

新疆阿克纳瓦山晚泥盆世火山岩 及其构造环境*

韩宝福

(北京大学地质学系, 北京 100871)

主题词 晚泥盆世火山岩 碱性玄武岩系列 岛弧 活动大陆边缘火山弧 新疆

提 要 新疆北部阿克纳瓦山晚泥盆世中基性火山岩以全碱含量较高为其最突出的特点。岩相学、矿物学、岩石化学、稀土元素和微量元素地球化学的研究表明, 火山岩属于碱性玄武岩系列, 以碱性玄武岩组岩石为主, 同时有少量橄榄玄粗岩组岩石, 表现为碱性玄武岩演化的肯尼迪趋势。火山岩是地幔部分熔融作用的产物, 但在岩浆上升过程中发生过橄榄石和(或)辉石的分离结晶作用。火山岩产出的构造环境为具有陆壳基底的岛弧或活动大陆边缘火山弧, 不可能是洋中脊。岛弧或活动大陆边缘火山弧的产生是以阿尔曼泰—扎河坝蛇绿混杂岩带为代表的次生洋盆, 自晚泥盆世起向北东方向(现代方向)俯冲作用的结果。

1 地质概况

阿克纳瓦山位于新疆北部二台以北, 晚泥盆世火山岩沿北西—南东方向展布(图1)。火山岩以层状产出, 倾向北东东, 倾角 40° — 60° , 产状稳定。东部和中泥盆统为断层接触, 西部和北部被第四系覆盖, 内部有华力西中期侵入的花岗岩体。火山岩中夹海百合灰岩层, 火山碎屑岩中含腕足类、珊瑚、苔藓虫和海百合茎等动物化石, 表明火山岩形成于浅海环境。火山岩的时代定为晚泥盆世晚期^①。火山岩以玄武质熔岩为主, 还有一定数量的火山角砾岩、角砾凝灰岩、熔结凝灰岩和凝灰砂岩等。

2 岩相学和矿物学特征

火山岩以绿色、灰绿色为主, 有轻微蚀变, 局部发生绿帘石化, 并有孔雀石矿化现象。岩石为致密块状, 具斑状结构、显微斑状结构和聚斑结构。斑晶矿物为单斜辉石、长石和少量角闪石, 偶见黑云母; 绿泥石、绿帘石和钛铁氧化物作为蚀变矿物或副矿物出现。基质呈间粒结构、填间结构、间隐结构或玻基交织结构。单斜辉石斑晶为半自形短柱状, 最大可达 $3 \times 5 \text{ mm}$, 具环带构造, 简单双晶发育, 内部可包含磁铁矿; 有些单斜辉石构成聚斑晶, 有

* 国家自然科学基金资助项目。

① 王嘉衍, 1:10万额尔齐斯河地区遥感地质矿产图说明书, 1986。
本文于1992年4月收到, 1992年7月改回。

的则发生绿泥石化或绿帘石化。长石斑晶有碱性长石和斜长石两种。斜长石多为长条状，碱性长石发育环带构造。长石的泥化或绢云母化现象普遍，发育卡斯巴双晶、钠长石双晶和卡-钠复合双晶。角闪石仅为斑晶，数量很少，呈半自形长柱状，有时见简单双晶和暗化边。绿帘石为蚀变矿物，一般出现在单斜辉石斑晶的边缘和解理缝中，偶见放射状集合体。火山岩中没有橄榄石和斜方辉石。

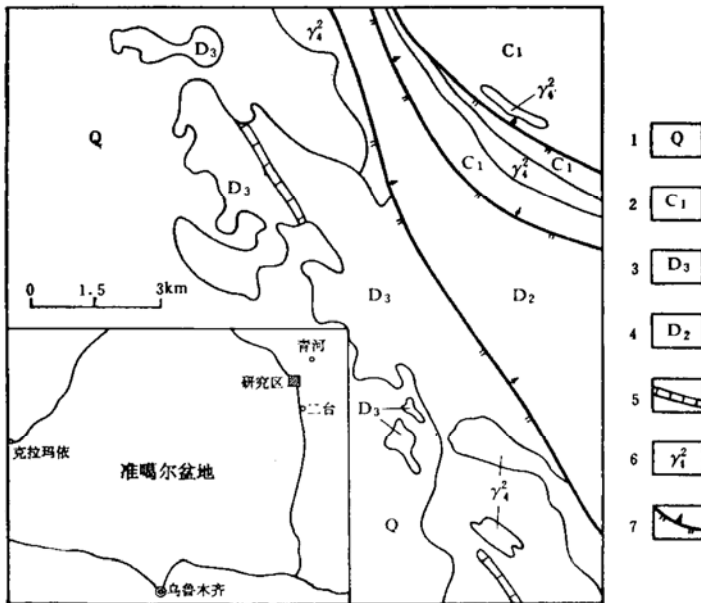


图1 新疆北部阿克纳瓦山地质简图

Fig. 1 Schematic geological map of Akenawa hills in north Xinjiang

1—第四系；2—下石炭统；3—上泥盆统；4—中泥盆统；5—生物灰岩层；6—花岗岩；7—逆断层

斑晶矿物电子探针分析结果列于表1。按照最新的辉石分类方案^[1]，单斜辉石皆属Ca-Mg-Fe辉石类，其中有两个样品的Wo ($\text{Ca}_2\text{Si}_2\text{O}_6$)含量达到51.8%，超出了单斜辉石的范围。(由于计算方法的原因，普通辉石会出现这种情况^[1])。因此，这些单斜辉石斑晶应为富Ca辉石类的普通辉石和透辉石。同一单斜辉石的Wo含量有从核部向边部增加的趋势

(表1)。

角闪石属于Ca角闪石类，为非闪角闪石和亚铁非闪角闪石^[2]。

长石的成分比较复杂。碱性长石有钠长石，而发育环带构造的碱性长石，核部为钠长石，边部为钾长石，而且钠长石和钾长石的成分比较纯正，分别为高温钠长石和K-透长石^[4]但有的碱性长石却有很高的CaO含量 ($\text{An}=16.0\%$)，成分相当于Ca-Na透长石的三元长石。在电子探针分析过程中发现，岩石中还有隐条纹长石，在一颗长石斑晶核部，相邻三个探针分析点的成分依次为钠长石、钾长石和钠长石。斑晶斜长石为拉长石。

3 主元素和稀土元素特征

火山岩为中基性岩石， $\text{SiO}_2=46.19\%—54.05\%$ (表2)。最突出的特点是全碱含量较高，变化范围较大， $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})=3.55\%—7.55\%$ 。在分析的七个样品中，六个样品的 $\text{Na}_2\text{O}>\text{K}_2\text{O}$ ， $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=0.13—0.53$ ，平均0.35，只有一个样品的 $\text{K}_2\text{O}>\text{Na}_2\text{O}$ ，但其 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})=5.88\%$ 。因此，火山岩的化学成分定名^[6]为碱性玄武岩、钾质粗面玄武岩、橄榄粗安岩和亚碱性玄武岩 (表2)。在图2中主要落入碱性火山岩区。

在主元素中，变化比较明显的是MgO，从早 (样品QH5-22) 到晚 (样品QH5-1) 基本呈降低趋势 (表2)。尽管如此，所有分析样品的CIPW标准矿物 (表2) 中都有标准矿物橄榄石，不出现标准矿物石英，特别是含0.37%—2.82%标准矿物霞石的五个样品，在玄武岩四

表 1 阿克纳瓦山火山岩斑晶矿物电子探针分析结果
Table 1 Electron microprobe analyses of phenocrystal minerals from volcanic rocks of Akenawa hills

顺序号	单斜辉石							长石							角闪石	
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	1	2	
样品号	QH5-18	QH5-18	QH5-18	QH5-18	QH5-18	QH5-21	QH5-21	QH5-14	QH5-21	QH5-21	QH5-21	QH5-21	QH5-21	QH5-1	QH5-7	
SiO ₂	53.11	50.18	52.22	52.99	51.44	50.47	51.09	64.59	53.30	49.75	65.33	64.43	60.99	43.11	43.59	
TiO ₂	0.57	0.57	0.51	0.35	0.32	1.36	1.33	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	1.25	2.01	
Al ₂ O ₃	4.72	5.89	4.46	3.24	3.31	4.43	3.76	21.33	28.86	30.80	20.29	28.81	19.87	10.90	10.30	
FeO	9.24	8.04	7.96	9.06	7.80	9.65	9.54	0.43	1.77	0.60	0.04	0.10	0.27	13.17	13.11	
MnO	0.48	0.15	0.26	0.65	0.28	0.35	0.41	0.09	0.04	0.04	0.02	0.00	0.02	0.32	0.43	
MgO	8.90	10.02	14.09	13.21	12.77	12.81	12.71	0.21	0.82	0.16	0.04	0.03	0.16	14.12	15.15	
CaO	21.40	21.83	21.89	19.73	21.03	19.59	20.01	1.41	2.75	12.27	0.45	1.65	0.17	11.52	10.50	
Na ₂ O	0.40	0.34	0.31	0.44	0.38	0.57	0.64	11.30	3.52	3.97	11.52	10.78	0.38	1.86	2.64	
K ₂ O	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.40	6.33	0.32	0.37	0.12	16.16	0.80	0.84	
	98.85	97.02	101.70	99.68	97.33	99.23	100.30	99.75	97.94	97.93	98.06	99.92	98.02	97.06	98.66	
Si	1.942	1.891	1.901	1.951	1.943	1.890	1.915	2.865	2.491	2.315	2.928	2.838	2.897	6.427	6.472	
Ti	0.016	0.016	0.014	0.010	0.009	0.038	0.037	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.140	0.225	
Al	0.203	0.262	0.191	0.141	0.148	0.196	0.164	1.115	1.590	1.689	1.072	1.184	1.112	1.915	1.814	
Fe ³⁺	0.000	0.001	0.003	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.160	
Fe ²⁺	0.282	0.252	0.239	0.276	0.246	0.302	0.294	0.016	0.069	0.023	0.002	0.004	0.011	1.631	1.270	
Mn	0.015	0.005	0.008	0.020	0.009	0.011	0.013	0.003	0.002	0.002	0.001	0.000	0.001	0.040	0.054	
Mg	0.485	0.563	0.764	0.725	0.719	0.715	0.699	0.014	0.057	0.011	0.002	0.002	0.011	3.137	3.351	
Ca	0.839	0.881	0.853	0.778	0.851	0.786	0.791	0.067	0.138	0.611	0.022	0.078	0.009	1.860	1.670	
Na	0.029	0.025	0.022	0.031	0.028	0.041	0.046	0.972	0.319	0.358	1.001	0.921	0.035	0.538	0.760	
K	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.023	0.407	0.019	0.021	0.007	0.979	0.152	0.159	
	3.812	3.896	3.995	3.934	3.953	3.979	3.959	5.075	5.074	5.029	5.049	5.034	5.055	15.840	15.935	
Wo	51.8	51.8	45.8	43.2	46.6	43.3	44.0	6.3	16.0	61.8	2.1	7.7	0.9	1.710	1.654	
En	29.9	33.1	41.0	40.3	39.4	39.4	38.9	91.5	36.9	36.2	95.9	91.6	3.4	0.000	0.000	
Fs	18.3	15.1	13.2	16.5	14.0	17.3	17.1	2.2	47.1	2.0	2.0	0.7	95.7	1.710	1.654	
	普通辉石	普通辉石	透辉石	核部 普通辉石	边部 透辉石	核部 普通辉石	边部 普通辉石	钠长石	Ca-Na 透长石	拉长石	钠长石	核部 钠长石	边部 K- 透长石			
																0.658

样品由北京大学地质学系电子探针室分析。在计算辉石和角闪石化学结构式时,按郑巧荣(1983)⁽³⁾方法计算 Fe³⁺和 Fe²⁺。

表 2 阿克纳瓦山火山岩化学成分和CIPW标准矿物
Table 2 Chemical compositions and CIPW normal minerals of volcanic rocks from Akenawa hills

顺序号	1	2	3	4	5	6	7
样品号	QH5-1	QH5-7	QH5-11	QH5-18	QH5-20	QH5-21	QH5-22
SiO ₂	50.59	54.05	48.46	47.91	51.53	46.19	47.59
TiO ₂	0.76	0.70	1.12	0.68	0.91	1.92	0.92
Al ₂ O ₃	14.98	17.14	15.72	17.25	17.44	16.11	13.61
Fe ₂ O ₃	9.45	6.53	7.43	5.73	3.30	7.01	7.75
FeO	2.78	3.32	4.29	4.93	6.81	5.85	5.60
MnO	0.28	0.21	0.24	0.22	0.21	0.23	0.25
MgO	4.44	3.48	6.35	5.08	5.25	6.37	7.09
CaO	9.01	5.75	10.42	8.82	5.92	9.35	10.69
Na ₂ O	4.90	6.25	2.50	2.68	3.88	2.68	3.05
K ₂ O	0.63	1.30	1.05	3.20	1.55	1.43	1.25
P ₂ O ₅	0.46	0.40	0.38	0.38	0.37	0.43	0.48
H ₂ O ⁺	2.28	1.49	2.53	3.61	3.32	3.03	2.34
H ₂ O ⁻	0.00	0.00	0.04	0.02	0.08	0.00	0.00
合计	100.56	100.62	100.56	100.51	100.52	100.62	100.65
Or	3.37	7.68	6.18	18.92	9.18	8.46	7.40
ab	37.49	48.13	21.13	17.46	32.82	21.97	20.81
an	17.02	14.88	28.59	25.59	25.67	27.70	19.75
nc	2.13	2.56	0.00	2.82	0.00	0.37	2.70
di-wo	10.32	4.62	8.61	6.55	0.55	6.64	12.54
di-cn	4.91	2.12	4.43	3.38	0.29	3.46	6.30
di-fs	5.28	2.47	3.96	2.99	0.24	2.99	5.96
hy-cn	0.00	0.00	5.87	0.00	10.87	0.00	0.00
hy-fs	0.00	0.00	5.25	0.00	8.67	0.00	0.00
Ol-fo	4.31	4.59	3.87	6.49	1.34	9.31	7.94
Ol-fs	5.54	5.85	3.79	6.32	1.14	8.84	8.29
mt	5.35	3.54	2.69	3.87	3.77	2.99	3.08
il	1.44	1.34	2.12	1.29	1.73	3.61	1.75
sp	1.08	0.94	0.91	0.91	0.87	1.01	1.14
Mg值	44	43	53	50	52	51	53
化学定名	橄榄粗安岩	橄榄粗安岩	亚碱性玄武岩	钾质粗面玄武岩	橄榄粗安岩	碱性玄武岩	碱性玄武岩

样品由北京大学地质学系用 ICP 法测定。用 CIPW 方法计算标准矿物时,按 Middlemost(1989)⁽⁵⁾方法调整 Fe²⁺和 Fe³⁺含量。

Mg 值 = Mg/(Mg + Fe²⁺), Fe³⁺/(Fe³⁺ + Fe²⁺) = 0.1。

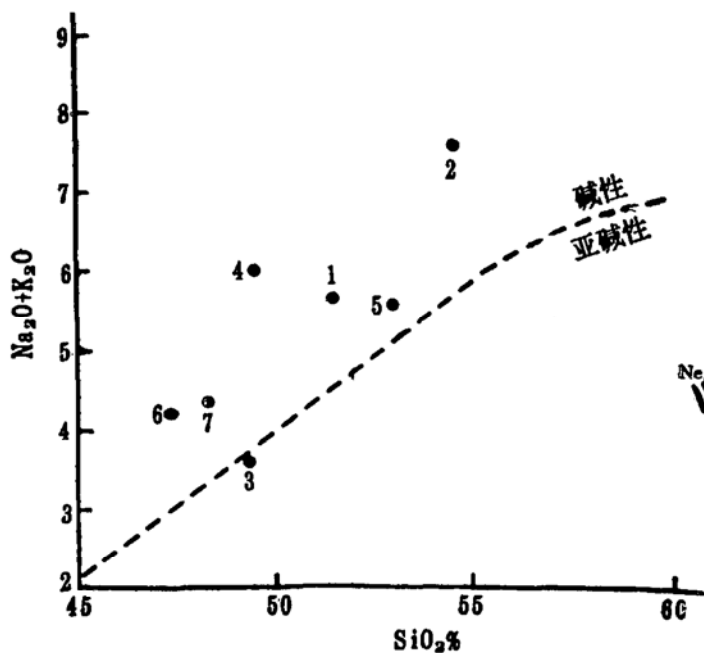


图 2 火山岩全碱—硅图解 (据 [6])

Fig. 2 Total alkali—silica diagram for volcanic rocks

图中虚线示碱性系列与亚碱性系列的界线⁽⁷⁾, 图中数字是表 2 中样品的顺序号

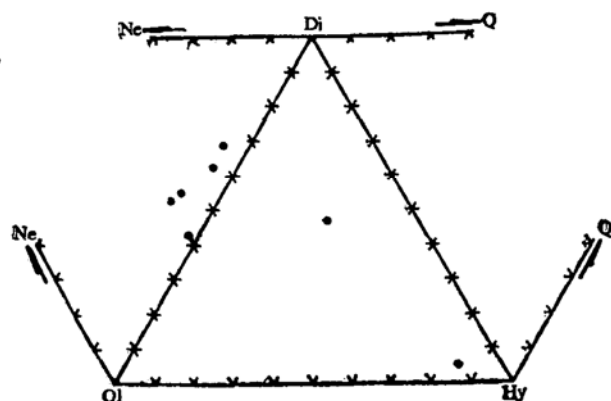


图 3 玄武岩的Ol—Di—Hy—Q—Ne图解

Fig. 3 Ol—Di—Hy—Q—Ne diagram for basalts

表 3 阿克纳瓦山火山岩的稀土元素含量

Table 3 REE contents of volcanic rocks from Akenawa hills

顺序号	1	2	3	4	5	6
样品号	QH5-1	QH5-7	QH5-11	QH5-18	QH5-21	QH5-22
La	14.42	15.00	16.39	10.70	13.20	6.31
Ce	27.05	29.30	32.26	20.50	28.08	13.10
Pr	3.73	4.37	4.35	3.07	3.97	2.02
Nd	17.67	18.40	21.15	14.00	20.46	10.80
Sm	4.28	4.33	5.41	3.46	5.71	3.16
Eu	1.47	1.28	1.64	1.31	2.00	1.01
Gd	3.91	4.02	4.81	3.41	5.70	3.51
Tb	0.60	0.60	0.77	0.51	0.92	0.58
Dy	3.36	3.51	4.31	2.82	5.72	3.42
Ho	0.65	0.64	0.84	0.55	1.09	0.69
Er	1.64	1.59	2.07	1.43	2.85	1.79
Tm	0.28	0.27	0.36	0.23	0.49	0.30
Yb	1.93	1.59	2.47	1.49	3.35	1.92
Lu	0.29	0.24	0.38	0.23	0.51	0.30
ΣREE	81.28	85.14	97.21	63.71	94.05	48.91
LREE/HREE	5.42	5.83	5.07	4.97	3.56	2.91
(La/Lu) _{cn}	4.84	6.03	4.29	4.65	2.55	2.13
δEu	1.09	0.93	0.97	1.16	1.07	0.93
δCe	0.81	0.80	0.84	0.79	0.86	0.82

样品由北京大学地质学系用 ICP-法测定。

面体中位于橄榄石—斜长石—透辉石 SiO_2 不饱和临界面的左侧(图3),充分说明它们的 SiO_2 是不饱和的;另两个样品虽然既不含标准矿物霞石,也不含标准矿物石英,代之以标准矿物紫苏辉石,但它们位于玄武岩四面体中紫苏辉石—斜长石—透辉石 SiO_2 饱和面的左侧(图3),表明它们的 SiO_2 介于饱和与不饱和之间的过渡状态。可见,阿克纳瓦山基本不存在 SiO_2 饱和即含标准矿物石英的岩石。

火山岩的稀土元素总量不是很高,而且变化较大(表3),球粒陨石标准化稀土元素分配型式为轻稀土元素富集型(图4), $(\text{La}/\text{Lu})_{\text{cn}}=2.13-6.03$,表明稀土元素发生了一定程度的分馏。结合野外地质产状,从早到晚,火山岩的稀土元素分馏程度和轻稀土元素富集程度呈增强趋势。所有样品的铕异常均不很明显, $\delta\text{Eu}=0.93-1.16$,但负铈异常却比较明显, $\delta\text{Ce}=0.79-0.86$ 。总体上,火山岩的稀土元素地球化学特征是相似的。

4 火山岩的性质

相对于 SiO_2 含量,岩石全碱含量较高和CIPW标准矿物中不出现标准矿物石英、多数样品含标准矿物霞石的特点表明,阿克纳瓦山火山岩属于碱性玄武岩系列,其中六个样品属于碱性玄武岩组。虽然样品QH5-11全碱含量相对偏低,定名为亚碱性玄武岩(表2),但它在

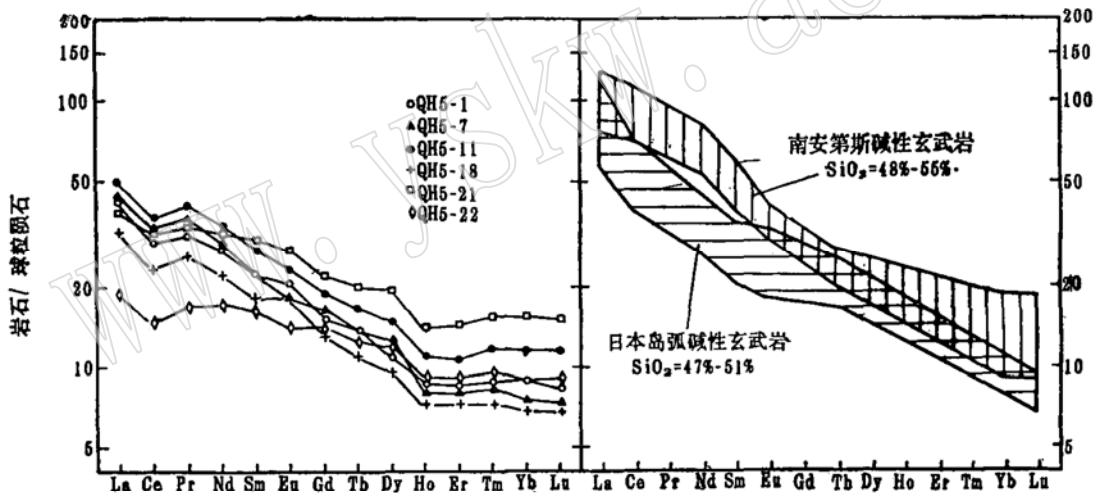


图4 阿克纳瓦山火山岩(左)和活动大陆边缘碱性玄武岩(右)球粒陨石标准化稀土元素分配型式

Fig. 4 Chondrite-normalized REE distributions of volcanic rocks from Akeuawa hill (left) and of alkaline basalts from active continental margin (right)

日本岛弧和安第斯山的数据引自参考文献[8,9]

图2中的位置非常靠近碱性系列与亚碱性系列的界线,其化学成分具有橄榄玄粗岩组岩石的特点^[10],因而和其它样品一样,同属碱性玄武岩系列。阿克纳瓦山火山岩总体上表现为碱性玄武岩系列演化中的肯尼迪趋势(图5)。火山岩的 K_2O 、 P_2O_5 含量也符合具肯尼迪趋势碱性玄武岩的特征^[7],只是 TiO_2 含量偏低(表4)。

研究表明,除 SiO_2 高度不饱和的岩石(如碧玄岩、霞石玄武岩和霞石岩)外,在碱性玄武岩系列中,碱性玄武岩组和橄榄玄粗岩组其它岩石的稀土元素含量和分配型式基本相似,

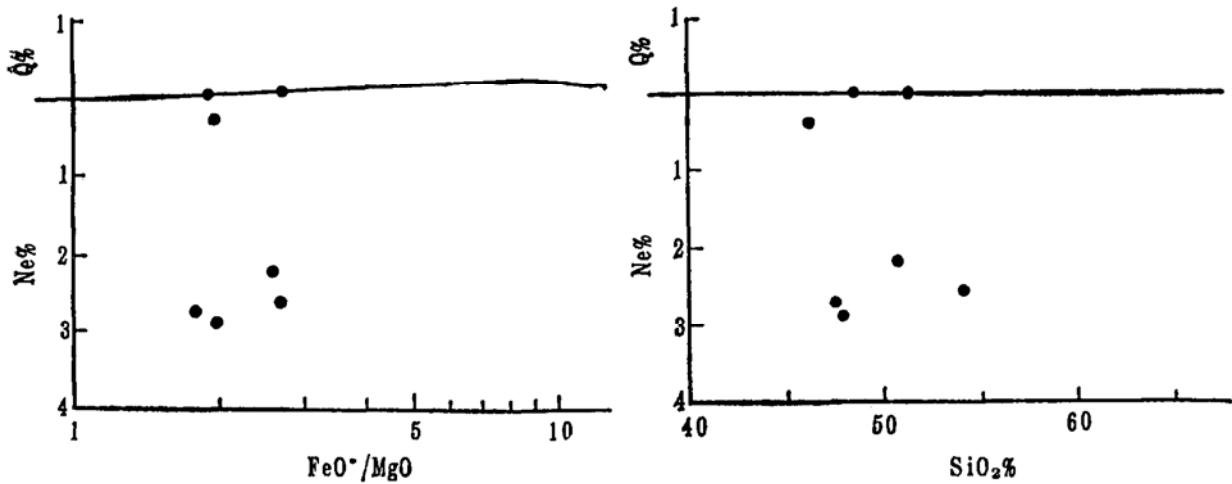


图 5 阿克纳瓦山碱性玄武岩的肯尼迪趋势图

Fig. 5 Kennedy trend of differentiation in the alkaline basalts of Akenawa hills

表 4 阿克纳瓦山碱性玄武岩副元素和微量元素含量

Table 4 Minor and trace element contents of alkaline volcanic rocks from Akenawa hills

顺序号	1	2	3	4	5	6	平均值	肯尼迪趋势玄武岩	MORB
样品号	QH5-1	QH5-7	QH5-11	QH5-18	QH5-21	QH5-22			
K ₂ O	0.63	1.30	1.05	3.20	1.43	1.25	1.48	0.2—3.9	0.15
TiO ₂	0.76	0.70	1.12	0.68	1.92	0.92	0.91	1.8—4.0	1.5
P ₂ O ₅	0.49	0.40	0.38	0.38	0.43	0.48	0.42	0.04—0.92	0.12
Rb	21	5	17	48	22	<5	19	5—320	2
Ba	130	228	140	736	265	266	294	50—1200	20
Sr	743	561	447	629	403	565	558	325—1500	120
Zr	75	71	86	43	116	40	72	100—635	90
Y	19	18	23	17	3	19	14	10—55	30
V	324		315		306		315	80—300	
Cr	76	44	76	68	104	64	72	15—1250	250
Co	26	24	26	30	32	34	29	12—100	
Ni	51	25	50	37	77	35	46	10—465	120
Th	32	28	36	29	48	38	35		0.2
Ta	5.1	4.8	5.1	5.2	5.6	6.6	5.4		0.18
Nb	80	25	35	29	50	32	42		3.5
Ce	27	29	32	20	28	13	25		10
Sm	4.3	4.3	5.4	3.5	5.7	3.2	4.4		3.3
Yb	1.9	1.6	2.5	1.5	3.4	1.9	2.1		3.4
Sc	35	22	56	31	47	48	40		40

样品由北京大学地质学系 ICP 光谱法测定。副元素含量为 wt%，微量元素含量为 ppm。肯尼迪趋势玄武岩数据引自 Miyashiro(1978)⁽⁷⁾。MORB 数据引自 Pearce 等(1981)⁽¹¹⁾，其中副元素含量 wt% 由 ppm 换算得出。

$\Sigma\text{REE} = 69 - 250 (\text{ppm})$, $(\text{La}/\text{Lu})_{\text{cn}} = 2.7 - 28.4$, 铈异常不明显, $\delta\text{Eu} = 1 \pm$, 有些碱性玄武岩的负铈异常比较明显⁽¹²⁾。与具肯尼迪趋势的碱性玄武岩相比, 阿克纳瓦山火山岩也基

本表现出相似的特征(表4),而且 $Nb/Y=1.39-4.21$,这是碱性玄武岩特征的微量元素比值之一^[13]。此外,岩石中不存在斜方辉石,而单斜辉石富Ca,具环带构造和沙钟构造,这些都是碱性玄武岩的基本特征。

综上所述,阿克纳瓦山晚泥盆世火山岩属于碱性玄武岩系列,但不是 SiO_2 高度不饱和的强过碱性火山岩。

火山岩一般可分为碱性和亚碱性两类^[7],就玄武岩而言,碱性玄武岩较 SiO_2 含量相同的亚碱性玄武岩具有更高的全碱含量。碱性玄武岩是一个岩石系列,以含标准矿物霞石的岩石为主时,便具肯尼迪趋势;但若以含标准矿物石英的岩石为主,或者含标准矿物霞石和石英的岩石共存时,则分别表现为库姆斯趋势或跨越趋势^[7]。这是因为玄武岩四面体中的橄榄石—斜长石—透辉石热分界面仅在低压无水条件下才存在,在高压($>1\text{ GPa}$)条件下,它不再是热分界面。这时,含标准矿物霞石的岩浆,既能与含标准矿物紫苏辉石的岩浆相互演化,也能与含标准矿物石英的岩浆相互演化,从而形成具不同演化趋势的碱性玄武岩。根据火山岩中单斜辉石斑晶化学成分(表1)估计的其结晶条件^[14]为: $t=1133-1223^\circ\text{C}$, $P=0.3-0.8\text{ GPa}$,深度约为10—26km,碱性长石斑晶是产生碱性玄武岩的岩浆处在相当深部位时结晶的^[4],有理由推测岩浆来自更大的深度。因此,阿克纳瓦山火山岩可能是含标准矿物霞石和含标准矿物紫苏辉石的两种岩浆相互演化的结果,因为它们时空关系非常密切,共同构成碱性玄武岩系列。

5 火山岩的成因

控制玄武岩形成和演化的两种最可能的过程是部分熔融和分离结晶作用。在这两种过程中,

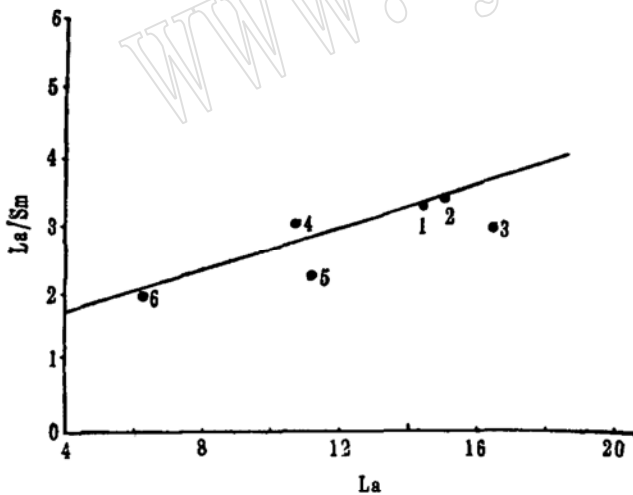


图6 阿克纳瓦山火山岩的La/Sm—La图解
Fig. 6 La/Sm—La diagram for volcanic rocks from Akenawa hills

图中数字是表3中样品的顺序号

中,强不相容元素的浓度 C^H 与其它微量元素的浓度 C^i 之间关系不同,通过 C^H/C^i-C^H 图解可以做过程判别:由不同程度批式部分熔融作用产生的一套样品,将趋于沿倾斜线分布,而分离结晶作用的趋势是水平线^[15]。但是,如果由部分熔融作用产生的岩浆后来再发生分离结晶作用,样品点将偏离倾斜线,造成分散^[16]。后来分离结晶作用越强的样品,偏离倾斜线越远。图6和图7a表明,阿克纳瓦山火山岩样品没有沿水平线分布的趋势,而且比较分散,但有四个样品基本沿倾斜线分布,另两个样品则偏离较远。这可能反映了由批式部分熔融作用产生的岩浆,后来受到分

离结晶作用的影响。

用最小二乘法求得图6中回归直线的方程为:

$$C^{La}/C^{Sm} = 0.1618C^{La} + 1.1016$$

相关系数 $r = 0.966$ 。相关系数检验和 F 检验表明, 回归方程的显著性水平为 0.05。

Hanson^[17]的研究表明, 由石榴石二辉橄榄岩部分熔融产生的一套样品, 稀土元素分配型式随部分熔融程度的不同呈现规律性变化: 随着部分熔融程度的提高, 稀土元素总量和分馏程度降低, 稀土元素分配型式从富集型向平坦型变化, 各分配曲线在重稀土元素部分交叉, 部分熔融程度越高的样品, 稀土元素分配型式越接近源岩的特点。从图 4 可以看出, 具线性关系的四个样品基本表现出上述特征, 从早 (样品QH5-22) 到晚 (样品QH5-1), 部分熔融程度呈降低趋势。

然而, 岩石中不含橄榄石的事实表明, 在部分熔融作用产生的岩浆中, 橄榄石可能是最主要的矿物分离相。由于橄榄石的稀土元素分配系数很小, 可认为等于 0^[17], 橄榄石分离结晶不会明显改变稀土元素分配型式和元素比值, 但却会导致稀土元素浓度和总量相对增加。橄榄石分离结晶的比例越高, 稀土元素浓度和总量的相对增加越明显。在 $C^H/C^i - C^H$ 图解中, 样品点将向右水平移动。如果橄榄石分离结晶比例不同, 样品点向右水平移动的距离有明显差异, 就会造成分散。在图 5 中, 虽然样品QH5-11和样品QH5-21偏离较远, 但它们的稀土元素分配型式却分别相似于样品QH5-18和样品QH5-22 (图 4), 这可能是因橄榄石分离结晶比例不同所致。所以, 这些样品基本保持了不同程度部分熔融作用所产生的岩浆的稀土元素分配型式和元素比值, 负铈异常也可能是源区岩石的特点。此外, 样品的 Mg 值、Ni 和 Cr 含量低 (表 2 和表 4), 都与橄榄石的分离结晶作用有关。

6 火山岩的构造环境

碱性玄武岩可以在多种构造环境中形成, 岛弧、活动大陆边缘火山弧、洋岛、大陆裂谷带和大陆内部都可产生碱性玄武岩。因此, 确定阿克纳瓦山碱性玄武岩的构造环境, 对于深入认识东准噶尔北部地区的构造演化具有非常重要的意义。

阿克纳瓦山碱性玄武岩的岩石化学和微量元素地球化学特征明显不同于洋中脊玄武岩 (表 4)。虽然在判别玄武岩构造环境的图解中阿克纳瓦山碱性玄武岩落在岛弧玄武岩区和洋中脊玄武岩区 (图 7 a) 或者火山弧熔岩区和洋中脊玄武岩区 (图 7 b), 但这并不一定意味着阿克纳瓦山碱性玄武岩形成于洋中脊。因为图 7 a 中的岛弧是指象汤加和新赫布里底那种在大洋型地壳上发育的岛弧, 而象北海道和新几内亚那种具大陆型地壳的火山弧, 其火山岩中并不贫 Zr, 完全可能落在洋中脊玄武岩区^[18]。由此推测, 阿克纳瓦山碱性玄武岩与具有陆壳基底的火山弧关系密切, 而 $Th/Nb = 0.4 - 1.19$, 与岛弧玄武岩 Th/Nb 比值完全一致, 却不同于洋中脊玄武岩的 Th/Nb 比值^[19]。地质证据也表明, 阿克纳瓦山碱性玄武岩是在浅海环境形成的。这样, 便可排除它们形成于洋中脊的可能性。

在稀土元素地球化学特征方面, 阿克纳瓦山碱性玄武岩与日本岛弧和安第斯活动大陆边缘火山弧碱性火山岩基本相似 (图 4), 只是阿克纳瓦山碱性玄武岩的稀土元素总量相对较低, 稀土元素分馏程度相对较弱。众所周知, 岛弧和陆缘火山弧中一般都发育一定数量的碱性玄武岩。象阿克纳瓦山碱性玄武岩那样, 由含标准矿物霞石和紫苏辉石的玄武岩一起组成碱性玄武岩的现象, 在活动大陆边缘火山弧中也存在, 如墨西哥的西火山岩带^[21]。所以, 阿

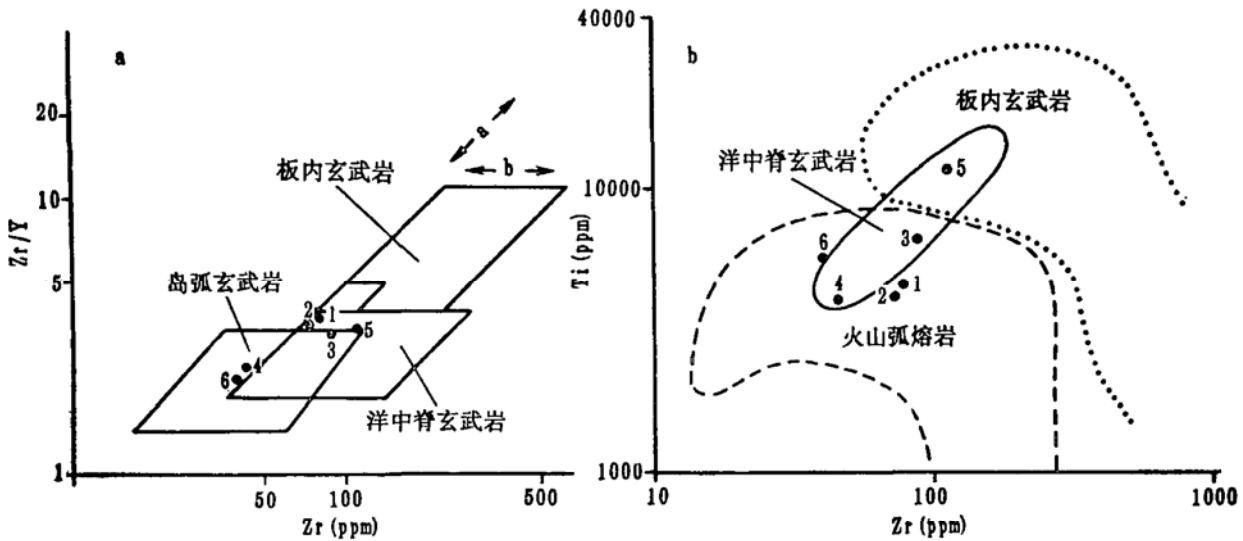


图 7 判别玄武岩构造环境的Zr/Y—Zr图解 (a) 和Ti—Zr图解 (b)
(据Pearce et al., 1979, 1982)

Fig. 7 Discrimination diagrams for tectonic settings of basalts (a) Zr/Y—Zr diagram and (b) Ti—Zr diagram

a 中的箭头 a 和 b 分别示部分熔融和分离结晶作用的方向。图中数字是表 4 中样品的顺序号

克纳瓦山碱性玄武岩很可能是在岛弧或活动大陆边缘火山弧的构造环境中形成的。

最近的研究^[22-24]提出, 在早古生代晚期至早一中泥盆世期间, 大陆拉伸作用使新疆北部的阿尔泰及其山前地区的地壳减薄, 统一的大陆分裂解体, 在陆壳断裂处产生了规模不大的洋盆。自晚泥盆世起, 洋壳向北东方向俯冲, 至早石炭世中期, 洋壳俯冲殆尽, 洋盆闭合, 阿尔曼泰—扎河坝蛇绿混杂岩带形成。在大陆拉伸作用期间, 现今的阿尔曼泰—扎河坝蛇绿混杂岩带以北地区没有出现洋壳, 仍然具陆壳基底。因此, 在后来洋壳俯冲期间, 如果发育岛弧, 它也应该是发育在大陆型地壳之上; 但若当时不存在象日本海那样的弧后盆地, 所产生的则应该是象安第斯山脉那样的活动大陆边缘火山弧, 只是其规模可能要小得多。因为由陆壳分裂解体产生的洋盆具次生性质, 洋盆规模小, 洋壳俯冲时间短, 所形成的活动大陆边缘和火山岩, 与大规模的原生洋壳长期俯冲作用形成的活动大陆边缘和火山岩相比, 既有相似性, 也应该有其特殊性, 这也应该反映在火山岩的岩石化学和地球化学特征上。

综上所述, 阿克纳瓦山火山岩很可能是在活动大陆边缘形成的, 尽管是岛弧还是活动大陆边缘火山弧尚不能肯定。活动大陆边缘皆以发育大量钙碱性火山岩为特征, 目前, 在阿克纳瓦山还未发育有这类岩石。但是, 在阿尔曼泰—扎河坝蛇绿混杂岩带以北其它地方的晚泥盆世火山岩中, 可能存在钙碱性火山岩。只有通过进一步工作, 才有可能建立起完整的活动大陆边缘火山岩系列, 进而确定究竟是岛弧还是活动大陆边缘火山弧。

7 结论

阿克纳瓦山晚泥盆世火山岩以中基性岩石为主, 最突出的特点是全碱含量较高。岩石化学成分以及稀土元素和微量元素地球化学特征表明, 火山岩属于由含标准矿物霞石和紫苏辉石的玄武岩组成的碱性玄武岩系列, 多数属于碱性玄武岩组, 少数属于橄榄玄粗岩组, 表现

为碱性玄武岩演化的肯尼迪趋势。

研究表明,阿克纳瓦山火山岩是地幔不同程度部分熔融作用的产物,熔融程度从早到晚呈降低趋势。在岩浆生成后到火山岩形成之前,岩浆中发生了橄榄石的分离结晶作用。这是岩石中不含橄榄石的原因所在。

火山岩的构造环境不可能是洋中脊,很可能是岛弧或活动大陆边缘火山弧,其下存在陆壳基底。活动大陆边缘的产生对应于以阿尔曼泰—扎河坝蛇绿混杂岩带为代表的次生洋壳向北东方向(现代方向)的俯冲作用。

本文是在何国琦教授、王式洸副教授指导下完成的。工作得到张进江、王喜桁和魏春景等同志的帮助。样品的分析测试由王凤珍、邵宏翔、张敬华、舒桂明和李小凤同志完成,并得到北京中关村联合分析测试基金的资助。图件由徐筠、许鉴儒同志清绘、植字。在此一并致谢!

参 考 文 献

- 1 Morimoto N. Nomenclature of pyroxenes. *Can. Mineral.* 1989, 27(1): 143—156.
- 2 Leake B E. Nomenclature of amphiboles. *Can. Mineral.* 1978, 16(4): 501—520.
- 3 郑巧荣. 由电子探针分析值计算 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} . *矿物学报*, 1983, (1): 55—62.
- 4 Smith J V. Brown W L. *Feldspar Minerals*. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 208—243.
- 5 Middlemost E A K. Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chem. Geol.* 1989, 77(1): 19—26.
- 6 Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, Zanettin B. A Chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. Petrology*, 1986, 27(3): 745—750.
- 7 Miyashiro A. Nature of alkalic volcanic rock series. *Contr. Miner. Petrol.* 1978, 66(1): 91—104.
- 8 Nakamura E, Campbell I H, McCulloch M T. Chemical geodynamics in a back arc region around the Sea of Japan: implications for the genesis of alkaline basalts in Japan, Korea, and China. *J. Geophys. Res.* 1989, 94(B4): 4634—4654.
- 9 Muñoz J, Stern C R. Alkaline magmatism within the segment 38°—39°S of the Plio-Quaternary volcanic belt of the southern South American continental margin. *J. Geophys. Res.* 1989, 94 (B4): 4545—4560.
- 10 Cullers R L, Graf J H. Rare earth elements in igneous rocks of the continental crust: predominantly basic and ultrabasic rocks. In: Henderson P, ed. *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, 1984. 237—274.
- 11 Pearce J A, Alabaster T, Shelton A W, Searle M P. The Oman ophiolite as a Cretaceous arc-basin complex: evidence and implication. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 1981, 300(A): 299—317.
- 12 陈德潜、陈刚. *实用稀土元素地球化学*. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
- 13 Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1973, 19(2): 290—300.
- 14 邱家骥、曾广策. 中国东部新生代玄武岩中低压单斜辉石的矿物化学及岩石学意义. *岩石学报*, 1987, (4): 1—9.
- 15 Allègre C J, Minster J F. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes. *Earth planet. Sci. Lett.* 1978, 38(1): 1—25.
- 16 Hofmann A W, Feigenson M D. Case studies on the origin of basalt. *Contr. Mineral. Petrol.* 1983, 84(4): 382—389.
- 17 Hanson G N. An approach to trace element modeling using simple igneous system as an example. In:

- Lipin B R, Mckay G A, ed. *Reviews in mineralogy*. Mineral. Soc. America, 1989. 79—97.
- 18 Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. *Contr. Mineral. Petrol.* 1979, 69(1): 33—47.
- 19 McDermott F, Hawkesworth C. Th, Pb, and Sr isotope variations in young island arc volcanics and oceanic sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1991, 104(1): 1—15.
- 20 Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe R S, ed. *Andesites*. Chichester: John Wiley and Sons, 1982. 525—547.
- 21 Luhr J F, Allan J F, Carmichael I S E, Nelson S A, Hasenaka T. Primitive calc-alkaline and alkaline rock types from the western Mexican volcanic belt. *J. Geophys. Res.* 1989, 94 (B4): 4515—4530.
- 22 何国琦、韩宝福、岳永君、王嘉衍. 中国阿尔泰造山带的构造分区和地壳演化. 见: 305项目《新疆地质科学》编委会编. *新疆地质科学*, 第2辑. 北京: 地质出版社, 1990. 9—20.
- 23 岳永君、王式洗、何国琦. 中国阿尔泰造山带中花岗岩类的成因类型及其在地壳演化中的意义. 见: 305项目《新疆地质科学》编委会编. *新疆地质科学*, 第2辑. 北京: 地质出版社, 1990. 72—85.
- 24 韩宝福. 新疆东准噶尔北部地区中泥盆世双峰式火山岩组合. *地质学报*, 1991, 65(4): 317—328.

Properties and Tectonic Environments of Late Devonian Volcanic Rocks in Akenawa Hills, Xinjiang

Han Baofu

(Department of Geology, Peking University)

Key words: Late Devonian volcanic rocks; alkaline basaltic series; island arc volcanic arc along active continental margin; Xinjiang

Abstract

The Late Devonian volcanic rocks of Akenawa Hills in northern Xinjiang, as a suite of intermediate and basic rocks, are characterized by high total alkali content which ranges from 3.55 to 7.55%. On the basis of their petrology, mineralogy, petrochemistry and REE as well as trace element geochemistry, it is believed that these volcanic rocks are of alkaline basaltic series dominated by rocks of alkaline basalt group with a small part belonging to shoshonite group, exhibiting a Kenedy trend of differentiation in alkaline basalts. The volcanic rocks might be products of partial melting of the mantle; nevertheless, fractionation and crystallization of olivine might have occurred in magma during the upward migration of magma through the crust. The tectonic environment of the volcanic rocks was probably an island arc or a volcanic arc along the active continental margin underlain by continental crust basement instead of a mid-oceanic ridge. The formation of an island arc or a volcanic arc in the active continental margin seems to have been related to Late Devonian northeastward subduction of the secondary oceanic crust formed during Early and Middle Devonian when the studied area was in extension and now represented by Aermantai-zhaheba ophiolitic melange zone.