

江绍断裂带晚中生代镁铁质火山岩成因及其深部过程意义*

秦社彩 范蔚茗 郭锋**

QIN SheCai, FAN WeiMing and GUO Feng**

中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2018-01-01 收稿, 2018-12-28 改回.

Qin SC, Fan WM and Guo F. 2019. Petrogenesis and geodynamic implications of Late Mesozoic mafic volcanic rocks along the Jiangshan-Shaoxing fault in SE China. *Acta Petrologica Sinica*, 35(6):1892–1906, doi:10.18654/1000-0569/2019.06.16

Abstract This paper presents Ar-Ar ages, major & trace element and Sr-Nd isotopic compositions of the mafic volcanic rocks from the Jiangshan and Pujiang regions along the Jiangshan-Shaoxing fault in SE China, with aims to understand their petrogenesis and geodynamic processes. Ar-Ar dating results show that the Jiangshan basalts erupted at ca. 99Ma during Late Cretaceous, while the Pujiang mafic lavas (include basalts and basaltic andesites) erupted at ca. 111 ~ 112Ma, corresponding to Early Cretaceous. The basaltic lavas from both localities show medium-K calc-alkaline affinities and can be further subdivided into three groups on the basis of geochemical variations. Group 1 is the Jiangshan basalt with similar geochemical compositions to oceanic island basalt (OIB), characterized by negligible Nb-Ta anomalies and no negative Pb anomalies and the highest $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (+4.4 ~ +5.8) and lowest $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.7049 ~ 0.7050). Group 2 is the Ti- and P-rich basalt from Pujiang, featured by weakly negative Nb-Ta anomalies and strongly positive Pb anomalies, and moderately radiogenic Nd ($\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = +1.5 \sim +2.1$) and Sr ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7062 \sim 0.7067$) isotopic compositions. Group 3 is the Ti- and P-poor basaltic andesite from Pujiang, showing strongly negative Nb-Ta anomalies and positive Pb anomalies, and the lowest $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-6.0 ~ -3.7) and highest $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.7083 ~ 0.7086). The geochemical variations can be interpreted through neither magmatic differentiation nor crustal contamination or assimilation via fractional crystallization. The comparisons of La/Nb, Ba/Nb and Zr/Ba and further Sr-Nd isotopic modelling results of the three groups suggest their derivation from a hybrid source through different proportional mixing of an enriched lithospheric mantle and convective asthenosphere. From 111 ~ 112Ma to 99Ma, the contribution of the enriched mantle component has been decreased with the increasing involvement of the asthenosphere, consistent with reinforced degree of lithospheric extension. In combination with the basin-range tectonic framework in SE China and similar petrogenesis of the contemporaneous basalts from the adjacent regions such as in the area along the Chenzhou-Linwu Fault, it is reasonable to conclude that the SE China experienced an extensive lithospheric extension-thinning during the early to late Cretaceous time.

Key words Lithosphere-asthenosphere interaction; Geochemistry; Mafic volcanic lavas; Late Mesozoic; The Jiangshan-Shaoxing fault

摘要 本文对沿江绍断裂带的江山和浦江两地区中生代镁铁质火山岩进行了 Ar-Ar 年代学、岩石学和元素-同位素地球化学研究。Ar-Ar 年代学结果显示,江山玄武岩的形成年龄约为 99Ma,为晚白垩世喷发产物;浦江玄武岩和玄武质安山岩的喷发时间为 111 ~ 112Ma,属于早白垩世。两区中生代镁铁质火山岩都为中钾钙碱性系列,根据其地球化学指标可划分为三组:第 1 组为江山 OIB 型玄武岩,在微量元素组成上无 Nb-Ta 亏损和 Pb 负异常,高 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和低 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比值,总体上显示出类似洋岛玄武岩的元素-同位素组成特征;第 2 组为高钛磷玄武岩,Nb-Ta 弱负异常和明显 Pb 正异常,中等 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比值;第 3 组为低钛磷玄武岩,强烈 Nb-Ta 负异常和中等 Pb 正异常,低 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-6.0 ~ -3.7) 和高 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为特征。三组

* 本文受国家自然科学基金杰出青年基金项目(41525006)和联合基金项目(U1701461)及广东省特支计划项目(2015TX01Z219)联合资助。

第一作者简介:秦社彩,女,1965年生,博士,岩石学专业,E-mail: pusqsc@mail.sysu.edu.cn

** 通讯作者:郭锋,男,1971年,研究员,博士生导师,主要从事岩石学与大地构造学研究,E-mail: guofeng@263.net

镁铁质火山岩相互之间缺乏分异演化关系,也不是同一母岩浆经历地壳混染作用的结果。对比三组镁铁质火山岩的 La/Nb 、 Ba/Nb 、 Zr/Ba 比值和 $Sr-Nd$ 同位素模拟结果,我们认为江绍断裂带晚中生代玄武岩为软流圈-岩石圈相互作用的产物,从早期(111~112Ma)到晚期(99Ma)镁铁质岩浆地幔源区软流圈组分的比例越来越多而岩石圈成份逐渐减少的趋势。考虑到该区晚中生代的盆岭构造格局与邻区郴州-临武断裂带同时期镁铁质岩浆的产出特点,华南地区在早白垩世晚期到晚白垩世期间发生了强烈的岩石圈伸展-减薄作用。

关键词 软流圈-岩石圈相互作用;地球化学;镁铁质火山岩;晚中生代;江绍断裂带

中图法分类号 P588.145;P597.3

中国东南沿海地区广泛发育以酸性岩为主(基性-中基性仅5%)的中生代火山岩(图1),主要沿海岸线呈近NE向的带状分布(浙江省地质矿产局,1996;福建省地质矿产局,1997)。有研究者(周新民和李武显,2000;Zhou and Li,2000;Guo *et al.*,2012)认为从内陆至浙闽沿海方向火山岩的量越来越多,时代也略显逐渐变新的趋势。但对华南内部包括江西、湖南、广西等地区的中生代火山岩及相关侵入岩的年代学和岩石地球化学研究显示,中生代岩浆活动从中三叠世(243Ma,Wang *et al.*,2007)一直持续到晚白垩世(约88Ma,Chen *et al.*,2014),并未显示出时间上的变化规律(Wang *et al.*,2005,2007;Chen *et al.*,2014;陈卫锋等,2005;郭新生等,2001;李献华等,1999;范蔚茗等,2003)。自20世纪80年代以来,华南地区中生代火山岩一直是我国地质学特别是岩石学领域的研究热点,主要得出3种成因观点:(1)扭断层系活动导致地壳重熔形成大量的中生代长英质岩浆(Xu *et al.*,1987,1993),这一观点显然与大面积火山岩分布的地质事实不符;(2)活动大陆边缘观点,认为古太平洋板块俯冲作用导致广泛的俯冲带地幔楔和地壳广泛熔

融(周新民和李武显,2000;Zhou and Li,2000;Lapierre *et al.*,1997;Zhou *et al.*,2006;王德滋和周新民,2002;Zhang *et al.*,2019)。但俯冲代表的挤压动力背景,难以解释同时期该地区一系列反映拉张背景的白垩纪红盆,也难以解释火山岩带近千米的宽度;(3)认为中生代火山岩带是岩石圈伸展背景下软流圈-岩石圈相互作用的产物,该观点基于晚中生代华南地区与美国盆岭省在构造格局和岩浆作用等方面具有可比性,认为岩石圈伸展背景下,软流圈上涌导致的岩石圈地幔熔融以及玄武岩浆底侵导致的地壳熔融是导致华南地区强烈火山活动的重要机制,但对于导致的岩石圈伸展的地球动力学背景仍不清楚(Wang *et al.*,2003,2005,2007;范蔚茗等,2003;Li,2000)。大陆镁铁质岩石是理解深部岩石圈化学性质和演化的重要探针,其成因受控于岩浆源区性质、岩浆演化过程和动力学环境。鉴于多年来对东南沿海地区中生代火山岩成因的争论,有必要对该地区火山岩带中的基性-中基性岩进行系统研究。

华南大陆由扬子古陆块和华夏古陆块在新元古代(0.9~0.82Ga)碰撞拼贴而成(李献华,1999),两陆块具有不同

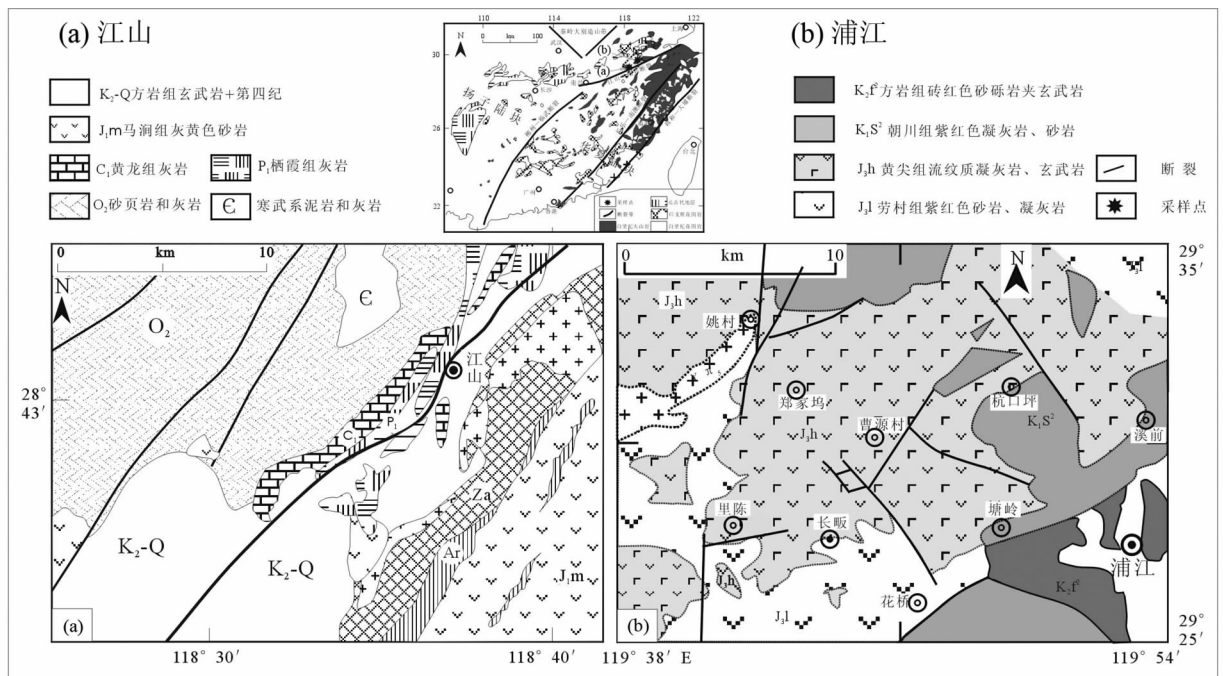


图1 浙江江山-浦江研究区地质图

Fig.1 A simplified geological map for Late Mesozoic volcanic mafic rocks at the Jiangshan and Pujiang regions, Zhejiang Province

的地质演化历史和基底地层结构,并具有陆下岩石圈地幔组成及性质的差异性。NE走向的江绍断裂带被认为是浙江境内分隔扬子与华夏两陆块的深大断裂(李献华, 1999; 水涛等, 1986)。其中浙西北属扬子地块,基底为中元古代平水群细碧-斑岩系及双溪坞群陆相钙碱性火山岩和火山碎屑沉积岩,其上覆盖南华系-三叠系海相沉积岩及白垩系火山-沉积岩系地层;浙东南属华夏地块,基底为古元古代八都群及中元古代陈蔡群,主要岩性为片岩、变粒岩、片麻岩,被巨厚的白垩系火山-沉积岩系覆盖(浙江省地质矿产局, 1996; 颜铁增等, 2005)。

本文选择沿江绍断裂带的江山和浦江两个地区喷发的镁铁质火山岩,开展岩石学、Ar-Ar年代学、主微量元素及Sr-Nd同位素地球化学研究,通过对比分隔扬子与华夏陆块的郴州-临武断裂区域的早白垩世和晚白垩世基性火山岩(Wang *et al.*, 2003)和广丰盆地晚中生代基性岩(余心起等, 2004),试图揭示两陆块交接带的江绍断裂带区域晚中生代时期镁铁质岩浆的源区性质、岩浆演化过程及深部地幔动力学环境。

1 样品与分析方法

1.1 样品采集与岩石学特征

本文研究的镁铁质火山岩样品,一部分采自江山县城西南约17km的新塘边镇坛石-吴村镇剖面(图1a),属于方岩组地层的8个样品(样品编号为03JSH-n)。剖面中见江山玄武岩被第四纪稻黄色土壤覆盖,地表见球状风化的玄武岩球体。玄武岩岩石呈黑色,致密坚硬,斑状结构,块状构造。斑晶为橄榄石(10%)、辉石(15%)和斜长石(30%);基质主要为隐晶质间粒结构,主要矿物为斜长石、单斜辉石、斜方辉石和橄榄石,橄榄石已部分伊丁石化。少量不透明矿物钛铁矿3%~5%。局部见绿泥石化和碳酸盐化。

另一部分样品采自浦江县境内,其中有3个样品(样品编号03PJ-03, 16, 19)采自县城以西10~25km的花桥-长畈剖面,另外11个样品(样品编号03PJ-n)采自长畈-里陈剖面(图1b)。前者位于下部火山岩层,后者位于上部火山岩层。在1971年出版的浙江省地质图(1:20万)及其后出版的地质图中,均被划为黄尖组地层(J_3h)。岩石呈灰绿色-灰黑色,斑状结构,斑晶约5%~15%不等,主要为斜长石、辉石;基质为间隐或间粒结构;致密块状,部分含有方解石杏仁体。

1.2 分析方法

分析前先将岩石手工碎至 $<1\sim 2\text{cm}$,在此过程中避免铁器等物的污染,将岩石碎粒用1%的稀盐酸浸泡、超声波振荡之后用去离子水清洗、风干,在放大镜下挑选出新鲜的岩石碎粒。

(1)对于拟测定Ar-Ar全岩年龄的样品进一步碎至40~

60目,并在显微镜下剔除斑晶及任何可能的风化蚀变部分,只留下火山岩基质部分。样品测试在中国科学院地质与地球物理所 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 实验室完成,采用常规加热方法在MM5400质谱仪上测试,云母校样GA-1550的参考年龄为 98.79 ± 0.96 (Renne *et al.*, 1998),测定结果经仪器质量歧视校正、放射性衰变校正和Ca、K同位素反应校正,得到Ca、K同位素反应校正参数: $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 2.6088 \times 10^{-4} \pm 1.1418 \times 10^{-5}$, $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 7.236 \times 10^{-4} \pm 2.814 \times 10^{-5}$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 2.648 \times 10^{-2} \pm 2.254 \times 10^{-4}$,具体分析流程见文献(王非等, 2004)。3个样品的Ar-Ar年龄分析数据见表1。

(2)对于进行同位素及岩石化学成分分析的样品,进一步用刚玉鄂式破碎机粉碎到20目以下,留出一份副样后,再用玛瑙球磨滚筒机研磨,过180目筛之后,供元素和同位素分析。主量元素在湖北省地质实验研究所用XRF法测定,其中 Fe^{2+} 由湿化学法分析;分析误差总体小于1%, K_2O 、 Na_2O 为2%~4%。微量元素在中国科学院广州地球化学研究所用ICP-MS法测定,具体方法与过程见文献(刘颖等, 1996),微量元素的分析精度总体好于5%; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值在中国科学院广州地球化学研究所的MC-ICP-MS质谱仪上测定,Sr和Nd同位素比值分别用 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.1194$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行标准化,分析误差用 2σ 给出。其中BCR1标准样品 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512626 \pm 9$ ($n = 12$),NBS987多次测定平均值为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710265 \pm 12$ ($n = 9$)。主、微量元素及同位素测定结果见表2和表3。

2 Ar-Ar 年龄

对1个江山样品03JSH-12和2个浦江样品(03PJ-13和03PJ-41)开展了Ar-Ar全岩年龄测试,样品的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱和反等时线图见图2和表1。由图2可以看出,江山玄武岩的年龄坪占 ^{39}Ar 释放量超过95%,坪年龄 $98.61 \pm 1.01\text{Ma}$ 和反等时线截距年龄 $98.84 \pm 1.02\text{Ma}$ 一致,而且初始 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 同位素组成为 290.1 ± 1.7 ,与大气值一致,所以江山玄武岩的喷发年龄约为99Ma。与文献报道的K-Ar年龄(98~105Ma)大体相似(余心起等, 2004; 王勇等, 2002)。

样品号03PJ-41来自浦江,其年龄坪虽然只占 ^{39}Ar 释放量70%,坪年龄 $110.91 \pm 1.20\text{Ma}$ 和反等时线截距年龄 $110.89 \pm 2.49\text{Ma}$ 一致,其高温释气阶段的年龄值与坪年龄差别不大,有可能是斑晶(如斜长石)的微量元素引起的。初始 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 同位素组成为 296.1 ± 15 ,与大气值一致,因此,该类岩石的喷发年龄约为111Ma。样品号03PJ-13也采自浦江,其年龄坪只占 ^{39}Ar 释放量70%,但高温阶段的年龄值与之差别很小。坪年龄 $112.27 \pm 1.14\text{Ma}$,与其反等时线截距年龄 $112.71 \pm 1.32\text{Ma}$ 一致。其初始 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 同位素组成为 280.8 ± 8 ,在误差范围内与大气值(295.5)基本一致。反等时线年龄基本代表镁铁质岩的喷发年龄,为 $112.71 \pm 1.32\text{Ma}$ 。

表1 江山、浦江镁铁质火山岩 Ar-Ar 测年结果

Table 1 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating results of Late Mesozoic mafic rocks by incremental heating from the Jiangshan and Pujiang regions, Zhejiang Province

温度(°C)	^{36}Ar (a)	^{37}Ar (ca)	^{38}Ar (cl)	^{39}Ar (k)	^{40}Ar (r)	Age $\pm 2\sigma$ (Ma)	^{40}Ar (r) (%)	^{39}Ar (k) (%)	K/Ca $\pm 2\sigma$		
03JSH-12, 全岩, 坪年龄 = 98.61 \pm 1.01 Ma, J-value = 0.00522, Total fusion age = 98.51 \pm 1.00 Ma											
700	0.00000	0.00000	0.00000	0.00010	0.00078	75.71	± 55.74	40.46	0.06	0.000	± 0.000
780	0.00003	0.00237	0.00000	0.00091	0.01013	102.09	± 8.74	56.53	0.60	0.215	± 0.046
860	0.00029	0.01795	0.00000	0.00439	0.04694	97.98	± 4.10	35.64	2.88	0.137	± 0.018
900	0.00021	0.01871	0.00000	0.00678	0.07170	96.89	± 2.16	53.39	4.45	0.204	± 0.027
950	0.00022	0.03018	0.00000	0.01560	0.16637	97.76	± 0.93	72.25	10.22	0.290	± 0.037
1000	0.00017	0.04616	0.00000	0.02725	0.29277	98.43	± 0.62	85.11	17.86	0.332	± 0.042
1050	0.00005	0.03300	0.00000	0.01803	0.19425	98.71	± 0.64	93.47	11.82	0.307	± 0.040
1080	0.00005	0.04069	0.00000	0.01782	0.19263	99.04	± 0.67	93.45	11.68	0.246	± 0.031
1120	0.00004	0.03817	0.00000	0.01622	0.17452	98.60	± 0.76	93.40	10.63	0.239	± 0.030
1170	0.00004	0.04821	0.00000	0.01428	0.15422	98.92	± 0.78	93.52	9.36	0.166	± 0.021
1220	0.00004	0.05305	0.00000	0.01400	0.15001	98.22	± 0.77	92.57	9.17	0.148	± 0.019
1300	0.00002	0.07972	0.00000	0.00844	0.09064	98.39	± 1.16	94.13	5.53	0.059	± 0.007
1400	0.00002	0.08012	0.00000	0.00879	0.09576	99.80	± 1.13	93.98	5.76	0.062	± 0.008
03PJ-13, 全岩, 坪年龄 = 112.27 \pm 1.14 Ma, J-value = 0.005189, Total fusion age = 111.06 \pm 1.10 Ma											
700	0.00005	0.00192	0.00000	0.00130	0.00986	69.72	± 4.20	38.94	0.36	0.381	± 0.117
780	0.00015	0.02007	0.00001	0.00824	0.08147	90.30	± 1.64	64.56	2.26	0.231	± 0.030
840	0.00023	0.09488	0.00000	0.03418	0.42183	111.98	± 0.77	86.06	9.40	0.202	± 0.025
900	0.00017	0.07185	0.00000	0.03045	0.37280	111.12	± 1.03	87.85	8.37	0.238	± 0.030
950	0.00006	0.02613	0.00000	0.03412	0.42178	112.16	± 0.60	95.74	9.38	0.734	± 0.101
1000	0.00008	0.02050	0.00000	0.03261	0.40390	112.37	± 0.58	94.34	8.97	0.894	± 0.113
1050	0.00020	0.04875	0.00000	0.06685	0.83002	112.64	± 0.56	93.20	18.38	0.770	± 0.097
1080	0.00016	0.03878	0.00000	0.05072	0.62837	112.40	± 0.57	92.81	13.95	0.735	± 0.093
1120	0.00014	0.05640	0.00000	0.04020	0.48884	110.38	± 0.62	92.34	11.05	0.400	± 0.051
1160	0.00011	0.04298	0.00001	0.02909	0.35258	110.04	± 0.74	91.87	8.00	0.380	± 0.048
1220	0.00009	0.04618	0.00001	0.01618	0.19779	110.98	± 0.90	88.47	4.45	0.197	± 0.025
1300	0.00005	0.02900	0.00000	0.01015	0.12384	110.77	± 1.06	89.58	2.79	0.197	± 0.026
1400	0.00005	0.02912	0.00001	0.00962	0.11722	110.61	± 1.53	88.88	2.64	0.186	± 0.024
03PJ-41, 全岩, 坪年龄 = 110.27 \pm 1.2 Ma, J-value = 0.005186, Total fusion age = 109.35 \pm 1.09 Ma											
700	0.00035	0.00035	0.00000	0.00087	0.00649	68.42	± 22.77	5.83	0.46	1.381	± 1.837
780	0.00014	0.00976	0.00001	0.00396	0.03496	80.94	± 3.03	45.96	2.10	0.228	± 0.031
900	0.00017	0.04650	0.00000	0.01782	0.21747	110.92	± 0.81	81.57	9.44	0.215	± 0.027
950	0.00012	0.02962	0.00000	0.02441	0.29881	111.23	± 0.66	89.06	12.94	0.463	± 0.060
1000	0.00012	0.01879	0.00000	0.02610	0.32035	111.53	± 0.64	90.35	13.83	0.780	± 0.098
1040	0.00014	0.02022	0.00000	0.02865	0.34965	110.92	± 0.65	89.20	15.18	0.796	± 0.105
1080	0.00012	0.01930	0.00000	0.02466	0.29840	110.01	± 0.62	89.74	13.07	0.718	± 0.101
1110	0.00008	0.02226	0.00000	0.01782	0.21440	109.38	± 0.65	89.82	9.45	0.450	± 0.057
1140	0.00005	0.01885	0.00000	0.01027	0.12283	108.74	± 1.11	88.92	5.44	0.306	± 0.040
1180	0.00006	0.02246	0.00000	0.01106	0.13089	107.69	± 1.13	88.75	5.86	0.277	± 0.036
1220	0.00002	0.01298	0.00000	0.00541	0.06514	109.42	± 1.55	90.72	2.87	0.234	± 0.030
1300	0.00003	0.01551	0.00000	0.00649	0.07758	108.68	± 1.12	89.29	3.44	0.235	± 0.032
1400	0.00006	0.01951	0.00000	0.01115	0.13202	107.71	± 0.86	87.68	5.91	0.321	± 0.041

表 2 江山、浦江镁铁质火山岩主量(wt%)、微量($\times 10^{-6}$)元素化学组成Table 2 Major element (wt%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) composition of Late Mesozoic mafic rocks from the Jiashan and Pujiang regions, Zhejiang Province

样品号	第 3 组浦江低钛磷玄武岩																					
	03JSH	03JSH	03JSH	03JSH	03JSH	03JSH	03JSH	03JSH	03PJ	03PJ	03PJ	03PJ	03PJ	03PJ	03PJ	03PJ	03PJ	03PJ	03PJ	03PJ		
SiO ₂	47.54	48.78	47.29	46.83	46.87	48.33	47.03	47.72	45.03	44.34	45.69	52.61	52.49	52.39	55.68	56.27	52.84	52.21	51.00	49.38	52.78	53.70
TiO ₂	1.88	1.81	1.98	1.86	1.98	1.91	1.87	1.96	2.87	2.76	2.96	1.16	1.13	1.16	1.00	1.03	1.13	1.11	1.20	1.11	1.07	1.11
Al ₂ O ₃	16.37	16.14	16.41	16.38	16.64	16.15	16.69	16.36	14.67	14.58	14.09	16.52	16.43	16.38	17.56	17.87	16.25	16.19	16.65	16.36	16.13	16.30
Fe ₂ O ₃	7.03	5.24	7.77	6.78	6.19	5.67	6.11	5.42	6.73	5.85	6.98	3.76	4.67	4.27	4.00	2.79	3.46	2.98	3.93	2.96	4.83	4.72
FeO	5.35	6.70	4.65	5.25	6.15	6.40	6.20	6.90	7.50	8.45	7.35	4.20	4.20	4.70	2.90	3.40	5.20	5.75	5.65	5.75	4.25	3.65
MnO	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.17	0.17	0.18	0.22	0.24	0.23	0.15	0.15	0.15	0.13	0.11	0.14	0.15	0.14	0.16	0.15	0.15
CaO	9.17	9.05	9.38	9.23	9.27	9.13	9.24	9.15	8.90	8.83	8.44	8.90	9.36	9.35	7.43	7.22	8.32	8.41	5.10	9.23	7.88	7.41
MgO	5.81	5.80	5.43	5.90	6.07	5.77	5.96	5.93	5.28	5.52	4.55	2.80	3.58	3.56	1.65	1.84	3.64	3.60	3.88	3.42	3.49	3.16
Na ₂ O	2.70	2.65	2.84	2.57	2.68	2.70	2.75	2.89	1.58	1.45	1.59	1.61	1.64	1.71	2.57	2.95	1.54	1.49	1.88	1.78	2.18	1.95
K ₂ O	0.92	0.89	0.96	0.87	0.92	0.95	0.96	0.96	0.70	0.75	1.19	2.26	1.73	1.89	2.28	2.08	1.31	1.57	2.52	0.96	1.89	1.87
P ₂ O ₅	0.28	0.28	0.28	0.27	0.28	0.27	0.29	0.30	0.72	0.73	0.90	0.30	0.29	0.30	0.35	0.35	0.30	0.30	0.32	0.32	0.30	0.30
H ₂ O ⁺	2.19	2.00	1.83	2.51	2.31	2.00	2.22	1.89	3.88	4.23	3.55	2.22	2.28	2.18	2.16	2.38	3.08	3.01	4.68	3.75	2.58	3.03
CO ₂	0.37	0.29	0.79	1.16	0.21	0.30	0.25	0.14	1.70	2.04	2.21	3.23	1.79	1.70	2.04	1.44	2.55	2.98	2.80	4.59	2.21	2.38
Los	2.56	2.29	2.62	3.67	2.52	2.30	2.47	2.03	5.58	6.27	5.76	5.45	4.07	3.88	4.20	3.82	5.63	5.99	7.48	8.34	4.79	5.41
Total	99.78	99.8	99.78	99.78	99.75	99.75	99.74	99.8	99.78	99.77	99.73	99.72	99.74	99.74	99.75	99.73	99.76	99.75	99.75	99.77	99.74	99.73
Mg [#]	0.47	0.48	0.46	0.48	0.48	0.47	0.48	0.48	0.41	0.42	0.38	0.40	0.43	0.43	0.31	0.36	0.44	0.43	0.43	0.42	0.42	0.42
Sc	25.04	26.16	26.61	26.48	26.68	26.41	25.12	27.27	27.81	27.83	34.05	26.5	26.63	28.62	16.52	17.28	25.22	25.9	27.49	25.52	24.63	25.07
V	224.9	224.1	236.2	236.9	234	229.6	217.5	231.7	425.4	262.7	271	202.2	209.3	212.6	119.4	115.4	197.4	197.2	210.6	203.3	189.2	201.8
Co	35.96	36.79	35.59	59.80	42.68	34.97	34.45	35.99	34.45	35.89	33.50	17.87	19.63	24.81	12.38	11.22	21.12	20.99	21.70	20.04	20.18	15.99
Ni	57.55	59.76	53.34	55.78	57.10	53.14	52.08	54.50	56.70	61.69	45.81	14.55	14.94	16.19	10.65	6.91	16.69	15.29	14.56	18.89	15.05	11.20
Ga	18.01	18.39	18.87	18.65	18.60	18.07	17.79	18.71	19.37	20.22	20.51	19.28	18.76	19.12	19.60	19.49	18.76	18.76	18.55	18.38	18.83	17.74
Rb	15.85	15.91	18.09	16.02	16.23	16.92	16.57	17.13	11.41	15.25	23.14	57.73	33.04	34.36	68.61	56.05	46.06	64.22	78.21	30.45	37.09	36.89
Sr	513.0	519.5	554.8	527.2	520.0	528.1	527.9	527.9	540.5	517.2	637.7	600.3	624.4	645.6	690.7	799.8	589.2	566.9	473.8	590.2	665.3	574.0

第 3 组浦江低钛磷玄武岩

第 2 组浦江高钛磷玄武岩

第 1 组江山玄武岩

续表 2

Continued Table 2

样品号	第 1 组江山玄武岩										第 2 组浦江高钛磷玄武岩										第 3 组浦江低钛磷玄武岩									
	03JSH -01	03JSH -03	03JSH -05	03JSH -06	03JSH -10	03JSH -11	03JSH -12	03JSH -14	03JSH -03	03JSH -16	03JSH -19	03PJ -14	03PJ -15	03PJ -17	03PJ -21	03PJ -22	03PJ -24	03PJ -25	03PJ -27	03PJ -39	03PJ -41	03PJ -42								
Y	22.18	22.21	22.82	21.41	22.02	23.04	22.26	24.18	40.41	31.80	38.54	30.68	25.91	26.84	34.05	29.88	25.94	25.93	26.68	25.50	25.41	26.23								
Zr	123.2	125.4	138.1	119.9	125.8	131.6	126.1	135.4	188.2	196.5	241.6	153.3	148.5	173.5	208.1	212.5	178.0	158.6	155.3	172.1	163.6	161.5								
Nb	14.88	14.80	15.79	14.40	14.81	15.67	15.04	16.29	15.57	15.74	18.68	10.27	9.91	10.23	13.27	13.26	10.37	10.45	10.42	10.13	10.13	8.63								
Ba	268.2	263.5	325.7	275.8	283.3	285.1	281.9	290.4	345.4	373.7	684.2	810.1	680.8	701.1	804.1	1007	704.1	783.4	772.0	527.8	798.6	741.0								
Hf	3.05	2.98	3.34	3.17	3.35	3.42	3.30	3.54	4.75	4.96	6.07	4.34	4.29	4.46	5.34	5.49	4.36	4.24	4.04	4.33	4.29	4.12								
Ta	0.80	0.79	0.85	0.79	0.86	0.88	0.85	0.93	0.85	0.88	1.05	0.54	0.52	0.52	0.67	0.67	0.54	0.52	0.52	0.52	0.54	0.50								
Th	1.81	1.72	1.99	1.82	1.90	2.02	1.93	2.10	1.09	1.11	1.35	3.26	3.05	3.02	4.49	4.72	3.02	3.11	2.99	3.08	3.11	3.03								
U	0.45	0.54	0.53	0.39	0.48	0.52	0.54	0.50	0.32	0.32	0.37	0.68	0.63	0.63	0.87	0.91	0.65	0.64	0.62	0.63	0.60	0.66								
La	14.94	14.64	15.88	14.57	14.84	15.90	15.41	16.39	23.64	23.95	29.21	24.39	24.00	24.27	32.08	32.64	24.83	25.01	24.97	23.76	24.81	22.61								
Ce	33.18	32.27	34.67	32.49	32.32	35.44	33.91	36.73	54.86	56.23	69.94	53.11	52.13	52.41	76.92	67.97	52.53	52.53	53.84	51.87	53.25	47.64								
Pr	4.23	4.12	4.42	4.20	4.24	4.60	4.38	4.70	7.49	7.66	9.63	6.53	6.48	6.51	8.20	8.34	6.61	6.56	6.86	6.44	6.63	6.27								
Nd	18.05	17.83	18.61	17.90	18.36	19.28	18.98	19.77	32.88	33.30	41.62	26.70	26.45	26.27	31.73	33.07	26.66	26.09	27.51	25.78	26.21	25.33								
Sm	4.34	4.36	4.53	4.37	4.43	4.70	4.48	5.04	7.26	7.61	9.40	5.77	5.50	5.76	6.58	6.81	5.71	5.57	5.77	5.47	5.64	5.48								
Eu	1.59	1.60	1.66	1.56	1.66	1.65	1.61	1.75	2.66	2.84	3.22	1.40	1.67	1.62	1.73	1.81	1.56	1.55	1.32	1.36	1.52	1.35								
Gd	4.81	5.09	5.09	5.01	5.09	5.27	5.06	5.41	7.39	7.75	9.50	5.97	5.77	5.79	6.34	6.49	5.75	5.74	5.74	5.61	5.62	5.67								
Tb	0.75	0.75	0.77	0.73	0.77	0.78	0.75	0.82	1.10	1.17	1.42	0.88	0.87	0.87	0.95	0.99	0.85	0.86	0.87	0.86	0.87	0.83								
Dy	4.21	4.30	4.45	4.34	4.56	4.61	4.47	4.79	6.10	6.45	7.96	5.11	5.16	5.22	5.56	5.90	5.01	5.00	5.20	4.96	5.06	4.88								
Ho	0.85	0.88	0.89	0.87	0.88	0.90	0.88	0.94	1.20	1.28	1.53	1.06	1.04	1.06	1.15	1.19	1.01	1.02	1.08	1.03	0.98	0.98								
Er	2.28	2.20	2.35	2.23	2.30	2.44	2.34	2.57	3.18	3.40	4.09	2.90	2.83	2.91	3.19	3.28	2.76	2.73	2.88	2.82	2.82	2.66								
Tm	0.33	0.32	0.34	0.33	0.35	0.36	0.35	0.36	0.46	0.48	0.59	0.44	0.43	0.44	0.48	0.49	0.41	0.43	0.42	0.42	0.42	0.40								
Yb	2.04	2.02	2.17	2.14	2.23	2.22	2.21	2.39	2.97	3.01	3.72	2.89	2.92	3.00	3.15	3.28	2.86	2.80	2.95	2.80	2.76	2.65								
Lu	0.31	0.33	0.34	0.32	0.35	0.36	0.34	0.37	0.45	0.48	0.59	0.47	0.46	0.47	0.51	0.53	0.46	0.45	0.46	0.45	0.43	0.42								
ΣREE	92	91	96	91	92	99	95	102	152	156	192	138	136	137	179	173	137	136	140	134	137	127								
(La/Yb) _N	5.2	5.2	5.2	4.9	4.8	5.1	5.0	4.9	5.7	5.7	5.6	6.1	5.9	5.8	7.3	7.1	6.2	6.4	6.1	6.1	6.4	6.1								

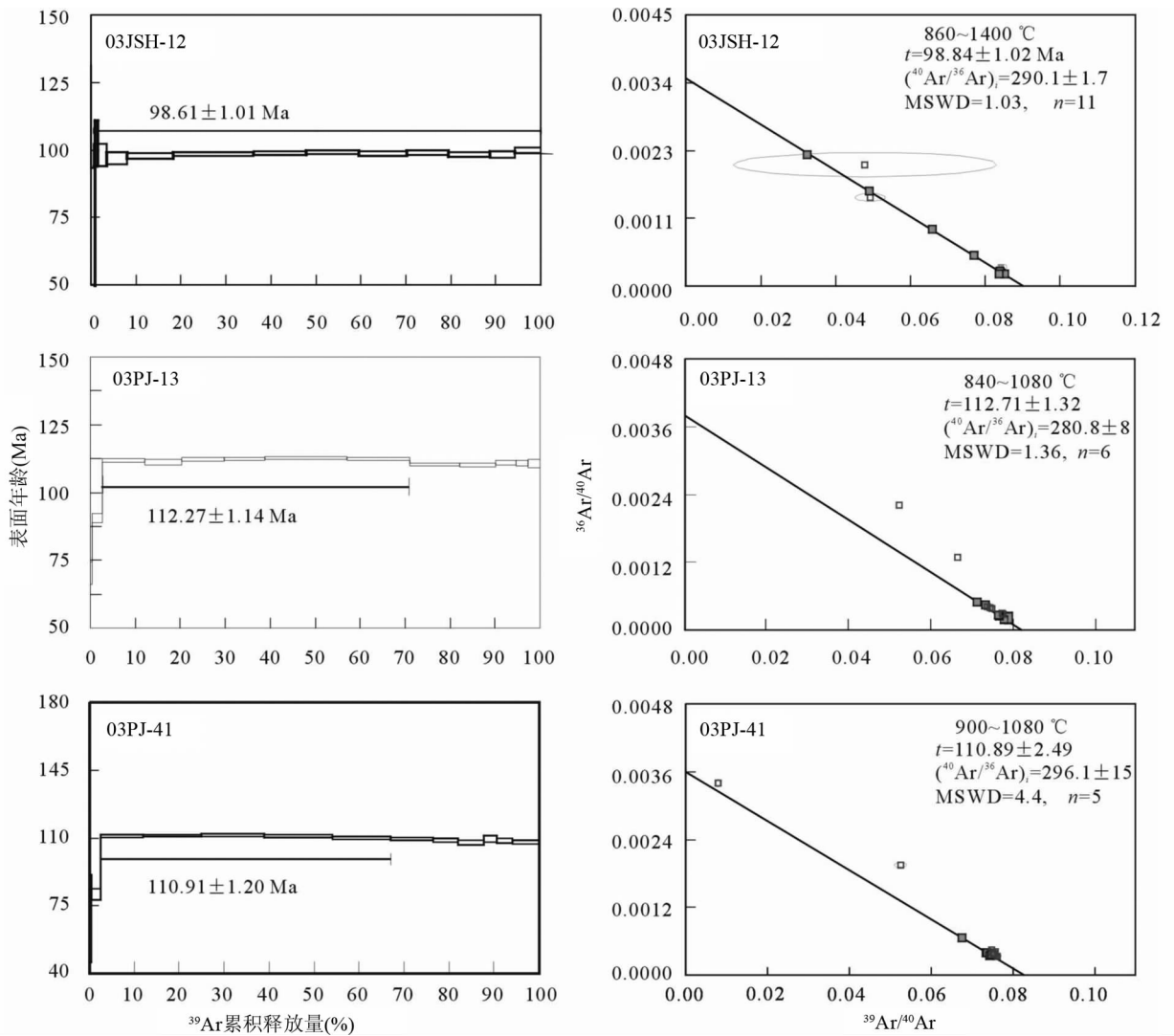


图2 江山、浦江镁铁质火山岩⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄谱及反等时线图

Fig.2 ⁴⁰Ar/³⁹Ar age plateau and inverse isochron age of Late Mesozoic mafic rocks from the Jiangshan and Pujiang regions, Zhejiang

比文献报道黄尖组地层 K-Ar 年龄 (131 ~ 121Ma) 要晚 (俞云文和徐步台, 1999)。

综上所述,本文江山镁铁质岩石年龄为 99Ma,浦江镁铁质岩石年龄为 111 ~ 112Ma。

3 镁铁质火山岩地球化学特征

3.1 主、微量元素组成

浦江与江山两地镁铁质火山岩的 K₂O + Na₂O 或 K₂O 中等,基本属于中钾钙碱性系列,少数为高钾钙碱性系列(见图3和表2)。根据这些玄武岩的地球化学特点,将其划分为3组。第1组为江山玄武岩,其 SiO₂ = 47.4% ~ 48.6% (氧化物均为无水 100% 标准化值),中等 TiO₂ (1.86% ~ 2.04%)

和低 P₂O₅ (0.28% ~ 0.31%) 为特征;第2组为浦江高钛磷玄武岩,其 SiO₂ 变化在 47.4% ~ 48.6% 之间,以高 TiO₂ (2.95% ~ 3.15%) 和富 P₂O₅ (0.76% ~ 0.96%) 为特点;第3组为浦江低钛磷玄武质安山岩,其 SiO₂ = 54.0% ~ 58.7%,具有低 TiO₂ (1.05% ~ 1.30%) 和 P₂O₅ (0.30% ~ 0.37%) 的特征。

从主、微量元素的 Harker 图可以看出(图4),本区镁铁质火山岩具有如下特征:(1)第1组和第2组相对低 SiO₂,高 MgO、CaO、FeO^T 和 Ni、Co、V,明显高 TiO₂ 和 P₂O₅。相对于幔源原始岩浆的高 Mg[#] (>70)、Ni(400 × 10⁻⁶ ~ 500 × 10⁻⁶) 特征 (Wilson, 1989),两组火山岩的较低 Mg[#] (分别为 46 ~ 48, 38 ~ 42),低 Ni(46 × 10⁻⁶ ~ 62 × 10⁻⁶) 和 Co(33 × 10⁻⁶ ~ 60 × 10⁻⁶) 含量则反映岩浆很可能经历过橄榄石的分离结晶作用;(2)第1组和第2组具有相似的 SiO₂、CaO、MgO 和 FeO^T,

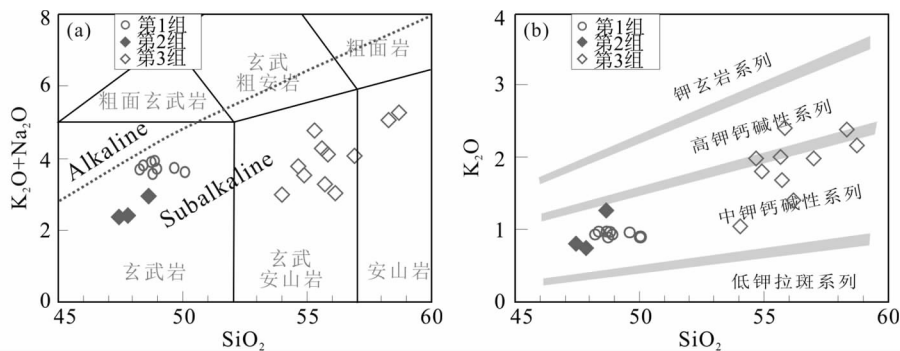


图3 江山、浦江镁铁质火山岩 SiO_2 - $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 图 (a) 和 SiO_2 - K_2O 图 (b)

点线是 Irvine and Baragar (1971) 给出的碱性和亚碱性界线

Fig.3 Total alkali vs. SiO_2 (TAS) (a) and SiO_2 vs. K_2O (b) plots of the Late Mesozoic mafic volcanic lavas from the Jiangshan and Pujiang regions, Zhejiang Province

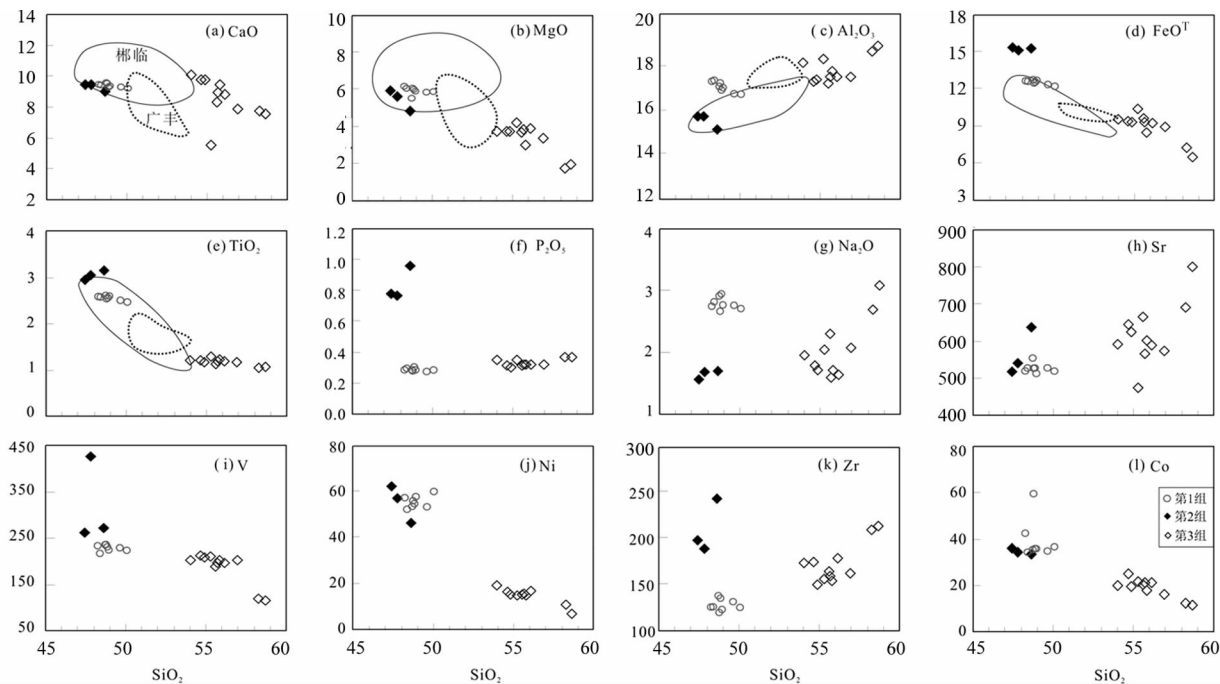


图4 江山、浦江镁铁质火山岩主微量元素 Harker 图解

图中实线区为郴-临(90Ma)OIB型玄武岩(Wang *et al.*, 2003),点线区为广丰盆地玄武岩(余心起等, 2004);后图数据来源同此图

Fig.4 SiO_2 vs. major element and trace element composition of the Late Mesozoic mafic volcanic lavas from the Jiangshan and Pujiang regions, Zhejiang Province

以及相似的 Ni、Co、Sr,反映两者的结晶分异程度类似。但两者 TiO_2 、 P_2O_5 、 Na_2O 、 $\text{Mg}^\#$ 明显不同。(3)第3组相对低 MgO 、 CaO 、 FeO^T 、 TiO_2 、 P_2O_5 , 贫不相容元素 Ni、Co、V, 高 SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、Sr, 显示出演化岩浆的特点。(4)三组岩石之间不存在连续的演化关系。然而第3组浦江玄武质安山岩内部则显示出连续的主、微量元素变化规律: MgO 、 FeO^T 、 CaO 和相容元素含量降低, Al_2O_3 、Sr、Zr、 K_2O 、 Na_2O 增加, TiO_2 、 P_2O_5 变化较弱, 显示出以单斜辉石为主的分离结晶作用

趋势。

在 REE 特征上, 第1组江山玄武岩的 REE 总量 (ΣREE) 变化在 $91 \times 10^{-6} \sim 102 \times 10^{-6}$ 之间, 显示出明显的 LREE 富集和 HREE 亏损的特点, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 4.7 \sim 5.2$, 平均 5.0, Eu 异常不明显, 与郴州-临武断裂带约 90Ma 的 OIB 型玄武岩类似(图 5a)。第2组浦江高钛磷玄武岩的稀土总量较高 ($\Sigma \text{REE} = 152 \times 10^{-6} \sim 192 \times 10^{-6}$, 平均 166×10^{-6}), 总体上也显示出轻重稀土分馏的 REE 配分模式, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 5.6 \sim 5.7$, Eu 异常不明显; 第3组浦江低钛磷玄武安山岩

表3 江山、浦江镁铁质火山岩 Sr-Nd 同位素元素组成

Table 3 Sr-Nd isotopic composition of Late Mesozoic mafic rocks from the Jiangshan and Pujiang regions, Zhejiang Province

岩石	样品号	Nd ($\times 10^{-6}$)	Sm ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} + 2\sigma$	$\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}$	$\left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_i$	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)
第1组 江山玄武岩	03JSH-03	17.83	4.358	0.512905 ± 14	0.15342	5.8	15.91	519.5	0.0865	0.7050	622	355
	03JSH-10	18.36	4.427	0.512892 ± 11	0.15135	5.5	16.23	520	0.0882	0.7050	635	375
	03JSH-11	19.28	4.702	0.512837 ± 10	0.15308	4.4	16.92	528.1	0.0905	0.7050	791	464
	03JSH-12	18.98	4.477	0.512857 ± 11	0.14806	4.9	16.57	527.9	0.0887	0.7050	684	427
	03JSH-14	19.77	5.037	0.512908 ± 11	0.15992	5.7	17.13	527.9	0.0917	0.7049	691	358
第2组 浦江高钛磷 玄武岩	03PJ-03	32.88	7.263	0.512680 ± 08	0.13865	1.7	11.41	540.5	0.0596	0.7062	956	691
	03PJ-16	33.3	7.613	0.512705 ± 08	0.14350	2.1	15.25	517.2	0.0833	0.7062	968	657
	03PJ-19	41.62	9.397	0.512673 ± 9	0.14172	1.5	23.14	637.7	0.1025	0.7067	1013	707
第3组 浦江低钛磷 玄武安山岩	03PJ-22	33.07	6.813	0.512291 ± 8	0.12931	-5.8	56.05	799.8	0.1979	0.7086	1551	1299
	03PJ-27	27.51	5.768	0.512406 ± 9	0.13160	-3.7	78.21	473.8	0.4662	0.7085	1387	1123
	03PJ-39	25.78	5.465	0.512284 ± 8	0.13306	-6.0	30.45	590.2	0.1457	0.7083	1635	1313
	03PJ-42	25.33	5.476	0.512298 ± 11	0.13569	-5.8	36.89	574	0.1815	0.7085	1664	1295

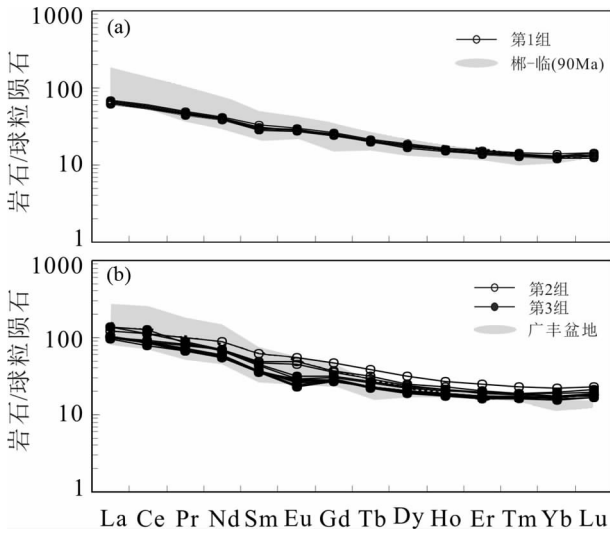


图5 江山、浦江镁铁质火山岩 REE 配分图(标准化值据 Taylor and McLennan, 1985)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns for Late Mesozoic mafic rocks from the Jiangshan and Pujiang regions, Zhejiang Province (normalization values after Taylor and McLennan, 1985)

的稀土总量和第2组相似($\sum \text{REE} = 127 \times 10^{-6} \sim 178 \times 10^{-6}$, 平均 144×10^{-6}), 显示出更强的轻重稀土分馏的 REE 配分模式, (La/Yb)_N = 5.8 ~ 7.3, 平均 6.3, Eu 具有弱负异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.69 \sim 0.89$)。第2和3组总体上与邻近的广丰盆地基性火成岩的 REE 特征相似(图5b)。

在微量元素蛛网图上(图6), 第1组江山玄武岩无 Nb-Ta 亏损且有 Pb 负异常, 与郴州-临武断裂带两侧中生代最晚期 OIB 型玄武岩(郴-临(90Ma))相似(Wang *et al.*, 2003)。La/Nb(1.0)大于典型 OIB 的 La/Nb(0.66)平均值, 且 REE

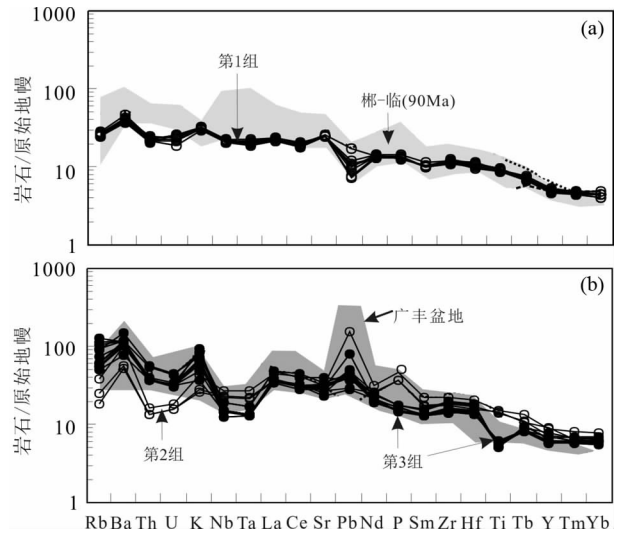


图6 江山、浦江镁铁质火山岩微量元素蛛网图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Primitive mantle-normalized spidergrams for Late Mesozoic mafic rocks from the Jiangshan and Pujiang regions, Zhejiang Province (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

和 HFSE 的含量较平均 OIB 低。

与第1组江山玄武岩的蛛网图曲线明显不同, 浦江玄武岩表现出明显的 Nb-Ta 负异常和不同程度的 Pb 正异常, 类似于岛弧火山岩的特征。其中第2组富钛磷玄武岩(03PJ-03, 16, 19)的 Pb 正异常和 Th-U 负异常更明显, Nb-Ta 负异常弱 ($\text{La}/\text{Nb} = 1.52 \sim 1.56$), 无 Ti 异常; 第3组低钛磷玄武安山岩有显著的 Nb-Ta 负异常 ($\text{La}/\text{Nb} = 2.34 \sim 2.62$, 平均 2.42), Ti 负异常和中等 Pb 正异常, 与广丰盆地玄武岩相似(余心起等, 2004)。

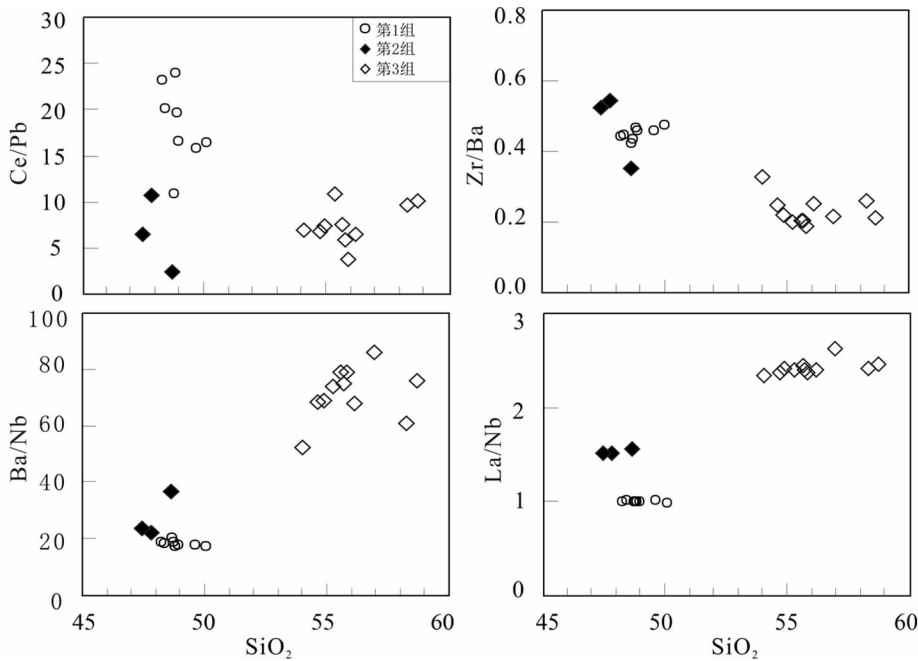


图7 江山、浦江镁铁质火山岩 SiO_2 对 La/Nb 、 Ba/Nb 、 Ce/Pb 、 Zr/Ba 图

Fig.7 SiO_2 vs. La/Nb , Ba/Nb , Ce/Pb , Zr/Ba plots for Late Mesozoic mafic rocks from the Jiangshan and Pujiang regions, Zhejiang Province

3.2 Sr-Nd 同位素组成

江绍断裂带晚中生代镁铁质火山岩的铷-钕同位素分析结果见表3。由表3可以看出,第1组江山玄武岩具有最高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (4.4 ~ 5.8) 和最低的放射成因 Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i = 0.7049 ~ 0.7050) 组成,与郴州-临武断裂带两侧约90Ma玄武岩(OIB型)的Sr-Nd同位素相近,相对N-MORB显示出同位素富集的特点。

第2组浦江高钛磷玄武岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 变化在1.5 ~ 2.1之间,中等程度的富集放射成因 Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i = 0.7062 ~ 0.7067);而第3组浦江低钛磷玄武质安山岩均则具有最低的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-6.0 ~ -3.7) 和最高的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i (0.7083 ~ 0.7086),与江山-广丰盆地的部分玄武岩的Sr-Nd同位素组成一致(余心起等,2004)。

4 岩石成因

综上所述,江绍断裂带两侧晚中生代三组镁铁质火山岩表现出差异性的主、微量元素地球化学特征和Sr-Nd同位素比值,导致元素-同位素差异性的原因包括:岩浆演化过程,如地壳混染(或AFC过程)和源区差异,如地幔源区不均一性以及不同类型地幔混合等。

4.1 分离结晶作用

微量元素La、Ba与Nb(Ta),Ce与Pb在基性-中基性岩

浆中的总分配系数相似,因而La/Nb、Ba/Nb、Ce/Pb比值基本不受玄武岩浆主要分离相(如橄榄石、辉石和斜长石)的影响。根据岩相学观察,三组玄武岩或玄武质安山岩的主要斑晶矿物为橄榄石、辉石和斜长石,因此三组镁铁质火山岩之间所显示的这些元素对比值的差异不能用简单的分离结晶作用来解释(图7),很可能是源区差异、地壳混染或者是不同程度的富集岩石圈物质的贡献。

从三组玄武岩(玄武安山岩)的元素含量随 SiO_2 的变化趋势可以看出(图4),第1组和第2组玄武岩相对原始基性岩浆的低Co、Ni和 $\text{Mg}^\#$ 指数指示了橄榄石的结晶分异,但较低的 SiO_2 说明结晶分异作用并不占主导地位,无Eu负异常则显示斜长石的结晶分异作用不显著。

第3组玄武质安山岩相对低 MgO 、 CaO 、 FeO^T ,贫不相容元素Ni、Co、V,高 SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、Sr等,均显示出演化岩浆的特点。从 MgO 、 CaO 、 FeO^T 以及其Ni、Co、V均与 SiO_2 呈反相关关系,而 Al_2O_3 、 Na_2O 、Sr与 SiO_2 没表现出明显的相关性,说明岩浆经历过镁铁质矿物(辉石、橄榄石等)结晶分异,而富钙钠铝的斜长石结晶分异作用不明显。

4.2 地壳混染或AFC作用

综合同位素和主、微量元素的特征,第1组玄武岩因具有相对低 SiO_2 、高 MgO 、无Eu负异常、无Nb-Ta负异常的微量元素分配模式,高Zr/Ba,高Ce/Pb,且在研究区具有最高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (4.4 ~ 5.8) 和最低的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 等特征,说明第1组玄武岩是源于OIB软流圈并带有明显OIB型玄武岩的特

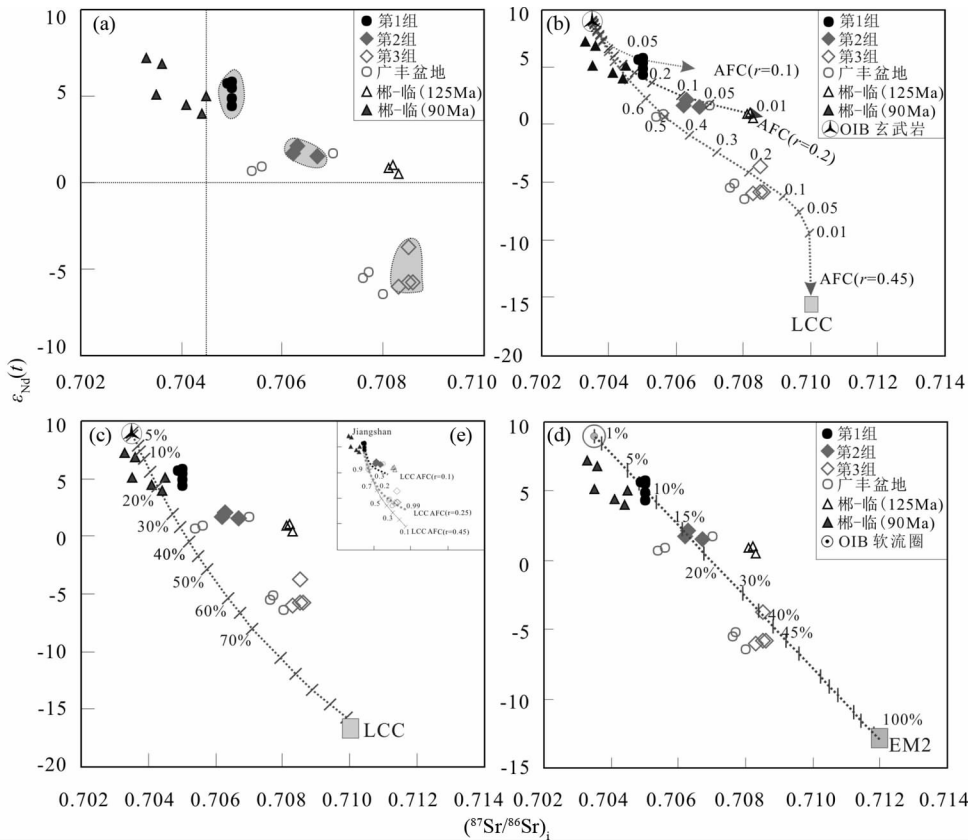


图8 江山、浦江镁铁质火山岩 Sr-Nd 同位素(a)与模拟岩浆同位素曲线(b-e)

(a) $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 对 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图; (b) OIB 型岩浆 AFC 过程同位素变化; (c) 下地壳混染 OIB 型岩浆同位素变化; (d) 不同比例 OIB 型软流圈和 EM2 部分熔融岩浆同位素组成; (e) 江山玄武岩岩浆 AFC 过程同位素变化. 模拟参数见表 4

Fig. 8 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ vs. $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram (a) and Sr-Nd isotope modelling results (b-e) for crustal contamination, AFC processes and source mixing of the Late Mesozoic mafic rocks from Jiangshan and Pujian regions, Zhejiang Province

表 4 模拟江绍断裂带区域镁铁质火山岩 Sr-Nd 同位素参数

Table 4 Parameters for simulating Sr-Nd compositions of basaltic magmas using OIB AFC, LCC-contaminated OIB, partial melting of OIB-type asthenosphere and EM2-type lithosphere

端元组分	Sr ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}})_i$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$
OIB 软流圈	20	1.2	0.7035	+9
OIB 玄武岩	660	38.5	0.7035	+9
江山玄武岩(第 1 组)	528	19.8	0.7049	+5.7
EM2	50	3	0.712	-13
LCC	350	35	0.710	-16

征,代表了本区受地壳混染作用最弱的基性岩。以表 4 参数模拟得到的 OIB 型岩浆受地壳混染同位素协变曲线(图 8c)显示,第 1 组玄武岩不是 OIB 型岩浆受地壳混染的结果;如果是 OIB 型岩浆经 AFC 过程,则当 $r = 0.1, F = 0.05$ 或 $r = 0.2, F = 0.2 \sim 0.3$ 时,才可能得到第 1 组的初始同位素组成(图 8b),显然,如此小比例的残余岩浆在化学成分上应该是长英质的,不可能还保留现在所观察到的低 SiO_2 性质。因

此第 1 组不可能是 OIB 型岩浆经历 AFC 过程的产物。第 1 组江山玄武岩作为本区最接近原始岩浆的基性岩(图 8e),也不可能通过 AFC 过程演化形成第 2 组和第 3 组玄武岩或玄武质安山岩。

与第 1 组类似,第 2 组浦江高钛磷玄武岩表现出可能为地壳混染的特征,如低 SiO_2 、高 MgO 、无 Eu 负异常,弱 Nb-Ta 亏损和强烈的正 Pb 异常;但是这些岩石同时显示出 Th-U 的相对亏损,这说明岩浆在上升过程中受到上地壳的混染作用的可能性不大。假如受到地壳混染作用的影响,其混染物质最有可能来自下地壳,但无论是上地壳还是下地壳的混染,在造成岩浆 Pb 正异常的同时也会导致混染岩浆中 Ti 含量降低从而引起 Ti 的负异常。与之相反,第 2 组玄武岩具有最高的 Ti 含量,且在蛛网图上无 Ti 负异常,反映岩浆受地壳混染作用的影响很小。Sr-Nd 同位素模拟也显示,只有当 $r = 0.2, F = 0.05 \sim 0.1$ 时(图 8b),才会演化到第二组高钛磷玄武岩,同理,如此低比例的残余演化岩浆是中酸性而不是现在所观察到的低 SiO_2 性质。因此,第二组高钛磷玄武岩不大可能通过初始 OIB 岩浆通过地壳混染或 AFC 过程演化而来。

第3组浦低钛磷江玄武质安山岩在微量元素地球化学特征上显示出 Nb-Ta 的强烈亏损, Pb 正异常和 Ti 负异常, 以及更高 Sr 和低 Nd 同位素组成, 最有可能受到地壳混染作用的影响。我们的模拟结果显示, 如果从原始的 OIB 型岩浆经历 AFC 过程, 当 $r=0.45$, $F=0.1 \sim 0.2$, 也就是岩浆演化到残余比例为 10% ~ 20% 时, 才能形成第3组玄武质安山岩, 显然经历了如此高程度 AFC 过程的岩浆应该是中酸性成分, 而非我们目前看到的玄武质安山岩成分。

综上所述, Sr-Nd 同位素的模拟结果都不支持研究区的三组火山岩为 OIB 型岩浆经地壳混染或 AFC 过程的产物。由于分离结晶作用对岩浆的初始 Sr-Nd 同位素组成没有影响, 因此我们认为造成三组镁铁质岩浆在元素-同位素组成上的差异主要继承了熔融源区地幔的差别。

4.3 岩浆源区特征

前人对中生代镁铁质岩石的研究结果显示 (Wang *et al.*, 2003), 在华南地区存在长期富集 LREE 和 LILE 的岩石圈地幔, 具有相对高 Sr 和低 Nd 同位素组成特征。本文所研究的三组岩石中, 第1组江山 OIB 型玄武岩则明显显示出软流圈地幔来源的高 Zr/Ba (0.42 ~ 0.48) 和低 La/Nb (1.0)、低 Ba/Nb (18 ~ 21) 比值特点 (Ormerod *et al.*, 1988; 陈江峰和江博明, 1999; Weaver, 1991; Fitton *et al.*, 1991; 徐义刚, 1999)。其相对于平均 OIB 略高的 Sr 和略低的 Nd 同位素比值则暗示有少量富集岩石圈地幔的贡献。第2组浦江高钛磷玄武岩的高 Zr/Ba (0.35 ~ 0.55)、高 Nb/U 比值, 指示了软流圈的主要贡献; 但其高于软流圈的 La/Nb、Ba/Nb 比值, Nb-Ta 负异常, 则指示富集岩石圈地幔对岩浆的贡献。第3组浦江低钛磷玄武质安山岩的 Ba/Nb (52 ~ 86, 平均 71) 明显高于地壳 (54) 与原始地幔 (9.8), 以及其较小的 Zr/Ba (约 0.2), 均指示富集岩石圈地幔来源的特征。因此, 三组基性火山岩均显示出软流圈和富集岩石圈地幔的共同来源特征。其中, 第1组玄武岩主要显示软流圈来源的特征; 第2组玄武岩显示软流圈为主, 兼有岩石圈的特征; 第3组玄武质安山岩则显示更多岩石圈的贡献。

研究区三组镁铁质火山岩的 Sr-Nd 同位素协变关系也反映其熔融源区至少存在 OIB 型软流圈和富集岩石圈两种端元组分。近年来对扬子、华夏陆块晚中生代岩石圈地幔的研究结果认为区域上存在类似于 EM2 型的岩石圈地幔 (Wang *et al.*, 2003, 2005)。首先, 图 8a 的 Sr-Nd 同位素协变图显示, 本区三组镁铁质火山岩同位素呈现规律性变化, 暗示源区的某种规律性变化。那么, 我们以假设的 OIB 型软流圈和岩石圈的同位素组成, 模拟部分熔融岩浆的同位素组成 (图 8d), 并与本区实际玄武岩的 Sr-Nd 初始同位素组成对比, 推断软流圈和岩石圈分别对本区玄武岩的贡献。

如图 8d 所示, 不同比例的软流圈 + 岩石圈地幔共同参与熔融可以很好地模拟得到本区三组镁铁质火山岩的初始同位素组成。7% ~ 10% 的 EM2 型岩石圈地幔 + 93% ~ 90%

的软流圈共同发生部分熔融作用产生的岩浆将具有与第1组江山玄武岩相似的 Sr-Nd 同位素组成; 15% ~ 20% 的 EM2 型岩石圈地幔 + 85% ~ 80% 的软流圈部分熔融形成的岩浆将具有类似第2组浦江高钛磷玄武岩的同位素特征; 35% ~ 45% 的 EM2 型岩石圈地幔 + 65% ~ 55% 的软流圈部分熔融产生的岩浆将具有与第3组浦江低钛磷玄武质安山岩的同位素组成。

总体上, 江绍断裂带晚中生代三组玄武岩 (或玄武质安山岩) 浆的来源及其地球化学特征, 可以很好地通过软流圈-岩石圈相互作用的模式来进行解释。

4.4 深部动力学意义

江绍断裂带晚中生代镁铁质火山岩的成因为岩石圈伸展背景下软流圈-岩石圈相互作用的结果, 并显示出早期到晚期软流圈成份比例越来越多、岩石圈成份越来越少的特点, 即早期 (112Ma) 玄武岩浆的源区受到了较多富集岩石圈地幔的影响, 形成了具有 Nb-Ta 亏损和 Pb 正异常的第3组低钛磷和第2组高钛磷两组岩石, 随着伸展-减薄幅度的加强, 软流圈地幔上涌, 则形成了无 Nb-Ta 亏损, 更低 Sr 和高 Nd 同位素组成的第1组 OIB 型江山玄武岩 (99Ma)。这与郴州-临武断裂带区域从 125 ~ 90Ma 期间基性火山岩由以富集岩石圈地幔来源为主演变到以软流圈来源的 OIB 型岩浆为主的变化特征相一致 (陈卫锋等, 2005; 郭新生等, 2001), 也类似于美国西部盆岭省第三纪的幔源岩浆变化趋势 (Hawkesworth *et al.*, 1995)。以下我们根据区域资料和对美国西部盆岭省的特征来分析可能的深部动力学过程。

导致岩石圈伸展的因素包括主动伸展和被动伸展, 其中主动伸展主要归因于异常热地幔柱的冲击作用, 显然东南沿海地区以中酸性岩浆为主的岩石类型和组合特点很难用地幔柱冲击作用来解释。引起岩石圈被动伸展的机制包括: 深大断裂活动引起的热扰动导致对流地幔绝热降压上涌、板片俯冲引起类似于弧后扩张的陆后伸展、造山带的垮塌和岩石圈拆离和去根作用等等。其主要的地表表现有: (1) 强烈的钙碱性-高钾钙碱性岩浆活动; (2) 典型的盆岭构造格局和裂陷作用; (3) 热穹作用和变质核杂岩的形成 (沈晓明等, 2008)。

在华南地区, 来自中生代镁铁质岩浆作用的记录反映自早中生代以来发生了多期次的幕式伸展作用, 且不同时期的镁铁质岩浆都显示软流圈-岩石圈相互作用的结果, 即既有来自软流圈地幔的类似 OIB 型的碱性玄武岩, 也有主要来自富集岩石圈地幔的钙碱性-高钾钙碱性的镁铁质火山岩 (范蔚茗等, 2003), 但与现代俯冲带主要以拉斑-钙碱性玄武岩的组合有较大差别。特别是江绍断裂区域作为华夏与扬子两陆块拼合的构造薄弱部位, 是对流软流圈地幔上升的有利部位, 或者在华南大陆受到张应力作用时软流圈地幔易于发生减压熔融的部位。因此直接的古太平洋板块俯冲作用不适合用来解释自早中生代以来的镁铁质岩浆成因。尽管随

着俯冲板片的后撤会导致弧后或陆后的岩石圈伸展、平俯冲作用导致的俯冲板片断裂或拆沉作用(Li and Li, 2007),但华南地区中生代镁铁质岩浆的分布呈现出面状分布,因此通过陆后伸展作用难以解释从东南沿海到华南内部数百千米宽的岩浆事件。

华南地区中生代的构造格局岩浆作用特点非常类似于美国西部盆地省新生代的演化特点,如强烈的火山作用和一系列断陷盆地的发育,以及多种镁铁质岩浆共生的特点(万天丰和朱鸿, 2002; 王鸿祯等, 1986)。尽管目前对于华南早中生代之前的构造格架仍存在分歧(金文山等, 1998; 陈海泓和肖文交, 1998),近年来开展的来自构造地质学和热年代学的证据反映华南地区确实存在印支期构造-热事件(陈培荣, 2004),热事件为区域上广泛的过铝质花岗岩的形成提供了热源(王岳军等, 2002, 2005)。类似地,华南地区与中国东北地区乃至整个中国东部在晚中生代期间处于类似的全球构造背景(Fan *et al.*, 2003; Guo *et al.*, 2003),即周边多板块作用导致了区域强烈的岩石圈伸展作用,包括分别来自印支陆块(Carter *et al.*, 2001)、古特提斯构造演化以及古太平洋板块的快速北移导致的拖曳作用等共同作用的结果(Ruppel, 1995; Fan *et al.*, 2001)。

5 结论

对分隔扬子与华夏陆块的江绍断裂带两侧的浙江江山和浦江两地区中生代镁铁质火山岩进行了全岩 Ar-Ar 年龄、同位素和地球化学研究,得出如下结论:

(1) 江山玄武岩 Ar-Ar 全岩年龄为 99Ma,为晚白垩世喷发产物;浦江玄武岩和玄武安山岩的 Ar-Ar 年龄为 111 ~ 112Ma,喷发形成于早白垩世。

(2) 两地镁铁质火山岩均属于中钾钙碱性岩石系列。根据其主微量元素及 Sr-Nd 同位素特征,可以划分三组:第 1 组为江山 OIB 型玄武岩;第 2 组为浦江高钛磷玄武岩;第 3 组为浦江低钛磷玄武安山岩。三组岩石为伸展背景下,软流圈-岩石圈相互作用的产物。从早到晚,岩浆熔融源区中岩石圈组分逐渐减少而软流圈组分逐渐增加,反映了岩石圈伸展-减薄的连续过程。

(3) 江绍断裂带晚中生代镁铁质火山岩在岩石类型组合上区别于现代俯冲带的以钙碱性-拉斑玄武岩的岩石组合,在时空分布和成因上与华南内部同时代玄武岩相似。结合华南地区晚中生代盆地构造格局以及多期次幕式伸展的特征,我们认为岩石圈伸展的动力学来源很可能是周边多板块相互作用导致的结果。

References

Bureau of Geology and Mineral Resources of Fujian Province. 1997. Lithostratigraphy in Fujian Province. Wuhan: Wuhan Geology

- College Press (in Chinese)
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Zhejiang Province. 1996. Lithostratigraphy in Zhejiang Province. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese)
- Carter A, Roques D, Bristow C and Kinny P. 2001. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia; Significance of Triassic thermotectonism (Indosinian Orogeny) in Vietnam. *Geology*, 29 (3): 211–214
- Chen HH and Xiao WJ. 1998. Archipelago orogenesis: Examples from Indosinian orogenic belts in South China. *Earth Science Frontiers*, 5 (Suppl. 1): 95–102 (in Chinese with English abstract)
- Chen JF and Jiang BM. 1999. Nd-Sr-Pb isotope tracer and crustal evolution of the Southeast China block. In: Zheng YF (ed.). *Chemical Geology Dynamics*. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Chen JY, Yang JH, Zhang JH and Sun JF. 2014. Geochemical transition shown by Cretaceous granitoids in southeastern China: Implications for continental crustal reworking and growth. *Lithos*, 196–197: 115–130
- Chen PR. 2004. Geodynamic setting of Mesozoic magmatism and its relationship to uranium metallogenesis in southeastern China. *Uranium Geology*, 20(5): 266–270 (in Chinese with English abstract)
- Chen WF, Chen PR, Xu XS and Zhang M. 2005. Geochemical characteristics of Cretaceous basaltic rocks in South China and constraints on Pacific plate subduction. *Science in China (Series D)*, 48(12): 2104–2117
- Fan WM, Guo F, Wang YJ and Zhang M. 2001. Post-orogenic bimodal volcanism along the Sulu Orogenic Belt in eastern China. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9–10): 733–746
- Fan WM, Guo F, Wang YJ and Lin G. 2003. Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of post-orogenic extension in the northern Da Hinggan Mountains, northeastern China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121(1–2): 115–135
- Fan WM, Wang YJ, Guo F and 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)
- Fitton JG, James D and Leeman WP. 1991. Basic magmatism associated with Late Cenozoic extension in the western United States: Compositional variations in space and time. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B8): 13693–13711
- Guo F, Fan WM, Wang YJ and Lin G. 2003. Geochemistry of Late Mesozoic mafic magmatism in west Shandong Province, eastern China: Characterizing the lost lithospheric mantle beneath the North China Block. *Geochimical Journal*, 37(1): 63–77
- Guo F, Fan WM, Li CW, Zhao L, Li HX and Yang JH. 2012. Multi-stage crust-mantle interaction in SE China: Temporal, thermal and compositional constraints from the Mesozoic felsic volcanic rocks in eastern Guangdong-Fujian provinces. *Lithos*, 150: 62–84
- Guo XS, Chen JF, Zhang X, Tang JF, Xie Z, Zhou TX and Liu YL. 2001. Nd isotopic ratios of K-enriched magmatic complexes from southeastern Guangxi Province: Implications for upwelling of the mantle in southeastern China during the Mesozoic. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 19–27 (in Chinese with English abstract)
- Hawkesworth C, Turner S, Gallagher K, Hunter A, Bradshaw T and Rogers N. 1995. Calc-alkaline magmatism, lithospheric thinning and extension in the Basin and Range. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B6): 10271–10286
- Irvine TN and Baragar ERA. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523–548
- Jin WS, Zhao FQ and Zhang HM. 1998. Division of tectonic units and its characteristics. *Geology of Zhejiang*, 14(1): 1–10 (in Chinese with English abstract)
- Lapierre H, Jahn BM, Charvet J and Yu YW. 1997. Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiites in Zhejiang Province and their relationship with the tectonic activity in southeastern China.

- Tectonophysics, 274(4): 321–338
- Li XH, Zhou HW, Liu Y, Lee CY, Sun M and Chen CH. 1999. Shoshonitic intrusive suite in SE Guangxi: Petrology and geochemistry. *Chinese Science Bulletin*, 45(7): 653–658
- Li XH. 1999. Geochemistry constraints on the crustal growth and evolution: A case study of South China. In: Zheng YF (ed.). *Chemical Geology Dynamics*. Beijing: Science Press, 288–316 (in Chinese)
- Li XH. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 293–305
- Li ZX and Li XH. 2007. Formation of the 1300-km-wide intercontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology* 35, 179–182
- Liu Y, Liu HC and Li XH. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS. *Geochimica*, 25(6): 552–558 (in Chinese with English abstract)
- Ormerod DS, Hawkesworth CJ, Rogers NW, Leeman WP and Menzies MA. 1988. Tectonic and magmatic transitions in the Western Great Basin, USA. *Nature*, 333(6171): 349–353
- Renne PR, Swisher CC, Deino AL, Karner DB, Owens TL and DePaolo DJ. 1998. Intercalibration of standards, absolute ages and uncertainties in $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating. *Chemical Geology*, 145(1–2): 117–152
- Ruppel C. 1995. Extensional processes in continental lithosphere. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B12): 24187–24215
- Shen XM, Zhang HX and Zhang BY. 2008. A preliminary study of relationship between, metamorphic core complexes and lithospheric thinning over the Mesozoic in south china. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(1): 11–19 (in Chinese with English abstract)
- Shui T, Xu BT, Liang RH and Qiu YS. 1986. Shaoxing-Jiangshan deep-seated fault zone, Zhejiang Province. *Chinese Science Bulletin*, 31(18): 1250–1255
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. In: Sanders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell Publishing
- Wan TF and Zhu H. 2002. Tectonics and environment change of Mesozoic in China continent and its adjacent areas. *Geoscience*, 16(2): 107–120 (in Chinese with English abstract)
- Wang DZ and Zhou XM. 2002. *Petrogenesis of Late Mesozoic Granitic Volcanic-intrusive Complexes in SE China and Crustal Evolution*. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Wang F, Zhu RX, Li Q, He HY, Luo QH, Lu XX, Sang HQ and Wang YL. 2004. A differential uplifting of Qinling orogeny belt evidences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology of granites. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 445–459 (in Chinese with English abstract)
- Wang HZ, Yang WR and Liu BP. 1986. *Tectonic History of the Ancient Continental Margins of South China*. Wuhan: Wuhan Geology College Press (in Chinese)
- Wang Y, Guan TY, Huang GF, Yu DG and Chen CL. 2002. Isotope chronological studies of Late Yanshanian volcanic rocks in Northeast Jiangxi Province. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(3): 233–236 (in Chinese with English abstract)
- Wang YJ, Zhang YH, Fan WM, Xi XW, Guo F and Lin G. 2002. Numerical modeling of the formation of Indo-Sinian peraluminous granitoids in Hunan Province: Basaltic underplating versus tectonic thickening. *Science in China (Series D)*, 45(11): 1042–1056
- Wang YJ, Fan WM, Guo F, Peng TP and Li CW. 2003. Geochemistry of Mesozoic mafic rocks adjacent to the Chenzhou-Linwu fault, South China: Implications for the lithospheric boundary between the Yangtze and Cathaysia blocks. *International Geology Review*, 45(3): 263–286
- Wang YJ, Fan WM, Peng TP and Guo F. 2005. Elemental and Sr-Nd isotopic systematics of the Early Mesozoic volcanic sequence in southern Jiangxi Province, South China: Petrogenesis and tectonic implications. *International Journal of Earth Sciences*, 94(1): 53–65
- Wang YJ, Fan WM, Liang XQ, Peng TP and Shi YR. 2005. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of Indosinian granites in Hunan Province and its petrogenetic implications. *Chinese Science Bulletin*, 50(13): 1395–1403
- Wang YJ, Fan WM, Sun M, Liang XQ, Zhang YH and Peng TP. 2007. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China block: A case study in the Hunan Province. *Lithos*, 96(3–4): 475–502
- Weaver BL. 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions: Trace element and isotopic constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, 104(2–4): 381–397
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*. London: Unwin Hyman Ltd, 22
- Xu JW, Zhu G, Tong WX, Cui K and Liu Q. 1987. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: A major shear system to the northwest of the Pacific Ocean. *Tectonophysics*, 134(4): 273–310
- Xu JW, Ma GF, Tong WX, Zhu G and Lin SF. 1993. Displacement of the Tancheng-Lujiang wrench fault system and its geodynamic setting in the northwestern Circum-Pacific. In: Xu JW (ed.). *The Tancheng-Lujiang Wrench Fault System*. Chichester: John Wiley and Sons, 51–74
- Xu YG. 1999. Continental basalt magmatism in extensional geological setting: Nature and dynamic process. In: Zheng YF (ed.). *Chemical Geology Dynamics*. Beijing: Science Press, 119–167 (in Chinese)
- Yan TZ, Yu YW, Chen JF, Xu XM, Wang JG, Cai ZH and Dong YH. 2005. Nd-Sr isotope features of Cretaceous volcanic rocks in northwestern Zhejiang. *Geology in China*, 32(3): 417–423 (in Chinese with English abstract)
- Yu XQ, Shu LS, Yan TZ, Yu YW, Zu FP and Wang B. 2004. Geochemistry of basalts of late period of Early Cretaceous from Jiangshan-Guangfeng, SE China and its tectonic significance. *Geochimica*, 33(5): 465–476 (in Chinese with English abstract)
- Yu YW and Xu BT. 1999. Stratigraphical sequence and geochronology of the upper Mesozoic volcano-sedimentary rock series in Zhejiang. *Journal of Stratigraphy*, 23(2): 136–145 (in Chinese with English abstract)
- Zhang B, Guo F, Zhang XB, Wu YM, Wang GQ and Zhao L. 2019. Early Cretaceous subduction of Paleo-Pacific Ocean in the coastal region of SE China: Petrological and geochemical constraints from the mafic intrusions. *Lithos*, 334–335: 8–24
- Zhou XM and Li WX. 2000. Origin of late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326(3–4): 269–287
- Zhou XM and Li WX. 2000. Origin of late Mesozoic igneous rocks in SE China: A integrated modeling of lithosphere subduction and basalt underplating. *Progress in Natural Sciences*, 10(3): 240–247 (in Chinese)
- Zhou XM, Sun T, Shen WZ, Shu LS and Niu YL. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 29(1): 26–33

附中文参考文献

- 陈海泓, 肖文交. 1998. 多岛海型造山作用——以华南印支期造山带为例. *地学前缘*, 5(增1): 95–102
- 陈江峰, 江博明. 1999. 铍、锶、铅同位素示踪和中国东南大陆地壳演化. 见: 郑永飞编. *化学地球动力学*. 北京: 科学出版社
- 陈培荣. 2004. 华南东部中生代岩浆作用的动力学背景及其与铀成矿关系. *铀矿地质*, 20(5): 266–270

- 陈卫锋, 陈培荣, 徐夕生, 张敏. 2005. 华南白垩纪玄武质岩石的地球化学特征及其对太平洋板块俯冲作用的制约. 中国科学(D辑), 35(11): 1007-1018
- 范蔚茗, 王岳军, 郭锋, 彭头平. 2003. 湘赣地区中生代镁铁质岩浆作用与岩石圈伸展. 地学前缘, 10(3): 159-169
- 福建省地质矿产局. 1997. 福建省岩石地层. 武汉: 武汉地质大学出版社
- 郭新生, 陈江峰, 张巽, 汤加富, 谢智, 周秦禧, 刘玉龙. 2001. 桂东南富钾岩浆杂岩的Nd同位素组成: 华南中生代地幔物质上涌事件. 岩石学报, 17(1): 19-27
- 金文山, 赵凤清, 张惠民. 1998. 华南构造单元划分及其特征. 浙江地质, 14(1): 1-10
- 李献华, 周汉文, 刘颖, 李寄岬, 孙敏, 陈正宏. 1999. 桂东南钾玄质侵入岩带及其岩石学和地球化学特征. 科学通报, 44(18): 1992-1998
- 李献华. 1999. 元古宙地壳增长和演化的地球化学制约——以华南为例. 见: 郑永飞编. 化学地球动力学. 北京: 科学出版社, 288-316
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用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
- 沈晓明, 张海祥, 张伯友. 2008. 华南中生代变质核杂岩构造及其与岩石圈减薄机制的关系初探. 大地构造与成矿, 32(1): 11-19
- 水涛, 徐步台, 梁如华, 邱郁双. 1986. 绍兴-江山古陆对接带. 科学通报, (6): 444-448
- 万天丰, 朱鸿. 2002. 中国大陆及邻区中生代-新生代大地构造与环境变迁. 现代地质, (2): 107-120
- 王德滋, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代花岗质火山-侵入杂岩成因与地壳演化. 北京: 科学出版社
- 王非, 朱日祥, 李齐, 贺怀宇, 罗清华, 卢欣祥, 桑海清, 王英兰. 2004. 秦岭造山带的差异隆升特征——花岗岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究的证据. 地学前缘, 11(4): 445-459
- 王鸿祯, 杨巍然, 刘本培. 1986. 华南地区古大陆边缘构造史. 武汉: 武汉地质学院出版社
- 王勇, 管太阳, 黄国夫, 余达淦, 陈丛林. 2002. 赣东北地区燕山晚期火山岩同位素年代学研究. 地球学报, 23(3): 233-236
- 王岳军, Zhang YH, 范蔚茗, 席先武, 郭锋, 林舸. 2002. 湖南印支期过铝质花岗岩的形成: 岩浆底侵与地壳加厚热效应的数值模拟. 中国科学(D辑), 32(6): 491-499
- 王岳军, 范蔚茗, 梁新权, 彭头平, 石玉若. 2005. 湖南印支期花岗岩SHRIMP锆石U-Pb年龄及其成因启示. 科学通报, 50(15): 1259-1266
- 徐义刚. 1999. 拉张环境中的大陆玄武岩浆作用: 性质及动力学过程. 见: 郑永飞编. 化学地球动力学. 北京: 科学出版社, 119-167
- 颜铁增, 俞云文, 陈江峰, 许兴苗, 汪建国, 蔡子华, 董尧鸿. 2005. 浙江省西北部白垩纪火山岩Nd-Sr同位素特征. 中国地质, 32(3): 417-423
- 余心起, 舒良树, 颜铁增, 俞云文, 祖辅平, 王彬. 2004. 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. 地球化学, 33(5): 465-476
- 俞云文, 徐步台. 1999. 浙江中生代晚期火山-沉积岩系层序和时代. 地层学杂志, 23(2): 136-145
- 浙江省地质矿产局. 1996. 浙江省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社
- 周新民, 李武显. 2000. 中国东南部晚中生代火成岩成因: 岩石圈消减和玄武岩底侵相结合的模式. 自然科学进展, 10(3): 240-247