编号:0258-7106(2017)06-1316-17

福建平和包围山钼矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义^{*}

潘天望¹² 张 达^{1**} 沈荣泉³ 陈泉流¹ 袁 远¹ 高孝巧¹ 狄永军¹

(1中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083;2广西遥感中心,广西南宁 530023;
 3福建省闽西地质大队,福建厦门 361012)

摘 要 通过对平和包围山钼矿床成矿岩体、赋矿火山岩及辉钼矿开展同位素年代学研究,结果表明:包围山 深部花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(98.1±1.1) Ma,容矿围岩-石帽山群底部凝灰熔岩成岩年龄为(104.6±1.1) Ma 矿体中辉钼矿的 Re-Os 同位素模式年龄为(95.2±1.5) Ma。辉钼矿中 Re 的含量指示成矿来源与壳幔 物质混合或幔源物质进一步演化有关。结合矿床地质特征及已有的研究成果,笔者认为包围山钼矿床的形成可能 与 125~92 Ma 古太平洋板块的俯冲作用机制有关。受该期区域伸展构造背景的影响,上杭-云霄成矿带下地壳或上 地幔部分熔融诱发了平和包围山一带岩浆-热液-成矿事件。

关键词 地球化学, 浩石 U-Pb 年龄; Re-Os 同位素年龄; 包围山钼矿床 福建 中图分类号: P618.65 文献标志码; A

Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating of Baoweishan molybdenum deposit in Pinghe County, Fujian Province, and its geological significance

PAN TianWang^{1,2}, ZHANG Da¹, SHEN RongQuan³, CHEN QuanLiu¹, YUAN Yuan¹, GAO XiaoQiao¹ and DI YongJun¹

(1 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Remote Sensing Center of Guangxi, Nanning 530023, Guangxi, China; 3 Western Fujian Geological Party, Xiamen 361012, Fujian, China)

Abstract

Based on isotopic chronological study of the ore-forming rock body, ore-bearing volcanic rocks and molybdenite from the Baoweishan molybdenum deposit in Pinghe County, the authors conducted LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and revealed that the age of the Baoweishan porphyry-like granite is (98.1 ± 1.1) Ma, and the age of the tuff-lava in the bottom of the "Shimaoshan Group" formation, which is the host rock of this deposit, is (104.6 ± 1.1) Ma. Re-Os dating of molybdenite from the orebodies yielded a model age of (95.2 ± 1.5) Ma. These age data indicate that the Baoweishan molybdenum deposit was formed at the early stage of late Cretaceous. Furthermore, the rhenium values of molybdenum samples from the deposit indicate that the mineralization is genetically closely related to the crust-mantle or the further evolution of the mantle. Based on geological features of the Baoweishan molybdenum deposit and the research results in this study, the authors consider that this deposit was probably generated in an extensional setting related to the subduction process of the Paleo-Pacific

^{*} 本文得到中国地质调查局地质调查(编号:12120113089600,12120114028701)项目资助

第一作者简介 潘天望,男,1988年生,硕士生,构造地质学专业。Email:pantianwang-cugb@163.com

^{**}通讯作者 张 达,男,1967年生,教授,博士生导师,主要从事构造地质学及成矿规律研究。Email:zhangda@cugb.edu.cn 收稿日期 2016-06-28;改回日期 2017-08-10。秦思婷编辑。

plate beneath the Eurasian continent during $125 \sim 92$ Ma, which triggered the partial melting of the lower crust or the upper lithospheric mantle to form the magmatic-hydrothermal ore-forming event in Baoweishan area along the Shanghang-Yunxiao ore-forming belt.

Key words: geochemistry, zircon U-Pb age, Re-Os age, Baoweishan molybdenum deposit, Fujian Province

钼矿作为中生代在福建省广泛分布的优势矿种 之一 具有较大的找矿前景。近年来上杭罗卜岭铜 (钼)矿床、永定山口钼矿床、清流行洛坑钨钼矿床、 连城铜坑钼矿床、马坑钼矿床、漳平北坑场钼矿床等 矿床的相继发现 使得闽西南坳陷成为福建省钼矿 较为集中的地区。同时,闽东火山坳陷带和闽西北 隆带也相继发现一批小-中型钼矿床 已报道并经过 研究的钼矿床包括霞浦大湾钼铍矿床(赵芝等, 2012)周宁咸格钼矿床(王登红等,2010)坪地钼矿 床、上西坑钼矿床(王翠芝等,2013)等,说明福建省 具有较大的钼矿找矿潜力。前人对上述钼矿床进行 了成岩成矿年龄、成矿物质来源、成矿动力学背景等 方面的研究(张家箐等,2008;罗锦昌等,2009;张达 等 2010;张承帅等,2012;梁清玲等,2013;王翠芝 等 2013 汪少怀等 2015) 综合已有的研究成果,认 为钼矿床(点)多沿着中生代火山断陷盆地边缘分 布 辉钼矿成矿与中酸性(偏碱性)岩浆活动关系密 切 雷广文,2010),大多分布于中生代花岗闪长岩、◎ 花岗闪长斑岩、二长花岗岩、碱长花岗斑岩、花岗斑 岩、石英斑岩和花岗岩岩株等内外接触带中、呈网脉 状、细脉-浸染状、条带状、团块状、透镜状及似层状 等产出(福建省地质矿产勘查开发局 1998)。除早 侏罗世火山岩中产出的永定山口钼矿外 ,福建中生 代火山岩区中型以上规模的钼矿床鲜有报道,且赋 存于晚白垩世石帽山群火山岩中的钼矿床在福建乃 至华南地区也较为少见。

包围山钼矿床主要位于上杭-云霄构造岩浆岩 带(陶奎元等,1998)东南段早白垩世晚阶段石帽山 群火山岩中,为层控-热液叠加改造型钼多金属矿床 (沈荣泉,2012;王献忠,2014),且有望达到大-中型 规模。由于该矿床成矿时代及与之相关的成矿围岩 及岩体时代尚不明了,制约了对该矿床成因及其形 成背景的认识,且一定程度上限制了火山岩区钼矿 找矿工作的深化。在野外调查的基础上,本文对平 和包围山钼矿床容矿围岩和深部花岗斑岩进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb定年研究,结合矿区辉钼矿 Re-Os 同位素年龄的测试,获得了包围山钼矿床成岩成矿 年龄,并在此基础上分析了矿床成因和成矿物质来 源。通过对比分析早白垩世晚期(约125 Ma)以来 上杭-云霄成矿带平和火山盆地大小矾山-包围山地 区与上杭火山盆地紫金山矿田铜、钼等多金属矿床 的岩浆-成矿活动时空规律和动力学背景,进而探讨 了包围山钼矿床形成的动力学背景及地质意义。

1 区域地质概况

华南地区中生代以来发生了多期次的构造岩浆 活动,其中,中生代以来的火山-侵入岩活动尤其明 显 形成了 NE 向的浙闽粤火山断陷带以及以 NW 向上杭-云霄断裂带为代表的火山-侵入岩带(图 1a)。NW 走向的火山岩带由 3 个中生代火山盆地 组成,其中。上杭地区紫金山火山盆地中铜金矿田产 出了一套典型的高硫浅成低温热液型-斑岩型成矿 系统(张德全等,2001;黄仁生,2008;邱小平等, 2010)。上杭-云霄构造岩浆岩带的永定地区以及平 和地区还存在 2 个规模较大的中生代火山岩出露 区,并伴随有一定规模的铜(钼)多金属矿床及矿化, 是寻找"紫金山式"矿床的重要区域(林东燕等, 2011 汪森等 2016)。上杭-云霄成矿带作为福建省 重要多金属成矿带之一,中生代广泛分布有铜、金、 铁、钼等金属矿产及其他多金属异常和矿化,且各类 型矿床或矿点基本分布于上杭紫金山、永定以及平 和 3 大火山盆地中(图 1b)。

早白垩世沿上杭-云霄断裂带北西段的上杭地 区发育 NW 走向的上叠式火山盆地,覆盖在华力西 期—印支期坳陷盆地的地层之上。该火山盆地北东 侧 晚侏罗世花岗岩及早白垩世中深成侵入岩-斑岩-潜火山岩与火山岩组合成一套完整的晚中生代火 山-侵入岩浆系统,构成紫金山-罗卜岭金银铜(钼)矿 集区(或称紫金山矿田)的地质背景。已发现的矿床 类型包括高硫浅成低温热液型铜金矿床,中低温热 液型铜、金(银)矿床和斑岩型铜(钼)矿床等。永定 火山盆地位于上杭-云霄构造岩浆岩带的中部,为早 侏罗世火山盆地,铜、钼矿床主要分布于早侏罗世火 山盆地内或边缘一带,受火山构造与区域构 造控制,成因类型为火山-次火山热液型或斑岩型。



图 1 包围山钼矿区域地质简图(a,据韦德光等,1997 修改)与福建上杭-云霄成矿带中生代火山盆地分布示意图(b,成矿带的划分据陶奎元等,1997 修改;火山岩和侵入岩的划分据地矿部福建省地质矿产勘查开发局,1998 修改) 1-白垩纪火山岩;2--侏罗纪火山岩;3--白垩世侵入岩;4--晚侏罗世侵入岩;5--断层;6--复式背斜;7--主要矿床(点);8--主要铜

(钼)矿床(点); 9—上杭-云霄成矿带界线; 10—火山盆地/矿集区; 11—省界

Fig. 1 Tectonic location of the Baoweishan molybdenum deposit (a, after Wei et al., 1997) and regional geological map of Mesozoic volcanic basin along the Shanghang-Yunxiao mineralization belt, Fujian Province (b, after Tao et al., 1998; Fujian Exploration Authorities of Ministry of Geology and Mineral Resources, 1998)

1—Cretaceous volcanic rocks; 2—Jurassic volcanic rocks; 3—Cretaceous intrusive rocks; 4—Late Jurassic intrusive rocks; 5—Fault; 6—Anticlinorium; 7—Major deposit (ore spot); 8—Major Cu (Mo) deposit (ore spot); 9—Boundary of Shanghang-Yunxiao mineralization belt; 10—Volcanic basins/mineralization area; 11—Provincial boundary 以永定山口钼(铜)矿、永定上下湖铜(钼)小型矿床 最具代表性。平和火山盆地位于上杭-云霄构造岩 浆岩带的南东段,矿化分布明显受火山-侵入岩活动 及火山构造、区域性线性构造的控制。主要矿床类 型有斑岩型铜(钼)矿(钟腾式),火山-次火山热液型 铜、金多金属矿(紫金山式),层控-热液叠加改造型 钼矿床(包围山式)等。

包围山钼矿床位于东南部的平和县火山盆地 内,构造上位于华夏板块闽东燕山期陆内造山带西 南缘,福安-南靖(NE向)深断裂与上杭-云霄(NW 向)深断裂交汇部位(图1a)。矿床所在的平和凹陷 区处于崎坑复合式火山机构环状组合体之中(图 1b)。区域上出露地层由古至新有中生界侏罗系下 统梨山组、侏罗系上统南园组、白垩系下统石帽山群 下组、上组。区域与成矿相关的侵入岩浆组合主要包 括晚侏罗世与钨、锡、铅锌、稀土元素相关的花岗闪长 岩-花岗斑岩(石英正长斑岩)组合;早白垩世 与铜、钼矿相关的闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩-花 岗岩-花岗斑岩(石英正长斑岩)组合(沈荣泉 2012)。

2 矿床地质特征

包围山矿区出露地层主要为下白垩统石帽山群 陆相碎屑沉积-火山喷发建造,以及第四系冲洪积 层。石帽山群按岩性和喷发旋回可分为2组3段: 下组下段仅出露于矿区北东部,主要由紫红色砂砾 岩等岩石组成;下组上段在矿区大面积出露,由流纹 质含角砾凝灰岩、流纹岩和英安质晶屑凝灰熔岩等 岩石组成;上组下段主要出露在包围山西部,主要岩 性为灰色粉砂岩及细砂岩夹泥岩。上述岩性层位的 产状以包围山南麓为中心,向四周倾斜,构成一火山 穹窿构造(图2)。

包围山火山穹窿构造位于北西向、近东西向及 近南北向断裂构造复合部位,其主要标志包括: ①凝灰质粉砂岩及火山岩呈环状外倾;②发育环 状、放射状断裂;③隐爆角砾岩的存在;④绢英岩化 蚀变呈椭圆状,自中心向外减弱;⑤磁异常呈环状, 激电、土壤测量异常呈椭圆状,元素浓集中心与穹窿 核部基本一致;⑥钼矿体与穹窿核部相一致,矿化 体范围与穹窿范围大体吻合(沈荣泉,2012)。地表 构造裂隙带发育,其中以北西向为主,次为近东西向 裂隙,少量走向北东。局部近南北向裂隙也较发育 (图2)。火山穹窿构造裂隙带为矿区主要的导矿和 储矿构造,钻孔中所揭露的几条高角度裂隙均含辉 钼矿和黄铁矿。

燕山晚期研究区侵入岩浆活动强烈,石英正长 斑岩及花岗斑岩等中酸性岩呈小岩墙、岩脉状产出。 其中,石英正长斑岩出露于矿区的东北部,为 NW 向 展布;花岗斑岩出露在矿区的中西部及包围山火山 穹窿深部,主要在尖岽火山口附近呈岩脉状产出;石 英斑岩呈脉状出露于矿区西北部。

包围山矿床主要矿体位于氧化带中,其次为混 合过渡带。原生矿体明显变薄,品位亦变低。区内 初步圈定4个钼矿体10层矿及3个低品位钼矿体8 层矿,主要由钻孔ZK1和ZK2控制(图3),已探明钼 金属量14.08万吨,可达大型规模(王献忠,2014)。 其中,ZK1圈出表外矿17层,总厚度105.13m,钼平 均品位0.028%;ZK2共圈出表外矿19层,总厚度 127.30m,钼品均品位0.031%。各矿体具有共同的 特点:钼矿体赋存于石帽山群下组上段火山穹隆构 造裂隙带的凝灰岩、角砾凝灰熔岩等岩石中,呈环状 分布,矿体顶底板的岩性基本相同,无明显的岩性标 志层,矿体形态呈透镜状、似层状,产状较平缓。

根据肉眼识辨及物相分析,包围山矿区矿石的 自然类型主要为氧化矿石、混合矿石和硫化矿石 3 类。金属矿物以黄铁矿为主,次为辉钼矿等;次生矿 物主要有褐铁矿和赤铁矿等(王献忠,2014)。矿区 内地表风化强烈,钼矿化肉眼难以辨别,钻孔中钼矿 化也少见,仅在少量孔段的石英脉侧、闪长玢岩脉中 见有辉钼矿呈细脉浸染状、细脉状分布。

矿石结构以显微鳞片结构为主;矿石构造以细脉条带状构造为主,细脉浸染状构造次之,少量斑 杂-浸染状构造。脉石矿物以石英、斜长石、钾长石、 萤石为主,次为绢云母、绿泥石等。

矿区热液蚀变发育,以绢英岩化为主,蚀变带围 绕包围山火山穹窿呈哑铃状分布,垂向上自下而上 分为硅化带、绢云母化带、绿泥石及绿帘石化带(王 献忠 2014)。绢英岩脉主要充填于火山口断裂面及 次生密集裂隙带中。绢英岩化带由次生石英及绢云 母组成,主要位于深部斑岩体外围,且自内向外逐渐 减弱,过渡为黄铁矿化、绿泥石化、钠长石化带,并转 为绢云母化带和硅化带,局部还可见绿帘石化、高岭 土化等蚀变。黄铁矿化、绢英岩化、钠长石化等与钼 矿化关系密切,且蚀变越强,矿化越好,矿化主要沿 裂隙两侧的围岩分布。



Q—Quatrnary sediments: $K_1 sh_2^a$ —Lower member of upper Formation of Shimaoshan Group: $K_1 sh_1^b$ —Upper member of lower Formation of Shimaoshan Group: $\gamma\pi$ —Granite-porphyry: $q\pi$ —Quartz porphyry: $\xi_{0\pi}$ —Quartz syenite porphyry: λK —Rhyolite: $\rho\pi K$ —Plagiophyre: Cbr—Cryptoexplosive breccia

3 样品的采集及分析方法

3.1 样品测试及结果

锆石选自包围山 ZK702 中孔深约 219 m 处的花 岗斑岩(ZK702-b1),以及石帽山群下组上段底部与

花岗斑岩接触带附近的英安质晶屑凝灰熔岩 (ZK2701-b1),在ZK2701中孔深约417.2 m。对这 2种岩性作描述如下。

(1)花岗斑岩:浅肉红色,斑状结构,块状构造;
斑晶含量约8%~10%,主要为钾长石(<5%),石英
(<3%)及斜长石(<2%),斑晶粒径在0.1~1.2 mm



图 3 包围山钼矿勘探线剖面图(据王献忠,2014) 1—石帽山群下组上段; 2—流纹岩; 3—花岗斑岩; 4—断层; 5—闪长玢岩脉; 6—Mo矿体: 7—Mo矿化体; 8—钻孔及编号 Fig. 3 Geological section along the exploration line of the Baoweishan molybdenum deposit (after Wang, 2014) 1—Upper member of lower Formation of Shimaoshan Group; 2— Rhyolite; 3—Granite—porphyry; 4—Fault; 5—Diorite-porphyrite; 6—Mo orebody; 7—Barren body; 8—Drill hole and its serial number

之间;基质与斑晶成分一致,主要为钾长石(50%)、 石英(<20%)、斜长石(<10%),少量白云母(< 2%);副矿物主要为黄铁矿(<2%)。受热液蚀变作 用影响,少数石英、钾长石发生膨凸重结晶作用(纪 沫等,2008),呈似斑状结构,斑晶边缘被基质矿物穿 插,或斑晶裂隙发育,被细粒石英、方解石充填。钾 长石蚀变较强,多发生黏土化,个别交代斜长石呈半 包含结构。斜长石半自行宽板状,发育聚片双晶、卡 钠复合双晶,晶面上见次生绢云母,常被石英交代 (图 4a、b)。白云母鳞片状,干涉色鲜艳,沿长英质矿 物边部分布。

(2)英安质晶屑凝灰熔岩:浅灰色、浅肉红色, 英安质晶屑凝灰熔岩结构,块状构造;主要由晶屑 (15%)、火山灰(85%),以及少量岩屑等(<1%)组 成(图 4c、d);副矿物为主要为黄铁矿(<2%)。火山 碎屑物粒度在 0.1~2 mm 之间,呈棱角-尖棱角状。 晶屑成分主要为斜长石,其次为钾长石、少量石英, 岩屑为凝灰岩。其中,斜长石板柱状,发育卡钠复合 双晶,已绢云母化呈交代残余;钾长石已高岭土化, 表面污浊。镜下裂隙发育,被细粒石英、方解石充填 (图 4d),脉宽 0.5~1 mm,辉钼矿、黄铁矿发育,少数 脉宽在 1 mm 以上的硅化脉或萤石脉中的辉钼矿沿 其两侧与围岩接触带分布,说明后者主要受高温热 蚀变的影响(图 4c、e、f)。

钻孔中选取1件辉钼矿样品进行 Re-Os 同位素

模式年龄研究,辉钼矿呈铅灰色,半自形叶片状或不规则粒状集合体,粒径一般在0.5~15 mm之间,辉 钼矿在硅化脉、萤石脉中或两侧呈细脉浸染状、细脉 状分布,基本与硅化脉、萤石岩脉同时或稍晚晶出 (图 4c、e、f)。

锆石与辉钼矿的分选由河北省廊坊市地科勘探 技术服务有限公司完成,锆石的挑选、制靶和阴极发 光(CL)成像由北京锆石领航科技有限公司实验室完 成。锆石 U-Pb 测年分析由天津矿产研究所实验室 利用 LA-ICP-MS 方法完成,具体测试原理及仪器配 置和实验流程详见 Andersen(2002)和李怀坤等 (2010)。采用 Andersen(2002)方法对普通 Pb 进行 校正。由于地球样品自~0.8 Ga 以来放射性衰变引 起的²⁰⁷Pb/²³⁵U比值的增幅较小,年轻锆石的²⁰⁷Pb 丰度较低而难以测量,并且该类锆石中常含有低的 不等量的普通 Pb, 使得年轻锆石在常规的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U谐和曲线上经常出现偏离谐和 线的情况(Yuan et al., 2004), 且目前 LA-ICP-MS 方法尚无法准确获得²⁰⁴Pb的含量,故对无法获得 ²⁰⁶Pb/²³⁸U谐和年龄的样品,采用 Tera-Wasserburg 谐和图解(Tera et al., 1972)处理,即²³⁸U/²⁰⁶Pb-²⁰⁷Ph/²⁰⁶Pb谐和线,将所有测试结果不进行普通 Pb 扣除而直接投图,形成一条不一致线,不一致线与谐 和线的下交点代表样品的形成年龄,而上交点则为 地球的年龄。采用 TE-MORA 作为外部锆石年龄标 准,数据处理采用 ICP-MS Data Cal 4.3 程序(Liu et al., 2008), Tera-Wasserburg 图解的生成及处理采用 Isoplot 软件完成(Ludwig, 2001)。利用 NIST612 玻 璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。 测试结果见表1。

3.2 锆石 U-Pb 年代学

凝灰熔岩样品(ZK2701-b1)中分选出的锆石多 为半自形-自形,短柱状晶体,粒径一般在 50~100 µm之间,长宽比为1:1~2:1(图 5a);花岗斑岩样品 (ZK702-b1)锆石呈自形长柱状或短柱状,裂纹发育, 粒径一般在 60~200 µm之间,长宽比在1.5:1~4:1 之间(图 5b)。CL 图像可见两类锆石大部分内部具 有较清晰的韵律环带和条带结构,锆石 Th/U 比值 均变化于 0.40~1.13(Th/U≥0.4),为典型的岩浆 锆石(Hoskin et al.,2003)。火山岩样品锆石中部分 颗粒中见有不规则的内核,表明为继承锆石。在分 析过程中,选择两者环带发育、晶型好的锆石 边部打点,分别挑选出17颗及21颗锆石,其U、Th、Pb



图 4 包围山钼矿床测试岩体及矿石样品照片岩相学特征 a、b. 花岗斑岩; c、d. 硅化英安质晶屑凝灰熔岩; c、e、f. 辉钼矿在硅化脉、萤石脉中或两侧呈细脉浸染状、细脉状分布, 基本与硅化脉、萤石岩脉同时或稍晚晶出

Fig. 4 Photographs showing ore samples and petrographical characteristics of the Baoweishan deposit a, b. Granite-porphyry: c.d. Silicified dacite crystal pyroclast tuff-lava: c, e, f. Molybdenite characterized by veinlet-dissemination and veinlet hosted in the quartz and fluorite veins or on two sides, suggesting that their crystallization was simultaneous with or later than those ore-bearing veins

同位素成分数据及谐和年龄见表1。

锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测年结果显示, 花岗斑岩样品中 21 个锆石分析点²⁰⁶Pb/²³⁸U 的年龄 范围为(98±1) Ma~(115±1) Ma,凝灰熔岩样品中 17个锆石分析点的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄范围为(104±1) Ma~(114±1) Ma。考虑到 2 种岩石形成的时代较 新,且锆石样品中常含有低的、不等量的普通 Pb,受 到继承铅、铅丢失以及多期构造热事件等因素的影 响,因此谐和图解(图 5c)中常出现偏离谐和线较远 的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄,而少量大于 110 Ma 的锆石年龄 可能为岩石在结晶过程中的捕获锆石。凝灰熔岩中 挑选出的 17 个锆石数据点在锆石 U-Pb 谐和图解中 给出了(104.6±1.2) Ma(MSWD=1.6)下交点年 龄,这与该年龄与具谐和 U-Pb 同位素组成锆石的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U比值年龄((104.5±1.1) Ma)在分析误差 范围内相同。因此,(104.6±1.2) Ma 被解释为凝 灰熔岩(ZK20701-b1)的形成年龄。样品(ZK702-b1) 21 个锆石数据点在 Tera-Wasserburg 图解(图 5d)中 给出了(98.8±1.1) Ma(MSWD=1.7)的下交点年龄,该年龄则代表了包围山花岗斑岩的结晶年龄。

3.3 辉钼矿 Re-Os 测定

辉钼矿 Re-Os 同位素年龄测试由中国地质科学院国家地质实验测试中心完成,采用电感耦合等离子质谱仪 TJA X-erie ICP-MS 进行测量,样品的化学处理流程和分析方法见文献(屈文俊等,2004),模式年龄 t 按以下式计算:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln(\frac{187\text{Os}}{187\text{Re}} + 1)$$

其中, $\lambda = (^{187}\text{Re} 衰变常数) = 1.666 \times 10^{-11} a^{-1}$ 。 辉钼矿(ZK701-b3)Re-Os同位素测试结果表明



图 5 包围山样品锆石阴极发光图和锆石年龄图

a、b. 包围山凝灰熔岩及花岗斑岩锆石阴极发光图; c、d. 包围山凝灰熔岩及花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄图和 Tera-Wasserburg 年龄图 Fig. 5 Cathodoluminescence (CL) image of zircons and LA-ICP-MS zircon U-Pb diagram of the Baoweishan samples a, b. Cathodoluminescence (CL) image of zircons of the Baoweishan tuff-lava and porphyry-like granite: c, d. LA-ICP-MS zircon U-Pb diagram for the Baoweishan tuff-lava and the Tera-Wasserburg diagram of zircons for porphyry-like granite

表
据
数
袠
ণ
ę
- H
μ
铅
_
表

Table 1 Zircon U-Pb isotopic data form the Baoweishan deposit

	701(B)/	,10-6					同位素	比值						年龄/M	a		
다. 다. 다.		0T	Th/11					1						DTAT / NH I	5		
	Pb	D		$^{207}\mathrm{Pb}/^{206}\mathrm{Pb}$	1σ	$^{207}\mathrm{Pb}/^{235}\mathrm{U}$	1σ	$^{206}\mathrm{Pb}/^{238}\mathrm{U}$	10	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	$^{207}\mathrm{Pb}/^{206}\mathrm{Pb}$	1σ	$^{207}\mathrm{Pb}/^{235}\mathrm{U}$	1σ	$^{206}\mathrm{Pb}/^{238}\mathrm{U}$	1σ
花岗斑	岩(ZK70)2-b ₁)															
1	9	274	0.62	0.10965	0.00434	0.24326	0.01041	0.01609	0.00018	0.00999	0.00026	1794	72	221	6	103	
2	12	682	0.52	0.05811	0.00161	0.12270	0.00350	0.01531	0.00016	0.00669	0.00013	534	61	118	ю	98	1
б	5	120	0.58	0.14468	0.01016	0.31573	0, 02469	0.01583	0.00026	0.00959	0.00037	2284	121	279	22	101	2
4	8	405	0.61	0.08450	0.00350	0.18308	0.00819	0.01571	0.00017	0.00774	0.00022	1304	81	171	8	101	1
5	10	433	0.54	0.15301	0.00633	0.34643	0.01512	0.01642	0.00020	0.01220	0.00026	2380	70	302	13	105	μ
9	13	747	0.44	0.07130	0.00199	0.15337	0.00463	0.01560	0.00016	0.00711	0.00018	966	57	145	4	100	1
٢	7	417	0.15	0.05497	0.00315	0.11727	0.00713	0.01547	0.00017	0.00643	0.00016	411	128	113	٢	66	1
8	7	367	0.51	0.11311	0.00292	0.24721	0.00671	0.01585	0.00017	0.00633	0.00015	1850	47	224	9	101	1
6	4	128	0.79	0.25255	0.01390	0.62899	0.03262	0.01806	0.00035	0.01418	0.00051	3201	87	495	26	115	7
10	15	888	0.43	0.07502	0.00204	0.16246	0.00563	0.01571	0.00018	0.00584	0.00018	1069	55	153	S	100	1
11	23	1165	0.81	0.10709	0.00272	0.23197	0.00695	0.01571	0.00017	0.00699	0.00016	1750	47	212	9	100	1
12	12	691	0.49	0.08443	0.00350	0.18228	0.00902	0.01566	0.00018	0.00640	0.00027	1302	80	170	8	100	1
13	9	232	1.50	0.13615	0.00717	0.31053	0.02069	0.01654	0.00024	0.00623	0.00023	2179	92	275	18	106	7
14	20	973	1.46	0.07123	0.00149	0.15707	0.00351	0.01599	0.00017	0.00474	0.00009	964	43	148	ŝ	102	-
15	9	291	0.69	0.08645	0.00382	0.18748	0.00880	0.01573	0.00018	0.00703	0.00018	1348	85	174	8	101	1
16	9	318	0.57	0.06876	0.00293	0.15204	0.00664	0.01604	0.00017	0.00731	0.00018	892	88	144	9	103	Ţ
17	11	639	0.53	0.05750	0.00183	0.12159	0.00393	0.01534	0.00016	0.00616	0.00011	511	70	117	4	98	1
18	17	1051	0.40	0.05313	0.00138	0.11615	0.00307	0.01586	0.00017	0.00623	0.00013	334	59	112	ю	101	Ţ
19	10	526	0.61	0.09084	0.00282	0.19717	0.00653	0.01574	0.00017	0.00815	0.00021	1443	59	183	9	101	1
20	14	775	0.41	0.09124	0.00269	0.19931	0.00641	0.01584	0.00017	0.00926	0.00028	1452	56	185	9	101	1
21	8	402	0.45	0.09511	0.00442	0.21284	0.01232	0.01623	0.00019	0.00923	0.00045	1530	88	196	11	104	1

	1σ		1	1	1	1	1		1	1	1	Ц	1	1	1	1	1	1	1
	$^{206}\mathrm{Pb}/^{238}\mathrm{U}$		108	106	113	114	104	110	109	110	110	110	106	111	106	108	104	107	106
	1σ		5	5	9	10	4	9	9	5	4	5	S	9	9	4	4	4	S
年龄/Ma	$^{207}\mathrm{Pb}/^{235}\mathrm{U}$		162	130	255	248	106	158	171	170	151	163	123	201	126	134	122	150	149
	1σ		99	91	42	68	91	74	61	53	60	60	83	57	105	65	62	50	69
	$^{207}\mathrm{Pb}/^{206}\mathrm{Pb}$		1045	594	1918	1835	137	966	1139	1116	865	1024	468	1452	534	631	, 489	886	910
	1σ		0.00013	0.00013	0.00012	0.00026	0.00015	0.00015	0.00014	0.00011	0.00011	0.00014	0.00014	0.00014	0.00012	0.00010	0.00011	0.00011	0.00013
	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		0.00569	0.00683	0.00614	0.00889	0.00671	0.00636	0.00653	0.00564	0.00516	0.00624	0.00621	0.00672	0.00609	0.00552	0.00537	0.00525	0.00510
	10		0.00017	0.00017	0.00018	0.00019	0.00017	0.00018	0.00018	0.00018	0.00017	0.00018	0.00017	0.00018	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017
素比値	$^{206}\mathrm{Pb}/^{238}\mathrm{U}$		0.01690	0.01659	0.01764	0.01792	0.01634	0.01715	0.01708	0.01725	0.01715	0.01725	0.01658	0.01742	0.01652	0.01687	0.01633	0.01680	0.01653
同位湯	10		0.00585	0.00572	0.00719	0.01141	0.00431	0.00635	0.00598	0.00515	0.00471	0.00553	0.00498	0.00685	0.00655	0.00437	0.00471	0.00400	0.00562
	$^{207}\mathrm{Pb}/^{235}\mathrm{U}$		0.17265	0.13663	0.28576	0.27712	0.10985	0.16853	0.18291	0.18266	0.16049	0.17450	0.12891	0.21913	0.13235	0.14130	0.12821	0.15889	0.15812
	10	K.	0.00242	0.00250	0.00278	0.00422	0.00189	0.00257	0.00237	0.00206	0.00196	0.00219	0.00211	0.00272	0.00278	0.00182	0.00204	0.00164	0.00231
	$^{207}\mathrm{Pb}/^{206}\mathrm{Pb}$		0.07411	0.05973	0.11748	0.11218	0.04876	0.07129	0.07768	0.07681	0.06787	0.07336	0.05640	0.09124	0.05811	0.06076	0.05694	0.06859	0.06937
TL/II			0.97	0.65	0.55	0.80	0.66	0.93	0.80	0.92	0.75	1.05	0.73	0.65	1.13	0.98	0.74	0.89	1.09
)/10 ⁻⁶	U	:701-b ₁)	450	446	394	364	480	399	480	451	528	628	440	391	377	540	531	685	555
w(B)	$\mathbf{P}\mathbf{b}$;岩(ZK2	6	6	8	6	6	8	10	6	10	14	×	8	×	11	10	13	11
타	г Г	凝灰焰	1	7	б	4	5	9	7	×	6	10	11	12	13	14	15	16	17

1325

2017 年

表 2 包围山矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄测试结果

 Table 2
 Re-Os isotopic results of the molybdenite form the Baoweishan deposit

百垟夕	,	u (Re)	$(ng.g^{-1})$	u (谱 Os)	V(ng. g ⁻¹ $)$	τ ι(¹⁸⁷ Re)	V($\mu \mathrm{g.g^{-1}}$)	u (¹⁸⁷ Os)	𝕂 ng.g ^{−1})	模式年龄/Ma		
	m/g	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	
ZK701-b ₃	0.03066	43.83	0.48	0.0226	0.0076	27.55	0.30	43.73	0.26	95.19	1.52	

辉钼矿模式年龄为(95.2±1.5) Ma(表2),求得的 辉钼矿中的 Os 初始值接近于0,表明其完全由 Re 衰变而成,符合 Re-Os 同位素体系模式年龄的计算 条件(蒋少涌等,2000),显示了数据的可靠性。

4 讨 论

4.1 成岩成矿时代约束

辉钼矿封闭温度较高(约 500℃),且不易受到后 期蚀变事件、较慢的冷却速度和构造事件的影响 (Suzuki et al., 1996) 因此, 对矿石中分离出的辉钼 矿进行 Re-Os 同位素定年是目前确定成矿时代的最 好方法 辉钼矿的 Re-Os 同位素定年结果也是精确 厘定矿床成矿时代的最好证据(Stein et al., 2001; Seiby et al., 2002)。本文首次开展辉钼矿 Re-Os 同《 位素定年研究,获得辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄 为(95.2±1.5) Ma,该年龄代表了包围山钼矿床的。 成矿作用时间。同时,本文首次获得包围山花岗斑 岩的锆石 U-Pb 年龄为(98.8±1.1) Ma,该年龄代 表了包围山火山穹窿构造中心花岗斑岩的侵位时 间 :石帽山群含矿围岩底部的英安质晶屑凝灰熔岩 中的锆石 U-Pb 年龄为(104.6±1.1) Ma,该年龄较 为准确的厘定了包围山钼矿区石帽山群下组上段底 部火山岩的形成时代 有效指示了包围山钼矿的成 矿年龄的下限。

上述研究成果表明,包围山钼矿床成矿年龄与 含矿围岩下限年龄相差约9 Ma,与包围山火山机构 中心的花岗斑岩时差约3 Ma,暗示包围山火山岩形 成后,以壳幔混源型为特征花岗斑岩(沈荣泉等, 2012)为大型钼矿成矿提供了充足的热和流体来源, 热液活动时限较长(约3 Ma),长时间的热液活动可 能是形成包围山大型钼矿床的重要因素之一。

4.2 成矿物质来源

Re-Os 同位素体系不但可以精确测定硫化物矿 床的成矿时代,且辉钼矿 Re 含量对成矿物质来源有 一定的示踪作用(Foster et al., 1996)。Mao 等 (2003)通过对中国各种成因类型钼矿床中辉钼矿 Re 含量统计与分析后指出,从幔源到壳幔混源再到 壳源,辉钼矿中的 Re 含量从($n \times 10 - 10^3$)× 10^{-6} → ($n \times 10$)× 10^{-6} → $n \times 10^{-6}$ 呈数量级逐次降低;陈衍 景等(2012)等通过对中国东北等地区钼矿床的辉钼 矿 α (Re)统计与分析后指出,辉钼矿 α (Re)越高,幔 源物质参与成矿作用越多,或者地壳成熟度较低; Zhong 等(2017)通过对华南各种成因类型钼矿床中 辉钼矿 Re 含量统计与分析后也指出,该区域单 Mo 矿床或 W-Mo 矿床辉钼矿中的 α (Re)小于(10×10) × 10^{-6} ,多数小于(5×10)× 10^{-6} ,指示壳幔混源岩 浆主要参与了该类矿床的成矿作用。此次测得的包 围山钼矿床中辉钼矿 α (187 Re)为(27.55 ± 0.30)× 10^{-6} 相当于壳幔混源岩浆矿床的 Re 含量,暗示了 成矿来源与壳幔物质混合或幔源物质进一步演化有 关。

4.3 成岩成矿动力学背景

平和大小矾山-包围山地区与上杭紫金山矿田 同处于上杭-云霄 NW 向铜、钼多金属成矿带上,矾 山地区还与紫金山矿田存在相似的陆相火山机构, 其中,石英-明矾石化蚀变分带相当于紫金山铜金矿 床的外带。特别是矾山地区早白垩世时期花岗岩及 次火山岩的侵入时代、地球化学特征及 Hf 同位素特 征与紫金山矿区非常相似(梁清玲等,2013;王森等, 2016),说明该时期该地区与紫金山铜金矿区可能具 有相似源区和动力学背景,因此将本区与紫金山地 区成岩成矿时代对比具有重要的找矿意义。

研究资料表明 约 125 Ma 以后中国东南部转入 了古太平洋板块正向俯冲构造体系,其中太平洋板 块俯冲过程中俯冲方向、速率、角度的变化或回撤效 应等也被用来解释东南沿海地区能形成晚中生代宽 广火山-侵入岩带的重要动力学原因(王强等,2005; 张岳桥等,2009;Zhou et al.,2006;Wang et al., 2011 Sun et al.,2012;刘磊,2015)。该时期紫金山 地区受到古太平洋构造域作用影响而处于伸展作用 环境(Jiang et al.,2013;Zhong et al.,2014;涨振杰 等 2015)表现为4期较大规模早白垩世火山喷发 与岩浆超浅层就位。从早白垩世第1期火山喷发与 岩浆就位开始(125~118 Ma)到第2期四方岩体的 侵入及火山-次火山岩的形成(115~103 Ma),再到 第3期石帽山群火山岩的喷出,罗卜岭-紫金山似斑 状花岗闪长(斑)岩的浅成侵位以及石英闪长玢岩等 次火山岩脉的形成(103~100 Ma) 最终早白垩世晚 期 第4期)罗卜岭斑岩的晚期就位、石帽山群火山 岩的晚期喷发以及大岩花岗斑岩、石英斑岩及正长 斑等成矿后期无矿脉岩的形成(100~92 Ma ↓于波 等 ,2013),其 Sr-Nd-Hf 同位素特征显示,随着源区 岩浆的演化 其幔源物质逐渐减少(毛建仁等 2002; 赵希林 2008 深清玲等 2013 武丽艳等 2013 Jiang et al. , 2013 Zhong et al. , 2014 Li et al. , 2014 Duan et al., 2016) 源区的变化指示了白垩世紫金山地 区很可能在古洋壳俯冲作用下地球动力学系统发生 了变化,导致100~92 Ma 岩浆源区中壳源组分的增 多。造成这种现象的原因有可能正是 125 Ma 以来 古洋壳俯冲作用强度变化引起的 ,亦或是回撤效应、 俯冲方向、角度或速率的改变造成的(梁清玲等, 2013 h

早白垩世晚期(125~92 Ma),紫金山及平和包 围山-大小矾山地区受古太平洋板块俯冲机制影响 而处于伸展作用环境,这两个地区较大规模的陆相 火山喷发和岩浆-成矿活动主要受向上杭-云霄深断◎ 裂的控制(张德全等,2001;黄仁生等,2008;王少怀, 2009 陈静等 2011 汪森等 2016 潘天望等 2016)。 该时期应力的松弛作用可能导致了上杭云霄成矿 带下部地壳发生减薄及张裂 ,为减薄的下地壳或上 地幔的减压熔融提供了条件、诱发了 NW 向上杭-云 霄成矿带中普遍发生较大规模的岩浆-热液-成矿事 件。具体表现为 NW 向上杭-云霄深断裂广泛分布 的基性岩墙群,说明该断裂深切至地幔,甚至有可能 达到了软流圈地幔,并且为早白垩世晚期大规模的 岩浆-成矿活动提供通道,为此沿深断裂多期次侵入 的新生钙碱性花岗闪长岩-花岗闪长斑岩或喷出的 火山-次火山岩不但多数具有弧火山的性质(武丽艳 等 2013 ; Jiang et al., 2013), 而且可能继承了早先 形成的与俯冲或和碰撞有关的幔源物质 ,幔源组分 贡献比例增大,且受该期区域伸展构造背景的影响 增强(张振杰等,2015)。随后又在92 Ma 左右东南 大陆岩石圈在古太平洋俯冲作用体系影响下进入伸 展-地壳减薄阶段(陈润生等,2008;王少怀等, 2015)。该时期以紫金山地区为代表的岩浆源区壳 源组分贡献比例增大 幔源组分减少 直至消失。该

地区在该时期伸展作用表现为较大规模的陆相火山 再次喷发(于波等 ,2013),形成的次火山岩含幔源物 质较少且以壳源型为主(李斌等 ,2013;Li et al., 2014),而多期次的次火山岩脉侵入,不但为成矿提 供了充足的热源、流体来源,而且为成矿元素的活化 迁移提供了充足的动力来源,形成了以悦洋低硫型 银多金属矿床(辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为(91.5± 0.4)Ma,刘晓东等,2005)为代表的受火山机构控制 的低硫浅成低温热液型银、金、铜矿床,同时形成了 以石英正长斑岩、花岗斑岩及正长(斑)岩脉等为代 表的无矿次火山岩脉(92~99 Ma)(于波等,2013;武 丽艳等,2013;Li et al.,2014)。

矾山地区花岗岩及花岗闪长岩的侵位年龄(110 ~112 Ma)与紫金山地区四方花岗闪长岩体的侵位 时间(109~112 Ma)非常接近,而且具有近乎一致的 Hf 同位素二阶段年龄(矾山地区花岗岩二阶段模式 年龄在1.0~1.6 Ga之间 四方岩体 Hf 二阶段年龄 在 1.1~1.6 Ga 之间 (梁清玲等, 2013; 王森等, 2016) 表明 2 个地区具有相似的源区及演化特征, 并可能经历了相似的成岩成矿过程。包围山地区与 矾山地区同处于早白垩世崎坑复合式火山机构环状 组合体之中 ,2 个地区岩浆-成矿活动主要受该组合 体控制 而该组合体的展布受 NW 向上杭-云霄深断 裂的控制 ,由此认为包围地区与矾山及紫金山地区 一样很可能也经历了相似的成岩成矿过程。包围山 花岗斑岩((98.1±1.1)Ma)脉与紫金山石英正长斑 岩(95~99 Ma),花岗斑岩((93±2)Ma)及正长斑岩 ((92.7±1.0) Ma) 脉等无矿次火山岩脉的侵入年龄 在误差范围内一致,并且包围山钼矿床(辉钼矿 Re-Os 模式年龄为(95.2±1.5) Ma)与同样受早白垩世 晚期火山岩地层控制的悦洋低硫型银多金属矿床 (冰长石的³⁹Ar-⁴⁰Ar等时线年龄为(94.7±2.3)Ma, 林全胜 2006)成矿年龄近乎一致。不仅如此,包围 山石帽山群含矿围岩底部的英安质晶屑凝灰熔岩的 锆石 U-Pb 年龄为(104.6±1.1) Ma,该年龄与紫金 山石帽山群流纹质晶屑凝灰岩的成岩年龄也近乎一 致(锆石 U-Pb 年龄为(105 ± 0.1) Ma Jiang et al., 2013)。以上研究表明 NW 向上杭-云霄成矿带上包 围山地区与紫金山地区岩脉侵位时间非常接近,均 发育了相近年龄的石帽山群火山岩,也具有相近的 成矿年龄 说明2个地区很可能在上杭-云霄深部断 裂控制下经历了相同的成岩成矿地质演化阶段 ,并 因该深断裂下地壳或上地幔部分熔融岩诱发 2 个地

区发生了相似的岩浆-热液-成矿事件。

综上所述,本文认为包围山钼矿床的形成可能 与125~92 Ma古太平洋板块的俯冲作用机制有关。 受该期区域伸展构造背景的影响,上杭-云霄成矿带 下地壳或上地幔部分熔融诱发了平和包围山一带岩 浆-热液-成矿事件。

5 结 论

(1) 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果表明,包围 山深部花岗斑岩结晶年龄为(98.1±1.1) Ma,容矿 围岩-石 帽 山 群 地 层 底 部 凝 灰 熔岩 成 岩 年 龄 为 (104.6±1.1) Ma 通过对矿体中辉钼矿的 Re-Os 同 位素分析,获得其模式年龄为(95.2±1.5) Ma,与花 岗斑岩成岩时差约 3 Ma。指示含矿热液活动时限 较长,长时间的热液活动可能是形成包围山大型钼 矿床的重要因素。辉钼矿中 Re 的含量指示成矿来 源与壳幔物质混合或幔源物质进一步演化有关。

(2)结合已有的研究成果,认为包围山钼矿床 的形成可能与125~92 Ma古太平洋板块的俯冲作 用机制有关。受该期区域伸展构造背景的影响,上 杭-云霄成矿带下地壳或上地幔部分熔融诱发了平 和包围山一带岩浆-热液-成矿事件的形成。

志 谢 野外工作得到了福建省闽西地质大队 沈荣泉、王献忠高级工程师等的大力支持;辉钼矿样 品测试的到了国家地质测试中心屈文俊研究员和李 超博士的帮助,锆石 U-Pb测年实验得到了天津矿产 研究所袁海帆老师的热情帮助;匿名审稿人的建设 性意见对完善本文很有价值,在此作者表示感谢。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that don 't report ²⁰⁴Pt[J]. Chemical Geology, 192(1-2):59-79.
- Chen J , Chen Y J , Zhong J , Sun Y , Li J and Qi J P. 2011. Fluid inclusion study of the Wuziqilong Cu deposit in the Zijinshan ore field , Fujian Province J]. Acta Petrologica Sinica , 25(5):1425-1438 in Chinese with English abstract).
- Chen R S , Lin D Y and Jiang J L. 2008. Dynamical mechanism and tectonics significance of Early Jurassic Volcanism in Fujian Provinc∉ J]. Geology of Fujian , 27(2): 156-165(in Chinese with English abstract).

- Chen Y J , Zhang C , Li N , Yang Y F and Deng K. 2012. Geology of the Mo deposits in northeast China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 42(5):1223-1268 in Chinese with English abstract).
- Duan G , Chen H Y , Pete H , Qi J P , Xu C , Zhang S , Xiao B , Liu G Y and Liu J M. 2016. The Mesozoic magmatic sources and tectonic setting of the Zijingshan mineral field , South China : Constraints from geochronology and geochemistry of igneous rocks in the southeastern ore Segment J J. Ore Geology Reviews , 80 : 800-827.
- Foster J G , Lambert D D , Frick L R and Mass R. 1996. Re-Os isotopic evidence for genesis of Archaean nickel ores from uncontaminated komatiites J J. Nature , 382 (6593):703-706.
- Fujian Exploration Authorities of Ministry of Geology and Mineral Resources. 1998. Instructions of Fujian geological map(1:500 000 J M]. Fuzhou : Fujian Map Press. 1-105 (cin Chinese).
- Hoskin P W O and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis J J. Reviews in Mineralogy and Geochemistry , 53 (1):27-62.
- Huang R S. 2008 . Igneous seriesand epithermal porphyry Cu-Au-Ag mineralization system in the Zijinshan ore field Fujian Province J]. Journal of Geomechanics , 14(1): 74-86(in Chinese with English abstract).
- Ji M , Hu L , Liu J L and Cao S Y. 2008. Dynamic recrystallization and metamorphic condition of main rock-forming minerals[J]. Earth Science Frontiers , 15(3): 226-233(in Chinese with English abstract).
- Jiang S H , Liang Q L , Bagas L , Wang S H , Nie F J and Liu Y F. 2013. Geodynamic setting of the Zijinshan porphyry-epithermal Cu-Au-Mo-Ag ore system , SW Fujian Province , China : Constrains from the geochronology and geochemistry of the igneous rocks J]. Ore Geology Reviews , 53 : 287-305.
- Jiang S Y, Yang J H, Zhang K D and Yu J M. 2000. Re-Os isotope tracer and dating methods in ore deposits research [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 36(6): 669-677(in Chinese with English abstract).
- Lei G W. 2010. On the ore-controlling factors and the metallogenic pattern of molybdenum deposits in East Fujiar[J]. Geology of Fujian , 29(3):194-200(in Chinese with English abstract).
- Li B , Zhao K D , Yang S Y and Dai B Z. 2013. Petrogenesis of the porphyritic dacite from Ermiaogou Cu-Au deposit in Zijinshan ore field and its metallogenetic implications [J]. Acta Petrologica Sinica , 29 (12):4167-4185(in Chinese with English abstract).
- Li B and Jiang S Y. 2014. Geochronology and geochemistry of Cretaceous Nanshanping alkaline rocks from the Zijinshan district in Fu-

jian Province , South China : Implications for crust-mantle interaction and lithospheric extensior [J] Journal of Asian Earth Sciences , 93:253-274.

- Li H K, Zhu S X, Xiang Z Q, Shu W B, Lu S N, Zhou H Y, Geng J Z, Li S and Yang F J. 2010. Zircon U-Pb dating on tuffbed form Gaoyuzhuang Formation in Yanqing Beijing further constraints on the new subdivision of the Mesoproterozoic stratigraphy in the northern North China Crator[J] Acta Petrologica Sinica, 26(7): 2131-2140(in Chinese with English abstract).
- Liang Q L , Jiang S H , Wang S H , Liu Y F , Bai D M and Chen C L. 2013. Petrogenesis of the Mesozoic magmatic rocks in Zijinshan area: Constraints from zicon Hf isotope evidence [J]. Acta Petrologica et Mineralogica , 32(3):318-328(in Chinese with English abstract).
- Lin D Y and Zheng Z Q. 2011. The country rock alteration characteristics and ore-finding potential analysis in the Fanshan of Pinghe County, Fujian Province J J. Geology of Fujian, 30(1):1-5(in Chinese with English abstract).
- Lin Q S. 2006. On the characteristics and genesis of the Yueyang silver polymetallic deposit in Wuping County, Fujian Province J J. Geology of Fujian, 25(3):82-88(in Chinese with English abstract).
- Liu L. 2015. Late Mesozoic episodic volcanism in SE China : Response to Paleo-Pacific subduction (degree of doctor of science [D]. Supervisor : Xu X S. Nanjing : Nanjing University. 130p(in Chinese with English abstract).
- Liu X D and Hua R M. 2005. ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of adularia from the Bitian gold-silver-copper deposit, Fujian Province[J]. Geological Review, 51(2):151-155(in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C and Chen H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 257(1): 34-43.
- Ludwig K R. 2001. Isoplot/ex (rev. 2.49), a geochronological toolkit for Microsoft Excel No. 14 M J. Berkeley University of California. 55.
- Luo J C , Chen Z H and Qu W J. 2009. Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Shankou molybdenum deposit in Yongding County of Fujian Province and its geological significance[J]. Rock and Mineral Analysis, 28(3): 254-258(in Chinese with English abstract).
- Mao J R , Tao K Y , Li J Y and Xie F G. 2002. Characteristics of Mesozoic granodioritic rocks in southwestern Fujian and their tectonic evolution [J]. Acta Petrologica et Mineralogica , 21(2): 135-142 (in Chinese with English abstract).

- Mao J W , Wang Y T , Lehmann B , Yu J J and Niu B G. 2003. Geodynamic setting of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas : Implication form the highly precise and accurate ages of metal deposites J J. Science in China Series D : Earth Sciences. 46(8):838-851.
- Pan T W , Zhang D , Ni J H , Chen Q L , Yuan Y and Di Y J. 2016. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the Jinxi copper (molybdenum) deposit in Pinghe County , Fujian Province , and its geological significance[J]. Geochimica , 45(2): 173-189 (in Chinese with English abstract).
- Qiu X P, Lan Y Z and Liu Y. 2010. The key to the study of deep mineralization and the evalution of ore-prospecting potential in the Zijinshan gold and copper deposit[J]. Acta Geoscienca Sinica, 31 (2):209-215(in Chinese with English abstract).
- Qu W J and Du A D. 2004. Highly precise Re-Os dating of molybdenite by ICP-MS with caries tube sample digestion [J]. Rock and Mineral Analysis, 22(4):254-257 in Chinese with English abstract).
- Seiby D, Creaser R A, Hart C J, Rombach C H, Thompson J F H, Simth F T, Bakke A A and Goldforb R J. 2002. Absolute timing of sulfide and gold mineralization : A comparison of Re-Os molybdenite and Ar-Ar mica methods form the Tintina gold belt[J]. Alaska Geology, 30(9):791-794.
- Shen R Q. 2012. Researching ore-forming geological conditions and predict outer part of molybdenum deposit of Baowei Hill in Pinghe of Fujian Province (dissertation for master degree 1 D]. Supervisor:
 Wu G and Lin Q S. Wuhang : China University of Geosciences.
 94µ(in Chinese with English abstract).
- Stein H J , Markey R J , Morgan J W , Hannah J L and Scherstén A. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite : How and why it work [J]. Terra Nova , 13(6):479-486.
- Sun W D , Yang X Y and Fan W M. 2012. Mesozoic large scale magmatism and mineralization in South China : Preface J]. Lithos , 150 : 1-5.
- Suzuki K, Shimizu H and Masuda A. 1996. Re-Os dating of molybdenites from ore deposits in Japan : Implication for the closure temperature of Re-Os system for molybdenite and the cooling history of molybdenum ore deposits J J. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60(16):3151-3159.
- Tao K Y , Gao T J , Lu Z G , Xie J Y and Wang Z M. 1998. The relations of volcanic-intrusive complex to tectonics and mineralizations of southeast China[M]. Beijing : Geological Publishing House. 1-367 (in Chinese).
- Tera F and Wasserburg G J. 1972. U-Th-Pb systematics in three Apollo 14 basalts and the problem of initial Pb in lunar rock [J]. Earth and

Planetary Science Letters, 14(3):281-304.

- Wang C Z and Liu W Y. 2013. Mineralogical characteristics of molybdenite of Mesozoic molybdenum in Fujian Province J J. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 38(6): 1240-1252 in Chinese with English abstract).
- Wang D H , Chen Z H , Chen Y C , Tang J X , Li J K , Ying L J , Wang C H , Liu S B , Li L X , Qin Y , Li H Q , Qu W J , Wang Y B , Chen W and Zhang Y. 2010. New data of the rock-forming and ore-forming chronology for China 's important mineral resources area [J]. Acta Geologica Sinica , 84(7): 1030-1040(in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Zhao Z H, Jian P, Xiong X L, Bao Z W, Dai T M, Xu J F and Ma J L. 2005. Geochronology of cretaceous A-type granitoids or alkaline intrusive rocks in the Hinterland, South China : Constraints for Late-Mesozoic tectonic evolution [J]. Acta Petrologica Sinica, 21(3):795-808(in Chinese with English abstract).
- Wang S, Zhang D, Zhao H S, Pan T W, Lü L J, Feng H B and Di Y J. 2016. Geochenmistry, zircon U-Pb dating and Hf isotope composition of granite in Fanshan area, Pinghe County, Fujian Province, and its geological significance J]. Earth Science, 41(1):1-17(in Chinese with English abstract).
- Wang S H, Pei R F, Zen X H, Qiu X P and Wei M. 2009. Metallogenic series and model of the Zijinshan mining field J]. Acta Geologica Sinica, 83(2):145-157 (in Chinese with English abstract).
- Wang S H and Huang H X. 2015. Re-Os isotopic dating of molybdenite and the Yanshanian mincralization of the Tongkeng molybdenum deposit in Liancheng , Fujian Province [J]. Journal of Jilin University : Earth Science Edition , 45(1):119-131(in Chinese with English abstract).
- Wang X Z. 2014. Geological characteristics and prospecting significance of molybdenum ore in Baowei mountain , Fujiar[J]. Geology of Fujian , 33(3):168-176(in Chinese with English abstract).
- Wang Y , Zhao Z F , Zheng Y F and Zhang J J. 2011. Geochemical constraints on the nature of mantle source for Cenozoic continental basalts ineast-central China J J. Lithos , 12(3):940-955.
- Wei D G , Jie Y J and Huang T G. 1997. Regional geological structure of Fujiar[J]. Regional Geology of China , 16(2):51-59 (in Chinese with English abstract).
- Wu L Y , Hu R Z , Qi Y Q and Zhu J J. 2013. Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages and geochemical characteristics of quartz syenite porphyry from Jintonghu deposit in Zijinshan ore field , Fujian Province , South China J]. Acta Petrologica Sinica , 29(12):4151-4166 (in Chinese with English abstract).

 $\operatorname{Yu} B$, $\operatorname{Pei} R$ F , $\operatorname{Qiu} X$ P , $\operatorname{Chen} J$ H , $\operatorname{Li} D$ P , $\operatorname{Zhang} W$ H and $\operatorname{Liu} W$ Y.

2013. The evolution series of Mesozioc magmatic rocks in the Zijinshan ore field ,Fujian Province[J]. Acta Geoscientica Sinice , 34 (4):437-446 in Chinese with English abstract).

- Yuan H L , Gao S , Liu X M , Li H M , Günther D and Wu F Y. 2004. Curate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. Geostandards and Geoanalytical Research , 28(3):53-370.
- Zhang C S , Mao J W , Xie G Q , Zhao C S , Yu M , Wang J X and Liu W G. 2012. Geology and molybdenite Re-Os ages of Makeng skarntype Fe-Mo deposit in Fujia Province J J. Journal of Jilin University : Earth Science Edition , 42(Supp.): 224-236(in Chinese with English abstract).
- Zhang D, Wu C G, Liu N Z, Di Y J, Lü L J and Cao W R. 2010. Re-Os isotopic dating of Molybdenite from the Beikengchang molybdenum deposit in Zhangping City. Fujian Province and its geological significance J]. Acta Geologica Sinica, 84(10): 1428-1437 (in Chinese with English abstract).
- Zhang D Q, She H Q, Yan S H and Xu W Y. 2001. Geochemistry of Mesozoic magmatites in the Zijinshan region and implication on regional tectonic inversion[J]. Geological Review, 47(6):608-616 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J J , Chen Z H , Wang D H , Zhang Z Y , Liu S B and Wang C H. 2008. Geological characteristics and metallogenic epoch of the Xingluokeng tungsten deposit , Fujian Proeince J J. Geotectonica et Metalbgenia , 32(1):92-97 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y Q, Xu X B, Jia D and Shu L S. 2009. Deformation record of the change from indosinian collision-related tectonic system to Yanshanian subduction-related tectonic systemin South China during the Early Mesozoid J]. Earth Science Frontiers, 16(1):234-247(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z J and Zuo R G. 2015. Tectonic evolution of southwestern Fujian Province and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposis [J]. Acta Petrologica Sinica , 31(1): 217-229(in Chinese with English abstract).
- Zhao X L ,Mao J R , Chen R and Xu N Z. 2008. SHPIMP zircon dating of the Zijingshan pluton in southwestern Fujian and its implications J J. Geology in China , 35(4): 490-597(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z, Chen Z H, Wang C H and Yang W P. 2012. Molybdenite Re-Os age of the Dawan Mo-Be deposit, east Fujian-A discussion on the tempo-spatial distribution and tectonic setting of the molybdenite deposit in Fujian Province[J]. Geotectonica et Metalbgenia, 36(3): 399-405(in Chinese with English abstract).
- Zhong J , Chen Y J , Pirajon F , Chen J , Li J , Qi J P and Li N. 2014.

1331

Geology, geochronology, fluid inclusion and H-O isotope geochemistry of the Luoboling porphyry Cu-Mo deposit, Zijinshan ore field, Fujian Province, China[J]. Ore Geology Reviews, 57: 61-67.

- Zhong J , Chen Y J and Pirajon F. 2017. Geology , geochemistry and tectonic settings of molybdenum deposits in South China: A review[J]. Ore Geology Reviews , 81 : 829-855.
- Zhou X M , Sun T , Shen W Z , Shu L S and Niu Y L. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China : A response to tectonic evolutior[J]. Episodes , 29(1):26-33.

附中文参考文献

- 陈静,陈衍景,钟军,孙艺,李晶,祁进平.2011. 福建省紫金山矿 田五子骑龙铜矿床流体包裹体研究[J]. 岩石学报,25(5): 1425-1438.
- 陈润生,林东燕,江剑丽.2008. 福建早侏罗世火山作用的动力学机制及大地构造学意义探讨[]]. 福建地质,27(2):156-165.
- 陈衍景,张成,李诺,杨永飞,邓轲.2012.中国东北钼矿床地质J]. 吉林大学学报(地球科学报),42(5):1213-1268.
- 地矿部福建省地质矿产勘查开发局.1998.中华人民共和国地质图 说明书(1:50万福建省幅]M]福州:福州地图出版社.1-105.
- 黄仁生. 2008. 福建紫金山矿田火成岩系列与浅成低温热液-斑岩型 铜金银成矿系统 J]. 地质力学学报,14(1):74-86.
- 纪沫,胡玲,刘俊来,槽淑云.2008.主要造岩矿物动态重结晶作用 及其变质条件[J].地学前缘,15(3):226-233.
- 蒋少涌,杨竞红,赵葵东,于际民.2000.金属矿床 Re-Os 同位素示 踪与定年研究[]]南京大学学报:自然科学,6(6):669-677.
- 雷广文. 2010. 闽东地区钼矿床控矿因素与成矿模式探讨[J]. 福建 地质, ((3):194-200.
- 李斌,赵葵东,杨水源,戴宝章.2013. 福建紫金山矿田二庙沟铜 (金)矿区英安玢岩的成因及其成矿意义[J]. 岩石学报,29 (12):4167-4185.
- 李怀坤,朱士兴,相振群,苏文博,陆松年,周红英,耿建珍,李生, 杨峰杰. 2010. 北京延庆高于庄组凝灰岩的锆石 U-Pb 定年研究 及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束[J]. 岩石学 报,26(7):2131-2140.
- 梁清玲,江思宏,王少怀,刘翼飞,白大明,陈春良. 2013. 福建紫 金山地区中生代岩浆岩成因-锆石 Hf 同位素证据[J]. 岩石矿物 学杂志,32(3):318-328
- 林东燕,郑志强.2011. 福建平和矾山地区围岩蚀变特征与找矿潜力 分析[J]. 福建地质,30(1):1-5.
- 林全胜. 2006. 福建武平悦洋银多金属矿床特征及成因探讨[J]. 福 建地质, 25(3):82-88.

- 刘磊. 2015. 中国东南部晚中生代幕式火山岩浆作用及古太平洋板 块俯冲机制 博士论文 [D]. 导师:徐夕生. 南京:南京大学. 130页.
- 刘晓东,华仁民. 2005. 福建碧田金银铜矿床冰长石的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄 J]. 地质论评,51(2):151-155.
- 罗锦昌,陈郑辉,屈文俊. 2009. 福建省永定山口钼矿辉钼矿铼-锇 同位素定年及其地质特征[J]. 岩矿测试. 28(3):254-258.
- 毛建仁,陶奎元,李寄●,谢芳贵.2002. 闽西南地区中生代花岗闪 长质岩石的特征及其构造演化[J]. 岩石矿物学杂志,21(2): 135-142.
- 潘天望,张达,倪建辉,陈泉流,袁远,狄永军. 2016. 福建平和锦 溪铜(钼)矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质 意义[J]. 地球化学,45(2):173-189.
- 邱小平,蓝乐彰,刘羽.2010. 紫金山金铜矿床深部成矿作用研究和 找矿前景评价的关键 J. 地球学报,31(2):209-215.
- 屈文俊,杜安道.高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉 钼矿铼-锇地质年龄[〕]. 2004.岩矿测试,22(4):254-257.
- 沈荣泉. 2012. 福建平和包围山钼矿成矿地质条件分析及外围找矿 预测(硕士论文][D]. 导师: 伍刚, 林全胜. 武汉: 中国地质大 学. 94页.
- 陶奎元,高天均,陆志刚,谢家莹,王振民.1998.东南沿海火山岩 基底构造及火山-侵入岩作用与成矿关系[M].北京:地质出版 社.1-367.
- 王翠芝,刘文元. 2013. 福建中生代钼矿的辉钼矿矿物学特征[J]. 地球科学-中国地质大学学报,38(6):1240-1252.
- 王登红,陈郑辉,陈毓川,唐局兴,李健康,应立娟,王成辉,刘善 宝,李立兴,秦燕,李华芹,屈文俊,王彦斌,陈文,张彦. 2010. 我国重要矿产地成岩成矿年代学研究新数据[J]. 地质学 报,84(7):1030-1040.
- 王强,赵振华,简平,熊小林,包志伟,戴●谟,许继峰,马金龙. 2005. 华南腹地白垩纪A型花岗岩类或碱性侵入岩年代学及其 对华南晚中生代构造演化的制约[J]. 岩石学报,21(3):795-808.
- 王森,张达,赵红松,潘天望,吕梁冀,冯海滨,狄永军. 2016. 福建 平和矾山地区花岗岩地球化学、年代学、Hf 同位素特征及地质意 义[J].地球科学,41(1):1-17.
- 王少怀,裴荣富,曾宪辉,邱小平,魏民. 2009. 再论紫金山矿田成 矿系列与成矿模式[J]. 地质学报,83(2):145-157.
- 王少怀,黄宏祥.2015. 福建连城铜坑钼矿床辉钥矿 Re-Os 同位素年 龄及燕山期成矿事件[J]. 吉利大学学报:地球科学版,45(1): 119-131.
- 王献忠. 2014. 福建平和包围山钼矿地质特征及找矿远景分析[J]. 福建地质, 33(3):168-176.
- 韦德光,揭育金,黄廷淦.1997.福建省区域地质构造特征[].中国

区域地质,16(2):51-60.

- 武丽艳,胡瑞忠,齐有强,朱经经.2013. 福建紫金山矿田浸铜湖矿 床石英正长斑岩锆石 U-Pb 年代学及其岩石地球化学特征[J]. 岩石学报,29(12):4151-4166.
- 于波,裴荣富,邱小平,陈景河,黎敦朋,张文慧,刘文元.2013. 福 建紫金山矿田中生代岩浆岩演化序列研究[J]. 地球学报,34 (4):437-446
- 张承帅,毛景文,谢桂青,赵财胜,于森,王金祥,刘武刚. 2012. 福 建马坑砂卡岩型铁(钼)矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 同位素年 龄」]. 吉林大学学报:地球科学版,42(增刊):224-236.
- 张达,吴淦国,刘乃忠,狄永军,吕良冀,曹文融. 2010. 福建漳平 北坑场钼多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质 意义[J]. 地质学报,84(10):1428-1437.

616.

- 张家箐,陈郑辉,王登红,陈振宇,刘善宝,王成辉. 2008. 福建行 洛坑大型钨矿的地质特征、成矿时代及其找矿意义[J]. 大地构 造与成矿学,32(1):92-97.
- 张岳桥,徐先兵,贾东,舒良树. 2009. 华南早中生代从印支期碰撞 构造体系向燕山期俯冲构造系转换的形变记录[J]. 地学前缘, 16(1):234-247.
- 张振杰,左仁广. 2015. 闽西南地区大地构造演化和矿床时空分布规 律[J]. 岩石学报,31(1):217-229.
- 赵希林,毛建仁,陈荣,许乃政.2008. 闽西南地区紫金山岩体锆石 SHPIMP 定年及其地质意义[]]. 中国地质,35(4):490-597.
- 赵芝,陈郑辉,王成辉,杨武平.2012. 闽东大湾钼铍矿的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄-兼论福建省钼矿时空分布及构造背景[J]. 大 地构造与成矿学,36(3):399-405.