

# 内蒙古太平沟斑岩型钼矿床 Re-Os 等时线年龄 及其地质意义

翟德高<sup>1,2</sup>, 刘家军<sup>1,2\*</sup>, 王建平<sup>1,2</sup>, 彭润民<sup>1,2</sup>, 王守光<sup>3</sup>, 李玉玺<sup>3</sup>, 常忠耀<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中国地质大学 岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室, 北京 100083;

3. 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要:** 内蒙古太平沟钼矿床位于中国著名的大兴安岭成矿带北缘, 属于环太平洋成矿域和古亚洲洋成矿域的叠加部位。通过对内蒙古太平沟斑岩型钼矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素测定, 获得等时线年龄为  $(130.1 \pm 1.3)$  Ma, 属于燕山成矿时期。太平沟斑岩型钼矿床是中国东部晚中生代岩浆活动的产物, 其成矿动力学背景为中国东部岩石圈处于拉伸减薄的环境。太平沟斑岩型钼矿床的 Re 含量为  $(9.9 \pm 0.085) \times 10^{-6} \sim (69.185 \pm 0.616) \times 10^{-6}$ , 相当于壳幔混合源岩浆矿床辉钼矿中的 Re 含量, 说明成矿物质为深部壳幔混合来源。

**关键词:** 斑岩型钼矿床; Re-Os 同位素; 太平沟; 内蒙古

**中图分类号:** P618.65

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-8527(2009)02-0262-07

## Re-Os Isotopic Chronology of Molybdenite from the Taipinggou Porphyry-type Molybdenum Deposit in Inner Mongolia and Its Geological Significance

ZHAI De-gao<sup>1,2</sup>, LIU Jia-jun<sup>1,2</sup>, WANG Jian-ping<sup>1,2</sup>, PENG Run-min<sup>1,2</sup>,

WANG Shou-guang<sup>3</sup>, LI Yu-xi<sup>3</sup>, CHANG Zhong-yao<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Lithosphere Tectonics and Lithosphere Technology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3. Inner Mongolia Institute of Geological Survey, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China)

**Abstract:** The Taipinggou porphyry-type molybdenum deposit in Inner Mongolia is located in the north of the well-known Da Hinggan Ling metallogenic belt in China. It lies in the superimposed part of the circum Pacific metallogenic province and the Paleo-Asian Oceanic metallogenic province. Re-Os dating of molybdenite from the Taipinggou porphyry-type deposit gives an isochron age of  $(130.1 \pm 1.3)$  Ma, and the ore-forming epoch belongs to the Yanshanian mineralization episodes. The Taipinggou molybdenum deposit is formed by the eastern China magmatic activities in late Mesozoic. The metallogenic geodynamics of the deposit is viewed that the lithosphere of east China is under the environment of lithospheric extension and thinning. The Re contents of the Taipinggou molybdenum deposit range from  $(9.9 \pm 0.085) \times 10^{-6}$  to  $(69.185 \pm 0.616) \times 10^{-6}$ , which equals to the Re contents of crust-mantle magmatic mixing. It also identifies that the sources of ore-forming materials come from the deep mixing of crust and mantle.

**Key words:** porphyry molybdenum deposit; Re-Os isotopic dating; Taipinggou; Inner Mongolia

收稿日期: 2008-12-22; 改回日期: 2009-03-05; 责任编辑: 戚开静。

基金项目: 中国地质大学(北京)大学生创新性实验计划项目; 内蒙古自治区政府地质勘查项目; 国家重点基础研究发展规划(2006CB403500); 高等学校学科创新引智计划(B07011); 教育部长江学者和创新团队计划。

作者简介: 翟德高, 男, 本科生, 1985年出生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事矿床地球化学研究。

Email: zhaidegao198537@Yahoo.com.cn.

\*通信作者: 刘家军, 男, 教授, 博士生导师, 1963年出生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事矿床地球化学研究。

Email: Liujiajuan@cugb.edu.cn.

## 0 引言

内蒙古自治区东部的太平沟钼多金属矿床是近年来发现的大—中型斑岩型矿床。该地区的研究程度相对较低,在20世纪80—90年代仅限于一定比例尺的区域地质调查工作,对该矿床的成矿规律、成矿特征及形成时代尚未进行深入研究。近年来,随着找矿工作的深入开展及测年技术水平的提高,关于太平沟钼矿床的深入研究成为可能。本文通过对内蒙古太平沟斑岩型钼矿床中辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄的精细测定,厘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动力学背景。

## 1 成矿地质背景

### 1.1 构造背景

太平沟斑岩型钼矿床位于西伯利亚板块与华北板块的缝合线上的天山造山带与大兴安岭造山带的转换部位<sup>[1]</sup>。邵积东等<sup>[2]</sup>将大兴安岭地区主

体划分为3个Ⅲ级成矿(区)带,太平沟矿区属于东乌旗—梨子山—鄂伦春华力西期、燕山期铁、铜、钼、金、铅、锌、钨成矿带。自中生代以来,受到太平洋板块俯冲的影响,该区内主要发育断裂构造。断裂以北东向和北西向为主,北东向断裂主要有  $F_5$ 、 $F_6$ 、 $F_7$ 、 $F_8$ ,贯穿全区(图1),沿  $NE\ 20^\circ \sim 30^\circ$  延长十几公里,地貌上表现为沟谷、断层三角面及断层崖。北西向断裂为  $F_3$ ,沿  $320^\circ$  方向延长近3 km,斜穿矿区,部分重叠在矿区的中部花岗岩与流纹质凝灰岩的接触带上,并在北西端、中部、南东端被北东向断裂截切,地貌呈现明显的断层崖和破碎带。东西向断裂主要为  $F_1$ ,走向  $263^\circ$  左右,矿区内延长近3 km,地貌显示为断层三角面和宽阔沟谷<sup>[3]</sup>。

### 1.2 地层

区域内出露的地层主要有:寒武系下统倭勒根岩群、志留系上统泥鳅河组、中生代白垩系下统光华组、甘河组及新生界第四系全新统。矿区内出露的地层主要为白垩系下统光华组的火山碎

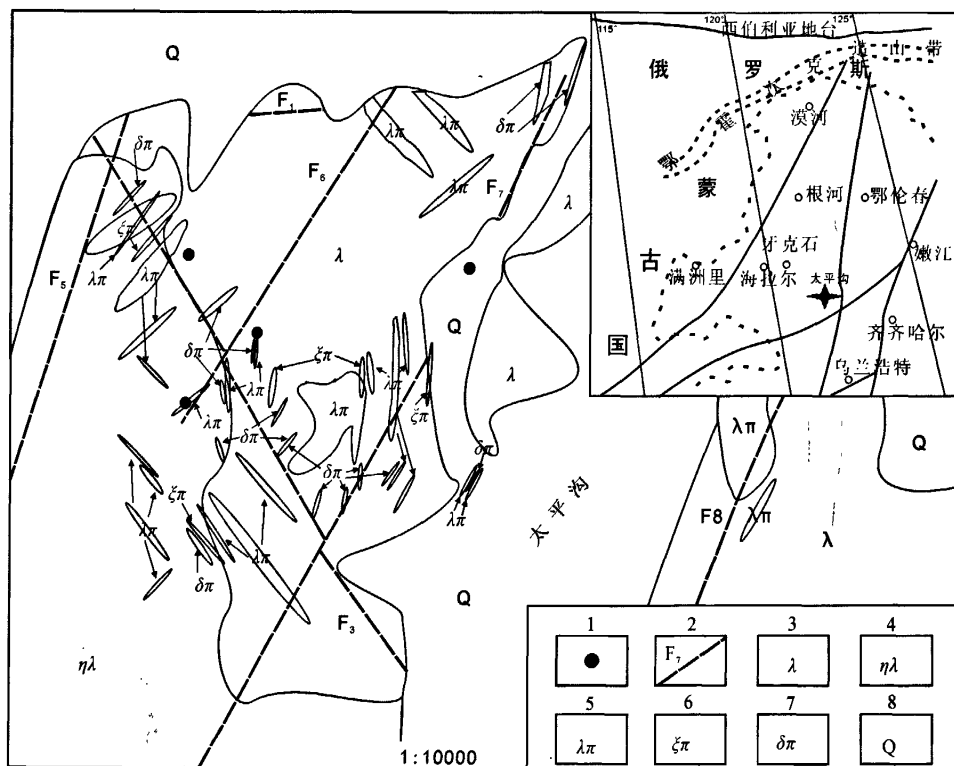


图1 内蒙古太平沟斑岩型钼矿床地质简图

Fig. 1 Simplified geological and structural map of Taipinggou porphyry molybdenum deposit in Inner Mongolia

1. 隐伏钼矿体位置; 2. 实测、推测断裂及编号; 3. 流纹质凝灰岩和流纹岩; 4. 二长花岗岩; 5. 花岗岩斑岩; 6. 正长斑岩脉; 7. 闪长斑岩脉; 8. 第四纪冲积物

屑岩,属于湖盆喷发沉积相,出露于矿区的北部、中部和东部,约占矿区面积的1/2,岩性为凝灰质角砾岩、凝灰质砂岩和流纹质凝灰岩,岩石层理不发育。矿区地层与早侏罗世花岗岩呈不整合接触关系,前者覆盖于后者之上。流纹质凝灰岩出露面积较大,约占矿区面积的1/2,主要分布在矿区的中部、北部和东部,是钼矿体的主要赋存层位(图1),该层中的硅化层与成矿的关系较为密切。流纹质凝灰岩为浅黄色、浅黄白色,凝灰结构,块状构造。岩石组成为岩屑、晶屑和火山灰胶结物,其中晶屑主要成分为石英、长石,含量为20%,粒径为0.5~2 mm;岩屑主要为凝灰质,粒径为3~10 mm,含量为5%,为凝灰质胶结;胶结物由细小的火山灰组成,局部可见硅化现象。

### 1.3 岩浆岩

区域内岩浆活动频繁,岩浆岩分布较为广泛。岩浆岩类型以中—酸性为主,主要有3期:二叠纪早中世查巴奇二长花岗岩、二叠纪早中世复兴水库正长花岗岩、侏罗纪早世官家街碱长花岗岩和白垩纪早世马石沟二长斑岩。岩浆岩大都呈岩株产出,总体呈东西向展布。区域内的侵入岩主要是二叠纪花岗岩,分布较广。

矿区内发育的岩浆岩主要有二长花岗岩、花岗斑岩、正长斑岩和闪长斑岩,其中花岗斑岩与Mo矿化的关系最为密切,它是矿区内的赋矿岩浆岩体。钼矿床大多出现在花岗斑岩体及其与流纹质凝灰岩的接触带内(图1)。花岗斑岩呈灰白色,斑状结构,块状构造。斑晶主要为正长石和石英,局部可见少量角闪石,基质为隐晶长英质。该类岩石分布较广,多呈岩脉产出。矿区内出露的脉岩主要为辉绿岩脉<sup>[1]</sup>。

## 2 矿床地质特征

### 2.1 矿体特征

在太平沟矿区内,现已圈定出12个钼矿体。主要矿体有6号、8号、3号、4号,它们均为隐伏矿体,在地表无出露。矿体赋存于花岗斑岩体内及外接触带附近的凝灰岩中,在接触带附近矿化较强烈,远离接触带矿化程度减弱。矿体呈似层状、巨厚层状、透镜状、脉状及不规则状,走向北东,倾向北西,倾角为5°~20°,矿体近平行产出。单个矿体最长达600 m,最厚为35.36 m。矿体平均厚度为16.75 m。矿石中Mo含量为0.01%~1.00%,平均含量为0.082 7%。其中6

号厚层状矿体平均厚度达28.92 m,平均品位为0.62%。

### 2.2 矿石特征

通过野外及显微镜下的观察与鉴定,可知主要矿石矿物为辉钼矿,其他矿物除黄铜矿、黄铁矿外,还有少量的辉铜矿、斑铜矿、方铅矿、闪锌矿、磁铁矿、赤铁矿、次生孔雀石、蓝铜矿、褐铁矿等。脉石矿物为石英、钾长石、绿泥石、绢云母、方解石、高岭石、黑云母等。在石英中发育大量的液体包裹体,这些包裹体呈环带状分布,显示其成矿环境为典型的浅成低温热液环境。主要矿物的生成顺序依次为磁铁矿—黄铁矿—辉钼矿—斑铜矿—方铅矿—闪锌矿—黄铜矿。

矿石中的辉钼矿以细小片状、星点状、薄膜状及脉状的形式充填于岩石节理裂隙中(图2)。矿石结构主要为自形、半自形结构。矿石构造以细脉状为主,少量为浸染状。含钼矿体中发育大量石英细脉,宽度一般为0.5~5.0 mm,个别可达1 cm。在岩心中可见到早期的含钼石英细脉被后期的石英细脉错断,可判断石英细脉的期次至少有2期。黄铁矿在原生矿石中普遍存在,以浸染状为主,局部可见细脉状分布。黄铁矿在花岗斑岩体中的含量为1%~2%,在接触带附近凝灰岩中的含量为2%~5%。经工程钻探可知,矿区深部的矿化以辉钼矿和黄铁矿矿化为主,黄铁矿由斑岩体到外接触带逐渐增多,其次则为黄铜矿化、磁铁矿化,偶见黑钨矿化和方铅矿化。通过对伴生有益元素的分析,矿石中的有用元素除Mo具工业价值外,Cu、Ag等元素可综合回收利用。

### 2.3 蚀变特征

矿区的主要蚀变类型为绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化、硅化、绿帘石化和钾化等。在时间上,绿帘石化—绢云母化、硅化与成矿的关系最为密切。根据蚀变的演化,结合主要矿石矿物的生成顺序,可将该矿区的成矿作用划分为3个矿化阶段:钾长石化—绿帘石化阶段、绢云母化—硅化阶段和碳酸盐化—绿泥石化阶段。其中,钾化—绿帘石化阶段为早期的矿化阶段,伴有少量铁的矿化,绢云母化—硅化阶段为铜—钼的矿化阶段,碳酸盐化—绿泥石化阶段为晚期的矿化阶段,以赤铁矿化为主。成矿的后期存在氧化阶段,即原生矿化的后期改造和次生富集阶段,主要为孔雀石—蓝铜矿—褐铁矿等次生矿化。另外,矿区内硅化现象普遍存在,在斑岩体和凝灰质围岩中均

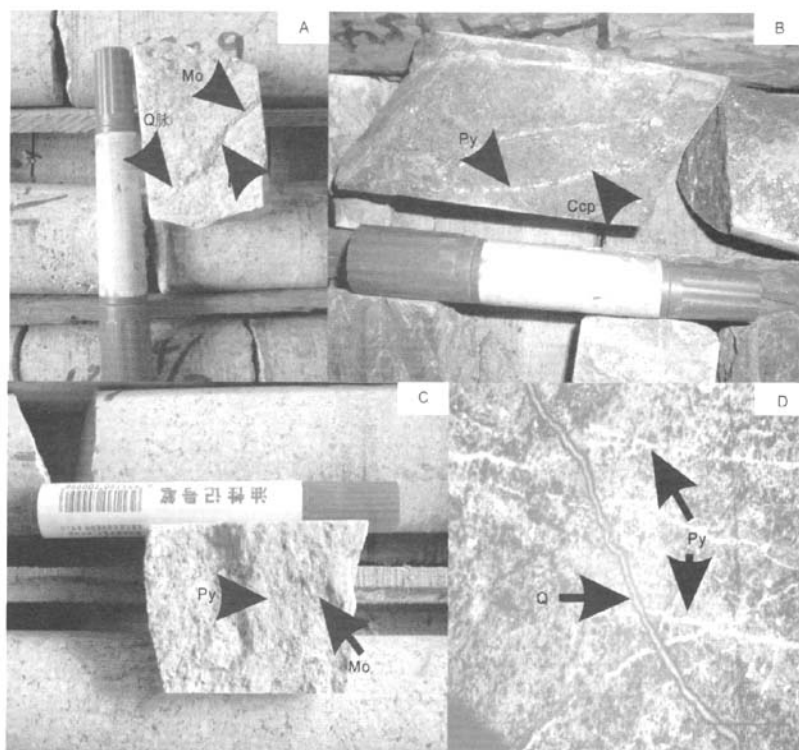


图2 太平沟钼矿矿石手标本、显微构造

Fig. 2 Ore specimen and microstructure of the Taipinggou porphyry molybdenum deposit

A. 花岗斑岩中细脉状矿石; B. 凝灰岩中细脉状矿石; C. 花岗斑岩中的浸染状矿化; D. 早期的黄铁矿脉被后期的石英脉切割

大量发育。在硅化强烈的部位常形成次生石英脉或硅质脉(图2), 硅化强处, 钼矿化也强, 这是矿区内的主要找矿标志。

### 3 辉钼矿样品测试方法

用于 Re-Os 同位素测年的辉钼矿样品均采自太平沟斑岩型钼矿体内。首先将野外采集的矿石新鲜样品进行破碎, 经过手工初步挑选出辉钼矿单矿物; 然后将其破碎、过筛至 40~80 目后, 在双目显微镜下进一步挑选, 使其纯度达到 98% 以上; 将其放置于玛瑙钵里进行研磨, 使其粒度 < 0.05 mm; 最后对处理好的辉钼矿样品进行 Re-Os 同位素分析。样品的 Re-Os 同位素测试是由国家地质试验中心实验室完成的。测量仪器采用电感耦合等离子体质谱仪 TJA X-series ICP-MS<sup>[4-5]</sup>。

#### 3.1 分解样品

准确称取待分析样品, 通过长细颈漏斗加入到 Carius 管(一种高硼厚壁大玻璃安瓿瓶)底部。缓慢加液氮到有半杯乙醇的保温杯中, 调节温度

至 -50~-80℃。放装好样品的 Carius 管到该保温杯中, 通过长细颈漏斗把准确称取的 <sup>185</sup>Re 和 <sup>190</sup>Os 混合稀释剂加入到 Carius 管底部, 加入质量浓度 10 mol/L 的 HCl 2 mL, 质量浓度 16 mol/L 的 HNO<sub>3</sub> 4 mL、质量浓度为 30% 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 1 mL。当管底溶液冰冻后, 用丙烷氧气火焰加热封好 Carius 管的细颈部分, 放入不锈钢套管内; 轻轻放套管入鼓风烘箱内, 待回到室温后, 逐渐升温到 200℃, 保温 24 h。在底部冷冻的情况下, 打开 Carius 管, 并用 40 mL 水将管中溶液转入蒸馏瓶中。

#### 3.2 蒸馏分离钨

在 105~110℃ 下蒸馏 50 min, 用 10 mL 水吸收蒸出的 OsO<sub>4</sub>, 用于测定 Os 同位素比值(ICPMS, 等离子体质谱仪测定), 将蒸馏残液倒入 150 mL Teflon 烧杯中待分离钨。

#### 3.3 萃取分离 Re

将第一次蒸馏残液置于电热板上, 加热近干, 再加少量水, 加热近干, 重复 2 次以降低酸度。加入 10 mL 质量浓度为 5 mol/L 的 NaOH, 稍微加

热, 转为碱性介质, 转入 50 mL 聚丙烯离心管中, 离心, 取上清液转入 120 mL Teflon 分液漏斗中。加入 10 mL 丙酮, 振荡 5 min, 萃取 Re, 静止分相, 弃去水相。加 2 mL 质量浓度为 5 mol/L 的 NaOH 溶液到分液漏斗中, 振荡 2 min, 洗去丙酮相中的杂质, 弃去水相, 排丙酮到 150 mL 已加有 2 mL 水的 Teflon 烧杯中, 在 50 ℃ 电热板上加热以蒸发丙酮, 加热溶液至干。加数滴浓硝酸和 30 % 过氧化氢, 加热蒸干以除去残存的钼。用数毫升稀 HNO<sub>3</sub> 溶解残渣, 稀释到硝酸浓度为 2 %。采用 ICPMS 测定 Re 同位素比值, 如含铼溶液中盐量超过 1 mg/mL, 需采用阳离子交换柱除去钠。

3.4 质谱测定

采用美国 TJA 公司生产的 TJA X-series ICPMS 测定同位素比值。对于 Re: 选择质量数 185、187 粒子, 用 190 粒子监测 Os。对于 Os: 选择质量数为 186、187、188、189、190、192 粒子, 用 185 粒子监测 Re。用 TJA X-series ICPMS 测得的 Re、Os 和 <sup>187</sup>Os 的空白水平值分别为 (0.010 4 ± 0.001 1) × 10<sup>-9</sup>、(0.000 1 ± 0.000 0) × 10<sup>-9</sup> 和 (0.000 4 ± 0.000 0) × 10<sup>-9</sup>, 远小于所测样品中 Re、Os 含量, 所以不会影响试验中 Re、Os 含量的标准测定。

在测试样品的过程中, 首先对试验标准物 HLP 的 Re 和 <sup>187</sup>Os 进行了 2 次分析, 保证本次样品测试结果可靠, 测试的结果和 HLP 样品的标准值见表 1。

4 测试结果

经实验测定得到的辉钼矿 Re-Os 同位素数据结果见表 2。6 件样品的模式年龄加权平均值为 (131.0 ± 1.2) Ma, MSWD = 1.4。采用 IsoPlot 软件对获得的 6 个数据进行等时线计算, 得到一条很好的 <sup>187</sup>Re - <sup>187</sup>Os 等时线, 年龄为 (130.1 ± 1.3) Ma, MSWD = 1.4, 拟合概率为 0.23 (图 3)。从 MSWD 值和拟合概率大小来看, 其等时线年龄是可靠的。辉钼矿中 <sup>187</sup>Os 的初始值为 0.20 ± 0.24, 比较接近于零, 表明辉钼矿形成时含有 <sup>187</sup>Os 的值

是比较低的, 辉钼矿中 <sup>187</sup>Os 都是 <sup>187</sup>Re 的衰变产物, 这符合计算模式年龄的条件, 也说明所获得的模式年龄是有效的。一般认为模式年龄代表同位素与母体分离的时间, 而等时线年龄则是同位素体系最后均一化的时间; 因此, 上述 Re-Os 等时线年龄代表了成矿年龄。齐小军 (2008, 内部学术交流) 通过 SHRIMP II 对太平沟花岗斑岩的测定得到花岗斑岩的谐和年龄为 (131.1 ± 0.9) Ma, 加权平均年龄为 (131.09 ± 0.91) Ma, 说明成岩、成矿时代相近, 成矿作用稍晚。

5 地质意义探讨

5.1 成矿地球动力学背景

太平沟钼矿床中辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄为 (130.1 ± 1.3) Ma, 显示成矿时代发生在燕山期, 对应的成矿动力学背景为大陆伸展体制, 岩石圈处于伸展减薄的环境<sup>[6]</sup>。大兴安岭地区岩浆成岩、成矿作用可分为早、晚 2 个阶段<sup>[7]</sup>, 太平沟钼矿床的成矿作用发生在岩浆成岩作用的晚期阶段。在中生代前后, 中国东部发生了构造与动力学体制的重大转折, 从挤压向伸展, 构造格局从东西向向北东向转折<sup>[8]</sup>, 如从洋 - 陆体制转变为陆内体制、从挤压碰撞体制为主转变为大陆伸展体制, 从岩石圈增厚转变为减薄。大兴安岭地区

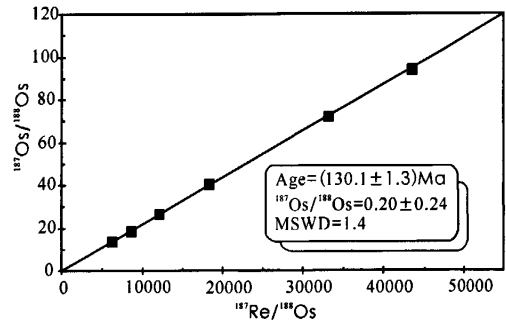


图 3 内蒙古太平沟辉钼矿床 Re-Os 等时线  
Fig. 3 Re-Os isotope isochron of molybdenite in the Taipinggou molybdenum deposit

表 1 实验标准物质 (HLP) 测定结果和标准值  
Table 1 Certified values and analytical data of Re-Os isotope for standard sample HLP

编号	原样名	样重/g	Re/10 <sup>-6</sup>		<sup>187</sup> Os/10 <sup>-9</sup>		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
080918 - 22	HLP	0.012 18	279.6	2.2	648.8	5.4	221.2	3.1
080923 - 22	HLP	0.010 40	275.2	2.1	640.4	5.4	221.8	3.1

表2 内蒙古太平沟钼矿床 Re-Os 同位素测试结果  
Table 2 Re-Os isotopic data of molybdenite from Taipinggou molybdenum deposit

序号	样重/g	Re /10 <sup>-9</sup>	Os /10 <sup>-9</sup>	<sup>187</sup> Re/10 <sup>-9</sup>	<sup>187</sup> Os/10 <sup>-9</sup>	模式年龄/Ma
1	0.049 75	13 478 ±105	0.028 0 ±0.007 1	8 471 ±66	18.65 ±0.15	132.0 ±1.82
2	0.051 03	19 276 ±174	0.032 8 ±0.003 3	12 115 ±109	26.64 ±0.21	131.8 ±1.90
3	0.505 60	9 900 ±85	0.009 6 ±0.005 0	6 223 ±53	13.61 ±0.10	131.1 ±1.80
4	0.099 37	52 795 ±477	0.027 7 ±0.014 1	33 185 ±300	71.85 ±0.57	129.8 ±1.90
5	0.103 06	69 181 ±616	0.043 8 ±0.013 7	43 485 ±387	93.87 ±0.82	129.4 ±1.90
6	0.006 17	29 204 ±263	0.042 1 ±0.017 1	18 357 ±165	40.40 ±0.40	131.9 ±2.00

注：序号1-2样品为本文分析，由国家地质实验中心实验室测试；序号3-6样品引自杨志强<sup>[1]</sup>。

晚三叠世岩石圈深部岩浆作用活跃，幔源岩浆上升、侵位，在中—新生代( $J_3-K_1$ )本区乃至中国北方东部都处于伸展体制下，是岩石圈减薄及能量散发的过程<sup>[9]</sup>。在130~120 Ma时期，大兴安岭及其两侧盆地均发生了玄武岩的喷溢，玄武岩具有富集地幔源区的特征，幔源岩浆的喷溢也显示了大兴安岭中生代处于大陆地壳伸展的背景<sup>[10]</sup>。由此说明，大兴安岭晚中生代的花岗岩—火山岩活动是在大陆伸展背景下形成的<sup>[11]</sup>。关于大兴安岭地区岩石圈在燕山时期的岩浆活动与太平洋板块的俯冲有关的问题，近年来一些研究成果并不支持这一观点，如邵济安等<sup>[12]</sup>根据大兴安岭火山岩微量元素中Sr/Nd同位素比值和Ba/Nb之间具有良好的线性关系，排除了由洋壳俯冲作用引起火山岩Nb、Ta亏损的可能性。从俯冲作用发生的时间来看，Engelbreton等<sup>[13]</sup>根据对伊泽奈崎(Izanagi)板块的古地磁研究结果，认为太平洋板块向东亚大陆边缘的俯冲作用最早也在晚白垩世之后，邵济安等<sup>[11]</sup>也认为太平洋板块向亚洲大陆下的正面俯冲始于晚白垩世，诸多证据确定中国东部燕山期岩浆活动(太平沟钼矿床的形成)与太平洋板块的俯冲作用无关<sup>[14]</sup>，其形成机制与 $K_1$ 早期由于软流圈的抬升引发岩浆底侵作用密切相关<sup>[15]</sup>。一些研究者对晚中生代火山岩中地幔捕虏体进行研究，进一步支持了岩浆底侵作用的观点，并提出辽西晚中生代的火山岩活动可能与软流圈底辟体脉动式上涌有关<sup>[10,16]</sup>。

5.2 成矿物质来源

Re-Os同位素体系不仅可以精确地测定硫化物矿床的成矿年龄，而且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<sup>[17]</sup>。一般通过金属硫化物矿床辉钼矿的Re含量来示踪其来源。Mao et al<sup>[18]</sup>通过对比国内外部分辉钼矿的Re含量后得出，从幔源、壳幔混源到壳源，其

辉钼矿中的Re含量变化规律为 $n \times 10^{-4} \rightarrow n \times 10^{-5} \rightarrow n \times 10^{-6}$ ，即呈数量级下降。从表2可以看出，太平沟钼矿床的Re含量为 $(9.900 \pm 0.085) \times 10^{-6} \sim (69.185 \pm 0.616) \times 10^{-6}$ ，相当于壳幔混合源岩浆矿床辉钼矿中的Re含量，说明成矿作用为壳幔混合作用的结果。根据大兴安岭成矿带深大断裂切割到上地幔的深度可知，来自深部上地幔的流体在沿着一定构造上升的途径中，与壳源的岩石发生过不同程度的混合作用，使得成矿流体组成部分被带出的同时也加入了壳源的物质。在上升过程中伴随外界条件及成矿流体成分的改变，成矿元素在有利的构造部位聚集。

5.3 成矿机制

太平沟钼矿床矿石矿物的组成以辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿为主，其次为辉铜矿，并含少量的斑铜矿、方铅矿等。前人研究表明，在200~350℃的NaCl水溶液中，当形成黄铜矿( $CuFeS_2$ ) + 黄铁矿( $FeS_2$ ) + 斑铜矿( $Cu_5FeS_4$ )和黄铜矿( $CuFeS_2$ ) + 辉钼矿( $MoS_2$ )组合时，Cu和Mo主要以硫化物络合物的形式存在<sup>[19-20]</sup>；因此，根据太平沟矿区矿石的组合关系可以推测，在成矿流体中主要金属元素Mo是以硫化物络合物的形式进行迁移的。

区域上德尔布干深大断裂和大兴安岭主脊断裂控制了全区的构造展布，根据地球物理探测可知这些深大断裂切穿上地幔的深度。在中生代，大兴安岭地区处于拉伸构造背景下，来自上地幔的流体在构造力的驱动下与围岩之间发生相互作用，演化为壳幔混源的流体。随着含矿流体进一步上升，在水热流体的环(对)流系统中<sup>[21]</sup>，通过围岩萃取使Cu、Mo得到进一步富集。

在太平沟钼矿床形成过程中，成矿流体具有低盐度、中温的特点，流体性质属于 $CO_2-H_2O-K^+-Na^+-SO_4^{2-}$ 类型<sup>[1]</sup>。成矿流体上升至近地表超浅成低压条件下，挥发分的增加使得成矿热液

系统内部压力增大,促使火山隐爆作用发生,导致原成矿系统热力学平衡遭到破坏。热液中的Cu、Mo硫化物络合物分解,进而沿着断裂、断层等有利构造位置充填形成浸染状、脉状和细脉状矿床。在矿区内可见爆破角砾岩及矿石的网脉状、细脉状和角砾状构造,这是岩浆后期存在火山隐爆作用的证据。

## 6 结 论

(1)内蒙古太平沟钼矿床为隐伏矿床,产于花岗斑岩体内外,矿石矿物主要为辉钼矿,含少量的黄铜矿、黄铁矿,脉石矿物主要有石英、钾长石、斜长石。矿石结构为半自形细小片状,构造以细脉状为主,少量为浸染状,是典型斑岩型钼矿床。

(2)辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 $(130.1 \pm 1.3)$  Ma,属于晚中生代燕山成矿时期。矿床成矿动力学背景为中国东部岩石圈处于拉伸减薄的环境。

(3)太平沟钼矿的 Re 含量为 $(9.900 \pm 0.085) \times 10^{-6} \sim (69.185 \pm 0.616) \times 10^{-6}$ ,相当于壳幔混合源岩浆矿床辉钼矿中的 Re 含量,说明成矿物质为深部壳幔混合来源。

致谢:论文完成过程中得到了吴胜华、杨宗锋和戴明建等同志的帮助,在此表示感谢。

## 参考文献:

- [1] 杨志强. 内蒙古阿荣旗太平沟铜、钼矿远景评价 [D]. 北京:中国地质大学地球科学与资源学院, 2008.
- [2] 邵积东, 王守光, 赵文涛, 等. 大兴安岭地区成矿地质特征及找矿前景分析 [J]. 地质与资源, 2007, 16(4): 252-256.
- [3] 王敏, 姚明, 刘畅. 物化探方法在内蒙古东北部太平沟地区(铜)钼矿找矿中的应用 [J]. 国土资源, 2008, 10(增刊): 112-113.
- [4] Shirey S B, Walker R J. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis [J]. Analytical Chemistry, 1995, 67(1): 2136-2141.
- [5] Du A D, Wu S Q, Sun D Z, et al. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: molybdenite HLP and JDC [J]. Geostandard and Geoanalytical Research, 2004, 28(1): 41-52.
- [6] 邵济安, 路凤香, 张履桥, 等. 辽西义县组玄武岩捕虏晶的发现及其意义 [J]. 岩石学报, 2005, 21(6): 1547-1556.
- [7] 祝洪臣, 张炯飞, 权恒. 大兴安岭中生代两期成岩成矿作用的元素、同位素特征及其形成环境 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2005, 35(4): 440-441.
- [8] 王瑜. 晚古生代末—中生代内蒙古—燕山地区造山过程中的岩浆热事件与构造演化 [J]. 现代地质, 1996, 10(1): 66-74.
- [9] 邵济安, 牟保磊, 何国琦, 等. 华北北部在古亚洲域与古太平洋域构造叠加过程中的地质作用 [J]. 中国科学: D 辑, 1997, 27(5): 390-394.
- [10] 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): 789-793.
- [11] 邵济安, 赵国龙, 王忠, 等. 大兴安岭中生代火山岩活动构造背景 [J]. 地质论评, 1999, 45(增刊): 422-430.
- [12] 邵济安, 刘福田, 陈辉, 等. 大兴安岭燕山晚中生代岩浆活动与俯冲作用关系 [J]. 地质学报, 2001, 75(1): 56-63.
- [13] Engebretson D C, Cox A, Gordon R G. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basins [J]. Geological Society of America, 1985, 206(1): 1-59.
- [14] 张旗, 赵太平, 王焰, 等. 中国东部燕山期岩浆活动的几个问题 [J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(3): 277-278.
- [15] 路凤香, 郑建平, 邵济安, 等. 华北东部中生代晚期—新生代软流圈上涌与岩石圈减薄 [J]. 地学前缘, 2006, 13(2): 87-89.
- [16] 邵济安, 陈福坤, 路凤香, 等. 辽西中生代软流圈底辟体的脉动式上涌 [J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2006, 31(6): 807-814.
- [17] 杨宗喜, 毛景文, 陈懋弘, 等. 云南个旧卡房砂卡岩型铜(锡)矿 Re-Os 年龄及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2008, 24(8): 1939-1942.
- [18] Mao J W, Zhang Z, Zhang Z, et al. 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, 1999, 63(1): 1815-1818.
- [19] Crerar D A, Barnes H L. Ore solution chemistry: V solubilities of chalcopyrite and chalcocite assemblages in hydrothermal solution at 200 degrees to 350 degrees [J]. Economic Geology, 1976, 71(4): 772-794.
- [20] 田应球, 池上荣, 吴厚泽. 300℃~500℃锌在含氟、氟溶液中的溶解度 [J]. 矿产与地质, 1991, 6(5): 5-9.
- [21] 刘建明, 张锐, 张庆洲. 大兴安岭地区的区域成矿特征 [J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 269-277.