

文章编号: 0258-7106(2013)01-0207-10

新疆祁漫塔格柯可卡尔德钨锡矿床控矿构造及⁴⁰Ar-³⁹Ar年代学研究*

丰成友¹, 李国臣², 李大新¹, 周安顺³, 李洪茂³

(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 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 3 吉林省地质调查院, 吉林 长春 130061)

摘要 位于新疆东昆仑祁漫塔格地区的白干湖是中国西部最新探明的一个具超大型远景规模的钨锡矿田, 柯可卡尔德是其中勘查程度最高、规模最大的钨锡矿床。文章在对柯可卡尔德钨锡矿地质特征详细野外调研和剖析的基础上, 重点开展了控矿构造和白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar定年研究。结果表明, 该矿区内构造活动强烈且具多期次性, 可划分为成矿前向西右旋剪切构造、成矿期以NE向为主的左旋张扭性断裂和成矿后近SN向正断层性质断裂等3期。应用白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar同位素测年技术, 分别测得了强云英岩化钨锡矿化花岗岩脉内白云母的积分年龄为(411.7±2.6)Ma, 等时线年龄为(411.8±4.7)Ma($n=8$, MSWD=0.21); 黑钨矿-石英脉垂直脉壁生长的片状白云母的积分年龄为(412.8±2.4)Ma, 等时线年龄为(414.6±3.9)Ma($n=10$, MSWD=0.22), 厘定了该矿床的成矿时代为晚志留世, 认为其形成于东昆仑地区加里东造山旋回的后碰撞构造阶段。

关键词 地质学; 地球化学; 钨锡矿床; 控矿构造; ⁴⁰Ar-³⁹Ar同位素测年; 柯可卡尔德; 白干湖矿田; 东昆仑祁漫塔格地区

中图分类号: P618.67; P618.44

文献标识码: A

Ore-controlling structure and ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology of Kekekaerde tungsten-tin deposit in Qimantage area, Xinjiang

FENG ChengYou¹, LI GuoChen², LI DaXin¹, ZHOU AnShun³ and LI HongMao³

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 3 Jilin Geological Survey, Changchun 130061, Jilin, China)

Abstract

The Baiganhu W-Sn orefield, in the western part of the Qimantage mountains, eastern Kunlun orogenic belt, is the most recently discovered, large, W-Sn discovery in Xinjiang Uygur Autonomous Region, NW China. The orefield comprises four W-Sn ore deposits: Kekekaerde, Baiganhu, Bashierxi and Awaer. Of them, the Kekekaerde W-Sn deposit is largest and has highest exploration intensity. In this study, based on detailed field geological investigation, the ore-controlling structures and age determination on W-Sn ores have been carried out. The results show us that intensive and multi-stage structural activities had taken place. They are, from early to late, right-lateral shear structure at pre-metallogenic stage, NE-striking predominately tension-shear structure

* 本文得到国家自然科学基金项目(批准号:41172076)、中国博士后科学基金项目(编号:20090460132)、中国地质调查局地质调查项目(1212011085528)和中国地质调查局青年地质英才计划(201112)的联合资助

第一作者简介 丰成友,男,1971年生,博士,研究员,博士生导师,主要从事矿床地质、地球化学研究。Email:fengchy@yahoo.com.cn
收稿日期 2012-05-18; 改回日期 2013-01-20。许德焕编辑。

at metallogenic stage and nearly SN-striking normal fault at post-metallogenic stage. The $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ incremental heating method was used to date, the results yield a $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ plateau age of (411.7 ± 2.6) Ma and an isochron age of (411.8 ± 4.7) Ma with MSWD being 0.21 for muscovite separated from strongly greisenized W-Sn mineralization granite, a $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ plateau age of (412.8 ± 2.4) Ma and an isochron age of (414.6 ± 3.9) Ma with MSWD being 0.22 for muscovite separated from quartz-wolframite vein with muscovite vertically growing along both walls of quartz vein, respectively. It is shown that the Kekekaerde W-Sn deposit was formed at late Silurian, corresponding to post-collisional stage during Caledonian tectonic cycle in eastern Kunlun area.

Key words: geology, geochemistry, tungsten-tin deposit, ore-controlling structure, $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ isotopic dating, Kekekaerde, Baiganhu orefield, Qimantage area, eastern Kunlun

白干湖钨锡矿田位于新疆若羌县境内、东昆仑祁漫塔格山西段向北凸出的弧形转弯处,是近年在中国西部地区勘查发现的一处具超大型远景规模的矿田,包括柯可卡尔德、白干湖、巴什尔希和阿瓦尔4个矿床。其中,柯可卡尔德钨锡矿床的勘查程度最高、规模最大,钨金属量达14余万吨,锡7.16万吨, $\alpha(\text{WO}_3)$ 为0.10%~0.48%(平均0.28%), $\alpha(\text{Sn})$ 为0.10%~0.56%(平均0.30%)。该矿床自发现以来,一些地质工作者分别对矿床地质及成因(时有东等2004;李洪茂等,2006)、流体包裹体(李国臣等2012a)、侵入岩体年代学及地球化学(李国臣等,2012b)、成矿背景及找矿方向(宋茂德等,2010)等进行了研究。然而,由于该矿床为近年新发现,时间较短,加之交通不便、环境恶劣,迄今科研工作仍较薄弱,控矿构造特征不清,钨锡成矿时代不明,仅依据区内花岗岩体的时代大致推断。

研究表明,在K-Ar法测试过程中,普遍存在放射性成因氩的丢失及过剩氩的加入,从而导致K-Ar定年失准(Dalrymple et al., 1969; McDowell, 1983; 魏菊英等, 1988);使用Rb-Sr等时线法测定成矿年龄所需的样品量大,而样品中必然有不同世代的包裹体,测得的结果有可能是混合年龄(魏菊英等, 1988; 李华芹等, 1993)。自上世纪90年代以来,高精度测年技术不断更新,云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法、辉钼矿Re-Os法等精细同位素定年技术得到有效、广泛应用(杜安道等, 1994; 陈文等, 2002)。在柯可卡尔德矿床,黑钨矿-石英脉两壁发育大量垂直脉壁同期生长的片状白云母细脉,石英脉内也产有大量团块状白云母,穿插于花岗岩中的黑钨矿-石英脉两侧常发生强烈的云英岩化,成矿期大量出现的白云母恰恰是运用 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法开展高精度年代学研究的最佳测试对象。本文在对柯可卡尔德钨锡矿床地质特征进行

详细野外调研和剖析的基础上,重点开展了控矿构造和白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年研究,以期对包括柯可卡尔德矿床在内的白干湖钨锡矿田的构造演化、主导控矿要素、成矿时代等获得更深入的认识。

1 区域和矿区地质

1.1 地层

白干湖矿田内出露的地层简单,由古元古界金水口群小庙组和志留系白干湖组组成。前者分布于白干湖断裂以北,为一套浅变质的陆源碎屑岩-碳酸盐岩沉积建造,岩性以绢云石英片岩为主,并与似层状、透镜状或薄层条带条纹状硅质大理岩(透闪石大理岩)相互构成互层和夹层,呈NE向展布,倾向总体以SE为主,局部夹有少量玄武岩及变石英砂岩、砂板岩等碎屑岩。后者分布于白干湖断裂的南侧,为一套浅变质的笔石页岩相沉积建造,岩性为粉砂质绢云母板岩、泥砂质绢云千枚岩等,多沿白干湖断裂的南侧呈NE向带状展布,片理总体走向 60° ,倾向SE,倾角 $50^\circ \sim 70^\circ$,与金水口群小庙组呈断层接触。

柯可卡尔德矿区内,仅出露金水口群小庙组(图1),因受侵入岩浆期后高温-气化热液的影响,故在近岩体和近矿围岩及附近裂隙处,常发生矽卡岩化、云英岩化、电气石化、硅化、黑钨矿化、白钨矿化等矿化蚀变作用,是最重要的赋矿围岩和矿源层。

1.2 构造

区内构造复杂,褶皱、断裂、裂隙和剪切带发育,具多期活动特征。贯穿区域的白干湖断裂是区内的主体构造,总体走向 60° ,倾向SE,倾角 $70^\circ \sim 80^\circ$,延伸逾230 km,可能属阿尔金南缘断裂带的次一级断裂。

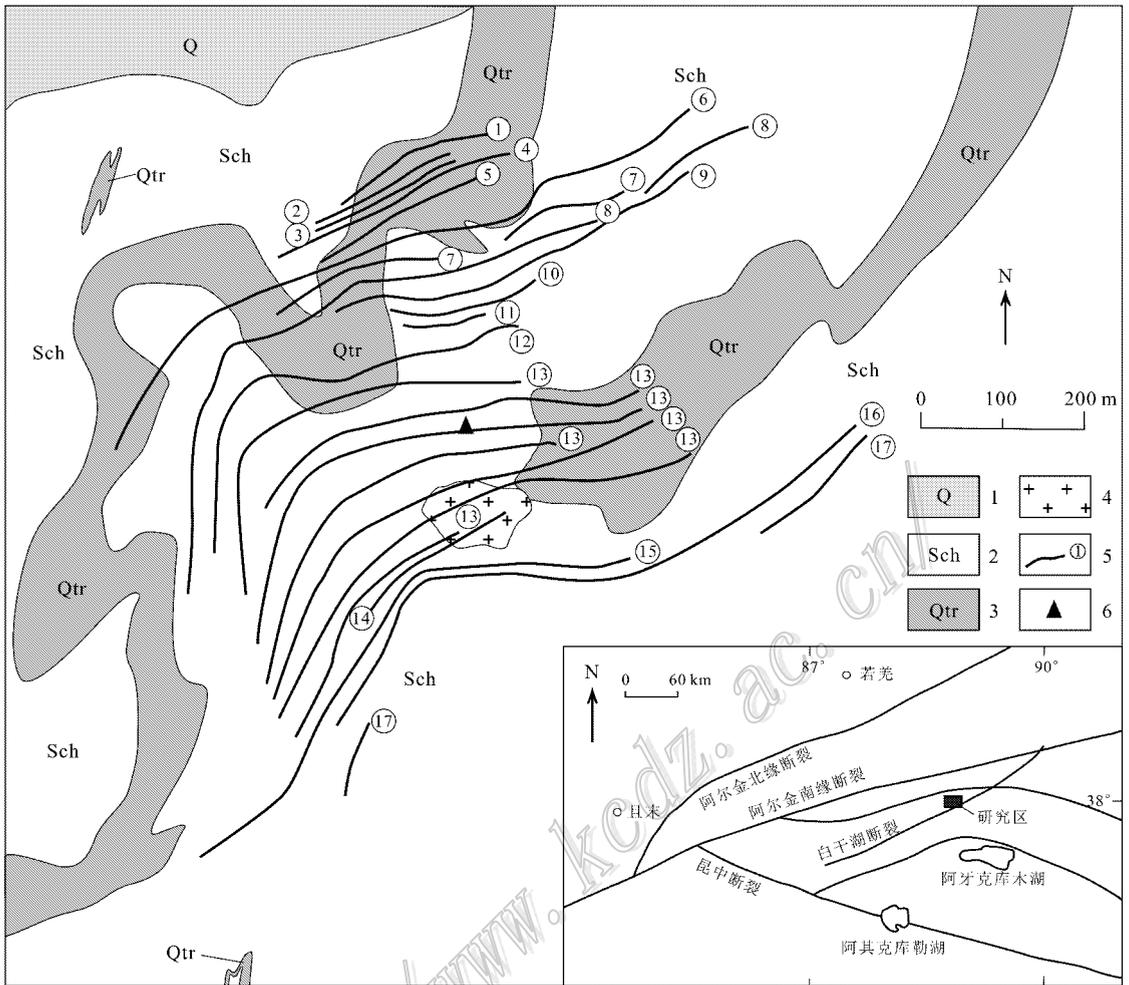


图 1 柯可卡尔德钨锡矿床地质略图(据李国臣等, 2012a)

1—第四系冲积层; 2—元古界金水口群绢云石英岩; 3—元古界金水口群石英透闪石岩; 4—伟晶岩; 5—黑钨矿-石英脉矿体及编号; 6—白云母采样位置

Fig. 1 Schematic geological map of the Kekekaerde tungsten-tin deposit (after Li et al., 2012a)

1—Quaternary; 2—Sericite quartz schist of Lower Proterozoic Jinshui Kou Group; 3—Quartz tremolite rock of Lower Proterozoic Jinshui Kou Group; 4—Pegmatite; 5—Wolframite-quartz vein and its serial number; 6—Muscovite sampling location

矿田内的褶皱构造包括产于白干湖矿区的背斜及产于柯可卡尔德和巴什尔希矿区的向斜。断裂构造包括 NE 向、NNE 向、NW 向和 NNW 向 4 组, 其中 NE 向断裂为区内重要的导矿、控矿构造。成矿裂隙包括 NE 向和近 EW 向 2 组, 前者一般长 200~500 m, 宽 10 cm~2 m, 倾向 SE, 倾角 25~70°, 是柯可卡尔德矿区隐伏花岗岩突起顶部主要工业矿脉的容矿裂隙, 多为黑钨矿-石英脉和钨锡矿化云英岩化二长花岗岩脉所充填; 后者一般长 1000~2000 m, 宽 2~10 cm, 倾向北, 倾角 50~75°, 主要为巴什尔希矿区钨锡石英细脉的容矿裂隙。

1.3 侵入岩

巴什尔希花岗岩为区内最重要的侵入岩体, 呈

岩基、岩株状出露于托格热萨依-柯可卡尔德一带, 侵入于金水口群小庙组内, 出露面积约 200 km², 岩性主要为钾长花岗岩和二长花岗岩等, 具多次侵入的特征。包亚范等(2008)测得其钾长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为(432.3 ± 0.8) Ma; 高晓峰等(2010)测得柯可卡尔德似斑状二长花岗岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为(458.0 ± 9.0) Ma; 李国臣等(2012b)测得白干湖矿田东北部出露的钾长花岗岩和二长花岗岩 SIMS 锆石 U-Pb 年龄分别为(422 ± 4) Ma 和(421 ± 4) Ma。可见两者均属加里东期晚奥陶世—晚志留世的产物。

1.4 矿体和矿石

柯可卡尔德矿床共探明钨锡矿体 23 条, 分布在

标高 3885~4394 m 之间。其中,15 条是呈线型展布于绢云石英片岩中的黑钨矿-石英脉矿体(图 2a,b); 6 条是赋存于隐伏花岗岩突起内呈板状或似层状面型产出的云英岩型矿体(图 2c); 2 条是产于外接触带大理岩内呈似层状-透镜状产出的矽卡岩型矿体(图 2d)。黑钨矿-石英脉型矿体和强云英岩化花岗岩脉型矿体呈斜列式紧密排列分布,一般延长 50~250 m,厚 0.5~2 m,走向 25~60°,倾向 SE,倾角 12~50°,形态变化较大。

矿石类型包括黑钨矿-石英脉型、云英岩型和矽卡岩型, $w(\text{WO}_3)$ 为 0.10%~0.48%, 平均 0.28%; $w(\text{Sn})$ 为 0.10%~0.56%, 平均 0.30%。金属矿物以黑钨矿、白钨矿、锡石、钨华、黄铜矿、蓝辉铜矿、孔雀石等为主,一些地段内,黑钨矿板状晶体巨大(图 2e,f), 锡石、钨华发育(图 2f)。非金属矿物主要有石英、白云母、透闪石,其次为黑云母、透辉石、方解石、绿柱石、电气石、萤石等。矿石结构有自形-半自形-他形粒状结构、变余花岗结构、鳞片花岗变晶结

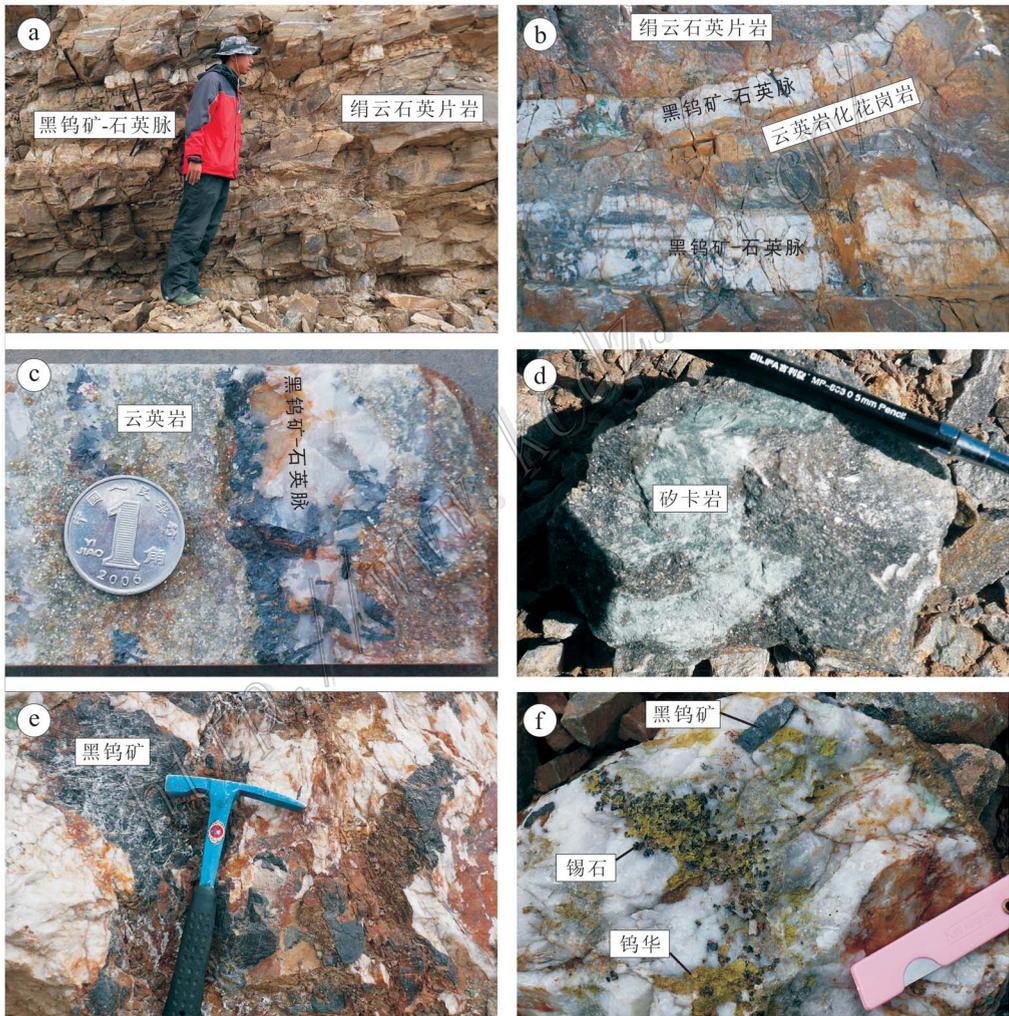


图 2 柯可卡尔德钨锡矿床矿石照片

- a. 绢云石英片岩中的黑钨矿-石英脉矿体; b. 黑钨矿-石英脉穿插云英岩化花岗岩; c. ZK18604 钻孔中的云英岩矿石, 有黑钨矿-石英脉穿插; d. 透闪石矽卡岩矿石; e. 黑钨矿-石英脉矿石中的黑钨矿呈团块状集合体; f. 黑钨矿-石英脉矿石中的板状黑钨矿、锡石和钨华

Fig. 2 Photographs of ores in the Kekekaerde W-Sn deposit

- a. Wolframite-quartz veins in sericite-quartz schist; b. Greisenized granite crosscutted by wolframite-quartz veins; c. Greisen-type ore crosscutted by wolframite-quartz vein from ZK18604; d. Tremolite skarn ore; e. Lumpish aggregated wolframite in wolframite-quartz vein ores; f. Tabular wolframite, cassiterite and tungstite in wolframite-quartz vein

构、交代溶蚀和残余结构,矿石构造包括细网脉浸染状构造、块状构造、脉状构造、梳状构造、晶洞状构造、角砾状构造等。

围岩蚀变发育,包括矽卡岩化、云英岩化(包括钠长石化、电气石化和萤石化)、硅化、碳酸盐化等。

根据矿脉穿插关系和矿物生成顺序,可划分出 5 个成矿阶段,即矽卡岩化阶段、云英岩化阶段、石英-氧化物阶段、石英-硫化物阶段和碳酸盐化阶段。

在空间上,近地表产于古元古界金水口群绢云石英片岩中的黑钨矿-石英脉为细-中脉型,常有云英岩化花岗岩脉相伴(图 2b),从地表围岩地层中的黑钨矿-石英脉→二长花岗岩体与地层围岩接触带部位的云英岩化高品位厚大钨锡矿化,展现出脉钨矿床的“五层楼+地下室”模式。在围岩地层内,沿裂隙充填的黑钨矿-石英脉两壁产有白云母细脉,与黑钨矿-石英脉相伴产出的二长花岗岩常发生强烈的云英岩化,它们是本次 Ar-Ar 法定年的主要对象。

2 控矿构造特征

柯可卡尔德矿区内,构造活动强烈且具多期次性,根据野外系统观察,可划分为 3 个阶段:

成矿前向西右旋剪切构造为区域变形构造,表现为由糜岩、构造片岩、糜棱岩组成的宽 2~5 km 的剪切带,走向 40~70°,倾向 130~160°,倾角 55~70°。该期构造-流体作用形成了地层围岩绢云石英片岩的条纹条带状构造(图 3a)以及其中强烈发育的旋转硅质透镜体(图 3b)、无根石英脉等。

成矿期以 NE 向为主的左旋张扭性断裂是黑钨矿-石英脉的主要控矿构造,以 NE 向为主,其次为 NW 向和近 EW 向,与赣南钨矿相比倾角较缓(图 3c)。在黑钨矿-石英脉的两壁,通常可见白云母线、黑钨矿板状晶体垂直脉壁生长,为典型的张性断裂,同时,可见黑钨矿-石英脉呈右行斜列式展布。另外,常见该期矿脉穿切强云英岩化花岗岩脉现象(图 3d)。矿石矿物主要为黑钨矿、白钨矿、锡石、黄铜矿等,孔雀石化、钨华发育。该期断裂的形成可能与白干湖田南东侧 NE 向的白干湖断裂带的演化有关,可能是其次级断裂裂隙系统,也可能是深部岩浆热液演化爆裂所致。

成矿后近 SN 向正断层性质断裂,矿床内十分发育,近 SN 向,倾向 W,正断层性质。近地表观察,该期断裂活动往往错断成矿期的黑钨矿-石英脉(图

3e),观察到的最大断距可达 2 m,部分地段可见方解石脉充填(图 3f)。

3 白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 测年

3.1 样品及测试方法

本次用于 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素测年的白云母样品分别采自柯可卡尔德矿区强云英岩化钨锡矿化花岗岩脉(KK117,坐标:E 88°56′24″,N 37°57′30″)(图 4a)和黑钨矿-石英脉(KK122,坐标:E 88°56′23″,N 37°57′36″)(图 4b),白云母为片状、鳞片状,采样位置见图 1。

首先将选纯的白云母矿物(纯度大于 99%)用超声波清洗,将清洗后的样品封进石英瓶中,送核反应堆内接受中子照射。照射工作在中国原子能科学研究所的“游泳池堆”中进行,使用 H4 孔道,中子流密度约为 $2.60 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,照射总时间为 1440 分钟,积分中子通量为 $2.25 \times 10^{18} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。同期接受中子照射的还有用做监控样的标准样 ZBH-25 黑云母标样,其标准年龄为 $(132.7 \pm 1.2) \text{ Ma}$,其 $\alpha(\text{K})$ 为 7.6%。

样品测试由中国地质科学院地质研究所国土资源部同位素地质重点实验室完成。样品的阶段升温加热使用石墨炉,每一个阶段加热 30 分钟,净化 30 分钟。质谱分析是在多接收稀有气体质谱仪 Helix MC 上进行的,每个峰值均采集 20 组数据。所有的数据在回归到时间零点值后,再进行质量歧视校正、大气氩校正、空白校正和干扰元素同位素校正。中子照射过程中所产生的干扰同位素校正系数通过分析照射过的 K_2SO_4 和 CaF_2 来获得,其值为: $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.0002389$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 0.004782$, $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.000806$ 。 ^{37}Ar 经过放射性衰变校正, ^{40}K 衰变常数 $\lambda = 5.543 \times 10^{-10} / \text{a}$ (Steiger et al., 1977);用 ISOPLOT 程序(Ludwig, 2001)计算坪年龄及正、反等时线。坪年龄误差以 2σ 给出。详细实验流程见有关文章(陈文等,2002;2006;张彦等,2006)。

3.2 测试结果

表 1 列出了 2 件白云母样品的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段升温加热分析数据。对采自强云英岩化钨锡矿化花岗岩脉(KK117)中的白云母样品进行了 13 个阶段的加热分析,加热温度区间为 700~1400℃,所获数据构成一条未受明显热事件扰动的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱

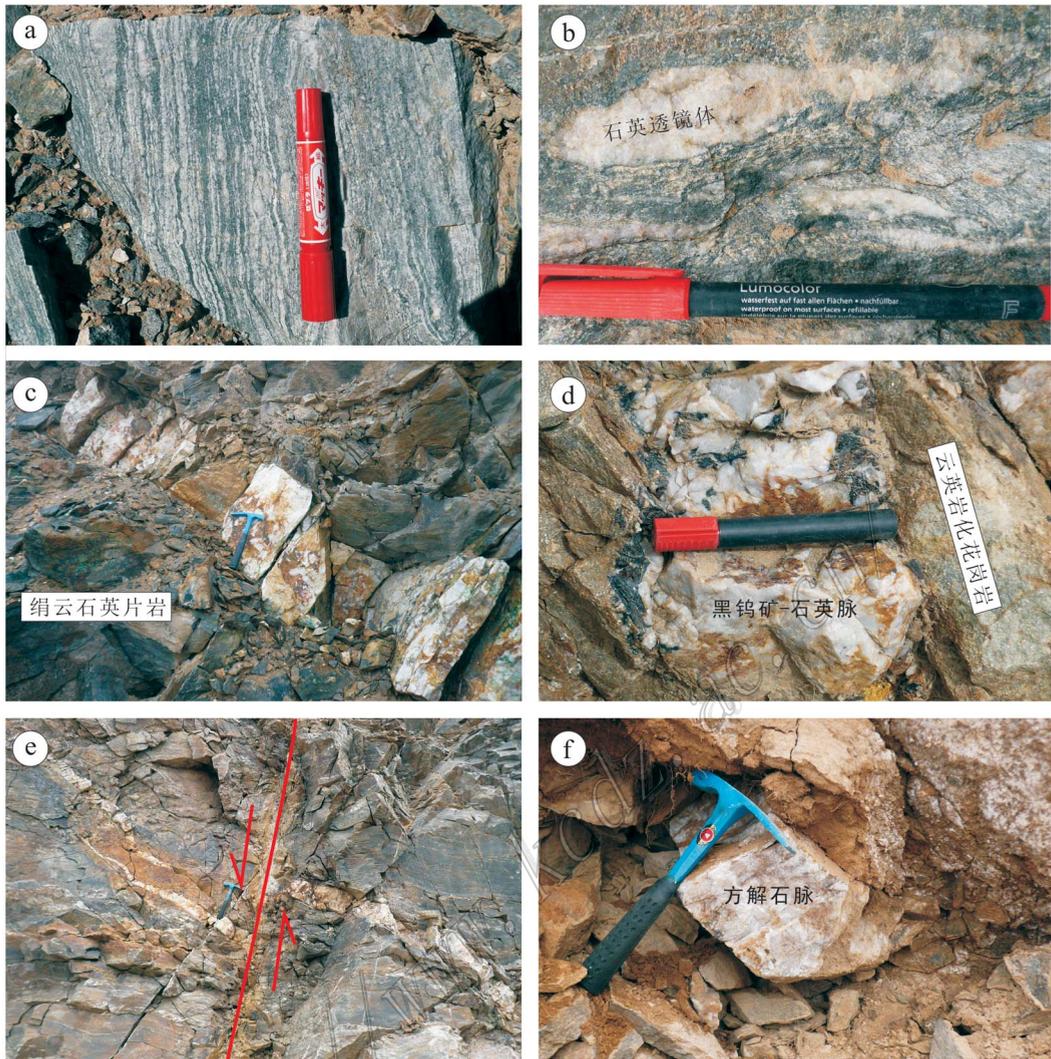


图3 柯可卡尔德钨锡矿床构造照片

- a. 绢云石英片岩的条纹条带状构造; b. 绢云石英片岩中的硅质透镜体; c. 绢云石英片岩中的张扭性断裂充填黑钨矿-石英脉;
d. 黑钨矿-石英脉穿插云英岩化花岗岩脉, 黑钨矿垂直脉壁生长; e. 近SN向正断层错断黑钨矿-石英脉; f. 方解石脉

Fig. 3 Photographs of structures in the Kekekaerde W-Sn deposit

- a. Lamellar and banded sericite-quartz schist; b. Siliceous lens in sericite-quartz schist; c. Tension-shear fracture infilled by wolframite-quartz vein;
d. wolframite-quartz vein crosscut greisenized granite with wolframite vertically growing along walls of fracture; e. Nearly SN-striking normal fault
misplacing wolframite-quartz vein; f. Calcite vein

线(图5a)。尽管受核反冲和测量误差的影响,在年龄谱线左侧和右侧终止处出现了5个不一致的视年龄值,即 (342 ± 12) Ma、 (369.6 ± 3.6) Ma、 (395.1 ± 3.6) Ma、 (398.9 ± 4.0) Ma、 (382.0 ± 6.0) Ma,但其所占的比例较小,谱线的其余部分累计释放的 ^{39}Ar 达93.2%,它们的积分年龄(加权平均年龄) $t_p = (411.7 \pm 2.6)$ Ma。参与积分年龄计算的8个点在 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 图解上构成一条很好的等时线(图5b),求得的等时线年龄为 (411.8 ± 4.7) Ma (MSWD=0.21)。

对采自黑钨矿-石英脉(KK122)脉壁的片状白云母样品进行了12个阶段的分步加热分析,加热温度区间为700~1400℃。在860~1400℃温度范围内,由第3至第12加热阶段共10个数据点组成了一个平坦的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱线(图5c), ^{39}Ar 累计释放量达97.9%,所获积分年龄(加权平均年龄) $t_p = (412.8 \pm 2.4)$ Ma(2σ),相应的等时线年龄为 (414.6 ± 3.9) Ma (MSWD=0.22)(图5d)。初始的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值为 (209 ± 30) ,非常接近尼尔值(理想大气值295.5),说明样品中不含过剩氩。

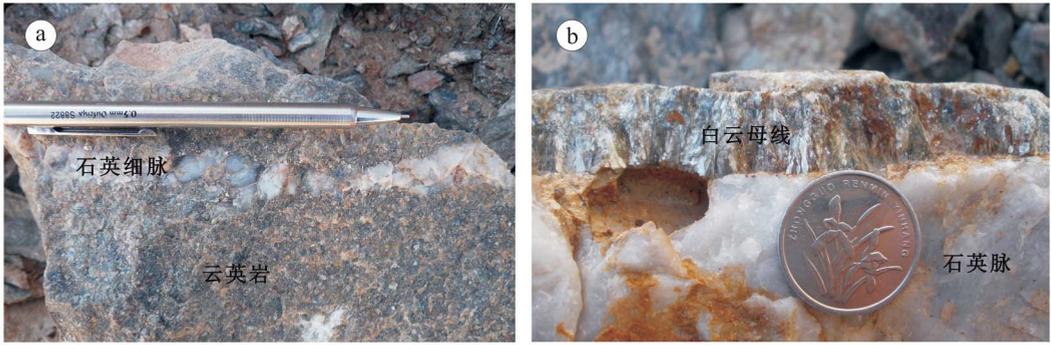


图 4 白云母样品矿石照片

a. 强云英岩化钨锡矿化花岗岩脉, 石英细脉穿插; b. 黑钨矿-石英脉, 白云母垂直脉壁生长

Fig. 4 Photographs of muscovite in ores

a. Strongly greisenized W-Sn mineralization granite, crosscutted by quartz vein; b. Wolframite-quartz vein with muscovite vertically growing along both walls of quartz vein

表 1 柯可卡尔德钨锡矿床白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 阶段升温加热分析数据

Table 1 ⁴⁰Ar/³⁹Ar incremental heating analytical data of muscovite in the Kekekaerde tungsten-tin deposit

$\theta/^\circ\text{C}$	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$^{40}\text{Ar}/\%$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$	$^{39}\text{Ar}/10^{-14}/\text{mol}$	^{39}Ar 积累/ $\%$	t/Ma
KK117 强云英岩化钨锡矿化花岗岩脉 ($t_p = (411.7 \pm 2.6) \text{ Ma}$, $m = 26.90 \text{ mg}$, $J = 0.005140$)									
700	307.9577	0.9047	0.0000	0.1867	13.18	40.6010	0.09	0.25	342 ± 12
780	86.9626	0.1446	0.0000	0.0407	50.87	44.2384	0.41	1.40	369.6 ± 3.6
850	54.4420	0.0230	0.0150	0.0174	87.50	47.6389	1.38	5.29	395.1 ± 3.6
900	50.3055	0.0025	0.0006	0.0129	98.49	49.5473	4.64	18.32	409.3 ± 3.7
940	49.8318	0.0006	0.0083	0.0126	99.66	49.6610	7.67	39.86	410.1 ± 3.7
970	49.8603	0.0004	0.0000	0.0126	99.72	49.7230	6.59	58.36	410.6 ± 3.7
1010	50.0675	0.0006	0.0015	0.0126	99.64	49.8866	4.95	72.25	411.8 ± 3.7
1050	50.2188	0.0006	0.0000	0.0127	99.66	50.0475	3.46	81.97	413.0 ± 3.7
1100	50.2457	0.0004	0.0000	0.0124	99.75	50.1176	3.08	90.61	413.5 ± 3.7
1150	50.3151	0.0002	0.0000	0.0125	99.87	50.2489	1.99	96.19	414.5 ± 3.7
1220	50.2053	0.0014	0.0083	0.0125	99.16	49.7864	0.82	98.49	411.0 ± 3.8
1300	49.4274	0.0043	0.0000	0.0125	97.40	48.1443	0.40	99.62	398.9 ± 4.0
1400	55.3152	0.0319	0.0000	0.0100	82.95	45.8828	0.13	100.00	382.0 ± 6.0
KK122 黑钨矿-石英脉 ($t_p = (412.8 \pm 2.4) \text{ Ma}$, $m = 26.69 \text{ mg}$, $J = 0.005156$)									
700	192.3949	0.5054	0.1462	0.1146	22.37	43.0519	0.08	0.22	361.6 ± 8.6
800	74.7167	0.0938	0.0756	0.0311	62.89	46.9903	0.66	2.08	391.4 ± 3.6
860	52.3271	0.0108	0.0000	0.0148	93.90	49.1349	1.69	6.83	407.4 ± 3.7
900	50.7362	0.0028	0.0000	0.0130	98.34	49.8924	3.76	17.37	413.0 ± 3.7
940	50.1838	0.0009	0.0047	0.0127	99.43	49.8998	7.40	38.12	413.0 ± 3.7
970	50.2610	0.0010	0.0069	0.0127	99.40	49.9573	6.23	55.61	413.5 ± 3.7
1010	50.4036	0.0010	0.0031	0.0127	99.39	50.0956	5.36	70.66	414.5 ± 3.7
1060	50.4165	0.0009	0.0029	0.0126	99.44	50.1320	4.17	82.38	414.7 ± 3.7
1120	50.3678	0.0005	0.0005	0.0126	99.69	50.2117	4.06	93.78	415.3 ± 3.7
1200	50.4766	0.0010	0.0218	0.0129	99.40	50.1733	1.43	97.80	415.1 ± 3.7
1300	50.6568	0.0025	0.0141	0.0129	98.55	49.9231	0.61	99.51	413.2 ± 3.8
1400	54.5540	0.0192	0.0000	0.0161	89.59	48.8757	0.18	100.00	405.4 ± 4.9

注：表中下标 m 者代表样品中测定的同位素比值；⁴⁰Ar* 代表放射性成因⁴⁰Ar；年龄误差为 2σ。测试仪器：多接收稀有气体质谱仪 Helix MC；测试单位：中国地质科学院地质研究所 Ar-Ar 同位素实验室。

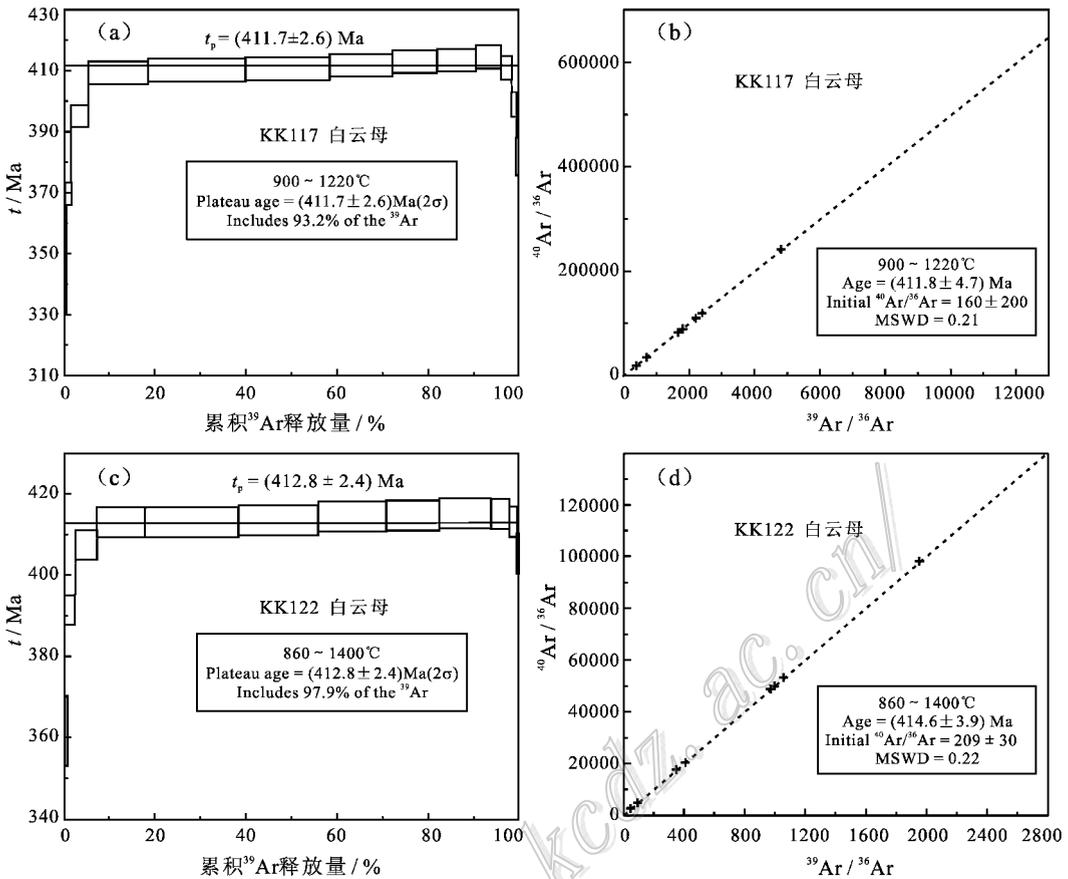


图5 柯可卡尔德矿床强云英岩化花岗岩(KK117)和黑钨矿-石英脉(KK122)中白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段升温年龄谱图与 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 等时线图

Fig. 5 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ stepwise heating age spectras and $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ versus $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ isochrons of muscovite separated from greisenized granite(KK117) and wolframite-quartz vein(KK122) in the Kekekaerde tungsten-tin deposit

上述2件白云母样品的积分年龄与对应的等时线年龄在误差范围内完全一致,因此,本文使用积分年龄值。等时线年龄与坪年龄在误差范围内完全一致,说明该白云母样品的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄测定结果是可信的,并且具有地质意义,能代表该钨锡矿床的形成年龄。

4 讨论

4.1 矿床成矿时代

本研究对柯可卡尔德钨锡矿床的成矿时代进行了白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 高精度精细测定,获得了强云英岩化钨锡矿化花岗岩脉内白云母的积分年龄(加权平均年龄)为 (411.7 ± 2.6) Ma,等时线年龄为 (411.8 ± 4.7) Ma(MSWD=0.21);黑钨矿-石英脉垂直脉壁生长的片状白云母的积分年龄(加权平均

年龄)为 (412.8 ± 2.4) Ma,等时线年龄为 (414.6 ± 3.9) Ma(MSWD=0.22)。可见,2件矿石样品中白云母的积分年龄与对应的等时线年龄在误差范围内完全一致,表明该钨锡矿床形成于晚志留世。

4.2 与其他钨锡矿床成矿时代对比

全球的钨锡矿床主要分布在中国、加拿大、俄罗斯、美国、韩国、玻利维亚等国家。其中,中国的钨锡资源在世界上占绝对优势,主要分布在南岭地区(王登红等,2007),还分布在东昆仑-阿尔金、天山、辽东-吉南、冈底斯-念青唐古拉等成矿带(黄晓娥等,2007)。矿床类型包括石英脉型、矽卡岩型、云英岩型、斑岩型、破碎带-蚀变岩型及少量火山岩型、风化型和砂矿型等,以前二者为主。Shen(2001)对全世界钨锡矿床的成矿时代进行了系统总结:分布较广,自元古宙→加里东期→海西期→印支期→燕山期→喜马拉雅期均有钨成矿作用发生,但大约有84%的

钨矿床形成于燕山期,并与陆壳改造型或重熔型花岗岩具有密切的时、空及成因联系。

近年来,对钨锡矿床产出最密集的南岭地区的成岩成矿年代学研究取得长足进展,获得了一大批锆石 U-Pb 法、辉钼矿 Re-Os 等时线法、云母 Ar-Ar 法等高精度同位素年代学数据。这些数据显示,南岭地区(包括赣南、湘南、粤北、桂东)钨锡矿床的成岩成矿具多期性,主要集中在 3 个时段(240~210)Ma、(170~150)Ma 和(130~90)Ma(Feng et al., 2012),其中,中-晚侏罗世(集中在 160~150 Ma)为钨锡大规模成矿集中爆发时期(Hua et al., 2005; 华仁民等, 2005; 毛景文等, 2007)。除毛景文等(1999)报道的祁连成矿带小柳沟、塔尔沟等钨矿床的成矿时代为加里东期(辉钼矿 Re-Os 模式年龄 436~496 Ma)外,位于东昆仑复合造山带的柯可卡尔德大型钨锡矿床形成于加里东晚期,颇具特色。

4.3 成矿地球动力学背景

对包括白干湖矿田在内的东昆仑地区成矿地球动力学背景的研究向来是地质学家们关注的热点,目前主要认为是东昆仑弧盆系(潘桂棠等, 2009)或东昆仑造山带(莫宣学等, 2007)。

早古生代时期,在早奥陶世,祁漫塔格地区曾有明显的张裂,局部可能已接近小洋盆(姜春发等, 2000),白干湖以东鸭子泉地区早奥陶世岛弧型岩浆岩的发现(崔美慧等, 2011),说明在早奥陶世之前祁漫塔格洋已经存在,并在早奥陶世可能处于由南向北的俯冲状态(王岳军等, 2000; 黎敦朋等, 2003);俯冲作用的持续进行,在北侧祁漫塔格山形成了早古生代末期火山岩浆弧带。志留纪期间,在岛弧北侧发生局部伸展,形成了祁漫塔格北部白干湖弧后复理石盆地(黎敦朋等, 2003);李国臣等(2012b)测得了白干湖矿田东北部钾长花岗岩和二长花岗岩的 SIMS 锆石 U-Pb 年龄,分别为(422±3)Ma 和(421±3.7)Ma,且具 A 型花岗岩性质,认为晚志留世该区已进入加里东造山旋回的后碰撞阶段。柯可卡尔德钨锡矿床白云母 Ar-Ar 法年代学研究表明,该矿床即形成于晚志留世大规模构造-岩浆-成矿事件的地球动力学过程。

对于晚古生代以来的构造演化,大多数学者认为其卷入到古特提斯构造演化体制,大致经历了晚泥盆世—石炭纪洋盆开启、晚二叠世—早三叠世洋壳由南向北俯冲消减、中-晚三叠世陆-陆碰撞和晚三叠世后碰撞造山等过程。

5 结 论

(1)柯可卡尔德矿区内,构造活动强烈且具多期次性,可划分为成矿前向西右旋剪切构造、成矿期以 NE 向为主的左旋张扭性断裂和成矿后近 SN 向正断层性质断裂共 3 期。

(2)利用高精度的白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素测年技术,分别测得了柯可卡尔德矿床强云英岩化钨锡矿化花岗岩脉内白云母的积分年龄为(411.7±2.6)Ma,等时线年龄为(411.8±4.7)Ma;黑钨矿-石英脉垂直脉壁生长的片状白云母的积分年龄为(412.8±2.4)Ma,等时线年龄为(414.6±3.9)Ma,厘定了矿床成矿时代为晚志留世。结合区域最新研究资料,认为该矿床形成于东昆仑地区加里东造山旋回的后碰撞构造阶段。

志 谢 野外工作得到了吉林省地质调查院的大力支持,白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄样品的测试工作由中国地质科学院地质研究所 Ar-Ar 同位素实验室的陈文研究员、张燕副研究员、刘新宇女士完成,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献/References

- 包亚范,刘延军,王鑫春. 2008. 东昆仑西段巴什尔希花岗岩与白干湖钨锡矿床的关系[J]. 吉林地质, 27(3):56-67.
- 陈 文,刘新宇,张思红. 2002. 连续激光阶段升温 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 地质年代测定方法研究[J]. 地质论评, 48(增刊):127-134.
- 陈 文,张 彦,金贵善,张岳桥. 2006. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的 Ar-Ar 热年代学证据[J]. 岩石学报, 22(4):867-872.
- 崔美慧,孟繁聪,吴祥珂. 2011. 东昆仑祁漫塔格早奥陶世岛弧:中基性火成岩地球化学、Sm-Nd 同位素及年代学证据[J]. 岩石学报, 27(11):3365-3379.
- 杜安道,何红蓼,殷宁万,邹晓秋,孙亚利,孙德忠,陈少珍,屈文俊. 1994. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究[J]. 地质学报, 68(4):339-347.
- 高晓峰,校培喜,谢从瑞,范立勇,过 磊,奚仁刚. 2010. 东昆仑阿牙克库木湖北巴什尔希花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 29(7):1001-1008.
- 华仁民,陈培荣,张文兰,陆建军. 2005. 论华南地区中生代 3 次大规模成矿作用[J]. 矿床地质, 24(2):99-107.
- 黄小娥,史维全. 2007. 我国钨矿地质勘查新进展[J]. 中国钨业, 22

(3) 6-9.

- 姜春发, 王宗起, 李锦轶. 2000. 中央造山带开合构造[M]. 北京: 地质出版社, 1-154.
- 黎敦朋, 李静, 张汉军, 李新林, 周小康, 杜少喜. 2003. 东昆仑祁漫塔格山志留系白干湖组浊积岩特征[J]. 陕西地质, 21(2): 39-44.
- 李国臣, 丰成友, 王瑞江, 李洪茂, 周安顺, 马圣钊, 刘建楠, 肖晔. 2012a. 新疆若羌县柯可卡尔德钨锡矿床地质特征与流体包裹体研究[J]. 地质学报, 86(1): 209-218.
- 李国臣, 丰成友, 王瑞江, 马圣钊, 李洪茂, 周安顺. 2012b. 新疆白干湖钨锡矿田东北部花岗岩锆石 SIMS U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J]. 地球学报, 33(2): 216-226.
- 李洪茂, 时友东, 刘忠, 王保金, 王泽利, 邱希萍. 2006. 东昆仑山若羌地区白干湖钨锡矿床地质特征及成因[J]. 地质通报, 25(1-2): 277-281.
- 李华芹, 刘家齐, 魏林. 1993. 热液矿床流体包裹体年代学研究及其地质应用[M]. 北京: 地质出版社, 1-126.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 23(10): 2329-2338.
- 毛景文, 张作衡, 张招崇. 1999. 北祁连山小柳沟钨矿辉相矿 Re-Os 年龄测定及其意义[J]. 地质论评, 45(4): 412-417.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 喻学惠, 刘成东, 谌宏伟, 袁万明, 刘云华. 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. 高校地质学报, 13(3): 403-414.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 36(1): 1-28.
- 时友东, 尹占军, 孙兴友. 2004. 新疆东昆仑白干湖钨锡矿床Ⅲ矿段地质特征[J]. 吉林地质, 23(4): 44-48.
- 宋茂德, 刘忠, 李洪茂, 孙兴有. 2010. 新疆东昆仑白干湖成矿带成矿地质背景及找矿方向[J]. 西北地质, 43(4): 44-52.
- 王登红, 陈毓川, 陈郑辉, 刘善宝, 许建祥, 张家菁, 曾载淋, 陈富文, 李华芹, 郭春丽. 2007. 南岭地区矿产资源形势分析和找矿方向研究[J]. 地质学报, 81(7): 882-890.
- 王岳军, 沈远超, 林舸. 2000. 中昆仑北部地区构造地质学初步研究[J]. 地层学杂志, 24(1): 55-59.
- 魏菊英, 王关玉. 1988. 同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1-166.
- 张彦, 陈文, 陈克龙, 刘新宇. 2006. 成岩混层 (I/S)Ar-Ar 年龄谱型及³⁹Ar 核反冲丢失机理研究——以浙江长兴地区 P-T 界线粘土岩为例[J]. 地质论评, 52(4): 556-561.
- Dalrymple G B and Lanphere M A. 1969. Potassium-argon dating[M]. San Francisco: W. H. Freeman. 258p.
- Feng C Y, Zhang D Q, Zeng Z L and Wang S. 2012. Chronology of the tungsten deposits in southern Jiangxi Province, and episodes and zonation of the regional W-Sn mineralization-evidence from high-precision zircon U-Pb, molybdenite Re-Os and muscovite Ar-Ar ages[J]. Acta Geologica Sinica, 86(3): 555-567.
- Hua R M, Chen P R, Zhang W L and Lu J J. 2005. Metallogenesis related to Mesozoic granitoids in the Nanling Range, and their geodynamic settings[J]. Acta Geologica Sinica, 79(6): 801-811.
- Ludwig K R. 2001. ISOPLOT 3.00. A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, California Maniar PD and Piccoli PM. 1989.
- McDowell F W. 1983. K-Ar dating: Incomplete extraction of radiogenic argon from alkali feldspar[J]. Isotope Geoscience, 1: 119-126.
- Shen J F. 2001. Main metallogenic characteristics of tungsten deposits in China[M]. Mineral Deposits at the Beginning of the 21st century, 1141-1144.
- Steiger R H and Jager E. 1977. Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 36: 359-362.