

doi: 10.12029/gc20210614

范飞鹏, 肖凡, 项红亮, 陈世忠, 李超, 周延, 陈凯, 曹明轩. 2021. 闽中德化邱垵钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其对成矿时间的限定[J]. 中国地质, 48(6): 1838-1849.

Fan Feipeng, Xiao Fan, Xiang Hongliang, Chen Shizhong, Li Chao, Zhou Yan, Chen Kai, Cao Mingxuan. 2021. Molybdenite Re-Os dating of the Qiucheng Mo deposit in Dehua of central Fujian Province and constraints on the mineralization time[J]. *Geology in China*, 48(6): 1838-1849(in Chinese with English abstract).

闽中德化邱垵钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年 及其对成矿时间的限定

范飞鹏¹, 肖凡¹, 项红亮², 陈世忠¹, 李超³, 周延¹, 陈凯⁴, 曹明轩⁵

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏南京 210016; 2. 福建省双旗山矿业有限责任公司, 福建德化 362500; 3. 国家地质实验测试中心, 北京 100037; 4. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221000; 5. 中国地质科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 福建德化邱垵钼矿床是德化—尤溪—永泰矿集区唯一一处规模较大的钼矿床。辉钼矿体分布在花岗斑岩外接触带, 辉钼矿多沿中新元古代变质岩和晚侏罗世花岗岩裂隙分布, 多呈浸染状、脉状和团块状。本次测得该矿床 6 件辉钼矿样品 Re-Os 模式年龄为 150.1~152.8 Ma, ¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os 等时线年龄为 (150.8±1.6) Ma, 加权平均年龄为 (151.8±0.9) Ma, 表明成矿时代为晚侏罗世晚期, 与该地区大规模的火山-侵入体活动相关; Re/Os 比值远大于 4, Re 同位素含量 $14.31 \times 10^{-6} \sim 45.8 \times 10^{-6}$ (最高达 174.7×10^{-6}), 指示成矿物质主要来源于壳源, 可能还有少量幔源物质的加入。邱垵钼矿床的形成可能为古太平洋板块朝东亚陆缘碰撞挤压作用结束向伸展作用转化过程的产物。

关键词: Re-Os 同位素年龄; 辉钼矿; 斑岩型钼矿; 矿产勘查工程; 邱垵; 福建德化
中图分类号: P578.2⁹² **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2021)06-1838-12

Molybdenite Re-Os dating of the Qiucheng Mo deposit in Dehua of central Fujian Province and constraints on the mineralization time

FAN Feipeng¹, XIAO Fan¹, XIANG Hongliang², CHEN Shizhong¹,
LI Chao³, ZHOU Yan¹, CHEN Kai⁴, CAO Mingxuan⁵

(1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 2. Shuangqishan Mining Co., Ltd. of Fujian, Dehua 362500, Fujian, China; 3. National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China; 4. School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221000, Jiangsu, China; 5. Graduate School of Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Qiucheng Mo deposit is located in the Dehua-Yongxi-Yongtai ore-concentrated area of Fujian Province. It is the only one large-scale molybdenum deposit there. Ore bodies are mainly distributed in the outer contact of granite porphyry, fissure

收稿日期: 2019-04-28; 改回日期: 2020-04-27

基金项目: 国家重点研发计划“武夷德化—尤溪—永泰矿集区三维综合探测与深部成矿预测”课题(2016YFC0600210)和中国地质调查局项目(DD20160037, DD20190153)联合资助。

作者简介: 范飞鹏, 男, 1982年生, 硕士, 高级工程师, 矿产普查与勘探专业; E-mail: fanfp1111@163.com。

filling of the middle-late Proterozoic metamorphic rocks and the late Jurassic granites. The molybdenite is disseminated, veins and lump. Re-Os dating of six molybdenite samples collected from the main ore body in the deposit yields the model age from 150.1 Ma to 152.8 Ma, the isochron age of (150.8 ± 1.6) Ma, and the weighted average age of (151.8 ± 0.9) Ma. It can thus be considered that the deposit was formed in the late stage of Late Jurassic and related to the large-scale volcanic and intrusive rock activities. According to the rhenium content (14.31×10^{-6} – 45.8×10^{-6} (one is 174.7×10^{-6})) and the ratio of Re and Os (much greater than 4) of molybdenum samples, it is inferred that the ore-forming materials of the deposit were mainly derived from the crust and possible addition of small amount of mantle materials. The Qiucheng Mo deposit may be the product of conversion process from the end of collision to the beginning of extension of the Paleo-Pacific plate towards the continental margin of East Asia.

Key words: Re-Os isochron age; molybdenite; porphyry molybdenum deposit; Qiucheng; Dehua of Fujian Province; mineral exploration

About the first and corresponding author: FAN Feipeng, male, born in 1982, master, engaged in mineral resource prospecting and exploration; E-mail: fanfp1111@163.com.

Fund support: Supported by the National Key R&D Program of China (No. 2016YFC0600210), the project of China Geology Survey (No. DD20160037, No. DD20190153).

1 引言

福建中部德化—尤溪—永泰矿集区位于东南沿海岩浆弧与闽西北变质岩带交汇部位,区内经历了复杂的多期构造-岩浆-成矿作用,成矿条件优越。该地区是武夷山成矿带内浅成低温热液型金矿集中分布区,区内有双旗山、邱村、东洋及青云山等金矿。钼矿主要有仙洋斑岩型铜(钼)矿和邱垵斑岩型钼矿,以邱垵规模最大且最具代表性。

迄今为止,福建中部德化—尤溪—永泰矿集区还没有获得过精确的成矿年龄,缺乏对成矿时代的限制,其主要原因和难度是无法选取出较为理想的测年矿物,而邱垵矿床发育大量的辉钼矿物是最好的测年矿物。利用该矿物进行 Re-Os 同位素测年已成为最直接测定不同类型钼矿床和含钼矿床成矿年龄的最为有效方法(杜安道等, 1994, 2004, 2009; Li et al., 2004; 姚军明等, 2007; 张达等, 2010; 梁清玲等, 2012; 郭春雨等, 2014; 李超等, 2016; 郑伟等, 2017; 高永宝等, 2018; 戴盼等, 2018)。邱垵钼矿床总体研究程度非常低,以往研究主要集中于青岗矿段成矿地质特征、矿床成因和找矿标志等方面(张集泉, 2013)。本文拟利用辉钼矿 Re-Os 同位素定年法精确厘定该矿床成矿时代,探讨其成矿质来源及其地质意义,丰富该地区矿产地质研究认识,对研究火山岩-次火山岩-侵入体与成矿的关系及其时空演化特征具有重要意义。

2 区域地质背景

邱垵钼多金属矿床位于周宁—华安火山基底断隆带中部,政和—大埔断裂带中段(冯宗帜和卞润章, 1991)(图 1a)。

区内出露地层主要为中—新元古代马面山群龙北溪组中浅变质岩和侏罗纪一套火山碎屑-沉积岩(图 1b),局部分布少量早二叠世文笔山组浅海相细碎屑沉积岩。龙北溪组岩性主要为乳白色石英岩、灰白色斜长变粒岩、灰绿色绿泥片岩、墨绿色绿泥阳起片岩及红褐色、灰绿色石榴石透辉石砂卡岩(磁铁矿层位);该套地层受接触变质作用和动力变形作用,主要呈“嵌入式条带”展布,片理走向北东 $40^\circ \sim 50^\circ$,倾向北西,倾角 $30^\circ \sim 45^\circ$ 。晚侏罗世南园组为钙碱性系列安山质-英安质-流纹质火山岩组合,可分为上、下 2 个火山喷发-沉积旋回,下旋回岩性以深灰、灰黑色安山岩、英安岩、英安质凝灰熔岩及凝灰岩为主,夹沉积细碎屑岩;上旋回为巨厚的中酸-酸性火山岩,其下部为深灰、灰色英安岩、流纹英安质凝灰熔岩、熔结凝灰岩夹砂页岩,上部为灰白、紫灰色流纹质晶屑凝灰岩、熔结凝灰岩、流纹岩偶夹砂页岩。

构造主要为断裂构造和火山构造。断裂构造主要有北东向福安—南靖、北东东向闽江口—永定、南北向浦城—永泰嵩口断裂在矿区附近交汇复合,以北东向和北北东向 2 组脆性断裂最为发育;火山构造主要沿北东向变质岩两侧分布。

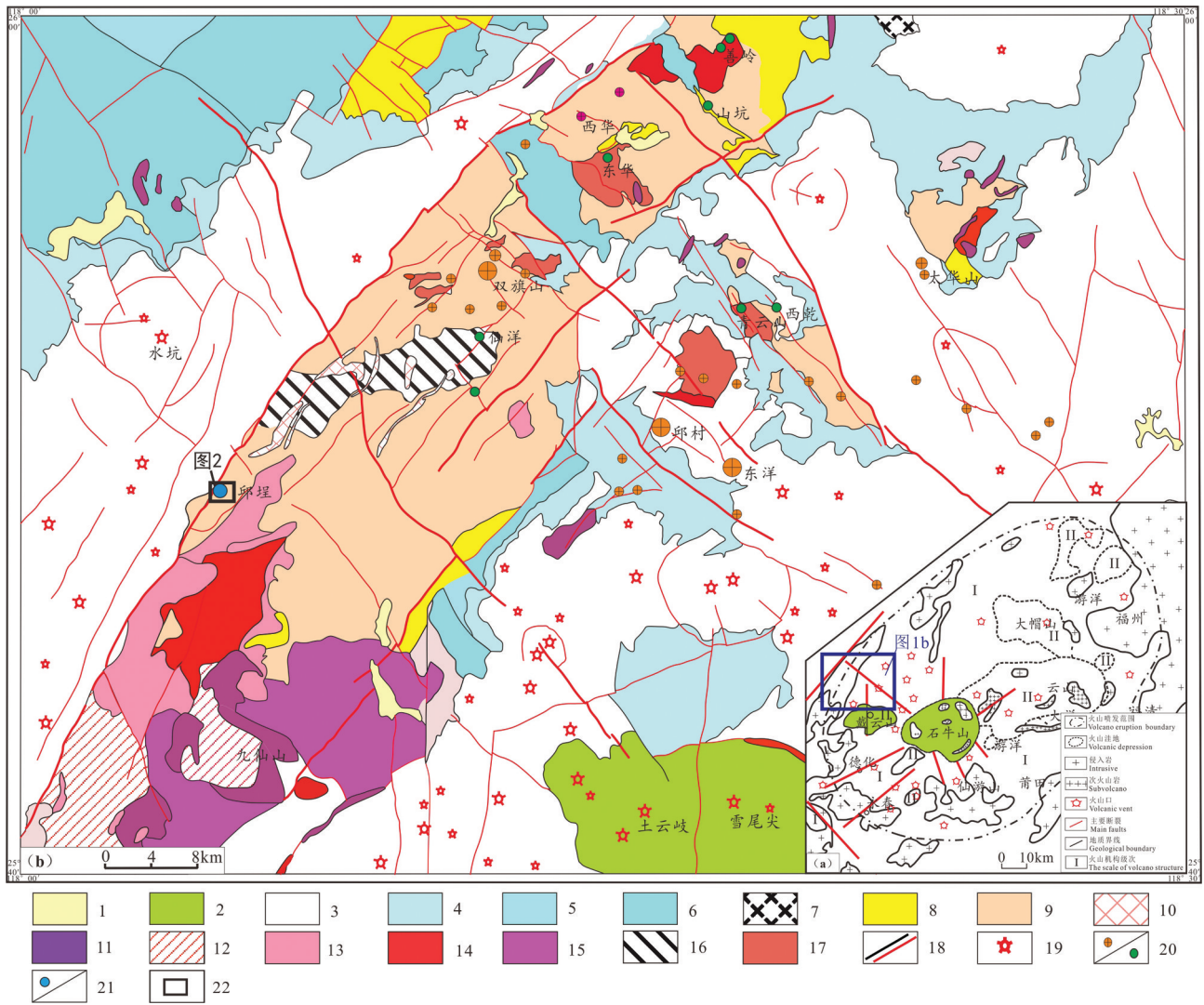


图1 德化地区地质简图(据资料^{①②}修改)

1—第四系;2—早白垩世火山岩;3—晚侏罗世火山岩;4—晚侏罗世碎屑岩;5—中侏罗世碎屑岩;6—早侏罗世碎屑岩;7—三叠纪碎屑岩;8—二叠纪碎屑岩夹碳酸岩;9—中元古代变质岩;10—早白垩世花岗斑岩;11—早白垩世钾长花岗岩;12—晚侏罗世花岗闪长岩;13—中侏罗世钾长花岗岩;14—中侏罗世二长花岗岩;15—三叠纪石英二长岩;16—志留纪石英闪长岩;17—志留纪闪长岩;18—地质界线和断层;19—火山口;20—金矿床或铜(铜金)矿床;21—钼矿;22—研究区

Fig.1 Regional geological map of the Dehua region (modified after research results report^{①②})

1-Quaternary; 2-Early Cretaceous volcanic rock; 3-Late Jurassic volcanic rock; 4-Late Jurassic clastic rock; 5-Middle Jurassic clastic rock; 6-Early Jurassic clastic rock; 7-Triassic clastic rock; 8-Permian clastic rock with carbonatite; 9-Middle and Late Proterozoic metamorphic rock; 10-Early Cretaceous granite porphyry; 11-Early Cretaceous moyite; 12-Late Jurassic granodiorite; 13-Middle Jurassic moyite; 14-Middle Jurassic monzonitic granite; 15-Triassic quartz monzonite; 16-Devonian quartz monzonite; 17-Devonian diorite; 18-Geological boundary and fault; 19-Volcanic vent; 20-Gold deposit or Copper(Copper-Gold)deposit; 21-Molybdenum deposit; 22-Research area

区内侵入岩以晚奥陶纪—早志留世侵入岩和中侏罗世—白垩世侵入活动最为强烈(图1)。晚奥陶世—早志留世侵入岩主要分布在双旗山、雷潭、东华、上涌等地,岩性以石英闪长岩、花岗闪长岩、闪长岩、辉绿玢岩等为主,岩体锆石U-Pb同位素年

龄介于456~412 Ma。中侏罗世—白垩世侵入岩在区内非常强烈,从166 Ma一直至119 Ma均有活动,多沿北东向断裂构造和火山机构分布,以多期花岗斑岩、闪长玢岩、辉长岩、二长花岗斑岩等为主。其中157~150 Ma的侵入岩活动在区内规模最大。

3 矿床地质特征

邱垵钼矿床位于福建省德化县汤头乡西约4 km处。该矿床主要由七叮湖矿段、仙坛矿段、邱垵矿段、东措矿段和青岗矿段等5个矿段组成。早期主要以开采磁铁矿为主,仅对青岗矿段进行过详查工作,评价为小型矿床(张集泉,2013)。随着近几年的深入工作,在邱垵、东措等矿段相继也发现了规模较大的辉钼矿体,该矿床钼矿具有大型规模前景。

邱垵矿段和东措矿段出露地层主要为中一新

元古代马面山群龙北溪组变质岩(图2),岩性以绿泥斜长片岩和斜长变粒岩夹矽卡岩。侵入岩主要为灰白色和红褐色两期花岗斑岩,均以脉状产出,局部可见少量辉绿岩脉。早期灰白色花岗斑岩(图3a)侵入龙北溪变质岩中,多为脉状,在岩体内接触带辉钼矿呈浸染状,外接触带辉钼矿多沿变质岩裂隙及面理分布,岩体中局部可见细小片状辉钼矿和零星黄铁矿化;该期岩体锆石U-Pb同位素年龄介于153~150 Ma(范飞鹏待发)。晚期红褐色花岗斑岩侵入变质岩中(图3b),切割辉钼矿体,沿侵入

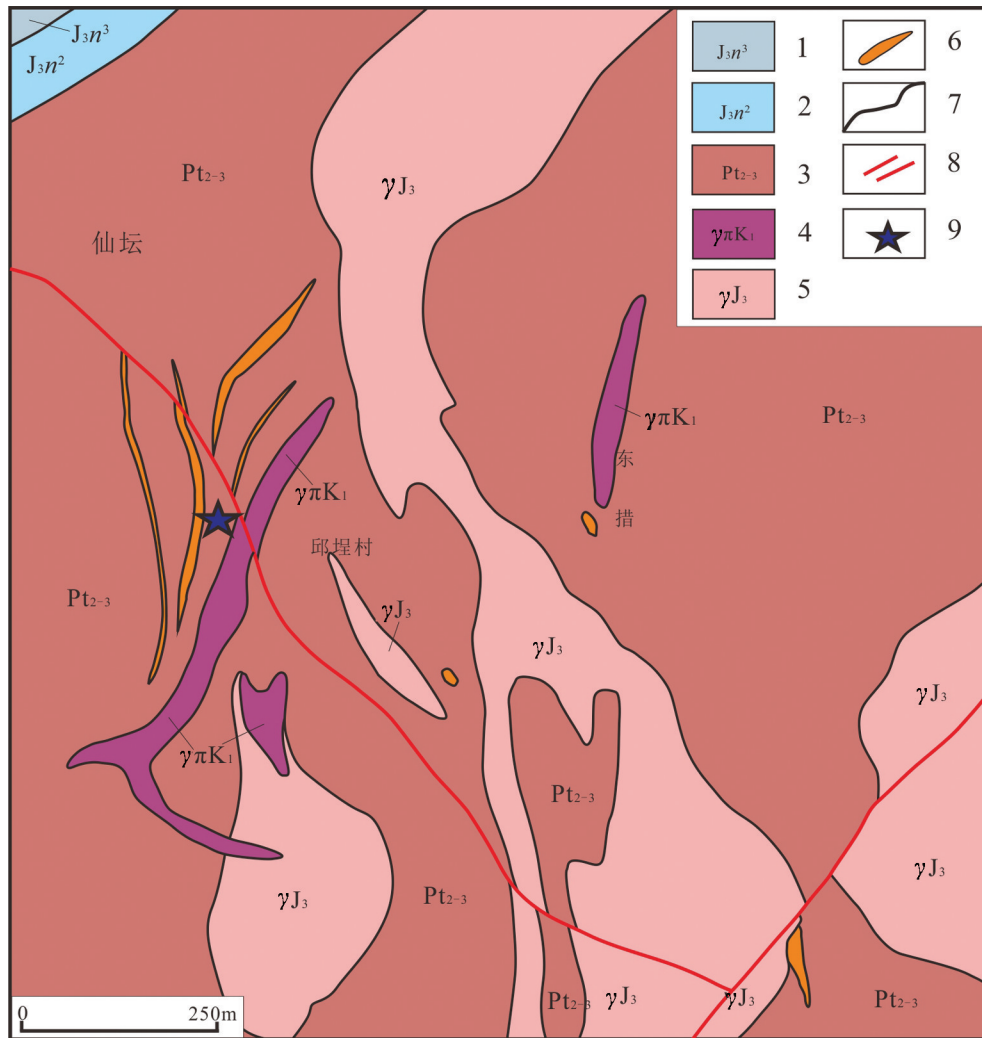


图2 福建德化邱垵矿区地质及采样位置图(据德化县邱垵矿业有限公司资料(2010)修改)

1—南园组第三段火山岩;2—南园组第二段火山岩;3—中新元古代变质岩;4—早白垩世花岗斑岩;5—晚侏罗世花岗岩;6—磁铁矿体;7—地质界线;8—断层;9—采样点位置

Fig.2 Geological map and sampling location of the Quiucheng deposit in Dehua, Fujian (modified from Qiucheng Mining Co., Ltd of Dehua County, 2010)

1—Volcanic rocks of the third member of the Nanyuan group; 2—Volcanic rocks of the third member of the Nanyuan group; 3—Middle and Late Proterozoic metamorphic rock; 4—Early Cretaceous granite porphyry; 5—Late Jurassic granite; 6—Magnetite ore; 7—Geological boundaries; 8—faults; 9—Sampling location

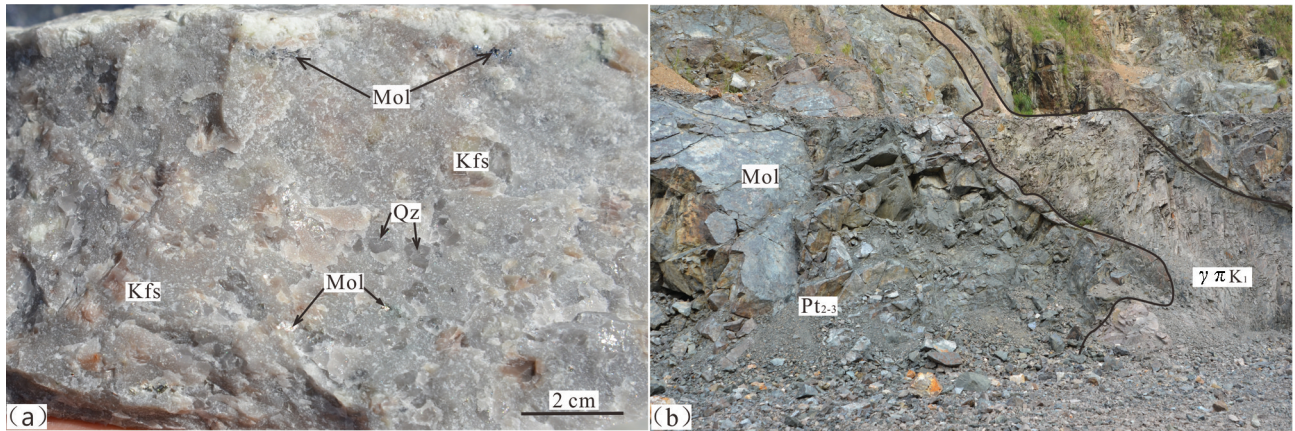


图3 福建德化邱埕—东措矿段岩石特征

a—灰白色花岗斑岩中见辉钼矿；b—红褐色花岗斑岩($\gamma\pi K_1$)侵入变质岩(Pt_{2-3})

Fig.3 Lithologic characteristics of Qiucheng-Dongcuo ore block in Dehua County of Fujian Province

a—Molybdenite in the grayish-white granite porphyry; b—Red-brown granite porphyry($\gamma\pi K_1$) intrude into the metamorphic rocks(Pt_{2-3})

接触面可见炭化、强烈变形等特征,该期岩体锆石U-Pb同位素年龄介于133~130 Ma(范飞鹏待发)。

矿区构造主要为断裂及裂隙构造,有北东向、北西向、近南北向及近东西向4组断裂及构造角砾岩破碎带,其中北东向断裂构造为主要控矿构造,由主要断裂构造控制的裂隙带、共扼剪节理及共生的追踪张节理、劈理化带为容矿构造。

邱埕矿段和东措矿段矿体以磁铁矿体和辉钼矿体为主。磁铁矿体主要呈近南北向似层状,局部呈透镜体状(图2),多沿矽卡岩面理分布。钼矿体多呈似层状和透镜体状(图4),分布标高在700~1020 m,钼矿体主要分布在花岗斑岩及花岗岩内外接触带石英脉中或脉壁和矽卡岩裂隙带中,明显晚于磁铁矿。据青岗矿段评价资料显示,矿体厚度15~193 m变化,矿体走向北东—近南北向 $50^\circ\sim 350^\circ$,倾向北西—西,倾角 $5^\circ\sim 15^\circ$,局部较陡。青岗矿段钼矿品位在0.137%~0.194%,平均品位0.158%(张集泉,2013),局部较富。

主要矿石矿物有磁铁矿、辉钼矿和黄铁矿。磁铁矿主要呈粒状、脉状和团块状3种。辉钼矿矿石主要呈浸染状(图3a)、脉状(图5a、b)和团块状(图5c)构造3种,另外在青岗矿段还存在网脉状和角砾状构造(张集泉,2013)。辉钼矿在反光镜下呈灰白色,反射色多色性变化显著,呈叶片状和束状,多与石英相互包裹(图5d)。

与辉钼矿伴生的蚀变矿物主要有石英、钾长石、石榴石和绿帘石,见有少量方解石、萤石、绿帘石等。其中,硅化与钼矿化关系最为密切。

4 样品采集及分析测试方法

4.1 样品采集

本文所采辉钼矿样品位多沿变质岩低缓裂隙带采集,采样位置($25^\circ 49' 46.87''N$, $118^\circ 5' 59.04''E$)见图2,辉钼矿矿物产于裂隙带及石英脉中(图5a~c)。辉钼矿多呈片状、鳞片状、浸染状、脉状、团块状分布于裂隙及矽卡岩裂隙中,片径一般为0.3~10 mm。采集的样品用大头针及小刀将辉钼矿剥离出来,在室内无污染环境下,首先对所采样品进行筛选碎样,保证每件样品纯度均高于99%,然后再用玛瑙研钵研磨至200目,该部分工作在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成。

4.2 分析测试方法

测试在中国地质科学院国家地质测试中心Re-Os同位素实验室完成,其中分析方法、分离步骤、同位素稀释、等离子体质谱技术和质谱测定等与文献(杜安道等,1994,2009,2012; Bohlkea et al., 2001; 屈文俊等,2003,2008,2009,2012; 李超等,2009,2010; 周利敏等,2012; 王礼兵等,2013; 李海立等,2016)一致,其分析流程现简述如下。

4.2.1 分解样品

准确称取0.4 g待分析样品,通过细颈漏斗加入Carius管(一种高硼厚壁大玻璃安瓿瓶,一般规格容积约30 mL)底部。缓慢加液氮到有半杯乙醇的保温杯中,使成黏稠状(摄氏 $-50\sim -80^\circ C$)。将装好样品的Carius管放到该保温杯中。用适量超纯浓HCl($2\sim 3\text{ mL } 10\text{ mol/L}$)通过细颈漏斗把准确称取

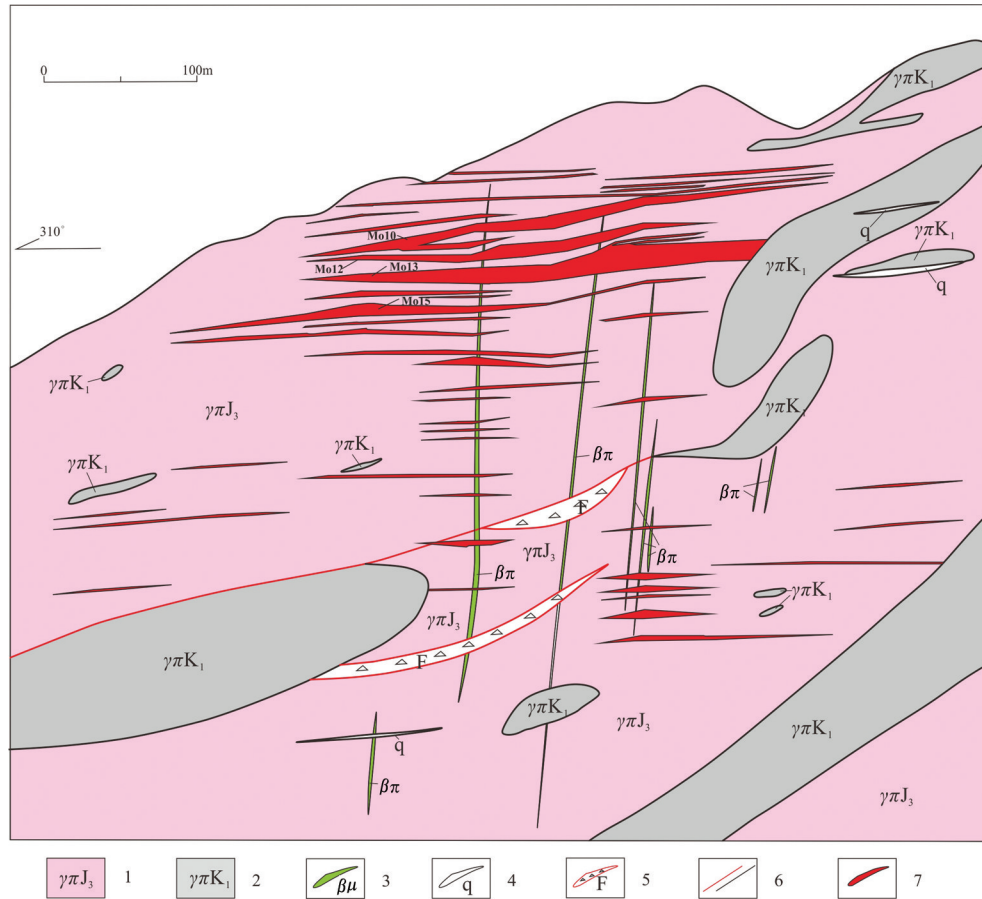


图4 青岗矿段20线地质剖面略图(据张集泉,2013修改)

1—晚侏罗世花岗岩斑岩;2—早白垩世花岗岩斑岩;3—辉绿岩;4—石英脉;5—断层破碎带;6—断层或地质界线;7—矿体

Fig.4 No.20 geological section of the Qinggang ore block

1—Late Jurassic granite porphyry; 2—Early Cretaceous granite porphyry; 3—Diabase; 4—Quartz vein; 5—Fracture zone; 6—Faults or geological boundary; 7—Ore body

的 ¹⁸⁵Re 和 ¹⁹⁰Os 混合稀释剂转入 Carius 管底部。再依次加入适量硝酸 (4~5 mL 16 mol/L) 和 30 % H₂O₂。当 Carius 管底溶液冻实后,用液化石油气和氧气火焰加热封好 Carius 管的细颈部分。擦净表面残存的乙醇,放入不锈钢套管内。轻轻放套管入鼓风烘箱内,待回到室温后,逐渐升温到 200 °C (辉钼矿)保温 24 h。取出冷却后在底部冻实的情况下,先用细强火焰烧熔 Carius 管细管部分一点,使内部压力得以释放。再用玻璃刀划痕,并用烧热的玻璃棒烫裂划痕部分。

4.2.2 直接蒸馏分离 Os

将溶好冰冻的 Carius 管在细颈处打开,蒸馏前放在冰水浴中回温后,加入相当样品溶液 1.5 倍体积左右的超纯水,把事先准备好的穿有两根 Teflon 细管(内径 0.5 mm,外径 0.9 mm)的胶头套在 Carius

管的细颈部分。吸收管内装有 1.5~5 mL 超纯水(冰水浴)吸收蒸馏出的 OsO₄。为了防止由于往 Carius 管内加水引起管内溶液先热后冷而导致吸收管内溶液倒吸入 Carius 管内,先把 Teflon 排气管插入吸收管内溶液液面之上,把 Carius 管插入盖上有洞的电蒸笼中,送气管插入 Carius 管内溶液底部,气路通畅后再将排气管插进吸收管吸收液底部,电蒸笼蒸汽 100 °C 加热 40~60 min。所得 OsO₄ 水吸收液可直接用于 ICP-MS 测定 Os 同位素比值。将蒸馏残液转入 150 mL Teflon 烧杯中待分离铼。

4.2.3 萃取分离 Re

将蒸馏残液置于电热板上,加热蒸干。加少量水,加热蒸干。重复两次以降低酸度。根据样品量加入 4~10 mL 10 mol/L NaOH(如果碱化后沉淀量过多,可适当增加 NaOH 用量),稍微加热,促进样品

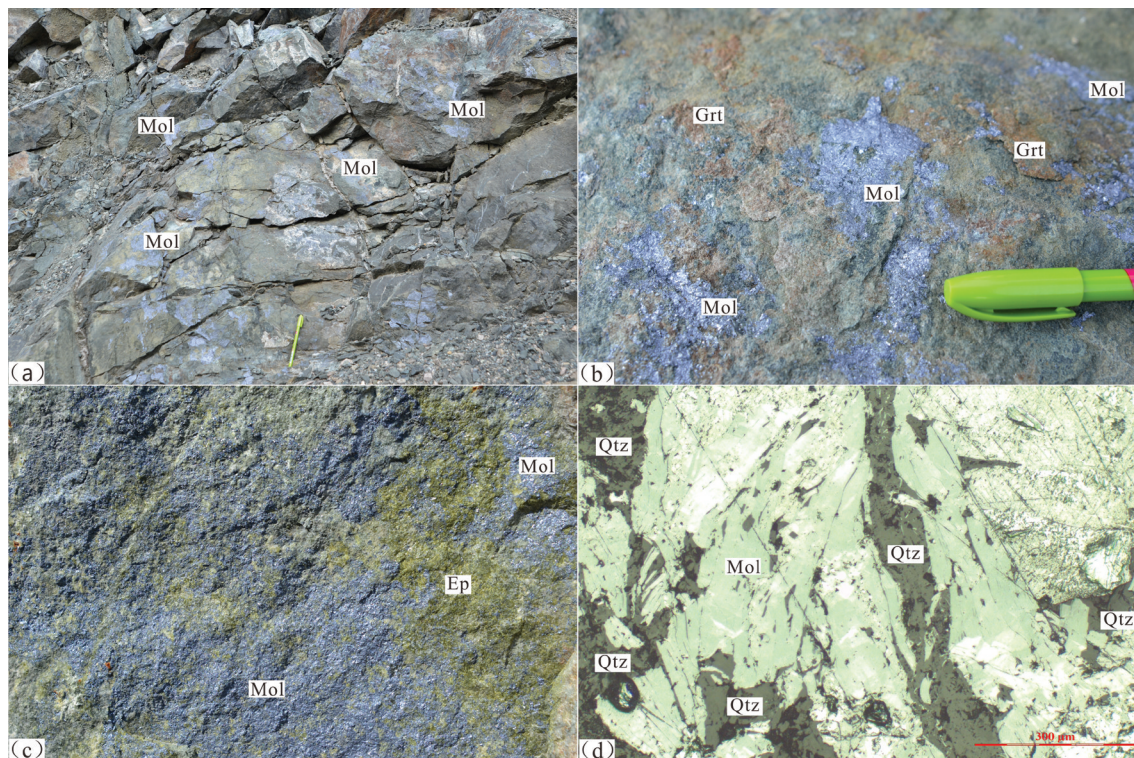


图5 邱垵矿床辉钼矿野外及镜下

a—斜长变粒岩中脉状辉钼矿；b—矽卡岩裂隙中脉状辉钼矿；c—团块状辉钼矿；d—显微镜下辉钼矿

Fig.5 Field and microscope photos of ores in the Qiucheng deposit

a—Vein molybdenites in plagioclase-granulite; b—Vein molybdenites in the fractures of skarn; c—Massive molybdenites; d—Molybdenite under the microscope

转为碱性介质。转入Teflon离心管中,加入4~10 mL丙酮,振荡1 min。萃取Re。离心后,用滴管直接取上层丙酮相到150 mL已加有2 mL水的Teflon烧杯中,在电热板上50℃加热除去丙酮,然后电热板温度升至120℃加热至干,加数滴浓硝酸和30%过氧化氢,加热蒸干以除去残存的Os。用数滴HNO₃溶解残渣,用水转移到小瓶中,稀释到适当体积,用ICP-MS测定Re同位素比值。

4.2.4 质谱测定

采用美国TJA公司生产的电感耦合等离子体质谱仪TJA X-series ICP-MS测定同位素比值。对于Re-Os含量很低的样品采用美国热电公司(Thermo Fisher Scientific)生产的高分辨电感耦合等离子体质谱仪HR-ICP-MS Element 2进行测量。对于Re:选择质量数185、187,用190监测Os。对于Os:选择质量数为186、187、188、189、190、192,用185监测Re。

所用仪器有电感耦合等离子体质谱仪TJAX-

series ICP-MS、Thermo Fisher Scientific高分辨电感耦合等离子体质谱仪HR-ICP-MS Element等,所得数据见表1,测试空白水平见表2。

5 结果分析

根据实验过程、测试数据误差及空白水平分析(表2),表1中Re-Os数据已扣除了本底对样品的影响,测试数据真实可靠。

从测试获得的6件样品中Re-Os数据可以看出,辉钼矿中Re含量为 $14.31 \times 10^{-6} \sim 45.80 \times 10^{-6}$ (1件 174.70×10^{-6}),¹⁸⁷Os含量为 $8.99 \times 10^{-9} \sim 28.79 \times 10^{-9}$ (1件 109.8×10^{-9}),普通Os含量较低,相对于¹⁸⁷Os可以忽略不计。本次数据处理采用Isoplot软件(Ludwig, 1999)对辉钼矿Re-Os数据进行投图,获得了Re-Os等时线年龄(150.8 ± 1.6) Ma ($2\sigma, n=5$)与加权平均值年龄(151.8 ± 0.9) Ma在误差内完全一致(图6a、b)。

辉钼矿中初始普通Os含量很低(Stein et al.,

表1 福建德化邱垵矿区辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄数据

Table 1 Re-Os model ages of molybdenite samples from the Qiucheng deposit in Dehua of Fujian

原样名	样重/g	Re/10 ⁻⁶	普 Os/10 ⁻⁹	¹⁸⁷ Re/10 ⁻⁶	¹⁸⁷ Os/10 ⁻⁹	模式年龄/Ma
18QCHu-tw5-1	0.00514	174.7±2.00	0.003641±0.121463	109.8±1.30	274.9±2.0	150.1±2.5
18QCHu-tw5-2	0.00584	18.12±0.15	0.004051±0.092786	11.39±0.09	28.88±0.21	152.1±2.3
18QCHu-tw5-3	0.00511	18.34±0.16	0.004651±0.061174	11.53±0.10	29.38±0.24	152.8±2.4
18QCHu-tw5-4	0.00521	14.31±0.14	0.004556±0.059817	8.99±0.09	22.80±0.16	152.0±2.4
18QCHu-tw5-5	0.00513	45.80±0.36	0.004636±0.106198	28.79±0.22	72.98±0.53	152.0±2.2
18QCHu-tw5-6	0.00515	25.53±0.18	0.004611±0.105617	16.05±0.11	40.60±0.24	151.7±2.1

表2 福建德化邱垵矿区 Re-Os 同位素测试空白水平
Table 2 Re-Os isotope age-dating blank background of the Qiucheng deposit in Dehua of Fujian

原样名	m _{Re} /10 ⁻⁶		m _(普Os) /10 ⁻⁹		m ¹⁸⁷ Os/10 ⁻⁹	
	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
BK	0.001048	0.001103	0.0001322	0.0000280	0.0001598	0.0000781

2001), 可以认为所有的 ¹⁸⁷Os 均来自于 ¹⁸⁷Re 的 β-衰变(Roberta et al., 2009)。所以通过辉钼矿中 Re-Os 法测得的年龄值具有较高的可信度。其模式年龄计算公式如下:

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

其中: ¹⁸⁷Os 为现在矿物中 ¹⁸⁷Os 的含量 (mol/g); ¹⁸⁷Re 为现在矿物中 ¹⁸⁷Re 的含量 (mol/g); 为了直观, 实际上采用了质量浓度, 即 10⁻⁹。这是因为 ¹⁸⁷Re 原子量 186.955765 和 ¹⁸⁷Os 原子量 186.955762 非常接近。无论采用什么单位得到的模式年龄或等时线年龄的差别都将小于千万分之一, 远小于目前年

龄测定的不确定度范围 2%。¹⁸⁷Re 衰变常数取 λ=1.666×10⁻¹¹ a⁻¹, 相对不确定度为 ±1.02% (Smolar et al., 1996)。本次测试 6 件辉钼矿样品中有 5 件 Re 总含量、¹⁸⁷Re 和 ¹⁸⁷Os 含量这 3 组数据各自差距不大, 而且模式年龄值也相近; 另外一件 Re 总含量、¹⁸⁷Re 和 ¹⁸⁷Os 含量这 3 组数据与其余数据差距较大, 但模式年龄值与其他数据相近。

6 讨论

6.1 成矿时代

辉钼矿 Re-Os 同位素定年方法, 是近年来解决金属矿床成矿时代问题, 精确厘定和限制成矿事件的有效技术手段之一。邱垵钼矿床中的辉钼矿样品 Re-Os 加权平均值年龄为 (151.8±0.9) Ma, 表明邱垵钼矿床辉钼矿的成矿时代为晚侏罗世。该年龄与区域火山岩和侵入岩活动时代基本一致(表 3), 该地区火山岩和侵入岩活动的高峰时间分别为 153~150 Ma 和 153~150 Ma, 与获得的辉钼矿年龄

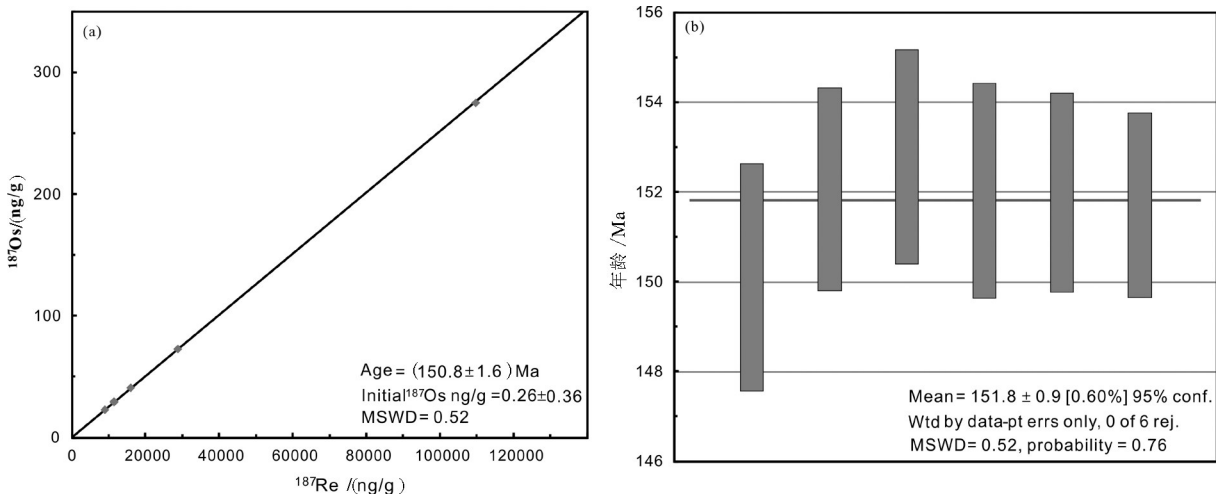


图6 福建德化邱垵矿区辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄图(a)和模式加权平均年龄图(b)

Fig.6 Re-Os isochron age(a) and weighted average model ages(b) of molybdenite from the Qiucheng deposit in Dehua of Fujian

也基本一致,说明德化地区在153~150 Ma存在大规模的钼矿成矿事件。另外,该成矿时间和南岭地区大规模成矿作用时间(165~150 Ma)(毛景文等,2008)相对应。因此,邱埕钼矿床成矿作用时间与区域内153~150 Ma时间段内的大规模火山岩和侵入岩活动关系密切,也可能与南岭地区的成矿事件相关。

6.2 成矿物质来源

成矿物质来源是探讨成矿规律,研究矿床成因、建立成矿和找矿模型的重要指标之一。由于Re-Os体系封闭性好,受后期改造弱,不仅可以直接准确地测定成矿年龄,而且还是硫化物矿床形成的强有力的示踪剂(毛景文等,1999; Stein et al., 2001; Ye et al., 2008; 周珂等, 2009; 李超等, 2016)。Os是高度相容元素,Re是中等程度的不相容元素(Shirey et al., 1998),地幔Re/Os比值<0.13,地壳的Re/Os比值>1,而大陆地壳的Re/Os比值>4(杜安道等,2009)。测试中Re/Os比值远大于4,指示大陆地壳可能为成矿提供了物质来源。毛景文等(1999)通过对国内与磁铁矿系列(I型)花岗岩有关斑岩型钼矿床和铜钼矿床、与钛铁矿系列花岗岩(S型)有关钨锡矿床和与幔源型相关的钼(铅)矿床对比研究后发现,辉钼矿的Re含量从幔源、壳幔混源到壳源,Re含量依次递降一个数量级,而斑岩型钼矿床中Re大多为 $10.51 \times 10^{-6} \sim 53.7 \times 10^{-6}$ (毛景文等,1999)。邱埕钼矿床中Re含量大多数从 $14.31 \times 10^{-6} \sim 45.8 \times 10^{-6}$ (1件为 174.7×10^{-6}),明显具有斑岩型矿床的特征,指示了成矿物质主要来源于地壳,可能还有少量幔源物质的加入。据研究资料^③显示,德化地区侵入岩多以壳源型为主,区内不同矿区火

山岩与侵入岩Sr-Nd同位素和铅等同位素也显示出壳源特征,同时显示有幔源组分的加入。因此,邱埕铁钼多金属矿床的成矿物质来源可能以壳源为主,成矿母岩为灰白色花岗斑岩。这一结论也与本区矿化与花岗斑岩时空分布关系一致^④。此外,该地区火山、次火山及侵入体的多期活动和演化与区域金银铜铅锌铁钼多金属成矿关系密切,从邱埕铁钼多金属矿床成矿特征、矿脉围岩、控矿构造、成矿物质来源、围岩蚀变以及矿脉的赋存状态来看,矿床的形成与灰白色花岗斑岩的侵位密切相关,在花岗斑岩结晶分异和有用组分富集并向上运移过程中,沿岩体顶部、变质岩及早期岩体裂隙带及构造有利部位沉淀形成钼矿体。

6.3 地质意义

德化地区位于东南沿海火山-侵入岩带的中东部,处于华南大陆边缘,经历了加里东褶皱造山作用(舒良树,2006; Li et al., 2010)、印支运动和燕山运动的叠加改造(Huang, 1945; 任纪舜, 1984, 1990)。170~160 Ma期间华南板块发生俯冲板片多处撕裂,160~150 Ma俯冲板块开天窗,软流圈物质上涌到下地壳形成壳幔源型高分异花岗质岩石(毛景文等,2008,2009),170~150 Ma中国东南部大部分地区已处于东亚活动大陆边缘构造体制下,古太平洋板块朝东亚陆缘的北西向碰撞挤压作用已经凸显(赵希林等,2008)。147~117 Ma东南沿海构造带从挤压构造应力体制向伸展构造应力体制转变,于早白垩世早中期(135 Ma)以来发生伸展垮塌(张岳桥等,2012)。德化地区各类火山岩、次火山岩和侵入体活动特征反映了德化地区构造互动从古太平洋板块俯冲到俯冲板片撕裂,再到俯冲方向调

表3 福建德化邱埕矿区及其附近矿床的成岩成矿年代统计

Table 3 Diagenetic and metallogenic ages of the Qiucheng deposit and adjacent deposits in Dehua of Fujian					
矿区或火山机构	岩性	测试方法	测定矿物	年龄/Ma	资料来源
戴云山火山机构	流纹质晶屑凝灰岩			151±1.4	
	沉凝灰岩			153±1.4	
太华山火山机构	晶屑凝灰岩			150±2.0	
邱埕钼矿	花岗斑岩			150±1.3	
	花岗斑岩	LA-ICP-MS	锆石	151±0.8	资料 ^③
永坑火山机构	晶屑凝灰岩			151±1.1	
	晶屑凝灰岩			151±1.1	
	含黄铁矿花岗斑岩			153±1.5	
双旗山金矿	蚀变花岗斑岩			153±1.0	
	蚀变二长斑岩			151±1.7	

整,以及挤压向伸展构造应力转变的整个过程。邱垵钼矿成矿时间可能为古太平洋板块朝东亚陆缘碰撞挤压作用基本结束向伸展作用转化的开始,成矿受该过程的影响,成矿花岗岩斑多受北东向和北西向断裂构造带控制,成矿时间与区内大规模的火山-次火山活动时间一致,也与南岭地区大规模的成岩成矿事件一致,是否与南岭东西向构造向武夷山北东向构造体系的转换相关? 本次研究认为邱垵钼矿床可能为古太平洋板块朝东亚陆缘碰撞挤压作用结束向伸展作用转化过程的产物。

7 结 论

(1)福建德化邱垵钼矿床中获得的6个辉钼矿样品的等时线年龄为(150.8±1.6) Ma,模式年龄为150.1~152.8 Ma,加权平均年龄为(151.81±0.91) Ma。

(2)邱垵铁钼多金属矿床形成于晚侏罗世晚期火山-次火山活动期。辉钼矿样品中 Re/Os 比值高(>4)及 Re 的含量大多数为 $14.31 \times 10^{-6} \sim 45.8 \times 10^{-6}$ (1件为 174.7×10^{-6}),显示邱垵钼矿床的成矿物质主要来源于地壳,可能还有少量幔源物质的加入,为该晚侏罗世火山喷发活动及后期次火山-侵入体热液作用的产物。

(3)邱垵钼矿床可能为古太平洋板块朝东亚陆缘碰撞挤压作用结束向伸展作用转化过程的产物。

致谢:在野外工作中得到了尤溪县鑫鑫矿业有限公司的大力支持,文章修改中得到了审稿人的指导,在此一并致以衷心的感谢。

注释

①福建省地质局. 1977. 1:20万德化幅区域地质调查报告[R].

②福建省地质调查研究院. 2018. 福建东洋地区矿产地质调查[R].

③南京地质调查中心. 2018. 武夷德化-尤溪-永泰矿集区三维综合探测与深部成矿预测2018年总结报告[R].

References

Bohlke J K, De Laeter J R, De Bièvre P, Peiser H S, Rosman K J R, Taylor P D P. 2001. Isotopic compositions of the elements[J]. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 34(1): 57-67.

Dai Pan, Wu Shenghua and Ding Chengwu. 2018. Zircon U-Pb dating of granite porphyry and Re-Os isotopic dating of molybdenite from Wangwu porphyry Mo-Cu deposit, Jiangxi Province, and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(9):

2598-2614(in Chinese with English abstract)

Du Andao, Qu Wenjun, Li Chao, Yang Gang. 2009. A review on the development of Re-Os isotopic methods and techniques[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3): 288-304(in Chinese with English abstract).

Du Andao, Qu Wenjun, Wang Denghong, Li Chao. 2012. Re-Os Methods and Its Application to Ore Study [M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).

Du Andao, He Hongliao, Yin Ningwan, Zou Xiaoqi, Sun Yiali, Sun Dezhong, Chen Shaozhen, Qu Wenjun. 1994. A study on the rhenium-osmium geochronometry of molybdenites[J]. *Acta Geologica Sinica*, 68(4): 339-347(in Chinese with English abstract).

Feng Zongzhi, Bian Runzhang. 1991. Volcanic geology and mineralization of volcanic rocks in Yongtai-Dehua area, Fujian Province[J]. *Bulletin of the Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources*, Supplement No. 9(in Chinese with English abstract).

Fujian Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. 1985. *Regional Geology of Fujian Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).

Gao Yongbao, Li Kan, Qian Bing, Li Wenyuan, He Shuyue, Zhang Damin, Wang Minsheng. 2018. The metallogenic chronology of Kaerqueka Deposit in Eastern Kunlun: Evidences from molybdenite Re-Os and phlogopite Ar-Ar ages[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(1): 96-107(in Chinese with English abstract).

Guo Chunli, Li Chao, Wu Shi-chong, Xu Yiming. 2014. Molybdenite Re-Os isotopic dating of Xitian deposit in Hunan Province and its geological significance[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2014, 33(1): 142-152(in Chinese with English abstract).

Huang T K. 1945. On Major Tectonic Forms of China[J]. *Geological Memoirs, Serial A*, 20: 1-165.

Li Chao, Qu Wenjun, Du'an Dao. 2009. Decoupling of Re and Os and migration model of ^{187}Os in coarse-grained molybdenite[J]. *Mineral Deposits*, 28(5): 707-712(in Chinese with English abstract).

Li Chao, Qu Wenjun, Du Andao, Sun Wenjing. 2009. Comprehensive study on extraction of rhenium with acetone in Re-Os isotopic dating[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3): 233-238 (in Chinese with English abstract).

Li Chao, Qu Wenjun, Du Andao. 2010. Rapid separation of osmium by direct distillation with carius tube[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 29(1): 14-16 (in Chinese with English abstract).

Li Chao, Pei Haoxiang, Wang Denghong, Zhou Limin, Zhao Hong, Li Xinwei, Qu Wenjun, Du Andao. 2016. Age and source constraints for Kongxintou copper molybdenum deposit Shandong from Re-Os isotope in molybdenite and chalcopyrite[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(2): 240-249(in Chinese with English abstract).

Li Haili, Xiao Huiliang, Fan Feipeng, Chen Lezhu, Liu Jianxiang,

- Chen Xutao. 2016. Molybdenite Re-Os isotopic age of Fei'eshan tungsten and molybdenum polymetallic deposit in Chao'an, Guangdong[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(2): 231–239(in Chinese with English abstract).
- Li Yongfeng, Mao Jingwen, Guo Baojian, Shao Yongjun, Fei Hongcai and Hu Huabin. 2004. Re-Os dating of molybdenite from the Nannihu Mo(~W) Orefield in the East Qinling and its geodynamic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 463–470.
- Li Zhengxiang, Li Xianhua, Wartho J A, Clark C, Li Wuxian, Zhang Chuanlin, Bao Chaomin. 2010. Magmatic and metamorphic events during the Early Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny, southeastern South China: New age constraints and pressure-temperature conditions[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 122(5/6): 772–793.
- Liang Qingling, Jiang Sihong, Shaohuai, Li Chao, Zeng Fagang. 2012. Re-Os dating of molybdenite from the Luoboling porphyry Cu-Mo deposit in the Zijinshan ore field of Fujian province and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(7): 1113–1118.
- Ludwig K. 1999. Isoplot/Ex, version 2.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Geochronology Center.
- Mao Jingwen, Shao Yongjun, Xie Guiqing, Zhang Jiandong, Chen Yuchuan. 2009. Mineral deposit model for porphyry skarn polymetallic copper deposits in Tongling ore dense district of Middle Lower Yangtze Valley metallogenic belt[J]. *Mineral Deposits*, 28(2): 109–119(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, Yuan Shunda, Cheng Yanbo, Cheng Yuchuan. 2008. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 510–526(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Zhang Zhaochong, Zhang Zuoheng, Yang Jianming, Wang Zhiliang, Du Andao. 1999. Re-Os age dating of molybdenites in the Xiaoliugou tungsten deposit in the Northern Qilian Mountains and its significance[J]. *Geological Review*, 45(4): 412–417(in Chinese with English abstract).
- Qu Wenjun, Du Andao, Ren Jing. 2008. Influence of H₂O₂ on the signal intensity of rhenium, osmium and Re-Os age in the process of dissolution for pyrite[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 8(2): 223–226(in Chinese with English abstract).
- Qu Wenjun, Du Andao. 2003. Highly precise Re-Os Dating of molybdenite by ICP-MS with carius tube sample digestion [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 22(4): 254–262(in Chinese with English abstract).
- Qu Wenjun, Du Andao, Li Chao. 2009. High-precise determination of osmium isotopic ratio in the Jinchuan copper-nickel sulfide ore samples[J]. *Rock and Mineral Analysis* 28(3): 219–222(in Chinese with English abstract).
- Ren Jishun. 1984. The Indosinian orogeny and its significance in the tectonic evolution of China [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 6(2): 31–42(in Chinese with English abstract).
- Ren Jishun. 1990. On the geotectonics of Southern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 64(4): 275–288(in Chinese with English abstract).
- Roberta L, Rudnick, Richard J, Walker. 2009. Interpreting ages from Re-Os isotopes in peridotites[J]. *Lithos*, 112: 1083–1095.
- Shirey S B, Walker R J. 1998. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry[J]. *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, 26: 423–500.
- Shu Liangshu. 2006. Pre-Devonian tectonic evolution in South China: From Cathaysian block to Caledonian orogenic belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 418–431(in Chinese with English abstract).
- Smoliar M.I., Walker R.J. and Morgan J.W. 1996. Re-Os ages of group IIA, IIIA, IVA and VIB iron meteorites[J]. *Science*, 271: 1099–1102.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Hannah J L, Schersten A. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works[J]. *Terra Nova*, 13: 479–486.
- Wang Libing, Qu Wenjun, Li Chao, Zhou Limin, Du Andao, Li Bo. 2013. Method study on the separation and enrichment of rhenium measured by negative thermal ionization mass spectrometry[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 32(3): 402–408(in Chinese with English abstract).
- Yao Junming, Hua Renmin, Qu Wenjun, Qi Huawen, Lin Jinfu, Du Andao. 2007. Molybdenite Re-Os isotopic dating of Huangshaping lead, zinc tungsten and molybdenum polymetallic deposit in South Hunan Province and its geological significance[J]. *Science in China(D)*, 37(4): 471–477(in Chinese).
- Ye Huishou, Mao Jingwen, Li Yongfeng, Guo Baojian, Zhang Changqing, Liu Jun, Yan Quanren, Liu Guoying. 2008. 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*, 82(1): 134–145.
- Zhang Da, Wu Ganguo, Liu Naizhong, Di Yongjun, Lü Liangji, Cao Wenrong. 2010. Re-Os isotopic age of molybdenite of the Beikengchang molybdenite and multi-metal deposit in Zhangping City, Fujian Province and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(10): 1428–1437(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiquan. 2013. Geologic characteristics of the Qinggang section of Qiucheng molybdenum deposit in Dehua County, Fujian Province [J]. *Geology of Fujian*, 32(2): 105–111(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Li Jianhua, Cui Jianjun, Shi Wei, Su Jinbao, Li Yong. 2012. The new progress in the study of Mesozoic tectonics of South China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(3): 257–279(in Chinese with English abstract).

- Zhao Xilin, Mao Jianren, Chen Rong, Xu Naizheng. SHRIMP zircon dating of the Zijinshan pluton in southwestern Fujian and its implications[J]. *Geology in China*, 2008, 35(4): 590–597(in Chinese with English abstract).
- Zheng Wei, Ouyang Hegen, Zhao Haijie, Zhao Caisheng, Yu Xiaofei, Luo Daluo, Huanghua Valley, Ouyang Zhixia. 2017. Re-Os dating for the molybdenite from the Xiping Mo-Cu polymetallic deposit in Guangdong Province and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(3): 843–858.
- Zhou Ke, Ye Huishou, Mao Jingwen, Qu Wenjun, Zhou Shufeng, Meng Fang, Gao Yalong. 2009. Geological characteristics and molybdenite Re-Os isotopic dating of Yuchiling porphyry Mo deposit in western Henan Province[J]. *Mineral Deposits*, 28(2): 170–184(in Chinese with English abstract).
- Zhou Limin, Gao Bingyu, Wang Libing, Li Chao, Qu Wenjun, Hou Zengqian, Du Andou. 2012. Improvements on the separation method of osmium by direct distillation in Carius tube[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 31(3): 413–418(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 戴盼, 吴胜华, 丁成武. 2018. 江西王垅斑岩型 Mo-Cu 矿床花岗斑岩锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 同位素测年及地质意义[J]. *岩石学报*, 34(9): 2598–2614.
- 杜安道, 屈文俊, 李超, 杨刚. 2009. 铼-钨同位素定年方法及分析测试技术的进展[J]. *岩矿测试*, 28(3): 288–304.
- 杜安道, 屈文俊, 王登红, 李超. 2012. 铼-钨法及其在矿床学中的应用[M]. 北京: 地质出版社.
- 杜安道, 何红蓼, 殷宁万, 邹晓秋, 孙亚利, 孙德忠, 陈少珍, 屈文俊. 1994. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究[J]. *地质学报*, 68(4): 339–347.
- 冯宗帜, 卞润章. 1991. 福建永泰—德化地区火山地质及火山岩含矿性[J]. *南京地质矿产研究所所刊, 增刊第9号*.
- 福建省地质矿产局. 1985. 福建省区域地质志[J]. 北京: 地质出版社.
- 高永宝, 李侃, 钱兵, 李文渊, 何书跃, 张大民, 王生明. 2018. 东昆仑卡而却卡铜钨铁多金属矿床成矿年代学: 辉钼矿 Re-Os 和金云母 Ar-Ar 同位素定年约束[J]. *大地构造与成矿学*, 42(1): 96–107.
- 郭春丽, 李超, 伍式崇, 许以明. 2014. 湘东南锡田辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义[J]. *岩矿测试*, 33(1): 142–152.
- 李超, 屈文俊, 杜安道. 2009. 大颗粒辉钼矿 Re-Os 同位素失耦现象及 ^{187}Os 迁移模式研究[J]. *矿床地质*, 28(5): 707–712.
- 李超, 屈文俊, 杜安道, 孙文静. 2009. 铼-钨同位素定年法中丙酮萃取铼的系统研究[J]. *岩矿测试*, 28(03): 233–238.
- 李超, 屈文俊, 周利敏, 杜安道. 2010. Carius 管直接蒸馏快速分离钨方法研究[J]. *岩矿测试*, 29(1): 14–16.
- 李超, 裴浩翔, 王登红, 周利敏, 赵鸿, 李欣尉, 屈文俊, 杜安道. 2016. 山东孔辛头铜钨矿成矿时代及物质来源: 来自黄铜矿、辉钼矿 Re-Os 同位素证据[J]. *地质学报*, 90(2): 240–249.
- 李海立, 肖惠良, 范飞鹏, 陈乐柱, 刘建雄, 陈叙涛. 2016. 广东潮安飞鹅山钨钼多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年[J]. *地质学报*, 90(2): 231–239.
- 梁清玲, 江思宏, 王少怀, 李超, 曾法刚. 2012. 福建紫金山矿田罗卜岭斑岩型铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 定年及地质意义[J]. *地质学报*, 86(7): 1113–1118.
- 毛景文, 邵拥军, 谢桂青, 张建东, 陈毓川. 2009. 长江中下游成矿带铜陵矿集区铜多金属矿床模型[J]. *矿床地质*, 28(2): 109–119.
- 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[J]. *高校地质学报*, 14(4): 510–526.
- 毛景文, 张作衡, 张招崇, 杨建民, 王志良, 杜安道. 1999. 北祁连山小柳沟钨矿床中辉钼矿 Re-Os 年龄测定及其意义[J]. *地质论评*, 45(4): 412–417.
- 屈文俊, 杜安道, 任静. 2008. 过氧化氢在黄铁矿的溶解过程中对铼-钨信号强度及年龄的影响研究[J]. *分析化学*, 8(2): 223–226.
- 屈文俊, 杜安道. 2003. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿铼-钨地质年龄[J]. *岩矿测试*, 22(4): 254–262.
- 屈文俊, 杜安道, 李超. 2009. 金川铜镍硫化物样品中钨同位素比值的高精度分析[J]. *岩矿测试*, 28(3): 219–222.
- 任纪舜. 1984. 印支运动及其在中国大地构造演化中的意义[J]. *地球学报*, 6(2): 31–42.
- 任纪舜. 1990. 论中国南部的大地构造[J]. *地质学报*, 64(4): 275–288.
- 舒良树. 2006. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带[J]. *高校地质学报*, 12(04): 418–431.
- 王礼兵, 屈文俊, 李超, 周利敏, 杜安道. 2013. 负离子热表面电离质谱法测量铼的化学分离方法研究[J]. *岩矿测试*, 32(3): 402–408.
- 姚军明, 华仁民, 屈文俊, 戚华文, 林锦富, 杜安道. 2007. 湘南黄沙坪铅锌钨钼多金属矿床辉钼矿的 Re-Os 同位素定年及其意义[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 37(4): 471–477.
- 张达, 吴淦国, 刘乃忠, 狄永军, 吕良冀, 曹文融. 2010. 福建漳平北坑场钨多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. *地质学报*, 84(10): 1428–1437.
- 张集泉. 2013. 福建德化丘垵矿区青岗钨矿床地质特征[J]. *福建地质*, 32(2): 105–111.
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 崔建军, 施炜, 苏金宝, 李勇. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展[J]. *地球学报*, 33(3): 257–279.
- 赵希林, 毛建仁, 陈荣, 许乃政. 2008. 闽西南地区紫金山岩体钨矿 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. *中国地质*, 135(4): 590–597.
- 郑伟, 欧阳荷根, 赵海杰, 赵财胜, 于晓飞, 罗大略, 黄华谷, 欧阳志侠. 2017. 广东锡坪钨铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 33(3): 843–858.
- 周珂, 叶会寿, 毛景文, 屈文俊, 周树峰, 孟芳, 高亚龙. 2009. 豫西鱼池岭斑岩型钨矿床地质特征及其辉钼矿铼-钨同位素年龄[J]. *矿床地质*, 28(2): 170–184.
- 周利敏, 高炳宇, 王礼兵, 李超, 屈文俊, 侯增谦, 杜安道. 2012. Carius 管直接蒸馏快速分离钨方法的改进[J]. *岩矿测试*, 31(3): 413–418.