

娘娘山碱性火山-侵入岩特征及 成岩定量模拟*

陈上达 刘聪 陈志贵

(江苏省地质矿产局地质矿产研究所, 南京 210018)

徐德安

(江苏省地质矿产局第一地质大队, 南京 211152)

主题词 碱性火山-侵入岩系 铷锶、钐钕同位素 壳幔混合物 部分熔融

提 要 本文通过对铜井娘娘山旋回中生代火山-侵入岩系岩石化学、微量、稀土元素以及铷锶、钐钕等同位素详细研究, 认为这套岩石具高碱、硅不饱和、强烈富集不相容元素和轻稀土特征。岩石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为0.7070—0.7073, ϵ_{Nd} 值为-3.4—3.3, 利用二元混合模式计算出蓝方石响岩和霓辉正长岩源区物质成分相当41%、42%上部陆壳和59%、58%亏损地幔组成的混合物, 源区物质经6.4%、6.6%部分熔融形成初始岩浆, 表明娘娘山旋回碱性火山-侵入岩系是壳幔混合物经部分熔融后所形成的产物。

宁芜地区娘娘山旋回碱性火山-侵入岩系尽管在地表分布不广, 因其与金铜矿关系密切和成因上的特殊意义, 对这套碱性岩系的成因研究始终是本区岩石研究的关键课题之一。主要观点有: 认为该岩系是地幔分异的安山质岩浆派生演化的产物⁽¹⁻²⁾; 岩石直接来自地幔部分熔融⁽³⁾; 本区高碱特征是由于受基底碳酸盐或膏盐层的混染、地幔部分熔融、地壳混染所致⁽⁴⁾。由于缺少微量、稀土、同位素等数据, 上述论点显得依据不够充分。作者对宁芜地区不同旋回的岩石化学、微量、稀土元素、Rb-Sr、Sm-Nd同位素进行了系统测试和详细研究, 通过对源区岩石定量模拟计算表明: 宁芜地区不同火山旋回属同一岩浆源, 不同旋回火山岩系在主元素、微量、稀土元素、同位素特征上的差异是由于源区岩石经不同程度部分熔融而引起的。本文着重对娘娘山旋回火山-侵入岩系地球化学特征, 源区物质成分(壳幔混合比), 成岩过程中的部分熔融度定量模拟进行研究, 借以提供该岩系的成岩物质来源及成岩方式——一种可能的定量地球化学模型。

1 地质背景

宁芜盆地形成于晚侏罗世, 消亡于晚白垩世⁽⁵⁾。盆地内中生代火山活动形成了由龙王

本文於1991年7月收到, 1991年12月改回。

* 本文是中国国家自然科学基金委员会资助的重大项目“中国东部金矿重要类型、成矿条件、富集规律及找矿方向研究”的成果之一。

山、大王山、姑山、白头山、娘娘山五个火山喷发旋回组成的高钾钙碱性岩系、橄榄粗安岩系和碱性岩系。

娘娘山旋回碱性火山-侵入岩系分布于“盆地”核部娘娘山破火山口内(图 1)，它是宁芜盆地火山活动末期的产物，其时代为110—97.1Ma^①。破火山口呈北东向椭圆形，面积约12 km²，破火山口边界受环状断裂所控制，粗面斑岩沿断裂充填形成环状岩墙，环内因喷发塌陷呈负向构造，火山岩系自外向内依次变新。旋回内岩相顺序：下部为爆发相的粗面质岩

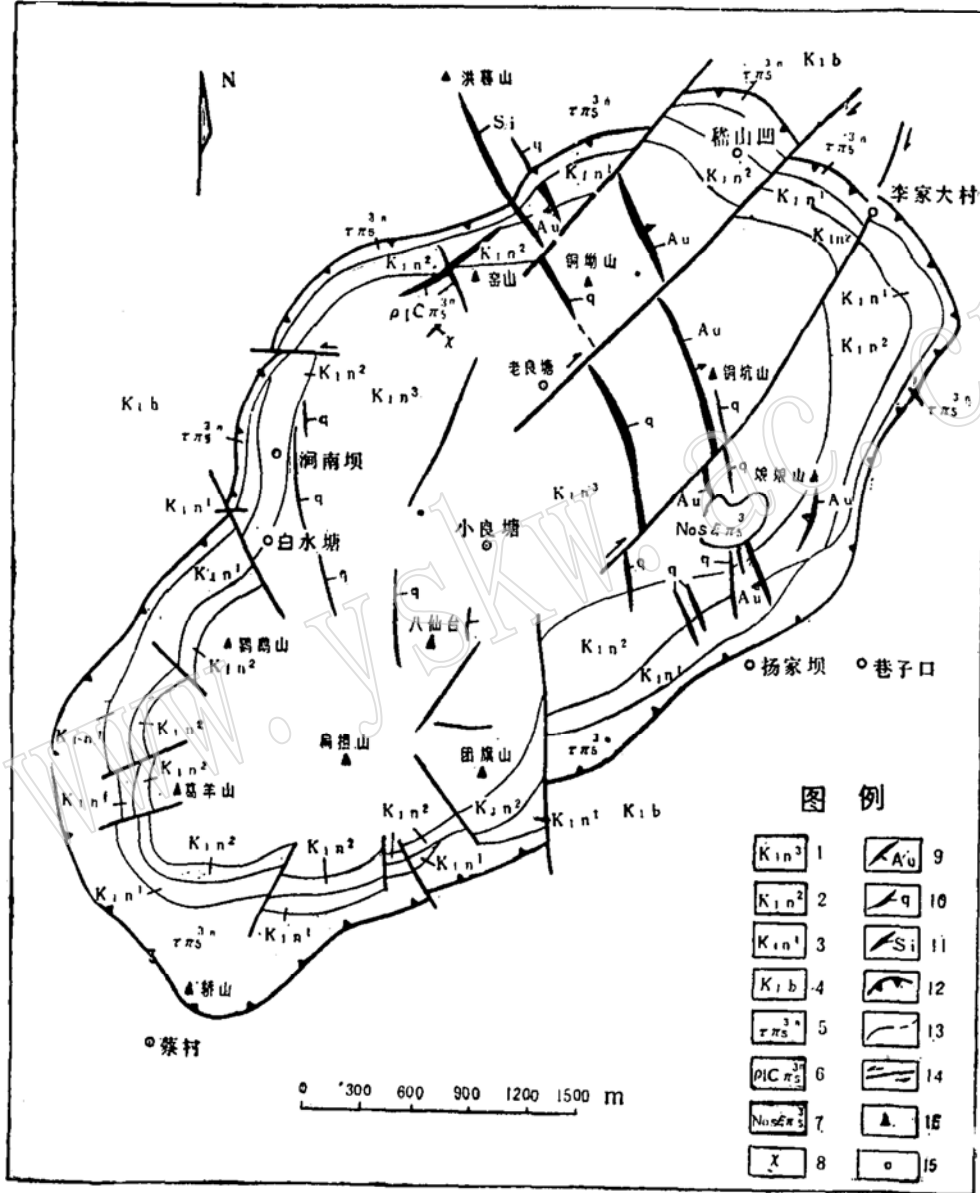


图 1 铜井娘娘山破火山口地质略图

Fig. 1 Sketch geological map of Niangniangshan caldera, Tongjing

- 1—娘娘山组上段响岩；2—娘娘山组中段高钾响岩质火山岩；3—娘娘山组下段粗面质火山岩；4—白头山组粗安岩；5—粗面斑岩（次火山岩）；6—假白榴石斑岩（次火山岩）；7—霓辉正长岩（火山颈相）；8—煌斑岩；9—金矿脉；10—石英脉（无矿）；11—硅化脉；12—破火山口边界；13—实、推测地质界线；14—平移断层（成矿后）；15—主要山峰；16—主要村庄

① 江苏省地质矿产局第一地质大队，1986，宁芜北段1/5万区域地质调查报告。

石,中部为火山灰流相的高钾响岩质岩石,上部为溢流相的蓝方石响岩质岩石;次火山-侵入岩分别为粗面斑岩、假白榴石斑岩、霓辉正长岩^①

2 主元素及微量元素地球化学特征

2.1 主元素岩石化学

岩石化学成分见表1。除高钾响岩质岩石外, $Al_2O_3/(Na_2O + K_2O + CaO)$ 的分子数比均小于1; CaO 、 MgO 含量在霓辉正长岩中较高,在CIPW标准矿物组合中均无刚玉出现。岩石里特曼指数(σ)均大于9。

表1 碱性岩系化学成分

Table 1 The chemical compositions of alkaline series (wt%)

阶段	岩石名称	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO
早	霓辉正长岩	49.16	0.85	17.12	3.24	3.67	0.11	2.88	7.46
	蓝方石响岩	59.16	0.48	18.84	1.85	1.54	0.12	0.98	2.10
中	假白榴石斑岩	55.11	0.34	20.29	3.06	0.66	0.06	1.12	2.36
	假白榴石响岩	58.12	0.30	21.98	2.06	0.38	0.06	0.50	1.38
晚	粗面斑岩	59.89	0.45	18.64	1.80	1.52	0.07	0.76	2.24
	粗面岩	59.94	0.49	18.89	1.46	1.62	0.10	0.75	2.43

阶段	岩石名称	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O ⁺	-Δ	总和
早	霓辉正长岩	2.89	6.71	0.43	3.35	2.7		100.57
	蓝方石响岩	6.00	6.65	0.13	0.09	0.60	0.34	99.30
中	假白榴石斑岩	2.31	9.64	0.13	1.79	2.24		100.65
	假白榴石响岩	2.73	9.82	0.09	1.06	1.74		100.34
晚	粗面斑岩	5.84	6.74	0.11	0.16	1.29		99.51
	粗面岩	5.87	7.07	0.12	0.01	0.59		99.35

上述特征表明娘娘山旋回碱性火山-侵入岩系属高碱、硅不饱和岩石。根据国际地科联对火山岩进行化学分类TAS图解,本旋回岩石主要为粗面质和响岩类,个别为响岩质碱玄岩。

在 K_2O-Na_2O 图中,娘娘山旋回岩石投影在钾钠系列和钾系列范围内。在相关图中可看出:第一阶段岩浆由粗面斑岩至假白榴石响岩向钾质方向演化;第二阶段岩浆由蓝方石响岩至霓辉正长岩,钠质降低并向基性方向演化。

2.2 微量元素地球化学特征

表2为娘娘山旋回碱性火山-侵入岩系微量元素分析结果。

岩石球粒陨石标准化曲线型式都十分相似,强烈富集K、Rb、U、Zr等大离子半径元素,Ba、Sr相对亏损(图2),与宁芜地区其它四个火山旋回(龙王山、大王山、姑山、白头山旋回)相比,Ba、Sr含量相对增高,和一般认为岩浆演化到晚期Ba、Sr含量降低的趋

① 同前脚注。

表2 碱性岩系微量元素丰度 (ppm)
Table 2 Trace element abundances of alkaline series

序号	样号	岩石名称	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
1	TN-06	霓辉正长岩	7.5	5730	181	5.4	1210	48800	18.9	18.9	97.9	136
2	TN-19	霓辉正长岩	6.8	5540	172	4.7	1780	49700	23.8	12.2	20	275
3	TN-14	假白榴石响岩	1.6	3160	57.6	5.0	1330	23600	5.8	7.3	30	149
4	TN-21	假白榴石斑岩	3.0	3466	66.8	11.4	600	26229	7.7	6.8	10.3	50.2
5	TN-08	蓝方石响岩	1.7	3220	57.0	3.3	940	23700	4.2	4.2	19.7	98.7
6	TN-09	熔结凝灰岩	1.0	3100	46.4	3.4	733	20500	3.1	3.1	22.1	102
7	TN-22	粗面斑岩	0.82	2956	59.6	7.3	667	20425	3.1	6.3	10.3	117

序号	样号	岩石名称	Y	Zr	Sr	K	Ba	Rb	U	Th	Ta	Nb
1	TN-06	霓辉正长岩	34.6	274	3240	51220	1940	147	5.4	14.7	0.54	24.7
2	TN-19	霓辉正长岩	32.1	160	5710	34202	1890	124	5.3	11.1	0.93	23.1
3	TN-14	假白榴石响岩	28.1	230	526	69960	1200	176	3.8	15.3	0.75	10.4
4	TN-21	假白榴石斑岩	27.3	280	1019	51386	1066	152	4.0	14.3	4.0	12.0
5	TN-08	蓝方石响岩	32.9	303	516	63506	576	152	4.5	14.4	0.49	21.1
6	TN-09	熔结凝灰岩	39.2	370	287	58691	415	184	6.0	15.9	0.49	21.6
7	TN-22	粗面斑岩	27.2	344	494	55700	910	142	5.4	16.6	4.5	15.7

势相反,说明娘娘山旋回岩浆不是由于结晶分异演化而来,显示了壳源物质的影响;过渡元素中由于Ti、Mn异常显著和Cr、Ni负异常,使曲线呈现“W”型(图3)。

2.3 稀土元素地球化学特征

岩石中稀土元素总量高(表3),显示轻稀土强烈富集的特征(图4)。具弱的负铕异常。从图4中不但可看出娘娘山旋回碱性火山-侵入岩系具有平行一致或重叠的稀土配分型式,同时也表明它们的源岩相似。

3 源区岩石幔壳组分的模拟

娘娘山旋回碱性火山-侵入岩系的铷锶、钐钕同位素测定值见表4。

根据霓辉正长岩和蓝方石响岩实测的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值及它们的年龄($T \approx 100\text{Ma}$),可计算出霓辉正长岩和蓝方石响岩T时的 I_{Sr} 值分别为0.7073和0.7070,T时的 ϵ_{Sr} 分别为41.5和37.6,T时地壳的 ϵ_{Sr} 值为320.7和319.8,T时地幔的 ϵ_{Sr} 值分别为-25.8和-25.8。该火山-侵入岩系 ϵ_{Sr} 值在地壳、地幔 ϵ_{Sr} 之间,表明属幔-壳混源型。

对于幔-壳混源型岩石可利用Faure^[6]的二元锶混合方程求它的壳-幔混合比。计算出的霓辉正长岩和蓝方石响岩地壳组分百分含量fc分别为44.8%和43%。

用表4的钐钕同位素参数计算出霓辉正长岩和蓝方石响岩T时的 ϵ_{Nd} 值分别为-3.3和-3.4,T时地壳的 ϵ_{Nd} 值皆为-13.8,T时地幔的 ϵ_{Nd} 值为9.8和9.8,亦显示了娘娘山旋回火山-侵入岩系属幔-壳混源型。

用Nd同位素二元混合模型求出的地壳重量百分数fc为38.35%和38.76%。

铷锶和钐钕两者计算的幔壳重量百分比值十分接近,故取两者的平均值,则霓辉正长岩

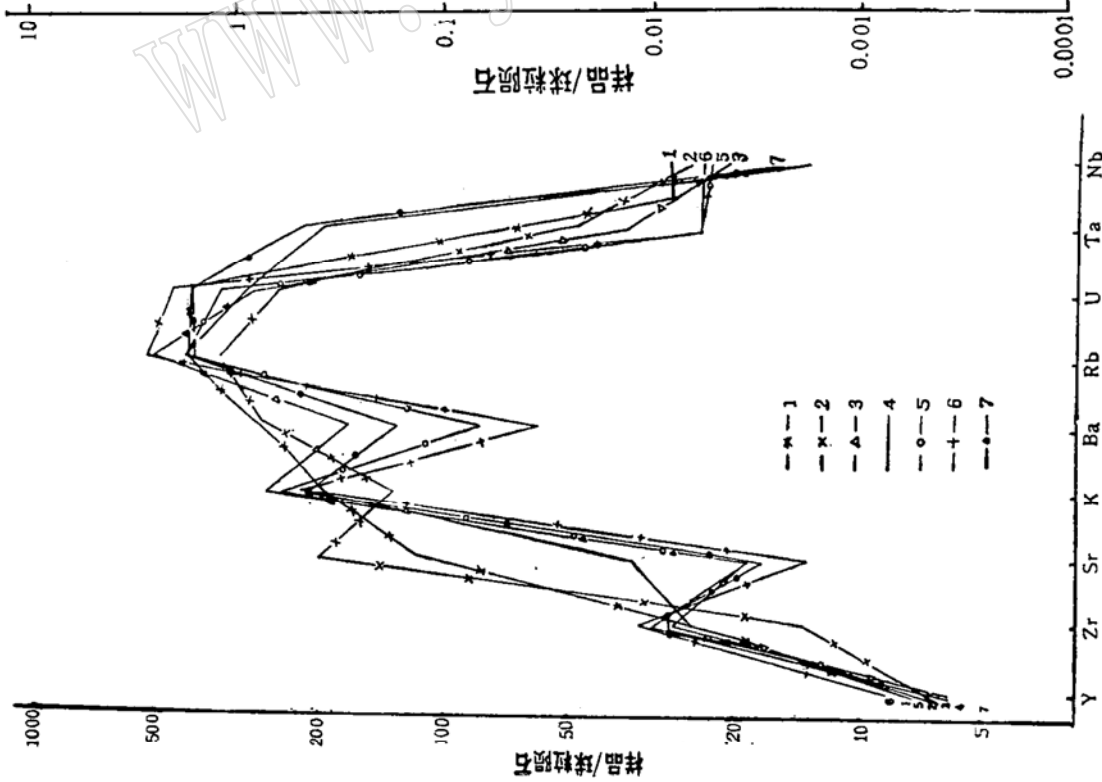


图 2 碱性岩系特征元素配分型式
 Fig. 2 Chondrite normalized characteristic element distribution patterns for alkaline series
 图表中样品序号相同

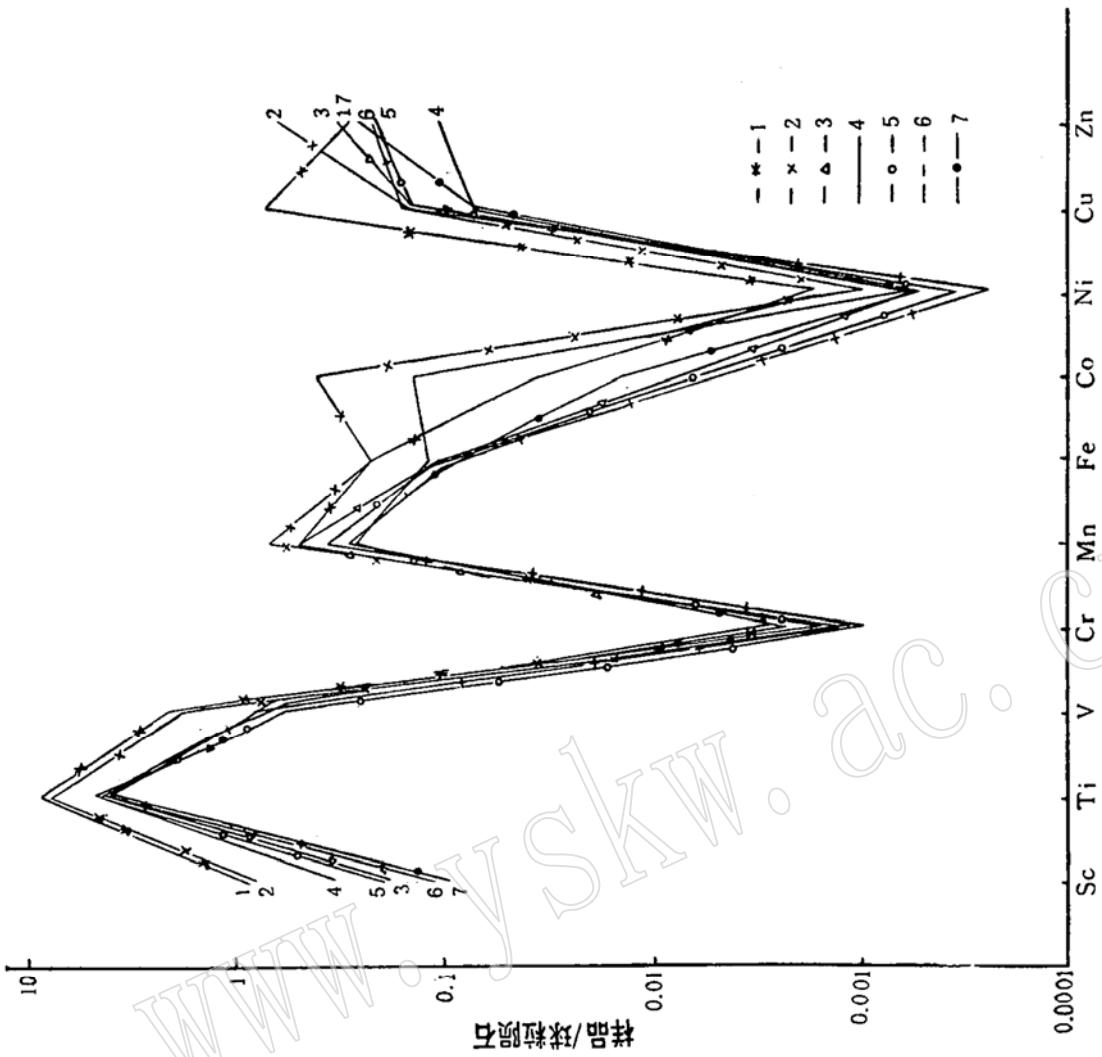


图 3 碱性岩系过渡元素配分型式
 Fig. 3 Chondrite normalized transition element distribution patterns for alkaline series
 图表中样品序号相同

表 3 碱性岩系稀土元素丰度 (ppm)
Table 3 REE abundances of alkaline series

序号	样号	岩石名称	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
1	TN-06	霓辉正长岩	100	210	26	96	21.2	5	15	2.1	8.5	1.3	3.3
2	TN-19	霓辉正长岩	103	224	26	98.4	20.3	4.9	14	1.5	7.6	1.1	3
3	TN-14	假白榴石响岩	85.7	186	22.4	85.6	17.8	4.6	12	1.2	6	1	2.7
4	TN-21	假白榴石斑岩	129	251	27.3	98.8	18.4	4.5	11.9	1.3	6.3	0.94	3
5	TN-08	蓝方石响岩	106	222	27.1	96	19	4	13.2	1.8	7.8	1.3	3.2
6	TN-09	熔结凝灰岩	126	260	31.3	111	22	4.2	15.3	1.9	9.1	1	3.9
7	TN-22	粗面斑岩	75.5	198	15.3	53.9	10.8	2.7	8.2	0.9	5.8	0.8	2.8

序号	样号	岩石名称	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	Eu/Eu* (La/Yb) _n
1	TN-06	霓辉正长岩	2.5	0.35	34.6	525.85	458.2	67.65	6.77	0.82
2	TN-19	霓辉正长岩	2.2	0.32	32.1	538.42	476.6	61.82	7.71	0.68
3	TN-14	假白榴石响岩	2	0.27	28.1	455.37	402.1	53.27	7.75	0.92
4	TN-21	假白榴石斑岩	2.1	0.3	27.3	582.14	529	53.14	9.95	0.74
5	TN-08	蓝方石响岩	2.5	0.37	32.9	541.17	474.1	67.07	7.07	0.72
6	TN-09	熔结凝灰岩	2.9	0.41	39.2	628.21	554.5	73.71	7.52	0.65
7	TN-22	粗面斑岩	2.2	0.31	27.2	404.41	356.2	48.21	7.39	0.85

表 4 端员组分和岩石样品同位素参数
Table 4 The isotopic parameters of endmembers and rocks

端员样品	年龄 (Ma)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	Rb/Sr	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr
	地壳		46.3 ^{*3}	140 ^{*3}	0.33	0.954888 ^{*3}
地幔		7.05 ^{*1}	470 ^{*1}	0.015	0.0541 ^{*1}	0.70264 ^{*1}
TN-06	97.1	151.1	3362	0.0449	0.12809	0.70749
TN-08	102.5	156.3	535.5	0.2919	0.83185	0.70842

端员样品	Sm (ppm)	Nd (ppm)	Sm/Nd	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	ε _{Sr} ^t	ε _{Nd} ^t
	地壳	4.5 ^{*2}	28 ^{*3}	0.1607	0.11376 ^{*3}	0.511877 ^{*3}	
地幔	0.34 ^{*3}	14 ^{*1}	0.0243	0.2136 ^{*1}	0.513151 ^{*1}		
TN-06	22.45	101.7	0.2207	0.1336	0.511638	41.5	-3.3
TN-08	21.06	98.56	0.2137	0.12972	0.511629	37.6	-3.4

*2—Faure (1986); *2—Taylor (1985); *3—刘昌实 (1990)。

地壳组分为42%，蓝方石响岩地壳组分为41%。这与我们所测得的霓辉正长岩δ¹⁸O为11.08‰，和蓝方石响岩δ¹⁸O为10.83‰的数据进行二元混合模式计算所得到的地壳组分十分近似，表明上述计算所得出的幔壳百分数是可靠的。

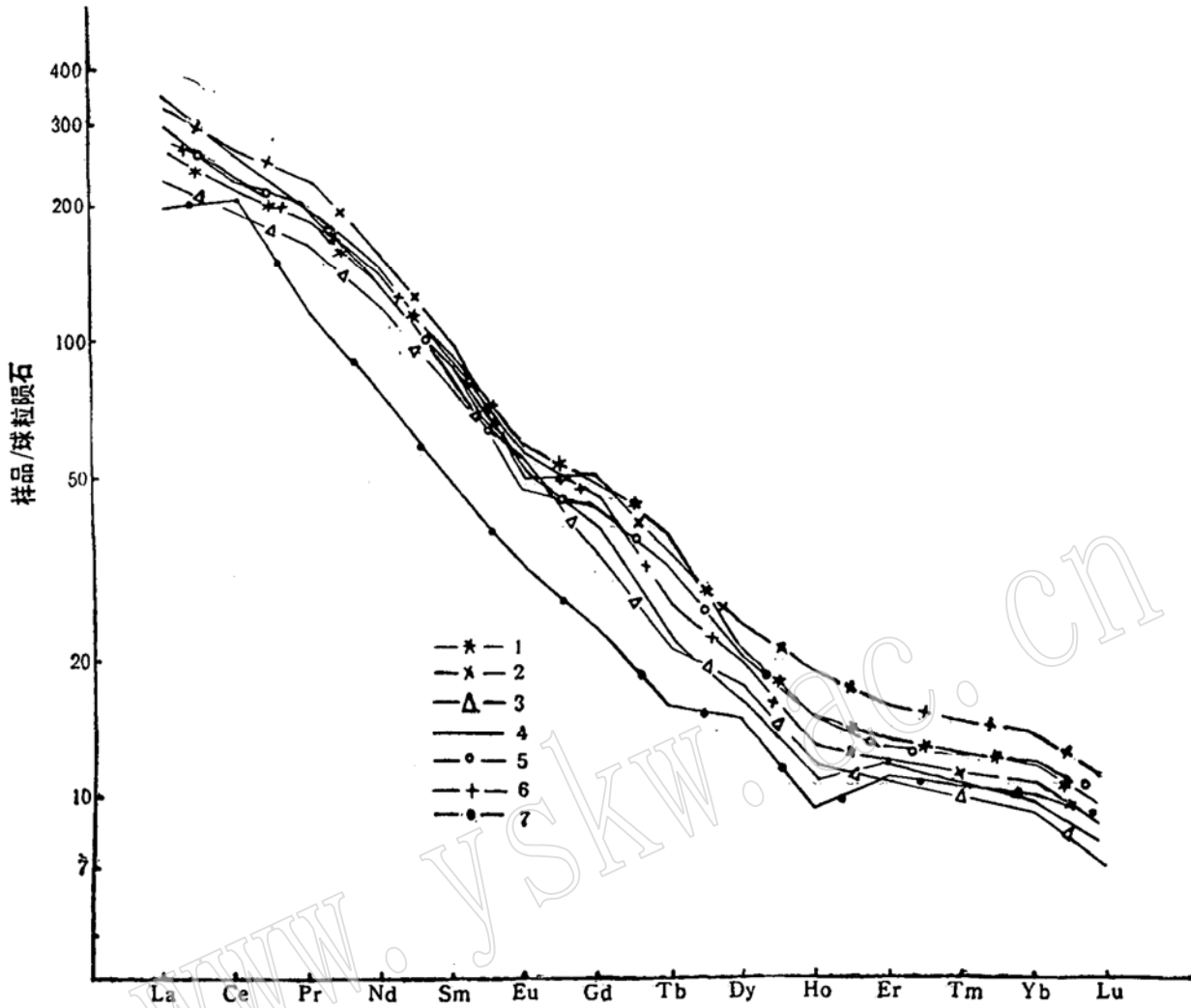


图 4 碱性岩系稀土元素配分型式

Fig. 4 Chondrite-normalized REE distribution pattern for alkaline series

图表中样品序号相同

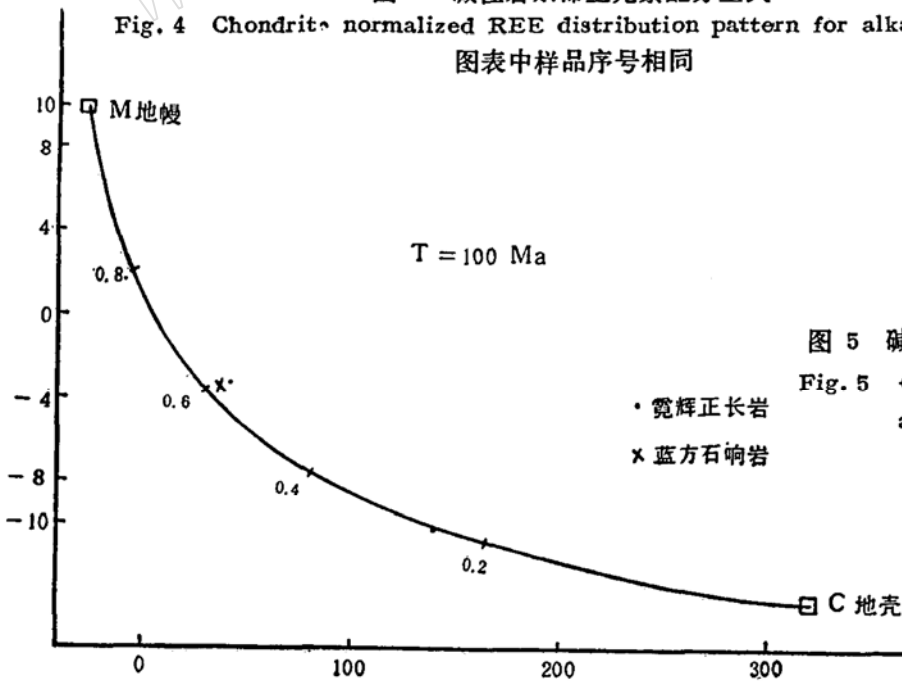


图 5 碱性岩系 $\epsilon_{Sr}-\epsilon_{Nd}$ 图解

Fig. 5 $\epsilon_{Sr}-\epsilon_{Nd}$ diagram for alkaline series

• 霓辉正长岩
x 蓝方石响岩

绘出 $T=100\text{ Ma}$ (图 5) 时的 $\epsilon_{\text{Sr}}-\epsilon_{\text{Nd}}$ 图解。该岩系两样品在图中的投影非常接近拟合的曲线, 表明所选的地幔、地壳端员组分是可靠的, 由此而计算出的幔壳比是可信的。

4 成岩过程中稀土元素熔融度的模拟

根据有关理论模型及娘娘山旋回碱性火山-侵入岩系 $1/\text{La}-1/\text{Nd}$ 和 $\text{La}/\text{Nd}-\text{La}$ 关系图 (图 6), 可认为该岩系为源区岩石经部分熔融而成的。

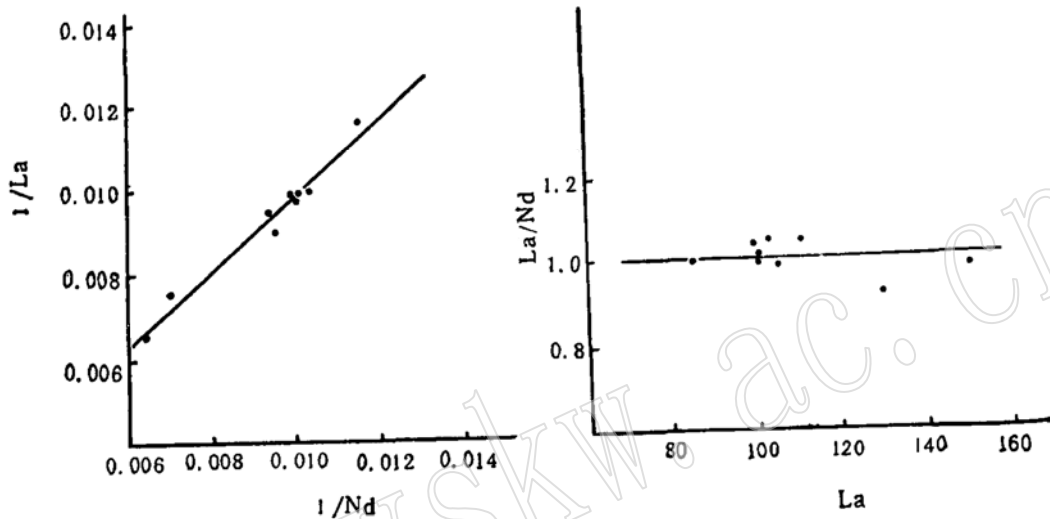


图 6 碱性岩系 $1/\text{La}-1/\text{Nd}$ 和 $\text{La}/\text{Nd}-\text{La}$ 关系图

Fig. 6 $1/\text{La}-1/\text{Nd}$ & $\text{La}/\text{Nd}-\text{La}$ diagrams of alkaline series

根据二元混合原理^[6], 任意一个元素在这种混合物中浓度可用下式表示

$$x_R = x_C \cdot f_c + x_m(1 - f_c) \quad (1)$$

据 Taylor^[9]的端员参数和计算得的幔壳比代入 (1) 式, 模拟出源区岩石化学成分 (表 5) 相当下地壳的成分, 它与把娘娘山旋回平均化学成分看作在 T 时刻由这一源区岩石部分熔融而形成的初始岩浆在化学成分上存在一定的差异, 这表明初始岩浆的形成不是由于源区岩石完全熔融, 而是经过部分熔融而形成的。

表 5 碱性岩系初始岩浆、源岩化学组分

Table 5 The chemical compositions of source rocks and primary magma of alkaline series (wt%)

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FcO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Ol	OPx	CPx	Kf	Pl
初始岩浆	TN-06	49.16	0.85	17.12	3.24	3.67	2.88	7.46	2.89	6.71	1.39	0	16.31	39.52	19.54
	TN-08	59.61	0.48	18.82	1.85	1.54	0.98	2.1	6	6.65	0.76	0	3.67	39.52	43.99
源区岩石	TN-06	56.59	0.3	8.44	2.69	3.86	21.43	3.43	1.82	1.42	0	55.51	4.8	8.35	26.06
	TN-08	56.48	0.3	8.37	2.7	3.87	21.65	3.43	1.8	1.4	0	55.91	5.02	8.35	25.78

根据部分熔融和元素分配理论, 可定量模拟部分熔融度(表6)。

表6 稀土总分配系数和部分熔融度

Table 6 The total distribution coefficients of REE and the degree of partial melting

		Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Er	Yb
TN-06	D_x	0.0554	0.0564	0.0729	0.2374	0.0971	0.1307	0.1758	0.2364
	P_x	0.0654	0.0736	0.1081	0.5936	0.1162	0.1241	0.1208	0.1168
	F_x	0.0813	0.0686	0.0282	-0.368	0.0301	0.0920	0.2066	0.2470
TN-08	D_x	0.0555	0.0569	0.0740	0.2378	0.0986	0.1327	0.1779	0.2390
	P_x	0.0757	0.0569	0.0549	0.6149	0.0544	0.0515	0.0540	0.0546
	F_x	0.0715	0.0639	0.0355	-0.3336	0.0418	0.0992	0.1955	0.2208

部分熔融方程^[10]:
$$F_x = \frac{C_0(x)/C_1(x) - D(x)}{1 - P(x)} \quad (2)$$

式中 $C_0(x)$ 代表源区岩石中元素的含量, 由(1)求得, $C_1(x)$ 代表实测样品中元素的含量, $D(x)$ 为 x 元素源区岩石的总分配系数由(3)式得。 $P(x)$ 为 x 元素初始岩浆中的总分配系数由式(4)求得。

$$D(x) = \sum_{i=1}^n x_i(C_0) K_{di}(x) \quad (3)$$

$$P(x) = \sum_{i=1}^n x_i(C_1) K_{di}(x) \quad (4)$$

式中 n 为矿物相数; $x_i(C_0)$ 、 $x_i(C_1)$ 为源区岩石实测样品 i 相矿物百分数; $K_{di}(x)$ 为元素在 i 相中的分配系数^[7]。

用最小二乘法计算出霓辉正长岩和蓝方石响岩的部分熔融度为6.4%和6.6%。

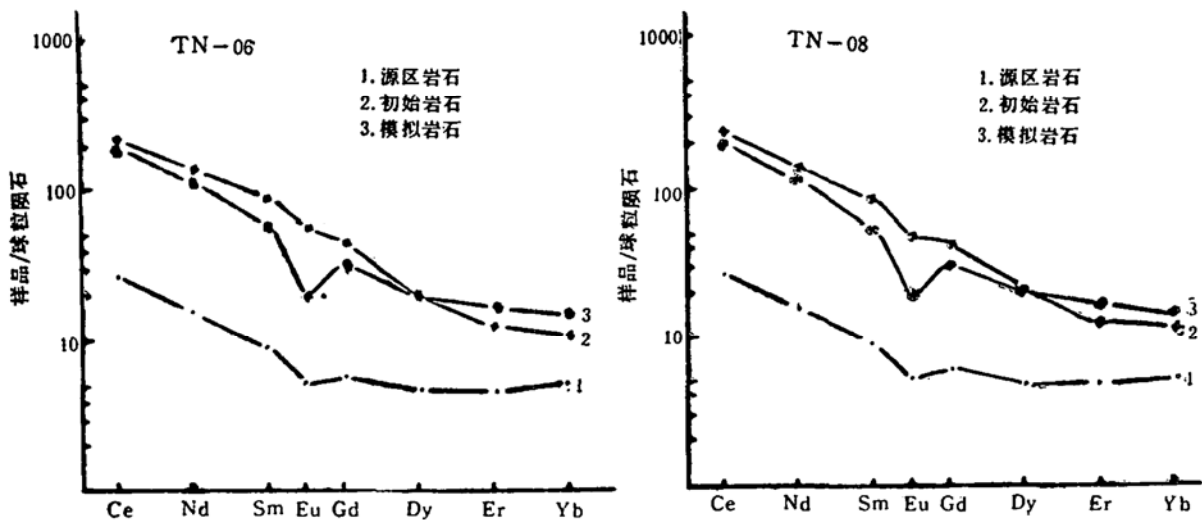


图7 源岩、初始岩石和模拟岩石稀土配分型式

Fig. 7 Chondrite normalized REE distributions patterns for source rocks, primary rocks and model rock

用 $C_0(x)$ 、 $P(x)$ 、 $D(x)$ 以及熔融度 Fx 值代入(2)式,可计算出霓辉正长岩和蓝方石响岩由源区岩石经6.4%和6.6%部分熔融时的 C_1 值,所拟合的稀土配分曲线和实测稀土配分曲线十分相似(图7),证明娘娘山旋回碱性火山-侵入岩的成因主要是由源区物质经不同部分熔融而形成的。

5 结语

(1) 娘娘山旋回火山-侵入岩系的主元素、微量、稀土元素及同位素地球化学特征显示了它们既具有地幔成因的特征亦具有地壳物质的特征,是一种幔-壳混源成因的火山-侵入岩系。

(2) 利用Rb-Sr、Sm-Nd二元混合模型计算出的壳幔百分比为:霓辉正长岩42%、58%,蓝方石响岩41%、59%,显示了较多地幔物质参与成岩作用,同时也混染有相当多的地壳物质。

(3) 利用稀土元素进行的部分熔融模型,求出源区物质经6.4%、6.6%部分熔融即可形成这套岩系,因而它的成岩经历了幔壳混合到部分熔融的成岩过程。

参 考 文 献

- 1 宁芜项目编写小组. 宁芜玢岩铁矿. 北京: 地质出版社, 1978.
- 2 陶奎元. 南京南部娘娘山碱性火山岩及其成因. 中国地质科学院院报, 1979, 1(1): 121—33.
- 3 邱家骥等. 长江中下游中生代火山岩岩石化学特征及成因分析. 地球科学, 1981, (1): 170—182.
- 4 吴利仁等. 华东及邻区中、新生代火山岩. 北京: 科学出版社, 1984. 160—167.
- 5 姜波等. 一个中生代拉分盆地——宁芜盆地的形成及演化. 地质科学, 1989, (4): 314—321.
- 6 Faure G. Principles of isotope geology. John Willey and Sons, 1986. 141—249.
- 7 王中刚等. 稀土元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1989. 384—393, 407—413.
- 8 沙鹏. 用微量元素研究火成岩成因的基本原理及其图解法. 南京大学学报(地球科学), 1989, (1, 2): 213—221.
- 9 Taylor S T, Malennan S and M. The continental crust, its composition and evolution. Blackwell Scientific Publications, 1985. 57—95.
- 10 Hanson G N. The application of trace elements to the petrogenesis of igneous rocks of granitic composition. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 38: 28—43.

Geochemical Characteristics and Quantitative Modelling of Diagenetic Process of Niangniangshan Alkaline Series

Chen Shangda Liu Cong Chen Zhigui

(Institute of Geology and Mineral Resources of BGMR, Jiangsu Province, Nanjing)

Xu Dean

(No. 1 Geological Party of BGMR, Jiangsu Province Nanjing)

Key words: alkaline series; Rb-Sr and Sm-Nd isotopes; mantle-crust mixing model; Partial melting

Abstract

The Niangniangshan alkaline series occurs in the Niangniangshan caldera, which is located in the centre of the Ningwu volcanic basin, and surrounded by ring fractures. The volcanic rocks in the caldera are getting younger from outer to inner. The major rock types include trachyte, high-potassium phonolite, hauynite phonolite and subvolcanic intrusive rocks.

This series is high alkaline, silica-undersaturated and very rich in LREE. The initial ratios of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and ϵ_{Nd} range from 0.7070 to 0.7073 and -3.4, -3.3 respectively. The quantitative modelling shows that: (1) the source rocks of hauynite phonolite and aegirine augite syenite are the mixtures of upper crust and depleted mantle, being 41% and 59% or 42% and 58% respectively; (2) the primary magma of the alkaline series was formed by partial melting of source rocks, the degrees of partial melting being 6.4% and 6.6%. The modelling provides probable quantitative geochemical model for diagenetic process of the alkaline series.