

小兴安岭霍吉河钼矿床成岩成矿年代学 及其地质意义

谭红艳^{1,2}, 汪道东³, 吕骏超², 舒广龙², 韩仁萍²

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;
3. 西北有色地质勘查局 七一二总队, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 霍吉河钼矿是小兴安岭地区于近年发现的大型斑岩型钼矿床。本文在对矿化特征分析的基础上, 采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 技术对霍吉河成矿花岗质杂岩测年, 获得中细粒花岗闪长岩和斑状花岗岩成岩年龄分别为 181.0 ± 1.9 Ma ($n=15$, MSWD=4.7) 和 193.6 ± 1.4 Ma ($n=25$, MSWD=2.3)。通过辉钼矿 Re-Os 同位素分析, 获得等值线年龄 176.3 ± 5.1 Ma ($n=5$, MSWD=1.3) 和加权平均年龄为 181.2 ± 1.8 Ma ($n=5$, MSWD=1.3)。两种方法获得的年龄大致相近, 表明成岩与成矿于同一系统形成, 成岩大致始于 193.6 ± 1.4 Ma, 成矿于岩浆期后 181.2 ± 1.8 Ma。霍吉河钼矿成岩成矿年龄与乌奴格吐山铜钼矿、兰家沟钼矿和杨家杖子钼矿等矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄相近, 表明中国东北地区广泛存在早侏罗世岩浆成矿作用。微量元素和同位素显示, 霍吉河花岗闪长岩和斑状花岗岩属 A 型花岗岩, 形成于地壳挤压向拉伸转换的构造环境, 成矿物质主要来自岩浆。

关键词: LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年; Re-Os 同位素测年; 花岗质杂岩; 霍吉河钼矿; 小兴安岭

中图分类号: P618.65; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)05-0733-18

Petrogenesis and mineralization chronology study on the Huojihe molybdenum deposit Xiao Hinggan Mountains and its geological implication

TAN Hong-yan^{1,2}, WANG Dao-dong³, LÜ Jun-chao², SHU Guang-long² and HAN Ren-ping²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Shenyang Center of Geological Survey, Shenyang 110034, China; 3. No. 712 Geological Party of Northwest Mining and Geological Exploration Bureau for Nonferrous Metals, Xianyang 712000, China)

Abstract: The Huojihe molybdenum deposit in the Xiao Hinggan metallogenic belt is a large porphyry deposit discovered in recent years. Based on the analysis of characteristics of mineralization, the authors conducted the LA-ICP-MS U-Pb dating of zircon from metallogenic granitic complex and Re-Os dating of molybdenite in Huojihe area. LA-ICP-MS U-Pb ages of zircons from medium-fine grained granodiorite and porphyritic granite are 181.0 ± 1.9 Ma ($n=15$, MSWD=4.7) and 193.6 ± 1.4 Ma respectively. The molybdenite Re-Os isochrones age is 176.3 ± 5.1 Ma ($n=6$, MSWD=1.3), with weighted average model age of 181.2 ± 1.8 Ma. The ages from the two methods are close to each other, suggesting that they might have been formed in the same petrogenetic ore-forming system. The petrogenesis started at 193.6 ± 1.4 Ma and the mineralization in the magma occurred at 181.2 ± 1.8 Ma. The ore-forming age of the Huojihe molybdenum deposit is close to the molybdenite Re-Os isochron age of the Wunugetu Cu-Mo deposit and the Lanjiagou and Yangjiazhangzi molybdenum deposits. There existed an early Jurassic magmatic-mineralization event in Northeast China. Trace element and isotope show that

收稿日期: 2012-10-10; 修订日期: 2013-09-02

基金项目: 中国地质调查局国土资源大调查项目(1212010010845)

作者简介: 谭红艳(1982-), 女, 在读博士, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 940095110@qq.com

granodiorite and porphyritic granite in Huojihe belong to A-type granites. Petrogenesis and mineralization of Huojihe molybdenum deposit were related to changes of the tectonic environment from crust extruding to extending. The mineral source was derived from magma.

Key words: zircon LA-ICP-MS U-Pb dating; Re-Os dating; granitic complex; Huojihe molybdenum deposit; Xiao Hinggan Mountains

小兴安岭花岗岩带是我国东北地区重要的有色金属和贵金属(金)成矿带,该成矿带由 20 多个矿床组成,大-中型矿床 13 个,矿种以钼、金、铅、锌、铁为主。其中钼金属矿资源量达百万吨以上,按成因类型主要分为:产于花岗岩类岩体与下寒武统接触带的矽卡岩型、产于花岗岩类岩体内部的斑岩型和与中生代火山活动有关的浅成低温热液型。小兴安岭地区上述 3 种代表性矿床主要有翠宏山矽卡岩型-斑岩型钼多金属矿床(刘志宏, 2009; 邵军等, 2011),鹿鸣和霍吉河斑岩型钼矿床(贾维林等, 2006; 时永明等, 2007; 郭嘉, 2009; 李林山等, 2010; 谭红艳等, 2012),东安金矿床和高松山浅成低温热液型金矿床(叶鑫, 2011)。

霍吉河钼矿床位于黑龙江省逊克县,地理坐标为东经 $128^{\circ}32' \sim 128^{\circ}36'$,北纬 $47^{\circ}22' \sim 47^{\circ}23'30''$,矿区面积约 5.0 km^2 (图 1)。黑龙江省第六地质勘察院自 2004 年对其进行勘查,2009 年提交钼金属资源量在 $27.5 \times 10^4 \text{ t}$ 以上,平均品位约 0.07%。近年来对现行小兴安岭成矿带花岗岩、花岗岩与成矿关系、成岩成矿大地构造背景的研究取得了许多重要进展(张海骅等, 1991; 黑龙江省地质矿产局, 1993; 韩振新等, 1995, 2004; 张兴洲等, 1998; 吴福元等, 1999; 肖庆辉等, 2002; 孙德有等, 2002, 2004a, 2005; 葛文春等, 2007; 葛肖虹等, 2007; 魏玉明, 2008; 韩振哲等, 2008, 2009, 2010, 2011; 张苏江, 2009; 张振庭, 2010)。韩振哲等(2010)、邵军等(2011)认为与成矿有关的花岗岩类形成于晚三叠世-早侏罗世,产于大陆碰撞向碰撞后转变的构造环境,具壳幔混合成因特征。张海骅等(1991)、黑龙江省地质矿产局(1993)、韩振新等(2004)认为该区域与钼矿密切相关的花岗闪长岩-二长花岗岩形成于加里东期或印支期。郭嘉(2009)认为霍吉河岩体主要由黑云母二长花岗岩构成,其锆石 U-Pb 年龄为 $184.92 \pm 0.91 \text{ Ma}$,为黑云母二长花岗岩结晶年龄,并认为黑云母二长花岗岩是加厚的下地壳底部基性岩部分熔融形成的埃达克质花岗岩。李林山等(2010)认为霍吉河岩体主要由斑状花岗闪长岩构

成,见有细粒二长花岗岩呈爆破角砾岩筒状出露,并根据大多数钼矿体环绕爆破角砾岩筒分布等特征,认为矿床成因类型为次火山热液型。韩振哲等(2010, 2011)研究认为小兴安岭成矿带花岗岩类形成时代主要为加里东期、印支期和燕山期,在物质成分上晚期形成的花岗岩类往往继承和改造先前形成的花岗岩,在空间上不同时期或同期不同花岗岩类往往相互交织在一起,进而造成对成岩成矿时代确定和构造背景研究变得较为复杂。经实地勘查,霍吉河钼矿床成矿岩体为花岗质杂岩体,因此对矿区单一花岗岩类的研究所得出的结论有可能以偏概全。所以,目前测得的黑云母二长花岗岩结晶年龄是否就可以代表霍吉河钼矿的成矿年龄?成矿构造环境又如何?本文针对以上疑问,采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年技术,对中细粒花岗闪长岩和斑状花岗岩进行了年代学精测,并通过 ICP-MS 法直接测定霍吉河钼矿辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄,在准确厘定霍吉河钼矿成岩成矿年龄基础上,结合前人资料,探讨成岩成矿动力学背景。

1 地质背景

小兴安岭地区属于中亚-兴蒙巨型造山带的东段,挟持于西伯利亚板块、华北板块和西太平洋板块之间。该区东以牡丹江断裂为界与佳木斯地块相邻,南以伊通-依兰断裂为界与张广才岭相邻,西部为松辽盆地,北以黑龙江为界。该区的构造发展与演化可归纳为地块形成阶段、再生地槽发展阶段、盖层形成发展阶段和大陆边缘活动带发展阶段(黑龙江省地质矿产局, 1993)。古、中元古代地处古陆边缘裂陷海槽,形成的下元古界东风山群和中元古界黑龙江群零星出露于东部地区,新元古代末期海槽闭合,同造山期花岗岩侵位,本区转入大陆克拉通。古生代以来,地质构造总的发展是在古大陆壳内,由隆拱、拉张裂陷到沉降、挤压闭合,经历多期反复交替的应力作用机制,其总的趋势是从稳定向活动过渡,又从活动向稳定发展。加里东早期边缘裂解海

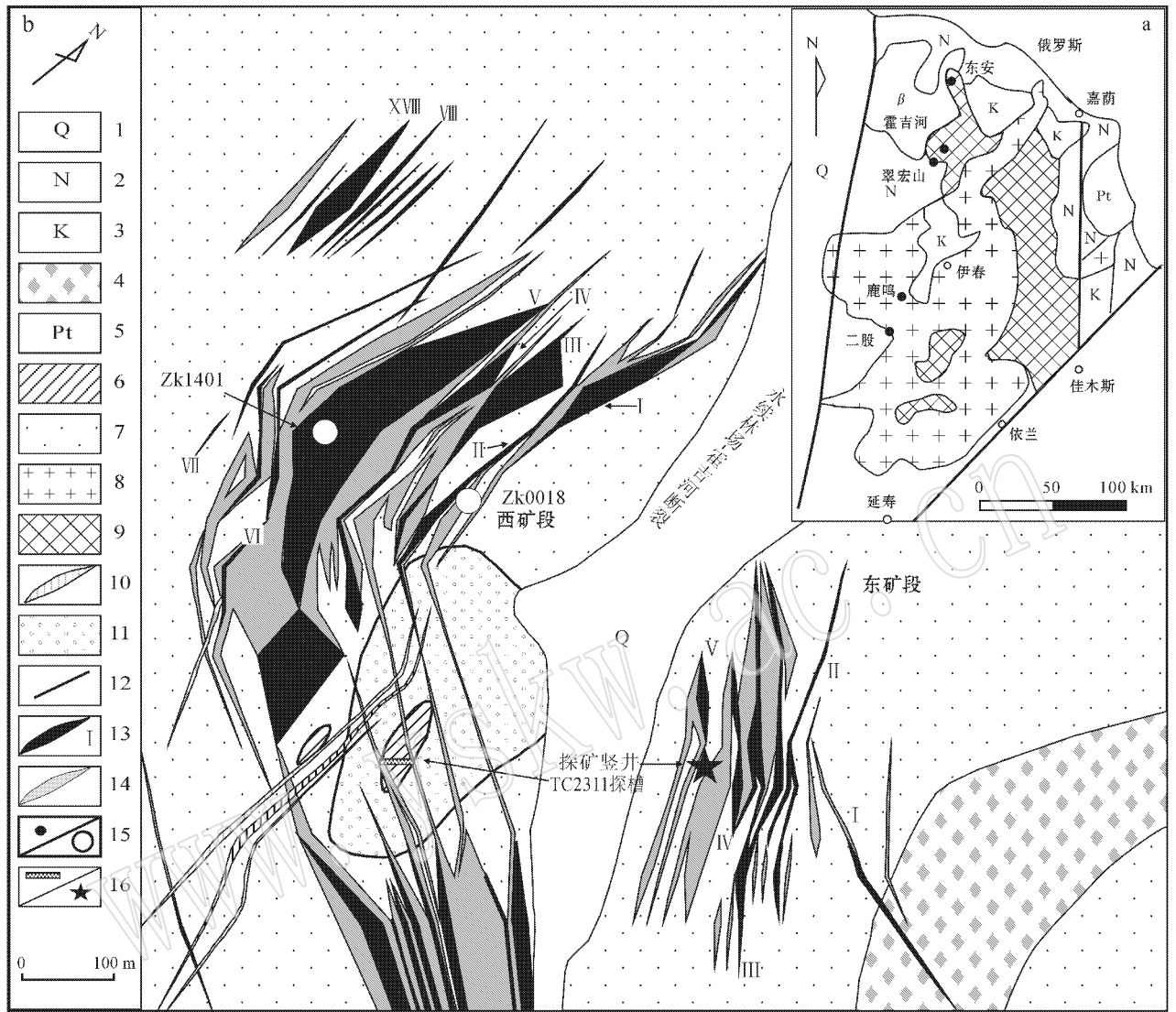


图 1 霍吉河钼矿床矿区地质图 [a 据陈静(2011); b 据魏玉明(2008)有改动]

Fig. 1 Geological map of the Huojihe molybdenum deposit (a after Chen Jing, 2011; b after Wei Yuming, 2008)

- 1—第四系；2—第三系；3—白垩系火山岩；4—风山屯组火山岩；5—元古界东风山群；6—早侏罗世细粒花岗岩或斑状花岗岩；7—早侏罗世花岗岩类；8—晚三叠—早侏罗花岗岩；9—早古生代花岗岩；10—钠长斑岩脉；11—爆破角砾岩；12—断层；13—钼矿体 ($Mo > 0.06\%$) 及编号；14—钼矿体 ($0.06 > Mo > 0.03\%$) 及编号；15—矿床位置及名称/钻孔及编号；16—探槽/探矿竖井
- 1—Quaternary；2—Paleogene；3—Cretaceous volcanic rocks；4—Fengshantun volcanic rocks；5—Proterozoic Dongfengshan Group；6—porphyritic granite；7—Early Jurassic granitoid；8—Late Triassic-Early Jurassic granite；9—Early Paleozoic granite；10—albite porphyritic dikes；11—explosive breccias；12—fault；13—molybdenum body ($Mo > 0.06\%$) and its serial number；14—molybdenum body ($0.06 > Mo > 0.03\%$) and its serial number；15—deposit location and name/drill hole and its serial number；16—trenching/prospecting shaft

水漫侵,形成稳定陆缘碎屑岩-碳酸盐岩,中期转为火山岛弧环境,晚期海槽封闭,隆升成陆。华力西中晚期伊春-延寿构造带复活,产生多次的开合运动。印支期本区发生陆内叠覆造山,岩浆活动强烈,地壳垂向增厚,各板块连为一体,亚洲大陆形成,古亚洲构造域活动结束。燕山期本区隆升,形成大规模重

熔型为主的富碱质钙碱性岩浆,同时伴随火山断陷的形成。总之,小兴安岭显生宙巨型花岗岩带经历了复杂的演化而形成,古生界呈孤岛状分布于“花岗岩海”之中,中生代火山岩较为发育,主要分布于黑龙江南岸的逊克地区,零星出露于花岗岩带之中。小兴安岭显生宙花岗岩带总体呈近SN向展布,

构成花岗岩带主体的碱长花岗岩-二长花岗岩-花岗闪长岩纵贯小兴安岭,越来越多的年代学证据表明该区早中生代花岗岩类分布最为广泛。佳木斯地块西缘的 SN 向牡丹江断裂是该区的重要构造,与之相伴的还有经历构造演化而形成的区域性 NE 和 NW 向等构造。

2 矿床地质特征

矿区地层主要为上三叠统风山屯组中酸性火山岩,出露于南东部。在矿区边部见早白垩世福民河组酸性火山岩地层覆盖花岗岩类。矿区断裂构造发育,主要有近 SN 向、NWW 向和 NNW 向三组断裂构造。近南北向永续林场-霍吉河断裂是矿区最重要的断裂构造,它纵贯矿区并将其切分为东西两个矿段,所有钼矿体均分布于该断裂的两侧。矿区侵入岩分布广泛,岩石类型以中细粒花岗闪长岩为主。此外,矿区发育有钠长斑岩脉,岩脉切穿矿体,为成矿后形成。在矿区中部发育有爆破角砾岩筒,它处

于三组断裂构造交汇部位,地表呈椭圆型,长约 600 m,平均宽约 260 m,面积约为 0.16 km²,产状近于直立(李林山等,2010)。爆破角砾岩具交代残留结构,角砾状构造,交代残留物为斑状花岗岩角砾和钾长石、斜长石及石英、黑云母矿物碎屑,胶结物为石英微晶和少量钾长石微晶等蚀变矿物。

钼矿体主要产于霍吉河岩体内部,绝大多数矿体产于中细粒-中粒花岗闪长岩或中细粒-中粒二长花岗岩中,且围绕角砾岩筒分布,只有少部分矿体分布于爆破角砾岩中。矿区共圈出工业钼矿体 40 条,低品位矿体 27 条。西矿段工业钼矿体 35 条,主矿体编号为 V、VI、VII、VIII。东矿段工业钼矿体 5 条编号分别为 I、II、III、IV、V,主要矿体为 II~V 号矿体。工业钼矿体长度 200~1 695 m,厚度 2~55 m,钼平均品位 0.066%~0.120%。西矿段矿体倾向北偏东或倾向东,倾角 15°~30°。东矿段矿体走向 317°~335°,倾向北东,倾角 10°~30°。矿体有分支复合现象,形态以(不规则)脉状为主,见透镜状和扁豆状等(表 1)(魏玉明,2008)。

表 1 霍吉河钼矿床主要矿体特征表

Table 1 Main ore body characteristics of the Huojihe molybdenum deposit

矿段矿体编号	勘探线号	长度/m	平均厚度/m	赋存标高/m		平均品位/%	产状			形态	
				最高	最低		走向	倾向	倾角		
西矿段	V	11-23, 31-47	1 695	34	550	230	0.068	N 8°~10°, S 300°	E	25°	脉状
	VI	16-15, 23-24	1 300	39	568	100	0.070	N 15°, S 320°	E	20°	脉状
	VII	3-12, 23-24	1 350	41	585	100	0.069	330°	E	20°~25°	脉状
	VIII	23-24	1 250	55	580	70	0.064	0°	E	25°	脉状
东矿段	II	19-31	470	10	558	400	0.073	315°~320°	E	10°~30°	复脉状
	III	19-31	787	31.5	545	400	0.106	315°~320°	E	10°~30°	脉状
	IV	23-35	300	16	520	440	0.070	315°~320°	E	10°~30°	脉状
	V	15-27	100	28	550	450	0.092	315°~320°	E	10°~30°	脉状

矿石矿物成分主要有 20 余种。金属矿物主要为辉钼矿和黄铁矿,见微量磁铁矿、黑钨矿、黄铜矿、斑铜矿、闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿、锡石、自然金等。脉石矿物主要有斜长石、钾长石、石英、黑云母、绿泥石、绿帘石及少量锆石、独居石、榍石、磷灰石、石膏等。根据辉钼矿集合体在矿石中产出的方式,钼矿可划分细脉状、浸染状、团窝状和角砾状四种构造类型。矿石类型主要为细脉状(图 2),细脉宽度一般 0.2~1 mm。辉钼矿与石英、钾长石、黑云母等呈细脉状分布于花岗闪长岩和二长花岗岩中。矿化强度与岩石碎裂程度密切相关,岩石裂隙越发育,钼矿化

越强。浸染状构造是主要矿石构造类型,浸染状矿石常与细脉状矿石相伴出现,辉钼矿集合体呈浸染状,主要分布在造岩矿物颗粒间,矿物集合体一般直径 0.01~1 mm,少量大于 1 mm。团窝状构造是指浸染状辉钼矿相对集中呈团窝出现在花岗岩类中,团窝大小一般 2~3 mm,构成了明显斑点团窝状矿石,这种构造不多见。角砾状构造仅见于西矿段爆破角砾岩中,辉钼矿主要呈细脉-浸染状分布于爆破角砾岩中,并见辉钼矿细脉穿切角砾。

围岩蚀变以钾长石化、硅化、黑云母化和绢云母化为主,次为粘土化、绿泥石化及硬石膏化和碳酸盐

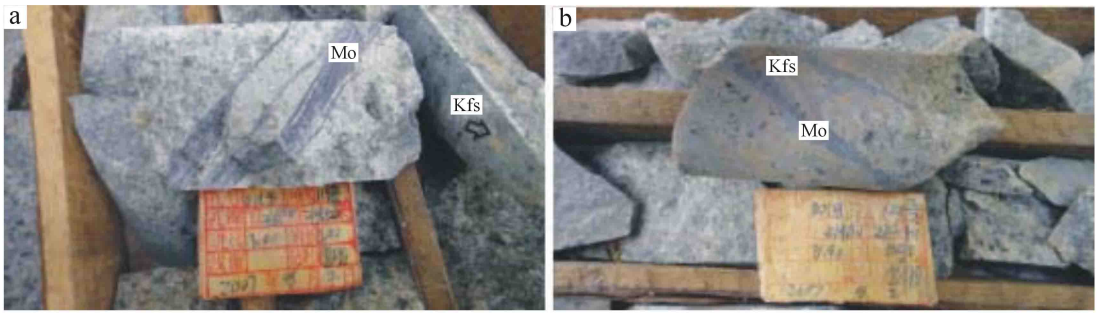


图2 霍吉河钼矿细脉状矿石(a)及钾长石化(b)

Fig. 2 The veinlet (a) and potassic feldspathized (b) ore of the Huojihe molybdenum deposit
a—采自 ZK0018 钻孔孔深 216.5 m; b—采自 ZK0018 钻孔孔深 219.5 m 处; Mo—辉钼矿; Kfs—钾长石

a—collected from drill hole ZK0018 at the depth of 216.5 m; b—from drill hole ZK0018 at the depth of 219.5 m; Mo—molybdenite;
Kfs—K-feldspar

化等,其中钾长石化、硅化、黑云母化和绢云母化与矿化关系密切。矿化主要有辉钼矿化和黄铁矿化,此外还伴有黑钨矿化、闪锌矿化、方铅矿化、黄铜矿化、斑铜矿化、磁铁矿化、针铁矿化、磁黄铁矿化等。按矿物生成顺序将矿化期次分为3个阶段:①石英钾长石化阶段,为矿化前期蚀变,形成浅肉红色粗大钾长石交代斑晶(图2b左)和白色粗粒石英,同时伴有少量自形晶黄铁矿及黑云母和白云母生成。石英多呈团块状或宽度多大于1 cm的石英脉,黄铁矿呈浸染状或细脉状。②石英硫化物阶段,金属矿化主要发生在该阶段。在花岗岩杂岩体内辉钼矿主要与微粒状他形石英组成不规则细网脉,脉宽多小于5 mm,脉内可含少量微粒状钾长石,沿脉两侧可出现较多交代钾长石(图2a右),石英细网越发育,钼品位也相对较高。同时有少部分浸染状或星散状辉钼矿生成并伴有绢云母化等蚀变。在角砾岩筒内表现为长石强烈绢云母化和胶结物中出现大量微细粒石英。③碳酸盐化阶段,发生于成矿之后,主要形成含石膏方解石细脉,同时有粘土矿物生成。

蚀变大致可划分为3个蚀变带,由爆破角砾岩为中心由下至上或由内向外依次为石英-钾长石化带(主要见于角砾岩筒深部)、石英-绢云母化带和粘土化带。石英-钾长石化带主要发育于角砾岩筒深部。石英-绢云母化带基本环绕石英-钾长石化带,大致与辉钼矿化钼矿化区域相吻合,粘土化带不发育。除粘土化带外,其余两蚀变带部分相互重叠或过渡。

3 含矿花岗岩特征

3.1 岩石学特征

矿区广泛出露的花岗岩类是霍吉河岩体的主要组成部分。霍吉河岩体呈岩株状,产于晚三叠世-早侏罗世基状花岗岩类中,出露面积约3.88 km²。霍吉河岩体主体岩石类型为中细粒花岗闪长岩,在探矿竖井还见有中细粒二长花岗岩,此外还见有斑状花岗岩或细粒花岗岩,它们呈相变关系,为同期岩浆活动产物(魏玉明,2008)。(表2,图1、图3)。

3.2 地球化学特征

霍吉河含矿花岗岩类常量元素、微量元素和稀土元素分析结果如表3。岩石SiO₂质量分数为66.05%~74.21%,K₂O+Na₂O为6.73%~8.31%,K₂O/Na₂O为1.41~1.91,A/CNK为0.96~1.15。岩石具有富碱质和相对富钾等特征,属偏铝质花岗岩类。由钾长石化中细粒花岗闪长岩→花岗闪长岩→二长花岗岩→蚀变斑状花岗岩,SiO₂质量分数逐渐增高,K₂O/Na₂O逐渐降低,K₂O+Na₂O波动不大,A/CNK接近于1.0。

稀土元素总量 ΣREE 为 $55.8 \times 10^{-6} \sim 159.01 \times 10^{-6}$, $\delta\text{Eu}=0.69 \sim 1.04$,由钾长石化中细粒花岗岩→花岗闪长岩→二长花岗岩→蚀变斑状花岗岩, ΣREE 均匀亏损, δEu 逐渐增高。LREE/HREE为12.24~15.22,(La/Yb)_N=15.00~19.28,配分模式为右倾斜型(图4a),稀土元素分异程度较高。(La/Sm)_N=

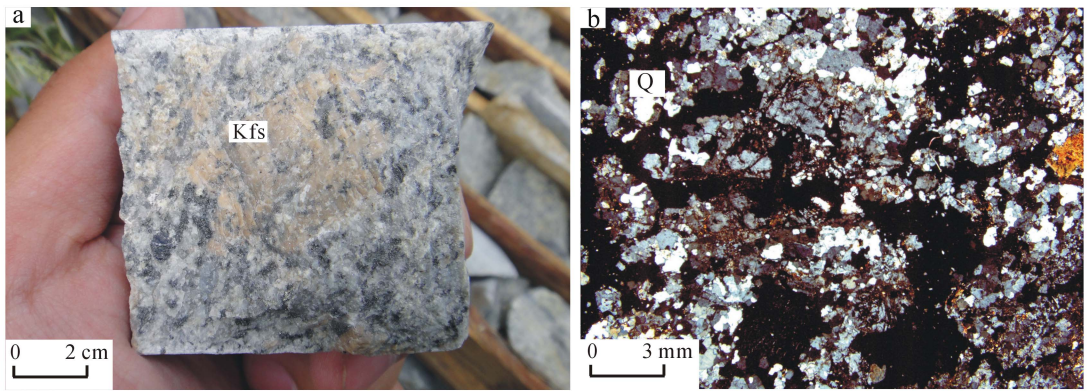


图 3 霍吉河钼矿中细粒花岗岩长岩中的钾长石交代斑晶(a)和细粒花岗岩(b, +)

Fig. 3 Fine-medium grained porphyroeous adamellite with potassium feldspar replacement phenocryst (a) and fine-grained granite (b, +) of the Huojihe molybdenum deposit

a—采自东矿段探矿竖井; b—采自西矿段 TC2311; Kfs—钾长石; Q—石英

a—collected from east ore block shaft; b—from west ore block TC2311; Kfs—K-feldspar; Q—quartz

表 2 霍吉河钼矿床含矿花岗岩类岩石学特征

Table 2 Petrological characteristics of ore-bearing granites of the Huojihe molybdenum deposit

岩石名称 (样品编号)	采样位置	岩石结构	岩石学特征
中细粒 花岗岩长岩 (H11)	ZK0401, 98 m	中细粒花岗结构	矿物粒径为 1.0~4.0 mm。钾长石: 约占 15%。斜长石: 中长石, 沿钾长石边部连生, 约占 55%。石英: 拉长变形, 约占 25%。黑云母: 沿解理缝绿泥石化, 约占 5%, 石英: 他形粒状, 边部锯齿状, 拉长变形, 约占 25%。副矿物: 磷灰石、磁铁矿、榍石(颗粒粗大)。岩石碎裂, 石英粒状或隐晶质集合体呈条带状。
中细粒 花岗岩长岩 (H41)	东矿段探矿竖井	细中粒不等 粒花岗岩结构	岩石主要由斜长石、微斜长石、石英和黑云母组成, 矿物粒径 0.8~2.6 mm。斜长石: 为中长石, 具环带状与微斜长石镶边, 约 40%。微斜长石: 土化, 约 25%。石英: 他形粒状, 沿微裂隙有黄铁矿分布, 约 20%。黑云母: 顺解理有绿泥石交代, 边缘针状铁矿物镶边, 约 15%。角闪石少量。局部见黄铁矿白云母微细脉穿插。
中细粒 二长花岗岩	东矿段探矿竖井 (据郭嘉, 2009)	中细粒不等粒 花岗结构	矿物一般粒度 2~3 mm, 个别碱长石粒度达 7 mm。碱长石, 粗粒者包有斜长石、黑云母等细粒包晶, 不同程度泥化。体积分数在 30%~35% 之间。斜长石, 较普遍绢云母化。体积分数在 40%~45% 之间。石英, 体积分数在 20% 左右。黑云母, 粒度在 0.2~1 mm。局部绿泥石化。体积分数在 5% 左右。
钾长石化 中细粒花岗 闪长岩(H2)	东矿段探矿竖井	变余中细粒 花岗结构	钾长石: 正长石及少量微斜长石, 粒度小于等于 1.6 mm×3.0 mm, 体积分数 55%。斜长石: 更长石, 粒度小于等于 1.2 mm×3.6 mm, 体积分数 15%。石英: 粒度小于 0.5 mm, 体积分数大于 25%。黑云母体积分数 4%。金属矿物约 1%。
硅化斑 状花岗岩 (H12)	西矿段 TC2311	斑状结构	斑晶由钾长石、斜长石和少量黑云母组成。基质为细粒状石英、钾长石、斜长石和黑云母。钾长石: 粒径为 1.2~2.1 mm, 约占 40%。斜长石: 轻微绢云母化, 聚片双晶, 粒径为 2.1~3.0 mm, 两端边部黑云母环绕, 宽为 0.05~1.0 mm, 约占 25%。石英: 粒径为 0.5~0.7 mm, 约占 30%。黑云母: 一般 0.07~1.2 mm, 约占 5%。局部相变为细粒花岗岩。

5.24~9.58, $(Gd/Yb)_N = 1.33 \sim 2.09$, $(Sm/Yb)_N = 2.01 \sim 3.58$, 轻稀土之间分馏程度较高, 而重稀土之间分馏不明显。与其它样品相比, H12 样品 ΣREE 最低, 具弱正铕异常, 这可能与斑状花岗岩遭受蚀变有关。在微量元素球粒陨石标准化蛛网图解上(图

4b), 富集 Rb、Ba、K、Th、U 等大离子亲石元素(LILE), 相对亏损 Ta、Nb 等高场强元素(HFSE)及大离子亲石元素 Ti, 显著亏损 P 元素。岩石 FeO^T 质量分数平均值为 2.05%~5.47%, 平均为 3.76。 $Ga \times 10^4 / Al$ 值为 3.13~4.68, 平均为 3.88。Zr 为

表 3 霍吉河含矿花岗岩主量元素($w_B/\%$)

稀土元素及微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果

Table 3 Major elements($w_B/\%$), REE and trace elements ($w_B/10^{-6}$) analyses of ore-bearing granite in Huojihe area

样号	H2	H41	H11	H12
岩石	花岗	花岗	花岗	硅化斑状
类型	闪长岩	闪长岩	闪长岩	闪长岩
SiO ₂	66.05	67.83	68.35	74.21
Al ₂ O ₃	14.07	14.48	14.65	13.52
TiO ₂	0.54	0.57	0.46	0.25
Fe ₂ O ₃	4.53	2.86	1.76	1
FeO	1.4	1.56	1.8	1.15
MnO	0.053	0.03	0.032	0.015
MgO	1.27	1.52	1	0.4
MaO	2.02	2.34	2.11	1.14
Na ₂ O	2.31	3.27	2.97	3.18
K ₂ O	4.42	5.04	5.18	4.47
P ₂ O ₅	0.15	0.16	0.14	0.07
K ₂ O+Na ₂ O	6.73	8.31	8.15	7.65
K ₂ O/Na ₂ O	1.91	1.54	1.74	1.41
A/CNK	1.15	0.96	1.02	1.11
LOI	3.09	1.61	1.38	0.47
TOTAL	99.9	101.27	99.83	99.86
La	35.60	31.8	28.4	16.3
Pr	7.11	6.6	5.55	2.14
Ce	62.80	57.5	49.7	21.1
Nd	22.90	24.2	20.1	7.06
Sm	3.70	3.67	3.41	1.07
Eu	0.83	0.85	0.9	0.35
Gd	3.30	3.57	2.44	0.94
Tb	0.47	0.48	0.33	0.13
Dy	2.67	2.52	1.77	0.82
Ho	0.50	0.5	0.34	0.16
Er	1.44	1.29	0.9	0.44
Tm	0.24	0.22	0.15	0.09
Yb	1.60	1.38	1.02	0.57
Lu	0.25	0.22	0.15	0.1
Y	15.60	16.1	9.2	4.53
∑REE	159.01	150.88	124.4	55.8
∑LREE	132.94	124.60	108.06	48.02
∑HREE	10.47	10.18	7.10	3.25
LREE/HREE	12.70	12.24	15.22	14.78
(La/Yb) _N	15.00	15.54	18.87	19.28
(La/Sm) _N	6.05	5.45	5.24	9.58
(Gd/Yb) _N	1.66	2.09	1.93	1.33
(Sm/Yb) _N	2.48	2.85	3.58	2.01
δEu	0.71	0.69	0.91	1.04
Hf	3.99	4.04	3.91	2.96
Zr	151	132.66	142	97.1
Ta	0.86	0.58	0.74	0.44
Nb	9.28	8.63	8.78	4.68
Cr	7.14	11.26	5.6	7.47
Co	4.59	5.31	4.52	2.09
Pb	15.7	13.5	15.03	6.17

续表 3

Continued Table 3

样号	H2	H41	H11	H12
Ni	3.15	3.78	5.25	2.35
Rb	170	159.63	179	154
Th	8.62	18.66	14.1	16.6
Ba	628	620.75	654	358
Sr	310	545.72	337	209
U	4.29	3.42	4.36	4.36
V	58.9	58.9	48.7	14.5
Cs	4.08	3.05	3.49	2.08
Li	9.23	8.39	9.83	3.26
Ga	32.5	35.9	24.3	23.9

注：由国土资源部东北矿产资源监督检测中心测试，样品编号同表 2。常量元素用 XRF 方法(FeO 用重铬酸钾容量法)，微量与稀土元素用 ICP-MS 仪器测试。

$97.1 \times 10^{-6} \sim 151 \times 10^{-6}$ ，Rb 为 $154.0 \times 10^{-6} \sim 179.0 \times 10^{-6}$ 。

4 成岩成矿年代学

4.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年

4.1.1 样品采集与处理

H2 样品采自东矿段的探矿竖井(图 1)，地理坐标东经 $128^{\circ}57'23''$ ，北纬 $48^{\circ}30'55''$ (GPS 定位)，岩性为钾长石化中细粒花岗闪长岩(见表 2)。H12 样品采自西矿段的 TC2311 探槽，地理坐标东经 $128^{\circ}56'48''$ ，北纬 $48^{\circ}30'32''$ (GPS 定位)，岩性为弱硅化斑状花岗岩(见表 2)。样品在沈阳地质调查中心实验室，采用人工破碎重砂淘洗法从花岗岩样品中分离出锆石，最后在双目镜下挑纯，锆石纯度达 99% 以上，无氧化、无污染。这些锆石多呈浅黄色、无色、透明度良好，金刚光泽。锆石晶体形态多为自形柱状，个别锆石成半自形粒状，环带结构发育，大部分可见明显的核、幔、壳结构。锆石柱面 {110} {100} 锥面 {111} 部分颗粒 {211} 发育。对其中晶体完好的锆石统计，长一般在 $0.05 \sim 0.25$ mm，最大达 0.32 mm，宽 $0.057 \sim 0.15$ mm，长宽比 $1.25:1 \sim 3.05:1$ ，颗粒晶面完整、平直光滑，有些颗粒在透射光下可见到裂纹和细小的包裹体。阴极发光(CL)图像(图 5、图 6)显示锆石中振荡环带结构发育，应为典型的岩浆结晶锆石。由表 4 数据可知，斑状花岗岩锆石的 U 与 Th 质量分数分别为 $454 \times 10^{-6} \sim 1432 \times 10^{-6}$ 和 $198 \times 10^{-6} \sim 924 \times 10^{-6}$ ，Th/U 平均值 $0.49 (> 0.4)$ ，中细粒花岗闪长岩锆石的 U 与 Th 质量分数

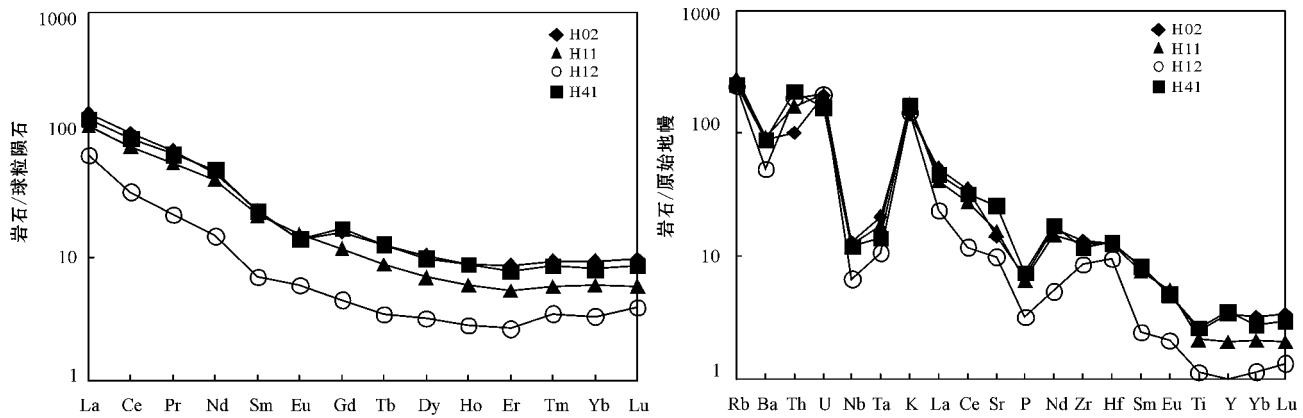


图 4 霍吉河含矿花岗岩类稀土元素配分模式图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b) 标准化数据据王中刚等, 1989)
Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider patterns (b) of ore-bearing granitoids of Huojihe area (normalized data after Wang Zhonggang *et al.*, 1989)

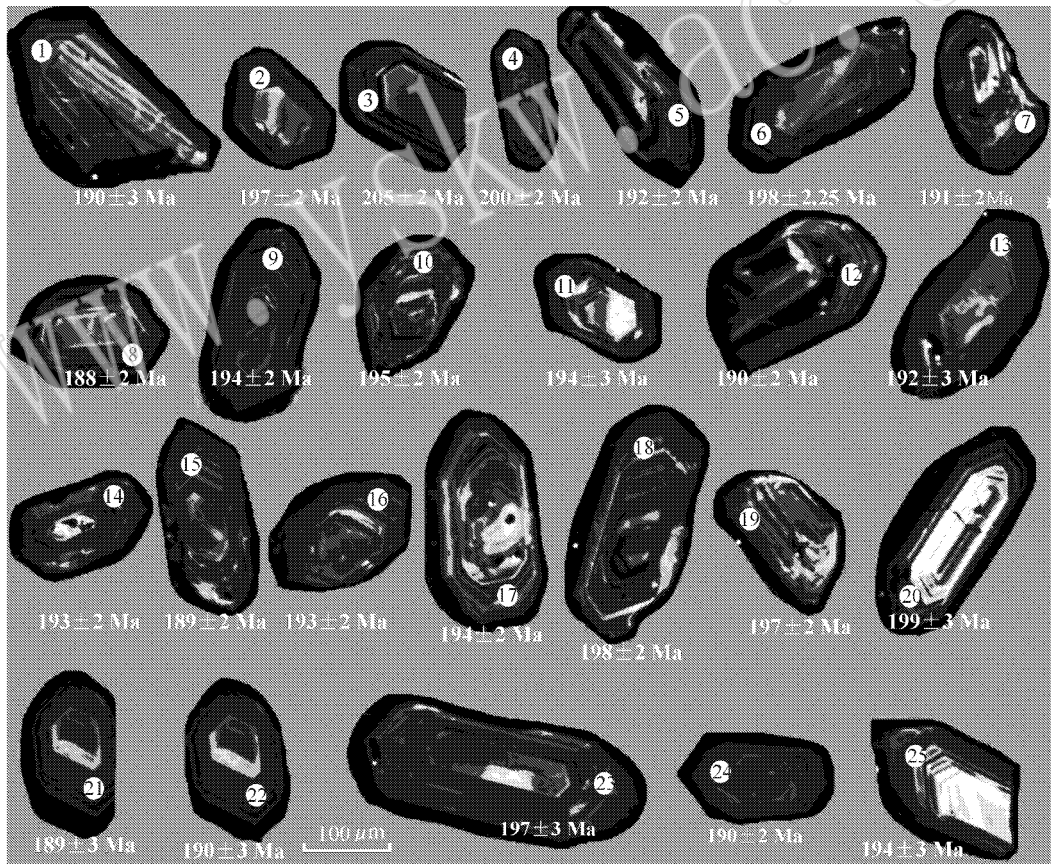


图 5 霍吉河钼矿斑状花岗岩(H12 样品) 锆石阴极发光图像

Fig. 5 CL images of zircon in granodiorite of sample H12 from the Huojihe molybdenum deposit

分别为 $332 \times 10^{-6} \sim 845 \times 10^{-6}$ 和 $193 \times 10^{-6} \sim 843 \times 10^{-6}$, Th/U 平均值 0.65 (> 0.4), 表明所测定的所有锆石均具有岩浆成因特征(叶会寿等, 2006)。

4.1.2 测试方法

将挑选好的待测锆石颗粒与 RSES 参考样 SL13 及数粒 TEM 置于环氧树脂制靶, 用于阴极发光研究

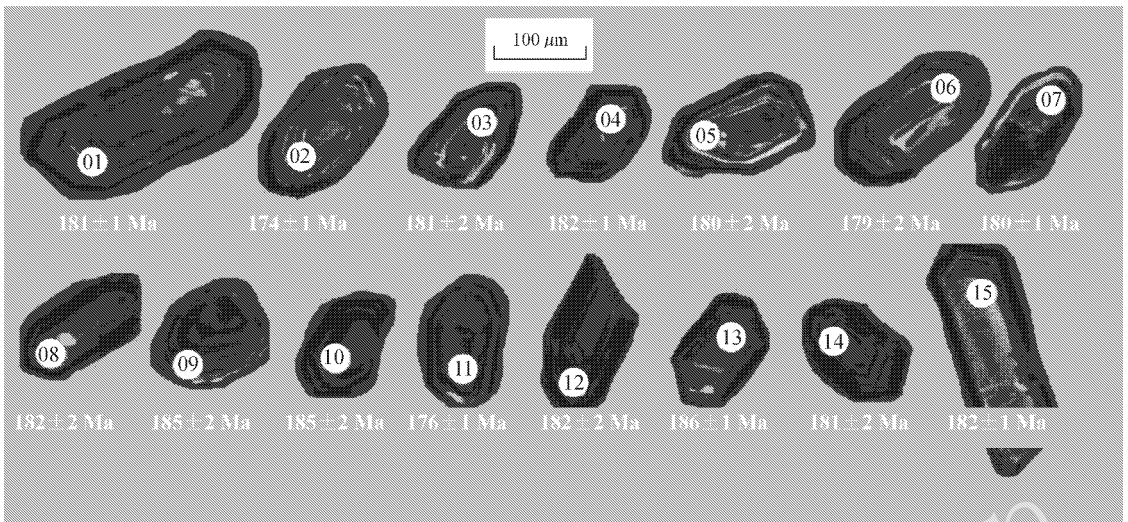


图 6 霍吉河钼矿中细粒花岗闪长岩(H2 样品)锆石阴极发光图像

Fig. 6 CL images of zircon in granodiorite of sample H2 of the Huojihe molybdenum deposit

及 LA-ICP-MS 测年。锆石阴极发光研究在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针研究室完成。锆石 U-Pb 同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 LA-ICP-MS 分析完成。激光剥蚀系统为 GeoLas2005, ICP-MS 为 Agilent7500a。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。在等离子体中心气流(Ar+He)中加入了少量氮气,以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精密度(Hu *et al.*, 2008)。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素质量分数及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCa(Liu *et al.*, 2008, 2010a)完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法同 Liu 等(2008, 2010a, 2010b)。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正,每分析 5 个样品点,分析 2 次 91500。对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移,利用 91500 的变化采用线性内插的方式进行了校正(Liu *et al.*, 2010a)。锆石标准 91500 的 U-Th-Pb 同位素比值推荐值据 Wiedenbeck 等(1995)。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex-ver3(Ludwig, 2003)完成。

4.1.3 测试结果

对 H2 样品锆石进行了 15 次分析,对 H12 样品

锆石进行了 25 次分析,分析结果列于表 4。H2 样品分析结果产生了 181.0 ± 1.9 Ma 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄, H12 样品分析结果产生了 193.6 ± 1.4 Ma 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄(图 7)。

4.2 辉钼矿 Re-Os 测年

4.2.1 样品采集与单矿物挑选

5 件辉钼矿样品分别采自东矿段探矿竖井的不同部位,组成一组样品。探矿竖井地理坐标为 $128^{\circ}57'23''$ 北纬 $48^{\circ}30'55''$ (GPS 定位)。5 件样品均为细脉浸染状钼矿石,辉钼矿主要产于石英细网脉中,少部分呈浸染状分布于含矿花岗岩质岩石中。辉钼矿石英细脉宽一般为 0.3~0.6 cm。辉钼矿单矿物由沈阳地质调查中心实验室挑选。

4.2.2 样品化学处理与测试方法

辉钼矿 Re-Os 同位素测试在国家地质测试中心进行,采用电感耦合等离子体质谱仪 TJA X-series ICP-MS 进行测量。采用 Carius 管封闭溶样分解样品,Re-Os 同位素分析的化学分离过程和分析方法详见有关文献(Shirey and Walker, 1995; Mao and Zhang, 1999; 蒋少涌等, 2000; 杜安道等, 2001; 屈文俊等, 2003)。实验全流程空白 Re 质量分数约为 10×10^{-12} , 普通 Os 质量分数约为 1×10^{-12} , 远远小于所测样品中的铼、钨质量分数,因此,不会影响实验中铼、钨质量分数的准确测定。

4.2.3 测试结果

模式年龄 t 按下式计算

$$t = \frac{1}{\lambda} \left\{ \ln \left[1 + \frac{\alpha(^{187}\text{Os})}{\alpha(^{187}\text{Re})} \right] \right\}$$

表 4 霍吉河钼矿中细粒花岗岩(H2) 和斑状花岗岩(H12) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试结果
 Table 4 LA-ICP-MS U-Pb isotopic analyses of zircons from Huojijie medium-fine grained granodiorite (H2) and granite (H12)

分析点	Pb		Th		U		Th/U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄	
	Th	U	比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	Ma	1 σ	Ma	1 σ	Ma	1 σ	Ma	1 σ	Ma	1 σ
H2-1	18.64	291	0.56	0.0491	0.0015	0.1920	0.0057	0.0283	0.0002	154	75	178	5	180	1			
H2-2	20.44	411	0.73	0.0521	0.0017	0.1956	0.0062	0.0273	0.0002	287	74	181	5	174	1			
H2-3	19.59	358	0.68	0.0520	0.0023	0.2047	0.0092	0.0285	0.0004	283	97	189	8	181	2			
H2-4	19.67	351	0.66	0.0493	0.0016	0.1949	0.0063	0.0286	0.0003	161	74	181	5	182	2			
H2-5	15.02	305	0.74	0.0517	0.0022	0.1995	0.0082	0.0283	0.0004	272	100	185	7	180	2			
H2-6	16.03	263	0.59	0.0535	0.0017	0.2081	0.0065	0.0282	0.0003	354	77	192	5	179	2			
H2-7	21.80	350	0.57	0.0499	0.0014	0.1955	0.0054	0.0283	0.0002	187	63	181	5	180	1			
H2-8	12.43	193	0.55	0.0500	0.0019	0.1964	0.0071	0.0286	0.0003	198	87	182	6	182	2			
H2-9	18.22	255	0.50	0.0507	0.0016	0.2042	0.0065	0.0291	0.0002	228	72	189	5	185	2			
H2-10	16.03	241	0.53	0.0505	0.0016	0.2036	0.0067	0.0291	0.0003	220	79	188	6	185	2			
H2-11	23.44	399	0.59	0.0495	0.0015	0.1897	0.0054	0.0277	0.0002	172	69	176	5	176	1			
H2-12	33.1	843	1.00	0.0512	0.0014	0.2023	0.0057	0.0286	0.0003	256	67	187	5	182	2			
H2-13	17.71	258	0.53	0.0514	0.0016	0.2073	0.0065	0.0292	0.0002	261	74	191	5	186	1			
H2-14	17.31	284	0.60	0.0504	0.0015	0.2011	0.0058	0.0290	0.0002	213	69	186	5	184	2			
H2-15	13.14	312	0.56	0.0533	0.0021	0.2098	0.0079	0.0287	0.0003	343	89	193	7	182	2			
H12-01	22.21	217	0.34	0.0568	0.0035	0.2300	0.0136	0.0299	0.0005	483	139	210	11	190	3			
H12-02	36.88	517	0.52	0.0500	0.0022	0.2148	0.0096	0.0310	0.0003	195	104	198	8	197	2			
H12-03	58.6	924	0.65	0.0498	0.0022	0.2219	0.0096	0.0323	0.0004	187	102	203	8	205	2			
H12-04	48.0	629	0.50	0.0501	0.0019	0.2177	0.0084	0.0314	0.0003	198	91	200	7	200	2			
H12-05	34.19	473	0.50	0.0478	0.0022	0.1994	0.0094	0.0302	0.0004	87	107	185	8	192	2			
H12-06	40.0	713	0.67	0.0467	0.0019	0.1994	0.0078	0.0312	0.0004	35	92.6	185	6.6	198	2.2			
H12-07	39.7	578	0.53	0.0498	0.0021	0.2064	0.0089	0.0300	0.0003	183	100	191	7	191	2			
H12-08	26.12	408	0.57	0.0498	0.0021	0.2039	0.0086	0.0296	0.0003	187	100	188	7	188	2			
H12-09	34.47	491	0.52	0.0503	0.0020	0.2114	0.0080	0.0305	0.0003	209	91	195	7	194	2			
H12-10	23.46	246	0.37	0.0464	0.0022	0.1980	0.0096	0.0307	0.0004	16.8	111.1	183	8	195	2			
H12-11	23.78	342	0.48	0.0464	0.0022	0.1960	0.0095	0.0305	0.0004	16.8	114.8	182	8	194	3			
H12-12	18.97	204	0.38	0.0485	0.0024	0.2010	0.0098	0.0300	0.0004	124.2	-80.5	186	8	190	2			
H12-13	18.93	230	0.40	0.0476	0.0022	0.1969	0.0093	0.0302	0.0004	76	107	183	8	192	3			
H12-14	30.40	482	0.58	0.0502	0.0018	0.2114	0.0074	0.0304	0.0003	211	83	195	6	193	2			
H12-15	26.05	363	0.50	0.0500	0.0026	0.2053	0.0103	0.0297	0.0003	195	129	190	9	189	2			
H12-16	23.42	268	0.41	0.0517	0.0026	0.2161	0.0104	0.0304	0.0004	272	108	199	9	193	2			
H12-17	36.7	531	0.54	0.0520	0.0020	0.2191	0.0082	0.0306	0.0003	287	89	201	7	194	2			
H12-18	21.45	281	0.49	0.0527	0.0024	0.2267	0.0102	0.0312	0.0004	317	104	207	8	198	2			
H12-19	21.46	239	0.41	0.0564	0.0024	0.2393	0.0096	0.0310	0.0003	478	97	218	8	197	2			
H12-20	20.19	212	0.38	0.0514	0.0024	0.2205	0.0102	0.0313	0.0004	257	107	202	9	189	3			
H12-21	16.02	198	0.45	0.0558	0.0032	0.2246	0.0130	0.0298	0.0005	443	121	206	11	189	3			
H12-22	37.70	494	0.46	0.0604	0.0031	0.2425	0.0101	0.0299	0.0004	617	111	220	8	190	3			
H12-23	28.88	418	0.56	0.0560	0.0028	0.2389	0.0114	0.0311	0.0005	450	111	218	9	197	3			
H12-24	33.4	527	0.59	0.0566	0.0026	0.2324	0.0104	0.0299	0.0004	476	104	212	9	190	2			
H12-25	17.42	225	0.48	0.0515	0.0031	0.2163	0.0127	0.0306	0.0005	261	137	199	11	194	3			

注:放射性成因铅同位素比值和年龄校正成普通铅的方法据 Anderson(2002)。测试单位为中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室。

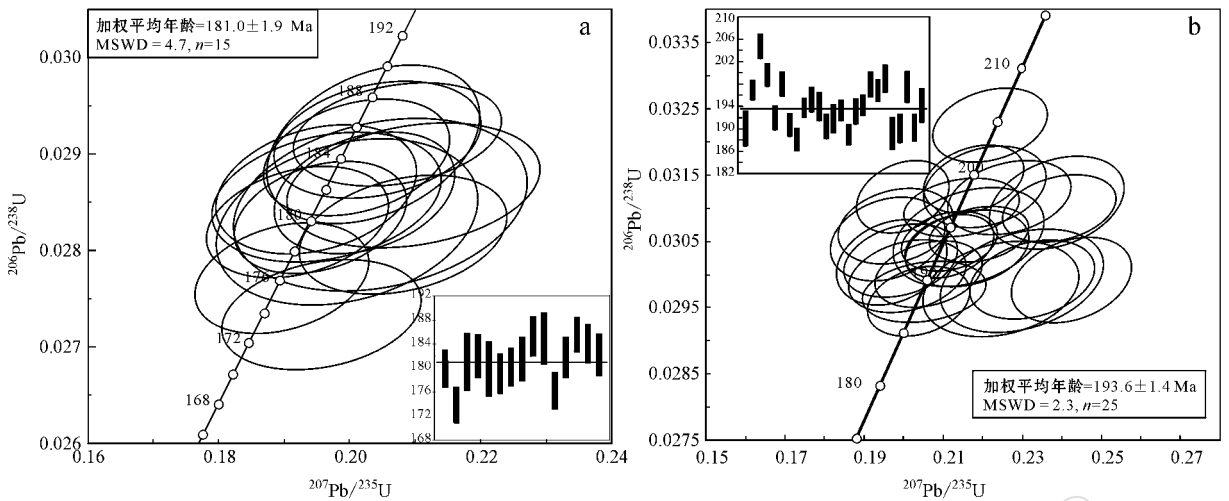


图 7 霍吉河钼矿中细粒花岗闪长岩 (a) 及斑状花岗岩 (b) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 7 Concordia diagram for LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic dating of medium-fine grained granodiorite (a) and porphyritic granite (b) from Huojihe

其中 λ (^{187}Re 衰变常数) = $1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ 。采用 Isoplot 软件作等时线和加权平均值。

5 件辉钼矿 Re-Os 同位素数据测试结果如表 5，获得等时线年龄和加权平均年龄分别为 $176.3 \pm 5.1 \text{ Ma}$ 和 $181.2 \pm 1.8 \text{ Ma}$ (图 8)。每件样品 Re、Os 质量分数相近，等时线上各个点未拉开，等时线年龄误差较大，加权平均值年龄更具代表性。

5 讨论

5.1 成岩成矿时代

霍吉河钼矿辉钼矿 Re-Os 同位素等值线年龄为 $176.3 \pm 5.1 \text{ Ma}$ ，加权平均年龄为 $181.2 \pm 1.8 \text{ Ma}$ 。求得的 Os 初始值接近于 0，辉钼矿中几乎不含有普 Os，辉钼矿中的 Os 可以看作完全由 Re 衰变而成，符合 Re-Os 同位素体系模式年龄的计算条件(蒋少涌

等 2000)，说明所获得的同位素年龄可以代表辉钼矿的结晶时间。用 LA-ICP-MS 法测得斑状花岗岩锆石加权平均年龄为 $193.6 \pm 1.4 \text{ Ma}$ ，与区域上形成最晚的二长花岗岩和正长-碱长花岗岩形成年龄 190~191 Ma 非常接近，这也恰好与区域上的含钼铅锌多金属成矿岩体形成峰期年龄 190.5 Ma 相吻合(韩振哲等，2010)。钾长石化中细粒花岗闪长岩锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $181.0 \pm 1.9 \text{ Ma}$ ，与郭嘉(2009)用同样方法获得的二长花岗岩年龄值 $184.92 \pm 0.91 \text{ Ma}$ 和辉钼矿 Re-Os 同位素年龄 $181.2 \pm 1.8 \text{ Ma}$ 十分接近，这一年龄代表岩浆作用晚期成岩成矿年龄。根据同位素测年结果，认为该矿床形成于同一成岩成矿系统，成岩成矿作用发生于早侏罗世，成岩大致始于 $193.6 \pm 1.4 \text{ Ma}$ ，成岩与成矿结束于 $181.2 \pm 1.8 \text{ Ma}$ 。

表 5 霍吉河钼矿辉钼矿 Re-Os 同位素数据

Table 5 Re-Os isotopic compositions of molybdenite from Huojihe molybdenum deposit

编号	样号	样重/g	$\alpha(\text{Re})/10^{-6}$		$\alpha(\text{普Os})/10^{-6}$		$\alpha(^{187}\text{Re})/10^{-6}$		$\alpha(^{187}\text{Os})/10^{-6}$		模式年龄/Ma	
			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
100510-13	TWH1-1	0.050 68	19.80	0.15	0.563 8	0.057 6	12.44	0.09	37.55	0.36	180.9	2.7
100519-4	TWH1-2	0.050 80	21.72	0.16	0.004 9	0.027 4	13.65	0.10	41.04	0.35	180.2	2.5
100519-5	TWH1-4	0.050 99	17.33	0.14	0.052 1	0.021 1	10.89	0.09	33.30	0.30	183.3	2.7
100519-6	TWH1-5	0.050 63	13.19	0.10	0.004 9	0.000 0	8.292	0.060	25.24	0.25	182.5	2.7
100423-18	TWH1-3	0.030 89	20.09	0.16	0.089 6	0.018 1	12.63	0.10	37.89	0.30	179.8	2.5

注：①由国家地质实验测试中心测试，分析者：屈文俊、曾法刚。②表中误差为 2σ ，其中 Re 和 Os 质量分数的计算误差包括稀释剂标定误差、质谱测量误差及质量分馏校正误差等。模式年龄的计算误差不仅包括稀释剂标定误差、质谱测量误差及质量分馏校正误差等，另外还包括 ^{187}Re 衰变常数 λ 的不确定度 (1.02%) λ 。

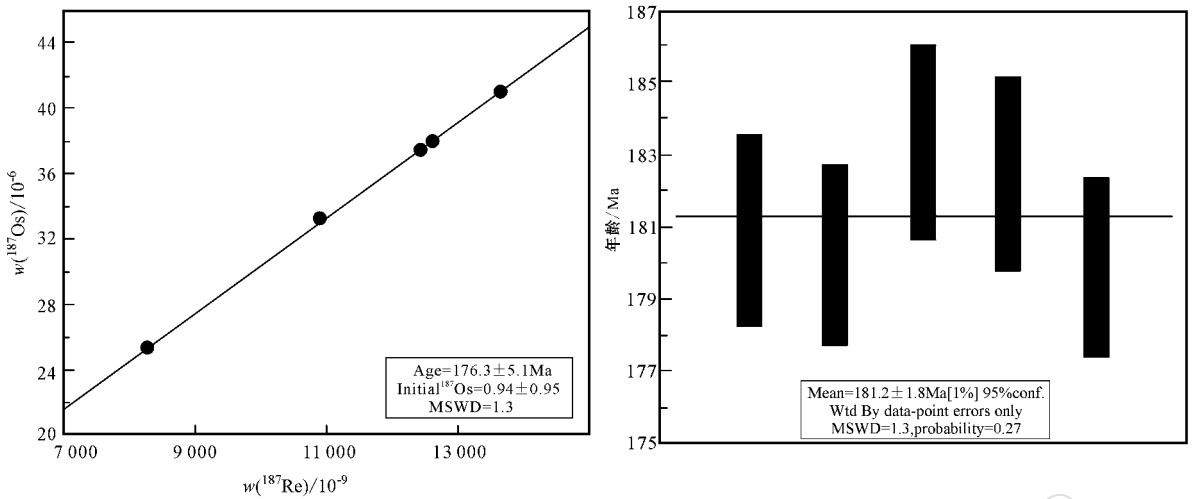


图 8 霍吉河辉钼矿 Re-Os 同位素等时线与年龄加权平均值

Fig. 8 Isochron diagram and weighted average of model age by Re-Os isotopes from Huojihe molybdenite

小兴安岭地区翠宏山钼多金属矿床二长花岗岩锆石 U-Pb 同位素年龄为 $192.8 \pm 2.5 \text{ Ma} \sim 199.0 \pm 3 \text{ Ma}$ (邵军等, 2011), 鹿鸣钼矿床含钼花岗闪长岩锆石 U-Pb 等值线年龄为 $187.1 \pm 1.2 \text{ Ma}$ 。鹿鸣钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素等值线年龄为 $177.4 \pm 3.5 \text{ Ma}$, 加权平均年龄为 $178.08 \pm 0.79 \text{ Ma}$ 。内蒙古东部地区的新台门钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 $178 \pm 5 \text{ Ma}$ (张遵忠等, 2009), 乌奴格吐山斑岩铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 $178.5 \pm 10 \text{ Ma}$ (李诺等, 2007)。燕辽成矿带的兰家沟钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 $186.5 \pm 0.7 \text{ Ma}$, 杨家杖子钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄为 $187 \pm 2 \text{ Ma} \sim 191 \pm 6 \text{ Ma}$ (黄典豪等, 1996)。霍吉河钼矿成矿年龄与上述钼矿床的测年数据相近, 小兴安岭-张广才岭地区多金属矿床成矿花岗岩类 U-Pb 锆石年龄为 $172.3 \pm 1.6 \text{ Ma} \sim 200.0 \pm 1 \text{ Ma}$ (唐文龙等, 2007; 刘志宏, 2009; 张苏江, 2009; 张振庭, 2010; 陈静, 2011; 韩振哲,

2011), 成岩成矿时代均为早侏罗世。研究表明, 中国东北地区早侏罗世存在大规模成岩成矿作用, 小兴安岭地区尤为显著。

5.2 成矿物质来源探讨

霍吉河花岗质岩石 K/Rb、K/Cs、Rb/Cs 和 Rb/Cs 值较高而 $\text{Li} \times 10^3/\text{Mg}$ 和 Rb/Sr 值较低, 与华南改造型花岗岩显著不同, 而与华南同熔型花岗岩相类似 (表 6)。岩石富集大离子亲石元素 (LILE), 相对亏损高场强元素 (HFSE), 显著亏损 P 元素, 显示原始岩浆为壳幔混源特征。Mao 等 (1999) 在综合分析 and 对比了中国各种类型钼矿床中辉钼矿的铼质量分数后总结认为, 从地幔到壳幔混源再到地壳, 矿石中的铼质量分数呈十倍地下降, Re 质量分数从 $n \times 10^{-4} \rightarrow n \times 10^{-5} \rightarrow n \times 10^{-6}$ 。因此, 辉钼矿的 Re 质量分数可以指示成矿物质的来源 (Mao and Zhang, 1999)。霍吉河钼矿中辉钼矿的铼质量分数平均为 39.92×10^{-6} , 显示成矿物质具有壳幔混源特征。霍吉河钼矿床黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $1.2\% \sim 4.4\%$ (表 7), 具

表 6 霍吉河地区花岗岩中部分元素比值

Table 6 Element ratios of granites from Huojihe area

样品编号	K/Rb	K/Cs	Rb/Cs	Rb/Cs	$\text{Li} \times 10^3/\text{Mg}$	Rb/Sr
H2	247.00	8 989.36	41.67	18.42	1.21	0.55
H 41	279.11	12 759.68	52.34	19.03	1.10	0.29
H 11	274.92	12 316.04	51.29	18.21	1.64	0.53
H 12	275.75	17 832.45	74.04	47.24	1.36	0.74
华南同熔型花岗岩 (高秉章等, 1991)	240.00	8 641.00	34.40	15.50	7.60	0.40
华南改造型花岗岩 (高秉章等, 1991)	67.00	122.5.00	22.20	8.80	276.10	11.70

有岩浆硫特征。小兴安岭-张广才岭地区多金属矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-1.5\text{‰} \sim 8.4\text{‰}$ (韩振新等, 2004; 陈静, 2011), 具有壳幔混源硫特征。霍吉河钼矿床主成矿阶段石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 $11.5\text{‰} \sim 14.7\text{‰}$, 石英流体包裹体 δD 为 $-78.4\text{‰} \sim -94.3\text{‰}$ (表 7)。矿床成矿温度为 $245.3 \sim 365.3\text{℃}$ (郭嘉, 2009), 平均为

305.5℃ 据此计算出的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 $4.42\text{‰} \sim 7.62\text{‰}$ 。在 $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}$ 关系图上, 只有 1 件样品落在岩浆水区域内, 其余 3 件样品均落在再平衡混合岩浆水所构成的区域 (张理刚, 1985) (图 9), 显示成矿流体中的水主要来自岩浆, 有少量其它水混入。综上所述, 霍吉河钼矿床成矿物质主要来自岩浆。

表 7 霍吉河钼矿床石英包裹体 D、石英 O 及硫化物 S 同位素组成

Table 7 Isotopic compositions of quartz inclusion D, quartz O and sulfide S of the Huojihe molybdenum deposit

样品编号	采样位置	测定矿物	产状	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	样品编号	测定矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$
DKH14	探矿竖井	石英	含钼石英脉	13.3	6.22	-78.4	DKH11	黄铁矿	1.2
DKH15	探矿竖井	石英	含钼石英脉	13.9	6.82	-94.3	DKH12	黄铁矿	1.8
DKH16	探矿竖井	石英	含钼石英脉	14.7	7.62	-85.2	DKH43	黄铁矿	4.2
DKH17	探矿竖井	石英	含钼石英脉	11.5	4.42	-86.6	DKH45	黄铁矿	4.4

注：测试单位为核工业北京地质研究院分析测试研究中心。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$ 计算公式为： $1000 \ln a_{\text{石英-水}} = 3.38 \times 10^6 \times T^{-2} - 3.40 (200 - 500\text{℃})$

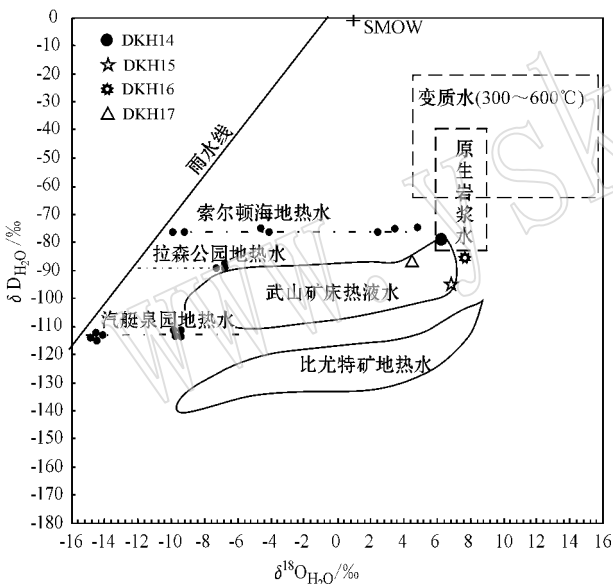


图 9 霍吉河钼矿床成矿流体 $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}$ 关系图 (底图据舒广龙, 2004)

Fig. 9 δD versus $\delta^{18}\text{O}$ diagram of ore-forming fluids from Huojihe molybdenite

5.3 成矿动力学背景

对小兴安岭地区成矿构造背景大致有两种主流观点。观点一强调太平洋板块俯冲作用的控制, 观点二强调古亚洲洋闭合后造山后伸展作用控制。最新的研究资料显示, 华北板块与西伯利亚板块在晚二叠世末期沿西拉木伦河-长春-延吉一线发生了碰撞拼合作用 (孙德有等, 2004b; Wu Fuyuan *et al.*, 2004)。在这次碰撞造山之后的岩石圈伸展构造环

境下, 在小兴安岭地区和张广才岭地区发生了多次 A 型花岗岩浆侵入事件, 形成了清水岩体 ($222 \pm 5\text{Ma}$)、毛家屯岩体 ($213 \pm 4\text{Ma}$)、密林岩体 ($197 \pm 2\text{Ma}$)、红石砬子岩体 ($210 \pm 1\text{Ma}$)、大王折子岩体 ($229 \pm 12\text{Ma}$) 等 A 型花岗岩 (孙德有等, 2004b)。霍吉河花岗闪长岩和斑状花岗岩 FeO^{T} 质量分数平均值为 3.76% ($> 1\%$), $\text{Ga} \times 10^4/\text{Al}$ 为 3.88 (> 2.6), Y/Nb 为 $0.97 \sim 2.69$, Ce/Nb 为 $4.51 \sim 10.83$, Zr 为 128.0×10^{-6} , Rb 为 165.7×10^{-6} , 具有 A 型花岗岩特征 (周佐民, 2011)。在 $\text{K}_2\text{O}/\text{MgO} - 10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 和 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} - 10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 判别图上, 4 件样品均落在 A 型花岗岩区 (图 10)。在 $\text{Y} - \text{Nb} - (\text{Y} + \text{Nb}) - \text{Rb}$ 构造判别图上, 霍吉河花岗岩类大多数落入火山弧和同碰撞花岗岩区内的后碰撞花岗岩区 (图 11a、11b), 在 $\text{R1} - \text{R2}$ 构造环境判别图落入同碰撞或造山期后区 (图 11c), 这与区域燕山早期二长花岗岩基本一致 (韩振哲等, 2010)。霍吉河钼矿花岗闪长岩、二长花岗岩和斑状花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 $181.0 \pm 1.9\text{Ma} \sim 193.6 \pm 1.4\text{Ma}$, 辉钼矿 Re-Os 年龄为 $181.2 \pm 1.8\text{Ma}$, 与密林花岗岩同期形成且同属 A 型花岗岩类, 由此认为霍吉河钼矿床成岩成矿于造山期后岩石圈伸展的构造环境。

6 结论

霍吉河钾长石化中细粒花岗闪长岩锆石 U-Pb 锆石 U-Pb 年龄为 $181.0 \pm 1.9\text{Ma}$ ($n = 15$, $\text{MSWD} =$

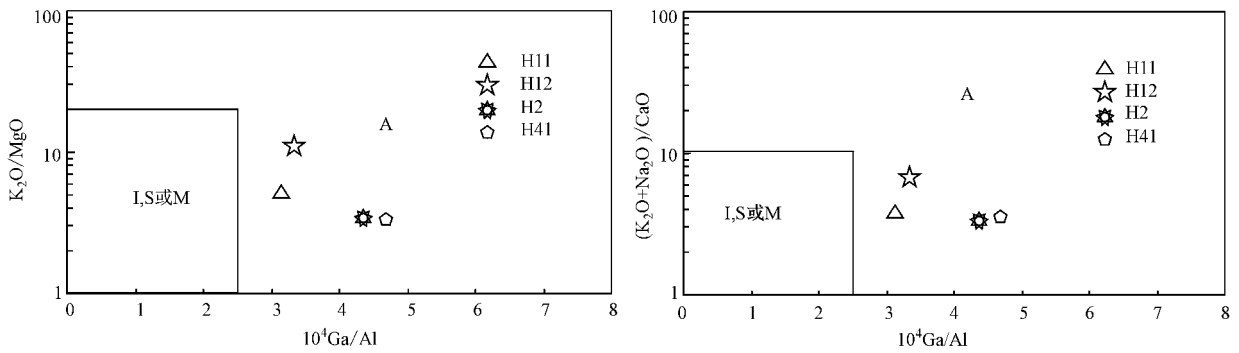


图 10 霍吉河含矿花岗岩类 $K_2O/MgO - 10^4 Ga/Al$ 和 $(K_2O + Na_2O)/CaO - 10^4 Ga/Al$ 判别图

Fig. 10 Discrimination diagrams of $K_2O/MgO - 10^4 Ga/Al$ and $(K_2O + Na_2O)/CaO - 10^4 Ga/Al$ of Huojijie granites

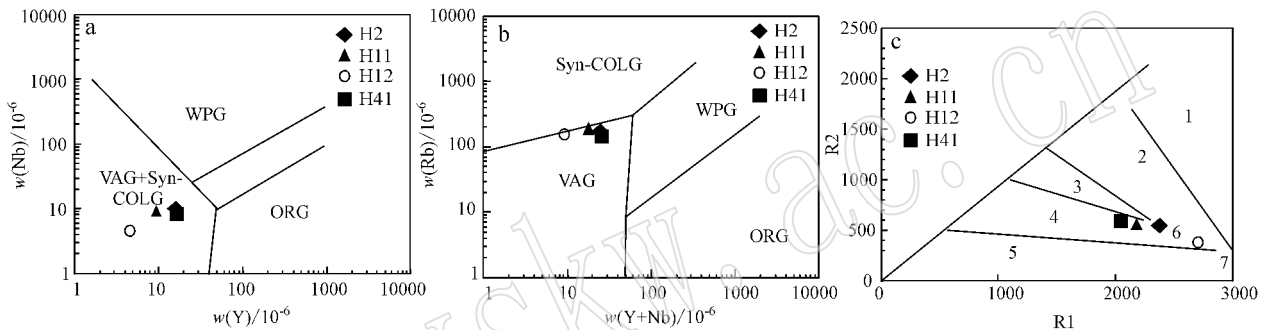


图 11 霍吉河花岗岩类 $Y - Nb$ (a) 和 $(Y + Nb) - R1$ (b) 及 $R1 - R2$ (c) 构造环境判别图

Fig. 11 Discrimination diagrams of tectonic setting from $Y - Nb$ (a), $(Y + Nb) - R1$ (b) and $R1 - R2$ (c)

4.7) 斑状花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 193.6 ± 1.4 Ma ($n = 25$, MSWD = 2.3), 辉钼矿 Re-Os 同位素年龄为 181.2 ± 1.8 Ma ($n = 5$, MSWD = 1.3) 表明成岩成矿作用发生于早侏罗世。认为该矿床成岩作用大致始于 193.6 ± 1.4 Ma, 成岩与成矿大致结束于 181.2 ± 1.8 Ma。霍吉河钼矿床成岩成矿年龄与我国东北地区许多钼矿成矿年龄基本一致, 表明中国东北地区早侏罗世存在大规模成岩成矿作用。霍吉河含矿花岗质杂岩具有富碱质、相对富钾等特征。地球化学特征显示, 霍吉河含矿花岗岩类属 A 型花岗岩。结合区域相关研究认为, 霍吉河钼矿床成岩成矿于造山期后岩石圈伸展的构造环境, 成矿物质主要来自岩浆。

References

Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb Analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192: 59~79.

Chen Jing. 2011. Metallogenic setting and metallogenesis of nonferrous-

precious metals in lesser Hinggan Mountain, Heilongjiang province [D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).

Du Andao, Zhao Dunmin, Wang Shuxian, et al. 2001. Precise Re-Os dating for molybdenite by ID-NTIMS with carius tube sample preparation [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 20(4): 247~252 (in Chinese with English abstract).

Gao Bingzhang, Hong Dawei, Zheng Jijian, et al. 1991. 1:50 000 Regional Geological Mapping Guide of Granites Area [M]. Wuhan: China University of Geosciences' Press (in Chinese).

Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Zhou Changyong, et al. 2007. Mineralization ages and geodynamic implications of porphyry Cu-Mo deposits in the east of Xingmeng Orogenic belt [J]. *Science Bulletin*, 52(20): 2407~2417 (in Chinese).

Ge Xiaohong and Ma Wenpu. 2007. Mesozoic-Cenozoic tectonic framework of southern northeast Asia [J]. *Geology in China*, 34(2): 212~228 (in Chinese with English abstract).

Guo Jia. 2009. Geological characteristic and origin of Mo deposit in Huojijie Heilongjiang province [D]. Changchun: Jilin University (in Chi-

- nese with English abstract).
- Han Zhenzhe. 2011. Characteristics of temporal and spatial evolution and polymetallic mineralization of early Mesozoic granites in southeastern Xiaoxing 'An Mountains[D]. Beijing : China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese).
- Han Zhenxin , Hao Zhengping and Hou Min. 1995. Metallogenic series of ore deposits related to Caledonian Granitoids in Xiaoxinganling region[J]. Mineral Deposits , 14(4) : 293 ~ 302(in Chinese with English abstract).
- Han Zhenxin , Xu Yanqiang , Zheng Qingdao , *et al.* 2004. Metallogenic Series and Evolution of Significant Metal and Nonmetal Mineral Resources in Heilongjiang Province[M]. Harbin : Heilongjiang People 's Publishing House(in Chinese).
- Han Zhenzhe , Zhao Hailing , Li Juanjuan , *et al.* 2010. Early Mesozoic granites and polymetallic mineralization in southeastern Yichun area Xiaohinggan Mountains[J]. Geology in China , 37(1) : 74 ~ 86(in Chinese with English abstract).
- Han Zhenzhe , Zhao Hailing , Su Shijie , *et al.* 2008. Genesis and geological significance of late Triassic Monzonitic granite in Jinsiantun , the southeast of Xiaoxinanlin Mountains[J]. Geoscience , 22(2) : 197 ~ 206(in Chinese).
- Han Zhenzhe , Zhao Hailing , Wang Panxi , *et al.* 2009. Geochemistry of the late Triassic-early Jurassic aluminous A-Type syenogranite-alkali feldspar granite in Yichun Area , Heilongjiang province and tectonic implications[J]. Acta Petrologica et Mineralogica , 28(2) : 97 ~ 108 (in Chinese with English abstract).
- Heilongjiang Bureau of Geological and Mineral. 1993. The Tectonics of Heilongjiang Province[M]. Beijing : Geological Publishing House(in Chinese).
- Hu Z C , Gao S , Liu Y S , *et al.* 2008. Signal enhancement in laser Ablation ICP-MS by addition of nitrogen in the Central Channel Gas [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry , 23 : 1 093 ~ 1 101.
- Huang Dianhao , Du Andao , Wu Chengyu , *et al.* 1996. Metalochronology of molybdenum(-copper) deposits in the north China platform : Re-Os age of molybdenite and its geological significance[J]. Mineral Deposits , 15(4) : 365 ~ 372(in Chinese with English abstract).
- Jia Weilin and Sun Jingshan. 2006. The census report of Luming Mo deposit in Tieli area , Heilongjiang Province[R]. Haerbin : Fifth Geological Exploration Institute of Heilongjiang Province(in Chinese).
- Jiang Shaoyong , Yang Jinghong , Zhao Kuidong , *et al.* 2000. Re-Os isotope tracer and dating methods in ore deposits research[J]. Journal of Nanjing University : Nature Science , 36(6) : 669 ~ 677(in Chinese with English abstract).
- Li Linshan , He Cai , Li Shaoyun , *et al.* 2010. Geologic characters and genesis of the Huojihe Molybdenum deposit in the Yichun , Heilongjiang Provinces[J]. Jilin Geology , 29(2) : 53 ~ 55(in Chinese).
- Li Nuo , Sun Yali , Li Jing , *et al.* 2007. Molybdenite Re/Os isochron age of the Wunugetu Shan porphyry Cu/Mo deposit , Inner Mongolia and its implication for metallogenic geodynamics[J]. Acta Petrologica , 23(11) : 2 881 ~ 2 886(in Chinese).
- Liu Y S , Hu Z C , Gao S , *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology , 257 : 34 ~ 43.
- Liu Y , Gao S , Hu Z , *et al.* 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen : U-Pb Dating , Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology , 51 : 537 ~ 571.
- Liu Y , Hu Z , Zong K , *et al.* 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin , 15 : 1 535 ~ 1 544.
- Liu Zhihong. 2009. Geological characteristic and origin of deposit in Cuihongshan W , Mo , Zn polymetallic deposit[D]. Changchun : Jilin University(in Chinese).
- Ludwig K R. 2003. ISOPLLOT 3.00 : A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley : Berkeley Geochronology Center.
- Mao Jingwen and Zhang Zuheng. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W(Mo) deposit in the Northern Qilian mountains and its geological significance[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta , 63(11 ~ 12) : 1 815 ~ 1 818.
- Qu Wenjun and Du Andao. 2003. Highly precise Re-Os dating of molybdenite by ICP-MS with carius tube sample digestion[J]. Rock and Mineral Analysis , 2(4) : 254 ~ 262(in Chinese with English abstract).
- Shao Jun , Li Xiurong and Yang Hongzhi. 2011. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granite in the Cuihongshan polymetallic deposit and its geological implications[J]. Acta Geoscientia Sinica , 32(2) : 163 ~ 170 (in Chinese).
- Shi Yongming , Cui Bin and Jia Weilin. 2007. Geological features for Luming molybdenum deposit at Tieli in the Heilongjiang provinces [J]. Geology and Prospecting , 43(2) : 19 ~ 22(in Chinese with English abstract).
- Shirey S B and Walker R J. 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis[J]. Anal. Chem. , 67 : 2 136 ~ 2 141.

- Shu Guanglong. 2004. The geological setting of mineralization and Porphyry metallogenic series with micro-disseminated gold deposits in Fengshan orefield of Hubei [D]. Changsha : Central South University (in Chinese with English abstract).
- Sun Deyou , Wu Fuyuan , Lin Qiang , *et al.* 2002. Petrogenesis and crust-mantle interaction of early Yanshanian Baishishan pluton in Zhangguangcai Range [J]. Acta Petrologica Sinica , 17 (2) : 227 ~ 235 (in Chinese with English abstract).
- Sun Deyou , Wu Fuyuan , Gao Shan , *et al.* 2004a. LA-ICPMS zircon U-Pb age of the Qingshui pluton in the east Xiao Hinggan Mountains [J]. Acta Geoscientica Sinica , 25 (2) : 213 ~ 218 (in Chinese with English abstract).
- Sun Deyou , Wu Fuyuan , Gao Shan , *et al.* 2005. Confirmation of two episodes of A-Type granite emplacement during late Triassic and early Jurassic the central Jilin province , and their constraints on the structural pattern of eastern Jilin-Heilongjiang area , China [J]. Earth Science Frontiers , 12 (2) : 263 ~ 275 (in Chinese with English abstract).
- Sun Deyou , Wu Fuyuan , Zhang Yanbin , *et al.* 2004b. The final closing time of the west Lamulun River-Changchun-Yanji plate suture zone [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition) , 4 (2) : 174 ~ 181 (in Chinese with English abstract).
- Tan Hongyan , Shu Guanglong , Lv Junchao , *et al.* (2012). LA-ICP-MS Zircon U-Pb and Molybdenite Re-Os Dating for the Luming Large-Scale Molybdenum Deposit in Xiao Hinggan Mountains and Its Geological Implication [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition) , 42 (6) : 1 757 ~ 1 770 (in Chinese with English abstract).
- Tang Wenlong and Yang Yanchen. 2007. Geochemical characteristics of mafic-ultramafic rocks and their geological significance in Hongqiling mine of Jilin [J]. Global Geology , 26 (2) : 164 ~ 172 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhonggang , Yu Xueyuan and Zhao Zhenhua. 1989. Geochemistry of Rare Earth Element [M]. Beijing : Science Press , 88 ~ 93 (in Chinese).
- Wei Yuming. 2008. The census report of Huojihe Mo deposit in Xunke area , Heilongjiang Province [R]. Jiamusi : Sixth Geological Exploration Institute of Heilongjiang Province (in Chinese).
- Wiedenbeck M , Alle P , Corfu F , *et al.* 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb , Lu-Hf , trace element and REE analyses [J]. Geostandards and Geoanalytical Research , 19 : 1 ~ 23.
- Wu Fuyuan , Sun Deyou and Lin Qiang. 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in northeast China [J]. Acta Petrologica Sinica , 15 (2) : 181 ~ 189 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan , Simon A W , Zhang Guangliang , *et al.* 2004. Geochronology and petrogenesis of the post-orogenic Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic complexes in Jilin Province , NE China [J]. Journal of Asian Earth Sciences , 23 (5) : 781 ~ 797.
- Xiao Qinghui , Deng Jinfu , Ma Daquan , *et al.* 2002. The Ways of Investigation on Granitoid [M]. Beijing : Geological Publishing House (in Chinese).
- Ye Huishou , Mao Jingwen , Li Yongfeng , *et al.* 2006. SHRIMP zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the super large Donggou porphyry Mo deposit in east Qinling , China , and its geological implication [J]. Acta Geologic Sinica , 78 (7) : 1 078 ~ 1 086 (in Chinese with English abstract).
- Ye Xin. 2011. Study on geological characteristics and genesis of Dong'an gold deposit , Xunke county , Heilongjiang Province [D]. Changchun : Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hairi , Luan Huimin and Chen Leguo. 1991. Determination of Indo Siniian granite in Heilongjiang Province [J]. Heilongjiang Geology , 1 (1) : 25 ~ 27 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ligang. 1985. Application of Stable Isotopes in Geosciences [M]. Xi'an : Shanxi Science and Technology Press (in Chinese).
- Zhang Sujiang. 2009. Analysis on the prospecting potentiality and ore-forming geological conditions in Tielu area Mo (Cu) deposit , Heilongjiang province [D]. Changchun : Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xingzhou , Mu Shimin , Yang Baojun , *et al.* 1998. Geodynamic of Heilongjiang Plates [M]. Beijing : Geological Publishing House , 20 ~ 23 (in Chinese).
- Zhang Zhenting. 2010. Forecast of lead zinc polymetallic ore in Yichun of Heilongjiang [D]. Changchun : Jilin University , 94 ~ 95 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zunzhong , Wu Changzhi , Gu Lianxing , *et al.* 2009. Molybdenite Re-Os dating of Xintaimen molybdenum deposit in Yanshan-Liaoning metallogenic belt , North China [J]. Mineral Deposits , 28 (3) : 313 ~ 320 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zuomin. 2011. Discrimination , genesis and tectonic setting of alkaline A-Type granite [J]. Geology and Mineral Resources of South China ,

27(3):216~220(in Chinese with English abstract).

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[D]. 长春:吉林大学.

杜安道,赵敦敏,王淑贤,等. 2001. Carius管溶样-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[J]. 岩矿测试, 20(4):247~252.

高秉章,洪大卫,郑基俭,等. 1991. 花岗岩类区1:5万区域地质填图方法指南[M]. 武汉:中国地质大学出版社.

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[J]. 科学通报, 52(20):2407~2417.

葛肖虹,马文璞. 2007. 东北亚南区中-新生代大地构造轮廓[J]. 中国地质, 34(2):212~228.

郭嘉. 2009. 黑龙江省霍吉河钼矿床地质特征及成因[D]. 长春:吉林大学.

韩振新,郝正平,侯敏. 1995. 小兴安岭地区与加里东期花岗岩类有关的矿床成矿系列[J]. 矿床地质, 14(4):293~302.

韩振新,徐衍强,郑庆道,等. 2004. 黑龙江省重要金属和非金属矿产的成矿系列及其演化[M]. 哈尔滨:黑龙江人民出版社.

韩振哲. 2011. 小兴安岭东段早中生代花岗岩类时空演化特征与多金属成矿[D]. 北京:中国地质大学(北京).

韩振哲,赵海玲,李娟娟,等. 2010. 小兴安岭东南伊春一带早中生代花岗岩与多金属成矿作用[J]. 中国地质, 37(1):74~86.

韩振哲,赵海玲,苏士杰,等. 2008. 小兴安岭东南金山屯一带晚三叠世二长花岗岩成因及其地质意义[J]. 现代地质, 22(2):197~206.

韩振哲,赵海玲,王盘喜,等. 2009. 黑龙江省伊春地区晚三叠世一早侏罗世铝质A型正长-碱长花岗岩地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 28(2):97~108.

黑龙江省地质矿产局. 1993. 黑龙江省区域地质志[M]. 北京:地质出版社.

黄典豪,杜安道,吴澄宇,等. 1996. 华北地台钨(铜)矿床成矿年代学研究-辉钼矿铼-钨年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 15(4):365~372.

贾维林,孙景山. 2006. 黑龙江省铁力市鹿鸣钼矿详查报告[R]. 黑河:黑龙江省第五地质勘察院.

蒋少涌,杨竞红,赵葵东,等. 2000. 金属矿床Re-Os同位素示踪与定年[J]. 南京大学学报自然科学, 36(6):669~677.

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[J]. 吉林地质, 29(2):53~55.

李诺,孙亚莉,李晶,等. 2007. 内蒙古乌努格吐山斑岩铜钼矿床辉钼矿铼-钨等时线年龄及其成矿动力学背景[J]. 岩石学报, 23(11):2881~2886.

刘志宏. 2009. 黑龙江省翠宏山钨钼钨多金属矿床地质特征及成因[D]. 长春:吉林大学.

屈文俊,杜安道. 2003. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿铼-钨地质年龄[J]. 岩矿测试, 22(4):254~262.

邵军,李秀荣,杨宏智. 2011. 黑龙江翠宏山铅锌多金属矿区花岗岩锆石SHRIMP U-Pb测年及其地质意义[J]. 地球学报, 32(2):163~170.

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[J]. 地质与勘探, 43(2):19~22.

舒广龙. 2004. 湖北丰山矿田成矿地质背景及斑岩成矿系列与微细浸染型金矿[D]. 长沙:中南大学.

孙德有,吴福元,高山,等. 2004a. 小兴安岭东部清水岩体的锆石激光探针U-Pb年龄测定[J]. 地球学报, 25(2):213~218.

孙德有,吴福元,高山,等. 2005. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质A型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约[J]. 地学前缘, 12(2):263~275.

孙德有,吴福元,林强,等. 2002. 张广才岭燕山早期白石山岩体成因与壳幔相互作用[J]. 岩石学报, 17(2):227~235.

孙德有,吴福元,张艳斌,等. 2004b. 西拉木伦河-长春-延吉板块缝合带的最后闭合时间-来自吉林大玉山花岗岩体的证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 33(2).

谭红艳,舒广龙,吕骏超,等. 2012. 小兴安岭鹿鸣大型钼矿LA-ICP-MS锆石U-Pb和辉钼矿Re-Os年龄及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(6):1757~1770.

唐文龙,杨言辰. 2007. 吉林红旗岭镁铁-超镁铁质岩的地球化学特征及地质意义[J]. 世界地质, 26(2):164~172.

魏玉明. 2008. 黑龙江省逊克县霍吉河钼矿床勘探报告[R]. 佳木斯:黑龙江省第六地质勘察院.

王中刚,于学元,赵振华. 1989. 稀土元素地球化学[M]. 北京:科学出版社, 88~93.

吴福元,孙德有,林强. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生[J]. 岩石学报, 15(2):181~189.

肖庆辉,邓晋福,马大铨,等. 2002. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京:地质出版社.

叶会寿,毛景文,李永峰,等. 2006. 东秦岭东沟超大型斑岩钼矿SHRIMP锆石U-Pb和辉钼矿Re-Os年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 78(7):1078~1086.

叶鑫. 2011. 黑龙江省逊克县东安金矿床地质特征及成因研究

- [D]. 长春: 吉林大学.
- 张海阳, 栾慧敏, 陈乐国. 1991. 黑龙江省印支期花岗岩的确定及其意义[J]. 黑龙江地质, 1(1): 25~27.
- 张理刚. 1985. 稳定同位素在地质科学中的应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社.
- 张苏江. 2009. 黑龙江省铁力地区钨(铜)矿床成矿地质条件及找矿潜力分析[D]. 长春: 吉林大学.
- 张兴洲, 穆石敏, 杨宝俊, 等. 1998. 黑龙江板块群的地球动力学[M]. 北京: 地质出版社, 20~23.
- 张振庭. 2010. 黑龙江省伊春地区铅锌多金属矿产预测[D]. 长春: 吉林大学.
- 张遵忠, 吴昌志, 顾连星, 等. 2009. 燕辽成矿带东段新台门钨矿床的 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 28(3): 313~320.
- 周佐民. 2011. 碱质 A 型花岗岩的判别、成因与构造环境[J]. 华南地质与矿产, 27(3): 216~220.

www.yskw.ac.cn