

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.341



内蒙古海苏沟岩体中钼矿床成岩成矿年代学、 地球化学及地质意义

谢元惠^{1,2}, 李小伟¹, 祝新友^{2*}, 黄行凯², 刘腾^{1,2}, 徐巧², 刘孜²

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 北京矿产地质研究院, 北京 100012

摘要: 海苏沟岩体位于大兴安岭造山带南段, 岩体中发育有海苏沟钼矿床及小井子北铜钼矿床, 目前对该岩体的了解还不完善, 成因类型存在争议且对两个钼矿床间差异并未进行探讨. 对该岩体不同岩相花岗岩开展锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学研究, 对矿区内辉钼矿进行 Re-Os 同位素研究. 获得海苏沟钼矿床黑云母花岗岩年龄结果为 137.1 ± 0.6 Ma 和 143.6 ± 0.8 Ma, 测得 Re-Os 模式年龄为 143.9 ± 2.9 Ma. 小井子北铜钼矿区二长花岗岩年龄为 126.5 ± 0.7 Ma. 海苏沟岩体中花岗岩均属高钾钙碱性系列 I 型花岗岩, 具准铝质—弱过铝质特征, 主量元素 SiO_2 含量为 $68.81\% \sim 77.18\%$, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量为 $6.80\% \sim 8.31\%$, CaO 含量为 $0.43\% \sim 2.88\%$, MgO 含量为 $0.15\% \sim 1.32\%$, A/CNK 值介于 $0.97 \sim 1.07$. 岩石相对富集轻稀土, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 6.19 \sim 10.74$, 稀土配分呈右倾海鸥型, 具有中等钕负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.37 \sim 0.81$). 结合已有的研究结果, 认为海苏沟岩体演化过程中经历了强烈的分离结晶作用, 该岩体黑云母花岗岩与钼矿床的形成密切相关. 海苏沟岩体的成岩及钼成矿作用的时间与西拉沐伦成矿带的第 3 期大规模成岩成矿作用时间相吻合, 对应当时的构造背景为构造体系转折 (由挤压环境转变为拉伸环境) 至岩石圈减薄的环境.

关键词: 海苏沟岩体; 海苏沟钼矿床; 小井子北钼矿床; 锆石 U-Pb 年代学; Re-Os 同位素; 地球化学.

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2020)01-043-18

收稿日期: 2018-09-26

Petrogenesis and Mineralization Chronology Study on the Mo Deposit of the Haisugou Intrusive Mass, Inner Mongolia, and Its Geological Implications

Xie Yuanhui^{1,2}, Li Xiaowei¹, Zhu Xinyou^{2*}, Huang Xingkai², Liu Teng^{1,2}, Xu Qiao², Liu Zi²

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China

Abstract: The Haisugou rock mass is located in the southern part of the Daxing'anling orogenic belt. The Haisugou Mo deposit and the Xiaojingzibei Cu and Mo deposit are found in the intrusive mass. At present, the understanding of the rock mass is insufficient, the genetic type is controversial and the difference between the two molybdenum deposits has not been discussed. In this study, zircon U-Pb geochronology and petro-geochemistry analyses were carried out on different rocky granites in Haisugou rock mass, and Re-Os isotope analyses on molybdenite in the mining area were conducted. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of the biotite granite in the Haisugou molybdenum mining area are 137.1 ± 0.6 Ma and 143.6 ± 0.8 Ma; the Re content of molybdenite in the Haisugou molybdenum deposit is 2.1×10^{-6} , the molybdenite Re-Os model age is 143.9 ± 2.9 Ma. The dating result of LA-ICP-MS zircon U-Pb of the monzonitic granite in the Xiaojingzibei copper-molybdenum deposit is 126.5 ± 0.7 Ma.

基金项目: 中国地质调查局基础性公益性地质矿产调查项目 (No. DD20160072).

作者简介: 谢元惠 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩浆活动与深部过程. ORCID: 0000-0003-3074-1005. E-mail: yuanhuixie@yeah.net

***通讯作者:** 祝新友, ORCID: 0000-0002-3531-6131. E-mail: zhuxinyou@outlook.com

引用格式: 谢元惠, 李小伟, 祝新友, 等, 2020. 内蒙古海苏沟岩体中钼矿床成岩成矿年代学、地球化学及地质意义. 地球科学, 45(1): 43-60.

The granite in the Haishugou pluton belongs to high-K calc-alkaline series I-type granite with metaluminous to weakly peraluminous characteristics. The main elements SiO_2 content is 68.81%–77.18%, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O} = 6.80\%–8.31\%$, CaO content ranges from 0.43% to 2.88%, MgO ranges from 0.15% to 1.32% and aluminum index (A/CNK) value ranges from 0.97 to 1.07. The rocks are relatively enriched in light rare-earth elements $(\text{La}/\text{Yb})_N = 6.19–10.74$ and the rare earth distribution pattern is right-dipping with a moderate negative Eu anomalies with a δEu value from 0.37 to 0.81. By combining existing research results, It can be considered that the magma evolution experienced magma mixing and the fractional crystallization plays a dominant role. The time of diagenesis and molybdenum metallogenesis of the Haisugou intrusive mass coincides with the time of the third phase of the large-scale diagenesis and mineralization of the Silamulun metallogenic belt, indicating the corresponding tectonic background is the transition of the tectonic system (from the extrusion environment to the tensile environment) to the lithosphere thinning environment.

Key words: Haisugou intrusive mass; Haisugou molybdenum deposit; Xiaojingzibei molybdenum deposit; zircon U-Pb chronology; Re-Os isotope; geochemistry.

0 引言

位于华北克拉通北缘早古生代造山带与大兴安岭造山带南段之间的西拉沐伦钼矿带是目前发现的一处较大的铜钼多金属成矿带(曾庆栋等, 2009, 2011; Zeng *et al.*, 2011). 带内目前发现有多处大、中、小型铜—钼多金属矿床, 矿化类型复杂多样, 如: 斑岩型的敖伦花(Cu-Mo)、鸡冠山(Mo-Cu)、小东沟(Mo-Cu)、好力宝(Mo-Cu)等; 石英脉型的碾子沟(Mo、Cu、Pb)、库里吐(Mo)等; 火山热液型的车户沟(Mo-Cu)、红山子(Mo-U)、柳条沟(Mo、Pb、Zn)等(马星华等, 2009). 这些矿床密集展布于西拉沐伦河断裂带两侧, 构成一个铜钼多金属矿集区.

海苏沟岩体位于西拉沐伦河断裂带北侧, 海苏沟岩体中发育有一系列小型矿床, 其中两个为钼矿床, 分别为海苏沟钼矿床和小井子北铜钼矿床. 赖勇等(2013)对海苏沟钼矿床开展了初步研究, 认为该矿床是西拉沐伦钼矿带中的典型代表之一, 并测得其赋矿岩体(岩性为黑云母花岗岩)的锆石 U-Pb 年龄为 137.6 ± 0.9 Ma. Shu *et al.* (2014, 2016) 进一步测出相近的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 136.4 ± 0.8 Ma, 指示黑云母花岗岩与钼成矿联系紧密; 此外, 其通过分析黑云母花岗岩的元素地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素特征, 发现黑云母花岗岩的形成经历了复杂的演化过程, 通过地幔的底侵作用, 年轻的下地壳发生部分熔融形成岩浆, 岩浆在上升过程中一些古老的上地壳物质添加到熔体, 完成侵位后, 形成了海苏沟岩体的主体部分. 刘孜等(2017)对小井子北铜钼矿床开展了相关研究, 他们分析了赋矿岩体(岩性为黑云母花岗岩)的地球化学特征并对

其形成时代进行了测定, 获得黑云母花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 131~134 Ma. 从年代学研究来看, 海苏沟岩体中钼矿床的形成与早白垩世岩浆活动密切相关.

笔者野外观察发现海苏沟岩体从岩相上可大致分为黑云母花岗岩及二长花岗岩两类, 但前人仅针对黑云母花岗岩进行过系统研究, 而对岩体中二长花岗岩单元尚未有系统认识. 此外, 前人对海苏沟岩体黑云母花岗岩成因类型方面的认识还存在争议, Shu *et al.* (2014) 认为其属于 I 型花岗岩类, 而刘孜等(2017)将其判定为 A 型花岗岩. 同时, 在同一岩体中, 两个钼矿床存在明显差异: 海苏沟钼矿床具有高品位的钼矿石, 而几乎未见铜和铁的硫化物; 与此相反的是, 小井子北铜钼矿床则同时具有较高的铜、钼矿石储量. 而造成二者差异的原因前人并未进行过探讨. 为了解决这些问题, 本文选择海苏沟岩体为研究对象, 重点分析二长花岗岩及黑云母花岗岩的岩相学特征, 综合主量、微量元素特征, 赋矿岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及海苏沟钼矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素年龄, 以期进一步厘定海苏沟钼矿床和小井子北铜钼矿赋矿岩体的形成时代及海苏沟钼矿床的成矿时代, 探讨造成同一岩体形成不同工业类型钼矿床的原因, 讨论岩体中两种花岗岩的岩石成因, 岩浆侵入序列及演化过程. 这将对研究钼矿床成岩成矿时限及矿床成因具有重要指示意义, 并丰富西拉沐伦铜钼多金属成矿带的成矿机制.

1 区域地质背景

大兴安岭造山带处在中亚造山带东南端,是位于西伯利亚克拉通与华北克拉通之间的古亚洲洋(鄂霍茨克洋)的演化产物(刘建明等, 2004; 杨帆等, 2019). 该造山带中南段发育有大量 Cu、Sn、Mo 等多金属矿产资源(图 1). 同时,区内断裂构造也较为发育,并与该区各期次褶皱构造紧密伴生,共同对控岩、控矿起着重要作用. 其中北部为二连—贺根山断裂,分隔大兴安岭造山带南北段;东部为嫩江断裂,松辽盆地与其毗邻;北部则以西拉沐伦断裂为界与华北克拉通边缘早古生代增生造山带相隔(图 1).

区域内地层较为发育,具有明显的双层结构,基底为晚古生代浅—轻微变质的中基性—酸性火山岩、含碳碎屑岩—碳酸盐岩建造,盖层为侏罗纪至白垩纪陆相中酸性火山岩和碎屑沉积岩建造(Zeng *et al.*, 2009). 区域内岩浆活动频繁,从海西期至燕山期均有岩浆活动,其中燕山中晚期岩浆活动规模最大,具有多期的特点,高分异的花岗岩与区内成矿关系密切(内蒙古自治区地质矿产局, 1991; 孙兴国, 2008).

2 矿区地质及岩浆岩特征

2.1 矿区地质特征

研究区位于大兴安岭造山带南段,在构造位置上属于锡林浩特中间地块中南部. 研究区内分布有多个小型矿床,分别为海苏沟钼矿床、小井子北铜钼矿床、小井子银矿床及小井子铅锌矿床(图 2). 该区域内矿床的形成均与海苏沟岩体密切相关(孔凡干, 2013; 赖勇, 2013). 海苏沟岩体与二叠系中统哲斯组(P_2zs)及大石寨组(P_2ds)围岩呈清晰的侵入接触关系,出露岩性主要为黑云母花岗岩和二长花岗岩,区内各类脉岩发育,主要有花岗岩脉、闪长玢岩脉等,脉体主要呈北北东走向,少数为北西西走向(图 2).

海苏沟钼矿区位于海苏沟岩体东南端的二道营子地区. 附近地层主要为第四系上更新统乌尔吉组($Qp^{3-2}w$)黄土、二叠系中统哲斯组(P_2zs)的一套砂岩层,砂岩层中发育轻微褐铁矿化及绿帘石化. 黑云母花岗岩为主要的赋矿岩体,矿区内脉岩主要有细粒花岗岩脉(图 3a)、闪长玢岩脉及安山玢岩脉等,均为晚期侵入产物,其中细粒花岗岩脉走向约为 65° ,宽约 1~2 m,长度 50~100 m. 围岩中发育有

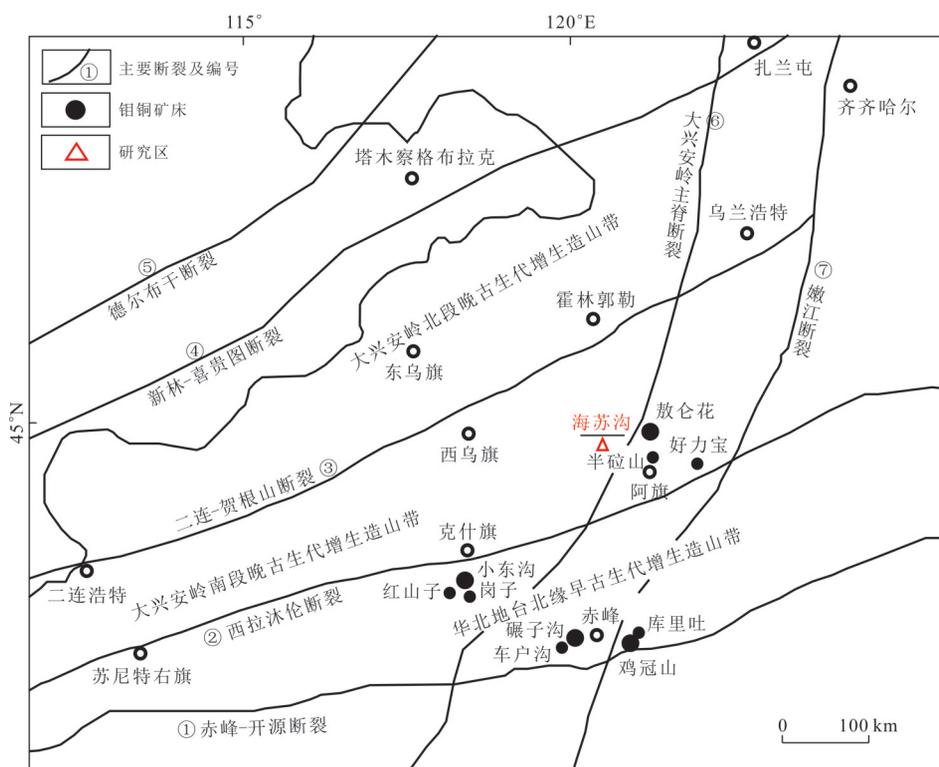


图 1 大兴安岭南段及区域构造简图

Fig. 1 Simplified tectonic map of the southern Da Hinggan Mts and its adjacent area

据刘建明等(2004)修编

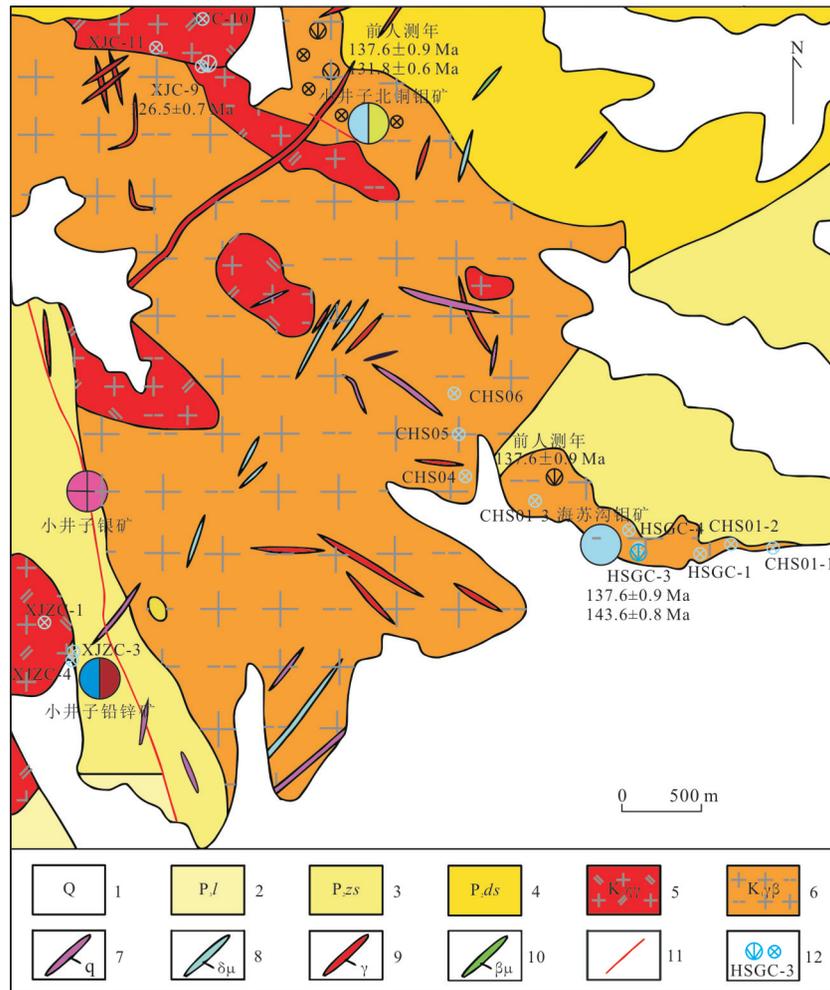


图2 研究区区域地质及矿床分布简图

Fig.2 Sketch of regional geology and distribution of deposits in the studied area

1. 第四系上更新统乌拉吉组黄土; 2. 二叠系上统林西组; 3. 二叠系中统哲斯组; 4. 二叠系中统大石寨组; 5. 白垩纪—二长花岗岩; 6. 白垩纪—黑云母花岗岩; 7. 石英脉; 8. 闪长玢岩脉; 9. 花岗岩脉; 10. 辉绿岩脉; 11. 断裂构造; 12. 样品位置及编号

大量石英细脉, 走向与矿脉走向相近, 约为 330° , 宽度为 2~15 cm. 矿区内断裂构造主要表现为与矿化相关的网脉状裂隙或节理, 后期大多为石英脉充填. 矿区内常见的蚀变有钾化(图 3b)、绿帘石化、碳酸盐化、高岭土化及绿泥石化等. 辉钼矿的矿化形态多样, 主要有赋存于浅灰色石英脉中的团块状、细脉状辉钼矿及赋存于岩体中的浸染状辉钼矿(图 3c). 基于赋矿岩体黑云母花岗岩的含矿特征及蚀变分带情况, 推测黑云母花岗岩与成矿密切相关.

小井子北铜—钼矿区位于海苏沟岩体的东北端, 矿区附近出露地层为二叠系中统大石寨组 (P_{ds}), 岩性为由浅变质砂岩、砂板岩及少量泥灰岩组成的一套碎屑岩. 地层与岩体的接触部位可见轻微角岩化、绢云母化现象. 黑云母花岗岩和二长花岗岩在矿区内均有出露, 二者与成矿关

系密切. 区内出露有一条极长的花岗斑岩脉, 长约 1 600 m, 宽为 1~5 m, 脉体走向为 $45^\circ\sim 48^\circ$, 为岩浆沿断层充填形成. 矿区内还发育有一组北西向断裂, 为区内控矿断裂, 断裂倾向 $205^\circ\sim 215^\circ$ 、倾角 $53^\circ\sim 62^\circ$ 、延伸 150~450 m、宽为 1~5 m, 后期被石英脉及含矿石英脉充填(刘孜等, 2017). 铜钼矿石伴随石英脉产出, 分布于黑云母花岗岩中. 矿区内常见的蚀变为钾化、硅化、绿泥石化、碳酸盐化及绢云母化等. 矿石中金属矿物种类多样, 主要有辉钼矿、黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿等. 脉石矿物以石英、方解石、绢云母为主.

2.2 岩浆岩特征

海苏沟钼矿区中主要岩浆岩类型为黑云母花岗岩. 黑云母花岗岩风化面呈浅灰白色, 具有轻微高岭土化, 新鲜面为灰白色. 岩石结构呈典型花岗

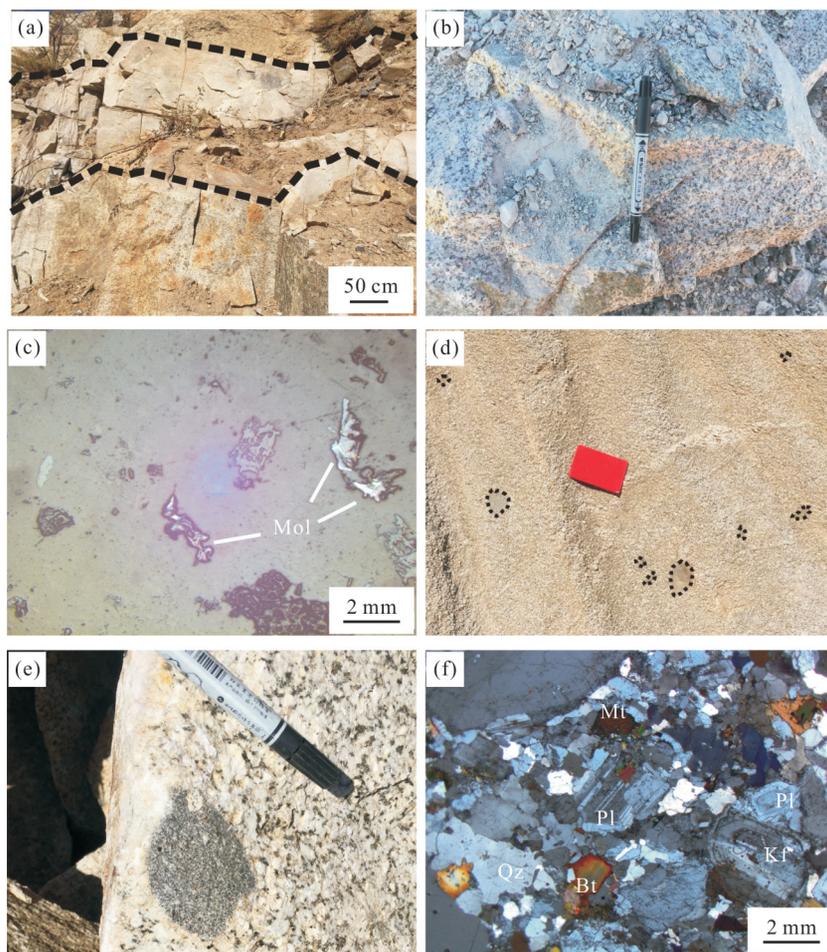


图 3 钼矿床地质特征

Fig.3 Geological characteristics of the Mo deposit

海苏沟钼矿区:a.细晶岩脉侵入至黑云母花岗岩;b.黑云母花岗岩中的钾化现象;c.成矿岩体中浸染状钼矿化;d.黑云母花岗岩中的暗色微粒包体.小井子北钼矿区:e.暗色微粒包体与寄主岩体呈弥散型接触特征;f.黑云母花岗岩镜下照片(正交偏光).Mol.辉钼矿;Bt.黑云母;Pl.斜长石;Qz.石英;Kf.钾长石

岩结构,块状构造.各矿物组分情况:石英含量占25%~30%,呈他形粒状充填于其他矿物间隙内,颗粒大小在1.0~2.5 mm之间,偶见有大颗粒者可达4~5 mm;斜长石含量约为40%~50%,呈半自形—自形粒状,颗粒大小为1.5~4.0 mm,环带结构发育;微斜长石含量可达15%~20%,呈半自形板柱状,颗粒大小为1~3 mm,可见卡式双晶;黑云母含量可达5%~10%,为黑褐色板片状矿物,矿物颗粒大小为1~3 mm.副矿物主要为锆石、磷灰石等.

黑云母花岗岩中分布有大量闪长质暗色微粒包体(MMEs)(图3d),这些包体的直径通常为几厘米,偶尔也能见到直径几十厘米的微粒包体,包体横截面呈圆形、椭圆形或透镜状.

小井子北铜钼矿区中主要岩浆岩类型有黑云母花岗岩和二长花岗岩.其中黑云母花岗岩特征

与海苏沟钼矿区大致相同,其中也有大面积的闪长质微粒包体分布,一些微粒包体在与主岩体接触时可见明显的浅色过渡区(图3e).二长花岗岩主要以小岩体及岩株的形式分布于主岩体中,其风化面呈灰白色,新鲜面为浅肉红色.岩石组构为花岗岩结构,块状构造.各矿物组分情况:微斜长石的含量为25%~30%,呈浅肉红色颗粒,半自形—自形粒状、板柱状,颗粒大小为1~4 mm;斜长石含量与碱性长石相近,达30%左右,自形程度较好,颗粒大小为2~5 mm;石英含量较高,可达30%~35%,呈他形粒状,颗粒大小为2~4 mm;黑云母含量约占5%,为片状矿物,部分发生绿泥石化,矿物颗粒大小为1~4 mm(图3f).

3 样品采集与分析测试方法

3.1 样品采集

在二道营子地区—海苏沟钼矿区的黑云母花岗岩体露头处采集 3 件新鲜样品,并在矿区矿石堆中采集辉钼矿样品 1 件;小井子北钼矿区附近的二长花岗岩体露头处采集 3 件新鲜样品并采集区内辉钼矿样品;海苏沟岩体西南侧小井子地区采集 3 件新鲜样品,为黑云母花岗岩和暗色微粒包体样品(图 2).对采集样品进行全岩主量及微量元素分析,选取样品 HSGC-3(N 119°2'46",E 44°18'18")和 XJC-9(N 119°0'54",E 44°19'52")进行 LA-ICP-MS U-Pb 测年分析,选取辉钼矿样品 XJZ01(N 119°2'42",E 44°18'18")进行 Re-Os 同位素模式年龄测定.

3.2 锆石 U-Pb 同位素测试

黑云母花岗岩和二长花岗岩样品的粉碎和锆石的挑选工作由河北省廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成.先通过重力和磁选进行分选,再在双目镜下进行挑纯.制靶由北京凯德正科技有限公司完成,制成环氧树脂样品靶.之后的锆石阴极发光(CL)、透射光及反射光照片的拍摄在中国科学院地质与地球物理研究所完成.

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行,所采用的仪器有德国 Lambda-Physik 公司生产的 ComPex102ArF 准分子激光器、Agilent 7500 型 ICP-MS 和 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M 光学系统联机.激光剥蚀孔径为 30 μm ,剥蚀样品深度为 20~40 μm .激光剥蚀过程中采用氦气作为剥蚀物质载气,氩气为补偿气用于调节灵敏度.样品分析流程为每次开始测试及测试结束都需要测定 NIST SRM610、91500、GJ-1 各一个,每测定 5 个样品点需要测定国际标准锆石 91500(Wiedenbeck *et al.*, 1995)一次,对剥蚀过程中信号的采集包括 25 s 左右的空白信号和 50 s 的样品信号.测得数据利用 GLITTER 软件进行处理,并利用 Andersen(2002)提出的方法对处理后的数据进行铅校正,最后的锆石谐和图绘制利用 Isoplot3.0(Ludwig *et al.*, 2001a, 2001b).具体实验步骤及数据处理过程可参考 Yuan *et al.*(2004).

3.3 辉钼矿 Re-Os 同位素测试

Re-Os 同位素的测定由中国地质科学院国家地质实验测试中心完成,仪器为 TJA X-series ICP-MS,采用同位素稀释 ICP-MS 质谱法进行测定.样

品化学处理流程及质谱测定技术可参考夏抱本等(2010)文献.样品分析步骤大致分为分解样品、蒸馏分离 Os、萃取分离 Re 及质谱测定.测定 Re 选择质量数 185 和 187,以 190 来监测 Os;测定 Os 选择质量数 186、187、188、189、190 及 192,以 185 来监测 Re.测得的 Re-Os 同位素数据使用软件 Ludwig *et al.*(1991)进行处理并获得同位素模式年龄,计算过程采用的衰变常数为 $\lambda(^{187}\text{Re})=1.666\times 10^{-11}\text{ a}^{-1}$.

3.4 主、微量元素测试

核工业北京地质研究院分析测试中心对样品主量和微量元素进行了分析.对于主量元素的分析,使用的测试仪器为飞利浦 PW204 型 X 射线荧光光谱仪,采用国家一级岩石标样 GBW07101-07114 为基本效应校正.使用高分辨电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析痕量元素和稀土元素,仪器型号为 HR-ICP-MS(Element I).通过分析标样 GSR 来监测数据质量,利用标准曲线法进行校正.测得数据的相对偏差一般小于 10%.

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

如图 4 锆石 CL 图像所示,黑云母花岗岩及二长花岗岩中采集到锆石样品(HSGC-3、XJC-9)具有相似的形态特征.大多数锆石为自形晶体,有明显的振荡环带,没有明显的古老核部和更年轻的增生边特征.锆石主要呈长柱状和短柱状,长轴长度可达 100~300 μm ,晶体长宽比为 1.5~3.0.以上特征均表明锆石为岩浆成因(Hanchar and Hoskin, 2003).

在样品 HSGC-3 中选择了 25 颗具有高透明度且无明显包裹体的锆石进行 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析.U-Pb 数据列于附表 1.测得的 ^{238}U 浓度变化在 $106\times 10^{-6}\sim 1\,548\times 10^{-6}$ 之间, ^{232}Th 范围为 $37\times 10^{-6}\sim 942\times 10^{-6}$. $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 值在 0.28~0.60 之间,这个值与 Belousova *et al.*(2002)提出的典型岩浆锆石 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 值(0.3~0.7)相吻合.锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 测试结果显示,有 2 个偏低的年龄($121.8\pm 0.8\text{ Ma}$ 、 $89.3\pm 0.5\text{ Ma}$)和一个偏高的年龄($146.0\pm 3.0\text{ Ma}$)谐和度偏低,还有一颗锆石年龄为 $132.0\pm 1.0\text{ Ma}$,可能是掺杂的后期脉岩锆石.剩余 19 个样品数据绘制的谐和曲线如图 5 所示,年龄数据大致可以分为两组:其中一组 14 个年龄分布在 $136.0\pm 1.0\text{ Ma}$ 至 $138.0\pm 1.0\text{ Ma}$ 之间,另一组 7 个年龄分布在 $143.0\pm 1.0\text{ Ma}$ 至 $144.2\pm 0.9\text{ Ma}$ 之间.校正后



图 4 海苏沟岩体黑云母花岗岩(a)及二长花岗岩(b)锆石阴极发光图像

Fig.4 Representative cathodoluminescence (CL) images of zircons from the biotite granite (a) and monzonitic granite (b) of the Haisugou intrusive mass

的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 137.1 ± 0.6 Ma (99.7%置信度, $\text{MSWD}=0.25$)和 143.6 ± 0.8 Ma (95%置信度, $\text{MSWD}=0.28$)。

选择样品XJC-9中25颗锆石进行U-Pb同位素测定, U-Pb同位素定年结果列于附表2. 锆石中 ^{238}U 浓度范围为 $74\times 10^{-6}\sim 1\ 066\times 10^{-6}$, ^{232}Th 范围为 $47\times 10^{-6}\sim 1\ 066\times 10^{-6}$, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 值在0.32~0.72之间, 为典型的岩浆锆石. 其中, 2个锆石的年龄偏低($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 113.6 ± 1.8 Ma、 110.7 ± 1.8 Ma)可能为后期侵入到脉岩中的锆石, 4个年龄偏高的锆石(143.1 ± 1.2 Ma、 142.5 ± 9.2 Ma、 140.2 ± 3.2 Ma、 138.9 ± 1.2 Ma)可能为捕获锆石, 其余19个数据绘制出一条谐和曲线(图5), 校正后的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 126.5 ± 0.7 Ma (95%置信度, $\text{MSWD}=0.97$)。

4.2 辉钼矿 Re-Os 年龄

小井子北铜钼矿床1个辉钼矿样品的Re-Os同位素的测试结果列于附表3, 附表3中数据显示辉钼矿样品的模式年龄为 143.9 ± 2.9 Ma。

4.3 全岩主量元素

选取研究区内采集的9个新鲜岩石样品进行主量元素和微量元素成分分析, 结果如附表4所示. 其

中, 二道营子地区—海苏沟钼矿区的3个黑云母花岗岩样品: SiO_2 含量为69.8%~70.8%, Al_2O_3 含量为14.0%~15.2%, CaO 含量为2.1%~2.9%, Na_2O 含量为3.5%~3.9%, K_2O 含量为2.9%~3.7%. 将3个样品的数据投入 $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 图中, 样品落入花岗闪长岩和花岗岩的区域内, 投在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图中, 样品落入高钾钙碱性系列的区域中(图6). 计算的3个A/CNK值(摩尔比: $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$)分别为0.97、1.07、1.03, 表明这些岩石为偏铝质—弱过铝质(图6)。

在小井子北铜钼矿区采集的3个二长花岗岩样品, 其 SiO_2 含量为76.9%~77.4%, Al_2O_3 含量为12.1%~12.3%, $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 含量均为0.9%, CaO 含量在0.4%~0.6%之间, K_2O 为4.7%~4.8%, Na_2O 含量为3.4%~3.5%. 样品落入 $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 图解的花岗岩区域内, 在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图中, 样品落入高钾钙碱性系列的范围内(图6). 样品的A/CNK值为1.01、1.04和1.05, 显示弱过铝质系列。

在小井子地区采集的样品为黑云母花岗岩和闪长质微粒包体样品. 其中闪长质包体的 SiO_2 含量为58.5%, MgO 含量为2.4%, $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 达到7.5%, Al_2O_3 含量为16.3%, CaO 含量为4.6%, Na_2O 含量

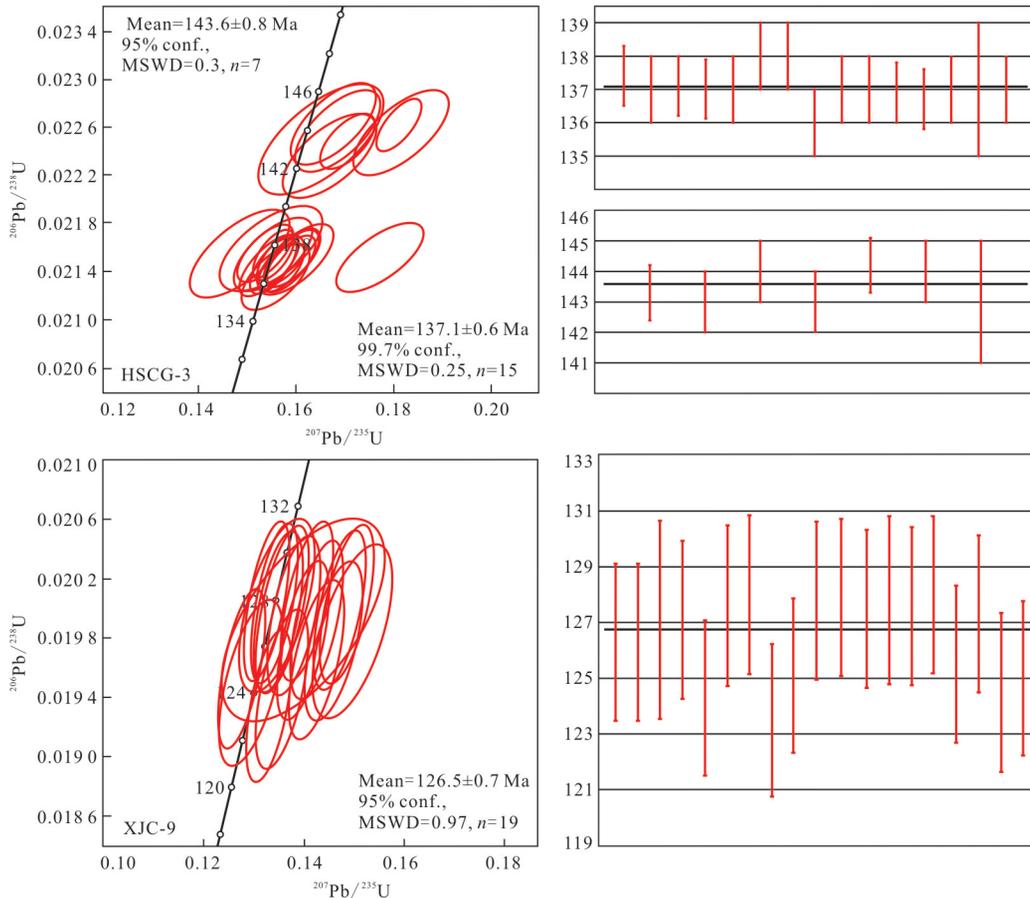


图 5 黑云母花岗岩 HSGC-3 及二长花岗岩 XJC-9 样品锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图

Fig.5 The Concordia diagram of LA-ICP-MS U-Pb zircon dating results for HSGC-3 sample from the biotite granite and XJC-9 sample from the monzonitic granite

为 3.4%, K_2O 含量为 2.6%, A/CNK 值为 0.97. 分别投入 $SiO_2-(Na_2O+K_2O)$ 图、 SiO_2-K_2O 图和 A/CNK-A/NK 图中, 样品落入闪长岩区域, 高钾钙碱性系列和偏铝质系列区域 (图 6). $SiO_2-(Na_2O+K_2O)$ 图中显示黑云母花岗岩较海苏沟钼矿区样品更靠近石英二长岩和花岗闪长岩区域 (图 6).

4.4 全岩微量元素

海苏沟岩体中采集到的 5 个黑云母花岗岩样品稀土元素 (REE) 显示出相似的分配模式 (图 7). ΣREE 的范围为 $101.49 \times 10^{-6} \sim 171.33 \times 10^{-6}$, $LREE/HREE=6.88 \sim 10.14$, 表现为轻稀土富集的特征. 如图 7 所示: 元素 Rb、U、K 和 Pb 相对富集, Ba、Nb、P、Zr 和 Ti 相对亏损, Eu 表现为中等负异常 ($Eu/Eu^*=0.63 \sim 0.81$), 从稀土元素蛛网图中可以看出, 小井子地区采集的一个黑云母花岗岩样品中稀土元素含量明显有所增高, 元素 Ce 出现轻微正异常, 可能是花岗岩中含有少量独居石.

3 个二长花岗岩样品中稀土元素 (REE) 含量范

围为 $97.66 \times 10^{-6} \sim 127.13 \times 10^{-6}$, 轻重稀土比为 9.49~11.23, 显示轻稀土富集的特征, 且钕负异常较明显. 原始地幔标准化蛛网图和球粒陨石标准化稀土元素蛛网图显示: 元素 Rb、Th、K 和 Pb 相对富集, Ba、Nb、P 和 Ti 相对亏损 (图 7).

哈克图显示了采集到的所有样品中几个选定的主量和微量元素随 SiO_2 在含量上的变化情况 (图 8), 选定的 6 种主量元素、及微量元素 Sr、Ba、Y、Eu 均伴随着 SiO_2 含量升高而有所下降 (图 8a~8f、8h~8j、8l). 微量元素 Rb 和 Zr 随着 SiO_2 含量升高而升高 (图 8g、8k).

5 讨论

5.1 年代学

西拉沐伦成矿带的钼成矿作用主要与中生代花岗岩有关, 沈存利等 (2010) 认为带内钼成矿主要集中在燕山期, 并以早中侏罗世和早白垩世的成矿最为密集.

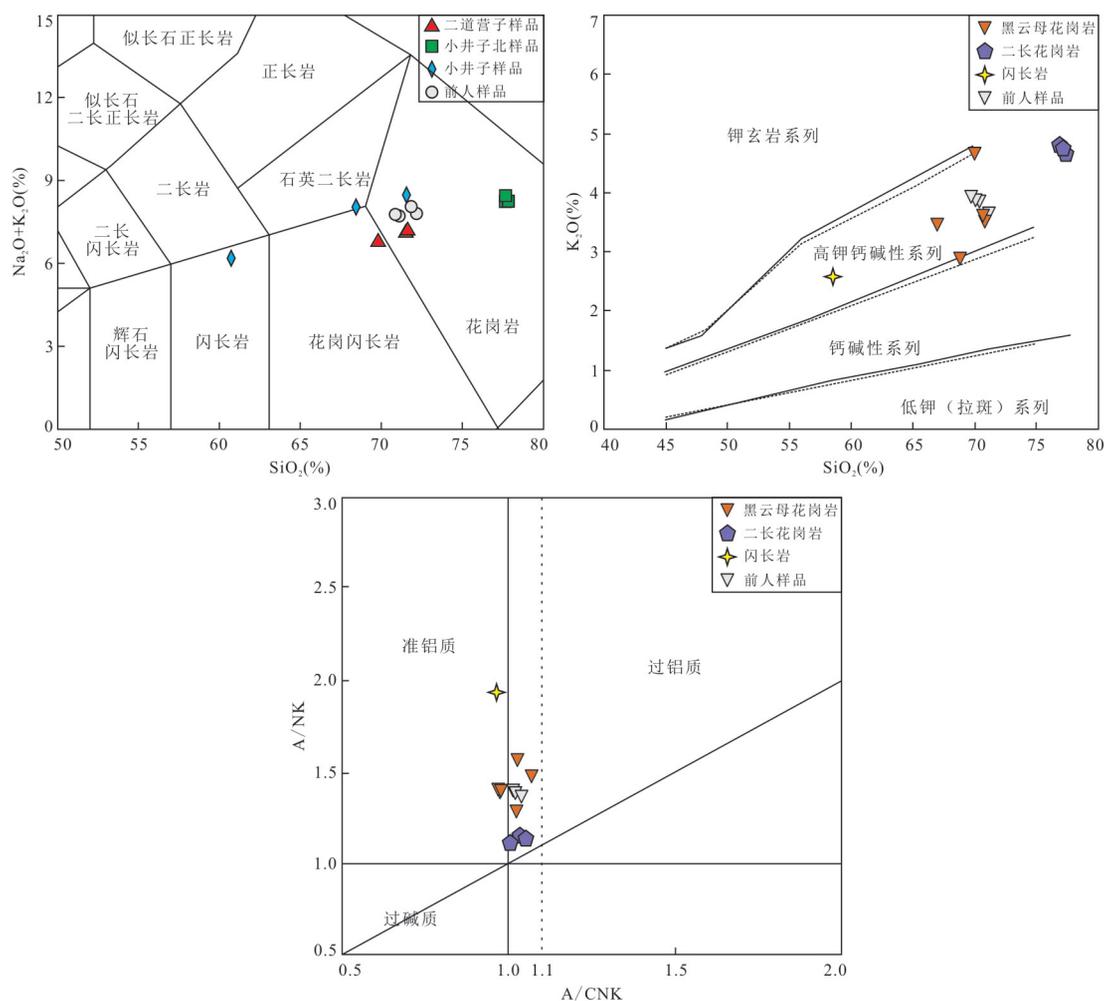


图 6 海苏沟岩体样品的 K_2O-SiO_2 图解、 $A/CNK-A/NK$ 图解及 $(Na_2O+K_2O)-SiO_2$ 图解

Fig.6 Classification of the Haisugou intrusive mass sample on K_2O vs. SiO_2 , A/CNK vs. A/NK and (Na_2O+K_2O) vs. SiO_2 diagrams

据 Rickwood(1989)、Peccerillo *et al.*(1976); 前人数据据刘夜等(2017)

曾庆栋等(2011)将与成矿相关的花岗岩浆活动分为主要的 3 期,即早—中三叠世(245~229 Ma)、晚侏罗世(152~148 Ma)和早白垩世(142~131 Ma).Zhang *et al.*(2010)则将 3 个重要成矿期划分为 258~210 Ma、180~150 Ma 和 140~110 Ma. 本文收集了带内部分钼矿床的成岩成矿年龄数据,见表 1. 大体可以看出,成岩成矿时代主要集中在 ~240 Ma、~150 Ma 和 ~135 Ma 三个时期,显示出明显的分段特征,这与前人的分期结果大致吻合. 虽然不同学者对不同成矿期带时间跨度的划分略有不同,但大体上的时间分段是一致的,故可以认为将西拉沐伦成矿带的钼成矿作用分为 3 期是较为合理的. 此外,在划分出的 3 个成矿时期中,以最后一期(130~145 Ma)的成矿作用最为活跃,该期形成的矿床在数量上最为显著,且成矿规模也相当可

观(马星华等, 2009; Shu *et al.*, 2014).

对二道营子地区—海苏沟钼矿区黑云母花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年得到锆石样品的年龄范围较大,由 136 Ma 至 144 Ma. 且大致可分为两组,年龄分别集中在 137 Ma 和 143 Ma 左右. 观察这些锆石的形态特征(图 4a),发现年龄较老的这些锆石并不具有继承锆石的特点. 未见明显熔蚀边及重结晶现象,且地球化学特征(比如 U、Th 含量及 Th/U 值)与较年轻的锆石没有明显区别(表 1). 故而认为这些锆石为循环晶,即多级岩浆房中早期的锆石,他们从早期岩浆房中结晶出来并被带到了上部新的年轻岩浆房内,岩浆房之间是成因联系的(Miller *et al.*, 2007). 从这些锆石年龄来看,该区域的岩浆活动时间可能是一个跨度,期间较年轻的一期岩浆活动的时间约为 137 Ma,

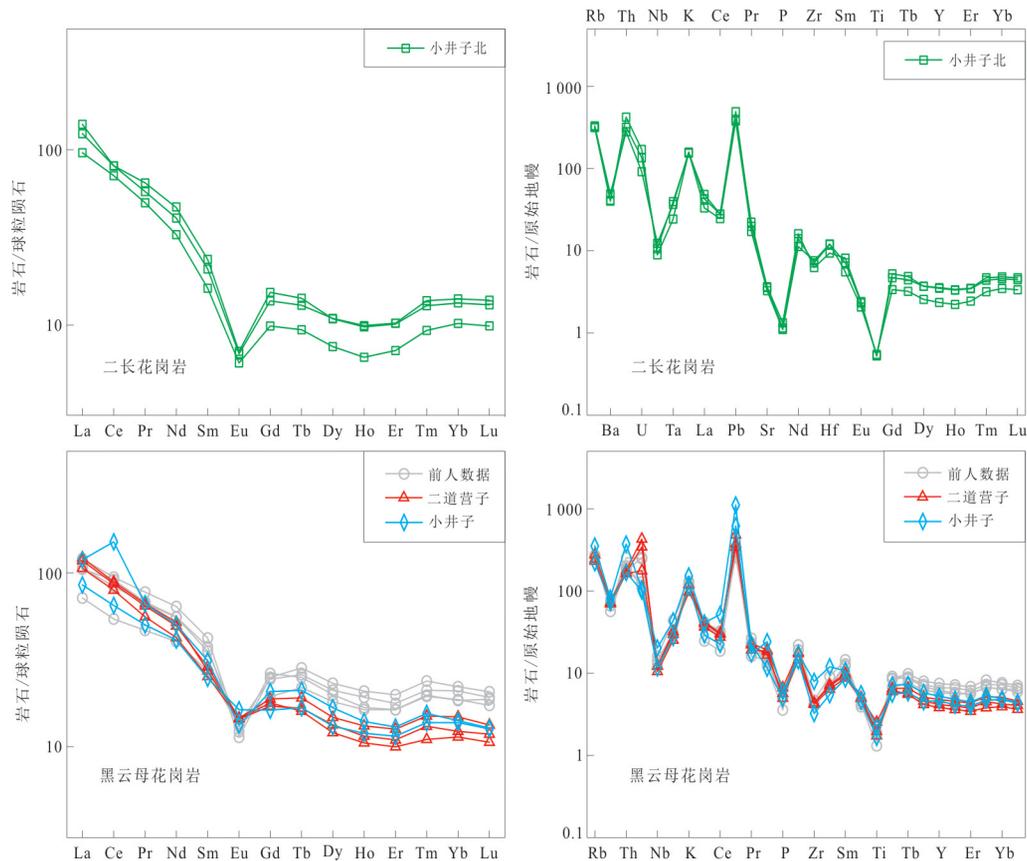


图7 海苏沟岩体各类花岗质岩石原始地幔标准化蛛网图和球粒陨石标准化稀土元素蛛网图

Fig.7 Primitive mantle normalized trace element and chondrite-normalized REE patterns spider diagrams for granitic rocks of the Haisugou intrusive mass

据 Sun and McDonough (1989); 前人数据据刘孜等(2017)

与赖勇等(2013)得到的年龄结果 137.6 ± 0.9 Ma 在误差范围内基本一致. 这与西拉沐伦成矿带早白垩世大规模岩浆活动的时限相吻合.

此外,本次采集的辉钼矿样品通过 Re-Os 同位素分析测得其模式年龄为 143.9 ± 2.9 Ma, 该年龄明显大于 Shu *et al.* (2016) 测得的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 136.4 ± 0.8 Ma. 结合该区岩浆活动情况, 笔者有理由认为存在一次伴随有更古老的钼成矿事件的岩浆活动, 时间大约在 143 Ma, 这个年龄在区域岩浆活动的时间跨度内. 综上所述, 海苏沟钼矿床可能是多期岩浆活动, 多期钼矿化叠加作用的产物, 黑云母花岗岩为主要成矿岩体.

对小井子北铜钼矿床的研究, 前人取得了一定进展. 刘孜等(2017)认为, 矿区内的黑云母花岗岩为主要成矿岩体, 并测得其锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 131~134 Ma. 本文获得矿区内二长花岗岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 126.5 ± 0.7 Ma, 年龄上明显区别于黑云母花岗岩. 且从野外观察来

看, 二长花岗岩主要以岩株和脉岩的形式产出于地表, 与黑云母花岗岩存在明显分界. 指示了二长花岗岩为较晚一期的侵入体, 代表了一期较年轻的岩浆活动. 采集到的锆石样品中有部分年龄偏大的锆石 (140 Ma 左右), 笔者推测其源于二长花岗岩岩浆侵位过程中捕获的部分黑云母花岗岩锆石, 而较年轻的年龄可能源于后期侵入到脉岩中的锆石.

综上所述, 海苏沟岩体的两个钼矿床与西拉沐伦成矿带的第 3 期大规模成岩成矿作用关系密切.

5.2 动力学背景

研究区位于大兴安岭造山带南段, 是古生代古亚洲洋构造成矿域与中生代滨西太平洋构造成矿域的叠加复合区的重要组成部分. 张永北等(2006)提出, 大兴安岭造山带的形成经历了西伯利亚古陆与华北地台中间的古亚洲洋消减和陆陆软碰撞的过程. 大兴安岭碰撞造山结束之后, 大兴安岭南段地壳的构造背景逐渐转化为伸展环境(张晓静等, 2010; 李鹏川等, 2016). 马星

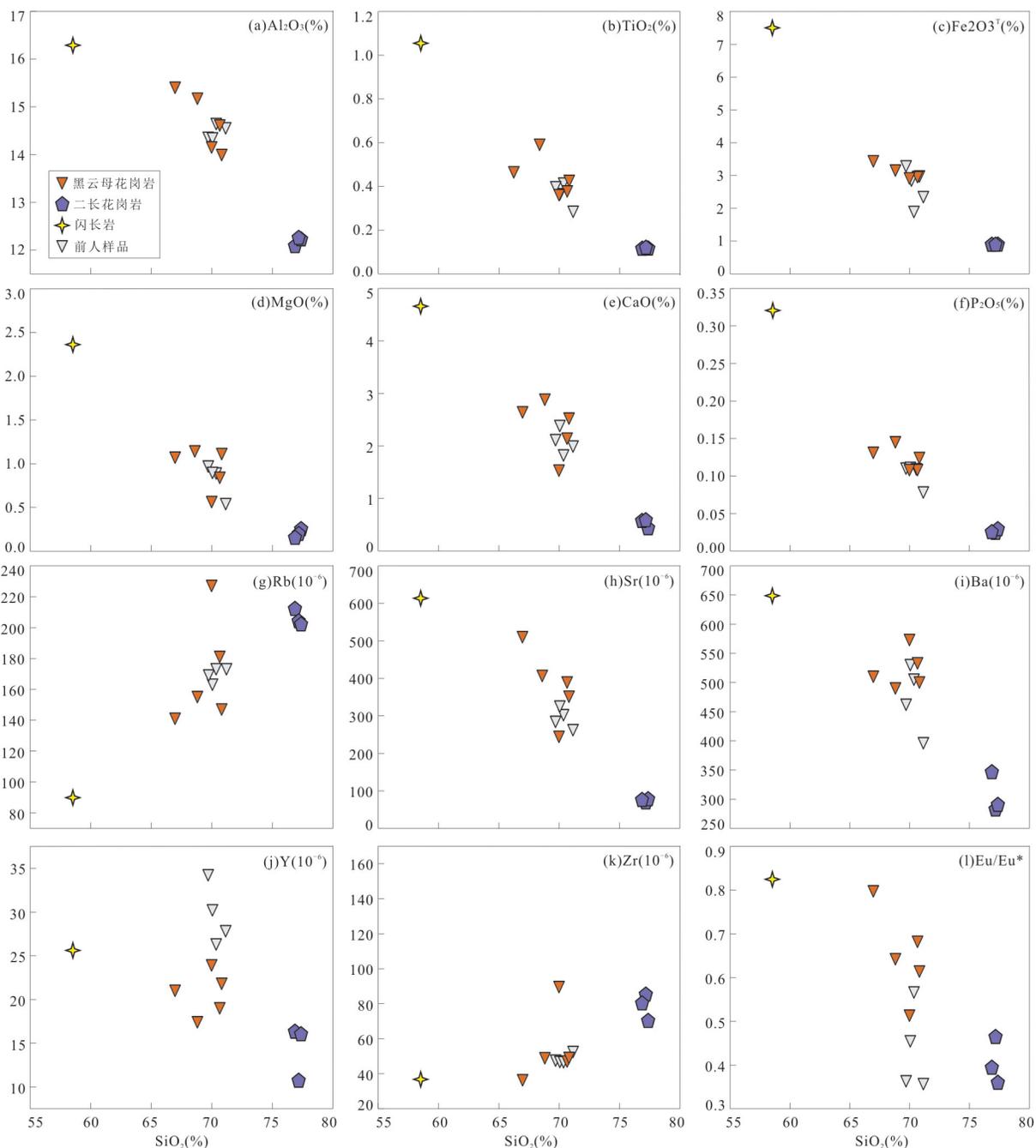


图 8 海苏沟岩体选定主量和微量元素哈克图解

Fig.8 Harker diagrams for selected major and trace elements of the Haisugou intrusive mass

前人数据来自刘孜等(2017)

华等(2009)认为,区域构造环境由挤压造山环境向伸展环境过渡主要发生在晚侏罗世—早白垩世;这与中国东部总体的构造背景大致吻合.中国东部广泛分布年龄大致为 139~110 Ma 的 A 型花岗岩、煌斑岩、高钾火山岩、辉绿岩岩脉群及变质核杂岩,它们标志着白垩纪早期,中国东部进入了相对伸展的环境(王德滋等, 1995).

张连昌等(2008)和 Zhang *et al.*(2009)提出位于

大兴安岭造山带南段的西拉沐伦成矿带主要经历了 3 期大规模的成矿活动,分别集中在 258~210 Ma、185~150 Ma 和 140~110 Ma,对应的地球动力学背景为后碰撞造山活动、构造体系转折(由挤压环境转变为拉伸环境)和岩石圈减薄,这些过程与区域上的构造背景基本一致.

海苏沟岩体黑云母花岗岩的成岩年龄在 131~144 Ma,二长花岗岩的成岩年龄大致为 127 Ma,从

表 1 西拉沐伦钼成矿带成岩成矿年龄及辉钼矿 Re 含量

Table 1 The age of ores and hosting rocks and the content of Re in the Xilamulun molybdenum metallogenic belt, China

矿床名称	矿床类型	测试矿物/岩石	测试方法	年龄(Ma)	Re 含量(10^{-6})	资料来源
车户沟	斑岩型	花岗斑岩	SHRIMP U-Pb	245.1±4.4	—	Zeng <i>et al.</i> (2010b)
		辉钼矿	Re-Os	245.0±5.0	48.2~113.3	
库里吐	斑岩型	二长花岗岩	SHRIMP U-Pb	229.4±4.3	—	吴华英等(2008)
		辉钼矿	Re-Os	236.0±3.3	17.0~38.1	Zhang <i>et al.</i> (2009)
元宝山	石英脉型	辉钼矿	Re-Os	248.0±3.0	2.9	Liu <i>et al.</i> (2010)
碾子沟	石英脉型	辉钼矿	Re-Os	153.0±5.0	18.1~27.4	Zhang <i>et al.</i> (2009)
		二长花岗岩	SHRIMP U-Pb	152.4±1.6	—	Zeng <i>et al.</i> (2010b)
		辉钼矿	Re-Os	154.3±3.6	12.6~37.0	张作伦等(2009)
鸡冠山	斑岩型	流纹斑岩	SHRIMP U-Pb	151.1±1.3	—	陈伟军等(2010)
		辉钼矿	Re-Os	148.5±3.3	8.2~57.1	
小东沟	斑岩型	辉钼矿	Re-Os	138.1±2.8	4.5~8.4	Zeng <i>et al.</i> (2010a)
		辉钼矿	Re-Os	135.5±1.5	2.2~10.3	聂风军等(2007)
		围岩	SHRIMP U-Pb	142.2±2.0	—	Zeng <i>et al.</i> (2010a)
岗子	云英岩型	花岗岩	SHRIMP U-Pb	139.1±2.3	—	Zeng <i>et al.</i> (2010b)
羊场	石英脉型	辉钼矿	Re-Os	138.5±4.5	4.1~20.2	Zeng <i>et al.</i> (2010c)
		二长花岗岩	LA-ICP-MS U-Pb	137.6±1.6	—	Zeng <i>et al.</i> (2011)
敖仑花	斑岩型	花岗斑岩	LA-ICP-MS U-Pb	133.6±2.3	—	Zeng <i>et al.</i> (2011)
		花岗斑岩	SHRIMP U-Pb	134.0±4.0	—	马星华等(2009)
		辉钼矿	Re-Os	132.0±1.0	6.0~38.9	
		辉钼矿	Re-Os	131.2±1.9	19.5~79.8	Zeng <i>et al.</i> (2010c)
		辉钼矿	Re-Os	129.4±3.4	18.8~31.3	Shu <i>et al.</i> (2016)
半砬山	斑岩型	花岗斑岩	SHRIMP U-Pb	129.4±3.5	—	曾庆栋等(2010)
		花岗闪长斑岩	LA-ICP-MS U-Pb	133.5±1.7	—	张晓静等(2010)
		辉钼矿	Re-Os	136.1±6.6	0.1~3.0	Shu <i>et al.</i> (2016)
		辉钼矿	Re-Os	140.5±2.4	1.1~1.3	Zeng <i>et al.</i> (2011)
沙布台	斑岩型	辉钼矿	Re-Os	135.3±2.6	2.3~37.6	Shu <i>et al.</i> (2016)
小井子北	石英脉型	黑云母花岗岩	LA-ICP-MS U-Pb	133.1±1.4	—	刘孜等(2017)
		二长花岗岩	LA-ICP-MS U-Pb	126.5±0.7	—	本文
海苏沟	石英脉型	黑云母花岗岩	LA-ICP-MS U-Pb	137.6±0.9	—	Shu <i>et al.</i> (2014)
		辉钼矿	Re-Os	136.4±0.8	2.1~28.8	Shu <i>et al.</i> (2016)
		黑云母花岗岩	LA-ICP-MS U-Pb	137.1±0.6	—	本文
		辉钼矿	Re-Os	143.9±2.9	2.1	本文

时间上看,当时的区域构造环境为构造体系转折—岩石圈减薄时期,由花岗岩类形成环境微量元素判别图可以看出,所有岩石样品在 Y-Nb 图解中均落入火山弧+同碰撞花岗岩区;在 Yb-Ta 图解中均落入火山弧花岗岩区,说明岩体当时可能处于活动大陆边缘的构造环境下,但是又属于非造山性质(图 9)。因此,海苏沟岩体形成时的构造背景应该是构造体系转折(由挤压环境转变为拉伸环境)至岩石圈减薄的环境。

5.3 花岗岩成因类型及演化

5.3.1 花岗岩成因类型 目前最常用的花岗岩分类为 SIMA 型分类法,以 I 型、S 型、A 型花岗岩较为常

见。近年的研究表明,兴蒙造山带分布有大量侏罗纪—白垩纪的花岗岩,主要为 A 型花岗岩和 I 型花岗岩,其中 A 型花岗岩居多,I 型花岗岩次之(王京彬, 2005)。通常 A 型花岗岩的化学判别标志为 $10^4 \times \text{Ga}/\text{Al} \geq 2.6$ 、 $\text{Zr} > 250 \times 10^{-6}$ 、 $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}) > 350 \times 10^{-6}$ (Whalen *et al.*, 1987)。而海苏沟岩体的二长花岗岩具有相对低的 $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 含量 ($144 \times 10^{-6} \sim 155 \times 10^{-6}$) 和 $10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 值 (2.18~2.30), 相对低的 FeO^T/MgO 值 (3.20~5.31) 和 $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$ 值 (14.0~19.0, 附表 4)。在 A 型花岗岩的判别图解中,样品大部分未落入 A 型花岗岩区域(图 10)。高硅的 S 型花岗岩表现为典型的

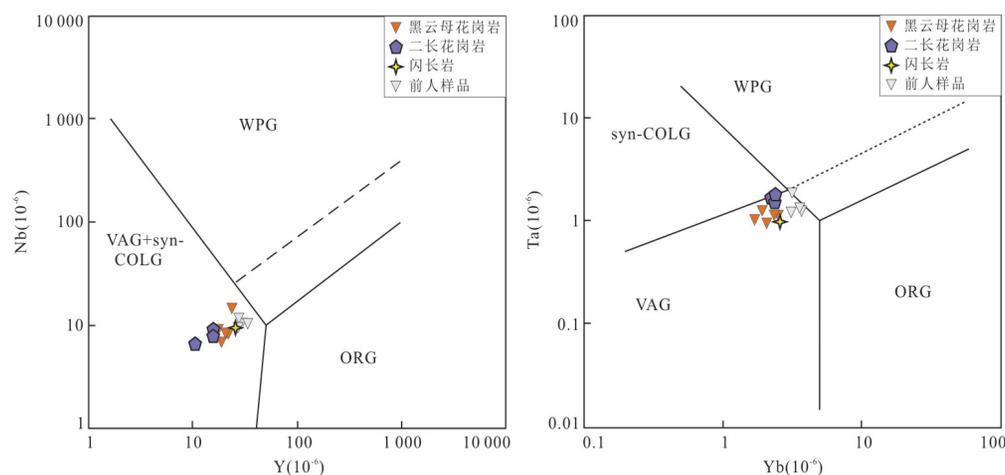


图9 海苏沟岩体花岗质岩石构造环境判别图

Fig.9 Tectonic setting discrimination diagram of granitic rocks of the Haisugou intrusive mass

据 Pearce *et al.* (1984); 前人数据据刘孜等 (2017)

强过铝质特征,即 A/CNK 值大于 1.1 (Clemens *et al.*, 2011). 而海苏沟岩体的二长花岗岩表现出偏铝质或轻微过铝质的特征,其 A/CNK 值为 1.01~1.05 (图 6), 这与 S 型花岗岩有明显差别. 并且二长花岗岩的 SiO_2 与 P_2O_5 含量表现出明显的负相关性 (图 8f), 这种负相关性表明二长花岗岩更接近 I 型花岗岩而非 S 型花岗岩, S 型花岗岩中 P_2O_5 与 SiO_2 含量呈正相关性或者 P_2O_5 随着 SiO_2 增加而保持不变 (Li *et al.*, 2007). 这是由于磷灰石在偏铝质及弱过铝质岩浆中可以达到饱和,但在强过铝质岩浆中会强烈溶解. 综合以上特征推断,海苏沟岩体二长花岗岩为 I 型花岗岩.

前人对海苏沟岩体黑云母花岗岩进行过成因类型的判断. 其中, Shu *et al.* (2014) 测得的黑云母花岗岩样品 ($Zr+Nb+Ce+Y$) 含量为 $138 \times 10^{-6} \sim 224 \times 10^{-6}$, $10^4 \times Ga/Al$ 值为 1.93~2.79, 且具有较低的 FeO^T/MgO 值和 $(K_2O+Na_2O)/CaO$ 值, 认为其属于 I 型花岗岩. 刘孜等 (2017) 测得黑云母花岗岩样品 ($Zr+Nb+Ce+Y$) 值为 $115 \times 10^{-6} \sim 149 \times 10^{-6}$, $10^4 \times Ga/Al$ 值为 2.52~3.18, FeO^T/MgO 值为 1.9~3.9, 认为其属于 A 型花岗岩. 本文采集到海苏沟黑云母花岗岩的样品分析结果显示: ($Zr+Nb+Ce+Y$) 含量为 $105 \times 10^{-6} \sim 220 \times 10^{-6}$; $10^4 \times Ga/Al$ 值为 2.47~3.18; FeO^T/MgO 值为 2.15~4.66; $(K_2O+Na_2O)/CaO$ 值为 2.36~5.41; A/CNK 值为 0.97~1.07. 对比以上数据可以看出黑云母花岗岩样品中 ($Zr+Nb+Ce+Y$) 值均低于 350×10^{-6} , 除个别 $10^4 \times Ga/Al$ 值明显大于 2.6 外, 其余均集中在 2.6

附近, 此外几乎所有样品都具有相对低的 FeO^T/MgO 值和 $(K_2O+Na_2O)/CaO$ 值. 综合微量元素地球化学特征及相关图解 (图 6、图 8、图 10) 推断, 海苏沟岩体黑云母花岗岩应属于 I 型花岗岩.

5.3.2 分离结晶 海苏沟岩体各类花岗岩显示出较大的化学成分变化 (附表 4), 从哈克图解中可以看出大量主量元素氧化物和微量元素与 SiO_2 之间存在明显相关性, 笔者推测在岩浆演化的过程中有分离结晶作用的参与. 从 Al_2O_3 、 CaO 、 Sr 含量及 Eu/Eu^* 与 SiO_2 含量的负相关性 (图 8a、8e、8h、8l) 指示了斜长石的分离结晶, 这一点在 Eu 负异常的稀土元素蛛网图上得到了印证. 从 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 MgO 和 CaO 与 SiO_2 含量的负相关性 (图 8b~8e) 可以看出岩体中主要的镁铁质组分角闪石的分离结晶; 从 TiO_2 和 Y 与 SiO_2 含量的负相关性 (图 8b、8j) 及微量元素蛛网图 (图 7) 中 Ti 的负异常推断, 钛铁矿、榍石和磁铁矿很可能也发生了分离结晶; 而 P_2O_5 与 SiO_2 含量的负相关性 (图 8f) 则暗示了磷灰石发生了分离结晶.

5.4 矿床成因及成矿物质来源探讨

主微量数据 (附表 4) 及各类图解显示 (图 6、图 7), 海苏沟钼矿区的黑云母花岗岩与小井子北铜钼矿区的黑云母花岗岩在地球化学特征方面极为相似, 暗示了两者具有密切的亲缘关系. 笔者推测二者为同一岩浆房中不同期次的岩浆上涌、侵位的产物. 但从成矿的表现来看, 海苏沟钼矿床中以钼成矿为主, 其他伴生的金属硫化物占比只有 1% 左右, 并未达到工业品位; 与此不同的是, 小井子北铜钼矿床中金属矿物种类多样, 且铜和钼均达到工业品

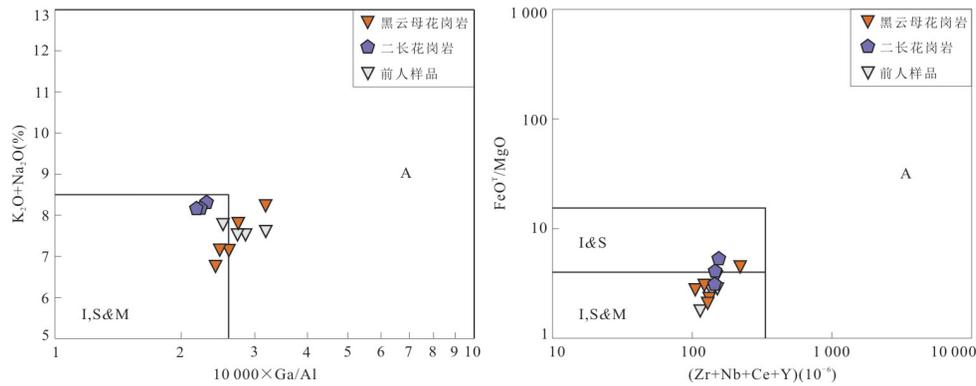


图 10 海苏沟岩体花岗质岩石 $10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 和 $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})-\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 图解

Fig.10 The $10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ and $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})-\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ diagrams of granitic rocks of the Haisugou intrusive mass

据 Whalen *et al.* (1987); 前人数据据刘孜等 (2017)

位.造成这种差异的原因目前还未有定论.

Shu *et al.* (2014) 提出海苏沟钼矿床之所以表现为单一矿种的钼矿床,是因为岩浆在演化过程中,分离结晶作用占了主导地位.正在结晶的花岗质岩浆中,Mo 的分配系数相对较低 (e.g., $D=0.02$; Robb, 2005),表现出不相容元素特征;而相同环境下 Cu 的分配系数则相对较高 (e.g., $D=2$; Robb, 2005),显示出相容元素特征,随着岩浆演化的过程,Mo 随着岩浆到达地表,而 Cu 则留在了源区和早结晶的矿物中.然而,当岩浆中的挥发分过饱和时,特别是挥发分中富 Cl,这种情况下, Cu 更易进入流体相中 (Cu 在 Cl 挥发分/熔体间的分配系数可达 100),而 Mo 不易受 Cl 的丰度影响,同时在挥发分/熔体相中具有中等程度的分配系数 (~ 5.5 , Keppler and Wyllie, 1991).小井子北铜钼矿床黑云母花岗岩的主微量数据显示,其同样经历了相当程度的分离结晶过程.俯冲带岩浆通常富水 (富含挥发分),因此随着岩浆的演化,大量的铜硫化物和钼很可能由流体相 (富挥发分) 携带至浅部地壳,最终发生沉淀形成铜钼矿.

一般认为,斑岩型钼矿床是在时间上、空间上和成因上均与斑状中酸性浅成或超浅成侵入体有关的一类钼矿床.这类矿床往往具有较大的规模,且矿石品位较低,矿化分布均匀,钼矿化特征是矿体多由细脉浸染状矿石组成,即成矿岩体中发育有大量含矿的石英细网脉,而石英-辉钼矿大脉和角砾岩型矿化较为少见 (曹冲等, 2018).海苏沟钼矿床主要矿化形式为石英-辉钼矿大脉型,这一矿化类型一般出现在石英脉型钼矿床和斑岩型钼矿床

中.赖勇等 (2013) 认为海苏沟钼矿床为斑岩型钼矿床,但与典型的以石英-辉钼矿型矿化为主的 Endsko 型斑岩钼矿不同的是,海苏沟钼矿床的矿石品位较高,矿种单一,矿床规模较小,且该矿床形成的构造背景为碰撞后的拉伸环境而非碰撞环境.而 Climax 型斑岩钼矿床的成矿岩体主要为 A 型花岗岩,且通常不发育石英-辉钼矿型矿化;大别型钼矿则主要发育在 S 型花岗岩中,且对应当构造环境为同碰撞或后碰撞环境.综合以上可以看出,海苏沟钼矿床并不属于斑岩型矿床,而应该是石英脉型钼矿床.海苏沟钼矿床与小井子北铜钼矿床的矿脉均受到北西向断层的控制,二者具有显著的成因联系,且矿化形式均为石英大脉型,故而笔者认为小井子北铜钼矿床属于石英脉型铜钼矿床.

Mao *et al.* (1999) 的研究指出,辉钼矿中 Re 的含量与其来源具有一定的相关性,如辉钼矿中 Re 含量为 $n \times 10^{-6}$ 及以下时,代表其为地壳来源;含量为 $n \times 10^{-5}$ 时,代表其为壳幔混源;含量为 $n \times 10^{-4}$ 时,代表其为地幔来源.孟祥金等 (2007) 在总结中国大量钼 (铜) 矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素数据后得出的结论也印证了这种相关性.

结合前人及本次辉钼矿样品的 Re-Os 同位素数据结果 (附表 3, 附表 1),海苏沟钼矿床中辉钼矿 Re 含量在 $2.1 \times 10^{-6} \sim 29 \times 10^{-6}$ 之间.由附表 1 可以看出,内蒙古地区钼矿的成矿物质来源,大多显示出壳源-壳幔混源的特征,辉钼矿中 Re 含量主要集中在 $n \times 10^{-6} \sim n \times 10^{-5}$ 之间.海苏沟钼矿床与内蒙古地区钼矿的物质来源相吻合,为壳源-壳幔混源.

6 结论

(1)海苏沟岩体的形成经历了多期岩浆活动的作用,从岩相上可以划分为黑云母花岗岩和二长花岗岩.其中成矿岩体黑云母花岗岩样品中大量年龄在143 Ma左右的循环晶锆石掺入137 Ma左右的锆石中,指示该岩浆活动在一个较广的时间跨度内,结合前人的研究成果,笔者认为131~144 Ma间均有黑云母花岗岩的岩浆活动.本次研究获得二长花岗岩锆石U-Pb年龄为 126.5 ± 0.7 Ma,二长花岗岩侵位年龄晚于黑云母花岗岩.海苏沟岩体形成时间对应的构造环境为构造体系转折(由挤压环境转变为拉伸环境)至岩石圈减薄.

(2)本次获得的海苏沟钼矿区辉钼矿Re-Os年龄为 143.9 ± 2.9 Ma,这个年龄在区域岩浆活动的时间跨度内,此外前人获得的辉钼矿Re-Os年龄为 136.4 ± 0.8 Ma,可以认为海苏沟钼矿床是多期岩浆活动、多期钼矿化叠加作用的产物,黑云母花岗岩为主要成矿岩体;小井子北钼矿区的黑云母花岗岩与海苏沟钼矿区黑云母花岗岩在岩相学与地球化学特征上基本一致,推测小井子北钼矿床成矿岩体为黑云母花岗岩,其成矿年龄可能在131~134 Ma之间.总的来说,海苏沟岩体成岩及钼矿化作用时间与西拉沐伦成矿带的第3期大规模成岩成矿作用时限大体一致.

(3)海苏沟岩体二长花岗岩及黑云母花岗岩均属于高钾钙碱性系列的I型花岗岩,原始岩浆在上升过程中经历了较高分离结晶作用.

(4)由辉钼矿中Re含量判断海苏沟钼矿床与内蒙古地区钼矿的物质来源相吻合,为壳源—壳幔混源,之所以形成单一钼矿种,是因为该区域岩浆演化过程中的分离结晶作用占了主导地位,而小井子北钼矿床中Cu的矿化可能是因为该区岩浆经历长期分离结晶,Cl挥发分(流体相)将Cu元素携带至浅部地壳发生富集沉淀.综合分析海苏沟钼矿床及小井子北钼矿床矿化类型及成矿岩体特征,并与典型钼矿床对比,认为两个钼矿床均为石英脉型矿床.

致谢:感谢“内蒙古赤峰有色金属基地综合地质调查”项目组对研究工作的鼓励与指导,野外工作得到北京矿产地质研究院的大力支持,野外过程中得到魏巍及张志强研究生的帮助,邹涛博士为文章思路提供了宝贵意见,杨志明研究员,曹明坚副

研究员及朱赖民教授对文章提供了宝贵的修改意见,谨此致谢!

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>).

Reference

- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that do not Report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00195-X)
- Belousova, E., Griffin, W., Y, O'Reilly, S.Y., et al., 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602-622. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0364-7>
- Cao, C., Shen, P., 2018. Advances and Problems in Study of Porphyry Molybdenum Deposits. *Geological Review*, 64(2): 477-497 (in Chinese with English abstract).
- Chen, W.J., Liu, J.M., Liu, H.T., et al., 2010. Geochronology and Fluid Inclusion Study of the Jiguanshan Porphyry Mo Deposit, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1423-1436 (in Chinese with English abstract).
- Clemens, J.D., Stevens, G., Farina, F., 2011. The Enigmatic Sources of I-Type Granites: The Peritectic Connection. *Lithos*, 126(3-4): 174-181. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.07.004>
- Hanchar, J.M., Hoskin, P.W.O., 2003. Zircon: Reviews in Mineralogy and Geochemistry. Mineralogical Society of America/Geochemical Society, Washington D. C..
- Inner Mongolia Autonomous Region Bureau of Geology and Mineral Resources, 1991. Regional Geology of Inner Mongolia Autonomous Region. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Keppeler, H., Wyllie, P.J., 1991. Partitioning of Cu, Sn, Mo, W, U, and Th between Melt and Aqueous Fluid in the Systems Haplogranite-H₂O-HCl and Haplogranite-H₂O-HF. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 109: 139-150. <https://doi.org/10.1007/BF00306474>
- Kong, F.G., Sun, J.Y., Wei, L.M., 2013. The Characteristics of Silver, Lead and Zinc Polymetallic Mineralization in Xiaojingzi Mining Area of Balinzuoqi. *Journal of Mineralogy*, 33(S2): 777 (in Chinese with English abstract).
- Lai, Y., Shu, Q.H., Wang, C., 2013. Evolution Mechanism of Ore-Forming Fluids of Porphyry Molybdenum (Copper) Deposits in Inner Mongolia: A Case Study of Porphyry Molybdenum Deposits in Haisugou, Moulenghua, Chehugou. *Journal of Mineralogy*, 33(S2): 455 (in Chinese with English abstract).

- Li, P.C., Liu, Z.H., Li, S.C., et al., 2016. Geochronology, Geochemistry, Zircon Hf Isotopic Characteristics and Tectonic Setting of Hudugeshaorong Pluton in Balinyouqi, Inner Mongolia. *Earth Science*, 41(12): 1995–2007 (in Chinese with English abstract).
- Li, X.H., Li, Z.X., Li, W.X., et al., 2007. U - Pb Zircon, Geochemical and Sr - Nd - Hf Isotopic Constraints on Age and Origin of Jurassic I- and A-Type Granites from Central Guangdong, SE China: A Major Igneous Event in Response to Foundering of a Subducted Flat-Slab?. *Lithos*, 96(1–2): 186–204. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.09.018>
- Liu, J.M., Zhang, R., Zhang, Q.Z., et al., 2004. The Regional Metallogeny of Daxinganling, China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 269–277 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J.M., Zhao, Y., Sun, Y.L., et al., 2010. Recognition of the Latest Permian to Early Triassic Cu - Mo Mineralization on the Northern Margin of the North China Block and Its Geological Significance. *Gondwana Research*, 17(1): 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.07.007>
- Liu, Z., Huan, X.K., Zhu, X.Y., et al., 2017. Chronology of U - Pb Zircon and Geochemistry of the Biotite Monzogranite and its Geological Implication of the North Xiaojingzi Copper-Molybdenum Deposit in Inner Mongolia. *Mineral Exploration*, 8(6): 997–1009 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K.R., 2001a. ISOPLOT/EX Version 2.49: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkley Geochronological Centre, Berkley.
- Ludwig, K.R., 2001b. SQUID Version 1.02: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkley Geochronological Centre, Berkley.
- Ludwig, K.R., Szabo, B.J., Moore, J.G., 1991. Crustal Subsidence Rate off Hawaii Determined from $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ Ages of Drowned Coral Reefs. *Geology*, 19(2): 171–174. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0171:CSROHD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0171:CSROHD>2.3.CO;2)
- Ma, X.H., Chen, B., Lai, Y., et al., 2009. Petrogenesis and Mineralization Chronology Study on the Aolunhua Porphyry Mo Deposit, Inner Mongolia, and Its Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2939–2950 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J.W., Zhang, Z.C., Zhang, Z.H., et al., 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. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00165-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00165-9)
- Meng, X.J., Hou, Z.X., Dong, G.Y., et al., 2007. The Geological Characteristics and Re - Os Isotope Age of Molybdenite of the Xiongjiashan Molybdenum Deposit, Jiangxi Province. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 946–951 (in Chinese with English abstract).
- Miller, J.S., Matzel, J.E.P., Miller, C.F., et al., 2007. Zircon Growth and Recycling during the Assembly of Large, Composite Arc Plutons. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167(1–4): 282–299. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.04.019>
- Nie, F.J., Zhang, W.Y., Du, A.D., et al., 2007. Re - Os Isotopic Dating on Molybdenite Separates from the Xiaodonggou Porphyry Mo Deposit, Hexigten Qi, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 898–905 (in Chinese with English abstract).
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Peccerillo, A., Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81. <https://doi.org/10.1007/bf00384745>
- Rickwood, P.C., 1989. Boundary Lines within Petrologic Diagrams which Use Oxides of Major and Minor Elements. *Lithos*, 22(4): 247–263. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(89\)90028-5](https://doi.org/10.1016/0024-4937(89)90028-5)
- Robb, L.J., 2005. Introduction to Ore-Forming Processes. Blackwell Publishing, Malden.
- Shen, C.L., Zhang, M., Yu, X.Q., et al., 2010. New Progresses in Exploration of Molybdenum Deposits and Analysis of Mineralization Prospect in Inner Mongolia. *Geology and Exploration*, 46(4): 561–575 (in Chinese with English abstract).
- Shu, Q.H., Chang, Z.S., Lai, Y., et al., 2016. Regional Metallogeny of Mo - Bearing Deposits in Northeastern China, with New Re - Os Dates of Porphyry Mo Deposits in the Northern Xilamulun District. *Economic Geology*, 111(7): 1783–1798. <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.7.1783>
- Shu, Q.H., Lai, Y., Wang, C., et al., 2014. Geochronology, Geochemistry and Sr - Nd - Hf Isotopes of the Haisugou Porphyry Mo Deposit, Northeast China, and Their Geological Significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 777–791. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2013.05.015>
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implication for Mantle

- Composition and Processes. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Sun, X.G., Liu, J.M., Qin, F., et al., 2008. The New Progress on Polymetallic Studies in Daxing'anling—The Revelation of the Southern Bank Xilamulun River Molybdenum Polymetallic Belt. *China Mining Magazine*, 17(2): 75–77, 83 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D.Z., Zhao, C.T., Qiu, J.S., 1995. The Tectonic Constraint on the Late Mesozoic A-Type Granitoids in Eastern China. *Geological Journal of Universities*, 2: 13–21 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J.B., Wang, Y.W., Wang, L.J., 2005. Tin-Polymetallic Metallogenic Series in the Southern Part of Daxing'anling Mountains China. *Geology and Prospecting*, 41(6): 15–20 (in Chinese with English abstract).
- Whalen, J.B., Currie, K.L., Chappell, B.W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419. <https://doi.org/10.1007/bf00402202>
- Wiedenbeck, M., Allé, P., Corfu, F., et al., 1995. Three Natural Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Element and REE Analyses. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 19(1): 1–23. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908x.1995.tb00147.x>
- Wu, H.Y., Zhang, L.C., Chen, Z.G., et al., 2008. Geochemistries, Tectonic Setting and Mineralization Potentiality of the Ore-Bearing Monzogranite in the Kulitu Molybdenum (Copper) Deposit of Xar Moron Metallogenic Belt, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 867–878 (in Chinese with English abstract).
- Xia, B.B., Xia, B., Wang, B.D., et al., 2010. Formation Time of the Tangbula Porphyry Mo - Cu Deposit Evidence from SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Tangbula Ore-Bearing Porphyries. *Geotectonica et Metallogenia*, 34(2): 291–298 (in Chinese with English abstract).
- Yang, F., Pang, X.J., Wu, M., et al., 2019. Geochronology, Geochemistry and Hf Isotopic Compositions of Granitoids in Jinchanggouliang Area, Chifeng, Inner Mongolia. *Earth Science*, 44(10): 3209–3222 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H.L., Gao, S., Liu, X.M., et al., 2004. Accurate U - Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation - Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353–370. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908x.2004.tb00755.x>
- Zeng, Q.D., Liu, J.M., 2010. Zircon SHRIMP U - Pb Dating and Geological Significance of the Ganite Porphyry from Banlashan Porphyry Molybdenum Deposit in Xilamulun Molybdenum Metallogenic Belt. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(4): 827–834 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Q.D., Liu, J.M., Qin, F., et al., 2010a. Geochronology of the Xiaodonggou Porphyry Mo Deposit in Northern Margin of North China Craton. *Resource Geology*, 60(2): 192–202. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2010.00125.x>
- Zeng, Q.D., Liu, J.M., Zhang, Z.L., et al., 2010b. Geology and Geochronology of the Xilamulun Molybdenum Metallogenic Belt in Eastern Inner Mongolia, China. *International Journal of Earth Sciences*, 100(8): 1791–1809. <https://doi.org/10.1007/s00531-010-0617-z>
- Zeng, Q.D., Liu, J.M., Zhang, Z.L., 2010c. Re - Os Geochronology of Porphyry Molybdenum Deposit in South Segment of Da Hinggan Mountains, Northeast China. *Journal of Earth Science*, 21(4): 392–401. <https://doi.org/10.1007/s12583-010-0102-4>
- Zeng, Q.D., Liu, J.M., Zhang, Z.L., et al., 2009. Geology and Lead-Isotope Study of the Baiyinnuoer Zn - Pb - Ag Deposit, South Segment of the Da Hinggan Mountains, Northeastern China. *Resource Geology*, 59(2): 170–180. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2009.00088.x>
- Zeng, Q.D., Liu, J.M., Zhang, Z.L., et al., 2009. Ore-Forming Time of the Jiguanshan Porphyry Molybdenum Deposit, Northern Margin of North China Craton and the Indosinian Mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 393–398 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Q.D., Liu, J.M., Zhang, Z.L., et al., 2011. Geology and Geochronology of the Xilamulun Molybdenum Metallogenic Belt in Eastern Inner Mongolia, China. *International Journal of Earth Sciences*, 100(8): 1791–1809. <https://doi.org/10.1007/s00531-010-0617-z>
- Zeng, Q.D., Liu, J.M., Zhang, Z.L., et al., 2011. Mesozoic Granitic Magmatism and Molybdenum Ore - Forming Processes in the Xilamulun Metallogenic Belt. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(6): 1705–1714, 1725 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L.C., Wu, H.Y., Wan, B., et al., 2009. Ages and Geodynamic Settings of Xilamulun Mo-Cu Metallogenic Belt in the Northern Part of the North China Craton. *Gondwana Research*, 16(2): 243–254. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.04.005>
- Zhang, L.C., Ying, J.F., Chen, Z.C., et al., 2008. Age and Tectonic Setting of Triassic Basic Volcanic Rocks in

- Southern Da Hinggan Range. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 911–920 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X.J., Zhang, L.C., Jin, X.D., et al., 2010. U - Pb Ages, Geochemical Characteristics and Their Implications of Banlashan Molybdenum Deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1411–1422 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.B., Sun, S.H., Mao, S., 2006. Mesozoic O-Type Adakitic Volcanic Rocks and Its Petrogenesis, Paleotectonic Dynamic and Mineralization Significance of the Eastern Side of Sourthern Da Hinggan, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2289–2304 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z.L., Zeng, Q.D., Qu, W.J., et al., 2009. The Molybdenite Re - Os Dating from the Nianzigou Mo Deposit, Inner Mongolia and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 212–218 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 曹冲, 申萍, 2018. 斑岩型钼矿床研究进展与问题. *地质论评*, 64(2): 477–497.
- 陈伟军, 刘建明, 刘红涛, 等, 2010. 内蒙古鸡冠山斑岩钼矿床成矿时代和成矿流体研究. *岩石学报*, 26(5): 1423–1436.
- 内蒙古自治区地质矿产局, 1991. 内蒙古自治区区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 孔凡干, 孙靖宇, 韦龙明, 2013. 巴林左旗小井子矿区银铅锌多金属矿化特征. *矿物学报*, 33(S2): 777.
- 赖勇, 舒启海, 王潮, 2013. 内蒙古斑岩(铜)矿成矿流体演化机理研究——以海苏沟、敖仑花、车户沟等斑岩钼矿为例. *矿物学报*, 33(S2): 455.
- 李鹏川, 刘正宏, 李世超, 等, 2016. 内蒙古巴林右旗胡都格绍荣岩体的年代学、地球化学、Hf同位素特征及构造背景. *地球科学*, 41(12): 1995–2007.
- 刘建明, 张锐, 张庆洲, 等, 2004. 大兴安岭地区的区域成矿特征. *地学前缘*, 1: 269–277.
- 刘孜, 黄行凯, 祝新友, 等, 2017. 内蒙古小井子北铜钼矿区黑云母二长花岗岩年代学、地球化学特征及地质意义. *矿产勘查*, 8(6): 997–1009.
- 马星华, 陈斌, 赖勇, 等, 2009. 内蒙古敖仑花斑岩钼矿床成矿成矿年代学及地质意义. *岩石学报*, 25(11): 2939–2950.
- 孟祥金, 侯增谦, 董光裕, 等, 2007. 江西金溪熊家山钼矿床特征及其 Re - Os 年龄. *地质学报*, 81(7): 946–951.
- 聂凤军, 张万益, 杜安道, 等, 2007. 内蒙古小东沟斑岩钼矿床辉钼矿铼-钨同位素年龄及地质意义. *地质学报*, 81(7): 898–905.
- 沈存利, 张梅, 于玺卿, 等, 2010. 内蒙古钼矿找矿新进展及成矿远景分析. *地质与勘探* 46(4): 561–575.
- 孙兴国, 刘建明, 覃锋, 等, 2008. 大兴安岭成矿研究新进展——西拉沐伦河南岸 Mo 多金属成矿带的发现. *中国矿业*, 17(2): 75–77, 83.
- 王德滋, 赵广涛, 邱检生, 1995. 中国东部晚中生代 A 型花岗岩的构造制约. *高校地质学报*, 2: 13–21.
- 王京彬, 王玉往, 王莉娟, 等, 2005. 大兴安岭南段锡多金属成矿系列. *地质与勘探*, 41(6): 15–20.
- 吴华英, 张连昌, 陈志广, 等, 2008. 内蒙古西拉木伦成矿带库里吐铜钼矿区二长花岗岩地球化学构造环境及含矿性分析. *岩石学报*, 24(4): 867–878.
- 夏抱本, 夏斌, 王保弟, 等, 2010. 汤不拉含矿斑岩的形成时代及其对斑岩钼铜矿的制约. *大地构造与成矿学*, 34(2): 291–298.
- 杨帆, 庞雪娇, 吴猛, 等, 2019. 内蒙古赤峰金厂沟梁地区花岗岩类年代学、地球化学与 Hf 同位素特征. *地球科学*, 44(10): 3209–3222.
- 曾庆栋, 刘建明, 2010. 西拉沐伦钼矿带半拉山斑岩钼矿床花岗岩钼锆石 SHRIMP U - Pb 测年及其地质意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 40(4): 827–834.
- 曾庆栋, 刘建明, 褚少雄, 等, 2011. 西拉沐伦成矿带中生代花岗岩浆活动与钼成矿作用. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(6): 1705–1714, 1725.
- 曾庆栋, 刘建明, 张作伦, 等, 2009. 华北克拉通北缘鸡冠山斑岩钼矿床成矿年代及印支期成矿事件. *岩石学报*, 25(2): 393–398.
- 张连昌, 英基丰, 陈志广, 等, 2008. 大兴安岭南段三叠纪基性火山岩时代与构造环境. *岩石学报*, 24(4): 911–920.
- 张晓静, 张连昌, 靳新娣, 等, 2010. 内蒙古半拉山钼矿含矿斑岩 U-Pb 年龄和地球化学及其地质意义. *岩石学报*, 26(5): 1411–1422.
- 张永北, 孙世华, 毛骞, 等, 2006. 大兴安岭南段东麓中生代 O 型埃达克质火山岩及其成因、古构造环境和找矿意义. *岩石学报*, 22(9): 2289–2304.
- 张作伦, 曾庆栋, 屈文俊, 等, 2009. 内蒙碾子沟钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. *岩石学报*, 25(1): 212–218.