

江汉盆地早第三纪玄武质岩石³⁹Ar/⁴⁰Ar年代学和地球化学特征及其成因意义*

彭头平^{1,2} 王岳军¹ 范蔚茗¹ 喻晓冰¹ 彭冰霞^{1,2} 徐政语³

PENG TouPing^{1,2}, WANG YueJun¹, FAN WeiMing¹, YU XiaoBing¹, PENG BinXia^{1,2} and XU ZhengYu³

1. 中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

3. 中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院杭州石油地质研究所, 杭州 310023

1. Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640, China

2. Graduated School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3. Hangzhou Institute of Petroleum Geology, Chinese National Petroleum Corp, Hangzhou 310023, China

2005-12-16 收稿, 2006-04-12 改回.

Peng TP, Wang YJ, Fan WM, Yu XB, Peng BX and Xu ZY. 2006. ³⁹Ar/⁴⁰Ar geochronology and geochemistry of the early Tertiary basaltic rocks in the Jianghan Basin, China and its petrogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6):1617-1626

Abstract ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology, major and trace elements and Sr-Nd isotope data are presented for the early Tertiary basaltic rocks from the Jianghan Basin. The volcanic rock were was erupted at ca. 57Ma and belong to subalkali series. These basaltic rocks are generally characterized by enrichment in LILE and LREE ((La/Yb)_{cn} = 3.5 ~ 10.4) with insignificantly negative Eu anomalies (Eu/Eu* = 0.99 ~ 1.08). These rocks display insignificant Nb-Ta positive anomalies, similar to those of ocean island basalt (OIB). Their elemental and Sr-Nd isotopic signatures are similar to those of early Tertiary volcanic rocks from the southern margin of the North China Block and the late Cenozoic basaltic rocks in Southeast China. Combined with Pb data of Mesozoic basalts from the middle-lower section of the Yangtze river, we propose that the geochemical characteristics feature of the Cenozoic lithospheric mantle beneath the northern Yangtze Block might inherit from that of Mesozoic lithospheric mantle. These basaltic rocks from the Jianghan basin in the northern Yangtze Block were generated from partial melting of EMII-like lithospheric mantle in respondings to the tectonic regime of intracontinental extension regime.

Key words Early Tertiary, Basaltic rocks, Intracontinental extension, Jianghan basin

摘要 江汉盆地早第三纪火山岩主、微量元素和 Sr-Nd 同位素以及精确的⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学研究表明:该火山岩形成于 57.3 ± 0.4Ma,由亚碱性的玄武岩和玄武质安山岩组成,富集 LILE 和 HFSE, (La/Yb)_{cn} = 3.5 ~ 10.4, Eu/Eu* = 0.99 ~ 1.08, 具有与洋岛玄武岩(OIB)相似的地球化学特征。微量元素比值和 Sr-Nd 同位素组成上表明,其地球化学特征与源于 EMII 型富集岩石圈-软流圈相互作用而形成的华北南缘早第三纪火山岩以及东南沿海新生代玄武质岩石相似。结合长江中下游地区中生代玄武岩 Pb 同位素的资料,暗示扬子北缘新生代岩石圈地幔属性可能是其中生代属性的继承。江汉盆地早第三纪玄武质岩石是在陆内的岩石圈伸展拉张构造背景下,对流软流圈上涌导致 EMII 型岩石圈地幔部分熔融的结果。

关键词 早第三纪;玄武质岩石;陆内伸展作用;江汉盆地

中图法分类号 P588.145; P597.3

* 本文得到国家自然科学基金(40473019, 40421303, 40334039)的联合资助。

第一作者简介:彭头平,男,1974年生,博士研究生,主要从事岩石大地构造研究, E-mail: tppeng@gig.ac.cn.

新生代以来,与伸展构造作用有关的陆内断陷盆地和玄武质岩石广泛发育于中国的东部和中部地区。关于这些火山岩的成因以及华北、华南陆块新生代岩石圈地幔属性差异的研究,目前主要集中在东部沿海地区,包括从中国的东北地区到南部的南海盆地新生代火山岩(Basu *et al.*, 1990; Fan and Hooper, 1991; Liu *et al.*, 1994; Zhang *et al.*, 1995; Han *et al.*, 1999; Chung *et al.*, 1995, 1999; Zou, 2000)。关于这些火山岩的成因及所反映的岩石圈属性,前人的研究认为它们来源于不同的源区,即中国的东北和华北地区岩石圈地幔主要表现为EMI型富集岩石圈地幔的特征(Basu *et al.*, 1991; Han *et al.*, 1999),而东南沿海及南海盆地下的岩石圈地幔主要表现为EMII型富集岩石圈地幔的特征(Tu *et al.*, 1991, 1992; Chung *et al.*, 1995, 1999; Zou, 2000)。然而,在中国中部地区尤其是秦岭-大别造山带两侧,由于新生代的火山岩出露较少,目前仅有的资料主要集中在造山带北侧盆地的火山岩(从柏林等, 1996, 2001; 杨祝良, 1998; Chung *et al.*, 1999),从而限制了对中新世以来华南、华北陆块内部岩石圈属性差异的了解。因此,本文选取大别造山带南侧江汉盆地早第三纪钻孔岩芯的样品及相关火山岩进行了较系统的年代学和、元素-和同位素地球化学研究,其目的在于:(1)了解形成这些玄武质岩石的华南内部岩石

圈地幔源区的属性(EMI或EMII型?);(2)探索形成这些玄武质岩石的地球动力学机制;(3)为新生代以来华南内部岩石圈地幔属性的研究提供重要的信息。

1 地质背景与样品描述

江汉盆地位于大别造山带之南、江南造山带中段之北(图1a),为一中新世陆相断陷盆地,面积约2800km²。中三叠世以来,由于受到秦岭-大别造山作用及造山后伸展构造作用的影响,盆地先后经历了从海陆交互相到陆相盆地的发育历程,充填了巨厚陆源碎屑岩系。盆地内基性火山岩较发育,大部分隐伏于盆地内(徐论勋等, 1995),仅有极少量出露于地表(图1b)。据研究(徐论勋等, 1995),盆地内火山活动可分为两个旋回,即中生代晚期旋回和早第三纪旋回。本文的样品主要来自金8井的玄武岩岩芯样品和采自湖北江陵八岭山玄武岩样品,岩石主要为玄武岩,斑状结构,基质为交织结构,气孔及肾仁状构造,斑晶主要由斜长石、少量辉石、橄榄石组成,含量约2%~3%,基质由斜长石和少量的辉石组成;主要矿物为斜长石、辉石、橄榄石,副矿物主要为磁铁矿、钛铁矿、磷灰石等。

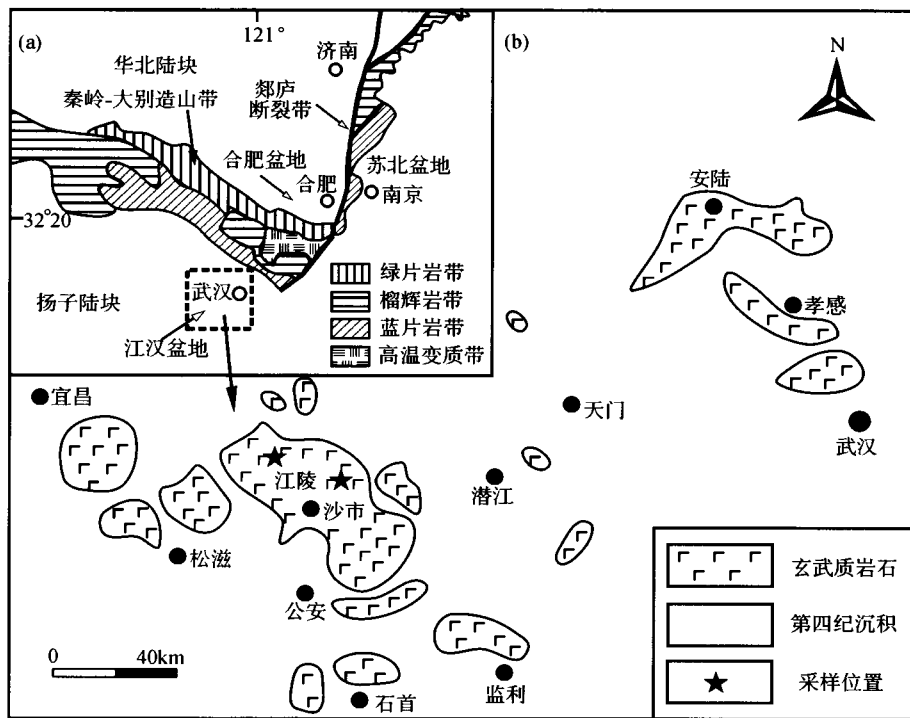


图1 中国中部构造划分(a)和江汉盆地早第三纪玄武质火山岩的分布简图(b)
(其中图b据徐论勋等(1995)的江汉盆地火山岩分布图修改)

Fig.1 Tectonic map of the Central China (a), geological map showing the distribution of early Tertiary basaltic rocks in the Jianghan Basin

2 分析方法

将样品(01JH-19)破碎至40-60目,挑选出不含斑晶的样品约0.2g用铝箔包裹,锡箔屏蔽,与参考标样一起置中国原子能科学研究院核反应堆照射,瞬时中子通量为 $6.63 \times 10^{12}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,积分中子通量为 $1.05 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$,照射时间为2627分钟。在超高真空析氩系统对样品用半导体化高频感应电炉加热熔样。样品分9个阶段从420℃~1450℃加热,氩经5埃分子筛、Cu-CuO(550℃)、海绵钛(850℃)和钛升华泵纯化后,进入中国科学院地质与地球物理研究所RGA-10气体质谱仪上进行静态Ar同位素测定。实验室测定的大气Ar及Ca、K照射产生的³⁶Ar、³⁹Ar、⁴⁰Ar干扰均经系统背景值和半衰期校正,Ar纯化、校正因子及年龄计算方法参照桑海清等(1997)。用作中子通量监测的ZBH-25黑云母标样的参考年龄为 $132.7 \pm 1.2 \text{ Ma}$ 。

主量元素在国土资源部湖北地质实验研究所XRF法测试,FeO和Fe₂O₃采用湿化学法单独分析。微量元素在中国科学院广州地球化学研究所Perkin-Elmer ELAN 6000 ICP-MS测试,标样为BCR-1,大部分元素的分析精度优于3%,具体的分析流程参阅刘颖等(1996)。Sr-Nd同位素组成在中国科学院地质与地球物理研究所的VG354质谱仪上完成,NBS987标样⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.710265 ± 12, La Jolla¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.511862 ± 10。整个过程中Sr空白含量低于 $5 \times 10^{-10} \text{ g}$,Nd空白低于 $5 \times 10^{-11} \text{ g}$,⁸⁶Sr/⁸⁷Sr = 0.1194, ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219。⁸⁷Rb/⁸⁶Rb、¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd比值分别用⁸⁶Sr/⁸⁷Sr = 0.1194, ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219校正,详细的分析方法可参见Wang et al., (2005)。

3 年代学

江汉盆地内基性火山岩广泛发育,徐论勋等(1995)针对

江汉盆地12口钻井和部分地表玄武岩样品进行了K-Ar法年代学研究,并建立了江汉盆地早第三纪地层地质年代表,即潜江组四段、荆沙组、新沟嘴组和沙市组时代分别为41.0Ma、45.5Ma、51.2Ma和62.4Ma。而且,已有的研究表明江汉盆地具有形成火山岩油气藏的地质条件(徐论勋等,1995),如在江汉盆地的江陵凹陷金家场构造江深4井和金4井新沟嘴组火山岩储层中分别获得日产0.79吨和0.13吨的少量油量。因此,火山岩年代学研究可以为江汉盆地早第三纪火山岩储层及含油层位的对比研究,以及新生代岩浆作用的时空分布研究提供重要的信息,针对此,我们选择江汉盆地金8井的样品01JH-19进行了⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学研究。其结果列于表1,其表观年龄坪谱及等时线如图1所示。

从表1和图2可见:样品表现出典型未受后期热扰动的封闭体系年龄坪谱特征。其低温加热步(420~550℃)坪年龄由 $97.5 \pm 1.4 \text{ Ma}$ 迅速降低到 $26.6 \pm 0.3 \text{ Ma}$,随后在680℃加热步时升高至坪年龄,期间释放的累积³⁹Ar为17%;在中高温加热步给出了近一致的⁴⁰Ar/³⁹Ar坪年龄,7个连续加热步表现出一致的⁴⁰Ar/³⁹Ar坪谱年龄,坪年龄的³⁹Ar累积量达到83%。其坪年龄为 $57.3 \pm 0.4 \text{ Ma}$ (图2a),在误差范围内与等时线年龄($56.4 \pm 0.3 \text{ Ma}$)一致(图2b)。⁴⁰Ar/³⁹Ar初始值294.4,近似于大气压值295.5,表明这些样品没有受到过剩氩和微裂隙内去气作用的影响(Wang et al., 2003)。因此,上述坪年龄是可信的,代表了该岩浆的形成年龄。同时考虑到样品未受到变形变质的影响,代表了其形成年龄,该年龄与江汉盆地沙市组早第三纪火山岩的K-Ar年龄相似(徐论勋等,1995)。

4 地球化学特征

江汉盆地早第三纪玄武质岩石的主微量元素、Sr-Nd同位素测试结果列于表2。样品的主量元素变化为:SiO₂ = 49.26%~53.82%, Al₂O₃ = 13.10%~15.89%, MgO = 5.74%

表1 江汉盆地早第三纪火山岩代表性样品的全岩⁴⁰Ar/³⁹Ar逐步加热分析结果

Table 1 ⁴⁰Ar/³⁹Ar isotopic analytical data for incremental heating experiments on basaltic rocks

加热温度/℃	(⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁶ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁷ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁸ Ar/ ³⁹ Ar) _m	³⁹ Ar _k ($\times 10^{-12} \text{ mol}$)	⁴⁰ Ar* / ³⁹ Ar ($\pm 1\sigma$)	³⁹ Ark%	表观年龄 ($t \pm 1\sigma \text{ Ma}$)
01JH-19, W = 0.1802g, J = 0.009642								
420	10.329	0.01562	0.06598	0.07673	6.678	5.758 ± 0.007	5.06	97.49 ± 1.35
550	7.1755	0.0191	0.41717	0.0420	15.72	1.540 ± 0.003	11.9	26.60 ± 0.33
680	7.7272	0.0151	0.88142	0.0782	9.181	3.316 ± 0.007	6.96	56.79 ± 0.78
800	6.9545	0.0121	0.66563	0.0568	15.30	3.416 ± 0.005	11.6	58.47 ± 0.75
920	5.7432	0.0081	0.43508	0.0456	34.32	3.365 ± 0.003	26.0	57.62 ± 0.71
1050	5.9191	0.0090	0.48022	0.0520	22.96	3.256 ± 0.004	17.4	55.78 ± 0.70
1180	5.8305	0.0084	0.56100	0.0537	13.68	3.356 ± 0.004	10.3	57.46 ± 0.73
1300	7.0512	0.0128	0.54625	0.0710	9.044	3.299 ± 0.006	6.85	56.49 ± 0.76
1450	9.5092	0.0208	0.75225	0.0902	5.008	3.418 ± 0.008	3.79	58.50 ± 0.85
$t_p = 57.3 \pm 0.4 \text{ Ma}$, $t_i = 56.4 \pm 0.3 \text{ Ma}$, $t_r = 56.1 \pm 0.1 \text{ Ma}$, $\pm ^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}_i = 299.1 \pm 8.6 \text{ Ma}$								

$\lambda = 5.543 \times 10^{-10} / \text{a}$, W = 0.1802g; t_p : 坪年龄; t_i : 等时线年龄; t_r : 反等时线年龄

表2 江汉盆地早第三纪火山岩主(wt%)、微量元素(ppm)和Sr-Nd同位素分析结果

Table 2 The analytical results of major (wt%), trace (ppm) elemental and Sr-Nd isotopic compositione

样品	岩芯样品							地表样品	
	01JH-2	01JH-4	01JH-7	01JH-8	01JH-12	01JH-17	01JH-19	01JH-21	01JH-23
SiO ₂	53.01	53.12	49.26	53.23	53.48	52.77	51.52	53.66	53.82
Al ₂ O ₃	13.60	13.10	14.67	13.58	13.52	13.55	13.69	14.89	15.89
Fe ₂ O ₃	3.45	5.72	5.96	3.22	2.36	3.18	4.56	3.75	3.59
FeO	7.93	5.25	5.55	7.82	8.72	8.13	6.13	5.57	5.63
MgO	6.36	6.32	8.01	6.57	6.49	6.19	7.88	5.77	5.74
CaO	6.98	4.60	8.13	7.07	7.83	4.92	4.44	8.23	8.22
Na ₂ O	3.72	3.19	3.43	3.67	3.43	3.39	3.58	3.21	3.20
K ₂ O	0.67	0.29	0.18	0.62	0.28	0.61	0.15	1.00	1.00
MnO	0.21	0.17	0.18	0.19	0.20	0.22	0.15	0.12	0.12
TiO ₂	1.97	2.15	2.08	1.93	1.98	2.01	1.99	1.94	1.94
P ₂ O ₅	0.20	0.21	0.25	0.19	0.20	0.20	0.23	0.36	0.37
LOI	1.66	2.66	2.11	1.69	1.32	2.56	3.47	1.28	1.26
Total	99.76	99.78	99.81	99.78	99.81	99.73	99.79	99.78	100.78
Mg*	50.9	52.3	56.9	56.5	51.9	50.3	58.1	53.7	53.8
Sc	20.7	19.9	21.4	20.0	19.6	21.3	19.7	17.8	17.9
V	219	206	217	204	212	222	210	185	186
Cr	416	181	262	219	213	223	205	206	253
Co	42.5	37.2	42.4	41.2	41.3	42.1	44.9	36.4	36.3
Ni	244	141	174	165	158	165	163	139	156
Rb	9.52	3.33	0.95	7.82	3.23	9.69	2.20	19.70	18.18
Sr	423	398	400	452	330	495	443	409	413
Y	22.3	22.0	22.3	21.0	21.1	21.4	22.2	18.8	19.3
Zr	96.3	99.8	104	93.1	95.4	94.5	103	143	141
Nb	13.3	13.7	16.8	12.2	12.9	13.0	17.1	26.0	25.6
Ba	253	145	145	236	122	294	96.1	272	272
La	9.45	9.76	12.4	8.97	9.23	9.20	11.6	20.2	20.5
Ce	20.2	21.3	25.7	19.5	20.2	19.8	26.3	39.8	40.4
Pr	2.38	2.61	2.98	2.38	2.42	2.42	3.05	4.52	4.50
Nd	11.7	12.1	12.8	11.3	11.6	11.7	14.2	19.2	19.1
Sm	3.62	3.77	3.75	3.81	3.69	3.89	4.62	4.74	5.08
Eu	1.39	1.39	1.41	1.37	1.37	1.34	1.52	1.67	1.67
Gd	4.25	4.69	4.57	4.28	4.39	4.39	4.68	4.60	4.82
Tb	0.80	0.83	0.80	0.76	0.79	0.79	0.80	0.79	0.78
Dy	4.51	4.44	4.68	4.14	4.26	4.31	4.40	4.02	3.96
Ho	0.90	0.88	0.88	0.84	0.81	0.82	0.87	0.74	0.79
Er	2.05	2.22	2.21	1.99	2.02	2.18	2.11	1.83	1.85
Tm	0.28	0.30	0.28	0.27	0.25	0.28	0.28	0.23	0.27
Yb	1.92	1.81	1.69	1.66	1.65	1.76	1.76	1.40	1.46
Lu	0.24	0.27	0.23	0.27	0.26	0.25	0.25	0.24	0.23
Hf	2.84	2.97	3.12	2.82	2.72	2.75	3.16	3.75	3.82
Ta	0.83	0.90	1.19	0.84	0.84	0.86	1.11	1.61	1.66
Pb	1.71	3.25	4.57	1.90	1.82	2.70	4.24	1.98	2.42
Th	1.25	1.30	1.77	1.27	1.28	1.26	1.88	3.07	3.14
U	0.32	0.26	0.39	0.30	0.28	0.30	0.48	0.58	0.63
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.707060		0.704135		0.704978		0.708775		
2σ	15		11		15		13		
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512832		0.512774		0.512809		0.512773		
2σ	15		20		20		14		
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(t)	0.707007		0.704129		0.704955		0.708763		
ε _{Nd} (t)	3.86		2.79		3.37		2.63		

注: 分析误差为2σ; ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr(t)和ε_{Nd}(t)为回算到57Ma的结果。

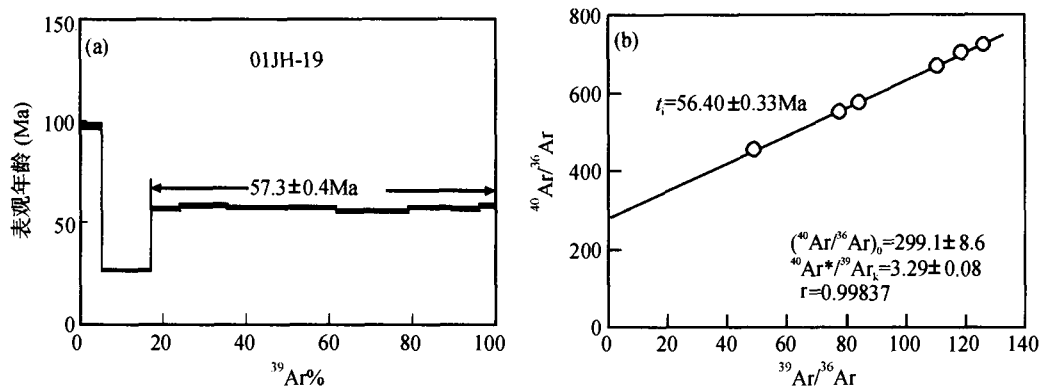


图2 玄武质岩石(01JH-19)的表观年龄坪谱(a)、等时线(b)图解

Fig. 2 ⁴⁰Ar/³⁹Ar age spectra (a), isochron age (b) (01JH-19) of the basaltic rocks from Jiangnan Basin

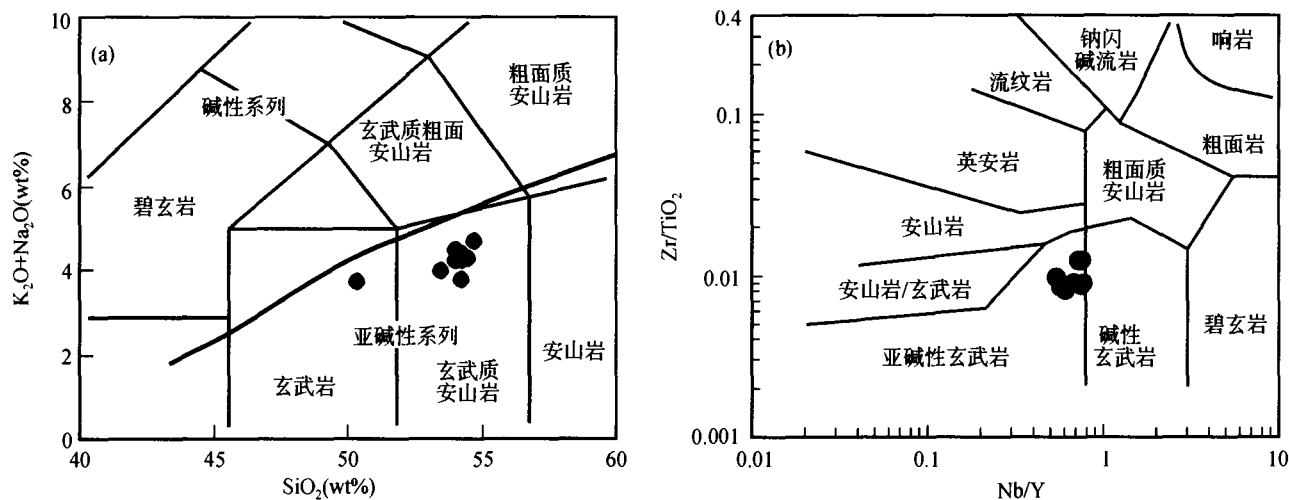


图3 江汉盆地早新生代玄武质岩石TAS(a)和Nb/Y对Zr/TiO₂(b)分类图解

(分类图分别引自 Middlemost, 1994 和 Floyd and Winchester, 1978)

Fig. 3 TAS(a)和Nb/Y vs. Zr/TiO₂(b) diagrams for the early Tertiary basaltic rocks in Jiangnan Basin

~8.01%, TiO₂ = 1.93% ~ 2.15%, Na₂O + K₂O = 3.61% ~ 6.00%, Mg[#] = 50.3 ~ 56.9。所有样品都具有高 Na₂O (3.20% ~ 5.58%) 和低 K₂O (0.15% ~ 1.00%) 的特征。在 TAS 和 Nb/Y 对 Zr/TiO₂ 分类图解上(图 3a, b), 所有样品都落在亚碱性玄武岩和玄武安山岩系列范围。

所有样品具有相对较高的稀土元素总含量(ΣREE = 282 ~ 416ppm), 在球粒陨石标准化图解中(图 4a), 表现出相似的 LREE 富集右倾型配分模式, 轻重稀土分异明显 ((La/Yb)_{cn} = 3.5 ~ 10.4, (Gd/Yb)_{cn} = 1.8 ~ 2.7); 无 Eu 异常(Eu/Eu* = 0.99 ~ 1.08)。相容元素的含量相对较低: Ni = 141 ~ 244ppm, Cr = 181 ~ 416ppm, Co = 36.3 ~ 42.5ppm, V = 185 ~ 222ppm, 表明岩浆早期可能发生了一定的以橄榄石和单斜辉石为主的分离结晶作用。在微量元素蛛网图上(图 4b), 样品富集大离子亲石元素(LILE), 具无 Nb-Ta 等高场强元素(HFSE)的负正异常, 相似于洋岛玄武岩(OIB)

(Hofmann, 1986) 和华北南缘早第三纪玄武质岩石的地球化学特征(从柏林等, 1996, 2001) (图 4b)。其不相容元素比值 Zr/Nb = 5.5 ~ 7.6, Nb/La = 1.25 ~ 1.47, Th/La = 0.13 ~ 0.16, Th/Nb = 0.09 ~ 0.12, Nb/U = 35.3 ~ 53.4。在 La 对 La/Sm 图上(图 5), 所有样品表现出明显的线性正相关关系, 表明部分熔融是主要控制因素。

四个代表性样品有着变化较大的 Sr 同位素组成(0.704135 ~ 0.708775) 和较均一的 Nd 同位素组成(0.512773 ~ 0.512832), 对应的初始⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.704129 ~ 0.708763, ε_{Nd}(57Ma) = 2.63 ~ 3.86。在 ε_{Nd}(57Ma) - ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr (t) 图解上(图 6), 其中两个样品(01JH-7 和 01JH-12) 显示出与 Samoa 洋岛玄武岩相似的亏损同位素组成特征(Hofmann, 1986), 另外两个样品(01JH-2 和 01JH-19) 具有富集 Sr 同位素组成的特征, 与华北南缘早第三纪火山岩的同位素组成非常相似(初始⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.703871 ~ 0.708374, ε_{Nd}(t) = 0.46 ~ 6.35) (从柏林等, 1996, 2001)。

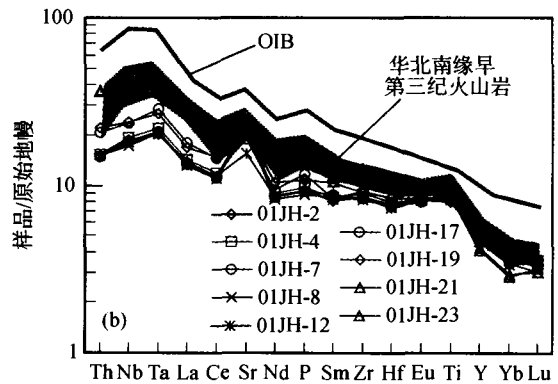
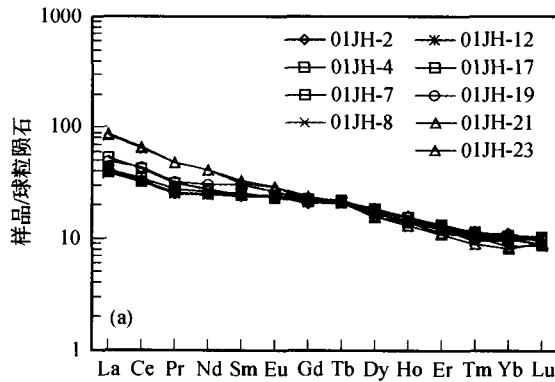


图4 玄武质岩石的球粒陨石(a)和原始地幔标准化(b)图解(标准化值分别引自 Taylor and McLennan, 1985; Sun and McDonough, 1989. 华北南缘早第三纪玄武岩数据引自从柏林等, 1996, 2001)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spidergrams (b) for early Tertiary basaltic rocks in Jiangnan Basin

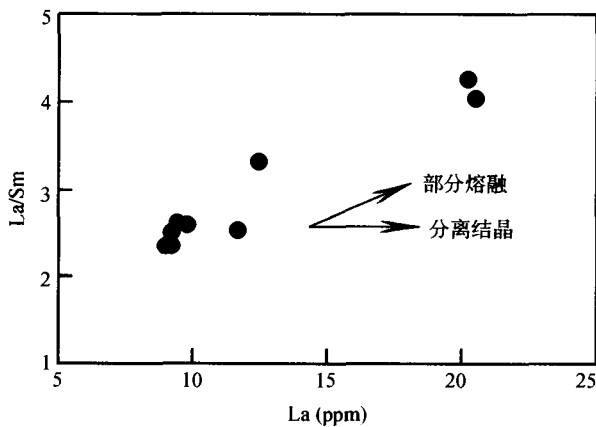


图5 江汉盆地早第三纪玄武岩玄武质岩石的 La 对 La/Sm 图解

Fig. 5 La vs. La/Sm plot of early Tertiary basaltic rocks in Jiangnan Basin

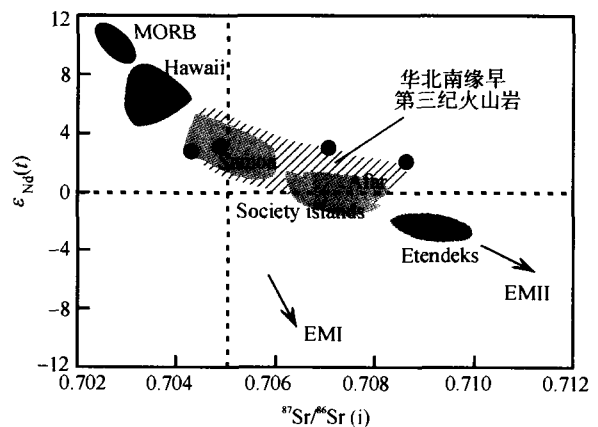


图6 江汉盆地早第三纪玄武质岩石的 $\epsilon_{Nd}(t)$ - $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$ 图解(华北南缘早第三纪火山岩数据引自从柏林等, 1996, 2001; Hawaii, Samoa, Afar 和 Etendeks 数据自 Hawkesworth *et al.*, 1984)

Fig. 6 $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. $^{87}Sr/^{86}Sr(i)$ diagram for the early Tertiary basaltic rocks in Jiangnan Basin

5 讨论

5.1 低温蚀变/地壳混染

对形成于大陆板内环境的基性火山岩,在讨论其源区属性之前,有必要讨论低温蚀变和地壳混染作用对岩石成分的影响。岩石学观察表明部分样品有轻微的绿泥石化,个别样品烧失量达 3.47%,及其相对低的烧失量(1.26% ~ 3.47%),样品也有着较大的 Sr 同位素组成变化表明江汉盆地玄武质岩石可能受到轻微的低温蚀变作用影响。因此,在岩石成因讨论中主要集中在不易受蚀变作用影响的元素以及它们的比值,比如 REE, Th, U, Nb, Ta, Zr, Hf, Ti 和元素比值 Zr/Nb, Nb/La, Nb/Th, Th/La, Nb/U 等。

江汉盆地玄武质岩石样品具有变化较大的 Sr 同位素组成和相对较低的 $\epsilon_{Nd}(57\text{Ma})$ 比值 (< 4.0),暗示岩浆在上升的过程中可能经历过地壳物质的混染作用。然而,所有样品在 TAS 和 Nb/Y 对 Zr/TiO₂ 分类图解上落在相同的亚碱性系列范围(图 3a, b),在微量元素蛛网图上表现出 Nb-Ta 等高场强元素正异常,以及 Nb/La 比值、初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 、 $\epsilon_{Nd}(57\text{Ma})$ 与 $Mg^{\#}$ 值之间不存在相关关系的特征(未给图),均表明样品主、微量元素和同位素组成在岩浆上升过程中未受到后期地壳物质的明显混染;其 Nb/U 比值(35.3 ~ 53.4)相似于 MORB 和 OIB 的比值特征(47 ± 10) (Hofmann *et al.*, 1986),明显高于大陆地壳的 Nb/U 比值 (± 10) (Taylor and McLennan, 1985),也表明这些玄武质岩浆在上升的过程中未受到地壳物质的明显混染,而更可能是其岩浆源区属性的反映。

5.2 源区属性

江汉盆地早第三纪玄武质岩石具有与华北南缘早第三纪玄武质岩石相似的不相容微量元素比值和 Sr-Nd 同位素组成,变化较大的 SiO₂,高 Na₂O,低且变化范围较窄的 P₂O₅/Al₂O₃ (0.014 ~ 0.024) 和 CaO/Al₂O₃ (0.32 ~ 0.58) 比值,及其 Zr/Nb(5.5 ~ 7.6) 和 Ce/Y(0.91 ~ 2.11) 比值落于 Deniel (1998) 所认为的尖晶石相橄榄岩熔融源区内; 以及具有相对较低的 (La/Yb)_{cn} (3.5 ~ 10.4) 和 (Gd/Yb)_{cn} (1.8 ~ 2.7) 比值及相对较高的 HREE 含量(其 HREE 含量大于 10 倍球粒陨石值),属于亚碱性系列的特征,也表明该玄武质岩浆可能是尖晶石相二辉橄榄岩源区较高程度部分熔融的产物(Chung *et al.*, 1999)。在微量元素蛛网图上(图 4b),所有样品都表现出与洋岛玄武岩(OIB)相似的特征,Zr/Nb = 5.5 ~ 7.6, Th/La = 0.13 ~ 0.16, Th/Nb = 0.09 ~ 0.12, 展示出与华北南缘早第三纪火山岩和与 EMII 型洋岛玄武岩(OIB)相似的地球化学特征(Weaver, 1991),表明其岩浆源区可能为 EMII 型富集岩石圈地幔。江汉盆地早第三纪玄武质岩石富集 LREE、LILE,在微量元素比值构造环境判别图解上(图 7a,b),样品都落在板内玄武岩和富集岩石圈地幔区域,并显示出板内富集趋势的特征(Pearce, 1983),因此推测这些玄武质岩石的成因与软流圈地幔关系密切,软流圈的上涌导致尖晶石相二辉橄榄岩地幔源区大比例部分熔融,是岩石圈-软流圈相互作用的产物。与东南沿海新生代来源于软流圈-岩石圈相互作用形成的玄武质岩石的特征相似(Chung *et al.*, 1995,1999)。

5.3 成因意义

中国东部沿海地区是东亚/西太平洋大陆边缘的重要组成部分,新生代以来,在这些地区发育了一系列与伸展构造

作用有关的断陷盆地和中基性火山岩,针对这些火山岩前人进行了大量的研究(Dostal *et al.*, 1991; Basu *et al.*, 1990; Liu *et al.*, 1994; Han *et al.*, 1999; Chung *et al.*, 1995,1999; Tu *et al.*, 1991; Zou *et al.*, 2000),如 Sr-Nd-Pb 同位素的研究(图 8a-b),表明中国的东北和华北地区新生代火山岩表现为 DMM + EMI 混合趋势的特征,而华南及南海盆地新生代火山岩显示出 DMM + EMII 混合趋势的特征。尤其是 Pb 同位素组成特征(图 8b),暗示中国东部新生代以来岩石圈地幔存在同位素地球化学的分区(Chung *et al.*, 1995,1999; Tu *et al.*, 1996),即华北岩石圈显示了以较低的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb (<18.0)为标志的 EMII 型地幔的特征(图 8b)(Bau *et al.*, 1991),而华南则显示出以较高的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb (>18.0)为标志的 EMII 型地幔的特征(图 8b)(Chung *et al.*, 1994,1995; Tu *et al.*, 1991, 1992)。然而,中国内部的华北、华南陆块内部由于受到中生代以来陆-陆碰撞造山作用及造山后伸展作用的影响,其岩石圈地幔同位素的分区以及同位素的分区时间问题一直是争论的焦点。近年来,从柏林等(1996,2001)在对造山带北侧盆地内早第三纪新生代火山岩的研究时,发现这些火山岩具有以高的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 值(>17.5)为特征的 EMII 属性,认为造山带北侧大规模的地幔上涌是从渐新世而不是从古新世开始的,即中国东部岩石圈地幔同位素地球化学分区应该在渐新世之后。而 Chung 等(1999)和李曙光等(2002)在对郯庐断裂带两侧新生代火山岩的研究后,认为华北和华南陆块岩石圈属性的差异是中生代岩石圈属性差异的继承。

然而,由于华南陆内新生代火山岩的出露较少,以致无法探讨新生代以来华南内部岩石圈地幔属性的继承性问题。本文对江汉盆地早第三纪玄武质岩石的研究表明,该区岩石圈地幔具有 EMII 型岩石圈地幔的特征。关于新生代这种 EMII 型岩石圈地幔的特征与华南中生代岩石圈地幔属性

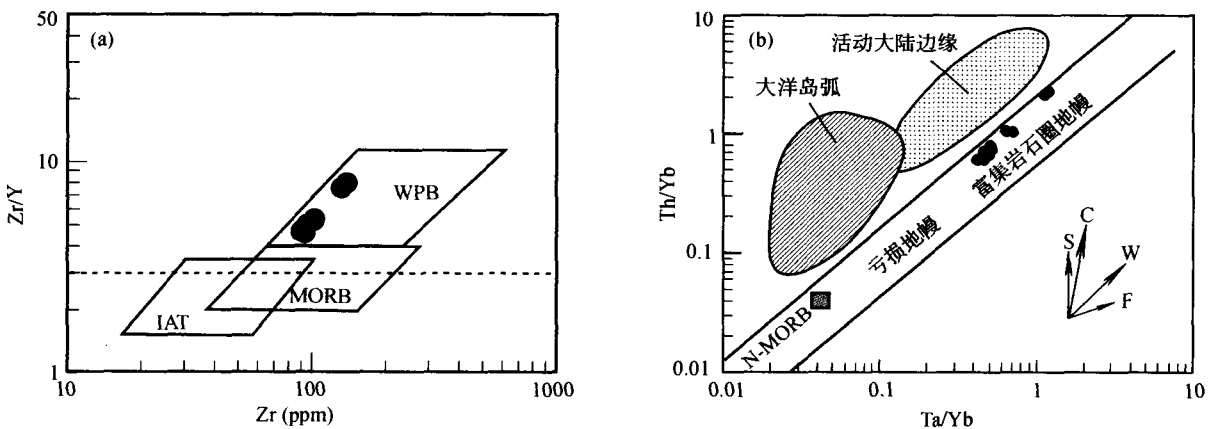


图 7 江汉盆地早第三纪玄武质岩石的 Zr/Y 对 Zr(a) 和 Ta/Yb 对 Th/Yb(b) 构造环境判别图解(其中 WPB 代表板内玄武岩, MORB 代表洋中脊玄武岩, IAT 代表火山弧玄武岩; W 代表板内富集趋势, C 代表大陆地壳趋势, F 代表分离结晶作用趋势, S 代表受俯冲组分影响趋势)

Fig. 7 Tectonic discrimination diagrams for the early Tertiary basaltic rocks in Jiangnan Basin(a,b)

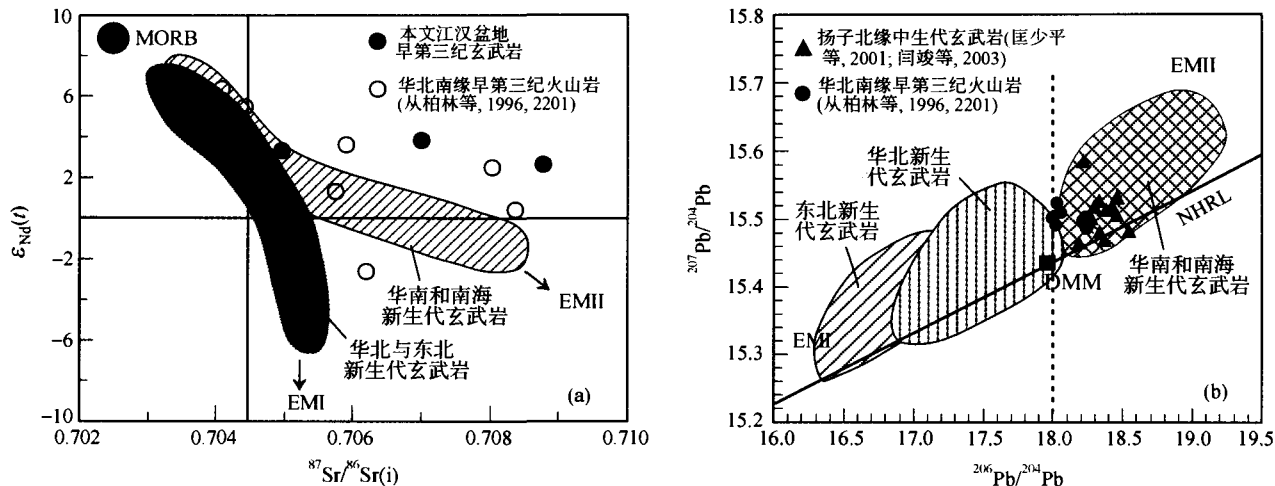


图 8 中国东部新生代玄武岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 对 $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$ (图 a) 和 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 对 $^{206}Pb/^{204}Pb$ (图 b) 图解 (其中华南和南海新生代玄武岩的数据引自 Tu *et al.*, 1991, 1992; Chung *et al.*, 1994, 1995, 1999; Zou *et al.*, 2000; Zhu *et al.*, 2004; 华北的数据引自 Peng *et al.*, 1986; Basu *et al.*, 1991; 沈渭洲等, 2002; 东北的数据引自 Peng *et al.*, 1986; Basu *et al.*, 1991; Zhang *et al.*, 1995; EM I, EM II 和 DMM 端元数据引自 Zindler and Hart, 1986)

Fig. 8 plots of $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$ (a) and $^{207}Pb/^{204}Pb$ vs. $^{206}Pb/^{204}Pb$ ratios (b) of Cenozoic basalts in the Eastern China

的继承性问题。虽然目前存在对华南内部中生代岩石圈地幔属性的不同的认识,即有人认为华南陆内中生代岩石圈地幔具有 EMII 型地幔的特征(李献华等, 1997; 赵振华等, 1998); 也有研究者认为华南陆内中生代岩石圈地幔具有 EM I + EM II 混合的特征(贾大成等, 2002; 匡少平等, 2001); 最近 Wang 等(2003)则认为以郴州-临武断裂为界, 华夏陆块中生代火山岩具有 OIB + EMII 混合趋势(彭头平等, 2004), 扬子陆块中生代火山岩具有 OIB + EM I 混合趋势的特征(范蔚若等, 2003); 而现有的大别南坡和长江中下游地区中生代基性火山岩 Pb 同位素的资料表明, 扬子陆块的北缘的岩石圈地幔主要显示以 $^{206}Pb/^{204}Pb > 18.0$ 为特征的 EMII 型地幔(图 8)(闫竣等, 2003)。从而说明扬子陆块的北缘江汉盆地新生代 EMII 型岩石圈地幔可能是其中生代岩石圈地幔属性的继承。其火山岩的成因与陆内的伸展作用有关, 是在岩石圈的伸展拉张构造背景下, 对流软流圈上涌导致岩石圈-软流圈相互作用, EMII 型岩石圈地幔部分熔融的结果。

6 结论

精确的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年代学结果 ($57.32 \pm 0.35Ma$) 表明江汉盆地玄武质岩石形成于早第三纪。其富集 LREE ($(La/Yb)_N = 3.5 \sim 10.4$) 和 LILE 以及无 Eu ($Eu/Eu^* = 0.99 \sim 1.08$) 负异常的特征, 表明其来源与富集岩石圈地幔关系密切; 在微量元素蛛网图上表现出 Nb-Ta 正异常, 具有与洋岛玄武岩(OIB)相似的地球化学特征, 表明其岩浆的形成可能与软流圈的上涌有关。微量元素比值特征以及在微

量元素蛛网图上表现出与华北陆块南缘来源于 EMII 型岩石圈地幔的早第三纪火山岩非常相似, 表明其岩浆系来源于 EMII 型岩石圈地幔的部分熔融。结合扬子陆块北缘长江中下游中生代玄武岩的研究资料, 表明扬子陆块北缘新生代的岩石圈属性是其中生代岩石圈属性的继承。这些玄武质岩石是大陆伸展构造背景作用下, 软流圈上涌导致岩石圈-软流圈相互作用, EMII 型富集岩石圈地幔大比例部分熔融的结果。这一研究也对江汉盆地早第三纪火山岩储层及含油层位的对比研究提供重要的信息。

References

Basu AR, Waang JW, Huang WK *et al.* 1991. Major element REE and Pb, Nd and Sr isotope geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of eastern China: Implication for their origin from suboceanic-type mantle reservoirs. *Earth and Planetary Science Letters*, 105:149 - 169

Cong BL, Wang QC, Zhang HZ, Yan X, Jiang LL. 1996. Petrogenesis of Cenozoic volcanic Rocks in Hefei Basin, China. *Acta Petrologica Sinica*, 12(3): 370 - 381 (in Chinese with English abstract)

Cong BL, Zhang RY, Li SG, Zhai MG, Wang SS, Chen CY and Akira Ishiwatari. 1992. Preliminary study of isotope chronology of eclogites in Northern Jiangsu and Eastern Shandong Provinces, China. *Papers for Professor Yukio Matsumoto*, 411 - 417

Chung SL, Sun SS, Tu K, Chen CH and Lee CY. 1994. Late Cenozoic basaltic volcanism around Taiwan Strait, SE China: Product of lithosphere-asthenosphere interaction during continental extension. *Chem. Geol.*, 112: 1 - 20

Chung SL, Jahn BM, Chen SJ, Lee T, Chen CH. 1995. Miocene basalts in northwestern Taiwan: Evidence for EM-type mantle source in the continental lithosphere. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 59(3): 549 - 555

- Chung SL. 1999. Trace element and isotope characteristics of Cenozoic basalts around the Tanlu Fault with implications for the eastern plate boundary between north and south China. *J. Geol.*, 107: 301–312
- Deniel C. 1998. Geochemical and isotopic (Sr, Nd, Pb) evidence for plum-lithosphere interactions in the genesis of Grande Comore magmas (Indian Ocean). *Chem. Geol.*, 144: 281–303
- Dostal J, Zhi X, Muchlenbachs K, Dupuy G, Zhai M. 1991. Geochemistry of Cenozoic alkali basaltic lavas from Shandong Province, eastern China. *Geochem. J.*, 25: 1–16
- Fan QC, Hooper PR. 1991. The Cenozoic basaltic rocks for eastern China: Petrology and chemical composition. *Jour of Petrology*, 32: 765–810
- Fan WM, Wang YJ, Guo F, Peng TP. 2003. Mesozoic mafic magmatism in Hunan-Jiangxi Provinces and the lithospheric extension. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 159–169 (in Chinese with English abstract)
- Floyd PA and Winchester JA. 1978. Identification and discrimination of altered and metamorphosed volcanic rocks using immobile elements. *Chemical Geology*, 21: 291–306
- Xu LX, Yan CD, Yu HL, Wang BQ, Yu FQ, Wang DF. 1995. Chronology of paleogene volcanic rocks in Jiangnan Basin. *Oil and Gas Geology*, 16(2): 132–137 (in Chinese with English abstract)
- Hawkesworth CJ, Rogers NW, van Calsteren PWC and Menzies MA. 1984. Mantle enrichment processes. *Nature*, 311(27): 331–335
- Hofmann AW. 1986. Nd in Hawaiian magmas: Constraints on source composition and evolution. *Chem. Geol.*, 57: 17–30
- Jia DC, Hu RZ, Lu Y, Xie GQ. 2002. Petrological and geochemical characteristics of sodium-rich lamprophyres in Jiaoxilin in northeastern Hunan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 459–467 (in Chinese with English abstract)
- Kuang SP, Zhang BR, Ling WL, Han YW. 2001. Mantle source of Late Cretaceous basalts in south Dabie orogenic belt, China. *Chinese Journal of Geology*, 36(2): 203–211 (in Chinese with English abstract)
- Li SG and Yang W. 2003. Decoupling of surface and subsurface sutures in the Dabie orogen and a continent-collisional lithospheric-wedging model: Sr-Nd-Pb isotopic evidences of Mesozoic igneous rocks in eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 48(8): 831–838 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Hu RZ, Rao B. 1997. Geochronology and geochemistry of Cretaceous mafic rocks from northern Guangdong Province, SE China. *Geochimica*, 26(2): 14–31 (in Chinese with English abstract)
- Liu CQ, Masuda A, Xie GH. 1994. Major- and trace-element compositions of Cenozoic basalts in eastern China: Petrogenesis and mantle source. *Chemical Geology*, 114: 19–42
- Liu Y, Liu HC, Li XH. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements using ICP-MS. *Geochimica*, 25(6): 552–558 (in Chinese with English abstract)
- Middlemost EAK. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth Sci. Rev.*, 37: 215–224
- Pearce JA. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth CJ, Norry MJ (eds.). *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Nantwich: Shiva Publishing. 158–185
- Peng ZC, Zartman RE, Futa K and Chen DG. 1986. Pb-, Sr- and Nd-isotopic systematics and chemical characteristics of Cenozoic basalts, eastern China. *Chem. Geol.*, 59: 3–33
- Peng TP, Wang YJ, Jiang ZM, Yu XB, Peng BX. 2004. ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology and geochemistry of Cretaceous basaltic rocks for the central and northwestern Jiangxi Province. *Geochimica*, 33(5): 447–458 (in Chinese with English abstract)
- Sang HQ, Wang SS, Qiu J. 1996. The ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of pyroxene, hornblende and plagioclase in Taipingzhai granulites in Qianxi County, Hebei Province and their geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 12(4): 390–400 (in Chinese with English abstract)
- Shen WZ, Zhao LZ, Zhao M, J, Kong QY, Cai YF. 2002. Study on the Lead isotopic compositions of Tertiary basalts in the Jiyang depressional basin, Shandong Province. *Acta Geologica Sinica*, 76(1): 33–38 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implication for mantle composition and processes. In: Saunder AD (Norry MJ (eds.)). *Magmatism in the ocean basins*. *Geol. Soc. Spec. Pub.*, 42: 313–345
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The continental crust: Its composition and evolution*. Blackwell, Oxford Press, 312
- Tu K, Flower MFJ, Carlson RW, Xie GH, Chen CY and Zhang M. 1992. Magmatism in the South China Basin: The isotopic and trace element evidence for an endogenous Dupal mantle component. *Chem. Geol.*, 97: 47–63
- Tu K, Flower MFJ, Carlson RW, Zhang M, Xie G. 1991. Sr, Nd and Pb isotopic compositions of Hainan basalts (South China): implications for a subcontinental lithosphere Dupal source. *Geology*, 19: 567–569
- Wang YJ, Fan WM, Guo F, Peng TP and Li CW. 2003. Geochemistry of Mesozoic rocks around Chenzhou-Linwu fault, South China: Implications for the lithospheric boundary between Yangtze and Cathaysia blocks. *International Geology Review*, 45: 263–286
- Wang YJ, Fan WM, Peng TP, Zhang HF, Guo F. 2005. Nature of the Mesozoic lithospheric mantle and tectonic decoupling beneath the Dabie Orogen, Central China: Evidence from ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of early Cretaceous mafic igneous rocks. *Chemical Geology*, 220: 165–189
- Weaver BL. 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, 104: 381–397
- Yan J, Chen JF, Yu G, Qian H, Zhou TX. 2003. Pb Isotopic Characteristics of Late Mesozoic Mafic Rocks from the Lower Yangtze Region: Enriched Mantle. *Geological Journal of China Universities*, 9(2): 195–206 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZL, Tao GY, Shen WZ, Wang LB, Yang XZ. 1998. Geochemistry and Source Characters of the Concealed Eocene basalts in North Jiangsu Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 14(3): 332–342 (in Chinese with English abstract)
- Zou HB, Zindler A, Xu XS, Qu Q. 2000. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: mantle sources, regional variations, and tectonic significance. *Chem. Geol.*, 171: 33–47
- Zhang M, Suddaby P, Thompson RN, Thirlwall MF, Menzies MA. 1995. Potassic volcanic rocks in NE China: geochemistry constraints on mantle source and magma genesis. *J. Petrol.*, 36: 1275–1303
- Zhao ZH, Bao ZW, Zhang BY. 1998. The geochemistry of Mesozoic basalts in south Hunan Province, South China. *Science in China (series D)*, 28 (suppl.): 7–14
- Zhu BQ, Wang HF, Chen YW, Chang XY, Hu YG, Xie J. 2004. Geochronological and geochemical constraint on the Cenozoic extension of Cathaysian lithosphere and tectonic evolution of the border sea basin in East Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 163–175

附中文参考文献

- 丛柏林, 王清晨, 张海政, 阎欣, 江来利. 1996. 中国合肥盆地新生代火山岩成因岩石学研究. *岩石学报*, 12(3): 370–381
- 丛柏林, 郭敬辉, 刘文军. 2001. 一个残留的地幔楔: 来自华北早第三纪火山岩的证据. *科学通报*, 46(21): 1825–1830

- 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. 地学前缘, 2003, 10(3): 159-169
- 贾大成, 胡瑞忠, 卢焱, 谢桂青. 2002. 湘东北蕉溪岭富钠煌斑岩地球化学特征. 岩石学报, 18(4): 459-467
- 匡少平, 张本仁, 凌文黎, 韩吟文. 2001. 大别造山带南坡晚白垩世玄武岩源区地幔特征. 地质科学, 36(2): 203-211
- 李曙光, 杨蔚. 2002. 大别造山带深部地缝合线与地表地缝合线的解耦及大陆碰撞岩石圈楔入模型: 中生代幔源岩浆岩 Sr-Nd-Pb 同位素证据. 科学通报, 47(24): 1998-1905
- 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 1997. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学. 地球化学, 26(2): 14-31
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. 地球化学, 25(6): 552-558
- 彭头平, 王岳军, 江志敏, 喻晓冰, 彭冰霞. 2004. 江西中西部地区白垩纪玄武质岩石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学和地球化学研究. 地球化学, 33(5): 447-458
- 桑海清, 王松山, 裘冀. 1996. 冀东太平寨麻粒岩中的辉石、角闪石、斜长石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义. 岩石学报, 12(4): 390-400
- 沈渭洲, 赵连泽, 赵明, 孔庆友, 蔡元峰. 2002. 山东济阳拗陷第三纪玄武岩的铅同位素研究. 地质学报, 76(1): 33-38
- 徐论勋, 阎春德, 俞惠隆, 王宝清. 1995. 江汉盆地下第三纪火山岩年代. 石油与天然气地质, 16(2): 132-137
- 闫峻, 陈江峰, 喻钢, 钱卉, 周泰禧. 2003. 长江中下游中生代中基性岩的铅同位素特征: 富集地幔的证据. 高校地质学报, 9(2): 195-206
- 杨祝良, 陶奎元, 沈渭洲, 王力波, 杨献忠. 1998. 苏北盆地隐伏早第三纪玄武岩地球化学及源区特征. 岩石学报, 14(3): 332-342
- 赵振华, 包志伟, 张伯友. 1998. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征. 中国科学(D辑), 28(增刊): 7-14