

内蒙古小东沟斑岩钼矿床地质特征及成因探讨^{*}

聂凤军,张万益,江思宏,刘妍

(中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037)

摘 要 小东沟早白垩世斑状黑云母花岗岩株侵位于上二叠统火山-沉积岩中,属富碱钙-碱性火成岩。钼矿化大多产在该岩株的顶部及其内、外接触带,呈细脉浸染状、条带状和团块状,最大矿化深度可达 300 m。钼矿石中的金属矿物有黄铁矿、辉钼矿、黄铜矿、闪锌矿和磁铁矿;非金属矿物有钾长石、石英和绢云母。从岩株中心向外,热液蚀变类型依次为硅化、钾化、云英岩化和青磐岩化,其中硅化和云英岩化与钼矿化具密切空间分布关系。据流体包裹体测试数据,可推测该矿床的形成温度为 320~420℃,形成深度为 1.56~2.85 km。稳定同位素测定结果表明,钼矿石主要是以岩浆水为主的混源流体淀积的结果,硫和钼主要来自中酸性岩浆源。另外,低 $f(\text{O}_2)$ 和高 $f(\text{S}_2)$ 的弱酸性还原效应以及成矿流体“沸腾”作用均是导致辉钼矿沉淀的原因。小东沟矿床属斑岩型中高温热液钼矿床。

关键词: 地质学;斑岩钼矿床;地质特征;成矿作用;成矿流体;小东沟;内蒙古

中图分类号: P618.65

文献标识码: A

Geological features and origin of Xiaodonggou porphyry molybdenum deposit in Hexigten Banner, Inner Mongolia

NIE FengJun, ZHANG Wan Yi, JIANG SiHong and LIU Yan

(Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract

Located in the easternmost part of the Early Paleozoic tectono-magmatic belt within the Ondur Sum-Ongniud Banner on the northern edge of the North China Craton, the newly discovered Xiaodonggou deposit is a medium-size porphyry molybdenum deposit occurring in central-eastern Inner Mongolia. During the Mesozoic Yanshanian orogeny, intense tectonic and igneous activities resulted in large-scale granitoid magmatism in Xiaodonggou and its neighboring areas. The Xiaodonggou granitoid porphyry stock was emplaced in the volcano-sedimentary sequence of the Upper Permian Ranfangdi Formation, controlled by the NS-trending fault zone. With an outcrop area of 0.22 km², it consists mainly of porphyritic biotite granite and fine-grained biotite granite which have the same mineral assemblage. Rock-forming minerals are mainly quartz, microcline, microperthite and plagioclase associated with minor biotite and sericite. Accessory minerals comprise magnetite, apatite, zircon, sphene and allanite. The porphyry stock is petrochemically characterized by relatively high SiO₂, K₂O, Rb, U and Th, and obviously low CaO, Fe₂O₃ + FeO, MgO, Sr, Ba, Nb, Ta and REE, thus belonging to silicon-high, potassium-rich rock of calc-alkaline series. Molybdenum mineralization occurs exclusively within the Xiaodonggou porphyritic granitoid stock as veins, veinlets and disseminated blocks. 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 the forms of

^{*} 本文得到国家自然科学基金项目(40573025)资助

第一作者简介 聂凤军,男,1956年生,研究员,博士生导师,从事金属矿床地质和地球化学研究。E-mail: nfej@mx.cei.gov.cn

收稿日期 2007-03-30; 改回日期 2007-08-27。许德焕编辑。

impregnation, radioflakes, thin films, aggregated flakes and veinlets in veins. Re-Os isotopic data of six molybdenite separates define a correlation line corresponding to an age of (135.5 ± 1.5) Ma. Hydrothermal alterations in Xiaodonggou roughly show zonation of K feldspathization, greisenization, silicification, and propylitization from the porphyritic biotite granite stock outward. Of these alterations, silicification and greisenization are well developed and have intimate relationship with molybdenum mineralization. Fluid inclusion studies yield homogeneous temperatures from 260 to 480 °C, with the main ore-forming stage ranging from 320 to 420 °C. Gaseous inclusions are frequently coexistent with multiphase inclusions containing such daughter minerals as halite, sylvite, molybdenite and Kfeldspar. Intense boiling of the ore-forming fluid resulted in the deposition of a great volume of molybdenite under the circumstances of medium to high temperature, relatively low $f(\text{O}_2)$ and $f(\text{S}_2)$ and weak acidity. Sulfur and oxygen isotopic data of the molybdenum ore indicate that the ore-forming fluid was dominated by magmatic water at the early ore-forming stage and characterized by mixed solution, with magmatic water as the major source at the main ore-forming stage. In contrast, the ore-bearing fluid was mainly heated meteoric water. Therefore, it is conceivable that sulfur and molybdenum were mostly derived from the magmatic source. Combined geochemical data, field geological observations and petrological evidence indicate that the Xiaodonggou deposit is a porphyry type hypothermal-mesothermal molybdenum deposit formed by Early Cretaceous intraplate granitoid magmatism on the northern margin of the North China Craton. In addition, the genetic model and mineral exploration criteria of the Xiaodonggou deposit can also be used as useful tools in the comprehensive evaluation of concealed molybdenum deposits on the northern margin of North China Craton.

Key words: geology, porphyry molybdenum deposit, geological feature, metallogeny, ore-forming fluid, Xiaodonggou, Inner Mongolia

小东沟钼矿床是华北地质勘查总院燕郊综合勘查院(以下简称综合勘查院)和内蒙古兴业集团公司的地质人员近两年来在前人工作基础上于内蒙古中东部地区发现的一处中型矿床。该矿床位于内蒙古克什克腾旗广兴元镇,西北距克什克腾旗政府所在地经棚镇 30 km,南距赤峰市 220 km,处于大兴安岭南段北坡近主脊部位,属中高山区。

该矿床及其外围的区域地质调查和找矿勘查工作始于 20 世纪 70 年代初期,1971~1982 年,原辽宁省第二区域地质测量队在该区开展过 1:20 万区域地质调查和矿产普查,并提交了相应的文字报告;1980~1983 年,原冶金工业部第一地质勘查公司综合普查大队(综合勘查院的前身)与第二地球物理探矿大队合作在该区进行过 1:5 万普查找矿工作,并且圈定出一大批铜、钼、铅、锌和银异常;1982~1983 年,综合普查大队对小东沟地区重要元素地球化学异常进行了系统的野外地质调查、物化探测量和钻(坑、槽)探工作,先后发现和圈定了 19 条钼矿体;

2004 年,内蒙古兴业集团公司获得小东沟钼矿化区探矿权后,委托综合勘查院对前人所圈定的钼矿化体进行了系统的地质勘查工作,获钼矿石量 4 153 万吨,钼金属量 3.3 万吨,整个矿床钼含量变化范围为 0.037%~0.112%,平均含量为 0.09%^{①②}。聂凤军等(2007)对小东沟钼矿床的辉钼矿样品进行了铼-钼同位素测定,所获同位素等时线年龄值为 (135.5 ± 1.5) Ma,并据此认为该矿床是早白垩世构造-岩浆活动的产物。另外,预可行性研究结果表明,小东沟钼矿床以矿体集中、矿化均匀、厚度稳定、杂质组分少、埋藏浅和开采条件好为特征,具有很好的开发前景^{①②}。

本文在前人工作的基础上,结合近期在小东沟地区所获得的稳定同位素、流体包裹体和元素地球化学数据,对小东沟斑岩钼矿床的地质特征和成矿机理进行了探讨,旨在为隐伏钼矿床的找矿勘查提供科学依据。

① 华北地质勘查局地质勘查总院. 2005. 内蒙古自治区克什克腾旗小东沟矿区钼矿详查报告. 内部资料.

② 核工业二四三大队. 2003. 内蒙古大兴安岭南段火山岩型钼、铀矿成矿地质特征及找矿方向. 大兴安岭地区矿产资源远景研讨会材料之八. 内部资料.

1 成矿地质环境

小东沟钼矿床位于华北陆台北缘温都尔庙-翁牛特旗早古生代构造-岩浆岩带的东段,其北侧 25 km 处即是华北陆台与西伯利亚板块的碰撞对接带——西拉木伦河深大断裂带(图 1)。需提及的是,受大兴安岭中生代 NE 向构造形迹叠加改造的影响,

在该矿床及其外围,古生代近 EW 向基底岩层较为少见,出露的地层主要为上二叠统铁营子组和染房地组以及上侏罗统满克头鄂博组和第四系(赵一鸣等,1994;内蒙古自治区地质矿产局,1991;王荃等,1991)^{①②}。铁营子组主要分布在小东沟矿区的中部和西部,约占全区岩(体)层出露面积的 50%,主要岩石类型为安山质角砾岩、安山质凝灰岩、流纹质凝灰熔岩、凝灰质细砂岩、凝灰质粗砂岩和砾岩。染房

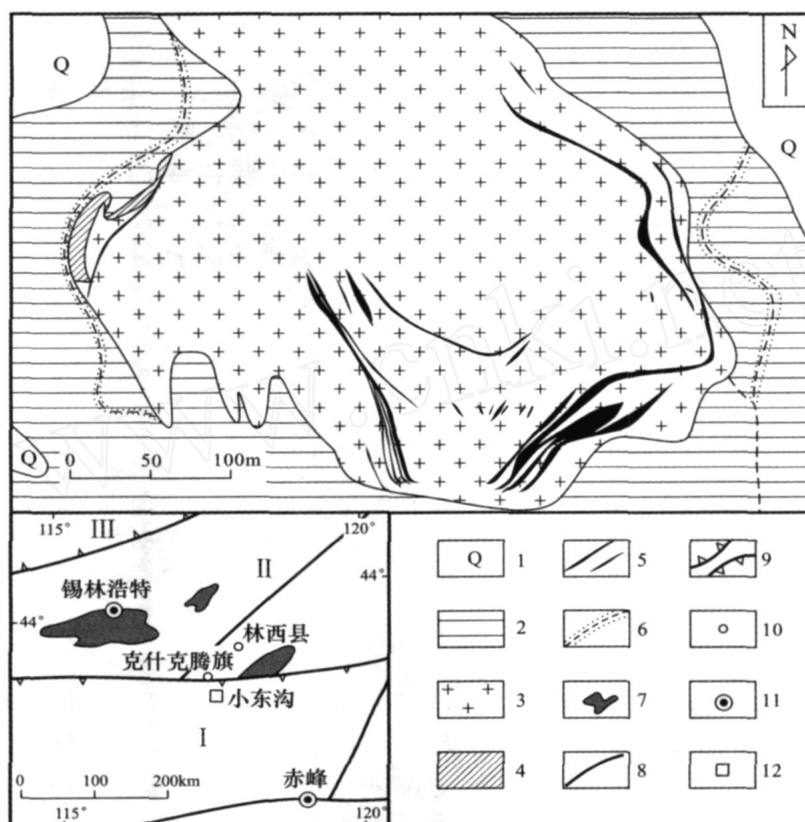


图 1 内蒙古克什克腾旗小东沟斑岩钼矿床地质略图

1—第四系;2—上二叠统染房地组火山-沉积岩;3—小东沟斑状黑云母花岗岩;4—黑云母花岗质混染岩;5—钼矿体;6—黑云母角岩化带;7—前寒武纪中间地块;8—断层;9—古板块缝合线;10—旗(县)政府所在地;11—地级市政府所在地;12—小东沟钼矿床;—华北陆台;—温都尔庙-翁牛特旗早古生代构造-岩浆岩带;—西伯利亚板块

Fig. 1 Simplified geological map of Xiaodonggou porphyry molybdenum deposit, Hexigten Banner, Inner Mongolia, with the insert showing its tectonic locality

1—Quaternary; 2—Upper Permian volcano-sedimentary rocks of Ranfangdi Formation; 3—Xiaodonggou porphyritic biotite granite stock; 4—Biotite granitoid hybrid; 5—Molybdenum ore body; 6—Biotite hornfels zone; 7—Precambrian metamorphic block; 8—Fault; 9—Suture zone; 10—Location of County government; 11—Location of Prefecture government; 12—Xiaodonggou molybdenum deposit. —Northern China craton; —Ondur Sunr-Ongniud Banner Early Paleozoic tectono-magmatic belt; —Siberian plate

① 华北地质勘查局地质勘查总院. 2005. 内蒙古自治区克什克腾旗小东沟矿区钼矿详查报告. 内部资料.

② 核工业二四三大队. 2003. 内蒙古大兴安岭南段火山岩型钼、铀矿成矿地质特征及找矿方向. 大兴安岭地区矿产资源远景研讨会材料之八. 内部资料.

地组主要出露在矿区的东部、北部和南部,约占全区岩(体)层出露面积的 30%,主要岩石类型为安山岩、安山质凝灰熔岩、英安-流纹质凝灰熔岩、凝灰岩和凝灰质砂岩。染房地组与下伏的铁营子组呈角度不整合接触或断层接触关系。上侏罗统满克头鄂博组零星分布在矿区的东南角,主要岩石类型为霏细斑岩、流纹质凝灰角砾岩和凝灰质砂岩,与下伏的上二叠统呈角度不整合接触关系。第四系分布在矿区低洼处和沟谷中,由砂土和砾石构成。

在小东沟钼矿区内,各种几何形态和不同产出规模的中酸性侵入岩体分布广泛,且与金属矿床具有一定的成因联系。具代表性的花岗岩类侵入岩体有边墙斑状花岗岩株(0.85 km²)和小东沟斑状黑云母花岗岩株(0.22 km²),后者不仅位于钼矿化区的中心地带,而且与钼矿体具有密切空间分布关系^①。除上述花岗岩类侵入岩外,该矿区内还广泛分布长英质岩脉(石英斑岩、花岗斑岩和正长岩)和辉绿岩脉,其中部分岩脉侵位于上二叠统铁营子组和染房地组以及上侏罗统满克头鄂博组,而另一部分岩脉则穿插到小东沟及边墙花岗岩类岩株之中。根据各类岩脉和岩株与钼矿体的空间分布关系,可以推断,绝大多数岩脉的形成时间都晚于小东沟和边墙花岗岩类岩株及钼矿体。

从构造形迹上看,上二叠统和上侏罗统内,各种产出规模和不同展布方向的褶曲构造十分明显,具代表性的有李营子背斜、东沟脑背斜、小东沟背斜和小东沟向斜,小东沟背斜与 NW 向断层交汇处即是小东沟岩株的产出部位。与各类褶皱构造相比,无论是在上二叠统和上侏罗统内,还是在花岗岩类侵入岩体中,断裂破碎带分布均较广泛,以 NW 向和近 NS 向正断层(F₂—F₈)最为发育。单个破碎带大多由 3 条以上断层、裂隙带或节理带构成,长度一般为 2~6 km,宽度为几米到数百米。尽管小东沟钼矿床的外围有部分铅-锌矿化带明显受 NW 向或近 NS 向断层破碎带的控制,但是,钼矿体本身并未受到任何后期断层破坏的影响^①。

2 含钼花岗岩类侵入岩

小东沟岩体呈岩株状侵位于上二叠统染房地

组,其北侧与边墙花岗岩株相连,地表出露面积为 0.22 km²。据地球物理测量数据,经钻探工程证实,小东沟岩株的主体为一近四边形的岩体(图 1),分别向南、西南和东南方向侧伏,东、西两侧倾角较陡,一般为 50°左右或近于直立,南侧产状较缓,一般为 30°左右。沿岩体与围岩接触带产出一条宽度为几米到近百米的角岩化带,主要岩性为角岩化安山岩、堇青石黑云母角岩、长英质角岩和黑云母角岩,其中,堇青石黑云母角岩的硫化物(黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿和磁黄铁矿)含量可高达 10%左右。另外,该岩株西侧的局部地段出露一条不规则状黑云母花岗质混染岩带,其岩相学特征与该岩株及角岩有明显差异。该混染岩为灰白到灰绿色,中粗粒斑杂状结构,条带状和块状构造,主要矿物组分为钾长石、斜长石、石英、黑云母、绿泥石和绿帘石,副矿物有榍石、黄铁矿、锆石和磁铁矿。

该岩株从中心到边部大体可划分为中心相和边缘相,前者为斑状黑云母花岗岩,后者为细粒黑云母花岗岩,两者呈渐变过渡关系。中心相斑状黑云母花岗岩是该岩株的主体,占整个岩株体积的 4/5。岩石呈灰白色-浅肉红色,中粗粒和似斑状结构,块状构造;斑晶主要为钾长石、斜长石和石英,粒度为 2.0~2.8 mm,含量为 35%~40%;基质矿物为钾长石(条纹长石、正长石、微斜长石)、斜长石(更长石、钠长石)、石英和黑云母,粒度为 0.1~0.5 mm,含量为 55%~60%。在所有的基质矿物中,钾长石占全部基质矿物含量的 37%~40%,斜长石为 20%~25%,石英为 30%~35%,黑云母为 1%~2%;副矿物有磷灰石、锆石、榍石、磁铁矿和褐帘石。边缘相细粒黑云母花岗岩环绕中心相分布,出露宽度为几米到数十米,向深部有变薄和尖灭现象,占整个岩株体积的 1/5。细粒黑云母花岗岩呈灰黄-灰白色,似斑状结构、细粒花岗结构,块状构造;主要矿物为钾长石(条纹长石、微斜长石、正长石)(含量为 35%~45%)、斜长石(20%~25%)、石英(30%~35%)和黑云母(1%~3%);副矿物有锆石、磷灰石、榍石和褐帘石。对该岩株内钼矿石中的 6 件辉钼矿样品进行了铼-钼同位素年龄测定,获得等时线年龄为(135.5±1.5) Ma,据此,确定该岩株的形成时代为早白垩世(聂凤军等,2007),说明其为中生代构造-岩浆活动的产物。

① 华北地质勘查局地质勘查总院. 2005. 内蒙古自治区克什克腾旗小东沟矿区钼矿详查报告. 内部资料.

小东沟岩株的新鲜斑状黑云母花岗岩、蚀变斑状花岗岩和云英岩化斑状花岗岩全岩样品的化学分析数据以及计算所获有关参数列于表 1。由表 1 可见,小东沟岩株在元素地球化学方面存在以下特点:

表 1 内蒙古小东沟钼矿区斑状黑云母花岗岩全岩样品主元素、微量元素和稀土元素分析结果及特征比值
Table 1 Chemical analytical data and characteristic ratios of major, trace and rare earth elements in whole-rock samples from porphyritic biotite granitoid stock occurring in Xiaodonggou molybdenum mineralized district, Inner Mongolia

	1	2	3	4	5	6	7
	XDG-1	XDG-4	XDG-2	XDG-3	XDG-5	BZ01	BZ02
w(B)/%							
SiO ₂	75.29	75.77	72.67	70.62	75.89	71.27	74.32
TiO ₂	0.20	0.16	0.14	0.16	0.17	0.25	0.12
Al ₂ O ₃	12.59	12.63	12.12	11.86	11.75	14.25	13.60
Fe ₂ O ₃	1.20	0.89	5.33	3.66	3.70	1.24	0.90
FeO	0.20	0.22	0.44	0.25	0.52	1.62	1.24
MnO	0.03	0.04	0.07	0.04	0.12	0.08	0.09
MgO	0.11	0.08	0.16	0.20	0.19	0.80	0.55
CaO	0.56	0.58	0.30	0.45	0.19	1.62	0.79
Na ₂ O	3.39	3.52	0.09	2.94	0.14	3.79	3.12
K ₂ O	5.39	5.37	4.21	4.54	4.00	4.03	4.52
P ₂ O ₅	0.03	0.02	0.02	0.08	0.02	0.16	0.10
H ₂ O ⁺	0.48	0.34	2.06	1.04	2.24	0.56	0.65
CO ₂	0.09	0.11	2.02	0.18	0.50		
总量	99.56	99.73	99.63	96.02	99.43	100	100
K ₂ O + Na ₂ O	8.78	8.89	4.3	7.48	4.14	7.82	7.64
K ₂ O/Na ₂ O [*]	1.59	1.53	46.78	1.54	28.57	1.06	1.45
w _B /10 ⁻⁶							
Rb	244	235	364	174	328	200	150
Ba	480	431	155	432	245	830	650
Sr	75.2	80.0	3.89	66.9	6.22	300	340
Nb	14.1	12.1	11.3	9.68	10.0	20	20
Ta	1.30	1.18	1.11	0.96	1.00	3.5	2.5
Th	20.9	18.9	7.43	15.2	15.9	18	13
U	5.93	5.53	4.35	3.89	4.14	3.5	2.5
Nb/ Ta [*]	10.85	10.25	10.18	10.08	10.00	5.71	8.00
U/ Th [*]	0.28	0.29	0.59	0.26	0.26	0.19	0.19
La	13.0	14.3	38.8	25.1	89.9	31.62	29.0
Ce	24.1	25.5	59.5	46.1	132	61.92	70.0
Pr	2.60	2.70	5.14	4.94	11.11	7.60	9
Nd	9.00	8.65	14.2	16.5	31.0	25.71	37
Sm	1.37	1.22	1.44	2.17	3.10	5.03	8
Eu	0.46	0.37	0.24	0.46	0.51	1.19	1.3
Gd	1.40	1.26	1.84	2.15	3.81	3.88	8
Tb	0.22	0.20	0.22	0.29	0.47	0.63	4.3
Dy	1.33	1.13	1.19	1.56	2.70	2.78	5
Ho	0.28	0.24	0.24	0.32	0.61	0.65	1.7
Er	1.01	0.87	0.84	1.11	2.28	1.50	3.3
Tm	0.16	0.14	0.13	0.17	0.36	0.27	0.27
Yb	1.29	1.10	1.04	1.37	2.65	1.36	0.33
Lu	0.22	0.18	0.17	0.22	0.42	0.23	0.8
Y	10.4	8.73	9.30	11.9	24.4	14.89	29.0
REE	56.44	57.86	124.99	102.46	280.92	144.37	207.0
LREE/ HREE [*]	8.55	10.30	21.04	13.25	20.12	11.78	6.51
(La/ Yb) _N [*]	6.64	8.56	24.58	12.07	22.35	15.32	57.89
Eu [*]	1.02	0.91	0.46	0.65	0.46	0.80	0.50

测试单位:国家地质实验测试中心。1~2—新鲜斑状黑云母花岗岩;3~4—蚀变斑状花岗岩;5—云英岩化斑状花岗岩。—花岗岩(黎彤等,1963);—二云母花岗岩(黎彤等,1963);—酸性岩(花岗岩和花岗闪长岩)(中国科学院贵阳地球化学研究所,1977);—混源岩(2份酸性岩和1份基性岩)(中国科学院贵阳地球化学研究所,1977);—壳幔性花岗岩(王中刚等,1989);—混源岩(2份酸性岩和1份基性岩)(中国科学院贵阳地球化学研究所,1977)。*单位为1。

与中国的花岗岩或二云母花岗岩的平均值相比,新鲜斑状黑云母花岗岩样品以相对富硅和碱质组分($K_2O + Na_2O$),而相对贫钙、铁和镁质组分为特征,属富碱质钙-碱性火成岩;与新鲜斑状黑云母花岗岩相比,蚀变斑状花岗岩样品以相对富铁质和镁质组分,而相对贫硅、铝、钙和钠为特点,暗示在热液蚀变过程中主元素曾发生过一定程度的带入和带出;与地壳酸性火成岩微量元素平均值相比,新鲜斑状黑云母花岗岩样品以相对富铷、铯和钍,而相对贫锶、钡、铈和钕为特点;与新鲜斑状花岗岩相比,蚀变斑状花岗岩样品的铷、铯和钍含量变化范围较大,并且贫铈、钡、铈和钍;2件新鲜斑状黑云母花岗岩样品的稀土元素分布型式均为右倾斜曲线,且不具明显的铕异常(Eu值为1.02和0.91)(图2);无论是其稀土元素总量(REE),还是LREE/HREE和 $(La/Yb)_N$ 比值,均明显低于壳幔型花岗岩(王中刚等,1989);与新鲜斑状黑云母花岗岩相比,蚀变斑状花岗岩样品相对富稀土元素,并且具有较明显的铕负异常(图2),另外,其LREE/HREE和 $(La/Yb)_N$ 比值相对较高。从新鲜斑状黑云母花岗岩和蚀变斑状花岗岩样品的上述变化特点不难看出,随着热液蚀变强度的增大,稀土元素含量呈现出明显富集的趋势。与新鲜斑状黑云母花岗岩和蚀变斑状花岗岩相比,含钼云英岩化斑状花岗岩的特征是:相对富铁、镁和挥发性组分(5.14%),而相对贫铝、钙、

钠、钾、钡、锶、铈、钡、铯和钍;其稀土元素(REE)含量(280.92×10^{-6})是新鲜斑状黑云母花岗岩的5倍,是蚀变斑状花岗岩的2倍,其稀土元素分布型式为一条右倾斜曲线,铕负异常比较明显(图2)。

3 钼矿体地质特征

小东沟地区的钼矿化主要在斑状黑云母花岗岩株顶部或沿内接触带呈浸染状、细网脉状和条带状产出。在剖面上,钼矿体大多呈似层状、环状、皮壳状和透镜体状分布(图3)。迄今为止,在 0.5 km^2 范围内,已先后发现和圈定了各种形态和不同规模的钼矿(化)体15条,其中具工业价值的矿体有6条。单个矿体的长度为250~800 m,平均为450 m;厚度为0.9~25.20 m,最厚为62.34 m,平均为5.78 m;倾斜深度为350~520 m,平均为390 m。钼矿石的钼含量为0.06%~0.25%,最高为0.83%,平均为0.109%。

在所确定的6条工业矿体中,1号和2号矿体以规模大、连续性好和品位高为特征,占全部探明钼矿石量(或储量)的90%。1号矿体位于小东沟岩株南部第6~19号勘探线之间,是小东沟钼矿床中规模最大的工业矿体。钼矿化主要在小东沟斑状黑云母花岗岩株顶部呈似层状、透镜体状和条带状产出,其空间分布形态完全受岩体内接触带产状的控制(图3)。从整体上看,1号矿体的中心地段呈近东西走向,向东、西和南倾斜,倾角为20~35°。矿体东西长为800 m,南北宽为400~600 m,厚度为0.90~62.34 m,平均为9.48 m。整个矿体的钼含量为0.06%~0.24%,平均为0.12%。该矿体占小东沟矿床已探明矿石量的54.58%,占金属总量的59.63%。2号矿体位于1号矿体之下,两者间为10~30 m厚的夹石或低品位钼矿化体所隔,其规模明显小于1号矿体。2号矿体在斑状花岗岩株内呈似层状或条带状产出,东西长700 m,南北宽350~500 m,厚度为0.63~28.12 m,平均为8.42 m;其钼含量为0.06%~0.24%,平均为0.09%,占小东沟矿床已探明矿石量的36.44%,占金属总量的31.13%。

详细的岩(矿)相学和矿物学研究结果表明,小东沟钼矿床的矿石类型为细脉-浸染状或浸染状硫化物型矿石,钼华和钼铅矿极为少见。矿石的金属矿物主要为辉钼矿、黄铜矿、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿、磁铁矿、方铅矿、白钨矿和黑钨矿;非金属矿物为

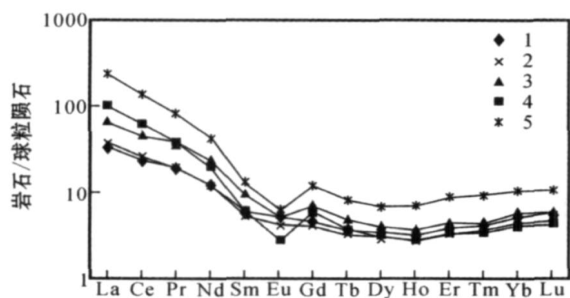


图2 内蒙古克什克腾旗小东沟斑状黑云母花岗岩全岩样品的稀土元素球粒陨石标准化型式

1~2—新鲜斑状黑云母花岗岩;3~4—蚀变斑状花岗岩;
5—云英岩化斑状花岗岩

Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns of representative whole-rock samples from Xiaodonggou porphyritic granitoid stock, Hexigten Banner, Inner Mongolia

1~2—Fresh porphyritic biotite granite; 3~4—Altered porphyritic granite; 5—Greisenized porphyritic granite

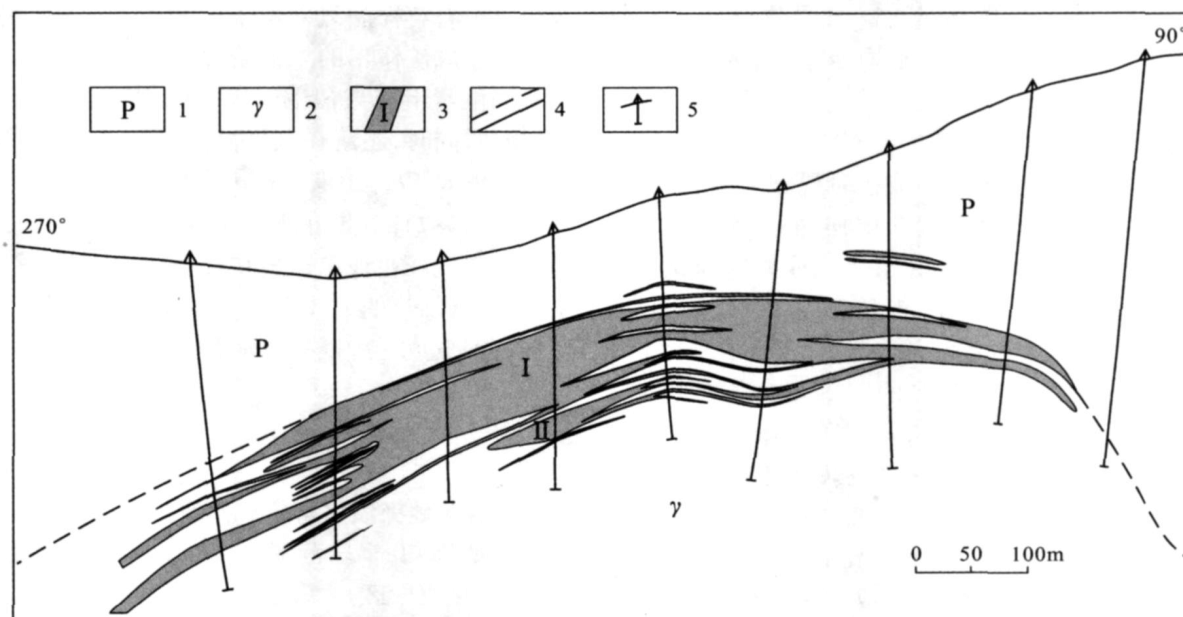


图 3 内蒙古克什克腾旗小东沟斑岩型钼矿床代表性地质勘探剖面图

1—上二叠统染房地组火山-沉积岩;2—小东沟斑状黑云母花岗岩;3—钼矿体及编号;4—矿体界限;5—钻孔位置

Fig. 3 Reprehensive geological section showing geometry of No. 1 Mo ore body in Xiaodonggou, Hexigten Banner, Inner Mongolia

1—Upper Permian volcano-sedimentary rocks of Ranfangdi Formation; 2—Xiaodonggou porphyritic biotite granite stock; 3—Molybdenum ore body and its serial number; 4—Boundary of ore body; 5—Location of drilling hole

钾长石、石英、绢云母、绿泥石和绿帘石。辉钼矿大多呈鳞片状集合体或团块状不均匀地散布在斑状花岗岩中,其单一叶片的大小一般为 $2\text{ mm} \times 3\text{ mm} \sim 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,最大者可达 $8\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 。在反光镜下,辉钼矿多呈灰白色,微带蓝灰色,非均质性明显,45°位置的偏光色微带淡红紫色;实测反射率波长为 587 nm , $R_e = 31.43\%$, $R_w = 35.76\%$ 。辉钼矿的产出方式主要有3种:呈稠密浸染状或稀疏浸染状产在斑状黑云母花岗岩株内;呈单一叶片或叶片状集合体在石英脉中沿云母或石英粒间空隙或微裂隙(解理)展布;呈稀疏浸染状、薄膜状或星点状在石英脉内产出。

4 地球化学特征

4.1 流体包裹体

岩(矿)相学研究结果表明,小东沟钼矿床石英内流体包裹体的类型主要有气液包裹体、含液体 CO_2 多相包裹体和含子矿物多相包裹体,多相包裹体中的子矿物主要为石盐、钾盐、钾长石和辉钼矿。

包裹体的粒径为 $6 \sim 28\text{ }\mu\text{m}$,最大者为 $41\text{ }\mu\text{m}$,平均为 $19\text{ }\mu\text{m}$ 。根据子矿物所占流体包裹体的体积,估算出成矿流体的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $15\% \sim 40\%$ 。在包裹体研究过程中,对120个气液包裹体和气体包裹体进行了均一化温度测量。在对包裹体加热时,绝大多数气液包裹体均一化为液相,而气体包裹体则多变为气相,此种变化特点表明,小东沟钼矿床的成矿作用很可能是在液相和气相条件下发生的。测得该矿床流体包裹体的均一化温度为 $260 \sim 480^\circ\text{C}$,主成矿阶段温度为 $320 \sim 420^\circ\text{C}$;成矿体系的压力为 $(40.9 \sim 76.5)\text{ MPa}$,对应的形成深度为 $1.56 \sim 2.85\text{ km}$ 。

为了确定成矿流体的化学成分,对该矿床5件石英样品的流体包裹体进行了液相和气相成分分析。测试结果表明,该矿床的成矿流体具下述特点:

所有样品均含有 H_2O 和 CO_2 及少量 N_2 ,其 H_2O 含量分别是 CO_2 和 N_2 的 $15 \sim 20$ 倍和 $320 \sim 480$ 倍;

成矿流体以富含 K^+ 和 Na^+ ,贫 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 以及缺失 Li^+ 为特点;所有流体包裹体的 K^+ 含量明显高于 Na^+ , Na^+/K^+ 比值为 $0.48 \sim 0.89$,平均为

① 李国文. 2006. 内蒙古小东沟钼矿床地球化学研究. 加拿大科林斯曼矿业公司地质调查报告.

0.65; 所有流体包裹体的 Cl^- 含量均高于 F^- , Cl^-/F^- 比值为 2.52~4.28, 平均为 3.20, 成矿流体以相对富 Cl^- 为特点。

4.2 硫同位素

采自小东沟钼矿床早期成矿阶段钼矿石(黄铜矿、辉钼矿、石英)的 8 件黄铁矿样品的 ^{34}S 值为 2.8‰~4.2‰, 平均为 3.8‰。主成矿阶段钼矿石(黄铁矿、辉钼矿、黄铜矿、钾长石、石英、绢云母)的 12 件黄铁矿样品的 ^{34}S 值为 3.2‰~4.8‰, 平均为 4.2‰; 8 件辉钼矿样品的 ^{34}S 值为 4.2‰~5.4‰, 平均为 4.6‰。晚期成矿阶段钼矿石(黄铁矿、辉钼矿、石英、绢云母)的 4 件黄铁矿样品的 ^{34}S 值为 -1.6‰~2.8‰, 平均为 1.5‰; 3 件辉钼矿样品的 ^{34}S 值为 3.0‰~4.3‰, 平均为 3.8‰。由上述硫化物样品硫同位素组成的变化特征可见, 早期成矿阶段钼矿石中硫化物(黄铁矿和辉钼矿)的 ^{34}S 值与主成矿阶段钼矿石中硫化物的 ^{34}S 值大体相似, 且略微富集 ^{32}S , 而晚期成矿阶段钼矿石中的硫化物则显示出相对富集 ^{32}S 的趋势。前人的硫同位素研究结果表明, 当岩浆流体与富水花岗岩熔体($^{34}\text{S}_\text{S}=0$)处于平衡状态时, 前者的 ^{34}S 值接近 4.0‰。另外, 典型斑岩型铜或钼矿床主成矿期硫化物的 ^{34}S 值为 2.8‰~4.8‰(Taylor, 1987)。需提及的是, 尽管小东沟钼矿床中硫化物的种类较多, 但迄今尚未在钼矿石中发现任何硫酸盐矿物, 因此可以推测, 成矿流体中的硫以还原形式硫组分占绝对优势。在与中酸性岩浆体系处于平衡状态时, 成矿流体的 ^{34}S 值应该与主成矿阶段辉钼矿样品的硫同位素平均值(4.6‰)相似, 因此, 小东沟钼矿床中的硫很可能来自岩浆流体。

4.3 氧同位素

为了进一步探讨小东沟钼矿床成矿流体的演化历史, 对不同成矿阶段钼矿石中的石英样品进行了氧同位素分析。早期成矿阶段 4 件石英样品的 $^{18}\text{O}_\text{石英}$ 值为 9.5‰~12.6‰, 平均为 10.9‰; 与石英平衡的水的 $^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 4.4‰~6.6‰, 平均为 4.9‰。主成矿阶段 6 件石英样品的 $^{18}\text{O}_\text{石英}$ 值为 9.6‰~13.8‰, 平均为 11.2‰; 与石英平衡的水的 $^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 3.6‰~6.8‰, 平均为 5.3‰。晚期成矿阶段 4 件石英样品的 $^{18}\text{O}_\text{石英}$ 值为 4.6‰~13.4‰, 平均为 7.8‰; 与石英平衡的水的 $^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 -5.6‰~-3.5‰, 平均为 -4.2‰。从不同

成矿阶段石英样品氧同位素组成的变化特点来看, 在该矿床成矿作用的早期阶段和主阶段, 石英样品的氧同位素组成与初生岩浆水的 ^{18}O 值(5‰~7‰)相似, 同时, 还落在金堆城大型钼矿床主成矿阶段石英的 $^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值变化范围内(2.6‰~8.3‰, 黄典豪等, 1987), 由此可推断, 该矿床主要是岩浆热液活动的产物。在该矿床成矿作用的晚期阶段, 由于受变质水(加热的大气降水)混入作用的影响, 成矿流体逐渐变成一种以变质水为主的混源流体。

5 矿床成因讨论

5.1 区域地壳演化与成矿作用

众所周知, 全球范围内许多大型或超大型钼矿床(或矿化集中区)大多沿前寒武纪古陆块体边缘产出, 并且与中、新生代构造-岩浆活动有关, 例如, 北美前寒武纪地台西部边缘的克莱梅克斯、亨德逊、埃蒙斯山和恩达科钼矿床, 中国华北前寒武纪陆台北缘的杨家杖子和兰家沟, 华北前寒武纪陆台南缘的金堆城、石家湾、黄龙铺、南泥湖、三道庄和上房沟(黄典豪等, 1987), 阿拉善前寒武纪地块西北缘的流沙山、白山和花黑滩(聂凤军等, 2002a; 2002b; 2001)。钼矿床的这种时空分布规律表明, 无论是前寒武纪变质岩块体, 还是中、新生代构造-岩浆活动, 均在钼及其他成矿物质的供给-运移-聚集过程中发挥了不可替代的作用, 前者为钼矿床的形成奠定了物质基础, 后者为钼矿床的形成提供了动力、热力和热液来源。

前人的研究结果表明, 小东沟钼矿床及其邻区地处华北陆台北缘西拉木伦河 EW 向深大断裂与嫩江-八里罕和大兴安岭主脊-林西 NE 向深大断裂的交汇部位, 是大兴安岭南段新城子-广兴源钼、铀和钼-铀矿化集中区的重要组成部分(Sun et al., 2001; Wang et al., 2001; 邵济安等, 1999; 赵一鸣等, 1994)。新城子-广兴源矿化集中区呈 NE 向展布, 横跨西拉木伦河深大断裂, 长 110 km, 宽 15~25 km, 分布面积为 2 000 km²。通过近几年的地质调查和普查找矿工作, 已先后在该地域内发现和圈定各类钼、铀和钼-铀矿床(点)26 处, 代表性矿床有小东沟斑岩型钼矿床(中型)、红山子火山岩型钼-铀矿床(铀为大型, 钼为中型)、万合永火山岩型钼矿床(中型)和托河钼-铀矿床(小型)。尽管该矿化集中区内的找矿勘查工作尚在进行中, 但中国北方又一

处大规模钼和铀资源接替基地已初露端倪^①。

新城子-广兴源矿化集中区内出露的地层主要为上二叠统和上侏罗统火山-沉积岩以及海西期和燕山期花岗岩类侵入岩,局部地段见有少量志留纪变质火山-沉积岩(绿片岩)和加里东期花岗岩类侵入岩(内蒙古自治区地质矿产局,1991)。另外,在该区的东南角,零星出露有新生代陆相沉积岩和玄武岩。钼矿化大多在燕山期花岗岩类侵入体内产出,而铀和钼-铀矿化则主要在侏罗纪中酸性火山岩地层内出现,具有一定的成矿专属性。区内,不同规模和展布方向的断裂分布广泛,以近EW向和NE向断裂最为发育,是重要的控岩(矿)构造。部分研究者将上述各类岩(体)层划分为3个构造层,即前中生代变质火山-沉积岩基底,中生代早-中期陆相火山岩盖层,中生代晚期-新生代陆相玄武岩层^②;与之相对应的是3个区域地壳演化阶段,即前中生代变质海相火山-沉积岩基底阶段,中生代早-中期陆相火山岩盖层阶段,中生代晚期-新生代伸展构造阶段(Xiao et al., 2003; 邵济安等, 1999; 王荃等, 1991; Wang et al., 1986)。

古生代时期,新城子-广兴源矿化集中区处于华北陆台、古亚洲洋壳和西伯利亚板块的汇聚带。前中生代基底各构造-地层单元大多经历过中-新元古代、加里东期和海西期构造运动,与之相对应的是华北陆台、古亚洲洋壳和西伯利亚板块之间长时期及多阶段的俯冲、碰撞和对接作用,具体表现形式为广泛分布的古生代火山-沉积岩地层、较为发育的海西期侵入岩体、十分复杂的构造形迹和星罗棋布的金属矿床(点)。古生代末期,随着古亚洲洋的消失,华北陆台与西伯利亚板块“焊接”为一个整体,此后,全区进入一个全新的地壳演化阶段(邵济安等, 1999; 王荃等, 1991; Tang, 1990)。古生代强烈的构造-岩浆作用及相关的热液活动可导致前中生代基底岩(体)层中钼和铀的含量明显增高,局部地段内中酸性火山岩的铀和钼含量分别可达 $(4 \sim 5) \times 10^{-6}$ 和 $(3 \sim 6) \times 10^{-6}$,为后来钼矿床(点)的形成奠定了物质基础^③。自中生代早期开始,受库拉板块与欧亚大陆多期次俯冲消减作用的影响,一系列NE向和NNE向深大断裂叠加在EW向构造之上,从而形成一系列大小不等的菱形断陷盆地。与此同时,该区

的主构造线方向开始从EW向转变为NE向或NNE向(邵济安等, 1999; 内蒙古自治区地质矿产局, 1991)。强烈的中酸性火山喷发作用可沿NE向断裂带或在断陷盆地内形成巨厚的火山-沉积地层,覆盖在前中生代基底构造层之上,上侏罗统满克头鄂博组火山-沉积岩就是此期构造-岩浆活动的产物。另外,在不同方向断裂带的交汇部位,不同形态和规模的花岗岩类侵入体呈星罗棋布,部分岩体与钼矿化带具有密切的空间分布关系。鉴于这些花岗岩类侵入体(含小东沟岩株)大多沿古板块汇聚带分布,其微量元素地球化学特征与同碰撞或火山弧环境内产出的花岗岩相同(图4),暗示其复杂的形成过程。侏罗纪构造-岩浆活动致使钼和铀得到进一步富集,并且形成一系列火山岩型钼-铀矿床(点),其中以侏罗纪中酸性火山岩为容矿围岩的红山子钼-铀矿床、万合永钼-铀矿床和托河钼-铀矿床的产出就是最好的例证。各矿床外围中酸性火山岩中钼和铀的含量分别为 $(6 \sim 10) \times 10^{-6}$ 和 $(4 \sim 8) \times 10^{-6}$,局部地段可构成钼和铀的矿源层或“矿胚”。

5.2 钼矿床的成矿作用

早白垩世时期,库拉板块对欧亚大陆俯冲作用的强度明显减低,并且逐渐消失殆尽。受区域性壳应力大幅度调整作用的影响,小东沟及其邻区的地壳处于构造活动高峰期。受近EW向和NE向深大断裂再次活化的影响,强烈的构造运动可诱发区域热流值的骤然增高。在此前提下,部分先成岩(体)层可通过熔融-同化-储集-均一化(MASH)的机制形成含钼的中酸性岩浆。这种岩浆在其上侵位过程中,一方面,自身可发生结晶分异作用,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,均可导致钼和挥发性组分(H_2O 、F和 CO_2)发生一定程度的富集,并且沿近NS向断裂侵位到上二叠统染房组火山-沉积地层内,在特定构造部位形成小东沟斑状花岗岩株。

关于中酸性岩浆体系中钼的含量,前人的元素地球化学实验结果表明,在水蒸汽相对饱和的钾硅酸盐($K_2Si_2O_5$)熔体中, MoS_2 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,部分研究者认为钼的流体/熔体分配系数为11.5(Isuk et al., 1981; Rybchikov et al., 1981)。

① 核工业二四三大队. 2003. 内蒙古大兴安岭南段火山岩型钼、铀矿成矿地质特征及找矿方向. 大兴安岭地区矿产资源远景研讨会材料之八. 内部资料.

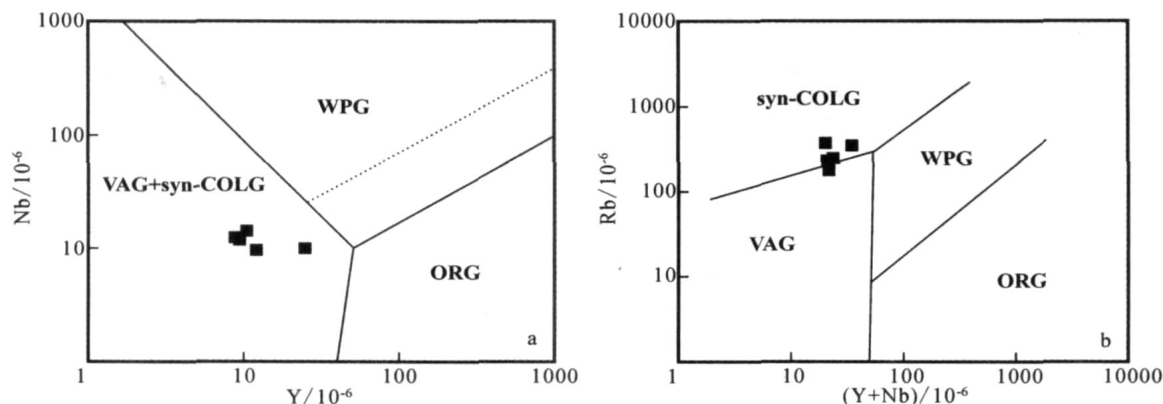


图 4 内蒙古克什克腾旗小东沟斑状黑云母花岗岩全岩样品 Nb 对 Y(a) 和 Rb 对 (Y+Nb) (b) 图解(引自 Pearce et al., 1984)

VAG—火山弧花岗岩; syn-COLG—同碰撞花岗岩; WPG—板内花岗岩; ORG—洋脊花岗岩

Fig. 4 Nb versus Y(a) and Rb versus (Y+Nb) (b) diagrams of representative whole-rock samples from Xiaodonggou porphyritic biotite granitoid stock, Hexigten Banner, Inner Mongolia (after Pearce et al., 1984)

VAG—Volcanic-arc granite; syn-COLG—Syncollision granite; WPG—Intraplate granite; ORG—Ocean ridge granite

无论是酸性熔体中 MoS_2 的溶解度, 还是钼在流体与熔体中的分配系数, 都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 (CO_2 、F、Cl、 H_2O)、 SiO_2 、 K_2O 、W、Mo、U、Cu、Nb 和 Y 等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, 2002a; 2002b; 2001; 赵一鸣等, 1994)。钼的成矿作用是该区中生代构造-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。在中酸性岩浆上侵过程中, 岩浆的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, 该特征尤为明显, 特别是在多期次断裂构造相互叠加的部位(岩体或火山-沉积地层), 这种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, 2002a)。

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。钼矿石的流体包裹体、硫和氧同位素特征大体上与典型的岩浆水相似。钼可与不同类型的阴离子团结合, 并且形成相对稳定的络合物。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。由于此阶段无明显大气降水混入, 因此, 无论是黄铁矿和闪锌矿样品, 还是辉钼矿样品, 其硫同位素比值完全可与世界范围内许多典型的斑岩型铜和钼矿床的硫化物相对比(聂凤军

等, 2002a; Taylor, 1987)。在成矿作用的中期阶段(主成矿期), 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的混合作用, 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的影响, 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, 混合热液流体对小东沟斑状黑云母花岗岩株和火山-沉积地层的交代蚀变作用可导致大量镁铁质矿物的解体, 释放出来的铁、镁、铝、钛、铜、铀和钼, 可与流体中的挥发性组分或其他阴离子团结合, 形成绢云母、绿泥石、黄铁矿、黄铜矿和辉钼矿。花岗岩类侵入体及火山-沉积地层中钾硅酸盐化、云英岩化、硅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下降, 特别是氧逸度的明显增高和 pH 值的大幅度降低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工业价值的钼、铀或钼(铀)矿床(点)。在成矿作用的晚期阶段, 成矿热液体系明显进入低温和低盐度流体演化阶段, 由于在成矿作用的早、中期阶段, 成矿组分已发生析离沉淀, 因此, 成矿流体中的钼已所剩无几, 很难形成具工业价值的钼矿体。至此, 小东沟钼矿床的内生成矿作用已全部结束。由于该矿床的主体隐伏于斑状花岗岩株内, 地表露头极罕见, 因此, 迄今尚未发现钼的次生

富集带。

综上所述,小东沟钼矿床是一处与燕山期花岗岩类侵入体有关的中高温热液矿床,可划属为斑岩型钼矿床。在该矿床的外围,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小东沟花岗岩类侵入体相似,并且存在一大批钼、铀和钨-铀矿化点或异常(带),是钼矿床找矿、勘查的有利地段。

6 结 论

(1)小东沟斑状花岗岩以富硅、碱质、铷、铀和钍,而贫钙、镁、铁、钡、锶、铈、钽和稀土元素为特征,属早白垩世同碰撞构造环境下形成的一种富碱钙-碱性火成岩。

(2)钼矿化大多产在斑状花岗岩株的顶部及其内、外接触带。成矿作用主要由气成-热液、中高温和低温热液阶段构成,以中高温热液阶段为主。与成矿作用有关的热液蚀变依次为硅化、云英岩化和钾化。

(3)流体包裹体研究结果表明,该矿床的形成温度为320~420℃,形成深度为1.56~2.85 km。根据气体包裹体与含子矿物多相包裹体的共存结构关系,同时结合矿石的矿物组合和结构构造,可推断,低 $f(\text{O}_2)$ 和高 $f(\text{S}_2)$ 的成矿体系的“沸腾”效应是导致辉钼矿大量沉淀的主要原因。

(4)硫和氧同位素数据表明,在小东沟钼矿床形成的各个阶段,其成矿流体的变化较大:在气成-热液阶段,成矿流体以岩浆水为主;在中高温热液阶段,为一种以岩浆水为主的混源热液;在低温热液阶段,为一种以加热大气降水为主的混源热液。

致 谢 本项目的野外地质调查及采样工作得到内蒙古兴业集团公司温银维总工程师的支持,以及小东沟钼矿李杰先生和李俊清先生的帮助,谨表衷心感谢。

References

Huang D H, Wu C Y and Nie F J. 1987. Geological features and origin of the Jinduicheng porphyry molybdenum deposit, Shaanxi province [J]. Mineral Deposits, 6(3): 22~34 (in Chinese with English abstract).
Inner Mongolian Bureau of Geology and Mineral Resources. 1991. Regional geology of Inner Mongolian Autonomous Region[M]. Bei-

jing: Geol. Pub. House. 1~725 (in Chinese with English abstract).

Isuk E E and Carman J H. 1981. 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., 76(8): 2222~2235.
Li T and Rao J L. 1963. The average chemical composition of China's magmatic rocks[J]. Acta Geologica Sinica, 43(3): 271~280 (in Chinese with English abstract).
Nie F J, Jiang S H, Zhao X M and Bai D M. 2001. Discovery of two new precious metal deposits in the Meng-Gar-Xin junction (Beishan) region and its geological significance[J]. Acta Geoscientia Sinica, 22(5): 397~402 (in Chinese with English abstract).
Nie F J, Jiang S H, Bai D M, et al. 2002a. Metallogeny and ore prospecting of ore deposits occurring within the conjunction area of Inner Mongolia, Gansu and Xinjiang (Beishan Mt.), northwestern China[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1~499 (in Chinese with English abstract).
Nie F J, Jiang S H, Zhao X M, Bai D M, Liu Y, Zhao M Y, Wang X L and Su X X. 2002b. Geological features and metallogenic type of the Liushashan gold (molybdenum) deposit in Ejinaqi, Western Inner Mongolia[J]. Geology-Geochemistry, 30(1): 1~7 (in Chinese with English abstract).
Nie F J, Zhang W Y, Du A D, Jiang S H and Liu Y. 2007. Re-Os isotopic dating on molybdenite separates from the Xiaodonggou porphyry Mo deposit, Hexigten Qi, Mongolia [J]. Acta Geologica Sinica, 81(7): 898~905 (in Chinese with English abstract).
Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. Journal of Petrology, 25: 956~983.
Ryabchikov I D, et al. 1981. Mobilization of molybdenum by fluids during the crystallization of granite melts[J]. Geochemical Journal, 18(4): 183~186 (in Russian).
Shao J A, Zhang L Q and Mu B L. 1999. Magmatism in the Mesozoic extending orogenic process of Da Hinggan Mts [J]. Earth Science Frontiers, 6(4): 339~346 (in Chinese with English abstract).
Sun S H and Akiyama S I. 2001. Geo-tectonic position of tin polymetallic mineralization zone in the southern Da Hinggan Mountains area, Inner Mongolia, China: A introduction to this special issue[J]. Resource Geology, 51(4): 275~282.
Tang K D. 1990. Tectonic development of the Sino-Korean craton[J]. Tectonics, 9: 249~260.
Taylor B E. 1987. Stable isotope geochemistry of ore-forming fluid[M]. Mineralogical Association of Canada Short Course Handbook. 13: 337~445.
Wang J B, Wang Y W, Wang L J and Uemoto T. 2001. Tin-polymetallic mineralization in the southern part of the Da Hinggan Mountains, China[J]. Resource Geology, 51(4): 283~291.
Wang Q, Liu X Y and Li J Y. 1991. Plate tectonics between Cathaysia and Angaraland in China[M]. Beijing: Peking Univ. Pub. House. 74~91 (in Chinese with English abstract).
Wang Q and Liu X Y. 1986. Paleoplate tectonics between Cathaysia and

- Angaraland in Inner Mongolia of China[J]. Tectonics, 5: 1073 ~ 1088.
- Wang Z G, Yu X Y and Zhao Z H. 1989. Rare earth element geochemistry[M]. Beijing: Science Press. 1 ~ 535 (in Chinese).
- Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. Tectonics, 22 (6): 1 ~ 20.
- Zhao Y M, Wang D W, Zhang D Q, et al. 1994. Geological setting and exploration model for the polymetallic deposits occurring in the southeastern part of Inner Mongolia [M]. Beijing: Seismologic Press. 1 ~ 234 (in Chinese).
- 沙山金(钼)矿床地质特征及矿床类型划分[J]. 地质地球化学, 30 (1): 1 ~ 7.
- 聂凤军, 江思宏, 赵省民, 白大明. 2001. 蒙-甘-新相邻(北山)地区两种新类型贵重金属矿床的发现及其意义[J]. 地球学报, 22 (5): 397 ~ 402.
- 聂凤军, 江思宏, 白大明, 等. 2002a. 北山地区金属矿床成矿规律及找矿方向[M]. 北京: 地质出版社. 1 ~ 499.
- 聂凤军, 江思宏, 赵省民, 白大明, 刘妍, 赵月明, 王新亮, 苏新旭. 2002b. 内蒙古流沙山金(钼)矿床地质特征及矿床类型划分[J]. 地质地球化学, 30 (1): 1 ~ 7.
- 聂凤军, 张万益, 杜安道, 江思宏, 刘妍. 2007. 内蒙古小东沟斑岩型钼矿床钼-钨同位素年龄及地质意义[J]. 地质学报, 81 (7): 898 ~ 905.
- 邵济安, 张履桥, 牟保磊. 1999. 大兴安岭中生代伸展造山过程中的岩浆作用[J]. 地学前缘, 6 (4): 339 ~ 346.
- 王荃, 刘雪亚, 李锦轶. 1991. 中国华夏与安加拉古陆间的板块构造[M]. 北京: 北京大学出版社. 74 ~ 91.
- 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. 1 ~ 535.
- 赵一鸣, 王大畏, 张德全, 等. 1994. 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. 1 ~ 234.

附中文参考文献

- 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.
- 黎彤, 绕纪龙. 1963. 中国岩浆岩的平均化学成分[J]. 地质学报, 43 (3): 271 ~ 280.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古区域地质志[M]. 北京: 地质出版社. 1 ~ 725.