

95 Ma 是华南晚中生代岩浆演化转折点吗?

——来自浙闽典型花岗岩体的证据

高秦¹⁾, 丁嘉林²⁾, 张延青¹⁾, 周鹏²⁾, 厉子龙¹⁾

1) 浙江大学海洋学院, 浙江舟山, 316000;

2) 台州市自然资源和规划局椒江分局, 浙江台州, 318000



内容提要:中国东南沿海地区出露的大面积中生代岩浆岩与矿化作用与区域构造域转换密切相关,在 100~90 Ma 左右浙闽地区壳幔作用强烈,前人大多数的研究工作是针对单个岩体或几个复式岩体展开的相应研究工作,缺少对浙闽沿海中生代花岗岩类的跨区域研究,特别是具体时间节点的对比如剖析。本研究选取浙闽地区 100~90 Ma 形成的典型花岗岩体为研究对象,通过对其进行地球化学数据分析和整理,并与前人在华南地区的研究数据相结合,认为 100~90 Ma 的浙闽花岗岩不同于日本和安第斯型的典型岛弧酸性岩。浙闽花岗岩的母岩浆可能起源于古太平洋板块俯冲引起基性岩浆上涌,少量基性岩浆与花岗质岩浆以不同比例混合形成了这一时期东南沿海中生代花岗岩类的母岩浆。地壳厚度的差异造成浙闽一带形成的母岩浆的不同,而花岗质岩体则是在这种不同母岩浆基础上高度演化的结果。利用 Rhyolite-MELTS 方法计算浙闽地区在 100~90 Ma 的岩浆过程,以福建长泰岩体为例,在含水量为 6%,压力为 300 MPa 的条件下进行模拟,计算结果显示 98 Ma 岩体的分离结晶程度约 37%,而从 95 Ma 开始,岩浆演化开始趋向于无明显规律。浙闽中生代花岗岩体显示以斜长石、钾长石、黑云母的分离结晶为主导的结晶过程,不同岩体的分离结晶程度有所不同。特别是在 95 Ma 时,浙闽一带的岩体同时出现了斜长石的分离结晶作用,随后又进入由钾长石和黑云母的分离结晶控制的阶段,结合 Sr、Ba 的变化特征和 Nd 同位素等变化,认为 95 Ma 左右存在地幔物质的介入,从而导致浙闽地区在晚中生代岩浆演化上出现了转变,而且 95 Ma 很可能是浙闽晚中生代花岗岩形成的转折期,岩浆温度的计算结果也显示了这一点。

关键词:浙闽酸性岩浆带;晚中生代;岩浆构造转折点;板块俯冲过程;基性岩浆底侵

晚中生代是古太平洋板块汇聚东亚大陆的重要时期 (Engelbreton et al., 1985; Maruyama et al., 1997; Isozaki et al., 2010; 林间等, 2017),它导致华南发生强烈的岩浆活动 (Xu Keqin et al., 1982; Charvet et al., 1994; Zhou Xinmin et al., 2000),形成的俯冲杂岩带残留在沿日本西南、经中国台湾、巴拉望—加里曼丹一线 (Faure et al., 1990; Isozaki et al., 1997; Wakita et al., 2005),在中国台湾以东、菲律宾和婆罗洲等地的蛇绿岩块 (Deschamps et al., 2000; Encarnacion et al., 2004; Dimalanta et al., 2006; Coggon et al., 2011; Asis et al., 2012) 应代表晚中生代俯冲洋壳残留。大规模岩浆活动是华南晚中生代最显著的地质特征,岩浆岩出露约 240000 km² (Zhou Xinmin et al., 2000)。近 60 年

来,华南中生代岩浆岩的研究经历了从时空分布到岩浆来源、从壳幔作用到构造背景等方面,已经取得了较多的研究成果和认识 (Zhou Xinmin et al., 2000; 王德滋等, 2004; Li Zhengxiang et al., 2007; Wang Yuejun et al., 2013; Zhang Guowei et al., 2013; Zheng Yongfei et al., 2013)。

东南沿海地区在白垩纪期间,经历了一次影响深远的岩石圈伸展作用,古太平洋板块俯冲也发生转向,开始以高角度正向俯冲 (Sun Weidong et al., 2007),浙闽地区出现了大量的花岗岩类,同时也发育少量基性岩类,浙闽地区晚中生代岩浆岩地球化学上也显示出双峰式 (潘振杰等, 2017; 张成晨等, 2019),浙闽地区侏罗纪火成岩相对白垩纪的较少,表明白垩纪是浙闽地区火成岩形成的鼎盛时期。

注:本文为国家自然科学基金重大研究计划重点项目 (编号: 91858213)、浙江大学教育基金世界顶尖大学合作计划资助项目以及浙江省台州市自然资源与规划局椒江分局科研项目 (编号: JJ201912) 的成果。

收稿日期: 2021-10-14; 改回日期: 2022-06-21; 网络首发: 2022-07-20; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.07.025

作者简介: 高秦,男,1990年生,博士研究生,主要从事岩石学研究; Email: gaoqin-dream@zju.edu.cn; 通讯作者: 厉子龙,男,1965年生,博士,教授,主要从事岩石地球化学与动力学演化研究; Email: zilongli@zju.edu.cn。

1 数据来源

该区数据主要来自公开发表的国内外文献,时代限于 100~90 Ma 之间,分为 98 Ma、95 Ma、92 Ma 三个年龄阶段。其中浙江地区为瑶坑岩体、大陈岛岩体(本文所测)、普陀山岩体,而福建主要为魁岐、太姥山、大层山等岩体(图 1)。鉴于部分早期文献的地球化学数据可能不够精确,本研究选择的中文文献主要是在 2010 年以后发表的,同时整理东海、南海、日本、南美地区的花岗岩数据进行对比分析。本文中出现的浙闽地区岩浆岩的时空分布是以岩体为单位,一个岩体由于成分、结构构造不同,我们取

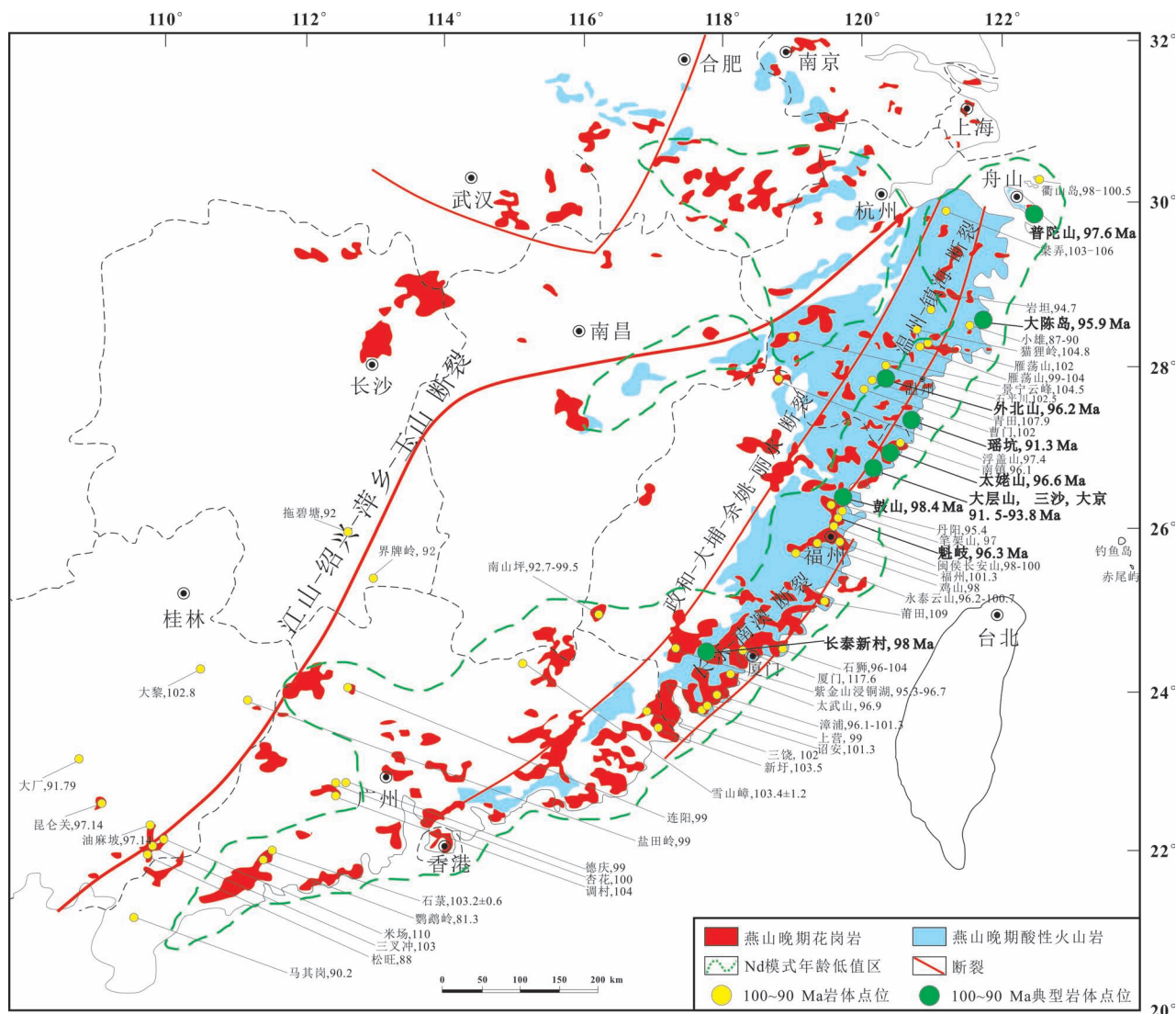


图1 华南地区燕山晚期花岗岩和酸性火山岩分布图(据 Wang Yuejun et al., 2013 修改;
Nd 同位素模式年龄低值区域据王德滋等, 2003)

Fig. 1 Distribution map of the Late Yanshanian granites and felsic volcanic rocks in South China (modified after Wang Yuejun et al. , 2013; Low Nd isotopic model ages region according to Wang Dezi et al. , 2003)

岩体地球化学数据的平均值;有些岩体(岩组)研究的文献很多,有些岩体研究的文献少,不论多寡,一个岩体均取一个平均值,以便进行比较和探讨,具体如下表 1:

表 1 日本、安第斯、浙闽地区 100~90 Ma 花岗岩主量元素(%)、
稀土和微量元素(μg/g) 含量平均值表

Table 1 Average contents of major elements (%) and trace elements (μg/g)
of the granites with ages from 100 ~ 90 Ma in Japan, Andes Mountains,
Zhejiang and Fujian Province

	日本	安第斯	浙闽	浙江地区			福建地区		
				92 Ma	95 Ma	98 Ma	92 Ma	95 Ma	98 Ma
SiO ₂	70.45	69.72	73.75	77.67	76.89	77.05	75.96	66.27	76.45
TiO ₂	0.38	0.40	0.22	0.09	0.14	0.86	0.14	0.47	0.14
Al ₂ O ₃	14.50	14.71	13.24	11.32	12.80	12.57	12.75	14.88	12.55
FeO ^T	2.90	2.24	1.63	0.14	1.16	0.79	0.98	2.94	1.05
MnO	0.04	0.06	0.06	0.08	0.12	0.07	0.07	0.06	0.05
MgO	0.82	0.84	0.34	0.05	0.04	0.16	0.20	1.25	0.12
CaO	2.52	2.22	0.98	0.19	0.20	0.54	0.43	2.26	0.38
Na ₂ O	3.68	3.91	3.55	3.87	4.30	4.12	4.38	4.03	3.63
K ₂ O	2.65	3.82	4.65	4.39	4.32	4.56	4.66	4.37	4.81
P ₂ O ₅	0.11	0.12	0.66	0.04	0.02	0.01	0.06	0.18	0.02
Li	9.95	15.95	20.14	-	-	-	-	48.79	7.61
Cs	2.72	4.62	3.23	1.64	-	2.17	2.82	3.83	1.62
Rb	88	113	200	293	135	187	163	149	255
Ba	454	667	435	12	596	187	119	945	150
Th	8.33	10.29	20.92	35.71	11.21	24.25	14.20	13.28	22.57
U	1.18	2.99	5.01	8.09	2.95	4.23	3.48	3.81	4.79
Nb	7.00	9.99	21.93	59.33	12.64	21.13	15.80	12.63	30.36
Ta	0.37	0.92	1.76	3.60	0.82	1.52	1.09	1.09	4.30
Pb	19.03	14.49	25.37	-	25.53	23.31	20.61	24.30	25.71
Sr	197.00	343.00	101.00	6.01	52.67	52.95	22.60	301.41	66.40
Zr	131	150	152	489	121	93	105	154	130
Hf	3.24	4.08	5.80	17.50	4.14	3.80	4.86	4.11	5.20
La	23.69	24.34	36.97	41.75	21.41	34.78	25.77	40.40	31.02
Ce	35.46	48.32	66.60	67.55	43.06	55.91	57.69	76.48	66.40
Pr	3.24	5.53	7.59	6.99	4.71	5.68	5.11	8.25	6.99
Nd	19.30	21.25	27.23	19.76	16.69	18.10	16.91	29.50	25.03
Sm	3.88	4.10	5.26	4.12	3.49	2.93	2.96	4.59	4.94
Eu	1.07	0.91	0.64	0.26	0.41	0.31	0.25	1.08	0.35
Gd	4.63	2.95	4.66	4.87	3.07	2.58	2.78	3.27	5.23
Tb	0.80	0.52	0.78	1.01	0.55	0.41	0.45	0.46	0.81
Dy	5.34	2.28	4.54	6.78	3.51	2.42	2.84	2.35	5.01
Ho	0.57	0.50	0.96	1.69	0.77	0.52	0.59	0.46	0.98
Er	3.27	1.22	2.84	5.82	2.30	1.60	1.84	1.35	3.23
Tm	0.26	0.21	0.46	1.03	0.37	0.28	0.29	0.19	0.40
Yb	2.79	1.42	2.98	7.46	2.58	1.93	1.91	1.25	3.31
Lu	0.44	0.22	0.47	1.24	0.43	0.31	0.30	0.20	0.50
Y	26.94	17.35	26.42	52.37	14.22	19.25	16.24	13.38	25.91

注:日本和安第斯数据来自潘振杰等, 2017; 浙江、福建地区岩体数据来自肖娥等, 2007; 邱检生等, 2008; Chen Jingyuan et al., 2013; 李良林等, 2013; 单强等, 2014; 赵蛟龙, 2016; 段政等, 2017; “-”表示未测数据。

2 矿物组合和岩石类型

华南浙闽沿海地区在 100~90 Ma 出露的酸性火山—侵入岩,侵入岩主要为花岗岩,其次是少量浅成的花岗闪长岩、石英二长岩等,酸性火山岩系列多数为流纹岩和熔结凝灰岩(图 1)。根据前人的研究,浙江地区按时代先后顺序可分为碱长花岗岩、钾长花岗岩、花岗岩系列;福建地区可分为花岗岩、正长斑岩、碱性花岗岩系列。

根据前人研究,典型岩体的矿物组成结果见表 2,98 Ma 浙闽岩体其主要矿物以斜长石出现为特点;到 95 Ma 则出现霓石等典型的碱性岩浆岩矿物;在 92 Ma 大量出现条纹长石;三组不同的矿物组合,暗示这一阶段浙闽地区较大源区差别和复杂的岩浆过程。

这一阶段的花岗岩化学组分呈现出了富硅、富碱和相对富铝及贫钙的特征,花岗岩 SiO₂ 含量一般在 70%以上,总体上属于钙碱性岩系,在沿海区域多为高钾钙碱性岩石系列(图 2),浙江普陀山、外北山 A 型花岗岩体、大陈岛钾长花岗岩体、福建魁岐岩体等,其 Na₂O+K₂O 的含量一般大于 8%,相对贫铁, A/CNK 在 1.0 左右,且分异指数较高,反映这些岩体大多经历了较强的结晶分异过程。

除福建在 95 Ma 发育较低硅的花岗岩外,浙闽地区在 100~90 Ma 岩浆活动产物总体差别不大,但较日本和南美安第斯的花岗岩类化学成分上富集 Si、Na、K(图 2),这反映了浙闽地区在俯冲背景下,较为独特的构造背景或岩浆源区。

3 微量元素特征

东南沿海在主量元素上表现

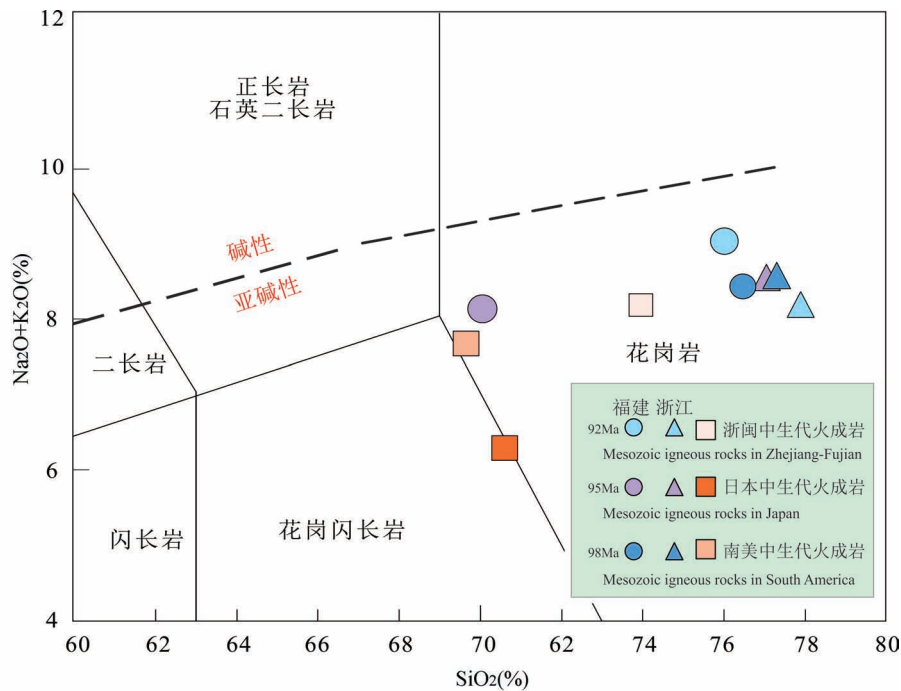


图 2 浙闽晚中生代典型岩体 TAS 图解(底图据 Middlemost, 1994)

Fig. 2 TAS diagram of the Late Mesozoic typical plutons in Zhejiang and Fujian (After Middlemost, 1994)

出高硅、富碱、准铝质或弱过铝质,岩浆演化程度较高,微量元素上也显示相应的特征,如亏损 Nb、Ta,富集 Th、Pb、K、U 等元素,显示出岛弧的特征,亦即陆壳的特征。从表 1 和图 2 来看,安第斯和浙闽显示共同的特点,但是浙闽某些岩体 LILE 甚至超过安第斯花岗岩(图 3a),陆壳混染似乎是两者一致的成因。如果浙闽也是安第斯型,按照岩浆岩类型和地壳厚度,安第斯地壳应该更厚,混染作用应当强于浙闽,可实际情况恰恰相反,说明安第斯型和浙闽型的岩浆来源可能不同,安第斯有俯冲的痕迹,有洋壳物

质加入和陆壳混染的影响;而浙闽则陆壳物质部分熔融形成的。同时,东南沿海地区晚中生代酸性岩花岗岩和花岗闪长岩中多含有中、基性包体,表明这些岩石并不是从基性岩连续结晶演化而来,其表现出一些混合成因的演化趋势。

浙闽地区 100~90 Ma 花岗岩类更为富集 LILE,亏损 HFSE(图 3a),Ba 和 Sr 负异常明显以及变化的轻重稀土比值(图 3b),特别是 δEu 负异常指示浙闽在此时期的岩石经历了较显著的斜长石分离结晶作用。浙闽这一时期的花岗岩相较于典型的岛弧花岗岩存在明显的演化趋势(图 4a、b)。但是这一阶段浙闽典型岩体并非简单的随着 SiO_2/MgO 值升高,浙闽典型花岗岩岩体 Rb/Sr 升高或 Ba 降低(绿色阴影代表的岩体数据);同时在 95 Ma 时出现了较大的变化,具体表现为福建地区的 SiO_2/MgO 值降低,浙江地区则在 SiO_2/MgO 值升高升高的情况下,Rb/Sr 和 Ba 的降低。所以对待岩浆演化的过程因该注意细节,不能只看化学数据的变化趋势。

综上所述,不论主量元素,还是大离子亲石元素、稀土元素的特征,浙闽沿海花岗岩在 95 Ma 左右存在化学成分上的转折。

表 2 浙闽地区 100~90 Ma 典型花岗质岩体的矿物组合

Table 2 Mineral assemblages of typical granitic plutons with ages of 100~90 Ma in Zhejiang and Fujian Provinces

	92 Ma	95 Ma	98 Ma
浙江地区	瑶坑岩体:条纹长石+石英+黑云母+钠铁闪石+锆石+萤石+独居石+铁钛氧化物	大陈岛岩体:钾长石+石英+黑云母+磁铁矿 外北山岩体:条纹长石+石英+更钠长石+黑云母+榍石+锆石+磷灰石+萤石	普陀山岩体:条纹长石+石英+斜长石+锆石+榍石+磷灰石+铁钛氧化物
福建地区	大层山/三沙/大京岩体:条纹长石+石英+斜长石+黑云母+磁铁矿+锆石+榍石+磷灰石	太姥山岩体:条纹长石+石英+黑云母+角闪石+磁铁矿+磷灰石+锆石+榍石+绿帘石+绿泥石 魁岐岩体:碱性长石+石英+霓石+铁钠长石+钠铁闪石+锆石+磷灰石	鼓弄岩体:钾长石+石英+少量黑云母+斜长石+锆石+榍石 长泰新村岩体:钾长石+斜长石+石英+黑云母+钛铁矿+磁铁矿+褐铁矿+锆石+萤石+独居石+褐帘石+榍石

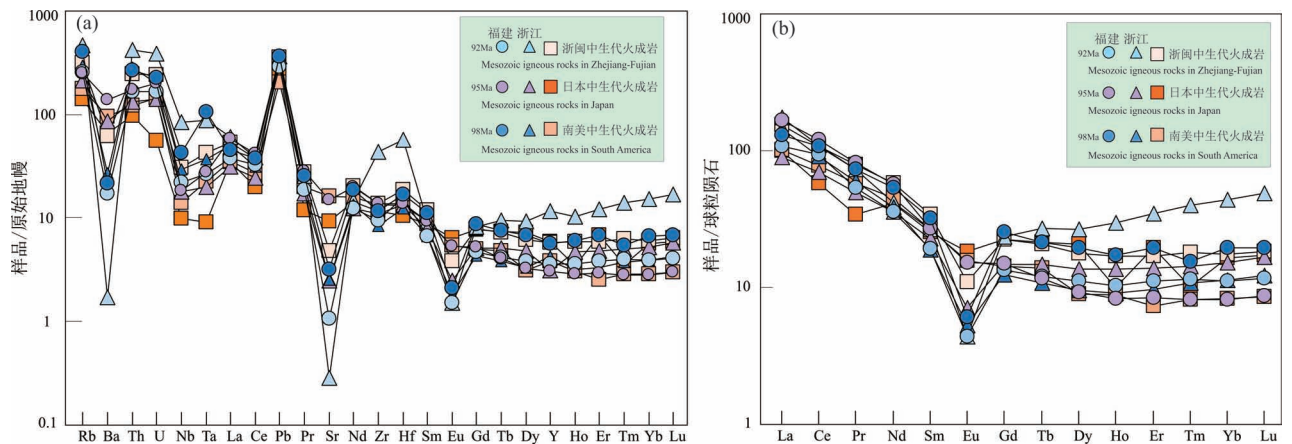


图 3 浙闽、日本和南美晚中生代典型岩体微量元素蛛网图和稀土配分曲线(据 Sun and McDonough, 1995)

Fig. 3 Spider diagram of trace and rare earth elements distribution diagram of Late Mesozoic typical plutons in Zhejiang—Fujian, Japan and South America (normalization values according to Sun and McDonough, 1995)

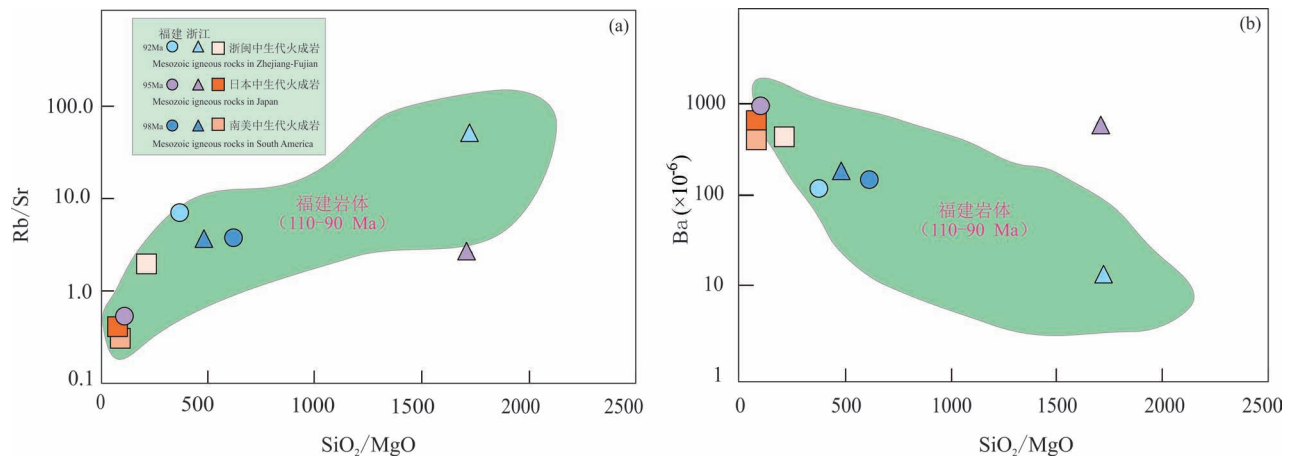


图 4 浙闽晚中生代典型岩体 Rb/Sr vs. SiO₂/MgO 和 Ba vs. SiO₂/MgO 图(福建岩体来自薛琦琪,2018)

Fig. 4 Rb/Sr vs. SiO₂/MgO and Ba vs. SiO₂/MgO diagrams of the Late Mesozoic typical plutons in Zhejiang and Fujian(Fujian granite from Xue Qiqi, 2018&)

4 构造背景与岩石成因

4.1 构造背景

与同时期中国东部内陆地区广泛分布的花岗岩类相比,中国东部沿海地区花岗岩类与古太平洋板块俯冲具有最直接的联系。这些典型的岩体位于平潭—东山构造带内,这一单元联结东海陆架和南海北部。现有的研究表明,华南岩浆岩带(Li Xianhua et al. , 2007; 徐夕生, 2008) 与东亚俯冲杂岩结合部(Wakita et al. , 2005) 的东海到南海陆架区域成为深入研究古太平洋俯冲及东亚活动大陆边缘演变新的突破口。南海北部的花岗岩类是侏罗纪—白垩

纪 I 型岩浆弧花岗岩类(162~148 Ma 和 137~102 Ma), 它们多数含有普通角闪石, 具有活动性流体组分富集和 Nb、Ta 强烈亏损等岩浆弧特点, 明显不同于华南同时代富硅、富碱的高分异 I 型或 A 型花岗岩(图 5)。

按由老到新的时间序列, 本次研究发现浙闽地区晚中生代典型花岗岩体在 (Y+Nb)—Rb 图上落在华南花岗岩类/南海型花岗岩类混合区—南海型花岗岩类—华南花岗岩类区域, 但是 95 Ma 的岩石要更符合南海花岗岩类, 结合矿物组合在此时出现了角闪石、霓石等典型的碱性岩石矿物, 显示了 95 Ma 可能有更多的流体参与岩浆的形成。

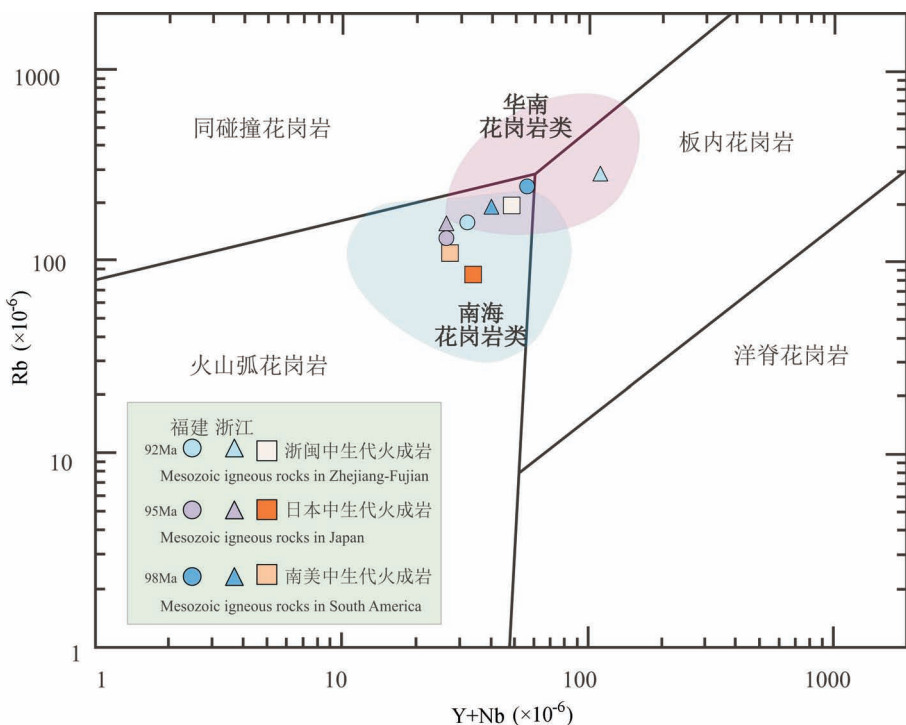


图5 浙闽晚中生代典型岩体与华南东部、南海晚中生代花岗岩类
(Y+Nb)—Rb 构造环境对比(据 Pearce et al., 1984)

Fig. 5 Comparison between the Late Mesozoic typical granitoids in Zhejiang—Fujian and the Late Mesozoic (Y+Nb)—Rb tectonic setting in eastern South China and South China Sea (according to Pearce et al., 1984)

Li Sanzhong et al. (2019)最近对东亚中生代大陆边缘演变及与古太平洋俯冲的控制作用进行了较为全面的总结和评述,认为晚中生代华南构造—岩浆演化受控于古太平洋 flat-slab subduction (200 ~ 160 Ma), slab foundering (160 ~ 125 Ma) 和 slab rollback (125 ~ 65 Ma); 据此,本次研究的地质阶段属于古太平洋俯冲后撤的阶段,结合前文对富集流体的矿物于 95 Ma 出现,本文认为浙闽典型的花岗岩体代表了中生代时期古太平洋板块俯冲最晚期的岩浆作用过程,在与南海地区岩浆对比后,认为这一过程发生在太平洋板块后撤的时间段,95 Ma 的岩体记录了后撤过程华南沿海地区岩石圈“底部加水弱化”的重要过程。

4.2 岩石成因

通过广泛搜集和整理分析前人对研究区岩体的 Nd 同位素数据,发现在 100 ~ 90 Ma 时期内,浙江地区 Nd 同位素值普遍要更富集(图 6),低的 Nd 同位素表明浙江地区地壳物质贡献增多,地壳也更厚。此外,浙闽地区的样品具有相似的 Nd 变化, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$

按照时代由老到新依次是:浙江(-7.7、-6.83、-0.9)、福建(-5.5、-2.9、-5.0)同位素组成变化(图 6),高于华南地壳的演化线表明样品中有不同程度的地幔物质贡献(Zhou Xinmin and Li Wuxian 2000; Li Zhengxiang and Li Xianhua, 2007; Li Zhen et al., 2012; Li Jianhua et al., 2014),且 95 Ma 较 98 Ma 要更加“亏损”,随后福建地区 92 Ma 又再次降低,而浙江的瑶坑岩体(92 Ma)同位素记录上没有像福建地区一样出现先升高再降低的过程,可能与瑶坑地区靠近温州—临海大断裂造成基性岩浆容易侵位,其活动时间延长有很大的关系,具体有待进一步研究。但是就整个浙闽在这一时期的花岗岩特征来看,95 Ma 左右是出现有同位素的“亏损”过程。

对浙闽沿海中生代花岗岩类成因的认识主要有:①

壳—幔相互作用产生的岩浆经过高程度的分离结晶形成的(Qiu Jiansheng et al., 2004; 邱检生等, 2008);② 先存的英云闪长质—花岗闪长质岩石经过分离结晶形成的(Zhao Jiaolong et al., 2015);③ 幔源基性岩浆与残余麻粒岩相地壳物质部分熔融产生的岩浆混合形成的(Zhao Jiaolong et al., 2016)。鉴于以上认识,本次研究利用 Rhyolite-MELTS 方法来计算含水硅酸盐体系的结晶过程,探索浙闽地区在 100 ~ 90 Ma 的岩浆过程。选取福建长泰岩体(SiO_2/MgO , 比值最低)作为初始组分(母岩浆),在含水量为 6%,压力为 300 MPa 的条件下进行模拟计算,模拟结果如下:按照时代来看,98 Ma 岩体的分离结晶程度约 37% (图 7a)。而从 95 Ma 开始,岩体演化无明显的趋势。

而在图 7b 中,浙闽晚中生代 100 ~ 90 Ma 样品显示以斜长石、钾长石、黑云母分离结晶为主导的结晶过程。但是不同时代样品的分离结晶程度有所不同,98 Ma 浙闽沿海地区钾长石和黑云母分离结晶为主,程度也较为相似,即钾长石 35%、黑云母

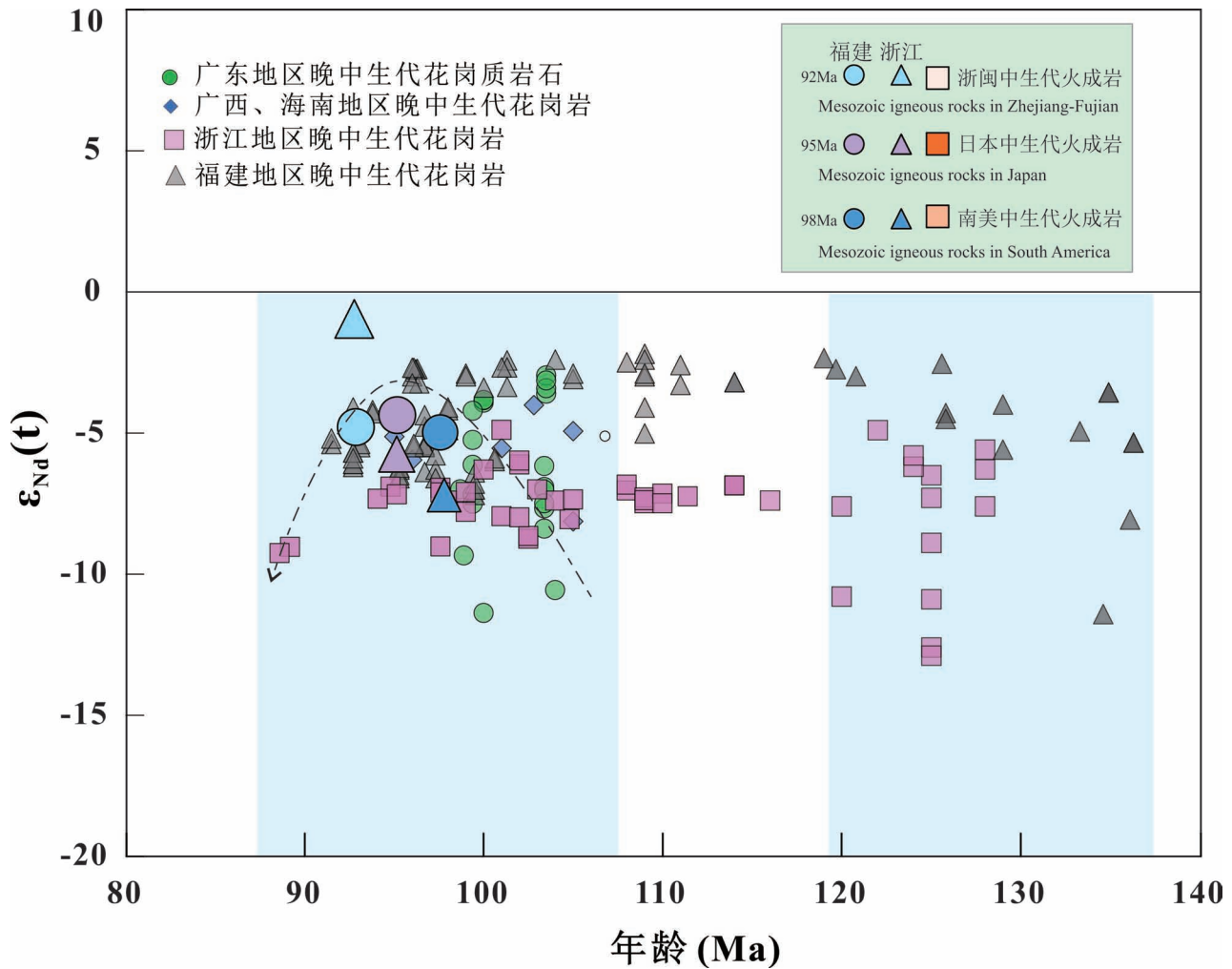


图 6 浙闽晚中生代典型岩体 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 随着年龄变化

Fig. 6 The changes of $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ with age of the Late Mesozoic typical plutons in Zhejiang—Fujian
Nd 同位素数据引自肖娥等, 2007; Li Zhen et al., 2012; 武丽艳等, 2013; Liu Lei et al., 2016; 赵姣龙, 2016;
Pan Fabin et al., 2018; Chen Jingyuan et al., 2019
Nd isotope data from Xiao E et al., 2007&; Li Zhen et al., 2012; Wu Liyan et al., 2013&; Liu Lei et al., 2016; Zhao Jiaolong, 2016&;
Pan Fabbini et al., 2018; Chen Jingyuan et al., 2019

28%; 在 95 Ma 开始浙闽一带的岩体出现斜长石的分离结晶, 且浙江岩体的分离结晶程度要高于福建, 这可能与后的地壳造成花岗质岩浆有较长时间的演化有关。随后 92 Ma 浙闽岩体又进入钾长石和黑云母的分离结晶, 但是程度明显高于 98 Ma。

因为花岗岩类不代表熔体成分, 而是代表对于堆积晶体和低效提取熔体的混合物, 在花岗岩质岩石成因研究中, 样品和样品组之间不同 $T(\text{SiO}_2/\text{MgO})$ 的值具有特殊的岩石学和地质意义 (Duan et al., 2021), 可以反映酸性岩浆的温度。具体的计算方程:

$$t(\text{SiO}_2/\text{MgO})/^{\circ}\text{C} = 1127.5 \times (\text{SiO}_2/\text{MgO})^{[-0.055]}$$

表 3 浙闽晚中生代典型岩体温度模拟计算结果			
Table 3 Simulation results of temperature of late Mesozoic typical plutons in Zhejiang and Fujian			
浙江		福建	
时代 (Ma)	温度 (°C)	时代 (Ma)	温度 (°C)
92	748.3	92	814.2
95	748.5	95	874.7
98	802.0	98	791.5

根据搜集的数据计算结果来看 (表 3), 福建地区温度变化从 781.5 °C 到 874.7 °C 再到 814.2 °C, 暗示了地幔或者其他地质作用的影响, 如超深断裂的活动。但是浙江地区 95 Ma 的温度没有出现升高, 这

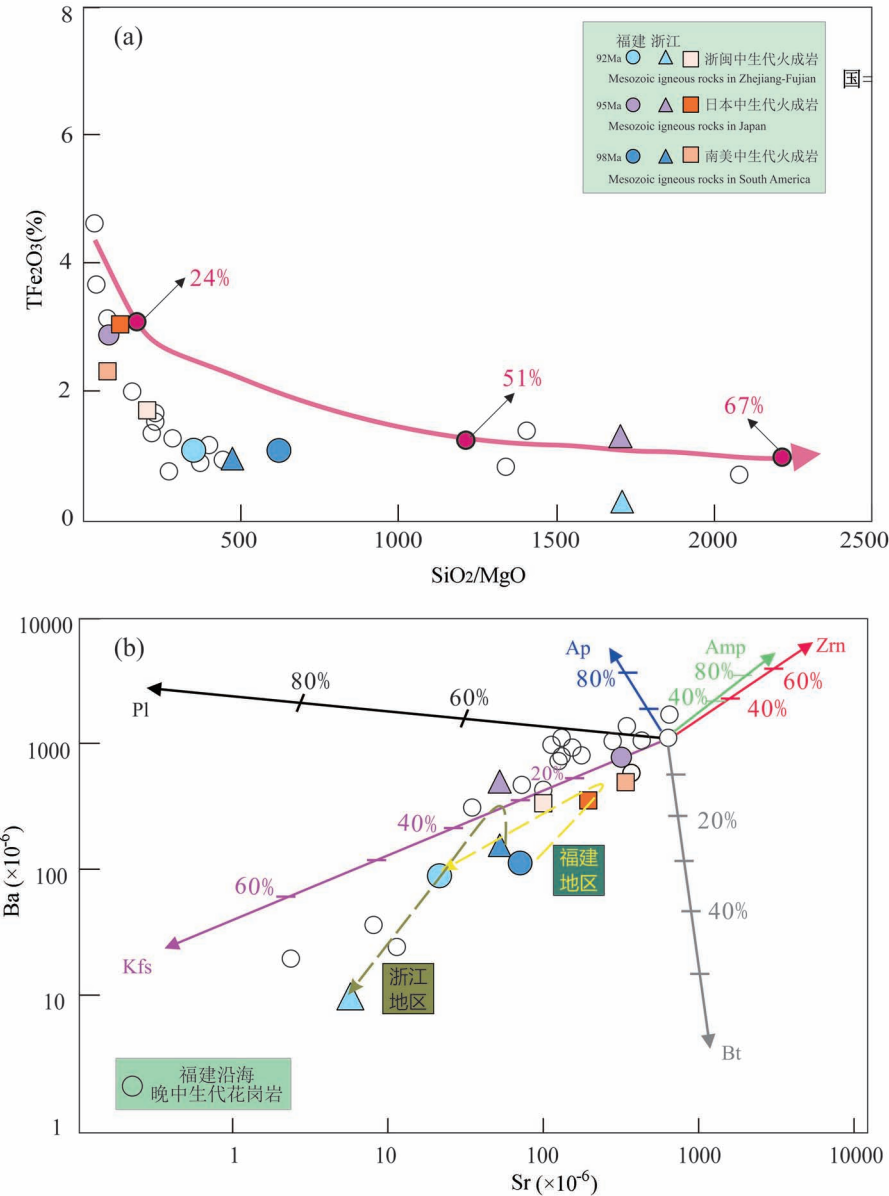


图 7 浙闽晚中生代典型岩体模拟计算结果示意图(福建岩体来自薛琦琪,2018)

Fig. 7 Schematic diagram of simulation calculation results of Late Mesozoic typical plutons in Zhejiang and Fujian(Fujian granite from Xue Qiqi, 2018)

(a) 箭头指示残余熔体组分随温度降低而减少的趋势;曲线上标注数字为模拟计算过程中熔体的分离结晶程度;(b) Ba 与 Sr 相关关系图;矿物分离结晶趋势线分别为:Pl—斜长石;Ap—磷灰石;Zrn—锆石;Kfs—钾长石;Bt—黑云母。计算使用的数据来源于 <https://earthref.org/GERM/>

Note: (a) The number marked on the curve is the degree of fractional crystallization of the melt in the process of analog calculation; (b) the trend lines of mineral separation and crystallization are: Pl—plagioclase; Ap—apatite; Zrn—zircon; Kfs—potassium feldspar; Bt—biotite. The data used in the calculation comes from <https://earthref.org/GERM/>

些样品位于大陈岛地区,岛上大面积为凝灰岩,样品位于多岩体的边部,所以温度较低,但是这样计算的温度也与瑶坑岩体温度相当;结合前面的 Nd 同位

素和微量元素的讨论,95 Ma 左右浙闽一带发生了构造背景景的转换。

综上所述,浙闽地区 100 ~90 Ma 的花岗岩类岩石的母岩浆是在太平洋俯冲后撤的背景下,在 95 Ma 有一次地幔物质的加入,由不同比例的亏损地幔物质与大陆地壳物质相互混合,在上升过程中经历了不同程度的岩浆演化(图 8),具体的过程如下:

在 98 Ma 左右,太平洋板块后撤导致软流圈物质上涌,岩石圈部分熔融并底垫到浙闽地壳一带,温度升高,造成地壳部分熔融,同时基性岩浆参与到地壳熔融过程中(图 8a)。浙江地区地壳厚度超过福建地区,两地形成各自不同的酸性岩浆,随后向地壳浅部侵位冷却。而在 95 Ma 由于板块后撤过程中,可能是原本软化的地壳断裂活动加剧,加剧了浙闽沿海深部软流圈上涌,造成一次较大的地幔熔融,更为强烈的地壳伸展减压,形成的基性岩浆混入到花岗质岩浆中,随后上侵冷却(图 8b);在 92 Ma 太平洋板块和欧亚板块运动“恢复”到 98 Ma 之前的水平,浙闽地壳继续较弱伸展熔融,不断演化形成高分异花岗岩质岩石(图 8c)。

5 结论

本研究以浙闽沿海地区出露的晚中生代(100 ~ 90 Ma)典型花岗岩类为研究对象,从岩石学、全岩主微量元素含量和 Nd 同位素组成等方面对其开展对比研究,通过相应的模拟计算,取得如下几点认识:

(1) 浙闽沿海晚中生代(100~90 Ma)典型花岗

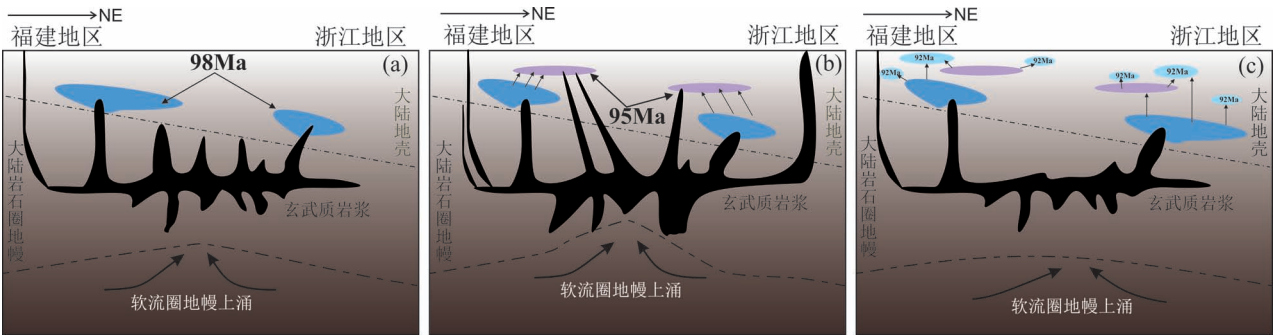


图 8 浙闽沿海地区 100~90 Ma 岩浆作用过程

Fig. 8 100~90 Ma magmatism in Zhejiang and Fujian coastal areas

岩的母岩浆起源于古太平洋板块俯冲引起的地幔楔部分熔融,产生的基性岩浆上涌,诱发上覆地壳发生部分熔融并产生花岗质岩浆。而少量基性岩浆与花岗质岩浆以不同比例混合形成了这一时期沿海中生代花岗岩类的母岩浆,在 95 Ma 左右的岩体表现的最为明显。

(2) 由于地壳厚度的不同,部分熔融形成的浙闽一带母岩浆也存在差异,而地表出露的岩体则是在这种不同母岩浆基础上高度演化的结果。利用 Rhyolite-MELTS 方法计算的浙闽地区在 100~90 Ma 的岩浆过程,结果显示 98 Ma 浙闽岩体的分离结晶程度基本一致,约 37%,而 95 Ma 和 92 Ma 的岩体,分离结晶程度差别较大。浙闽晚中生代花岗岩体显示以斜长石、钾长石、黑云母的分离结晶为主导的结晶过程,且浙江岩体的分离结晶程度要高于福建,在 95 Ma 浙闽一带的岩体出现明显斜长石的分离结晶。

(3) 浙闽沿海典型晚中生代(100~90 Ma)花岗岩的演化过程中,95 Ma 是一个关键的时间节点,也预示着太平洋板块和欧亚板块的构造运动的转换,但其具体的动力机制值得进一步研究。

致谢:本研究得到了台州市自然资源和规划局椒江分局和大陈岛开发建设管理委员会在野外工作方面提供的支持和帮助。同时,感谢审稿专家和章雨旭研究员耐心细致的审稿,为提高论文质量提出了很好的修改意见。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

段政,邢光福,余明刚,赵希林,靳国栋. 2017. 浙江外北山铝质 A₁ 型花岗岩成因:矿物学、年代学、地球化学及 Hf 同位素制约. 地

质学报, 91(1): 180~197.

李良林,周汉文,陈植华,王锦荣,陈正华,肖依. 2013. 福建太姥山地区和鼓山地区 A 型花岗岩对比及其地球动力学意义. 现代地质, 27(3): 509~524.

林间,徐敏,周志远,王月. 2017. 全球俯冲带大洋钻探进展与启示. 地球科学进展, 32(12): 1253~1266.

贾丽辉. 2018. 东南沿海粤东地区晚中生代花岗质岩石成因研究与含矿性评价. 导师:毛景文. 北京:中国地质大学(北京)博士学位论文: 1~155.

潘振杰,张旗,陈刚,焦守涛,杜雪亮,苗秀全,王金荣,安屹. 2017. 中国东部中生代岩浆活动与板块俯冲的关系——浙闽与日本弧和安第斯弧的对比及其意义. 岩石学报, 33(5): 1507~1523.

邱检生,肖娥,胡建,徐夕生,蒋少涌,李真. 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.

单强,曾乔松,李建康,卢焕章,侯茂洲,于学元,吴传军. 2014. 福建魁岐晶洞花岗岩锆石 U-Pb 年代学及其地球化学研究. 岩石学报, 30(4): 1155~1167.

王德滋,沈渭洲. 2003. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化. 地学前缘, 3(3): 209~220.

武丽艳,胡瑞忠,齐有强,朱经经. 2013. 福建紫金山矿田浸铜湖矿床石英正长斑岩锆石 U-Pb 年代学及其岩石地球化学特征. 岩石学报, 29(12): 4151~4166.

肖娥,邱检生,徐夕生,蒋少涌,胡建,李真. 2007. 浙江瑶坑碱性花岗岩体的年代学、地球化学及其成因与构造指示意义. 岩石学报, 23(6): 1431~1440.

徐克勤,胡受奚,孙明志,叶俊. 1982. 华南两个成因系列花岗岩类及其成矿特征. 矿床地质, 2(2): 4~17.

徐夕生. 2008. 华南花岗岩—火山岩成因研究的几个问题. 高校地质学报, 14(3): 283~294.

薛琦琪. 2018. 福建沿海中生代花岗岩类岩石学与地球化学. 导师:牛耀龄. 北京:中国地质大学(北京)硕士学位论文: 1~257.

张成晨,许长海,何敏,高顺利. 2019. 东海到南海晚中生代岩浆弧及陆缘汇聚体制综述. 地球科学进展, 34(9): 950~961.

赵蛟龙. 2016. 浙闽沿海晚中生代 I—A 型复合花岗岩体成因及其构造意义. 导师:邱检生. 南京:南京大学博士学位论文: 1~147.

Asis J, Jasin B. 2012. Aptian to Turonian Radiolaria from the Darvel Bay ophiolite complex, Kunak, Sabah. Bulletin of the Geological Society of Malaysia, 58: 89~96.

Charvet J, Lapiere H, Yu Yunwen. 1994. Geodynamic significance of the Mesozoic volcanism of southeastern China. Journal of Southeast

- Asian Earth Sciences, 9(4): 387~396.
- Chen Jingyuan, Yang Jinhui, Zhang Jiheng, Sun Jinfeng, Wilde S A. 2013. Petrogenesis of the Cretaceous Zhangzhou batholith in southeastern China: Zircon U-Pb age and Sr—Nd—Hf—O isotopic evidence. *Lithos*, 162: 140~156.
- Chen Jingyuan, Yang Jinhui, Zhang Jiheng. 2019. Origin of Cretaceous aluminous and peralkaline A-type granitoids in northeastern Fujian, coastal region of southeastern China. *Lithos*, 340~341: 223~238.
- Coggon J A, Nowell G M, Pearson D G, Parman S W. 2011. Application of the ^{190}Pt — ^{186}Os isotope system to dating platinum mineralization and ophiolite formation: An example from the Meratus Mountains, Borneo. *Economic Geology*, 106(1): 93~117.
- Deschamps A, Moniea P, Lallemanda S, Hsu S K, Yeh K Y. 2000. Evidence for Early Cretaceous oceanic crust trapped in the Philippine Sea Plate. *Earth and Planetary Science Letters*, 179(3~4): 503~516.
- Dimalanta C B, Yumul G P. 2006. Magmatic and amagmatic contributions to crustal growth in the Philippine island arc system: Comparison of the Cretaceous and post-Cretaceous periods. *Geosciences Journal*, 10(3): 321~329.
- Duan Meng, Niu Yaoling, Sun Pu, Chen Shuo, Kong Juanjuan, Li Jiyong, Zhang Yu, Hu Yan, Shao Fengli. 2021. A simple and robust method for calculating temperatures of granitoid magmas. *Mineralogy and Petrology*, 116(1): 93~103.
- Duan Zheng, Xing Guangfu, Yu Minggang, Zhao Xilin, Jin Guodong. 2017&. The petrogenesis of Waibeishan aluminous A₁-type granite in Zhejiang Province: Constraints from mineralogy, zircon U-Pb dating, geochemistry and Hf isotope. *Acta Geologica Sinica*, 91(1): 180~197.
- Faure M, Ishida K. 1990. The Mid—Upper Jurassic Iostrome of the west Philippines: A distinctive key-marker for the North Palawan block. *Journal of Asian Earth Sciences*, 4(1): 61~67.
- Encarnacion J. 2004. Multiple ophiolite generation preserved in the northern Philippines and the growth of an island arc complex. *Tectonophysics*, 392: 103~130.
- Engelbreton D C. 1985. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific Basin. *Geological Society of America*, 206(9): 1~60.
- Isozaki Y, Aoki K, Nakama T, Yanai S. 2010. New insight into a subduction-related orogen: A reappraisal of the geotectonic framework and evolution of the Japanese Islands. *Gondwana Research*, 18(1): 82~105.
- Jia Lihui. 2018&. petrogenesis of Late Mesozoic granitoids and evaluation of metallogenic potential in Eastern Guangdong, coastal area of SE China. Mentor: Mao Jingwen. Beijing: China University of Geosciences, Beijing doctoral dissertation: 1~155.
- Li Lianglin, Zhou Hanwen, Chen Zhihua, Wang Jinrong, Chen Zhenghua, Xiao Yi. 2013&. Comparison of A-type granites from Taimushan and Gushan regions in Fujian Province and their geodynamic significance. *Geoscience*, 27(3): 509~524.
- Li Sanzhong, Suo Yanhui, Li Xiyao, Zhou Jie, Santosh M, Wang Pengcheng, Wang Guanzeng, Guo Lingli, Yu Shenyaoyao, Lan Haoyuan, Dai Liming, Zhou Zaizhen, Cao Xianzhi, Zhu Junjiang, Liu Bao, Jiang Suhua, Wang Gang, Zhang Guowei. 2019. Mesozoic tectono—magmatic response in the East Asian ocean—continent connection zone to subduction of the Paleo-Pacific Plate. *Earth-Science Reviews*, 192: 91~137.
- Li Jianhua, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Johnston S T. 2014. Cretaceous tectonic evolution of South China: A preliminary synthesis. *Earth-Science Reviews*, 134(1): 98~136.
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Li Wuxian, Liu Ying, Yuan Chao, Wei Gangjian, Qi Changshi. 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.
- Li Zhen, Qiu Jiansheng, Xu Xisheng. 2012. Geochronological, geochemical and Sr—Nd—Hf isotopic constraints on petrogenesis of Late Mesozoic gabbro—granite complexes on the southeast coast of Fujian, South China: Insights into a depleted mantle source region and crust—mantle interactions. *Geological Magazine*, 149(3): 459~482.
- Li Zhengxiang, Li Xianhua. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2): 179~182.
- Lin Jian, Xu Min, Zhou Zhiyuan, Wang Yue. 2017&. Ocean drilling investigation of the global subduction processes. *Advances in Earth Science*, 32(12): 1253~1266.
- Liu Lei, Xu Xisheng, Xia Yan. 2016. Asynchronizing paleo-Pacific slab rollback beneath SE China: Insights from the episodic Late Mesozoic volcanism. *Gondwana Research*, 37: 397~407.
- Liu Liang, Qiu Jiansheng, Zhao Jiaolong. 2016. A hybrid origin for two Cretaceous monzonitic plutons in eastern Zhejiang Province, Southeast China: Geochronological, geochemical, and Sr—Nd—Hf isotopic evidence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 115: 183~203.
- Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G, Terabayashi M. 1997. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Island Arc*, 6(1): 121~142.
- Middlemost, E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37(3~4): 215~224.
- Pan Fabin, Liu Rong, Jin Cong, Jia Baojian, He Xiaobo, Gao Zhong, Tao Lu, Zhou Xiaochun, Zhang Liqi. 2018. Petrogenesis of Early Cretaceous granitoids from southwest Zhejiang, NE South China Block and its geodynamic implication. *Lithos*, 308: 196~212.
- Pan Zhenjie, Zhang Qi, Chen Gang, Jiao Shoutao, Du Xuiliang, Miao Xiuquan, Wang Jinrong, An Yi. 2017&. Relation between Mesozoic magmatism and plate subduction in eastern China: Comparison among Zhejiang—Fujian, Japan arc and Andes arc. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1507~1523.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956~983.
- Qiu Jiansheng, Wang Dezi, McInnes B I A, Jiang Shaoyong, Wang Rucheng, Kanisawa S. 2004. Two subgroups of A-type granites in the coastal area of Zhejiang and Fujian Provinces, SE China: age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 95(1~2): 227~236.
- Qiu Jiansheng, Xiao E, Hu jian, Xu Xisheng, Jiang Shaoyong, Li Zhen. 2008&. Ptrogenesis 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(22): 2468~2484.
- Shan Qiang, Zeng Qiaosong, Li Jiankang, Lu Huanzhang, Hou

Maozhou, Yu Xueyuan, Wu Chuanjun. 2014&. U-Pb geochronology of zircon and geochemistry of Kuiki miarolitic granites, Fujian Province. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 1155~1167.

Sun Weidong, Ding Xing, Hu Yanhua, Li Xianhua. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3~4): 533~542.

Sun Shensu, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A. D, Norry, M. J. *Magmatism in the ocean basalts*. Geological Society Special Publication, 42: 313~345.

Wakita K, Metcalfe I. 2005. Ocean plate stratigraphy in East and Southeast Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(6): 679~702.

Wang Dezi, Shen Weizhou. 2003&. Genesis of granitoids and crustal evolution in southeast China. *Earth Science Frontiers*, 3: 209~220.

Wang Yuejun, Fan Weiming, Zhang Guowei, Zhang Yanhua. 2013. Phanerozoic tectonics of the South China Block: Key observations and controversies. *Gondwana Research*, 23(4): 1273~1305.

Wu Liyan, Hu Ruizhong, Qi Youqiang, Zhu Jingjing. 2013&. Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages and geochemical characteristics of quartz syenite porphyry from Jintonghu deposit in Zijinshan ore field, Fujian Province, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4151~4166.

Xiao E, Qiu Jiansheng, Xu Xisheng, Jiang Shaoyong, Hu Jiang, Li Zhen. 2007&. Geochronology and geochemistry of the Yaokeng alkaline granitic pluton in Zhejiang province; Petrogenetic and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 6: 1431~1440.

Xu Keqin, Hu Shouxi, Sun Mingzhi, Ye Jun. 1982&. On the two genetic series of granites in Southeastern China and their metallogenic characteristics. *Mineral Deposits*, 2: 1~14.

Xu Xisheng. 2008&. Several problems worthy to be noticed in the research of granites and volcanic rocks in SE China. *Geological Journal of China Universities*, 3: 283~294.

Xu Xisheng, Zhao Kai, He Zhenyu, Liu Lei, Hong Wentao. 2021. Cretaceous volcanic—plutonic magmatism in SE China and a genetic model. *Lithos*, 402: 105728.

Xue Qiqi. 2018&. Petrographic and geochemistry of Mesozoic granitoids along the coastal area of Fujian Province. Mentor: Niu Yaoling. Beijing: China University of Geosciences, Beijing Master Thesis: 1~257.

Zhang Chengchen, Xu Changhai, He Min, Gao Shunli. 2019&. Late Mesozoic convergent continental margin with magmatic arc from East to South China Seas; A review. *Advances in Earth Science*, 34(9): 950~961.

Zhang Guowei, Guo Anlin, Wang Yuejun, Li Sanzhong, Dong Yunpeng, Liu Shaofeng, He Dengfa, Cheng Shunyou, Lu Rukui, Yao Anping. 2013. Tectonics of South China continent and its implications. *Science in China (Series D)*, 56(11): 1804~1828.

Zhao Jiaolong, Qiu Jiansheng, Liu Liang, Wang Ruiqiang. 2016. The Late Cretaceous I and A-type granite association of southeast China: Implications for the origin and evolution of post-collisional extensional magmatism. *Lithos*, 240: 16~33.

Zhao Jiaolong. 2016&. Ptrogenesis and tectonic significance of the Late Mesozoic I- and A-type composite granite plutons in coastal Zhejiang and Fujian provinces. Mentor: Qiu Jiansheng. Nanjing: Nanjing University Doctor Thesis: 1~147.

Zheng Yongfei, Xiao Wenjiao, Zhao Guochun. 2013. Introduction to tectonics of China. *Gondwana Research*, 23(4): 1189~1206.

Zhou Xinmin, Li Wuxian. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326(3): 269~287.

Is 95 Ma the turning point of the late Mesozoic magmatic evolution in south China?

—— Evidence from typical granitoids in Zhejiang and Fujian Province

GAO Qin¹⁾, DING Jialin²⁾, ZHANG Yanqing¹⁾, ZHOU Peng²⁾, LI Zilong¹⁾

1) Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan, Zhejiang, 316000;

2) Jiaojiang Substation, Taizhou Bureau of Natural Resources and Planning, Taizhou, Zhejiang, 318000

Objectives: A large Mesozoic magmatic rocks are exposed in the coastal area of the southeastern China. The data of geochemistry and zircon U-Pb ages of granitoids from typical plutons in the coastal area of Zhejiang and Fujian are studied systematically in order to explore the reason for the complexity of magmatism during the period of 100~90 Ma.

Methods: Comparative analyses of regional geochemical characteristics, U-Pb zircon geochronology and Rhyolite-MELTS method to calculate magma processes at 100~90 Ma in Zhejiang—Fujian area.

Results: Plagioclase is as the main mineral in Zhejiang—Fujian plutons at 98 Ma, while typical minerals of aegirine and large amounts of striped feldspar respectively appear at 95 Ma and 92 Ma. The high alkaline granites in Zhejiang—Fujian area is different from those typical island arc granites in the world. The granites in Zhejiang and Fujian area are enriched in LILE, depleted in HFSE, Nb—Ta, negative anomalies of Ba and Sr, strong Eu

anomaly and varied LREE/HREE ratios. Most of the granites in Zhejiang—Fujian during this period are derived from partial melting of continental crust materials and existing the transition in chemical composition in 95 Ma.

Conclusions: The parental magma of Zhejiang—Fujian granites at 90 ~ 100 Ma are derived from partial melting of the mantle caused by the subduction of the paleo-Pacific plate, the Late Mesozoic magmatic evolution in Zhejiang—Fujian area underwent a transition due to the intervention of mantle materials around 95 Ma, and the transition period of the Late Mesozoic granitic formation in Zhejiang—Fujian area is probably about 95 Ma.

Keywords: Zhejiang—Fujian acid magmatic zone; magmatic—tectonic turning point; late Mesozoic; plate subduction process; mafic magma upwelling

Acknowledgements: This research is supported by the scientific research project of Taizhou Bureau of Natural Resources and planning Jiaojiang substation and the World’s Top Universities Cooperation Program of Zhejiang University Education Fund, meanwhile, the help of Dachen Island Development and Construction Management Committee in field work was also appreciated.

First author: GAO Qin, male, born in 1990, Ph. D. Student, is mainly engaged in petrology research; Email: gaoqin-dream@zju.edu.cn

Corresponding author: LI Zilong, male, born in 1965, Ph. D., Professor, is mainly engaged in petrogeochemistry and geodynamic evolution research; Email: zilongli@zju.edu.cn

Manuscript received on: 2021-10-14; Accepted on: 2022-06-21; Network published on: 2022-07-20
Doi: 10.16509/j.georeview.2022.07.025 **Edited by:** ZHANG Yuxu

