

内蒙古莲花山铜矿床辉钼矿铼—钷年代学、 矿石硫—铅同位素地球化学与矿床成因

康欢,刘翼飞,江思宏

中国地质科学院矿产资源研究所,自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京,100037

内容提要:莲花山铜矿床位于内蒙古大兴安岭中南段,其成因还存在一定的争议。本文对其开展了辉钼矿铼—钷测年和硫化物的硫、铅同位素研究。研究结果显示,矿床形成于 139.1 ± 1.1 Ma,属于早白垩世,并非前人所认为的三叠纪。莲花山铜矿床硫化物的硫同位素组成($\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$)分布于 -1.5% 至 5.0% 之间,具有塔式分布特征,与大兴安岭中南段地区产出的其他锡—钨—银多金属矿床中硫化物的硫同位素组成非常类似,显示硫来源于深部岩浆,受到浅部硫源混染程度较小。莲花山铜矿床硫化物的铅同位素组成具有线性排列特征,显示成矿作用过程中成矿物质经历了两端元的混合,包括一个低放射性成因铅端元和一个高放射性成因铅端元。这种铅同位素特征与大兴安岭中南段产出的其他多金属矿床中的铅同位素具有非常相似的特征,反映了这些矿床可能含有一个相似的低放射性成因铅端元,但受到浅部不同铅的混染。莲花山铜矿床辉钼矿中铼的含量平均为 1078×10^{-9} ,低于兴蒙造山带中与俯冲环境形成的斑岩铜矿床中辉钼矿铼的含量2个数量级,但与高分异花岗岩有关的锡—钨—银多金属矿床中辉钼矿中铼的含量相似,显示莲花山铜矿床的形成可能与高分异花岗岩岩浆活动有关,是高分异花岗岩晚期岩浆—热液作用的结果。莲花山铜矿床的产出指示区域内可能具有寻找高分异花岗岩型深成高温锡—钨矿化的潜力。

关键词:莲花山铜矿;硫同位素;铅同位素;高分异花岗岩;内蒙古

大兴安岭中南段是我国一处典型的锡—钨—铜—铅—锌—银多金属成矿带。在该成矿带内,矿化通常具有中低硫逸度的特征,含有不同金属组合的数个矿床通常相邻产出,构成一个由高温到低温演化的多金属成矿系统(Liu Yifei et al., 2012, 2014)。这类成矿系统通常分布于高分异花岗岩基3~5 km外,矿化的影响范围则可以达到10 km以上,如维拉斯托—拜仁达坝成矿系统,具有从高温的斑岩(或潜火山岩)锡—钨矿化,向中温的脉状铜—锌矿化,以及中低温的脉状锌—铅—银矿化,和更低温的纯萤石矿化演化的特征(Liu Yifei et al., 2014)。

大兴安岭中南段的该类型矿化主要形成于晚侏罗世至早白垩世(如, Pan Xiaofei et al., 2009; Jiang Sihong et al., 2012; Ouyang Hegen et al.,

2014; Zhang Xuebin et al., 2014; Ruan Banxiao et al., 2015; Liu Chunhua et al., 2016; Liu Yifei et al., 2016; Zhai Degao et al., 2016; Liu Yuan et al., 2017),但该地区广泛分布有成矿后形成的火山—沉积岩系,如早白垩世的玛尼吐组、白音高老组及梅勒图组,也常被数米甚至数十米厚的草原残坡积和冲积物所覆盖,影响矿化露头的出露;部分矿床产出于碳质含量较高的沉积岩中,如二叠纪哲斯组,影响电法找矿效果。上述情况使得该地区的该类成矿系统中的不同矿化端元通常难以被完全揭露,制约着该地区的找矿突破。深入理解这类成矿系统的成因以及成矿花岗岩与不同矿化端元在空间上的展布关系,为就矿找矿提供了一套行之有效、多快好省的方法(Liu Yifei et al., 2014)。

莲花山铜矿床位于大兴安岭中段,内蒙古自治

注:本文为国家重点研发计划项目(2017YFC0601303)和中国地质科学院基本科研业务费项目(项目编号:YYWF201715)联合资助成果。收稿日期:2018-07-25;改回日期:2018-11-11;网络发表日期:2019-05-10;责任编辑:黄敏。

作者简介:康欢,男,1988年生。博士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email:181kanghuan@163.com。通讯作者:刘翼飞,男,博士,从事矿床学与矿床地球化学研究。Email:lyfsky@126.com。

引用本文:康欢,刘翼飞,江思宏. 2019. 内蒙古莲花山铜矿床辉钼矿铼—钷年代学、矿石硫—铅同位素地球化学与矿床成因. 地质学报, 93(12):3082~3094, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019143.
Kang Huan, Liu Yifei, Jiang Sihong. 2019. Molybdenite Re-Os dating and ore S-Pb isotopes of the Lianhuashan Cu deposit, Inner Mongolia, and their genetic significance. Acta Geologica Sinica, 93(12):3082~3094.

区兴安盟突泉县杜尔基镇,地理坐标为东经 $121^{\circ}52'$,北纬 $45^{\circ}36'$ 。该矿床发现于 20 世纪 80 年代,已揭露的矿化以铜为主,伴生铅、锌、银。前人在该矿床开展了大量的工作,主要集中在以下几个方面:①矿床围岩的侵位年龄,主要为石炭纪至三叠纪(Zhou Zhenhua et al., 2012; Wang Zhongyu et al., 2014);②成矿围岩和成矿物质的硫和铅同位素组成(Xiao Bingjian et al., 2008; Li Hao et al., 2016);③成矿围岩的 Hf 同位素组成;④矿床围岩的主量和微量元素地球化学特征(Xiao Bingjian et al., 2008);⑤矿床蚀变分带特征(Song Changchun, 1996)。上述研究结果显示,莲花山矿床具有岩浆热液矿床的特征。但大兴安岭中南段的这类矿床通常产出于成矿岩体的外围数公里之外,矿区范围内采集的岩石通常与矿床的形成不具有直接的成因联系(Liu Yifei et al., 2014)。虽然在该矿床已经开展了大量的研究,前人主要通过围岩的锆石 U-Pb 年龄来探讨该矿床的成矿时代,但是围岩和成矿作用之间的关系尚不确定,因此,其形成时代尚未有效地限定,为该矿床成因的探讨及找矿模型的建立和进一步找矿带来了诸多限制。

本文通过对大兴安岭中南段地区产出的莲花山铜矿辉钼矿铼—钨年代学和矿石硫—铅同位素的研究,精确限定成矿作用的形成时代,结合前人的研究,进一步厘清莲花山铜矿的形成过程,并通过与区域内产出的其他类似地质特征矿床的地质对比,揭示莲花山铜矿化区的找矿潜力及找矿方向。

1 地质背景

莲花山矿床位于大兴安岭中南段锡—钨—银—铅—锌—铜多金属成矿带内,是中蒙边境巨型成矿带的组成部分(Zhao Yiming et al., 1997; Nie Fengjun et al., 2004; Liu Yifei et al., 2017)。构造上处于中亚造山带的东段(Jahn et al., 2000),西伯利亚板块和华北板块相互碰撞拼接部位——索伦山缝合带的北侧。该区古生代属西伯利亚板块南缘俯冲增生带,自古生代末期至中生代期间,发生了明显的碰撞造山过程、碰撞后伸展作用过程及其间的构造大转换阶段(Jahn et al., 2000; Mao Jingwen et al., 2005)。在该构造演化格局的影响之下,区域内地层、断裂、侵入岩和多金属矿化发育,主要呈北东向展布。

区域内火山—沉积岩系发育,主要有古生界二叠系下统大石寨组,分布于矿区北部、莲花山东南,

主要为安山岩、角砾凝灰岩,夹凝灰质砾岩、安山玢岩等;中生界中侏罗统万宝组,分布于簸箕山西北至交流河一带及矿区东南部等地,主要为安山质—英安质角砾岩、凝灰岩夹砂岩;上侏罗统满克头鄂博组,主要分布于矿区南部及王围泡子南部附近,主要为流纹质晶屑凝灰岩、凝灰质砂岩、粉砂岩;第四系沉积(图 1)。

区域内岩浆侵入活动显著,侵入岩主要分布于矿区中部(图 1)。主要为一套中性—中酸性浅成、超浅成潜火山—侵入岩,其中包括:闪长玢岩、花岗闪长岩、花岗闪长斑岩(部分文献称为斜长花岗斑岩)和潜火山岩。其中,闪长玢岩分布于簸箕山、莲花山和九龙西山一带,岩体侵入下二叠统大石寨组和万宝组,是重要的赋矿围岩;花岗闪长斑岩在矿区内呈脉状出露,分走向西北向和北东向两组,岩脉明显受构造控制;在矿区北部的陈台屯一带,花岗闪长斑岩侵位于大石寨组及闪长玢岩中,岩体的侵位年代为 ~ 237 Ma(Zhou Zhenhua et al., 2012)。

2 矿床地质特征

莲花山矿床及其周边产出有莲花山、陈台屯和长春岭三个矿床。其中莲花山铜矿床的矿化体主要呈脉状产出于闪长玢岩内,部分产出于花岗闪长斑岩内,铜储量达中型规模。已查明具工业意义的矿体约 30 余条,产状受成矿前的断裂控制,呈北西 $300^{\circ}\sim 330^{\circ}$ 平行产出,分布于 $5\text{ km}\times 5\text{ km}$ 的范围内(图 1)。单个矿体延长 $200\sim 500\text{ m}$,部分矿体可达 700 m 。单个矿体一般厚度 $1.2\sim 3.4\text{ m}$,部分地段可达 10 m 。单个矿体延深可达 510 m ,平均铜品位 $0.7\%\sim 1.78\%$,局部可 $>4\%$ 。伴生银,品位在 $120\sim 154\text{ g/t}$ 之间(Zhou Zhenhua et al., 2012; Gu Alei, 2016)。

在莲花山矿床的北侧,产出有隐伏的陈台屯铜矿化(图 1)。陈台屯铜矿化体主要赋存于地表 120 m 以下至地表 250 m 之间,产出于花岗闪长斑岩与二叠纪大石寨组火山岩的侵入接触带内外。矿化体呈平缓的脉状、透镜状产出,共有 $7\sim 8$ 条矿化体。矿化体最厚处可达 40 余米,延长一般小于 200 余米,最长可达 400 余米。矿化体主要由细脉浸染状矿石构成。铜品位约 0.36% (Gu Alei, 2016)。

莲花山矿床的东侧 2 km 处,产出有长春岭铅—锌—银—铜矿化(图 1)。矿化体产于下二叠统大石寨组地层砂砾岩构造裂隙中,受南北向和北西向两组断裂构造控制。脉体整体走向北西至正北,倾

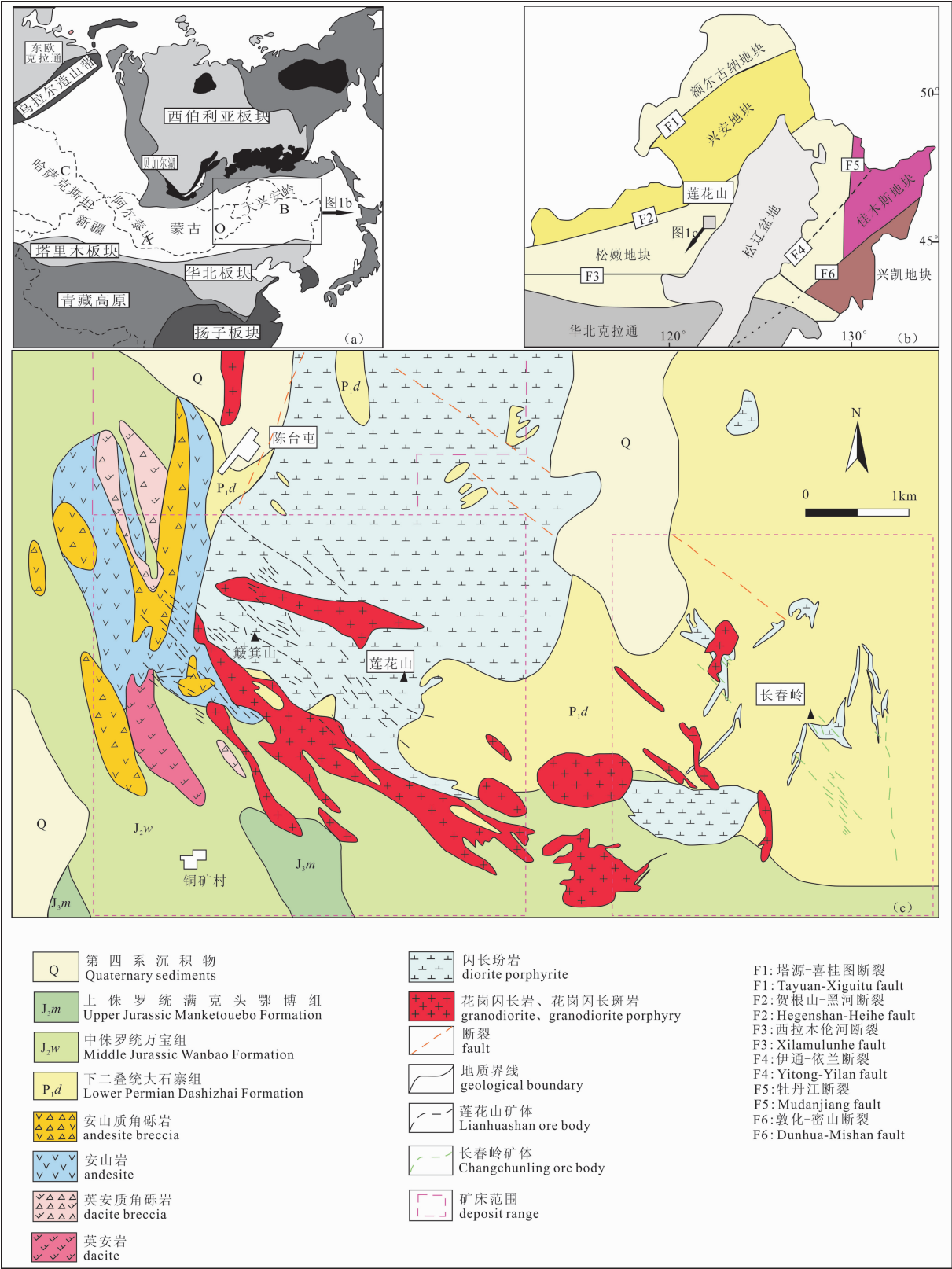


图 1 内蒙古莲花山矿田地质简图(据 Gu Alei, 2016 修改)

Fig. 1 Schematic geological map of Lianhuashan ore field, Inner Mongolia (modified after Gu Alei, 2016)

向北东,倾角在 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 左右。矿化体延长一般在 $100\sim 250$ m 左右,部分矿体延长可达 500 余米。矿体品位为铅 0.47 %、锌 1.18 %、银 39.8 g/t 和铜

0.11 %。

莲花山矿床内围岩蚀变强烈,主要为电气石化、阳起石化、硅化、绢云母化和碳酸盐化。金属矿化有

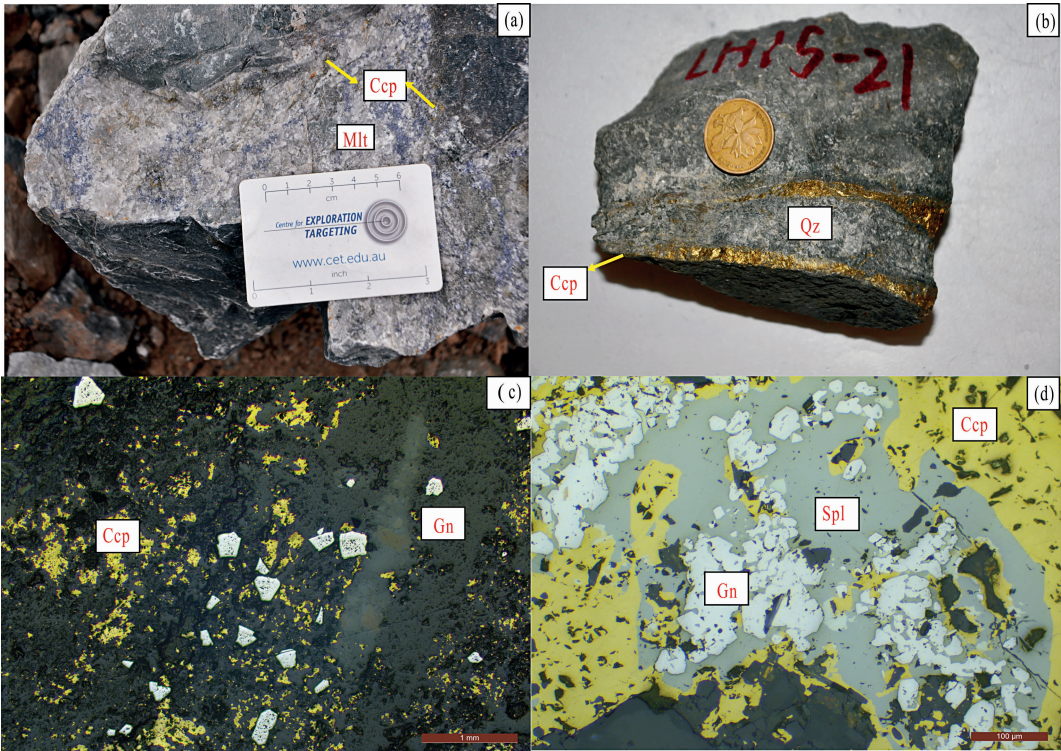


图 2 内蒙古莲花山铜矿床矿石特征照片

Fig. 2 Ore characteristics of Lianhuashan copper deposit, Inner Mongolia

(a)—黄铜矿和辉钼矿共生的石英脉;(b)—石英脉两侧的脉状黄铜矿;(c)—它形粒状方铅矿分布于黄铜矿中;
(d)—闪锌矿和方铅矿交代黄铜矿;Ccp—黄铜矿;Mlt—辉钼矿;Qz—石英;Gn—方铅矿;Spl—闪锌矿

(a)—quartz vein coexisting with chalcopyrite and molybdenite; (b)—veinary chalcopyrite on both sides of quartz vein; (c)—xenomorphic granular galena distributed in chalcopyrite; (d)—replacement of chalcopyrite by galena and sphalerite; Ccp—chalcopyrite; Mlt—molybdenite; Qz—quartz; Gn—galena; Spl—sphalerite

高温阶段氧逸度较高的磁铁矿化,并逐渐过渡到中高温的毒砂—黄铁矿化,再过渡到中温磁黄铁矿—黄铜矿—闪锌矿—方铅矿化,该阶段产出有少量的辉钼矿,成矿晚期形成低温含银硫化物及硫酸盐。莲花山矿床内硫化物组合也反映了成矿作用过程中硫逸度和氧逸度具有逐渐降低的趋势,与维拉斯托—拜仁达坝成矿系统类似,但是矿化开始的早期阶段有显著的磁铁矿化,显示其初始氧逸度比维拉斯托成矿系统更高(Liu Yifei et al., 2014)。同时,莲花山、陈台屯、长春岭铜三个矿床的空间分布特征也与维拉斯托脉状铜矿床与拜仁达坝脉状铜—锌—铅—银矿床具有非常类似的特征(Liu Yifei et al., 2012),反映三者可能组成了一个由高温向低温逐渐过渡的多金属成矿系统。

3 样品采集及测试结果

3.1 辉钼矿铼—钷同位素定年

用于辉钼矿铼—钷同位素定年的 4 件样品采自 29 号井的副井位置,地理坐标为 121°52′58.1″E,45°

34′5″N。测试的辉钼矿形成于磁黄铁矿—黄铜矿—闪锌矿—方铅矿化阶段,辉钼矿和黄铜矿共生(图 2),多以含钼石英脉的形式产于花岗闪长岩中。辉钼矿在双目镜下进行反复挑选,纯度达 99%,且颗粒的粒径远小于 2 mm,为避免大颗粒辉钼矿测年的失偶效应(Selby et al., 2001)。

辉钼矿的分析测试在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成,采用美国 TJA 公司生产的电感耦合等离子体质谱仪 TJA X-series ICP-MS 测定同位素比值。Re、Os 化学分离步骤和质谱测定主要包括分解样品、蒸馏分离钨、萃取分离铼和质谱测定 4 个步骤,详细流程见 Shirey et al. (1995)、Du Andao et al. (1994)和 Du Andao et al. (2004)。实验采用国家标准物质 GBW04435(JDC)为标样,监测化学流程和分析数据的可靠性。最后铼—钷同位素的等时线年龄和加权平均年龄计算采用 Isoplot/Exver3(Ludwig, 2003)完成,计算过程中所采用的衰变常数 $\lambda(^{187}\text{Re}) = 1.666 \times 10^{-11} / \text{a}$ (Smoliar et al., 1996)。

实验测得辉钼矿铼—钨同位素定年数据列于表 1,可见莲花山铜矿 4 件辉钼矿样品的模式年龄非常接近,介于 $137.9 \pm 2.5 \sim 140.9 \pm 2.4$ Ma 之间,等时线年龄为 139.5 ± 1.5 Ma (MSWD = 2.2) (图 3a),加权平均年龄为 139.1 ± 1.1 Ma (MSWD =

1.09)(图 3b),等时线年龄和加权平均年龄非常接近,说明此次实验测得的年龄可靠。由于模式年龄的加权平均具有更小的误差和 MSWD,因此,加权平均年龄代表了莲花山辉钼矿的形成时代,为早白垩世。

表 1 内蒙古莲花山铜矿床中辉钼矿铼—钨同位素数据

Table 1 Re-Os isotopic data of molybdenite separates from the Lianhuashan copper deposit, Inner Mongolia

样品编号	样重(g)	Re $\pm 2\sigma(\times 10^{-9})$	普 Os $\pm 2\sigma(\times 10^{-9})$	$^{187}\text{Re}\pm 2\sigma(\times 10^{-9})$	$^{187}\text{Os}\pm 2\sigma(\times 10^{-9})$	模式年龄(Ma)
LH15-16	0.08057	197.7 ± 1.5	0.015 ± 0.0005	124.3 ± 1.0	0.2877 ± 0.0019	138.8 ± 2.0
LH15-17	0.00239	2218 ± 24	1.202 ± 0.016	1394 ± 15	3.275 ± 0.027	140.9 ± 2.4
LH15-18	0.30001	221.1 ± 1.8	0.0034 ± 0.0006	139 ± 1.1	0.3217 ± 0.0026	138.7 ± 2.1
LH15-20	0.04062	4197 ± 57	0.0054 ± 0.0004	2638 ± 36	6.069 ± 0.036	137.9 ± 2.5

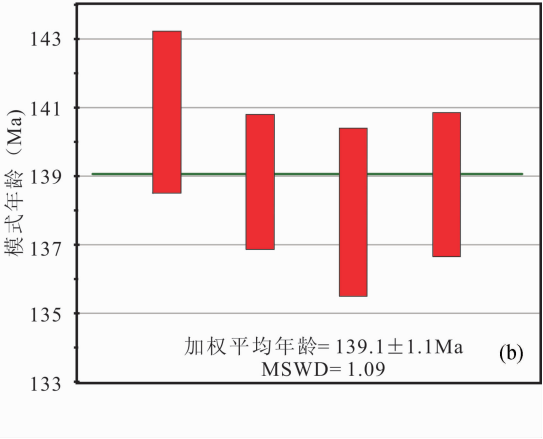
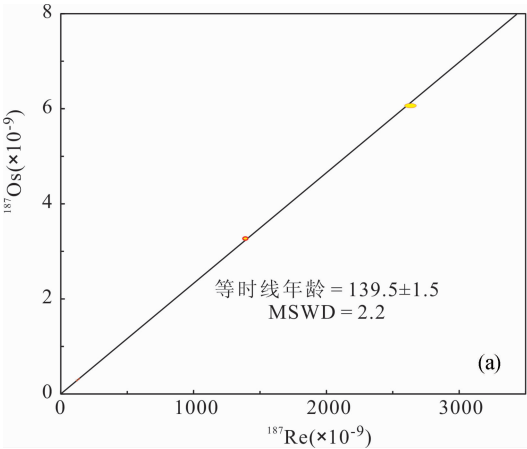


图 3 内蒙古莲花山铜矿床辉钼矿铼—钨同位素等时线图(a)与加权平均年龄图(b)
Fig. 3 Re-Os isochron (a) and weighted mean model ages (b) of molybdenite separates from Lianhuashan copper deposit, Inner Mongolia

3.2 矿石硫—铅同位素组成

用于硫同位素测试的 14 件样品以及用于铅同位素测试的 5 件样品均采自 29 号井的副井位置。测试的矿物主要为磁黄铁矿—黄铜矿—闪锌矿—方铅矿化阶段形成的黄铜矿、闪锌矿和方铅矿,多以石英—硫化物脉的形式产于花岗闪长岩中(图 2)。硫化物在双目镜下进行反复挑选,纯度达 99 %。硫同位素测试工作是在核工业地质研究院同位素实验室 MAT251EM 质谱计上完成的。标准物质的日常分析精度为 $\pm 0.2 \text{ ‰}$ 。铅同位素分析是在核工业北京地质研究院分析测试中心 MAT261 质谱计上完成的。实验室 Pb 空白本底为 0.1 ng。

硫同位素组成的测试结果见表 2。结果显示,莲花山矿区硫化物 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值分布于 -1.5 ‰ 至 5.0 ‰ 之间,平均值为 1.3 ‰ ,接近于 0 值,分布范围窄,具有显著的塔式分布特征,具有岩浆硫的来源特征(图 4)。从共生硫化物硫同位素的富集顺序来看,硫同位素基本达到平衡状态,但有部分样品没有

达到完全的平衡分馏状态。铅同位素组成测试结果见表 3。结果显示,莲花山矿区硫化物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分布于 18.104 至 18.492 之间, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分布于 15.427 至 15.769 之间, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分布于 37.815 至 38.570 之间,不同矿物的铅同位素不具有明显的差别(图 5)。

4 讨论

4.1 莲花山铜矿的形成时代及其意义

前人通过 LA-ICP-MS 方法对莲花山矿区的侵入岩开展了锆石铀—铅定年,测年结果显示,花岗闪长斑岩形成于三叠纪(如, ~ 237 Ma, Zhou Zhenhua et al., 2012; $249 \sim 240$ Ma, Wang Zhongyu et al., 2014)。由于花岗闪长斑岩与矿化具有密切的空间关系,因此这期花岗闪长斑岩的侵位年龄也曾被认为是成矿年龄(Zhou Zhenhua et al., 2012)。本次研究中,与黄铜矿具有共生关系的辉钼矿的铼—钨同位素年龄结果显示,成矿发生

表 2 内蒙古莲花山铜矿床中硫化物硫同位素数据

Table 2 Sulfur isotopic composition of sulfides from Lianhuashan deposit, Inner Mongolia

样号	样品	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}(\text{‰})$	样号	样品	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}(\text{‰})$
LH14-15-1	黄铜矿	0.2	Yd2W4-单 1 **	闪锌矿	1.1
LH14-15-2	闪锌矿	0.3	Yd2W5-单 2 **	闪锌矿	1
LH14-20	黄铜矿	−1.1	Yd2W6-单 1 **	黄铁矿	1.4
LH14-21	黄铜矿	−0.6	Yd2W7-单 1 **	辉钼矿	1.5
LH14-35	黄铜矿	0.4	Yd2W2-单 1 ***	黄铜矿	1.9
LH15-7	方铅矿	0.1	Yd2W3-单 1 ***	黄铜矿	2.3
LH15-9	黄铜矿	−1.5	Yd2W4-单 1 ***	黄铜矿	1.2
LH15-11	黄铁矿	2.6	Yd2W5-单 1 ***	黄铜矿	1.6
LH15-12	黄铜矿	1.8	Yd2W6-单 1 ***	黄铜矿	1.6
LH15-13	黄铜矿	2	3Yd1W1-单 2 ***	闪锌矿	1
LH15-14	黄铁矿	2.8	Yd2E8-单 1 ***	黄铜矿	1.9
LH15-29	黄铁矿	2.8	Yd2E8-单 1 ***	闪锌矿	1.1
LH15-30	黄铜矿	2.3	Yd2E8-单 2 ***	闪锌矿	1.3
LH15-31	黄铜矿	1.9	Yd2E8-单 3 ***	黄铜矿	0.9
5-5 *	黄铜矿	1	Yd2E9-单 1 ***	毒砂	1.2
5-8 *	黄铜矿	0.8	Yd2E11-单 1 ***	黄铜矿	1.3
36-3	黄铜矿	0.2	Yd2E13-单 1 ***	黄铜矿	1.5
36-5 *	斑铜矿	0.2	ZK62-单 1 ***	粗粒毒砂	2.1
36-7 *	黄铁矿	2.2	ZK62-单 2 ***	粗粒毒砂	2.7
40-2 *	黄铁矿	2.7	ZK62-单 3 ***	辉钼矿	1.5
40-6 *	黄铜矿	1.7	ZK62-单 4 ***	黄铁矿	1.4
40-7 *	毒砂	2.5	ZK62-单 5 ***	闪锌矿	3.3
40-8 *	黄铁矿	3.3	N-单硫 1 ***	黄铁矿	1.9
TK-01 *	黄铜矿	1	N-单硫 2 ***	黄铁矿	2.3
TK-02-A *	黄铁矿	0.6	N-单硫 3 ***	辉钼矿	1
TK-02-B *	黄铜矿	1	N-单硫 4 ***	黄铁矿	0.74
TK-03-A *	黄铁矿	5	dy184/1526 ***	闪锌矿	0.2
TK-03-B *	黄铜矿	1.2	dy118/1528 ***	方铅矿	−0.7
TK-05 *	黄铜矿	0.9	L13T2035/1103 ***	黄铜矿	1.4
TK-06 *	黄铜矿	0.6	dy1/0736 ***	毒砂	1.9
Yd2W3-单 2 **	黄铜矿	1.6	dzn145/0737 ***	闪锌矿	−1.4

注: * 样品引自 Li Hao et al. (2016), ** 样品引自 Xiao Bingjian et al. (2008), *** 样品引自内蒙古自治区突泉县莲花山矿区铜银矿床初勘探报告, 1981 。

于~139 Ma,为早白垩世,并非前人所认为的三叠纪。大兴安岭中南段地区的中生代锡—钨—银多金属成矿作用非常强烈。从成矿时代上看,少数矿化发生于三叠纪,如白音诺尔矿床,但该矿床在三叠纪形成以后又叠加了早白垩世的矿化(Jiang Sihong et al., 2017);部分形成于中—晚侏罗世,如双尖子山铅锌银多金属矿床形成于~165 Ma(Liu Chunhua et al., 2016),布敦化铜多金属矿床形成于~150 Ma(Ouyang Hegen et al., 2014);大部分矿床集中形成于早白垩世,如大井锡—铅—锌—银多金属矿床与成矿有关的岩浆活动就位于~144 Ma(Jiang Sihong et al., 2012),边家大院锡—铅—锌—银成矿系统与成矿有关的正长花岗岩的侵位年龄为 143~140 Ma(Wang Xilong et al., 2014; Ruan Banxiao et al., 2015; Gu Yuchao et al., 2017),白音查干锡—铅—锌—银成矿系统与成矿有关的斑岩

体的侵位年龄为~141 Ma(Liu Xin et al., 2017),维拉斯托—拜仁达坝锡—钨—铅—锌—银多金属成矿系统成矿岩体侵位年龄在~138 Ma,辉钼矿铼—钼年代学研究显示成矿年代为~135 Ma(Liu Yifei et al., 2016),浩布高铁锌矽卡岩矿床辉钼矿铼—钼年代学研究显示成矿年代为~142 Ma(Liu Yuan et al., 2017),道伦达坝铜钨锡多金属矿床锡石铀—铅谐和年龄在 137~135 Ma 之间(Chen Gongzheng et al., 2018),毛登锡多金属矿床斑岩侵位年龄为~139 Ma(Zhang Xuebin et al., 2014),白音诺尔矿床在三叠纪形成以后又叠加了早白垩世的矿化(Jiang Sihong et al., 2017),黄岗梁铁锡矿床铼—钼年代学研究显示成矿年代为~135 Ma(Zhai Degao et al., 2014)。从莲花山矿床的成矿时代(~139 Ma)来看,与上述早白垩世锡—钨—银多金属矿化的时代是一致的。由于这个时期锡—钨

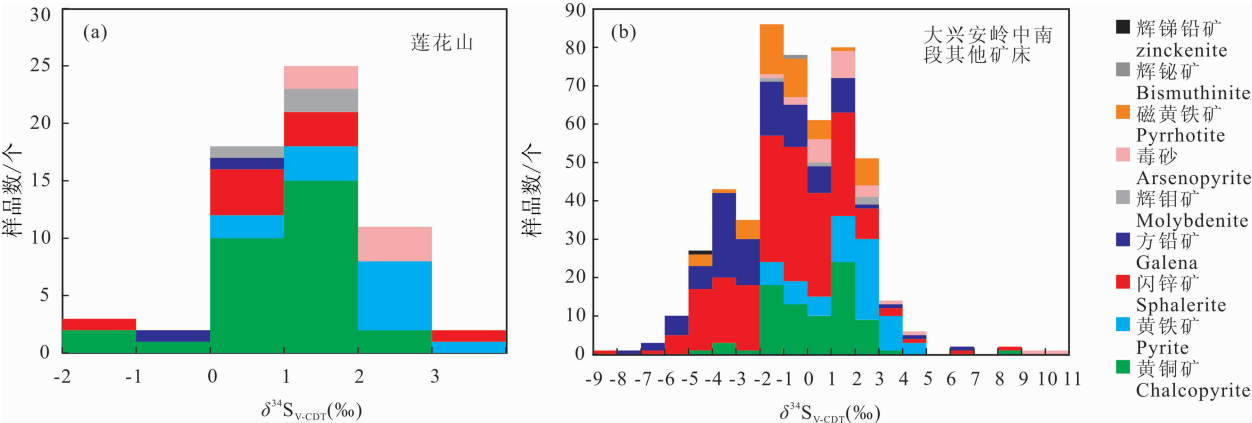


图 4 内蒙古莲花山铜矿床中硫化物硫同位素组成直方图

Fig. 4 Sulfur isotopic composition histogram of sulfides from Lianhuashan deposit, Inner Mongolia

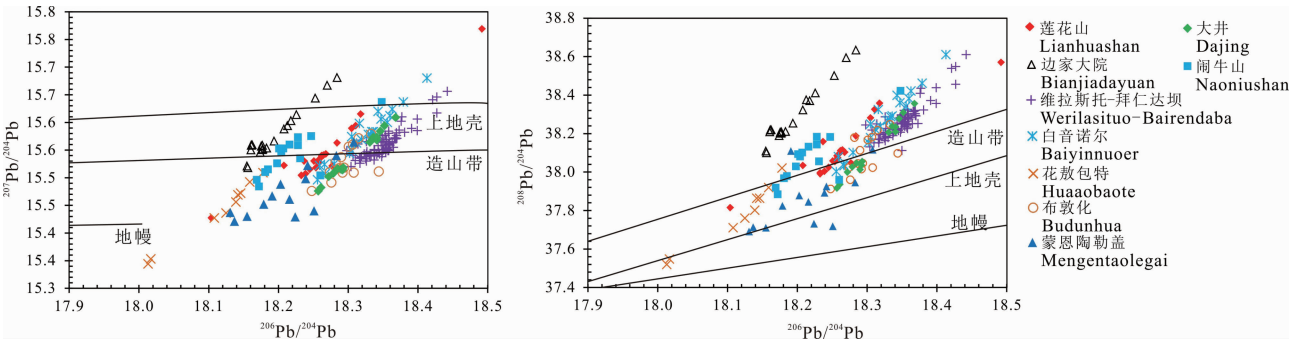


图 5 大兴安岭中南段多金属矿床矿石铅同位素组成(据 Zartman et al. 1981,1987 修改)

Fig. 5 Lead isotopic composition of sulfides from deposits in middle-southern Great Xing'an Range (modified after Zartman et al. ,1981,1987)

一银多金属矿化在大兴安岭地区具有非常广的分布范围,显示莲花山铜矿床可能与这一期矿床的形成具有类似的成因。

尽管大量的研究,尤其是同位素地质学的研究显示,这类矿床与岩浆活动具有密切的成因联系(Chen Xiang et al. , 1999; Chu Xuelel et al. , 2002a, 2002b; Zhang Qian et al. , 2002; Zhu Xiaoqing et al. , 2004; Jiang Sihong et al. , 2010; Wang Xilong et al. , 2014; Ouyang Hegen, et al. , 2015; Ruan Banxiao et al. , 2015; Liu Chunhua et al. , 2016; Liu Yifei et al. , 2016; Jiang Sihong, et al. , 2017; Liu Yuan et al. , 2017),但从莲花山矿区前人已发表的年代学和地球化学数据判断(Xiao Bingjian et al. , 2008; Zhou Zhenhua et al. , 2012; Wang Zhongyu et al. , 2014),成矿岩体在矿区范围内并未出露或有效揭露。

4.2 莲花山铜矿的成因类型

本次研究取得的硫同位素组成显示具有塔式分布的特征,为岩浆来源硫的特征。这与大兴安岭中

南段产出的其他锡—钨—铜—铅—锌—银矿床非常类似(图 4),如大井矿床(Feng Jianzhong et al. , 1994; Liu Wei et al. , 2002)、维拉斯托—拜仁达坝(Jiang Sihong et al. , 2010; Ouyang Hegen et al. , 2014; Liu Ruilin et al. , 2018)、布敦化(Wu Xinli et al. , 2012)、花敖包特(Chen Yongqing et al. , 2014)、边家大院(Wang Xilong et al. , 2014; Ruan Banxiao et al. , 2015)、白音诺尔(Jiang Sihong et al. , 2017)、浩布高(Liu Yuan et al. , 2017)。这些矿床具有较为集中的空间分布特征和相似的形成时代(Ouyang Hegen et al. , 2013)。因此,这种较窄的硫同位素分布特征同时也显示硫来源于深部较为均一的深源岩浆源区(Chu Xuelel et al. , 2002; Liu Hong et al. , 2018),受到地壳上部围岩混染的程度较小。由硫化物硫同位素估计,热液中硫同位素组成大概平均为+1 ‰,与地幔硫的来源特征非常接近(Eldridge et al. , 1991)。

莲花山矿床硫化物的铅同位素具有显著的线性关系,部分样品可能受到不同围岩的混染,有所偏移

表 3 内蒙古莲花山铜矿床中硫化物铅同位素数据
Table 3 Lead isotopic composition of sulfides from
Lianhuashan deposit, Inner Mongolia

样号	样品名称	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb
LH14-15-1	黄铜矿	18.262	15.54	38.111
LH14-15-2	闪锌矿	18.262	15.538	38.102
LH14-20	黄铜矿	18.208	15.522	38.034
LH14-21	黄铜矿	18.268	15.543	38.102
LH14-35	黄铜矿	18.311	15.594	38.325
连 36-5 *	黄铜矿	18.492	15.769	38.570
8101 *	方铅矿	18.237	15.530	38.158
长 8102 *	方铅矿	18.104	15.427	37.815
5-5 *	黄铜矿	18.257	15.531	38.084
5-8 *	黄铜矿	18.245	15.515	38.024
36-3 *	黄铜矿	18.305	15.589	38.281
36-5 *	斑铜矿	18.254	15.518	38.054
36-7 *	黄铁矿	18.258	15.526	38.073
40-2 *	黄铁矿	18.251	15.530	38.057
40-6 *	黄铜矿	18.318	15.615	38.357
40-7 *	毒砂	18.233	15.504	37.996
TK-02-A *	黄铁矿	18.239	15.507	38.004
TK-02-B *	黄铜矿	18.265	15.541	38.115
TK-03-A *	黄铁矿	18.233	15.504	37.990
TK-03-B *	黄铜矿	18.284	15.563	38.187
TK-05 *	黄铜矿	18.264	15.540	38.112
TK-06 *	黄铜矿	18.277	15.521	38.047

注: * 数据来源于 Li Hao et al. (2016)。

(图 5)。这种铅同位素的分布特征与大兴安岭中南段产出的其他多金属矿床的铅同位素具有相似的特征,如大井(Chu Xuelei et al., 2002)、孟恩陶勒盖(Zhang Qian et al., 2002)、维拉斯托—拜仁达坝(Jiang Sihong et al., 2010;Ouyang Hegen et al., 2014;Liu Ruilin et al., 2018)、布敦化(Wu Xinli et al., 2012)、花敖包特(Chen Yongqing et al., 2014)、闹牛山(He Haigen et al., 2017)、白音诺尔(Jiang Sihong et al., 2017)、边家大院(Wang Xilong et al., 2014)。由于铅同位素组成在成矿作用过程中不发生同位素的分馏,并代表了硫化物形成之时的铅同位素组成,因此这种线性关系是成矿作用过程中两个成矿端元混合的结果(Liu Yifei et al., 2012)。其中有一个放射性成因铅含量较高的端元(²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 以及 ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 含量较高),另外一个放射性成因铅含量较低的端元(²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 以及 ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 含量较低)。这些多金属矿床铅同位素总体上分布于一个扇形区域,它们放射性成因铅含量较低的端元,具有趋近于相似的比值(图 5)。这个特征显示这些矿床可能具有一个相似的低放射性成因铅的端元,在成矿岩浆就位过程中,受到不同的高放射性成因铅端元的混染。浅部高放射性成因

铅的不同,使得不同矿床表现为不同的线性特征,从而使得不同矿床铅投影于一个扇形区域。这种铅同位素特征也显示,大兴安岭中南段产出的多金属矿床,可能具有一个类似的低放射性成因铅的源区,构成了成矿岩浆形成的初始源区。

这种铅同位素组成也显示,虽然大兴安岭中南段地区的多金属矿床含有不同的金属元素组合,如部分矿床富铅—锌—银,部分矿床富铜,部分矿床富锡—钨,但它们很可能具有相似的成因,它们在同一个矿集区内构成了一个由高温向低温逐渐演化的锡—钨—银多金属成矿系统,如维拉斯托和拜仁达坝成矿系统(Liu Yifei et al., 2014)。由此可见,莲花山铜矿床虽然以铜为主,但是很可能只是一个锡—钨—铜—锌—铅—银成矿系统的一个矿化端元而已。

大兴安岭中南段产出的这类锡—钨—银多金属成矿系统,其成矿作用主要与大规模的高分异型花岗岩晚期分异的小岩株有直接的成因联系,如维拉斯托—拜仁达坝成矿系统(Liu Yifei et al., 2014)和白音查干成矿系统(Liu Xin et al., 2017)。虽然在莲花山矿集区暂时没有出露或者揭露与成矿有关的高分异花岗岩株以及岩基,但是从莲花山矿床硫—铅同位素与大兴安岭中南段其他锡—钨—银多金属成矿系统对比显示,莲花山矿床可能属于高分异花岗岩有关的岩浆热液矿床。

4.3 与俯冲环境下斑岩铜矿床的对比

由于大兴安岭中南段地区产出的部分矿床具有浸染状的矿化特征,部分矿化也与斑状似斑状侵入体有密切的空间联系,例如,本处研究的莲花山矿床,部分矿床也被文献中称为斑岩型矿床(Zhou Zhenhua et al., 2012)。同时,大兴安岭中南段赋存有大量的含铜矿床,这类矿床与区域内大规模多阶段的高分异型花岗岩有关,如维拉斯托锌铜矿(Liu Yifei et al., 2016)。因此有必要将该类“斑岩型”矿化与俯冲环境形成的斑岩型铜矿床进行对比,以揭示它们之间的共性与差异。由于俯冲环境下斑岩铜矿成矿岩浆具有相对较低的分异程度($\text{SiO}_2 < 65\%$,如多宝山铜矿床,Wu Guang et al., 2015),铼作为相容元素,其在岩浆中的含量将受到岩浆分异过程的显著影响。因此,辉钼矿中的铼的含量对于判断矿床的成因具有重要的意义(Mao Jingwen et al., 1999; Stein, 2001; Zheng Wei et al., 2018)。可以预期的是,分异程度较低的岩浆中将含有相对较高的铼,而分异程度较高的岩浆中将含有

较低的铼,同时,与分异程度较低的岩浆中出溶流体有关的辉钼矿也将含有较高的铼,而与分异程度较高的岩浆中出溶流体有关的辉钼矿也将含有较低的铼。如多宝山斑岩铜矿床辉钼矿中铼的含量在 $121.7 \times 10^{-6} \sim 1159 \times 10^{-6}$ 之间,平均为 722×10^{-6} (Zhao Yiming et al., 1997; Liu Jun et al., 2012; Zeng Qingdong et al., 2014), 乌奴格吐山斑岩铜矿中辉钼矿中铼的含量在 $121 \times 10^{-6} \sim 299 \times 10^{-6}$ 之间,平均为 221×10^{-6} (Tan Gang et al., 2010), 然而, 莲花山铜矿中辉钼矿铼的含量在 $198 \times 10^{-6} \sim 4197 \times 10^{-9}$ 之间,平均为 1078×10^{-9} 。这个含量与维拉斯托-拜仁达坝成矿系统中辉钼矿的铼含量相似($55 \times 10^{-9} \sim 686 \times 10^{-9}$, 平均 259×10^{-9} , Liu Yifei et al., 2016; Zhai Degao et al., 2016), 低于俯冲环境有关斑岩铜矿床辉钼矿中铼的含量 2 个数量级。因此辉钼矿中铼含量与大兴安岭地区斑岩铜矿进行对比, 显示莲花山铜矿床成矿岩浆所经历的分异过程显著高于俯冲环境下斑岩铜矿床的成矿岩浆, 其形成过程与高分异花岗岩有成因联系, 并非是俯冲环境下所形成的相对低分异的斑岩铜矿化的成矿岩浆。

由于铜元素在成矿过程中兼具相容元素与亲流体元素的地球化学特征, 所以, 铜矿化可以形成与基性-超基性有关的铜镍硫化物矿床, 也可以形成斑岩型铜矿化。在大兴安岭中南段产出的部分铜矿床虽然也具有斑岩型矿化的一些地质特征, 如有浸染状、细脉浸染状的特征, 但是由于其成矿岩浆经历了强烈的结晶分异过程, 因此大量的铜可能因此在岩浆演化过程中被结晶分异过程所分离, 这也是在大兴安岭中南段地区发现的中生代铜矿化通常不具有较大规模的原因(一般矿床的铜金属量不超过数万吨)。这个结果也显示, 大兴安岭中南段地区虽然有一些中生代的铜矿化具有浸染状和细脉浸染状特征, 但是它们的成矿岩浆具有高分异的特征, 因此, 其矿化规模很难与俯冲环境下的斑岩铜矿床相比。然而, 这类矿化通常指示在矿集区内可能存在与高分异岩浆活动有关的锡-钨多金属矿化, 因此, 这个地区寻找锡-钨多金属矿化相比斑岩型铜矿床反而具有更大的潜力。

5 结论

(1) 莲花山铜矿床辉钼矿铼-钨加权平均年龄结果显示, 矿床形成于 139.1 ± 1.1 Ma, 属于早白垩世, 并非前人所说的三叠纪。

(2) 莲花山铜矿床硫化物的硫同位素组成分布于 -1.5‰ 至 5.0‰ 之间, 具有塔式分布特征, 与大兴安岭中南段地区产出的其他锡-钨-银多金属矿床中硫化物的硫同位素组成非常类似, 显示硫来源于深部岩浆, 受到浅部硫源混染程度较小。

(3) 莲花山铜矿床硫化物铅同位素组成具有显著的线性排列特征, 显示成矿作用过程中成矿物质经历了两端元的混合, 包括一个低放射性成因铅端元和一个高放射性成因铅端元。这种铅同位素特征与大兴安岭中南段产出的其他多金属矿床非常相似, 大部分的矿床的硫化物铅同位素分布于一个扇形区域, 显示它们可能含有一个相似的低放射性成因铅端元, 并受到浅部不同的高放射性成因铅端元的混染。

(4) 莲花山铜矿床辉钼矿中铼的含量平均为 1078×10^{-9} , 显著低于兴蒙造山带俯冲环境下斑岩铜矿床中辉钼矿铼的含量, 与兴蒙造山带中高分异花岗岩有关的锡-钨-银多金属矿床中辉钼矿铼的含量相似, 显示莲花山铜矿床的形成可能与高分异花岗岩岩浆活动有关, 属于高分异花岗岩晚期岩浆-热液作用有关的铜矿化。

(5) 莲花山铜矿床指示区域内可能具有寻找高分异花岗岩型深成高温锡-钨矿化的潜力。

注 释

① 吉林省地质局. 1981. 内蒙古自治区突泉县莲花山矿区铜银矿床初期勘探报告.

References

- Chen Xiang, Xiao Li. 1999. Geochemical study of the Erentaolegai Ag deposit, Inner Mongolia. *Geology and Resources*, 8(3): 171~178(in Chinese with English abstract).
- Chu Xuelei, Huo Weiguo, Zhang Wei. 2002a. S, C and Pb isotopes and sources of ore-forming materials in the Dajing Cu deposit in Linxi, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 566~574(in Chinese with English abstract).
- Chu Xuelei, Sun Min, Zhou Meifu. 2002b. Distribution and material source of platinum group elements in ore of Dajing Cu deposit in Linxi, Inner Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 47(6): 457~461(in Chinese with English abstract).
- Chen Yongqing, Zhou Ding, Guo Lingfen. 2014. Discussion on the genesis of the Huaaobaote Pb-Zn-Ag deposit in Inner Mongolia: Evidence of fluid inclusions and S, Pb, H and O isotope. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(5): 1478~1491(in Chinese with English abstract).
- Chen Gongzheng, Wu Guang, Li Tiegang, Liu Ruilin, Wu Liwen, Zhang Peichun, Zhang Wei, Chen Yuchuan. 2018. LA-ICP-MS zircon and cassiterite U-Pb ages and their geological significance in the Daolundaba Cu-W-Sn deposit, Inner Mongolia. *Mineral Deposits*, 37(2): 225~245(in Chinese with English abstract).
- Du Andao, He Hongwei. 1994. Study on the determination method

- of geological age of Re-Os isotope of molybdenite. *Acta Geologica Sinica*, 68(4): 339~347 (in Chinese with English abstract).
- Du Andao, Wu Shuqi, Sun Dezhong, Wang Shuxian, Qu Wenjun, Markey R, Stain H, Morgan J, Malinovskiv D. 2004. Preparation and Certification of Re-Os Dating Reference Materials: Molybdenites HLP and JDC. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(1): 41~52.
- Eldridge C S, Compston W, Williams I S, Harris J, Bristow J. 1991. Isotope evidence for the involvement of recycled sediments in diamond formation. *Nature*, 353(6345): 649~653.
- Feng Jianzhong, Ai Xia, Wu Yubin, Liu Guoping. 1994. Stable isotope geochemical characteristics of the Dajing polymetallic deposit in Inner Mongolia. *Jilin Geology*, 13(3): 60~66 (in Chinese with English abstract).
- Gu Alei. 2016. Metallogenic geological process and metallogenic model of the epithermal-porphyry copper polymetallic ore-forming system in the central-eastern Daxing'anling. *Jilin University* (in Chinese with English abstract).
- Gu Yuchao, Chen Renyi, Jia Bin, Song Wanbing, Yu Changtao, Yan Nan. 2017. Study on the chronology and formation environment of deep syenite granite in the Pb-Zn-Ag deposit of the Bianjiadayuan, Inner Mongolia. *Geology in China*, 44(1): 101~117 (in Chinese with English abstract).
- He Haigen, Yang Yongqiang, Wu Liwen, Qian Mengxuan, Niu Jifang, Li Hao, Liu Huaijin, Sun Yinqiang. 2017. S-Pb isotope geochemical characteristics and ore-forming material sources of the Naoniushan Cu-Au deposit in the middle section of the Greater Xing'an Mountains. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 32(1): 24~32 (in Chinese with English abstract).
- Jahn B M, Wu Fuyuan, Chen Bin. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences*, 91(1-2): 181~193.
- Jiang Sihong, Nie Fengjun, Liu Yifei, Yun Fei. 2010. S and Pb isotope studies of Bairendaba and Weilasituo Ag deposit in Inner Mongolia. *Mineral Deposits*, 29(1): 101~112 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Sihong, Liang Qingling, Liu Yifei, Liu Wei. 2012. Zircon U-Pb age of magmatic rocks in the Dajing mining area and its surrounding areas in Inner Mongolia and its constraints on metallogenic time. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 495~513 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Sihong, Chen Chunliang, Leon B, Liu Yuan, Han Ning, Kang Huan, Wang Zehai. 2017. Two mineralization events in the Baiyinnuoer Zn-Pb deposit in Inner Mongolia, China: Evidence from field observations, S-Pb isotopic compositions and U-Pb zircon ages. *Journal of Asian Earth Sciences*, 144: 339~367.
- Liu Wei, Li Xinjun, Tan Jun. 2002. Fluid mixing of the Dajing Cu-Sn-Ag-Pb-Zn deposit in Inner Mongolia—Fluid inclusions and stable isotope evidence. *Chinese Science: Earth Science*, 32(5): 405~414 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. User manual for Isoplot 3.1, A geochronological toolkit for Microsoft Excel. *Brekeley: Geochronology Center Special Publication*, 4: 472~504.
- Liu Jun, Wu Guang, Li Yuan, Zhu Mingtian, Zhong Wei. 2012. Re-Os sulfide (chalcopyrite, pyrite and molybdenite) systematics and fluid inclusion study of the Duobaoshan porphyry Cu (Mo) deposit, Heilongjiang Province, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49(3): 300~312.
- Liu Yifei, Nie Fengjun, Jiang Sihong, Liu Wei, Liang Qingling. 2012. The Pb-Zn-Ag deposit of Bairendaba, Inner Mongolia: Elemental zoning and its genesis. *Journal of Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(4): 1055~1068 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yifei, Fan Zhiyong, Jiang Hucan, Nie Fengjun, Jiang Sihong, Ding Chengwu, Wang Fengxiang. 2014. Study on porphyry-hydrothermal vein mineralization system of Weilasituo-Bairendaba Dam, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2373~2385 (in Chinese with English abstract).
- Li Hao, Yang Yongqiang, He Haigen, Wang Jianwei, Niu Jifang, Hua Lei, Xie Jin. 2016. S and Pb isotopic compositions and sources of ore-forming materials in the Lianhuashan Cu-Ag deposit in the central and southern Daxing'anling. *Geological Survey and Research*, 39(1): 31~38 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chunhua, Leon B, Wang Fengxiang. 2016. Isotopic analysis of the super-large Shuangjianzishan Pb-Zn-Ag deposit in Inner Mongolia, China: Constraints on magmatism, metallogenesis, and tectonic setting. *Ore Geology Reviews*, 75: 252~267.
- Liu Yifei, Jiang Sihong, Leon B. 2016. The genesis of metal zonation in the Weilasituo and Bairendaba Ag-Zn-Pb-Cu-(Sn-W) deposits in the shallow part of a porphyry Sn-W-Rb system, Inner Mongolia, China. *Ore Geology Reviews*, 75 (Part 2): 150~173.
- Liu Yifei, Jiang Sihong. 2017. The molybdenum mineralization in the northern margin of the Xingmeng orogenic belt and the North China plate: Progress, laws, problems and genesis. *Mineral Deposits*, 36(3): 557~594 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yuan, Jiang Sihong, Leon B, Han Ning, Chen Chunliang, Kang Huan. 2017. Isotopic (C-O-S) geochemistry and Re-Os geochronology of the Haobugao Zn - Fe deposit in Inner Mongolia, NE China. *Ore Geology Reviews*, 82: 130~147.
- Liu Xin, Li Xuegang, Zhu Xinyou, Sun Yalin, Jiang Yiyuan, Jiang Binbin, Wang Hai, Cheng Xiyin. 2017. Study on mineralization of Baiyinchagan tin polymetallic deposit in Inner Mongolia II: Chronology, geochemical characteristics and geological significance of ore-forming granite porphyry. *Mineral Exploration*, 8(6): 981~996 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Li Guangming, Huang Hanxiao, Xiao Wangfeng, Yan Guoqiang, Ma Dongfang, Zhang Hai, Zhang Hong. 2018. Sources of ore-forming materials in the Shangxu orogenic gold deposit, northern Xizang (Tibet): Constraints from C, S and Pb isotopes. *Geological Review*, 64(5): 1285~1301 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ruilin, Wu Guang, Chen Zhengyi, Li Tiegang, Jiang Yi, Wu Liwen, Zhang Peichun, Zhang Wei, Chen Yuchuan. 2018. Fluid inclusions and isotopic characteristics of the Weilasituo tin polymetallic deposit in the southern Daxing'anling area. *Mineral Deposits*, 37(2): 199~224 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Zhang Zhaochong, Zhang Zuoheng, Du Andao. 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(11~12): 1815~1818.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, Li Xiaofeng, Wang Yitian, Zhang Changqing, Li Yongfeng. 2005. The period of the Mesozoic large-scale mineralization in northern China and its geodynamic background. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169~188 (in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Jiang Sihong, Zhang Yi, Liu Yan, Hu Peng. 2004. Geological characteristics and genesis of porphyry copper deposits in the border and adjacent areas of China and Mongolia. *Mineral Deposits*, 23(2): 176~189 (in Chinese with English abstract).

- Ouyang Hegen, Mao Jingwen, Santosh M, Wu Yue, Hou Lin, Wang Xifei. 2014. The Early Cretaceous Weilasituo Zn-Cu-Ag vein deposit in the southern Great Xing'an Range, northeast China: Fluid inclusions, H, O, S, Pb isotope geochemistry and genetic implications. *Ore Geology Reviews*, 56: 503 ~ 515.
- Ouyang Hegen, Wu Xinli, Mao Jingwen, Su Huiming, Santosh M, Zhou Zhenhua, Li Chao. 2014. The nature and timing of ore formation in the Budunhua copper deposit, southern great Xing'an range: Evidence from geology, fluid inclusions, and U-Pb and Re-Os geochronology. *Acta Geologica Sinica*, 63 (s2): 238 ~ 251.
- Pan Xiaofei, Guo Lijun, Wang Shuo, Xue Huaimin, Hou Zengqian, Tong Ying, Li Zhiming. 2009. Discussion on the Ar/Ar age of muscovite in the Weilasituo Cu-Zn deposit, Inner Mongolia. *Acta Petrologica ET Mineralogica*, 28 (5): 473 ~ 479 (in Chinese with English abstract).
- Ruan Banxiao, Lv Xinbiao, Yang Wu, Liu Shentai, Yu Yingmin. 2015. Geology, geochemistry and fluid inclusions of the Bianjiadayuan Pb-Zn-Ag deposit, Inner Mongolia, NE China; Implications for tectonic setting and metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 71: 121 ~ 137.
- Shirey S B, Walker R J. 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis. *Analytical Chemistry*, 67: 2136 ~ 2141.
- Smoliar M I, Walker R J, Morgan J W. 1996. Re-Os Ages of Group IIA, IIIA, IVA, and IVB Iron Meteorites. *Science*, 271 (5252): 1099 ~ 1102.
- Song Changchun. 1996. Study on the statistical zoning of the alteration of the Lianhuashan Cu-Ag deposit in Inner Mongolia. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 15 (3): 182 ~ 184 (in Chinese with English abstract).
- Selby D, Creaser R A. 2001. Re-Os geochronology and systematics in molybdenite from the Endako porphyry molybdenum deposit, British Columbia, Canada. *Economic Geology*, 96: 197 ~ 204.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Hannah J L, Schersten A. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works. *Terra Nova*, 13 (6): 479 ~ 486.
- Tan Gang, Chang Guoxiong, Qi Hongquan, Li Jinwen, Zhang Dequan, Yang Yucheng, Zhang Bin, Xiang Anping, Dong Yingjun. 2010. The Re-Os isotope dating of the molybdenum deposit in the Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia, and its geological significance. *Mineral Deposits*, 29 (s1): 506 ~ 508 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xinli, Mao Jingwen, Zhou Zhenhua, Ouyang Hegen. 2012. H-O-S-Pb isotope characteristics and metallogenic indication of Budunhua Cu deposit in the central and southern part of Daxing'anling. *Geology in China*, 39 (6): 1812 ~ 1829 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xilong, Liu Jiajun, Zhai Degao, Wang Jianping, Zhang Qibin, Zhang Anli. 2014. Isotope geochemical characteristics and sources of ore-forming materials of the Bianjiadayuan Ag polymetallic deposit in Linxi, Inner Mongolia. *Geology in China*, 41 (4): 1288 ~ 1303 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xilong, Liu Jiajun, Zhai Degao, Yang Yongqiang, Wang Jianping, Zhang Qibin, Zhang Anli. 2014. U-Pb geochronology, petrochemical characteristics and geological significance of quartz porphyry in the Bianjiadayuan mining area, Inner Mongolia. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33 (5): 654 ~ 665 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhongyu, Sun Jinggui, Bai Lingan, Chai Peng, Gu Alei, Zhao Keqiang, Li Yujie. 2014. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of granodiorite porphyry in Lianhuashan Cu deposit, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 33 (9): 1320 ~ 1325 (in Chinese with English abstract).
- Wu Guang, Chen Yuchuan, Sun Fengyue, Liu Jun, Wang Guorui, Xu Bei. 2015. Geochronology, geochemistry, and Sr-Nd-Hf isotopes of the early Paleozoic igneous rocks in the Duobaoshan area, NE China, and their geological significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 229 ~ 250.
- Xiao Bingjian, Wang Weide, Zhang Qiang, Li Xiandong, Wang Zhenliang, Liu Tong, Hu Lailong. 2008. Discussion on metallogenic geological background of Lianhuashan Cu-Ag deposit in Tuquan, Inner Mongolia. *Geology and Exploration*, 44 (1): 26 ~ 30 (in Chinese with English abstract).
- Zartman R E, Doe B R. 1981. Plumbotectonics—The model. *Tectonophysics*, 75 (1): 135 ~ 162.
- Zartman R E, Haines S M. 1987. The plumbotectonic model for Pb isotopic systematics among major terrestrial reservoirs—A case for bi-directional transport. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52 (6): 1327 ~ 1339.
- Zhao Yiming, Bi Chengsi, Zou Xiaohu, Sun Yali, Du Andao, Zhao Yuming. 1997. The Re-Os isotopic age of molybdenite in the Duobaoshan and Tongshan large porphyry Cu (-Mo) deposits in Heilongjiang. *Acta Geoscientia Sinica*, 27 (1): 61 ~ 67 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qian, Zhan Xinzhi, Zhai Yuzhuo, Shao Shuxun, Liu Zhihao. 2002. Pb isotope composition and source of ore Pb in the Mengentaolegai Ag-Pb-Zn-In deposit, Inner Mongolia. *Geochimica*, 31 (3): 253 ~ 258 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiaoping, Zhang Qian, He Yuliang, Shao Shuxun. 2004. Study on the genesis of the Mengentaolegai Ag-Pb-Zn-In deposit in Inner Mongolia. *Mineral Deposits*, 23 (1): 52 ~ 60 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhenhua, Wu Xinli, Ouyang Hegen. 2012. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating and Hf isotope study and its geological significance of oblique granite porphyry in Lianhuashan Cu-Ag deposit, Inner Mongolia. *Geology in China*, 39 (6): 1472 ~ 1485 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xuebin, Zhou Changhong, Jia Xiaoping, Wu Rongze, Xu Cui, Yang Ju, Wang Mingming, Fan Chao. 2014. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemical characteristics of the fragmented lava in Maodeng, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 33 (7): 974 ~ 983 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Qingdong, Liu Jianming, Chu Shaoxiong, Wang Yongbin, Sun Yan, Duan Xiaoxia, Zhou Lingli, Qu Wenjun. 2014. Re-Os and U-Pb geochronology of the Duobaoshan porphyry Cu-Mo (-Au) deposit, northeast China, and its geological significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79 (2): 895 ~ 909.
- Zhai Degao, Liu Jiajun, Zhang Hongyu, Yao Meijuan, Wang Jianping, Yang Yongqiang. 2014. S-Pb isotopic geochemistry, U-Pb and Re-Os geochronology of the Huanggangliang Fe-Sn deposit, Inner Mongolia, NE China. *Ore Geology Reviews*, 59 (6): 109 ~ 122.
- Zhai Degao, Liu Jiajun, Li Junming, Zhang Mei, Li Boyang, Fu Xu, Jiang Hucan, Ma Lijun, Qi Liang. 2016. Diagenesis, metallogenic age and geological significance of the Weilasituo porphyry tin deposit in Inner Mongolia. *Deposit Geology*, 35 (5): 1011 ~ 1022 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Wei, Ouyang Zhixia, Chen Youliang, Zhao Haijie, Chu Kelei, Wu Xiaodong, Yang Shenghu, Wang Rupeng, Liu Donghong. 2018. Re-Os isotopic age and source of ore-forming materials of molybdenum from the Qiguling copper-tungsten-molybdenum polymetallic deposit in the southern segment of the Qinhang metallogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 92 (1): 94 ~ 106 (in Chinese with English abstract).

Chinese with English abstract).

参 考 文 献

陈祥,肖力.1999.内蒙古额仁陶勒盖银矿床地球化学研究.地质与资源,8(3):171~178.

储雪蕾,霍卫国,张巽.2002.内蒙古林西县大井铜多金属矿床的硫、碳和铅同位素及成矿物质来源.岩石学报,18(4):566~574.

储雪蕾,孙敏,周美夫.2002.内蒙古林西大井铜多金属矿床矿石的铂族元素分布及物质来源.科学通报,47(6):457~461.

陈永清,周顶,郭令芬.2014.内蒙古花敖包特铅锌银多金属矿床成因探讨:流体包裹体及硫、铅、氢、氧同位素证据.吉林大学学报(地球科学版),44(5):1478~1491.

陈公正,武广,李铁刚,刘瑞麟,武利文,章培春,张彤,陈毓川.2018.内蒙古道伦达坝铜钨锡矿床 LA-ICP-MS 锆石和锡石 U-Pb 年龄及其地质意义.矿床地质,37(2):225~245.

杜安道,何红蓼.1994.辉钼矿的铼-钼同位素地质年龄测定方法研究.地质学报,68(4):339~347.

冯建忠,艾霞,吴俞斌,刘国平.1994.内蒙大井多金属矿床稳定同位素地球化学特征.吉林地质,13(3):60~66.

古阿雷.2016.大兴安岭中东部浅成热液-一斑岩铜多金属成矿系统成矿地质过程与成矿模式.吉林大学.

顾玉超,陈仁义,贾斌,宋万兵,余昌涛,鞠楠.2017.内蒙古边家大院铅锌银矿床深部正花岗岩年代学与形成环境研究.中国地质,44(1):101~117.

贺海根,杨永强,武利文,钱梦轩,牛吉芳,李浩,刘怀金,孙引强.2017.大兴安岭中段闹牛山铜金矿床的硫铅同位素地球化学特征与成矿物质来源.地质找矿论丛,32(1):24~32.

江思宏,聂凤军,刘翼飞,云飞.2010.内蒙古拜仁达坝及维拉斯托银多金属矿床的硫和铅同位素研究.矿床地质,29(1):101~112.

江思宏,梁清玲,刘翼飞,刘妍.2012.内蒙古大井矿区及外围岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及其对成矿时间的约束.岩石学报,28(2):495~513.

李浩,杨永强,贺海根,王建伟,牛吉芳,华磊,谢进.2016.大兴安岭中南段莲花山铜银矿床硫、铅同位素组成特征及成矿物质来源.地质调查与研究,39(1):31~38.

刘洪,李光明,黄瀚霄,肖万峰,闫国强,马东方,张海,张红.2018.藏北商旭造山型金矿床成矿物质来源探讨:C、S、Pb 同位素证据.地质论评,64(5):1285~1301.

刘伟,李新俊,谭骏.2002.内蒙古大井铜-锡-银-铅-锌矿床的流体混合作用——流体包裹体和稳定同位素证据.中国科学:地球科学,32(5):405~414.

刘翼飞,聂凤军,江思宏,刘妍,梁清玲.2012.内蒙古拜仁达坝铅-锌-银矿床:元素分带及其成因.吉林大学学报(地),42(4):1055~1068.

刘翼飞,樊志勇,蒋胡灿,聂凤军,江思宏,丁成武,王丰翔.2014.内蒙古维拉斯托-拜仁达坝斑岩-热液脉状成矿体系研究.地质学报,88(12):2373~2385.

刘翼飞,江思宏.2017.兴蒙造山带及华北板块北缘钼矿化——进展、规律、问题与成因初探.矿床地质,36(3):557~594.

刘新,李学刚,祝新友,孙雅琳,蒋昊原,蒋斌斌,王海,程细音.2017.内蒙古白音查干锡多金属矿床成矿作用研究Ⅱ:成矿花岗岩斑岩年代学、地球化学特征及地质意义.矿产勘查,8(6):981~996.

刘瑞麟,武广,陈公正,李铁刚,江彪,武利文,章培春,张彤,陈毓川.2018.大兴安岭南段维拉斯托锡多金属矿床流体包裹体和同位素特征.矿床地质,37(2):199~224.

毛景文,谢桂青,张作衡,李晓峰,王义天,张长青,李永峰.2005.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.岩石学报,21(1):169~188.

聂凤军,江思宏,张义,刘妍,胡朋.2004.中蒙边境及邻区斑岩型铜矿床地质特征及成因.矿床地质,23(2):176~189.

潘小菲,郭利军,王硕,薛怀民,侯增谦,童英,李志明.2009.内蒙古维拉斯托铜钼矿床的白云母 Ar/Ar 年龄探讨.岩石矿物学杂志,28(5):473~479.

宋长春.1996.内蒙古莲花山铜银矿床蚀变统计分带研究.矿物岩石地球化学通报,15(3):182~184.

谭钢,常国雄,余宏全,李进文,张德全,杨郅城,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铼-钼同位素定年及其地质意义.矿床地质,29(s1):506~508.

武新丽,毛景文,周振华,欧阳荷根.2012.大兴安岭中南段布敦化铜矿床 H-O-S-Pb 同位素特征及成矿指示.中国地质,39(6):1812~1829.

王喜龙,刘家军,翟德高,王建平,张琪彬,张安立.2014.内蒙古林西边家大院银多金属矿床同位素地球化学特征及成矿物质来源探讨.中国地质,41(4):1288~1303.

王喜龙,刘家军,翟德高,杨永强,王建平,张琪彬,张安立.2014.内蒙古边家大院矿区石英斑岩 U-Pb 年代学、岩石地球化学特征及其地质意义.矿物岩石地球化学通报,33(5):654~665.

王忠禹,孙景贵,白令安,柴鹏,古阿雷,赵克强,李玉洁.2014.内蒙古莲花山铜矿区花岗闪长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄.地质通报,33(9):1320~1325.

肖丙建,王伟德,张强,李宪栋,王真亮,刘同,胡来龙.2008.内蒙古突泉县莲花山银铜矿床成矿地质背景探讨.地质与勘探,44(1):26~30.

翟德高,刘家军,李俊明,张梅,李泊洋,付旭,蒋胡灿,马立军,漆亮.2016.内蒙古维拉斯托斑岩型锡矿床成岩、成矿时代及其地质意义.矿床地质,35(5):1011~1022.

赵一鸣,毕承思,邹晓秋,孙亚莉,杜安道,赵玉明.1997.黑龙江多宝山、铜山大型斑岩铜(钼)矿床中辉钼矿的铼-钼同位素年龄.地球学报,27(1):61~67.

张乾,战新志,裘愉卓,邵树勋,刘志浩.2002.内蒙古孟恩陶勒盖银铅锌铜矿床的铅同位素组成及矿石铅的来源探讨.地球化学,31(3):253~258.

张学斌,周长红,贾晓青,吴荣泽,徐翠,杨菊,王明明,范超.2014.内蒙古毛登地区碎斑熔岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征.地质通报,33(7):974~983.

郑伟,欧阳志侠,陈友良,赵海杰,楚磊,吴晓东,杨胜虎,汪汝澎,刘宏宏.2018.钦杭成矿带南段旗鼓岭铜钼铅多金属矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及成矿物质来源.地质学报,92(1):94~106.

周振华,武新丽,欧阳荷根.2012.内蒙古莲花山铜银矿斜长花岗岩斑岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年、Hf 同位素研究及其地质意义.中国地质,39(6):1472~1485.

朱笑青,张乾,何玉良,邵树勋.2004.内蒙古孟恩陶勒盖银铅锌铜矿床成因研究.矿床地质,23(1):52~60.

Molybdenite Re-Os dating and ore S-Pb isotopes of the Lianhuashan Cu deposit, Inner Mongolia, and their genetic significance

KANG Huan, LIU Yifei*, JIANG Sihong

MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing, 100037

* Corresponding author: lyfsky@126.com

Abstract

Located in the central-southern Great Xing'an Range, Inner Mongolia, China, the Lianhuashan copper deposit remains controversy in its genesis. In this study, molybdenite Re-Os dating and S-Pb isotopes of sulfides has been carried out. The results indicate that the Lianhuashan deposit was formed at 139.1 ± 1.1 Ma, not the Triassic documented by the previous literature. The $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ values of sulfides from the Lianhuashan deposit vary from -1.5‰ to 5.0‰ , and have Gaussian distribution feature, which indicate the sulfur derived from deep magmatic sources. The $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ values of the Lianhuashan sulfides are very similar to other tin-tungsten-silver polymetallic deposits in the central-southern Great Xing'an Range. The lead isotopes of the Lianhuashan sulfides have a linear distribution feature in the $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ charts, indicating that the lead is mixture from two endmembers, one is lower in $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, and another endmember is higher in $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. The lead isotopic feature is also similar to other polymetallic deposits in the central-southern Great Xing'an Range. The average Re content in molybdenite of the Lianhuashan copper deposit is 1078×10^{-9} , which is significant lower than that of porphyry copper deposits formed in subduction tectonic setting about two orders of magnitude, but similar to Re content in molybdenite from the Sn-W-Ag polymetallic deposits associated with highly fractionated granites in the central-southern Great Xing'an Range. The Re content in molybdenite indicates that the formation of Lianhuashan copper deposit is related to the highly fractionated granitic magmatism, rather than subduction related magmatism. The study also indicates that there is potential to find Sn-W mineralization associated highly fractionated granites in the Lianhuashan area.

Key words: Lianhuashan copper deposit; sulfur isotope; lead isotope; highly fractionated granites; Inner Mongolia