪古陆边缘裂陷盆地,形成了 SEDEX 型 Pb-Zn 矿;早古生代洋-陆俯冲,大陆增生、俯冲岛弧形成,导致了岛弧型斑岩-矽卡岩-浅成低温热液型 Au-Cu-Pb-Zn 矿床的大量出现;晚古生代克拉通之间古陆及拼贴体碰撞造山,形成了许多造山型-MVT(密西西比河谷)型 Au-Cu-Pb-Zn 矿床;中生代-新生代构造活动相对减弱,形成了陆源的拗陷盆地砂岩型 Pb-Zn-Cu-Co 矿床。

库尔德里金矿床的成矿作用与晚古生代早泥盆世石英闪长斑岩有密切成因关系,处于当时的古陆碰撞造山阶段。本文中矿床与典型造山型金矿床特征进行对比见表 2。对比结果显示,本矿床与典型造山型金矿具有相似的地质特征。因此,笔者认为库尔德里金矿床的矿床成因为造山型金矿。

表 2 库尔德里金矿床与典型造山型金矿床特征对比表

Tab. 2 Comparison table of the characteristics of the Kugadri gold deposit and the typical orogenic gold deposit

地质特征	典型造山型金矿(Groves et al., 1998)	库尔德里金矿床
大地构造背景	挤压和转换挤压背景	中亚造山带之哈萨克斯坦-准噶尔板块的穆云库姆-克齐尔库姆-伊犁微板块之肯得克斯地块
控矿构造	矿体严格受构造控制,多位于大型挤压构造的二级或三级构造内	研究区断裂构造发育,主要为NW向和NE向,其次为NEE向;矿体产于接触带近岩体一侧
矿石类型	以石英脉为主,含有≤3%~5%的硫化物和≤5%~15%的碳酸盐矿物	以石英闪长斑岩内的石英脉为主,硫化物含量≤3%
围岩蚀变	碳酸盐化、硫化物化和绿泥石化、绢云母化等	硅化、绢云母化和钾长石化
成矿流体	以 CO ₂ -H ₂ O-NaCl±CH ₄ 组合为特征,富含 CO ₂	CO ₂ -H ₂ O-NaCl, 富含 CO ₂
成矿温度	200~700 °C	290~380 °C
成矿流体盐度	3~10 wt%NaCleqv	0.0~15.1 wt%NaCleqv

5 结论

(1)库尔德里金矿床含矿石英脉可划分为 Q1 和 Q2,粗粒石英 Q1 中主要发育的包裹体类型为 W 型和

C 型,细粒石英 Q2 中主要发育的包裹体类型为 W 和 S 型。

(2)Q1 石英中,W 型包裹体的均一温度 298~378 °C,盐度为 1.1~15.1 wt%NaCleqv; C 型包裹体的完全均一温度为 278~418 °C,主要为 292~375 °C,盐度为

0~13.4 wt%NaCl_{eqv}, XCO₂ 的含量为 0.11~0.52。Q₂ 石英中, W 型包裹体均一温度为 119~294 °C, 盐度为 1.6~22.9 wt%NaCl_{eqv}; S 型包裹体的完全均一温度为 136~327 °C, 对应盐度为 29.1~31.0 wt%NaCl_{eqv}。

(3) 成矿压力和成矿深度估算结果表明: 成矿流体存在高压和低压两组压力, 成矿流体发生沸腾的深度约为 5 km, 成矿深度约为 2~5 km, 成矿温度为 290~380 °C, 成矿流体富含 CO₂。库尕德里金矿床的成矿作用与晚古生代早泥盆世石英闪长斑岩有密切成因关系, 处于当时的古陆碰撞造山阶段。与典型造山型金矿对比, 该矿床具有相似的地质特征, 其成因为造山型金矿。

参考文献(References):

- 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 Yanjing, NI Pei, FAN Hongrui, et al. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(9): 2085-2108.
- 陈衍景. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力[J]. *中国地质*, 2006, 33(6): 1181-1196.
- CHEN Yanjing. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential[J]. *Geology in China*, 2006, 33(6): 1181-1196.
- 范宏瑞, 谢奕汉. 豫西上官构造蚀变岩型金矿成矿过程中的流体—岩石反应[J]. *岩石学报*, 1998, 14(4): 529-541.
- FAN Hongrui, XIE Yihan, WANG Yinglan. Fluid-Rock Interaction during Mineralization of the Shangong Structure-Controlled Alteration-Type Gold Deposit in Western Henan Province, Central China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1998, 14(4): 529-541.
- 高俊, 朱明田, 王信水, 等. 中亚成矿域斑岩大规模成矿特征: 大地构造背景、流体作用与成矿深部动力学机制[J]. *地质学报*, 2019, 93(1): 24-71.
- GAO Jun, ZHU Mingtian, WANG Xinshui, et al. Large-scale porphyry-type mineralization in the Central Asian metallogenic domain: tectonic background, fluid feature and metallogenic deep dynamic mechanism[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(1): 24-71.
- 何国琦, 朱永峰. 中国新疆及其邻区地质矿产对比研究[J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 451-460.
- HE Guoqi, ZHU Yongfeng. Comparative study of the geology and mineral resources in Xinjiang, China, and its adjacent regions[J]. *Geology in China*, 2006, 33(3): 451-460.
- 何书跃, 林贵, 钟世华, 等. 造山作用孕育“青海金腰带”[J]. *西北地质*, 2023, 56(6): 1-16.
- HE Shuyue, LIN Gui, ZHONG Shihua, et al. Geological Characteristics and Related Mineralization of “Qinghai Gold Belt” Formed by Orogeny[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(6): 1-16.
- 黄杰, 安芳. 中亚成矿域核心区斑岩铜矿地质和地球化学特征研究现状综述[J]. *西北地质*, 2018, 51(1): 192-208.
- HUANG Jie, AN Fang. Geological and Geochemical Characteristics of Porphyry Copper Deposits in Core Part of Central Asian Metallogenic Domain: A review[J]. *Northwestern Geology*, 2018, 51(1): 192-208.
- 吕鹏瑞. 新形势下中国与中亚国家矿产资源合作研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2022.
- 刘斌. 中高盐度 NaCl-H₂O 包裹体的密度式和等容式及其应用[J]. *地质论评*, 2001, 47(6): 617-622.
- LIU Bin. Density and Isochoric Formulae for NaCl-H₂O Inclusions with Medium and High Salinity and Their Applications[J]. *Geological Review*, 2001, 47(6): 617-622.
- 卢焕章, 池国祥, 朱笑青, 等. 造山型金矿的地质特征和成矿流体[J]. *大地构造与成矿学*, 2018, 42(2): 244-265.
- LU Huanzhang, CHI Guoxiang, ZHU Xiaqing, et al. Geological Characteristics and Ore Forming Fluids of Orogenic Gold Deposits[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2018, 42(2): 244-265.
- 孙非非, 张爱奎, 刘智刚, 等. 东昆仑西段阿其音金矿成矿流体特征及其成因机制[J]. *西北地质*, 2023, 56(6): 82-94.
- SUN Feifei, ZHANG Aikui, LIU Zhigang, et al. Analysis of the Genesis and H-O-S-Pb Isotopic Characteristics of Aqiyin Gold Deposit in the Western Section of the East Kunlun[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(6): 82-94.
- 王广瑞. 新疆北部与邻区地质及成矿条件对比[J]. *新疆地质*, 1994, 12(1): 75-82.
- WANG Guangrui. Comparison of geological and metallogenic conditions between northern Xinjiang and adjacent areas[J]. *Xinjiang Geology*, 1994, 12(1): 75-82.
- 邱正杰, 范宏瑞, 丛培章, 等. 造山型金矿床成矿过程研究进展[J]. *矿床地质*, 2015, 34(1): 21-38.
- QIU Zhengjie, FAN Hongrui, CONG Peizhang, et al. Recent progress in the study of ore-forming processes of orogenic gold deposits[J]. *Mineral Deposits*, 2015, 34(1): 21-38.
- 王庆飞, 邓军, 赵鹤森, 等. 造山型金矿研究进展: 兼论中国造山型金成矿作用[J]. *地球科学*, 2019, 44(6): 2155-2186.
- WANG Qingfei, DENG Jun, ZHAO Hesen, et al. Review on Orogenic Gold Deposits[J]. *Earth Science*, 2019, 44(6): 2155-2186.
- 肖文交, 宋东方, Brian Fwindley, 等. 中亚增生造山过程与成矿作用研究进展[J]. *中国科学:地球科学*, 2019, 49(10): 1512-1545.
- XIAO Wenjiao, SONG Dongfang, BRIAN Fwindley, et al. Research progresses of the accretionary processes and metallogenesis of

- the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 49(10): 1512–1545.
- 薛春纪, 赵晓波, 莫宣学. 中亚成矿域斑岩铜金成矿的地质环境问题[J]. *岩石学报*, 2016, 32(5): 1249–1261.
- XUE Chunji, ZHAO Xiaobo, MO Xuanxue. Problem on porphyry Cu-Au metallogenic environment in Central Asian: An overview[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(5): 1249–1261.
- 薛春纪, 赵晓波, 赵伟策, 等. 中-哈-吉-乌天山变形带容矿金矿床: 成矿环境和控矿要素与找矿标志[J]. *地学前缘*, 2020, 27(2): 294–319.
- XUE Chunji, ZHAO Xiaobo, ZHAO Weice, et al. Deformed zone hosted gold deposits in the China-Kazakhstan-Kyrgyzstan-Uzbekistan Tian Shan: metallogenic environment, controlling parameters, and prospecting criteria[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(2): 294–319.
- 杨林, 王庆飞, 赵世宇, 等. 造山型金矿构造控矿作用[J]. *岩石学报*, 2023, 39(2): 277–292.
- YANG Lin, WANG Qingfei, ZHAO Shiyu, et al. Structural controls on orogenic gold deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(2): 277–292.
- 朱永峰. 中亚成矿域核心区地质演化和巨型成矿带划分[J]. *矿床地质*, 2014, 33(3): 471–485.
- ZHU Yongfeng. Geological evolution and division of giant metallogenic belts in core part of Central Asian Metallogenic Region[J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(3): 471–485.
- 薛春纪, 赵晓波, 莫宣学, 等. 西天山“亚洲金腰带”及其动力背景和成矿控制与找矿[J]. *地学前缘*, 2014, 21(5): 128–155.
- XUE Chunji, ZHAO Xiaobo, MO Xuanxue, et al. Asian Gold Belt in western Tianshan and its dynamic setting, metallogenic control and exploration[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(5): 128–155.
- Burlinson K. Decrepitation in gold exploration: A case history from the Cotan prospect, N. T. Decrepitation in gold exploration. A case history from the Cotan prospect, N. T.[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1991, 42: 143–156.
- Bodnar R J. Fluid inclusion evidence for a magmatic source for metals in porphyry copper deposits[J]. *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*, 1995, 23: 139–152.
- Brown P E Flincor. A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data[J]. *American Mineralogist*, 1989, 74: 1390–1393.
- Brown P E, Lamb W M. P-V-T properties of fluids in the system H₂O-CO₂-NaCl: New graphical presentations and implications for fluid inclusion studies[J]. *Geochimica et Cosmochimica*, 1989, 53: 1209–1221.
- Goldfarb R J, Baker T, Dubé B, et al. Distribution, Character, and Genesis of Gold Deposits in Metamorphic Terranes[J]. *One Hundredth Anniversary Volume*, 2005: 407–450.
- Goldfarb R J, Groves D I. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time[J]. *Lithos*, 2015, 233: 2–26.
- Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, et al. Orogenic Gold Deposits: a Proposed Classification in the Context of Their Crustal Distribution and Relationship to other Gold Deposit Types[J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 13(1): 7–27.
- Hall D L, Sterner S M, Bodnar R J. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions[J]. *Economic Geology*, 1988, 83: 197–202.
- Kerrick R, Goldfarb R, Groves D, et al. The Characteristics, Origins, and Geodynamic Settings of Supergiant Gold Metallogenic Provinces[J]. *Science in China Series, Earth Sciences*, 2000, 43(1): 1–68.
- Mavrogenes J A, Bodnar R J, Graney J R, et al. Comparison of decrepitation, microthermometric and compositional characteristics of fluid inclusions in barren and auriferous mesothermal quartz veins of the Cowra Creek Gold District, New South Wales, Australia[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1995, 54(3): 167–175.
- Roedder E, Bodnar R J. Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1980, 8: 263–301.
- Ridley J R, Diamond L W. Fluid chemistry of orogenic lodegold deposits and implications for genetic models[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2000, 13: 141–162.