

新疆阿斯喀尔特钼矿床中辉钼矿 Re-Os 定年 及成因意义

刘文政^{1,2}, 张 辉^{1*}, 唐红峰¹, 唐 勇¹, 吕正航¹

(1. 中国科学院 地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 阿斯喀尔特钼矿床位于中亚成矿域阿尔泰成矿省哈龙-青河成矿带的东南部。7 件辉钼矿样品 Re-Os 同位素年龄介于(224.6±3.1) Ma 与(235.7±3.4) Ma 之间, 加权平均年龄为(229.0±3.0) Ma, 等时线年龄为(228.7±7.1) Ma, 表明成矿作用发生于印支期。辉钼矿样品 Re 含量为 38.26~56.45 μg/g, 指示成矿元素 Re 具有壳幔混合来源特征。由于阿斯喀尔特钼矿床成矿时代晚于古亚洲洋闭合时间(约 250 Ma), 并且花岗岩-伟晶岩体系中的晚期伟晶岩以低的锆石 Hf 同位素组成(-1.50~ +1.69)为特征, 相似于区域中侵入的三叠纪伟晶岩中锆石 Hf 同位素组成, 如可可托海 3 号脉、柯鲁木特 112 号脉, 因此, 推测与阿斯喀尔特钼矿床具有成因联系的花岗岩-伟晶岩体系, 其成因与哈萨克斯坦-西伯利亚板块在晚古生代发生陆-陆碰撞造山作用, 在三叠纪构造体系由挤压转为伸展背景下, 先期存在幔源物质的古老地壳物质发生减压部分熔融有关。

关键词: 印支成矿作用; Re-Os 同位素; 辉钼矿; 钼矿床; 阿斯喀尔特

中图分类号: P597 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2015)02-0145-10

Molybdenite Re-Os dating of the Asikaerte Be-Mo deposit in Xinjiang, China and its genetic implications

LIU Wen-zheng^{1,2}, ZHANG Hui^{1*}, TANG Hong-feng¹, TANG Yong¹ and LÜ Zheng-hang¹

1. Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The Asikaerte Be-Mo deposit is located in the southeast of the Halong-Qinghe metallogenic belt of the Altai metallogenic province in Central Asian metallogenic domain. Seven molybdenite samples from the deposit were collected and analyzed, which yield Re-Os isotope ages ranging from (224.6±3.1) Ma to (235.7±3.4) Ma, with an isochron age of (228.7±7.1) Ma, and a weighted mean age of (229.0±3.0) Ma, indicating that Be and Mo mineralization occurs in the Triassic period. The Re contents of the seven molybdenite samples range from 38.26 μg/g to 56.45 μg/g, suggesting that the ore-forming metals are originated from crust-mantle mixed sources. As the mineralogical epoch of Asikaerte Be-Mo deposit postdates the closure time of Paleo-Asia ocean (~250 Ma), and zircons from the late pegmatite show Hf isotope characteristics similar to those from the Triassic pegmatites in the Chinese Altai (such as Koktokay No. 3 pegmatite, and Kelumute No. 112 pegmatite), it can be speculated that the granite-pegmatite system, to which the Be-Mo deposit shows a genetic relationship, is derived from partial melting (crust thickening and decompression melting) of ancient crust with mantle-derived residual materials under a post-collision extensional setting in the Triassic, after the Kazakhstan block collides with the Siberian block in late Paleozoic.

Key words: Indosinian epoch mineralization; Re-Os isotope; molybdenite; Be-Mo deposit; Asikaerte

收稿日期(Received): 2014-03-14; 改回日期(Revised): 2014-06-10; 接受日期(Accepted): 2014-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(41372104); 新疆有色金属工业集团地质科研项目(YSKY2011-02)

作者简介: 刘文政(1989-), 男, 硕士研究生, 矿物学岩石学矿床学。E-mail: lwzheng@126.com

* 通讯作者(Corresponding author): ZHANG Hui, E-mail: zhanghui@vip.gyig.ac.cn, Tel: +86-851-5891494

0 引言

中亚造山带是全球最大的增生造山带与大陆成矿域^[1-5]，它经历了多期次的洋盆形成、俯冲消减和闭合等过程，并在二叠纪末-三叠纪初彻底闭合^[6-11]。按照现代成矿理论，洋壳俯冲和大陆碰撞可分别形成古生代和中生代的岩浆热液（斑岩型夕卡岩型等）、变质热液型（造山型）和浅成热液等多类成矿系统^[11-15]。

阿斯喀尔特铍-钼矿床位于中亚成矿域阿尔泰山成矿省哈龙-青河成矿带的东南部，为一富含绿柱石的大型铍钼矿床。截止目前，该矿床仍是我国花岗岩型铍钼矿床的典型代表，在矿床学上具有重要的理论意义。前人对矿床的地质特征、控矿因素、形成机理及其成因等方面开展了一定的研究^[16-17]，但至今还缺乏高精度的成矿年代学数据，从而制约了对该矿床成因的认识。本次我们对阿斯喀尔特铍-钼矿床开展辉钼矿 Re-Os 定年，并根据辉钼矿中 Re 含量，初步探讨矿床成因。

1 地质背景

1.1 区域地质背景

阿尔泰山造山带位于中国、蒙古、俄罗斯和哈萨克斯坦四国的交界处，是中亚造山带的重要组成部分，北邻西萨彦岭古岛弧带，东北部是乌列善-科布多古岛弧带，南侧以额尔齐斯深断裂与哈萨克斯坦板块相接。中国阿尔泰山造山带构造运动剧烈，以红山嘴-诺尔特断裂、康布铁堡-库尔特断裂和额尔齐斯断裂带为界划分为北、中、南阿尔泰山 3 个块体^[18-20]。北阿尔泰山块体主要由中晚泥盆世火山岩（安山岩、英安岩等）和晚泥盆世-早石炭世火山沉积岩组成。中阿尔泰山主要为震旦纪-早古生代深变质岩系以及奥陶纪-二叠纪侵入岩，并可能有前寒武纪基底^[21]，具有微陆块的特点^[3,18,22,23]。南阿尔泰山由片麻岩和志留纪-石炭纪火山-沉积岩岩系组成^[19,24]。

阿斯喀尔特矿区位于中阿尔泰山块体的东南端的北东翼，矿区主要构造线方向与区域构造一致，为 NNW 310°~330°。区域上的沉积火山岩建造主要有下中元古界克木齐群（Pt₁₋₂km）和上元古界富蕴群（Pt₃fm）等结晶基底、中上泥盆统忙代恰群（D₂₋₃md）和下石炭统红山咀组（C₁h）等上古生代盖层、第四系等

新生代盖层；岩浆岩建造主要有海西早期的青格里英云闪长岩（D₂Q）、海西中晚期的阿尔沙特二云母花岗岩（CAL）和库吉尔特钾长花岗岩（KL）、海西晚期的别也萨麻斯钾长花岗岩（PB）和诺尔特达坂花岗斑岩、石英斑岩（PN）（图 1）。

1.2 矿区地质特征

矿区出露地层为中上奥陶统哈巴河群上亚群的黑云石英片岩、十字黑云石英片岩、条带状绿帘变粒岩、片麻岩及混合岩，第四系冰川堆积沿水系分布。矿区位于蒙古边缘弧西段，走向 NW，倾向 NE 的科克托木斯克-巴勒其格压扭性主干断裂的下盘所派生的第三序次张扭性分枝断裂所夹部位。岩浆活动频繁，出露花岗岩占区域面积的 60% 以上，主要有花岗闪长岩、黑云母花岗岩、二云母花岗岩、中细粒白云母花岗岩和细粒钠长石化白云母花岗岩。黑云母花岗岩分布于 1 号矿脉外围，面积约 0.9 km²，为阿斯喀尔特花岗岩型铍钼矿床的围岩。二云母花岗岩出露面积约为 5.0 km²，局部地段含绿柱石，为阿斯喀尔特花岗岩型铍钼矿床的母岩（图 2a）。中细粒白云母花岗岩与二云母花岗岩呈渐变关系。细粒钠长石化白云母花岗岩产状与中细粒白云母花岗岩一致，位于中细粒白云母花岗岩顶部，两者也呈渐变关系。

花岗闪长岩呈浅灰黑色，中细粒结构，块状构造。主要矿物组成为石英（20%~25%）、斜长石（50%）、钾长石（约 10%）和黑云母（10%~15%）。黑云母花岗岩为灰白色，不等粒半自形粒状结构，块状构造。主要由石英（30%~35%）、斜长石（约 40%）、钾长石（约 15%）、黑云母（5%~10%）以及少量白云母（约 2%）组成。二云母花岗岩呈灰白色，中粗粒花岗结构，似斑状构造、块状构造。主要由钾长石（35%）、斜长石（30%）、石英（25%）、黑云母（约 5%）、白云母（约 4%）等组成。中细粒白云母花岗岩呈浅灰白色，中细粒结构，块状构造。主要矿物组成为石英（15%~20%）、钾长石（约 50%）、钠长石（25%~30%）、白云母（2%~5%），副矿物（磷灰石、锆石及榍石等）含量小于 1%。细粒钠长石化白云母花岗岩呈浅灰白色，中细粒结构、花岗结构，块状构造。主要矿物为石英（约 28%）、钠长石（约 40%）、钾长石（约 30%）、白云母（约 2%）。

1.3 花岗岩-伟晶岩的垂直分带及矿化特征

阿斯喀尔特铍钼矿床由原生矿和次生砂矿两部

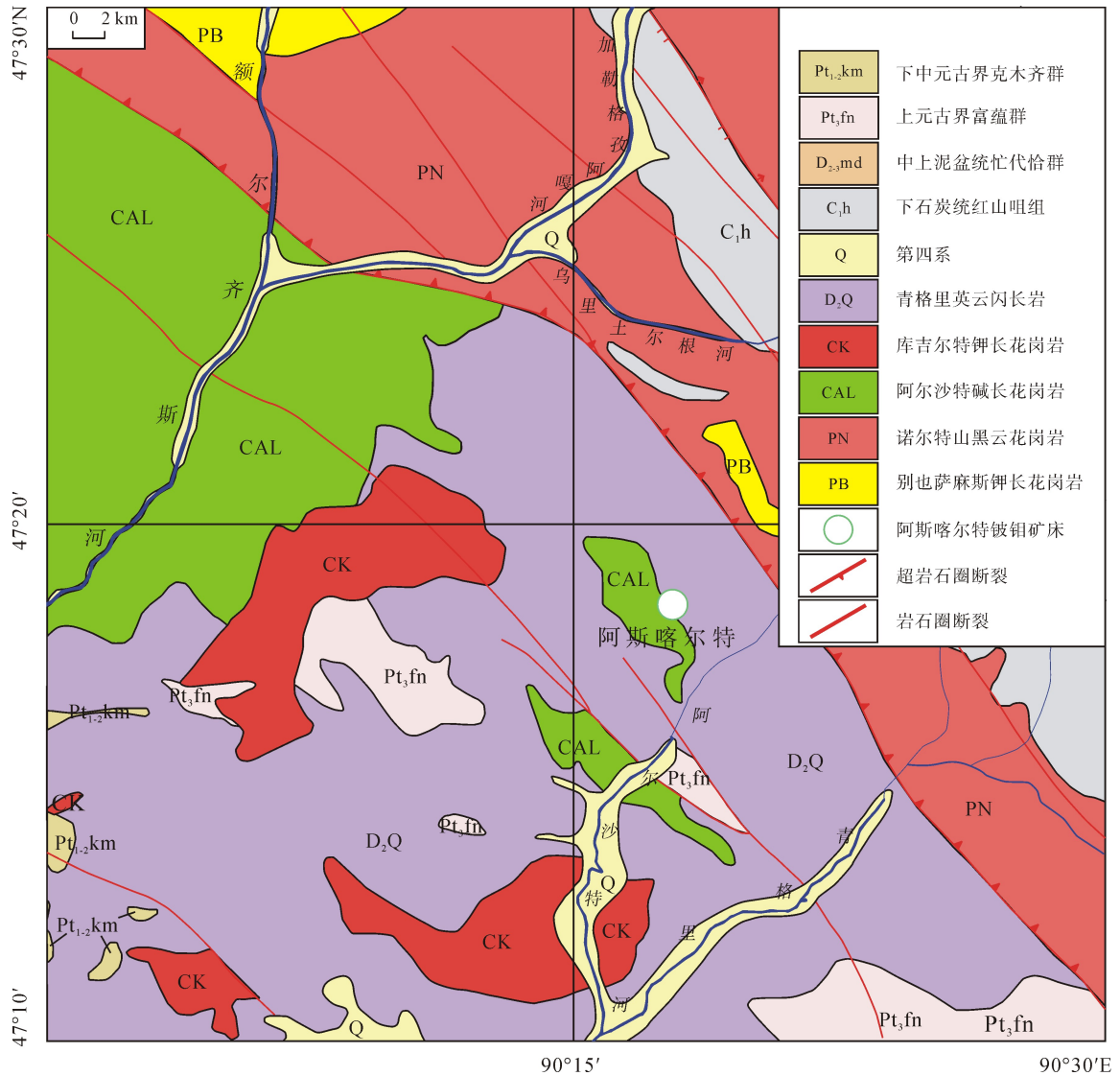


图 1 研究区地质简图(据丁建刚¹⁾)

Fig.1 Geological sketch map of the study area (after Ding Jian-gang¹⁾)
CAOB –中亚造山带。
CAOB – the Central Asian Orogenic Belt.

分组成, 其中原生矿产于钠长石化白云母花岗岩岩株顶部, 岩株呈等轴状, 倾向 NE, 倾角约 60°, 为含 Be、Mo、Nb 花岗岩。阿斯喀尔特钨钼矿床是由上部的似伟晶岩型钨矿体与下部的花岗岩型钨矿体组成, 两者呈渐变过渡关系。从下部花岗岩到上部伟晶岩, 存在明显的垂直分带现象, 由下往上发育 7 个岩性(结构)带, 依次是中细粒白云母花岗岩带、含绿柱石的细粒钠长石化白云母花岗岩带、条带状白云母-石英-钠长石带、含绿柱石的下部白云母-石英带、块体石英带、含绿柱石的上部白云母-石英带、

含绿柱石的白云母-微斜长石-钠长石带(图 2b)。各岩性(结构)带的特征分述如下。

(1) 含绿柱石的白云母-微斜长石-钠长石带, 厚 2~10 m, 钨矿化弱, 上盘与斑状黑云母花岗岩接触, 围岩蚀变强烈, 矿体本身则有微斜长石、钠长石、白云母和石英, 副矿物有磷灰石、石榴石、磁铁矿、黄铁矿和辉钨矿。矿物颗粒大小、结构及成分变化较大, 粒度 0.1~10 cm。

(2) 含绿柱石的上部白云母-石英带, 宽 0.1~0.2 m, 长 125 m, 倾角 45°~50°, 为钨矿体, 由白云母、微斜

1) 丁建刚, 新疆富蕴县可可托海北部区域地质矿产图, 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局, 2008。

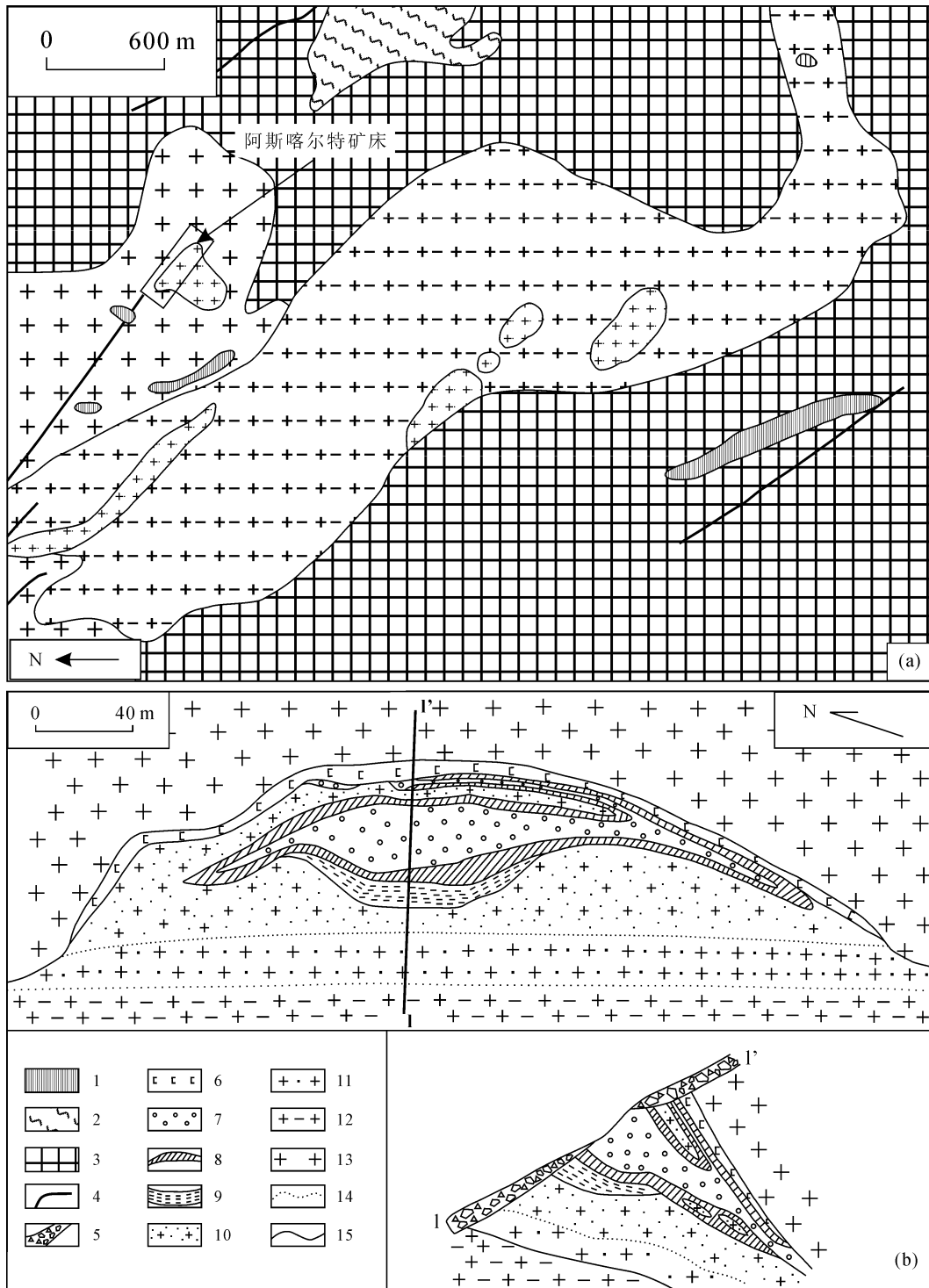


图2 阿斯喀尔特地铍-钼矿床地质简图(a)和岩性分带剖面图(b) (据文献[17]改编)

Fig.2 Geological sketch map of Asikaerte Be-Mo deposit (a) and a profile showing lithologic zonation (b) (after Reference [17])

1- 黑云母-石英片岩; 2- 黑云母片麻岩; 3- 花岗闪长岩; 4- 断层; 5- 第四系冰层漂砾层; 6- 白云母-微斜长石-钠长石带; 7- 块体石英带; 8- 白云母-石英带; 9- 条带状白云母-石英-钠长石带; 10- 含绿柱石细粒钠长石花岗岩; 11- 中细粒白云母花岗岩; 12- 二云母花岗岩; 13- 黑云母花岗岩; 14- 岩相过渡界线; 15:地质界线。

长石、钠长石、石英和绿柱石组成, 副矿物包括辉钼矿、黄铁矿及铋的氧化物。绿柱石为不同颜色的绿色, 六方柱状, 常见为不透明, 少许无色透明, 横

截面直径多数在 0.5~4cm 之间, 大者可达 10 cm。辉钼矿为铅灰色, 呈大小不等的鳞片状, 聚集成星散状、脉状或层状, 发育极不连续。

(3) 块体石英带, 产于矿脉的中心部位, 呈纺锤状, 长 264 m, 宽 30 m, 延伸 60 m, 上下盘皆与石英-白云母带呈波状接触, 钨矿化弱; 石英块体的边部有绿柱石产出, 伴生有黄铁矿、闪锌矿、辉钼矿、巢状石膏及重晶石脉; 辉钼矿产于石英边缘内侧, 与黄铁矿、辉钼矿、闪锌矿和绿柱石共生, 含量极少。

(4) 含绿柱石的下部白云母-石英带, 围绕石英脉呈环状分布, 长 265 m, 宽 0.1~5 m, 沿倾斜延伸大于 100 m, 主要矿物包括白云母(20%~30%)、石英(10%~20%)、绿柱石(3%~5%)、微斜长石(2%~20%), 为钨矿体, 副矿物包括辉钼矿、黄铁矿及铋的氧化物。绿柱石为不同颜色的绿色, 六方柱状, 常见为不透明, 少许无色透明, 横截面直径多数在 0.5~4 cm 之间, 大者可达 10cm。辉钼矿为铅灰色, 呈大小不等的鳞片状, 聚集成星散状、脉状或层状, 发育极不连续。

(5) 条带状白云母-石英-钠长石带, 长 140 m, 宽 4~5 m, 与细粒钠长石化白云母花岗岩石渐变关系, 与白云母绿柱石矿带界线清楚, 具有十分清晰的钠长石、微斜长石、石英、白云母及绿柱石组成的条带状构造, 条带长 0.1~2 m, 各条带之界面处辉钼矿较多, 该带为钨矿体, 绿柱石是浅绿色、黄绿色, 短柱状和放射状, 粒径 0.3~2 cm。

(6) 含绿柱石的细粒钠长石化白云母花岗岩带, 厚 20~50 m, 为钨矿体, 绿柱石主要产于钠长石化白云母花岗岩的内部及其岩脉中, 其分布极不均匀。绿柱石产状主要包括: (a) 产于岩体内部, 通常晶体多呈他形-半自形, 充填在微斜长石与石英之间; (b) 赋存于钠长石化白云母岩体顶部的长英质脉中, 脉体形状大多不规则, 宽约 10~30 cm, 长 0.2~1 m, 主要由大小为 1~2 cm 的石英和微斜长石组成。绿柱石主要产于石英与微斜长石的接触处或石英集合体中, 其中产于微斜长石中的绿柱石, 多为他形或半自形, 产于石英、微斜长石接触带中绿柱石, 在靠近微斜长石一侧多为他形, 而靠近石英一侧多发育有完整的晶面, 完全产于石英集合体中的绿柱石则为完整的六方柱状; (c) 绿柱石-石英共生组合呈脉状充填于白云母花岗岩岩体顶部裂隙中, 脉厚 2~20 cm, 长 1~3 m, 脉体中部主要为石英, 绿柱石一般分布在脉的两侧, 发育完整的六方柱状, 晶体大小在 1~2 cm, 晶体的长轴方向多与脉壁垂直排列, 形成梳状结构。当石英特别少时, 便形成了单纯的绿柱石网脉, 厚 1~2 cm, 长不到 1 m, 同时绿柱石还可形

成很小的晶洞, 其中还伴生有少量的无色水晶。辉钼矿呈六角形、叶片状、薄板状(片径 0.1~0.4 mm), 或沿裂隙面呈星点状、玫瑰浸染状, 与锰铝榴石、绿柱石、黄铁矿密切共生, 或呈巢状集合体星点状分布。

(7) 中细粒白云母花岗岩带, 仅有微弱的钨矿化。

2 样品采集及分析方法

本次采集了 7 个辉钼矿样品, 图 3 显示含辉钼矿样品的手标本的实物照片, 有关辉钼矿产状及其矿物共生组合特征的描述列于表 1。

样品经粉碎分离粗选和双目镜下挑纯, 获得了纯度大于 99% 的辉钼矿。辉钼矿样品溶解, Re、Os 纯化分离, ICP-MS 分析等均在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完成。

具体步骤如下: 首先进行初测。称取辉钼矿 10 mg, 放入已清洗的特氟龙罐子中, 加入 5 mL HNO₃ 及 0.1 mL Re 稀释剂 (25 ng/g) 密封, 放入烘箱内于 120 °C 加热 5 h。将特氟龙杯敞口蒸干, 加入 2 mL HCl 并蒸干(此步骤重复 2 次)。完全蒸干后加入 HCl 约 2 mL, 趁热转移至 15 mL 试管内, 定容到 10 mL, 将溶液混合均匀后离心, 将上述溶液上柱, 用 2 mol/L 的 HCl 清洗 1 遍以后, 收集用 9 mol/L 的 HNO₃ 淋洗的液体, 浓缩成 1 滴时转移到试管内, 定容到 3 mL, 用于 Re 含量的初测。然后进行实测。根据初测得到的 Re 含量确定称样量及稀释剂含量(Re 稀释剂及 Os 稀释剂), 准确称取后放入卡洛斯管中, 并加入 5 mL HNO₃ 密封放入钢套中于 185 °C 加热 12 h, 将冷却后的卡洛斯管放入冰箱冷冻层冷冻 1 h。开管后连接好特氟龙密封塞, 在消解后的试液中加入约 1 倍的纯水及 3 mL H₂O₂, 水浴加热, 将 Os 鼓入吸收液中, 吸收完全后将吸收液放入冰箱冷冻, 该溶液用于 Os 含量的测定。将剩下的试液移出, 放入 100 mL 烧杯中蒸干, 用 HCl 赶出 HNO₃, 完全蒸干后加入 HCl 约 2 mL, 趁热转移至 15 mL 试管内, 定容到 10 mL, 将溶液混合均匀后离心, 将上述溶液上柱以后, 收集用 9 mol/L 的 HNO₃ 淋洗的液体, 浓缩成 1 滴时转移到试管内, 定容到 3 mL, 该溶液用于 Re 的 ICP-MS 测定。Re-Os 化学分离和质谱测定方法参见文献[25~26]。实验仪器为 ELAN DRC-e ICP-MS, 仪器灵敏度大于 40000 cps/ppb (1 ppb = 1 ng/g ¹¹⁵In), 相对标准偏差(RSD)小于 3%。Re 和 Os 全流程空白

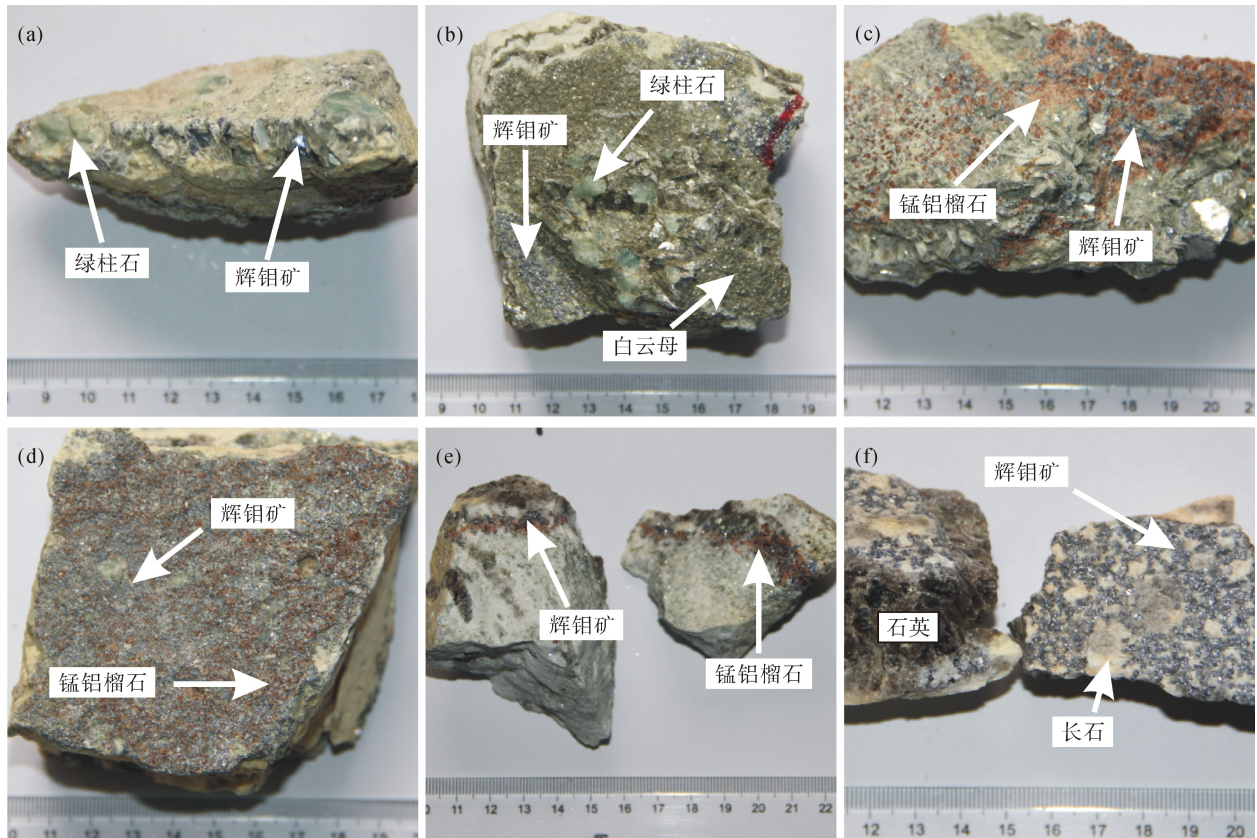


图 3 含辉钼矿样品的显微照片

Fig.3 Microscopic photos for molybdenite-bearing hand samples
(a) QHA12-02; (b) QHA12-03; (c) QHA12-04; (d) QHA12-05; (e) QHA12-07; (f) QHA12-08.

表 1 辉钼矿样品产状及矿物共生组合特征

Table 1 Occurrence of the molybdenite samples and its mineral paragenesis

序号	样品号	样品特征
1	QHA12-02	产于含绿柱石的石英-白云母带, 辉钼矿呈粗大晶片、浸染状, 与粗粒白云母、它形石英、中等自形绿柱石共生
2	QHA12-03	辉钼矿呈细小晶片、浸染状大量发育于条带状伟晶岩中的细粒钠长石化白云母花岗岩层, 与细粒白云母共生
3	QHA12-04	产于含绿柱石的石英-白云母带, 辉钼矿呈浸染状发育, 与锰铝榴石、长石、石英共生
4	QHA12-05	辉钼矿呈细小晶片、浸染状大量发育于条带状伟晶岩层, 与锰铝榴石、绿柱石共生
5	QHA12-07	辉钼矿产于钠长石化花岗岩中, 沿裂隙面呈浸染状, 与锰铝榴石共生
6	QHA12-08	辉钼矿产于条带状伟晶岩中, 呈细小晶片、浸染状与钠长石共生
7	QHA12-10	产于含绿柱石的石英-白云母带, 辉钼矿呈细小晶片、薄板状, 与细粒白云母共生

值分别为 0.006 ng/g 和 0.002 ng/g。实验结果由辉钼矿标样 JDC 监控, 标样测定年龄数据与推荐值基本一致, 指示分析结果稳定可靠。

3 讨论

3.1 阿斯喀尔特钼矿床的成矿时代及成矿物质来源

模式年龄根据辉钼矿中的 ^{187}Re 和 ^{187}Os 含量进行计算, 7 件辉钼矿 Re-Os 同位素测试结果列于表 2。

计算公式为 $t = (1/\lambda) \times \ln(1 + ^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})$, 其中衰变常数 $\lambda = 1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ [27]。本次获得单个辉钼矿样品 Re-Os 同位素年龄介于 $(224.6 \pm 3.1) \text{ Ma}$ 与 $(235.7 \pm 3.4) \text{ Ma}$ 之间, 其加权平均值为 $(229.0 \pm 3.0) \text{ Ma}$ (图 4a)。利用 ISOPLOT 软件 [28], 将 7 件样品数据进行线性拟合, 获得 Re-Os 等时线年龄为 $(228.7 \pm 7.1) \text{ Ma}$ (图 4b)。两者在误差范围内一致, 显示了数据的可靠性。因此, 所获得的 $(228.7 \pm 7.1) \text{ Ma}$ 的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄代表了阿斯喀尔特钼矿床的成矿时代。此年龄与矿区细粒钠长石化白云母花岗岩、伟

表 2 阿斯塔特钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测年数据
Table 2 Re-Os isotopic data for molybdenite from the Asikaerte Be-Mo deposit

样品号	Re (ng/g)		¹⁸⁷ Re (ng/g)		¹⁸⁷ Os (ng/g)		年龄 (Ma)	
	测定值	1σ	测定值	1σ	测定值	1σ	测定值	1σ
QHA12-02	49673.8	2309.0	31095.8	1445.4	117.1	2.3	226.5	4.5
QHA12-03	43282.7	2001.1	27094.9	1252.7	103.8	2.2	230.4	4.8
QHA12-04	45735.9	690.3	28630.7	432.1	109.3	1.9	229.6	3.9
QHA12-05	38262.5	715.6	23952.3	448.0	93.9	1.4	235.7	3.4
QHA12-07	56446.7	683.9	35335.6	428.1	136.2	3.2	231.8	5.5
QHA12-08	46766.6	835.5	29275.9	523.0	109.4	1.5	224.6	3.1
QHA12-10	50654.8	1514.6	31709.9	948.2	120.1	2.2	227.8	4.2

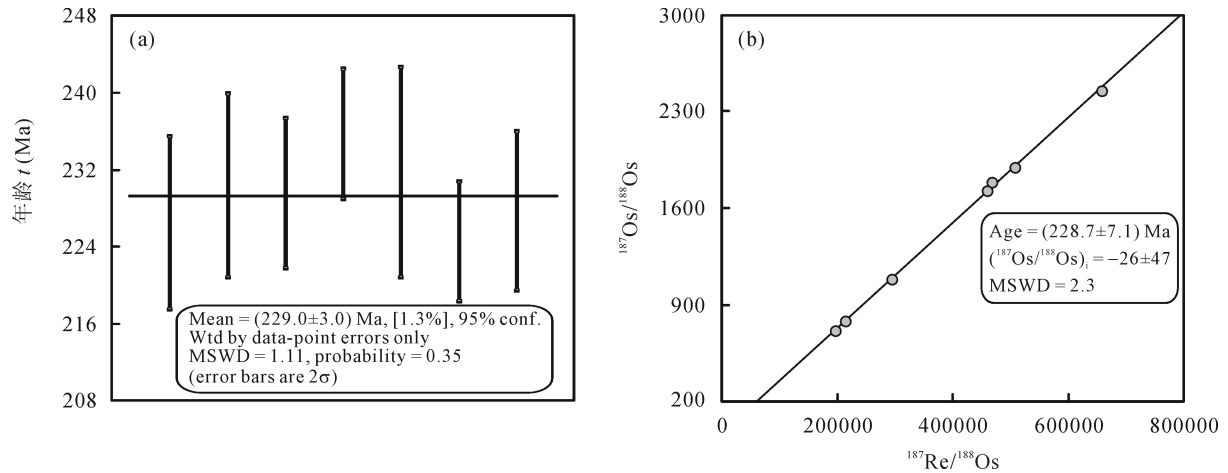


图 4 辉钼矿加权平均年龄(a)和 Re-Os 等时线年龄(b)

Fig.4 The weighted mean age (a) and Re-Os isochron age (b) of molybdenite

晶岩中锆石 U-Pb 年龄((231.4±2.0) Ma 和(220.6±1.6) Ma, 课题组未发表数据)基本一致, 表明阿斯塔特钼矿床的成矿时代与钠长石化白云母花岗岩、伟晶岩形成时代几乎是同时, 均形成于印支期。

已有的研究表明, 辉钼矿中 Re 含量可用于成矿物质来源示踪, 从幔源→壳幔混合源→壳源, 辉钼矿 Re 含量显示从 100 n μg/g → 10 n μg/g → n μg/g 递降趋势^[11,15,26,29-31]。阿斯塔特钼矿床 7 件辉钼矿样品的 Re 含量为 38.26~56.45 μg/g, 显示成矿物质的壳幔混合源特征。

3.2 阿勒泰造山带中印支期构造-岩浆-热液-成矿作用

已有的研究揭示, 阿勒泰造山带经历了奥陶纪-志留纪陆缘俯冲, 晚泥盆世发生主碰撞造山, 导致陆弧及陆缘边缘裂解、弧后盆地形成, 最终洋盆闭合, 早石炭世开始转入晚(或后)造山阶段, 早-中二叠世时期开始进入了后造山阶段, 而中生代之后则进入非造山期^[18-21,24,32,33]。

近年来, 在阿勒泰造山带中越来越多的印支期成岩、成矿作用得到证实。位于阿勒泰造山带南缘

(阿巴宫断裂的北侧)的阿巴宫多金属成矿带中的铁木尔特铅锌铜矿床 Ar-Ar 年龄为 235~240 Ma^[34], 乌拉斯沟铜矿 Ar-Ar 年龄为 220 Ma^[35], 萨热阔布金矿 Ar-Ar 年龄为(213.5±2.3) Ma^[36], 上述矿床被认为是典型的陆-陆碰撞体制下形成的造山型矿床。而广泛分布于中阿尔泰构造单元中的花岗伟晶岩及其相关的稀有金属矿床, 已有的锆石 U-Pb 定年结果显示它们形成于印支期, 如世界著名的可可托海 3 号伟晶岩脉超大型稀有金属矿床(Li-Be-Nb-Ta-Cs-Rb-Hf 矿床)的形成时代应该在 220~210 Ma 之间^[37-40], 柯鲁木特 112 号伟晶岩脉(Li-Be-Nb-Ta 矿床)形成于(238.3±2.0) Ma 至(210.7±1.6) Ma 之间^[41], 群库尔伟晶岩(Be-Nb-Ta 矿床)和佳木开伟晶岩(Li-Be-Nb-Ta-Cs 矿床)等形成时代分别为(206.8±1.6) Ma 和(212.2±1.7) Ma^[42]。通过对阿勒泰造山带中典型伟晶岩(可可托海 3 号脉、柯鲁木特 112 号脉)地球化学研究, 我们提出陆-陆碰撞造山体制下, 在三叠纪时构造体制由挤压转换为伸展背景, 导致加厚地壳物质减压熔融, 是我国阿勒泰造山带中伟晶岩大规模分布的构造背景^[41]。

本文所研究的阿斯塔特钼矿床的细粒钠长

石化白云母花岗岩、伟晶岩形成时代分别为(231.4±2.0) Ma 和(220.6±1.6) Ma (课题组未发表数据), 与可可托海 3 号伟晶岩北部的阿拉尔花岗岩的形成时代(约 220 Ma^[43]和约 230 Ma^[39])一致, 表明它们是相同构造-岩浆活动的产物。与之对应的是, 俄罗斯山区阿尔泰有相当数量的中生代花岗岩类产出, 分布在比斯克-巴尔瑙尔盆地以南至中俄、中蒙边界之间的区域以及哈萨克斯坦阿尔泰山区, 主要包括似斑状二云母花岗岩、白云母电气石花岗岩、似斑状角闪石黑云母花岗岩、黑云母花岗岩、角闪石黑云母正长岩、花岗正长岩, 还有白岗岩、翁岗岩和含锂辉石花岗岩等, 构成“淡色花岗岩-花岗岩类”组合, 形成时代在 250~180 Ma 之间^[44-46]。在俄罗斯山区阿尔泰南部与中、蒙、哈等国接壤的地区, 已发现有 10 多个与稀有金属矿床有关的早中生代花岗岩体, 其中重要的岩体有钦达加泰、昆古尔贾林、奥罗察干、卡尔古特、阿卡拉哈等^[46]。已有的研究显示, 俄罗斯阿尔泰山中生代花岗岩的形成时代集中在早三叠纪-早侏罗世, 而相关的稀有金属矿床主要形成于晚三叠世-早侏罗世, 稀有金属成矿作用往往与同一岩体的晚期岩浆活动密切相关。由于花岗岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值与富集地幔来源的岩浆基本相当, 因此很可能是幔源岩浆与地壳物质混合所致^[46-47]。

本文研究的矿区条带状伟晶岩中锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值在 -1.50~+1.69 范围, 平均为 +0.32, 伟晶岩 Hf 同位素模式年龄为 790~910 Ma, t_{DM2} 为 1140~1350 Ma (课题组未发表数据); 与可可托海 3 号脉、柯鲁木特 112 号脉、卡鲁安矿区伟晶岩具有相似的 Hf 同位素特征, 均以其锆石中低的正值 ($\epsilon_{Hf}(t) = 0.0 \sim +2.4$) 和相对较老的模式年龄($t_{DM2} = 1100 \sim 1250$ Ma) 为特征。较小的正 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值和古老的 t_{DM2} 年龄显示伟晶岩的物源是以古老地壳为主、幔源物质为辅的混合物源, 由此, 我们认为与稀有金属矿床相关的伟晶岩初始岩浆很可能是与先期存在幔源物质的古老地壳物质部分熔融有关。

由上可见, 阿尔泰造山带中印支期构造-岩浆-热液-成矿作用异常发育, 三叠纪(即印支期)是中亚地区最重要的成矿时代之一^[48]。就阿尔泰山造山带而言, 中生代花岗岩、伟晶岩及其相关的稀有金属成矿作用的时限应为三叠纪-侏罗纪, 是哈萨克斯坦与西伯利亚板块在晚古生代发生陆-陆碰撞造山作用, 在三叠纪-侏罗纪时构造体制由挤压转换为伸展背景下的加厚地壳物质减压熔融的产物。显然, 与伟晶岩一样, 与中生代花岗岩相关的稀有金属矿床

在阿尔泰山及毗邻地区可能具有广阔的找矿远景。

4 结 论

(1) 阿斯喀尔特铍钼矿床的 7 件辉钼矿样品 Re-Os 年龄介于(224.6±3.1) Ma 和(235.7±3.4) Ma 之间, 加权平均年龄为(229.0±3.0) Ma, 等时线年龄为(228.7±7.1) Ma, 表明阿斯喀尔特铍钼矿床形成于三叠纪;

(2) 阿斯喀尔特铍钼矿床辉钼矿样品 Re 含量介于 38.26~56.45 $\mu\text{g/g}$, 指示成矿元素 Re 具有壳幔混合源特征;

(3) 与铍钼矿床形成具成因关系的花岗岩-伟晶岩体系, 其形成很可能与三叠纪时后碰撞体制的伸展背景下先期存在幔源物质的古老地壳物质发生减压部分熔融有关。

参考文献(References):

- [1] 陈衍景. 中国西北地区中亚型造山-成矿作用的研究意义和进展[J]. 高校地质学报, 2000, 6(1): 17-22.
Chen Yan-jing. Progress in the study of Central Asia-type Orogenesis-metallogenesis in Northwest China [J]. Geological Journal of China Universities, 2000, 6(1): 17-22 (in Chinese with English abstract).
- [2] 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题[J]. 岩石学报, 2009, 25(11): 2695-2726.
Chen Yan-jing, Zhai Ming-guo, Jiang Shao-yong. Significant achievement and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent [J]. Acta Petrol Sinica, 2009, 25(11): 2695-2726 (in Chinese with English abstract).
- [3] 李锦轶, 何国琦, 徐新, 李华芹, 孙桂华, 杨天南, 高立明, 朱志新. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨[J]. 地质学报, 2006, 80(1): 148-168.
Li Jin-yi, He Guo-qi, Xu Xin, Li Hua-qin, Sun Gui-hua, Yang Tian-nan, Gao Li-ming, Zhu Zhi-xin. Crustal tectonic framework of northern Xinjiang and adjacent regions and its formation [J]. Acta Geol Sinica, 2006, 80(1): 148-168 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王京彬, 徐新. 新疆北部后碰撞构造演化与成矿[J]. 地质学报, 2006, 80(1): 23-31.
Wang Jing-bin, Xu Xin. Post collisional tectonic evolution and metallogenesis in northern Xinjiang, China [J]. Acta Geol Sinica, 2006, 80(1): 23-31 (in Chinese with English abstract).
- [5] 肖文交, 舒良树, 高俊, 熊小林, 王京彬, 郭召杰, 李锦轶, 孙敏. 中亚造山带大陆动力学过程与成矿作用[J]. 新疆地质, 2008, 26(1): 4-8.
Xiao Wen-jiao, Shu Liang-shu, Gao Jun, Xiong Xiao-lin, Wang Jing-bin, Guo Zhao-jie, Li Jin-yi, Sun Min. Continental dynamics of the central Asian orogenic belt and its metallogeny [J]. Xinjiang Geology, 2008, 26(1): 4-8 (in Chinese with English abstract).

- Chinese with English abstract)
- [6] Bazhenov M L, Collins A Q, Degtyarev K E, Levashova N M, Mikolaichuk A V, Pavlov V E, Van der Voo R. Paleozoic northward drift of the North Tien Shan (Central Asia) as revealed by Ordovician and Carboniferous paleomagnetism [J]. *Tectonophysics*, 2003, 366(1): 113–141.
- [7] Sengö r A, Natal'in B. Paleotectonics of Asia: Fragments of a synthesis [M]//Yin A, Harrison M. *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 486–640.
- [8] Xiao Wen-jiao, Zhang Lian-chang, Qin Ke-zhang, Sun Shu, Li Ji-liang. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia [J]. *Am J Sci*, 2004, 304(4): 370–395.
- [9] Xiao W, Windley B, Huang B, Han C, Yuan C, Chen H, Sun M, Sun S, Li J. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia [J]. *Int J Earth Sci*, 2009, 98(6): 1189–1217.
- [10] Xiao W, Windley B F, Hao J, Zhai M. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt [J]. *Tectonics*, 2003, 22(6): 1069–1089.
- [11] 陈衍景, 张成, 李诺, 杨永飞, 邓轲. 中国东北钼矿床地质 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(5): 1223–1268.
Chen Yan-jing, Zhang Cheng, Li nuo, Yang Yong-fei, Deng Ke. Geology of the Mo deposits in Northeast China [J]. *J Jilin Univ (Earth Sci Ed)*, 2012, 42(5): 1223–1268 (in Chinese with English abstract).
- [12] Pirajno F. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems* [M]. Berlin: Springer, 2009: 1–1250.
- [13] 陈衍景, 富士谷. 豫西金矿成矿规律 [M]. 北京: 地震出版社, 1992: 1–234.
Chen Yan-jing, Fu Shi-gu. *Gold Mineralization in West Henan* [M]. Beijing: Seismological Press, 1992: 1–234 (in Chinese).
- [14] 陈衍景, 肖文交, 张进江. 成矿系统: 地球动力学的有效探针 [J]. *中国地质*, 2008, 35(6): 1059–1073.
Chen Yan-jing, Xiao Wen-jiao, Zhang Jin-jiang. Ore-system as a geodynamic probe [J]. *Geol China*, 2008, 35(6): 1059–1073 (in Chinese with English abstract).
- [15] 李诺, 陈衍景, 张辉, 赵太平, 邓小华, 王运, 倪智勇. 东秦岭斑岩钼矿带的地质特征和成矿构造背景 [J]. *地学前缘*, 2007, 14(5): 186–198.
Li Nuo, Chen Yan-jing, Zhang Hui, Zhao Tai-ping, Deng Xiao-hua, Wang Yun, Ni Zhi-yong. Molybdenum deposits in East Qinling [J]. *Earth Sci Front*, 2007, 14(5): 186–198 (in Chinese with English abstract)
- [16] 巫晓兵, 范良明, 毛玉元. 阿斯喀尔特铍钼矿床成因再认识 [J]. *成都理工学院学报*, 1996, 23(3): 113–115.
Wu Xiao-bing, Fan Liang-ming, Mao Yu-yuan. Rethinking the causes of the Asikaerte Be deposit [J]. *J Chengdu Inst Technol*, 1996, 23(3): 113–115 (in Chinese with English abstract).
- [17] 邹天人, 李庆昌. 中国新疆稀有及稀土金属矿床 [M]. 北京: 地质出版社, 2006: 34–51.
Zou Tian-ren, Li Qing-chang. *Rare and Rare Earth Metal Deposits in Xinjiang, China* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 34–51 (in Chinese).
- [18] Li J Y, Xiao W J, Wang K Z, Sun G H, Gao L G. Neoproterozoic-Paleozoic tectonostratigraphy, magmatic activities and tectonic evolution of eastern Xinjiang, NW China [C]//Mao Jingwen, Goldfarb R J, Seltman R, Wang D H, Xiao W J, Hart C. *Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altai and Tianshan*. IAGOD Guidebook Series 10. London: CERCAMS/NHM, 2003: 31–74.
- [19] Xiao W, Windley B, Badarch G, Sun S, Li J, Qin K, Wang Z. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: Implications for the growth of Central Asia [J]. *J Geol Soc*, 2004, 161(3): 339–342.
- [20] 何国琦. 中国新疆古生代地壳演化及成矿 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1994: 1–437.
He Guo-qi. *Paleozoic Custal Evolution and Mineralization in Xinjiang, China* [M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 1994: 1–437 (in Chinese).
- [21] Hu A, Jahn B-m, Zhang G, Chen Y, Zhang Q. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence. Part I. Isotopic characterization of basement rocks [J]. *Tectonophysics*, 2000, 328(1): 15–51.
- [22] 李会军, 何国琦, 吴泰然, 吴波. 阿尔泰-蒙古微大陆的确 定及其意义 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1369–1379.
Li Hui-jun, He Guo-qi, Wu Tai-ran, Wu Bo. Confirmation of Altai-Mongolia microcontinent and its implications [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2006, 22(5): 1369–1379 (in Chinese with English abstract).
- [23] 李锦轶. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演 变 [J]. *地质论评*, 2004, 50(3): 304–322.
Li Jin-yi. Late Neoproterozoic and Paleozoic tectonic framework and evolution of eastern Xinjiang, NW China [J]. *Geol Rev*, 2004, 50(3): 304–322 (in Chinese with English abstract).
- [24] Windley B F, Kröner A, Guo Jinghui, Qu Guosheng, Li Yingyi, Zhang Chi. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution [J]. *J Geol*, 2002, 110(6): 719–737.
- [25] 黄小文, 漆亮, 高剑峰. 铼-钼同位素分析样品预处理研究 进展 [J]. *岩矿测试*, 2011, 30(1): 90–103.
Huang Xiao-wen, Qi Liang, Gao Jian-feng. A Review on sample preparation in Re-Os isotopic analysis [J]. *Rock Mineral Anal*, 2011, 30(1): 90–103.
- [26] 杜安道, 何红廖, 殷万宁, 邹晓秋, 孙亚莉, 孔德忠, 陈少 珍, 屈文俊. 辉钼矿的铼-钼同位素地质年龄测定方法研究 [J]. *地质学报*, 1994, 68(4): 339–347.
Du An-dao, He Hong-liao, Yin Wan-ning, Zou Xiao-qiu, Sun Ya-li, Kong De-zhong, Chen Shao-zhen, Qu Wen-jun. A study on the rhenium-osminun geochronometry of molybdenites [J]. *Acta Geol Sinica*, 1994, 68(4): 339–347 (in Chinese with English abstract).
- [27] Smoliar M I, Walker R J, Morgan J W. Re-Os ages of group IIA, IIIA, IVA, and IVB iron meteorites [J]. *Science*, 1996, 271(5252): 1099–1102.
- [28] Ludwing K. Isoplot/Ex, version 2.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [K]. Geochronology Center, Berkeley, Special Publication 1a, 1999.
- [29] Berzina A N, Sotnikov V I, Economou-Eliopoulos M,

- Eliopoulos D G. Distribution of rhenium in molybdenite from porphyry Cu-Mo and Mo-Cu deposits of Russia (Siberia) and Mongolia [J]. *Ore Geol Rev*, 2005, 26(1): 91–113.
- [30] Mao J, Zhang Z, Zhang Z, Du A. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W (Mo) deposit in the northern Qilian mountains and its geological significance [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63(11): 1815–1818.
- [31] Stein H, Markey R, Morgan J, Hannah J, Scherstén A. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works [J]. *Terra Nova*, 2001, 13(6): 479–486.
- [32] 王涛, 童英, 李舫, 张建军, 史兴俊, 李锦轶, 韩宝福, 洪大卫. 阿尔泰造山带花岗岩时空演变、构造环境及地壳生长意义——以中国阿尔泰为例[J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(6): 595–618.
Wang Tao, Tong Ying, Li Shan, Zhang Jian-jun, Shi Xing-jun, Li Jin-yi, Han Bao-fu, Hong Da-wei. Spatial and temporal variations of granitoids in the Altay orogen and their implications for tectonic setting and crustal growth: Perspectives from Chinese Altay [J]. *Acta Petrol Mineral*, 2010, 29(6): 595–618 (in Chinese with English abstract).
- [33] 许继峰, 陈繁荣, 于学元, 牛贺才, 郑作平. 新疆北部阿尔泰地区库尔提蛇绿岩: 古弧后盆地系统的产物[J]. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20(3): 344–352.
Xu Ji-feng, Chen Fan-rong, Yu Xue-yuan, Niu He-cai, Zheng Zuo-ping. Kuerti ophiolite in Altay area of North Xinjiang: Magmatism of an ancient back-arc basin [J]. *Acta Petrol Mineral*, 2001, 20(3): 344–352 (in Chinese with English abstract).
- [34] 郑义, 张莉, 郭正林. 新疆铁木尔特铅锌铜矿床锆石 U-Pb 和黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学及其矿床成因意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(1): 191–204.
Zheng Yi, Zhang Li, Guo Zheng-lin. Zircon LA-ICP-MS U-Pb and biotite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Tiemuert Pb-Zn-Cu deposit, Xinjiang: Implications for ore genesis [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2013, 29(1): 191–204 (in Chinese with English abstract).
- [35] Zheng Yi, Zhang Li, Chen Yan-jing, Qin Ya-jing, Liu Chun-fa. Geology, fluid inclusion geochemistry, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Wulasigou Cu deposit, and their implications for ore genesis, Altay, Xinjiang, China [J]. *Ore Geol Rev*, 2012, 49: 128–140.
- [36] 秦雅静, 张莉, 郑义, 刘春发, 迟好刚. 新疆萨热阔布金矿 Ar-Ar 定年及其地质意义[J]. *矿物学报*, 2011, 31(增刊): 629–630.
Qin Ya-jing, Zhang Li, Zheng Yi, Liu Chun-fa, Chi Hao-gang. Ar-Ar dating of Sarekuobu gold deposit and its geological significance in Xinjiang [J]. *Acta Mineral Sinica*, 2011, 31(suppl): 629–630 (in Chinese).
- [37] Wang Tao, Tong Ying, Jahn B-m, Zou Tian-ren, Wang Yan-bin, Hong Da-wei, Han Bao-fu. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Altai No. 3 Pegmatite, NW China, and its implications for the origin and tectonic setting of the pegmatite [J]. *Ore Geol Rev*, 2007, 32(1/2): 325–336.
- [38] Zhu Y F, Zeng Y S, Gu L B. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite No. 3 vein and related granites in the Keketuohai region, Altay Mountains, northwest China [J]. *J Asian Earth Sci*, 2006, 27(1): 61–77.
- [39] 陈剑锋. 阿尔泰 3 号脉缓倾斜部分的形成和演化[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2011.
Chen Jian-feng. Geochemistry of the part of the plate of the Altai No.3 pegmatite and its formation and evolution [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [40] 刘锋, 张志欣, 李强, 屈文俊, 李超. 新疆可可托海 3 号伟晶岩脉成岩时代的限定: 来自辉钼矿 Re-Os 定年的证据[J]. *矿床地质*, 2012, 31(5): 1111–1118.
Liu Feng, Zhang Zhi-xin, Li Qiang, Qu Wen-jun, Li Chao. New age constraints on Koktokay pegmatite No.3 Vein, Altay Mountains, Xinjiang: Evidence from molybdenite Re-Os dating [J]. *Mineral Deposit*, 2012, 31(5): 1111–1118 (in Chinese with English abstract).
- [41] Lv Zheng-hang, Zhang Hui, Tang Yong, Guan Shen-jin. Petrogenesis and magmatic-hydrothermal evolution time limitation of Kelumute No. 112 pegmatite in Altay, Northwestern China: Evidence from zircon U-Pb and Hf isotopes [J]. *Lithos*, 2012, 154: 374–391.
- [42] 任宝琴, 张辉, 唐勇, 吕正航. 阿尔泰造山带伟晶岩年代学及其地质意义[J]. *矿物学报*, 2011, 31(3): 587–596.
Ren Bao-qin, Zhang Hui, Tang Yong, Lü Zheng-hang. LA-ICPMS U-Pb zircon geochronology of the Altai pegmatites and its geological significance [J]. *Acta Mineral Sinica*, 2011, 31(3): 587–596 (in Chinese with English abstract).
- [43] 刘宏. 新疆阿尔泰阿拉尔花岗岩地球化学特征及其与可可托海 3 号脉演化关系[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
Liu Hong. Geochemical characteristics of Aral granite and the evolutionary relationship between it and Keketuohai No.3 pegmatite vein, Altay Xinjiang [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [44] Kozlov M, Khalilov V, Stasenko N, Timkin V. Jurassic leucogranite-granite formation in Altai [J]. *Geol Geophys (Sov Geol Geophys)*, 1991, 32(8): 44.
- [45] Vladimirov A G, Ponomareva A P, Shokalskii S P, Khalilov V A, Kostitsyn Y A, Ponomarchuk V A, Rudnev S N, Vystavnoi S A, Kruk N N, Titov A V. Late Paleozoic-early Mesozoic granitoid magmatism in Altai [J]. *Geol Geofiz*, 1997, 38(4): 755–770.
- [46] 韩宝福. 中俄阿尔泰山中生代花岗岩与稀有金属矿床的初步对比分析[J]. *岩石学报*, 2008, 24(4): 655–660.
Han Bao-fu. A preliminary comparison of Mesozoic granitoids and rare metal deposits in Chinese and Russian Altai Mountains [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2008, 24(4): 655–660 (in Chinese with English abstract).
- [47] Potseluev A, Babkin D, Kotegov V. The Kalguty complex deposit, the Gorny Altai: Mineralogical and geochemical characteristics and fluid regime of ore formation [J]. *Geol Ore Deposit*, 2006, 48(5): 384–401.
- [48] 朱永峰. 新疆的印支期运动与成矿[J]. *地质通报*, 2007, 26(5): 510–519.
Zhu Yong-feng. Indosin movement and metallogeny in Xinjiang, China [J]. *Geol Bulletin China*, 2007, 26(5): 510–519 (in Chinese with English abstract).