

陕西洛南县石家湾钼矿 Re-Os 同位素年龄及地质意义

赵海杰^{1,2}, 叶会寿², 李超³

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 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; 3. 国家地质实验测试中心, 北京 100037)

摘要: 陕西石家湾钼矿床位于东秦岭成矿带西段黄龙铺地区, 钼矿化呈细脉-网脉状分布于花岗斑岩体及其围岩中, 与矿化有关的围岩蚀变有钾长石化、硅化、绢云母化, 属斑岩型矿床。在矿床中选取不同矿化类型的辉钼矿样品, 进行了 Re-Os 同位素定年, 获得模式年龄变化范围为 $143.1 \pm 2.1 \sim 145.1 \pm 2.2$ Ma 之间, 其加权平均年龄 $(144.0 \pm 1.1$ Ma, MSWD=0.91), 等时线年龄 $(145.4 \pm 2.1$ Ma, MSWD=0.83) 与石家湾斑岩体的成岩年龄 $(141.4 \pm 0.6$ Ma) 相近, 说明成岩成矿作用发生在晚侏罗世—早白垩世。综合辉钼矿中 Re 的含量、硫同位素以及相关岩体的源区特征等多方面证据认为, 石家湾斑岩型钼矿的成矿物质主要来自于下地壳, 并混有少量幔源成分。

关键词: Re-Os 年龄; 斑岩钼矿; 成矿物质; 石家湾; 陕西

中图分类号: P578.2⁺91; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)01-0090-09

Re-Os dating of molybdenite from the Shijiawan molybdenum deposit in Shaanxi Province and its geological implications

ZHAO Hai-jie^{1,2}, YE Hui-shou² and LI Chao³

(1. College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037, China)

Abstract: Located in the East Qinling molybdenum belt of Shaanxi Province, the Shijiawan ore deposit is a large porphyry deposit. Mineralization of the deposit consists of quartz-molybdenite veinlets and stockworks which occur in altered granite porphyry and wall rocks. Hydrothermal alteration is composed of potash feldspathization, silicification and sericitization. Direct Re-Os dating of molybdenites collected from different ores in the Shijiawan deposit was carried out to better understand the age of mineralization. The results show that molybdenite samples yield ¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os model ages ranging from 143.1 ± 2.1 Ma to 145.1 ± 2.2 Ma, with the average of 144.0 ± 1.1 Ma (MSWD=0.91), and give an isochron age of 145.4 ± 2.1 Ma (MSWD=0.83). These ages are close to the zircon U-Pb ages of Shijiawan feldspar-granite porphyry (141.4 ± 0.6 Ma), indicating that mineralization occurred in Late Jurassic-Early Cretaceous period. In combination with the evidence from S isotope, Re content and chemical characteristics of the related pluton, the authors hold that the ore-forming materials were mainly derived from the crust, with the addition of a little mantle material.

Key words: Re-Os dating; porphyry molybdenum deposit; ore-forming material; Shijiawan; Shaanxi

收稿日期: 2012-06-21; 修订日期: 2012-12-03

基金项目: 中国地质调查项目(1212011220869); 全国危机矿山接替资源找矿资助项目(20089949, 200841019)

作者简介: 赵海杰(1982-), 女, 汉族, 助研, 现从事矿床学研究, E-mail: zhaohaijie-610@163.com

东秦岭地区位于华北板块南缘华熊断隆区内，是中国最大的钼矿成矿带，产有金堆城、石家湾、木龙沟、夜长坪、银家沟、南泥湖—三道庄、上房沟、雷门沟、鱼池岭、东沟、秋树湾等钼(钨)多金属矿床，钼金属储量达到 500 万吨以上(Mao *et al.*, 2008)。最近几年，东秦岭地区钼矿找矿不断取得新突破，发现了几个超大型—大型斑岩型钼矿，且在一些矿床的外围发现了一系列脉状铅锌银矿(毛景文等，2009)，丰富了该区的成矿元素及成矿类型，也进一步说明了该带具有良好的找矿潜力。在过去的几十年，有关该成矿带的地质特征、成岩成矿年龄及成矿地球动力学背景受到国内外学者的关注(Stein *et al.*, 1997; 陈衍景等，2000; 张国伟等，2001; 卢欣祥等，2002; 毛景文等，2003; 李永峰等，2005; 叶会寿等，2006; Mao *et al.*, 2010)，丰硕的找矿成果极大地推动了该成矿带内科研工作地开展。

石家湾钼矿床位于东秦岭钼成矿带的西段金堆城地区，距著名的金堆城超大型斑岩钼矿床约 12 km，地理坐标：34°20′33″N~34°21′08″，110°00′59″~110°01′50″E，已探明钼储量达 14.3 万 t，Mo 的平均品位为 0.071% (许成等，2009)，达大型规模。尽管该区域研究程度较高，但是关于石家湾矿床的资料相对有限。杜本臣等(1986)介绍了矿床的地质特征，陈福根等(1984)对矿床辉钼矿进行了详细的矿物学研究，赵海杰等(2010)分析了成矿岩体地球化学特征。对于矿床年龄，尽管黄典豪等(1994)报道了石家湾矿床 1 个样品的 Re-Os 表面年龄为 138±8 Ma，但其误差较大。随着 Re-Os 同位素分析方面和质谱技术的改进，特别是¹⁸⁷Re 衰变常数的重新厘定，大大提高了辉钼矿定年的精确度。为了精确厘定该矿床的成矿年龄，为探讨区域成矿动力学背景提供参考，本文在详细野外调研的基础上，利用 Re-Os 同位素体系测定了石家湾钼矿床中辉钼矿的年龄，并讨论了矿床的成矿物质来源。

1 区域地质

陕西石家湾钼矿床处于华北陆块南缘黄龙铺地区，区内前寒武纪结晶基底为新太古代太华群片麻岩系，盖层自下而上依次为中元古界熊耳群火山岩，官道口群和新元古界栾川群浅变质含碳碎屑岩—碳酸盐岩—硅质岩建造，并呈角度不整合覆盖在结晶基底上(胡受奚等，1988)。该区域在地质历史期间曾

经受过多次构造运动的影响，褶皱、断裂发育，形成以近东西向为主体的构造格局，但北西向的断裂亦发育(图 1)，多组断裂构成宽达 1~3 km、走向 300°~330° 的断裂带，切割深达上地幔(黄典豪等，1985)。褶皱构造主要有近东西向的黄龙铺背斜(板岔梁—蚂蚁山)。区内侵入岩浆岩有老牛山二长花岗岩基、石家湾花岗斑岩和沿北西向断裂充填的辉绿岩脉、碱性花岗斑岩。其中老牛山复式岩体由晚三叠世(223~214 Ma)和晚侏罗世(152~146 Ma)花岗岩岩石组成(齐秋菊等，2012)，石家湾碱性花岗斑岩和辉绿岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 131±1 Ma 和 129±2 Ma，形成于早白垩世(赵海杰等，2010)。

区内发育金堆城、石家湾、大石沟、文公岭、桃园和二道河等矿床或矿点，矿化元素以钼为主，并伴有

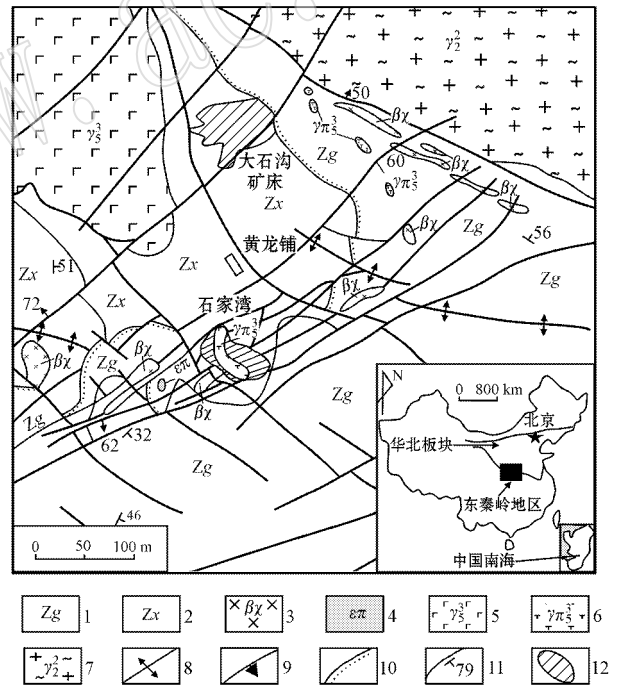


图 1 石家湾地区地质简图(底图据黄典豪等(1985)修改)
Fig. 1 Geological sketch map of the Shijiawan Mo deposit
1—中元古界高山河组泥砂质板岩、石英砂岩、石英岩；2—中元古界熊耳山群火山岩；3—辉绿岩；4—正长斑岩；5—老牛山花岗岩；6—花岗斑岩；7—片麻状花岗岩；8—背斜；9—断层；10—不整合界线；11—地质界线及产状；12—钼矿体

1—argillaceous-arenaceous slate and quartzite, metaquartzose sandstone of Mesoproterozoic Gaoshanhe Formation; 2—Mesoproterozoic Xiong'er Group volcanic rocks; 3—diabase; 4—syenite porphyry; 5—Laoniushan granite; 6—granitic porphyry; 7—gneissic granite; 8—anticline; 9—fault; 10—unconformity; 11—stratigraphic boundary and attitude; 12—Mo ore body

稀土、铅和钨等矿化。成矿类型为斑岩型和脉型,整体受北西向断裂带控制。许成等(2009)将石家湾、大石沟、文公岭、桃园和二道河等这些矿床或矿点统一划为黄龙铺矿田。

2 矿区地质

黄龙铺地区出露地层为中元古界熊耳群火山岩和高山河组石英岩、石英砂岩,并与太古宇太华群片麻岩基底呈不整合接触(赵亨等,1983)。石家湾钼矿位于黄龙铺背斜的南翼,老牛山岩基东侧凸出部位。与成矿有关的石家湾斑岩体出露长600 m,宽30~130 m,呈扁豆状,面积约0.06 km²,沿北西向断裂侵位于熊耳群火山岩和高山河组沉积岩中。石家湾斑岩体为多次侵入的复式岩体,黑云母花岗闪长斑岩为第一次侵入的产物,呈残留体零星出露于岩体的边部和内部,第二次侵入为二长花岗斑岩,为主侵入体。与钼矿关系密切的为第三次侵入的钾长花岗斑岩,呈脉状和不规则状侵入早期岩石的裂隙中(杜本臣等,1986)。钾长花岗斑岩斑晶含量约占5%~8%,矿物组合为钾长石(2%~4%)、石英(1%~2%)及少量斜长石(1%)和黑云母(1%),基质成分与斑晶一致,地球化学特征揭示其为钙碱性I型花

岗岩,认为源区来自基底太华群的部分熔融,锆石U-Pb加权平均年龄为141.4±0.6 Ma(赵海杰等,2010)。

石家湾钼矿体主要产于花岗斑岩体内以及外接触带的高山河组石英砂岩、熊耳群火山岩、辉绿岩脉中。矿体地表出露面积为0.48 km²,水平投影面积0.58 km²。纵剖面上,为一沿长轴方向两端膨大、中间收缩、底板具波状起伏的“船形体”(图2),横截面呈中厚边薄的透镜状。已探明钼储量为14.3万t,Mo的平均品位为0.071%。矿石以细脉浸染状、网脉状构造、块状构造为主,结构包括叶片-鳞片状结构、聚片状结构和交代结构。金属矿物主要为辉钼矿、黄铁矿、磁铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿,脉石矿物包括石英、钾长石、斜长石、黑云母、绢云母、阳起石、绿泥石、绿帘石、方解石、萤石等。

辉钼矿产出方式有:①呈辉钼矿-石英细脉分布在石英砂岩、辉绿岩及岩体中(图3a、图4b);②以稀疏或稠密浸染状产于脉石矿物中(图3b);③呈薄膜状产于围岩中的石英脉两壁(图3c);④呈团块状发育在石英脉中(图3d)。显微镜下辉钼矿晶体颗粒呈弯曲条片状、板条状、鳞片状和片状,集合体则以放射状、斑杂状和聚片状为主(图4d),大多粒径细小,短径约为1 mm。

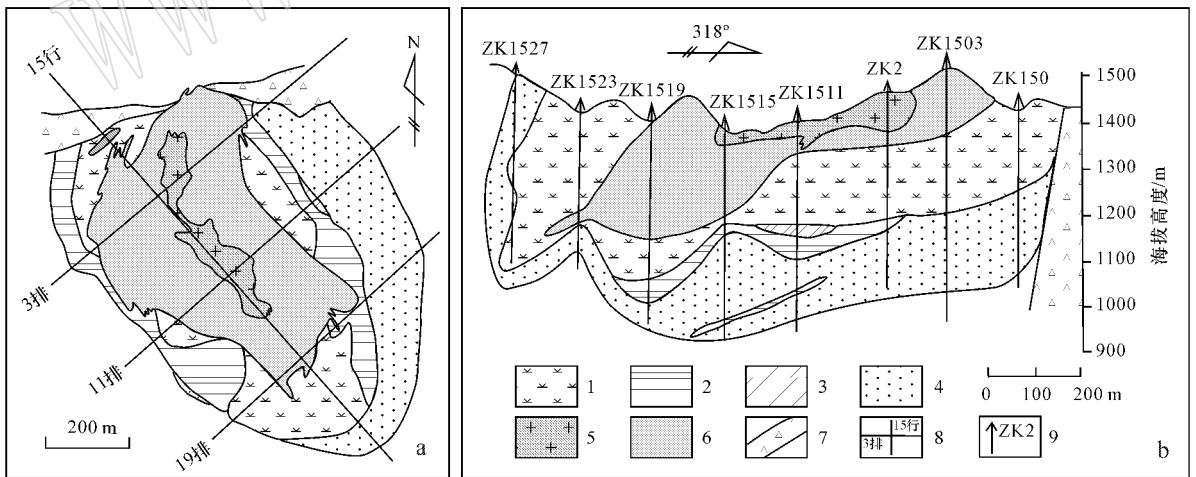


图2 石家湾矿床斑岩型矿体蚀变分带及15线剖面图 [据祝启明等(1989)^①、杜本臣等(1986)修改]

Fig. 2 Alteration zone and cross-section along No. 15 exploration line of the Shijiawan deposit

(modified from Zhu Qiming *et al.*, 1989^① and Du Benchen *et al.*, 1986)

1—钾长石化带;2—绢英岩化带;3—高岭土化带;4—青磐岩化带;5—产于岩体中的矿体;6—产于围岩中的矿体;7—断层角砾岩;
8—勘探线;9—钻孔

1—potash feldspathization zone; 2—sericite-quartz alteration zone; 3—kaolinized zone; 4—propylitized zone; 5—ores in rock body;
6—ores in wall rock; 7—fault breccia; 8—exploratory line; 9—drill hole

① 祝启明,李六权. 1989. 陕西省洛南县黄龙铺钼矿区详细普查地质报告. 陕西省地质矿产局第十三地质队.

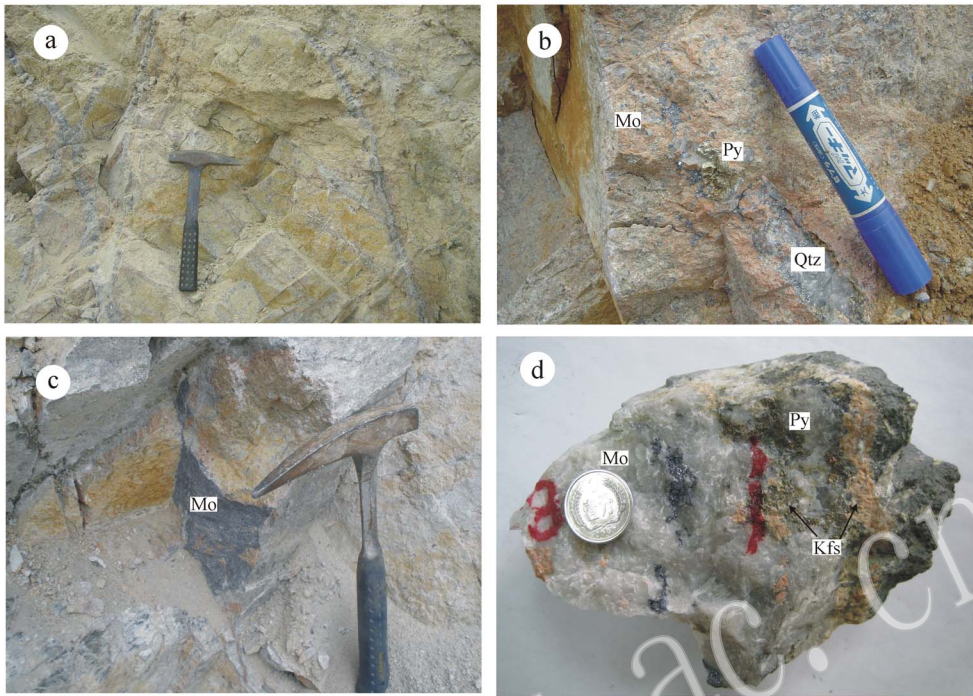


图 3 石家湾矿床钼矿化类型

Fig. 3 Mineralization types in the Shijiawan Mo deposit

- a—石家湾斑岩体中的网脉状辉钼矿-石英脉；b—岩体中的浸染状辉钼矿(Mo)、团块状黄铁矿(Py)和石英(Qtz)；c—岩体裂隙壁上的薄膜状辉钼矿；d—火山岩中的石英脉，脉中团块状辉钼矿、黄铁矿和钾长石(Kfs)
- a—molybdenite-quartz veinlets in Shijiawan porphyritic rock; b—disseminated molybdenite (Mo), pyrite (Py) and quartz (Qtz) in rock body; c—pellicular molybdenite filled in fractures of host rock; d—lumpy molybdenite, pyrite and K-feldspar (Kfs) in quartz vein of volcanic rock

围岩蚀变主要有硅化、钾长石化(图 3d)、绢英岩化、高岭土化、青磐岩化及萤石化等，且具有面型蚀变分带特征，自斑岩体向外，大致呈现出钾长石化→绢英岩化→高岭土化带→青磐岩化带。矿体主要赋存在钾长石化带和绢英岩化带中(图 2)。成矿与石家湾钾长花岗岩关系密切，应属斑岩型钼矿床。成矿作用大致可分为 3 个阶段：钾长石-石英阶段，形成无矿化的钾长石-石英脉；辉钼矿-石英阶段，主要形成硫化物-石英脉、硫化物-萤石-钾长石(白云母)-石英脉；晚阶段为碳酸盐阶段，形成黄铁矿-方解石-石英脉。

3 样品描述及测试方法

用于 Re-Os 同位素测年的 4 件样品均采自石家湾矿区露天采场，辉钼矿呈细脉状分布在石英砂岩中，或呈薄膜状产在辉绿岩的裂隙壁上(图 4a、4b)。采样位置及样品描述见表 1。辉钼矿样品直接手

标本上取得，样品处理工作在廊坊诚信地质服务有限公司完成。首先通过重力、磁法进行分离，再在显微镜下进行详细观察，剔除不纯组分，每件样品的纯度均大于 99%。辉钼矿颗粒细小，单颗粒 0.05~0.1 mm，可以避免大颗粒辉钼矿中由于 Re 和 Os 的失偶而引起的测年误差(Stein *et al.*, 2003; Selby and Creaser, 2004)。

辉钼矿的 Re-Os 同位素分析测试工作在国家地质测试中心 Re-Os 同位素实验室完成，采用 Carius 管封闭溶样分解样品，Re-Os 同位素分析原理及详细分析流程依据 Shirey 和 Walker(1995)及 Du 等(2004)。采用美国 TJA 公司生产的 TJAX-series 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo 公司)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。TJA X-series ICP-MS 测得的 Re、Os 和 ^{187}Os 的空白值分别为 $(0.0092 \pm 0.0013) \times 10^{-9}$ ~ $(0.0409 \pm 0.0018) \times 10^{-9}$ 、 $(0.0002 \pm 0.0000) \times 10^{-9}$ ~ $(0.0000$

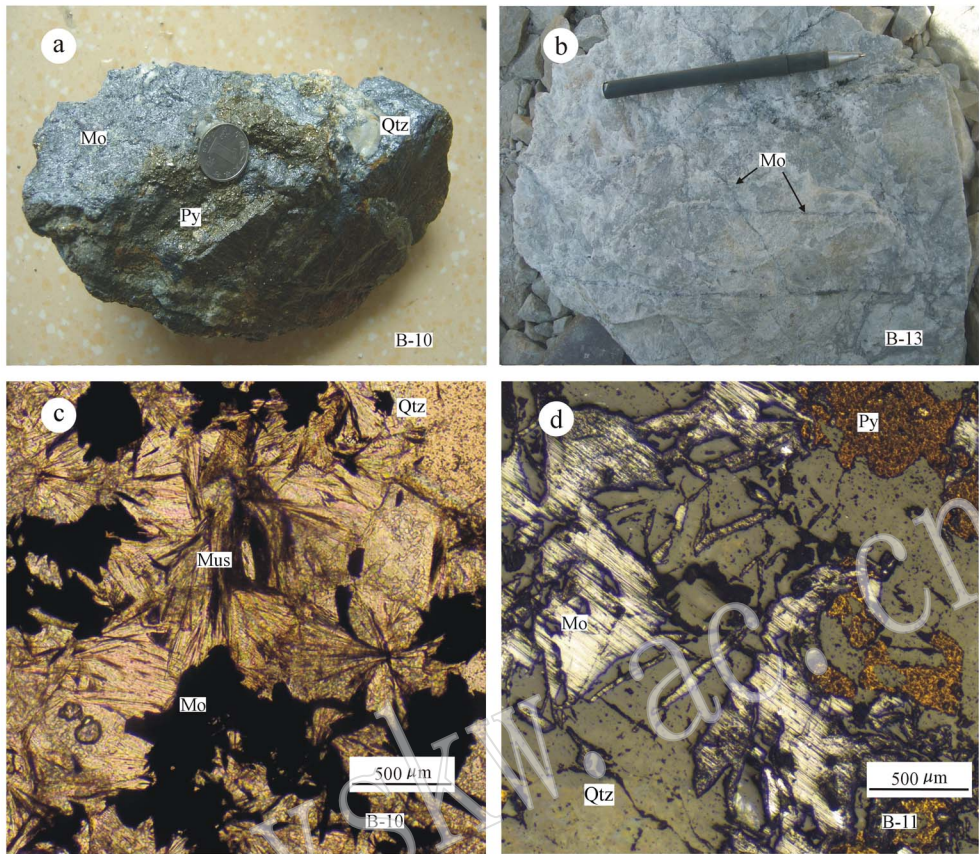


图 4 陕西石家湾矿床中辉钼矿样品及显微镜照片

Fig. 4 Photographs and microphotographs of molybdenite samples

- a—辉绿岩中的石英(Qtz)-辉钼矿(Mo)脉,并伴有黄铁矿(Py)化; b—石英砂岩中的辉钼矿-石英网脉; c—辉钼矿交代白云母(Mus)集合体(单偏光); d—石英-黄铁矿-辉钼矿(反射光)
- a—molybdenite(Mo)-quartz(Qtz) veins+ pyrite(Py) in diabase; b—molybdenite-quartz stocks in quartz; c—muscovite(Mus) replaced by molybdenite (plainlight); d—quartz + pyrite + molybdenite (reflected light)

表 1 辉钼矿 Re-Os 测年样品描述

Table 1 Description of molybdenite for Re-Os samples

样品号	采样位置	样品描述	成矿阶段	照片号
B-10	N: 34°22'07" E: 110°01'37"	辉绿岩裂隙面上的薄膜状辉钼矿化和团块状黄铁矿,后期方解石脉叠加。	石英-辉钼矿阶段	图 4a
B-11	N: 34°20'57" E: 110°01'18"	石英砂岩裂隙面上的薄膜状辉钼矿,伴有浸染状黄铁矿化	石英-辉钼矿阶段	无
B-12	N: 34°20'49" E: 110°01'38"	钾长石化花岗岩中的网脉状石英-辉钼矿细脉	石英-辉钼矿阶段	图 3a
B-13	N: 34°20'58" E: 110°01'21"	伴有黄铁矿,辉钼矿的石英细脉穿切石英砂岩,构成网脉状结构	石英-辉钼矿阶段	图 4b

$\pm 0.0000) \times 10^{-9}$ 和 $(0.0001 \pm 0.0000) \times 10^{-9} \sim (0.0003 \pm 0.0001) \times 10^{-9}$, 远小于所测样品和标样中 Re、Os 含量, 因此不会影响实验结果。辉钼矿 Re-Os 定年实验误差为 2σ , 普 Os 是根据原子量表 (Wieser, 2006) 和同位素丰度表 (Bohlkea *et al.*,

2005)、通过 $^{192}\text{Re}/^{190}\text{Os}$ 测量比计算得出 (Bohlkea *et al.*, 2005; Wieser, 2006)。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%) ,置信度为 95%。

为保证测试结果的可靠性 ,在本次测试过程中 ,分析了实验标准物质 HLP 的 Re、Os 和¹⁸⁷Os ,测试结果和 HLP 样品的标准值(GBW04435)见表 2 ,经对比发现本次测试结果相当可靠 ,因而 ,所获得的辉钼矿的 Re-Os 数据亦相当精确。

表 2 实验标准物质 HLP 辉钼矿的 Re-Os 测定结果和标准值

Table 2 Certificated values and analytical data of Re-Os isotope for standard sample molybdenite(HLP)

编号	原样名	样重/g	$\alpha(\text{Re}) \times 10^{-6}$	$\alpha(^{187}\text{Os}) \times 10^{-6}$	t/Ma
1202099	HLP	0.010 01	262.0	606.4	220.7
GBW04435			283.8	659.0	221.4

4 测定结果

分析结果列于表 3 中。由表 3 可以看出 4 件辉钼矿样品获得近似的模式年龄值范围 : 143.1 ± 2.1

$\sim 145.1 \pm 2.2$ Ma ,采用 ISOPLOT 软件(Ludwig , 2001)对获得的 4 个数据进行等时线计算 ,得到等时线年龄为 145.4 ± 2.1 Ma ,MSWD=0.83 ,初始¹⁸⁷Os 为 -0.23 ± 0.30 (图 5) ,加权平均年龄为 144.0 ± 1.1 Ma(图 6)。所得到的等时线年龄与模式加权年龄非常接近。

5 讨论

5.1 成矿时代

本次分析的石家湾钼矿床中辉钼矿的普 Os 含量很低 ,Re 含量变化范围为 $(9.34 \pm 0.070) \times 10^{-6}$ $\sim (33.94 \pm 0.32) \times 10^{-6}$,Re-Os 模式年龄变化范围为 143.1 ± 2.1 Ma 至 145.1 ± 2.2 Ma 之间 ,其加权平均年龄为 144.0 ± 1.1 Ma ,MSWD=0.91(图 6) ,Re-Os 等时线年龄为 145.4 ± 2.1 Ma ,MSWD=0.83 (图 5) 4 个样品测试结果拟合的等时线相关性很好 ,表明辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄数据是可靠的。此外 ,由于本次用于 Re-Os 同位素测年的样品包含

表 3 石家湾钼矿床 Re-Os 同位素测试结果

Table 3 Analytical data of Re-Os isotope for the Shijiawan Mo deposit

样号	样重/g	$\alpha(\text{Re}) \times 10^{-6}$	$\alpha(\text{Os}) \times 10^{-6}$	$\alpha(^{187}\text{Re}) \times 10^{-6}$	$\alpha(^{187}\text{Os}) \times 10^{-9}$	模式年龄/Ma
B-10	0.049 20	18.32 ± 0.20	$0.032 7 \pm 0.008 3$	11.52 ± 0.13	27.52 ± 0.23	143.3 ± 2.3
B-11	0.048 09	33.94 ± 0.32	$0.039 9 \pm 0.031 4$	21.33 ± 0.20	51.52 ± 0.42	144.8 ± 2.1
B-12	0.034 26	19.79 ± 0.21	$0.111 7 \pm 0.011 9$	12.44 ± 0.13	30.11 ± 0.24	145.1 ± 2.2
B-13	0.048 30	9.338 ± 0.070	$0.013 1 \pm 0.040 7$	5.869 ± 0.044	14.01 ± 0.12	143.1 ± 2.0

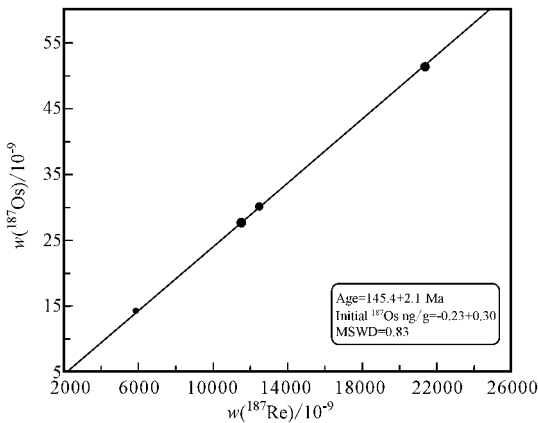


图 5 陕西省洛南县石家湾斑岩钼矿中辉钼矿 Re-Os 同位素等时线

Fig. 5 Re-Os isochron of molybdenites from the Shijiawan Mo deposit

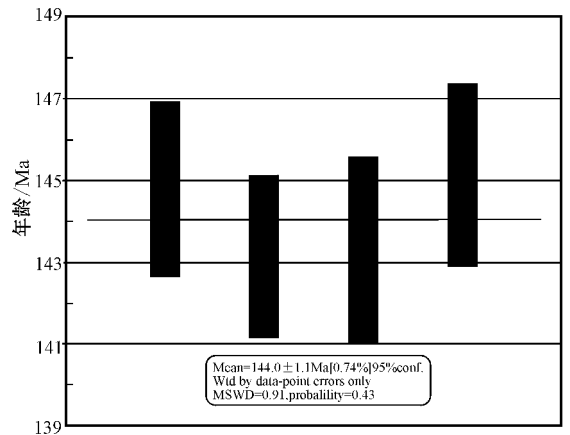


图 6 陕西省洛南县石家湾斑岩钼矿中辉钼矿 Re-Os 模式年龄加权平均值

Fig. 6 Weighted average of Re-Os model age of molybdenites from the Shijiawan Mo deposit

了该矿床多种类型的矿石,因而此等时线年龄 145.4 ± 2.1 Ma 可以直接代表该矿床的形成年龄,说明其形成于晚侏罗世—早白垩世,与石家湾钾长花岗岩的成岩年龄 141.4 ± 0.6 Ma(赵海杰等,2010)接近,表明它们应为同一构造-岩浆-流体活动的产物。

5.2 成矿物质来源

对于东秦岭成矿带内钼矿床的成矿物质来源,张本仁等(1996)研究了华北地台南缘的岩石圈组成,Mo 元素主体上富集于下地壳和上地幔,结合 Nd、Sr 同位素组成特征,认为东秦岭钼矿成矿物质主体来源于下地壳,但混有少量地幔组分。据资料显示,区内出露的太古宙太华群、中元古代的熊耳群及晚元古代的官道口群地层 Mo 含量均很低,而秦岭地区包括金堆城、石家湾、上房沟等这些岩体的成矿元素丰度值高,Mo 含量平均为 59.02×10^{-6} ,远高于世界花岗岩的平均值(1×10^{-6}),因此,Mo 元素萃取自地壳的可能性小,很可能由成矿岩体携带而来,而东秦岭地区的成矿斑岩体多由下地壳物质部分熔融形成(卢欣祥等,2002)。陈衍景等(2000)通过研究东秦岭成矿斑岩体的锶、氧同位素特征,初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.705 \sim 0.714$, $\delta^{18}\text{O} = 7.2\text{‰} \sim 12.1\text{‰}$,从而认为成矿物质主要来自下地壳。

本文所研究的石家湾矿床相关的钾长花岗岩具有较高的 Sr 初始比值(0.7073~0.7077)及低的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(-14.8~-16.0), $\epsilon\text{Hf}(141\text{ Ma})$ 值介于 -25.01~-15.97 之间,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值均略高于上地幔(0.702~0.706),而落于华北板块下地壳范围(0.706~0.713, Jahn *et al.*, 1999),故被认为来自下地壳,并混有少量地幔成分(赵海杰等,2010)。地球化学特征表明其与时间和空间相近的金堆城花岗岩(143 Ma)具有一致的源区特征及成岩方式,后者的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 值为 0.708~0.711(焦建刚等,2010)。石家湾岩体的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 1.9‰~5.1‰(薛祖雷等,1984),矿石的该值介于 1.0‰~2.5‰,平均值为 1.63‰(罗铭玖等,1991),处于岩浆流体来源范围内(-3‰~7‰, Ohmoto, 1986),暗示硫源为深源。辉钼矿 Re 的含量对于成矿物质来源的示踪意义(Stein *et al.*, 1997; Mao *et al.*, 1999) 根据本文的分析结果,石家湾辉钼矿 Re 的含量范围为 $9.34 \times 10^{-6} \sim 33.94 \times 10^{-6}$,平均为 20.35×10^{-6} ,符合来自壳幔混源 Re 的含量范围,远低于成矿物质被认为来自地幔的黄龙铺矿床中 Re 含量,范围为 283.5

$\times 10^{-6} \sim 633.1 \times 10^{-6}$,平均为 428.36×10^{-6} (黄典豪等,1994)。可见,石家湾矿床的成矿物质来源明显不同于黄龙铺矿床,为壳幔混源。

Mao 等(2008)经统计认为,东秦岭地区的钼矿床有 3 个重要的成矿期,即 233~221 Ma、148~138 Ma 和 131~112 Ma。石家湾矿床辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄为 145.4 ± 2.1 Ma,MSWD=0.83,与著名的金堆城钼矿(焦建刚等,2010)、夜长坪钼(钨)矿(毛冰等,2011)、秋树湾铜钼矿(郭保健等,2006; Mao *et al.*, 2008)、南泥湖-三道庄(李永峰等,2003;向君峰等,2012)钼矿床同属于东秦岭地区 3 个重要成矿期的第 2 期。此期大规模的成岩成矿作用形成于中国大陆东部区域构造体制转折的晚期,受伸展构造应力场的制约(毛景文等,2005)。

6 结论

(1) 石家湾斑岩钼矿辉钼矿的 Re-Os 模式年龄变化范围: $143.1 \pm 2.1 \sim 145.1 \pm 2.2$ Ma 之间,其加权平均年龄为 144.0 ± 1.1 Ma,MSWD=0.91,Re-Os 等时线年龄为 145.4 ± 2.1 Ma,MSWD=0.83,与钾长花岗岩斑岩体的成岩时代相近,表明矿化作用发生在晚侏罗世—早白垩世。

(2) 石家湾辉钼矿 Re 的含量范围为 $9.34 \times 10^{-6} \sim 33.94 \times 10^{-6}$,平均为 20.35×10^{-6} ,结合已有的硫同位素测试结果以及相关岩体的源区特征等多方面证据,认为成矿物质主要来自于下地壳,并混有幔源成分。

致谢 在野外工作期间得到洛南县九龙矿业有限公司梁慧山工程师的大力支持与协助,两位审稿人对本文提出了建设性的修改意见,在此一并表示衷心感谢。

References

- Bohlkea J K, Laeter J R, Bievre P D, *et al.* 2005. Isotopic compositions of the elements[J]. J. Phys. Chem. Ref. Data, 34(1): 5~67.
- Chen Fugen, Du Benchen, Wu Qingzhou, *et al.* 1984. Preliminary study on polymorphism of molybdenite from Shijiawan Mo deposit in Shaanxi Province[J]. Geology of Shaanxi, 2(2): 1~18 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing, Li Chao, Zhang Jing, *et al.* 2000. Sr and O characteris-

- tics of pophyries in Qinling molybdenum deposit belt and their implication to genetic mechanism and type [J]. Science in China : Series D , 30(Suppl.): 64 ~ 72 (in Chinese).
- Du A D , Wu S Q , Sun D Z , *et al.* 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials : Molybdenite HLP and JDC1 [J]. Geostand. Geoanal. Res. , 28 : 41 ~ 52.
- Du Benchen , Chen Fugen , Wu Qingzhou , *et al.* 1986. Geology of Shijiawan molybdenum deposit in Luonan County , Shaanxi Province [J]. Geology of Shaanxi , 4(2) : 58 ~ 70 (in Chinese with English abstract).
- Guo Baojian , Mao Jingwen , Li Houmin , *et al.* 2006. Re-Os dating of the molybdenite from the Qishuwan 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 Dianhao , Wang Yichang and Nie Fengjun. 1985. A new type of molybdenum deposit geological characteristics and metallogenic mechanism of the Huanglongpu carbonatite vein-type of molybdenum (lead) deposit , Shaanxi [J]. Acta Geologica Sinica , 59(3) : 241 ~ 257 (in Chinese with English abstract).
- Huang Dianhao , Wu Chenyu , Du Andao , *et al.* 1994. Re-Os Isotope ages of molybdenum deposits in east Qinling and their Significance [J]. Mineral Deposits , 13(3) : 221 ~ 229 (in Chinese with English abstract).
- Jahn B M , Wu F Y , Lo C H , *et al.* 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust : geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex central China [J]. Chemical Geology , 157(1 ~ 2) : 119 ~ 146.
- Jiao Jiangang , Tang Zhongli , Qian Zhuangzhi , *et al.* 2010. Metallogenic Mechanism , Magma Source and Zircon U-Pb Age of Jinduicheng Granitic Porphyry , East Qinling [J]. Earth science-Journal of China University of Geosciences , 35(6) : 1010 ~ 1022 (in Chinese with English abstract).
- Li Yongfeng , Mao Jingwen , Bai Fengjun , *et al.* 2003. Re-Os Isotopic Dating of Molybdenites in the Nannihu Molybdenum (Tungsten) Orefield in the Eastern Qinling and Its Geological Significance [J]. Geological Review , 49(6) : 652 ~ 659 (in Chinese with English abstract).
- Li Yongfeng , Mao Jingwen , Hu Huabin , *et al.* 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).
- Lu Xinxiang , Yu Zaiping , Feng Youli , *et al.* 2002. Mineralization and tectonic setting of deep-hypabyssal Granites in East Qinling Mountain [J]. Mineral Deposits , 21(2) : 168 ~ 178 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K. 2001. Isoplot/Ex , version 3. 0 : A geochronological toolkit for Microsoft Excel [A]. Berkeley Geochronology Center Special Publication [C]. Berkeley , 1 ~ 43.
- Luo Mingjiu , Zhang Fumin , Dong Qunying , *et al.* 1991. Molybdenum deposits in China [M]. Zhengzhou : Henan Science and Technology Press , 1 ~ 45 (in Chinese).
- Mao Bing , Ye Huishou , Li Chao , *et al.* 2011. Molybdenite Re-Os isochron age of Yechangping Mo deposit in western Henan Province and its geological implications [J]. Mineral Deposits , 30(6) : 1069 ~ 1074 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen , Xie Guiqing , Bierlein F , *et al.* 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta , 72(18) : 4607 ~ 4626.
- Mao Jingwen , Xie Guiqing , Pirajno F , *et al.* 2010. Late Jurassic-Early Cretaceous granitoid magmatism in Eastern Qinling , central eastern China : SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications [J]. Australian Journal of Earth Sciences , 57 : 51 ~ 78.
- Mao Jingwen , Xie Guiqing , Zhang Zuoheng , *et al.* 2005. Mesozoic large scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic setting [J]. Acta Petrologica Sinica , 21(1) : 169 ~ 188 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen , Ye Huishou , Wang Ruiting , *et al.* 2009. Mineral deposit model of Mesozoic porphyry Mo and vein-type Pb-Zn-Ag ore deposit in the eastern Qinling , Central China and its implication for prospecting [J]. Geological Bulletin of China , 28(1) : 72 ~ 79 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen , Zhang Zhaochong , Zhang Zuoheng , *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 Jingwen , Zhang Zuoheng , Yu Jinjie , *et al.* 2003. Geodynamic setting of Mesozoic large-scale mineralization in the North China and adjacent area : Implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits [J]. Sciences in China (Series D) , 33(4) : 289 ~ 299 (in Chinese).
- Ohmoto H. 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits [A]. Valley J W , Taylor H P and O 'Neil J R. Reviews in Mineralogy Volume 16 : Stable Isotopes in High Temperature Geological Processes [C]. Mineralogical Society of America , 491 ~ 560.
- Qi Qiuju , Wang Xiaoxia , Ke Changhui , *et al.* 2012. Geochronology and origin of the Laojiushan complex in the southern margin of North China Block and their implications : New evidences from zircon dating , Hf isotopes and geochemistry [J]. Acta Petrologica Sinica , 28 (1) : 279 ~ 301 (in Chinese with English abstract).
- Selby D and Creaser R A. 2004. Macroscale NTIMS and microscale LA-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-Os with molybdenite [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta , 68 : 3897 ~ 3908.
- Shirey S B and Walker R J. 1995. Carius Tube digest ion for low-blank Rhenium-Osmium Analysis [J]. Anal. Chem. , 67 : 2136 ~ 2141.
- Stein H J , Markey R J , Morgan J W , *et al.* 1997. Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling molybdenum belt Shanxi Province [J]. China. Econ. Geol. , 92 : 827 ~ 835.
- Stein H J , Schersten K , Hannah J L , *et al.* 2003. Subgrain-scale decoupling of Re and ¹⁸⁷Os assessment of laser ablation ICP-MS spot dating in molybdenite [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta , 92 :

827~835.

- Wieser M E. 2006. Atomic weights of the elements 2005 (IUPAC technical report [J]. Pure Appl. Chem. , 78(11): 2 051~2 066.
- Xiang Junfeng, Mao Jingwen, Pei Rongfu, *et al.* 2012. New geochronological data of granites and ores from the Nannihu-Sandaozhuang Mo(W) deposit[J]. Geology in China, 39(2): 458~473 in Chinese with English abstract).
- Xu Cheng, Song Wenlei, Qi Liang, *et al.* 2009. Geochemical characteristics and tectonic setting of ore-bearing carbonatites in Huanglongpu Mo ore field[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(2): 422~430 (in Chinese with English abstract).
- Xue Zulei, Wu Xiangdong, Wang Yangcang, *et al.* 1984. A review on the genesis and metallogeny of the molybdenite-bearing granitoid at Jinduicheng, Shaanxi[J]. Geology of Shaanxi, 2(2): 37~46(in Chinese with English abstract).
- Ye Huishou, Mao Jingwen, Li Yongfeng, *et al.* 2006. SHRIMP zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the super large Donggou porphyry Mo deposit in East Qinling, China and its geological implication[J]. Acta Geologica Sinica, 80(7): 1 078~1 088 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Benren, Zhang Hongfei, Zhao Zhidan, *et al.* 1996. Geochemical subdivision and evolution of the lithosphere in East Qinling and adjacent regions-implications for tectonics[J]. Science in China(Series D), 26(3): 201~208(in Chinese).
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, *et al.* 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 1~72(in Chinese).
- Zhao Haijie, Mao Jingwen, Ye Huishou, *et al.* 2010. Chronology and Petrogenesis of the Shijiawan granite porphyry in Shanxi Province: Constrains from zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions[J]. Mineral Deposit, 29(1): 143~157(in Chinese with English abstract).
- Zhao Heng, Zhu Qiming, Zhu Bingyi, *et al.* 1983. A discuss on the geological structure skeleton of Huanglongpu polymetallic Mo ore field [J]. Geology of Shaanxi, 28~35(in Chinese with English abstract).
- 胡受奚,林潜龙,陈泽铭,等. 1988. 华北与华南古板块拼合带地质和成矿[M]. 南京:南京大学出版社,442~489.
- 黄典豪,王义昌,聂凤军,等. 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,等. 1994. 东秦岭地区钼矿床的铼-钨同位素年龄及其意义[J]. 矿床地质, 13(3): 221~230.
- 焦建刚,汤中立,钱壮志,等. 2010. 东秦岭金堆城花岗斑岩体的锆石 U-Pb 年龄、物质来源及成矿机制[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 35(6): 1 010~1 022.
- 李永峰,毛景文,白凤军,等. 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,等. 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.
- 卢欣祥,于在平,冯有利,等. 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.
- 罗铭玖,张辅民,董群英,等. 1991. 中国钼矿床[M]. 郑州:河南科技出版社, 1~452.
- 毛冰,叶会寿,李超,等. 2011. 豫西夜长坪钼矿床辉钼矿铼-钨同位素年龄及地质意义[J]. 矿床地质, 30(6): 1 069~1 074.
- 毛景文,谢桂青,张作衡,等. 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, 31(1): 169~188.
- 毛景文,叶会寿,王瑞廷,等. 2009. 东秦岭中生代钼铅锌银多金属矿床模型及其找矿评价[J]. 地质通报, 28(1): 72~79.
- 毛景文,张作衡,余金杰,等. 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[J]. 中国科学(D辑), 33(4): 289~299.
- 齐秋菊,王晓霞,柯昌辉,等. 2012. 华北地块南缘老牛山杂岩体时代、成因及地质意义——锆石年龄、Hf 同位素和地球化学新证据[J]. 岩石学报, 28(1): 279~301.
- 向君峰,毛景文,裴荣富,等. 2012. 南泥湖—三道庄钼(钨)矿的成矿成矿年龄新数据及其地质意义[J]. 中国地质, 39(2): 458~473.
- 许成,宋文磊,漆亮,等. 2009. 黄龙铺钼矿田含矿碳酸岩学特征及其形成构造背景[J]. 岩石学报, 25(2): 422~430.
- 薛祖雷,吴向东,王养苍,等. 1984. 陕西金堆城地区含钼花岗岩类成因及成矿的讨论[J]. 陕西地质, 2(2): 37~46.
- 叶会寿,毛景文,李永峰,等. 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): 1 078~1 088.
- 张本仁,张宏飞,赵志丹,等. 1996. 东秦岭及邻区壳、幔地球化学分区和演化及其大地构造意义[J]. 中国科学(D辑), 26(3): 201~208.
- 张国伟,张本仁,袁学诚,等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京:科学出版社, 1~729.
- 赵海杰,毛景文,叶会寿,等. 2010. 陕西洛南县石家湾钼矿相关花岗岩斑岩的年代学及岩石成因:锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素制约[J]. 矿床地质, 29(1): 143~157.
- 赵亨,祝启明,朱炳义,等. 1983. 论黄龙铺多金属钼矿田地质构造骨架[J]. 陕西地质, 28~35.

附中文参考文献

- 陈福根,杜本臣,武清周,等. 1984. 陕西石家湾钼矿床中辉钼矿多型初步研究[J]. 陕西地质, 2(2): 1~18.
- 陈衍景,李超,张静,等. 2000. 秦岭钼矿带斑岩体锆氧同位素特征与岩石成因机制和类型[J]. 中国科学(D辑): 30(增刊): 62~72.
- 杜安道,何红蓼,殷宁万,等. 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.
- 杜本臣,陈福根,武清周,等. 1986. 陕西洛南石家湾钼矿床地质特征[J]. 陕西地质, 4(2): 58~70.
- 郭保健,毛景文,李厚民,等. 2006. 秦岭造山带秋湾铜钼矿床辉钼矿的 Re-Os 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(9): 2 341~2 348.