

编号: 0258-7106(2011)03-0435-13

河南罗山县母山钼矿床成矿作用特征及锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年代学*

杨梅珍^{1,2}, 曾键年², 任爱群³, 陆建培², 潘思东²

(1 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 2 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 3 河南省地质矿产勘查开发局第三地质调查队, 河南 信阳 464000)

摘要 母山钼矿床是大别山北缘地区斑岩型钼矿床的典型代表, 以发育于花岗斑岩体内、外接触带的细网脉浸染型矿化为特征, 并具有以岩体顶部由早期硅化形成的无矿石英核为中心的典型的斑岩热液体系蚀变分带模式。在无矿石英核的石英中, 富气相包裹体和含石盐子矿物的三相包裹体共存, 说明其原始岩浆流体曾发生过低压相分离。流体包裹体均一温度测试结果表明, 成矿热液体系的冷却作用是 Mo、Cu 等成矿元素沉淀的重要原因。成矿岩体地球化学研究表明, 母山成矿花岗斑岩体的特征是: 低 Sr ($< 400 \times 10^{-6}$)、低 Y (1.8×10^{-6})、轻、重稀土元素分异强烈 ($(La/Yb)_N = 32.13 \sim 68.69$)、Eu 负异常中等—较弱 ($\delta Eu = 0.66 \sim 0.92$) 以及较高的 ($^{87}Sr/^{86}Sr$) 值 (0.70962 ~ 0.71076) 和较低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 (-14.77 ~ -13.36)。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素精细年代学测试结果显示, 母山成矿花岗斑岩的侵位年龄为 $(142.0 \pm 1.8) Ma$, 表明其是大别造山带碰撞造山后加厚陆壳部分熔融的产物, 其成岩成矿时间比大别山地区早白垩世岩浆活动峰期 (~130 Ma) 早约 10 Ma, 代表了大别山地区较早的一次钼多金属成矿事件。

关键词 地球化学 细脉浸染型矿化 母山钼矿床 锆石 U-Pb 年龄 河南省

中图分类号: P618.65

文献标志码: A

Characteristics of Mo mineralization and zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronology of Mushan Mo deposit from Luoshan County, Henan Province

YANG MeiZhen^{1,2}, ZENG JianNian¹, REN AiQun³, LU JianPei² and PAN SiDong²

(1 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2 China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3 Third Geological Survey Team, Henan Bureau of Geology Exploration and Mineral Development, Xinyang 464000, Henan, China)

Abstract

Mushan Mo deposit, a typical porphyry molybdenum deposit occurs in the northern margin of Dabie Mountain, is characterized by veinlet-disseminated mineralization and typical porphyry hydrothermal system alteration envelope centering the unmineralized quartz core formed by silicification early at the top of granitic porphyry. The coexistence of vapour-rich and halite-bearing three-phase inclusions indicates that the primitive magmatic fluid has experienced phase separation under low pressure. The results of homogenization temperatures of fluid inclusions show that the ore-forming element including Mo, Cu deposited by cooling of ore-forming hydrother-

* 本文得到地质过程与矿产资源国家重点实验室开放课题(编号: GPMR201014)和河南省国土资源厅 2007 年度省“两权价款”地质科研计划项目(编号: 2882)的联合资助

第一作者简介 杨梅珍, 女, 1965 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩石学、矿床学的研究和教学工作。Email: ymzkitty@163.com

收稿日期 2010-05-06; 改回日期 2010-12-28。许德焕编辑。

mal system. Mushan granitic porphyry related to mineralization exhibits low Sr ($< 400 \times 10^{-6}$), low Yb ($< 1.8 \times 10^{-6}$), strong fractionation of LREE and HREE [$(La/Yb)_N = 32.13 \sim 68.69$], moderate to slight Eu negative anomaly ($\delta Eu = 0.66 \sim 0.92$), and high $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i (0.70962 \sim 0.71076)$, extremely low $\epsilon Nd(t)$ ($-14.77 \sim -13.36$). The result of zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronology that Mushan granitic porphyry emplaced at (142.0 ± 1.8) Ma. It concluded that rock forming and Mo mineralization of Mushan Mo deposit are resulted from the thickened continental crust by partial melting during post-collision of Dabie Mountain, and it happened nearly 10 Ma earlier than granitic magmatism peak (~ 130 Ma) in early Cretaceous in Dabie region.

Keywords: geochemistry, veinlet-disseminated mineralization, Mushan Mo deposit, U-Pb age of zircon, Henan Province

近年来,大别山北缘地区的找矿工作取得了重大进展。河南省地质矿产局第三地质调查大队在大别山西段(河南省境内)探明了汤家坪大型斑岩型钼矿床(杨泽强,2007),新发现了光山县干鹤冲斑岩型钼矿床(罗齐云等,2009)。安徽省313地质队则在大别山东段(安徽省境内)发现了金寨县沙坪沟特大型钼矿床(资源导刊编辑部,2009)、银山角砾岩-斑岩型钼矿床(徐晓春等,2009),大别山北麓再次成为找矿的热点区域。因而,深入认识区域成矿时空结构规律和成岩-成矿的关联机制,对于指导找矿和成矿潜力评价具有重要意义。

母山矿床是大别北缘地区较早发现的斑岩型钼矿床,20世纪80年代已进行过较详细的勘探。该矿床尽管发现较早,也获得了一些关于成矿作用的基础地质信息(邱顺才,2006),但还缺乏成岩-成矿年代学及地质背景的系统研究。本次工作在系统研究母山钼矿床成矿作用特征的基础上,应用锆石U-Pb精细测年技术对与母山钼矿床成矿相关的花岗斑岩进行了年代学研究,结合区域火山岩、深成侵入岩年代学的最新研究成果,探讨了中生代火山-岩浆活动序次及其成矿时间序列,综合成矿岩体岩石地球化学及Sr-Nd同位素信息,了解了钼矿床成矿深部动力学机制和成矿构造动力学背景。

1 区域地质背景

桐柏-大别造山带夹持于华北与扬子两大板块之间,与华北板块(I)以明港-固始断裂(F6)为界,与扬子板块(II)以襄樊-广济断裂(F5)为界。该造山带从北至南大致划分为北淮阳绿片岩-低角闪岩相变质构造带(III)、桐柏-大别构造带(IV)和南淮阳蓝片岩-绿片岩相变质构造带(V)(图1)(Liu et al., 2004)。其中,北淮阳绿片岩-低角闪岩相变质构造

带又分为北、南2个亚带。桐柏-商城断裂(F2)及大悟-浠水断裂(F9)分别为桐柏-大别构造带与北淮阳构造带及南淮阳构造带的分界断裂;龟山-梅山断裂(F1)为北淮阳构造带北亚带与南亚带的分界断裂(图1)。

罗山县灵山镇母山地区位于大别山北缘,北淮阳构造带西段(河南段),龟山-梅山断裂(F1)的南侧,中生代石山口火山盆地南缘的外侧,南邻燕山期灵山花岗岩体。区内出露地层为中元古界龟山岩组(Pt₂g)、泥盆系南湾组(D_n)等基底变质岩系,以及中生界白垩系陈棚组火山碎屑岩(K₁c)。

龟山岩组主要岩性为斜长角闪片岩、变粒岩和绢云石英片岩。南湾组的主要岩性为黑云母变粒岩夹斜长角闪片岩或斜长角闪岩透镜体,以及黑云母变粒岩与浅粒岩互层,是母山成矿岩体的直接围岩。地层产状为 $53 \sim 70^\circ / 20 \sim 35^\circ$ 。陈棚组火山碎屑岩呈角度不整合覆于变质基底岩系之上,沿龟山-梅山断裂(F1)广泛分布于北部区域。

该地区内区域构造以断裂为主,NWW向的龟山-梅山断裂和桐柏-商城断裂分别从该矿区的北部和南部通过;其次,发育不同规模的NE向横断裂,其中规模较大的是涩港-大悟断裂(F8),其与龟山-梅山断裂及桐柏-商城断裂的交汇处分别控制了石山口火山喷发中心和中生代灵山深成侵入花岗岩基。与涩港-大悟断裂平行的公山-莲花山次级断裂与NW向石家冲次级断裂的交汇部控制了母山成矿岩体的分布。

该区中生代火山喷发和岩浆侵入活动强烈。母山钼矿床西南2 km处的灵山黑云母二长花岗岩体为一大型岩基,出露面积490 km²,是由中粗粒花岗岩或中粗粒似斑状花岗岩以及细粒含黑云母花岗岩构成的复式岩体,其锆石LA-ICP-MS U-Pb同位素年龄为 (129.3 ± 2.5) Ma(周红升等,2009)。母山钼

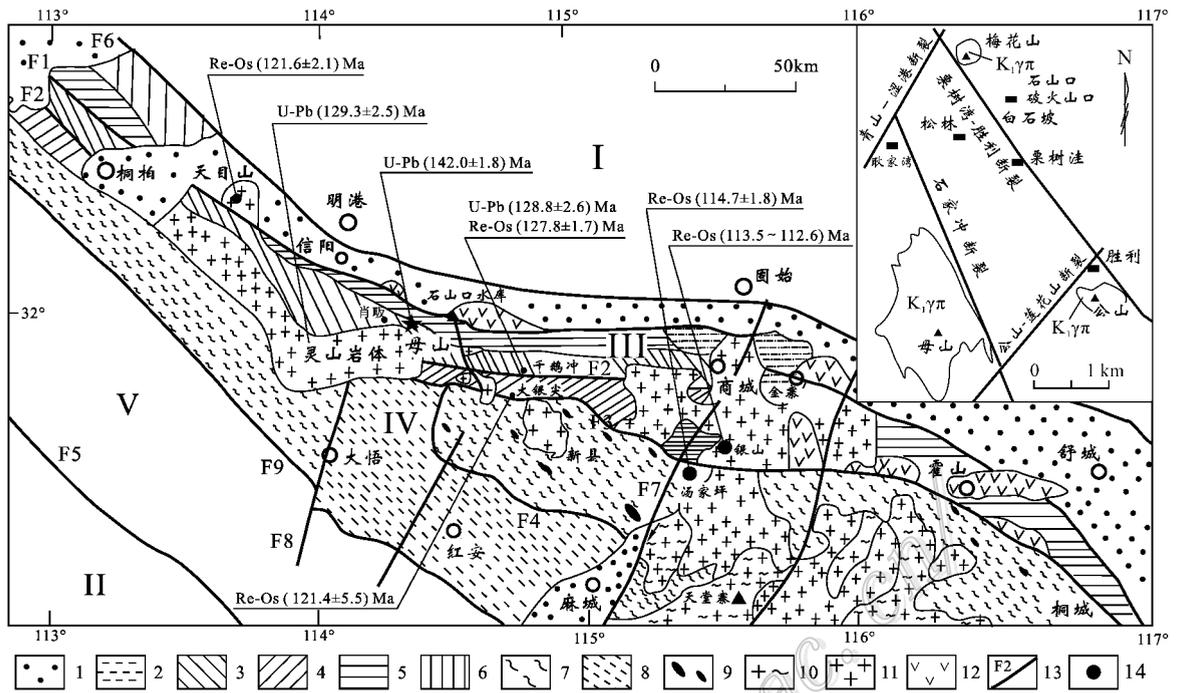


图 1 母山钼矿床区域地质略图(据徐晓春等 2009 ;Liu et al. , 2004)

1—中-新生界(K-E);2—石炭系;3—南湾组复理石带(Dn);4—肖家庙组(Z-Ox);5—龟山岩组(Pt_{2g})、卢镇关岩群(Pt_{2l});6—歪庙组(Pt₃-Pz);7—桐柏-大别片麻杂岩(Ar₃-Pt₁);8—红安高压变质带(Pt₃);9—超高压榴辉岩岩块;10—晋宁期花岗岩;11—白垩纪花岗岩;12—早白垩世火山岩(K_{1c});13—断裂带及编号;14—钼矿床;F1—龟山-梅山断裂;F2—桐柏-商城断裂;F3—熊店-浒湾断裂;F4—丰店-七里坪断裂;F5—襄樊-广济断裂;F6—明港-固始断裂;F7—商城-麻城断裂;F8—涩港-大悟断裂;F9—大悟-滠水断裂;I—华北板块;II—扬子板块;III—北淮阳绿片岩-低角闪岩相变质构造带;IV—桐柏-大别构造带;V—南淮阳蓝片岩-绿片岩相变质构造带. 钼矿床年代学资料据杨泽强, 2007;徐晓春等 2009 及本文;K_{1γπ}—早白垩世花岗斑岩;右上角小图为母山钼矿床构造纲要图

Fig. 1 Regional geological sketch map of the Mushan Mo deposit (after Xu et al. , 2009 ; Liu et al. , 2004)

1—Mesozoic-Cenozoic (K-E); 2—Carboniferous; 3—Flysch belt of Nanwan Formation (Dn); 4—Xiaojiamiao Formation (Z-Ox); 5—Guishan Formation (Pt_{2g}), Luzhuguan Group (Pt_{2l}); 6—Waimiao Formation (Pt₃-Pz); 7—Tongbai-Dabie metamorphic complex (Ar₃-Pt₁); 8—Hong'an high-pressure metamorphic belt (Pt₃); 9—Superhigh pressure eclogite; 10—Granite of Jinning stage; 11—Cretaceous granite; 12—Early Cretaceous volcanic rocks (K_{1c}); 13—Fault zone and its serial number; 14—Mo deposit; F1—Guishan-Meishan fault; F2—Tongbai-Shangcheng fault; F3—Xiongdian-Huwan fault; F4—Fengdian-Qiliping fault; F5—Xiangfan-Guangji fault; F6—Minggang-Gushi fault; F7—Shangcheng-Macheng fault; F8—Segang-Dawu fault; F9—Dawu-Xishui fault; I—North China Plate; II—Yangtze Plate; III—Northern Huaiyang green schist-low amphibolite metamorphic facies tectonic belt; IV—Tongbai-Dabie HP-UHP belt; V—Southern Huiyang Blue schist-Green schist metamorphic facies tectonic belt. Chronological data of Mo deposits from Yang, 2007; Xu et al. , 2009 and this paper; K_{1γπ}—Early Cretaceous granite porphyry; Small picture at the right corner showing structure outline of the Mushan Mo deposit

矿床的北侧为石山口破火山口,是信阳-霍山中生代火山岩带西段的重要火山喷发中心之一。

该区域内发育以钼和铅锌为主的多金属矿床。母山钼矿床北侧约 1.5 km 处有白石坡中型银铅锌矿床和胜利湾铅锌矿点,其北西约 7.5 km 处有皇城山银矿床。

2 成矿岩体地质及地球化学

母山岩体侵入于泥盆系南湾组,平面上呈轴向 NNW 的卵形,南宽北窄(图 2),地表出露面积 1.5

km²。其东、西两侧的接触面均向岩体内倾,横断面呈楔形,上宽下窄,并向 SSE 倾伏。该岩体是一个多次侵入的复式岩体,具同心环状特征。其内部相为分布于该岩体西南部的多斑花岗斑岩(K_{1m²γπ}),出露面积约为该岩体总面积的 1/6(图 2),与外部相花岗斑岩(K_{1m¹γπ})无明显界线,呈渐变过渡关系。

花岗斑岩(K_{1m¹γπ})是母山岩体的主体,其边部有众多的岩脉群穿插于围岩中。该岩石的新鲜面为浅肉红色,斑状结构,块状构造。其斑晶含量约为 40%,主要为斜长石、条纹长石、石英和少量黑云母。斜长石含量约 20%,粒径 0.8~0.25 mm,他形-半自

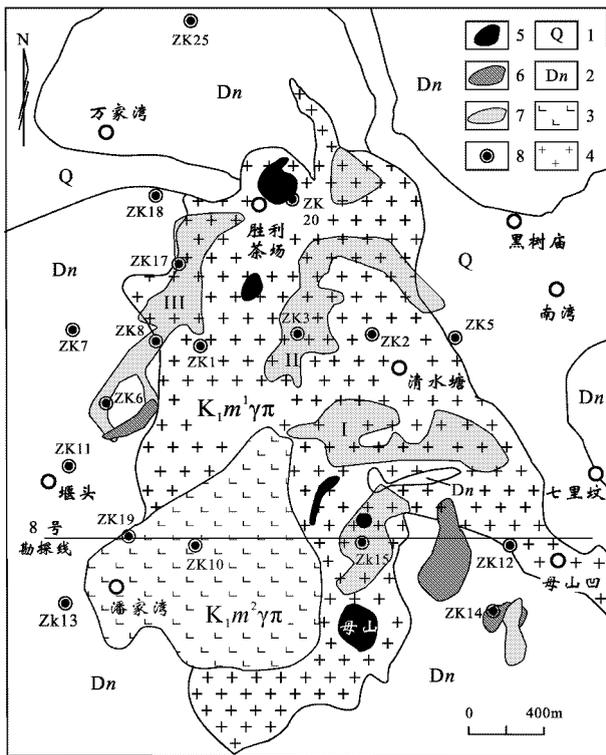


图2 母山钼矿床地质图

(据河南地质局第十地质大队, 1980^① 修编)

1—第四系; 2—泥盆系南湾组(Dn); 3—多斑花岗岩斑岩($K_1m^2\gamma\pi$); 4—花岗斑岩($K_1m^1\gamma\pi$); 5—无矿石英核; 6—Cu异常($\geq 500 \times 10^{-6}$); 7—Mo异常($\geq 100 \times 10^{-6}$); 8—钻孔及编号

Fig. 2 Geological map of the Mushan Mo deposit

1—Quaternary; 2—Devonian Nanwan Formation (Dn); 3—Plyspotted granite porphyry ($K_1m^2\gamma\pi$); 4—Granite porphyry ($K_1m^1\gamma\pi$); 5—Barren quartzite core; 6—Cu anomaly ($\geq 500 \times 10^{-6}$); 7—Mo anomaly ($\geq 100 \times 10^{-6}$); 8—Drill hole and its serial number

形晶结构, 板状晶形, 聚片双晶发育, $An=15$, 属更长石, 表面绢云母化, 条纹长石含量约 5%, 粒径为 0.6~1.2 mm, 表面有泥化现象, 石英含量约 15%, 粒径 0.8~2.5 mm, 六方双锥晶形, 有明显的港湾状和浑圆状溶蚀结构, 并可见裂纹及波状消光现象。基质具微晶结构, 主要由正长石微晶和均匀分布的微粒石英以及少量绢云母组成, 微晶石英粒径为 0.01~0.02 mm。副矿物主要有钛铁矿、磷灰石、榍石及锆

石等。

多斑花岗岩斑岩($K_1m^2\gamma\pi$)为肉红色, 斑状结构, 块状构造。斑晶约为 60%, 粒度一般为 8 mm × 5 mm 左右, 主要由斜长石、钾长石、石英及少量黑云母组成。斜长石为自形板状更长石, 钾长石晶体可见卡式双晶, 粒度为 10 mm × 15 mm; 石英多为六方双锥, 粒径 6 mm; 黑云母为鳞片状, 多水化蚀变且析出网状金红石。基质约占 40%, 微晶结构, 粒径一般为 0.04~0.06 mm, 主要由石英、钾长石等组成。副矿物为磁铁矿、白钛石、磷灰石及锆石。斑晶含量较高和基质粒度较粗等特征显示出该多斑花岗岩斑岩($K_1m^2\gamma\pi$)为母山岩体的内部相。

母山岩体的岩石化学分析结果^②表明, 其 $w(SiO_2)$ 为 69.95%~74.45%, $w(Al_2O_3)$ 多变化于 13.88%~15.17% 之间, 个别高达 17.17%, $w(K_2O + Na_2O)$ 一般变化于 7.51%~9.86%, K_2O/Na_2O 比值为 2.24~6.45, A/CNK 集中在 1.04~1.61 之间, 属过铝质; 在 $w(SiO_2)-w(K_2O)$ 图解中属高钾钙碱性系列。 ΣREE 变化较大, 一般为 $(92.7 \sim 174) \times 10^{-6}$ ($La/Yb)_N$ 为 32.13~68.69, 个别为 13.6, δEu 为 0.66~0.92。其稀土元素配分模式为轻、重稀土元素分异较强的、Eu 负异常中等—较弱的明显右倾型(图 3a), 明显不同于一般 A 型花岗岩的海鸥型稀土元素配分模式, 而与同熔 I 型花岗岩的相似。其微量元素的特征是 Ba、Sr、Ti、Nb 有不同程度的亏损, 而 Rb、K、Th、Pb 富集(图 3b)。其 $w(Sr)$ 为 $(57 \sim 98) \times 10^{-6}$; $w(Yb)$ 为 $(0.31 \sim 1.21) \times 10^{-6}$, 低于 1.8×10^{-6} ; $w(Y)$ 为 $(3.19 \sim 13.9) \times 10^{-6}$, 低于 181×10^{-6} 。其低 Sr 低 Yb 特征与喜马拉雅型花岗岩一致(张旗等 2006), 反映其岩浆源区残留相中存在石榴子石和斜长石, 说明其岩浆源区深度较大, 是大别造山带碰撞造山后较厚下地壳深熔作用的产物。母山岩体与其南侧的灵山黑云母二长花岗岩体具有相似的特征(周红升等 2009), 反映出它们形成于相似的构造背景。母山花岗岩的 Sr-Nd 同位素分析结果表明, 其具有高的 Sr 初始值 $(0.70962 \sim 0.71076)$ 和较低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 $(-14.77 \sim -13.36)$, 显示出其岩浆源区的壳源性质。

① 河南地质局第十地质大队, 1980. 河南省罗山县涩港母山钼矿详细普查报告. 内部资料。

② 河南省地质矿产勘查开发局第三地质调查队, 1990. 豫南大别山北麓中生代火山岩地质特征与银金多金属矿产研究报告. 内部资料。

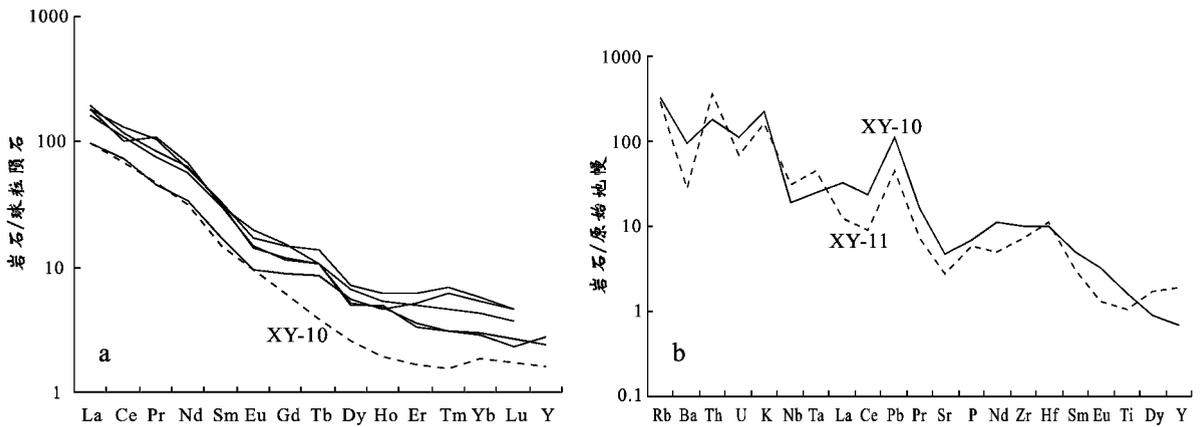


图3 与母山钼矿床相关的侵入岩的稀土元素配分模式(a)和微量元素蛛网图(b)

球粒陨石值据 Boynton, 1984; 原始地幔值据 Sun et al., 1984; 数据来源: XY-10 和 XY-11 据本文测试结果; 其余据卢欣祥, 1986^①

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b)

of the granitic porphyry from the Mushan Mo deposit

Chondrite-normalization values from Boynton, 1984; primitive mantle normalization values from Sun and McDonough, 1984

3 矿床地质特征

3.1 矿化特征

母山矿床的钼矿化主要为细网脉型, 主要产在花岗斑岩体的内接触带和外接触带 200~400 m 范围的围岩内, 以及多斑花岗斑岩体的内部。其中, 以花岗斑岩体内、外接触带的矿化最好, 现已探明有 3 个工业矿体; 多斑花岗斑岩体内部的矿化则较弱。就整个矿床而言, 矿化较均匀, 但相对分散, 品位较低, 一般在 0.044% 以下, 矿体数量多, 但单个矿体的规模较小。

现已圈出 3 个主矿体和 18 个小矿体。其中, I、II 号主矿体位于母山岩体东侧的内、外接触带, III 号主矿体位于母山岩体西北侧的接触带偏外侧, 分别大致与该矿区内的 3 个钼铜异常区相一致(图 2)。这 3 个主矿体占整个矿床储量的 86%。主矿体埋深 20~40 m, 形态多为似层状, 矿化均匀, 连续性好, 大致沿接触带向岩体内部倾斜, 倾角 50~60°, 规模大者长 1 200 m, 倾向延深 500 m, 厚 60~80 m。 $\alpha(\text{Mo})$ 平均为 0.040%~0.044%, 单个样品的最高值可达 0.348%。 $\alpha(\text{Cu})$ 除个别单工程外, 均低于 0.11%, 一般为 0.003%~0.1%, 平均为 0.063%, 单个工程最

高者为 0.454%, 通常圈不出单独的工业矿体。

3.2 矿石特征

母山钼矿床的矿石矿物相对简单, 主要为黄铁矿、黄铜矿和辉钼矿; 非金属矿物主要为石英, 含少量方解石、钾长石、绿帘石、绿泥石及萤石。

矿石以典型的细网脉构造为特征。其细脉一般宽 1~3 mm, 呈网状, 脉体越细, 脉石矿物越少, 金属矿物越多, 辉钼矿愈富集。当脉宽小于 1 mm 时, 脉体基本为辉钼矿, 相反, 脉体愈粗, 矿石矿物愈分散。辉钼矿沿脉壁对称分布, 呈线纹状、断线状。浸染状矿化主要表现为辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿呈星点状分布在含矿脉体穿插的蚀变围岩中, 黄铁矿分布范围较广, 辉钼矿多出现于石英脉附近, 黄铜矿则远离含矿脉体分布。辉钼矿为鳞片状结构, 黄铁矿有浅黄色和深黄色 2 种, 前者自形-半自形, 后者为他形, 黄铜矿多与深黄色黄铁矿共生, 特别是在绿泥石和绿帘石发育时黄铜矿矿化较强。矿化的强弱与含矿脉体的密集程度有关。

3.3 围岩蚀变类型及分带

母山矿区的围岩蚀变类型有硅化、钾化、石英-绢云母化、青磐岩化。蚀变分带显示出以胜利茶场至母山断续分布的无矿石英核为中心的典型斑岩蚀变分带模式(图 4)。

① 卢欣祥. 1986. 河南省大别山地区的构造岩浆活动及中生代斑岩矿带. 大别山地区地质找矿研讨会论文集(地质矿产部大别山重点片). 56-67.

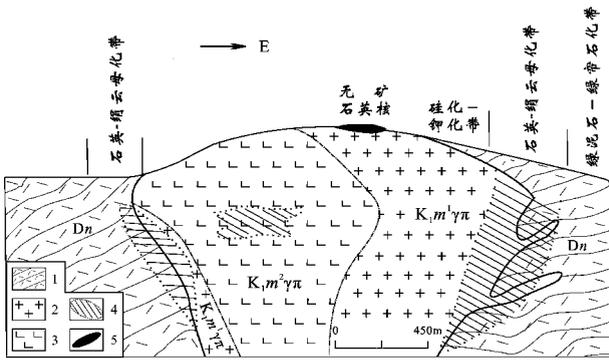


图4 母山斑岩型钼矿床矿化蚀变剖面示意图

(据8号勘探线剖面编,河南地质局第十地质大队,1980^①)

1—泥盆系南湾组(Dn);2—花岗斑岩($K_1m^1\gamma\pi$);3—多斑花岗斑岩($K_1m^2\gamma\pi$);4—矿化带;5—无矿石英核

Fig. 4 Section sketch map of mineralization and alteration of Mushan porphyry Mo deposit

1—Devonian Nanwan Formation (Dn); 2—Granite porphyry ($K_1m^1\gamma\pi$); 3—Plyspotted granite porphyry ($K_1m^2\gamma\pi$); 4—Mineralization zone; 5—Barren quartzite core

硅化 相当于斑岩矿床中心部位的次生石英岩,以石英岩和密集的石英脉形式产出,是岩浆期后热液最早期的产物,一般来说,这种早期硅化位于岩体顶部正上方(Seedorff et al., 2004)。石英岩呈等轴状或长条状沿母山-胜利茶场一线的山顶分布(图2),呈NNW向大致等距右形斜列断续延伸。石英岩中常包裹有花岗斑岩的岩屑或碎块,可见零星分布的黄铁矿,未见辉钼矿和黄铜矿。

钾长石化 以石英-钾长石细脉和网脉为特征,分布在岩体中或穿插在早期形成的石英岩中,基本未见矿化。

石英-绢云母化 分布在硅化-钾化带的外侧,集中在接触带内外两侧,以发育硫化物-石英细脉和网脉为特征,与辉钼矿矿化关系密切。

绿泥石-绿帘石化带 远离接触带分布,主要表现为围岩中出现绿泥石和绿帘石脉状蚀变,以及方解石-萤石细脉穿插,与黄铜矿化关系密切。

3.4 矿物组合及成矿多阶段性

脉体的分布和相互穿插关系(图5)以及矿物组合特征等显示出,母山矿区的热液成矿作用大致经历了4个阶段。

微量黄铁矿-石英岩化阶段 形成了无矿石英核,其矿物组合为石英及少量的黄铁矿,均一温度为280~370℃。

钾长石-石英脉阶段 主要矿物组合为石英和钾长石,均一温度为239.3~328.2℃。

多金属硫化物-石英脉阶段(钼矿化阶段) 其矿物组合主要为石英、黄铁矿、辉钼矿、黄铜矿、方铅矿和闪锌矿等,形成温度在260~280℃之间。

方解石-萤石脉阶段 其主要组成矿物为方解石和萤石,基本无硫化物,形成温度一般较低,在200℃以下。

在这4个阶段中,多金属硫化物-石英脉阶段是主成矿阶段。

3.5 成矿物理化学条件及成矿流体性质

本次研究的样品采自母山花岗斑岩体顶部的硅化无矿石英核、石英-钾长石脉以及辉钼矿-石英脉。对样品中石英内的流体包裹体进行了显微观察,均一温度和盐度测定。此项工作在中国地质大学国家重点实验室流体包裹体室完成。

无矿石英核中流体包裹体丰富(图6),多为浑圆状,少数为不规则状。包裹体最大的达20 μm,一般为6~10 μm;其类型有3种,即液相包裹体、富气相包裹体和含子矿物的三相包裹体。

液相包裹体和富气相包裹体的气相分数一般较高,为20%~50%;其均一温度为227~370℃(图7a),峰值为280~370℃;冷冻温度为-1.6~-6.5℃,据其冷冻温度估算的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为2.7%~9.85%;在均一温度-盐度-密度曲线图上,求得其流体密度为0.72~0.77 g/cm³。据此可知,其流体属中-低盐度低密度流体,具有岩浆初始超临界流体的一般特征(Ruska et al., 2004)。据其盐度和均一温度估算出其压力最大值为(2×10^7) Pa左右,估计其形成深度在700 m左右,属超浅成条件。

含石盐子矿物的三相流体包裹体加热后,其石盐子矿物消失的温度与气泡消失的温度非常接近,为226.2~275.5℃,说明这类包裹体捕获了正在沸腾的石盐饱和溶液^②。根据子矿物消失的温度估算出其盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为30%~35%,密度为1.04~1.05 g/cm³,属高盐度高密度流体。

① 河南地质局第十地质大队,1980.河南省罗山县涩港母山钼矿详细普查报告.内部资料。

② 武汉地质学院矿床教研室,1984.包裹体热力学讲义。



图 5 母山斑岩型钼矿床的多阶段矿化特征

a. 由早阶段(I)热液活动引起的硅化作用在岩体顶部形成了石英核,其表面褐铁矿化明显,但金属矿物很少,裂隙被钾长石-石英脉(II)充填,石英核代表了岩体顶部最早的非矿热液蚀变作用,也是斑岩侵入体中心上部的热液蚀变; b. 石英核内的钾长石-石英网脉,显示出钾长石化相对晚于硅化; c. 母山岩体西北缘内部节理裂隙发育,岩体发生较强的黄铁矿化,黄铁矿呈细粒浸染状和细脉浸染状,并可见 3~5 mm 厚的石英-辉钼矿细脉网脉(III); d. 斑岩体内的辉钼矿-石英脉(III)

Fig. 5 Mineralization multistage of the Mushan porphyry Mo deposit

a. Quartzite(I) core formed by silicification at the top of the Mushan intrusion, limonitized but little metal mineral, and its fracture filled by K-feldspar-quartz vein(II). Quartzite core is the products by early barren hydrothermal alteration at the top of center of the intrusion; b. K-feldspar-quartz network in quartzite core, reflecting K-feldspar alteration late than early silicification; c. Fractures developed in northwestern margin of the Mushan intrusion, fine-grained-veinlets disseminated pyrites and 3~5 mm thickness quartz-molybdenite veinlet(III) occurred in granite porphyry; d. Quartz-molybdenite veinlet(III) in granite porphyry

富气相包裹体与含石盐子矿物的三相包裹体共存的现象,是岩浆初始超临界流体在压力低于(1×10^8)Pa 条件下发生相分离的结果(Anthony et al., 2005),代表成矿流体的早期演化,标志着成矿作用正式启动。根据多相包裹体中石盐与气泡基本同时消失,估算出饱和和蒸气压,其均一瞬间流体压力为(5×10^6)Pa 左右,如此低的压力是岩浆体系由静岩压力环境转化为静水压力环境的压力值,反映了岩浆热液体系封闭与开放环境的交替变化。无矿石英核内石英中流体包裹体的特征显示出,水饱和含矿岩浆在上升到浅成-超浅成环境时,发生了强烈的第二次沸腾,形成了独立的含矿流体体系,热液硅化石英核通常代表热液流体的活动中心(Seedorff et al.,

2008),因此,随后发生的钾长石化和石英-辉钼矿化都围绕石英核分布。

石英-钾长石脉内的石英中流体包裹体丰富,体积较小,一般为 3~8 μm ,主要为液相和纯液相包裹体,气相分数较低。其均一温度为 239.3~328.2 $^{\circ}\text{C}$ (图 7b),峰值为 300~330 $^{\circ}\text{C}$;冷冻温度为 -1.2~-5.2 $^{\circ}\text{C}$;据冷冻温度估算的流体盐度 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 3.5%~8.12%,流体密度为 0.71~0.79 g/cm^3 。

辉钼矿-石英脉阶段石英内流体包裹体的均一温度为 260~280 $^{\circ}\text{C}$,显示出 Mo 等成矿元素的沉淀集中发生在相对较低的温度条件和较窄的温度区间,说明成矿流体体系温度的降低可能是矿质沉淀的重要机制。

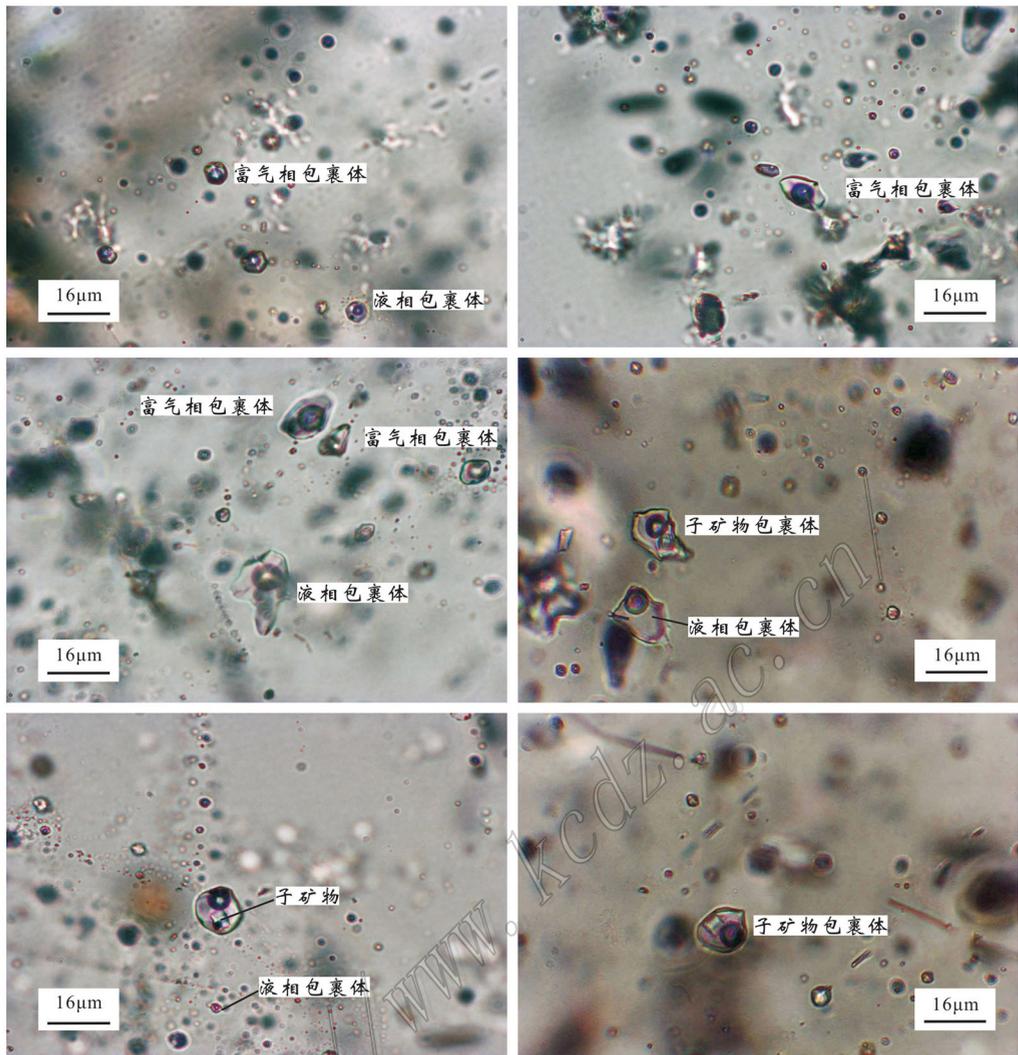


图6 母山花岗斑岩体顶部无矿石英核内石英中流体包裹体的特征

Fig. 6 Fluid inclusions in quartz of barren quartzite core on the top of the Mushan granite porphyry body

流体包裹体研究表明,母山钼矿床的成矿流体经历了由超临界均一相到高盐度高密度流体相与低盐度低密度流体相共存的演化过程。成矿流体形成于岩浆上侵至浅部时由压力骤减所引起的岩浆体系内挥发分的快速出溶作用,成矿流体体系上侵后温度的降低可能是矿质沉淀的主要原因。

母山钼矿床内金属硫化物的硫同位素特征反映其具有岩浆硫来源的特点。Hoefs(2009)的研究认为,一般含水花岗质熔体的 $\delta^{34}\text{S}$ 值在0附近,而与花岗质熔体相平衡的岩浆流体的 $\delta^{34}\text{S}$ 值与该熔体的接近,即也在0附近。黄铁矿、辉钼矿和方铅矿等是组成母山钼矿床矿石的主要硫化物,该矿床内黄铁矿

的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $0\sim-0.3\text{‰}$ (李诗言等,2006),即其成矿流体中的硫为还原S,未出现氧化态S,故不存在硫同位素分馏作用的影响,因此,该黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值($0\sim-0.3\text{‰}$)可代表成矿流体初始来源的硫同位素组成特征,该值与花岗质熔体的 $\delta^{34}\text{S}$ 值很接近,反映出成矿流体具岩浆流体性质。

综上所述,母山钼矿床显示出,以母山花岗斑岩体为中心的接触带细网脉型矿化和蚀变分带模式具有典型斑岩型矿床的矿化蚀变特征,是典型的斑岩型钼矿床。该矿床内石英中流体包裹体的特征及均一温度研究结果表明,成矿流体来自花岗质岩浆内挥发分的出溶,温度降低是矿质沉淀的主要原因。

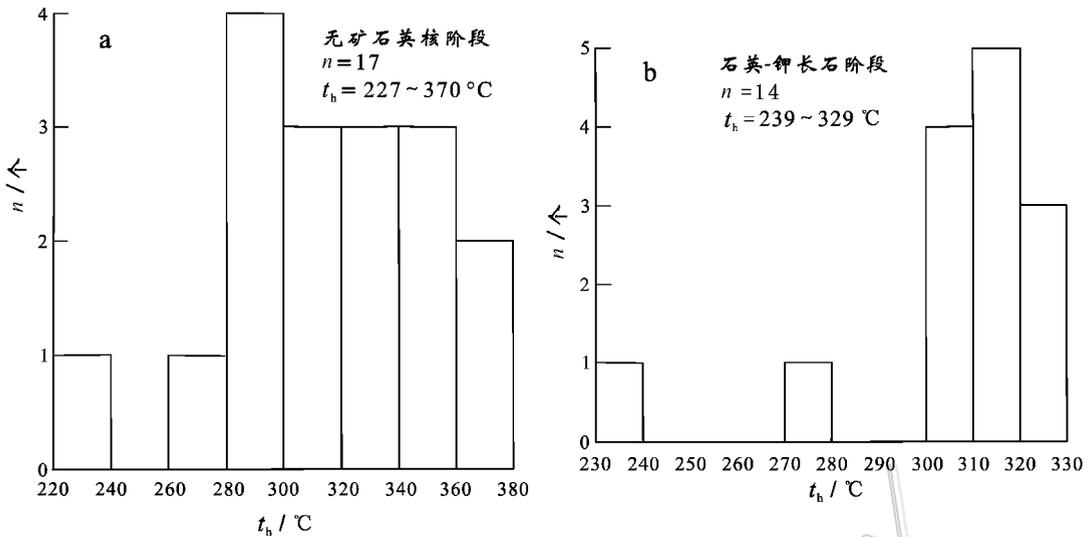


图 7 母山钼矿床内石英中流体包裹体的均一温度直方图

Fig. 7 Histograms of homogeneous temperature of fluid inclusions in quartz from the Mushan Mo deposit

4 锆石 U-Pb 同位素年代学

4.1 样品采集及分析方法

本研究用于锆石 U-Pb 同位素测年的样品采自母山岩体南西侧的花岗斑岩,样品较新鲜。锆石样品的分选在河北省区域地质调查队实验室进行,采用人工破碎重砂淘洗,从花岗岩样品中分离出锆石,然后在双目镜下挑纯,锆石样品的纯度达 99% 以上,无氧化,无污染。单矿物锆石样品的制靶、阴极发光照相及 U-Pb 同位素分析,在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。所使用的激光剥蚀系统为德国 Lamda Physik 公司的 GeoLas 2005 深紫外(DUV)193 nm UArF 准分子激光剥蚀系统,测试中所采用的激光束斑直径为 30 μm ,采用哈佛大学标准锆石 91500 作为外标校正,未知点的分析与标样分析交叉进行。测试用的 ICP-MS 为 Agilent 7500a 型。同位素比值数据处理采用 GLITTER(4.0 版)软件。

锆石 U-Pb 同位素分析之前,先在显微镜下用透射光和反射光观察锆石晶体的形态,并进行粒度统计,然后选择晶形好、包裹体和裂隙少的锆石颗粒进行阴极发光照相(图 8)。在样品测试过程中,尽量选择生长环带明显、无包裹体和裂纹的锆石晶体,或尽量避免锆石中的裂纹和包裹体。由于母山岩体的侵位时代较新,所测锆石的 ^{207}Pb 和 ^{235}U 含量低,

$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值的精度较差,因此,采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 值获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(Compton et al., 1992)。根据实测的 ^{204}Pb 采用 ComPbCorr # 3-151 程序对普通铅进行校正。应用 Isoplot 3.0 程序进行加权平均年龄的计算及谐和曲线的绘制。

4.2 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定结果

从母山花岗斑岩样品中挑选出的锆石多为无色,透明度良好,以短柱状为主,少数呈长柱状,多为自形晶,少数为半自形。对 26 颗晶形完好的锆石进行了统计,其长度一般为 160~480 μm ,宽 64~176 μm ,长宽比为 1.5:1~4.0:1,晶面完整、平直光滑。从锆石的阴极发光图像可观察到清晰的振荡型岩浆生长环带。

锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定结果列于表 1。锆石的 $\omega(\text{U})$ $\omega(\text{Th})$ 分别为 $(158 \sim 1027) \times 10^{-6}$ 和 $(148 \sim 674) \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.41~1.40,绝大多数大于 0.45,属于典型的岩浆成因锆石(Belousova 2002)。而且, Th、U 含量呈现较好的正相关关系,与典型岩浆锆石的特征一致。对 16 颗锆石的 16 个测点进行了测试。其中, 10-9、10-11 和 10-13 等 3 个测点因所获之 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 模式年龄较年轻而被剔除外,其余 13 个测点给出了在误差范围内基本一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 模式年龄,为 $(137 \pm 1) \sim (150 \pm 2)$ Ma,在锆石 U-Pb 谐和曲线上获得的年龄为 (142.0 ± 1.8) Ma (MSWD = 3.6)(图 9),此年龄值可代表母山花岗斑岩的侵位年龄。

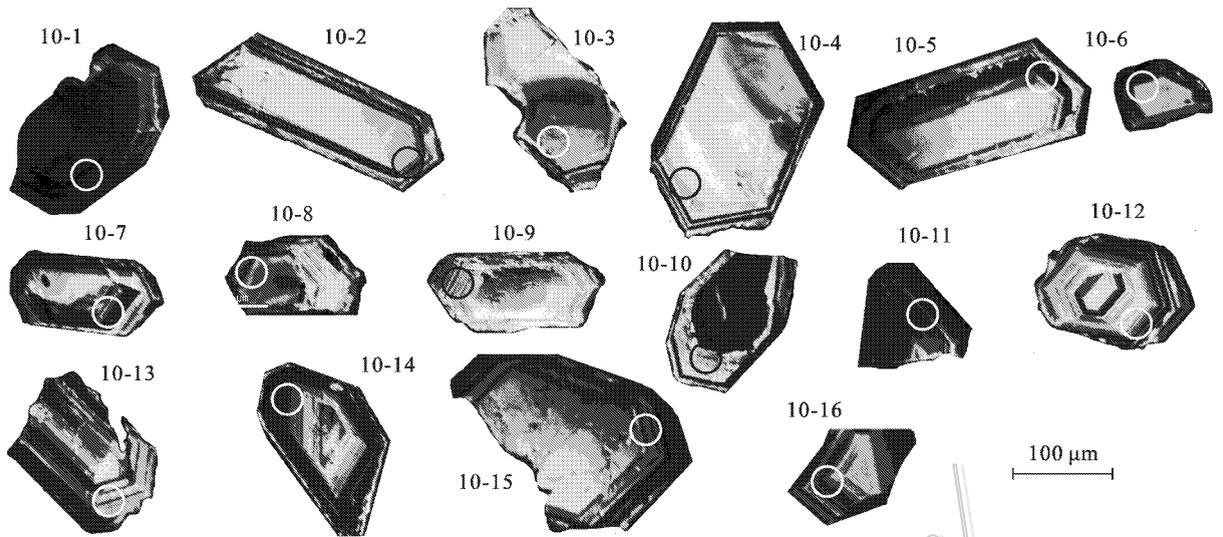


图8 母山花岗斑岩(XY-10号样品)内锆石的阴极发光图像

Fig. 8 CL image of zircons in granite-porphry from the Mushan Mo deposit

表1 母山花岗斑岩体内锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测试结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb dating for zircons from the Mushan granite porphyry

样品号	$\alpha(\text{B})10^{-6}$		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		ρ^r
	^{232}Th	^{238}U		比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄/Ma	1σ	年龄/Ma	1σ	年龄/Ma	1σ	
XY-10-1	412	864	0.48	0.0512	0.0012	0.1510	0.0034	0.0214	0.0001	0.0070	0.0001	143	3	137	1	140	3	0.9
XY-10-2	148	357	0.41	0.0512	0.0023	0.1563	0.0070	0.0225	0.0004	0.0083	0.0003	147	6	143	3	166	6	0.9
XY-10-3	332	444	0.75	0.0498	0.0016	0.1531	0.0048	0.0224	0.0002	0.0067	0.0001	145	4	143	1	136	3	0.9
XY-10-4	307	632	0.49	0.0510	0.0014	0.1596	0.0044	0.0227	0.0002	0.0073	0.0002	150	4	145	2	146	3	0.9
XY-10-5	130	254	0.51	0.0488	0.0025	0.1497	0.0073	0.0224	0.0002	0.0072	0.0002	142	6	143	1	145	4	0.9
XY-10-6	451	712	0.63	0.0499	0.0014	0.1556	0.0040	0.0226	0.0001	0.0071	0.0001	147	4	144	1	143	3	0.9
XY-10-7	273	317	0.86	0.0498	0.0020	0.1564	0.0064	0.0228	0.0003	0.0070	0.0002	148	6	146	2	142	3	0.9
XY-10-8	220	158	1.40	0.0524	0.0026	0.1664	0.0082	0.0235	0.0004	0.0071	0.0002	156	7	150	2	142	4	0.9
XY-10-9	674	578	1.17	0.0525	0.0013	0.1430	0.0037	0.0197	0.0001	0.0049	0.0001	136	3	126	1	98.3	1.6	0.9
XY-10-10	352	348	0.67	0.0533	0.0009	0.1645	0.0024	0.0224	0.0001	0.0073	0.0001	123	4	143	1	147	1	0.83
XY-10-11	204	437	1.01	0.0511	0.0017	0.1288	0.0044	0.0183	0.0002	0.0057	0.0001	148	5	117	1	115	2	0.9
XY-10-12	299	432	0.47	0.0499	0.0018	0.1564	0.0058	0.0228	0.0003	0.0078	0.0002	130	6	145	2	158	4	0.9
XY-10-13	433	718	0.69	0.0471	0.0022	0.1369	0.0067	0.0210	0.0002	0.0066	0.0002	145	4	134	1	132	4	0.9
XY-10-14	567	1027	0.60	0.0498	0.0014	0.1537	0.0040	0.0225	0.0002	0.0071	0.0001	144	3	143	1	144	2	0.9
XY-10-15	432	494	0.55	0.0493	0.0011	0.1526	0.0032	0.0224	0.0001	0.0072	0.0001	139	4	143	1	146	2	0.9
XY-10-16	214	333	0.87	0.0494	0.0015	0.1472	0.0043	0.0217	0.0002	0.0066	0.0001	312	12	138	1	133	3	0.9

5 讨论及结论

5.1 母山钼矿床成矿时代及构造动力学背景

母山钼矿床的成矿作用属于典型的以岩体为中心的斑岩型矿化作用,与花岗斑岩(成矿岩体)的成岩作用具有密切的关系。一般来说,花岗质岩浆作用的时间可跨越几百万年,而单个成矿岩体的就位、成矿和冷却等作用的持续时间一般只有(1~10)×

10^4 a (Vigneresse, 2007)。因此,根据成岩作用与成矿作用的这种近时性,可以认为,母山花岗斑岩体的成岩侵位时间代表了母山钼矿床的成矿时间,即母山钼矿床的成矿作用发生在(142±1.8) Ma,与其西部相距较近的肖畷钼矿床的成矿时代(142 Ma)非常一致(李厚民等, 2008),说明它们是同一时期的产物。

母山钼矿床的成矿时代相当于晚侏罗世—早白垩世,明显早于大别深成侵入岩带的灵山岩体(129.3

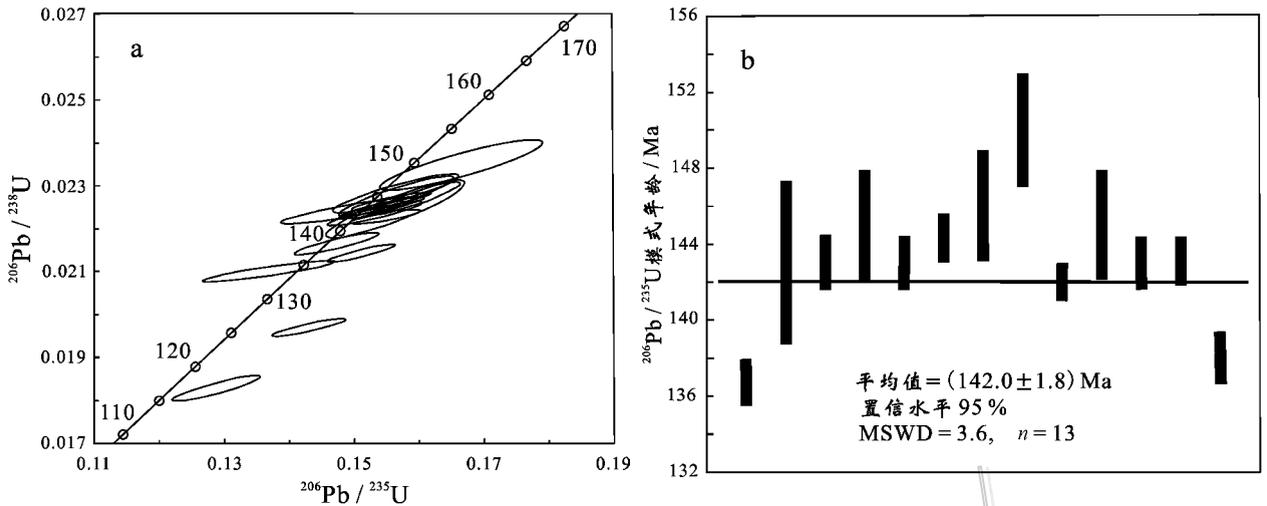


图 9 母山钼矿床花岗斑岩内锆石 U-Pb 谐和曲线 (a) 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 (b)

Fig. 9 U-Pb concordia (a) and weighted mean age plots (b) of zircons in granite porphyry from the Mushan Mo deposit

± 2.5) Ma, 周红升等, 2009) 和鸡公山岩体 (135.8 ± 1.3) Ma, 周红升等, 2009), 宝寨二长花岗岩体 (锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 (135.7 ± 1.7) Ma, 笔者将另文发表), 安徽金寨地区银山二长花岗岩 ($^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄为 $(136.8 \pm 1.6) \sim (130.4 \pm 1.2)$ Ma, 徐晓春等, 2009), 商城岩体 (锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 131~130 Ma, 黄丹峰等, 2010) 和北淮阳构造带的陈棚组火山岩 (锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 (133.1 ± 1.5) Ma, 笔者未发表数据), 商城地区金刚台火山岩 (锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (129 ± 2) Ma, 黄丹峰等, 2010), 白石坡花岗斑岩脉 (锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 (136.8 ± 1.2) Ma, 笔者未发表数据) 等, 比大别山地区早白垩世岩浆活动峰期 (~ 130 Ma, 张超等, 2008) 早约 10 Ma, 说明在大别造山带碰撞造山后的巨量酸性岩浆深成侵入-喷出作用的较早期, 存在一次与花岗质岩浆浅成活动有关的钼多金属成矿作用。而大别山北缘的河南省光山县千鹤冲斑岩钼矿床的成矿作用 (锆石 U-Pb 年龄为 (128.8 ± 2.6) Ma, 辉钼矿 Re-Os 同位素年龄为 (127.8 ± 1.7) Ma, 另文发表), 则代表了巨量酸性岩浆深成侵入-喷出作用较晚期的成矿事件。但是, 母山矿床与千鹤冲矿床的成矿岩体具有一致的岩石地球化学特征, 即轻、重稀土元素分异强烈、Eu 负异常较弱、低 Sr 低 Yb 及较高的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值和低 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, 反映出它们形成于相似的构造背景, 均为大别造山带碰撞造山后 (135 Ma 左右) 构造体制由挤压向伸展转换时期 (马昌前等, 2003) 加厚下地壳

深熔作用的产物, 其时限与东秦岭第二期成矿时限 (148~138 Ma) 基本一致 (Mao et al., 2008)。

大别山地区商城县的汤家坪 (5 个 Re-Os 模式年龄加权平均值为 (114.7 ± 1.8) Ma), 大银尖 (122.1 ± 2.4) Ma), 天目山钼矿床 (Re-Os 模式年龄为 (121.6 ± 2.1) Ma) (杨泽强, 2007) 和安徽金寨地区的银山钼矿床 (Re-Os 模式年龄为 113.5~112.6 Ma, 徐晓春等, 2009) 均为大别山地区第二期大规模成矿事件的产物, 其形成时代与东秦岭东沟斑岩钼矿床的时代一致 (Re-Os 年龄为 116.5~115.5 Ma, 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 112 Ma, 叶会寿等, 2006)。汤家坪、天目山成矿岩体 (杨泽强, 2009; 李法岭, 2008) 与东沟钼矿床成矿岩体 (叶会寿等, 2006) 均具有高 Yb 低 Sr、较强 Eu 亏损等特征, 为正常厚度陆壳部分熔融的产物。在该时期, 大别造山带已转化为受西太平洋构造域影响, 其构造-岩浆作用导致加厚地壳拆沉, 岩石圈的厚度减薄为正常厚度, 软流圈地幔小规模上涌, 导致小规模的低 Sr 高 Yb 型花岗质成矿岩体侵位, 以及发生钼多金属成矿作用。

综上所述, 大别山北缘地区存在 142~127 Ma 和 122~110 Ma 两期重要的成矿事件, 它们是印支期后大别造山带构造体制从挤压收缩向区域性伸展转化直至岩石圈强烈伸展减薄的地球动力学响应。

5.2 找矿意义

母山钼矿床是以花岗斑岩浅成侵入体为中心的典型的斑岩型钼矿床。尽管 20 世纪 80 年代就对其

进行了普查和勘探,但因受其品位和规模的限制,一直未被开采和利用。通过成矿作用特征的系统研究发现,母山斑岩钼矿床形成后很可能经历了较高度度的剥蚀,主要表现为:①成矿岩体出露面积大,内部相多斑花岗岩斑岩暴露地表,岩相带出露较齐全;②热液蚀变体系的无石英核沿母山岩体中脊大量出露,地表钾化带分布广,上部的硅化-绢云母化蚀变带剥蚀严重;③化探异常元素组合为 Mo-Cu 高温元素组合,Pb 元素异常分布局限(邱顺才,2006)。因此,较高的剥蚀水平是影响该矿床规模的重要因素。该矿床尽管经历了一定程度的剥蚀,但仍有部分被保存下来,因而,应在母山岩体西北缘剥蚀程度较低的地段开展进一步的找矿工作。

志 谢 在样品处理及测试过程中得到了赵来时、周练、胡兆初三位教授的帮助,审稿人也为本文提出了非常宝贵的修改意见,在此表示衷心感谢!

References

- Anthony E W J, Christoph A H and Zentrum E. 2005. Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits [J]. *Econ. Geol.*, 100(7): 1287-1312.
- Belousova E A, Griffin WL, O'Reilly S Y, et al. 2002. Igneous zircon trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 143: 602-622.
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies [A]. In: Henderson P, ed. *Rare earth element geochemistry* [C]. *Developments in Geochemistry*, 2: 63-114.
- Compton W, Willms L S, Kirschvink J L, et al. 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time scale [J]. *J. Geol. Soc. London*, 149: 171-184.
- Hoefs J. 2009. *Stable isotope geochemistry* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Huang D F, Luo Z H and Lu X X. 2010. Zircon SHRIMP U-Pb age and tectonic implications of Jingangtai volcanic rocks in north margin of Dabie Mountain [J]. *Earth Science Frontiers*, 17(1): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- Klemm L M, Pettker T and Heinrich C A. 2008. Fluid and source magma evolution of the Questa porphyry Mo deposit, New Mexico, USA [J]. *Mineralium Deposita*, 43: 533-552.
- Li F L. 2008. Characteristics of rock bodies in Tianmushan with its Mo mineralization, Southern Henan [J]. *Mineral Resources and Geology*, 22(2): 111-115 (in Chinese with English abstract).
- 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 to Mesozoic magmatic activities in the East Qinling-Dabie Mountains [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(11): 1468-1477 (in Chinese with English abstract).
- Li S Y, Ma H W and Han C Q. 2006. Analysis on origin of porphyry molybdenum deposits from Dabie (northern slope) [J]. *Express Information of Mining Industry*, (7): 48-50 (in Chinese).
- Li X M and Foland K A. 1995. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ cooling ages and fission track dating of Dabie orogen [J]. *Science in China (Ser. B)*, 25(12): 1086-1092 (in Chinese).
- Liu X C, Jahn B M, Liu D Y, et al. 2004. SHRIMP U-Pb zircon dating of a metagabbro and eclogites from western Dabieshan (Hong'an Block), China, and its tectonic implications [J]. *Tectonophysics*, 394: 171-192.
- Luo Q Y and Li J L. 2009. The geological features and metallogenesis of Qian'echong copper-molybdenum polymetallic deposit in Guangshan County, Henan Province [J]. *Mineral Resources and Geology*, 23(6): 495-499 (in Chinese with English abstract).
- Ma C Q, Yang K G and Ming H L. 2003. Evidence of granite on the shift of Mesozoic crust of Dabie Mountains from compression to extension [J]. *Science in China (Ser. D)*, 33(9): 817-826 (in Chinese with English abstract).
- Ma H W. 2008. Geology of porphyry molybdenum (tungsten, copper) deposits in the Dabeishan, eastern Qingling [J]. *Geology and Prospecting*, 41(1): 50-54 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Xie G Q and Bierlein F. 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 4607-4626.
- Qiu S C. 2006. Geological characters and prospecting direction of the Mushan molybdenum deposit, Henan Province [J]. *Mineral Resources and Geology*, 20(4-5): 403-408 (in Chinese with English abstract).
- Rui Z Y, Zhang H T and Chen R Y. 2006. Problems of porphyry copper deposits [J]. *Mineral Deposits*, 25(4): 491-500 (in Chinese with English abstract).
- Ruska B G, Reed M H, Dilles J H, Klemm L M and Heinrich C A. 2004. Compositions of magmatic hydrothermal fluids determined by LA-ICP-MS of fluid inclusions from the porphyry copper-molybdenum deposit at Butte, MT [J]. *Chemical Geology*, 210: 173-199.
- Seedorff E and Einaudi M T. 2004. Henderson porphyry molybdenum system, Colorado: I. Sequence and abundance of hydrothermal mineral assemblages, flow paths of evolving fluids, and evolutionary style [J]. *Econ. Geol.*, 99: 3-37.
- Seedorff E and Einaudi M T. 2008. Henderson porphyry molybdenum system, Colorado: II. Decoupling of introduction and deposition of metals during geochemical evolution of hydrothermal fluids [J]. *Econ. Geol.*, 103(5): 939-956.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and process [A]. In: Sauder AD and Norry M J, eds. *Magmatism in the ocean basin* [C]. *Geol. Soc. Spe. Pub.*, 42: 313-345.
- Vigneresse J L. 2007. The role of discontinuous magma input in felsic

- magma and ore generation[J]. *Ore Geology Review*, 30: 181-216.
- Wang G C and Yang W R. 1998. Uplift evolution during Mesozoic-Cenozoic of the Dabie orogenic belt: Evidence from the tectono-chronology[J]. *Earth Science*, 23(5): 461-467 (in Chinese with English abstract).
- Xu X C, Lou J W and Lu S M. 2009. Re-Os ages of molybdenum-lead-zinc polymetallic deposits and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of related magmatic rocks in Yinshan area, Jinzhai, Anhui Province[J]. *Mineral Deposits*, 28(5): 621-632 (in Chinese with English abstract).
- Yang K G, Ma C Q, Xu C H and Yang W R. 1999. Difference in uplift between Beihuaiyang belt and Dabie orogenic belt[J]. *Science in China (Ser. D)*, 29(2): 817-826 (in Chinese).
- Yang Z Q. 2007. Re-Os isotopic ages of Tangjiaping molybdenum deposit in Shangcheng County, Henan and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 26(3): 289-295 (in Chinese with English abstract).
- Yang Z Q. 2009. Geochemistry and tectonic setting of the Tangjiaping Mo-riched granite porphyry in the Northern Dabie Mountains[J]. *Geological Review*, 55(5): 746-752 (in Chinese with English abstract).
- Ye H S, Mao J W, Li Y F. 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).
- Zhang C and Ma C Q. 2008. Large-scale late Mesozoic magmatism in the Dabie mountain: Constraints from zircon U-Pb dating and Hf isotopes[J]. *Journal Mineralogy and Petrology*, 28(4): 71-79 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Wang Y, Li C D, Wang Y L, Jin W J and Jia X Q. 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249-2269 (in Chinese with English abstract).
- Zhou H S, Su H and Ma C Q. 2009. Formation-age, tectonic setting and ascertainment of A-type granite on the Lingshan pluton in Dabie orogenic belt[J]. *Journal of Xinyang Normal University*, 22(2): 222-226 (in Chinese with English abstract).
- 质, 22(2): 111-115.
- 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.
- 李诗言, 马宏卫, 韩存强. 2006. 大别山(北坡)斑岩型钼(铜)矿床成因初析[J]. *矿业快报*, (7): 48-50.
- 李学明, Foland K A. 1995. 大别造山带冷却年龄的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和裂变径迹年龄测定[J]. *中国科学(B辑)*, 25(12): 1086-1092.
- 罗齐云, 李吉林. 2009. 河南光山县千鹤冲铜钼多金属矿床地质特征及成因浅析[J]. *矿产与地质*, 23(6): 495-499.
- 马昌前, 杨坤光, 阴厚利. 2003. 大别山中生代地壳从挤压转向伸展的时间--花岗岩的证据[J]. *中国科学(D辑)*, 33(9): 817-826.
- 马宏卫. 2008. 东秦岭大别山段斑岩型钼(铜)矿床地质特征[J]. *地质与勘探*, 41(1): 50-54.
- 邱顺才. 2006. 河南省母山钼矿地质特征及找矿方向[J]. *矿产与地质*, 20(4-5): 403-408.
- 芮宗瑶, 张洪涛, 陈仁义. 2006. 斑岩铜矿研究中若干问题探讨[J]. *矿床地质*, 25(4): 491-500.
- 王国灿, 杨巍然. 1998. 大别造山带中生代隆升作用的时空格局--构造年代学证据[J]. *地球科学*, 23(5): 461-467.
- 徐晓春, 楼金伟, 陆三明. 2009. 安徽金寨银山钼-铅-锌多金属矿床 Re-Os 和有关岩浆岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测定[J]. *矿床地质*, 28(5): 621-632.
- 杨坤光, 马昌前, 许长海, 杨巍然. 1999. 北淮阳构造带与大别造山带的差异性隆升[J]. *中国科学(D辑)*, 29(2): 817-826.
- 杨泽强. 2007. 河南商城县汤家坪钼矿辉钼矿铼-钨同位素年龄及地质意义[J]. *矿床地质*, 26(3): 289-295.
- 杨泽强. 2009. 北大别山商城汤家坪富钼花岗岩斑岩体地球化学特征及构造环境[J]. *地质论评*, 55(5): 746-752.
- 叶会寿, 毛景文, 李永峰. 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.
- 张超, 马昌前. 2008. 大别山晚中生代巨型岩浆活动的启动: 花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约[J]. *矿物岩石*, 28(4): 71-79.
- 张旗, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. *岩石学报*, 22(9): 2249-2269.
- 周红升, 苏华, 马昌前. 2009. 灵山岩体的形成时代、构造背景及其 A 型花岗岩的厘定[J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 22(2): 222-226.
- 资源导刊编辑部. 2009. 安徽金寨找到特大型钼矿床[J]. *资源导刊*, (8): 46.

附中文参考文献

- 黄丹峰, 罗照华, 卢欣祥. 2010. 大别山北缘金台火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及构造意义[J]. *地学前缘*, 17(1): 1-9.
- 李法岭. 2008. 河南南部天目山岩体特征及其钼矿化[J]. *矿产与地*