

文章编号: 1000-4734(2009)02-0243-10

闽北角闪辉长岩的地球化学特征 及其地球动力学意义

张贵山^{1,2}, 温汉捷², 李石磊³, 胡瑞忠², 裘愉卓²

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 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, 贵州 贵阳 550002; 3. 四川省川威集团有限公司, 四川 内江 642469)

摘要: 赤门角闪辉长岩是中国东南部晚白垩世末基性岩浆活动的产物, 分布在福建省南平市的北部, 总体呈近 N₃₀°E 向展布。岩石属于低钾(拉斑)岩石系列, 富 Al₂O₃ > K₂O 的特征, 岩浆演化过程中经历了以橄榄石、辉石、斜长石和 Ti-F 氧化物的分离结晶作用。赤门角闪辉长岩具相对富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE)、亏损高场强元素(HFSE)的特性, 不相容元素蛛网图显示出消减带岩石的地球化学性质, 以 Nb/Ta 异常为特征。微量元素地球化学研究表明, 赤门角闪辉长岩浆在上升侵位过程中未发生地壳物质混染, 来自不含石榴石的富集岩石圈地幔岩部分熔融的产物, 地幔源区的演化与太平洋板块俯冲密切相关。赤门角闪辉长岩形成于大陆拉张带 陆内初始裂谷的过渡环境。综合晚中生代的基性岩类资料, 与形成较早的沿海辉长岩对比研究, 赤门角闪辉长岩是拉张向裂谷转换体制下形成的过渡岩石类型, 标志初始裂谷活动的开始。

关键词: 角闪辉长岩; 地球化学; 富集地幔; 福建

中图分类号: P588.12; P595 文献标识码: A

作者简介: 张贵山, 男, 1971 生, 博士, 讲师 主要从事岩石地球化学、矿床地球化学研究。E-mail: zgs4h@chd.edu.cn

中国东南部地处欧亚大陆的东南缘, 位于扬子板块、印支板块和太平洋板块的中间地带, 经历了 Columbia 超大陆、Rodinia 超大陆、Gondwana 大陆、Pangea 超大陆及欧亚大陆形成与演化的多期构造运动^[1]。受特提斯构造域和太平洋构造域活动的影响, 使中国东南部中生代的地质构造作用变得非常复杂。中生代的构造变形、岩浆与沉积作用响应在全球中生代构造中独具特色, 出现了大规模的中酸性岩浆活动作用、NNE 向的盆山系统和与岩浆活动有关的成矿作用, 构造应力场也发生了根本性的转变, 特别是晚中生代以来, 岩浆作用等各种地质作用表现尤为强烈。因此, 中国东南部晚中生代岩浆作用与岩石圈动力学背景长期受到地学界极大关注^[2-4], 取得许多重要成果, 但有关火成岩一些基础地质问题仍在争论

中, 如晚中生代大规模岩浆活动的大陆动力学背景是大陆边缘挤压环境, 还是弧后或岩石圈伸展环境、走滑系统、裂谷或走滑 + 同期裂解、盆岭省, 一直在争论中。镁铁质岩石在探索地幔作用、壳幔相互作用等方面起到越来越重要的作用, 已迅速成为研究板块碰撞、壳幔相互作用、岩浆演化和地幔属性的窗口, 中生代镁铁质岩石的研究也取得一些重要的成果, 关于玄武岩和基性侵入岩地幔源区的性质、微量元素组成与 Sr-Nd 等同位素组成是源区固有性质还是壳幔相互作用的结果, 目前仍存在不同的观点。前人虽对东南沿海分布的早白垩世晚期和晚白垩世早期侵位、空间上与中酸性岩伴生的辉长岩体进行了研究^[5-13], 总结出了碰撞造山带中蛇绿(杂)岩^[14-15]、碰撞造山的同构造侵入岩^[9-10]、活动大陆边缘的钙碱性岩浆系列暗色端元^[6]、白垩纪玄武岩浆同期异向产物^[16]等观点, 反映出对辉长岩形成的大陆动力学背景认识仍有分歧, 因此对白垩纪辉长岩体的深入理解和认识还需更多资料的积累。本文选择时空上没有中酸性岩伴生、侵位时间晚于沿海辉

收稿日期: 2008-09-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目(编号: 2007CB411402); 中国科学院知识创新工程项目(编号: KZCX2-102 KZCX3-SW-125)

长岩带的赤门角闪辉长岩为研究对象(图 1), 进行系统岩石学、地球化学研究, 初步探讨成岩背景及源区性质、岩浆演化, 同时与东南沿海辉长岩带进行对比, 为中国东南部晚白垩世-早第三纪的构造格局和深部地质作用的研究提供新的资料。

1 地质概况及岩石学特征

赤门角闪辉长岩体位于政和一大埔断裂带东侧的南平市赤门乡地区(图 1), 地表由 9 个规模不一的小岩体、岩瘤、岩株组成, 出露面积不大于 2 km², 侵位于晚侏罗世火山岩地层长林组中, 总体近 SN 向展布, 面积最大岩体呈 NNW。区域上分布有前寒武纪迪口组的变质岩层和晚侏罗世长林组的火山碎屑沉积地层, 及燕山期花岗岩和呈 SN-NE 向展布的脉岩(图 1), 脉岩为花岗斑岩脉和花岗岩脉, 规模小。前人资料显示, 赤门角闪辉长岩侵位于第三纪^[17]。

角闪辉长岩主要由斜长石(45%)、辉石(30%)、角闪石(20%)和副矿物(<5%)组成。斜长石呈无色, 长板状、板状, 自形晶一半自形晶, 干涉色为一级灰白, 聚片双晶、卡钠双晶发育, 粒度一般在 0.54 mm×0.12 mm, 最大可达 1.40 mm×0.30 mm; 镜下鉴定为拉长石(A_n=60); 辉石呈它形, 具多色性, 最高干涉色为 II 级兰, 部分辉石已经纤闪石化, 局部保留辉石的光性, 为普通辉

石; 角闪石为片状, 具有多色性, N₈绿色, N_m淡绿色, 中正突起, 最高干涉色 II 级兰, 二轴晶(-), 平行消光, 为普通角闪石; 副矿物有磁铁矿、磷灰石和榍石。辉长结构, 块状构造。

2 样品分析方法

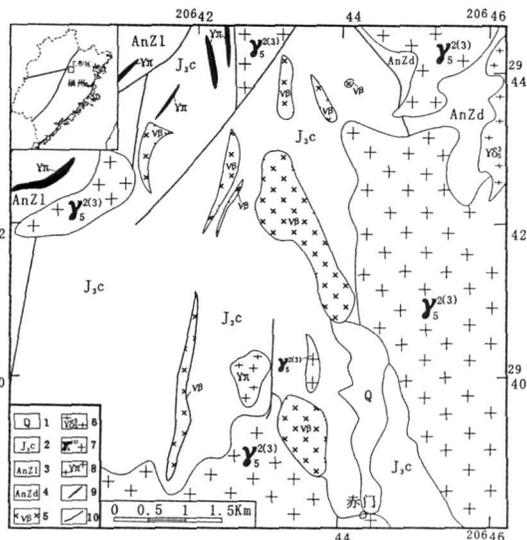
本次研究的样品采自位于图中间的四个不同岩体(图 1)。样品的主量元素在中国科学院地球化学研究所完成, 微量元素和稀土元素分析在中国科学院广州地球化学研究所完成。主量元素采用常规化学分析, 分析误差小于 5%。微量元素和稀土元素采用高分辨率电感耦合等离子质谱分析法完成的, 分析精度小于 1%~5%, 具体的分析方法及流程参考文献[18]的相关报道。

3 地球化学特征

3.1 主量元素

赤门角闪辉长岩的 SO₂ 含量在 50.29%~50.71% 之间, 平均值为 50.48%, 与东南部沿海的平潭辉长岩体(115 Ma)接近^[10,12], 高于岱前山、东蔡、东岳山、桃花山和青兰山(表 1)。扣除烧失量换算成 100% 后投影到 TAS 全碱图上(图 2a), 赤门角闪辉长岩与平潭辉长岩性质相似, 为典型亚碱性辉长岩; 岱前山等辉长岩属于橄榄辉长岩类。在 SO₂-K₂O 图解上(图 2b), 赤门样品投影到钙碱性与低钾(拉斑)岩性系列分界线附近, 平潭样品分布在钙碱性岩性系列区域。在 FAM(F⁺O⁻-Na₂O+K₂O-M⁺O)三角图上(略), 赤门角闪辉长岩与平潭辉长岩为钙碱性岩性系列, 岱前山等辉长岩属于拉斑岩性系列。赤门角闪辉长岩具有较高的 Al₂O₃ 含量: 16.30%~21.88% (平均为 18.31%), 样品具有高 A 的特征, 与岩相学观察到普遍发育的钙质斜长石现象相符; MgO 的含量较低 3.61%~6.50% (平均为 5.58%); Na₂O+K₂O 含量在 2.98%~3.78% 之间, 表现出低钾、富钠(Na₂O>K₂O, K₂O/Na₂O=0.08~0.25)的特征; TiO₂ 含量: 0.89%~1.16% 之间; TFe 的含量在 6.22%~9.43%, FeO 在 5.54%~7.43% 之间, F₂SiO₃ 在 0.76%~2.23%; CaO 在 11.47%~12.69% 之间。

图 3 显示, 赤门角闪辉长岩 MgO 与 TiO₂、TFeO、CaO、NiO 呈正相关关系, 与 Al₂O₃、K₂O+Na₂O 呈负相关关系, 暗示在岩浆演化过程, 发生了



1. 第四系 2. 长林组 3. 龙北溪组 4. 迪口组 5. 角闪辉长岩 6. 花岗闪长岩 7. 花岗岩 8. 花岗斑岩 9. 岩脉 10. 断层
图 1 赤门地区地质简图(据 1:5万夏道幅地质图修改)

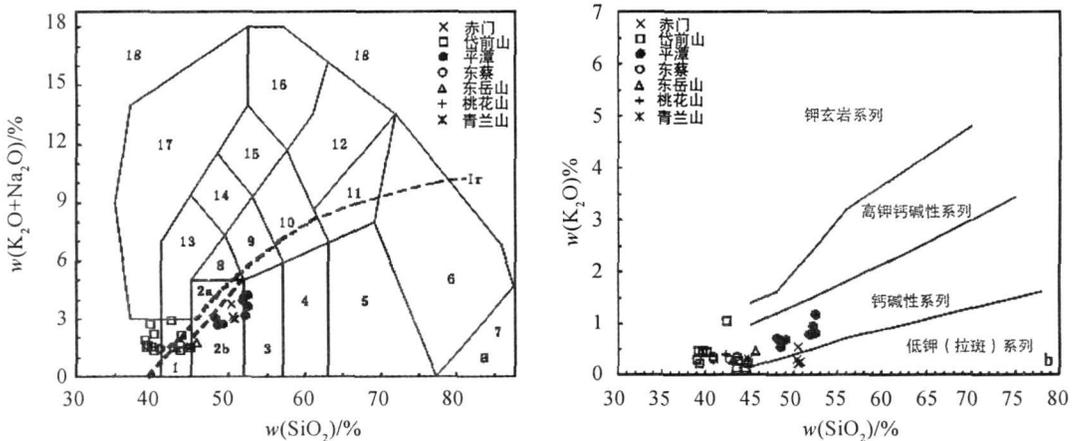
Fig. 1. Simplified regional geological map of the Chimen bojite in northern Fujian

一定程度的单斜辉石、TiFe氧化物、橄榄石和斜长石分离结晶; 另外, CaO/Al_2O_3-CaO 间存在很好的正相关关系, 同样表明岩浆演化经历了单斜辉石分离结晶。

表 1 赤门角闪辉长岩及沿海辉长岩的岩石化学分析结果 ($w_B/\%$)
Table 1. Petrochemical analyses (%) of the Chimen bojite and coastal gabbro in Fujian

	CM-1	CM-2	CM-3	CM-5	CM-6	岱前山 ^[9, 11] (12)	平潭 ^[10, 12] (8)	东蔡 ^[12] (4)	东岳山 ^[12] (2)	桃花山 ^[12] (1)	青兰山 ^[12] (1)
SiO ₂	50.71	50.54	50.48	50.40	50.29	41.29	50.81	41.92	44.34	42.24	44.80
TiO ₂	1.16	0.92	0.89	0.93	0.90	1.79	0.96	1.48	0.81	1.16	0.82
Al ₂ O ₃	16.30	16.98	16.96	19.42	21.88	18.18	17.87	17.56	17.66	16.32	16.99
Fe ₂ O ₃	2.23	1.18	1.39	1.04	0.76	8.56	3.53	8.94	6.24	8.87	4.87
FeO	7.43	6.94	6.92	6.82	5.54	7.22	6.80	7.70	6.06	8.51	6.75
MnO	0.24	0.21	0.21	0.16	0.16	0.19	0.15	0.31	0.14	0.17	0.18
CaO	11.47	12.69	12.61	12.25	12.12	12.04	9.57	12.49	13.35	12.58	12.67
MgO	6.50	6.49	6.37	4.95	3.61	6.55	5.31	6.19	7.68	7.08	9.22
K ₂ O	0.24	0.23	0.23	0.53	0.29	0.84	0.80	0.32	0.38	0.40	0.30
Na ₂ O	2.78	2.75	2.88	2.58	3.49	1.51	2.66	1.22	1.24	1.13	1.29
P ₂ O ₅	0.19	0.13	0.13	0.17	0.16	0.19	0.20	0.03	0.03	0.03	0.02
烧失量	0.30	0.48	0.48	0.24	0.40	0.87	1.35	1.37	1.68	1.11	1.44
总计	99.55	99.54	99.55	99.49	99.60	99.23	99.96	99.53	99.58	99.60	99.35
H ₂ O	0.20	0.13	0.14	0.12	0.14	-	-	-	-	-	-
Mg [#]	0.47	0.48	0.48	0.42	0.39	0.48	0.44	0.45	0.56	0.45	0.58

注: 圆括号中数据为样品数。



a 采用 Middlemost^[19]的深成岩 TAS分类命名图, 图中碱性系列与亚碱性系列分界线 (1) 根据文献^[20]绘制; b 采用 Rickwood^[21]的岩石系列 K_2O-SO_2 分类图解

1 橄榄辉长岩; 2^a碱性辉长岩; 2^b亚碱性辉长岩; 3 辉长闪长岩; 4 闪长岩; 5 花岗闪长岩; 6 花岗岩; 7 硅英岩; 8 二长辉长岩; 9 二长闪长岩; 10 二长岩; 11 石英二长岩; 12 正长岩; 13 副长石辉长岩; 14 副长石二长闪长岩; 15 副长石二长正长岩; 16 副长石正长岩; 17 副长石深成岩; 18 霓方钠岩 磷霞岩/粗白榴岩

岱前山引自文献^[9, 11]; 平潭引自文献^[10, 12]; 东蔡、东岳山、桃花山、青兰山引自文献^[12]

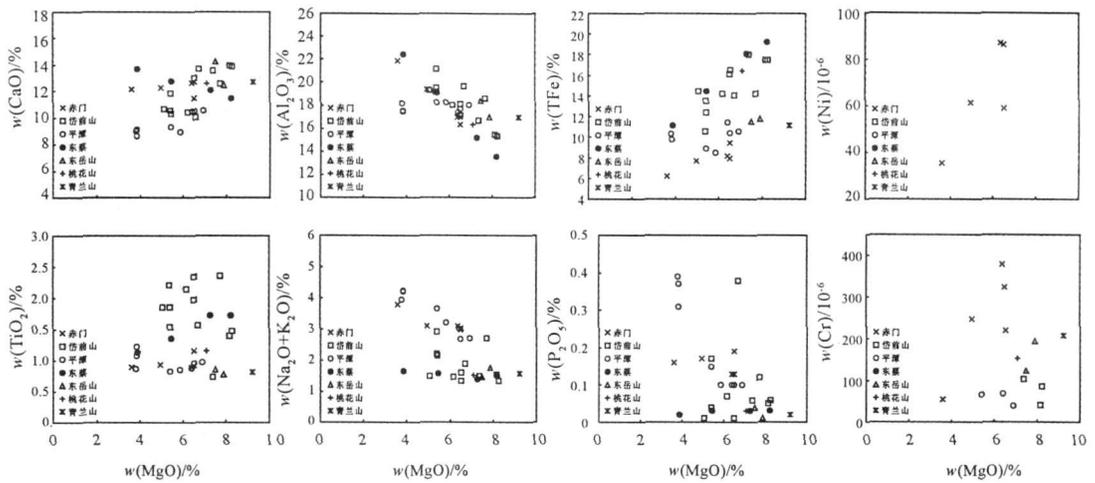
图 2 赤门角闪辉长岩 TAS 岩石分类 (a) 和 SO_2-K_2O 图解 (b)

Fig. 2. TAS (a) diagrams of rock classification and SO_2-K_2O (b) diagrams of the Chimen bojite in Fujian

3.2 稀土与微量元素

赤门角闪辉长岩稀土元素与微量元素见表 2。岩体稀土总量较低 $\sum REE=63 \sim 98 \mu g/g$ 平均为 $73 \mu g/g$ 高于岱前山、平潭辉长岩 ($42 \sim 65 \mu g/g$)^[9, 10], 低于东蔡辉长岩 ($122 \mu g/g$)^[12]。赤

门角闪辉长岩的 $(La/Yb)_N=3.2 \sim 4.5$ $\sum IREE/\sum HREE=3.8 \sim 5.0$ 表明轻重稀土分异不十分强烈, 中度富集轻稀土元素, $\delta Eu=0.91 \sim 1.08$ 稀土配分曲线总体呈右倾式, 曲线走势较为平缓 (图 4 a), 与平潭辉长岩类似, 与堆晶作用形成的岱前山辉长岩有着明显区别。



岱前山引自文献 [9, 11]; 平潭引自文献 [10, 12]; 东蔡、东岳山、桃花山、青兰山引自文献 [12].

图 3 赤石门角闪辉长岩 MgO 的 Hark 图解

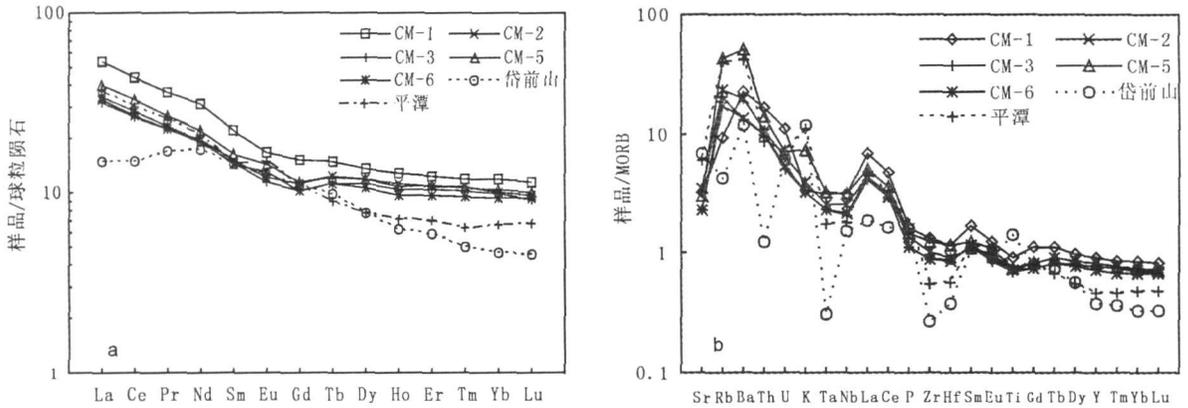
Fig. 3. Hark diagrams of MgO from the Chimen biotite in Fujian

表 2 赤石门角闪辉长岩及沿海辉长岩微量元素分析数据 ($\mu\text{g/g}$)

Table 2 Trace element and REE analyses of the Chimen biotite and coastal gabbro in Fujian

样品	CM-1	CM-2	CM-3	CM-5	CM-6	岱前山 ^[9, 11] (5)	平潭 ^[10, 12] (3)	东蔡 ^[12] (3)
Sc	36	44	46	30	21	-	-	-
V	246	216	224	200	116	-	-	-
Cr	219	324	379	247	54	99	58	-
Ni	86	59	87	62	35	-	-	-
Rb	5.3	9.6	11	24	13	2.4	22	-
Sr	288	203	206	269	315	611	543	-
U	0.52	0.25	0.24	0.33	0.30	-	-	-
Zr	100	65	66	91	74	19.8	40	-
Nb	7.2	4.9	4.9	7.2	5.9	3.6	4.2	-
Ba	140	85	81	317	124	75	261	-
Hf	2.4	1.8	1.8	2.4	1.9	0.76	1.2	-
Ta	0.41	0.30	0.30	0.43	0.33	0.04	0.23	-
Th	1.95	1.17	1.17	1.68	1.27	0.15	1.05	-
Y	26	23	21	23	20	11	13	-
La	17	11	10	13	11	4.7	12	16
Ce	36	22	22	27	23	12	25	42
Pr	4.4	2.7	2.7	3.2	2.8	2.0	3.1	7.1
Nd	19	12	12	14	12	11	13	23
Sm	4.4	3.0	2.9	3.3	2.9	2.9	2.9	6.6
Eu	1.3	0.92	0.87	1.09	0.99	0.95	1.1	2.3
Gd	4.1	3.0	2.8	3.1	2.8	3.0	2.9	7.9
Tb	0.75	0.62	0.56	0.60	0.56	0.50	0.45	1.42
Dy	4.5	4.0	3.7	3.9	3.5	2.5	2.5	6.7
Ho	0.97	0.86	0.79	0.83	0.73	0.48	0.54	1.48
Er	2.7	2.3	2.2	2.4	2.1	1.3	1.5	3.8
Tm	0.39	0.36	0.34	0.35	0.31	0.17	0.21	0.61
Yb	2.6	2.2	2.2	2.3	2.0	1.0	1.4	3.1
Lu	0.38	0.32	0.30	0.33	0.30	0.15	0.22	0.49
Σ REE	98	65	63	74	65	43	66	123
(La/Yb) _N	4.5	3.3	3.2	3.8	3.7	3.2	5.6	3.6
ΣEu	0.91	0.93	0.94	1.05	1.08	1.00	1.19	0.97

注: 圆括号内数字为样品数.



球粒陨石标准值引自文献 [22], MORB数值引自文献 [23]

图 4 赤门角闪辉长岩球粒陨石标准化稀土元素分布模式 (a) 与不相容元素 MORB 标准化蛛网图 (b)

Fig. 4. Chondrite-normalized REE patterns (a) and Primary mantle-normalized incompatible trace element spidergrams (b) of the Chimen bojie in northern Fujian

大洋中脊玄武岩 (NMORB) 标准化的不相容元素“蛛网图”中 (图 4 b), 赤门角闪辉长岩总体上显示富集大离子亲石元素 (K Rb Ba 等) 和轻稀土元素、亏损高场强元素 (Nb Ta 等) 的特征, 与活动大陆边缘玄武岩相似。富集 K Rb Ba Th U La 等大离子亲石元素, 亏损 Nb Ta 和 Ti 显示消减带岩石地地球化学特征, 暗示源区演化与俯冲板片派生的富水流体交代地幔楔有关。跟沿海地区的辉长岩“蛛网图”比较 (图 4 b), 与平潭辉长岩的微量元素配分图趋势基本一致, 但平潭 Nb Ta 和 Zr H 等高场强元素更亏损; 与岱前山辉长岩存在较大差别, 岱前山 Ti 为正异常, Nb Ta Zr H 更加亏损, Th 为负异常。

赤门角闪辉长岩的相容元素含量变化明显, Ni=35~87 μg/g Cr=54~379 μg/g V=116~246 μg/g Ni/C 明显低于 Wilson^[24] 给出的原始岩浆 (Ni: 400~500 μg/g Cr>1000 μg/g), MORB (Ni: 90~130 μg/g Cr: 251~411 μg/g) 和板内玄武岩 (Ni: 90~130 μg/g Cr: 352~536 μg/g), 成岩过程中可能经历了橄榄石、单斜辉石的分离结晶。相容元素的原始地幔标准化分布模式图 (图 5 a) 呈“W”型, 明显亏损 Ni Co 与 C 元素, 显示地幔衍生岩的过渡元素分布特征。

4 讨论

4.1 岩浆的演化

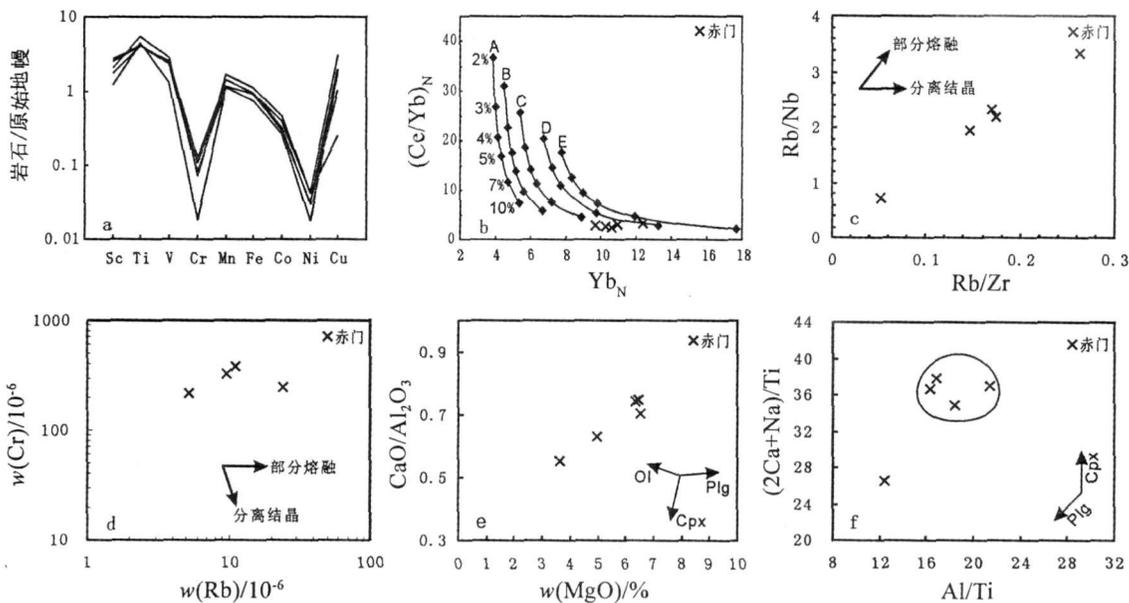
中国东南部晚中生代生产出的辉长岩体, 时空分布存在差异, 表现出不同的地球化学特征, 说明

它们应具有不同的岩浆起源和岩浆演化过程。Rb/Nb-Rb/Z 图解中 (图 5 g)^[25], 角闪辉长岩表现出正斜率直线型平衡部分熔融演化趋势, Cr/Rb 图解中 (图 5 d)^[26], 角闪辉长岩表现为近似水平线部分熔融演化趋势, 说明赤门角闪辉长岩是地幔源部分熔融的产物, (Ce/Yb)_N-(Yb)_N 图解可进一步判断地幔源区物质的部分熔融程度, 图 5 b 显示赤门角闪辉长岩的原始岩浆是由地幔源区物质发生了约 7%~10% 的部分熔融形成的。赤门角闪辉长岩的 Ni C 等元素低于原始地幔、MORB 和板内玄武岩中过渡族元素的含量, 反映岩浆在固结成岩之前经历了一定程度的结晶分异的演化。CaO/Al₂O₃-MgO 图解 (5 g) 和 (2Ca+Nb)/Ti-Al-Ti 图解 (5 f) 表明, 赤门角闪辉长岩的原始岩浆有单斜辉石的分离结晶的演化, 图中显示样品分布较为集中, 可能说明岩浆分离作用的程度较低, 因此, 赤门角闪辉长岩具有较高 A 的特征可能由辉石的分离结晶而造成 F 相对亏损 A 富集, 或高 Al₂O₃ 是地幔橄榄岩部分熔融并经俯冲作用改造的产物^[27]。福建沿海岱前山等早白垩世辉长岩同样具有高 Al₂O₃ 特征, 可能与赤门角闪辉长岩有相似岩浆演化过程。赤门角闪辉长岩没有显著 Sr Eu 负异常, 显示弱的 Eu 负异常, 可能存在斜长石分离结晶作用, 分离结晶程度不高。

赤门角闪辉长岩和沿海地区的辉长岩在时空分布存在差异, 均具有高 Sr 含量、富集 LILE (K Rb 等) 和 LREE 亏损 HFSE (Nb Ta 等) 相似的地球化学特征。辉长岩的原始岩浆在上升过程中是否受到大陆地壳物质混染? 赤门角闪辉长岩

LREE与 Sr 不存在相关性,说明岩石富集 LREE是原始岩浆固有的性质,非岩浆上升过程中地壳物质混染导致的。 Nb/U Nb/La 比值是判断混染和岩浆产生构造环境的灵敏指标,赤门角闪辉长岩的 Nb/U 分别为 13.9 ~ 21.9 (平均值: 19.1), Nb/La 为 0.42 ~ 0.57 (平均值: 0.50), 远

低于全球 MORB OB 的值 ($Nb/U=47$, $Nb/La \approx 1.0$), Nb/U 高于大陆地壳的平均值 (≈ 12), Nb/La 低于大陆地壳的平均值 (≈ 0.7)^[29], 这些特征单纯的用地壳物质混染很难解释。因此,上述的证据表明,形成岩浆在上升过程中没有明显地壳物质的混染作用,其地球化学特征继承了地幔源区性质。



图原始地幔数据引自文献[23]; b图据 Jung等[28],是以Ol(71%),OPx(10%),Amph(4%)以及不同比例的Cpx/Grt(A:11%:4%, B:12%:3%, C:13%:2%, D:14%:1%, E:14.5%:0.5%)模拟源区矿物部分熔融得出的熔融曲线; c图和 d图参考 Xie等[13]绘制。Ol:橄榄石,OPx:斜方辉石,Plg:斜长石,Cpx:单斜辉石,Amph:角闪石,Grt:石榴石

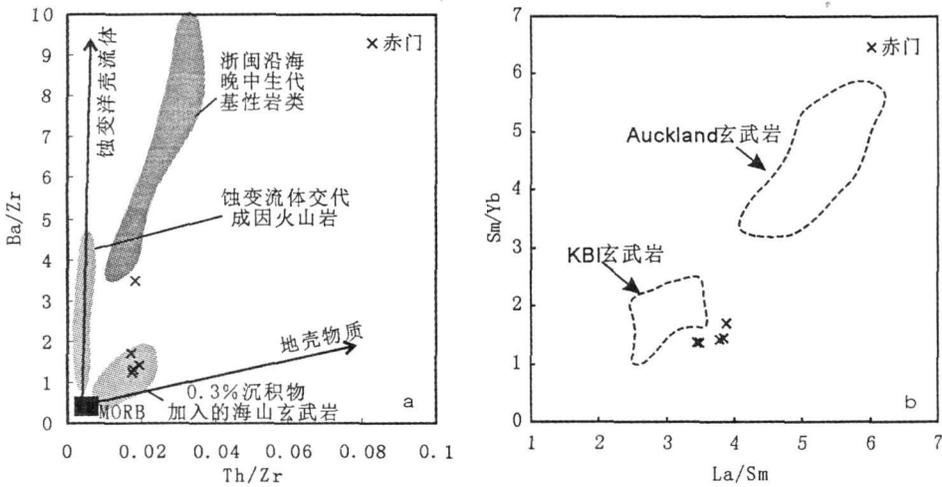
图 5 赤门角闪辉长岩相容元素原始地幔标准化图 (a) 与部分熔融判别图 (b, c, d) 及岩浆演化图 (e, f)
 Fig. 5 Primary mantle normalized compatible trace element spidergrams (a) and discrimination diagrams of partial melting (b, c, d) and diagrams of magma evolution (e, f) for the Chimen bojie in northern Fujian

4.2 地幔源区性质

赤门角闪辉长岩明显富集 K, Rb, Ba, Sr, Th 和 La 等大离子亲石元素, 相对亏损 Ta, Nb 和 Ti 等高场强元素, 显示出俯冲带幔源岩石的成分特点^[30]。岩石富集 Th 亏损 Ta, Nb, Zr, Hf 与俯冲带流体交代岩石圈地幔有关^[31]。 $Nb/Ta=16.2 \sim 17.7$ (平均为 16.9), 与原始地幔的 $Nb/Ta=17.5 \pm 2.0$ 一致^[32]; $Zr/Hf=36.7 \sim 41.7$ (平均值为 38.5), 略高于原始地幔值 (36.27 ± 2.0)^[33], Zr/Hf 比值高可能是受俯冲流体交代作用影响^[34]。据 Th/Zr Ba/Zr 图判别俯冲蚀变流体与地壳物质在源区演化的作用^[35], 岩体主要落在沉积物混染的火山岩内, 并表现蚀变洋壳流体交代演化的趋势 (图 6 a), 沉积物混染可能是俯冲板块

携带地壳物质进入地幔再循环。

强不相容元素之间的比值 (如: Ba/La , Th/K , Nb 等) 同样可以起到类似于同位素的示踪作用, 判别地幔源区的组成特征, 示踪地幔源的演化趋势。选择 Ba/La , Th/La 和 Ba/Th 比值进行判别, 赤门角闪辉长岩 $Ba/La=8.0 \sim 11.4$ (平均为 8.9), $Th/La=0.112 \sim 0.133$ (平均为: 0.118), $Ba/Th=69 \sim 97$ (平均为: 78), 分别与 EMII 型地幔特征值接近 ($Ba/La=8.3 \sim 11.3$, $Th/La=0.122 \sim 0.163$, $Ba/Th=67 \sim 84$)^[37], 反映赤门角闪辉长岩体的地幔源区具有 EMII 的性质。EMII 型地幔端元是由古板块俯冲带入的陆源沉积物、蚀变洋壳或者洋岛玄武岩的再循环形成的^[38]。赤门角闪辉长岩体所表现出的 EMII 富集组分可能是俯冲作用相联系的地壳物质再循环进入并交



图底图以及海山玄武岩、火山岩资料引自文献 [35], 浙闽沿海基性岩类资料引自文献 [4];

b图参考文献 [36], Auckland由含 garnet 源区物质部分熔融形成的, KB则相反

图 6 赤门角闪辉长岩 $Ba/Zr-Th/Zr$ (a) 和 $Sm/Yb-La/Sm$ (b) 相关图

Fig. 6. Correlation diagrams of $Ba/Zr-Th/Zr$ (a) and $Sm/Yb-La/Sm$ (b) for the Chimen bojite in northern Fujian.

代地幔形成的。早中生代始古太平洋板块对欧亚大陆的俯冲碰撞, 俯冲板块析出的流体和携带的沉积物熔体交代上覆地幔楔成为可能, LILE或类 K元素带入地幔楔形成富集地幔, 具有 EMII 性质。李继亮等^[39]指出, 东南地区中生代地幔为一个古俯冲带再循环地幔源区。由此可见, 赤门角闪辉长岩体是由俯冲改造的上覆富集地幔楔部分熔融的产物。

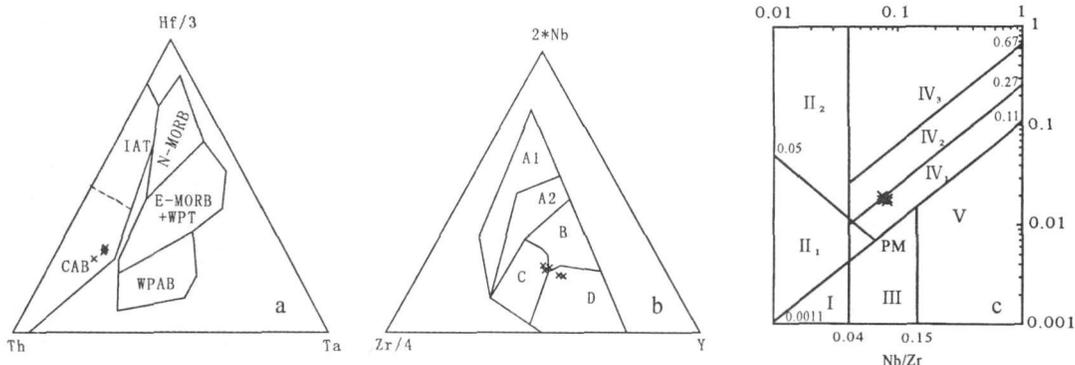
研究表明, 源于软流圈地幔的玄武岩, 其 La/Nb 值约 < 1.5 , La/Ta 值约 < 22 , 岩石圈地幔来源的玄武岩则与之相反^[39]。赤门角闪辉长岩的 La/Nb 值介于 $1.76 \sim 2.37$, La/Ta 值介于 $29.5 \sim 41.9$, 赤门角闪辉长岩的 La/Nb 和 La/Ta 分别大于 1.5 和 22 。利用 $La/Sm-Sm/Yb$ 图解可进一步判断岩石源区深度, 因为这两个比值对部分熔融过程比较敏感, Sm/Yb 受源区是否含有石榴石的显著影响。图 6b 显示, 赤门角闪辉长岩具有低 Sm/Yb 值, 与源区矿物不含石榴石且起源深度相对较浅的 KB 玄武岩投影区接近, 远离源区母岩含石榴石且起源较深的 Auckland 玄武岩投影区, 赤门角闪辉长岩应源自岩石圈地幔。由上论述可知, 赤门角闪辉长岩地幔源区为具有富集特征的岩石圈地幔。

4.3 构造意义

赤门角闪辉长岩侵入时间为白垩纪末期, 全岩 K-A 年龄为 $67.6 \pm 5.4 \text{ Ma}$ ^[40], 沿海地区辉长

岩侵入时间主要为 $95 \sim 129 \text{ Ma}$ ^[5-10]。晚白垩世-早第三纪的基性侵入岩, 呈散状分布在福建各地, 可能与赤门角闪辉长岩形成于统一的动力学背景中。赤门角闪辉长岩体的 $Zr/Y = 2.8 \sim 4.0$ (平均值为: 3.5), 表明其形成于板内 (或大陆边缘弧) 环境中, 而非大洋岛弧。在玄武岩 $Hf_3-Th-Ta$ 三角构造判别图解上 (图 7a)^[41], 赤门的样品点落在钙碱性玄武岩 (CAB) 的范围内, 在 Nb_2-Zr/Y 判别图上 (图 7b)^[42], 样品点也落在岛弧玄武岩区域内, 反映赤门角闪辉长岩体具有大陆边缘弧玄武岩地球化学特征。在 $Th/Zr-Nb/Zr$ 判别图上 (图 7c)^[43], 样品点落在陆内初始裂谷 (陆缘裂谷) 拉斑玄武岩和大陆拉张带玄武岩区域内。结合福建地质演化历史, 研究区在晚白垩世-早第三纪属于板内环境^[17], 赤门角闪辉长岩具有大陆边缘弧的地球化学特征, 可能反映在岩浆形成之前, 地幔源区发生了俯冲交代富集作用。

中国东南部晚中生代伸展拉张活动主要在白垩纪, 伴随着断陷盆地形成与有规模火山喷发, 古太平洋自晚中生代以来开始向中国东南大陆以低角度消减, 后来俯冲角度增大, 引起玄武质岩浆底侵和中下地壳部分熔融, 以及伸展应力下的地壳深熔作用, 形成了晚侏罗世-白垩纪花岗岩和流纹岩^[4]。晚新生代玄武岩研究表明, 主要形成于陆内裂谷环境^[44-45]。晚白垩世末和第三纪的岩浆活动、深部地质作用过程是否具有同一性和一致性?



a WPAB—板内玄武岩, EMORB—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; b A1, A2板内碱性玄武岩, A2, C板内拉斑玄武岩, B-PMORB, D-N-MORB, C D火山弧玄武岩; c I 大洋板块发散边缘, N-MORB区, II 板块汇聚边缘 (II₁ 大洋岛弧玄武岩区; II₂ 陆缘火山弧玄武岩区), III 大陆板内 (III₁ 陆内初始裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区; III₂ 大陆拉张带玄武岩区; III₃ 陆-陆碰撞带玄武岩区), IV 大洋板内, V 地幔柱玄武岩区, PM 原始地幔

图 7 赤门角闪辉长岩体构造环境判别图

Fig. 7. Tectonic discrimination diagrams of the Chimeng bojiite in northern Fujian

赤门角闪辉长岩形成于晚白垩世末, 其大离子亲石元素 (如: Ba, Th, Rb等) 含量比较低, 低于浙闽晚中生代玄武岩的含量^[4], 与早白垩世晚期侵入的辉长岩相似 (如: 平潭等) (表 2)。赤门角闪辉长岩可能是构造转换过渡类型岩石, 如下证据得以体现: ①中国东南部晚中生代的镁铁质岩, 只有少部分地区的岩石没有 Nb-Ta 负异常, 其它地区的岩石^[4]与赤门角闪辉长岩一样均具有 Nb-Ta 负异常的性质, 显示俯冲消减成因玄武岩地球化学组成特征, 地幔源区与太平洋板块俯冲有关; ②早白垩世晚期形成的辉长岩体, 空间上有中、酸性岩石伴生, 侵位时间有一致性^[10], 赤门角闪辉长岩在空间上没有中、酸性岩石伴生现象; ③晚于赤门角闪辉长岩形成的赣中早第三纪铁镁质岩石 (49~65 Ma) 蛛网图没有 Nb-Ta 负异常, $\epsilon_{Nd}(t) > 0$ 与太平洋俯冲无关, 形成于板内伸展拉张构造环境^[46]; ④朱炳泉等^[47]研究发现, 广东茂名等盆地火山岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值在 56 ± 2 Ma 时明显由负值转变为正值, 源区转变为亏损地幔, 表明中国东南部存在早第三纪岩石圈减薄与软流圈上涌地质事件; ⑤ Th₁Zr/Nb₁Zr 构造判别图上, 赤门样品落在陆内初始裂谷 (陆缘裂谷) 拉斑玄武岩区, 微量元素表现为大陆边缘弧玄武岩组成特征; ⑥赤门角闪辉长岩为亚碱性系列, 属于拉斑和钙碱性系列,

赣中早第三纪铁镁质岩石介于碱性和亚碱性系列之间, 以碱性系列为主^[46]。以上地质地球化学特征可能表明赤门角闪辉长岩是在大陆拉张向裂谷转换体制下, 形成的过渡类型岩石, 来自类似 EM II 型地幔的部分熔融, 赤门角闪辉长岩是大洋板块消减作用减弱岩浆作用的产物。

5 结 论

(1) 对赤门角闪辉长岩的系统研究表明, 该岩体形成的构造背景为大陆拉张带—初始裂谷环境, 侵入时代为晚白垩世末期, 其产出可能标志初始裂谷活动的开始;

(2) 赤门角闪辉长岩的微量元素地球化学特征表明, 源区来自具有 EMII 型富集地幔组成特征地幔岩石的部分熔融, 地幔源区的演化与古太平洋板块俯冲密切相关, 与中国东南部晚中生代存在富集型岩石圈地幔的事实相符;

(3) 赤门角闪辉长岩具有消减带岩石的地球化学特征, 侵入时代为晚白垩世末期, 稍晚形成的第三纪铁镁质岩石没有消减带成因岩石的性质, 说明角闪辉长岩是在大陆拉张带向初始裂谷转换的体制下, 形成的过渡岩石类型, 标志着太平洋板块消减作用减弱, 逐渐失去了对中国东南部岩浆活动的影响能力。

参 考 文 献:

- [1] 范蔚茗, 王岳军, 郭锋, 彭头平. 湘赣地区中生代镁铁质岩浆作用与岩石圈伸展[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 159-169.
- [2] Gilder SA, Gill J, Coe R S, et al. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China[J]. J Geophys Res, 1996, 101(B7): 16137-16154.
- [3] Li X H. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in southeast China[J]. J of Asian Earth Sci, 2000, 18: 293-305.
- [4] 王德兹, 周新民, 等. 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[M]. 北京: 科学出版社, 2002, 1-295.
- [5] 周珣若, 吴克隆. 漳州型花岗岩[M]. 北京: 科学出版社, 1994, 1-148.
- [6] 周新民, 徐夕生, 董传万, 李惠民. 中国东南活动大陆边缘的矿物标志: 钙长石质斜长石[J]. 科学通报, 1994, 39(11): 1011-1014.
- [7] Zou H B. A mafic-ultramafic rock belt in the Fujian coastal area, southeastern China: A geochemical study[J]. J of Southeast Asian Earth Science, 1995, 12: 121-127.
- [8] Dong C W, Zhou X M, Li H M, Ren S L, Zhou X H. Late Mesozoic crust-mantle interaction in southeastern Fujian: Isotopic evidence from the Pingnan igneous complex[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(6): 495-495.
- [9] 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.
- [10] Xu X S, Dong C W, Li W X, Zhou X M. Late Mesozoic intrusive complexes in coastal area of Fujian, SE China: The significance of the gabbro-diorite-granite association[J]. Lithos, 1999, 46(2): 299-315.
- [11] 赵军红, 胡瑞忠, 刘燊. 福建岱前山辉长岩体的地球化学特征与成因探讨[J]. 矿物学报, 2004, 24(3): 245-252.
- [12] Wang Z H. The origin of the Cretaceous gabbros in the Fujian coastal region of SE China: implications for deformation-accompanied magmatism[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 144: 230-240.
- [13] Xie X, Xu X S, Zou H B, Jiang S Y, Zhang M, Qiu J H. Early J₂ basalts in SE China: Incipience of large-scale late Mesozoic magmatism[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 49(8): 796-815.
- [14] Li J L. Tectonic framework and evolution of southeastern China[J]. J of Southeast Asian Earth Science, 1993, 8: 219-223.
- [15] Lu H F, Jia D, Wang Z H, Guo L, Shi Y, Zhang Q. Tectonic evolution of the Dongshan Terrane, Fujian Province, China[J]. J South Amer Earth Sci, 1994, 7(3): 349-365.
- [16] 李惠民, 董传万, 徐夕生, 周新民. 泉州辉长岩中单颗粒锆石 U-Pb 法定年—闽东南基性岩浆的起源[J]. 科学通报, 1995, 40(2): 158-160.
- [17] 福建省地质矿产勘查开发局. 1:50万福建省地质图说明书[M]. 福州: 福建省地图出版社, 1998, 1-120.
- [18] 李献华, 刘颖, 涂湘林, 胡光黔, 曾文. 硅酸盐岩石化学组成的 ICP-AES 和 ICP-MS 准确测定: 酸溶与碱熔分解样品方法的对比[J]. 地球化学, 2002, 31(3): 289-294.
- [19] Middlemost E A K. Naming materials in the mafic igneous rock system[J]. Earth Science Reviews, 1994, 37: 215-224.
- [20] Irvine T N, Barager W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1971, 8: 532-548.
- [21] Rickwood P C. Boundary lines with in Petrologic diagram which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 1989, 22: 247-263.
- [22] Anders E, Grevesse N. Abundances of the elements Meteoritic and solar[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53: 197-214.
- [23] 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.
- [24] Wilson M. Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach[M]. London: Unwin Hyman, 1989, 1-466.
- [25] 马昌前, 杨坤光, 唐仲华, 李增田. 花岗岩类岩浆动力学: 理论方法及鄂东花岗岩类例析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994, 38-48.
- [26] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1997, 1-169.
- [27] Hawkesworth C, Turner S, Gallagher K, Hunter A, Bradshaw T, Rogers N. Calc-alkaline magmatism, lithospheric thinning and extension in the Basin and Range[J]. J Geophys Res, 1995, 100(B6): 10271-10286.
- [28] Jung S, Maasberg P. Major and trace element systematics and isotope geochemistry of Cenozoic mafic volcanic rocks from the Vogelsberg (Central Germany) — Constraints on the origin of continental alkaline and tholeiitic basalts and their mantle sources[J]. J of Volcanology and Geothermal Research, 1998, 86: 151-177.
- [29] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust[J]. Review Geophysics, 1995, 33: 241-265.
- [30] Keppeler H. Constraints from partitioning experiments on the composition of subduction zone fluids[J]. Nature, 1996, 380: 237-240.
- [31] Davies G R, Macdonald R. Crustal influences in the petrogenesis of the Navajho basalt-comendite complex: Combined trace element and Sr-Nd-Pb isotope constraints[J]. Journal of Petrology, 1987, 28: 1009-1031.
- [32] Jochum K P, McDonough W F, Palme H, Spettel B. Compositional constraints on the continental lithospheric mantle from trace elements in spinel peridotite xenoliths[J]. Nature, 1989, 340: 548-550.
- [33] Stolz A J, Jochum K P, Spettel B, Hofmann A W. Fluid- and melt-related enrichment in the subarc mantle: Evidence from Nb/Ta varia-

- tions in island-arc basalts [J]. *Geology*, 1996, 24(7): 587-590
- [34] Rudnick R L, Fountain D M. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective [J]. *Rev Geophys*, 1995, 33: 267-309
- [35] Ishizuka Q, Taylor R N, Milton J A, Nesbitt R W. Fluid mantle interaction in an intra-oceanic arc: Constraints from high-precision Pb isotopes [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 211: 221-236
- [36] Huang Y M, Hawkesworth C, Smith J, Calsteren P van, Black P. Geochemical study of Late Cenozoic basaltic volcanism in Northland and Coromandel, New Zealand: Implications for mantle enrichment processes [J]. *Chemical Geology*, 2000, 164(3-4): 219-238
- [37] Weaver B L. The origin of ocean island basalt end-member compositions: Trace element and isotopic constraints [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1991, 104: 381-397
- [38] Hart S R. Heterogeneous mantle domains: Signature genesis and timing chronologies [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1988, 90: 273-296
- [39] 李继亮. 中国东南大陆及相邻海域岩石圈结构、组成与演化 [J]. *地球科学进展*, 1996, 3: 221-222
- [40] 张贵山. 福建晚中生代以来基性超基性岩的年代学、地球化学及其地球动力学意义 [D]. 中国科学院地球化学研究所, 2006: 36-49
- [41] Wood D A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1980, 50: 11-30
- [42] Meschede M. A method of discriminating between different type of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram [J]. *Chem Geol*, 1986, 56: 207-218
- [43] 孙书勤, 汪云亮, 张成江. 玄武岩类岩石大地构造环境的 Th-Nb-Zr 判别 [J]. *地质论评*, 2003, 49(1): 40-47
- [44] Liu C Q, Masuda A, Xie G H. Major and trace element compositions of Cenozoic basalts in eastern China: Petrogenesis and mantle source [J]. *Chemical Geology*, 1994, 14: 19-42
- [45] Ho K S, Chen J C, Lo C H, Zhao H L. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating and geochemical characteristics of Late Cenozoic basaltic rocks from the Zhejiang-Fujian region, SE China: Eruption ages, magma evolution and petrogenesis [J]. *Chemical Geology*, 2003, 197: 287-318
- [46] 谢桂青, 毛景文, 胡瑞忠, 李瑞玲, 曹建勋. 赣中早第三纪镁铁质岩石的地质地球化学及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2005, 21(1): 77-90
- [47] 朱炳泉, 王慧芬, 陈毓蔚, 常向阳, 胡耀国, 谢静. 新生代华夏岩石圈减薄与东亚边缘海盆构造演化的年代学与地球化学制约研究 [J]. *地球化学*, 2002, 3: 213-221

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF BOJITE IN NORTHERN FUJIAN PROVINCE AND THEIR GEODYNAMIC SIGNIFICANCE

ZHANG Gui-shan², WEN Han-jie, LI Shi-lei, HU Rui-zhong, QIU Yu-zhuo

(1. College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

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

3. Sichuan Tianyue Group Co. Ltd., Neijiang 642469, China)

Abstract: The Chimen bojite with a nearly NS strike was a product of mafic magma activity in southeastern China at the end of Late Cretaceous. And it is spreaded in the northern part of Nanping City in Fujian Province. It belongs to low-K (tholeiite) rock series characterized by high Al contents and $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$. Possibly resultant from fractional crystallization of olivine, clinopyroxene, plagioclase and titanium-iron oxide. These stocks are significantly enriched in LILE (such as K, Rb, Ba, Th, and U) and IREE, depleted in HFSE (Nb, Ta, Zr, Hf). In the primary mantle-normalized spidergram, they show the geochemical features of subduction zone rocks and negative Nb, Ta, Ti anomalies. The results of trace element geochemical study indicated that the bojite was not contaminated by crustal material during emplacement; it was derived from partial melting of garnet-free enriched lithospheric mantle, and the evolution of the mantle source region is closely related with the subduction of the Pacific plate. The Chimen bojite was formed in the geodynamic setting between the crustal extension belt and the continental initial rift. In combination with the results of geobogical studies for the Late Mesozoic mafic igneous rocks in SE China, it is suggested that the Chimen bojite belongs to the transitional rock series in the transitional zone from the crustal extension belt to the continental initial rift, which may be used to trace rift start up when compared to the coastal gabbro.

Key words: bojite; geochemistry; enriched mantle; Fujian Province