

吉林安图刘生店钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义

王 辉¹⁾, 任云生¹⁾, 赵华雷¹⁾, 鞠 楠¹⁾, 屈文俊²⁾

1) 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061;

2) 国家地质实验测试中心, 北京 100037

摘 要: 刘生店钼矿是吉林中东部新发现的一个重要斑岩型钼矿床。6件辉钼矿样品 Re-Os 同位素分析表明: 辉钼矿中 Re 含量为 9.88 ~ 11.37 $\mu\text{g/g}$, Os 含量为 27.68 ~ 32.40 ng/g , 获得的模式年龄为 $(168.0 \pm 2.3) \sim (170.8 \pm 2.5)$ Ma, 加权平均年龄为 (169.36 ± 0.97) Ma, $\text{MSWD}=0.73$, 等时线年龄 (185 ± 12) Ma, $\text{MSWD}=0.72$ 。以加权平均年龄作为该矿床的形成年龄, 即钼的成矿作用发生于中侏罗世, 与同属小兴安岭-张广才岭钼矿带的大黑山和福安堡矿床成矿时代基本一致, 是燕山早期太平洋板块俯冲构造背景下, 吉黑东部大规模钼成矿作用的集中表现。据辉钼矿中 Re、Os 含量, 初步认为刘生店钼矿成矿物质以壳源为主, 但混有少量幔源组分。

关键词: Re-Os 同位素定年; 辉钼矿; 斑岩型钼矿; 刘生店钼矿; 吉林安图

中图分类号: P618.65; P597.3 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2011.06.08

Re-Os Dating of Molybdenite from the Liushengdian Molybdenum Deposit in Antu Area of Jilin Province and Its Geological Significance

WANG Hui¹⁾, REN Yun-sheng¹⁾, ZHAO Hua-lei¹⁾, JU Nan¹⁾, QU Wen-jun²⁾

1) College of Earth Science, Jilin University, Changchun, Jilin 130061;

2) National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037

Abstract: The Liushengdian ore deposit is one of the porphyry molybdenum deposits recently discovered in eastern Jilin Province. Re-Os dating of six molybdenite samples collected from typical ores shows that the Re and Os values of samples vary between 9.88 and 11.37 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ and between 27.68 and 32.40 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ respectively; the model age ranges from (168.0 ± 2.3) to (170.8 ± 2.5) Ma, with the weighted mean age being (169.36 ± 0.97) Ma ($\text{MSWD}=0.73$), and the isochron age being (185 ± 12) Ma ($\text{MSWD}=0.72$). The results indicate that molybdenum mineralization took place in middle Jurassic, roughly contemporaneous with that of Daheishan and Fuanpu molybdenum deposits, which belong to the Xiao Hinggan Mountains-Zhangguangcai Mountain metallogenic belt. These ore deposits were formed by the large-scale Yanshanian metallogenic activity in the eastern part of northeastern China, influenced by the subduction of the Pacific plate. In addition, the Re content of the molybdenite suggests that the ore-forming materials might have been derived mainly from the crust with the participation of small amounts of mantle materials.

Key words: Re-Os dating; molybdenite; porphyry molybdenum deposit; Liushengdian molybdenum deposit; Antu area of Jilin province

本文由中国地质调查局项目(编号: 1212011085485)和吉林大学基本科研业务费项目(编号: 200903025)联合资助。

收稿日期: 2011-10-04; 改回日期: 2011-10-29。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 王辉, 男, 1987年生。硕士研究生。主要从事矿产普查与勘探专业研究。E-mail: wang_hui2007@qq.com。

通讯作者: 任云生, 男, 1969年生。博士, 教授。主要从事矿床地质学与区域成矿规律研究。通讯地址: 130061, 吉林长春市建设街 2199号。E-mail: renys@jlu.edu.cn。

小兴安岭-张广才岭地区是我国重要的钼矿带(罗铭玖等, 1991), 除吉林大黑山钼矿外, 近年来又相继发现了鹿鸣、霍吉河、福安堡、季德屯、大石河、刘生店、双山等 10 余个大、中型钼矿床, 因矿床数量多、品位高、资源量丰富而备受关注。该区钼矿类型以斑岩型单钼矿床为主, 空间上多分布于西拉木伦-长春断裂两侧、敦化-密山断裂以东地区(图 1)。这些矿床成矿年龄的确定将有利于区域钼矿成矿规律的总结, 对于吉黑东部钼矿的成矿构造背景具有重要的指示意义。

辉钼矿 Re-Os 同位素定年是一种直接确定钼矿床成矿年龄的有效手段。然而, 目前仅有文献(李立兴等, 2009; 王成辉等, 2009)对成矿带内的福安堡、大黑山钼矿的辉钼矿 Re-Os 年龄进行了报道, 精确的成矿年代学数据相对较少。基于此, 本文选择该钼矿带南段具有代表性的刘生店钼矿, 在总结矿床地质特征的基础上, 通过辉钼矿 Re-Os 同位素定年研究, 厘定该钼矿床形成时代, 揭示成矿物质来源, 探讨成矿构造环境, 为进一步讨论区域大规模钼成矿作用奠定基础。

1 矿区地质概况

研究区地处华北板块东北部边缘增生带内, 敦化-密山断裂东南侧, 西拉木伦-长春断裂东南段-富尔河断裂西南侧(图 1)。显生宙以来, 该区先后经历了晚古生代佳蒙地块(王成文等, 2008; 周建波等, 2009)与华北板块的碰撞对接、晚古生代-早中生代古亚洲构造域与环太平洋构造域的叠加与转换(邵济安等, 1997; 吴福元等, 1999; 吴智平等, 2007), 不同时期的构造-岩浆活动强烈, 为区内铜、金、钼等内生金属成矿作用提供了良好的成矿地质条件。

刘生店钼矿处于北西向的富尔河断裂和敦化-安图断裂与北东向的敦化-密山断裂和鸭绿江(丹东-两江-安图)断裂相交所形成的菱形区域内, 矿区及外围断裂构造主要有北西向的牛心山-刘生店断裂、鱼亮子-太平屯断裂, 东西向的牛心山-刘生店断裂, 其中刘生店-三岔子断裂是敦化-三道沟深大断裂一部分, 在矿区北侧通过, 横贯全区, 走向近东西, 产状较陡; 牛心山-刘生店断裂分布于矿区的东北部(图 1), 走向北西, 倾向北东, 倾角 70°, 属压扭性构造, 为区内主要的控矿构造(王景德等, 2007)。

矿区内岩浆岩出露面积占矿区总面积的 90%以上, 二长花岗斑岩($\eta\gamma\pi_3^2$)呈岩株状侵入二长花岗岩($\eta\gamma_2^2$)岩基中, 构成了的典型斑岩成矿系统(图 1)。

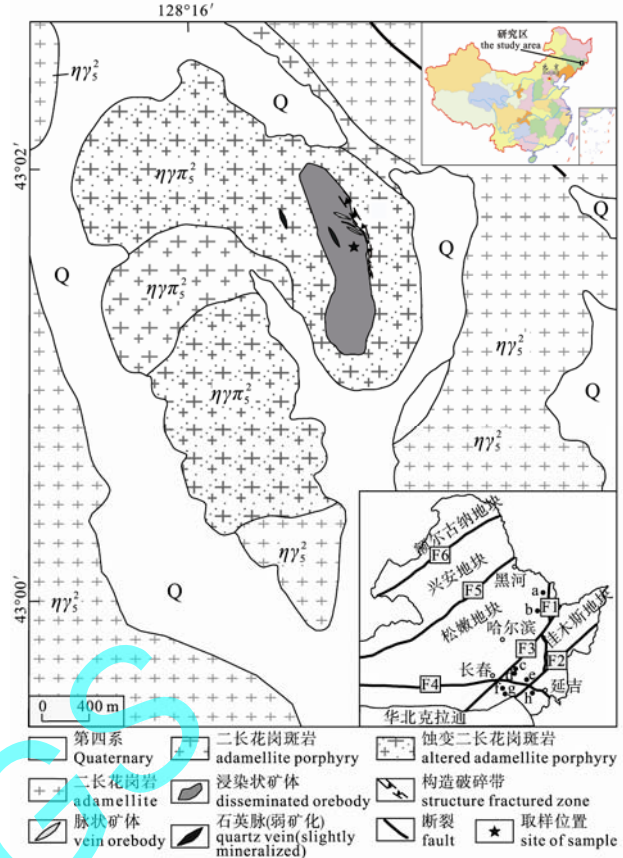


图 1 刘生店钼矿地质简图(大地构造位置图据葛文春等, 2007 修改)

Fig. 1 Simplified geology map of the Liushengdian molybdenum deposit (tectonic division modified after GE Wen-chun et al., 2007)
 F1-牡丹江断裂; F2-敦化-密山断裂; F3-伊通-依兰断裂; F4-西拉木伦-长春断裂; F5-嫩江断裂; F6-塔源-喜桂图断裂; a-霍吉河钼矿床; b-鹿鸣钼矿床; c-福安堡钼矿床; d-季德屯钼矿床; e-大石河钼矿床; f-大黑山钼矿床; g-四方甸子钼矿床; h-刘生店钼矿床
 F1-Mudanjiang fault; F2-Dunhua-Mishan fault; F3-Yitong-Yilan; F4-Xar Moron River-Changchun fault; F5-Nenjiang fault; F6-Tayuan-Xiguitu fault; a-Huojijhe molybdenum deposit; b-Luming molybdenum deposit; c-Fuanpu molybdenum deposit; d-Jidetun molybdenum deposit; e-Dashihe molybdenum deposit; f-Daheishan molybdenum deposit; g-Sifangdianzi molybdenum deposit; h-Liushengdian molybdenum deposit

二长花岗斑岩出露面积约 6 km², 岩体内 70%发生不同程度的蚀变, 为主要的赋矿围岩。二长花岗斑岩呈斑状结构(图 2A), 斑晶主要为斜长石、钾长石、石英、白云母(黑云母蚀变产物), 含量 40%~50%。岩体内发育不同类型的蚀变, 如绢云母化(图 2B, C)、碳酸盐化(图 2D)、硅化、钾长石化、高岭土化、绿泥石化等。

二长花岗斑岩内的蚀变具有明显的分带性, 自斑岩体中心向外依次为钾化带、石英-绢云母化带、泥化带。钾化带出露范围较窄, 且矿化较弱; 石英-绢云母化带位于斑岩体内东侧, 呈椭圆状北西方向

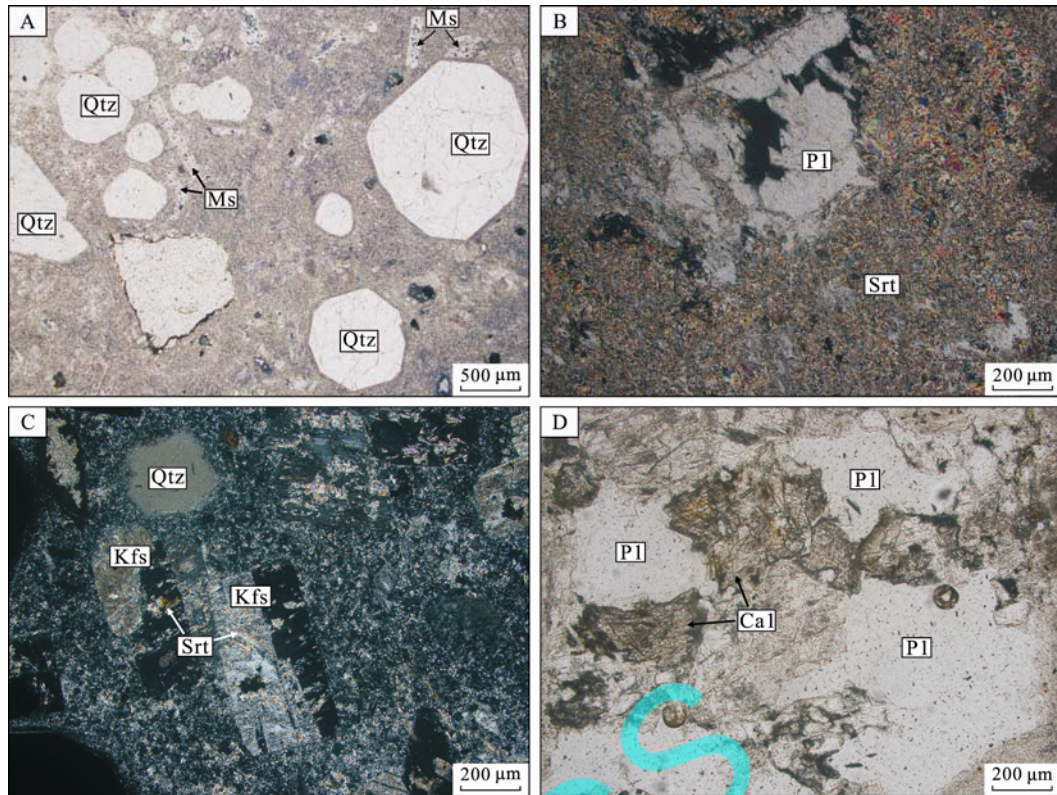


图 2 刘生店钼矿含矿蚀变二长花岗斑岩显微照片

Fig. 2 Microscopic photographs of altered adamellite porphyry in the Liushengdian molybdenum deposit

A-斑状结构; B-斜长石发生绢云母化; C-钾长石发生绢云母化; D-斜长石发生碳酸盐化

矿物代号: Qtz-石英; Ms-白云母; Pl-斜长石; Srt-绢云母; Kfs-钾长石; Cal-方解石

A-Porphyritic texture; B-Sericitization in plagioclase; C-Sericitization in k-feldspar; D-Carbonation in plagioclase

Mineral codes: Qtz-Quartz; Ms-Muscovite; Pl-Plagioclase; Srt-Sericite; Kfs-K-feldspar; Cal-Calcite

展布, 长轴长 2650 m, 短轴长 1030 m, 厚度大于 250 m, 矿化与蚀变强烈, 发育硅化、绢云母化、高岭土化、辉钼矿化及黄铁矿化等, 该带蚀变程度不甚均衡, 在平面上由内向外逐渐减弱, 在垂向上由地表向深部逐渐增强, 带内含钼石英细脉和辉钼矿细脉较发育, 钼品位随含钼率变化而变化, 矿化与蚀变强度呈正相关关系, 钼矿体主要赋存于此带之中。泥化带分布于石英-绢云母化带外侧, 二者呈渐变过渡关系, 出露面积约 1.5 km²。可见高岭土化、绿泥石化及碳酸盐化和褐铁矿化等。蚀变强度从内至外逐渐减弱, 并过渡到正常二长花岗斑岩。

2 矿体及矿石特征

刘生店钼矿目前已发现的工业矿体 7 条, 贫矿体 3 条, 均赋存于石英-绢云母化带之中, 矿体的展布方向受蚀变带所控制。矿体在空间上呈厚板状, 连续性较好, 产状稳定、规模较大、矿化强弱呈过渡性变化, 矿体与围岩呈渐变过渡关系。号主矿体在在平面上呈板状, 剖面上呈似层状, 倾向南西, 倾角 10°~17°, 长约 600 m, 宽 80~456 m, 厚 8~

89.41 m, 平均 28.82 m, 钼品位一般为 0.03%~0.25%, 平均品位 0.075%, 矿体沿走向、倾向和垂向上均呈现出高低相间变化特征(朴英姬, 2010)。

矿化类型主要为细脉型和细脉浸染型。二者空间上密切共生, 前者主要表现为沿微裂隙分布的含辉钼矿石英细脉(图 3A), 钼品位一般较高; 浸染型矿石中辉钼矿颗粒较细(0.5~2 mm), 局部呈粗粒(5~20 mm)集合体分布。矿石中金属矿物以辉钼矿为主, 此外含少量黄铜矿、黄铁矿。辉钼矿镜下多呈片状集合体(图 3B)、浸染状(图 3C)或沿石英裂隙呈不连续的细脉状(图 3D)。非金属矿物以石英、绢云母、白云母、伊利石、绿泥石为主, 其次为钾长石、方解石等。

根据刘生店钼矿床的成矿地质条件、矿化特征、围岩蚀变类型及其分带性判断, 该矿床成因上属斑岩型单钼矿床。

3 样品描述与测试方法

本次研究用于 Re-Os 同位素定年的 6 件辉钼矿样品采自刘生店矿区露天采坑内的原生钼矿石, 赋

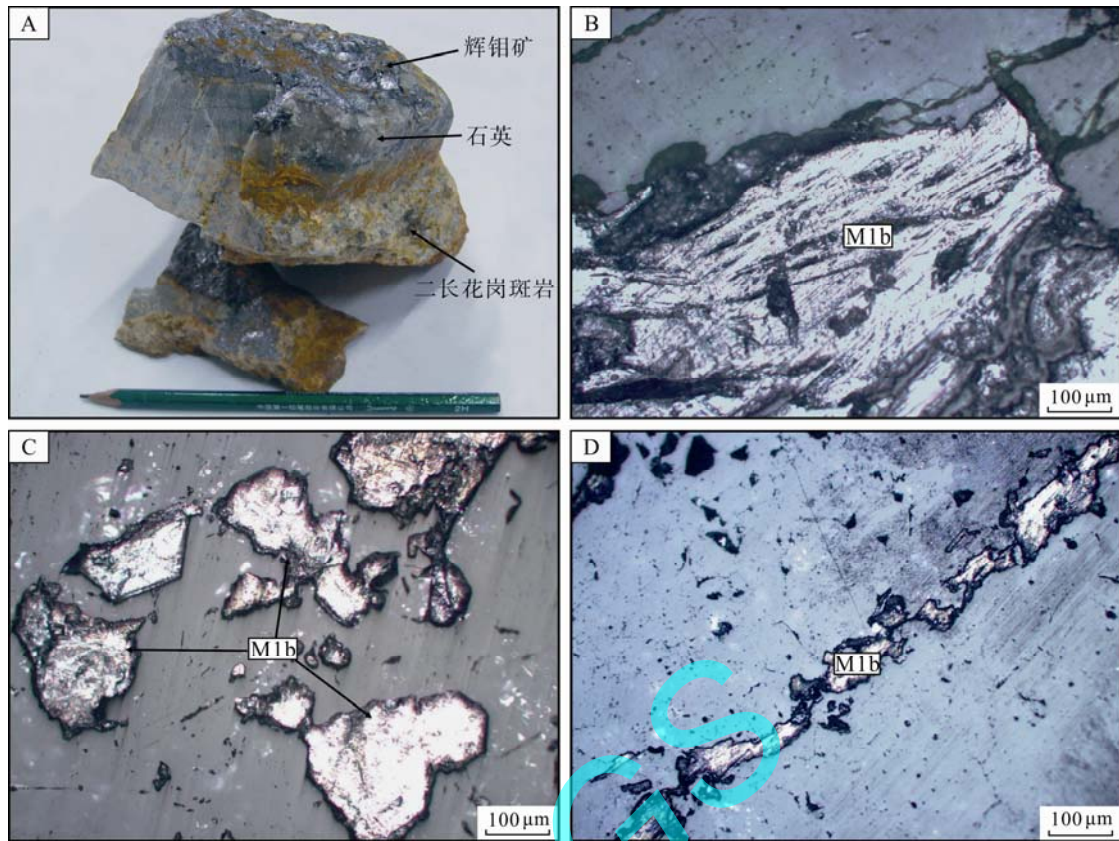


图3 刘生店钼矿石及辉钼矿显微照片

Fig. 3 Ore photographs of the Liushengdian molybdenum deposit

A-石英脉型钼矿石; B-辉钼矿呈片状集合体; C-浸染状钼矿石; D-辉钼矿呈不连续的脉状; M1b-辉钼矿
A-Quartz-vein type molybdenum ore; B-Aggregate of molybdenite flakes; C-Disseminated molybdenum ore;
D-Discontinuous veinlike molybdenite; M1b-Molybdenite

矿岩石为二长花岗斑岩,发育明显的石英-绢云母化,辉钼矿呈细脉状、浸染状分布。矿石样品经无污染粉碎、浮选、重液等方法处理后,在双目镜下挑选出无污染、无氧化的辉钼矿晶体颗粒。为减少 Re-Os 同位素的失耦现象的影响(Selby et al., 2004; 杜安道等, 2007),所挑选的辉钼矿粒度均小于 2 mm,并且在单矿物提纯的过程中,不断的粉碎和混合使辉钼矿颗粒达到了的细化均一。

辉钼矿 Re-Os 同位素测试工作在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室完成。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 Os、萃取分离 Re、质谱测定四步,详细流程参见有关文献(Shirey et al., 1995; 杜安道等, 1994, 2001)。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。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%),置信水平 95%。

4 测试结果与讨论

4.1 测试结果

实验全流程空白 Re 为 0.0029 ng, 普 Os 为 0.0001 ng, ^{187}Os 为 0.0003 ng, 远远低于所测样品中的铼、钨含量,因此不会影响实验中铼、钨含量测定的准确性。6 件辉钼矿 Re-Os 同位素测试结果见表 1。辉钼矿 $w(^{187}\text{Re})$ 为 9.88 ~ 11.37 $\mu\text{g/g}$, $w(^{187}\text{Os})$ 为 27.68 ~ 32.40 ng/g, Re 与 ^{187}Os 含量变化比较协调,得到模式年龄 $(168.0 \pm 2.3) \text{ Ma} \sim (170.8 \pm 2.5) \text{ Ma}$ 。采用 Isoplot 软件(Ludwig, 2003)绘制了辉钼矿 Re-Os 同位素等时线图(图 4A)与加权平均年龄图(图 4B),求得等时线年龄 $(185 \pm 12) \text{ Ma}$, MSWD=0.72, 加权平均年龄为 $(169.36 \pm 0.97) \text{ Ma}$, MSWD=0.73。

4.2 辉钼矿 Re 含量与成矿物质来源

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。一般认为,从地幔来源到壳幔混源再到地壳来源,辉钼矿

表 1 吉林安图刘生店钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测定结果
Table 1 Re-Os isotopic data of molybdenites separate from the Liushengdian molybdenum deposit

样品编号	样重/g	Re ± 2 /($\mu\text{g/g}$)	^{187}Re ± 2 /($\mu\text{g/g}$)	^{187}Os ± 2 /(ng/g)	模式年龄/Ma
YB065-1	0.05088	15.75 ± 0.24	9.90 ± 0.15	27.83 ± 0.46	168.5 ± 2.3
YB065-2	0.05068	15.71 ± 0.24	9.88 ± 0.15	27.68 ± 0.44	168.0 ± 2.3
YB065-3	0.05098	16.80 ± 0.26	10.56 ± 0.16	29.87 ± 0.52	169.6 ± 2.4
YB065-4	0.05239	16.19 ± 0.30	10.17 ± 0.20	28.86 ± 0.52	170.0 ± 2.6
YB065-5	0.05878	18.08 ± 0.28	11.37 ± 0.18	32.40 ± 0.60	170.8 ± 2.5
YB065-6	0.05738	17.22 ± 0.30	10.83 ± 0.20	30.65 ± 0.52	169.7 ± 2.5

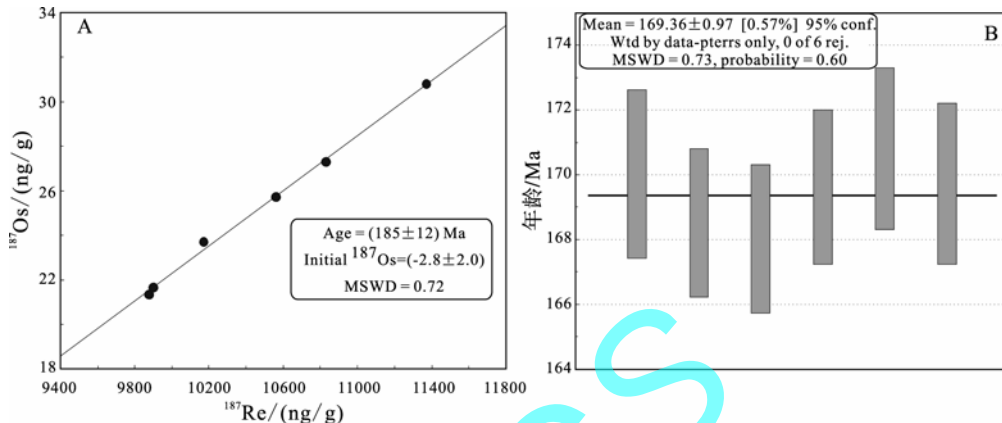


图 4 刘生店钼矿辉钼矿 Re-Os 同位素等时线图(A)与加权平均年龄图(B)

Fig. 4 Re-Os isochron(A) and weighted mean of Re-Os model ages(B) of molybdenites from the Liushengdian deposit

中的Re含量成 10 倍地下降, 从 $n \times 10^{-4} \sim n \times 10^{-5} \sim n \times 10^{-6}$ (Mao et al., 1999)。本文获得刘生店钼矿辉钼矿中Re含量为 9.88 ~ 11.37 $\mu\text{g/g}$, 6 件样品的均值为 10.45 $\mu\text{g/g}$, 指示成矿物质应可能为壳幔混源, 但以地壳来源为主, 仅混有少量幔源组分。

同处小兴安岭-张广才岭成矿带南段的福安堡钼矿中Re含量为 9.94~15.13 $\mu\text{g/g}$ (李立兴等, 2009), 与本文测定结果较接近; 大黑山钼矿中辉钼矿Re含量为 24.15~43.57 $\mu\text{g/g}$ (王成辉等, 2009), 是刘生店和福安堡钼矿的 2~3 倍, 在一定程度上暗示着其成矿物质也以壳源为主, 但幔源组分比例明显增多。结合区内不同钼矿的成矿地质条件、矿化特征及矿床成因, 初步认为小兴安岭-张广才岭成矿带南段成矿物质为壳幔混源, 以壳源为主, 钼矿成矿流体深部演化过程中有少量地幔物质加入。

4.3 刘生店与区域斑岩型钼矿成矿时代

Re-Os同位素定年法基于 ^{187}Re 的衰变产生 ^{187}Os 来计算地质年龄的(杜安道等, 2009)。辉钼矿天然富集Re及非放射成因Os, 这就意味着所有 ^{187}Os 均源于 ^{187}Re 衰变(Markey et al., 1998)。本次实验 ^{187}Os 初始值为 (-2.8 ± 2.0) , 接近于 0, 表明辉钼矿形成时几乎不含 ^{187}Os , 符合Re-Os同位素体系模式年龄计算条件(蒋少涌等, 2000)。6 件样品中Re、Os含量相

近, 等时线没有拉开, 导致等时线年龄 (185 ± 12) Ma与模式年龄有一定差别 $(>10 \text{ Ma})$, 且误差(12 Ma)较大, 因而本文采用模式年龄的加权值 (169.36 ± 0.97) Ma作为辉钼矿的结晶时间, 即刘生店钼矿形成于中侏罗世, 为该区燕山早期大规模构造-岩浆-成矿事件的产物。

近年来的研究资料表明, 大黑山地区斑岩钼矿与成矿有关的花岗闪长斑岩的年龄为 $(170 \pm 3) \text{ Ma}$ (葛文春等, 2007); 霍吉河钼矿和鹿鸣钼矿与成矿有关的二长花岗岩的年龄分别为 $(184.92 \pm 0.9) \text{ Ma}$ (郭嘉, 2009)和 $(174.0 \pm 1.9) \text{ Ma}$ (张苏江, 2009); 福安堡钼矿和大黑山钼矿的辉钼矿Re-Os等时线年龄分别为 $(166.9 \pm 6.7) \text{ Ma}$ (李立兴等, 2009)和 $(168.2 \pm 3.2) \text{ Ma}$ (王成辉等, 2009); 本文所获得的刘生店钼矿的辉钼矿Re-Os加权平均年龄 $(169.36 \pm 0.97) \text{ Ma}$ 与上述同类矿床成矿年龄具有较好的一致性。陈毓川等(2003)在探讨华北陆块北缘区域矿床成矿谱系时指出, 华北陆块北缘中生代构造-岩浆活动带矿床成矿作用高峰期发生在 180~140 Ma; 葛文春等(2007)分析了多宝山铜矿、大黑山钼矿、三矿沟矽卡岩型铜矿的岩体年龄数据, 认为中国东北近 NNE 向斑岩型-矽卡岩型铜钼成矿带的大规模成岩成矿时间为 185~170 Ma 和 145~130 Ma。

综合前人和本文的测年结果,可以初步认为,早侏罗世晚期至中侏罗世初期应为小兴安岭-张广才岭地区斑岩-矽卡岩型铜钼矿化的高峰期。

4.4 成岩成矿构造背景

斑岩型矿床常被解释为 B 型俯冲(大洋板块俯冲)所诱发的岩浆弧区的产物(芮宗瑶等, 1984; 赵一鸣等, 1997)。近年来大陆碰撞造山带也被证明可以形成有利的斑岩成矿系统(陈衍景等, 1991; 陈衍景, 2002; 侯增谦等, 2003; Liang et al., 2007)。通过区域构造演化和区域斑岩型钼矿特征的分析发现, 该区斑岩型钼矿的大规模成矿与太平洋板块的俯冲作用的成因联系更值得关注。证据如下:

(1)越来越多的研究资料(孙德有等, 2004; 赵寒冬, 2009; 李朋武等, 2007; 刘永江等, 2010)表明, 西拉木伦-长春断裂(缝合带)两侧的华北板块与佳蒙地块于早二叠世已经完成碰撞对接;

(2)小兴安岭-张广才岭钼矿带上近年来发现的斑岩型钼矿虽然分布于华北板块北缘、松嫩地块等不同构造单元, 但具有基本一致的成矿年龄, 成岩成矿具有大致相同的物质源区, 说明它们受同期构造-岩浆事件制约;

(3)近年来获得的沿南北向分布的黑龙江群蛇绿岩中蓝片岩相变质作用的年龄为 180~165 Ma, 暗示了东北地区在侏罗纪存在太平洋板块的俯冲作用(李锦轶等, 1999; Wu et al., 2007);

(4)中侏罗世为东北地区古亚洲构造域与环太平洋构造域发生最终转换的时期(赵越等, 1994), 经历了被动大陆边缘 转换大陆边缘 斜向俯冲大陆边缘 正向俯冲大陆边缘四个过程, 自三叠纪-中侏罗世东亚大陆为古太平洋板块相对东亚大陆作离散运动的被动大陆边缘阶段, 中侏罗世以后东亚大陆进入活动陆缘阶段(徐嘉炜等, 1993; 林强等, 1999)。

因此, 小兴安岭-张广才岭钼矿带内以大黑山、刘生店等矿床为代表的斑岩型钼矿可能为古亚洲构造域与环太平洋构造域发生转换时期, 被动陆缘向活动陆缘转换背景下的产物。

5 结论

(1)刘生店钼矿 6 件辉钼矿样品 Re-Os 同位素模式年龄(168.0 ± 2.3)~(170.8 ± 2.5) Ma, 加权平均年龄为(169.36 ± 0.97) Ma(MSWD=0.73), 等时线年龄为(185 ± 12) Ma, 以辉钼矿模式年龄的加权平均值(169.36 ± 0.97) Ma 确定成矿时代, 即刘生店钼矿形成于中侏罗世, 属燕山早期成矿;

(2)刘生店钼矿辉钼矿中 Re 含量为 9.88~

11.37 $\mu\text{g/g}$, 指示成矿物质可能以壳源为主, 成矿流体深部演化过程中有少量地幔物质加入;

(3)小兴安岭-张广才岭地区为东北地区重要的斑岩型钼矿带, 区内大黑山、刘生店、福安堡、鹿鸣、霍吉河等矿床具有基本一致的成岩成矿时代和相似的物质源区, 为同期构造-岩浆事件的产物;

(4)区域构造演化分析和典型矿床成岩成矿时代研究表明, 该区燕山早期大规模斑岩型钼成矿作用与太平洋板块的俯冲作用有关, 可能为构造体制大转折过程中被动陆缘向活动陆缘转换背景下的产物。

致谢: 野外工作中得到华祥矿业公司以及吉林省第六地质调查所关英福工程师的大力支持与帮助, 在此表示衷心感谢!

参考文献:

- 陈衍景, 富士谷, 谢鸿森, 裘愉卓. 1991. 远离 B 型俯冲带的斑岩矿床成矿模式[C]. 第四届全国矿物岩石地化学学术回忆摘要. 北京: 地震出版社.
- 陈衍景. 2002. 中国区域成矿研究的若干问题及其与陆陆碰撞的关系[J]. 地学前缘, 9(4): 319-328.
- 陈毓川, 薛春纪, 王登红, 李华芹, 路远发. 2003. 华北陆块北缘区域矿床成矿谱系探讨[J]. 高校地质学报, 9(4): 520-535.
- 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, 屈文俊, 李超看, 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.
- 杜安道, 屈文俊, 王登红, 李厚民, 丰成友, 刘华, 任静, 曾法刚. 2007. 辉钼矿亚晶粒范围内 Re 和 ^{187}Os 的失耦现象[J]. 矿床地质, 26(5): 572-580.
- 杜安道, 赵敦敏, 王淑贤, 孙德忠, 刘敦一. 2001. Carius 管溶样-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.
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 张吉衡. 2007. 兴蒙造山带东段斑岩型 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.
- 郭嘉. 2009. 黑龙江省霍吉河钼矿床地质特征及成因[D]. 长春: 吉林大学.
- 侯增谦, 曲晓明, 王淑贤, 高永丰, 杜安道, 黄卫. 2003. 西藏高原冈底斯斑岩铜矿带辉钼矿 Re-Os 年龄: 成矿作用时限与动力学背景应用[J]. 中国科学(D 辑), 33(7): 609-618.
- 蒋少涌, 杨竞红, 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.

- 李锦轶, 牛宝贵, 宋彪. 1999. 长白山北段地壳的形成和演化[M]. 北京: 地质出版社.
- 李立兴, 松权衡, 王登红, 王成辉, 屈文俊, 汪志刚, 毕守业, 于城. 2009. 吉林福安堡钼矿中辉钼矿铼-钨同位素定年及成矿作用探讨[J]. 岩矿测试, 28(3): 283-287.
- 李朋武, 高锐, 管焯, 李秋生. 2007. 华北与西伯利亚地块碰撞时代的古地磁分析—兼论苏鲁-大别超高压变质作用的构造起因[J]. 地球学报, 28(3): 234-252.
- 林强, 葛文春, 孙德有, 吴福元. 1999. 东北亚中生代火山岩的地球动力学意义[J]. 地球物理学报, 42(增刊): 75-84.
- 刘永江, 张兴洲, 金巍, 迟效国, 王成文, 马志红, 韩国卿, 温泉波, 赵英利, 王文弟, 赵喜峰. 2010. 东北地区晚古生代区域构造演化[J]. 中国地质, 37(4): 943-951.
- 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.
- 朴英姬, 张忠光, 李国瑞. 2010. 吉林省安图县刘生店钼矿地质特征及找矿远景[J]. 吉林地质, 29(4): 54-58.
- 芮宗瑶, 黄崇轲, 齐国明, 徐钰, 张洪涛. 1984. 中国斑岩铜(钼)矿床[M]. 北京: 地质出版社.
- 邵吉安, 牟保磊, 何国琦, 张履桥. 1997. 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), 27: 390-394.
- 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 高山. 2004. 西拉木伦河-长春-延吉板块缝合带的最后闭合时间—来自吉林大玉山花岗岩体的证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 34(2): 174-181.
- 王成辉, 松权衡, 王登红, 李立兴, 于城, 汪志刚, 屈文俊, 杜安道, 应立娟. 2009. 吉林大黑山超大型钼矿辉钼矿铼-钨同位素定年及其地质意义[J]. 岩矿测试, 28(3): 269-273.
- 王成文, 金巍, 张兴洲, 马志红, 迟效国, 刘永江, 李宁. 2008. 东北及邻区晚古生代大地构造属性新认识[J]. 地层学杂志, 32(2): 119-136.
- 王景德, 陈惠鹏, 赵娟. 2007. 安图县刘生店钼矿床地质特征及找矿标志[J]. 吉林地质, 26(2): 6-9.
- 吴福元, 曹林. 1999. 东北亚地区的若干重要基础地质问题[J]. 世界地质, 18(2): 1-13.
- 吴智平, 侯旭波, 李伟. 2007. 华北东部地区中生代盆地格局及演化过程探讨[J]. 大地构造与成矿学, 31(4): 385-399.
- 徐嘉炜, 朱光, 马国锋. 1993. 东亚大陆边缘演化的若干认识: 亚洲的增生[M]. 北京: 地震出版社.
- 张苏江. 2009. 黑龙江铁力地区钼(铜)矿床成矿地质条件及找矿潜力分析[D]. 长春: 吉林大学.
- 赵寒冬. 2009. 东北地区小兴安岭南段—张广才岭北段古生代火成岩组合与构造演化[D]. 北京: 中国地质大学.
- 赵一鸣, 张德全. 1997. 大兴安岭及其邻区铜多金属矿床成矿规律与远景评价[M]. 北京: 地震出版社.
- 赵越, 杨振宇, 马醒华. 1994. 东亚大地构造发展的重要转折[J]. 地质科学, 29(2): 105-119.
- 周建波, 张兴洲, 马志红, 刘立, 金巍, 张梅生, 王成文, 迟效国. 2009. 中国东北地区的构造格局与盆地演化[J]. 石油与天然气地质, 30(5): 530-538.

References:

- CHEN Yan-jing, FU Shi-gu, XIE Hong-sen, QIU Yu-zhuo. 1991. Genetic model for porphyries and their related deposits far from the Benioff zone[C]//Proceedings of 4th National Symposium on Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Beijing: Seismological Press: 253-255(in Chinese).
- CHEN Yan-jing. 2002. Several important problems in study of regional metallogenesis in China: Their relationship to continental collision[J]. Earth Science Frontiers, 9(4): 319-328(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan, XUE Chun-ji, WANG Deng-hong, LI Hua-qin, LU Yuan-fa. 2003. A discussion on the regional mineralizing pedigree of the ore deposits in the northern margin of the North China Landmass[J]. Geological Journal of China Universities, 9(4): 520-535(in Chinese with English abstract).
- DU An-dao, HE Hong-liao, YIN Ning-wan, ZOU Xiao-qiu, SUN Ya-li, SUN De-zhong, CHEN Shao-zhen, QU Wen-jun. 1994. A study on the Rhenium-Osmium Geochronometry of molybdenites[J]. Acta Geologica Sinica, 68(4): 339-347(in Chinese with English abstract).
- DU An-dao, QU Wen-jun, LI Chao, YANG Gang. 2009. A review on the development of Re-Os isotopic dating methods and techniques[J]. Rock and Mineral Analysis, 28(3): 288-304(in Chinese with English abstract).
- DU An-dao, QU Wen-jun, WANG Deng-hong, LI Hou-min, FENG Cheng-you, LIU Hua, REN Jing, CENG Fa-gang. 2007. Sub-grain-size decoupling of Re and ¹⁸⁷Os within molybdenite[J]. Mineral Deposits, 26(5): 572-580(in Chinese with English abstract).
- DU An-dao, ZHAO Dun-min, WANG Shu-xian, SUN De-zhong, LIU Dun-yi. 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).
- GE Wen-chun, WU Fu-yuan, ZHOU Chang-yong, ZHANG Ji-heng. 2007. Porphyry Cu-Mo deposits in the eastern Xing an-Mongolian Orogenic Belt: Mineralization ages and their geodynamic implication[J]. Chinese Science Bulletin, 52(20):

- 2407-2417(in Chinese).
- GUO Jia. 2009. Geological characteristics and origin of Mo deposit in Hojihe Heilongjiang Province[D]. Changchun: Jilin University(in Chinese with English abstract).
- HOU Zeng-qian, QU Xiao-ming, WANG Shu-xian, GAO Yong-feng, DU An-dao, HUANG Wei. 2003. The Re/Os age of molybdenites from Gangdeses porphyry copper deposits belt, Xizang Plateau: Mineralization age and application of dynamic setting[J]. *Science in China (Series D)*, 33(7): 609-618(in Chinese).
- JIANG Shao-yong, YANG Jiang-hong, ZHAO Kui-dong, YU Jin-min. 2000. Re-Os isotope tracer and dating methods in ore deposits research[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 36(6): 669-677(in Chinese with English abstract).
- LI Jin-tie, NIU Bao-gui, SONG Biao. 1999. Formation and evolution of the earth's crust in northern Changbai Mountain[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- LI Li-xing, SONG Quan-heng, WANH Deng-hong, WANG Cheng-hui, QU Wen-jun, WANG Zhi-gang, BI Shou-ye, YU Cheng. 2009. Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Fu'anpu molybdenum deposit of Jilin Province and discussion on its metallogenesis[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3): 283-287(in Chinese with English abstract).
- LI Peng-wu, GAO Rui, GUAN Ye, LI Qiu-sheng. 2007. Paleomagnetic constraints on the collision of Siberian and North China Blocks, with a discussion on the tectonic origin of the ultra-high-pressure metamorphism in the Sulu-Dabie region[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 28(3): 234-252(in Chinese with English abstract).
- LIANG Hua-ying, CAMPBELL I H, ALLEN C M, SUN Wei-dong, YU Heng-xiang, XIE Ying-weng, ZHANG Yu-Quan. 2007. The age of the potassic alkaline igneous rocks along the Ailao Shan-Red River shear zone: Implications for the onset age of left-lateral shearing[J]. *The Journal of Geology*, 115(2): 231-242.
- LIN Qiang, GE Wen-chun, SUN De-you, WU Fu-yuan. 1999. Geomechanical significance of the Mesozoic volcanics in Northeast Asia[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 42(S1), 75-84(in Chinese).
- LIU Yong-jiang, ZHANG Xing-Zhou, JIN Wei, CHI Xiao-guo, WANG Cheng-wen, MA Zhi-hong, HAN Guo-qing, WEN Quan-bo, ZHAO Ying-li, WANG Wen-di, ZHAO Xi-feng. 2010. Late Paleozoic tectonic evolution in Northeast China[J]. *Geology in China*, 37(4): 943-951(in Chinese with English abstract).
- LUDWIG K R. 2003. User's manual for isoplot 3.0, A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Geochronology Center, Special Publication no.4.
- LUO Jiu-ming, ZHANG Fu-ying, DONG Qun-ying, XU Yong-ren, LI Shi-mei, LI Kun-hua. 1991. Molybdenum Deposit of China[M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Publishing House(in Chinese).
- MAO Jing-wen, ZHANG Zhao-chong, ZHANG Zuo-heng, DU An-dao. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W(Mo) deposit in the northern Qilian mountains and its geological significance[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 63(11-12): 1815-1818.
- MARKEY R, STEIN H, MORGAN J. 1998. Highly precise Re-Os dating for molybdenite using alkaline fusion and NTIMS[J]. *Talanta*, 45(5): 935-946.
- PIAO Ying-ji, ZHANG Zhong-guang, LI Guo-rui. 2010. Geologic features and prospecting potential of Liushengdian molybdenum, Antu County of Jilin Province[J]. *Jilin Geology*, 29(4): 54-58(in Chinese with English abstract).
- RUI Zong-yao, HUANG Chong-ke, QI Ming-guo, XU Yu, ZHANG Hong-tao. 1984. Porphyry Copper (Molybdenum) Deposit in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- SELBY D, CREASER R A. 2004. Macroscale NTIMS and microscale IA-MC-ICP-MS Re-Os isotopic analysis of molybdenite: Testing spatial restrictions for reliable Re-Os age determinations, and implications for the decoupling of Re and Os within molybdenite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(19): 3897-3908.
- SHAO Ji-an, MU Bao-lei, HE Guo-qi, ZHANG Lu-qiao. 1997. Geological effects in tectonic superposition of Paleo-Pacific domain and Paleo-Asian domain in northern part of North China[J]. *Science in China (Series D)*, 27(5): 390-394(in Chinese).
- SHIREY S B, WALKER R J. 1995. Carius tube digestion for low-blank Rhenium-Osmium analysis[J]. *Anal Chern*, 67(13): 2136-2141.
- SUN De-you, WU Fu-yuan, ZHANG Yan-bin, GAO Shan. 2004. The final closing time of the west Lamulun River-Changchun-Yanji plate suture zone evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 34(2): 174-181(in Chinese with English abstract).
- WANG Cheng-hui, SONG Quan-heng, WANG Deng-hong, LI

- Li-xing, YU Cheng, WANG Zhi-gang, WU Wen-juan, DU An-dao, YING Li-juan. 2009. Re-Os isotopic dating of molybdenite from the daheishan molybdenum deposit of Jilin Province and its geological significance[J]. Rock and Mineral Analysis, 28(3): 269-273(in Chinese with English abstract).
- WANG Cheng-wen, JIN Wei, ZHANG Xing-zhou, MA Zhi-hong, CHI Xiao-guo, LIU Yong-jiang, LI Ning. 2008. New understanding of the Late Paleozoic tectonics in Northeastern China and adjacent areas[J]. Journal of Stratigraphy, 32(2): 119-136(in Chinese with English abstract).
- WANG Jing-de, CHEN Hui-peng, ZHAO Juan. 2007. Geologic features and ore-hunting indicator of the Liushengdian Mo deposit, Antu County, Jilin Province[J]. Jilin Geology, 26(2): 6-9(in Chinese with English abstract).
- WU Fu-yan, YANG Jin-hui, LO Ching-hua, WILDE S A, SUN De-you, JAHN B M. 2007. The Jiamusi Massif: A Jurassic accretionary terrane along the western pacific margin of NE China[J]. Island Arc, 16: 156-172.
- WU Fu-yuan, CAO Lin. 1999. Some important problems of geology in Northeastern Asia[J]. Global Geology, 18(2): 1-13(in Chinese with English abstract).
- WU Zhi-ping, HOU Xu-bo, LI Wei. 2007. Discussion on Mesozoic basin patterns and evolution in the Eastern North China Block[J]. Geotectonica Et Metallogenia, 31(4): 385-399(in Chinese with English abstract).
- XU Jia-wei, ZHU Guang, MA Guo-feng. 1993. Some understanding about the evolution of continental margin in East Asia[M]. Beijing: Seismological Press(in Chinese).
- ZHANG Su-jiang. 2009. Analysis on the prospecting potentiality and Ore-forming geological conditions in Tieli area MO(Cu) Deposit[D]. Changchun: Jilin University(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Han-dong. 2009. Paleozoic igneous rock assemblages and tectonic evolution in southern Xiaoxing'anling-northern Zhangguangcailing, Northeastern China[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yi-ming, ZHANG De-quan. 1997. Metallogeny and prospective evaluation of copper polymetallic in the Da Hinggan Mountains and its adjacent regions[M]. Beijing: Seismological Press(in Chinese).
- ZHAO Yue, YANG Zhen-yue, MA Xing-hua. 1994. Geotectonic transition from Paleasian system and Paleotethyan system to Paleopacific active continental margin in Eastern Asia[J]. Chinese Journal of Geology, 29(2): 105-119(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Jian-bo, ZHANG Xing-zhou, MA Zhi-hong, LIU Li, JIN Wei, ZHANG Mei-sheng, WANG Cheng-wen, CHI Xiao-guo. 2009. Tectonic framework and basin evolution in Northeast China[J]. Oil & Gas Geology, 30(5): 530-538(in Chinese with English abstract).

中国地质科学院专家发现后生动物真正始祖

日前,《自然》杂志刊登了一篇名为《远古的海洋“水母”撼动了动物进化树——化石修改了演化的顺序》的评论文章,介绍了以中国地质科学院的古生物学家唐烽研究员为首的学术团队的研究成果。该成果发现华南贵州的一类 5.8 亿年前的化石,导致了对已知的动物系统树的怀疑,这类被命名为“八臂仙母虫”的化石生物,将重新排序生命系统树的最早期分支。

八臂仙母虫化石最早是由中国地质科学院唐烽等在贵州铜仁江口县发现并命名的。其存在于早于寒武纪的伊迪卡拉纪地层中,化石的年龄区间大约是距今 5.51 亿至 5.8 亿年。依据八臂仙母虫的最新材料,唐烽等推断,这类化石可能代表一个原始类群的栉水母动物,是已知最老的栉水母动物化石。八臂仙母虫为栉水母处于更为原始位置的观点加重了砝码。同时,这一研究成果将栉水母动物的最早化石记录从“澄江生物群”的寒武纪早期推前了大约 3000 万年。