

闽东南基性岩脉成因及动力学背景研究： Sr-Nd 同位素、元素地球化学*

张贵山^{1,2} 温汉捷² 胡瑞忠² 裘愉卓² 许成²

ZHANG GuiShan^{1,2}, WEN HanJie², HU RuiZhong², QIU YuZhuo² and XU Cheng²

1. 长安大学地球科学与国土资源学院, 西安 710054

2. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002

1. College of Earth Science and Land Resources, Xi'an 710054, China

2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2006-05-28 收稿, 2006-11-10 改回。

Zhang GS, Wen HJ, Hu RZ, Qiu YZ and Xu C. 2007. Genesis and dynamic setting of mafic dikes in southeastern Fujian: evidence from Sr-Nd isotopic and major and trace element geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 23(4):793-804

Abstract In southeastern Fujian, the Haibian spessartite dike and Chihu gabbro dike emplaced at late Cretaceous and Paleocene, respectively, are high-K calcalkali and calcalkali rocks. They are characterized by high Al content and $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, and possibly formed by fractional crystallization of olivine and clinopyroxene. The mafic dikes show enrichment in LILE (such as K, Rb, Ba, Sr, Th) and LREE, depletion in HFSE (such as Nb, Ta, and Ti). In primary-mantle-normalized spidergram, they have the feature of continental marginal arc and negative anomalies of Ta, Nb and Ti. Chondrite-normalized REE patterns for the mafic dikes are LREE enrichment ($\text{La}/\text{Ybn} = 5.0 \sim 10.9$ and $11.2 \sim 12.0$ for Haibian and Chihu, respectively). They are characterized by high initial Sr isotopes (Haibian: $0.70577 \sim 0.70574$; Chihu: $0.70547 \sim 0.70552$) and low $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (Haibian: $-8.1 \sim -1.8$; Chihu: $-0.2 \sim 0.6$). According to the Sr-Nd isotopic and trace element characteristics and field observation, the mafic dikes are not affected by crustal material during emplacement. Their mantle source may be related with subduction of the Pacific plate, and mixed by normal mantle wedge and oceanic and terrigenous deposits. This results in enrichment of LILE and LREE. The Haibian and Chihu dikes formed extensional continental margin or rifting environment. From late Cretaceous and Paleocene, the crustal extension may happen at southeastern Fujian, which is consistent with the tectonic setting of southeastern China.

Key words Sr-Nd isotopes, Mantle source, Crustal extension, Mafic dikes, Southeastern Fujian

摘要 闽东南的海边斜闪煌斑岩脉和赤湖辉长岩脉分别形成于晚白垩世和古新世,为高钾钙碱性和钙碱性系列岩石,具有高Al、 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ 的特征;岩浆演化过程中可能经历了以橄榄石、单斜辉石为主的结晶分异作用。海边和赤湖基性岩脉具有相对富集大离子亲石元素和轻稀土元素,亏损高强度元素特征,不相容元素蛛网图显示出大陆边缘弧的地球化学特征,以Nb、Ta、Ti负异常为特征;海边和赤湖明显富集轻稀土元素, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 分别为5.0~10.9和11.2~12.0。具有高Sr同位素初始值和低 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,海边的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$: 0.70577~0.70574, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$: -8.1~-1.8,赤湖的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$: 0.70547~0.70552, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$: -0.2~0.6。根据Sr、Nd同位素、微量元素研究及野外地质观察,本区基性岩脉的岩浆在上升侵位过程中未发生地壳物质混染。通过Sr、Nd同位素和微量元素等研究,认为地幔源区的演化与古太平洋板块俯冲密切相关,俯冲流体交代地幔楔、消减洋壳携带的海洋与陆源沉积物参与地幔源区的混合,形成本区基性岩脉的富集地幔源区,大离子亲石元素和轻稀土元素特别富集是俯冲流体与沉积物共同参与源区演化的结果。海边和赤湖基性岩脉形成的构造背景属于活动大陆边缘弧,构造性质应为活动陆缘拉张带(或裂谷带)。晚白垩世和古新世,闽东南发生了地壳拉张事件,与中国东南部晚白垩世以来的地壳拉张期次是一致的。

关键词 Sr-Nd同位素;地幔源区;地壳拉张;基性岩脉;闽东南

中图法分类号 P588.136; P597.3

* 中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-125, KZCX2-102)资助。

第一作者简介:张贵山,男,1971年生,博士,讲师,从事岩石地球化学、矿床地球化学的研究, E-mail: zhangguishan1@sina.com; zygszh@chd.edu.cn

幔源基性岩脉是深部热-动力作用在地表的重要表现形式(邵济安等,2003),起源于地幔的基性岩浆充填先存破裂或区域性节理形成的,是岩石圈伸展和地壳拉张的产物,其对研究深部地幔性质和大陆动力学演化具有重要的指示意义(Weaver *et al.*,1981; Hoek *et al.*,1995)。因此,基性岩脉(岩墙群)已经成为国内外地质学界研究的热点(Halls, 1988; Hoek *et al.*,1995; Ernst, *et al.*,2000; Lenoir *et al.*,2003; 李献华等,1997; 张成立等,1999; 邵济安等,2003)。中国东南部普遍发育晚中生代基性岩脉(李献华等,1997; 谢桂青等,2002; 葛小月等,2003),但福建地区研究报道的较少(Lan *et al.*,1995; 张贵山等,2004)。中国东南部晚中生代火成岩成因与大地构造背景存在不同的认识:一些学者认为是阿尔卑斯型的大陆碰撞模式(Hsü *et al.*,1990),另部分观点为与古太平洋板块俯冲有关的活动大陆边缘(Holloway *et al.* 1982; Jahn *et al.*,1990; Zhou and Li,2000)和大陆伸展-裂谷模式(Gilder *et al.*,1996; Li *et al.*,2000),类似于盆岭构造。中国东南部岩石圈地幔的性质也存在富集与亏损的争论,有学者认为中国东南部岩石圈一直处于长期亏损的状态(黄萱等,1986; 李献华等,1997; Lapmre *et al.*,1997),更多学者认为是富集地幔(杨祝良等,1999; 章邦栋等,2004)。基性岩脉的侵入标志着中国东南部构造演化进入了一个重要的阶段,正确认识基性岩脉的成因及动力学背景对于揭示华南大陆岩石圈作用和构造演化格局都有着重要的意义,因此,闽东南基性岩脉的研究无疑将为探讨东南部大陆岩石圈性质、结构与动力学演化及地壳拉张等科学问题提供有力的依据。本文将主要从岩石学、地球化学和 Sr-Nd 同位素方面着重讨论闽东南基性岩脉成因、源区性质和构造背景。通过对闽东南基性岩脉的研究,将对福建及中国东南部晚中生代的岩石圈地幔性质和动力学演化做初步探讨。

1 地质概况

1.1 区域地质背景

中国东南部大陆主要由早、中元古代基底、古生代沉积盖层和中生代的火山沉积岩组成,并被大量的花岗岩所侵入;政和-大埔和长乐-南澳断裂带是东南沿海重要的构造体系,前者是华南加里东褶皱带和东南沿海褶皱带的分界线(Li *et al.*,1996),也是晚中生代 I 型和 S 型火成岩的分界线(王德兹等,2002);长乐-南澳断裂带是东南沿海晚中生代岩浆作用、变质作用和变形作用控制带(王德兹等,2002),对东南沿海晚中生代的岩浆活动产生深远的影响。区域上闽东南位于晚中生代浙闽岩浆活动带的南端,广泛发育高钾钙碱性系列的酸性火山岩和花岗岩,基性侵入岩和玄武岩出露面积小,缺少中性岩石,空间上酸性岩与基性岩组成复合岩流(玄武岩-流纹岩)和复合岩体(辉长岩-花岗岩)(如:云山-石牛山火山岩、漳州岩体和泉州岩体),火山喷发与岩浆侵入主要集中在 120~90Ma(王德兹等,2002)。

工作区位于闽东南的漳浦县赤湖镇和东山县东山岛[图 1],恰在东南沿海晚中生代的火成岩带和变质变形带内。本区出露的侵入岩为侏罗纪和早、晚白垩世的花岗岩类,以晚侏罗世和白垩纪花岗岩体为主;地层为侏罗系火山岩沉积地层、第三系佛昙组和第四纪地层以及零星出露前泥盆系澳角群(Andy)地层。侏罗系火山岩沉积地层中产动植物化石及孢粉;佛昙组地层中产被子植物花粉;澳角群地层发生强烈变质作用,地层层序非常复杂,澳角群可能是中国东南部沿海的基底地层。区内侏罗纪的花岗岩和流纹岩都已经遭受不同程度的变质变形作用,白垩纪的岩浆岩基本上未发生变质作用。

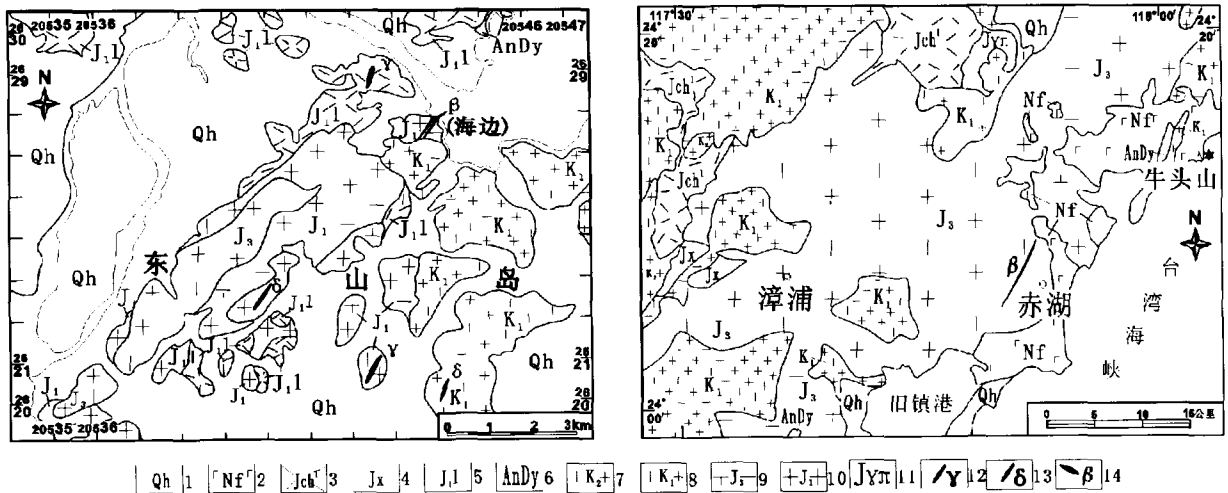


图 1 东山海边(据 1:5 万东山县幅地质图修改)和漳浦赤湖(据 1998 年福建省 1:50 万地质图修改)地区地质图
1-全统统;2-佛昙组;3-赤水组;4-下渡组;5-梨山组;6-澳角群;7-晚白垩世花岗岩;8-早白垩世花岗岩;9-晚侏罗世花岗岩;10-早侏罗世花岗岩;11-侏罗纪花岗岩斑岩;12-细粒花岗岩脉;13-闪长岩脉;14-基性岩脉

Fig. 1 Geological sketch map in Haibian and Chihu of southeast Fujian

1.2 脉岩地质概况与岩石学特征

东山基性岩脉出露于东山岛靠海一侧, 侵位在早侏罗世中细粒花岗闪长岩体中, 花岗岩体发生强烈变质和变形作用, 岩体中发育被石英填充的小型揉皱, 揉皱尖端的方向大致与岩脉的走向一致。东山海边基性岩脉由两条单脉组成, 脉体间隔 ~5m, 单条岩脉厚度约 20 ~ 30cm, 两条岩脉平行排列, 走向均为 NE35°, 近于直立, 几乎在同一位置两岩脉发生左旋错动现象, 被错开的脉体的产状未发生变化, 推测在基性岩浆贯入之前, 区域应力场中存在两种性质不同的应力, 两种应力共同作用下形成如今岩脉的形状。全岩 K-Ar 法测定岩脉的年龄为: 83.9Ma^①。脉岩由斑晶和基质组成, 斑晶由斜长石、角闪石和橄榄石构成, 基质由微粒状角闪石、斜长石组成, 矿物总体含量(斑晶+基质): 角闪石(55%)、斜长石(36%)、橄榄石(5%)和副矿物(<4%)的磁铁矿与黄铁矿等; 斑晶和基质均呈自形晶, 典型煌斑结构, 块状构造, 矿物均发生未蚀变, 为斜闪煌斑岩。

漳浦赤湖基性岩脉位于赤湖镇的西北方向约 500m 处, 侵位于晚侏罗世的中细粒钾长花岗岩体中, 岩体的侵入时代为 148Ma^②。脉宽约 7 ~ 10m, 最宽处约 20m, 脉体长约 ~6km, 走向为 NE30°, 近于直立, 左行错断现象发育, 暗示区域上曾经发生脆性剪切作用。围岩中发育与主岩脉相连的派生细小岩脉, 与主岩脉夹角小于 45°, 指示基性岩脉形成之前的破裂是拉张与剪切应力共同作用的产物。岩脉与围岩界线清晰, 与岩脉接触的围岩呈灰白色, 表明发生烘烤作用, 暗示基性岩浆上升速度比较快。全岩 K-Ar 测定岩脉的年龄为: 57.8Ma^①。赤湖基性岩脉的岩石主要由斜长石(85%)、辉石(10%)组成, 斜长石呈自形-半自形, 斜长石均为拉长石(An > 50%), 辉石为半自形-它形, 次要矿物为绿泥石(2%), 副矿物为磷灰石(<1%)和磁铁矿、黄铁矿(3%), 辉长结构, 块状构造, 为辉长岩。

2 样品分析方法

挑选新鲜的岩石样品进行主量元素、微量元素与稀土元素分析。主量元素分析在中国科学院地球化学研究所分析测试中心完成, 采用常规湿化学方法分析, 分析的误差优于 5%。微量元素和稀土元素在中国科学院地球化学研究所的 Finnigan MAT 公司 ELEMENT 型高分辨率等离子质谱仪(ICP-MS)上进行测试, 方法及流程参考文献(Qi *et al.*, 2000), 测试过程中插入 USGS 标准样品 BCR-1(玄武岩)和 W-2(辉绿岩)进行分析监控, 分析结果(见表 1), 与标样推荐值对比分析, 多数的元素分析数值误差小于 5%, 少数元素的误差在 5% ~ 10%, 只有元素(Sr(BCR-1)、Tm(W-2))的误差较大, 超过 10%。分析结果见表 1。

在薄片鉴定和地球化学测试数据初步研究的基础上, 选择新鲜、具有代表性的全岩样品供同位素分析, 样品研磨成

<200 目。样品的 Rb、Sr、Sm、Nd 含量及其同位素的化学分离与质谱测定均在南京大学质谱实验室的 VG354 同位素质谱仪上完成, 方法与流程参考文献(王银喜等, 1988)。实验过程测定 Nd 同位素的 BCR-1 标样中¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512645 ± 8(2σ), 测定 Nd 同位素的美国 La Jolla 标样中¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.511860 ± 3(2σ), 标准化值采用¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219, Nd 的全实验流程本底为(5 ~ 7) × 10⁻¹¹g, Sm、Nd 含量的分析误差优于 0.5%, ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 的分析误差(2σ)为 0.2%。实验过程测定 Sr 同位素的 NBS-987 标样中⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.710236 ± 7(2σ), 测定 Sr 同位素的 BBS-607 长石标样中⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 1.199987 ± 9(2σ), 标准化值采用⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.1194, Sr 的全实验流程本底为(1 ~ 2) × 10⁻⁹g, Rb、Sr 含量分析误差优于 0.5%, ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 的分析误差(2σ)为 0.2%。分析结果见表 2。

3 地球化学特征

3.1 岩石化学

海边和赤湖基性岩脉的主元素见表 1, 海边斜闪煌斑岩脉的 SiO₂ 含量在 50.74% ~ 53.84%, 赤湖辉长岩脉的 SiO₂ 含量在 50.87% ~ 51.28% 之间, 扣除烧失量换算成 100% 后投到 TAS 全碱图(Le Maitre, 1989)上(图 2a), 海边的样品分别落在玄武岩和玄武安山岩的区域内, 赤湖的样品点落在玄武质区域内, 两者属于基性岩范畴, 样品均在 Ir 线下方(Irvine, 1971), 为亚碱性岩石系列。亚碱性火成岩系列可以按 SiO₂-K₂O 图解进一步分类(图 2b)(Ewart A, 1982), 两个地区的样品点落在高钾钙碱性系列与钙碱性系列区域内。海边的斜闪煌斑岩脉的 Na₂O + K₂O 含量在 3.75% ~ 5.34%, K₂O/Na₂O = 0.41 ~ 0.67; 赤湖辉长岩脉的 Na₂O + K₂O 含量在 3.65% ~ 4.11% 之间, K₂O/Na₂O = 0.54 ~ 0.64; 两个地区的岩脉都具有较高的 Al₂O₃ 含量, 海边斜闪煌斑岩脉的为 15.92% ~ 21.65%, 赤湖的为 19.05% ~ 20.71%, 和岩相学观察到普遍发育的钙质斜长石现象相符, 与闽浙地区中生代的基性火成岩高铝特征类似; 海边的 TiO₂ 在 0.70% ~ 1.49%, MgO 的含量为 3.72% ~ 7.49%, CaO 含量在 8.12% ~ 10.10%; 赤湖的 TiO₂ 含量在 1.32% ~ 1.65%, MgO 的含量在 4.27% ~ 5.04%, CaO 含量在 9.64% ~ 11.22%。如图 3 显示, MgO 与 SiO₂、Al₂O₃、Na₂O + K₂O 呈负相关关系, 与 CaO、Ni、Cr 呈正相关关系, 反映在岩浆演化过程中曾发生橄榄石、单斜辉石、斜长石的分离结晶作用; MgO 与 TFe、TiO₂ 呈正相关关系, 暗示在岩浆演化过程中, 存在 Ti-Fe 氧化物矿物分离结晶作用。CaO/Al₂O₃ 与 CaO 呈非常好的正相关关系, 也反映了岩浆形成过程中曾经发生单斜辉

① 作者未发表数据

② 1:50 万福建省地质图说明书, 福建省地质矿产勘查开发局, 1998, 43 ~ 77。

表1 闽东南基性岩脉的岩石化学分析结果(%)与微量元素分析结果(μg/g)

Table 1 Analytical data of chemical compositions (%) and trace element compositions (μg/g) of mafic dikes in southeast Fujian

样品	HB-1	HB-2	HB-3	HB-4	HB-5	HB-6	CH-1	CH-2	CH-3	CH-4	CH-5	BCR-1	W-2
SiO ₂	53.61	50.74	51.37	50.96	53.13	53.84	50.00	49.75	50.1	49.74	49.77	—	—
TiO ₂	0.88	0.70	1.49	1.01	1.39	1.09	1.61	1.47	1.52	1.73	1.29	—	—
Al ₂ O ₃	15.92	16.29	21.65	16.39	21.35	17.89	18.64	18.94	20.24	19.78	18.96	—	—
Fe ₂ O ₃	1.87	2.79	2.39	2.29	2.73	3.23	2.81	2.08	1.94	2.15	1.92	—	—
FeO	4.88	4.78	5.29	6.34	4.2	5.02	6.58	6.44	5.95	5.88	5.72	—	—
MnO	0.18	0.14	0.13	0.15	0.14	0.14	0.16	0.17	0.17	0.16	0.17	—	—
MgO	7.06	7.49	3.94	6.99	3.72	4.24	4.53	4.38	4.29	4.36	4.93	—	—
CaO	8.12	10.10	8.72	9.14	8.80	8.43	9.62	10.26	9.42	9.97	10.97	—	—
Na ₂ O	3.33	2.70	2.41	2.60	2.24	3.25	2.41	2.45	2.38	2.40	2.31	—	—
K ₂ O	2.01	1.11	1.54	1.65	1.51	1.56	1.30	1.57	1.41	1.30	1.26	—	—
P ₂ O ₅	0.22	0.15	0.048	0.34	0.043	0.44	0.044	0.044	0.042	0.042	0.045	—	—
H ₂ O ⁻	0.30	0.26	—	0.27	—	0.20	—	—	—	—	—	—	—
烧失量	1.90	2.14	0.64	1.28	0.61	0.58	2.18	2.24	2.32	2.23	2.23	—	—
总计	100.28	99.39	99.62	99.41	99.86	99.91	99.88	99.79	99.78	99.74	99.58	—	—
Mg [#]	66	65	49	60	50	49	47	48	50	50	54	—	—
Sc	29.6	26.6	18.7	24.2	19.0	19.6	19.7	17.9	18.9	18.8	19.1	29.1	33.8
V	215	182	189	196	203	203	205	198	203	202	201	392	276
Cr	317	611	10.5	294	17.5	47	46	56	32	42	49	7.4	88
Co	34	35	22	32	24	24	32	32	31	32	36	36	44
Ni	98	185	17.1	113	20	31	76	70	59	63	81	13	70
Rb	72	74	125	72	104	92	26	34	32	27	26	46	19.5
Ba	214	201	471	543	506	586	617	831	706	609	656	636	176
Sr	498	427	655	644	737	795	767	752	759	806	715	274	184
Th	2.68	2.49	4.36	5.67	4.38	3.82	3.62	3.51	3.66	3.83	3.57	6.03	2.16
U	0.67	0.66	2.06	1.34	1.25	1.21	0.70	0.70	0.71	0.75	0.68	1.74	0.51
Pb	—	—	36	—	29	—	21	25	21	29	27	13.8	8.82
Nb	7.3	3.55	8.2	7.8	7.7	7.3	12.9	12.5	14.0	12.9	12.4	12.9	7.66
Ta	0.417	0.219	0.448	0.418	0.416	0.431	0.69	0.69	0.78	0.69	0.66	0.79	0.45
Zr	93	81	165	152	163	154	195	198	207	208	189	179	89
Hf	2.34	2.10	4.02	3.64	4.01	3.59	4.34	4.34	4.73	4.54	4.13	4.85	2.45
Y	19.8	18.2	21.0	20.7	28.4	26.9	24.5	23.7	25.6	24.8	23.0	36.2	21.4
La	13.5	11.9	21.3	28	32	23.6	38	37	41	40	38	26	10.6
Ce	27	23	53	56	64	47	83	81	88	86	80	55	24.4
Pr	3.31	2.96	6.78	6.73	7.87	6.08	9.7	9.5	10.3	9.9	9.4	6.77	2.91
Nd	14.4	12.9	29	27	31	26	38	38	40	39	37	28	12.6
Sm	3.27	2.86	5.82	5.45	6.18	5.52	7.19	6.78	7.53	7.33	6.60	6.41	3.03
Eu	0.97	0.97	1.72	1.54	1.84	1.64	2.07	2.01	2.09	2.10	1.92	2.00	1.12
Gd	2.98	2.66	5.59	4.49	6.41	4.64	6.47	6.29	6.80	6.81	6.13	7.00	3.8
Tb	0.56	0.51	0.75	0.67	0.92	0.78	0.89	0.88	0.92	0.97	0.90	1.10	0.6
Dy	3.48	3.21	3.92	3.74	5.18	4.80	4.80	4.67	4.85	5.05	4.48	6.14	3.72
Ho	0.70	0.65	0.83	0.71	1.11	0.93	0.96	0.96	1.00	1.00	0.93	1.34	0.77
Er	1.93	1.87	2.19	2.02	2.98	2.66	2.61	2.48	2.58	2.64	2.43	3.58	2.17
Tm	0.29	0.27	0.32	0.28	0.45	0.40	0.37	0.36	0.38	0.39	0.36	0.54	0.32
Yb	1.74	1.65	1.89	1.75	2.71	2.45	2.30	2.14	2.44	2.35	2.22	3.26	2.01
Lu	0.26	0.24	0.29	0.25	0.43	0.35	0.35	0.33	0.38	0.37	0.35	0.52	0.31
ΣREE	74	66	133	139	163	127	196	193	208	204	190	148	68
L/H	5.2	5.0	7.4	9.0	7.1	6.5	9.5	9.7	9.8	9.4	9.7	5.3	4.0
δEu	0.95	1.07	0.92	0.95	0.90	0.99	0.93	0.94	0.89	0.91	0.93	0.91	1.01

注: BCR-1(玄武岩)和 W-2(辉绿岩)为 USGS 国际标准样品, Mg[#] = 100 × Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺) (Mg²⁺, Fe²⁺ 为摩尔当量),

δEu = Eu_{CN} / √(Sm_{CN} * Gd_{CN}) (Eu_{CN}, Sm_{CN}, Gd_{CN} 均为球粒陨石标准化值), L/H = ΣLREE / ΣHREE, “—”表示未分析。

表 2 闽东南基性岩脉的 Sr、Nd 同位素组成

Table 2 Sr-Nd isotopic composition for mafic dikes in southeastern Fujian

样号	Rb ($\mu\text{g/g}$)	Sr ($\mu\text{g/g}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ($\pm 2\sigma$)	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	Sm ($\mu\text{g/g}$)	Nd ($\mu\text{g/g}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ($\pm 2\sigma$)	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
HB-3	126.4	660.2	0.5591	0.707071 \pm 25	0.70640	5.791	27.85	0.1232	0.512503 \pm 13	0.51244	-1.8
HB-4	75.4	649.3	0.3256	0.70646 \pm 9	0.70607	5.987	37.40	0.0961	0.512272 \pm 13	0.51222	-6.1
HB-5	105.2	741.5	0.4168	0.706272 16	0.70577	6.203	32.08	0.1198	0.512496 12	0.51243	-1.9
CH-1	24.95	759.7	0.1006	0.705604 18	0.70552	7.214	39.16	0.1145	0.512597 15	0.51255	-0.2
CH-2	36.08	749.3	0.1331	0.705581 10	0.70547	7.015	38.52	0.1076	0.512631 9	0.51259	0.5
CH-3	29.96	751.8	0.1207	0.70559 15	0.70549	7.489	38.99	0.1136	0.512639 14	0.51260	0.6
CH-4	25.95	790.1	0.0979	0.705562 11	0.70548	7.162	39.11	0.1125	0.512642 15	0.51260	0.7

注：1) 同位素 Sr、Nd 初始值校正年龄用 $t = 57.8\text{Ma}$ (CH)、 83.9Ma (HB)，为全岩 K-Ar 年龄(均未发表)。2) 计算 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 时采用参数值为：
 $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHCR}} = 0.1967$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHCR}} = 0.51264$, $\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11}\text{年}^{-1}$, $\lambda_{\text{Sm}} = 6.54 \times 10^{-12}\text{年}^{-1}$ 。

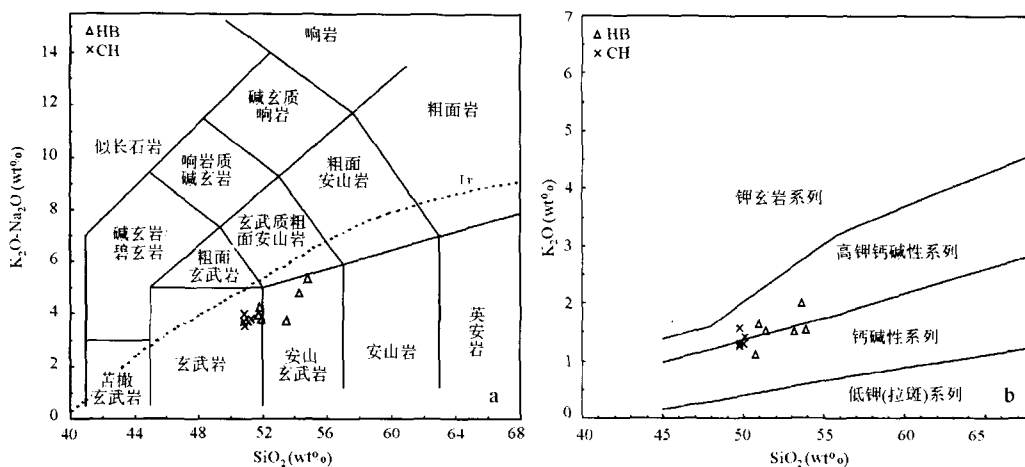


图 2 海边、赤湖基性岩脉的 TAS 岩石分类图解(a)和 SiO₂-K₂O 图解(b)

HB-海边斜闪煌斑岩脉 CH-赤湖辉长岩脉

Fig. 2 TAS classification diagram (a) and SiO₂-K₂O diagram (b) of mafic dikes in Haibian and Chihu, southeastern Fujian

石分离结晶作用(Сущевская et al, 2003)。图 3 显示, 活跃元素(如: K、Na、Al)在海边的基性岩脉中较赤湖的高, 过渡元素(如: Ti、Ni、Co 等(Cr 例外))海边基性岩脉比赤湖的要低, 岩矿鉴定两个地区的岩石未见明显蚀变现象, 可能显示两者源区的演化有一定的差别。

3.2 稀土元素

稀土元素分析结果见表 1。海边的基性岩脉的稀土总量为 66 $\mu\text{g/g}$ ~ 163 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 117 $\mu\text{g/g}$, LREE/HREE 的比值为 4.0 ~ 9.0, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 5.0 \sim 10.9$, 富集轻稀土元素, 稀土配分曲线图形与赤湖的基本一致, δEu 在 0.90 ~ 1.07, 暗示曾发生弱的斜长石分离结晶作用。赤湖基性岩脉的稀土元素总量为 190 $\mu\text{g/g}$ ~ 209 $\mu\text{g/g}$, 平均为 198 $\mu\text{g/g}$, 稀土总量较高; LRRE/HRRE 的比值为 9.4 ~ 9.8, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 在 11.2 ~ 12.0, 岩脉明显富集轻稀土元素; 稀土元素配分曲线总体上

是较陡右倾式, 显示非常弱的 Eu 负异常, δEu 在 0.89 ~ 0.94 在范围内, 同样暗示着有较弱斜长石分离结晶作用过程。两个地区基性岩脉均无 Ce 异常, 表明它们未受低温蚀变的影响。两者稀土元素的特征与浙闽地区晚中生代的玄武岩/辉长(辉绿)岩基本类似(王德兹等, 2002), 均为较陡右倾模式, 明显富集轻稀土元素, 表明基性岩脉与浙闽地区的基性岩有相似源区或岩浆演化过程。

3.3 微量元素

微量元素分析结果见表 1。基性岩脉的相容元素的含量: 海边的 Ni = 17.1 ~ 184 $\mu\text{g/g}$ (平均: 77 $\mu\text{g/g}$), Cr = 10.5 ~ 611 $\mu\text{g/g}$ (平均: 216 $\mu\text{g/g}$), Co = 22 ~ 34 $\mu\text{g/g}$ (平均: 28.6 $\mu\text{g/g}$), Sc = 18.7 ~ 29.6 $\mu\text{g/g}$ (平均: 22.9 $\mu\text{g/g}$), V = 189 ~ 215 $\mu\text{g/g}$ (平均: 198 $\mu\text{g/g}$)。赤湖的 Ni = 59 ~ 81 $\mu\text{g/g}$ (平均: 70 $\mu\text{g/g}$), Cr = 32 ~ 56 $\mu\text{g/g}$ (平均: 45 $\mu\text{g/g}$), Co = 31 ~ 36 $\mu\text{g/g}$

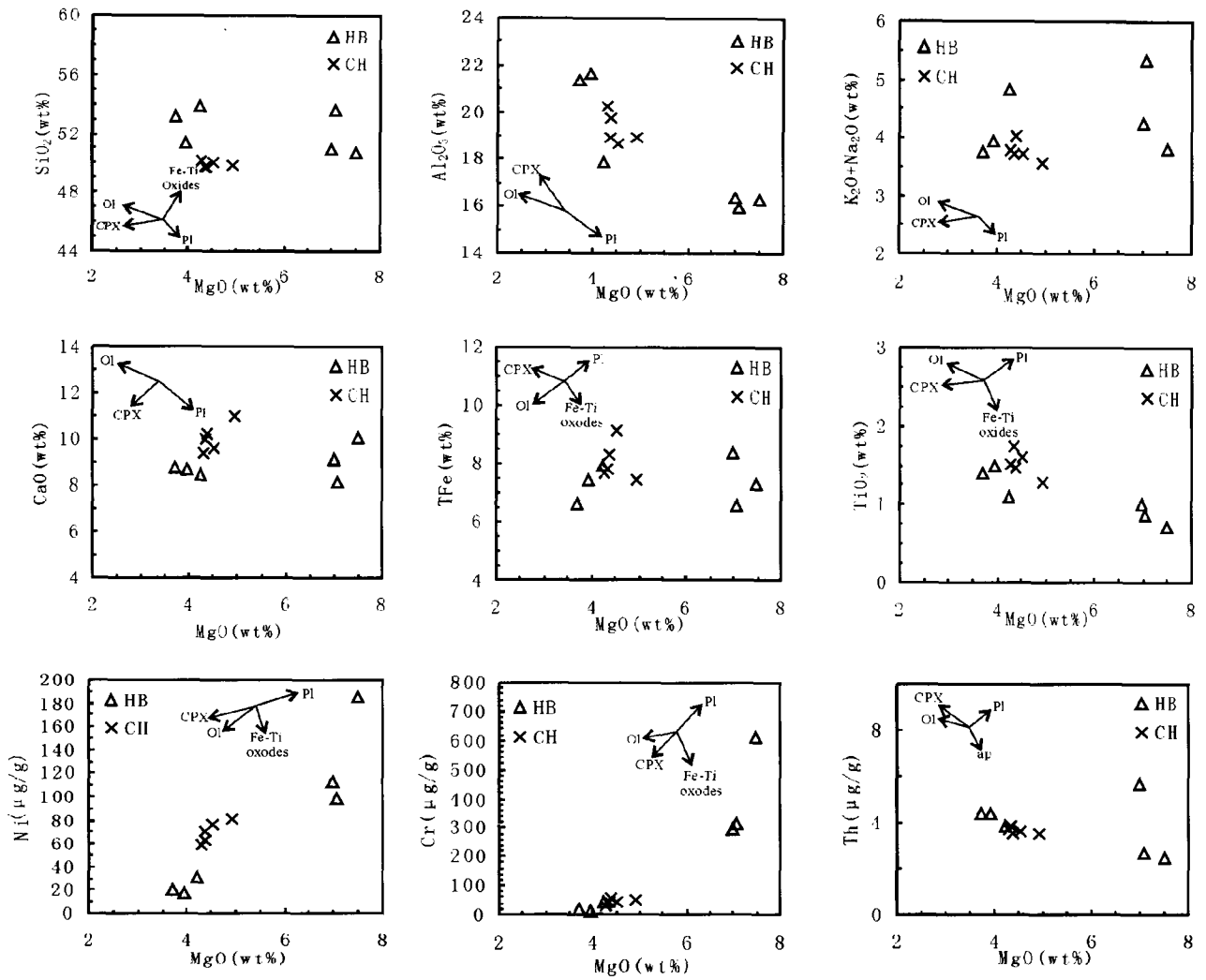


图3 赤湖、海边基性岩脉 MgO 协变图解(图例同图2)

Fig.3 MgO variation diagrams of mafic dikes in Haibian and Chihu, southeastern Fujian

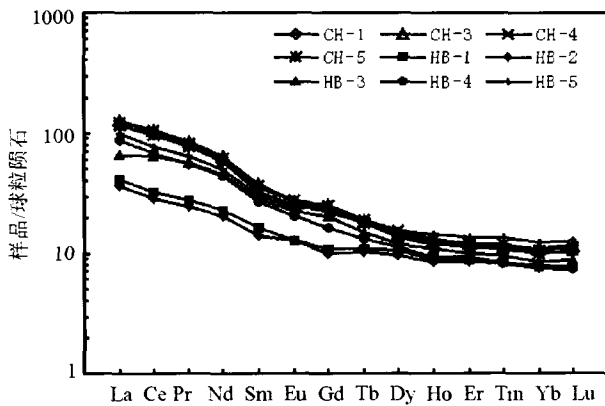


图4 海边、赤湖基性岩脉球粒陨石标准化稀土元素分布模式

球粒陨石标准值引自文献(Anders et al, 1989)

Fig.4 Chondrite-normalized REE pattern of mafic dikes in Haibian and Chihu, southeastern Fujian

(平均: 33 $\mu\text{g/g}$), Sc = 17.9 ~ 19.7 $\mu\text{g/g}$ (平均: 18.9 $\mu\text{g/g}$), V = 191 ~ 205 $\mu\text{g/g}$ (平均: 202 $\mu\text{g/g}$)。两个地区的 Ni、Cr 元素含量明显低于原始岩浆值 (Ni: 400 ~ 500 $\mu\text{g/g}$, Cr > 1000 $\mu\text{g/g}$) (Wilson, 1989), 与 MORB (Ni: 90 ~ 130 $\mu\text{g/g}$, Cr: 251 ~ 411 $\mu\text{g/g}$) 和板内玄武岩 (Ni: 90 ~ 130 $\mu\text{g/g}$, Cr: 352 ~ 536 $\mu\text{g/g}$) 存在一定的差别 (Wilson, 1989), 表明基性岩浆形成过程中曾经历橄榄石、单斜辉石的分离结晶作用。过渡元素 Sc、Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu 的原始地幔标准化分布模式图(略)呈“W”型, Ni、Cr 为负异常, 明显亏损 Ni、Cr 和 Co, 反映出地幔衍生岩过渡元素分布的特征。

从表1可知, 本区基性岩脉的亲石元素总体上高于原始地幔和洋中脊玄武岩。在大洋中脊玄武岩(N-MORB)标准化的不相容元素“蛛网图”中(图5), 海边与赤湖基性岩脉的不相容元素标准化分布图呈右倾隆起型, 富集大离子亲石元素(LILE)、轻稀土元素(LRRE)和亏损高场强元素(HFSE)的特征, 显示出 K、Ba、Rb 和 Ce 为明显的正异常, Nb、Ta 和 Ti

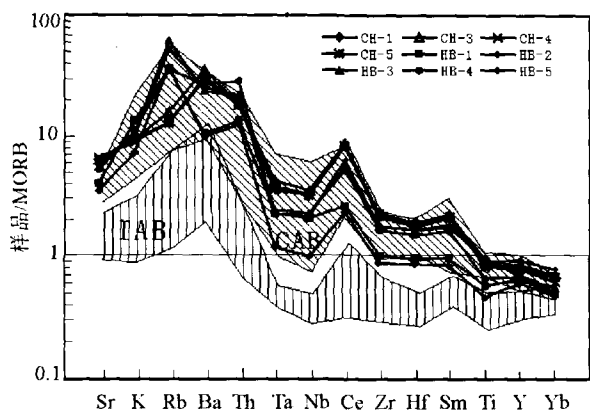


图5 海边、赤湖基性岩脉不相容元素元素 MORB 标准化蛛网图

MORB 标准值引自文献(Pearce et al 1983)

CAB-大陆弧玄武岩; IAB-岛弧玄武岩

Fig. 5 MORB-normalized incompatible trace element spidergrams of mafic dikes in Haibian and Chihu, southeastern Fujian

为负异常的特征。海边和赤湖基性岩脉的不相容元素标准化分布曲线恰好落在典型的大陆边缘弧玄武岩的区域内 (Dehari, 1994), 表明基性岩脉的形成与大陆边缘弧密切相关, 其产出构造环境可能为活动大陆边缘弧。

4 Sr、Nd 同位素组成

海边和赤湖基性岩脉的 Sr、Nd 同位素比值见表 2。海边的斜闪煌斑岩脉的 Rb 的含量在 69.9 ~ 126.4 μg/g (平均值为: 94.2 μg/g), Sr 的含量在 490.5 ~ 741.5 μg/g (平均值为: 635.4 μg/g), Rb/Sr = 0.12 ~ 0.19, 与琼南晚白垩世的基性岩脉特征相似 (葛小月等, 2003)。海边的斜闪煌斑岩脉的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 初始值在 0.70577 ~ 0.707574, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_i 的初始值在 0.512112 ~ 0.512435, ε_{Nd}(t): -6.1 ~ -1.8。赤湖辉长岩脉的 Rb 的含量在 24.95 ~ 29.96 μg/g (平均值为: 30.33 μg/g), Sr 的含量在 749.3 ~ 759.7 μg/g (平均值为: 753.6 μg/g), Rb/Sr = 0.033 ~ 0.048 (平均值为: 0.040), 表现出上地幔的源区特征; 赤湖的辉长岩脉的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 初始值在 0.70547 ~ 0.70552, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_i 的初始值在 0.512554 ~ 0.512596, ε_{Nd}(t): -0.2 ~ 0.6。本区基性岩脉具有 Sr 高含量的特征, 大于中国东部大陆地壳值 (Sr = 284 μg/g) (Gao et al, 1998) 和原始地幔值 (Sr = 21.1 μg/g) (Sun and McDonough, 1989), 也高于闽东基底岩石早元古界麻源群 Sr 的含量 (75.80 ~ 81.53 μg/g) (邢光福等, 1998) 和陈蔡群 Sr 的最高含量为 474.6 × 10⁻⁶ (章邦桐等, 1993), 所以本区岩脉高 Sr 含量不可能由地幔源区经放射性成因 Sr 的长期累积产生, 也不可能由地壳混染产生, 是由不同源区的混合作用形成的。(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i-(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_i 图解上 (图 6a), 海边与赤湖基性岩脉无明显相关关系。海边的

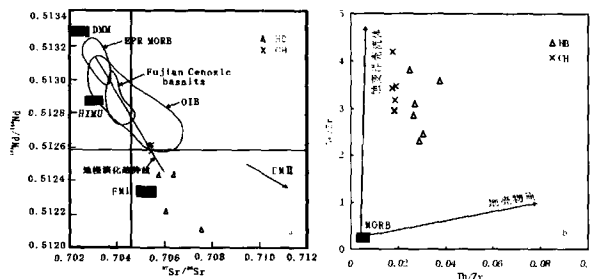


图6 海边、赤湖基性岩脉的 Sr-Nd 同位素相关图 (a) 与 Th/Zr-Ba/Zr 图解 (b) (图例同图 2)

EPR MORB 引自 (Wilson, 1989)、OIB 和新生代玄武岩分别引自 (Staudigel et al, 1984) 和 (Zou et al, 2000; 陈道公等, 1992), 地幔端员引自 (Zindler et al, 1986)。

Fig. 6 Plots of initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios vs ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd (a) and Th/Zr-Ba/Zr diagram (b) for mafic dikes in Haibian and Chihu, southeastern Fujian

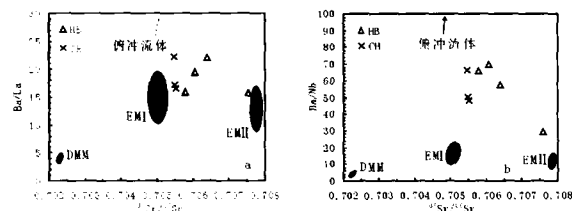


图7 海边、赤湖基性岩脉 Ba/La (a)、Ba/Nb (b) 与 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 相关图解 (图例同图 2)

Fig. 7 Ba/La (a) and Ba/Nb (b) vs (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i variation diagrams of mafic dikes in Haibian and Chihu, southeastern Fujian

ε_{Nd}(t): -6.1 ~ -1.8, 位于第四象限的富集地幔源区, 显示出富集地幔源区的特征。赤湖的 ε_{Nd}(t): -0.2 ~ 0.6, 在 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i-(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_i 图解上有两个样品落在洋岛玄武岩 (OIB) 的区域内, 表现出具有弱亏损地幔的源区性质。

5 讨论

5.1 岩石成因论

东山海边的斜闪煌斑岩脉与漳浦赤湖辉长岩脉产出于长乐-南澳带的东侧, 其形态分布受长乐-南澳构造带的控制 (张贵山等, 2006), 推测其在成岩过程中同样受该构造带影响。古太平洋板块对欧亚大陆的俯冲角度和方向的不断变化, 岩浆弧随着时间逐渐由内陆向沿海迁移 (Zhou et al, 2000), 大量研究表明地幔物质参与岩浆作用的比例也随着岩浆弧的迁移逐渐增加 (黄萱等, 1986)。本区的斜闪煌斑岩脉和辉长岩脉是源于地幔基性岩浆充填裂隙或区域性节理形成的, 所以对探讨地幔组成显得非常重要。Sr-Rb/Sr 图解中 (略) (赵振华, 1997), 海边斜闪煌斑岩和赤湖辉长岩呈双

曲线分布, Ba/Ca-Sr/Ca 图解中(略)(Ouma *et al.*, 1981), 两个地区的样品点为正的线性相关, 两图解均表明本区的脉岩是地幔岩部分熔融作用的产物。主量和微量元素的研究表明岩浆在上升过程中可能经历了橄榄石、单斜辉石和 Ti-Fe 氧化物的分离结晶作用。

中国东南部晚白垩世和古新世是公认的拉张(或裂谷)构造环境(李献华等, 1997; 谢桂青, 2003), 本区的基性岩脉是在上述构造背景下形成的。伸展拉张的构造环境中, 基性岩浆一般上升速率很快, 在地壳中滞留时间短, 上升过程中与地壳发生混染可能性不大, 野外观察到岩脉有明显的冷凝边和烘烤边现象, 表明岩浆在侵位后快速冷却、固化, 阻止了岩浆在上升过程中与地壳物质混染的发生, 说明基性岩浆在上升侵位的过程中没有受到明显的地壳物质混染。再根据不相容元素的比值进一步判断海边和赤湖基性岩脉是否受地壳物质混染。Hofman 等(1986)对大洋玄武岩的研究表明, MORB 和 OIB 的 Nb/U 比值较高且均一, 为 47 ± 10 , 可以作为判别地壳混染的重要指标。大陆地壳的 Nb/U 比值通常很低, 多集中在 12 左右(Taylor *et al.*, 1995), 中国东部地壳 Nb/U 约为 9.6(Gao *et al.*, 1998)。海边的斜闪煌斑岩脉的 Nb/U 比值在 3.97 ~ 10.9(平均: 6.37), 赤湖辉长岩脉的 Nb/U 比值在 17.2 ~ 18.6(平均: 18.3), 两个地区 Nb/U 远低于 MORB 的比值, 低于或接近大陆的比值。OIB 和 MORB 中的 Ce/Pb = 25 ± 5 (Sun and McDonough, 1989), 大陆地壳的 Ce/Pb = 4.12(Taylor *et al.*, 1995), 中国东部大陆地壳的 Ce/Pb = 3.95(Gao *et al.*, 1998), 海边的 Ce/Pb = 1.46 ~ 2.25(平均为: 1.86), 赤湖的 Ce/Pb = 2.99 ~ 4.18(平均为 3.47)。本区的样品投到 Ce/Pb-Nb/U 图解上(略), 落在大陆地壳的附近, 远离 MORB 和原始地幔(PM), 并没有落在 MORB 或 PM 与地壳(CC)之间, 这一特征与云南老王寨煌斑岩类似, 其地球化学特征不是由地壳混染作用控制的(Huang *et al.*, 2002), 同时与没有发生地壳混染作用的胶东半岛中生代的基性岩脉类似(Yang *et al.*, 2004), 说明本区的基性岩脉没有受到明显的地壳物质混染的影响, 微量元素的地球化学特征是源区演化的结果。同理, 其它微量元素的比值对均表现为上述的特征(如: La/Nb、Th/Nb、Rb/Nb 等), 表明海边斜闪煌斑岩和赤湖辉长岩的岩浆在侵位的过程中发生地壳混染的可能性不大。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -1/Sr 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ -1/Nd 图解(略)显示, 海边和赤湖的投影点均不呈线性相关, 基本上可以排除受地壳物质混染的可能性, MgO-($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)图解显示上, 海边和赤湖的样品投影点没有相关性, 反映基性岩脉的岩浆未受到地壳混染作用的影响。一般来说, 地壳具有富 Th、低 Nb 的特征, 因而发生地壳混染作用必然导致 Nb、Th 之间存在负相关关系, 本区基性岩脉的 Nb-Th 和 Nb/Y-Th/Y 呈正相关关系(图略), 表明源区混合作用对微量元素的影响远大于地壳混染作用。综合野外地质观察、同位素与微量元素地球化学特征表明, 本区基性岩脉在上升侵位的过程中可能没有发生明显的地壳混染作用。

微量元素地球化学研究表明, 本区的基性岩脉相对富集大离子亲石元素、轻稀土元素和亏损高场强元素的特征, 不相容元素分配模式为强烈富集型, 稀土元素分配模式为轻稀土富集型, Sr 同位素初始值明显高于洋中脊玄武岩(MORB)的值, 也高于福建新生代未被地壳混染玄武岩的 Sr 同位素比值(0.703601 ~ 0.704559)(图 6a)(Zou *et al.*, 2000; 陈道公等, 1992), 前文论述本区基性岩脉未发生地壳物质混染, 那这些特征可能反映源区存在地幔流体交代作用。地幔交代作用的流体主要有三种形式: ① 深部地幔上升的流体(Green *et al.*, 1988); ② 板块俯冲富含 ALK、LREE 及不相容元素的脱水俯冲流体(Keppler, 1996; Zhou and Li, 2000); ③ 地幔低度部分熔融形成的流体(Schiano *et al.*, 1992)。

中生代中国东南部发生重要的地质事件为古太平洋板块对欧亚大陆的俯冲消减作用, 俯冲流体交代地幔的现象是普遍存在的(Zhou and Li, 2000), 因此引起本区地幔交代作用的流体应为脱水俯冲流体。利用 Th/Zr-Ba/Zr 判别俯冲流体交代作用, Zr 是高场强元素性质不活泼, 属于惰性元素; Th 是亲地壳元素, 能够指示地壳物质加入源区的程度, 流体中 Th 为不活动性元素(Keppler, 1996); Ba 属于大离子亲石元素, 蚀变洋壳流体中含量很高, 根据 Th/Zr-Ba/Zr 图解可以有效判别蚀变洋壳流体与地壳物质在源区演化的作用, 据图 6b 显示海边和赤湖基性岩脉在 MORB 与蚀变洋壳流体之间演化, 本区基性岩脉的地幔源区发生流体交代作用, 流体应该来源于俯冲大洋板块的脱水作用(Zhou and Li, 2000), 俯冲流体交代地幔是源区的重要演化模式。海边和赤湖基性岩脉的不相容元素具有 Nb-Ta-Ti 负异常, Nb-Ta-Ti 负异常是地幔源受到板块俯冲富水流体交代的有力证据。

根据 Sr、Nd 同位素和不相容元素(LILE、LREE 和 HFSE)的地球化学特征及野外地质观察, 认为海边和赤湖基性岩脉未发生地壳混染作用, 同位素和微量元素地球化学特征是地幔源区演化的结果, 其地幔源区可能来自流体交代的富集地幔。流体来自俯冲大洋板块脱水作用, 富含大离子亲石元素和轻稀土元素的俯冲流体交代上覆地幔楔, 并把 LILE 和 LREE 带入地幔楔, 地幔交代过程可能深海沉积物可能被带入地幔楔与地幔发生混合, 可能形成了本区基性岩脉的富集地幔源区。古太平洋板块的消减作用随时间逐渐减弱, 古新世俯冲消减作用基本终止(~50Ma)(Tapponnier *et al.*, 1982), 因此消减作用对岩浆活动影响也时间逐渐减弱到终止, 赤湖辉长岩的同位素表现出弱的亏损地幔的性质, 可能由于太平洋板块消减作用即将终止, 而对岩石圈改造也随之减弱, 岩石圈地幔继承了原来俯冲板块改造的性质, 微量元素保留大陆边缘弧的地球化学特征, 是海边与赤湖地球化学特征存在差异的原因。

5.2 地幔源区特征

对地幔不均一性及其随时间演变的认识, 是了解地幔、地球动力学和大地构造演化的重要基础。地幔不均一性由

大量火山岩的 Sr、Nd、Pb 同位素研究得到证实。Zindler and Hart (1986) 根据大洋玄武岩的 Sr、Nd、Pb 同位素特征定义了不同的地幔端员, 幔源玄武岩一般是由单一地幔端员或几个地幔端员混合组成的。海边斜闪煌斑岩 Nb/Ta 比值为 16.2 ~ 18.6, 平均: 17.7, Zr/Hf 比值为 38.8 ~ 43.0, 平均: 40.8; 赤湖辉长岩 Nb/Ta 比值为 18.0 ~ 18.9, 平均: 18.8, Zr/Hf 比值为 43.7 ~ 45.8, 平均: 45.1, 前者的 Nb/Ta 和 Zr/Hf 比值接近或略高于原始地幔值, 后者明显高于原始地幔值, 反映本区基性岩脉直接来源于地幔的部分熔融, 因为地幔矿物中的分配系数具有 $D_{Nd} < D_{Ta} < 1$ 的性质 (Munch U, 1998), 所以由地幔熔融作用生成的岩浆熔体的 Nb/Ta 比值应略大于原始地幔比值。利用 Nb 的原始地幔标准化 La、Ce、P、Zr、Ti 和 Y 的曲线排列和斜率来判别地幔性质, 本区基性岩脉构成了负斜率、近平行分布曲线, 表明本区地幔受到交代富集。在 $\epsilon_{Nd}(t)$ -t 图解上 (略), 本区的基性岩脉的投影点位于地幔演化线的范围内, 图 6a 显示 Sr 与 Nd 同位素具有由富集向亏损迁移的特征, 暗示海边和赤湖基性岩脉的地幔源区不是由单一地幔端员组成的。前文论述了海边和赤湖地幔源区经历了流体交代作用, 导致 LILE 和 LREE 的富集, 俯冲流体具有较低 Sr 同位素比值 (0.7045) 和较高的 Nd 同位素比值 (0.51315) 特征 (Ishizuka *et al.*, 2003), 所以单一的流体交代作用不能满足本区基性岩脉的同位素组成要求, 本区地幔源

区可能存在不同端员的混合。

本区基性岩脉的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.70547 \sim 0.70640$, $\epsilon_{Nd}(t) = -6.1 \sim 0.6$, 类似于浙闽沿海晚中生代的基性岩类同位素值 ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7058 \sim 0.7099$, $\epsilon_{Nd}(t) = -8.04 \sim -0.51$) (王德滋等, 2002), 暗示本区基性岩脉与浙闽沿海基性岩类的地幔源区有相似的演化过程。高 Sr 同位素初始值与低 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值, 一般认为, 是由地壳物质混染或存在富集型地幔源区造成的。本文和前人大量研究表明 (赵振华等 1998; 邢光福等, 1998; 谢晰等, 2001; 张贵山等, 2004), 中国东南部中生代玄武岩 (或基性岩) 成岩过程中未发生地壳物质混染或地壳混染作用不会对同位素和微量元素组成产生重大影响, 因此, 本区基性岩脉的地球化学特征可能是由于存在富集地幔或源区发生混合造成的。另外, 海边和赤湖基性岩脉的大离子亲石元素、轻稀土元素的比值 (如: Ba/La、Ba/Th、K/Rb、Th/La) 具有富集地幔端员的特征 (Weaver, 1991), 暗示本区岩石圈地幔可能为富集型的。Ba/La - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 Ba/Nb - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 显示 (图 8) 样品点落在 EM I 和 EM II 之间, 暗示海边斜闪煌斑岩和赤湖辉长岩的源区可能是 DMM (亏损地幔) 与 EM I、EM II 混合而成的富集地幔, 富集地幔的形成与太平洋板块的俯冲消减作用密切相关 (李献华等, 1997; 赵振华等, 1998)。

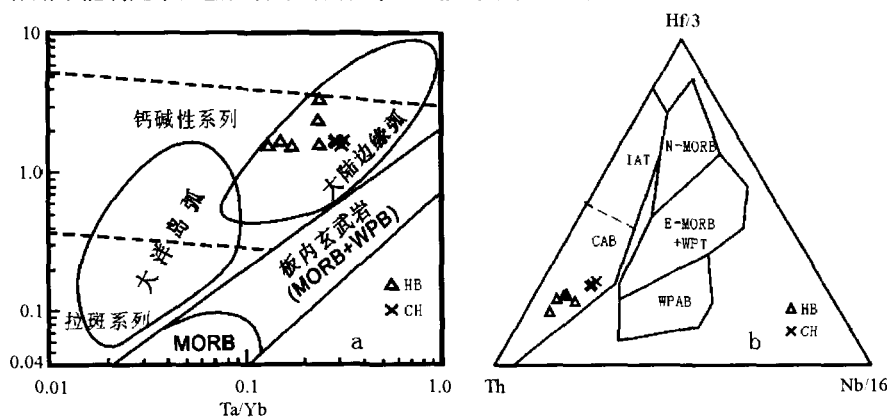


图 8 海边、赤湖基性岩脉 Ta/Yb-Th/Yb (a) 和 Hf/3-Th-Ta-Ta/Yb (b) 构造环境判别图解 (图例同图 2)

图 a 底图引自: Pearce, 1983; 图 b 底图引自: Wood, 1980

图 b: WPB-板内玄武岩; E-MORB-富集型洋中脊玄武岩; N-MORB-亏损型洋中脊玄武岩; IAT-岛弧拉斑玄武岩; CAB-钙碱性玄武岩

Fig. 8 Tectonic discrimination diagrams of Hf/3-Th-Ta-Ta/Yb (a) and Ta/Yb-Th/Yb (b) for mafic dikes in Haibian and Chihu, southeastern Fujian

当大洋板块的俯冲到一定的深度发生脱水作用, 富含 LILE 和 LREE 的俯冲流体交代上覆地幔楔, 因而 LILE 和 LREE 被带入地幔楔发生富集 (Zhou and Li, 2000), 俯冲过程中大洋板块可以把海洋和陆源沉积物带入上地幔深处。晚白垩世以来中国东南部处在拉张裂谷的构造背景下 (Li *et al.*, 2000), 软流圈地幔会以减压绝热形式上升填充因岩石圈伸展减薄造成的空间, 软流圈上涌过程中可能把被带入上地幔深部的海洋和陆源沉积物推移到地幔楔中, 与地幔楔混

合发生熔融形成富集地幔源区。沉积物中有较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和高的 Sr 含量与较高的 Nd 含量, 从而导致地幔源区有较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和低 $\epsilon_{Nd}(t)$ 。Th 是亲地壳元素, 俯冲流体中其为不活动性元素 (Keppler, 1996), 本区基性岩脉的 Th 含量在 2.49 ~ 5.67 $\mu\text{g}/\text{g}$ (其中: 海边平均: 3.9 $\mu\text{g}/\text{g}$, 赤湖平均: 3.6 $\mu\text{g}/\text{g}$), 介于大陆地壳与深海沉积物之间, Th/Nb 值接近或超过地壳的比值 (HB: Th/Nb = 0.368 ~ 0.702, CH: Th/Nb = 0.261 ~ 0.296, 地壳: Th/Nb = 0.44), 本区 Th 富集可能有

地壳物质加入造成的,基性岩脉在成岩过程中未发生地壳物质混染,地壳物质应以源区混合的形式加入,为前文的设想提供了有力证据。沉积物与俯冲流体以富含 LILE 和 LREE 为特征,本区基性岩脉的 LILE、LREE 与 HFSE 之间的比值(如: La/Nb、Ba/Nb、Rb/Nb 等)远大于地幔端元特征值,也高出地壳的特征值(Weaver, 1991),反映出 LILE 和 LREE 相当富集的特征,表明是俯冲流体与沉积物共同参与源区演化的结果。因此,我们认为海边和赤湖的地幔源区是由俯冲流体交代地幔楔与板块携带的深海和陆源沉积物混合构成的,为富集地幔。

综上所述,闽东南晚白垩世和古新世的地幔源为富集型,太平洋板块俯冲作用和软流圈地幔上涌改造了上覆地幔性质;地幔源区可能是由俯冲流体交代地幔楔与板块携带的深海和陆源沉积物混合构成的,而赤湖辉长岩同位素表现出弱亏损特征,与古新世古太平洋板块消减作用逐渐终止、软流圈地幔上涌参与源区演化有关。

5.3 动力学背景

中生代早期开始,太平洋板块对欧亚大陆发生强烈的俯冲作用,从而使中国广大东部地区成为活动大陆边缘,开始了太平洋动力体系演化的历史,太平洋构造域(NE)逐渐代替特提斯构造域(EW)成为主构造域。然而对闽东南中生代的大地构造性质的认识颇有争议, Lu *et al.* (1994) 和合作者认为闽东南中生代发生了碰撞造山作用,存在闽台微大陆与浙闽中生代火山弧碰撞造山带;一些学者认为是与古太平洋板块有关的安第斯型活动大陆边缘(Holloway *et al.*, 1982);任纪舜等(1998)认为西太平洋古陆斜向碰撞亚洲大陆形成了中生代陆缘活化带。中国东南部晚中生代岩浆作用内陆向沿海带状迁移与太平洋板块俯冲角度的变化密切相关,台湾中央山脉东侧的玉里带为晚中生代洋壳消减的缝合带(Zhou and Li, 2000),地震层析成像分析表明晚中生代火成岩的形成与古太平洋俯冲密切相关(Van and Voo, 1999),东南沿海的火成岩微量元素地球化学性质显示了活动大陆边缘的特征(如:平潭杂岩体、岱前山辉长岩体等)(王德滋等, 2002),以上证据表明闽东南晚中生代构造背景应为活动大陆边缘。海边的斜闪煌斑岩脉 Zr/Y 的值 4.5 ~ 7.9(平均: 6.0),赤湖辉长岩脉的 Zr/Y = 7.9 ~ 8.4(平均 8.2),大于 3,表明研究区为大陆弧构造环境,非大洋岛弧环境。玄武岩构造判别图(图 8a、b)显示,海边和赤湖的样品均落在大陆边缘弧和火山弧钙碱性玄武岩(CAB)的范围内,暗示研究区为大陆边缘弧的构造环境,与不相容元素蛛网图判别相一致,结合福建晚中生代地质演化历史,研究区为陆缘拉张(裂谷)构造环境(李献华等, 1997)。福建东部发育一系列的碱性火成岩,其同位素年龄为 104 ~ 90Ma(王德滋等, 2002),本区基性岩脉的同位素年龄分别为 83.7Ma 和 57.8Ma。前人在金門岛发现 ~90Ma 的基性岩脉(Lan *et al.*, 1995),表明早白垩世晚期到古新世闽东南的构造背景已从大陆边缘拉张带进

入陆缘裂谷阶段。

基性岩脉是起源于地幔的基性岩浆充填先存破裂或区域性节理形成的。根据本区基性岩脉产状及形态分析表明,破裂与区域性节理形成过程中,不仅受到拉张力作用,而且还受到左旋剪切力作用。NE 向展布的长乐-南澳左旋走滑韧(脆)性剪切带是区域内主构造,并一直处于活动状态,主要活动时期为 100 ~ 120Ma,导致东南沿海发生强烈的变形作用(舒良树等, 2002)。本区基性岩脉形成时受到左旋剪切力作用,长乐-南澳带的左旋走滑运动产生的剪切作用控制了本区基性岩脉分布。地球物理资料表明,闽东南的岩石圈厚度最薄处约为 45km,岩石圈厚度等势线呈扁圆形沿 NE 向展布(长轴),沿海的岩石圈内发现一层具有软流圈物性的幔内高导层(王培宗等, 1993),说明闽东南存在软流圈上涌的事件,软流圈地幔物质可能进入岩石圈。岩石圈厚度等势线分布特征表明,软流圈地幔可能是沿 NE 向上涌,必然导致闽东南的岩石圈沿 NW 向减薄和坍塌。软流圈地幔上涌,岩石圈地幔减薄和坍塌,促使地壳发生拉张和裂谷的构造演化,根据岩石圈减薄的方向可以推测拉张力为 NW。在 NW 向拉张力作用下,形成一系列 NE 向断陷盆地和基性岩脉,解释了晚中生代福建省的断陷盆地和基性岩脉多沿 NE 分布形成原因。地幔上涌可能是中国东南部地壳拉张的内在因素,据前人研究表明中国东南部地壳拉张裂陷是非连续多期次的(胡瑞忠等, 2004),暗示地幔上涌是脉动式的,非连续性的。东山海边的斜闪煌斑岩脉的 K-Ar 年龄为 83.9Ma,海边斜闪煌斑岩脉与金門岛的基性岩脉的年龄基本一致(Lan *et al.*, 1995),漳浦赤湖的辉长岩脉的 K-Ar 年龄为 57.8Ma,表明闽东南晚白垩世和古新世发生地壳拉张(裂谷)事件。

6 结论

(1) 海边和赤湖的基性岩脉分别形成于 83.9Ma、57.8Ma,说明闽东南晚白垩世和古新世发生地壳拉张事件,与中国东南部晚白垩世和古新世地壳拉张期次是一致的。

(2) 两个地区均为高钾钙碱性系列与钙碱性系列,富集 LILE、LREE,亏损 HFSE,微量元素具有活动大陆边缘弧的特征;海边斜闪煌斑岩脉的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i: 0.70577 ~ 0.707574, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$: -6.1 ~ -1.8,赤湖辉长岩脉的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i: 0.70547 ~ 0.70552, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$: -0.2 ~ 0.6,具有高 Sr 同位素初始值,低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值。

(3) 基性岩浆在上升侵位过程中未发生明显的地壳混染作用,大离子亲石元素和轻稀土元素特别富集是俯冲流体与沉积物共同参与源区演化的结果。

(4) 地幔源区的演化与古太平洋板块俯冲密切相关,俯冲流体交代地幔楔、消减洋壳携带的海洋与陆源沉积物参与地幔源区的混合,形成本区基性岩脉的富集地幔源区。

(5) 海边和赤湖基性岩脉形成的构造背景属于活动大陆边缘弧环境,构造性质应为活动陆缘拉张带(裂谷带)。

(6)从岩脉的形态上判断,长乐-南澳韧性剪切带与岩脉的形成存在一定的联系。软流圈地幔上涌是地壳拉张(裂谷)的内在因素,也是基性岩脉沿 NE 向分布的主要原因。

References

- Anders E, Gressle N. 1989. Abundances of the elements: Meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53: 197-214
- Chen DG, Zhang JB. 1992. Nd, Sr, Pb and K-Ar age of basaltic rocks in Longhai and Minxi, Fujian Province. *Acta Petrologica Sinica*, 8(4): 324-331 (in Chinese with English abstract)
- Debari S. 1994. Petrogenesis of the Fiambala Gabbroic intrusion, northwestern Argentina; a deep crustal syntectonic pluton in a continental magmatic arc. *J. Petrol.*, 35(3): 679-713
- Ernst RE, Buchan KL, Hamilton MA *et al.* 2000. Integrated paleomagnetism and U-Pb geochronology of mafic dikes of the eastern Anabar Shield Region, Siberia: Implications for Mesoproterozoic Paleolatitude of Siberia and Comparison with Laurentia. *The Journal of Geology*, 108: 381
- Ewart A. 1982. The mineralogy and petrology of Tertiary-Recent orogenic volcanic rocks with special reference to the andesitic-basaltic compositional range. In: Thorpe RS (Ed.). *Andesites*. Wiley, Chichester, 25-87
- Gao S, Luo TC, Zhang BR *et al.* 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 1959-1975
- Ge XY, Li XH, Zhou HW. 2003. Geochronologic, geochemistry and Sr-Nd isotope of the Late Cretaceous mafic dike swarms in southern Hainan Island. *Geochimica*, 32(1): 11-20 (in Chinese with English abstract)
- Gilder SA, Gill J, Coe RS *et al.* 1996. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China. *J. Geophys Res*, 101: 16137-16154
- Green DH and Wallace ME. 1988. Mantle metasomatism by ephemeral carbonatite melts. *Nature*, 336: 459-462
- Hart SR. 1988. Heterogeneous mantle domains: signature genesis and mining chronologies. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 90: 273-296
- Hoek JD and Seitz HM. 1995. Continental mafic dykes swarms as tectonic indicators: an example from the Vestfold Hills, East Antarctica. *Precambrian Research*, 75: 121-139
- Hofman AW, Jochum KP, Seufert M *et al.* 1986. Nd and Pb in oceanic basalts: new constraints on mantle evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 79: 33-45
- Holloway NH. 1982. North Palawan Block, Philippines-its relation to Asian Mainland and Role in evolution of south China Sea. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 66: 1355-1383
- Hsü KJ, Li JL, Chen HH *et al.* 1990. Tectonic of south China: Key to understanding west Pacific geology. *Tectonophysics*, 183: 9-39
- Hu RZ, Bi XW, Su WC *et al.* 2004. The relationship between uranium metallogenesis and crustal extension during the Cretaceous-Tertiary in south China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 153-160 (in Chinese with English abstract)
- Huang X, Sun SH, DePaolo DJ *et al.* 1986. Nd-Sr Isotope study of Cretaceous magmatic rocks from Fujian province. *Acta Petrologica Sinica*, 2(2): 50-63. (in Chinese with English abstract)
- Huang, ZL., Liu, CQ., Yang HL *et al.* 2002. The geochemistry of lamprophyres in the Laowangzhai gold deposits, Yunnan Province, China: Implications for its characteristics of source region. *Geochemical Journal*, 36: 91-112
- Irvine TN and Barager WRA. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 532-548
- Ishizuka O, Taylor RN, Milton JA *et al.* 2003. Fluid mantle interaction in an intra-oceanic arc: constraints from high-precision Pb isotopes. *Earth and Planetary Science Letters* 211: 221-236
- Jahn BM, Zhou XH, Li JL. 1990. Formation and tectonic evolution of Southeastern China and Taiwan: Isotopic and geochemical constraints. *Tectonophysics*, 183: 145-160
- Kepler H. 1996. Constraints from partitioning experiments on the composition of subduction-zone fluids. *Nature*, 380: 237-240
- Lan CY, Chung SL, Mertzman SA *et al.* 1995. Mafic dikes from Chinmen and Liehyu of southeast China: petrochemical characteristics and tectonic implications. *J. of Geological Science China*, 35: 183-213
- Lapierre H, Jahn BM, Charvet J, Yu YW. 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
- Le Maitre RW, Bateman P, Keller J *et al.* 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*. Oxford: Blackwell, 193
- Lenoir X, Féraud G and Geoffroy L. 2003. High-rate flexure of the East Greenland volcanic margin: constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of basaltic dykes. *Earth and Planetary Science Letters*, 214(3-4): 515-528
- Li XH, McCulloch MT. 1996. Secular variation in the Nd isotopic composition of Neoproterozoic sediments from the southern margin of the Yangtze Block: Evidence for a Proterozoic continental collision in southeast China. *Precambrian Research*, 76(1-2): 67-76
- Li XH. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in southeast China. *Journal of Asian Earth Science*, 18: 293-305
- 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)
- Lu HF, Jia D, Wang ZH *et al.* 1994. Tectonic evolution of the Dongshan Terrane, Fujian Province, China. *J. South Amer. Earth Sci.*, 7(3): 349-365
- Münch U. 1998. Nb/Ta fractionation in a Cambrian arc/back arc system, New Zealand: source constraints and application of refined ICPMS techniques. *Chemical Geology*, 144: 23-45
- Onuma N, Hirano M and Isshiki N. 1981. Sr/Ca-Ba/Ca systematics in four volcanoes of Oshima, Izu Islands, Japan. *Geochem. J.*, 15: 315-324
- Pearce JA. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth CJ and Norry MJ (eds.). *Continental basalts and mantle xenoliths*. Nantwich: Shiva, 230-249
- Qi L, Hu J, Gregoire DC. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*, 51: 507-513
- Schiano P, Clochiatti R, Joron JL. 1992. Melt and fluid inclusions in basalts and xenoliths from Tahaa Island, Society archipelago: evidence for a metasomatized upper mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 111(1): 69-82
- Shao JA, Zhang YB, Zhang LQ *et al.* 2003. Early Mesozoic dike swarms of carbonatites and lamprophyres in Datong area. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 93-104 (in Chinese with English abstract)
- Staudigel H, Zindler A, Hart SR *et al.* 1984. The isotope systematic of a juvenile intraplate volcano: Pb, Nd and Sr isotope ratios of basalts from Loihi Seamount, Hawaii. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 69: 13-29
- Sun SS, McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD, Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, (42): 313-345
- Tapponnier P, Peltzer G, LeDain AY, Armijo R, Cobbold P. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10: 611-616
- Taylor SR and McLennan SM. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Review Geophysics*, 33: 241-265
- Van Der Voo R, Spakman W, Bijiwaard H. 1999. Mesozoic subducted slabs under Siberia. *Nature*, 397: 246-249
- Wang DZ, Zhou XM *et al.* 2002. Petrogenesis of granitic volcanic and

- intrusive complex and crustal evolution in the Late Mesozoic of Southeastern China. Beijing: Science Press, 1-295 (in Chinese)
- Wang PZ, Chen YA, Cao BT *et al.* 1993. Crust-Upper-Mantle Structure and Deep Structural Setting of Fujian Province. *Geology of Fujian*, 13(2): 79-158
- Wang YX, Yang JD, Tao XC *et al.* 1988. A study of the Sm-Nd method for fossil mineral rock and its application. *J of Nanjing University (Natural Sciences Edition)*, 24(2): 297-308 (in Chinese with English abstract)
- Weaver BL, Tarney J. 1981. The Scourie dyke suite: Petrogenesis and geochemical nature of Proterozoic sub-continental mantle. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 78: 175-188
- Weaver BL. 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions; trace element and isotopic constraints. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 104: 381-397
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach*. London: Unwin Hyman, 1-466
- Wood DA. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crystal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 50: 11-30
- Xie GQ, Hu RZ, Jia DC. 2002. Geological and geochemical characteristics and its significance of mafic dikes from Northwest Jiangxi Province. *Geochimica*, 31(4): 229-337 (in Chinese with English abstract)
- Xie X, Xu XS, Zou HB *et al.* 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)
- Xing GF, Tao KY. 1998. The impact of Sr content on Sr isotope of magmatic rocks during crust-mantle interaction -an application to petrogenesis of cretaceous bimodal rocks in the coastal region of southeastern China. *Volcanology & Mineral Resources*, 19(1): 24-33 (in Chinese with English abstract)
- Yang JH, Chung SL, Zhai MG, Zhou XH. 2004. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong Peninsula, China: evidence for vein-plus-peridotite melting in the lithospheric mantle. *Lithos*, 73: 145-160
- Yang ZL, Shen WZ, Tao KY. 1999. Sr, Nd and Pb isotopic characteristics of early cretaceous basaltic rocks from the coast of Zhejiang and Fujian; evidences for ancient enriched mantle source. *Scientia Geologica Sinica*, 34(1): 56-68 (in Chinese with English abstract)
- Zhang BT, Chen PR, Ling HF *et al.* 2004. Pb-Nd-Sr isotopic study of the middle jurassic basalts in southern Jiangxi Province: characteristics of mantle source and tectonic implication. *Geological Journal of China Universities*, 10(2): 145-156 (in Chinese with English abstract)
- Zhang BT, Zhang ZH. 1993. *The evolution of continental crust and uranium metallization in Southeastern China*. Beijing: Atomic Power Publishing House, 1-208 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GS, Wen HJ, Qiu YZ. 2004. Geochemistry of the late Mesozoic mafic dikes in western Fujian. *Geochimica*, 33(3): 243-253 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GS, Wen HJ, Hu RZ, Qiu YZ, Yang GS, Yu WX. 2006. Geological implications of tectonic stress field formed in mafic dikes in southeastern Fujian. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(2): 142-148 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Bao ZW, Zhang BY. 1998. The geochemistry of Mesozoic basalts in south Hunan Province, South China. *Science in China (D)*, 28(suppl): 7-14 (in Chinese)
- Zhao ZH. 1997. *The Principle of Trace Elements Geochemistry*. Beijing: Science Press, 1-169
- Zhou XM, Li WX. 2000. Origin of late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326: 269-287
- Zindler A, Hart SR. 1986. Chemical geodynamics. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci. Lett.*, 14: 493-571
- Zou HB, Zindler A, Xu XS, Qi Q. 2000. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: mantle sources, regional variations and tectonic significance. *Chemical Geology*, 171: 33-47
- Сушевская Н. М. Мигдисова Н. А. Беляцкий Б. В. Пейве А. А. 2003. Образование обогащенных толеитовых магм в пределах западной части Африкано-Антарктического хребта (Южная Атлантика). *Геохимия*, 1: 3-24

附中文参考文献

- 陈道公, 张剑波. 1992. 福建龙海明溪两区玄武质火山岩钾-氩年龄和 Nd, Sr, Pb 同位素研究. *岩石学报*, 8(4): 324-331
- 葛小月, 李献华, 周汉文. 2003. 琼南晚白垩世基性岩墙群的年代学、元素地球化学和 Sr-Nd 同位素研究. *地球化学*, 32(1): 11-20
- 胡瑞忠, 毕献武, 苏文超等. 2004. 华南白垩-第三纪地壳拉张与铀成矿的关系. *地学前缘*, 11(1): 153-160
- 黄莹, 孙世华, Depaolo DJ 等. 1986. 福建省白垩纪岩浆岩 Nd-Sr 同位素研究. *岩石学报*, 2(2): 50-63
- 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): 14-30
- 邵济安, 张永北, 张履桥, 牟保磊, 王佩瑛, 郭峰. 2003. 大同地区早中生代煌斑岩-碳酸岩岩墙群. *岩石学报*, 19(1): 93-104
- 王德兹, 周新民等著. 2002. *中国东南部晚中生代花岗岩质火山岩-侵入杂岩成因与地壳演化*. 北京: 科学出版社, 1-295
- 王培宗, 陈耀曹, 曹宝庭等. 1993. 福建省地壳-上地幔结构及深部构造背景研究. *福建地质*, 13(2): 79-158
- 王银喜, 杨杰东, 陶仙聪等. 1988. 化石、矿物和岩石样品的 Sm-Nd 同位素实验方法及其应用. *南京大学学报(自然科学版)*, 2: 297-308
- 谢桂青, 胡瑞忠, 贾大成. 2002. 赣西北基性岩脉的地质地球化学特征及其意义. *地球化学*, 31(4): 229-337
- 谢昕, 徐夕生, 邹海波等. 2001. 中国东南沿海中-新生代微量元素和 Nb-Sr-Pb 同位素研究. *岩石学报*, 17(4): 617-628
- 邢光福, 陶奎元. 1998. 在壳幔作用过程中 Sr 含量对岩浆岩 Sr 同位素组成的影响: 兼论东南沿海白垩纪双峰式火山岩的成因. *火山地质与矿产*, 19(1): 24-33
- 杨祝良, 沈渭洲, 陶奎元, 沈加林. 1999. 浙闽沿海早白垩世玄武岩锶、钕、铅同位素特征: 古老富集地幔的证据. *地质科学*, 34(1): 56-68
- 张贵山, 温汉捷, 裘愉卓. 2004. 闽西晚中生代基性岩脉的地球化学研究. *地球化学*, 33(3): 243-253
- 张贵山, 温汉捷, 胡瑞忠, 裘愉卓, 杨光树, 于文修. 2006. 闽东南基性岩脉形成的构造应力场地质意义. *大地构造与成矿学*, 30(2): 142-148
- 章邦桐, 陈培荣, 凌洪飞等. 2004. 赣南中侏罗世玄武岩的 Pb-Nd-Sr 同位素地球化学研究: 中生代地幔源区特征及构造意义. *高校地质学报*, 10(2): 145-156
- 章邦桐, 张祖还. 1993. *华南东部陆壳演化与铀成矿作用*. 北京: 原子能出版社, 1-208
- 赵振华, 包志伟, 张伯友. 1998. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征. *中国科学(D)*, 38(增刊): 7-14
- 赵振华. 1997. *微量元素地球化学原理*. 北京: 科学出版社, 1-169