

东秦岭石窑沟斑岩钼矿床地质特征及 辉钼矿 Re-Os 年龄*

高亚龙^{1,2} 张江明³ 叶会寿^{4**} 孟芳¹ 周珂¹ 高阳¹

GAO YaLong^{1,2}, ZHANG JiangMing³, YE HuiShou^{4**}, MENG Fang¹, ZHOU Ke¹ and GAO Yang¹

1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 天津华北地质勘查局, 天津 300170

3. 武警黄金第六支队, 三门峡 472000

4. 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开放实验室, 北京 100037

1. School of Geosciences and Resources, State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2. Tianjin North China Geological Exploration Bureau, Tianjin 300170, China

3. No. 6 Gold Geological Party of CAPF, Sanmenxia 472000, China

4. MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2009-11-16 收稿, 2010-02-23 改回.

GAO YL, Zhang JM, Ye HS, Meng F, Zhou K and Gao Y. 2010. Geological characteristics and molybdenite Re-Os isotopic dating of Shiyagou porphyry molybdenum deposit in the East Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 729–739

Abstract The Shiyagou deposit is a large molybdenum deposit lately discovered in the East Qinling molybdenum belt. Emplaced along the intersection of the EW-trending Machaoying fault and the NE-trending Jiaoyuan fault, the Shiyagou deposit has a proven reserve of more than 100,000 tonnes Mo, averaging grade of 0.068%. Mineralization of the deposit consists of quartz-molybdenite veinlets and stockworks which occur in the altered granite porphyry and Proterozoic Xionger Group. Hydrothermal alteration is well developed and is composed of potassic feldspar alteration, silicification, sericitization, and pyritization, typical of porphyry Mo deposits. Five molybdenite-bearing samples of different mineralizing types were selected for precise Re-Os dating, and the results yield Re-Os model ages between $131.3 \pm 2.4 \sim 134.3 \pm 2.6$ Ma and an isochron age of 135.2 ± 1.8 Ma. The Re contents of molybdenite are $(8.242 \pm 0.116 \sim 30.24 \pm 0.24) \times 10^{-6}$, indicating that they were mainly derived from the lower crust. The age of the Shiyagou molybdenum deposit is consistent with that of the Yuchiling and Leimengou Mo deposits in the East Qinling molybdenum belt, indicating that porphyry Mo mineralization was driven by the Early Cretaceous lithospheric extension in East China.

Key words Re-Os dating; Porphyry molybdenum deposit; Lithospheric extension; Shiyagou; East Qinling

摘要 在东秦岭钼成矿带最近探明的石窑沟大型钼矿床位于近东西向马超营断裂带与北东向石窑沟-焦园断裂带的交汇部位, 获得钼金属储量 10 余万吨, 平均品位 0.068%。钼矿化呈细脉-网脉状分布于花岗斑岩体及其围岩熊耳群火山岩中, 与矿化有关的围岩蚀变有钾长石化、硅化、绢云母化、黄铁矿化等, 具有斑岩型钼矿床的一些基本特点。在矿床中选取 5 件不同矿化类型的辉钼矿样品, 采用 ICP-MS 法进行 Re-Os 同位素定年, 获得模式年龄 $131.3 \pm 2.4 \sim 134.3 \pm 2.6$ Ma, 等时线年龄 135.2 ± 1.8 Ma (MSWD = 0.18), 形成于早白垩世, 与豫西熊耳山地区雷门沟、鱼池岭等钼矿床形成时代相近。据辉钼矿 Re 含量 $(8.242 \times 10^{-6} \sim 30.24 \times 10^{-6})$ 推测, 矿床成矿物质主要来自于下地壳。矿床为东秦岭-大别山地区中生代第三期钼成矿作用产物, 形成于早白垩世中国东部岩石圈伸展环境。

* 本文受全国危机矿山接替资源找矿项目 (20089949, 200841019) 和公益性行业科研专项经费项目 (K0801) 的联合资助。

第一作者简介: 高亚龙, 男, 1986 年生, 硕士研究生, 构造地质学专业, E-mail: 410532994@qq.com

** 通讯作者: 叶会寿, 男, 1964 年生, 研究员, 矿床学专业, E-mail: yehuishou@163.com

关键词 Re-Os 同位素年龄;斑岩钼矿;岩石圈伸展;石窑沟;东秦岭

中图分类号 P597.3;P618.65

东秦岭钼矿带西起陕西省金堆城地区,东延至河南省方城地区,北以三门峡-宝丰断裂为界,南至商丹断裂,产有金堆城、南泥湖-三道庄、上房沟、东沟、雷门沟、木龙沟、夜长坪、银家沟、秋树湾、鱼池岭等 19 余个钼(钨)多金属矿床,钼金属储量达到 500 万吨以上(Mao *et al.*, 2008)。前人已经完成了大量勘查和研究工作,特别是二十世纪 90 年代以来,获得了一大批精确的 Re-Os 同位素年龄数据结果(黄典豪等, 1994; Stein *et al.*, 1997; 李永峰, 2005; 叶会寿等, 2006; Mao *et al.*, 2008; 周珂等, 2009), 比较准确地厘定了东秦岭钼矿的成矿时代, 为探讨与钼大规模成矿有关的地球动力学背景, 提供了有力的科学依据。目前研究结果表明, 东秦岭地区大多数钼矿与燕山期产出的花岗斑岩体存在时空和成因联系, 且受近东西向与北北东向-北东向两组构造复合部位的控制, 为同一构造-岩浆-流体作用的产物, 少数矿床形成于晚三叠世, 可能与地幔排气或循环地壳流体有关(罗铭玖等, 1991; 黄典豪等, 1994; 毛景文等, 2003, 2005; 李永峰, 2005; 张正伟等, 2007; 李诺等, 2007)。但对于成岩成矿机制和动力学背景仍存在不同的认识, 代表性观点有: 由 A 型俯冲导致的大陆内部的挤压背景, 含矿岩体为 I 型或同熔型(胡受奚等, 1988); A 型俯冲过程的挤压-伸展转变期(晚侏罗世-早白垩世), 成矿岩体主要为陆壳重熔型或碰撞型(陈衍景等, 2000; 李诺等, 2007); Mao *et al.* (2008) 统计及测定了东秦岭-大别造山带 15 个钼矿 Re-Os 同位素年龄后发现, 东秦岭存在三期钼成矿作用: 233 ~ 221 Ma 形成的以黄龙铺和大湖为代表两类脉状钼矿; 148 ~ 138 Ma 形成的与 I 型花岗质岩和 I-S 过渡型花岗质岩相关的钼矿, 以南泥湖-三道庄斑岩-夕卡岩型钼矿和金堆城斑岩型钼矿为代表; 131 ~ 112 Ma 形成的与 S 型、S-I 过渡型、A 型花岗岩相关的斑岩钼矿, 如雷门沟(李永峰等, 2006)、鱼池岭(周珂等, 2009)、东沟(叶会寿等, 2006)斑岩型钼矿; 认为三期成矿作用对应的动力学背景分别为: 后碰撞造山过程的局部伸展, 伊佐奈岐板块 NWW 向俯冲于欧亚板块之下所导致的弧后伸展环境和早白垩世区域岩石圈的大规模减薄、拆沉和热侵蚀, 后两期成矿作用与岩浆活动具有密切的时空和成因联系(Mao *et al.*, 2010)。

石窑沟钼矿床(东经 111°33'59", 北纬 34°01'48")位于东秦岭钼矿带熊耳山地区狮子庙矿田内, 处于近东西向马超营断裂带与北东向石窑沟-焦园断裂带的交汇部位。武警黄金部队第六支队在矿田内已发现和查明了红庄、南坪、元岭等金矿床(席书锋等, 2004), 近些年来又发现和勘查了石窑沟钼矿床, 钼金属量大于 10 万吨, 达大型规模, 平均品位 0.068%。虽然本区多数钼矿床都与晚侏罗世壳幔同熔型中酸性小斑岩体有关(卢欣祥等, 2002), 但石窑沟矿区地表并未见与成矿相关的花岗斑岩体, 矿床成因类型的不确定性成为了制约矿区进一步找矿勘探的因素; 而对成矿机制和成矿

万方数据

动力学背景进行讨论时, 成矿时代的确定无疑是前提条件。本次通过对石窑沟钼矿的钼矿化类型、特征、围岩蚀变类型及其分带等地质特征的总结初步确定了该矿的矿床类型, 明确了矿区进一步找矿勘探的方向; 利用辉钼矿 Re-Os 同位素精确了该矿的成矿时代, 结合前人的资料, 探讨了成矿地质背景, 为区域成矿机制和成矿动力学背景的讨论提供了佐证。

1 矿床地质特征

1.1 地层

矿区内出露的地层主要为中元古界熊耳群张合庙组(Chz)、焦园组(Chj)、坡前街组(Chp)、眼窑寨组(Chy)火山岩。

张合庙组: 分布于矿区西北部, 98203 号断裂北侧, 岩性以灰绿色安山岩为主。焦园组: 矿区出露很广, 以灰紫色、红色流纹岩、流纹斑岩、灰绿色安山岩为主, 次为杏仁状安山岩等, 是重要的赋矿地层。坡前街组: 在矿区内大面积出露, 横贯矿区东西两侧, 以灰绿色安山岩、杏仁状安山岩及粗面安山岩为主, 是主要的赋矿地层。眼窑寨组: 在矿区以南出露, 主要为灰色流纹斑岩, 次为紫灰色英安斑岩。

1.2 构造特征

矿区以发育近东西向马超营区域断裂及其次级断裂、北东向石窑沟-焦园断裂及其次级断裂为主, 其次为近南北向、北西向断裂。

东西向马超营区域性断裂带: 走向北西西向, 倾向北, 倾角 60° ~ 85°, 断裂带两盘为熊耳群中酸性火山岩, 局部有片理化现象, 是主要控矿断裂, 如 96234(南带, 见图 1b)、98203(中带见图 1b)、98202(北带)等含金碎裂蚀变带均为近东西向。本区马超营断裂带经历了两期重要变形: 早期中深构造层次逆冲推覆韧性剪切及燕山晚期平移走滑(南侧脆-韧性逆冲)(张国伟等, 2001), 形成时代分别为 524.9 ± 1.9 Ma 和 130 ~ 120 Ma(韩以贵, 2007)。

北东向石窑沟-焦园断裂带: 走向 30° ~ 60°, 倾向北西, 倾角 40° ~ 80°, 经历了压剪向张剪的演化(陈衍景等, 2003), 是主要的控矿构造带, 赋存 103、201、202、203、204 等矿脉。区域上该组断裂切割了五丈山岩体(156.8 ± 1.2 Ma), 但未在花山岩体(130.8 ± 1.4 Ma)中见到, 说明该组断裂在 156.8 ~ 130.8 Ma 之间有过一次活动(李永峰, 2005; 韩以贵, 2007)。

近南北向断裂: 主要分布于矿区东部, 走向 350° ~ 25°, 倾向北西西, 倾角 50° ~ 80°, 局部反倾, 早期为张性, 晚期为压扭性, 该组断裂规模较小, 有金矿化显示, 如 038 号矿脉。

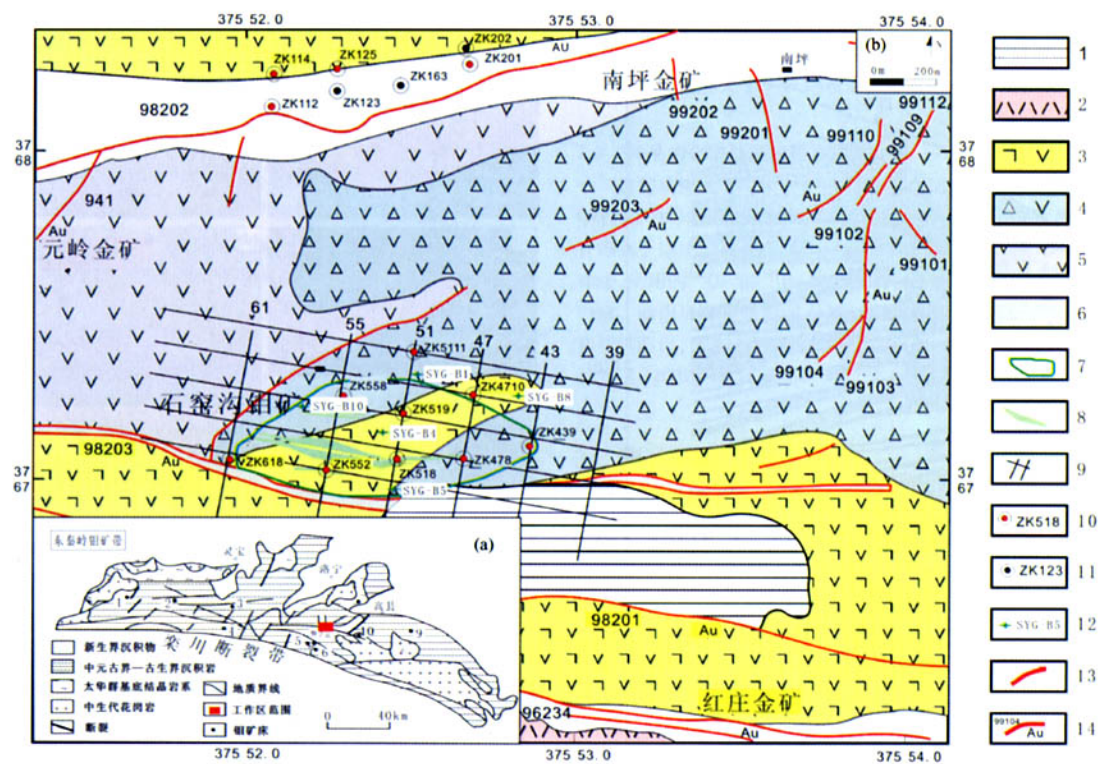


图1 东秦岭钼矿带地质简图(a, 据叶会寿等,2006 修改)和石窑沟矿区地质及采样位置图(b, 据武警黄金第六支队,2009^①修改)

图1(a)中钼矿床: 1-金堆城;2-木龙沟;3-银家沟;4-夜长坪;5-南泥湖;6-上房沟;7-三道庄;8-雷门沟;9-东沟;10-鱼池岭;11-石窑沟. 图1(b)中图例:1-晚白垩世-第三纪陆相碎屑岩; 2-中元古代熊耳群眼窝寨组流纹斑岩; 3-中元古代熊耳群坡前组粗面安山岩; 4-中元古代熊耳群焦园组灰紫色流纹岩、流纹斑岩; 5-中元古代熊耳群张合庙组灰绿色安山岩; 6-断裂带中破碎蚀变岩; 7-钼异常区; 8-地表钼矿化区带; 9-勘探线; 10-见矿钻孔; 11-未见矿钻孔; 12-采样位置; 13-断裂; 14-含金断裂及编号

Fig.1 Sketch map of geology of the East Qinling molybdenum belt (a, Modified from Ye *et al.* , 2006) and map showing the geology of the Shiyagou Mo-deposit and sample locations (b)

北西向断裂;走向 300° ~ 320°,倾向北东,倾角 60° ~ 80°,压扭性断裂,该组断裂也有金矿化的显示,但规模较小。

1.3 成矿岩体特征

矿区地表未见岩体出露,但在钻孔深部见有花岗斑岩脉(枝)及花岗斑岩体。在钻孔 ZK518 中见 6 条花岗斑岩脉(枝),在 422m 处发现有两期花岗斑岩脉(枝);在钻孔 ZK519 见 11 条花岗斑岩脉(枝),671.35 ~ 800.90m 中见到厚约 130m 的花岗斑岩体(图 2),且具有钼矿化。表明深部存在隐伏的钼矿化花岗斑岩体。

花岗斑岩(钻孔 519),呈肉红色,斑状结构,块状构造。斑晶为自形的板柱状钾长石和斜长石,基质为细粒镶嵌状的

石英和长石,另有少量黑云母和角闪石。结合镜下鉴定结果,进一步定名为角闪黑云二长花岗斑岩。

1.4 矿床特征

1.4.1 矿体特征

按钼品位 0.03% 划分矿体边界(图 1b),已控制矿体东西长 600m,南北宽 400m,赋存最高标高 962m,最低标高 -109m,控制垂厚可达 1071m(图 2)。矿体北部和西部边界基本控制,东部和南部边界仍未控制。矿体中部矿化连续,夹石较少;边部多分枝呈透镜状,夹石增多,矿化连续性较差。已查明钼金属资源量 10 万吨以上,平均品位 0.068% (武警黄金第六支队,2009)。

① 武警黄金第六支队. 2009. 河南省栾川县红庄-元岭矿区钼金矿详查中间报告

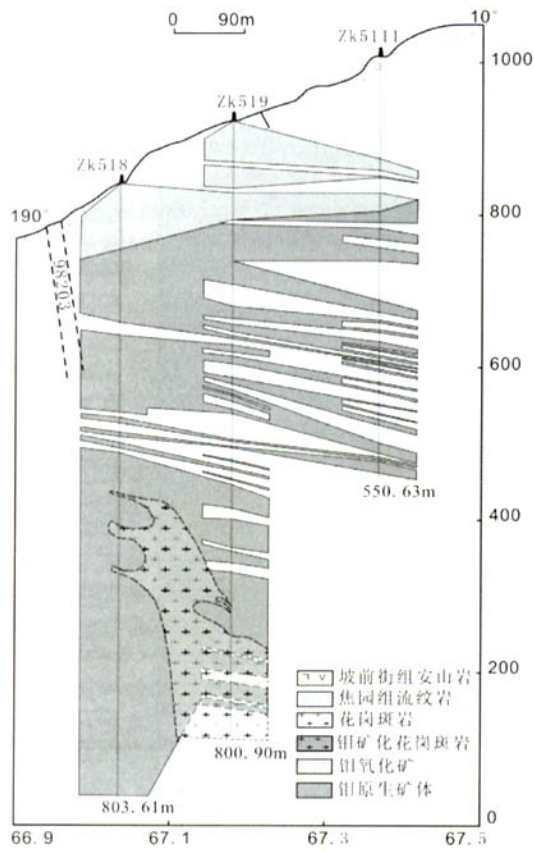


图2 石窑沟钼矿51号勘探线剖面图(据武警黄金第六支队,2009修改)

Fig. 2 The sketch map of No.51 exploration line in the Shiyagou Mo deposit

1.4.2 矿化特征

辉钼矿主要呈辉钼矿石英细脉-网脉产于隐伏花岗斑岩脉(枝)、花岗斑岩内接触带附近,矿化为花岗斑岩型钼矿,或产于隐伏花岗斑岩体的外接触带熊耳群火山岩裂隙中。矿石以细脉浸染状、网脉状构造(图3a)为主,其次为块状、角砾状、晶洞构造(图3b)。辉钼矿主要以细脉浸染状产出,产出方式有:①呈浸染状分布于脉石矿物中;②沿矿脉的两壁呈几乎纯的辉钼矿薄膜产出(图3c);③与石英呈相间条带分布;④沿岩石的微裂缝充填,形成微细的辉钼矿脉。

矿石中金属矿物主要有辉钼矿、黄铁矿、磁铁矿,微量黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、磁黄铁矿、白钨矿等。脉石矿物主要有石英、钾长石、绢云母、白云石、绿泥石、透闪石、透辉石等,其次为蛇纹石、角闪石、黑云母、方解石、高岭石等;微量的萤石、绿帘石、磷灰石、电气石等。

辉钼矿以细粒自形-半自形、他形鳞片状结构(图4c)为万方数据

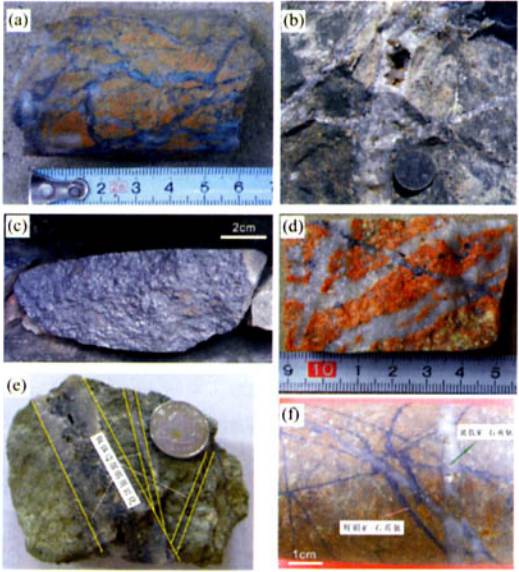


图3 石窑沟钼矿化及围岩蚀变类型

(a)-花岗斑岩体中网脉状矿石(ZK518,深173m);(b)-地表蚀变安山岩中具晶洞构造的辉钼矿、黄铁矿化石英脉;(c)-薄膜状辉钼矿化(ZK518,深542~543m);(d)-内接触带中钾化(ZK518,深515m);(e)-地表蚀变岩中绢英岩化;(f)-黄铁矿-石英脉体切割辉钼矿-石英脉体(ZK518)

Fig. 3 Mineralization and alteration types in Shiyagou Mo deposit

(a)-Molybdenite veinlet in buried granite (ZK518, 173m); (b)-Molybdenite mineralized quartz vein with miarolitic cavity in outer alteration zone; (c)-Pellicular molybdenite (ZK518, 542~543m); (d)-K-feldsparization in inner alteration zone; (e)-Sericitization and silicification; (f)-Molybdenite-quartz vein cut by pyrite-quartz vein (ZK518)

主,其次呈自形-半自形长板状、树枝状(图4d)、叶片状、针状晶片,不规则状,偶见其聚合体呈菊花状、放射状结构。

1.4.3 围岩蚀变

矿体围岩主要为熊耳群火山岩,岩性有安山岩、英安岩、流纹岩和花岗斑岩。成矿过程中由于流体与围岩的相互作用,产生蚀变矿物主要有钾长石、石英、黄铁矿、绢云母、碳酸盐、高岭石、绿泥石,并具有分带的特点,近矿部位钾化(图3d)、硅化、黄铁矿化,向外硅化、绢英岩化(图3e)、绢云母化,远矿部位高岭石化、碳酸盐化、绿泥石化较发育,具有斑岩型钼矿蚀变类型和分带的特征。其中硅化、钾长石化与钼矿化关系密切。

钾长石化:可见2期,早期钾长石化呈面状分布于隐伏花岗斑岩中,斑岩中斜长石被钾长石交代或绿帘石化;晚期钾长石化呈脉状及团块状多分布于石英脉两壁,脉宽数毫

米。钾长石化多产出于花岗斑岩体或花岗斑岩脉(枝)中。

硅化:呈细脉、网脉及团块状产出,脉宽一般 1~10mm,伴有较强黄铁矿化及辉钼矿化。硅化常分布在外接触带围岩火山岩中,也叠加在钾长石化斑岩中。硅化与辉钼矿化关系密切。

1.4.4 成矿期次与成矿阶段

据矿脉穿插关系、典型矿物组合和矿石构造特征,石窑沟钼矿成矿过程可划分为气成-热液期和热液期。

气成-热液期:以产于花岗斑岩中面状钾长石化为主要特征,矿化很弱,局部见星点状辉钼矿、黄铁矿,矿物主要为钾长石、石英。

热液期为主要钼成矿期,可划分出 3 个成矿阶段:第 I 阶段辉钼矿-石英阶段(图 3f),是成矿的主要阶段,主要形成细脉浸染状、网脉状辉钼矿化石英脉,辉钼矿多产于石英脉与围岩的接触壁上,石英脉沿脉壁破碎后,留下十分显眼的薄膜状辉钼矿;蚀变类型主要为硅化、沿矿脉两壁产出的条带状钾长石化等;金属矿物主要为辉钼矿,少量的黄铁矿、黄铜矿等,脉石矿物有石英、钾长石、绢云母等。第 II 阶段黄铁矿-石英阶段(图 3f),是成矿的重要阶段,形成黄铁矿化石英脉,石英网脉相对前期在宽度和长度上较大,切穿前期的石英细脉和浸染状辉钼矿化花岗斑岩;围岩蚀变主要有硅化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化等蚀变;石英多呈乳白色,黄铁矿呈中粗粒团块状,与黄铁矿伴生的金属矿物有少量辉钼矿、黄铜矿、磁黄铁矿等。第 III 阶段碳酸盐-石英阶段,是成矿最后阶段,不形成辉钼矿,主要形成石英脉、碳酸盐脉,多充填于外接触带破碎裂隙中。

2 样品及测试

2.1 样品采集

本次选取的 5 件主成矿阶段的辉钼矿分别为产于花岗斑岩外接触带中不同矿化类型的矿石。采样位置和样品描

述见图 1b 及表 1,部分样品特征见图 4。样品经无污染粉碎通过重力、磁法进行分离,并在双目镜下挑选,最终得到新鲜、无氧化、纯度大于 99% 的粉末状辉钼矿(0.05~0.2mm)。

2.2 样品的化学处理流程及测试方法

辉钼矿样品 Re-Os 含量的测定是在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室进行的,试验所用的仪器是电感耦合等离子体质谱仪 TJA X-series ICP-MS,采用 Carius tube 熔样法,所用的¹⁹⁰Os 和¹⁸⁵Re 稀释剂来自于美国橡树岭国家实验室。操作步骤包括样品分离、蒸馏分离 Os、萃取分离 Re 和质谱测定,详细流程参见有关文献(Markey et al., 1998; 杜安道, 2001; Du et al., 2004)。

3 测试结果

辉钼矿 Re-Os 同位素测试结果见表 2。在样品熔样过程中的平均 Re、Os 空白分别小于 33 pg 和 0.5 pg,没有普 Os 被检测到,因此 Re、Os 同位素含量的测定没有受到影响。标样 JDC 被两次用于监测分析数据,测试结果分别为 140.4 ± 3.2Ma 和 140.0 ± 2.7Ma,标准值为 139.6 ± 3.8Ma(Du et al., 2004),可证明分析数据的可靠性。

从表 2 可以看出,5 个样品 Re 的含量介于(8.241 ± 0.116) × 10⁻⁶ ~ (30.24 ± 0.0.24) × 10⁻⁶之间。模式年龄计算所用公式为: $t = 1/\lambda [\ln(1 + ^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})]$, 其中¹⁸⁷Re 衰变常数 λ = 1.666 × 10⁻¹¹ yr⁻¹ (Smoliar et al., 1996)。模式年龄变化范围 131.3 ± 2.4 ~ 134.3 ± 2.6Ma, 平均模式年龄 133.4 ± 1.0Ma, MSWD = 1.04 (图 5)。用 Isoplot (Ludwig, 2001) 软件作图,¹⁸⁷Re 和¹⁸⁷Os 的相对误差均输入 2.0% (2σ), 5 件样品的测试结果加权拟合后得到一条相关性很好的等时线(图 6),等时线年龄为 135.2 ± 1.8Ma,¹⁸⁷Os 的初始值¹⁸⁷Os_i = (-0.33 ± 0.30) × 10⁻⁹, 平均权重方差 MSWD = 0.18。

表 1 辉钼矿样品描述

Table 1 Description of the molybdenite samples

| 样品号 | 采样位置 | 描述 | 对应成矿阶段 | 图号 |
|---------|---------------------------------|--------------------|----------|---------|
| SYG-B1 | N 34°01'36.6" E 111°34'4.3" | 硅化蚀变岩中石英-辉钼矿脉 | 辉钼矿-石英阶段 | |
| SYG-B4 | N 33°01'44.8" E 111°33'58.9" | 辉钼矿化石英脉 | 辉钼矿-石英阶段 | 图 4a, c |
| SYG-B5 | N 34°01'51" E 111°34'1.3" | 蚀变安山岩裂隙面上薄膜状辉钼矿化 | 辉钼矿-石英阶段 | 图 4b, d |
| SYG-B8 | N 34°01'39" E 111°34'16.7" | 蚀变安山岩中细粒浸染状辉钼矿化石英脉 | 辉钼矿-石英阶段 | |
| SYG-B10 | N 34°01'39.8" E 111°33'49" | 绢英岩化蚀变岩中辉钼矿化石英脉 | 辉钼矿-石英阶段 | |

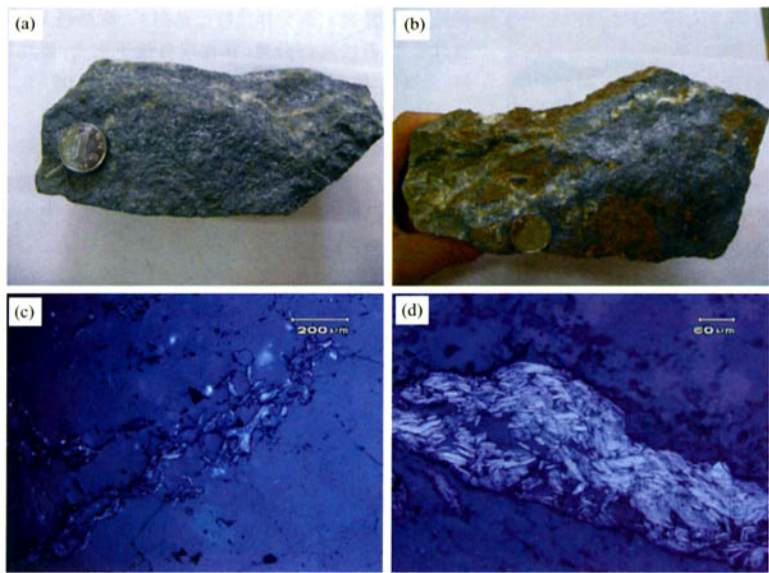


图4 石窑沟辉钼矿测年样品
(a)-辉钼矿化石英脉;(b)-蚀变安山岩裂隙面上薄膜状辉钼矿;(c)-树枝状辉钼矿+石英(反光镜);(d)-鳞片状辉钼矿+石英+绢云母(反光镜)

Fig. 4 Photographs and microphotographs of molybdenite samples

(a)-Molybdenite in quartz vein; (b)-Pellicular molybdenite filled in fracture of the host rock; (c)-Dendritic molybdenite + quartz(under reflector); (d)-Scaly molybdenite + quartz + sericite(under reflector)

表2 石窑沟钼矿中辉钼矿 Re-Os 同位素测试结果

Table 2 Re-Os isotope data for molybdenite from the Shiyagou porphyry molybdenum deposit

| 样品号 | 样重(g) | Re (× 10 ⁻⁶) | | 普 Os (× 10 ⁻⁹) | | ¹⁸⁷ Re (× 10 ⁻⁶) | | ¹⁸⁷ Os (× 10 ⁻⁹) | | Mode age (Ma) | |
|---------|---------|---------------------------|-------|-----------------------------|--------|--|-------|--|------|-----------------|-----|
| | | 测定值 | 2σ | 测定值 | 2σ | 测定值 | 2σ | 测定值 | 2σ | 测定值 | 2σ |
| SYG-B8 | 0.03067 | 18.51 | 0.17 | 0.0084 | 0 | 11.64 | 0.11 | 25.97 | 0.22 | 133.8 | 2.0 |
| SYG-B1 | 0.02123 | 30.24 | 0.24 | 0.0111 | 0.0001 | 19.01 | 0.15 | 42.49 | 0.37 | 134.01 | 1.9 |
| SYG-B5 | 0.02716 | 8.241 | 0.116 | 0.0061 | 0.0198 | 5.18 | 0.073 | 11.34 | 0.1 | 131.3 | 2.4 |
| SYG-B10 | 0.02562 | 22.07 | 0.24 | 0.0046 | 0.036 | 13.87 | 0.15 | 30.86 | 0.27 | 133.4 | 2.2 |
| SYG-B4 | 0.05072 | 22.24 | 0.27 | 0.0311 | 0.0211 | 13.98 | 0.17 | 31.33 | 0.41 | 134.4 | 2.6 |

注:①普 Os 是根据 Nier 值的 Os 同位素丰度,通过¹⁹²Os/¹⁹⁰Os 测量比计算得出;②¹⁸⁷Os 是¹⁸⁷Os 同位素总量;③不确定值是 2σ 水平. 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%

4 讨论

4.1 矿床类型

石窑沟钼矿产于近东西向马超营区域性断裂和北东向石窑沟-焦园断裂带的交汇处,尽管在矿区内地表未见与矿化有关的花岗斑岩体,但在钻孔中发现花岗斑岩体和脉(枝),如钻孔 ZK519 岩芯中见到厚 130m 的花岗斑岩体(图 2),岩体

内发育钼矿化,表明矿区内存在与钼矿化相关的花岗斑岩体.辉钼矿呈细脉-网脉浸染状的辉钼矿-石英脉赋存于花岗斑岩体和外接触带熊耳群火山岩裂隙中.围岩蚀变类型有钾长石化、硅化、绢云母化、黄铁矿化、黄铁绢英岩化、绿帘石化、萤石化、碳酸盐化和绿泥石化等,从矿体向围岩大致有钾长石化、硅化、青磐岩化的蚀变分带现象,其中硅化、钾长石化与矿化关系密切.这些特征与斑岩型钼矿的特征相吻合,石窑沟钼矿应属斑岩型钼矿。

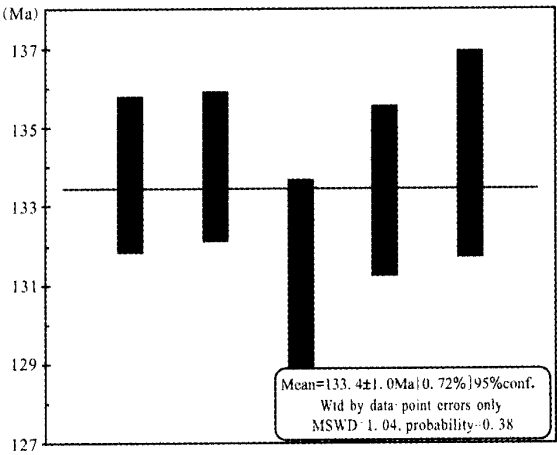


图5 石窑沟钼矿中辉钼矿 Re-Os 模式年龄加权平均值
Fig. 5 Weighted mean of Re-Os model ages for molybdenite from Shiyagou deposit

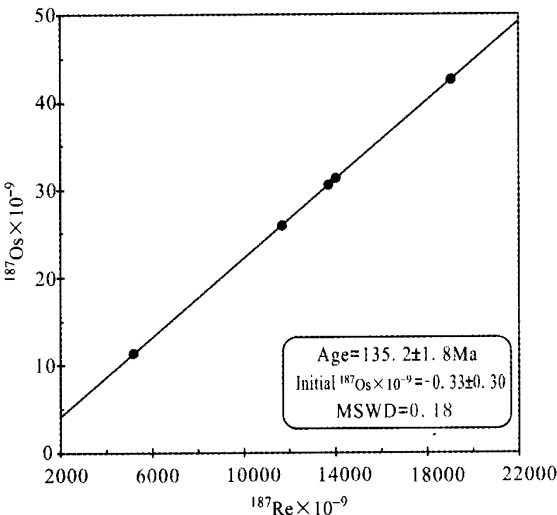


图6 石窑沟钼矿中辉钼矿 Re-Os 同位素等时线
Fig. 6 Re-Os isochron age for molybdenite from Shiyagou deposit

4.2 成矿物质来源

张本仁等(1994)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。卢欣祥等(2002)和王晓霞等(1986)研究发现, 东秦岭地区与燕山期钼矿有关的花岗斑岩体起源深度大于 30km, 而东秦岭莫霍面的最大深度 40 余千米, 岩浆起源于下地壳中。安三元等(1984)通过对秦岭 40 个代表性斑岩体的岩石化学研究, 得出岩浆源应位于下地壳。陈衍景等(2000)结合东秦岭该类斑岩体铍、氧同位素特征, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i = 0.705 \sim 0.714$, $\delta^{18}\text{O} = 7.2\text{‰} \sim 12.1\text{‰}$, 也得出成岩成

矿物质主要来自下地壳。

同样, 辉钼矿 Re 含量亦可以指示成矿物质的来源(Mao *et al.*, 1999; Stein *et al.*, 2001)。Mao *et al.* (1999)综合分析对比了中国各种类型钼矿床辉钼矿铼的含量, 发现从地幔来源到壳幔混源再到地壳来源, 矿石中的含铼量呈 10 倍地下降, 从幔源→I 型花岗岩→S 型花岗岩有关的钼矿床, Re 含量从 $n \times 10^{-4} \rightarrow n \times 10^{-5} \rightarrow n \times 10^{-6}$ 。石窑沟钼矿 Re 的含量 $8.241 \times 10^{-6} \sim 30.24 \times 10^{-6}$, 与鱼池岭钼矿 $12.48 \times 10^{-6} \sim 53.39 \times 10^{-6}$ (周珂等, 2009)和雷门沟钼矿的 $11.5 \times 10^{-6} \sim 16.2 \times 10^{-6}$ (李永峰等, 2006)相近, 后两者物质来源经研究主要来源于下地壳。因此, 初步推测石窑沟钼矿成矿物质主要来自于下地壳。

4.3 成矿时代

Re-Os 年龄直接记录了硫化物矿化的时间(Selby *et al.*, 2002), 与矿化相关岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄能很好的吻合(如 Stein *et al.*, 1997; Selby *et al.*, 2002), 较之 K-Ar 和 Ar-Ar 年龄, 辉钼矿的 Re-Os 体系不容易受后期的热液、变质和构造事件干扰(Suzuki *et al.*, 1996; Stein *et al.*, 1998, 2001), 所以辉钼矿的 Re-Os 年龄可以准确代表石窑沟钼矿的成矿时代。

辉钼矿的 Re-Os 体系用于测年时存在失偶效应(Stein *et al.*, 2003)。Selby and Creaser(2004)指出失偶效应会严重影响所测年龄的准确性和可重复性, 并通过实验发现细粒的辉钼矿(<2mm)很少出现失偶效应, 只需很少量(1mg)便可获得准确的 Re-Os 年龄。本次用于测试的 5 个辉钼矿样品均为细粒, 经过粉碎、挑纯, 最终用于测试的粒度介于 0.05 ~ 0.2mm, 远小于 2mm, 同时考虑到该矿成矿时代很年轻(135Ma), 可以忽略失偶效应(Stein *et al.*, 2003; Selby and Creaser, 2004; Xie *et al.*, 2007)对测年结果的影响; 5 个样品的年龄接近一致(表 2), 均在彼此误差范围内, 进一步证实了数据的可靠性。

综上, 本次测得石窑沟钼矿的 Re-Os 等时线年龄($135.2 \pm 1.8\text{Ma}$)、平均模式年龄($133.4 \pm 1.0\text{Ma}$)准确代表了该矿的成矿时代。虽然目前尚无石窑沟斑岩体的年代数据, 但石窑沟钼矿与同区的雷门沟钼矿($132.4 \pm 1.9\text{Ma}$, 李永峰等, 2006)、祁雨沟钼矿化($135.6 \pm 5.6\text{Ma}$, 姚军明等, 2009)、东沟钼矿($115.1 \pm 2.0\text{Ma}$, 叶会寿等, 2006)和鱼池岭钼矿($131.2 \pm 1.4\text{Ma}$, 周珂等, 2009)年龄接近, 后四者经研究成岩年龄和成矿年龄一致, 皆为同一构造-岩浆-流体活动的产物(李永峰等, 2006; 叶会寿等, 2006; 姚军明等, 2009; 周珂等, 2009)。由上, 推定石窑沟钼矿与上述钼矿及相关岩体应形成于统一的成岩成矿地质事件。

4.4 成矿动力学背景

新元古代晚期至中三叠世, 秦岭造山带处于以现代板块构造体制为基本特征的板块构造演化阶段(张国伟等,

2001)。同位素测年结果显示,扬子板块与华北板块在 242 ~ 219Ma 间实现了碰撞对接(Li *et al.*, 1992; Ames *et al.*, 1993; Zheng *et al.*, 2007),于中三叠世末进入陆内构造演化阶段(张国伟等,2001)。

燕山早期,中国东部区域构造体制发生转换,表现为从 EW 向构造格局转变到 NE 向构造格局(任纪舜等,2000;赵越等,1994)。冀北和内蒙古南部展布的 EW 向中晚侏罗世髫髻山组火山岩($163.2 \pm 5.9\text{Ma}$,牛宝贵等,2003)和 NE-NNE 向分布的张家口组火山岩($135.8 \pm 3.1\text{Ma}$ 和 $136.3 \pm 3.4\text{Ma}$,牛宝贵等,2003)所夹的时限,可能代表了转换的整个过程(任纪舜等,1998)。董树文等(2007)指出,135 ~ 100Ma,由于中侏罗世中国东部地壳岩石圈增厚,诱发了以华北为中心的岩石圈垮塌减薄。Wu *et al.* (2005)研究表明中国东北部 132 ~ 120Ma 的岩浆岩侵位于伸展环境,认为这与同时期的岩石圈拆沉有关。毛景文等(2007)和 Goldfarb *et al.* (2007)各自研究指出,135Ma 之后古太平洋板块停止向欧亚大陆之下俯冲,代之向北北东方向走滑,造成欧亚大陆岩石圈出现大规模伸展,并形成一系列矿产。这与包括华南地区、长江中下游地区和大兴安岭地区以及韩国在内的整个东亚大陆边缘成矿作用具有一致性(Choi *et al.*, 2005; Mao *et al.*, 2006; 毛景文等,2008)。

在东秦岭地区,构造体制转折表现为燕山期北东向构造叠置在东西向构造带之上,二者的交汇部位控制了斑岩体的侵位和钼多金属矿床的空间分布(张正伟等,2007;李永峰,2005)。刘少峰和张国伟(2008)通过盆山关系的分析,得出晚侏罗世末-早白垩世东秦岭-大别山造山带开始伸展垮塌。此时,受中国东部大规模岩石圈拆沉作用(邓晋福等,2006)的影响,东秦岭地区岩石圈减薄,软流圈物质上涌,导致强烈的壳-幔相互作用和伸展活动,形成了小秦岭变质核杂岩(张进江等,1998)、各种类型的花岗岩(范宏瑞等,1994;叶会寿等,2006; Mao *et al.*, 2010)、岩墙(王团华等,2008)和不同类型的矿产组合(王志光等,1997;毛景文等,2005)。石窑沟钼矿产于本区近 EW 向马超营断裂带和 NE 向石窑沟-焦园断裂带的交汇部位,其中石窑沟-焦园断裂在 156.8 ~ 130.8Ma 之间有过一次活动(李永峰,2005;韩以贵,2007),本次测得石窑沟钼矿 Re-Os 等时线年龄为 $135.2 \pm 1.8\text{Ma}$,表明石窑沟钼矿形成于中国东部岩石圈大规模伸展环境,与雷门沟、祁雨沟、东沟和鱼池岭钼矿共同为东秦岭-大别山地区第 3 期钼成矿作用(Mao *et al.*, 2008)的产物。

5 结论

(1)石窑沟钼矿属斑岩型钼矿床,矿化经历了气成-热液期、热液期,其中热液期的辉钼矿-石英阶段和黄铁矿-石英阶段为钼富集的主要阶段。

(2)5 件辉钼矿样品的 Re-Os 同位素精确定年得到模式年龄变化范围 $131.3 \pm 2.4 \sim 134.3 \pm 2.6\text{Ma}$,平均模式年龄为 133.4Ma。

133.4 \pm 1.0Ma,等时线年龄为 $135.2 \pm 1.8\text{Ma}$,成矿作用发生于早白垩世。

(3)石窑沟钼矿辉钼矿的 Re 含量为 $8.241 \times 10^{-6} \sim 30.24 \times 10^{-6}$,初步推断成矿物质主要来自于下地壳。

(4)石窑沟钼矿形成于东秦岭-大别山地区中生代第三期钼成矿作用阶段,早白垩世中国东部区域岩石圈大规模伸展环境。

致谢 野外工作得到武警黄金第六支队的大力支持;室内工作得到 Re-Os 同位素实验室杜安道研究员、屈文俊研究员和李超博士的帮助;论文写作过程中得到了毛景文教授、程彦博博士和向君峰博士的指点以及两位审稿人的细致评阅和中肯建议,在此表示衷心感谢!

References

- Ames L, Tilton GR and Zhou GZ. 1993. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons: U-Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites. *Geology*, 21: 339–342
- An SY and Lu XX. 1984. The geological features and its implication to mineralization of the porphyry in eastern Qinling. In: Xu KQ and Tu GC (eds.). *Granite Geology and Implication to Mineralization*. Nanjing: Jiangsu Press of Science and Technology, 398–405 (in Chinese)
- Chen YJ, Li C, Zhang J, Li Z and Wang HH. 2000. Sr and O characteristics of porphyries in Qinling molybdenum deposit belt and their implication to genetic mechanism and type. *Science in China (Series D)*, 30(Suppl.): 64–72 (in Chinese)
- Chen YJ, Sui YH and Pirajno F. 2003. Exclusive evidences for CMF model and a case of orogenic silver deposits: Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit, east Qinling orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 551–568 (in Chinese with English abstract)
- Choi SG, Kwon ST, Ree JH, So CS and Pak SJ. 2005. Origin of Mesozoic gold mineralization in South Korea. *The Island Arc*, 14: 102–114
- Deng JF, Su SC, Liu C, Zhao GC, Zhao XG, Zhou S and Wu ZX. 2006. Discussion on the lithospheric thinning of the North China craton: Delamination or thermal erosion and chemical metasomatism? *Earth Science Frontiers*, 13(2): 105–119 (in Chinese with English abstract)
- Du AD, Zhao DM, Wang SX, Sun DZ and Liu DY. 2001. Precise Re-Os dating for molybdenite by ID-NTIMS with Carius tube sample preparation. *Rock and Mineral Analysis*, 20(4): 247–252 (in Chinese with English abstract)
- Du AD, Wu SQ, Sun DZ, Wang SX, Qu WJ, Markey R, Stein H, Morgan JW and Malinovsky D. 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenite HLP and JDC. *Geostand. Geanal. Res.*, 28: 41–52
- Dong SW, Zhang YQ, Long CX, Yang ZY, Ji Q, Wang T, Hu JM and Chen XH. 2007. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan Movement. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1449–1461 (in Chinese with English abstract)
- Fan HR, Xie YH and Wang YL. 1994. Petrological and geochemical

- characteristics and genesis of the Huashan granitic batholiths, western Henan. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 13(1): 19–32 (in Chinese with English abstract)
- Goldfarb RJ, Hart G, Davis G and Groves D. 2007. East Asian gold: Deciphering the anomaly of Phanerozoic gold in Precambrian cratons. *Econ. Geol.*, 102: 341–345
- Han YC. 2007. Structural and magmatic evolutions in western Henan Province and their implications to gold mineralization: New geochronological evidence. Ph. D. Thesis. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–119 (in Chinese with English abstract)
- Huang DH and Wu CY. 1994. Re-Os isotope ages of molybdenum deposits in east Qinling and their significance. *Mineral Deposits*, 13(3): 221–230 (in Chinese with English abstract)
- Hu SX, Lin QL, Chen ZM, Sheng ZL and Li SM. 1988. The Geology and Metallogeny of the Amalgamation Zone between Ancient North China Plate and South China Plate: Taking Qinling-Tongbai as An Example. Nanjing: Nanjing University Press, 442–489 (in Chinese)
- Li N, Chen YJ, Zhang H, Zhao TP, Deng XH, Wang Y and Ni ZY. 2007. Molybdenum deposits in East Qinling. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 186–198 (in Chinese with English abstract)
- Li SG, Liu D, Chen Y and Ge N. 1992. The Sm-Nd isotopic age of coesite-bearing eclogite from the southern Dabie Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 37: 1638–1641
- Liu SF and Zhang GW. 2008. Evolution and geodynamics of basin/mountain systems in East Qinling-Dabieshan and its adjacent regions, China. *Geological Bulletin of China*, 27(12): 1943–1960 (in Chinese with English abstract)
- Li YF. 2005. The Temporal-spatial evolution of Mesozoic granitoids in Xiong'ershan area and their relationships to molybdenite-gold mineralization. Ph. D. Thesis. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–135 (in Chinese with English abstract)
- Li YF, Mao JW, Liu DY, Wang YB, Wang ZL, Wang YT, Li XF, Zhang ZH and Guo BJ. 2006. SHRIMP zircon U-Pb and molybdenite Re-Os datings for the Leimengou porphyry molybdenum deposit, Western Henan and its geological implication. *Geological Review*, 52(1): 122–131 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig K. 2001. Isoplot/Ex, version 3.0: A geochronological tool kit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley, 1–43
- Luo MJ, Zhang FM, Dong QY, Xu YR, Li SM and Li KH. 1991. Molybdenum Deposits in China. Zhengzhou: Henan Press of Science and Technology, 35–39, 108–130, 393–435 (in Chinese)
- Lu XX, Yu ZP, Feng YL, Wang YT, Ma WF and Cui HF. 2002. Mineralization and tectonic setting of deep hypabyssal granites in East Qinling Mountain. *Mineral Deposits*, 21(2): 168–178 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Zhang ZC, Zhang ZH and Du AD. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W(Mo) deposit in the northern Qilian mountains and its geological significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(11–12): 1815–1818
- Mao JW, Zhang ZH, Yu JJ, Wang YT and Niu BG. 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. *Sciences in China (Series D)*, 33(4): 289–299 (in Chinese)
- Mao JW, Xie GQ, Zhang ZH, Li XF, Wang YT, Zhang CQ and Li YF. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169–188 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Wang YT, Lehmann B, Yu JJ, Du AD, Mei YX, Li YF, Zang WS, Stein HJ and Zhou TF. 2006. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications. *Ore Geol. Rev.*, 29: 307–324
- Mao JW, Xie GQ, Guo CL and Chen YC. 2007. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2329–2338 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Bierlein F, Qu WJ, Du AD, Ye HS, Pirajno F, Li HM, Guo BJ, Li YF and Yang ZQ. 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 4607–4626
- Mao JW, Xie GQ, Guo CL, Yuan SD, Cheng YB and Chen YC. 2008. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 510–526 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Pirajno F, Ye HS, Wang YB, Li YF, Xiang JF and Zhao HJ. 2010. Late Jurassic-Early Cretaceous granitoid magmatism in Eastern Qinling, central-eastern China: SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications. *Australian Journal of Earth Sciences*, 57: 51–78
- Markey R, Stein H and Morgan J. 1998. Highly precise Re-Os dating for molybdenite using alkaline fusion and NTIMS. *Talanta*, 45: 935–946
- Niu BG, He ZJ, Song B and Ren JS. 2003. SHRIMP dating of the Zhangjiakou volcanic series and its significance. *Geol. Bull.*, 22(2): 140–141 (in Chinese)
- Ren JS, Niu BG, He ZJ, Xie GL and Liu ZG. 1998. Tectonic framework and geodynamic evolution of eastern China. In: Ren JS and Yang WR (eds.). *Composition, Structure, Evolution and Environment of Continental Lithosphere of China*. Beijing: Atomic Energy Press, 1–12 (in Chinese with English abstract)
- Ren JS, Wang ZX and Chen BW. 2000. View on China Tectonics from the Globe: Brief Introduction of the Tectonic Map of China and Adjacent Area. Beijing: Geological Publishing House, 1–50 (in Chinese with English abstract)
- Selby D, Creaser RA, Hart CJ, Rombach CS, Thompson JFH, Smith MT, Bakke AA and Goldfarb RJ. 2002. Absolute timing of sulfide and gold mineralisation: A comparison of Re-Os molybdenite and Ar-Ar mica methods from the Tintina Gold Belt, Alaska. *Geology*, 30: 791–794
- Selby D and Creaser RA. 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 and Os within molybdenite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68(19): 3897–3908
- Smoliar MI, Walker RJ and Morgan JW. 1996. Re-Os ages of group II A, III A, IV A and VIB iron meteorites. *Science*, 271: 1099–1102
- Stein HJ, Markey RJ, Morgan JW, Du AD and Sun Y. 1997. Highly

- precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling molybdenum belt, Shaanxi Province, China. *Economic Geology*, 92: 827–835
- Stein HJ, Sundblad K, Markey R and Motuza G. 1998. Re-Os ages for Archean molybdenite and pyrite, Kuittila-Kiviso, Finland and Proterozoic molybdenite, Kabeliai, Lithuania: Testing the chronometer in a metamorphic and metasomatic setting. *Mineral Deposita*, 33: 329–345
- Stein HJ, Markey RJ, Morgan JW, Hannah JL and Schersten A. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works. *Terra Nova*, 13(6): 479–486
- Stein HJ, Schersten K, Hannah JL and Markey R. 2003. Subgrain-scale decoupling of Re and ^{187}Os assessment of laser ablation ICP-MS spot dating in molybdenite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 92: 827–835
- Suzuki K, Shimizu H and Masuda A. 1996. Re-Os dating of molybdenites from ore deposits in Japan: Implication for the closure temperature of the Re-Os system for molybdenite and the cooling history of molybdenum ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60: 3151–3159
- Wang TH, Mao JW and Wang YB. 2008. Research on SHRIMP U-Pb chronology in Xiaolinling-Xionger' shan area: The evidence of delamination of lithosphere in Qinling orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1273–1287 (in Chinese with English abstract)
- Wang XX, Jiang CY and An SY. 1986. Characteristics and significances of the two-pyroxene granulite enclave in small intermediate-acid porphyry rock body. *Xi'an College of Geology*, (2): 16–22 (in Chinese)
- Wang ZG, Cui H and Xu ML. 1997. The Tectonic Evolution and Mineralization in the South Margin of North China Block. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1–296 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Lin JQ, Simon A, Wilde SA, Zhang XO and Yang JH. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 233: 103–119
- Xie GQ, Mao JW, Li RL, Qu WJ, Pirajno F and Du AD. 2007. Re-Os molybdenite and Ar-Ar phlogopite dating of Cu-Fe-Au-Mo (W) deposits in southeastern Hubei, China. *Mineralogy and Petrology*, 90: 249–270
- Xi SF, Wang XC and Li QL. 2004. Geological characteristics of the Shizimiao gold field, Henan. *Gold Geology*, 10(1): 29–32 (in Chinese with English abstract)
- Yao JM, Zhao TP, Li J, Sun YL, Yuan ZL, Chen W and Han J. 2009. Molybdenite Re-Os age and zircon U-Pb age and Hf isotope geochemistry of the Qiyugou gold system, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 374–384 (in Chinese with English abstract)
- Ye HS, Mao JW, Li YF, Guo BJ, Zhang CQ, Liu J, Yan QR and Liu GY. 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. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 1078–1088 (in Chinese with English abstract)
- Zhang BR, Luo TC, Gao S *et al.* 1994. Geochemical Study of the Lithosphere, Tectonism and Metallogenesis in the Qinling-Dabashan Region. Wuhan: Press of China University of Geoscience, 257–277 (in Chinese)
- Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC, Xiao QH *et al.* 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Beijing: Science Press, 432–435 (in Chinese)
- Zhang JJ, Zheng YD and Liu SW. 1998. The Xiaolinling Metamorphic Core Complex: Structure, Genetic Mechanism and Evolution. Beijing: Ocean Press, 1–63 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZW, Zhang ZS, Dong Y, Peng WF and Zhang JJ. 2007. Molybdenum deposits in eastern Qinling, central China: Deep structural constraints on their formation. *Acta Mineralogica Sinica*, 27(3/4): 372–378 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Y, Yang ZY and Ma XH. 1994. Geotectonic transition from paleoasian system and paleotethyan system to paleopacific continental margin in eastern Asian. *Scientia Geologica Sinica*, 29(2): 105–119 (in Chinese with English abstract)
- Zheng YF, Gao TS, Wu YB, Gong B and Liu XM. 2007. Fluid flow during exhumation of deeply subducted continental crust: Zircon U-Pb age and O-isotope studies of a quartz vein within ultrahigh-pressure eclogite. *J. Metamorph. Geol.*, 25: 267–283
- Zhou K, Ye HS, Mao JW, Qu WJ, Zhou SF, Meng F and Gao YL. 2009. Geological characteristics and molybdenite Re-Os isotopic dating of Yuchiling porphyry Mo deposit in western Henan Province. *Mineral Deposits*, 28(2): 170–184 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 安三元, 卢欣祥. 1984. 秦岭斑岩组合的地质特征及成矿关系. 见: 徐克勤, 涂光炽主编. 花岗岩地质和成矿关系. 南京: 江苏科学技术出版社, 398–405
- 陈衍景, 李超, 张静, 李震, 王海华. 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. *中国科学(D辑)*, 30(增刊): 64–72
- 陈衍景, 隋颖慧, Franco PIRAJNO. 2003. CMF模式的排他性依据和造山型银矿实例: 东秦岭铁炉坪银矿同位素地球化学. *岩石学报*, 19(3): 551–568
- 邓晋福, 苏尚国, 刘翠, 赵兴国, 周肃, 吴宗黎. 2006. 关于华北克拉通燕山期岩石圈减薄的机制与过程的讨论: 是拆沉, 还是热侵蚀和化学交代? *地学前缘*, 13(2): 105–119
- 杜安道, 赵敦敏, 王淑贤, 孙德忠, 刘敦一. 2001. Caris 管溶样和负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼-钼同位素地质年龄. *岩矿测试*, 20(4): 247–252
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 杨振宇, 季强, 王涛, 胡建民, 陈宣华. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. *地质学报*, 81(11): 1449–1461
- 范宏瑞, 谢奕汉, 王英兰. 1994. 豫西花山花岗岩基岩石学和地球化学特征及其成因. *岩石矿物学杂志*, 13(1): 19–32
- 韩以贵. 2007. 豫西地区构造、岩浆作用与金成矿的关系-同位素年代学的新证据. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京), 1–119
- 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 何红蓼. 1994. 东秦岭地区钼矿床的铼-钼同位素年龄研究. *矿床地质*, 13(3): 221–230
- 胡受奚, 林潜龙, 陈泽铭, 盛中烈, 黎世美. 1988. 华北与华南古板块拼合带地质和成矿. 南京: 南京大学出版社, 442–489
- 李诺, 陈衍景, 张辉, 赵太平, 邓小华, 王运, 倪智勇. 2007. 东秦岭斑岩钼矿带的地质特征和成矿构造背景. *地学前缘*, 14(5):

186-198

- 刘少峰, 张国伟. 2008. 东秦岭-大别山及邻区盆-山系统演化与动力学. 地质通报, 27(12): 1943-1960
- 李永峰. 2005. 豫西熊耳山地区中生代花岗岩类时空演化与钼(金)成矿作用. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京), 1-135
- 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. 地质论评, 52(1): 122-131
- 罗铭玖, 张辅民, 董群英, 许永仁, 黎世美, 李昆华. 1991. 中国钼矿床. 郑州: 河南科学技术出版社, 35-39, 108-130, 393-435
- 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. 矿床地质, 21(2): 168-178
- 毛景文, 张作衡, 余金杰, 王义天, 牛宝贵. 2003. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示. 中国科学(D 辑), 33(4): 289-299
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景. 岩石学报, 21(1): 169-188
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景. 岩石学报, 23(10): 2329-2338
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 袁顺达, 程彦博, 陈毓川. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. 高校地质学报, 14(4): 510-526
- 牛宝贵, 和政军, 宋彪, 任纪舜. 2003. 张家口组火山岩 SHRIMP 定年及其重大意义. 地质通报, 22(2): 140-141
- 任纪舜, 牛宝贵, 何政军, 谢广连, 刘志刚. 1998. 中国东部的构造格局和动力演化. 见: 任纪舜, 杨巍然主编. 中国东部岩石圈结构与构造岩浆演化. 北京: 原子能出版社, 1-12
- 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚. 2000. 从全球看中国大地构造-中国及邻区大地构造图简要说明. 北京: 地质出版社, 1-50
- 王晓霞, 姜常义, 安三元. 1986. 中酸性小斑岩中二辉麻粒岩包体的特征及其意义. 西安地质学院学报, (2): 16-22
- 王团华, 毛景文, 王彦斌. 2008. 小秦岭-熊耳山地区岩墙锆石 SHRIMP 年代学研究-秦岭造山带岩石圈拆沉的证据. 岩石学报, 24(6): 1273-1287
- 王志光, 崔毫, 徐孟罗. 1997. 华北地块南缘地质构造演化与成矿. 北京: 冶金工业出版社, 1-296
- 席书锋, 王学成, 李群亮. 2004. 河南狮子庙金矿田矿床地质特征. 黄金地质, 10(1): 29-32
- 姚军明, 赵太平, 李晶, 孙亚莉, 原振雷, 陈伟, 韩军. 2009. 河南祁雨沟金成矿系统辉钼矿 Re-Os 年龄和锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素地球化学. 岩石学报, 25(2): 374-384
- 叶会寿, 毛景文, 李永峰, 郭保健, 张长青, 刘珺, 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. 地质学报, 80(7): 1078-1088
- 张本仁, 骆庭川, 高山等. 1994. 秦巴岩石圈构造及成矿规律地球化学研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 257-277
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉等著. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 432-435
- 张进江, 郑亚东, 刘树文. 1998. 小秦岭变质核杂岩的构造特征、形成机制及构造演化. 北京: 海洋出版社, 1-63
- 张正伟, 张中山, 董有, 彭万夫, 张建军. 2007. 东秦岭钼矿床及其深部构造制约. 矿物学报, 27(3/4): 372-378
- 赵越, 杨振宇, 马醒华. 1994. 东亚大地构造发展的重要转折. 地质科学, 29(2): 105-119
- 周珂, 叶会寿, 毛景文, 屈文俊, 周树峰, 孟芳, 高亚龙. 2009. 豫西鱼池岭斑岩型钼矿床地质特征及其辉钼矿铼-钨同位素年龄. 矿床地质, 28(2): 170-184