

福州盆地西缘霏细斑岩脉锆石 U-Pb 年龄及其地质意义

林木森, 吴凌啸, 王翠芝

LIN Musen, WU Lingxiao, WANG Cuizhi

福州大学紫金矿业学院, 福建 福州 350108

Zijin College of Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China

摘要:通过对福州盆地西北缘发育的霏细斑岩脉野外地质特征、锆石 U-Pb 测年及地球化学研究, 讨论其与福州复式花岗岩体的成因联系。研究区霏细斑岩呈紫灰色, 局部可见明显的流动构造, 主要由正长石斑晶组成, 脉体呈北东向侵入于早期福州复式岩体中。研究结果显示, 霏细斑岩脉形成于 97.4Ma, 具有钙碱性 I 型花岗岩的特征。该期岩浆活动形成于福州复式岩体的过渡期, 且其地球化学特征与早白垩世钙碱性 I 型花岗岩、晚白垩世碱性 A 型花岗岩之间存在连续过渡的关系, 反映其为福建东南沿海构造体制从弧后扩张向陆内伸展转换的产物, 暗示该构造体制的转换时间约为 97Ma。

关键词:霏细斑岩; 锆石 U-Pb 年龄; 晚白垩世; 福州盆地西缘; 地质意义

中图分类号: P588.1; P597+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2019)10-1726-07

Lin M S, Wu L X, Wang C Z. Zircon U-Pb age of the felsite porphyry veins in western Fuzhou basin of Fujian Province and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(10):1726-1732

Abstract: This paper presents U-Pb zircon geochronology, petrology, and major and trace elements of Cretaceous felsite porphyry veins in western Fuzhou basin, Fujian Province. These data were used to investigate the genetic relationship between felsite porphyry and Fuzhou composite granite body. Felsite porphyry shows purplish gray color and is mainly composed of orthoclase phenocrysts, and the well-developed flow structure is present on the margin. Felsite porphyry veins have a NE-trending strike and intruded into Fuzhou composite granite body. Felsite porphyry shows the features of calc-alkali and I-type granites, with the emplacement age being 97.4Ma; it was formed in the transition period between early Fuzhou composite granite body (111~100Ma) and late Fuzhou composite granite body (95~90Ma). The geochemical characteristics between the above three phase rock types present a gradually-changed transitional relation on the time scale. That is, this felsite porphyry is the product of the tectonic regimes conversion between Early and Late Cretaceous in southeastern China. The authors thus hold that the transformation age may be 97Ma.

Key words: felsite porphyry; zircon U-Pb age; Late Cretaceous; western Fuzhou basin; geological significance

福州复式岩体主要分布于福州盆地周缘, 受控于长乐-南澳断裂带, 属于典型的燕山晚期岩浆活动的产物^[1-8]。福州盆地西北缘北东东向构造裂隙极发育, 顺此裂隙形成近百条的岩脉群, 它们平行排列、断续延伸几千米, 宽度几米不等, 把福州复式花岗岩体切成条条块块^[9]。这一岩脉群的主体主要

分为 2 类, 一类是中酸性岩类, 以霏细(斑)岩和(石英)正长斑岩为主; 另一类是基性岩类, 以辉绿(玢)岩为主。

前人研究主要集中在燕山晚期的福州复式岩体及辉绿岩脉群上^[6-8, 10-19], 但对区内众多的霏细(斑)岩脉很少进行研究, 而其同样具有重要的构造

收稿日期: 2017-12-10; 修订日期: 2018-04-09

资助项目: 福建省自然科学基金项目《福建沿海晚中生代地球动力学机制——以琅岐岛中-基性岩墙群为例》(编号: 2018J01472) 和福州大学第 25 期本科生科研训练计划项目《福州盆地西缘溪源宫周边岩浆岩组合特征及地质意义》(编号: 25273)

作者简介: 林木森(1987-), 男, 博士, 讲师, 构造地质学专业, 从事大地构造与造山带方面的研究。E-mail: linmusen@fzu.edu.cn

意义。本文通过对福州盆地西缘岐安地区燕山晚期霏细斑岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征研究,阐明其形成与福州复式岩体岩浆活动的关系,为福建沿海地区燕山晚期岩浆活动提供更精确的年代学约束。

1 地质背景及岩石学特征

福建省位于中国东南部,濒临西太平洋,属华南褶皱系的一部分,是全球构造-岩浆活动最活跃的地区之一。晚中生代以来,受古太平洋构造域的影响,

福建东部沿海地区发生了非常强烈的岩浆活动,出露大量花岗质火山-侵入杂岩及岩墙(脉)群^[20]。

研究区位于福州盆地西缘福州大学城岐安村附近(北纬 26°3'41"、东经 119°10'54") (图 1-a),该区火山-侵入杂岩发育。笔者对该区岩石出露较好的剖面进行了详细的野外地质调查,发现在近 100m 的剖面中,存在多达 6 种岩性穿插出露,分别有闪长岩、花岗岩、石英正长斑岩、钾长花岗岩、霏细岩及辉绿岩(图 1-b)。其中前两者为该段岩体的主体,后四者呈脉状侵入其中,反映了该区岩浆多期次活

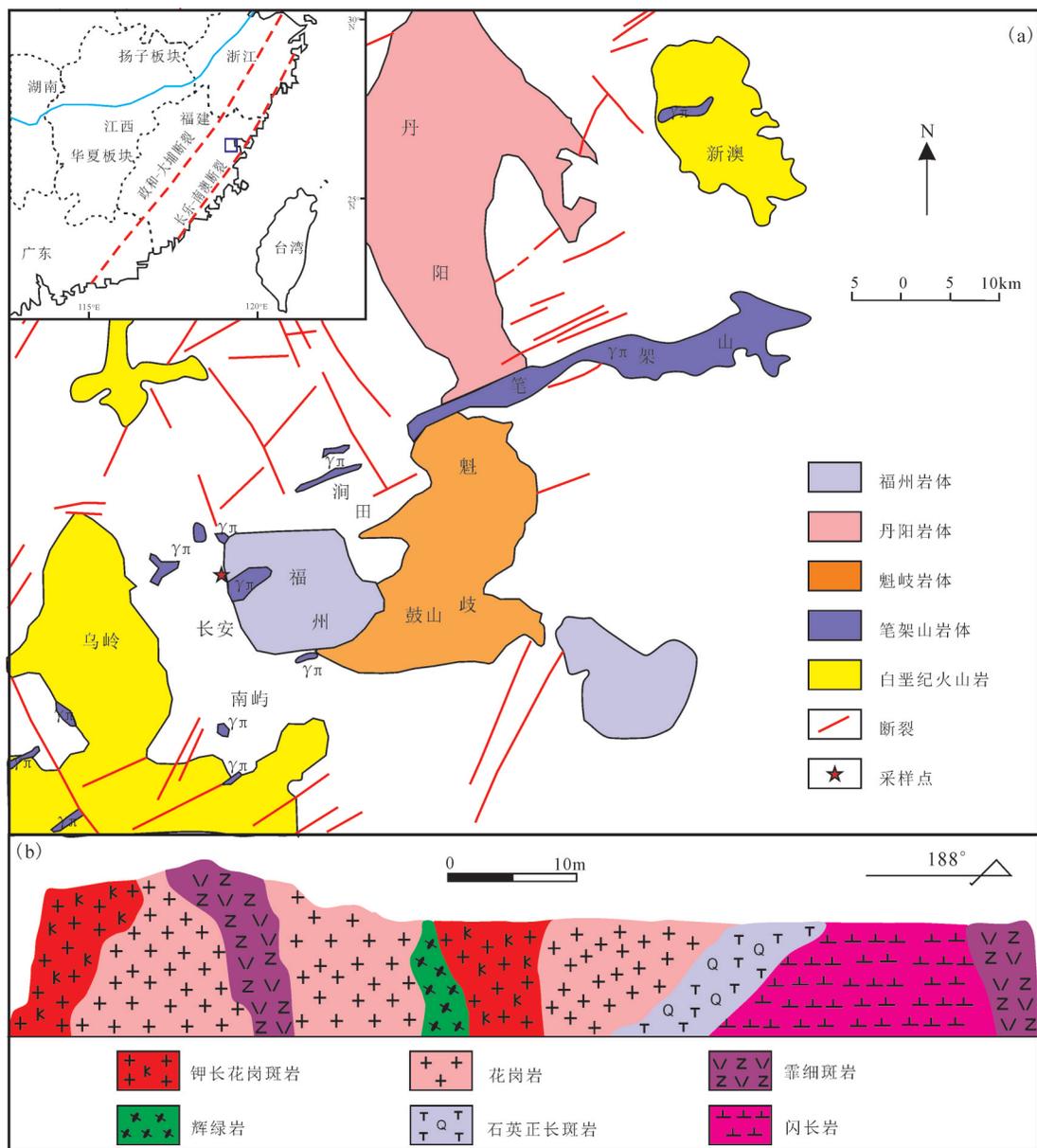


图 1 研究区地质简图(a,据参考文献[9]修改)和岐安村岩体剖面(b)
Fig. 1 Simplified geological map of the study area (a) and geological section of Qi'an rock mass (b)

动的特征。本文主要针对其中的霏细斑岩进行研究,该剖面出露2条霏细斑岩脉,出露宽度4~5m,均呈北东向产出,分别侵入于花岗岩和闪长岩中,在其与花岗岩的接触面还可见红褐色烘烤边(图2-a)。岩石在露头上看起来非常新鲜,也很致密,没有明显的蚀变。

霏细斑岩呈紫灰色,块状构造,局部可见明显的流动构造(图2-b),具有明显的斑状结构(图2-c)。斑晶略定向排列,含量10%~20%,主要为正长石(半自形板状,长轴2~4mm),及少量石英。基质由极细的他形长英质矿物集合体组成,颗粒间的界线模糊,呈霏细结构,局部脱玻化现象明显,在重结晶以后出现微晶和锥晶,放射状排列,呈球粒结构(图2-d)。

2 年代学特征

本文用于同位素测年的样品较新鲜,无风化现象。在河北省廊坊宇能岩石矿物分选技术服务有限公司实验室用常规方法从样品中分离锆石,分离出的锆石颗粒大于200颗,保证了U-Pb测年锆石

的质量。在武汉上谱分析科技有限责任公司制靶,阴极发光(CL)照相后,进行LA-ICP-MS测年,微区激光剥蚀系统为GeoLas 2005,分析采用的激光束斑直径为32 μm ,频率为10Hz。锆石测定点Pb同位素比值、U-Pb表面年龄和U-Th-Pb含量采用Glitter 4.0程序计算。年龄加权平均值计算及谐和图的绘制采用Ludwig^[21]的Isoplot完成(表1)。

岐安霏细斑岩中的锆石多呈浅黄色-无色透明、半自形-自形粒状或柱状,晶体长200~500 μm ,长宽比为1:1~4:1。CL图像显示锆石多具有清晰的环带结构(图3-a),Th/U值为0.97~3.80(平均为1.67),具有岩浆锆石特征。本文共选择25颗锆石进行了LA-ICP-MS U-Pb测试分析,通过校正后的有效测点为24个,这些有效测点基本上位于谐和线上,²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄为92.8 \pm 2.9~106.0 \pm 3.8Ma,²⁰⁷Pb/²³⁵U年龄为82.6 \pm 4.3~119.0 \pm 10.5Ma,说明²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄和²⁰⁷Pb/²³⁵U年龄具有良好的谐和度(表1)。²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值为97.4 \pm 1.2Ma(MSWD=4,图3-b),说明岐安霏细斑岩的形成时代为晚白垩世。

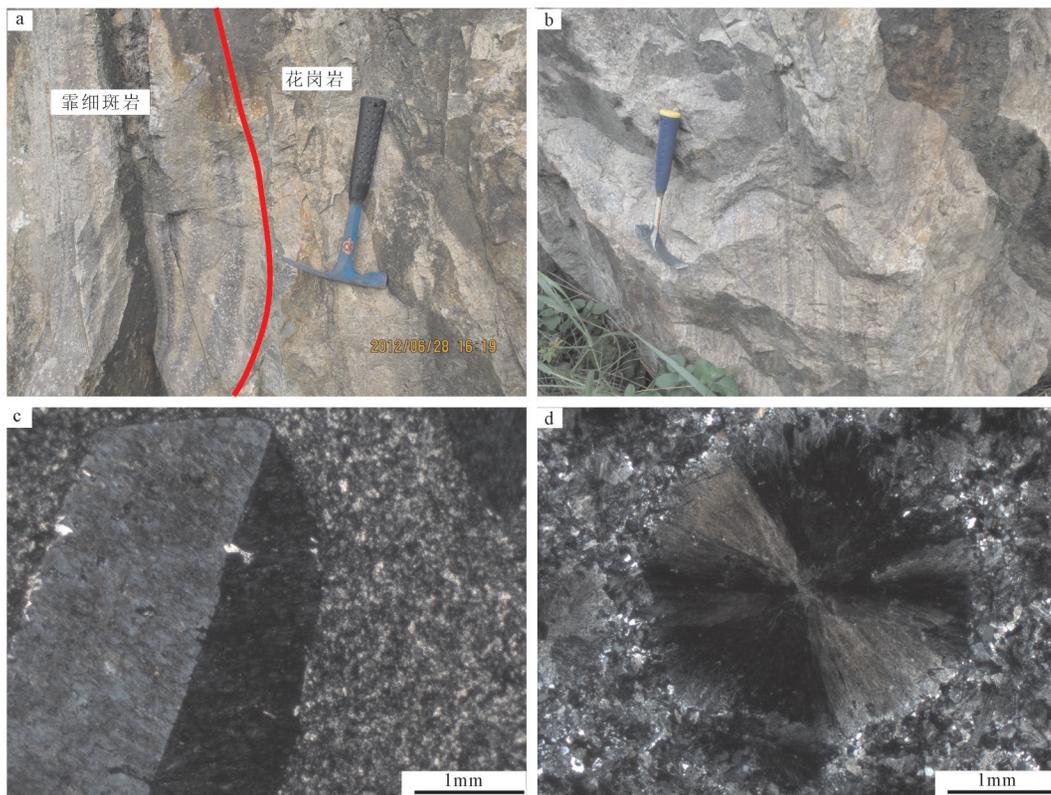


图2 霏细斑岩宏观(a,b)及微观(c,d)特征

Fig. 2 Macroscopic (a,b) and microscopic (c,d) characteristics of felsite porphyry

表 1 霏细斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 定年数据
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb dating data of felsite porphyry

测点号	Th/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}	同位素比值				年龄/Ma							
			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
1	40	34	0.0669	0.0096	0.124	0.0116	0.0156	0.0005	835	300	119.1	10.5	99.5	3.1
2	107	96	0.0505	0.0048	0.100	0.0080	0.0149	0.0003	217	217	96.6	7.3	95.1	2.1
3	58	38	0.0559	0.0079	0.110	0.0142	0.0166	0.0006	450	321	106.1	13.0	106.0	3.8
4	157	99	0.0517	0.0044	0.111	0.0083	0.0153	0.0003	272	190	106.9	7.6	97.8	1.6
5	499	365	0.0505	0.0029	0.107	0.0059	0.0154	0.0003	217	131	102.9	5.4	98.3	1.6
6	460	380	0.0417	0.0024	0.0848	0.0046	0.0149	0.0002			82.6	4.3	95.4	1.1
7	168	94	0.0656	0.0114	0.120	0.0175	0.0145	0.0005	794	369	115.4	15.9	92.8	2.9
8	256	263	0.0488	0.0025	0.100	0.0048	0.0151	0.0002	200	119	96.9	4.4	96.5	1.4
9	141	124	0.0483	0.0041	0.0971	0.0066	0.0153	0.0003	122	180	94.1	6.1	97.9	2.0
10	399	342	0.0528	0.0027	0.109	0.0052	0.0150	0.0002	320	110	105.0	4.8	96.2	1.2
11	450	296	0.0455	0.0027	0.0922	0.0048	0.0150	0.0002			89.6	4.4	95.9	1.3
12	137	69	0.0570	0.0067	0.121	0.0114	0.0160	0.0004	500	259	116.0	10.3	102.4	2.8
13	623	357	0.0480	0.0025	0.105	0.0053	0.0159	0.0002	98.2	119	101.4	4.9	101.6	1.3
14	1176	412	0.0496	0.0024	0.107	0.0050	0.0157	0.0002	176	115	103.6	4.6	100.6	1.2
15	791	531	0.0515	0.0022	0.114	0.0049	0.0160	0.0002	261	100	109.8	4.5	102.3	1.2
16	1145	518	0.0506	0.0020	0.108	0.0040	0.0156	0.0002	233	89	104.0	3.7	99.6	1.1
17	1033	622	0.0527	0.0017	0.110	0.0035	0.0151	0.0002	322	74	105.8	3.2	96.8	1.1
18	744	570	0.0470	0.0019	0.0957	0.0037	0.0148	0.0002	50.1	93	92.8	3.5	94.4	1.0
19	529	383	0.0558	0.0028	0.121	0.0059	0.0158	0.0002	443	111	116.4	5.4	101.2	1.3
20	561	148	0.0513	0.0035	0.104	0.0060	0.0152	0.0003	254	183	100.8	5.5	97.2	1.7
21	616	532	0.0484	0.0020	0.0980	0.0040	0.0147	0.0002	120	98	94.9	3.7	94.0	1.1
22	134	108	0.0503	0.0048	0.101	0.0079	0.0150	0.0003	209	207	98.2	7.3	96.3	2.1
23	38	36	0.0622	0.0112	0.145	0.0189	0.0178	0.0008	683	393	137.8	16.8	113.5	5.1
24	397	351	0.0510	0.0027	0.107	0.0053	0.0154	0.0002	239	122	103.5	4.9	98.8	1.4
25	2012	577	0.0497	0.0019	0.101	0.0036	0.0148	0.0002	189	82	98.0	3.3	94.7	1.0

3 地球化学特征

本文样品的全岩主量、微量元素测试分析在澳实分析检测(广州)有限公司完成。主量元素采用硼酸锂/偏硼酸锂熔融, X 射线荧光光谱法(XRF)分析, 分析误差优于 0.5%; 微量和稀土元素采用多酸(四酸)消解, 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)分析, 相对标准偏差小于 5%。

岐安霏细斑岩主量、微量分析结果见表 2。该霏细斑岩的 SiO_2 质量分数为 77.63%, Al_2O_3 质量分数为 10.76%, CaO 含量为 0.11%, MgO 含量为 0.12%, $\text{Mg}^\#$ 值(20.4)较低, TiO_2 (0.09%) 和 P_2O_5 (0.01%) 含量较低, 全碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 质量分数为 8.62%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值(10.34) 较高。里特曼指数(σ) 为 2.15, 为钙碱性。A/CNK=1.08, 显示弱过铝质特征, 总体偏向 I 型花岗岩的特征。

岐安霏细斑岩稀土元素总量为 113.2×10^{-6} ,

(La/Yb)_N 值为 5.23, 说明轻稀土元素较重稀土元素略富集, 配分曲线呈略右倾的“海鸥型”(图 4-a), La-Sm 段较陡, 而 Gd-Lu 段相对平缓, 负 Eu 异常明显($\delta\text{Eu} = 0.34$)。霏细斑岩微量元素具有富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Th、U、K, 亏损 Nb、Ta、Sr、P、Ti 的特点(图 4-b), 表现出岛弧/活动大陆边缘产生的钙碱性岩系的地球化学特征^[22-23]。

本文研究的霏细斑岩形成时代介于福州复式岩体中早白垩世花岗岩及晚白垩世花岗岩之间, 且三者微量元素特征上呈现递进演化的关系(图 4), 可能反映连续过渡或转换的构造环境特征。

4 讨论

4.1 岩石成因

福州盆地西缘岐安霏细斑岩形成于晚白垩世早期, 其形成时代介于福州复式岩体中的早白垩世花岗岩和晚白垩世花岗岩之间。该区霏细斑岩富

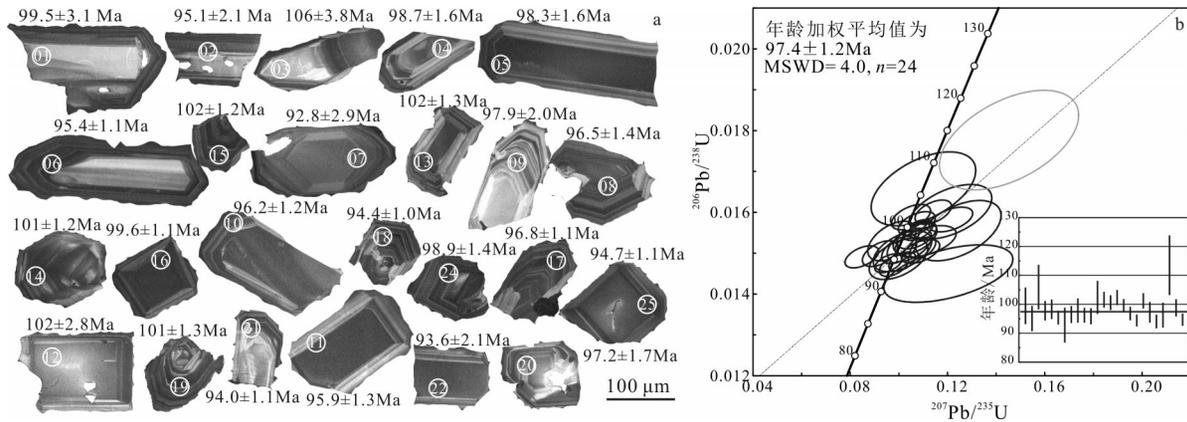


图3 霏细斑岩锆石阴极发光图像(a)和U-Pb谐和图(b)

Fig. 3 Zircon cathodoluminescence images (a) and U-Pb concordia diagram (b) of felsite porphyry

铝、富钾, A/CNK 值为 1.08, 属于钾玄质 I 型花岗岩系列。从花岗岩成因判别图解(图 5)可以看出, 霏细斑岩与福州复式岩体中的早白垩世花岗岩落入 I、S 型花岗岩区, 晚白垩世花岗岩落入 A 型花岗岩区, 同样, 根据锆石 Ti 温度计^[25-26], 对霏细斑岩形成结晶时的锆石饱和温度进行了估算, 其形成温度为 703~743℃, 温度较低, 说明其形成过程中可能有流体的加入, 由下地壳物质部分熔融形成, 与 A 型花岗岩的高温特征存在明显差异^[27]。因此, 根据其矿物组成及地球化学特征, 判断该区霏细斑岩属于 I 型花岗岩系列。

在 Rb-(Ta+Yb) 图解(图 6)中, 霏细斑岩与福州复式岩体中的早、晚白垩世花岗岩均落入后碰撞构造区, 而早白垩世偏向于火山弧环境, 晚白垩世偏向于板内环境。从稀土元素配分曲线变化看(图

4-a), 早白垩世花岗岩、霏细斑岩、晚白垩世花岗岩, 重稀土元素含量由低到高, δEu 从弱负异常演化成强负异常; 微量元素蛛网图(图 4-b)显示, 三者的微量元素分异特征也越来越明显, 说明早期幔源组分较高, 后期经过强烈的岩浆分异作用, 且均与伸展构造有关, 属于典型的陆缘伸展减薄构造岩浆组合, 表明中国东南地区燕山期构造岩浆活动到此趋于尾声^[2]。

综上所述, 这 3 期岩体的主量、微量元素特征及构造环境均呈现一种递进演化的关系, 可能反映了中生代晚期福建沿海地区连续过渡的活动大陆边缘构造环境特征。

4.2 大地构造意义

晚中生代以来, 福建沿海地区经历了古太平洋板块对欧亚大陆板块的俯冲作用, 形成了大规模的

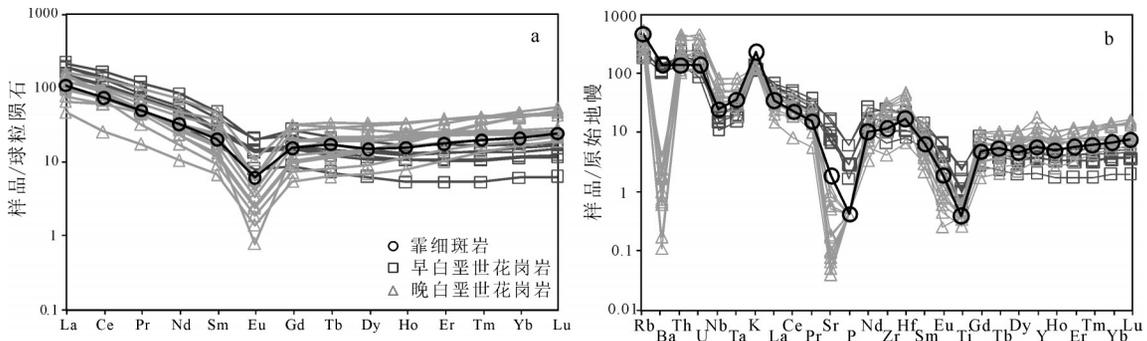


图4 霏细斑岩及福州复式岩体花岗岩样品稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

(标准化数据参考文献[24], 早白垩世和晚白垩世花岗岩据参考文献[7])

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) of felsite porphyry and Fuzhou composite granite body

表 2 霏细斑岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 2 Chemical compositions of major, trace and rare earth elements of felsite porphyry

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	K ₂ O/Na ₂ O	A/CNK	σ
77.63	0.09	10.76	1.09	0.10	0.12	0.11	0.76	7.86	0.01	0.67	99.20	10.34	1.08	2.15
Rb	Sr	Ba	U	Th	Nb	Ta	Zr	Hf	Ga	Cr	Cs	Sn	W	V
342	42.1	1090	3.29	13.60	20.1	1.7	143	5.8	11.6	20	2.31	3	1	10
La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
26.6	46.4	4.84	15.4	3.19	0.36	3.23	0.66	3.82	0.91	3.00	0.52	3.65	0.63	29.0

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为10⁻⁶

岩浆岩体,是中国东南部晚中生代重要的构造-岩浆热事件^[31-33],福州复式岩体即为该期事件的产物。福州复式岩体处于浙闽粤沿海中生代断陷活动带内,分布于福州-连江一带,受控于南澳-长乐深断裂,主要侵入南园组火山岩中^[1,9]。前人通过对福州复式岩体的岩石学、年代学、地球化学等的研究表明^[6-8,10-15],其主体包括福州岩体、丹阳岩体、魁岐岩体和笔架山岩体,钙碱性和碱性岩石都有出露,主要分为2期:早白垩世(111~100Ma)和晚白垩世(95~90Ma)。早期为钙碱性I型花岗岩,主要分布于福州岩体和丹阳岩体,为挤压背景下弧后扩张的产物;晚期为碱性A型花岗岩,主要分布于魁岐岩体,偏向于板内伸展背景下的产物^[6-7]。2期岩浆岩构成了少见的I-A型岩石系列,反映福建沿海晚中生代构造体制的变迁。

研究区霏细斑岩形成于上述福州复式岩体2期岩浆事件之间,且其地质特征与2期复式岩体具有

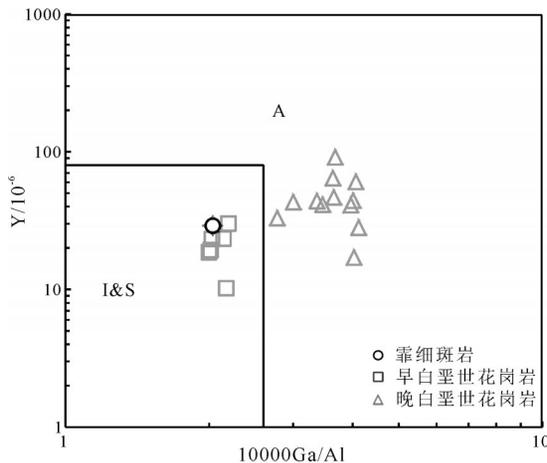


图 5 1000Ga/Al-Y 图解^[28]

Fig. 5 1000Ga/Al-Y diagram

A—A型花岗岩;I—I型花岗岩;S—S型花岗岩

递进演化的关系,说明该区构造体制的转换时间约为97Ma。因此,岐安霏细斑岩的发现,填补了福州复式岩体早白垩世—晚白垩世岩浆演化序列中的过渡部分,对研究岩浆演化具有重要的意义。

5 结论

(1)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示,福州盆地西缘霏细斑岩的形成年龄为 97.4±1.2Ma,属于晚白垩世。

(2)福州盆地西缘霏细斑岩具有钙碱性 I 型花岗岩的地球化学特征,形成于活动大陆边缘的构造环境。

(3)岐安霏细斑岩形成于早、晚白垩世 2 期福州复式岩体之间,为岩浆演化序列中的过渡部分,反映其为福建东南沿海构造体制从弧后扩张向陆内伸展转换的

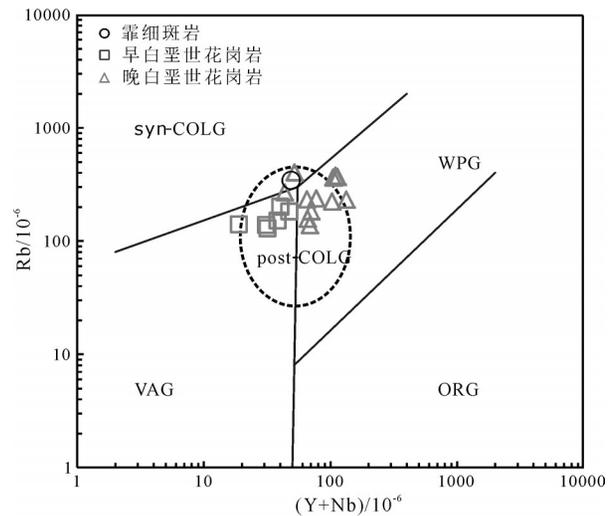


图 6 (Y+Nb)-Rb 图解^[29-30]

Fig. 6 (Y+Nb)-Rb diagram

ORG—洋脊花岗岩;VAG—火山岛弧花岗岩;WPG—板内花岗岩;syn-COLG—同碰撞花岗岩;post-COLG—后碰撞花岗岩

产物,暗示该构造体制的转换时间约为97Ma。

致谢:感谢项目组全体同仁,为本文编写提供了翔实和丰富的地质成果;感谢审稿专家对本文提出的建议和修改意见。

参考文献

- [1]吴郭泉. 福州复式岩体的组成及其演化[J]. 岩石学报, 1991, (2): 81-88.
- [2]王德滋, 沈渭洲. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化[J]. 地质前缘, 2003, 10(3): 209-220.
- [3]邱检生, 肖娥, 胡建, 等. 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[J]. 岩石学报, 2008, 24(11): 2468-2484.
- [4]邢光福, 陈荣, 杨祝良, 等. 东南沿海晚白垩世火山岩浆活动特征及其构造背景[J]. 岩石学报, 2009, 25(1): 77-91.
- [5]李良林, 周汉文, 陈植华, 等. 福建沿海晚中生代花岗质岩石成因及其地质意义[J]. 地质通报, 2013, 32(7): 1047-1062.
- [6]林清茶, 程雄卫, 张玉泉, 等. 活动大陆边缘花岗岩类演化——以福州复式岩体为例[J]. 地质学报, 2011, 85(7): 1128-1133.
- [7]朱雪丽. 福州复式岩体花岗岩年代学、地球化学及岩石成因[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2015: 1-60.
- [8]单强, 曾乔松, 李建康, 等. 福建魁岐晶洞花岗岩锆石U-Pb年代学及其地球化学研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(4): 1155-1167.
- [9]福建省地质矿产局. 福建省区域地质志(及附图)[M]. 北京: 地质出版社, 1985.
- [10]Martin H, Bonin B, Didier J, 等. 中国东南部福州花岗质杂岩的岩石学和地球化学[J]. 地球化学, 1991, 6(2): 101-111.
- [11]李真, 邱检生, 蒋少涌, 等. 福建金山花岗质复式岩体的元素和同位素地球化学及其成因研究[J]. 地质学报, 2009, 83(4): 515-527.
- [12]黄莹, 孙世华, DePaolo D J, 等. 福建省白垩纪岩浆岩Nd、Sr同位素研究[J]. 岩石学报, 1986, (2): 50-63.
- [13]林瑶瑕. 福建沿海A型花岗岩带的基本特征及其大地构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 1987, (4): 311-323.
- [14]凌洪飞, 沈渭洲, 黄小龙. 福建省花岗岩类Nd-Sr同位素特征及其意义[J]. 岩石学报, 1999, 15(2): 255-262.
- [15]邱检生, 王德滋, 蟹泽聪史, 等. 福建沿海铝质A型花岗岩的地球化学及岩石成因[J]. 地球化学, 2000, 29(4): 313-321.
- [16]董传万, 周超, 顾红艳, 等. 福建湄洲岛镁铁质岩墙群与寄主花岗岩的形成时差、地球化学及成因[J]. 吉林大学学报, 2011, 41(3): 735-744.
- [17]张贵山. 福建晚中生代以来基性-超基性岩的年代学、地球化学及其地球动力学意义[D]. 中国科学院研究生院(地球化学研究所)博士学位论文, 2006: 1-108.
- [18]杨永峰, 董传万, 闫强, 等. 浙闽沿海晚中生代伸展构造作用: 来自福建沿海中-基性岩墙群的证据[J]. 矿物岩石, 2010, 30(2): 87-94.
- [19]熊欣, 王翠芝, 王林刚, 等. 福州闽侯长安闪长岩岩体的地球化学特征及其地质意义[J]. 地质与勘探, 2011, 47(6): 1035-1043.
- [20]Li Z, Qiu J S, Yang X M. 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[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 128: 232-248.
- [21]Ludwig K R. User's manual for isoplot/EX version 3.00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 2003, 4: 1-70.
- [22]李昌年. 构造岩浆判别的地球化学方法及其讨论[J]. 地质科技情报, 1992, 11(3): 73-78.
- [23]Zhao Z H, Zhou L D. REE geochemistry of some alkali-rich intrusive rocks in China[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 1997, (2): 145-158.
- [24]Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publication, 1989, 42(1): 313-345.
- [25]Watson E B, Wark D A, Thomas J B. Crystallization thermometers for zircon and rutile[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2006, 151(4): 413-433.
- [26]Ferry J M, Watson E B. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti in-zircon and Zr-in-rutile thermometers[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2007, 154(4): 429-437.
- [27]李小伟, 莫宣学, 赵志丹, 等. 关于A型花岗岩判别过程中若干问题的讨论[J]. 地质通报, 2010, 29(23): 278-285.
- [28]Whalen J B, Carre K L, Chappell B W. A type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95(4): 407-419.
- [29]Pearce J A. Sources and settings of granitic rocks[J]. Episodes, 1996, 19(4): 120-125.
- [30]Peccherillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58(1): 68-81.
- [31]Yang J, Zhao Z, Hou Q, et al. Petrogenesis of Cretaceous (133 - 84Ma) intermediate dykes and host granites in southeastern China: Implications for lithospheric extension, continental crustal growth, and geodynamics of Palaeo-Pacific subduction[J]. Lithos, 2018, 296: 195-211.
- [32]吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1217-1238.
- [33]徐夕生. 华南花岗岩-火山岩成因研究的几个问题[J]. 高校地质学报, 2008, 14(3): 283-294.