

# 内蒙古小东沟斑岩型钼矿床的成矿时代 及成矿物质来源

覃 锋<sup>1,2</sup>, 刘建明<sup>1</sup>, 曾庆栋<sup>1</sup>, 张瑞斌<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 地质与地球物理研究所 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 小东沟斑岩型钼矿床位于大兴安岭南段, 距北部的西拉木伦河大断裂仅 25 km。对小东沟岩体进行了 Sr-Nd 同位素和铅同位素分析,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$  为 0.705 0 ~ 0.705 5,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  为 -2.4 ~ -2.8; 对主要钼矿体的 6 件辉钼矿样品进行了铼-钨同位素分析, 所获同位素等时线年龄为  $(138.1 \pm 2.8)\text{Ma}$ , 表明小东沟钼矿床形成于早白垩世。铅同位素分析结果表明小东沟斑岩型钼矿床的成岩成矿物质具有不同来源, 成岩物质来自俯冲洋壳衍生的新生地壳物质, 而成矿物质来自地幔分异的产物(流体), 属于壳源岩浆+幔源流体的组合。结合区域构造演化历史, 对小东沟斑岩型钼矿的成因做出如下解释: 在早白垩世, 大兴安岭开始隆升, 岩石圈拆沉, 软流圈(层)物质上涌、基性岩浆的底侵以及地幔流体的加入, 引起下地壳岩石的熔融, 随后更多的地幔含矿流体进入到岩浆房。岩浆携带来自地幔的含矿流体, 沿着区域性的 EW、NE 向深大断裂上侵定位, 并在此过程中演化形成富硅、富钾质的花岗岩, 最后沿近 NS 向的断裂侵位到二叠纪地层中, 沉淀形成矿床。

**关键词:** Sr-Nd 同位素; 铅同位素; 铼-钨同位素; 幔源流体; 小东沟斑岩型钼矿床; 内蒙古

中图分类号: P618.65

文献标识码: A

文章编号: 1000-8527(2008)02-0173-08

## The Metallogenic Epoch and Source of Ore-forming Materials of the Xiaodonggou Porphyry Molybdenum Deposit, Inner Mongolia

QIN Feng<sup>1,2</sup>, LIU Jian-ming<sup>1</sup>, ZENG Qing-dong<sup>1</sup>, ZHANG Rui-bin<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The Xiaodonggou porphyry Mo deposit is located in the southern part of Da Hinggan Mountains, with a distance of 25 km from the Xamoron River huge fault northward. The Sr-Nd isotope and Pb isotope analyses of the Xiaodonggou intrusion show that the value of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$  ranges from 0.705 0 to 0.705 5, and  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  ranges from -2.4 to -2.8. Re-Os isotopic age dating for six molybdenite sampled from the major orebody gives an isochron age of  $(138.1 \pm 2.8)\text{Ma}$ , indicating that this deposit formed in the early Cretaceous. Pb isotope analyses results show that the rock and ore-forming materials of the Xiaodonggou porphyry molybdenum deposit are from different sources. The rock-forming materials are from juvenile crust materials originating from subducted oceanic crust, while the ore-forming materials are from mantle fluid. Considering the tectonic history of this area, we explain the origin of the Xiaodonggou porphyry Mo deposit as following: as the Da Hinggan Mountains began to raise in the early Cretaceous, delamination of the lithosphere, upwelling of the materials from the asthenosphere, undeplating of basic magmas and mantle fluid led the lower crust rocks melting, following with more mantle fluid entering the magma room. Carrying the mantle fluid, magma uplifted along the EW, NE

收稿日期: 2007-12-07; 改回日期: 2008-03-04; 责任编辑: 戚开静。

基金项目: 国家科技部“973 项目(2006CB403507)。

作者简介: 覃 锋, 男, 硕士研究生, 1983 年出生, 矿床学专业, 主要从事矿床成因及矿床地球化学研究工作。

E-mail: qinfeng1983b@sohu.com。

huge fault and evolved into granite rich in silicate and potash, then invaded into the Permian strata and finally precipitated into Mo deposit

**Key words:** Sr-Nd isotope; Pb isotope; Re-Os isotope; mantle fluid; Xiaodonggou porphyry molybdenum deposit; Inner Mongolia

## 1 概述

小东沟斑岩型钼矿床位于内蒙古克什克腾旗广兴元镇,距北部的西拉木伦河大断裂 25 km (图 1),处于大兴安岭南段北坡近主脊部位。这一地区通常被认为是华北地台向北增生的早古生代增生造山带(兴蒙造山带的一部分),以西拉木伦缝合带为其增生边界;晚中生代受到大兴安岭隆起作用强烈的叠加和改造,更多显示后者的痕迹。

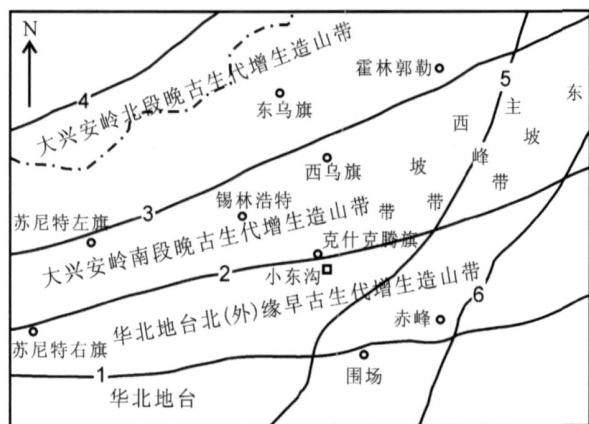


图 1 内蒙古克什克腾旗小东沟钼矿床构造位置示意图  
(底图据任纪舜等<sup>[2]</sup>简化修改)

Fig. 1 Simplified geological map showing the tectonic locality of the Xiaodonggou porphyry Mo deposit, Hexigten Qi, Inner Mongolia

1. 华北地台北缘断裂; 2. 西拉木伦河断裂; 3. 二连-贺根山断裂; 4. 乌努尔郭勒春断裂; 5. 大兴安岭主脊断裂; 6. 嫩江断裂

大兴安岭南段发育与俯冲洋壳衍生的新生地壳部分熔融有关的正  $Nd(t)$  值花岗岩,显示有大量的地幔物质参与成岩过程,并在其中发现与花岗岩有关的铜、铅、锌、锡等多金属矿床,其成矿物质具有地幔来源特征,但是地幔来源的成矿物质如何与地壳熔融形成的花岗岩混合仍然有待研究。罗照华等<sup>[1]</sup>在阐述透岩浆流体成矿理论时将底侵的幔源岩浆及位于壳幔边界的流体设想成是成矿流体的补给源。依此推论,成矿、成岩物质则应该具有不同的来源,具有不同的同位素系统。这与先成岩(体)层通过熔融—同化—储集—均一化(MASH)的机制形成的成岩、成矿体系是不

同的。本文对小东沟钼矿床进行了 Re-Os 同位素定年以探讨其成矿年代,通过对岩体中钾长石、硫化物的铅同位素分析以探讨其成岩、成矿物质是否同源。把小东沟斑岩型钼矿床的成矿作用研究同整个大兴安岭的深部过程研究紧密地结合起来,有助于探讨成矿作用的地球动力学背景。

## 2 区域地质特征

小东沟钼矿床位于内蒙古克什克腾旗经棚镇东南约 30 km 处,该矿是原辽宁省第二区域地质测量队在 1:20 万区测时发现的,2005 年华北地质勘查总院燕郊综合勘查院对该矿进行了详查,基本查明和掌握了矿体的赋存状态和成矿规律,认为该矿为中型斑岩钼矿床。

区域出露地层主要为上二叠统铁家营子组和染房地组以及上侏罗统满克头鄂博组火山—沉积岩和第四系冲洪积物(图 2)。铁家营子组分布于矿区西部,约占矿区面积的 1/2,岩性以变粗安岩为主,其次为变安山岩、变英安岩及火山角砾岩、流纹质凝灰熔岩等;染房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%,以变安山岩及变安山质凝灰熔岩为主,安山玢岩仅见于底部;上侏罗统满克头鄂博组地层在矿区内出现不多,零星分布在矿区的东南角,自上而下为霏细斑岩、流纹质凝灰角砾岩和变凝灰质砂岩。

小东沟岩体呈岩株状侵位于上二叠统染房地组火山—沉积岩地层中,地表出露面积为 0.22 km<sup>2</sup>。据物探资料推断并经钻探证实,岩体向南、西南、东南方向侧伏。其中东、西两侧产状较陡,南侧产状较缓。由于混染作用,在岩体边缘局部地段出现细粒黑云母花岗岩,甚至出现与围岩呈渐变关系的黑云母花岗质混染岩、混染角岩化安山岩等。除了小东沟岩体外,矿区还出现有长英质岩脉、石英斑岩脉和正长斑岩脉等岩浆岩。

从构造形迹上看,上二叠统和上侏罗统火山—沉积岩地层中各种产出规模和不同展布方向的褶曲构造十分明显。小东沟背斜是矿区最重要的控

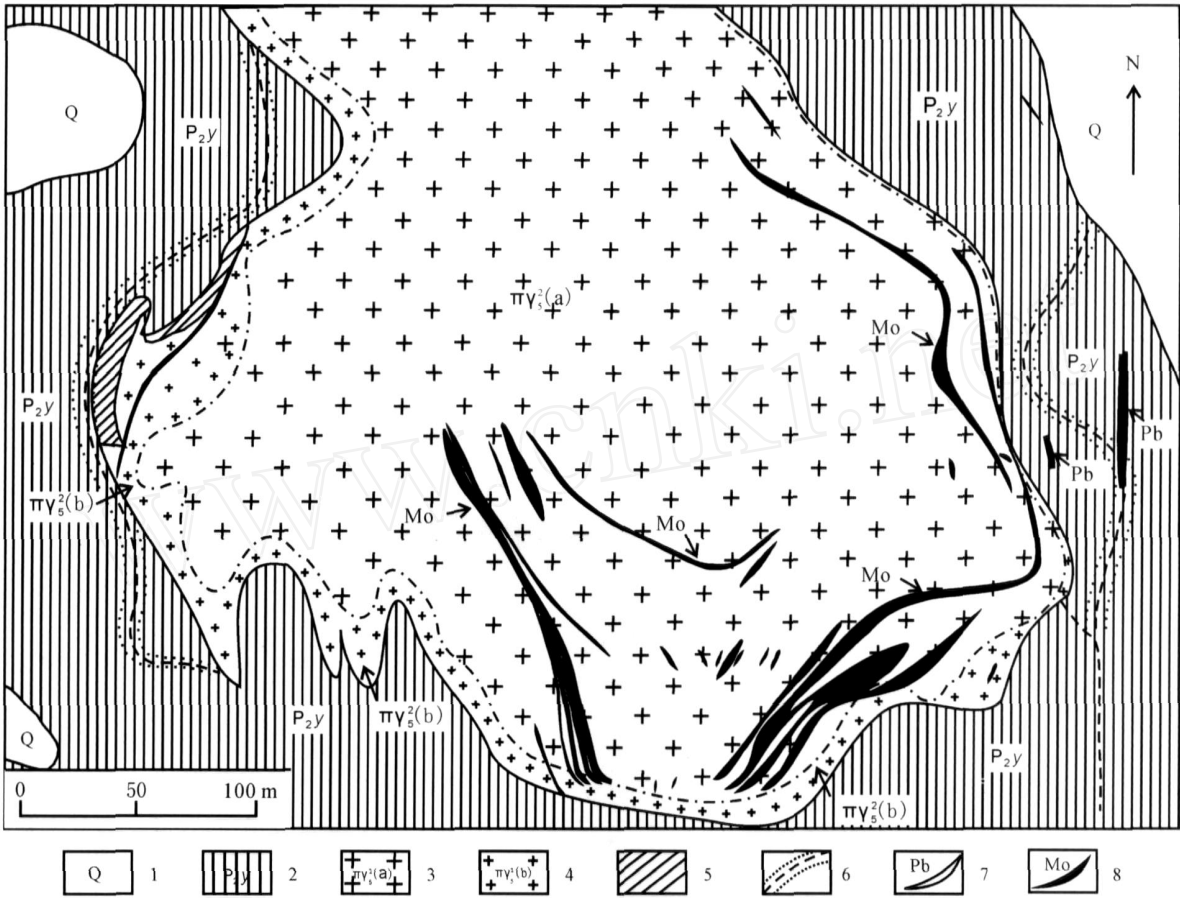


图 2 内蒙古克什克腾旗小东沟钼矿床地质略图

Fig. 2 Simplified geological map of Xiaodonggou porphyry Mo deposit, Hexigten Qi, Inner Mongolia

1. 第四系；2. 上二叠统染房地组；3. 小东沟岩体中心相；4. 小东沟岩体边缘相；5. 黑云母花岗质混染岩；6. 黑云母角岩化带；7. 铅、锌矿体；8. 钼矿体

矿容矿构造，其与北西向断层交汇处即是小东沟岩株的产出部位。此外，断裂破碎带分布也非常广泛，其中以 NW 向和近 NS 向正断层最为发育<sup>[2-3]</sup>。NNW 向断裂带则是矿区外围铅锌矿最重要的控矿容矿构造，以节理、裂隙、破碎带发育为特征；NWW 向断裂构造为成矿后构造，也是节理裂隙密集带，对矿体无明显的破坏作用。

3 小东沟岩体的地质地球化学特征

小东沟岩体从中心到边部大体可划分为中心相和边缘相 (图 2)，前者为斑状花岗岩，后者为细粒花岗岩，二者呈渐变过渡关系。中心相斑状花岗岩是小东沟岩株的主体，代表性全岩样品呈浅肉红色，为中—粗粒和似斑状结构，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 2~3 mm，占全岩矿物含量的 35%~40%；基质矿物有钾长石、

斜长石、石英和黑云母，粒径变化范围为 0.1~0.5 mm，含量为 55%~60%；副矿物有磷灰石、锆石、榍石、磁铁矿和褐帘石。相比之下，边缘相的细粒花岗岩环绕岩株分布，宽数米至数十米，厚几米至十几米，向深部有变薄以至消失的现象。代表性细粒花岗岩样品呈灰黄—灰白色，为似斑状结构、细粒花岗结构，呈块状构造。具斑状结构的岩体其斑晶含量为 5%~10%，成分为钾长石、斜长石和石英，粒径变化范围为 1~2 mm；基质主要为钾长石，含量为 35%~45%，斜长石含量为 20%~25%，石英含量为 30%~35%，黑云母含量为 1%~3%，粒径变化范围为 0.1~0.2 mm；副矿物有锆石、磷灰石、榍石和褐帘石。尽管中心相斑状花岗岩与边缘相细粒花岗岩在结构构造上存在有一定的差别，但是二者的主要元素含量和特征比值十分接近，不存在明显差别。

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

3.1 主量元素

结合前人的测试数据和作者采集样品分析的结果(表 1),小东沟岩体全岩样品共 40件,  $SiO_2$  含量为 74.62% ~ 75.56%, 平均值为 75.14%; 富碱,  $w(K_2O + Na_2O)$  为 8.7% ~ 8.83%, 平均值为 8.74%;  $w(K_2O)/w(Na_2O)$  值为 1.29 ~ 1.77, 平均值为 1.37%; 贫钙,  $CaO$  含量为 0.28% ~ 0.75%, 平均值为 0.45%;  $Mg-Fe$  组分相对较贫。全岩样品主元素以相对富硅和碱质组分尤其是富钾为特征, 这与我国的东秦岭钼矿带容矿花岗岩和北美 Handerson-Climax 钼矿带容矿花岗岩是一致的。高碱含量可以显著降低熔体的固相线温度<sup>[4]</sup>, 实验证明钼在接近固相线温度的含水碱-硅质熔体中是高度溶解的, 在合适的条件下, 岩浆中的钼浓集在岩浆晚期形成的含水富碱残余熔体中<sup>[5-6]</sup>。

3.2 Sr、Nd 同位素

由于未蚀变的样品较少, 所以只对 2 件小东沟岩体的新鲜样品进行了  $Rb-Sr-Sm-Nd$  同位素组成测定。实验在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素实验室进行, 相关实验参数据周新华等<sup>[7]</sup>。考虑到钼矿体与小东沟岩体的空间分布

关系, 小东沟岩体并未显示岩浆多次侵位的现象, 可能只有一期岩浆作用, 而辉钼矿呈稠密或稀疏浸染状分布在花岗岩中, 推测辉钼矿的形成略晚于花岗岩浆冷却的时间。因此用辉钼矿铷-钕年龄求  $Sr-Nd$  同位素的初始值, 将小东沟斑岩型钼矿床中辉钼矿的铷-钕定年结果 (138.1 Ma) 带入, 求得  $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$  值为 0.705 0 ~ 0.705 5,  $_{Nd}(t)$  值为 -2.4 ~ -2.8 (表 2)。

大兴安岭南段广泛出露从晚古生代—晚中生代正  $_{Nd}(t)$  值的花岗质侵入体, 认为与俯冲洋壳衍生的新生地壳熔融有关<sup>[8]</sup>。此外也出现  $_{Nd}(t)$  值微负的中—酸性岩浆岩, 推测是受到古老地壳物质的混染所致。例如西拉木伦河断裂和赤峰—开原断裂之间的中生代火山岩, 具有 EM I-EM 过渡特征的  $Sr-Nd$  同位素组成 (图 3), 认为 EM I 特征是受到华北克拉通岩石圈组分的混染, 而 EM 特征则是受到古消减带物质活化的影响<sup>[7]</sup>。

小东沟岩体的位置非常靠近西拉木伦河断裂, 处于过渡区内 (图 3),  $_{Nd}(t)$  值微负, 显示具有 EM-EM I 过渡的特征, 以 EM 为主; 因此, 认为小东沟岩体的母岩浆可能是由古亚洲洋俯冲洋壳转化形成的下地壳物质部分熔融形成, 并且有华北

表 1 小东沟岩体代表性样品主量元素成分 ( $w_B/\%$ )  
Table 1 Major elements analyses of representative whole-rock from the Xiaodonggou intrusion (%)

样品	$SiO_2$	$TO_2$	$Al_2O_3$	$TFeO$	$MgO$	$MnO$	$CaO$	$Na_2O$	$K_2O$	$P_2O_5$	总量
XDG-121	74.89	0.15	13.46	0.73	0.20	0.03	0.71	3.57	5.26	0.03	99.53
XDG-122	74.73	0.19	13.38	1.20	0.22	0.04	0.75	3.62	5.20	0.03	99.68
XDG-1	75.29	0.20	12.59	1.42	0.11	0.03	0.56	3.39	5.39	0.03	99.58
XDG-2	75.77	0.16	12.63	1.13	0.08	0.04	0.58	3.52	5.37	0.02	99.75
XDG-3	75.44	0.13	11.88	3.64	0	0.04	0.28	3.10	5.48	0.03	100.02
XDG-4	75.12	0.16	12.35	2.89	0.01	0.06	0.45	3.78	4.97	0.03	99.82
XDG-5	74.62	0.14	12.48	2.90	0.02	0.05	0.75	3.80	4.90	0.02	99.68
XDG-6	75.56	0.19	12.23	2.86	0	0.07	0.18	3.76	5.03	0.04	99.92

注: 实验在中国科学院地质与地球物理研究所进行, 使用 XRF 测试, XDG-121、XDG-122 为斑状花岗岩; XDG-1、XDG-2 为聂凤军等于 2007 年测试; XDG-3—XDG-6 由天津华北地质勘查总院燕郊综合勘查院中心实验室测定。

表 2 小东沟岩体  $Rb-Sr-Sm-Nd$  同位素测定结果及主要参数  
Table 2 The  $Rb-Sr-Sm-Nd$  isotope determination data and some major parameters of the Xiaodonggou intrusion

样品	岩石名称	$w(Rb)/10^{-6}$	$w(Sr)/10^{-6}$	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr \pm 2$	$^{87}Sr/^{86}Sr(t)$	$_{Sr}(t)$	$t/Ma$
XDG-121	斑状花岗岩	244.57	104.2	6.797 4	0.718 310 $\pm 14$	0.704 957	8.8	138.1
XDG-122	斑状花岗岩	239.30	114.4	6.057 8	0.717 400 $\pm 14$	0.705 500	16.5	138.1
样品	岩石名称	$w(Sm)/10^{-6}$	$w(Nd)/10^{-6}$	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd \pm 2$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	$_{Nd}(t)$	$t/Ma$
XDG-121	斑状花岗岩	1.45	6.59	0.133 0	0.512 455 + 90	0.512 335	-2.4	138.1
XDG-122	斑状花岗岩	2.15	10.28	0.126 6	0.512 433 + 12	0.512 318	-2.8	138.1

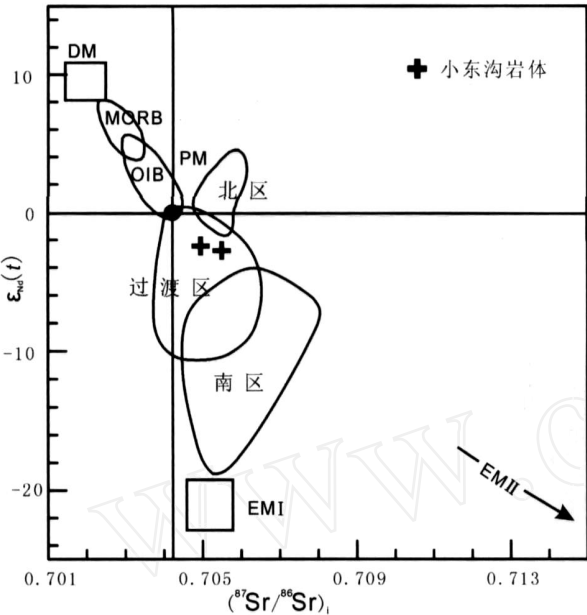


图 3 小东沟岩体与华北克拉通北缘晚中生代火山岩 Sr-Nd 同位素组成对比 (底图据周新华等<sup>[71]</sup>)

Fig. 3 Comparison of Sr-Nd isotope compositions between Xiaodonggou intrusion and Late Mesozoic volcanic rocks across northern margin of North China craton  
注：北区为西拉木伦河断裂以北区域火山岩样品；过渡区为西拉木伦河断裂和赤峰—开原断裂之间区域火山岩样品；南区为赤峰—开原断裂以南、华北克拉通内部区域火山岩样品

地台古老岩石圈组分的贡献。同时，小东沟钼矿床处于热液非常发育的成矿系统，推测可能是一个开放的系统，热液的性质应对寄主岩的地球化学特征有重要影响；所以，从小东沟岩体的 Sr-Nd 同位素组成较接近 PM 来看，可能有地幔物质（流

体）的直接加入，这在后文的铅同位素分析中得到了证实。

4 钼矿体的地质特征

钼矿化主要产于小东沟岩体内部，受岩体及其接触带形态控制，与岩体的钾长石化—绢云母化蚀变关系密切。在岩体顶部和边部的钾长石化—绢云母化蚀变带内，钼矿化主要呈浸染状产出，矿化均匀，分布较集中，矿化连续性较好，形成似层状矿体，其规模较大（图 4）；随着钾长石化—绢云母化蚀变向深部的减弱，钼矿化强度亦随之减弱，主要表现为矿化不均匀、连续性较差，矿体形态多为透镜状、不规则状，其规模较小。

迄今为止，共发现和圈定了各种形态和不同规模的钼矿体（化）15 条。具有工业价值的矿体有 6 条，其单个矿体长度变化范围为 750 ~ 800 m，平均值为 450 m；厚度为 0.9 ~ 25.2 m，平均值为 5.78 m；倾斜延深为 350 ~ 520 m，平均值为 390 m。代表性钼矿石样品中的钼含量为 0.06% ~ 0.25%，平均值为 0.109%。

5 辉钼矿的铼 - 钨同位素组成

5.1 样品的采集与处理

用于铼 - 钨同位素年龄测定的 6 件辉钼矿样品分别采自 号矿体（图 4）中心地段的不同部位。辉钼矿呈稠密或稀疏浸染状分布在花岗岩中，局部地段与黄铁矿呈共生结构关系，采样地段均未见

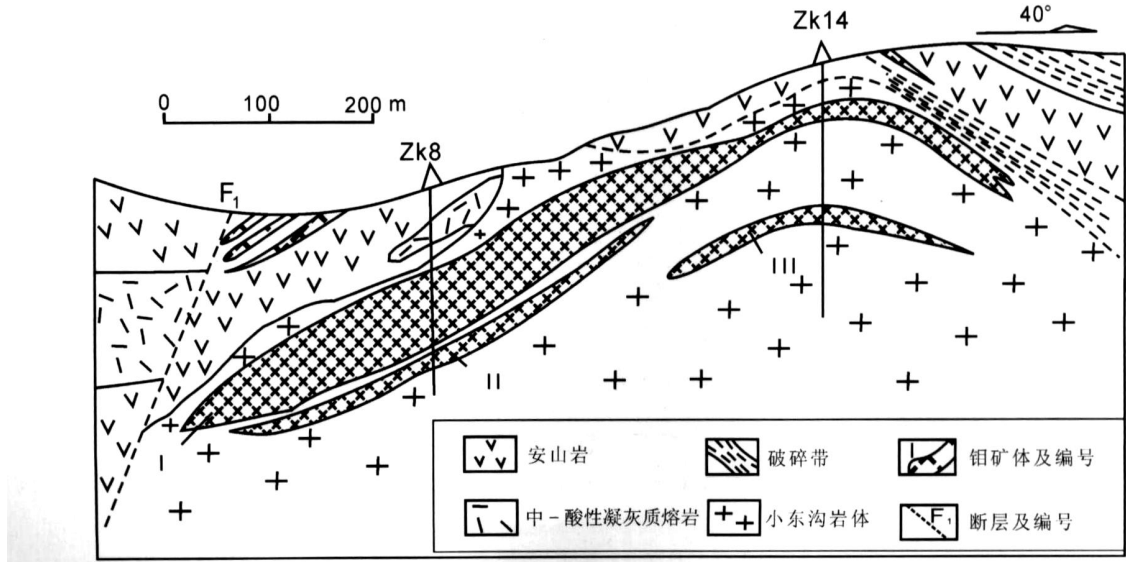


图 4 小东沟钼矿床代表性地质勘探剖面 (据吕增尧等<sup>[91]</sup>)

Fig. 4 Geologic section of the Xiaodonggou molybdenum deposit

有强烈构造变形和热液蚀变现象。辉钼矿样品是采用特制工具直接从手标本上获取的，并且在双目镜下进行了仔细检查，每件辉钼矿样品的纯度(体积分数)均大于 98%。

辉钼矿样品的铼 - 钨同位素分析是在国家地质实验测试中心铼 - 钨同位素年代学实验室完成的，样品的化学处理流程和质谱测定技术据杜安道等<sup>[10-11]</sup>。

5.2 钼矿体的成矿时代

小东沟钼矿床 号矿体 6 件辉钼矿样品铼 - 钨同位素分析数据及其特征值列于表 3。在<sup>187</sup>Os - <sup>187</sup>Re图(图 5)中，所有 6 件辉钼矿样品分析数据均接近排列在一条直线上，相关系数大于 0.995。该直线对应的等时线年龄值为(138.1 ± 2.8)Ma，MSWD 值为 0.81，<sup>187</sup>Os初始值为 - 0.04 ± 0.02。一般来讲，判别同位素等时线年龄是否具有地质意义的重要依据有 3 条，即所测样品是否同时期形成；所测样品是否具有同样物质来源；同位素体系是否处于封闭状态。本次用于铼 - 钨同位素年代学研究的辉钼矿样品具有以下特点：(1) 6 件辉钼矿样品均采自 号矿体中心地段；(2) 辉钼矿呈稠密或稀疏浸染状分布在花岗岩中，或多或少均有黄铁矿伴生；(3) 所获铼 - 钨同位素模式年龄值变化范围较小(136.5 ~ 138.4 Ma，平均值为 137.6 Ma)；(4) 样品所在地段未见强烈变形和热液蚀变现象。因此认为本次用于铼 - 钨同位素定年的样品基本可以满足判别同位素等时线年龄的条件。

表 3 小东沟钼矿床辉钼矿铼 - 钨同位素测定结果  
Table 3 Re-Os isotope analyses of molybdenite separated from the Xiaodonggou porphyry Mo deposit

样品	质量 /g	<sup>187</sup> Re ± 2 / (ng/g)	<sup>187</sup> Os ± 2 / (ng/g)	模式年龄 /Ma
XDGH - 1	0.100 13	838 2 ±66	12.00 ±0.09	136.5 ±1.8
XDGH - 2	0.100 10	455 8 ±49	6.55 ±0.05	137.1 ±2.1
XDGH - 10	0.100 06	763 5 ±60	11.05 ±0.09	138.0 ±1.9
XDGH - 18	0.100 09	841 8 ±84	12.21 ±0.09	138.4 ±2.0
XDGH - 19	0.100 18	752 8 ±68	10.91 ±0.09	138.2 ±2.0
XDGH - 21	0.100 49	600 5 ±63	8.66 ±0.08	137.5 ±2.2

可将小东沟钼矿的 Re-Os同位素等时线(138.1 ± 2.8)Ma看作辉钼矿从含矿流体中沉淀与富集的时间，推测钼矿体的形成略晚于小东沟岩体的形成；因此，无论是斑岩型钼矿床，还是斑状花岗岩或细粒花岗岩，它们的形成时间均为白垩纪早期，属燕山

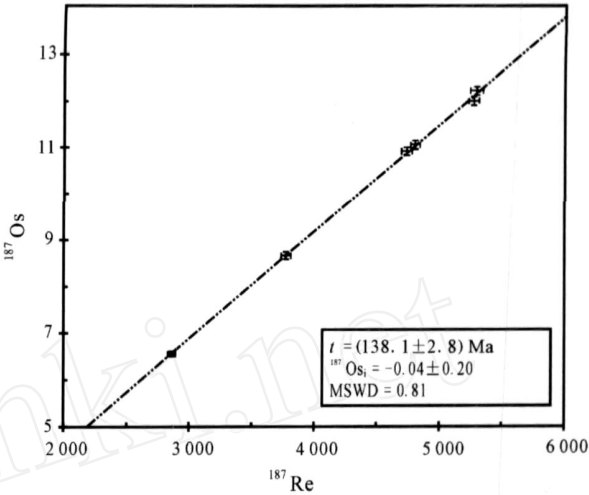


图 5 小东沟钼矿床中辉钼矿的铼 - 钨同位素等时线图  
Fig.5 Re-Os isotope isochron diagram of molybdenite in the Xiaodonggou molybdenum deposit

中期中—酸性岩浆及相关热液上侵定位的产物。

6 普通铅同位素特征

对小东沟钼矿床中的 4 个辉钼矿样品(取自 I 号矿体中心地段)、1 个黄铁矿样品(取自晚期的黄铁绢英岩脉)、2 个上二叠统安山岩围岩样品和 1 个主岩钾长石样品(从未蚀变的新鲜花岗岩样品中挑出)共 8 个样品进行了普通铅同位素分析，实验在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素实验室进行。

结果显示所有样品的铅同位素数据可分为 2 组(表 4，图 6)。一组包括 4 个辉钼矿样品，具有相似的铅同位素组成，<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 比值为 17.88 ~ 17.98，<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 值为 15.47 ~ 15.49，<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 比值为 37.89 ~ 37.99；另一组为黄铁矿、上二叠统安山岩围岩和岩体钾长石样品，<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 比值为 17.95 ~ 18.10，<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 的比值为 15.56 ~ 15.61，<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 比值为 38.19 ~ 38.43。2 组样品的单阶段模式年龄、μ 值、ε 值都不同(图 6(b))。第一组模式年龄为 349 ~ 395 Ma，μ 值为 9.27 ~ 9.31，ε 值为 35.98 ~ 36.32；第二组模式年龄为 406 ~ 459 Ma，μ 值为 9.43 ~ 9.52，ε 值为 37.44 ~ 38.34。

钾长石的铅同位素比值可以代表岩石的初始值，用来确定花岗岩岩石的起源<sup>[10-13]</sup>。根据二者不同的铅同位素组成，认为小东沟岩体和辉钼矿的源区不同，即成岩、成矿物质来自 2 个不同的源区，2 个源区的衍生物发生了混合。二叠纪安山岩围岩与辉钼矿中铅同位素组成的不同说明成矿物质也不可能萃取自岩体的围岩。此外，黄铁矿的

表 4 小东沟钼矿床中矿石、钾长石及围岩的铅同位素组成  
Table 4 Lead isotope composition of ores, potash feldspar and wall rock in the Xiaodonggou Mo deposit

样品	岩石或矿物	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	模式年龄 /Ma	μ	Th/U	Th/U
XDGH - 24	辉钼矿	17.916 99	15.491 31	37.977 93	393	9.31	36.32	3.78
XDGH - 32	辉钼矿	17.934 22	15.490 51	37.965 59	380	9.30	36.16	3.76
XDGH - 19	辉钼矿	17.977 00	15.490 81	37.987 87	349	9.30	36.02	3.75
XDGH - 27	辉钼矿	17.879 93	15.470 86	37.893 13	395	9.27	35.98	3.76
qf - 6	黄铁矿	17.948 85	15.565 71	38.209 66	459	9.45	37.85	3.88
qf - 11	安山岩	18.008 16	15.576 44	38.253 02	429	9.46	37.79	3.87
qf - 12	安山岩	17.990 52	15.557 39	38.189 89	419	9.43	37.44	3.84
XDG - 121	钾长石	18.097 62	15.611 44	38.425 74	406	9.52	38.34	3.90

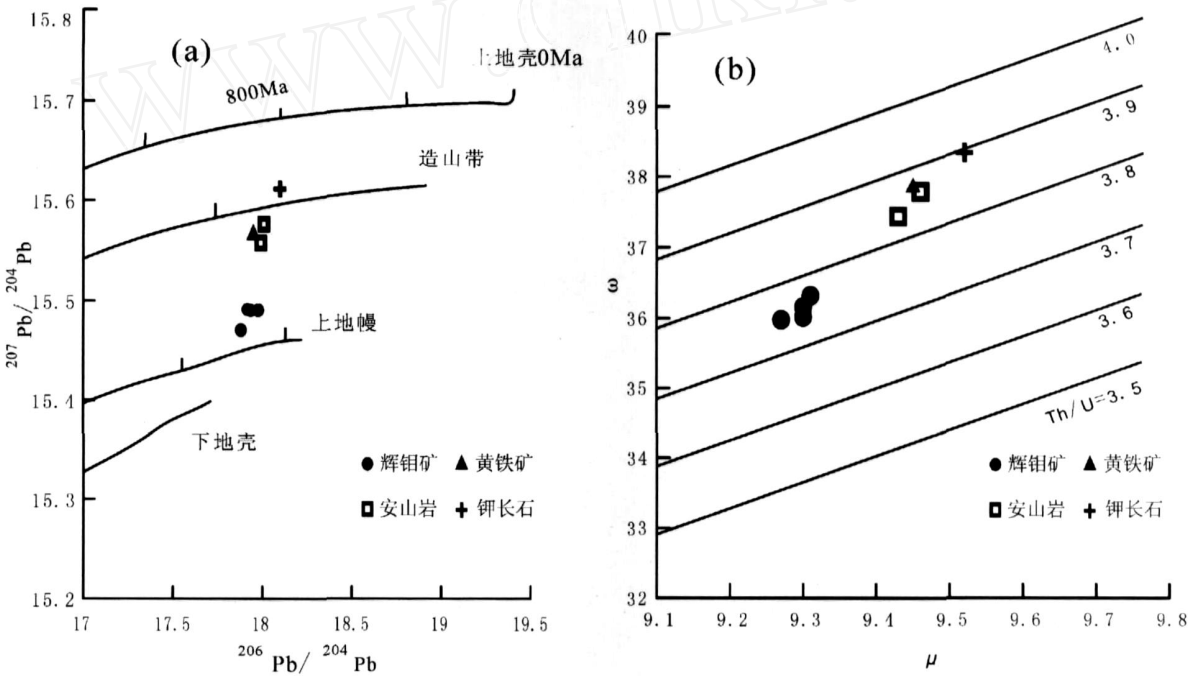


图 6 小东沟钼矿床矿石和围岩 <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb - <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 及特征参数图解

Fig. 6 <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb - <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb diagram of ores, potash feldspar and wall rock in the Xiaodonggou Mo deposit and diagram of special parameters

铅同位素与小东沟岩体、安山岩的铅同位素较相似，说明可能来自岩浆或者围岩。

在 <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb - <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 图解中 (图 6(a))，第一组样品值位于地幔演化线附近，表明辉钼矿的成矿物质可能来源于地幔。第二组样品值则落在造山带演化线附近，指示可能与前中生代位于深部地壳的造山带物质有关。依据 Sr-Nd 同位素组成特征，小东沟岩体的成岩物质应为古亚洲洋俯冲的洋壳转化形成的下地壳物质熔融形成，而成矿流体则来自地幔。

7 讨论及结论

7.1 成岩、成矿物质的异源性

铅同位素组成显示小东沟斑岩型钼矿床的成

岩、成矿物质具有不同的源区。辉钼矿的成矿物质来源于地幔，而小东沟岩体的成岩物质则来自俯冲洋壳衍生的新生地壳物质熔融。

可以提供地幔物质的源区有地幔直接分异的产物、玄武岩底侵转化成的下地壳以及俯冲洋壳衍生的新生地壳。由于小东沟钼矿床的构造位置靠近华北地台北缘，如果成矿物质来自玄武岩底侵转化成的下地壳或俯冲洋壳衍生的新生地壳，那么在析出、转移的过程中必然会受到华北地台古老克拉通物质的影响，应该具有和小东沟岩体相似的铅同位素组成，二者显示出同源性；因此将成矿物质来源解释为地幔分异的产物 (流体) 更合理，小东沟钼矿床的成岩成矿物质属于壳源岩浆 + 幔源成矿流体的组合。

## 7.2 成矿时代的地质意义

毛景文等<sup>[14]</sup>提出在华北克拉通和大兴安岭南段,中生代金属矿床大规模成矿作用有 200 ~ 160 Ma、140 Ma、120 Ma左右三大期次。通过对小东沟斑岩型钼矿床辉钼矿样品的铼-钨同位素测定,其成矿年代为 $(138.1 \pm 2.8)\text{Ma}$ ,可划归为 140 Ma这一大成矿期,而该成矿期对应的是 140 Ma左右南北主应力场向东、西主应力场构造体制大转折。邵济安等<sup>[15]</sup>指出大兴安岭在早白垩世开始整体隆升,处于伸展的构造环境。伸展环境为岩石圈的拆沉和软流圈(层)物质上涌提供条件,导致基性岩浆的底侵,引发下地壳岩石的熔融,同时部分熔融的地幔物质能够参与花岗岩和火山岩的形成过程。小东沟钼矿床矿石和岩体铅同位素所显示出的异源性较好地反映了这一过程。

结合小东沟钼矿床的成矿年代背景,成矿、成岩物质的异源性,以及小东沟岩体的构造位置和岩石学特点,可对其形成过程做出如下解释:在早白垩世伸展作用的构造背景下,受区域性地壳应力大幅度调整的影响,小东沟及其邻区的地壳处于构造活动高峰期,EW向和NE向深大断裂再次活化。基性岩浆底侵、软流圈上涌和地幔流体的加入促使下地壳岩石发生熔融,随后有更多地幔的含矿流体进入岩浆房形成壳源岩浆+幔源成矿流体组合。岩浆携带来自地幔的含矿流体沿着区域性的EW、NE向深大断裂上侵定位,并在此过程中分异演化形成富硅、富钾质的花岗岩,最后沿近NS向断裂侵位到二叠纪地层中,沉淀形成矿床。

致谢:感谢审稿人对本文提出的宝贵意见,感谢中国科学院地质与地球物理研究所、岩石圈演化国家重点实验室裘翼和王秀丽分别给本文进行SrNd、Pb同位素分析测试。在野外工作过程中得到小东沟钼矿床赵广金等技术人员的大力支持,在此表示衷心的感谢!

## 参考文献:

- [1] 罗照华,莫宣学,卢欣祥. 透岩浆流体成矿作用——理论分析与野外证据 [J]. 地学前缘, 2007, 14(3): 165 - 183.
- [2] 任纪舜,牛宝贵,刘志刚. 软碰撞、叠覆造山和多旋回缝合作用 [J]. 地学前缘, 1999, 6(3): 85 - 93.
- [3] 聂凤军,张万益,杜安道,等. 内蒙古小东沟斑岩型钼矿床辉钼矿铼-钨同位素年龄及地质意义 [J]. 地质学报, 2007, 81(7): 898 - 905.
- [4] Glyuk D S, Anfiligov V N. Phase equilibria in the system granite-H<sub>2</sub>O-HF at a pressure of 1 000 kg/cm<sup>2</sup> [J]. Geochemistry International, 1974, 1973: 321 - 325.
- [5] Stempirok M. Geological significance of immiscibility in fused silicate systems containing tungsten and molybdenum [J]. International Geology Review, 1974, 17(11): 1306 - 1315.
- [6] Isuk E E. Solubility of molybdenite in the system Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-MoS<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> with geologic application [D]. Iowa: University of Iowa, 1976.
- [7] 周新华,张国辉,杨进辉,等. 华北克拉通北缘晚中生代火山岩 SrNd-Pb同位素填图及其构造意义 [J]. 地球化学, 2001, 30(1): 10 - 23.
- [8] 洪大卫,王式光,谢锡林,等. 兴蒙造山带正  $Nd(t)$ 值花岗岩的成因和大陆生长 [J]. 地学前缘, 2000, 7(2): 441 - 456.
- [9] 吕增尧,赵英福. 内蒙古小东沟钼多金属矿床地质特征 [J]. 矿产与地质, 2004, 18(3): 256 - 259.
- [10] 杜安道,何红蓼,殷宁万,等. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究 [J]. 地质学报, 1994, 68(4): 339 - 347.
- [11] 杜安道,赵敦敏,王淑贤,等. Garius管溶样和负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼-钨同位素地质年龄 [J]. 岩矿测试, 2001, 20(4): 247 - 252.
- [12] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992.
- [13] 万天丰. 古生代与三叠纪中国各陆块在全球古大陆再造中的位置与运动学特征 [J]. 现代地质, 2007, 21(1): 1 - 13.
- [14] 毛景文,张作衡,余金杰,等. 华北中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示 [J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(4): 289 - 300.
- [15] 邵济安,张履桥,肖庆辉,等. 中生代大兴安岭的隆起——一种可能的陆内造山机制 [J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 789 - 794.