

文章编号: 0258-7106(2009)03-0313-08

燕辽成矿带东段新台门钼矿床的 Re-Os 同位素 年龄及其地质意义*

张遵忠^{1,2}, 吴昌志^{2,3**}, 顾连兴^{1,2}, 冯 慧¹, 郑远川¹, 黄建华³,
李 晶⁴, 孙亚莉⁴

(1 江苏省有色金属华东地质勘查局, 江苏 南京 210007; 2 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室,
南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093; 3 新疆大学地质与勘查工程学院,
新疆 乌鲁木齐 830046; 4 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

摘 要 文章对新台门钼矿取自花岗斑岩含矿石英脉中的 5 件辉钼矿样品进行了 Re-Os 同位素分析, 获得模式年龄介于 (177 ± 4) ~ (185 ± 1) Ma 之间, 加权平均年龄为 (183 ± 3) Ma (2σ , MSWD = 1.6), 表明该矿床形成于早侏罗世。结合区域岩浆活动和成矿作用的年代学格架, 作者认为燕辽成矿带, 特别是辽西地区的早侏罗世成矿作用非常重要, 其形成应与印支期末华北板块与南北两侧大陆聚合后的伸展作用有关。

关键词 地球化学; Re-Os 同位素测年; 斑岩钼矿; 早侏罗世; 燕辽成矿带

中图分类号: P618.65; P597+.3

文献标志码: A

Molybdenite Re-Os dating of Xintaimen molybdenum deposit in Yanshan-Liaoning metallogenic belt, North China

ZHANG ZunZhong^{1,2}, WU ChangZhi^{2,3}, GU LianXing^{1,2}, FENG Hui¹,
ZHENG YuanChuan¹, HUANG JianHua³, LI Jing⁴ and SUN YaLi⁴

(1 East China Bureau of Geology for Non-ferrous Metals, Nanjing 210007, Jiangsu, China; 2 State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 3 School of Geology and Exploration Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 4 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract

The Xintaimen molybdenum deposit is situated in eastern Yanshan-Liaoning metallogenic belt and the transitional zone between the western Liaoning depression and the Shanhaiguan-Beizhen uplift in North China. There are two ore types in the deposit: one is veinlet-dissemination type, and the other is fracture-filling type. As the former type ore possesses the dominant position, the authors consider that the deposit can be regarded as a porphyry type Mo deposit. Five molybdenite samples from the veinlet-dissemination type ore yielded Re-Os isotopic model ages ranging from (177 ± 4) Ma to (185 ± 1) Ma, and a weighted average age of (183 ± 3) Ma (2σ , MSWD = 1.6). These data show that the porphyry type Mo mineralization occurred in Early Jurassic. According to chronological framework of regional magmatic activities and igneous mineralization, this paper holds

* 本文得到国家重点基础研究发展计划项目(2006CB403501)和国家自然科学基金项目(40872050; 40872064)的联合资助

第一作者简介: 张遵忠, 男, 1968年生, 博士, 副研究员, 主要研究方向为花岗岩及其成矿作用。

通讯作者: 吴昌志, 男, 1975年生, 博士, 副教授, 主要从事花岗岩、火山岩及相关成矿作用研究。Email: wucz@nju.edu.cn

收稿日期: 2009-03-05; 改回日期: 2009-04-03。李 岩编辑。

that the Early Jurassic mineralization is very important in the Yanshan-Liaoning metallogenic belt, especially in western Liaoning area. The tectonic setting is supposed to be of an extensional process after continental collision between the North China plate and the Mongolia and Yangtze block in Late Indo-China epoch.

Key words: geochemistry, Re-Os isotopic dating, porphyry Mo deposit, Early Jurassic, Yanshan-Liaoning metallogenic belt

位于华北克拉通北缘中段的燕辽钼(铜)成矿带与东秦岭钼矿带和小兴安岭—张广才岭钼、铜多金属矿带被称之为中国3大钼矿带(芮宗瑶等,1994;裴荣富等,1998)。该带西起内蒙古四子王旗、白乃庙,东至辽宁锦州—北票一线(罗铭玖等,1991)。带内已发现钼(铜)矿床(点)20余处,矿床类型主要为矽卡岩型、斑岩型和斑岩-矽卡岩型,如杨家杖子矽卡岩型钼矿、贾家营矽卡岩-斑岩型钼矿,兰家沟斑岩型钼矿,寿王坟矽卡岩型铜(铁、钼)矿等,小寺沟斑岩-矽卡岩型铜(钼)矿床等(黄典豪等,1996;代军治等,2006)。

毛景文等(2005,2003)研究认为,中国北方中生代出现过3次大规模成矿作用,且对应的地球动力学背景分别为:200~160 Ma的后碰撞造山过程,140 Ma左右的Izanagi板块向东亚大陆俯冲的大陆弧后伸展岩浆活动阶段和120 Ma左右岩石圈大规模快速减薄时期。近年来,随着Re-Os同位素年代学的广泛应用,燕辽成矿带与金属矿化特别是与辉钼矿化有关的成矿时代数据有了较多的积累。前人根据年代学数据将燕辽成矿带钼矿床大规模成矿作用划分为3个成矿期:230 Ma左右、180 Ma左右和140 Ma左右(黄典豪等,1996;代军治等,2006;代军治,2008)。目前对三叠纪和晚侏罗世岩浆和成矿作用的报道较为普遍,对早侏罗世岩浆作用也有少量报道,但对早侏罗世成矿作用的报道仅限于杨家杖子和兰家沟钼矿的成矿年龄,且上述2个成矿作用均与同一个岩体(虹螺山岩体)有关,从而限制了对辽西地区早侏罗世成矿作用及其地质背景研究的深入探讨。

本文将虹螺山岩体附近的新台门钼矿床进行矿床地质和Re-Os同位素测年研究,以揭示其矿床特征及成矿时代,并探讨其地质意义。

1 区域地质概况

燕辽成矿带位于华北板块的东北部。华北板块北侧以鄂霍茨克缝合带与西伯利亚板块相隔,东侧

以西太平洋俯冲带与太平洋板块相接,而南侧以秦岭—大别—苏鲁碰撞带与扬子板块相邻(图1, Ren, 1996)。对华北板块与西伯利亚板块之间的关系目前存在较多的争议(Davis et al., 2001),不过依据一些地质与古地磁资料,多数学者认为华北板块在晚二叠世与蒙古地块拼贴(赵越,1990; Wang et al., 1995; Yin et al., 1996),此后一直到晚侏罗世,华北—蒙古联合板块与北侧的西伯利亚板块之间皆被蒙古鄂霍茨克洋分割(Ren, 1996)。晚侏罗世—早白垩世,华北—蒙古板块与西伯利亚板块拼合,蒙古—鄂霍茨克洋消失。

新台门钼矿位于燕辽成矿带东段,辽西拗陷和山海关—北镇古隆起之间的过渡地带,其南东以高桥—西双山大断裂为界与山海关—北镇古隆起相连,北西以女儿河大断裂与辽西拗陷相衔接(图1)。区内出露地层比较完整,主要分布在笔架山向斜和哑鹿沟向斜地区及其虹螺山花岗岩杂岩体的四周,其他地区呈规模不等、零星分散的残留体出现。震旦系以砂岩、薄层页岩、硅质灰岩和石灰岩为主,直接不整合覆盖于太古界片麻状花岗岩基底之上,厚约2 000 m。寒武系分上、中、下统,其岩性主要为石英砂岩、角砾状石灰岩-灰质白云岩,薄层竹叶状灰岩、条带状石灰岩和鲕状灰岩等。奥陶系假整合于寒武系之上,岩性单一,为厚层状石灰岩,底部零星出露有灰质页岩。中石炭统一上二叠统主要为陆相碎屑沉积夹煤系地层,与奥陶系呈轻微角度不整合接触,局部为假整合。侏罗系—白垩系火山岩在区域上广泛发育,主要岩性为安山岩、流纹岩及中-酸性火山碎屑岩等,在矿区内则主要分布在一些小型盆地中(阎树魁,1990)。区内中生代岩浆活动强烈,除中基性-酸性火山岩外,还发育花岗岩类。花岗岩类可分为2个期次,早期为黑云母花岗岩,呈岩基状产出,岩体规模较大,出露广泛,岩相变化复杂。该期中心相为黑云母花岗岩,过渡相为角闪黑云母花岗岩,边缘相为斑状黑云母花岗闪长岩。吴福元等(2006)测得其中的松树卯岩体LA-ICP-MS单颗粒锆石U-Pb年龄为 (221 ± 2) Ma,属三叠纪侵入的产物。晚期侵

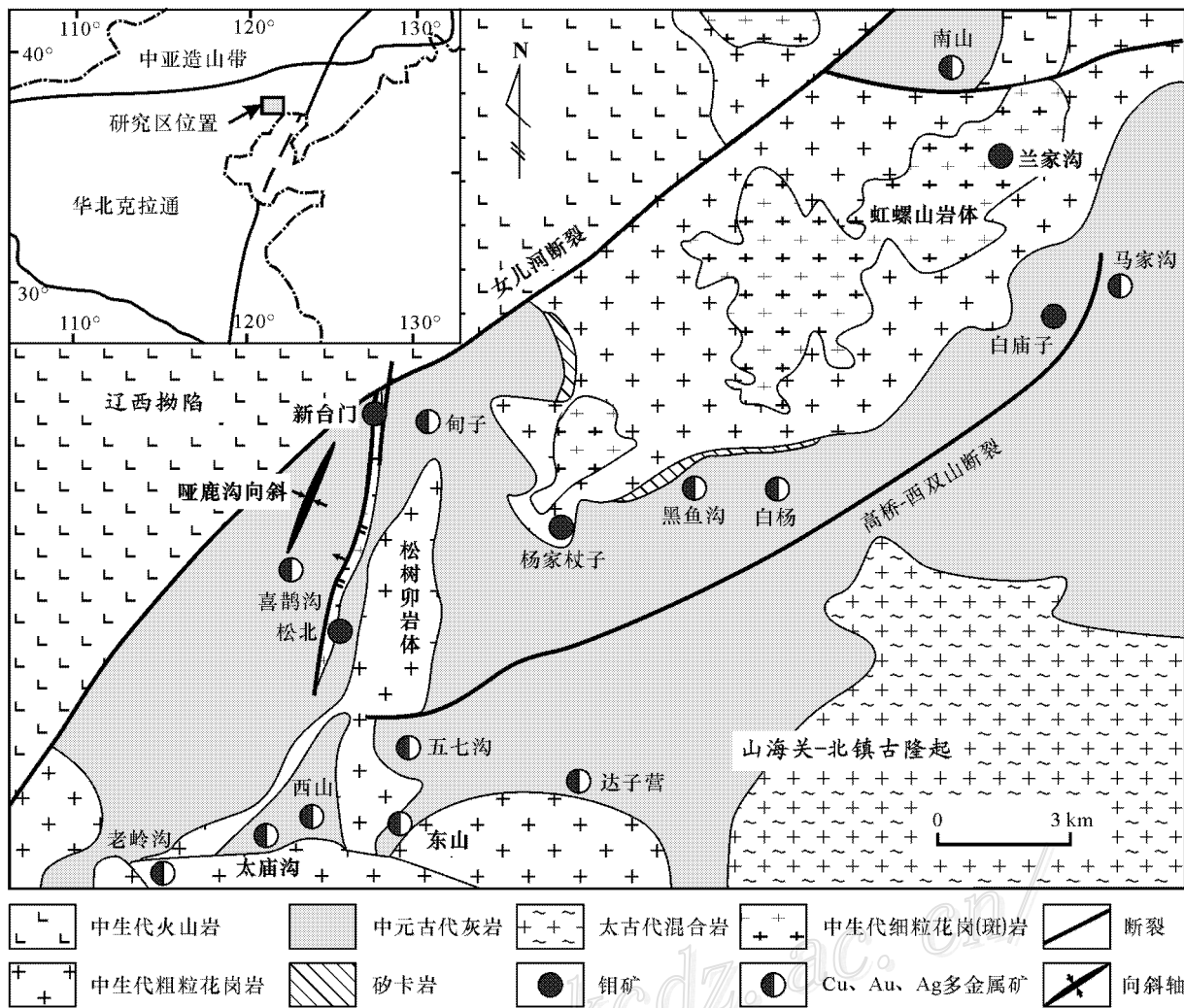


图 1 新台门钼矿区地质略图(据阎树魁,1990 修改)

Fig. 1 Simplified geological map of the Xintaimen molybdenum deposit (modified after Yan, 1990)

入的为红色花岗岩杂岩体,呈岩株状产出,其主体相为红色花岗岩,一般可划分出 3 个带:内部带为粗粒红色花岗岩,过渡带为中粗粒斑状、似斑状花岗岩,边缘带为细粒花岗岩、花岗斑岩等。晚期细粒花岗岩和花岗斑岩与成矿关系密切,在本区占有十分重要的地位。晚期代表性岩体虹螺山岩体的侵位时代为早侏罗世[LA-ICP-MS (189 ± 4)Ma, 吴福元等, 2006]。

2 矿床地质

新台门钼矿位于白马石—碱厂一带,在延伸 50 km、宽 10~15 km 的南北向构造带与女儿河断裂的交汇处。区域构造十分发育,除哑鹿沟向斜和一系

列近南北向的冲断层外,还发育有呈南北向分布的闪长岩、似斑状花岗闪长岩、淡色花岗岩和花岗斑岩等各种侵入岩体。矿区控矿构造为北松树卵(以下简称松北)—新台门压扭性断裂,呈 NNE 向。矿区 NNE 向断裂与女儿河断裂的相交处即为新台门钼矿位置,也是岩浆和矿化活动的最强区域。

赋矿的松北花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(181 ± 2)Ma(MSWD=3.7, $n=24$, 本课题组未发表资料)。新台门钼矿床主要赋存在松北花岗斑岩内的压碎带及节理裂隙发育地段。组成矿体的矿化细脉受多组裂隙控制,相互交织成网脉带。矿区内已探明 20 条矿脉,基本上皆由相互平行、大小不等的扁豆体组成(阎树魁,1990)。新台门钼矿的矿石可分为以下 2 种类型。第一种为细脉浸染状辉钼

矿矿石。辉钼矿主要产于石英细脉-网脉中。石英脉宽1~50 mm不等,辉钼矿矿化程度与脉宽呈反比,以辉钼矿化为主,伴有少量黄铁矿化。赋矿花岗斑岩具较明显的硅化、浸染状和团斑状黄铁矿化及弱的浸染状辉钼矿化。矿石品位约0.03%~0.50% (图2a、2b)。另一种为破碎带填充状辉钼矿矿石。辉钼矿颗粒极细(<0.1 mm),在手标本上部分呈胶状,金属光泽不明显,主要产于花岗斑岩构造破碎带或节理缝中,偶见少量伴生黄铁矿。破碎带内局部发育张性裂隙,部分裂隙中充填有自形程度完好的石英和辉钼矿晶体(图2b),多数裂隙呈波状分布于蚀变较强的花岗斑岩之中,并充填有细粒辉钼矿颗粒(图2c)。强烈破碎的花岗斑岩常呈浅黄绿色,水云母-叶腊石化发育,并可伴生细脉-网脉状矿化和浸染状矿化。矿石品位明显高于细脉浸染状矿石,约0.1%~3%。

总体而言,新台门钼矿与相邻的松北斑岩钼矿(阎树魁,1990;代军治等,2006)相似,以细脉浸染状辉钼矿矿石为主,但局部受构造破碎带影响发生钼的沉淀和富集。从区域构造和岩体发育特征来看,岩体侵位与构造活动几乎同步完成,许多充填辉钼矿的构造破碎裂隙呈波状分布,也进一步表明构造

破碎与岩浆侵入活动的近同时性。因此本文仍沿袭前人的看法,将新台门钼矿定为斑岩型钼矿床。

3 样品与测试

本文研究的5件样品均采自新台门斑岩钼矿主井口矿石堆。测试用辉钼矿用含辉钼矿石英脉经粉碎后在双目镜下经手工挑选出,每样均大于1 g,纯度>99.9%。样品处理在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室进行,铼、钼 ICP-MS 分析在长安大学成矿作用及其动力学开放研究实验室用美国热电公司生产的 X7 型 ICP-MS 仪器上完成。

样品处理及测试按 Sun 等(2001)的方案进行:①称样后,依次加入 NaOH 和 Na₂O,置于马弗炉熔融,避免了只用 NaOH 进行样品熔融时的喷溅现象;②丙酮萃取 Re 后,有机相直接置于电热板上加热挥发,取代了三氯甲烷和水萃取 Re 的步骤;③用 NaClO₄ 替代 Ce(SO₄)₂ 分离纯化 Os。以 OsO₄ 水溶液进样进行 ICP-MS 测定,灵敏度可提高 40 倍以上。分析过程以国标 GBW04435 和 GBW04436 为标样,监控化学流程和分析数据的可靠性。5件辉钼矿

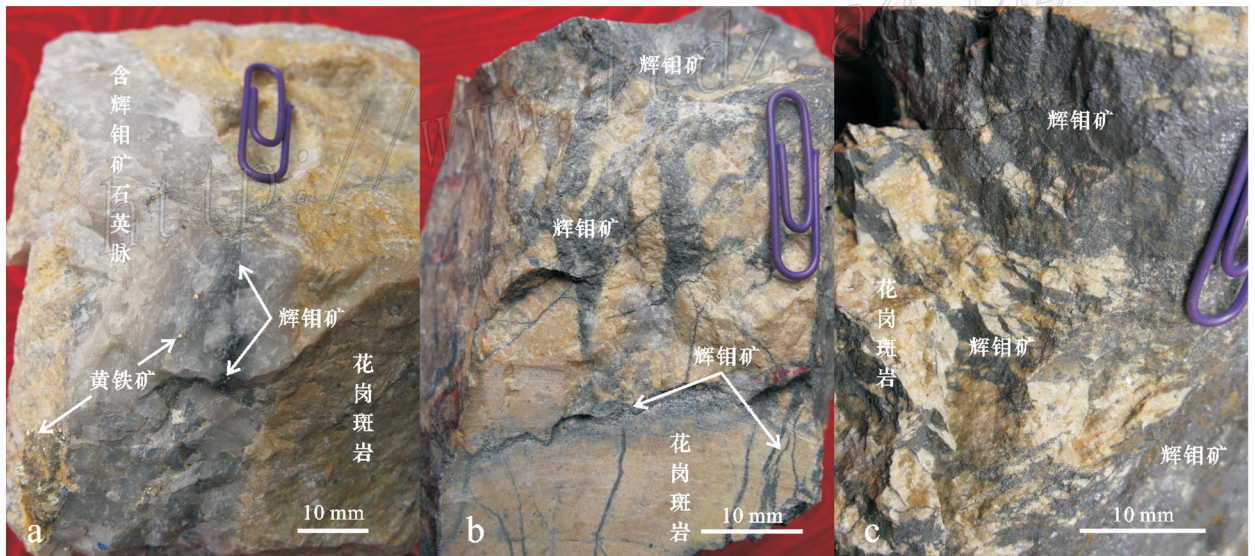


图2 新台门钼矿床典型矿石照片

a. 花岗斑岩中的含辉钼矿石英脉; b. 花岗斑岩中的细脉浸染状辉钼矿矿石; c. 强烈破碎花岗斑岩中充填有细粒辉钼矿

Fig. 2 Representative photographs of ores from the Xintaimen Mo deposit

a. Molybdenite-bearing quartz vein in granite porphyry; b. Veinlet-disseminated molybdenite ore in granite porphyry;

c. Fine-grained molybdenite filling intensely fractured granite porphyry

Re-Os 同位素测试结果列于表 1, 辉钼矿 Re 含量介于 $(7246.8 \pm 40.4) \times 10^{-9} \sim (22100.9 \pm 403.1) \times 10^{-9}$, Re 与 Os 含量变化较协调(呈线性相关)。

4 结果与讨论

4.1 新台门钼矿成矿年龄

辉钼矿是迄今被发现的最富 Re 的硫化物, 而且其中的普通 Os 相对放射成因的 ^{187}Os 可以忽略不计 (Markey et al., 1998), 也就是说辉钼矿中的 ^{187}Os 完全是 ^{187}Re 的衰变产物。因此, 辉钼矿中 ^{187}Os 与 ^{187}Re 的含量关系, 可以提供矿床形成时代的信息。表 1 中 5 件样品的 Os 模式年龄介于 $(177 \pm 4) \sim (185 \pm 1) \text{Ma}$ 。

采用 Re 衰变常数值为 $1.666 \times 10^{-11} / \text{a}$ (Smoliar et al., 1996), 利用 ISOPLOT 软件 (Model 3, Ludwig, 1999) 将 5 件样品的数据回归成一条直线, 求得 Re-Os 等时线年龄为 $(178 \pm 5) \text{Ma}$ (MSWD = 0.83,

图 3a); 另求得 5 件样品数据的加权平均年龄为 $(183 \pm 3) \text{Ma}$ (MSWD = 1.6, 2σ , 图 3b)。由图 3 可见, 本次 5 件样品的等时线年龄与加权平均年龄在误差范围内一致, 显示了数据的可靠性。此外, 求得 Os 初始值为 0.43×10^{-9} , 接近于 0, 表明辉钼矿形成时几乎不含 Os, 辉钼矿中的 Os 可看作完全由 Re 衰变而成, 符合 Re-Os 同位素体系模式年龄的计算条件 (蒋少涌等, 2000), 说明所获得的模式年龄可以代表辉钼矿的结晶时间。总之, 新台门斑岩钼矿床的钼矿化时限为 $(177 \pm 4) \sim (185 \pm 1) \text{Ma}$, 加权平均年龄为 $(183 \pm 3) \text{Ma}$, 与赋矿的松北花岗斑岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 $(181 \pm 2) \text{Ma}$ 相一致, 即岩体侵位和辉钼矿成矿作用均发生于早侏罗世。

4.2 燕辽成矿带早侏罗世成矿事件

毛景文等 (2005) 虽将 200~160 Ma 划为中国北方中生代的一次成矿作用, 但也指出这一时期的成矿年龄数据较少, 在一大型矿集区往往只有极个别矿床属这一阶段。如辽西地区目前仅黄典豪等 (1996)

表 1 新台门钼矿床 Re-Os 同位素测年数据

Table 1 Re-Os isotopic data of molybdenites in the Xintaimen Mo deposit

样品编号	m/g	Re/ 10^{-9}	$\pm 1\sigma$	$^{187}\text{Re}/10^{-9}$	$\pm 1\sigma$	$^{187}\text{Os}/10^{-9}$	$\pm 1\sigma$	t/Ma	$\pm 1\sigma$
CZ-40	0.09928	7246.77	40.35	4554.73	25.26	14.0264	0.0388	184.6	1.1
CZ-41	0.09980	7276.07	55.88	4573.15	34.9	813.9214	0.0490	182.4	1.5
CZ-49	0.06500	18795.3	382.4	11813.2	239.4	34.8599	0.1631	176.9	3.7
CZ-55	0.04075	18988.4	213.2	11934.6	133.4	36.1553	0.1278	181.6	2.1
CZ-64	0.02658	22100.9	403.1	13890.8	252.4	41.6375	0.1449	179.7	3.3

年龄计算公式: $t = 1/\lambda \ln(1 + ^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})$, $\lambda(^{187}\text{Re}) = 1.666 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ (Smoliar et al., 1996)

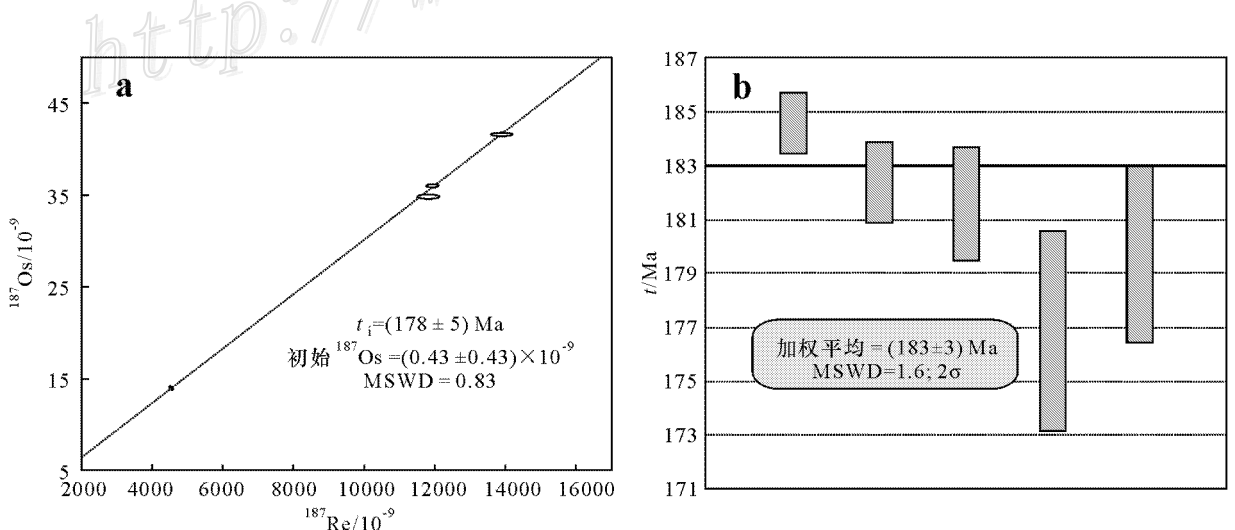


图 3 新台门钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素等时线图 (a) 和加权平均年龄图 (b)

Fig. 3 Re-Os isochron (a) and weighted average age (b) of molybdenites from the Xintaimen Mo deposit

报道了杨家杖子和兰家沟钼矿的成矿年龄,且上述2个成矿作用均与同一个岩体(虹螺山岩体)有关。

近年来所报道成矿时代为早侏罗世的矿床主要有辽西地区的辽宁白云金矿(石英 Ar-Ar 法, 209~197 Ma, 刘国平等, 2000)和冀东后沟金矿(石英 Ar-Ar 法, 202.6~176.7 Ma, 胡达骧等, 1994)。与此同时,这2个地区也有一些早侏罗世花岗岩被报道,如冀东青山口岩体(锆石 SHRIMP U-Pb 法, 199 ± 2) Ma, 罗镇宽等, 2001), 辽西虹螺山岩体(锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法, 189 ± 4) Ma, 吴福元等, 2006), 宽帮岩体(锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法, 182 ± 2) Ma, 吴福元等, 2006)和旧门岩体(锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法, 190 ± 3)~(185 ± 2) Ma, 吴福元等, 2006)。由此可见,目前文献中所报道的早侏罗世成矿年龄与这一时期的大规模成矿作用并不协调,而本文对新台门斑岩钼矿成矿时代的确定,再次说明燕辽地区早侏罗世成矿作用的问题值得重视。

现在看来,燕辽成矿带不仅存在早侏罗世强烈的花岗岩类侵入活动,也存在同期重要的成矿作用,特别是斑岩钼矿的成矿作用,其形成多与高硅、富碱的高钾钙碱性花岗岩类密切相关(吴利仁等, 1990)。近年来,国内外学者通过对燕辽成矿带内下侏罗统火山岩的研究发现,北京西山南大岭玄武岩应喷发于早侏罗世(赵越等, 2006),而其地球化学特征表明,该玄武岩源于俯冲交代改造古老岩石圈地幔的减压熔融,形成于陆内伸展环境(汪洋等, 1994; 李晓勇等, 2004)。此外,李伍平(2006)通过对辽西北票早侏罗世兴隆沟组英安岩的地球化学研究认为,该组火山岩具有埃达克岩的地球化学特征,可能是古亚洲洋壳残片部分熔融形成的,而孙德有等(2005)认为吉林中部的早侏罗世两期铝质 A 型花岗岩可能是与佳木斯板块和松嫩—张广才岭板块在早侏罗世早期沿嘉荫—牡丹江缝合带碰撞拼合有关的伸展作用的产物,并认为东北地区东部早侏罗世便开始进入滨太平洋构造域的演化阶段。

事实上,自古生代末至早侏罗世,华北板块接连发生一系列陆-陆碰撞挤压事件:二叠纪—早三叠世沿 Solonker 缝合带发生华北陆块与西伯利亚板块的碰撞以及三叠纪期间扬子板块与华北板块沿勉略缝合带碰撞。至早侏罗世,华北板块北缘已与蒙古陆块拼合,其北侧蒙古—鄂霍茨克洋正向南俯冲(Ren, 1996; 赵越等, 2002),南缘扬子板块的深俯冲作用已经完成并形成超高压变质带(Li et al., 1993),而东

侧太平洋板块的作用尚未显现(Maruyama et al., 1997)。上述多陆块的碰撞使得华北地区长期处于强烈的挤压环境,陆壳强烈缩短和增厚(陈衍景等, 2003, 2004)。而在燕辽沉降带的这类古造山带,陆壳的缩短和增厚应该尤其显著。早侏罗世期间,由于华北板块没有受明显的碰撞挤压作用,减压和固体物质的弹性回跳属性势必导致增厚的碰撞带岩石圈快速而强烈伸展(陈衍景, 1998, 2006; Chen et al., 2005)。因此,笔者认为正是由于碰撞后的岩石圈伸展作用造成了燕辽成矿带早侏罗世大量花岗岩类的发育和斑岩型钼(铜)矿的形成。

5 结论

(1)新台门钼矿床存在细脉浸染状和裂隙充填式2种矿石类型,但以前者占主导地位,仍可定为斑岩型钼矿床。

(2)新台门钼矿床的 Re-Os 模式年龄介于(177 ± 4)~(185 ± 1) Ma, 5 件样品的加权平均年龄为(183 ± 3) Ma (MSWD=1.6, 2σ),表明成矿作用发生在早侏罗世。

燕辽成矿带内早侏罗世成矿作用和岩浆作用的重要性应得到充分重视,相关的成岩成矿背景需要进一步深入研究。此外,裂隙充填式钼矿的搬运方式、沉淀机制和钼的来源等问题也值得深入研究。

志 谢 辽宁省有色地质勘查局马永昌教授级高工和李友权工程师在野外工作中提供了热情的帮助,审稿人和编辑对论文提出了宝贵的修改意见,在此谨致谢忱。

References

- Chen Y J. 1998. Constraints and their mechanism on the petrogenetic and metallogenic model for collision orogenesis [J]. *Earth Science Frontiers*, 5(Sup.): 109-118 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Sui Y H and Pirajno F. 2003. Exclusive evidences for CMF model and a case of orogenic silver deposits: Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit, east Qinling orogen [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 551-568 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Chen H Y, Zaw K, Pirajno F and Zhang Z J. 2004. The geodynamic setting of large-scale metallogenesis in mainland China, Exemplified by skarn type gold deposits [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 57-83 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Pirajno F and Sui Y H. 2005. Geology and D-O-C isotope

- systematics of the Tieluping silver deposit, Henan, China: Implications for ore genesis [J]. *Acta Geologica Sinica*, 9 : 106-119.
- Chen Y J. 2006. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential [J]. *Geology in China*, 33(6): 1181-1196 (in Chinese with English abstract).
- Dai J Z, Mao J W, Yan 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*, 26(5): 598-612 (in Chinese with English abstract).
- Dai J Z. 2008. The metallogenesis and geodynamic settings of molybdenum (copper) deposits in Yan-Liao metallogenic belt (dissertation for doctor degree) [D]. Supervisor : Mao J W. Beijing : Chinese Academy of Geological Sciences. 1-107 (in Chinese with English abstract).
- Davis G A, Zheng Y D and Wang C. 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning Provinces, Northern China [J]. *GSA Memoir*, 194 : 171-197.
- Hu D X and Luo H L. 1994. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of gold-bearing quartz veins and their geological significance in typical gold deposits of Zhangjiakou-Xuanhua gold field, Hebei Province [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 29(2): 151-158 (in Chinese with English abstract).
- Huang D H, Du A D, Wu C Y, Liu L S, Sun Y L and Zou X Q. 1996. Metalochronology of molybdenum (-copper) deposits in the North China Platform : Re-Os age of molybdenite and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 15(4): 365-373 (in Chinese with English abstract).
- Jiang S Y, Yang J H, Zhao K D and Yu J M. 2000. Re-Os isotope tracer and dating methods in ore deposits research [J]. *J. Nanjing University (Nature Science)*, 36(6): 669-677 (in Chinese with English abstract).
- Li S G, Xiao Y L and Liou D L. 1993. Collision of the North China and Yangtze Blocks and formation of coesite-bearing eclogites : Timing and processes [J]. *Chem. Geol.*, 109 : 89-111.
- Li W P. 2006. Geochemical characteristics of the early Jurassic dacites of the Xinglonggou Formation in Beipiao area, west Liaoning Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1608-1616 (in Chinese with English abstract).
- Li X Y, Fan W M, Guo F, Wang Y J and Li C W. 2004. Modification of the lithospheric mantle beneath the northern North China Block by the Paleo-Asian Ocean : Geochemical evidence from mafic volcanic rocks of the Nandaling Formation in the Xishan area, Beijing [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 557-566.
- Liu G P and Ai Y F. 2000. Studies on the mineralization age of Baiyun gold deposit in Liaoning [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(4): 627-632 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K. 1999. Isoplot/Ex, Version 2.0 : A geochronological toolkit for Microsoft Excel [Z]. Geochronology Center, Berkeley, Special Publication 1a.
- Luo M J, Zhang F M, Dong Q Y, Xu Y R, Li S M and Li K H. 1991. China molybdenum deposit [M]. Zhengzhou : Henan Sci. & Techn. Press. 425p (in Chinese).
- Luo Z K, Guan K, Qiu Y S, Miao L C, Qiu Y M, McNaughton N J and Groves D I. 2001. Zircon SHRIMP U-Pb dating of albite dyke in Jinchangyu gold mine, Jidong area, Hebei, China [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 16(4): 226-231 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Zhang Z H, Yu J J, Wang Y T and Niu B G. 2003. The geodynamic setting of Mesozoic large-scale mineralization in North China : The revelation from accurate timing of metal deposits [J]. *Science in China (Series D)*, 33(4): 289-300 (in Chinese).
- Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, Li X F, Wang Y T, Zhang C Q and Li Y F. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169-188 (in Chinese with English abstract).
- Markey R, Stein H and Morgan J. 1998. Highly precise Re-Os dating for molybdenite using alkaline fusion and NTIMS [J]. *Talanta*, 45 : 935-946.
- Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G and Terabayashi M. 1997. Paleogeographic maps of the Japanese islands : Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present [J]. *The Island Arc*, 6(1): 121-142.
- Pei R F, Lv F X, Fan J Z, Fang R H and Qi C S. 1998. Metal deposits metallogenetic series and prospecting of north margin of the north China massif and its north side [M]. Beijing : Geol. Pub. House. 237p (in Chinese).
- Ren J S. 1996. The continental tectonics of China [J]. *J. Southeast Asian Earth Sciences*, 13(3-5): 197-204.
- Rui Z Y, Shi L D and Fang R H. 1994. Geology of nonferrous metallic deposits in the northern margin of the north China landmass and its adjacent area [M]. Beijing : Geol. Pub. House. 576p (in Chinese with English abstract).
- Smoliar M L, Walker R J and Morgan J W. 1996. Re-Os ages of group IA, IVA and IVB iron meteorites [J]. *Sci.*, 271 : 1099-1102.
- Sun D Y, Wu F Y, Gao S and Lu X P. 2005. Confirmation of two episodes of A2-type granite emplacement during Late Triassic and Early Jurassic in the central Jilin Province, and their constraints on the structural pattern of eastern Jilin-Heilongjiang area, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 263-275 (in Chinese with English abstract).
- Sun Y L, Zhou M F and Sun M. 2001. Routine Os analysis by isotope dilution inductively coupled plasma mass spectrometry : OsO_4 in water solution gives high sensitivity [J]. *J. Analytical Atomic Spectrometry*, 16 : 345-349.
- Wang H and Mo X. 1995. An outline of tectonic evolution of China [J]. *Episodes*, 18 : 6-16.
- Wang Y and Sun J S. 1994. Trace elements characteristics and genesis of basalts in the early Jurassic Nandaling Formation, Western Hills, Beijing [J]. *Beijing Geol.*, 4 : 16-24 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Yang J H, Zhang Y B and Lin X M. 2006. Emplacement ages of the Mesozoic granites in southeastern part of the Western

- Liaoning Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 315-325 (in Chinese with English abstract).
- Wu L R, Zhang X Q and Sun S H. 1990. On the magma generation, evolution and molybdenum mineralization of the Yangjiazhangzi complex, Jinxi, Liaoning Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 6(3): 1-115 (in Chinese with English abstract).
- Yan S K. 1990. Geological characters and metallogenic regularity of Yangjiazhangzi Mo orefield in the west Liaoning Province[J]. *Geol. & Prospect.*, 26(5): 10-16 (in Chinese).
- Yin A and Nie S. 1996. A Phanerozoic palinspastic reconstruction of China and its neighboring regions[A]. In: Yin A and Harrison T M, ed. *Tectonic evolution of Asia*[C]. Cambridge Univ. Press. 442-485.
- Zhao Y. 1990. Mesozoic orogenics and tectonic evolution of the Yanshan area[J]. *Geol. Rev.*, 36(1): 1-13 (in Chinese).
- Zhao Y, Cui S Q, Guo T and Xu G. 2002. Evolution of a Jurassic basin of the Western Hills, Beijing, North China and its tectonic implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(4-5): 211-217 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y, Song B, Zhang S H and Liu J. 2006. Geochronology of the inherited zircons from Jurassic Nandaling basalt of the Western Hills of Beijing, North China: Its implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 184-190 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈衍景. 1998. 影响碰撞造山成岩成矿模式的因素及其机制[J]. *地学前缘*, (增刊): 109-118.
- 陈衍景, 隋颖慧, Pirajno F. 2003. CMF 模式的排他性依据和造山型银矿实例: 东秦岭铁炉坪银矿同位素地球化学[J]. *岩石学报*, 19(3): 551-568.
- 陈衍景, 陈华勇, Zaw K, Pirajno F, 张增杰. 2004. 中国陆区大规模成矿的地球动力学: 以夕卡岩型金矿为例[J]. *地学前缘*, 11(1): 57-83.
- 陈衍景. 2006. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力[J]. *中国地质*, 33(6): 1181-1196.
- 代军治, 毛景文, 杨富全, 叶会寿, 赵财胜, 谢桂青, 张长青. 2006. 华北地台北缘燕辽钼(铜)成矿带矿床地质特征及动力学背景[J]. *矿床地质*, 26(5): 598-612.
- 代军治. 2008. 燕辽成矿带钼(铜)矿床成矿作用及成矿动力学背景(博士学位论文)[D]. 导师: 毛景文. 北京: 中国地质科学院. 107 页.
- 胡达骥, 罗桂玲. 2004. 河北张宣金矿区含金石英脉⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄[J]. *地质科学*, 29(2): 151-158.
- 黄典豪, 杜安道, 吴澄宇, 刘兰笙, 孙亚莉, 邹晓秋. 1996. 华北地台北缘钼(铜)矿床成矿年代学研究——辉钼矿铼-钨年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 15(4): 365-373.
- 蒋少涌, 杨亮红, 赵葵东, 于际民. 2000. 金属矿床 Re-Os 同位素示踪与定年研究[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 36(6): 669-677.
- 李伍平. 2006. 辽西北票早侏罗世兴隆沟组英安岩的地球化学特征[J]. *岩石学报*, 22(6): 1608-1616.
- 李晓勇, 范蔚茗, 郭锋, 王岳军, 李超文. 2004. 古亚洲洋对华北陆缘岩石圈的改造作用: 来自西山大岭组中基性火山岩的地球化学证据[J]. *岩石学报*, 20(3): 557-566.
- 刘国平, 艾永富. 2000. 辽宁白金矿成矿时代探讨[J]. *岩石学报*, 16(4): 627-632.
- 罗铭玖, 张辅民, 董群英, 许永仁, 黎世美, 李昆华. 1991. 中国钼矿床[M]. 郑州: 河南科学技术出版社. 425 页.
- 罗镇宽, 关康, 袁有守, 苗来成, Qiu M Y, McNaughton N J, Groves D I. 2001. 冀东金厂峪金矿区钠长岩脉及青山口花岗岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其意义[J]. *地质找矿论丛*, 16(4): 226-231.
- 毛景文, 张作衡, 余金杰, 王义天, 牛宝贵. 2003. 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)*, 33(4): 289-300.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. *岩石学报*, 21(1): 169-188.
- 裴荣富, 吕凤翔, 范继璋, 方如恒, 齐朝顺. 1998. 华北地块北缘及其北侧金属矿床成矿系列与勘查[M]. 北京: 地质出版社. 237 页.
- 芮宗瑶, 施林道, 方如恒. 1994. 华北陆块北缘及邻区有色金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社. 576 页.
- 孙德有, 吴福元, 高山, 路孝平. 2005. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质 A 型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约[J]. *地学前缘*, 12(2): 263-275.
- 汪洋, 孙金声. 1994. 北京西山侏罗世南大岭组玄武岩微量元素特征及成因[J]. *北京地质*, 4: 16-24.
- 吴福元, 杨进辉, 张艳斌, 柳小明. 2006. 辽西东南部中生代花岗岩时代[J]. *岩石学报*, 22(2): 315-325.
- 吴利仁, 张秀棋, 孙世华. 1990. 论辽宁锦西杨家杖子杂岩体的岩浆成因演化及成矿作用[J]. *岩石学报*, (3): 1-115.
- 阎树魁. 1990. 辽西杨家杖子钼矿田地质特征及成矿规律[J]. *矿产与勘探*, 26(5): 10-16.
- 赵越. 1990. 燕山地区中生代造山运动及构造演化[J]. *地质论评*, 36(1): 1-13.
- 赵越, 崔盛芹, 郭涛, 徐刚. 2002. 北京西山侏罗纪盆地演化及其构造意义[J]. *地质通报*, 21(4-5): 211-217.
- 赵越, 宋彪, 张拴宏, 刘健. 2006. 北京西山侏罗世南大岭组玄武岩的继承锆石年代学及其含义[J]. *地学前缘*, 13(2): 184-190.