

浙闽晚中生代辉绿岩脉的岩石成因:年代学与地球化学制约*

秦社彩 范蔚茗 郭锋** 李超文 高晓峰

QIN SheCai, FAN WeiMing, GUO Feng**, LI ChaoWen and GAO XiaoFeng

中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2010-05-04 收稿, 2010-06-13 改回.

Qin SC, Fan WM, Guo F, Li CW and Gao XF. 2010. Petrogenesis of Late Mesozoic diabase dikes in Zhejiang-Fujian provinces: Constraints from Ar-Ar dating and geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11):3295–3306

Abstract The diabases from Wencheng in Zhejiang Province and Yongtai in Fujian Province that intrude into the Late Mesozoic intermediate-felsic volcanic rocks in SE China were formed at 90 ~ 94Ma under an extensional setting. These rocks are calc-alkaline with a SiO₂ range of 48.61% ~ 55.54%, a Na₂O range of 1.98% ~ 3.89% and a K₂O range of 0.28% ~ 2.26%. Fractional crystallization of predominant mafic minerals (e.g., olivine and pyroxene) and subordinate plagioclase and accessory minerals was responsible for the major and trace element variations. They are characterized by arc-like trace element features with large ion lithophile element (LILE, e.g., Ba and Th) and light REE (LREE) enrichments and high field strength element (HFSE) depletions and radiogenic Sr and nonradiogenic Nd isotopic compositions (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr(i) = 0.7080 ~ 0.7097, $\epsilon_{Nd}(t) = -7.7 \sim -3.4$ for the Wencheng diabases; ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr(i) = 0.7061 ~ 0.7062, $\epsilon_{Nd}(t) = -1.2 \sim +0.5$ for the Yongtai diabases). All these features were quite different from those mafic magmas derived from asthenosphere. However, neither crustal contamination and/or assimilation via fractional crystallization nor magma mixing processes could well explain the observed elemental and isotopic variations in these rocks. By contrast, the combined geochemical data suggest that these diabases were formed through different proportional mixing between an enriched lithosphere component and the underlying asthenosphere under an extensional regime throughout the SE China continent. The Wencheng diabases with more evolved Sr-Nd isotopic compositions were derived from such a mixed source containing a higher proportion of enriched component, whereas the asthenosphere component was greater in the melting source for the Yongtai diabases to account for their less evolved Sr-Nd isotope signatures.

Key words Geochemistry; Lithospheric extension; Diabases; Late Mesozoic; SE China

摘要 来自浙江文成和福建永泰两地的侵入于晚中生代中酸性火山岩地层中辉绿岩脉的形成于90~94Ma,为晚白垩世岩石圈伸展作用产物。两地辉绿岩的SiO₂ = 48.61%~55.54%, Na₂O = 1.98%~3.89%, K₂O = 0.28%~2.26%,为钙碱性系列;岩浆在演化过程中经历了一定程度的镁铁质矿物、斜长石和副矿物的分离结晶作用。在微量元素特征上LILE(如Ba、Th)和LREE富集、HFSE亏损;具高放射成因Sr和低放射成因Nd同位素组成(文成辉绿岩:⁸⁷Sr/⁸⁶Sr(i) = 0.7080~0.7097, $\epsilon_{Nd}(t) = -7.7 \sim -3.4$;永泰辉绿岩:⁸⁷Sr/⁸⁶Sr(i) = 0.7061~0.7062, $\epsilon_{Nd}(t) = -1.2 \sim +0.5$),明显不同于亏损软流圈来源岩浆。地壳混染/AFC、岩浆混合等过程不足以解释这些辉绿岩的元素-同位素变化特征。结合主、微量元素和Sr-Nd同位素组成,我们认为区域晚中生代辉绿岩为伸展拉张背景下,软流圈上涌与富集岩石圈地幔相互作用,两种源区共同发生部分熔融的结果,其中文成辉绿岩有更大比例的富集岩石圈组分参与,而永泰辉绿岩的熔融源区中软流圈组分则更高。

关键词 地球化学;岩石圈伸展;辉绿岩;晚中生代;东南沿海

中图法分类号 P588.124; P597.3

这些中酸性岩浆岩通常被更期的镁铁质岩脉穿插。部分研究结果认为,这些中生代的岩浆活动为古太平洋板块俯冲作用下强烈壳-幔相互作用的结果(王德滋和周新民, 2002;徐夕生和谢昕, 2005);然而,同期或晚期的镁铁质岩浆岩的研

1 引言

中国东南沿海地区发育了巨量的中生代中酸性岩浆岩,

* 本文受中国科学院知识创新工程项目(KZCX1-YW-15-2和ZCX2-YW-Q08-3-7)资助。

第一作者简介:秦社彩,女,1965年生,博士,岩石学专业,E-mail: pusqsc@mail.sysu.edu.cn

** 通讯作者:郭锋,E-mail: guofeng@263.net

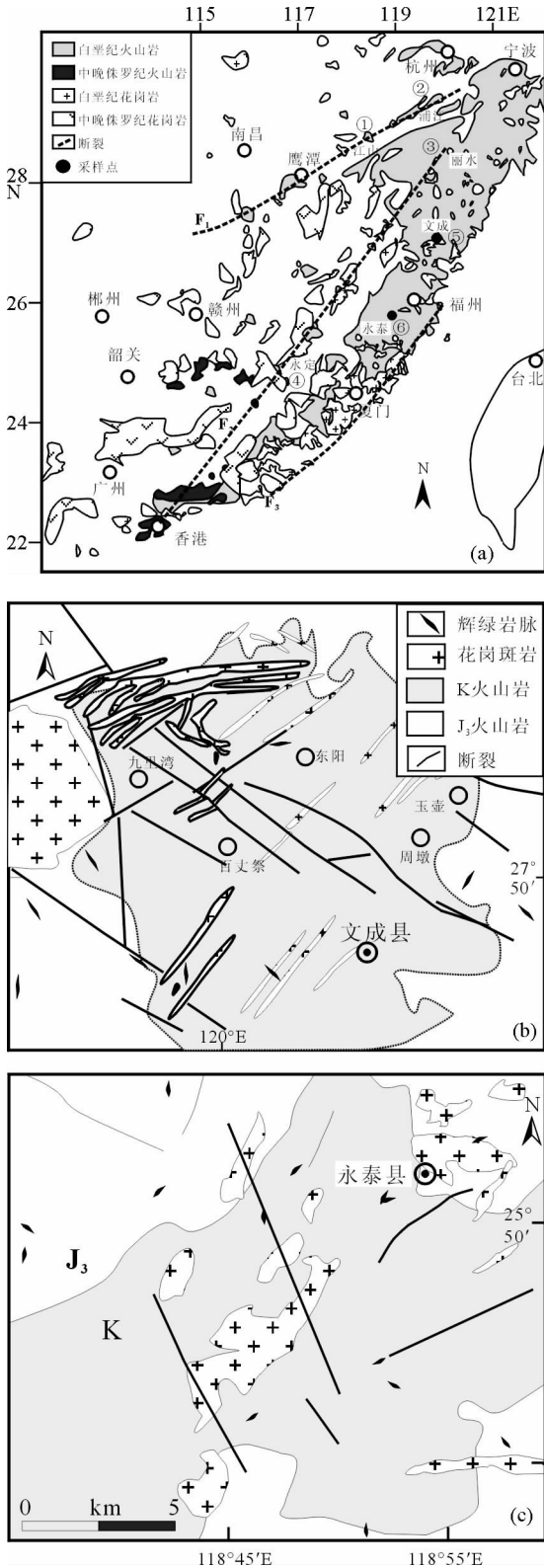


图1 浙闽晚中生代辉绿岩产状地质略图

(a)-区域地质图;(b)-文成地区辉绿岩分布图(据泰顺幅①、平阳幅②1:20万地质图);(c)-为永泰地区辉绿岩分布图(据德化幅③1:20万地质图③). F1=江山-绍兴断裂;F2=丽水-莲花山断裂;F3=长乐-南澳断裂

Fig. 1 Simplified geological maps showing the distribution of Late Mesozoic diorites in Zhejiang and Fujian provinces

(a)-A simplified geological map of the study area; (b)-Distribution of Late Mesozoic diorites from the Wenzhou area; (c)-Distribution of Late Mesozoic diorites in the Yongtai area

究则反映当时东南乃至华南地区中生代存在多期次的岩石圈伸展作用,且在不同地区存在岩石圈地幔组成的横向不均一性(李奇焜,1994;李献华等,1997;谢桂青等,2002;葛小月等,2003;张贵山等,2004)。目前对于这些镁铁质岩石的成因仍存在认识上的分歧,究竟是否与俯冲作用有直接的动力学联系也尚未得到确凿证据的支持。

基性岩脉作为幔源岩浆浅侵位的产物,为玄武质岩浆充填张性裂隙形成,代表了基性岩浆从地幔上升到地表的通道,并被认为是伸展构造的重要标志之一,其地球化学特征能为地幔源区的物质组成和深部过程提供制约(Halls,1982;Halls and Fahrig 1987; Windley, 1995)。相对于东南沿海地区广泛发育的晚中生代基性岩脉而言,目前开展的研究程度还欠全面和深入。本文对东南沿海地区浙江文成和福建永泰两地的辉绿岩脉进行了 Ar-Ar 年代学、岩石学、主、微量元素和 Sr-Nd 同位素地球化学研究,以理解晚中生代时期东南沿海地区岩浆形成的深部地质过程和构造背景。

2 地质概况

东南沿海地区浙江文成和福建永泰,中生代岩浆作用非常发育,岩浆作用以中酸性成分为主,其中火山岩中英安岩、流纹岩占绝对优势,只有少量的安山岩、玄武岩,其总厚度在2000~7000km之间变化不等。无论是长英质火山岩还是镁铁质火山岩,在岩石化学上主要表现为钙碱性-高钾钙碱性性质(王德滋和周新民,2002;Lapierre *et al.*, 1997;Wang *et al.*, 2003, 2005)。前人的调查显示(浙江省地质矿产局,1996),浙江和福建的晚中生代火山岩出露面积占整个基岩出露面积的90%,巨厚的火山岩覆盖在扬子陆块和华夏陆块的古老基底之上(图1a)。

研究区内与火山活动相关的 NE 走向深大断裂带有3条:萍乡-广丰-江山-绍兴深断裂(F1);丽水-莲花山深断裂(F2);长乐-南澳深断裂(F3)。其中萍乡-广丰-江山-绍兴深大断裂被认为是分隔扬子和华夏陆块的岩石圈断裂,断裂两侧的震旦系及下古生界沉积建造差异明显。地震资料显示,沿断裂带走向为一明显的深部构造变异带,莫霍面不连续。丽水-莲花山深大断裂自中晚元古代形成以来一直持续活动,控制了区域中生代火山-沉积盆地的分布。长乐-南澳深

① 浙江省重工业局区域地质测量队. 1970. 泰顺幅 1:20万地质图
② 浙江省区域地质测量大队. 1977. 平阳幅 1:20万地质图
③ 福建省区域地质测量大队. 1980. 德化幅 1:20万地质图

断裂位于浙闽粤沿海,呈 NE-NNE 向平行海岸线分布,该断裂在地球物理场方面显示为一个规模宏大的形状清晰的重力梯度带和莫霍面变异带,白垩纪强烈活动(陆志刚等, 1997; 聂春和朱根灵, 2004)。本文研究的基性岩脉样品分别采自浙江文成和福建永泰地区,介于 F2 和 F3 断裂带之间(图 1a)。

在浙江文成周墩镇大坑村西南方向以及百丈祭石头龙村以西的火山岩中发育了大量的辉绿岩脉(图 1b)。火山岩为晚中生代灰绿色-灰紫色酸性火山岩及火山碎屑岩,辉绿岩脉呈宽 1~5m 的深灰绿色-灰黑色岩墙,产状近直立,侵位于酸性火山岩中;部分呈岩墙群产出,与火山岩之间接触界线清晰。辉绿岩呈深灰绿色-灰黑色,有些呈典型的辉绿结构,辉石充填在斜长石组成的格架中;有些则为嵌晶含长结构,斑晶主要为较大单斜辉石晶体,其内杂乱地包含自形-半自形的长条状斜长石,基质为间粒结构,主要由长条状斜长石、辉石和少量橄榄石、不透明副矿物及少量玻璃组成。局部见黝帘石化、绿泥石化和碳酸岩化等低温蚀变现象。

福建永泰的辉绿岩脉位于寨下-凤际剖面,岩脉呈灰黑-灰绿色,近直立产状侵位于晚中生代酸性火山岩中,与火山岩界线清晰,脉宽 1~10m 不等,走向 40°~45°,局部呈密集的岩墙群产出(图 1c)。手标本呈灰绿色-灰黑色,辉绿结构。以斜长石为主(50%~60%),单斜辉石为 15%~20%,不透明矿物 8%~10%,部分样品见石英斑晶(<5%)及少量蛇纹石化橄榄石。

3 分析方法

辉绿岩新鲜样品经手工碎至 <1~2cm,将破碎的岩屑用

1% 的稀盐酸浸泡、超声波振荡之后用去离子水清洗、风干(以消除碳酸盐化等的影响),在放大镜下挑选出新鲜的岩屑。

Ar-Ar 全岩年龄分析样品在显微镜下进一步剔除斑晶及风化蚀变部分,只留下基质部分。样品测试在中国科学院地质与地球物理所 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 实验室完成,采用常规加热方法在 MM5400 质谱仪上测试,云母校样 GA-1550 的参考年龄为 98.79 ± 0.96 ,测定结果经仪器质量歧视校正、放射性衰变校正和 Ca、K 同位素反应校正,得到 Ca、K 同位素反应校正参数: $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 2.6088 \times 10^{-4} \pm 1.1418 \times 10^{-5}$, $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 7.236 \times 10^{-4} \pm 2.814 \times 10^{-5}$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 2.648 \times 10^{-2} \pm 2.254 \times 10^{-4}$,具体分析流程见王非等(2004)。Ar-Ar 分析数据见表 1。

元素-同位素分析样品继续用刚玉鄂式破碎机粉碎到 20 目以下,再用玛瑙球磨滚筒机研磨至小于 180 目。主量元素在湖北省地质实验研究所用 XRF 法测定,其中 Fe^{2+} 由湿化学法分析;分析误差总体小于 1%, K_2O 、 Na_2O 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 2σ 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 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710265 \pm 12$ ($n = 9$)。主、微量元素及同位素测定结果见表 2 和 3。

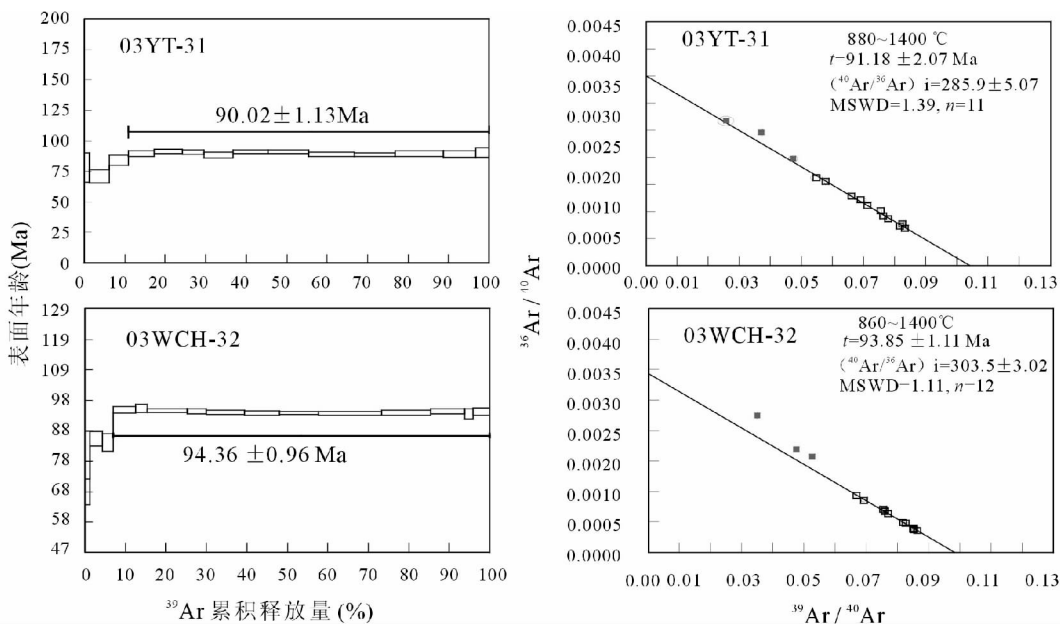


图 2 浙闽辉绿岩全岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱和反等时线图

Fig. 2 Whole-rock $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra and inverse isochrons of Late Mesozoic diabases in Zhejiang and Fujian provinces

表 1 浙闽晚中生代辉绿岩 Ar-Ar 分析结果

Table 1 Ar-Ar dating results of Late Mesozoic diabases from Zhejiang and Fujian provinces

温度(℃)	³⁶ Ar(a)	³⁷ Ar(ca)	³⁸ Ar(cl)	³⁹ Ar(k)	⁴⁰ Ar(r)	Age ± 2σ (Ma)	⁴⁰ Ar(r) (%)	³⁹ Ar(k) (%)	K/Ca ± 2σ
700	0.00021	0.00448	0.00000	0.00288	0.02135	67.61 ± 4.33	25.39	1.27	0.361 ± 0.063
780	0.00027	0.01088	0.00000	0.00670	0.06316	85.52 ± 2.48	43.77	2.96	0.346 ± 0.050
820	0.00022	0.01171	0.00000	0.00635	0.05891	84.22 ± 2.96	47.78	2.80	0.305 ± 0.047
860	0.00020	0.02182	0.00000	0.01247	0.13119	95.21 ± 1.08	68.74	5.50	0.321 ± 0.045
900	0.00009	0.00983	0.00000	0.00671	0.07101	95.71 ± 1.35	71.69	2.96	0.384 ± 0.059
950	0.00011	0.01912	0.00000	0.02235	0.23413	94.80 ± 0.62	87.56	9.86	0.657 ± 0.098
980	0.00005	0.00923	0.00000	0.01056	0.11041	94.66 ± 0.93	87.16	4.66	0.643 ± 0.091
1020	0.00015	0.02354	0.00000	0.02149	0.22395	94.33 ± 0.71	83.49	9.48	0.513 ± 0.070
1060	0.00010	0.01882	0.00000	0.01952	0.20287	94.09 ± 0.68	86.85	8.61	0.583 ± 0.085
1100	0.00010	0.01430	0.00000	0.02174	0.22601	94.10 ± 0.54	88.03	9.59	0.854 ± 0.127
1150	0.00024	0.03791	0.00000	0.03568	0.36973	93.82 ± 0.60	83.99	15.73	0.529 ± 0.072
1200	0.00028	0.06250	0.00000	0.02718	0.28289	94.21 ± 0.81	77.35	11.98	0.244 ± 0.033
1250	0.00018	0.05746	0.00000	0.01915	0.20010	94.58 ± 0.88	78.73	8.44	0.187 ± 0.026
1300	0.00005	0.02423	0.00000	0.00458	0.04749	93.82 ± 1.64	76.43	2.02	0.106 ± 0.015
1400	0.00010	0.04062	0.00000	0.00943	0.09845	94.54 ± 1.18	77.66	4.16	0.130 ± 0.018

温度(℃)	³⁶ Ar(a)	³⁷ Ar(ca)	³⁸ Ar(cl)	³⁹ Ar(k)	⁴⁰ Ar(r)	Age ± 2σ (Ma)	⁴⁰ Ar(r) (%)	³⁹ Ar(k) (%)	K/Ca ± 2σ
700	0.00008	0.00423	0.00000	0.00070	0.00591	78.17 ± 12.02	21.04	1.21	0.093 ± 0.022
780	0.00020	0.01461	0.00001	0.00291	0.02218	70.66 ± 5.47	27.47	5.04	0.112 ± 0.015
830	0.00012	0.01483	0.00000	0.00267	0.02436	84.19 ± 4.26	41.75	4.63	0.101 ± 0.014
880	0.00006	0.02210	0.00000	0.00367	0.03578	89.74 ± 2.37	67.10	6.37	0.093 ± 0.013
930	0.00004	0.02092	0.00000	0.00399	0.03968	91.51 ± 1.74	78.57	6.92	0.107 ± 0.015
970	0.00004	0.01205	0.00000	0.00316	0.03116	90.76 ± 1.97	74.38	5.48	0.147 ± 0.021
1010	0.00008	0.01010	0.00000	0.00414	0.03964	88.38 ± 2.56	64.06	7.16	0.230 ± 0.039
1050	0.00006	0.01135	0.00000	0.00494	0.04882	91.04 ± 1.54	73.01	8.56	0.244 ± 0.037
1090	0.00005	0.01602	0.00001	0.00577	0.05706	91.15 ± 1.60	79.74	9.99	0.202 ± 0.030
1130	0.00006	0.02412	0.00002	0.00659	0.06363	89.02 ± 1.66	77.14	11.41	0.153 ± 0.022
1170	0.00008	0.03780	0.00003	0.00580	0.05571	88.62 ± 1.42	70.16	10.04	0.086 ± 0.012
1220	0.00014	0.08822	0.00004	0.00690	0.06704	89.54 ± 2.22	62.19	11.96	0.044 ± 0.006
1300	0.00013	0.08526	0.00001	0.00464	0.04481	89.11 ± 2.89	54.16	8.03	0.031 ± 0.004
1400	0.00006	0.02528	0.00000	0.00185	0.01810	90.17 ± 3.89	51.98	3.20	0.041 ± 0.006

4 Ar-Ar 年代学

从图 2 和表 1 可以看出,文成辉绿岩(03WCH-32)年龄坪占³⁹Ar 累积释放量 90% 以上,坪年龄为 94.36 ± 0.96Ma,与反等时线截距年龄 93.85 ± 1.11Ma 在误差范围内一致,且其初始⁴⁰Ar/³⁶Ar 同位素组成为 303.5 ± 3.03,在误差范围内与大气⁴⁰Ar/³⁶Ar 一致,该组辉绿岩脉的成岩年龄约 94Ma。福建永泰辉绿岩(03YT-31)年龄坪占³⁹Ar 累积释放量 90% 以上,坪年龄为 90.02 ± 1.13Ma,与反等时线截距年龄 91.18 ± 2.07Ma 在误差范围内一致,~90Ma 的 Ar-Ar 坪年龄代表了该组辉绿岩的成岩年龄。

两地辉绿岩年龄 90~94Ma,对应于李献华等(1997)报道的华南中生代 4 次重要拉张活动中的晚期阶段。

5 地球化学特征

5.1 主量元素特征

在主量元素变化方面,浙江文成和福建永泰两地辉绿岩

基本一致,SiO₂ 为 48.61~55.54% (无水 100% 标准化含量),TiO₂ = 1.41%~2.04%,Na₂O = 1.98%~3.89%,K₂O = 0.28%~2.26%,MgO = 4.08%~5.32% (表 2)。在 TAS 图和 SiO₂-K₂O 图上除 2 个文成样品外均落入钙碱性区域(图 3)。在 Harker 图上,这些辉绿岩脉随 SiO₂ 的增加,MgO、FeO^T、CaO、Al₂O₃、TiO₂ 和 P₂O₅ 均降低,反映了一定程度的镁铁质矿物、斜长石和副矿物如钛铁矿、磷灰石的分离结晶作用。相对华南内部如闽西、江西及海南同时代辉绿岩(张贵山等, 2004; 谢桂青等, 2002; 葛小月等, 2003),本文辉绿岩样品具相对低 MgO (或 Mg[#] = 41~48) 和高 FeO^T、TiO₂ 的特征(图 4)。

5.2 微量元素特征

文成辉绿岩 ΣREE 为 143 × 10⁻⁶~193 × 10⁻⁶, (La/Yb)_N = 9.0 × 10⁻⁶~13.5, Eu/Eu* = 0.80~0.90,永泰辉绿岩 ΣREE = 113 × 10⁻⁶~127 × 10⁻⁶, (La/Yb)_N = 5.9~9.7, Eu/Eu* = 0.88~0.97 (表 2)。两者均呈 LREE 富集的右倾模式, Eu 弱亏损(图 5),反映岩浆经历了一定程度的斜长石

表 2 浙闽晚中生代辉绿岩主(wt%)、微量($\times 10^{-6}$)元素分析结果Table 2 Major (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) compositions of Late Mesozoic diabases from Zhejiang and Fujian provinces

样品号	浙江文成										福建永泰					
	03WCH-04	03WCH-06	03WCH-30	03WCH-32	03WCH-33	03WCH-38	03WCH-41	03WCH-42	03YT-31	03YT-32	03YT-33	03YT-35	03YT-36			
SiO ₂	52.45	49.76	51.55	50.29	51.83	49.97	51.36	48.14	49.05	53.29	52.67	51.78	52.59			
TiO ₂	1.33	1.96	1.67	1.62	1.66	1.54	1.66	1.79	1.69	1.54	1.56	1.59	1.60			
Al ₂ O ₃	16.45	15.81	16.43	16.56	16.48	16.36	16.20	16.51	16.84	15.47	15.40	15.43	15.28			
Fe ₂ O ₃	6.40	5.47	3.94	3.85	4.03	5.23	4.98	5.97	5.82	4.03	4.29	4.72	4.49			
FeO	2.50	6.00	6.50	6.70	6.40	5.30	5.60	5.50	5.30	5.55	5.40	5.30	5.25			
MnO	0.15	0.17	0.16	0.20	0.15	0.25	0.17	0.17	0.18	0.16	0.16	0.17	0.16			
MgO	4.14	4.19	4.07	4.22	3.98	4.37	4.01	4.85	4.73	4.52	4.66	4.94	4.33			
CaO	8.51	7.31	8.30	7.87	8.75	6.93	8.31	8.45	9.00	6.01	6.42	6.23	7.16			
Na ₂ O	1.87	3.54	2.46	2.46	2.54	2.48	2.37	2.48	2.63	3.61	3.47	3.74	3.45			
K ₂ O	0.26	1.49	1.65	2.10	1.18	2.15	1.87	1.67	0.56	1.69	1.75	1.81	1.58			
P ₂ O ₅	0.37	0.54	0.44	0.44	0.46	0.43	0.46	0.47	0.54	0.45	0.46	0.47	0.46			
LOI	5.34	3.49	2.58	3.38	2.29	4.69	2.75	3.73	3.38	3.43	3.50	3.54	3.41			
Total	99.77	99.73	99.75	99.69	99.75	99.7	99.74	99.73	99.72	99.75	99.74	99.72	99.76			
Mg#	0.47	0.41	0.42	0.43	0.42	0.44	0.42	0.45	0.45	0.47	0.48	0.48	0.46			
Sc	19.9	23.0	21.6	20.3	20.5	18.2	22.0	22.9	26.6	24.8	26.2	24.8	25.6			
V	156	234	207	203	197	190	210	214	244	214	230	218	225			
Cr	47.5	28.7	19.2	16.8	18.1	16.9	19.6	35.4	98.0	75.5	82.5	88.1	80.1			
Co	20.0	23.1	26.1	22.6	25.7	22.1	21.9	24.9	26.2	21.0	22.3	22.4	21.7			
Rb	2.2	28.9	50.5	60.3	32.5	56.4	50.0	35.3	9.5	45.3	45.7	43.8	38.1			
Ba	385	676	676	1165	708	1078	769	692	547	606	670	764	593			
Sr	592	799	682	713	701	604	688	765	644	711	727	654	619			
Th	4.71	2.24	6.56	3.82	4.38	3.73	4.63	3.32	1.80	3.66	3.34	2.80	3.10			
U	0.82	0.49	0.65	0.58	0.70	0.56	0.73	0.56	0.35	0.72	0.67	0.58	0.64			
Nb	9.7	10.6	10.3	9.3	10.2	9.8	11.3	10.4	7.5	9.1	7.9	7.8	8.1			
Ta	0.54	0.60	0.63	0.54	0.60	0.54	0.62	0.62	0.49	0.62	0.56	0.54	0.57			
Zr	228	202	177	183	196	150	205	183	130	140	138	133	150			
Hf	5.826	5.106	4.229	4.692	5.006	3.907	5.201	4.658	3.507	3.854	3.818	3.553	3.75			
Y	23.5	27.8	25.8	22.7	24.0	20.0	24.0	23.6	23.7	25.2	23.5	22.8	24.1			
La	32.08	29.63	36.38	33.26	37.26	33.68	38.80	28.63	18.40	22.28	21.47	19.96	21.10			

续表 2

Continued Table 2

样品号	03WCH-04	03WCH-06	03WCH-30	03WCH-32	03WCH-33	03WCH-38	03WCH-41	03WCH-42	03YT-31	03YT-32	03YT-33	03YT-35	03YT-36
地区	浙江文成						福建永泰						
Ce	63.44	63.00	70.02	66.24	73.81	66.67	76.53	60.10	40.57	47.13	44.94	42.75	45.14
Pr	8.23	8.67	9.30	8.61	9.63	8.73	10.02	8.10	5.80	6.56	6.13	5.91	6.19
Nd	31.13	35.96	35.31	33.46	37.27	32.84	39.73	32.00	24.32	26.67	24.94	24.58	25.80
Sm	5.93	7.36	6.77	6.34	6.89	6.28	7.48	6.35	5.40	5.63	5.29	5.20	5.49
Eu	1.61	2.12	1.89	1.66	1.93	1.58	1.99	1.96	1.77	1.74	1.62	1.53	1.69
Gd	5.49	7.04	5.71	5.76	5.91	5.55	6.52	5.96	5.66	5.51	5.46	5.36	5.63
Tb	0.81	0.97	0.84	0.81	0.87	0.77	0.89	0.86	0.82	0.85	0.81	0.77	0.82
Dy	4.51	5.14	4.44	4.42	4.72	4.12	4.92	4.77	4.53	4.73	4.60	4.43	4.57
Ho	0.86	0.97	0.85	0.81	0.86	0.76	0.89	0.87	0.87	0.90	0.87	0.84	0.88
Er	2.21	2.45	2.12	2.12	2.22	1.98	2.30	2.29	2.30	2.41	2.28	2.22	2.28
Tm	0.35	0.38	0.32	0.31	0.33	0.28	0.35	0.34	0.34	0.36	0.35	0.34	0.35
Yb	2.18	2.37	1.95	1.93	2.10	1.79	2.18	2.13	2.22	2.31	2.27	2.20	2.31
Lu	0.35	0.37	0.29	0.31	0.32	0.27	0.34	0.33	0.34	0.37	0.37	0.34	0.35
(La/Yb) _N	10.54	8.99	13.41	12.39	12.72	13.49	12.77	9.62	5.95	6.92	6.79	6.5	6.56
ΣREE	159	166	176	166	184	165	193	155	113	127	121	116	123
δEu	0.85	0.89	0.91	0.83	0.9	0.8	0.85	0.96	0.97	0.94	0.91	0.88	0.92

表 3 浙闽晚中生代辉绿岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 3 Sr-Nd isotopic compositions of Late Mesozoic diabases from Zhejiang and Fujian provinces

样品号	Rb(×10 ⁻⁶)	Sr(×10 ⁻⁶)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr±2σ	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(i)	Nd(×10 ⁻⁶)	Sm(×10 ⁻⁶)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd±2σ	ε _{Nd} (t)
03WCH-04	2.18	591.6	0.0104	0.708058±10	0.7080	31.13	5.93	0.1195	0.512418±10	-3.4
03WCH-06	28.9	798.8	0.1021	0.708486±10	0.7084	35.96	7.36	0.1285	0.512362±9	-4.6
03WCH-30	50.5	682.4	0.2089	0.709704±14	0.7094	35.31	6.77	0.1203	0.512226±10	-7.1
03WCH-32	60.3	712.9	0.2389	0.709938±13	0.7096	33.46	6.34	0.1189	0.512293±10	-5.8
03WCH-33	32.5	701.2	0.1308	0.709489±9	0.7093	37.27	6.89	0.1161	0.512193±6	-7.7
03WCH-38	56.4	603.9	0.2640	0.710089±13	0.7097	32.84	6.27	0.1120	0.512241±10	-6.8
03WCH-42	35.3	764.8	0.1305	0.709156±17	0.7090	32	6.35	0.1246	0.512353±10	-4.7
03YT-31	9.54	643.5	0.0418	0.706137±11	0.7061	24.32	5.40	0.1395	0.512575±10	-0.6
03YT-32	45.3	711.3	0.1798	0.706323±11	0.7061	26.67	5.63	0.1324	0.512628±9	0.5
03YT-33	45.7	727.1	0.1775	0.706358±17	0.7061	24.94	5.29	0.1332	0.512568±10	-0.6
03YT-35	43.8	653.9	0.1894	0.706430±13	0.7062	24.58	5.20	0.1328	0.512556±9	-1.2

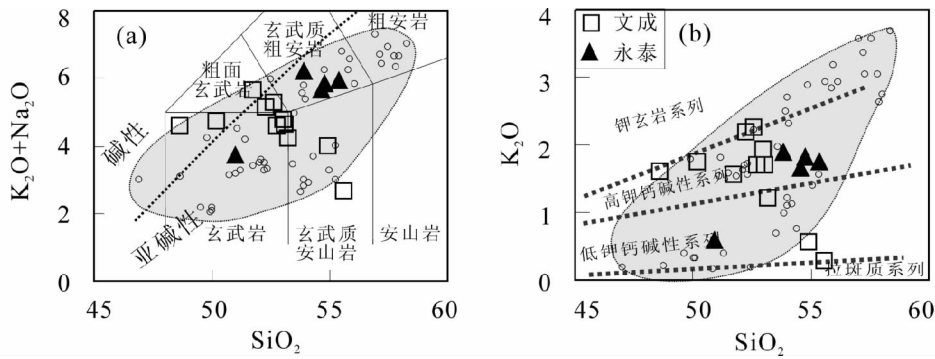


图3 浙闽辉绿岩 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 图解 (a, 据 Middlemost, 1994) 和 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解 (b, 据 Morrison, 1980)

图中阴影区代表闽西、江西及海南辉绿岩空心圆点围成的区域,数据引自张贵山等, 2004; 谢桂青等, 2002; 葛小月等, 2003

Fig. 3 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (a, after Middlemost, 1994) and $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ diagrams (b, after Morrison, 1980) of Late Mesozoic diabases in Zhejiang and Fujian provinces

The shaded areas represent the compositional ranges of diabases (hollow circles) from the western Fujian, Jiangxi and Hainan islands (Zhang *et al.*, 2004; Xie *et al.*, 2002; Ge *et al.*, 2003)

分离结晶作用;与 MgO 、 FeO^{T} 的变化一致,相容微量元素 Co、V 与 SiO_2 呈负相关关系,而 Sr 则与 Al_2O_3 、 Na_2O 的变化类似(图4)。微量元素蛛网图表现为 LILE (如 Ba、Th) 和 LREE 富集、HFSE 元素亏损的特点,与粤北、海南及闽西部分辉绿岩相似(图6)。这种微量元素特征可能是亏损地幔岩浆(如 MORB 或 OIB 型岩浆)受地壳混染的结果,也可能是富集岩石圈地幔部分熔融岩浆的特征或不同源区混合作用所致。

5.3 Sr-Nd 同位素组成

文成辉绿岩具有高放射成因 Sr 和低放射成因 Nd 同位素组成: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i) = 0.7080 \sim 0.7097$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -7.7 \sim -3.4$ (表3),与海南基性岩脉(81Ma)相似(葛小月等, 2003),也与区域上的浦江玄武质安山岩(约110Ma)的同位素组成相似($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i) = 0.7083 \sim 0.7086$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -6.0 \sim -3.7$,秦社彩, 2007);福建永泰辉绿岩具有中等放射成因 Sr 和类似球粒陨石的 Nd 同位素组成,其初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i) = 0.7061 \sim 0.7062$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 变化在 $-1.2 \sim +0.5$ 之间(表3)。这些特征表明华南晚中生代不同地区基性岩脉的 Sr-Nd 同位素组成存在差异,但都不同于亏损软流圈起源的镁铁质岩浆。这种相对演化的 Sr-Nd 同位素组成特征也暗示在岩浆演化或源区形成过程中有再循环地壳物质的参与。

6 岩石成因讨论

6.1 分离结晶作用

在主量元素变化方面,两地辉绿岩脉基本上均属于高钾钙碱性系列岩石,与福建沿海、闽西辉绿岩以及玄武质火山岩相似,而与海南辉绿岩的高钾系列(钾玄岩,约81Ma)或粤北辉绿岩的低钾拉斑系列不同(葛小月等, 2003;李献华

等, 1997)。辉绿岩相对低的 MgO 和 $\text{Mg}^{\#}$ 指示这些岩石在形成过程中经历了分离结晶作用,如 MgO 、 FeO^{T} 、Co、V 等随 SiO_2 增加而明显减少反映镁铁矿物(如橄榄石等)为主的分离结晶作用;所有样品都显示出弱 Eu 负异常,且 CaO 、 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 随 SiO_2 增加的变化略有降低,指示斜长石存在一定程度的分离结晶作用,但不占主导地位(图4)。结合岩相学观察,认为辉绿岩岩浆曾经历了富镁铁矿物(如橄榄石等)为主和斜长石为辅的分离结晶作用。

6.2 地壳组分混染作用

浙、闽两地的辉绿岩脉所显示出的较高放射成因 Sr 和较低放射成因 Nd 暗示这些岩石可能其源区或在岩浆演化过程中受到了地壳组分的混染作用。由于上地壳岩石的 $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5$ 比值高,岩浆一旦经历上地壳混染作用,分异岩浆的 $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5$ 比值会随 SiO_2 增加而迅速增加。然而,两地辉绿岩的 $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5$ 与 SiO_2 之间并没有显示正相关关系(如图7a, b),反映岩浆受上地壳混染的可能性不大。如果这些辉绿岩确实受到地壳混染作用的影响,最有可能的混染物是下地壳岩石(LCC)。

已有研究显示(Wang *et al.*, 2003, 2005;秦社彩, 2007),区域上如江山、赣南存在 OIB 型元素-同位素特征的玄武岩,我们选择前人报道的 OIB 型玄武岩和本文具最高 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和最低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i)$ 的样品(YT-32)分别代表地幔来源岩浆端元,并选择区域下地壳岩石作为混染端元进行模拟计算(模拟参数见表4)。模拟结果显示(图8a, b),无论是文成还是永泰地区辉绿岩的 Sr-Nd 同位素组成都难以用 OIB 岩浆受到下地壳混染作用来解释。在另一方面,以 YT-32 为代表的地幔来源岩浆需要混入 20% ~ 50% 的 LCC 物质才可能形成文成辉绿岩,如此高的下地壳物质组分加入难以达到热平衡(Guo *et al.*, 2007)。类似地,两个地区的辉绿岩也不

表4 浙闽辉绿岩 Sr-Nd 同位素模拟参数

Table 4 Modeling parameters for Sr-Nd isotopic compositions of Late Mesozoic diabase in Zhejiang and Fujian provinces

端元组分	Sr ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
OIB 软流圈	20	1.2	0.7035	+9
OIB 玄武岩	660	38.5	0.7035	+9
EM2	50	3	0.712	-13
LCC	230	50	0.712	-12

注:LCC 来自胡恭任和章邦桐 (1998); OIB 玄武岩和 EM2 的 Sr-Nd 同位素组成据 Wang *et al.* (2003, 2005), EM2 端元的 Sr 和 Nd 含量为估计值, 大致相当于原始地幔的 2.5 倍, 其余参数来自 (Sun and McDonough, 1989)

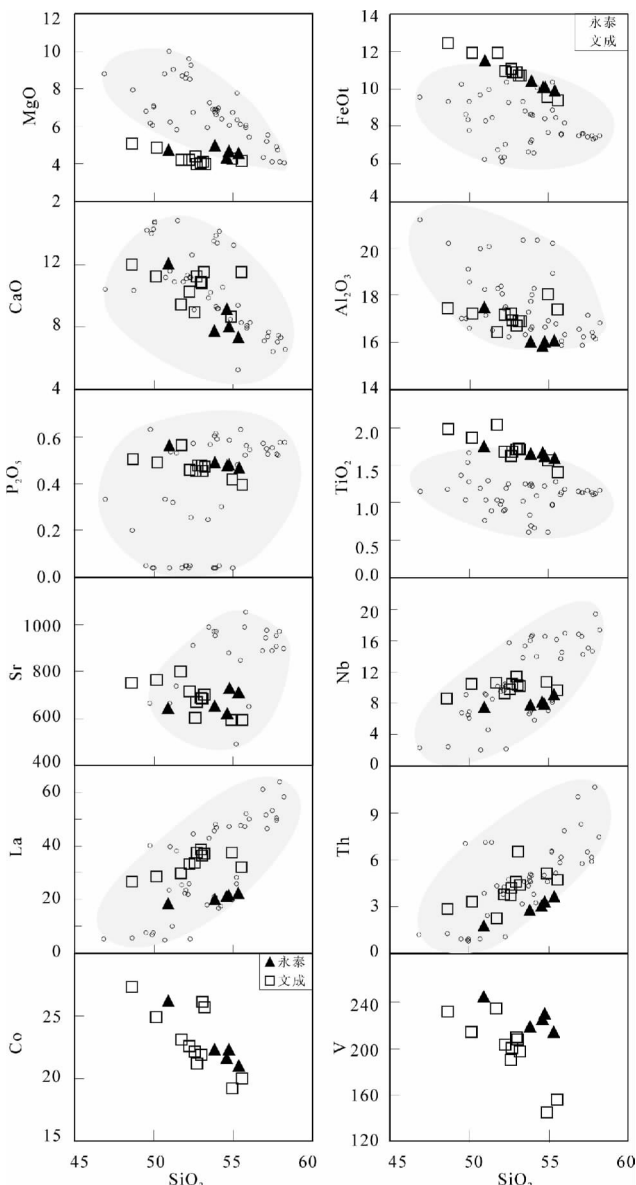


图4 浙闽辉绿岩 Harker 图解

图中阴影区数据来源同图3

Fig. 4 Harker diagrams of Late Mesozoic diabases in Zhejiang and Fujian provinces

The data of the shaded areas are the same as those in Fig. 3

大可能为 OIB 型岩浆经 AFC 作用的结果 (图 8c)。只有当同化作用速率和分离结晶速率之比值 $r = 0.45$ 时, 残余熔体分数 F 分别为 5% ~ 20% 和 40% ~ 50% 时才能模拟出目前观察到的文成和永泰辉绿岩的 Sr-Nd 同位素组成, 如此低残余岩浆比例情况下形成的是中酸性岩浆, 而不是目前见到的镁铁质熔体。综上所述, 我们认为文成和永泰地区晚中生代辉绿岩浆受地壳混染或 AFC 的影响可以忽略, 与前人认为区域中生代玄武岩受地壳混染作用的影响非常有限的结论相一致 (谢昕等, 2001)。

6.3 岩浆混合作用

影响基性岩浆元素和同位素地球化学特征变化的因素除源区成分、部分熔融程度、分离结晶作用、地壳混染或 AFC 外, 还有不同来源岩浆的混合作用或不同源区混合作用的结果。两地辉绿岩 La/Nb 与 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 负相关, 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i)$ 的正相关 (图 9a, b), 导致这些相关关系的原因有 3 种: (1) 岩浆混合作用, 比如 OIB + 壳源酸性岩浆; (2) 地壳混染作用/AFC 过程; 和 (3) 源区混合, 其中一个端元具高 La/Nb 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i)$ 和低 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$, 如富集岩石圈地幔; 而另一端元则低 La/Nb 、高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i)$, 如软流圈地幔。

当高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 原始地幔岩浆混入壳源的富放射性 Sr-Nd 的中酸性岩浆, 混合后的岩浆将表现出 $1/\text{Sr}-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i)$ 负相关、 $1/\text{Nd}-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的正相关变化, 然而文成和永泰辉绿岩并没有表现出类似的相关性 (图 8a, b), 因此认为岩浆混合作用并非控制浙闽辉绿岩脉成因的控制因素, 这与我们野外观察事实—辉绿岩脉与酸性火山围岩之间为截然接触界线是一致的。

基于上述讨论和分析, 文成和永泰地区晚中生代辉绿岩脉的 Sr-Nd 同位素组成主要继承了岩浆熔融源区的同位素组成。

6.4 岩浆源区

Wang *et al.* (2003, 2005) 对扬子、华夏陆块晚中生代镁铁质岩石的研究认为在华夏陆块存在类似于 EM2 型的岩石圈地幔。我们本次研究的辉绿岩所显示的 LILE 和 LREE 富集、HFSE 亏损等微量元素特征也暗示其熔融源区地幔受到了富集作用。

岩石圈地幔参与大陆玄武岩浆形成的方式主要有三种: (1) 来自软流圈 (或地幔柱) 的岩浆在穿越岩石圈地幔时发生混染作用 (Wilson and Downes, 1991; Arndt *et al.*, 1993); (2) 熔体直接来源于大陆岩石圈地幔的熔融, 软流圈主要提供部分熔融的热源 (Gallagher and Hawkesworth, 1992; Hooper and Hawkesworth, 1993; Hawkesworth *et al.*, 1995; Rogers *et al.*, 1995); (3) 岩石圈底部与软流圈同时发生部分熔融作用 (Macdonald *et al.*, 2001)。Ormerod *et al.* (1988) 认为 Zr/Ba 比值可用于判断源区俯冲组分的经验指标, $\text{Zr}/\text{Ba} > 0.2$ 的岩浆趋于 OIB 性质。本文辉绿岩的 $\text{Zr}/\text{Ba} = 0.14$

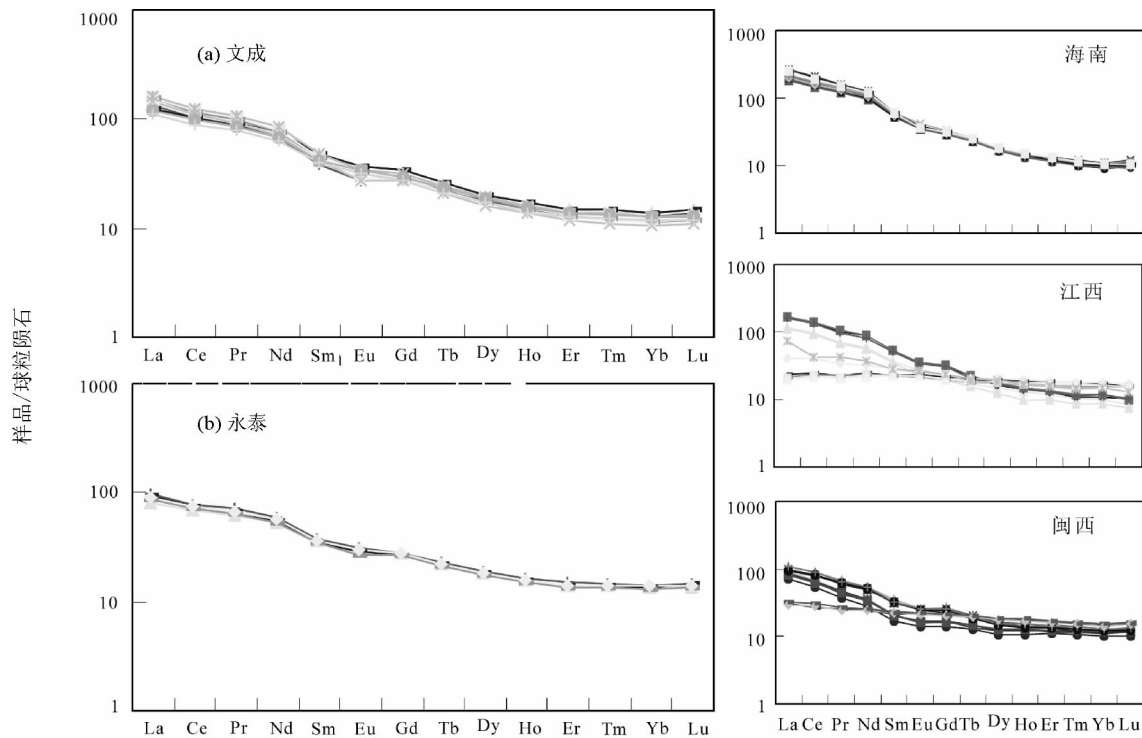


图5 浙闽辉绿岩 REE 配分模式图

球粒陨石标准值引自 Taylor and McLennan, 1985; 其它数据来源同图3

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns of Late Mesozoic diabases in Zhejiang and Fujian provinces

Chondrite value is from Taylor and McLennan (1985); Other data are the same as in Fig. 3

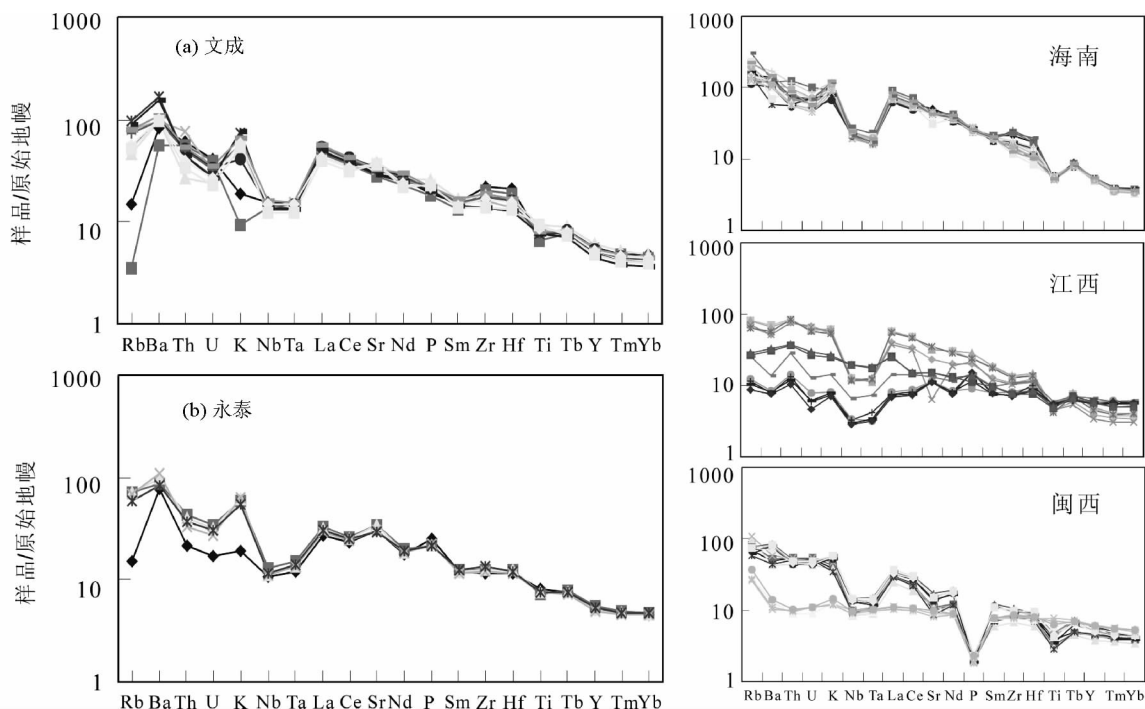


图6 浙闽辉绿岩微量元素蛛网图

原始地幔标准化值引自 Sun and McDonough, 1989; 其它数据来源同图3

Fig.6 Primitive mantle-normalized spidergrams of Late Mesozoic diabases in Zhejiang and Fujian provinces

Primitive mantle value is from Sun and McDonough (1989). Other data are the same as in Fig. 3

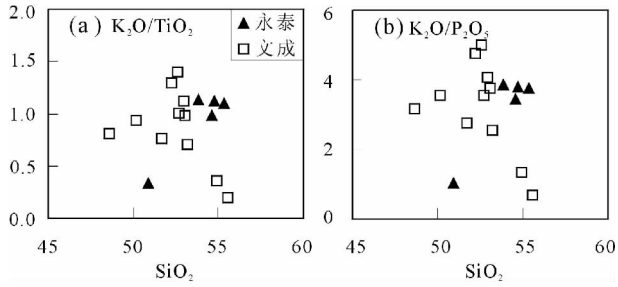


图7 浙闽辉绿岩 SiO_2 对 $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5$ 等元素比值图

图中阴影区数据来源同图3

Fig. 7 SiO_2 vs. $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5$ plots of Late Mesozoic diabases in Zhejiang and Fujian provinces

The data of the shaded areas are the same as in Fig. 3

~0.59,既显示出 OIB 型岩浆的性质 ($\text{Zr}/\text{Ba} > 0.2$),又有富集岩石圈地幔的特征 ($\text{Zr}/\text{Ba} < 0.2$),但多数样品的 $\text{Zr}/\text{Ba} < 0.2$,暗示区域辉绿岩的主体部分存在富集岩石圈地幔的参与。

为更好地理解这两种组分的相对贡献,我们进一步利用表4的参数,对软流圈和岩石圈共同参与下岩浆熔融源区的同位素变化特征进行了模拟,图8d的模拟曲线与实际辉绿岩样品的匹配结果显示,当70%~50% OIB型软流圈+30%~50% EM2型岩石圈共同熔融时能较好地解释文成辉绿岩的 Sr-Nd 同位素变化范围,而85%~80% OIB型软流圈+15%~20% EM2 熔融时则能形成目前所见到的永泰辉绿岩同位素组成。

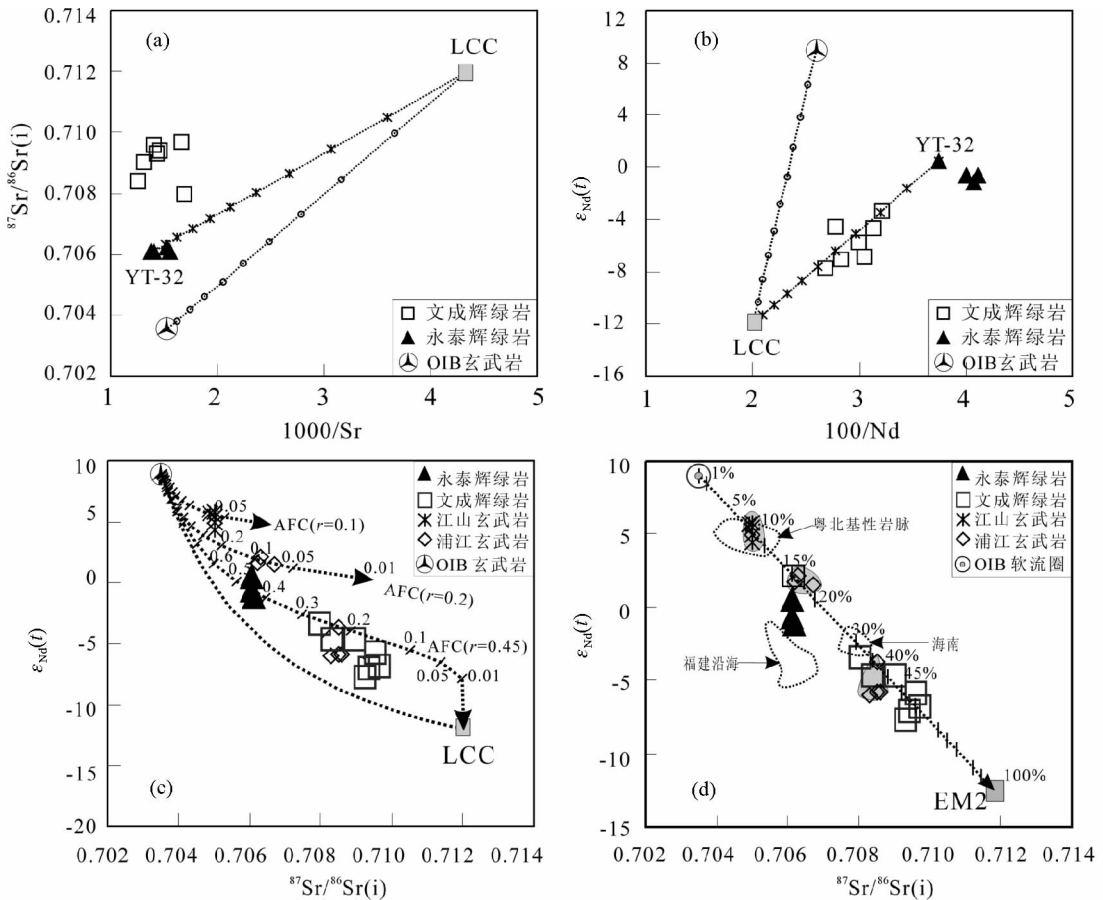


图8 浙闽辉绿岩 Sr-Nd 同位素组成及模拟曲线

模拟计算参数见表4

Fig. 8 Sr-Nd isotope compositions of Late Mesozoic diabases in Zhejiang and Fujian provinces

The calculation parameters in the modeling are listed in Table 4

6.5 岩浆作用构造背景

以上分析表明,文成和永泰地区的辉绿岩均表现出明显

的相对 HFSE 亏损,暗示其岩石圈地幔组分的富集作用与俯冲板片的改造作用有关,这种富集型的幔源特征可能早期俯冲板片改造的记录,也可能是同期板块俯冲的结果。用于指

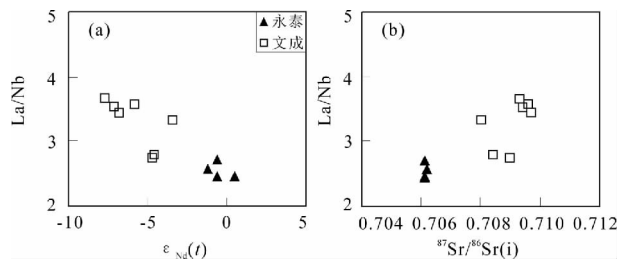


图9 浙闽辉绿岩 La/Nb 对 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i)$ (a) 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (b) 图

Fig. 9 La/Nb vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i)$ (a) and La/Nb vs. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (b) plots of Late Mesozoic diabases in Zhejiang and Fujian provinces

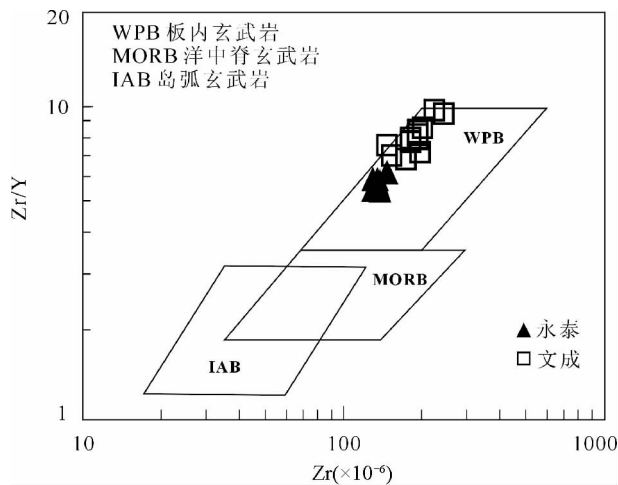


图10 浙闽辉绿岩 Zr 对 Zr/Y 图 (据 Pearce, 1982)

Fig. 10 Zr vs. Zr/Y diagram of Late Mesozoic diabase in Zhejiang and Fujian provinces (after Pearce, 1982)

示基性岩浆形成构造背景的 Zr/Y-Zr 图解显示 (Pearce, 1982), 文成和永泰辉绿岩均落入板内环境区域 (图 10), 暗示辉绿岩浆并非形成于真正的岛弧或活动大陆边缘环境, 其所显示出的富集型幔源特征可能主要继承了早期的俯冲板片改造记录。

同时, 在中国东南部发育了一系列早白垩世拉张红色断陷盆地, 反映自早白垩世以来, 区域上处于岩石圈伸展背景。华南地区晚中生代从早到晚 (140 ~ 70Ma) 发育了多期次而广泛的辉绿岩脉, 也指示当时强烈的地壳拉张背景 (李献华等, 1997; 赵军红, 2004), 这种地壳拉张从早期的局部地区 (如 140Ma 主要集中在粤北和闽西) 过渡到晚期 (94Ma 以来) 的全面性拉张的幕式活动特点 (范蔚茗等, 2003; Li and Li, 2007)。这种伸展背景下形成的辉绿岩脉遍布于华南的闽西、福建沿海、海南及江西等地, 为富集岩石圈地幔和对流软流圈共同熔融作用的产物 (李寄岷, 1994; 李献华等, 1997; 谢桂青等, 2002; 葛小月等, 2003; 张贵山等, 2004;

赵军红, 2004)。此外, 来自江绍断裂带镁铁质火成岩的研究也显示, 白垩纪晚期 (112 ~ 99Ma), 软流圈来源的岩浆在地表的出露范围有逐渐增大的趋势 (秦社彩, 2007)。

综上所述, 形成于浙闽沿海火山活动晚期 (90 ~ 94Ma) 的辉绿岩脉, 是华南地区全面伸展拉张背景下, 软流圈上涌与富集岩石圈地幔相互作用并发生部分熔融的产物, 是岩石圈伸展作用的重要表现之一。

References

- Arndt NT, Czamanske GK, Wooden JL and Fedorenko VA. 1993. Mantle and crustal contributions to continental flood volcanism. *Tectonophysics*, 223:39-52
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Zhejiang Province. 1996. *Lithostratigraphy of Zhejiang Province*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1-236 (in Chinese)
- Fan WM, Wang YJ, Guo F and 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)
- Gallagher K and Hawkesworth CJ. 1992. Dehydration melting and the generation of continental flood basalts. *Nature*, 358:57-59
- Ge XY, Li XH and Zhou HW. 2003. Geochronology, geochemistry and Sr-Nd isotopes of the Late Cretaceous mafic dike swarms in southern Hainan Island. *Geochimica*, 32(1): 11-20 (in Chinese with English abstract)
- Guo F, Fan WM, Li XY and Li XY. 2007. Geochemistry of Mesozoic mafic volcanic rocks from the Yanshan belt in the northern margin of the North China Block: Relations with post-collisional lithospheric extension. In: Zhai MG, Windley BF, Kusky TM *et al.* (eds.). *Mesozoic Sub-Continental Lithospheric Thinning under Eastern Asia*. Geological Society, London, Special Publications, 280:101-130
- Halls HC. 1982. The importance and potential of mafic dyke swarms in studies of geodynamic processes. *Geoscience Canada*, 9(3):145-154
- Halls HC and Fahrig WC. 1987. *Mafic Dyke Swarms*. Geological Society of Canada Special Publication, 34
- Hawkesworth CJ, Turner S, Gallagher K, Hunter A, Bradshaw T and Rogers N. 1995. Calc-alkaline magmatism, lithospheric thinning and extension in the Basin and Range. *J. Geophys. Res.*, 100: 10271-10286
- Hooper PR and Hawkesworth CJ. 1993. Isotopic and geochemical constraints on the origin and evolution of the Columbia River basalt. *J. Petrol.*, 34:1203-1246
- Hu GR and Zhang BT. 1998. Neodymium isotope composition and source materials of the meta-basement in Central Jiangxi Province. *Acta petrologica et Mineralogica*, 17(1): 35-40 (in Chinese with English abstract)
- Lapierre H, Jahn BM, Charvet J and 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
- Li JY. 1994. Implications for the mantle evolution of SE China since Late Mesozoic chronology and geochemistry of basaltic rocks from Penghu islands and mafic dikes from east Fujian. Ph. D. Dissertation. Taibei: Taiwan University (in Chinese with English summary)
- Li XH, Hu RZ and Rao B. 1997. Geochronology and geochemistry of Cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China. *Geochimica*, 26(2): 14-29 (in Chinese with English abstract)
- Li ZX and Li XH. 2007. Formation of the 1300km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2):179-182
- Liu Y, Liu HC and Li ZH. 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)
- Lu ZG, Tao KY, Xie JY, Xie DK, Wang WB and Chen HN. 1997. Volcanic Geology and Mineral Resources of SE China Continent. Beijing: Geological Publishing House, 1–428 (in Chinese)
- Macdonald R, Rogers NW, Fitton JG, Black S and Smith M. 2001. Plume-lithosphere interaction in the generation of the basalts of the Kenya rift, East Africa. *J. Petrol.*, 42:877–900
- Middlemost EAG. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth Sciences Review*, 37:215–224
- Morrison GW. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association. *Lithos*, 13:97–108
- Nie TC and Zhu GL. 2004. On the characteristics and evolution of geological structures in the intermediate section of the Zhenghe-Dapu deep faulted zone. *Geology of Fujian*, (4):186–189 (in Chinese)
- Ormerod DS, Hawkesworth CJ, Rogers NW, Leeman WP and Menzies MA. 1988. Tectonic and magmatic transitions in the western Great Basin, USA. *Nature*, 333(6171–6172):349–353
- Pearce JA. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorps RS (ed.). *Andesites*. New York: John Wiley and Sons, 525–548
- Qin SC. 2007. Geochronology and geochemistry of Cretaceous mafic volcanic rocks from Zhejiang and Fujian provinces, SE China: Petrogenesis and geodynamic implications for lithospheric extension. Ph. D. Dissertation. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1–113 (in Chinese with English summary)
- Rogers NW, Hawkesworth CJ and Ormerod DS. 1995. Late Cenozoic basaltic magmatism in the Western Great Basin, California and Nevada. *J. Geophys. Res.*, 100:10287–10301
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and process. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Oceanic Basins*. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 42: 313–345
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 209–230
- Wang DZ and Zhou XM. 2002. Genesis of Late Mesozoic Volcanic Intrusive Complex of Southeast China and Crustal Evolution. Beijing: Science Press, 1–295 (in Chinese)
- Wang F, Zhu RX, Li Q, He HY, Luo QH, Lu XX, Sang HQ and Wang YL. 2004. A differential uplifting of Qinling orogeny belt evidences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology of granites. *Earth Science Frontiers*, 11(4):445–459 (in Chinese with English abstract)
- Wang YJ, Fan WM, Guo F, Peng TP and Li CW. 2003. Geochemistry of Mesozoic mafic rocks adjacent to the Chengzhou-Linwu fault, South China; Implication for the lithospheric boundary between the Yangtze and Cathaysic blocks. *International Geology Review*, 45:263–286
- Wang YJ, Fan WM, Peng TP and Guo F. 2005. Elemental and Sr-Nd isotopic systematics of the Early Mesozoic volcanic sequence in S Jiangxi Province, South China: Petrogenesis and tectonic implication. *Int. J. Earth Sci.*, 94:53–65
- Wilson M and Downes H. 1991. Tertiary-Quaternary extension-related alkali magmatism in western and central Europe. *J. Petrol.*, 32:811–849
- Windley BF. 1995. *The Evolving Continents*. 3rd Edition. New York: John Wiley and Sons
- Xie GQ, Hu RZ and Jia DC. 2002. Geological and geochemical characteristics and its significance of mafic dikes from Northwest Jiangxi Province. *Geochimica*, 31(4):329–337 (in Chinese with English abstract)
- Xie X, Xu XS, Zou HB and 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 XS and Xie X. 2005. Late Mesozoic-Cenozoic basaltic rocks and crust-mantle interaction, SE China. *Geological Journal of China Universities*, 11(3):318–334 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GS, Wen HJ and Qiu YZ. 2004. Geochemistry of the Late Mesozoic mafic dikes in western Fujian Province. *Geochimica*, 33(3):243–253 (in Chinese with English abstract)
- Zhao JH. 2004. Chronology and geochemistry of mafic rocks from Fujian Province; Implications for the mantle evolution of SE China since Late Mesozoic. Ph. D. Dissertation. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1–107 (in Chinese with English summary)

附中文参考文献

- 范蔚茗,王岳军,郭锋,彭头平. 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
- 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
- 胡恭任,章邦桐. 1998. LCC 来自赣中变质基底的 Nd 同位素组成和物质来源. *岩石矿物学杂志*, 17(1):35–40
- 李寄岷. 1994. 澎湖地区玄武岩类与福建地区基性岩脉之定年学与地球化学研究兼论中生代晚期以来中国东南地幔之演化. 博士学位论文. 台北:台湾大学
- 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): 14–29
- 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
- 陆志刚,陶奎元,谢家莹,谢寰克,王文斌,陈鹤年. 1997. 中国东南大陆火山地质及矿产. 北京:地质出版社
- 聂童春,朱根灵. 2004. 政和-大埔深(大)断裂带中段地质构造特征及其演化探讨. *福建地质*, (4): 186–189
- 秦社彩. 2007. 浙闽白垩纪镁铁质火山岩的地球化学特征及其深部动力学意义. 博士学位论文. 广州:中国科学院广州地球化学研究所
- 王德滋,周新民. 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
- 王非,朱日祥,李齐,贺怀宇,罗清华,卢欣祥,桑海清,王英兰. 2004. 秦岭造山带的差异隆升特征——花岗岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究的证据. *地学前缘*, 11(4):445–459
- 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):329–337
- 谢昕,徐夕生,邹海波,邢光福. 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
- 徐夕生,谢昕. 2005. 中国东南部晚中生代-新生代玄武岩与壳幔作用. *高校地质学报*, 11(3):318–334
- 张贵山,温捷捷,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
- 赵军红. 2004. 福建省基性岩的年代学和地球化学:晚中生代以来中国东南部地幔演化. 博士学位论文. 贵阳:中国科学院地球化学研究所
- 浙江省地质矿产局. 1996. *浙江岩石地层*. 武汉:中国地质大学出版社