

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2020.4.3

# 新疆北部弧—盆转化体系下铁氧化物—铜—金矿床的流体演化特征:来自卤族元素和稀有气体同位素的证据

梁培<sup>1,2</sup>, 陈华勇<sup>2,\*</sup>, 赵联党<sup>3</sup>, Kendrick MARK<sup>4</sup>, 江宏君<sup>2,5</sup>, 张维峰<sup>6</sup>,  
吴超<sup>2</sup>, 谢玉玲<sup>1</sup>

1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083
2. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640
3. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710064
4. Research School of Earth Sciences, Australian National University, Acton 2601, Australia
5. 中国科学院大学, 北京 100049
6. 中国地质调查局 武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205

LIANG Pei<sup>1,2</sup>, CHEN Huayong<sup>2,\*</sup>, ZHAO Liandang<sup>3</sup>, Kendrick MARK<sup>4</sup>, JIANG Hongjun<sup>2,5</sup>,  
ZHANG Weifeng<sup>6</sup>, WU Chao<sup>2</sup>, XIE Yuling<sup>1</sup>

1. Civil and Resource Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China
3. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710064, China
4. Research School of Earth Sciences, Australian National University, Acton 2601, Australia
5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
6. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China

LIANG Pei, CHEN Huayong, ZHAO Liandang, et al. Fluid evolution of iron oxide-Cu-Au (IOCG) deposits in the basin inversion setting, North Xinjiang: constraints from halogen and noble gas composition of fluid inclusions. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(3): 239-253

**Abstract:** Represented by the Laoshankou, Qiaoxiahala and Heijianshan deposits, the northern margin of East Junggar and the Yamansu belt of East Tianshan are two important potential belts for iron oxide Cu-Au (IOCG) mineralization in North Xinjiang. All IOCG deposits in these two regions formed in a basin inversion setting and show significant two-stage mineralization. In this study, we used halogen and noble gases as reliable tracers to track the fluid sources and evolution of these deposits. The results showed that three different fluid end members are mainly involved in the mineralization processes of the three deposits: (1) the magmatic hydrothermal fluid, with I/Cl, Br/Cl and <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar ratios of (16.3–18.0) × 10<sup>-6</sup>, (1.03–1.06) × 10<sup>-3</sup> and 352–437, respectively, in the magnetite stage of the Heijianshan deposit; (2) surface-derived basin brine by seawater evaporation, with I/Cl, Br/Cl and <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar ratios of (77.1–87.7) × 10<sup>-6</sup>, (1.53–1.80) × 10<sup>-3</sup> and 672–883, respectively, in the copper-gold stage of the Laoshankou deposit; and (3) basin brine or formation water by water-rocks reaction and evaporate dissolution, with I/Cl, Br/Cl and <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar ratios of (477–26 301) × 10<sup>-6</sup>, (0.39–1.28) × 10<sup>-3</sup> and 288–510, respectively, as the main mineralizing fluids in the magnetite stage of the Laoshankou and Qiaoxiahala deposits and for the Cu-Au mineralization of the Qiaoxiahala and Heijianshan deposits. The obvious multi-stage mineralization and involvement of Ca-rich hypersaline non-magmatic brines in the Cu-Au stage in the iron oxide Cu-Au deposits

收稿日期:2019-10-11;修回日期:2020-03-10

基金项目:国家自然科学基金项目(U1603244);中国博士后科学基金面上资助项目(2019M650480);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-18-080A1);中国科学院 B 类战略性先导科技专项项目(XDB18030206)

作者简介:梁培(1990—),女,博士后,矿业工程专业。E-mail:liangpei1990@gmail.com

\*通信作者简介:陈华勇(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事矿床学研究。E-mail:huayongchen@gig.ac.cn

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2020,27(3)

in North Xinjiang resemble the characteristics of other IOCG type deposits in the world.

**Keywords:** fluid evolution; iron oxide-Cu-Au deposit; halogen; noble gas; North Xinjiang

**摘要:**东准噶尔北缘和东天山雅满苏带是中国新疆北部地区两个重要的晚古生代铁氧化物-铜-金矿化潜力区,以老山口、乔夏哈拉和黑尖山矿床作为典型矿床代表。研究表明两区域的铁氧化物-铜-金矿床均产于盆地闭合的弧盆转化体系下,且具有明显的铁、铜-金两阶段矿化。卤族元素和稀有气体同位素作为可靠的流体示踪剂,被应用于探究这一特定构造环境下的铁氧化物-铜-金矿床的流体演化和矿床成因。结果显示老山口、乔夏哈拉和黑尖山矿床的成矿流体具有明显的混合流体端员特征:(1)岩浆流体端员,主要参与黑尖山矿床磁铁矿阶段, I/Cl、Br/Cl 和  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值分别为  $(16.3\sim 18.0)\times 10^{-6}$ 、 $(1.03\sim 1.06)\times 10^{-3}$  和 352~437;(2)海水表源蒸发成因盐卤水端员,主要参与老山口矿床铜-金矿化阶段, I/Cl、Br/Cl 和  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值分别为  $(77.1\sim 87.7)\times 10^{-6}$ 、 $(1.53\sim 1.80)\times 10^{-3}$  和 672~883;(3)蒸发岩溶解或者深度水-岩反应成因的盐卤水/沉积岩地层水端员,主要参与到老山口、乔夏哈拉矿床的磁铁矿阶段以及黑尖山、乔夏哈拉矿床的铜-金矿化阶段,综合 I/Cl、Br/Cl 和  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值分别为  $(477\sim 26\ 301)\times 10^{-6}$ 、 $(0.39\sim 1.28)\times 10^{-3}$  和 288~510。明显的多阶段矿化和铜-金矿化阶段以非岩浆富 Ca 高盐度卤水为主的特征与世界范围内的 IOCG 型矿床极为相似,表明新疆北部的铁氧化物-铜-金矿床应为 IOCG 型矿床。

**关键词:** 流体演化; 铁氧化物-铜-金矿床; 卤族元素; 稀有气体同位素; 新疆北部

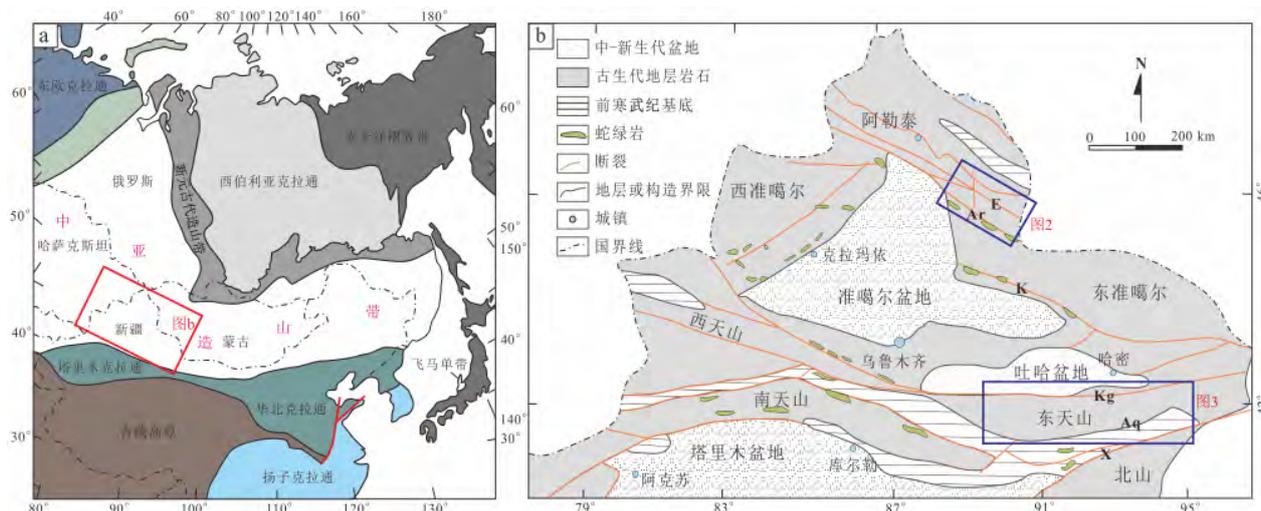
**中图分类号:** P611; P595 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2020)03-0239-15

## 0 引言

中亚造山带(CAOB)是全球最大的显生宙陆壳增生与改造带<sup>[1]</sup>,北起西伯利亚板块,南至塔里木—华北板块,东以太平洋为界,西到乌拉尔山脉,处于亚欧大陆的核心部位(图 1a)<sup>[2]</sup>。在中国西北地区,自北向南包含阿尔泰造山带、准噶尔地块以及天山造山带。作为其中准噶尔地块以及天山造山带的重要组成部分(图 1b)<sup>[3-4]</sup>,东准噶尔北缘和东天山雅满苏带是新疆北部两个重要的晚古生代铁、铜、金多金属成矿带,具有较好的铁氧化物-铜(-金)矿床勘查潜力<sup>[5-7]</sup>。目前,两区域已发现有一系列赋存于晚古生代海相火山岩地层中的相关矿床,其中包含东准噶尔北缘的乔夏哈拉铁-铜-金矿床、老山口铁-铜-金矿床和科克库都克铜-金矿床以及东天山雅满苏带的黑尖山铁-铜(-金)矿床、沙泉子铁-铜矿床、百灵山铁-铜矿床和多头山铁-铜矿床等<sup>[5-9]</sup>。前人曾对该类矿床的地质特征及矿床成因机制进行过一系列研究,虽取得了丰富的资料,但对矿床成因机制的认识仍然存在较大分歧<sup>[7-17]</sup>。总结前人的成因认识,可以归纳为 3 点:(1)海相火山岩型矿床;(2)夕卡岩型矿床;(3)IOCG 型矿床。归结产生分歧的根源,是前人对于该类矿床不同矿化阶段成矿流体来源和演化的认识不同,因此如何能够准确厘定成矿流体来源便成为探究矿床成因机制的关键。

近年来卤族元素(Cl、Br、I)和稀有气体同位素(Ar、Kr、Xe)因其相对稳定的化学特征,已被作为可靠的流体示踪剂,逐渐应用于不同构造地质环境、不同成因类型矿床成矿流体初始来源和成矿过程的比较研究中<sup>[18]</sup>。特别是在区分岩浆热液流体、盆地卤水、低温变质水方面具有独特的实用价值:(1)稀有气体同位素组成在不同源区端员中存在数量级的变化,如流体中的  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值在水圈(即空气饱和水 ASW,  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值 295.5)、近地表沉积岩地层水( $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值约 2 000)和深部地壳或幔源流体( $n\times 10^4$ )中存在明显不同,从而可以有效区分流体来源并能定量探究各端员组分在流体中的比例<sup>[19-20]</sup>;(2)水岩反应过程中,地壳中的稀有气体同位素( $^{36}\text{Ar}$  和  $^{40}\text{Ar}_E$ )可以有效指示水岩反应程度、流体在储水层中的滞留时间和储水层岩相学信息<sup>[21-23]</sup>;(3)卤族元素可以最大限度的保留原始流体的特征<sup>[24]</sup>,同时为流体盐度提供佐证信息<sup>[25]</sup>,进一步指导不同流体来源的区分;(4)卤族元素中的 I 与有机组分具有很强的相关性<sup>[26]</sup>,对于区分有机水,判断地层水、盆地卤水与富有机质沉积岩地层的相互反应情况具有重要意义。综上,我们有理由相信流体包裹体卤族元素和稀有气体同位素分析可以有效区分矿床不同矿化期的流体来源,为矿床成因机制的探讨提供依据。

本文分别选取了东准噶尔北缘的老山口和乔夏哈拉矿床以及东天山雅满苏带的黑尖山矿床作为典型矿床代表,选取其中不同矿化阶段的代表性矿物进行流体包裹体卤族元素和稀有气体同位素测试分



E—额尔齐斯断裂; Ar—阿尔曼台断裂; K—卡拉麦里断裂; Kg—康古尔断裂; Aq—阿奇克库都克断裂; X—星星峡断裂。

图1 中亚造山带构造分区简图(a)和新疆北部地质简图(b)

(据文献[2-4]修改)

Fig.1 Simplified tectonic divisions of the Central Asian Orogenic Belt(a) and simplified geological map of North Xinjiang(b). Modified from [2-4].

析,以厘定该类矿床的成矿流体来源和演化规律并为矿床成因机制提出进一步的认识。

## 1 地质背景

### 1.1 区域地质

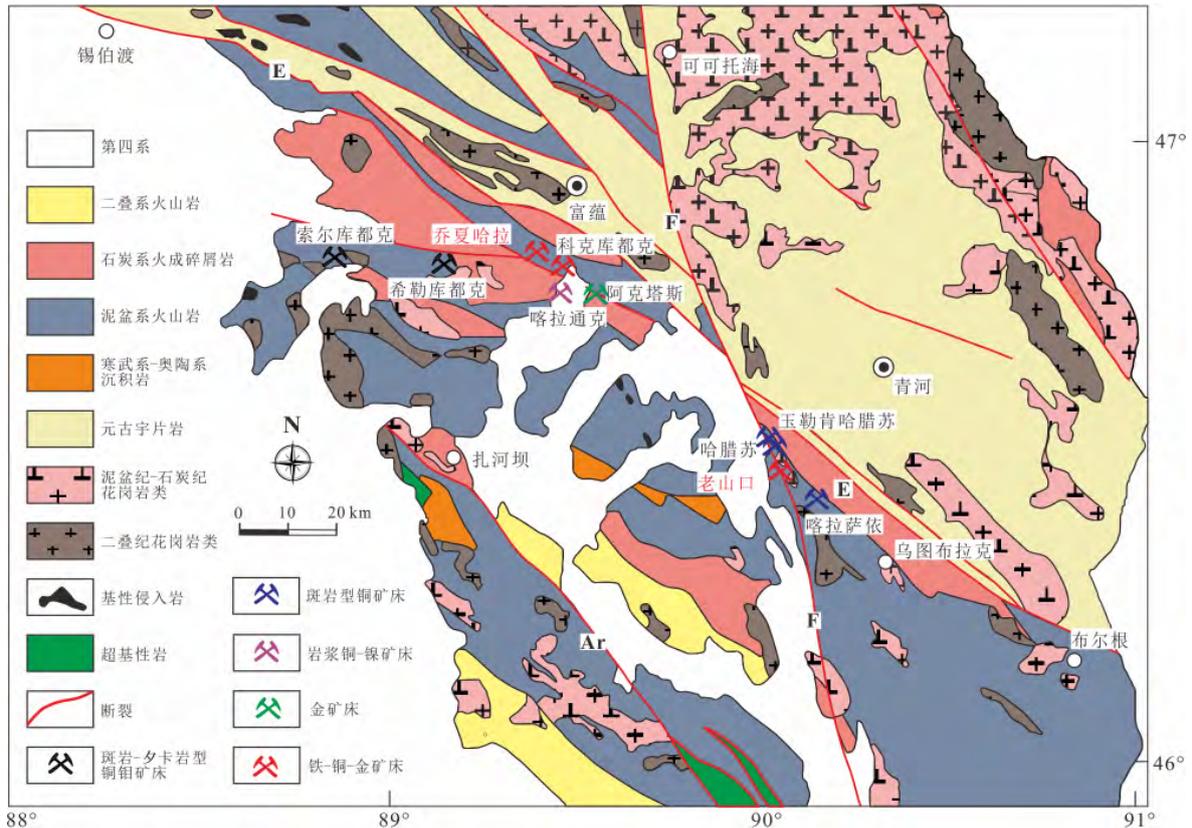
东准噶尔北缘位于准噶尔地块东北部,处于西伯利亚板块和哈萨克斯坦—准噶尔板块的结合部位,以额尔齐斯深大断裂为界,北临阿尔泰造山带南缘(图1b)<sup>[3-4]</sup>。区域出露地层以上古生界火山—沉积序列为主,下古生界地层发育较少,两者呈不整合接触关系<sup>[27-28]</sup>,其中中泥盆统北塔山组和下石炭统南明水组为本区主要的赋矿地层。地层总体呈NW或NNW向展布,与区域断裂构造延伸方向相同。区域构造以NW向的额尔齐斯大断裂和NNW向的富蕴大断裂为主,伴随有多条次级断裂(图2)<sup>[7,12,29]</sup>。

区域长英质岩浆岩广泛发育,主要分布于扎河坝西北和额尔齐斯—富蕴大断裂的交汇处,包含泥盆纪—石炭纪花岗岩类和二叠纪花岗岩类(图2)<sup>[7,12,29]</sup>。近期研究表明区域长英质岩浆岩主要存在两期,一期为390~370 Ma与古准噶尔洋向南俯冲有关的钙碱性岩浆岩,另一期为330~280 Ma与后碰撞—后造山伸展有关的钙碱性—碱性岩浆岩<sup>[29-32]</sup>。

东天山雅满苏带位于东天山构造带的中部,北以雅满苏断裂带为界与康古尔剪切带相邻,南以阿奇克库都克断裂为界与中天山地块相接(图3)<sup>[33]</sup>。出露地层主要由下石炭统火山—沉积岩系及二叠系

互层的海相和陆相碎屑岩组成<sup>[13]</sup>。其中,上石炭统的马头滩组为主要的赋矿地层。晚石炭世—早二叠世花岗岩类侵入到晚古生代地层中,主要分布于雅满苏带的东部(图3)<sup>[33]</sup>。

前人年代学数据显示<sup>[15-17,34]</sup>,东天山雅满苏带铁氧化物—铜—金矿床的产出时代主要集中于320~290 Ma,如沙泉子(315~305 Ma)、多头山(324~288 Ma)、百灵山(314~307 Ma)和黑尖山(约316 Ma)矿床等。相比之下,东准噶尔北缘铁氧化物—铜—金矿床的产出时代相对较老,主要集中在390~370 Ma。对于东准噶尔北缘和东天山雅满苏带与铁氧化物—铜—金矿床相关的晚古生代的构造演化,前人曾进行大量的研究<sup>[30,35-40]</sup>,然而对于各自构造演化过程和俯冲极性的认识还存在很大分歧。近年来,通过对雅满苏构造带中沙泉子矿床中晚石炭世沙泉子组玄武岩<sup>[41]</sup>以及东准噶尔北缘老山口和乔夏哈拉矿床北塔山组玄武岩<sup>[40,42-43]</sup>岩石地球化学的研究,表明东天山雅满苏构造带晚石炭世(C1;320~300 Ma)处于弧后盆地逐渐闭合重新形成岛弧体系的过程中,而东准噶尔北缘中泥盆世(D2-D3;390~370 Ma)玄武岩产出于俯冲相关的大洋岛弧环境(西太平洋型),并兼具弧后盆地的构造特征,即两者均处于由弧后盆地向岛弧转化的弧盆转化体系下。因此,东准噶尔北缘和东天山雅满苏构造带晚古生代的铁氧化物—铜—金矿床均产出于弧盆转化体系,而这一独特的构造特征与中安第斯 IOCG 成矿带所处的中生代构造演化过程基本相似<sup>[44]</sup>。



E—额尔齐斯断裂;F—富蕴断裂;Ar—阿尔曼台断裂。  
图2 南阿尔泰—东准噶尔北缘接触造山带区域图  
(据文献[7,12,29]修改)

Fig.2 Regional metallogenic map of the contacting region between the southeastern Altay orogenic belt and northeastern Junggar terrane. Modified from [7,12,29].

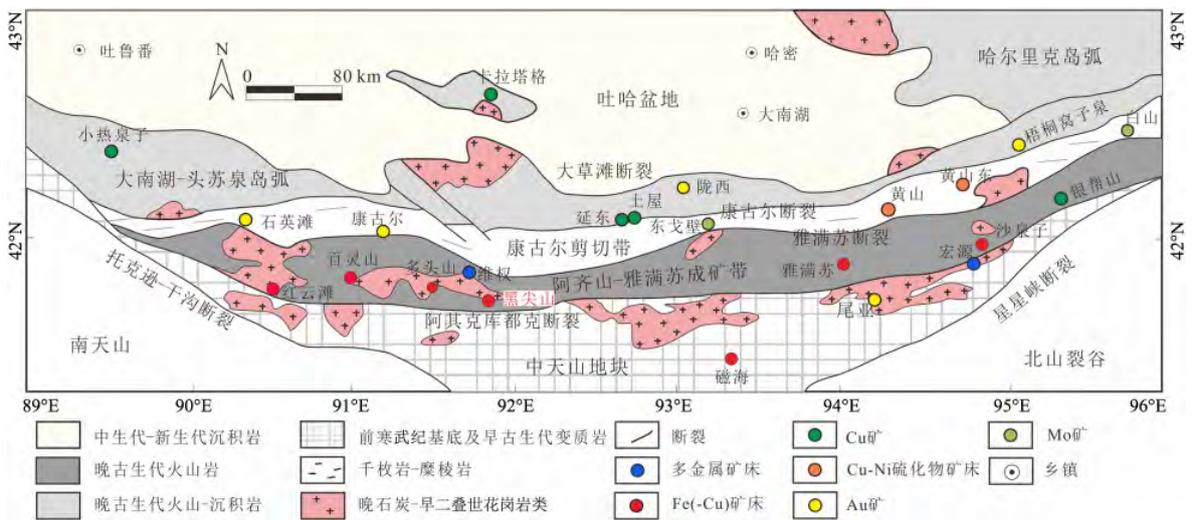


图3 东天山地质-矿产简图  
(据文献[33]修改)

Fig.3 Geological map of the eastern Tianshan orogenic belt showing the distribution of major ore deposits. Modified from [33].

### 1.2 矿床地质

为探究上述新疆北部弧盆转化体系下铁氧化物-铜-金矿床的成因机制,本文选取老山口、乔夏哈拉、黑尖山 3 个典型矿床进行不同矿化阶段相关流

体包裹体卤族元素和稀有气体同位素的研究。前人对 3 个矿床的地质特征进行过大量描述<sup>[7,10-12,16]</sup>,研究认为以上矿床均赋存于海相火山岩地层中,且具有明显的铁、铜-金两阶段成矿的特点。根据野外观

察和薄片鉴定,老山口矿床被划分为4个蚀变-矿化阶段:(Stage L-I)钙硅酸盐蚀变阶段;(Stage L-II)角闪石-绿帘石-磁铁矿矿化阶段,是主要的磁铁矿成矿阶段;(Stage L-III)黄铁矿-黄铜矿矿化阶段,是重要的铜-金矿化阶段;(Stage L-IV)后期脉阶段。乔夏哈拉矿床被划分为6个蚀变-矿化阶段:(Stage Q-I)早夕卡岩阶段,包含石榴子石等干夕卡岩矿物;(Stage Q-II)晚夕卡岩阶段,包含绿帘石和角闪石等湿夕卡岩矿物;(Stage Q-III)磁铁矿矿化阶段,以磁铁矿-钾长石-磷灰石-绿帘石矿物组合为代表;(Stage Q-IV)磁铁矿-黄铁矿矿化阶段,以磁铁矿-石英-方解石矿物组合为代表;(Stage Q-V)黄铜矿矿化阶段,以黄铜矿-绿泥石-方解石矿物组合为代表;(Stage Q-VI)后期脉阶段。黑尖山矿床可划分为6个阶段:(Stage H-I)绿帘石蚀变阶段;(Stage H-II)磁铁矿矿化阶段,包含早期赤铁矿化和晚期磁铁矿-角闪石-石英矿化;(Stage H-III)黄铁矿蚀变阶段,以黄铁矿-石英矿化组合为代表;(Stage H-IV)铜-金矿化阶段,以黄铜矿-方解石-石

英矿化组合为代表;(Stage H-V)后期脉;(Stage H-VI)表生蚀变阶段。

## 2 分析样品和方法

### 2.1 样品及流体包裹体特征

在已有成矿期次精细化分和细致流体包裹体显微岩相学观察的基础上,分别选取老山口、乔夏哈拉和黑尖山矿床磁铁矿矿化阶段和铜-金矿化阶段(或硫化物阶段)富含流体包裹体的代表性矿物,其中包含Stage H-II的1件石英、Stage H-III的1件石英、Stage Q-III的1件石英、Stage Q-V的2件方解石、Stage L-II的3件绿帘石和Stage L-III的2件绿帘石,共10件样品(表1)。本文对黑尖山矿床相关样品及其流体包裹体特征进行说明(图4)。Zhao等<sup>[16]</sup>通过对黑尖山矿床不同阶段流体包裹体特征的研究得出,磁铁矿矿化阶段成矿流体以高温(536 °C)、高盐度(56%)为特征。黄铁矿蚀变阶段成矿流体以中温(262 °C)、高盐度(34.7%)为特征。

表1 新疆北部铁氧化物-铜-金矿床测试样品简介

Table 1 Descriptions of analytical samples from iron oxide-copper-gold deposits in North Xinjiang

矿床	阶段	样品号	采样位置	描述
黑尖山	Stage H-II 磁铁矿矿化阶段	HJ13-003	露天主采坑底部	块状磁铁矿-赤铁矿-石英矿石
	Stage H-III 黄铁矿蚀变阶段	HJ13-001	露天主采坑底部	块状磁铁矿-赤铁矿-石英矿石
乔夏哈拉	Stage Q-III 磁铁矿矿化阶段	QX-053	N46°48'20.19", E89°39'50.27"	破碎带中的石英-钾长石脉
	Stage Q-V 黄铜矿矿化阶段	QX-009	N46°48'57.72", E89°39'10.88"	破碎带中的石英-方解石-孔雀石脉
	Stage Q-V 黄铜矿矿化阶段	QX-014	N46°48'54.18", E89°39'20.51"	围岩中的石英-方解石-孔雀石脉
老山口	Stage L-II 磁铁矿矿化阶段	LS-024	N46°28'14.82"; E90°6'3.98"	火山岩中的条带状夕卡岩-磁铁矿带
	Stage L-II 磁铁矿矿化阶段	LS14-029	五号矿井第3巷道	浸染状磁铁矿-绿帘石矿石
	Stage L-III 金属硫化物阶段	LS14-065	五号矿井第7巷道	块状的磁铁矿-绿帘石矿石
	Stage L-III 金属硫化物阶段	LS14-038	五号矿井第5巷道	火山岩中的绿帘石-黄铁矿脉
	Stage L-III 金属硫化物阶段	LS14-056	五号矿井第7巷道	块状磁铁矿中的绿帘石-黄铁矿脉



a—块状磁铁矿-赤铁矿-石英矿石(HJ13-001);b—块状磁铁矿-赤铁矿-石英矿石(HJ13-003)。Hem—赤铁矿;Mag—磁铁矿;Qtz—石英。

图4 黑尖山矿床磁铁矿矿石手标本照片

Fig.4 Photographs of hand specimen of magnetite ore rocks from the Heijianshan deposit

## 2.2 技术方法

将上述所选样品研磨至 40~60 目, 在双目镜下对单矿物挑纯 1~2 g, 使纯度达到 99%, 随后在超声波清洗器中清洗, 干燥后用铝箔包裹好。将处理好的样品连同 Ar-Ar 通量监控剂 (Hb3Gr, GA1550)<sup>[45]</sup> 和 Shallowater I-Xe 标样<sup>[18,46]</sup> 一同密封在玻璃管中, 将样品放入核反应堆中照射 47 MWh。将照射后样品 (各 50~100 mg) 用锡箔纸包裹好, 放入改进的 Nupro 真空管中, 以待真空破碎分析。在此过程中, 样品在 120 °C 的温度下被烘烤 24 h 以达到超真空状态。随后通过连续的 2~4 次破碎分析以打开不同的流体包裹体群, 并释放出稀有气体组分。释放的气体成分采用冷-热 Zr-Al 吸收剂吸收, 随后通过超真空抽气管道被接入到 MAP 215-50 稀有气体质谱仪, 分析 Ar、Kr 和 Xe 等稀有气体同位素组成。Cl、K、Ca、Br、I 和 U 等元素含量则通过中子通量和稀有气体质谱仪所测得的放射成因的稀有气体同位素 (<sup>38</sup>Ar<sub>Cl</sub>、<sup>39</sup>Ar<sub>K</sub>、<sup>37</sup>Ar<sub>Ca</sub>、<sup>80</sup>Kr<sub>Br</sub>、<sup>128</sup>Xe<sub>I</sub> 和 <sup>134</sup>Xe<sub>U</sub>) 结合放射反应方程式计算获得。以上样品核辐射照射在美国加利福尼亚大学戴维斯分校的 McLellan Research and Reactor Center 完成, 卤族元素和稀有气体同位素组成分析在澳大利亚国立大学稀有气体实验室完成。具体的测试流程和方法详见文献<sup>[18,20]</sup>。

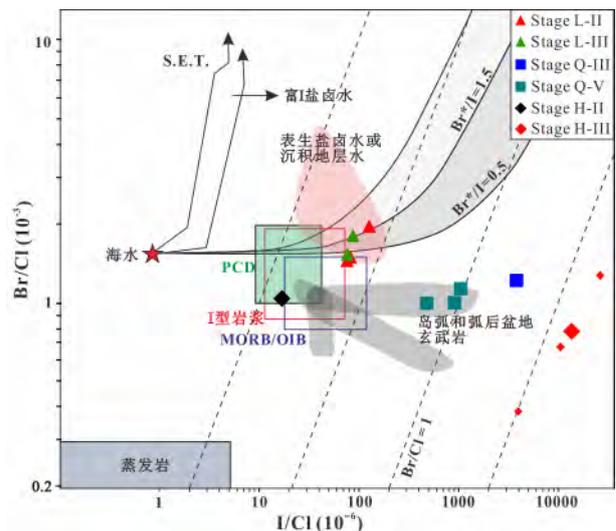
## 3 测试结果

新疆北部弧盆转化体系下老山口、乔夏哈拉和黑尖山矿床的铁和铜-金两阶段矿化的流体包裹体卤族元素和稀有气体同位素测试数据见表 2。其中老山口和乔夏哈拉矿床采用多次真空破碎分析结果的加权平均值 (大符号表示加权平均值), 黑尖山矿床多次真空破碎的测试数据在结果中均有体现 (小符号表示单次真空破碎测试值)。各矿床铁矿化和铜-金矿化阶段的卤族元素和稀有气体同位素数据总结如下。

### 3.1 卤族元素

老山口、乔夏哈拉和黑尖山矿床测试样品的卤族元素比值 I/Cl 和 Br/Cl 存在明显不同的区间范围和变化规律 (图 5)<sup>[18,47-57]</sup>。老山口矿床从铁矿化阶段到铜金矿化阶段, I/Cl 相对比较均匀, I/Cl 值分别为  $(76.5 \sim 127) \times 10^{-6}$  和  $(77.1 \sim 87.7) \times 10^{-6}$ , 而 Br/Cl 相对变化范围较大, Br/Cl 值分别为  $(1.45 \sim 1.96) \times 10^{-3}$  和  $(1.53 \sim 1.80) \times 10^{-3}$ 。同时, 由变化趋势可见 I 和 Br 含量应具有一定的负相关关系。乔夏

哈拉矿床从铁矿化阶段到铜-金矿化阶段, I/Cl 和 Br/Cl 比值变化与老山口矿床正好相反, I/Cl 相对变化范围较大, I/Cl 值分别为  $3.759 \times 10^{-6}$  和  $(477 \sim 1042) \times 10^{-6}$ , 而 Br/Cl 相对比较均匀, Br/Cl 值分别为  $1.22 \times 10^{-3}$  和  $(1.00 \sim 1.13) \times 10^{-3}$ 。上述两矿床各成矿阶段流体的卤族元素含量均明显偏离岩浆流体范围。黑尖山矿床磁铁矿矿化阶段和硫化物阶段的 I/Cl 和 Br/Cl 比值存在极端的两极差异, 磁铁矿阶段 I/Cl 和 Br/Cl 比值分别为  $(16.3 \sim 18.0) \times 10^{-6}$  (平均  $16.9 \times 10^{-6}$ ) 和  $(1.03 \sim 1.06) \times 10^{-3}$  (平均  $1.05 \times 10^{-3}$ ), 位于地幔岩浆流体范围内。黄铁矿硫化物阶段 I/Cl 和 Br/Cl 比值分别为  $(3.958 \sim 26.301) \times 10^{-6}$  (平均  $13.590 \times 10^{-6}$ ) 和  $(0.39 \sim 1.28) \times 10^{-3}$  (平均  $0.79 \times 10^{-3}$ ), 具有极高的 I/Cl 比值而明显偏离岩浆流体。



S.E.T.—海水和海水蒸发轨迹; 沉积海相孔隙流体的  $Br^*/I = 0.5 \sim 1.5$ , 含有机质流体的  $Br^*/I < 10$ 。大符号代表队多次测试均值, 小符号代表单次测试值, 下同。

图 5 老山口、乔夏哈拉和黑尖山矿床流体包裹体卤族元素 I/Cl-Br/Cl 图解 (据文献<sup>[18,47-57]</sup>修改)

Fig.5 I/Cl-Br/Cl discrimination diagram for fluid inclusions during different mineralization stages in the Laoshankou, Qiaoxiahala and Heijianshan deposits. Modified from <sup>[18,47-57]</sup>.

### 3.2 稀有气体同位素

流体包裹体中 <sup>40</sup>Ar 主要存在 3 种来源 (<sup>40</sup>Ar<sub>E</sub> + <sup>40</sup>Ar<sub>R</sub> + <sup>40</sup>Ar<sub>atm</sub> = <sup>40</sup>Ar<sub>total</sub>): <sup>40</sup>K 放射性成因的 <sup>40</sup>Ar<sub>R</sub>, 大气 <sup>40</sup>Ar<sub>atm</sub> ( $295.5 \times ^{36}\text{Ar}_{\text{atm}}$ ) 和独立起源的 <sup>40</sup>Ar<sub>E</sub>。一般情况下, 流体包裹体中初始 <sup>40</sup>Ar 组成应当通过 <sup>40</sup>Ar<sub>R</sub> 和年龄进行校正, 其校正变化值一般在 0.1%~2%, 误差范围值较小<sup>[18]</sup>。因此, 对于几百个百万年左右的成矿事件, 现场产生的放射性成因 <sup>40</sup>Ar<sub>R</sub> 可以忽略不计 (<sup>40</sup>Ar<sub>E</sub> + <sup>40</sup>Ar<sub>atm</sub> = <sup>40</sup>Ar<sub>total</sub>), 因此测试所

表 2 新疆北部铁氧化物-铜-金矿床流体包裹体卤族元素和稀有气体同位素分析表  
Table 2 Results of isotopic analysis of halogen and noble gas elements in fluid inclusions during different mineralization stages in the North Xinjiang iron oxide-Cu-Au deposits

样品号	矿物	Br/Cl (10 <sup>-3</sup> )	I/Cl (10 <sup>-6</sup> )	Br/I	K/Cl	Ca/Cl	<sup>40</sup> Ar <sub>E</sub> /Cl (10 <sup>-6</sup> )	<sup>39</sup> Ar/ <sup>40</sup> Ar (10 <sup>-5</sup> )	<sup>38</sup> Ar/ <sup>40</sup> Ar (10 <sup>-4</sup> )	<sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar (10 <sup>-3</sup> )	<sup>38</sup> Kr/ <sup>39</sup> Ar (10 <sup>-3</sup> )	<sup>136</sup> Xe/ <sup>39</sup> Ar (10 <sup>-3</sup> )	<sup>136</sup> Xe/ <sup>138</sup> Xe	<sup>136</sup> Xe/ <sup>39</sup> Ar (10 <sup>-3</sup> )	F( <sup>84</sup> Kr)F( <sup>136</sup> Xe)F( <sup>138</sup> Xe)	K/ <sup>39</sup> Ar (10 <sup>6</sup> )	<sup>40</sup> Ar*/K (10 <sup>-3</sup> )	分阶段表观 年龄/Ma			
黑尖山(本文)																					
Stage H-I																					
HJ-003	石英	1.05	18	58.3	0.03	29.7	1.91	29.7	56	0.01	181	352	0.02	0.2	1.15	1.06	1.8	1.57	0.86	0.07	3 303
HJ-003	石英	1.03	16.9	60.6	0.02	49	1.63	49	56	0.01	212	375	0.02	0.21	1.21	1.12	1.86	1.66	1.19	0.07	3 334
HJ-003	石英	1.05	16.4	64.1	0.03	0.27	1.47	65.2	56	0.01	235	391	0.02	0.24	1.32	1.14	2.09	1.81	1.95	0.05	2 867
HJ-003	石英	1.06	16.3	65.2	0.03	0.79	1.57	89.8	56	0.01	219	437	0.03	0.27	1.54	1.3	2.42	2.1	2.52	0.06	3 060
HJ-003 av.	石英	1.05	16.9	62.1	0.03	0.53	1.64	58.4	56	0.01	212	389	0.02	0.23	1.31	1.15	2.04	1.78	1.63	0.06	3 141
Stage H-II																					
HJ-001	石英	0.39	3 958	0.1	0.12	160	1.04	1.04	34.7	0.03	292	292	0.02	0.21	1.2	1.16	1.89	1.64	0.13		
HJ-001	石英	0.69	10 510	0.07	0.23	729	1.37	1.37	34.7	0.05	288	288	0.02	0.22	1.21	1.1	1.92	1.65	0.31		
HJ-001	石英	1.28	26 301	0.05	0.22	2 669	2.55	2.55	34.7	0.05	290	290	0.03	0.26	1.51	1.3	2.06	2.06	0.55		
HJ-001 av.	石英	0.79	13 590	0.07	0.19	1 186	1.65	1.65	34.7	0.04	290	290	0.02	0.23	1.3	1.19	1.9	1.78	0.33		
乔夏哈拉(另文发表)																					
Stage Q-III																					
QX-053 av.	石英	1.22	3 759	0.32	0.09	—	44.6	4.76	14.7	0.01	2.04	510	0.02	0.17	1.14	0.96	1.5	1.56	0.48	0.56	6 775
Stage Q-IV																					
QX-009 av.	方解石	1	477	2.08	0.39	189	42.9	1.75	15.3	0.04	2.29	370	0.03	0.29	1.71	1.22	2.57	2.34	0.7	0.13	4 243
QX-14 av.	方解石	1	907	1.13	0.2	345	50.4	1.12	15.3	0.02	1.9	351	0.03	0.23	1.49	1.25	2.05	2.03	0.2	0.32	5 737
QX-014(dup) av.	方解石	1.13	1 042	1.09	0.22	319	61.8	1.26	15.3	0.02	1.52	374	0.02	0.18	1.16	1.07	1.56	1.59	0.25	0.31	2 573
老山口(另文发表)																					
Stage L-I																					
LS-024 av.	绿帘石	1.96	127	15.4	0.24	7.21	9.96	19	15.7	1.07	5.34	492	0.02	0.15	0.88	1.1	1.33	1.2	4.52	0.06	2 754
LS14-029 av.	绿帘石	1.49	82.8	18	0.1	6.42	11.3	24	15.7	1.21	4.22	566	0.02	0.11	1.01	0.97	1.02	1.38	2.49	0.12	4 150
LS14-065 av.	绿帘石	1.45	76.5	19	0.12	8.23	12.1	37.6	15.7	1.3	2.64	749	0.03	0.22	1.86	1.33	1.94	2.55	4.59	0.1	3 974
Stage L-III																					
LS14-038 av.	绿帘石	1.8	87.7	20.6	0.16	11.8	15.1	39.4	21.2	2.18	3.4	883	0.02	0.2	1.33	1.16	1.81	1.82	6.29	0.1	3 924
LS14-056 av.	绿帘石	1.53	77.1	19.9	0.42	21.3	28.6	13.2	21.2	4.14	9.92	672	0.02	0.18	1.25	1.1	1.76	1.71	5.45	0.12	3 711

得  $^{40}\text{Ar}_{\text{EA}}/^{36}\text{Ar}$  值 = 初始  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  值 ( $^{40}\text{Ar}_{\text{EA}} = ^{40}\text{Ar}_{\text{E}} + ^{40}\text{Ar}_{\text{atmospheric}}$ )。

在  $\text{Cl}/^{36}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  图解中(图 6)<sup>[20,58]</sup> 以空气 Ar 值为端点形成多条  $^{40}\text{Ar}_{\text{E}}/\text{Cl}$  的演化曲线, 越多大气 Ar 的加入会使得流体包裹体的 Ar 测试值不断向空气 Ar 值偏移<sup>[23,59]</sup>, 但  $^{40}\text{Ar}_{\text{E}}/\text{Cl}$  曲线并非大气 Ar 加入后的演化曲线, 由于  $^{40}\text{Ar}_{\text{E}}$  或 Cl 并不共存于大气中, 因此  $^{40}\text{Ar}_{\text{E}}/\text{Cl}$  值不受大气污染物加入的影响, 不同的  $^{40}\text{Ar}_{\text{E}}/\text{Cl}$  值截距可以代表着不同的包裹体类型或流体源区<sup>[47]</sup>。由图 6<sup>[20,58]</sup> 中可见老山口矿床的  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  值从铁矿化阶段到铜-金矿化阶段依次升高, 分别为 492~749 和 672~883, 其  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  值与

Osborne 和 Eloise IOCG 矿床<sup>[25,49]</sup> 内典型沉积岩地层水的范围相一致。  $\text{Cl}/^{36}\text{Ar}$  值从磁铁矿矿化阶段到铜-金矿化阶段显示微弱的降低趋势, 分别为  $(19.0\sim37.6)\times 10^6$  和  $(13.2\sim39.4)\times 10^6$ , 整体上处于典型的壳源流体范围<sup>[58]</sup>。  $^{40}\text{Ar}_{\text{E}}/\text{Cl}$  斜率值存在较大的增高, 从早阶段到晚阶段, 依次为  $(9.96\sim12.1)\times 10^{-6}$  和  $(15.1\sim28.6)\times 10^{-6}$ , 表明其存在两组不同的流体影响, 主体处于前人总结的盐卤水范围<sup>[20,58]</sup>。  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  值与  $\text{I}/\text{Cl}$ 、 $\text{Br}/\text{Cl}$  值均未体现出明显的相关性(图 7)。

乔夏哈拉矿床的  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  值和  $\text{Cl}/^{36}\text{Ar}$  值从磁铁矿矿化阶段到铜-金矿化阶段依次降低, 存在明显的正相关关系(图 6)<sup>[20,58]</sup>, 与老山口矿床演化曲线存在明显的不同,  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  值和  $\text{Cl}/^{36}\text{Ar}$  值也相对较低。 铁、铜-金两阶段依次为 510 和  $4.76\times 10^6$ 、351~374 和  $(1.12\sim1.75)\times 10^6$ 。 其  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  值和  $\text{Cl}/^{36}\text{Ar}$  值均显示出明显的典型壳源沉积地层水的特征<sup>[20,25,58,60]</sup>。 而  $^{40}\text{Ar}_{\text{E}}/\text{Cl}$  值整体变化不大, 显示微弱的升高趋势, 依次为  $44.6\times 10^{-6}$  和  $(42.9\sim61.8)\times 10^{-6}$ , 表明其流体性质从磁铁矿阶段到黄铜矿阶段变化相对不明显。  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  值与  $\text{I}/\text{Cl}$ 、 $\text{Br}/\text{Cl}$  值均表现出明显的正相关关系(图 7)。 而对于黑尖山矿床来说磁铁矿阶段和硫化物阶段  $\text{Cl}/^{36}\text{Ar}$  值存在明显的不同, 分别为  $(29.7\sim89.8)\times 10^6$  (平均  $58.4\times 10^6$ ) 和  $(1.04\sim2.55)\times 10^6$  (平均  $1.65\times 10^6$ )。  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  值接近空气  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  值(295.5), 且存在微弱差异, 从磁铁矿阶段到硫化物阶段逐渐降低, 依次为 352~437 (平均 389) 和 288~292 (平均 290)。  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  值与  $\text{I}/\text{Cl}$  值呈负相关关系, 而与  $\text{Br}/\text{Cl}$  值呈正相关关系(图 7)。

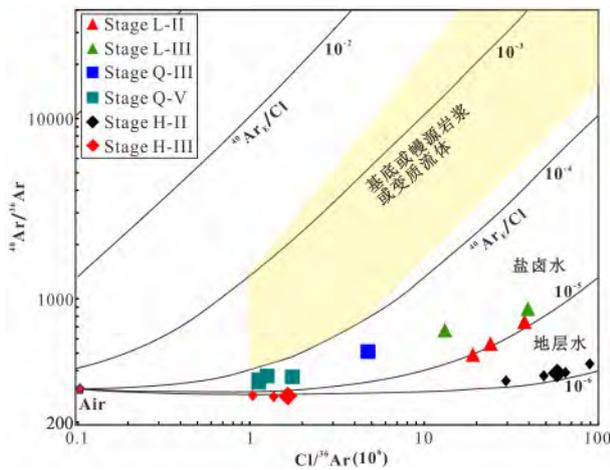
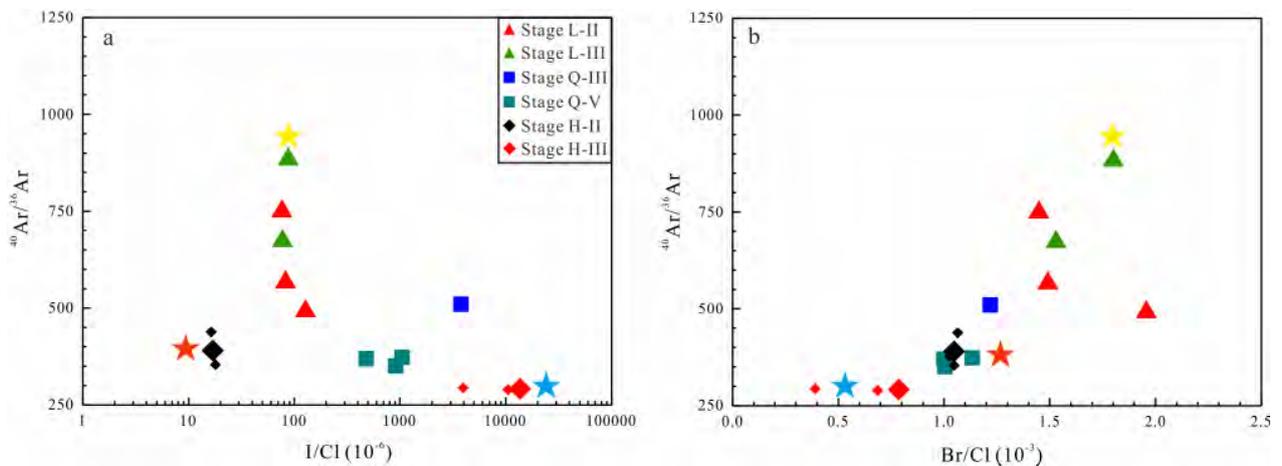


图 6 老山口、乔夏哈拉和黑尖山矿床流体包裹体卤族元素和稀有气体同位素  $\text{Cl}/^{36}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  图解 (据文献<sup>[20,58]</sup>修改)

Fig.6  $\text{Cl}/^{36}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  discrimination diagram for fluid inclusions during different stages of mineralization in the Laoshankou, Qiaoxiahala and Hejiashan deposits. Modified from <sup>[20,58]</sup>.

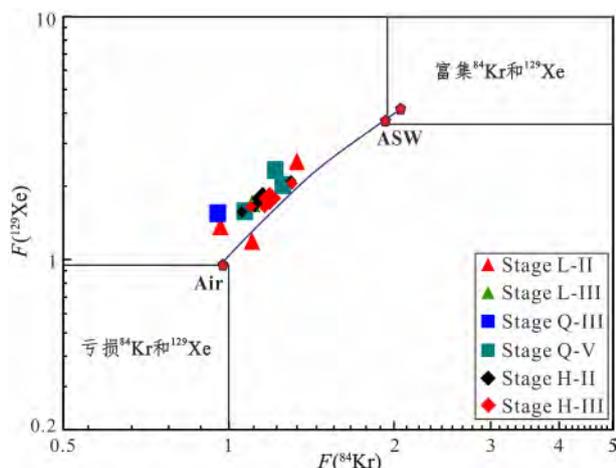


a— $\text{I}/\text{Cl}-^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  图解; b— $\text{Br}/\text{Cl}-^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  图解。橙星—岩浆流体端员; 黄星—海水蒸发盐卤水端员; 蓝星—水-岩反应地层水端员。

图 7 老山口、乔夏哈拉和黑尖山矿床流体包裹体卤族元素和稀有气体同位素图解

Fig.7 Plots of halogens and noble gases for fluid inclusions during different mineralization stages in the Laoshankou, Qiaoxiahala and Hejiashan deposits

稀有气体分馏系数( $F$ )指稀有气体相对空气 $^{36}\text{Ar}$ 的相对比值( $F(X) = (X/^{36}\text{Ar})_{\text{sample}} / (X/^{36}\text{Ar})_{\text{air}}$ )<sup>[61]</sup>,因此空气的分馏系数为1。图 $F(^{84}\text{Kr})-F(^{129}\text{Xe})$ 可见新疆北部铁氧化物-铜-金矿床各阶段样品均落于Air-ASW演化线上(图8)<sup>[61-62]</sup>,从磁铁矿矿化阶段到铜-金矿化阶段 $F(^{84}\text{Kr})$ 和 $F(^{129}\text{Xe})$ 分别为:老山口矿床0.97~1.33和1.20~2.55→1.10~1.16和1.71~1.82;乔夏哈拉矿床0.96和1.56→1.07~1.25和1.59~2.34;黑尖山矿床1.06~1.30(平均1.15)和1.57~2.10(平均1.78)→1.10~1.30(平均1.19)和1.64~2.06(平均1.78)。



$F$ —稀有气体分馏系数; $F(X) = (X/^{36}\text{Ar})_{\text{sample}} / (X/^{36}\text{Ar})_{\text{air}}$ ;  
ASW—空气饱和水,即大气降水和海水。

图8 老山口、乔夏哈拉和黑尖山矿床流体包裹体稀有气体同位素 $F(^{84}\text{Kr})-F(^{129}\text{Xe})$ 图解  
(据文献[61-62]修改)

Fig.8 Plots of  $F(^{84}\text{Kr})-F(^{129}\text{Xe})$  for fluid inclusions during different mineralization stages in the Laoshankou, Qiaoxiahala and Heijianshan deposits. Modified from [61-62].

## 4 讨论

### 4.1 成矿流体来源

卤族元素和稀有气体同位素对于反映不同成矿流体来源具有重要指示意义,结合已有流体包裹体显微测温和C-H-O-S稳定同位素测试分析,本文将对新疆北部老山口、乔夏哈拉和黑尖山矿床的磁铁矿成矿阶段和铜-金硫化物成矿阶段的成矿流体进行以下分析。

黑尖山矿床磁铁矿矿化阶段,流体包裹体卤族元素和稀有气体同位素表现出来明显的端员特征(橙星),低I/Cl、Br/Cl比值,低 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值(图8)<sup>[61-62]</sup>。卤族元素I/Cl和Br/Cl比值明显落于岩浆流体范围(图5)<sup>[18,47-57]</sup>,而该阶段黄铁矿原位S同位素数据值1.7‰~4.3‰<sup>[16]</sup>,同样表示明显的岩浆源属性(±5‰)。然而较低的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值

却与岩浆流体源高的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值(3 000)不相符,线性的air-ASW演化曲线(图7)表明稀有气体组分没有出现大范围的丢失,即没有发生明显的相分离或者分异过程。较低的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值极有可能与低 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 的上/中地壳物质或者沉积岩有关<sup>[25,63]</sup>。而略微高于岩浆流体(5.5‰~9.5‰)<sup>[64]</sup>的O同位素值(8.8‰~9.7‰)在一定程度上也表明了富O围岩的影响。黄铁矿蚀变阶段却表现出另一端员特征(蓝星);即高I/Cl,低Br/Cl, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值(图8)<sup>[61-62]</sup>,明显不同于岩浆流体端员。已有的流体包裹体数据显示该阶段流体以中温(262℃)、高盐度(34.7%)、富Ca-Mg为特征<sup>[16]</sup>,具有明显的高盐度卤水特点。高盐度卤水一般存在3种来源:(1)海水等的表源蒸发;(2)蒸发岩溶解;(3)高程度的水-岩反应<sup>[20,65-66]</sup>。研究发现,蒸发过程会使得流体的Br/Cl比值明显增高,明显高于海水的Br/Cl比值<sup>[67]</sup>,黄铁矿蚀变阶段低的Br/Cl比值可以有效排除表源蒸发来源。较高的黄铁矿原位S流体同位素(4.6‰~10.0‰,早期高达24.3‰~29.3‰)<sup>[16]</sup>显示该阶段早期存在蒸发岩(10‰~26‰)<sup>[68]</sup>溶解的影响,随后大量经水-岩反应形成的盐卤水加入。由于I含量与有机质存在明显的相关性,极高的I/Cl比值表明成矿流体存在与富有机质围岩的充分反应。而较低的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值表明存在空气Ar的加入,也进一步表明存在富有机质沉积岩地层的参与<sup>[20-21,23,26,69-70]</sup>。

对比发现乔夏哈拉磁铁矿矿化阶段和铜-金矿化阶段存在与黑尖山黄铁矿蚀变阶段流体端员相似的卤族元素和稀有气体同位素数据(图8)<sup>[61-62]</sup>,表明其同样存在明显的水-岩反应和富有机质沉积岩地层的影响以及一定程度的蒸发岩溶解,同时可以排除岩浆流体的参与。结合乔夏哈拉磁铁矿矿化阶段与晚石炭世海水(约-26‰)相似的较高的H同位素(-26.3‰)数据<sup>[7]</sup>,表明该阶段存在大量石炭世海水的参与,因此判断该阶段成矿流体主要来源于海水与富有机质围岩反应所形成,同期岩浆仅提供热源促进流体循环,而区域断裂则为流体运移、循环提供通道。铜-金矿化阶段H同位素含量明显降低(-123‰~-92‰),然而仍然保持高I/Cl,低 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值的特征,且流体盐度<30%表明其应主要为沉积岩地层水,即地层中的先存水,经成岩、压实作用逐渐析出、富集而形成的流体。

而老山口矿床的成矿流体则明显体现出另一端员特征(黄星),特别是铜-金矿化阶段成矿流体以中

I/Cl, 高 Br/Cl,  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值为特点(图 8)<sup>[61-62]</sup>。较高的 Br/Cl 比值, 表明存在表源蒸发过程, 并且排除蒸发岩溶解过程, 而 Cl/ $^{36}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  图解(图 6)<sup>[20,58]</sup>中也显示铜-金矿化阶段成矿流体的 Cl/ $^{36}\text{Ar}$  坡度值明显增加, 向表源盐卤水方向偏移, 结合其接近于饱和盐度海水(约 26%)的盐度值(23.3%)<sup>[12]</sup>表明该阶段存在海水表源蒸发形成的盐卤水的参与。而磁铁矿阶段与乔夏哈拉磁铁矿矿化阶段存在相似的 Br/Cl,  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值, 仅 I/Cl 值存在较大差异, 表明两者流体性质应大体相同, I/Cl 值与围岩有机质含量存在明显相关性, 而乔夏哈拉矿床海相火山沉积岩中的红色的大理石化灰岩<sup>[5]</sup>可以为有机质提供更多来源。

#### 4.2 流体演化规律

以往的地质特征研究和岩相学观察表明新疆北部老山口、乔夏哈拉和黑尖山铁氧化物-铜-金矿床均存在明显的铁、铜-金两阶段矿化。现有卤族元素和稀有气体同位素数据, 结合已有的流体包裹体显微测温和稳定同位素数据<sup>[7,12,16]</sup>可以看出, 该类矿床存在相似的流体演化规律, 存在明显的多期流体的叠加(图 9)。铁氧化物矿化阶段, 同期岩浆作用发挥较大的作用, 主要存在 2 种形式:(1)以岩浆流体形式直接参与铁成矿阶段;(2)岩浆流体不直接

参与成矿, 同期岩浆仅提供热源, 成矿流体来自于海水与富有机质围岩反应。铜-金矿化阶段, 以非岩浆热液流体的广泛参与为特点, 主要是富 Ca 卤水或地层水形式, 包含(1)表源海水蒸发所形成的盐卤水、(2)蒸发岩溶解所形成的高盐卤水以及(3)深度水-岩反应所形成的沉积地层水。

#### 4.3 典型矿床对比

为了更好地限定新疆北部铁氧化物-铜-金矿床的成因类型, 将前人争议集中的海相火山岩型、夕卡岩型和 IOCG 型矿床与上述矿床的地质特征、流体性质与演化进行对比, 结果表明:(1)铁-铜-金矿体产于海相火山碎屑岩中, 并非局限于岩浆岩和岩石地层的接触带附近;(2)矿体的展布与区域断裂构造有关;(3)矿体及其围岩中局部的确发现辉石、石榴子石等夕卡岩化, 但并非普遍发育, 整体主要以广泛发育的绿帘石、绿泥石蚀变为主;(4)矿区存在局部钠-钙蚀变带和钾化带;(5)矿脉明显切割海相火山碎屑岩地层, 层控特点不明显;(6)明显的铁、铜-金两阶段矿化;(7)矿床所产出的构造环境为弧盆转化体系(弧后盆地闭合)。以上特征明显不同于海相火山热液型矿床和夕卡岩型矿床, 却与中安第斯 IOCG 型矿床具有一定相似之处(表 3)<sup>[6-7,16,71-77]</sup>。

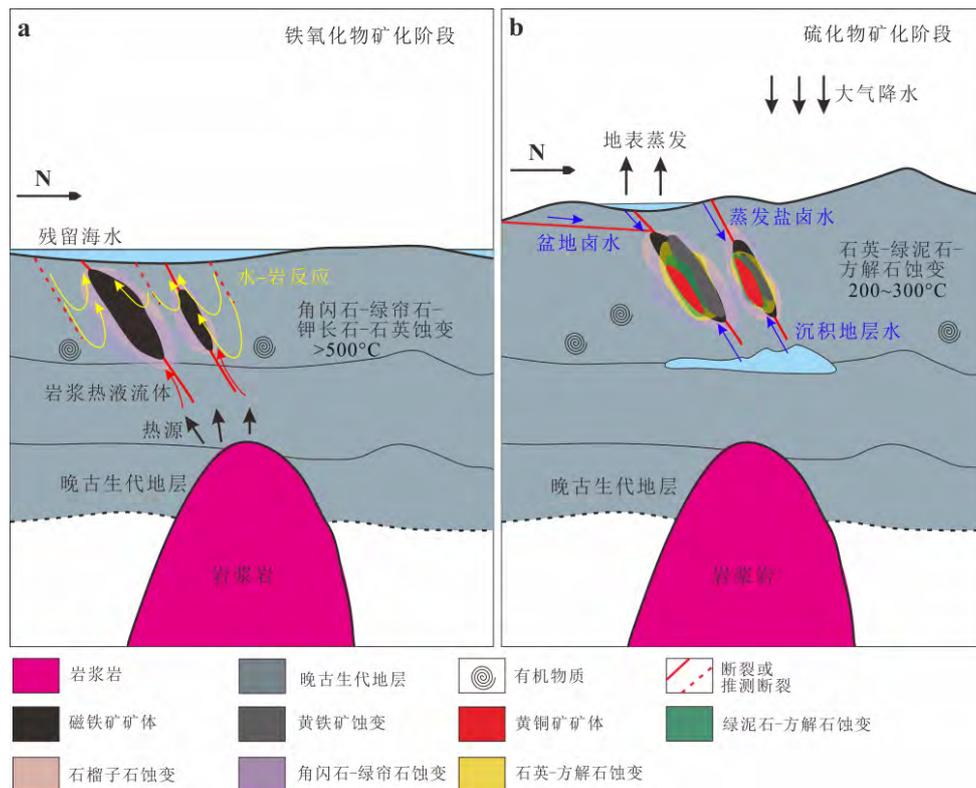


图 9 新疆北部铁氧化物-铜-金矿床成矿模式图

Fig.9 Schematic metallogenic model for iron oxide-Cu-Au deposits in North Xinjiang

表3 新疆北部铁氧化物-铜-金矿床与主要矿床成因类型地质特征对比表  
Table 3 Comparisons of geological characteristics between the North Xinjiang iron oxide-copper-gold deposits and main possible deposit types

对比内容	黑尖山矿床	老山口矿床	乔夏哈拉矿床	海相火山岩型铁铜矿床	夕卡岩型铁铜矿床 (Skarn)	中安第斯 IOCG 矿床
构造环境	盆地闭合 (弧盆转化体制)	大洋岛弧环境 (弧盆转化体制)	大洋岛弧环境 (弧盆转化体制下)	俯冲背景下的大陆弧环境	岛弧、弧后盆地、大陆边缘弧环境	大陆边缘弧后盆地倒转环境
赋矿围岩	马头滩组凝灰岩和角砾凝灰岩	北塔山组玄武-安山质火山岩及火山角砾岩	北塔山组火山岩和沉积岩	海相火山岩、次火山岩、火山沉积岩	富 Ca 或富 Mg 火山岩为主, 并存在碎屑沉积岩或灰岩、大理岩等碳酸盐岩	玄武-安山质火山熔岩、凝灰岩、火山角砾岩、沉积岩和中-酸性侵入岩
岩石类型	中-酸性侵入体	闪长玢岩(准铝质、钙碱性-钾玄质)	闪长玢岩(准铝质、钙碱性-钾玄质)	中-酸性侵入体	钙碱性、准铝质中酸性侵入岩	准铝质-弱过铝质、钙碱性-高钾钙碱性系列中酸性侵入岩为主, 少数为基性岩墙
岩浆活动	与矿化无明显的时空关系	与矿化具有紧密的时空关系, 存在一定关联	与矿化具有紧密的时空关系, 存在一定关联	与矿化无明显时空关系, 矿体和夕卡岩并不产在中酸性岩体和碳酸盐岩的接触带	与矿化具有紧密的时空关系	与矿体缺乏直接空间接触关系, 但部分矿床的矿体赋存于岩体中
成矿相关性	与矿化无明显的时空关系	与矿化具有紧密的时空关系, 存在一定关联	与矿化具有紧密的时空关系, 存在一定关联	与矿化无明显时空关系, 矿体和夕卡岩并不产在中酸性岩体和碳酸盐岩的接触带	与矿化具有紧密的时空关系	与矿体缺乏直接空间接触关系, 但部分矿床的矿体赋存于岩体中
控矿构造	断裂切割矿体, 断裂构造控矿不明显	断裂切割矿体, 断裂构造控矿不明显	断裂构造控制明显	火山构造控制明显	受褶皱、断裂控制明显	受断裂构造控制明显
矿石类型	层状、似层状矿体含块状、浸染状、角砾状和脉状矿石	层状、透镜状矿体含块状、条带状、脉状和浸染状矿石	似层状、透镜状矿体含块状、条带状、角砾状、脉状和浸染状矿石	脉状、层状、透镜状、板状、条带状矿体含块状、细脉浸染状矿石	层状、透镜状、脉状矿体含块状、浸染状、脉状矿石	脉状或脉状、层状矿体含块状、条带状、角砾状矿石
矿化分带	铁、铜-金矿化分带明显	明显, 上铁下铜, 即上部磁铁铁矿体, 下部铜-金矿体	明显, 上铁下铜, 即上部磁铁铁矿体, 中部含铜金磁铁铁矿体, 下部铜-金矿体	不明显, 主体铁矿体	明显, 自内向外依次为岩体、内夕卡岩与磁铁矿化、外夕卡岩与硫化物、灰岩	铁、铜-金矿化分带明显, 并具有明显不同的矿化组合
蚀变-矿化组合	(1)Ca-Mg 蚀变; (2)Fe 矿化阶段为磁铁矿-角闪石-石英+钾长石组合; (3)Cu (-Au) 矿化阶段为黄铜矿-石英-绿泥石组合+银金矿+赤铁矿	(1)Ca 硅酸盐阶段, 包含钙石榴子石、辉石夕卡岩等, 钠、钾化微弱; (2)Fe 矿化阶段整体以磁铁矿-绿帘石-角闪石组合为主; (3)Cu-Au 矿化阶段以黄铜矿(磁铁矿)-角闪石-绿泥石-方解石组合为主	早期广泛发育石榴子石夕卡岩和绿帘石-角闪石夕卡岩, 钠化不明显, 存在明显钾化并与磁铁矿共生, 整体仍以绿帘石化为主, 存在磁铁矿-磷灰石-钾长石-石英-绿帘石矿物组合; 后期存在晚期磁体矿化以磁铁矿-石榴子石-石英-黄铁矿-方解石组合为主; 铜矿化阶段为黄铜矿-绿泥石-石英组合	钠长石化(少数出现钾长石化)、夕卡岩化、湿夕卡岩化或退化蚀变(磁铁矿矿化阶段, 绿帘石化和绿帘石化为主)、硫化物矿化以及石英-碳酸盐化; 以低钛磁铁矿为主, 有少量黄铁矿、黄铜矿和磁黄铁矿	早夕卡岩阶段发育钙或镁石榴子石、辉石等; 退夕卡岩阶段发育角闪石、绿帘石等, 即磁铁矿-退夕卡岩组合; 其后发育石英-硫化物矿物组合; 侵入体自身普遍发育钠化, 沉积岩发生接触热变质作用	普遍存在 Na 和 Na-Ca 化, 且多位于深部更远离矿体端, 个别矿体缺乏钾化或钠化; 存在大量的磁铁矿和赤铁矿矿化以及经济品位的铜、金, 其中铁矿化为磁铁矿-黑云母-钾长石和角闪石组合(少数出现石榴子石、辉石、钠长石、绢云母、绿帘石、绿泥石等)以及赤铁矿-绢云母-绿泥石组合(发育或不发育钾化蚀变), 矿体深部铜金矿化为富铜硫化物-方解石组合
成矿流体特征	Fe 矿化阶段为高温(590 °C) Na-Ca-Mg-Fe 体系; Cu (-Au) 矿化阶段为中温(240 °C) Ca-Mg 体系	磁铁矿阶段: 高温(529 °C)、中盐度(约 15.7%)、富 Mg/Fe 流体; 铜-金阶段: 中温(279 °C)、低盐度(8%~12%)、富 Na 流体和中温、中盐度(14%~18%)、富 Mg/Fe 或 Ca 流体混合	磁铁矿阶段: 高温(520 °C)、低-中盐度(10%~15%)、富 Mg/Fe; 磁铁矿-硫化物阶段: 中-高温(431 °C)、低-中盐度(2%~12%)、富 Mg/Fe; 铜-金阶段: 低-中温(270 °C)、低-中盐度(4%~16%)、富 Ca 或富 Na 流体	成矿流体由早期到晚期, 温度由高到低, 盐度由高到低	早夕卡岩阶段主要为高温(>500 °C)、高盐度(>50%)原始岩浆流体, 退夕卡岩阶段和主成矿阶段多为中温(约 300 °C)、中盐度(<25%)岩浆流体, 之后向大气降水和沉积岩方向演化	铁矿化阶段: 高温(>400 °C)、高盐度、富 Na 或 Fe/Mg 流体; 铜-金阶段: 低温(100~450 °C)、高盐度、富 Ca 或富 Na 岩浆或非岩浆流体
流体与成矿物来源	Fe 矿化阶段: 主要为岩浆热液流体; Cu (-Au) 矿化阶段: 盆地卤水与火山岩地层反应	存在明显多源流体混合: 钙硅酸盐阶段, 岩浆流体; 磁铁矿阶段, 海水加入到岩浆流体中; 铜-金阶段, 海水蒸发盆地盐卤水; 后期脉, 大气降水	存在明显多源流体混合: 夕卡岩阶段, 岩浆流体; 磁铁矿阶段, 海水加入到岩浆流体中; 磁铁矿-硫化物阶段, 地下水; 铜金阶段, 富有机质地下水; 后期脉, 大气降水	成矿流体早期以岩浆水为主, 晚期海水占的比例增大	成矿流体主要为岩浆流体, 也具有其他变质流体、大气降水或盆地卤水的加入	存在广泛的卤水混入以及碳酸组分: 铁矿化阶段主要为岩浆流体或其他流体与围岩水-岩反应; 铜-金阶段通常为富 Ca 海水或盆地卤水, 富或不富 CO <sub>2</sub>
参考文献	本文和[16]	本文和[6]	本文和[7]	[71-72]	[73-74]	[75-77]

成矿流体来源是探究矿床成因机制的重要因素, 前人对火山热液型 Fe-Cu(Au) 矿床、夕卡岩型 Fe-Cu(-Au) 矿床和 IOCG 型矿床成矿流体来源和演化规律均进行过大量研究。海相火山岩型 Fe-Cu(-Au) 矿床, 总体而言, 其成矿流体主要来自于岩浆热液和循环海水。高温岩浆热液是岩浆在岩浆房中发生分异而形成, 同时岩浆房提供大量的热, 促使沿火山机构(放射状和环状裂隙)下渗的海水进行流体循环。由于围岩为火山碎屑岩, 岩石孔隙发育有利于水-岩反应的进行, 使得海水不断淋滤围岩中的成矿物质(如 Fe、Cu、Au 等), 并与之前分异的岩浆热液流体结合形成富 Fe-Cu 热液, 沿裂隙上升富集沉淀形成矿床<sup>[71-72]</sup>。对于夕卡岩型 Fe-Cu(-Au) 矿床, 大量研究表明, 其早期夕卡岩期及磁铁矿期是以岩浆流体为主, 之后大气降水混入且比例逐渐增加。硫化物期, 由于侵入岩体所产生的热促使大气降水不断发生对流循环, 更多的大气降水混入, 但主体仍为岩浆流体<sup>[71, 73-74]</sup>。而对于 IOCG 型矿床中的流体演化过程, Chen 等<sup>[75-76]</sup>通过中安第斯弧盆转化体系下多个 IOCG 型矿床的研究和总结, 提出两阶段演化模式即早期磁铁矿期以岩浆热液流体为主, 晚期铜-金矿化期则以低温、富 Ca 高盐盆地卤水为特点<sup>[44]</sup>。上述研究表明不同类型的矿床流体演化过程存在明显的差异, 而其中铜-金矿化期流体性质和来源的差异最为明显, IOCG 型矿床铜-金矿化阶段的富 Ca 高盐盆地卤水明显不同于斑岩、夕卡岩型和火山热液型矿床以 Na、K 成分为主的高盐岩浆热卤水。

通过以上流体包裹体卤族元素和稀有气体同位素的研究不难发现, 上述新疆北部铁氧化物-铜-金矿床的成矿流体(特别是铜-金矿化阶段)明显具有多源非岩浆流体的特征, 更加偏向于 IOCG 型矿床特征。

## 5 结论

(1) 新疆北部东准噶尔北缘和东天山雅满苏带的铁氧化物-铜-金矿床均产出于晚古生代盆地闭合的弧盆转化体系下。

(2) 卤族元素和稀有气体同位素显示, 老山口、乔夏哈拉和黑尖山矿床存在明显非岩浆流体的加入, 特别是铜-金矿化阶段以富 Ca 高盐度盆地卤水为主要特点。

(3) 新疆北部铁氧化物-铜-金矿床在地质特征和成矿流体演化方面与 IOCG 型矿床具有明显的相似之处。

本文野外工作得到了新疆地质矿产开发局第一和第四地质大队的大力支持, 成文过程中审稿人对文章提出了宝贵的修改意见, 在此一并表示衷心的感谢。

## 参考文献

- [1] SENGÖR A M C, NATAL'IN B A, BURTMAN V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 1993, 364(6435): 299-307.
- [2] JAHN B M, WU F Y, CHEN B. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic[J]. *Episodes*, 2000, 23(2): 82-92.
- [3] CHEN Y J, PIRAJNO F, WU G, et al. Epithermal deposits in North Xinjiang, NW China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2011, 101(4): 889-917.
- [4] 杨富全, 毛景文, 夏浩东, 等. 新疆北部古生代浅成低温热液型金矿特征及其地球动力学背景[J]. *矿床地质*, 2005, 24(3): 242-263.
- [5] 张维峰, 陈华勇, 江宏君, 等. 新疆东天山多头山铁-铜矿区花岗岩类的年代学、地球化学、岩石成因及意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2017, 41(6): 1171-1191.
- [6] LIANG P, CHEN H Y, HAN J S, et al. Iron oxide-copper-gold mineralization of the Devonian Laoshankou deposit (Xinjiang, NW China) in the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 104: 628-655.
- [7] LIANG P, CHEN H Y, WU C, et al. Mineralization and ore genesis of the Qiaoxiahala Fe-Cu(-Au) deposit in the northern margin of East Junggar terrane, Central Asian Orogenic Belt: constraints from fluid inclusions and stable isotopes[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 100: 360-384.
- [8] 赵联党, 陈华勇, 张莉, 等. 新疆黑尖山 Fe-Cu(-Au) 矿床氩氧同位素特征及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2017, 36(1): 38-56.
- [9] 江宏君, 陈华勇, 韩金生, 等. 东天山沙泉子铁铜矿床矿物学特征及其成矿意义[J]. *地球化学*, 2016, 45(4): 329-355.
- [10] LI Q, LÜ S J, YANG F Q, et al. Geological characteristics and genesis of the Laoshankou Fe-Cu-Au deposit in Junggar, Xinjiang, Central Asian Orogenic Belt[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 68: 59-78.
- [11] LI Q, ZHANG Z X, GENG X X, et al. Geology and geochemistry of the Qiaoxiahala Fe-Cu-Au deposit, Junggar region, northwest China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 57: 462-481.
- [12] LIANG P, CHEN H Y, HAN J S, et al. Iron oxide-copper-

- gold mineralization of the Devonian Laoshankou deposit (Xinjiang, NW China) in the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 104: 628-655.
- [13] MAO J W, RICHARD J G, WANG Y T, et al. Late Paleozoic base and precious metal deposits, East Tianshan, Xinjiang, China; characteristics and geodynamic setting[J]. *Episodes*, 2005, 28(1): 23-36.
- [14] ZHANG W F, CHEN H Y, PENG L H, et al. Discriminating hydrothermal fluid sources using tourmaline boron isotopes: example from Bailingshan Fe deposit in the Eastern Tianshan, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 98: 28-37.
- [15] ZHANG W F, CHEN H Y, PENG L H, et al. Ore genesis of the Duotoushan Fe-Cu deposit, Eastern Tianshan, NW China: constraints from ore geology, mineral geochemistry, fluid inclusion and stable isotopes[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 100: 401-421.
- [16] ZHAO L D, CHEN H Y, ZHANG L, et al. Geology and ore genesis of the late Paleozoic Heijianshan Fe oxide-Cu (-Au) deposit in the Eastern Tianshan, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 91: 110-132.
- [17] 黄小文, 漆亮, 王怡昌, 等. 东天山沙泉子铜铁矿床磁铁矿 Re-Os 定年初探[J]. *中国科学:地球科学*, 2014, 44(4): 605-616.
- [18] KENDRICK M A, BURNARD P. Noble gases and halogens in fluid inclusions: a journey through the Earth's crust[M]// BURNARD P. *The noble gases as geochemical tracers*. Berlin: Springer, 2013: 319-369.
- [19] KENDRICK M A, BURGESS R, PATTRICK R A D, et al. Fluid inclusion noble gas and halogen evidence on the origin of Cu-porphyry mineralising fluids[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(16): 2651-2668.
- [20] KENDRICK M A, DUNCAN R, PHILLIPS D. Noble gas and halogen constraints on mineralizing fluids of metamorphic versus surficial origin: Mt Isa, Australia[J]. *Chemical Geology*, 2006, 235(3): 325-351.
- [21] KENDRICK M A, BURGESS R, PATTRICK R A D, et al. Hydrothermal fluid origins in Mississippi Valley-type ore districts: combined noble gas (He, Ar, Kr) and halogen (Cl, Br, I) analysis of fluid inclusions from the Illinois-Kentucky fluorspar district, Viburnum Trend, and Tri-State districts, midcontinent United States[J]. *Economic Geology*, 2002, 97(3): 453-469.
- [22] KENDRICK M A, BURGESS R, PATTRICK R A D, et al. Hydrothermal fluid origins in a fluorite-rich Mississippi Valley-type district: combined noble gas (He, Ar, Kr) and halogen (Cl, Br, I) analysis of fluid inclusions from the South Pennine ore field, United Kingdom[J]. *Economic Geology*, 2002, 97(3): 435-451.
- [23] TURNER G, BANNON M P. Argon isotope geochemistry of inclusion fluids from granite-associated mineral veins in southwest and northeast England[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(1): 227-243.
- [24] FUSSWINKEL T, GIEHL C, BEERMANN O, et al. Combined LA-ICP-MS microanalysis of iodine, bromine and chlorine in fluid inclusions[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2018, 33(5): 768-783.
- [25] FISHER L A, KENDRICK M A. Metamorphic fluid origins in the Osborne Fe oxide-Cu-Au deposit, Australia: evidence from noble gases and halogens[J]. *Mineralium Deposita*, 2008, 43(5): 483-497.
- [26] WORDEN R H. Controls on halogen concentrations in sedimentary formation waters [J]. *Mineralogical Magazine*, 1996, 60(2): 259-274.
- [27] 新疆维吾尔自治区区域地质表编写组. 西北地区区域地质表, 新疆维吾尔自治区分册[M]. 北京: 地质出版社, 1983: 1-496.
- [28] 尚海军, 李强, 于秀斌, 等. 新疆准噶尔北缘乔夏哈拉和老山口铁铜金矿床地质特征及磁铁矿成分分析[J]. *新疆地质*, 2017, 35(1): 43-49.
- [29] 薛春纪, 赵战锋, 吴淦国, 等. 中亚构造域多期叠加斑岩铜矿化:以阿尔泰东南缘哈腊苏铜矿床地质、地球化学和成矿时代研究为例[J]. *地学前缘*, 2010, 17(2): 53-82.
- [30] 董英. 阿尔泰造山带晚古生代花岗岩年代学、成因及其地质意义[D]. 北京: 中国地质科学院, 2006: 1-102.
- [31] 吕书君, 杨富全, 柴凤梅, 等. 东准噶尔北缘老山口铁铜金矿区侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. *地质论评*, 2012, 58(1): 149-164.
- [32] WU C, CHEN H Y, HOLLINGS P, et al. Magmatic sequences in the Halasu Cu Belt, NW China: trigger for the Paleozoic porphyry Cu mineralization in the Chinese Altay-East Junggar[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 71: 373-404.
- [33] DENG X H, WANG J B, PIRAJNO F, et al. Re-Os dating of chalcopyrite from selected mineral deposits in the Kalatag district in the eastern Tianshan orogen, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 77: 72-81.
- [34] HUANG X W, ZHOU M F, QI L, et al. Re-Os isotopic ages of pyrite and chemical composition of magnetite from the Cihai magmatic-hydrothermal Fe deposit, NW China[J]. *Mineralium Deposita*, 2013, 48(8): 925-946.
- [35] ZHANG W F, CHEN H Y, HAN J S, et al. Geochronology and geochemistry of igneous rocks in the Bailingshan area: implications for the tectonic setting of Late Paleozoic magmatism and iron skarn mineralization in the eastern Tianshan, NW China[J]. *Gondwana Research*, 2016, 38: 40-59.
- [36] XIAO W J, WINDLEY B F, BADARCH G, et al. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: implications for the growth of Central Asia[J]. *Journal of the Geological Society*, 2004, 161(3): 339-342.
- [37] 许继峰, 梅厚钧, 于学元, 等. 准噶尔北缘晚古生代岛弧中与

- 俯冲作用有关的 adakite 火山岩: 消减板片部分熔融的产物 [J]. 科学通报, 2001, 46(8): 684-688.
- [38] 张海祥, 牛贺才, SATO H, 等. 新疆北部晚古生代埃达克岩、富铋玄武岩组合: 古亚洲洋板块南向俯冲的证据 [J]. 高校地质学报, 2004, 10(1): 106-113.
- [39] 周刚. 新疆阿尔泰玛因鄂博断裂带两侧后碰撞花岗岩类的年代学、岩石学和地球化学研究 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2007: 1-127.
- [40] 梁培, 陈华勇, 韩金生, 等. 东准噶尔北缘早石炭世构造体制转变: 来自碱性花岗岩年代学和地球化学制约 [J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41(1): 202-221.
- [41] JIANG H J, HAN J S, CHEN H Y, et al. Intra-continental back-arc basin inversion and Late Carboniferous magmatism in Eastern Tianshan, NW China: constraints from the Shaquanzi magmatic suite [J]. Geoscience Frontiers, 2017, 8(6): 1447-1467.
- [42] LIANG P, CHEN H Y, HOLLINGS P, et al. The Paleozoic tectonic evolution and metallogenesis of the northern margin of East Junggar, Central Asia Orogenic Belt: geochronological and geochemical constraints from igneous rocks of the Qiaoxiahala Fe-Cu deposit [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 130: 23-45.
- [43] LIANG P, CHEN H Y, HOLLINGS P, et al. Geochronology and geochemistry of igneous rocks from the Laoshankou district, North Xinjiang: implications for the Late Paleozoic tectonic evolution and metallogenesis of East Junggar [J]. Lithos, 2016, 266/267: 115-132.
- [44] CHEN H Y, COOKE D R, BAKER M J. Mesozoic iron oxide copper-gold mineralization in the central Andes and the Gondwana Supercontinent breakup [J]. Economic Geology, 2013, 108(1): 37-44.
- [45] RODDICK J C. High precision intercalibration of  $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$  standards [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1983, 47(5): 887-898.
- [46] KENDRICK M A. High precision Cl, Br and I determinations in mineral standards using the noble gas method [J]. Chemical Geology, 2012, 292: 116-126.
- [47] KENDRICK M A, MARK G, FISHER L, et al. Noble gas and halogen constraints on Mt Isa Cu ores [J]. ASEG Extended Abstracts, 2006, 2006(1): 1-2.
- [48] KENDRICK M A, ARCULUS R J, DANYUSHEVSKY L V, et al. Subduction-related halogens (Cl, Br and I) and  $\text{H}_2\text{O}$  in magmatic glasses from Southwest Pacific Backarc Basins [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 400: 165-176.
- [49] ZHEREBTSOVA I K, VOLKOVA N N. Experimental study of behaviour of trace elements in the process of natural solar evaporation of Black Sea water and Lake Saskatchewan brine [J]. Geochemistry International, 1966, 3(4): 656-670.
- [50] HOLSER W T. Trace elements and isotopes in evaporites [M]// BURNS R G. Marine minerals. Mineralogical Society of America Short Course Notes, 1979, 6: 295-346.
- [51] FONTES J C, MATRAY J M. Geochemistry and origin of formation brines from the Paris Basin, France: 1. Brines associated with Triassic salts [J]. Chemical Geology, 1993, 109(1/2/3/4): 149-175.
- [52] FEDO C M, SIRCOMBE K N, RAINBIRD R H. Detrital zircon analysis of the sedimentary record [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53(1): 277-303.
- [53] FEHN U, SNYDER G, EGEBERG P K. Dating of pore waters with  $^{129}\text{I}$ : relevance for the origin of marine gas hydrates [J]. Science, 2000, 289(5488): 2332-2335.
- [54] MURAMATSU Y, DOI T, TOMARU H, et al. Halogen concentrations in pore waters and sediments of the Nankai Trough, Japan: implications for the origin of gas hydrates [J]. Applied Geochemistry, 2007, 22(3): 534-556.
- [55] MURAMATSU Y, FEHN U, YOSHIDA S. Recycling of iodine in fore-arc areas: evidence from the iodine brines in Chiba, Japan [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2001, 192(4): 583-593.
- [56] TOMARU H, FEHN U, LU Z, et al. Dating of dissolved iodine in pore waters from the gas hydrate occurrence offshore Shimokita Peninsula, Japan:  $^{129}\text{I}$  results from the D/V Chikyuu shakedown cruise [J]. Resource Geology, 2009, 59(4): 359-373.
- [57] TOMARU H, LU Z, SNYDER G T, et al. Origin and age of pore waters in an actively venting gas hydrate field near Sado Island, Japan Sea: interpretation of halogen and  $^{129}\text{I}$  distributions [J]. Chemical Geology, 2007, 236(3): 350-366.
- [58] KENDRICK M A, BAKER T, FU B, et al. Noble gas and halogen constraints on regionally extensive mid-crustal Na-Ca metasomatism, the Proterozoic Eastern Mount Isa Block, Australia [J]. Precambrian Research, 2008, 163(1): 131-150.
- [59] IRWIN J J, REYNOLDS J H. Multiple stages of fluid trapping in the Stripa granite indicated by laser microprobe analysis of Cl, Br, I, K, U, and nucleogenic plus radiogenic Ar, Kr, and Xe in fluid inclusions [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(2): 355-369.
- [60] KENDRICK M A, PHILLIPS D, MILLER J M. Part I. Decrepitation and degassing behaviour of quartz up to  $1560\text{ }^\circ\text{C}$ : analysis of noble gases and halogens in complex fluid inclusion assemblages [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70(10): 2540-2561.
- [61] OZIMA M, PODOSEK F A. Noble gas geochemistry [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002: 1-300.
- [62] SMITH S P, KENNEDY B M. The solubility of noble gases in water and in NaCl brine [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1983, 47(3): 503-515.
- [63] MORRISON G. The Claytons granite model for the Osborne Cu-Au deposit: partial melting as a mineralizing process [M]

- //Structure, tectonics and ore mineralising processes abstract volume. EGRU Contribution, 2005: 1-93.
- [64] SHEPPARD S M. Characterization and isotopic variations in natural waters[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1986, 16(1): 165-183.
- [65] BARTON M D, JOHNSON D A. Evaporitic-source model for igneous-related Fe oxide-(REE-Cu-Au-U) mineralization [J]. *Geology*, 1996, 24(3): 259.
- [66] PIRAJNO F. Halogens in hydrothermal fluids and their role in the formation and evolution of hydrothermal mineral systems[M]//HARLOV D E, ARANOVICH L. The role of halogens in terrestrial and extraterrestrial geochemical processes: surface, crust, and mantle. Cham: Springer International Publishing, 2018: 759-804.
- [67] LI M H, YAN M D, WANG Z R, et al. The origins of the Mengye potash deposit in the Lanping-Simao Basin, Yunnan province, Western China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 69: 174-186.
- [68] HOEFS J. Stable isotope geochemistry[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2008: 1-636.
- [69] HANOR J S. Origin of saline fluids in sedimentary basins [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1994, 78(1): 151-174.
- [70] O'NIONS R K, BALLENTINE C J. Rare gas studies of basin scale fluid movement[J]. *Philosophical Transactions A*, 1993, 344(1670): 141-156.
- [71] 张招崇, 侯通, 李厚民, 等. 岩浆-热液系统中铁的富集机制探讨[J]. *岩石学报*, 2014, 30(5): 1189-1204.
- [72] 张招崇, 柴凤梅, 谢秋红. 热幔-冷壳背景下的高角度俯冲: 海相火山岩型铁矿的形成[J]. *中国地质*, 2016, 43(2): 367-379.
- [73] 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思, 等. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 1-354.
- [74] MEINERT L D, DIPPLE G M, NICOLESCU S. World skarn deposits[J]. *Economic Geology*, 2005, 100: 299-336.
- [75] CHEN H Y, KYSER T K, CLARK A H. Contrasting fluids and reservoirs in the contiguous Marcona and Mina Justa iron oxide-Cu(-Ag-Au) deposits, south-central Perú[J]. *Mineralium Deposita*, 2011, 46(7): 677-706.
- [76] CHEN H Y. External sulphur in IOCG mineralization: implications on definition and classification of the IOCG clan [J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 51: 74-78.
- [77] WILLIAMS P J, BARTON M D, JOHNSON D A, et al. Iron oxide copper-gold deposits: geology, space-time distribution, and possible modes of origin[J]. *Economic Geology*, 2005, 100: 371-405.

## 《地学前缘》出版改革重要通知

为了推进《地学前缘》数字化、网络化转型升级,快速发表作者的研究成果,《地学前缘》编辑部将利用和依托中国知网(CNKI)研发并经国家批准的快速传播平台——CAJ-NP。《地学前缘》编辑部已签约加入了此传播平台的《中国学术期刊网络版》(CAJ-N)。CAJ-N作为学术期刊网络版的正式出版物,与以往没有正式刊号的优先数字出版不同,因已经解决了论文网络首发规范性问题,可以得到国家出版管理部门、科研及其管理部门的认可。《中国学术期刊网络版》(CAJ-N)有①录用定稿、②排版定稿、③整期汇编定稿三种模式,而其核心是第①种录用定稿。录用定稿是以网络首发方式发表单篇论文(作者可及时上网下载获得该单篇论文的出版证书),这是出版学术期刊网络版的实质意义,对确认作者研究成果首发权、学术竞争力和影响力作用重大,同时也保证了读者获取科研情报与知识的及时性。

最需要注意的是,《地学前缘》的单篇论文录用定稿一经CAJ-N首发,那么作者在《地学前缘》后续的出版过程中不得修改自己论文的题目、作者、机构名称和学术内容(如数据等等)(如需修改必须刊发网络勘误声明),只可基于编辑规范进行少量文字的修改。我们会进一步与作者联系解释有关事宜。