

文章编号: 0258-7106(2012)04-0930-12

内蒙古大苏计和曹四夭大型钼矿床的发现及意义^{*}

聂凤军¹, 刘翼飞¹, 赵宇安^{1,2}, 曹毅¹

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2 石家庄经济学院, 河北 石家庄 050031)

摘 要 大苏计矿床和曹四夭矿床是近几年在内蒙古中部地区找到的 2 处大型—特大型钼矿床, 产出规模分别达到 20 万吨和 200 万吨。钼矿化主要在太古宙变质岩及中生代石英斑岩、正长斑岩和花岗斑岩体内呈浸染状、网脉状和脉状产出, 并且构成筒状、倒扣碗状和囊状矿体。两处矿床无论在产出环境和地质特征上, 还是在矿物种属、元素组合和热液蚀变方面, 均与美国克莱麦克斯钼矿床和黑龙江岔路口钼矿床较为相似, 是中生代构造-岩浆活动的产物, 属古大陆碰撞造山后伸展环境产出的斑岩型矿床。文章所提出的地壳 4 个演化阶段和 3 个成矿期次的成矿模式对于提高大苏计和曹四夭钼矿床理论研究水平, 推动低山丘陵覆盖区大型隐伏钼矿床的找矿勘查工作深入进行, 均具有重要意义。

关键词 地质学; 斑岩钼矿床; 地质意义; 成矿作用; 大苏计; 曹四夭; 内蒙古中部

中图分类号: 618.65

文献标志码: A

Discovery of Dasuji and Caosiyao large-size Mo deposits in central Inner Mongolia and its geological significances

NIE FengJun¹, LIU YiFei¹, ZHAO YuAn^{1,2} and CAO Yi¹

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;

2 Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, Hebei, China)

Abstract

Located in Liangcheng uplift of Inner Mongolian massif (Axis) within the Northern China craton, the newly discovered Dasuji and Caosiyao deposits are large-size and superlarge Mo deposits in central Inner Mongolian, respectively. During the Mesozoic Indosinian and Yanshanian orogenies, intensive tectonic and igneous activities resulted in large-scale granitoid magmatism in the Dasuji and Caosiyao mineralized districts. The granitoid porphyry stocks and dyke swarms were emplaced in the Achaean metamorphic rocks of the Jining Group. There exist no differences in ore-bearing intrusions in the Dasuji and Caosiyao mineralized districts. The ore-bearing granitoid intrusions consist of quartz porphyry, syenogranite porphyry and granite porphyry. Rock-forming minerals are mainly quartz, microcline, micropertite and plagioclase associated with minor biotite and sericite. Accessory minerals are magnetite, apatite, zircon, sphene and allanite. The porphyry stocks are petrochemically characterized by relatively high SiO₂, K₂O, Rb, Nb and U, obviously low CaO, Fe₂O₃ + FeO, MgO, Sr, Ba, Ta and REE, belonging to silicon-high, potassium-rich rock of calc-alkaline series. Molybdenum mineralization occurs in both Achaean metamorphic rocks and granitoid porphyry stocks as veins, veinlets and

^{*} 本文是国家重点自然科学基金项目(41030421)和中国地质调查局地质调查项目(1212010911029)联合资助的成果

第一作者简介 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。Email: nfjj@mx.cei.gov.cn

收稿日期 2012-05-12; 改回日期 2012-06-10。张绮玲编辑。

disseminated blocks. The molybdenum ore consists of pyrite, chalcopyrite, molybdenite, sphalerite, pyrrhotite, scheelite, wolframite, K-feldspar, quartz, sericite, chlorite and epidote. As the most important economic molybdenum mineral, molybdenite occurs in impregnation, radioflake, thin film, aggregated flakes and veinlet forms in the veins. Re-Os isotopic data of four molybdenite separate samples from the Dasuji deposit defined a correlation line corresponding to an age of (222.5 ± 3.2) Ma. Meanwhile, the molybdenite samples from the Caosiyao deposit has yielded Re-Os model ages from 136 Ma to 130 Ma, with an average value of 134 Ma. The types of hydrothermal alteration observed both at Dasuji and Caosiyao are mainly silicification, sericitization, K-feldspathization, biotitization, fluoritization, chloritization, uraltization and carbonatization. Of these alterations, silicification and K feldspathization are well developed, and have intimate relationship with molybdenum mineralization. Preliminary studies show that both the Dasuji and Caosiyao deposits were formed during the Mesozoic Indosinian and Yanshanian extensional tectonic movements that resulted in the intensive igneous activities. The well-developed high K and SiO_2 granitoid porphyry stocks might have acted as the “engines” of the ore-forming systems. Most of the Mo was derived from partial melting of the Precambrian continental crust. The ore-forming fluid was dominated by magmatic water at the early metallogenic stage, and was characterized by mixture with magmatic water as the major source at the main metallogenic stage. The combined geochemical data, field geological observations and petrological evidence indicate that both the Dasuji and Caosiyao deposits belong to the porphyry type medium-high temperature hydrothermal Mo deposit. The Dasuji deposit is believed to be a product of the Early Indosinian intraplate granitoid magmatism within the Liangcheng uplift. Moreover, the forming-processes of the Caosiyao deposit may be genetically related to the Yanshanian igneous activities in the same tectonic unit. The genetic model and mineral exploration criteria of the Dasuji and Caosiyao deposits can also be used as useful tools during the comprehensive evaluation of concealed Mo deposits in Inner Mongolian massif of the North China craton.

Key words: geology, porphyry Mo deposit, geological significances, deposit geology, ore-forming process, Dasuji, Caosiyao, central Inner Mongolia

内蒙古大苏计大型钼矿床和曹四天超大型钼矿床分别位于卓资县县城东南 26 km 处和兴和县城关镇东南 3 km 处,是近年来在内蒙古中部地区找到的 2 处最为重要的金属矿床(李香资等,2012;沈存利等,2010;于玺卿等,2008)。有数据显示,大苏计和曹四天矿床的钼资源量分别大于 20 万吨和 200 万吨,其中后者的产出规模有望超过安徽沙坪沟钼矿床和黑龙江岔路口钼矿床而跃居为中国钼矿床之最。大苏计矿床的露天开采前期准备工作即将完成,预计将在 2012 年 10 月全部投入生产。相比之下,曹四天矿床地质普查勘探工作正如火如荼进行之中。不难预料,随着大苏计和曹四天矿床的相继开发利用,内蒙古中部地区有望成为继陕西金堆城和河南南泥湖-三道庄之后的另外一处特大型钼产业基地。鉴于大苏计和曹四天矿床分别是 2006 年和 2011 年找到的大型和超大型钼矿床,并且具有相似的产出环境、地质特征和成矿作用,因此,作者认为有必要将两者看作为一个整体进行系统介绍和研

究。基于上述考虑,本文对大苏计和曹四天矿床的找矿经验、地质特征和找矿标志进行总结,对这两处矿床产出环境和形成作用进行讨论,同时,将它们与美国科罗拉多克莱麦克斯、中国陕西金堆城和黑龙江岔路口钼矿床进行了对比分析,旨在进一步提高内蒙古中部地区钼矿床理论研究水平,推动该地区隐伏金属矿床找矿勘查工作的深入进行。

1 成矿环境

大苏计大型钼矿床和曹四天超大型钼矿床分别位于内蒙古卓资县和兴和县境内(图 1),两者相距 90 km,属凉城-兴和钼、铅-锌-银和金成矿带的东、西两端。尽管两处钼矿床的地理位置不同,但是所在的大地构造环境较为相似,分别为华北克拉通北部内蒙古台隆(地轴)西段凉城断隆的西侧和东侧(沈存利等,2010;阎国翰等,2007;内蒙古地矿局,1991;孙荣圭等,1986)。有学者认为该区位于燕辽三叉裂

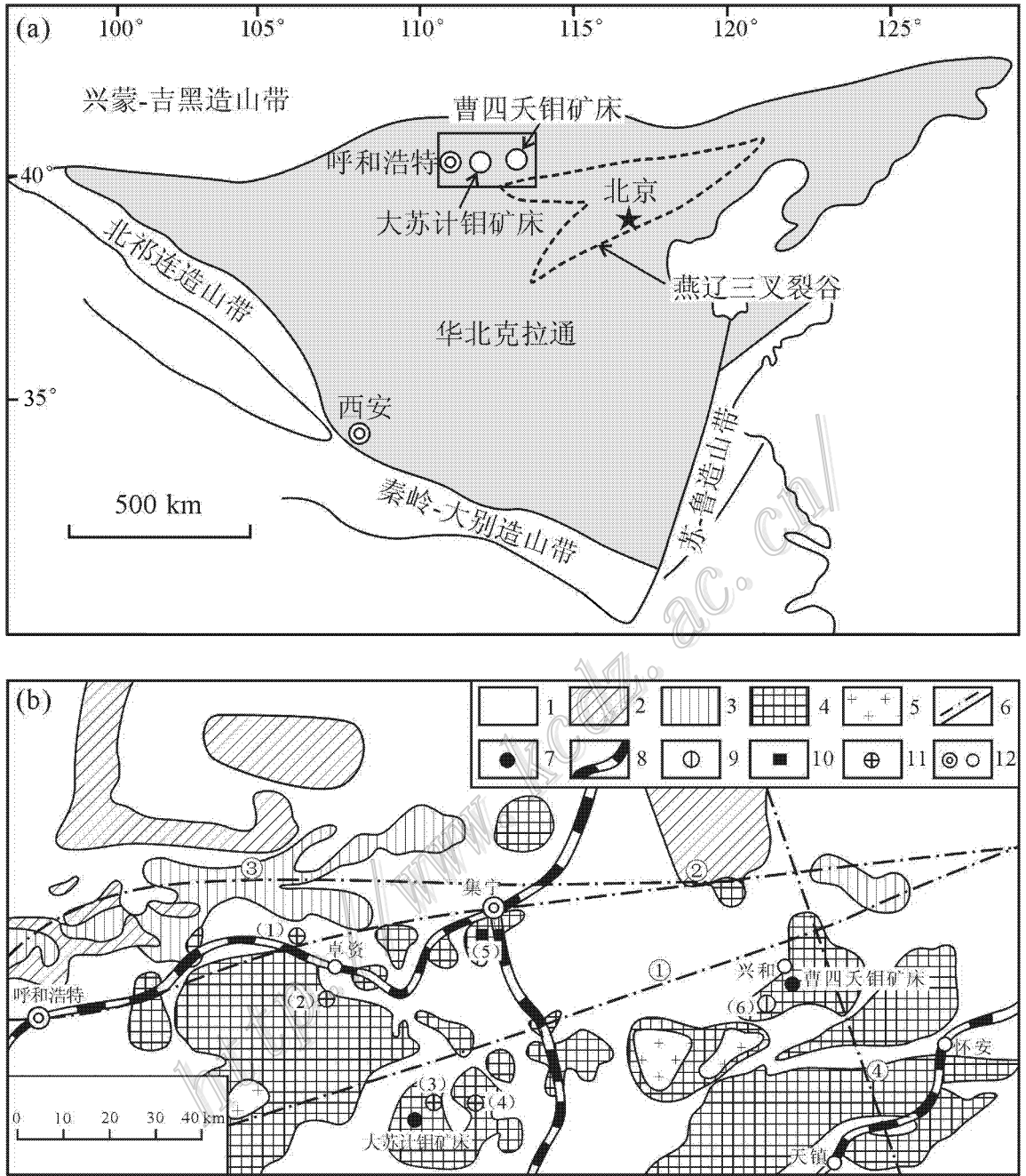


图 1 内蒙古中部大苏计和曹四天钼矿床区域地质略图(根据阎国翰等, 2007; 孙荣圭等, 1986 资料改编)

1—中-新生界地层; 2—古元古界二道洼群变质岩; 3—新太古界乌拉山群变质岩; 4—古太古界集宁群变质岩; 5—中生代花岗岩; 6—实测和推测深大断裂 ①—岱海-黄旗海北东向断裂; ②—临河-包头-呼和浩特-集宁近东西向断裂; ③—固阳-武川-尚义东西向断裂; ④—商都-兴和-蔚县北西向断裂); 7—钼矿床; 8—铁路线; 9—钨矿点; 10—铅-锌-银矿床; 11—金矿床; 12—城镇。主要金属矿床(点)(1)—金盆砂金矿床; (2)—大什字金矿床; (3)—驼盘金矿床; (4)—大阳坡金矿床; (5)—李清地铅-锌-银矿床; (6)—三家子钨矿点

Fig. 1 Simplified regional geological map showing locations of the Dasuji and Caosiyao Mo deposits in Inner Mongolia (modified after Yan et al., 2007 and Sun et al., 1986)

1—Mesozoic-Cenozoic volcano-sedimentary rocks; 2—Paleoproterozoic metamorphic rocks of Erdaowa Group; 3—Neoproterozoic metamorphic rocks of Wulashan Group; 4—Paleoproterozoic metamorphic rocks of Jining Group; 5—Mesozoic granitoid intrusions; 6—Measured and inferred deep-rooted faults (①—Daihai-Huangqihai NE-trending fault; ②—Linhe-Baotou-Huhhot-Jining EW-trending fault; ③—Guyang-Wuchuan-Shangyi EW-trending fault; ④—Shangdu-Xinghe-Yuxian NW-trending fault); 7—Molybdenum deposit; 8—Railway; 9—Tungsten ore spot; 10—Lead-zinc-silver deposit; 11—Gold deposit; 12—City or town. Major ore deposit (ore spot) (1)—Jinpen placer gold deposit; (2)—Dashizi gold deposit; (3)—Tuopan gold deposit; (4)—Dayangpo gold deposit; (5)—Liqingdi lead-zinc-silver deposit; (6)—Sanjiayao tungsten ore spot

谷西北端(图1a)(阎国翰等,2007)。就凉城断隆本身而言,其北侧是临河-包头-呼和浩特-集宁近东西向深大断裂,南侧为岱海-黄旗海北东向断陷盆地,西部是呼和浩特-河曲北北东向断裂,东侧为商都-兴和-蔚县北西向断裂(图1b)(张彤等,2009;内蒙古地矿局,1991)。需要提及的是,大苏计和曹四夭矿床均位于区域性深大断裂与其次一级断裂的交汇部位,并且与伸展构造形迹有关(李香资等,2012;于玺卿等,2008)。大苏计和曹四夭矿区范围内出露的地层均为太古宙集宁群片麻岩、混合岩和变粒岩以及斜长角闪岩,局部地段见有大理岩,其上为中、上侏罗统砂砾岩、粉砂岩和泥灰岩以及第四系沉积物所覆盖。岩浆活动贯穿于从前寒武纪经古生代到中生代地壳演化全部进程,其中前寒武纪英云闪长岩、钾长花岗岩、苏长岩和黑云母花岗岩以及古生代钾长花岗岩和辉长岩分布广泛,占全部岩(体)层出露面积的40%(李香资等,2012;于玺卿等,2008;内蒙古地矿局,1991)。中生代侵入岩主要有似斑状花岗岩、正长花岗(斑)岩、石英斑岩和花岗斑岩,它们大多呈岩株状、脉状和岩墙(或群)侵入到太古宙变质岩地层(体)中,并且构成钼矿床的容矿围岩。有数据表明,除了在太古宙变质岩地层中见有不同期次单斜平面褶曲和宽缓背向形外,两处钼矿区范围内北西向、北东向、北北东向、近东西向和近南北向断裂(层)分布广泛,其中以前二者最为发育,并且是重要的导矿和容矿构造(李香资等,2012;于玺卿等,2008;内蒙古地矿局,1991)。需要指出的是,两组或多组不同方向断裂的交汇处常常是含矿侵入岩体及厚大钼矿体产出的有利部位。从区域矿床(点)分布特征看,凉城断隆内除了产出有钼矿床(点)外,还分布有一系列金、钨和铅-锌-银矿床(点)。代表性矿床(点)有李清地铅-锌-银矿床、驼盘金矿床、太阳坡金矿床和三家夭钼矿点(于玺卿等,2008;陈旺等,2006;内蒙古地矿局,1991)。资料表明,随着大苏计和曹四夭钼矿床的发现,凉城断隆区的找矿勘查工作将进入到一个新阶段,中国北方又一处大型钼矿产业基地已初露端倪。

2 地质特征

2.1 大苏计钼矿床

钼矿化大都在中生代石英斑岩、正长花岗斑岩和花岗斑岩及其容矿围岩(前寒武纪片麻状英云闪

长岩)内呈网脉状、脉状和浸染状产出,并且构成厚层状、截锥状、囊状和透镜状矿体(沈存利等,2010;张彤等,2009;于玺卿等,2008)(图2,图3a、3b)。从平面上看,主矿体(I号矿体)呈椭圆状分布,东西长850 m,南北宽360~450 m;在剖面上,矿体倾斜延深为300~440 m,平均值350 m,矿层累计厚度为150~230 m,单个矿层厚度为1~5 m,最厚处大于100 m(张彤等,2009;于玺卿等,2008)。一般情况下,矿体的顶部由次生氧化型矿石构成,厚度变化范围为70~130 m,容矿围岩为石英斑岩。与次生氧化型矿体相比,原生硫化型矿体厚度变化范围为150~250 m,主要出现在正长花岗(斑)岩内。矿体的顶、底板可以是碎裂石英斑岩、花岗斑岩和正长花岗(斑)岩,也可以是前寒武纪斜长花岗岩和英云闪长岩,矿体与围岩没有明显界线,呈渐变过渡关系。近矿围岩蚀变有硅化、绢云母化、绢英岩化、绿泥石化和高岭石化,其中硅化与钼矿化具有密切空间分布关系。尽管热液蚀变波及的范围较大和强度较高,但是自矿体中心向外,它们大多呈不规则片状和不连续状条带产出,不具有明显的分带现象。根据钼矿石的自然属性,可划分为次生氧化型和原生硫化型2种类型。氧化型矿石主要由钼华、钼钙矿和褐铁矿以及硬锰矿、软锰矿、高岭石和黏土类组成, $w(\text{Mo})$ 变化范围为0.03%~0.30%,平均值0.082%(张彤等,2009;于玺卿等,2008)。硫化型钼矿石金属矿物有辉钼矿、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿和磁铁矿;脉石矿物有石英、钾长石、斜长石、绢云母和高岭石以及萤石、绿泥石、绿帘石、黑云母、方解石、叶蜡石和白云母, $w(\text{Mo})$ 为0.03%~0.28%,平均值为0.11%(张彤等,2009;于玺卿等,2008)。另外,在个别钻孔中可见到含方铅矿、闪锌矿和辉钼矿的石英脉, $w(\text{Mo})$ 和 $w(\text{Zn})$ 分别为0.058%~0.089%(平均值0.07%)和2.38%~16.50%(平均值7.8%); $w(\text{Pb})$ 和 $w(\text{Ag})$ 分别为0.9%~5%(平均值3.6%)和 $(60\sim225)\times10^{-6}$ (平均值 96×10^{-6})。前人曾对4件辉钼矿样品进行过铼-钨同位素年龄测定,所获等时线年龄为 $(222.5\pm3.2)\text{Ma}$ (张彤等,2009)。

2.2 曹四夭钼矿床

钼矿化大都在中生代多斑和少斑花岗斑岩株(出露面积为 0.08 km^2)及太古宙砂线石-石榴子石片麻岩、变粒岩和石英岩内呈细脉状、网脉状、脉状和浸染状产出(图3c),并且构成厚层状、囊状、脉状

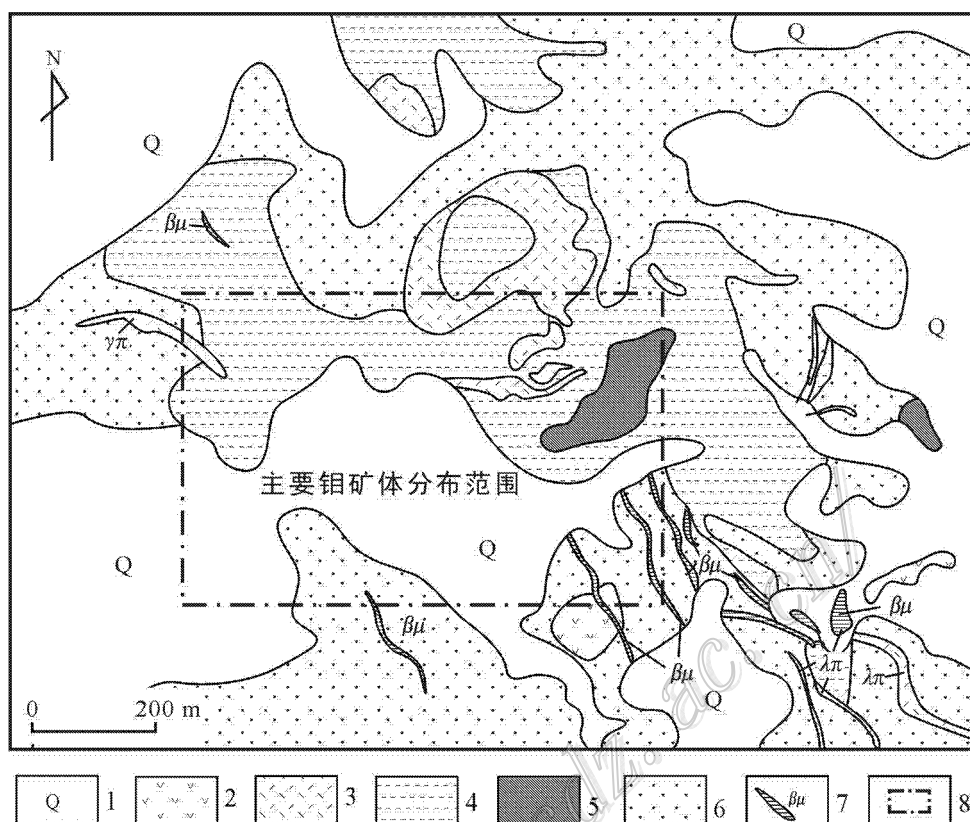


图 2 内蒙古大苏计钼矿床地质简图(根据沈存利等 2010 和于玺卿等 2008 资料改编)

1—第四系;2—集宁群片麻岩、变粒岩和混合岩;3—花岗斑岩;4—石英斑岩;5—正长花岗岩;6—太古代碎裂斜长花岗岩;
7—辉绿岩脉;8—主矿体分布范围

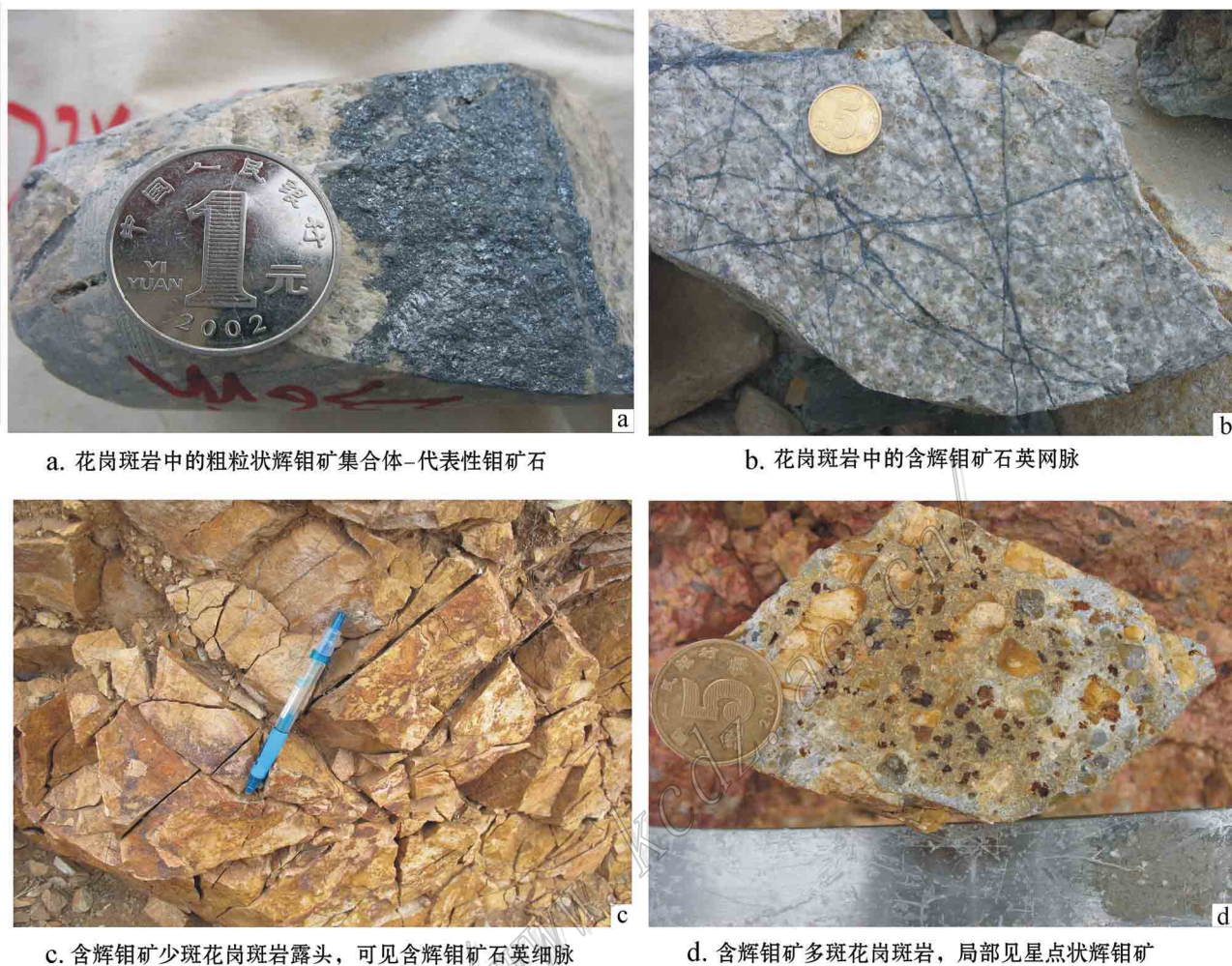
Fig. 2 Simplified geological map of the Dasuji large-size Mo deposit in Zhuozi County, Inner Mongolia
(modified after Shen et al., 2010 and Yu et al., 2008)

1—Quaternary; 2—Archean gneiss, migmatite and granulite of Jining Group; 3—Mesozoic granite porphyry; 4—Mesozoic quartz porphyry;
5—Mesozoic syenogranite; 6—Archean cataclastic plagiogranite; 7—Mesozoic diabase; 8—Distribution of main ore bodies

和透镜状矿体。从平面上看,整个钼矿化区呈一不对称的“哑铃”状分布,东西长1 900 m,南北宽700~1 400 m(图4)。含矿少斑(图3c)和多斑花岗斑岩(图3d)的锆石铀-铅同位素年龄值变化范围为131~134 Ma,属早白垩世岩浆活动产物(李香资等,2012)。

在剖面上,钼矿化体呈穹窿状和“倒扣钟”状产出。个别钻孔见矿厚度为400~900 m,平均值520 m,倾斜延深大于500 m,其中单个矿体厚度为5~20 m,最厚处可达百余米。与中国北方其他钼矿床相似,曹四天钼矿床各主要钼矿体的顶部同样存在有厚度不等的次生氧化矿化带(厚度小于150 m),其下部为厚大的原生硫化型矿体(刘翼飞等,2011;聂凤军等,2011a, 2011b;于玺卿等,2008)。钼矿体的顶、底板可以是中生代多斑或少斑花岗斑岩,也可以是

太古宙片麻岩、变粒岩和石英岩。矿体与围岩没有明显界线,呈渐变过渡关系。近矿围岩蚀变有硅化、绢云母化、钾长石化、黑云母化和绿泥石化以及萤石化、次闪石化和碳酸盐化,其中硅化、绢云母化和钾长石化与钼矿化具有密切的时空分布关系。根据钼矿石的自然属性,可将其划分为次生氧化型和原生硫化型。氧化型矿石主要由钼华、钼钙矿和褐铁矿以及硬锰矿、软锰矿、高岭石和黏土类组成, $w(\text{Mo})$ 变化范围为0.03%~0.069%,平均值0.046%(李香资等,2012)。硫化型钼矿石的金属矿物有黄铁矿、辉钼矿、黑钨矿、磁铁矿、闪锌矿和方铅矿;脉石矿物有石英、斜长石、钾长石、绢云母、黑云母、绿泥石、萤石、次闪石和方解石, $w(\text{Mo})$ 变化范围为0.03%~0.56%,平均值0.08%(李香资等,2012)。另外,沿少斑或多斑花岗岩株与变质岩地层接触带



a. 花岗斑岩中的粗粒状辉钼矿集合体-代表性钼矿石

b. 花岗斑岩中的含辉钼矿石英网脉

c. 含辉钼矿少斑花岗斑岩露头，可见含辉钼矿石英细脉

d. 含辉钼矿多斑花岗斑岩，局部见星点状辉钼矿

图3 内蒙古大苏计钼矿床(a, b)和曹四天钼矿床(c, d)照片

Fig. 3 Photos of the Dasuji large-size Mo deposit (a, b) and the Caosiyao superlarget Mo deposits (c, d)

可见有含黑钨矿石英脉和网脉， $w(\text{WO}_3)$ 可达0.56%。最新辉钼矿铼-钨同位素测年结果表明，4件样品的模式年龄值分别为 $(131.9 \pm 2.3) \text{ Ma}$ 、 $(131.2 \pm 2.3) \text{ Ma}$ 、 $(129.7 \pm 2.0) \text{ Ma}$ 和 $(128.6 \pm 2.4) \text{ Ma}$ (聂凤军等, 2012)，平均值为 $(130.4 \pm 2.4) \text{ Ma}$ ，成矿时间略晚于含矿斑岩体的形成时间(131~134 Ma)。

2.3 物化探异常

1:5万水系沉积物测量和1:1万岩屑测量结果表明，无论是在大苏计矿区，还是在曹四天矿区均存在有明显的化探异常，其元素组合比较复杂，并且具有明显的分带现象。在大苏计矿区，异常元素组合以银、铅、锌、钨、铋和钼为主，同时伴生有金、砷、锑、锰和锡。异常呈椭圆形分布，以面积大、强度高和浓集中心明显为特征。从元素浓集中心向外，元素水平分带依次为钼(金)-铋-钨-铅-锌-银(于玺卿等，

2008)。在曹四天矿区，异常的元素组合以钨、钼、砷、铅、铋和银为主，同时伴生有铜、锌、金、锑、锰和锡。元素异常呈半环状分布(向西开口、向东闭合)，并且以面积大、强度一般和浓集中心清晰为性征。从浓集中心向外，元素水平分带依次为钼(锑)-钨(砷)-铋-铅-锑-砷-碲-金(钨)，其中锑、砷和钨在元素分带中反复出现，暗示矿区范围内存在有多期热液活动叠加事件(李香资等, 2012)。大苏计和曹四天矿区的致矿激电异常十分明显，其与化探异常带(点)和热液蚀变带相叠加部位常常是厚大钼矿体产出的有利地段，在大苏计矿区，含矿侵入岩的 η_s 值多大于4%，而其他岩体(层)多小于2%。以 η_s 值大于或等于3%为基准数值所圈定的异常为一不规则的“亚玲”状，其分布范围与含矿石英斑岩体和正长斑岩体所在部位相吻合。两处等轴状激电异常的 η_s

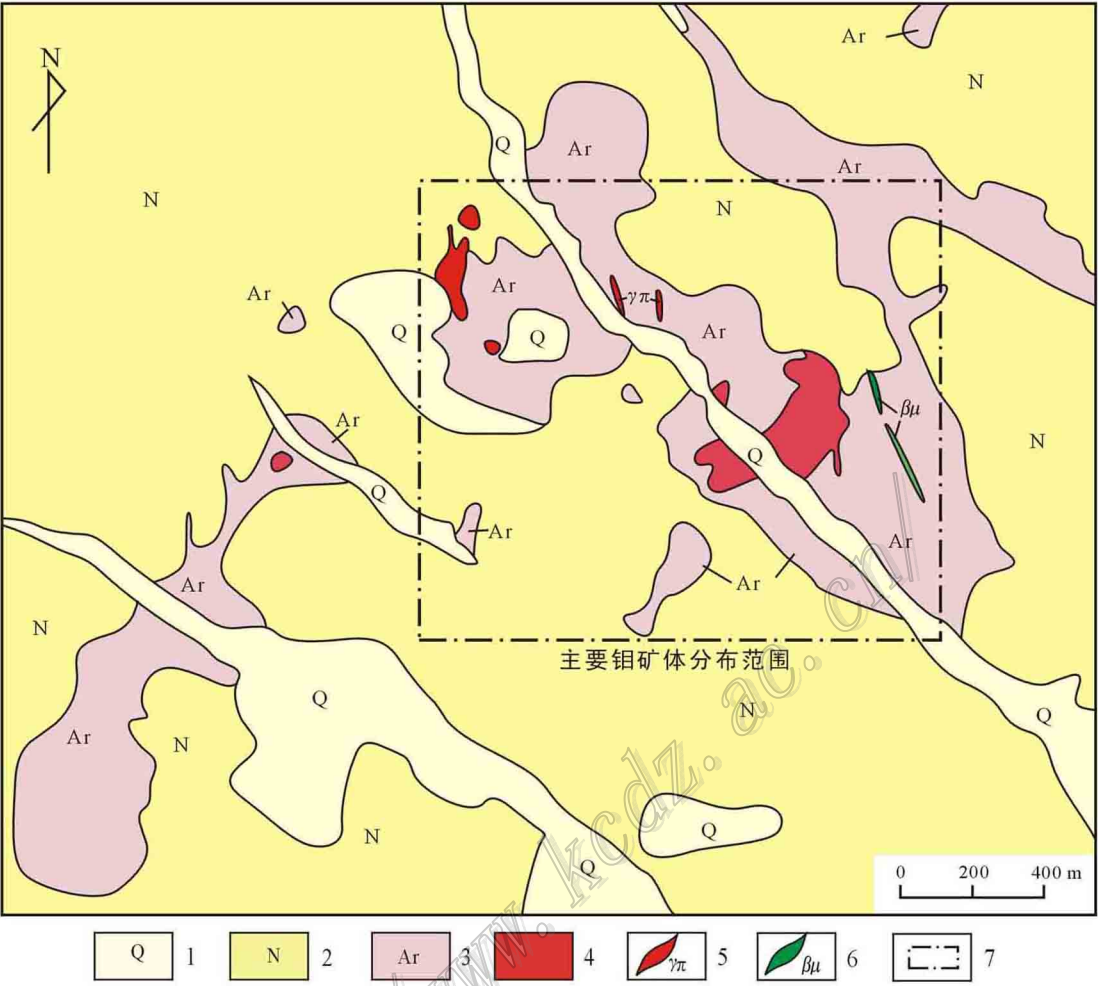


图 4 内蒙古兴和县曹四天超大型钼矿床地质简图(根据李香资等 2012 资料改编)

1—第四系沉积物; 2—第三系火山-沉积岩; 3—太古宙浅粒岩、石英岩和片麻岩; 4—花岗斑岩、多斑花岗斑岩; 5—花岗岩类侵入岩脉及石英脉; 6—辉绿岩脉; 7—主要矿化体分布范围

Fig. 4 Simplified geological map of the Caosiyao superlarge Mo deposit in Xinghe County, Inner Mongolia (modified after Li et al., 2012)

1—Quaternary sediments; 2—Tertiary volcano-sedimentary rocks; 3—Archean granulitite, quartzite and gneiss; 4—Mesozoic granite porphyry and glomeroporphyritic granite; 5—Mesozoic granitoid dykes and related quartz veins; 6—Mesozoic diabase dykes; 7—Distribution of main ore bodies

极大值均在 10% 左右(于玺卿等, 2008)。与大苏计矿区相比, 曹四天矿区的激电异常呈南北向条带状和串珠状展布, 并且存在有多个高异常值中心, 其视幅频率(FS 值)均大于 1.5%, 最高值为 14.75%, 视电阻率值为 50~400 Ωm, 最高值为 500 Ωm(李香资等, 2012)。矿区范围内, 激电异常的高极化率和低电阻率值对应得很好, 暗示了深部含硫化物地质体的存在。与前述大苏计钼矿区一样, 曹四天矿区的激电异常、钨-钼-砷-铜-锌异常与含钨钼热液蚀变带相互叠加的部位是找矿的有利地段。

3 成矿潜力

3.1 经验教训

发现大苏计和曹四天钼矿床应该是近年来在内蒙古中部低山丘陵覆盖区最重大的找矿突破, 同时, 也标志着该区隐伏金属矿床找矿勘查工作进入到一个新的阶段。长期以来, 人们认为华北克拉通北部内蒙古台隆(地轴)中西段凉城断隆区不具备有产生大规模成矿作用的条件, 并且将其视为寻找大型金

属矿床的“禁区”和“盲区”。尽管在2006年之前,地质学家通过几十年坚持不懈的努力也找到过一些铅-锌-银、金和钨矿床(点),但是它们大多以数量少、规模小和品位低为特点,中型规模以上矿床较为少见。现在我们不得不承认,凉城断隆区是找矿勘查工作中一处不应该被忽视而确实被忽略的成矿单元。找矿经验表明,无论是大苏计大型钼矿床,还是曹四天超大型钼矿床,它们均是在最新成矿理论指导下,采用地质分析与物、化探技术相结合找到矿床的典型案例,值得借鉴和学习。应该说,十分清晰的找矿目标、坚忍不拔的找矿决心和实事求是的实干态度以及对物、化探数据的超高解读能力均在两处矿床发现进程中发挥了重要作用。如前所述,尽管许多地勘单位也都在大苏计和曹四天地区进行过以铅-锌-银、金和钨为找矿目标的地质调查和潜力评价工作,但是忽视对已有资料数据的综合性分析和研究以及“单打一”的找矿思维方式致使他们错失了找到大型和特大型钼矿床的机遇。大苏计和曹四天矿床的发现再次表明,创新性找矿思维方式、准确的成矿条件分析、系统的地质调查、精细的物化探测量和适量的山地工程验证是寻找大型金属矿床缺一不可的前提条件。

3.2 矿床对比

众所周知,全球范围内许多大型或超大型钼矿床大多在前寒武纪古陆块体内部或边缘产出,并且与中、新代构造-岩浆活动具有密切成因联系。为了对世界上最典型的斑岩型钼矿床有一个全方位的了解,本文将美国克莱麦克斯钼矿床和金堆城钼矿以及最近在黑龙江找到的岔路口超大型钼矿床的基本地质特征列于表1,以供参考对比。

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达数千公里、宽为几十到百余公里的狭长地带,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麦克斯、亨德逊、埃蒙斯山和思达科等矿床(Ludington et al., 2009a, 2009b)。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也产出有金堆城、石家湾、黄龙铺、南泥湖、三道庄和上房沟等几十处巨型和大型钼矿床(焦建刚等, 2010; 朱赖民等, 2008; 黄典豪等, 1987)。与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、曹四天、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(聂凤军等, 2011a, 2011b; 沈存利等, 2010)。在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-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(聂凤军等, 2011a, 2011b; 沈存利等, 2010)。钼矿床的上述分布特点表明,以下3点可能是钼矿床形成的关键要素,其一、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;其二、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;其三、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利空间条件。大苏计和曹四天与克莱麦克斯、金堆城和岔路口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。

3.3 矿床成因

如前所述,大苏计和曹四天矿区范围内出露的地层均为太古宙集宁群变质岩,其上为中生界火山-沉积岩以及第四系沉积物所覆盖(内蒙古地矿局, 1991)。钼矿化多产在太古宙集宁群变质岩以及中生代浅成花岗类侵入岩体内,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,其中以近东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,即太古代变质岩基底和中生代伸展构造及相关岩浆活动,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和华北克拉通北缘的侧向增生、兴蒙造山带内陆-陆碰撞和造山后伸展(Meng, 2003; Ren et al., 1999)。另外,太平洋板片对华北-蒙古块体侧向俯冲所产生的远程效应也可能对本区产生过一定影响。大苏计和曹四天及邻区金属矿床(点)时空分布特点表明,其成矿作用与碰撞过程中所诱发的岩浆作用及相关流体活动密切相关。

大苏计大型钼矿床和曹四天特大型钼矿床分别位于凉城断隆区的西侧和东侧,并且与中生代深大断裂和富碱花岗岩类侵入岩体具有密切时空分布关系。尽管上述两处钼矿床在地理位置和形成时代上存在有一定的差异,但是它们的形成过程大体相似,可用图5来表示。有数据表明,虽然太古宙片麻岩、

表 1 大苏计和曹四夭钼矿床与国内外典型钼矿床对比一览表

Table 1 Comparison of the Dasuji and Caosiyao molybdenum deposits and other typical molybdenum deposits occurring in the world

对比内容	克莱麦克斯式钼矿床	金堆城式钼矿床	岔路口钼多金属矿床	大苏计钼矿床	曹四夭钼矿床
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	华北克拉通内蒙古台隆(地轴)西段凉城断隆的西侧	华北克拉通内蒙古台隆(地轴)西段凉城断隆的西侧和东侧
形成时代/Ma	33~18	141~127	146.9±0.8	222.5±3.2	130±1.8
地层	前寒武纪变质岩或中、新生代火山-沉积岩	新元古界熊耳群板岩、安山岩和凝灰岩	侏罗纪英安岩和流纹岩,局部地段见有前中生代沉积岩	太古代片麻岩、混合岩、斜长花岗岩和英云闪长岩	太古代片麻岩、混合岩、变粒岩和石英岩
侵入岩	第三纪钙-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)	印支期高钾钙-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,而贫锶和钼, $\omega(\text{F})$ 一般大于1%	富硅、氟、铷和铯,而贫铁、钙、镁、锶和钼, $\omega(\text{F})$ 一般大于0.5%	富硅、氟、钾、铷和铯,贫铁、镁、钙、锶和钼, $\omega(\text{F})$ 大于1%	富硅、氟、钾、铷和铯,贫铁、镁、钙、锶和钼, $\omega(\text{F})$ 大于0.5%	富硅、氟、钾、铷和铯,贫铁、镁、钙、锶和钼, $\omega(\text{F})$ 大于1.5%
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,磁法和激电异常是良好的找矿标志	磁法和激电异常与银-铅-铋-钨-铍-钼元素异常相叠加部位是找矿有利地段	磁法和激电异常与钨-钼-铋-铅-铍-银元素异常相叠加部位是找矿有利地段
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	厚层状、截锥状、囊状和透镜状	厚层状、囊状、脉状和透镜状矿体
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	硅化、绢云母化、绢英岩化、绿泥石化和高岭石化,分带特征不明显	硅化、绢云母化、钾长石化、黑云母化、绿泥石化、萤石化、次闪石化和碳酸盐化
矿物组成	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	金属矿物:辉钼矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿和磁铁矿; 脉石矿物:石英、钾长石、斜长石、绢云母、高岭石、萤石、绿泥石、黑云母和方解石	金属矿物:黄铁矿、辉钼矿、黑钨矿、磁铁矿、闪锌矿和方铅矿; 脉石矿物:石英、斜长石、钾长石、绢云母、黑云母、绿泥石、萤石、次闪石和方解石
元素组合	Mo-F-W-Sn-Zn-Ag-Pb	Mo-F-Sn-Zn-Pb	Mo-F-Ag-Zn-Pb	Mo-F-Zn-Pb-Au	Mo-F-W-Bi-Ag
成矿条件	温度 400~600℃/200~400℃; $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 5%~36%;深度小于0.5 km	温度 300~400℃;盐度 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 5%~40%;深度小于0.5 km	温度 300~400℃; $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 5%~40%;深度小于0.5 km	温度 350~450℃/200~400℃; $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 6%~22%;深度0.5 km左右	温度 350~400℃; $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 8%~22%;深度0.5 km左右
吨位/品位	20~200万吨/0.5%~0.2%	130万吨/0.6%~0.8%	136~200万吨/0.03%~0.65%	20万吨左右/0.03%~0.28%(0.11%)	200万吨/0.03%~0.56%(0.08%)
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	前寒武系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_2O 、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	印支期陆壳裂陷作用诱发岩体(层)发生部分熔融,并且形成一定规模岩浆作用及相关流体活动,并且在构造有利部位形成钼矿床	燕山期深大断裂再次发生活化,并且产生一定规模岩浆作用及相关流体活动,进而在不同断裂构造的交汇部位形成钼矿床
参考文献	Ludington et al., 2009a; 2009b; Mutschler et al., 1981	朱赖民等, 2008; 黄典豪等, 1987	刘翼飞等, 2011; 聂凤军等, 2011a; 吕克鹏等, 2010	本文, 张彤等, 2009; 于玺卿等, 2008	本文, 李香资等, 2012

变粒岩和大理岩以及斜长花岗岩、英云闪长岩和花岗闪长岩钼的丰度值略高于地壳背景值,但是长时间和多期次构造-岩浆作用及相关流体活动致使钼及相关成矿组分发生明显富集,并且有可能形成“矿源层”、“预富集带”或“矿胚”(图 5)(李香资等 2012; 聂凤军等 2011b; 于玺卿等 2008)。中生代时期,受本区东部库拉板块与欧亚古陆以及北部鄂霍茨克洋壳与兴蒙块体俯冲、碰撞和对接的远程效应影响,凉城断隆及邻区的大规模伸展构造作用致使早期形成的深大断裂再次活化、并且诱发一定规模的深源岩浆活动,矿区及外围中生代正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值辉长(绿)岩脉(墙)的存在即是很好例证(Nie et al., 2002; 洪大卫等 2000)。有证据表明,深源岩浆与太古宙变质

岩以及中-新元古代—古生代侵入岩的作用过程十分复杂,它们可以用同化-分馏-结晶(AFC)模型或者熔融-同化-储集-均一化(MASH)模型来描述。无论是哪种模型,只要深源岩浆与含钼的变质岩块体或侵入岩发生相互作用,那么就有可能形成含钼的长英质岩浆及相关的含矿流体。有鉴于此,含矿变质岩和侵入岩是钼矿床物质来源的“母体”,而中生代浅成花岗岩类侵入岩体则是成矿作用的“发动机”,否则将很难解释为什么钼矿体的产出规模要数倍(或几十倍)于含矿花岗岩类小岩体。

无论是中-酸性熔体中 MoS_2 的溶解度,还是钼在流体与熔体中的分配系数,它们均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

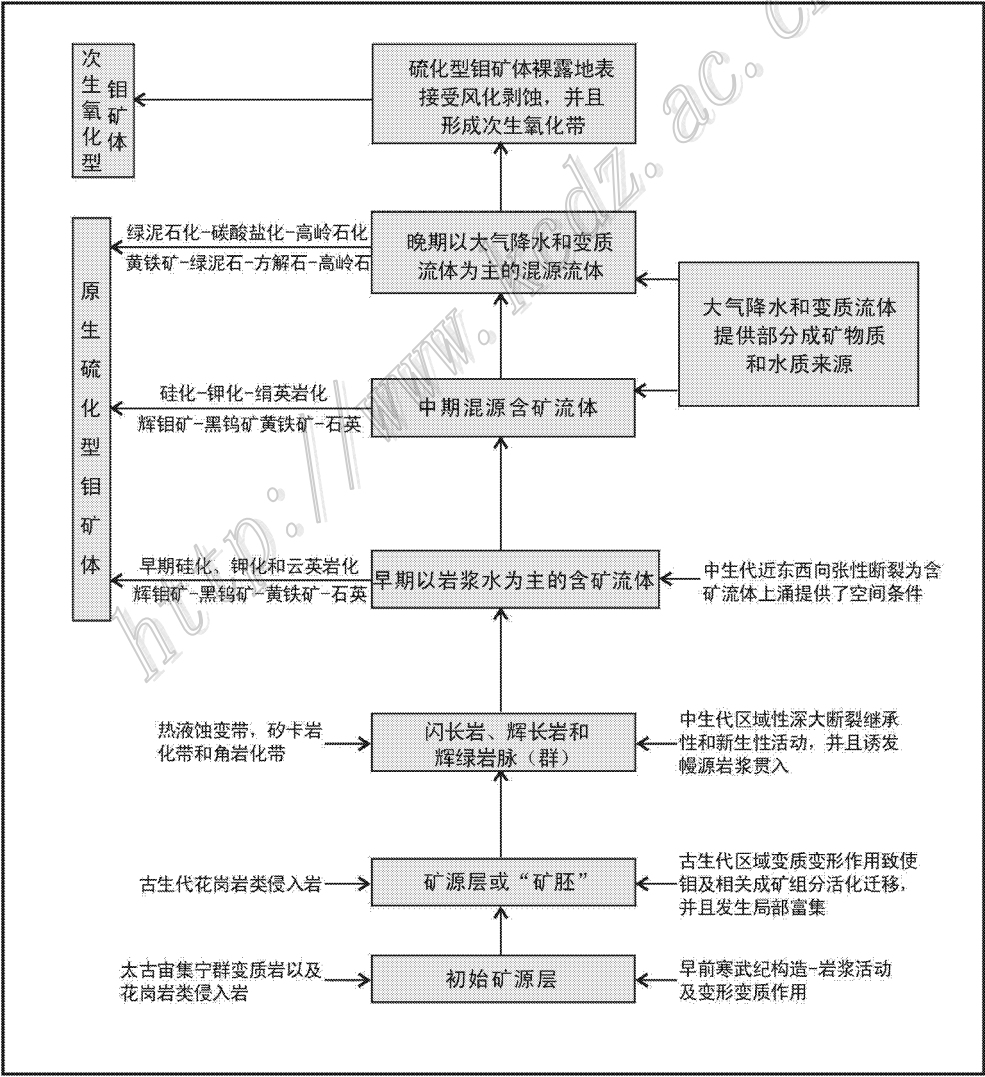


图 5 内蒙古中部大苏计和曹四夭钼矿床概念成矿模式

Fig. 5 Conceptual metallogenetic model for the Dasuji and Caosiyao Mo deposits in central Inner Mongolia

体系自身的结晶分异作用可促使大量的挥发性组分(CO_2 、F、Cl、 H_2O)、 SiO_2 、 K_2O 、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(聂凤军等,2007;2011a;黄典豪等,1987)。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、沉淀和富集创造了有利条件(聂凤军等,2007;2011a)。在成矿作用的早期阶段,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(郑五一等,2012)^①。随着时间推移,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作用,进而形成混源型成矿流体,矿石的硫和氧同位素数据兼具岩浆流体与大气降水双重特点(郑五一等,2012)^①。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(图5)。大苏计和曹四天矿床各主要钼矿体形成之后,长期裸露地表,并且遭受风化剥蚀,最终在原生硫化物矿体顶部形成次生氧化型矿体。如上所述,大苏计和曹四天钼矿床均是与中生代浅成花岗岩类侵入岩有关的中-高温热液矿床,可划属为斑岩型钼矿床。两处矿床外围印支期和燕山期花岗岩类侵入岩分布广泛,其产出环境和岩相学特征与大苏计和曹四天矿区含矿花岗岩类侵入岩体相似,并且存在有一大批钼和钼-钨矿化点或异常(带),是开展隐伏钼矿床找矿勘查的有利地段。

4 结 论

(1) 大苏计大型钼矿床和曹四天超大型钼矿床

均在太古宙变质岩内产出,并且与深大断裂和中生代浅成富碱花岗岩类侵入岩具有密切时空分布关系,其产出环境和地质特征与美国克莱麦克斯钼矿床和黑龙江岔路口钼多金属矿床存在许多相似之处,属斑岩型钼矿床;

(2) 太古代变质岩、多期断裂构造和中生代浅成富碱花岗岩类侵入岩是形成钼矿床的3个基本条件,它们分别为钼成矿作用提供了物质组分、赋矿空间和动力来源。“三位一体”成矿模式为在内蒙古中部低山丘陵覆盖区寻找隐伏钼矿床提供了理论基础;

(3) 系统的区域地质调查,精细的物化探测量,稀疏的钻探验证和创新性综合分析在上述两矿床发现过程中发挥了重要作用。钼多金属元素组合异常和高极化-低磁异常与热液蚀变带相互叠加部位是寻找隐伏钼矿体的最有利地段。

参考文献/References

- 陈旺,孙紫英,刘国军,王金娃,王建平. 2006. 李清地铅锌银矿区成矿地质特征及找矿新进展[J]. 地质与勘探, 42(1): 26-29.
- 洪大卫,王试光,谢锡林,张季生. 2000. 兴安造山带正ε(Nd,t)值花岗岩的成因和大陆地壳生长[J]. 地学前缘, 7(2): 441-456.
- 黄典豪,吴澄宇,聂凤军. 1987. 陕西金堆城斑岩钼矿床地质特征及成因探讨[J]. 矿床地质, 6(3): 22-34.
- 焦建刚,汤中立,钱壮志,袁海潮,闫海卿,孙涛,徐刚,李小东. 2010. 东秦岭金堆城花岗岩斑岩体的锆石U-Pb年龄、物质来源及成矿机制[J]. 地球科学, 35(6): 1011-1022.
- 李香资,班宜红,权知心,瓮纪昌,王卫东. 2012. 内蒙古兴和县曹四天钼矿床地球化学特征及成矿模型探讨[J]. 地质调查与研究, 35(1): 39-46.
- 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.
- 吕克鹏,韩龙,张佳男. 2010. 叉路口钼矿床地质特征及找矿标志浅析[J]. 黑龙江科技信息(21): 31.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古区域地质志. 中华人民共和国地质矿产部专报(一)区域地质,第25号[M]. 北京:地质出版社. 1-725.
- 聂凤军,江思宏,张义等. 2007. 中蒙边境中东段金属矿床成矿

① 郑五一,Smith C P,张文海. 2012. 内蒙古中部大苏计和三家天地区钼和钨矿资源调查. 北京首地金石科技发展有限公司内部地质调查报告. 1-25.

- 规律和找矿方向[M]. 北京:地质出版社. 1-574.
- 聂凤军,孙振江,李超,刘翼飞,吕克鹏,张可,刘勇. 2011a. 黑龙江岔路口钼多金属矿床辉钼矿-钼同位素年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 30(5):828-836.
- 聂凤军,张可,刘翼飞,江思宏,刘勇,刘妍. 2011b. 华北克拉通北缘及邻区印支岩岩浆活动与钼和金成矿作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版) 41(6):1651-1666.
- 聂凤军,李香资,李超,赵宇安,刘翼飞. 2012. 内蒙古曹四天大型钼矿床钼-钼同位素年龄及地质意义[J]. 地质论评, 58(6)(待刊).
- 沈存利,张梅,于玺卿,程文国,高维裕,周文川. 2010. 内蒙古钼矿找矿新进展及成矿远景分析[J]. 地质与勘探, 46(4):1-15.
- 孙荣圭, Richard Lee Armstrong, 孙大中, 韩光. 1986. 阴山东段先寒武变质岩的 Rb-Sr 年代[J]. 地质科学, (3):258-264.
- 阎国翰,牟保磊,曾贻善,蔡剑辉,任康绪,李凤棠. 2007. 华北克拉通火成碳酸岩时空分布和锆钼同位素特征及地质意义[J]. 高校地质学报, 13(3):463-473.
- 于玺卿,陈旺,李伟. 2008. 内蒙古大苏计斑岩型钼矿床地质特征及其找矿意义[J]. 地质与勘探, 44(2):29-37.
- 张彤,陈志勇,许立权,陈郑辉. 2009. 内蒙古卓资县大苏计钼矿辉钼矿钼-钼同位素定年及其地质意义[J]. 岩矿测试, 28(3):279-282.
- 朱赖民,张国伟,郭波,李华. 2008. 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, 82(2):204-220.
- Ludington S, Hammarstrom J and Piatak N. 2009a. Low-fluorine stockwork molybdenite deposits[R]. U. S. Geological Survey Open-File Report 2009-1211, 9p.
- Ludington S and Plumlee G S. 2009b. Climax-type porphyry molybdenum deposits[R]. U. S. Geological Survey Open-File Report 2009-1215, 16p.
- Meng Q R. 2003. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract[J]? Tectonophysics, 369:155-174.
- Mutschler F, Wright E G, Ludington S and Abbott J T. 1981. Granite molybdenite systems[J]. Econ. Geol., 76:874-897.
- Nie F J, Jiang S H, Su X X and Wang X L. 2002. Geological features and origin of gold deposits occurring in the Baotou-Bayan Obo district, south-central Inner Mongolia, People's Republic of China[J]. Ore Geology Review, 20:139-169.
- Ren J S, Wang Z X, Chen B W. 1999. The tectonics of China from a global view-a guide to the tectonic map of China and adjacent regions [M]. Beijing: Geol. Publ. House. 1-32.