

文章编号: 1000-4734(2004)03-0245-08

福建岱前山辉长岩体的地球化学特征与成因探讨

赵军红^{1,2}, 胡瑞忠¹, 刘 燊^{1,2}

(1. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100001)

摘要: 岱前山辉长岩体沿福建长乐—南澳大断裂带分布, 侵位于沿海的绿片岩相和角闪岩相的变质岩中及内陆的中生代火山岩中, 对其成因存在较多分歧。该岩体表现为与俯冲有关的岛弧地球化学特点, 但在时间上又与古太平洋板块低角度歪斜俯冲、晚中生代的变质事件、平潭—东山变质带抬升和长乐—南澳剪切带运动在时间上基本一致。对于其成因不能简单的用拉张或碰撞加以解释, 是受俯冲流体交代的上地幔, 经部分熔融沿长乐—南澳断裂—应力转换带侵入。它与中国东南部出露的其它基性岩同源, 但并未受到地壳的混染作用。计算结果表明, 岱前山岩体经 7% 的部分熔融形成, 其 Sm、Nd 含量高于原始地幔。

关键词: 岱前山; 俯冲; 拉张; 岩石圈地幔; 部分熔融

中图分类号: P581; P588.12 **文献标识码:** A

作者简介: 赵军红, 男, 1975 年生, 博士研究生, 地球化学专业。

中国东南部自中生代以来, 发育不同期次的基性脉岩, 岩体及岩流, 它以特殊的构造环境和地理位置引起地质学家的广泛关注^[1-3], 成为研究板块碰撞, 壳幔相互作用, 岩浆演化和地幔属性的窗口。然而, 与新生代玄武岩相比, 中国东南部中生代玄武岩和基性侵入岩分布相对较少, 因此到目前有关中国东南部中生代基性岩的地球化学研究较少。

中国东南部中生代基性岩的侵入位于重要的转折时期, 其显著特点是从侏罗纪到白垩纪区域构造应力场从挤压到拉张的转变^[4]。正确认识其成因和构造环境对于揭示华南板块的大地构造格架和壳幔演化历史都有重要的意义。

福建沿海地区在中生代经历了强烈的岩浆和构造活动, 晚中生代的中酸性岩石广泛分布, 占整个面积的 70%, 形成了一条长 500 km、宽 100 km 的火山岩带。侵入岩体尽管成分变化较大, 但主要组成为花岗岩, 其次为少量的闪长岩和辉长岩。

沿长乐—南澳断裂带, 分布着十余处镁铁、超镁铁质辉石岩、辉长岩块, 具代表性的有福建沿海的漳州上房辉长岩, 泉州桃花山辉石岩、辉长岩, 平潭岛莲花山辉长岩及福州官山橄长岩体, 这为我们较深入的研究晚中生代中国东南大地构造格架和

深部地质作用提供了良好的条件, 本文就莆田岱田山堆晶辉长岩的成岩背景和演化做一讨论。

1 岩石学和岩石化学特征

岱前山辉长岩出露于福建莆田, 由角闪辉长岩、斜长石和角闪石得到的全岩-矿物 Sm-Nd 内部等时线年龄为 $(95 \pm 2) \text{Ma}$ ^[1]。岩体近等轴, 据磁法和重力测定, 岩体南坡较陡, 为 $60^\circ \sim 70^\circ$, 北坡较缓, 为 $20^\circ \sim 30^\circ$, 岩块长 1.4 km, 宽 1.25 km。在岱前山附近的四乡、埔尾和东蔡也分布有辉长小岩块, 除辉长岩体外, 还分布有花岗岩, 共同组成了岱前山杂岩体, 辉长岩的围岩为糜棱岩化的变质岩。

岩石为灰黑色, 辉长结构, 块状构造。晶体主要为斜长石、角闪石、黑云母、单斜辉石和少量的铁—镁氧化物, 其中角闪石有轻微的绿泥石化。斜长石在单偏光镜下呈无色, 干涉色为一级灰—灰白—一级黄, 聚片双晶发育, 粒径大多数 $< 1.2 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$, 呈长条状、板状晶体, 自形程度较低, 费氏台测得 $An = 70$, 为培长石。角闪石呈绿色、黄褐色, 中等突起, 在 T2 样品中表现极为自形。

基性岩体 SiO_2 为 38.28% ~ 44.8%, 变化范围较小 (表 1), Al_2O_3 含量较高, 为 17.10% ~ 21.16%, 而 MgO 含量较低, 为 6.52% ~ 5.06%, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 1.35\% \sim 2.91\%$, DT2 样品的 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 8.29\%$ 。大部分样品均显示出低钾的特

收稿日期: 2003-12-17

基金项目: 中国科学院创新项目 (KZCX2-102); 国家杰出青年科学基金 (49925309)

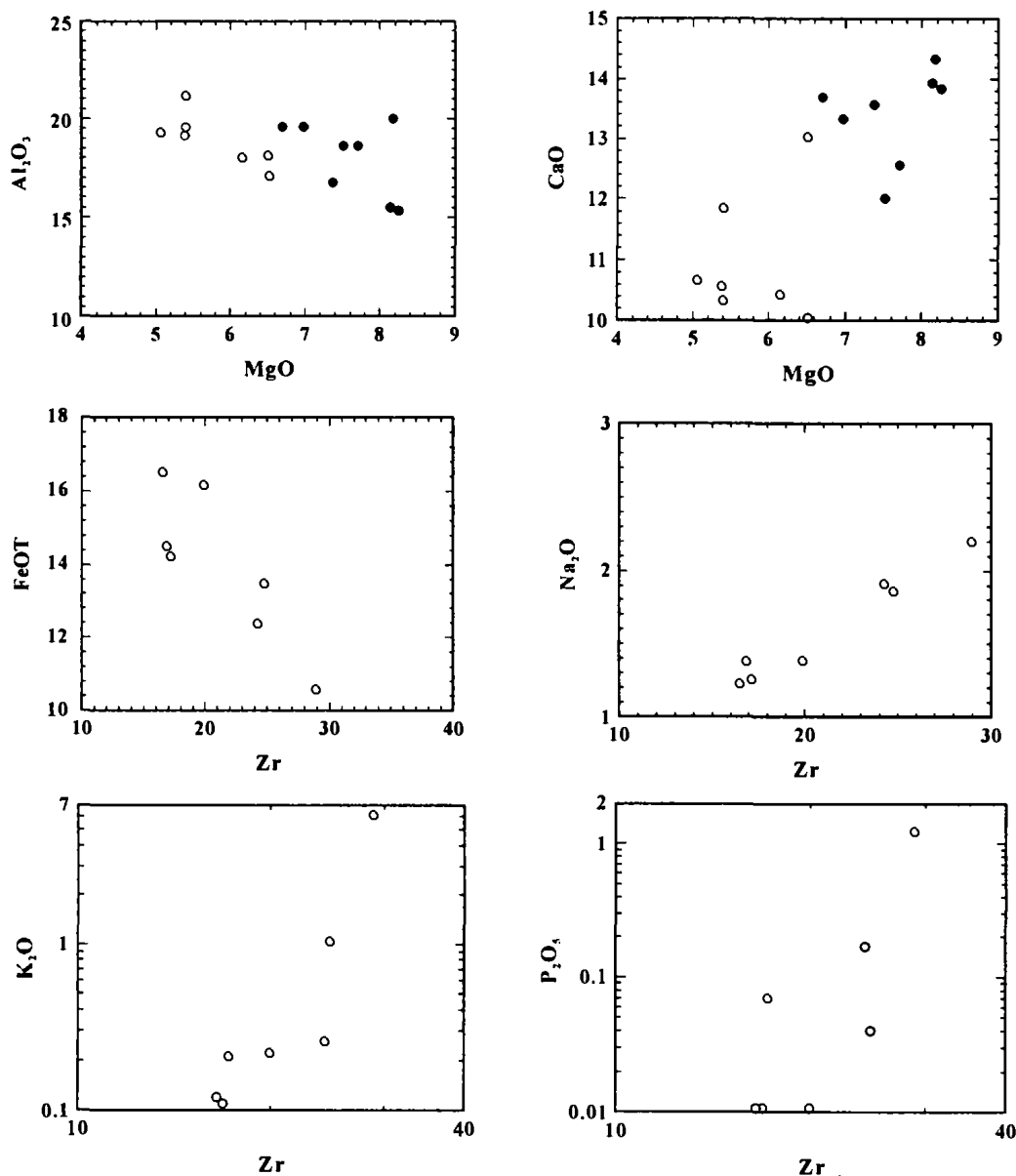
点,DT2号样品 K_2O 含量最高为 6.09%。除 DT2 样品其 $K_2O/Na_2O = 2.77$ 外,其它样品均为 $K_2O < Na_2O$ 。所以从化学成分看,岱前山岩体具岛弧低镁、高铝玄武岩的特征。

岩浆岩的成分异常以 MgO 或 SiO_2 为指标来表示。岱前山岩体中, MgO 与 Al_2O_3 成负相关,与 CaO 成正相关(图 1),与其它元素的协变图表现极不规则;由于 SiO_2 的变化范围较小,也不能系

表 1 岱前山岩体主元素分析结果 ($w_B/\%$)

Table 1. Major element analyses (%) of the samples from Daiqianshan

样号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI	TOTAL
DT11	44.49	1.85	19.31	8.21	7.10	0.23	5.06	10.66	1.38	0.11	0.01	0.43	99.69
DT14	42.29	1.86	19.55	7.15	7.05	0.21	5.39	11.85	1.86	1.05	0.04	0.30	99.50
DT17	44.80	2.15	18.02	7.48	7.50	0.26	6.15	10.43	1.26	0.21	0.07	0.35	99.38
DT2	40.04	2.21	19.15	7.23	4.07	0.23	5.38	10.56	2.20	6.09	1.25	0.50	99.50
DT3	38.28	1.97	18.10	9.24	7.84	0.27	6.50	13.03	1.39	0.22	0.01	1.55	99.41
DT5	43.62	1.54	21.16	8.20	5.01	0.23	5.40	10.32	1.91	0.26	0.17	0.85	99.42
DT8	43.54	2.34	17.10	9.36	8.10	0.24	6.52	10.02	1.23	0.12	0.01	0.50	99.88



●据文献[2,3] ○本文数据

图 1 Zr 与常量元素相关图

Fig. 1. Variation plots of Zr vs. major elements for Daiqianshan rocks.

统地反映岩体内发生的各种物理和化学作用,因此以 MgO 和 SiO₂ 为岩浆分异指标的协变图不能完全表征岩体的组成和过程变化。基性岩浆中, Zr 在部分熔融和分离结晶作用中表现强烈的不相容性,并且在变质作用过程中相对不活泼,岱前山基性岩 Zr 含量变化较大,为 $11 \times 10^{-6} \sim 42 \times 10^{-6}$,因此高场强元素(HFSE)、过渡族元素(Σ Fe₂O₃, MnO 和 V)以及稀土元素与 Zr 的协变关系对成岩过程和分类将十分重要。

Zr 与 Sr、La、Ba 具有良好的相关性(图 2),说明岩石未受蚀变作用影响,测试结果基本能代表岩石的原始化学组成。在相关图中,Zr 与 FeO_T

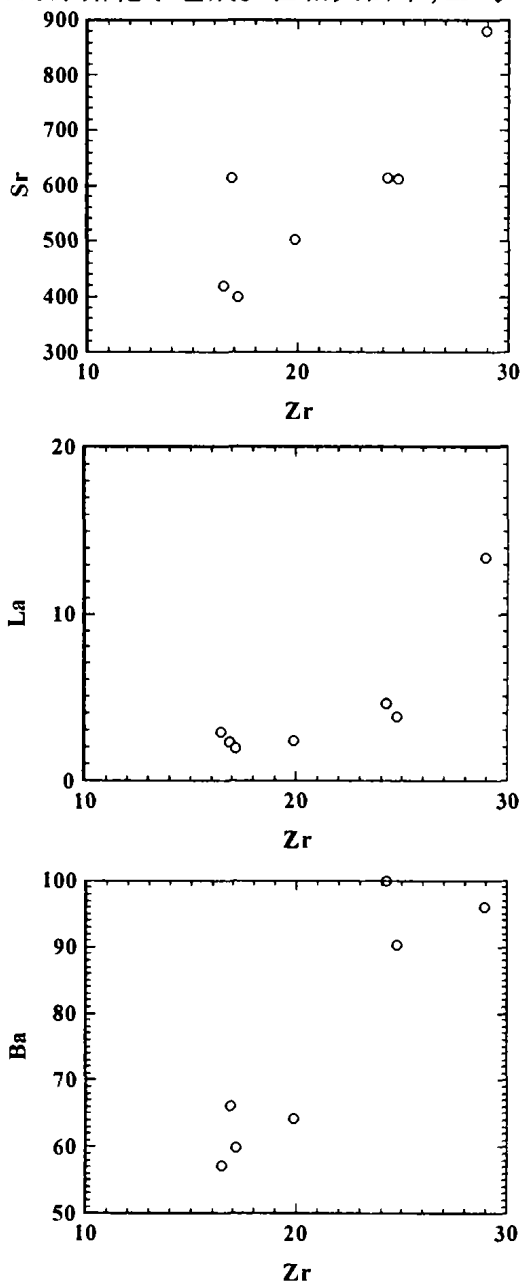


图 2 Zr 与微量元素 Sr、La、Ba 相关图

Fig. 2. Correlations between Zr and the selected trace elements.

成负相关,与 K₂O、Na₂O 和 P₂O₅ 成明显的正相关性(图 1),说明可能有角闪石、单斜辉石的分离结晶作用和斜长石的堆晶作用。这和镜下鉴定的结果一致。CaO/Al₂O₃-MgO, Ba-Zr 之间的正相关性表明,辉石是分离结晶作用的主要组分。考虑到 K、Na 等活动性较强的元素可能在变质过程中有一定程度变化,因此以活动性较弱的高场强元素为基础的岩石类型判别图解要比 TAS 图解更能反映岩石的本质特征,在 Zr/TiO₂-Nb/Y 分类图中(图 3),所有样品均落在亚碱性玄武岩范围内。

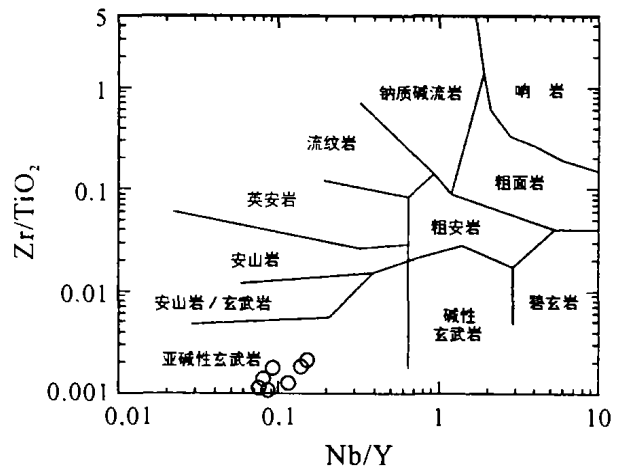


图 3 岱前山岩体岩石 Zr/TiO₂-Nb/Y 分类图

Fig. 3. Classification of mafic rocks from Daiqianshan.

2 稀土和微量元素

岱前山辉长岩的微量元素和稀土元素列于表 2。稀土元素和不相容元素的标准曲线如图 4、5 所示。稀土元素总量较低,除 DT2 样品 Σ REE = 107.7×10^{-6} 外,其它样品 Σ REE = $21.3 \times 10^{-6} \sim 35.4 \times 10^{-6}$ 。稀土配分模式可明显区分出两种类型。第一组以 DT3、DT17 样品为代表,轻稀土亏损型,中稀土富集,形成倒“V”型, $(La/Sm)_N = 0.64 \sim 0.74$, $(Sm/Yb)_N = 2.47 \sim 2.72$, $(La/Yb)_N = 1.74 \sim 1.83$;另一组为轻稀土富集型, $(La/Sm)_N = 0.98 \sim 1.39$, $(Sm/Yb)_N = 2.51 \sim 3.74$, $(La/Yb)_N = 2.69 \sim 5.20$ 。两组样品均显示 δ Eu 正异常,说明在岩浆演化过程中有斜长石的堆晶作用。

大离子亲石元素(LILE)、轻稀土元素(LREE)与 Zr 成正的线性相关,表明没有受到低温蚀变作用的影响,从不相容元素的原始地幔标准化图上可以看出(图 5),岩石普遍富集大离子亲石元素 Sr、K、Rb、Ba,并表现出高 Sr 的特点($Sr = 399 \times 10^{-6}$

表 2 岱前山岩体微量元素分析结果 ($w_B/10^{-6}$)

Table 2. Trace element analyses ($\mu\text{g/g}$) of the samples from Daiqianshan

样号	DT2	DT3	DT5	DT8	DT11	DT14	DT17	D95-2-1 ^[5]	D95-2-2 ^[5]	Pu4-8 ^[5]
Sr	1098	502	614	419	615	612	399	524	922	938
Rb	2.33	3.52	2.98	2.06	2.09	2.25	1.35	2	2	1
Ba	110	64	100	57	66	90	60	78	93	65
Th	0.29	0.15	0.28	0.13	0.15	0.24	0.12	0.06	0.12	0.11
Zr	33	20	24	16	17	25	17	11	42	27
Hf	1.30	0.85	1.06	0.69	0.80	1.03	0.88	1.03	0.14	0.79
Nb	2.19	0.88	1.46	0.59	0.86	1.37	0.67	0.5	2.6	4.2
Ta	0.09	0.04	0.06	0.03	0.05	0.06	0.04	0.23	0.68	0.11
Y	22.53	11.10	9.67	7.08	7.45	9.94	8.94	2.8	24.9	11.8
La	13.4	2.4	4.6	2.8	2.3	3.8	1.9	4.6	7.9	3.8
Ce	38.2	6.4	11.3	6.1	5.9	9.8	5.6	8.8	21.8	10.2
Pr	5.17	1.15	1.64	0.94	0.92	1.55	0.98	1.2	3.9	2.7
Nd	25.41	6.62	8.01	4.70	5.16	7.71	5.77	4.7	20.2	11.9
Sm	6.22	2.07	2.19	1.33	1.52	2.17	1.94	0.87	5.31	3.64
Eu	1.82	0.81	0.77	0.54	0.60	0.74	0.67	0.65	1.75	1.16
Gd	5.95	2.48	2.15	1.45	1.61	2.17	2.12	0.8	5.53	5.57
Tb	0.86	0.38	0.33	0.24	0.25	0.32	0.32	0.11	0.81	0.72
Dy	4.95	2.32	1.93	1.35	1.62	2.12	1.82	0.51	4.47	3.77
Ho	0.90	0.39	0.39	0.25	0.31	0.39	0.35	0.1	0.9	0.7
Er	2.43	1.10	0.97	0.70	0.78	1.01	1.00	0.27	2.31	1.69
Tm	0.29	0.15	0.14	0.09	0.10	0.14	0.11	0.04	0.29	0.23
Yb	1.85	0.93	0.86	0.59	0.62	0.86	0.79	0.23	1.77	1.22
Lu	0.26	0.12	0.10	0.08	0.09	0.14	0.10	0.04	0.26	0.19

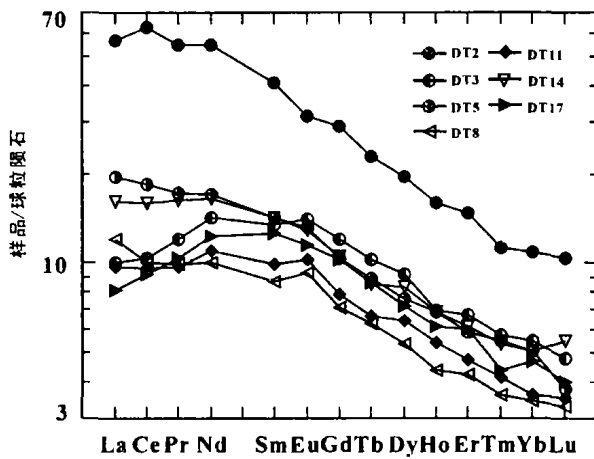


图 4 岱前山岩体的 REE 配分模式图 (标准化数据据文献[6])

Fig. 4. The REE distribution patterns of mafic rocks from Daiqianshan.

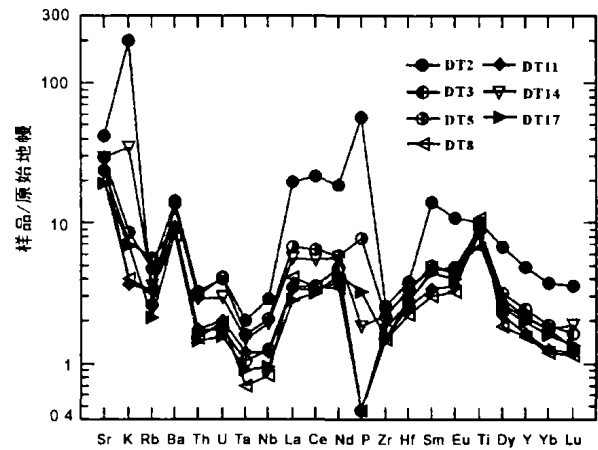


图 5 岱前山基性岩不相容微量元素的原始地幔标准化图解(标准化数据据文献[6])

Fig. 5. Primitive mantle-normalized incompatible element spidergram of mafic rocks from southern Fujian.

~ 881×10^{-6}), 具明显的 Nb-Ta、Zr-Hf 槽, 除 DT2 样品 $\text{Ti/V} = 39.45$ 外, 其它样品 $\text{Ti/V} = 17.13 \sim 19.14$, 在 Nb-Zr-Y 三角图中(图 6)^[7], 所有样品均落入火山弧玄武岩的范围, 以上微量元素变化表明岱前山岩体体现了与俯冲作用有关的岛弧特

点, 明显不同于 OIB 和板内玄武岩的地球化学特性^[8]。考虑到 DT2 样品具最高的 ΣREE , Ti/V 比, 及 Sr 含量, 因此推测 DT2 可能代表了原始岩浆的化学组成。

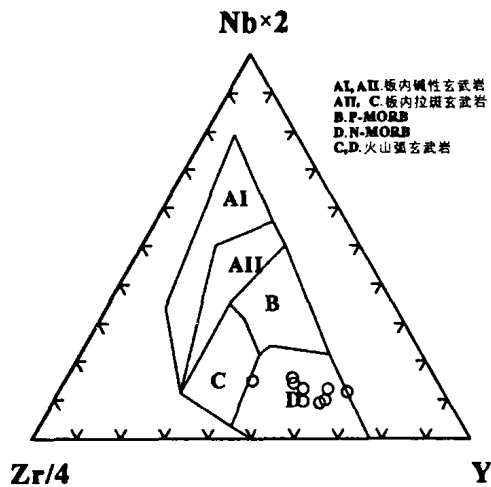


图 6 岱前山辉长岩体的 Zr-Nb-Y 图解^[7]

Fig. 6. Zr-Nb-Y discrimination diagram of the Daiqianshan mafic intrusion.

3 讨论

3.1 构造意义

近年来,随着对中国东南沿海大地构造和地幔属性的研究,人们对出露于福建沿海的镁铁-超镁铁岩的成因和构造涵意有不同的认识,归结起来有以下四种:

(1) 出露于碰撞造山带中指示地体或微板块碰撞拼贴的蛇绿岩或蛇绿混杂岩^[9,10];

(2) 可能反映了辉长岩是碰撞造山带中的同构造侵入岩^[2];

(3) 侵入于中国东南沿海活动大陆边缘的钙碱性岩浆系列的暗色端元^[11];

(4) 是白垩纪来自上地幔受地壳混染的玄武岩浆的同期异相产物,标志着中国东南部大规模地壳拉张运动的开始^[12]。

由于这些超镁铁质岩体沿长乐-南澳断裂带分布,因此被认作蛇绿岩套的一部分而成为确定此断裂带是地缝合线带最有力的证据^[9,13],然而却缺少地质学方面的证据,在福建沿海地区,至今尚未找到前陆褶皱带^[9];这些镁铁、超镁铁质岩在空间上无一例外地与闪长岩、花岗闪长岩共生,并且未找到构造冷侵入的明显证据,在长乐-南澳断裂带附近未发现除辉石岩、辉长岩外构成蛇绿岩套所必须的其它岩石类型,如拉斑玄武岩、硅质岩等^[14];地球化学特征上,蛇纹岩中尖晶石高 $Cr^{\#}$,辉长岩富 Fe, TiO_2 和轻稀土,基性岩中斜长石、辉石,云母等矿物富 Ca^[4]。因此不支持辉长

岩是蛇绿岩一部分的解释。

王志洪等^[1]认为,岱前山堆晶角闪辉长岩的 Sm-Nd 同位素年龄为 $(95 \pm 2) Ma$, 该年龄可能反映了辉长岩是碰撞造山带中的同构造侵入岩,但这一解释与该岩体地球化学所表征的岛弧成因相悖,同时在福建近海未发现晚中生代逆冲褶皱带和前陆盆地。在时间尺度上,台湾中央山脉东侧大南澳基底杂岩的玉里带被认为是中国东南部晚中生代缝合带的位置^[15,16], 其中的蓝闪石和绿辉石的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年值为 $100 \sim 110 Ma$ ^[16], 表明在晚中生代发生了高压变质事件, $100 \sim 110 Ma$ 代表了晚中生代俯冲作用末期的年龄;然而根据平潭-东山变质带的热演化史研究表明,太平洋板块俯冲末期年龄可能要滞后,该变质带活动期为 $82 \sim 132 Ma$, 纪录了两次快速冷却期,分别为 $110 \sim 132 Ma$ 和 $84 \sim 110 Ma$, 对应于变质带的抬升和长乐-南澳剪切带沿大陆边缘的运动,它们均由古太平洋板块的低角度-歪斜俯冲所引起^[17];福建沿海地区晚白垩(约 $90 Ma$) 时期是公认的拉张(或裂谷)构造环境^[18]。由此可见,福建沿海地区晚中生代的岩浆作用(岱前山岩体)、变质事件、拉张作用、平潭-东山变质带抬升和长乐-南澳剪切带运动在时间上基本一致,所以难以用构造-岩浆作用由“挤压-地壳增厚-陆壳重熔”向“拉张-岩石圈减薄-双峰式岩浆作用”机制的转变模式加以解释^[19]。据此推测岱前山岩体是晚中生代上地幔部分熔融的产物,并沿长乐-南澳断裂破碎带侵入。长乐-南澳断裂带是一应力转换带,东部为碰撞造山作用,而西部为伸展拉张背景,证据有:①岱前山等镁铁、超镁铁质岩体沿长乐-南澳断裂带分布;②磁法、重力测量和钻孔资料表明,岩体为无根构造,顺断层侵入;③长乐-南澳断裂带两侧,东部为平潭-东山变质岩带,西部为晚中生代岩浆岩带。这样不但可以解释晚中生代发生于东南沿海的构造热事件^[2]和碰撞事件^[9,10],而且也说明了断裂带西侧由于软流圈上涌、岩石圈伸展减薄的拉张构造背景。

虽然岱前山岩体位于长乐-南澳北东向断裂带,但是地球化学特征明显有别于其它辉长岩、辉石岩等镁铁、超镁铁岩体,其显著特点有 SiO_2 含量极低;总体上稀土总量低。通常认为,斜长石的堆晶作用可造成岩浆的高 Sr 趋势,但中国东南部晚中生代基性岩具有高 Sr 的普遍特征,因此难以用斜长石的堆晶作用来解释,但也不能排除对 Sr 含

量的影响。

对晚中生代基性岩中的高 Sr 特征曾有不同的解释,周金城等认为^[20],是太平洋板块俯冲导致的源区富集和上侵过程中地壳混染两方面地质过程所致。杨祝良等^[21]强调,其高 I_{Sr} ,低 ϵ_{Nd} 及富放射成因 Pb 的特点表明,基性岩源区为一富集型的陆下岩石圈地幔,由古老的俯冲地壳物质再循环进入并交代地幔而形成,目前尚无足够的证据说明地壳混染对其构成的影响。周新华认为玄武岩的高 Sr 趋势是它们源自大陆岩石圈地幔特征的反映。尽管目前我们还缺少同位素方面的证据,但地球化学特征似乎不支持岱前山岩体受地壳较大程度混染的可能性,这些证据包括:①由王志洪^[1]所测定的角闪辉长岩其 $\epsilon_{Nd}(t) = 12.60$,与 MORB 类似,并接近 DMM 端元^[22,23];②在 Rb/Nb-Zr, Nb/Zr-Zr 图解中,该岩体与壳源组分不具有相关性,在 Rb/Nb-SiO₂ 图中,样品 D95-2-1、DT3 具高的 Rb/Nb 值(≈ 4),但 SiO₂ 最低,为 38.28%,无法用地壳混染解释(图 7)^[24];③SiO₂ 含量低,并且变化范围较窄。这种不相容微量元素相对富集,而放射成因同位素比值相对亏损的地幔源很可能是一长期亏损的地幔源受到近期(形成基性岩之前)的俯冲带流体的交代所致^[18]。岱前山辉长岩体的 Al₂O₃ 含量较高, Hawkesworth 等^[25]指出,高 Al₂O₃ 特征是地幔橄榄岩部分熔融并经俯冲作用改造的产物。同时它的 Nb/Ta 比值也较大,为 17.6~24.5,均高于球粒陨石的 Nb/Ta 比值^[26],这与华南地区燕山晚期地幔普遍发生过富集交代作用的结果是一致的^[27,28]。由此可见,岱前山辉长岩体是经俯冲作用改造的上地幔橄榄岩部分熔融的产物,与中国东南部晚中生代玄武岩同源,但可能受流体交代作用和地壳混染的程度不同造成了他们的差异。

3.2 部分熔融

对于岩石成因的判别通常要涉及到估算源区组分、部分熔融程度及成岩过程中发生的变化。对部分熔融程度的计算首先要知道源区的化学组成,然而在大多数情况下这是不可能的。Maaløe 提出了双元素比值法计算部分熔融程度和源区的组成^[29],从而避免了由假定源区组成而带来计算的不确定性,首先选择两端元 DT2 和 DT8,其 Sm、Nd 含量分别为(Sm₁, Nd₁)和(Sm₂, Nd₂),因此按批式熔融的理论模式,在低程度批式熔融熔体中元

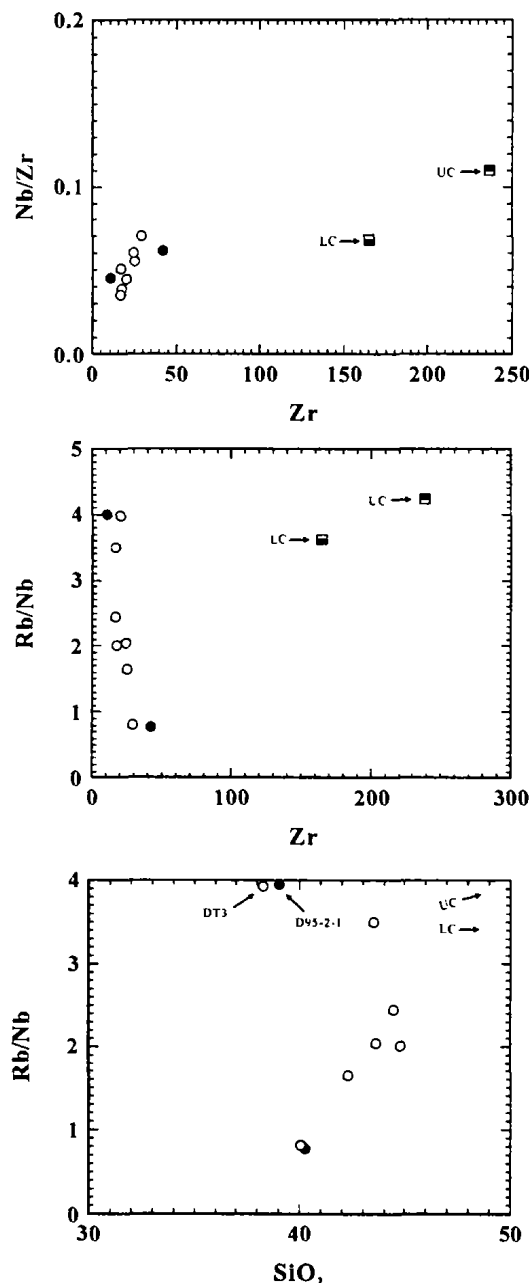


图 7 岱前山辉长岩体 Rb/Nb-Zr、Nb/Zr-Zr、Rb/Nb-SiO₂ 图解(上地壳、下地壳组成据 Wedepohl^[24])
Fig. 7. Plots of Rb/Nb-Zr, Nb/Zr-Zr and Rb/Nb-SiO₂ for the Daiqianshan mafic rocks.

素含量为:

$$Nd_1(Sm_1) = S_{Nd(Sm)} / [D_{Nd(Sm)} + f(1 - P1_{Nd(Sm)})] \quad (1)$$

相同道理,较高程度部分熔融 g 时为:

$$Nd_2(Sm_2) = S_{Nd(Sm)} / [D_{Nd(Sm)} + f(1 - P2_{Nd(Sm)})] \quad (2)$$

式中, D 代表分配系数。

考虑到岱前山岩体较小,又是在同一期岩浆过程中成岩演化,因此我们按 Zou 等^[30]的假定使得 $P1_{Nd(Sm)} = P2_{Nd(Sm)}$,可以简化 Maaløe 小比例部

分熔融程度的估算:

$$f = [D_{Sm}(Q_{Sm}-1)(1-P_{Nd}) - D_{Nd}(Q_{Nd}-1)(1-P_{Sm})] / (Q_{Nd}-Q_{Sm})[(1-P_{Nd})(1-P_{Sm})]$$

其中 $Q_{Nd(Sm)} = Nd_1(Sm_1)/Nd_2(Sm_2)$ 。石榴石对 Y 的分配系数 ($D_{\text{gar/melt}}^Y = 1 \sim 4$) 远大于 Zr ($D_{\text{gar/melt}}^Z = 0.4 \sim 0.7$)^[31], 如果在熔融过程中源区有石榴石的残余体存在, 其含量变化将引起岩浆中 Y 含量的改变, 并且 Zr/Y 和 Y 应具有相关性, 岱前山岩体中, Zr/Y 与 Zr、Y 均无相关性, 说明该岩体的物源区可能不是在石榴石二辉橄榄岩地幔, 这也和稀土元素的配分模式较为平坦相一致。因此假定在上地幔部分熔融过程中其分配系数为 $D = 0.55 \text{ Ol} + 0.24 \text{ Opx} + 0.15 \text{ Cpx} + 0.05 \text{ Pl} + 0.01 \text{ Sp}$, 部分熔融模型为: $0.30 \text{ Opx} + 0.55 \text{ Cpx} + 0.29 \text{ Pl} + 0.04 \text{ Sp} \rightarrow 0.18 \text{ Ol} + \text{melt}$ ^[32], 单矿物对各元素的分配系数参照 Andreas Spath 等^[33]。计算结果表明 $f = 7.4\%$, 由公式(1)、(2)计算得源区 Sm、Nd 含量为 0.68×10^{-6} 和 2.46×10^{-6} , 此值略高于原始地幔 (0.44×10^{-6} , 1.35×10^{-6})^[6], 也不同于 OIB、MORB。一般认为, 中国东南部岩石圈

地幔长期以来处于亏损状态^[18], 其微量元素的富集只能解释为源区在部分熔融作用前受到俯冲作用的改造。岱前山辉长岩稀土总量低, 可能是部分熔融程度和堆晶作用共同作用的结果。

4 结 论

岱前山岩体由部分熔融形成, 伴有角闪石、单斜辉石的分离结晶作用和斜长石的堆晶作用;

微量元素变化表明岱前山岩体体现了与俯冲作用有关的岛弧特点, 明显不同于 OIB 和板内玄武岩的地球化学特性;

岱前山岩体既不是指示地体或微板块碰撞拼贴的蛇绿岩或蛇绿混杂岩, 也不是碰撞过程中的同构造侵入岩。研究表明, 该岩体是上地幔部分熔融的产物, 沿长乐—南澳断裂破碎带的侵入体, 东部为欧亚板块的末期俯冲, 西部为软流圈上涌、岩石圈减薄的伸展拉张区;

岱前山岩体未受地壳混染作用, 其高 Sr 和岛弧特点为俯冲过程中流体交代作用所致;

该岩体约经历了 7% 的部分熔融。

参 考 文 献:

- [1] 王志洪, 卢华复. 福建沿海堆晶辉长岩的 Sm-Nd 年龄及意义[J]. 地质论评, 1999, 45(4): 408-411.
- [2] Xu X S, Dong C W, Li W X, et al. Late Mesozoic intrusive complexes in the coastal area of Fujian SE China: the significance of the gabbro-diorite-granite association [J]. *Lithos*, 1999, 46: 299-315.
- [3] Zou Haibo. A mafic-ultramafic rock in the Fujian coastal area, southeastern China: a geochemical study [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1995, 12(1-2): 121-127.
- [4] 吴福元, 孙德有. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄[J]. 长春科技大学学报, 1999, 29(4): 313-318.
- [5] 李武显, 周新民. 浙闽沿海晚中生代火成岩成因的地球化学制约[J]. 自然科学进展, 2000, 10(7): 630-647.
- [6] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geol Soc Spec Publ*, 1989, 42: 313-345.
- [7] Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram [J]. *Chem Geol*, 1986, 56: 207-218.
- [8] Muller D, Rock N M S, Groves D I. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks from different tectonic settings: a pilot study [J]. *Mineral Petrol*, 1992, 46(2): 259-289.
- [9] Li J-L. Tectonic framework and evolution of southeastern China [J]. *J Southeast Asian Ear Sci*, 1993, 8(1-4): 219-233.
- [10] Lu H F, Jia D, Wang Z H, et al. Tectonic evolution of the Dongshan Terrane, Fujian Province, China [J]. *J South Amer Ear Sci*, 1994, 7(3): 349-365.
- [11] Zhou X, Xu X, Dong C, et al. Mineralogical indicator of the active continental margin of southeastern China: anorthitic plagioclase [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39(16): 1362-1366.
- [12] Li Huimin, Dong Chuanwan, Xu Xishen, et al. Single zircon U-Pb chronological study on the gabbro from Quanzhou [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40: 158-160.
- [13] Hsu K J, Li J, Chen H, et al. Tectonic of South China: Key to understanding West Pacific geology [J]. *Tectonophysics*, 1990, 183, 9-40.
- [14] 朱云鹤. 一条正在发育的中、新生代裂谷带[J]. 火山地质与矿产, 1998, 19(1): 37-39.
- [15] Cao R, Zhu S. Studies on the Mesozoic marginal arc system of the southeast coast and Taiwan in China [J]. *Sci China (B)*, 1990, 33: 980-992.

- [16] Lo C H, Chen C H, Yang H C, *et al.* Exhumation of metamorphic complexes in East China—a consequence of late Mesozoic extension tectonics [A]. *International Symposium on Lithosphere Dynamics of East Asia, Program and Extended Abstract* [C]. 1996, 76 ~ 78.
- [17] Chen Wenshan, Yang Hsiao-Chin, Wang Xin, *et al.* Tectonic setting and exhumation history of the Pingtan-Dongshan Metamorphic Belt along the coastal area, Fujian Province, Southeast China [J]. *J Asian Earth Sciences*, 2002, 20: 829 ~ 840.
- [18] 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 粤北白垩纪元基性岩脉的年代学和地球化学[J]. 地球化学, 1997, 26(2): 14 ~ 31.
- [19] 徐夕生, 周新民, 王德滋. 壳幔作用与花岗岩成因——以中国东南沿海为例[J]. 高校地质学报, 1999, 5(3): 241 ~ 249.
- [20] 周金城, 陈荣. 浙闽沿海晚中生代壳幔作用研究[J]. 自然科学进展, 2000, 10(6): 571 ~ 574.
- [21] 杨祝良, 沈渭洲, 陶奎元, 等. 浙闽沿海早白垩世玄武岩锶、钕、铅同位素特征—古老富集型地幔的证据 [J]. 地质科学, 1999, 34(1): 59 ~ 68.
- [22] Hart S R. Large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere [J]. *Nature*, 1984, 309: 753 ~ 757.
- [23] Zindler A, Hart S R. Chemical geodynamics [J]. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1986, 14: 493 ~ 571.
- [24] Wedepohl K. H., The composition of the continental crust [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1995, 59: 1217 ~ 1232.
- [25] Hawkesworth C, Turner S, Gallagher K, Hunter A, Bradshaw T, Rogers N. Calc-alkaline magmatism, lithospheric thinning and extension in the Basin and Region [J]. *J Geophys Res*, 100(B7): 10271 ~ 10286.
- [26] Stolz A J, Jochum K P, Spettel R, *et al.* Fluid- and melt-related enrichment in the subarc mantle: Evidence from Nb/Ta variations in island-arc basalts [J]. *Geology*, 1996, 24(7): 587 ~ 590.
- [27] Li Xian-hua. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China [J]. *J Asian Earth Sci*, 2000, 18(3): 293 ~ 305.
- [28] 赵振华, 包志伟, 张伯友. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(增刊): 7 ~ 14.
- [29] Sven Maaløe, Rolf B. Pedersen. Two methods for estimating the degree of melting and trace element concentrations in the sources of primary magmas [J]. *Chemical Geology*, 2003, 193: 155 ~ 166.
- [30] Zou H, Zindler A. Constraints on the degree of dynamic partial melting using concentration ratios [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60: 711 ~ 717.
- [31] Jenner G A, Foley S F, Jackson S E, *et al.* Determination of partition coefficients for trace elements in high pressure-temperature experimental run products by laser ablation microprobe inductively coupled plasmamass spectrometry (LAM-ICP-MS) [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58: 5099-5130.
- [32] Gurenko A A, Chaussidon M. Enriched and depleted primitive melts included in olivine from Icelandic tholeiites: Origin by continuous melting of a single mantle column [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1995, 59(14): 2905 ~ 2917.
- [33] Spath A, Le Roes A P, Opiyo-Akech N. Plume-lithosphere interaction and the origin of continental rift-related alkaline volcanism—the Chyulu Hills Volcanic Province, Southern Kenya [J]. *J Petro*, 2001, 42(4): 765 ~ 787.

GEOCHEMISTRY AND GENESIS OF DAIQIANSHAN GABBRO, FUJIAN PROVINCE

ZHAO Jun-hong^{1,2}, HU Rui-zhong¹, LIU Shen^{1,2}

(1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

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

Abstract: The Daiqianshan mafic intrusion is situated along the Changle-Nanao fault zone in the Fujian coastal area. The rock body intruded the metamorphic rocks which are composed of biotite gneiss, amphibole schist, sillimanite schist and Mesozoic volcanic rocks. This paper shows that the rock body possesses subduction-related signatures with island-arc affinity. However, the age of the rock is close to the timing of low-angle oblique subduction of the ancient Pacific plate, high-pressure metamorphic event, uplift of the Pingtan-Dongshan metamorphic belt and movement along the Changle-Nanao shear zone. So the genesis of the rock shouldn't be interpreted merely as lithospheric extension or collision events, it might be derived from the upper mantle and intruded along the Changle-Nanao fault zone, and also had experienced metasomatism prior to intrusion. The rock body has the same source like other mafic rocks exposed in southeastern China, but the Daiqianshan intrusion has not experienced much crustal assimilation. The degree of partial melting is estimated at about 7.4%, and the Sm, Nd concentrations of the source rocks are slightly higher than those of the pre-mantle source.

Key words: Daiqianshan; subduction; extension; mantle; partial melting