

赣杭构造带中西段中生代基性脉岩 地球化学特征

齐有强^{1,2}, 胡瑞忠¹, 刘 燊¹, 戚华文¹, 冯彩霞¹

1. 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, 贵阳 550002

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039

摘要:赣杭构造带中西段发育的基性脉岩以辉绿岩为主, SiO₂ 质量分数为 46.88%~53.69%, 从西段至中段总体显示亚碱性至碱性的变化规律。微量元素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)和重稀土元素(HREE)。稀土元素总量具有明显的规律性分布, 即呈中段(广丰)—中西段交接部(余江、东乡)—西段(永丰、峡江)的递减趋势。西段永丰地区有明显的负 Eu 异常。Sr、Nd 同位素变化比较大 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 为 0.704 635~0.708 769, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_i 为 0.512 173~0.512 758, ε_{Nd}(t) 为 -6.8~+5.6, 暗示其源区具有明显的不均一性。具体表现为中西段结合部(东乡、余江)及西段(峡江)为亏损地幔, 而西段(永丰)和中段(广丰)为偏向 EM II 型富集地幔来源。基性脉岩总体表现为地幔部分熔融的产物, 西段(永丰)受到较明显的分离结晶作用影响。在古太平洋板块俯冲影响下产生的弧后拉张作用以及造成的构造带重新活化作用对基性脉岩的形成产生了重要影响, 地区间岩石地球化学特征上的差异主要与流体对岩浆源区交代程度的不同有关。

关键词:赣杭构造带; 基性脉岩; 地球化学特征; 流体交代

中图分类号: P588.13

文献标识码: A

文章编号: 1671-5888(2008)05-0784-11

Geochemical Characteristics of the Mafic Dikes from the Gan - Hang Tectonic Belt

QI You-qiang^{1,2}, HU Rui-zhong¹, LIU Shen¹, QI Hua-wen¹, FENG Cai-xia¹

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

2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The SiO₂ content of the mafic dikes from Gan-Hang tectonic belt ranges from 46.88% to 53.69%. The dolerites from middle and west of Gan-Hang(Jiangxi-Zhejiang) tectonic belt belong to sub-alkaline and alkaline series, respectively. The trace elements of the mafic dikes are characterized by enrichment in LREE and LILE (Ba, Rb and K) and depletion in HREE and HFSE (Ta, Nb, Zr, Hf and Ti). The REE of the mafic dikes decreases gradually from Guangfeng to Yujiang and Dongxiang, and then to Yongfeng and Xiajiang. The mafic dikes from Yongfeng have obviously Eu anomalies. The Sr and Nd isotopic composition of mafic dikes are of a wide range, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i varying from 0.704 635 to 0.708 769, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_i from 0.512 173 to 0.512 758, and ε_{Nd}(t) from -6.8 to +5.6, revealing that

收稿日期: 2008-05-22

基金项目: 国家“973”项目(2007CB411402); 国家自然科学基金项目(40634020, 40673029, 40773020)

作者简介: 齐有强(1982—), 男, 山东临清人, 博士研究生, 主要从事岩石地球化学研究, E-mail: qiyouqiang@sina.com.cn

通讯联系人: 胡瑞忠(1958—), 男, 湖南道县人, 研究员, 博士生导师, 从事矿床学和地球化学研究, E-mail: huruizhong@vip.gyig.ac.cn 或 liushen@vip.gyig.ac.cn.

the mafic dikes were derived from partial melting of different magma sources. The mafic dikes from Yujiang, Dongxiang and Xiajiang were derived from depleted mantle, while the mafic dikes from Guangfeng and Yongfeng were produced by partial melting of EM II -type enriched mantle due to mantle metasomatism. In addition, there occurred fractional crystallization of olivine, clinopyroxenes, plagioclase and Ti-Fe oxide during the magma ascent. The mafic dikes were related with the subduction of the Paleo-Pacific, different tectonic locations may account for their different petrologic characteristics.

Key words: Gan - Hang tectonic belt; mafic dikes; geochemical characteristics; metasomatism

基性脉岩及其分异物作为区域性地壳拉张环境下的产物,对研究大陆动力学背景具有重要指示意义^[1]。华南地区广泛发育的基性脉岩,为研究中国东南部动力学背景提供了载体。前人分别从年代学、矿物学、岩石学和地球化学等方面对广布于华南各地区的基性脉岩进行了详细研究,并取得了许多重要成果^[2-5]。赣杭构造带处于一级大地构造单元扬子准地台和华南地块的结合部位,横跨江南元古宙岛弧和华南加里东造山带两个二级构造单元(图 1),长期控制两侧地质构造、岩浆活动、沉积、变质以及成矿作用。带内发育火山岩、沉积岩及小面积的侵入岩和基性脉岩。因此,对带内各种地质体(特别是基性脉岩)的详细研究能为构造带活动情况提供重要证据。然而,对赣杭构造带的研究,前人多集中在有关的火山岩、火山盆地、金属成矿和构造背景等方面^[6-9],对基性脉岩方面的研究相对较少。

工作区圈定在赣杭构造带中西段,通过对赣杭构造带控制下的基性脉岩研究,以期对中生代时期

赣杭构造带演化及其对带内深源岩浆活动提供约束,同时对古太平洋板块俯冲作用的影响、华南岩石圈地幔性质等方面提供一定参考。

1 地质概况及采样

赣杭构造活动带东起浙江绍兴,西至江西永丰,总体呈北东向展布,由绍兴—江山断裂发展演化而来。该带主要由绍兴—江山、广丰—东乡和抚州—永丰 3 条深、大断裂构成,是晚侏罗世—早白垩世火山活动的主要场所^[10]。根据火山构造、区域构造演化及成矿作用等发育特点,划分为永丰—抚州、东乡—广丰、江山—绍兴 3 个火山活动段,分别对应西、中、东段^①。

本研究样品采自赣杭构造带的中西段,脉体产状较陡。东乡、余江两地位于中西段交接部,发育产自断裂带内基性脉岩,皆侵入接触上白垩统南雄组,界线清楚。广丰脉岩样品出露于白垩系尊桥组、茅店组和河口组。永丰县样品呈东西向条带状展布,

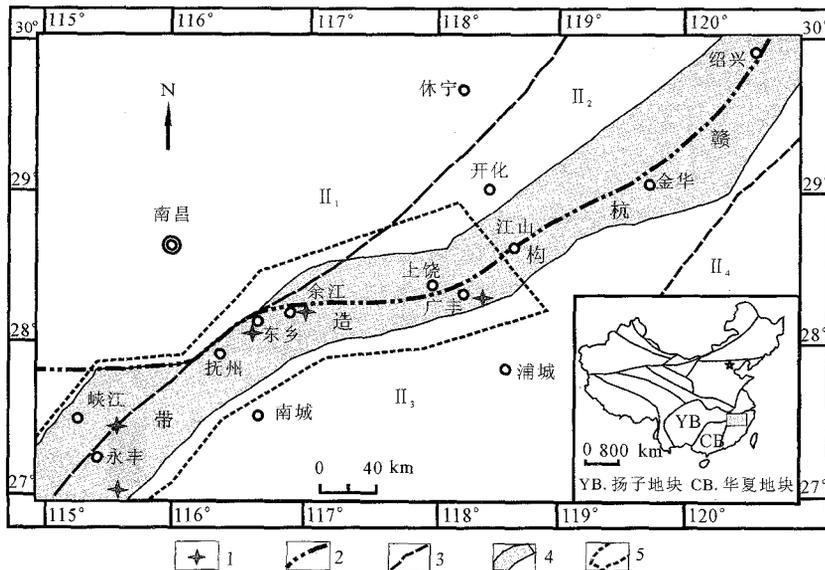


图 1 赣杭构造带大地构造及采样位置略图(底图据文献[9])

Fig. 1 Geotectonic sketch map and sampling sites of the Gan - Hang tectonic belt

1. 采样位置; 2. 一级构造单元; 3. 二级构造单元; 4. 赣杭构造带范围; 5. 研究区域; II₁. 江南台隆; II₂. 钱塘台坳; II₃. 武夷山—四明山地隆; II₄. 浙闽中生代断陷带

① 华东地勘局. 赣杭带构造火山岩成矿带铀成矿规律及成矿预测. 赣杭带研究成果报告, 1987.

西端侵位于震旦系下统的下坊组,东端侵位于燕山晚期发育的第一阶段第一期花岗岩体内。峡江样品出露于震旦系下统上施组,侵入接触,界限明显;野外观察岩脉受后期构造改造明显,位于倒转背斜核部。区调资料显示峡江地区脉岩为燕山晚期的产物^[11]。

前人对区内岩脉的成岩年龄做过一些工作。余江岩脉 K-Ar 定年结果为 87.2 Ma 和 78.5 Ma^[2],广丰下蒋基性岩脉 K-Ar 定年为 100 Ma^[12],与同区中酸性岩脉 Rb-Sr 等时线年龄 110.83 Ma 及锆石 U-Pb 同位素年龄 105.4 Ma 基本一致^[12]。江西永丰沙溪圩岩脉 K-Ar 年龄为 100.2 Ma^[2]。前人研究表明,研究区脉岩为燕山晚期产物,与带内玄武岩年龄范围一致^[12]。

2 岩相学特征及分析方法

样品岩性上主要为辉绿岩,块状构造,结构主要为辉绿结构。主要矿物为辉石、斜长石,晶体大小以中西段交接部最大,约 0.02 mm,斑状结构的斑晶一般为 0.04~0.06 mm。所有样品斜长石晶体长宽比较高,自形程度好。余江、峡江、东乡样品见有少量橄榄石,且有蛇纹石化现象。副矿物主要为磁铁矿和钛铁矿。

主量元素在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,采用 X 射线荧光光谱分析法(AXIOS PW4400)完成;微量元素在中国科学院

地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室,采用电感耦合等离子体质谱法(ELEMENT 型 ICP-MS)完成。主量元素分析重现性优于 3%,微量元素分析精度优于 10%。

3 地球化学特征

3.1 岩石化学

样品的岩石化学分析结果见表 1。在 TAS 分类图解中^[13-14](图 2a),样品落在玄武岩、玄武安山岩、玄武粗安岩内。用 Zr/TiO₂-Nb/Y 判别图(图 2b)进行分类^[15],西段(永丰、峡江)主要位于亚碱性玄武岩与安山岩系列的边界,中段(广丰)位于亚碱性玄武岩与碱性玄武岩的边界,中西段交接部(东乡、余江)位于碱性玄武岩内。结果与 TAS 图解判别结果一致。岩浆从西段向东段总体上有亚碱性至碱性系列变化的规律。

样品 MgO 质量分数为 3.90%~7.56%,平均 5.56%,东乡、峡江、余江明显高于其他地区。做元素双变量协变图(图略),发现 MgO 与 Fe₂O₃、Ni、CaO、Cr 具有正相关关系;与 K₂O、Al₂O₃、Zr 呈负相关关系;与 Sr、SiO₂、Th 及 P₂O₅ 相关性不明显。暗示在成岩过程中,存在橄榄石和单斜辉石的分离结晶作用。在 CaO-CaO/Al₂O₃ 图解上,二者存在正相关关系,同样说明岩石成岩过程中经历了单斜辉石的分离结晶作用^[16]。

表 1 赣杭构造带中西段样品的岩石化学分析结果
Table 1 Analysis of chemical compositions for samples

样品号	采样区	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总量
DX01	东乡	46.88	2.03	15.71	11.13	0.15	6.85	8.97	3.17	1.47	0.54	2.71	99.61
DX01-2	东乡	48.10	1.43	16.21	11.67	0.19	7.30	9.27	2.95	0.90	0.29	1.00	99.31
SX01	永丰	53.69	1.19	16.59	8.54	0.14	4.57	7.07	2.74	1.98	0.29	2.87	99.66
SX02	永丰	51.10	0.93	17.02	8.71	0.15	5.16	6.69	3.40	2.94	0.21	3.65	99.95
SX04	永丰	53.08	1.18	16.48	8.93	0.17	4.80	7.63	2.35	1.78	0.29	2.69	99.39
SX06	永丰	53.56	1.18	16.67	8.89	0.17	4.78	7.22	2.59	2.01	0.29	2.40	99.77
YJ01	余江	47.48	2.06	15.84	11.44	0.15	7.56	8.24	3.16	1.46	0.55	1.72	99.66
YJ02	余江	51.67	1.61	15.39	10.08	0.16	6.14	7.65	3.32	1.70	0.51	1.59	99.82
XJ01	峡江	52.29	1.04	16.33	9.83	0.12	7.13	8.50	2.71	0.45	0.10	1.09	99.59
GF01	广丰	49.41	1.87	16.51	9.96	0.13	4.15	5.01	3.82	3.19	1.07	4.44	99.57
GF03	广丰	51.80	1.94	16.78	9.69	0.15	4.31	6.83	3.31	2.60	1.14	1.47	100.02
QB01	广丰	49.54	1.97	16.96	9.98	0.12	3.90	6.62	3.64	2.85	1.20	2.59	99.37

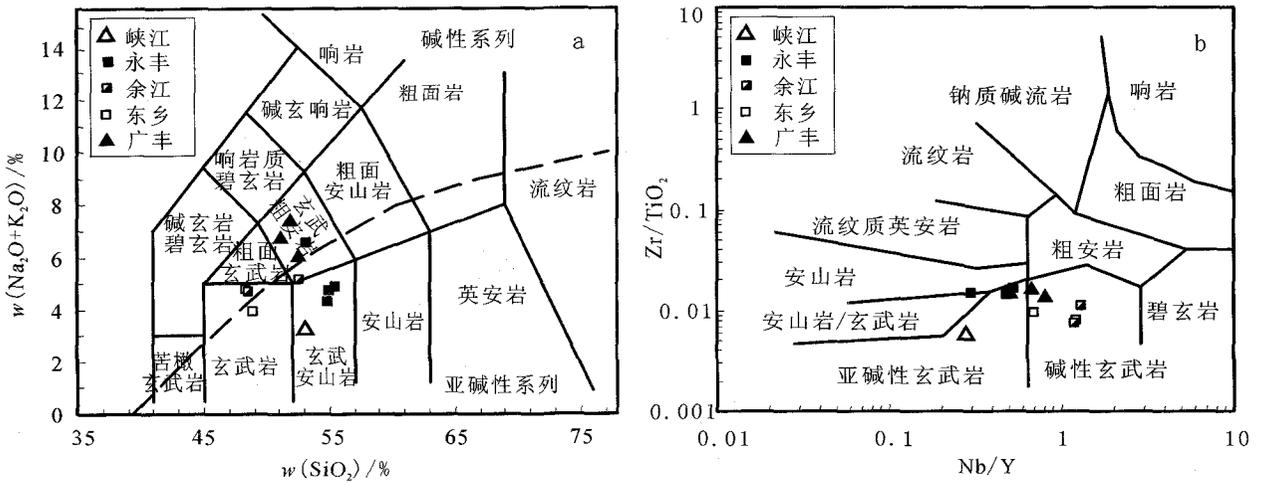


图 2 赣杭构造带中西段基性脉岩的岩石化学分类图解
Fig. 2 Petrochemistry classification diagrams of mafic dikes

3.2 微量元素

由基性脉岩的 MORB 标准化微量元素蛛网图可见(图 3,表 2)。脉岩亲石元素总量明显高于原始地幔和洋中脊玄武岩^[17],总体显示“隆起”特征。富集大离子亲石元素(LILE)(Ba、Rb、K),亏损高场强元素(HFSE)(Ta、Nb、Zr、Hf、Ti),暗示脉岩在成因上可能与俯冲陆壳和上地幔的流体交代有关^[18]。个别样品 P 略亏损可能与磷灰石的结晶分异有关。

中段(广丰)大离子亲石元素(Ba、Rb、Ce、Sm)强烈富集,Th 相对偏低。Ti 的负异常,可能与钛铁矿等含 Ti 矿物的分离结晶有关。中西段交接部(余江、东乡)总体高于大陆弧钙碱性玄武岩(CAB),Nb 和 Ta 高于其它地区,有 Ba 和 Rb 富集,无 P 和 Ti

异常。西段(峡江)微量元素含量总体偏低,尤其以 Ba、Th 和 Ce 亏损为特点,具有最为亏损的 Nb 和 Ta;西段(永丰)微量元素总体都高于 CAB,具有高的 Rb 和 Th,但相对亏损 P 和 Ti,暗示曾经历过钛铁矿和磷灰石的分离结晶。显示中西段结合部(东乡、余江)受到俯冲陆壳或上地幔影响比其他地区要小,中段(广丰)和西段(永丰)可能都受到了较多的俯冲或流体交代作用影响。

过渡元素(表 3)球粒陨石标准化分配图解(图 4)可见,岩石分配曲线呈现明显的“W”形,Cr、Ni 呈现明显的亏损谷,表明岩浆形成过程中经历橄榄石和单斜辉石分离结晶作用。

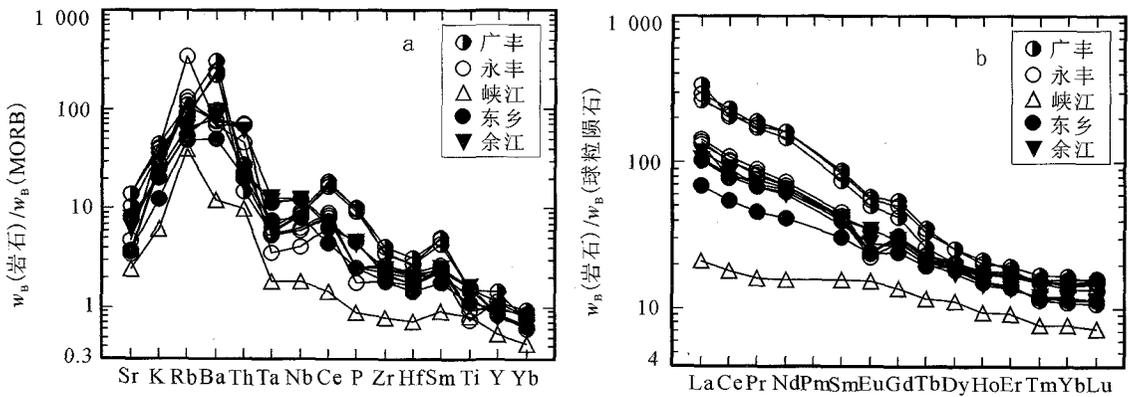


图 3 赣杭构造带基性脉岩 MORB 标准化蛛网图(a)和球粒陨石标准化 REE 分布模式图(b)
Fig. 3 MORB-normalized trace elements spidergram(a) and chondrite-normalized REE patterns of mafic dikes(b)
MORB,球粒陨石数据见文献[17]

表2 赣杭构造带中西段样品微量元素分析结果

Table 2 Analysis of trace elements compositions for samples

 $w_B/10^{-6}$

样品号	采样区	Ba	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Th	Pb	Ni	V	Cr	Hf	Sc
DX01	东乡	608	30.7	749	23.5	160	28.6	2.76	4.20	73.0	221	189.0	3.54	21.1
DX01-2	东乡	316	27.2	339	26.7	135	18.5	2.44	4.15	96.6	205	161.0	3.00	27.8
SX01	永丰	436	72.8	312	27.6	185	14.1	8.28	9.84	19.2	190	39.6	4.52	21.6
SX02	永丰	437	192.4	429	31.7	137	9.6	5.54	8.52	25.2	197	66.9	3.39	24.0
SX04	永丰	475	62.1	327	29.0	166	14.1	8.22	11.80	25.3	199	60.1	4.09	23.4
SX06	永丰	493	67.7	333	27.6	195	14.8	8.43	12.10	20.9	198	46.5	4.60	23.0
YJ01	余江	598	31.4	707	23.8	155	28.3	2.87	4.26	77.7	211	207.3	3.53	20.6
YJ02	余江	503	36.7	565	22.3	181	29.3	7.28	7.44	83.5	166	208.0	4.24	18.0
XJ01	峡江	75	22.0	219	15.0	57	4.2	1.18	3.42	146.0	128	246.0	1.50	17.7
GF01	广丰	1 912	61.3	1 239	40.0	267	20.2	2.37	9.59	22.7	181	53.5	5.57	16.0
GF03	广丰	71	51.1	935	31.9	309	21.9	3.23	15.90	33.5	195	67.6	6.44	17.0
QB01	广丰	1 383	46.6	1 250	24.0	257	19.6	1.78	9.21	23.2	179	58.8	5.57	14.2
样品号	采样区	Ta	Co	U	W	$\frac{Th}{U}$	$\frac{Nb}{Ta}$	$\frac{Zr}{Hf}$	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu
DX01	东乡	1.46	41.0	0.68	1.45	4.1	19.6	45.2	24.6	49.0	6.50	29.3	6.21	1.99
DX01-2	东乡	0.97	46.9	0.62	0.47	3.9	19.0	45.2	16.5	33.6	4.35	19.4	4.66	1.39
SX01	永丰	0.71	27.0	1.04	0.85	7.9	19.8	41.1	31.7	63.1	7.71	32.1	6.28	1.29
SX02	永丰	0.46	30.7	0.72	0.76	7.7	21.0	40.3	31.7	47.4	7.23	30.9	6.09	1.41
SX04	永丰	0.70	29.6	0.96	0.87	8.6	20.2	40.7	33.0	61.1	8.01	32.6	6.54	1.39
SX06	永丰	0.71	30.1	1.09	0.79	7.7	20.9	42.4	34.2	67.2	8.50	34.2	7.00	1.41
YJ01	余江	1.53	40.4	0.68	0.27	4.2	18.5	43.9	24.8	50.3	6.71	30.5	6.52	2.00
YJ02	余江	1.66	35.3	1.37	1.15	5.3	17.6	42.6	27.8	55.3	6.45	28.4	5.79	1.61
XJ01	峡江	0.24	42.6	0.23	0.25	5.1	17.6	38.4	5.1	11.0	1.52	7.4	2.38	0.90
GF01	广丰	0.75	23.8	0.49	0.86	4.9	26.9	48.0	80.2	126.0	18.00	75.8	13.30	3.35
GF03	广丰	0.83	29.4	0.63	0.26	5.1	26.4	48.0	69.1	141.0	17.10	75.6	13.00	3.23
QB01	广丰	0.74	25.7	0.52	0.30	3.4	26.7	46.2	62.8	131.0	16.50	67.9	11.40	2.92
样品号	采样区	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	LREE	Σ REE	$(La/Yb)_N$	δEu	
DX01	东乡	6.02	0.78	4.66	0.85	2.31	0.31	1.93	0.29	117	135	6.5	0.98	
DX01-2	东乡	4.97	0.73	4.86	0.97	2.72	0.40	2.65	0.41	80	97	3.2	0.88	
SX01	永丰	5.85	0.81	4.86	0.95	2.86	0.40	2.52	0.38	142	161	6.5	0.64	
SX02	永丰	6.42	0.88	5.30	1.02	2.95	0.39	2.51	0.38	125	145	6.5	0.68	
SX04	永丰	6.29	0.83	5.11	1.00	2.82	0.40	2.44	0.37	143	162	7.0	0.66	
SX06	永丰	6.15	0.86	5.15	0.99	2.76	0.39	2.55	0.39	153	172	6.9	0.64	
YJ01	余江	6.10	0.78	4.84	0.87	2.34	0.30	1.99	0.28	121	138	6.4	0.95	
YJ02	余江	5.50	0.76	4.37	0.82	2.24	0.31	2.02	0.29	125	142	7.1	0.86	
XJ01	峡江	2.80	0.44	2.85	0.53	1.53	0.20	1.32	0.19	28	38	2.0	1.06	
GF01	广丰	11.20	1.32	6.58	1.21	3.04	0.38	2.31	0.34	316	343	17.9	0.81	
GF03	广丰	10.40	1.25	6.51	1.16	3.22	0.44	2.84	0.38	319	345	12.5	0.82	
QB01	广丰	8.65	0.99	5.14	0.85	2.40	0.29	1.86	0.28	293	313	17.4	0.86	

表 3 赣杭构造带中西段基性脉岩过渡元素组成
Table 3 Transitional element contents of mafic dikes

样品号	采样区	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
DX01	东乡	21.14	12 154	221	189.3	1 155	77 910	41.0	73.0	37.1	109.4
DX01-2	东乡	27.75	8 552	205	161.4	1 451	81 690	46.9	96.6	81.1	106.0
SX01	永丰	21.58	7 126	190	39.6	1 064	59 780	27.0	19.2	27.6	89.9
SX02	永丰	24.00	5 568	197	66.9	1 166	60 970	30.7	25.2	25.4	93.2
SX04	永丰	23.43	7 096	199	60.1	1 281	62 510	29.6	25.3	31.0	97.9
SX06	永丰	22.98	7 042	198	46.5	1 326	62 230	30.1	20.9	24.9	97.1
YJ01	余江	20.57	12 340	211	207.3	1 188	80 080	40.4	77.7	36.6	108.4
YJ02	余江	17.96	9 667	166	208.0	1 210	70 560	35.3	83.5	49.4	104.0
XJ01	峡江	17.66	6 221	128	246.2	937	68 810	42.6	145.9	69.7	89.1
GF01	广丰	16.07	11 232	181	53.5	1 035	69 720	23.8	22.7	26.4	117.0
GF03	广丰	16.95	11 651	195	67.6	1 131	67 830	29.4	33.4	30.9	138.1
QB01	广丰	14.17	11 819	179	58.8	904	69 860	25.7	23.2	15.7	123.8

3.3 稀土元素

各区基性脉岩稀土元素总量变化较大。稀土总量显现从中西段交接部向中西两端稀土元素渐趋富集的特征,暗示源区岩浆可能经历了不同程度的部分熔融。(La/Yb)_N 值较大的变化范围显示出轻重稀土分异差异的特征。中段(广丰)轻稀土强烈富集,La 为球粒陨石的近 300 倍,而 Yb 仅为球粒陨石的 10 倍,暗示中段岩浆可能来源于相对较深的石榴子石相地幔,源区存在石榴子石残留相^[5]。西段(峡江)稀土总量少,轻重稀土分异较差,LREE 和 MREE 相对 HREE 的富集可能与角闪石和单斜辉石影响有关,暗示源区存在角闪石残留相。岩石样

品 δEu=0.64~1.06,平均 0.83,无明显的 Eu 负异常。永丰地区 Eu 亏损暗示存在斜长石分离结晶作用。

研究区样品普遍呈现弱 Ce 负异常。考虑到研究区 Ce 负异常的普遍性,排除了高氧化条件下的风化作用影响。另外,前人研究表明^[3, 19],东南沿海经历俯冲作用的岩石没有明显 Ce 负异常。故本区 Ce 负异常应为负 Ce 地壳的混入,或代表了源区的固有特征。

3.4 Sr-Nd 同位素

赣杭构造带脉岩 Sr、Nd 同位素数据见表 4。Sr、Nd 同位素初始比值变化范围较大:⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值

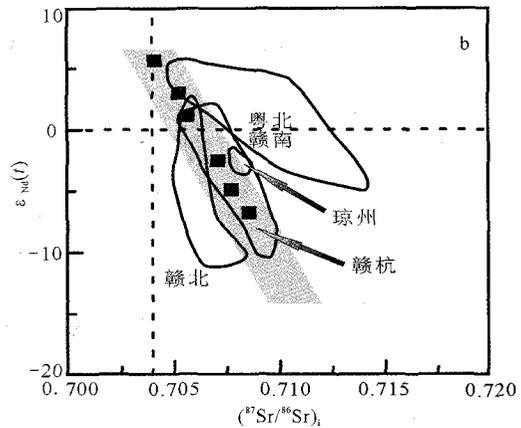
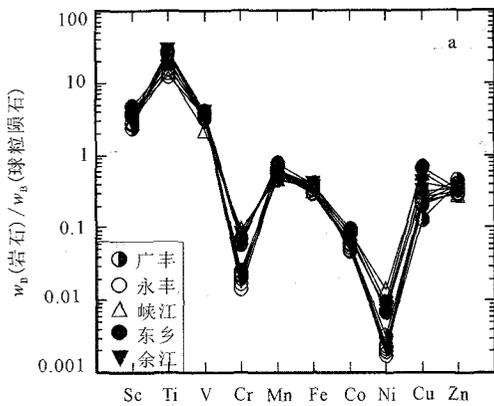


图 4 赣杭构造带基性脉岩过渡元素球粒陨石标准化(a)及 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i - ε_{Nd}(t) 相关图解(b)

Fig. 4 Chondrite-normalized diagram of transitional elements(a) and (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i - ε_{Nd}(t) correlation diagram(b)

图 b 中数据投点按照 ε_{Nd}(t) 由大到小的顺序依次为: 峡江、东乡、余江、永丰、广丰(两个样品); 赣北、赣南引自文献[2, 4, 20-21]; 琼州引自文献[5]; 赣杭构造带引自文献[2, 22-23]; 赣北引自文献[2]

表4 赣杭构造带中西段基性脉岩 Sr、Nd 同位素组成

Table 4 Sr and Nd isotopic compositions of mafic dikes

样号	样点	$\frac{87\text{Rb}}{86\text{Sr}}$	$\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}$	2σ	$(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}})_i$	$\frac{147\text{Sm}}{144\text{Nd}}$	$\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}$	2σ	$(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}})_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	来源
GF03	广丰	0.157 743	0.708 769	0.000 014	0.708 566	0.103 957	0.512 235	0.000 014	0.512 173	-6.8	本文
YJ02	余江	0.187 816	0.705 855	0.000 012	0.705 656	0.123 198	0.512 658	0.000 012	0.512 598	1.1	本文
DX01-2	东乡	0.231 949	0.705 493	0.000 014	0.705 238	0.145 284	0.512 763	0.000 014	0.512 689	3.0	本文
XJ01	峡江	0.290 236	0.704 635	0.000 013	0.704 098	0.194 347	0.512 925	0.000 014	0.512 758	5.6	本文
QB01	广丰	0.107 846	0.707 876	0.000 010	0.707 730	0.101 513	0.512 327	0.000 011	0.512 263	-4.9	本文
YFX2	沙溪	0.640 100	0.707 985	0.000 010	0.707 082	0.120 515	0.512 459	0.000 09	0.512 380	-2.5	文献[2]

为 0.704 635 ~ 0.708 769, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.512 173 ~ 0.512 758, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -6.8 ~ +5.6。由图 4 可见,基性脉岩样品具有线性分布趋势,且与前人在赣杭构造带区域所做的数据投点重合^[2, 22-23]。其中峡江、东乡、余江地区样品 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) > 0$, 显示出偏向亏损地幔端元的特征;其他地区样品投点则偏向 EM II 富集地幔端元,与闫峻等认为的华南板块岩石圈地幔以 EM II 端元为主的研究结果一致^[24]。研究区基性脉岩源区总体具有由亏损地幔端元向富集地幔端元过渡的特征。

4 成因讨论

4.1 地壳混染及成岩方式

本区的岩石 Sr、Nd 同位素与地壳高丰度元素 (SiO_2 、Ba 和 Th) 无明显的相关性。Ce/Pb 值为 3.2 ~ 14.3, 大部分高于大陆地壳平均值 4.0; Nb/U 值为 13.3 ~ 42.1, 高于全球大陆地壳平均值 10 ~ 12^[25-26]。Nb/Ta 与 La/Yb 不具有正相关关系。本

区岩石产出在岩石圈拉张构造背景下,并在重新活化的构造活动带上,岩浆上升速度快,遭受地壳混染的程度较小。综合以上证据,样品没有受到明显的地壳混染作用,岩石地球化学特征应该是由源区继承而来。在 La - La/Sm、 $\text{K}_2\text{O} - \text{Ce}/\text{Yb}$ 图解中(图略),数据点总体呈正相关分布,暗示本区岩浆为部分熔融条件下的产物。但在成岩过程中各地区基性岩浆可能经历了单斜辉石、橄榄石、斜长石(永丰),钛铁矿和磷灰石等矿物的分离结晶作用。

4.2 地幔源区

基性脉岩源区性质是岩石学成因研究中的重要部分。通过 Ba/Nb - La/Nb 做图(图 5)^[27],该区基性脉岩分成明显的两部分:中西段交接部(东乡、余江)主要落在 OIB 附近, La/Nb < 1.2, 可能与软流圈地幔有关^[28];其它分布在弧火山和大陆壳平均附近, La/Nb > 1.2, 高于粤北基性岩脉值(1.12)^[4], 显示富集地幔的特征,暗示大陆地壳物质在岩浆生成中的重要作用。

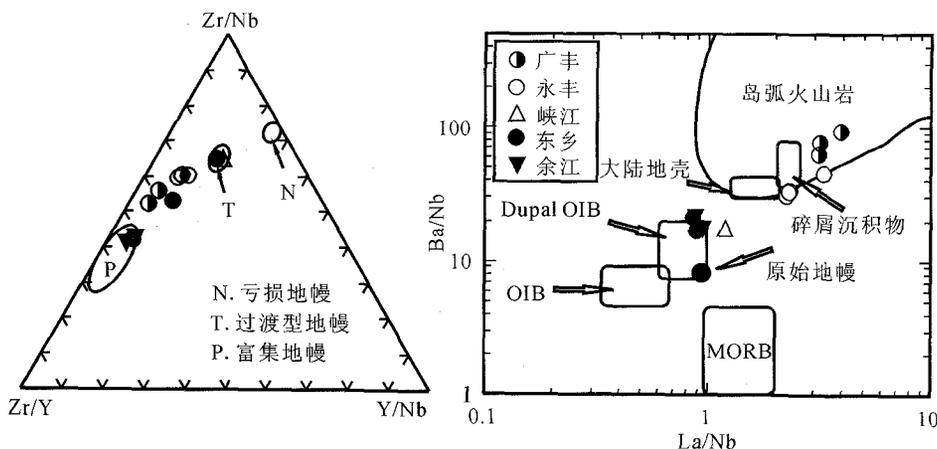


图5 赣杭构造带基性脉岩微量元素比值图解

Fig. 5 Diagram of trace elements ratios of mafic dikes

左图底图据文献[29];右图底图据文献[27]

本区 Nb/Ta 比值较高(17.6~26.9),平均为 21.2,永丰、广丰地区普遍高于球粒陨石^[30],可能与俯冲板片熔体的交代作用有关,与华南地区普遍发生过富集交代作用的结论一致^[4,31]。中西段交接部(余江、东乡)样品 Nb 和 Ta 高于其它地区,并有 Ba 和 Rb 富集,无 P 和 Ti 异常,暗示此区岩石受俯冲作用或流体交代作用影响较小。Zr/Nb - Zr/Y - Y/Yb 图解^[29](图 5)中,样品落在过渡性地幔向富集地幔演化线上,与同位素反映出的向富集地幔端元过渡的趋势相一致。Fodor 认为^[29],过渡性地幔可能暗示陆内裂谷发育,与本区大地构造背景特征相吻合。

4.3 动力学背景

通过岩浆活动、断陷盆地和变质核杂岩等方面的研究,不同学者普遍认为中国东南部晚中生代以来(至少白垩纪)经历了大规模的拉张作用,处于陆内岩石圈伸展的构造背景^[32]。此动力学背景不仅影响了构造带的活动,还影响了区内的岩浆活动。

前人研究表明,古太平洋板块在晚中生代 135~85 Ma 期间曾以低角度(<30°)快速率(>200 mm/a)向东亚陆缘俯冲^[33],使大洋板块下插到很远的大陆之下,形成宽达上千千米的火山岩带^[34]。海沟与岩浆弧之间形成挤压应力区,弧后形成拉张应力区。由于斜向俯冲,在欧亚陆缘发生强大的剪切应变,形成大规模左旋走滑断层。岩浆在强度薄弱的火山弧优先发育,同时老的断裂带再次活化,为岩浆上侵提供导引空间。因此中国东南部地区中生代以来的构造演化以斜向俯冲下的拉张旋回为背景。

印支期构造活动后,赣杭构造带受古太平洋板块俯冲作用影响,进入大陆边缘活动阶段。晚侏罗世一早白垩世,赣杭构造带发生局部拉张,出现火山喷发活动,进入火山活动带发育阶段。大量火山岩研究反映出区域拉张作用对岩石成因的巨大影响^[10,23]。余心起发现赣杭构造带在晚中生代白垩纪时期存在两个阶段的拉张作用,肯定了断裂带对岩浆的控制作用^[10]。拉张作用一方面活化了构造带,同时又与断裂带共同影响了本区的岩浆作用。早白垩世末,带内再次发生大规模的拉张,形成赣杭红盆断陷带。盆地类型从早期断陷盆地至晚期坳陷盆地的变化,反映出拉张活动时代上的扩张^[8]。红层中发育玄武岩和夹层及大规模的基性脉岩群,局部还发现有金伯利岩筒,暗示基性岩浆活动发育较深^[9]。

Zr/Y-Zr 相关图解^[35](图 6)显示研究区都落在板内玄武岩区内,与微量元素蛛网图显示的大陆边缘弧钙碱性玄武岩(CAB)特征不一致。研究区在侏罗纪-白垩纪时期,曾处在古太平洋板块俯冲的构造背景下,说明在成岩之前曾存在着大洋俯冲作用。俯冲作用对成岩产生了重要影响,并为流体的交代作用提供了必要条件。前人研究认为^[36-37],俯冲到深部在变质脱水反应中被释放出来的水能对俯冲带的物化状态、俯冲板片地幔边界与地幔楔的演化及俯冲带变形产生重要影响。

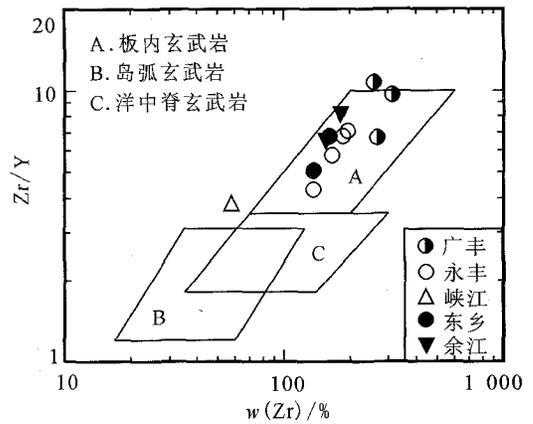


图 6 赣杭构造带基性脉岩的 Zr/Y - Zr 构造判别图解
Fig. 6 Zr/Y - Zr tectonic discriminate diagrams for mafic dikes

综上所述,大的拉张构造背景为基性岩浆的发育提供了必要条件;同时受拉张作用影响构造带被再次活化,并对岩浆发育起到重要的控制作用。当岩浆在侵入浅地表的过程中,活化的构造带为其提供了良好通道。构造活动带内不同区段的岩石地球化学和同位素特征,显示了活动带内岩浆发育的不均一性及晚期断裂对早期断裂继承的不完善性。体现在流体交代作用对岩浆源区的改造作用上,如中西段结合部受到的交代作用要弱于其它地区。此外,前人年代学研究显示,中西段结合部脉岩样品年龄为 80 Ma 左右,而中段和西段年龄为 100 Ma,较早受到俯冲作用影响的岩浆受到了更多的流体交代影响,佐证了古太平洋板块对欧亚大陆边缘俯冲作用随时间的变化。显然同在一个大的拉张构造背景控制下,岩石显出的差异主要由交代作用对岩浆源区交代作用产生的差异所致,同时也显示出构造活动对俯冲流体作用的重要影响作用。

5 结论

(1) 研究区岩石 SiO_2 质量分数为 46.88%~53.69%, 位于基性岩范围内。主要岩石类型为辉绿岩, 覆盖碱性和亚碱性系列, 岩浆从西向东总体显示出由亚碱性至碱性的变化规律。岩石地球化学以富集 LREE 和 LILE、亏损 HREE 和 HFSE 为特征, 类似于大陆弧钙碱性玄武岩。Sr-Nd 同位素数据 displays 地幔源区总体具有由亏损地幔端元到富集地幔端元过渡的趋势。

(2) 岩浆上升侵位过程中, 没有发生明显的地壳混染, 存在着橄榄石、单斜辉石、斜长石和 Ti-Fe 氧化物的分离结晶。基性岩脉的岩浆为部分熔融的产物, 西段(永丰)可能受到较明显的分离结晶过程。

(3) 基性岩脉岩浆的来源分为两种: 中西段结合部(东乡、余江)及西段的峡江地区为亏损地幔端元, 中段(广丰)和西段(永丰)为富集地幔端元。古太平洋板块俯冲产生的拉张作用以及拉张作用造成的构造带重新活化对基性岩脉的形成产生了重要影响, 地区间岩石地球化学特征上的差异主要与流体对岩浆源区交代程度的不同有关。

本文样品采集前期思路的整理得到了毕献武研究员的热情帮助; 同位素测试过程得到了李湖峰博士和储著银博士的指导和帮助; 资料搜集得到了江西省地质矿产局的大力支持; 岩矿鉴定中, 得到了刘铁庚老师的热心指导。在此一并感谢。

参考文献(References):

- [1] Hall H C, Fahrig W F. Mafic dyke swarms (IDC1) [J]. Geological Association of Canada Special Paper, 1987, **34**: 1-503.
- [2] 谢桂青. 中国东南部晚中生代以来的基性岩脉(体)的地质地球化学特征及其地球动力学意义初探——以江西省为例[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2003: 1-126.
XIE Gui-qing. Late Mesozoic and Cenozoic mafic dikes (bodies) from Southeastern China: geological and geochemical characteristics and its geodynamics — a case of Jiangxi Province [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, 2003: 1-126.
- [3] 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): 243-253.
ZHANG Gui-shan, WEN Han-jie, QIU Yu-zhuo. Geochemistry of the late Mesozoic mafic dikes in western Fujian Province [J]. Geochemica, 2004, **33**(3): 243-253.
- [4] 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]. Geochemica, 1997, **26**(2): 14-31.
- [5] 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. Geochronology, geochemistry and Sr-Nd isotopes of the Late Cretaceous mafic dike swarms in southern Hainan Island [J]. Geochemica, 2003, **32**(1): 11-20.
- [6] 邓家瑞, 张志平. 赣杭构造带区域大地构造背景的探讨[J]. 铀矿地质, 1999, **15**(2): 71-76.
DENG Jia-rui, ZHANG Zhi-ping. Discussion on regional geotectonic setting of Gan-Hang tectonic belt [J]. Uranium Geology, 1999, **15**(2): 71-76.
- [7] 邓家瑞, 张志平. 赣杭构造带前寒武纪构造格局的探讨[J]. 铀矿地质, 1997, **13**(6): 321-326.
DENG Jia-rui, ZHANG Zhi-ping. Discussion on the Precambrian structural framework of the Gan-Hang tectonic belt [J]. Uranium Geology, 1997, **13**(6): 321-326.
- [8] 余心起, 舒良树, 颜铁增, 等. 赣杭构造带红层盆地原型及其沉积作用[J]. 沉积学报, 2005, **23**(1): 12-20.
YU Xin-qi, SHU Liang-shu, YAN Tie-zeng, et al. Prototype and sedimentation of red basins along the Gan-Hang tectonic belt [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, **23**(1): 12-20.
- [9] 邓家瑞, 张志平. 赣杭构造带及其地质意义[J]. 铀矿地质, 1989, **5**(1): 15-21.
DENG Jia-rui, ZHANG Zhi-ping. Gan-Hang tectonic belt and its geologic significance [J]. Uranium Geology, 1989, **5**(1): 15-21.
- [10] 余心起, 吴淦国, 舒良树, 等. 白垩纪时期赣杭构造带的伸展作用[J]. 地学前缘, 2006, **13**(3): 31-43.
YU Xin-qi, WU Gan-guo, SHU Liang-shu, et al. The Cretaceous tectonism of the Gan-Hang tectonic belt, southeastern China [J]. Earth Science Frontier, 2006, **13**(3): 31-43.
- [11] 江西省地质矿产局. 江西省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1984: 1-921.

- Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Jiangxi Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984: 1-921.
- [12] 余达淦,叶发旺,王勇. 江西广丰早白垩世中晚期盆地火山-侵入杂岩活动序列确认及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2001, **25**(3): 271-276.
- YU Da-gan, YE Fa-wang, WANG Yong. Active succession establishment for volcanic-intrusive complex in middle-late lower Cretaceous in Guangfeng, Jiangxi and its geological implication[J]. Geotectonics et Metallogenia, 2001, **25**(3): 271-276.
- [13] Bas M J L, Maitre R W L, Streckeisen A, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. J Petrology, 1986, **27**(3): 745-750.
- [14] Irving T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. Canadian Journal of Earth Science, 1971, **8**(5): 523-548.
- [15] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical magma type discrimination: application to altered and metamorphosed basic igneous rocks[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1976, **28**(3): 459-469.
- [16] Qi Q, Taylor L A, Zhou X. Petrology and geochemistry of an unusual tridymite-hercynite xenolith in tholeiite from Southeastern China[J]. Mineralogy and Petrology, 1994, **50**(4): 195-207.
- [17] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication, 1989, **42**: 313-345.
- [18] 李曙光, 聂永红, 郑双根. 俯冲陆壳与上地幔的相互作用-I. 大别山同碰撞镁铁-超镁铁岩的主要元素及痕量元素地球化学[J]. 中国科学(D辑), 1997, **27**(6): 488-493.
- LI Shu-guang, NIE Yong-hong, ZHENG Shuang-gen. Interaction between subducted continental crust and upper mantle: I. major and trace elements geochemistry of the syncollision mafic-ultramafic rocks in Dabie Mountains[J]. Science in China (Series D), 1997, **27**(6): 488-493.
- [19] 陈荣, 周金城. 福建同安角闪辉长岩的矿物化学、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及地质意义[J]. 地质论评, 2001, **47**(6): 602-607.
- CHEN Rong, ZHOU Jin-cheng. Mineral chemistry and ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of hornblende gabbros from Tong'an, Fujian Province and their geological significance[J]. Geological Review, 2001, **47**(6): 602-607.
- [20] Li X H, McCulloch M T. Geochemical characteristics of Cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China: age, origin and tectonic significance[J]. Mantle Dynamics and Plate Interaction in East Asia Geodynamics, 1998, **27**: 405-419.
- [21] 李献华. 诸广山岩体中基性岩脉的成因初探——Sr、Nd、O同位素证据[J]. 科学通报, 1990, **35**(16): 1247-1249.
- LI Xian-hua. Genesis of intermediate-basic-dykes in Zhuguang body: evidences from Sr, Nd and O isotopes[J]. Chinese Science Bulletin, 1990, **35**(16): 1247-1249.
- [22] 余心起, 舒良树, 颜铁增, 等. 江山-广丰地区早白垩世晚期玄武岩的岩石地球化学及其构造意义[J]. 地球化学, 2004, **33**(5): 465-476.
- YU Xin-qi, SHU Liang-shu, YAN Tie-zeng, et al. Geochemistry of basalts of late period of Early Cretaceous from Jiangshan-Guangfeng, SE China and its tectonic significance[J]. Geochimica, 2004, **33**(5): 465-476.
- [23] 陈繁荣, 王德滋. 赣杭地区中生代两类不同成因火山-侵入杂岩的对比研究[J]. 地球化学, 1995, **24**(2): 169-179.
- CHEN Fan-rong, WANG De-zi. Comparative anatomy of two contrasting Mesozoic volcanic-intrusive complexes in NE Jiangxi and its vicinities, China[J]. Geochimica, 1995, **24**(2): 169-179.
- [24] 闫峻, 陈江峰, 喻钢, 等. 长江中下游晚中生代中基性岩的铅同位素特征: 富集地幔的证据[J]. 高校地质学报, 2003, **9**(2): 195-206.
- YAN Jun, CHEN Jiang-feng, YU Gang, et al. Pb isotopic characteristics of Late Mesozoic mafic rocks from the lower Yangtze region: evidence for enriched mantle[J]. Geological Journal of China Universities, 2003, **9**(2): 195-206.
- [25] Hofmann A W, Jochum K P, Seufert M, et al. Nb and Pb in oceanic basalts: new constraints on mantle evolution[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1986, **79**(1/2): 33-45.
- [26] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust[J]. Reviews of Geophysics, 1995, **33**(2): 241-265.
- [27] Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, et al. Crust-mantle in-

- teraction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr - Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China [J]. *Chemical Geology*, 1999, **157**(1/2): 119 - 146.
- [28] Miller C, Schuster R, Klötzli U, et al. Post-Collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: geochemical and Sr - Nd - Pb - O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis[J]. *Journal of Petrology*, 1999, **40**(9): 1399 - 1424.
- [29] Fodor R V, Vetter S K. Rift-zone magmatism: petrology of basaltic rocks transitional from CFB to MORB, southeastern Brazil margin [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1984, **88**(4): 307 - 321.
- [30] 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.
- [31] Li X H. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, **18**(3): 293 - 305.
- [32] 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 等. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀成矿关系研究的若干问题[J]. *矿床地质*, 2007, **26**(2): 139 - 152.
HU Rui-zhong, BI Xian-wu, PENG Jian-tang, et al. Some problems concerning relationship between Mesozoic - Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China[J]. *Mineral Deposits*, 2007, **26**(2): 139 - 152.
- [33] Maruyama S, Send T. Orogeny and relative plate motions: example of the Japanese Islands[J]. *Tectonophysics*, 1986, **127**(3/4): 305 - 329.
- [34] 董树文, 邓晋福. 论东亚大陆的构造翘变: 燕山运动的全球意义[J]. *地质论评*, 2000, **46**(1): 8 - 13.
DONG Shu-wen, DENG Jin-fu. On tectonic seesawing of the East Asia continent: global implication of the Yanshanian movement [J]. *Geological Review*, 2000, **46**(1): 8 - 13.
- [35] Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, **69**: 33 - 47.
- [36] 黄德志, 高俊, 戴塔根. 俯冲带流体作用的地球化学示踪[J]. *地学前缘*, 2001, **8**(3): 131 - 140.
HUANG De-zhi, GAO Jun, DAI Ta-gen. Geochemical tracing of the fluids in subduction zones [J]. *Earth Science Frontiers*, 2001, **8**(3): 131 - 140.
- [37] 周长勇, 葛文春, 吴福元, 等. 大兴安岭北段塔河辉长岩的岩石学特征及其构造意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2005, **35**(2): 143 - 149.
ZHOU Chang-yong, GE Wen-chun, WU Fu-yuan, et al. Petrological characteristics and tectonic implications of the Tahe gabbro in the northern part of the Great Xing'an range [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2005, **35**(2): 143 - 149.
- [8] Wygrala B P. Integrated study of an oil field in the southern Po basin, Northern Italy[J]. *Berichte Kernforschungsanlage Jülich*, 1989, **2313**(B6): 1 - 217.
- [9] Laslett G M, Galbraith R F. Statistical modeling of thermal annealing of fission tracks in apatite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, **60**(24): 5117 - 5131.
- [10] King L C. *The morphology of the Earth*[M]. Edinburgh: Oliver & Boyd, 1967.
- [11] Ollier C D, Pain C F. Equating the basal unconformity with the palaeoplain: a model for passive margins [J]. *Geomorphology*, 1997, **19**(1/2): 1 - 15.
- [12] Gilchrist A R, Summerfield M A. Differential denudation and flexural isostasy in formation of rifted margin upwarps[J]. *Nature*, 1990, **346**(8): 739 - 742.
- [13] Gilchrist A R, Kooi H, Beaumont C. Post-Gondwana geomorphic evolution of southwestern Africa: implications for the controls on landscape development from observations and numerical experiments [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, **99** (B6): 12211 - 12228.
- [14] Tucker G E, Slingerland R L. Erosional dynamics, flexural isostasy, and long-lived escarpments: a numerical modeling study [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, **99**(B6): 12229 - 12243.
- [15] Kooi H, Beaumont C. Escarpment evolution on high-elevation rifted margins: insights derived from a surface processes model that combines diffusion, advection, and reaction [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, **99**(B6): 12191 - 12209.

(上接 776 页)