文章编号：1004—5589（2016）03—0738—14

冀东太平村钼矿床辉钼矿 Re–Os 同位素测年及其地质意义

孙金龙[1,2]，任云生[1]，杨玉山[2]，王强[2]，刘剑波[2]，张金江[2]，
聂卫东[2]，王爱臣[2]，屈文俊[3]

1. 吉林大学 地球科学学院，长春 130061；
2. 河北省地矿局 秦皇岛矿产水文工程地质大队，河北 秦皇岛 066001；
3. 国家地质实验测试中心，北京 100037

摘要： 太平村钼矿床位于燕辽钼（铜）成矿带中段南部，马兰峪复背斜核部西段。矿体主要赋存于燕山期中酸性侵入体外接触带的变质岩及角砾岩中，深部主要表现为隐伏似斑状二长花岗岩中的稀疏浸染状辉钼矿化，表明区内钼矿化与侵入岩系统有关。对矿区深部矿体中的7件辉钼矿样品进行了 Re–Os 同位素测年，其模式年龄为（162.5 ± 2.5）～（165.7 ± 2.5）Ma，加权平均年龄为（164.11 ± 0.92）Ma，MSWD = 0.82，等时线年龄为（164.4 ± 3.9）Ma，MSWD = 1.7，表明太平村钼矿形成于中侏罗世晚期。辉钼矿中 Re 含量为 18.79×10^{-6}～66.65×10^{-6}，平均 41.86×10^{-6}，指示成矿物质可能为壳幔混合来源，与同属燕辽钼（铜）成矿带的辽宁肖家营子钼矿床、冀东唐杖子金（钼）矿床、峪耳崖金矿床及下营房金矿床辉钼矿成矿时代、成矿物质来源基本一致，同属燕辽钼（铜）成矿带第三期构造–岩浆岩–成矿事件的产物。

关键词： Re–Os 同位素测年；地质年代学；成矿物质来源；太平村钼矿床；冀东

中图分类号： P618.65；P597 **文献标识码：** A **doi：** 10.3969/j.issn.1004-5589.2016.03.014

Re–Os isotopic dating of molybdenite from Taipingcun Mo deposit in eastern Hebei and its geological significance

SUN Jin-long[1,2], REN Yun-sheng[1], YANG Yu-shan[2], WANG Qiang[2],
LIU Jian-bo[2], ZHANG Jin-jiang[2], NIE Wei-dong[2], WANG Ai-chen[2], QU Wen-jun[3]

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;
2. Qinhuangdao Mineral, Hydrogeology and Engineering Geological Team of Heibei Department of Geology and Mineral Industries, Qinhuangdao 066001, Hebei, China;
3. National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037, China

Abstract: Taipingcun Mo deposit is located in the western Malanyu anticlinorium core, and the southern central Yanshan–Liaoning molybdenum (copper) metallogenic belt. The ore bodies are mainly hosted in metamorphic rocks and breccias along the exocontact zone of Yanshanian intermediate-acid intrusive bodies. Besides, sparsely disseminated molybdenite mineralization was found in concealed porphyritic monzonitic granite in deep. It indicates that molybdenum mineralization in the area is associated with the intrusive rocks. The Re–Os dating of seven molybdenite samples collected from the deep ore bodies shows the model ages ranging from (162.5 ± 2.5) Ma to

收稿日期： 2016-03-14；**改回日期：** 2016-06-01
基金项目： 河北省地质矿产勘查开发局项目“河北省兴隆县太平村钼多金属矿成矿机制及找矿方向研究”（201406）.
通讯作者： 任云生（1969-），男，教授，博士生导师，主要从事矿床学的教学与研究工作. E-mail: renys@jlu.edu.cn

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(165.7 ± 2.5) Ma, the weighted mean age of (164.11 ± 0.92) Ma, MSWD = 0.82 and the isochronal age of (164.4 ± 3.9) Ma, MSWD = 1.7, which indicates the deposit formed in the late Middle Jurassic. The Re content of molybdenites is $18.79 \times 10^{-6} \sim 66.65 \times 10^{-6}$, with an average value of 41.86×10^{-6}, suggesting a mixing origin of the materials from crust and mantle. The ore-forming age and materials of the Taipingcun Mo deposit are basically consistent with those of the Xiaojiayingzi Mo deposit in Liaoning, the Tangzhangzi gold (molybdenum) deposit, Yuerya-and Xiayingfang gold deposits in eastern Hebei. All belongs to the Yanshan–Liaoning molybdenum (copper) metallogenic belt. These deposits are resulted from the third phase of the tectonic-magmatic-metallogenic events of Yanshan –Liaoning molybdenum (copper) metallogenic belt.

Key words: Re–Os isotopic dating; geochronology; ore-forming materials; Taipingcun Mo deposit; eastern Hebei

0　引言

燕辽钼(铜)成矿带位于华北克拉通北缘中段，是继东秦岭钼矿带之后的中国第二大钼矿带。矿床类型齐全，主要有斑岩型、斑岩–矽卡岩型、矽卡岩型、热液脉型和角砾岩型，主要分布在辽西和冀北地区[1]。冀东位于燕辽钼(铜)成矿带中段南部，是中国重要的金矿床和沉积变质铁矿床集中区之一[2,3]，但近年河北省地矿局秦皇岛矿产水文工程地质大队在冀东马兰峪复背斜西段分别发现了太平村钼矿床和南双硐钼矿床，预示着冀东地区具有巨大的钼矿成矿潜力，该区已成为继辽西和冀北地区之后燕辽钼(铜)成矿带的又一大型钼矿集区，也是河北省重要的钼矿矿集区。

目前，太平村钼矿正处于找矿阶段，对于矿床的成矿过程、成矿流体特征和成岩成矿时代等还缺乏系统研究。笔者以区域成矿地质背景和矿床地质研究为基础，通过矿石中辉钼矿 Re–Os 同位素测年研究，厘定该钼矿床形成时代，探讨成矿物质来源，开展区内典型矿床对比分析，为研究总结区域成矿规律和寻找钼矿提供资料及理论依据，拓展冀东地区找矿思路。

1　区域地质概况与成矿地质条件

冀东位于华北地台燕山板内造山带东段，是古亚洲洋构造域和滨太平洋构造域的叠加部位，属于中朝准地台(I_2)燕山台褶带(II_2^2)马兰峪复背斜(III_2^7)。区内太古界变质基底构成背斜轴部，中上元古界及其以后的沉积盖层构成背斜南北两翼(图 1)。

区域构造十分复杂，密云—喜峰口东西向大断裂为本区主干断裂，形成于中元古代之前，具有长期活动性，早期属压性断裂，中生代该断裂发生大规模右行走滑。该断裂与马兰峪复背斜隆起关系比较密切[4-6]，断裂对中–晚元古代沉积具有明显的控制作用，对岩浆活动的导控作用也较明显[7]，断裂以北形成裂陷槽地，以南则形成一系列东西向，大体呈等间距串珠状排列的花岗质岩体，构成冀东中部侵入岩带[8]，分布主要受近东西向、北东向及近南北向构造的复合控制，岩体多为多期侵入形成，印支期和燕山期岩浆活动最为强烈，岩性以花岗岩类岩石为主[9]，规模差别较大。出露规模较大的有王坪石、前分水岭、茅山、罗文峪、高家店、青山口、都山和肖营子等岩体，出露规模较小的为麻地、西厂沟、水泉沟和峪耳崖岩体等。成岩时代 220 ~ 113 Ma[10,11]，与区内的金、钼多金属矿床在时间、空间和成因上密切相关[12,13]。这些构造、岩浆活动的同时伴随丰富的成矿流体，发生多期构造–岩浆–成矿事件，构成本区最重要的内生金属成矿期①②。

2　矿床地质特征

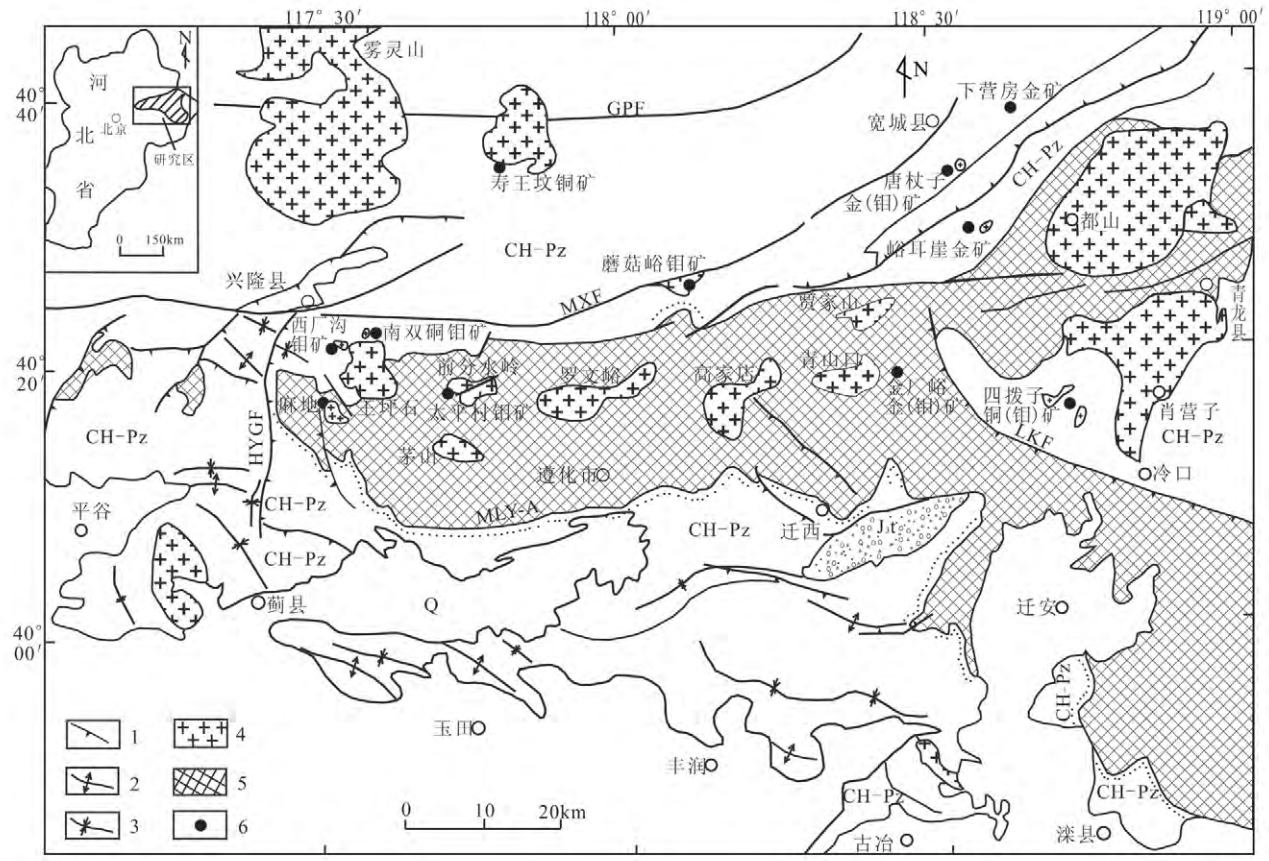
太平村钼矿床位于马兰峪复背斜西段中北部，即密云—喜峰口东西向大断裂南部，前分水岭岩体西侧。

矿区主要出露太古界迁西群马兰峪组二段变质岩系，岩性主要为角闪斜长片麻岩、黑云角闪斜长

① 河北省地质调查院. 承德市幅 1–25 万区域地质调查报告[R]. 石家庄: 河北省地质调查院，2000.

② 河北省地质矿产勘查开发局. 马兰峪幅 遵化县幅 1–5 万区域地质调查报告[R]. 石家庄: 河北省地质矿产勘查开发局，1996.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



Q. 第四系; J_3t. 土城子组; CH–Pz. 中元古界—古生界盖层岩系; GPF. 古北口—平泉断裂; HYGF. 黄崖关断裂; LKF. 冷口断裂; MXF. 密云—喜峰口断裂; XL TH. 兴隆逆冲断层; MLY – A. 马兰峪背斜.

1. 逆冲断层; 2. 背斜轴迹; 3. 向斜轴迹; 4. 中生代侵入岩; 5. 太古宇—古元古代结晶体系; 6. 典型矿床.

图 1 冀东一带区域地质及钼矿床分布简图[14,15]

Fig. 1 Regional geological and molybdenum deposit sketch map of eastern Hebei

片麻岩、斜长片麻岩和斜长角闪岩等。区内断裂构造主要分为北东、北西及近东西向三组，受区域构造演化影响具有多期活动性，部分断裂活动对矿体有一定的破坏作用。

区内地表出露 13 个规模不等、形态各异的隐爆角砾岩。此外还在钻孔 ZK7–1、ZK15–1、ZK23–1 深部见有隐爆角砾岩。这些角砾岩主要集中分布在矿区西北太平村一带，即燕山期侵入岩周围。角砾岩与区内燕山期岩浆活动及构造活动等有关。角砾成分主要为产出位置的变质岩，偶见少量伟晶岩、闪长岩和煌斑岩等，呈棱角状–次棱角状，大小不一，硅质胶结。大部分角砾岩蚀变矿化较强，蚀变以硅化、绢云母化为主，矿化主要黄铁矿化、褐铁矿化和辉钼矿化等。辉钼矿多呈浸染状、细脉状或呈薄膜状分布于角砾边缘或硅质胶结物中，局部富集形成矿体。

矿区岩浆岩活动十分强烈，以岩株、岩脉为主，岩性从超基性岩–中酸性岩均有见及，但以燕山早期中酸性–酸性岩浆侵入活动为主，主要岩性为二长花岗岩、花岗闪长岩、石英二长闪长岩和花岗斑岩等。前分水岭岩体出露于矿区北东侧，在其周围分布规模不等、形态各异 10 个“卫星”小岩株，主要集中分布于矿区中北部（图 2），并在钻孔 ZK0–1、ZK0–3（–510 m 标高以下）新发现隐伏似斑状二长花岗岩体，岩体内见稀疏浸染状辉钼矿。

矿区目前控制钼矿体以隐伏矿体为主，主要赋存于燕山期岩浆岩外接触带变质岩中，部分角砾岩及蚀变辉绿岩局部也有分布，且在隐伏似斑状二长

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

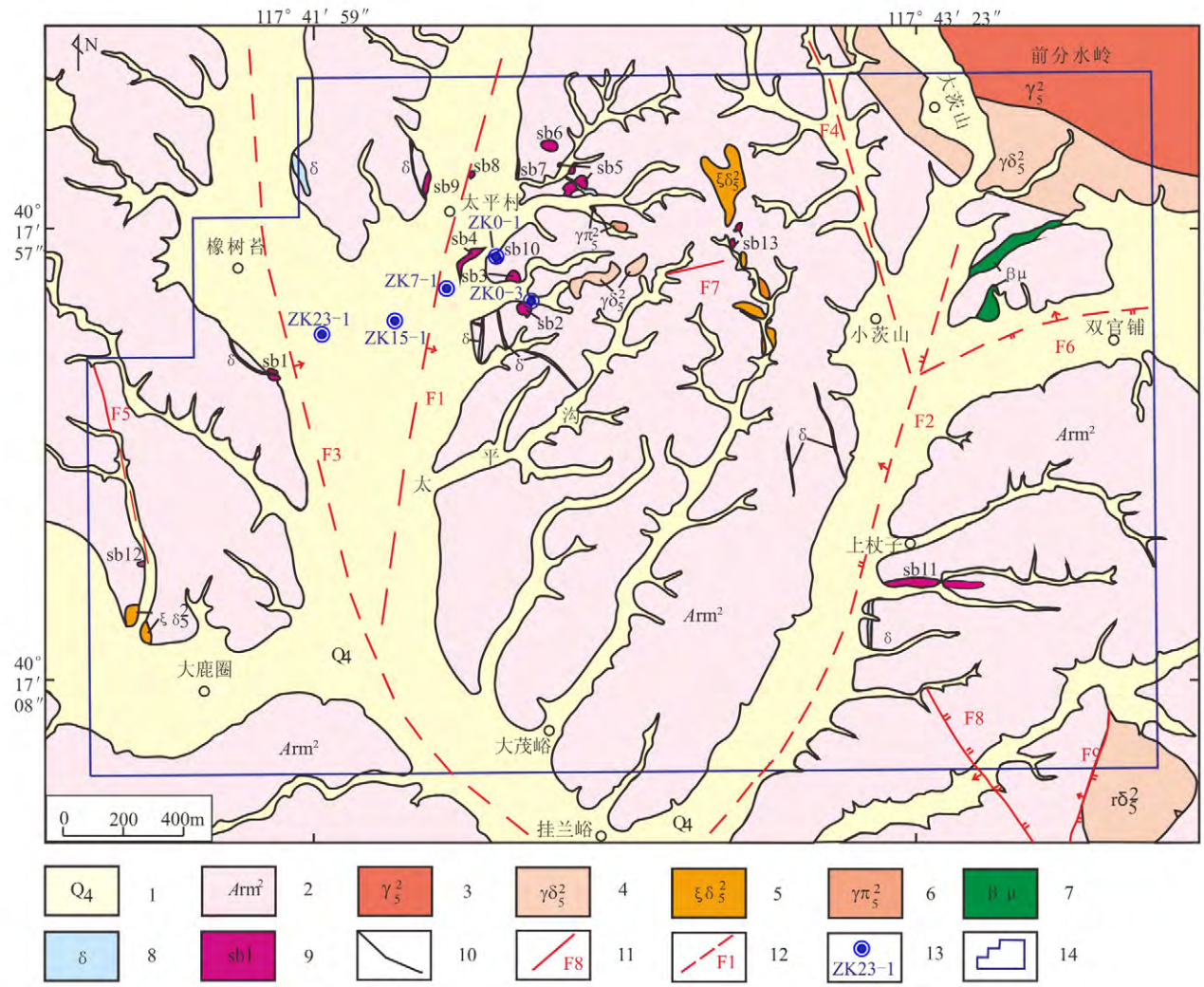


图 2　太平村钼矿床地质简图[16]

Fig. 2　Simplified geological map of Taipingcun Mo deposit

花岗岩中见有稀疏浸染状辉钼矿化。矿体受岩浆岩侵入活动及构造活动产生的节理裂隙控制明显，区内裂隙极其发育，其发育程度、规模直接决定着矿脉规模及密度，从而决定着矿体的品位及厚度[16]，多条辉钼矿石英细脉、辉钼矿细脉及浸染状辉钼矿集中富集形成矿体，对围岩没有明确的选择性，具有经济价值的矿体与围岩没有明显界线，呈渐变过渡关系。矿脉主要以缓倾斜分布，倾角以 0° ~ 35° 为主，呈不规则脉状、透镜状成群成带集中产出，矿体形态不规则，厚度、品位变化较大。矿体赋存标高 – 662. 63 ~ 270. 62 m，单个矿体厚度 1. 05 ~ 167. 57 m 不等，品位 0. 030% ~ 1. 542%。主要矿化类型为含辉钼矿石英细脉型和薄膜状辉钼矿微细脉型，即辉钼矿呈细脉状、浸染状分布于石英脉中及两壁或沿裂隙直接充填，脉宽一般 0. 1 ~ 5 cm，偶见宽度 > 10 cm 辉钼矿石英脉。

矿石以辉钼矿石英脉型矿石为主，脉石矿物主要有石英、钾长石、斜长石和绢云母等；矿石矿物主要为辉钼矿、黄铁矿，其次为磁铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿和方铅矿等。辉钼矿在矿石中一般独立产出，与其他金属矿物无明显的交生关系（图 3）。矿石结构主要有自形–半自形叶片状结构，

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



A. 辉钼矿分布于隐伏似斑状二长花岗岩中；B. 隐伏角砾岩中辉钼矿；C. 辉钼矿、黄铁矿呈浸染状分布于强硅化斜长片麻岩中；D. 辉钼矿细脉、辉钼矿石英脉缓倾斜斜交片麻理分布；E. 辉钼矿石英脉及其边部钾化蚀变晕中浸染状辉钼矿；F. 辉钼矿呈细脉浸染状分布于石英脉中及边部；G. 辉钼矿石英脉分布于伟晶岩中；H. 辉钼矿细网脉分布于伟晶岩中；I. 辉钼矿呈片状分布于透明矿物中；J. 辉钼矿、黄铁矿呈细脉浸染状分布于厚大缓倾斜石英脉中；K. 自形–半自形叶片状辉钼矿斑杂状集合体分布于石英脉中；Mo. 辉钼矿；Py. 黄铁矿；Qtz. 石英；Kfs. 钾长石；Chl. 绿泥石.

图 3 太平村钼矿床矿石标本及其蚀变矿化特征

Fig. 3 Ore and its alternation and mineralization characteristics of Taipingcun Mo deposit

它形叶片状结构，少见自形–它形晶粒状结构、交代结构；构造为细脉状、浸染状、网脉状和角砾状构造。在富钼矿石中辉钼矿的粒度较粗，一般为（0.5 ×0.30 ~0.1 ×0.003） mm；贫钼的矿石中多见细小的辉钼矿，粒度仅为（0.1 ×0.05 ~0.05 ×0.001） mm。

矿区围岩蚀变较强，以硅化、钾化与辉钼矿化关系最为密切。不同地段蚀变矿化类型略有不同，

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

以矿区中北部岩浆岩和角砾岩集中分布区域为中心，F2、F3 两条断裂所夹区域表现为高温蚀变矿化特征，主要为钾化、硅化、黑云母化、云英岩化、萤石化叠加绿泥石化、绿帘石化和碳酸盐化等，矿化主要为辉钼矿化、黄铁矿化和绿柱石等。F2、F3 两条断裂以外区域表现为低温蚀变矿化特征，主要为硅化、黝帘石化、绿泥石化、纤闪石化、绢云母化和碳酸盐化等，矿化主要为铜、铅、锌、银和金等，但二者之间的界线不十分清晰[17,18]。

综合分析认为，太平村钼矿具有斑岩型钼矿床的成矿地质条件和矿化蚀变特征。

3　辉钼矿 Re–Os 同位素定年研究

3.1　样品采集与处理

用于辉钼矿 Re–Os 同位素定年的 7 件矿石样品分别采自钻孔 ZK31–1、ZK31–2、ZK0–1、ZK23–1 岩芯中，为黄铁矿辉钼矿石英脉、辉钼矿石英脉和辉钼矿细脉，样品辉钼矿含量较高。辉钼矿的分选在河北省廊坊市宏信地质勘查技术服务有限公司完成，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，辉钼矿纯度达 99%。为减少 Re–Os 同位素的失耦现象的影响[19]，挑选的辉钼矿粒度均 <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。

3.2　分析方法

辉钼矿 Re–Os 同位素分析在国家地质实验测试中心完成。Re–Os 化学分离步骤和质谱测定主要包括分解样品、直接蒸馏分离 Os、萃取分离 Re 及质谱测定，详细流程参见文献[20–28]。实验采用美国 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–Os 含量很低的样品采用美国热电公司(Thermo Fisher Scientific)生产的高分辨电感耦合等离子体质谱仪 HR–ICP–MS Element 2 进行测量。对于 Re：选择质量数 185、187，用 190 监测 Os；对于 Os：选择质量数为 186、187、188、189、190、192，用 185 监测 Re。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和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%)，模式年龄置信水平 95%。实验全流程 Re、Os 和 ^{187}Os 空白水平分别为(0.001 3 ± 0.000 2) ng、(0.000 89 ± 0.000 12) ng、(0.000 21 ± 0.000 06) ng，远小于样品含量，故不会影响实验中 Re、Os 含量的测定。为保证测试结果的可靠性，同时对实验标准物质 GBW04435(HLP)中 Re 和 Os 进行测定。

4　测试结果

太平村钼矿床 7 件辉钼矿样品 Re–Os 同位素测试结果见表 1。辉钼矿 $\omega_{(Re)}$ 为 18.79×10^{-6} ~ 66.64×10^{-6}，$\omega^{187}_{(Re)}$ 为 11.81×10^{-6} ~ 41.89×10^{-6}；$\omega_{(普Os)}$ 为 $0.105\ 7\times10^{-6}$ ~ $0.353\ 4\times10^{-6}$；$\omega^{187}_{(Os)}$ 为 32.24×10^{-6} ~ 114.4×10^{-6}。

表 1　冀东太平村钼矿床辉钼矿 Re–Os 同位素测定结果

Table 1　Re–Os isotopic analyses of molybdenite separates from Taipingcun Mo deposit in eastern Hebei

样品编号	样重/g	$\omega_{(Re)}$ / ×10^{-6}		$\omega_{(普Os)}$ / ×10^{-6}		$\omega^{187}_{(Re)}$ / ×10^{-6}		$\omega^{187}_{(Os)}$ / ×10^{-6}		模式年龄/Ma	
		测定值	不确	测定值	不确	测定值	不确	测定值	不确	测定值	不确
HB–7–1	0.006 74	34.55	0.27	0.328 4	0.077 6	21.71	0.17	59.35	0.39	163.8	2.3
HB–7–2	0.006 31	43.25	0.41	0.105 7	0.081 3	27.18	0.26	73.67	0.50	162.5	2.5
HB–7–3	0.006 33	44.35	0.41	0.423 0	0.096 0	27.88	0.26	76.95	0.52	165.5	2.5
HB–8–1	0.006 19	45.01	0.39	0.186 4	0.185 7	28.29	0.25	78.22	0.58	165.7	2.5
HB–8–2	0.007 28	40.41	0.35	0.156 7	0.156 1	25.40	0.22	69.44	0.50	163.9	2.4
HB–9–1	0.006 05	66.64	0.47	0.353 4	0.100 9	41.89	0.30	114.4	0.80	163.8	2.3
HB–11–1	0.007 07	18.79	0.27	0.161 3	0.098 8	11.81	0.17	32.24	0.21	163.6	3.1
GBW04435 (HLP)	0.010 45	284.6	2.6					656.7	3.9	220.6	3.2
GBW04435 (HLP)		283.8	6.2					659.0	14.4	221.4	5.6

注：测试单位：国家地质实验测试中心；分析者：李超、周利敏.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

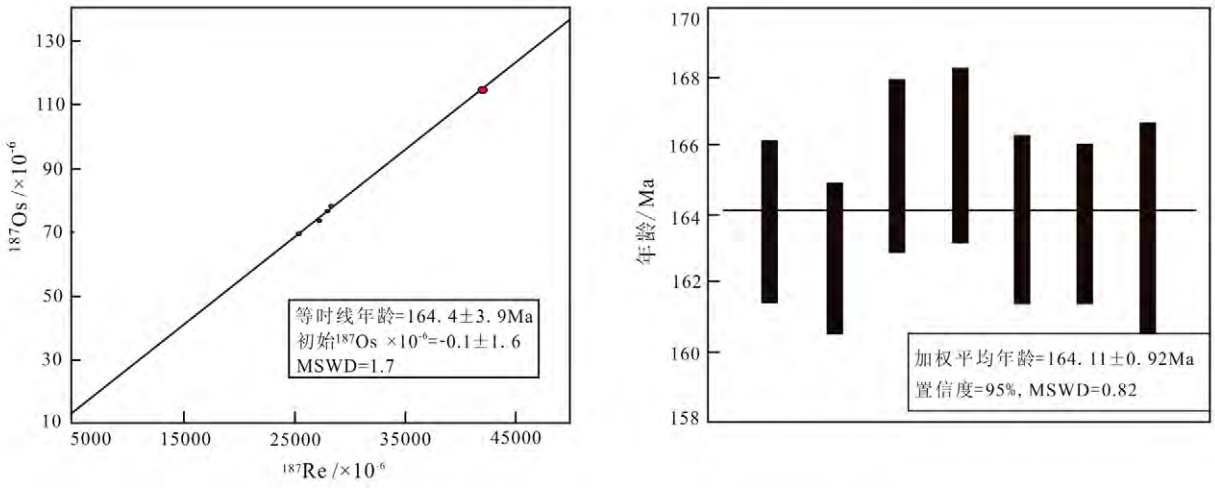


图 4 太平村钼矿床辉钼矿 Re–Os 同位素等时线图与加权平均年龄图

Fig. 4 Re – Os isochron and weighted mean of Re–Os model ages of molybdenites from Taipingcun Mo deposit

模式年龄计算采用公式: $t = 1/\lambda ([\ln (1 + {}^{187}Os/{}^{187}Re)]$

式中: λ 为 ^{187}Re 的衰变常数 1.666 (10^{-11} a^{-1} (±1.02%)[29]。

7 件样品的 Re–Os 同位素模式年龄十分接近, 为 (162.5 ± 2.5) ~ (165.7 ± 2.5) Ma。采用 Isoplot 软件绘制了辉钼矿 Re–Os 同位素等时线图与加权平均年龄图 (图 4), 求得等时线年龄 (164.4 ± 3.9) Ma, MSWD = 1.7, 加权平均年龄为 (164.11 ± 0.92) Ma, MSWD = 0.82。等时线年龄与模式年龄加权平均值在误差范围内基本一致且 MSWD 接近 1, 显示了数据的可靠性。

5 讨论

5.1 与区域成矿时代的对比

对于热液矿床而言, 辉钼矿 Re–Os 同位素定年技术常用于直接测定金属硫化物矿床的形成年龄, 其准确性已得到公认[30]。太平村钼矿床 7 件不同位置的辉钼矿样品 Re–Os 同位素模式年龄在误差范围内基本相同, 集中于 162.5 ~ 165.7 Ma; 加权平均年龄为 (164.11 ± 0.92) Ma, 等时线年龄为 (164.4 ± 3.9) Ma, 等时线年龄与模式年龄加权平均值在误差范围内基本一致, 而 7 件样品的 ^{187}Re 含量 (或 $^{187}Re/^{188}Os$) 相近, 因而本文采用模式年龄的加权平均值 (164.11 ± 0.92) Ma 作为本矿床辉钼矿的结晶时间, 即太平村钼矿形成于中侏罗世晚期, 为本区燕山早期大规模构造–岩浆岩–成矿事件的产物。

根据近年研究资料, 对冀东地区钼多金属矿床同位素年龄数据统计 (表 2) 可见, 金厂峪金 (钼) 矿床中辉钼矿 Re–Os 年龄为 (242.6 ± 6.8) Ma[31], 与都山岩体年龄 (240 ± 4) Ma 相近, 可能为早期构造薄弱面在印支构造岩浆作用下发生破裂, 含矿热液贯入形成热液矿床[3]; 四拨子钼 (铜) 矿床钼矿为两期成矿, 主成矿期的辉钼矿 Re–Os 年龄为 (194 ± 1) Ma, 与其有成岩联系的五拨子、老商家花岗斑岩的 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄分别为 (189.77 ± 0.73) Ma、(196.35 ± 0.80) Ma, 晚期辉钼矿 Re–Os 年龄为 (121.1 ± 1.8) Ma[32,33]; 唐杖子金 (钼) 矿床的辉钼矿 Re–Os 年龄为 (170.1 ± 1.6) Ma[3], 其成矿岩体花岗斑岩的 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄为 (173 ± 2) Ma[11]; 峪耳崖金矿床中辉钼矿 Re–Os 年龄为 (171.9 ± 2.7) Ma[15], 其成矿岩体花岗岩的 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄为 (174 ± 3) Ma、(175 ± 1) Ma[3]; 下营房金矿床中辉钼矿 Re–Os 年龄为 (164.2 ± 2.3) Ma, 其成矿岩体花岗斑岩的 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄为 (163.32 ± 0.90) Ma[34]; 寿王坟铜 (钼) 矿床的辉钼矿 Re–Os 年龄为 (148 ± 4) Ma[35], 与其有成岩联系的花岗闪长岩的 Rb–Sr 等时线年龄为 130 Ma[36]; 西厂沟、麻地、蘑菇峪和水帘洞钼矿床虽未获得辉钼矿 Re–Os 年龄数据, 但与其有成岩联系的岩体年龄大致可代表各矿床的成矿时代, 即麻地钼 (金) 矿床和蘑菇峪钼多金属矿床形成于中

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

侏罗世; 水帘洞钼多金属矿床形成于晚侏罗世; 西厂沟钼(硫铁)矿床形成于晚侏罗–早白垩世[37,38]。以上数据显示,冀东地区除金厂峪金(钼)矿床中辉钼矿为印支期成矿外,其他矿床中辉钼矿均为燕山期成矿,各矿床的成岩成矿时代大致表现出"东早西晚"的空间分布规律,成矿时代从早三叠–早白垩世,但主要集中于中–晚侏罗世。与毛景文等[39,40]提出的我国北方大规模成矿作用出现在 200 ~ 160 Ma,140 Ma ± 和 130 ~ 110 Ma 三个峰期基本相符,但冀东地区存在早三叠世钼成矿事件,也符合陈毓川等[41]指出的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,即 180 ~ 140 Ma 的时间范围。

表 2　冀东典型钼矿床成岩成矿年代学格架

Table 2　Isochron date of diagenesis and mineralization in eastern Hebei

矿床名称	辉钼矿		岩体年龄/Ma	资料来源
	Re–Os 年龄/Ma	ω(Re)/10^{-6}		
太平村钼矿床	164.11 ± 0.92	18.79 ~ 66.64	……	本文
唐杖子金(钼)矿床	170.1 ± 1.6	12.56 ~ 41.67	173 ± 2	[9, 11]
峪耳崖金矿床	171.9 ± 2.7	50.63 ~ 116.1	174 ± 3、175 ± 1	[3, 15]
下营房金矿床	164.2 ± 2.3	……	163.32 ± 0.90	[34]
金厂峪金(钼)矿床	242.6 ± 6.8	……	240 ± 4	[3, 31]
四拨子钼(铜)矿床	194 ± 1	38.74 ~ 71.35	196.35 ± 0.80、189.77 ± 0.73	[32, 33]
	121.1 ± 1.8	6.475 ~ 6.923	……	
寿王坟铜(钼)矿床	148 ± 4	10.51 ± 0.18	130	[35, 39]
西厂沟钼(硫铁)矿床	……	……	138.6、113.0	[37]
麻地钼(金)矿床	……	……	166.3 ± 5.0	[38]
蘑菇峪钼多金属矿床	……	……	156.0	[37]
水帘洞钼多金属矿床	……	……	136.9	[37]

对比燕辽钼(铜)成矿带重要矿床可知,太平村钼矿床与辽西肖家营子钼矿(165.5 ± 4.6)几乎同时形成[42,43],同属燕辽钼(铜)成矿带第三期构造–岩浆岩–成矿事件的产物。前人研究认为,燕辽钼(铜)成矿带钼矿床主要集中分布于冀北和辽西地区,带内中生代大规模的构造–岩浆热事件和与之有关的成矿作用分为 5 个阶段,即中–晚三叠世(240 ~ 205 Ma)、早侏罗世(204 ~ 175 Ma)、中侏罗世(175 ~ 154 Ma)、晚侏罗世(154 ~ 135 Ma)和早白垩世(135 ~ 110 Ma)[32,33,35,44]。近年来,随着找矿勘查工作的深入,在冀东相继发现了太平村钼矿、南双硐钼矿、四拨子钼(铜)矿和西厂沟钼矿等钼矿床,并获得了一系列的成岩成矿年龄数据。这些新发现均证实冀东与冀北、辽西同样为燕辽钼(铜)成矿带的重要钼矿集区,具有进一步寻找有价值钼矿的潜力,应该加以重视。

5.2　区域侏罗世成矿构造背景的讨论

中生代以来,本区进入陆内造山作用阶段,区内构造演化是挤压与伸展交替的过程,记录了从古亚洲洋构造域汇聚构造体制向古太平洋构造域俯冲构造体制转换的大陆动力学过程,早期 EW、NE 向构造受到活化,形成了不同级别的 EW、NE 向的逆冲推覆构造,NE、NNE 向的韧性剪切带和变质核杂岩构造[45]。

侏罗世是燕山地区地壳运动和内陆造山运动的重要时期,构造、岩浆活动广泛、强烈,并伴有大量的有色及贵金属矿床的形成。近年来,越来越多的证据表明,早侏罗世时期燕辽地区仍以挤压作用为主,局部地区发生伸展构造。这一挤压作用的动力来源可能与蒙古—鄂霍茨克海的消减、闭合作用有关[1]。强烈的挤压作用使得下地壳或太古宙基底发生重熔或部分熔融,形成了一系列花岗质岩浆,如冀东青山口、五拨子、老商家和辽西杨家杖

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

子、兰家沟等花岗岩体，与强烈的构造岩浆活动相伴，燕辽地区在早侏罗世发生了大规模的钼矿化作用，如形成冀东四拨子钼（铜）矿床、辽西兰家沟钼矿床和杨家杖子钼矿床等等。中侏罗世燕辽地区构造和岩浆活动最为强烈，燕辽地区构造运动以髫髻山组安山岩之下的角度不整合为特征的燕山运动A幕（175～160 Ma）[46]为代表，大多数学者[46-48]认为，燕山A幕运动前，燕辽地区岩浆活动和构造变形主要受古亚洲洋构造域控制，构造形迹呈EW向，A幕运动期间，古太平洋板块向东亚大陆的俯冲作用逐渐加强，以至于燕辽地区区域构造格局开始由古亚洲洋构造域向古太平洋构造域转化，逐步形成了NE向和NNE向的构造形迹，而这种构造转换时间很可能发生在160 Ma前后[46]，构造变形表现为早期的同造山伸展作用和晚期的挤压收缩构造。中侏罗世燕辽地区发生强烈的火山喷发和岩浆侵入活动，冀东中部侵入岩带的侵入体则主要形成于此时，为一些同构造的侵入体，一般为大小不等的岩株，伴随强烈的岩浆活动形成了大量与侵入岩有关的钼、金矿床，如太平村钼矿床、麻地钼（金）矿床、唐杖子金（钼）矿床和下营房金矿床等。地球化学资料表明，中侏罗世冀东地区岩浆性质显示出较典型的同熔型岩浆特点，推断是软流层与岩石圈相互作用的产物，形成于燕山运动A幕期间或中间幕期的伸展与挤压转换的过程中，可能同时与鄂霍茨克洋的闭合或古太平洋的俯冲存在一定联系[1]。

晚侏罗世，受古太平洋板块西向俯冲的影响，区域性EW向、NE向断裂被复活，进一步向NE向、NNE向转换。在此过程中，大量的玄武质岩浆沿着这些NE向和NNE向的深大断裂系统上升底侵，并带来大量的热源。上地壳岩石发生大规模熔融或多次重熔，形成了同熔型或I型花岗闪长岩、花岗斑岩、石英二长岩和正长岩等。伴随着这些花岗质岩浆的侵位，形成了与I型或壳幔混源型花岗质岩浆有关的钼、铜等矿化作用。如寿王坟、西厂沟和水帘洞等斑岩型、斑岩-矽卡岩型钼矿床或铜钼矿床。这一时期大规模成矿作用的控矿构造和相关的深源花岗质岩浆的形成表明他们处于构造体制大转折时期，其动力学来源与古太平洋板块向华北板块俯冲碰撞有关[1]。

近年来的研究资料表明，冀东地区钼金多金属矿床的成岩成矿时代主要集中于侏罗世，尤其是中-晚侏罗世。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。根据前人对区域成矿背景研究，冀东钼金多金属矿床与古太平洋板块的俯冲作用有关，为构造体制大转折背景下的产物。

5.3 成矿物质来源

孟祥金等[49,50]对中国斑岩型辉钼矿Re-Os同位素测试数据进行了分析总结归纳：成矿物质来源以地幔物质为主的钼矿，其辉钼矿Re含量基本为$100\times10^{-6}\sim1\,000\times10^{-6}$；成矿物质具有壳幔混合源的钼矿，其辉钼矿中Re含量大多在十几μg/g至几十μg/g；成矿物质完全来自壳源的矿床，其辉钼矿Re含量为$1\sim n$ μg/g或更低。毛景文等[51]在综合分析、对比了中国各类型钼矿床中辉钼矿Re的含量后，总结认为从地幔→壳幔混合→地壳，矿石中辉钼矿Re的含量呈1个数量级下降，从幔源→I型→S型花岗岩有关的矿床，Re质量分数从$n\times10^{-4}\rightarrow n\times10^{-5}\rightarrow n\times10^{-6}$。因此，辉钼矿的Re质量分数可以指示成矿物质的来源。太平村钼矿床中辉钼矿Re的含量变化于$18.79\times10^{-6}\sim66.65\times10^{-6}$（表1），平均为$41.86\times10^{-6}$，分布较均匀，表明其成矿物质主要为壳幔混合作用的结果。这与冀东金厂峪金（钼）矿床、四拨子钼（铜）矿床、唐杖子金（钼）矿床、寿王坟铜（钼）矿床和峪耳崖金矿床等相似（表2），表明冀东地区钼矿成矿物质来源具壳幔混源特征，体现出同源多阶段特性。对比同属燕辽钼铜成矿带的辽西肖家营子钼（铁）矿、杨家杖子钼矿、兰家沟钼矿和冀北的小寺沟铜钼矿、大湾钼矿和大草坪钼矿得知其Re含量一致（$10.5\times10^{-6}\sim83.7\times10^{-6}$，个别$163.0\times10^{-6}$）[33]，同样为壳幔混合作用的结果，物质源区相似。

5.4 区域钼成矿特点及潜力分析

马兰峪复背斜及密云—喜峰口大断裂为矿集区主要的控岩控矿构造，对中生代中酸性火山喷发、岩浆侵入和与侵入体有关的矿床起着控制作用。中生代时期复活的近EW向老基底断裂和新产生的NE-NNE向断裂或在其交汇部位，往往形成侵入体或火山机构，控制着与钼、铜（钼）或金（钼）矿化有关的花岗岩类和矿床的空间分布。矿集区内已知的钼、铜、金矿床（点），大多沿深断裂带及

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其旁侧分布，或在深断裂带与其他断裂的交汇部位产出，总体上呈带状分布，与深断裂带延伸一致[35]。并且矿床与中生代尤其是燕山期的中酸性小侵入体关系密切，多产于小岩体（尤其是大岩体的“卫星”小岩体）之中或内外接触带中。钼成矿对围岩没有选择性，不同地区、不同时代的不同地层组合可能对钼成矿作用矿化类型、成矿元素组合和矿化强度有一定的影响，但不是主要因素，更多的是为钼成矿作用提供一个有利的物理化学环境[52]。侵入岩与围岩条件对矿床的形成存在一定的制约性，产于花岗斑岩、长英质或中性火山岩内的钼或金（钼）矿床多为斑岩型和脉型，而产在花岗质岩类与碳酸盐岩地层接触带的钼、铜（钼）或金（钼）矿床为矽卡岩型或斑岩–矽卡岩型。矿床的成矿物质及成矿流体主要来源于下地壳或与太古代结晶基底有关的花岗岩，钼矿的形成主要与中生代富硅、富钾质花岗岩有关[1,44]。

根据本区 1∶20 万水系沉积物测量成果可知，区内分布大量浓集中心明显、异常强度高、成矿信息强的钼元素异常，且多位于规模较大岩体西侧，在钼异常中心附近大多分布有“卫星”小岩体即成矿岩体。目前，冀东地区已经发现多个钼矿床（如太平村钼矿、南双硐钼矿等），并且在多处金矿床（如下营房金矿、峪耳崖金矿等）中也发现较好的钼矿化，证实区内钼异常的找矿价值。区内钼矿床类型较为齐全，包括斑岩型、斑岩–矽卡岩型、矽卡岩型及热液脉型，使该区已成为一个集不同类型钼矿于一区的大型钼矿集中区，并且呈现出良好的找矿前景。

6　结论

（1）太平村钼矿受岩浆构造活动产生的裂隙控制明显，对围岩没有选择性，围岩蚀变大致表现分带特征。隐伏花岗岩中见稀疏浸染状辉钼矿，结合时空分布特征证实区内钼矿与侵入岩系统有关，具有斑岩型钼矿床的成矿地质条件和矿化蚀变特征。

（2）太平村钼矿辉钼矿 Re–Os 模式年龄加权平均值为（164.11 ± 0.92）Ma，表明该矿床形成于中侏罗世晚期，为燕辽钼（铜）成矿带第三期构造–岩浆岩–成矿事件的产物，属中国北方中生代 200 ~ 160 Ma 的大规模成矿作用的结果。与古太平洋板块的俯冲作用有关，为构造体制大转折背景下的产物。

（3）太平村钼矿辉钼矿 Re 的平均含量为 41.86×10^{-6}，指示成矿物质为壳幔混源，与冀东金厂峪金（钼）、寿王坟铜（钼）等矿床，辽西肖家营子钼（铁）矿、杨家杖子钼矿、兰家沟钼矿和冀北的小寺沟铜钼矿、大湾钼矿、大草坪钼矿等矿床具有相似的物质源区，体现出同源多阶段特性。

（4）冀东地区钼多金属矿床的成岩成矿时代主要集中于中–晚侏罗世，与中国北方中生代大规模成矿作用峰期和燕辽钼（铜）成矿带中生代大规模的构造–岩浆岩–成矿事件相对应。进一步证实中–晚侏罗世为冀东地区钼成矿作用的高峰期。该区已成为一个集不同类型钼矿于一区的大型钼矿集中区，并且呈现出良好的找矿前景。

参考文献：

[1] 代军治. 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]. 北京：中国地质科学院，2008.
DAI Jun-zhi. The metalloseneses and geodynamic settings of molybdennm (copper) deposits in Yan–Liao metallogenic belt: doctor's degree thesis [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2008.

[2] 李俊建，沈保丰，翟安民，等. 冀东地区金矿床类型及其地质特征 [J]. 前寒武纪研究进展，2002，25（2）：73-79.
LI Jun-jian, SHEN Bao-feng, QU An-min, et al. Type and geological character of gold deposits in eastern Hebei Province [J]. Progress in Precambrian Research, 2002, 25 (2): 73-79.

[3] 罗镇宽，关康，裘有守，等. 冀东金厂峪金矿区钠长岩脉及青山口花岗岩体 SHRIMP 锆石 U–Pb 定年及其意义 [J]. 地质找矿论丛，2001，16（4）：226–231.
LUO Zhen-kuan, GUAN Kang, QIU You-shou, et al. Zircon SHRIMP U–Pb dating of albite dyke in Jinchangyu gold mine, Jidong area, Hebei, China [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2001, 16 (4): 226-231.

[4] 张长厚，宋鸿林. 燕山板内造山带中生代逆冲推覆构造及其与前陆褶冲带的对比研究 [J]. 地球科学，1997，22（1）：33-36.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

ZHANG Chang-hou, SONG Hong-lin. Mesozoic thrust tectonics in Yanshan intraplate orogen and the difference between them and those of foreland fold-and-thrust belt [J]. Earth Science, 1997, 22 (1): 33-36.

[5] 张长厚，宋鸿林，王根厚，等. 燕山板内造山带中段近东西向中生代右行走滑构造系统 [J]. 地球科学，2001，26 (5)：464-472.
ZHANG Chang-hou, SONG Hong-lin, WANG Gen-hou, et al. Mesozoic dextral strike-slip structural system in middle segment of intraplate Yanshan orogenic belt, northern China [J]. Earth Science, 2001, 26 (5): 464-472.

[6] 张长厚，吴淦国，徐德斌，等. 燕山板内造山带中段中生代构造格局与构造演化 [J]. 地质通报，2004，23 (9)：864-875.
ZHANG Chang-hou, WU Gan-guo, XU De-bin, et al. Mesozoic tectonic framework and tectonic evolution in the middle belt of Yanshan intraplate orogenic belt [J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23 (9): 864-875.

[7] 马君. 冀东马兰峪隆起核部中生代中酸性侵入岩岩石地球化学特征及构造意义：博士学位论文 [D]. 北京：中国地质大学，2009.
MA Jun. Geochemical characteristics and Mesozoic intermediate and felsic plutons in Malanyu uplift, eastern Hebei Province, and it's tectonic implications: doctor's degree thesis [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009.

[8] 梅燕雄. 冀东金矿成矿特征及成矿演化：博士学位论文 [D]. 北京：中国地质科学院，1997.
MEI Yan-xiong. The metallogenic characteristics and evolution of gold deposits in Jidong region, Hebei Province, China: doctor's degree thesis [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1997.

[9] 李正远，叶会寿，贺文，等. 冀东唐杖子金（钼）矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 同位素年龄 [J]. 矿床地质，2014，33 (6)：1366-1378.
LI Zheng-yuan, YE Hui-shou, HE Wen, et al. Geological characteristics and molybdenite Re-Os isotopic dating of Tangzhangzi gold (molybdenum) deposit in eastern Hebei Province [J]. Mineral Deposits, 2014, 33 (6): 1366-1378.

[10] 张秋生，杨振升，高德玉，等. 冀东金厂峪地区高级变质区地质与金矿床 [M]. 北京：地质出版社，1991：324-432.
ZAHNG Qiu-sheng, YANG Zhen-sheng, GAO De-yu, et al. Geology and gold deposits in the high metamorphic area of Jidong, Jinchangyu [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 324-432.

[11] 郭少丰，汤中立，罗照华，等. 冀东唐杖子、牛心山花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义 [J]. 地质通报，2009，28 (10)：1458-1464.
GUO Shao-feng, TANG Zhong-li, LUO Zhao-hua, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geological significance from granite bodies in Tangzhangzi and Niuxinshan eastern Hebei Province, China [J] Geological Bulletin of China, 2009, 28 (10): 1458-1464.

[12] 芮宗瑶，黄崇轲，齐国明，等. 中国斑岩铜（钼）矿床 [M]. 北京：地质出版社，1984：1-64.
RUI Zong-yao, HUANG Chong-ke, QI Guo-ming, et al. Porphyry copper (molybdenum) deposits of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984: 1-64.

[13] 裴荣富，吕凤翔，范继璋，等. 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，1998：1-237.
PEI Rong-fu, LÜ Feng-xiang, FAN Ji-zhang, et al. Metallogenic series of ore deposits and mineral exploration in north margin of the north China massif and its north side [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1-237.

[14] 李海龙，张长厚，邹云，等. 冀东马兰峪背斜南翼与西部倾伏端盖层变形特征及其构造意义 [J]. 地质通报，2008，27 (10)：1698-1708.
LI Hai-long, ZHANG Chang-hou, ZOU Yun, et al. Tectonic deformations of the cover in the southern limb and western plunging zone of the Malanyu anticlinorium, eastrn Hebei, China, and its tectonic implications [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27 (10): 1698-1708.

[15] 陈绍聪，叶会寿，王义天，等. 冀东峪耳崖金矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义 [J]. 中国地质，2014，41 (5)：1565-1576.
CHEN Shao-cong, YE Hui-shou, WANG Yi-tian, et al. Re-Os age of molybdenite from the Yuerya Au deposit in eastern Hebei Province and its geological significance [J]. Geology in China, 2014, 41 (5): 1565-1576.

[16] 刘永慧，马润，陈志勇，等. 内蒙古曹四天钼矿床地质特征及找矿标志 [J]. 世界地质，2014，33 (2)：426-432.
LIU Yong-hui, MA Run, CHEN Zhi-yong, et al. Geological characteristics and prospecting indicator of Caos-

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

iyao Mo deposit, Inner Mongolia [J]. Global Geology, 2014, 33 (2): 426-432.

[17] 张金江，孙金龙，聂卫东，等. 冀东马兰峪复背斜太平村钼矿床的发现及意义 [J]. 吉林地质，2015，34 (3)：49-54.
ZHANG Jin-jiang, SUN Jin-long, NIE Wei-dong, et al. The discovery and significance of Malanyu anticlinorium Taipingcun Mo deposit in eastern Hebei Province [J]. Jilin Geology, 2015, 34 (3): 49-54.

[18] 聂卫东，杨玉山，刘剑波，等. 河北省兴隆县太平村钼矿矿化体分布特征及成因探讨 [J]. 吉林地质，2013，32 (2)：46-49.
NIE Wei-dong, YANG Yu-shan, LIU Jian-bo, et al. Distribution characteristics and origin of molybdenum mineralization of Taipingcun Xinglong County, Hebei Province [J]. Jilin Geology, 2013, 32 (2): 46-49.

[19] 杜安道，屈文俊，王登红，等. 辉钼矿亚晶粒范围内 Re 和 ^{187}Os 的失耦现象 [J]. 矿床地质，2007，26 (5)：572-580.
DU An-dao, QU Wen-jun, WANG Deng-hong, et al. Size decoupling of Re and ^{187}Os within molybdenite [J]. Mineral Deposits, 2007, 26 (5): 572-580.

[20] 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.

[21] 杜安道，屈文俊，李超，等. 铼-锇同位素定年方法及分析测试技术的进展 [J]. 岩矿测试，2009，28 (3)：288-304.
DU An-dao, QU Wen-jun, LI Chao, et al. A review on the development of Re-Os isotopic dating methods and techniques [J]. Rock and Mineral Analysis, 2009, 28 (3): 288-304.

[22] 杜安道，屈文俊，王登红，等. 铼-锇法及其在矿床学中的应用 [M]. 北京：地质出版社，2012：1-182.
DU An-dao, QU Wen-jun, WANG Deng-hong, et al. Re-Os method and its application in the science of deposit [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 1-182.

[23] 屈文俊，杜安道. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿铼-锇地质年龄 [J]. 岩矿测试，2003，22 (4)：254-257，262.
QU Wen-jun, DU An-dao. Highly precise Re-Os dating of molybdenite by ICP-MS with Carius tube sample digestion [J]. Rock and Mineral Anaiysis, 2003, 22 (4): 254-257, 262.

[24] 屈文俊，杜安道，任静. 过氧化氢在黄铁矿的溶解过程中对铼-锇信号强度及年龄的影响 [J]. 分析化学，2008，36 (2)：223-226.
QU Wen-jun, DU An-dao, REN Jing. Influnence of H_2O_2 on the signal intensity of rhenium osmium and Re-Os age in the process of dissolution for pyrite [J]. Analytical Chemistry, 2008, 36 (2): 223-226.

[25] 屈文俊，杜安道，李超，等. 金川铜镍硫化物样品中锇同位素比值的高精度分析 [J]. 岩矿测试，2009，28 (3)：219-222.
QU Wen-jun, DU An-dao, LI Chao, et al. High-precise determination of osmium isotopic Ratio in the Jinchuan copper nickel sulfide ore samples [J]. Rock and Mineral Anaiysis, 2009, 28 (3): 219-222.

[26] 李超，屈文俊，杜安道，等. 铼-锇同位素定年法中丙酮萃取铼的系统研究 [J]. 岩矿测试，2009，28 (3)：233-238.
LI Chao, QU Wen-jun, DU An-dao, et al. Comprehensive study on extraction of rhenium with acetone in Re-Os isotopic dating [J]. Rock and Mineral Anaiysis, 2009, 28 (3): 233-238.

[27] 李超，屈文俊，杜安道. 大颗粒辉钼矿 Re-Os 同位素失耦现象及 ^{187}Os 迁移模式研究 [J]. 矿床地质，2009，28 (5)：707-712.
LI Chao, QU Wen-jun, DU An-dao. Decoupling of Re and Os and migration model of ^{187}Os in coarse-grained molybdenite [J]. Mineral Deposits, 2009, 28 (5): 707-712.

[28] 李超，屈文俊，周利敏，等. Carius 管直接蒸馏快速分离锇方法研究 [J]. 岩矿测试，2010，29 (1)：14-16.
LI Chao, QU Wen-jun, ZHOU Li-min, et al. Rapid separation of osmium by direct distillation with Carius tube [J]. Rock and Mineral Analysis, 2010, 29 (1): 14-16.

[29] Smoliar M I, Walker R J, Morgan J W. Re-Os ages of group IIA, IIIA, IVA and VIB iron meteorites [J]. Science, 1996, 271: 1099-1102.

[30] 鞠楠，任云生，王超，等. 吉林敦化大石河钼矿床成因与辉钼矿 Re-Os 同位素测年 [J]. 世界地质，2012，31 (1)：68-76.
JU Nan, REN Yun-sheng, WANG Chao, et al. Ore genesis and molybdenite Re-Os dating of Dashihe molybdenum deposit in Dunhua, Jilin [J]. Global Geology, 2012, 31 (1): 68-76.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[31] 宋扬，王瑞江，聂凤军，等. 冀东金厂峪金矿区印支期成矿作用的发现及地质意义[J]. 地球学报，2011，32(1)：125-128.
SONG Yang，WANG Rui-jiang，NIE Feng-jun，et al. The discovery of the Indosinian metallogenesis in the Jinchangyu gold deposit and its geological significance[J]. Acta Geoscientica Sinica，2011，32(1)：125-128.

[32] 李强，孟祥元，武峰，等. 河北省四拨子—六拨子钼铜矿区侵入岩LA-ICP-MS锆石U-Pb定年及成矿意义[J]. 矿床地质，2012，31(2)：255-270.
LI Qiang，MENG Xiang-yuan，WU Feng，et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of intrusive rocks and its metallogenic significancein Sibozi-Liubozi molybdenum-copper deposit of Qinglong County，Hebei Province[J]. Mineral Deposits，2012，31(2)：255-270.

[33] 李强，孟祥元，杨富全，等. 河北省青龙满族自治县四拨子—六拨子钼铜矿床的辉钼矿Re-Os年龄及意义[J]. 中国地质，2012，39(6)：1622-1634.
LI Qiang，MENG Xiang-yuan，YANG Fu-quan，et al. Re-Os ages of molybdenite from the Sibozi-Liubozi molybdenum-copper deposit in Qinglong Country of Hebei Province and its implications for metallogeny[J]. Geology in China，2012，39(6)：1622-1634.

[34] 邹滔，王玉往，王京彬，等. 冀东下营房金矿成矿年代学研究[J]. 地质与勘探，2016，52(1)：84-97.
ZOU Tao，WANG Yu-wang，WANG Jing-bin，et al. Geochronology of the Xiayingfang Au deposit eastern Hebei Province[J]. Geology and Exploration，2016，52(1)：84-97.

[35] 黄典豪，杜安道，吴澄宇，等. 华北地台钼(铜)矿床成矿年代学研究辉钼矿铼-锇年龄及其地质意义[J]. 矿床地质，1996，15(4)：78-81，83-86.
HUANG Dian-hao，DU An-dao，WU Cheng-yu，et al. The metallogenic geochronology-molybdenite Re-Os age and its geological significance of the north China platform molybdenum(copper) deposit[J]. Mineral Deposits，1996，15(4)：78-81，83-86.

[36] 张瑞斌，刘建明，叶杰，等. 河北寿王坟铜矿黄铜矿铷锶同位素年龄测定及其成矿意义[J]. 岩石学报，2008，24(6)：1353-1358.
ZHANG Rui-bin，LIU Jian-ming，YE Jie，et al. Chalcopyrite Rb-Sr isochron age dating and its´ ore-forming significance in Shouwangfen Cu deposit in Hebei Province[J]. Acta Petrological Sinica，2008，24(6)：1353-1358.

[37] 邵克忠，王宝德，李洪阳. “华北地台”斑岩钼矿“成矿”侵入体地质特征[J]. 河北地质学院学报，1985，1：1-18.
SHAO Ke-zhong，WANG Bao-de，LI Hong-yang. The geological characteristics of the “ore-forming” intrusions of “North China platform”[J]. Journal of Hebei Institute of Geology，1985，1：1-18.

[38] 王季亮，李丙译，周德星，等. 河北省中酸性岩体地质特征及其与成矿作用关系[M]. 北京：地质出版社，1994：1-213.
WANG Ji-liang，LI Bing-yi，ZHOU De-xing，et al. Geological characteristics of the intermediate acidic rock mass and its relationship with mineralization in Hebei Province[M]. Beijing：Geological Publishing House，1994：1-213.

[39] 毛景文，张作衡，余金杰，等. 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[J]. 中国科学(D辑)，2003，33(4)：289-299.
MAO Jing-wen，ZHANG Zuo-heng，YU Jin-jie，et al. Geodynamic setting of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas-implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits[J]. Science in China(Ser. D)，2003，33(4)：289-299.

[40] 毛景文，谢桂青，张作衡，等. 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，2005，21(1)：171-190.
MAO Jing-wen，XIE Gui-qing，ZHANG Zuo-heng，et al. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. Acta Petrological Sinica，2005，21(1)：171-190.

[41] 陈毓川，薛春纪，王登红，等. 华北陆块北缘区域矿床成矿谱系探讨[J]. 高校地质学报，2003，9(4)：520-535.
CHEN Yu-chuan，XUE Chun-ji，WANG Deng-hong，et al. A discussion on the regional metallogenic pedigree of the ore deposits in the north margin of the North China landmass[J]. Geological Journal of China Universities，2003，9(4)：520-535.

[42] 代军治，毛景文，杜安道，等. 辽西肖家营子钼(铁)矿床Re-Os年龄及其地质意义[J]. 地质学报，2007，31(7)：917-923.
DAI Jun-zhi，MAO Jing-wen，DU An-dao，et al. Re-Os Dating of molybdenite from the Xiaojiayingzi Mo

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(Fe) deposit in western Liaoning and its geological significance [J]. Acta geologica Sinica, 2007, 31 (7): 917-923.

[43] 刘长纯, 杨仲杰, 王成龙, 等. 辽宁肖家营子钼多金属矿成矿模式与找矿模型 [J]. 世界地质, 2012, 31 (2): 238-246.
LIU Chang-chun, YANG Zhong-jie, WANG Cheng-long, et al. Metallogenic model and prospecting model in Xiaojiayingzi molybdenum polymetallic deposit of Liaoning [J]. Global Geology, 2012, 31 (2): 238-246.

[44] 代军治, 毛景文, 杨富全, 等. 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, 2006, 25 (5): 598-612.
DAI Jun-zhi, MAO Jing-wen, YANG Fu-quan, et al. Geological characteristics and dynamic background of the molybdenum (copper) deposit along Yanshan-Liaoning metallogenic belt on northern margin of North China block [J]. Mineral Deposits, 2006, 25 (5): 598-612.

[45] 马寅生, 吴满路, 曾庆利. 燕山及邻区中新生代挤压与伸展的转换和成矿作用 [J]. 地球学报, 2002, 23 (2): 115-121.
MA Yin-sheng, WU Man-lu, ZENG Qing-li. The Mesozoic-Cenozoic compression and extension transformation process and ore-forming process in Yanshan and adjacent area [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23 (2): 115-121.

[46] 赵越, 徐刚, 张拴宏, 等. 燕山运动与东亚构造体制的转变 [J]. 地学前缘, 2004, 11 (3): 319-328.
ZHAO Yue, XU Gang, ZHANG Shuan-hong, et al. Yanshan movement and conversion of tectonic regimes in East Asia [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11 (3): 319-328.

[47] 郑亚东, Davis G A, 王琮, 等. 燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题 [J]. 地质学报, 2000, 74 (4): 289-302.
ZHENG Ya-dong, Davis G A, WANG Cong, et al. Maojr mesozoic tectonie events in the Yanshan belt and the plate tectonic setting [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2000, 74 (4): 289-302.

[48] 李伍平, 赵越, 李献华, 等. 燕山造山带中—晚侏罗世髫髻山期(蓝旗期)火山岩的成因及其动力学意义 [J]. 岩石学报, 2007, 23 (3): 557-564.
LI Wu-ping, ZHAO Yue, LI Xian-hua, et al. Genesis of the middle Later Jurassic volcanic rocks of Tiaojishan (Lanqi) period and its geodynamic implications, Yanshan orogen, East China [J]. Acta Petrological Sincia, 2007, 23 (3): 557-564.

[49] 孟祥金, 侯增谦, 董光裕, 等. 江西金溪熊家山钼矿床特征及其 Re-Os 年龄 [J]. 地质学报, 2007, 81 (7): 946-951.
MENG Xiang-jin, HOU Zeng-qian, HONG Guang-yu, et al. The geological characteristics and Re-Os isotope age of molybdenite of the Xiongjiashan molybdenum deposit, Jiangxi Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81 (7): 946-951.

[50] 李厚民, 叶会寿, 毛景文, 等. 小秦岭金(钼)矿床辉钼矿铼-锇定年及其地质意义 [J]. 矿床地质, 2007, 26 (4): 417-424.
LI Hou-min, YE Hui-shou, MAO Jing-wen, et al. Re-Os dating of molybdenites from gold ore district and its Au (Mo) deposits in Xiaoqinling geological significance [J]. Mineral Deposits, 2007, 26 (4): 417-424.

[51] Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H, 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 (11/12): 1815-1818.

[52] 黄凡, 陈毓川, 王登红, 等. 中国钼矿主要矿集区及其资源潜力探讨 [J]. 中国地质, 2011, 38 (5): 1111-1134.
HAUNG Fan, CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, et al. A discussion on the major molybdenum ore concentration areas in China and their resource potential [J]. Geology in China, 2011, 38 (5): 1111-1134.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net