

文章编号:0258-7106 (2009) 02-0133-10

豫西熊耳山寨凹钼矿床辉钼矿铼-钨 年龄及其地质意义*

李厚民¹, 叶会寿¹, 王登红¹, 陈毓川², 屈文俊³, 杜安道³

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2 中国地质科学院, 北京 100037; 3 国家地质实验测试中心, 北京 100037)

摘要 寨凹钼矿床位于河南熊耳山地区, 是新近发现的穿插于太古宙太华岩群深变质岩中的辉钼矿石英脉型钼矿床。为了获得该钼矿床的成矿年龄, 从10件采自辉钼矿石英脉的样品中挑选出辉钼矿单矿物进行Re-Os同位素年龄测定。10件辉钼矿样品22次测定结果的年龄最小值为(1 680±24)Ma, 最大值为(1 831±29)Ma。其中10件辉钼矿粗粒(自然粒度)状态下13次测定结果的等时线年龄为(1 686±67)Ma, MSWD=16; 4件研磨后粉末状辉钼矿9次测定结果的等时线年龄为(1 804±12)Ma, MSWD=1.09。两条等时线的初始¹⁸⁷Os值在误差范围内接近于0, 表明¹⁸⁷Os全部由Re衰变而来。上述结果表明, 寨凹钼矿床形成于17~18亿年的中元古代早期, 是目前中国已知最老的钼矿床, 为中元古代早期华北克拉通伸展-裂解环境中构造-岩浆热事件所伴随的热液成矿作用的产物, 与熊耳群火山岩浆活动有密切的时空和成因联系; 辉钼矿的Re含量为 $4.832 \times 10^{-6} \sim 0.665 \times 10^{-6}$, 平均 3.045×10^{-6} , 表明成矿物质可能来自围岩地层。东秦岭地区从元古宙到印支期、燕山期的钼矿化构成该区的钼成矿谱系, 寨凹钼矿床可能是该谱系中最早的端员。

关键词 地球化学; Re-Os同位素定年; 辉钼矿; 钼矿床; 成矿谱系; 寨凹; 豫西

中图分类号: P618.65 **文献标志码:** A

Re-Os dating of molybdenites from Zhaiwa Mo deposit in Xiong'er Mountain, western Henan Province, and its geological significance

LI HouMin¹, YE HuiShou¹, WANG DengHong¹, CHEN YuChuan², QU WenJun³ and DU AnDao³

(1 MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing

100037, China; 2 Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

3 National Analytic Center of Geology, Beijing 100037, China)

Abstract

The Zhaiwa Mo deposit in the Xiong'er Mountain of western Henan Province is a quartz vein-type molybdenite deposit newly discovered in the hypometamorphic rocks of Archean Taihua Group. In order to determine the age of the deposit, the authors selected pure molybdenite grains from 10 quartz molybdenite vein-type ore samples for Re-Os isotopic dating. The Re-Os ages obtained from 22 analyses of 10 molybdenite separates range from (1 680±24) Ma to (1 831±15) Ma. The 13 data of the above 22

* 本文得到自然科学基金项目“滇东北峨眉山玄武岩铜矿中有机质对铜富集成矿的作用”(编号40572060)、地质大调查项目《我国西部重要成矿区带矿产资源潜力评估》(编号1212010535804)、《中国成矿体系综合研究》(编号1212010634002)和《我国重要矿产和区域成矿规律研究》(编号1212010633903)共同资助

第一作者简介 李厚民,男,1962年生,博士,研究员,主要从事矿床学研究及成矿区划工作。Tel:010-68999510; Email: lihoumin2002@163.com

收稿日期 2009-01-09; 改回日期 2009-2-13。张绮玲编辑。

analyses of 10 molybdenite separates in natural coarse grains give a ^{187}Re - ^{187}Os isochron of $(1\ 686 \pm 67)$ Ma with MSWD being 16. The 9 data of the above 22 analyses of 4 molybdenite separates in milled powder state give a ^{187}Re - ^{187}Os isochron of $(1\ 804 \pm 12)$ Ma with MSWD being 1.09. The original ^{187}Os values of both ^{187}Re - ^{187}Os isochrons approach zero within the reasonable error extent, suggesting that all the ^{187}Os resulted from the decay of Re. All this suggests that the ore-forming process of the Zhaiwa Mo deposit occurred in an extension-broken setting of North China Craton at the late stage of Paleoproterozoic and hence the deposit might be the oldest Mo deposit in China. The Re content of the molybdenite ranges from 4.832×10^{-6} to 0.665×10^{-6} with an average value of 3.045×10^{-6} , implying that the metallogenetic materials were leached from host rocks. Intermediate-basic dykes are associated with volcanic rocks of Paleoproterozoic Xiong'er Group, implying that Mo mineralization was related to the Paleoproterozoic magmatism. Mo mineralization in East Qinling Mountains took place from Middle Proterozoic through Indosinian to Yanshanian and constituted a Mo metallogenetic sequence, with the Zhaiwa Mo deposit being the oldest end member of this sequence.

Key words: geochemistry, Re-Os dating, molybdenite, Mo deposit, metallogenetic sequence, Zhaiwa, western Henan Province

东秦岭地区是中国著名的钼矿成矿区,区内分布有著名的金堆城钼矿田(包括金堆城、黄龙铺、石家湾等钼矿床)、南泥湖钼矿田(有南泥湖、上房、三道庄等钼矿床)、雷门沟钼矿床以及新近发现的东沟钼矿床、汤家坪钼矿床等。这些钼矿床均形成于中生代,以斑岩-矽卡岩型为特色,围岩主要为元古代地层。最近,在熊耳山地区太古宙太华岩群变质岩中新发现寨凹辉钼矿石英脉型钼矿床,并对它进行了商业开采,但是对该矿床没有进行过正规的地质勘查工作,研究程度很低,尤其是其成矿时代尚不清楚。为此,笔者对寨凹钼矿床进行了初步研究,测定了该矿床中辉钼矿的 Re-Os 年龄,并对其地质意义进行了探讨。

1 寨凹钼矿床地质概况及样品特征

寨凹钼矿床位于华北陆块南缘熊耳山西段,区内出露地层主要为新太古界太华岩群和下元古界上部熊耳群,古近系、新近系、第四系主要分布于山前断裂以北的洛宁盆地中(图1)。太华岩群为一套中深变质岩系,岩性主要为角闪斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩,构成熊耳山变质核杂岩;熊耳群为一套中基性-中酸性火山岩,岩性主要为玄武安山岩、安山岩、杏仁状安山岩、英安流纹岩和碎屑岩,构成熊耳山变质核杂岩的盖层,基本未变质。在太华岩群与熊耳群地层接触面附近发育规模较大的拆离断层带,产状平缓,由强烈片理化的韧性剪切带、角砾岩带、绿泥石

化碎裂岩带及脆性正断层组成;规模较小的北北东向断裂带极其发育,成群成带密集分布,单条断裂带长度一般小于 3 000 m,宽度 0.5~10.5 m(一般 1~2 m),产状 $280 \sim 310^\circ \angle 55 \sim 85^\circ$,由构造挤压片岩和矿化蚀变岩组成。区内侵入岩以燕山期花岗岩为主,其次有中元古代早期石英闪长岩脉、细晶闪长岩脉及辉绿辉长岩脉等中基性脉岩(图1)。

在该区碾盘沟一带,发育网脉状、团块状硅化、钾化、黄铁绢英岩化蚀变带,呈近东西向带状展布,蚀变带中见有细脉-网脉状黄铜矿和少量辉钼矿。硅化蚀变带中心部位的细脉状、浸染状铜钼矿化与化探异常吻合较好(钼次生晕异常面积大于 1 km^2),钼矿化较为普遍,地表已发现 3 条钼铜矿化带,地表宽 2~10 m,东西长约 200 m,钼品位(w_{Mo})在 0.01%~0.1%之间。

寨凹钼矿床位于碾盘沟铜钼矿化带中。矿区内有多条采矿巷道。通过对采矿巷道中矿体的观察,发现钼矿化主要呈辉钼矿石英脉充填于近东西向的构造裂隙中(图2),其次充填于近南北向的构造裂隙中,单脉宽度可达 5cm。这些矿化构造裂隙产状近于直立,密疏不均,一般在石英细脉较发育地段,矿化强烈,形成钼矿体,局部蚀变矿化较强地段也有呈浸染状分布的辉钼矿化,一些地段也可见黄铜矿石英脉。辉钼矿石英脉的围岩主要为黑云角闪斜长片麻岩,其次为花岗细晶岩。钼矿体宽为 10~15m,钼平均品位 0.064%,最高品位 1.87%。钼矿石组成单一,金属矿物为辉钼矿,未见其他金属矿物;脉石

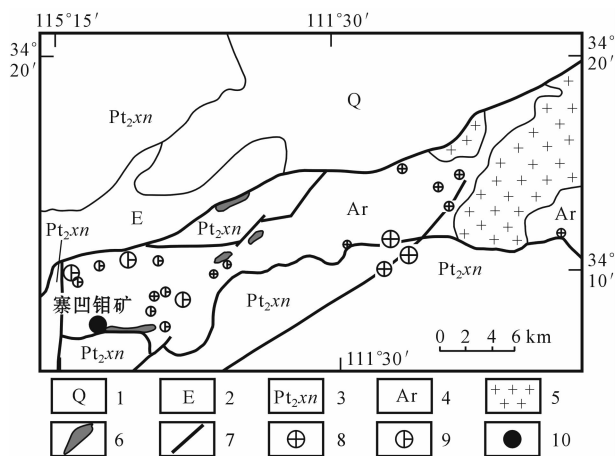


图 1 熊耳山地区主要金属矿床分布图

1—第四系;2—新近系、古近系砾岩;3—中元古代熊耳群火山岩;4—太古宙太华岩群变质基底;5—中生代花岗岩类;6—中元古代中基性脉岩;7—断层;8—金矿床;9—银铅锌(金)矿床;

10—钼矿床

Fig. 1 Distribution of main metallic deposits in the Xion'ger Mountain, Henan Province

1—Quaternary; 2—Tertiary conglomerate; 3—Volcanic rocks of Paleoproterozoic Xiong'er Group; 4—Metamorphic basement of Archean Taihua Group; 5—Mesozoic granitoids;

6—Paleoproterozoic intermediate-basic dyke; 7—Fault; 8—Gold deposit; 9—Ag-Pb-Zn(-Au) deposit; 10—Molybdenite deposit

矿物除与辉钼矿共生的热液石英外,其余脉石矿物为围岩中的黑云母、角闪石、斜长石等。根据坑道观察结合采出矿石研究,该矿区钼矿化形式单一,以辉钼矿石英脉充填为主,为单一成矿期产物,没有观察到不同期次矿脉穿插现象。

本文用于挑选辉钼矿的矿石样品采自寨凹钼矿区 PD01 和 PD03 采矿坑道,样品均为辉钼矿石英脉。样品送至廊坊市科大岩石矿物分选技术服务有限公司,由专业技术人员对其中的辉钼矿进行人工挑选,避免了挑样过程污染因素对测试结果的影响。在显微镜下检查选出的辉钼矿单矿物纯度大于 99%,晶体新鲜,无氧化,无污染,符合测试要求。用玛瑙研钵对粗粒辉钼矿样品进行了研磨。

2 样品化学处理流程及测试方法

辉钼矿的 Re-Os 同位素测试在国家地质测试中心进行,Re、Os 测定过程主要包括样品分解、蒸馏分离 Os、萃取分离 Re 和质谱测定 4 个步骤:

(1)分解样品 准确称取待分析样品,通过长细

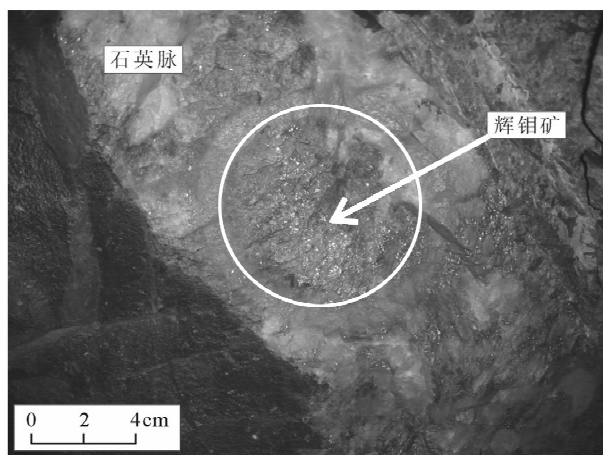


图 2 含辉钼矿石英脉(摄于寨凹钼矿区采矿坑道壁,脉宽 10 cm)

Fig. 2 Molybdenite-quartz vein in the Zhaiwa Mo deposit

颈漏斗加入到 Carius 管(一种高硼厚壁大玻璃安瓿瓶)底部。缓慢加液氮到有半杯乙醇的保温杯中,调节温度到摄氏 $-50\sim-80^{\circ}\text{C}$ 。将装好样的 Carius 管放到该保温杯中,通过长颈漏斗把准确称取的 ^{185}Re 和 ^{190}Os 混合稀释剂加入到 Carius 管底部,再加入 2 ml 浓度为 10 mol/l 的 HCl, 6 ml 浓度为 16 mol/l 的 HNO_3 。当管底溶液冰冻后,用丙烷氧气火焰加热封好 Carius 管的细颈部分。放入不锈钢套管内。轻轻放套管入鼓风机烘箱内,待回到室温后,逐渐升温到 230°C ,保温 12 h。在底部冷冻的情况下,打开 Carius 管,并用 40 ml 水将管中溶液转入蒸馏瓶中。

(2)蒸馏分离 Os 于 $105\sim110^{\circ}\text{C}$ 蒸馏 50 min,用 10 ml 水吸收蒸馏出的 OsO_4 。用 ICP-MS(等离子体质谱仪)测定 Os 同位素比值。将蒸馏残液倒入 150 ml Teflon 烧杯中待分离 Os。

(3)萃取分离 Re 将第一次蒸馏残液置于电热板上,加热近干。加少量水,加热近干。重复两次以降低酸度。加入 10 ml 浓度为 5 mol/l 的 NaOH,稍微加热,转为碱性介质。转入 50 ml 聚丙烯离心管中,离心,取上清液转入 120 ml Teflon 分液漏斗中。加入 10 ml 丙酮,震荡 5 min,萃取 Re。静止分相,弃去水相。加 2 ml 浓度为 5 mol/l 的 NaOH 溶液到分液漏斗中,振荡 2 min,洗去丙酮相中的杂质。弃去水相,排丙酮到 150 ml 已加有 2 ml 水的 Teflon 烧杯中。在电热板上 50°C 加热以蒸发丙酮。加热溶液至干。加数滴浓硝酸和 30% 过氧化氢,加热蒸干以除去残存的 Os。用数毫升稀硝酸溶解残渣,稀释

到硝酸浓度为2%。备 ICP-MS 测定 Re 同位素比值。如含 Re 溶液中盐量超过 1 mg/ml, 需采用阳离子交换柱除去 Na。

(4) 质谱测定 采用美国 TJA 公司生产的 TJA PQ ExCell ICP-MS 测定同位素比值。

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。

3 测定结果

寨凹钼矿床自然粒径辉钼矿(粗粒, 粒径 1~3 mm) 的 Re-Os 同位素年龄测定结果见表 1, 其中编号 Zhaiw-1-1 和 Zhaiw-1-2、Zhaiw-2-1 和 Zhaiw-2-2、Zhaiw-4-1 和 Zhaiw-4-2 分别是 Zhaiw-1、2、4 三个样

品在自然颗粒度情况下进行的平行分析。对辉钼矿单矿物样品量较大的样品, 采用玛瑙研钵将其磨碎到粒径 < 0.1 mm, 然后对其粉末进行了 Re-Os 同位素年龄测定, 结果见表 2, 其中编号为 Zhaiw-5-1 至 Zhaiw-5-6 为对样品 Zhaiw-5 粉末进行的 6 次平行分析, Zhaiw-6-1、Zhaiw-8-1、Zhaiw-9-1 分别是 Zhaiw-6、Zhaiw-8、Zhaiw-9 的粉末样品。表 1 和表 2 中, $c(\text{Os}_{\text{普}})$ 是根据 Nier 值的 Os 同位素丰度, 通过 $^{192}\text{Os}/^{190}\text{Os}$ 测量比计算得出, ^{187}Os 是 ^{187}Re 同位素总量。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。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%), 置信水平 95%。

10 件辉钼矿样品 22 次测定结果的年龄最小值为 $(1\ 680 \pm 24)$ Ma, 最大值为 $(1\ 831 \pm 29)$ Ma。

表 1 寨凹钼矿(自然粒径)辉钼矿 Re-Os 同位素年龄测定结果

Table 1 Re-Os data of (natural grains) molybdenite from the Zhaiwa Mo deposit in Henan Province

样品编号	样重/g	Re/(ng/g)		$c(\text{Os}_{\text{普}})$ /(ng/g)		^{187}Re /(ng/g)		^{187}Os /(ng/g)		模式年龄 t /Ma	
		测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ
Zhaiw-1-1	0.01022	2212	19	0.015	0.018	1390	12	40.47	0.31	1722	16
Zhaiw-1-2	0.04997	1996	20	0.0007	0.0101	1255	12	37.76	0.29	1780	17
Zhaiw-2-1	0.00995	2581	21	0.015	0.036	1622	13	48.50	0.40	1768	16
Zhaiw-2-2	0.05012	2534	23	0.0007	0.0107	1593	15	48.53	0.37	1802	17
Zhaiw-3	0.00691	2290	27	0.0341	0.0263	1440	17	41.05	0.32	1688	18
Zhaiw-4-1	0.01035	3056	24	0.136	0.017	1921	15	54.94	0.57	1693	17
Zhaiw-4-2	0.05016	2916	28	0.1230	0.0142	1833	18	53.64	0.41	1731	16
Zhaiw-5	0.05064	4832	42	0.012	0.028	3037	27	86.20	0.65	1680	15
Zhaiw-6	0.05003	2024	16	0.012	0.028	1272.0	9.8	38.51	0.29	1790	16
Zhaiw-8	0.05022	1269	12	0.012	0.014	797.8	7.4	24.11	0.18	1787	17
Zhaiw-9	0.05160	665	6	0.011	0.137	418	4	12.53	0.11	1771	17
Zhaiwa-1	0.09803	2040	22	0.0055	0.0011	1282	14	37.02	0.28	1709	23
Zhaiwa-2	0.01012	3967	34	0.0033	0.0006	2494	21	74.21	0.55	1760	21

模式年龄 t 计算公式为: $t = 1/\lambda[\ln(1 + ^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})]$, 其中, $\lambda(^{187}\text{Re}$ 衰变常数) = $1.666 \times 10^{-11}/\text{a}$ 。

表 2 寨凹钼矿(研磨粉末)辉钼矿 Re-Os 同位素年龄测定结果

Table 2 Re-Os data of (milled powder) molybdenite from the Zhaiwa Mo deposit in Henan Province

样品编号	样重/g	Re/(ng/g)		$c(\text{Os}_{\text{普}})$ /(ng/g)		^{187}Re /(ng/g)		^{187}Os /(ng/g)		模式年龄 t /Ma	
		测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ
Zhaiw-5-1	0.01999	4180	35	0.0035	0.0260	2628	22	79.87	0.63	1797	17
Zhaiw-5-2	0.05054	4274	39	0.0028	0.0213	2686	25	82.19	0.64	1809	17
Zhaiw-5-3	0.08012	4257	34	0.0027	0.0200	2676	22	81.85	0.62	1809	16
Zhaiw-5-4	0.09973	4205	46	0.0028	0.0839	2643	29	81.88	0.71	1831	15
Zhaiw-5-5	0.15012	4273	37	0.0025	0.0377	2686	23	81.67	0.65	1798	16
Zhaiw-5-6	0.20018	4281	56	0.0019	0.0280	2691	35	82.16	0.68	1805	17
Zhaiw-6-1	0.06035	1975	17	0.0003	0.0242	1241	10.5	38.309	0.329	1824	26
Zhaiw-8-1	0.06156	1095	9	0.0334	0.0172	688	5.9	21.291	0.160	1828	25
Zhaiw-9-1	0.09999	848	9	0.0620	0.0085	533	5.7	16.405	0.123	1819	28

模式年龄 t 计算公式为: $t = 1/\lambda[\ln(1 + ^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})]$, 其中, $\lambda(^{187}\text{Re}$ 衰变常数) = $1.666 \times 10^{-11}/\text{a}$ 。

4 讨 论

4.1 寨凹钼矿床辉钼矿 Re-Os 年龄的可靠性

Re-Os 同位素定年方法是目前比较成熟的直接确定成矿年龄的定年方法之一。在辉钼矿、毒砂、含砷黄铁矿、含碳页岩等 Re-Os 同位素定年的测定对象中,辉钼矿是最理想的。该方法的 $\lambda(^{187}\text{Re 衰变常数})=1.666 \times 10^{-11}/\text{a}$,适合于测定地球形成(约 45 亿年)以来成矿事件的年龄。

国外的前寒武纪辉钼矿定年实例很多,与 U-Pb 定年结果一致。如西澳太古宙 Yilgarn 克拉通辉钼矿的年龄为 2 760~2 620 Ma(Stein et al., 2001),与锆石 U-Pb 年龄相吻合;西南 Slave 省新太古代 Yellowknife 绿岩带 Duckfish 细晶岩中辉钼矿的 Re-Os 模式年龄(2 611±7)Ma 与该细晶岩的锆石 U-Pb 年龄(2 611.2±1.5)Ma 和楣石 U-Pb 年龄(2 608±3)Ma 一致,该绿岩带次火山相的 Ryan Lake 侵入体中辉钼矿石英脉的辉钼矿 Re-Os 模式年龄(2 679±8)Ma 与该侵入体的 U-Pb 锆石结晶年龄 2 671 Ma 一致(Ootes et al., 2007);巴西 Gameleira Cu-Au-Mo 矿床辉钼矿 Re-Os 年龄为(2 614±14)Ma(Marschik et al., 2002);印度 Malanjhand 大型斑岩 Cu(Mo)矿床的辉钼矿年龄为(2 494±8)~(2 449±8)Ma(Zimmerman et al., 2002);斯堪的纳维亚西南部 Sveconorwegian 造山带辉钼矿 Re-Os 年龄为(1 019±3)Ma~(931±3)Ma(Bingen et al., 2006);挪威南部 Cu-Mo 矿床辉钼矿 Re-Os 年龄为(1 047±2)~(973±4)Ma(Stein et al., 2002; Bingen et al., 2003);美国 Copper Queen 矿山石英-黄铜矿-斑铜矿-辉钼矿矿石中辉钼矿年龄为(1 055±4)Ma(Gillerman et al., 2002);宾夕法尼亚西南部辉钼矿 Re-Os 年龄为(975.0±2.4)Ma(Pierotti et al., 2006);加拿大 Moss 钼矿床的辉钼矿的 Re-Os 模式年龄为(1 053±4)Ma~(860.9±9.2)Ma(Lentz et al., 2005);南印度 Amabalavayal 地区碱性花岗岩和花岗伟晶岩中辉钼矿的 Re-Os 年龄为(567±28)Ma 和(566±77)Ma(Santosh et al., 1995),花岗岩的全岩 Rb-Sr 等时线年龄为(595±20)Ma,伟晶岩的黑云母 K-Ar 年龄为(560±30)Ma,十分接近;赞比亚铜矿带 Re-Os 辉钼矿年龄为(525.7±3.4)Ma(Barra et al., 2004)。这些实例表明:辉钼矿 Re-Os 定年方法对确定前寒

武纪(及寒武纪)成矿作用的年龄是有效的,与其他方法(如锆石 U-Pb 法)的定年结果一致。

在寨凹钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测定过程中,Zhaiw-1、2、4 粗粒(自然颗粒度)样品所有平行测定结果的重现性都很差,相对误差在 2%~7%,年龄值偏小,为 1 680~1 802 Ma。由于挑样是由专业人员严格按照操作规程进行的,因此这种重现性差不能用挑样过程的污染来解释。杜安道等(2007)认为粗粒辉钼矿样品平行测定结果重现性不理想是辉钼矿亚晶粒范围内 Re 和 ^{187}Os 的失耦现象造成的。当 Zhaiw-5 磨碎到粒径 < 0.1 mm 后进行平行测定时,其结果重现性非常好,6 次平行测定平均值的相对标准偏差仅 0.72%,模式年龄较大,为 1 797~1 831 Ma,等时线年龄为(1 809±13)Ma(MSWD=0.64),比 Zhaiw-5 粗粒(自然颗粒度)辉钼矿直接测定获得的年龄 1 680 Ma 大很多。Zhaiw-6、-8、-9 三件样品粗粒辉钼矿的年龄分别为 1 790 Ma、1 787 Ma 和 1 771 Ma,其磨细后的年龄分别为 1 824.4 Ma、1 828.4 Ma 和 1 819.2 Ma,表明磨细后的年龄值大于粗粒的年龄值是普遍规律。

10 件粗粒辉钼矿(自然颗粒度)13 次测定结果(表 1)的等时线年龄为(1 686±67)Ma,线性关系较差(MSWD=16),但初始 ^{187}Os 值在误差范围内接近 0 值(图 3),说明 ^{187}Os 全部是 Re 衰变而来。4 件辉钼矿研磨后 9 次测定结果(表 2)的等时线年龄为(1 804±12)Ma,线性关系很好(MSWD=1.09),初始 ^{187}Os 值为 0.23±0.23,在误差范围内接近 0(图 3),也说明 ^{187}Os 全部是 Re 衰变而来。可见,寨凹钼矿床形成于 17~18 亿年。

4.2 寨凹钼矿床是目前中国年龄最大的钼矿床

从表 3 可以看出,本次获得的寨凹钼矿床辉钼矿 Re-Os 年龄是目前在已发表的文献中最大的钼矿床 Re-Os 年龄,属中元古代。属新元古代的有:四川拉拉铁氧化物-铜-金-钼-稀土元素矿床、广西宝坛地区铜镍硫化物矿床和贵州遵义黑色页岩型镍钼钨族元素矿床等;属早古生代的有黑龙江多宝山、铜山大型斑岩铜(钼)矿床等;属晚古生代的有内蒙古额勒根矿化区斑岩型钼(铜)矿床、内蒙古流沙山金(钼)矿床等;属中生代的非常多,如东秦岭黄龙铺、大湖、金堆城、南泥湖、上房、三道庄、雷门沟、东沟、汤家坪、泉家峪等钼矿床、东天山白山钼矿床、燕辽成矿带钼(铜)矿床、内蒙古小东沟斑岩型钼矿床、江苏

表3 中国已发表的部分钼矿床 Re-Os 年龄
Table 3 Some Re-Os ages of Mo deposits in China

时代	矿床名称	测定对象	年龄/Ma	资料来源
中元古代(1 800~1 000 Ma)	豫西寨凹钼矿床	辉钼矿	1 700~1 800	本文
新元古代(1000~540 Ma)	四川拉拉铁氧化物-铜-金-钼-稀土元素矿床	辉钼矿	928~1005	李泽琴等(2003)
	四川拉拉铁氧化物-铜-金-钼-稀土元素矿床	辉钼矿	1002	王登红等(2007)
	广西宝坛地区铜镍硫化物矿床	铜镍硫化物矿石	982	毛景文等(2001a)
	贵州遵义黄家湾镍钼铂族元素矿床	黑色页岩型矿石	541.3	毛景文等(2001b)
早古生代(540~420 Ma)	黑龙江多宝山、铜山大型斑岩铜(钼)矿床	辉钼矿	506	赵一鸣等(1997)
晚古生代(420~250 Ma)	内蒙古额勒根矿化区斑岩型钼(铜)矿化	辉钼矿	332.0	聂凤军等(2005)
	内蒙古流沙山金(钼)矿床	辉钼矿	260	聂凤军等(2002)
	东天山白山钼钨矿区	辉钼矿	229	李华芹等(2005)
	燕辽钼(铜)成矿带	辉钼矿	180, 140	代军治等(2006;2007)
	东秦岭黄龙铺、大湖矿床	辉钼矿	221.5~232.9	黄典豪(1994),李厚民等(2007)
中生代(250~65 Ma)	金堆城、南泥湖、上房、三道庄、雷门沟、东沟、汤家坪、泉家峪等	辉钼矿	115~148	李永峰等(2003;2004;2005;2006);叶会寿等(2006);李厚民等(2007)
	内蒙古小东沟斑岩型钼矿床	辉钼矿	135.5	聂凤军等(2007)
	江苏安基山铜(钼)矿床	辉钼矿	108,106	王立本等(1997)
	长江中下游	辉钼矿	134.7~143.7	毛景文等(2004)
	云南境内马厂箐斑岩铜矿	辉钼矿	33.9	孟祥金等(2003)
新生代(65Ma 以来)	云南铜厂铜矿	辉钼矿	34.4	孟祥金等(2003)
	西藏玉龙等铜钼矿	辉钼矿	35.4~36.2	孟祥金等(2003)

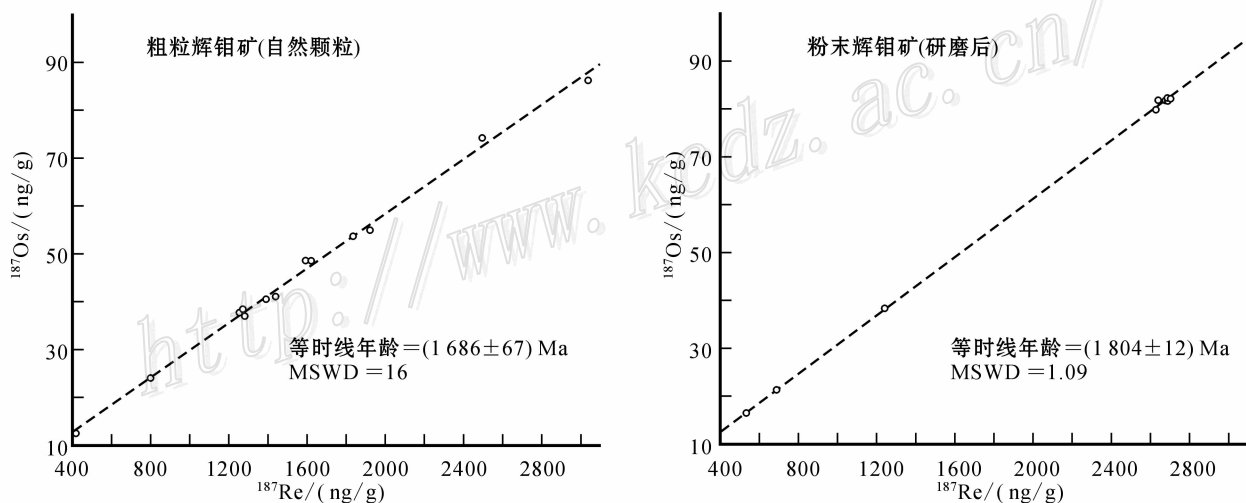


图3 寨凹钼矿床辉钼矿 ^{187}Re - ^{187}Os 关系图

Fig. 3 ^{187}Re - ^{187}Os isochron of molybdenite from the Zhaiwa Mo deposit

安基山铜(钼)矿床、长江中下游铁铜矿床等;新生代的钼矿床较多,如云南境内马厂箐斑岩铜矿床、铜厂铜矿床,西藏玉龙等铜钼矿床等。本文测定的寨凹钼矿床的辉钼矿 Re-Os 年龄不仅是目前测定的东秦岭地区最老的钼成矿年龄,也是目前报道的中国最老的钼成矿年龄。

4.3 寨凹钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄的地质意义

在中元古代早期,华北克拉通以广泛的伸展-裂解构造为主,表现为坳拉谷系发育、非造山岩浆活动(环斑花岗岩、斜长岩、辉长岩、花岗岩类及伟晶岩脉等)、大规模基性岩墙群侵位以及早期变质基底隆升

或退变质构造热事件等(李江海等,2000)。在华北克拉通北缘,代表性岩浆活动产物为大庙斜长岩杂岩体、赤城-古北口岩带的斜长岩、含橄石英正长岩及富钾环斑花岗岩和平谷-蓟县火山岩带,同位素年龄范围为 1.6~1.85Ga(郁建华等,1996;任康绪等,2006;赵太平等,2004a;Zhang et al., 2007);在华北克拉通南缘,以中元古代熊耳群火山岩发育为特征,其锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 1.80~1.75 Ga(赵太平等,2004b)。

这一时期的华北克拉通伸展-裂解所伴随的构造-岩浆热事件也伴随着成矿作用的发生,如形成了华北克拉通北缘著名的大庙式岩浆型钒钛磁铁矿矿床。寨凹钼矿床也形成于这一时期,与熊耳群火山岩在空间上接近,在时间上一致,两者可能具有成因联系,表明这一时期的构造-岩浆热事件除形成岩浆型矿床外,也有大量成矿热液活动,形成热液型金属矿床。

4.4 寨凹钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素提供的成因信息

辉钼矿的 Re 含量对其物质来源可能有指示意义。Mao 等(1999)在综合分析、对比了中国各种类型钼矿床中辉钼矿的 Re 含量后认为,从地幔来源到壳幔混源再到地壳来源,矿石中的含铼量呈数量级下降;从与幔源有关、到与 I 型花岗岩有关、再到与 S 型花岗岩有关的矿床,Re 的含量也从 $n \times 10^{-4} \rightarrow n \times 10^{-5} \rightarrow n \times 10^{-6}$ 发生变化。因此,辉钼矿的 Re 含量可以指示成矿物质的来源(Mao et al., 1999; Stein et al., 1997)。在东秦岭地区,与幔源碳酸岩有关的黄龙铺钼(铅)矿辉钼矿的铼含量最高,为 $256.0 \times 10^{-6} \sim 633.1 \times 10^{-6}$, 平均 428.36×10^{-6} (黄典豪等,1985),很可能为造山晚期地幔蠕动或脱气过程的一种成矿响应(毛景文等,2005);金堆城、南泥湖-三道庄、上房沟及雷门沟等斑岩-矽卡岩型钼矿床辉钼矿的 Re 含量为 $12.9 \times 10^{-6} \sim 53.7 \times 10^{-6}$, 秋树湾斑岩-矽卡岩型钼矿床辉钼矿的铼含量为 $112.7 \times 10^{-6} \sim 180.0 \times 10^{-6}$, 与源于下地壳的斑岩体有关(卢欣祥等,2002;李永峰等,2003;郭保健等,2006);小秦岭大湖和泉家峪石英脉型(钼)金矿床中辉钼矿的 Re 含量很低,大湖为 $1.531 \times 10^{-6} \sim 2.305 \times 10^{-6}$, 泉家峪为 $5.382 \times 10^{-6} \sim 17.282 \times 10^{-6}$, 可能反映了来自地壳的信息(李厚民等,2007)。寨凹钼矿床的 Re 含量为 $4.832 \times 10^{-6} \sim 0.665 \times 10^{-6}$, 平均 3.045×10^{-6} , 明显低于黄龙铺、金堆城、南泥湖-三道庄、雷门沟、秋树湾等斑岩-矽卡岩型钼矿床中辉钼矿的 Re 含量,与大湖石英脉型金

(钼)矿床中辉钼矿的 Re 含量接近,也显示地壳来源的特征。根据矿区发育与熊耳群火山岩同期的中元古代早期中基性脉岩和钼矿化为辉钼矿石英细脉型(而不是斑岩-矽卡岩型),推断钼成矿可能与中元古代早期形成熊耳群火山岩的岩浆活动对围岩中 Mo 活化、富集有关。

4.5 东秦岭地区的钼矿床成矿谱系

“区域矿床成矿谱系”是指一个区域内地质构造演化过程中成矿作用的演化及时空结构(陈毓川等,2003)。东秦岭地区的钼矿化具有多期性,寨凹钼矿形成于中元古代早期(17~18 亿年),呈辉钼矿石英脉穿插于太华岩群深变质岩中,可能与形成熊耳群火山岩的岩浆活动有关;黄龙铺钼矿和大湖钼金矿形成于印支期(220~230 Ma),为热液脉型,可能与造山期后张性环境的偏碱性花岗岩岩浆活动有关;金堆城和南泥湖等地区的钼矿床是东秦岭地区最强的钼成矿事件的产物,与 I 型花岗岩浆活动有关,为斑岩-矽卡岩型,发生于 140 Ma 左右,成矿围岩为中元古代早期浅变质的火山岩和沉积岩建造;雷门沟钼矿床与寨凹钼矿床同处于熊耳山地区,围岩地层也是太华岩群深变质岩,但其成矿与斑岩有关,为斑岩型钼矿床,成矿作用发生于 130 Ma 左右;东沟钼矿和汤家坪钼矿为与 A 型花岗岩有关的斑岩型,形成于 110 Ma 左右。上述不同时期的钼矿化集中发育于东秦岭地区,构成东秦岭地区钼成矿谱系,它们是不同时期构造-岩浆地质事件的产物(李厚民等,2008)。寨凹钼矿床是目前在该谱系发现的最老矿床,有可能是该谱系的最早端员。这对拓展该区钼矿找矿思路有重要启迪,也就是说,在东秦岭钼成矿带找钼矿不仅要关注中生代与中酸性岩浆岩(及碱性碳酸岩)有关的斑岩-矽卡岩型及热液脉型钼矿,而且也应重视太古宙深变质岩中辉钼矿石英脉型钼矿。

5 结 论

综上所述,可以得出如下结论:

- (1)寨凹钼矿床形成于中元古代早期,是中国目前已知最老的钼矿床;辉钼矿石英脉穿插于太古宙太华岩群高级变质岩中,是东秦岭地区的钼矿新类型。
- (2)辉钼矿 Re 含量低,显示钼矿化的成矿物质可能来自围岩地层。
- (3)寨凹钼矿床是中元古代早期华北克拉通伸展-裂解环境中构造-岩浆热事件所伴随的热液成矿

作用的产物,与熊耳群火山岩及相关的中基性岩脉有密切的时空和成因联系。

(4)东秦岭地区中元古代早期—印支期—燕山期钼矿构成一个钼矿成矿谱系,寨凹钼矿床可能是这一钼成矿谱系的最早端员。

References

- Barra F, Broughton D W, Ruiz J and Hitzman M W. 2004. Multi-stage mineralization in the Zambian Copperbelt based on Re-Os isotope constraints[J]. Abstracts with Programs - Geological Society of America, 36(5): 516.
- Bingen B and Stein H J. 2003. Molybdenite Re-Os dating of biotite dehydration melting in the Rogaland high-temperature granulites, S. Norway[J]. Earth and Planetary Science Letters, 208(3-4): 181-195.
- Bingen B, Stein H J, Bogaerts M, Bolle O and Mansfeld J. 2006. Molybdenite Re-Os dating constrains gravitational collapse of the Sveconorwegian Orogen, SW Scandinavia[J]. Lithos, 87(3-4): 328-346.
- Chen Y C, Xue C J, Wang D H, Li H Q and Lu Y F. 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).
- Dai J Z, Mao J W, Du A D, Xie G Q, Bai J, Yang F Q and Qu W J. 2007. Re-Os dating of molybdenite from the Xiaojiayingzi Mo (Fe) deposit in Western Liaoning and its geological significance [J]. Acta Geologica Sinica, 81(7): 917-923 (in Chinese with English abstract).
- Dai J Z, Mao J W, Yang 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, 25(5): 598-612 (in Chinese with English abstract).
- Du A D, Qu W J, Wang D H, Li H M, Feng C Y, Liu H, Ren J and Zeng F G. 2007. Subgrain-size decoupling of Re and ¹⁸⁷Os within molybdenite[J]. Mineral Deposits, 26(5): 573-580 (in Chinese with English abstract).
- Gillerman V S, Jercinovic M J and Stein H J. 2002. U-Pb and Re-Os geochronology suggest a multistage Precambrian-Mesozoic history for thorium and copper mineralization, Lemhi Pass, Idaho[J]. Abstracts with Programs - Geological Society of America, 34(6): 337.
- Guo B J, Mao J W, Li H M, Qu W J, Qiu J J, Ye H S, Li M W and Zhu X L. 2006. Re-Os dating of the molybdenite from the Qiushuwan Cu-Mo deposit in the east Qinling and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(9): 2341-2348 (in Chinese with English abstract).
- Huang D H, Wang Y C, Nie F J and Jiang X J. 1985. A new type of molybdenum deposit- Geological characteristics and metallogenic mechanism of the Huanglongpu carbonatite vein-type molybdenum (lead) deposit, Shaanxi[J]. Acta Geologica Sinica, 59:241-267 (in Chinese with English abstract).
- Huang D H, Wu C Y, Du A D and He H L. 1994. Re-Os isotope ages of molybdenum deposits in the East Qinlin and their significance[J]. Mineral Deposits, 13(3): 221-300 (in Chinese with English abstract).
- Lentz D R and Creaser R A. 2005. Re/ Os model age constraints on the genesis of the Moss molybdenite pegmatite-aplite deposit, southwestern Grenville Province, Quyon, Quebec, Canada[J]. Exploration and Mining Geology, 14(1-4): 95-103.
- Li H M, Chen Y C, Ye H S, Wang D H, Guo B J and Li Y F. 2008. Mo, (W), Au, Ag, Pb, Zn minerogenetic series related Mesozoic magmatic activities in the east Qinling-Dabie mountains [J]. Acta Geologica Sinica, 82(11): 1468-1477 (in Chinese with English abstract).
- Li H M, Ye H S, Mao J W, Wang D H, Chen Y C, Qu W J and Du A D. 2007. Re-Os dating of molybdenites from Au (Mo) deposits in Xiaoqinling gold ore district and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 26(4): 417-424 (in Chinese with English abstract).
- Li H Q, Wu H, Chen F W, Deng G, Yang H M, Yang Z F, Mei Y P and Guo J. 2005. Isotopic chronological evidence for Yanshanian diagenetic mineralization in Baishan Rhenium-Molybdenum mine, E. Tianshan Mountains[J]. Acta Geologica Sinica, 79(2): 249-255 (in Chinese with English abstract).
- Li J H, Qian X L, Hou G T, Liu S W and Chen J. 2000. Late Palaeo-proterozoic to early Meso-proterozoic tectonic framework and major tectono-thermal episodes of North China[J]. Earth Science, 25(1): 15-20 (in Chinese with English abstract).
- Li Y F, Mao J W, Guo B J, Shao Y J, Fei H C and Hu H B. 2004. Re-Os dating of molybdenite from the Nannihu Mo (-W) orefield in the East Qinling and its geodynamic significance [J]. Acta Geologica Sinica, 78(2): 463-470 (in Chinese with English abstract).
- Li Y F, Mao J W, Bai F J, Li J P and He Z J. 2003. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Nannihu molybdenum (tungsten) orefield in the Eastern Qinling and its geodynamic significance [J]. Geological Review, 49(6): 652-659 (in Chinese with English abstract).
- Li Y F, Mao J W, Hu H B, Guo B J and Bai F J. 2005. Geology, distribution, types and tectonic settings of Mesozoic molybdenum deposits in East Qinling area[J]. Mineral Deposits, 24(3): 292-304 (in Chinese with English abstract).
- Li Y F, Mao J W, Liu D Y, Wang Y B, Wang Z L, Wang Y T, Li X F, Zhang Z H and Guo B J. 2006. SHRIMP zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the Leimengou porphyry molybdenum deposit, western Henan and its geological implication[J]. Geological Review, 52(1): 122-131 (in Chinese with English abstract).
- Li Z Q, Wang J Z, Liu J J, Li C Y, Du A D, Liu Y P and Ye L. 2003. Re-Os dating of molybdenite from Lala Fe-Oxide-Cu-Au-Mo-REE deposit, southwest China: implications for ore genesis [J]. Geology and Exploring, 18(1): 39-42 (in Chinese with English abstract).
- Lu X X, Yu Z P, Feng Y L, Wang Y T, Ma W F and Cui H F. 2002. Mineralization and tectonic setting of deep-hypabyssal granites in the East Qinling mountain[J]. Mineral Deposits, 21

- (2): 168-178(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H et al. 1999. 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*, 63(11-12): 1815-1818.
- Mao J W and Du A D. 2001a. The 982 Ma Re-Os age of copper-nickel sulfide ores in the Baotan area, Guangxi, and its geological significance[J]. *Science in China (Series D)*, 31(12): 992-998 (in Chinese).
- Mao J W, Zhang G D, Du A D, Wang Y T and Zeng M G. 2001b. Geology, geochemistry, and Re-Os isotopic dating of the Huangjiawan Ni-Mo-PGE deposit, Zunyi, Guizhou Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 234-243(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Steins H J, Du A D, Zhou T F, Mei Y X, Li Y F, Zang W S and Li J W. 2004. Molybdenite Re-Os precise dating for molybdenite from Cu-Au-Mo deposits in the Middle-Lower Reaches of Yangtze River Belt and its implications for mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 121-131 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Marschik R, Mathur R and Ruiz J. 2002. An Archean Re-Os molybdenite age for the Gameleira Cu-Au-Mo mineralization, Carajas Province, Brazil [J]. *Abstracts with Programs - Geological Society of America*, 34(6): 337.
- Meng X J, Hou Z Q, Gao Y F, Huang W, Qu X M and Qu W J. 2003. Development of porphyry copper-molybdenum-lead-zinc ore-forming system in east Gangdese Belt, Tibet; Evidence from Re-Os age of molybdenite in Bangpu copper polymetallic deposit [J]. *Mineral Deposits*, 22(3): 246-252(in Chinese with English abstract).
- Nie F J, Jiang S H, Zhao X M, Bai D M, Liu Y, Zhao Y M, Wang X L and Su X X. 2002. Geological features and metallogenic type of the Liushashan gold (molybdenum) deposit in Ejinaqi (Prefecture), western Inner Mongolia [J]. *Geology Geochemistry*, 30(1): 1-7(in Chinese with English abstract).
- Nie F J, Qu W J, Liu Y, Du A D and Jiang S H. 2005. Re-Os isotopic age dating of molybdenite separates from Elegen porphyry Mo (Cu) mineralized area, northwestern Alxa, western Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 24(6): 638-646 (in Chinese with English abstract).
- Nie F J, Zhang W Y, Du A D, Jiang S H and Liu Y. 2007. Re-Os isotopic dating on molybdenite separates from the Xiaodonggou porphyry Mo deposit, Hexigten Qi, Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 898-905 (in Chinese with English abstract).
- Ootes L, Lentz D R, Creaser R A, Ketchum J W F and Falck H. 2007. Re-Os molybdenite ages from the Archean Yellowknife greenstone belt; comparison to U-Pb ages and evidence for metal introduction at approximately 2675 Ma[J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 102(3): 511-518.
- Pierotti G M, Mathur R, Smith R C and Barra F. 2006. Re-Os molybdenite ages for the Antietam Reservoir, eastern Pennsylvania, a story of open-system behavior Re-Os isotopes in molybdenite[J]. *Abstracts with Programs - Geological Society of America*, 38(2): 24.
- Ren K X, Yan G H, Cai J H, Mu B L, Li F T, Wang Y B and Chu Z Y. 2006. Chronology and geological implication of the Palaeoproterozoic alkaline-rich intrusions belt from the northern part in the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 377-386 (in Chinese with English abstract).
- Santosh M, Suzuki K and Masuda A. 1995. Re-Os dating of molybdenites from southern India; Implication for Pan-African metallogeny[J]. *Gondwana Research Group Memoir*, (2): 31-36.
- Stein H J and Bingen B. 2002. 1. 05-1. 01 Ga Sveconorwegian metamorphism and deformation of the supracrustal sequence at Saesvatn, South Norway; Re-Os dating of Cu-Mo mineral occurrences[J]. *Geological Society Special Publications*, 204: 319-335.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Du A D and Sun Y. 1997. Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenum from the East Qinling molybdenum belt, Shaanxi Province, China[J]. *Econ. Geol.*, 98: 175-180.
- Stein H J, Markey R and Schersten A. 2001. Re-Os dating of Archean orogenic Au deposits in the Yilgarn, Western Australia [J]. *Abstracts with Programs - Geological Society of America*, 33(6): 130.
- Wang D H, Luo Y N, Qu W J, Li Y Q, Fu D M, Li Y G, Li C J, Chen Z Y and Fu X F. 2007. Geology, geochemistry and prospecting of PGE deposits in SW China[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 234-235(in Chinese).
- Wang L B, Ji K J and Chen D. 1997. Re-Os isotope ages of molybdenite from the Anjishan copper deposit and the Tongshan copper-molybdenum deposit and their implications [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 16(2): 154-159 (in Chinese with English abstract).
- Ye H S, Mao J W, Li Y F, Guo B J, Zhang C Q, Liu J, Yan Q R and Liu G Y. 2006. SHRIMP zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the superlarge Donggou porphyry Mo deposit in east Qinling, China, and its geological implication [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 1078-1088 (in Chinese with English abstract).
- Yu J H, Fu H Q, Ilmari H, Tapani O R, Matti V and James K M. 1996. A 1. 70 Ga anorogenic rapakivi granite suite in the northern part of North China Craton[J]. *Jour. Geol. & Min. Res. North China*, 11(3): 341-350 (in Chinese with English abstract).
- Zhang S H, Liu S W, Zhao Y, Yang J H, Song B and Liu X M. 2007. The 1. 75 ~ 1. 68 Ga anorthosite-mangerite-alkali granitoid-rapakivi granite suite from the northern North China Craton; Magmatism related to a Paleoproterozoic orogen[J]. *Precambrian Research*, 155: 287-312.
- Zhao T P, Chen F K, Zhai M G and Xia B. 2004a. Single zircon U-Pb ages and their geological significance of the Damiao anorthosite complex, Hebei Province, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 685-690 (in Chinese with English abstract).

Zhao T P, Zhai M G, Xia B, Li H M, Zhang Y X and Wan Y S. 2004b. Study on the zircon SHRIMP ages of the Xionger Group volcanic rocks: Constraint on the starting time of covering strata in North China Craton[J]. Chinese Science Bulletin, 9(23): 2495-2502(in Chinese).

Zhao Y M, Bi C S, Zou X Q, Sun Y L, Du A D and Zhao Y M. 1997. The Re-Os isotopic age of molybdenite from Duobaoshan and Tongshan porphyry copper (molybdenum) deposits[J]. Acta Geoscientia Sinica, 18(1): 61-67 (in Chinese with English abstract).

Zimmerman A, Stein H J, Markey R J, Hannah J L, Sarkar S C and Pal A B. 2002. Re-Os dating of the Malanjhand Cu (Mo) deposit in central India, tracking formation and deformation during the late Archean-early Proterozoic[J]. Abstracts with Programs-Geological Society of America, 34(6): 187.

附中文参考文献

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.

代军治,毛景文,杜安道,谢桂青,白杰,杨富全,屈文俊. 2007. 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, 81(7): 917-923.

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, 25(5): 598-612.

杜安道,屈文俊,王登红,李厚民,丰成友,刘华,任静,曾法刚. 2007. 辉钼矿亚颗粒范围内 Re 和 ^{187}Os 的失偶现象[J]. 矿床地质, 26(5): 573-580.

郭保健,毛景文,李厚民,屈文俊,仇建军,叶会寿,李蒙文,竹学丽. 2006. 秦岭造山带秋树湾铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(9): 2341-2348.

黄典豪,王义昌,聂风军,江秀杰. 1985. 一种新的钼矿床类型——陕西黄龙铺碳酸岩脉型钼(铅)矿床地质特征及成矿机制[J]. 地质学报, 59(3): 241-257.

黄典豪,吴澄宇,杜安道,何红蓼. 1994. 东秦岭地区钼矿床的铼-钼同位素年龄及其意义[J]. 矿床地质, 13(3): 221-229.

李厚民,陈毓川,叶会寿,王登红,郭保健,李永峰. 2008. 东秦岭—大别地区中生代与岩浆活动有关钼(钨)金银铅锌矿床成矿系列[J]. 地质学报, 82(11): 1468-1477.

李厚民,叶会寿,毛景文,王登红,陈毓川,屈文俊,杜安道. 2007. 小秦岭金(钨)矿床辉钼矿铼-钼定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 26(4): 417-424.

李华芹,吴华,陈富文,邓刚,杨红梅,杨再峰,梅玉萍,郭敬. 2005. 东天山白山钼钨矿区燕山期成岩成矿作用同位素年代学证据[J]. 地质学报, 79(2): 249-255.

李江海,钱祥麟,侯贵廷,刘树文,陈晶. 2000. “吕梁运动”新认识[J]. 地球科学, 25(1): 15-20.

李永峰,毛景文,白凤军,李俊平,和志军. 2003. 东秦岭南泥湖钼(钨)矿田 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 49(6): 652-659.

李永峰,毛景文,胡华斌,郭保健,白凤军. 2005. 东秦岭钼矿类型、特征、成矿时代及其地球动力学背景[J]. 矿床地质, 24(3): 292-304.

李永峰,毛景文,刘敦一,王彦斌,王志良,王义天,李晓峰,张作衡,郭保健. 2006. 豫西雷门沟斑岩钼矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼

矿 Re-Os 测年及其地质意义[J]. 地质论评, 52(1): 122-131.

李永峰,王春秋,白凤军,宋艳玲. 2004. 东秦岭钼矿 Re-Os 同位素年龄及其成矿动力学背景[J]. 矿产与地质, 18(6): 571-578.

李泽琴,王奖臻,刘家军,李朝阳,杜安道,刘玉平,叶琳. 2003. 拉拉铁氧化物-铜-金-钼-稀土矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质找矿论丛, 18(1): 39-42.

卢欣祥,于在平,冯有利,王义天,马维峰,崔海峰. 2002. 东秦岭深源浅成型花岗岩的成矿作用及地质构造背景[J]. 矿床地质, 21(2): 168-178.

毛景文,杜安道. 2001a. 广西宝坛地区铜镍硫化物矿石 982 Ma Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 中国科学(D辑): 31(12): 992-998.

毛景文,张光弟,杜安道,王义天,曾明果. 2001b. 遵义黄家湾镍铂钨族元素矿床地质、地球化学和 Re-Os 同位素年龄测定[J]. 地质学报, 75(2): 234-243.

毛景文, Holly Steins, 杜安道, 周涛发, 梅燕雄, 李永峰, 藏文栓, 李进文. 2004. 长江中下游地区铜金(钨)矿 Re-Os 年龄测定及其对成矿作用的指示[J]. 地质学报, 78(1): 121-131.

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.

孟祥金,侯增谦,高永丰,黄卫,曲晓明,屈文俊. 2003. 西藏冈底斯东段斑岩铜钨铅锌成矿系统的发育时限: 帮浦铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 年龄证据[J]. 矿床地质, 22(3): 246-252.

聂风军,江思宏,赵省民,白大明,刘妍,赵月明,王新亮,苏新旭. 2002. 内蒙古流沙山金(钨)矿床地质特征及矿床类型的划分[J]. 地质地球化学, 30(1): 1-7.

聂风军,屈文俊,刘妍,杜安道,江思宏. 2005. 内蒙古额勒根斑岩型铜(钨)矿化区辉钼矿铼-钼同位素年龄及地质意义[J]. 矿床地质, 24(6): 638-646.

聂风军,张万益,杜安道,江思宏,刘妍. 2007. 内蒙古小东沟斑岩型钼矿床辉钼矿铼-钼同位素年龄及地质意义[J]. 地质学报, 81(7): 898-905.

任康绪,阎国翰,蔡剑辉,牟保磊,李凤棠,王彦斌,储著银. 2006. 华北克拉通北部地区古-中元古代富碱侵入岩年代学及意义[J]. 岩石学报, 22(2): 377-386.

王登红,骆耀南,屈文俊,李云泉,傅德明,李佑国,李纯杰,陈振宇,付小方. 2007. 中国西南铂族元素矿床地质、地球化学与找矿[M]. 北京:地质出版社. 234-235.

王立本,季克俭,陈东. 1997. 安基山和铜山铜(钨)矿床中辉钼矿的铼-钼同位素年龄及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 16(2): 154-159.

叶会寿,毛景文,李永峰,郭保健,张长青,刘王君,闫全人,刘国印. 2006. 东秦岭东沟超大型斑岩钼矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 80(7): 1078-1088.

郁建华,付会芹,哈巴拉 I,拉莫 O T,发斯乔基 M,莫坦森 J K. 1996. 华北克拉通北部 1.70Ga 非造山环斑花岗岩岩套[J]. 华北地质矿产杂志, 11(3): 341-350.

赵太平,陈福坤,翟明国,夏斌. 2004a. 河北大庙斜长岩杂岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 20(3): 685-690.

赵太平,翟明国,夏斌,李惠民,张毅星,万渝生. 2004b. 熊耳群火山岩锆石 SHRIMP 年代学研究: 对华北克拉通盖层发育初始时间的制约[J]. 科学通报, 49(22): 2342-2349.

赵一鸣,毕承思,邹晓秋,孙亚莉,杜安道,赵玉明. 1997. 黑龙江多宝山、铜山大型斑岩铜(钨)矿床中辉钼矿的铼-钼同位素年龄[J]. 地球学报, 18(1): 61-67.