

宁镇地区中生代安基山中酸性侵入岩的地球化学： 亏损重稀土和钇的岩浆产生的限制

许继峰 王强 徐义刚 赵振华 熊小林

XU JiFeng, WANG Qiang, XU YiGang, ZHAO ZhenHua and XIONG XiaoLin

中国科学院广州地球化学研究所

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

2001-06-12 收稿, 2001-09-10 改回.

Xu JF, Wang Q, Xu YG, Zhao ZH and Xiong XL. 2001. Geochemistry of Anjishan intermediate-acid intrusive rocks in Ningzhen area: Constraint to origin of the magma with HREE and Y depletion. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4):576-584

Abstract Anjishan intrusive body in early Cretaceous in Ningzhen area of Jiangsu province, east China mainly consists of intermediate-acid rocks (quartz-diorite and granodiorite). These intermediate-acid intrusive rocks are characteristic of HREE and Y depletion, similar to those of adakite. They have low Yb and Y concentration (Yb 0.78~1.16 $\mu\text{g/g}$; Y 7.4~12.5 $\mu\text{g/g}$), but high Sr concentration (550~1579 $\mu\text{g/g}$), therefore possessing high La/Yb and Sr/Y ratios. These rocks lie in the adakite and high-Al TTD field on Sr/Y - Y diagram. Although Anjishan intermediate-acid intrusive rocks show compositional characteristics similar to adakite, our results indicate that they are not related to subduction, therefore they may not be the product of slab melting. On the other hand, nor is it likely for a crystal fractionation or AFC process of the basaltic magma to generate these rocks, since Anjishan intermediate-acid intrusive rocks don't exhibit a successive compositional variational trend with the associated mafic rocks and basalts, and evidence of assimilation by crustal material has not been found. Thus, we conclude that Anjishan intermediate-acid intrusive rocks were most likely derived from partial melting of mafic materials in the lower part of a thick crust. In comparison, the contemporaneous intermediate-acid intrusive and volcanic rocks in the Suzhou-Wushi and Jiangsu-zhejiang areas, which are located near Ningzhen area, don't show HREE and Y depletion, therefore the rocks are thought to be most probably the product of partial melting by materials of a middle-upper crust level. Moreover, the adakitic compositional characters of Anjishan intermediate-acid intrusive rocks suggest that their crustal source had garnet and pyroxene/ amphibole residues but without plagioclase, therefore, the Anjishan intermediate-acid magmas were most likely derived from lower part of a thick continental crust, whose thickness in early Cretaceous was over 40 km. It must be noted that the present thickness of the crust in the Ningzhen area is only about 30 km. Thus, our study suggests that the thick crust in the area could be thinned after the early Cretaceous.

Key words Adakite, Intermediate-acid igneous rock, Lower crust, Mesozoic, Ningzhen area

摘要 江苏省宁镇地区的中生代安基山中酸性侵入岩以亏损重稀土和钇及富集铈为成分特征,它们与消减过程的板片熔融无关,也不是基性岩浆分离结晶和地壳物质混染的产物,很有可能是相对较厚的地壳下部的镁铁质物质部分熔融产生的。相比,与安基山岩体邻近的同时代的苏州-无锡地区的和江浙地区的中酸性侵入岩和火山岩不具有亏损重稀土和钇特征,它们可能是中上地壳物质部分熔融的产物。研究表明,中生代时宁镇地区可能存在一个相对较厚的地壳(>40km)。由于宁镇地区现在地壳的厚度仅30km左右,因此该地区中生代或之后可能经历了一个地壳的减薄过程。

关键词 埃达克岩; 中酸性火成岩; 下地壳; 中生代; 宁镇地区

中图法分类号 P598.121

国家重点基础研究发展规划项目(G1999043202)、和攀登计划预选项目(95-Y-25)和中国地质大学“壳幔体系组成、物质交换和动力学”开放实验室资助。

第一作者简介: 许继峰,男,1963年5月20日生,博士,副研究员,从事火成岩岩石学和地球化学研究, E-mail: jifengxu@gig.ac.cn

1 引言

江苏省的宁镇地区广泛发育着中生代岩浆活动, 其中中酸性侵入岩分布最广, 它们以高资、石马、安基山、其林门岩体为代表, 通常被称为宁镇岩(基)段(毛建仁等, 1990)。前人对宁镇地区的侵入岩曾进行过详细的岩石学和地球化学工作(宁仁祖等, 1989; 毛建仁等, 1990; 夏嘉生, 2000等), 因此该地区的中酸性侵入岩是我国研究程度较高的地区之一。然而, 宁镇地区中酸性侵入岩所具有的一个重要的地球化学特征还未引起重视, 这就是几乎所有的中酸性侵入岩石都亏损重稀土元素和钇($Yb < 1.9 \mu\text{g/g}$, $Y < 18 \mu\text{g/g}$), 它们与 adakite (Defant and Drummond, 1990) 的组成特征相似, 而具有 adakite (埃达克岩) 成分特征的岩石在我国已开始受到关注(Xu *et al.*, 2000; 王强等, 2000, 2001; 张旗等, 2001; 熊小林等, 2001; 许继峰等, 2001)。新的地球化学资料证实了宁

镇地区中生代侵入岩具有类似于 adakite 的成分特征, 其中以安基山岩体中的岩石最为典型。本文将根据安基山岩体岩石的新的地球化学数据, 并与邻区(苏州-无锡、江浙)不具有 adakite 成分特征的其它火成岩作对比, 试图从新的角度探讨该地区侵入岩的成因, 并揭示其地球动力学意义。

2 地质背景和岩体地质

安基山岩体是宁镇地区代表性的中生代侵入岩体之一, 其地表出露为一个不规则形状的岩株, 属于更大的高资杂岩体的西部组成部分(图 1)。安基山岩株沿北北西向展布延伸达 10km, 最宽处约 4km, 面积近 40km², 它东北部与高资岩体呈侵入接触, 其它部分则侵入在志留系-泥盆系沉积岩之中。该岩体的同位素年龄为 106~123Ma(毛建仁等, 1990; 夏嘉生, 2000), 这些同位素数据表明其形成在晚白垩纪。

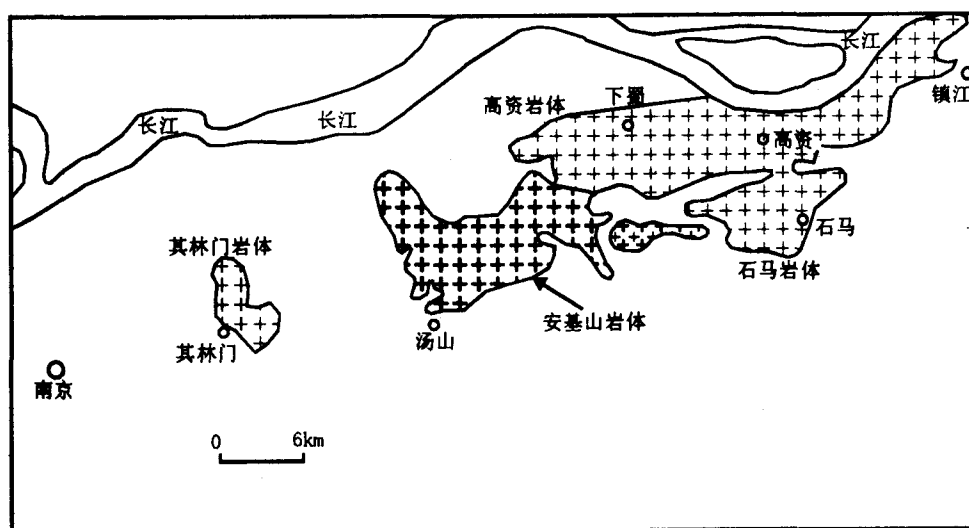


图 1 宁镇地区中生代中酸性侵入体的分布图

根据夏嘉生(2000)和毛建仁等(1990)地质图简化

Fig. 1 The distribution of Mesozoic intermediate-acid intrusions in Ningzhen area

安基山岩体主要由两种岩石类型组成, 石英闪长岩分布最广泛, 分布在岩体的中部和东北部, 花岗闪长岩次之, 多见于岩体西北部。除了上两种主要岩性之外, 还可见有少量中基性的闪长玢岩。前人研究显示, 该岩体可分成两个相带(毛建仁等, 1990), 外部相为石英闪长(玢)岩, 内部相为花岗闪长(斑)岩, 至深部渐变为似斑状花岗闪长岩; 而夏嘉生(2000)则将该岩体划分成两个侵入岩单元, 安基山石英闪长岩单元和花岗闪长岩单元。总之, 该岩体中的岩石应为具有成因联系并具有演化关系的侵入岩系。

岩体中的石英闪长岩为块状构造, 斑状结构, 斑晶主要为斜长石及少量角闪石等, 基质为微晶状, 由长石和石英聚合体组成; 花岗闪长岩也为块状构造, 斑状或似斑状结构, 斑晶为斜长石及少量角闪石和钾长石, 基质为微粒-细粒的斜长石、钾长石、石英、黑云母等。石英闪长岩和花岗闪长岩具有相似的矿物组成, 但后者含有相对较多的实际矿物石英, 并且结晶相对较粗。两者含有一个相似的副矿物组合: 磷灰石、磁铁矿、锆石、金红石等。

整个岩体在地表出露非常不佳, 多被第四系所覆盖, 或

遭受严重的地表风化,很难见到新鲜的岩石露头。由于地表岩石的新鲜样品罕见,本文主要采用取自钻孔中的岩石样品作成分分析。这些非常新鲜岩石样品,主要取自于安基山铜矿周围的没有矿化的岩石,它们的岩性主要是石英闪长岩和花岗闪长岩类。

3 地球化学组成

9个新鲜的石英闪长岩和花岗闪长岩样品的主元素和微量元素成分列于表1中。其主元素用湿化学方法中科院广州地球化学研究所测定,而微量元素及稀土元素用 ICP-MS 在中国地质大学(武汉)分析。这些岩石具有相对均一的岩石化学组成,它们的 SiO_2 变化在 60%~66%(wt.) 之间,尽管它们的 SiO_2 略小于 63%(wt.),但部分岩石中的实际矿物石英的含量超过 20%,因此证实它们中的部分岩石为石英闪长岩,而石英的含量高的岩石为花岗闪长岩。它们的 Al_2O_3 含量多大于 15%,仅两个样品略低,也接近 15%。所有的岩石表现出低的 TiO_2 含量,分布在 0.44%~0.71% 之间,相对比一般的中酸性侵入岩的 TiO_2 含量偏低。这些主元素成分特征与那些典型的板片熔融成因的 adakite (Defant and Drummond, 1990) 相似,但需要指出的是,这些岩石有相对较高的 K_2O (0.42%~2.87%), 明显不同于 adakite, 不过它们的 Na_2O 仍显著高于 K_2O ($\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$), 表明它们还是钠质火成岩,这一特征与典型的秘鲁厚地壳熔出的具有 adakite 成分特征的岩石 (Atherton and Petford, 1993) 相同。

安基山岩体岩石的稀土元素特征非常相似于典型的 adakite, 它们有陡倾的富集 LREE 稀土模式,特别是它们都明显亏损重稀土元素, HREE 都明显低于 10 倍球粒陨石的丰度(图 2), 因此具有高的 La/Yb 比值。它们也不出现一般中酸性火成岩常见的负铕异常,少数岩石还有不明显的正铕异常。安基山岩体岩石的 Yb 均接近或小于 $1\mu\text{g/g}$, 明显亏损 HREE。与苏州-无锡地区同时代、同岩性的侵入岩(查桥岩体和消泾岩体等,毛建仁等, 1990) 和江浙的中生代中酸性火山岩 (Lapierre *et al.*, 1997) 相比,尽管它们的主元素成分相似,但后两者有明显高的重稀土元素含量(图 3), 它们的 Yb 多大于 $2\mu\text{g/g}$ 。因此,以安基山岩体为代表的宁镇地区的侵入岩亏损重稀土元素,具有 adakite 的成分特征,而邻近地区的正常的中酸性火成岩则不具有 adakite 的成分特征,这种差异暗示着安基山和宁镇地区中酸性岩石成因的特殊性。

安基山的石英闪长岩和花岗闪长岩的微量元素组成也显示出 adakite 岩石的亲合性,这些岩石的 MORB 标准化的元素曲线表现出明显的钽和铌的负异常(图 2), 并有铈的显著的正异常峰,它们的铈的丰度多大于 $800\mu\text{g/g}$ (仅一个样品稍低为 $550\mu\text{g/g}$), 最高的趋近 $1600\mu\text{g/g}$, 但是所有的岩石都具有低的元素 Y 的丰度,它们的 Y 变化在仅 7.5~12.4 $\mu\text{g/g}$ 之间,因此这些岩石具有很高的 Sr/Y 比值,它们在图 4 落入

adakite 岩石成分区,显示出类似 adakite 岩石的成分特征,而江浙的中生代中酸性火山岩有低的 Sr/Y, 在图 4 分布在正常的安山岩和英安岩区。

综上所述,宁镇地区代表性的安基山岩体的侵入岩以亏损重稀土和钇、高的 Sr/Yb 和 La/Yb 比值为特征,但有相对于典型的 adakite 较高的 K_2O , 因此它们应属于与 adakite 成分相似的火成侵入岩。它们的成分特征明显不同于苏州-无锡地区和江浙地区具有正常成分组成的中酸性侵入岩和火山岩。由此可知,中生代时,宁镇地区及邻区形成了两种成分的火成岩——具有 adakite 成分特征的火成岩和具有正常重稀土和钇含量的火成岩。

4 讨论

4.1 安基山侵入岩成因的地球化学限制

具有 adakite 成分特征的火成岩有多种成因解释,主要模式有:(1)同源基性岩浆的 AFC 模型 (Castillo *et al.*, 1999); (2)消减板片中 MORB 岩石的部分熔融 (Defant and Drummond, 1990); (3)厚的下地壳中镁铁质岩石的部分熔融等 (Atherton and Petford, 1993; Peacock *et al.*, 1994)。首先,安基山岩体中的岩石可能不是同源的基性岩浆分离结晶与地壳混染(AFC 模型)产生的。在中生代时,宁镇地区及邻区未见大规模的基性岩浆活动;前人研究也表明,宁镇地区在地表呈孤立状的中酸性岩体向地壳深处 2000 米连成一片,组成宁镇地区巨大的岩基带,主要由中酸性侵入岩构成(夏嘉生, 2000), 尽管地表也出露有少量的中生代镁铁质火成岩,但很难想象如此大体积的中酸性侵入岩是由这些小规模的基性岩浆分异形成。在宁镇地区出露的那些基性火成岩比安基山岩体岩石有明显高的 TiO_2 、HREE、Y 的含量,这种基性岩浆通过主要矿物长石和角闪石等的分离结晶很难产生安基山岩体岩石的高 Sr/Y、La/Yb 比值和低的 Y 和重稀土含量。更重要的证据是,在 Th-Ni 和 Th-Ba 成分变异图解上(图 5),安基山岩体的中酸性岩石与宁镇地区的中生代镁铁质火成岩及江浙地区的中生代玄武岩并不显示出连续的成分变化,这与菲律宾的 Camiguin 岛与 AFC 过程有关的具有 adakite 成分特征的酸性火山岩明显不同,后者与玄武质火山岩呈现出连续的成分演化趋势,被认为由玄武质岩浆的分异并同时遭受地壳物质的混染(AFC 模型)形成 (Castillo *et al.*, 1999)。在图 5 上安基山的中酸性岩石还显示出随着元素 Ni, Ba 变化,元素 Th 含量基本保持不变,而且它们的 Th 含量低于宁镇地区中生代镁铁质火成岩,但高于江浙地区的中生代玄武岩,并与上地壳的平均值相当。这些结果表明安基山中酸性岩石没有明显的地壳物质的混染或者混染是不重要的,否则,它们的 Th 含量将随着 Ni 和 Ba 的降低而增高。因此,用 AFC 模型很难解释安基山岩体的中酸性岩石表现出的成分变化。

表 1 安基山岩体岩石的主元素(%)和微量元素($\mu\text{g/g}$)成分

Table 1 Major and trace element compositions of the rocks in Anjishan intrusion

岩石类型	石英闪长岩和花岗闪长岩								
	21	22	25	28	30	31	32	33	34
SiO ₂	64.46	65.12	64.89	65.05	63.12	63.93	62.34	64.97	60.26
TiO ₂	0.52	0.44	0.46	0.47	0.47	0.48	0.51	0.48	0.71
Al ₂ O ₃	15.53	14.84	15.80	14.98	15.70	15.93	15.25	15.52	15.24
Fe ₂ O ₃	1.13	0.93	1.72	2.56	1.59	1.40	1.05	1.68	1.97
FeO	2.97	2.76	2.53	2.22	2.33	2.73	2.95	2.55	3.30
MnO	0.08	0.07	0.04	0.04	0.06	0.06	0.12	0.06	0.13
MgO	1.53	2.38	1.69	1.52	2.88	2.24	1.97	2.11	3.99
CaO	5.31	4.25	4.48	4.28	3.69	4.54	4.09	4.31	6.71
Na ₂ O	4.88	4.45	4.55	4.38	4.05	4.62	4.03	4.90	5.54
K ₂ O	2.87	2.69	2.67	2.98	2.81	2.60	2.12	1.74	0.42
P ₂ O ₅	0.35	0.24	0.25	0.26	0.29	0.27	0.31	0.27	0.36
LOI	0.27	2.05	0.43	0.80	2.55	0.71	4.79	0.95	0.88
Σ	99.90	100.23	99.55	99.54	99.54	99.51	99.53	99.54	99.51
Sc	5.6	3.3	5.2	5.1	3.8	4.6	5.0	5.0	11.4
V	80.8	57.3	62.6	69.2	62.1	69.2	70.1	63.3	110
Cr	35.4	19.6	27.7	22.0	24.9	32.0	44.6	32.3	113
Co	9.8	9.3	8.8	10.5	9.9	11.2	11.2	11.7	20.5
Ni	18.9	12.0	22.5	12.2	17.5	64.6	23.2	16.5	42.9
Cu	119	37.2	34.2	291	13.7	16.1	11.7	30.1	17.9
Zn	29.3	69.7	31.7	34.7	39.6	55.2	76.8	47.0	64.1
Rb	50.4	38.1	47.6	43.8	44.6	25.3	35.3	21.0	5.09
Sr	845	822	972	906	1093	843	550	1210	1579
Ba	1744	1904	1843	1591	2066	1665	667	2559	707
Y	10.4	7.5	8.1	9.2	8.2	8.8	8.9	8.4	12.4
Zr	80.9	77.9	61.8	69.7	78.3	98.9	110	40.1	103
Hf	2.9	2.7	2.3	2.5	2.7	3.3	3.3	1.7	3.3
Nb	17.2	13.3	13.6	14.5	15.2	13.6	12.3	14.5	22.4
Ta	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	0.8	1.0	1.4
Pb	9.8	17.1	10.0	8.4	11.9	9.0	15.2	14.4	41.7
Th	15.7	8.92	10.3	11.9	9.8	9.3	7.9	8.8	12.3
U	3.5	2.3	2.6	2.6	2.8	2.2	2.2	2.4	3.5
La	45.1	37.5	37.4	40.1	36.7	37.7	32.5	34.9	42.0
Ce	73.7	71.9	73.1	78.1	68.7	60.9	59.0	67.1	84.1
Pr	8.04	6.80	7.18	7.76	6.68	7.08	6.14	6.58	8.27
Nd	27.6	23.5	25.2	26.9	23.0	25.2	22.6	23.2	30.7
Sm	4.41	3.71	4.00	4.20	3.56	4.07	3.91	3.89	5.20
Eu	1.36	1.33	1.40	1.39	1.28	1.35	1.16	1.36	1.53
Gd	3.69	3.44	3.44	3.40	3.36	3.48	2.80	3.55	3.82
Tb	0.47	0.37	0.39	0.42	0.37	0.40	0.39	0.37	0.55
Dy	2.29	1.92	2.01	2.12	1.92	2.10	1.95	1.93	2.80
Ho	0.40	0.31	0.32	0.35	0.32	0.34	0.30	0.30	0.47
Er	1.04	0.84	0.89	0.94	0.84	0.89	0.81	0.85	1.28
Tm	0.14	0.11	0.11	0.12	0.11	0.12	0.10	0.10	0.16
Yb	1.06	0.81	0.86	0.94	0.88	0.91	0.78	0.79	1.16
Lu	0.16	0.12	0.13	0.14	0.13	0.14	0.12	0.11	0.19
Mg [#]	40.61	54.11	42.48	37.45	57.71	50.01	47.41	48.07	58.36

主元素用湿化学法测定; 微量和稀土元素用 ICP-MS 分析, 大部分微量元素的准确度大于 5%, 少数元素的准确度好于 10%。

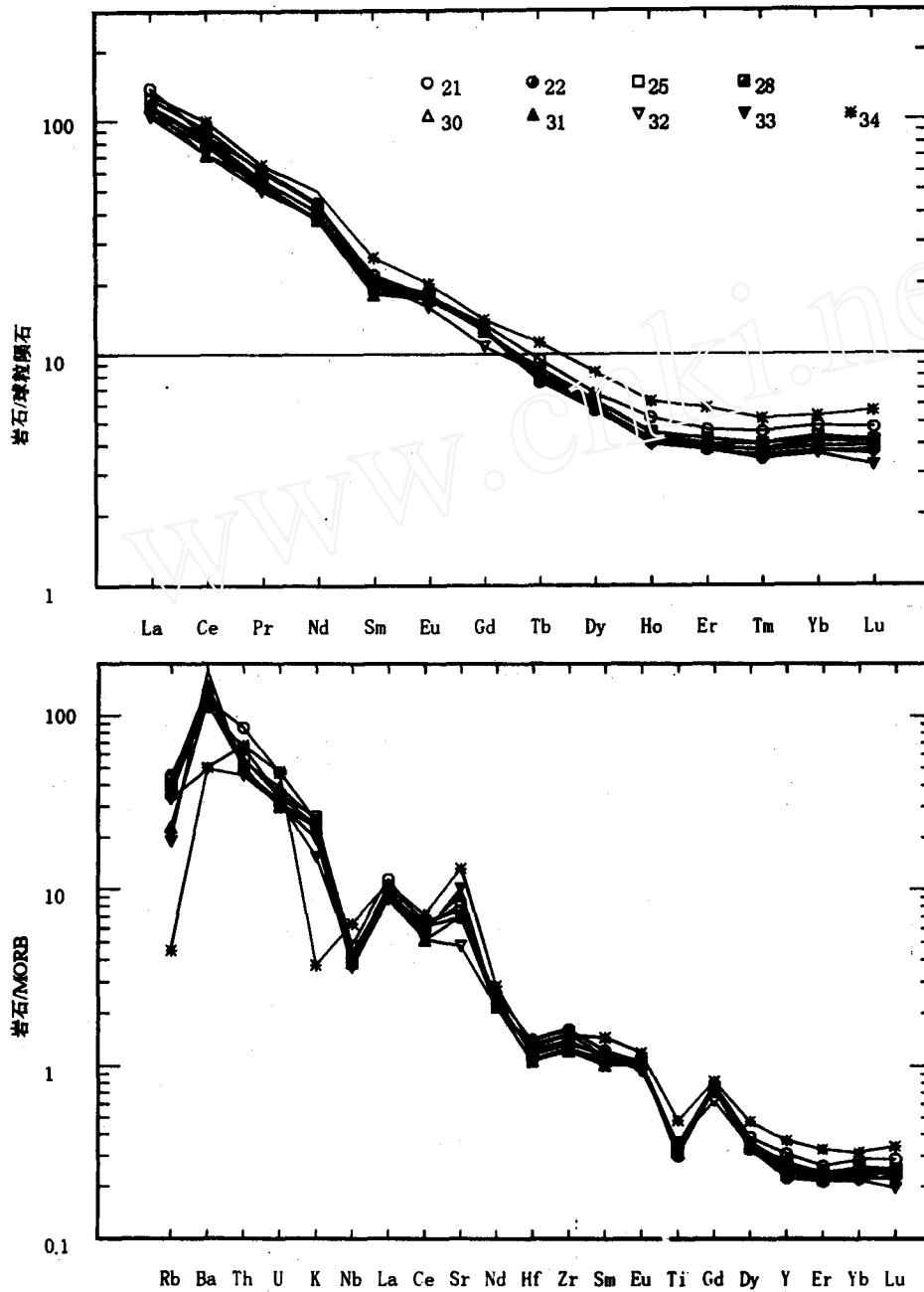


图2 安基山岩体中酸性侵入岩稀土和不相容微量元素模式

安基山侵入岩亏损 HREE 和 Y, 但富集 Sr 并明显地表现出 Sr 的正异常峰, 它们也不出现 Eu 的异常。

微量元素特征表现出钙碱性岩石亏损 HFSE 如 Ti、Nb 的成分组成特征, 这些特点都与 adakite 岩石的组成特征类似。

球粒陨石和 MORB 的标准化值根据 Sun and McDonough(1989)

Fig. 2 REE and trace element pattern of Anjishan intermediate-acid intrusive rocks

在另一方面, 由于安基山岩体的石英闪长岩和花岗闪长岩的二氧化硅的含量接近 66% 左右, 属于较酸性的火成岩, 通常这样高 SiO_2 含量的岩石也是不能直接由地幔部分熔融产生的, 因为地幔橄榄岩的直接部分熔融不能形成英安质岩浆或更酸性的岩浆 (Jahn and Zhang, 1984)。

由于宁镇地区的地理位置上接近太平洋西岸, 而已有研

究表明在中生代时古太平洋板块或 Izanaqi 板块向欧亚大陆消减俯冲, 在中国东部形成了与消减作用有关的中生代火成岩 (Lapierre *et al.*, 1997; Zhou and Li, 2000), 因此, 安基山岩体的岩石通过板片熔融产生也是另外一种可能性。然而, 安基山岩体中的石英闪长岩和花岗闪长岩有比典型的 adakite 岩石明显高的 K_2O 含量, 不同于板片熔融产生的岩

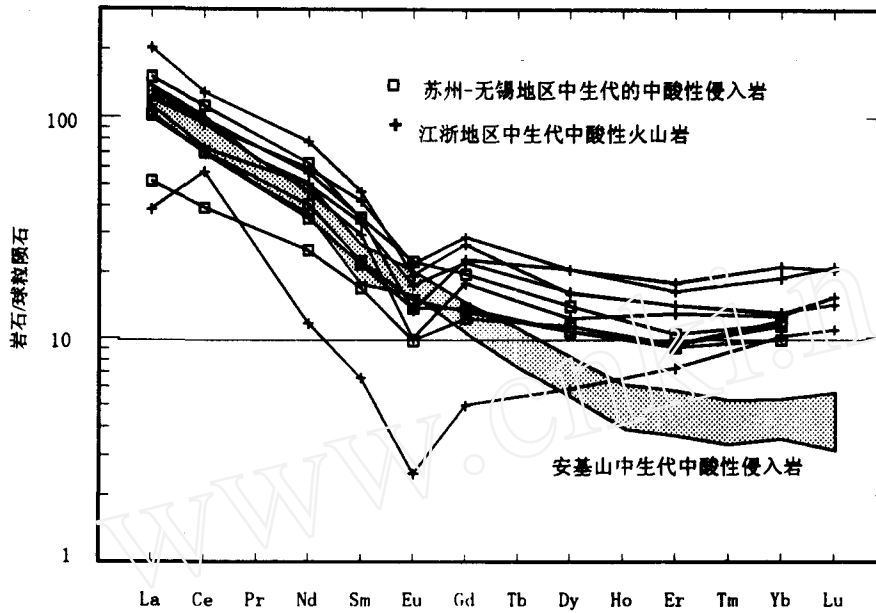


图3 安基山岩体与不具有 adakite 成分特征的中酸性火成岩稀土组成的比较

苏州-无锡地区的侵入岩包括查桥、金墅、消泾和城皇庙岩体,它们为石英闪长岩和花岗闪长岩等,数据根据毛建仁(1990)。江浙地区中生代的中酸性火山岩主要为英安岩和流纹岩等,数据引自 Lapierre *et al.* (1997)。这些岩石都有高的重稀土含量,并表现出 Eu 的负异常,明显不同于亏损 HREE 的安基山侵入岩石。球粒陨石的标准化值根据 Sun and McDonough(1989)

Fig. 3 Comparison of REE compositional characteristics between Anjishan intrusive rocks and the other igneous rocks without adakitic composition signature

石的成分特征。更为重要的是,这些石英闪长岩和花岗闪长岩的钆和铈同位素特征也显著地不同于板片熔融的岩浆组成,它们的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} < 0.5123$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.706$ (许继峰,待刊),这些同位素组成特征强烈地证明了安基山岩体的岩石不大可能由消减俯冲板片的 MORB 岩石的部分熔融产生。

我们认为安基山岩体的岩石不是俯冲板片的部分熔融产物,也不是基性岩浆的分异或 AFC 过程的产物,它们也不可能直接起源于陆壳之下的地幔源区,因此,我们倾向于这些岩石有可能是由于下地壳中镁铁质岩石的部分熔融形成的。已有研究显示,秘鲁的 Cordillera Blanca 岩基的中酸性侵入岩被认为是典型的来自下地壳镁铁质岩石部分熔融的产物,它们也具有高 Sr/Y、La/Yb 比值和低的 Y 和重稀土含量,但有比 adakite 岩石相对较高的 K_2O (Atherton and Petford, 1993)。与 Cordillera Blanca 岩基的岩石相比,安基山岩体的侵入岩除了 SiO_2 稍低之外(前者多在 70% 左右),其他的地球化学特征几乎完全相同,所以安基山岩体的侵入岩的成因与其相似,最有可能是下地壳中的镁铁质岩石的部分熔融产生。

4.2 安基山侵入岩的深地壳源区限制

地壳源区镁铁质岩石的部分熔融可以形成不同成分的

中酸性侵入岩或火山岩。如果依据这些中酸性火成岩的重稀土元素和钇含量的高低,可将其分成两类:亏损重稀土元素和钇 ($\text{Yb} < 1.9$ 和 $\text{Y} < 18\mu\text{g/g}$) 的中酸性火成岩(或 adakite-like 岩石)和正常的中酸性火成岩 ($\text{Yb} > 1.9$ 和 $\text{Y} > 18\mu\text{g/g}$),其中正常的中酸性火成岩在我国更为常见,而亏损重稀土元素和钇的中酸性火成岩却报道不多。在宁镇地区和邻近的江浙地区,这两类中生代中酸性火成岩都有出露,宁镇地区的中酸性侵入岩是典型的亏损重稀土元素和钇的类型,而燕山期苏州-无锡地区的花岗岩体等及江浙地区的中酸性火山岩则是不亏损重稀土元素和钇的正常类型。我们认为这两类火成岩起源于不同深度的地壳源区。

以安基山岩体为代表的亏损重稀土元素和钇的中酸性岩,应该起源于一个深的地壳源区。它们与 adakite 形成条件相似,其源区的镁铁质岩石处在一个相对较大的压力条件下,如向榴辉岩(榴闪岩)转变的过程中,源岩中的斜长石转变成石榴石,它们的 HREE 和 Y 进入到石榴石等残留相中,这样使得在源岩部分熔融熔出的中酸性岩浆亏损 HREE 和 Y 并富集 Sr。实验岩石学研究表明,镁铁质岩石在大于 1.2 GPa 的压力下,斜长石不稳定而向石榴石转变,在高于这个压力下的岩石部分熔融形成的熔体具有亏损重稀土和钇的组成 (Rapp *et al.*, 1991; Rapp and Watson, 1995)。因此,以安基山侵入岩为代表的亏损重稀土元素和钇的岩石,应来自于一个压力大于 1.2 GPa 的下地壳源区。

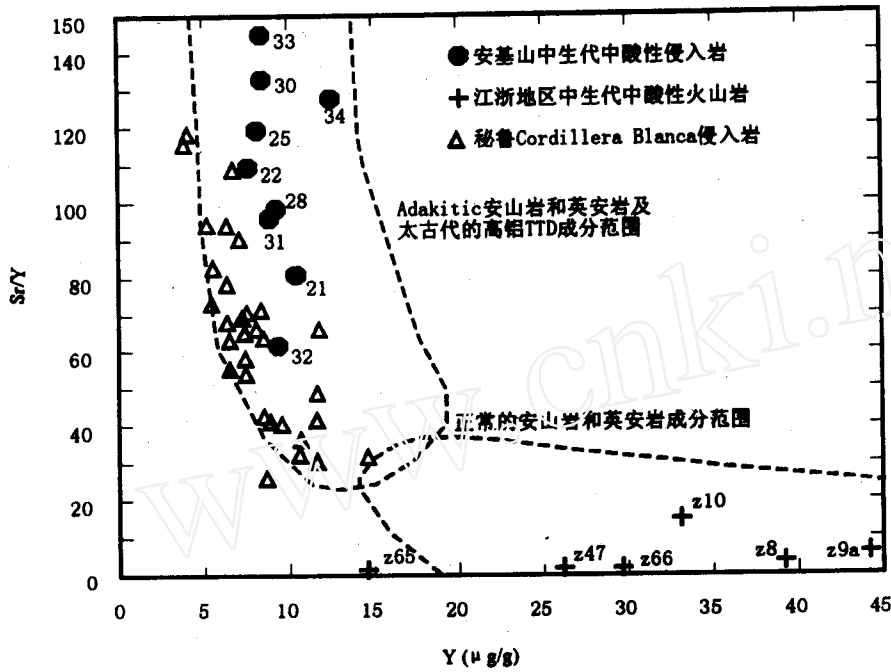


图4 安基山侵入岩的 Sr/Y—Y 成分变异图

安基山侵入岩石具有低的 Y 和非常高的 Sr/Y 比值, 相似于 adakitic 安山岩和英安岩和高铝 TTD, 也与秘鲁 Cordillera Blanca 岩体的地壳部分熔融形成的具有 adakite 成分特征的侵入岩 (Atherton and Petford, 1993) 类似; 而中生代江浙地区的中酸性火山岩 (数据引自 Lapierre *et al.*, 1997) 落入正常的安山岩和英安岩成分区域。原图引自 Atherton and Petford (1993)。图中符号附近为样品号。

Fig. 4 Sr/Y—Y diagram of Anjishan intrusive rocks

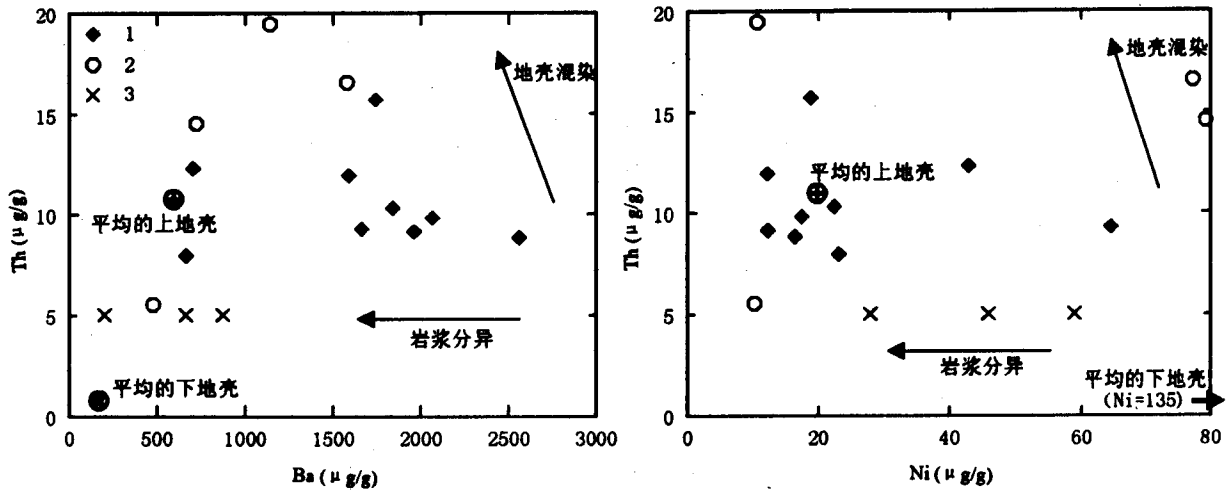


图5 安基山岩体中酸性岩石的 Ba—Th 和 Ni—Th 图解

1. 安基山岩体中的中酸性侵入岩石; 2. 宁镇地区中生代的镁铁质火成岩 (许继峰, 待刊); 3. 江浙地区中生代玄武岩 (Lapierre *et al.*, 1997)。图中上地壳和下地壳平均值引自 Taylor and McLennan (1985)。在该图上安基山中酸性侵入岩表现出随着 Ba 和 Ni 的变化而 Th 的含量基本保持不变, 并且它们与其它玄武质岩石也不呈现出连续的成分变化, 表明他们的成分变化可能与玄武质岩浆的 AFC 过程无关。

Fig. 5 Ba—Th and Ni—Th diagram of Anjishan intermediate-acid intrusive rocks

相比, 苏州-无锡及江浙地区的正常中酸性火成岩, 它们相对富集重稀土元素和钇, 并且一些岩石还出现明显的负钕异常(图 3), 这些特征表明它们的地壳源区的残留相矿物可能没有石榴石而存在有斜长石, 所以这种地壳源区的部分熔融形成的中酸性岩浆不具有亏损重稀土元素和钇的成分特征。由于这类岩石的地壳源区中仍存在有斜长石, 因此这些岩石形成应在小于 1.2 GPa 的条件下产生。据此可知, 象苏州-无锡地区及江浙地区的中生代不亏损重稀土元素和钇中酸性火成岩, 应该是在比宁镇地区的侵入岩石更浅的地壳源区部分熔融形成的, 它们的地壳源区可能位于中上地壳之中。

4.3 安基山侵入岩产生的地球动力学意义及存在的问题

根据上述, 安基山侵入岩是具有 adakite 成分特征的中酸性火成岩, 它们亏损重稀土和钇的成分特征指示它们的岩浆起源于一个下地壳源区, 这个地壳源区的深度应大于约 40km (1.2GPa, Rapp and Watson, 1995)。因此, 我们认为安基山侵入岩的岩浆也应形成在大于 40km 的深度。由于前面已经证明安基山侵入岩起源于下地壳, 这就意味着中生代时宁镇地区的地壳厚度可能 $> \sim 40\text{km}$, 应该是一个相对较厚的地壳, 这跟的秘鲁 Cordillera Blanca 岩基(4.65~6.7 Ma)地区现今的地壳厚约 50km (Atherton and Petford, 1993) 的情况相似, 该地区分布有 adakite 成分特征的侵入岩石, 表明在这种厚地壳中可熔出具有 adakite 成分特征的火成岩石。

中生代时宁镇地区是一个约 $> 40\text{km}$ 的厚地壳, 有趣的是地球物理资料表明宁镇地区现代的地壳厚度仅在 30km 左右(王谦生, 1992), 这表明从安基山侵入岩在 100~126Ma 之间形成后到现在, 宁镇地区的地壳的厚度已经显著变薄了, 从约 $> 40\text{km}$ 变化成 30km 左右, 因此在这个时期该地区发生了明显的地壳减薄作用, 这是一个非常有意义并值得重视的地球动力学过程。

宁镇地区地壳的增厚和减薄过程是如何发生的现在还不清楚。从更大的区域上来看, 下地壳部分熔融形成的类似 adakite 成分特征的中生代岩石还发现在华东地区的沙溪和月山(王强等, 2001)、大别山(王强等, 2001)等地, 表明在华东或更大的范围内可能存在有一个类似 adakite 成分特征侵入岩的分布区域, 因此, 从宁镇地区觉察到的地壳的减薄作用看来不是局部的, 而很有可能是一个区域上的动力学过程。该区域中生代的厚地壳如何产生目前也不能确定, 可能的原因有中生代大规模的岩浆底侵作用(underplating)或陆内地壳的俯冲叠置等, 都可以造成地壳的增生和加厚。另外, 宁镇地区的这些侵入岩是在地壳的增厚过程中产生的, 还是在厚地壳减薄过程中形成的, 目前也是不确定的。因此, 该区域地壳部分熔融形成的这类岩石的发现也引伸出许多重要的地质科学问题, 非常有必要对这些岩石做更深入的研究。

5 结论

(1) 宁镇地区安基山侵入岩以亏损重稀土、钇和富集铈为成分特征, 它们与 adakite 成分类似, 但不是板片熔融或基性岩浆分异和地壳物质混染的产物。

(2) 安基山侵入岩的岩浆应起源于一个相对较深的地壳源区, 它们是下地壳中的镁铁质物质部分熔融产生的; 相比, 同时代的苏州-无锡地区和江浙地区不亏损重稀土和钇的中酸性火成岩则应是中上地壳物质(部分)熔融形成的。

(3) 宁镇地区地壳部分熔融成因的岩石具有类似 adakite 成分特征表明该地区在中生代可能为一个约 $> 40\text{km}$ 的厚地壳, 中生代之后该区域曾发生了明显的地壳减薄, 造成现代地壳厚度仅为 30km。

References

- Atherton M P, Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362: 144-146
- Castillo P R, Janney P E, and Solidum R U. 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin island, southern Philippines; insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 134: 33-51
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction Lithosphere. *Nature*, 662-665
- Jahn B M and Zhang J Q. 1984. Archean granulite gneisses from eastern Hubei Province, China; rare earth geochemistry and tectonic implication; *Contrib. Mineral. Petrol.*, 85: 224-243
- Lapierre H, Jahn B M, Chavet J, Yu Y W. 1997. Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiites in Zhejiang province and their relationship with the tectonic activity in southeastern China. *Tectonophysics*, 274: 321-338
- Mao J R, Su Y X, Chen S Y. 1990. Felsic intrusions and mineralization in the middle and lower paers of Yangtze River. Beijing: Geological Publishing House, 1-191 (in Chinese with English abstract)
- Ning Renzu, Chen Gensheng. 1989. The rare earth element characteristics of Ningzhen intrusive rocks in Yanshan period. *Geochimica*, (1): 52-60 (in Chinese with English abstract)
- Peacock S M, Rushmer T, Thompson A B. 1994. Partial melting of subducting oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 121: 227-244
- Rapp R P, Watson E B, Miller C F. 1991. Partial melting of amphibolite/ eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites. *Precambrian Researh*, 51: 1-25
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling. *J. Petrol.*, 36: 891-931

- Sun S - S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. *Magmaism in the ocean basin* (Saunders, A. D. and Norry, M. J. eds.), Geol. Soc. Sp. Publ., 42: 313-345
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The Continental Crusts: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Cambridge, Mass., 1-150.
- Wang Qiansheng. 1992. Research on characteristics of regional gravity field and geomagnetic field and crustal structure in Zhe-Wan area of Southeast China, In: Li Ji-liang (ed.), *Investigation on the structure and evolution of oceanic and continental Lithosphere in Southeast China*. Beijing: Chinese Science and Technology Publishing House, 287 - 294 (in Chinese)
- Wang Q, Xu J, Wang J, Zhao Z, Qiu J, Wang R, Xiong X, Sang L, Peng L. 2000. The recognition of adakite-type gneisses in the North Dabie Mountains and its implication to ultrahigh pressure metamorphic geology. *Chinese Science Bulletin*, 45 (21):1927-1933
- Wang Q, Xu J, Zhao Z. 2001a. The summary and comment on reearch on a new kind of igneous rock-adakite. *Advance in Earth Science*, 16 (2): 201 - 208 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Zhao Z, Xiong X, Xu J. 2001b. Crustal growth and the melting of mafic lower crust: evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite-porphyrites, in Anhui province, China. *Geochimica*, 30 (4): 353 - 362 (in Chinese with English abstract)
- Xia Jiasheng. 2000. A preliminary division of Lineage units of granitoid rocks in Ninzhen region. *Jiangsu Geology*, 24(2): 81 - 86 (in Chinese with English abstract)
- Xiong Xiaolin, Zhao Zhenhua, Bai Zhenghua, Mei Houjun, Wang Yixian, Wang Qiang, Xu Jifeng, Bao Zhiwei. 2001. Adakite-type sodium-rich rocks in Awulale Mountain of west Tianshan: Significance for the vertical growth of continental crust. *Chinese Science Bulletin*, 46(10): 811-817
- Xu Ji-Feng, Wang Qiang, Yu Xue-Yuan. 2000. Geochemistry of high-Mg andesites and adakitic andesite from the Sanchazi block of the Mian-Lue ophiolitic melange in the Qinling Mountains, central China; Evidence of partial melting of the subducted Paleo-Tethyan crust. *Geochem. J.*, 34: 359-377
- Xu JF, Mei HJ, Yu XY, Bai ZH, Niu HC, Chen FR, Zhen ZP, Wang Qiang. 2001. Adakites related to subduction in the northern margin of Junggar arc for the Late Paleozoic; products of slab melting, *Chinese Science Bulletin*, 46(15): 1312-1316
- Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China; implications for Lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326: 269-287
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q, Yang J, Wang, Y, Zhao, T, Guo G. 2001a. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in yunshanian period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236-244 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Qian Q, Wang E, Wang Y, Zhao T, Hao J, Guo G. 2001b. An east China Plateau in mid-late Yanshanian period; implication from adakites. *Scientia Geologica Sinica*, 36(2):248 - 255 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 毛建仁, 苏郁香, 陈三元. 1990. 长江中下游酸性侵入岩与成矿. 北京: 地质出版社. 1-191
- 宁仁祖, 陈根生. 1989. 宁镇地区燕山期侵入岩的稀土元素特征. *地球化学*, (1):52-60
- 王谦生. 1992. 中国东南浙皖地区的区域重磁场特征与地壳构造的研究. 见: 李继亮主编. 中国东南海陆岩石圈结构与演化研究. 北京: 中国科学技术出版社, 287-294
- 王强, 许继峰, 王建新. 2000. 北大别山 adakite 型灰色片麻岩的确定及其与超高压变质作用的关系. *科学通报*, 45: 1017-1024
- 王强, 许继峰, 赵振华. 2001. 一种新的火成岩: 埃达克岩(adakite)的研究综述. *地球科学进展*, 16(2):201-208
- 王强, 赵振华, 熊小林, 许继峰. 2001. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据. *地球化学*, 30(4): 353-362
- 夏嘉生. 2000. 宁镇地区花岗岩类岩石谱系单位的初步划分. *江苏地质*, 24(2):81-86
- 熊小林, 赵振华, 白正华, 梅厚钧, 王一先, 王强, 许继峰, 包志伟. 2001. 西天山阿吾拉勒 adakite 型钠质中酸性岩及地壳垂向增生. *科学通报*, 47(4): 281-287
- 许继峰, 梅厚钧, 于学元, 白正华, 牛贺才, 陈繁荣, 王强. 2001. 准噶尔北缘晚古生代岛弧中与俯冲作用有关的 adakite 火山岩: 消减板片部分熔融的产物. *科学通报*, 46(8):684-687
- 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 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, 王焰, 赵太平, 郝杰, 郭光军. 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(2):248 - 255