

·专题研究·

溧水盆地两类晚中生代中酸性火山岩的岩石成因

高晓峰^{1,2}, 郭 锋¹, 李超文^{1,2}, 蔡观强^{1,2}

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 边缘海重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院 研究生院 北京 100049)

摘 要: 下扬子地区溧水盆地晚中生代中酸性火山岩的元素-同位素地球化学分析结果显示, 区域上存在同期的两类准铝质高钾钙碱性中酸性火山岩。第 1 类以龙王山组粗面安山岩为代表, 它们在空间上与玄武岩共生, SiO_2 含量为 58.0%~58.9%, 富集大离子亲石元素(如 $\text{Rb}=104 \times 10^{-6} \sim 117 \times 10^{-6}$, $\text{Ba}=651 \times 10^{-6} \sim 695 \times 10^{-6}$)及 LREE(如 $\text{Ce}=47.4 \times 10^{-6} \sim 49.0 \times 10^{-6}$), 强烈亏损 Nb-Ta, 基本无 Eu 异常或弱异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.87 \sim 1.01$, 平均值为 0.95)和同期玄武岩具有非常相似的 Sr 和 Nd 同位素比值[$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i) = 0.70551 \sim 0.70557$; $\epsilon\text{Nd}(t) = -3.6 \sim -2.9$], 为同期基性岩浆经历了角闪石+斜长石+磷灰石分离结晶作用的产物。第 2 类火山岩由大王山组粗面岩组成, 其 SiO_2 含量为 61.9%~66.4%, MgO 变化在 1.07%~2.56% 之间, 表现出与龙王山组中酸性火山岩类似的微量元素元素特征, 但具更高的 K_2O 、Rb、Th、REE、HFSE 和低的 FeO_T 、 TiO_2 、 P_2O_5 、CaO、Sr 和相容元素含量, 较龙王山组基性火山岩具高 Sr 和低 Nd 同位素比值[$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i) = 0.70663 \sim 0.70813$; $\epsilon\text{Nd}(t) = -7.7 \sim -4.8$], 其高钾、准铝质的英安岩成分特征难以通过地壳部分熔融作用来解释, 而相对同期基性火山岩高 Sr 而低 Nd 的同位素组成反映它们为玄武质岩浆在上升过程中受到大陆上地壳物质同化混染作用(AFC)的产物。

关键词: 地球化学, 岩石成因, 中酸性火山岩, 晚中生代, 溧水盆地

中图分类号: P588.14 P581

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2007)01-0001-12

The genesis of two types of Late Mesozoic intermediate-felsic volcanic rocks in Lishui Basin, Lower Yangtze valley

GAO Xiao-feng^{1,2}, GUO Feng¹, LI Chao-wen^{1,2} and CAI Guan-qiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Major element, trace element and Sr-Nd isotope data of two types of Late Mesozoic metaluminous and high-K calc-alkaline intermediate-felsic volcanic rocks from the Lishui Basin in Lower Yangtze valley are reported in this paper. The first type is represented by the trachyandesites occurring in the Longwangshan Formation. These rocks span a SiO_2 range of 58.0%~58.9%, characterized by significant LILE (e.g., $\text{Rb}=104 \times 10^{-6} \sim 117 \times 10^{-6}$, $\text{Ba}=651 \times 10^{-6} \sim 695 \times 10^{-6}$) and LREE (e.g., $\text{Ce}=47.44 \times 10^{-6} \sim 48.96 \times 10^{-6}$) and Nd-Ta depletion with insignificant Eu anomalies ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.87 \sim 1.01$, with an average of 0.95), and similar Sr and Nd isotopic compositions [$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i) = 0.70551 \sim 0.70557$, $\epsilon\text{Nd}(t) = -3.6 \sim -2.9$] to the contemporaneous mafic lavas. These rocks are spatially coeval with the mafic volcanic rocks and are interpreted as the differentiates of the basaltic magmas after removal of a fractional assemblage of amphibole + plagioclase + apatite. The second type is composed of trachytes occurring in the Dawangshan Formation. These rocks span a SiO_2 range of 61.9%~66.4% and MgO range of 1.07%~2.56%, showing similar trace element features to trachy-

收稿日期: 2006-05-08; 修订日期: 2006-11-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40073011); 中国科学院知识创新项目(GIGCX-04-04)

作者简介: 高晓峰(1979-), 男, 在读博士研究生, 构造地质学专业; 通讯作者: 郭锋, 电话: 020-85290280, E-mail: guofengt@263.net

andesites of the Longwangshan Formation. Compared with basalts and trachyandesites from the Longwangshan Formation, they have higher K_2O , Rb, Th, REE, HFSE, lower FeO_T , TiO_2 , P_2O_5 , CaO, Sr and compatible element contents, and more radiogenic Sr and less radiogenic Nd isotopic compositions [$^{87}Sr/^{86}Sr(i) = 0.70663 \sim 0.70813$; $\epsilon Nd(t) = -7.7 \sim -4.8$]. The unique characteristics (e.g., K-rich, metaluminous and dacitic compositions) in these rocks argue against an origin of crust-derived melts. It is thus considered that these melts as differentiates of the primary basaltic magmas were subjected to assimilation and fractional crystallization.

Key words: geochemistry; petrogenesis; intermediate-felsic volcanic rocks; Late Mesozoic; Lishui Basin

下扬子地区位于扬子陆块的东北缘,晚中生代期间该区广泛发育了高钾钙碱性-钾玄岩系列火成岩(Zhou *et al.*, 1994; 邢凤鸣等, 1996; 邢凤鸣, 1998; 王元龙等, 2001; 刘洪等, 2002)。前人根据区域上晚中生代中基性火成岩的元素-同位素地球化学研究认为其熔融源区为一个富集不相容元素的岩石圈地幔(刘洪等, 2002; 李超文等, 2004),但对该区广泛出露的中酸性火山岩成因却存在一定分歧(陈江峰等, 1993; 王元龙等, 2001; Xu *et al.*, 2002)。作为地表最广泛分布的岩石类型,中酸性火成岩的成因对于理解地壳的结构、热演化和地壳熔融动力学过程能提供重要的约束。近年来在下扬子地区中酸性火成岩中发现存在类似 adakite 的中酸性火山岩和侵入岩(Xu *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2006),其成因被认为与扬子加厚下地壳熔融或岩石圈的拆沉作用相关。然而,区域上众多的中酸性火成岩并不具有 adakite 岩石的特征,其岩石成因目前仍不清楚,制约了对区域构造演化的深入认识。本文对出露于下扬子地区溧水盆地的龙王山组粗面安山岩和大王山组粗面岩开展了主、微量元素和 Sr-Nd 同位素组成的分析测试,结合前人发表的有关同期中基性火成岩数据,以深入分析这些不同类型的中酸性火山岩成因。

1 区域地质概况和岩相学特征

在大地构造位置上,溧水盆地位于下扬子地区,秦岭-大别-苏鲁造山带造山带的南侧,是一个以北界为 NNE 向郟庐断裂、南界为近 EW 向青阳广德断裂的向东开口的楔形块体。新元古代末,九岭地块与浙西地块拼合,形成了下扬子陆块的主体。晚震旦世,该区全面接受盖层沉积,自晚奥陶世末到晚志留世末,下扬子区震旦-早古生代的拗拉槽消亡,出现了以磨拉石沉积组合的前陆盆地。从泥盆纪初开

始,下扬子地区进入新的构造演化阶段,其重要表现是陆相磨拉石的沉积作用结束,前陆盆地消亡,全区经历了夷平作用,普遍缺失早-中泥盆世沉积。到晚泥盆世,下扬子区又重新接受沉积(夏邦栋, 1998)。于三叠纪,扬子同华北陆块发生碰撞与拼接,形成了其北侧的秦岭-大别-苏鲁造山带(Li *et al.*, 1993; Okay *et al.*, 1993)。

研究区内中生代岩浆活动十分强烈,尤其是晚中生代火山岩广泛出露。溧水盆地晚中生代火山岩主要包括龙王山组和大王山组。龙王山组和大王山组主要出露于溧阳县茅山、溧水县新桥、云合、东芦等地(图1)。龙王山组的上覆地层为云合山组,主要岩性为灰黄、暗紫色凝灰质粉砂岩,下伏地层为象山群($J_{1-2}xn$),主要由灰黄色泥质粉砂岩组成。而大王山组则覆盖在云合山组之上。根据野外考察资料,在代表性的龙王山组剖面上,该组下部主要由浅灰色的沉凝灰岩、粉砂质泥岩等组成,上部以熔岩为主,主要由粗面岩、粗面安山岩、橄榄粗玄岩和角闪粗玄岩组成。大王山组下部主要由辉石粗玄岩组成,中部为紫色的粗面安山岩,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。本文研究的中酸性火山岩样品由龙王山组粗面安山岩和大王山组粗面岩组成。溧水盆地龙王山组粗面安山岩为斑状结构,斑晶含量约占 10%,主要包括单斜辉石(含量约 5%,粒径 1~2 mm)、斜长石(含量约 60%,粒径 1~3 mm)、钾长石(含量约 5%,粒径 1~2 mm)和角闪石(含量约 30%,粒径 1~2 mm)。斜长石为卡钠复合双晶,钾长石为卡氏双晶。基质为隐晶质-间隐结构,主要由自形程度低的微晶长石和角闪石组成,有不透明矿物(约 5%)和少量不规则状的石英(3%~5%);斜长石表现出高岭土化,辉石局部绿泥石化,角闪石发育暗化边。大王山组粗面岩为斑状结构,斑晶含量约占 15%,主要包括斜长石(含量约 75%,粒径 1~6 mm)和角闪石(含量

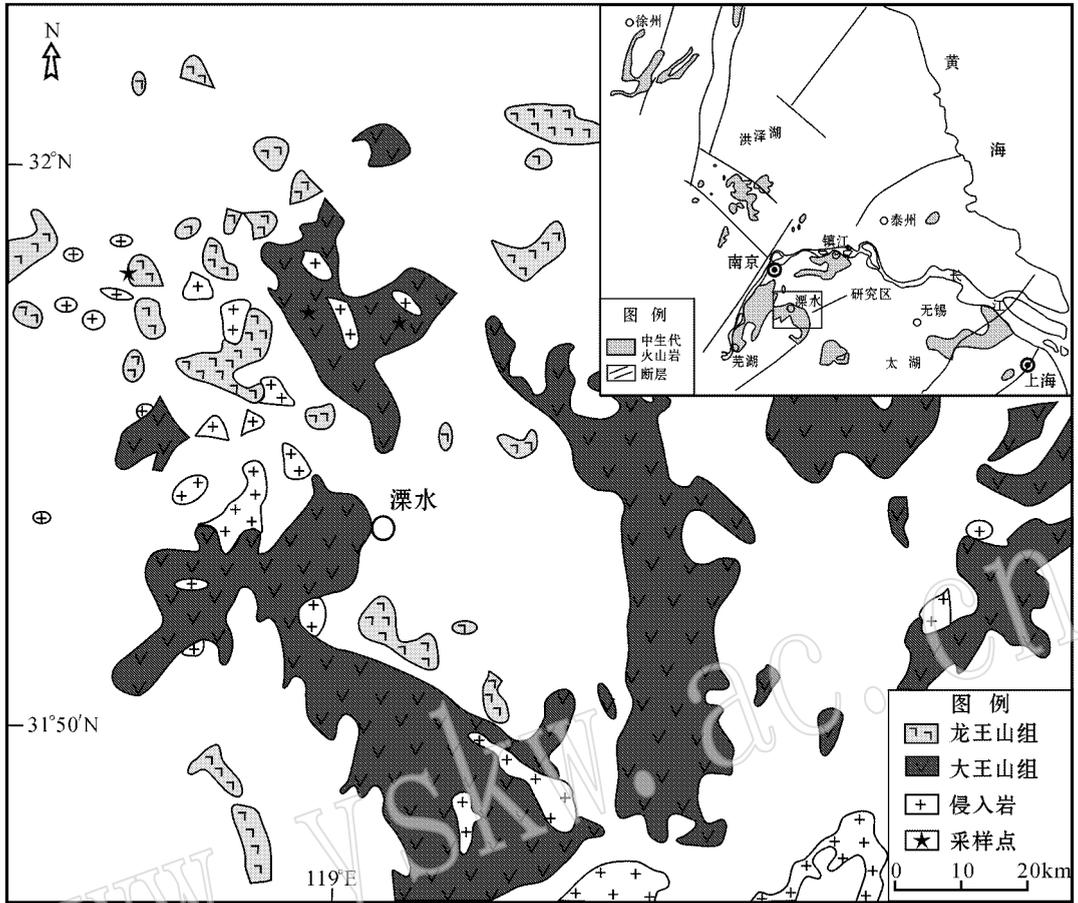


图 1 溧水盆地晚中生代火山岩分布略图(据江苏省地质矿产局,1984)

Fig. 1 Geological sketch map of Late Mesozoic volcanic rocks in the Lishui Basin(modified after JSBGMR, 1984)

约 25% 粒径 1~2 mm) 部分斜长石表现为巨晶;基质为隐晶质结构,主要由自形程度低的长石、角闪石和少量石英及不透明矿物(约 3%)组成。张旗等(2003)对宁芜地区龙王山组和大王山组火山岩的锆石 SHRIMP 年龄测试结果分别为 131 ± 4 Ma 和 127 ± 3 Ma,认为其为早白垩世喷发产物。

2 分析技术与方法

样品用颚式刚玉对滚机粉碎到厘米级大小,在显微镜下把风化蚀变的颗粒以及含捕虏晶和杏仁充填体的颗粒挑走,剩余新鲜的样品经过超声波清洗后,在玛瑙颚式破碎机中粉碎到过 20 目筛,从中缩分出一半样品在玛瑙钵中研磨到过 160 目筛,然后进行主量和微量元素的测试。主量元素测试在国土资源部湖北地质矿产研究所中利用 X 射线荧光光谱(XRF)测试,分析误差小于 1%,其中 FeO 含量通过湿化学方法测定。微量元素在中国科学院地球化学

所利用等离子光谱质谱法(ICP-MS)测定,分析误差总体上低于 5%,其中 Cr、Ni 和 V 元素的分析误差在 10%左右(Qi *et al.*, 2000)。

Sr 和 Nd 同位素比值在中国科学院地质和地球物理研究所 VG354 质谱上测定。分析样品为过 20 目筛的岩屑,在溶样前用 6 mol/L HCl 溶液于室温下淋滤 24h,然后离心并吸走上层清液,残留部分在烘箱内低于 60°C 温度下烘 2 d,再用玛瑙钵磨碎至过 200 目筛,淋滤的主要目的是避免后期蚀变导致 Sr 同位素比值的影响。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值分别用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行标准化,对国际标样(La Jolla)多次测定的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 平均值为 0.511862 ± 10 ($n = 13$), BCR-1 两次测定结果为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512626 \pm 9$, NBS987 多次测定平均值为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710265 \pm 12$ ($n = 6$),整个实验流程本底: $\text{Sr} < (2 \sim 5) \times 10^{-10} \text{g}$, $\text{Nd} < 5 \times 10^{-11} \text{g}$,同位素比值的分析误差用 2σ 给出。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比

值用 ICP-MS 分析的 Rb、Sr、Sm 和 Nd 含量计算, 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 用 $t = 130 \text{ Ma}$ 计算 (张旗等, 2003)。

3 中酸性火山岩的地球化学特征

3.1 主、微量元素地球化学特征

所有主量元素含量(表 1)经过无烧失量 100% 标准化后, 龙王山组粗面安山岩的 SiO_2 含量为 58.0% ~ 58.9%, Al_2O_3 含量为 15.5% ~ 15.9%, K_2O 含量为 3.70% ~ 4.03%, MgO 的含量为 2.77% ~ 3.20%, FeO_T 含量[$0.9 \times \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$]为 6.67% ~ 7.09%, TiO_2 含量为 0.86% ~ 0.90%, $\text{Mg}^\#$ [$\text{Mg}/(\text{Mg} + \sum\text{Fe})$ 原子比值]为 0.43 ~ 0.45。相对龙王山组粗面安山岩, 大王山组粗面岩以高 SiO_2 (61.9% ~ 66.4%) K_2O (3.76% ~ 5.95%) 和低 MgO (1.07% ~ 2.56%) TiO_2 (0.48% ~ 0.72%) Al_2O_3 (15.2% ~ 15.7%) 和 FeO_T (3.70% ~ 5.71%) 为特征。龙王山组粗面安山岩和大王山组粗面岩都为准铝质的高钾钙碱性酸性岩石(表 1 和图 2)。后文和图中龙王山组中基性火山岩数据据引自李超文等(2004), $A/\text{CNK} = \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (原子比), $A/\text{NK} = \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$ (原子比)。

随着 SiO_2 含量的增加, 龙王山组和大王山组中酸性火山岩与龙王山组基性火山岩总体上均表现出连续的演化特征, 如具 Al_2O_3 、 MgO 、 FeO_T 、 TiO_2 、 CaO 、 P_2O_5 、Sr、Co、V、Ni 降低和 Rb、Th 等增加的趋势(图 3)。从龙王山组基性火山岩到酸性火山岩, 稀土元素含量(如 La)降低, 而大王山组中酸性火山岩则较龙王山组基性和中酸性火山岩 REE 含量高(图 3n)。

在 REE 配分模式图(图 4a 和 c)上, 所有中酸性火山岩样品均表现出近平行的富集 LREE 的右倾型分布模式, 轻重稀土元素分异明显。龙王山组粗面安山岩和基性火山岩具有相似的稀土元素配分模式, 中酸性火山岩的 $\sum\text{REE} = 119.8 \times 10^{-6} \sim 123.1 \times 10^{-6}$ (La/Yb) $_{\text{cn}} = 7.3 \sim 8.7$ (La/Sm) $_{\text{cn}} = 2.8 \sim 3.0$ (Dy/Yb) $_{\text{cn}} = 1.14 \sim 1.35$, HREE 内部分馏作用较弱, 无铕异常或弱异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.87 \sim 1.01$, 平均为 0.95)。与龙王山组中酸性火山岩相比, 大王山组中酸性火山岩的 $\sum\text{REE}$ 相对高些 ($\sum\text{REE} = 140.2 \times 10^{-6} \sim 151.8 \times 10^{-6}$, 并具有弱的负 Eu 异常

($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.79 \sim 0.90$, 平均为 0.84) (La/Yb) $_{\text{cn}} = 10.2 \sim 11.8$ (La/Sm) $_{\text{cn}} = 3.8 \sim 4.9$ (Dy/Yb) $_{\text{cn}} = 1.07 \sim 1.27$, HREE 内部分馏作用弱。

在不相容元素原始地幔标准化蛛网图(图 4b 和 4d)上, 所有样品都表现出类似于岛弧火山岩的不相容元素配分型式。龙王山组火山岩具 LILE 富集和

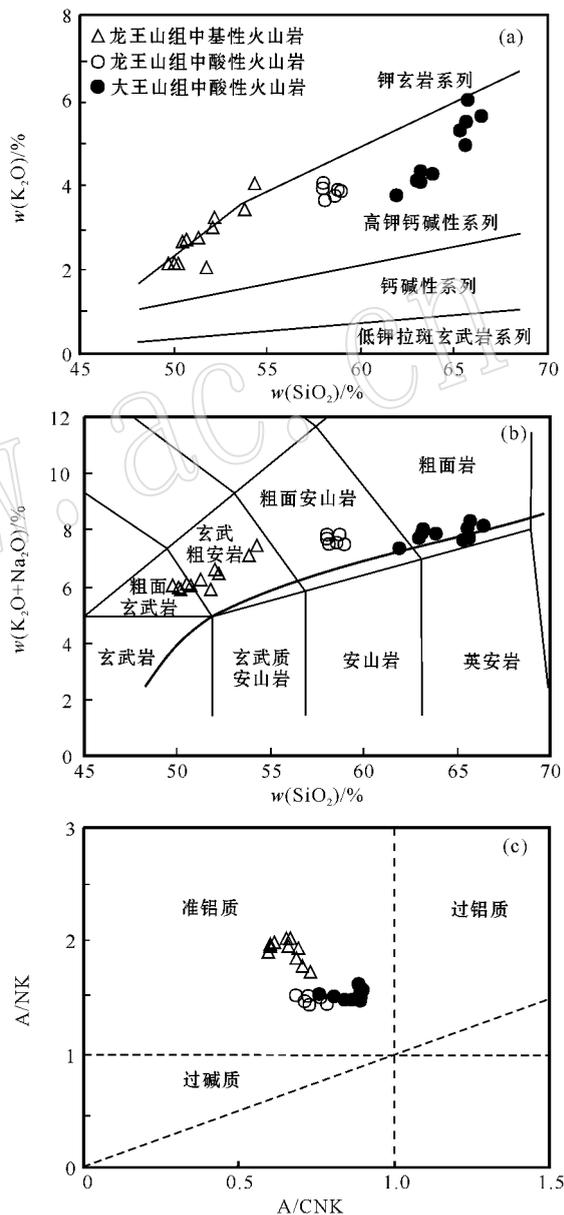


图 2 溧水盆地晚中生代中酸性火山岩 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ (a), $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ (b) 和 $A/\text{NK} - A/\text{CNK}$ (c) 图解 (据 Morrison (1980) 和 Middlemost (1994))

Fig. 2 K_2O versus SiO_2 (a), $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ versus SiO_2 (b), A/NK versus A/CNK (c) diagrams of Late Mesozoic intermediate-felsic volcanic rocks in Lishui Basin [basefigure from Morrison (1980) and Middlemost (1994)]

表 1 下扬子地区溧水盆地晚中生代中酸性火山岩主量元素 ($w_B/\%$) 和微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 分析结果Table 1 Major ($w_B/\%$) and trace element ($w_B/10^{-6}$) concentrations of Late Mesozoic intermediate-felsic volcanic rocks from Lishui Basin, Lower Yangtze region

岩石 样号	龙王山组粗面安山岩						大王山组粗面岩									
	20LS-1	20LS-2	20LS-28	20LS-30	20LS-31	20LS-33	20LS-34	20LS-35	20LS-37	20LS-38	20LS-39	20LS-41	20LS-43	20LS-44	20LS-46	20LS-47
SiO ₂	57.69	56.64	56.74	57.93	57.58	56.70	61.17	61.36	62.11	59.80	59.90	62.00	61.25	60.22	61.00	58.46
Al ₂ O ₃	15.54	15.45	15.39	15.22	15.48	15.32	14.56	14.83	14.81	14.96	14.89	14.27	14.89	14.97	14.57	14.40
Fe ₂ O ₃	6.36	5.56	6.08	5.85	6.38	5.93	1.23	1.46	1.49	4.20	3.87	1.60	3.92	4.36	1.57	4.54
FeO	1.27	1.55	1.52	1.58	1.28	1.55	2.63	2.50	2.53	0.98	1.33	2.03	1.50	1.20	2.52	1.35
MgO	3.14	2.70	3.12	2.87	3.12	3.13	1.46	1.57	1.76	1.76	2.08	1.00	2.24	2.20	1.41	2.42
CaO	5.18	6.85	5.80	6.05	5.54	6.10	3.64	4.22	4.03	4.41	4.64	4.08	3.53	3.85	3.77	5.30
Na ₂ O	3.85	3.77	3.78	3.61	3.75	3.71	2.19	2.25	2.59	3.49	3.44	2.39	3.49	3.65	2.34	3.33
K ₂ O	3.82	3.61	3.94	3.82	3.70	3.88	5.54	4.98	4.66	4.03	3.92	5.24	4.08	3.87	5.10	3.55
MnO	0.12	0.14	0.15	0.11	0.11	0.13	0.07	0.08	0.10	0.10	0.11	0.09	0.09	0.11	0.09	0.11
TiO ₂	0.86	0.84	0.86	0.86	0.88	0.86	0.45	0.48	0.47	0.63	0.63	0.44	0.64	0.68	0.47	0.68
P ₂ O ₅	0.40	0.38	0.41	0.39	0.40	0.40	0.19	0.20	0.20	0.25	0.24	0.19	0.25	0.25	0.19	0.28
LOI	1.49	2.24	1.93	1.44	1.51	2.01	6.65	5.85	5.05	5.17	4.73	6.46	3.90	4.42	6.76	5.37
Total	99.72	99.73	99.72	99.73	99.73	99.72	99.78	99.78	99.80	99.78	99.78	99.79	99.78	99.78	99.79	99.79
Mg [#]	0.45	0.43	0.45	0.43	0.44	0.45	0.41	0.43	0.45	0.40	0.44	0.34	0.45	0.44	0.39	0.44
A/CNK	0.78	0.68	0.73	0.72	0.76	0.72	0.90	0.88	0.89	0.82	0.81	0.84	0.90	0.87	0.90	0.76
V	223	215	228	229	217	232	86	88	88	148	130	81	140	145	83	134
Cr	21	20	22	22	22	22	34	36	36	26	25	31	29	27	37	29
Co	22	22	22	21	21	22	11	11	12	14	16	11	16	15	13	17
Ni	12	12	11	11	13	11	11	12	11	11	10	10	10	10	13	12
Rb	110.3	104.2	111.7	109.3	105.8	117.7	172.8	158.3	160.9	145.5	139.9	184.2	145.1	126.0	174.3	125.2
Sr	685	689	627	728	682	707	248	326	226	237	342	209	310	268	202	343
Ba	685	695	680	668	676	651	657	654	691	615	610	689	623	551	682	624
Th	7.63	7.50	7.56	7.67	7.68	7.84	15.16	15.20	15.14	14.01	14.10	15.02	14.22	13.56	14.17	12.41
U	2.55	2.95	2.40	2.46	2.52	2.75	4.15	4.35	4.24	3.00	3.87	4.36	4.15	4.04	4.09	5.03
Nb	7.06	7.13	6.87	6.99	7.73	7.13	9.71	9.66	9.68	9.63	9.48	9.75	9.96	9.97	9.28	8.90
Ta	0.50	0.47	0.56	0.51	0.53	0.51	0.84	0.77	0.78	0.75	0.82	0.77	0.82	0.82	0.73	0.73
Zr	111	104	109	107	109	108	132	124	121	133	126	141	122	124	129	120
Hf	4.42	3.38	3.65	3.44	3.58	3.49	3.98	3.92	3.54	4.26	4.03	4.11	3.96	4.40	4.10	3.83
Y	19.7	20.8	20.9	20.0	20.1	20.2	17.9	18.5	18.6	20.7	22.2	17.8	20.8	21.0	17.0	20.0
La	23.1	23.4	23.2	23.2	23.8	23.5	34.1	33.9	34.4	32.8	32.9	32.7	33.4	31.5	32.8	30.2
Ce	47.4	48.8	49.0	47.4	48.6	49.0	61.7	64.7	66.0	60.2	64.6	62.3	63.4	63.2	61.6	58.7
Pr	5.54	5.74	5.77	5.49	5.83	5.54	6.61	6.77	6.88	6.97	6.84	6.38	7.06	7.05	6.29	6.49
Nd	23.1	23.3	24.1	23.4	23.3	22.1	24.4	25.0	24.7	25.0	26.0	22.8	26.9	26.7	22.6	24.9
Sm	4.88	5.05	5.04	4.90	5.41	4.97	4.56	4.51	4.46	5.23	5.43	4.18	5.57	5.29	4.02	4.68
Eu	1.58	1.51	1.57	1.50	1.46	1.46	1.18	1.21	1.23	1.29	1.38	1.18	1.34	1.35	1.03	1.34
Gd	4.54	4.38	4.67	4.55	4.63	4.60	3.65	3.93	3.88	4.61	4.66	3.86	4.31	4.74	3.65	4.26
Tb	0.67	0.67	0.65	0.65	0.67	0.67	0.57	0.57	0.57	0.65	0.67	0.54	0.67	0.70	0.53	0.67
Dy	3.74	3.67	3.63	3.76	3.77	3.81	3.27	3.29	3.29	3.80	3.70	3.16	3.69	3.52	2.88	3.70
Ho	0.68	0.69	0.70	0.71	0.73	0.71	0.62	0.62	0.61	0.69	0.71	0.59	0.70	0.74	0.56	0.71
Er	2.07	2.03	2.20	2.03	2.08	2.21	1.95	1.89	1.92	2.13	2.24	1.87	2.05	2.07	1.82	2.19
Tm	0.28	0.30	0.30	0.32	0.30	0.26	0.24	0.30	0.28	0.33	0.26	0.25	0.30	0.31	0.27	0.30
Yb	1.81	1.96	1.98	2.14	1.99	2.05	1.95	1.99	1.97	2.05	2.16	1.86	2.08	2.09	1.88	1.89
Lu	0.29	0.32	0.31	0.29	0.30	0.26	0.31	0.28	0.30	0.31	0.34	0.30	0.32	0.29	0.28	0.30

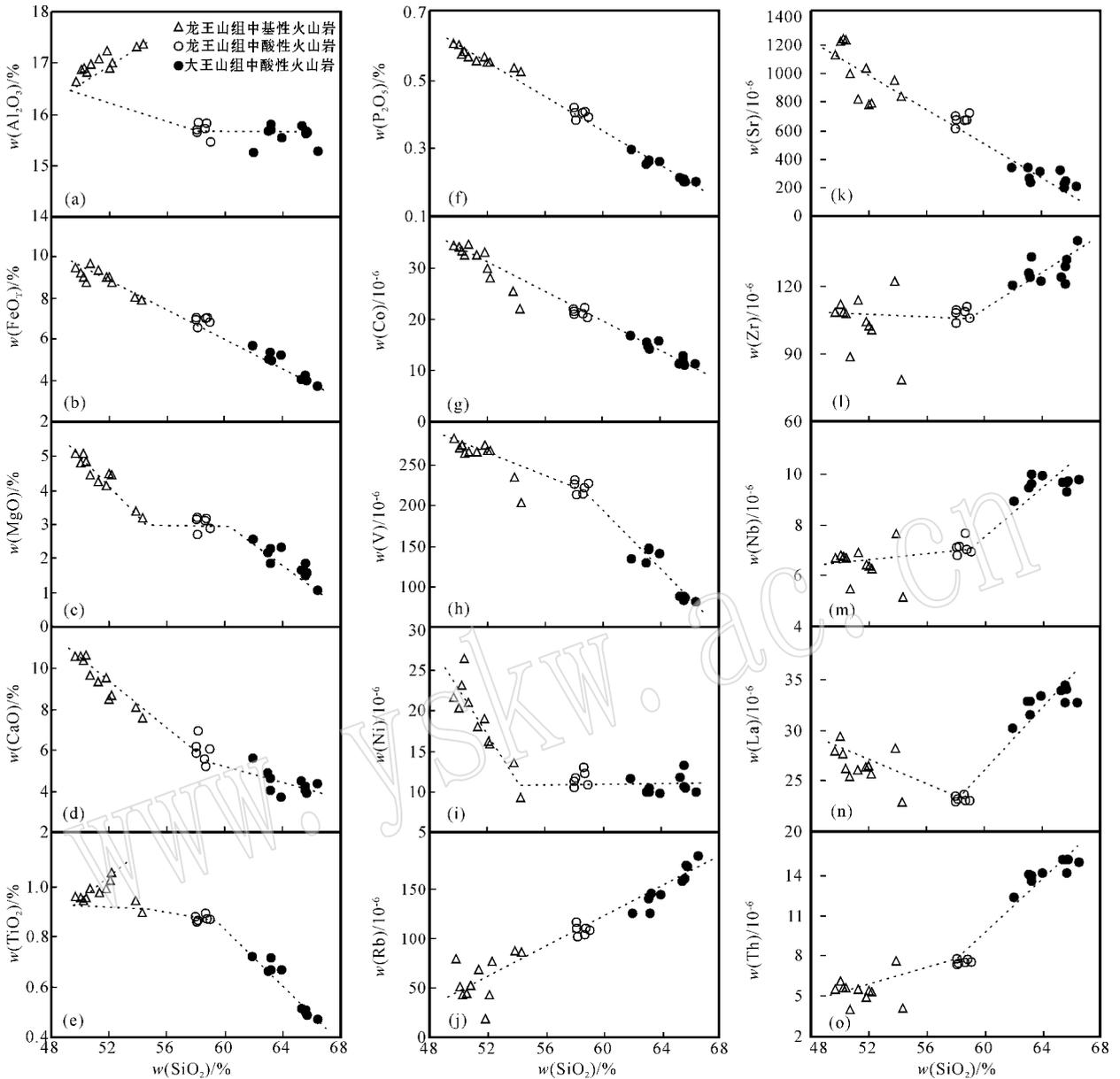


图 3 溧水盆地晚中生代酸性火山岩 SiO_2 对主量、微量元素变化图

Fig. 3 SiO_2 versus major element and trace element plots of Late Mesozoic intermediate-felsic volcanic rocks in Lishui Basin

Sr 正异常而亏损 Nb-Ta、Ti、P 的特征,与该组底部的中基性火山岩非常相似;大王山组火山岩也富集 LILE(如 Rb、Ba、Th),强烈亏损 Nb-Ta-Ti,并显示出 Sr 和 P 的负异常。

3.2 Sr-Nd 同位素组成

Sr-Nd 同位素比值的分析测试结果见表 2。龙王山组酸性火山岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ 为 0.705 5 ~ 0.705 6, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为 -3.6 ~ -2.9;大王山组酸性火山岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ 为 0.706 6 ~ 0.708 1, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 变化于 -7.7 ~ -4.8。在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - \epsilon\text{Nd}(t)$ 图(图

5)上,龙王山组酸性火山岩和同组的基性火山岩具有非常相似的 Sr-Nd 同位素组成。大王山组的中酸性火山岩相对龙王山组的中基性火山岩具有更高 Sr 和低 Nd 的同位素组成。

4 岩石成因讨论

4.1 龙王山组酸性火山岩成因

目前对下扬子地区中基性火山岩的研究表明(邢凤鸣,1998;刘洪等,2002;李超文等,2004),

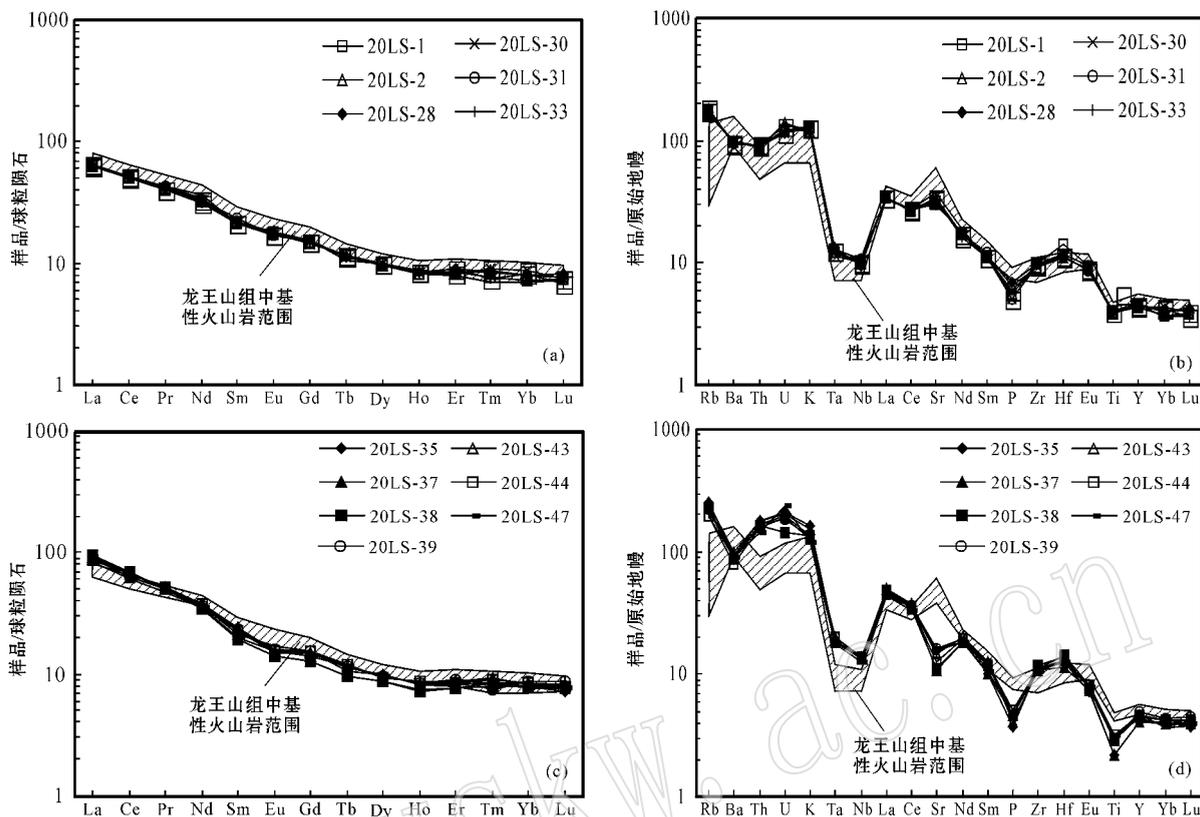


图 4 溧水盆地晚中生代中酸性火山岩的球粒陨石标准化 REE 配分模式 (a, c) 和原始地幔标准化不相容元素蛛网图 (b, d) 球粒陨石和原始地幔标准化值分别引自 Taylor and McLennan (1985) 和 Sun and McDonough (1989)]
 Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a and c) and primitive mantle (PM) normalized spidergrams (b and d) of Late Mesozoic intermediate-felsic volcanic rocks from Lishui Basin [trace element for chondrite from Taylor and McLennan (1985) , those for PM from Sun and McDonough (1989)]

表 2 下扬子地区溧水盆地晚中生代中酸性火山岩 Sr-Nd 同位素分析结果

$\omega_B/10^{-6}$

Table 2 Sr-Nd isotope data of Late Mesozoic intermediate-felsic volcanic rocks in Lishui Basin, Lower Yangtze valley

岩石类型 样品号	龙王山组粗面安山岩			大王山组粗面岩				
	20LS-1	20LS-30	20LS-33	20LS-37	20LS-39	20LS-43	20LS-44	20LS-47
Rb	110.3	109.3	117.7	160.9	139.9	145.1	126.0	125.2
Sr	685	728	707	226	342	310	268	343
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.4662	0.4343	0.4817	2.0611	1.1830	1.3536	1.3615	1.0554
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$	0.706467 ± 20	0.706341 ± 19	0.706481 ± 18	0.712081 ± 10	0.709118 ± 15	0.70936 ± 20	0.709456 ± 25	0.708651 ± 19
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(\text{i})$	0.70557	0.70551	0.70556	0.70813	0.70685	0.70676	0.70684	0.70663
Sm	4.88	4.90	4.97	4.46	5.43	5.57	5.29	4.68
Nd	23.12	23.37	22.11	24.67	25.97	26.90	26.68	24.91
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1277	0.1267	0.1358	0.1093	0.1264	0.1253	0.1199	0.1135
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	0.512395 ± 8	0.51242 ± 11	0.512434 ± 10	0.512168 ± 9	0.512301 ± 9	0.512282 ± 8	0.512325 ± 10	0.512235 ± 10
$\epsilon\text{Nd}(t)$	-3.6	-3.0	-2.9	-7.7	-5.4	-5.7	-4.8	-6.4
t_{DM}/Ga	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.3	1.4

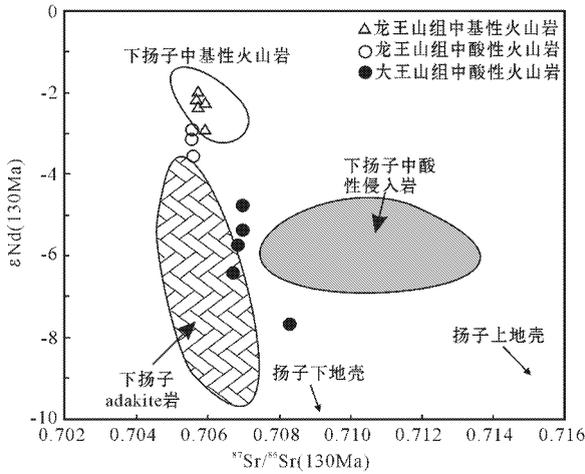


图 5 溧水盆地晚中生代酸性火山岩的 Sr-Nd 同位素变化图

Fig. 5 Sr-Nd isotope variation diagram of Late Mesozoic intermediate-felsic volcanic rocks in Lishui Basin

数据来源:下扬子地区 adakite 质岩(王强等,2002;Xu *et al.*, 2002);下扬子地区酸性侵入岩(邢凤鸣等,1996;Chen *et al.*, 2001;王强等,2003);龙王山组中基性火山岩(李超文等,2004)
Data source: adakite of Lower Yangtze valley(Wang *et al.*, 2002; Xu *et al.*, 2002); intermediate-felsic intrusive rocks of Lower Yangtze valley(Xing *et al.*, 1996; Chen *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2003); mafic volcanic rocks of Longwangshan Formation(Li Chaowen *et al.*, 2004)

在晚中生代区域上存在一个富集 LILE 和 LREE 的岩石圈地幔。溧水盆地晚中生代龙王山组酸性火山岩 SiO_2 含量变化于 58.0%~58.9%, 与同组中基性火山岩相比具有较低 MgO 、 FeO_T 、 Al_2O_3 、 CaO 、 P_2O_5 和高 Rb、Th。它们与同期的玄武安山岩在空

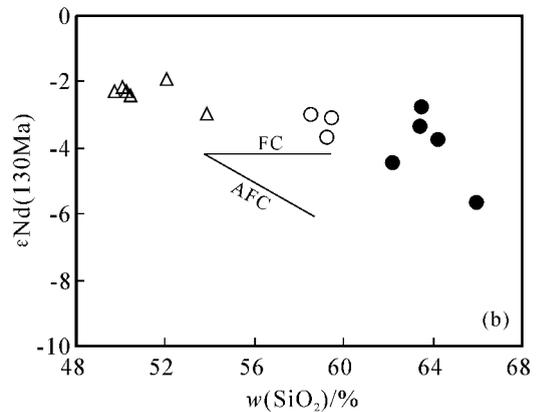
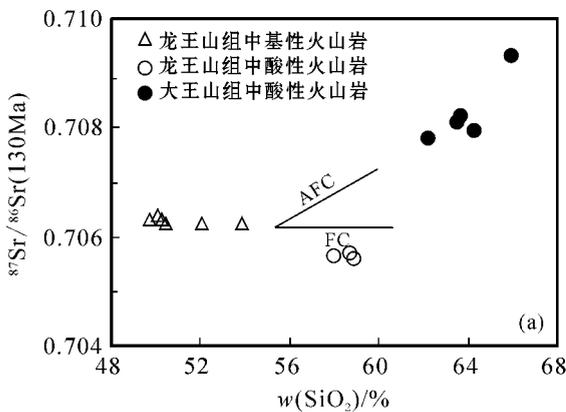


图 6 溧水盆地晚中生代酸性火山岩 SiO_2 对 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (a) 和 $\epsilon\text{Nd}(t)$ (b) 图解

Fig. 6 SiO_2 versus $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (a) and $\epsilon\text{Nd}(t)$ (b) diagrams of Late Mesozoic intermediate-felsic volcanic rocks in Lishui Basin

间上的共生关系,主、微量元素的连续变化趋势以及 Sr-Nd 同位素组成上的相似性都反映它们来源于相同或相似的母岩浆。对于分异的岩浆,地壳混染作用和 AFC 过程可能影响其元素-同位素地球化学特征。在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $\epsilon\text{Nd}(t)$ - SiO_2 图(图 6)上,龙王山组酸性火山岩表现出弱的 Sr-Nd 同位素成分变化,样品点近于水平的分布说明地壳混染对龙王山组酸性火山岩的影响可以忽略。

从图 3 的变化趋势可以看出, MgO 、 FeO_T 、 CaO 随着 SiO_2 的增加逐渐减少,暗示从玄武岩到安山岩的演化的过程中其分离结晶相主要为镁铁矿物,如角闪石、辉石等。尽管辉石和角闪石的分离结晶作用都能导致岩浆中的相容元素如 Cr、Co、Ni、V 等的降低,通常在玄武质安山岩熔融体系中,来自实验岩石学的研究显示角闪石 Ti 的分配系数大于 1.0,而辉石的 Ti 分配系数小于 1.0(Dostal *et al.*, 1983)。在 Zr 对 TiO_2 图上(图 7a),从龙王山组基性火山岩到粗面安山岩, TiO_2 和 Zr 都降低,反映其主要的分离相为角闪石、辉石等其他镁铁质矿物的分离结晶作用较弱。从基性火山岩到粗面安山岩,随着 SiO_2 的增加, Al_2O_3 、 CaO 和 Sr 迅速降低,同时随着 Sr 含量增加 Rb、Ba/Sr 比值增加(图 3 和图 7),反映斜长石为主要分离相。值得一提的是,从龙王山组基性火山岩到粗面安山岩, P_2O_5 和 La 降低,而 Th 增高和 Th/La 比值增加,显示了磷灰石分离结晶作用对 LREE 和 Th 含量变化的控制作用。在玄武质安山岩熔体体系中, Th 和 La 在磷灰石中分配系数分别为 $D_{\text{Th}} = 1.7 \sim 17$ 和 $D_{\text{La}} = 4 \sim 30$, $D_{\text{La}} > D_{\text{Th}}$ ^①。为了

① Th 和 La 在玄武安山岩体系中的分配系数资料来自分配系数数据库网站 <http://earthref.org/cgi-bin/er.cgi>。

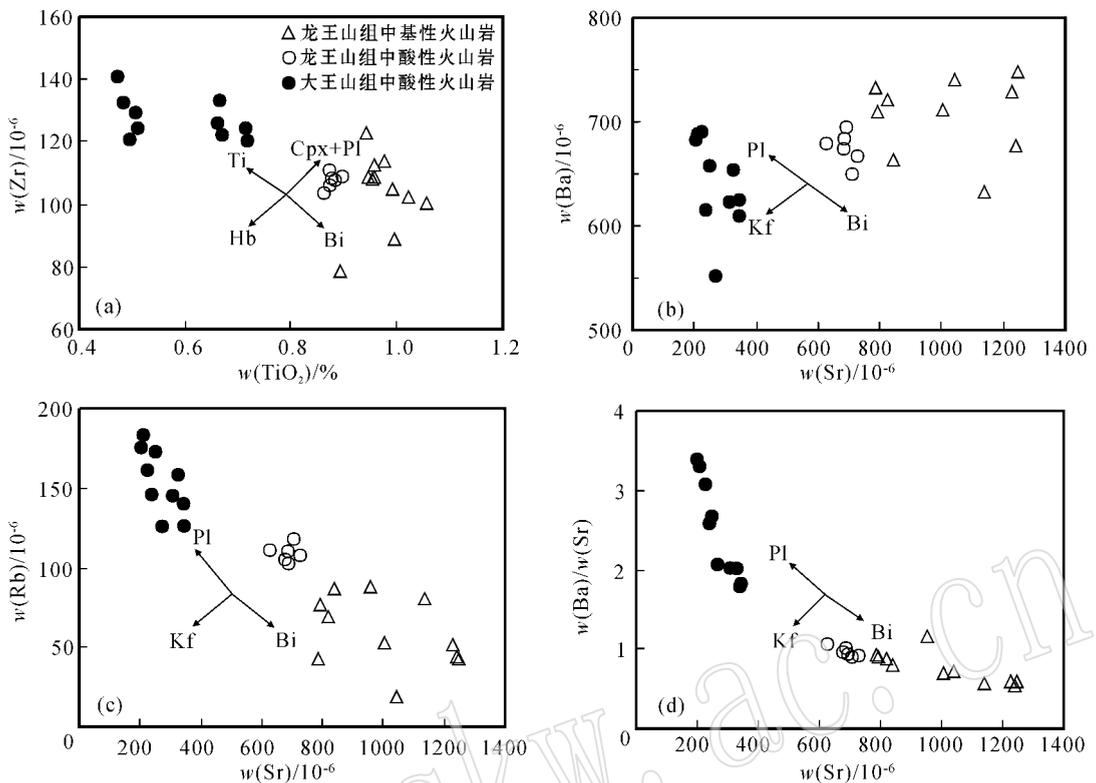


图 7 溧水盆地晚中生代中酸性火山岩 Zr-TiO₂ (a)、Sr 对 Ba (b)、Rb (c) 和 Ba/Sr (d) 图解

Fig. 7 Zr versus TiO₂ (a) and Sr versus Ba (b), Rb (c) and Ba/Sr (d) diagrams of Late Mesozoic intermediate-felsic volcanic rocks in Lishui Basin

Ti—钛铁矿 ;Hb—角闪石 ;Kf—钾长石 ;Pl—斜长石 ;Bi—黑云母 ;Cpx—单斜辉石

Ti—ilmenite ;Hb—hornblende ;Kf—K-feldspar ;Pl—plagioclase ;Bi—biotite ;Cpx—clinopyroxene

便于计算,本文分别取中间值 $D_{Th} = 10$ 和 $D_{La} = 20$ 来计算磷灰石的分异对稀土元素的影响。根据磷灰石分子式 $Ca_5(PO_4)_3R$ (汤云晖等, 2005), R 可以为 F^- 、 Cl^- 、 OH^- 等阴离子, P_2O_5 所占比例平均约为 42%。磷灰石分离结晶作用引起的元素含量变化可以由以下公式计算: $\Delta M_i = C_i \times D_i \times (P_1 - P_2) / 0.42$, 其中 ΔM_i 为元素变化量, D_i 为某元素在磷灰石/玄武岩岩浆的分配系数, P_1 为 P_2O_5 在玄武岩中的平均值, P_2 为 P_2O_5 在安山岩中的平均值, C_i 是某元素在玄武岩中的含量, 其中 Th 和 La 在玄武岩的平均含量为 5.4×10^{-6} 和 27×10^{-6} (李超文等, 2004)。当 P_2O_5 含量由当龙王山组基性火山岩平均值 0.55% 降低到中酸性火山岩的平均值 0.40% 时, 大约 0.36% 的磷灰石分离出来, 由上式计算所获得的岩浆体系中 Th 和 La 的减少量大约分别为 0.19×10^{-6} 和 1.93×10^{-6} 。显然, 磷灰石的分离结晶对龙王山组从玄武岩到粗面安山岩的 LREE 含量降低有一定的控制作用, 但对 Th 含量变化的控制作用不明

显。

综合上述分析, 本文认为龙王山组中酸性火山岩为该组基性火山岩经历了角闪石 + 斜长石 + 磷灰石分离结晶作用的产物。

4.2 大王山组中酸性火山成因

近年来对区域上的部分中酸性火山岩的研究表明 (王元龙等, 2001; Xu *et al.*, 2002; 王强等, 2002; Wang Qiang *et al.*, 2006), 地壳部分熔融可能是中酸性火山岩的重要成因之一。来自镁铁质岩石的部分熔融实验岩石学资料 (Rapp *et al.*, 1991; Rapp and Watson, 1995; Wilhelm and Hans, 1997; Susana and Antonio, 2001; Xiong *et al.*, 2005) 显示, 镁铁质岩石在压力大于 1.5 GPa 条件下部分熔融, 由于源岩中的斜长石不稳定向石榴石转变, 它们的 HREE 和 Y 进入到石榴石等残留相中, 其熔融形成的中酸性岩浆具有高 Sr、低 HREE 和 Y 的类似于现代俯冲带 adakite 岩或太古宙 TTG 岩石的特征 (Defant and Drummond, 1990; Petford and Atherton,

1996); 镁铁质岩石在下地壳压力条件下(如 1.0 GPa)条件下熔融出的中酸性熔体主要具富钠特征。因此, 大王山组中酸性火山岩的富 K、低 Sr 和高 Y 的特征难以通过下地壳镁铁质岩石部分熔融形成。假如扬子下地壳存在大量的古老长英质片麻岩, 如崆岭群(Gao *et al.*, 1999; Ma *et al.*, 2000), 实验岩石学研究结果(Ellis and Thompson, 1986; Patiño Dounce and Beard, 1995; Skjerlie and Johnston, 1996; Castro *et al.*, 1999)显示, 在石英饱和的 $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 体系下熔融的长英质岩浆应为过铝质, 而不是大王山组所表现出的准铝质特征($A/\text{CNK} = 0.76 \sim 0.90$)。综上所述, 下地壳部分熔融作用不大可能产生具有大王山组中酸性火山岩地球化学特征的岩浆。在另一方面, 实验岩石学资料显示, 主要由中酸性岩石组成的中、上地壳岩石部分熔融作用形成的岩浆成分主要是花岗质的(Patiño Dounce and Beard, 1995), 而不是大王山组的英安质岩浆。因此, 笔者认为地壳部分熔融作用不适合用来解释大王山组这套准铝质、富钾的英安质岩浆成因, 它们很可能为幔源岩浆的分异作用产物。

在 Harker 图解(图 3)上, 随着 SiO_2 的增加, MgO 、 CaO 、 FeO_T 逐渐降低说明在演化过程中分离结晶相主要是镁铁质矿物(如辉石和角闪石), TiO_2 降低说明有一定的富钛矿物分离结晶。在 REE 配分型式中表现出弱的 Eu 负异常和 Sr 负异常及 Al_2O_3 随着 SiO_2 增加逐渐减少暗示如斜长石的分离结晶作用, P 负异常则暗示磷灰石发生了分离结晶。尽管如此, 大王山组粗面英安岩相对区域上的同期基性岩浆相比具有更加高的 Sr 同位素组成及更低的 Nd 同位素组成(图 5), 反映其不可能由同期幔源岩浆(如具有类似龙王山组基性火山岩的镁铁质岩浆)经直接分离结晶作用而形成, 在岩浆分异过程中应有更高放射成因 Sr 和更低放射成因 Nd 的地壳物质参与(图 5)。这种地壳物质的加入既可以通过地壳混染, 也可以通过 AFC 过程来完成。在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ - $\epsilon\text{Nd}(t)$ 图(图 8)上, 大约 40%~60% 以花岗岩为代表的上地壳组分加入到幔源基性岩浆才能获得目前所观察到大王山组中酸性火山岩的 Sr-Nd 同位素组成。图 8 中, UCC 以花岗岩为代表(Chen and Jahn, 1998), LCC 以崆岭群 TTG 为代表(Gao *et al.*, 1999; Ma *et al.*, 2000)地壳混染曲线上所标数字为地壳物质的质量分数, AFC 曲线上数字为残余岩浆的质量分数。然而如此多的冷地壳物

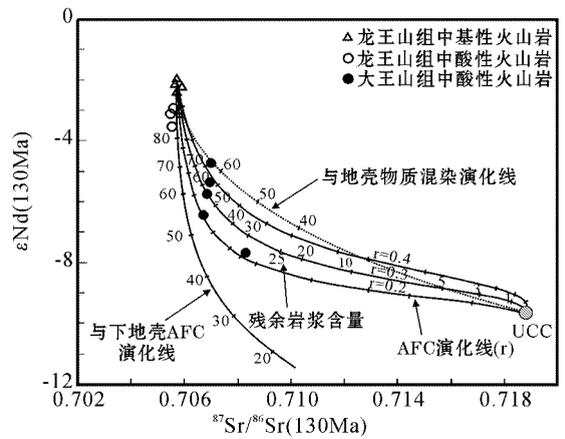


图 8 溧水盆地晚中生代中酸性火山岩的 Sr-Nd 同位素模拟图

Fig. 8 Sr-Nd isotope modeling result of Late Mesozoic intermediate-felsic volcanic rocks in Lishui Basin

质加入到岩浆中将难以达到热平衡, 岩浆将固结在上地壳而不是喷出地表。因此简单混染作用不适合用来解释大王山组中酸性火山岩的成因。

根据前面所提及的大王山组中酸性火山岩与区域基性火山岩之间的变化趋势, 本文选择 Sr、Nd 的总体分配系数为 D_{Sr} 为 1.5, D_{Nd} 为 0.6, 以龙王山组玄武岩中最低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 和高 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 样品 20LS-17 来近似代表幔源岩浆的同位素组成, 以崆岭群来代表区域的下地壳组分(Gao *et al.*, 1999; Ma *et al.*, 2000), 以下扬子地区显生宙花岗岩的平均组成来代表上地壳(Chen and Jahn, 1998)来进行模拟计算。计算结果(图 8)显示: 幔源基性岩浆通过下地壳物质同化混染作用(AFC)形成的中酸性岩浆在 Sr-Nd 同位素组成上相对大王山组中酸性火山岩具明显的低 Sr 和 Nd, 排除了下地壳物质同化混染的可能性; 当 r (混染速率/分离结晶速率) 为 0.2~0.4 时, 其残余岩浆 F 变化在 0.25~0.7 之间, 通过上地壳同化混染作用可以较好地模拟出大王山组中酸性火山岩的 Sr-Nd 同位素变化特征, 这与大王山组中酸性火山岩在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $\epsilon\text{Nd}(t)$ - SiO_2 图(图 6)上表现出的明显 AFC 趋势相吻合。

5 主要认识

溧水盆地晚中生代高钾钙碱性中酸性火山岩在岩石成因上可以分为两种类型: 第 1 类火山岩以龙王山组的粗面安山岩为代表, 以富 LILE 及 LREE、

强烈亏损 Nb-Ta 为特征,无铷异常或弱异常,和同期玄武岩具有非常相似的 Sr-Nd 同位素比值,在空间上与玄武岩共生,为同期基性岩浆经历了角闪石 + 斜长石 + 磷灰石分离结晶作用的产物。第 2 类火山岩由大王山组粗面岩组成,具有 LREE 富集的 REE 配分模式和弱的铷负异常,富集 Ba、K 和不同程度的 Nb-Ta、Ti、Sr 亏损的微量元素特征,其高钾、准铝质的英安岩成分特征难以通过地壳部分熔融作用来解释,而相对同期基性火山岩高 Sr 而低 Nd 的同位素组成反映它们为同期幔源镁铁质岩浆在上升过程中受到上地壳物质同化混染作用(AFC)的结果。幔源岩浆分异作用(分离结晶或 AFC 过程)可能是形成区域上广泛分布的中酸性火山岩和相关侵入岩最为重要的方式。

References

- Castro A, Patiño Douce A E, Corretge L G, *et al.* 1999. Origin of peraluminous granites and granodiorites, Iberian massif, Spain: an experimental test of granite petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 135(2~3): 255~276.
- Chen Jiangfeng and Jahn Bor-ming. 1998. Crustal evolution of south-eastern China: Nd and Sr isotopic evidence[J]. *Tectonophysics*, 284: 101~133.
- Chen Jiangfeng, Yan Jun, Xie Zhi, *et al.* 2001. Nd and Sr isotopic compositions of igneous rocks from the Lower Yangtze region[J]. *Physics and Chemistry of the Earth (A)*, 26: 719~731.
- Chen Jiangfeng, Zhou Taixi, Li Xueming, *et al.* 1993. Genesis of Yanshanian intermediate-felsic intrusive rocks series in the southern Anhui and its constraints on Sr-Nd isotopic[J]. *Geochimica*, 22(3): 261~268(in Chinese with English abstract).
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347: 662~665.
- Dostal J, Dupuy C, Carron J P, *et al.* 1983. Partition coefficients of trace elements: application to volcanic rocks of St Vincent, West Indies[J]. *Geochimica Cosmochim Acta*, 47: 525~533.
- Ellis D J and Thompson A B. 1986. Subsolidus and partial melting reaction in the quartz excess CaO + MgO + Al₂O₃ + SiO₂ + H₂O system under water excess and water deficient conditions to 10 kb: some implications for the origin of peraluminous melts from mafic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 27: 91~121.
- Gao Shan, Ling Wenli, Qiu Yumin, *et al.* 1999. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic composition of Archaean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(13/14): 2 071 ~ 2 088.
- Jiangsu Bureau of Geology and Mineral Resources. 1984. *Regional Geology of Jiangsu Province and Shanghai Municipality*[M]. Beijing: Geological Publication Press, 446~490(in Chinese with English abstract).
- Li Chaowen, Guo Feng and Li Xiaoyong. 2004. Petrogenesis and geodynamic implications of Late Mesozoic mafic volcanic rocks from the Lishui Basin of the Lower Yangtze region[J]. *Geochimica*, 33(4): 361~371(in Chinese with English abstract).
- Li Shuguang, Xiao Yilin, Liu Deliang, *et al.* 1993. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites: timing and process[J]. *Chemical Geology*, 109: 89~111.
- Liu Hong, Qiu Jiansheng, Luo Qinghua, *et al.* 2002. Petrogenesis of the Mesozoic potash-rich volcanic rocks in the Luzong basin, Anhui Province: Geochemical constraint[J]. *Geochimica*, 31(2): 129~140(in Chinese with English abstract).
- Ma Changqian, Ehlers C, Xu Changhai, *et al.* 2000. The roots of the Dabieshan Ultrahigh-pressure metamorphic terrane: constraints from geochemistry and Nd-Sr isotope systematics[J]. *Precambrian Research*, 102: 279~301.
- Middlemost E A G. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Reviews*, 37: 215~224.
- Morrison G W. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association[J]. *Lithos*, 13: 97~108.
- Okay A I, Sengör A M C and Satir M. 1993. Tectonics of an ultrahigh-pressure metamorphic terrane: the Dabie Shan/Tongbai Shan orogen, China[J]. *Tectonics*, 12: 1 320~1 334.
- Patiño Douce A E and Beard J S. 1995. Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar[J]. *Journal of Petrology*, 36: 707~738.
- Petford N and Atherton M P. 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca Batholith, Peru[J]. *Journal of Petrology*, 37: 1 491~1 521.
- Qi Liang, Hu Jing and Gregoire D C. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Talanta*, 51: 507~513.
- Rapp R P and Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 36: 891~931.
- Rapp R P, Watson E B and Miller C F. 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemite and tonalities[J]. *Precambrian Research*, 51: 1~25.
- Skjerlie K P and Johnston A D. 1996. Vapour-absent melting from 10 to 20 kbar of crustal rocks that contain multiple hydrous phases: Implications for anatexis in the deep to very deep continental crust and active continental margins[J]. *Journal of Petrology*, 37(3): 661~691.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes [A]. Sauders A D & Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. Geological Society Special Publication, 42: 313~345.
- Susana L and Antonio C. 2001. Determination of the fluid-absent solidus

- and supersolidus phase relationships of MORB-derived amphibolites in the range 4~14 kbar[J]. *American Mineralogist*, 86 : 1 396 ~ 1 403.
- Taylor S R and McLemann S M. 1985. *The Continental Crust : Its Composition and Evolution*[M]. Blackwell : Oxford Press , 312.
- Tang Yunhui , Han Chunming , Bao Zengkuan , *et al.* 2005. SRXRF analysis of apatite crystal and its fluid inclusion[J]. *Nuclear Techniques* , 28(8) : 580~582 (in Chinese).
- Wang Qiang , Xu Jifeng , Zhao Zhenhua , *et al.* 2003. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive rocks in the Tongling area , Anhui Province , China and their constraint on geodynamic process[J]. *Science in China(Series D)* , 46 : 801~815.
- Wang Qiang , Xu Jifeng , Jian Ping , *et al.* 2006. Petrogenesis of Adakite Porphyries in an Extensional Tectonic Setting , Dexing , South China : Implications for the Genesis of Porphyry Copper Mineralization[J]. *Journal of Petrology* , 47 : 119~144.
- Wang Qiang , Zhao Zhenhua , Xu Jifeng , *et al.* 2003. Petrogenesis and metallogenesis of the Yanshanian adakite-like rock in the Eastern Yangtze Block[J]. *Science in China(D)* , 46(Sup) : 164~176.
- Wang Yuanlong , Zhang Qi and Wang Yan. 2001. Geochemical characteristics of volcanic rocks from Ningwu area , and its significance[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 17(4) : 565~576 (in Chinese with English abstract).
- Wilhelm S and Hans A S. 1997. Partial fusion of basic granulites at 5 to 15 kbar : implications for the origin of TTG magmas[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology* , 127 : 30~45.
- Xia Bangdong. 1998. Pre-Mesozoic tectonic evolution of the lower Yangtze region[J]. *Journal of Chengdu University of Technology* , 25(2) : 145~152 (in Chinese with English abstract).
- Xing Fengming. 1998. Geochemistry of basic rock from the eastern part of the Yangtze magmatic rock belt[J]. *Geochimica* , 27(3) : 258~267 (in Chinese with English abstract).
- Xing Fengming and Xu Xiang. 1996. High-Potassium calc-alkaline intrusive rocks in Tongling area , Anhui province[J]. *Geochimica* , 25(1) : 29~38 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Xiaolin , Adam J , Green T H. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt : Implications for TTG genesis[J]. *Chemical Geology* , 218 : 339~359.
- Xu Jifeng , Shinjo R , Defant M J , *et al.* 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China : Partial melting of delaminated lower continental crust? [J]. *Geology* , 30(12) : 1 111~1 114.
- Zhang Qi , Jian Ping , Liu Dunyi , *et al.* 2003. SHRIMP zircon dating of late Mesozoic volcanic rocks from Ningwu region and its tectonic implication[J]. *Science in China(D)* , 33(4) : 309~314 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jincheng , Zhao Taiping and Chen Kerong. 1994. Mesozoic shoshonite series from Lishui in Lower Yangtze region , China[J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences* , 10(3/4) : 263~277.

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锶、钷同位素制约[J]. *地球化学* , 22(3) : 261~268.
- 江苏省地质矿产局. 1984. 江苏省及上海市区域地质志[M]. 北京 : 地质出版社 , 446~490.
- 李超文 , 郭 锋 , 李晓勇. 2004. 溧水盆地晚中生代基性火山岩成因及深部动力学过程探讨[J]. *地球化学* , 33(4) : 361~371.
- 刘 洪 , 邱检生 , 罗清华 , 等. 2002. 安徽庐枞中生代富钾火山岩成因的地球化学制约[J]. *地球化学* , 31(2) : 130~139.
- 汤云晖 , 韩春明 , 梁增宽 , 等. 2005. 磷灰石及其流体包体的 SRXRF 分析[J]. *核技术* , 28(8) : 580~582.
- 王 强 , 许继峰 , 赵振华 , 等. 2003. 安徽铜陵地区燕山期侵入岩的成因及其对深部动力学过程的制约[J]. *中国科学(D 辑)* , 33 : 323~334.
- 王 强 , 赵振华 , 许继峰 , 等. 2002. 扬子地块东部燕山期埃达克质岩与成矿[J]. *中国科学(D 辑)* , 32(增刊) : 127~136.
- 王元龙 , 张旗 , 王 焰. 2001. 宁芜火山岩的地球化学特征及其意义[J]. *岩石学报* , 17(4) : 565~576.
- 夏邦栋. 1998. 下扬子前中生代构造演化[J]. *成都理工学院学报* , 25(2) : 145~152.
- 邢凤鸣. 1998. 扬子岩浆带东段基性岩地球化学[J]. *地球化学* , 27(3) : 258~267.
- 邢凤鸣 , 徐 祥. 1996. 铜陵地区高钾钙碱系列侵入岩[J]. *地球化学* , 25(1) : 29~38.
- 张 旗 , 简 平 , 刘敦一 , 等. 2003. 宁芜火山岩的锆石 SHRIMP 定年及其意义[J]. *中国科学(D 辑)* , 33(4) : 309~314.