

doi:10.3799/dqkx.2016.005

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

王森, 张达*, 赵红松, 潘天望, 吕良冀, 冯海滨, 狄永军

中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

摘要: 为了揭示矾山地区中生代花岗岩的成因、侵位时间及其与成矿的关系, 在岩石地球化学研究基础上, 进行锆石 U-Pb-Hf 同位素测试, 并与紫金山矿田进行对比, 为本区找矿预测提供依据。矾山地区花岗岩具有高钾、高碱、富铷、低钛等特征, 富集轻稀土元素, 具弱一中等负铈异常。富集大离子亲石元素(K、Rb、Th 等), 亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti 等), 具有板块俯冲后伸展环境特征。对花岗岩岩体进行锆石 U-Pb 测年, 获得了 110 Ma 的年龄。花岗岩与花岗闪长岩 Hf 同位素特征相似, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-3.1 \sim -1.6$, T_{DM2} 为 1 066~1 366 Ma, 说明花岗岩主要来源于中元古代地壳物质的重融, 同时显示出壳幔混合作用的特征。矾山地区与紫金山矿区构造、成岩、成矿特征相似, 具有“紫金山式”铜金矿找矿潜力。

关键词: 大小矾山; 锆石 U-Pb; Hf 同位素; 紫金山; 岩石学。

中图分类号: P597; P595 文章编号: 1000-2383(2016)01-0067-17 收稿日期: 2015-09-30

Geochemistry, Zircon U-Pb Dating and Hf Isotope Composition of Granite in Fanshan Area, Pinghe County, Fujian Province, and Its Geological Significance

Wang Sen, Zhang Da*, Zhao Hongsong, Pan Tianwang, Lü Liangji, Feng Haibin, Di Yongjun

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: In order to study the chronological and geochemical characteristics of the Mesozoic granite and granodiorite from Fanshan area and their relationship with the regional mineralization, the LA-MC-ICPMS zircons U-Pb dating method was employed to assess the ages and Hf isotope composition, preceded by their petrological and geochemical studies. In addition, the authors aim to provide more evidences that will facilitate the next phase of prospecting by making a comparison with Zijinshan copper-gold ore field. The metaluminous-peraluminous high-K calcalkaline granite series and granodiorite are characterized by high contents of K_2O , SiO_2 , and low TiO_2 . These samples are enriched in light rare earth element (LREE) and large ionic lithophile elements (LILE, e.g. K, Rb, Sr, Cs), but depleted in high strength elements (HFSE, e.g. Nb, Ta, Zr, Ti), and have negative Eu anomalies. The geochemical properties of granite and granodiorite are similar to those of the magmatic arc rocks, which suggest a backarc spreading setting. The zircon U-Pb dating of two representative samples yield an emplaced age of 110 Ma, in Early Cretaceous. Zircon grains from the granites have lower Hf-isotope compositions with $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -3.1 \sim -1.6$ and younger Hf model ages ($T_{\text{DM2}} = 1\,066 \sim 1\,366$ Ma. In comparison with the metamorphic basement near the study area, we suggest that the granitic rocks are probably derived from a Mesoproterozoic crust, but the granodiorite may have originated from a Mesoproterozoic crust-mixed with a fraction of mantle materials. Based on the comparative study with Zijinshan Orefield, it is concluded that there are similar structural, lithogeneous and metallogenic features between the two areas, and there is huge prospecting

基金项目: 中国地质调查局“武夷山植被覆盖区勘查模型研究与控矿要素探查”项目(No.12120113089600); “福建龙岩马坑一大田汤泉铁矿整装勘查区专项填图与技术应用示范”项目(No.12120114028701); “武夷山植被覆盖区成矿地质背景研究与成矿要素综合推断”项目(No.1212011085472)。

作者简介: 王森(1986—), 男, 博士, 主要从事构造地质学及成矿地质背景研究。E-mail: wangsen_cug@163.com

*** 通讯作者:** 张达, E-mail: zhangda@cugb.edu.cn

引用格式: 王森, 张达, 赵红松, 等, 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. 地球科学, 41(1): 67-83.

potential to find “Zijinshan style” copper-gold polymetallic deposits in Fanshan area.

Key words: Fanshan; zircon U-Pb dating; Hf isotope; Zijinshan, petrology.

0 引言

大小矾山地区位于东南沿海火山断拗带,华夏陆块东缘的闽东中生代火山岩覆盖区,属于 NW 向上杭—云霄构造—岩浆活动带的东段。上杭—云霄构造带是一条区域性断裂,同时也是闽东南地区重要的 Au、Cu、Pb、Zn、Ag、Mo 等多金属及明矾石等非金属成矿带,著名的紫金山特大型铜金矿、悦洋大型银矿等矿床均分布于其中。大小矾山地区与位于 NW 向上杭—云霄成矿亚带北西段的紫金山铜金矿田具有相似的控矿构造、岩浆、化探异常及矿化蚀变特征(林东燕和郑志强,2011;王森等,2013;Li and Jiang,2014)。区内成矿地质条件良好,构造—岩浆活动频繁,火山机构发育,矿化蚀变强烈,并在区内及其周边地域已相继发现多处铜、金、铅、锌、银、钼等多金属及明矾石矿床(黄家厅等,1990;余日启,2008;陈斌,2010),是寻找“紫金山”式铜、金、多金属矿床的重要地区。

紫金山铜金矿田处于 NE 向松溪—上杭火山喷发带与 NW 向上杭—云霄构造岩浆活动带叠加部位,受 NW 向区域构造控制作用明显。前人(Ying *et al.*, 2007;肖爱芳和黎敦朋,2012;黄文婷等,2013;Jiang *et al.*, 2013;Zhong *et al.*, 2014)对紫金山地区的矿床成因、构造及岩浆作用特征进行了大量的研究,认为紫金山铜金矿田的成矿作用与早白垩世火山—侵入作用有关,属于高硫型浅成低温热液矿田,容矿岩石主要为紫金山复式岩体,与早白垩世(111~93 Ma)岩浆事件具有成因联系。但对成矿时期构造环境方面的研究存在较大争议。Jiang *et al.* (2013)认为紫金山地区与成矿关系密切的早白垩世岩浆岩形成于古太平洋板块向欧亚板块俯冲的活动大陆边缘环境;Li *et al.* (2014)则认为早白垩世岩浆岩形成于伸展环境,由于岩石圈地幔大规模伸展作用,导致地壳物质部分熔融,岩浆底侵,从而形成了大规模中酸性岩浆岩。上杭—云霄一带中生代岩浆活动及成矿作用明显受区域构造控制,对构造环境的研究有助于认识该区成岩成矿动力学背景,具有重要的找矿指导意义。

大小矾山地区与紫金山矿区同位于上杭—云霄铜、金、铅、银等多金属及明矾石矿化带,具有相似的构造环境、矿化分带、岩浆活动及火山机构特征,是

“紫金山”式铜、金等多金属矿床的重要找矿靶区。与紫金山铜金矿床相比较,矾山一带地表围岩蚀变以高硫型明矾石次生石英岩化为特征,相当于紫金山铜金矿床蚀变分带的外带(林东燕和郑志强,2011),说明深部可能存在隐伏的铜多金属矿。由于受植被、火山覆盖及地形因素的影响,前人对大小矾山一带的地质调查研究相对薄弱,对上杭—云霄成矿带中生代花岗岩的形成时限、岩浆演化特征及其与成矿作用之间的关系尚缺乏系统的同位素年代学及地球化学制约。在紫金山铜金矿田认识基础上,笔者选取矾山地区与成矿关系密切的花岗岩、花岗闪长岩为研究对象,进行年代学、元素地球化学及同位素示踪研究,并与区域上杭—云霄成矿带典型矿床地质特征进行对比,探究大小矾山地区花岗岩的成岩成矿时代、岩石成因、构造环境及其与区域成矿作用之间的关系,为植被覆盖区找矿预测工作提供理论指导。

1 区域地质背景

大小矾山地区位于华夏板块东南缘,政和—大浦断裂带东侧,闽西南拗陷带以东地区,闽东火山断拗带的南段。区域上位于 NW 向上杭—云霄断裂与 NE 向福安—南靖断裂带的交汇部位(图 1),与紫金山铜、金矿田同处于上杭—云霄构造—岩浆活动带。区内岩浆活动强烈,断裂构造及火山机构非常发育,矿化蚀变较强,成矿地质条件良好,是寻找斑岩型、浅成低温热液型铜、金等多金属矿的有利地段,具有良好的找矿潜力。

区内出露的地层比较简单,主要为下侏罗统梨山组(J_1l)内陆盆地碎屑岩、细粒砂岩,上侏罗统南园组(J_3n)酸性、中酸性火山岩及下白垩统黄坑组(K_1h)陆相沉积—火山岩。区域上,南园组和黄坑组地层与铜、金、多金属矿成矿作用密切相关(林东燕和郑志强,2011)。黄坑组主要为中厚层状紫红色砂砾岩、巨厚层状紫灰色英安玢岩、紫红色花砂砾岩、凝灰质粉砂岩及紫红色流纹岩。南园组岩性较复杂,上段为英安质晶屑凝灰熔岩,中段为流纹质熔结凝灰岩、晶屑凝灰岩、凝灰熔岩、火山角砾岩以及流纹岩等,下段为深灰色英安质晶屑凝灰熔岩,由下而上具有中酸—酸性—中酸性的演化规律。

研究区以线性构造为主,以区域脆性断裂及火

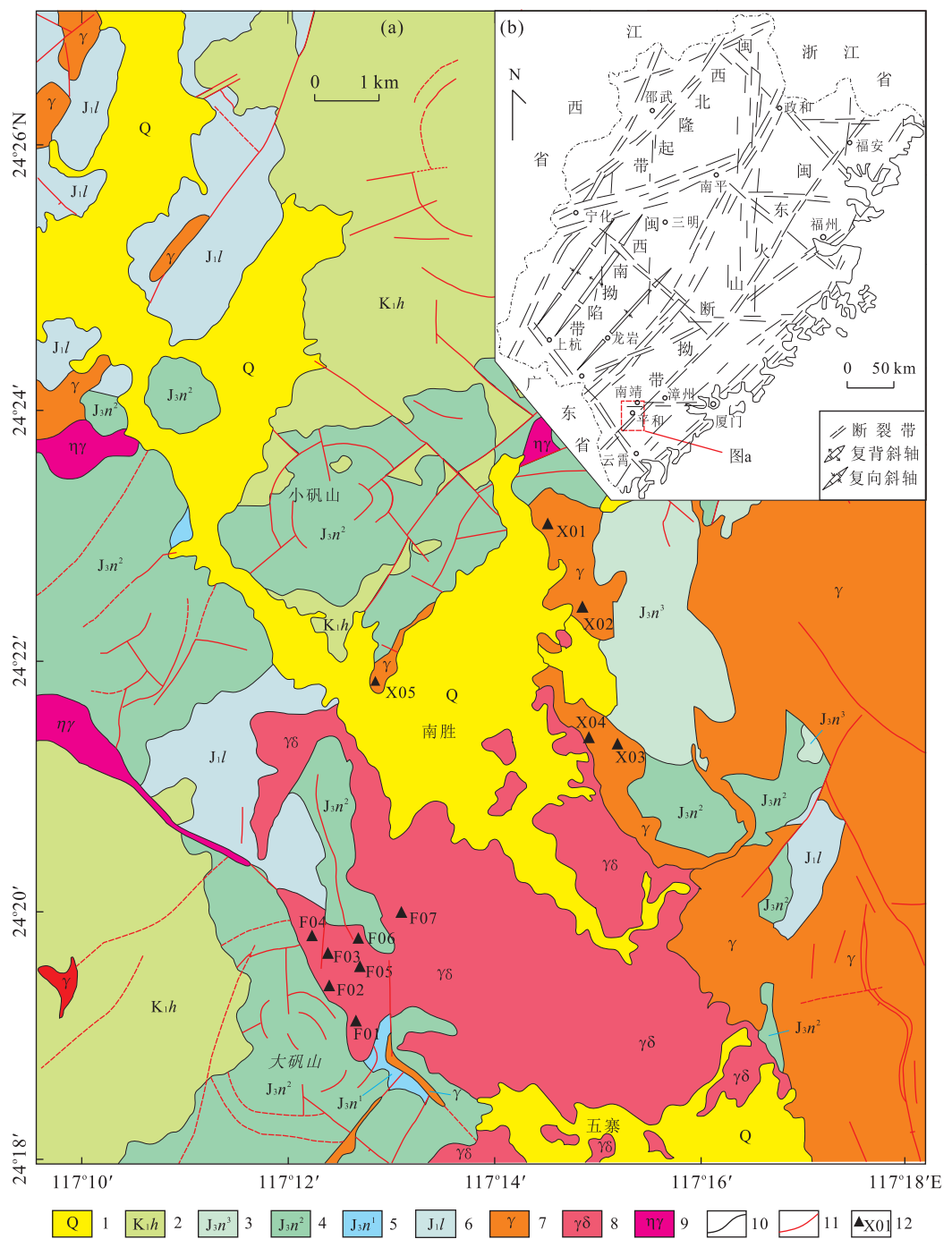


图 1 硃山地区地质简图(a)及区域位置图(b)

Fig.1 Geological sketch map (a) and regional location (b) of the Fanshan area

1.第四纪;2.下白垩统黄坑组;3.上侏罗统南园组上段;4.上侏罗统南园组中段;5.上侏罗统南园组下段;6.下侏罗统梨山组;7.花岗岩;8.花岗闪长岩;9.二长花岗岩;10.地质界线;11.断层;12.采样点;a.据福建省地质调查研究院,2011.福建平和大小硃山地区矿产远景调查地质矿产图;b.据韦德光等(1997)

山断裂为主,区域断裂主要为 NE 向和 NW 向,少量近 EW 向,在不同方向的区域断裂复合部位往往发育环状和放射状火山机构.硃山地区处于福安—南靖断裂 NE 向与上杭—云霄 NW 向断裂的交汇处,构造—岩浆活动强烈,NE 向、NW 向两组断裂

控制着该地区中生代以来的岩浆侵入及火山喷发.大小硃山火山机构、断裂构造比较发育,与钟腾山、鹅公山等火山机构共同组成欧寮复合式火山机构环状组合体,表现为醒目的环状、放射状断裂构造,这些火山断裂常常与地表 Cu、Pb、Zn 及明矾石矿化关

系密切.区内岩浆活动、火山作用强烈,中生代酸性、中酸性火山—侵入岩大面积出露,其中侵入岩以燕山晚期花岗岩类为主.研究区出露的侵入岩主要有燕山早期花岗闪长岩、二长花岗岩及含黑云母花岗岩,呈 NE、NW 向带状及脉状展布,该区燕山晚期花岗岩体与黄坛组火山岩共同构成了早白垩世火山—侵入杂岩.岩石普遍遭受不同程度的蚀变,主要为明矾石化、地开石化、绿泥石化及绢云母化.大小矾山主要出露中细粒花岗岩及中粗粒花岗闪长岩,岩体侵入于南园组火山岩中,在侵入体外接触带常具有硅化、云英岩化及绿泥石化等,并表现出显著的铜、金、银、铅等地球化学异常特征,与成矿关系密切.

2 样品描述及分析方法

对大小矾山火山附近的 4 个岩体共采集 15 个样品进行岩石地球化学分析.在小矾山东南部 5 个地质点(X01~X05)共采取 8 件二长花岗岩样品,在大矾山东北侧 7 个地质点(F01~F07)共采取 7 件花岗闪长岩样品,具体位置见图 1 所示.挑选新鲜岩石进行薄片制作、镜下观察,并选取代表性样品进行岩石地球化学成分测试、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素测试.所采花岗岩岩石学特征如下.

小矾山二长花岗岩侵位于火山机构东南部,受 NW 及 NE 向构造控制而呈带状展布.岩石呈灰白色、浅肉红色,具中细粒二长结构(图 2a),块状构造,主要矿物为石英(25%~30%)、斜长石(30%~40%)、钾长石(25%~35%)、黑云母(5%~10%),副矿物为磷灰石、榍石和磁铁矿等.石英自形程度低,多呈他形粒状,粒径为 0.5~2.0 mm,具波状消光.斜长石呈半自形、自形板状,粒径多为 0.5~

1.5 mm,常见聚片双晶及卡钠复合双晶.钾长石多呈他形,粒径以 1~2 mm 为主,个别可达 3~4 mm,发育卡式双晶,局部绢云母化.黑云母为片状,局部被绿泥石交代.

大矾山花岗闪长岩侵位于火山机构东北部,受构造控制亦呈 NE 向展布.岩石呈浅肉红色,中—细粒结构,块状构造.主要矿物为石英(15%~20%)、斜长石(40%~50%)、钾长石(15%~25%)、黑云母(约 5%)和角闪石(约 5%).副矿物为榍石和磁铁矿等.石英自形程度较低,多呈他形粒状,粒径多为 0.5~1.0 mm,具波状消光.斜长石呈半自形—自形,粒径多为 0.5~2.0 mm,发育聚片双晶,局部可见环带结构(图 2b).钾长石多呈他形,粒径为 0.5~2.0 mm,可见卡式双晶,局部绢云母化.黑云母为片状,局部被绿泥石化.角闪石为短柱状,自形程度较好,可见一组完全解理.

锆石的分选由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,通过常规方法将岩石样品进行破碎,并经浮选和磁法进行分选.在双目镜下挑选晶形和透明度较好,并且无明显裂痕和包裹体的锆石颗粒,将其置于环氧树脂制靶,然后研磨抛光至有足够的新鲜锆石截面,并进行透、反射光图像采集,锆石阴极发光(CL)成像在北京锆年领航科技有限公司实验室完成.锆石 LA-ICP MS U-Pb 同位素分析在天津地质矿产研究所激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪上进行,具体测试原理及详细分析流程和数据处理过程同文献(王森和张达,2015).为了保证测试结果的可靠性,每分析 8 个测点,测一次标样以监测仪器的稳定性和离子计数统计的精确性.数据处理采用 Isoplot 宏程序进行年龄谱和图的生成及处理,同位素比值和年龄误差(标准误差)为 1σ 水平.锆石 Lu-

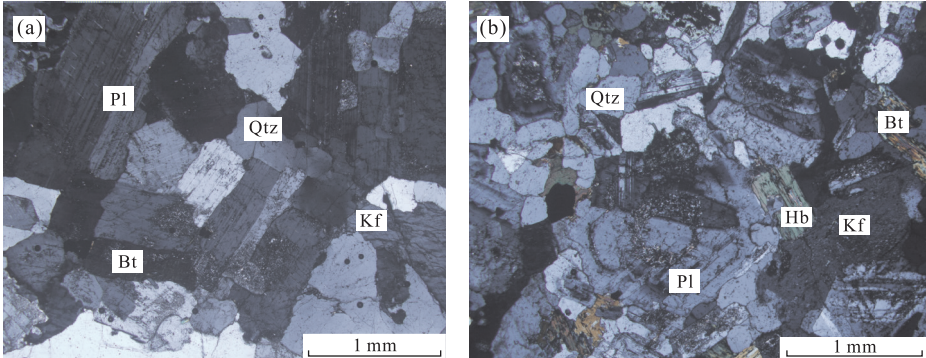


图 2 矾山地区花岗岩(a)和花岗闪长岩(b)显微镜下特征

Fig.2 Microscope images of granites (a) and granodiorites (b) from the Fanshan area
Qtz. 石英; Pl. 斜长石; Kf. 钾长石; Bt. 黑云母; Hb. 普通角闪石

Hf 同位素分析在广州地化所实验室完成,在 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 定年基础上,参照锆石阴极发光图像,选择在原位年龄分析位置或其附近进行,实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,激光束斑直径为 33 μm ,能量为 80 mJ,重复频率为 8 Hz.采用蓬莱锆石作为参考物质(Li *et al.*, 2010),其精度为 $0.282\,882\pm0.000\,006(2\sigma, n=56)$,实验详细操作方法和原理见 Wu *et al.*(2006).

岩石常量元素、微量元素及稀土元素分析在国家地质实验测试中心完成.其中,常量元素为 X 射线荧光光谱仪测定(XRF),并用等离子光谱法进行验证,FeO 使用湿化学法测定;微量元素和稀土元素采用等离子质谱仪测定(ICP-MS).

3 锆石 U-Pb 及 Hf 同位素特征

从两个代表性岩体样品(X01-b2 和 F02-b1)中挑选出的锆石特征表明,所选锆石晶形较好,表现出

柱状晶体,颗粒较大的特征,粒径集中于 80 ~ 200 μm 之间(图 3),岩浆震荡环带非常清晰,表现出岩浆锆石的特征.

3.1 锆石 U-Pb 同位素特征

从表 1 可以看出,花岗岩样品 X01-b2 中 21 颗锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值集中于 109~129 Ma 之间,除个别点外,其他测试点均落在谐和线附近,并表现出相对密集的簇状(图 4a).其中 4 号和 13 号点²⁰⁶Pb/²³⁸U 的年龄为 129 Ma,接近于其围岩南园组火山岩(J_3n)的年龄(王森, 2014),可能为捕获围岩中的锆石.此外,测试点 5、8、9、17 和 22 可能由于普通铅影响导致²⁰⁷Pb/²³⁵U 比值偏高,而未落到谐和线上.除测试点 6 和 15 外,其余测试点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄均位于 109~115 Ma 之间.剔除少数偏离点后,1~3、5~6、8~9、16 和 18~21 号共 12 个点锆石年龄集中在 109~113 之间,在谐和图上表现为密集簇状,说明锆石保持了相对较好的封闭性.表面年龄加权平均值为 110.26 ± 0.74 Ma(MSWD=2.1)(图 4a).

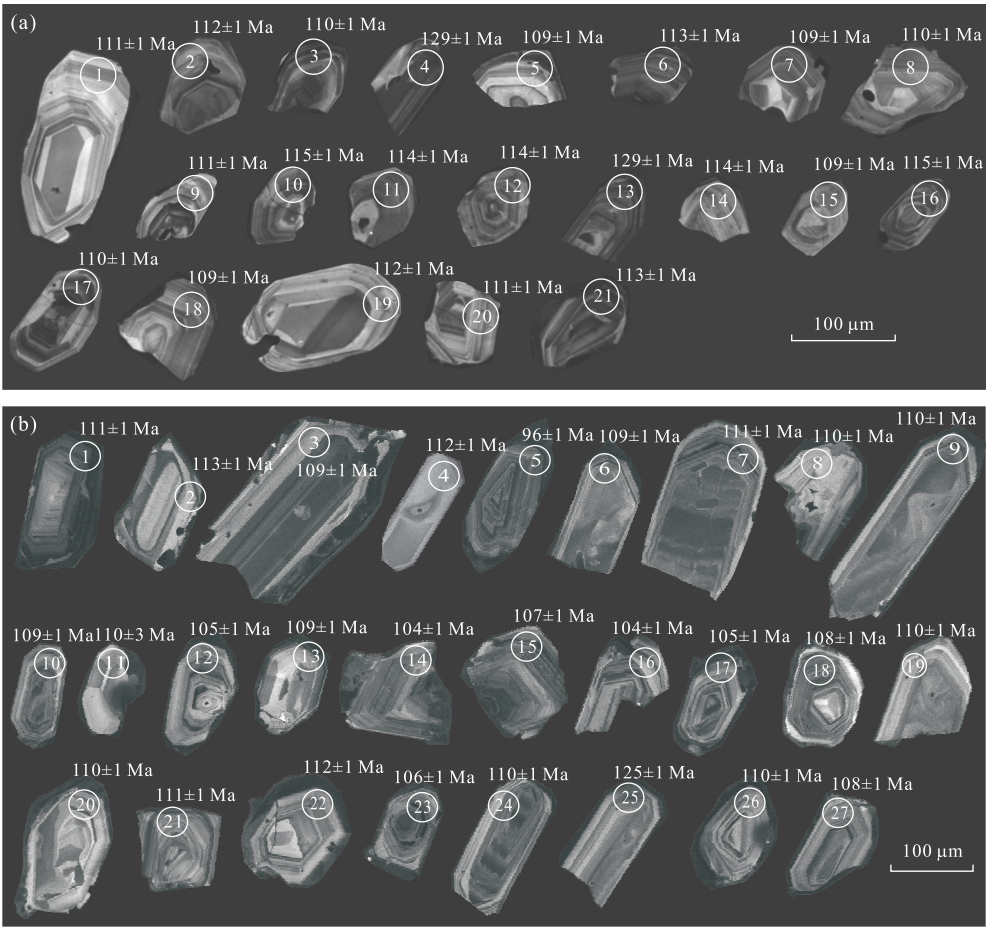


图 3 样品 X01-b2(a)和 F02-b1(b)锆石阴极发光图像及测试点位置

Fig.3 Cathodoluminescence images and the test location of zircons from samples of X01-b2 (a) and F02-b1 (b)

表 1 矾山地区花岗岩及花岗闪长岩 LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 定年测试结果

Table 1 LA-MC-ICP MS Zircon U-Pb dating results of granite and granodiorite from the Fanshan area

测试点	Th/U	同位素比值			年龄 (Ma)		
		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U±1σ
X01-b2							
1	0.625 1	0.049 1±0.005 8	0.118 0±0.013 3	0.017 4±0.000 2	151±276	113±13	111±1
2	0.594 7	0.049 1±0.001 8	0.118 4±0.004 3	0.017 5±0.000 1	154±84	114±4	112±1
3	0.915 4	0.059 7±0.001 8	0.142 1±0.004 2	0.017 3±0.000 1	591±64	135±4	110±1
4	0.645 2	0.054 6±0.001 1	0.152 6±0.003 3	0.020 3±0.000 1	396±43	144±3	129±1
5	0.816 2	0.090 5±0.001 3	0.212 9±0.003 6	0.017 1±0.000 1	1436±28	196±3	109±1
6	0.678 8	0.055 3±0.000 9	0.132 5±0.002 2	0.017 4±0.000 1	424±36	126±2	111±1
7	0.489 3	0.049 4±0.001 7	0.120 7±0.004 2	0.017 7±0.000 1	165±80	116±4	113±1
8	0.713 8	0.083 9±0.002 1	0.197 8±0.005 1	0.017 1±0.000 1	1 289±49	183±5	109±1
9	0.849 2	0.212 6±0.001 5	0.502 8±0.007 4	0.017 2±0.000 2	2 925±11	414±6	110±1
10	0.982 0	0.050 7±0.000 8	0.125 6±0.002 0	0.018 0±0.000 1	228±35	120±2	115±1
11	0.832 3	0.048 4±0.001 1	0.118 7±0.002 7	0.017 8±0.000 1	117±52	114±3	114±1
12	0.761 6	0.048 9±0.003 2	0.120 5±0.008 2	0.017 9±0.000 1	143±156	116±8	114±1
13	0.529 6	0.055 2±0.001 3	0.153 5±0.003 7	0.020 2±0.000 1	419±54	145±3	129±1
14	0.506 2	0.048 5±0.001 2	0.119 3±0.003 2	0.017 9±0.000 1	122±60	114±3	114±1
15	0.494 8	0.087 0±0.001 6	0.204 0±0.003 9	0.017 0±0.000 1	1 361±36	189±4	109±1
16	0.489 8	0.051 3±0.003 0	0.127 8±0.007 5	0.018 1±0.000 1	254±133	122±7	115±1
17	0.945 9	0.051 9±0.001 9	0.123 0±0.005 5	0.017 2±0.000 1	283±82	118±5	110±1
8	0.484 2	0.052 1±0.000 4	0.122 6±0.001 0	0.017 1±0.000 1	290±18	117±1	109±1
19	0.550 2	0.049 0±0.002 6	0.118 5±0.006 4	0.017 6±0.000 1	146±126	114±6	112±1
20	0.722 5	0.277 3±0.002 0	0.661 1±0.004 0	0.017 3±0.000 1	—	515±3	111±1
21	0.730 2	0.049 2±0.000 7	0.120 4±0.001 7	0.017 8±0.000 1	156±31	115±2	113±1
F02-b1							
1	0.455 0	0.047 1±0.002 9	0.112 3±0.006 8	0.017 3±0.000 1	54±145	108±7	111±1
2	0.240 7	0.047 4±0.002 0	0.115 7±0.005 0	0.017 7±0.000 1	69±101	111±5	113±1
3	0.895 9	0.050 4±0.002 0	0.119 0±0.004 7	0.017 1±0.000 1	213±90	114±4	109±1
4	0.375 7	0.048 4±0.001 6	0.116 5±0.004 1	0.017 5±0.000 1	120±80	112±4	112±1
5	0.578 6	0.089 0±0.002 0	0.184 1±0.004 3	0.015 0±0.000 1	1 405±44	172±4	96±1
6	0.402 9	0.048 8±0.002 6	0.114 9±0.006 1	0.017 1±0.000 1	139±126	110±6	109±1
7	0.544 5	0.047 5±0.001 1	0.113 9±0.002 6	0.017 4±0.000 1	75±54	110±3	111±1
8	0.641 5	0.048 5±0.003 1	0.114 9±0.007 5	0.017 2±0.000 1	125±151	110±7	110±1
9	0.480 8	0.047 8±0.001 4	0.113 5±0.003 3	0.017 2±0.000 1	91±68	109±3	110±1
10	0.772 7	0.049 0±0.002 0	0.115 5±0.004 8	0.017 1±0.000 1	149±97	111±5	109±1
11	0.507 2	0.048 5±0.002 3	0.114 9±0.017 2	0.017 2±0.000 5	122±110	110±17	110±3
12	0.637 1	0.086 2±0.002 2	0.194 7±0.005 8	0.016 4±0.000 1	1 342±50	181±5	105±1
13	0.412 6	0.050 1±0.002 1	0.118 1±0.005 2	0.017 1±0.000 1	198±98	113±5	109±1
14	0.597 4	0.068 1±0.001 4	0.152 5±0.003 5	0.016 2±0.000 1	872±43	144±3	104±1
15	0.538 0	0.049 2±0.001 6	0.113 6±0.003 9	0.016 7±0.000 1	159±76	109±4	107±1
16	0.316 9	0.071 2±0.001 5	0.160 2±0.003 8	0.016 3±0.000 1	964±43	151±4	104±1
17	0.487 8	0.053 4±0.001 4	0.120 4±0.003 4	0.016 3±0.000 1	346±60	115±3	105±1
18	0.618 8	0.050 6±0.001 5	0.118 2±0.003 7	0.017 0±0.000 1	221±69	113±4	108±1
19	0.062 8	0.049 4±0.003 8	0.117 6±0.009 4	0.017 3±0.000 1	166±181	113±9	110±1
20	0.611 8	0.048 9±0.002 1	0.116 5±0.005 0	0.017 3±0.000 1	145±100	112±5	110±1
21	2.517 5	0.372 3±0.006 6	0.889 3±0.019 7	0.017 3±0.000 1	3 801±27	646±14	111±1
22	0.973 2	0.046 9±0.000 7	0.113 5±0.001 8	0.017 6±0.000 1	44±38	109±2	112±1
23	0.675 4	0.048 6±0.002 9	0.111 5±0.007 0	0.016 7±0.000 1	128±140	107±7	106±1
24	0.551 4	0.048 4±0.001 9	0.115 2±0.004 5	0.017 3±0.000 1	117±91	111±4	110±1
25	0.761 3	0.080 5±0.001 8	0.217 0±0.005 1	0.019 6±0.000 1	1 208±44	199±5	125±1
26	0.704 6	0.077 2±0.002 0	0.182 5±0.005 4	0.017 2±0.000 1	1 125±53	170±5	110±1
27	0.477 4	0.048 5±0.001 8	0.112 7±0.004 3	0.016 9±0.000 1	123±89	108±4	108±1

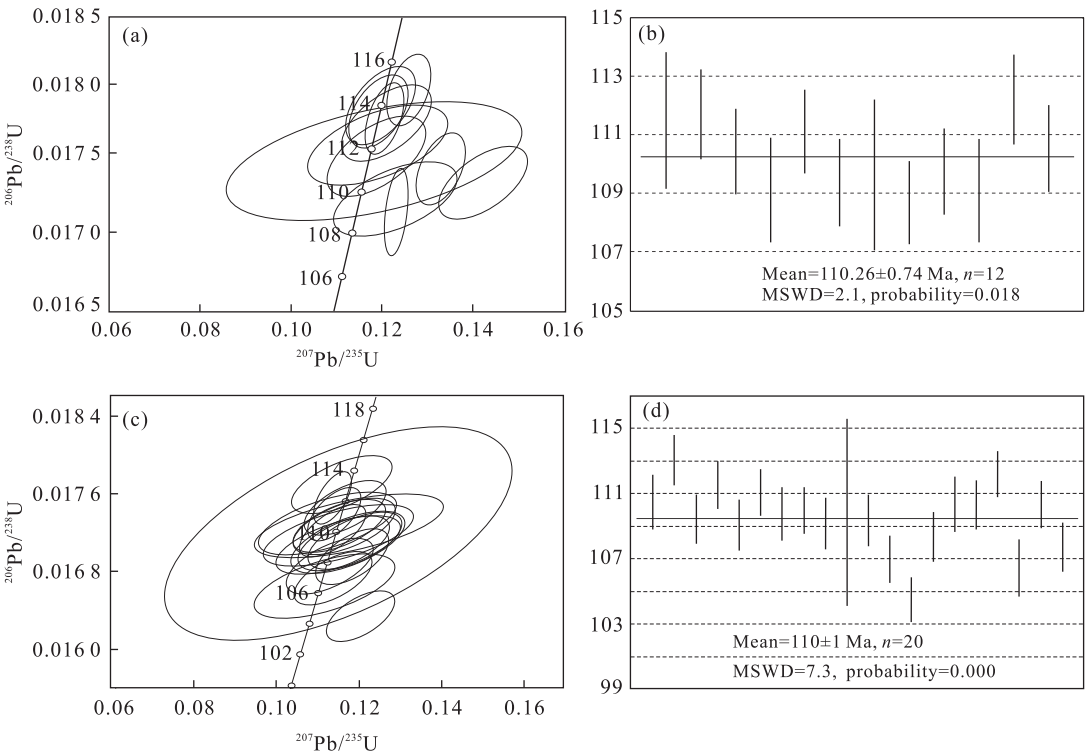


图 4 样品 X01-b2(a,b)和 F02-b1(c,d)锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagram of samples of X01-b2(a,b)and F02-b1(c,d)

对样品 F02-b1 共选择 28 个测试点,测试结果表明(表 1),除测试点 6 和 26 外,其他点的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值集中于 104~113 Ma 之间,总体上表现出密集的簇状(图 4b),表明锆石保持了相对好的封闭性.其中,测试点 6 和 26 可能为捕获锆石,测试点 22 可能为普通铅丢失所致.剔除少数偏离点后,2~4、7~12、14、16、18~21、23~25 和 28 号点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 110 ± 1 Ma.两个样品的锆石 Th/U 比值相对较高,均大于 0.4(表 1),表明为岩浆成因锆石(吴元保和郑永飞,2004).

以上结果表明,花岗岩及花岗闪长岩样品锆石 U-Pb 谐和年龄均为 110 ± 1 Ma,形成于早白垩世晚期.个别锆石年龄偏差可能为捕获围岩锆石所致,但总体上,两个样品锆石年龄比较集中,主要测试点数据结果位于 109~111 Ma 年龄之间,代表了本区花岗岩及花岗闪长岩的结晶年龄.

3.2 锆石 Hf 同位素

在 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测年基础上,对大小砷山花岗岩和花岗闪长岩体 2 个代表性样品的锆石进行微区 Hf 同位素测定,分析结果见表 2.对于 X01-b2 样品,其初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282 519~0.282 701(加权平均值为 0.282 634,误差 $2\sigma = 0.000\ 011$), $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围介于 -6.6~-0.2 之

间(平均值为 -2.6),对应的二阶段模式年龄 T_{DM2} 为 1 177~1 551 Ma.对于样品 F02-b1,其初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282 617~0.282 751(加权平均值为 0.282 672,误差 $2\sigma = 0.000\ 011$), $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围介于 -3.1~1.6 之间(平均值为 -1.2),绝大多数 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为负值,对应的二阶段模式年龄 T_{DM2} 为 1 066~1 366 Ma.两个样品 Hf 同位素具有比较好的一致性.

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素特征

分析结果见表 3,大小砷山地区二长花岗岩和花岗闪长岩总体上具有富硅、低钛、高碱、偏铝一过铝质等特征.其中,小砷山花岗岩 SiO_2 含量为 69.21%~77.77%, Al_2O_3 含量为 12.18%~14.83%,岩石全碱(ALK)为 7.35%~8.34%,表征岩石碱性程度的碱度率(A.R)为 2.34~3.01.大砷山花岗闪长岩 SiO_2 含量为 62.98%~69.88%, Al_2O_3 含量为 14.31%~16.47%,岩石全碱(ALK)含量为 5.54%~6.99%,碱度率(A.R)为 1.78~2.44.在扣除烧失量再换算成百分数后投影到 TAS 全碱图(图 5a)上,两个地区的样

表 2 矾山地区花岗岩及花岗闪长岩 LA-MC-ICP MS 锆石 Lu-Hf 同位素分析结果
Table 2 LA-ICP MS zircon Lu-Hf isopote analyses for granite and granodiorite from the Fanshan area

样品	年龄(Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (<i>t</i>)	<i>T</i> _{DM1} (Ma)	<i>T</i> _{DM2} (Ma)	<i>f</i> _{Lu/Hf}
X01-b2										
1	111	0.027 015	0.001 061	0.282 643	0.000 010	−4.6	−2.2	864	1 306	−0.97
2	112	0.037 299	0.001 560	0.282 662	0.000 010	−3.9	−1.5	847	1 265	−0.95
3	110	0.039 347	0.001 595	0.282 595	0.000 012	−6.2	−3.9	944	1 416	−0.95
5	109	0.023 133	0.000 975	0.282 579	0.000 014	−6.8	−4.5	951	1 450	−0.97
6	111	0.040 227	0.001 624	0.282 519	0.000 014	−8.9	−6.6	1 054	1 586	−0.95
8	109	0.032 508	0.001 402	0.282 679	0.000 009	−3.3	−1.0	820	1 228	−0.96
9	110	0.063 931	0.002 630	0.282 537	0.000 011	−8.3	−6.1	1056	1 551	−0.92
18	109	0.038 288	0.001 569	0.282 692	0.000 010	−2.8	−0.5	805	1 200	−0.95
19	112	0.028 630	0.001 117	0.282 683	0.000 010	−3.1	−0.8	808	1 216	−0.97
20	111	0.030 854	0.001 131	0.282 701	0.000 011	−2.5	−0.2	783	1 177	−0.97
21	113	0.050 733	0.001 987	0.282 681	0.000 011	−3.2	−0.9	830	1 224	−0.94
FS02-b1										
2	111	0.013 678	0.000 535	0.282 682	0.000 010	−3.2	−0.8	797	1 216	−0.98
3	113	0.037 866	0.001 593	0.282 751	0.000 012	−0.7	1.6	722	1 066	−0.95
4	109	0.039 804	0.001 554	0.282 678	0.000 009	−3.3	−1.0	825	1 232	−0.95
7	109	0.017 343	0.000 777	0.282 624	0.000 009	−5.2	−2.9	884	1 350	−0.98
8	111	0.030 083	0.001 207	0.282 721	0.000 013	−1.8	0.5	757	1 133	−0.96
9	110	0.017 760	0.000 748	0.282 687	0.000 012	−3.0	−0.6	795	1 207	−0.98
10	110	0.029 363	0.001 315	0.282 673	0.000 014	−3.5	−1.2	826	1 241	−0.96
11	109	0.034 150	0.001 321	0.282 705	0.000 012	−2.4	−0.1	782	1 171	−0.96
12	110	0.025 608	0.001 050	0.282 658	0.000 009	−4.0	−1.7	842	1 274	−0.97
14	109	0.032 049	0.001 304	0.282 663	0.000 011	−3.9	−1.5	841	1 264	−0.96
16	107	0.020 797	0.000 899	0.282 624	0.000 009	−5.2	−2.9	886	1 351	−0.97
18	105	0.023 738	0.001 059	0.282 645	0.000 010	−4.5	−2.3	860	1 305	−0.97
19	108	0.014 048	0.000 628	0.282 658	0.000 012	−4.0	−1.7	833	1 274	−0.98
20	110	0.024 369	0.001 071	0.282 708	0.000 012	−2.3	0.1	772	1 161	−0.97
21	110	0.021 229	0.000 950	0.282 664	0.000 013	−3.8	−1.5	832	1 260	−0.97
23	112	0.040 189	0.001 738	0.282 617	0.000 013	−5.5	−3.1	916	1 366	−0.95
24	106	0.035 257	0.001 510	0.282 640	0.000 014	−4.7	−2.5	879	1 319	−0.95
25	110	0.022 432	0.000 938	0.282 695	0.000 011	−2.7	−0.4	788	1 191	−0.97
27	108	0.025 462	0.001 128	0.282 666	0.000 010	−3.8	−1.5	833	1 258	−0.97

品分别落入花岗岩区和花岗闪长岩区.在(Na₂O+K₂O)-SiO₂图解上,所有样品均落入亚碱性区域,在SiO₂-K₂O图解(图 5b)上,样品均落入高钾钙碱性区域.

4.2 稀土、微量元素特征

由表 4 可以看出,矾山地区花岗岩和花岗闪长岩具有相似的微量、稀土元素分配特征.总的看来,样品的总稀土含量较高(表 4),∑REE 值分别为(134.17~232.38)×10^{−6}和(149.95~201.76)×10^{−6},明显富集轻稀土元素,并且轻重稀土比值(LREE/HREE)较高,分别为(4.62~9.83)×10^{−6}和(6.19~8.38)×10^{−6}.样品的稀土元素分配曲线均表现为明显的右倾型,具有明显的负 Eu 异常,δEu 平均值分别为 0.48 和 0.74,可能由于岩浆分异过程中斜长石的分离结晶作用所致(Wu *et al.*, 2003a).

在稀土元素球粒陨石标准化配分模式(图 6)上展示出显著的“V”字形,以上与福建东南沿海铝质 A 型花岗岩特征相似(邱检生等,2000),说明可能具有相同的岩浆起源.

微量元素总体上以富集大离子亲石元素(LILE;如 K、Rb、Th、U 等)和亏损高场强元素(HFSE;如 Nb、Ta、Ti 等)为特征(图 7).在图 7 上,花岗岩与花岗闪长岩样品的曲线特征基本一致,总体上呈凸型.Ba、Sr 的亏损表明岩浆岩经历了斜长石、钾长石等矿物的分离结晶作用.Ti 亏损则可能是受到了钛铁矿的分离结晶作用影响,Nb 和 Ta 的强烈亏损表明岩浆应来源于地壳.在图 6 中具有弱的 Ce 负异常,这可能是由于岩石遭受蚀变或者弱的风化作用所引起的.

表 3 矾山地区花岗岩及花岗闪长岩主量元素分析结果(%)

Table 3 Major element analytical results of granite and granodiorite from the Fanshan area

样品号	X01-b1	X01-b2	X02-b1	X03-b1	X04-b1	X05-b1	X05-b2	X05-b3
SiO ₂	77.60	76.50	75.48	74.62	69.21	77.37	77.77	77.57
TiO ₂	0.14	0.14	0.24	0.22	0.43	0.14	0.14	0.15
Al ₂ O ₃	12.33	12.18	12.74	13.44	14.83	12.60	12.38	12.46
Fe ₂ O ₃	0.33	0.67	1.32	0.90	1.97	0.87	0.77	0.80
FeO	0.43	0.11	0.52	0.77	1.37	0.18	0.13	0.11
MnO	0.03	0.03	0.08	0.07	0.12	0.05	0.02	0.04
MgO	0.11	0.11	0.41	0.41	1.15	0.11	0.12	0.12
CaO	0.40	0.42	1.23	1.34	2.85	0.27	0.28	0.36
Na ₂ O	3.19	3.03	3.41	3.70	3.55	3.24	3.02	2.97
K ₂ O	5.03	5.06	4.09	4.18	3.75	5.09	4.90	5.20
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.06	0.06	0.14	0.02	0.01	0.01
LOI	0.65	0.72	0.69	0.68	1.29	0.70	0.77	0.74
Total	100.26	98.99	100.27	100.39	100.66	100.64	100.31	100.53
ALK	8.25	8.29	7.53	7.90	7.35	8.34	7.96	8.19
A.R	3.01	2.85	2.91	3.01	2.34	3.03	2.82	2.73

样品号	F01-b1	F02-b1	F03-b1	F04-b1	F05-b1	F06-b1	F07-b1
SiO ₂	64.78	69.88	67.02	64.34	64.26	64.61	62.98
TiO ₂	0.63	0.41	0.53	0.66	0.68	0.68	0.71
Al ₂ O ₃	16.47	14.31	15.19	15.25	16.15	15.20	15.78
Fe ₂ O ₃	3.22	2.05	1.90	2.78	3.17	2.89	2.81
FeO	1.81	1.27	1.86	2.52	2.31	2.53	3.06
MnO	0.13	0.06	0.06	0.10	0.08	0.10	0.12
MgO	1.75	1.07	1.62	1.99	2.03	2.10	2.31
CaO	3.32	2.85	3.19	4.28	3.59	4.29	4.44
Na ₂ O	2.57	3.06	3.84	3.18	2.92	2.95	3.05
K ₂ O	2.97	3.94	3.11	3.10	2.87	3.06	2.84
P ₂ O ₅	0.21	0.12	0.17	0.21	0.22	0.21	0.23
LOI	1.90	0.81	1.30	1.36	1.56	1.14	1.43
Total	99.77	99.81	99.78	99.78	99.82	99.77	99.75
ALK	5.54	6.99	6.95	6.29	5.78	6.02	5.89
A.R	1.78	2.11	2.44	1.97	1.84	1.87	1.86

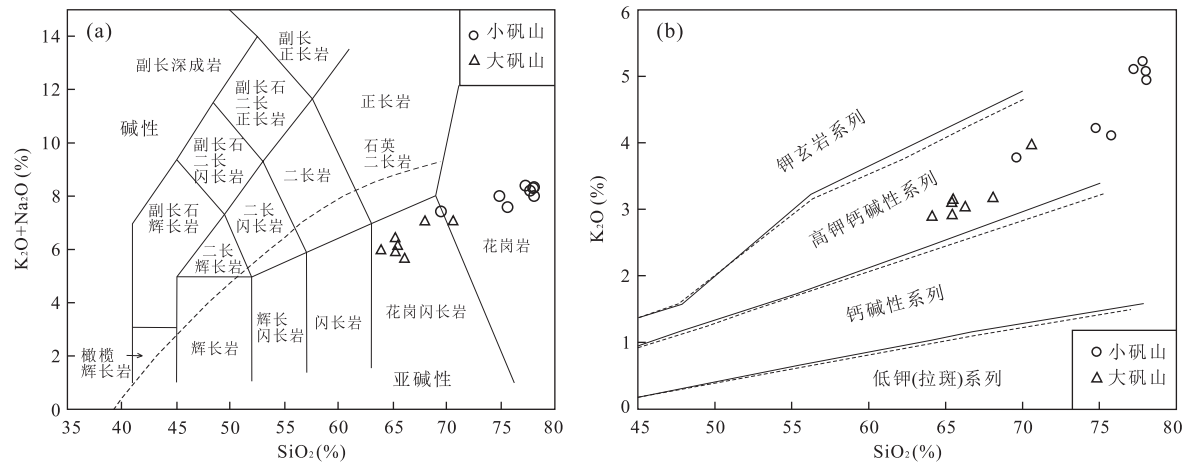


图 5 矾山地区花岗岩与花岗闪长岩的 SiO₂-(Na₂O+K₂O)及 SiO₂-K₂O 图

Fig.5 The SiO₂-(Na₂O+K₂O) (a) and SiO₂-K₂O (b) diagrams of granite and granodiorite from the Fanshan area
a 据 Le Bas *et al.* (1986) 及 SiO₂-K₂O 图解; b 据 Peccerillo and Taylor (1976)

表 4 矾山地区花岗岩及花岗闪长岩稀土、微量元素分析结果(10^{-6})

Table 4 REE and trace element analytical results of granite and granodiorite from the Fanshan area

样品号	X01-b1	X01-b2	X02-b1	X03-b1	X04-b1	X05-b1	X05-b2	X05-b3
La	46.18	63.68	41.65	43.06	28.70	40.29	56.94	44.96
Ce	78.37	75.52	73.37	77.41	54.81	67.23	56.19	38.91
Pr	9.61	14.28	8.32	8.72	6.12	8.10	11.66	10.07
Nd	32.42	47.15	28.81	31.31	22.78	28.07	40.80	34.48
Sm	5.55	8.33	5.22	6.03	4.43	5.06	7.12	5.96
Eu	0.66	0.96	0.77	0.91	1.11	0.61	0.79	0.69
Gd	4.60	6.44	4.93	6.59	4.05	4.65	5.93	4.60
Tb	0.79	1.14	0.93	1.38	0.72	0.81	1.01	0.79
Dy	4.40	5.95	5.63	9.14	4.06	4.59	5.34	4.15
Ho	0.88	1.08	1.18	2.05	0.82	0.91	1.01	0.77
Er	2.71	3.22	3.81	6.72	2.60	2.78	3.04	2.39
Tm	0.47	0.53	0.68	1.20	0.44	0.47	0.50	0.40
Yb	3.28	3.63	4.87	8.28	3.13	3.26	3.46	2.83
Lu	0.45	0.47	0.60	0.94	0.40	0.46	0.50	0.41
ΣREE	190.37	232.38	180.77	203.74	134.17	167.29	194.29	151.41
L/H	9.83	9.35	6.99	4.61	7.27	8.33	8.35	8.27
(La/Yb) _N	10.10	12.58	6.13	3.73	6.58	8.87	11.80	1.21
(La/Sm) _N	5.37	4.94	5.15	4.61	4.18	5.14	5.16	1.88
(Gd/Yb) _N	1.16	1.47	0.84	0.66	1.07	1.18	1.42	0.56
δEu	0.40	0.40	0.46	0.44	0.80	0.38	0.37	0.27
Cs	2.33	2.09	2.46	2.36	2.95	2.86	3.08	3.20
Rb	194.10	193.30	199.80	191.00	152.30	179.20	214.00	191.80
Ba	437.70	443.20	578.20	649.70	711.10	508.50	662.60	589.40
Th	20.30	22.52	25.30	21.74	14.81	21.29	25.13	23.21
U	3.47	3.49	3.65	3.47	4.06	4.07	7.05	3.94
Nb	6.50	9.49	8.69	6.49	3.67	6.39	7.06	6.28
Ta	1.33	1.57	2.00	1.76	1.31	1.39	1.57	1.46
Pb	18.89	16.10	23.67	24.21	27.01	19.86	25.03	17.37
Sr	58.40	62.02	162.90	166.20	365.00	83.64	83.56	82.09
Zr	92.00	86.45	117.19	118.91	136.30	87.16	86.54	94.31
Hf	3.96	3.84	5.25	5.48	6.27	4.07	4.36	4.49
Y	4.40	5.95	5.63	9.14	4.06	4.59	5.34	4.15
Zr/Hf	23.23	22.49	22.34	21.70	21.74	21.42	19.87	21.01
Nb/Ta	4.88	6.06	4.35	3.68	2.81	4.58	4.48	4.31
Ba/Nb	67.30	46.72	66.55	100.08	193.90	79.58	93.92	93.91
Nb/U	1.87	2.71	2.38	1.87	0.90	1.57	1.00	1.59
Ba/La	9.48	6.96	13.88	15.09	24.78	12.62	11.64	13.11
Ce/Pb	4.15	4.69	3.10	3.20	2.03	3.38	2.24	2.24
Zr/Ba	0.21	0.20	0.20	0.18	0.19	0.17	0.13	0.16

样品号	F01-b1	F02-b1	F03-b1	F04-b1	F05-b1	F06-b1	F07-b1
La	41.39	48.56	31.56	33.70	33.34	29.99	31.39
Ce	73.68	68.76	63.45	65.99	63.66	61.89	63.66
Pr	9.83	10.52	7.24	7.82	8.55	7.60	7.72
Nd	37.37	38.01	25.84	28.99	32.12	28.92	29.04
Sm	6.94	7.12	4.75	5.52	6.26	5.58	5.52
Eu	1.70	1.60	1.13	1.32	1.40	1.29	1.29
Gd	6.55	7.07	4.20	5.28	6.01	4.98	4.93
Tb	0.99	1.14	0.68	0.84	0.92	0.77	0.77
Dy	6.03	7.20	4.14	5.28	5.75	4.63	4.70
Ho	1.16	1.42	0.79	1.03	1.09	0.88	0.90
Er	3.42	4.44	2.41	3.02	3.19	2.51	2.60
Tm	0.58	0.78	0.42	0.51	0.55	0.42	0.44
Yb	3.71	5.23	2.86	3.28	3.43	2.69	2.85

续表 4

样品号	F01-b1	F02-b1	F03-b1	F04-b1	F05-b1	F06-b1	F07-b1
Lu	0.61	0.92	0.49	0.56	0.55	0.43	0.45
ΣREE	193.96	202.76	149.95	163.14	166.81	152.58	156.24
L/H	7.42	6.19	8.38	7.24	6.76	7.81	7.86
(La/Yb) _N	8.90	8.75	8.27	8.54	9.14	9.46	9.53
(La/Sm) _N	4.93	4.87	4.86	4.83	4.86	4.94	4.91
(Gd/Yb) _N	1.14	1.14	1.10	1.13	1.19	1.21	1.21
δEu	0.77	0.69	0.77	0.75	0.70	0.75	0.76
Cs	3.49	5.31	2.26	3.09	3.42	1.72	1.82
Rb	59.90	129.20	78.10	76.30	52.20	68.10	67.50
Ba	701.10	605.40	674.90	642.10	698.90	766.30	682.70
Th	17.72	25.14	21.21	17.50	15.16	13.64	14.31
U	5.30	7.39	5.25	7.14	4.38	3.57	4.21
Nb	9.10	11.40	10.90	8.70	8.90	9.50	9.10
Ta	1.55	1.77	1.82	1.58	1.41	1.12	1.18
Pb	11.44	16.05	28.32	17.43	28.18	13.15	19.03
Sr	245.10	270.00	269.20	277.10	257.00	308.00	384.10
Zr	82.30	101.80	89.70	91.80	87.30	107.10	128.00
Hf	3.05	3.80	3.35	4.04	3.49	3.43	5.99
Y	35.87	46.37	23.41	30.80	32.52	25.31	25.30
Zr/Hf	26.97	26.77	26.78	22.70	25.02	31.19	21.35
Nb/Ta	5.86	6.44	5.99	5.51	6.29	8.47	7.72
Ba/Nb	77.04	53.11	61.92	73.80	78.53	80.66	75.02
Nb/U	1.72	1.54	2.08	1.22	2.03	2.66	2.16
Ba/La	16.94	12.47	21.38	19.05	20.96	25.55	21.75
Ce/Pb	6.44	4.28	2.24	3.79	2.26	4.71	3.35
Zr/Ba	0.12	0.17	0.13	0.14	0.12	0.14	0.19

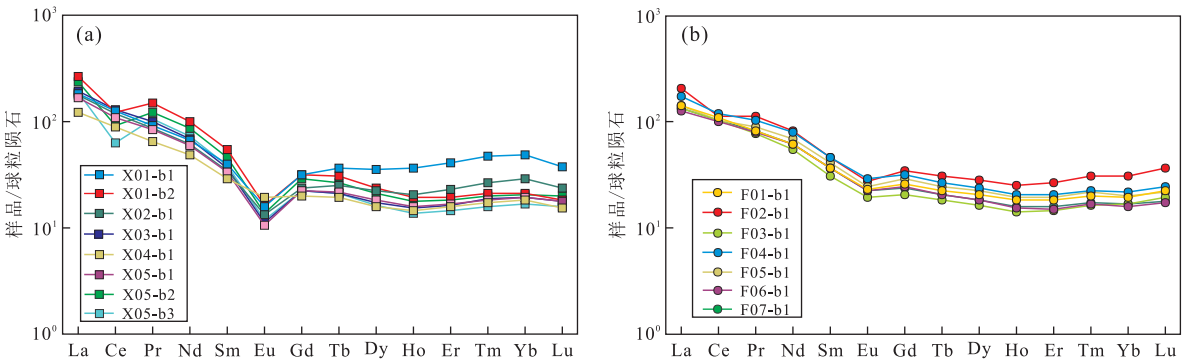


图 6 矾山地区花岗岩(a)及花岗闪长岩(b)稀土元素球粒陨石标准化配分模式
Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns of granite (a) and granodiorite (b) from the Fanshan area
标准值据 Sun and McDonough(1989)

5 讨论

5.1 成岩年代学

锆石具有较高的封闭温度和良好的稳定性,富含 U 和 Th,低普通 Pb,这些特性使锆石 U-Pb 定年成为同位素年代学研究中最常用和最有效的方法之一(吴元保和郑永飞,2004).矾山地区花岗岩及花岗闪长岩锆石 U-Pb 定年结果表明,岩体侵位于 110±

1 Ma,隶属于早白垩世晚期,这与同处于上杭—云霄成矿亚带的紫金山地区罗卜岭斑岩型铜矿床的成矿母岩四方岩体的形成时代(112±0.5 Ma)非常接近(Jiang *et al.*, 2013).王森等(2013)对矾山地区与成矿关系密切的火山机构次火山岩体进行锆石 U-Pb 测年,结果为 108~110 Ma,与花岗岩的结晶年龄一致.结合区域构造环境、岩石地球化学特征及锆石 U-Pb 年龄的一致性,推测两个地区的花岗岩可

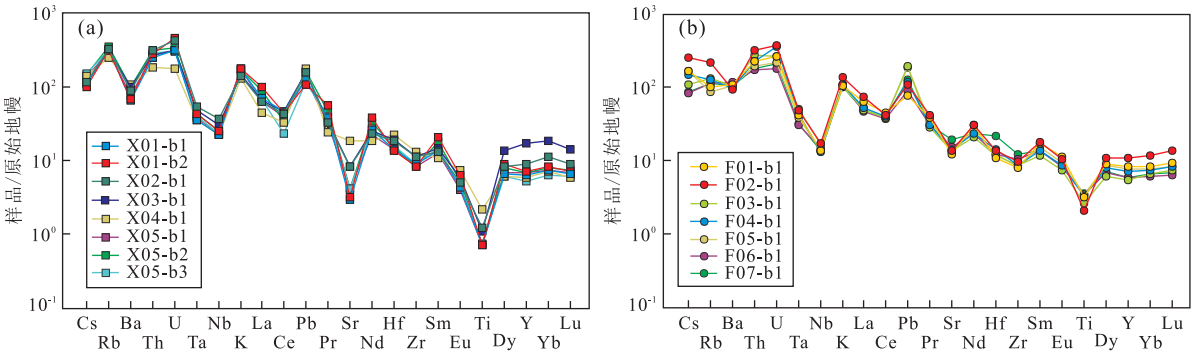


图 7 矾山地区花岗岩(a)及花岗闪长岩(b)微量元素原始地幔标准化蜘蛛图

Fig.7 Primitive mantle normalized spider diagram of granite (a) and granodiorite (b) from the Fanshan area
标准值据 Sun and McDonough(1989)

能为同源同期活动的产物。

大小矾山与紫金山铜金矿田同属于上杭—云霄NW向铜多金属、明矾石成矿带,并且具有相似的成矿地质背景、蚀变特征及矿化类型,特别是本区花岗岩及次火山岩侵入时代、地球化学特征及 Hf 同位素特征与紫金山铜金矿区非常相似(梁清玲等, 2013),因此将本区花岗岩类与紫金山矿田围岩特征进行对比研究具有重要的找矿意义。紫金山矿床围岩为英安质岩类,主要由紫金山英安玢岩、罗卜岭花岗闪长斑岩、紫金山复式花岗岩体、四方花岗闪长岩体等侵入体构成,并且与成矿关系非常密切。其中,英安玢岩体同位素测年结果为 105.0 ± 0.7 Ma 和 105.0 ± 2.2 Ma;罗卜岭岩体锆石 U-Pb 年龄为 103.5 ± 0.6 Ma 和 102.9 ± 0.9 Ma(黄文婷等, 2011);四方岩体锆石 U-Pb 年龄为 112.0 ± 0.5 Ma(Jiang *et al.*, 2013)和 107.8 ± 1.2 Ma(毛建仁等, 2002);紫金山斑岩体全岩 Rb-Sr 等时线测年结果为 110.8 ± 0.3 Ma(毛建仁等, 1998)。大小矾山地区围岩同样为英安岩类,花岗岩及花岗闪长岩的侵位年龄均为 110 ± 1 Ma,显然,两个地区与成矿关系密切的岩体年龄相近。此外,Chen *et al.* (2014)对漳州复式岩体进行了锆石 U-Pb 年龄测定,得出 107~97 Ma 的成岩年龄。陈景河(1999)对与成矿关系密切的两件明矾石和一件绢云母单矿物进行 K-Ar 测年,得出 94.10~111.78 Ma 的成矿年龄。本次测试的两个样品的 Hf 同位素二阶段年龄与紫金山四方花岗闪长岩体的 Hf 二阶段年龄非常接近,并且具有相同的岩浆源区特征。

以上特征表明,大小矾山地区花岗岩岩体与上杭—云霄成矿带主要成矿岩体的侵位时间非常接近,具有一致的成岩和成矿年龄。两个地区岩体的侵

位年龄、岩石地球化学成分及同位素特征非常接近,并具有相同的成矿构造环境及同位素源区,说明两个地区可能经历了相同的成岩、成矿过程,矾山地区具有巨大的“紫金山式”找矿潜力。

5.2 岩浆源区及成因

矾山地区花岗岩与花岗闪长岩中锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 $-6.6 \sim 1.6$,样品中多数锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为负值,部分为正值。在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解上(图 8),样品主要分布于球粒陨石及地壳分异演化线之间,揭示其源区可能主要为陆壳物质,部分锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为正值,说明成岩过程中具有较明显的幔源物质参与,这表明源区同位素具有不均一性,可能与华南地区壳幔相互作用有关。目前多数学者认为地幔组分参与花岗岩成岩过程是通过以下方式(Wu *et al.*, 2003b)进行:幔源岩浆侵入到地壳基底岩石中形成初生地壳,随后在后期热事件的影响下,这种既有初生地壳成分又有古老基底地壳构成的混合地壳原岩发生部分熔融。因此,矾山地区花岗岩 Hf 同位素所显示的幔源成分可能是壳幔岩浆混合作用所引起的。两个代表性样品的单阶段 Hf 模式年龄在 722~1 056 Ma 之间,二阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} 在 1 066~1 551 Ma 之间,表明来源于中元古代地壳,中元古代模式年龄说明其源区主要以扬子克拉通下地壳物质为主,暗示该区中元古代时期曾发生一次重要的地壳增生事件。矾山地区花岗岩与紫金山成矿围岩四方岩体的 Hf 二阶段年龄(1.1~1.6 Ga)相近(梁清玲等, 2013),表明两个地区具有相似岩浆来源及演化特征,可能经历了相同的成岩成矿过程。

岩石地球化学特征表明,矾山地区花岗岩具有高硅、富碱、准铝质和贫钙、镁、铁的特征,是一套高钾钙碱性岩石系列,这种高温、贫水的岩石成因通常

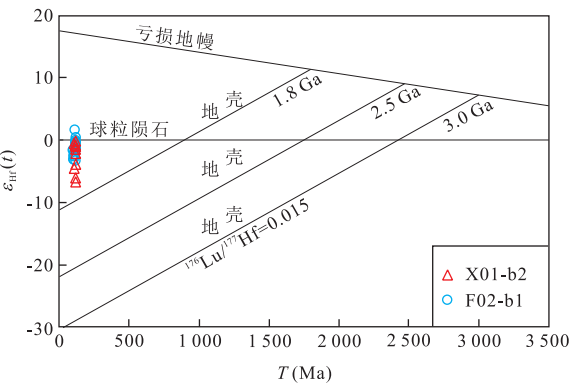


图 8 砵山地区花岗岩及花岗闪长岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - T 关系

Fig.8 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - T diagram of granites and granodiorites from the Fanshan area

是由于岩石圈的拉张减薄作用引起的,与岩石圈的减压卸载与地幔物质的底侵作用密切相关(魏春生等,2001).样品 A/CNK 值以大于 1 为主,显示弱过铝质的特征,说明成岩物质主要来源于地壳,同时稀土元素分布型式及 Pb 的正异常显示出壳源成因.花岗岩和花岗闪长岩具有不同程度的 Ba、Sr、Ti、Eu 等元素亏损,表明岩浆经历一定程度的分离结晶作用.上述元素在两种岩石中的亏损程度不同,表明二者岩浆的分离结晶作用过程具有一定的差异性.Ba、Ti、Nb、Zr、Ta 亏损,与陆壳重熔型花岗岩相似(周建等,2012),具有地壳岩浆来源的特征.

以上特征表明,砵山地区花岗岩主要来源于深部的中元古代地壳物质的重熔,同时由于地壳成分的不均一性导致具有少量幔源成分的加入.砵山地区花岗岩与花岗闪长岩的地球化学特征存在一定程度的差异性,但总体上具有相似的微量元素及同位素源区特征.上述结果支持了 Xu *et al.* (2007) 认为的西华夏地块具有中元古代基底的观点,同时也说明华夏地块中元古代基底在上杭—云霄一带是普遍存在的.

5.3 构造意义

大小砵山地区位于太平洋板块与欧亚板块的结合部位,区域上处于华夏褶皱带的东南部,是上杭—云霄铜金等多金属及明砵石成矿带的重要组成部分,同时也是华南地块中生代构造—岩浆活动最为强烈的地区之一.砵山地区花岗岩类岩石具有富硅、高碱、低钛、偏铝质的特征,为高钾钙碱性系列,具有陆壳源区的特征.这与中国东南沿海中生代中酸性火山岩地球化学特征一致(周建等,2012; Li and Jiang, 2014),具有岩石圈伸展环境的特点.富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,轻重稀土分异显著,

富集轻稀土元素,并呈现出轻微—中等程度的负锆异常,兼具碰撞后与弧火山岩 (Johnson *et al.*, 1996) 的特征.微量元素 Ba、Ti、P、Nb、Zr 和 Ta 亏损,代表了陆壳重熔型花岗岩(王学求等,2010),稀土元素及 Hf 同位素特征也显示壳源成因.在图 9a 中,样品基本上都落入了后碰撞花岗岩区域;在图 9b 中,样品大部分落入了碰撞后构造环境.

中生代以来华南大陆构造格局发生了重大变化,早—中侏罗世以 EW 向构造为主的古特提斯构造域向燕山早期以 NE 向构造为主的滨太平洋构造域转换(吴淦国等,2000; 张德全等,2001; 舒良树, 2012; 张岳桥等,2012).中—晚侏罗世,古太平洋板块向亚洲板块俯冲,直接导致东亚晚侏罗世大陆内部广泛变形和陆内造山活动(Zhang *et al.*, 2008; 毛建仁, 2013).晚侏罗世—早白垩世,华南地区进入造山后松弛阶段,由于遭受太平洋动力学体系影响,出

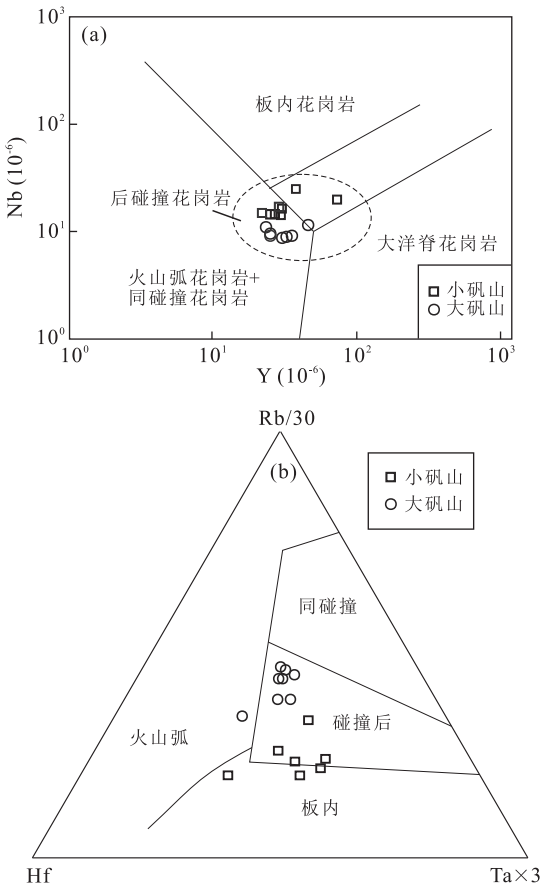


图 9 砵山地区花岗岩及花岗闪长岩 Y-Nb 及 (Rb/30)-Hf-Ta $\times$ 3 判别图解

Fig.9 Y-Nb and (Rb/30)-Hf-Ta $\times$ 3 discrimination diagrams of the granite and granodiorite from the Fanshan area

a 据 Foster *et al.* (1997); b 据 Harris *et al.* (1986)

现弧后伸展,开始由挤压向拉张环境转换(张岳桥等,2012)。受板块俯冲作用影响,深部构造活化,打破了地壳和上地幔的温度和压力平衡,导致莫霍面上升、地壳变薄,地幔上隆,幔源玄武质岩浆底侵,从而促进了局部熔融和岩浆的生成,于是便形成了东南沿海大规模中酸性火山侵入体,并伴随大规模成矿作用。

在对晚中生代岩浆岩的研究过程中,目前多数学者认为中国东南沿海早白垩时期处于岩石圈伸展作用阶段(Yu *et al.*, 2006; 唐立梅等, 2010; Li *et al.*, 2014; 徐先兵等, 2014; 王森和张达, 2015), 由于伸展拉张作用导致不同程度的岩石圈地幔上涌, 并发生壳幔混合作用。大小矾山一带中酸性岩体侵位于燕山晚期, 微量元素上表现出造山后花岗岩的特征, 是由俯冲碰撞阶段向板内伸展阶段转变的产物(李晓勇等, 2002), 代表了中国东部中生代晚期发生的由俯冲向岩石圈伸展减薄的构造环境。在对东南沿海大规模中酸性火山岩研究中, 多数学者认为晚侏罗—早白垩世东南沿海已经开始由挤压向伸展环境转换(吴福元等, 2003; 赵希林等, 2009; 舒良树, 2012; Chen *et al.*, 2014)。矾山地区花岗岩属于造山后阶段的产物, 代表了晚中生代古太平洋板块向欧亚板块俯冲造山之后的伸展构造环境。

6 结论

(1) 利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年方法, 获得大小矾山地区花岗岩及花岗闪长岩的侵位年龄, 均为 110 ± 1 Ma, 属于早白垩世。矾山地区花岗岩与紫金山成矿岩体具有相近的岩石特征及侵位年龄。

(2) 大小矾山地区花岗岩与花岗闪长岩 Hf 同位素组成具有较好的一致性: 小矾山花岗岩 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始比值为 $0.282\,519 \sim 0.282\,701$, $\epsilon(t) = -6.6 \sim -0.2$, 二阶段模式年龄 $T_{\text{DM2}} = 1\,177 \sim 1\,551$ Ma; 大矾山花岗闪长岩初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 $0.282\,617 \sim 0.282\,751$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -3.1 \sim -1.6$, 对应的二阶段模式年龄 T_{DM2} 为 $1\,066 \sim 1\,366$ Ma。矾山地区花岗岩类的岩浆源区可能为古元古—中元古代物质, 说明源区物质的形成可能与华夏陆块中元古代地壳增生事件相关。同时, 地壳成分的不均一性, 表明具有少量幔源成分的加入。

(3) 岩石地球化学上具有富硅、高碱、低钛、富铝和高钾钙碱性系列特征, 富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素, 轻重稀土分异显著, 富集轻稀土元素,

并呈现出轻微—中等程度的负锆异常。综合分析表明, 岩体应为碰撞后造山阶段中元古代地壳部分熔融的产物, 形成于古太平洋板块向欧亚板块俯冲造山之后的伸展构造环境。

(4) 大小矾山地区与紫金山铜金矿区具有相似的地质背景, 并且与成矿关系密切的岩体的岩石地球化学特征、成岩年龄及 Hf 同位素特征等非常相似, 两个地区可能经历了相同的成岩成矿地质演化阶段。大小矾山地区是寻找“紫金山”矿床的有利地段, 找矿潜力巨大, 值得开展进一步找矿工作。

致谢: 在野外工作开展和资料搜集过程中得到福建地调院吴伯兴高级工程师的热心指导和帮助, Lu-Hf 同位素测试由中国地质大学(北京)刘艳宾博士协助完成, 此外, 审稿专家及编辑对本文的修改提出了宝贵意见, 在此一并表示感谢!

References

- Chen, B., 2010. On the Geologic Characteristics of the Xiaoginshan Iron and Gold Metallic Ores in Pinghe County, Fujian Province and Its Ore-Finding Prospect. *Geology of Fujian*, 29(3): 207—211 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J.H., 1999. The Metallogenic Mode of Zijinshan Copper (Gold) Deposit. *Gold*, 20(7): 8—13 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J.Y., Yang, J.H., Zhang, J.H., et al., 2014. Geochemical Transition Shown by Cretaceous Granitoids in South-eastern China: Implications for Continental Crustal Re-working and Growth. *Lithos*, (196—197): 115—130. doi:10.1016/j.lithos.2014.03.003
- Foster, H.J., Tischendorf, G., Trumbull, R.B., 1997. An Evaluation of the R (Y+Nb) Discrimination Diagram to Infer Tectonic Setting of Silicic Igneous Rocks. *Lithos*, 40(2—4): 261—293.
- Harris, N.B.W., Pearce, J.A., Tindle, A.G., 1986. Geochemical Characteristics of Collision-Zone Magmatism. In: Coward, M.P., Reis, A.C., eds., *Collision Tectonics, Geological Society of London, Special Publications*, 19(1): 67—81. doi:10.1144/gsl.sp.1986.019.01.04
- Huang, J.T., Hong, Y.P., Yang, L.C., et al., 1990. Geological Characteristics of Minerogenesis and Prospecting of Silver-Lead-Zinc, Tin and Gold in Mesozoic Volcanic Intrusive Complex Region, Pinghe-Anxi Area, Fujian Province. *Geology of Fujian*, 9(3): 215—227 (in Chinese with English abstract).
- Huang, W.T., Hu, C.J., Li, J., et al., 2011. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating and Characteristics of Luoboling Copper

- Molybdenum Mineralized Porphyry, in Zijinshan Area. *Acta Mineralogica Sinica*, 31 (Suppl.): 592 — 593 (in Chinese).
- 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).
- 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.
- Johnson, K. E., Harmon, R. S., Richardson, J. M., et al., 1996. Isotope and Trace Element Geochemistry of Augustine Volcano, Alaska: Implications for Magmatic Evolution. *Journal of Petrology*, 37(1): 95 — 115. doi:10.1093/petrology/37.1.95
- Le Bas, M. J., Maitre, R. W., Strecklson, A., et al., 1986. A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27 (3): 745 — 750.
- 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. doi:10.1016/j.jseaes.2014.07.040
- Li, X. H., Long, W. G., Li, Q. L., et al., 2010. Penglai Zircon Megacrysts: A Potential New Working Reference Material for Microbeam Determination of Hf-O Isotopes and U-Pb Age. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 34(2): 117 — 134.
- Li, X. Y., Guo, F., Wang, Y. J., 2002. Post-Orogenic Tectono-Magmatism and Its Implications for Evolution of Orogenic Belts. *Geological Journal of China Universities*, 8 (1): 68 — 78 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Qiu, J. S., Yang, X. M., 2014. A Review of the Geochronology and Geochemistry of Late Yanshanian (Cretaceous) Plutons along the Fujian Coastal Area of Southeastern China: Implications for Magma Evolution Related to Slab Break-Off and Rollback in the Cretaceous. *Earth-Science Review*, (128): 232 — 248. doi:10.1016/j.earscirev.2013.09.007
- 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).
- Lin, D. Y., Zheng, Z. Q., 2011. The Country Rock Alteration Characteristics and Ore-Finding Potential Analysis in the Fanshan of Pinghe County, Fujian Province. *Geology of Fujian*, 30(1): 1 — 5 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. R., 2013. Mesozoic-Cenozoic Magmatism and Mineralization in Southeastern China and the Surrounding Areas. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Mao, J. R., Tao, K. Y., Chen, S. Y., et al., 1998. The Granitic Magmatism and Mineralization in Southwest Fujian. *Volcanology and Mineral Resources*, 19(4): 311 — 320 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. R., Tao, K. Y., Li, J. 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).
- Peccerillo, R., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area. *Northern Turkey*, 58(1): 63 — 81.
- Qiu, J. S., Wang, D. Z., Satoshi, K., et al., 2000. Geochemistry and Petrogenesis of Aluminous A-Type Granites in the Coastal Area of Fujian Province. *Geochimica*, 29(4): 313 — 321 (in Chinese with English abstract).
- She, R. Q., 2008. Geologic Characteristics of the Tongzhongkeng Anomalous Zone in Pinghe County of Fujian Province and Its Ore-Finding Perspective. *Geology of Fujian*, 27(3): 267 — 274 (in Chinese with English abstract).
- 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, 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. doi: 10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19
- Tang, L. M., Chen, H. L., Dong, C. W., et al., 2010. Late Mesozoic Tectonic Extension in SE China: Evidence from the Basic Dike Swarms in Hainan Island, China. *Acta Petrologica*, 26 (4): 1204 — 1216 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S., 2014. Volcanic Characteristics and Their Prospecting Significance of Fanshan in Pinghe, Fujian Province (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing, 21 — 29 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S., Zhang, D., 2015. The Extensional Tectonic Evolution of

- the Southwestern Fujian since the Late Neopaleozoic: Constraints from U-Pb Dating and Geochemistry of the Basic-Intermediate Dikes. *Geotectonica et Metallogenia*, 39 (5): 889—902 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S., Zhang, D., Di, Y. J., et al., 2013. Ore-Finding Potential Analysis in the Fanshan of Pinghe County, Fujian Province. *Acta Mineralogica Sinica*, (Suppl.): 50—51 (in Chinese).
- Wang, X. Q., Xie, X. J., Zhang, B. R., et al., 2010. China Geochemical Probe: Making “Geochemical Earth”. *Acta Geologica Sinica*, 84 (6): 854—864 (in Chinese with English abstract).
- Wei, C. S., Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., 2001. Nd-Sr-O Isotopic Geochemistry Constraints on the Age and Origin of the A-Type Granites in Eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 95—111 (in Chinese with English abstract).
- Wei, D. G., Jie, Y. J., Huang, T. G., 1997. Regional Geological Structure of Fujian. *Regional Geology of China*, 16(2): 51—59 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Jahn, B. M., Wilde, S. A., et al., 2003a. Highly Fractionated I-Type Granites in NE China (I): Geochronology and Petrogenesis. *Lithos*, (66): 241—273. doi: 10.1016/S0024-4937(02)00222-0
- Wu, F. Y., Jahn, B. M., Wilde, S. A., et al., 2003b. Highly Fractionated I-Type Granites in NE China (II): Isotopic Geochemistry and Implications for Crustal Growth in the Phanerozoic. *Lithos*, (67): 191—204.
- Wu, F. Y., Ge, W. C., Sun, D. Y., et al., 2003. Discussions on the Lithospheric Thinning in Eastern China. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 51—60 (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. doi: 10.1016/j.chemgeo.2006.05.003
- Wu, G. G., Zhang, D., Chen, B. L., et al., 2000. Transformation of Mesozoic Tectonic Domain and Its Relation to Mineralization in Southeastern China: An Evidence of Southwestern Fujian Province. *Earth Science*, 25 (4): 390—396 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Mineralogy Study of the Causes of Zircons and U-Pb Age Constraints on Interpretation. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589—1604 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, A. F., Li, D. P., 2012. LAVICP-MS U-Pb Dating of Zircon from Zijinshan Complex Massif, Fujian Province. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science)*, 35(4): 343—351 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. B., Li, Y., Xue, D. J., et al., 2014. Deformation Characteristics and Geochronological Constraints of Late Mesozoic Extensional Structures in Quanzhou, Fujian Province. *Earth Science*, 39 (1): 45—63 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. S., O'Reilly, S. Y., Griffin, W. L., et al., 2007. The Crust of Cathaysia: Age, Assembly and Reworking of Two Terranes. *Precambrian Research*, 158 (1—2): 51—78. doi: 10.1016/j.precamres.2007.04.010
- Ying, J. F., Zhang, H. F., Sun, M., et al., 2007. Petrology and Geochemistry of Zijinshan Alkaline Intrusive Complex in Shanxi Province, Western North China Craton: Implication for Magma Mixing of Different Sources in an Extensional Regime. *Lithos*, 98 (1—4): 45—66. doi: 10.1016/j.lithos.2007.02.001
- Yu, X. Q., Wu, G. G., Zhang, D., et al., 2006. Cretaceous Extension of the Ganhang Tectonic Belt, Southeastern China: Constraints from Geochemistry of Volcanic Rocks. *Cretaceous Research*, 27(5): 663—672.
- Zhang, D., Liu, W. C., Wu, G. G., et al., 2008. Magnetic Fabric and Emplacement of the Fenghuangshan Pluton, Tongling, Anhui Province, East-Central China. *International Geology Review*, 50 (11): 994—1007. doi: 10.2747/0020-6814.50.11.994
- Zhang, D. Q., She, H. Q., Yan, S. H., et al., 2001. Geochemistry of Mesozoic Magmatites in the Zijinshan Region and Implication on Regional Tectonic Inversion. *Geological Review*, 47 (6): 608—616 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Q., Dong, S. W., Li, J. H., et al., 2012. The New Progress in the Study of Mesozoic Tectonics of South China. *Acta Geoscientica Sinica*, 33 (3): 257—279 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. L., Mao, J. R., Ye, H. M., et al., 2009. The Geochemical Characteristics of Biotite and Its Petrogenesis Implication in the Caixi Pluton and Sifang Pluton from Shanghang Area of Fujian Province. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 28 (2): 162—168 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Zhou, J., Xu, S. F., Chi, Q. H., et al., 2012. Geochemical Characteristics of the Mesozoic Volcanic Belt in Southeast Coast of China. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 93—100 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈斌,2010.福建平和小芹山铁金多金属矿地质特征及找矿前景分析.福建地质,29(3):207—211.

陈景河,1999.紫金山铜(金)矿床成矿模式.黄金,20(7):8—13.

黄家厅,洪尧萍,杨良彩,等,1990.福建平和—安溪中生代火山—侵入杂岩区银铅锌、锡、金成矿地质特征和找矿前景.福建地质,9(3):215—227.

黄文婷,胡春杰,李晶,等,2011.福建紫金山矿田罗卜岭铜钼矿化斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及成矿岩浆特征研究.矿物学报,31(增刊):592—593.

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.

李晓勇,郭锋,王岳军,2002.造山后构造岩浆作用研究评述.高校地质学报,8(1):68—78.

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.

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.福建地质,30(1):1—5.

毛建仁,2013.中国东南部及临区中生代岩浆作用与成矿.北京:科学出版社.

毛建仁,陶奎元,陈三元,等,1998.闽西南花岗岩质岩浆作用与成矿.火山地质与矿产,19(4):311—320.

毛建仁,陶奎元,李寄嵎,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.

邱检生,王德滋,蟹泽聪史,等,2000.福建沿海铝质 A 型花岗岩的地球化学及岩石成因.地球化学,29(4):313—321.

余日启,2008.福建平和铜钟坑锡异常区地质特征及找矿远景浅析.福建地质,27(3):267—274.

舒良树,2012.华南构造演化的基本特征.地质通报,31(7):1035—1053.

唐立梅,陈汉林,董传万,等,2010.中国东南部晚中生代构造伸展作用——来自海南岛基性岩墙群的证据.岩石学报,26(4):1204—1216.

王森,2014.福建平和大小矾山火山机构特征及找矿意义(硕士学位论文).北京:中国地质大学,21—29.

王森,张达,2015.闽西南晚古生代以来伸展构造演化:中基性岩墙群的年代学、地球化学制约.大地构造与成矿学,39(5):889—902.

王森,张达,狄永军,等,2013.福建平和大小矾山中生代火山岩覆盖区找矿潜力分析.矿物学报,(增刊):50—51.

王学求,谢学锦,张本仁等,2010.地壳全元素探测——构建“化学地球”.地质学报,84(6):854—864.

魏春生,郑永飞,赵子福,2001.中国东部 A 型花岗岩形成时代及物质来源的 Nd-Sr-O 同位素地球化学制约.岩石学报,17(1):95—111.

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—59.

吴福元,葛文春,孙德有,等,2003.中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题.地学前缘,10(3):51—60.

吴淦国,张达,陈柏林,等,2000.中国东南大陆中生代构造域的转换及其与成矿的关系——以闽西南地区为例.地球科学,25(4):390—396.

吴元保,郑永飞,2004.锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约.科学通报,49(16):1589—1604.

肖爱芳,黎敦朋,2012.福建省紫金山复式花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年.东华理工大学学报(自然科学版),35(4):343—351.

徐先兵,李源,薛德杰,等,2014.福建泉州晚中生代伸展构造变形特征与年代学制约.地球科学,39(1):45—63.

张德全,余宏全,阎升好等,2001.福建紫金山地区中生代构造环境转换的岩浆岩地球化学证据.地质论评,47(6):608—616.

张岳桥,董树文,李建华,等,2012.华南中生代大地构造研究新进展.地球学报,33(3):257—279.

赵希林,毛建仁,叶海敏,等,2009.福建上杭地区晚中生代花岗岩体黑云母的地球化学特征及成因意义.矿物岩石地球化学通报,28(2):162—168.

周建,徐善法,迟清华,等,2012.东南沿海中生代火山岩带地球化学特征.地学前缘,19(3):93—100.