



编号: 0258-7106(2010)06-1043-11

# 内蒙古西沙德盖钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义\*

侯万荣<sup>1,2</sup>, 聂凤军<sup>1</sup>, 杜安道<sup>3</sup>, 李超<sup>3</sup>, 江思宏<sup>1</sup>, 白大明<sup>1</sup>, 刘妍<sup>1</sup>

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 武警黄金第一总队, 黑龙江 哈尔滨 150086;  
3 国家地质实验测试中心, 北京 100037)

**摘要** 西沙德盖钼矿床是近年来在内蒙古中西部地区找到的一处中型钼矿床。钼矿化在西沙德盖斑状钾长花岗岩株及其与太古界乌拉山群变质岩接触带内呈浸染状和脉状产出, 并且构成透镜状矿体。本次研究过程中, 对9件代表性辉钼矿样品进行了 Re-Os 同位素年龄测定, Re-Os 同位素模式年龄值变化范围为 222.4~226.3 Ma, 等时线年龄为  $(226.4 \pm 3.3)$  Ma, 与赋矿围岩花岗斑岩的成岩年龄一致, 由此认为西沙德盖钼矿床与斑状钾长花岗岩的形成时间均为晚三叠世, 属印支晚期构造-岩浆活动的产物。结合矿区外围其他钼矿床同位素年龄数据, 可以推测, 内蒙古中西部大规模钼矿化发生的时间为印支晚期。古大陆内部张裂构造作用所诱发的岩浆活动是导致钼矿床形成的主导因素。

**关键词** 地质学; Re-Os 同位素; 辉钼矿; 成矿年龄; 西沙德盖钼矿床; 内蒙古  
**中图分类号**: P618.65 **文献标志码**: A

## Re-Os isotopic dating of molybdenite from Xishadegai molybdenum deposit in Urad Front Banner of Inner Mongolia and its geological significance

HOU WanRong<sup>1,2</sup>, NIE FengJun<sup>1</sup>, DU AnDao<sup>3</sup>, LI Chao<sup>3</sup>, JIANG SiHong<sup>1</sup>, BAI DaMing<sup>1</sup> and LIU Yan<sup>1</sup>  
(1 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 No. 1 Gold General Party of CAPF, Harbin 150086, Heilongjiang, China; 3 National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037, China)

### Abstract

Located in the western section of the northern margin of the North China Plate, the Xishadegai ore deposit is a newly discovered Mo deposit. Molybdenum mineralization occurs within the Xishade porphyritic K-feldspar granite stock or along its contact zone with Archean metamorphic rocks of the Ulashan Group. Ore bodies consist of veins, veinlets and disseminated blocks. Re-Os dating of nine molybdenite samples collected from the main ore body shows that the isochron age is  $(226.4 \pm 3.3)$  Ma and the model ages range from 222.4 Ma to 226.3 Ma with an average value of  $(225 \pm 1)$  Ma, consistent with the age of the ore-bearing wall rock K-feldspar porphyritic granite. It can thus be considered that the K-feldspar porphyritic granite and the molybdenum deposit were both formed in Late Triassic, and that magmatism and mineralization took place in late Indosinian period in the northern margin of the North China Block. In consideration of other isotopic age data from the molybdenum deposits in adjacent areas, it can be inferred that the large-scale molybdenum mineralization in the central and western regions of Inner Mongolia occurring during the late Indosinian. magmatic activity induced by internal

\* 本文得到国家重点自然科学基金项目(编号: 41030421)、危机矿山接替资源找矿项目(编号: 20089948)和地质调查项目(编号: 1212010911029)共同资助

第一作者简介 侯万荣, 男, 1968年生, 高级工程师, 在读博士, 从事矿产勘查及矿床地质研究。Email: wwanrong\_01@sina.com

收稿日期 2010-03-31; 改回日期 2010-07-06。张绮玲编辑。

tectonic extension of paleo-continent plates seems to have been the dominant factor responsible for the formation of the molybdenum deposit.

**Key words:** geology, Re-Os isotope, molybdenite, ore-forming age, Xishadegai molybdenum deposit, Inner Mongolia

西沙德盖钼矿床是内蒙古第五地勘院近年来发现的一处中型钼矿床,位于内蒙古乌拉特前旗沙德盖苏木境内,南距哈达门沟大型金矿 20 km,中心地理坐标为:东经 109°25′47″,北纬 40°47′12″。

矿区地质调查和找矿勘查工作始于 20 世纪 80 年代。1985 年,内蒙古第一物化探队开展 1:20 万余太幅区域化探扫面时,圈定出一大批金、钼、铅、锌和银异常,并提交了相应的成果报告;1987 年,内蒙古第一物化探队对余太幅 1:20 万化探圈定的西沙德盖钼、铅、锌、银、钨、锡组合异常开展 1:5 万水系沉积物测量,结果发现钼异常重现性好,强度较高,浓集中心明显;1988~1989 年,内蒙古第五地勘院在大桦背岩体以北,乌落托沟-巴勒代沟一带进行以金为主的找矿工作,开展了系统的野外地质调查及 1:1 万地质填图工作,在钼异常浓集区 1.3 km<sup>2</sup> 范围内系统采集了土壤样品,圈定了 2 条钼异常带,并在这 2 条异常带上选择 3 个高峰区进行了探槽揭露,发现钼矿化体走向与土壤测量异常走向吻合较好;2002~2005 年,对已圈定的土壤异常带进行系统的钻(坑、槽)探工作,先后发现和圈定 13 条钼矿(化)体<sup>①</sup>,进一步确定了其工业意义。

由于矿床发现时间较短,较全面的研究工作较少,为了查明该矿床的产出环境、控矿因素和形成机理,本文首次对代表性钼矿石中的辉钼矿进行了 Re-Os 同位素年龄测定,确定了该矿床的成矿年龄,并结合区域成矿环境,探讨了该矿床的成矿背景,以期为该钼矿床的找矿勘查提供理论依据。

## 1 成矿地质环境

西沙德盖钼矿床地处华北地台北缘西段内蒙古地轴中部阴山隆起带西端的乌拉山地区,区内出露的地层主要有太古界乌拉山群、古元古界二道洼群和中元古界马家店群,其中太古界乌拉山群主要为黑云斜长片麻岩、斜长角闪片麻岩、斜长角闪岩、混合岩化片麻岩和变粒岩等。区内褶皱和断裂构造发

育,乌拉山复背斜呈东西向展布,由乌拉山群变质岩构成,核部为混合岩,翼部为片麻岩,区内深大断裂纵横交错,主要断裂有近东西向的乌(拉特前旗)包(头)呼(和浩特)深大断裂、临(河)-集(宁)深大断裂和北西向的土(默特左旗)-固(阳)深大断裂,其中的乌-包-呼和临-集两条深大断裂控制着区内岩浆岩及金属矿床(点)的分布(图 1)。矿区内 F<sub>1</sub> 和 F<sub>2</sub> 为控矿的主要断裂,钼矿体主要赋存在这 2 条断裂之间, F<sub>1</sub> 分布在太古界乌拉山群片麻岩与印支期花岗斑岩岩体接触带上,位于矿区西北边界,长 1 000 m 左右,走向 NE,倾向 320°左右,倾角 60°左右,为逆断层。F<sub>2</sub> 位于 F<sub>1</sub> 断裂南 500 m 左右的岩体内部,为矿化体的南部边界,长约 900 m,走向 NWW-EW-NEE 向,呈向南突出的弧形,总体倾向 30°左右,倾角 80°左右。F<sub>2</sub> 和 F<sub>1</sub> 向西延伸复合交汇,两者之间形成了构造脆弱带,为矿液运移和储存提供了空间(图 2)。区内岩浆岩比较发育,主要岩石类型有花岗岩、钾长花岗斑岩、石英闪长岩、花岗闪长岩等,脉岩主要有花岗斑岩脉、伟晶岩脉、辉绿岩脉等。形成时代分别为元古代早期、加里东期、海西期和印支期,其中印支期岩体与钼矿床具有密切的空间分布关系。迄今为止,研究区内先后发现和圈定各类金属矿床(点)几十处,其中代表性金矿床有哈达门沟、柳坝沟、后石花、东伙房和十八顷壕,钼矿床有大苏计、西沙德盖等(图 1)。

## 2 矿床地质特征

### 2.1 含矿岩体岩石特征

西沙德盖岩株形态呈不规则状,出露面积约 7.5 km<sup>2</sup>,侵位于乌拉山群变质岩中(图 1),主要由中细粒斑状钾长花岗岩和中粗粒似斑状钾长花岗岩所组成。其中边部的中细粒斑状钾长花岗岩矿化蚀变较弱,可见轻度硅化,斜长石部分绢云母化、钾长石化。颜色为肉红色,斑状结构,块状构造,斑晶由粒径 1~0.8 mm 左右的钾长石、石英组成,基质成分由粒径在

① 内蒙古自治区第五地质矿产勘查开发院, 2005. 内蒙古自治区乌拉特前旗西沙德盖钼矿详查地质报告, 1-35.

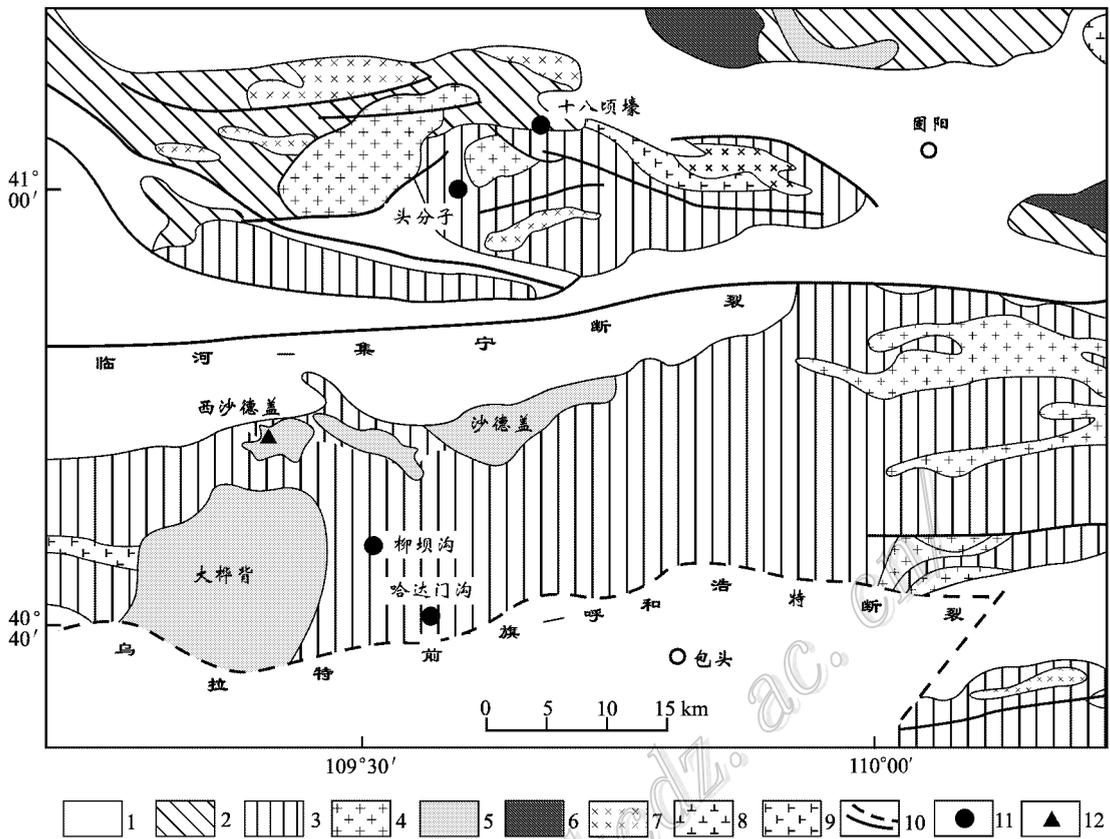


图 1 内蒙古西沙德盖区域地质简图(根据中国人民武装警察部队黄金指挥部,1995 资料改编)

1—中-新生代陆相沉积岩;2—元古宇色尔腾山群和渣尔泰群变质岩;3—太古宇乌拉山群变质岩;4—燕山期花岗岩;5—印支-海西期花岗岩;6—加里东期花岗岩;7—元古宙花岗岩;8—印支-海西期闪长岩;9—元古宙闪长岩;10—断层及推断层;11—金矿床;12—钼矿床

Fig. 1 Simplified geological map of the Xishadegai region (modified after the gold Headquarters of the CPAF, 1995)  
1—Mesozoic-Cenozoic continental sedimentary rocks; 2—Proterozoic metamorphic rock of Seertengshan and Zhaertai Groups; 3—Archaean metamorphic rock of Wulashan Group; 4—Yanshanian granite; 5—Indosinian-Hercynian granite; 6—Caledonian granite; 7—Proterozoic granite; 8—Indosinian-Hercynian diorite; 9—Proterozoic diorite; 10—Fault and inferred fault; 11—Gold deposit; 12—Molybdenum deposit

0.1 mm 左右的半自形-他形钾长石、石英、白云母组成。中心部位的中粗粒似斑状花岗岩为主要赋矿部位,可见强烈的云英岩化、硅化、钾化以及钠长石化、高岭土化、黄铁绢英岩化等。颜色为肉红色,斑状结构,块状构造。斑晶呈半自形-他形,由 2~4 mm 粒径的钾长石、石英组成,基质由 0.5 mm 左右粒径的钾长石、斜长石、石英、黑云母及白云母组成。

### 2.2 矿体地质特征

矿区内出露的地层主要为太古界乌拉山群,岩浆岩为西沙德盖斑状花岗岩株,侵入于太古界片麻岩中。钼矿体赋存在斑状花岗岩株内及其与片麻岩的接触带中。在岩株内的钼矿体主要位于西沙德盖斑状钾长花岗岩体内的云英岩化蚀变带中,矿体呈网脉状-脉状、似层状、浸染状,矿体与围岩没有严格界线,主要由品位来圈定,矿体规模大,品位高,是西

沙德盖钼矿的主体。产于西沙德盖斑状花岗岩与片麻岩接触带内、外带的钼矿(化)体,受构造控制,呈薄层状,品位较低。目前区内共圈出钼矿体 6 条,矿化体 7 条,其中①号和⑥号矿体以产出规模大和矿石品位高为特点。①号矿体规模最大,形态复杂,呈复脉状、透镜状和囊状产出,地表 P12 线以西为一条矿脉,向东在 P13 线分支为 3 条,在深部 P12 线分支为 4 条, P13 和 P14 线分支为 5 条,分支矿脉总体呈北东东走向,向北西或北倾斜,倾角 65~80°,矿体地表出露长 600 m,厚度变化较大,分支矿脉厚度变化范围为 2~66 m,矿体中心部位最大真厚度 108 m,倾斜延深 375 m,  $\alpha(Mo)$  变化在 0.06%~0.43% 之间,平均值为 0.087%。⑥号矿体呈脉状,可见分支复合现象,地表为两条平行矿体,向深部合为一条,走向 80°,倾向 350°,倾角近直立,矿体长度 100 m,

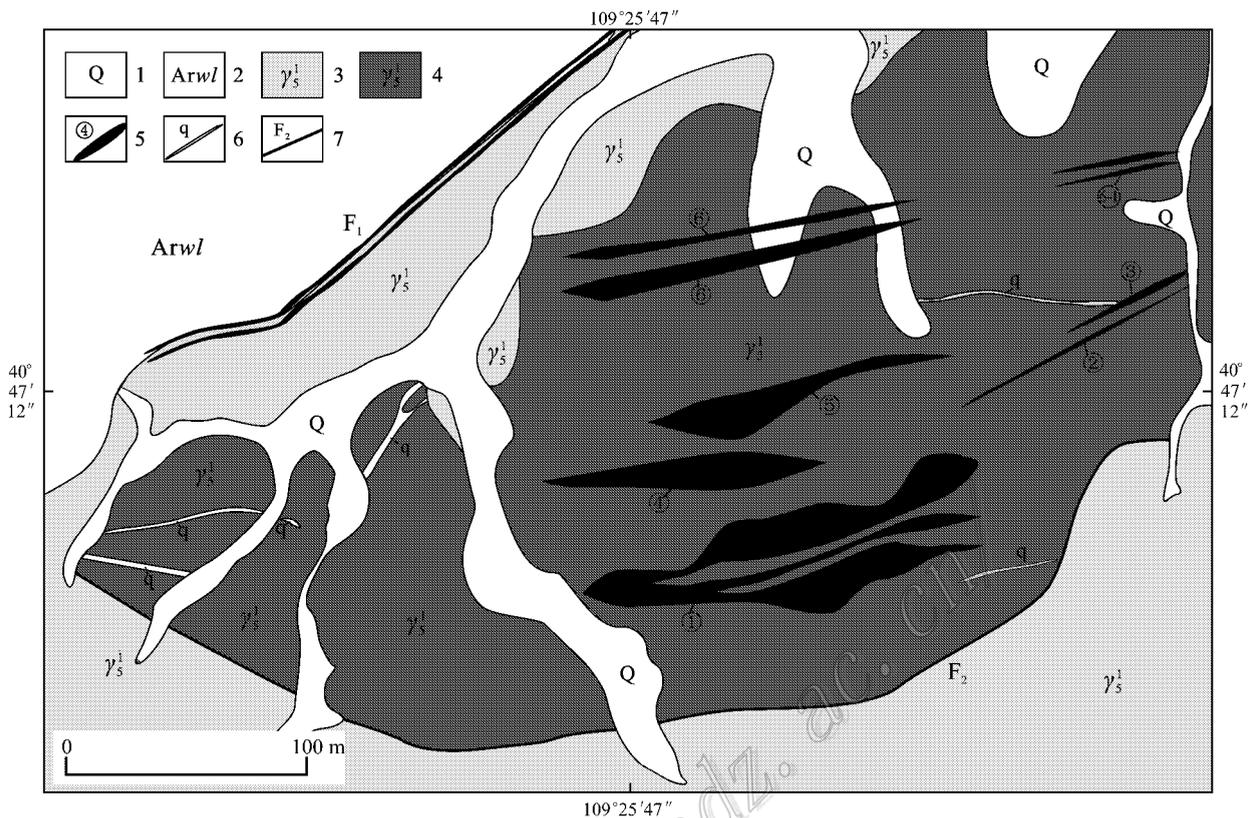


图2 西沙德盖钼矿床地质图(据内蒙古第五地质勘查院资料改编)

1—第四系;2—太古界乌拉山群;3—边缘相中细粒斑状钾长花岗岩;4—中心相中粗粒似斑状钾长花岗岩;5—钼矿体及编号;6—石英脉

Fig. 2 Sketch geological map of the Xishadegai Mo deposit (modified after No. 5 Geological Party of Inner Mongolia)

1—Quaternary; 2—Archean Wulashan Group; 3—Marginal phase medium-fine grained porphyritic K-feldspar granite; 4—Central phase medium-coarse grained porphyritic K-feldspar granite; 5—Mo body and its serial number; 6—Quartz vein

厚度2~35 m, 倾斜延深200 m,  $w(\text{Mo})$ 为0.024%~0.126%, 平均值为0.107%<sup>①</sup>(图2)。根据矿物组合, 可将钼矿石划分为3种类型: 石英脉型、蚀变岩型和氧化矿石(图3)。蚀变岩型钼矿石进一步可分为钾硅化蚀变岩型和云英岩型2种。石英脉型钼矿石(图3a)的矿物成分为: 石英占95%, 绢云母、钾长石占3%~5%, 辉钼矿1%~2%。钾硅化蚀变岩型钼矿石(图3b)的矿物成分中, 石英含量(质量分数, 下同) $\geq 70\%$ , 钾长石20%~25%, 黑云母1%~2%, 白云母1%~2%, 辉钼矿1%~2%, 还有少量黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿等, 可见石英为基底包含钾长石晶体, 被石英包含的钾长石晶体部分呈自形板状, 部分呈半自形-他形板状, 辉钼矿呈叶片状或集合体与白云母紧密共生。云英岩型钼矿石(图3c)的主要矿物成分为: 白云母15%~20%, 石英 $\geq 50\%$ ,

钾长石20%~25%, 金属矿物有辉钼矿(2%~3%), 还有黄铁矿、磁铁矿等。矿化与云英岩化作用可能同时进行, 黄铁矿、辉钼矿与白云母紧密共生。氧化矿石(图3d)呈灰黄-黄褐色, 主要分布于地表及以下20 m左右范围内。

围岩蚀变主要为云英岩化、硅化、钾长石化, 其次是钠长石化、高岭土化等。矿石矿物主要有黄铁矿、辉钼矿、磁黄铁矿、磁铁矿、赤铁矿、钼钨钙矿、钼酸铅矿及钼化等, 脉石矿物主要有石英、钾长石、斜长石、白云母、高岭石、萤石等。矿石中的辉钼矿以细小片状、薄膜状、网脉状及脉状的形式充填于花岗岩斑岩节理裂隙或呈浸染状散布于花岗斑岩中。辉钼矿多数粒度很小, 少量呈微鳞片状、叶片状集合体产出, 粒径在镜下为0.003~0.01 mm, 集合体可达0.2 mm, 局部肉眼可见2~3 mm的辉钼矿。矿石结构主

① 内蒙古自治区第五地质矿产勘查开发院, 2005. 内蒙古自治区乌拉特前旗西沙德盖钼矿详查地质报告. 1-35. 内部资料.

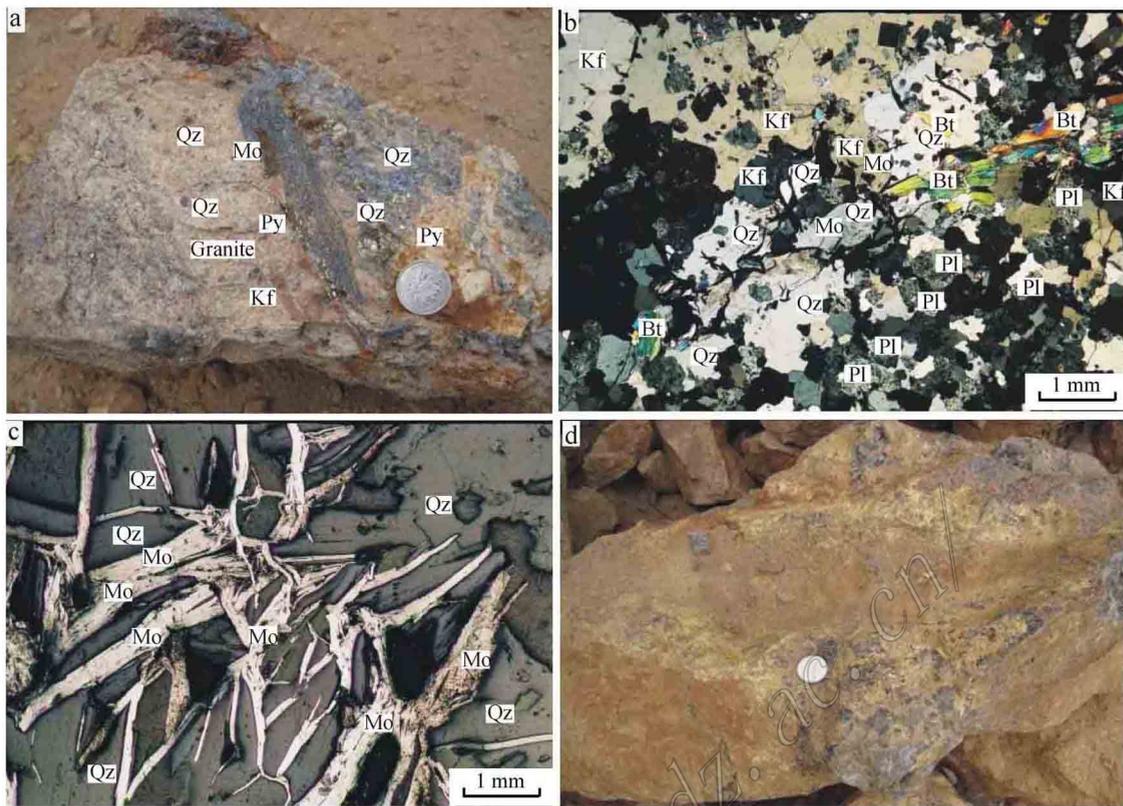


图3 西沙德盖钼矿石标本及显微镜下照片

a. 石英细脉网脉状钼矿化; b. 钾硅化蚀变岩型钼矿石(正交偏光); c. 云英岩型钼矿石(反光); d. 氧化钼矿石

Fig. 3 Photos of Xishadegai molybdenum ore and molybdenite under microscope

a. Quartz veinlet-stockwork type molybdenum mineralization; b. Quartz-rich alkali feldspar type molybdenum mineralization; c. Greisen type molybdenum mineralization; d. Oxidized molybdenum ore

要为自形、半自形结构和交代结构。矿石构造以细脉状、网脉状为主,少量为浸染状、蜂窝状构造。根据野外调查和镜下观察该矿床矿石的物质成分、矿物组合、矿石结构和构造以及矿物的相互穿插关系,将矿化过程大体划分为岩浆-热液期和表生期;岩浆-热液期又分为岩浆气化热液阶段、钾硅化蚀变阶段、石英-白云母-多金属硫化物阶段和石英-碳酸盐阶段。岩浆气化热液阶段可见辉钼矿呈浸染状、稀疏浸染状、星点状在花岗斑岩中分布,偶见萤石化等;钾硅化热液蚀变阶段可见先期形成的钾长石被石英包裹,矿化可见少量黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿和辉钼矿等;石英-白云母-多金属硫化物阶段为主要成矿阶段,可见烟灰色透明石英呈脉状、网脉状沿早期形成的岩(矿)石穿插,伴随着强烈金属矿化,可见黄铁矿、辉钼矿与白云母、石英网脉紧密共生;石英-碳酸盐阶段可见乳白色石英脉和方解石细脉沿早阶段石英脉穿插、包裹早阶段矿化角砾,偶见铁白云石脉穿插早阶段的石英脉。表生期(氧化阶段)主要是原生

矿石出露地表经受氧化作用,可见矿石呈灰黄-黄褐色,主要矿物有褐铁矿、针铁矿、赤铁矿、钼钨钙矿、钼酸铅矿、钼化以及高岭石等,偶见孔雀石等。

### 3 辉钼矿 Re-Os 同位素年龄测定

#### 3.1 样品的采集与处理

本次研究工作从西沙德盖钼矿床代表性矿体①号和⑥号中心地段不同部位共采集9件矿石样品。样品主要为钾硅化热液蚀变阶段和石英-白云母-多金属硫化物阶段的产物,矿石类型主要为钾硅化蚀变岩型钼矿石和云英岩型钼矿石,在矿石中可见辉钼矿与黄铁矿、白云母、石英细脉、网脉紧密共生。辉钼矿呈浸染状、薄膜状、细粒状,细脉状。在室内,将野外采集的矿石样品采用特制工具直接从手标本上获取辉钼矿,并且在显微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%,主要挑选浸染状辉钼矿,并将其放置于玛瑙钵里进行研

磨,使其粒度 $<0.05\text{ mm}$ ,最后对处理好的辉钼矿样品进行 Re-Os 同位素分析。

### 3.2 分析方法

辉钼矿样品的铼-钨同位素分析在国家地质实验室测试中心铼-钨同位素年代学实验室完成。样品的化学处理流程和质谱测定技术简述如下(Du et al., 2004; 杜安道等, 2009; 2001; 1994; 屈文俊等, 2009, 2003) 准确称取待分析样品,通过细颈漏斗加入到 Carius 管底部。缓慢加液氮到有半杯乙醇的保温杯中,使成粘稠状( $-50\sim-80^{\circ}\text{C}$ )。将装好样品的 Carius 管放到该保温杯中。用适量超纯浓 HCl 通过细颈漏斗把准确称取的 $^{185}\text{Re}$ 和 $^{190}\text{Os}$ 混合稀释剂转入 Carius 管底部。再依次加入 2 mL 10 mol/L HCl, 4 mL 16 mol/L  $\text{HNO}_3$  和 1 mL 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$ , 一定要注意一种试剂冻实后再加另一种试剂。当 Carius 管底溶液冻实后,用液化石油气和氧气火焰加热封好 Carius 管的细颈部分。擦净表面残存的乙醇,放入不锈钢套管内。轻轻放套管入鼓风机烘箱内,待回到室温后,逐渐升温到 $200^{\circ}\text{C}$ ,保温 24 h。取出,冷却后在底部冻实的情况下,先用细强火焰烧熔 Carius 管细管部分一点,使内部压力得以释放。再用玻璃刀划痕,并用烧热的玻璃棒烫裂划痕部分。

将待打开的 Carius 管放在冰水浴中回温使内容物完全融化,用约 20 mL 水将管中溶液转入蒸馏瓶中。把内装 5 mL 超纯水的 25 mL 比色管放在冰水浴中,以备吸收蒸馏出的  $\text{OsO}_4$ 。连接蒸馏装置,加热煮沸 30 min。所得  $\text{OsO}_4$  水吸收液可直接用于 ICP-MS 测定 Os 同位素比值。将蒸馏残液转入 150 mL Teflon 烧杯中待分离铼。

将蒸馏残液置于电热板上,加热近干。加少量水,加热近干。重复两次以降低酸度。加入 10 mL 5 mol/L NaOH,稍微加热,促进样品转为碱性介质。转入 Teflon 离心管中,加入 10 mL 丙酮,振荡 1 min 萃取 Re。离心后,用滴管直接取上层丙酮相到 150 mL 已加有 2 mL 水的 Teflon 烧杯中,在电热板上 $50^{\circ}\text{C}$ 加热除去丙酮,然后电热板温度升至 $120^{\circ}\text{C}$ 加热至干,加数滴浓硝酸和 30% 过氧化氢,加热蒸干以除去残存的  $\text{Os}$ 。用数滴  $\text{HNO}_3$  溶解残渣,用水转移到小瓶中,稀释到适当体积,备 ICP-MS 测定 Re 同位素比值。

质谱测定采用美国 TJA 公司生产的电感耦合等离子体质谱仪 TJA X-series ICP-MS 测定同位素比值。对于 Re 选择质量数 185、187,用 190 监测  $\text{Os}$ 。对于 Os 选择质量数为 186、187、188、189、190、192。用 185 监测 Re。

### 3.3 数据处理及结果

经实验室测试分析,分别得出 Re、Os、 $^{187}\text{Re}$ 、 $^{187}\text{Os}$  的含量,普 Os 是根据原子量表(Wieser, 2006) 和同位素丰度表(Bohlkea et al., 2005),通过 $^{192}\text{Os}/^{190}\text{Os}$  测量比计算得出,Re、Os 含量的不确定度包括样品和稀释剂的称量误差、稀释剂的标定误差、质谱测量的分馏校正误差、待分析样品同位素比值测量误差,置信水平 95%。模式年龄的不确定度还包括衰变常数的不确定度(1.02%),置信水平 95%。在此基础上根据公式计算出模式年龄值(表 1)。其中 $\lambda(^{187}\text{Re} \text{ 衰变常数}) = 1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Smoliar et al., 1996)。模式年龄公式为:

$$t = \frac{1}{\lambda} \left[ \text{In} \left( 1 + \frac{^{187}\text{Os}}{^{187}\text{Re}} \right) \right]$$

表 1 内蒙古西沙德盖钼矿床辉钼矿铼-钨同位素测定结果

Table 1 Re-Os isotopic analyses of molybdenite separates from the Xishadegai molybdenum deposit, Inner Mongolia

样号	m/g	Re/ $\mu\text{g/g}$		普 Os/ng/g		$^{187}\text{Re}/\mu\text{g/g}$		$^{187}\text{Os}/\text{ng/g}$		模式年龄/Ma	
		测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
XSD4	0.05062	11.08	0.10	0.0375	0.0289	6.965	0.061	25.87	0.21	222.5	3.2
XSD1	0.03055	12.67	0.10	0.0140	0.0222	7.961	0.065	29.56	0.24	222.4	3.1
XSD2	0.05005	17.69	0.13	0.0260	0.0200	11.12	0.08	41.76	0.37	225.0	3.2
XSD3	0.05072	17.35	0.13	0.0262	0.0336	10.91	0.08	41.14	0.34	226.0	3.1
XSD5	0.05020	11.26	0.08	0.0519	0.0395	7.077	0.053	26.73	0.25	226.3	3.3
XSD9	0.05030	21.12	0.17	0.0068	0.0230	13.27	0.11	49.94	0.42	225.4	3.2
XSD11	0.05140	17.88	0.14	0.0700	0.0386	11.24	0.09	42.36	0.37	225.8	3.2
XSD13	0.04993	23.84	0.21	0.0767	0.0182	14.99	0.13	56.00	0.45	223.9	3.2
XSD14	0.08042	20.43	0.19	0.0207	0.0127	12.84	0.12	48.20	0.41	224.8	3.4

最后,所获铼-钨同位素分析数据采用 Isoplot 软件作等时线和加权平均值(Ludwig,1999)年龄图,得到铼-钨同位素等时线(图 4)和加权平均值年龄(图 5)。从表 1 可见,西沙德盖钼矿床的辉钼矿的  $\alpha(\text{Re})$  为  $11.08 \sim 23.84 \mu\text{g/g}$ ,  $\alpha(^{187}\text{Re})$  为  $6.965 \sim 14.99 \mu\text{g/g}$ ,  $\alpha(^{187}\text{Os})$  为  $25.87 \sim 56.00 \text{ ng/g}$ 。成矿模式年龄为  $(222.4 \pm 3.1) \sim (226.3 \pm 3.3) \text{ Ma}$ , 模式年龄加权平均值为  $(225 \pm 1) \text{ Ma}$ , 等时线年龄为  $(226.4 \pm 3.3) \text{ Ma}$ 。

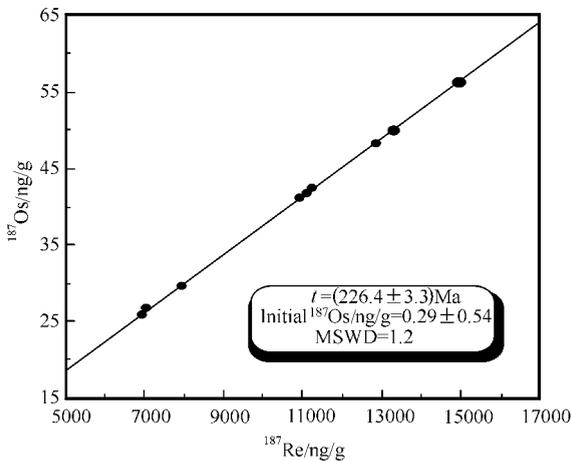


图 4 西沙德盖钼矿床中辉钼矿  $\text{Re-Os}$  同位素等时线图

Fig. 4  $\text{Re-Os}$  isotopic isochron diagram of molybdenite separates from the Xishadegai molybdenum deposit, Inner Mongolia

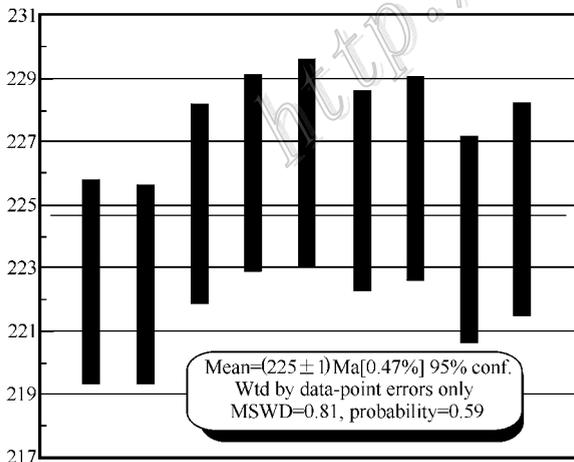


图 5 西沙德盖钼矿床中辉钼矿  $\text{Re-Os}$  模式年龄加权平均值

Fig. 5  $\text{Re-Os}$  weighted mean model age diagram of molybdenite separates from the Xishadegai molybdenum deposit, Inner Mongolia

## 4 讨论

### 4.1 成矿时代

西沙德盖钼矿床 9 件辉钼矿样品的  $\text{Re-Os}$  同位素模式年龄值变化范围为  $222.4 \sim 226.3 \text{ Ma}$ , 平均值为  $(225 \pm 1) \text{ Ma}$ , 采用 Isoplot 软件(Ludwig,1999)所获辉钼矿  $\text{Re-Os}$  同位素等时线年龄为  $(226.4 \pm 3.3) \text{ Ma}$ ,  $\text{MSWD}$  值为 1.2, 模式年龄与等时线年龄的一致性表明,所获数据的可信度较高。表明钼成矿时代为三叠纪,这与笔者对西沙德盖斑状花岗岩锆石测定的 LA-ICP-MS  $\text{U-Pb}$  谐和年龄  $(222.9 \pm 0.82) \text{ Ma}$  基本一致(另文发表),因此,钼矿床成矿作用与岩浆活动发生的时间均为印支晚期。野外地质调查和室内研究结果表明,西沙德盖钼矿床外围钼和金(钼)矿床(点)分布广泛,其中大苏计钼矿床和哈达门沟金(钼)矿床以产出规模大和矿石品位高为特征。需要提及的是,西沙德盖和大苏计矿床无论在产出环境和地质特征上,还是在成矿作用、矿化类型等方面均存在许多相似之处,如它们均产于华北板块北缘内蒙古地轴中部阴山隆起带印支期斑岩株内及其与太古代变质岩的接触带,钼矿化均呈浸染状、薄膜状、脉状、网脉状在斑岩中分布,之间的矿石矿物和脉石矿物、矿石的结构构造也可类比,围岩蚀变包括云英岩化、硅化、钾长石化、钠长石化、高岭土化、绢云母化等基本相似,但它们的规模、脉状矿石和浸染状矿石的比例、氧化矿石和原生矿石的比例有差别,大苏计目前探明的规模达到大型,以浸染状矿石为主,氧化带要相对厚一些。相比之下,哈达门沟金(钼)矿床为与侵入岩有关的热液脉型矿床。聂凤军等(2005)曾对哈达门沟金(钼)矿床含石英脉中绢云母进行过  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  同位素年龄测定,所获数据为  $(239.76 \pm 3.04) \text{ Ma}$ ,张彤等(2009)所测大苏计钼矿床的辉钼矿样品  $\text{Re-Os}$  同位素年龄数据为  $(222.5 \pm 3.2) \text{ Ma}$ 。根据上述年龄数据,同时结合其他地质证据,可以推测,内蒙古中西部乌拉山-大青山一带钼矿成矿作用主要形成于印支期(侯万荣等,2010)。

迄今为止,内蒙古境内找到的钼矿床(点)主要分布在东南部的西拉木伦河两侧,中北部的洪格尔地区和中西部的大青山-乌拉山地区,并且构成相应的矿集区(图 6)。西拉木伦矿集区钼矿床的形成作用主要发生在以下 3 个时间段,即  $(258 \sim 210) \text{ Ma}$ 、

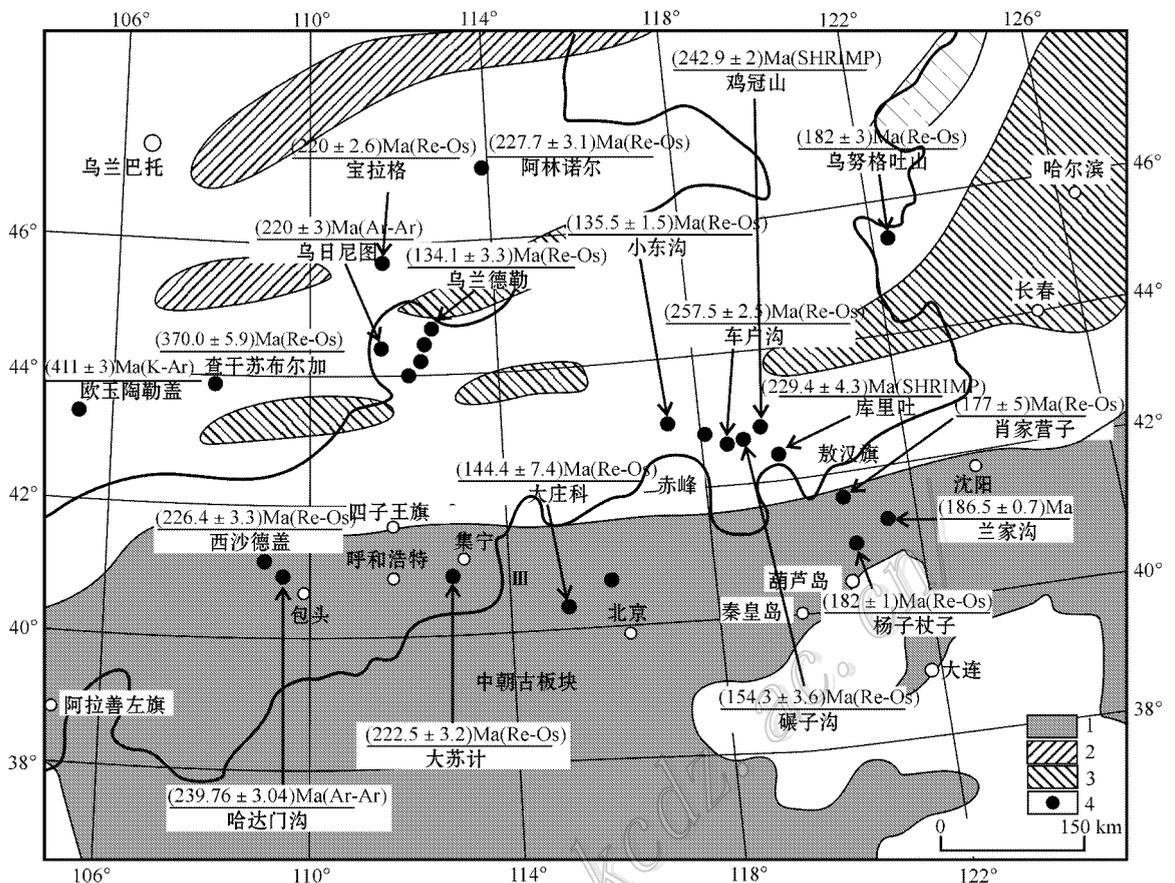


图6 内蒙古中东部及邻区主要钼多金属矿床及其成矿时代(底图据聂凤军等,2004改编)

1—古陆块;2—亲古西伯利亚陆块;3—亲古中华陆块;4—钼多金属矿床(点)

Fig. 6 Distribution of main molybdenum polymetallic deposits in the middle-east part of Inner Mongolia and its adjacent areas with precise age data(modified after Nie et al., 2004)

1—Paleo-continental block; 2—Related paleo-Siberian continental block; 3—Related paleo-China continental block; 4—Molybdenum polymetallic deposit (ore spot)

(180~150) Ma 和(140~110) Ma (Zhang et al., 2009),例如鸡冠山岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和车户沟钼矿床辉钼矿 Re-Os 年龄分别为(242.9 ± 2)~(256.9 ± 6.9) Ma 和(257.5 ± 2.5) Ma (Zhang et al., 2009),相比之下,碾子沟和小东沟钼矿床辉钼矿 Re-Os 年龄分别为(154.3 ± 3.6) Ma (张作伦等, 2009)和(135.5 ± 1.5) Ma (聂凤军等, 2007)。中北部洪格尔矿集区乌兰德勒钼矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为(134.1 ± 3.3) Ma (陶继雄等, 2009),乌日尼图(钨)矿床蚀变矿物绢云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄为(220 ± 3) Ma 和(218 ± 4) Ma (内蒙古地调院, 2010, 未发表),另外,靠近该区的蒙古宝拉格钼矿床辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄为(220.0 ± 2.6) Ma (Pirajno F 2010, 个人通信)。中西部的乌拉山-大青山地区

西沙德盖矿床和大苏计矿床辉钼矿 Re-Os 分别为(226.4 ± 3.3) Ma 和(222.5 ± 3.2) Ma (张彤等, 2009),聂凤军(2005)获得的哈达门沟金(钼)矿床绢云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 同位素年龄值为(239.76 ± 3.04) Ma。综观已获得的各类同位素年龄数据,分别是印支期和燕山期岩浆作用及其相关的热液活动的产物,表明内蒙古中西部钼矿床的成矿作用主要与印支期构造-岩浆活动有关,东南部和中北部钼矿床(点)则分别是印支期和燕山期岩浆作用及其相关热液活动的产物。

自20世纪90年代开始,人们对华北陆块北缘东段及邻区产出的钼矿床或铜(钼)矿床开展了同位素年代学研究工作,所获之年龄数据主要分布在2个时间段:①早-中侏罗世(185~170 Ma),如多宝山

(三矿沟铜矿, 175 Ma)、乌奴格吐山钼矿[(182 ± 3) Ma]、大黑山钼矿[(175 ± 3) Ma]、肖家营子钼矿[(177 ± 5) Ma]、杨家杖子钼矿[(182 ± 1) Ma]、兰家沟钼矿[(186.5 ± 1.0) Ma]; ② 晚侏罗世—早白垩世(145~130 Ma), 如小寺沟[(134 ± 3) Ma]、寿王坟[(148 ± 4) Ma]、大庄科(145~147 Ma)、雷门沟(132~136 Ma) (葛文春等, 2007; 代军治等, 2006)。上述数据使得侏罗纪到白垩纪构造-岩浆活动与钼成矿作用关系的研究倍受人们重视, 在燕山期花岗岩类侵入岩发育区, 钼或钨(铜)矿床的找矿勘查工作也获得了重要进展。相比之下, 印支期花岗岩类发育区, 钼矿床综合找矿评价工作并没有引起人们的足够重视, 这的确是一个不应该被忽略的问题。因此, 在今后的勘查工作中, 应注意总结这个时期钼矿的产出环境、地质特征及找矿标志, 加强研究印支期岩浆构造活动及其成矿作用, 重视区域上的物化探异常、矿点、矿化点信息, 以期找到更多类似的斑岩型钼多金属矿床。

#### 4.2 成矿物质来源

$\text{Re-Os}$  同位素体系不仅可以精确地确定硫化物矿床形成的时间, 同时可以示踪成矿物质来源以及指示成矿过程中不同来源物质混入的程度, 一般可通过金属硫化物矿床辉钼矿的  $\text{Re}$  含量来示踪其来源。孟祥金等(2007)总结了我国近年来积累的大量与中酸性岩浆岩(斑岩)作用有关的钨(铜)矿床辉钼矿  $\text{Re-Os}$  同位素测试数据, 认为成矿物质来源于地幔或以地幔物质为主的矿床, 其辉钼矿  $\omega(\text{Re})$  多在  $100 \times 10^{-6} \sim 1\,000 \times 10^{-6}$  范围内, 成矿物质具有壳幔混合源的矿床, 其辉钼矿  $\omega(\text{Re})$  多在  $10 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$  范围内, 而成矿物质完全来自壳源(上地壳)的矿床, 其辉钼矿  $\omega(\text{Re})$  明显偏低, 在  $1 \times 10^{-6} \sim n \times 10^{-6}$  或更低。毛景文等(Mao et al., 1999)在综合分析、对比了中国各种类型钼矿床中辉钼矿的铼含量后, 认为从地幔到壳幔混源再到地壳, 矿石中的含铼量成十倍地下降, 从与幔源有关  $\rightarrow$  I 型  $\rightarrow$  S 型花岗岩有关的矿床, 其辉钼矿中的  $\omega(\text{Re})$  变化规律为  $n \times 10^{-4} \rightarrow n \times 10^{-5} \rightarrow n \times 10^{-6}$ 。张克尧等(2009)根据近年来铼-钨同位素研究的新成果认为, 铼( $20 \times 10^{-6}$  以下)和钨( $26.4 \times 10^{-9}$  以下)的含量低代表其成矿物质来源于地壳重熔岩浆。本文获得的西沙德盖钼矿床中辉钼矿的  $\omega(\text{Re})$  为  $11.08 \times 10^{-6} \sim 23.84 \times 10^{-6}$ ,  $\omega(^{187}\text{Re})$  为  $6.965 \times 10^{-6} \sim 14.99 \times 10^{-6}$ ,  $\omega(^{187}\text{Os})$  为  $25.87 \times 10^{-9} \sim 56.00 \times 10^{-9}$ , 介于

表 2 西沙德盖黄铁矿硫同位素分析结果  
Table 2 Sulfur isotope composition of sulfides from the Xishadegai ore deposit

原样号	测试对象	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\%$
XSD1	黄铁矿	4.5
XSD2	黄铁矿	4.7
XSD3	黄铁矿	5.7
XSD4	黄铁矿	4.8
XSD9	黄铁矿	5.6
XSD13	黄铁矿	4.3

壳幔混合源范围内, 与张克尧等(2009)总结的成果相比, 西沙德盖钼矿床的成矿物质偏壳源。本次在研究区测定了西沙德盖钼矿石中与辉钼矿共生的黄铁矿  $\delta^{34}\text{S}$  值, 为  $+4.3\% \sim +5.7\%$  (表 2), 平均为  $+4.93\%$ , 为低正值, 硫同位素比较均一, 落入岩浆硫范围。通过与其他钼矿床相对比, 初步认为西沙德盖钼矿床的成矿物质主要来源于地壳, 但混有少量地幔组分, 为壳幔混合作用的结果。

## 5 结论

(1) 西沙德盖钼矿床中的 9 件辉钼矿样品  $\text{Re-Os}$  同位素模式年龄为  $222.4 \sim 226.3$  Ma, 等时线年龄为  $(226.4 \pm 3.3)$  Ma, 大规模钼矿化发生的时间为晚三叠世, 与含矿斑状钾长花岗岩结晶年龄一致, 同属印支晚期构造-岩浆活动的产物。

(2) 西沙德盖钼矿床的 9 件辉钼矿样品  $\omega(\text{Re})$  为  $(11.08 \sim 23.84) \times 10^{-6}$ , 平均  $17.04 \times 10^{-6}$ , 变化范围较小。矿区矿石中黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$  值为  $+4.3\% \sim +5.7\%$ , 平均为  $+4.93\%$ , 落入岩浆硫范围。通过与其他钼矿床相对比, 初步认为西沙德盖钼矿床的成矿物质来源具有壳幔混源, 且偏壳源的特点。

(3) 通过成矿年龄对比和总结, 可以看出印支期为华北板块北缘钼矿成矿的重要时期, 这为找矿提供了依据。

志 谢 本研究的野外调查与采样工作得到武警黄金第二支队樊永威警官、中金包头市鑫达黄金公司李伟总工程师的热情帮助, 吴良士研究员对本文提出了很好的修改建议, 作者谨表衷心感谢。

## References

Bohlkea J K, Laeter J R and Bievre P D. 2005. Isotopic compositions of

- the element[J]. Phys. Chem. Ref. Data, 34(1): 57-67.
- Dai J Z, Mao J W, Yang F Q, Ye H S, Zhao C S, Xie G Q and Zhang C Q. 2006. Geological characteristics and geodynamic background of molybdenum (copper) deposits along Yanshan-Liaoning metallogenic belt on northern margin of North China block[J]. Mineral Deposits, 25(5): 598-612 (in Chinese with English abstract).
- Du A D, He H L, Yin N W, Zou X Q, Sun Y L, Sun D Z, Chen S Z and Qu W J. 1994. A study on the rhenium-odmium geochronometry of molybdenite[J]. Acta Geologica Sinica, 68(4): 339-347 (in Chinese with English abstract).
- Du A D, Zhao D M, Wang S X, Sun D Z and Liu D Y. 2001. Precise Re-Os dating for molybdenite by ID-NTIMS with carius tube sample preparation[J]. Rock and Mineral Analysis, 20(4): 247-252 (in Chinese with English abstract).
- Du A D, Wu S Q, Sun D Z, Wang S X, Qu W J, Richard M H S, John M and Dmitry M. 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenite HLP and JDC[J]. Geostandard and Geoanalytical Research, 28(1): 41-52.
- Du A D, Qu W J, Li C and Yang G. 2009. A review on the development of Re-Os isotopic dating technique and methods[J]. Rock and Mineral analysis, 28(3): 288-304 (in Chinese with English abstract).
- Ge W C, Wu F Y, Zhou C Y and Zhang J H. 2007. Metalochronology of porphyry Cu, Mo deposits in the Eastern Xing'anling-Mongolian orogenic belt (XMOB) and its implication for metallogenic geodynamic[J]. Chinese Science Bulletin, 52(20): 2407-2417 (in Chinese with English abstract).
- Gold Headquarter of Chinese Armed Police Force. 1995. Geology of the Hadamengou pegmatitic gold deposit occurring in Inner Mongolia Autonomous Region[M]. Beijing: Seismological Press. 1-227 (in Chinese with English abstract).
- Hou W R, Nie F J, Xu B, Li W, Fan Y W and Zhao C R. 2010. Geological features and geodynamic background of molybdenum polymetallic deposits in the central-western Inner Mongolia[J]. Geology and Exploration, 46(5): 751-764 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K. 1999. Isoplot/Ex, version 2.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Geochronology Center.
- Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H and Du A D. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W (Mo) deposit in the northern Qilian Mountains and its geological significance[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63(1): 1815-1818.
- Meng X J, Hou Z Q, Dong G Y, Liu J G, Qu W J, Yang Z S, Zou L Y, Wan L J and Xiao M Z. 2007. The geological characteristics and Re-Os isotope age of molybdenite of the Xiongiashan molybdenum deposit, Jiangxi Province[J]. Acta Geologica Sinica, 81(7): 946-951 (in Chinese with English abstract).
- Nie F J, Jiang S H, Zhang Y, Liu Y and Hu P. 2004. Geological features and origin of porphyry copper deposits in China-Mongolia border region and its Neighboring Areas[J]. Mineral Deposits, 23(2): 176-191 (in Chinese with English abstract).
- Nie F J, Jiang S H, Liu Y and Hu P. 2005. Re-discussions on the time limitation of gold mineralization occurring within the Hadamengou deposit, west-central Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Acta Petrologica Sinica, 21(6): 1719-1728 (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, Inner Mongolia[J]. Acta Geologica Sinica, 81(7): 898-905 (in Chinese with English abstract).
- Qu W J and Du A D. 2003. Highly precise Re-Os dating of molybdenite by ICP-MS with carius tube sample digestion[J]. Rock and Mineral Analysis, 22(4): 254-262 (in Chinese with English abstract).
- Qu W J, Du A D, Li C and Sun W J. 2009. High-precise determination of osmium isotopic ratio in the Jinchuan copper-nickel sulfide ore samples[J]. Rock and Mineral Analysis, 28(3): 219-222 (in Chinese with English abstract).
- Smoliar M I, Walker R J and Morgan J W. 1996. Re-Os ages of group IIA, IIIA, IVA and VIB iron meteorites[J]. Science, 271: 1099-1102.
- Tao J X, Wang T, Chen Z H, Luo Z Z, Xu L Q, Hao X Y and Cui L W. 2009. The Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Wulandele molybdenum-copper polymetallic deposit in Sonid Zuoqi of Inner Mongolia and its geological significance[J]. Rock and Mineral Analysis, 28(3): 249-253 (in Chinese with English abstract).
- Wieser M E. 2006. Atomic weights of the elements (IUPAC technical report)[J]. Pure Appl. Chem., 78(11): 2051-2066.
- Zhang K Y, Wang J P, Du A D, Lin Q T, Huang J M, Hu R H and Huang Q M. 2009. Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Chiluo molybdenum deposit in Fu'an, Fujian Province[J]. Geology in China, 36(1): 147-155 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L C, Wu H Y, Wan B and Chen Z G. 2009. Ages and geodynamic settings of Xilamulun Mo-Cu metallogenic belt in the northern part of the North China Craton (in Geodynamic processes and metallogenesis of the Central Asian and related orogenic belts)[J]. Gondwana Research, 16(2): 243-254.
- Zhang T, Chen Z Y, Xu L Q and Chen Z H. 2009. The Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Dasuji molybdenum deposit in Zhuozi County of Inner Mongolia and its geological significance[J]. Rock and Mineral Analysis, 28(3): 279-282 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z L, Zeng Q D, Qu W J, Liu J M, Sun X G, Zhang R B, Chen W J and Qin F. 2009. The molybdenite Re-Os dating from the Niangezou Mo deposit, Inner Mongolia and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(1): 212-218 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 代军治, 毛景文, 杨富全, 叶会寿, 赵财胜, 谢桂青, 张长青. 2006. 华北地台北缘燕辽钨(铜)成矿带矿床地质特征及动力学背景[J]. 矿床地质, 25(5): 598-612.

- 杜安道,何红蓼,殷宁万,邹晓秋,孙亚利,孙德忠,陈少珍,屈文俊. 1994. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究[J]. 地质学报, 68(4): 339-347.
- 杜安道,赵敦敏,王淑贤,孙德忠,刘敦一. 2001. Carius 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, 20(4): 247-252.
- 杜安道,屈文俊,李超,杨刚. 2009. 铼-钨同位素定年方法及分析测试技术的进展[J]. 岩矿测试, 28(3): 288-304.
- 葛文春,吴福元,周长勇,张吉衡. 2007. 兴蒙造山带东段斑岩型  $\text{Cu, Mo}$  矿床成矿时代及其地球动力学意义[J]. 科学通报, 52(20): 2407-2417.
- 侯万荣,聂凤军,徐斌,李伟,樊永威,赵春荣. 2010. 内蒙古中西部钼多金属矿床地质特征及其动力学背景[J]. 地质与勘探, 46(5): 751-764.
- 孟祥金,侯增谦,董光裕,刘建光,屈文俊,杨竹森,左力艳,万禄进,肖茂章. 2007. 江西金溪熊家山钼矿床特征及其  $\text{Re-Os}$  年龄[J]. 地质学报, 81(7): 946-951.
- 聂凤军,江思宏,刘妍,胡朋. 2005. 再论内蒙古哈达门沟金矿床的成矿时限问题[J]. 岩石学报, 21(6): 1719-1728.
- 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辉钼矿铼-钨同位素年龄及地质意义[J]. 地质学报, 81(7): 898-905.
- 屈文俊,杜安道. 2003. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿铼-钨地质年龄[J]. 岩矿测试, 22(4): 254-262.
- 屈文俊,杜安道,李超,孙文静. 2009. 金川铜镍硫化物样品中钨同位素比值的高精度分析[J]. 岩矿测试, 28(3): 219-222.
- 陶继雄,王弢,陈郑辉,罗忠泽,许立权,郝先义,崔来旺. 2009. 内蒙古苏尼特左旗乌兰德勒钼铜多属矿床辉钼矿铼-钨同位素定年及其地质特征[J]. 岩矿测试, 28(3): 249-253.
- 张克尧,王建平,杜安道,林仟同,黄金明,胡荣华,黄庆敏. 2009. 福建福安赤路钼矿床  $\text{Re-Os}$  同位素年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 36(1): 147-155.
- 张彤,陈志勇,许立权,陈郑辉. 2009. 内蒙古卓资县大苏计钼矿床辉钼矿铼-钨同位素定年及其地质意义[J]. 岩矿测试, 28(3): 279-282.
- 张作伦,曾庆栋,屈文俊,刘建明,孙兴国,张瑞斌,陈伟军,覃锋. 2009. 内蒙古碾子沟钼矿床辉钼矿  $\text{Re-Os}$  定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 25(1): 212-218.
- 中国人民武装警察部队黄金指挥部. 1995. 内蒙古自治区哈达门沟伟晶岩金矿地质[M]. 北京:地震出版社. 1-154.