

文章编号: 0258-7106(2014)04-0776-09

大兴安岭北段岔路口和大黑山斑岩型钼矿床 硫、铅同位素特征*

胡新露¹, 姚书振^{1*}, 何谋春^{1,2}, 丁振举¹, 刘明³, 崔玉宝¹, 沈军¹

(1 中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074; 2 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 3 黑龙江省有色金属地质勘查研究总院, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要 岔路口和大黑山钼矿床位于大兴安岭北段,是近年来新发现的2个斑岩型钼矿床。文章通过对这2个矿床的硫、铅同位素的研究,探讨了成矿物质来源。岔路口矿区硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为1.8‰~2.9‰,平均2.4‰;大黑山矿区硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于0.4‰~2.3‰,平均1.53‰,均显示出典型的岩浆硫特征。岔路口矿区硫化物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别变化于18.311~18.356、15.536~15.573和38.115~38.229,大黑山矿区硫化物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值则分别变化于18.341~18.719、15.529~15.637和38.033~38.363。铅同位素进一步指示铅的来源与燕山期岩浆作用有关。在铅同位素构造模式图中,矿石铅主要投点于地幔演化线和造山带演化线之间,表明铅来自于壳幔物质的混合。大兴安岭北段在晚侏罗世受古太平洋板块俯冲的影响,发生了强烈的壳、幔相互作用并产生了大量含钼岩浆,为该斑岩型钼矿床的形成奠定了基础。

关键词 地球化学;硫同位素;铅同位素;岔路口;大黑山;斑岩型钼矿床;大兴安岭

中图分类号 P618.67; P597.2

文献标志码 A

Sulfur and lead isotopic characteristics of Chalukou and Daheishan porphyry Mo deposits in northern segment of Da Hinggan Mountains

HU XinLu¹, YAO ShuZhen¹, HE MouChun^{1,2}, DING ZhenJu¹, LIU Ming³, CUI YuBao¹ and SHEN Jun¹

(1 Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2 State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3 Heilongjiang Geological Exploration Research Institute for Non-ferrous Metals, Harbin 150000, Heilongjiang, China)

Abstract

The Chalukou deposit and the Daheishan deposit are two newly discovered porphyry Mo deposits in the northern segment of the Da Hinggan Mountains. This paper reports the sulfur and lead isotopes of these two deposits, with the purpose of constraining the source of the ore-forming materials. The results suggest that the $\delta^{34}\text{S}$ values of the Chalukou and Daheishan deposits vary from 1.8‰ to 2.9‰ (2.4‰ on average) and from 0.4‰ to 2.3‰ (1.53‰ on average), respectively, suggesting typical magmatic sulfur. The sulfides in the Chalukou deposit have $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios of 18.311~18.356, 15.536~15.573 and 38.115~38.229, respectively, while the sulfides in the Daheishan deposit have $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios of 18.341~18.719, 15.529~15.637 and 38.033~38.363, respectively.

* 本文由大兴安岭北段典型矿床剖析及成矿模式专题研究项目(编号: SDK2010-25)和黑龙江省“斑岩体系”成矿模式及找矿方向研究项目(编号: 201211008)联合资助

第一作者简介 胡新露,男,1987年生,博士研究生,从事矿床学研究。Email: huxinlu00@foxmail.com

** 通讯作者 姚书振,男,1947年生,教授,博导,从事矿床学研究。Email: szyao@cug.edu.cn

收稿日期 2013-08-08; 改回日期 2014-02-21。张锦玲编辑。

$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios of 18.341~18.719, 15.529~15.637 and 38.033~38.363, respectively. The lead isotope characteristics additionally indicate that the origin of the Pb was related to the Yanshanian magmatism. In the tectonic discriminant diagram of lead isotopes, most of the samples fall in the transition zone between the mantle lead evolution line and the orogen lead evolution line, suggesting that the lead was mainly derived from mixture of crust-mantle materials. The northern segment of the Da Hinggan Mountains experienced the subduction of the Paleo-Pacific Plate, accompanied by intense crust-mantle interactions, thus resulting in the generation of abundant Mo-bearing magma, which laid a good foundation for the formation of the porphyry Mo deposits in this area.

Key words: geochemistry, sulfur isotope, lead isotope, Chahukou, Daheishan, porphyry Mo deposit, Da Hinggan Mountains

大兴安岭地区经历了古亚洲洋构造体系、蒙古-鄂霍茨克洋构造体系以及滨太平洋构造体系的强烈叠加,复杂的地质构造演化使其成为中国东北部重要的有色金属和贵金属成矿区(刘建明等,2004;葛文春等,2007;Zeng et al., 2011;武新丽等,2012)。近年来,在大兴安岭北段相继发现了一系列钼、铜、铅锌、金、银矿床,引起了越来越多的研究者的关注(武广等,2002;2008a;2008b;王晓勇等,2004;毛景文等,2005;陈衍景等,2012)。岔路口和大黑山钼矿床均为近年来在该区新发现的斑岩型钼矿床,其中岔路口钼矿床为特大型,大黑山钼矿床为中型。前人对岔路口矿床的基础地质特征、成矿时代和岩浆活动期次等方面有了较系统的研究(付瑞忠等,2011;刘翼飞等,2011;聂凤军等,2011;2013;孟昭君等,2011;刘军等,2013;Liu et al., 2014),但尚缺乏对其成矿物质来源的探讨,对大黑山矿床的成矿物质来源目前也尚无报道。本次研究通过对岔路口和大黑山矿床中硫化物的硫、铅同位素的系统分析,探讨了成矿物质来源,试图为深入研究大兴安岭北段斑岩型钼矿床的成矿作用奠定基础。

1 区域地质背景

大兴安岭地区处于兴蒙造山带的东段,南部与华北地台接壤,北界为蒙古-鄂霍茨克构造带,东临松辽盆地和小兴安岭-张广才岭(图1),整体呈NE-NNE向展布(刘建明等,2004;白令安等,2012)。

区内地层可划分为3个单元:①前寒武纪的变质基底,包括古元古界兴华渡口群和新元古界佳疙瘩组、嘎拉山组和倭勒根群,由绿片岩相、角闪岩相的变质岩组成,主要分布于北部地区;②古生代的碎屑岩和碳酸盐岩,主要包括寒武系苏中组 and 额尔古纳河组、奥陶系多宝山组、铜山组和伊勒呼里山

群、泥盆系泥鳅河组和大民山组、石炭系莫尔根河组和新伊根河组、二叠系大石寨组和林西组,其中早古生代地层一般发生了一定程度的变质作用,主要分布于南部和北东部;③中生代的陆相火山碎屑岩系,在全区广泛分布(胡道功等,2003;张连昌等,2007;2008;王圣文等,2009;赵勇伟等,2012)。

区内侵入岩主要形成于海西期和燕山期。海西期侵入岩主要呈岩基和岩株状分布于额尔古纳地块和兴安地块北部,岩石类型从酸性到基性-超基性均有发育,其中基性-超基性岩体主要形成于泥盆纪,多沿块体拼合构造带发育。燕山期侵入岩主要形成于中-晚侏罗世和早白垩世,多为中酸性岩体(孙立新等,2012),呈NE向串珠状分布,与同时代火山岩系构成同源、同时、异相的火山-侵入杂岩(刘建明等,2004;Zhang et al., 2010)。

由于多个构造体系的叠加作用,本区断裂构造极为发育。其中古亚洲洋和蒙古-鄂霍茨克洋的演化导致了本区近东西向和部分NE向断裂的发育,而滨太平洋构造体系的叠加则造成了本区广泛分布的NE-NNE向断裂。这几组断裂的交切部位控制着本区主要的火山岩浆活动和成矿作用。

2 矿床地质特征

2.1 岔路口钼矿床

岔路口矿床位于黑龙江省大兴安岭地区松岭区,是近年来发现的一处特大型斑岩钼矿床,截止2011年底,已获得(331+332+333)钼金属量246.47万吨。矿区被多布库尔河分割为河东区(图2)和河西区两部分,目前地质工作主要集中在河东区。矿区出露地层主要为新元古界一下寒武统倭勒根群大网子组变质岩和中生代火山-沉积岩,大网子组主要为浅变质沉积岩及变质海相中基性火山岩,

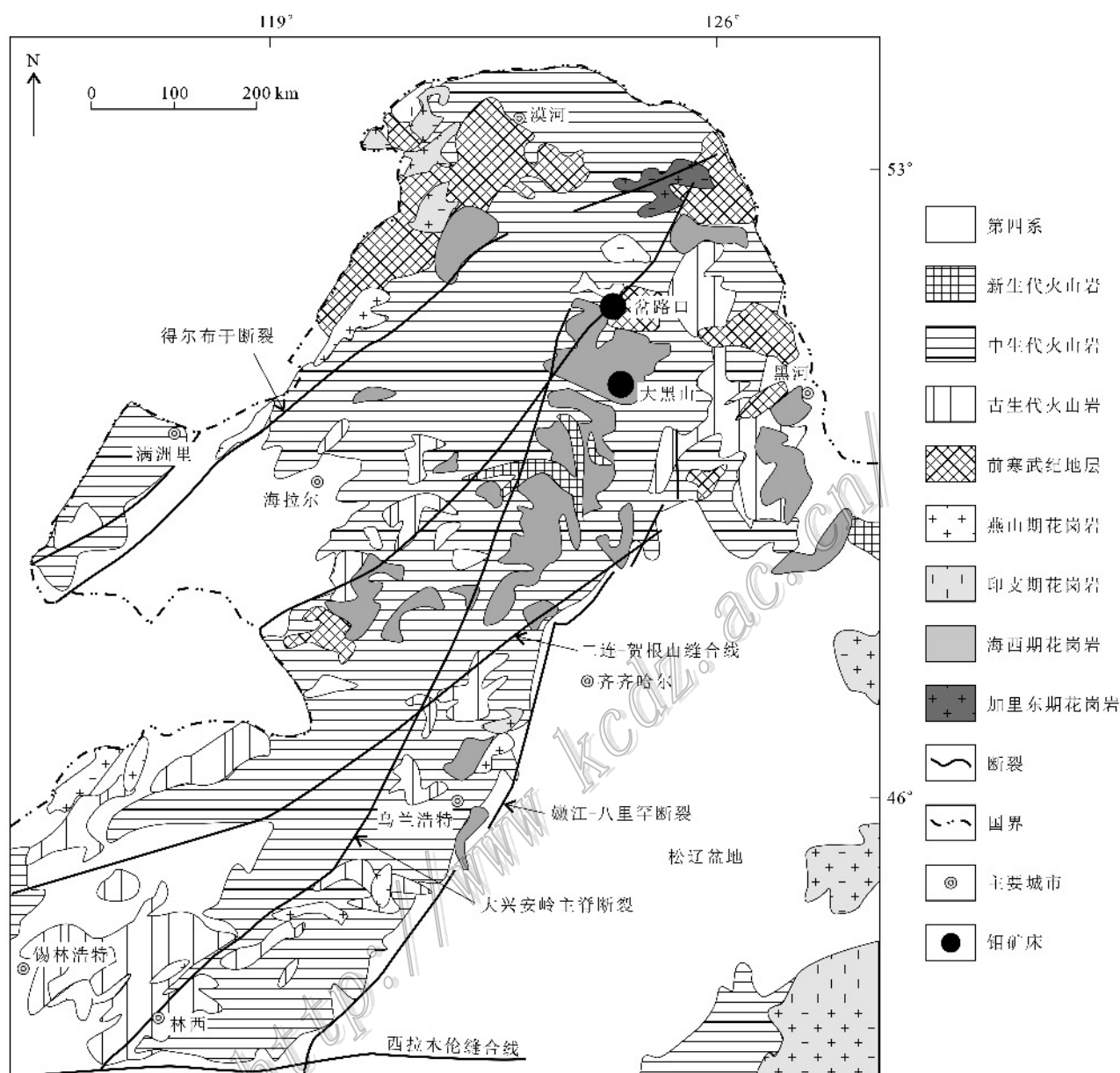


图 1 大兴安岭地区区域地质略图(据祁近平等, 2005; 白令安等, 2012)

Fig. 1 Simplified geological map of the Da Hinggan Mountains (modified after Qi et al., 2005; Bai et al., 2012)

呈 NE 向展布。中生代火山-沉积岩主要由流纹岩、英安岩及少量安山岩组成(刘翼飞等, 2011; 孟昭君等, 2011)。矿区侵入岩有二长花岗岩、花岗斑岩、石英斑岩和细粒花岗岩等, 均为燕山期形成(刘军等, 2013), 其中与成矿有关的岩体为花岗斑岩、石英斑岩及细粒花岗岩(图 2)。该矿床辉钼矿 Re-Os 年龄为 $(146.9 \pm 0.8) \text{ Ma}$ (聂凤军等, 2011; 2013)。

钼矿体总体呈 NE 向拉长的穹窿状, 产于花岗斑岩、石英斑岩、隐爆角砾岩以及中生代的火山-沉积岩中, 矿体形态为层状、透镜状、囊状。在钼矿体

上部伴有铅、锌、银矿化。钼矿石主要为细脉状(图 3a)、细脉浸染状(图 3b、c)和角砾状构造, 铅锌矿石则主要呈脉状、细脉状和块状产出。金属矿物主要为黄铁矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、磁黄铁矿以及表生氧化作用形成的褐铁矿和镜铁矿。非金属矿物有石英、钾长石、绢云母、水白云母、高岭石、绿泥石、绿帘石、萤石、方解石等。该矿床具有典型的斑岩型矿床的围岩蚀变类型和蚀变分带, 自岩体中心向外依次发育石英-钾长石化带、石英-绢云母化带、泥化带、青磐岩化带。矿体主要产于石英-钾长石

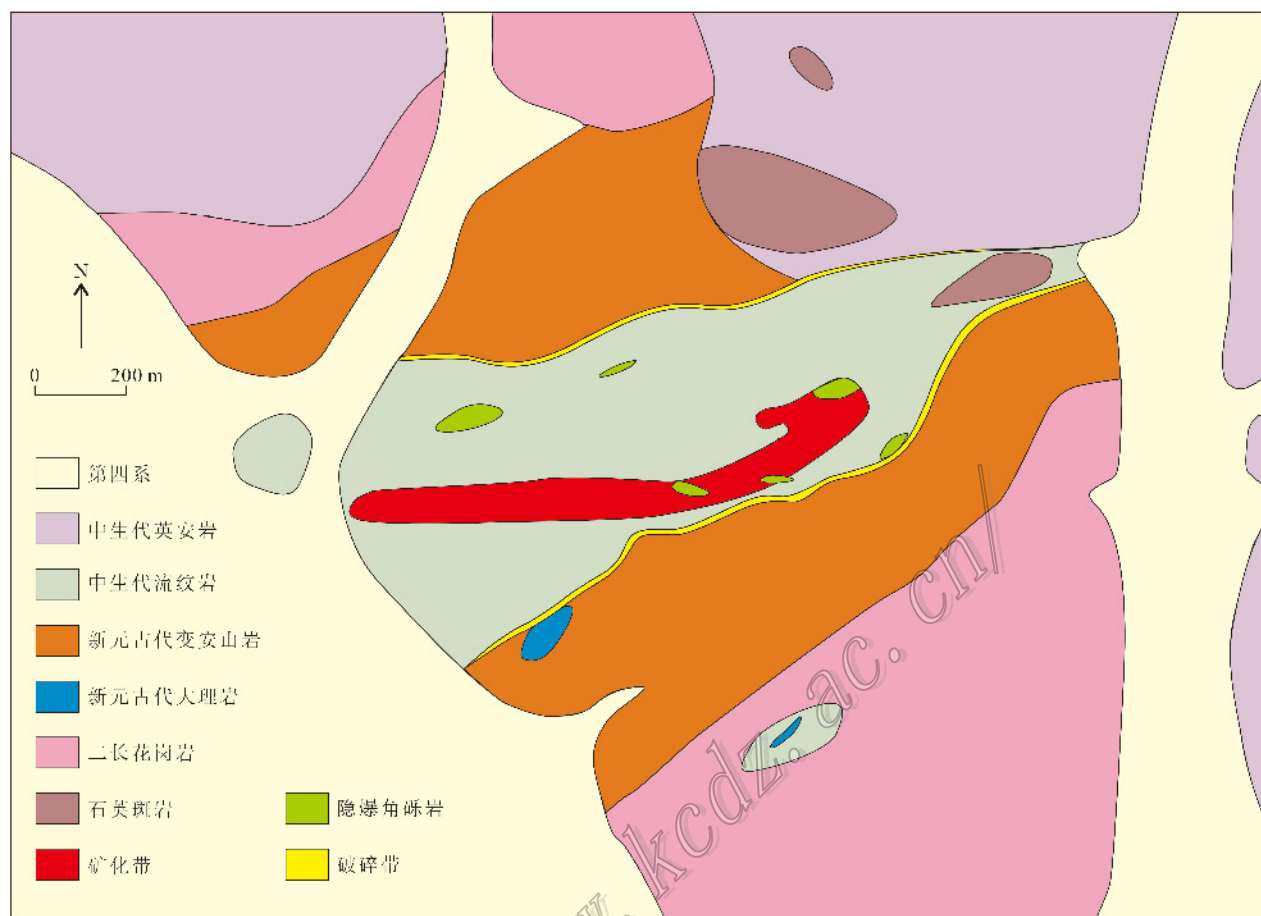


图2 岔路口矿区地质图(据刘冀飞等, 2011; 王建平等, 2011; 聂凤军等, 2013 改编)

Fig. 2 Geological sketch map of the Chalukou deposit (modified after Liu et al., 2011; Wang et al., 2011; Nie et al., 2013)

化带和石英-绢云母化带之中。根据矿石类型、不同脉体之间的穿插关系和矿物共生组合, 可将成矿过程划分为4个阶段: I 石英-钾长石阶段; II 石英-辉钼矿阶段; III 石英-多金属硫化物阶段; IV 萤石-方解石-石英阶段。

2.2 大黑山钼矿床

大黑山钼矿床也位于黑龙江大兴安岭松岭区, 与岔路口钼矿床相距约 100 km。矿区出露地层主要为上石炭统一下二叠统宝力高庙组(C_3-P_1bl)凝灰岩、英安岩、安山岩。侵入岩主要有与成矿有关的花岗闪长岩和矿区南部大面积分布的细粒花岗岩(图4)。花岗闪长岩的地表出露面积不到 0.5 km², 但深部钻孔控制的隐伏岩体面积大于 2 km², 该岩体的成岩时代为晚侏罗世($(147 \pm 1) Ma$, Hu et al., 2014), 表明大黑山矿床也为晚侏罗世形成, 与岔路口矿床的成矿时代基本一致。地层与花岗闪长岩的接触带多发生角岩化, 矿体主要赋存于花岗闪长岩

体顶部及其与凝灰岩(或角岩)的接触带。截止目前, 矿区共发现钼矿体 190 条(工业矿体 87 条)、铜矿体 22 条(工业矿体 7 条)、铅锌矿体 8 条(工业矿体 3 条), 呈大小不等的脉状及透镜状矿体多以矿体群形式分布。矿体走向北西, 倾向北东, 倾角 30~45°。矿石矿物主要有黄铁矿、辉钼矿、方铅矿、黄铜矿、闪锌矿、钼华等, 脉石矿物有石英、钾长石、绿泥石、绿帘石、绢云母、方解石等。矿石主要为细脉状、网脉状和浸染状构造(图 5a、b、c)。围岩蚀变类型主要有钾长石化、硅化、绢云母化、黄铁矿(褐铁矿)化, 与铜、钼矿化关系密切, 此外还有绿泥石化、绿帘石化和碳酸盐化等。常形成石英-钾长石化、石英-绢云母化或黄铁绢英岩化的蚀变组合。不同的蚀变类型相互叠加、逐渐过渡, 无明显的界线, 但总体表现为由下到上, 石英-绢云母化逐渐变强, 石英-钾长石化逐渐变弱的趋势。绿泥石、绿帘石和碳酸盐化主要发育于岩体顶部与角岩过渡的位置。

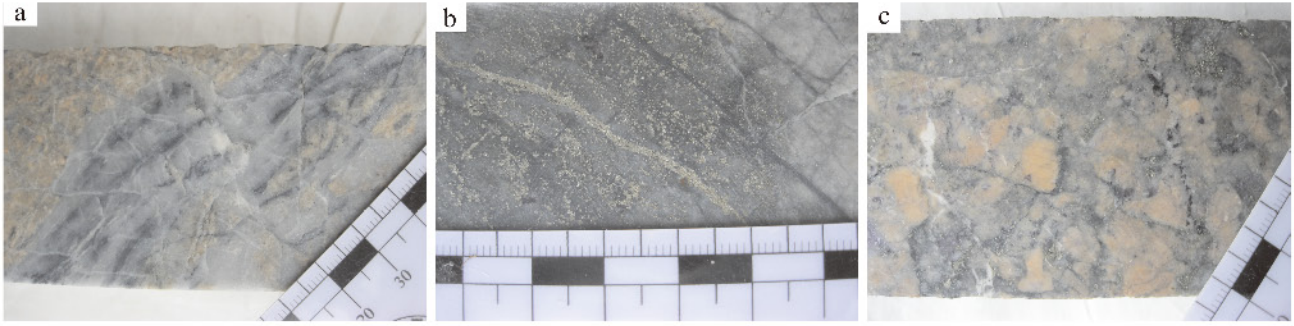


图 3 岔路口矿区矿化特征

a. 石英-辉钼矿脉; b. 细脉浸染状黄铁矿; c. 石英-萤石-方解石-黄铁矿脉胶结钾化角砾

Fig. 3 Mineralization characteristics of the Chalukou deposit

a. Quartz-molybdenite vein; b. Veinlet disseminated pyrite; c. Potassic altered breccias cemented by quartz-fluorite-calcite-pyrite veins

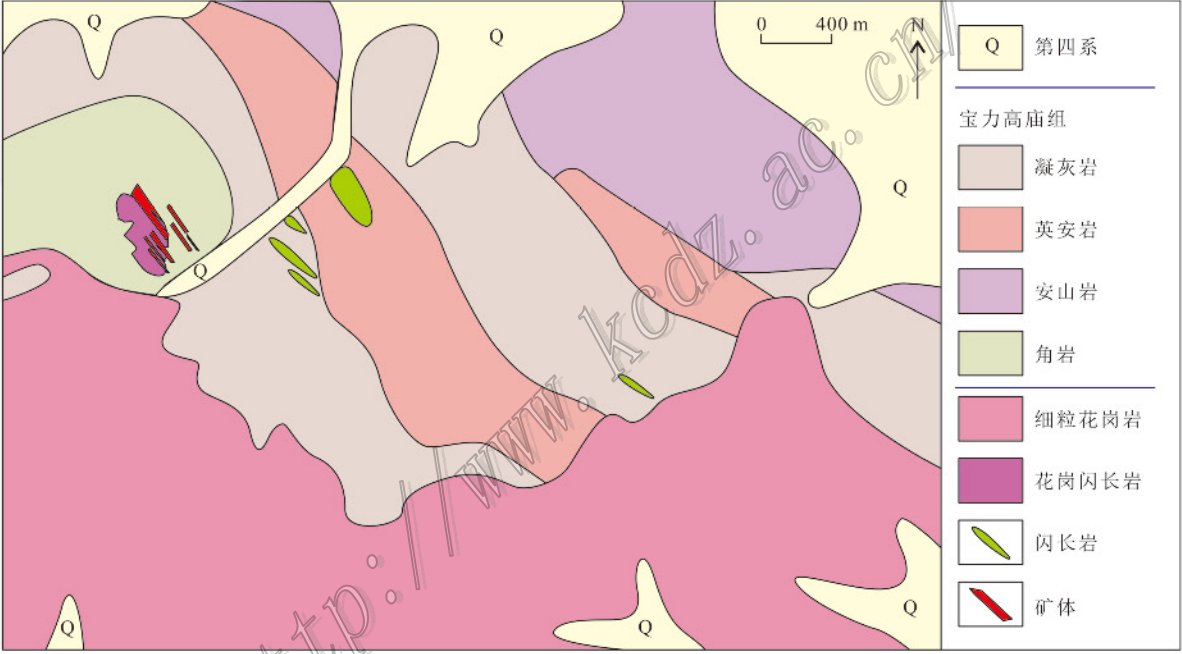


图 4 大黑山矿区地质图

Fig. 4 Geological sketch map of the Daheishan deposit

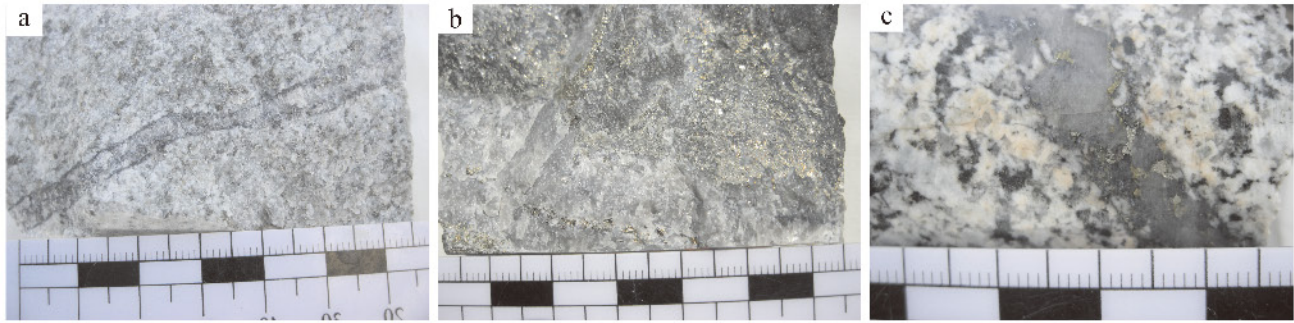


图 5 大黑山矿区矿化特征

a. 石英-辉钼矿脉; b. 石英-黄铁矿脉; c. 石英-黄铁矿-黄铜矿-辉钼矿脉

Fig. 5 Mineralization characteristics of the Daheishan deposit

a. Quartz-molybdenite vein; b. Quartz-pyrite veins; c. Quartz-pyrite-chalcopyrite vein

3 样品及分析方法

岔路口矿区的硫化物样品采自不同的钻孔岩芯和矿石堆之中,为不同产状的黄铁矿。大黑山矿区的硫化物样品采自多个钻孔岩芯,包括不同产状和矿物组合的黄铁矿、黄铜矿和方铅矿矿石。将样品粉碎至 40~60 目,经清洗、干燥之后,在双目镜下挑选新鲜纯净的硫化物单矿物样品,纯度达 99% 以上。硫、铅同位素分析均在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。

硫同位素分析时,首先将硫化物中的硫氧化为 SO_2 并用冷冻法收集,然后用 Finnigan MAT-251 同位素质谱仪分析硫同位素组成,数据以 CDT 标准给出,分析精度优于 $\pm 0.2\text{‰}$ 。铅同位素样品先用混合酸分解,然后用树脂交换法分离出铅,进而用 ISO-PROBE-T 热电离质谱仪进行测试,检测方法和依据为 GB/T17672-1999《岩石中铅铋钨同位素测定方法》,测试误差分别为: $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: $2\sigma < 0.008$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: $2\sigma < 0.003$; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: $2\sigma < 0.004$ 。

4 分析结果

4.1 硫同位素

硫同位素分析结果见表 1。岔路口矿区 8 件不同类型黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值并无明显差别,变化于 $1.8\text{‰} \sim 2.9\text{‰}$,平均值为 2.4‰ 。大黑山矿区不同硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值也较为均一,变化于 $0.4\text{‰} \sim 2.3\text{‰}$,

平均 1.53‰ ,其中 5 件黄铁矿样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 $0.4\text{‰} \sim 2.3\text{‰}$,平均 1.64‰ ;黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 1.4‰ ;方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 1.1‰ 。

4.2 铅同位素

铅同位素分析结果列于表 2。岔路口矿区 8 件黄铁矿样品的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 $18.311 \sim 18.356$ (平均 18.334), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 $15.536 \sim 15.573$ (平均 15.559), $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 $38.115 \sim 38.229$ (平均 38.183)。大黑山矿区 5 件黄铁矿样品的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 $18.353 \sim 18.668$ (平均 18.436), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 $15.53 \sim 15.62$ (平均 15.551), $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 $38.111 \sim 38.309$ (平均 38.173);1 件黄铜矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.719$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.637$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.363$;1 件方铅矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.341$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.529$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.033$ 。前人研究结果表明,大兴安岭地区燕山期花岗岩类的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.121 \sim 18.672$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.480 \sim 15.606$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.628 \sim 38.525$ (武广, 2005; 褚少雄等, 2012);中生代火山岩地层的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.696 \sim 18.414$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.446 \sim 15.533$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.703 \sim 38.206$ (Wang et al., 2006; 周新华等, 2009)。

5 讨论

5.1 硫的来源

矿床的硫同位素组成是判断成矿物质来源的重要依据。应用硫同位素示踪成矿物质来源时,一般

表 1 岔路口和大黑山矿区硫化物的硫同位素组成
Table 1 Sulfur isotope composition of sulfides from the Chalukou and Dabeishan deposits

矿区	样品编号	样品描述	矿物名称	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
岔路口	DB-5	钾化带中的细粒浸染状黄铁矿	黄铁矿	2.7
	DB-8	黄铁矿-方铅矿脉	黄铁矿	2.3
	DB-17	方解石-萤石-黄铁矿脉	黄铁矿	1.8
	DB-18	钾化带中的细粒浸染状黄铁矿	黄铁矿	1.9
	DB-21	围岩中的黄铁矿细脉	黄铁矿	2.6
	DB-22	方解石-萤石-黄铁矿脉	黄铁矿	2.6
	DB-23	围岩中的粗粒黄铁矿	黄铁矿	2.9
	1606-5	青磐岩化带中的黄铁矿脉	黄铁矿	2.4
	DHS-9	石英-黄铜矿细脉	黄铜矿	1.4
大黑山	DHS-10	黄铁矿脉	黄铁矿	1.8
	DHS-11	陡倾的黄铁矿脉	黄铁矿	1.7
	DHS-12	陡倾的黄铁矿脉	黄铁矿	2
	DHS-13	缓倾的黄铁矿脉	黄铁矿	2.3
	DHS-14	石英-黄铁矿脉	黄铁矿	0.4
	906-2	含黄铁矿、方铅矿的石英脉	方铅矿	1.1

表2 岔路口、大黑山矿区硫化物的铅同位素组成

Table 2 Lead isotope composition of sulfides from the Chailoukou and Dabeshan deposits

矿区	样品编号	测试对象	成矿时代/Ma	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	μ	Th/U	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
岔路口	DB-5	黄铁矿	146.9 ± 0.8	18.338	15.569	38.218	9.41	3.67	67.71	15.93	26.24
	DB-8	黄铁矿	146.9 ± 0.8	18.321	15.553	38.165	9.38	3.66	66.72	14.89	24.82
	DB-17	黄铁矿	146.9 ± 0.8	18.315	15.549	38.153	9.37	3.66	66.37	14.63	24.5
	DB-18	黄铁矿	146.9 ± 0.8	18.353	15.559	38.181	9.39	3.65	68.58	15.28	25.25
	DB-21	黄铁矿	146.9 ± 0.8	18.341	15.573	38.229	9.42	3.68	67.88	16.19	26.54
	DB-22	黄铁矿	146.9 ± 0.8	18.311	15.536	38.115	9.35	3.64	66.14	13.78	23.48
	DB-23	黄铁矿	146.9 ± 0.8	18.334	15.565	38.200	9.4	3.67	67.47	15.67	25.76
	1606-5	黄铁矿	146.9 ± 0.8	18.356	15.565	38.204	9.4	3.66	68.76	15.67	25.87
大黑山	DHS-9	黄铜矿	147 ± 1	18.719	15.637	38.363	9.51	3.56	89.89	20.37	30.14
	DHS-10	黄铁矿	147 ± 1	18.390	15.533	38.111	9.33	3.60	70.74	13.58	23.37
	DHS-11	黄铁矿	147 ± 1	18.363	15.532	38.133	9.34	3.62	69.16	13.52	23.96
	DHS-12	黄铁矿	147 ± 1	18.668	15.620	38.309	9.48	3.56	86.92	19.26	28.69
	DHS-13	黄铁矿	147 ± 1	18.405	15.542	38.181	9.35	3.62	71.61	14.17	25.25
	DHS-14	黄铁矿	147 ± 1	18.353	15.530	38.133	9.33	3.63	68.58	13.39	23.96
	906-2	方铅矿	147 ± 1	18.341	15.529	38.033	9.33	3.59	67.88	13.32	21.28

注: $\alpha = ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $\beta = ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $\gamma = ^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $\Delta\alpha = (\alpha/\alpha_{\text{mantle}} - 1) \times 1000$, $\Delta\beta = (\beta/\beta_{\text{mantle}} - 1) \times 1000$, $\Delta\gamma = (\gamma/\gamma_{\text{mantle}} - 1) \times 1000$, α_{mantle} 、 β_{mantle} 和 γ_{mantle} 为 t 时的地幔值。岔路口矿床的成矿时代据聂凤军等(2011),大黑山矿床的成矿时代据Hu等(2014)。

要判断成矿流体的总硫同位素组成。除了少量表生氧化作用形成的褐铁矿、镜铁矿和钼华以外,岔路口和大黑山矿床的金属矿物组合基本上仅见硫化物,指示矿质沉淀时成矿流体具有较低的氧逸度。而在氧逸度较低时,硫化物的硫同位素组成可以近似代表成矿流体的总硫同位素组成(Ohmoto, 1972)。岔路口和大黑山矿床硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值均表现为较小的正值,且变化范围较小(所有样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于0.4‰~2.9‰)。指示成矿流体的硫源单一,总体显示出岩浆来源的特征。大黑山矿床硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值总体显示出黄铁矿(平均1.64)>黄铜矿(1.4)>方铅矿(1.1)的特征,表明硫同位素可能达到了分馏平衡。

岔路口矿区的矿体主要产于花岗斑岩体、石英斑岩体的顶部及其与围岩的接触带,而大黑山矿区的矿体产于该区花岗闪长岩体顶部及其与围岩的接触带,指示岔路口矿床的成矿母岩为该区的花岗斑岩和石英斑岩,大黑山矿床的成矿母岩是该区的花岗闪长岩。

5.2 铅的来源

在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造模式图解(图6a、b)中,岔路口和大黑山矿床硫化物铅同位素的大部分投点落于地幔演化线和造山带演化线之间,且靠近造山带演化线,表明铅的

起源可能与造山作用有关。岔路口矿区硫化物的铅同位素组成变化范围较小,指示其成矿物质应来源于单一源区。而大黑山矿区的铅同位素变化范围则相对较大,有2个硫化物样品的投点落于造山带演化线之上,表明该矿床的铅可能来自不同的源区,成矿过程中可能有围岩或其他深部物质的混入。但是在在大黑山矿区范围内,宝力高庙组地层除部分地段发育角岩化以外,未见广泛的蚀变发育,表明热液活动的规模和强度有限,不能从地层中萃取大量的成矿物质。因此围岩地层没有为成矿提供大量的矿物质,成矿物质应该主要来自于赋矿的花岗闪长岩。

大兴安岭地区中生代火山岩和燕山期花岗岩铅同位素的大部分投点同样位于地幔演化线与造山带演化线之间,火山岩样品的投点更靠近地幔演化线,而花岗岩样品的铅同位素具有相对较大的变化范围,更靠近造山带演化线(图6a),表明燕山期花岗岩可能为壳幔混合来源。对比来看,岔路口和大黑山矿区硫化物铅同位素的变化范围和趋势与燕山期花岗岩类似,进一步表明成矿物质应该来自于燕山期花岗岩。此外,在 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 图解(图7)中,岔路口和大黑山矿床硫化物铅同位素的投点也均落于岩浆作用范围内,靠近地幔源铅、造山带铅和地壳与地幔混合的俯冲带铅(岩浆作用)三者的边界,指示矿石铅来源于壳幔混合,且与岩浆作用有关。

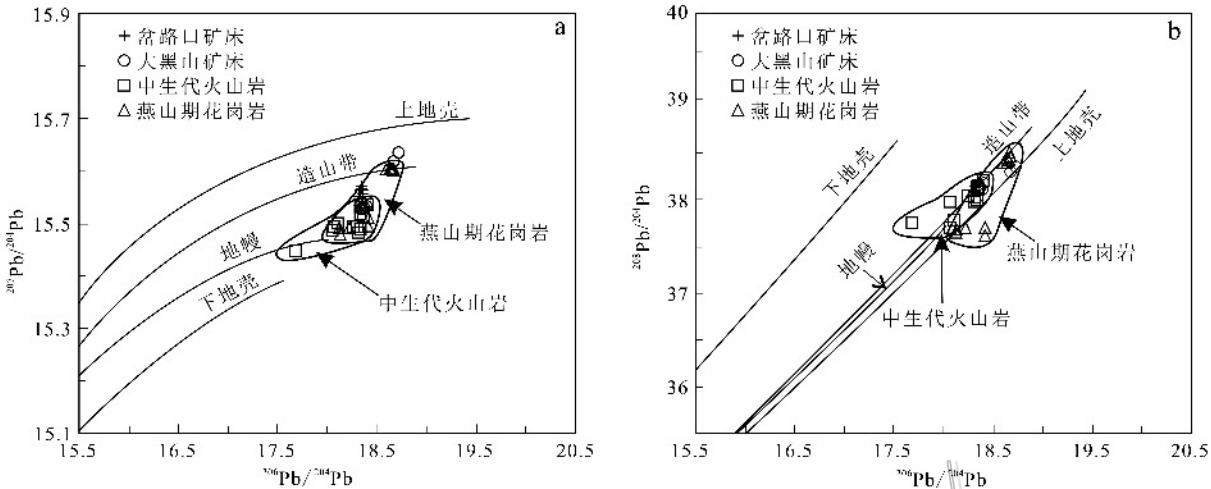


图 6 岔路口和大黑山矿区矿石硫化物铅同位素构造模式图(底图据 Zartman et al., 1981; 燕山期花岗岩数据引自武广, 2005; 褚少雄等, 2012; 中生代火山岩数据引自 Wang et al., 2006; 周新华等, 2009)

Fig. 6 Lead isotope tectonic discriminant diagram for sulfides from the Chalukou and Daheishan deposits (base diagram after Zartman et al., 1981; data for Yanshanian granitoids after Wu, 2005; Chu et al., 2012; data for Mesozoic volcanic rocks after Wang et al., 2006; Zhou et al., 2009)

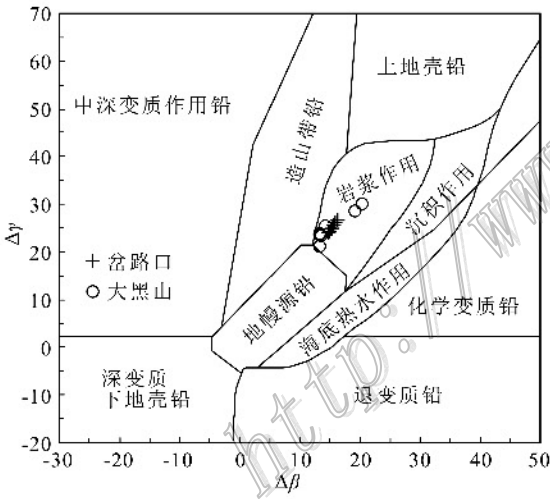


图 7 岔路口和大黑山矿区硫化物铅同位素 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 图解(底图据朱炳泉, 1998)

Fig. 7 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ diagram for lead isotope of sulfides from the Chalukou and Daheishan deposits (base diagram after Zhu, 1998)

6 结 论

(1) 岔路口和大黑山钼矿床硫化物的硫同位素组成基本一致, 均表现为较小的正值且变化范围小, 指示硫来源于岩浆。

(2) 矿石铅同位素的变化范围和趋势与燕山期

花岗岩相似, 进一步指示成矿物质应来源于矿区的燕山期花岗岩, 且燕山期花岗岩起源于壳幔物质的混合。

(3) 大兴安岭北部地区在晚侏罗世受古太平洋板块俯冲的影响, 发生了强烈的壳幔相互作用, 形成了大量的富含 Mo 的岩浆, 该类岩浆上侵至地壳浅部, 在有利的地质环境中形成了斑岩型钼矿床。

志 谢 野外工作中得到了黑龙江省有色金属地质勘查研究总院、黑龙江省齐齐哈尔矿产勘查开发总院及黑龙江省地质科学研究所的领导和技术人员的支持和帮助, 李超、陈斌和曾国平同学在矿物挑选过程中给予了帮助, 两位审稿人对文章提出了宝贵的修改意见, 在此一并表示衷心的感谢。

参考文献/References

白令安, 孙景贵, 张 勇, 韩世炯, 杨凤超, 门兰静, 古阿雷, 赵克强. 2012. 大兴安岭地区内生铜矿床的成因类型、成矿时代与成矿动力学背景[J]. 岩石学报, 28(2): 468-482.

陈衍景, 张 成, 李 诺, 杨永飞, 邓 轲. 2012. 中国东北钼矿床地质[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(5): 1223-1268.

褚少雄, 刘建明, 徐九华, 魏 浩, 柴 辉, 佟匡胤. 2012. 黑龙江三矿沟铁铜矿床花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 定年岩石成因及构造意义[J]. 岩石学报, 28(2): 433-450.

- 付瑞忠, 闾学胜, 孟昭君, 王建平. 2011. 黑龙江省大兴安岭岔路口斑岩型钼多金属矿床地质特征[J]. 矿产勘查, 2(3): 232-240.
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 张吉衡. 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.
- 胡道功, 李洪文, 刘旭光, 于荣文. 2003. 大兴安岭吉峰科马提岩 Sm-Nd 等时线年龄测定[J]. 地球学报, 24(5): 405-408.
- 刘建明, 张锐, 张庆洲. 2004. 大兴安岭地区的区域成矿特征[J]. 地学前缘, 11(1): 269-277.
- 刘军, 毛景文, 武广, 罗大峰, 王峰, 周振华, 胡妍青. 2013. 大兴安岭北部岔路口斑岩钼矿床岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 87(2): 208-226.
- 刘翼飞, 聂凤军, 孙振江, 吕克鹏, 张可, 刘勇. 2011. 岔路口特大型钼多金属矿床的发现及其意义[J]. 矿床地质, 30(4): 759-764.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 21(1): 171-190.
- 孟昭君, 闾学胜, 李宪臣, 王建平, 张瑞忠, 吕克鹏, 孙振江, 石耀军, 张佳南, 王宏燕, 韩龙, 张国玉. 2011. 大兴安岭北东段森林覆盖区岔路口巨型斑岩钼多金属矿床的发现过程及意义[J]. 中国地质, 38(6): 1504-1517.
- 聂凤军, 孙振江, 李超, 刘翼飞, 吕克鹏, 张可, 刘勇. 2011. 黑龙江岔路口钼多金属矿床辉钼矿铼-钨同位素年龄及地质意义[J]. 矿床地质, 30(5): 828-836.
- 聂凤军, 孙振江, 刘翼飞, 吕克鹏, 赵宇安, 曹毅. 2013. 大兴安岭岔路口矿区中生代多期岩浆活动与钼成矿作用[J]. 中国地质, 40(1): 273-286.
- 祁进平, 陈衍景, Pirajno F. 2005. 东北地区浅成低温热液矿床的地质特征和构造背景[J]. 矿物岩石, 25(2): 47-59.
- 孙立新, 任邦方, 赵凤清, 彭丽娜. 2012. 额尔古纳地块太平川巨斑状花岗岩的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征[J]. 地学前缘, 19(5): 114-122.
- 王建平, 韩龙, 吕克鹏. 2011. 大兴安岭岔路口钼多金属矿床地质特征[J]. 矿产与地质, 25(6): 486-490.
- 王圣文, 王建国, 张达, 祁小军, 吴淦国, 赵丕忠, 杨宗峰, 刘彦兵. 2009. 大兴安岭太平沟钼矿床成矿年代学研究[J]. 岩石学报, 25(11): 2913-2923.
- 王晓勇, 赵春荣, 王振宇, 李向文, 崔学武. 2004. 大兴安岭北部金矿床类型及地质特征[J]. 黄金地质, 10(2): 50-54.
- 武广, 朱群, 赵财胜. 2002. 大兴安岭北部上黑龙江拗陷区金铜矿床类型及地质特征[J]. 矿床地质, 21(S1): 261-264.
- 武广. 2005. 大兴安岭北部区域成矿背景与有色-贵金属矿床成矿作用(博士论文)[D]. 导师: 孙丰月, 吉林: 吉林大学, 68页.
- 武广, 陈衍景, 糜梅, 朱明田, 刘军. 2008a. 大兴安岭北部小伊诺盖沟金矿床流体包裹体特征及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 32(2): 185-194.
- 武广, 李忠权, 糜梅, 刘军, 朱明田. 2008b. 大兴安岭北部砂宝斯金矿床成矿流体特征及矿床成因[J]. 矿物岩石, 28(1): 31-38.
- 武新丽, 毛景文, 周振华, 欧阳荷根. 2012. 大兴安岭中南段布敦化铜矿床 H-O-S-Pb 同位素特征及成矿指示[J]. 中国地质, 39(6): 1812-1829.
- 张连昌, 陈志广, 周新华, 英基丰, 王非, 张玉涛. 2007. 大兴安岭根河地区早白垩世火山岩深部源区与构造-岩浆演化: Sr-Nd-Pb-Hf 同位素地球化学制约[J]. 岩石学报, 23(11): 2823-2835.
- 张连昌, 英基丰, 陈志广, 吴华英, 王非, 周新华. 2008. 大兴安岭南段三叠纪基性火山岩时代与构造环境[J]. 岩石学报, 24(4): 911-920.
- 赵勇伟, 樊祺诚. 2012. 大兴安岭哈拉哈河-绰尔河第四纪火山岩地幔源区与岩浆成因[J]. 岩石学报, 28(4): 1119-1129.
- 周新华, 英基丰, 张连昌, 张玉涛. 2009. 大兴安岭晚中生代火山岩成因与古老地块物质贡献: 锆石 U-Pb 年龄及多元同位素制约[J]. 地球科学, 34(1): 1-10.
- 朱炳泉. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社, 1-330.
- Hu X L, Yao S Z, He M C, Ding Z J, Cui Y B, Shen J, Chen B and Zhu B P. 2014. Geochemistry, U-Pb geochronology and Hf isotope studies of the Daheishan porphyry Mo deposit in Heilongjiang Province, NE China[J]. Resource Geology, 64(2): 102-116.
- Liu J, Mao J W, Wu G, Wang F, Luo D and Hu Y Q. 2014. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating of the Chelukou porphyry Mo deposit in the northern Great Xing'an Range, China and its geological significance[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 79: 696-709.
- Okamoto H. 1972. Systematic of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. Econ. Geol., 67: 551-578.
- Wang F, Zhou X H, Zhang L C, Ying J F, Zhang Y T, Wu F Y and Zhu R X. 2006. Late Mesozoic volcanism in the Great Xing'an Range (NE China): Timing and implications for the dynamic setting of NE Asia[J]. Earth and Planetary Science Letters, 251(1-2): 179-198.
- Zartman R E and Doe B R. 1981. Plumbotectonics-the model[J]. Tectonophysics, 75: 135-162.
- Zeng Q D, Liu J M, Yu C M, Ye J and Liu H T. 2011. Metal deposits in the Da Hinggan Mountains, NE China: Styles, characteristics, and exploration potential[J]. International Geology Review, 53(7): 846-878.
- Zhang J H, Gao S, Ge W C, Wu F Y, Yang J H, Wilde S A and Li M. 2010. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China: Implications for subduction-induced delamination[J]. Chemical Geology, 276(3-4): 144-165.