

新疆准噶尔北缘索尔库都克铜钼矿氦-氩同位素组成及地质意义

耿新霞¹, 左文喆², 陈风河³, 蒋国豪⁴, 张志欣⁵

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2. 河北联合大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063009; 3. 河北省地矿局 探矿技术研究院, 河北 三河 065201;

4. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;

5. 中国科学院 新疆生态与地理研究所 新疆矿产资源研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 索尔库都克铜钼矿床位于准噶尔北缘, 矿体呈似层状、透镜状、脉状产于中泥盆世北塔山组安山岩和矽卡岩中。采用稀有气体同位素质谱法, 对矿床中绿帘石矽卡岩、安山岩和矿石3种产状的黄铁矿中流体包裹体氦和氩同位素组成进行测试分析。测试结果显示, 黄铁矿中流体包裹体的⁴He含量为(0.882 1~13.341 0) × 10⁻⁸ cm³ STP/g, ³He/⁴He为0.88~1.76 Ra(Ra为大气中的³He/⁴He, Ra=1.4 × 10⁻⁶), 幔源He占13.27%~26.93%, 表明成矿流体中氦主要来源于地壳。⁴⁰Ar含量为(4.237 6~13.970) × 10⁻⁸ cm³ STP/g, ⁴⁰Ar/³⁶Ar为301.07~331.55, ⁴⁰Ar*含量占1.71%~10.87%, 表明成矿流体中Ar主要来源于大气降水。3种产状的黄铁矿中氦、氩同位素组成及特点相似, 结合矿床流体包裹体和稳定同位素研究, 认为成矿流体来源于壳-幔相互作用的岩浆流体和大气降水, 矿床的形成与安山岩和矽卡岩关系密切, 暗示矿床成因为矽卡岩型。

关键词: He、Ar同位素; 黄铁矿; 成矿流体; 矽卡岩; 索尔库都克铜钼矿; 准噶尔北缘

中图分类号: P618.41; P618.65; P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2014)02-0331-08

Helium and Argon Isotopes Tracing of Ore-forming Fluid in the Suoerkuduke Cu-Mo Deposit in the Northern Margin of Junggar, Xinjiang

GENG Xin-xia¹, ZUO Wen-zhe², CHEN Feng-he³, JIANG Guo-hao⁴, ZHANG Zhi-xin⁵

(1. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Land and Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. College of Mining Engineering, Hebei United University, Tangshan, Hebei 063009, China;

3. Institute of Prospecting Technology Research of Hebei Bureau of Geology, Sanhe, Hebei 065201, China; 4. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550002, China; 5. Xinjiang Research

Center for Mineral Resources, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: The Suoerkuduke Cu-Mo deposit located in the northern margin of Junggar Terrane, is hosted by skarn and andesite of Middle Devonian volcanic rocks of Beitashan Formation. The orebodies are stratoid, lenticular and vein types. Helium and argon isotopic compositions of fluid inclusions in pyrite from epidote skarn, andesite and ore were analyzed by using an inert gas isotopic mass spectrometer. The analysis results indicated that the ⁴He content ranges from 0.882 1 × 10⁻⁸ cm³ STP/g to 13.341 0 × 10⁻⁸ cm³ STP/g, the ³He/⁴He ranged from 0.88 Ra to 1.76 Ra, the He content from mantle varied from 13.27% to 26.93%, all of these characteristics showed that the He in ore-forming fluids derived mainly from crust. The ⁴⁰Ar content varied from 4.237 6 × 10⁻⁸ cm³ STP/g to 13.970 × 10⁻⁸ cm³ STP/g, the ⁴⁰Ar/³⁶Ar was 301.07 to 331.55, and the radiogenic ⁴⁰Ar* varied from 1.71% to 10.87%, indicated Ar in the ore-forming fluid was mainly from atmospheric water. The

收稿日期: 2013-06-14; 改回日期: 2013-10-18; 责任编辑: 楼亚儿。

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAB06B03-02); 国土资源部中国地质大调查项目(12120113093600, 1212011220894)。

作者简介: 耿新霞, 女, 助理研究员, 博士, 1979年出生, 矿产普查与勘探专业, 主要从事成矿规律研究。

Email: gengxinxia@cags.ac.cn。

composition of He and Ar in three kinds of pyrite was similar. Combining deposit fluid inclusion and isotopic characteristics, we suggested that helium and argon isotopes of fluid inclusions in pyrite were mixture of crust fluid, mantle fluid and atmospheric water. The formation of deposit closely related with skarn and andesite, which imply that the ore genesis was skarn type Cu-Mo deposit.

Key words: helium and argon; pyrite; ore-forming fluid; skarn; Suoerkuduke Cu-Mo deposit; the northern margin of Junggar

0 引言

新疆准噶尔北缘位于西伯利亚板块与哈萨克斯坦板块的结合部位,是中亚增生型造山带的重要组成部分^[1-3],也是我国重要的铬-铜镍(钼)-金成矿带之一^[4],已发现喀拉通克大型铜镍矿床、索尔库都克中型铜钼矿床、希勒库都克中型铜钼矿床、玉勒肯哈腊苏中型铜(钼)矿床、哈腊苏中型铜矿床、乔夏哈拉小型铁铜金矿床等^[5-8]。索尔库都克铜钼矿床位于新疆富蕴县城 245°方向 65 km 处,是新疆地质矿产局第二区域地质调查大队 1984 年进行 1:5 万区域地质调查时发现的,目前由新疆白银矿业开发有限公司开发^①。矿区发育侵入岩和次火山岩,矿体呈似层状、透镜状、脉状赋存于安山岩和矽卡岩中,但矽卡岩并非沿岩体接触带分布,而是沿北塔山组火山岩层间发育。具有这种特点的铜矿或铜钼矿在中亚造山带十分少见,索尔库都克中型铜钼矿是唯一成形的矿床。前人对该矿床的地质特征、地球化学、年代学、成矿物质来源等进行了研究^[9-13],但对成矿流体来源研究相对薄弱,矿床成因存在(类)矽卡岩型、斑岩型、火山热液型等观点^[9-10,14]。

He、Ar 同位素化学性质不活泼,且在地壳与地幔中的组成差异明显,常被作为壳-幔相互作用过程的极为灵敏的同位素示踪剂。热液流体中的 He、Ar 同位素主要有大气饱和水、地壳流体和地幔流体 3 种来源,不同来源的 He、Ar 同位素组成具有明显差异,可以有效示踪成矿流体的来源^[15-18]。黄铁矿是保存氦的理想矿物,在包裹体被圈闭的 100 Ma 内,即使是最容易扩散的氦也不容易发生明显的丢失^[19]。本文采用稀有气体同位素质谱法,以绿帘石矽卡岩、安山岩和矿石 3 种产状中的黄铁矿为研究对象,开展黄铁矿的 He、Ar 同位素地球化学研究,在分析后期地质作用对成矿流体初始 He、

Ar 同位素组成影响的基础上,对成矿流体进行示踪,探讨成矿流体的来源与演化,以期对深入认识矿床成因提供依据。

1 矿床地质特征

索尔库都克铜钼矿床位于准噶尔北缘,属哈萨克斯坦-准噶尔板块与西伯利亚板块的萨吾尔晚古生代岛弧^[2,20-21]。矿区出露地层为中泥盆统北塔山组,由一套中基性火山岩夹少量英安岩、凝灰质砂岩组成。自下而上分 3 个亚组:第一亚组为凝灰岩、角砾凝灰岩、凝灰质砂岩、英安岩、流纹岩、火山角砾岩等;第二亚组为玄武岩、辉石安山岩、安山岩、凝灰岩、凝灰质砂岩、火山角砾岩等,是矿床的主要赋矿层位(图 1);第三亚组为生物碎屑灰岩、泥灰岩夹少量砂岩、粉砂岩、硅质岩等。

索尔库都克倒转背斜是矿区的主要褶皱构造,轴向 NNW,长 9.5 km,宽 4.5 km。正常翼地层顺序:下部为北塔山组第二亚组第一岩性段,中部为第二岩性段,上部为第三岩性段。矿体在正常翼中呈层状产出,而在倒转翼中呈透镜状产出,背斜控制矿体的空间分布。矿区断裂较发育,以 NW 向为主,NE 向次之。岩浆侵入活动强烈,主要有黑云母花岗岩、碱长花岗岩、辉石闪长岩。岩脉有安山玢岩、花岗斑岩、英安斑岩、霏细岩等。

目前在矿区已圈定铜矿体 62 个,钼矿体 37 个,铁矿体 9 个,矿体呈似层状、透镜状、脉状产于北塔山组第二亚组第二岩性段的安山岩和矽卡岩中。钼矿体大多产于矿带中上部,即位于主铜矿体之上,磁铁矿体主要产于主铜钼矿体之上或之间。矿区地质图见图 1。⑤号矿体为最大铜矿体,超过矿区铜资源量的 60%,矿体长 1 040 m,控制最大斜深 873 m,平均视厚度 22.43 m,倾向 SW,倾向 2°~31°,局部出现膨大、缩小及尖灭再现等现象。④号矿体为矿区的第二大铜矿体,位于⑤号矿

① 刘国仁. 新疆准噶尔北东部铜矿成矿规律与矿产预测. 中国地质大学(北京). 2012.

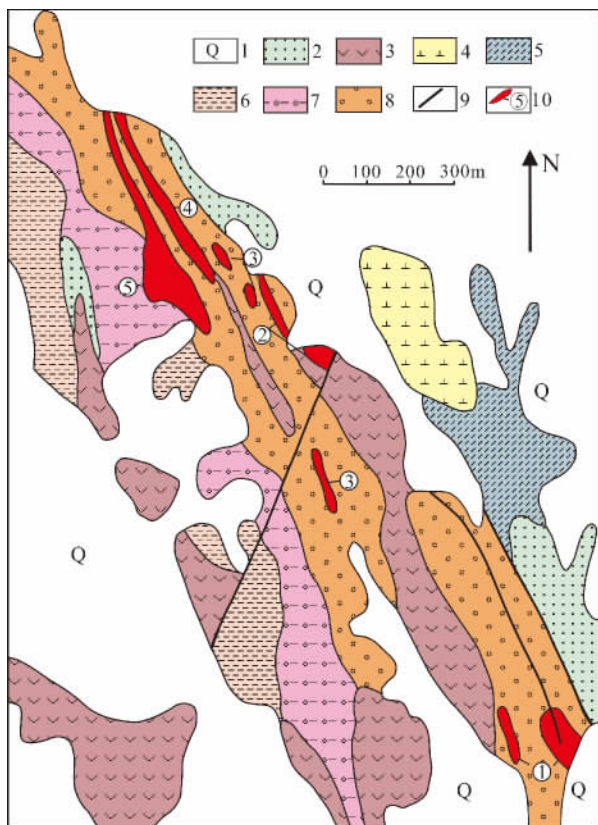


图1 新疆索尔库都克铜钼矿床矿区地质图

(据新疆地质矿产勘查开发局第二区域地质调查大队, 2009)

Fig. 1 The geological map of the Suoerkuduke Cu-Mo deposit (modified from No. 2 Regional Geological Survey Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, 2009)

- 1. 第四系沉积物; 2. 凝灰质砂岩; 3. 安山岩; 4. 辉石闪长岩;
- 5. 透钙铁辉石砂卡岩; 6. 绿帘石砂卡岩; 7. 绿帘石石榴子石砂卡岩;
- 8. 石榴子石砂卡岩; 9. 断层; 10. 铜矿体及编号

体的底部, 占矿区铜资源量的 8.42%, 矿体长 748 m, 控制最大斜深 580 m, 平均视厚度 11.34 m, 倾向 SW, 倾角 15°~46°, 局部矿体沿倾斜方向出现尖灭、再现等现象。

矿石类型主要为黄铜矿矿石、黄铜矿-辉钼矿矿石、辉钼矿矿石、黄铜矿-磁黄铁矿矿石和磁铁矿矿石。矿石构造以稀疏浸染状为主, 细脉浸染状次之, 个别为细脉状、稠密浸染状和团块状构造(图 2)。矿石结构以它形微粒为主, 它形细-微粒次之, 个别为它形不等粒及它形细粒结构。金属矿物主要为黄铜矿、黄铁矿, 其次有辉钼矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、磁铁矿, 少量白铁矿、斑铜矿等, 非金属矿物以绿帘石、石榴子石、透辉石为主, 其次为阳起石、斜长石、绿泥石、石英、方解石, 少量黑云母、葡萄石、钾长石等。矿石中 Cu 品位 0.57%~1.67%, 平均 0.64%, Mo 品位 0.04%~0.67%, 平均 0.080%, Fe 品位 21%~51.4%, 平均 34.75%。此外有少量 Ag(3.83 g/t)、Au(0.25 g/t) 等有益元素。

矿区围岩蚀变强烈, 北塔山组第二亚组的安山岩、凝灰岩等中基性火山岩主要发育绿帘石化、石榴子石化、透辉石化, 少量黑云母化、绿泥石化、葡萄石化、钾长石化等。矿区砂卡岩具有分带性, 自西向东依次为绿帘石砂卡岩、绿帘石石榴子石砂卡岩、石榴子石砂卡岩、绿帘石砂卡岩。铜矿化与绿帘石-石榴子石砂卡岩有关, 钼矿化与石榴子石砂卡岩密切相关。

根据矿体特征、穿插关系、矿物共生组合、

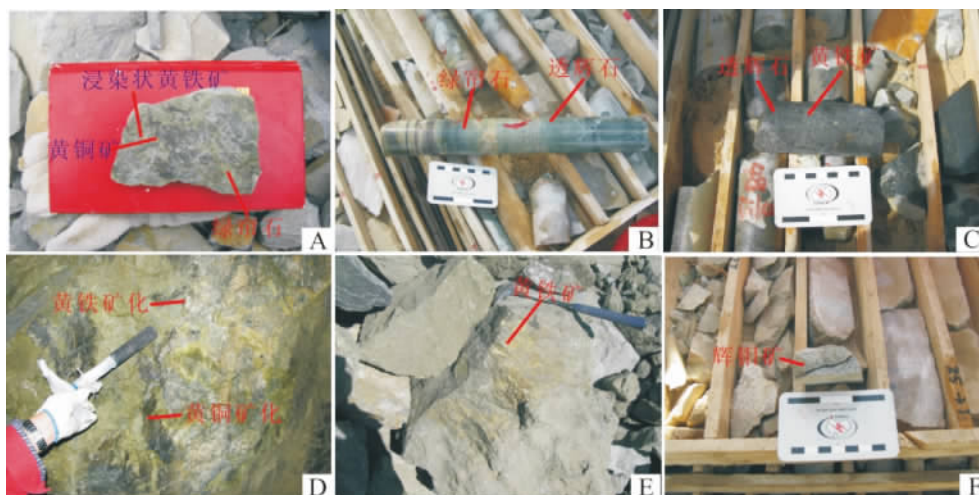


图2 索尔库都克铜钼矿床矿石特征

Fig. 2 Characteristics of ores in the Suoerkuduke Cu-Mo deposit

- A. 含稀疏浸染状黄铁矿黄铜矿绿帘石砂卡岩; B. 绿帘石透辉石砂卡岩; C. 含团斑状黄铁矿安山岩; D. 绿帘石砂卡岩中黄铁矿黄铜矿化;
- E. 稠密浸染状黄铁矿黄铜矿矿石; F. 含稀疏浸染状辉钼矿石榴子石砂卡岩

生成顺序及矿石组构等特征,将矿床成矿过程分为3个阶段。(1)矽卡岩阶段:主要生成石榴子石、透辉石,无矿化。(2)退化蚀变阶段:主要生成绿帘石、阳起石、绿泥石、辉钼矿、钾长石、斜长石、黑云母、磁铁矿,是铁的主要成矿阶段。(3)石英-硫化物阶段:是铜钼的主要成矿阶段,主要生成磁黄铁矿、黄铁矿、辉钼矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、斑铜矿、方解石、石英等。

2 样品及分析方法

本次用于流体包裹体 He、Ar 同位素测试的 6 件样品采自⑤号铜钼矿坑道中,均为新鲜未蚀变的岩(矿)石。样品为含稀疏浸染状黄铁矿黄铜矿绿帘石矽卡岩、含团斑状黄铁矿安山岩和稠密浸染状黄铁矿黄铜矿矿石。3 件绿帘石矽卡岩中黄铁矿为它形不等粒结构,粒径 1~2 mm,见有细粒黄铜矿。2 件安山岩样品中黄铁矿较自形,多为立方体,粒径 2~4 mm。1 件黄铜矿矿石中黄铁矿呈它形不等粒结构,与黄铜矿共生,粒径 1~3 mm。以上 3 种类型样品均形成于石英-硫化物阶段,其中的流体包裹体可代表矿床形成时的成矿流体。

将样品破碎至 20~40 目,在双目显微镜下挑选新鲜的黄铁矿单矿物,纯度为 99% 以上。He、Ar 同位素测试分析在中国科学院矿床地球化学国家重点实验室完成。测试仪器为全金属静态高真空稀有气体质谱仪(GV5400),仪器主要技术参数:氦测定灵敏度为 3.9725×10^{-4} A/Torr(1 Torr = 1.33×10^2 Pa),氩测定灵敏度为 1.1018×10^{-4} A/Torr,法拉第杯分辨率是 228.1,电子倍增器的分辨率为 682.3。分析过程如下:(1)将挑选好的单矿物在超声波丙酮溶液中洗净烘干;(2)称取 500~1 000 mg 矿物装入螺旋式压碎装置;(3)将样品装入烘烤螺旋式加热装置中烘烤,温度保持在 120~150 °C,除去矿物和装置中吸附的大气成分,并把系统抽成高真空状态;(4)在高真空条件下(10^{-8} Torr)压碎样品,使流体包裹体中的气体释放,进入气体净化系统;(5)气体被纯化后,使用液氮将重稀有气体冷冻在活性炭冷阱中,与氦分离;(6)将纯化分离后的稀有气体送入主机中进行同位素分析。He、Ar 同位素的分析误差小于 10%。

3 测试结果与讨论

6 件黄铁矿中流体包裹体的 He、Ar 同位素值测试结果列于表 1。

3.1 分析结果影响因素

测试样品中的流体包裹体为成矿古流体,包裹体形成后,下列因素可能会影响流体包裹体初始 He、Ar 同位素组成^[19]:(1)后期热液叠加改造;(2)He、Ar 扩散丢失;(3)放射成因新生 He、Ar;(4)同位素分馏及大气污染。本次测试的黄铁矿多数为粒状结构,部分见有自形立方体结构,未见后期改造的痕迹,其流体包裹体应以原生包裹体为主。He 在黄铁矿中的扩散系数很低,即使是大于 100 Ma 的时间尺度内,He 在流体包裹体中扩散丢失的量并不多^[20],索尔库都克铜钼矿床形成时代为 310 Ma 左右^[11]。由于矿物中流体包裹体 He 的扩散系数比矿物晶格中放射性成因 He 的扩散系数低几个数量级,Ar 的扩散系数比 He 更低^[15 22-24],而流体包裹体中 He 的扩散丢失大于 70% 时才会对 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值产生可观测的影响^[15],据此认为索尔库都克铜钼矿床黄铁矿的流体包裹体中 He 和 Ar 几乎没有扩散。宇宙射线与样品作用可产生一定量的 He,但这种作用仅限于长期(>100 a)暴露于地表或地表 1.5 m 以内的样品^[15],本次测试样品均采自坑道,故可排除宇宙成因 ^3He 的可能性。流体包裹体内原地放射成因 ^{40}Ar 的产率研究结果表明^[25-26],对于非含钾矿物(本文样品黄铁矿为非含钾矿物),其流体包裹体内原地放射成因 ^{40}Ar 的量可忽略不计。在成矿时捕获流体包裹体及用真空压碎法获取流体包裹体样品的过程中,稀有气体不会产生明显的同位素分馏^[27],为消除样品表面吸附和次生包裹体中的气体,将样品加热至 130 °C 并烘烤 10 h 以上,可排除次生包裹体和矿物表面吸附的 He、Ar 同位素的影响。因此,本文研究的索尔库都克黄铁矿包裹体中的 He、Ar 同位素测定值可以代表黄铁矿形成时流体的初始 He、Ar 同位素值。

3.2 He-Ar 同位素组成

索尔库都克铜钼矿床 3 件绿帘石矽卡岩中黄铁矿的 $^4\text{He} = 0.9279 \times 10^{-8} \sim 11.8740 \times 10^{-8}$ cm³ STP/g,平均为 5.2672×10^{-8} cm³ STP/g, $^3\text{He} = 1.9574 \times 10^{-14} \sim 26.6710 \times 10^{-14}$ cm³ STP/g,平均为 10.7664×10^{-14} cm³ STP/g, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 0.8800 ~ 1.7649 Ra(Ra 为大气中的 $^3\text{He}/^4\text{He}$, Ra = 1.4×10^{-6}), ^{40}Ar 含量变化于 $5.1323 \times 10^{-8} \sim 9.2840 \times 10^{-8}$ cm³ STP/g, ^{36}Ar 含量分布较集中,变化于 $1.6549 \times 10^{-10} \sim 2.8751 \times 10^{-10}$ cm³ STP/g 之间, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为 314.07 ~ 331.55,平均为 324.80。

表1 新疆索尔库都克铜钼矿床黄铁矿中流体包裹体的氦和氩同位素分析结果

Table 1 Helium and argon isotope compositions of fluid inclusions in pyrite from the Suoerkuduke Cu-Mo deposit								
样号	样品	质量/g	$^4\text{He}/$ $10^{-8}\text{cm}^3\text{STP/g}$	$^3\text{He}/$ $10^{-14}\text{cm}^3\text{STP/g}$	$R/10^{-6}$	R/Ra	$^{40}\text{Ar}/$ $10^{-8}\text{cm}^3\text{STP/g}$	$^{36}\text{Ar}/$ $10^{-10}\text{cm}^3\text{STP/g}$
Sek-2	含黄铁矿绿帘石砂卡岩	0.128 0	2.999 6	3.670 8	$1.232 0 \pm 0.020 6$	$0.880 0 \pm 0.014 7$	5.738 9	1.913 4
Sek-3	含黄铁矿安山岩	0.111 5	13.341 0	20.742 0	$1.595 3 \pm 0.031 0$	$1.139 5 \pm 0.022 1$	13.970 0	4.647 1
Sek-4	黄铁矿黄铜矿矿石	0.236 1	6.252 9	13.641 0	$2.223 4 \pm 0.026 7$	$1.588 1 \pm 0.019 1$	11.840 0	3.827 6
Sek-6	含黄铁矿绿帘石砂卡岩	0.064 3	0.927 9	1.957 4	$2.225 5 \pm 0.089 5$	$1.589 6 \pm 0.063 9$	5.132 3	1.654 9
Sek-8	含黄铁矿安山岩	0.157 2	0.821 2	2.195 56	$2.471 4 \pm 0.074 6$	$1.765 3 \pm 0.053 3$	4.237 6	1.365 1
Sek-9	含黄铁矿绿帘石砂卡岩	0.333 0	11.874 0	26.671 0	$2.470 8 \pm 0.024 7$	$1.764 9 \pm 0.017 6$	9.284 0	2.875 1

样号	样品	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}^*/\%$	$^{40}\text{Ar}^*/$ $10^{-8}\text{cm}^3\text{STP/g}$	$^{40}\text{Ar}^*/^4\text{He}$	$\text{He}^M/\%$
Sek-2	含黄铁矿绿帘石砂卡岩	314.07 ± 22.80	$0.214 8 \pm 0.020 7$	5.912 7	0.339 3	0.113 1	13.271 6
Sek-3	含黄铁矿安山岩	301.07 ± 7.65	$0.169 8 \pm 0.001 9$	1.850 1	0.258 5	0.019 4	17.276 2
Sek-4	黄铁矿黄铜矿矿石	306.37 ± 8.03	$0.197 8 \pm 0.011 6$	3.548 0	0.420 1	0.067 2	24.199 1
Sek-6	含黄铁矿绿帘石砂卡岩	328.78 ± 13.68	-	10.122 3	0.519 5	0.559 9	24.222 2
Sek-8	含黄铁矿安山岩	306.77 ± 10.68	-	3.673 8	0.155 7	0.189 6	26.933 6
Sek-9	含黄铁矿绿帘石砂卡岩	331.55 ± 13.36	$0.184 1 \pm 0.029 6$	10.873 2	1.009 5	0.085 0	26.927 5

注: He^M 为地幔成因的He同位素; $^{40}\text{Ar}^*$ 为放射性成因的 ^{40}Ar 同位素; R 为样品的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 实测值; 计算采用参数为国际公认的地球大气值: $\text{Ra} = ^3\text{He}/^4\text{He} = 1.400 \times 10^{-6}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 295.5$, $^4\text{He}/^{36}\text{Ar} = 0.165$; SPT. 标准温度和压力。

2件安山岩样品中黄铁矿的 $^4\text{He} = 0.821 2 \times 10^{-8} \sim 13.341 0 \times 10^{-8} \text{cm}^3 \text{STP/g}$, 平均为 $7.801 1 \times 10^{-8} \text{cm}^3 \text{STP/g}$, $^3\text{He} = 2.195 5 \times 10^{-14} \sim 20.742 0 \times 10^{-14} \text{cm}^3 \text{STP/g}$, 平均为 $11.468 8 \times 10^{-14} \text{cm}^3 \text{STP/g}$, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $1.139 5 \sim 1.765 3 \text{Ra}$, ^{40}Ar 含量变化于 $4.237 6 \times 10^{-8} \sim 13.970 0 \times 10^{-8} \text{cm}^3 \text{STP/g}$, ^{36}Ar 含量变化于 $1.365 1 \times 10^{-10} \sim 4.647 1 \times 10^{-10} \text{cm}^3 \text{STP/g}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为 $301.07 \sim 306.77$, 平均为303.92。

1件矿石中黄铁矿的 $^4\text{He} = 6.252 9 \times 10^{-8} \text{cm}^3 \text{STP/g}$, $^3\text{He} = 13.641 0 \times 10^{-14} \text{cm}^3 \text{STP/g}$, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $1.588 1 \text{Ra}$, $^{40}\text{Ar} = 11.840 0 \times 10^{-8} \text{cm}^3 \text{STP/g}$, $^{36}\text{Ar} = 3.827 6 \times 10^{-10} \text{cm}^3 \text{STP/g}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为306.37。

上述测试结果表明绿帘石砂卡岩、安山岩和矿石中黄铁矿的He-Ar同位素含量及特征均相近, 暗示绿帘石砂卡岩、安山岩和矿石之间存在成因联系。

研究表明, 流体中惰性气体的来源主要有3种, 不同来源的He-Ar同位素组成及其比值具有显著差异^[15-16, 28-29]: 大气饱和水(大气降水和海水)的 $^3\text{He}/^4\text{He} = 1 \text{Ra}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 295.5$; 地幔流体具有高的 ^3He 值, $^3\text{He}/^4\text{He} = 6 \sim 9 \text{Ra}$, Ar以放射性成因的为主, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值变化较大, 一般大于4000; 地壳流体的He、Ar以放射性成因为主, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的特征值为 $0.01 \sim 0.05 \text{Ra}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} > 295.5$ 。

索尔库都克铜钼矿床中6件黄铁矿的流体包裹体 $^3\text{He}/^4\text{He} = 0.880 0 \sim 1.765 3 \text{Ra}$, 平均为 $1.454 6 \text{Ra}$, 与大气组成比较接近, 高于地壳放射性成因的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值, 低于地幔流体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 特征值, 在 $^3\text{He}-^4\text{He}$ 同位素组成图中(图3), 样品均落于地幔端元和地壳端元之间。假定成矿流体为壳幔二元体系, 根据如下壳幔二元体系公式可以计算出样品中幔源氦的组成百分数^[29]: $\text{He}_{\text{地幔}} = \{ (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{样品}} - (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{地壳}} \} / \{ (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{地幔}} - (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{地壳}} \}$

$-(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{地壳}} \times 100$ ，其中， $(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{地壳}}$ 值为地壳岩石的平均产率 0.02 Ra， $(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{地幔}}$ 值为大陆岩石圈的平均值 6.5 Ra^[15]，计算得到样品中幔源 He 占 13.27% ~ 26.93%，表明成矿流体中 He 为地壳流体和地幔流体两端元混合产物。

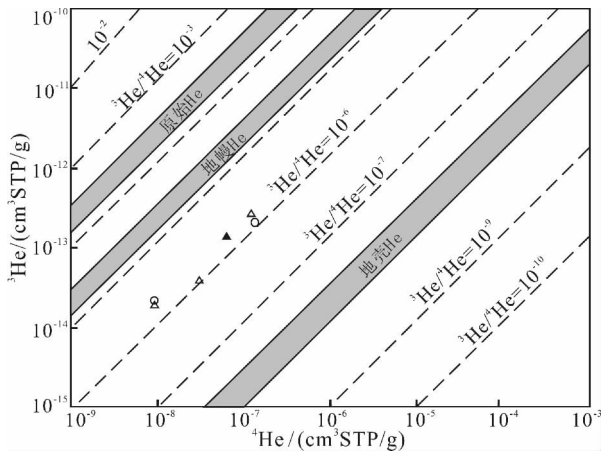


图3 索尔库都克铜钼矿床黄铁矿中流体³He - ⁴He 图

(底图据 Mamyrin et al., 1984^[30])

△绿帘石砂卡岩中黄铁矿; ○安山岩中黄铁矿; ▲矿石中黄铁矿
Fig. 3 ³He - ⁴He diagram of fluid inclusions in pyrite from Suoerkuduke Cu-Mo deposit

(after Mamyrin et al., 1984^[30])

6 件黄铁矿样品的 ⁴⁰Ar/³⁶Ar 值为 301.07 ~ 331.55，平均为 314.76，与大气饱和水 Ar 同位素非常接近，低于地壳放射性成因的氩同位素和地幔中氩同位素几个数量级。在 ⁴⁰Ar/³⁶Ar - R/Ra 图解中(图 4)，样品投点落于大气饱和水和地幔流体值之间，表现出成矿流体是壳幔源流体和大气降水两端元混合的特征，表明具有大气成因 Ar 同位素组成的大气降水下渗过程中获取容矿围岩中放射性成因 ⁴⁰Ar，导致 ⁴⁰Ar/³⁶Ar 值高于大气饱和水值。根据放射性成因 ⁴⁰Ar* 含量的计算公式，可以计算出样品中放射性成因 Ar 同位素的组成数^[31]： $^{40}\text{Ar}^* = \{1 - 295.5 / (^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{样品}}\} \times 100$ ，计算结果显示了黄铁矿中流体包裹体的放射性成因 ⁴⁰Ar* 含量占总数的 1.7% ~ 10.9%，大气 ⁴⁰Ar 贡献达 89.1% ~ 98.3%，表明成矿流体中 Ar 主要来源于大气降水，大气饱和水参与成矿作用。

3.3 成矿流体来源

新疆索尔库都克铜钼矿床黄铁矿中流体包裹体的 ³He/⁴He 值为 0.88 ~ 1.76 Ra，与壳源流体参与成矿过程的湖北鸡笼山金铜矿床 (³He/⁴He = 0.025 ~ 0.051 Ra)^[31]、陕西穆家庄铜矿床

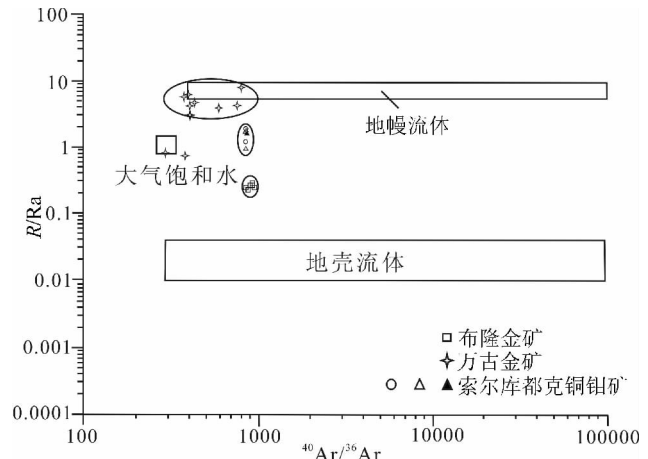


图4 索尔库都克铜钼矿床黄铁矿中流体⁴⁰Ar/³⁶Ar - R/Ra 图

(底图据 Burnard et al., 1999^[16])

△绿帘石砂卡岩中黄铁矿; ○安山岩中黄铁矿; ▲矿石中黄铁矿
Fig. 4 Plot of ⁴⁰Ar/³⁶Ar versus R/Ra of the fluids in pyrite from Suoerkuduke Cu-Mo deposit(after Burnard et al., 1999^[16])

(³He/⁴He = 0.23 ~ 0.64 Ra)^[32]、新疆布隆金矿床 (³He/⁴He = 0.24 ~ 0.82 Ra)^[33] 差别较大，与主要为幔源流体参与成矿的万古金矿 (³He/⁴He = 0.8 ~ 9.8 Ra)^[17] 也差别较大，而与成矿流体来源为壳 - 幔相互作用的岩浆流体和大气降水的华北地块南缘钼矿床 (³He/⁴He 1.38 ~ 3.64 Ra)^[34]、阿尔泰克因布拉克铜锌矿床 (³He/⁴He = 0.95 ~ 1.89 Ra)^[35] 较为相近。黄铁矿的流体包裹体中 ⁴⁰Ar/³⁶Ar 的值 (301.07 ~ 331.55) 较为集中，高于大气 Ar 同位素组成，特征与成矿流体来源于壳幔混合成因岩浆流体和大气降水的华北地块南缘钼矿床 (⁴⁰Ar/³⁶Ar = 295.68 ~ 346.39)^[34]、河南西部公峪金矿床 (⁴⁰Ar/³⁶Ar = 298 ~ 391)^[36]、新疆萨瓦亚尔顿金矿床 (⁴⁰Ar/³⁶Ar = 201 ~ 348)^[37] 相似，表现出幔源流体和大气降水参与成矿的特征。黄铁矿中流体包裹体的 ⁴⁰Ar* / ⁴He 比值分布范围较大，变化于 0.019 4 ~ 0.559 9 之间，其平均值 0.172 与地壳流体的 ⁴⁰Ar* / ⁴He 平均值 0.156^[15,19] 比较接近，个别样品(编号 Sek - 6)的 ⁴⁰Ar* / ⁴He 值接近地幔流体的 ⁴⁰Ar* / ⁴He 比值 0.33 ~ 0.56^[38]。在 ⁴⁰Ar* / ⁴He - R/Ra 图解中(图 5)，索尔库都克铜钼矿床的样品位于壳源氩和幔源氩之间，与成矿流体分别来源于壳源(布隆金矿^[33])和幔源(万古金矿^[17])的典型矿床明显不同。结合 ⁴⁰Ar/³⁶Ar - R/Ra 图解(图 4)，索尔库都克铜钼矿床的样品位于地幔流体和地壳流体之间，图示中位于布隆金矿^[33]和万古金矿^[17]之间，表明索尔库都克铜钼矿床的成矿流体为地

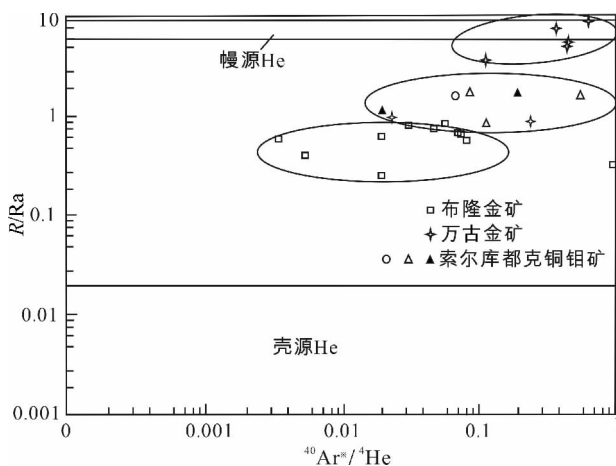


图5 索尔库都克铜钼矿床黄铁矿中流体 $^{40}\text{Ar}^*/^4\text{He}$ - R/Ra 关系图

△绿帘石矽卡岩中黄铁矿; ○安山岩中黄铁矿; ▲矿石中黄铁矿
Fig. 5 Plots of $^{40}\text{Ar}^*/^4\text{He}$ versus R/Ra of the fluid in pyrite from Suorokuduku Cu-Mo deposit

幔流体和地壳流体混合的产物。

前人的研究资料表明, 索尔库都克铜钼矿床中石榴子石、绿帘石流体包裹体均一温度为 165 ~ 403 °C, 盐度为 7.43% ~ 15.95%, 绿帘石的 δD 为 -87‰ ~ -63‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 2.49‰ ~ 5.59‰, 表现出岩浆水的特征, 这些均表明成矿过程中存在中高温流体的加入, 成矿流体来源于深源岩浆^[9]。石英-硫化物阶段中石英的 δD 为 -102‰ ~ -101‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 2.3‰ ~ 5.6‰, 认为成矿流体主要来源于岩浆水, 混合了大气降水; 方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -5.8‰ ~ -3.3‰, $\delta^{18}\text{O}$ 为 7.5‰ ~ 8.2‰, 与幔源碳、氧同位素接近, 认为碳来自深源^[9-10]; 黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化于 -2.8‰ ~ 1.5‰, 黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化于 -3.4‰ ~ 1.3‰, 平均值为 -1.8‰, 峰值位于零值附近, 显示出岩浆硫的特点。结合本文研究的黄铁矿流体包裹体中的 He、Ar 同位素特征, 认为矿床的成矿流体主要来源于壳-幔相互作用的岩浆流体和大气降水。

3.4 对矿床成因的启示

索尔库都克铜钼矿床的研究工作集中于 20 世纪 90 年代, 但对于矿床成因存在斑岩型、(类)矽卡岩型、火山热液型等多种观点^[9-10, 14]。前人研究表明, 蚀变安山岩的 Rb-Sr 等时线年龄为 288 Ma, 石榴子石和绿帘石单矿物的 Sm-Nd 等时线年龄为 284 Ma, 辉钼矿的 Re-Os 同位素模式年龄为 2902 ~ 93 Ma, 加权平均年龄为 310 Ma^[11]。上述年龄数据表明矿床形成于晚石炭世—早二叠世,

矿床的形成与矽卡岩和安山岩关系密切。本文所研究的绿帘石矽卡岩、安山岩和黄铜矿矿石中黄铁矿流体包裹体的 He、Ar 同位素组成和特点基本相似, 表明形成矽卡岩和矿石的流体为相同的流体, 这种流体主要来源于壳-幔相互作用的岩浆流体和大气降水, 同样暗示矿床的形成与矿区矽卡岩和安山岩有关。结合矿体赋存于中泥盆世北塔山组安山岩和矽卡岩中的地质特征, 认为矿床成因为矽卡岩型。石炭纪末到早二叠世时期, 新疆北部进入碰撞后伸展阶段^[39], 强烈的地壳活动导致深部岩浆沿断裂上升, 壳-幔相互作用的岩浆热液与富钙镁的北塔山组安山岩发生交代作用, 在矽卡岩阶段形成透辉石、石榴子石, 在退化蚀变阶段形成绿帘石、绿泥石、阳起石, 伴有铁矿体形成。随着大气降水的加入, 导致流体的温度降低, 在石英-硫化物阶段形成了铜钼矿体。

4 结论

新疆索尔库都克铜钼矿床矿体呈似层状、透镜状、脉状产于中泥盆世北塔山组安山岩和矽卡岩中。绿帘石矽卡岩、安山岩和黄铜矿矿石中黄铁矿流体包裹体的 He、Ar 同位素组成基本相似, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 0.88 ~ 1.76 Ra, 幔源 He 占 13.27% ~ 26.93%, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值变化于 301.07 ~ 331.55, 放射性成因的 $^{40}\text{Ar}^*$ 含量占 1.71% ~ 10.87%。He、Ar 同位素组成表明成矿过程中有地幔流体的参与。结合矿床流体包裹体和稳定同位素研究, 认为矿床的成矿流体来源于壳-幔相互作用的岩浆流体和大气降水, 矿床的形成与安山岩和矽卡岩关系密切, 矿床成因为矽卡岩型。

致谢: 野外工作得到新疆白银矿业开发有限公司采矿部李浩以及公司领导的支持和帮助, 在此致以衷心的感谢。

参考文献:

- [1] Sengor A M C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Al-taid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia [J]. Nature, 1993, 364: 299 - 307.
- [2] Jahn B M, Griffin W L, Windley B F. Continental growth in the Phanerozoic: evidence from Central Asia [J]. Tectonophysics, 2000, 328(1/2): 7 - 10.
- [3] Mao J W, Pirajno F, Zhang Z H, et al. A review of the Cu-Ni sulphide deposits in the Chinese Tianshan and Altay orogens (Xinjiang Autonomous Region, NW China): Principal characteristics and ore-forming processes [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 32(2/4): 184 - 203.

- [4] 王京彬,李博泉,张积斌,等. 额尔齐斯聚矿带金铜成矿条件及找矿预测 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999: 1 - 178.
- [5] Chai F M, Zhang Z C, Mao J W, et al. Geology, petrology and geochemistry of the Baishiquan Ni-Cu-bearing mafic-ultramafic intrusions in Xinjiang, NW China: Implications for tectonics and genesis of ores [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32 (2/4): 218 - 235.
- [6] 龙灵利,王京彬,王玉往,等. 新疆富蕴地区希勒库都克铜钼矿床含矿斑岩的年代学与地球化学特征 [J]. *地质通报*, 2009, 28(12): 1840 - 1851.
- [7] 杨富全,刘国仁,秦纪华,等. 新疆准噶尔北缘玉勒肯哈腊苏铜(钼)矿床流体包裹体和稳定同位素研究 [J]. *矿床地质*, 2012, 31(5): 965 - 982.
- [8] Yang F Q, Mao J W, Franco P, et al. A review of the geological characteristics and geodynamic setting of Late Paleozoic porphyry copper deposits in the Junggar region, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Northwest China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 49(10): 80 - 98.
- [9] 刘铁庚,梅厚钧,于学元,等. 据索尔库都克铜-钼矿地化特征探讨其成因类型 [J]. *新疆地质*, 1992, 10(2): 176 - 183.
- [10] 陈仁义,刘玉琳,芮宗瑶. 新疆索尔库都克类夕卡岩铜(钼)矿床地质特征及矿床成因 [J]. *地质论评*, 1995, 41(2): 165 - 173.
- [11] Wan B, Xiao W J, Han C M, et al. Re-Os molybdenite age of the Cu-Mo skarn ore deposit at Suoerkuduke in East Junggar, NW China and its geological significance [J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 56(1): 541 - 548.
- [12] 王玉山,钟晓玲. 新疆索尔库都克铜钼矿矿石特征 [J]. *新疆地质*, 2004, 22(2): 226 - 227.
- [13] 姚春彦,董永观,高卫华. 新疆阿勒泰南缘索尔库都克矽卡岩型 Cu 矿脉岩锆石 U-Pb 年龄及其意义 [J]. *矿床地质*, 2012, 31(增刊): 627 - 628.
- [14] 杨海波,高鹏,唐兴国,等. 新疆富蕴县索尔库都克铜(钼)矿床地质特征及成因探讨 [J]. *陕西地质*, 2007, 25(2): 11 - 18.
- [15] Stuart F M, Burnard P G, Taylor R P, et al. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He-Ar isotopes in fluid inclusions from Dae Hwa W-Mo mineralization, South Korea [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59 (22): 4663 - 4673.
- [16] Burnard P G, Hu R, Turner G, et al. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan gold deposits, Yunnan Province, China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(10): 1595 - 1604.
- [17] Mao J W, Kerrich R. High $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in the Wangu gold deposit, Hunan Province, China: implications for mantle fluids along the Tanlu deep fault zone [J]. *Geochemical Journal*, 2002, 36(4): 197 - 208.
- [18] Yang F Q, Mao J W, Wang Y T, et al. Geology and geochemistry of the Bulong quartz-barite vein-type gold deposit in the Xinjiang Uygur Autonomous Region, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2006, 29(1): 52 - 76.
- [19] 胡瑞忠. 成矿流体氦、氩同位素地球化学 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 1997, 16(2): 120 - 124.
- [20] 成守德,徐新. 新疆及邻区大地构造编图研究 [J]. *新疆地质*, 2001, 19(1): 33 - 37.
- [21] 何国琦,成守德,徐新,等. 中国新疆及邻区大地构造图(1:2500000)说明书 [M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1 - 65.
- [22] Trull T W, Kurz M D, Jenkins W J. Diffusion of cosmogenic ^3He in olivine and quartz: implications for surface exposure dating [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 103(1/4): 241 - 256.
- [23] 李延河,李金城,宋鹤彬,等. 矿物流体包裹体的氩同位素分析及地质应用 [J]. *矿床地质*, 2002, 21(增刊): 982 - 985.
- [24] 王彦斌,曾普胜,李延河,等. 安徽铜陵新桥铜-金矿床的 He、Ar 同位素组成及其意义 [J]. *现代地质*, 2004, 18(4): 524 - 528.
- [25] Qiu H N. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the quartz samples from two mineral deposits in western Yunnan (SW China) by crushing in vacuum [J]. *Chemical Geology*, 1996, 127(1/3): 211 - 222.
- [26] Turner G, Stuart F M. Helium/heat ratios and deposition temperatures of sulphides from the ocean floor [J]. *Nature*, 1992, 357: 581 - 583.
- [27] Podosek F A, Bernatowicz T J, Kramer F E. Adsorption of xenon and krypton on shales [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45(21): 2401 - 2415.
- [28] Hiyagon H, Ozima M, Marty B, et al. Noble gases in submarine glasses from mid-oceanic ridges and Loihi Seamount: constraints on the early history of the Earth [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(3): 1301 - 1316.
- [29] Ballentine C J, Burnard P G. Production, release and transport for noble gases in the continental crust [J]. *Review Mineral Geochemical*, 2002, 47: 481 - 538.
- [30] Mamyrin B A, Tolstikhin L N. Helium Isotopes in Nature Developments in Geochemistry [M]. Amsterdam: Elsevier, 1984: 1 - 273.
- [31] 贾宝剑,李胜荣,杨庆雨,等. 湖北鸡笼山金铜矿床流体包裹体 He、Ar 同位素组成及其地质意义 [J]. *黄金*, 2012, 33(7): 10 - 16.
- [32] 朱华平,张德全,张汉诚,等. 陕西柞山地区穆家庄铜矿床成矿流体来源的氦氩同位素示踪 [J]. *地质与勘探*, 2005, 41(5): 22 - 26.
- [33] 杨富全,王义天,毛景文,等. 新疆阿合奇县布隆石英重晶石脉型金矿床地质特征和硫氩同位素研究 [J]. *地质论评*, 2004, 50(1): 87 - 98.
- [34] 朱赖民,张国伟,郭波,等. 华北地块南缘钼矿床黄铁矿流体包裹体氦、氩同位素体系及其对成矿动力学背景的示踪 [J]. *科学通报*, 2009, 54(12): 1725 - 1735.
- [35] 张志欣,杨富全,刘锋,等. 新疆阿尔泰山南缘克因布拉克铜

(下转第 347 页)

- [22] 杜安道, 屈文俊, 李超, 等. 铼-钨同位素定年方法及分析测试技术的进展 [J]. 岩矿测试, 2009, 28(3): 288-304.
- [23] 靳新娣, 李文君, 吴华英, 等. Re-Os 同位素定年方法进展及 ICP-MS 精确定年测试关键技术 [J]. 岩石学报, 2010, 26(5): 1617-1624.
- [24] 李晶, 孙亚莉, 何克, 等. 辉钼矿 Re-Os 同位素定年方法的改进与应用 [J]. 岩石学报, 2010, 26(2): 642-648.
- [25] Smoliar M L, Walker R J, Morgan J W. Re-Os ages of group II A, III A, IV A, and IV B iron meteorites [J]. Science, 1996, 271: 1099-1102.
- [26] 蒋少涌, 杨竟红, 赵葵东, 等. 金属矿床 Re-Os 同位素示踪与定年研究 [J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2000, 36(6): 669-677.
- [27] 翟德高, 刘家军, 王建平, 等. 内蒙古太平沟斑岩型钼矿床 Re-Os 等时线年龄及其地质意义 [J]. 现代地质, 2009, 23(2): 262-268.
- [28] 毛景文, 王志良. 中国东部大规模成矿时限及其动力学背景的初步探讨 [J]. 矿床地质, 2000, 19(4): 289-296.
- [29] 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景 [J]. 岩石学报, 2005, 21(1): 169-188.
- [30] 陈毓川, 薛春纪, 王登红, 等. 华北陆块北缘区域矿床成矿谱系探讨 [J]. 高校地质学报, 2003, 9(4): 520-535.
- [31] Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H, et al. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W (Mo) deposit in the northern Qilian mountains and its geological significance [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(11/12): 1815-1818.
- [32] Stein H J, Markey R J, Morgan J W, et al. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: how and why it works [J]. Terra Nova, 2001, 13(6): 479-486.
- [33] Hiroshi O. Stable isotope geochemistry of ore deposits [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 1986, 16(1): 491-559.
- [34] Han C M, Xiao W J, Zhao G C, et al. A Re-Os study of molybdenites from the Lanjiagou Mo deposit of North China Craton and its geological significance [J]. Gondwana Research, 2009, 16(2): 264-271.
- [35] 张遵忠, 吴昌志, 顾连兴, 等. 燕辽成矿带东段新台门钼矿床的 Re-Os 同位素年龄及其地质意义 [J]. 矿床地质, 2009, 28(3): 313-320.
- [36] 代军治, 毛景文, 杜安道, 等. 辽西肖家营子钼(铁)矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义 [J]. 地质学报, 2007, 81(7): 917-923.
- [37] 沈光银. 河北撒岱沟门钼矿床地质特征及找矿远景 [J]. 矿产勘查, 2011, 2(5): 494-500.
- [38] 刘舒波, 李超, 岑况, 等. 含辉钼矿全岩样品 Re-Os 同位素定年研究: 在北京大庄科钼矿床中的应用 [J]. 现代地质, 2012, 26(2): 254-260.
- [39] Chaussidon M, Lorand J P. Sulphur isotope composition of orogenic spinel lherzolite massifs from Ariège (North-Eastern Pyrenees, France): An ion microprobe study [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990, 54(10): 2835-2846.
- [40] 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 等. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿 [M]. 北京: 科学出版社, 1988: 217.
- [41] 代军治, 毛景文, 杨富全, 等. 华北地台北缘燕辽钼矿(铜)成矿带矿床地质特征及动力学背景 [J]. 矿床地质, 2006, 25(5): 598-612.
- [42] 杨庚, 柴育成, 吴正文. 燕山造山带东段——辽西地区薄皮逆冲推覆构造 [J]. 地质学报, 2001, 75(3): 321-332.
- [43] Davis G A, Zheng Y D, Wang C, et al. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China [M] // Hendrix M S, Davis G A. Paleozoic and Mesozoic Tectonic Evolution of Central Asia: From Continental Assembly to Intracontinental Deformation. Boulder: Geological Society of America Memoir, 2001: 171-197.
- [44] 马寅生, 崔盛芹, 赵越, 等. 华北北部中生代构造体制的转换过程 [J]. 地质力学学报, 2002, 8(1): 15-25.
- [45] 赵越, 徐刚, 张拴宏, 等. 燕山运动与东亚构造体制的转变 [J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 319-328.
- [46] 赵越, 杨振宇, 马醒华. 东亚大地构造发展的重要转折 [J]. 地质科学, 1994, 29(2): 105-119.
- [47] 邵济安, 牟保垒, 张履桥. 华北东部中生代构造格局转换过程中的深部作用与浅部响应 [J]. 地质论评, 2000, 46(1): 32-40.

(上接第 338 页)

- 锌矿床成矿流体的氦-氩同位素示踪 [J]. 新疆地质, 2014, 32(1): 65-59.
- [36] 李永峰, 毛景文, 胡华斌, 等. 豫西公峪金矿床流体包裹体及其 He、Ar、S、H、O 同位素组成对成矿流体来源的示踪 [J]. 岩石学报, 2005, 21(5): 1347-1358.
- [37] 杨富全, 毛景文, 王义天, 等. 新疆萨瓦亚尔顿金矿床年代学、氦氩碳氧同位素特征及其地质意义 [J]. 地质论评, 2006, 52(3): 341-350.
- [38] Dunai T J, Baur H. Helium, neon and argon systematics of the European subcontinental mantle: implications for its geochemical evolution [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(13): 2767-2783.
- [39] 张招崇, 周刚, 闫升好, 等. 阿尔泰山南缘晚古生代火山岩的地质地球化学特征及其对构造演化的启示 [J]. 地质学报, 2007, 81(3): 344-358.