



# 宁芜早白垩世火山岩地球化学特征及岩浆演化

滕霞<sup>1,2</sup>, 黄德志<sup>1,2</sup>, 卢洋<sup>1,2</sup>, 汪龙<sup>1,2</sup>, 刘珍兰<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 湖南省有色金属资源与地质灾害探查重点实验室, 长沙 410083)

**摘要:** 宁芜盆地位于中国东部长江中下游成矿带, 盆地内主要发育 4 套火山岩。本研究主要通过地球化学手段探究该火山岩地球化学性质及岩浆演化特征。结果表明: 火山岩主要为安山岩、粗安岩和英安岩; 早期龙王山组为低钾系列, 其余 3 组火山岩为高钾钙碱性-橄辉玄武岩系列。4 套火山岩  $Mg^{\#}$  值为 66.51~40.33, 轻稀土富集, Ta、Nb、Ti 亏损, 指示原始岩浆形成于富集地幔部分熔融。原始岩浆形成后经历了以分离结晶为主的岩浆演化过程, 主要表现为  $Mg^{\#}$  降低和向富碱系列演化。结合区域地质和年代学研究, 认为宁芜火山活动发生在受古太平洋俯冲和大别造山后区域引张的共同作用下的岩石圈减薄环境, 郧庐断裂早白垩世走滑使得宁芜盆地拉分和富集地幔减压熔融形成岩浆。

**关键词:** 宁芜盆地; 火山岩; 地球化学; 富集地幔; 岩浆演化

**文章编号:** 1004-0609(2017)-07-1455-16

**中图分类号:** P611; P618.51

**文献标志码:** A

宁芜盆地是中国东部一处晚中生代火山盆地, 由于其丰富的铁矿资源受到广泛关注, 众多学者对区内岩浆岩和矿床进行过深入研究。早在上世纪的《宁芜玢岩铁矿》<sup>[1]</sup>一书中就对盆地内发现的不同铁矿床分类, 并对不同类型的矿床特征及成矿作用进行了详细阐述; 之后的学者在流体包裹体和稳定同位素方面对典型矿床进行研究<sup>[2-7]</sup>, 为矿床成因分类提供证据和解释。进入 21 世纪, 利用同位素测年技术, 袁顺达等<sup>[8]</sup>和范裕等<sup>[9]</sup>分别通过矿石中金云母 Ar-Ar 测年将成矿年龄范围限制在 129~135 Ma; 在明确闪长玢岩类与成矿作用关系的基础上, 不同学者通过对不同岩体进行锆石 U-Pb 定年, 获得其侵入年龄为 128~132 Ma<sup>[10-13]</sup>。前人在火山岩研究方面也积累了较丰富的地球化学和年代学数据<sup>[14-19]</sup>(见表 1), 但关注于火山岩岩浆演化过程<sup>[14, 17, 20]</sup>及构造意义的研究报道较少, 而宁芜火山活动是长江中下游白垩纪岩浆活动的重要组成部分, 能一定程度反映/印证区域岩浆过程和构造活动, 且与盆地内铁矿成矿作用直接相关。因此, 本文作者以宁芜盆地火山岩地球化学特征为研究对象, 探讨盆地内早白垩世火山岩的岩浆过程及形成的构造环境。

表 1 宁芜盆地火山岩锆石 U-Pb 测年数据

Table 1 Zircon U-Pb dating of volcanic rocks from Ningwu basin

Circles of volcanic rocks	Age/Ma	References
Nianguangshan formation	118.8±1.6	[14]
	126.6±1.1	[15]
	130.6±1.1	[16]
	130.4±1.0	[17]
	130.1±1.0	[17]
Gushan formation	127.2±1.7	[14]
	128.5±1.8	[18]
	128.2±1.3	[18]
	129.5±0.8	[15]
	131.5±1.0	[16]
Dawangshan formation	127±3	[19]
	130.2±1.1	[17]
	131.0±1.0	[17]
	130.3±0.9	[18]
	131.4±1.8	[14]
Longwangshan formation	131.7±1.2	[14]
	132.2±1.6	[15]
	131±4	[19]
	133.3±1.1	[17]
	134.0±2.7	[14]
	134.8±1.3	[15]

基金项目: 国家科技支撑项目(2011BAB04D01)

收稿日期: 2016-05-26; 修订日期: 2016-11-08

通信作者: 黄德志, 教授, 博士; 电话: 13687340390; E-mail: dzhuang\_01@163.com

# 1 区域地质背景

长江中下游成矿带位于扬子地块北缘，具有“一盖两底”的地壳特征<sup>[21]</sup>。印支期扬子板块向北板块俯冲碰撞造山后，长江中下游构造环境由板缘到板内转换<sup>[22]</sup>，构造上属大别造山带前陆盆地。

宁芜盆地位于长江中下游成矿带内(见图 1)，北起南京，南至芜湖，东西侧分别以方山-小丹阳断裂和滨江断裂为界。盆地内断裂发育，由 NNE 和 NW 两组构成主体构造框架，同时发育近 EW 向断裂。区内出露地层主要为 T<sub>2</sub>-J<sub>3</sub> 陆相碎屑岩及灰岩和白垩纪火山岩。分布广泛的火山岩由老至新依次为龙王山、大

王山、姑山和娘娘山组。其中龙王山组主要分布在盆地东侧，岩性以灰紫色角闪安山质火山角砾岩、沉火山角砾岩及熔岩为主，不整合于三叠-侏罗系地层之上；大王山组分布最广，岩性为角闪安山质熔岩、安山质火山角砾岩、安山岩、沉凝灰岩等；姑山组出露于南段姑山附近，岩性主要为安山岩、安山质凝灰岩砾岩、凝灰岩；娘娘山组出露在盆地西侧娘娘山附近，岩性主要为假白榴石响岩、火山角砾岩、熔结凝灰岩和黝方石响岩等<sup>[1]</sup>。近 10 年已发表的火山岩锆石 U-Pb 年龄结果显示(见表 1)，火山岩喷发年龄集中在 135~120 Ma，属早白垩世。除喷出岩外，盆地内还出露闪长岩类超浅成岩体和零星分布的花岗岩类，岩体侵入时代与火山喷发时代接近<sup>[10-14]</sup>。

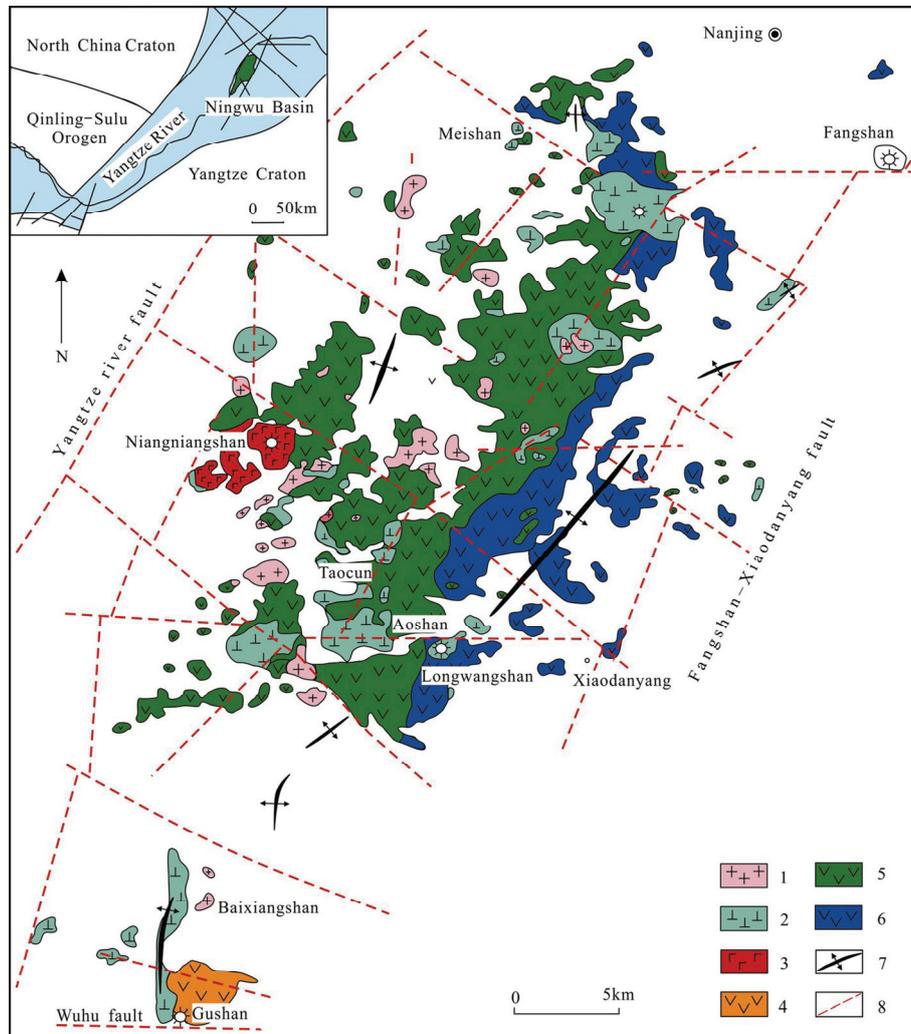


图 1 宁芜盆地构造简图及岩浆岩分布<sup>[1]</sup>：1—花岗岩；2—闪长玢岩；3—娘娘山组火山岩；4—姑山组火山岩；5—大王山组火山岩；6—龙王山组火山岩；7—背斜构造；8—断裂

Fig. 1 Geological sketch showing distribution of igneous rocks in Ningwu basin<sup>[1]</sup>: 1—Granite; 2—Diorite porphyrite; 3—Volcanic rocks of Niangninagshan formation; 4—Volcanic rocks of Gushan formation—Volcanic rocks of Dawangshan formation; 6—Volcanic rocks of Longwangshan formation; 7—Axes of anticline; 8—Fault

## 2 采样及测试方法

本研究采集 4 套火山岩样品共 54 件, 其中 11 件龙王山组样品采自吴村钻孔 KZ3401 中 460~550 m 处岩芯, 岩性主要为灰绿色、灰黑色安山岩、凝灰岩、凝灰质安山岩, 发育绿泥石化以及少量磁铁矿化和硅化; 14 件大王山组样品采自吴村钻孔 ZK001 中 150~260 m 处岩芯, 岩性为深灰色、浅灰褐色粗面岩、粗安岩、安山岩、熔结角砾岩, 磁铁矿化、黄铁矿化、硅化蚀变较明显; 11 件姑山组样品采自姑山铁矿附近, 岩性为灰黑色安山岩和安山质凝灰岩, 发育磁铁矿、绿泥石化; 16 件娘娘山组样品采自钻孔 ZK0202 和 ZK0901 岩芯, 岩性为黝方石响岩和假白榴石响岩等(见图 2)。

主量和微量稀土测试由澳实(广州)测试有限公司完成。主量元素测定使用 X 荧光光谱仪, 采用 ME-XRF06 分析方法, 精度优于 5%; 微量和稀土元素测定使用电感耦合等离子质谱仪, 采用 ME-MS81 分析方法, 精度优于 3%。

## 3 火山岩地球化学特征

### 3.1 主量元素

样品主量元素分析结果见表 2。除龙王山组外, 其余 3 组火山岩灼失量较大, 可能与后期蚀变有关。4 套火山岩样品  $\text{SiO}_2$  平均值为 53.16%~59.46%;  $\text{TiO}_2$  含量均低(小于 1%), 平均值为 0.64%~0.78%;  $\text{MgO}$  含量依次降低, 平均值为 4.59%~1.77%;  $\text{Mg}^\#$  ( $\text{Mg}^\# = w(\text{Mg})/[w(\text{Mg})+w(\text{Fe})]$ ) 依次降低, 平均值为 66.51~40.33;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量依次升高, 平均值为 13.34%~17.66%。龙王山组样品  $\text{K}_2\text{O}$  含量很低(0.21%~0.93%),  $\text{Na}_2\text{O}$  平均值为 6.65%, 表现出贫钾富钠特征, 里特曼指数( $\sigma$ )为 1.77~4.31; 大王山组  $\text{Na}_2\text{O}$  平均值为 0.94%,  $\text{K}_2\text{O}$  为 3.70%,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  比值为 0.03~0.76, 具有富钾特征,  $\sigma$  为 0.39~3.89; 姑山组  $\text{Na}_2\text{O}$  平均值为 3.67%,  $\text{K}_2\text{O}$  为 2.06%,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  比值为 1.38~3.18,  $\sigma$  为 2.29~3.43; 娘娘山组  $\text{Na}_2\text{O}$  平均值为 4.42%,  $\text{K}_2\text{O}$  平均值为 5.75%, 相比前 3 组, 更为富钠富钾,  $\sigma$  为 6.28~14.95。

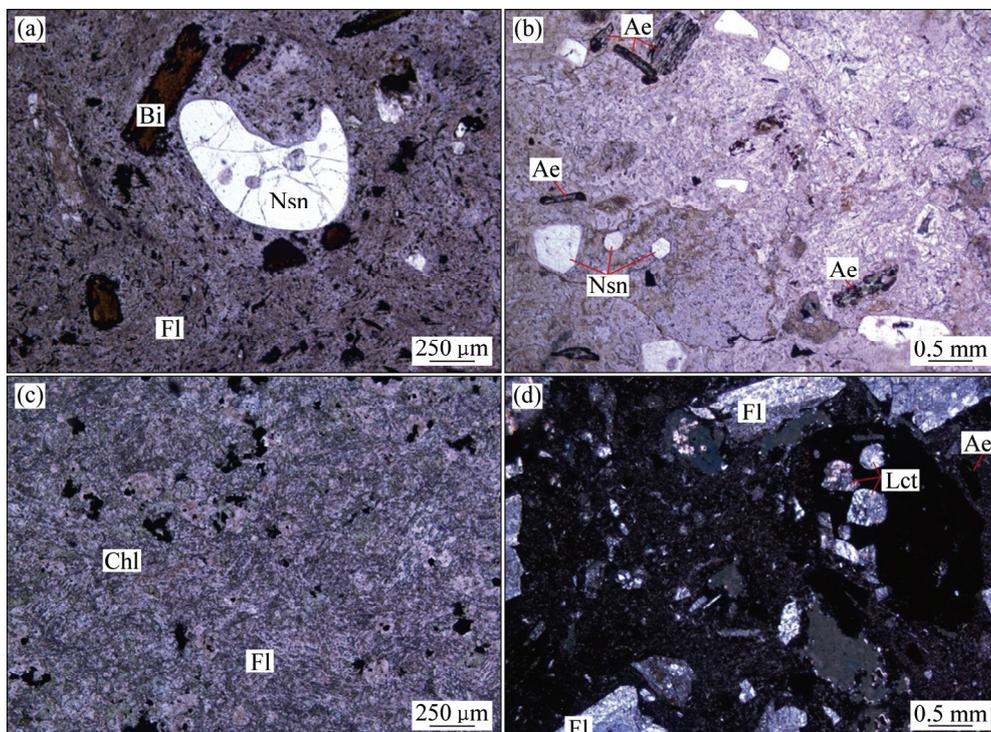


图 2 宁芜盆地火山岩的显微照片: (a) 黝方石响岩; (b) 粗面岩; (c) 凝灰质安山岩; (d) 含白榴石响岩(Nsn—黝方石; Bi—黑云母; Fl—长石; Ae—霓辉石; Chl—绿泥石; Lct—白榴石)

Fig. 2 Photomicrographs of volcanic rocks from Ningwu basin: (a) Nosean phonolite; (b) Trachyte; (c) Tuffaceous andesite; (d) Leucite-bearing phonolite (Nsn—Nosean; Bi—Biotite; Fl—Feldspar; Ae—Aegirine augite; Chl—Chlorite; Lct—Leucite)

表2 宁芜盆地火山岩主量元素含量

Table 2 Major element compositions of volcanic rocks from Ningwu basin

Sample No.	Mass fraction/%											
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	LOI	Total
LWS02	58.88	11.46	4.12	5.60	10.90	6.00	0.27	0.14	0.17	0.61	1.20	99.35
LWS03	58.49	11.80	3.98	5.30	10.59	6.25	0.25	0.16	0.26	0.66	1.50	99.24
LWS04	61.99	15.00	2.66	3.12	6.07	7.76	0.28	0.11	0.13	0.76	1.67	99.55
LWS05	58.88	11.75	4.85	6.12	8.73	6.10	0.20	0.20	0.17	0.47	2.34	99.81
LWS06	61.15	14.57	2.76	3.41	7.12	7.59	0.45	0.11	0.18	0.73	1.43	99.50
LWS07	58.58	16.70	4.52	2.98	6.19	7.26	0.93	0.11	0.15	0.71	1.57	99.70
LWS08	54.82	10.45	5.01	7.48	9.85	4.78	0.35	0.20	0.39	0.51	4.24	98.08
LWS09	61.23	12.62	5.06	4.18	6.85	6.21	0.21	0.14	0.27	0.79	2.32	99.88
LWS11	57.68	9.74	8.36	6.94	9.58	4.88	0.22	0.23	0.03	0.21	1.84	99.71
LWS12	61.44	17.80	2.62	1.93	4.16	8.89	0.33	0.11	0.14	0.79	1.40	99.61
LWS14	60.93	14.85	4.71	3.41	5.09	7.42	0.30	0.15	0.06	0.77	1.76	99.45
DWS01	63.74	14.22	4.84	1.87	2.51	0.11	3.63	0.02	0.21	0.63	7.32	99.10
DWS02	59.04	16.71	6.55	1.78	1.35	0.20	4.43	0.02	0.26	0.77	8.25	99.36
DWS03	60.38	14.64	6.08	2.40	1.28	0.25	4.38	0.03	0.21	0.67	8.66	98.98
DWS04	53.81	16.70	6.55	3.73	1.81	0.30	4.83	0.05	0.28	0.76	9.90	98.72
DWS05	52.57	15.54	7.30	2.71	3.18	0.36	5.74	0.05	0.22	0.82	10.05	98.54
DWS06	60.62	14.38	4.88	2.51	3.30	0.10	2.51	0.06	0.24	0.69	9.30	98.59
DWS07	56.31	17.34	4.81	3.75	3.38	2.00	3.79	0.05	0.28	0.83	6.57	99.11
DWS08	55.58	17.70	5.71	4.23	1.79	1.55	3.80	0.06	0.29	0.84	7.20	98.75
DWS09	54.50	18.84	3.69	3.73	2.53	2.72	3.58	0.04	0.30	0.91	8.14	98.98
DWS11	54.74	17.83	3.59	4.05	3.44	0.43	2.88	0.04	0.32	0.84	10.25	98.41
DWS12	57.01	17.23	3.52	3.82	3.39	0.70	2.97	0.03	0.31	0.82	9.15	98.95
DWS13	54.46	17.23	3.77	3.46	4.68	0.11	2.45	0.06	0.30	0.80	11.40	98.72
DWS14	56.76	16.49	4.31	2.58	3.66	2.12	3.62	0.04	0.26	0.77	8.27	98.88
DWS15	55.15	16.47	5.30	2.98	4.07	2.24	3.17	0.05	0.26	0.78	7.70	98.17
GS001	54.68	16.52	5.25	1.29	6.64	3.75	2.21	0.10	0.30	0.67	8.11	99.52
GS002	52.13	16.38	7.58	4.05	7.38	4.26	1.34	0.10	0.25	0.68	5.84	99.99
GS016	55.30	16.65	5.01	2.55	7.66	3.84	1.78	0.07	0.22	0.73	5.52	99.33
GS017	53.70	16.32	4.94	3.40	7.49	3.66	1.87	0.11	0.28	0.73	7.20	99.70
GS020	54.91	16.82	5.84	2.18	5.43	3.52	2.29	0.10	0.32	0.65	7.71	99.77
GS021	55.39	16.30	6.10	2.60	4.61	3.57	1.76	0.07	0.30	0.65	8.05	99.40
GS022	55.77	16.38	6.48	3.11	3.20	3.51	2.51	0.04	0.30	0.68	7.33	99.31
GS023	54.20	16.50	6.75	1.86	5.33	3.33	2.22	0.10	0.34	0.65	8.91	100.19
GS025	54.88	16.36	6.70	2.67	4.10	3.52	2.17	0.07	0.30	0.61	7.68	99.06
GS026	54.65	16.37	6.86	2.47	4.15	3.31	2.39	0.08	0.31	0.63	7.82	99.04
GS027	55.26	16.60	6.81	2.54	4.26	4.11	2.11	0.08	0.34	0.66	7.09	99.86
NNS01	53.27	18.57	4.15	1.43	4.19	2.94	6.69	0.15	0.24	0.55	7.39	99.57
NNS02	54.01	17.81	3.67	1.27	4.55	4.03	5.83	0.16	0.25	0.58	6.83	98.99
NNS03	56.33	16.66	4.19	1.49	4.13	3.17	5.98	0.18	0.39	0.64	6.69	99.85
NNS04	49.29	15.62	6.67	3.47	5.80	4.99	4.05	0.13	0.62	0.81	8.41	99.86
NNS05	48.85	16.55	7.64	3.79	4.91	5.01	3.73	0.14	0.63	0.82	7.26	99.33
NNS06	55.93	18.88	4.16	1.60	2.37	4.77	6.20	0.06	0.38	0.66	4.39	99.40
NNS07	51.58	16.97	5.02	2.37	4.71	5.07	4.43	0.13	0.38	0.65	7.85	99.16
NNS09	52.76	20.38	3.50	0.92	3.36	1.39	10.69	0.14	0.21	0.50	5.22	99.07
NNS10	53.54	17.32	3.96	1.67	4.81	5.62	4.21	0.32	0.25	0.57	7.35	99.62
NNS11	53.98	18.10	4.48	1.47	3.91	5.27	5.18	0.34	0.32	0.68	6.07	99.80
NNS12	52.24	16.77	5.72	1.80	4.94	6.46	2.88	0.30	0.46	0.75	7.41	99.73
NNS13	58.07	18.77	2.85	0.78	2.96	5.04	6.02	0.14	0.19	0.53	4.32	99.67
NNS14	50.63	16.62	6.28	1.86	5.38	6.16	2.72	0.31	0.49	0.95	8.03	99.43
NNS15	51.52	17.43	4.79	1.56	4.96	4.03	6.28	0.28	0.33	0.66	7.37	99.21
NNS16	55.40	18.42	4.33	1.11	3.20	5.06	5.70	0.19	0.32	0.70	5.03	99.46

### 3.2 微量及稀土元素

火山岩样品微量稀土元素测试结果见表 3 至表 6。龙王山、大王山和姑山组火山岩稀土总量依次降低, 平均含量分别为  $175.45 \times 10^{-6}$ 、 $133.74 \times 10^{-6}$ 、 $103.32 \times 10^{-6}$ , 其中龙王山组总量变化大( $92.51 \times 10^{-6} \sim 270.83 \times 10^{-6}$ ), 但趋势一致。3 组火山岩均表现出相似的 REE 右倾分配模式(图 3),  $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$  比值介于 2.24~4.25, 轻稀土中等富集, 重稀土较平坦; 仅龙王山组样品表现出轻微 Eu 负异常。娘娘山组样品稀土总量明显高于前 3 组,  $\Sigma\text{REE}$  平均值为  $472.57 \times 10^{-6}$ , 右倾明显, 轻稀土更为富集( $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}=6.16\sim 8.76$ )。

微量元素蛛网图中(图 3), 4 组火山岩均亏损 Ta、Nb、Ti、P。此外, 龙王山组样品同时亏损 Rb、K、Ba、Sr, 富集 Th、U; 大王山组富集 U、K、La, Sr 和 Ba 表现出从亏损到富集的变化; 姑山组样品富集 K、Sr、Nd, 娘娘山组富集 La、Nd、Sm。

## 4 讨论

### 4.1 岩石类型及岩浆岩系列

龙王山组主微量元素特征均落在英安岩和粗安岩范围(见图 4(a)和(b)); 大王山组微量元素全部落在安

表 3 龙王山组火山岩微量稀土元素分析结果

Table 3 Trace element compositions of volcanic rocks from Longwangshan formation

Element	Mass fraction/ $10^{-6}$										
	LWS02	LWS03	LWS04	LWS05	LWS06	LWS07	LWS08	LWS09	LWS11	LWS12	LWS14
V	128	105	116	150	122	107	133	142	156	75	109
Cr	100	120	140	80	120	130	110	140	50	130	130
Tl	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03
Rb	3.6	3.4	2.3	1.9	4.7	9.1	2.7	2.6	5.5	2.4	2.1
Ba	86.5	85.0	79.5	61.1	147.0	203.0	103.5	62.7	55.8	138.0	102.0
Th	8.37	9.37	17.50	7.39	7.39	10.45	13.10	23.30	6.06	18.70	14.60
U	2.03	2.14	2.60	1.36	2.11	1.60	2.34	3.01	1.17	1.62	1.80
Nb	14.2	16.7	16.8	10.1	14.8	11.3	11.7	20.3	4.2	15.1	24.5
Ta	1.0	1.1	1.3	0.7	1.0	1.2	1.0	1.3	0.3	1.2	1.2
La	23	33.4	21.8	13.8	22.6	14.8	43.1	32.2	10.9	15.5	16.4
Ce	68.1	83.9	60.4	34	75.6	39.9	103	78.9	29.1	39	44.2
Pb	2.2	2.5	1.5	1.2	1.4	3.2	1.8	2.7	2	2.1	2.4
Pr	9.40	9.90	7.47	4.51	10.45	5.20	11.40	10.10	3.65	5.13	5.36
Sr	178	188	183	183	241	519	293	179	196	283	233
Nd	40.9	41.2	32.6	19.5	42.5	22.1	46.0	41.5	16.1	20.5	22.7
Zr	188	227	231	144	268	141	230	499	93	173	228
Hf	4.9	5.5	6.3	3.9	6.8	3.7	6.2	12.9	2.6	4.8	5.9
Sm	10.50	7.89	6.92	4.76	9.54	4.80	8.96	8.60	3.49	4.58	4.30
Eu	2.37	2.11	1.59	1.03	1.77	1.31	1.75	2.05	0.79	1.37	1.40
Gd	7.66	7.59	6.10	3.74	7.52	4.54	7.20	7.70	3.42	3.70	4.12
Tb	1.12	1.21	0.86	0.69	1.06	0.69	1.15	1.13	0.44	0.54	0.57
Dy	6.91	6.59	4.91	4.56	7.10	4.22	6.47	6.65	2.83	3.35	4.04
Y	33.5	36.5	26.5	19.4	32.2	21.8	32.6	31.6	16.2	17.5	22.5
Ho	1.28	1.41	0.96	0.84	1.17	0.83	1.16	1.10	0.63	0.64	0.68
Er	3.58	4.00	2.99	2.47	3.79	2.30	3.57	3.86	1.91	1.98	2.64
Tm	0.58	0.58	0.45	0.45	0.58	0.41	0.68	0.67	0.34	0.49	0.39
Yb	3.35	3.69	2.92	2.11	3.14	2.43	3.29	3.42	2.24	2.37	2.25
Lu	0.44	0.41	0.51	0.35	0.6	0.33	0.5	0.6	0.47	0.36	0.38
$\Sigma\text{REE}$	212.69	240.38	176.98	112.21	219.62	125.66	270.83	230.08	92.51	117.01	131.93

表4 大王山组火山岩微量稀土元素分析结果

Table 4 Trace element compositions of volcanic rocks from Dawangshan formation

Element	Mass fraction/ $10^{-6}$													
	DWS01	DWS02	DWS03	DWS04	DWS05	DWS06	DWS07	DWS08	DWS09	DWS11	DWS12	DWS13	DWS14	DWS15
V	148	191	137	183	224	145	251	242	221	209	203	186	171	165
Cr	50	60	40	30	40	40	30	30	30	30	30	30	30	20
Tl	0.65	0.93	1.07	1.37	1.20	0.74	1.30	1.48	1.06	0.98	1.08	0.81	1.08	1.05
Rb	117.0	132.5	111.0	143.0	165.5	114.0	141.5	168.5	173.5	138.5	142.0	118.0	151.0	133.0
Ba	553	551	1885	1395	1525	237	528	322	240	273	319	128	768	685
Th	7.48	9.46	7.98	9.00	10.20	6.01	6.08	6.76	7.36	7.10	7.22	6.67	6.98	6.68
U	8.27	6.53	5.50	8.52	11.65	27.20	1.99	1.83	10.05	2.79	3.58	3.05	2.52	1.59
Nb	7.9	7.3	6.7	7.1	7.7	5.7	6.0	6.2	7.0	6.2	6.8	6.9	7.6	7.5
Ta	0.8	0.5	0.5	0.5	0.6	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.7	0.4	0.5	0.5
La	19.3	25.0	22.1	23.1	31.2	21.1	21.1	23.4	23.5	24.7	22.5	22.6	24.1	24.1
Ce	38.5	50.6	44.9	45.5	59.9	40.0	41.8	47.3	47.3	46.9	44.3	45.4	48.9	46.7
Pb	12.0	36.8	8.0	11.5	14.2	9.5	9.9	8.6	6.0	9.2	12.5	12.7	9.9	10.0
Pr	4.27	5.8	4.88	5.44	6.81	4.77	4.89	5.17	5.07	5.98	5.17	4.97	5.52	5.86
Sr	259	739	391	507	435	200	339	378	286	441	293	154.5	305	280
Nd	17.4	23.9	20.8	20.3	27.3	18.6	20.3	22.2	20.9	21.8	22.1	21.9	23.8	21.5
Zr	136	147	138	138	160	111	130	140	151	134	176	139	186	173
Hf	3.0	3.9	3.3	3.6	4.1	3.2	3.4	3.9	3.6	3.6	4.0	3.5	4.9	4.1
Sm	3.23	4.74	4.78	4.91	5.64	3.84	4.28	4.06	4.26	4.73	3.86	3.35	4.84	4.71
Eu	0.89	1.24	1.09	1.37	1.37	1.25	1.4	1.19	1.12	1.31	1.28	1.16	1.17	1.14
Gd	3.08	4.09	3.47	4.04	4.55	3.48	3.94	3.54	3.69	4.34	3.74	3.75	4.44	4.23
Tb	0.48	0.67	0.54	0.53	0.68	0.68	0.54	0.46	0.62	0.6	0.61	0.62	0.66	0.63
Dy	2.6	3.6	3.16	3.6	3.78	3.16	3.48	2.87	3.58	3.54	3.28	3.53	3.97	3.79
Y	14.2	19.4	18.9	17.3	19.6	15.9	18.5	17	18.4	18.8	16.9	19.8	20	20.9
Ho	0.56	0.75	0.73	0.74	0.68	0.55	0.74	0.63	0.7	0.74	0.71	0.76	0.76	0.73
Er	1.59	2.43	2.33	1.72	2.21	1.95	1.87	1.61	1.93	2.26	1.71	2.24	2.19	2.19
Tm	0.27	0.47	0.35	0.32	0.39	0.35	0.36	0.34	0.39	0.34	0.42	0.31	0.35	0.44
Yb	1.47	2.56	2.03	1.99	2.11	1.62	1.9	1.45	1.95	2.03	1.69	2.09	2.01	2.3
Lu	0.23	0.43	0.39	0.32	0.3	0.21	0.34	0.24	0.35	0.18	0.37	0.36	0.34	0.39
ΣREE	108.07	145.68	130.45	131.18	166.52	117.46	125.44	131.46	133.76	138.25	128.64	132.84	143.05	139.61

山岩范围内(见图 4(b)), 而主量投图落在安山岩、英安岩、粗安岩(见图 4(a)); 姑山组微量元素落在安山岩、玄武岩(见图 4(b)), 主量主要落在安山岩、粗安岩范围(见图 4(a)); 娘娘山组主量落入粗安岩、碱玄质响岩、粗面英安岩区域(见图 4(a)), 在微量图解中主要落在英安岩、粗安岩区域内(见图 4(b))。

早期的前人工作认为宁芜火山岩均为橄榄玄粗岩系列<sup>[26]</sup>, 之后又有学者指出是高钾钙碱性-橄榄玄粗岩系列<sup>[20]</sup>或高钾钙碱性-钾质碱性系列<sup>[27]</sup>。本研究中

龙王山组基本落入低钾系列, 大王山组主要为橄榄玄粗和高钾钙碱性, 姑山组火山岩为高钾钙碱性, 娘娘山组主要为橄榄玄粗岩系列(见图 5, 图中主要氧化物是扣除灼减量值)。本研究中龙王山组样品均采自盆地中段钻井岩芯, 手标本和镜下均显示龙王山组火山岩特征; 样品灼减量除一个样品在 4%左右, 其余均在 2.4%以下,  $K_2O$  与  $Na_2O$  表现出轻微正相关, 可以排除后期蚀变造成低钾特征。因此, 认为宁芜火山岩早期(龙王山组)为低钾系列, 大王山、姑山和娘娘山组

表 5 姑山组火山岩微量稀土元素分析结果

Table 5 Trace element compositions of volcanic rocks from Gushan formation

Element	Mass fraction/ $10^{-6}$										
	GS001	GS002	GS016	GS017	GS020	GS021	GS022	GS023	GS025	GS026	GS027
V	89	120	92	83	94	79	83	98	83	86	89
Cr	20	20	10	10	10	10	10	90	80	20	20
Tl	0.25	0.19	0.19	0.25	0.40	0.26	0.40	0.60	0.35	0.36	0.33
Rb	61.7	29.5	41.1	43.8	59.9	57.0	70.0	75.1	75.0	86.9	72.2
Ba	396	375	531	1040	411	379	391	383	425	456	394
Th	3.50	2.80	2.68	2.24	2.77	3.08	3.09	2.87	2.93	3.25	2.99
U	1.04	0.60	0.93	0.89	1.00	0.79	0.88	0.76	0.85	0.95	0.95
Nb	4.8	3.7	4.0	6.0	5.6	4.8	4.8	4.5	4.5	4.5	4.8
Ta	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3
La	16.5	12.8	22.5	18.8	17.4	12.6	13.8	16	13.3	15.3	13.9
Ce	33.6	32.8	61.5	43.9	36.7	28.9	29.6	34.1	28.5	32.3	29.9
Pb	3.9	4.6	4.4	5.7	7.2	5	3.8	7.3	4.5	4.4	4.5
Pr	4.07	4.59	8.03	5.51	4.62	3.80	3.73	4.14	3.68	4.02	3.67
Sr	613	565	619	602	570	515	500	464	533	536	506
Nd	16.1	19.9	29.8	21.8	18.3	16.1	14.5	16.4	15.1	16.5	14.6
Zr	99	99	104	94	106	101	105	107	117	104	100
Hf	2.8	2.9	2.9	2.8	3.0	2.8	3.0	3.0	3.2	2.8	2.9
Sm	3.28	4.67	5.36	4.70	3.71	3.57	3.00	3.43	3.15	3.11	2.90
Eu	1.02	1.40	1.75	1.48	1.22	1.03	0.95	1.05	1.01	1.07	0.99
Gd	3.09	4.22	4.21	4.13	3.54	3.14	2.54	3.03	2.97	3.06	2.76
Tb	0.40	0.62	0.63	0.60	0.52	0.46	0.38	0.44	0.39	0.40	0.38
Dy	2.55	3.38	3.57	3.50	3.00	2.49	2.01	2.62	2.15	2.25	2.15
Y	13.2	17.9	17.1	18.4	15.1	13.4	10.6	13	11.8	12.2	11.4
Ho	0.51	0.66	0.68	0.68	0.55	0.49	0.38	0.53	0.42	0.43	0.41
Er	1.61	2.00	2.02	2.04	1.71	1.47	1.16	1.56	1.41	1.26	1.25
Tm	0.20	0.28	0.27	0.25	0.25	0.20	0.18	0.20	0.18	0.20	0.19
Yb	1.31	1.73	1.60	1.70	1.50	1.36	1.14	1.41	1.27	1.15	1.20
Lu	0.20	0.26	0.27	0.24	0.23	0.22	0.18	0.21	0.18	0.19	0.15
ΣREE	97.64	107.21	159.29	127.73	108.35	89.23	84.15	98.12	85.51	93.44	85.85

火山岩为高钾钙碱性-橄榄玄粗岩系列。

#### 4.2 岩浆来源分析

对宁芜盆地内白垩世 4 组火山岩是否为同源演化存在不同看法。一些学者认为 4 组火山岩具有相同起源, 地球化学特征差异是岩浆演化程度不同的结果<sup>[26]</sup>。另一些学者则认为娘娘山组与其他火山岩不同, 是一次独立的火山喷发事件<sup>[14, 29]</sup>。

相似的稀土微量特征(见图 3)和微量元素间明显的线性关系(见图 6)均显示, 4 组火山岩具有相同的岩

浆来源, 前人对 Sr、Nd、Pb、Hf 同位素研究认为宁芜盆地火山岩岩浆来源于富集地幔<sup>[14, 17-18, 26, 30]</sup>。如火山岩  $\epsilon\text{Nd}(t)$  为  $-7.3 \times 10^{-3} \sim -1.8 \times 10^{-3}$ ,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  为 0.7050~0.7085<sup>[17, 20]</sup>; 盆地内与火山岩同源的次火山岩  $\epsilon\text{Nd}(t)$  为  $-3.58 \times 10^{-3} \sim -8.74 \times 10^{-3}$ ,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  为 0.7053~0.7074<sup>[30]</sup>, 均显示富集地幔特征。本研究结果与前人研究结果一致, 火山岩在 Th/Yb-Nb/Yb 图解中(见图 6(a))显示与俯冲特征相关的富集特征。La/Sm-La 图解显示(见图 7), 龙王山、大王山、姑山组形成过程以部分熔融作用为主, 娘娘山组火山岩形成则经历了明

表6 娘娘山组火山岩微量元素分析结果

Table 6 Trace element compositions of volcanic rocks from Niangniangshan formation

Element	Mass fraction/ $10^{-6}$															
	NNS01	NNS02	NNS03	NNS04	NNS05	NNS06	NNS07	NNS09	NNS10	NNS11	NNS12	NNS13	NNS14	NNS15	NNS16	
V	86	76	104	163	190	108	126	61	75	85	123	61	144	99	93	
Cr	10	10	10	10	20	10	10	*	10	10	10	10	20	10	10	
Tl	1.44	1.29	1.42	0.60	0.61	0.98	0.78	1.48	1.01	1.13	0.79	1.13	0.82	1.29	1.18	
Rb	196.5	169.5	176.0	87.9	103.5	175.0	138.0	265.0	130.5	151.0	108.5	159.5	110.0	179.5	160.0	
Ba	1125	949	1355	906	1090	1615	866	1640	832	874	787	1050	427	1490	1045	
Th	24.9	22.9	22.2	8.6	12.0	24.1	19.4	25.1	23.1	25.8	18.1	30.4	18.5	21.7	25.4	
U	6.13	6.32	6.28	2.22	2.90	6.63	5.02	4.98	7.28	5.18	3.58	8.29	3.40	4.34	5.51	
Nb	19.7	19.3	18.1	9.7	12.5	19.2	15.5	17.2	18.9	20.8	15.3	24.0	17.2	17.0	21.2	
Ta	0.8	0.8	0.8	0.5	0.8	0.9	0.7	0.8	0.8	0.9	0.7	1.1	0.7	0.7	0.9	
La	99.1	103.0	83.5	52.2	69.6	93.0	83.2	88.2	112.0	105.5	93.2	110.5	121.5	96.0	109.5	
Ce	207	215	177	107	151	193	172	179	238	224	202	229	265	203	231	
Pb	18.3	19.6	19.9	8.2	8.2	8.9	6.6	27.6	9.4	9.2	8.5	13.4	16.9	10.4	8.0	
Pr	22.2	23.2	19.1	12.2	17.9	20.8	19.1	18.8	25.3	24.3	22.1	24.0	29.6	22.0	25.1	
Sr	1010	1110	1300	593	704	739	683	1470	638	515	573	693	561	655	491	
Nd	78.2	82.3	67.9	45.7	68.4	74.7	69.9	64.0	91.4	88.4	81.7	82.8	111.5	81.5	90.7	
Zr	432	430	429	191	271	464	345	403	428	485	391	576	405	395	505	
Hf	7.9	8.7	8.7	4.5	6.0	9.0	7.1	7.2	8.4	9.5	8.1	10.9	8.4	7.8	9.9	
Sm	15.15	15.50	13.35	8.71	13.70	14.20	13.60	11.65	17.20	16.70	15.95	15.65	22.10	15.30	17.20	
Eu	3.89	3.92	3.19	2.42	3.57	3.35	3.51	3.44	4.20	3.72	4.21	3.31	5.59	3.88	3.86	
Gd	11.10	11.15	11.35	6.94	10.95	10.25	10.25	8.67	11.90	12.00	12.40	10.95	16.35	11.80	12.35	
Tb	1.38	1.45	1.46	0.88	1.33	1.22	1.28	1.04	1.40	1.46	1.51	1.39	1.96	1.39	1.55	
Dy	6.50	6.37	6.98	4.15	6.05	5.75	6.22	4.91	6.57	7.20	6.74	6.85	8.93	6.60	7.33	
Y	29.8	30.3	31.6	20.4	27.7	26.9	27.6	22.5	30.5	33.2	30.9	34.0	40.0	31.3	35.1	
Ho	1.08	1.13	1.14	0.72	0.99	0.96	0.99	0.83	1.08	1.18	1.09	1.16	1.46	1.11	1.22	
Er	2.60	2.73	2.70	1.79	2.49	2.52	2.52	2.08	2.86	3.05	2.74	3.01	3.45	2.61	3.06	
Tm	0.36	0.37	0.37	0.26	0.35	0.35	0.32	0.28	0.39	0.39	0.37	0.41	0.44	0.35	0.44	
Yb	2.24	2.17	2.36	1.59	2.09	2.17	1.93	1.73	2.23	2.47	2.29	2.55	2.57	2.30	2.58	
Lu	0.33	0.32	0.34	0.23	0.33	0.32	0.31	0.25	0.32	0.39	0.32	0.41	0.40	0.33	0.38	
ΣREE	480.93	498.91	421.84	264.69	376.40	449.49	412.18	406.83	545.35	523.96	477.52	525.99	630.85	479.47	541.37	

显的分离结晶作用。龙王山组  $Mg^\#$  范围在 57~73, 接近地幔部分熔融形成的原始岩浆值(约 73)<sup>[35]</sup>; Tl 为  $0.02 \times 10^{-6}$ , 明显低于地壳平均值( $0.5 \times 10^{-6}$ <sup>[31]</sup>); 在 Ba/Nb-La/Nb 图中(见图 6(b))落在原始地幔和洋中脊玄武岩附近, 在 Pb/Ce-Pb 图中(见图 6(c))落入大洋玄武岩中。上述特征均表明龙王山组火山岩相对后 3 组更具地幔特征。4 套火山岩样品 Ba 和 Sr 呈正相关(见图 6(d)); 大王山和娘娘山组 Ba 平均值分别为  $672 \times 10^{-6}$  和 Ba 平均值为  $1070 \times 10^{-6}$ , 姑山和娘娘山组的 Sr

平均值分别为  $548 \times 10^{-6}$  和  $782 \times 10^{-6}$ , 明显高于地壳 ( $w(Ba)=456 \times 10^{-6}$ ,  $w(Sr)=320 \times 10^{-6}$ <sup>[31]</sup>), 单独的地壳混染无法造成这么高的值, 只可能是岩浆演化的结果。

### 4.3 岩浆演化

4 组火山岩 MgO 含量与  $Mg^\#$  依次降低(平均值在 66.51~40.33), 各组火山岩中 MgO 与  $SiO_2$  呈负相关(见图 8),  $SiO_2$  与  $(Na_2O+K_2O)$  整体呈负相关, 随  $SiO_2$  含量增高,  $SiO_2$  与  $(Na_2O+K_2O)$  由正相关变为负相关(见

图 4(a)), 表明岩浆向富碱系列演化。MgO 对其他主要元素氧化物图解中(见图 8), 大王山组 MgO 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 呈正相关, 可能由斜长石和磷灰石

的分离结晶引起。龙王山组 MgO 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O 呈负相关, 与 CaO 呈正相关; 娘娘山组 MgO 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O 呈负相关, 与 CaO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 呈正相关, 表明随岩浆

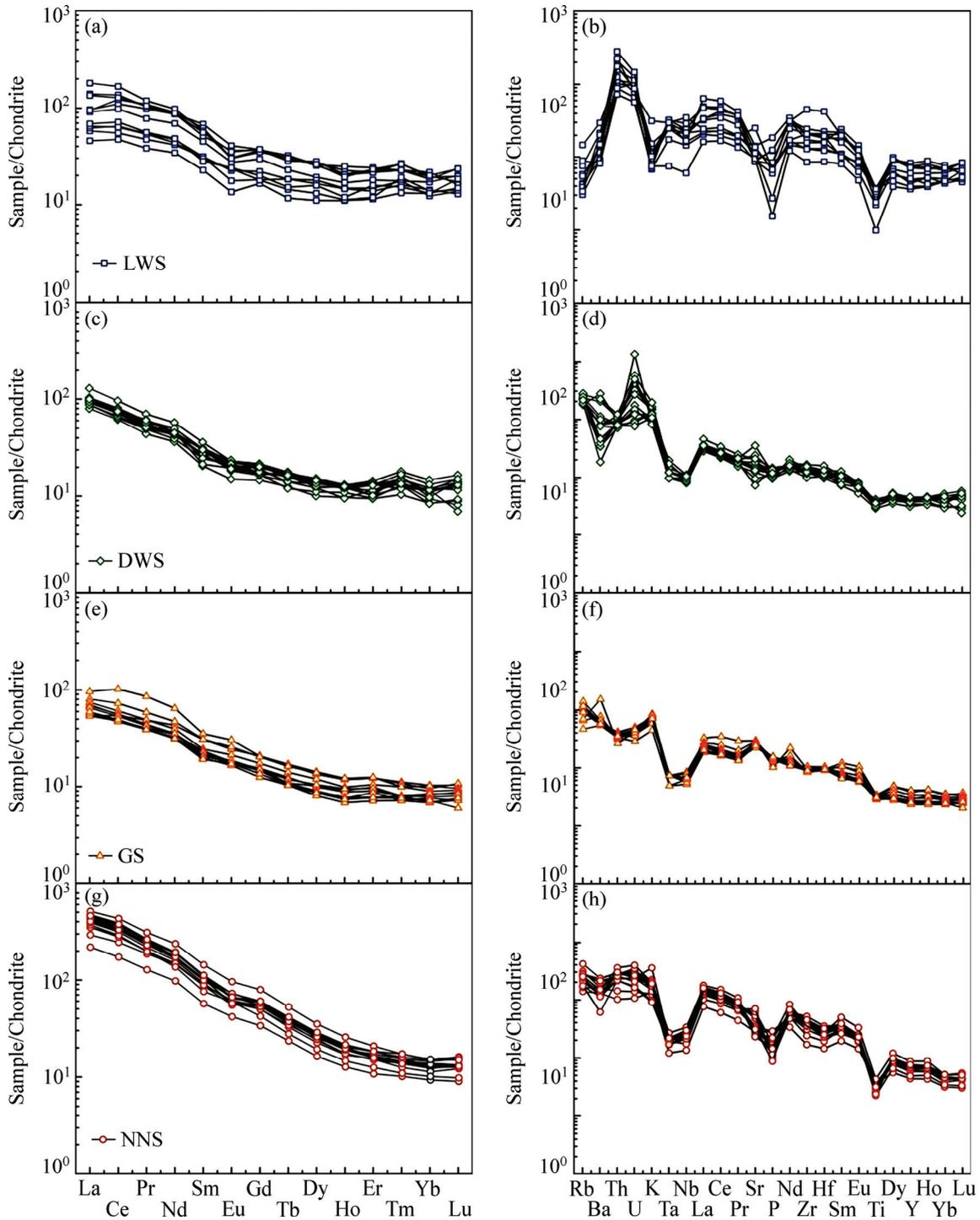


图 3 宁芜盆地火山岩 REE 分配图和微量元素蛛网图(球粒陨石和原始地幔标准值据文献[23]; LWS—龙王山组样品; DWS—大王山组样品; GS—姑山组样品; NNS—娘娘山组样品)

Fig. 3 Chondrite-normalized rare earth element patterns and primitive mantle-normalized spider diagrams for Ningwu volcanic rocks (The normalization values of Chondrite and primitive mantle are from Ref. [23]): (a), (b) LWS—Volcanic rock samples from Longwangshan formation; (c), (d) DWS—Volcanic rock samples from Dawangshan formation; (e), (f) GS—Volcanic rock samples from Gushan formation; (g), (h) NNS—Volcanic rock samples from Niangniangshan formation

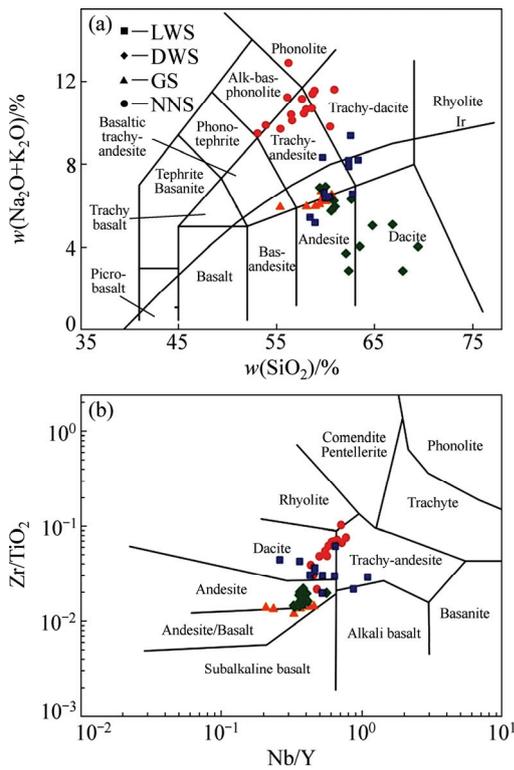


图4 宁芜火山岩 TAS 图解<sup>[24]</sup>及 Zr/TiO<sub>2</sub>-Nb/Y 图解<sup>[25]</sup>

Fig. 4 TAS classification diagram<sup>[24]</sup> (a) and Zr/TiO<sub>2</sub>-Nb/Y diagram<sup>[25]</sup> (b) for volcanic rocks from Ningwu basin

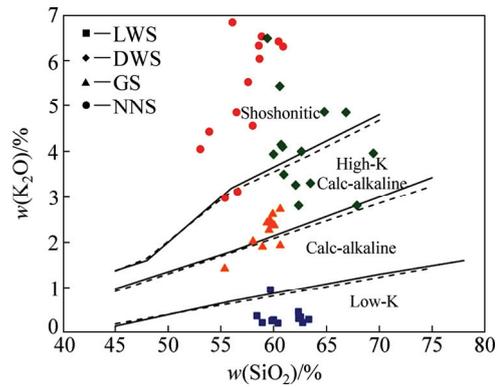


图5 宁芜火山岩 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 图解<sup>[28]</sup>

Fig. 5 Plot of K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub><sup>[28]</sup> for volcanic rocks from Ningwu basin

演化, 除存在磷灰石的分离结晶, 斜长石减少, 碱性长石增加, 所以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 未随 MgO 减少而减少, 而 CaO 随之减少, 亦与前述富碱演化特征的结论一致。

微量元素蛛网图中(见图3), 4组火山岩均出现 Ta、Nb、Ti、P 亏损。Ta、Nb、Ti 亏损可以由角闪石或含钾矿物的分离结晶有关或部分熔融时作为残留固相造成<sup>[36]</sup>, P 与磷灰石分离结晶有关, 与 Haker 图解释一

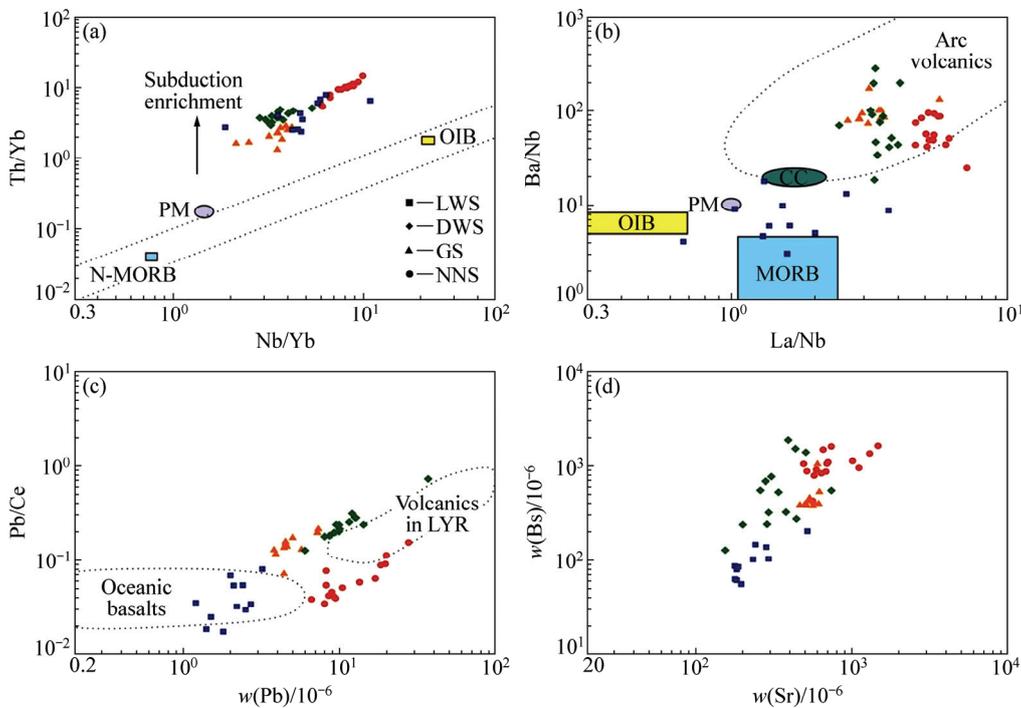


图6 宁芜火山岩微量元素协变图解: (a) Th/Yb-Nb/Yb; (b) Ba/Nb-La/Nb; (c) Pb/Ce-Pb<sup>[17]</sup>; (d) Ba-Sr(PM<sup>[23]</sup>—原始地幔; N-MORB<sup>[23]</sup>—洋中脊玄武岩; OIB<sup>[23]</sup>—洋岛玄武岩; CC<sup>[23]</sup>—陆壳; OIB-MORB array<sup>[32]</sup>—洋岛玄武岩-洋中脊玄武岩序列; Arc volcanics<sup>[33]</sup>—岛弧火山岩)

Fig. 6 Plots for volcanic rocks from Ningwu basin: (a) Th/Yb-Nb/Yb; (b) Ba/Nb-La/Nb; (c) Pb/Ce-Pb<sup>[17]</sup>; (d) Ba-Sr(PM<sup>[23]</sup>—Primitive mantle; N-MORB<sup>[23]</sup>—N-type MORB; OIB<sup>[23]</sup>—Ocean island basalt; CC<sup>[23]</sup>—Continental crust; OIB-MORB array<sup>[32]</sup>—N-type MORB-Ocean island basalt array; Arc volcanics<sup>[33]</sup>—Arc volcanic rocks)

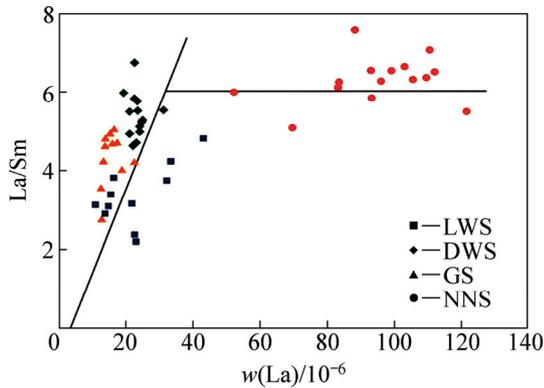


图 7 宁芜火山岩 La/Sm-La 图解<sup>[34]</sup>

Fig. 7 Plot of La/Sm-La<sup>[34]</sup> for volcanic rocks from Ningwu basin

致, 亦与本区磷灰石发育普遍的情况相符。此外, 龙王山组样品亏损 Rb、K、Ba, 亦可以由富钾矿物分离造成。龙王山组样品间稀土和微量分配模式类似但含

量分散, 娘娘山组次之, 反映龙王山组喷发时间最长, 岩浆于期间经历了较长时间演化。大王山组样品微量稀土分配集中, 个别活动性强的微量元素(Ba、U、Sr)变化大, 可能与岩石形成后热液蚀变有关。

火山岩样品均具有右倾的稀土分配模式(见图 3), 可以由 LREE 分配系数低的矿物(石榴子石、橄榄石、斜方辉石、单斜辉石)存在于残留相或分离结晶引起。仅早期龙王山组表现出微弱 Eu 负异常, 反映可能存在斜长石的分离结晶; 磷灰石具有负 Eu 异常, 磷灰石的分离结晶可以抵消斜长石分离造成的 Eu 异常<sup>[37]</sup>, 因而演化后期未显示 Eu 负异常。龙王山、大王山和姑山组火山岩稀土总量变化不大, 平均值为  $103.32 \times 10^{-6} \sim 175.45 \times 10^{-6}$ ; 娘娘山组稀土总量明显高于前 3 组,  $\Sigma\text{REE}$  平均值为  $472.57 \times 10^{-6}$ , 右倾明显, 轻稀土更为富集, 可能反映前 3 组和娘娘组虽然同源, 但形成时部分熔融程度可能不同, 不是一次形成。同时不排除存在浅部二次岩浆房的可能。

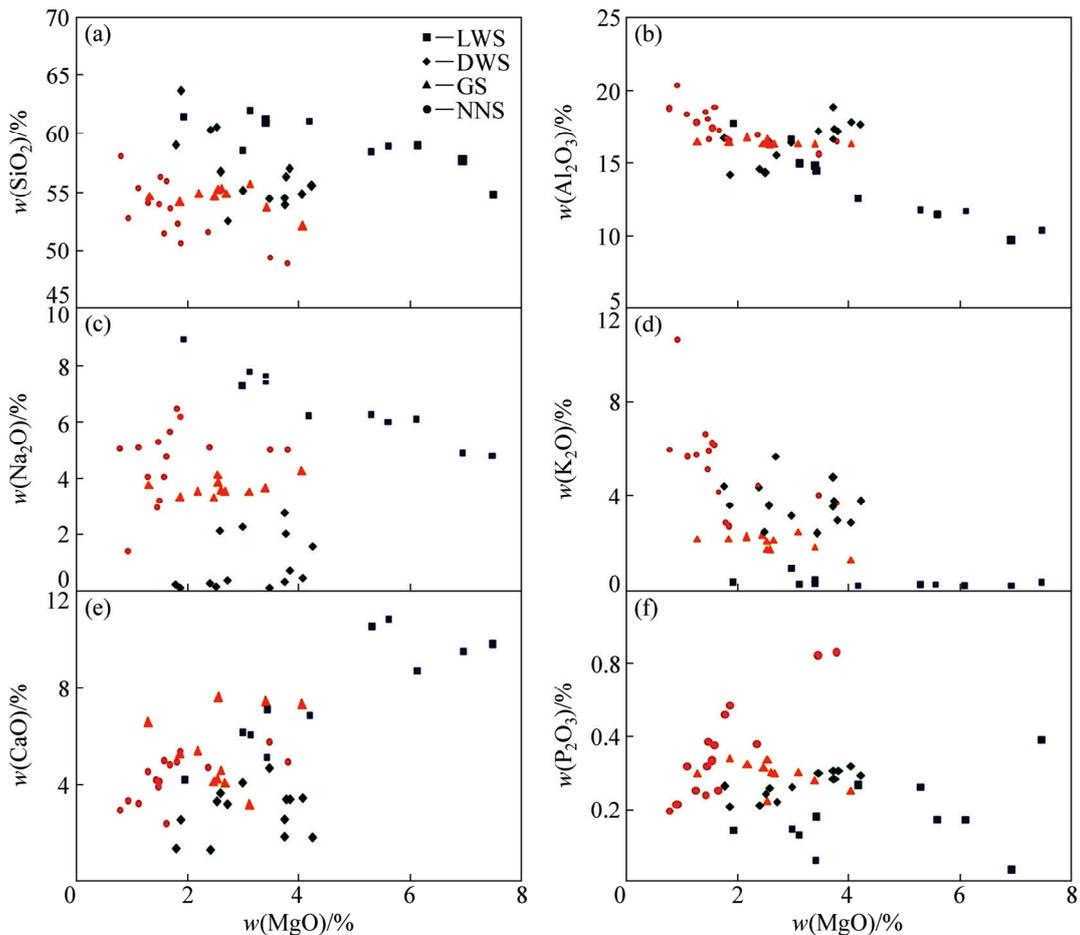


图 8 主量元素 Haker 图解

Fig. 8 Haker diagrams of MgO vs other major oxides: (a) SiO<sub>2</sub>-MgO; (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO; (c) Na<sub>2</sub>O-MgO; (d) K<sub>2</sub>O-MgO; (e) CaO-MgO; (f) P<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO

#### 4.4 大地构造背景分析

早白垩世, 华北与华南板块碰撞拼合已结束, 包括宁芜盆地在内的长江中下游均处于板内环境。Zr/Y-Zr 图解中(见图 9(a)), 除姑山组样品外, 其余三组均有部分样品落入板内环境; Hf-Th-Ta 图解中则一致落入岛弧玄武岩内(见图 9(b)), 出现这种情况认为是与扬子板块岩石圈地幔具富集特征有关。长江中下游地区的富集地幔特征多有报道<sup>[14, 17-18, 20, 26-27, 29, 40-43]</sup>, 通常认为该区富集地幔特征与流体/熔体交代或地壳拆沉有关, 比如, 有些学者提出富集地幔与俯冲板片及沉积物析出的流体/熔体交代有关, 认为交代的流体/熔体与古太平洋俯冲<sup>[17]</sup>, 印支期扬子俯冲<sup>[40]</sup>, 或晋宁期华夏向扬子板块俯冲事件<sup>[14, 41]</sup>有关。而持拆沉观点的学者将其与大别造山带碰撞造山相联系<sup>[29, 42]</sup>或软

流圈上涌底侵<sup>[43]</sup>。如前所述, 火山岩具有亏损 Ta、Nb、Ti, 富集 LILE, 类似于岛弧火山岩(IAB)特征<sup>[44]</sup>, Th/Yb-Nb/Yb 显示与俯冲有关的富集特征, 表明富集地幔形成与俯冲板片流体/熔体交代关系密切, 但也不排除地壳拆沉在共同起作用的可能性。

前人对宁芜盆地白垩纪火山喷发的大地构造背景主要存在两种不同认识: 大别造山带造山后伸展<sup>[17, 22, 29]</sup>和古太平洋板块俯冲<sup>[14, 27]</sup>。前者认为大别造山带山根垮塌伸展造成宁芜火山岩快速喷发<sup>[17, 22]</sup>; 后者认为古太平洋俯冲造成郟庐断裂左行走滑, 深部岩石圈剪切使得软流圈轻物质上涌造成热侵蚀<sup>[14]</sup>; 也有学者认为与板内裂谷环境有关<sup>[26]</sup>。尽管如此, 众多国内学者普遍认可中国东部中生代经历了大规模的岩石圈伸展减薄<sup>[14-18, 20, 29, 41, 45]</sup>, 减薄机制为软流圈上涌造成热侵蚀<sup>[14, 16-17, 20, 41]</sup>或岩石圈拆沉<sup>[18, 29]</sup>。

上述两种认识并非相互矛盾。三叠纪扬子板块向华北克拉通碰撞拼合, 到侏罗纪古太平洋开始俯冲, 作为印支期运动与燕山期运动的分界, 但太平洋持续改变角度、方向和速率发生俯冲的同时, 扬子和华北间的大别造山带可能仍存在造山后作用, 能够影响到作为造山带前陆拗陷的长江中下游地区。因此, 本文作者认为, 长江中下游白垩世岩浆活动可能受控于这两者的共同作用, 尤其考虑到早期古太平洋大致向南俯冲<sup>[4]</sup>, 与大别造山带作用方向一致。

宁芜盆地位于郟庐断裂南段以东, 郟庐断裂带的左行剪切与宁芜拉分盆地形成和火山岩喷发关系密切<sup>[46]</sup>。史大年等<sup>[43]</sup>(2012)曾报道宁芜盆地正下方存在“幔隆构造”, Moho 面深度只有 28 km。“幔隆构造”有利于在伸展减薄背景下的地幔物质减压熔融; 盆地内断裂发育, 地表火山口分布在断裂交汇部位, 表明断裂为岩浆运移提供通道; 基底地层中存在滑脱层<sup>[47]</sup>, 为岩浆水平运移和短暂停留提供空间。

## 5 结论

1) 宁芜盆地早白垩世火山活动频繁, 喷发形成的火山岩岩性主要为安山岩、粗安岩和英安岩。其中最早形成的龙王山组火山岩为低钾系列, 大王山、姑山和娘娘山组火山岩为高钾钙碱性-橄辉玄武岩系列。

2) 4 套火山岩具有类似的微量稀土特征, 显示来自同一岩浆源。Mg<sup>#</sup>为 66.51~40.33, 轻稀土富集, Ta、Nb、Ti 亏损, 结合前人同位素研究, 认为其原始岩浆形成于不同程度的富集地幔部分熔融。原始岩浆形成后经历了以分离结晶为主的岩浆演化过程, 主要表现

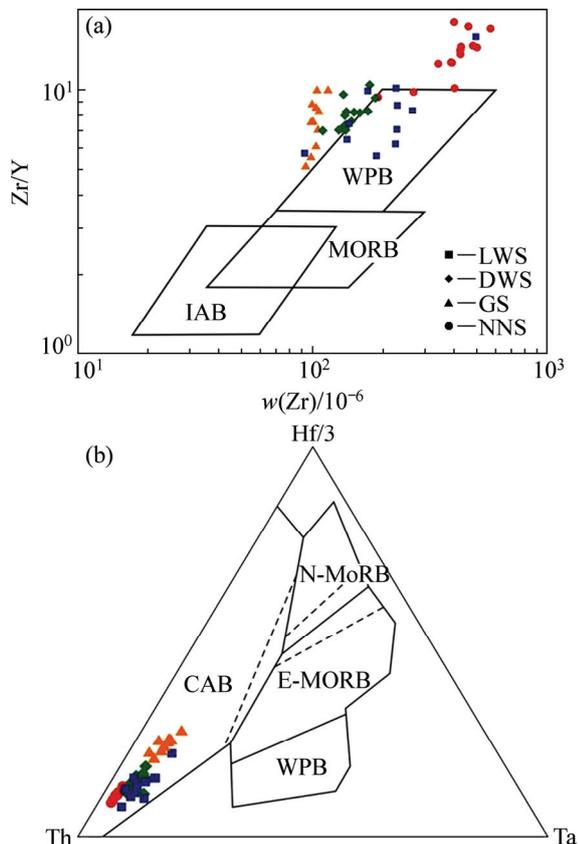


图 9 构造环境判别图解: (a) Hf/3-Th-Ta<sup>[38]</sup>; (b) Zr/Y-Zr<sup>[39]</sup> (WPB—板内玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩; IAB—岛弧玄武岩; N-MORB—N 型洋中脊玄武岩; E-MORB—E 型洋中脊玄武岩; CAB—钙碱性玄武岩)

Fig. 9 Discrimination diagrams of Hf/3-Th-Ta<sup>[38]</sup> (a) and Zr/Y-Zr<sup>[39]</sup> (b) (WPB—Within plate basalt; MORB—Mid-ocean ridge basalt; IAB—Island arc basalts; N-MORB—N-type MORB; E-MORB—E-type MORB; CAB—Calc-alkali basalts)

为火山岩 Mg<sup>#</sup>降低和向富碱系列演化。

3) 在古太平洋俯冲和大别造山后伸展的共同作用下, 中国东部发生岩石圈减薄和软流圈物质上涌。郟庐断裂发生走滑, 造成宁芜盆地拉分 and 富集岩石圈地幔减压部分熔融形成原始岩浆, 并在上升过程中经历了以结晶分异为主的岩浆演化过程。岩浆沿断裂和滑脱面运移, 近地表喷发形成了具有富集地幔特征的陆内火山岩。

## REFERENCES

- [1] 宁芜研究项目编写小组. 宁芜玢岩铁矿[M]. 北京: 地质出版社, 1978: 1-320.  
Ningwu Research Group. Porphyrite iron deposit of Ningwu[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1978: 1-320.
- [2] 李荫清, 魏家秀, 周兴汉, 马秀娟. 某玢岩铁矿床中气液包裹体特征和成矿温度[J]. 地质学报, 1979, 50(1): 53-59.  
LI Yin-qing, WEI Jia-xiu, ZHOU Xing-han, MA Xiu-juan. Fluid inclusions and temperature of the porphyry iron deposits in the Ningwu basin[J]. Acta Geologica Sinica, 1979, 50(1): 53-59.
- [3] 陈毓川, 张荣华, 盛继福, 艾永德. 玢岩铁矿矿化蚀变作用及成矿机理[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, 1982(1): 1-29.  
CHEN Yu-chuan, ZHANG Rong-hua, SHENG Ji-fu, AI Yong-de. The mineralization and alteration of the porphyrite iron deposits and their mechanism[J]. Bull Ist M Dep, Chinese Acad Geol Sci, 1982(1): 1-29.
- [4] 李秉伦, 谢奕汉. 宁芜地区宁芜型铁矿的成因、分类和成矿模式[J]. 中国科学(B 辑), 1984, 14(1): 80-86.  
LI Bing-lun, XIE Yi-han. The origin, classification, and genesis model of the Ningwu type iron deposits in the Nanjing and Wuhu area[J]. Science China(B), 1984, 14(1): 80-86.
- [5] 卢冰, 胡受奚, 蔺雨时, 叶水泉. 宁芜型铁矿床成因和成矿模式的探讨[J]. 矿床地质, 1990, 9(1): 13-25.  
LU Bing, HU Shou-xi, LIN Yu-shi, YE Shui-quan. A study on origin and ore-forming model of Ningwu type iron deposits[J]. Mineral Deposits, 1990, 9(1): 13-25.
- [6] 马芳, 蒋少涌, 姜耀辉, 倪培, 凌洪飞. 宁芜盆地凹山和东山铁矿床流体包裹体和氢氧同位素研究[J]. 岩石学报, 2006, 22(10): 2581-2589.  
MA Fang, JIANG Shao-yong, JIANG Yao-hui, NI Pei, LING Hong-fei. Fluid inclusions and H-O isotopic compositions in the Washan and Dongshan iron deposits, Ningwu basin, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(10): 2581-2589.
- [7] 李延河, 段超, 韩丹, 陈新旺, 王丛林, 杨秉阳, 张成, 刘锋. 膏盐层氧化障在长江中下游玢岩铁矿成矿中的作用[J]. 岩石学报, 2014, 30(5): 1355-1368.  
LI Yan-he, DUAN Chao, HAN Dan, CHEN Xin-wang, WANG Cong-lin, YANG Bing-yang, ZHANG Cheng, LIU Feng. Effect of sulfate evaporate salt layer for formation of porphyrite iron ores in the Middle-Lower Yangtze River area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(5): 1355-1368.
- [8] 袁顺达, 侯可军, 刘敏. 安徽宁芜地区铁氧化物-磷灰石矿床中金云母 Ar-Ar 定年及其地球动力学意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(3): 797-808.  
YUAN Shun-da, HOU Ke-jun, LIU Min. Timing of mineralization and geodynamic framework of iron-oxide-apatite deposits in Ningwu Cretaceous basin in the middle-lower reaches of the Yangtze river, China: Constraints from Ar-Ar dating on phloppites[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(3): 797-808.
- [9] 范裕, 周涛发, 袁峰, 张乐骏, 钱兵, 马良, 谢杰, 杨西飞. 宁芜盆地玢岩型铁矿床的成矿时代: 金云母 40Ar-39Ar 同位素年代学研究[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 810-820.  
FAN Yu, ZHOU Tao-fa, YUAN Feng, ZHANG Le-jun, QIAN Bin, MA Liang, XIE Jie, YANG Xi-fei. Geochronology of the porphyry-like type iron deposits in Ning-Wu basin: Evidence from <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar phlogopite dating[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(5): 810-820.
- [10] 范裕, 周涛发, 袁峰, 张乐骏, 钱兵, 马良, DAVID R C. 宁芜盆地闪长玢岩的形成时代及对成矿的指示意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(9): 2715-2728.  
FAN Yu, ZHOU Tao-fa, YUAN Feng, ZHANG Le-jun, QIAN Bin, MA Liang, DAVID R C. Geochronology of the diorite porphyrites in Ningwu basin and their metallogenic significances[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(9): 2715-2728.
- [11] 薛怀民, 董树文, 马芳. 长江中下游地区庐(江)-枞(阳)和宁(南京)-芜(湖)盆地内与成矿有关潜火山岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. 岩石学报, 2010, 26(9): 2653-2664.  
XUAN Huai-min, DONG Shu-wen, MA Fang. Zircon U-Pb SHRIMP ages of sub-volcanic bodies related with porphyritic Fe-deposits in the Luzong and Ningwu basins, Middle and Lower Yangtze River Reaches, Central China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(9): 2653-2664.
- [12] 段超, 毛景文, 李延河, 侯可军, 袁顺达, 张成, 刘佳林. 宁芜盆地凹山铁矿床辉长闪长玢岩和花岗闪长斑岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2011, 85(7): 1159-1171.  
DUAN Chao, MAO Jing-wen, LI Yan-he, HOU Ke-jun, YUAN Shun-da, ZHANG Cheng, LIU Jia-lin. Zircon U-Pb geochronology of the gabbro-diorite porphyry and granodiorite porphyry from Washan iron deposit in Ningwu basin, and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(7): 1159-1171.
- [13] 李锦伟, 陈津华, 曾键年, 陆建培, 张燕霞, 李小芬, 吴亚飞, 陆顺富. 宁芜盆地吉山铁矿床辉长闪长玢岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 2012, 31(6): 1227-1236.

- LI Jin-wei, CHEN Jin-hua, ZENG Jian-nian, LU Jian-pei, ZHANG Yan-xia, LI Xiao-fen, WU Ya-fei, LU Shun-fu. SHRIMP zircon U-Pb dating of gabbro-diorite porphyrite in Jishan iron ore deposit of Ningwu basin and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(6): 1227-1236.
- [14] 王丽娟, 王汝成, 于津海, 杨颖鹤, 黄建平, 张少琴. 宁芜盆地火山-侵入岩的时代、地球化学特征及其地质意义[J]. *地质学报*, 2014, 88(7): 1247-1272.
- WANG Li-juan, WANG Ru-cheng, YU Jin-mei, YANG Yin-he, HUANG Jian-ping, ZHANG Shao-qin. Geochronology, geochemistry of volcanic-intrusive rocks in the Ningwu basin and its geological implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(7): 1247-1272.
- [15] 周涛发, 范裕, 袁峰, 张乐骏, 钱兵, 马良, 杨西飞, DAVID R C. 宁芜(南京-芜湖)盆地火山岩的年代学及其意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(7): 960-971.
- ZHOU Tao-fa, FAN Yu, YUAN Feng, ZHANG Le-jun, QIAN Bin, MA Liang, YANG Xi-fei, DAVID R C. Geochronology and significance of volcanic rocks in the Ningwu basin of China[J]. *Science China: Earth Science*, 2011, 41(7): 960-971.
- [16] 闫峻, 刘海泉, 宋传中, 徐夕生, 安亚军, 刘佳, 戴立群. 长江中下游繁昌-宁芜火山盆地火山岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. *科学通报*, 2009, 54(12): 1716-1724.
- YAN Jun, LIU Hai-quan, SONG Chuan-zhong, XU Xi-sheng, AN Ya-jun, LIU Jia, DAI Li-qun. Zircon U-Pb geochronology of the volcanic rocks from Fanchang-Ningwu volcanic basins in the Lower Yangtze region and its geological implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(12): 1716-1724.
- [17] TANG Y J, ZHANG H F, YING J F, SU B X, LI X H, SANTOSH M. Rapid eruption of the Ningwu volcanics in eastern China: Response to Cretaceous subduction of the Pacific plate[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14(6): 1703-1721.
- [18] 侯可军, 袁顺达. 宁芜盆地火山-次火山岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2010, 26(3): 888-902.
- HOU Ke-jun, YUAN Shun-da. Timing of mineralization and geodynamic framework of iron-oxide-apatite deposits in Ningwu Cretaceous basin in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, China: Constraints from Ar-Ar dating on phlogopites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(3): 797-808.
- [19] 张旗, 简平, 刘敦一, 王元龙, 钱青, 王焰, 薛怀民. 宁芜火山岩的锆石 SHRIMP 定年及其意义[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(4): 309-314.
- ZHANG Qi, JIAN Ping, LIU Dun-yi, WANG Yuan-long, QIAN Qing, WANG Yan, XUE Huai-min. SHRIMP dating of volcanic rocks from the Ningwu area and its geological implications[J]. *Science China D*, 2003, 33(4): 309-314.
- [20] 王元龙, 张旗, 王焰. 宁芜火山岩的地球化学特征及其意义[J]. *岩石学报*, 2001, 17(4): 565-575.
- WANG Yuan-long, ZHANG Qi, WANG Yan. Geochemical characteristics of volcanic rocks from Ningwu area, and its significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(4): 565-575.
- [21] 常印佛, 董树文, 黄德志. 论中-下扬子“一盖多底”格局与演化[J]. *火山地质与矿产*, 1996, 17(1/2): 1-15.
- CHANG Yin-fo, DONG Shu-wen, HUANG De-zhi. On tectonics of “polybasement with one cover” in Middle-Lower Yangtze craton China[J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 1996, 17(1/2): 1-15.
- [22] 董树文, 马立成, 刘刚, 薛怀民, 施炜, 李建华. 论长江中下游成矿动力学[J]. *地质学报*, 2011, 85(5): 612-625.
- DONG Shu-wen, MA Li-cheng, LIU Gang, XUAN Huai-min, SHI Wei, LI Jian-hua. On dynamics of the metallogenic belt of Middle-Lower Reaches of Yangtze River, eastern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(5): 612-625.
- [23] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- [24] Le MAITRE R W. *Igneous rocks: A classification and glossary of terms* [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2002: 1-236.
- [25] WINCHESTER J A, FLOYD P A. Geochemical discrimination of different magma series and the differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 1977, 20(4): 325-343.
- [26] 邢凤鸣. 宁芜地区中生代岩浆岩的成因—岩石学与 Sr、Nd、Pb 同位素证据[J]. *岩石矿物学*, 1996, 15(2): 126-137.
- XING Feng-ming. Petrological and Nd, Sr, Pb isotopic evidence for genesis of Mesozoic magmatic rocks in Nanjing—Wuhu area[J]. *Acta Petrologica et Mineralogical*, 1996, 15(2): 126-137.
- [27] 汪洋, 邓晋福, 姬广义. 长江中下游地区早白垩世埃达克质岩的大地构造背景及其成矿意义[J]. *岩石学报*, 2004, 20(2): 297-314.
- WANG Yang, DENG Jin-fu, JI Guang-yi. A perspective on the geotectonic setting of early Cretaceous adakite-like rocks in the Lower reaches of Yangtze River and its significance for copper-gold mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(2): 297-314.
- [28] PECCERILLO A, TAYLOR S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1976, 58(1): 63-81.
- [29] 杜杨松, 曹毅, 袁万明, 楼亚儿, 李顺庭, 鲁鑫. 安徽沿江地区中生代碰撞后到造山后岩浆活动和壳幔相互作用—来自火山-侵入杂岩和岩石包体的证据[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1294-1302.
- DU Song-yang, CAO Yi, YUAN Wang-ming, LOU Ya-er, LI Shun-ting, LU Xin. Mesozoic post-collisional to post orogenic magmatic activities and crustal interaction with mantle along the

- Yangtze River, Anhui province: Evidence from volcanic-intrusive complexes and xenoliths[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6): 1294–1302.
- [30] 黄德志. 宁芜矿集区深部构造及成矿作用的浅部响应研究成果报告[R]. 长沙: 中南大学, 2015.  
HUANG De-zhi. Study report on the shallow response to deep tectonics and mineralization in Ningwu area[R]. Changsha: Central South University, 2015.
- [31] RUDNICK R L, GAO S. Composition of the continental crust, in treatise on geochemistry [M]. 2nd ed. Oxford: Elsevier-Pergamon, 2014: 1–45.
- [32] PEARCE J A, PEATE D W. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas[J]. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 2003, 23(1): 251–285.
- [33] JAHN Bor-ming, WU Fu-yuan, LO Ching-hua, TSAI Chin-ho. Crust–mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic–ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China[J]. *Chemical Geology*, 1999, 365(2/3): 119–146.
- [34] 陈道公, 支霞臣, 杨海涛. 地球化学(第二版)[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 163–218.  
CHEN Dao-gong, ZHI Xia-chen, YANG Hai-tao. *Geochemistry (2nd edition)*[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2009: 163–218.
- [35] ROEDER P L, EMSLIE R F. Olivine-liquid equilibrium[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1970, 29(4): 275–289.
- [36] POWELL W, ZHANG M, O'REILLY S Y, TIEPOLO M. Mantle amphibole trace-element and isotopic signatures trace multiple metasomatic episodes in lithospheric mantle, western Victoria, Australia[J]. *Lithos*, 2004, 75(s1/2): 141–171.
- [37] HOSKIN P W O. Identifying accessory mineral saturation during differentiation in granitoid magmas: An intergraded approach[J]. *Journal of Petrology*, 2000, 41: 1365–1396.
- [38] WOOD D A. The application of a Th, Hf, Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, 50(1): 11–30.
- [39] PEARCE J A, NORRIS M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1979, 69(1): 33–47.
- [40] 闫峻, 陈江峰, 喻钢, 钱卉, 周泰禧. 长江中下游晚中生代中基性岩的铅同位素特征: 富集地幔的证据[J]. *高校地质学报*, 2003, 9(2): 195–206.  
YAN Jun, CHEN Jiang-feng, YU Gang, QIAN Hui, ZHOU Tai-xi. Pb Isotopic characteristics of Late Mesozoic mafic rocks from the Lower Yangtze region: evidence for enriched mantle[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2003, 9(2): 195–206.
- [41] 闫峻, 陈江峰, 谢智, 杨刚, 喻钢, 钱卉. 长江中下游地区蝌蚪山晚中生代玄武岩的地球化学研究: 岩石圈地幔性质与演化的制约[J]. *地球化学*, 2005, 34(5): 455–469.  
YAN Jun, CHEN Jiang-feng, XIE Zhi, YANG Gang, YU Gang, QIAN Hui. Geochemistry of Late Mesozoic basalts from Kedoushan in the Middle and Lower Yangtze regions: constraints on characteristics and evolution of the lithospheric mantle[J]. *Geochimica*, 2005, 34(5): 455–469.
- [42] 李曙光, 何永胜, 王水炯. 大别造山带的去山根过程与机制: 碰撞后岩浆岩的年代学和地球化学制约[J]. *科学通报*, 2013, 58(23): 2316–2322.  
LI Shu-guang, HE Yong-sheng, WANG Shui-jiong. Process and mechanism of mountain-root removal of the Dabie Orogen: Constraints from geochronology and geochemistry of post-collisional igneous rocks[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(23): 2316–2322.
- [43] 史大年, 吕庆田, 徐文艺, 严加永, 赵金花, 董树文, 常印佛. 长江中下游成矿带及邻区地壳结构—MASH成矿过程的P波接收函数成像证据[J]. *地质学报*, 2012, 86(3): 389–399.  
SHI Da-nian, LÜ Qing-tian, XU Wen-yi, YAN Jia-yong, ZHAO Jin-hua, DONG Shu-wen, CHANG Yin-fo. Crustal structures beneath the Mid-lower Yangtze metallogenic belt and its adjacent regions in eastern China: Evidences from P-wave receiver function imaging for a MASH metallization process?[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(3): 389–399.
- [44] 汪龙, 刘春明, 胡召齐, 江来利, 黄德志. 皖南鹤城科马提质变玄武岩地球化学特征及大地构造意义[J]. *中国有色金属学报*, 2016, 26(4): 863–877.  
WANG Long, LIU Chun-ming, HU Zhao-qi, HUANG De-zhi. Tectonic significance and geochemistry of Komatiitic meta-basalt in Hecheng, southern Anhui[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2016, 26(4): 863–877.
- [45] LI Xian-hua. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18(3): 293–305.
- [46] 姜波, 徐嘉炜. 一个中生代的拉分盆地—宁芜盆地的形成及演化[J]. *地质科学*, 1989, 24(4): 314–322.  
JIANG Bo, XU Jia-wei. Formation and evolution of the Ningwu basin as a Mesozoic pull-apart basin[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1989, 24(4): 314–322.
- [47] 梁锋, 吕庆田, 严加永, 刘振东. 长江中下游宁芜火山岩盆地深部结构特征—来自反射地震的认识[J]. *岩石学报*, 2014, 30(4): 941–956.  
LIANG Feng, LÜ Qing-tian, YAN Jia-yong, LIU Zhen-dong. Deep structure of Ningwu volcanic basin in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River: Insights from reflection seismic data[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(4): 941–956.

## Geochemical characteristics of early Cretaceous volcanic rocks and magma evolution in Ningwu basin, Eastern China

TENG Xia<sup>1,2</sup>, HUANG De-zhi<sup>1,2</sup>, LU Yang<sup>1,2</sup>, WANG Long<sup>1,2</sup>, LIU Zhen-lan<sup>1,2</sup>

(1. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Hunan Key Laboratory of Non-ferrous Resources and Geological Hazard Detection, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The Ningwu basin is located in the Middle-Lower Yangtze River metallogenic zone, Eastern China. Four cycles of volcanic rocks were widely found in the basin. By the tool of geochemistry, the geochemical characteristics and magma evolution of these volcanic rocks were studied. The results show that volcanic rocks are mainly andesites, trachy-andesites and dacites. The volcanic rocks of the Longwangshan formation, which were formed earlier, are low K series while volcanic rocks of other formations vary from high K calc-alkaline to shoshonite. With the Mg indexes from 66.51 to 40.33, volcanic rocks show the similar LREE-enriched patterns and depletion in high field strength elements of Ta, Nb and Ti, suggesting that the primitive magma resulted from partial melting of enriched mantle. The decreasing Mg index and the increasing alkali also indicate that the magma experienced significant fractional crystallization after forming. Combined with regional geology and dating studies, it is thought that volcanic activities in the Ningwu basin happened at the regional lithospheric thinning, resulting from the subduction of Paleo-Pacific and post-orogen extension of Dabie Mountain. At that time, active Tanlu fault triggered partial melting of the enriched mantle beneath the Ningwu basin.

**Key words:** Ningwu basin; volcanic rocks; geochemistry; enriched mantle; magma evolution

**Foundation item:** Project (2011BAB04D01) supported by the National Science and Technology Support Program of China

**Received date:** 2016-05-26; **Accepted date:** 2016-11-08

**Corresponding author:** HUANG De-zhi; Tel: 13687340390; E-mail: dzhuang\_01@163.com

(编辑 何学锋)