

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.256



# 福建紫金山矿田黑云母花岗岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素组成

谢其锋<sup>1,2</sup>, 蔡元峰<sup>2\*</sup>, 董云鹏<sup>3</sup>, 黎敦朋<sup>1</sup>

1. 福州大学紫金矿业学院, 福建福州 350108

2. 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 江苏南京 210046

3. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西西安 710069

**摘要:**紫金山矿田位于华南褶皱系东部, 闽西南凹陷西南部, 是我国大型—超大型浅成—中温热液铜金矿床, 区内发现多个与岩浆活动密切相关的金、银、铜等金属矿床。对紫金山矿田东南矿段与成矿密切相关的细粒黑云母花岗岩开展了详细野外地质调查、岩相学和锆石稀土元素、U-Pb 年代学和 Hf 同位素研究。LA-ICP-MS 法获得细粒黑云母花岗岩中岩浆结晶锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  谐和年龄为  $109.5 \pm 1.9$  Ma (MSWD=0.74,  $N=16$ ),  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $107.44 \pm 0.94$  Ma (MSWD=1.06,  $N=16$ ), 二者在误差范围内结果一致, 结合锆石稀土元素和岩浆振荡环带特征及 Th/U 比值, 上述年龄结果可代表岩石的结晶年龄, 表明细粒黑云母花岗岩侵位于燕山期早白垩世。细粒黑云母花岗岩锆石 Hf 同位素初始比值  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  均为负, 介于  $-4.99 \sim -1.06$  (平均值为  $-2.99$ ); 两阶段 Hf 模式年龄 ( $t_{\text{DM}^2}$ ) 介于  $1\,233.7 \sim 1\,485.4$  Ma (平均值为  $1\,362.4$  Ma)。样品的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 、Hf 同位素地壳模式年龄分布范围变化较小, 暗示岩体的岩浆来源具有较为均一的锆石 Hf 同位素组成。紫金山矿田东南矿段早白垩世花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征, 反映了闽西南早白垩世的岩浆成矿活动时间和源区特征, 其成因与中国东南部岩石圈伸展减薄和壳源物质参与岩浆形成演化密切相关。

**关键词:** LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年; Hf 同位素; 早白垩世; 花岗岩; 伸展减薄; 紫金山矿田东南矿段; 矿床。

中图分类号: P588.34; P597.3

文章编号: 1000-2383(2019)04-1311-16

收稿日期: 2018-08-21

## Zircon Geochronology and Hf Isotope Compositions of Biotite Granite in Southeast Ore Section of Zijinshan Ore Field, Fujian Province

Xie Qifeng<sup>1,2</sup>, Cai Yuanfeng<sup>2\*</sup>, Dong Yunpeng<sup>3</sup>, Li Dunpeng<sup>1</sup>

1. College of Zijin Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

2. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing 210046, China

3. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China

**Abstract:** Zijinshan ore field is located in the eastern part of South China fold system, belonging to the Southwest Fujian depression, where develops many large and super-large epithermal Au-Cu-Ag deposits which are closely related with magmatic activities. The study in this paper is based on a detailed research of the fine-grained biotite granite in the southeastern ore section including field geological survey and petrography, zircon rare earth elements, in-situ zircon U-Pb chronology and Hf isotope et al.. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating shows that the  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  correlated age of the biotite granite is  $109.5 \pm 1.9$  Ma (MSWD=0.74,  $N=16$ ), and  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  weighed age is  $107.44 \pm 0.94$  Ma (MSWD=1.06,  $N=16$ ), and the two ages

**基金项目:** 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室项目 (No.20-15-05); 西北大学大陆动力学国家重点实验室项目; 福州大学 2017 年国家级大学生创新训练计划项目 (No.201710386031)。

**作者简介:** 谢其锋 (1981—), 男, 副教授, 博士, 主要从事矿产普查与勘探教学与研究。ORCID: 0000-0001-7152-2461. E-mail: xieqf@fzu.edu.cn

\* 通信作者: 蔡元峰, E-mail: caiyf@nju.edu.cn

**引用格式:** 谢其锋, 蔡元峰, 董云鹏, 等, 2019. 福建紫金山矿田黑云母花岗岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素组成. 地球科学, 44(4): 1311-1326.

are within the error range. According to zircon REE and magmatic oscillatory zoning characteristics and the Th/U ratios, the age can represent the rock crystallization age, which suggests fine-grained biotite granite emplaced in the Early Cretaceous of the Yanshanian epoch. The Hf isotope initial ratio  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values are negative, ranging from  $-4.99$  to  $-1.06$  (mean value is  $-2.99$ ). Two stage Hf model ages ( $t_{\text{DM}}^2$ ) range from 1 233.7 Ma to 1 485.4 Ma (mean value is 1 362.4 Ma). The  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  and Hf values show small variations in distribution, which implies that magmatic rocks having a more uniform zircon Hf isotope composition. The in-situ zircon U-Pb chronology and Hf isotope show time and source characteristics of Early Cretaceous magmatic activity in south-western part of Fujian Province, which results from the evolution of the extension and thinning, and crust-derived magma substance involved from lithosphere are closely related. In this paper, it provides new evidence on the mineralization and tectonic evolution of the Zijinshan ore field.

**Key words:** LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; Hf isotope; Early Cretaceous; granite; extension and thinning; southeast ore section in Zijinshan ore field; ore deposits.

福建省紫金山矿田位于华南褶皱东部,闽西南拗陷的西南部,行政区域上处于福建省龙岩市上杭县,是我国著名的大型—超大型 Cu-Au 多金属矿田,矿床面积约  $4.3 \text{ km}^2$ .紫金山矿田在中生代发生拉张、地幔上涌的构造作用下,燕山期花岗岩侵入作用过程中形成了大规模的构造—岩浆—成矿活动,形成了由英安玢岩、石英斑岩、英安质、花岗质隐爆角砾岩和角砾状凝灰岩等为中心的火山岩—次火山岩侵入岩,形成了一套斑岩—浅成低温热液成矿系统(张德全等,2001,2003,2005;毛建仁等,2002;黄仁生,2008;王少怀等,2009;邱小平等,2010;胡春杰等,2012;黄文婷等,2013;Jiang *et al.*,2013).紫金山矿田自西南向北东方向,发育了悦洋大型 Ag 多金属矿(低硫化)、紫金山大型—超大型 Cu-Au 矿(高硫化)浅成低温热液型矿床以及斑岩型罗卜岭 Cu-Mo 矿床,在中间地带出现过渡型矿床,包括了罗卜岭、悦洋、五子骑龙、大岩里、二庙沟、龙江亭等与矿床成因密切相关的一系列中、小型矿床(图 1)(张德全等,2001,2003;王少怀等,2009;胡春杰等,2012;黄文婷等,2013;李斌等,2013).前人对紫金山矿田开展过大量的岩石学、岩石地球化学及年代学研究,众多学者对不同岩体的年代学特征、分布范围,以及岩体对矿床的控制和影响作用方面的认识存在着一定的差异(张德全等,2001;毛建仁等,2002;胡春杰等,2012;肖爱芳等,2012;黄文婷等,2013;李斌等,2013,2015;王翠芝,2013;于波等,2013).总体看来,前人针对与成矿矿体密切相关的花岗岩围岩的锆石开展了 U-Pb 和 Hf 同位素测试工作,但是对与成矿关系密切的黑云母花岗岩研究相对欠缺.因此,为了更好地讨论和约束紫金山矿田花岗岩体对不同矿床成矿的控制、影响作用,本文选取了紫金山矿田东南矿段与成矿密切相关的黑云母花岗岩进行了精确的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb

测年和 Hf 同位素组成研究,不仅有助于加深紫金山矿田基础地质研究程度,也能有效讨论和约束岩体对矿床的成矿作用和成矿时代,对讨论矿田内中生代岩浆源区及演化特征,和识别紫金山矿田的构造属性和多金属矿床形成和演化过程也有重要意义.

近年来,随着现代地球化学测试技术的日益提升,运用高精度离子探针质谱仪(SHRIMP)和激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS)等技术方法对紫金山的部分岩体进行了锆石 U-Pb 定年,厘定了多个岩体的年龄(赵希林,2007;胡春杰等,2012;黄文婷等,2013;李斌等,2013,2015;Jiang *et al.*,2013;于波等,2013;Li and Jiang,2014;Zhong *et al.*,2014;Sun *et al.*,2015;Li *et al.*,2017;Duan *et al.*,2017;Jiang *et al.*,2017;Wang *et al.*,2017,2018).为了有效地约束紫金山矿田东南矿段成矿矿体花岗岩围岩的成岩时代与岩浆来源,本文对紫金山矿田东南矿段 PT-720 平台开展了详细的野外地质调查,并对平台中发育的浅肉红色细粒黑云母花岗岩开展了锆石原位 U-Pb 测年和 Hf 同位素分析等研究工作,初步确定东南矿段细粒黑云母花岗岩体的侵位时代为早白垩世,岩浆来源主体为壳源,成因可能是在中国东南部受太平洋动力学体系的相互作用下,在东南沿海地区发生拉张伸展、地壳减薄、下部地壳部分熔融形成花岗质岩浆.

## 1 区域地质概况

福建省紫金山金铜矿田位于华夏地块闽西南拗陷带的西南部,处于北东向宣和复背斜和云霄—上杭北西向深断裂交汇处,区域上受到北西向深断裂的影响,不同期次的构造和岩浆活动控制和影响了区内的成矿、蚀变作用(王少怀等,2009;张文媛和王

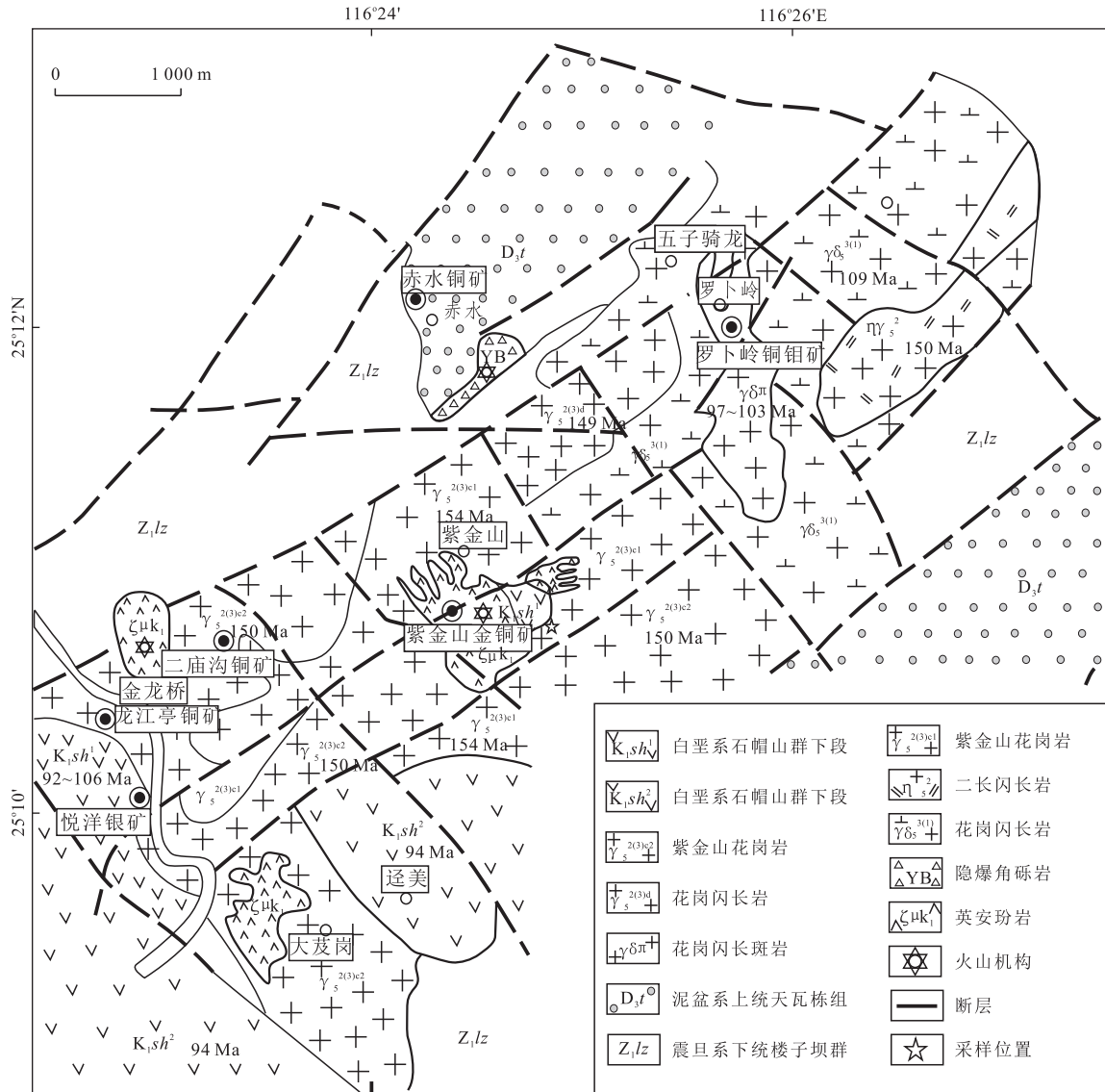


图 1 紫金山矿田中生代岩浆岩及矿床分布

Fig.1 Distribution of Mesozoic magmatic rocks and ore deposits in the Zijinshan ore field

据邱小平等(2010)和于波等(2013)修改

翠芝, 2014). 区内出露地层自下而上包括: 新元古界楼子坝群浅海相粉砂质、绢云母千枚岩, 晚泥盆统天瓦崇组和桃子坑组浅海—滨海相碎屑岩沉积地层、早石炭世林地组下段海相石英砂砾岩和晚石炭世船山组海相泥晶灰岩, 下白垩统石帽山群下段喷发火山碎屑、英安岩和复成分砂砾岩, 第四系砂砾岩。

紫金山矿田构造主要受控于北西向宣和复式背斜, 由震旦系和古生界地层组成, 整体呈北东向展布(王少怀和裴荣富, 2007), 区内断裂构造较发育, 主要为北东向和北西向两组, 其次为北北东向、近东西向次级断裂和少量近东西向、南北向次一级断裂, 整体上处于武夷山成矿带中生代陆缘岩弧构造环境(图 1)(邱小平等, 2010). 矿田内主要发育了两期侵

人体, 晚侏罗世侵入体的分布主要受控于前白垩纪具陡倾性质的复背斜轴向断裂及其控制的次级断裂(张德全等, 2003), 白垩纪火山岩—侵入岩岩浆作用和成矿活动主要受控于北西向断裂(陈静等, 2011). 矿田内发育的断裂和岩浆活动, 是矿床形成过程中重要的导矿和容矿构造(王少怀等, 2009; Zhong et al., 2014; Sun et al., 2015; Wang et al., 2017, 2018). 紫金山东南矿段矿床容矿构造主要由紫金山复式岩体组成, 由早—中侏罗世的中酸性岩浆侵入到北西向上杭—云霄与北东向宣和复背斜交汇处, 而形成规模较大的岩基(图 2a). 晚侏罗世—早白垩世, 不同规模和岩性的花岗岩体侵入到受北西向、北东向断裂(图 2b, 2c)与火山机构双重控制的岩体



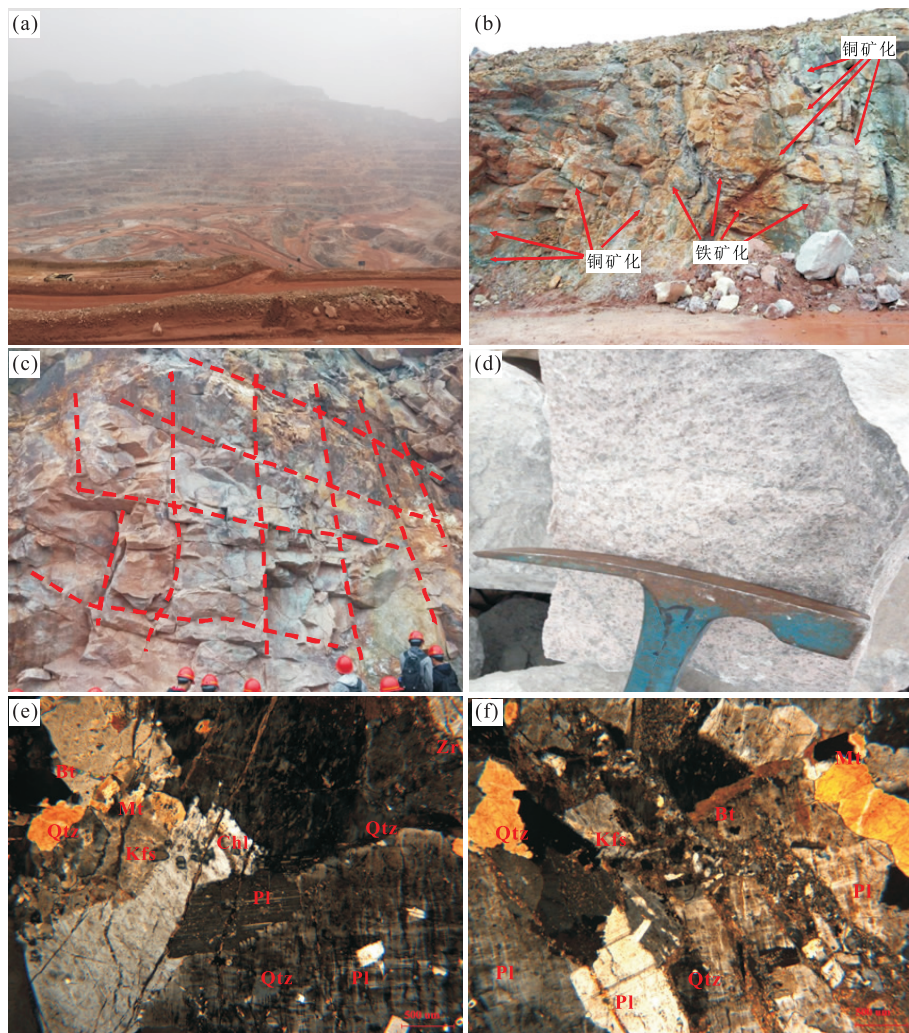


图 2 紫金山矿田东南矿段细粒黑云母花岗岩的野外宏观露头照片(a~d)和镜下照片(e,f)

Fig.2 Outcrop (a-d) and microscope images (e,f) the granite in southeast ore section of Zijinshan ore field

a. 紫金山矿田东南矿段整体状况; b. 蓝辉铜矿化、黄铁矿矿化花岗岩体, 发育一组北北西向节理; c. 岩体中发育北北西-北北东向两组近垂直节理; d. 浅肉红色细粒黑云母花岗岩; e. 花岗岩, 细粒花岗结构; f. 具环带结构的斜长石交代聚片双晶斜长石. 矿物缩写: Qtz. 石英; Kfs. 钾长石; Pl. 斜长石; Bt. 黑云母; Chl. 绿泥石; Zr. 锆石; Ap. 磷灰石

中, 形成了紫金山铜多金属高硫浅成低温热液矿床. 经过前期的勘探和开采证实, 铜金矿床位于紫金山复式岩体的中部, 与二庙沟岩体、迳美岩体以及矿区中不同期次的岩体侵入到断裂交汇部分密切相关; 由于受多期岩浆、矿化热液的共同作用, 成矿条件复杂, 由此所产生的围岩蚀变也很强烈. 金矿床主要分布于浅水面以上 (>600 m), 与低温硅化密切相关, 大部分金矿体的分布受控于硅化帽, 而少量的原生金呈分散状态分布于硫化物中; 紫金山金铜矿受多期矿化热液作用, 围岩蚀变强烈. 金矿主要分布于潜水面以上, 与区内低温硅化密切相关, 大部分金矿体的空间分布受硅化帽控制, 部分原生金矿呈分散状态赋存于硫化矿物中; 铜矿主要分布于潜水面以下, 与明矾石化、硅化关系密切, 形成“上金下铜”的局

面, 截至目前其底界尚未得到很好的约束(张文媛和王翠芝, 2014).

矿区内花岗岩体露头发育良好, 侵入体与围岩的内接触带发生强烈矿化, 接触面呈港湾状, 矿石矿物主要由铜矿、蓝辉铜矿、黄铁矿和褐铁矿化等组成, 次要矿物由铜蓝、斑铜矿、闪锌矿和方铜矿等组成; 侵入体与围岩外接触带发生强烈蚀变, 主要由硅化、地开石化、明矾石化、绢云母化等组成; 岩体发育了北北西节理和北北西-北北东向两组近垂直的节理(图 2b, 2c). 本次采集的岩石标本为外接触带未发生蚀变且与蓝辉铜矿密切相关的细粒黑云母花岗岩, 岩石整体呈现为浅肉红色, 细粒花岗结构, 块状构造(图 2d). 矿物粒径在 0.5~1.5 mm 不等, 主要矿物成分为斜长石 15%~28%、钾长石 34%~

50%、石英 20%~28% 和黑云母 7%~10%，副矿物主要有锆石、磷灰石等(图 2d)。

岩体的围岩地层主要为区域伸展地球动力学机制下形成的白垩纪岩浆岩(张德全等, 2001, 2003; Sun *et al.*, 2015; Jiang *et al.*, 2017), 在地表先后形成了早白垩世石帽山群火山岩、紫金山火山岩筒中的英安玢岩、隐爆角砾岩和浅成的四坊岩体, 以及在紫金山—罗卜岭地区形成的铜钼矿化的花岗闪长斑岩(肖爱芳等, 2012)。在不同构造位置上, 二者的接触界面和界线都有一定的差异, 在露天采场西南部可见紫金山东南矿段花岗岩体不整合下伏于石帽山群下段流纹岩和熔结火山角砾岩; 在二庙沟剖面东北侧, 石帽山群不整合覆于下震旦统楼子坝群之上, 而花岗岩体不整合侵入到石帽山群上段肉红色流纹岩、流纹斑岩(张德全等, 2003; 肖爱芳等, 2012)。

## 2 样品描述及分析方法

紫金山矿田东南矿段细粒黑云母花岗岩样品的采样位置为东南矿段 PT-720 平台, 因为矿区位置为保密地点, 因此经纬度坐标不能公开公布。细粒黑云母花岗岩为紫金山矿田成矿元素的主要富矿围岩, 隐爆角砾岩沿着北北东—北北西两组断裂、及其相互交叉部分和次一级裂隙充填, 形成了一系列透镜状、脉状和条带状矿体。岩石薄片磨制在紫金矿业集团低品位难处理黄金资源综合利用国家重点实验室完成, 在福州大学福建省矿产资源中心实验室蔡司 Axioskop40 偏光显微镜下进行薄片鉴定、照相等。区内断裂构造较发育, 主要为北东向和北西向两组, 其次为北北东向、近东西向次级断裂和少量近东西向、南北向次一级断裂。

样品薄片下定名为细粒黑云母花岗岩。岩石呈浅肉红色碎裂状细粒花岗岩, 块状构造, 主要矿物成分为石英 13%~18%, 钾长石 38%~43%, 斜长石 20%~25%, 黑云母 1%~5% 及少量副矿物。石英呈他形粒状, 粒度较小, 不均匀分布于其他矿物颗粒之间, 因为磨制后的薄片厚度超过 0.3 mm, 部分石英的干涉色呈现为黄色(图 2e, 2f); 钾长石呈半自形—自形结构, 内部含少量石英颗粒和斜长石, 主要为条纹长石和正长石(图 2e, 2f); 斜长石主要成分为 An 牌号在 30~33 的中长石, 少量为 30 左右的更长石, 多呈半自形板片状—长柱状, 粒径 0.6~2.0 mm 之间, 聚片双晶发育, 环带结构少见, 表面发育不同程度的绢云母化和绿泥石化(图 2e, 2f)。黑云母呈细粒

他形集合体条带状分布在斜长石和钾长石矿物颗粒之间, 边部受到不同程度的绿泥石化。矿物粒径 2~6 mm, 均值为 3 mm, 副矿物组合为磁铁矿、榍石、锆石、磷灰石等。用于 U-Th-Pb 同位素测定的锆石单矿物分选由河北省区域地质矿产调查研究所完成, 原岩样品新鲜, 重约 5 kg。将分离出来的锆石在双目镜下挑出无裂隙、无包体、透明度好的颗粒, 用环氧树脂固定、打磨、抛光至锆石中心部位暴露出来, 然后透射光、背射光照相和阴极发光(CL)显微结构照相均在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成。通过 CL 镜下对比和分析, 选择锆石晶形完好、无裂隙、环带清晰的颗粒进行锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成的测试分析。

锆石 U-Pb 同位素测试分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成, 仪器为第二代 LA-ICP-MS 测试仪, 激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, 激光束斑直径为 32  $\mu\text{m}$ , 激光剥蚀样品的深度为 20~40  $\mu\text{m}$ , 详细的实验原理和流程参数见袁洪林等(2003)和 Yuan *et al.*(2004)。进行锆石同位素比值和年龄计算时, 采用与未知样品交替测得的标准锆石 91500 的值为外标进行校正(Wiedenbeck *et al.*, 1995), 元素含量采用美国国家标准物质局人工合成的硅酸盐玻璃 NIST SRM610 作为外标。采样方式为单点剥蚀, 数据采集选用一个质量峰一个点的跳峰方式(peak jumping), 每测试 5 个样品分析点重新测试一次标准样, 以此保证标样和样品的仪器条件一直处于良好的状态。以  $^{29}\text{Si}$  作为内标元素进行校正, 样品的同位素比值和元素含量数据处理采用 GLITTER(4.0 版, Macquarie University)软件, 并采用 Andersen 程序(Andersen, 2002)软件对测试数据进行普通铅校正, 年龄计算及谐和图绘制采用 ISOPLOT(2.49 版, Ludwig, 2003)软件完成。

锆石 Hf 同位素分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成, 采用 Neptune 多接收 ICP-MS 配套的 New wave UP-213+Geolas193 激光剥蚀系统。分析时采用激光的束斑直径为 44  $\mu\text{m}$ , 激光脉冲频率为 8 Hz, 以氦气作为载气。为了校正  $^{176}\text{Lu}$  和  $^{176}\text{Yb}$  对  $^{176}\text{Hf}$  的干扰, 取  $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}=0.026\ 58$  和  $^{176}\text{Yb}/^{173}\text{Yb}=0.796\ 218$  作为定值, 分别采用  $^{172}\text{Yb}/^{173}\text{Yb}=1.352\ 74$ ,  $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.732\ 5$  对 Yb 和 Hf 的同位素比值进行指数归一化质量歧视校正, Lu 的质量歧视和 Yb 一致(Chu *et al.*, 2002)。详细分析步骤可参见 Wu *et al.*



(2006)和侯可军等(2007).

### 3 锆石 U-Pb 测年及 Hf 同位素特征

通过详细对比分析锆石的透射光、反射光和阴极发光照片,选择了锆石样品中晶体形态相似、晶体形态发育完整,并且内部结构形态清晰、振荡环带发育的长柱状、粒状自形锆石颗粒,并且锆石测试部分无包裹体、无裂隙以及无杂质的部位进行 U-Th-Pb 同位素测试分析.锆石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 同位素测试分析的阴极发光图像见图 3,同位素测试分析结果见附表 1,锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  同位素谐和年龄图见图 4a,锆石稀土元素的球粒陨石标准化图见图 4b(锆石中稀土元素含量未在本文中列出).锆石 Hf 同位素测试点的分布位置见阴极发光图 3,为了保证 Hf 同位素分析数据的代表性,选择测点时尽量邻近 U-Th-Pb 同位素测试点,Hf 同位素分析结果见表 1.

#### 3.1 锆石晶体形态及阴极发光照片特征

阴极发光照片显示细粒黑云母花岗岩样品锆石颗粒(图 3)颜色近于无色,锆石颗粒绝大部分是自形程度较好的长柱状,少部分为粒状,锆石形态相似,具有明显的核部和较好的岩浆振荡环带结构,为典型岩浆成因(简平等,2001;Belousova *et al.*,2002;Wu and Zheng,2004;Harley and Kelly,2007).锆石核部成因较复杂,主要由岩浆成因、变质作用等复杂原因形成,如 3,4 和 14 号锆石.极少部分锆石发生了后期破碎作用,如 9,11~13 号锆石.锆石粒径多在 120~150  $\mu\text{m}$  之间,部分粒径可达 200  $\mu\text{m}$  以上,如 1,4,10 和 14 号锆石.锆石长短轴比一般在 2:1~1:1 之间,少量的锆石颗粒长短轴比达到 3:1.反射光下显示大部分锆石颗粒表面较

为干净,部分锆石颗粒含有矿物包裹体,如 2,10 号锆石;部分锆石有裂隙,如 8 号锆石.

#### 3.2 锆石 U-Pb 年代学特征

阴极发光照片显示,U-Pb 同位素测试点全部清晰且具有均一的岩浆振荡环带(图 3),为典型的岩浆成因锆石(简平等,2001;Belousova *et al.*,2002;Wu and Zheng,2004;Harley and Kelly,2007).除掉由于锆石形成过程中 Pb 不同程度丢失而造成  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  年龄谐和度较差,以及锆石核部成因较复杂的测点数据后,对所有数据处理采用 Glitter 4.0 软件, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  谐和年龄和  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄均使用 ISOPLOT (2.49 版,Ludwing,2003)软件处理.

对东南矿段细粒黑云母花岗岩样品中的 17 颗锆石进行 U-Th-Pb 同位素测试(加权平均年龄排除了核部年龄 1 个点,见图 3 中的测点 1,测点数据见附表 1 中的 14CL01 点),锆石中 Th、U 含量变化范围不大,Th 含量为  $327 \times 10^{-6} \sim 923 \times 10^{-6}$ ,平均为  $482 \times 10^{-6}$ ;U 含量为  $552 \times 10^{-6} \sim 1426 \times 10^{-6}$ ,平均为  $792 \times 10^{-6}$ (附表 1);Th/U 比值平均值为 0.61,只有一个值小于 0.51(为 0.35),其他值介于 0.51~0.94(附表 1),具有岩浆锆石的特点,Th 和 U 的相关系数为 0.54(图略).锆石稀土元素与球粒陨石标准化图显示(图 4b),稀土元素分布较为均一,并且 HREE 较为富集,具有明显的正 Ce 异常和适度的 Eu 负异常.校正后获得锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄在 104.1~110.8 Ma 之间,年龄数据比较集中, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $107.44 \pm 0.94$  Ma (MSWD=1.06, N=16)(图 4a);在  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  一致曲线上均接近于谐和线,交点年龄为  $109.5 \pm 1.9$  Ma (MSWD=0.74, N=16)(图 4a);在误差范围内,二者的年龄基本一致.结合岩浆振荡环

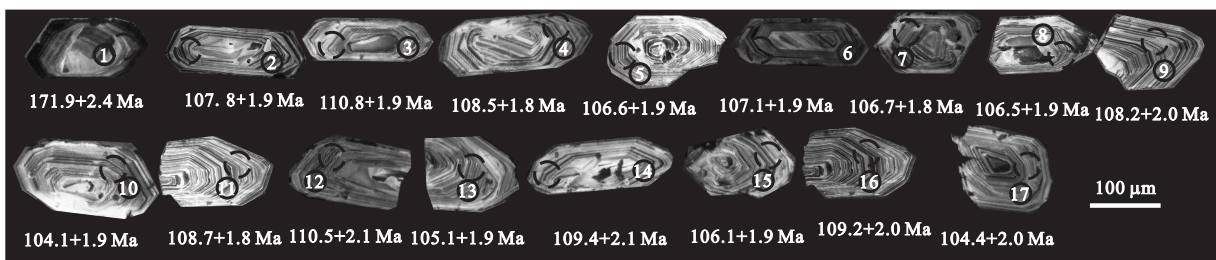


图 3 紫金山矿区东南矿段花岗岩锆石的 CL 图像、U-Pb 和 Hf 同位素测点位置及编号

Fig.3 Typical zircon U-Pb and Hf isotope analysis spot numbers, CL images,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages from granite zircons of south-east ore section in Zijinshan ore field

实线圆圈为 U-Pb 年龄测点,直径为 32  $\mu\text{m}$ ;虚线圆圈为相应的 Hf 同位素测点,直径为 44  $\mu\text{m}$

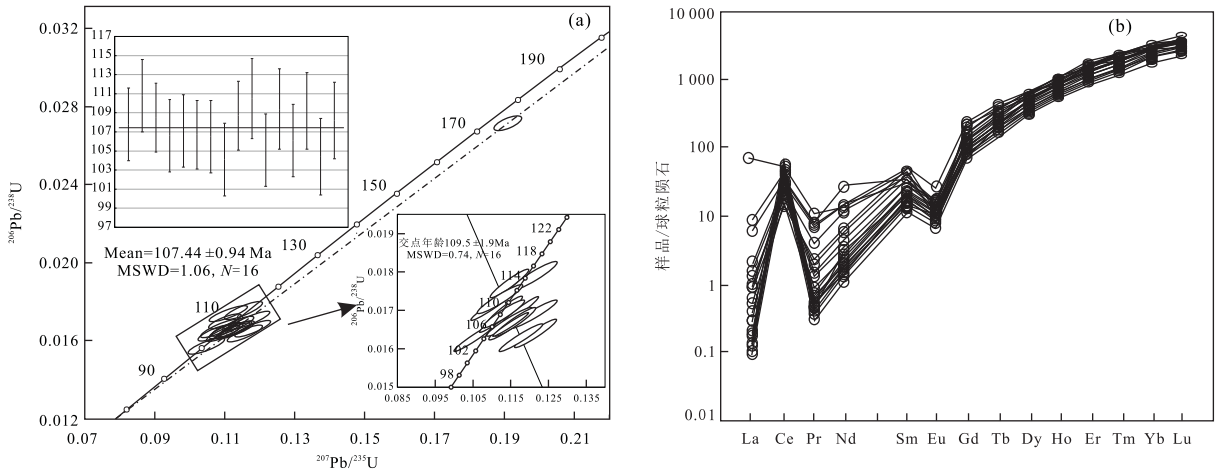


图 4 紫金山矿田东南矿段花岗岩锆石 U-Pb 谐和图(a)和锆石稀土元素球粒陨石标准化图(b)

Fig.4 Zircon <sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U-<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U concordia diagram and <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U weighed average age (a), chondrite-normalized REE patterns diagram (b) of southeast ore section in Zijinshan ore field

球粒陨石标准数据采用 Sun and McDonough(1989)

表 1 闽西南紫金山矿田花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石原位 Lu-Hf 同位素组成分析结果

Table 1 LA-MC-ICP-MS in-situ analyses of zircon Lu-Hf isotopic composition of the Zijinshan granites, Southwest Fujian Province

测点	年龄(Ma)	<sup>176</sup> Yb/ <sup>177</sup> Hf		<sup>176</sup> Lu/ <sup>177</sup> Hf		<sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf		ε <sub>Hf</sub> (t)	t <sub>DM</sub> <sup>1</sup> (Ma)	t <sub>DM</sub> <sup>2</sup> (Ma)	f <sub>Lu/Hf</sub>
		比值	2σ	比值	2σ	比值	2σ				
14CL01	171.9	0.025 621	0.000 265	0.001 236	0.000 013	0.282 609	0.000 019	-2.1	916.0	1 353.8	-0.96
14CL02	107.8	0.030 448	0.000 585	0.001 439	0.000 022	0.282 590	0.000 019	-4.2	947.3	1 433.9	-0.96
14CL03	110.8	0.032 544	0.000 463	0.001 500	0.000 020	0.282 607	0.000 023	-3.5	925.4	1 395.4	-0.95
14CL04	108.5	0.040 784	0.001 013	0.001 881	0.000 040	0.282 624	0.000 023	-3.0	910.5	1 360.1	-0.94
14CL05	106.6	0.031 269	0.000 428	0.001 504	0.000 020	0.282 594	0.000 020	-4.1	943.7	1 426.6	-0.95
14CL06	107.1	0.028 901	0.000 232	0.001 341	0.000 011	0.282 665	0.000 021	-1.5	838.3	1 265.2	-0.96
14CL07	106.7	0.023 936	0.000 467	0.001 166	0.000 020	0.282 626	0.000 019	-2.9	889.6	1 352.5	-0.96
14CL08	106.5	0.040 713	0.003 581	0.001 753	0.000 138	0.282 568	0.000 021	-5.0	987.1	1 485.7	-0.95
14CL09	104.1	0.045 229	0.000 987	0.002 071	0.000 044	0.282 644	0.000 021	-2.4	885.4	1 317.2	-0.94
14CL10	108.7	0.056 805	0.004 055	0.002 553	0.000 170	0.282 625	0.000 022	-3.0	925.8	1 360.4	-0.92
14CL11	110.5	0.025 336	0.000 206	0.001 187	0.000 010	0.282 608	0.000 021	-3.5	916.4	1 392.2	-0.96
14CL12	105.1	0.029 219	0.000 678	0.001 394	0.000 037	0.282 679	0.000 021	-1.1	819.4	1 234.8	-0.96
14CL13	109.4	0.033 660	0.000 467	0.001 630	0.000 025	0.282 631	0.000 021	-2.7	894.2	1 342.6	-0.95
14CL14	106.1	0.039 611	0.000 532	0.001 825	0.000 024	0.282 604	0.000 021	-3.7	937.8	1 406.0	-0.95
14CL15	109.2	0.026 562	0.000 930	0.001 251	0.000 041	0.282 636	0.000 021	-2.5	878.6	1 330.7	-0.96
14CL16	104.4	0.018 377	0.000 226	0.000 879	0.000 009	0.282 595	0.000 019	-4.0	926.8	1 423.1	-0.97
14CL17	108.2	0.031 557	0.001 055	0.001 520	0.000 044	0.282 661	0.000 020	-1.7	848.6	1 275.1	-0.95

带特征(图 3), 锆石稀土元素数据成图(图 4b)和 U-Pb 同位素年龄, 上述年龄结果代表了岩体的结晶年龄, 为早白垩世阿尔布期。

### 3.3 锆石的稀土元素特征

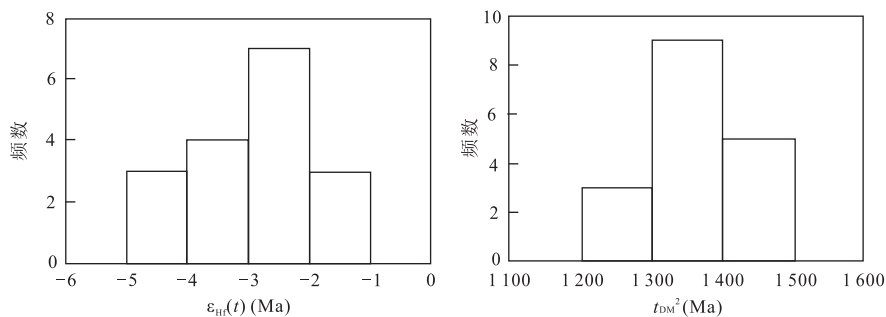
在完成锆石 U-Th-Pb 含量测试之后, 结合锆石阴极发光图像, 对该测点的邻近区域也测试了锆石颗粒的稀土元素(微量元素)含量(表 2)。锆石样品所有测点的稀土含量在 626.25 × 10<sup>-6</sup> ~ 1 700.56 × 10<sup>-6</sup> 之间, 重稀土元素含量总体较高, 轻重稀土元素比值在 0.03~0.13 之间, 平均值为 0.05, 轻重稀土

比值为明显的 Ce 正异常, 均值为 146.97, 中等的负 Eu 异常, 均值为 0.45(表 2)。在稀土元素球粒陨石标准化图解上显示出较陡左倾的图谱特征(图 4b), 重稀土元素从 Gd 到 Yb 呈现出递增的特征。所有的数据都具有明显的 Ce 元素正异常, 中等的 Eu 元素负异常, 这些特征与典型的岩浆锆石稀土元素组成特征一致(耿元生和周喜文, 2011)。一般认为, 锆石样品稀土元素中 Ce 元素正异常与岩浆在氧化状态中该元素较其他元素更易进入晶格密切相关, Ce 异常也与成矿环境中氧逸度和锆石结晶温度有关(Pett-

表 2 闽西南紫金山矿田东南矿段花岗岩锆石 LA-ICP-MS 稀土元素数据

Table 2 Rare earth elements measured by LA-ICP-MS from southeast ore field of Zijinshan granite zircons, Southeast Fujian Province

测点	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
14CL01	0.09	39.63	0.38	6.35	11.44	2.31	52.59	18.17	208.44	77.48	340.77	74.99	740.58	127.34
14CL02	19.06	64.24	4.83	20.19	4.53	1.58	13.28	5.00	64.77	28.73	152.12	40.63	473.54	100.59
14CL03	1.05	25.40	0.30	1.93	1.53	0.71	9.40	3.34	45.30	20.29	109.88	28.99	343.53	72.92
14CL04	0.01	32.78	0.05	0.69	1.81	1.03	11.96	4.54	56.03	23.25	119.09	30.58	349.96	71.39
14CL05	0.01	22.92	0.02	0.71	1.39	0.76	9.33	3.53	46.53	20.43	105.34	27.14	321.66	66.47
14CL06	0.02	20.10	0.02	0.31	1.30	0.72	8.09	3.26	44.02	19.42	104.37	28.32	328.81	70.64
14CL07	0.14	23.93	0.08	0.50	1.63	0.64	8.86	3.65	48.97	21.58	115.54	30.40	355.93	76.69
14CL08	0.01	26.29	0.02	0.56	1.68	0.70	9.66	4.14	55.71	25.12	134.03	35.37	412.69	90.32
14CL09	0.01	32.52	0.03	0.60	1.94	1.03	12.44	5.16	69.38	32.40	172.63	44.97	524.85	113.56
14CL10	0.01	22.30	0.03	0.63	1.05	0.68	9.16	3.41	46.87	19.90	102.18	26.68	308.49	65.70
14CL11	0.06	29.08	0.05	0.65	1.42	0.96	11.25	4.29	59.90	27.13	145.66	38.45	455.44	99.39
14CL12	0.02	22.65	0.02	0.53	1.13	0.70	9.55	3.65	48.37	21.14	114.12	29.24	352.29	76.63
14CL13	0.04	23.58	0.02	0.59	1.22	0.67	9.50	3.52	47.74	21.33	113.13	29.28	343.91	76.52
14CL14	0.72	38.14	0.27	1.44	2.71	1.16	16.72	6.49	85.44	37.32	195.60	49.63	554.49	119.83
14CL15	0.26	22.56	0.15	1.18	1.42	0.78	9.57	4.09	55.63	24.38	132.97	35.64	423.28	93.75
14CL16	0.03	25.25	0.04	1.04	2.45	1.26	14.66	5.63	73.90	32.88	174.94	46.04	539.69	124.65
14CL17	0.01	30.33	0.03	0.80	1.74	0.74	9.70	3.93	52.39	22.63	119.27	30.76	356.40	80.34

图 5 紫金山矿田东南矿段花岗岩锆石地壳模式年龄( $t_{DM}^2$ )和  $\epsilon_{Hf}(t)$  柱状图Fig.5 Zircon  $t_{DM}^2$  and Hf isotopic compositions of the granite of the Zijinshan from Zijinshan granite zircons, Southeast Fujian Province

ke *et al.*, 2005; Liang *et al.*, 2006; Bolhar *et al.*, 2008; Trail *et al.*, 2012; Burnham and Berry, 2012). Eu 的负异常则与锆石形成过程中长石的结晶作用相关, 先结晶的长石斑晶优先获得了岩浆熔体中的 Eu, 因此后结晶的锆石中 Eu 元素含量减少 (Hoskin and Schaltegger, 2003; 耿元生和周喜文, 2011).

### 3.4 锆石 Hf 同位素

对细粒黑云母花岗岩锆石样品 U-Th-Pb 同位素测试的邻近点也进行了 Lu-Hf 同位素分析,  $\epsilon_{Hf}(t)$  值和两阶段模式年龄用岩体的谐和年龄计算. 样品 17 个测点的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值介于 0.000 879 ~ 0.002 553, 平均值为 0.001 537, 平均值小于 0.002, 表明锆石在形成之后具有极低的放射性成因 Hf 积累, 因此测定的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值基本可以代表锆石结晶时体系的 Hf 同位素组成 (吴福元等, 2007; 孙金凤等, 2009). 样品的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值介于 0.282 568 ~

0.282 679, 加权平均值为  $0.282\ 621 \pm 0.000\ 015$ , 锆石 Hf 同位素初始值  $\epsilon_{Hf}(t = 107.1\ \text{Ma})$  均为负值, 介于  $-5 \sim -1.1$ , 平均值为  $-2.99$ , 显示了较为均一的 Hf 同位素组成; 锆石 Hf 同位素单阶段“亏损地幔”模式年龄 ( $t_{DM}^1$ ) 介于 819.4 ~ 987.1 Ma, 平均年龄为 905.35 Ma; 锆石 Hf 同位素两阶段“地壳”模式年龄 ( $t_{DM}^2$ ) 介于 1 234.8 ~ 1 485.7 Ma, 平均年龄为 1 362.08 Ma. 由两阶段 Hf 模式年龄 ( $t_{DM}^2$ ) 和  $\epsilon_{Hf}(t)$  直方图可以看出 (图 5),  $\epsilon_{Hf}(t)$  主体分布于  $-4 \sim -2$  范围区间,  $t_{DM}^2$  主体分布 1 300 ~ 1 500 Ma 范围区间, 源岩时代为中元古代.

## 4 讨论

### 4.1 岩体形成与成矿年代学讨论

前人对紫金山矿田不同地区的岩体开展过研



究,认为矿田主要经历了以下几个构造阶段的岩浆活动和成矿阶段。早古生代( $>154$  Ma)的陆内挤压阶段,元古代基底发生重熔形成岩浆房(陈国能, 1998, 2011; 于波等, 2013; 陈国能等, 2015a, 2015b; Duan *et al.*, 2017; Jiang *et al.*, 2017)。随着挤压应力造成上地壳褶皱变形,岩浆房内的岩浆多次向上侵位,形成了不同期次和不同规模的岩体。岩浆可以分为两个体系,分别为晚侏罗世花岗岩和白垩纪火山—侵入杂岩,其中晚侏罗世花岗岩形成于陆内挤压造山构造背景(张旗, 2013, 2014)。前人通过锆石 TIMS U-Pb 法获得迳美岩体年龄为  $145 \pm 12$  Ma(毛建仁等, 1998),全岩 Rb-Sr 等时线法为  $157 \pm 7.3$  Ma(张德全等, 2001),锆石 SHIMP 法获得的年龄为  $154 \pm 2$  Ma(于波等, 2013)和  $150 \pm 3$  Ma(赵希林等, 2007),锆石 LA-ICP-MS 法获得的年龄为  $163.5 \pm 1.8$  Ma(李斌等, 2015)。紫金山岩体 SHRIMP U-Pb 年龄为  $168 \pm 9.6$  Ma(赵希林等, 2008),才溪岩体锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄和 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为  $150 \pm 3$  Ma(赵希林等, 2007)和  $146.4 \pm 8.6$  Ma(胡春杰等, 2012),基本处于同一阶段。

前人曾对区内矿物的成矿年代进行了一定程度的研究,获得了近矿围岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄为  $127 \pm 3$  Ma,钻孔内中粗粒花岗岩 Rb-Sr 年龄为  $118 \pm 2$  Ma,为第 1 期矿化作用年龄(陈好寿, 1996)。前人曾对二庙沟的英安玢岩锆石进行 U-Pb 年代学研究,证实其形成年龄为  $105.7 \pm 1.5$  Ma(邱检生等, 2008; 李斌等, 2013);五子骑龙矿区钾硅酸盐化蚀变及 Cu(Mo) 矿化年龄,其蚀变绢云母坪年龄记录了铜—硫化物矿化的年龄为  $102.53 \pm 1.50$  Ma(张德全等, 2005),紫金山金铜矿与金矿化相关的石英流体包裹体 Rb-Sr 年龄约为  $100 \pm 3$  Ma(陈好寿, 1996)。同时,也证实了罗卜岭斑岩体的辉钼矿形成年龄为  $104.9 \pm 1.6$  Ma(梁清玲等, 2012);与铜伴生的明矾石 K-Ar 年龄为  $103.86$  Ma(周肃和陈好寿, 1996),石英闪长岩、钻孔中的英安玢岩等的 Rb-Sr 等时线年龄为  $102 \pm 9$  Ma,二长花岗岩年龄为  $105$  Ma,本文测试的黑云母细粒花岗岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 结晶年龄为  $107.3 \pm 1.3$  Ma,二者形成年龄处于同一阶段。

因此,可以推测矿床主要包括两期岩浆活动,成岩作用分别发生于晚侏罗世和早白垩世,而成矿作用发生在早白垩世。因此,厘定早白垩世紫金山东南矿段成岩成矿作用序列如下:在  $107$  Ma 左右黑云母花岗岩侵入,并随后发生强烈的蚀变和矿化;  $100$

Ma 左右,石英闪长岩、英安玢岩等的侵入,成岩成矿作用近乎结束。因此,成岩岩体的形成年龄要早于两期矿化蚀变的年龄,进一步证实了区内早白垩世岩体对成岩成矿的控制影响作用。

#### 4.2 岩体部分熔融条件讨论

在岩浆结晶过程中,可以利用锆石饱和温度计算锆石饱和岩石的初始岩浆温度(Miller *et al.*, 2003)。根据锆石微量元素测试中获得 Ti 元素的含量可以有效计算初始岩浆的温度(Watson and Harrison, 2005; Watson *et al.*, 2006; Ferry and Watson, 2007)。同时,锆石微量元素测试中获得 REE 和 Y 等提供锆石形成的环境信息、重建岩浆历史、反演岩浆源区性质。而锆石 Ti 含量温度计则是近几年刚提出的微量元素温度计,并被应用于不同成因的锆石中(Watson and Harrison, 2005; Watson *et al.*, 2006; Ferry and Watson, 2007; Page *et al.*, 2007; Baldwin *et al.*, 2007; Harrison *et al.*, 2007; Hiess *et al.*, 2008; Fu *et al.*, 2008; Anderson *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2010; Zheng, 2011; Sun *et al.*, 2015; Duan *et al.*, 2017)。前人根据锆石中 Ti 含量分别计算出了二庙沟岩体的形成温度分布区间介于  $567 \sim 969$  °C,平均值为  $728$  °C(中值为  $757$  °C);迳美岩体的形成分布区间比较大,介于  $634 \sim 831$  °C,中值为  $770$  °C(平均值为  $780$  °C)(李斌等, 2013);而紫金山矿区东南矿段中细粒黑云母花岗岩的形成温度介于  $591 \sim 716$  °C,中值为  $633$  °C(平均值为  $634$  °C),明显要低于二庙沟、迳美岩体的形成温度,岩体形成温度可能代表了紫金山东南矿段矿体的围岩温度,由此可能揭示东南矿段黑云母花岗岩的低成岩温度有利于矿床形成。

锆石矿物最高的封闭温度可达  $900$  °C,并且在岩浆结晶的早期形成,因此可利用锆石的饱和温度来探讨岩浆形成的早期温度。在 CL 图像扫描和同位素测年工作中发现,紫金山矿田各个岩体锆石中都存在继承锆石或独立的锆石核部现象,说明紫金山东南矿段岩体的形成温度相对较低,早期形成的锆石矿物只是发生了部分熔融(Chen *et al.*, 2003; 陈国能, 2011; 阮诗昆和曾文灿, 2014; Li and Jiang, 2014; Zhong *et al.*, 2014)。因此,紫金山东南矿段中细粒黑云母花岗岩锆石所计算出来的岩体温度即可代表形成温度。本文所测试的 Hf 同位素结果也揭示了岩体主要来自于地壳组分的部分熔融条件。

#### 4.3 岩石成因及成矿

锆石是花岗岩中常见的副矿物,不但具有封闭

温度高、抗风化能力强的特点,而且是研究 U-Pb、Hf 同位素定年和岩浆来源的重要对象。紫金山矿田各个岩体的花岗岩中,含少量或不含黑云母,含白云母居多,同时未见堇青石矿物,通过锆石饱和温度计算的温度介于 633~770 °C,主要来源为陆壳岩石的含水深熔作用,表明其属于白云母花岗岩(李斌等, 2015)。紫金山岩体的 Hf 模式年龄比较年轻,印证了华夏古老变质岩参与岩浆的形成过程(赵希林等, 2013;李斌等, 2015; Duan *et al.*, 2017)。主量元素(FeO、MgO)、微量元素(Ni、Cr 和 V)和 Nd 同位素特征也揭示,紫金山岩体没有接受幔源组分的参与,主要受到了后期热液蚀变作用(Rollinson, 1993; Frietsch and Perdahl, 1995; Zhou and Li, 2000; Zhou *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2008; He and Xu, 2012; Meng *et al.*, 2013; 李斌等, 2013; 赵禹等, 2014; 李斌等, 2015; Duan *et al.*, 2017)。紫金山矿田各个岩体的物质来源可能相同,但是主量元素、微量元素受到分离结晶的控制和影响作用(李斌等, 2013, 2015; 赵禹等, 2014; 张旗, 2014; Li *et al.*, 2017)。而岩浆演化过程中,紫金山岩体发生不同程度的钾长石分离结晶作用,并且褐帘石和独居石控制了岩体的轻稀土含量变化(李斌等, 2013, 2015)。

紫金山地区的岩浆活动与成矿作用密切相关,前人对此做出了卓有成效的研究。研究表明,紫金山矿床与早白垩世岩体侵入及次火山活动相关,形成了典型的浅成低温热液高硫化物多金属矿床(张德全等, 2003; 毛建仁等, 2004; 毛景文等, 2004; Jiang *et al.*, 2013; 王翠芝, 2013; 张文媛和王翠芝, 2014; Duan *et al.*, 2017)。Sr-Nd-Pb 同位素测试表明,早白垩世花岗闪长岩和火山岩主要来源于壳幔熔体混合产物(沈渭洲等, 2000; 谢昕等, 2005; 徐夕生和谢昕, 2005; Jiang *et al.*, 2013)。本文锆石 Hf 同位素特征表明,二阶段模式年龄显示为中元古生代基底,与前人通过火山岩测试所获得的结果一致(梁清玲等, 2013; 李斌等, 2013)。二阶段模式年龄是岩浆发生壳幔分异的时代的重要依据(吴福元等, 2007),本文认为紫金山地区中生代岩浆源区与中元古代基底物质密切相关,岩浆的侵入作用对矿床的形成影响重大,同时也揭示了 Hf 同位素特征对岩体源区的示踪具有较大的优越性。

研究认为,紫金山地区经历了中一晚侏罗世、早白垩世期间复杂的构造运动控制和影响作用,普遍认为古太平洋板块向欧亚板块俯冲经历了中一晚侏罗世和早白垩世两期古洋壳自西南向东北方向的俯

冲作用,第 1 阶段的俯冲作用使地幔物质上涌和古洋壳物质加入,并与古元古代基底物质形成混合岩浆区;第 2 阶段古洋壳继续俯冲,形成了复杂的壳幔作用过程,具有幔源物质和古元古代物质随岩体侵入年代变新而逐渐减少的特征(谢昕等, 2005; 徐夕生和谢昕, 2005; Zhou *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2007; 舒良树, 2012; 李斌等, 2013; Li and Jiang, 2014; Jiang *et al.*, 2017; Duan *et al.*, 2017)。而紫金山黑云母花岗岩的形成阶段就处于后期作用阶段,缺少了幔源物质的加入,完全是在岩浆的原地重熔作用下形成(陈国能, 2011; 陈国能等, 2015a, 2015b)。源区物质的变化说明了紫金山矿田在早白垩世期间,俯冲作用减弱或者古洋壳向陆壳俯冲方向、角度或者速率发生了较大规模的改变(Engelbreton *et al.*, 1985; Northrup *et al.*, 1995; Ren *et al.*, 2002; 舒良树, 2012)。

紫金山矿田东南矿段黑云母花岗岩结晶形成于早白垩世,具有火山弧花岗岩或活动大陆边缘花岗岩的特征,与矿田内的多金属矿产成矿事件密切相关,可能与早期地幔物质的上涌相关。前人研究证实,紫金山地区的多金属元素的成矿物质主要来源于地幔,而早白垩世的花岗质岩体是含矿母岩,或者说成矿年代与岩体的结晶年代基本一致(毛建仁等, 2004; 毛景文等, 2004; 谢昕等, 2005; 李斌等, 2013; Zhong *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2017; Jiang *et al.*, 2017; 谢其锋等, 2017)。研究同时表明,福建省东南沿海地区在燕山晚期遭受了古太平洋板块向欧亚板块不同规模、不同阶段的多期次俯冲作用,导致欧亚板块弧拉张、岩石圈减薄和地幔物质上涌(徐夕生和谢昕, 2005; 陈国能等, 2015a),形成大规模的岩浆活动以及 Au、Cu 和 Ag 等大规模的多金属矿产(毛景文等, 2004)。因此,本文认为紫金山矿田东南矿段早白垩世的成矿作用与幔源物质的上涌密切相关,幔源物质上涌过程携带的大量 Au、Cu 和 Ag 等元素是成矿物质来源,早白垩世所发育的北西西向和北东东向两组断裂、裂隙是矿床的容矿空间,而幔源物质的上涌是由古太平洋板块的俯冲作用引起。

## 5 结论

(1)紫金山矿田东南矿段黑云母花岗岩锆石 LA-ICP-MS 法获得  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  年龄为  $109.5 \pm 1.9 \text{ Ma}$  (MSWD=0.74,  $N=16$ ),  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $107.44 \pm 0.94 \text{ Ma}$  (MSWD=1.06,

$N=16$ ),表明岩体侵位于燕山期早白垩世。锆石 Hf 同位素分析表明岩体源区与中元古代基底物质的原地熔融密切相关。

(2)紫金山东南矿段早白垩世花岗质岩体与古太平洋向欧亚板块俯冲作用密切相关,紫金山矿田的大规模成矿事件与燕山期幔源物质的上涌过程提供矿源,以及北西西向和北东东向断裂、裂隙形成容矿空间等条件密切相关。

致谢:锆石样品的 CL 图像扫描、LA-ICP-MS 测试 U-Pb 和 MC-ICP-MS 测试 Lu-Hf 分别得到了南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室李娟老师、王孝磊教授、武兵工程师和孙盼工程师的指导和帮助;测试过程中受到南京大学地球科学与工程学院张阳博士、张贺博士的帮助;匿名审稿专家和编委的诸多审阅意见非常有益于稿件质量的提高;论文修改过程中受到编辑部老师给予的诸多指导和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

附表 1 见本刊官网 (<http://www.earth-science.net>)。

## References

- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That do not Report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192 (1-2): 59-79.
- Anderson, J.L., Barth, A.P., Wooden, J.L., et al., 2008. Thermometers and Thermobarometers in Granitic Systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69 (1): 121-142.
- Baldwin, J.A., Brown, M., Schmitz, M.D., 2007. First Application of Titanium-in-Zircon Thermometry to Ultrahigh-Temperature Metamorphism. *Geology*, 35(4): 295-298.
- Belousova, E., Griffin, W., O'Reilly, S.Y., et al., 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602-622.
- Bolhar, R., Weaver, S.D., Palin, J.M., et al., 2008. Systematics of Zircon Crystallisation in the Cretaceous Separation Point Suite, New Zealand, Using U/Pb Isotopes, REE and Ti Geothermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 156(2): 133-160.
- Burnham, A.D., Berry, A.J., 2012. Erratum to "An Experimental Study of Trace Element Partitioning between Zircon and Melt as a Function of Oxygen Fugacity". *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 95: 196-212.
- Chen, B., Tian, W., Jahn, B.M., et al., 2008. Zircon SHRIMP U-Pb Ages and In-Situ Hf Isotopic Analysis for the Mesozoic Intrusions in South Taihang, North China Craton: Evidence for Hybridization between Mantle-Derived Magmas and Crustal Components. *Lithos*, 102 (1-2): 118-137.
- Chen, G.N., 1998. Advances in the Study of Genesis and Metallogeny of Granite: A Brief Introduction of the Melting In-Situ Hypothesis and Geochemical Field of the Elements. *Advance in Earth Sciences*, 13(2): 140-144 (in Chinese with English abstract).
- Chen, G.N., 2011. Pondering over the Genesis of Rocks and the Evolution of Lithosphere. *Earth Science Frontiers*, 18(1): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- Chen, G.N., Grapes, R., Zhang, K., 2003. A Model for Mesozoic Crustal Melting and Tectonic Deformation in Southeast China. *International Geology Review*, 45 (10): 948-957.
- Chen, G.N., Chen, Z., Chen, X., et al., 2015a. Crustal Melting and Its Relationship with Continental Orogeny. *Geotectonica et Metallogenia*, 39 (3): 383-390 (in Chinese with English abstract).
- Chen, G.N., Qiu, W., Lu, Y.X., et al., 2015b. Multi Crustal Melting and Its Relationship to the Formation of Volcanic-Type Uranium-Polymetal Ore-Field. *Earth Science Frontiers*, 22 (4): 22-28 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H.S., 1996. The Research on the Mineralization Chronology and Isotopic Exploration Assessment for Zijinshan Copper-Gold Deposit. *Geotectonica et Metallogenia*, 20 (4): 348-360 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J., Chen, Y.J., Zhong, J., et al., 2011. Fluid Inclusion Study of the Wuziqilong Cu Deposit in the Zijinshan Ore Field, Fujian Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5): 1425-1438 (in Chinese with English abstract).
- Chu, N.C., Taylor, R.N., Chavagnac, V., et al., 2002. Hf Isotope Ratio Analysis Using Multi-Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: An Evaluation of Isobaric Interference Corrections. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17(12): 1567-1574.
- Duan, G., Chen, H.Y., Hollings, P., et al., 2017. The Mesozoic Magmatic Sources and Tectonic Setting of the Zijinshan Mineral Field, South China: Constraints from Geochronology and Geochemistry of Igneous Rocks in the Southeastern Ore Segment. *Ore Geology Reviews*, 80: 800-827.
- Engelbreton, D.C., Cox, A., Gordon, R.G., 1985. Relative Motions Between Oceanic and Continental Plates in the Pacific Basin. Geological Society of America, Boulder.
- Ferry, J.M., Watson, E.B., 2007. New Thermodynamic Models and Revised Calibrations for the Ti-in-Zircon and Zr-



- in-Rutile Thermometers. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(4): 429–437.
- Frietsch, R., Perdahl, J. A., 1995. Rare Earth Elements in Apatite and Magnetite in Kiruna-Type Iron Ores and Some Other Iron Ore Types. *Ore Geology Reviews*, 9(6): 489–510.
- Fu, B., Page, F. Z., Cavosie, A. J., et al., 2008. Ti-in-Zircon Thermometry: Applications and Limitations. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 156(2): 197–215.
- Geng, Y. S., Zhou, X. W., 2011. Characteristics of Geochemistry and Zircon Hf Isotope of the Early Neoproterozoic Granite in Alax Area, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 897–908 (in Chinese with English abstract).
- Harley, S. L., Kelly, N. M., 2007. Zircon Tiny but Timely. *Elements*, 3(1): 13–18.
- Harrison, T. M., Watson, E. B., Aikman, A. B., 2007. Temperature Spectra of Zircon Crystallization in Plutonic Rocks. *Geology*, 35(7): 635–638.
- He, Z. Y., Xu, X. S., 2012. Petrogenesis of the Late Yanshanian Mantle-Derived Intrusions in Southeastern China: Response to the Geodynamics of Paleo-Pacific Plate Subduction. *Chemical Geology*, 328: 208–221.
- Hiess, J., Nutman, A. P., Bennett, V. C., et al., 2008. Ti-in-Zircon Thermometry Applied to Contrasting Archean Metamorphic and Igneous Systems. *Chemical Geology*, 247(3–4): 323–338.
- Hoskin, P. W. O., Schaltegger, U., 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27–62.
- Hou, K. J., Li, Y. H., Zou, T. R., et al., 2007. Laser Ablation-MC-ICP-MS Technique for Hf Isotope Microanalysis of Zircon and Its Geological Applications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595–2604 (in Chinese with English abstract).
- Hu, C. J., Huang, W. T., Bao, Z. W., et al., 2012. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Dacite Porphyry from Zijinshan Cu-Au Deposit and Its Metallogenetic Implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(2): 284–292 (in Chinese with English abstract).
- Huang, R. S., 2008. Igneous Series and Epithermal Porphyry Cu-Au-Ag Mineralization System in the Zijinshan Ore Field, Fujian Province. *Journal of Geomechanics*, 14(1): 74–86 (in Chinese with English abstract).
- Huang, W. T., Li, J., Liang, H. Y., et al., 2013. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Ages and Highly Oxidized Features of Magma Associated with Luoboling Porphyry Cu-Mo Deposit in Zijinshan Ore Field, Fujian Province. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 283–293 (in Chinese with English abstract).
- Jian, P., Cheng, Y. Q., Liu, D. Y., 2001. Petrographical Study of Metamorphic Zircon: Basic Roles in Interpretation of U-Pb Age of High Grade Metamorphic Rocks. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 183–191 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S. H., Bagas, L., Liang, Q. L., 2017. Pyrite Re-Os Isotope Systematics at the Zijinshan Deposit of SW Fujian, China: Constraints on the Timing and Source of Cu-Au Mineralization. *Ore Geology Reviews*, 80: 612–622.
- Jiang, S. H., Liang, Q. L., Bagas, L., et al., 2013. Geodynamic Setting of the Zijinshan Porphyry-Epithermal Cu-Au-Mo-Ag Ore System, SW Fujian Province, China: Constraints from the Geochronology and Geochemistry of the Igneous Rocks. *Ore Geology Reviews*, 53: 287–305. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.02.001>
- Li, B., Jiang, S. Y., 2014. Geochronology and Geochemistry of Cretaceous Nanshanping Alkaline Rocks from the Zijinshan District in Fujian Province, South China: Implications for Crust-Mantle Interaction and Lithospheric Extension. *Journal of Asian Earth Sciences*, 93: 253–274. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2014.07.040>
- Li, B., Zhao, K. D., Yang, S. Y., et al., 2013. Petrogenesis of the Porphyritic Dacite from Ermiaogou Cu-Au Deposit in Zijinshan Ore Field and Its Metallogenetic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4167–4185 (in Chinese with English abstract).
- Li, B., Zhao, K. D., Zhang, Q., et al., 2015. Petrogenesis and Geochemical Characteristics of the Zijinshan Granitic Complex from Fujian Province, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 31(3): 811–828 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. Y., Hao, X. L., Liu, J. Q., et al., 2017. The Formation of Luoboling Porphyry Cu-Mo Deposit: Constraints from Zircon and Apatite. *Lithos*, 272–273: 291–300.
- Li, X. H., Li, Z. X., Li, W. X., et al., 2007. U-Pb Zircon, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Constraints on Age and Origin of Jurassic I- and A-Type Granites from Central Guangdong, SE China: A Major Igneous Event in Response to Foundering of a Subducted Flat-Slab?. *Lithos*, 96(1–2): 186–204.
- Liang, H. Y., Campbell, I. H., Allen, C., et al., 2006. Zircon  $Ce^{4+}/Ce^{3+}$  Ratios and Ages for Yulong Ore-Bearing Porphyries in Eastern Tibet. *Mineralium Deposita*, 41(2): 152–159. <https://doi.org/10.1007/s00126-005-0047-1>
- Liang, Q. L., Jiang, S. H., Wang, S. H., et al., 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. *Acta Geologica Sinica*, 86 (7): 1113—1118(in Chinese with English abstract).
- Liang, Q.L., Jiang, S.H., Wang, S.H., et al., 2013. Petrogenesis of the Mesozoic Magmatic Rocks in Zijinshan Area: Constraints from Zircon Hf Isotope Evidence. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(3): 318—328(in Chinese with English abstract).
- Liu, S.J., Li, J.H., Santosh, M., 2010. First Application of the Revised Ti-in-Zircon Geothermometer to Paleoproterozoic Ultrahigh-Temperature Granulites of Tuguiwula, Inner Mongolia, North China Craton. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 159(2): 225—235.
- Ludwing, K.R., 2003. Isoplot/Ex Version 3.00, A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel, Berkeley Geochronology Center, Berkeley.
- Mao, J.R., Tao, K.Y., Chen, S.Y., et al., 1998. The Granitic Magmatism and Mineralization in Southwest Fujian. *Volcanology & Mineral Resources*, 19(4): 311—320(in Chinese with English abstract).
- Mao, J.R., Tao, K.Y., Lee, C.Y., et al., 2002. Geochronology and Geochemical Characteristics in Late Mesozoic Sifang Pluton, Southwestern Fujian, and Their Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 449—458(in Chinese with English abstract).
- Mao, J.R., Xu, N.Z., Hu, Q., et al., 2004. The Mesozoic Rock-Forming and Ore-Forming Processes and Tectonic Environment Evolution in Shanghang-Datian Region, Fujian. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 285—296(in Chinese with English abstract).
- Mao, J.W., Xie, G.Q., Li, X.F., et al., 2004. Mesozoic Large Scale Mineralization and Multiple Lithospheric Extension in South China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 45—55(in Chinese with English abstract).
- Meng, F.C., Zhang, J.X., Cui, M.H., 2013. Discovery of Early Paleozoic Eclogite from the East Kunlun, Western China and Its Tectonic Significance. *Gondwana Research*, 23(2): 825—836.
- Miller, C.F., McDowell, S.M., Mapes, R.W., 2003. Hot and Cold Granites? Implications of Zircon Saturation Temperatures and Preservation of Inheritance. *Geology*, 31(6): 529.
- Northrup, C.J., Royden, L.H., Burchfiel, B.C., 1995. Motion of the Pacific Plate Relative to Eurasia and Its Potential Relation to Cenozoic Extension along the Eastern Margin of Eurasia. *Geology*, 23(8): 719.
- Page, F.Z., Ushikubo, T., Kita, N.T., et al., 2007. High-Precision Oxygen Isotope Analysis of Picogram Samples Reveals 2  $\mu\text{m}$  Gradients and Slow Diffusion in Zircon. *American Mineralogist*, 92(10): 1772—1775.
- Pettke, T., Audétat, A., Schaltegger, U., et al., 2005. Magmatic-to-Hydrothermal Crystallization in the W-Sn Mineralized Mole Granite (NSW, Australia)—Part II: Evolving Zircon and Thorite Trace Element Chemistry. *Chemical Geology*, 220(3—4): 191—213.
- Qiu, J.S., Xiao, E., Hu, J., et al., 2008. Petrogenesis of Highly Fractionated I-Type Granites in the Coastal Area of Northeastern Fujian Province: Constraints from Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Nd-Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2468—2484(in Chinese with English abstract).
- Qiu, X.P., Lan, Y.Z., Liu, Y., 2010. The Key to the Study of Deep Mineralization and the Evaluation of Ore-Prospecting Potential in the Zijinshan Gold and Copper Deposit. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(2): 209—215(in Chinese with English abstract).
- Ren, J.Y., Tamaki, K., Li, S.T., et al., 2002. Late Mesozoic and Cenozoic Rifting and Its Dynamic Setting in Eastern China and Adjacent Areas. *Tectonophysics*, 344(3—4): 175—205. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(01\)00271-2](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(01)00271-2)
- Rollinson, H.R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation and Interpretation, Longman Scientific and Technical, Essex.
- Ruan, S.K., Zeng, W.C., 2014. Discussion on the Metallogenic Model of Granite “In-Situ Melting” in Zijinshan Mineralization Area. *Geological Science and Technology Information*, 33(6): 170—174, 179(in Chinese with English abstract).
- Shen, W.Z., Ling, H.F., Li, W.X., et al., 2000. Crust Evolution in Southeast China: Evidence from Nd Model Ages of Granitoids. *Science China Earth Sciences*, 30(5): 471—478(in Chinese).
- Shu, L.S., 2012. An Analysis of Principal Features of Tectonic Evolution in South China Block. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1035—1053(in Chinese with English abstract).
- Sun, J.F., Yang, J.H., Wu, F.Y., 2009. Application of In-Situ Isotopic Analysis to Granite Genesis. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 129—139(in Chinese with English abstract).
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345.
- Sun, W.D., Huang, R.F., Li, H., et al., 2015. Porphyry Deposits and Oxidized Magmas. *Ore Geology Reviews*, 65: 97—131.
- Trail, D., Bruce Watson, E., Tailby, N.D., 2012. Ce and Eu

- Anomalies in Zircon as Proxies for the Oxidation State of Magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 97:70—87. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.08.032>
- Wang, R.R., Xu, Z.Q., Santosh, M., et al., 2017. Petrogenesis and Tectonic Implications of the Early Paleozoic Intermediate and Mafic Intrusions in the South Qinling Belt, Central China: Constraints from Geochemistry, Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopes. *Tectonophysics*, 712—713: 270—288. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.05.021>
- Wang, C.Z., 2013. Litho-geochemical Characteristics of the Alunite Metasomatic Altered Rock of the Zijinshan Gold-Copper Deposit. *Advances in Earth Science*, 28(8): 897—912 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S., Zhang, D., Wu, G.G., et al., 2018. Late Mesozoic Tectonic Evolution of Southwestern Fujian Province, South China: Constraints from Magnetic Fabric, Zircon U-Pb Geochronology and Structural Deformation. *Journal of Earth Science*, 29(2): 391—407. <https://doi.org/10.1007/s12583-017-0968-5>
- Wang, S.H., Pei, R.F., 2007. Ore Resource Prognosis and Ore-Prospecting Targets in Southern Central Gangdise Range. *Mineral Deposits*, 26(3): 346—352 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S.H., Pei, R.F., Zeng, X.H., et al., 2009. Metallogenic Series and Model of the Zijinshan Mining Field. *Acta Geologica Sinica*, 83(2): 145—157 (in Chinese with English abstract).
- Watson, E.B., Harrison, T.M., 2005. Zircon Thermometer Reveals Minimum Melting Conditions on Earliest Earth. *Science*, 308(5723): 841—844.
- Watson, E.B., Wark, D.A., Thomas, J.B., 2006. Crystallization Thermometers for Zircon and Rutile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(4): 413—433.
- Wiedenbeck, M., Allé, P., Corfu, F., et al., 1995. Three Natural Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Element and REE Analyses. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 19(1): 1—23. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908x.1995.tb00147.x>
- Wu, F.Y., Li, X.H., Zheng, Y.F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185—220 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F.Y., Yang, Y.H., Xie, L.W., et al., 2006. Hf Isotopic Compositions of the Standard Zircons and Baddeleyites Used in U-Pb Geochronology. *Chemical Geology*, 234(1—2): 105—126.
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., 2004. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589—1604.
- Xiao, A.F., Li, D.P., Liu, X.M., 2012. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating for the Volcanic Rocks of the Lower Formation of the Shimaoshan Group and Evolution of the Cretaceous Magmatism in the Zijinshan Cu-Au Orefield, Fujian Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(4): 613—623 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Q.F., Cai, Y.F., Dong, Y.P., et al., 2017. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopic Compositions of Yanshanian Granites in the Shanghang Area, Fujian Province. *Acta Geologica Sinica*, 91(10): 2212—2230 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X., Xu, X.S., Zou, H.B., et al., 2005. The Large Scale Stage Magmatism of Mesozoic in Southeast China: Evidence from the Early Jurassic Basalts. *Science China Earth Science*, 35(7): 587—605 (in Chinese).
- Xu, X.S., Xie, X., 2015. Late Mesozoic-Cenozoic Basaltic Rocks and Crust-Mantle Interaction, SE China. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 318—334 (in Chinese with English abstract).
- Yu, B., Pei, R.F., Qiu, X.P., et al., 2013. The Evolution Series of Mesozoic Magmatic Rocks in the Zijinshan Orefield, Fujian Province. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(4): 437—446 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H.L., Gao, S., Liu, X.M., et al., 2004. Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353—370.
- Yuan, H.L., Wu, F.Y., Gao, S., et al., 2003. Precise Determinations of U-Pb Age and Rare Earth Element Concentrations of Zircons by Excimer LA-ICP MS Using a Two-Stage Ablation Strategy. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 1511—1520 (in Chinese).
- Zhang, D.Q., Feng, C.Y., Li, D.X., et al., 2005. The Evolution of Ore-Forming Fluids in the Porphyry-Epithermal Metallogenic System of Zijinshan Area. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(2): 127—136 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D.Q., Li, D.X., Feng, C.Y., et al., 2001. The Temporal and Spatial Framework of the Mesozoic Magmatic System in Zijinshan Area and Its Geological Significance. *Acta Geoscientica Sinica*, 22(5): 403—408 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D.Q., She, H.Q., Li, D.X., et al., 2003. The Porphyry-Epithermal Metallogenic System in the Zijinshan Region, Fujian Province. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 253—261 (in Chinese with English abstract).



- Zhang, Q., 2013. Is the Mesozoic Magmatism in Eastern China Related to the Westward Subduction of the Pacific Plate? *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(1): 113–128 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., 2014. Geodynamic Implications of Continental Granites. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(4): 785–798 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. Y., Wang, C. Z., 2014. Thermoelectric Characteristics of Pyrite in the Zijinshan Copper-Gold Deposit and Its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 88(7): 1288–1298 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. L., Liu, K., Mao, J. R., et al., 2013. The Differences of Geochemical Characteristics and Relative with Ore-Forming Processes of Two Types Early-Cretaceous Granites in Southwestern Fujian Province. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 32(1): 87–96 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. L., Mao J. R., Chen R., et al., 2007. Zircon SHRIMP Age and Geochemical Characteristics of the Caixi Pluton in Southwestern Fujian Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(3): 223–231 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. L., Mao, J. R., Chen, R., et al., 2008. SHRIMP Zircon Dating of the Zijinshan Pluton in Southwestern Fujian and Its Implications. *Geology in China*, 35(4): 590–597 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., Zhao, Y. Y., Hao, L. B., et al., 2014. A Discussion on the Source and Nature of Initial Ore-Forming Fluids of the Zijinshan Deposit in Fujian Province: Evidence from REE and Trace Elements. *Geological Bulletin of China*, 33(10): 1562–1570 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. F., 2011. On the Theoretical Calculations of Oxygen Isotope Fractionation Factors for Carbonate-Water Systems. *Geochemical Journal*, 45(4): 341–354.
- Zhong, J., Chen, Y. J., Pirajno, F., et al., 2014. Geology, Geochronology, Fluid Inclusion and H-O Isotope Geochemistry of the Luoboling Porphyry Cu-Mo Deposit, Zijinshan Orefield, Fujian Province, China. *Ore Geology Reviews*, 57: 61–77. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.09.004>
- Zhou, S., Chen, H. S., 1996. Geochronology and Geological Significance of the Zijinshan Copper-Gold Deposit. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 15(4): 216–219 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. M., Li, W. X., 2000. Origin of Late Mesozoic Igneous Rocks in Southeastern China: Implications for Lithosphere Subduction and Underplating of Mafic Magmas. *Tectonophysics*, 326(3–4): 269–287.
- Zhou, X. M., Sun, T., Shen, W. Z., et al., 2006. Petrogenesis of Mesozoic Granitoids and Volcanic Rocks in South China: A Response to Tectonic Evolution. *Episodes*, 29(1): 26–33.

### 附中文参考文献

- 陈国能, 1998. 花岗岩成因与成矿理论研究进展——原地重熔说与元素地球化学场简介. *地球科学进展*, 13(2): 140–144.
- 陈国能, 2011. 岩石成因与岩石圈演化思考. *地学前缘*, 18(1): 1–8.
- 陈国能, 陈震, 陈雄, 等, 2015a. 壳内熔融与大陆造山——中山大学地质学系成立 90 周年暨陈国能院士诞辰 102 周年纪念. *大地构造与成矿学*, 39(3): 383–390.
- 陈国能, 邱惟, 卢映新, 等, 2015b. 陆壳多次重熔与火山岩型铀—多金属矿田的形成. *地学前缘*, 22(4): 22–28.
- 陈好寿, 1996. 紫金山铜金矿床成矿年代及同位素找矿评价研究. *大地构造与成矿学*, 20(4): 348–360.
- 陈静, 陈衍景, 钟军, 等, 2011. 福建省紫金山矿田五子骑龙铜矿床流体包裹体研究. *岩石学报*, 27(5): 1425–1438.
- 耿元生, 周喜文, 2011. 阿拉善地区新元古代早期花岗岩的地球化学和锆石 Hf 同位素特征. *岩石学报*, 27(4): 897–908.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等, 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. *岩石学报*, 23(10): 2595–2604.
- 胡春杰, 黄文婷, 包志伟, 等, 2012. 福建紫金山矿田晚中生代英安玢岩形成时代及其成矿意义. *大地构造与成矿学*, 36(2): 284–292.
- 黄仁生, 2008. 福建紫金山矿田火成岩系列与浅成低温热液—斑岩铜金银成矿系统. *地质力学学报*, 14(1): 74–86.
- 黄文婷, 李晶, 梁华英, 等, 2013. 福建紫金山矿田罗卜岭铜钼矿化斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及成矿岩浆高氧化特征研究. *岩石学报*, 29(1): 283–293.
- 简平, 程裕淇, 刘敦一, 2001. 变质锆石成因的岩相学研究——高级变质岩 U-Pb 年龄解释的基本依据. *地学前缘*, 8(3): 183–191.
- 李斌, 赵葵东, 杨水源, 等, 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. *岩石学报*, 29(12): 4167–4185.
- 李斌, 赵葵东, 张倩, 等, 2015. 福建紫金山复式岩体的地球化学特征和成因. *岩石学报*, 31(3): 811–828.
- 梁清玲, 江思宏, 王少怀, 等, 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. *地质学报*, 86(7): 1113–1118.
- 梁清玲, 江思宏, 王少怀, 等, 2013. 福建紫金山地区中生代岩浆岩成因——锆石 Hf 同位素证据. *岩石矿物学杂志*,

- 32(3):318—328.
- 毛建仁,陶奎元,陈三元,等,1998.闽西南花岗质岩浆作用与成矿.火山地质与矿产,19(4):311—320.
- 毛建仁,陶奎元,李奇岫,等,2002.闽西南晚中生代四方岩体同位素年代学、地球化学及其构造意义.岩石学报,18(4):449—458.
- 毛建仁,许乃政,胡青,等,2004.福建省上杭一大田地区中生代成岩成矿作用与构造环境演化.岩石学报,20(2):285—296.
- 毛景文,谢桂青,李晓峰,等,2004.华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展.地学前缘,11(1):45—55.
- 邱俭生,肖娥,胡建,等,2008.福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因:锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约.岩石学报,24(11):2468—2484.
- 邱小平,蓝岳彰,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.地球学报,31(2):209—215.
- 阮诗昆,曾文灿,2014.紫金山矿集区花岗岩“原地重熔”成矿模式探讨.地质科技情报,33(6):170—174,179.
- 沈渭洲,凌洪飞,李武显,等,2000.中国东南部花岗岩类的 Nd 模式年龄与地壳演化.中国科学(D 辑),30(5):471—478.
- 舒良树,2012.华南构造演化的基本特征.地质通报,31(7):1035—1053.
- 孙金凤,杨进辉,吴福元,2009.原位微区同位素分析在花岗岩成因研究中的应用.地学前缘,16(2):129—139.
- 王翠芝,2013.紫金山铜金矿明矾石交代蚀变岩的岩石地球化学特征.地球科学进展,28(8):897—912.
- 王少怀,裴荣富,2007.冈底斯中段南缘成矿远景预测及找矿方向.矿床地质,26(3):346—352.
- 王少怀,裴荣富,曾宪辉,等,2009.再论紫金山矿田成矿系列与成矿模式.地质学报,83(2):145—157.
- 吴福元,李献华,郑永飞,等,2007.Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用.岩石学报,23(2):185—220.
- 肖爱芳,黎敦朋,柳小明,2012.福建省紫金山铜金矿田石帽山群下组火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年与白垩纪岩浆活动期次.大地构造与成矿学,36(4):613—623.
- 谢其锋,蔡元峰,董云鹏,等,2017.福建上杭地区燕山期花岗岩锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成.地质学报,91(10):2212—2230.
- 谢昕,徐夕生,邹海波,等,2005.中国东南部晚中生代大规模岩浆作用序幕:J<sub>2</sub> 早期玄武岩.中国科学(D 辑),35(7):587—605.
- 徐夕生,谢昕,2005.中国东南部晚中生代—新生代玄武岩与壳幔作用.高校地质学报,11(3):318—334.
- 于波,裴荣富,邱小平,等,2013.福建紫金山矿田中生代岩浆岩演化序列研究.地球学报,34(4):437—446.
- 袁洪林,吴福元,高山,等,2003.东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析.科学通报,48(14):1511—1520.
- 张德全,丰成友,李大新,等,2005.紫金山地区斑岩—浅成热液成矿系统的成矿流体演化.地球学报,26(2):127—136.
- 张德全,李大新,丰成友,等,2001.紫金山地区中生代岩浆系统的时空结构及其地质意义.地球学报,22(5):403—408.
- 张德全,余宏全,李大新,等,2003.紫金山地区的斑岩—浅成热液成矿系统.地质学报,77(2):253—261.
- 张旗,2013.中国东部中生代岩浆活动与太平洋板块向西俯冲有关吗? 岩石矿物学杂志,32(1):113—128.
- 张旗,2014.大陆花岗岩的地球动力学意义.岩石矿物学杂志,33(4):785—798.
- 张文媛,王翠芝,2014.紫金山铜金矿黄铁矿热电性特征及其地质意义.地质学报,88(7):1288—1298.
- 赵希林,刘凯,毛建仁,等,2013.闽西南地区早白垩世两类花岗质岩体地球化学异同及其与成矿作用关系.矿物岩石地球化学通报,32(1):87—96.
- 赵希林,毛建仁,陈荣,等,2007.闽西南地区才溪岩体锆石 SHRIMP 定年及其地球化学特征.岩石矿物学杂志,26(3):223—231.
- 赵希林,毛建仁,陈荣,等,2008.闽西南地区紫金山岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义.中国地质,35(4):590—597.
- 赵禹,赵玉岩,郝立波,等,2014.福建紫金山矿床初始成矿流体来源及性质——来自稀土和微量元素的证据.地质通报,33(10):1562—1570.
- 周肃,陈好寿,1996.紫金山铜金矿同位素年代学及其地质意义.矿物岩石地球化学通报,15(4):216—219.

附表 1 闽西南紫金山矿田东南矿段花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素数据

Appendix table1 U-Pb isotope composition of zircons measured by LA-ICP-MS from Zijinshan granites, Southeast Fujian Province

测点	测值			比值		同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度
	Pb*	U	Th	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$2\sigma$		
14CL01	49.30	1426	866	0.61	0.051 3	0.001 0	0.191 1	0.004 0	0.027 0	0.000 4	252.7	46.0	177.6	3.4	171.9	2.4	103%	
14CL02	14.17	666	338	0.51	0.048 7	0.002 0	0.113 2	0.004 5	0.016 9	0.000 3	131.4	92.2	108.9	4.1	107.8	1.9	101%	
14CL03	17.27	759	455	0.60	0.047 1	0.001 8	0.114 7	0.004 2	0.017 7	0.000 3	53.4	87.2	110.2	3.8	110.8	1.9	99%	
14CL04	23.46	986	923	0.94	0.048 5	0.001 7	0.113 4	0.003 9	0.017 0	0.000 3	121.1	79.4	109.1	3.5	108.5	1.8	101%	
14CL05	11.63	538	327	0.61	0.049 9	0.002 3	0.114 8	0.005 1	0.016 7	0.000 3	190.5	102.3	110.4	4.6	106.6	1.9	104%	
14CL06	15.65	722	424	0.59	0.048 5	0.001 9	0.112 0	0.004 4	0.016 8	0.000 3	122.5	91.2	107.8	4.0	107.1	1.9	101%	
14CL07	18.20	844	533	0.63	0.050 1	0.001 9	0.115 3	0.004 3	0.016 7	0.000 3	200.3	84.7	110.8	3.9	106.7	1.8	104%	
14CL08	15.04	702	399	0.57	0.050 6	0.002 0	0.116 3	0.004 5	0.016 7	0.000 3	222.9	89.5	111.7	4.1	106.5	1.9	105%	
14CL09	14.22	684	402	0.59	0.052 4	0.002 1	0.117 7	0.004 7	0.016 3	0.000 3	303.1	90.4	113.0	4.3	104.1	1.9	109%	
14CL10	22.64	1104	383	0.35	0.050 1	0.001 8	0.117 4	0.004 1	0.017 0	0.000 3	198.3	79.1	112.7	3.7	108.7	1.8	104%	
14CL11	12.23	552	325	0.59	0.047 0	0.002 2	0.112 1	0.005 0	0.017 3	0.000 3	49.8	105.8	107.9	4.6	110.5	2.1	98%	
14CL12	17.40	818	503	0.61	0.053 7	0.002 1	0.121 6	0.004 6	0.016 4	0.000 3	356.1	84.8	112.5	4.2	105.1	1.9	107%	
14CL13	16.30	710	433	0.61	0.049 1	0.002 0	0.121 2	0.005 0	0.017 9	0.000 3	151.1	94.5	116.1	4.5	109.4	2.1	106%	
14CL14	16.76	789	518	0.66	0.050 2	0.002 1	0.114 8	0.004 6	0.016 6	0.000 3	203.8	92.1	110.4	4.2	106.1	1.9	104%	
14CL15	17.09	804	429	0.53	0.046 7	0.001 9	0.110 0	0.004 5	0.017 1	0.000 3	32.8	95.8	106.0	4.1	109.2	2.0	97%	
14CL16	14.58	703	433	0.62	0.046 8	0.002 1	0.105 5	0.004 6	0.016 3	0.000 3	40.5	103.0	101.8	4.2	104.4	2.0	98%	
14CL17	14.65	657	496	0.76	0.051 9	0.002 3	0.121 0	0.005 2	0.016 9	0.000 3	279.8	96.9	116.0	4.7	108.2	2.0	107%	