

文章编号: 0379 - 1726(2004)03 - 0243 - 11

闽西晚中生代基性岩脉的地球化学研究

张贵山^{1,2}, 温汉捷¹, 裘愉卓¹

(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 100039)

摘要: 对闽西三个地区基性岩脉的地球化学研究发现, 该区域的基性岩脉为亚碱性岩石系列, 具有高 Al、低 Ti、 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ 的特征; 相对富集大离子亲石元素、亏损高强场元素。半村辉绿岩脉和拔里角闪辉长岩脉以 Nb、Ta、Ti 负异常为特征, 林子坟辉绿岩脉具有 Nb、Ta 负异常和 Ti 弱正异常。半村和拔里的岩脉稀土元素总量高, 明显富集轻稀土元素, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 6.8 \sim 8.4$; 林子坟的岩脉稀土元素总量相对较低, 轻稀土元素弱富集, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 2.0$ 。结合基性岩脉的地球化学特征和区域构造演化分析, 初步认为半村和拔里的基性岩脉来自与俯冲作用有关的富大离子亲石元素流体交代的富集地幔; 林子坟基性岩脉是软流圈地幔部分熔融的产物, 地壳混染作用是其相对富集大离子亲石元素的原因。结合玄武岩构造环境判别图解可知, 半村和拔里岩脉具有的大陆边缘弧的特征并不指示基性岩脉形成的构造环境, 而是说明其源区受到俯冲板片派生出来的流体交代作用。半村和拔里岩脉形成于大陆板内拉张带, 林子坟岩脉形成于板内裂谷环境。与华南其他地区的基性岩脉对比表明, 虽然晚中生代华南地区处于拉张的构造背景下, 但是岩脉形成的构造环境与微量元素地球化学特征均有明显的差异, 反映了各地区构造环境演变和地幔演化的复杂性。

关键词: 基性岩脉; 地幔源区; 构造环境; 福建省**中图分类号:** P594 **文献标识码:** A

0 引言

基性岩脉群是代表大陆拉张裂解的岩石, 它们的形成与岩石圈减薄和地壳拉张作用有直接关系。基性岩脉群不仅包含着丰富的幔源信息, 而且可以作为重要构造转换时间衡量的标尺^[1], 对探讨构造格局的时空演化起着重要作用, 并且在地球动力学研究中有重要而特殊的意义。近年来, 对基性岩脉群的研究已经成为国内外热点^[2~6], 在岩墙群的分布、形态、古地磁、岩石学、地球化学、年代学和构造演化等方面取得了一系列的成果^[3,4,7,8]。

侏罗纪到白垩纪, 华南大陆区域构造应力场已经发生了从挤压到拉张的演变, 表现为与拉张有关的 I 型、A 型花岗岩大量侵入和双峰式火山岩喷发, 同时形成了一系列的 NE 向断裂带和断陷盆地, 并伴有大量基性岩脉群出现^[9]。目前, 对华南中生代基性岩脉的系统研究工作主要集中在粤北、赣西北、湘东北和琼南等地区, 对福建地区基性岩脉的研究报

道^[10]较少, 显得研究不够系统和深入。福建地处华南大陆的东南缘, 濒临太平洋, 为环太平洋构造体系的一部分, 中生代岩浆活动与构造演化十分特征, 一直是广大地质学者研究的热点^[10~14]。本次工作拟以闽西晚中生代基性岩脉为对象, 对其进行系统的岩石学、主元素和微量元素地球化学研究, 并结合基性岩脉产出的大地构造背景, 对其成岩方式、成岩环境和源区性质进行初步的探讨。

1 基性岩脉的基本地质特征

政和 - 大埔断裂带以东沿海地区晚中生代主要为壳 - 幔混合源 I 型以及幔源 A 型花岗岩类和复合杂岩体^[15]; 而政和 - 大埔断裂带以西地区晚中生代的 I 型花岗岩类出露非常有限, 主要为早中生代的壳源型 S 花岗岩类, 政和 - 大埔断裂带两侧岩浆作用差异^[16]对晚中生代基性岩浆的活动及基性脉岩的产出和地球化学性质是否有控制作用? 本项目以福建地区为研究区, 样品采集遍布政和 - 大埔断裂

收稿日期: 2003 - 05 - 26; 接受日期: 2003 - 12 - 04

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-125; KZCX2-102)

作者简介: 张贵山(1971 -), 男, 硕士研究生, 矿床地球化学专业。E-mail: zhangguishan71@tom.com

带的两侧,而本文主要对政和-大埔断裂带西侧三个地区的基性岩脉初步成果做相关的报道(图1),岩脉分别为永安市南部罗坊镇半村的辉绿岩脉、清流县东华乡拔里村的角闪辉长岩脉和永安市北部的大湖镇林子坟的辉长辉绿岩脉。半村辉绿岩脉侵入燕山早期的中-粗粒黑云母花岗岩体中,花岗岩的侵入时代 $173\text{ Ma}^{[1]}$,岩脉宽 $7\sim 9\text{ m}$,长 $1\ 000\text{ m}$ 左右,走向为 290° ,倾角为 $75^\circ\sim 85^\circ$ 。拔里村角闪辉长岩脉侵入震旦系的变质晶玻屑凝灰岩地层,脉宽 10 m 左右,岩脉走向为 55° 。林子坟辉长辉绿岩脉侵入燕山早期的粗粒似斑状钾长花岗岩体中,花岗岩体的侵入时代为 142 Ma (黑云母 K-Ar)^[1],岩脉宽约 $5\sim 7\text{ m}$,走向为 340° ,倾角约为 $70^\circ\sim 75^\circ$,局部有膨

大的现象。

半村辉绿岩脉,主要由斜长石(82%)、普通辉石(15%)和少量石英组成;斜长石呈自形一半自形晶,普通辉石呈他形晶,主要填充在由斜长石构成的三角形格架中,部分辉石已经绿泥石化;副矿物为磷灰石和磁铁矿,典型的辉绿结构,块状构造。拔里角闪辉长岩脉主要由斜长石(65%)、普通辉石(15%)和角闪石(18%)组成,斜长石呈自形一半自形晶;普通辉石为半自形-他形晶;角闪石呈棕黄色,局部有绿泥石化现象;有少量的石英和方解石,副矿物有磁铁矿和磷灰石,为辉长结构,块状构造。林子坟辉长辉绿岩脉,主要由斜长石(65%)、普通辉石(30%)组成,斜长石呈自形一半自形晶,辉石呈半自形-他形

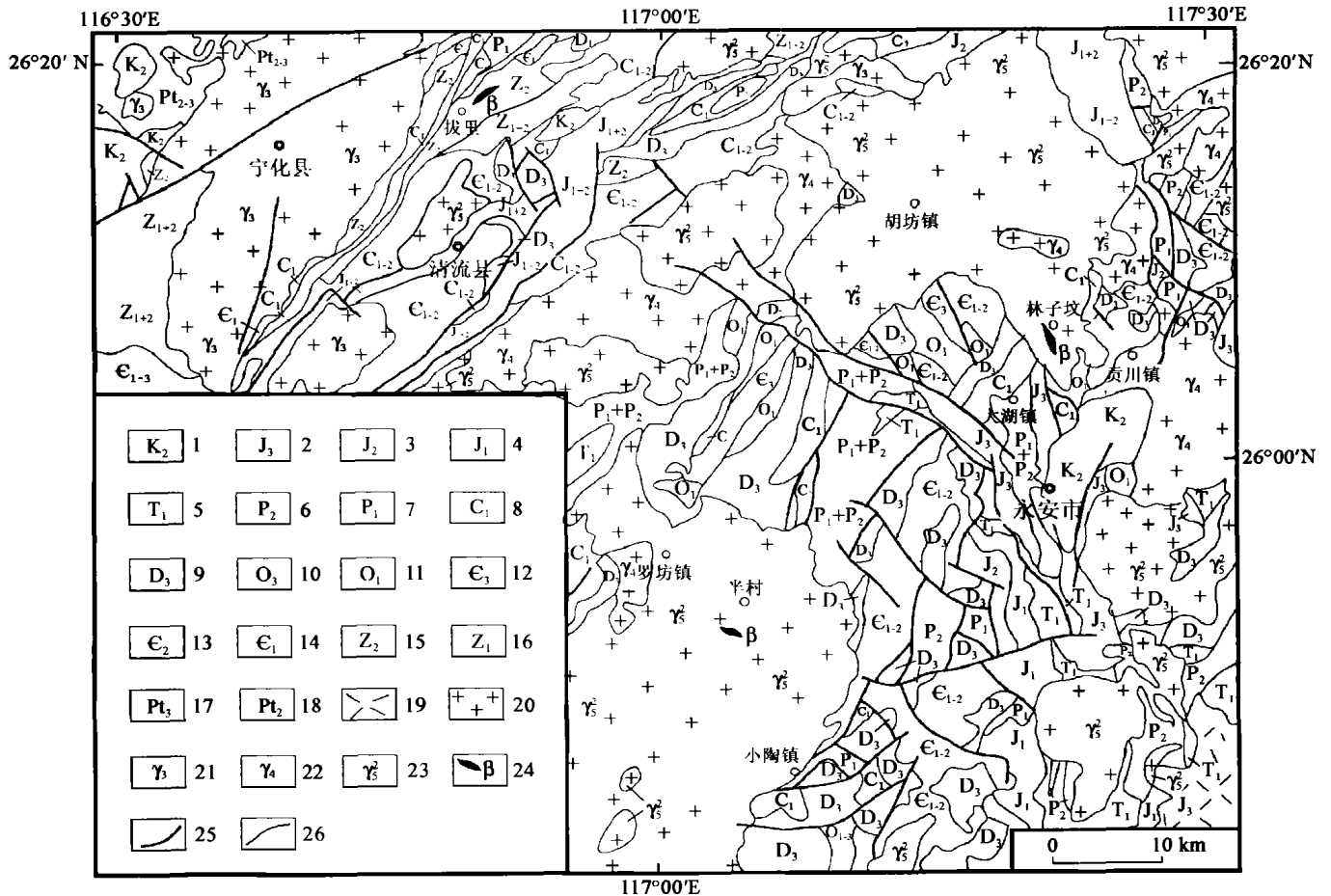


图1 闽西地区地质构造简图

Fig. 1 Geological sketch map of western Fujian Province

据1998年版福建省1:50万地质图修改 1. 上白垩统; 2. 上侏罗统; 3. 中侏罗统; 4. 下侏罗统; 5. 下三叠统; 6. 上二叠统; 7. 下二叠统; 8. 下石炭统; 9. 上泥盆统; 10. 上奥陶统; 11. 下奥陶统; 12. 上寒武统; 13. 中寒武统; 14. 下寒武统; 15. 中震旦统; 16. 下震旦统; 17. 上元古界; 18. 中元古界; 19. 流纹岩; 20. 花岗岩; 21. 早古生代花岗岩; 22. 晚古生代花岗岩; 23. 中生代花岗岩; 24. 辉长(辉绿)岩脉; 25. 断裂; 26. 地质界线

1) 福建省地质矿产勘查开发局, 1:50万福建省地质图说明书, 1998, 43~77
 2) 福建省闽西地质大队区域地质调查分队, 1:5万地质图(贡川幅), 1990

晶,副矿物为磷灰石和磁铁矿,辉长辉绿结构,块状构造。三个地区基性岩脉的斜长石均为拉长石 (An > 50%)。

2 样品分析方法

挑选新鲜的岩石样品进行主元素和微量元素分析。主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,分析误差小于 10%。微量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 [17],分析过程中插入 USGS 标准样品 BCR-1(玄武岩)和 W-2(辉绿岩),与标样推荐值进行对比,一般元素分析误差小于 10%,其中绝大多数元素分析误差小于 5%;只有个别元素 [Sr(BCR-1)、Tm(W-2)] 分析误差较大,超过 10%。分析结果见表 1。

3 地球化学特征

3.1 岩石化学

从表 1 可以看出,三个地区基性岩脉的 SiO₂ 含量为 48.84% ~ 52.78%,扣除烧失量换算成 100% 后投到 TAS 全碱图^[18](图 2a)上,半村辉绿岩脉样品落在玄武质安山岩区域内,拔里角闪辉长岩脉样品

投在玄武岩区域与玄武质安山岩交界的范围内,林子坟辉长辉绿岩脉样品落在玄武岩区域内,所有的样品均在 Irvine 分界线下,本区岩脉属于亚碱性岩石系列。对于亚碱性火成岩系列可以按 K₂O-SiO₂ 图解^[20-21]进一步分类(图 2b),半村属于钙碱性系列,拔里属于高钾钙碱性系列,林子坟样品点却落在钙碱性系列与低钾拉斑系列的交界线上,属于一种过渡类型,在 FMA 图解(略)上林子坟样品点落在拉斑系列区域内。

研究区基性岩脉的 Na₂O + K₂O 含量在 2.03% ~ 3.47% 之间,所有样品的 Na₂O > K₂O, K₂O/Na₂O 比值为 0.20 ~ 0.99;半村辉绿岩脉 K₂O/Na₂O 比值在 0.65 ~ 0.77 之间,拔里角闪辉长岩脉在 0.93 ~ 0.99 之间,林子坟辉长辉绿岩脉则在 0.20 ~ 0.25 之间。三个地区的基性岩脉具有较高的 Al₂O₃ 含量 (16.32% ~ 18.91%),与岩相学观察到普遍发育钙质斜长石的现象相符,该特点被认为是岩浆起源于与俯冲有关的活动大陆边缘或岛弧环境的矿物学标志^[22],与闽浙地区中生代基性火成岩的高 Al 特征一致^[23],可能与本区高 Al 基底有关;半村辉绿岩脉的 TiO₂ 含量为 0.59% ~ 0.82%,拔里角闪辉长岩脉为 0.74% ~ 1.01%,林子坟辉长辉绿岩脉则为 1.26% ~ 1.64%,明显高于前两个地区的基性岩脉,与沿海地区由堆晶作用形成辉长岩的 TiO₂ 含量(如岱前山等)相似。MgO 的含量在 5.99% ~ 9.64% 之间, Mg[#] 总体上与 SiO₂、TFe、Al₂O₃、TiO₂ 呈负相关关

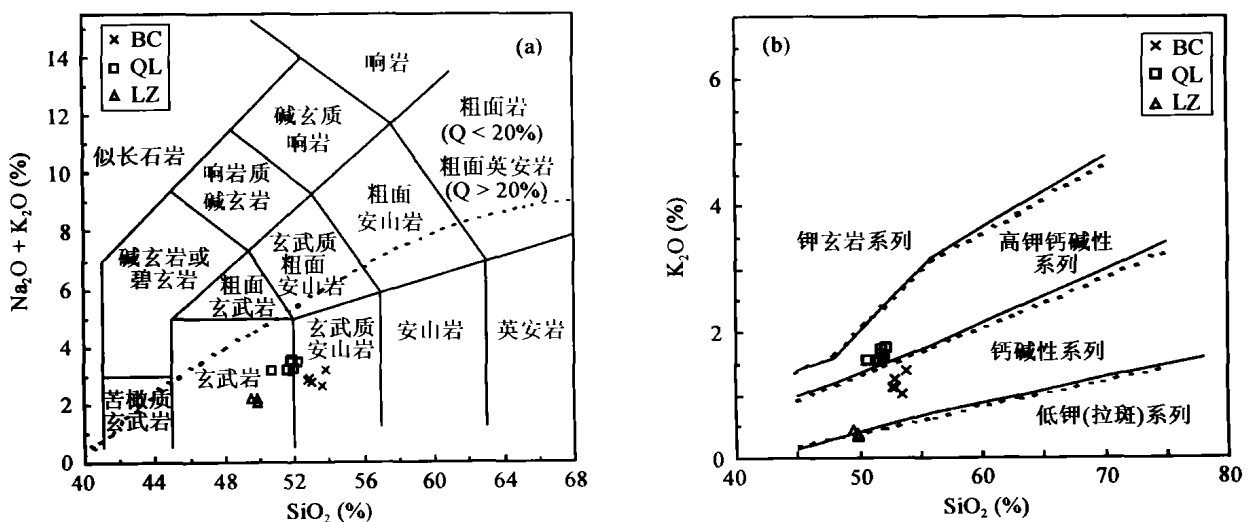


图 2 闽西基性岩脉的 TAS 岩石分类图解(a)和 K₂O-SiO₂ 图解(b)

Fig. 2 TAS classification diagram (a) and K₂O-SiO₂ diagram (b) of mafic dikes in western Fujian Province

BC, 半村辉绿岩脉; QL, 拔里角闪辉长岩脉; LZ, 林子坟辉长辉绿岩脉。

图 2a 中: 虚线为 Irvine 分界线^[18], 上方为碱性岩石系列, 下方为亚碱性岩石系列。

图 2b 中: 实线据文献[20]; 虚线据文献[21]

表1 闽西基性岩脉的主元素(%)与微量元素(μg/g)分析结果

Table 1 Analytical data of major (%) and trace element (μg/g) compositions of mafic dikes in western Fujian Province

| 样品 | BC-1 | BC-2 | BC-3 | BC-4 | BC-7 | QL-1 | QL-2 | QL-3 | QL-4 | QL-5 | QL-6 | LZ-1 | LZ-2 | LZ-3 | LZ-4 | BCR-1 | W-2 |
|--------------------------------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|------|
| SiO ₂ | 52.15 | 51.96 | 51.68 | 52.77 | 52.78 | 50.43 | 50.03 | 49.24 | 50.31 | 50.18 | 50.56 | 49.23 | 49.27 | 49.24 | 48.84 | | |
| TiO ₂ | 0.82 | 0.67 | 0.64 | 0.59 | 0.60 | 0.87 | 1.01 | 0.74 | 1.00 | 0.95 | 0.88 | 1.26 | 1.64 | 1.52 | 1.36 | | |
| Al ₂ O ₃ | 17.24 | 17.40 | 17.54 | 16.32 | 17.02 | 16.89 | 17.72 | 17.66 | 17.50 | 17.81 | 17.01 | 18.35 | 16.38 | 18.91 | 16.86 | | |
| Fe ₂ O ₃ | 1.24 | 1.16 | 1.07 | 1.73 | 1.23 | 0.46 | 0.61 | 0.75 | 0.63 | 0.61 | 1.62 | 1.51 | 1.64 | 1.54 | 2.09 | | |
| FeO | 5.74 | 5.91 | 5.24 | 5.67 | 5.32 | 5.73 | 5.96 | 5.32 | 5.36 | 5.55 | 5.26 | 6.18 | 7.58 | 6.76 | 8.07 | | |
| MnO | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.17 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.21 | 0.22 | 0.22 | 0.23 | | |
| MgO | 6.55 | 6.64 | 6.64 | 6.45 | 6.77 | 9.30 | 8.42 | 9.64 | 8.51 | 8.30 | 8.22 | 6.91 | 6.99 | 5.99 | 6.72 | | |
| CaO | 11.78 | 11.34 | 11.85 | 11.17 | 11.69 | 9.60 | 9.38 | 9.95 | 9.70 | 9.54 | 9.64 | 12.64 | 12.72 | 12.36 | 12.28 | | |
| Na ₂ O | 1.66 | 1.67 | 1.69 | 1.79 | 1.58 | 1.65 | 1.80 | 1.57 | 1.80 | 1.77 | 1.71 | 1.78 | 1.70 | 1.68 | 1.75 | | |
| K ₂ O | 1.10 | 1.22 | 1.11 | 1.38 | 1.02 | 1.54 | 1.53 | 1.53 | 1.67 | 1.61 | 1.70 | 0.37 | 0.36 | 0.35 | 0.43 | | |
| P ₂ O ₅ | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | | |
| 烧失 | 1.63 | 1.77 | 2.12 | 2.02 | 1.54 | 3.01 | 3.13 | 3.03 | 3.08 | 3.16 | 3.20 | 1.33 | 1.34 | 1.22 | 1.40 | | |
| 总计 | 100.11 | 99.94 | 99.79 | 100.09 | 99.76 | 99.68 | 99.79 | 99.63 | 99.77 | 99.69 | 100.01 | 99.81 | 99.88 | 99.83 | 100.08 | | |
| Mg [†] | 67.21 | 66.94 | 69.46 | 67.10 | 69.55 | 74.52 | 71.77 | 76.51 | 71.62 | 73.23 | 72.79 | 66.80 | 62.5 | 61.32 | 60.00 | | |
| Sc | 33.1 | 33.7 | 32.6 | 34.0 | 32.3 | 26.8 | 28.9 | 30.2 | 27.4 | 26.5 | 26.2 | 42.9 | 42.7 | 42.1 | 42.8 | 29.1 | 33.8 |
| V | 221 | 226 | 206 | 221 | 213 | 205 | 216 | 202 | 206 | 215 | 211 | 322 | 309 | 327 | 342 | 392 | 276 |
| Cr | 78.7 | 78.9 | 97.6 | 82.8 | 81.1 | 660 | 650 | 825 | 731 | 653 | 612 | 219 | 194 | 210 | 200 | 7.41 | 88 |
| Co | 38.0 | 37.7 | 35.1 | 37.8 | 37.8 | 40.4 | 42.3 | 42.1 | 39.9 | 40.1 | 38.0 | 49.5 | 50.5 | 51.1 | 51.3 | 35.7 | 43.8 |
| Ni | 38.2 | 42.0 | 42.9 | 39.6 | 40.9 | 196 | 184 | 217 | 215 | 176 | 165 | 77.7 | 67.8 | 72.8 | 74.0 | 13.0 | 70 |
| Rb | 44.3 | 51.4 | 61.5 | 67.7 | 36.4 | 43.7 | 48.9 | 39.4 | 49.4 | 46.5 | 47.7 | 18.0 | 16.8 | 17.1 | 23.3 | 46.3 | 19.5 |
| Sr | 205 | 232 | 235 | 224 | 181 | 285 | 358 | 299 | 326 | 330 | 314 | 192 | 188 | 169 | 211 | 274 | 184 |
| Zr | 94.2 | 95.5 | 76.8 | 93.8 | 88.5 | 106 | 117 | 104 | 111 | 104 | 110 | 84.2 | 91.2 | 86.5 | 94.8 | 179 | 89 |
| Nb | 6.96 | 7.13 | 5.85 | 7.09 | 6.66 | 9.61 | 10.2 | 9.20 | 9.99 | 9.53 | 10.4 | 6.09 | 6.95 | 6.45 | 6.79 | 12.9 | 7.66 |
| Ba | 343 | 369 | 296 | 408 | 303 | 528 | 591 | 549 | 547 | 488 | 583 | 91.6 | 71.3 | 77.4 | 96.1 | 636 | 176 |
| Hf | 2.28 | 2.31 | 1.84 | 2.40 | 2.18 | 2.58 | 2.80 | 2.68 | 2.67 | 2.70 | 2.93 | 2.27 | 2.35 | 2.42 | 2.50 | 4.85 | 2.45 |
| Ta | 0.45 | 0.43 | 0.36 | 0.45 | 0.43 | 0.52 | 0.61 | 0.49 | 0.54 | 0.54 | 0.59 | 0.38 | 0.42 | 0.40 | 0.42 | 0.79 | 0.45 |
| Th | 4.61 | 4.57 | 3.71 | 4.56 | 4.28 | 3.71 | 4.26 | 3.79 | 3.90 | 3.93 | 4.17 | 0.75 | 0.85 | 0.81 | 0.88 | 6.03 | 2.16 |
| U | 1.11 | 1.14 | 0.89 | 1.12 | 1.06 | 0.92 | 1.04 | 0.93 | 0.99 | 0.93 | 1.02 | 0.19 | 0.23 | 0.23 | 0.23 | 1.74 | 0.51 |
| Y | 20.2 | 20.3 | 16.8 | 19.5 | 20.1 | 26.8 | 25.4 | 23.0 | 23.3 | 22.3 | 24.1 | 28.8 | 27.2 | 26.8 | 27.9 | 36.2 | 21.4 |
| La | 20.9 | 20.5 | 16.6 | 19.7 | 19.8 | 21.8 | 25.2 | 23.3 | 23.4 | 22.3 | 25.6 | 7.35 | 7.67 | 6.91 | 7.59 | 26.0 | 10.6 |
| Ce | 41.6 | 40.3 | 32.5 | 39.9 | 38.6 | 48.0 | 53.8 | 49.5 | 50.3 | 49.0 | 53.8 | 16.7 | 18.6 | 17.3 | 18.7 | 55.1 | 24.4 |
| Pr | 4.46 | 4.43 | 3.55 | 4.13 | 4.20 | 5.77 | 6.35 | 5.68 | 5.84 | 5.77 | 6.29 | 2.44 | 2.50 | 2.37 | 2.58 | 6.77 | 2.91 |
| Nd | 16.4 | 16.5 | 13.2 | 15.9 | 15.7 | 23.2 | 25.5 | 22.5 | 23.9 | 23.7 | 25.3 | 11.6 | 12.2 | 11.7 | 12.2 | 28.2 | 12.6 |
| Sm | 3.21 | 3.17 | 2.60 | 3.12 | 3.06 | 4.96 | 5.46 | 5.00 | 4.80 | 4.84 | 4.94 | 3.29 | 3.50 | 3.41 | 3.43 | 6.41 | 3.03 |
| Eu | 0.90 | 0.96 | 0.81 | 0.95 | 0.95 | 1.41 | 1.48 | 1.40 | 1.46 | 1.44 | 1.50 | 1.28 | 1.28 | 1.26 | 1.32 | 2.00 | 1.12 |
| Gd | 3.54 | 3.51 | 2.88 | 3.50 | 3.31 | 5.03 | 5.52 | 4.68 | 5.16 | 5.01 | 5.16 | 4.40 | 4.26 | 4.24 | 4.37 | 7.00 | 3.80 |
| Tb | 0.54 | 0.51 | 0.48 | 0.54 | 0.54 | 0.76 | 0.77 | 0.69 | 0.76 | 0.70 | 0.72 | 0.74 | 0.77 | 0.74 | 0.76 | 1.10 | 0.60 |
| Dy | 3.20 | 3.16 | 2.67 | 3.04 | 3.31 | 4.05 | 3.98 | 3.73 | 3.85 | 3.81 | 3.96 | 4.56 | 4.41 | 4.57 | 4.67 | 6.14 | 3.72 |
| Ho | 0.72 | 0.72 | 0.61 | 0.70 | 0.72 | 0.86 | 0.87 | 0.79 | 0.81 | 0.76 | 0.87 | 1.01 | 0.97 | 0.95 | 1.03 | 1.34 | 0.77 |
| Er | 2.03 | 1.95 | 1.85 | 2.01 | 2.06 | 2.39 | 2.40 | 2.18 | 2.28 | 2.18 | 2.35 | 2.77 | 2.68 | 2.68 | 2.75 | 3.58 | 2.17 |
| Tm | 0.29 | 0.30 | 0.27 | 0.30 | 0.31 | 0.36 | 0.34 | 0.30 | 0.33 | 0.32 | 0.36 | 0.41 | 0.42 | 0.40 | 0.40 | 0.54 | 0.32 |
| Yb | 1.88 | 1.90 | 1.69 | 2.00 | 2.00 | 2.05 | 2.11 | 1.91 | 2.04 | 2.09 | 2.21 | 2.49 | 2.57 | 2.43 | 2.62 | 3.26 | 2.01 |
| Lu | 0.31 | 0.32 | 0.26 | 0.31 | 0.30 | 0.31 | 0.33 | 0.30 | 0.33 | 0.31 | 0.34 | 0.40 | 0.41 | 0.40 | 0.39 | 0.52 | 0.31 |
| ΣREE | 100 | 98 | 80 | 96 | 95 | 121 | 134 | 122 | 125 | 122 | 133 | 59 | 62 | 59 | 63 | 148 | 68 |
| L/H | 7.0 | 6.9 | 6.5 | 6.8 | 6.6 | 6.6 | 7.2 | 7.4 | 7.1 | 7.1 | 7.4 | 2.5 | 2.8 | 2.6 | 2.7 | 5.3 | 4.0 |
| δEu | 0.82 | 0.88 | 0.91 | 0.88 | 0.92 | 0.86 | 0.82 | 0.88 | 0.90 | 0.89 | 0.91 | 1.03 | 1.01 | 1.01 | 1.04 | 0.91 | 1.01 |

注: BC. 半村辉绿岩脉; QL. 拔里角闪辉长岩脉; LZ. 林子坟辉长辉绿岩脉。Mg[†] = 100 × Mg / (Mg + Fe²⁺) (摩尔比); L/H 为 LREE/HREE。

系,与 CaO 为正相关关系,暗示在岩浆演化过程中,存在单斜辉石、Ti-Fe 氧化物等矿物分离结晶作用^[24]。

3.2 稀土元素

稀土元素分析结果见表 1。各基性岩脉的稀土元素总量 (Σ REE) 变化不大,最高为 134 $\mu\text{g/g}$;拔里角闪辉长岩脉 Σ REE 较高,为 121 ~ 134 $\mu\text{g/g}$,平均为 126 $\mu\text{g/g}$,轻重稀土元素比值 (LREE/HREE) 为 6.6 ~ 7.4, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 7.3 ~ 8.4,该岩脉明显富集轻稀土元素 (LREE);半村辉绿岩脉的 Σ REE 在 80 ~ 100 $\mu\text{g/g}$ 之间,LREE/HREE 比值在 6.5 ~ 7.0 范围内, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 6.8 \sim 7.7$,表明岩脉富集 LREE,半村与拔里稀土元素特征类似于活动大陆边缘玄武岩;林子坟辉长辉绿岩脉 Σ REE 较低,在 59 ~ 63 $\mu\text{g/g}$ 之间,LREE/HREE 比值 2.5 ~ 2.8, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 2.0$,轻重稀土元素分异作用不十分明显,类似于拉斑玄武岩稀土元素的特征^[25]。半村和拔里岩脉的稀土元素分布模式总体上是较陡右倾式 (图 3),显示较弱的 Eu 异常, δEu 在 0.82 ~ 0.92 范围内,暗示着有较弱斜长石分离结晶作用过程;而林子坟岩脉的稀土元素分布模式却是较缓的平坦型 (图 3), $\delta\text{Eu} \approx 1.02$ 。 SiO_2 与 Σ REE 和 δEu 无明显的相关性,表明岩浆演化和地壳混染过程不是控制岩浆稀土元素演化的主要途径,LREE 含量主要反映原始岩浆富集的特征^[27]。

3.3 微量元素

微量元素分析结果见表 1。三个地区的基性岩脉只有 Cr 和 Ni 含量存在明显的差异,其他相容元

素的含量变化不大,半村辉绿岩脉的 Ni 为 38.2 ~ 42.9 $\mu\text{g/g}$,Cr 为 78.7 ~ 97.6 $\mu\text{g/g}$;拔里角闪辉长岩脉的 Ni 为 165 ~ 217 $\mu\text{g/g}$,Cr 为 612 ~ 825 $\mu\text{g/g}$;林子坟辉长辉绿岩脉的 Ni 为 67.8 ~ 77.7 $\mu\text{g/g}$,Cr 为 194 ~ 219 $\mu\text{g/g}$;均低于原始岩浆值 (Ni 400 ~ 500 $\mu\text{g/g}$,Cr > 1 000 $\mu\text{g/g}$)^[28],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 $\mu\text{g/g}$)^[28] 存在一定的差别,表明基性岩浆曾经历了橄榄石、单斜辉石和 Ti-Fe 氧化物的分离结晶作用。三个地区基性岩脉的 Sc、Ni、V、Cr、Co 和 Ti 的原始地幔标准化分布模式图 (略) 呈“W”型,明显亏损 Ni、Cr 和 Co,显示出地幔衍生岩的过渡元素分布的特征^[29]。在大洋中脊玄武岩 (N-MORB) 标准化的不相容元素“蛛网图” (图 4) 中,闽西基性岩脉总体上具有富集大离子亲石元素 (LILE)、亏损高场强元素 (HFSE) 和 K、Rb、Ba 为正异常与 Nb、Ta 负异常的特征,与活动大陆边缘玄武岩有相似的性质。半村和拔里除 K、Rb、Ba、Th、U、La 和 Ce 等大离子亲石元素明显富集外,还具明显的 Nb、Ta 和 Ti 的负异常,暗示岩脉源区曾遭受俯冲板片派生的富水流体的交代^[31];林子坟 LILE 富集程度低于前两条岩脉, HFSE 略有富集,且 Nb 和 Ta 为负异常, Ti 呈现弱的正异常,可能与地幔源区演化特征不同有关^[32]。三条岩脉的 Nb 和 Ta 负异常与浙闽沿海晚中生代辉长岩和玄武岩相一致^[24],暗示与之有相似的成岩构造环境。

4 讨论

如前所述,半村和拔里的基性岩脉属于钙碱性

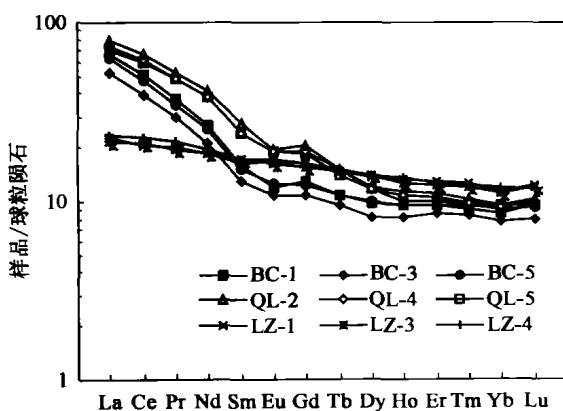


图 3 基性岩脉球粒陨石标准化稀土元素分布模式

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of mafic dikes in western Fujian Province

球粒陨石标准值引自文献[26]

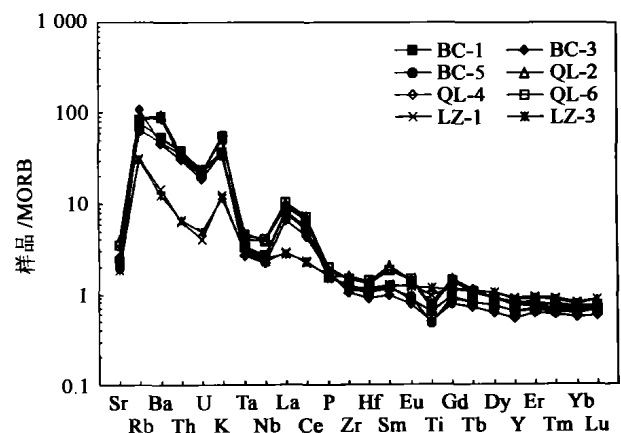


图 4 基性岩脉不相容元素 N-MORB 标准化蛛网图

Fig. 4 N-MORB-normalized incompatible trace element spidergram of mafic dikes in western Fujian Province

MORB 数值引自文献[30]。

系列,林子坟属于拉斑系列,半村的 Nb/Ta 比值为 15.5~16.6(平均为 15.9),拔里为 16.7~18.8(平均为 18.0),林子坟为 16.0~16.5(平均为 16.2),在原始地幔的 Nb/Ta 比值 ($17.5 \pm 2.0^{[33]}$) 范围内;本区基性岩脉明显富集 LILE 和 LREE,亏损 Nb、Ta、Zr 和 Hf 等 HFSE,可能由于源区存在俯冲板片派生的富水流体交代或地壳混染作用所致。基性岩脉地壳混染的形式主要有两种:(1)由俯冲板片带到深部的大洋沉积物参与源区的演化或基性岩浆发生底侵作用造成下地壳物质混染;(2)基性岩浆上升过程中与地壳发生混染。一般来说,基性岩脉形成于伸展拉张的构造环境中,岩浆上升速率很快,在地壳中滞留时间短,与地壳发生混染比例不会太大。LILE/HFSE 比值能够很好地反映源区性质,选取 Th/Ta 比值来判断基性岩脉是否发生地壳混染。原始地幔的 Th/Ta 比值为 2.3,大陆地壳约为 10。半村的 Th/Ta 比值为 9.96~10.7,拔里为 6.94~7.78,林子坟为 1.98~2.13;半村和拔里的 Th/Ta 比值在原始地幔与大陆地壳之间,说明两条岩脉曾发生过地壳混染作用,林子坟更集中在原始地幔附近。研究表明,浙闽沿海晚中生代辉长岩-玄武岩中存在元古宙的磨圆锆石是地幔与地壳岩石相互作用的矿物学证据^[34],谢昕等研究认为,中国东部沿海中生代基性岩地壳混染的比例较小^[35]。而本区半村和拔里的 Th/Ta 比值较大,甚至接近于地壳值,好像地壳混染比例较大,与前述事实是不相符的,所以 Th/Ta 比值的变化的不可能只是地壳混染一种作用导致的,可能与源区其他演化方式有关。Hofmann *et al.* 对大洋玄武岩的研究表明,MORB 和洋岛玄武岩(OIB)的 Nb/U 比值较高且均一,为 $47 \pm 10^{[31]}$ 。Woodhead *et al.* 在研究太平洋 Pitcairn 岛的玄武岩后证实,Nb/U 比值与源区物质有关,而与岩浆过程(结晶分异、同化混染、混合作用和液态分离)无关^[36]。大陆地壳的 Nb/U 比值通常很低,多集中在 12 左右^[37],中国东部地壳 Nb/U 比值约为 9.6^[38]。从三个地区基性岩脉的 Nb/U 比值分析,半村辉绿岩的 Nb/U 比值在 6.2~6.5 之间,拔里角闪辉长岩在 9.7~10.3 之间,而林子坟辉长辉绿岩则在 28.1~31.2 之间,前两个地区基性岩脉的 Nb/U 比值均低于大陆壳,显然非地壳混染所致,更合理的解释是地幔源区受到俯冲流体的交代,半村和拔里的基性岩脉是地幔源区受到流体交代的程度较高,较大程度地改变了 Nb/U 比值,也包括其他的一些微量元素比值。林子坟 Nb/U 比值在 MORB 与地壳

的比值之间,说明岩脉源区遭受了地壳混染作用,岩脉的 LILE 相对富集和 Nb、Ta 负异常可能与地壳混染有关,并非是俯冲流体交代地幔源造成的,Nb/U 比值较靠近原始地幔,表明其直接来自地幔部分熔融作用。原始地幔和 MORB 的 Nb/La 比值大于 1.0,而大陆地壳平均值 Nb/La 在 0.7 左右^[37]。半村基性岩脉的 Nb/La 比值为 0.33~0.36,拔里基性岩脉为 0.39~0.44,林子坟基性岩脉则为 0.83~0.91;半村与拔里的 Nb/La 比值明显低于大陆地壳的平均值,且结晶分异不会导致 Nb/La 比值的降低(Nb 比 La 更不相容),与浙闽沿海晚中生代辉长岩-玄武岩的 Nb/La 比值(0.11~0.43)较相近^[23],再次说明地壳混染不是主导因素,应主要由地幔源区受到俯冲带流体的交代所致。林子坟基性岩脉 Nb/La 比值特征表明直接来自地幔的部分熔融。半村和拔里的 (Rb/Yb)_n 比值变化于 14.1~28.2 之间,高于中国东部新生代玄武岩的 (Rb/Yb)_n 比值(约 1.8~3.5^[39]),表明地幔源区在岩浆形成前经历了强烈的地幔交代作用,致使亲石元素,尤其强不相容亲石元素富集,而林子坟的 (Rb/Yb)_n 为 5.07~6.90,更靠近新生代玄武岩,也说明林子坟地幔源区可能与新生代玄武岩相似:直接来自软流圈地幔。

综上所述,半村和拔里基性岩脉表现出富集 LILE 和 LREE、相对亏损 HFSE,具有 Nb-Ta-Ti 负异常的地球化学特征,而且 Nb-Ta-Ti 负异常也是地幔源区受到板块俯冲作用富水流体交代的有力证据,初步认为半村和拔里基性岩脉源区继承了俯冲板片派生的富水流体交代作用,板块俯冲作用改造了岩石圈地幔并参与了岩浆形成过程,源区应为流体交代的富集地幔楔;林子坟基性岩脉可能直接由软流圈地幔部分熔融作用形成,相对富集 LILE 和 Nb-Ta 负异常特征可能是由地壳混染造成的。更仔细的判断有待于 Sr、Nd 和 Pb 的同位素证据去进一步证实。

闽西三个地区基性岩脉形成的大地构造背景是否也存在差别? Zr、Y、Nb、Th、Hf、Ta 和 Yb 为不活动元素,在岩浆演化过程中具有一定的连续性,基本上不受后期改造的影响,因此,本文采用上述几种元素判断基性岩脉形成的大地构造背景是有效的。三个地区基性岩脉的 Zr/Y 比值均大于 3(半村为 4.9~5.3,拔里为 4.4~5.3,林子坟为 3.3~3.8),表明其形成于大陆弧环境,而非大洋岛弧范围。在 Ta/Yb-Th/Yb 的图解(略)上,半村和拔里的样品均落在大陆边缘弧的区域内,林子坟样品却落在板内

玄武岩 (WPB + MORB) 内, 说明林子坟基性岩脉的产出环境已经远离大陆边缘弧, 属于板内环境; 再利用 Hf/3-Th-Ta 的三角图解 (图 5a) 判别^[40], 半村和拔里样品仍然落在岛弧钙碱性玄武岩 (CAB) 的范围内, 林子坟样品则位于板内玄武岩 (WPB + E-MORB) 区域, 半村和拔里基性岩脉微量元素虽具有大陆弧的地球化学特征, 但结合福建晚中生代地质演化的研究成果, 工作区应属于陆内环境, 已经不是活动大陆边缘弧的环境, 半村和拔里基性岩脉的岛弧特征, 并不代表岩脉成岩的实际构造环境。孙书勤等给出了玄武岩类的 Th/Zr-Nb/Zr 大地构造背景判别图解^[41], 根据该图解 (图 5b), 半村和拔里基性岩脉形成于大陆拉张带, 林子坟产出于陆内裂谷及陆缘裂谷, 该图解反映岩脉产出的构造环境, 表明半村和拔里基性岩脉来自较浅的岩石圈地幔, 林子坟来自较深的软流圈地幔; Ormerod *et al.* 曾指出, Zr/Ba 比值大于 0.2 的玄武岩源区来自软流圈地幔, Zr/Ba 比值小于 0.2 的则来自岩石圈地幔^[42], 半村和拔里的 Zr/Ba 比值在 0.2 附近, 反映源区来自较浅的岩石圈地幔; 林子坟的 Zr/Ba 比值为 0.92 ~ 1.28, 其源区来自更深的软流圈地幔, 印证了图解 5b 的结论。

中生代以来华南大陆的构造格局发生重大变

化, 前侏罗纪 EW 向的主构造域逐渐被 NE 向的太平洋构造体系所取代, 构造转换在晚侏罗世基本完成^[1]。晚中生代华南构造应力场由挤压 - 拉张转换到拉张为主的演化过程, 中侏罗世华南局部地区 (南岭东段) 已经处在拉张的环境当中, 这种构造环境应是一种后造山的大陆裂解地球动力学背景^[43]; 从晚侏罗世一早白垩世开始, 华南处于拉张裂陷的构造应力场中, 该阶段岩浆活动达到一个高峰期; 晚白垩世末期华南已由拉张向裂谷过渡, 新生代一种新的构造格局逐渐代替了拉张裂陷^[44]。拉张构造与大洋板块的消减作用直接相关^[12], 大洋板块俯冲作用诱发软流圈地幔物质上涌, 岩石圈减薄、大陆地壳开始拉张裂陷, 从而形成松弛拉张的构造应力场, 晚中生代大规模岩浆活动是在拉张的构造背景下发生的, 说明岩浆活动与拉张构造是紧密相联的; 古太平洋板块俯冲的角度从侏罗纪起由缓不断变陡, 岩浆弧随着角度的变陡逐渐由内陆向沿海地区迁移, 从而形成宽广的火成岩带。火成岩区的形成机制一直是争论的焦点, 有关形成机制学说非常之多, Zhou *et al.* 在研究华南东南部晚中生代火成岩时提出^[45], 岩石圈消减作用、玄武岩浆底侵作用和地壳深熔作用相结合的模式, 比较符合东南部实际情况。板块俯冲和地幔物质上涌是拉张构造演变和大规模岩浆

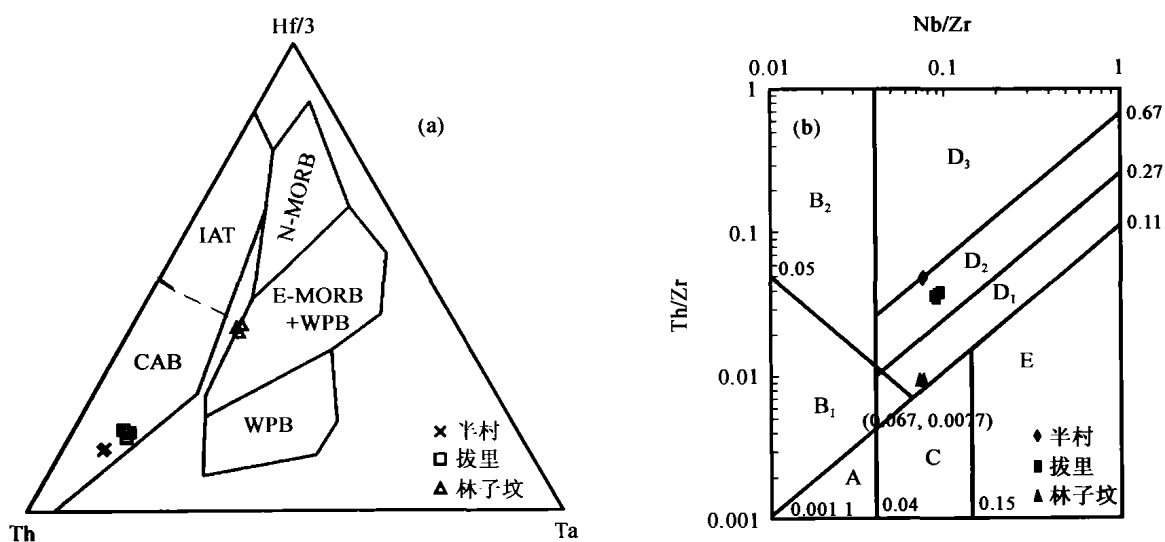


图 5 闽西基性岩脉 Hf/3-Th-Ta (a) 和 Th/Zr-Nb/Zr (b) 构造环境判别图解

Fig. 5 Hf/3-Th-Ta (a) and Th/Zr-Nb/Zr (b) diagrams of mafic dikes in western Fujian Province

图 5a 中: 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。

图 5b 中: A. 大洋板块发散边缘 N-MORB 区; B. 板块汇聚边缘 (B₁. 大洋岛弧玄武岩区; B₂. 陆缘火山弧玄武岩区); C. 大洋板内玄武岩; D. 大陆板内玄武岩 (D₁. 陆内初始裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区; D₂. 大陆拉张带玄武岩区; D₃. 陆-陆碰撞带玄武岩区); E. 地幔柱玄武岩区。(0.067, 0.007) 为原始地幔的 Th/Zr 和 Nb/Zr 比值。

1) 中国东部大地构造格架中两大关键地质问题研究获突破性进展, 中国地质科学院 2003 年第 1 期简报。

活动发生的内在因素。

宁化 - 南平构造带与政和 - 大埔断裂带将福建划分为三个不同的构造单元：(1) 闽西北隆起带、(2) 闽西南拗陷带；(3) 闽东火山断拗带。闽东火山断拗带处于政和 - 大埔断裂带以东，是著名的晚中生代陆相中酸性火山岩、花岗岩的喷出和侵入区。闽西北隆起带是在华夏古陆基底上发展而成的，中元古代中—晚期，华夏古陆发生裂陷，形成闽西南与闽西北两个不同的断块，闽西北区是华夏古陆的一部分，元古宇地层广泛出露，而上古生界—中生界地层零星分布；中生界地层明显受政和 - 大埔断裂带控制；区内侵入岩以侏罗纪花岗岩类（S型花岗岩）最为发育，其次为志留纪花岗岩类，花岗岩的出露明显受政和 - 大埔断裂带控制，闽西北深部处于地幔缓隆带上。闽西南拗陷带位于政和 - 大埔断裂带以西，南平 - 宁化构造带以南地区，深部属地幔拗陷带，该区也是在华夏古陆基础上发展而成的，地层从古元古界到第四系均有分布，其中以上泥盆统一三叠统地层分布最广，其次为震旦系—奥陶系和中生界地层，中生界地层以盆地形式呈 NE 向展布，受断裂带控制明显。侵入岩以燕山期花岗岩（S型花岗岩）为主；闽西南在中三叠世的印支运动作用下海退成陆，印支运动使闽西南褶皱隆起成山，并形成一系列 NNE 向的盆岭地形，燕山期与闽西北一样成为隆起区。政和 - 大埔断裂带以西晚中生代岩浆活动比闽东地区弱得多，这可能与该断裂带在晚中生代活动有关。

研究区位于闽西南拗陷带的北端，宁化 - 南平构造带以南，政和 - 大埔断裂带以西地区，区内花岗岩以早、晚侏罗世为主，地层以震旦系—奥陶系为主（图 1），根据上文分析，研究区在晚中生代应属于板内环境。半村和拔里基性岩脉具有大陆弧的地球化学特征，却形成于大陆板内拉张带，与地球化学特征不相符。因此大陆边缘弧的特征并不指示基性岩脉形成的构造环境，而是说明其源区受到俯冲板片派生出来的流体交代作用。可能是太平洋板块俯冲到本区岩石圈之下，但是没有发生岩浆作用，而是滞留相当长的时间后，由于拉张作用进一步深入，诱导上覆地幔楔发生湿熔融，从而形成基性岩浆，并沿着张性裂隙上升形成基性岩脉。随着伸展拉张作用进一步加强，俯冲作用影响基本消失，裂陷更深直接达到软流圈地幔，导致软流圈地幔部分熔融，形成了林子坟基性岩脉的原始岩浆，经过进一步的演化后，沿着裂陷上升形成基性岩脉。这只是对闽西基性岩脉的

初步认识，更深入的研究有待于 Sr、Nd 和 Pb 的同位素和年代学证据去进一步证实。

综上所述，半村和拔里基性岩脉形成于板块俯冲后陆内环境，源区为俯冲流体交代的富集地幔楔；林子坟基性岩脉可能直接来自软流圈地幔的部分熔融，成岩环境为陆内裂谷。与华南其他地区的基性岩脉^[19, 26, 46]相比发现，虽然晚中生代华南处于拉张的构造背景下，但是岩脉形成的构造环境与微量元素地球化学特征均有明显的差异，反映了各地区构造演变与地幔演化的复杂性。

野外工作得到了福建省区域地质调查队的张正义、马金清和许美辉高级工程师的大力支持和帮助；薄片鉴定得到了战新志研究员的指导；写作和修改过程中得到了黄智龙研究员的帮助；论文最终定稿得益于各位审稿专家的富有建设性的严格批评意见；笔者谨致谢忱。

参考文献 (References):

- [1] Hoek J D, Seitz H M. Continental mafic dyke swarms as tectonic indicators: An example from the Vestfold Hills, East Antarctica [J]. *Precamb Res*, 1995, 75(3-4): 121~139.
- [2] 张成立, 周鼎武, 刘颖宇. 武当山地块基性岩墙群地球化学研究及其大地构造意义[J]. *地球化学*, 1999, 28(2): 126~135.
Zhang Cheng-li, Zhou Ding-wu, Liu Ying-yu. Geochemistry of basic dykes in Wudangshan block and their tectonic significance [J]. *Geochimica*, 1999, 28(2): 126~135 (in Chinese with English abstract).
- [3] Tamey J. Geochemistry and significance of mafic dyke swarms in the Proterozoic [A]. Condie K C. *Proterozoic Crustal Evolution* [C]. Amsterdam: Elsevier, 1992. 151~179.
- [4] Atubbs H M, Hall R P, Hughes D J. *et al.* Evidence for a high Mg andesitic parental magma to the East and West satellite dykes of the Great Dyke, Zimbabwe: A comparison with the continental tholeiitic Mashonaland sills [J]. *J Afr Earth Sci*, 1999, 28(2): 325~336.
- [5] 马芳, 穆志国, 李江海. 前寒武纪基性岩墙群的地球化学特征与岩石成因讨论[J]. *地质地球化学*, 2000, 28(4): 58~64.
Ma Fang, Mu Zhi-guo, Li Jiang-hai. Geochemistry and petrogenesis of Precambrian mafic dike swarms [J]. *Geology-Geochemistry*, 2000, 28(4): 58~64 (in Chinese with English abstract).
- [6] 邵济安, 张履桥, 魏春景, 等. 北京南口中生代双峰式岩墙群的组成及其特征[J]. *地质学报*, 2001, 75(2): 205~212.
Shao Ji-an, Zhang Lü-qiao, Wei Chun-jing, *et al.* Composition and features of the Mesozoic bimodal dike swrm in Nankou Area, Beijing [J]. *Acta Geol Sinica*, 2001, 75(2): 205~212 (in Chinese with English abstract).

- [7] 邵济安, 李献华, 张履桥, 等. 南口 - 古崖居中生代双峰式岩墙群形成机制的地球化学制约 [J]. 地球化学, 2001, 30(6): 517 ~ 524.
Shao Ji-an, Li Xian-hua, Zhang Lü-qiao, *et al.* Geochemical condition for genetic mechanism of the Mesozoic bimodal dike swarms in Nankou-Guyaju [J]. *Geochimica*, 2001, 30(6): 517 ~ 524 (in Chinese with English abstract).
- [8] 周鼎武, 张成立, 周小虎, 等. 武当地块基性岩墙群 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年及其地质意义 [J]. 岩石学报, 1999, 15(1): 14 ~ 20.
Zhou Ding-wu, Zhang Cheng-li, Zhou Xiao-hu, *et al.* ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of basic dykes from Wudang block and their geology significance [J]. *Acta Petrol Sinica*, 1999, 15(1): 14 ~ 20 (in Chinese with English abstract).
- [9] 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学 [J]. 地球化学, 1997, 26(2): 14 ~ 31.
Li Xian-hua, Hu Rui-zhong, Rao Bing. Geochronology and geochemistry of Cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China [J]. *Geochimica*, 1997, 26(2): 14 ~ 31 (in Chinese with English abstract).
- [10] Lan C Y, Chung S L, Mertzman S A, *et al.* Mafic dikes from Chinmen and Liehyu islands, off Southeast China: Petrochemical characteristics and tectonic implications [J]. *J Geol Soc China*, 1995, 38(3): 183 ~ 214.
- [11] 黄萱, 孙世华, DePaolo D J, 等. 福建省白垩纪岩浆岩 Nd, Sr 同位素研究 [J]. 岩石学报, 1986, 2(2): 50 ~ 63.
Huang Xuan, Sun Shi-hua, DePaolo D J, *et al.* Nd-Sr isotope study of Cretaceous magmatic rocks from Fujian Province [J]. *Acta Petrol Sinica*, 1986, 2(2): 50 ~ 63 (in Chinese with English abstract).
- [12] Gilder S A, Keller G R, Luo M, *et al.* Eastern Asia and the Western Pacific timing and spatial distribution of rifting in China [J]. *Tectonophysics*, 1991, 197(2-4): 225 ~ 243.
- [13] 谢奕克, 马荣升, 张禹慎, 等. 华南大陆地壳生长过程与地幔柱构造 [M]. 北京: 地质出版社, 1996. 1 ~ 257.
Xie Dou-ke, Ma Rong-sheng, Zhang Yu-shen, *et al.* The Crust Growth of South China Continent and Mantle Plume Tectonics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996. 1 ~ 257 (in Chinese).
- [14] 吴淦国, 张达, 陈柏林, 等. 中国东南大陆中生代构造域的转换及其与成矿的关系——以闽西南地区为例 [J]. 地球科学, 2000, 25(4): 390 ~ 396.
Wu Gan-guo, Zhang Da, Chen Bai-lin, *et al.* Transformation of Mesozoic tectonic domain and its relation to mineralization in southeastern China: An evidence of southwestern Fujian Province [J]. *Earth Sci*, 2000, 25(4): 390 ~ 396 (in Chinese with English abstract).
- [15] 魏春生, 郑永飞, 赵子福. 中国东部 A 型花岗岩形成时代及物质来源的 Nd-Sr-O 同位素地球化学制约 [J]. 岩石学报, 2001, 17(1): 95 ~ 111.
Wei Chun-sheng, Zheng Yong-fei, Zhao Zi-fu. Nd-Sr-O isotopic geochemistry constraints on the age and origin of the A-type granites in eastern China [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2001, 17(1): 95 ~ 111 (in Chinese with English abstract).
- [16] 毛建仁, 陶奎元, 李寄岷, 等. 闽西南晚中生代四方岩体同位素年代学、地球化学及其构造意义 [J]. 岩石学报, 2002, 18(4): 449 ~ 458.
Mao Jian-ren, Tao Kui-yuan, Lee Chi-yu, *et al.* Geochronology and geochemical characteristics in late Mesozoic Sifang pluton, southwestern Fujian, and their significance [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2002, 18(4): 449 ~ 458 (in Chinese with English abstract).
- [17] Qi Liang, Hu Jing, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Talanta*, 2000, 51(3): 507 ~ 513.
- [18] Le Maitre R W. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms [M]. Oxford: Blackwell, 1989. 1 ~ 193.
- [19] Irvine T N, Barager W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. *Can J Earth Sci*, 1971, 8: 532 ~ 548.
- [20] Peccerillo R, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1976, 58(1): 63 ~ 81.
- [21] Ewart A. The mineralogy and petrology of Tertiary-Recent orogenic volcanic rocks with special reference to the andesitic-basaltic compositional range [A]. Thorpe R S. *Andesites* [C]. Chichester: Wiley, 1982. 25 ~ 87.
- [22] Beard J S. Characteristic mineralogy of arc-related cumulate gabbros: Implications for the tectonic setting of gabbroic plutons and for andesite genesis [J]. *Geology*, 1986, 14(10): 848 ~ 851.
- [23] 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 ~ 642.
Li Wu-xian, Zhou Xin-min. Geochemical constraints on the origin of late Mesozoic igneous rocks in the coast of Zhejiang and Fujian provinces [J]. *Prog Natur Sci*, 2000, 10(7): 630 ~ 642 (in Chinese).
- [24] 刘从强, 解广轰, 增田彰正. 中国东部新生代玄武岩的地球化学——I. 主元素和微量元素组成: 岩石成因及源区特征 [J]. 地球化学, 1995, 24(1): 1 ~ 19.
Liu Cong-qiang, Xie Guang-hong, Masuda A. Geochemistry of Cenozoic basalts from eastern China—I. Major element and trace element compositions: Petrogenesis and characteristics of mantle source [J]. *Geochimica*, 1995, 24(1): 1 ~ 19 (in Chinese with English abstract).
- [25] 王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 稀土元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989. 133 ~ 190.
Wang Zhong-gang, Yu Xue-yuan, Zhao Zhen-hua, *et al.* Rare Earth Element Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1989. 133 ~ 190 (in Chinese).
- [26] Anders E, Grevesse N. Abundances of the elements: Meteoritic and solar [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1989, 53(1): 197 ~ 214.
- [27] 贾大成, 胡瑞忠, 谢桂青. 湘东北中生代基性岩脉岩石地球化学特征 [J]. 矿物岩石, 2002, 22(3): 37 ~ 41.
Jia Da-cheng, Hu Rui-zhong, Xie Gui-qing. Lithochemical characteristics of Mesozoic mafic dikes in Northeast Hunan Province [J]. *J Mineral Petrol*, 2002, 22(3): 37 ~ 41 (in Chinese with English abstract).

- [28] Wilson M. *Igneous Petrogenesis: Global Tectonic Approach* [M]. London: Unwin Hyman, 1989, 1~466.
- [29] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学 [M]. 北京: 地质出版社, 1992, 1~164.
Li Chang-nian. *Trace Element Petrology of Igneous Rock* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992, 1~164 (in Chinese).
- [30] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. *Geol Soc Spec Publ* 42, 1989, 313~345.
- [31] Hofmann A W, Jochum K P, Seufert M, *et al.* Nd and Pb in oceanic basalts: New constraints on mantle evolution [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1986, 79(1/2): 33~45.
- [32] Stolz A J, Jochum K P, Spettel B, *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.
- [33] Jochum K P, McDonough W F, Palme H, *et al.* Compositional constraints on the continental lithospheric mantle from trace elements in spinel peridotite xenoliths [J]. *Nature*, 1989, 340(6232/6234): 548~550.
- [34] 李惠民, 董传万, 徐夕生, 等. 泉州辉长岩中单颗粒锆石 U-Pb 法定年——闽东南基性岩浆岩的起源 [J]. *科学通报*, 1995, 40(2): 158~160.
Li Hui-min, Dong Chuan-wan, Xu Xi-sheng, *et al.* Dating of U-Pb by single zircon from Quanzhou gabbro: Origin of basic igneous rocks from southeastern Fujian [J]. *Chinese Sci Bull*, 1995, 40(2): 158~160 (in Chinese).
- [35] 谢昕, 徐夕生, 邹海波, 等. 中国东南沿海中-新生代玄武岩微量元素和 Nb-Sr-Pb 同位素研究 [J]. *岩石学报*, 2001, 17(4): 617~628.
Xie Xin, Xu Xi-sheng, Zou Hai-bo, *et al.* Trace element and Nd-Sr-Pb isotope studies of Mesozoic and Cenozoic basalts in coastal area of SE China [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2001, 17(4): 617~628 (in Chinese with English abstract).
- [36] Woodhead J D, McCulloch M T. Ancient seafloor signals in Piteaim Island lavas and evidence for large amplitude, small length-scale mantle heterogeneities [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1989, 94(3): 257~273.
- [37] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust [J]. *Rev Geophys*, 1995, 33(2): 241~265.
- [38] Gao S, Luo T C, Zhang B R, *et al.* Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1998, 62(11): 1959~1975.
- [39] 邱家骧, 王人镜, 李昌年, 等. 五大连池-科洛-二克山富钾火山岩 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991, 85~95.
Qiu Jia-xiang, Wang Ren-jing, Li Chang-nian, *et al.* The Wudalianchi-Keluo-Erkeshan K-rich volcanic rocks [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1991, 85~95 (in Chinese).
- [40] Wood D A. 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 [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1980, 50(1): 11~30.
- [41] 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.
Sun Shu-qin, Wang Yun-liang, Zhang Cheng-jiang. Discrimination of the tectonic settings of basalts by Th, Nb and Zr [J]. *Geol Rev*, 2003, 49(1): 40~47 (in Chinese with English abstract).
- [42] Ormeid D S, Hawkesworth C J, Rogers N W, *et al.* Tectonic and magmatic transitions in the Western Great Basin, USA [J]. *Nature*, 1988, 333(6171-6172): 349~353.
- [43] Chen Pei-tong, Hua Ren-min, Zhang Bang-tong. Early Yanshanian post-orogenic granitoids in the Nanling region — Petrological constraints and geodynamic settings [J]. *Sci China (D)*, 2002, 45(8): 755~768.
- [44] 舒良树, 周新民. 中国东南部晚中生代构造作用 [J]. *地质论评*, 2002, 48(3): 249~260.
Shu Liang-shu, Zhou Xin-min. Late Mesozoic tectonism of Southeast China [J]. *Geol Rev*, 2002, 48(3): 249~260 (in Chinese with English abstract).
- [45] Zhou X M, Li W X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. *Tectonophysics*, 2000, 326(3-4): 267~287.
- [46] 葛小月, 李献华, 周汉文. 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 [J]. *地球化学*, 2003, 32(1): 11~20.
Ge Xiao-yue, Li Xian-hua, Zhou Han-wen. Geochronologic, geochemistry and Sr-Nd isotopes of the Late Cretaceous mafic dike swarms in southern Hainan Island [J]. *Geochimica*, 2003, 32(1): 11~20 (in Chinese with English abstract).

Geochemistry of the late Mesozoic mafic dikes in western Fujian Province

ZHANG Gui-shan^{1,2}, WEN Han-jie¹, QIU Yu-zhuo¹

(1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Mafic dikes are a special kind of rock series represented the pull-apart role within the continental plate. It includes abundant information of mantle and is recognized as the time scale of the important tectonic conversion. From Jurassic to Cretaceous the tectonic stress took place a great conversion from extrusion to pull-apart, accompanying with the intrusion of I type and type granites and the eruption of bimodal volcanic rocks and the formation of a great amount of mafic dikes in southern China. By the studies on mafic dikes in western Fujian, this paper discusses the diagenetic method and process and the source feature of mafic dikes in term of the petrology and geochemistry combined with the geotectonic background. The geochemical studies show that the late Mesozoic mafic dikes in western Fujian Province belong to subalkaline rock series with the characteristics of high Al, low Ti and $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$. Compared to MORB, the mafic dikes are enriched in LILE and depleted in HFSE. The Bancun diabase dike and Bali bojite dike are characterized by the negative anomalies of Nb, Ta and Ti, whereas the Linzifen diabase dike shows the negative anomaly of Nb-Ta and slightly positive anomaly of Ti. The ΣREE contents of the Bancun and Bali mafic dikes, with the obvious enrichment of LREE [$(\text{La}/\text{Yb})_N = 6.8 \sim 8.4$], is higher than that of the Linzifen with the slight enrichment of LREE [$(\text{La}/\text{Yb})_N = 2.0$]. The tectonic discriminant diagrams of $\text{Hf}/3\text{-Th-Ta}$ and $\text{Th}/\text{Zr-Nb}/\text{Zr}$ show that the Bancun and Bali mafic dikes might be formed in the continental pull-apart belt, whereas the Linzifen mafic dike might be formed in the continental rift or epicontinental rift. Based on above geochemical evidence and regional geotectonic evolution, it is indicated that the Bancun and Bali mafic dikes might be derived from subduction-related metasomatic enriched mantle, however, the Linzifen mafic dike might be the partial-melting product of the asthenosphere and the crustal contamination resulted in the enrichment of LILE. Combined with the basalt tectonic discrimination diagrams, the Bancun and Bali mafic dikes, with features of continent marginal arc magmatism, possess no meaning for identification of their tectonic environment, but imply the metasomatism of their source region caused by fluids derived from subducting plate. Therefore, the Bancun and Bali dikes are recognized as products formed in the pull-apart belt with-in continental plate; while the Linzifen dike in with-in plate rift. In comparison with mafic dikes in other areas of South China, an apparent variation is found in the tectonic environment and trace element geochemistry of mafic dikes, although they were all formed at a same extensional tectonic environment in South China during late Mesozoic. It reflects the complexities of the tectonic environment evolution and mantle composition in various areas of South China.

Key words: mafic dikes; mantle source; tectonic environment; Fujian Province

CLC number: P594

Document code: A