

闽西晚中生代基性脉岩稀土元素地球化学特征

张贵山^{1,2}, 温汉捷^{2*}, 胡瑞忠², 裘愉卓²

(1. 长安大学地球科学与国土资源学院, 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)

摘要: 利用稀土元素特征对闽西基性脉岩的成岩方式和岩浆演化机制进行探讨。闽西基性岩脉的稀土元素参数与常量元素的协变关系表明岩浆在上升侵入过程中可能没有发生地壳混染作用, 在成岩过程中结晶分异作用可能不明显; 多种稀土元素协变关系表明闽西基性脉岩的成岩机制可能为上地幔部分熔融作用, 基性脉岩的地幔源区可能曾经遭受过俯冲流体交代富集作用, 这种交代可能与古太平洋板块俯冲密切相关, 软流圈地幔上涌导致地壳拉张作用的发育。

关键词: 基性脉岩; 成岩方式; 闽西; 稀土

中图分类号: O614.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4343(2008)04-0503-07

中国东南部位于欧亚大陆的东南缘, 属于环太平洋岩浆构造体系的一部分, 为晚中生代构造岩浆强烈活动的地区。中国东南部中生代构造格局产生巨大的变化, NE 向太平洋构造体系替代了 EW 向古亚洲构造体系, 这种转变可能完成于晚侏罗世末期^[1,2], 这对中国东部的构造演化、岩浆活动及成矿作用产生了深远影响; 表现在构造应力场发生根本性变化, 拉张裂隙逐渐替代了原来的挤压构造, 一系列与拉张构造相关的火成岩产出(基性脉岩、碱性岩、双峰式火山岩等)。中国东南部晚中生代火成岩以大面积的流纹岩—花岗岩占绝对优势, 岩石类型主要以钙碱性系列为主, 成因特殊的基性脉岩、碱性侵入岩的规模较弱, 出露面积小, 由于基性脉岩、碱性岩形成与拉张裂谷构造背景相关, 对探讨中国东南部晚中生代大陆动力学背景和岩浆演化具有重要意义, 因此备受众多学者关注^[3-8]。

幔源基性脉岩是源于地幔的基性岩浆充填先存破裂或区域性节理形成的, 为岩石圈伸展和地壳拉张的产物, 对研究深部地幔性质和大陆动力学演化具有重要的指示意义^[9-12]。研究区位于政和—大埔断裂带以西的闽西地区(图 1(a)), 闽西地区主要以前侏罗纪和早、中侏罗世的壳源型 S

花岗岩浆活动为主, 晚侏罗世以来岩浆活动比较弱, 岩浆侵入和火山活动有局限性, 研究闽西基性脉岩对探讨内陆地区晚中生代岩浆活动规律和构造演化有重要的意义。因此, 本文以闽西基性脉岩为研究对象, 利用稀土元素对基性脉岩的形成机制做初步的讨论。

1 地质背景

1.1 基性脉岩的地质背景

中国东南部大陆主要由早-中元古代基底、古生代沉积盖层和中生代的火山沉积岩组成, 并被大量的花岗岩所侵入。政和—大埔断裂带是东南部重要的构造体系之一, 是华南加里东褶皱带和东南沿海褶皱带的分界线^[13], 也是晚中生代 I 型和 S 型火成岩的分界线^[14]; 政和以西地区主要产出 S 型火成岩。

研究区位于政和—大埔断裂带西部的闽西(图 1), 为永安半村辉绿岩(BC)、宁化曹坊辉绿岩脉(CF)和清流拔里角闪辉长岩(QL)。半村辉绿岩脉侵入燕山早期黑云母花岗岩体中, 岩体的侵入时代 173Ma^[15], 走向为 290°, 倾角为 75°~85°。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, 岩脉走向为 55°。曹坊辉绿岩脉侵入震旦系

收稿日期: 2007-10-17; 修订日期: 2008-01-17

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

作者简介: 张贵山(1971-), 男, 博士, 讲师; 研究方向: 岩石地球化学与矿床地球化学

* 通讯联系人 (E-mail: wenhanjie@vip.gyig.ac.cn)

上统的楼前组的变质流纹质凝灰岩地层(Z₂lq),岩脉恰好位于两条NW向断层的中间部位,岩脉的走向为325°。

1.2 样品分析测试

挑选新鲜的岩石样品进行稀土元素分析。主要元素分析在中国科学院地球化学研究所分析测试中心完成,采用常规湿化学方法分析,分析的误差优于5%。微量元素和稀土元素是在中国科学院地球化学研究所和中国科学院广州地球化学研究所电感耦合高分辨率等离子质谱仪(ICP-MS)上完成,分析精度优1%~5%。

半村辉绿岩为浅绿色,主要矿物有斜长石、普通辉石、绿泥石;副矿物为磷灰石和磁铁矿与黄铁矿,典型的辉绿结构,块状构造。拔里角闪辉长岩为墨绿色,主要矿物为斜长石、普通辉石和角闪石,副矿物为磁铁矿、黄铁矿与磷灰石,辉长结构,块状构造。曹坊辉绿岩为浅绿色,主要矿物为斜长石、透辉石、紫苏辉石;副矿物为磁铁矿和黄铁矿,辉绿结构,块状构造。

2 稀土元素特征

闽西基性脉岩的稀土元素含量见表1。3个地区基性脉岩的稀土总量80~134 μg·g⁻¹,其中清流拔里角闪辉长岩脉的稀土总量最高,在121~134 μg·g⁻¹。半村辉绿岩脉的稀土总量为95~100

μg·g⁻¹,平均为94 μg·g⁻¹,δ_{Eu}值在0.82~0.92,平均为0.88,显示弱的负Eu异常特征,δ_{Ce}值在1.01~1.06,平均为1.02,没有Ce异常显示,LREE/HREE值在6.46~6.99,平均为6.74,表明轻稀土富集的性质,(La/Yb)_N值在6.75~7.65,平均为7.08。清流拔里角闪辉长岩脉的稀土总量为121~134 μg·g⁻¹,平均为126 μg·g⁻¹,δ_{Eu}值在0.82~0.91,平均为0.88,与半村基性脉岩具有相似的性质,弱的负Eu异常特征,δ_{Ce}值在1.01~1.03,平均为1.02,LREE/HREE值在6.65~7.37,平均为7.12,表明轻稀土富集的性质,(La/Yb)_N值在7.31~8.21,平均为7.85。宁化曹坊的辉绿岩脉的稀土总量为103~109 μg·g⁻¹,平均为104 μg·g⁻¹,δ_{Eu}值在0.89~0.94,平均为0.92,负Eu异常不十分明显,δ_{Ce}值在0.98~1.01,平均为0.99,无异常显示,LREE/HREE=5.03~5.13,平均为5.11,(La/Yb)_N值在4.90~5.02,平均为4.94。3个地区的基性脉岩的均显示弱的负Eu异常,但这一特征与蒙古查干苏布尔加(Tsagaan Suvarga)大型斑岩型铜钼矿区的辉长岩和含矿蚀变岩中Eu异常及其演化特征^[17]具有明显差异,暗示它们之间具有不同大陆动力学背景。在研究区内,曹坊辉绿岩脉的负Eu异常比其他两个地区更弱一些,暗示在成岩过程中有弱的斜长石的分离结晶作

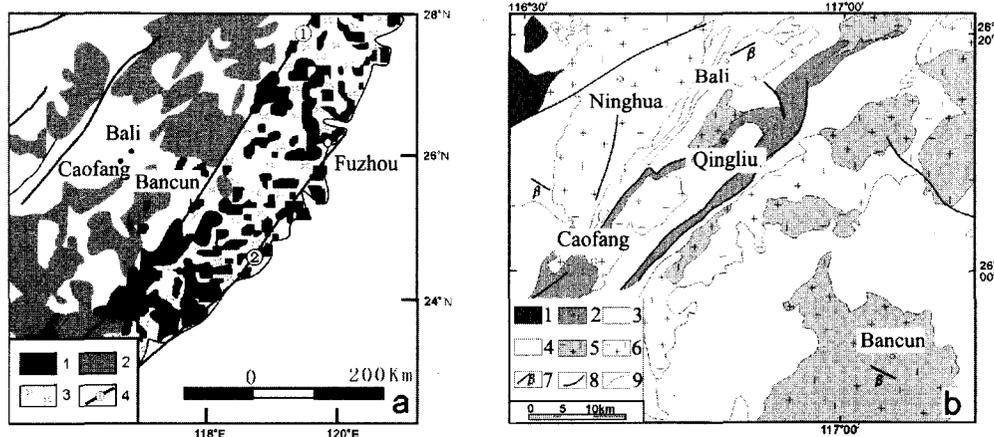


图1 区域地质构造简图(a)(据[15]修改)、闽西地质构造简图(b)(据[16]修改)

Fig.1 Geological sketch map of western Fujian

(a); 1 - Cretaceous granitoids; 2 - Jurassic granitoids; 3 - Late Mesozoic volcanics; 4 - Faults (①: Zhenghe-Dapu fault zone, ②: Changle-Nan'ao fault zone); (b); 1 - Cretaceous strata; 2 - Jurassic strata; 3 - Late Paleozoic strata; 4 - Before Paleozoic strata; 5 - Mesozoic granitoids; 6 - Before Mesozoic granitoids; 7 - Mafic dikes; 8 - Faults; 9 - Geological boundary

表 1 闽西基性岩脉微量元素、稀土元素含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)与主量元素含量(%，质量分数)*

Table 1 Trace element, REE and Major element of mafic dikes in western Fujian*

	BC-1	BC-2	BC-3	BC-4	BC-5	CF-1	CF-2	CF-3	CF-4	CF-5	QL-1	QL-2	QL-3	QL-4	QL-5	QL-6
La	20.9	20.5	16.6	19.7	19.8	19.0	19.2	20.2	19.1	18.6	21.8	25.2	23.3	23.4	22.3	25.6
Ce	42	40	33	40	39	39	38	41	38	39	48	54	49	50	49	54
Pr	4.46	4.43	3.55	4.13	4.20	4.45	4.52	4.81	4.56	4.51	5.77	6.35	5.68	5.84	5.77	6.29
Nd	16	16	13	16	16	19	18	20	19	18	23	26	22	24	24	25
Sm	3.21	3.17	2.60	3.12	3.06	4.24	4.20	4.65	4.38	4.33	4.96	5.46	5.00	4.80	4.84	4.94
Eu	0.90	0.96	0.81	0.95	0.95	1.28	1.26	1.33	1.25	1.24	1.41	1.48	1.40	1.46	1.44	1.50
Gd	3.54	3.51	2.88	3.50	3.31	4.10	4.07	4.43	3.98	3.98	5.03	5.52	4.68	5.16	5.01	5.16
Tb	0.535	0.509	0.479	0.536	0.538	0.768	0.762	0.811	0.763	0.758	0.763	0.765	0.685	0.757	0.696	0.720
Dy	3.20	3.16	2.67	3.04	3.31	4.76	4.69	5.15	4.86	4.72	4.05	3.98	3.73	3.85	3.81	3.96
Ho	0.715	0.721	0.612	0.697	0.723	0.98	1.00	1.08	1.01	1.00	0.857	0.873	0.788	0.813	0.765	0.870
Er	2.03	1.95	1.85	2.01	2.06	2.83	2.84	3.02	2.81	2.80	2.39	2.40	2.18	2.28	2.18	2.35
Tm	0.295	0.301	0.275	0.300	0.315	0.404	0.402	0.446	0.427	0.401	0.359	0.343	0.296	0.325	0.318	0.358
Yb	1.88	1.90	1.69	2.00	2.00	2.66	2.63	2.82	2.68	2.59	2.05	2.11	1.91	2.04	2.09	2.21
Lu	0.313	0.320	0.264	0.312	0.303	0.379	0.391	0.406	0.382	0.385	0.311	0.335	0.300	0.329	0.309	0.341
REE	100	98	80	96	95	103	103	109	103	102	121	134	122	125	122	133
L/H	6.99	6.93	6.46	6.75	6.56	5.10	5.13	5.03	5.11	5.16	6.65	7.22	7.37	7.06	7.05	7.35
δ_{Eu}	0.82	0.88	0.91	0.88	0.92	0.94	0.93	0.89	0.92	0.91	0.86	0.82	0.88	0.90	0.89	0.91
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	7.65	7.40	6.75	6.77	6.81	4.90	5.02	4.92	4.90	4.95	7.30	8.21	8.41	7.91	7.31	7.96
SiO ₂	52.15	51.96	51.68	52.77	52.78	53.06	52.75	52.88	52.64	52.69	50.43	50.03	49.24	50.31	50.18	50.56
TiO ₂	0.82	0.67	0.64	0.59	0.60	1.21	1.21	1.24	1.25	1.22	0.87	1.01	0.74	1.00	0.95	0.88
Al ₂ O ₃	17.24	17.40	17.54	16.32	17.02	14.86	14.88	14.54	14.61	14.76	16.89	17.72	17.66	17.51	7.81	17.01
Fe ₂ O ₃	1.24	1.16	1.07	1.73	1.23	2.88	2.92	2.38	2.56	2.76	0.46	0.61	0.75	0.63	0.61	1.62
FeO	5.74	5.91	5.24	5.67	5.32	8.16	8.17	8.66	8.68	8.49	5.73	5.96	5.32	5.36	5.55	5.26
MnO	0.16	0.16	0.16	0.16	0.17	0.18	0.18	0.17	0.18	0.18	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
CaO	11.78	11.34	11.85	11.17	11.69	9.30	9.37	9.25	9.16	9.22	9.60	9.38	9.95	9.7	9.54	8.22
MgO	6.55	6.64	6.64	6.45	6.77	5.30	5.39	5.50	5.48	5.56	9.30	8.42	9.64	8.51	8.3	9.64
K ₂ O	1.10	1.22	1.11	1.38	1.02	1.27	1.17	1.19	1.24	1.07	1.54	1.53	1.53	1.67	1.61	1.71
Na ₂ O	1.66	1.67	1.69	1.79	1.58	2.55	2.46	2.51	2.57	2.38	1.65	1.80	1.57	1.80	1.77	1.70
P ₂ O ₅	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.17	0.17	0.18	0.18	0.19	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05
Weightlessness	1.63	1.77	2.12	2.02	1.54	0.80	1.05	1.10	1.13	1.05	3.01	3.13	3.03	3.08	3.16	3.20
Total	100.11	99.94	99.79	100.09	99.76	99.74	99.73	99.61	99.68	99.57	99.68	99.79	99.63	99.77	99.69	100.01
H ₂ O ⁻	-	-	-	-	-	0.24	0.13	0.19	0.29	0.20	-	-	-	-	-	-
Ta	0.454	0.426	0.356	0.45	0.427	0.524	0.535	0.572	0.546	0.518	0.518	0.613	0.487	0.544	0.538	0.594

* Data of BC and QL are from^[5], BC: Bancun; QL: Bali; CF: Caofang, -: Not analyses

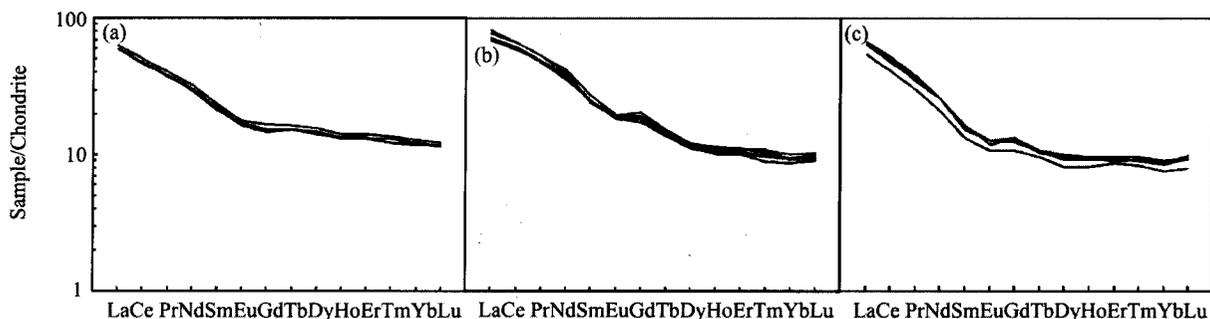


图 2 基性岩脉球粒陨石标准化稀土元素分布模式

Fig.2 Chondrite-normalized REE pattern of mafic dikes in western Fujian (chondrite-normalized values are from^[18])

(a) Caofang; (b) Bali; (c) Bancun

用,斜长石分离结晶的程度有一定的差异;未出现铈异常,基性脉岩形成于氧逸度低的环境中。

半村、拔里和曹坊基性脉岩的 $(La/Yb)_N$ 值在 5.03~8.21, 表征稀土元素有较强的分馏。从稀土元素配分曲线看出(图 2(a~c)), 半村、拔里和曹坊基性脉岩共同的特征为右倾富集、轻重稀土强分馏、轻稀土元素富集型。表 1 和配分曲线显示 3 个地区基性脉岩的稀土元素总量、轻重稀土比值以及铈异常程度的不同, 暗示基性岩浆演化过程不尽相同或来自不同的地幔源区。全岩 K-Ar 法测年获得半村辉绿岩脉形成年龄为 111.3 Ma、曹坊辉绿岩脉形成年龄为 110.7 Ma、拔里角闪辉长岩形成年龄为 79.3 Ma^[19], 稀土元素配分曲线显示, 拔里角闪辉长岩脉的稀土元素分馏程度比半村、曹坊强, 而且稀土总量高, 反映形成晚的基性脉岩稀土总量越高, 轻、重稀土的分馏程度越强的规律, 本区基性脉岩的稀土总量与 $(La/Yb)_N$ 存在正相关关系, 这可能与地幔橄榄岩部分熔融程度有关。基性脉岩的轻稀土元素较为富集, 轻稀土为球粒陨石的几十倍(如: La/N 值在 52~80), La/Sm 值在 4.3~6.5 和 Sm/Yb 值在 1.5~2.6, 重稀土元素含量低, 如 Yb 为球粒陨石的

8.0~12.7 倍, 石榴石是含 Yb 的矿物相, 地幔岩发生部分熔融形成原始岩浆时, Yb 易保留在残余固相中, 使岩浆重稀土亏损, 因此源区演化过程中可能有石榴石的残留, 源区可能来自富集石榴石-尖晶石二辉橄榄岩的部分熔融。

3 讨论

3.1 基性脉岩成因

闽西基性脉岩的微量元素地球化学研究表明, 脉岩形成于陆内拉张带构造环境中^[5]。半村、拔里和曹坊基性脉岩的稀土配分曲线为富集 LREE 型, 轻稀土富集一般由地壳混染作用或者存在富集地幔源形成的。如果岩浆在上升的过程中发生地壳物质混染, 引起基性脉岩的 LREE 富集, 若基性岩浆发生地壳混染作用, SiO_2 -LREE 必然存在正的相关性^[20], 图 3(a) 显示本区的基性脉岩的 SiO_2 与 LREE 之间总体上为负相关关系, 说明基性岩浆在上升侵位过程中没有与地壳发生混染作用。微量元素、Sr-Nd 同位素地球化学研究表明闽西地区基性脉岩未发生地壳物质混染作用^[19]。因此, 基性脉岩富集 LREE 的性质是源区演化的结果。

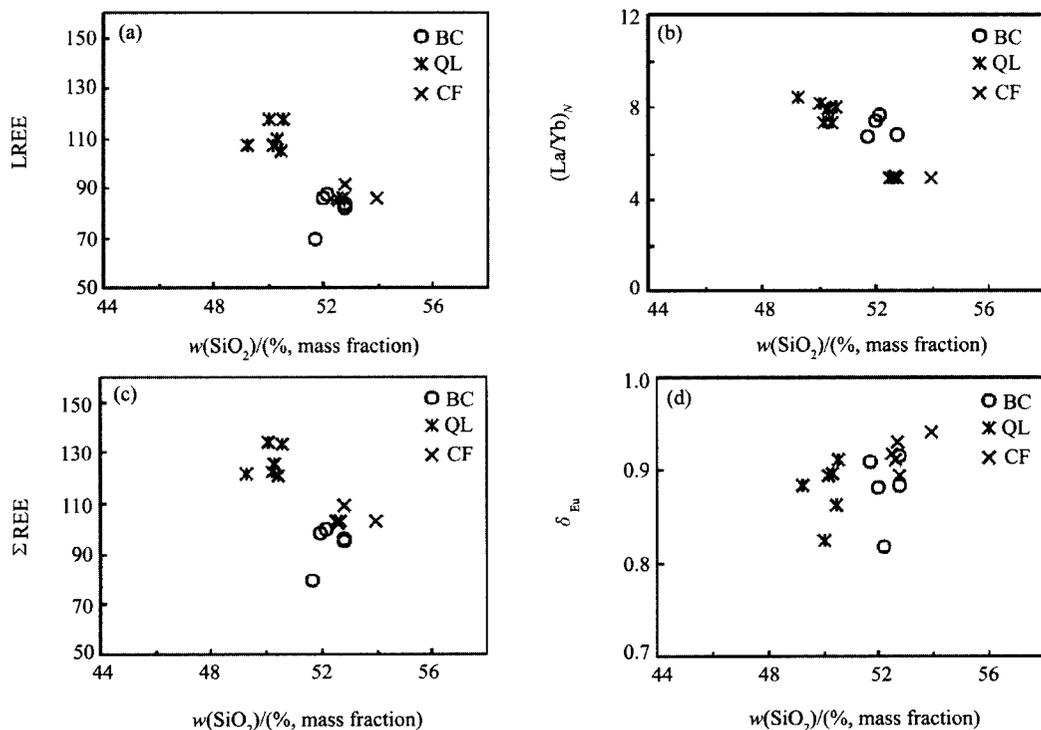


图 3 闽西基性脉岩 SiO_2 与稀土元素参数协变图解

Fig. 3 Covariance plots of SiO_2 and rare-earth element parameter from mafic dikes in western Fujian

BC: Bancun, QL: Bali, CF: Caofang

(La/Yb)_N-SiO₂ 相关关系中(图 3(b)), 半村、拔里和曹坊的样品点显示负相关关系, 如果在成岩过程中结晶分异作用为主, 则(La/Yb)_N-SiO₂ 之间应呈正相关性^[18], 随着酸度(SiO₂)的增加轻重稀土分馏程度更加强烈; 本区基性脉岩具有负相关性, 用结晶分异作用是很难解释的, 基性脉岩的原始岩浆可能是地幔岩部分熔融作用形成的。若岩浆以结晶分异作用为主要演化方式, 则早期结晶的矿物组合 SiO₂ 含量低, 稀土含量高, 随着其结晶分异的增强会导致∑REE 和 SiO₂ 出现负相关, 同时, 分离过程中斜长石的晶出, 也会导致 δ_{Eu} 与 SiO₂ 的负相关变化规律^[21], 本区基性脉岩的∑REE-SiO₂ 的相关性不显著(图 3(c)), δ_{Eu} 与 SiO₂ 之间存在正相关性(图 3(d)), 因此, 闽西基性脉岩的在岩浆演化过程中, 结晶分异作用不十分明显, δ_{Eu} 值表明, 可能在岩浆演化早期存在弱的斜长石结晶过程, 但是结晶分异作用不是脉岩的主要成岩方式。

轻重稀土元素的具有不同的分配系数, 在岩浆演化中表现出不同的性质, 如 La 等为亲湿岩浆元素, 而 Sm, Yb 等为亲岩浆元素, 根据元素与元素、元素对比值、元素的倒数等来判别岩石的成岩过程。在判别岩浆成因的 La/Sm-La 图(略)中, 半村、拔里和曹坊基性脉岩的样品点分别沿着部分熔融演化方向展布, 1/Er-1/Yb, 1/Sm-1/Gd, Ce/Yb-Ce, Ce/La-Sm/Nd 等图(略)也显示出部分熔融的线性特征, 反映 3 个地区基性脉岩是为地幔岩不同部分熔融作用的产物。

3.2 成岩意义

根据福建白垩纪构造地质演化史, 闽西区域构造背景应是陆(板)内环境。Ce/Yb-Ta/Yb 图^[22](图 4)上显示闽西基性脉岩样品点落在钙碱性玄武岩区域, 代表大陆边缘弧的构造环境, 非板内玄武岩环境, 这与闽西构造背景是不相符。Ce/Yb-Ta/Yb 图显示的岛弧地球化学性质, 可能代表基性脉岩形成之前, 本区发生过板块的俯冲消减作用, 俯冲消减的信息被保存下来。随着构造演化的不断深入, 地幔岩发生部分熔融形成玄武质岩浆, 并沿先存的破裂或区域性节理上侵形成了基性脉岩, 具有岛弧性质的特征被基性脉岩继承。

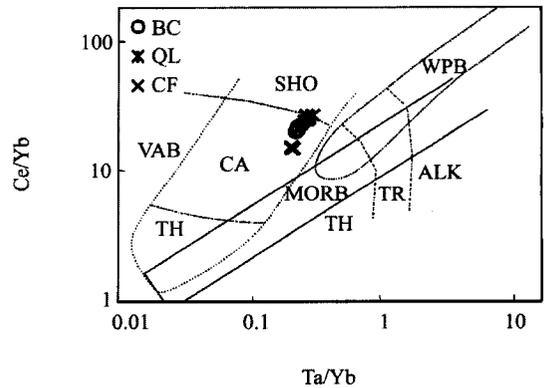


图 4 闽西基性脉岩 Ce/Yb-Ta/Yb 判别图

Fig. 4 Discrimination diagrams of Ce/Yb-Ta/Yb from mafic dikes in western Fujian

MORB: Mid ocean ridge basalts; WPB: Within-plate basalts; VAB: Volcanic arc basalts; SHO: Sho-shonitic rock; CA: Calc-alkali basalts; TH: Tholeiites; TR: Transitional basalts; ALK: Alkaline basalts

自三叠纪(250 Ma)古太平洋板块开始对欧亚大陆俯冲消减, 一直延续到白垩世末^[23]。早期太平洋板块以低角度、快速俯冲, 可使大洋板块下插到很远的大陆之下, 最远可达赣西、湘东地区^[22], 可能太平洋板块俯冲到本区岩石圈之下, 俯冲板块释放的富 H₂O 流体交代上覆地幔楔并发生富集, 地幔楔没有立即发生岩浆作用, 而是滞留相当长的时间, 因此岩浆作用具有滞后效应。

中国东南部中生代岩浆作用随时间逐渐由内陆向沿海方向迁移, 可能与古太平洋板块俯冲参数不断变化密切相关^[24]。板块俯冲作用会诱导软流圈地幔物质发生上涌, 软流圈上涌不仅导致岩石圈地幔发生部分熔融, 而且软流圈地幔物质向两侧运移产生对流作用, 在俯冲板块的上方对流作用必然产生巨大反转力, 反转力作用在俯冲板块上, 会产生一个向下压的力, 该力可能导致板块发生向后翻转。俯冲作用过程中流体交代作用降低了上覆地幔楔的熔融温度, 软流圈地幔的上涌带来了热能, 致使局部岩石圈地幔发生部分熔融, 形成的玄武质岩浆被不断地抽提并上升到中、下地壳发生底侵作用, 地壳熔融形成了花岗质岩浆。随着大量玄武岩浆被抽提到地壳中, 底侵作用使地壳大规模熔融, 形成了中国东南部晚中生代巨型花岗质火山岩—侵入杂岩^[14]。由于地幔岩不断

熔融, 诱发岩石圈发生减薄, 软流圈物质以绝热减压形式填充岩石圈减薄所留下的空间。持续上涌可能导致西部软流圈向东流动, 产生更大范围的软流圈上涌和对流作用, 对流作用产生的反转力驱使俯冲大洋板块逐渐后退, 俯冲参数发生变化(如: 俯冲角度逐渐变大等)。软流圈上涌加剧中国东南部岩石圈减薄与伸展, 导致地壳拉张作用的强烈发育, 进一步发展形成了新生代的大陆裂谷构造。随着拉张作用进一步深入, 闽西岩石圈地幔发生湿熔融, 从而形成玄武质岩浆, 并沿着构造薄弱带(先存裂隙或区域性节理)上升形成基性岩脉。

4 结 论

闽西基性脉岩的形成机制为上地幔部分熔融作用, 岩浆演化过程中没有发生地壳混染作用, 同时基性脉岩的稀土元素地球化学特征继承了其地幔源区的稀土元素性质。稀土元素的判别研究表明, 闽西基性脉岩的地幔源曾经遭受板块俯冲过程释放的流体交代富集作用。软流圈地幔上涌导致地壳拉张作用的发育。

参考文献:

- [1] 赵 越, 张拴宏, 徐 刚, 杨振宇, 胡健民. 燕山板内变形带侏罗纪主要构造事件 [J]. 地质通报, 2004, 23(9): 854.
- [2] 任纪舜, 牛宝贵, 和政军. 中国东部的构造格局和动力演化 [A]. 见: 任纪舜, 杨巍然主编: 中国东部岩石圈结构与构造岩浆演化 [C]. 北京: 原子能出版社, 1998. 1.
- [3] 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.
- [4] 谢桂青, 胡瑞忠, 贾大成. 赣西北基性岩脉的地质地球化学特征及其意义 [J]. 地球化学, 2002, 31(4): 229.
- [5] 张贵山, 温汉捷, 裘愉卓. 闽西晚中生代基性岩脉的地球化学研究 [J]. 地球化学, 2004, 33(3): 243.
- [6] 涂光炽, 张玉泉, 赵振华. 华南两个富碱侵入岩带的初步研究 [A]. 徐克勤, 涂光炽. 花岗岩地质和成矿关系 [C]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1986. 20.
- [7] 王 强, 赵振华, 简 平. 华南腹地白垩纪 A 型花岗岩类或碱性侵入岩年代学及其对华南晚中生代构造演化的制约 [J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 795.
- [8] 张贵山, 温汉捷, 胡瑞忠, 裘愉卓. 闽东南基性岩脉成因及动力学背景研究: Sr-Nd 同位素、元素地球化学 [J]. 岩石学报, 2007, 23(4): 793.
- [9] Weavaer B L, Tarney J. The scourie dyke suite: petrogenesis and geochemical nature of Proterozoic sub-continental mantle [J]. Contrib Mineral Petrol, 1981, 78: 175.
- [10] Halls H C, Shaw E G. Paleomagnetism and orientation of precambrian dykes, eastern Lake Superior region, and their use in estimates of crustal tilting [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1988, 25: 732.
- [11] Hoek J D, Seitz H M. Continental mafic dykes swarms as tectonic indicators; an example from the Vestfold Hills, East Antarctica [J]. Precambrian Research, 1995, 75: 121.
- [12] Lenoir X, Féraud G, Geoffroy L. High-rate flexure of the East Greenland volcanic margin: constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of basaltic dykes [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 214(3-4): 515.
- [13] Li X H, McCulloch M T. Secular variation in the Nd isotopic composition of neoProterozoic sediments from the southern margin of the Yangtze Block: Evidence for a Proterozoic continental collision in southeast China [J]. Precambrian Research, 1996, 76(1-2): 67.
- [14] 王德兹, 周新民. 中国东南部晚中生代花岗岩火山岩-侵入杂岩成因与地壳演化 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 1.
- [15] Li X H. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in southeast China [J]. Journal of Asian Earth Science, 2000, 18: 293.
- [16] 福建省地质矿产勘查开发局. 福建省 1: 50 万地质图说明书 [M]. 福州: 福建省地图出版社, 1998. 1.
- [17] 方维萱, 杨社峰, 刘正桃, 韦星林, 张宝琛. 蒙古查干苏布尔加(Tsagaan Suvarga)大型斑岩型铜钼矿床含矿蚀变岩常量、微量和稀土元素地球化学特征及意义 [J]. 中国稀土学报, 2007, 25(1): 85.
- [18] Anders E, Grevesse N. Abundances of the elements: meteoritic and solar [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53: 197.
- [19] 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. 100.
- [20] 王中刚, 余学元, 赵振华. 稀土元素地球化学 [M]. 北京: 科技出版社, 1989. 1.
- [21] 袁 峰, 周涛发, 岳书仑. 阿尔泰诺尔特地区塔斯比克都尔根岩体的岩石地球化学特征和形成机制 [J]. 地质地球化学, 2001, 29(2): 36.
- [22] Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [A]. Thorpe R S. Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks [C]. New York: John Wiley and Sons, 1982. 525.
- [23] 胡受冕, 赵乙英, 胡志宏, 郭继春, 徐 兵. 中国东部中-新生代活动大陆边缘构造-岩浆作用演化和发展 [J]. 岩石学报, 1994, 10(4): 370.
- [24] 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: 269.

Rare Earth Element Geochemistry Characteristic of Late Mesozoic Mafic Dikes in Western Fujian Province

Zhang Guishan^{1,2}, Wen Hanjie^{2*}, Hu Ruizhong², Qiu Yuzhuo² (1. *College of Earth Science and Land Resources, Xi'an 710054, China*; 2. *Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*)

Abstract: Based on the characteristics of REE (rare earth elements) of mafic dikes in western Fujian Province in China, both petrogenetic type and magma evolution mechanism of the rocks were discussed. The variation of REE data and major elements of the dikes showed that magma contamination with crust might not happen when magma intrusion, and that magma crystallization differentiation was not obvious in process of

the dikes forming. The variation also showed that the partial melting of upper mantle possibly formed the dikes. The mantle source of basic dikes possibly underwent the metasomatism and the enrichment of fluid of subduction. This metasomatism was closely related to subduction of the ancient Pacific plate because the mantle upwelling from asthenosphere resulted in the development of crust extension.

Key words: mafic dike; petrogenetic process; western Fujian Province; rare earths