中 国 科 学 (B 辑)
第 24 卷 第 10 期 SCIENCE IN CHINA (Series B) 1994 年 10 月

我国某些富碱侵入岩的稀土元素地球化学*

赵振华 周玲棣
(中国科学院广州地质新技术研究所，广州 510640)

摘 要

根据对 40 个富碱侵入岩体的近 300 个样品的稀土元素分析，较系统地研究了我国富碱侵入岩的稀土元素组成特征，分析了控制稀土元素分布的主要因素．根据稀土元素、微量元素组合及 Sr, Nd 同位素组成特征，探讨了富碱侵入岩的源区物质和成岩过程，用部分熔融、多阶段分离结晶和分离结晶混染模型计算了紫金山、赛马、碾子山、山海关等富碱侵入岩的成岩模型．

关键词 碱性岩、碱性花岗岩、稀土元素、成岩模型

涂光炽[1)]提出的富碱侵入岩包括 A 型花岗岩 (Loiselle, 1979) 和碱性岩类[1]，这是对常见的花岗岩类二分系统的重要修正和补充．富碱侵入岩形成于特殊地质构造环境，因而对研究区域地质构造演化具有重要意义．本文根据对 40 个岩体近 300 个样品的稀土元素分析，较系统总结了我国富碱侵入岩的稀土元素地球化学特征，分析了控制稀土元素分布的重要因素，讨论了富碱侵入岩成岩模型．

1 稀土元素组成

岩石的稀土元素含量采用化学-等离子体光谱法分析(少数样品用等离子体质谱 ICP-MS 分析)，代表性样品的分析结果列于表 1.

1.1 碱性花岗岩类

由钠闪石(霓石、霓辉石)花岗岩和共生的钾长花岗岩组成，它们的稀土组成有以下特点：(1)稀土元素总含量较高 一般在 300ppm 以上，一些发生晚期矿化蚀变作用(如钠长石化)的岩体稀土元素总含量达 1000ppm 甚至更高；(2)Eu 强烈亏损 Eu/Eu*(δEu) 一般在 0.30 以下，在稀土分布模式图中 Eu 处形成显著“深谷”；(3)相对富重稀土 多数碱性花岗岩 $(La/Yb)_N<5$，甚至出现 $(La/Yb)_N\sim 1$.

不同类型碱性花岗岩的稀土组成也存在某些差异，根据轻、重稀土组内元素比值 $(La/Sm)_N$ 和 $(Gd/Yb)_N$ 特征，可将碱性花岗岩类划分为 3 种类型：

1994-01-05 收稿，1994-04-01 收修改稿．
* 中国科学院院长基金资助项目．
1) 涂光炽，华南两个富碱侵入岩带的初步研究，1982.

(1)中稀土亏损型　相对亏损中稀土元素Sm, Eu, Gd, Tb, Dy和Ho,其组成特点是: $(La/Sm)_N$为5—10, $(Gd/Yb)_N \leqslant 1$, $(La/Yb)_N \sim 3$, Eu强烈亏损,形成了少见的"Y"形稀土分布模模式. 典型代表是福建魁歧钠闪石花岗岩、福建云霄晶洞钾长花岗岩[2]、浙江桃花岛钠闪石花岗岩、河北雾灵山霓石化钠长石花岗岩等,这种类型称为魁岐型(图1(a)).

(2)轻稀土相对富集型　$(La/Yb)_N > 5$, $(La/Sm)_N \sim 5$, $(Gd/Yb)_N \sim 1$, Eu强烈亏损. 这种类型在碱性花岗岩中较为普遍,它们与S型黑云母二长花岗岩的区别在于其稀土总含量高、Eu强烈亏损. 属于这种类型的有黑龙江碾子山钠闪石花岗岩、新疆布尔根钠闪石花岗岩、河北山海关钠闪石花岗岩等. 这种类型称为碾子山型(图1(b)).

(3)重稀土富集型　特点是$(La/Yb)_N < 5$, $(La/Sm)_N < 5$, $(Gd/Yb)_N \leqslant 1$, Eu强烈亏损,形成了近水平的"V"形稀土分布模式. 这种特点与S型碱长花岗岩很相似,但碱长花岗岩稀土元素含量低. 这种类型的典型代表是我国内蒙古巴尔泽钠闪石花岗岩、尼日利亚钠闪石花岗岩、哈萨克斯坦钠闪石花岗岩等. 这种类型称为巴尔泽型(图1(c)).

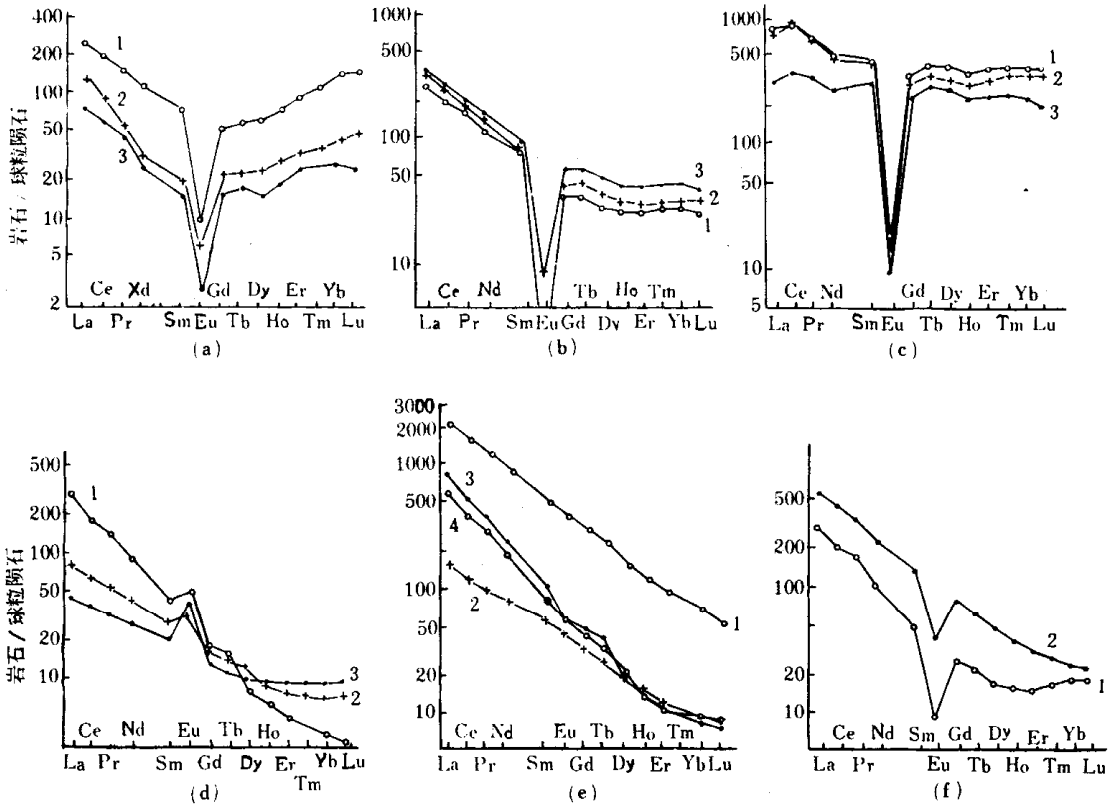


图1　富碱侵入岩稀土元素分布模式

(a)魁岐型: 1和2为魁岐, 3为云霄; (b)碾子山型: 1—3为碾子山; (c)巴尔泽型: 1—3为巴尔泽; (d)Eu富集型: 1为凤城, 2为永胜, 3为二台; (e)Eu正常型: 1, 3, 4为凤城, 2为紫金山; (f)Eu亏损型: 1为丫髻山, 2为永胜

在发生交代蚀变作用时,在一个岩体中可出现两种不同类型的稀土分布模式,例如,巴尔泽岩体,从岩体下部钠闪石花岗岩到岩体上部钠长石化钠闪石花岗岩,稀土元素分布模式由

轻稀土富集型 ($(La/Yb)_N=8.85$, $(La/Sm)_N=2.74$) 逐渐变化到重稀土富集型 ($(La/Yb)_N=1.39$, $(La/Sm)_N=1.1$, $(Gd/Yb)_N=0.8$). 当碱性花岗岩形成过程中受到岩浆晚期热液蚀变作用时，稀土元素分布出现较典型的"M"型四分组效应 (tetrad effect)，即每 4 个稀土元素组成一组 (La, Ce, Pr, Nd) (Pm, Sm, Eu, Gd) (Gd, Tb, Dy, Ho) (Er, Tm, Yb, Lu)，形成 4 条上凸曲线[3](图 1(c)). 我国内蒙古巴尔泽钠长石化钠闪石花岗岩、哈萨克斯坦钠长石化钠闪石花岗岩和我国山海关钠闪石花岗岩仅在重稀土出现四分组效应. 这种特殊的稀土分布型式在矿化的 S 型碱长花岗岩也有出现，可作为碱性花岗岩矿化作用标志.

1.2　碱性岩类

本文讨论的碱性岩类不包括碱性镁铁质和超镁铁质岩、碳酸岩. 碱性岩类稀土元素组成的主要特点是：稀土总含量高，一般高于 300ppm(少数偏酸性正长岩例外)，有的可达几千 ppm. 稀土元素含量变化范围大，同一岩体的同一岩石类型稀土含量变化可达一个数量级；强烈富集轻稀土，$(La/Yb)_N>10$，常达 100 或更高；Eu 相对富集，常出现明显 Eu 正异常或无 Eu 异常. 陡右倾斜平滑或 Eu 正异常型稀土分布模式是碱性岩不同于其它类型岩浆岩的典型特征.

根据 Eu 异常特点可将碱性岩分为 3 种类型：

(1) Eu 富集型　　Eu 形成正异常，如个旧霓霞正长岩和方钠霓霞正长岩 (Eu/Eu* 1.40)、新疆阿尔泰及辽宁凤城碱性正长岩 (Eu/Eu* 1.96)、河北雾灵山英碱正长岩、四川太和正长岩 (Eu/Eu* 1.66) (图 1(d)).

(2) Eu 正常型　　无明显 Eu 富集或亏损 (Eu/Eu* ～ 1)，稀土组成模式为平滑的右倾斜型，如山西紫金山霓辉正长岩和霞石正长岩；辽宁赛马霓霞正长岩和黑榴霞石正长岩等. 不同类型碱性岩之间差异仅在稀土元素总含量 (特别是轻稀土) 不同(图 1(e)).

(3) Eu 亏损型　　这种类型较为少见，Eu 出现负异常 (Eu/Eu* ～ 0.5)，如安徽城山、大龙山、黄梅尖石英正长岩、广东丫髻山含霞石角闪正长岩和吉林永胜含霞霓辉正长岩等. 这些岩体多属偏碱性岩石，形成过程中一般有较大量地壳物质加入，如黄梅尖、城山石英正长岩地壳物质占 40%—46%[4]，或经历了长石的强烈结晶分异作用 (图 1(f)).

2　稀土元素分布规律及控制因素

2.1　构造环境

富碱侵入岩主要沿深断裂带分布，其中，碱性岩主要沿裂谷带分布，碱性花岗岩主要沿裂谷、板内深断裂、大陆板块边缘深断裂带分布. 沿板内裂谷或深断裂分布的碱性花岗岩一般为非造山期形成，常与碱性岩密切组合，稀土元素总含量高，相对富轻稀土 (碾子山型)，在 ΣREE-$(La/Yb)_N$ 图上位于右侧 (图 2)，如攀西太和、茨达、哀牢山 - 金沙江、岗山、碾子山、龙王磴和山海关，国外的尼日利亚、奥斯陆和阿森申等，分布在大陆边缘活动带的碱性花岗岩形成于造山晚期，常与 I 型

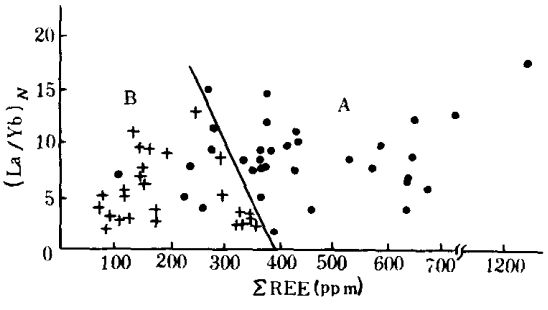


图 2　不同构造环境碱性花岗石的稀土组成

A——板块内部，B——板块边缘

● 为攀西、哀牢山 - 金沙江、山海关 - 兴隆等碱性花岗岩，+ 为闽浙沿海碱性花岗岩

花岗岩密切组合，以稀土含量较低（<350ppm）、相对富重稀土为特征，位于 ΣREE-$(La/Yb)_N$ 图左侧(图 2)，如魁岐、云霄、金刚山、桃花岛、青田、舟山和布尔根等.

2.2 源区成分

富碱侵入岩源区主要为上地幔物质，在岩浆形成过程中下地壳物质有不同程度加入(讨论见后). 地幔成分，例如受交代富集的程度，形成岩浆的部分熔融(或分离结晶)程度、地壳物质加入的比例、残余相(或结晶相)矿物组成，是控制富碱侵入岩稀土组成的重要因素. 当富集地幔低程度部分熔融、残留相富石榴子石时，形成富稀土，特别是富轻稀土的陡右倾斜分布模式，而结晶相富含斜长石的高程度分离结晶形成 Eu 的强烈亏损.

2.3 岩石化学成分

碱性杂岩体的同一岩石系列，如碱性正长岩或霞石正长岩，随钠质火成系数 $(Na_2O+K_2O)/Al_2O_3$ 增加，稀土元素总含量(特别是轻稀土)增加. 碱性正长岩常分布在岩体边部或外圈，霞石正长岩常分布在岩体内部或内圈，从岩体边部向中心 $(Na_2O+K_2O)/Al_2O_3$ 增加，稀土总含量增加，轻稀土相对富集.

碱性花岗岩也有类似规律，如山海关环状钠闪石花岗岩，从岩体边部到内部，稀土元素含量增加一倍，Eu 亏损程度增加. 许多碱性花岗岩常与 I 型花岗岩组成复式岩体，从 I 型花岗岩到碱性花岗岩，随 Si, K, Na 含量增加和 Ca, Al, Fe, Mg 含量降低，稀土元素组成从富轻稀土、富 Eu(Eu 无亏损或弱亏损)渐变为重稀土相对富集、Eu 强烈亏损. 典型实例有福州鼓山和漳州复式岩体(闪长岩→二长花岗岩→碱性花岗岩)(图 3(a), $(La/Yb)_N$ 17.42 → 5.55 → 2.79; Eu/Eu* 0.76 → 0.55 → 0.28).

在富碱侵入岩带中还见到由碱性岩和碱性花岗岩组成杂岩体或岩套，从早到晚表现为由碱性岩向碱性花岗岩的演化，相应的稀土元素组成变化为由右倾斜的无 Eu 亏损或 Eu 富集型变化为相对富重稀土、Eu 强烈亏损型，呈明显的"互补"特征. 典型实例有阿尔泰布尔根(碱性正长岩 $(La/Yb)_N=4.53$, Eu/Eu*=1.96 → 钾长花岗岩、钠闪石花岗岩 $(La/Yb)_N=5.10$, Eu/Eu*=0.04)，河北兴隆雾灵山(英碱正长岩 $(La/Yb)_N=11.57$, Eu/Eu*=1.70 → 霓石钠闪石花岗岩 $(La/Yb)_N=14.72$, Eu/Eu*=0.18)，四川太和(正长岩 $(La/Yb)_N=11.0$, Eu/Eu*=1.66 → 霓石霓辉石花岗岩 $(La/Yb)_N=8.5$, Eu/Eu*=0.48). (图 3(b)).

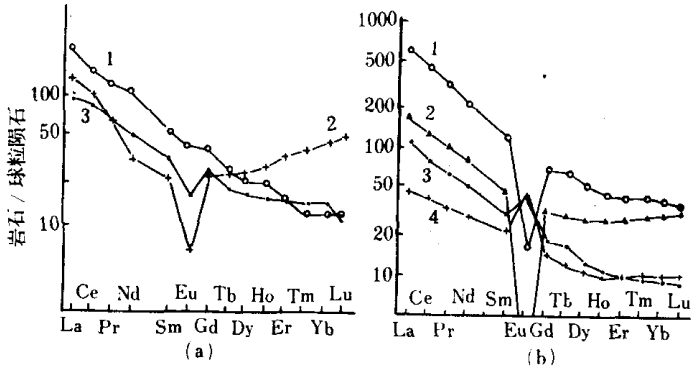


图 3 富碱侵入岩的稀土组成演化

(a) I 型 - 碱性花岗岩：1—3 为福州鼓山，(b)碱性岩 - 碱性花岗岩：1—4 为河北兴隆

2.4 岩石的矿物组成

富碱侵入岩的稀土元素主要以稀土独立矿物或富稀土矿物(独居石、磷钇矿、氟碳铈矿、褐帘石和榍石等)和以类质同象形式存在. 对个旧、紫金山、魁岐和巴尔泽等碱性岩、碱性花岗岩的有关矿物含量、稀土元素组成进行了分析，计算了矿物对全岩稀土元素的分配(表 1, 2). 由表 2 可见，个旧碱性岩稀土元素的主要载体矿物是榍石，其稀土含量占全岩的 65%，其次为霞石、黑榴石、长

表 1　我国某些富碱侵入岩的稀土组成(ppm)

岩石名称	产地	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Σ	$(La/Yb)_N$	δEu	文献
钠闪石花岗岩	黑龙江 碾子山	140.63	289.04	33.41	117.52	21.10	0.74	15.18	1.71	14.15	2.82	7.77	1.24	7.95	1.18	74.16	728.59	11.92	0.12	本文
钠闪石花岗岩	黑龙江 碾子山	93.95	187.41	20.42	79,87	15.79	0.49	13.07	2.10	11.29	2.26	5.85	0.90	5.45	0.82		439.67	11.62	0.10	本文
钠闪石花岗岩	河北 山海关	86.89	152.42	19.96	74.35	14.72	0.041	10.50	1.71	8.96	1.76	4.41	0.63	4.00	0.57		380.92	14.65	0.01	本文
钠闪石花岗岩	河北 山海关	78.43	153.09	19.95	63.66	11.95	0.17	9.25	1.65	9.43	2.00	5.76	0.93	6.24	0.82	53.80	417.13	8.47	0.04	本文
钠闪石花岗岩	河北 响山	59.92	112.97	14.86	50.78	10.52	0.32	8.93	1.51	8.71	1.75	4.78	0.73	4.49	0.57	45.79	326.63	8.99	0.10	本文
钠闪石花岗岩	吉林 岗山	56.58	135.93	14.20	41.24	6.72	0.11	4.37	0.76	3.60	0.73	2.21	0.38	2.56	0.35	18.71	288.45	14.90	0.06	本文
钠闪石花岗岩	吉林 岗山	82.85	180.53	20.25	60.79	10.63	0.19	7.15	1.22	6.14	1.29	3.81	0.68	4.71	0.63	32.88	413.75	11.85	0.06	本文
霓石钾长花岗岩	河北 兴隆	186.81	345.85	38.76	127.50	21.91	1.14	16.72	3.01	16.53	3.35	9.75	1.64	10.32	1.48	99.65	884.42	12.2	0.18	本文
霓石钠长花岗岩	河北 兴隆	96.30	153.27	15.66	46.03	6.90	0.35	4.95	0.87	4.03	0.84	2.21	0.37	2.57	0.44	24.33	359.12	25.26	0.18	本文
钠闪石花岗岩	新疆 布尔根	64.50	133.59	13.61	53.90	10.52	0.14	9.79	1.74	10.84	2.53	7.35	1.26	8.34	1.34		304.55	5.10	0.04	本文
钾长花岗岩	新疆 布尔根	37.68	73.75	7.44	29.23	6.23	0.35	6.08	1.20	7.99	1.79	5.38	0.87	5.91	0.90		184.8	4.20	0.17	本文
钾长花岗岩	浙江 普陀岛	29.83	55.58	5.63	15.59	2.62	0.11	2.71	0.45	3.31	0.66	2.26	0.34	1.88	0.18	28.41	149.56	10.69	0.12	本文
碱性花岗岩	山东 崂山	29.78	50.55	5.13	12.69	2.51	0.14	2.22	0.44	2.81	0.67	2.29	0.41	3.02	0.46	22.48	135.59	6.65	0.18	本文
碱性花岗岩	山东 崂山	37.13	61.00	5.98	14.23	2.84	0.18	2.41	0.53	2.76	0.70	2.48	0.47	3.47	0.56	22.67	157.41	7.0	0.21	本文
钠闪石花岗岩	福建 魁岐	39.12	73.02	6.73	18.49	4.21	0.46	5.98	1.11	8.27	2.10	7.40	1.26	9.45	1.61	63.58	242.79	2.79	0.28	本文
钠闪石花岗岩	福建 魁岐	23.24	58.53	4.80	14.62	3.23	0.35	3.34	0.74	4.74	1.06	3.76	0.53	4.68	0.80	33.31	157.53	3.35	0.33	a)—[2]
晶洞钾长花岗岩	福建 云霄	20.78	41.46	4.22	11.12	2.65	0.10	3.93	0.32	4.48	0.87	3.17	0.44	4.35	0.64	33.55	132.08	3.22	0.09	本文
钠闪石花岗岩	浙江 桃花岛	40.76	71.95	5.10	13.93	2.77	0.14	2.99	0.57	3.67	0.86	2.64	0.47	3.67	0.58		150.10	7.32	0.15	本文
霓石化钠长花岗岩	河北 雾灵山	69.83	151.11	18.14	64.54	14.20	0.72	13.01	2.82	20.03	5.07	19.55	3.73	30.87	5.08	155.93	574.63	1.52	0.16	本文
钠闪石花岗岩	吉林 白石砬子	48.67	103.39	14.08	50.34	11.61	0.17	10.23	1.81	11.34	2.23	6.87	1.18	8.59	1.09	63.35	334.95	3.81	0.04	本文
钠闪石花岗岩	河南 龙王磴	124.31	260.86	37.13	136.89	24.91	1.45	19.61	3.10	17.96	3.56	9.65	1.45	9.49	1.24	86.03	737.64	8.83	0.20	本文
钠闪石花岗岩	河南 龙王磴	318.62	590.43	59.08	222.66	36.78	1.31	32.07	4.63	24.00	5.00	12.14	1.80	10.53	1.58		1320.63	19.94	0.12	本文
钠闪石花岗岩	浙江 青田	74.90	151.99	18.68	62.45	13.35	0.47	9.98	1.82	10.18	2.16	6.09	0.96	5.76	0.83	68.29	427.92	7.54	0.12	a)
钠闪石花岗岩	四川 茨达	83.6	127		61.3	17.2	0.34	7.70	3.19					12.7	1.88		306.87	7.26	0.06	b)
霓石花岗岩	四川 太和	72.72	157.6	20.57	64.11	15.02	2.42	15.70	2.40	11.82	2.67	5.65	0.58	5.67	1.01		377.83	8.50	0.48	c)
钠长石化钠闪石花岗岩	内蒙 巴尔泽	252.83	655.23	84.53	316.26	94.78	1.22	93.32	20.57	138.42	27.50	85.15	13.84	93.28	13.19	690.99	2581.11	1.82	0.03	本文
钠闪石花岗岩	内蒙 巴尔泽	92.04	273.67	39.00	149.16	53.01	0.68	56.96	12.43	82.31	15.69	47.56	7.01	44.38	5.70	435.27	1320.87	1.39	0.03	本文
钠闪石花岗岩	内蒙 巴尔泽	110.40	267.86	32.79	115.76	30.86	0.45	28.58	5.86	35.79	6.91	20.59	3.26	22.01	3.08	186.92	891.12	3.38	0.03	本文
钠闪石花岗岩	内蒙 巴尔泽	57.58	137.94	17.68	66.09	17.31	0.25	16.10	3.14	18.68	3.61	10.94	1.75	11.53	1.64	100.85	465.09	3.36	0.04	本文
黑榴霞石正长岩	辽宁 赛马	108.95	266.83	36.32	120.38	22.94	5.57	14.07	2.16	8.75	1.54	3.83	0.66	3.17	0.43	40.19	635.79	23.17	0.94	本文
黑色霓石霓霞正长岩	辽宁 赛马	151.10	252.14	30.03	89.01	14.81	3.65	8.82	1.40	5.14	0.90	2.15	0.43	1.78	0.25	22.02	583.63	57.23	0.97	本文
绿色霓石霓霞正长岩	辽宁 赛马	738.93	1421.20	165.49	464.71	88.47	23.35	58.71	9.13	34.54	5.98	14.16	2.54	10.84	1.28	187.53	3226.86	45.95	0.99	本文
异性石霓霞正长岩	辽宁 赛马	274.73	593.30	73.76	241.43	58.51	16.66	47.03	8.08	38.22	7.21	19.26	3.19	17.55	2.30	215.43	1616.66	10.55	0.97	本文

表 1 (续)

岩石名称	产地		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Σ	$(La/Yb)_N$	δEu	文献
霓辉正长岩	山西	紫金山	38.92	76.13	10.80	42.31	9.03	2.66	8.02	1.17	5.59	1.01	2.56	0.40	2.17	0.33	25.15	228.23	12.09	0.95	本文
霞石正长岩	山西	紫金山	17.71	40.52	6.37	29.48	8.30	2.79	8.58	1.43	7.58	1.42	3.67	0.55	3.09	0.40	34.53	166.42	3.86	1.01	本文
黑榴石霞石正长岩	山西	紫金山	15.85	38.40	5.69	20.48	4.01	1.09	2.93	0.46	2.12	0.39	1.03	0.16	1.02	0.16	11.20	104.99	10.47	0.97	本文
英碱正长岩	河北	雾灵山	33.32	62.28	7.82	30.47	5.76	2.89	4.68	0.80	4.02	0.78	2.06	0.31	1.94	0.29	20.29	177.71	11.57	1.70	本文
碱性正长岩	新疆	二台	16.51	37.25	4.24	18.55	4.48	3.22	4.27	0.71	3.96	0.84	2.46	0.37	2.40	0.38		99.64	4.53	1.95	本文
碱性正长岩	云南	个旧	140.3	242.8	26.2	54.1	5.9	1.98	7.3	1.24	1.6	0.14	0.51	0.13	0.98	0.93	9.93	494	85.3	1.02	c)
黑榴霞石正长岩	云南	个旧	281.7	420.1	40.6	96.3	15.5	5.22	19.3	1.44	8.8	2.18	4.7	0.75	5.10	2.21	52.0	956	32.8	1.00	d)
霓霞正长岩	云南	个旧	143.4	165.4	23.9	54.8	7.7	3.09	9.9	0.81	3.5	9.34	1.5	0.13	1.85	—	17.7	443	45.9	1.20	d)
方钠霓霞正长岩	云南	个旧	227.2	346.0	31.5	67.7	3.7	3.18	13.4	1.37	4.3	0.76	2.0	0.44	2.51	0.15	26.7	731	53.7	1.40	d)
碱性正长央	河北	水泉沟	44.38	92.13	9.78	40.56	8.16	2.18	5.94	0.77	3.85	0.70	1.74	0.26	1.39	0.21	17.48	229.53	21.53	0.96	本文
霓辉角闪二长岩	河北	水泉沟	31.35	52.61	4.98	19.93	3.75	1.14	2.77	0.36	1.98	0.39	1.08	0.17	1.09	0.18	10.59	132.38	19.39	1.08	本文
辉石正长岩	云南	卓潘	90.77	216.8	31.2	85.5	14.2	4.2	12.7	1.4	3.5	0.7	—	0.1	0.7	0.1	11.3	480.1	86.2	1.04	c)
花岗正长斑岩	云南	姚娄	88.3	152.2	23.4	62.9	10.1	3.0	9.5	1.2	3.5	0.5	1.1	0.2	1.0	0.2	18.1	375.2	54.1	1.01	c)
霓辉正长岩	河南	林县	16.90	29.68	3.63	12.11	2.17	0.75	1.62	0.28	1.26	0.25	0.70	0.12	0.81	0.13	7.04	77.45	14.07	1.22	e)
霓霞正长岩	河南	林县	36.35	45.51	4.60	9.72	1.67	0.37	1.10	0.22	1.00	0.20	0.74	0.12	1.09	0.17	8.25	111.11	37.08	0.83	e)
辉石正长岩	河南	洪山	24.38	45.40	5.47	19.01	3.59	1.01	2.79	0.46	2.27	0.44	1.27	0.22	1.32	0.19	12.53	120.35	12.45	0.98	e)
含霞石角闪正长岩	广东	丫髻山	80.55	145.85	18.73	55.23	8.43	0.61	5.55	0.95	4.77	1.02	2.83	0.50	3.48	0.52	26.39	355.41	15.60	0.27	本文
霓辉正长岩	吉林	永胜	25.34	50.60	6.87	26.19	5.49	2.43	4.54	0.67	3.44	0.64	1.62	0.24	1.50	0.24	15.28	145.09	11.38	1.48	本文
石英正长岩	安徽	黄梅尖	67.8	145	17.2	48.4	9.05	0.74	6.56	1.17	6.29	1.22	3.70	0.66	4.38	0.65		303.6	10.44	0.44	[4]
黑云母石英正长岩	安徽	城山	107	223	27.3	81.6	15.3	1.90	11.2	2.05	10.7	2.13	6.14	1.05	6.29	0.95		497	11.47	0.43	[4]
榍石	山西	紫金山	1173	3374	462	2065	417	123	444	40	286	38	127	7	100	5		8661	7.72	0.87	本文
榍石	山西	龙王庙	1490	3792	445	1762	318	80	24	24	202	22	104	8	101	5		8761	9.72	2.80	本文
榍石	辽宁	赛马	4611	13906	1919	7302	1122	266	850	78	327	20	92	—	54	—		30547	56.24	2.63	本文
榍石	云南	个旧	19376.5	8051.2	2523.1	5776	701.2	261.3	785.4	81.6	231.1	75.4	57.2	2.21	56.3	—		38950	204.2	1.20	c)
霞石	云南	个旧	94.6	136.5	12.5	26.1	2.3	1.02	4.0	0.53	0.93	0.58	0.25	—	0.67	0.48		285	83.5	1.30	c)
磷灰石	山西	紫金山	1857	2559	212	838	111	26	168	2	63	—	26	—	21	—		5883	58.25	0.53	本文
磷灰石	山西	龙王庙	1717	2924	255	847	104	24	132	9	55	4	30	1	29	1		6132	39.0	0.63	本文
磷灰石	辽宁	赛马	6143	9178	959	2967	377	79	248	29	91	19	39	7	26	4		20166	155.64	0.79	本文
锆石	辽宁	赛马	171	335	28	80	19	5	40	14	78	30	99	21	163	37		1120	0.69	0.55	本文
黑榴石	云南	个旧	118.0	437.0	90.4	382.2	120.2	39.7	108.6	19.5	91.0	24.7	49.0	7.24	53.2	7.64		2024	1.3	1.14	c)
变生锆石	福建	魁岐	483.1	1162	81.53	265.2	94.24	8.29	259.3	103.41	967.2	355.9	1621	426.7	3436	758.9	6153	100022.8		0.15	[2]
钠闪石	福建	魁岐	51.57	104.8	9.42	27.89	6.87	1.82	9.02	1.66	12.35	2.86	10.46	2.28	19.05	4.57	97.2	264.74		0.72	[2]

a) 董传万，1988; b) 周伯苇等，1985; c) 张玉泉，1993; d) 陆　杰，1984; e) 穆克敏等，1989.

表 2　稀土元素在碱性岩中的分配

岩　石	矿　物	矿物在岩石中的含量 (%)	矿物的稀土元素总含量 (ppm)	矿物的稀土占岩石稀土总量的比例 (%)	矿物中 Eu 总含量 (ppm)	矿物中 Eu 占岩石 Eu 总含量的比例 (%)
二长岩	磷灰石	0.81	47.65	31.7	0.21	10.5
(紫金山)	榍　石	1.0	86.61	57.5	1.23	61.5
二长岩	磷灰石	0.79	29.15	15.2	0.13	6.5
(紫金山)	榍　石	1.0	83.77	43.6	1.10	55.0
霓辉正长岩	磷灰石	2.15	154.50	89.2	1.53	76.3
(紫金山)	榍　石	0.5	12.15	7.0	0.27	13.5
霓石正长岩	磷灰石	0.23	18.66	14.0	0.05	5.0
(紫金山)	榍　石	0.25	6.08	4.6	0.14	13.5
碱性正长岩 (凤城)	磷灰石	0.37	74.61	17.3	0.29	7.3
霞石正长岩[b] (个旧)	榍　石	1.05	485.4[a]	64.7		
	霞　石	32.42	111.2[a]	14.8		
	黑榴石	2.08	50.6[a]	6.7		
	长　石	48.65	34.1[a]	4.5		
	萤　石	1.50	7.2[a]	1.0		

a) RE_2O_3, b)陆　杰，个旧岩浆杂岩体地球化学研究(硕士论文)，1984.

石、萤石和方钠石，它们分配的稀土占全岩的百分比例依次为 15, 7, 5, 1 和 0.5. 榍石、霞石强烈富轻稀土、富 Eu、稀土元素总含量高，黑榴石相对富重稀土(表 1). 紫金山、赛马碱性杂岩具有类似特点，除榍石仍是稀土的主要载体矿物外，磷灰石也是主要的分配稀土的矿物，如

表 3　稀土元素在碱性花岗岩中的分配[a]

岩　石		矿　物	矿物在岩石中的含量 (%)	矿物稀土元素总含量 (ppm)	矿物稀土占岩石稀土总量的比例 (%)	矿物中 Eu 总含量 (ppm)	矿物中 Eu 占岩石 Eu 总量比例 (%)
钠闪石花岗岩 (魁岐)		变生锆石	0.0654	6.55	24.66	0.0054	7.7
		独居石	0.0004	2.36[b]	24.58		
		钠闪石	0.6	1.59	9.30	0.011	15.7
		霓　石	1.2	1.24	7.25	0.011	15.7
		萤　石	0.0135	0.79	4.62	0.003	4.3
钠闪石花岗岩 (巴尔泽)	强钠长石化钠闪石花岗岩	兴安矿	0.603	3288.8	52.0		
		独居石	0.1368	886.3	14.0		
		锆　石	4.326	2284.1	36.1		
	中钠长石化钠闪石花岗岩	兴安矿	0.06166	336.3	13.0		
		独居石	0.0499	323.3	12.5		
		锆　石	1.4492	765.2	29.5		
		钠闪石	5.0	36.0	1.4		
		长　石	15.0	58.5	2.3		
		赤铁矿	6.0	81.0	3.1		
	弱钠长石化钠闪石花岗岩	兴安石	0.0898	489.8	22.4		
		独居石	0.0198	128.3	5.9		
		锆　石	0.6511	343.8	15.7		

a) 据洪大卫和吉林地质八队资料计算，b) La+Ce+Pr+Nd.

在紫金山霓辉正长岩中，磷灰石分配了岩石中近90%的稀土．与花岗岩中的磷灰石不同，碱性岩中的磷灰石以稀土总含量高、富轻稀土、富Eu为特征．

与碱性岩不同，碱性花岗岩中独居石、锆石是稀土的主要载体矿物，它们分配了岩石中50%以上的稀土．在巴尔泽钠闪石花岗岩富钇的稀土矿物——兴安矿(Y, Yb)$BeSiO_4(OH)$，分配了岩石中52%的稀土(表3)．

富碱侵入岩受钠长石化(河北兴隆、内蒙巴尔泽碱性花岗岩)后轻稀土含量降低、重稀土含量增加，Eu亏损程度变化不明显(如兴隆，$(La/Yb)_N$由12—15降低到1.5，巴尔泽由3.4降到1.8)，在巴尔泽还表现为稀土总含量明显增加(近5倍)．这些特点表明，富钠的熔体-溶液是稀土元素(特别是重稀土)的重要活化剂，Балашов等[5]的实验表明，富碱的熔体对稀土特别是重稀土有更强的萃取能力．

3 富碱侵入岩成岩模型

3.1 源区物质

富碱侵入岩主要沿板块内裂谷、深断裂、地幔热柱和板块边缘深断裂分布．在岩石组合上常见到碱性岩与碱性花岗岩，碱性花岗岩与I型花岗岩的密切组合：歪碱白榴正长岩→歪碱正长岩→石英正长岩→钠闪石花岗石[6](奥斯陆)；橄榄辉长岩→正长岩→铁橄榄石花岗岩→钠闪石花岗岩→钠长石花岗岩(尼日利亚)；正长岩→钠闪石花岗岩(四川太和)；碱性辉长岩→碱性正长岩→钠闪石花岗岩、钾长花岗岩(新疆布尔根)；I型花岗岩→钠闪石花岗岩(福建魁歧、浙江平阳、青田)．这些特征表明，富碱侵入岩源区主要为深源—上地幔并受到下地壳物质不同程度混染[7]．

Sr和Nd同位素组成资料提供了富碱侵入岩深部来源的证据(另文讨论)，如紫金山、赛马、永胜、个旧等16个碱性岩$^{87}Sr/^{86}Sr$初始比值范围为0.7041—0.7098；山海关、碾子山、魁岐、巴尔泽、布尔根等19个碱性花岗岩$^{87}Sr/^{86}Sr$初始比值范围为0.700—0.710，均低于0.710．紫金山、赛马、二台等11个碱性岩的$^{143}Nd/^{144}Nd$值范围为0.51187—0.51251；山海关、碾子山、布尔根等19个碱性花岗岩$^{143}Nd/^{144}Nd$值为0.51215—0.51282．由上述资料计算的$\varepsilon Sr(T)$值为低正值(<100)或高负值(>−50)，$\varepsilon Nd(T)$值为近于零的低正值或高负值(>−10)．

稀土和微量元素组成提供了源区特征的限制：碱性岩强烈富轻稀土的特点表明其源区应有足够量的富重稀土的矿物，如石榴子石，作为残留相．另外，根据部分熔融和分离结晶作用理论模型，在以上地幔为源区、总分配系数D为0的极端条件下，极低的部分熔融程度(如F=0.01—0.05)，所形成的熔体中微量元素浓度Nb为55—110ppm，Zr为800—1600ppm，Ce为140—280ppm，即使在这种极限条件下也未能达到某些富碱侵入岩(如巴尔泽、赛马)中相应微量元素浓度．而如此低程度部分熔融是难以聚集成岩浆体的．因此，这些富碱侵入岩源区应为交代富集地幔[8]．

由上述，富碱侵入岩源区物质主要为上地幔(石榴石二辉橄榄岩)、交代富集地幔(轻稀土富集)和幔源岩石(如洋壳玄武岩)，在岩石形成过程中不同程度地加入了下地壳物质，少数碱性花岗岩，如崂山，由于产出的特殊地质背景，其源岩主要为下地壳古老变质岩．

3.2 成岩过程

3.2.1 部分熔融 在La/Sm-La图解中[9](图4(a), (b))，紫金山、赛马等碱性杂岩体构成正相

关直线，相关系数分别为 0.89 和 0.92，表明紫金山、赛马等岩体成岩经历了部分熔融过程．

3.2.2　分离结晶　在碱性杂岩体中，同一岩石类型（如紫金山的霓辉正长岩、赛马黑色霓石霓霞正长岩、绿色霓石霓霞正长岩）的稀土组成呈系统变化，不同部位岩石的稀土组成模式相互平行，差异仅在稀土总含量不同．在上述 La/Sm-La 图解中构成与“La”轴近平行直线[9]（图 4(a), (b)），表明这些岩石形成过程经历了分离结晶作用．碱性花岗岩的 Eu 强烈亏损表明其成岩过程经历了高程度分离结晶作用．在 Rb/Sr-Rb 图解中，布尔根、山海关、崂山和魁歧等碱性花岗岩构成指数曲线（图 4(c)）．在由强不相容元素与强相容元素构成的 log-log 图解[10]（Rb-Cr, Rb-Sr）中，崂山、山海关等碱性花岗岩构成陡倾斜负相关线（图 4(d)）．这些特点表明分离结晶作用在碱性花岗岩成岩过程中起重要作用．

3.2.3　混合或分离结晶混染（AFC）　Sr 和 Nd 同位素组成显示富碱侵入岩形成过程中不同程度地加入了下地壳物质，即发生了混合或混染作用．同位素 - 微量元素图解 $^{87}Sr/^{86}Sr$-Sr 和 ^{87}Sr-1/Sr 分别构成双曲线和直线（图 4(e)）．

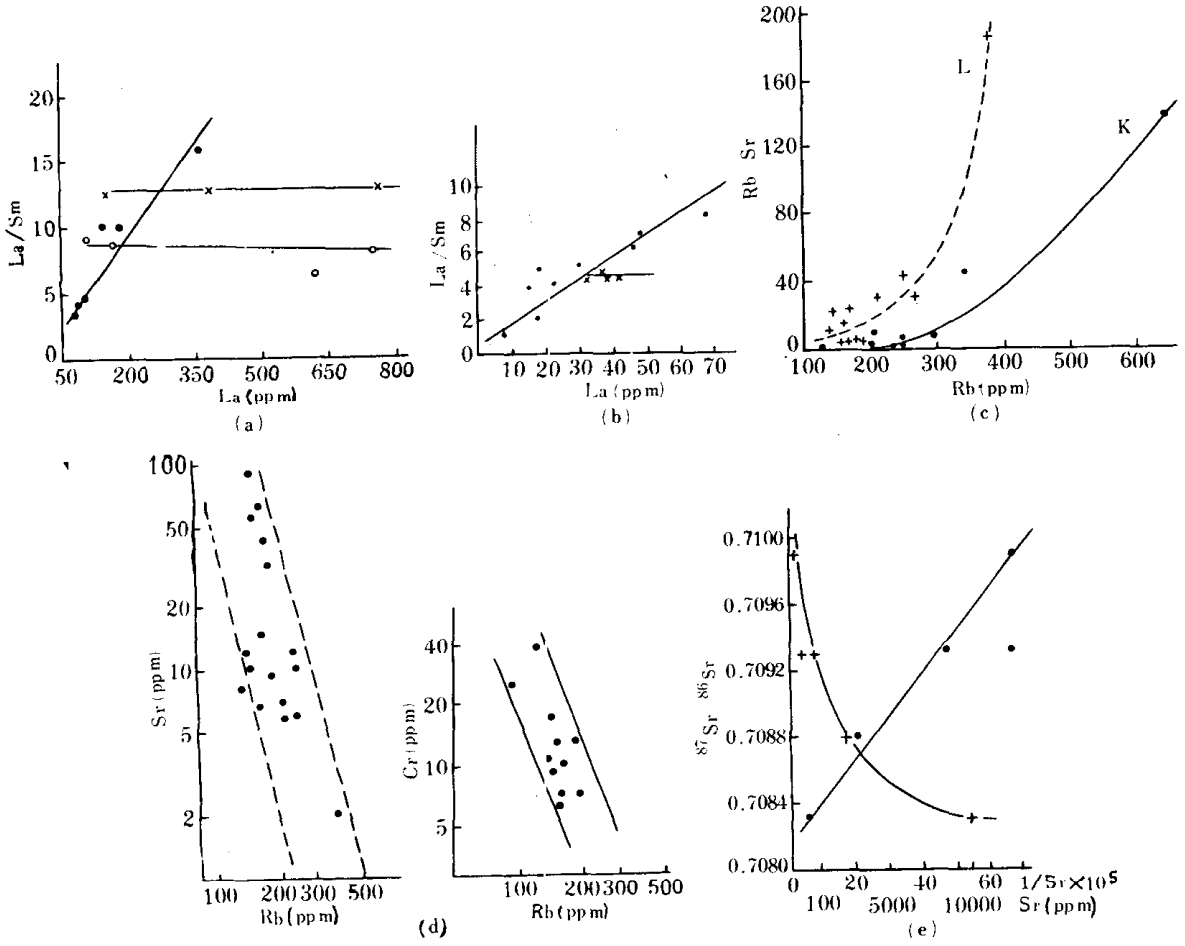


图 4　富碱侵入岩成岩过程判别图

(a)赛马碱性岩：× 为黑色霓石霓霞正长岩，○为绿色霓石霓霞正长岩；(b)紫金山碱性岩：× 为霓辉正长岩，● 为霞石正长岩、黑榴石霞石正长岩、假榴霞石正长岩、二长岩；(c)崂山(L)、魁歧(K)；(d)崂山；(e)赛马

3.3 成岩模型计算

选择赛马、紫金山碱性杂岩和碾子山、山海关、东准噶尔钠闪石花岗岩进行成岩模型计算. 根据上述有关源区物质、成岩过程的判据,这些富碱侵入岩成岩模型计算如下:

(1)紫金山碱性杂岩 成岩过程符合部分熔融模型,计算表明,在低程度部分熔融情况下,实比与非实比部分熔融无明显差异. 富碱侵入岩均为低程度部分熔融产物,计算时均采用实比部分熔融公式:

$$C_l^i = C_0^i/D + F(1-D), \tag{1}$$

式中 C_0^i 为源区微量元素 i 的浓度,如上述,设源区为弱富集地幔,轻稀土浓度为球粒陨石的5倍,重稀土浓度为3倍. 矿物组成为橄榄石 Ol_{50},斜方辉石 Opx_{20},单斜辉石 Cpx_{15},金云母 Flg_5,石榴子石 Gar_{10}. 总分配系数 D 的计算取自 Hanson[11] 地幔熔融矿物分配系数,部分熔融程度 F 为5%—10%(F=0.05—0.10),计算结果列于表4, 图5(a)为模型计算与实测浓度之比较.

表4 富碱侵入岩成岩模型计算

	元 素	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Yb
碱性杂岩(紫金山)	C_0^i a)	4.04	3.0	0.975	0.367	0.777	0.627
	D	0.019	0.044	0.064	0.083	0.10	0.46
	F=0.05模式浓度	59.04	32.79	8.77	2.84	5.35	1.29
	F=0.10模式浓度	34.39	21.53	6.18	2.10	4.10	1.22
	实测浓度范围	21.05	14.87	3.62	1.09	2.93	1.02
		|	|	|	|	|	|
		114.99	53.95	11.75	3.41	9.74	3.09
碱性杂岩(赛马)	C_0^i	6.464	4.80	1.56	0.588	1.295	1.045
	D	0.015	0.035	0.053	0.064	0.0815	0.37
	F=0.02模式浓度	184.20	87.76	21.78	7.11	12.97	2.73
	F=0.10模式浓度	56.77	36.40	10.58	3.73	7.47	2.41
	AFC模式浓度	101.7	149.6	37.47	12.31	22.91	5.34
		|	|	|	|	|	|
		314.08	64.0	18.80	6.68	13.74	4.81
	实测浓度范围	170.21	53.22	10.86	2.85	8.12	3.33
		|	|	|	|	|	|
		593.30	241.43	58.51	16.66	47.03	17.55
钠闪石花岗岩(碾子山、山海关 东准噶尔)	$C_{0.1}^i$	34.39	21.53	6.18	2.10	41.0	1.22
	D_0^i	30.91	25.71	5.50	1.90	3.90	1.36
	D_1	0.22	0.37	0.47	1.74	0.60	0.53
	F_1=0.40模式浓度	63.17	38.35	8.94	0.96	5.62	2.09
	D_2	0.18	0.14	0.10	1.49	0.08	0.07
	F_2 b)=0.16模式浓度	133.91	84.33	20.39	0.61	13.06	4.90
	实测浓度范围	69.28	37.87	9.29	0.20	8.99	4.95
		|	|	|	|	|	|
		289.04	117.52	21.10	0.74	15.18	7.95

a)初始浓度、模式浓度单位皆为 ppm, b)为 F_1 的 40%(0.40×0.40=0.16).

(2)赛马碱性杂岩 成岩过程符合分离结晶混染模型(AFC),在总分配系数 $D \ll 1$ 情况下,分离结晶混染模型公式[12]:

$$C_m = C_m^0 F^{-1}\left[1 - \frac{C_a}{C_m^0}\ \frac{r}{r-1}\right], \tag{2}$$

式中 C_m^0 为分离结晶岩浆的初始成分，由交代富集地幔 2%—10%(F=0.02—0.10)部分熔融产生，交代富集地幔轻稀土浓度为球粒陨石 8 倍，重稀土为 5 倍，矿物组成为 $Ol_{52}Opx_{25}Opx_{12}Flg_3Gar_{10}$；$C_a$ 为混染物中相应微量元素浓度，计算时采用下地壳成分 (Taylor, 1985)，$r=\frac{M_a}{M_c}$，为单位时间内混染与分离结晶速率之比，计算时用 r=0.2；F 为分离结晶程度，取 F=0.60，计算结果列于表 4. 图 5(b) 为模型计算与实测浓度之比较.

(3)碾子山等碱性花岗岩　　成岩过程符合多阶段分离结晶模型，计算公式为

$$C_l^i = C_0^i F_1^{D_1^i - D_2^i} F_2^{D_2^i - D_3^i} \cdots F_n^{D_n^i - 1}, \tag{3}$$[9]

式中 C_0^i 为分离结晶岩浆微量元素 i 初始浓度，D_n^i 为不同分离结晶阶段微量元素 i 的总分配系数，F_n 为不同阶段残余熔体的体积比. 本文采用两阶段分离结晶模型 (n=2)；F_1=0.40，F_2=0.16(即第一阶段残余熔体的 40%)，C_0^i 为弱富集上地幔(轻稀土为 5 倍球粒陨石，重稀土为 3 倍)经 10% 部分熔融 ($Ol_{50}Opx_{20}Cpx_{15}Flg_5Gar_{10}$) (表 $4C_{0,L}^i$)，与下地壳物质混合(混合比 20%)(表 $4C_0^i$). 第一阶段分离结晶相矿物组成：斜长石 Plg_{50}、钾长石 Or_{35}、角闪石 Hb_{10}；第二阶段结晶相矿物组成：$Plg_{50}Or_{35}Bio_{10}$，分配系数 D 分别采用英安岩 D_1 和流纹岩 D_2 体系(表 4). 图 5 为模型计算与实测浓度之比较.

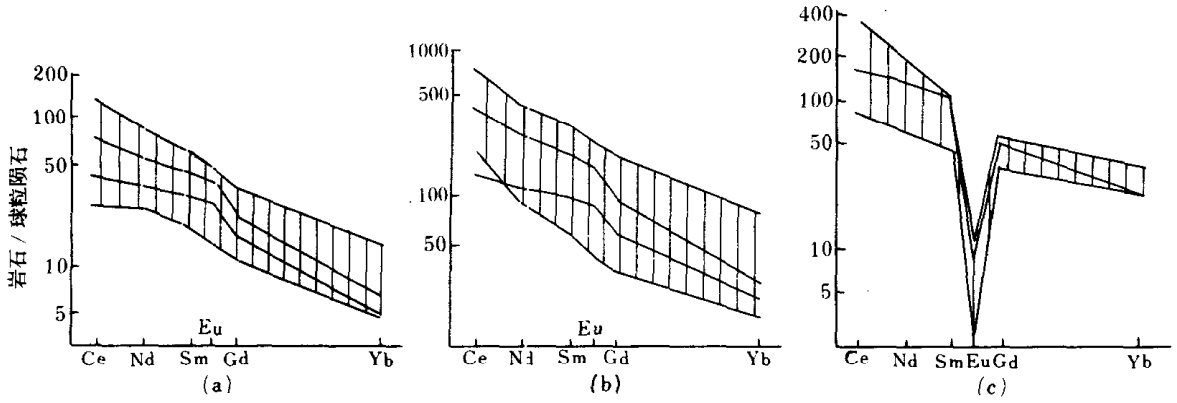


图 5　富碱侵入岩成岩模型计算

(a) 紫金山碱性杂岩，(b)赛马碱性杂岩，(c)碾子山、山海关、东准噶尔钠闪石花岗石

4　结　　论

(1)富碱侵入岩具有不同于其它类型岩浆岩的稀土组成：碱性岩以稀土元素总含量高、显著富轻稀土、富集 Eu 为特征；碱性花岗岩以相对富含重稀土、Eu 强烈亏损为特征. 这些特征受富碱侵入岩形成的构造环境、源岩、岩体岩石化学成分、矿物组成、交代蚀变作用等因素控制. 一般情况下，榍石、磷灰石是碱性岩稀土主要载体矿物；独居石、锆石是碱性花岗岩稀土主要载体矿物.

(2)Sr 和 Nd 同位素组成及稀土、微量元素组合特征表明，富碱侵入岩源岩主要是富集程

度不同的上地幔物质或幔源岩石，在成岩过程中受到下地壳物质不同程度的混染.

(3)不同类型富碱侵入岩符合下述成岩模型：弱富集地幔低程度部分熔融(紫金山碱性岩，5%—10%部分熔融)；分离结晶混染(AFC)(赛马碱性岩，富集地幔2%—10%部分熔融→分离结晶 $F=0.60$，混染率 $r=0.2$)；多阶段分离结晶(碾子山、山海关、东准噶尔等碱性花岗岩：弱富集地幔10%部分熔融，下地壳加入20%→两阶段分离结晶 $F_1=0.40$，$F_2=0.16$).

致谢 本文在涂光炽教授指导下完成，王一先副研究员参加了部分工作，特此致谢.

参 考 文 献

[1] 涂光炽等，花岗岩地质和成矿关系，江苏科学技术出版社，南京，1984，21—37.
[2] 洪大卫等，福建沿海晶洞花岗岩带的岩石学和成因演化，北京科学技术出版社，北京，1987，77—91.
[3] 赵振华等，地球化学，1992，(3)：221—232.
[4] 章邦桐等，岩石学报，1988，(3)：1—14.
[5] Балашов, Ю. А., друг. *Геохимия*, 1975, **12**: 1705—1717.
[6] Collins, W. J. *et al.*, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1982, **80**: 189—200.
[7] Eby, G. N., *Lithos*, 1990, **26**: 115—134.
[8] Doss, L., Murthy, V. R., *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1980, **48**: 268—276.
[9] Allegre, C. J., Minster, J. F., *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1978, **38**: 1—25.
[10] Cocherie, A., *Geochem. et Cosmochi. Acta*, 1986, **50**: 2517—2522.
[11] Hanson, G. N., *Am. Rev. Earth and Planet. Sci.*, 1980, **8**: 371—406.
[12] Depaolo, D. J., *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1981, **53**: 189—202.