

编号: 0258-7106(2011)03-0547-10

# 阿吾拉勒山琼布拉克铜矿床流体包裹体 及碳氧同位素研究\*

罗勇<sup>1,2,3</sup> 廖思平<sup>4</sup> 杨武斌<sup>1,3</sup> 单强<sup>1\*\*</sup> 周昌平<sup>5</sup>

(1 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 2 南阳师范学院环境科学与旅游学院, 河南 南阳 473061;  
3 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4 江西省地质调查研究院, 江西 南昌 330030; 5 新疆维吾尔自治区  
地质矿产勘查开发局第七地质大队, 新疆 乌苏 833000)

**摘要** 琼布拉克铜矿床位于新疆伊宁县境内, 前人对该矿床的成因一直存在争议。文章通过对琼布拉克铜矿床方解石中的流体包裹体进行系统的岩相学、显微测温学和碳氧稳定同位素分析研究, 探讨了成矿流体的来源及演化。研究表明, 琼布拉克铜矿床的流体包裹体主要为气-液两相包裹体, 另有少量的气相包裹体, 未见富 CO<sub>2</sub> 和含子矿物的流体包裹体, 显示出张性构造环境流体包裹体组合的特征。琼布拉克铜矿床流体包裹体的均一温度和盐度变化范围较大, 分别介于 92~356℃ 和  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  0.88%~16.89% 之间, 成矿流体的密度从 0.62 g/cm<sup>3</sup> 变化到 1.04 g/cm<sup>3</sup>。琼布拉克铜矿床方解石中  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  为 -7.37‰~-4.19‰, 与地幔碳同位素组成(-5‰±2‰) 基本相同,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  为 9.63‰~11.91‰, 与火山岩氧同位素组成值(5‰~15‰) 相似, 表明成矿流体主要来自于地幔, 暗示成矿作用与区内二叠纪火山活动有关。

**关键词** 地球化学 流体包裹体 方解石 稳定同位素 铜矿床 琼布拉克

中图分类号: P618.41

文献标志码: A

## Fluid inclusion and carbon oxygen isotope studies of Qiongbulake copper deposit in Awulale Mountains, Xinjiang

LUO Yong<sup>1,2,3</sup>, LIAO SiPing<sup>4</sup>, YANG WuBin<sup>1,3</sup>, SHAN Qiang<sup>1</sup> and ZHOU ChangPing<sup>5</sup>

(1 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2 School of Environmental Science and Tourism, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, Henan, China; 3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4 Jiangxi Institute of Geological Survey, Nanchang, 330030, Jiangxi, China; 5 No 7 Geological Survey Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resource Exploration, Wusu 833000, Xinjiang, China)

### Abstract

Located in Yining County of Xinjiang, the Qiongbulake copper deposit was formed in relation to magmatic hydrothermal fluids. These fluids formed a stockwork of calcite veinlets. The distribution of veins and fluid inclusions in these veins records the progressive pressure, temperature, and compositional evolution of the hydrothermal fluids that formed this copper deposit. This paper aims to characterize the temporal and spatial evolution of the mineralizing system and to understand the mechanism that controlled the accumulation of this large, massive Cu deposit. On the basis of the studies by means of inclusion petrography, microthermometry and carbon, oxygen stable isotope, the authors systematically studied characteristics of the ore-forming fluids and the origin of the Qiongbulake copper deposit. Three types of fluid inclusions in calcite were recognized, i. e., VL

\* 本研究由中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-107)和国家自然科学基金(41040029)联合资助

第一作者简介 罗勇, 男, 1983年生, 博士研究生, 地球化学专业。Email: luoyong@gig.ac.cn

\*\* 通讯作者 单强, 男, 副研究员, 主要从事矿床、包裹体地球化学研究。Email: qshan@gig.ac.cn

收稿日期 2011-02-27; 改回日期 2011-04-05。张绮玲编辑。

type inclusions, LVa type inclusions and LVb type inclusions, with no CO<sub>2</sub> phase fluid inclusions and daughter phase fluid inclusions. Fluid inclusions associated with calcite display moderate-low homogenization temperature (92.3 ~ 355.9°C), moderate-low salinities ( $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  0.88% ~ 16.89%) and low density (0.62 ~ 1.04 g/cm<sup>3</sup>). C and O isotope determinations of calcite show  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  values of -7.37‰ ~ -4.19‰ and  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  values of 9.63‰ ~ 11.91‰, suggesting that the ore-forming fluids were derived from the mantle and volcanism. On the whole, the Qiongbulake copper deposit is a moderate-low hydrothermal ore deposit.

**Key words:** geochemistry, fluid inclusion, calcite, stable isotope, copper deposit, Qiongbulake

琼布拉克铜矿床位于新疆伊宁县境内,在拜什墩农场北东约 11 km 处,铜金属储量达中型规模。前人有称其为“穹布拉克”或“穷布拉克”,后因村易名为“琼布拉克铜矿”而改为现名。上世纪 50 年代民间就开始对该矿床开采,但直到上世纪 80 年代末才在该矿区圈出具有开采价值的工业矿体。王士明(1989)首先对琼布拉克铜矿床进行了研究,认为该矿床为中型铜银矿床,它是一个与火山机构有关的火山热液型矿床,并认为该矿床的成矿作用可以分为高-中温热液和低温热液 2 期,以低温热液期为主。随后,王士明(1994)又对琼布拉克铜矿床的控矿构造进行了分析,指出上、下二叠统砂砾岩与玄武岩接触面及构造复合部位是最佳赋矿空间。李小军(1990)认为琼布拉克铜矿床受火山作用的控制,并对矿区内的火山岩的喷发旋回和喷发韵律进行了分析,明确指出下二叠统小旋回火山活动较为强烈,尤其是第三韵律与成矿作用关系最为密切。魏在强(1993)根据赋矿围岩特征将琼布拉克铜矿床的矿体分成砂砾岩型和火山熔岩型 2 类,认为前者为火山热泉型铜矿化,而后者为火山热液型铜矿化,同时他指出,虽然 2 类矿体的矿化机制不同,但两者具有明显的亲缘关系。雷宇涓(1993)强调琼布拉克铜矿化与火山作用密切相关,并根据硫同位素分析结果推断成矿流体来自深部。莫江平等(1997)将琼布拉克铜矿床的成矿作用分成火山-次火山热液成因和沉积-改造成因 2 类,并对 2 类矿体中的黄铁矿和黄铜矿的硫同位素组成进行了研究,发现火山-次火山热液矿体的硫同位素组成变化范围较窄,接近陨硫,它主要来自深部的岩浆源,而沉积-改造型矿体的硫同位素组成变化较大,显示出沉积硫的特征,主要来自地层。铅同位素示踪研究显示,无论是火山-次火山热液型,还是沉积-改造型矿床的铅同位素都位于上地幔铅和下地壳铅之间,表明成矿的金属物质均由火山作用从深部带来(莫江平等,1997)。此外,莫江平等(1997)还对火山-次火山热液矿体的形成温

度进行了初步探讨,认为该类矿体形成于低温条件(92 ~ 192°C)。最近,杨明德等(2009)对琼布拉克铜矿床的控矿条件和找矿标志进行了探讨,认为强烈的绿泥石化-碳酸盐化组合,并叠加硅化是最佳的找矿标志。

综上所述,尽管人们对矿床的成因还存在争议,但均认为二叠纪的火山活动对琼布拉克铜矿床的形成具有重要的控制作用。虽然人们对琼布拉克铜矿床进行了一些研究,但关于矿床形成的物理化学条件方面的研究还很零散,仅有少量的方解石流体包裹体测温工作和论述(王士明,1989;魏在强,1993;莫江平等,1997),而关于成矿机制的讨论更显薄弱。

流体包裹体是矿物形成过程中所捕获的原始流体,它携带了成矿过程的各种地质地球化学信息,是揭示矿床形成物理化学条件、探讨矿床成因的最直接地质样品(卢焕章等,2004;Roedder,2002)。本文对琼布拉克铜矿床的流体包裹体进行了系统的岩相学、显微测温学研究,同时对主要脉石矿物方解石进行了碳、氧稳定同位素研究,以期探讨该矿床形成的物理化学条件和矿床形成机制。

## 1 地质背景

琼布拉克铜矿床位于新疆西天山伊犁板块阿吾拉勒成矿带西段(王永新,1997;隗合明等,1999),夹持在喀什河断裂和巩乃斯河断裂之间。区内断裂构造和火山岩十分发育,总体构造线近于 EW 向。琼布拉克铜矿区出露地层主要为二叠系,包括下二叠统塔尔得套组( $P_1t^5$ )和上二叠统塔姆其萨依组( $P_2t$ ),两者是该区的主要含矿层位,二者呈平行不整合接触。塔尔得套组第五岩性段( $P_1t^5$ )为一套韵律明显的陆相火山岩建造,主要为火山沉积相凝灰角砾集块岩、溢流相安山玄武岩、气爆溢流-弱爆发相角砾熔岩、火山角砾岩及安山玄武岩、溢流相安山玄武岩、爆发相火山角砾岩。塔姆其萨依组( $P_2t$ )为

一套陆源碎屑岩夹火山岩建造。下部为火山沉积建造，以紫红色、灰紫色砂岩、砂砾岩为特征，表现为氧化沉积环境；上部为陆相火山岩建造，以灰色、灰绿色、灰紫色中-细粒碎屑岩夹灰-灰黑色碳质灰岩、泥灰岩为特点，反映出相对还原的沉积环境(刘荻, 2005; 杨明德等, 2009)。矿体主要赋存在  $P_{1t}^5$  中基性火山岩和  $P_{2t}$  砂砾岩地层中(图 1)。

矿区内褶皱构造不发育，但断裂构造十分发育，总体呈弧形，中部向南凸出，东西两侧向北收敛的弧形张扭性大断裂。核部主要为  $P_{1t}^5$  火山岩地层，外侧及西翼是  $P_{2t}$  地层。主矿体多位于弧形构造中部向南凸出部位，沿断裂带岩石破碎并见有较多的断层角砾岩分布，断裂破碎带宽数十米至百余米，沿断裂带碳酸盐化、褐铁矿化和绿泥石化等蚀变较强，说明该断裂是区内重要的控矿断裂构造。在矿区还发育一系列近于垂直地层分布的 NNE 向和 NNW 向的次级断裂，其内亦可见含铜方解石脉。

琼布拉克铜矿床的主要矿体分别产于二叠纪中基性火山岩和砂砾岩中，前者为火山-次火山热液型，而后者则为沉积-改造型(魏在强, 1993; 雷宇涓, 1993; 莫江平等, 1997; 杨明德等, 2009)。

沉积-改造型是矿区内重要的铜矿化类型，以 I-1、I-2 号矿体为代表。赋矿地层为上二叠统塔姆其萨依组砂砾岩的下部层位，铜矿化稳定，产于下部紫红色砂岩与上部灰绿色砂岩过渡的粗砾岩层中，铜矿化主要发育于砾岩填隙物中。矿体呈似层状、透镜状顺层产出，产状与地层基本一致，金属矿物主要有辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿、黄铁矿，少量方铅矿，伴生矿物为角银矿和自然银。矿化垂向分带比较明显，地表以孔雀石为主，其次为辉铜矿、斑铜矿，局部有方铅矿；中浅部(200 m 以上)为辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿和少量黄铁矿组合，200 m 以下以黄铁矿为主，少量黄铜矿。矿体长 400~600 m，厚 2~9.7 m，平均为 6.02 m，倾向延伸 270 m，铜品位一般为 0.6%~

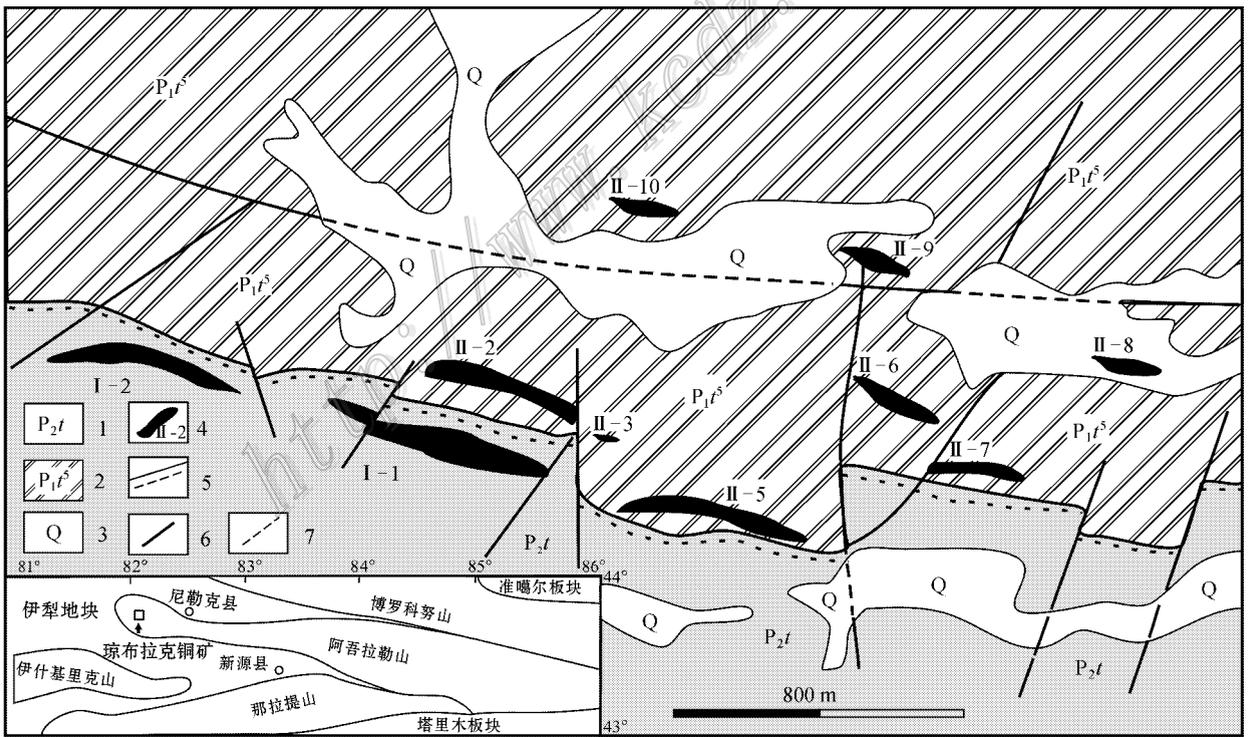


图 1 琼布拉克铜矿床地质简图(据莫江平等, 1997; 刘荻, 2005; 杨明德等, 2009)

- 1—上二叠统塔姆其萨依组砂砾岩；2—下二叠统塔尔德套组熔岩、角砾熔岩；3—第四系；4—铜矿体及编号；5—不整合地质界线；
- 6—实测断层；7—推断断层

Fig. 1 Simplified geological map of the Qiongbulake copper deposit(after Mo et al., 1997; Liu, 2005; Yang et al., 2009)

- 1—Glutenite of Upper Permian Tamuqisayi Formation；2—Lava and lava breccia of lower Permian Taerdetao Formation；3—Quaternary；
- 4—Copper ore vein and its serial number；5—Unconformity；6—Measured fault；7—Inferred fault

1% 地表和浅部铜矿化一般较好,向深部品位较低,矿化主要发育在胶结物中,砾石中矿化很弱,蚀变和金属矿物沿砾石间交代填隙发育。矿石矿物呈细脉状、网脉状分布于砾石的胶结物中。围岩蚀变主要为碳酸盐化、绿泥石化、硅化,其中硅化和碳酸盐化与矿化的关系最为密切。

火山-次火山热液成矿型矿化是区内最重要的铜矿化类型,以Ⅱ-2、Ⅱ-5、Ⅱ-6、Ⅱ-7号矿体为代表。矿体产于下二叠统塔尔得套组第五岩性段上部杏仁状玄武安山岩与安山质角砾熔岩接触面及其两侧,呈似层状、顺层透镜状成带状展布,表现明显的层控特征。矿石以浸染状和细脉状为主,局部为块状,熔岩中有时见铜矿化发育于杏仁体中。金属矿物组合较简单,地表以孔雀石为主,少量辉铜矿,浅部以辉铜矿、斑铜矿为主,深部则为黄铜矿、黄铁矿,辉铜矿和斑铜矿为主的矿体下部可见自然铜矿化。围岩蚀变以绿泥石化、碳酸盐化为主,少量绿帘石化、硅化。矿化富集程度与蚀变强度成正相关关系。含铜矿芯中黄铜矿、辉铜矿呈他形粒状沿裂隙和气孔充填,光片中发现铜磁铁矿的残留体,并在其表面

见到辉铜矿和黄铜矿,表明热液交代作用贯穿成矿过程的始终(魏在强,1993)。在Ⅱ-6号矿体ZK7808孔深部约400m处辉绿岩中见到含星点状或稀疏浸染状自然铜矿化,含矿岩石为辉绿岩,矿化层厚度约20多米,但矿化较好的仅有几米,拣块分析 $w(\text{Cu})$ 为0.32%,铜矿物仅为自然铜,没有发现其他硫化物,围岩蚀变主要为绿泥石化、碳酸盐化和硅化。该类型铜矿目前看来品位不高,规模不大,但在东部的木斯铜矿床也是以自然铜矿化为主,成矿地质条件相似。

在琼布拉克铜矿床中,方解石与黄铜矿、辉铜矿等共生,说明方解石与铜矿化关系十分密切(图2A~D)。本文以火山-次火山热液型铜矿化为研究对象,探讨琼布拉克铜矿床主要成矿作用成矿流体的特征及矿床形成机制。

## 2 样品测试方法

本文研究所用样品为采自琼布拉克铜矿床Ⅱ-2、Ⅱ-5、Ⅱ-6、Ⅱ-7号矿体中的脉状方解石,流体

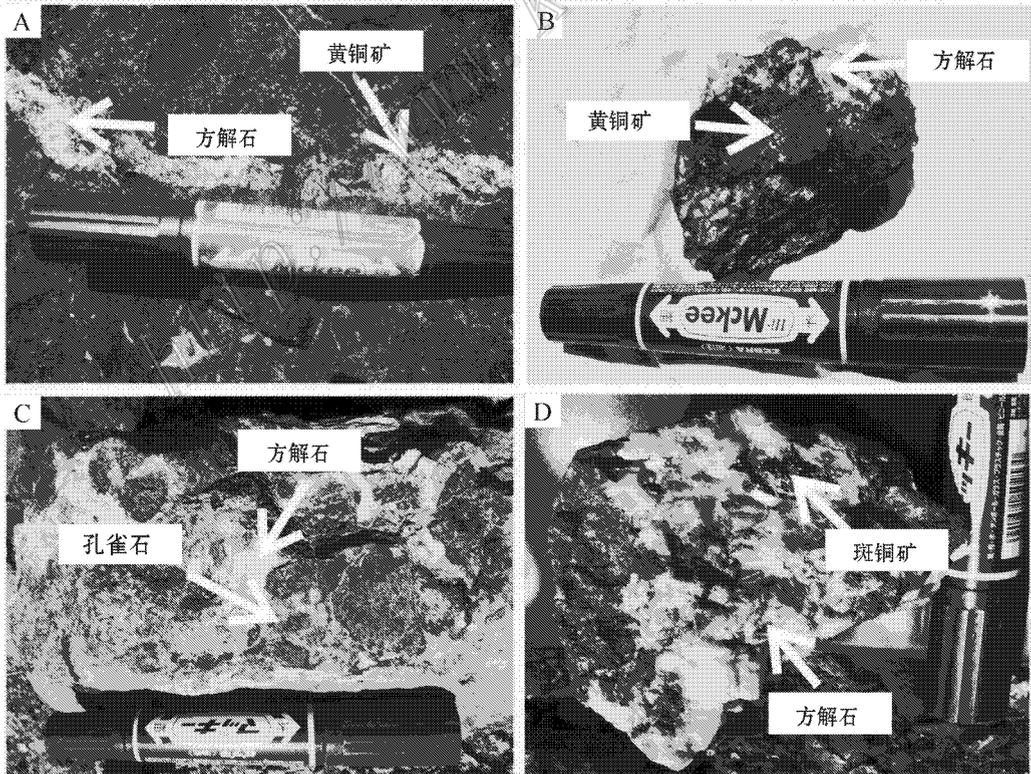


图2 琼布拉克铜矿床矿石手标本照片

Fig. 2 Photographs of rock hand specimens from the Qiongbulake copper deposit

包裹体的岩相学和显微测温研究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用 Linkam MDS 600 型冷热台完成。仪器测定温度范围为 $-196 \sim 550^{\circ}\text{C}$ , 测量精度在 $-100 \sim 25^{\circ}\text{C}$  范围内为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ,  $25 \sim 400^{\circ}\text{C}$  范围内为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ,  $400^{\circ}\text{C}$  以上为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。测试升温速率一般为 $0.2 \sim 5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。方解石的碳、氧稳定同位素分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室完成, 分析仪器为 GV IsoPrime II 型稳定同位素质谱仪, 测试精度 $\delta^{13}\text{C}$  好于 $0.05\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  好于 $0.08\text{‰}$ 。

对于盐度不饱和的流体包裹体, 根据包裹体冷冻回温后冰完全融化的温度(冰点), 利用冰点-盐度公式:  $w_t = 0.00 + 1.78T_m + 0.0442T_m^2 + 0.000557T_m^3$  (Bodnar, 1993) 算出相应的盐度,  $w_t$  为 NaCl 的质量分数,  $T_m$  为冰点温度; 刘斌等(1999) 根据实验数据推导出 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系不同盐度流体包裹体的密度式:  $\rho = A + B \times t + C \times t^2$ ,  $\rho$  为流体密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $t$  为均一温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ), A、B 和 C 为无量纲参数, 不同盐度流体对应不同值, 根据该公式计算出不同类型包裹体的流体密度。

## 3 流体包裹体

### 3.1 流体包裹体岩相学特征

在琼布拉克铜矿床方解石中, 流体包裹体呈孤立或群状分布, 一般呈群状分布的包裹体较小, 而孤立状分布的包裹体较大。根据室温条件下的相态及相态比, 可以将琼布拉克铜矿床火山热液型矿体的流体包裹体分为以下 3 种类型(表 1):

**VL 型包裹体:** 该类包裹体最明显的特征就是气泡的体积较大, 约占整个包裹体体积的 30%~50% (图 3A、3B、3C)。该类流体包裹体的直径小于  $50 \mu\text{m}$ , 主要在  $10 \mu\text{m}$  左右; 其形状为方形、椭圆形、不规则状; 呈孤立状分布(图 3G、3H、3I), 为原生包裹体, 在所研究的样品中个数相对较少。

**LVa 型包裹体:** 该类包裹体气泡体积相对较小,

约占整个包裹体的 10%~30% (图 3D)。与 VL 型流体包裹体一样, LVa 型流体包裹体的直径小于  $50 \mu\text{m}$ , 主要在  $10 \mu\text{m}$  左右; 其形状为不规则状、长条形和椭圆形; 呈孤立或群状分布(图 3G、3H、3I), 为原生或假次生包裹体, 在所研究的样品中个数相对较多。

**LVb 型包裹体:** 该类包裹体气泡体积较小, 一般小于 10%, 个别小于 5% (图 3E、3F), 其大小及形状与上述两类流体包裹体相似。在主矿物方解石中该类流体包裹体也是呈孤立或群状分布(图 3G、3H、3I), 为原生或假次生包裹体, 在所研究的样品中个数最多。

### 3.2 显微测温学研究

流体包裹体显微测温结果(表 2)显示, 琼布拉克铜矿床流体包裹体的均一温度和冰点温度的变化范围较大, 分别为  $92 \sim 356^{\circ}\text{C}$  和  $-0.5 \sim -13^{\circ}\text{C}$ , 其盐度  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  在 0.88%~16.89% 之间变化, 而密度则在  $0.62 \sim 1.04 \text{g}/\text{cm}^3$  之间变化。

测温结果同时还显示, 不同类型包裹体的温度范围差异明显(图 4), VL 型包裹体的均一温度范围  $275 \sim 356^{\circ}\text{C}$ , 冰点温度范围  $-3.3 \sim -0.5^{\circ}\text{C}$ , 根据冰点温度计算的盐度  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  范围为 0.88%~5.41%, 根据均一温度计算流体密度范围为  $0.62 \sim 0.80 \text{g}/\text{cm}^3$ , VL 型包裹体在升温过程中气泡扩大, 最终均一成气相; LVa 型包裹体的均一温度范围  $245 \sim 338^{\circ}\text{C}$ , 冰点温度范围  $-13 \sim -5.9^{\circ}\text{C}$ , 根据冰点温度计算的盐度  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  范围为 9.08%~16.89%, 根据均一温度计算流体密度范围为  $0.78 \sim 0.91 \text{g}/\text{cm}^3$ , LVa 型包裹体在升温过程中气泡缩小, 最终气泡消失均一成液相; LVb 型包裹体的均一温度范围  $92 \sim 288^{\circ}\text{C}$ , 冰点温度范围  $-9.8 \sim -0.1^{\circ}\text{C}$ , 根据冰点温度计算的盐度  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  范围为 0.18%~13.72%, 根据均一温度计算流体密度范围为  $0.82 \sim 1.04 \text{g}/\text{cm}^3$ , LVb 型包裹体在升温过程中气泡缩小, 最终气泡消失均一成液相。

表 1 琼布拉克铜矿床流体包裹体特征

Table 1 Characteristics of fluid inclusions from the Qiongbulake copper deposit

类型	相态数	气相分数	大小	形状	产状	个数
VL	两相	30%~50%	$< 50 \mu\text{m}$	方形、扁圆形、不规则形	孤立或群状	较少
LVa	两相	10%~30%	$< 50 \mu\text{m}$	长条形、扁圆形、不规则形	孤立或群状	较多
LVb	两相	$< 10\%$	$< 50 \mu\text{m}$	长条形、扁圆形、不规则形	孤立或群状	最多

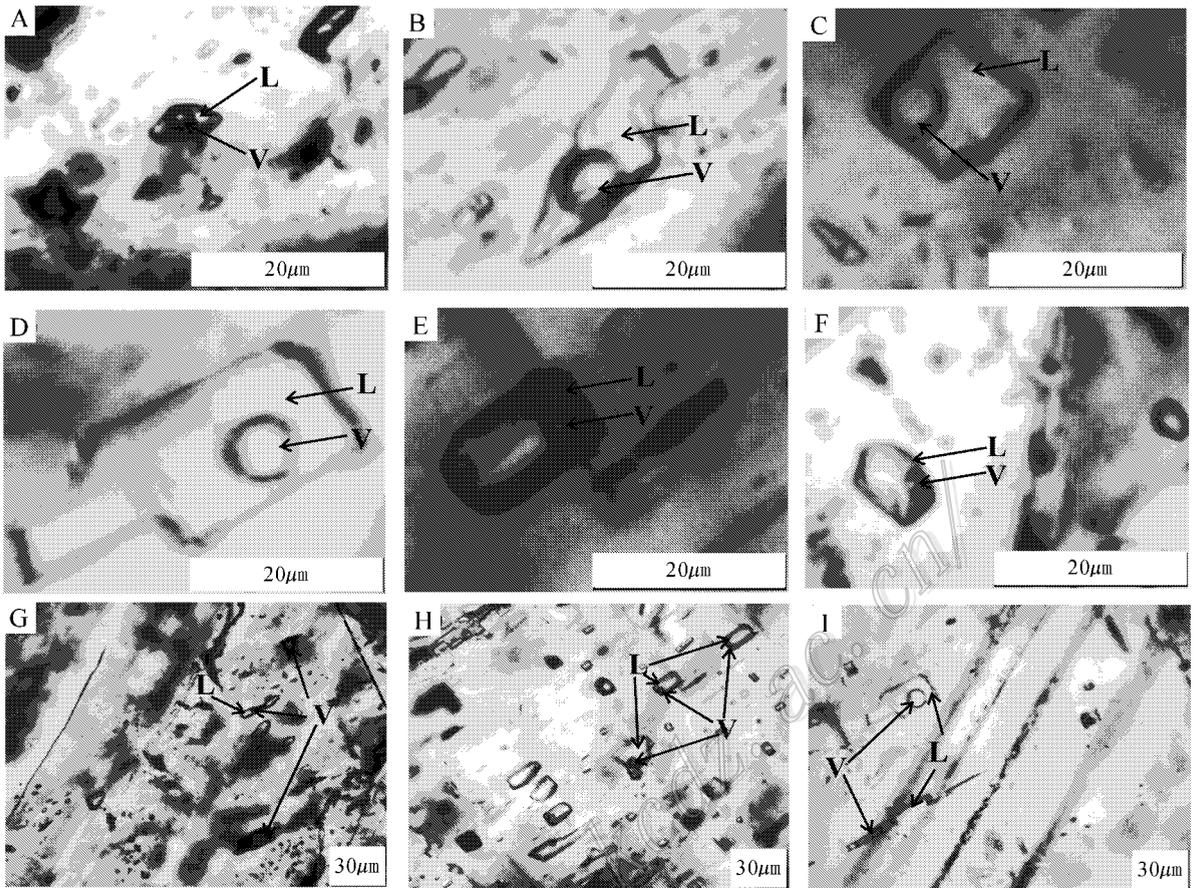


图3 琼布拉克铜矿床流体包裹体显微照片

A、B、C. VL型包裹体；D. LVa型包裹体；E、F. LVb型包裹体；G、H、I. 包裹体分布；L—液相；V—气相

Fig. 3 Photomicrographs of fluid inclusions in the Qiongbulake copper deposit

A, B, C. VL type fluid inclusion; D. LVa type fluid inclusion; E, F. LVb type fluid inclusion; G, H, I. Distribution of fluid inclusions; L—Liquid phase; V—Volatile phase

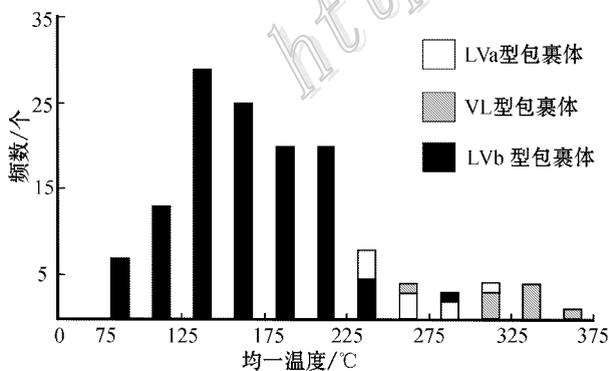


图4 琼布拉克铜矿床流体包裹体均一温度频数直方图

Fig. 4 Histogram of homogenization temperatures of fluid inclusions in the Qiongbulake copper deposit

## 4 稳定同位素特征

本次研究挑选了7件琼布拉克的方解石样品,分析了其碳、氧稳定同位素组成。测试结果(表3)显示 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-7.37\% \sim -4.19\%$ ,与地幔碳同位素值( $-5 \pm 2\%$ )基本吻合; $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 $9.63\% \sim 11.91\%$ ,与火山岩氧同位素值 $5\% \sim 15\%$ 也基本一致(郑永飞等,2000)。在图5中,琼布拉克的方解石的投影点主要落在原始岩浆碳酸岩区域附近,沿着岩浆流体去气漂移方向排列(Demeny et al., 2010),表明琼布拉克火山热液型铜矿化的成矿流体可能源于地幔,岩浆流体的去气作用使得 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 发生漂移。据莫江平等(1997)研究,该类

表 2 琼布拉克铜矿床流体包裹体显微测温数据  
Table 2 Microthermometric data for fluid inclusions from the Qiongbulake copper deposit

类型	$t_h/^\circ\text{C}$		$t_{m-ice}/^\circ\text{C}$		$w(\text{NaCl}_{eq})/\%$		$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$		个数
	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	
LVa	245~338	278	-13~-5.9	-8.16	9.08~16.89	11.79	0.78~0.91	0.87	10
VL	275~356	322	-3.3~-0.5	-2.24	0.88~5.41	3.76	0.62~0.80	0.70	9
LVb	92~288	162	-9.8~-0.1	-4.08	0.18~13.72	6.76	0.82~1.04	0.96	120

表 3 琼布拉克铜矿床方解石碳、氧稳定同位素数据  
Table 3 Isotopic data of calcite from the Qiongbulake copper deposit

样号	主矿物	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$
QBW-1	方解石	-7.37	-18.43	11.91
QBW-2	方解石	-6.65	-19.81	10.49
QBW-3	方解石	-7.12	-18.54	11.80
QBW-4	方解石	-4.19	-20.64	9.63
QBW-5	方解石	-5.95	-19.58	10.72
QBW-6	方解石	-6.12	-20.25	10.04
QBW-7	方解石	-6.63	-20.34	9.94

注 PDB 标准与 SMOW 标准之间的换算关系(Coplen et al., 1983):  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 1.03091 \delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} + 30.91$

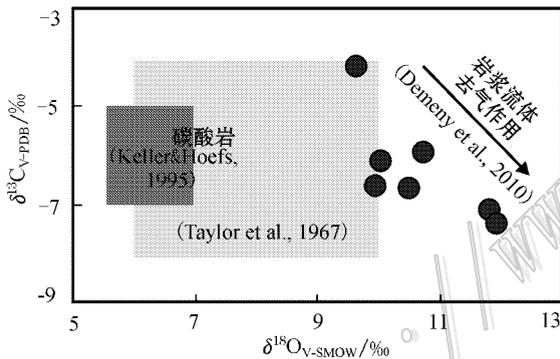


图 5 琼布拉克铜矿床碳、氧稳定同位素组成图

Fig. 5  $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$  diagram of the Qiongbulake copper deposit

型铜矿化成矿流体的  $\delta^{34}\text{S}$  值介于  $-10.6\text{‰} \sim 0.1\text{‰}$ , 平均为  $-5.8\text{‰}$ , 变化范围较窄, 接近陨硫的同位素组成, 也暗示其成矿流体来源于深源地幔岩浆。

### 5 讨论

琼布拉克火山热液型铜矿体内 3 类包裹体捕获的流体性质有明显的差异, 在均一温度与盐度图解中其投影点分别落在 3 个区域中, LVb 型包裹体落在相对低温区, LVa 型包裹体落在相对高温高盐度区, 而 VL 包裹体则落在相对高温低盐度区(图 6)。

VL 型包裹体的温度与盐度成负相关, 随着温度的上升, 盐度有明显降低的趋势, 这些特征在一定程度上暗示, 在琼布拉克铜矿床形成过程中成矿流体曾发生过沸腾作用(Roedder, 1984; 张德会, 1997; Hedenquist et al., 1985)。更重要的是低盐度的富气相的 VL 型包裹体的均一温度与高盐度的相对贫气相的 LVa 型包裹体的均一温度范围十分相近(图 6), 这也在一定程度上暗示在琼布拉克铜矿床形成过程中成矿流体曾发生过沸腾作用。大量隐爆角砾岩的存在从岩相学角度也证实琼布拉克铜矿床成矿流体曾发生过沸腾作用。原始均一的流体由于所处环境温压条件的变化, 发生沸腾作用, 从而导致流体包裹体盐度和密度存在差异, 这是导致琼布拉克铜矿床多种流体包裹体共存的主要原因。沸腾作用是通过去气作用(气体的分离散失)引起金属沉淀。沸腾作用所引起的矿化主要在沸腾面附近发生, 矿质在小体积空间沉淀, 一般形成的矿化具有品位高、矿化规模小、范围小、但强度大等特点(Meinert et al., 1997; Lu et al., 2003; 张德会, 1997)。

由于琼布拉克铜矿床断裂发育, 在流体运移过程中, 构造环境的变化, 如由韧性、压性裂隙系统进入张性断裂系统, 引起压力的突然释放, 造成流体“减压沸腾”(张文淮等, 1996; Heinrich et al., 1992; Cline, 2003), 断裂或水力压裂形成的构造空间逐渐

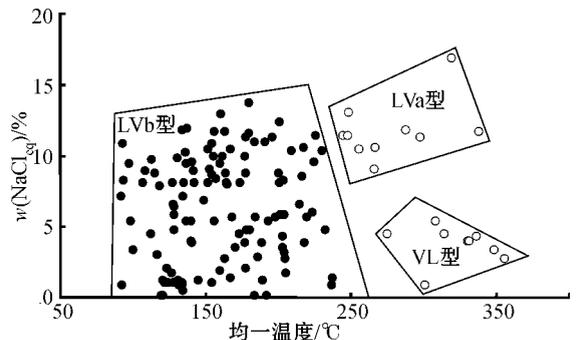


图 6 琼布拉克铜矿床流体包裹体均一温度-盐度图

Fig. 6 Salinity versus homogenization temperature of fluid inclusions of the Qiongbulake copper deposit

被减压沸腾所沉淀的方解石和硫化物等所充填,后续上升的流体通道被堵塞,流体由静水压力逐渐转化为静岩压力,沸腾作用停止。此后,随着流体内压的不断增高,当新一轮构造破碎发生时,沸腾作用便可能再次发生(Calagari, 2004)。本次研究中的VL型和LVa型包裹体可能为减压沸腾的结果。

测温结果显示,琼布拉克铜矿床VL型和LVa型包裹体的均一温度上限可达340~350℃,考虑到压力效应,其捕获温度应更高,这暗示该矿床的原始成矿流体可能是一种高温、高盐度的超临界流体,具有很高的渗透性和高的溶解能力,可以溶解大量的成矿金属。当这种流体进入张性断裂系统,由于“减压沸腾”突然卸载使成矿元素铜沉淀,同时形成了VL型和LVa型包裹体;在大多数情况下,由于温度和压力的逐渐下降,富含成矿元素的成矿流体缓慢卸载使成矿元素铜沉淀,并形成捕获温度和盐度连续变化的LVb型包裹体。铜在流体中主要以氯化物 $\text{CuCl}_{\text{aq}}$ (Crerar et al., 1976)或 $\text{CuCl}_2$ (Var'yash et al., 1981; Zotov et al., 1995)的形式存在。Cu的溶解度随着Cl含量的降低而降低,达到饱和状态即形成黄铜矿。在温度低于250℃的热水溶液中,铜硫化物的溶解度大大减小,有利于铜质的沉淀(李荫清等, 1995)。琼布拉克铜矿床的流体包裹体均一温度峰值主要出现在250℃以下,这表明温度降低是导致该矿床铜沉淀的主要原因之一。

通过公式计算,琼布拉克铜矿床流体包裹体的密度在0.62~1.04 g/cm<sup>3</sup>之间变化,主要集中在0.70~0.99 g/cm<sup>3</sup>,与前人研究(Roedder, 1976)的多数岩浆热液流体密度(<1.0 g/cm<sup>3</sup>)相当,说明岩浆热液流体是成矿流体的来源之一。

琼布拉克铜矿床流体包裹体数量多、粒径大,富气相及富液相包裹体均有,气相分数变化范围大,成分以H<sub>2</sub>O为主,未见以CO<sub>2</sub>为主的包裹体出现,与杨巍然等(1996)所指出的张性断裂体系中流体包裹体特征相似,这也在一定程度上暗示该矿床的形成受张性构造的控制。沿琼布拉克大断裂两侧分布的次级断裂是主褶皱构造形成过程中的伴生层间滑脱构造(常印佛等, 1991),它们具有张性特征,不但是成矿流体运移的主要通道,而且还是重要的储矿构造。

玉希莫勒盖达坂及艾肯达坂火山岩的地球化学特征及同位素年代学的研究显示,阿吾拉勒地区在二叠纪进入了后俯冲演化阶段,区内二叠系火山岩

均是后俯冲岩浆作用的产物(牛贺才等, 2010; 罗勇等, 2010)。研究显示,在后俯冲伸展(软流圈上涌或岩石圈地幔减薄)过程中形成了相当数量的幔源橄榄粗岩或夏威夷质的基性碱性岩浆岩,它们为区内铜矿床的形成提供了充足的成矿物质(成矿流体和成矿元素)和成矿能量,对区内铜矿床的形成具有明显的制约作用。

## 6 结 论

(1)琼布拉克铜矿床流体包裹体发育,主要为气液两相包裹体,另有少量的气相包裹体,未见富CO<sub>2</sub>包裹体和含子矿物包裹体。具有典型张性断裂体系中流体包裹体组合特征,暗示区域张性断裂构造体系对该矿床的形成具有明显的控制作用。

(2)流体包裹体测温结果显示,琼布拉克铜矿床的流体包裹体均一温度峰值主要出现在250℃以下,表明温度降低是导致该矿床铜沉淀的主要原因之一,而VL和LVa两种类型包裹体的均一温度相近且较高,但盐度差别较大,它们的形成很可能与“减压沸腾”过程有关。两类包裹体的存在一定程度上暗示“减压沸腾”也是琼布拉克铜矿床铜沉淀富集机制之一。

(3)琼布拉克铜矿床方解石中碳、氧稳定同位素特征表明成矿流体主要源于地幔,它是地幔岩浆流体去气作用的产物。

志 谢 在野外工作中得到了新疆维吾尔自治区国家305项目办公室、新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第七地质大队、吉林省通化地质矿产勘查开发院、江西省地质调查研究院等有关单位领导和同志的大力支持,匿名审稿人为本稿的审阅和发表付出了大量时间和精力,在此一并表示谢忱!

## References

- Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H<sub>2</sub>O-NaCl solutions[J]. *Geochemical et Cosmochimica Acta*, 57: 683-684.
- Calagari A A. 2004. Fluid inclusion studies in quartz veinlets in the porphyry copper deposit at Sungun, East Azarbaijan, Iran[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 179-189.
- Chang Y F, Liu X P and Wu Y C. 1991. The copper-iron belt of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River[M]. Beijing: Geol.

- Pub. House. 2-48 (in Chinese).
- Crerar D A and Barnes H L. 1976. Ore solution chemistry(V): Solubilities of chalcopyrite assemblages in hydrothermal solution at 200 to 350°C [J]. *Econ. Geol.*, 71: 772-794.
- Cline J S. 2003. How to concentrate copper [J]. *Science*, 302( 5653 ): 2075-2076.
- Coplen T B, Kendall C and Hople J. 1983. Comparison of stable isotope reference samples [J]. *Nature*, 302: 236-238.
- Demeny A, Dallai L, Frezzotti M L, Vennemann T W, Embey-isztin A, Dobosi G and Nagy G. 2010. Origin of CO<sub>2</sub> and carbonate veins in mantle-derived xenoliths in the Pannonian Basin [J]. *Lithos*, 117: 172-182.
- Hedenquist J W and Henley R W. 1985. The importance of CO<sub>2</sub> on freezing point measurements of fluid inclusions: Evidence from active geothermal systems and implications for epithermal ore deposition [J]. *Econ. Geol.*, 80: 1379-1406.
- Heinrich C A, Ryan C G, Mernagh T P and Eadington P J. 1992. Segregation of ore metals between magmatic brine and vapor: A fluid inclusion study using PIXE microanalysis [J]. *Econ. Geol.*, 87( 6 ): 1566-1583.
- Keller J and Hoefs J. 1995. Stable isotope characteristics of recent natrocarbonatites from Oldoinyo Lengai [A]. In: Bell K, ed. Carbonatites volcanism: Oldoinyo Lengai and Petrogenesis of Natrocarbonatites [C]. *Lavcei Proceeding in Volcanology Lavcei*. 4: 113-123.
- Lei Y J. 1993. Simple analysis of deposit genesis and P<sub>1</sub>t<sup>5</sup> volcanic rock geochemistry characteristic in the Qiongbulake copper deposit [J]. *Mineral and Geology of Xinjiang*, 1: 165-170 (in Chinese).
- Liu B and Shen K. 1999. Thermodynamics of fluid inclusion [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 118p (in Chinese).
- Liu D. 2005. Potential analysis and geological features of the Qiongbulake copper deposit, Xinjiang [J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 28( 1 ): 2-4 (in Chinese).
- Li X J. 1990. Simple analysis of metallization and Permian volcanic cycle of Qiongbulake [J]. *Mineral and Geology of Xinjiang*, 1: 80-84 (in Chinese).
- Li Y Q and Chen D F. 1995. Process of the Xiaoxinancha gold-copper deposit, Jilin Province [J]. *Mineral Deposits*, 14( 2 ): 151-173 (in Chinese with English abstract).
- Lu H Z, Liu Y M, Wang C L, Xu Y Z, Li H Q. 2003. Mineralization and fluid inclusion study of the Shizhuyuan W-Sn-Bi-Mo-F skarn deposit, Hunan Province, China [J]. *Econ. Geol.*, 98( 5 ): 955-974.
- Lu H Z, Fan H R, Ni P, Ou G X, Shen K and Zhang W H. 2004. Fluid inclusion [M]. Beijing: Science Press. 370-394 (in Chinese).
- Luo Y, Niu H C, Shan Q, Yang W B, Zhang B, Zhou C P, Liao S P and Yu X Y. 2010. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Aikendaban Permian shoshonite in the western Tianshan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26( 10 ): 2925-2934 (in Chinese with English abstract).
- Meinert L D, Heflon K K, Mayes D and Tasiran I. 1997. Geology and fluid evolution of the Big Gossan Cu-Au skarn deposit, Ertzberg district, Jura [J]. *Econ. Geol.*, 92( 5 ): 509-534.
- Mo J P and Cai H Y. 1997. Metallogenic model of the Qiongbulake copper deposit in Xinjiang [J]. *Mineral Resources and Geology*, 11( 1 ): 26-31 (in Chinese with English abstract).
- Niu H C, Shan Q, Luo Y, Yang W B, Zhou C P, Liao S P and Yu X Y. 2010. Geochronological and geochemical studies on quartz diorite in Yuximolegai Daban, west Tianshan and its tectonic implication [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26( 10 ): 2935-2945 (in Chinese with English abstract).
- Roedder E. 1976. Fluid-inclusion evidence on the genesis of ores in sedimentary and volcanic rocks [J]. *Geochemical Studies*, 2: 67-110.
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions [J]. *Reviews in Mineralogy*, 12.
- Roedder E. 2002. Fluid Inclusions [M]. *Encyclopedia of Physical Sciences and Technology*. Third Edition. 2: 71-77.
- Taylor H P, Frechen J and Degens E T. 1967. Oxygen carbon isotope studies of carbonatites from the Laachersee district West Germany and Alno district, Sweden [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31: 407-430.
- Var'yash L N and Rekharskiy V I. 1981. Behaviour of Cl(I) in chloride solution [J]. *Geochem. Int.*, 7: 1003-1008.
- Wang S M. 1989. Study result and discovery of the Qiongbulake copper-silver deposit [J]. *Mineral and Geology of Xinjiang*, 1: 16-27 (in Chinese).
- Wang S M. 1994. Secondary ore-prospecting effect of the Qiongbulake copper-silver deposit [J]. *Mineral Resources and Geology*, 8( 5 ): 363-368 (in Chinese).
- Wang Y X. 1997. Discuss of mineral in Yili subplate from Xinjiang [J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 2: 1-7 (in Chinese).
- Wei H M, Wu W K and Xue C J. 1999. Metallogenic series and their formation and evolution in Western Tianshan, Xinjiang [J]. *Acta Geological Sinica*, 73( 3 ): 219-230 (in Chinese).
- Wei Z Q. 1993. Geological characteristics of the Qiongbulake copper deposit in Xinjiang [J]. *Mineral and Geology of Xinjiang*, 1: 75-84 (in Chinese).
- Yang M D, Mo J P and Cai H Y. 2009. Analysis of geological feature and ore-controlling condition of Qiongbulake copper deposit in west Aiulale region, Xinjiang [J]. *Mineral Resources and Geology*, 23( 3 ): 230-234 (in Chinese with English abstract).
- Yang W R and Zhang W H. 1996. Character of fault property and combination of fluid inclusions [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 21( 3 ): 285-290 (in Chinese with English abstract).
- Zhang D H. 1997. Some new advances in ore-forming fluid geochemistry on boiling and mixing of fluids during the processes of hydrothermal deposits [J]. *Advances in Earth Science*. 12( 6 ): 546-552 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W H, Zhang Z J and Wu G. 1996. Ore-forming fluid and mineralization mechanism [J]. *Earth Science Frontiers*, 4( 3 ): 245-252

(in Chinese with English abstract).

- Zheng Y F and Chen J F. 2000. Stable isotope geochemistry[M]. Beijing: Science Press. 155-208 (in Chinese).
- Zotov A V, Kudrin A V, Levin K A, Shikina N D and Var'yash L N. 1995. Experimental studies of the solubility and complexing of selected ore elements (Au, Ag, Cu, Mo, As, Sb, Hg) in aqueous solution[A]. In: Shmulovich K I, Yardley B W D, Gonchar G, eds. Fluid in the crust[C]. London: Chapman and Hall. 95-138.

#### 附中文参考文献

- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带研究[M]. 北京: 地质出版社. 2-48.
- 雷宇涓. 1993. 穷布拉克铜矿区  $P_1t^5$  火山岩岩石化学特征及矿床成因浅析[J]. 新疆矿产地质, 1: 165-170.
- 李小军. 1990. 穷布拉克二叠纪火山旋回及其成矿作用浅析[J]. 新疆矿产地质, 1: 80-84.
- 李荫清, 陈殿芬. 1995. 吉林小西岔金铜矿床流体包裹体及成矿作用研究[J]. 矿床地质, 14(2): 151-173.
- 刘斌, 沈昆. 1999. 流体包裹体热力学[M]. 北京: 地质出版社. 118页.
- 刘荻. 2005. 新疆穷布拉克铜矿地质特征及远景分析[J]. 新疆有色金属, 28(1): 2-4.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 2004. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社. 11-33.
- 罗勇, 牛贺才, 单强, 杨武斌, 张兵, 周昌平, 廖思平, 于学

- 元. 2010. 西天山艾肯达坂二叠纪钾质火山岩的地球化学特征及岩石成因[J]. 岩石学报, 26(10): 2925-2934.
- 莫江平, 蔡宏渊. 1997. 新疆穷布拉克铜矿床成矿模式[J]. 矿产与地质, 11(1): 26-31.
- 牛贺才, 单强, 罗勇, 杨武斌, 周昌平, 廖思平, 于学元. 2010. 西天山玉希莫勒盖达坂石英闪长岩的微量元素地球化学及同位素年代学研究[J]. 岩石学报, 26(10): 2935-2945.
- 王士明. 1989. 穷布拉克铜银矿床的发现与主要研究成果[J]. 新疆矿产地质, 1: 16-27.
- 王士明. 1994. 穷布拉克(铜、银)矿化探二次开发找矿效果[J]. 矿产与地质, 8(5): 363-368.
- 王永新. 1997. 新疆伊犁亚板块矿产初探[J]. 新疆有色金属, 2: 1-7.
- 隗合明, 吴文奎, 薛春纪. 1999. 新疆西天山金属矿床成矿系列及形成演化规律[J]. 地质学报, 73(3): 219-230.
- 魏在强. 1993. 新疆穷布拉克铜矿地质特征[J]. 新疆矿产地质, 1: 75-84.
- 杨明德, 莫江平, 蔡宏渊. 2009. 新疆阿吾拉勒西段穷布拉克铜矿地质特征及控矿条件分析[J]. 矿产与地质, 23(3): 230-234.
- 杨巍然, 张文淮. 1996. 断裂性质与流体包裹体组合特征[J]. 地球科学, 21(3): 285-290.
- 张德会. 1997. 流体的沸腾和混合在热液成矿中的意义[J]. 地球科学进展, 12(6): 546-552.
- 张文淮, 张志坚, 伍刚. 1996. 成矿流体及成矿机制[J]. 地学前缘, 4(3): 245-252.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 155-208.

<http://www.kw.com>