

大兴安岭岔路口矿区中生代多期岩浆活动与钼成矿作用

聂凤军¹ 孙振江² 刘翼飞¹ 吕克鹏² 赵宇安^{1,3} 曹毅¹

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 黑龙江省有色金属地质勘查 706 队, 黑龙江 齐齐哈尔 161006; 3. 石家庄经济学院, 河北 石家庄 050031)

摘要:岔路口矿床是迄今为止在中国东北地区找到的最大规模钼多金属矿床, 钼、铅-锌和银的储量分别为 124 万 t、26 万 t 和 2773 t。考虑到大规模地质勘查工作仍在进行中, 金属储量的增加只是个时间问题。钼多金属矿化大都在中一晚侏罗世和早白垩世酸性火山岩和隐爆角砾岩以及燕山期石英斑岩(花岗斑岩)内呈浸染状、细脉状和网脉状产出, 并且构成似层状、囊状和“倒扣钟”状矿体。钼多金属矿石主要由辉钼矿、黄铁矿、磁铁矿、方铅矿、闪锌矿、石英、钾长石、萤石和绢云母所组成, 其中 8 件辉钼矿样品的 Re-Os 同位素等时线年龄为(146.9±0.8)Ma。初步研究结果表明, 岔路口矿床无论在产出环境和地质特征方面, 还是在矿物种类和元素组合上均可与美国克莱梅克斯钼矿床相对比, 属高氟含量斑岩型钼矿床。古大陆内部伸展构造环境中中生代多期中酸性岩浆活动为矿床的形成提供了动力、热力和物质来源, 隐爆角砾岩带为成矿流体运移和成矿物质堆积提供了空间条件。

关键词:钼多金属矿床; 地质特征; 中生代; 多期岩浆活动; 成矿作用; 岔路口; 大兴安岭

中图分类号: P618.65 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)01-0273-14

岔路口矿床位于黑龙江省大兴安岭地区松岭区, 东南距松岭区政府所在地小杨气镇 50 km, 距勃志林场 24 km, 地理坐标为: 东经 123°49′15″~123°56′30″, 北纬 51°08′15″~51°11′00″(图 1)。该矿床是黑龙江有色金属地质勘查 706 队(以下简称 706 队)在黑龙江大兴安岭北部找到的一处特大型钼多金属矿床。迄今为止, 所确定的钼、铅-锌和银的储量(332+333)分别为 124 万 t、26 万 t 和 2 773 万 t, 平均品位分别为 0.09%、1.27%和 10×10^{-6} 。考虑到大规模地质勘探工作仍在进行中, 金属储量增加只是个时间问题。需要提及的是, 岔路口矿床的发现是几代地质工作者辛勤劳动的结晶, 同时, 也标志着大兴安岭地区找矿勘查工作进入到一个新的阶段^[1-5]。从地壳活动论角度, 探讨中生代岩浆活动与钼成矿作用成因

关系, 无论是对进一步丰富岔路口矿区基础地质研究内容, 还是对提高钼矿床理论研究水平均具有重要理论和实际意义。

岔路口及邻区的区域地质调查和找矿勘查工作始于 20 世纪 50 年代。自 20 世纪 50 年代末期开始, 中央和地方人民政府所属地勘队伍曾先后在该地区开展过 1:100 万、1:50 万和 1:20 万区域地质调查及 1:50 万和 1:20 万水系沉积物地球化学测量, 同时, 还完成有 1:20 万和 1:5 万航空物探测量, 并且提交有相应的文字报告和图件。另外, 重要地段和关键地区 1:5 万矿产地质调查也获重要进展, 圈定出一大批物化探异常, 发现有若干金属矿床(点)^[1-3,6]。2003—2006 年, 706 队在承担黑龙江省资源补偿费项目——“黑龙江省大兴安岭地区松岭区多布库尔

收稿日期: 2013-01-01; 改回日期: 2013-01-26

基金项目: 国家重点自然科学基金项目(41030421)、中国地质调查局地质调查项目(12120109 11029)和 973 国家科技计划课题(2013CB429805)联合资助。

作者简介: 聂凤军, 男, 1956 年生, 研究员, 博士生导师, 从事金属矿床地球化学研究; E-mail: nfj@mx.cei.gov.cn。

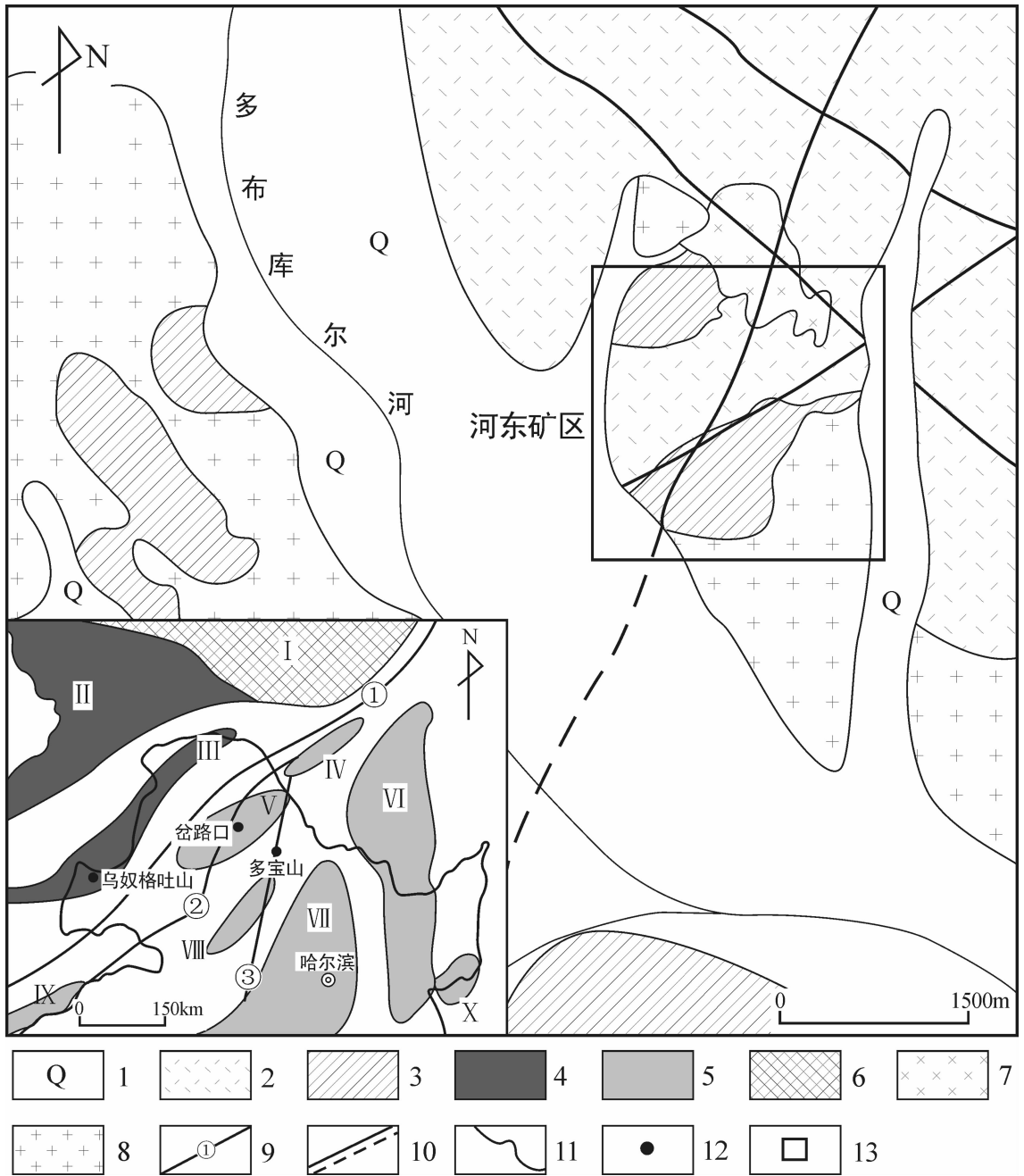


图1 大兴安岭岔路口钼多金属矿床区域地质略图(根据 Ren et al., 1999; 刘翼飞等, 2011; 孟昭君等, 2011; 聂凤军等, 2011 资料改编)

1—第四系; 2—侏罗纪火山-沉积岩; 3—新元古界-寒武系变质岩; 4—亲西伯利亚块体及编号; 5—亲中华块体及编号; 6—前寒武纪克拉通; 7—中生代粗面岩; 8—古生代二长花岗岩; 9—深大断裂及编号(①—得尔布干; ②—鄂伦春-头道桥; ③—嫩江); 10—一般断层; 11—国界; 12—斑岩型铜和钼矿床; 13—河东矿区范围; 古陆块体: I—西伯利亚板块; II—亚布洛诺夫块体; III—阿依拉格块体; IV—结雅块体; V—鄂伦春块体; VI—布列亚-佳木斯块体; VII—松花江块体; VIII—扎兰屯块体; IX—达里甘嘎块体; X—兴凯块体

Fig. 1 Simplified regional geological map of the Chalukou molybdenum polymetallic deposit, Da Hinggan Mountains (modified after Ren et al., 1999; Liu et al., 2011; Meng et al., 2011; Nie et al., 2011)

1—Quaternary; 2—Jurassic volcano-sedimentary rocks; 3—Neoproterozoic-Cambrian metamorphic rocks; 4— Pro-Siberia blocks; 5—Paleo-Chinese blocks; 6—Precambrian craton; 7—Mesozoic trachyte; 8—Paleozoic monzogranite; 9—Deep-rooted fault (①—Deerbugan; ②—Elunchun-Touolaqiao; ③—Nenjiang); 10— General fault; 11—National boundaries; 12—Porphyry copper and molybdenum deposit; 13—Eastern mineralized district. Blocks of ancient continent: I—Siberia; II—Yablonov; III—Ayrag; IV—Zeya; V—Oroqen; VI—Bureya-Jiamusi; VII—Songhuajiang; VIII—Zalantun; IX—Dariganga; X—Xingkai

河上游铜多金属预查”过程中,圈定出多处水系沉积物元素异常。通过对部分元素异常的查证和揭露发现有多条钼多金属矿(化)体,进而揭开了笼罩在这一特大型钼多金属矿床上的“面纱”,并且将本区找矿勘查工作推向一个新阶段。

1 成矿地质环境

岔路口矿床地处兴蒙造山带东北段(部分地区又称华北—蒙古联合块体或华—蒙块体),位于鄂伦春中间地块的西南侧,其东南方向80 km处,即是鄂伦春—头道桥深大断裂(图1)^[1,6-8]。矿区及外围各时代地层分布广泛、构造形迹复杂、侵入岩十分发育和金属矿床(点)星罗棋布,为大兴安岭北段最重要的矿化集中区。

1.1 地层

岔路口矿区出露的地层主要有新元古代—早寒武世变质沉积岩、侏罗系和白垩纪火山岩以及第四纪冲洪积物^[1-9]。新元古代—早寒武世变质沉积岩主要出露在矿区中部多布库尔河两侧,主要岩石类型有片岩、板岩、页岩、变质粉砂岩和大理岩。相比之下,中—晚侏罗世和早白垩世中酸性火山岩分布广泛,主要岩石类型有安山岩、英安岩、流纹岩、角砾岩、凝灰岩和凝灰熔岩,其中英安岩和流纹岩是钼多金属矿体的主要容矿围岩^[1-3]。第四纪冲洪积物主要出现在矿化区低洼处和沟谷中,由砂土和砾石所构成。

1.2 侵入岩

各个地质时代、不同产出规模和分布形态各异的侵入岩体分布广泛,其中花岗岩类侵入岩以产出数量多、出露面积大、岩石类型复杂和含矿性比较好为特点。岩体大多呈岩株状和岩脉侵入到新元古代—早寒武世变质岩或中生代火山—沉积岩地层,并且为晚期侵入岩脉所切割。根据矿区范围内花岗岩类侵入岩的空间分布特点,并且结合同位素年龄数据,可将其大体划分为3期,即成矿期前、同成矿期和成矿期后^①。

1.3 隐爆角砾岩

岔路口矿区隐爆角砾岩大都在中—晚侏罗世火山岩中呈条带状和筒状产出,出露面积变化范围较大,从几平方米到几十平方米。在剖面上,它们大都

为上大下小的喇叭口状或围绕侵入岩脉(或株)的环带状^[1-5]。一般情况下,隐爆角砾岩带与中—晚侏罗世火山岩地层界线清晰,但是其与花岗斑岩和石英斑岩呈渐变过渡关系。角砾大都为几平方厘米到几平方米棱角状—次圆状,大小相差悬殊,其成分既可以是流纹岩、英安岩和凝灰熔岩,也可以是花岗斑岩、石英斑岩和石英闪长岩,胶结物主要是蚀变晶屑、岩屑和蚀变矿物集合体。野外接触关系和同位素年龄数据表明,隐爆角砾岩分别形成于晚侏罗世(152 Ma)和早白垩世(135 Ma)^①。

1.4 矿区构造

各种展布方向、不同产出规模和几何形态各异的断层破碎带分布广泛,其中以北东向和北西断层破碎带(又称多布库尔河断裂)产出规模最大,并且与钼多金属矿体具有密切空间分布关系。另外,在岔路口外围的北东侧北东向与北西向线性构造交汇部位分布有明显环状构造,长度和宽度分别为9 km和3 km,这一呈北东向展布构造形迹为岔路口矿床的重要导矿构造^[1-3,5-6,9]。需要提及的是,厚度大、品位高和连续性好的钼多金属矿体大都在北东向、北东东向与北西向断层交汇部位产出,因此,各类断层交汇部位很可能是成矿流体上涌的通道和积淀空间^[9]。

1.5 区域矿产

岔路口及邻区地处大兴安岭金属成矿带的北段,牙克石—根河铅—锌—钼—金—铜成矿带的东北端。迄今为止,在这一地域发现和圈定各类金属矿床(点)十余处,其中代表性矿床(点)有塔源铅—锌矿床、环宇铅—锌矿床、宏伟铜—银—金矿床、303铜—钼矿点和韩家园子钽—铁矿床。另外,在岔路口矿区东南160 km处产出有多宝山、铜山和三矿沟铜(钼)矿床,西南方向380 km处分布有乌努格吐山、八大关和八八一铜(钼)矿床^[1-3,7-8,10]。岔路口及外围金属矿床(点)空间分布特点表明,该区具有优越的成矿环境、良好的控矿条件和充足的物质来源,因此,在这一地区实现找矿工作的更大突破是完全有可能的。

2 花岗岩类侵入岩^①

2.1 成矿期前侵入岩

主要为前中生代石英闪长岩和二长花岗岩以及

①刘翼飞,聂凤军,曹毅,等.黑龙江岔路口地区侵入岩成岩年代学及地球化学特征.中国地质科学院矿产资源研究所未发表科研报告, 2012:1-25.

中生代钾长花岗岩和碱性辉绿岩。中生代钾长花岗岩出露在矿区的西部、南部和北部,呈岩株(脉)状侵入到前中生代石英闪长岩中,并为早白垩世火山岩所覆盖。相比之下,碱性辉绿岩较为少见,大多呈不连续的岩脉侵入到前中生代变质岩地层,并且为晚侏罗世—早白垩世火山—沉积岩所覆盖。两类岩石岩相学特征简述如下:(1)钾长花岗岩:代表性全岩样品呈灰白色—浅肉红色,中粒似斑状结构、块状构造。主要由钾长石、斜长石和石英以及少量黑云母组成,其中石英含量为 25%~30%、钾长石(条纹长石、正长石、微斜长石)为 45%~50%、斜长石(更长石、钠长石)以及黑云母为 3%~5%,副矿物有磷灰石、锆石、榍石、磁铁矿和褐帘石。钾长石、斜长石和黑云母分别遭受到不同程度泥化、绢云母化和绿泥石化;(2)碱性辉绿岩:代表性岩石样品呈暗灰—灰黑色—灰绿色,细—微粒辉绿结构或变余辉绿结构,块状构造。岩石主要由辉石、碱性辉石和斜长石(钙长石和钠长石)以及少量石英、黑云母、角闪石和绿泥石组成,个别岩石薄片中含微量橄榄石。受强烈热液蚀变作用影响,碱性辉绿岩所含辉石和斜长石分别为角闪石、黑云母、钠长石、绿泥石、黝帘石、绿帘石、高岭石和碳酸盐类矿物所取代。副矿物有磷灰石、磁铁矿和钛铁矿。

2.2 同成矿期侵入岩

石英斑岩和花岗斑岩是岔路口矿区最重要的两种含矿岩体,它们分别呈岩枝和岩脉侵入到前中生代变质岩、中—晚侏罗世火山岩中。在地表,石英斑岩呈岩枝或脉产出,其主体出露于地表及其以下 600 m 处,并且逐步过渡为花岗斑岩(未出露地表)。整个岩株埋深为 600~800 m,长度大于 800 m,宽度为 200~400 m,最宽处达 600 m^[1],并且与隐爆角砾岩带具有密切空间分布关系。需要提及的是,无论是浅部产出的石英斑岩,还是深部出现的花岗斑岩,它们无一例外地遭受到强烈硅化、绢云母化、钾长石化、萤石化、高岭土化、绿泥石化、绿帘石化和碳酸岩化。两种含矿侵入岩岩相学特点简述如下:(1)石英斑岩:代表性全岩样品呈灰白—浅肉红色,斑状结构,块状构造。斑晶以石英为主,并且见有少量钾长石,粒径变化范围为 2.0~2.8 mm,占全岩的 15%~25%。石英斑晶自形程度较高,溶蚀和碎裂特征比较明显。基质全部隐晶质物质,占全部岩石的 60%~70%,副矿物有磷灰石、锆石、榍石、磁铁矿和褐帘

石;(2)花岗斑岩:代表性全岩样品呈灰白—浅肉红色,斑状和多斑状结构,块状构造。斑晶主要有钾长石、斜长石和石英,粒径变化范围为 2.0~2.8 mm,占全岩矿物含量的 15%~20%;基质矿物有显微晶质正长石、钠长石和石英以及隐晶质物质。副矿物有磷灰石、锆石、榍石、磁铁矿和褐帘石。

2.3 成矿期后侵入岩

二长花岗斑岩、花岗斑岩、粗安斑岩和闪长玢岩呈脉或岩株侵入到中—晚侏罗世火山岩中,明显切割和破坏了矿体,属成矿期后构造—岩浆活动产物。受论文篇幅所限,这里对二长花岗斑岩和花岗斑岩岩相学进行简要描述:(1)二长花岗斑岩:代表性全岩样品呈浅肉红色,斑状结构、块状构造。斑晶主要有钾长石和斜长石(更长石和钠长石),二者含量大体相同,占全岩斑晶和基质含量的 15%~25%,基质全部为隐晶质或显微隐晶质,含量为 55%~65%。受强烈热液蚀变作用影响,大多数岩石样品的斑晶和基质为绢云母、绿泥石、黝帘石、绿帘石、高岭石和碳酸盐类矿物所取代。副矿物有磷灰石、锆石、榍石、磁铁矿和褐帘石;(2)花岗斑岩:代表性全岩样品呈灰白色—浅肉红色,斑状结构、块状构造。斑晶主要有钾长石、斜长石和石英以及少量黑云母,粒径变化范围为 2.0~2.8 mm,占全岩矿物和基质含量的 15%~25%。基质呈显微隐晶质和显微晶质(钾长石、钠长石和石英),二者的含量分别为 55%~65%和 10%~15%。受强烈热液蚀变作用影响,大多数岩石样品的斑晶和基质为绢云母、绿泥石、绿帘石、粘土类和碳酸盐类矿物所取代。副矿物有磷灰石、锆石、榍石、磁铁矿和褐帘石。

3 钼多金属矿床特征

岔路口矿区以多布库尔河为界,划分为河东和河西两处矿区,两者相距 3 km。整个矿化区东西长 8 km,南北宽 5 km,分布面积 40 km²(图 1)^[1-5,9]。迄今为止,多布库尔河东部河东区的详细地质勘查工作已接近尾声,而河西区地质普查工作则正在进行之中。考虑到河东和河西区的工作程度相差较大,这里仅以河东区为例,对岔路口矿床地质特征进行概要介绍和总结。如前所述,钼多金属矿化大都在中—晚侏罗世和早白垩世酸性火山岩和燕山期浅成侵入岩体(流纹斑岩或花岗斑岩)内呈网脉状、细脉—浸染状和条带状产出。矿体如同巨大的“倒扣钟”或

“碗”状(或拉长式穹隆状)位于火山侵入杂岩体内,地表出露长度为1 800 m,宽度为200~1 000 m,倾斜延深达815 m,分别向南西、北东、西北和东南方向倾斜,倾角为25°~60°(图2~3)。在垂向上,矿体顶板的埋藏深度为200~400 m,从上到下,大体可以划分为3种类型,即薄层状、厚层状和囊状,其中前二者位于后者之上^[1-5,9]。各类矿体地质特征简述如下:(1)薄层状矿体:在中酸性火山岩中呈薄层状和脉状产出,厚度为几米到几十米,钼含量为0.03%~0.08%,平均值0.06%。矿体以产出规模小、矿石品位低和连续性差为特点;(2)厚层状矿体:在中酸性火山岩和花岗斑岩内呈厚层状、斑状和透镜状产出,厚度为几十米到百余米,钼含量0.06%~0.26%,平均值0.12%。矿体以产出规模大、矿石品位较高和连续性较好为特征;(3)囊状矿体:在花岗斑岩和隐爆角砾岩带内呈厚层状和囊状产出,厚度为几十米到数百米,钼含量为0.08%~0.53%,平均值0.18%。矿体以产出规模大、矿石品位高和连续性较好为特征。系统的钻探结果表明,随着深度增加,钼矿体有明显增厚和变富的趋势,除了个别钻孔穿过厚大矿体外,大部分钻孔终止于矿体内部,暗示了其深部仍存在有较大找矿空间(图3)。

除了前述3种单一的钼矿体之外,在其边部和内部还发现和圈定有一系列产出规模大小不等和几何形态各异的银-铅-锌矿体。在目前所圈定的27条矿体中,其中有20条银-铅-锌矿体与钼矿体伴生,其余为独立产出的矿体。银-铅-锌矿化大都在前中生代变质岩和中-晚侏罗世和早白垩世火山岩以及燕山期花岗斑岩或石英斑岩体内呈细脉状和团块状产出。单个脉状和透镜状矿体多呈北东向展布,向北西向倾斜,倾角30°~50°,长度为100~1 700 m,平均值600 m,厚度为1.3~6.4 m,平均值为3.2 m;倾斜延伸200~450 m,平均值310 m。代表性矿石样品铅、锌和银的平均品位分别为0.28%,0.99%和 11×10^{-6} 。单个矿体铅、锌和银最高含量分别为1.65%、3.75%和 216×10^{-6} ^[1-5,9]。无论是含矿中-晚侏罗世酸性火山岩(英安岩和流纹岩),还是燕山期流纹斑岩和花岗斑岩,它们均遭受到强烈热液蚀变作用影响。从花岗斑岩体(流纹斑岩体)中心地带向外,热液蚀变分带十分明显,依次为石英-钾长石化带、石英-绢云母化带、泥化带和青磐岩化带,其中前者和后者分别与钼矿化带和银-铅-锌矿化带具有密切空间分布关系(图2)^[1-5,9]。

初步的岩(矿)相学和矿物学研究结果表明,岔路口矿床的矿石类型为块状、浸染状、条带状和角砾状硫化物型矿石,钼华、钼铅矿和钼钙矿极为少见^[1-5,9]。矿石的金属矿物主要有黄铁矿、辉钼矿、闪锌矿、方铅矿和磁铁矿以及少量黄铜矿和斑铜矿;脉石矿物有石英、钾长石、萤石、绢云母、高岭石、绿泥石、方解石和绿帘石。辉钼矿大多呈鳞片状集合体或团块状不均匀散布在流纹岩、英安岩、花岗斑岩和石英斑岩内,其单一叶片的大小一般为2 mm×3 mm~5 mm×5 mm,最大者可达到8 mm×12 mm。辉钼矿的产出方式有3种:(1)呈稠密浸染状或稀疏浸染状在火山岩或浅成侵入岩内产出;(2)呈单一叶片或叶片集合体在石英脉中沿绢云母或石英粒间空隙或微裂隙展布;(3)呈稀疏浸染状,薄膜状或星点状在石英脉内产出。为了确定钼多金属矿床的形成时间,前人对8件代表性辉钼矿样品进行了铼-钼同位素年龄测定,所获等时线年龄值为 (146.9 ± 0.8) Ma, MSWD值为0.56^[9]。根据上述同位素年龄数值,同时结合野外地质资料和侵入岩同位素年龄数据,可以推测岔路口矿床是燕山中期构造-岩浆活动产物。

4 矿床对比分析

众所周知,全球范围内许多大型或超大型钼矿床大多沿前寒武纪古陆块体边缘产出,并且与中、新生代多期次构造-岩浆活动具有密切成因联系。为了更好地了解岔路口矿床的产出特点,本文将美国克莱梅克斯钼矿床、金堆城钼矿床和岔路口钼多金属矿床基本地质特征列于表1。在北美前寒武纪地台西缘与科迪勒拉中、新生代造山带之间分布有一条长度可达数千千米,宽度为几十到百余千米的狭长地带,其内产出有一系列巨型或大型钼矿床,如世界上最著名的克莱梅克斯、亨德逊、埃蒙斯山和恩达科等矿床^[11-12]。同样,在华北克拉通南缘与中生代构造-岩浆岩带相叠加地域的金堆城、石家湾、黄龙铺、南泥湖、三道庄和上房沟等地也产出有几十处巨型和大型钼矿床^[13-15]。与中国华北克拉通南缘相比,华北克拉通北部钼矿床产出环境和矿床地质特征更为复杂一些。华北克拉通北缘与中生代构造-岩浆岩带相叠加部位分布有查干花、大苏计、大庄科、撒岱门沟、杨家杖子和兰家沟等数十处大型和中型钼矿床^[10,16-17]。在中国华北克拉通北部的兴蒙造山带内,前寒武纪中间地块分布广泛,其与中生代构造-

表1 岔路口钼多金属矿床与其他典型斑岩钼矿床对比

Table 1 Comparison between the Chalukou deposit and other typical porphyry Mo deposits

对比内容	克莱梅克斯式钼矿床	金堆城式钼矿床	岔路口钼多金属矿床
产出环境	北美前寒武纪古大陆碰撞造山后伸展环境	华北克拉通南缘豫陕断隆区伸展构造带	鄂伦春前寒武纪中间地块边缘拉张构造带
形成时代	33~18 Ma	141~127 Ma	(146.9±0.8) Ma
容矿围岩	新生代浅成花岗岩类侵入岩, 前寒武纪变质岩或中、新生代火山-沉积岩	燕山期花岗斑岩, 新元古界熊耳群板岩、安山岩和凝灰岩	燕山期石英斑岩和花岗斑岩, 中-晚侏罗世—早白垩世英安岩和流纹岩
侵入岩	古近-新近纪钙-碱质浅成侵入岩(A型花岗岩类)	燕山期高钾钙-碱质浅成侵入岩(A型花岗岩类)	燕山期高钾钙-碱质浅成侵入岩(A型花岗岩类)
岩石化学	富硅、氟、铷和铯, 而贫锶和锆, 氟含量一般大于1%	富硅、氟、铷和铯, 而贫铁、钙、镁、锶和锆, 氟含量一般大于0.5%	富硅、氟、钾、铷和铯, 贫铁、镁、钙、锶和锆, 氟含量大于1%
地球物理	重力负异常区, 磁法和激电异常是良好的找矿标志	重力正、负异常过渡带, 磁法和激电异常可作为很好的找矿标志	重力正、负异常过渡带上, 磁法和激电异常是很好的找矿标志
矿体形态	倒扣“钟”状或“碗”状	似层状、囊状和筒状以及倒扣“碗状”	倒扣“钟状”和“碗状”以及筒状和囊状
热液蚀变	从矿体中心向外依次为硅化、钾长石化、绢云母化和青磐岩化	从矿体中心向外依次为硅化、钾长石化、绢(云)英岩化和青磐岩化	从矿体中心向外依次为硅化、钾长石化、绢云母化、泥化和青磐岩化
矿物学	金属矿物: 辉钼矿、黑钨矿、锡石、闪锌矿、方铅矿、磁铁矿和黄铁矿; 脉石矿物: 石英、萤石、钾长石、黑云母、黄玉、钠长石和白云母	金属矿物: 辉钼矿、黄铁矿、磁铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿和辉铋矿; 脉石矿物: 石英、微斜长石、条纹长石、绢云母、黑云母、绿泥石、萤石和方解石	金属矿物: 辉钼矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、磁铁矿和白铁矿; 脉石矿物: 石英、萤石、钾长石、绿泥石、绢云母、钠长石和方解石
元素组合	Mo-F-W-Sn-Zn-Ag-Pb	Mo-F-Sn-Zn-Pb	Mo-F-Ag-Zn-Pb
成矿条件	温度: 400~600℃/200~400℃; 盐度: (5~36) wt%NaCl eq; 深度: 小于0.5 km	温度: 300~400℃; 盐度: (15~40) wt%NaCl eq; 深度: 小于0.5 km	温度: 300~400℃; 盐度: (5~30) wt%NaCl eq; 深度: 小于0.5 km
吨位/品位	20~200 万 t/0.5%~0.2%	130 万 t/0.6%~0.8%	124 万 t/0.06%~0.26%
矿床成因	岩浆底侵作用导致陆壳发生部分熔融, 形成一定规模高氟含量岩浆及相关流体, 并且在构造有利部位形成钼矿床	前寒武纪变质岩的重熔融作用可以产生一定量的中酸性岩浆及相关流体, 富挥发分流体(H ₂ O、F和CO ₂)可在构造有利部位形成钼矿床	陆壳重力塌陷和岩石圈减薄导致壳、幔物质发生熔融, 并且产生一定规模岩浆及相关流体, 进而在构造有利部位形成钼多金属矿床
参考文献	?11-12?	?13-15?	?1-5, 9?

岩浆带相互叠加的部位也产出有大型和中型钼矿床,如激流河、太平川、霍吉河、翠宏山、鹿鸣、翠岭、五道岭和岔路口^[10,16-17]。钼矿床的上述分布特点表明,以下4点可能是钼矿床形成的关键要素:①古陆壳各岩层(体)钼含量明显高于地壳各类岩石克拉克值,具有明显的钼地球化学异常场;②伸展构造条件下,岩石圈减薄和拆沉作用导致古陆壳发生部分熔融,并且产生高氟含量岩浆及相关流体;③幔源组分可通过不同方式注入到以壳源物质为主的含钼岩浆体系中,致使含矿与非矿岩体存在明显差异;④深大

断裂的再活化为岩浆及相关流体上升运移和沉淀富集创造了有力空间条件。岔路口矿床与克莱梅克斯和金堆城钼矿床对比分析结果表明,它们无论在产出环境和地质特征方面,还是在矿物组合和成矿作用上均存在许多相似之处,均属高氟含量岩浆斑岩型钼矿床。

5 岩浆活动与成矿作用

5.1 成矿动力学背景

如前所述,岔路口及邻区出露的地层主要有侏

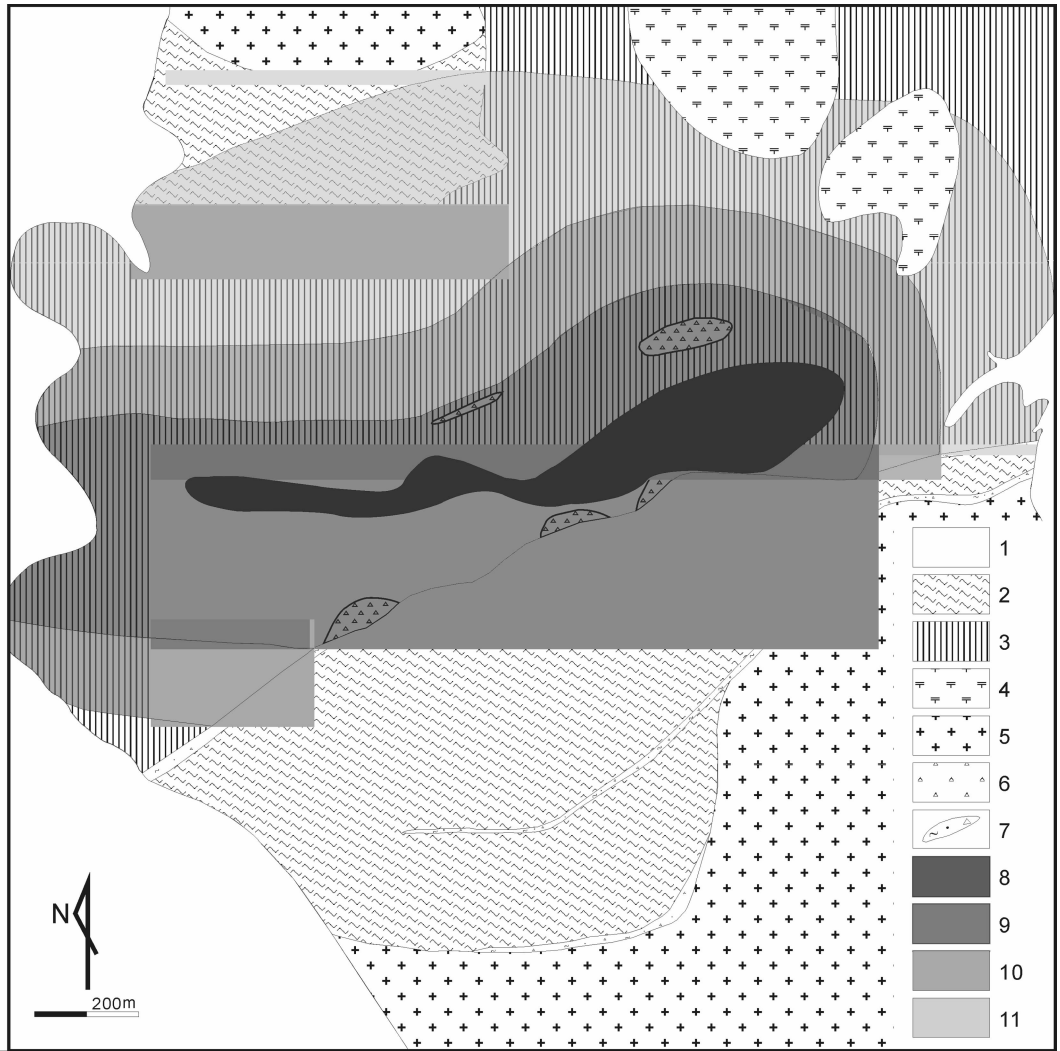


图 2 大兴安岭岔路口钼多金属矿床东矿区地质简图(根据刘翼飞等,2011;孟昭君等,2011;聂凤军等,2011 资料改编)
 1—第四系;2—侏罗纪火山—沉积岩;3—新元古代—寒武纪变质岩;4—古生代二长花岗岩;5—粗面岩;6—隐爆角砾岩;7—构造破碎带;8—矿化带;9—石英—绢云母带;10—泥化带;11—千枚岩化带

Fig.2 Simplified geological map of the eastern mineralized district of the Chalukou molybdenum polymetallic deposit, Da Hinggan Mountains (modified after Liu et al., 2011; Meng et al., 2011; Nie et al., 2011)

- 1-Quaternary; 2-Jurassic volcano-sedimentary rocks; 3-Neoproterozoic-Cambrian metamorphic rocks; 4-Palozoic monzogranite;
- 5- Mesozoic trachyte; 6-Cryptoexplosion breccias zone; 7-Tectonic breccias zone; 8-Mineralized zone; 9-Quartz-sericite zone;
- 10-Argillaceous zone; 11-Phyllic zone

罗—白垩纪火山—沉积岩和隐爆角砾岩带以及海西期和燕山期花岗岩类侵入岩,局部地段见有新元古代—早寒武世变质火山—沉积岩和海西期花岗岩类侵入岩^[1-6]。需要指出的是,钼矿化大都在中—晚侏罗世到早白垩世酸性火山岩地层以及燕山期花岗斑岩(流纹斑岩)内产出,成矿专属性比较明显。区内各种产出规模和不同展布方向的断裂分布广泛,其中以北西向和东北向断裂最为发育,并且是重要的控岩(矿)构造。部分学者将上述各类岩(体)层划分为

2个构造层,即前中生代变质火山—沉积岩基底,中生代伸展构造、火山喷溢作用和岩浆侵入活动,与之相对应的是若干个区域地壳演化阶段,即西伯利亚板块南缘侧向增生、鄂霍茨克洋盆闭合、陆—陆碰撞和造山后伸展^[1-6,10,18-21]。另外,太平洋板片对华—蒙块体侧向俯冲所产生的远程效应也可能对该区产生过一定影响。岔路口及邻区金属矿床(点)时空分布特点表明,其成矿作用与古大陆板块碰撞和对接以及造山期后伸展过程中所诱发的岩浆作用及相关流

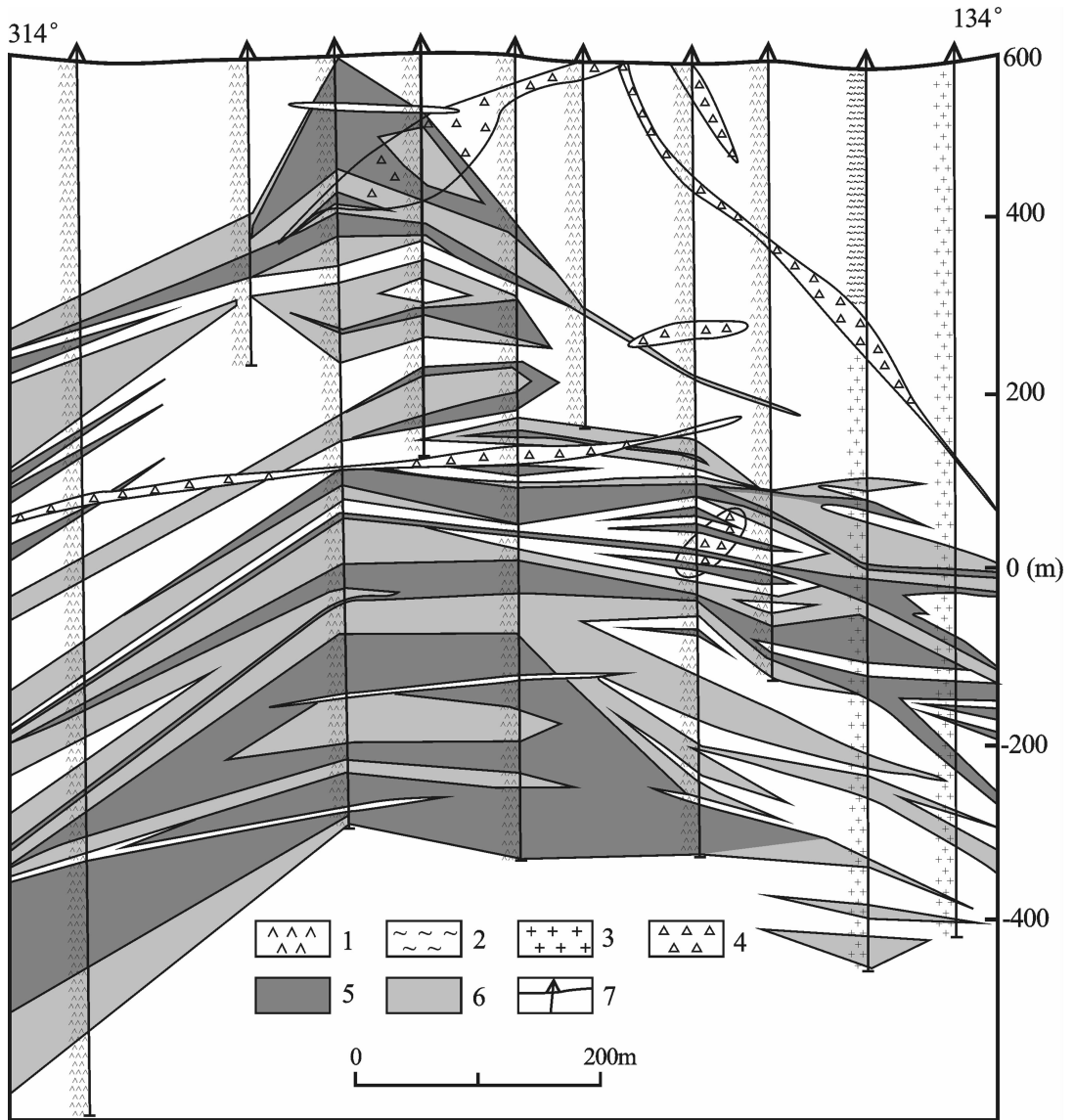


图3 大兴安岭岔路口钼多金属矿床第15号地质勘探线剖面简图(根据刘翼飞等,2011;孟昭君等,2011;聂凤军等,2011资料改编)
 1—侏罗纪火山岩;2—新元古代—寒武纪变质岩;3—二长花岗岩;4—隐爆角砾岩;5—工业矿体;6—矿化体;7—钻孔位置
 Fig.3 Simplified geological section along No. 15 geological exploration line at the Chalukou molybdenum polymetallic deposit, Da Hinggan Mountains (modified after Liu et al., 2011; Meng et al., 2011; Nie et al., 2011)
 1—Jurassic volcano-sedimentary rocks; 2—Neoproterozoic-Cambrian metamorphic rocks; 3— Monzogranite; 4—Cryptoexplosion breccias zone; 5—Ore body with high ore grade; 6—Ore body with low ore grade; 7—Drill hole

体活动密切相关。矿床成因类型、空间分布形态、形成时间和地质特征本身就是某种构造、岩浆和热事件的具体反映^[17,21-22]。

中生代初期,随着蒙古—鄂霍茨克(以下简称蒙—鄂)大样板片对西伯利亚板块的持续俯冲,后者向南的侧向增生速率明显加快。蒙—鄂大洋盆地的萎缩和消失最终导致华—蒙块体与西伯利亚板块的对接碰撞^[6,18-21]。随着两大陆块“焊接”为一个整体(160 Ma左右)^[20],岔路口及邻区进入到一个全新的

地壳演化阶段。两大陆块的碰撞以及古太平洋板块对华—蒙块体的俯冲挤压致使区域地壳发生明显缩短和增厚,进而形成海拔较高的大兴安岭山脉^[18-21]。与此同时,一系列北东向逆冲和推覆构造致使前中生代岩层(体)发生褶皱和动力变质作用,并且诱发中酸性岩浆活动。需要提及的是,强烈的构造-岩浆作用及相关热液活动可导致前中生代基底岩(体)层中钼、银、铅和锌含量明显增高,局部地段,代表性火山-沉积岩样品中钼、银、铅和锌含量含量分别可达

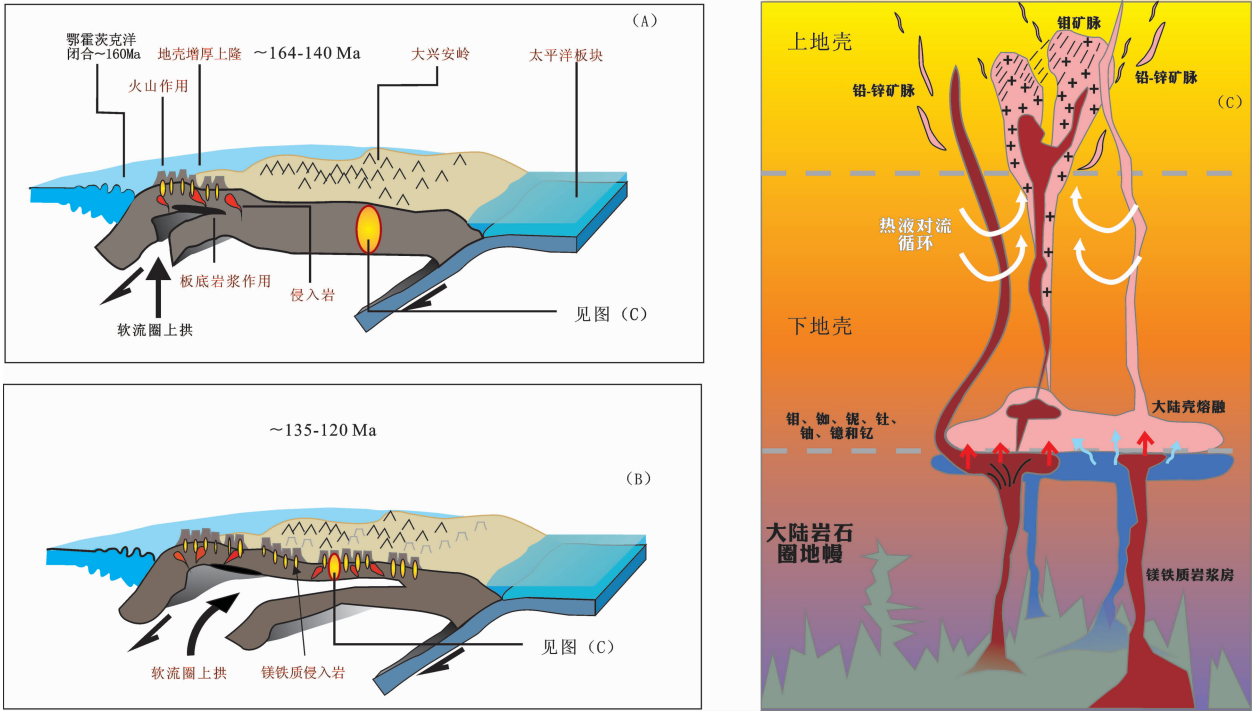


图 4 大兴安岭岔路口及邻区地壳演化与成矿作用三维示意图(根据文献 Wang et al., 2006; Pirajno et al., 2009 资料改编)
 Fig.4 Sketch three-dimensional diagram showing the relationship between the late Mesozoic tectonic evolution and regional Mo polymetallic mineralization in the Chalukou ore district and its adjacent areas, Da Hinggan Mountains (modified after Wang et al., 2006; Pirajno et al., 2009)

到 $(4\sim 8)\times 10^{-6}$ 、 $(0.2\sim 0.5)\times 10^{-6}$ 、 $(30\sim 50)\times 10^{-6}$ 和 $(210\sim 400)\times 10^{-6}$ ，为后来钼多金属矿床的形成奠定了物质基础。中—晚侏罗世到早白垩世，受上部地壳重力塌陷，中—下地壳热软化和韧性流变效应的影响，岔路口及邻区开始从挤压转变为拉张状态，并且逐步达到碰撞造山后伸展作用高峰期(图 4)^[18-21]。受区域性地壳应力大幅度调整作用影响，北东向深大断裂及其次一级构造再次发生大规模活化，大量正断层、拆离断层、断陷盆地和变质核杂岩的出现以及区域热流值的骤然增高即是很好的例证^[6,18-21]。研究表明，重力滑塌(Gravitational collapse)作用所形成张性构造形迹，为深源岩浆和热水溶液活动提供了有利通道，同时，其所产生的高热流值，为中—下地壳进一步加热软化和韧性流变提供了热力来源^[18,21]。需要指出的是，在上部地壳发生重力塌陷的同时，地壳下部鄂霍茨克大洋板块的快速下沉可以导致壳、幔物质的部分熔融，并且通过熔融—同化—储集—均—化(MASH)机制形成含矿中酸性岩浆^[18,20,23]。强烈的中酸性火山喷发作用可沿北东向断裂带或在断陷盆地内

形成巨厚的火山—沉积岩地层，并且覆盖在前中生代基底构造层之上。另外，在不同方向断裂带的交汇部位，各种几何形态和不同产出规模的花岗岩类侵入岩体星罗棋布，其中部分岩体与钼矿化带具有密切的空间分布关系。

5.2 多期岩浆活动

如前所述，受到华—蒙块体、西伯利亚板块和蒙—鄂洋壳以及古太平洋板块相互作用影响，岔路口矿区中生代构造—岩浆活动从开始到结束持续了 34 Ma 之久，其大体上可以分为成矿期前、同成矿期和成矿期后 3 个阶段。各阶段所形成的侵入岩体具有如下几个特点：(1)成矿期前：代表性岩石类型有钾长花岗岩和碱性辉绿岩，其锆石 LA-ICP-MS 锆石铀—铅同位素年龄分别为 $(164.7\pm 1.7)\text{Ma}$ 和 $(163.2\pm 1.2)\text{Ma}$ ^①。属中侏罗世岩浆活动产物。与中国标准酸性岩相比，钾长花岗岩和碱性辉绿岩以富铈和钡，而贫钷、铈、钼、钽、铀、钇和镱为特点，其中碱性辉绿岩稀土元素含量，钇和镱含量明显高于前者(表 2)。尽管上述 2 种侵入岩无论在岩相学和矿物

① 刘翼飞, 聂凤军, 曹毅, 等. 黑龙江岔路口地区侵入岩成岩年代学及地球化学特征. 中国地质科学院矿产资源研究所未发表科研报告, 2012: 1-25.

表 2 大兴安岭岔路口钼多金属矿区主要侵入岩代表性样品微量元素 (10^{-6}) 及钆同位素特征
 Table 2 Minor element (10^{-6}) and Nd isotopic characteristics of the representative samples from the major intrusions in the Chalukou polymetallic mineralized district, Da Hinggan Mountains

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
样品编号	CLK-65	CLK-66	CLK-43	CLK-45	CLK-3	CLK-8	CLK-51	CLK-52	CLK-55	CLK-56	BZ-01
岩石名称	钾长花岗岩		碱性辉绿岩		石英斑岩(流纹斑岩)		花岗岩		二长花岗岩		对比岩石
Rb	114	162	132	128	252	327	136	161	90.4	88.5	200①
Sr	710	643	485	198	32.7	81.9	58.5	60	575	416	300
Ba	2525	2947	2096	1131	159	269	785	983	970	480	830
Nb	8.41	4.51	13.5	14.9	35	43.4	11.3	10.8	9.0	6.73	20
Ta	0.65	0.44	0.63	0.73	3.12	3.65	0.83	0.81	0.69	0.55	3.5
Th	4.31	2.85	3.64	3.69	43.2	50.1	11.1	10.1	7.32	7.42	18
U	1.01	0.63	1.89	1.08	11.7	18.6	2.55	3.31	2.41	2.27	3.5
Y	9.48	5.16	20.8	21.9	23.4	25.7	15.1	14.2	9.16	6.21	14.9②
Yb	0.99	0.56	2.06	2.04	4.2	4.51	1.74	1.65	1.03	0.76	1.36
(La/Yb) _N	19.84	14.99	15.08	16.46	3.42	2.31	15.17	14.95	22.9	21.07	15.32
δ Eu	1.44	1.84	1.05	0.93	0.16	0.22	0.68	0.71	1.04	0.96	0.80
Σ REE	116.33	58.25	220.67	233.97	89.25	74.71	159.84	150.88	125.43	86.33	159.26
ϵ Nd(0)	-4.4	-4.8	-0.7	-1.2	-1.9	-2.5	-2.3	-3.0	-5.1	-5.6	-
ϵ Nd(t)	-4.8	-6.3	-4.0	-4.1	1.3	0.8	-3.3	-3.7	-5.4	-5.4	-

注:①—酸性岩(花岗岩和花岗闪长岩)^[24];②—壳幔性花岗岩^[25]。

学方面,还是在产出形态上均存在有明显差别,但是 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值比较接近,分别为-4.8~-6.3,平均值为-5.6和-4.0~-4.1,平均值为-5.6。 $T_{2\text{DM}}$ 值为分别为 1 343~1 465 Ma 和 1 275~1 290 Ma^①。上述特征表明,成矿期前侵入岩的成岩物质主要来自古大陆的重熔作用;(2)同成矿期:代表性岩石类型石英斑岩和花岗斑岩,其中前者锆石铀-铅位素等年龄值为(152.15±0.47) Ma,略早于主要矿体辉钼矿样品的 Re-Os 同时线年龄(146.9±0.8) Ma^②,二者均与晚侏罗世岩浆作用有关。与中国标准酸性岩相比,同成矿期石英斑岩以富铷、铯、钽、铀、钇和镱,而贫锶和钡为特点,稀土元素含量、(La/Yb)_N 比值和 δEu 值明显偏低(表 2)。2 件全岩样品 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 0.8~1.3,明显高于其他非矿侵入岩, $T_{2\text{DM}}$ 值为 841~876 Ma,明显低于其他侵入岩。初步研究结果表明,尽管石英斑岩的成岩物质主要来自大陆地壳的重熔作用,但是在其演化过程中混入有大量的幔源物质,否则将很难解释为什么此类岩石具有如此高的铷、钽、铀、钇和镱含量以及较高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,研究结果表明,尽管幔源物质注入不一定能够提供多少钼或铜,但是却提供了大量的 S 和 H₂O,创造了有利成矿条件^{②③};(3)成矿期后:代表性岩石类型有二长花岗斑岩和花岗斑岩,其锆石铀-铅年龄值分别为 (132.48±0.77)Ma 和 (135.49±0.56) Ma^①,属早白垩世岩浆活动的产物。成矿期前二长花岗斑岩与中国标准酸性岩的钡、钇、镱和稀土元素含量以及(La/Yb)_N 比值和 δEu 值大体相似,前者铷、铯、铷、钽、钽和铀含量均有不同程度贫化(表 2)。相比之下,成矿期后花岗斑岩除了铷含量、 δEu 值和(La/Yb)_N 比值明显增高外,其他元素含量均有不同程度亏损。二长花岗斑岩和花岗斑岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值分别为-3.3~-3.7 和-5.40~5.4, $T_{2\text{DM}}$ 值分别为 1 193~1 229 Ma 和 1 393~1 392 Ma。无论是二长花岗斑岩,还是花岗斑岩,其微量元素地球化学和钆同位素特征与成矿期前侵入岩存在许多相似之处,暗示成岩物质主要来自地壳。

5.3 钼的成矿作用

如前所述,富硅、碱质组分、氟、铷、铯、钽、铀、钇和镱,而贫铁、镁、钙、贫锶和钡的岩浆在其上侵定位过程中,一方面自身可以发生结晶分异作用,另一方面遭受早期岩(体)层的混染同化。无论是哪种地质

作用,它们均可导致钼和挥发性组分(H₂O、F 和 CO₂)发生一定程度的富集,沿近北东向断裂侵位到侏罗纪火山-沉积岩地层,并且在特定构造部位形成岔路口石英斑岩(花岗斑岩)和石英斑岩株(墙、脉)。

关于中酸性岩浆体系中钼的含量,前人元素地球化学实验结果表明,水蒸汽相对饱和的钾硅酸盐(K₂Si₂O₃)熔体中 MoS₂ 的溶解度可高达 12.5%。另外,关于含钼流体与中酸性岩浆熔体中钼的分布状态,部分学者认为钼的流体/熔体分配系数为 11.5^[27-28]。无论是中酸性熔体中 MoS₂ 的溶解度,还是钼在流体与熔体中的分配系数,它们揭示了这样的地质事实,当深熔岩浆沿有利构造部位上侵时,岩浆体系自身的结晶分异作用可促使大量的挥发性组分(CO₂、F、Cl、H₂O)、SiO₂、K₂O、W、Mo、U、Cu、Nb 和 Y 等元素在岩浆房顶部或旁侧发生富集作用,进而形成含矿的岩浆流体,并且沿构造薄弱地带形成一系列含矿石英脉、细脉、网脉和线脉^[9,15-17,22,26]。钼的成矿作用是本区中生代构造-岩浆活动的重要组成部分,同时也是中酸性岩浆作用的继续和发展。需要指出的是,在中酸性岩浆的上侵过程中,岩浆冷凝和收缩效应可产生大量张裂隙(或原生节理),在岩体与围岩接触带上,这种构造特征尤为明显,特别是多期次断裂构造相互叠加的部位(岩体或火山-沉积岩地层),上述的张裂构造系统就更为发育,为含矿流体上升、沉淀和富集创造有利条件^[13,15-17,22]。

在成矿热液流体演化的早期阶段,成矿流体主要是一种含钼的岩浆热液,并且以高温和高盐度为特点。代表性钼矿石的流体包裹体、硫和氧同位素特征大体上与典型岩浆水相似,钼可与各种不同类型的阴离子团结合,并且形成相对稳定的络合物^[11-12,15,17,23]。含金属元素络合物的流体可通过岩体(层)粒间孔隙或原生冷凝细微裂隙进行扩散与运移,进而在构造有利地段沉淀,并且形成含黄铁矿、黄铜矿和辉钼矿的石英脉、细脉、网脉和线脉。鉴于在此阶段没有明显大气降水混入,无论是黄铁矿和闪锌矿样品,还是辉钼矿样品,它们的硫同位素比值完全可与世界范围内许多典型斑岩型铜和钼矿床硫化物相对比^[11-12,15,22,26]。在成矿作用中期阶段(主成矿期),随着时间推移,成矿体系的温度和压力条件发生明显变化,容矿围岩的破裂导致大气降水与岩浆流体发生不同程度混合

①刘翼飞,聂凤军,曹毅,等.黑龙江岔路口地区侵入岩成岩年代学及地球化学特征.中国地质科学院矿产资源研究所未发表科研报告, 2012:1-25.

作用,进而形成混源型成矿流体。在此期间,受成矿体系围岩静压力和静水压力交替变化影响,容矿围岩出现破裂,成矿流体开始沸腾和成矿物质发生淀积,进而形成大量细脉浸染状钼矿石。一般来讲,上述钼矿石的流体包裹体、硫和氧同位素数据兼具岩浆流体与大气降水双重特点。另外,混合热液流体对浅成侵入岩和火山-沉积岩地层的交代蚀变作用可导致大量镁铁矿物的解体,释放出来的铁、镁、铝、钛、银、铅、锌和钼,可与流体中的挥发性组分或其他阴离子团结合,进而形成绢云母、绿泥石、黄铁矿、黄铜矿和辉钼矿。花岗岩类侵入岩体与火山-沉积岩地层中硅化、钾化和碳酸盐化蚀变带的存在即是很好的例证。当含矿流体沿特定构造破碎带上升到近地表处时,成矿体系温度和压力的骤然降低,特别是氧逸度和 pH 值的变化均可造成热液体系物理-化学条件的不平衡,进而在花岗岩类侵入体内接触带及旁侧形成具有工业价值的钼、银、铅和锌矿床(点)。在成矿作用晚期阶段,成矿热液体系明显进入低温和低盐度流体演化阶段,鉴于成矿作用早、中期阶段,成矿组分已发生析离沉淀,成矿流体的钼已所剩无几,很难形成具有工业价值的钼矿体。至此,岔路口矿床的内生成矿作用已全部结束。

6 结 论

(1)岔路口钼多金属矿体大都在燕山期石英斑岩和花岗斑岩株以及中-晚侏罗世和早白垩世酸性火山岩地层内呈倒扣“钟”或“碗”状产出,其产出环境、地质特征、含矿岩体、围岩蚀变和形成机理均可与美国克莱梅克斯钼矿床相对比,属燕山期斑岩型钼多金属矿床。

(2)岔路口含钼石英斑岩和花岗斑岩以相对富硅、碱质组分、铷、铯、钍、铀、钇和镱,而相对亏损钙、镁、铁、钡和锶为特征,与成矿作用有关的热液蚀变依次为硅化、云英岩化和泥化,属古大陆内部伸展构造环境多期次岩浆活动的产物。

(3)晚侏罗世时期,受岩石圈减薄和陆壳重力塌陷等作用影响,前中生代基底岩(体)层发生深熔作用,并且产生大量含钼酸性岩浆及相关流体,进而形成侵入岩体,同时为钼多金属矿床的形成提供了物质、热力和动力来源。

(4)与非成矿期侵入岩相比,同成矿期含矿石英斑岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值明显偏高,均为正值。尽管研究区成

岩(矿)物质主要来自大陆地壳的重熔作用,但是在其演化过程中同样也混入有大量的幔源物质,岩浆性质的变化为矿床的形成创造了有利条件。

(5)岔路口钼多金属矿区外围及深部,中-晚侏罗世和早白垩世安山岩、英安岩和流纹岩分布广泛,各类断裂构造形迹复杂,各类燕山期浅成花岗岩类侵入岩发育,物化探异常和热液蚀变带星罗棋布,是寻找钼多金属矿床的最佳地段。

参考文献(References):

- [1] 孟昭君, 阙学胜, 李宪臣, 等. 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, 2011, 38(6):1504-1517.
Meng Zhaojun, Kan Xuesheng, Li Xianchen, et al. The discovery and exploration process of the Chalukou giant porphyry molybdenum polymetallic deposit in forest-covered area of northeastern Daxinganling Mountains and its geological significance [J]. Geology in China, 2011, 38(6):1504-1517(in Chinese with English abstract).
- [2] 王建平, 韩龙, 吕克鹏. 大兴安岭岔路口钼多金属矿床地质特征 [J]. 矿产与地质, 2011, 25(6):486-490.
Wang Jianping, Han Long, Lu Kepeng. Geological characteristics of the Chaloukou molybdenum polymetallic deposit, Daxinganling [J]. Mineral Resources and Geology, 2011, 25(6):486-490 (in Chinese with English abstract).
- [3] 付瑞忠, 阙学胜, 孟昭君, 等. 黑龙江省大兴安岭岔路口斑岩型钼多金属矿地质特征 [J]. 矿产勘查, 2011, 2(3):232-240.
Fu Ruizhong, Kan Xuesheng, Meng Zhaojun, et al. Geological characteristics of Chaloukou porphyry molybdenum polymetallic deposit Daxinganling, Heilongjiang Province [J]. Mineral Exploration, 2011, 2(3):232-240(in Chinese with English abstract).
- [4] 吕克鹏, 韩龙, 张佳男. 岔路口钼矿床地质特征及找矿标志浅析 [J]. 黑龙江科技信息, 2010, (21):31.
Lu Kepeng, Han Long, Zhang Jianan. A preliminary analyses on the geological features and exploration criteria of the Chaloukou molybdenum deposit [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2010, (21):31 (in Chinese).
- [5] 刘翼飞, 聂凤军, 孙振江, 等. 岔路口特大型钼多金属矿床的发现及其意义 [J]. 矿床地质, 2011, 30(4):759-764.
Liu Yifei, Nie Fengjun, Sun Zhengjiang, et al. Discovery of Chaloukou super large scale molybdenum polymetallic deposit, northern Daxinganling, China, and its significance [J]. Mineral Deposits, 2011, 30(4):759-764 (in Chinese with English abstract).
- [6] 黑龙江省地质矿产局. 黑龙江省区域地质志 [M]. 北京:地质出版社, 1993:1-73.
Heilongjiang Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geology of Heilongjiang Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993:1-725(in Chinese with English abstract).
- [7] 杨郢城. 得尔布干成矿带及邻区成矿规律与找矿方向研究 [R]. 中

- 地质科学院博士后研究报告, 2010:1-148
- Yang Yuncheng. Metallogenic Studies and Prospecting Orientation on Deerbugan Metallogenic Zone and Adjacent Area [R]. Post-Doctoral Research Report of Chinese Academy of Geological Sciences, 2010:1-149(in Chinese with English abstract).
- [8] 杨祖龙, 张德全, 李进文, 等. 德尔布干成矿带西南段矿床类型、成矿分带及找矿方向[J]. 矿床地质, 2009, 28(1):53-62.
- Yang Zulong, Zhang Dequan, Li Jinwen, et al. Ore-forming types, metallogenic zoning and potential prospecting areas in southwestern sector of Deerbugan metallogenic belt [J]. Mineral Deposits, 2009, 28(1):53-62(in Chinese with English abstract).
- [9] 聂凤军, 孙振江, 李超, 等. 黑龙江岔路口钼多金属矿床辉钼矿-钼同位素年龄及地质意义[J]. 矿床地质, 2011, 30(5):828-836.
- Nie Fengjun, Sun Zhengjiang, Li Chao, et al. Re-Os isotopic age dating on molybdenite separates from the Chalukou porphyry Mo polymetallic deposit, Heilongjiang Province [J]. Mineral Deposits, 2011, 30(5):828-836(in Chinese with English abstract).
- [10] 赵一鸣, 王大畏, 张德全, 等. 内蒙古东南部铜多金属成矿地质条件及找矿模式[M]. 北京:地震出版社, 1994:1-234.
- Zhao Yiming, Wang Dawei, Zhang Dequan, et al. Geological Setting and Exploration Model for the Polymetallic Deposits Occurring in the Southeastern Part of Inner Mongolia [M]. Seismological Press, Beijing, 1994:1-234(in Chinese)
- [11] Ludington S, Hammarstrom J, Piatak N. Low-fluorine stockwork molybdenite deposits [R]. U.S. Geological Survey Open-File Report, 2009, 2009-1211, 9 p.
- [12] Ludington S, Plumlee G S. Climax-type porphyry Molybdenum deposits [R]. U.S. Geological Survey Open-File Report, 2009, 2009-1215, 16.
- [13] 焦建刚, 汤中立, 钱壮志, 等. 东秦岭金堆城花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄、物质来源及成矿机制[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2010, 35(6):1011-1022.
- Jiao Jiangan, Tang Zhongli, Qian Zhuangzhi, et al. Metallogenic mechanism, magma source and zircon U-Pb age of Jinduicheng granitic porphyry, east Qinling [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2010, 35 (6):1011-1022 (in Chinese with English abstract).
- [14] 朱赖民, 张国伟, 郭波, 等. 东秦岭金堆城大型斑岩钼矿床 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成矿动力学背景[J]. 地质学报, 2008, 82(2):204-220.
- Zhu Laimin, Zhang Guowei, Guo Bo, et al. U-Pb (LA-ICP-MS) zircon dating for the large Jinduicheng porphyry Mo deposit in the east Qinling, China, and its metallogenetic geodynamical setting [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82 (2):204-220 (in Chinese with English abstract).
- [15] 黄典豪, 吴澄宇, 聂凤军. 陕西金堆城斑岩钼矿床地质特征及成因探讨[J]. 矿床地质, 1987, 6(3):22-34.
- Huang Dainhao, Wu Chengyu, Nie Fengjun. Geological features and origin of the Jinduicheng porphyry molybdenum deposit, Shanxi Province [J]. Mineral Deposits, 1987, 6 (3): 22-34 (in Chinese with English abstract).
- [16] 沈存利, 张梅, 于玺卿, 等. 内蒙古钼矿找矿新进展及成矿远景分析[J]. 地质与勘探, 2010, 46(4):1-15.
- Shen Cunli, Zhang Mei, Yu Xiqing, et al. New progresses in exploration of molybdenum deposits and analysis of mineralization prospect in Inner Mongolia [J]. Geology and Exploration, 2010, 46(4):1-15(in Chinese with English abstract).
- [17] 聂凤军, 张可, 刘翼飞, 等. 华北克拉通北缘及邻区印支期岩浆活动与钼和金成矿作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41 (6):1651-1666.
- Nie Fengjun, Zhang Ke, Liu Yifei, et al. Indosinian magmatic activity and Mo, Au mineralization occurring along the northern margin of North China Craton and its adjacent area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41 (6):1651-1666 (in Chinese with English abstract).
- [18] Meng Qingren. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract [J]. Tectonophysics, 2003, 369: 155-174.
- [19] Ren Jishun, Wang Zuoxun, Chen Binwei, et al. The tectonics of China from a global view—a guide to the tectonic map of China and adjacent regions [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999, 1-32.
- [20] Wang Fei, Zhou Xinhua, Zhang Lianchang, et al. Late Mesozoic volcanism in the Great Xing'an Range (NE China): timing and implications for the dynamic setting of NE Asia. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 251:179-198.
- [21] Pirajno F, Ernst R E, Borisenko A S, et al. Intraplate magmatism in Central Asia and China and associated metallogeny[J]. Ore Geology Reviews, 2009, 35:114-136.
- [22] 聂凤军, 江思宏, 张义, 等. 中蒙边境中东段金属矿床成矿规律和找矿方向[M]. 北京:地质出版社, 2007:1-574.
- Nie Fengjun, Jiang Sihong, Zhang Yi, et al. Metallogeny and ore Prospecting of Ore Deposits Occurring along the Border Region of China and Mongolia [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007:1-717(in Chinese with English abstract).
- [23] 洪大卫, 王试光, 谢锡林, 等. 兴蒙造山带正 ϵ (Nd, t) 值花岗岩的成因和大陆地壳生长[J]. 地学前缘, 2000, 7(2):441-456.
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Xie Xilin, et al. Genesis of positive ϵ Nd granitoids in the Da Hinggan Mts-Mongolia orogenic belt and continental crustal growth [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7 (2):441-456.
- [24] 中国科学院贵阳地球化学研究所. 简明地球化学手册 [M]. 北京:科学出版社, 1977, 69-72
- Guiyang Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. Concise handbook of geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1977:69-72 (in Chinese)
- [25] 王中刚, 于学元, 赵振华. 稀土元素地球化学[M]. 北京:科学出版社, 1989:1-535.
- Wang Zhonggang, Yu Xueyuan, Zhao Zhenhua. Rare Earth

- Element Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1989: 1–535 (in Chinese).
- [26] 侯增谦, 郑远川, 杨志明, 等. 大陆碰撞成矿作用: I. 冈底斯新生代斑岩成矿系统 [J]. 矿床地质, 2012, 31(4): 647–670.
- Hou, Zengqian, Zheng Yuanchuan, Yang Zhiming, et al. Metallogensis of the continental collision setting: Part I. the Gangdese Cenozoic porphyry deposit systems [J]. Mineral Deposits, 2012, 31(4): 647–670 (in Chinese with English abstract).
- [27] Isuk E E, Carman J H. The system $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{Si}_2\text{O}_5\text{-MoS}_2\text{-H}_2\text{O}$ with implication for molybdenum transport in silicate melts [J]. Econ. Geol., 1981, 76 (8): 2222–2235.
- [28] Ryabchikov I D, et al. Mobilization of molybdenum by fluids during the crystallization of granite melts [J]. Geochemical Journal, 1981, 18(4): 183–186 (in Russian).

Mesozoic multiple magmatic activities and molybdenum mineralization in the Chalukou ore district, Da Hinggan Mountains

NIE Feng-jun¹, SUN Zheng-jiang², LIU Yi-fei¹, LV Ke-peng², ZHAO Yu-an^{1,3}, CAO Yi¹

(1. Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2. No.706 Geological Party for Nonferrous Metal of Heilongjiang Province, Qiqihar 161006, Heilongjiang, China; 3. Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, Hebei, China)

Abstract: Located at the northernmost corner of the Deerbugan metallogenic belt, the newly found Chalukou deposit is the largest molybdenum polymetallic deposit ever discovered in Northeast China. It contains 1.24 Mt of Mo (metal), 0.26 Mt of Pb–Zn and 2773 t of Ag. As a part of the evaluation project on the molybdenum deposit, mineral exploration around the Chalukou deposit is still under way. During the Mesozoic Yanshanian orogeny, intense extensional tectonic and igneous activities resulted in the intrusion of large-scale acid volcanic rocks and granitoids at Chalukou and its neighboring areas. The Chalukou granite porphyry and rhyolite porphyry stocks were emplaced in the Jurassic volcano-sedimentary sequence controlled by NE- and NW-trending fault zones. Rock-forming minerals of the two porphyry stocks are mainly quartz, microcline, micropertite and plagioclase associated with minor biotite and sericite. Accessory minerals are magnetite, apatite, zircon, sphene and allanite. The two porphyry stocks are petrochemically characterized by relatively high SiO_2 , K_2O , F, Rb, Nb, U, Th, Y and Yb and obviously low CaO, $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}$, MgO, Sr, Ba and REE, with positive $\delta^{143}\text{Nd}$ (t) value. Molybdenum mineralization occurs within the Chalukou porphyry stocks and volcanic rocks as stockwork, veins, veinlets and disseminated blocks. The molybdenum ore consists of pyrite, chalcopyrite, molybdenite, sphalerite, galena, magnetite, pyrrhotite, K-feldspar, fluorite, quartz, sericite and chlorite. As the most important economic molybdenum mineral, molybdenite occurs in the forms of impregnation, radioflake, thin film, aggregated flakes and veinlet. Re–Os isotopic age dating of eight molybdenite separates from the Chalukou deposit yielded an isochron age of 146.9 ± 0.8 Ma and model ages ranging from 146.2 to 149.1 Ma with an average value of 147.4 Ma. As the Re–Os isochron age is in agreement with field geological evidence, the authors hold that the Re–Os isochron age represents the major ore-forming time of the Chalukou deposit, which corresponded to geodynamical setting of intracontinental extension after the collision of the Siberian plate and North China–Mongolian tract. Hydrothermal alteration at Chalukou shows rough zonation of K feldspathization, greisenization, silicification, and propylitization from the two porphyry stocks outwards. Of these alterations, silicification and greisenization are well developed, and have intimate relationship with molybdenum mineralization. Studies show that all these ore-forming materials, dynamic forces and fluids might have been provided by the Yanshanian granitoid magma. Moreover, the accumulation conditions of the ore-forming materials were offered by the NW- and NE-trending lineament and ring fractured zone as well as Jurassic volcano-sedimentary rocks. A comparative analysis indicates that the Chalukou deposit belongs to high-F porphyry type molybdenum deposit. The Late Jurassic lithosphere stretching and asthenosphere upwelling might have resulted in the melting of the thickened lower crustal material, and then produced molybdenum-rich granitoid magma. When the magma moved along structures developed within the upper crust, ore-bearing fluid derived from condensation fraction of the magma filled the structures and replaced country rocks, thus forming the deposits. Therefore, it is believed that the Chalukou deposit was a product of the Late Jurassic intraplate granitoid magma in the northeastern part of the North China–Mongolian tract. The genetic model and mineral exploration criteria of the Chalukou deposit can also be used as useful tools during the comprehensive evaluation of concealed molybdenum deposits in northern Da Hinggan Mountains.

Key words: molybdenum polymetallic deposit; geological feature; Mesozoic, multiple magmatic activities; mineralization; Chalukou; Da Hinggan Mountains

About the first author: NIE Feng-jun, male, born in 1956, senior researcher, supervisor of doctor candidates, engages in the study of geochemistry of metal mineral deposits; E-mail: nfi@mx.cei.gov.cn.