

# 浙江浦江晚中生代埃达克质火山岩的成因\*

秦社彩<sup>1,2</sup> 范蔚茗<sup>1\*\*</sup> 郭锋<sup>1</sup> 李超文<sup>1,2</sup> 高晓峰<sup>1,2</sup>

QIN SheCai<sup>1,2</sup>, FAN WeiMing<sup>1</sup>, GUO Feng<sup>1</sup>, LI ChaoWen<sup>1,2</sup> and GAO XiaoFeng<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所边缘海地质重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

2006-03-10 收稿, 2006-07-20 改回.

**Qin SC, Fan WM, Guo F, Li CW and Gao XF. 2006. Petrogenesis of late Mesozoic adakitic andesites from Pujiang area in Zhejiang Province, eastern China. Acta Petrologica Sinica, 22(9):2305-2314**

**Abstract** Late Mesozoic adakitic andesites found in the Laocun Formation from the Pujiang area in Zhejiang Province are geochemically distinct from the contemporaneous calc-alkaline felsic volcanic rocks in the southeastern coast areas of China. These rocks span a SiO<sub>2</sub> range of 57.64% ~ 62.61% and MgO 2.29% ~ 3.43%, characterized by high Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (>16%), Na<sub>2</sub>O (4.01% ~ 4.52%), Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O (1.94 ~ 5.51 with an average of 2.89) and Sr (583 ~ 643 μg/g), and low Y (11.4 ~ 13.2 μg/g) and HREE (e.g., Yb = 1.16 ~ 1.26 μg/g). They have lower (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> (0.7041 ~ 0.7043) and higher ε<sub>Nd</sub>(t) (0.3 ~ 2.3) than the contemporaneous counterparts in the area and along the southeastern coast regions of China. All these geochemical features are similar to adakites occurring in modern subduction zones. Their even lower (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> ratios than the contemporaneous mafic rocks are inconsistent with an origin of differentiates of the mafic magmas by fractional crystallization or assimilation via fractional crystallization. Since there lacks robust evidence for late Mesozoic oceanic ridge subduction toward the southeastern coast regions of China, these rocks were probably derived from crustal anatexis, and the higher ε<sub>Nd</sub>(t) and lower T<sub>DM</sub> called for an important contribution of juvenile material in the source. Considering the late Mesozoic extensional regime in the region, we relate the petrogenesis of these adakitic magmas to the Mesozoic crustal growth, consistent with the existence of Mesozoic high-ε<sub>Nd</sub>(t) and low-T<sub>DM</sub> "Shi-Hang belt".

**Key words** Adakitic andesites, Petrogenesis, Pujiang area in Zhejiang province, Late Mesozoic

**摘要** 浙江浦江地区白垩纪劳村组存在一套独特的中酸性火山岩, 其主量元素表现出富 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (>16%) 和 Na<sub>2</sub>O (4.01% ~ 4.52%), 高 Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O (1.94 ~ 5.51, 平均 2.89), 高 Sr (583 ~ 643 μg/g), 贫 Y (11.4 ~ 13.2 μg/g) 和 HREE (如 Yb = 1.16 ~ 1.26 μg/g), 以及低 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> (0.7041 ~ 0.7043) 和高 ε<sub>Nd</sub>(t) (0.3 ~ 2.3)。这些火山岩在元素-同位素组成上明显不同于浦江地区或区域上的晚中生代中酸性火山岩, 而与现代俯冲带产出的埃达克岩类似。由于这些岩石相对于晚中生代的基性岩浆具有更低的 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 比值, 因此难以通过玄武岩浆的分离结晶或同化混染作用来解释, 最有可能是地壳部分熔融的产物。在构造背景方面, 目前还没有确切的证据说明区域存在晚中生代洋壳的俯冲作用, 我们倾向于认为劳村组埃达克质火山岩可能为新增生玄武质地壳部分熔融的结果, 其形成与区域上中生代地壳增生作用有直接的动力学联系。

**关键词** 埃达克质火山岩; 岩石成因; 浙江浦江; 晚中生代

中图法分类号 P588.14

\* 本论文的研究得到中国科学院知识创新工程项目 (KZCX2-SW-117 和 GIGCX-04-04), 中国科学院边缘海地质重点实验室项目 (MSGLCAS03-3) 的共同资助。

第一作者简介: 秦社彩, 女, 1965 年生, 在读博士生, 岩石地球化学专业, E-mail: pusqsc@mail.sysu.edu.cn

\*\* 通讯作者: 范蔚茗, 研究员, 博士生导师, E-mail: wmfan@gig.ac.cn

## 1 引言

中国东南沿海广泛发育晚中生代火山岩。区域上火山岩主要由英安质—流纹质岩石组成,其喷发体积超过总量的95%,镁铁质岩石则不足5%。前人的研究主要集中在酸性火山岩的成因与地壳演化方面,仅有少部分研究将重点放在了镁铁质火山岩(王德滋和周新民,2002; Zhou *et al.*, 2000; Li, 2000; Li *et al.*, 2004; Lapierre *et al.*, 1997; 谢昕等, 2001; 余心起等, 2004; 颜铁增等, 2005)。对于这些不同成分的火山岩的成因,目前较一致的看法有:①酸性火山岩与基性火山岩分别来自不同的岩浆源区;②巨量的酸性火山岩是在基性岩浆底侵于中-下地壳而导致地壳部分熔融的产物。但有关东南沿海晚中生代巨量岩浆形成的地球动力学背景仍存在明显分歧,目前的两大主流观点为:(1)认为中生代时期古太平洋板块向西(东南沿海大陆)俯冲,消减板块脱水,致使地幔楔发生湿的部分熔融,从而形成上侵的基性岩浆(Zhou *et al.*, 2000; Lapierre *et al.*, 1997);(2)认为东南沿海自早中侏罗世开始直至中生代结束一直处于逐渐拉张的应力环境,深部岩石圈/伸展减薄,软流圈上涌,致使岩石圈地幔及软流圈发生减压熔融形成基性岩浆,或深部热的软流圈对下部地壳的直接加热并诱发中下地壳的部分熔融(Li, 2000; Li *et al.*, 2004; 范蔚茗等, 2003; 李献华等, 1997; Wang *et al.*, 2003, 2005)。

我们在对东南沿海晚中生代火山岩的研究中,于浙江省浦江的劳村组发现了一套钙碱性安山岩,其主量元素、微量元素和同位素特征与前人所报道的同期中酸性火山岩具有较大的地球化学差别,而与现代俯冲带形成的埃达克岩(adakite)相似,因而将其定名为埃达克质(adakitic)火山岩。本文对这组岩石开展了元素-同位素分析,并对比于东南沿海地区同期的中酸性火山岩和现代俯冲带埃达克岩以理解其岩石成因,为东南沿海地区晚中生代火山岩形成的深部动力学机制提供地球化学制约。

## 2 地质背景

浦江县位于浙江省中西部地区江绍断裂带的中段,属于扬子地块与华夏地块的接壤部位,通常被划归浙西北构造单元,但严格来说位于浙西北和浙东南构造单元的交接部位(图1)。区内出露的基底地层为中元古代平水群细碧—角闪岩系和双溪坞群陆相钙碱性火山岩和火山碎屑沉积岩,其上覆盖震旦系—三叠系海相沉积岩。晚中生代火山—沉积岩系分为上下两个岩系:下岩系建德群(135~115 Ma)自下而上分别为劳村组、黄尖组和寿昌组;上岩系衢江群(113~90 Ma)自下而上分别为馆头组、朝川组和方岩组(俞云文等,1999)。其中建德群下部的劳村组,隶属于东南沿海晚中生代火山活动最早的喷发旋回,岩性以沉积岩为主,次为凝灰岩—流纹质火山岩,夹玄武岩、玄武安山岩、安山岩。本文研究的埃达克质火山岩采自劳村组的火山岩夹层,该层火山岩为较新鲜的、较

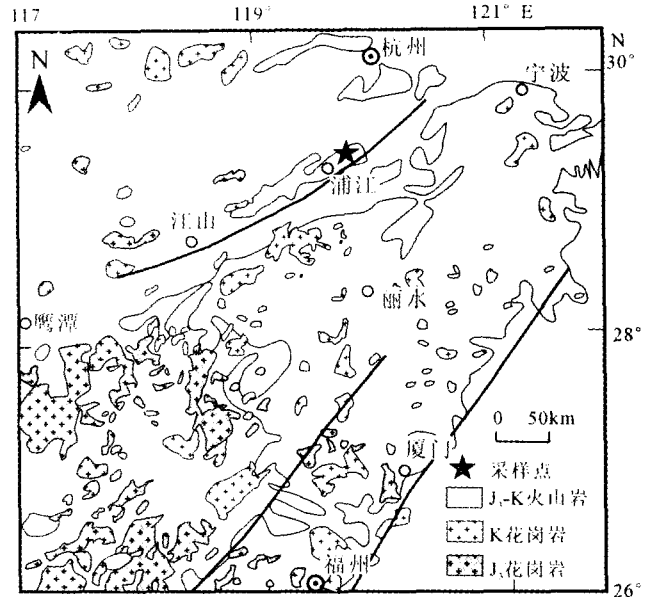


图1 浙江浦江地区地质简图(根据浙江省地质矿产局, 1996. K-J 地层分布改绘)

Fig. 1 Geological distribution for late Mesozoic adakitic volcanic rocks at Pujiang area, Zhejiang (after Bureau of Geology and Mineral Resources of Zhejiang Province, 1996.)

为致密的熔岩,夹少量凝灰岩。样品新鲜,风化或蚀变较弱,呈灰绿色,弱斑状-隐晶结构,致密块状构造,斑晶主要为斜长石,约占2%~3%,结晶粒度细小,粒径在0.5~1 mm,基质由细晶斜长石、角闪石和石英以及玻璃质组成,弱定向排列。该组火山岩的全岩 Rb-Sr 和 K-Ar 年龄变化在 135~126 Ma 之间,被划归为早白垩世(颜铁增等,2005; 俞云文等,1999)。

## 3 分析方法与技术

将新鲜样品(样品号 PJ-44-50)手工碎至 <1~2 cm,用 1% 的稀盐酸浸泡、超声波振荡之后用去离子水清洗、风干,在放大镜下挑选出新鲜的岩石碎粒,用刚玉鄂式破碎机粉碎到 20 目以下,留出一份副样后,再用玛瑙球磨滚筒机研磨,过 180 目筛之后,供元素和同位素分析。

主量元素在湖北省地质实验研究所用 XRF 法测定,其中  $\text{Fe}^{2+}$  由湿化学法分析;分析误差总体小于 1%,  $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  为 2%~4%;微量元素在中国科学院广州地球化学研究所用 ICP-MS 法测定,具体方法与过程见文献(刘颖等,1996),微量元素的分析精度总体好于 5%; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  和  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比值在中国科学院广州地球化学研究所的 MC-ICP-MS 质谱仪上测定, Sr 和 Nd 同位素比值分别用  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.1194$  和  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$  进行标准化,分析误差用  $2\sigma$  给出。其中 BCR1 标准样品  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512626 \pm 9$  ( $n = 12$ ), NBS987 多次测定平均值为  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710265 \pm 12$  ( $n = 9$ )。浙江浦江地区晚中生代埃达克质火山岩的主、微量元素及同位素测定结果见表 1 和表 2。

表1 浦江劳村组埃达克质火山岩及 Adakite 的主、微量元素组成

Table 1 Major element (wt%) and trace element compositions ( $\mu\text{g/g}$ ) of late Mesozoic adakitic andesites of Laocun Formation from the Pujiang area in Zhejiang Province

来源 岩性 Sample	本 文					Smithes, 2000 及其引文			
	安山岩					英安岩			
	03PJ-44	03PJ-46	03PJ-48	03PJ-49	03PJ-50	1adakite	2adakite	3adakite	4adakite
SiO <sub>2</sub>	57.07	55.04	60.44	58.37	59.18	63.89	64.66	59.70	62.55
TiO <sub>2</sub>	0.88	0.84	0.63	0.69	0.66	0.61	0.51	0.89	0.62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.77	17.09	16.74	17.07	17.16	17.40	16.77	15.43	17.27
TFe	6.94	6.81	5.44	5.86	5.54	4.68	4.20	3.75	3.48
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.54	3.51	3.04	2.21	2.94				
FeO	3.40	3.30	2.40	3.65	2.60				
MnO	0.13	0.12	0.12	0.14	0.12	0.08	0.08	0.04	0.09
MgO	3.43	3.41	2.49	2.89	2.29	2.47	2.20	4.76	3.62
CaO	3.91	6.64	4.58	3.93	4.92	5.23	5.00	7.48	7.12
Na <sub>2</sub> O	4.35	4.52	4.12	4.01	4.40	4.40	4.09	3.69	4.66
K <sub>2</sub> O	1.75	0.82	1.76	2.07	2.04	1.52	1.72	2.08	1.22
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.20	0.20	0.21	0.22	0.22	0.19	0.17	0.39	
Los	4.33	4.29	3.22	4.52	3.21				
Total	99.76	99.78	99.75	99.77	99.74				
Mg <sup>#</sup>	48	49	47	48	44	48	51	72	67
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	2.49	5.51	2.34	1.94	2.16	2.89	2.38	1.77	3.82
Sc	21.35	21.56	11.03	11.15	10.04				
V	171.30	185.50	108.10	106.80	105.90				
Cr	67.95	67.06	44.67	48.24	39.69	54.00	36.00	161.00	97.00
Co	13.87	13.60	9.20	10.36	8.85				
Ni						39.00	24.00	126.00	76.00
Ga	16.43	18.00	16.86	18.10	16.79				
Rb	37.00	11.44	29.96	44.51	35.65	30.00		13.00	
Sr	642.80	583.90	617.30	658.30	650.30	869.00	706.00	2366.00	1886.00
Y	12.98	13.18	12.40	11.37	12.42	9.50	10.00		
Zr	120.50	116.40	94.33	99.61	109.30	117.00			
Nb	3.90	3.93	4.47	4.89	4.54	8.30			
Ba	588.90	452.90	709.60	663.20	789.30	485.00		320.00	306.00
Hf	3.08	2.96	2.41	2.71	2.83				
Ta	0.27	0.27	0.29	0.32	0.30				
Th	3.40	3.30	3.13	3.23	3.16	3.50		2.90	4.90
U	0.82	0.77	0.65	0.76	0.74	1.00		1.00	1.30
Sr/Y	49.52	44.30	49.78	57.90	52.36	91.47	70.60		
La	16.23	16.23	18.08	18.91	18.71	17.50	19.00	30.30	26.60
Ce	33.78	33.19	37.66	38.41	38.28	34.60		70.90	60.90
Pr	4.36	4.31	4.78	4.97	4.94				
Nd	16.52	17.04	17.85	18.74	18.60	20.10		39.80	30.30
Sm	3.43	3.48	3.38	3.52	3.46	3.10		6.80	4.40
Eu	0.91	1.01	0.82	0.81	0.89	0.97		1.74	1.16
Gd	3.08	3.23	3.00	3.16	3.18	2.25			
Tb	0.44	0.45	0.42	0.45	0.42	0.37		0.48	0.34
Dy	2.43	2.54	2.33	2.36	2.26	1.43			
Ho	0.46	0.48	0.43	0.45	0.43				
Er	1.26	1.27	1.15	1.18	1.11				
Tm	0.20	0.18	0.18	0.18	0.17				
Yb	1.26	1.24	1.18	1.20	1.16	0.91	0.93	0.62	0.72
Lu	0.20	0.20	0.19	0.19	0.19	0.15		0.07	0.09
ΣREE	84.57	84.84	91.46	94.52	93.81	81.38	19.93	150.71	124.51
δEu	0.84	0.90	0.77	0.73	0.81	1.07		1.35	1.39
La/Yb	12.87	13.05	15.39	15.75	16.07	19.23	20.43	48.87	36.94
Nb/U	4.8	5.1	6.9	6.4	6.1	8.3			
Th/U	4.2	4.3	4.8	4.3	4.3	3.5		2.9	3.8

1) 氧化物为百分含量(wt%), 微量元素为  $\mu\text{g/g}$

表2 浦江劳村组埃达克质火山岩的 Sr、Nd 同位素组成

Table 2 Sr-Nd isotope data of late Mesozoic adakitic andesites of Laocun Formation from the Pujiang area in Zhejiang Province

样号	岩性	Rb	Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	Nd	Sm	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	$\epsilon(\text{Nd}, t)$	$T_{\text{DM2}}(\text{Ma})$
03PJ-44	安山岩	37.00	642.8	0.1626	$0.704630 \pm 10$	0.70433	16.52	3.43	0.1276	$0.512697 \pm 12$	2.30	653
03PJ-46	安山岩	11.44	583.9	0.0553	$0.704248 \pm 14$	0.70415	17.04	3.48	0.1254	$0.512695 \pm 10$	0.34	813
03PJ-48	安山岩	29.96	617.3	0.1371	$0.704506 \pm 11$	0.70425	17.85	3.38	0.1165	$0.512619 \pm 8$	0.97	764
03PJ-49	安山岩	44.51	658.3	0.1910	$0.704443 \pm 13$	0.70409	18.74	3.52	0.1155	$0.512636 \pm 7$	1.31	736
03PJ-50	安山岩	35.65	650.3	0.1548	$0.704595 \pm 10$	0.70431	18.60	3.46	0.1143	$0.512627 \pm 10$	1.15	749

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i)$  和  $(\text{Nd}, t)$  的计算取  $t = 130 \text{ Ma}$

## 4 分析结果

### 4.1 主微量元素地球化学特征

本次研究的 5 个劳村组埃达克质火山岩样品的  $\text{SiO}_2$  变化范围为 55.04% ~ 60.44%,  $\text{MgO}$  为 2.29% ~ 3.43%,  $\text{Mg}^*$  为 44 ~ 49, 属于钙碱性安山岩 (图 2)。在主量元素方面富  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (>16%) 和  $\text{Na}_2\text{O}$  ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.94 \sim 5.51$ , 平均 2.89), 微量元素方面相对高 Sr (583 ~ 643  $\mu\text{g/g}$ ), 贫 Y (11.4 ~ 13.2  $\mu\text{g/g}$ ) 和 HREE (如  $\text{Yb} = 1.16 \sim 1.26 \mu\text{g/g}$ ), 与 Defant 和 Drummond (1990) 定义的埃达克岩的主微量元素指标 ( $\text{SiO}_2 \geq 56\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 2$ ,  $\text{Sr} \geq 400 \mu\text{g/g}$ ,  $\text{Y} < 18 \mu\text{g/g}$ ,  $\text{Yb} < 1.8 \mu\text{g/g}$ ) 相符。而区域上王德滋和周新民 (2002) 报道的安山质岩的  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  均小于 2 (1.08 ~ 1.79), 多数样品并不体现出类似埃达克岩的低 Y 特点 (15.1 ~ 22.4  $\mu\text{g/g}$ , 多数大于 20); Lapierre *et al.* (1997) 和谢昕等 (2003) 报道的安山质岩石  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  变化较大 (0.7 ~ 3.14), 尽管有些表现出富  $\text{Na}_2\text{O}$  的特征, 但其具有较高的 HREE 和 Y 的特点 (Y 均大于 20  $\mu\text{g/g}$ ), 不具有高 Sr/Y 比值及低 Y、Yb 的埃达克岩特征。

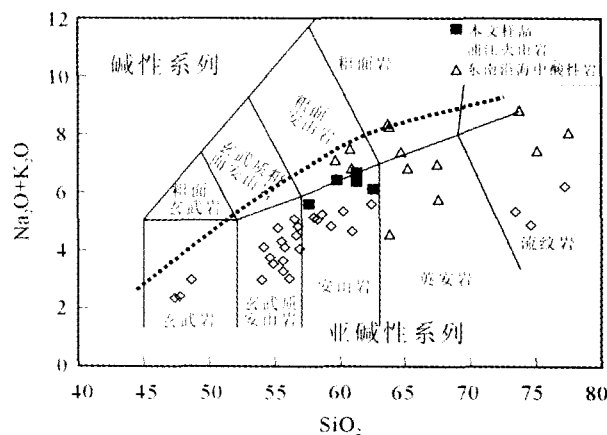


图2  $\text{SiO}_2$  对  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  岩石分类图

东南沿海中酸性岩数据来自王德滋和周新民, 2000; Laipierre *et al.*, 1997; 浦江火山岩为作者课题组未发表资料; 本文样品为劳村组埃达克质火山岩

Fig. 2 Total alkali versus  $\text{SiO}_2$  (TAS) plot for late Mesozoic adakitic andesites of Laocun Formation

在 Harker 图上 (图 3), 本文劳村组埃达克质火山岩的  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  明显偏高,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  也偏高, Y、Yb、Nb、Zr 以及 La、Rb 明显偏低。低 Y 和 Yb 很可能反映源区部分熔融时残留了富含 HREE 和 Y 的石榴石, 低 Nb 和 Zr 含量可能反映源岩贫 HFSE 或者是源区残留富钛矿物 (如金红石、榍石等) 的结果。在 Y 对 Sr/Y 图上 (图 4), 劳村组埃达克质火山岩落在现代埃达克岩和太古代 TTG 的变化范围中。

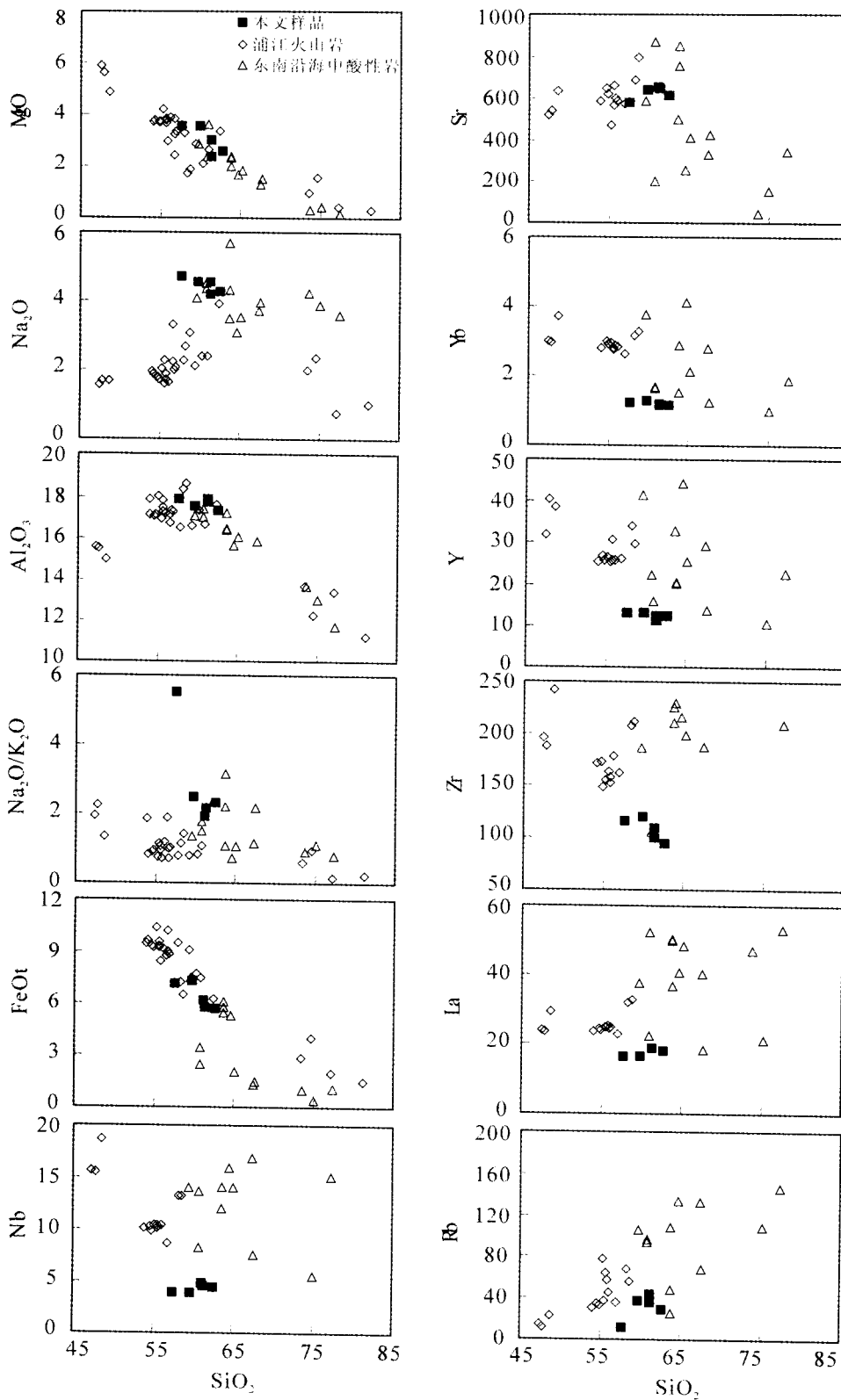


图3 SiO<sub>2</sub>对Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O、主量元素(wt%)和微量元素(μg/g)图(图例同图2)

Fig. 3 SiO<sub>2</sub> versus major element compositions (wt%), trace element concentrations (μg/g) and Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O for late Mesozoic adakitic andesites of Laocun Formation

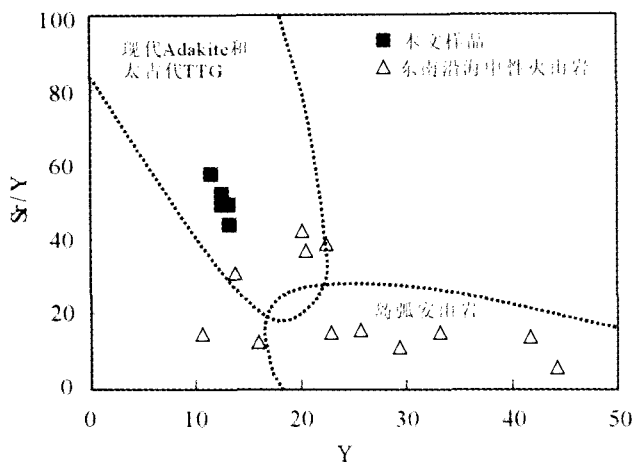


图4 Sr/Y对Y变化图(图例同图2)

Fig. 4 A yttrium ( $\mu\text{g/g}$ ) versus Sr/Y diagram of late Mesozoic adakitic andesites of Laocun Formation

本文劳村组埃达克质火山岩的 REE 含量总体上比前人报道的同类酸性火山岩低, 在球粒陨石标准化 REE 配分模式上为 LREE 相对富集的右倾型(图 5a), 与现代俯冲带埃达克岩基本相似。这些样品显示出弱的负 Eu 异常 ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.73 \sim 0.90$ ), 可能与源区斜长石的少量残留或斜长石的结晶分异有关。微量元素蛛网图总体上显示出富集大离子亲石元素(LILE, 如 Rb、Ba、K、Sr 等)和 Nd-Ta 亏损的特征(图 5b)。这些特征与区域上前人报道的中酸性火山岩在 Th-U、Zr、Hf 和 Sr 等元素上存在一定的区别。

#### 4.2 Sr 和 Nd 同位素组成

本文劳村组埃达克质火山岩的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7041 \sim 0.7043$ 、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 0.3 \sim 2.3$ , 相对原始硅质地球低放射成因 Sr 和高放射成因 Nd, 与现代埃达克岩的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i < 0.705$ 、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) > 0$  的同位素组成相似(Martin, 1999), 而明显不同于区域上中生代火山岩。已有的文献均报道浙江中生代火山岩  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  都大于 0.705 (0.70533 ~ 0.71208), 而且绝大多数大于 0.708, 除少量拉斑玄武岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  大于 0 外, 绝大多数小于 0, 且基本上  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) < -3.5$  (图 6) (王德滋和周新民, 2002; Lapierre *et al.*, 1997; 颜铁增等, 2005; 沈渭洲等, 1999; 杨祝良等, 1999; 谢昕等, 2001, 2003)。劳村组埃达克质火山岩的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  (0.7041 ~ 0.7043) 低于浦江地区劳村组和黄尖组的基性火山岩, 以及稍晚的江山基性火山岩(课题组未发表资料, 图 6)。依据 Sr、Nd 同位素组成(特别是埃达克质火山岩的低 Sr 同位素组成)可以基本排除劳村组中酸性埃达克质火山岩由类似于区域上的基性岩浆直接演化分异演化形成, 类似地, 基性岩浆受地壳混染成因的可能性非常小。但劳村组埃达克质火山岩的 Sr 和 Nd 同位素

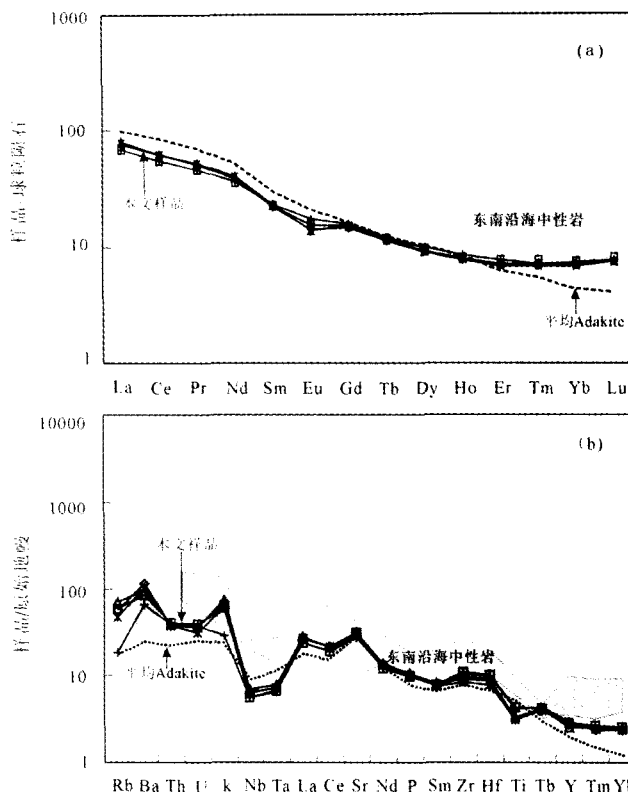


图5 浦江劳村组埃达克质火山岩的 REE 模式(a)和微量元素蛛网图(b)

球粒陨石和原始地幔标准化值分别引自 Taylor and McLennan (1985) 和 Sun and McDonough (1989)。资料来源: 东南沿海中性岩资料来自王德滋和周新民, 2002; Lapierre *et al.*, 1997。现代俯冲带平均 adakite 来自 Smithies (2000)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle (PM)-normalized spidergrams (b) of late Mesozoic adakitic andesites of Laocun Formation. Normalized values for chondrite are from Taylor and McLennan (1985) and for PM from Sun and McDonough (1989) respectively; Mean values of adakites in modern subduction zones are from Smithies (2000).

位于来自郴州—临武断裂以西扬子地块的中生代基性岩的范围中(Wang *et al.*, 2003; 见图 6), 可能暗示两者在成因上存在联系。

此外, 劳村组埃达克质火山岩的  $T_{\text{DM}}$  变化范围为 653 ~ 813 Ma, 相对区域上浙江中生代火山岩 1200 ~ 1945 Ma 的  $T_{\text{DM}}$  年龄明显年轻(Zhou and Li, 2000; Lapierre *et al.*, 1997; 颜铁增等, 2005; 沈渭洲等, 1999; 杨祝良等, 1999), 暗示本文劳村组埃达克质火山岩源区有较多来自亏损地幔岩浆或新生地壳的贡献。

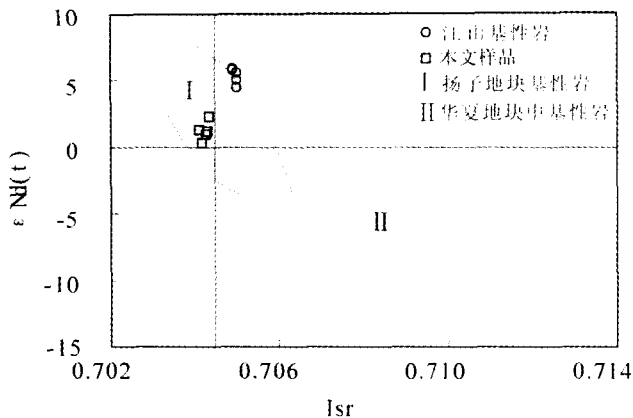


图6 劳村组埃达克质火山岩与区域中基性火山岩的Sr-Nd同位素变化

图中江山玄武岩为约90 Ma OIB型基性岩(课题组未发表数据); I 扬子地块 OIB + EM1 型基性岩(175 ~ 80Ma), 数据来自 Wang *et al.* (2003); II 东南沿海晚中生代中基性岩, 来自王德滋和周新民(2002)、Zhou *et al.* (2000)、Lapierre *et al.* (1997)、谢昕等(2001)、余心起等(2004)、颜铁增等(2005)

Fig. 6  $\epsilon_{Nd}(t)$  versus  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$  diagram for late Mesozoic adakitic andesites of Laocun Formation and the contemporaneous counterparts in the area and along the southeastern coast regions of China

## 5 岩浆成因讨论

综合前面的主、微量元素和同位素分析结果可以看出, 劳村组埃达克质火山岩与前人报道的浙江、福建一带的同类中酸性岩石具有不同的元素-同位素地球化学组成(王德滋和周新民, 2002; Lapierre *et al.*, 1997), 总体上显示出相似于现代俯冲带埃达克岩的特征(Defant and Drummond, 1990)。

埃达克岩最初定义为新生代俯冲带中由年轻而热的俯冲板片高压下发生部分熔融形成的一类富  $Al_2O_3$ 、 $Na_2O$  和高 Sr、低 Y 和 HREE 的中酸性岩石, 其源区的残留相包括辉石、石榴石、角闪石和金红石等(Defant and Drummond, 1990)。因此, 埃达克岩的产出指示年轻洋壳(或大洋中脊)消减带的存在。但随着对埃达克岩研究的不断发展, 非年轻大洋板片俯冲环境同样可以形成具有类似埃达克岩元素地球化学特征的岩石—adakitic 岩石(埃达克质岩, 包括 TTG)(Smithies, 2000; Martin, 1999; Xu *et al.*, 2000, 2002)。除新生代俯冲带中俯冲板片部分熔融的成因外, 这类岩石还可以由某些老洋壳(大于 40 Ma)俯冲过程中的部分熔融或地幔中残留消减板片的部分熔融形成, 或形成于与板片俯冲无关的碰撞造山带、大陆板内或活动大陆边缘等环境。总之, 埃达克质岩石是玄武质的源区岩石在相当于榴辉岩相的条件下发生部

分熔融形成的, 并在源区残留石榴石—角闪石等矿物, 因而这类岩石的发现及其成因对于理解地壳的结构、增生和再循环等深部过程具有一定的指示意义(肖龙等, 2004; Guo *et al.*, 2006)。

### 5.1 原生岩浆与演化或混染岩浆

本文劳村组埃达克质火山岩, 与区域上相同  $SiO_2$  的岩石相比, 其  $MgO$ (或  $Mg^{\#}$ )、 $Al_2O_3$  和 Sr 含量较高,  $Na_2O$  明显偏高,  $TiO_2$ 、 $P_2O_5$ 、HREE(Y, Yb)、Zr、Nb-Ta 等明显偏低。由于辉石、角闪石、斜长石等主要基性造岩矿物的结晶分异都难以导致岩浆中的 Sr、Sr/Y 高, HREE 低的特征(Atherton and Petford, 1993), 所以这些地球化学特征很可能反映的是源区特征, 或是受到混染的结果。

虽然本文样品的地球化学特征不能排除岩浆结晶分异的存在, 且还呈现出较弱的 Eu 负异常, 但其 Sr 仍为正异常, 岩石在岩相学上基本表现为隐晶质的结构特点, 说明岩浆在形成之后很可能以较快的方式喷发至地表。特别是该区处于拉张性断裂带部位, 较低的 Sr 同位素比值, 也反映原始岩浆并没有与地壳充分接触反应从而受到混染, 因而我们倾向于认为劳村组埃达克质火山岩总体上代表了初始岩浆的特点, 样品中表现出的弱 Eu 负异常很有可能为少量斜长石分离结晶的结果, 也可能是源区残留斜长石的结果, 二者之间目前仍难以区别。其次, 劳村组埃达克质火山岩较本区域晚中生代的浦江、江山玄武岩有更低的  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$ , 和类似的  $\epsilon_{Nd}(t)$ , 因此其成因难以用简单的幔源岩浆通过分离结晶作用或 AFC 过程来进行解释。事实上该组岩石低的  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$ (0.7041 ~ 0.7043)、较高的  $\epsilon_{Nd}(t)$ (0.3 ~ 2.3) 以及相对小的  $T_{DM}$  均明显表现出受地幔影响或有新增生地壳参与的亏损特征。

### 5.2 劳村组埃达克质火山岩的成因

本文劳村组埃达克质火山岩的  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t < 0.705$ ,  $\epsilon_{Nd}(t) > 0$ ,  $T_{DM}$  较小, 反映其源区存在相当比例的年轻地壳, 因此不排除洋壳俯冲熔融成因的可能性。但是, 产于新生代俯冲带的埃达克岩, 一般带有岩浆上升过程中受到地幔楔地幔混染的印记(fingerprints), 如  $Mg^{\#}$  增高和  $SiO_2$  减小。若以 Rapp and Watson(1995)熔融玄武岩的实验岩石数据受到二辉橄榄岩(Wilson, 1985)混染进行模拟计算, 60% 板片熔体与 40% 二辉橄榄岩反应将形成  $SiO_2$  约 60%, 但  $Mg^{\#}$  为 86 的熔体, 而 90% 板片熔体 + 10% 二辉橄榄岩将产生  $SiO_2$  约 67%,  $Mg^{\#}$  为 67 的岩浆(Stern *et al.*, 1996)。本文埃达克质火山岩的  $Mg^{\#}$  变化在 44 ~ 49,  $SiO_2$  变化在 57.6% ~ 62.6% 之间, 与新生代俯冲环境下形成的相同  $SiO_2$  埃达克岩的  $Mg^{\#}$  指数相比, 其  $Mg^{\#}$  指数仍明显偏低。来自中生代镁铁质岩浆的研究显示本区自中生代早期(175 Ma)至晚期(80 ~ 90 Ma)

岩石圈一直处于伸展减薄的拉张构造背景(Li, 2000; Li *et al.*, 2004; 范蔚茗等, 2003; Wang *et al.*, 2003, 2005)。在晚中生代期间,东南沿海地区并不存在年轻且热的大洋中脊俯冲作用,难以发现俯冲板片熔融成因的直接证据。

从劳村组埃达克质火山岩与本地区、区域上中基性岩的对比可以得出,该组岩石不太可能是幔源基性岩浆与地壳混合的结果,而更可能代表地壳重熔的初始岩浆,很可能是新增生玄武质地壳部分熔融的结果,而与洋壳俯冲作用关系不大。其初始岩浆从 Sr、Nd 同位素组成与扬子地块中生代玄武岩的亲缘性(图 6),也可能说明这种新生的玄武质地壳类似扬子地块的同期由 OIB + EMI 组成的玄武质岩石。

近年的研究表明,东南沿海在晚中生代时期处于拉张、岩石圈伸展/减薄的动力学环境,浦江恰位于扬子地块与华夏地块的接洽部位的江绍断裂带上,位于 Gilder *et al.* (1996) 识别出的、中生代岩石圈伸展引起的高  $\epsilon_{Nd}(t)$ 、低  $T_{DM}$  特征的“十杭带”的北东端,也就是说晚中生代时该区是有利于软流圈地幔上涌的构造活动带。浦江附近的江山(同处于江绍断裂带)存在的晚中生代 OIB 型玄武岩或安山质玄武岩(课题组未发表数据),本组埃达克质岩的低 ( $^{87}Sr/^{86}Sr$ )<sub>i</sub>、高  $\epsilon_{Nd}(t)$  的特征和低  $T_{DM}$  年龄也反映了岩浆源区有亏损地幔组分的参与。

从前面的分析可以看出,底侵玄武岩浆或其与下地壳的混合源区能够熔融形成具有埃达克岩特征的中酸性岩浆。劳村组埃达克质火山岩中 Eu 的弱负异常和相对较低的 Sr 含量很可能反映其源区残留相不但有类似现代埃达克岩浆之源区残留相中富集 MREE 和 HREE 的角闪石和石榴石,还含有一定比例的残留斜长石。这样的源区残留相组合部分熔融的温压条件为 800 ~ 1000°C, 压力为 0.9 ~ 1.3 GPa, 相当于 30 ~ 45 km(葛小月等, 2002)。

### 5.3 地球动力学意义

尽管本文劳村组埃达克质火山岩的主微量元素地球化学特征与新生代俯冲带形成的埃达克岩类似,但埃达克岩的年轻且热的俯冲板片部分熔融成因机制难以解释本文劳村组埃达克质火山岩的成因。近几年一些研究者在我国东部晚中生代火山岩中发现类似的埃达克质安山岩和英安岩(肖龙等, 2004; 张旗等, 2001; 王强等, 2002; 高晓峰等, 2005), 这些岩石的成因与大洋板块的俯冲作用无直接动力学联系。已有的证据表明,晚中生代时期东南沿海处于岩石圈伸展减薄、软流圈上涌的拉张环境,从而导致了区域上大规模的岩浆活动。从湖南、赣南的中晚中生代玄武岩来看,岩石圈伸展减薄过程中,富集的岩石圈地幔发生熔融,形成 EMI 和 EMII 玄武岩浆,在伸展/减薄强烈部位,如深大断裂带区域,软流圈上涌可产生减压熔融形成 MORB 或 OIB 型岩浆。这些岩浆侵位底垫于下地壳,部分侵位于地壳浅部或喷出地表(范蔚茗等, 2003; Wang *et al.*, 2003, 2005; Li,

2000; Li *et al.*, 2004), 这些亏损幔源岩浆的加入导致沿着一些岩石圈断裂带发生了地壳增生作用。劳村组埃达克质火山岩很可能就是形成于这样的地球动力学背景下,在源自软流圈地幔热的作用下,新增生的地壳再次发生部分熔融,并残留石榴石、角闪石或辉石能及少量的斜长石,形成富  $Al_2O_3$ 、 $Na_2O$ 、高 Sr 和低 HREE 和 Y 的埃达克质岩浆。劳村组埃达克质火山岩的低 ( $^{87}Sr/^{86}Sr$ )<sub>i</sub> 和高  $\epsilon_{Nd}(t)$  的同位素组成也显示新增生地壳的重要贡献,并与区域上发现的中生代高  $\epsilon_{Nd}$  和低  $T_{DM}$  “十杭带”相吻合,这些具有类似埃达克岩特征的中酸性火山岩的形成与区域上地壳增生作用有直接的动力学联系(Gilder *et al.*, 1996; 陈江峰等, 1999), 形成过程示意图见图 7。

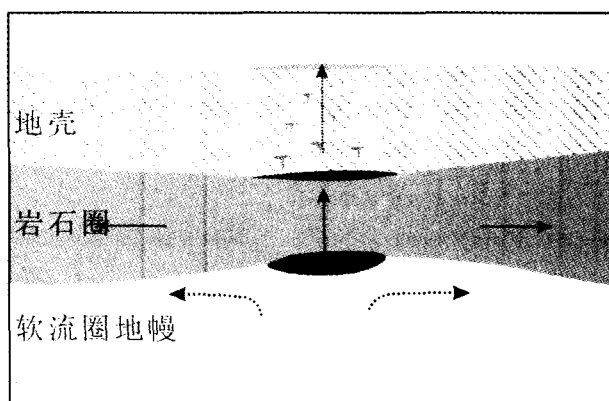


图 7 浦江劳村组埃达克质火山岩在岩石圈伸展/减薄机制中形成示意图

Fig. 7 Sketch map for generation of late Mesozoic adakitic rocks in extensional regime from Laocun Formation at Pujiang, Zhejiang province

致谢 本论文的研究得到中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-SW-117 和 GIGCX-04-04), 中国科学院边缘海地质重点实验室项目(MSGLCAS03-3)的共同资助。张旗研究员和另一位匿名审稿人的宝贵评审意见对论文的最终定稿提供了重要帮助,在此表示感谢!

### References

- Atherton MP, Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362 (11):144 - 146
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Zhejiang Province. 1996. Lithostratigraphy of Zhejiang Province. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese)
- Chen JF, Jahn BM. 1999. Nd-Sr-Pb isotope tracer and continental crust evolution in SE China. In: Zheng Y F ed. *Chemical Geodynamics*. Beijing: Science Press: 262 - 287 (in Chinese)
- Defant MJ, Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347:662 - 665



- Fan WM, Wang YJ, Guo F, Peng TP. 2003. Mesozoic mafic magmatism in Hunan-Jiangxi Provinces and the lithospheric extension. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 159 - 169 (in Chinese with English abstract)
- Gao XF, Guo F, Fan WM, Li CW, Li XY. 2005. Origin of late Mesozoic intermediate-felsic volcanic rocks from the northern Da Hinggan Mountain NE China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 737 - 748 (in Chinese with English abstract)
- Ge XY, Li XH, Chen ZG *et al.* 2002. The geochemical characteristics and petrogenesis of Yanshanian high Sr and low Y type intermediate-acid igneous rocks in eastern China; constraints on the thickness of crust in eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 47(6): 474 - 480 (in Chinese)
- Gilder SA, Gill J, Coe RS, Zhao X, Liu Z, Wang G, Yuan K, Liu W, Kuang G, Wu H. 1996. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of South China. *J. Geophys. Res.* 101: 16137 - 16154
- Guo F, Fan WM, Li CW. 2006. Geochemistry of late Mesozoic adakites from the Sulu belt, eastern China; magma genesis and implications for crustal recycling beneath continental collisional orogens. *Geological Magazine*, 143(1): 1 - 13
- Lapierre H, Jahn B M, Charvet J, Yu Y W. 1997. Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiites in Zhejiang Province and their relationship with the tectonic activity in southeastern China. *Tectonophysics*, 274: 321 - 338
- Li XH, Chung SL, Zhou HW, Lo CH, Liu Y, Chen CH. 2004. Jurassic intraplate magmatism in southern Hunan-eastern Guangxi:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating, geochemistry, Sr-Nd isotopes and implications for the tectonic evolution of SE China. In: Malpas J, *et al.* eds. *Aspects of tectonic evolution of China*. Geological Society, London, Special Publications, 226: 193 - 215
- Li XH, Hu RZ, Rao B. 1997. Geochronology and geochemistry of Cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China. *Geochimica*, 26(2): 14 - 31 (in Chinese with English abstract)
- Li XH. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China. *J of Asian Earth Sciences*, 18: 293 - 305
- Liu Y, Liu H C, Li XH. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS. *Geochimica*, 25(6): 552 - 558 (in Chinese with English abstract)
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46: 411 - 429
- Rapp RP, Watson EB. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8 - 32 kbar; implications for continental growth and crust-mantle recycling. *J. Petrol.*, 36: 891 - 931
- Shen WZ, Ling HF, Wang DZ, Xu BT, Yu YW. 1999. Study on Nd - Sr isotopes of Mesozoic igneous rocks in Zhejiang, China. *Scientia Geologica Sinica*, 34(2): 223 - 232 (in Chinese with English abstract)
- Smithies RH. 2000. The Achaean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakites. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 182(1): 115 - 125
- Stern CR, Kilian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 123: 263 - 281
- Wang DZ, Zhou XM. 2002. Genesis of Late Mesozoic Granitic Volcanic-intrusive Complex and Crust Evolution in Southeastern China. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Wang Q, Zhao ZH, Xu JF, Li XH, Bao ZW, Xiong X L, Liu Y M. 2002. Petrogenesis and metallogenesis of the Yanshanian adakitelike rocks in the Eastern Yangtze Block. *Science in China (D)*, 32 (Supplement): 127 - 136 (in Chinese with English abstract)
- Wang YJ, Fan WM, Guo F, Peng TP, Li CW. 2003. Geochemistry of Mesozoic Mafic Rocks Adjacent to the Chenzhou-Linwu Fault, South China: Implication for the Lithospheric Boundary between the Yangtze and Cathaysia Blocks. *International Geology Review*, 45: 263 - 286
- Wang YJ, Fan WM, Peng TP, Guo F. 2005. Elemental and Sr Nd isotopic systematics of the early Mesozoic volcanic sequence in southern Jiangxi Province, South China; petrogenesis and tectonic implications. *Inter. J. Earth Sci.*, 94: 52 - 65
- Wilson M. 1985. *Igneous Petrogenesis*. London: UNWIN HYMAN
- Xiao L, Rapp RP and Xu JF. 2004. The role of deep processes controls on variation of compositions of adakitic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 219 - 228 (in Chinese with English abstract)
- Xie X, Xu XS, Xing GF, Zou H B. 2003. Geochemistry and genesis of early Cretaceous volcanic assemblages in eastern Zhejiang. *Acta Petrologica Sinica*, 19: 385 - 398 (in Chinese with English abstract)
- Xie X, Xu XS, Zou HB, Xing GF. 2001. Trace element and Nd-Sr-Pb isotope studies of Mesozoic and Cenozoic basalts in coastal area of SE China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 617 - 628 (in Chinese with English abstract)
- Xu JF, Wang Q, Yu XY. 2000. Derivation of high Mg andesites and adakitic andesite from the Sanchzi block of the Mian-Lue ophiolitic m lunge in the Qinling Mountains, Central China: Evidence of partial melting of the subducted Paleo-Tethyan crust. *Geochemical J*, 34: 359 - 377
- Yan TZ, Yu YW, Chen JF, Xu XM, Wang JG, Cai ZH, Dong YH. 2005. Nd-Sr isotope features of Cretaceous volcanic rocks in northwestern Zhejiang. *Chinese Geology*, 32(3): 417 - 423 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZL, Shen WZ, Tao KY, Shen JL. 1999. Sr-Nd and Pb isotopic characteristics of early Cretaceous basaltic rocks from the coast of Zhejiang and Fujian: Evidence for ancient enriched mantle source. *Scientia Geologica Sinica*, 34(1): 59 - 68 (in Chinese with English abstract)
- Yu XQ, Shu LS, Yan TZ, Yu YW, Zu FP, Wang B. 2004. Geochemistry of basalts of late period of Early Cretaceous from Jiangshan-Guangfeng, SE China and its tectonic significance. *Geochimica*, 33(5): 465 - 477 (in Chinese with English abstract)
- Yu Y W, Xu B T. 1999. Stratigraphical sequence and geochronology of the upper Mesozoic volcano-sedimentary rock series in Zhejiang. *Journal of Stratigraphy*, 23(2): 136 - 145 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Qian Q, Wang EC, Wang Y, Zhao TP, Hao J, Guo GG. 2001. An east China plateau in mid-late Yanshanian period: Implication from adakites. *Scientia Geologica Sinica*, 17(2): 236 - 244 (in Chinese with English abstract)
- Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implication for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326: 269 - 287

#### 附中文参考文献

- 陈江峰, 江博明. 1999. Nd-Sr-Pb 同位素示踪和中国东南大陆地壳演化. 见: 郑永飞主编. 化学地球动力学. 北京: 科学出版社. 262 - 287
- 范蔚茗, 王岳军, 郭锋等. 2003. 湘赣地区中生代镁铁质岩浆作用与岩石圈伸展. *地学前缘*, 10(3): 159 - 169
- 高晓峰, 郭锋, 范蔚茗等. 2005. 南兴安岭晚中生代中酸性火山岩的岩石成因. *岩石学报*, 21(3): 737 - 748
- 葛小月, 李献华, 陈志刚等. 2002. 中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩的地球化学特征及成因: 对中国东部地壳厚度的制约. *科学通报*, 47(6): 474 - 480
- 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 1997. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化

- 学. 地球化学, 26(2): 14-31
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 多种微量元素. 地球化学, 25(6): 552-558
- 沈渭洲, 凌洪飞, 王德滋等. 1999. 浙江省中生代火成岩的 Nd-Sr 同位素研究. 地质科学, 34(2): 223-232
- 王德滋, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代花岗质火山-侵入杂岩成因与地壳演化. 北京: 科学出版社
- 王强, 赵振华, 许继峰等. 2002. 扬子地块东部燕山期埃达克质(adakite 质安山)岩与成矿. 中国科学(D 辑), 32(增刊): 127-136
- 肖龙, Robert P RAPP, 许继峰. 2004. 深部过程对埃达克质岩石成分的制约. 岩石学报, 20(2): 219-228
- 谢昕, 徐夕生, 邢光福等. 2003. 浙东早白垩世火山岩组合的地球化学及其成因研究. 岩石学报, 19: 385-398
- 谢昕, 徐夕生, 邹海波等. 2001. 中国东南沿海中-新生代玄武岩微量元素和 Nd-Sr-Pb 同位素研究. 岩石学报, 17(4): 617-628
- 颜铁增, 俞云文, 陈江峰等. 2005. 浙江省西北部白垩纪火山岩 Nd-Sr 同位素特征. 中国地质, 32(3): 417-423
- 杨祝良, 沈渭洲, 陶奎元等. 1999. 浙闽沿海早白垩世玄武岩锶、钕、铅同位素特征. 地质科学, 34(1): 59-68
- 余心起, 舒良树, 颜铁增. 2004. 江山-广丰地区早白垩世晚期玄武岩的岩石地球化学及其构造意义. 地球化学, 33(5): 465-477
- 俞云文, 徐步台. 1999. 浙江中生代晚期火山沉积岩系层序和时代. 地层学杂志, 23(2): 136-145
- 张旗, 钱青, 王二七等. 2001. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示. 地质科学, 36(2): 248-255
- 张旗, 王焰, 钱青等. 2001. 中国东部中生代埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. 岩石学报, 17(2): 236-244
- 浙江省地质矿产局. 1996. 浙江省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社