

宁芜地区中生代岩浆岩的成因 ——岩石学与 Nd、Sr、Pb 同位素证据

邢凤鸣

(安徽省地质科学研究所, 合肥 230001)

主题词 中生代 岩浆岩 成因 宁芜地区

提 要 宁芜中生代火山盆地产出火山岩与侵入岩。火山岩以玄武粗安岩、粗安岩和粗面岩为主, 安山岩和响岩少量, 火山岩以高钾富碱为特征, 已确定为橄揽安粗岩系。侵入岩以辉长闪长玢岩—辉长闪长岩为主, 以高钠低硅为特征, 并有辉长岩和花岗岩产出。据地质学和 Nd、Sr、Pb 同位素资料, 侵入岩与火山岩属同一个岩浆系列, 是碱性玄武岩浆在下地壳经过轻度 AFC 混合后, 侵入上地壳, 在轻度混染的情况下, 经过以结晶分离为主的岩浆分异形成的。

宁芜地区以其丰富的铁矿资源早已为地质学家所关注。70 年代曾进行过大规模研究并提出“玢岩铁矿”的成矿模式^[1]。其后, 邱家骧等^[2]提出下扬子地区中生代火山岩有两种母岩浆: 碱性玄武岩浆和流纹岩浆; 吴利仁等^[3]提出岩浆多来源和混熔岩浆说; 薛怀民等^[4]认为宁芜地区火山岩属橄揽安粗岩系; 王德滋等^[5]则更进一步提出橄揽安粗岩系的新概念, 并将橄揽安粗岩系的形成环境划分为两种构造类型; 陶奎元等^[6]对娘娘山组火山岩的演化做了分析, 提出矿物学和岩石化学的系统变化起因于岩浆出现的成分梯度。常印佛等(1991)对侵入岩做了研究, 划分出两个基本的成因系列: 同熔系列和改造系列, 同时提出与成矿有关的岩浆岩是异常演化的产物: 铁矿与钠硅质异常演化有关, 铜矿与钾硅质异常演化有关。以往的工作虽十分有益, 提出了许多令人信服的新认识, 但也有不足之处。首先, 将火山岩与侵入岩结合起来研究, 著作不多, 深度不够; 其次是 Nd、Sr、Pb 等同位素分析数据不多, 限制了对岩浆岩成因的认识。我们最近的工作对上述两点做了补充, 提出了某些新的认识。

1 岩石学和岩石化学特点

宁芜地区侵入岩主要由辉长闪长玢岩—辉长闪长岩和辉长岩组成, 前两者常呈相变关系。此外, 还有少量的钠长闪长玢岩和钠长岩。这些都是铁矿的成矿母岩。辉长闪长岩为全晶质细粒不等粒结构或似辉绿结构, 斜长石占 75%—85%、 $An = 35—63$; 单斜辉石 5%—15%; 钾长石少量; 偶见角闪石和黑云母。辉长闪长玢岩为细斑密斑结构, 斑晶以斜长石为

主,占 50%—64%, $An = 42$ —69; 次为单斜辉石,占 12%—17%; 斜方辉石少量,有时具单斜辉石反应边。

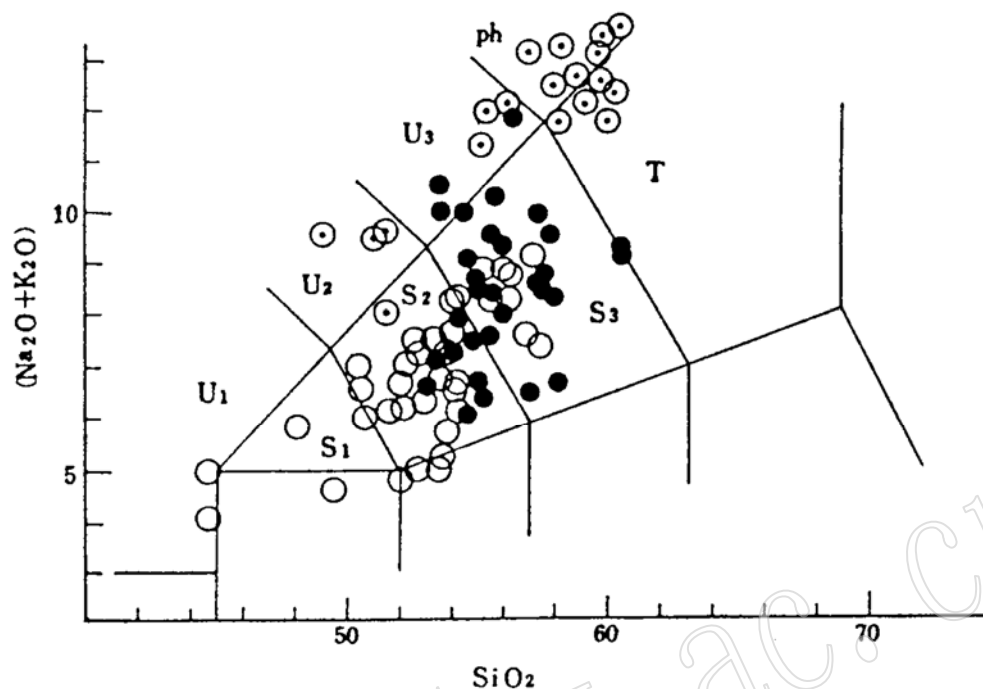


图 1 宁芜地区岩浆岩 TAS 图(据参考文献[10])

Fig. 1 TAS diagram of magmatic rocks in Ningwu(Nanjing - Wuhu)area

○—侵入岩;●—龙王山组和大王山组火山岩;◐—娘娘山组火山岩;U₁—碱玄岩;U₂—响岩质碱玄岩;U₃—碱玄质响岩;ph—响岩;S₁—粗玄岩;S₂—玄武粗安岩;S₃—粗安岩;T—粗面岩。

基质具微晶结构,主要是微晶更长石—中长石,占 9%—15%,辉石 5%—8%。副矿物以磷灰石,磁铁矿和锆石为主。辉长岩分布在南京到芜湖地区,为含钾长石和黑云母的碱长辉长岩,如南京的蒋庙岩体、高古山岩体、大栏杆岩体;马鞍山的阳湖塘岩体;当涂的姑山岩体;以及芜湖市区的几个岩体等等。蒋庙岩体深部见磁铁矿纯橄岩、辉橄岩和辉石岩等超镁铁质岩石包体。上述侵入岩的同位素年龄为 129—120Ma^[8,1]。

宁芜地区火山岩是侵入岩的同源喷发物,自下而上分为:龙王山组,大王山组,姑山组和娘娘山组。前两组大面积分布,是宁芜地区火山岩的代表。姑山组和娘娘山组分布局限,主要集中在二个点上。龙王山组和大王山组的主要成员是:玄武粗安岩,粗安岩和粗面岩;姑山组是安山岩;娘娘山组是以假白榴石响岩和蓝方石响岩为主的碱性火山岩。火山岩的同位素年龄为 127—90Ma^[9]。

富碱是宁芜火山岩和侵入岩的共同特征。侵入岩的 δ 值为 $4.4 \pm$, 火山岩为 $5.3 \pm$, 钙碱指数 $CA < 56$ 。显然,它们已不能列为钙碱系列,而属于碱钙系列^[2]。在 TAS 图上(图 1),侵入岩和火山岩大部投入碱玄岩到粗安岩区,部分投入响岩区,更直观地表明它们并不属于钙碱系列。侵入岩低硅富钠,而火山岩则相对高硅富钾,似乎是两个不同的岩浆岩系列,有不同的起源和成因。但是,侵入岩尽管富钠,钾的含量并不低,在 K_2O-SiO_2 图上(图 2),多数样品投入高钾岩系和橄榄安粗岩系,部分投入中钾岩系,显示出与火山岩的某种内在联系(后述)。

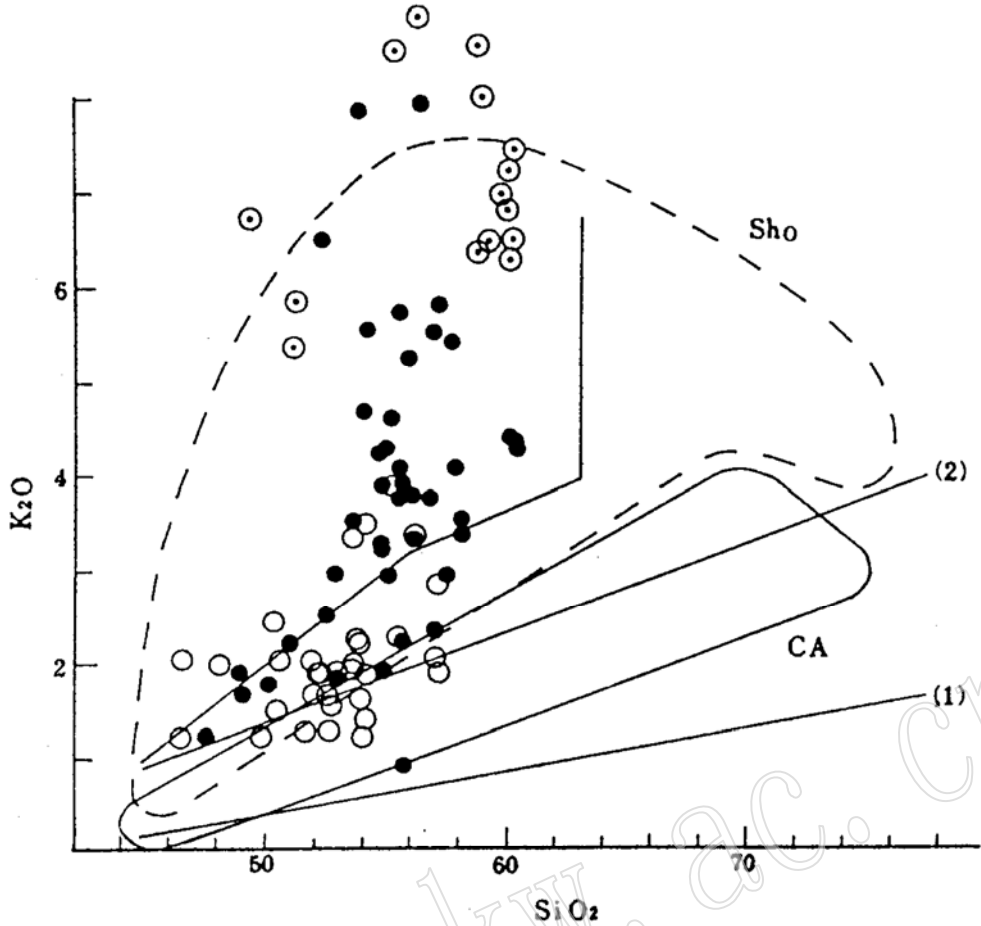


图 2 安徽宁芜地区岩浆岩 K_2O-SiO_2 图

Fig. 2 K_2O-SiO_2 diagram for magmatic rocks from Nanjing—Wuhu area

((1)–(3)据[11];Sho、CA 据[12];(1)以上为中钾岩系;(2)以上为高钾岩系;(3)以上为橄榄安粗岩系; Sho—橄榄安粗岩系;CA—钙碱性岩系;○—侵入岩;●—龙王山组大王山组火山岩;⊙—娘娘山组火山岩

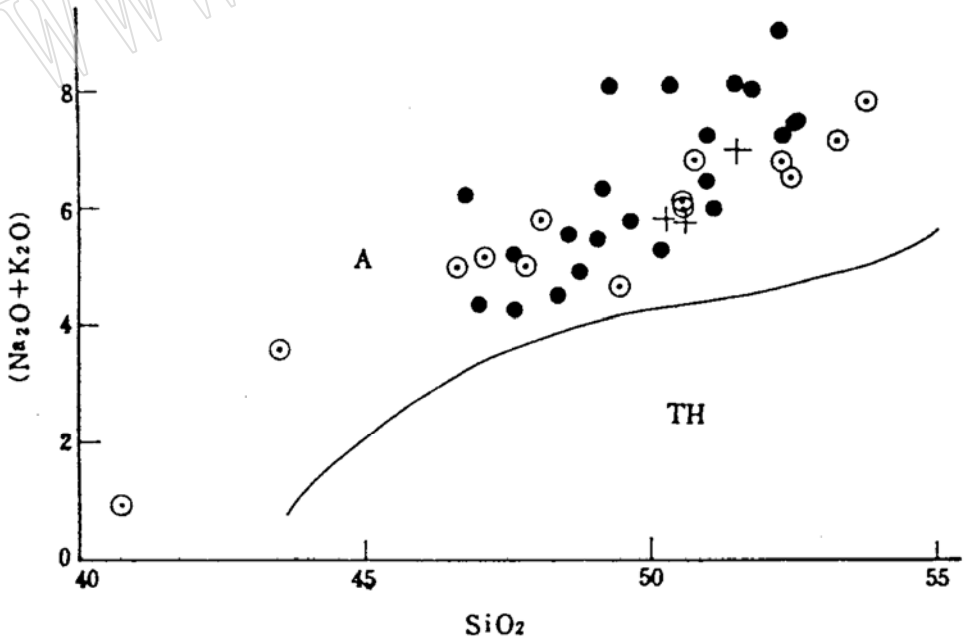


图 3 玄武岩分类图(据 Handman, 1972)

Fig. 3 Classification of basalt

⊙—辉长岩;●—玄武岩;+—典型橄榄安粗岩系玄武岩(据[12]);A—碱性玄武岩;TH—拉斑玄武岩

宁芜、繁昌直到铜陵地区的玄武岩和辉长岩均无标准矿物石英出现,有 70% 以上的样品含标准矿物霞石,大都属于硅弱不饱和的基性岩。这些岩石在玄武岩分类图上(Honddman, 1972)均投入碱性玄武岩区(图 3),这意味着它们的原始岩浆是硅不饱和的高钾碱性玄武岩浆。中基性至中酸性侵入岩和火山岩中常常出现的石英,只能是同化硅铝质地壳的产物,因为硅不饱和岩浆在低压下(小于 $10 \times 10^8 \text{Pa}$)的分离结晶不能演变成为硅过饱和的岩浆。

2 REE 特征

REE 测试结果列于表 1,应用 Boynton 推荐的球粒陨石值所做的标准化配分曲线见图 4。

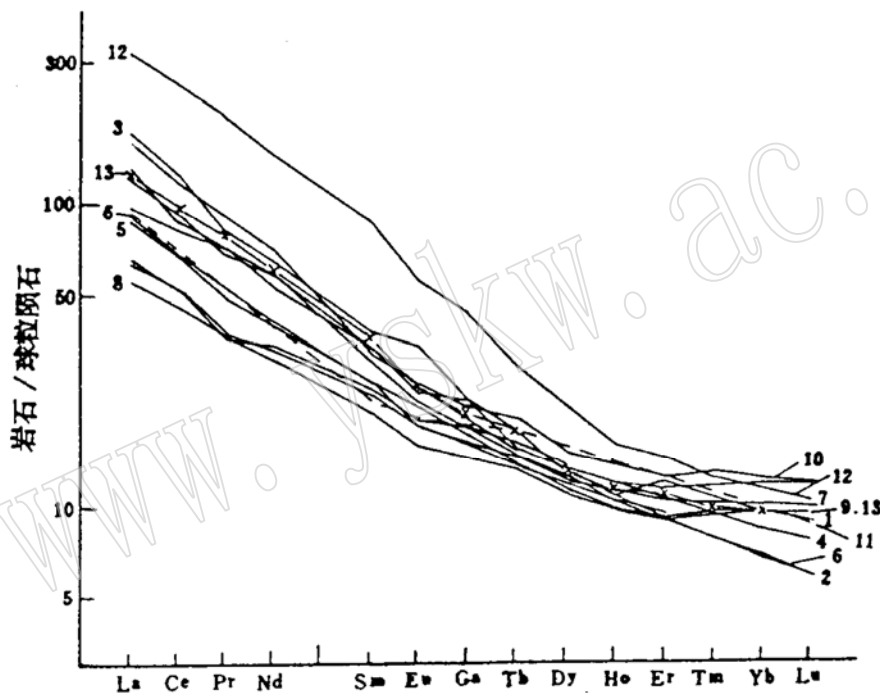


图 4 宁芜地区中生代岩浆岩 REE 配分型式图

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of Mesozoic magmatic rocks from Nanjing - Wuhu area
编号含意同表 4

总的看来,REE 丰度比较高, $\delta \text{Eu} = 0.9 \pm$ 。在图 4 中,所有样品的 REE 配分曲线均表现出一致的型式,说明不但有一致的来源,而且有相似的演化程度。幔源岩石大都表现为水平的,或左倾的 REE 配分型式。右倾的配分型式往往是岩浆演化的结果。像石榴石、橄榄石、斜方辉石和单斜辉石等 LREE 分配系数低的矿物的分离结晶可以形成 REE 配分型式右倾型的岩浆岩。本区基性—中基性岩所具有的右倾型 REE 配分型式,很可能与深部镁铁矿物的结晶分异有关,因为基性岩中很少或没有橄榄石与斜方辉石。原始岩浆富碱也可能是一个重要的原因,许多大陆碱性玄武岩和橄榄安粗岩系玄武岩,就有右倾的 REE 配分型式^[13]。本区基性岩的 REE 配分型式与它们一致,而与洋盆、弧后盆地和岛弧拉斑玄武岩明

表1 宁芜地区岩浆岩REE丰度
Table 1 REE abundance of magmatic rocks from Nanjing - Wuhu area

序号	岩石	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣRRE	δEu
1	蒋庙辉长岩	37.92	76.29	8.32	34.04	6.52	1.74	5.67	0.72	4.19	0.76	2.46		1.93	0.29	1.81	0.86
2		*122 41.00	94.4 71.47	68.2	56.7 35.10	33.4 5.82	23.7 1.61	21.9	15.2 0.67	13.0	10.6	11.7		9.2 1.36	8.7 0.19		
3	阳湖塘辉长岩	*132 53.76	88.4 102.0		58.5 38.92	29.8 7.31	21.9 2.47		14.1	3.85	0.73	1.89	0.30	1.92	0.29	2.30	0.91
4		*173.4 49.77	126.3 95.36	82.6	64.9 41.66	37.5 6.75	33.6 2.34	21.8	17.1 0.70	12.0	10.2	9.0	9.3	9.2 1.70	8.7 0.25		
5	梅山辉长闪长玢岩	*160 26.91	118 53.16		69.4 23.27	34.6 4.96	31.8 1.33		14.77					8.1	7.5		0.86
6		*86.8 28.86	65.8 54.81	47.7	38.8 24.35	25.4 4.91	18.1 1.33	16.6	13.3 0.64	10.8	9.5	8.8	0.30	1.89 1.39	8.7 0.19	129	
7	姑山辉长岩	*92.5 19.48	67.8 41.00	5.82	40.6 19.32	25.2 4.44	18.1 1.34	13.1	0.63	3.47	0.68	1.85	0.30	6.65	5.7		0.94
8	姑山辉长闪长岩	*62.8 16.85	50.7 36.69	37.2	32.2 19.62	22.8 4.65	18.2 1.38	15.9	13.9	11.8	10.7	10.0	0.32	2.06	0.31	104	
9	凹山辉长闪长玢岩	*54.4 20.14	45.4 40.69	35.5	32.7 18.03	23.8 3.85	18.8 1.13	17.8	15.4	13.1	11.7	11.2	0.37	2.40	0.37	99.40	0.90
10	螺蚌山玄武岩	*65.0 30.34	50.4 66.14	35.3	30.0 31.30	19.7 6.34	15.4 1.89	14.0	12.7	10.4	9.3	8.7	0.29	1.90	0.29	101	
11	龙王山角闪粗安岩	*97.9 28.84	81.9 56.05	69.8	52.2 23.29	32.5 4.27	25.7 1.39	21.6	19.0	14.6	13.1	12.0	0.41	2.47	0.37	162	0.95
12	娘娘山响岩质熔结凝灰岩	*93.0 99.62	69.4 206.3		38.8 88.27	21.9 16.81	18.9 4.01		17.3					2.01	0.28		
13	双庙橄辉岩玄武岩	*321 38.91	255 78.94	198	147 35.97	86.2 6.95	54.6 1.83	42.9	28.5	20.9	15.5	14.0	0.39	2.32	0.34	479	0.85
Boymton 球粒陨石值		*126 0.310	97.6 0.808	79 0.122	60 0.600	35.6 0.195	24.9 0.0735	19.8	17.1	12.2	10.9	10.5	9.6	9.1	9.0		

1. 据[14]: 2—13 本文; * 球粒陨石标准化值(据[15])。REE由湖北省地质实验研究所用 ICP—AES 法测定, 误差 3% ±, 其中 2, 4, 6, 11 号样品由成都地质学院三系核分析实验室用中子活化法测定, 误差 3%—5%。

表2 宁芜地区岩浆岩 Nd、Sr 同位素数据
Table 5 Nd and Sr isotopic of the magmatic rocks from Nanjing - Wuhu area

序号	样号	岩石	年龄 ($\times 10^6$)	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}$	$\frac{^{143}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}$	I_{Nd}	ϵ_{Nd}	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$\frac{\text{Rb}}{\text{Sr}}$	$\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}$	$\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}$	I_{Sr}	ϵ_{Sr}
1	AC-10	蒋庙碱长辉长岩	125	4.12	20.99	0.196	0.1187	0.512644 $\pm$ 20	0.512547	118.7	883	0.134	0.3874	0.70534 $\pm$ 1	0.70465	4.2
2	AC-22	阳湖塘碱长辉长岩	125	7.96	44.39	0.179	0.1084	0.512633 $\pm$ 20	0.512544	149.1	1151	0.130	0.3735	0.70596 $\pm$ 9	0.7053	13.5
3	AC-23	姑山碱长辉长岩	129	2.84	12.66	0.224	0.1356	0.512193 $\pm$ 9	0.512079	58.13	774	0.075	0.2164	0.70696 $\pm$ 4	0.7065	30.6
4	MA-1	梅山辉长闪长玢岩	123	4.10	19.08	0.215	0.1300	0.512440 $\pm$ 39	0.512335	116.6	609	0.192	0.5524	0.70754 $\pm$ 1	0.7066	31.9
5	No.2	姑山辉长闪长岩	125	2.50	9.58	0.261	0.1576	0.512311 $\pm$ 17	0.512182	60.56	519	0.117	0.3363	0.70711 $\pm$ 6	0.7065	30.5
6		凹山辉长闪长玢岩	120	6.54	34.50	0.190	0.1146	0.512195 $\pm$ 6	0.512105	123.3	685	0.180	0.5023	0.708624 $\pm$ 28	0.7077	48
7	AC-6	霍里岭长花岗岩	123	4.09	23.79	0.172	0.1039	0.512043 $\pm$ 26	0.511959	241.8	197	1.227	3.5476	0.71273 $\pm$ 3	0.7065	30.5
8	AC-64	麒麟山玄武岩	116	6.06	30.21	0.201	0.1213	0.512216 $\pm$ 30	0.512124	24.98	1169	0.021	0.0165	0.70682 $\pm$ 2	0.7067	
9	AC-220	龙王山粗安岩	126	4.462	23.74	0.188	0.1136	0.512478 $\pm$ 11	0.512384	103.8	216	0.481	1.3872	0.709865 $\pm$ 39	0.7074	43.3
10	AC-224	娘娘山响岩质凝灰岩	105	11.79	61.63	0.191	0.1156	0.512414 $\pm$ 6	0.512335	209.5	304	0.689	1.9878	0.708690 $\pm$ 52	0.7057	18.8
11		洞阳花岗闪长岩	120							134	451	0.297	0.860	0.70777	0.7063	
12		凹山辉长闪长玢岩	120							75	601	0.125	0.361	0.70622	0.7056	
13		娘娘山响岩质凝灰岩	105							154	641	0.240	0.696	0.70723	0.7062	
14		大王山安山岩	120							75	756	0.100	0.287	0.70603	0.7055	
15		釜山碱性玄武岩	53	8.57	44.16	0.194	0.1173	0.512748	0.512707	17.8	1196	0.015	0.0431	0.70468	0.70465	

1—5, 7—10 本文; 11—14 据 [15]; 6 董树文提供; 15 据 [16];
年龄指岩体和火山岩组的同位素年龄; 1—3, 7 为 Rb-Sr 全岩矿物等时线(本文); 4—6, 9 为 K-Ar 全岩, 据 [1]; 8, 14 为 Ar-Ar 法, 黑云母, 据 [9]; 10—13 为 Rb-Sr 全岩等时线, 据 [15];
15 为 K-Ar, 全岩, 据 [16]
注: Sr 同位素分析: 1—8 由宜昌地质矿产研究所李志昌、蔡红等完成, 9—10 由中国科技大学陈江峰完成。

显不同。因此, 稀土元素资料也支持宁芜地区岩浆岩的原始岩浆为大陆碱性玄武岩浆的认识。

宁芜地区侵入岩与火山岩有相同的 δEu 值和 REE 配分型式, 显示出它们的同源性与相关性。

只有娘娘山组火山岩的 REE 配分型式倾斜变陡, 且丰度增高, 表明它经历了高度结晶分异的演化过程。

3 同位素组成特点

宁芜地区岩浆岩的 Nd、Sr、Pb 同位素组成列于表 2 和表 3。本区 Nd、Sr、Pb 同位素组成的特点是: ϵ_{Nd} 较高, 为 +1.4—-7.7; I_{Sr} 较低, 为 0.70465—0.7077。 ϵ_{Nd} 变化大而 I_{Sr} 变化小, 因而在 $\epsilon_{\text{Nd}}-I_{\text{Sr}}$ 图上呈陡倾斜排列(图 5)。南京蒋庙辉长岩和马鞍山阳湖塘辉长岩 ϵ_{Nd} 最高和 I_{Sr} 最低, 与含地幔岩石包体的当涂釜山碱性玄武岩有十分相似的 ϵ_{Nd} 和 I_{Sr} 值, 在图 5 中分布在一起, 表明它们可能有共同的源区。

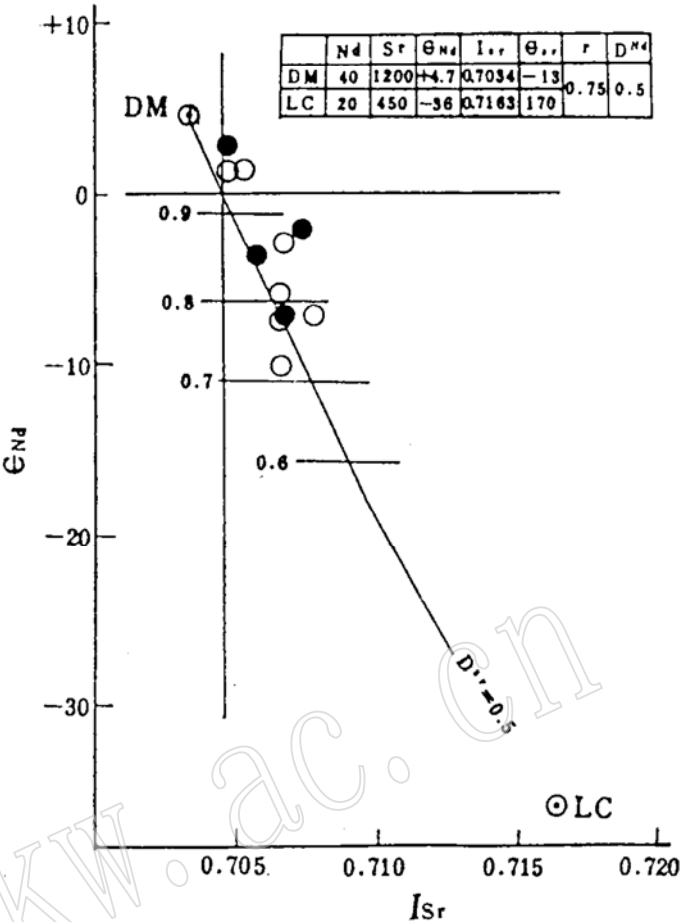


图 5 宁芜地区岩浆岩 $\epsilon_{\text{Nd}}-I_{\text{Sr}}$ 图

Fig. 5 $\epsilon_{\text{Nd}}-I_{\text{Sr}}$ diagram for magmatic rocks from Nanjing - Wuhu area
○—侵入岩; ●—火山岩

表 3 宁芜地区岩浆岩铅同位素数据

Table 3 Pb isotopic data of mgmatic rocks from Nanjing - Wuhu area

序号	测定对象	岩 石	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	^{204}Pb
1	钠长石	钟九钠长闪长岩	18.268 ± 0.051	15.590 ± 0.054	38.264 ± 0.061	1.367
2	斜长石	凹山辉长闪长岩	18.375 ± 0.049	15.589 ± 0.053	38.371 ± 0.053	1.363
3	钠长石	陶村钠长岩	18.335 ± 0.067	15.630 ± 0.068	38.543 ± 0.070	1.360
4	斜长石	蒋庙辉长岩	18.592 ± 0.047	15.591 ± 0.051	38.467 ± 0.050	1.357
5	钾长石	霍里二长花岗岩	18.388 ± 0.007	15.520 ± 0.012	38.270 ± 0.007	1.366
6	斜长石	阳湖塘辉长岩	18.073 ± 0.012	15.473 ± 0.012	37.951 ± 0.011	1.379
7	斜长石	蒋庙辉长岩	18.473 ± 0.013	15.528 ± 0.013	38.258 ± 0.013	1.366
8	全岩	蝌蚪山玄武岩	18.062 ± 0.028	15.439 ± 0.026	37.862 ± 0.024	1.381
9	斜长石	姑山辉长岩	18.83 ± 0.01	15.74 ± 0.01	38.87 ± 0.02	
10	全岩	华南中生代地幔	18.290 ± 0.218	15.569 ± 0.075	38.454 ± 0.278	
11	全岩	女山二辉橄辉岩	18.264	15.612	38.547	

1—9 本文; 1—8 黄斌测试; 9 宜昌地矿所测试; 10 据 [17], 11 据 [18]。

宁芜地区岩浆岩的 Pb 同位素组成为: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别在 18.30 和 15.60 左右, 在 Zartman 的铅构造演化图上(图 6), 其投影点与各构造演化曲线高度相交, 主要集中在地幔和造山带之间。地幔的实际位置较高(图 6 的 H 和 N), 投影点主要分布在地幔附

近并向下地壳方向延伸,显示出以地幔铅为主并受到下地壳铅的污染。

4 成因讨论

宁芜地区岩浆岩的原始岩浆估计为幔源高钾碱性玄武岩浆,本区基性岩 $\text{SiO}_2 = 47.80\% - 52.50\%$, $\text{K}_2\text{O} = 1.20\% - 3.10\%$, $> 1.50\%$ 者达 85%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.38 - 0.80$, 70% 高出 0.50, 没有一个样品 $\text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O} > 2\%$, 在 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图上(图 2)投入高钾岩系和橄榄安粗岩系,高钾是明显的。在做过岩石化学分析的 30 个基性岩样品中,经计算均不出现标准矿物石英,但有 70% 的样品出现标准矿物霞石,在图 3 均投入碱性玄武岩区。高 Sr 也是大陆碱性玄武岩和金伯利岩的特征。本区辉长岩和玄武岩含 Sr 分别为 $900\mu\text{g/g} \pm$ 和 $1100\mu\text{g/g} \pm$ 。

宁芜地区基性岩在 $\text{La}/\text{Sm} - \text{La}$ 图上^[19]投影在一条直线附近,线性相关系数 $R = 0.984$,斜率 $m = 0.0734$,初始值 $I_{\text{La}/\text{Sm}} = 2.816$,与邻区第三纪下方山组大陆碱性玄武岩投影点所构成的直线基本重合,说明它们的性质相同,有共同的源区。因而,本区岩浆岩的原始岩浆可能为大陆高钾碱性玄武岩浆。

作为宁芜岩浆岩基性端员的蒋庙辉长岩和阳湖塘辉长岩,虽有污染的痕迹,但 ϵ_{Nd} 仍为正值,且 I_{Sr} 很低,说明其原始岩浆起源于亏损地幔。上述两个辉长岩富集 LREE 和大离子亲石元素。这种矛盾现象说明亏损地幔在近期(岩浆形成之前)发生过交代作用,根据 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ —年龄图上亏损地幔演化线与计算的辉长岩演化线的交点估计,地幔交代作用的上限,按蒋庙岩体为 300Ma,按阳湖塘岩体为 350Ma,比较接近。

下扬子地区是早古生代以来长期发育的凹陷区,沉降中心由两侧逐步向沿江地带迁移,自 $T_2 - K_1$ 收缩到沿江狭长地带,并由凹陷转变为断陷火山盆地^[7]。根据盆地的演化规律,地表的长期凹陷经常对应深部地幔的缓慢隆起,有利于包括碱质在内的地幔热流从地幔深部上升,向顶部富集,产生地幔交代作用。交代作用会降低岩石圈地幔的熔点,使之软化上涌并部分熔融,产生对流。地幔对流产生的引张作用使地壳变薄并发生断陷,导致早白垩世强烈的岩浆活动以及 Cu、Au、Fe、S 等矿床的形成。

碱性玄武岩浆通过结晶分异和同化混染形成中基性的碱性火山岩和侵入岩,如上述。被同化的围岩可能以太古代麻粒岩相下地壳酸性组份为主,上地壳物质为次。主要依据是:在 $\epsilon_{\text{Nd}} - I_{\text{Sr}}$ 图上,样品投影点作陡倾斜排列,指向古老的下地壳(图 5),只是由于混染不强,这种陡倾斜的排列延伸不长,但其演化趋势比较明显,而且大体上沿着模拟的亏损地幔与太古代麻粒岩相下地壳^[20]的 AFC 混合曲线分布。在铅同位素比值图上(图 6),与下地壳的混染虽不如图 5 明显,但也有类似的趋势,大部分样品集中在华南中生代地幔和安徽女山

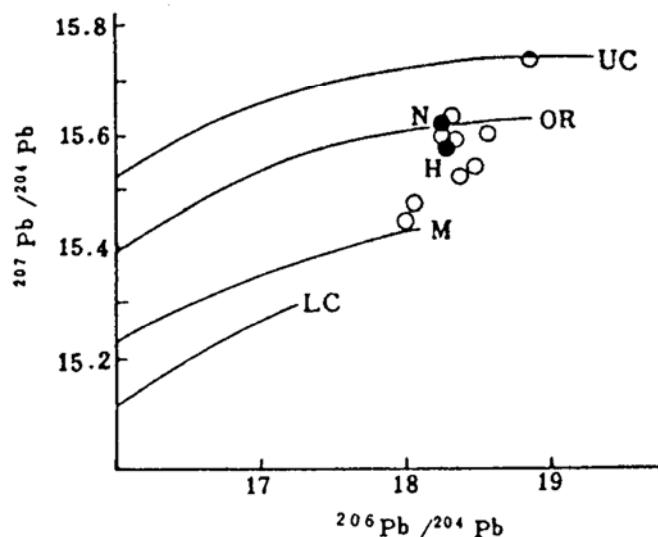


图 6 宁芜地区岩浆岩长石

$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图

Fig 6 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram for feldspar of magmatic rocks from Nanjing - Wuhu area
○—岩浆岩;●—地幔;H—华南中生代地幔^[17];N—安徽女山新生代地幔^[18]

新生代地幔附近并向下地壳方向延伸。蝌蚪山玄武岩具有最低的铅同位素比值,其 Rb 的丰度和 ϵ_{Nd} 也很低,显示受到的下地壳污染最强。阳湖塘辉长岩 ϵ_{Nd} 为正值,高 Rb(与高 K 有关)而低 I_{Sr} , 比较接近原始岩浆,说明演化程度低,但 Pb 同位素较低,似在较低的 μ 值环境中演化的,也可理解为与下地壳的污染有关,像山东临朐碱性玄武岩那样^[21]。姑山辉长岩具有很低的 ϵ_{Nd} 、Rb 和 I_{Sr} , 显示受到下地壳的污染较强,而 Pb 同位素比值则显示受到上地壳的强烈污染。本区岩浆岩 Pb 同位素组成比较复杂,加上它与 Nd、Sr 同位素组成的复杂关系,可能预示比较复杂的过程,虽可能以二元混合为主,有些岩石可能具有多源的物质来源。

我们认为,上述幔源岩浆同化地壳岩石并不是简单二元混合,而是以分离结晶为主的 AFC 混合,即在岩浆演化过程中同化混染与结晶分异同时发生(Assimilation with Fractional Crystallization)。

主元素比值—同位素比值图和 I_{Sr} — $1/\text{Sr}$ 图能有效地区别结晶分异、简单二元混合和 AFC 混合^[22]。单纯的结晶分异, ϵ_{Nd} 或 I_{Sr} 基本保持不变;简单二元混合,主元素比值与 ϵ_{Nd} 或 I_{Sr} 协变,或 I_{Sr} 与 $1/\text{Sr}$ 协变,呈良好的线性关系;投影点分散,则为 AFC 混合。见图 7 和图 8,

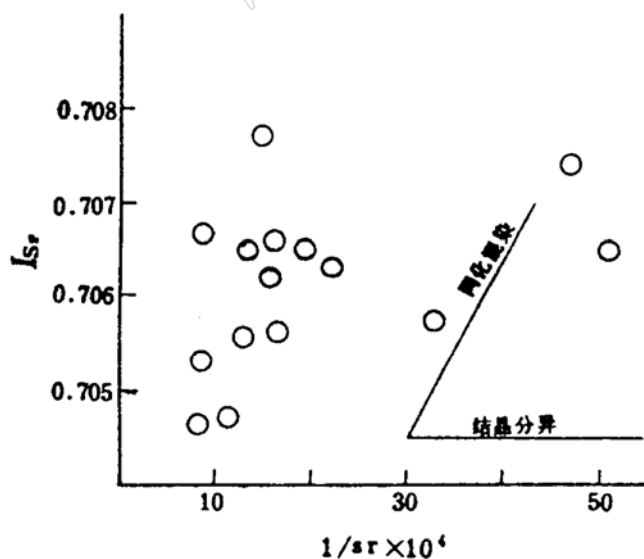


图 8 宁芜地区岩浆岩 I_{Sr} — $1/\text{Sr}$ 图

Fig. 8 I_{Sr} — $1/\text{Sr}$ diagram for magmatic rocks from Nanjing—Wuhu area

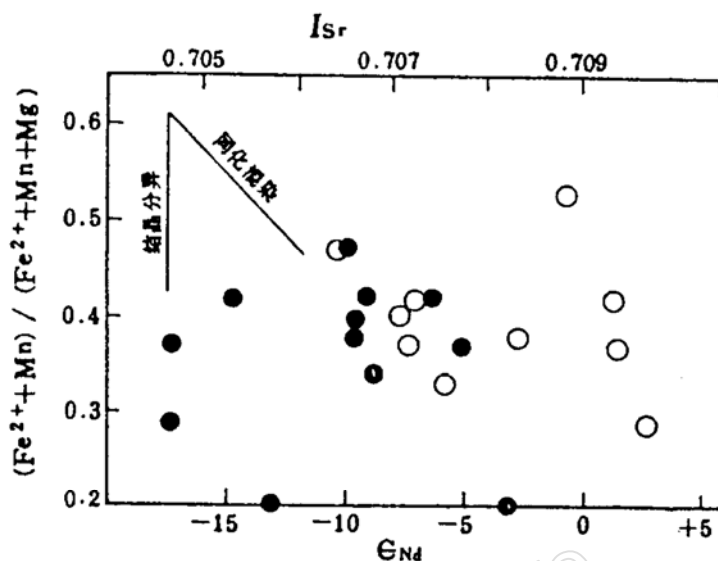


图 7 宁芜地区岩浆岩 $((\text{Fe}^{2+}+\text{Mn})/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mn}+\text{Mg})-\epsilon_{\text{Nd}})$ — I_{Sr} 图

Fig. 7 $((\text{Fe}^{2+}+\text{Mn})/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mn}+\text{Mg})-\epsilon_{\text{Nd}})$ — I_{Sr} diagram for magmatic rocks from Nanjing—Wuhu area
啊— I_{Sr} ; 啊— ϵ_{Nd}

宁芜地区岩浆岩的投影点分散,为 AFC 混合。AFC 混合的模拟计算表明,地壳物质的混染量不大,除霍里花岗岩达到 30% 外,其它岩石均在 5%—25% 之间(图 5),说明分离结晶仍然是岩浆演化的主要方式,这可能与岩浆在深处停留不久,就上升到地壳浅部有关。

宁芜地区侵入岩和喷出岩,大都具有似斑状或斑状结构,从岩石结构上看,岩浆结晶至少经历了两个阶段。早阶段为基性矿物的晶出阶段,为呈斑晶出现的中—拉长石和透辉石—普通辉石(可能还有已经分离出去的橄榄石和斜方辉石等);晚阶段为碱性阶段,主要是岩浆最后定位时,钠更长石等的快速结晶,形成基质。许多自形粒状磁铁矿分布在辉石(有时在斜长石)中,说明结晶时的氧逸度较高,抑制了铁不能大部进入暗色矿物,形成独立的铁相(或铁

浆),为后来形成铁矿床提供了条件。高氧逸度与岩浆富碱有关,在“碱-三价铁效应”^[23]作用下,部分铁离子被氧化成高价,与低价铁结合成为磁铁矿,使铁不能大量进入暗色矿物,导致暗色矿物贫铁。

低硅富钠闪长岩类是铁矿的成矿母岩,已获公认。铁与钠相关,也已多次被认证。但是这种低硅富钠富铁岩浆的形成机制,并未得到充分的说明。与前人的看法不同,笔者认为低硅富钠闪长岩类并不是一种独立的岩浆产物,而是岩浆分异形成的。

宁芜地区成矿岩体辉长闪长玢岩—辉长闪长岩主要超浅成和次火山岩与火山岩为同源产物,地质证据充分,已有共同的认识^[1,24]。但是侵入岩与火山岩在化学组成上却存在着明显的差异:侵入岩低硅富钠,铁矿化发育;火山岩相对高硅高钾低钙镁,铜金矿化较普遍。这种差异不是两个独立岩浆体系之间的差异,两者的连续演变关系在图1,图3—图5表现得比较清楚。十分明显,这种差别表现出一种互补性,其中 K_2O 与 Na_2O 的互补性最为明显,在图9,侵入岩与火山岩的投影点连续递变分布,两者

呈反相关,侵入岩的 Na_2O/K_2O 比值高于1.4,火山岩大都低于1.4。虽有上述变化,总碱度变化不大且较高, $\sigma = 4.4-4.7$ 。如将龙王山组和大王山组火山岩与美国 Absaroka 橄榄安粗岩系火山岩^[25]相比,其化学成份相似,但全碱和钾的含量更高;如果将宁芜火山岩与侵入岩的化学成分做算术平均,仍然与 Absaroka 火山岩相当,唯 σ 值仍高。因此,总的来讲,宁芜地区岩浆岩的原始岩浆可能是比美国橄榄安粗岩系的原始岩浆更高钾富碱的岩浆——大陆碱性玄武岩浆。

由上述,侵入岩与火山岩可能源于一个共同的岩浆房,该岩浆房可能是原始岩浆在地壳深处短时间演化后上升到上地壳的岩浆房,由于围岩较冷,同化作用较弱。该岩浆房有一个相对平静的时期,岩浆逐渐分异,伴随着结晶分离,上部偏酸性,相对富硅富钾,下部偏基性,相对低硅富钠。当在应力作用下岩浆上升时,岩浆房上部的岩浆首先喷出形成火山岩,之后,应力下降,下部岩浆部分侵入成侵入体,多形成于大王山组晚期。

宁芜地区岩浆房的分异作用,不仅有岩石成因意义,更有重要的成矿意义。正是由于岩浆房的分异,才形成了低硅富钠的闪长岩类及有关的铁矿床;而 Cu、Au 则与 K_2O 同步富集在岩浆房上部,随岩浆喷出地表,趋于分散,因而形成有工业价值的矿床不多。这种分异可

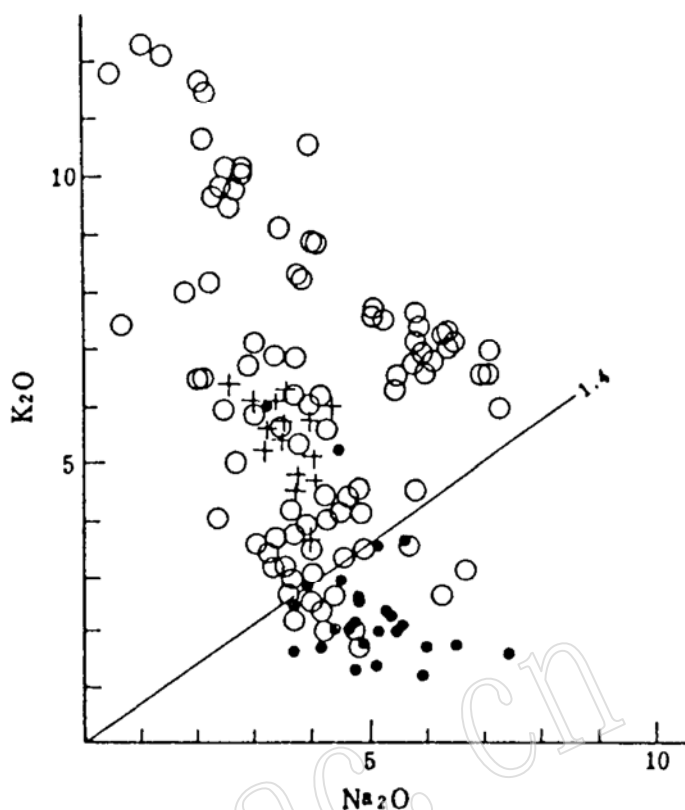


图9 宁芜地区中生代成矿岩体、火山岩和花岗岩的 K_2O-Na_2O 相关图

Fig. 9 K_2O-Na_2O correlogram of Mesozoic ore-forming rock bodies, volcanic rocks and granite in Nanjing—Wuhu area

●—成矿岩体; ○—火山岩; +—花岗岩; 1.4— Na_2O/K_2O 比值; K_2O 与 Na_2O 均经去掉挥发性组份后做为100%重新计算

能比较彻底,因而与侵入岩有关的铁矿床中,几乎没有 Cu、Au 矿体形成,后者的找矿重点应该放在火山岩区,尤其是富钾的火山岩中。

娘娘山组火山岩含大量副长石等碱性矿物,以各种响岩为主,已属碱性岩^[6]。但是,它可能不是一个独立的岩系。因为没有证据说明它与龙王山组和大王山组有不同的起源。在岩石化学组成上,它与龙王山组大王山组连续变化,共同组成一个完整的演变系列,主要差别是更富钾和全碱(图1、图2);在同位素组成上也与龙王山组大王山组以及侵入岩一致,共同排列在图5的 AFC 混合曲线附近;稀土元素丰度虽有一定差别,但轻稀土更加富集与岩石高钾富碱一致,说明演化程度更高,而不是配分型式上的本质差异。娘娘山组是宁芜地区火山活动最晚阶段的产物,这时火山活动已收缩到一个点上,能量已经减弱,必须有较长的时间才能聚集起足够的爆发力,因而有充分的分异条件,暗色矿物及斜长石大量分离出去,导致高钾富碱火山岩的形成。

娘娘山组火山岩有较高的 $\epsilon_{Nd}(-3.3)$ 和较低的 $I_{Sr}(0.7057-0.7062)$, 说明幔源岩浆受到的地壳污染较少,很可能是碱性玄武岩浆在下地壳短暂停留后直接侵入上地壳浅部,由于围岩冷,同化作用弱,在近封闭的条件下,发生结晶分异,形成化学梯度,愈向上愈富钾、铷等元素,愈向下愈富 Ca、Sr、Ba 等元素。在构造作用下,岩浆喷发时,岩浆房上部岩浆首先喷出,形成第一亚旋迴高钾的以假白榴石响岩为主的火山岩;然后,较下部岩浆喷出,形成第二亚旋迴相对富钠的以蓝方石响岩为主的火山岩。由于分异较充分,喷出的岩浆总体上是岩浆房上部的部分,所以从早到晚形成的火山岩,均以富钾($K_2O/Na_2O > 1$)、LREE 和其它不相容元素为特征,总体上是一种高钾碱性火山岩。

参 考 文 献

- 1 宁芜研究项目编写小组. 宁芜玢岩铁矿. 北京:地质出版社,1978.
- 2 邱家骧,王人镜,王方正等. 长江下游中生代火山岩岩石化学及成因分析. 地球科学,1981,(1):170—181.
- 3 吴利仁,齐进英. 长江下游中生代火山岩. 岩石学研究第五辑. 北京:科学出版社,1985,1—9.
- 4 薛怀民,陶奎元. 宁芜地区中生代火山岩系列的新认识及其地质意义. 江苏地质,1989,(4):9—14.
- 5 王德滋,周金城,邱检生. 橄榄安粗岩系的研究现状. 南京大学学报(地球科学),1991,(4):321—328.
- 6 陶奎元,薛怀民. 论南京娘娘山碱性岩岩浆梯度及其成因机制. 岩石矿物学杂志,1989,8(4):289—299.
- 7 常印佛,刘湘培,吴言昌. 长江中下游铁铜成矿带. 北京:地质出版社,1991.
- 8 徐祥,邢凤鸣. 宁芜地区三个辉长岩的全岩和矿物 Rb—Sr 等时线年龄. 地质科学,1994,29(3):309—312.
- 9 胡华光,胡世玲,王松山等. 根据同位素年龄讨论侏罗、白垩纪火山岩地层时代. 地质学报,1982,56(4):315—323.
- 10 Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali—silica diagram. J. Petrol. 1986,27:745—750.
- 11 Peccerillo A and Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc—alkaline volcanic rocks from kastamonu area, northern Turkey. Contrib. Mineral. Petrol. 1976. 58:63—81.
- 12 Morrison G W. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association, Lithos, 1980,13(1):97—108.
- 13 Henderson P(ed). Rare earth element geochemistry. Elsevier Science Publishers B. V. 1984,40—68;138—158.
- 14 宁仁祖,陈根生. 宁镇地区燕山期侵入岩的稀土元素特征. 地球化学,1989,(1):52—61.
- 15 Ishihara S, Li Wenda, Sasaki A et al. Characteristics of Cretaceous magmatism and related mineralization of the Ningwu basin, Lower Yangtze area, eastern China. Bull Geol. Surv. Japan, 1986,37(5):207—231.
- 16 陈道公,杨杰东,王银喜. 苏皖鲁某些新生代火山岩的钕同位素组成及意义. 科学通报,1990,(12):925—927.

- 17 张理刚,王可法,陈振胜等.同位素地球化学研究.陈好寿主编.杭州:浙江大学出版社,1994,287—303.
- 18 叶敬仁.长江中下游铁铜多金属矿带的铅同位素研究及其大地构造与成矿学.大地构造与成矿学,1985,9(4):309—322.
- 19 邢凤鸣,徐祥.安徽沿江地区中生代岩浆岩的基本特点.岩石学报,1995,11(4)(出版中).
- 20 Faure G. Principles of isotope geology. John Wiley and sons, 1986, 229.
- 21 陈道公,周海涛,杨杰东等.鲁皖苏新生代火山岩成因及地幔源特征的同位素证据.中国上地幔特征与动力学论文集.北京:地震出版社,1990,124—131.
- 22 Foland K A, Henderson C M B and Gleason J. Petrogenesis of the magmatic complex at Mount Ascutney, Vermont, USA. I. Assimilation of crust by mafic magmas based on Sr and O isotopic and major element relationships. Contrib. Mineral. Petrol, 1985, 90: 331-345.
- 23 卡迈克尔 I S E, 特纳 F J 和费尔福根 J. 火成岩石学. 北京:地质出版社, 1982.
- 24 贵阳地球化学研究所. 宁芜铁矿形成机理. 北京:科学出版社.
- 25 Meen J K. Formation of shoshonites from calcalkaline basalt magmas: geochemical and experimental constraints from the type locality, Contrib. Miner. Petrol. 1987, 97: 333—351.

Petrological and Nd, Sr, Pb Isotopic Evidence for Genesis of Mesozoic Magmatic Rocks in Nanjing—Wuhu Area

Xing Fengming

(Anhui Institute of Geological Sciences, Hefei 230001)

Key words: Mesozoic; magmatic rock; genesis; Ningwu area

Abstract

In the Nanjing—Wuhu area Mesozoic volcanic basin there occur volcanic and intrusive rocks. Volcanic rocks are mainly basaltic trachyandesite, trachyandesite, and trachyte, with small amounts of andesite and phonolite. Characterized by high potassium and rich alkali, the volcanic rocks are defined as shoshonite. Dominated by gabbro-diorite porphyrite-gabbro-diorite, intrusive rocks are characterized by high sodium and low silicon, together with the existence of gabbro and granite. According to geological and Nd, Sr, Pb isotopic data, intrusive rocks and volcanic rocks belong to the same magmatic series formed by magmatic differentiation (mainly crystallization fractionation) in a low-degree hybridization environment when alkaline basaltic magma intruded into the upper crust after low-degree AFC mixture in the lower crust.