

小兴安岭霍吉河钼矿区含矿花岗岩类特征及成矿年龄*

张琳琳¹ 刘翠^{1**} 周肃¹ 孙凯² 邱瑞照³ 冯瑶¹

ZHANG LinLin¹, LIU Cui^{1**}, ZHOU Su¹, SUN Kai², QIU RuiZhao³ and FENG Yao¹

1. 中国地质大学,北京 100083

2. 天津地质矿产研究所,天津 300170

3. 中国地质调查局发展研究中心,北京 100037

1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China

3. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China

2014-02-10 收稿, 2014-06-10 改回.

Zhang LL, Liu C, Zhou S, Sun K, Qiu RZ and Feng Y. 2014. Characteristics of ore-bearing granites and ore-forming age of the Huojihe molybdenum deposit in Lesser Xing'an Range. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11):3419–3431

Abstract Ore-bearing granitoid assemblage of the Huojihe molybdenum deposit in Heilongjiang Province consists of biotite monzogranites, monzogranites and aplite granite. The major elements analyses indicate that the ore-bearing granite rocks belong to K-rich calc alkaline-shoshonitic series, with the feature of metaluminous-peraluminous rocks. Harker diagrams show that their magmatic evolution have been subjected to magma mixing, and deeply influenced by hydrothermal fluids, with weak Eu negative or none anomalies, inferring that they aren't suffered a remarkable plagioclase fractional crystallization. Rare-earth elements analyses show that they are all enriched in LREE but depleted in HREE. In addition, the total rare earth elements of monzogranites and aplite granite are significantly lower than those of biotite monzogranites, but their HREE's depletion are lighter than the latter. Their MORB-normalized trace elements diagrams show enrichment of incompatible elements (Cs, Rb, Th) and Pb and Sr, but depletion in Ta and Nb, indicating that the phosphorite and the minerals which are rich in titanium have been fractional crystallized in magma evolution, with characteristics of the island arc magmatic rocks and thickened continental crust. Ore-bearing granites show higher concentration of Mo, Cu, Pb, Zn, W and Cr. Highly evolved granites characteristics in monzogranites and aplite granite and much higher content of molybdenum linked them very close to the molybdenum mineralization. Their whole-rock Pb isotope analyses show that the source of Pb is very complicated, with mixture feature. The model ages of the molybdenite are determined to be $180.7 \pm 2.5\text{Ma} \sim 181.3 \pm 2.6\text{Ma}$, indicating that the ore-formation might have occurred in Early Jurassic period, later than or nearly simultaneously with the formation of host rock, biotite monzogranites. We presume that the monzogranites and aplite granite with a little younger age might be metallogenic rocks. It is believed that the crustal accretion, crust-mantle interaction and delamination in the Huojihe area caused by the subduction of the Mongol-Okhotsk oceanic plate and Paleo-Pacific oceanic plate in opposite directions in the Early Jurassic period may have attributed to the formation of these granitoid rocks and Mo deposit in this region. The highly evolved granitoid dykes can serve as guidelines for future ore-exploration in this region.

Key words Huojihe molybdenum deposit; Granites; Pb isotope; Re-Os model ages; Lesser Xing'an Range

摘要 黑龙江霍吉河钼矿区内含矿花岗岩类岩石组合为黑云母二长花岗岩、二长花岗岩和花岗细晶岩,属高钾钙碱性岩-钾玄岩系列准铝质-过铝质岩石,具有轻稀土富集、重稀土亏损分馏模式;富集不相容元素(Cs,Th)并表现为Ta和Nb负异常以及Pb、Sr正异常,显示俯冲带地球化学特征。含矿岩浆岩明显富集Mo、Cu、Pb、Zn、W、Cr等金属元素。岩石全岩铅同位素来

* 本文受中国地质调查局项目(1212011121075、1212010911028、1212010711814、12120114020901、1212011220921、1212011121266)、科技部国际合作专项(2011DFA22460、2010DFB23390)和国家重点基础研究发展计划项目(2011CB808901)联合资助。

第一作者简介:张琳琳,女,1985年生,硕士,矿物学、岩石学、矿床学专业,E-mail: zllandyou@163.com

** 通讯作者:刘翠,女,1973年生,博士,副教授,岩石学专业, E-mail: liucui@cugb.edu.cn

源比较复杂,具有混合成因铅特征。辉钼矿 Re-Os 模式年龄为 $180.7 \pm 2.5\text{Ma}$ 和 $181.3 \pm 2.6\text{Ma}$, 钼矿成矿时代为早侏罗世。霍吉河钼矿是在蒙古-鄂霍茨克洋和古太平洋相向联合俯冲作用下,导致霍吉河地区发生地壳增生和壳幔相互作用以及后来的拆沉作用,形成了该区花岗质岩石和钼矿床。高度演化的花岗岩体(脉)可以作为今后本区钼矿床的找矿方向。

关键词 霍吉河钼矿区;花岗岩类;Pb 同位素;Re-Os 模式年龄;小兴安岭

中图法分类号 P588.121; P597.3; P618.65

辉钼矿 Re-Os 测年是一种直接测定成矿年龄的新方法,近年来得到了迅速的发展。对于钼矿床,采用 Re-Os 同位素体系测定辉钼矿的形成年龄,就可以直接确定主要矿化阶段的时代,其同位素比值还可以判断成矿金属的物质来源,对研究矿床成矿时代和成因具有很大的意义(谢智和陈江峰,1998)。霍吉河钼矿区位于黑龙江省逊克县境内,距伊春红星林业局霍吉河林场北 6km,是黑龙江省佳木斯六院近年来新发现和正在勘查的钼矿床,目前已探明钼金属储量达到大型规模。近年来,国内众多学者对霍吉河钼矿床的产出特征、含矿岩体地球化学特征、成岩年龄、成矿地质背景等方面进行了多方研究,取得了不少重要认识,但由于本区地质演化史漫长、构造错综复杂,加之,该区基岩出露差,矿床发现时间短,科学研究尚不够系统和深入(李永峰等,2005;孙红杰,2009)。尤其是对致矿侵入体和赋矿岩体的区分、成矿物质来源、时代及其形成动力学背景等仍存在争议,影响了对该成矿带的认识及找矿方向的确立。在矿床的成岩成矿年龄方面,目前已获得的黑云母二长花岗岩锆石 ICP-MS U-Pb 年龄结果分别为: $193.6 \pm 1.4\text{Ma}$ 和 $181.0 \pm 1.9\text{Ma}$ (谭红艳等,2013)、 $190.3 \pm 2.4\text{Ma}$ (张森等,2013)、 $178 \pm 2\text{Ma}$ (孙珍军,2010)、 $184.92 \pm 0.91\text{Ma}$ (郭嘉,2009)、 $184.1 \pm 1.5\text{Ma}$ (陈静,2011)和 $186 \pm 1.7\text{Ma}$ (杨言辰等,2012);5 个辉钼矿 Re-Os 样品等时线年龄为 $176.3 \pm 5.1\text{Ma}$,模式年龄加权平均为 $181.2 \pm 1.8\text{Ma}$ (谭红艳等,2013)。黑云母二长花岗岩的形成年龄范围较大(178~193.6Ma),与成矿年龄的关系不明确。因此,本文在前人工作基础上,对霍吉河钼矿区与成矿有关的侵入岩进行了新的野外地质调查和室内研究,测定了岩石主量元素、稀土、微量元素含量和分析了铅同位素组成,并对 3 件矿石中的辉钼矿样品进行了 Re-Os 同位素定年,经过综合研究,探讨了该钼矿床成矿物质来源及成矿动力学背景,提出了区域进一步找矿的方向。

1 地质背景

霍吉河钼矿区位于小兴安岭-张广才岭钼成矿带北端。近年来,该成矿带还发现了鹿鸣钼矿(韩振哲等,2010;孙珍军,2010;时永明等,2007;刘翠等,2014)、翠宏山钨钼锌多金属矿(刘志宏,2009)、翠岭钼矿(杨言辰等,2012;张苏江,2009)、大黑山钼矿(葛文春等,2007)和石林公园南钨钼矿(孙珍军,2010)等钼矿床及矿化点近 20 处(杨言辰等,2012),使该带成为我国重要的钼成矿带。小兴安岭-张广才岭成矿带分布有大面积的近 SN 向展布的花岗岩,其形成时

代为 190~160Ma(孙德有等,2001;Miao *et al.*, 2004;隋振民等,2007)。葛文春等(2007)获得吉林大黑山地区与斑岩钼矿有关的花岗闪长斑岩的形成时代为 $170 \pm 3\text{Ma}$;韩振哲等(2010)通过对小兴安岭东南鹿鸣-兴安-前进地区早中生代含矿花岗岩的研究,将该区成矿过程划分为三期:(1)与斑状二长花岗岩有关的 Mo、Au 成矿期(225.0~199.4Ma);(2)与细粒二长花岗岩斑岩有关的 Mo 成矿期(201.7~195.3Ma)(唐文龙,2007);(3)与正长花岗岩有关的 Pb、Zn、Mo 成矿期(225~195Ma)。在大地构造位置上霍吉河矿区位于兴安岭-内蒙褶皱区、伊春-延寿褶皱系的五星-关松镇中间隆起带北部,北沟-十八公里复背斜西翼(韩振新等,2004;陈涛和朱书宏,2011)。矿区周围主要出露三叠系上统凤山屯组、白垩系下统光华组以及第四系全新统松散堆积层。岩基状燕山期黑云母二长花岗岩在矿区内大面积出露,石英二长斑岩和花岗细晶岩呈岩脉或岩株状出露,近南北向永续林场-霍吉河旋扭断裂(霍吉河林场南沟断裂)穿过矿区,并控制了石英二长斑岩脉的侵位(李林山等,2010;杨言辰等,2012)(图 1)。

霍吉河林场南沟将矿区分为东西两个矿段,西矿段为矿区的主含矿段。西矿段矿体的总体走向由北部的北东向,向南转变为近南北走向,然后变为东西向,构成一个半环状(图 1)。该矿段矿体规模大,矿化连续,厚度稳定。东矿段位于霍吉河林场南沟的东侧,矿段呈北西走向,矿体为不规则条带状、脉状或扁豆状等,厚度较小(郭嘉,2009;李林山等,2010;杨言辰等,2012)。

2 含矿花岗岩类岩石学及岩相学特征

霍吉河钼矿区内出露的岩浆岩类型较为简单,采集了矿区内东西矿段地表和钻孔岩浆岩样品 23 件(图 1),对其岩石学特征进行了镜下观察,含矿岩体主要为黑云母二长花岗岩、二长花岗岩和花岗细晶岩,而石英二长斑岩并不含矿,因此本文对含矿岩石(采样位置见图 1)进行了重点研究。其中 7 件新鲜含矿样品的岩相学特征如下:

黑云母二长花岗岩:为矿区大面积出露的岩浆岩,目前发现的矿体绝大部分产在该岩石中。岩石手标本呈灰白色至肉红色,似斑状结构,块状构造(图 2a)。主要矿物有石英(30%)、钾长石(35%)、斜长石(20%)、黑云母(10%~15%)和白云母(1%~5%)及少量副矿物(图 2b)。其中,石英呈他形,大小约 2~5mm;钾长石为半自形-自形晶,大小约 5~10mm,部分钾长石表面发育裂纹,裂纹由白云母充填;斜长石呈自形-半自形,颗粒较钾长石小,约 3mm,部分斜长石

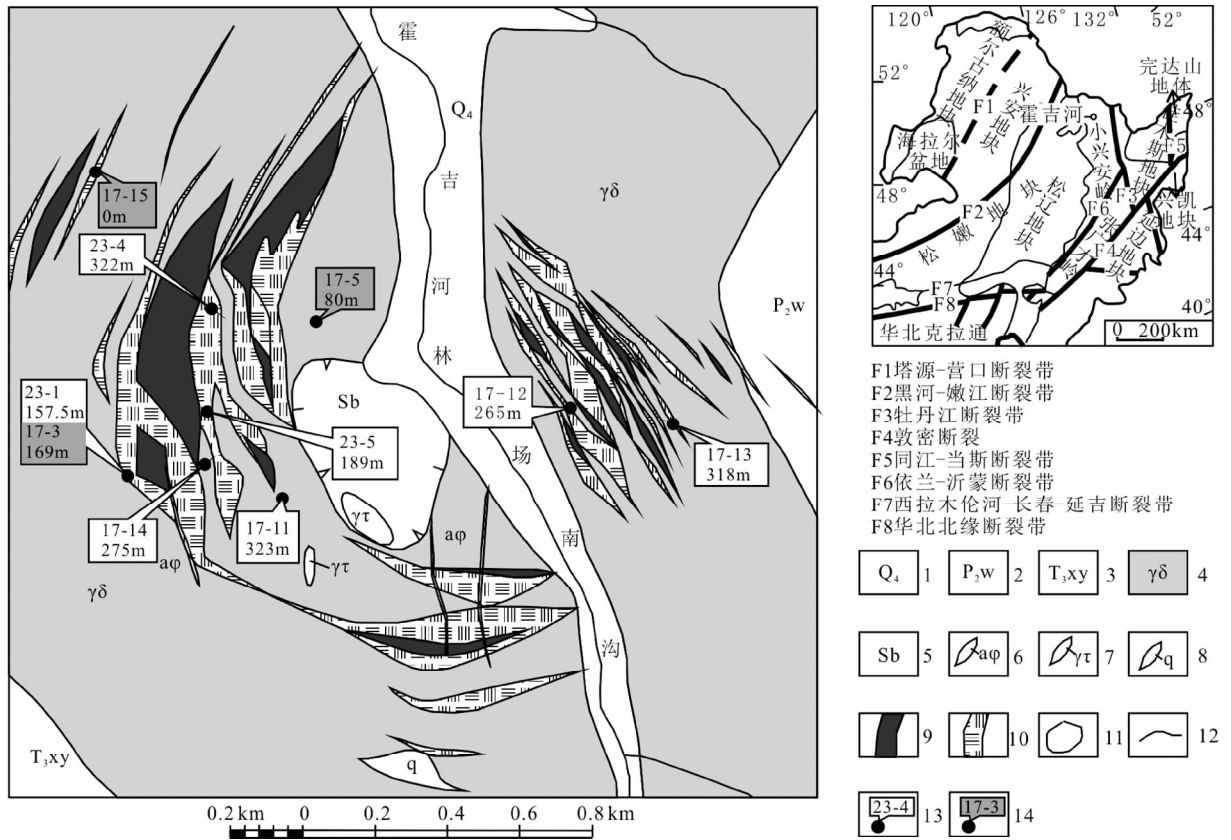


图1 霍吉河钼矿区地质简图及采样位置(据李林山等,2010;杨言辰等,2012)

1-第四系松散堆积物;2-五道岭组中酸性火山岩;3-碱长花岗岩;4-黑云母二长花岗岩;5-爆破角砾岩;6-石英二长斑岩脉;7-花岗细晶岩;8-石英脉;9-钼工业矿体;10-钼低品位矿体;11-火山角砾岩筒;12-地质界线;13-岩石样品所在钻孔位置及采样深度;14-辉钼矿样品所在钻孔位置及采样深度

Fig. 1 Topography and geology sketch of Huojihe molybdenum deposit (after Li *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2012)

发育聚片双晶和韵律环带,斜长石的边缘部分蚀变为绢云母;黑云母为片状、放射状(图2d),大小约1~2mm,多色性明显,部分黑云母发生绿泥石化;白云母大小约1mm,为片状或鳞片状。岩石中可见钾化、绢云母化、泥化、高岭土化等矿化蚀变(图2c)。

金属矿物主要为辉钼矿,有少量黄铁矿;反光镜下辉钼矿呈灰白色,他形,呈浸染状(图3a);黄铁矿呈浅黄色,自形。

二长花岗岩:该岩石仅出现在钻孔中,地表未出露(见图1中17-11),岩石呈浅肉红色(图2e),呈不等粒结构,主要由石英(45%)、钾长石(30%)、斜长石(15%)和白云母(10%)组成。石英呈他形,粒径约1~3mm;钾长石呈半自形,粒径约1~3mm,表面发育高岭土化;斜长石呈半自形-他形,粒径约2~5mm,大部分蚀变为绢云母;白云母呈片状,粒径约0.05mm;在石英颗粒间可见斜长石蚀变的绢云母充填(图2f)。副矿物为锆石,自形。

金属矿物主要为辉钼矿,有少量黄铁矿;反光镜下辉钼矿呈灰白色,他形,呈细脉浸染状(图3b);黄铁矿呈浅黄色,自形。

花岗细晶岩:矿区内呈岩株状侵入到黑云母二长花岗岩内,出露面积较小(图1)。文中样品采自17-12钻孔中,岩石手标本呈肉红色,细粒花岗结构,块状构造,矿物组成主要有石英(45%)、钾长石(40%)、斜长石(13%)和黑云母(2%)(图2g,h)。其中石英呈他形,大小约0.5mm;钾长石呈半自形,颗粒较大,约1mm,个别可见两组不完全解理;斜长石呈自形,颗粒较小,大小约0.5mm,发育聚片双晶;黑云母呈片状,自形-他形,大小约0.3mm,黄褐色-浅黄色,吸收性明显。

金属矿物主要有辉钼矿、黄铁矿和黄铜矿等。反光镜下辉钼矿呈灰白色,他形,细脉浸染状(图3c);黄铁矿呈自形,浅黄色;黄铜矿呈自形,黄色。花岗细晶岩中石英网脉发育,呈灰色,辉钼矿大都赋存在石英网脉中(图2g)。

矿区内围岩蚀变主要有钾长石化、绢云母化、硅化、高岭土化等。矿化主要有辉钼矿化、磁铁矿化和黄铁矿化等,矿化与蚀变有着密切关系。蚀变特征矿物主要为石英和绢云母,其次为黑云母,伴有钾长石和绿泥石等,且石英网脉发育,辉钼矿呈细脉状和浸染状赋存在蚀变带中。研究表明:硅化、钾长石化和绢云母化越发育,相应的矿化蚀变就越强,钼含量也越高(郭嘉,2009)。

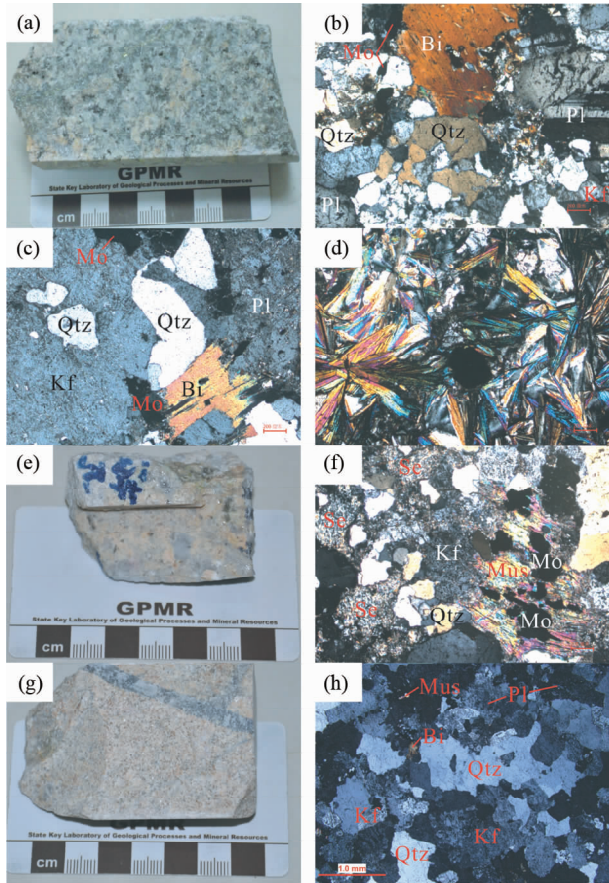


图2 霍吉河钼矿区黑云母二长花岗岩、二长花岗岩及花岗细晶岩手标本和正交偏光下显微照片

黑云母二长花岗岩手标本照片(似斑状结构)(a)和显微照片(b,c)及黑云母二长花岗岩中的团簇状黑云母(d);二长花岗岩手标本照片(e)和显微照片(斜长石均已发生绢云母化)(f);花岗细晶岩手标本照片(g)和显微照片(h). Mo-辉钼矿;Bi-黑云母;Se-绢云母;Qtz-石英;Pl-斜长石;Kf-钾长石

Fig. 2 The photos and microphotographs (CPL) of biotite monzogranites, monzogranites and aplite granite from Huojihe Mo deposit

3 样品测试数据及结果讨论

3.1 测试方法

本文全岩样品主量元素在核工业北京地质研究院分析测试所和国土资源部武汉综合岩矿测试中心采用X-荧光光谱(XRF)方法完成,精度优于5%,微量元素在国土资源部武汉综合岩矿测试中心等离子体质谱(ICP-MS)实验室完成,详细的测试流程见Qin *et al.* (2009)。测试结果见表1。

Pb-Pb 同位素分析在天津地质调查中心实验测试室同位素实验室完成,分析流程见参考文献(彭子成和 Kwak, 1986; 谢智等, 2007; 李全忠等, 2007),测试结果见表2。

辉钼矿 Re-Os 的化学分离、纯化和质谱测试在中国地质科学院国家地质实验测试中心 Re-Os 实验室完成。样品处

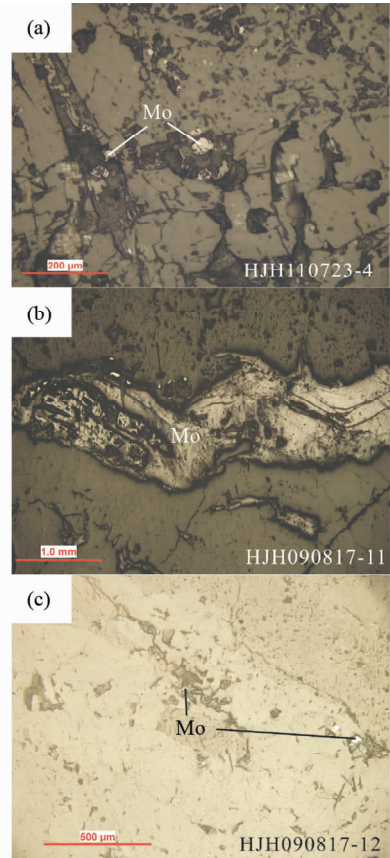


图3 主要金属矿物镜下照片

(a)-黑云母二长花岗岩中浸染状辉钼矿;(b)-二长花岗岩中细脉状辉钼矿;(c)-花岗细晶岩中浸染状辉钼矿

Fig. 3 The microphotographs of main ore minerals

理、分析方法及流程参照有关文献(杜安道等, 1994, 2001; Du *et al.*, 2004),测试结果见表3。

3.2 主量元素特征

主量元素分析数据表明岩石 SiO_2 较高(67.75% ~ 76.39%),属酸性岩类, K_2O 为 3.79% ~ 6.26%,样品数据除去烧失量后重新换算成 100% 在火成岩 TAS 分类图解中大多投到花岗岩区域,仅有 1 个样品在花岗闪长岩与花岗岩的交界处,与野外定名一致(图 4a)。在 SiO_2 - K_2O 图解中样品投入到高钾钙碱性岩和钾玄岩系列区域(图 5i)。 Na_2O 为 2.04% ~ 3.49%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 1.09 ~ 2.82,均大于 1,为富钾质岩石。样品 Al_2O_3 较高(11.08% ~ 15.38%),铝饱和指数(A/CNK)为 0.90 ~ 1.07,在 A/CNK-A/NK 图解落入准铝质-过铝质岩石区,为铝弱过饱和岩石(图 4b)。 MgO 为 0.31% ~ 1.74%, $\text{Mg}^\#$ 为 27.1 ~ 48.9。 CaO 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 分别为 0.95% ~ 2.79% 和 1.67% ~ 4.11%。 P_2O_5 和 TiO_2 较低,分别为 0.04% ~ 0.19% 和 0.14% ~ 0.56%。岩石固结指数(SI)为 3.22 ~ 13.46,分异指数(DI)为 78.22 ~ 92.88;岩石里特曼指数(σ)为 1.81 ~ 2.80,为钙碱性岩系列。

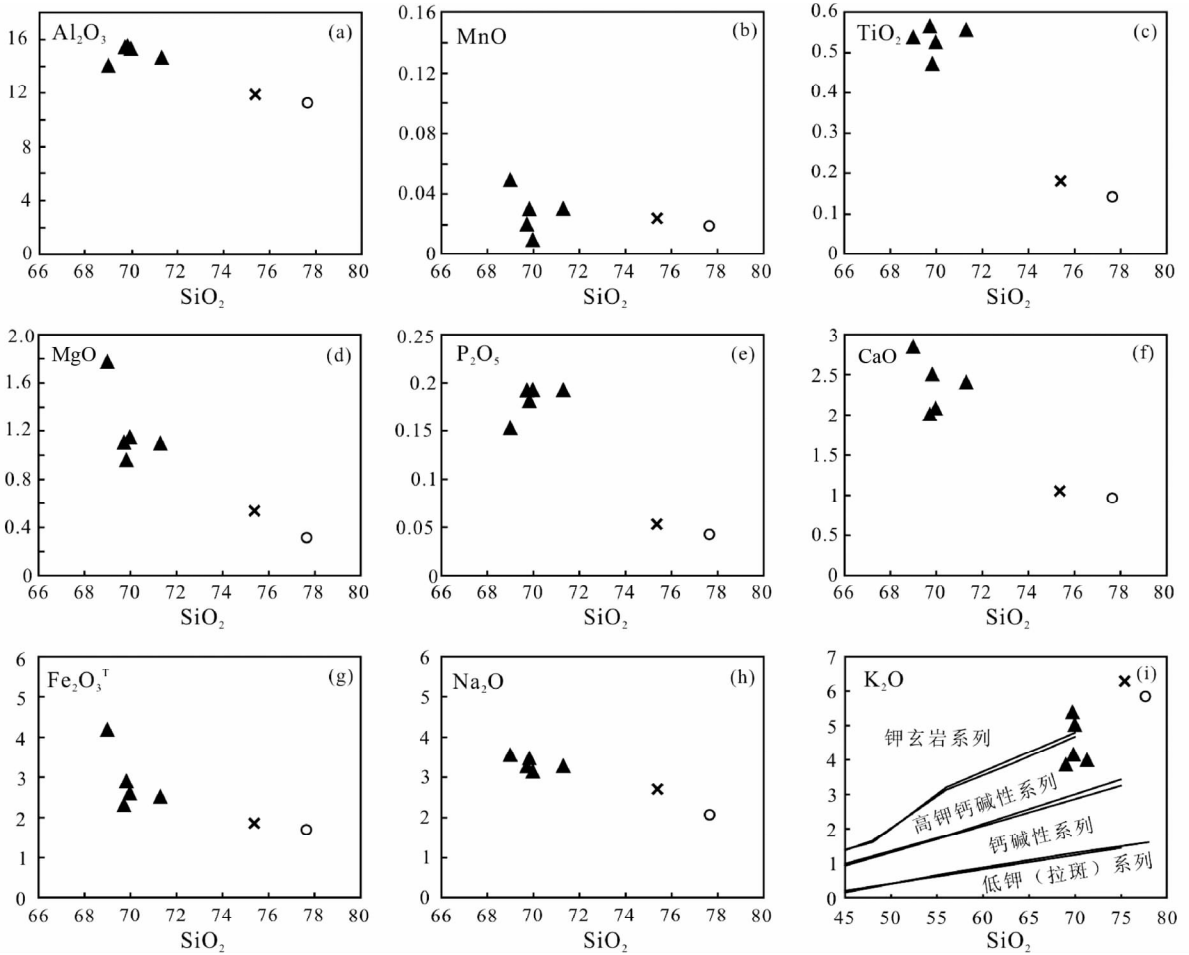


图5 霍吉河矿区花岗岩类 Harker 图解(i, 据 Le Maitre, 2002)

Fig.5 Harker diagrams of granites from Huojihe Mo deposit (i, after Le Maitre, 2002)

在 Harker 图解中(图 5), 岩石随 SiO_2 含量的增加, Al_2O_3 、 CaO 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 、 MgO 、 MnO 、 TiO_2 和 P_2O_5 含量的变化线性关系不强, 但整体呈降低趋势(图 5a-g); 而 Na_2O 和 K_2O 与 SiO_2 的含量并不呈线性关系(图 5h, i), 说明矿区内上述岩石在演化过程中可能发生了岩浆混合作用, 但受后期热液影响比较大, 图 2d 中簇状黑云母的出现同样也说明热液流体对岩石的改造作用(罗照华等, 2013)。矿区岩浆岩为微弱负 Eu 异常或无负 Eu 异常, 同时岩石具有较大的 La/Sm 变化范围, 表明其岩浆演化主要以部分熔融为主, 分离结晶作用微弱(董昕, 2008)。

3.3 稀土元素特征

样品稀土总量低至中等, ΣREE 为 $66.70 \times 10^{-6} \sim 159.0 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 为 $3.44 \sim 6.76$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 $8.98 \sim 22.08$, $(\text{Ce}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 $4.95 \sim 13.39$ (表 1), 为轻稀土富集、重稀土亏损分馏模式。 δEu 介于 $0.78 \sim 0.99$, 为微弱负铕异常或无异常, 表明岩浆演化过程中斜长石未发生明显的分离结晶作用。在球粒陨石标准化稀土元素图(图 6a)上, 配分曲

线总体相似, 呈右倾模式。而二长花岗岩和花岗岩细晶岩的稀土总量明显低于黑云母二长花岗岩的范围, 但这两种岩石的重稀土亏损程度较黑云母二长花岗岩轻。

邓晋福等(1996)基于实验岩石学和相平衡角度认为, Eu 异常可以作为一个指示标志, 如果中酸性火山岩和花岗岩类岩石具有弱的或者无负 Eu 异常, 说明岩浆未与斜长石平衡, 其形成深度应大于 $50 \sim 60 \text{km}$, 是具有山根的加厚陆壳; 如果有明显的负 Eu 异常, 说明岩浆形成于正常陆壳底部或者加厚陆壳的中上部。霍吉河矿区与成矿相关的岩体稀土元素特征表明其形成于加厚的陆壳。

3.4 微量元素特征

岩石主要富集 Cs、Rb、Th 等不相容元素, 并表现为 Ta 和 Nb 负异常以及 Rb 和 Sr 正异常, 亏损 Ti 和 P 元素的特征, 与俯冲带岩浆地球化学特征相似(Wilson, 1989; Dilek and Furnes, 2011), 表示岩浆演化过程中有磷灰石及富钛矿物的分离结晶(李昌年, 1992), 显示了加厚陆壳的基本特征。

矿区内含矿岩浆岩明显富集 Mo、Cu、W、Pb、Zn、Cr 等金

表 2 霍吉河钼矿区花岗岩类的 Pb 同位素分析结果及参数

Table 2 Pb isotopic data of the granites from Huojihe Mo deposit

样品号	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$	$(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$	$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$	μ	ω
110723-1	18.734	15.554	38.267	18.480	15.551	38.118	9.36	34.42
110723-5	19.401	15.606	38.696	18.291	15.554	37.730	9.39	33.84
090817-13	19.242	15.589	38.629	18.900	15.597	38.398	9.42	33.85
090817-14	19.041	15.592	38.592	18.978	15.587	38.427	9.39	33.5
090817-11	19.202	15.612	38.656	17.390	15.506	37.230	9.42	36.23
090817-12	19.159	15.596	38.592	18.804	15.578	38.216	9.39	33.44

注:表中 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$ 、 $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$ 、 $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$ 为 $t = 186 \pm 1.7\text{Ma}$ (杨言辰等,2012)时的铅同位素比值

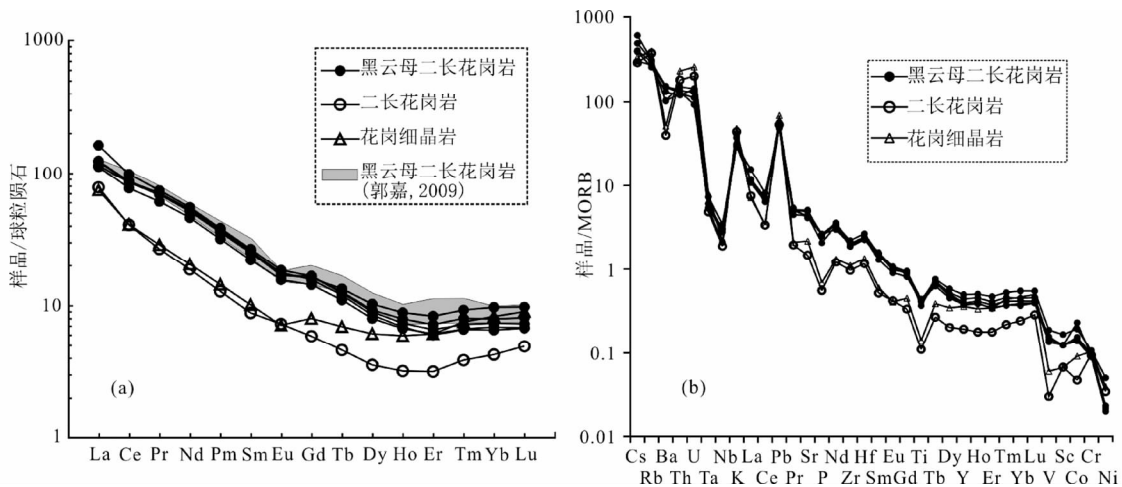


图 6 霍吉河矿区岩浆岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(a, 标准化值据 Sun and McDonough, 1989)和微量元素 MORB 标准化蜘蛛图(b, 标准化值据 Dilek and Furnes, 2011)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE diagrams (a, normalization values after Sun and McDonough, 1989) and MORB-normalized trace elements spider diagrams (b, normalization values after Dilek and Furnes, 2011) of magmatic rocks from Huojihe molybdenum deposit

属元素, Mo、Cu 和 W 的平均值分别为 54.14×10^{-6} 、 66.64×10^{-6} 和 8.66×10^{-6} , 明显高于黑龙江省花岗岩 Mo、Cu 和 W 的平均值 (1.5×10^{-6} 、 18.5×10^{-6} 和 1.85×10^{-6}) (韩振哲等, 2009)。在微量元素 MORB 标准化蜘蛛图(图 6b)上, 黑云母二长花岗岩、二长花岗岩和花岗细晶岩具有相似的配分模式。与稀土元素配分图类似, 二长花岗岩的微量元素 MORB 标准化模式图与花岗细晶岩更相似。

二长花岗岩和花岗细晶岩是研究样品中分异指数最高 (>92) 和固结指数最低的 (<5) 的两件样品, 具有“高度演化的花岗岩”的显著特征: 富硅质、碱质, 而贫钙质, 过渡元素 Ba、Sr 强烈亏损, 亲石元素 (Li、Rb、Th、U、Nb) 显著富集 (吴澄宇和万渝生, 1997), Mo 含量最高 (2~55 倍), 显示了更高的钼成矿相关性, 与其他研究者结果一致 (吴澄宇和万渝生, 1997)。

3.5 Pb 同位素特征

霍吉河钼矿区内的 6 件岩石样品的全岩铅同位素分析结果见表 2。从表中可见, 年龄校正后的黑云母二长花岗岩

石中 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 18.291 ~ 18.978, 平均值为 18.662; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 15.551 ~ 15.597, 平均值为 15.573; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 37.730 ~ 38.427, 平均值为 38.168; 二长花岗岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 17.390, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 15.506, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 37.230; 花岗细晶岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 18.804, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 15.578, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 38.216, 三种岩石的铅同位素比值在误差测定值范围内一致, 显示它们可能为同一岩浆来源。

在铅同位素增长曲线图 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (图 7a) 中, 岩石主要落在地幔和造山带线之间; 在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (图 7b) 中, 样品主要投在上地壳线和地幔线之间。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造源区判别图(图 7c, d) 中, 样品主要落在造山带与洋岛火山岩区域。综合以上铅同位素分析, 矿区岩浆岩中的铅来源比较复杂, 具有混合成因铅特征。

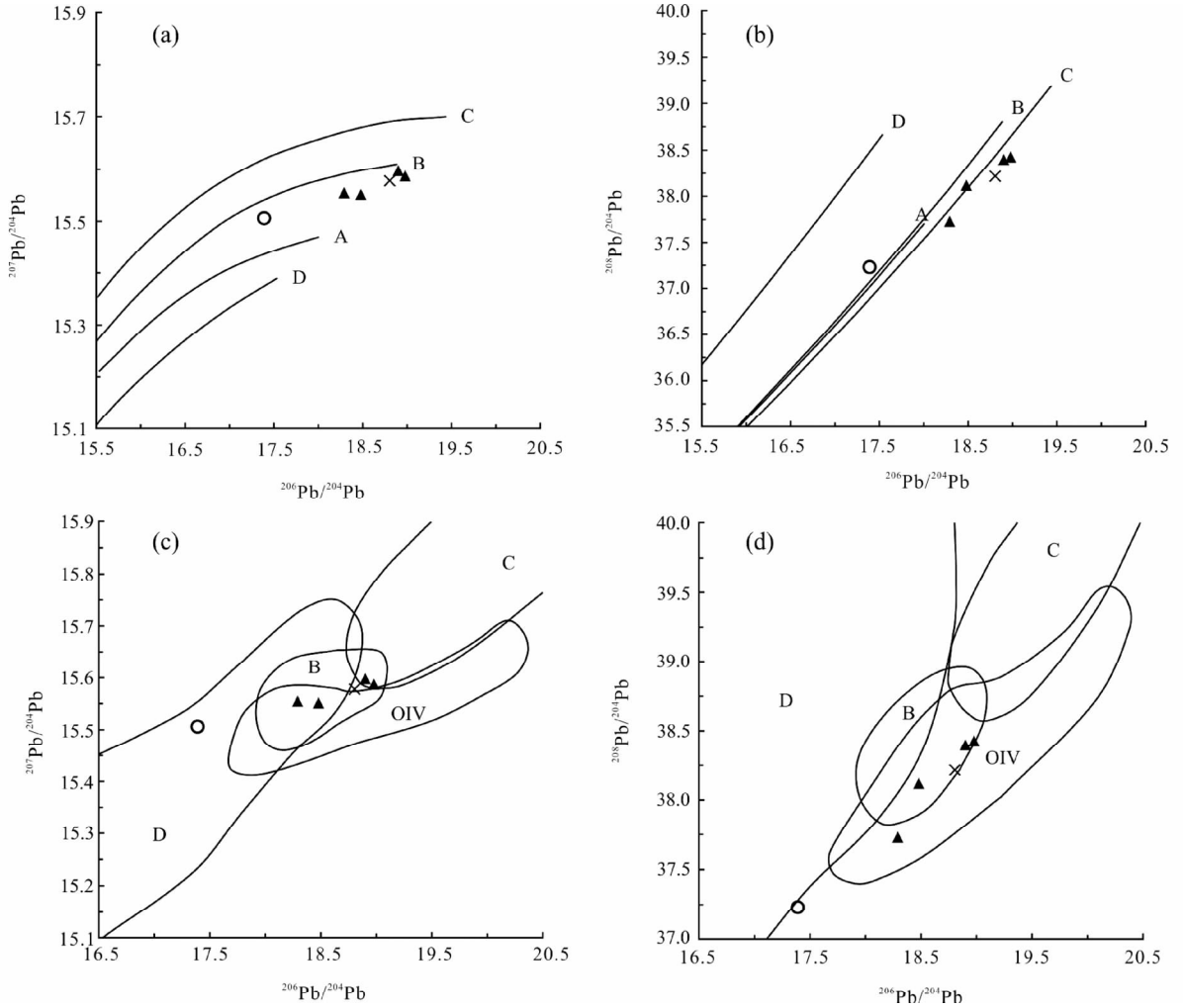
3.6 Re-Os 同位素测年

从矿区地表及钻孔中的石英脉中选出 3 件辉钼矿样品

表3 霍吉河钼矿区辉钼矿 Re-Os 同位素分析结果

Table 3 Re-Os data for molybdenite from the Huojihe Mo deposit

样品名	样重(g)	Re ($\times 10^{-6}$)		普 Os ($\times 10^{-9}$)		^{187}Re ($\times 10^{-6}$)		^{187}Os ($\times 10^{-9}$)		模式年龄(Ma)		$\frac{^{187}\text{Os}}{\text{普 Os}}$
		测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	
090817-15	0.05039	13.69	0.12	0.3623	0.0101	8.605	0.074	28.02	0.22	195.0	2.8	77
090817-15	0.05264	12.90	0.11	0.3804	0.0124	8.106	0.07	26.64	0.21	196.8	2.8	70
090817-3	0.05046	12.04	0.09	0.0043	0.0096	7.565	0.057	22.89	0.21	181.3	2.6	5323
090817-5	0.05026	30.92	0.23	0.0566	0.0143	19.43	0.14	58.58	0.48	180.7	2.5	1035

图7 铅同位素 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 及 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 增长曲线及构造环境判别图(底图据 Zartman and Doe, 1981)

A-地幔;B-造山带;C-上地壳;D-下地壳;OIV-洋岛火山岩

Fig. 7 Evolution curve of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and tectonic environment discrimination diagrams (after Zartman and Doe, 1981)

进行 Re-Os 同位素分析(图1),其中样品 HJH090817-3(黑云母二长花岗岩)和 HJH090817-5(花岗岩细晶岩)为钻孔中样品,而采自地表黑云母二长花岗岩的样品 HJH090817-15 的矿物晶体较大。HJH090817-3 和 HJH090817-5 的辉钼矿 Re-Os 模式年龄分别为 $180.7 \pm 2.5\text{Ma}$ 和 $181.3 \pm 2.5\text{Ma}$,在误差范围内一致(表3)。HJH090817-15 的 Re-Os 模式年龄为 ~

$196.8 \pm 2.8\text{Ma}$,高于其它2个辉钼矿样品结果,也高于本区前人所获的黑云母二长花岗岩同位素年龄(178~193Ma)。

Re-Os 同位素体系是硫化物矿床形成和成矿过程中地壳物质混入程度的示踪剂和指示剂(Foster *et al.*, 1996)。Os 是相容性元素,而 Re 是中等不相容性元素,在壳幔作用中 Re 更易进入熔体,使地壳相对富 Re,而 Os 更多保留在地

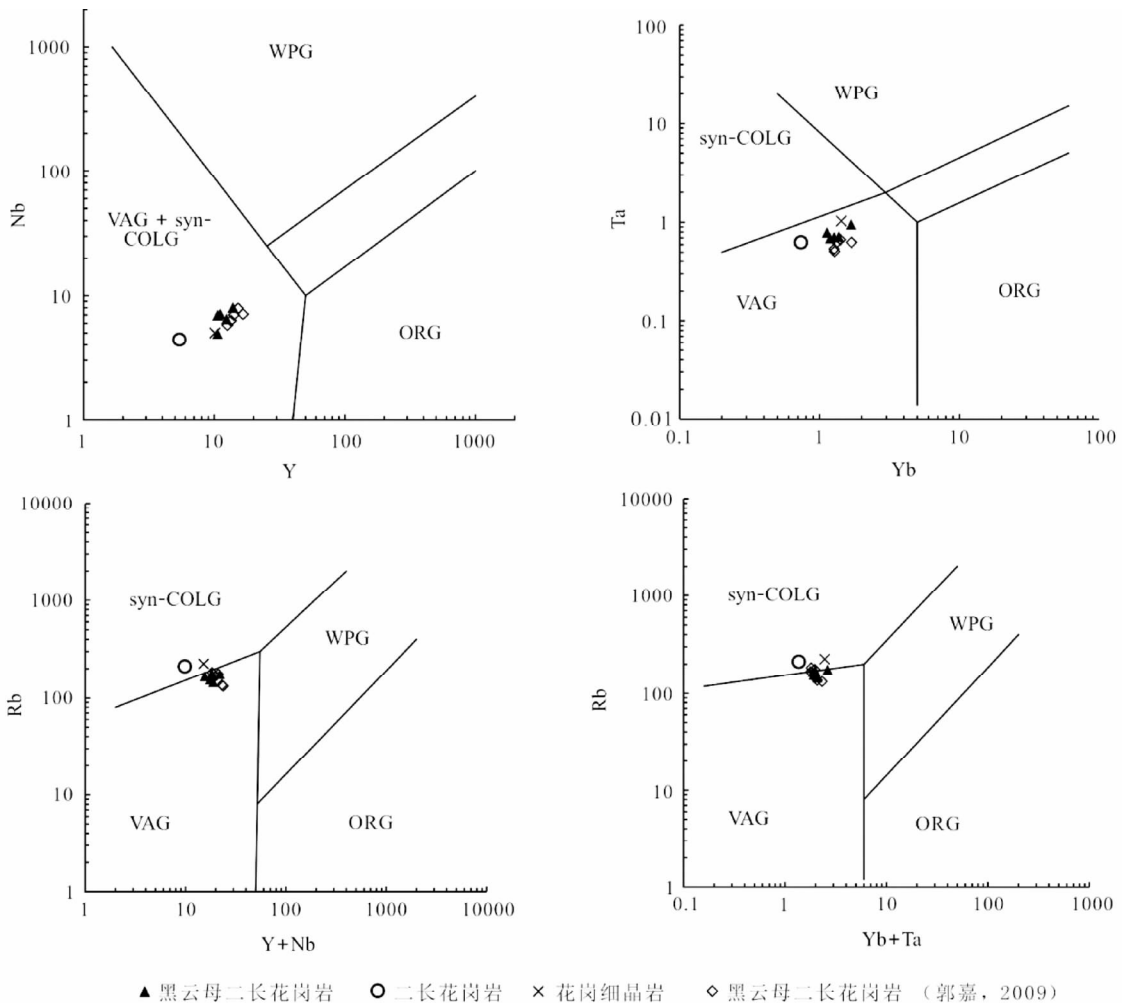


图8 矿区岩浆岩构造环境判别图(底图据 Pearce *et al.*, 1984)

Syn-COLG-同碰撞花岗岩; VAG-火山弧花岗岩; WPG-板内花岗岩; ORG-洋脊花岗岩. 图9 图例同此图

Fig. 8 Discrimination of tectonic setting for the magmatic rocks from Huojihe Mo deposit (after Pearce *et al.*, 1984)

幔中(谢智和陈江峰, 1998)。因此, 辉钼矿中的 Re 含量可以指示其成矿物质的来源, 即含量在 $100 \times 10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6}$ 之间以幔源为主; 含量在 $10 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ 之间具有壳幔混合源特征; 含量在 $1 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$ 或更低, 成矿物质则来自地壳(Mao *et al.*, 1999; 李厚民等, 2007)。本文所得 3 件辉钼矿样品 Re 的含量分别为 13.69×10^{-6} 、 12.04×10^{-6} 和 30.92×10^{-6} , 反映出霍吉河钼矿床的成矿物质具有壳幔混合特征。

4 讨论

4.1 成矿年龄及岩体

样品 HJH090817-15 的 Re 含量 (13.69×10^{-6} 和 12.90×10^{-6}) 与另 2 个样品 (分别为 12.04×10^{-6} 和 30.92×10^{-6}) 比较相差不大(表 3), 但是普通 Os 的含量 (0.3623×10^{-9} 和 0.3804×10^{-9}) 明显高于另外 2 个样品 (分别为 $0.0043 \times$

10^{-9} 和 0.0566×10^{-9}) 将近 2 个数量级, 并且 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 的值 (77 和 70) 远小于同矿区其它两个辉钼矿样品 (分别为 5323 和 1035)(表 3)。在辉钼矿的 Re-Os 年龄测定时所测得的 ^{187}Os 既包括放射成因 ^{187}Os , 也包括非放射成因 ^{187}Os 。虽然通常在利用 Re-Os 同位素测年体系中含有一定量的初始 ^{187}Os , 但是其含量在现有的精度内对该体系的影响可以忽略(Stein *et al.*, 1998; 杜安道等, 2007)。新的研究表明: 如果普通 Os 过高, 不考虑非放射成因 ^{187}Os , 直接采用公式计算 Re-Os 模式年龄, 所得结果肯定偏高(李超等, 2012)。这也可能是辉钼矿得到的年龄有时老于成矿侵入体的原因(邓晋福等, 2009; Liu *et al.*, 2011)。样品 HJH090817-15 采自地表, 晶体较大, 因此推测其较高的模式年龄很有可能是受到普通 Os 的影响, 不予采信, 而将另外 2 个样品的模式年龄看做辉钼矿的形成年龄。该结果与谭红艳等(2013)获得的 $181.2 \pm 1.8\text{Ma}$ 的成矿年龄结果一致(该矿区 5 个辉钼矿的加权平均年龄, 即霍吉河钼矿的成矿时代为 $\sim 180\text{Ma}$ 左右

(早侏罗世),稍晚于黑云母二长花岗岩岩体的形成年龄(平均 185.4Ma),说明矿床的形成晚于或与黑云母二长花岗岩几近同时,这和野外观察到的岩体矿化情况相符。本矿区二长花岗岩和花岗细晶岩目前还没有直接的放射性测年结果,但花岗细晶岩在矿区内呈岩株状侵入到黑云母二长花岗岩明确表明其较晚的形成年龄,二长花岗岩和花岗细晶岩矿物组成以及地球化学分析结果更为接近,表明两者关系更为紧密,可能具同源性。虽然根据岩石矿物颗粒的大小解释二长花岗岩可能是花岗细晶岩的深成相,但在同一岩浆作用下出现矿物颗粒相差悬殊的两种岩石,从侵入深度的角度解释似乎有些欠妥,笔者更倾向于认为花岗细晶岩矿物颗粒较小的原因是由于流体的快速流失(罗照华等,2010)。当花岗细晶岩岩浆侵入到黑云母二长花岗岩中时,由于含矿流体流失到围岩中,造成了花岗细晶岩的快速结晶与成矿,同时流体对围岩(黑云母二长花岗岩)也进行了改造,影响了其地球化学特征和矿物形态(如图 2d 中的簇状黑云母)并且成矿(罗照华等,2010)。该猜测得到笔者近期获得的黑云母二长花岗岩样品(110723-4)中黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 阶段升温坪年龄($175.95 \pm 0.86\text{Ma}$)的印证(另文发表),该年龄与谭红艳等(2013)5个辉钼矿的等时线年龄($176.3 \pm 5.1\text{Ma}$)在误差范围内一致。综合以上分析,有理由认为花岗细晶岩才是钼矿床的成矿母岩,这与野外出露及岩芯中观察到的二长花岗岩和花岗细晶岩富含辉钼矿一致,同时也与微量元素表现出更高的钼成矿相关性一致。新的成矿年龄结果与刘翠等(2014)获得的鹿鸣钼矿床成矿有关花岗斑岩的年龄($174 \pm 2\text{Ma}$)和杨言辰等(2012)获得的翠岭钼矿床与成矿有关石英二长岩的年龄($178 \pm 0.7\text{Ma}$)基本一致,均为燕山早期及其产物。

4.2 成矿构造环境

霍吉河钼矿区与成矿有关岩浆岩在微量元素 Nb-Y、Ta-Yb、Rb-Y + Nb 和 Rb-Yb + Ta 构造环境判别图(图 8)和 Rb/30-Hf-3Ta 构造环境判别图解(图 9)中主要落在火山弧花岗岩区域。

研究区介于华北地台与西伯利亚地台之间,该区经历了古亚洲洋构造域、蒙古-鄂霍次克海和滨太平洋构造域等的长期演化、拼合及转化,因此地质过程非常复杂(刘翠等,2011)。研究表明,晚古生代及其以前东北地区的额尔古纳、兴安、松嫩三个地块就相互碰撞拼合成为一体,早侏罗世佳木斯地块又与上述已拼合的地块拼合(孙德有等,2001;李锦轶等,1999)。侏罗纪太平洋板块的俯冲作用导致已稳定的小兴安岭地区局部伸展张(葛文春等,2007);而北部蒙古-鄂霍茨克海的演化直到早白垩世还存在着向南的逆冲推覆(李锦轶等,2009)。那么该区具有火山弧性质的花岗岩是在太平洋向西俯冲作用下产生的,还是在蒙古-鄂霍次克海向南(或南东)俯冲形成的呢?吉黑东部绥芬河-延边地区的早侏罗世火山岩富钠、高铝和高镁,自东向西 K_2O 和 SiO_2 含量

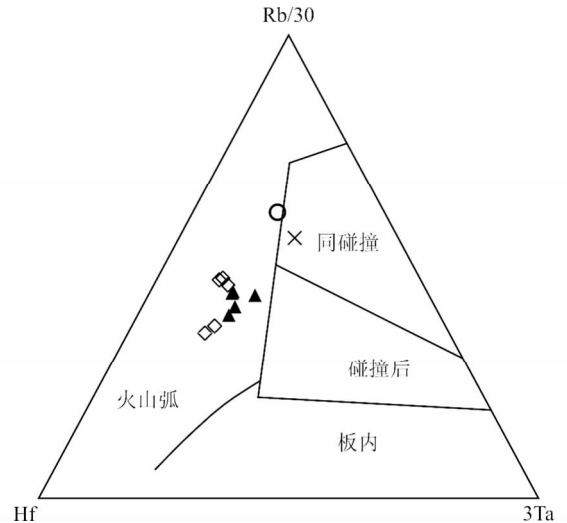


图 9 微量元素 Rb/30-Hf-3Ta 构造环境判别图

Fig. 9 Rb/30-Hf-3Ta diagram

呈增高趋势,而 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值具有降低的趋势,表明陆壳成熟度逐渐增高,标志着古太平洋板块向西俯冲作用的开始,暗示早侏罗世该区东部处于活动大陆边缘的构造背景(裴福萍等,2008;唐杰等,2011;Yu *et al.*, 2012)。而最近在额尔古纳地块发现的早侏罗世(183Ma)钙碱性火山岩也被证实是在蒙古-鄂霍次克海向南(南东)俯冲作用的结果(Xu *et al.*, 2013)。如此看来,本区同处于古太平洋板块向西俯冲和蒙古-鄂霍次克海板块向南(南东)双向俯冲之下(徐美君等,2013)。考虑到小兴安岭的北西-南东向展布,矿区的空间位置以及矿区内断裂(北北西-南南东)、矿体和岩体的展布,特别是约 180Ma 的成岩、成矿时代等,本文认为该区在早侏罗世主要受蒙古-鄂霍茨克洋和古太平洋板块相向联合俯冲作用的影响,并导致了佳木斯地块与松嫩地块发生拼合,产生了伊春-二股地区广泛的地壳增生作用(杨言辰等,2012),而洋壳的俯冲作用是导致该区地壳增生作用(Taylor and McLennan, 1995;吴福元,1999)的主因。洋壳俯冲所形成的具有火山弧性质的岩浆导致霍吉河地区发生壳幔相互作用,最终形成该区中粗粒的黑云母二长花岗岩岩基,后来由于加厚的岩石圈发生拆沉效应(杨言辰等,2012),导致黑云母二长花岗岩岩基的快速抬升,而岩基驱动的深部岩浆和流体快速跟随上升,侵入到岩基中形成花岗细晶岩岩株和钼矿床。由于小兴安岭-张广才岭成矿带分布有大面积印支-早侏罗世花岗岩,在该区寻找燕山早期斑岩型钼矿的前景巨大。要重点关注岩基中发育的浅成-超浅成相的花岗斑岩-花岗岩脉。

5 结论

(1) 黑云母二长花岗岩、二长花岗岩和花岗细晶岩硅高,碱高,为高钾钙碱性岩-钾玄岩系列,准铝质-过铝质岩石。岩

石富集不相容元素, 亏损高场强元素, 稀土总量不高, 具有轻稀土富集、重稀土亏损的分馏模式。Harker 图解显示其岩浆演化过程中经历了岩浆混合作用, 但受热液流体的改造较大, Eu 的弱负异常和无异常显示其未经历明显的斜长石分离结晶。

(2) 岩石主量元素、痕量元素、稀土元素以及同位素等特征结合构造环境判别图指出上述岩石形成于火山弧的大地构造环境, 并经过了明显的壳幔相互作用。

(3) 霍吉河钼矿床辉钼矿 Re-Os 模式年龄分别为 180.7 ± 2.5 Ma 和 181.3 ± 2.6 Ma。因此, 钼矿床成矿时代为早侏罗世, 稍晚或近同时于容矿岩石黑云母二长花岗岩的形成时代, 推测稍晚的二长花岗岩和花岗细晶岩可能为成矿母岩。

(4) 结合区域构造演化, 指出霍吉河钼矿主要受蒙古-鄂霍茨克洋和古太平洋板块相向联合俯冲作用的影响, 导致霍吉河地区发生地壳增生和壳幔相互作用, 形成该区的花岗质岩石; 之后的拆沉作用最终导致了该区的成矿。

(5) 高度演化的花岗岩体(脉)是本区今后钼矿床的找矿方向。

致谢 黑龙江省区域地质调查所张昱、田世攀等人在野外地质工作中给予了帮助; 中国地质大学(北京)狄永军、喻学惠和王瑜教授在本项目的研究与成文过程中给予了指导和帮助; 罗照华教授在审稿过程中提出了大量建设性的意见和建议; 在此一并表示衷心感谢! 邓晋福教授指导、参与了本项目研究及野外工作, 并在成文过程中提出了宝贵意见, 值此邓晋福教授八十华诞之际, 仅以此文庆贺邓老师 80 大寿!

References

Chen J. 2011. Metallogenic setting and metallogenesis of nonferrous-precious metals in Lesser Hinggan Mountain, Heilongjiang Province. Ph. D. Dissertation. Changchun: Jilin University, 70 - 90 (in Chinese with English summary)

Chen T and Zhu SH. 2011. Discussion of the genesis and potential analysis of Mo deposit in Huojihe. China New Technologies and Products, (13): 73 (in Chinese)

Deng JF, Zhao HL, Mo XX *et al.* 1996. Continental Roots-Plume Tectonics of China; Key to the Continental Dynamics. Beijing: Geological Publishing House, 16 - 21 (in Chinese)

Deng JF, Feng YF, Liu C *et al.* 2009. Yanshanian (Jurassic-Cretaceous) orogenic processes, magma sources and metallogenesis as well as coal formation in the Taihangshan-Yanshan-West Liaoning region. Geology in China, 36(3): 623 - 633 (in Chinese with English abstract)

Dilek Y and Furnes H. 2011. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. Geological Society of America Bulletin, 123(3 - 4): 387 - 411

Dong X. 2008. The geochronology and geochemistry of the Mesozoic and Cenozoic granitoids from southwestern Gangdese belt, Tibet. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geosciences, 38 - 58 (in Chinese with English summary)

Du AD, He HL, Yin NW *et al.* 1994. A study on the rhenium-osmium geochronometry of molybdenites. Acta Geologica Sinica, 68(4): 339 - 347 (in Chinese with English abstract)

Du AD, Zhao DM, Wang SX *et al.* 2001. Precise Re-Os dating for molybdenite by ID-NTIMS with Carius Tube Sample Preparation. Rock and Mineral Analysis, 20(4): 247 - 252 (in Chinese with English abstract)

Du AD, Wu SQ, Sun DZ *et al.* 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenite HLP and JDC. Geostandard and Geoanalytical Research, 28(1): 41 - 52

Du AD, Qu WJ, Wang DH *et al.* 2007. Subgrain-size decoupling of Re and ¹⁸⁷Os within molybdenite. Mineral Deposits, 26(5): 572 - 580 (in Chinese with English abstract)

Foster JG, Lambert DD, Frick LR and Maas R. 1996. Re-Os isotopic evidence for genesis of Archaean nickel ores from uncontaminated komatiites. Nature, 382(6593): 703 - 706

Ge WC, Wu FY, Zhou CY *et al.* 2007. Metallogenic epoch and geodynamics significance of Cu, Mo porphyry type in the east of Xing-Meng orogenic belt. Science Bulletin, 52(20): 2407 - 2417 (in Chinese)

Guo J. 2009. Geological characteristics and origin of Mo deposit in Huojihe Heilongjiang Province. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University, 1 - 28 (in Chinese with English summary)

Han ZX, Xu YQ and Zheng QD. 2004. Metallogenic Series and Its Evolution of Important Metallic and Nonmetallic Minerals in Heilongjiang Province. Harbin: Heilongjiang People's Publishing House, 1 - 241 (in Chinese)

Han ZZ, Zhao HL, Li JJ *et al.* 2009. Metallogenic prognosis of porphyry style molybdenum mineralization potential in Xing'an Area, Tieli City, Heilongjiang Province. Geology and Exploration, 45(3): 253 - 259 (in Chinese with English abstract)

Han ZZ, Jin ZY, Lü J *et al.* 2010. Characteristics of diagenesis and mineralization of the ore-bearing granite and its tectonic setting in the Early Mesozoic era in the Luming-Xing'an-Qianjin Area, southeast of the Lesser Hinggan Mountains. Geology and Exploration, 46(5): 852 - 862 (in Chinese with English abstract)

Le Maitre RW. 2002. Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms. 2nd Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 33 - 39

Li C, Qu WJ, Du AD *et al.* 2012. Study on Re-Os isotope in molybdenite containing common Os. Acta Petrologica Sinica, 28(2): 702 - 708 (in Chinese with English abstract)

Li CN. 1992. Igneous Trace Elements Petrology. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1 - 195 (in Chinese)

Li HM, Ye HS, Mao JW *et al.* 2007. Re-Os dating of molybdenites from Au (-Mo) deposits in Xiaoqinling gold ore district and its geological significance. Mineral Deposits, 26(4): 418 - 423 (in Chinese with English abstract)

Li JY, Niu BG, Song B *et al.* 1999. The Formation and Evolution of the Northern Section Crust of Changbaishan. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 137 (in Chinese)

Li JY, Zhang J, Yang TN *et al.* 2009. Crustal tectonic division and Evolution of the southern part of the North Asian Orogenic Region and its adjacent areas. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 39(4): 584 - 605 (in Chinese with English abstract)

Li LS, He C, Li SY *et al.* 2010. Geological features and genesis of Huojihe Mo deposit of Yichun City, Heilongjiang Province. Jilin Geology, 29(2): 53 - 55 (in Chinese)

Li QZ, Xie Z, Chen JF *et al.* 2007. Pb-Sr-Nd isotopic characteristics of the gabbros from Jinan and Zouping and the contribution of the lower crust to the magma source. Geological Journal of China Universities, 13(2): 297 - 310 (in Chinese with English abstract)

Li YF, Mao JW, Hu HB *et al.* 2005. Geology, distribution, types and tectonic settings of Mesozoic molybdenum deposits in East Qinling area. Mineral Deposits, 24(3): 292 - 304 (in Chinese with English abstract)

Liu C, Deng JF, Kong WQ *et al.* 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of the fine-grained granite and molybdenite Re-Os dating in the Wurunitu molybdenum deposit, Inner Mongolia, China. Acta Geologica Sinica, 85(5): 1057 - 1066

Liu C, Deng JF, Xu LQ *et al.* 2011. A preliminary frame of magma-

- tectonic-Mo metallogenic events of Mesozoic Era in Da Hinggan Mountains and Xiao Hinggan Mountains areas. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 166 – 178 (in Chinese with English abstract)
- Liu C, Deng JF, Luo ZH *et al.* 2014. Post-batholith metallogenesis: Evidence from Luming super large molybdenite deposit in Lesser Xing'an Range. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3400 – 3418 (in Chinese with English abstract)
- Liu ZH. 2009. Geological characteristics and origin of deposit in Cuihongshan W, Mo, Zn polymetatic deposit. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University, 1 – 70 (in Chinese with English summary)
- Luo ZH, Lu XX, Xu JY *et al.* 2010. Petrographic indicators of the ore-bearing intrusions. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2247 – 2254 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZH, Yang ZF, Dai G *et al.* 2013. Crystal populations of igneous rocks and their implications in genetic mineralogy. *Geology in China*, 40(1): 176 – 181 (in Chinese with English abstract)
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635 – 643
- Mao JW, Zhang ZC, Zhang ZH *et al.* 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenum in the Xiaoliugou W (Mo) deposit in the northern Qinling Mountains and its geological significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(11 – 12): 1815 – 1818
- Miao LC, Fan WM, Zhang FQ *et al.* 2004. Zircon SHRIMP geochronology of the Xinkailing-Kele complex in the northwestern Lesser Xing'an Range, and its geological implication. *Chinese Science Bulletin*, 49(2): 201 – 209
- Middlemost EAK. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Sci. Rev.*, 37(3 – 4): 215 – 224
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Petrology*, 25(4): 956 – 983
- Pei FP, Xu WL, Meng E *et al.* 2008. The beginning of the paleo-Pacific plate subduction: Geochronological and geochemical evidence from the Early-Middle Jurassic volcanic rocks in the eastern of Jilin and Heilongjiang provinces. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(Suppl. 1): 268 (in Chinese)
- Peng ZC and Kwak L. 1986. Measurement of Pb isotopes and trace contents of minim U-Th-Pb in basalt. *Rock and Mineral Analysis*, 5(2): 121 – 125 (in Chinese with English abstract)
- Qin JF, Lai SC, Grapes R *et al.* 2009. Geochemical evidence for origin of magma mixing for the Triassic monzonitic granite and its enclaves at Mishuling in the Qinling orogen (central China). *Lithos*, 112(3 – 4): 259 – 276
- Shi YM, Cui B and Jia WL. 2007. Geological features of Luming molybdenum deposit at Tieli in the Heilongjiang Province. *Geology and Prospecting*, 43(2): 19 – 22 (in Chinese with English abstract)
- Stein HJ, Morgan JW, Markey RJ *et al.* 1998. An introduction to Re-Os: What's in it for the mineral industry? *Society of Economic Geologists Newsletter*, 32(1): 8 – 15
- Sui ZM, Ge WC, Wu FY *et al.* 2007. Zircon U-Pb ages, geochemistry and its petrogenesis of Jurassic granites in northeastern part of the Da Hinggan Mts. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 461 – 480 (in Chinese with English abstract)
- Sun DY, Wu FY, Lin Q *et al.* 2001. Petrogenesis and crust-mantle interaction of Early Yanshanian Baishishan pluton in Zhangguangcai Range. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 227 – 235 (in Chinese with English abstract)
- Sun HJ. 2009. Analysis of the main types and mineralogenetic epoch of East Qinling molybdenum deposits. *China Molybdenum Industry*, 33(4): 28 – 33 (in Chinese)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotope systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313 – 345
- Sun ZJ. 2010. The mineralization and geochemical features of Stone Forest Park Mo (W) in Xiaoxing'anling. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University, 1 – 48 (in Chinese with English summary)
- Tan HY, Wang DD, Lü JC *et al.* 2013. Petrogenesis and mineralization chronology study on the Huojihe molybdenum deposit Xiao Hinggan Mountains and its geological implication. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(5): 733 – 748 (in Chinese with English abstract)
- Tang J, Xu WL, Wang F *et al.* 2011. Petrogenesis of bimodal volcanic rocks from Maoershan Formation in Zhangguangcai Range: Evidence from geochronology and geochemistry. *Global Geology*, 30(4): 508 – 520 (in Chinese with English abstract)
- Tang WL. 2007. Geochemical characteristics of magmatites and metallogenic prognosis in Qianjin area, Heilongjiang Province. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University, 10 – 29 (in Chinese with English summary)
- Taylor SR and McLennan SM. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Rev. Geophys.*, 33(2): 241 – 265
- Wilson BM. 1989. *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach*. London: Unwin Hyman
- Wu CY and Wan YS. 1997. Geochemistry of rare-earth elements and the genetic of granitic rocks; Applications and problems. In: Zhang BX, Hong DW and Wu XZ (eds.). *The Modulation Methods of the Lithospheric Research*. Beijing: Atomic Energy Press, 201 – 214 (in Chinese)
- Wu FY. 1999. Formation time and mechanism of continental crust. In: Zheng YF (ed.). *Chemical Geodynamics*. Beijing: Science Press, 224 – 261 (in Chinese)
- Xie Z and Chen JF. 1998. Application of Re-Os isotopic systematics in the study of ore deposit. *Geology-Geochemistry*, 26(4): 79 – 82 (in Chinese with English abstract)
- Xie Z, Li QZ, Chen JF *et al.* 2007. The geochemical characteristics of the Early Cretaceous volcanics in Luzhong region and their source significances. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 235 – 249 (in Chinese with English abstract)
- Xu MJ, Xu WL, Wang F *et al.* 2013. Geochronology and geochemistry of the Early Jurassic granitoids in the central Lesser Xing'an Range, NE China and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 354 – 368 (in Chinese with English abstract)
- Xu WL, Pei FP, Wang F *et al.* 2013. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 167 – 193
- Yang YC, Han SJ, Sun DY *et al.* 2012. Geological and geochemical features and geochronology of porphyry molybdenum deposits in the Lesser Xing'an Range-Zhangguangcai Range metallogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 379 – 390 (in Chinese with English abstract)
- Yu JJ, Wang F, Xu WL *et al.* 2012. Early Jurassic mafic magmatism in the Lesser Xing'an-Zhangguangcai Range, NE China, and its tectonic implications: Constraints from zircon U-Pb chronology and geochemistry. *Lithos*, 142 – 143: 256 – 266
- Zartman RZ and Doe BR. 1981. Plumbotectonics-the model. *Tectonophysics*, 75(1 – 2): 135 – 162
- Zhang S, Kou LL, Han RP *et al.* 2013. Metallogeny and zircon U-Pb age of ore-bearing granodiorite of the Huojihe molybdenum deposit in Heilongjiang Province. *Geology and Resources*, 22(3): 169 – 173 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SJ. 2009. Analysis on the prospecting potentiality and ore-forming geological conditions in Tieli area Mo (Cu) deposit, Heilongjiang Province. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University, 12 – 21 (in Chinese with English summary)

附中文参考文献

- 陈静. 2011. 黑龙江小兴安岭区域成矿背景与有色、贵金属矿床成矿作用. 博士学位论文. 长春: 吉林大学, 70 – 90
- 陈涛, 朱书宏. 2011. 论述霍吉河钨矿床的成因及远景评价. *中国新*

- 技术新产品,(13):73
- 邓晋福,赵海玲,莫宣学等.1996.中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙.北京:地质出版社,16-21
- 邓晋福,冯艳芳,刘翠等.2009.太行-燕山地区燕山期造山过程、岩浆源区与成矿作用.中国地质,36(3):623-633
- 董昕.2008.西藏冈底斯带西南部中生代花岗岩年代学与地球化学.硕士学位论文.北京:中国地质大学,38-58
- 杜安道,何红蓼,殷宁万等.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,赵敦敏,王淑贤等.2001. Carius 管溶样和负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼-钨同位素地质年龄.岩矿测试,20(4):247-252
- 杜安道,屈文俊,王登红等.2007.辉钼矿亚晶粒范围内 Re 和¹⁸⁷Os 的失耦现象.矿床地质,26(5):572-580
- 葛文春,吴福元,周长勇等.2007.兴蒙造山带东段斑岩型 Cu、Mo 矿床成矿时代及其地球动力学意义.科学通报,52(20):2407-2417
- 郭嘉.2009.黑龙江省霍吉河钼矿床地质特征及成因.硕士学位论文.长春:吉林大学,1-28
- 韩振新,徐衍强,郑庆道.2004.黑龙江省重要金属和非金属矿产的矿床成矿系列及其演化.哈尔滨:黑龙江人民出版社,1-241
- 韩振哲,赵海玲,李娟娟等.2009.黑龙江铁力兴安一带斑岩型钼矿资源潜力预测.地质与勘探,45(3):253-259
- 韩振哲,金哲岩,吕军等.2010.小兴安岭东南鹿鸣-兴安-前进地区早中生代含矿花岗岩成岩成矿特征.地质与勘探,46(5):852-862
- 李超,屈文俊,杜安道等.2012.含有普通钨的辉钼矿 Re-Os 同位素定年研究.岩石学报,28(2):702-708
- 李昌年.1992.火成岩微量元素岩石学.武汉:中国地质大学出版社,1-195
- 李厚民,叶会寿,毛景文等.2007.小秦岭金(钼)矿床辉钼矿铼-钨定年及其地质意义.矿床地质,26(4):418-423
- 李锦轶,牛宝贵,宋彪等.1999.长白山北段地壳的形成与演化.北京:地质出版社,1-137
- 李锦轶,张进,杨天南等.2009.北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化.吉林大学学报(地球科学版),39(4):584-605
- 李林山,何财,李少云等.2010.黑龙江省伊春市霍吉河钼矿床地质特征及成因探讨.吉林地质,29(2):53-55
- 李全忠,谢智,陈江峰等.2007.济南和邹平辉长岩的 Pb-Sr-Nd 同位素特征和岩浆源区中下地壳物质贡献.高校地质学报,13(2):297-310
- 李永峰,毛景文,胡华斌等.2005.东秦岭钼矿类型、特征、成矿时代及其地球动力学背景.矿床地质,24(3):292-304
- 刘翠,邓晋福,许立权等.2011.大兴安岭-小兴安岭地区中生代岩浆-构造-钼成矿地质事件序列的初步框架.地学前缘,18(3):166-178
- 刘翠,邓晋福,罗照华等.2014.岩基后成矿作用:来自小兴安岭鹿鸣超大型钼矿的证据.岩石学报,30(11):3400-3418
- 刘志宏.2009.黑龙江省翠宏山钨钼铋多金属矿床地质特征及成因.硕士学位论文.长春:吉林大学,1-70
- 罗照华,卢欣祥,许俊玉等.2010.成矿侵入体的岩石学标志.岩石学报,26(8):2247-2254
- 罗照华,杨宗峰,代耕等.2013.火成岩的晶体群与成因矿物学展望.中国地质,40(1):176-181
- 裴福萍,许文良,孟恩等.2008.古太平洋俯冲作用的开始:来自吉黑东部早-中侏罗世火山岩的年代学及地球化学证据.矿物岩石地球化学通报,27(增1):268
- 彭子成, Kwak L. 1986. 玄武岩中钼同位素和微量铀钍铅的测定.岩矿测试,5(2):121-125
- 时永明,崔彬,贾维林.2007.黑龙江省铁力市鹿鸣钼矿床地质特征.地质与勘探,43(2):19-22
- 隋振民,葛文春,吴福元等.2007.大兴安岭东北部侏罗纪花岗岩岩石的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因.岩石学报,23(2):461-480
- 孙德有,吴福元,林强等.2001.张广才岭燕山早期白石山岩体成因与壳幔相互作用.岩石学报,17(2):227-235
- 孙红杰.2009.东秦岭钼矿的主要类型和成矿时代浅析.中国钼业,33(4):28-33
- 孙珍军.2010.小兴安岭石林公园钼(钨)成矿作用及地球化学特征.硕士学位论文.长春:吉林大学,1-48
- 谭红艳,汪道东,吕骏超等.2013.小兴安岭霍吉河钼矿床成岩成矿年代学及其地质意义.岩石矿物学杂志,32(5):733-748
- 唐杰,许文良,王枫等.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
- 唐文龙.2007.黑龙江省前进地区岩浆岩地球化学特征与成矿预测.硕士学位论文.长春:吉林大学,10-29
- 吴澄宇,万渝生.1997.稀土元素地球化学与花岗岩岩石的成因——应用与问题.见:张炳熹,洪大卫,吴宣志主编.岩石圈研究的现代方法.北京:原子能出版社,201-214
- 吴福元.1999.大陆地壳的形成时间及增生机制.见:郑永飞主编.化学地球动力学.北京:科学出版社,224-261
- 谢智,陈江峰.1998.Re-Os 同位素体系在金属矿床研究中的应用.地质地球化学,26(4):79-82
- 谢智,李全忠,陈江峰等.2007.庐枞早白垩世火山岩的地球化学特征及其源区意义.高校地质学报,13(2):235-249
- 徐美君,许文良,王枫等.2013.小兴安岭中部早侏罗世花岗岩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
- 杨言辰,韩世炯,孙德有等.2012.小兴安岭-张广才岭成矿带斑岩型钼矿床岩石地球化学特征及其年代学研究.岩石学报,28(2):379-390
- 张森,寇林林,韩仁萍等.2013.黑龙江省霍吉河钼矿成矿特征及赋矿花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 年龄.地质与资源,22(3):169-173
- 张苏江.2009.黑龙江省铁力地区钼(铜)矿床成矿地质条件及找矿潜力分析.硕士学位论文.长春:吉林大学,12-21