

辽宁姚家沟钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄测定及其地质意义^{*}

方俊钦¹ 聂凤军^{2**} 张可³ 刘勇³ 徐备¹
FANG JunQin¹, NIE FengJun^{2**}, ZHANG Ke³, LIU Yong³ and XU Bei¹

1. 北京大学地球与空间科学学院,造山带与地壳演化教育部重点实验室,北京 100871

2. 中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037

3. 北京科技大学土木与环境工程学院,北京 100083
1. *Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*

2. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

3. *Civil and Environmental Engineering Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China*
- 2011-08-10 收稿, 2012-01-10 改回.

Fang JQ, Nie FJ, Zhang K, Liu Y and Xu B. 2012. Re-Os isotopic dating on molybdenite separates and its geological significance from the Yaojiagou molybdenum deposit, Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2):372–378

Abstract Eight molybdenite samples were selected from the Yaojiagou molybdenum deposit. The Re-Os isotopic model ages ranging from 166.1 ± 2.3Ma to 169.1 ± 2.5Ma, yielded an isochron age of 168.8 ± 3.9Ma (MSWD = 1.12), which was interpreted to be the ore-forming age of the deposit. Combined with existing geochronologic data of Yaojiagou granit pluton, we assume that there were multistage of intrusions in Yaojiagou area and the Yaojiagou molybdenum deposit was related to the magma intrusion activities in 168.8 ± 3.9Ma. In combination with metallogenic geological background, we infer that the Yaojiagou molybdenum deposit developed from Early to Middle Jurassic, influenced by magma and fluid function of post-collision between North China Craton and Siberia Craton.

Key words Re-Os isotopic ages; Molybdenite; Ore-forming age; Yaojiagou molybdenum deposit; Qingchengzi orefield

摘 要 本文对青城子矿田姚家沟钼矿床中的 8 件辉钼矿样品进行 Re-Os 同位素分析,所获辉钼矿的模式年龄值为 166.1 ± 2.3Ma ~ 169.1 ± 2.5Ma,等时线年龄为 168.8 ± 3.9Ma (MSWD = 1.12),代表流体成矿年龄,结合姚家沟花岗岩体已有的年代学数据,我们推测姚家沟地区可能存在多期次岩浆侵入,姚家沟钼矿床与 168.8 ± 3.9Ma 的岩浆侵入活动有关。结合区域成矿地质背景,我们推断早中侏罗纪时期,姚家沟钼矿床可能受古亚洲洋闭合的影响,是华北板块与西伯利亚板块后碰撞造山阶段构造-岩浆作用及相关流体活动的产物。

关键词 Re-Os 同位素年龄;辉钼矿;成矿时代;姚家沟钼矿床;青城子矿田

中图法分类号 P597.3 P618.65

青城子矿田位于辽宁省凤城市境内,地理坐标为东经 123°34′ ~ 123°42′,北纬 40°42′ ~ 40°46′,是我国北方最重要的钼-铅-锌矿田之一。新中国成立后,原政务院(国务院前身)辽东地质调查队宋叔和等(1950 ~ 1953)在青城子矿田做过不同比例尺地质调查,并且撰写了相应的地质报告。自 1950 年起,辽宁省冶金工业部门和有色金属工业总公司所属地勘队伍在青城子及其外围开展了大规模的普查勘探工作,并且发现翟家沟和李家堡子等铅-锌矿床以及周家和华岩寺等铜矿床(方如恒等,1994)。迄今为止,人们先后在青城子矿田发现和圈定各种类型矿床 13 处,不同产出规模矿体 200

*

本文受国家重点自然科学基金项目(41030421)和地质调查项目(1212010911029)联合资助。

第一作者简介:

方俊钦,男,1987 年生,硕士生,构造地质学专业,E-mail: jqfang@pku.edu.cn

**

通讯作者:聂凤军,男,1956 年生,研究员,博士生导师,从事金属矿床地球化学研究,E-mail: nfjj@mx.cei.gov.cn

余条,累计探明的铅、锌资源量 1988 万吨(沙德铭等,2007),为我国东北老工业基地的重要原材料产地。鉴于青城子矿田同时产出有若干大型铅-锌、金和银矿床,为我国北方重要的有色和贵金属矿集区(薛春纪等,2003),其成矿理论研究和找矿勘查工作历来倍受人们关注,并且提出有不同的成矿模式。

关于青城子矿田各主要矿床(体)的成因,主要存在有三种观点:(1)青城子矿田是元古代沉积作用的产物,即海底火山喷气型矿床(王魁元等,1994)或浊积岩型矿床(陈江,2000);(2)青城子矿田为沉积-变质-热液叠加改造型层控矿床(蒋少涌,1987,1988;蒋少涌和魏菊英,1989;丁梯平等,1992);(3)近年来所获新资料和新数据显示,青城子矿田大多数矿床的成矿作用与中生代岩浆热液活动有关(刘国平和艾永福,2002;薛春纪等,2003;Yu *et al.*, 2009),青城子矿田内的小佟家堡子金矿床的形成时代被认为是燕山期(167Ma,绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法,刘国平和艾永福,2002),另一种观点则认为该矿床的形成时间为印支期(217.6Ma~230.7±5Ma,Rb-Sr 等时线和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法,薛春纪等,2003)。最新数据则显示青城子矿田的榛子沟、喜鹊沟铅-锌矿床和高家堡子银矿床的形成时代大约分别为 225Ma 和 140Ma(Yu *et al.*, 2009)。

尽管青城子矿田中各矿床(体)所处的地理位置存在一定的差异,但它们的产出环境、地质特征、矿物组份和元素组合大体相似,随着近年来找矿勘查工作深入开展,人们在青城子矿田的中心地带发现一处中型钼矿床-姚家沟钼矿床,其地质特征与华北克拉通东北缘杨家杖子钼矿床等较为相似,均属矽卡岩型钼矿床(代军治等,2008)。为了厘清姚家沟钼矿床与该区侵入岩之间的时间耦合关系,我们通过辉钼矿 Re-Os 同位素测年方法,测定了姚家沟矽卡岩型钼矿床的成矿时代,并结合区域内其它成岩成矿年代学的研究进展,探讨了区域地壳演化与钼矿床成矿作用的关系。

1 成矿地质背景

青城子矿田位于华北克拉通东北缘,地处辽-吉古元古代裂谷带(图1)。辽-吉古元古代裂谷西起郅庐断裂,向东经盖县、宽甸、桓仁、浑江、临江、长白,然后折向南进入朝鲜检德,至日本海终止,南界在庄河附近有一臂向南经石城岛、长山群岛与胶东元古代地层相连,北界在鞍山-本溪一带。辽-吉古元古代裂谷是在华北太古代克拉通基础上形成的陆间裂谷,经历了地壳拉张裂陷-快速沉降-慢速沉降-回返挤压-收缩上隆的演化过程(方如恒等,1994)。

古元古代早期裂谷形成过程中沉积有巨厚的辽河群,其下部为于家堡子组和浪子山组火山岩-碎屑岩建造,产出有铜-钴矿床(如于家堡子铜-钴-铁矿床),中部为大石桥组碳酸盐岩建造,产出有铅-锌矿床(如榛子沟、喜鹊沟铅-锌矿床),上部为盖县组碎屑岩-火山碎屑岩建造,产出有金-银矿床

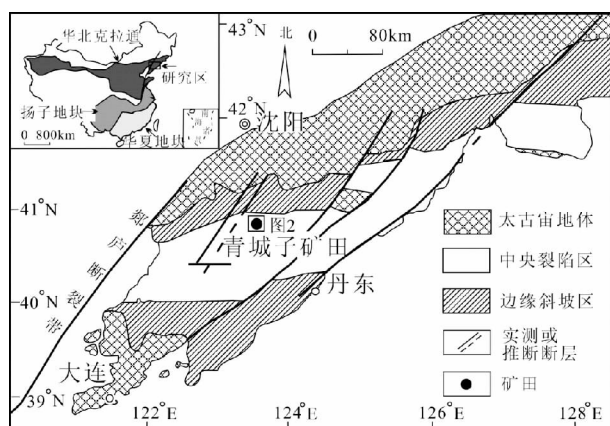


图1 辽东青城子矿田区域地质略图(据王文清和曲亚军,2000;Yu *et al.*, 2009)

Fig. 1 Simplified geological map of the Qingchengzi orefield in the eastern Liaoning Province (after Wang and Qu, 2000; Yu *et al.*, 2009)

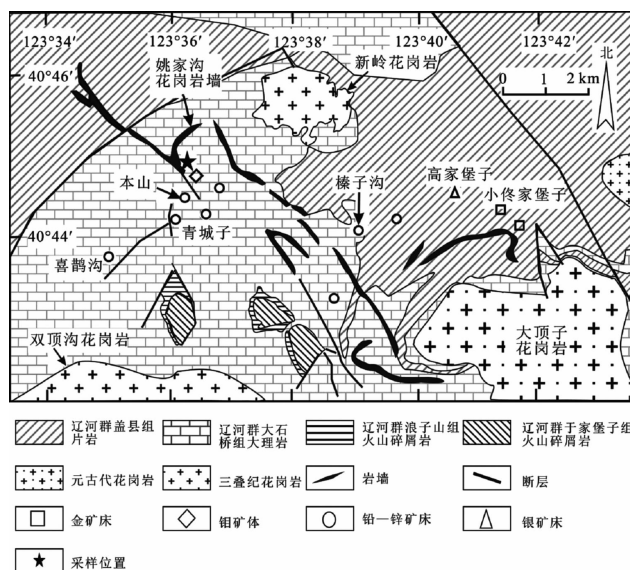


图2 青城子矿田的地质简图(据辽宁省有色地质局勘探总院,1990^①;Yu *et al.*, 2009)

Fig. 2 Sketch geological map of the Qingchengzi orefield (after Yu *et al.*, 2009)

(如小佟家堡子金矿床、高家堡子银矿床)。这些裂谷沉积建造在距今大约 1.8Ga 时经受了角闪岩相到绿片岩相变质作用,形成斜长角闪岩、变粒岩、多种片岩和大理岩(薛春纪等,2003)。

青城子及邻区内岩浆活动强烈(图2),侵入岩分布广泛,形成时代主要集中在古元古代和中生代。古元古代中晚

① 辽宁省有色地质局勘探总院. 1990. 青城子区域地质图(内部资料)

期,形成有地壳重熔型钠质花岗岩,主要分布在水泉、连山关、石家岭和大顶子等地,其中大顶子岩体是黑云母斜长花岗岩,侵位时代为 1740 ~ 1621 Ma (黑云母 K-Ar 法,方如恒等,1994)。

中生代区域构造-岩浆活动强烈,侵入岩十分发育,以酸性岩体(墙)为主。青城子矿田的北侧有新岭岩体和姚家沟岩体,南侧有双顶沟岩体。新岭黑云母花岗岩的侵位年龄为 227 ~ 218 Ma (黑云母 K-Ar 法,方如恒等,1994),这与其锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 225.3 ± 1.8 Ma (Yu *et al.*, 2009) 大体一致。双顶沟黑云母花岗岩形成的年龄为 231 ± 5 Ma (黑云母 K-Ar 法,方如恒等,1994),姚家沟斑状花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 184.5 ± 1.6 Ma (Yu *et al.*, 2009)。矿田范围内不同规模的煌斑岩脉分布广泛,其 K-Ar 同位素年龄值变化范围为 211 ~ 130 Ma (全岩 K-Ar 法,刘国平和艾永福,2002)。

2 矿床地质

青城子矿田的赋矿围岩主要为辽河群大石桥组大理岩,其内侵入有大量的花岗岩类岩体,代表性岩体分别是姚家沟、新岭、双顶沟和大顶子岩体。

青城子矿田各类矿体几何形态十分复杂多样,受构造控制明显,其矿体形态和产状大致可归纳为三类(方如恒等,1994):

(1) 层状、似层状矿体:形态稳定,与岩层整合产出,矿体规模大。如榛子沟矿体,矿体长达 1500 ~ 2000 m,单个矿体 50 ~ 200 m,铅的平均品位 2.72%,锌 4.0%,约占全区总储量 30%。

(2) 沿切层断裂充填交代的脉状矿体:这类矿体主要分布在本山一带,断裂在切过有利岩层大理岩时矿体变得富厚。这类矿体规模较小,铅的平均品位 4.42%,锌 1.01%,约占全区总储量 30%。

(3) 主断裂一侧的沿层羽毛状矿体:这类矿体主要分布在南山一带,产出主于主干断裂一侧,形如羽毛,其规模大小不等。铅的平均品位 5.0%,锌 0.91%,约占全区总储量 37%。

青城子矿田各矿床矿石类型较多(如浸染状矿石、致密块状矿石、条带状矿石和细脉浸染状矿石等),但金属矿物种类较为简单,主要有:黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂、白铁矿和辉钼矿,此外尚有少量(或微量)的磁铁矿、辉铜矿、银黝铜矿、深红银矿、辉银矿、硫锑银矿、金银矿和银金矿等十几种金银矿物;脉石矿物以方解石、白云石、石英为主。矿物共生组合主要有黄铁矿-方铅矿;黄铁矿-方铅矿-闪锌矿;黄铁矿-磁黄铁矿-方铅矿;黄铁矿(白铁矿)-闪锌矿-黄铜矿;毒砂-黄铁矿-方铅矿;方铅矿-闪锌矿等。含金、银矿物多与黄铁矿、方铅矿共生。

姚家沟矽卡岩型钼矿床产于本山以北一带,位于姚家沟花岗岩体与辽河群大石桥组大理岩(图 3a)的接触带及其附



图3 姚家沟钼矿床围岩和辉钼矿矿石标本

(a)-围岩:大理岩;(b)-与黄铁矿伴生的辉钼矿;(c)-矽卡岩中的浸染状辉钼矿;(d)-与石英脉伴生的辉钼矿

Fig. 3 Host rock and molybdenite specimens in Yaojiagou molybdenum deposit

近的围岩中。辉钼矿在岩体和矽卡岩内呈以下方式产出:(1) 浸染状散布于矿物粒间(图 3b)或石榴子石裂纹中,辉钼矿粒径一般为 0.5 ~ 1.0 mm;(2) 单一辉钼矿细脉(图 3d),细脉宽 0.1 ~ 0.5 mm;(3) 结晶粗大的菊花状集合体产出(图 3c),粒径大小 5 ~ 7 mm,见于矿床边缘,但数量较少。矿石多呈半自形-他形叶片结构,残余结构,具浸染状、细脉状或网脉状构造。矿石矿物主要有辉钼矿和黄铁矿,含少量闪锌矿、方铅矿和黄铜矿等(图 3b, d);脉石矿物有石榴子石、透辉石、符山石、阳起石、透闪石、金云母、绿帘石、石英、方解石和萤石等。围岩蚀变类型与围岩性质有关,矽卡岩的热液蚀变有黄铁矿化、绿泥石化、碳酸盐化和硅化,其中以硅化作用与钼矿化关系较为密切。细粒花岗岩以发育绢云母化和硅化为特征。矿化蚀变作用可分为 5 个阶段:(1) 矽卡岩阶段,除形成石榴子石和透辉石外,还发育透闪石、阳起石、硅镁石、石英、金云母、绿帘石、方解石等,偶见辉钼矿化;(2) 磁铁矿阶段,以磁铁矿为主,伴生有部分黄铁矿、方铅矿和黄铜矿;(3) 辉钼矿阶段,为主要矿化阶段,辉钼矿呈浸染状、团块状、网脉状交代石榴子石矽卡岩和透辉石矽卡岩;(4) 铅、锌多金属硫化物阶段,形成方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿等,铅锌矿化与钼矿化在空间上分离,一般分布于钼矿床外侧的大理岩中;(5) 晚期碳酸盐阶段,发育方解石和玉髓,伴有少量黄铁矿和方铅矿,基本未见辉钼矿化。

3 采样与测试

测试样品采自本山北部,毗邻姚家沟岩体的一处砷卡岩型钼矿床,坐标点为 123°36′11.4″E,40°44′43.8″N(图 2),层位相当于大石桥组的中下段,即本山和喜鹊沟等钼-铅-锌矿床的层位之上。用于 Re-Os 同位素年龄测定的 8 件辉钼矿样品分别采自钼矿床的不同位置。辉钼矿多呈鳞片状集合体镶嵌在围岩中,局部地段与黄铁矿和黄铜矿呈共生结构关系。辉钼矿样品是采用特制工具直接从手标本上获取的,并且在实体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%。

样品辉钼矿的 Re-Os 同位素组成是在国家地质实验测试中心采用同位素稀释 ICP-MS 质谱法测定;Re-Os 化学分离步骤和质谱测定主要包括分解样品、蒸馏分离 Re、萃取分离 Os、质谱测定四步,前人对样品化学处理过程和样品测试方法的详细过程已有很多叙述,在此不再叙述。详细流程参见有关文献(Shirey and Walker, 1995;屈文俊和杜安道, 2003;杜安道等,2009)。实验采用国家标准物质 GBW04436(JDC)为标样,监控化学流程和分析数据的可靠性。本次辉钼矿 Re-Os 定年实验的 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。模式年龄的不确定度还包括衰变常数的不确定度(1.02%)。

4 测试结果

8 件辉钼矿样品 Re-Os 同位素测试结果见表 1。给出的 8 件模式年龄介于 166.1 ± 2.3Ma ~ 169.1 ± 2.5Ma 之间,加权平均值为 167.54 ± 0.87Ma (MSWD = 0.71)。采用¹⁸⁷Re 衰

表 1 姚家沟钼矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素测定结果

Table 1 Re-Os isotopic analyses of molybdenite separates from the Yaojiagou molybdenum deposit

样品号	样重 (g)	Re (× 10 ⁻⁶)	Os (× 10 ⁻⁹)	¹⁸⁷ Re (× 10 ⁻⁶)	¹⁸⁷ Os (× 10 ⁻⁹)	模式 年龄 (Ma)
QCZ5.3	0.03070	98.12	0.2998	61.67	172.0	167.1
QCZ5.1	0.01116	184.7	0.0836	116.1	322.2	166.4
QCZ5.2	0.00976	144.4	0.3451	90.78	254.6	168.1
QCZ5.4	0.01178	104.2	0.3145	65.51	183.4	167.8
QCZ9.1	0.01060	144.0	0.6208	90.48	255.2	169.1
QCZ9.2	0.01035	136.9	0.1894	86.05	242.2	168.7
QCZ9.3	0.01147	108.3	0.0193	68.05	188.6	166.1
QCZ10	0.01347	113.8	0.1557	71.54	199.9	167.5

变常数值 $\lambda = 1.666 \times 10^{-11}/a$ (Smoliar *et al.*, 1996), 利用 ISOPLOT 软件将 8 件数据回归成一条直线,求得等时线年龄为 168.8 ± 3.9Ma (MSWD = 1.12) (图 4)。本次研究对矿石矿物辉钼矿进行直接定年,代表了姚家沟钼矿床的形成时代。表 1 的 Re-Os 同位素测定结果表明:不同位置的辉钼矿样品 Re-Os 年龄大致相同,8 件辉钼矿的 Re-Os 同位素数据的等时线年龄(图 4) MSWD 值较小,说明等时线年龄可靠。¹⁸⁷Os_i 初始值为 -1.6 ± 4.9 × 10⁻⁹,接近于 0,表明辉钼矿形成时几乎不含¹⁸⁷Os,辉钼矿中的¹⁸⁷Os 系由¹⁸⁷Re 衰变形成,符合 Re-Os 同位素体系模式年龄计算条件。而且模式年龄的加权平均值 167.54 ± 0.87Ma 和等时线年龄 168.8 ± 3.9Ma 吻合较好,说明所获得等时线年龄代表辉钼矿的结晶时间。

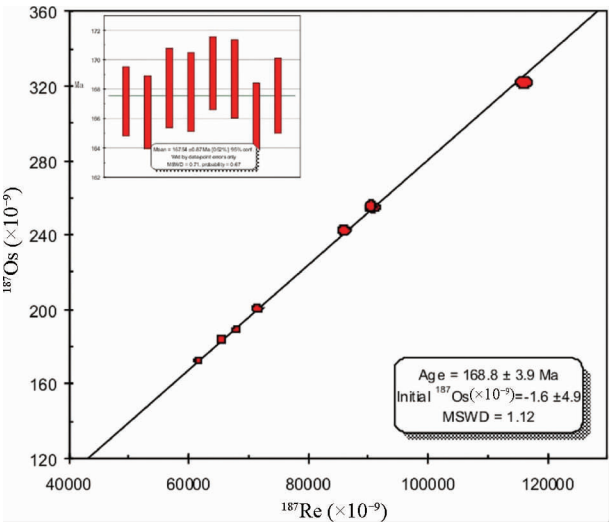


图 4 姚家沟钼矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素等时线图
Fig. 4 Re-Os isochron of molybdenum in the Yaojiagou molybdenum deposit

5 讨论

5.1 成矿时代

青城子矿田周围岩浆活动比较强烈,矿田几乎全部被花岗岩体所包围。根据前人数据(见表 2),整个矿田除了东南部的大顶子岩体为古元古代(约 1621Ma,锆石 U-Pb 法,方如恒等,1994),其余岩体形成于中生代:北部有新岭岩体(约 225Ma,锆石 U-Pb 法,Yu *et al.*, 2009)和姚家沟岩体(约 185Ma,锆石 U-Pb 法,Yu *et al.*, 2009),南部有大面积出露的双顶沟岩体(约 230Ma,锆石 U-Pb 法,方如恒等,1994),燕山期闪长岩脉(约 140Ma,全岩 K-Ar 法,方如恒等,1994)遍布全区,且广泛发育燕山期煌斑岩脉(约 130Ma,全岩 K-Ar 法,刘国平和艾永福,2002)。

表2 青城子矿田中生代的成岩成矿年代学格架

Table 2 The Mesozoic isochron data of the Qingchengzi orefield

岩浆期次	岩体	测年方法	年龄值 (Ma)	数据来源	成矿时代	数据来源
燕山期	姚家沟	锆石 U-Pb	184.5 ± 1.6	Yu <i>et al.</i> , 2009	姚家沟矽卡岩中的 辉钼矿 168.8 ± 3.9Ma	本文
	煌斑岩脉	黑云母 K-Ar	84 ~ 100	方如恒等(1994) 及 其参考文献	高家堡子银矿独立银矿石 138.7 ± 4.1Ma	Yu <i>et al.</i> , 2009
		全岩 K-Ar	130 ~ 150	刘国平和艾永福,2002		
	闪长岩脉	全岩 K-Ar	140	方如恒等,1994		
印支期	新岭	黑云母 K-Ar	214 ~ 231	103 队 ^① ,1976	榛子沟闪锌矿 221 ± 12Ma	
			217.6 ~ 226.7	方如恒等,1994		
		锆石 U-Pb	225.3 ± 1.8	Yu <i>et al.</i> , 2009	小佟家堡子金矿 217.6Ma ~ 230.7 ± 5Ma	
	双顶沟	黑云母 K-Ar	236 ~ 346	103 队,1976	喜鹊沟黄铁矿 225Ma	Yu <i>et al.</i> , 2009
		锆石 U-Pb	200 ~ 220	103 队,1976		
			230.7 ± 5	方如恒等,1994		

近年来所获新资料和新数据显示,青城子矿田大多数矿床的成矿作用与中生代岩浆热液活动有关:小佟家堡子金矿床的形成时代被认为是燕山期(167Ma, 绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar法, 刘国平和艾永福, 2002), 另一种观点则认为该矿床的形成时间为印支期(217.6Ma ~ 230.7 ± 5Ma, Rb-Sr 等时线和⁴⁰Ar/³⁹Ar法, 薛春纪等, 2003), 与金、银成矿关系密切的硅化等围岩蚀变可能主要发生在印支中期(薛春纪等, 2003)。榛子沟铅-锌矿床的成矿时代为 221 ± 12Ma(闪锌矿, Rb-Sr 等时线, Yu *et al.*, 2009)、喜鹊沟铅-锌矿床成矿时代为 225Ma(黄铁矿, Rb-Sr 等时线, Yu *et al.*, 2009)、高家堡子银矿床成矿时代为 138 ± 4.1Ma(独立银矿石, Rb-Sr 等时线, Yu *et al.*, 2009), 即青城子矿田的铅-锌和银矿床的形成时代大约分别为 225Ma 和 140Ma。

根据已有同位素年代学数据, 可以确定本区中生代岩浆活动可分为印支期和燕山期, 印支期岩浆活动主要为 225Ma(以新岭和双顶沟岩体为代表), 燕山期岩浆活动分别为 185Ma(以姚家沟岩体为代表)和 130 ~ 140Ma(以煌斑岩脉和闪长岩脉为代表)。相应的成矿作用可分为 2 期: (1) 印支期成矿以榛子沟铅-锌矿床、小佟家堡子金矿床和喜鹊沟铅-锌矿床为代表, 其成矿时代分别与印支期新岭岩体和双顶沟岩体一致, 暗示两者具有密切的成因联系。(2) 燕山期成矿以高家堡子银矿床为代表, 可能与本区分布的 130 ~ 140Ma 煌斑岩脉和闪长岩脉有关, 本文测定的姚家沟矿床成矿时代为 168.8 ± 3.9Ma, 与姚家沟岩体 184.5 ± 1.6Ma (Yu *et al.*, 2009) 年龄相差 16Ma, 推测姚家沟花岗岩体可能存在多次侵入, 姚家沟矿床与其后期的岩浆侵入有关, 属于早中侏罗纪时期构造-岩浆作用及相关流体活动的产物。

5.2 成矿动力学背景探讨

华北克拉通北缘中生代构造-岩浆活动和大规模成矿作

用, 形成于中亚造山带后碰撞伸展作用阶段(毛景文等, 2003, 2005; Chen *et al.*, 2007; 陈衍景等, 2009)。毛景文等(2003, 2005)认为, 华北克拉通在中生代发生三期大规模成矿事件, 最早一期时间是 200 ~ 160Ma, 即三叠纪晚期到侏罗纪中期, 华北克拉通在一定程度上仍然处于华北板块与西伯利亚板块后碰撞造山时期, 造山过程中的松弛阶段, 大量花岗岩浆经过同熔或重熔作用形成及上侵定位, 形成如杨家杖子斑岩-矽卡岩型钼矿床等有关岩体。(Chen *et al.*, 2007)认为, 进入中生代, 华北克拉通开始“被活化”, 发育较多岩浆岩和热液矿床, 其整体性和统一性也随即遭受破坏。中侏罗纪及其以前, 华北克拉通的构造演化主要受古亚洲洋闭合的影响, 在白垩纪及其以后, 华北克拉通地质演化主要受太平洋板块活动的引领; 在晚侏罗纪-白垩纪初, 古亚洲洋构造域转化为太平洋构造域, 引发了大规模、多样式、多矿种的成矿作用(翟明国等, 2003; 陈根文等, 2008)。刘红涛等(2002)通过对华北板块北缘中生代花岗岩的研究指出, 160 Ma 以前的中生代早中期, 华北板块北缘岩石圈仍处于碰撞后前期的强烈加厚的过程之中, 表明此时华北板块北缘处于后碰撞造山环境。

近年来的研究资料表明, 姚家沟矽卡岩型钼矿床的成矿时代与华北克拉通东北缘的一些钼矿床较为相近(表 3): 辽西肖家营子矽卡岩型钼矿床的辉钼矿成矿 Re-Os 年龄为 165.5 ± 4.6Ma(代军治等, 2007), 其成矿岩体-闪长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 169.9 ± 1.4Ma(代军治, 2008); 辽西兰家沟矽卡岩型钼矿床的辉钼矿成矿 Re-Os 年龄为 181.6 ± 6.5Ma (Han *et al.*, 2009), 其成矿岩体-细粒花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 188.9 ± 1.2Ma(代军治等, 2008); 杨家杖子矽卡岩型钼矿床的辉钼矿 Re-Os 年龄为 191 ~ 187Ma(黄典豪等, 1996); 其岩体主体形成于 190 ~ 180Ma(吴福元等, 2006)。这些数据与本文测定的姚家沟矽卡岩型钼

① 103 队和青城子铅矿地质综合研究组. 1976. 青城子矿田地质综合研究总结报告(1970 ~ 1975). 1 - 143

表 3 华北克拉通东北缘典型钼矿床成岩成矿年代学格架
Table 3 The isochron data of diagenesis and mineralization in the northeast margin of North China Craton

钼矿床名称	Re-Os 年龄 (Ma)	资料来源	岩体年龄 (Ma)	资料来源
姚家沟	168.8 ± 3.9	本文	184.5 ± 1.6	Yu <i>et al.</i> , 2009
肖家营子	165.5 ± 4.6	代军治等, 2007	169.9 ± 1.4	代军治, 2008
兰家沟	181.6 ± 6.5	Han <i>et al.</i> , 2009	188.9 ± 1.2	代军治等, 2008
杨家杖子	191 ~ 187	黄典豪等, 1996	190 ~ 180	吴福元等, 2006

矿床形成时代大致相近, 它们的成岩成矿时代大约在 190 ~ 160Ma, 都是侏罗纪早中期构造-岩浆和相关流体活动的产物, 属于毛景文等 (2003, 2005) 提出的华北克拉通中生代第一期 (200 ~ 160Ma) 大规模成矿事件。

综上所述, 我们推断, 三叠纪晚期到侏罗纪中期, 华北克拉通东北缘中生代钼成矿带 (包括姚家沟、肖家营子、兰家沟和杨家杖子等钼矿床) 主要受古亚洲洋闭合的影响, 是华北板块与西伯利亚板块后碰撞造山阶段构造-岩浆作用和相关流体活动的产物, 中生代大规模岩浆活动为该区的铅-锌与钼矿床的形成提供了动力、热力、热液和物质来源。

6 结论

(1) 首次对青城子矿田姚家沟钼矿床中的辉钼矿样品进行了 Re-Os 同位素分析, 所获等时线年龄为 168.8 ± 3.9 Ma, 代表流体成矿时间, 属于侏罗纪早中期构造-岩浆作用及相关流体活动的产物。青城子矿田中生代岩浆活动分为印支期和燕山期, 其对应的成矿作用也有两期, 姚家沟矽卡岩型钼矿床的形成与燕山期姚家沟岩浆活动有关。

(2) 结合已有的年代学数据和前人的观点, 我们推断, 华北克拉通东北缘中生代钼成矿带可能是华北板块与西伯利亚板块后碰撞造山阶段构造-岩浆作用和相关流体活动的产物, 中生代大规模岩浆活动为该区的铅-锌与钼等矿床的形成提供了动力、热力、热液和物质来源。

致谢 本研究的野外地质调查与采样工作得到沈阳地质调查中心赵东方工程师的支持和帮助, 谨表衷心感谢。审稿人对本文提出了重要的修改意见, 特此感谢!

References

Chen GW, Xia H and Chen SQ. 2008. The geological evidences of Late Mesozoic tectonic transition in North China. *Geology in China*, 35 (6): 1162 - 1177 (in Chinese with English abstract)
Chen J. 2000. Turbidite type of silver and the gold polymetallic deposit of Liaoning Qingchengzi orefields. *Liaoning Geology*, 17 (4): 241 -

244 (in Chinese with English abstract)
Chen YJ, Chen HY, Zaw K, Pimjino F and Zlumbg ZJ. 2007. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: An overview. *Ore Geology Review*, 31: 139 - 169
Chen YJ, Zhai MG and Jiang SY. 2009. Significant achievements and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (11): 2695 - 2726 (in Chinese with English abstract)
Dai JZ, Mao JW, Du AD *et al.* 2007. Re-Os dating of molybdenite from the Xiaojiayingzi Mo (Fe) deposit in western Liaoning and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 81 (7): 918 - 923 (in Chinese with English abstract)
Dai JZ. 2008. The metallogenesis and geodynamic settings of molybdenum (copper) deposits in Yan-Liao metallogenic belt. Ph. D. Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1 - 107 (in Chinese with English summary)
Dai JZ, Mao JW, Zhao CS *et al.* 2008. Zircon SHRIMP U-Pb age and petrogeochemical features of the Lanjiagou granite in western Liaoning Province. *Acta Geologica Sinica*, 82 (11): 1555 - 1564 (in Chinese with English abstract)
Ding TP, Jiang SY, Wan DF *et al.* 1992. Stable Isotope Studies on the Proterozoic Pb-Zn Mineral Belt of Northern China. Beijing: Beijing Science and Technology Publishing House, 36 - 60 (in Chinese with English abstract)
Du AD, Qu WJ, Li C and Yang G. 2009. A review on the development of Re-Os isotopic dating methods and techniques. *Rock and Mineral Analysis*, 28 (3): 288 - 304 (in Chinese with English abstract)
Fang RH, He SS and Fu DB. 1994. Nonferrous metallic ore deposit in the east Liaoning-south Jilin Early Proterozoic rift. In: Rui ZY, Shi LD and Fang RH. (eds.). *Geology of Nonferrous Metallic Deposits in the Northern Margin of the North China Landmass and Its Adjacent Area*. Beijing: Geological Publishing House, 54 - 109 (in Chinese)
Huang DH, Du AD, Wu CY, Liu LS, Sun YL and Zou XQ. 1996. Metalochronology of molybdenum (copper) deposits in the north China platform: Re-Os age of molybdenite and its geological significance. *Mineral Deposits*, 15 (4): 289 - 297 (in Chinese with English abstract)
Han CM, Xiao WJ, Zhao GC, Sun M, Qu WJ and Du AD. 2009. A Re-Os study of molybdenites from the Lanjiagou Mo deposit of North China Craton and its geological significance. *Gondwana Research*, 16: 264 - 271
Jiang SY. 1987. Pb-isotope composition at Qingchengzi lead-zinc deposit and its geological application. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, (4): 112 - 119 (in Chinese with English abstract)
Jiang SY. 1988. Stable isotope geological characteristics of oxygen, carbon, lead and sulfur and metallogenesis of the Qingchengzi lead-zinc deposit, Liaoning Province. *Geological Review*, 34 (6): 515 - 523 (in Chinese with English abstract)
Jiang SY and Wei JY. 1989. Geochemistry of the Qingchengzi lead-zinc deposit, Liaoning Province. *Mineral Deposits*, 8 (4): 20 - 28 (in Chinese with English abstract)
Liu GP and Ai YF. 2002. Study on ore-forming epoch of Xiaotongjiapuzi gold deposit, Liaoning Province. *Mineral Deposits*, 21 (1): 53 - 57 (in Chinese with English abstract)
Liu HT, Zhai MG, Liu JM and Sun SH. 2002. The Mesozoic granitoids in the northern marginal region of North China Craton: Evolution from post-collisional to anorogenic settings. *Acta Petrologica Sinica*, 18 (4): 33 - 448 (in Chinese with English abstract)
Mao JW, Zhang ZH, Yu JJ, Wang YT and Zhu BG. 2003. The geodynamic setting of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas: Implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits. *Science in China (Series D)*, 33 (4): 289 - 299 (in Chinese)

- Mao JW, Xie GQ, Zhang ZH, Li XF, Wang YT, Zhang CQ and Li YF. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169 – 188 (in Chinese with English abstract)
- Qu WJ and Du AD. 2003. Highly precise Re-Os dating of molybdenite by ICP-MS with carius tube sample digestion. *Rock and Mineral Analysis*, 22(4): 254 – 262 (in Chinese with English abstract)
- Sha DM, Zhao DF, Zhang S *et al.* 2007. Deep prospecting work is beginning to dawn of Qingchengzi Pb-Zn deposits of Liaoning Province. *Acta Mineralogica Sinica*, (suppl): 521 – 522 (in Chinese with English abstract)
- Shirey SB and Walker RJ. 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis. *Anal. Chem.*, 67: 2136 – 2141
- Smoliar MI, Walker RJ and Morgan JW. 1996. Re-Os ages of group IIA, IIIA, IVA and VIB iron meteorites. *Science*, 271: 1099 – 1102
- Wang KY, Zhao YM and Cao XL. 1994. The Geology of Typical Pb-Zn Deposits of the North Margin of Proterozoic North China Platform. Beijing. Geological Publishing House; 1 – 190 (in Chinese)
- Wang WQ and Qu YJ. 2000. Geological characteristics and metallogenic models of gold deposits of Paleoproterozoic in eastern Liaoning Province. *Liaoning Geology*, 17(3): 161 – 172 (in Chinese with English abstract)
- Wang XF, Liu PD, Yang GL, Zhang XM and Yi X. 2010. Analyzing the geological features of the Qingchengzi Pb-Zn orefield. *Non-ferrous Mining and Metallurgy*, 26(2): 3 – 6 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Yang JH, Zhang YB and Liu XM. 2006. Emplacement ages of the Mesozoic granites in southeastern part of the western Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 315 – 325 (in Chinese with English abstract)
- Xue CJ, Chen YC, Lu YF *et al.* 2003. Metallogenic epochs of Au and Ag deposits in Qingchengzi ore-clustered area, eastern Liaoning Province. *Mineral Deposits*, 22(2): 177 – 184 (in Chinese with English abstract)
- Yu G, Chen JF, Xue CJ, Chen YC, Chen FK and Du XY. 2009. Geochronological framework and Pb, Sr isotope geochemistry of the Qingchengzi Pb-Zn-Ag-Au orefield, Northeastern China. *Ore Geology Reviews*, 35: 367 – 382
- Zhai MG, Zhu RX, Liu JM, Meng QR, Hou QL, Hu SB, Li Z, Zhang HF and Liu W. 2003. The key timing of the Mesozoic tectonic in northeastern China. *Science in China (Series D)*, 33(10): 913 – 920 (in Chinese)

附中文参考文献

- 陈根文, 夏换, 陈绍清. 2008. 华北地区晚中生代构造转折的地质证据. *中国地质*, 35(6): 1162 – 1177
- 陈江. 2000. 辽宁青城子矿田浊积岩型金银多金属矿床. *辽宁地质*. 17(4): 241 – 244
- 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 2009. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题. *岩石学报*. 25(11): 2695 – 2726
- 代军治, 毛景文, 杜安道等. 2007. 辽西肖家营子钼(铁)矿床 Re-Os 年龄及其地质意义. *地质学报*. 81(7): 918 – 923
- 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. 北京: 中国地质科学院, 1 – 107

- 代军治, 毛景文, 赵财胜等. 2008. 辽西兰家沟钼矿床花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及岩石化学特征. *地质学报*. 82(11): 1555 – 1564
- 丁梯平, 蒋少涌, 万德芳等. 1992. 华北元古宙铅-锌成矿带稳定同位素研究. 北京: 北京科学技术出版社, 36 – 60
- 杜安道, 屈文俊, 李超, 杨刚. 2009. 铼-钼同位素定年方法及分析测试技术的进展. *岩矿测试*, 28(3): 288 – 304
- 方如恒, 何恃松, 傅德彬. 1994. 辽东-吉南古元古代裂谷有色金属矿床. 见: 芮宗瑶, 施林道, 方如恒编著. 华北陆块北缘及邻区有色金属矿床地质. 北京: 地质出版社, 54 – 109
- 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(铜)矿铼-钼年龄及其地质意义. *矿床地质*, 15(4): 289 – 297
- 蒋少涌. 1987. 辽宁青城子铅-锌矿床的铅同位素组成及其地质特征. *北京大学学报(自然科学版)*, (4): 112 – 119
- 蒋少涌. 1988. 辽宁青城子铅-锌矿床氧、碳、铅、硫同位素地质特征及矿床成因. *地质论评*, 34(6): 515 – 523
- 蒋少涌, 魏菊英. 1989. 青城子铅-锌矿床的地球化学. *矿床地质*, 8(4): 20 – 28
- 刘国平, 艾永福. 2002. 辽宁小佟家堡子金矿床成矿时代探讨. *矿床地质*, 21(1): 53 – 57
- 刘红涛, 翟明国, 刘建明, 孙世华. 2002. 华北克拉通北缘中生代花岗岩: 从碰撞后到非造山. *岩石学报*, 18(4): 433 – 448
- 毛景文, 张作衡, 余金杰, 王义天, 朱宝贵. 2003. 华北及邻区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. *中国科学(D 辑)*, 33(4): 289 – 299
- 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. *岩石学报*, 21(1): 169 – 188
- 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-钼地质年龄. *岩矿测试*, 22(4): 254 – 262
- 沙德铭, 赵东芳, 张森等. 2007. 辽宁青城子铅-锌矿深部找矿工作曙光初现. *矿物学报*, (增刊): 521 – 522
- 王魁元, 赵彦明, 曹秀兰. 1994. 华北陆台北缘元古宙典型铅锌矿地质. 北京: 地质出版社, 1 – 190
- 王秀福, 刘培栋, 桂杨莲, 张秀敏, 衣欣. 2010. 青城子铅-锌矿田地质特征. *有色矿冶*, 26(2): 3 – 6
- 王文清, 曲亚军. 2000. 辽东古元古宙金矿地质特征及成矿模式. *辽宁地质*, 17(3): 161 – 172
- 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. *岩石学报*, 22(2): 315 – 325
- 薛春纪, 陈毓川, 路远发等. 2003. 辽东青城子矿集区金、银成矿时代及地质意义. *矿床地质*, 22(2): 177 – 184
- 翟明国, 朱日详, 刘建明, 孟庆任, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟. 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. *中国科学(D 辑)*, 33(10): 913 – 920