

大兴安岭北段小柯勒河铜钼矿床硫化物 Re-Os 年龄及其地质意义

冯雨周^{1,2}, 邓昌州³, 陈华勇^{1*}, 李光辉³,
肖兵^{1,2}, 李如操^{1,2}, 时慧琳³

(1.中国科学院 广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.黑龙江省地质调查研究总院, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘要: 黑龙江省小柯勒河铜钼矿床为大兴安岭多金属成矿带北段新发现的矿床。矿体主要赋存于花岗闪长斑岩内, 少量赋存于新元古代浅变质碎屑岩和侏罗纪-白垩纪火山碎屑岩与花岗闪长斑岩的接触部位。矿床中发育显著的细脉浸染状、浸染状矿化, 相关的钠-钙化、钾化、绿泥石化、绢英岩化等热液蚀变十分发育且分布广泛。其中铜钼矿化与钾化蚀变关系最为密切, 部分黄铜矿化与绿泥石化有关。本次研究选择与钾化关系密切的石英-黄铁矿-黄铜矿脉和石英-辉钼矿±黄铁矿±黄铜矿脉中的黄铁矿和辉钼矿开展 Re-Os 同位素定年。结果表明, 4 件黄铁矿的 Re-Os 等时线年龄为 153 ± 11 Ma, 4 件辉钼矿的 Re-Os 同位素等时线年龄为 148.5 ± 1.5 Ma, 加权平均年龄为 147.9 ± 1.1 Ma。综合考虑测年结果的一致性以及精度可靠性, 认为小柯勒河铜钼矿床可能形成于 148 Ma 左右。结合区域动力学背景分析认为, 小柯勒河铜钼矿床可能形成于蒙古-鄂霍茨克洋闭合之后蒙古-中朝地块与西伯利亚地块之间的后碰撞阶段, 即由挤压向伸展转换的环境。

关键词: Re-Os 定年; 成矿动力学; 小柯勒河铜钼矿床; 大兴安岭多金属成矿带

中图分类号: P611; P597 文献标志码: A 文章编号: 1001-1552(2020)03-0465-011

0 引言

大兴安岭成矿带是中亚造山带的重要组成部分, 也是我国东北地区著名的多金属成矿带。大兴安岭成矿带中金属矿产资源集中分布于大兴安岭北段德尔布干地区、大兴安岭中段巴林右旗-乌兰浩特地区、翁牛特旗-赤峰地区、黑龙江多宝山地区等 4 个有色金属矿床集中区。德尔布干地区位于大兴安岭多金属成矿带北段, 区域内分布有众多斑岩型钼(铜)矿床, 如太平川斑岩型钼(铜)矿床(黄世武等, 2010;

王召林等, 2014)、布鲁吉山斑岩型钼矿床(韩龙等, 2010)、乌奴格吐山斑岩型铜钼矿床(谭钢等, 2010)、哈达图牧场斑岩型钼多金属矿床(王来云等, 2010)、岔路口斑岩型钼矿床(聂凤军等, 2011; 金露英等, 2014)、兴阿斑岩型钼矿床(吴秀云等, 2015)以及小柯勒河铜钼矿床等。其中, 小柯勒河铜钼矿床为大兴安岭多金属成矿带北段新发现的矿床, 由黑龙江省地矿局齐齐哈尔矿产勘查开发总院发现并开展了大量的找矿勘查工作, 积累了约 45000 m 长的钻孔样品。通过近几年的找矿勘探, 小柯勒河勘查区内铜

收稿日期: 2018-12-27; 改回日期: 2019-02-18

项目资助: 黑龙江省国土科研项目(201701)资助。

第一作者简介: 冯雨周(1988-), 男, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: fengyuzhoucsu@163.com

通信作者: 陈华勇(1976-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事造山带金属矿产成矿模式研究及找矿勘探应用。Email: huayongchen@gig.ac.cn

资源量已达到大型规模,成为大兴安岭地区新的铜、钼找矿基地,具有较大的找矿潜力和资源远景(尚毅广,2017)。由于小柯勒河勘查区尚处于找矿勘查阶段,基础研究工作较为薄弱,前人对小柯勒河铜钼矿床地质特征、锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学特征和流体包裹体等方面开展了初步研究(尚毅广,2017)。锆石 U-Pb 年代学研究表明矿区内致矿岩体花岗闪长斑岩成岩年龄为 142 Ma;晚于花岗闪长斑岩侵入的闪长玢岩地球化学特征分析结果显示其具有典型埃达克岩的特征;流体包裹体特征指示成矿流体具有中温、高盐度的特点。通过与典型斑岩型矿床特征的对比分析,尚毅广(2017)认为小柯勒河铜钼矿床为斑岩型。前人虽然对小柯勒河矿区蚀变矿化特征进行了描述,但缺少对成矿期次的厘定,同时在成矿时代和成矿物质来源方面尚未开展过研究。

精确厘定成矿时代对解决矿床成因和成矿动力学背景具有重要的指示意义(王建等,2014;黄小文等,2016;应立娟等,2017;严清高等,2018;江小均等,2018;赵冰爽等,2018)。近年来,随着 Re-Os 同位素分析技术的不断改进(杜安道等,1994,2009;Markey et al.,1998;Stein et al.,1998;屈文俊等,2000;屈文俊和杜安道,2003;Sun et al.,2010),辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿和磁黄铁矿等金属硫化物 Re-Os 同位素定年已经成功地应用于金矿床、铁(铜)矿床、矽卡岩-斑岩型铜矿床、沉积型铜矿床、铜镍硫化物矿床、铅锌矿床和钼矿床成矿时代研究中(Qu et al.,2001;Du et al.,2004;李杰等,2005;漆亮等,2006;Qi et al.,2010;靳新娣等,2010;Chu et al.,2015)。另外,Re 和 Os 为亲铜、亲铁元素,但在地幔部分熔融过程中,Os 是高度相容元素,趋向于富集在地幔中,而 Re 是中等不相容元素,主要富集在地壳中,导致壳幔分异过程中 Re/Os 值存在很大差别。因此,黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿和磁黄铁矿等硫化物中 Re、Os 含量已经成为矿床学中研究成矿物质来源的重要指示标志之一(Mao et al.,1999;Zimmerman et al.,2014;袁玲玲和刘锋,2017)。野外调查表明,小柯勒河矿区内黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿等金属硫化物十分发育且分布广泛,有利于开展 Re-Os 同位素测年研究。

本文拟在成矿期次等矿床地质研究基础上,通过对小柯勒河铜钼矿床主成矿阶段的黄铁矿和辉钼矿的 Re-Os 同位素精确测年,限定其成矿时代,分

析成矿物质来源,并为矿床形成的动力学背景提供科学依据。

1 成矿地质背景

大兴安岭多金属成矿带处于中亚造山带与滨太平洋成矿带叠置转换部位。该地区自古生代以来先后经历了古亚洲洋闭合、蒙古-鄂霍茨克洋俯冲以及古太平洋俯冲等漫长造山作用和地壳增生过程(吴福元等,1999;陈衍景等,2009;Wu et al.,2011;Chen et al.,2017)。多期次构造演化导致大兴安岭成矿带内不同时代、规模不一的地块拼接或地体增生。大兴安岭成矿带北段构造单元从北到南依次为额尔古纳地块、兴安地块和锡林浩特地块,地块之间被德尔布干、贺根山-黑河、嫩江和西拉木伦区域断裂构造所分割。德尔布干区域大断裂为大兴安岭北段重要的控岩控矿构造(图 1),是蒙古境内的蒙古深大断裂之东延部分,总体走向为 NNE 向,长约 900 km;断裂形成于新元古代,具有多期活动的特征,自古生代以来,该断裂控制了前中生代地层、岩浆岩的形成和展布,同时控制了中生代岩浆-热液过程及相关多金属成矿作用(武广,2006)。区域内地层主要为前寒武纪结晶基底的古元古界兴华渡口群、新元古代浅变质岩系,古生代寒武纪、奥陶纪、志留纪、泥盆纪、石炭纪和二叠纪碎屑岩、碳酸盐岩,以及中生代侏罗纪、白垩纪火山-碎屑岩系和含煤沉积建造(图 1)。其中新元古界至下寒武统及侏罗纪-白垩纪火山碎屑岩建造广泛分布于小柯勒河矿区内,为重要的含矿地层(戴慧敏,2016)。区域内岩浆活动强烈,形成了分布广泛的岩浆岩(图 1),且主要形成于早古生代、晚古生代、三叠纪(印支期)、早-中侏罗世(燕山早期)、晚侏罗世(燕山中期)和白垩纪(燕山晚期)6 个时期(武广,2006;Chen et al.,2017)。

2 矿床地质特征

小柯勒河铜钼矿床位于大兴安岭多金属成矿带北段兴安地块东侧,塔源镇北东侧约 25 km 处(图 1)。矿区内出露地层包括新元古代石英砂岩、板岩、片岩、千枚岩等,侏罗纪-白垩纪流纹岩、流纹质凝灰岩、英安岩、英安质凝灰岩等(图 2)。矿区构造以断裂构造为主,其中小柯勒河断裂和大乌苏河断裂控制了矿区内岩浆岩和矿体的形态和分布。野外

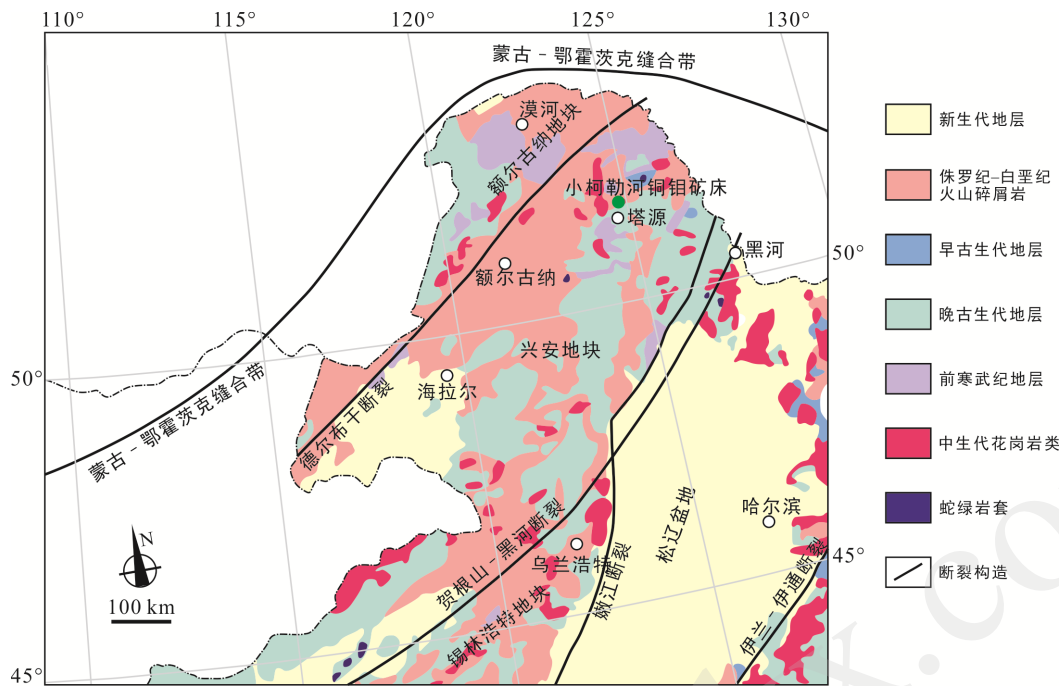


图 1 大兴安岭多金属成矿带地质简图(据 Chen et al., 2017 修改)
Fig.1 Geological map of the Great Xing'an Range polymetallic belt

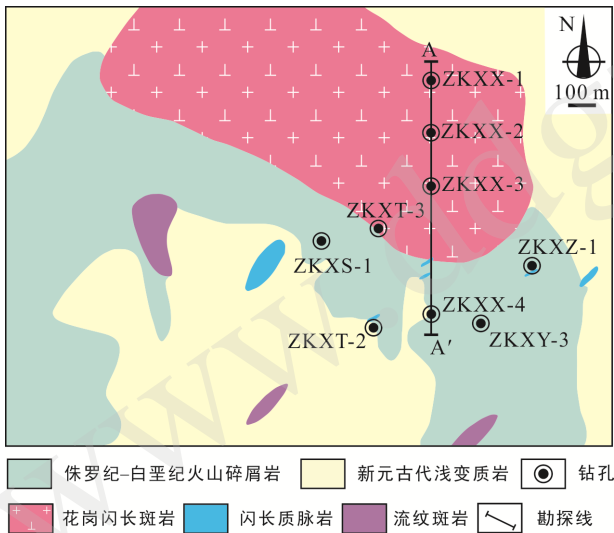


图 2 小柯勒河铜钼矿床矿区地质简图
Fig.2 Geological map of the Xiaokelehe Cu-Mo deposit

调查发现, 矿区内岩浆岩分布广泛, 根据侵入关系从早到晚依次为花岗闪长斑岩、二长岩、闪长质脉岩和流纹斑岩(图 3a)。花岗闪长斑岩为区内最重要的赋矿围岩, 呈岩株产出, 出露面积约为 3 km²。最新的锆石 U-Pb 年龄(150.0±1.6 Ma, 课题组未发表数据)显示其成岩时代为晚侏罗世。

截至目前, 在小柯勒河矿区内共圈定了 71 条铜(钼)矿体, 其中 AA'勘探线中 01[#], 02[#], 03[#]和 04[#]是小柯勒河矿区内较具规模的 4 条矿体(尚毅广, 2017)。

01[#]和 02[#]矿体为钼矿体, 分布于 AA'勘探线 1~171 m 的范围内, 主要呈纺锤状分布于花岗闪长斑岩中, 矿体走向均为近 EW 向(图 3a)。两个矿体的长度分别为 248.1 m 和 315.6 m, 厚度分别为 68 m 和 71 m, Mo 平均品位分别为 0.064%和 0.06%。03[#]为铜矿体, 分布于 AA'勘探线-25~51 m 的范围内(图 3a)。该矿体呈纺锤状分布于花岗闪长斑岩中, 走向为近 EW 向, 长约 424 m, 厚约 76 m, Cu 平均品位为 0.42%。04[#]为铜钼矿体, 位于 AA'勘探线-159~-99 m 的范围内(图 3a)。该矿体呈纺锤状分布于花岗闪长斑岩中, 走向为近 EW 向, 长约 361 m, 厚约 42 m, Cu 和 Mo 平均品位分别为 0.51%和 0.094%(尚毅广, 2017)。

矿石类型以细脉浸染状为主, 矿石的矿物组合较为简单, 金属矿物以磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿为主, 还有少量的闪锌矿、赤铁矿和金红石; 非金属矿物包括奥长石、楣石、钾长石、石英、黑云母、绿泥石、绿帘石、硬石膏、白云母、石膏和少量的磷灰石、方解石。矿石结构主要有晶粒结构、交代溶蚀结构、双晶结构和环带结构; 矿石构造包括细脉浸染状构造和角砾状构造。矿区内围岩蚀变十分发育且在空间上具有明显的分带特征(图 3b), 主要有钠-钙化、钾化、绿泥石化和绢英岩化。根据矿物组合特征和脉体穿切关系, 小柯勒河铜钼矿床蚀变矿化过程可以划分为钠-钙化阶段、钾化阶段、

绿泥石阶段和绢英岩化阶段。其中,钾化阶段是铜钼矿化最重要的形成阶段。矿区 AA'勘探线中 01[#], 02[#], 03[#]和 04[#]等 4 个主要矿体均分布于钾化蚀变带中(图 3)。

3 样品采集与测试方法

野外调查发现,与钾化相关的矿化形式以石英脉为主,包括石英-黄铁矿-黄铜矿脉(V1)和石英-辉钼矿±黄铁矿±黄铜矿脉(V2)。石英-黄铁矿-黄铜矿脉脉壁平直,脉宽多数小于 1 mm,少量可达 5 mm,脉侧发育钾长石蚀变晕(图 4a),在空间上位于花岗闪长斑岩体深部。该类脉体中金属硫化物主要为黄铁矿和黄铜矿,黄铁矿主要呈半自形-它形粒状,与黄铜矿为共生关系(图 4b、c)。石英-辉钼矿±黄铁矿±黄铜矿脉脉壁平直,脉宽 2 mm~1 cm,脉侧发育不同程度的钾长石蚀变晕(图 4d),在空间上与石英-黄铁矿-黄铜矿脉的分布范围一致。另外,可见石英-辉钼矿±黄铁矿±黄铜矿脉切割错断石英-黄铁矿-黄铜矿脉(图 4e),表明石英-辉钼矿±黄铁矿±黄铜矿脉的形成时间要晚于石英-黄铁矿-黄铜矿脉。石英-辉

钼矿±黄铁矿±黄铜矿脉中金属硫化物主要为辉钼矿、黄铁矿和黄铜矿。辉钼矿呈鳞片状、束状产出,且与黄铁矿和黄铜矿共生(图 4f)。考虑到样品的代表性及测试结果的对比性,分别采集 AA'勘探线 4 个钻孔的石英-黄铁矿-黄铜矿脉中黄铁矿(4 件)和石英-辉钼矿±黄铁矿±黄铜矿脉中辉钼矿单矿物(4 件)进行 Re-Os 同位素定年。黄铁矿和辉钼矿单矿物的挑选均在广州拓岩检测技术有限公司完成。

黄铁矿 Re-Os 同位素组成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测定,测试仪器为 PE Elan DRC-e ICP-MS。实验过程主要包括样品的分解、蒸馏分离 Os、萃取分离 Re 和质谱测定等 4 个步骤,详细实验流程见 Qi et al. (2010)。数据分析采用 Isoplot 软件。黄铁矿 Re-Os 同位素分析结果见表 1。辉钼矿 Re-Os 同位素组成在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成,测试仪器为 Thermo Scientific X-Series 2 ICP-MS。实验过程主要包括样品的分解、蒸馏分离 Os、萃取分离 Re 和质谱测定等 4 个步骤,详细实验流程见 Sun et al. (2010)。数据分析采用 Isoplot 软件。辉钼矿 Re-Os 同位素分析结果见表 2。

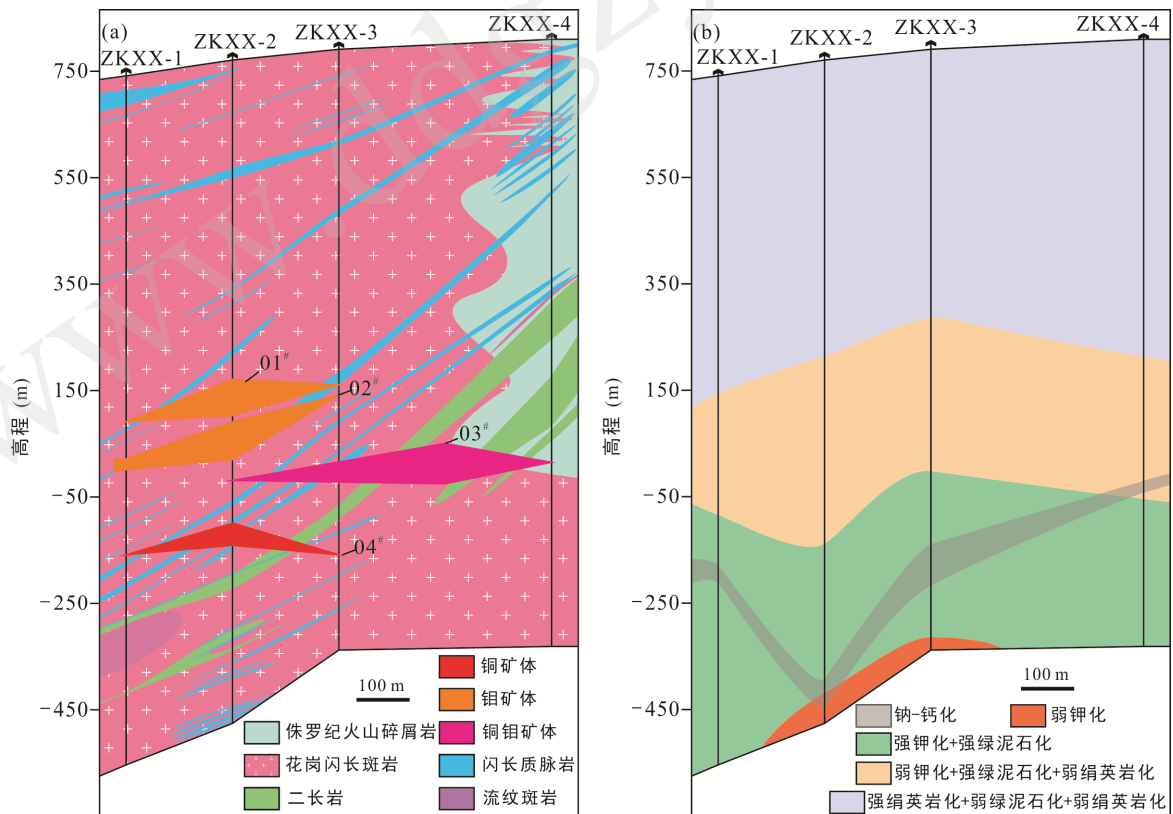
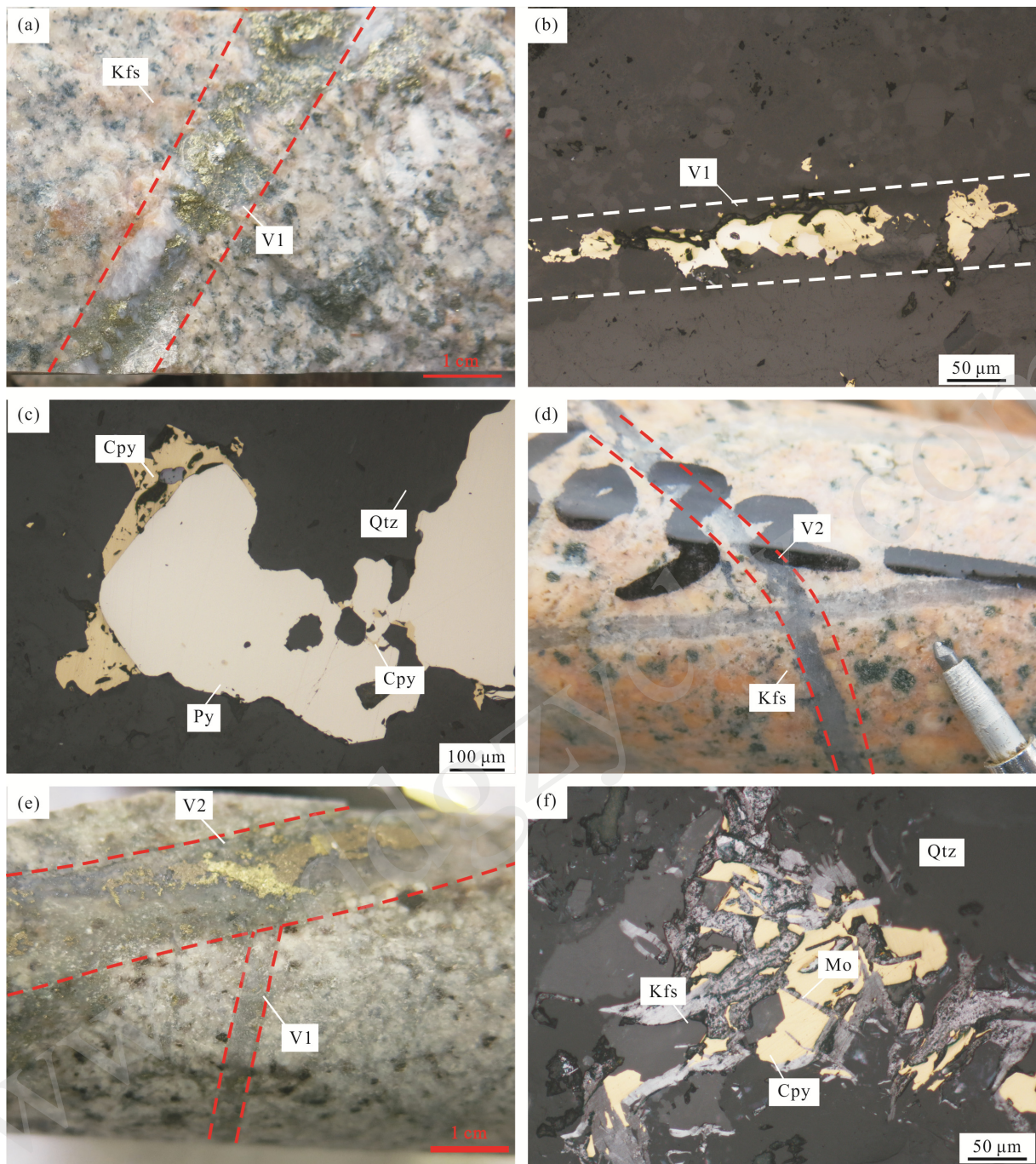


图 3 小柯勒河铜钼矿床 AA'勘探线地质剖面图(a)及蚀变特征图(b)

Fig.3 Geological profiles for prospecting line AA' of the Xiaokelehe Cu-Mo deposit (a) and alteration features for prospecting line AA' of the Xiaokelehe Cu-Mo deposit (b)



(a) 花岗闪长斑岩中与钾化密切相关的石英-黄铁矿-黄铜矿脉(V1); (b) 花岗闪长斑岩中石英-黄铁矿-黄铜矿脉(反射光); (c) 石英-黄铁矿-黄铜矿脉中黄铁矿与黄铜矿共生, 局部显弱交代; (d) 花岗闪长斑岩中与钾化密切相关的石英-辉钼矿±黄铁矿±黄铜矿脉(V2); (e) 石英-辉钼矿±黄铁矿±黄铜矿脉(V2)错断石英-黄铁矿-黄铜矿脉(V1); (f) 石英-辉钼矿±黄铁矿±黄铜矿脉脉中硫化物共生现象。矿物代号: Qtz. 石英; Kfs. 钾长石; Py. 黄铁矿; Cpy. 黄铜矿; Mo. 辉钼矿。

图4 小柯勒河铜钼矿床矿石特征

Fig.4 Characteristics of the ores in the Xiaokelehe Cu-Mo deposit

4 测试结果

小柯勒河铜钼矿床黄铁矿的 Re-Os 同位素测试结果(表 1)显示, 黄铁矿中 Re 的含量为 2.10×10^{-9} ~ 46.74×10^{-9} , 普 Os 的含量为 0.0067×10^{-9} ~ $0.0130 \times$

10^{-9} , ^{187}Os 的含量为 0.0038×10^{-9} ~ 0.0774×10^{-9} , $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值分别为 1483~19677 和 4.27~50.77。通过 Isoplot 软件(Ludwig, 1998)对黄铁矿 Re-Os 数据进行投图, 获得了 Re-Os 等时线年龄为 $153 \pm 11 \text{ Ma}$ ($n=4$, $\text{MSWD}=1.4$) 和初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.46 \pm 0.83$ (图 5)。

表 1 小柯勒河铜钼矿床中黄铁矿 Re-Os 同位素数据
Table 1 Re-Os isotopic results for pyrite from the Xiaokelehe Cu-Mo deposit

样号	Re($\times 10^{-9}$)		普Os($\times 10^{-9}$)		$^{187}\text{Os}(\times 10^{-9})$		$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$		$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$		模式年龄(Ma)	
	含量	1 σ	含量	1 σ	含量	1 σ	含量	1 σ	含量	1 σ	测定值	1 σ
XK-1	30.85	0.95	0.0074	0.0004	0.0498	0.0003	19677	1334	50.77	3.79	154.7	1.0
XK-2	22.08	0.47	0.0088	0.0002	0.0348	0.0003	11754	376	29.64	1.17	151.2	1.4
XK-3	46.74	1.04	0.0130	0.0002	0.0774	0.0004	16924	449	44.75	1.57	158.5	0.8
XK-4	2.10	0.07	0.0067	0.0003	0.0038	0.0001	1483	85	4.27	0.29	172.7	2.8

表 2 小柯勒河铜钼矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素数据
Table 2 Re-Os isotopic results for molybdenite from the Xiaokelehe Cu-Mo deposit

样号	样重(g)	Re($\times 10^{-6}$)		$^{187}\text{Re}(\times 10^{-6})$		$^{187}\text{Os}(\times 10^{-9})$		模式年龄(Ma)	
		含量	2 σ	含量	2 σ	含量	2 σ	测定值	2 σ
XL-2	0.0102	320.8	2.67	200.8	1.7	494.9	4.0	147.1	2.4
XL-3	0.0098	367.0	2.54	229.7	1.6	570.7	4.5	148.3	2.4
XL-4	0.0104	147.4	1.19	92.3	0.7	228.9	2.3	148.1	2.1
XL-5	0.0124	174.0	1.19	108.9	0.7	270.1	3.6	148.0	2.2

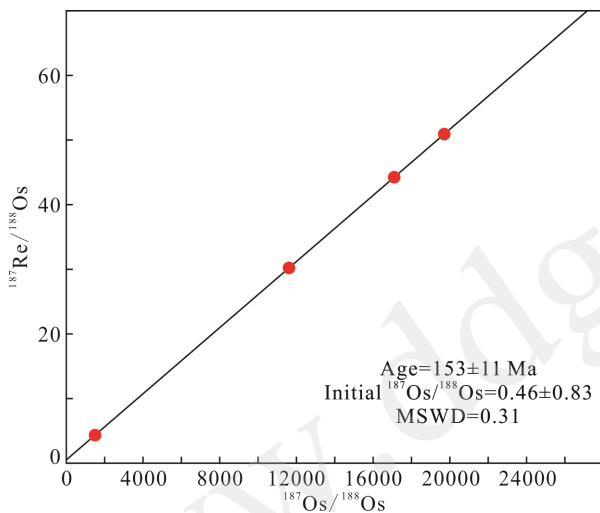


图 5 小柯勒河铜钼矿床中黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄

Fig.5 Re-Os isochron age of pyrite from the Xiaokelehe Cu-Mo deposit

小柯勒河铜钼矿床辉钼矿中 Re 含量为 $147.4 \times 10^{-6} \sim 367.0 \times 10^{-6}$, 远高于黄铁矿中 Re 的含量, ^{187}Os 的含量为 $228.9 \times 10^{-9} \sim 570.7 \times 10^{-9}$ 。普 Os 含量极低, 相对于 ^{187}Os 含量可以忽略不计。经计算, 辉钼矿模式年龄变化范围为 147.1~148.3 Ma。采用 Isoplot 软件(Ludwig, 1998)对辉钼矿 Re-Os 数据进行投图(图 6), 获得辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 148.5 ± 1.5 Ma($n=4$, MSWD=0.42), 加权平均年龄为 147.9 ± 1.1 Ma($n=4$, MSWD=0.2)。结果显示, 辉钼矿模式年龄、等时线年龄和加权平均年龄在误差范围内一致。

5 讨论

5.1 成矿时代与物质来源

本次研究的黄铁矿和辉钼矿样品分别选自与钾化主成矿阶段密切相关的 V1 和 V2 石英脉。由于样品选自同一成矿阶段的同一类型脉体, 且辉钼矿和黄铁矿的封闭温度都高于 500 °C(Suzuki et al., 1996; Nozaki et al., 2010), 其 Re-Os 同位素体系不容易受变形、变质或者后期地质事件影响并持续保持封闭(Raith and Stein, 2000; Stein et al., 2001)。因此, 本次在小柯勒河矿区内所选择的样品满足了硫化物 Re-Os 定年的必要条件, 即①测试样品必须具有相同的来源, 即具有相同的初始同位素组成; ②测试样品必须同时形成; ③样品形成后同位素体系必须保持封闭(黄小文等, 2016)。

除了上述 3 个必需的条件, 由于不同的硫化物中 Re、Os 含量存在差异, 具有不同 Re-Os 同位素特征的硫化物用到的等时线投图、模式年龄计算方法等不同。Stein et al. (2000)根据硫化物中的普 Os 含量将硫化物分为普 Os 含量较高的岩浆硫化物和普 Os 含量低而放射性 ^{187}Os 含量高(LLHR)的硫化物, 且 LLHR 硫化物中 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} > 50$ 。辉钼矿中几乎不含普 Os, 属于 LLHR 硫化物的极端情况, 可以直接通过 ^{187}Re 和 ^{187}Os 含量计算等时线年龄。本文获得 4 件辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 148.5 ± 1.5 Ma, 加权平均年龄为 147.9 ± 1.1 Ma。小柯勒河铜钼矿床 3 个黄铁矿样品(XK-2、XK-3 和 XK-4)

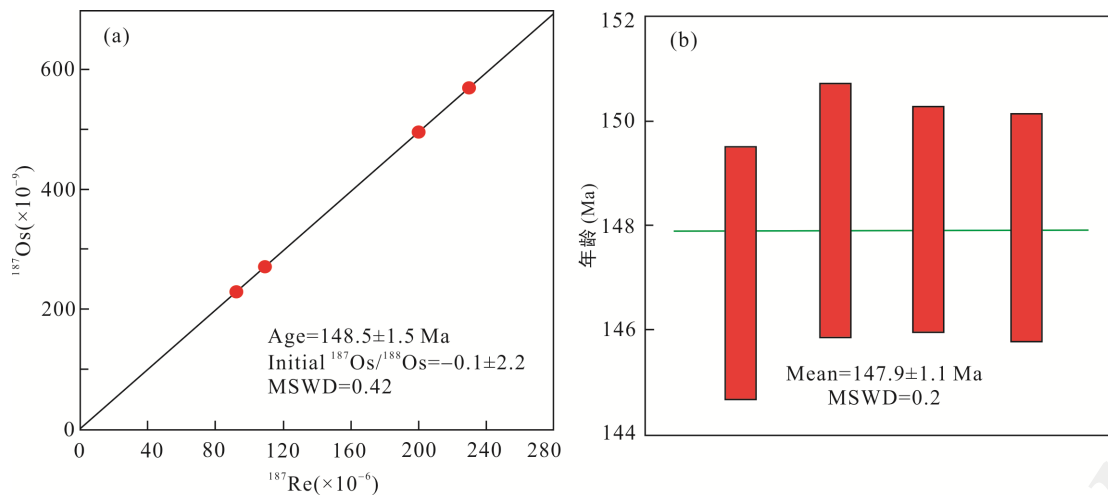


图6 小柯勒河铜钼矿床中辉钼矿 Re-Os 等时线年龄图(a)及加权平均值年龄图(b)

Fig.6 Re-Os isochron age (a) and weighted average age (b) of molybdenite from the Xiaokelehe Cu-Mo deposit

中 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 均小于 50, 不属于 LLHR 硫化物(Stein et al., 2001)。通过 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值计算获得小柯勒河铜钼矿床中黄铁矿等时线年龄为 153 ± 11 Ma。黄铁矿和辉钼矿 Re-Os 同位素年龄测试结果显示, 在不同实验室测试获得的黄铁矿 Re-Os 同位素年龄与辉钼矿 Re-Os 同位素年龄在误差范围内一致。由于黄铁矿 Re-Os 年龄数据误差较大, 因此, 本文将辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 148.5 ± 1.5 Ma 作为小柯勒河铜钼矿床的成矿年龄。综上, 我们认为小柯勒河铜钼矿床的成矿时代为晚侏罗世, 该成矿年龄与锆石 U-Pb 定年获得的矿区内花岗闪长斑岩的年龄一致(150.0 ± 1.6 Ma, 课题组未发表数据), 同时与区域上岔路口斑岩型钼矿床成矿时代一致($146.9 \sim 148.0$ Ma; 聂凤军等, 2011; Liu et al., 2014)。

近年来, 辉钼矿 Re-Os 同位素示踪已经成为成矿物质来源研究的一个重要手段(Stein et al., 2001; 王建等, 2014; 严清高等, 2018; 江小均等, 2018)。研究发现, 地幔中 Re 的含量高于地壳, 因此幔源成因辉钼矿比壳源成因更加富集 Re(Mao et al., 1999; Stein et al., 2001)。地幔成因、壳幔混源成因及地壳成因矿床辉钼矿中 Re 含量分别为 $n \times 10^{-4}$, $n \times 10^{-5}$, $n \times 10^{-6}$ (Mao et al., 1999)。本次研究获得 4 件辉钼矿样品中 Re 含量为 $1.474 \times 10^{-4} \sim 3.670 \times 10^{-4}$, 在数量级上与地幔成因辉钼矿一致, 指示小柯勒河铜钼矿床中辉钼矿可能具幔源特征。

5.2 成矿动力学背景

大兴安岭多金属成矿带处于中亚造山带东段, 是古亚洲洋、蒙古-鄂霍茨克洋和环太平洋构造体制的叠加转换地带(许文良等, 2013), 地质构造复杂,

岩浆活动频繁。研究表明, 古亚洲洋最终于中三叠世闭合, 之后进入蒙古-鄂霍茨克洋和环太平洋构造体系演化阶段(许文良等, 2013; 唐杰等, 2018)。因此, 小柯勒河铜钼矿床晚侏罗世构造环境应该主要与蒙古-鄂霍茨克洋或环太平洋两个构造环境有关。有学者对东北地区早侏罗世火山岩成岩年龄和地球化学特征进行了统计分析, 结果表明, 吉黑东部地区出露早-中侏罗世($190 \sim 173$ Ma)钙碱性火山岩组合, 具有陆缘弧环境岩浆岩的特征(许文良等, 2008, 2013; 裴福萍等, 2009)。同时小兴安岭-张广才岭地区同时代分布有双峰式火成岩组合(唐杰等, 2011; 徐美君等, 2013), 表现出弧后伸展环境岩浆岩的特征。而位于大兴安岭多金属成矿带北段的额尔古纳地块上同时代火山岩为一套钙碱性火山岩组合, 表现出陆缘弧环境下的岩浆岩特征(许文良等, 2013; 唐杰等, 2018)。这种火成岩空间分布特征表明东北地区在早侏罗世开始受到古太平洋板块俯冲作用的影响, 且从吉黑地区到小兴安岭-张广才岭显示了俯冲环境中陆缘向陆内火山岩成分的变化。但大兴安岭北段额尔古纳地块上陆缘弧环境的早侏罗世火成岩与古太平洋板块俯冲无关, 应形成于蒙古-鄂霍茨克洋向南俯冲背景。另外, 同位素年代学资料表明位于大兴安岭多金属成矿带北段的额尔古纳地块内中晚侏罗世-早白垩世火山岩平行于蒙古-鄂霍茨克缝合带呈北东向展布, 而位于松辽盆地东缘的吉黑东部地区普遍缺乏同时代火山岩。因此, 有学者提出古太平洋板块在东北地区晚侏罗世-早白垩世俯冲作用不明显(许文良等, 2013; 唐杰等, 2018)。

基于上述分析, 晚侏罗世小柯勒河铜钼矿床应

该与蒙古-鄂霍茨克洋构造体系的演化有关。晚古生代-中生代, 蒙古-鄂霍茨克洋自西向东呈剪刀式闭合, 东部闭合的时间可能持续到晚侏罗世-早白垩世(Kravchinsky et al., 2002; Sorokin et al., 2010)。而对于额尔古纳地块, 闭合时间发生于中侏罗世末期-晚侏罗世早期(Meng, 2003; 李锦轶等, 2004), 主要证据有: ①漠河推覆构造和大量倾向北的逆冲断层, 使泥盆纪灰岩推覆到中侏罗世陆相碎屑岩之上, 并造成了上黑龙江前陆盆地沉积物褶皱, 地壳缩短、增厚(李锦轶等, 2004); ②在兴安地块与松嫩-张广才岭地块之间的黑河-孙吴地区发现了具有 S 型花岗岩地球化学属性的白云母花岗岩, 其形成时代为 168 ± 2 Ma, 可能形成于陆陆碰撞陆壳加厚的背景(许文良等, 2013); ③在满洲里-额尔古纳地区形成了一套中侏罗世碱性-亚碱性过渡属性的火山岩组合, 以塔木兰沟组玄武粗安岩-粗面岩为代表, 这些火山岩形成于加厚陆壳垮塌阶段相对应的伸展环境(许文良等, 2013)。因此, 晚侏罗世小柯勒河铜钼矿床应该与蒙古-鄂霍茨克洋闭合之后蒙古-中朝地块与西伯利亚地块碰撞造山作用密切相关。岔路口斑岩型钼矿床是大兴安岭多金属成矿带北段近年来新发现的矿床, 空间上距离小柯勒河铜钼矿床约 100 km, 同位素年代学指示其成矿时代为 146~148 Ma(聂凤军等, 2011; 李真真等, 2012), 可能与小柯勒河矿床形成于同一岩浆-热液成矿事件。前人对岔路口矿床中与成矿关系密切的岩浆岩地球化学特征进行了研究, 指示致矿岩体总体属于高钾钙碱性岩石, 表明该岩体可能形成于由挤压向伸展转换的背景, 即后碰撞环境。此外, 前人在大兴安岭多金属成矿带北段上黑龙江盆地内陆续发现了洛古河、马林、龙沟河和二十一站等晚侏罗世-早白垩世中酸性花岗质岩石。地球化学特征显示, 这些岩体均属于高钾钙碱性系列, 表明可能形成于蒙古-中朝地块与西伯利亚地块碰撞环境中的后碰撞阶段(武广等, 2008, 2009; 黄英和苏培珍, 2013; 李睿华等, 2018)。因此, 大兴安岭多金属成矿带北段在晚侏罗世-早白垩世总体上处于蒙古-中朝地块与西伯利亚地块陆陆碰撞的后碰撞阶段。

结合区域地质构造和岩浆演化, 小柯勒河铜钼矿床的形成与古亚洲洋的俯冲和闭合后的碰撞造山过程无关, 也与古太平洋板块俯冲过程无关, 而与蒙古-鄂霍茨克洋构造体系的演化有关, 形成于蒙古-中朝地块与西伯利亚地块陆陆碰撞的后碰撞阶段, 这种斑岩铜钼矿床的形成背景可能与青藏高原

形成于后碰撞环境的冈底斯斑岩成矿带类似(侯增谦等, 2003, 2007)。

6 结 论

(1) 通过对与钾化关系密切的石英-黄铁矿-黄铜矿脉和石英-辉钼矿±黄铁矿±黄铜矿脉中的黄铁矿和辉钼矿开展 Re-Os 同位素定年, 结果表明, 黄铁矿 Re-Os 等时线年龄为 153 ± 11 Ma; 辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 148.5 ± 1.5 Ma, 加权平均年龄为 147.9 ± 1.1 Ma。表明小柯勒河铜钼矿床形成于晚侏罗世。

(2) 小柯勒河铜钼矿床形成于蒙古-鄂霍茨克洋闭合后蒙古-中朝地块与西伯利亚地块陆陆碰撞的后碰撞阶段。

致谢: 野外工作得到了黑龙江省地矿局齐齐哈尔矿产勘查开发总院孟凡波工程师的大力支持, 黄铁矿 Re-Os 同位素测试得到中国科学院地球化学研究所漆亮研究员的大力帮助, 辉钼矿 Re-Os 同位素测试得到中国科学院广州地球化学研究所李杰研究员的大力帮助, 中国科学院地质与地球物理所张连昌研究员和中国地质科学院矿产资源所武广研究员提出了宝贵的修改意见和建议, 在此一并表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 2009. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题. 岩石学报, 25(11): 2695-2726.
- 戴慧敏. 2016. 大兴安岭成矿带中北段铜多金属矿床地球化学建模及潜力评价研究. 北京: 中国地质大学博士学位论文: 50-90.
- 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. 地质学报, 68(4): 339-347.
- 杜安道, 屈文俊, 李超, 杨刚. 2009. 铼-钨同位素定年方法及分析测试技术的进展. 岩矿测试, 28(3): 288-304.
- 韩龙, 张佳男, 王建平. 2010. 大兴安岭布鲁吉山钼多金属异常特征及找矿前景探讨. 科学技术创新, (20): 36-36.
- 侯增谦, 吕庆田, 王安建, 李晓波, 王宗起, 王二七. 2003. 初论陆-陆碰撞与成矿作用——以青藏高原造山带为例. 矿床地质, 22(4): 319-333.
- 侯增谦, 潘小菲, 杨志明, 曲晓明. 2007. 初论大陆环境斑岩铜矿. 现代地质, 21(2): 332-351.
- 黄世武, 张连昌, 李克庆, 陈志广, 吴华英, 相鹏, 张晓

- 静. 2010. 得尔布干成矿带太平川铜钼矿床含CH₄流体包裹体研究. 岩石学报, 26(5): 1386-1396.
- 黄小文, 漆亮, 高剑峰, 孟郁苗. 2016. 关于硫化物Re-Os同位素定年的一些思考. 矿物岩石地球化学通报, 35(3): 432-440.
- 黄英, 苏培珍. 2013. 黑龙江龙沟河岩体构造环境分析及其就位机制探讨. 甘肃冶金, 35(1): 64-66.
- 江小均, 严清高, 李文昌, 李超, 吴鹏, 管申进, 余海军, 李金龙. 2018. 滇中老街子Pb-Ag多金属矿床的成矿时代及成矿动力学背景探讨: 来自硫化物Re-Os同位素证据. 地质学报, 92(6): 1280-1296.
- 金露英, 秦克章, 孟昭君, 李光明, 宋国学, 李真真, 吕克鹏, 阚学胜, 赵超. 2014. 大兴安岭北段岔路口巨型钼(钨)矿床脉体特征、产状及其对成矿的指示. 矿床地质, 33(4): 742-760.
- 靳新娣, 李文君, 吴华英, 张连昌, 杜安道. 2010. Re-Os同位素定年方法进展及ICP-MS精确定年测试关键技术. 岩石学报, 26(5): 1617-1624.
- 李杰, 许继峰, 梁细荣. 2005. Re-Os同位素分析测试技术进展. 质谱学报, 26(3): 175-181.
- 李锦轶, 莫中国, 和政军, 孙桂华, 陈文. 2004. 大兴安岭北段地壳左行走滑运动的年代及其对中国东北及邻区中生代以来地壳构造演化重建的制约. 地学前缘, 11(3): 157-168.
- 李睿华, 张哈, 孙丰月, 武广, 张宇婷, 王硕. 2018. 大兴安岭北段二十一站岩体年代学、地球化学及其找矿意义. 岩石学报, 34(6): 1725-1740.
- 李真真, 秦克章, 宋国学, 金露英, 李光明, 孟昭君, 阚学胜, 李宪臣. 2012. 大兴安岭北段岔路口巨型高氟型斑岩钼矿成矿特色与关键控制因素. 矿床地质, 31(S1): 297-298.
- 聂凤军, 孙振江, 李超, 刘翼飞, 吕克鹏, 张可, 刘勇. 2011. 黑龙江岔路口钼多金属矿床辉钼矿-钨同位素年龄及地质意义. 矿床地质, 30(5): 828-836.
- 裴福萍, 许文良, 杨德彬, 于洋, 孟恩. 2009. 华北克拉通东北缘岩石圈深部物质组成的不均一性: 来自吉林南部中生代火山岩元素及Sr-Nd同位素地球化学的证据. 岩石学报, 25(8): 1962-1974.
- 漆亮, 周美夫, 严再飞, 皮道会, 胡静. 2006. 改进的卡洛斯管溶样等离子体质谱法测定地质样品中低含量铂族元素及铼的含量. 地球化学, 35(6): 667-674.
- 屈文俊, 杜安道, 高洪涛. 2000. ¹⁸⁶Re和¹⁸⁸Re双同位素稀释法在辉钼矿-钨测年中的应用. 岩矿测试, 19(4): 241-244.
- 屈文俊, 杜安道. 2003. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿-钨地质年龄. 岩矿测试, 22(4): 254-257.
- 尚毅广. 2017. 黑龙江省大兴安岭地区小柯勒与972高地金多金属矿床地质特征及成矿预测. 长春: 吉林大学硕士学位论文: 10-60.
- 谭钢, 常国雄, 余宏全, 李进文, 张德全, 杨郟城, 张斌, 向安平, 董英君. 2010. 内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿床辉钼矿-钨同位素定年及其地质意义. 矿床地质, 29(S1): 506-508.
- 唐杰, 许文良, 王枫, 高福红, 曹花花. 2011. 张广才岭帽儿山组双峰式火山岩成因: 年代学与地球化学证据. 世界地质, 30(4): 508-520.
- 唐杰, 许文良, 王枫, 葛文春. 2018. 古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲历史: 东北亚陆缘中生代-古近纪岩浆记录. 中国科学: 地球科学, 48(5): 549-583.
- 王建, 谢桂青, 陈风河, 朱乔乔, 李伟, 张志远. 2014. 鄂东南地区鸡笼山矽卡岩金矿床的辉钼矿Re-Os同位素年龄及其构造意义. 地质学报, 88(8): 1539-1548.
- 王来云, 钟立平, 刘善丽, 罗长青. 2010. 内蒙古呼伦贝尔市哈达图牧场钼多金属矿床地质特征及成因探讨. 吉林地质, 29(2): 56-59.
- 王召林, 金浚, 李占龙, 刘焘. 2014. 大兴安岭中北段太平川斑岩钼(铜)矿床辉钼矿Re-Os年龄及地质意义. 矿床地质, 33(S1): 45-46.
- 吴福元, 孙德有, 林强. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生. 岩石学报, 15(2): 22-30.
- 吴秀云, 褚春岩, 赵希成. 2015. 内蒙古兴阿斑岩钼矿床地质特征、成岩时代与岩浆成因研究. 矿产勘查, 6(6): 689-701.
- 武广. 2006. 大兴安岭北部区域成矿背景与有色、贵金属矿床成矿作用. 长春: 吉林大学博士学位论文: 40-60.
- 武广, 陈衍景, 孙丰月, 李景春, 李之彤, 王希今. 2008. 大兴安岭北端晚侏罗世花岗岩类地球化学及其地质和找矿意义. 岩石学报, 24(4): 899-910.
- 武广, 陈衍景, 赵振华, 赵太平, 李之彤, 张哲. 2009. 大兴安岭北端洛古河东花岗岩的地球化学、SHRIMP锆石U-Pb年龄和岩石成因. 岩石学报, 25(2): 233-247.
- 徐美君, 许文良, 王枫, 高福红, 于介江. 2013. 小兴安岭中部早侏罗世花岗质岩石的年代学与地球化学及其构造意义. 岩石学报, 29(2): 354-368.
- 许文良, 葛文春, 裴福萍, 孟恩, 于洋, 杨德彬. 2008. 东北地区中生代火山作用的年代学格架及其构造意义. 矿物岩石地球化学通报, 27(增刊): 286-287.
- 许文良, 王枫, 裴福萍, 孟恩, 唐杰, 徐美君, 王伟. 2013. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约. 岩石学报, 29(2): 339-353.

- 严清高, 李超, 江小均, 王忠强, 李云驹, 李伟. 2018. 滇中昆阳磷矿成矿时代及沉积环境Re-Os同位素示踪研究. *岩矿测试*, 37(4): 462–474.
- 应立娟, 王登红, 李超, 王阔, 王开建, 王兰根, 王要武, 张熊, 蒋金昌. 2017. 广东大宝山北部层状矿体硫化物Re-Os测年及指示. *地学前缘*, 24(5): 31–38.
- 袁玲玲, 刘锋. 2017. 阿尔泰山南缘塔拉特铅锌铁多金属矿床硫化物Re-Os和Rb-Sr年龄及其地质意义. *矿床地质*, 36(6): 1333–1351.
- 赵冰爽, 李杰, 龙晓平, 袁超. 2018. 东天山梅岭铜矿床黄铁矿Re-Os等时线年龄: Os同位素不均一的结果. *地球科学*, 43(9): 2966–2979.
- Chen Y J, Zhang C, Wang P, Pirajno F and Li N. 2017. The Mo deposits of Northeast China: A powerful indicator of tectonic settings and associated evolutionary trends. *Ore Geology Reviews*, 81(2): 602–640.
- Chu Z Y, Yan Y, Chen Z, Guo J H, Yang Y H, Li C F and Zhang Y B. 2015. A comprehensive method for precise determination of Re, Os, Ir, Ru, Pt, Pd concentrations and Os isotopic compositions in geological samples. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 39(2): 151–169.
- Du A D, Wu S Q, Sun D Z, Wang S X, Qu W J, Markey R, Stein H, Morgan J and Malinovskiy D. 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenites HLP and JDC. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(1): 41–52.
- Kravchinsky V A, Cogné J P, Harbert W P and Kuzmin M I. 2002. Evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean as constrained by new palaeomagnetic data from the Mongol-Okhotsk suture zone, Siberia. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 148(1): 34–57.
- Liu J, Mao J W, Wu G, Wang F, Luo D F and Hu Y Q. 2014. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating of the Chalukou porphyry Mo deposit in the northern Great Xing'an Range, China, and its geological significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 696–709.
- Ludwig K. 1998. Using Isotope/Ex, Age of Chronological Toolkit for Microsoft Excel (version 1.0). Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1: 1–4.
- Mao J W, Zhang Z H, Zhang Z H and Du A D. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W(Mo) deposit in the northern Qilian Mountains and its geological significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(11): 1815–1818.
- Markey R, Stein H and Morgan J. 1998. Highly precise Re-Os dating for molybdenite using alkaline fusion and NTIMS. *Talanta*, 45(5): 935–946.
- Meng Q R. 2003. What drove Late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract? *Tectonophysics*, 369(3–4): 155–174.
- Nozaki T, Kato Y and Suzuki K. 2010. Re-Os geochronology of the Iimori Besshi-type massive sulfide deposit in the Sanbagawa metamorphic belt, Japan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(15): 4322–4331.
- Qi L, Zhou M F, Gao J F and Zhao Z. 2010. An improved Carius tube technique for determination of low concentrations of Re and Os in pyrites. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 25(4): 585–589.
- Qu W J, Du A D and Zhao D M. 2001. Determination of ^{187}Os in molybdenite by ICP-MS with neutron-induced ^{186}Os and ^{188}Os spikes. *Talanta*, 55(4): 815–820.
- Raith J G and Stein H J. 2000. Re-Os dating and sulfur isotope composition of molybdenite from tungsten deposits in western Namaqualand, South Africa: Implications for ore genesis and the timing of metamorphism. *Mineralium Deposita*, 35(8): 741–753.
- Sorokin A A, Sorokin A P, Ponomarchuk V A and Travin A V. 2010. The age and geochemistry of volcanic rocks on the eastern flank of the Umlekan-Ogodzha volcano plutonic belt (Amur region). *Russian Geology and Geophysics*, 51(4): 369–379.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Hannah J L and Scherstén A. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works. *Terra Nova*, 13(6): 479–486.
- Stein H J, Morgan J W and Schersten A. 2000. Re-Os dating of low-level highly radiogenic (LLHR) sulfides: The Harnas gold deposit, southwest Sweden, records continental scale tectonic events. *Economic Geology*, 95(8): 1657–1671.
- Stein H J, Sundblad K, Markey R J, Morgan J W and Motuza G. 1998. Re-Os ages for Archean molybdenite and pyrite, Kuittila-Kivisuo, Finland and Proterozoic molybdenite, Kabeliai, Lithuania: Testing the chronometer in a metamorphic and metasomatic setting. *Mineralium Deposita*, 33(4): 329–345.
- Sun Y L, Xu P, Li J, He K, Chu Z Y and Wang C Y. 2010. A practical method for determination of molybdenite Re-Os age by inductively coupled plasma-mass spectrometry combined with Carius tube-HNO₃ digestion. *Analytical Methods*, 2(5): 575–581.

- Suzuki K, Shimizu H and Masuda A. 1996. Re-Os dating of molybdenites from ore deposits in Japan: Implication for the closure temperature of the Re-Os system for molybdenite and the cooling history of molybdenum ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(16): 3151–3159.
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, Zhang Y B, Grant M L, Wilde S A and Jahn B M. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in Northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1–30.
- Zimmerman A, Stein H J, Morgan J W, Markey R J and Watanabe Y. 2014. Re-Os geochronology of the El Salvador porphyry Cu-Mo deposit, Chile: Tracking analytical improvements in accuracy and precision over the past decade. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 131: 13–32.

Re-Os Isotopic Dating of Sulfides from the Xiaokelehe Cu-Mo Deposit in the Northern Part of the Great Xing'an Range, NE China, and its Geological Implications

FENG Yuzhou^{1,2}, DENG Changzhou³, CHEN Huayong^{1*}, LI Guanghui³,
XIAO Bing^{1,2}, LI Rucuo^{1,2} and SHI Huilin³

(1. CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Heilongjiang Institute of Geological Survey, Harbin 150036, Heilongjiang, China)

Abstract: The newly-discovered large-scale Xiaokelehe Cu-Mo deposit is located in the northern part of the Great Xing'an Range polymetallic belt. The ores are mainly hosted in the granodiorite porphyry and minor in the surrounding Neoproterozoic and Jurassic-Cretaceous sedimentary rocks. The mineralization styles are principally veinlet-disseminated and disseminated, accompanied by pervasive sodic-calcic, potassic, chlorite and phyllic alteration. The potassic alteration is the most important Cu-Mo mineralization stage. However, the following chlorite alteration is also associated with Cu mineralization. This study focused on Re-Os dating of pyrite and molybdenite from quartz-pyrite-chalcopyrite and quartz-molybdenite±pyrite±chalcopyrite veins, respectively, which are both associated with potassic alteration. The results show that the Re-Os isochron ages of four pyrite samples are 153 ± 11 Ma, which are in good agreement with the isochron age (148.5 ± 1.5 Ma) and weighted mean age (147.9 ± 1.1 Ma) of four molybdenite samples within analytical errors. Our results show that a hydrothermal alteration-mineralization event occurred around 148 Ma. The Xiaokelehe Cu-Mo deposit was formed in a compression to extension tectonic transition setting associated with collisional orogeny between the Mongol-Sinokorea and Siberia continents.

Keywords: Re-Os dating of sulfides; geodynamics; Xiaokelehe Cu-Mo ore deposit; Great Xing'an polymetallic belt