

# 宁芜火山岩的地球化学特征及其意义<sup>\*</sup>

王元龙 张旗 王焰

WANG YuanLong, ZHANG Qi and WANG Yan

中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2001-05-30 收稿, 2001-09-17 改回.

Wang YL, Zhang Q and Wang Y. 2001. Geochemical characteristics of volcanic rocks from Ningwu area, and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4):565-575

**Abstract** The early Cretaceous volcanic rocks in Ningwu area are composed of basic to intermediate volcanic rocks. Compared with alkaline basalts, Ningwu volcanic rocks are poor in Ti, Fe and enriched in K and LREE, with  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  ratios near to 1. Plotting in the shoshonite field in  $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$  diagram, all samples from Longwangshan Formation and most of samples from Dawangshan Formation are considered to be the products of partial melting of LILE- and fluid-rich mantle. Since the volcanic rocks in Ningwu area are formed in the interplate environment, the potassium-rich magma is probably generated by upwelling of asthenospheric mantle and the extension-thinning process of the Lithosphere or rifting. Ningwu volcanic rocks are enrichment of LILE and depletion of HFSE with negative Ti, Nb (Ta) anomaly. At the same time, the volcanic rocks of Longwangshan Formation and Dawangshan Formation in the bottom of Ningwu volcanic rocks show different geochemical characters from that of Ningwu volcanic rocks. The volcanic rocks of Longwangshan Formation have higher contents of Rb, Ba, K and poorer LREE (La, Ce, Nd), Eu, Sr and higher ISr ratios and lower  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  values than that of the volcanic rocks of Dawangshan Formation. This cannot be interpreted as a crystallization process because the Dawangshan Formation lies higher than the Longwangshan Formation in stratigraphic sequence. The only explanation for this is that in the early stage of volcanic exploration (Longwangshan Formation) the magmas undergo contamination with continental crust during upwelling and absorb abundant LILE such as K, Rb, Ba from the country rocks, which result in relatively high ISr ratios and low  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  values of the volcanic rocks of Longwangshan Formation. Poor correlation between  $\text{SiO}_2$  and  $\text{K}_2\text{O}$  in the volcanic rocks of Longwangshan Formation also argues the contamination of the continental crust. But in the strongest exploration stage (Dawangshan Formation) the isotopic composition of the volcanic rocks are close to that of primitive magmas due to the decrease of contamination between magmas and country rocks. Recent studies show that a large amount of adakite-like rocks of late-Mesozoic period crop out in the middle-lower reaches of Changjiang River. The adakite-like rocks are assumed to be derived from the lowest part of the thickened continental crust and to be generated by partial melting of the basic lower crust under very high temperature. Widespread eruption of the volcanic rocks in Ningwu area demonstrates that the mantle of the region was active during the early Cretaceous period, resulting in large amount of shoshonitic magma underplating beneath the lower crust, and the lower crust melting to form adakite-like magma finally.

**Key words** Nanjing-Wuhu area, Early Cretaceous, Volcanic rocks, Shoshonitic series, Adakite-like rocks, Geochemistry

**摘要** 宁芜早白垩世火山岩由中基性成分组成,与碱性玄武岩比较,火山岩贫 Ti、Fe,富 K 和 LREE,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  近似等于 1, 在  $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$  图中龙王山组的全部和大王山组的大部落入橄辉玄武岩区域,属于橄辉玄武岩系列,为富集 LILE 和水的幔幔部分熔融的产物。宁芜火山岩产于板内环境,富钾质岩浆的形成可能与软流圈地幔上涌和岩石圈的伸展-减薄或裂谷作用有关。宁芜火山岩富集大离子亲石元素,亏损高场强元素, Ti、Nb(Ta) 具负异常。宁芜火山岩底部的龙王山组和主体大王山组具有不同的地球化学特征:与大王山组相比,前者更富 Rb、Ba、K,而相对贫 LREE(La、Ce、Nd)、Eu、Sr,  $I_{\text{Sr}}$  较高,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  较低。由于龙王山组层位低,大王山组层位高,不可能解释为分离结晶作用的结果,而只能说明在火山岩喷发的早期阶段(龙王山组),岩浆穿过陆壳上升过程中与围岩发生过混染作用,从围岩中带入较多的 K、Rb、Ba 等大离子亲石元素,从而使得  $I_{\text{Sr}}$  较高和  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  较低。龙王山组  $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$  不具相关性也说明陆壳混染的影响。至宁芜火山岩喷发的极盛时期(大王山组),岩浆与围岩

\* 国家 973 项目“大规模成矿作用与大型矿集区预测”(G1999043206-05)和中国科学院知识创新工程基金项目(KZCX 1-07)资助的课题

第一作者简介:王元龙,男,1957年生,副研究员,岩石学和矿床地质学专业。E-mail: wicylw@163bj.com

的混染程度降低,  $I_{\text{Ce}}$  和  $\text{Nd}(t)$  值更接近岩浆的初始组成。据了解, 在长江中下游地区有许多晚中生代的埃达克质岩出露, 埃达克质岩来自加厚的陆壳底部, 需要很高的温度才能使下地壳基性岩发生部分熔融。宁芜一带火山岩的大规模喷出, 表明在早白垩世初期该区地幔处于十分活跃的状态, 可能有大量橄榄玄粗质岩浆底侵到下地壳底部, 烘烤下地壳使之熔融形成埃达克质岩浆。

**关键词** 南京-芜湖地区; 早白垩世; 火山岩; 橄辉玄粗岩系; 埃达克质岩; 地球化学

**中图法分类号** P588.14

## 1 前言

宁芜地区与火山岩有关的铁矿资源丰富, 70年代末80年代初曾进行过大规模的研究(宁芜研究项目编写小组, 1978)。宁芜火山岩位于下扬子岩浆岩带的东部, 下扬子燕山期岩浆岩带为一个狭长的东北向岩带, 东起上海, 西到武汉, 沿长江分布。毛建仁等(1990)将该区岩浆岩划分为沿江地区以石英闪长岩和花岗闪长岩为主的长江系列和长江之南以花岗岩为主的江南系列。据张旗等(2001a, b)的分析, 长江系列的大部分侵入岩属于埃达克质岩系, 是加厚的地壳底部下地壳镁铁质岩石部分熔融形成的, 宁芜和溧水一带的火山岩和侵入岩也一并归为埃达克岩系列(张旗等, 2001a, b)。笔者新近研究发现, 宁芜地区的火山岩主要由中基性成分组成, 不大可能是壳源的, 而应当属于地幔部分熔融的产物, 可能代表了导致长江中下游地区埃达克质岩熔融的来自地幔的热源。

宁芜火山岩还是我国最早报道的橄辉玄粗岩(Shoshonite)的产地。由于翻译的原因, shoshonite一词有多种叫法: 如安粗岩(于学元, 1981, 1986)、橄辉玄粗岩(薛怀民, 1989; 徐志刚等, 1999)、橄辉安粗岩(王德滋等, 1996; 邢凤鸣等, 1996, 1998)、钾玄岩(邓晋福等, 1992)等, 徐志刚等(1999)建议将其译为橄辉玄粗岩。宁芜火山岩是否属于shoshonite是一个有争议的问题。因此, 探讨宁芜火山岩岩石系列及其成因有重要的学术意义。

宁芜盆地火山岩从下向上分为龙王山组、大王山组、姑山组和娘娘山组(有的还从大王山组分出一个白头山组), 其中娘娘山组与前3个组不同, 是以白榴石响岩和蓝方石响岩为主的碱性火山岩。本文仅涉及前3个组。

## 2 地质概貌

宁芜火山盆地北起南京市(宁), 南至芜湖(芜), 沿NNE方向展布, 长约60km, 宽约20km, 火山岩出露面积约1000km<sup>2</sup>(图1)。该火山盆地发育在震旦纪以来的长期拗陷带中, 属于一个继承式的中生代陆相火山盆地。出露的基底地层为晚三叠统黄马青组、早侏罗统象山群和晚侏罗统西横山组, 称为下构造层(图1), 分布在盆地的东侧; 盆地西北部有少量晚白垩统浦口组以及第三纪的砂砾岩覆盖于火山岩之上(上构造层)。宁芜火山岩以龙王山组(占20%)和大王山

组(75%)为主(徐志刚等, 1999), 姑山组和娘娘山组很少(不到5%)。

(1) 龙王山组沿盆地东侧呈长条形分布。在代表性的龙王山剖面上, 该组下部主要由浅灰色的沉凝灰岩、粉砂质泥岩、火山集块岩等组成, 上部以熔岩为主, 主要由歪长粗面岩、橄辉玄粗岩和角闪石玄粗岩组成, 其间夹火山角砾岩。

(2) 大王山组是宁芜火山岩的主体, 厚度可达3000余米。下部以辉石玄粗岩为主, 含一些火山集块岩、角砾岩、凝灰岩、沉凝灰岩、凝灰质粉砂岩, 局部见有火山沉积铁矿; 中部为紫红色的安山岩, 局部见有凝灰质粉砂岩透镜体; 上部主要为灰红色, 浅灰色粗面岩, 粗面质熔凝灰岩。

(3) 姑山组分布范围小, 仅见于南段的姑山, 北段的梅山等地。上部以熔岩为主, 灰黑色安山岩、英安岩等, 下部则主要为一些火山碎屑岩和沉积岩。

(4) 娘娘山组仅见于盆地西侧的娘娘山一带。下部主要为集块岩、角砾岩和假白榴石响岩及熔结凝灰岩; 上部为响岩质熔结角砾岩、蓝方石响岩等。娘娘山组是宁芜盆地晚期中心式火山喷发的产物, 无论在火山活动方式及岩石成分上都不同于其他火山旋回。

对下扬子地区中生代火山岩系地层的时代归属, 虽已进行了许多的研究工作, 但目前仍未取得一致意见。早期通常把大部分火山岩系地层都归属于晚侏罗世, 近年晚侏罗世-早白垩世的界线有所下移, 目前在各火山盆地1:5万地质测量工作中, 大都将火山岩系下部的龙王山组划归晚侏罗世, 其余则划属于白垩纪(引自岳文浙等, 1999)。而据我们收集的火山岩同位素定年资料(表1), 龙王山组在136~125 Ma之间, 大王山组(125~120 Ma)、姑山组(117~110 Ma), 均属于早白垩世, 仅娘娘山组年龄较新(106~91 Ma), 为早白垩世最晚期的火山岩。

## 3 地球化学

分析方法: 主元素和微量元素分析在中国科学院地球化学所资源环境分析实验室完成, 主元素用湿化学方法测定(分析者: 李绥荣); 微量元素用ICP-MS方法完成(分析者: 漆亮), Nd和Sr同位素在中科院地质与地球物理研究所用VG354质谱仪分析(分析者: 张任恬和乔广生), 分析数据见表2。宁芜火山岩的龙王山组、大王山组和姑山组火山岩SiO<sub>2</sub>含量在52.9%~59.2%之间(表2), 平均56.2%。在Si-K图中(图2a), 龙王山组富K, 全部落在橄辉玄粗岩范

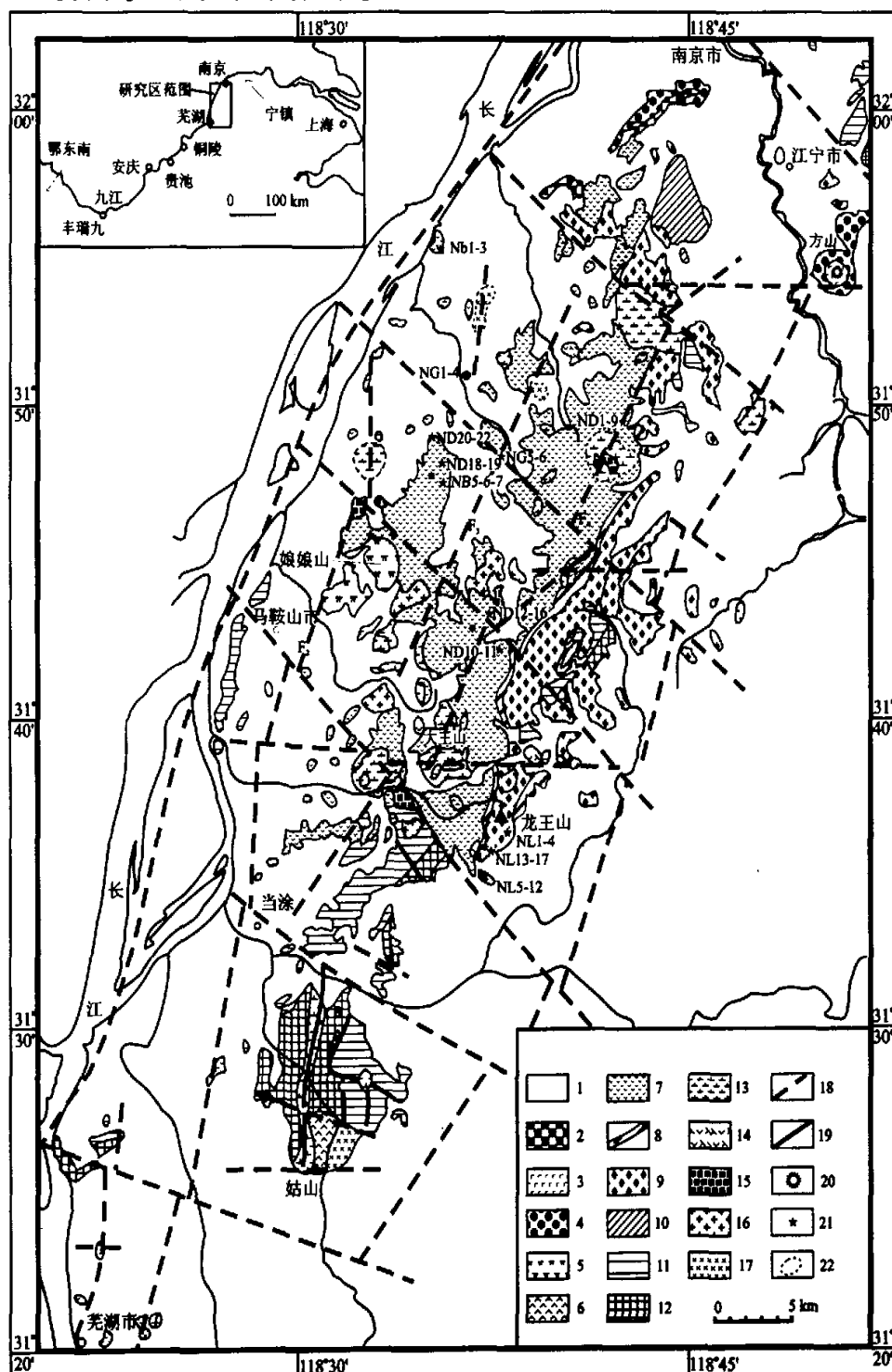


图1 宁芜地区火山岩地质图(据宁芜研究项目编写小组,1978)

1. 第四系; 2. 上构造层第三亚构造层(N<sub>2</sub>); 3. 上构造层第二亚构造层(N<sub>21</sub>); 4. 上构造层第一亚构造层(K<sub>2</sub>-N<sub>1</sub>); 5. 娘娘山组火山岩; 6. 姑山组火山岩; 7. 大王山组火山岩; 8. 龙王山组凝灰岩; 9. 龙王山组火山岩; 10. 下构造层第三亚构造层(J<sub>3x</sub>); 11. 下构造层第二亚构造层(J<sub>1-2</sub>); 12. 下构造层第一亚构造层(D-T); 13. 辉长-闪长玢岩; 14. 安山玢岩、粗安玢岩、粗面斑岩; 15. 二长岩、石英闪长岩; 16. 花岗岩; 17. 辉长岩; 18. 推测断层; 19. 实测断层; 20. 火山口; 21. 采样点; 22. 据钻孔推测的隐伏地质体

Fig. 1 Geological map of the volcanic rocks in Ningwu area (after Ningwu Volcanic Rocks Study Project, 1978)

表1 宁芜火山岩同位素年龄资料

Table 1 Isotopic chronological data of the volcanic rocks in Ningwu area

旋回	样品号	岩石名称	产地	测定对象	测定方法	年龄(Ma)	测定单位	资料来源
娘娘山	NW10-M5	粗安岩	梅山	全岩	K-Ar	91.0	中科院地质所	1
	JT-4	黝方石响岩	娘娘山	全岩	K-Ar	99.8	中科院地质所	1
	JT-3	黝方石响岩	铜井	全岩	K-Ar	105.5	中科院地质所	1
		粗面岩		黑云母	K-Ar	94.3		2
姑山	NW11-M7	安山岩	梅山	全岩	K-Ar	109.7	中科院地质所	1
	JM3	安山岩	梅山	全岩	K-Ar	114.0	中科院地质所	1
	AS-3	安山岩	鹰子山	全岩	K-Ar	113.2	中科院地质所	1
	AL-13	粗安岩	龙王山	全岩	K-Ar	114.6	中科院地质所	1
	NW35-G2	安山岩	姑山	全岩	K-Ar	115.7	中科院地质所	1
		安山岩		黑云母	K-Ar 等时线	116.6		2
大王山	JM2	安山岩	梅山	全岩	K-Ar	121.4	中科院地质所	1
	AQ-Z1	粗安质角砾熔岩	七里尖	全岩	K-Ar	120.2	中科院地质所	1
		安山岩		黑云母	K-Ar	121.4	南京地矿所	2
				黑云母	K-Ar 等时线	122.4	南京地矿所	2
				黑云母	K-Ar	124.6	中科院地质所	3
龙王山	NW37-丹2	粗面岩	小丹阳	黑云母	K-Ar	125.3	中科院地质所	1
		粗安质角砾熔岩	龙王山	全岩	K-Ar	126.8	中科院地质所	1
	NW-37	粗安岩	小丹阳	黑云母	Ar-Ar	129.2	澳大利亚大学	4
	NW-37	粗安岩	小丹阳	黑云母	K-Ar	127.1	澳大利亚大学	4
	JM-2	安粗岩	梅山	黑云母	K-Ar	130.1	澳大利亚大学	4
				黑云母	K-Ar	130.5		5
				黑云母	K-Ar	125.3		中科院地质所
				全岩	Rb-Sr	136.0		5
		粗面岩			Ar-Ar 等时线	126.6		2

资料来源:1,宁芜研究项目编写组,1978;2,李坤英,1982;3,中国科学院地质研究所火山岩组,1980;4,Wang et al., 1980;5,岳文浙等,1999。  
(注:2,3 引自岳文浙等,1999)。

围,大王山组则落在橄榄玄粗岩和高钾钙碱性区域。邢凤鸣等(1996)统计的龙王山组和大王山组安粗岩的平均成分也落在橄榄玄粗岩系,而姑山组 K 含量较低,为高钾钙碱系列(图 2a)。龙王山组的  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  比值最低(0.8),大王山组和姑山组较高(分别为 1.2 和 1.5,据邢凤鸣等,1996)。看来,宁芜火山岩由早到晚, K 丰度有降低的趋势。龙王山组、大王山组和姑山组总的  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  比,按本文资料为 1.0,按邢凤鸣等(1996)为 1.1。因此,宁芜火山岩以橄榄玄粗岩系为主,晚期向高钾钙碱系列演化。

宁芜火山岩为 LREE 富集的类型,有弱的负异常(图 2b)。其中,龙王山组的 LREE 富集程度较大王山组略低(龙

王山组  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 4.2-6.1$ ,大王山组为 5.3-10.3),前者的 HREE 丰度略高(龙王山组的  $\text{Yb} = 2.28-2.33 \mu\text{g/g}$ ,大王山组为 1.98-2.19  $\mu\text{g/g}$ ,表 2,图 2b),说明龙王山组和大王山组可能不是同一地幔源分离结晶作用的结果。龙王山组有较明显的负异常,而大王山组负异常不明显,可能是因为龙王山组富 K,钾长石数量较多的反映。在蛛网图中,宁芜火山岩富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,具 Ti、Nb (Ta) 的负异常(图 2c)。龙王山组和大王山组不同的是,前者富 Rb、Ba、K,贫 LREE(La、Ce、Nd)、Eu、Sr,后者则有明显的 Sr 正异常(图 2c),暗示龙王山组可能有陆壳物质的混入,图 2a 中龙王山组 Si-K 不具相关性,也说明陆壳混染的影响。

表 2 宁芜火山岩主量和微量元素化学分析

Table 2 Major and trace element analysis of the volcanic rocks in Ningwu area

样品号	NL5	NL9	NL11	ND2	ND9	ND18	ND21	NB1	NB2	NB6	NG3	全区平均	龙王山组平均(18) <sup>1)</sup>	大王山组平均(17) <sup>1)</sup>	姑山组平均(5) <sup>1)</sup>
岩石	亚长粗面岩	橄辉粗安岩	亚长粗面岩	安粗岩	安山岩	安粗岩	安粗岩	安粗岩	玄武岩	安山岩	安山岩				
SiO <sub>2</sub>	56.72	52.88	56.12	56.27	57.26	59.20	55.07	57.51	53.61	56.33	56.86	56.17	55.31	56.81	57.12
TiO <sub>2</sub>	0.72	0.70	0.67	0.76	0.80	0.65	0.93	0.78	0.73	0.72	0.77	0.75	0.76	0.76	0.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.80	18.89	17.95	18.42	17.65	17.71	17.95	14.64	16.29	16.30	16.29	17.35	17.12	16.7	16.51
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.21	5.20	3.65	3.60	3.20	1.93	4.10	4.30	4.33	4.20	4.48	4.02	6.03	5.09	3.53
FeO	2.49	6.10	4.35	4.30	4.40	3.77	4.20	2.50	2.47	2.60	2.42	3.60	2.46	2.76	3.13
MnO	0.18	0.44	0.39	0.21	0.16	0.08	0.13	0.14	0.13	0.14	0.11	0.19	0.31	0.13	0.08
MgO	2.00	3.60	3.20	2.50	3.30	2.00	2.40	2.90	1.90	3.60	3.50	2.81	2.13	2.06	2.45
CaO	1.00	0.90	1.00	2.70	5.00	5.10	5.80	7.70	7.70	6.50	4.30	4.36	2.85	3.69	5.61
Na <sub>2</sub> O	5.04	2.03	4.45	6.20	3.32	2.65	4.07	3.01	2.92	2.30	3.34	3.58	3.83	4.48	3.58
K <sub>2</sub> O	4.50	6.60	5.30	2.26	2.00	4.32	2.86	3.39	3.29	3.02	2.78	3.67	4.61	3.75	2.4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.20	1.00	1.17	0.93	0.97	0.97	1.00	0.90	0.97	0.83	0.97	0.99	0.34	0.38	0.24
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	2.20	2.09	1.72	2.32	1.06	1.10	0.99	1.30	4.70	3.05	3.86	2.22	4.12	3.01	2.08
CO <sub>2</sub>					0.60	0.62	0.65	0.80	1.06	0.65		0.40			2.08
总和	100.06	100.43	99.97	100.47	98.72	100.10	100.15	98.87	100.10	100.24	99.98	100.10	100.10	100.07	100.08
Mg <sup>#</sup>	0.34	0.38	0.43	0.38	0.45	0.4	0.36	0.45	0.35	0.51	0.5	0.41	0.33	0.34	0.41
Li	13.63	20.08	11.35	14.07	22.42	10.58	8.31	15.83	14.57	38.78	52.34	20.18			
Sc	13.2	12.2	11.6	21.8	21.3	16.0	17.9	19.4	17.9	18.9	19.0	17.19			
V	108	107	108	176	176	134	186	174	163	166	180	153.84			
Cr	13	31	8	10	9	39	9	65	40	58	23	27.70			
Co	8.3	18.2	19.2	21.1	20.8	12.1	16.7	21.7	18.2	21.3	22.1	18.16			
Ni	6.6	17.6	5.9	7.8	6.9	15.1	7.1	22.3	16.9	17.7	13.7	12.50			
Rb	187.8	190.5	160.0	49.8	43.6	109.3	62.9	117.9	113.8	80.8	98.0	110.40			
Sr	198	140	283	278	561	599	628	697	628	662	451	465.85			
Y	19.5	19.2	18.1	19.2	20.1	17.8	21.2	18.8	19.6	18.8	18.7	19.18			
Zr	131.8	129.4	128.2	93.7	97.6	133.5	124.4	83.9	84.0	113.0	106.3	111.43			
Nb	7.8	7.6	7.7	5.3	5.4	7.6	6.4	7.7	7.0	6.7	6.2	6.84			
Cs	7.2	2.2	1.1	0.6	2.8	7.1	3.2	5.0	4.3	3.1		3.34			
Ba	1278	4265	2529	706	652	723	660	518	436	547	492	1164.25			
La	15.63	23.31	19.13	19.13	20.26	26.89	26.56	34.13	35.72	25.84	21.89	24.41			
Ce	35.26	47.09	40.09	39.75	42.08	54.01	54.45	66.54	69.46	53.04	45.20	49.72			
Pr	4.14	5.52	4.38	4.61	4.98	5.95	6.07	7.03	7.45	6.03	5.08	5.57			
Nd	17.41	21.69	18.23	19.86	20.78	23.22	25.28	27.50	29.19	24.26	21.11	22.59			
Sm	3.71	4.50	4.04	4.62	4.46	4.46	5.52	5.29	5.79	5.03	4.44	4.72			
Eu	0.78	1.20	0.98	1.26	1.43	1.23	1.45	1.48	1.56	1.31	1.29	1.27			
Gd	3.86	4.01	3.52	3.84	4.43	4.11	4.76	4.38	4.78	4.40	3.97	4.15			
Tb	0.50	0.54	0.52	0.53	0.62	0.57	0.67	0.63	0.65	0.61	0.56	0.58			
Dy	3.27	3.51	3.10	3.36	3.67	3.28	4.01	3.64	3.84	3.45	3.39	3.48			
Ho	0.73	0.70	0.67	0.75	0.77	0.67	0.79	0.71	0.71	0.70	0.72	0.72			
Er	2.21	2.14	2.00	2.16	2.21	1.91	2.34	2.05	2.10	2.10	2.14	2.12			
Tm	0.32	0.33	0.34	0.34	0.34	0.30	0.34	0.32	0.31	0.30	0.30	0.31			
Yb	2.28	2.32	2.33	2.18	2.19	2.08	2.19	2.09	2.10	1.98	2.09	2.17			
Lu	0.32	0.30	0.33	0.28	0.28	0.28	0.31	0.30	0.29	0.30	0.30	0.30			
Hf	3.99	3.73	3.95	2.77	2.97	4.33	4.19	3.09	3.01	3.84	3.73	3.60			
Ta	0.48	0.47	0.44	0.31	0.31	0.58	0.36	0.55	0.53	0.49	0.43	0.45			
Pb	7.46	10.59	13.09	4.46	8.77	14.67	15.41	17.66	22.62	27.01	26.58	15.30			
Th	6.03	5.86	5.81	3.64	3.81	11.73	6.56	13.95	13.91	10.30	8.24	8.17			
U	1.23	1.35	1.33	0.83	0.83	3.34	1.73	4.30	3.32	3.26	2.42	2.48			

注: NL, 龙王山组; ND和NB, 大王山组; NG, 姑山组。采样位置见图1。1) 据邢凤鸣等(1995), 括号内数字为样品数。

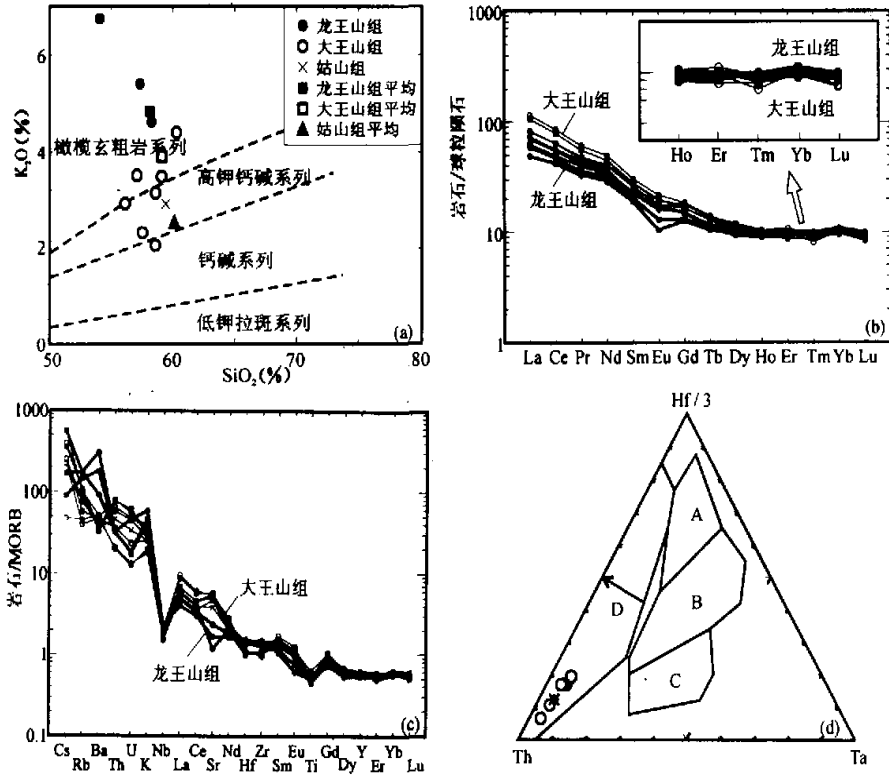


图2 宁芜火山岩  $SiO_2$ - $K_2O$ (a)、REE 分布(b)、微量元素分布(c)和 Ta-Th-Hf(d)图  
 Fig. 2  $SiO_2$ - $K_2O$  diagram (a), chondrite-normalized REE patterns (b), MORB-normalized trace element diagram (c), and Ta-Th-Hf diagram (d) for Ningwu volcanic rocks

表3 宁芜火山岩 Sr-Nd 同位素分析

Table 3 Sr-Nd isotopic analysis of the volcanic rocks in Ningwu area

	NL-5	NL-9	ND-2	ND-9	ND-21	NB-2	NB-6	NG-3
Rb	176	187.8	50.93	43.07	60.16	100.1	85.1	97.13
Sr	187	119	239.4	625	696.9	742.1	675.4	381.4
$^{87}Sr/^{86}Sr$	0.713217	0.715977	0.707593	0.705418	0.706249	0.706095	0.70595	0.706889
$^{87}Rb/^{86}Rb$	2.719	4.537	0.6144	0.2021	0.2492	0.3895	0.3637	0.7354
$I_{Sr}$	0.7082	0.7076	0.7065	0.7050	0.7058	0.7054	0.7053	0.7055
Sm	3.129	4.225	4.019	3.619	5.022	5.432	4.62	4.084
Nd	15.27	21.53	19.01	17.19	24.03	28.37	22.92	19.87
$^{143}Nd/^{144}Nd$	0.512221	0.512196	0.512351	0.512327	0.512313	0.512393	0.512394	0.512370
$^{147}Sm/^{144}Nd$	0.124	0.1187	0.1278	0.1273	0.1264	0.1158	0.1219	0.1243
$\epsilon_{Nd}(t)$	-6.9	-7.3	-4.5	-4.9	-5.2	-3.4	-3.5	-4.0
$T_{DM}$	1575	1528	1416	1450	1459	1178	1254	1328

注: 岩石名称及所处层位见表1, 采样位置见图1.  $t=129$  Ma (Wang et al., 1981).

宁芜火山岩  $Th > Ta$ ，在  $Th-Ta-Hf$  图中落在岛弧区域(图 2d)，但这并不表明宁芜火山岩形成于岛弧环境(详见后述)。

宁芜火山岩的 Nd、Sr 同位素组成见表 3。与大王山组相比，龙王山组的  $I_{Sr}$  较高， $\epsilon_{Nd}(t)$  较低(图 3)，由于龙王山组层位低，大王山组层位高，不可能解释为分离结晶作用的结果，而可能说明在火山岩喷发的早期阶段(龙王山组)，岩浆穿过陆壳上升过程中与围岩发生过混染作用，从围岩中带入较多的 K、Rb、Ba 等大离子亲石元素，从而使得  $I_{Sr}$  值较高和  $\epsilon_{Nd}(t)$  较低。至宁芜火山岩喷发的极盛时期(大王山组)，岩浆与围岩的混染程度降低， $I_{Sr}$  值和  $\epsilon_{Nd}(t)$  值更接近岩浆的初始组成。

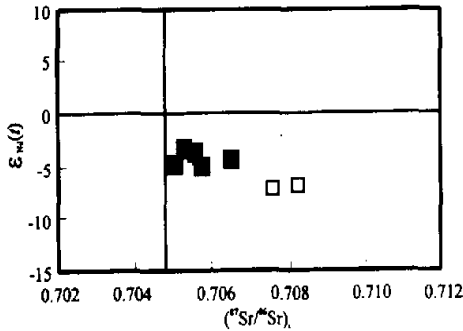


图 3 宁芜火山岩 Nd-Sr 同位素图  
空心方块为龙王山组；实心方块为大王山组

Fig. 3 Diagram of Nd-Sr isotope for Ningwu volcanic rocks

## 4 讨论

### 4.1 关于橄榄玄粗岩系问题

自南亚君等<sup>①</sup>首次提出宁芜盆地火山岩为橄榄安粗岩组合(shoshonite)后，得到许多人的赞同(于学元，1986；薛怀民等，1989；王德滋等，1996；邢凤鸣等，1996，1998；唐永成等，1998；邓晋福等，1992)。徐志刚等(1999)归纳了中国东部中生代火山岩资料，认为它们中的大多数都不是 shoshonite 系列。

Shoshonite 的名称最初是研究美国黄石公园一种含钾长石的玄武岩时提出的，Joplin(1968)把它作为一个岩石系列的名称(Shoshonitic magmatic series)用于一套由玄武质到粗面质的岩石，并把它看作与碱性玄武岩系列对应的富钾岩石系列。Morrison(1980)总结了 shoshonite 的特点，提出 shoshonite 区别于碱性玄武岩系列、钙碱性系列、拉斑玄武岩系列的一些判别标准。橄榄玄粗岩系以高碱质(在硅-碱图上落在碱性玄武岩区)不同于亚碱性系列的岩石，而与碱性玄武岩系列相似；但又以富钾、低钛和弱的富铁趋势与碱性玄武岩系列相区别。在橄榄玄粗岩组合中，中基性火山岩占优势，Peccerillo et al. (1976) 只把  $SiO_2 < 63\%$  的岩石定义为橄

榄玄粗岩系。

宁芜火山岩是中基性的， $K_2O$  含量变化大，从 2%~6.6% (不包括娘娘山组)，全区平均的  $Na_2O/K_2O$  近似等于 1，在 Si-Alk 图中，龙王山组全部和大王山组大部落入碱性区域(文中未附)，在 Si-K 图中落入橄榄玄粗岩区域，只有一部分大王山组和出露较少的姑山组落入高钾钙碱系列(图 2a)。与碱性玄武岩比较，宁芜火山岩贫 Ti 和  $Fe(TiO_2 < 1\%)$ ，平均的总 Fe 含量  $< 9\%$ ，见表 1)，因此，笔者认为，宁芜火山岩的主体属于橄榄玄粗岩系列，只少量火山岩(大王山组的一部分和姑山组)属于高钾钙碱系列。

### 4.2 火山岩形成的构造环境

对本区中生代火山作用的大地构造环境存在不同的认识。多数学者认为属于与俯冲作用有关的大陆边缘火山弧(吴利仁等，1982；翁世劫等，1983；陶奎元等，1988；邓晋福等，1992)，有的认为属于大陆裂谷火山作用(王东方，1986)，有的认为火山岩起因于断裂重熔(霍玉华等，1986；徐嘉炜等，1987)(以上见邓晋福等，1992 的评述)。王德滋等(1996)认为宁芜火山岩与基底深断裂有关，长江中下游断裂控制了火山构造洼地和火山断陷盆地的形成。

多数学者认为橄榄玄粗岩源于富集地幔(有来自消减带的水和 LILE 加入或经历了陆壳混染作用)(Rogers et al., 1987; Bacon, 1990; Beccaluva et al., 1991; Pe-Piper and Piper, 1992; 邓晋福等，1992; Turner et al., 1993; 王德滋等，1996)，只有少数人认为是玄武岩高压下分离结晶形成的(Meen, 1987)。富集大量水和流体的地幔的部分熔融形成的玄武-安山质岩浆必定富集 LILE，具有很高的  $Th/Ta$  比值。因此，不能根据橄榄玄粗岩的地球化学特征来判断其形成的构造环境。此外，长江中下游地区与宁芜火山岩同时代的中酸性火成岩也不适合于判断构造环境，因为，花岗岩的地球化学性质主要反映的是花岗岩源区的性质和构造环境，而非花岗岩形成时的构造环境(Roberts et al., 1993)。而且，长江中下游晚中生代的侵入岩大多为埃达克质岩石(张旗等，2001a)，埃达克质岩浆的形成与石榴石处于平衡，岩浆将强烈亏损 HREE 和 Nb、Y 等高场强元素，在 Pearce et al. (1984) 的 Nb-Y 和 Rb-Nb+Y 图中，样品点将向左侧偏离落入岛弧区，从而导致错误的结论。

针对中国东部晚中生代岩浆活动的特征，笔者认为，应当主要依据玄武岩(辉长岩)，包括双峰式火山岩中的玄武岩的资料来考虑它们的形成环境。中国东部有许多双峰式火山岩，其成因也存在争论。中国东部大多数玄武岩(和辉绿岩及辉长岩)属于钙碱系列，少数为高钾钙碱性、橄榄玄粗岩系及拉斑质的，富 Fe、Ti 和 P，具板内玄武岩的特征，如八达岭花岗岩中包裹的辉长岩(王焰等，2001)、浙闽赣粤的双峰式火

① 南亚君，徐建国，1980. 宁芜盆地橄榄安粗岩组合岩石化学及演化特征. 第一届全国火山岩会议论文集.

表4 长江中下游地区埃达克质岩的地球化学特征

Table 4 The geochemical characteristics of adakite-like rocks from middle-lower reaches of Yangtze River area

地区	鄂东南	安庆	铜陵	贵池	沙溪
岩石组合	石英闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩	花岗岩闪长岩	石英闪长玢岩
SiO <sub>2</sub> (%)	57~66		59~62		57~61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	16~19		15~17		17~18
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1.37~1.84		0.97~2.25		2.29~3.54
Sr(μg/g)	737~1210	1604	758~1075	723	859~1491
Y(μg/g)	11~14	14	13~20	14	9~12
Yb(μg/g)	0.98~1.14	1.26	0.73~1.87	1.36	0.80~1.16
Sr/Y	54~114	114	39~102	53	89~116
La/Yb	42~51	39	18~51	27	15~24
I <sub>s</sub>	0.706~0.707	0.706~0.707	0.707~0.709	0.706~0.708	0.705~0.706
ε <sub>Nd</sub> (t)	-8~-12	-7~-13	-11~-16	-6~-7	-4~-5
t(Ma)	133~136	136	137	137	127~137
T <sub>DM</sub> (Ga)	1.3~1.6	1.3~1.6	1.7~2.2	1.3~1.6	1.2~1.3
参考文献	1~3	1,4,5	1,4~7	3,5,7	4,8

1. 毛建仁等, 1990; 2. 马昌前等, 1994; 3. 陈江峰等, 1994; 4. 邢凤鸣等, 1995; 5. 常印佛等, 1995; 6. 陈江峰等, 1993; 7. Chen *et al.*, 1985; 8. 王强等, 2000

山岩(Li *et al.*, 1998; 杨祝良等, 1999)、大兴安岭玄武岩和双峰式火山岩(林强等, 1998; 邵济安等, 1999; 郭峰等, 2001)。中国东部燕山期玄武岩总体上具板内玄武岩的特征, 但有的玄武岩具有岛弧玄武岩的印记, 如 LILE 富集, HFSE 亏损, Th>Ta 等。一种可能的解释是陆壳混染所致, 另一种可能是由于地幔不均一性所引起的, 由于受到早先的消减事件带来的流体的影响, 使地幔发生了交代作用从而相对富集 LILE、亏损 HFSE 和 Ti 等元素(林强等, 1998; 郭峰等, 2001; 王岳军等, 2001)。

研究表明, 橄榄玄粗岩系主要来源于与俯冲作用有关的富钾和 LILE 的交代地幔, 包括大洋岛弧、大陆弧和后碰撞弧环境, 只有极少数产于板内伸展环境(Morrison, 1980; Foley *et al.*, 1992; Muller *et al.*, 1995)。宁芜地区在中生代时远离大陆边缘, 属板内环境。板内钾质岩浆的形成通常与软流圈地幔上涌和岩石圈的伸展-减薄或裂谷作用有关(李献华等, 2001), 表明晚中生代时宁芜地区发生了软流圈地幔上涌、岩石圈伸展和裂谷作用。本文的研究表明, 这个时期的岩石圈伸展和裂谷作用也影响到整个长江中下游地区, 形成了该区广泛的中酸性岩浆活动。推测软流圈地幔的上涌和地温梯度增高导致上覆岩石圈地幔中的低熔组分(LILE 和 LREE 富集的交代地幔)发生部分熔融形成了橄榄玄粗岩系火山岩。

#### 4.3 宁芜火山岩与长江中下游埃达克质岩的关系

长江中下游地区的火成岩大体沿长江分布, 从武汉直抵

上海。该区火成岩大多为中酸性成分的, 仅靠近苏皖一带的宁芜、溧水、庐枞地区中基性的火山岩较多, 其他地区也有中基性火成岩零星出露(图4左)。毛建仁等(1990)在总结长江中下游中酸性火成岩时, 将沿长江一带分布的以石英闪长岩、石英闪长玢岩、花岗岩闪长岩、石英二长岩为主的一套组合称之为长江系列, 而位于其南的以花岗岩为主的岩系称为江南系列。据我们分析, 长江系列的大多数岩体类似埃达克岩的地球化学特征, 属于埃达克质岩(表4和图4右), 如鄂东南的铁山、鄂城、封瑞九(封三洞-瑞昌-九江)地区的湖北封三洞、江西武山和城门山, 安徽的月山, 铜陵的铜官山、狮子山, 贵池铜山, 滁州榔岬山、沙溪, 宁镇地区的安基山和上海的张埭等(其时代大多限制在 127~137Ma 之间, 与宁芜火山岩是同时代的, 见表4及所附的文献), 而江南系列中只有少量偏中性成分的岩体可能具有埃达克岩的特征。

宁芜一带的中基性火山岩和长江中下游其他地方的中酸性火成岩有什么关系, 是我们关注的问题。埃达克质岩石来自加厚的陆壳底部下地壳基性麻粒岩的部分熔融(张旗等, 2001a), 因此, 它需要很高的温度, 只有来自地幔的热供给有可能使下地壳基性岩发生部分熔融。宁芜一带火山岩的大规模喷出, 表明在早白垩世初期该区地幔处于十分活跃的状态, 有大量橄榄玄粗岩岩浆被从地幔中分出来, 可能有相当一部分岩浆底侵到地壳底部, 烘烤下地壳使之发生部分熔融, 形成埃达克质岩浆喷出地表或侵入在地壳浅部。在长江中下游的其他地区, 也有来自幔源的中基性岩石的零星分布, 暗示其深部地幔也发生了部分熔融作用, 从而为埃达



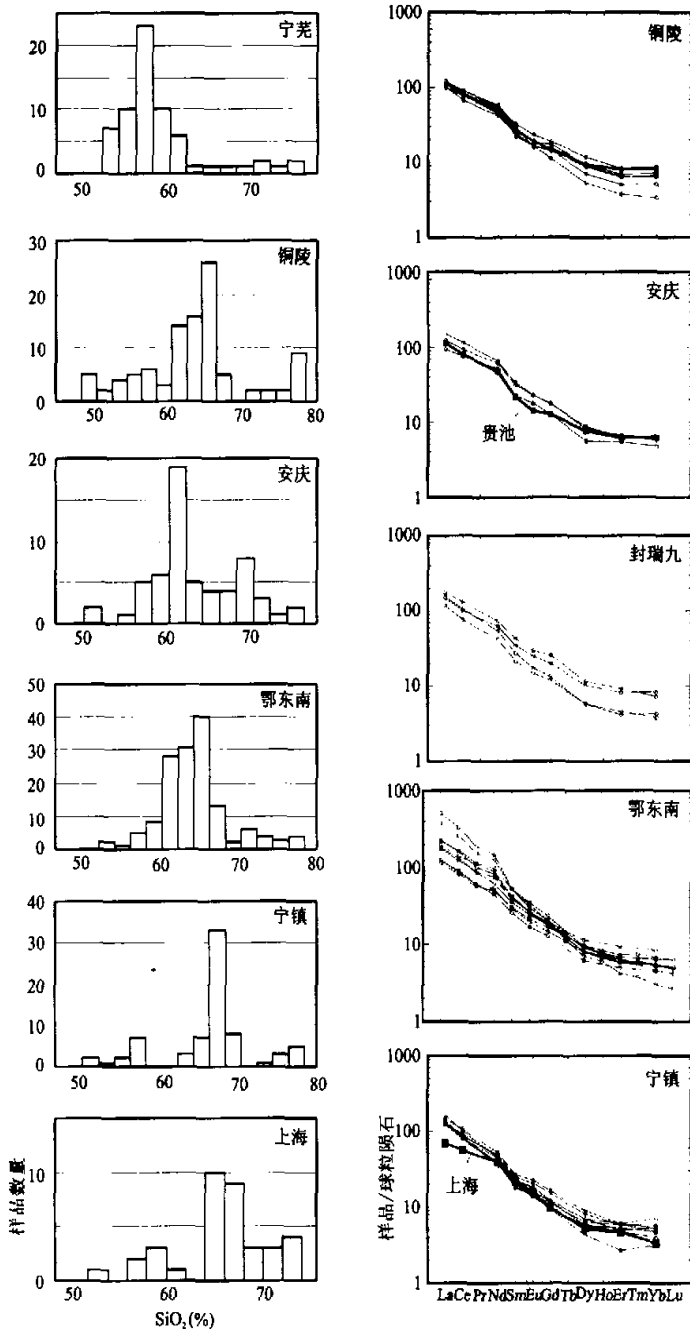


图 4 长江中下游地区若干火山岩和侵入岩 SiO<sub>2</sub> 分布直方图(左)和中性侵入岩 REE 图(右)  
 宁芜为火山岩,其它地区为侵入岩. 资料来源:宁芜据本文和毛建仁等(1990),其余据毛建仁等(1990)

Fig. 4 Frequency diagrams of SiO<sub>2</sub>(left) and REE patterns for intermediate to acid intrusive in Lower Yangtze River area (right)

克质岩石的形成提供了条件。

此外,宁芜富K质的橄榄玄粗岩系的确定,表明源区地幔富含水和流体,玄武质岩浆烘烤下地壳,水和流体则伴随玄武质岩浆一道进入下地壳,一方面可以降低下地壳熔融的温度,另一方面可能从下地壳中淋滤出有用元素(Fe、Cu、Au、Mo等),并随中性性和中酸性岩浆上升,在合适的条件下富集成矿。

## 5 结论

(1) 宁芜火山岩由中性成分组成,与碱性玄武岩比较,宁芜火山岩贫Ti和Fe,富K和LREE,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  近似等于1,在Si-K图中龙王山组的全部和大王山组的大部分落入橄榄玄粗岩区域,属于橄榄玄粗岩系列,为交代地幔部分熔融的产物。宁芜地区在中生代时远离大陆边缘,属板内环境。宁芜富钾质岩浆可能与软流圈地幔上涌和岩石圈的伸展-减薄或裂谷作用有关。

(2) 宁芜火山岩的龙王山组和大王山组具有不同的地球化学特征,与后者相比,龙王山组更富LILE,  $1_{\text{Sr}}$  较高,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  较低,说明龙王山组可能受到陆壳混染作用的影响,大王山组火山岩的Nd-Sr同位素组成更接近宁芜火山岩的初始组成。

(3) 长江中下游地区有许多晚中生代的埃达克质岩出露,埃达克质岩来自加厚的陆壳底部,需要很高的温度才能使下地壳基性岩发生部分熔融。宁芜一带火山岩的大规模喷出,表明在早白垩世初期该区地幔处于十分活跃的状态,有大量橄榄玄粗质岩浆被从地幔中分出来,可能有相当一部分岩浆底侵到下地壳底部,烘烤下地壳使之发生部分熔融,形成埃达克质熔浆喷出地表或侵入在地壳浅部。

**致谢:** 野外工作期间得到南京地质矿产研究所薛怀民博士、谢宴克研究员、毛建仁研究员的热情帮助,与薛怀民博士的交流使笔者受益匪浅,钱青博士参加了野外工作,在此一并表示衷心地感谢。

## References

- Bacon C R. 1990. Calc-alkaline, shoshonite and primitive tholeiitic lavas from monogenetic volcanics near Crater Lake, Oregon. *J. Petrol.*, 31: 135-166
- Beccaluva L, Girolamo P D, Serri G. 1991. Petrogenesis and tectonic settings of the Roman volcanic province, Italy. *Lithos*, 26: 191-221
- Chen J F, Foland K A, Zhou T X. 1985. Mesozoic granitoids of the Yangtze fold belt; isotopic constraints on the magma sources. In: Wu L R *et al.* (eds.). *The crust-the significance of granite gneisses in the Lithosphere*. Theophrastus, Athens, 217-237
- Chen J F, Jahn B M. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophy.*, 284: 101-133
- Chen J F, Zhou T X, Li X M *et al.* 1993. Sr and Nd isotopic constraints on source regions of the intermediate and acidic intrusions from southern Anhui province. *Geochemistry*, 3: 261-268 (in Chinese with English abstract)
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction Lithosphere. *Nature*, 347: 662-665
- Foley S F, Peccerillo A. 1992. Potassic and ultrapotassic magmas and their origin. *Lithos*, 28: 181-185
- Guo F, Fan WM, Wang YJ and Lin G. 2001. Petrogenesis of the late Mesozoic bimodal volcanic rocks in the southern Da Hinggan Mts., China. *Acta Petrologica Sinica*, 17: 161-168 (in Chinese with English abstract)
- Joplin G A. 1968. The shoshonite association; a review. *J. Geol. Soc. Aust.*, 15: 275-294
- Li Xian-hua, McCulloch M T. 1998. Geochemical characteristics of Cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China: Age, origin and tectonic significance. In: Flower M F J *et al.* (eds.). *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. Am. Geophys. Union, Washington D. C. 405-419
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Liu Ying *et al.* 2001. Mesozoic shoshonitic intrusives in the Yangchun Basin, western Guangdong, and their tectonic significance: II. Trace elements and Sr-Nd isotopes. *Geochimica*, 30: 57-65 (in Chinese with English abstract)
- Ma CQ, Yang KG, Tang ZH. 1994. Magma-dynamics of granitoids — theory, method and a case study of the eastern Hubei granitoids. Wuhan: Press of China University of Geosciences. (in Chinese)
- Mao J R, Su Y X, Chen S Y. 1990. Felsic intrusions and mineralization in the middle and lower part of Yangtze River. Beijing: Geological Publishing House, 1-191. (in Chinese with English abstract)
- Meen J K. 1987. Formation of shoshonites from calc-alkaline basalt magmas: geochemical and experimental constraints from the type locality. *Contr. Mineral. Petrol.*, 97: 333-351
- Morrison G W. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association. *Lithos*, 13: 97-108
- Muller D, Groves D L. 1995. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization. Berlin: Springer-Verlag, 1-210
- Ningwu Project Group. 1978. The porphyrite iron deposit of Ningwu. Beijing: Geological Publishing House
- Pearce J A, Harris B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretations of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25: 956-983
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58: 63-81
- Pe-Piper G and Piper D J W. 1992. Geochemical variation with time in the Cenozoic high-K volcanic rocks of the island of Lesbos, Greece; significance for shoshonite petrogenesis. *J. Volcan. Geotherm. Res.*, 53: 371-387
- Roberts M P and Clemens J D. 1993. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids. *Geology*, 21: 825-828
- Rogers N W, Hawkesworth C J, Matthey D P *et al.* 1987. Sediment subduction and the source of potassium in orogenic leucites. *Geology*, 15: 451-453
- Shao JA, Han QJ, Zhang LQ *et al.* 1999. Two kinds of vertical accretion of the continental crust; an example of the Da Hinggan Mts. *Acta Petrologica Sinica*, 15(4): 600-606 (in Chinese with English abstract)
- Tang Yongcheng, Wu Yanchang, Chu Guozheng *et al.* 1998. Geology of copper-gold polymetallic deposits in the along-Changjiang area of Anhui Province. Beijing: Geological Publishing House, 1-351 (in Chinese)

- Turner S, Arnaud N, Liu J *et al.* 1993. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau; implications for convective thinning of the Lithosphere and the source of ocean island basalts. *J. Petrol.*, 37: 45-71
- Wang D Z, Ren Q J, Chen K R. 1996. Characteristics of volcanic rocks in the shoshonite province, eastern China and their metallogenesis. *Acta Geologica Sinica*, 70: 23-34 (in Chinese with English abstract)
- Wang Sungshan, McDougall I. 1980. K-Ar and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages on Mesozoic volcanic rocks from the Lower Yangtze Volcanic Zone, southeastern China. *J. Geol. Soc. Austral.*, 27: 121-128
- Wang Y and Zhang Q. 2001. A granitoid complex from Badaling area, North China: composition, geochemical characteristics and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 533-540
- Wang YJ, Fan WM, Guo F and Li X. 2001. Petrological and geochemical characteristics of Mesozoic granodioritic intrusions in southeast Hunan province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 169-175
- Xing Fengming, Xu Xiang. 1998. The characteristics and origin of the shoshonites around the Yangtze River reaches of Anhui. *Geol. Anhui*, 8(2): 8-20 (in Chinese with English abstract)
- Xing Fengming. 1996. Petrological and Nd, Sr, Pb isotopic evidence for genesis of Mesozoic magmatic rocks in Nanjing-Wuhu area. *Acta Petrol. Mineral.*, 15: 126-137 (in Chinese with English abstract)
- Xu Z G, Sheng J F, Sun S P. 1999. A discussion on characteristics of shoshonite rock series (association) and some problems. *Geological Review*, 45 (suppl.): 43-62 (in Chinese with English abstract)
- Xue Huaiming, Tao Kuiyuan. 1989. New view on the Mesozoic volcanic sequences in Ning-Wu. *Geol. Jiangsu*, (11): 9-14 (in Chinese with English abstract)
- Yang Zhuliang, Shen Weizhou, Tao Kuiyuan *et al.* 1999. Sr, Nd and Pb isotopic characteristics of Early Cretaceous basaltic rocks from the coast of Zhejiang and Fujian: Evidences for ancient enriched mantle source. *Scientia Geologica Sinica*, 34(1): 59-68 (in Chinese with English abstract)
- Yu Xueyuan. 1986. Characteristics and origin of Mesozoic volcanic rocks in Southeastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 2(1): 15-25 (in Chinese with English abstract)
- Yue Wenzhe, Ding Baoliang. 1999. Study on Cretaceous stratigraphic sequence of continental basin in Jiangsu. *Volcano. Mineral. Res.*, 20: 287-344 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Qi, Qian Qing, Erchie Wang *et al.* 2001. Existence of East China Plateau in mid-late Yanshan period: implication from adakites. *Scientia Geologica Sinica*, 36: 248-255 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing *et al.* 2001. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the Mesozoic adakites in eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236-244
- 演化及其原始物质来源. 中国地质科学院南京地质矿产研究所刊, 3: 98-118
- 李献华, 周汉文, 刘颖等. 2001. 粤西阳春中生代钾质侵入岩及其构造意义. II. 微量元素和 Sr-Nd 同位素地球化学. *地球化学*, 30: 57-65
- 林强, 葛文春, 孙德有等. 1998. 中国东北地区中生代火山岩的大地构造意义. *地质科学*, 33: 129-139
- 马昌前, 杨坤光, 唐仲华等. 1994. 花岗岩类岩浆动力学-理论方法及鄂东花岗岩类例析. 武汉: 中国地质大学出版社, 1-260
- 毛建仁, 苏郁香, 陈三元等. 1990. 长江中下游中酸性侵入岩与成矿. 北京: 地质出版社, 1-191
- 宁芜研究项目编写小组. 1978. 宁芜玢岩铁矿. 北京: 地质出版社
- 邵济安, 韩庆军, 张耀桥等. 1999. 陆壳垂向增生的两种方式: 以大兴安岭为例. *岩石学报*, 15: 600-606
- 汤德平, 陈凤贤. 1992. 中生代火山岩的成因和演化. 见: 邓晋福, 叶德隆, 赵海玲等著. 下扬子地区火山作用深部过程与盆地形成. 武汉: 中国地质大学出版社, 44-121
- 唐水成, 吴宜昌, 储国正等. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质. 北京: 地质出版社, 1-351
- 陶奎元, 高天钧, 陆志刚等. 1988. 东南沿海火山岩基底构造及火山-侵入作用与成矿关系. 北京: 地质出版社, 1-43
- 王德滋, 任启江, 邱经生等. 1996. 中国东部橄榄安粗岩省的火山岩特征及其成矿作用. *地质学报*, 70: 23-34
- 王焰, 张旗. 2001. 八达岭花岗岩岩体的组成、地球化学特征及其意义. *岩石学报*, 17(4): 533-540
- 王岳军, 范蔚茗, 郭峰, 李旭. 2001. 湘东南中生代花岗岩闪长质小岩体的岩石地球化学特征. *岩石学报*, 17(1): 169-175
- 吴利仁, 齐进英, 王昕渡等. 1982. 中国东部中生代火山岩. *地质学报*, 56(3): 223-234
- 邢凤鸣, 徐祥. 1998. 安徽沿江地区橄榄安粗岩系的特点和成因: 大陆橄榄安粗岩系一例. *安徽地质*, 8(2): 8-20
- 邢凤鸣. 1996. 宁芜地区中生代岩浆岩的成因——岩石学与 Nd, Sr, Pb 同位素证据. *岩石矿物学杂志*, 15: 126-137
- 徐志刚, 盛继福, 孙善平. 1999. 关于“橄榄安粗岩系列(组合)”特征及某些问题的讨论. *地质评论*, 45(增刊): 43-62
- 薛怀民, 陶奎元. 1989. 宁芜地区中生代火山岩系列的新认识及其地质意义. *江苏地质*, (11): 9-14
- 杨祝良, 沈渭洲, 陶奎元等. 1999. 浙闽沿海早白垩世玄武岩、玢岩、铅同位素特征—古老富集型地幔的证据. *地质科学*, 34: 59-68
- 于学元. 1986. 中国东南部中生代火山岩地球化学及成因. *岩石学报*, 2(1): 15-25
- 岳文浙, 丁保良. 1999. 江苏白垩纪陆相层序地层研究. *火山地质与矿产*, 20: 287-344
- 张旗, 王焰, 钱青等. 2001a. 中国东部中生代埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. *岩石学报*, 17(2): 236-244
- 张旗, 钱青, 王二七等. 2001b. 燕山中晚期的“中国东部高原”: 埃达克岩的启示. *地质科学*, 36: 248-255
- 中国科学院地质研究所火山岩组. 1980. 长江下游若干地区中生代火山岩的多旋回和侧向分布. 国际交流地质学论文集, 北京: 地质出版社, 108-115.

#### 附中文参考文献

- 陈江峰, 周泰禧, 李学明等. 1993. 安徽南部燕山期中酸性侵入岩的源区、钕同位素制约. *地球化学* (3): 261-274
- 邓晋福, 叶德隆, 赵海玲等. 1992. 下扬子地区火山作用深部过程与盆地形成. 北京: 中国地质大学出版社
- 郭峰, 范蔚茗, 王岳军等. 2001. 大兴安岭南段晚中生代双峰式火山作用. *岩石学报*, 17: 161-168
- 李坤英. 1982. 中国东南部中生代火山岩的同位素年龄/时间和空间