

福建永泰云山晚中生代双峰式火山岩的地球化学及岩石成因*

邱检生 王德滋 周金城

(南京大学地球科学系, 南京 210093)

主题词 双峰式火山岩 地球化学 岩石成因 福建永泰云山

摘要 永泰云山早白垩世石帽山群第I、II旋回岩石组合由沉积岩、基性熔岩、酸性火山岩构成,缺乏中性成分的岩石单元,为典型的双峰式岩石组合。其玄武岩富碱(尤其富钾)、富铝、富铁,贫镁,富轻稀土元素和大离子亲石元素,贫高场强元素及亲铁元素,并具偏高的 I_{Sr} 值和显著偏低的 $\epsilon_{Nd}(T)$ 值[$I_{Sr}=0.70682\sim 0.70770$, $\epsilon_{Nd}(T)=-7.42\sim -3.22$]。流纹质岩石总体具富碱、富硅、富铝,贫钙、贫镁特征,其Rb、Th等元素的含量较高,而Ba、Sr、Ti、P等元素含量则明显偏低,并具显著的铕负异常($\delta Eu=0.16\sim 0.44$),岩石的 $\epsilon_{Nd}(T)$ 值变化于 $-5.93\sim -2.22$ 。I、II旋回玄武岩和流纹岩在地球化学特征上均具明显变异。根据对火山岩地球化学特征的综合分析表明,玄武岩主要为幔源岩浆与下部地壳岩石相互作用的产物,而流纹岩则为玄武岩浆与上部地壳物质进行热及成分交换的结果,不同旋回的玄武岩和流纹岩有不同的源区,为多次脉动分层部分熔融的产物。

中国东部中、新生代构造岩浆活动强烈,中生代与新生代岩浆活动的显著差异在于前者主要表现为大规模的中酸性岩浆活动,而后者则以广泛的基性岩浆活动为特征。近年来,越来越多的资料表明在东南沿海晚中生代的火山岩中也存在一定数量的玄武岩^[1~5],这些玄武岩多与同时代的流纹质火山岩共生,构成双峰式岩石组合。前人对区内的这套双峰式岩石组合进行过一定程度的研究^[1,3~5],本文以福建永泰火山盆地中的云山火山机构为例,对这套双峰式火山岩的地球化学特征进行了系统总结,并对其成因提出了新见解。

1 火山岩产出的地质背景

云山破火山机构位于闽东火山喷发带中段,永泰火山盆地近中央部位,构造上处于永定-闽江口北东东向断裂带上(图1)。该火山机构平面上呈长椭圆形,长轴北东东向,环状及放射状断裂发育。其火山口中央为潜火山岩相的石英二长斑岩,火山口周围为早白垩世石帽山群火山岩。据冯宗帜等对该区火山岩剖面的实测^[3],石帽山群可区分为三个沉积-喷发旋回,相应构成下、中、上三个组,下、中组为沉积岩-基性熔岩-酸性火山岩三元结构的

* 本文得到国家自然科学基金(编号:49632080)及高等学校博士学科点专项科研基金联合资助

第一作者简介 邱检生,男,1965年生,博士,副教授,主要从事火山-次火山作用及其与成矿关系方面的研究。

收稿日期 1998-12-09, 改回日期 1998-12-30

岩石组合,缺乏中性成分的岩石单元。其第 I 旋回玄武岩的 K-Ar 年龄为 113.2Ma,第 II 旋回流纹质火山岩的 K-Ar 年龄为 106.8Ma^[3],玄武岩与流纹岩形成时代相近,空间上紧密共存,因而为典型的双峰式岩石组合。该区第 I 旋回玄武岩的厚度达 141m,大于相应旋回流纹质火山岩的厚度(为 114m),第 II 旋回酸性流纹质火山岩所占比例明显增大,玄武岩和流纹质火山岩的厚度分别为 107m 和 575m^[3],至第 III 旋回(即石帽山群上组),在云山火山机构主要为沉积岩-酸性火山岩组合,缺乏玄武质的岩石单元,在该旋回的顶部还发育有含钠铁闪石和霓石的碱性流纹岩,但在永泰火山盆地的其它地区,如九重山、淡岫寨等地仍有双峰式火山岩。从区域范围看,石帽山群双峰式的岩浆活动自早至晚渐趋变弱。

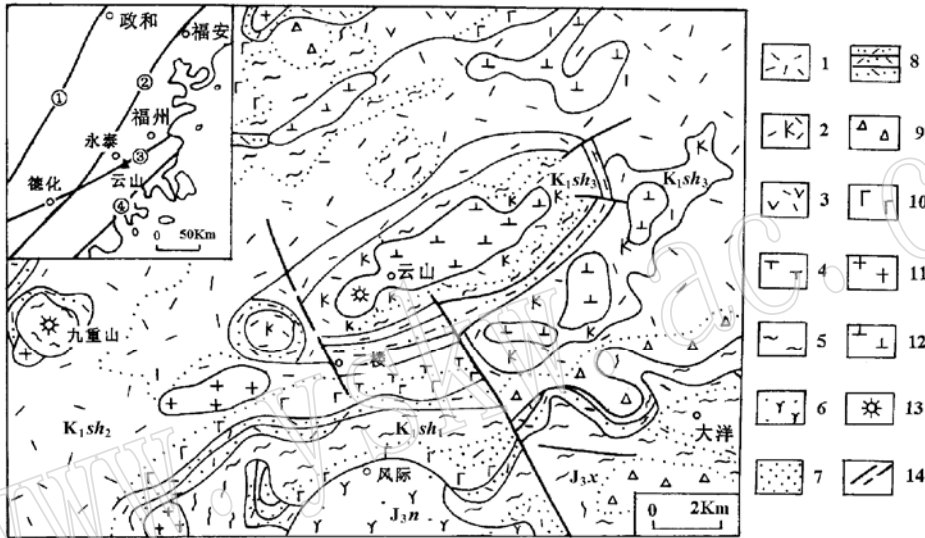


图 1 永泰云山破火山地质略图(据[3]修改)

Fig. 1 Geological sketch map of Yunshan caldera, Yongtai County

1—流纹岩; 2—钾长流纹岩; 3—英安岩; 4—石英粗面岩; 5—熔结凝灰岩; 6—英安质凝灰熔岩; 7—凝灰岩; 8—凝灰质砂岩或粉砂岩; 9—火山角砾岩; 10—玄武岩; 11—花岗岩; 12—石英二长斑岩; 13—火山喷发中心; 14—实测及推测断裂(①政和—大埔断裂; ②福安—南靖断裂; ③永定—闽江口断裂; ④长乐—南澳断裂)。J₃n—南园组; J₃x—小溪组; K₁sh₁—石帽山群下组; K₁sh₂—石帽山群中组; K₁sh₃—石帽山群上组

2 火山岩的地球化学

组成云山双峰式火山岩基性端员的岩石类型相对简单,按 TAS 分类主要为玄武安山岩和玄武粗安岩,而酸性端员的岩石类型相对复杂,包括多种流纹质熔岩(如钾长流纹岩、球粒流纹岩、球泡流纹岩等)及流纹质火山碎屑岩(主要为熔结凝灰岩),此外在第 II 旋回的上段还分布有石英粗面岩。

2.1 主量元素

表 1 列出了云山双峰式火山岩的岩石化学成分及主要岩石化学参数,为便于对比,表中还列出了福建沿海新生代玄武岩(以福建龙海为代表)及拉斑玄武岩和碱性玄武岩的平均值。由表 1 数据可知,云山双峰式火山岩中玄武质岩石在化学成分上具有以下特点:(1)富

碱,其 K_2O+Na_2O 含量变化于 4.11%~7.07%,在 $SiO_2-(K_2O+Na_2O)$ 岩系划分图^[6]上主要投在碱性系列,而区内新生代玄武岩则多投在亚碱性岩系(图 2a)。(2)富钾, K_2O 含量为 1.48%~3.84%, K_2O/Na_2O 值平均达 0.68,远高于区内新生代玄武岩。在 IUGS(1989)推荐的 SiO_2-K_2O 分类图^[7]上,云山晚中生代双峰式火山岩中的玄武岩多投在高钾岩石区,而新生代玄武岩主要位于低钾和中钾岩石分界线两侧(图 2b)。(3)富铝、贫镁,其 Al_2O_3 含量变化于 15.77%~17.29%, MgO 值介于 3.55%~5.13%,与新生代玄武岩明显有别(图 2c)。(4)相对富铁,其 FeO^*/MgO 值平均达 2.07,远高于区内新生代玄武岩及世界拉斑玄武岩和碱性玄武岩的相应值。上述特征反映云山晚中生代双峰式火山岩中的玄武岩并非原始地幔岩浆派生的产物。其第 I 旋回与第 II 旋回玄武岩在化学成分上具明显变异,第 II 旋回玄武岩较之第 I 旋回玄武岩相对贫硅、贫碱, K_2O/Na_2O 值偏低,但 FeO 、 CaO 含量偏高。双峰式火山岩中的流纹岩较之 Nockolds(1954)提出的流纹岩的平均成分^[10]总

表 1 永泰云山晚中生代双峰式火山岩岩石化学成分(%)及主要岩石化学参数

Table 1 Chemical composition (%) and main petrochemical parameters of Late Mesozoic bimodal volcanic rocks in Yunshan, Yongtai County

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
样品数	(1)	(5)	(1)	(2)	(12)	(1010)	(279)	(1)	(2)	(1)	(2)	(4)	(6)
SiO_2	53.56	52.31	51.80	51.52	50.83	48.62	46.33	77.22	77.68	75.30	76.01	69.52	75.64
TiO_2	1.39	1.54	1.52	1.63	1.50	2.00	2.58	0.13	0.13	0.21	0.17	0.60	0.16
Al_2O_3	15.96	16.26	17.01	16.94	15.16	15.1	14.9	11.65	11.88	12.10	12.18	14.19	12.19
Fe_2O_3	5.91	5.69	4.92	4.91	3.82	3.46	4.69	1.15	1.02	12.12	1.44	2.65	1.37
FeO	2.76	3.68	4.77	4.84	6.96	7.77	7.12	0.10	0.14	0.13	0.36	0.84	1.29
MnO	0.14	0.12	0.14	0.14	0.16	0.17	0.18	0.04	0.06	0.07	0.05	0.10	0.05
MgO	4.30	4.40	4.31	4.30	6.94	7.84	8.09	0.20	0.16	0.20	0.36	0.49	0.10
CaO	7.18	6.63	8.00	8.09	8.58	10.17	9.88	0.22	0.13	0.22	0.17	0.42	0.14
Na_2O	2.52	3.88	2.63	2.77	2.61	2.76	3.2	3.77	3.11	3.46	2.96	3.77	3.10
K_2O	2.42	2.54	1.48	1.51	0.70	0.84	1.28	4.49	4.81	4.95	5.04	5.38	5.01
P_2O_5	0.85	0.74	0.53	0.50	0.24	0.35	0.52	0.03	0.03	0.03	0.02	0.10	0.01
σ	2.31	4.67	1.92	2.16	1.40	2.31	6.03	1.99	1.81	2.19	1.94	3.16	2.01
ALK	4.94	6.42	4.11	4.28	3.31	3.60	4.48	8.26	7.92	8.41	8.00	9.15	8.11
K/Na	0.96	0.73	0.56	0.55	0.27	0.30	0.40	1.19	1.65	1.43	1.70	1.43	1.62
A/NKC	0.81	0.77	0.83	0.81	0.73	0.63	0.61	1.02	1.14	1.06	1.15	1.11	1.13
TFe/Mg	1.88	2.04	2.13	2.15	1.50	1.39	1.40	5.68	6.85	10.19	4.65	6.61	24.40
A.R.	1.54	1.77	1.39	1.41	1.32	1.33	1.44	4.48	3.41	3.56	2.32	3.83	3.83
AKI	0.42	0.56	0.35	0.37	0.33	0.36	0.45	0.95	0.87	0.91	0.85	0.85	0.86
DI	44.4	50.6	37.6	37.9	29.4	28.6	32.2	96.3	95.8	94.2	93.8	89.7	93.3

1—第 I 旋回玄武岩,本文资料; 2—第 I 旋回玄武岩平均值,据本文及[3]综合; 3—第 II 旋回玄武岩,本文资料; 4—第 II 旋回玄武岩平均值,据本文及[3]综合; 5—福建沿海新生代玄武岩平均值,据[8]综合; 6—拉斑玄武岩平均值,据[9]; 7—碱性玄武岩平均值,据[9]; 8—第 I 旋回流纹岩,本文资料; 9—第 I 旋回流纹岩平均值,据本文及[3]综合; 10—第 II 旋回流纹岩,本文资料; 11—第 II 旋回流纹岩平均值,据本文及[3]综合; 12—第 II 旋回粗面岩平均值,据[3]综合; 13—第 III 旋回流纹岩(非双峰式)平均值,据本文及[3]综合; σ —里特曼指数; $ALK = K_2O + Na_2O$; $K/Na = K_2O/Na_2O$; $A/NKC = Al_2O_3/(Na_2O + K_2O + CaO)$, 分子比; $TFe/Mg = (FeO + 0.9 \times Fe_2O_3)/MgO$; A.R.—碱度率; $AKI = (Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$; D.I.—分异指数。本文数据由南京大学地球科学系中心实验室用湿法化学分析法测定。

体具有富硅、铝, 贫钙、镁的特征, 岩石的 A/NKC 值变化于 $1.02 \sim 1.26$, 分异演化程度较高, $D.I$ 值介于 $93.5 \sim 96.3$, 其全碱含量也较高, $K_2O + Na_2O$ 值变化于 $7.87\% \sim 8.41\%$, AKI 值介于 $0.78 \sim 0.95$ 。第 I 旋回与第 II 旋回流纹岩之间在化学成分上同样存在一定的变异, 总体而言, 第 II 旋回流纹岩相对贫硅、富碱, 富钙、镁, 在第 II 旋回上部发育有石英粗面岩。第 III 旋回非双峰式的流纹岩明显富铁、贫镁, 其 FeO^*/MgO 值平均达 24.40 , 略富碱, 而硅、铝变化则不大。上述三个旋回流纹岩成分的变异反映它们并非简单的同源岩浆分异演化的产物。

2.2 微量元素

云山晚中生代双峰式火山岩中玄武岩的 Rb 、 Sr 、 Ba 含量分别变化于 $47 \times 10^{-6} \sim 104 \times 10^{-6}$ 、 $666 \times 10^{-6} \sim 1086 \times 10^{-6}$ 和 $759 \times 10^{-6} \sim 1248 \times 10^{-6}$ (表 2), 较之区内新生代玄武岩^[11] 明显偏高(图 3a, b), 而 Nb 、 Zr 等高场强元素及 Cr 、 Co 、 Ni 等亲铁元素的含量则显著偏低(图 3c)。与 P. E. Holm (1985) 提出的洋岛玄武岩、大陆拉斑玄武岩及初始裂谷拉斑玄武岩^[12] 相比, 云山晚中生代双峰式火山岩中的玄武岩也以富钾、富大离子亲石元素为特征(图 4), 其 Th/U 值远高于相比较的各类玄武岩, 反映其成岩物质中壳源组份所占比例较大。从微量元素相对于原始地幔标准化的配分型式中还可看出, 云山晚中生代双峰式火山岩中玄武岩有较明显的 Nb 负异常, 与大陆拉斑玄武岩相似, 但明显有别于洋岛玄武岩和初始裂谷环境下的拉斑玄武岩, 后者常表现出一定的 Nb 正异常(图 4), 因此, 尽管云山双峰式火山岩的出现指示当时该区构造环境已处于拉张状态, 但尚未达到裂谷化程度, 其玄武岩的起源深度应相对较浅。第 II 旋回玄武岩较之第 I 旋回玄武岩贫 Rb 、 Sr 、 Ba 及 Nb 、 Zr 、 Hf , 相对富 Ni 、 Co 、 V , 但 Cr 的含量又较高, 这种特征也说明这两个旋回的玄武岩并非同源岩浆分异演化的产物, 而可能为

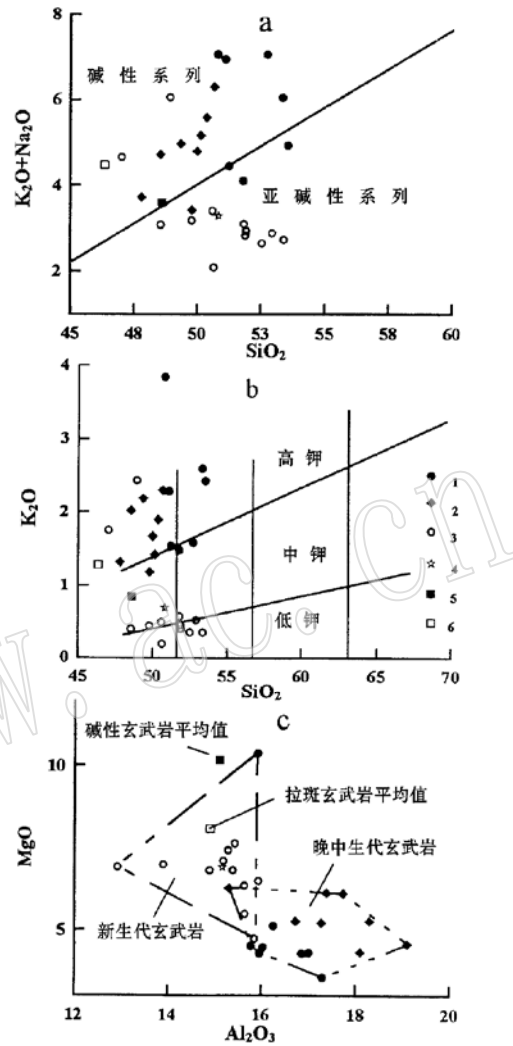


图 2 浙闽沿海晚中生代双峰式火山岩中玄武岩与新生代玄武岩 $SiO_2 - (K_2O + Na_2O)$ (a)、 $SiO_2 - K_2O$ (b) 及 $Al_2O_3 - MgO$ (c) 关系对比图

Fig. 2 $SiO_2 - (K_2O + Na_2O)$ (a), $SiO_2 - K_2O$ (b) and $Al_2O_3 - MgO$ (c) diagrams of basalt from late Mesozoic bimodal volcanic rocks and Cenozoic basalts in Zhejiang-Fujian coastal areas

1—福建云山晚中生代双峰式火山岩中的玄武岩(除本文资料外, 尚引用了文献[3]的资料); 2—浙江玄坛地晚中生代双峰式火山岩中的玄武岩^[4]; 3—福建龙海新生代玄武岩^[8]; 4—福建龙海新生代玄武岩平均值(据[8]综合); 5—拉斑玄武岩平均值^[9]; 6—碱性玄武岩平均值^[9]。a、b 底图分别据文献[6]和[7]

不同源区岩石部分熔融所致。双峰式火山岩中流纹岩明显富 Rb、Th, 贫 Ba、Sr、Ti、P, 其微量元素相对于原始地幔的配分型式与玄武岩迥异(图4), 反映二者之间缺乏明显的成因联系。

2.3 稀土元素

云山双峰式火山岩中第 I 旋回与第 II 旋回玄武岩稀土元素特征有较明显的差异, 第 I 旋回玄武岩的稀土元素总量及轻、重稀土元素比值均高于第 II 旋回玄武岩, I、II 旋回玄武岩的 ΣREE 含量和 LREE/HREE 值分别变化于 $255.92 \times 10^{-6} \sim 275.73 \times 10^{-6}$ 、 $128.23 \times 10^{-6} \sim 187.30 \times 10^{-6}$ 和 $13.02 \sim 15.34$ 、 $3.98 \sim 10.11$ (表3)。与区内新生代玄武岩相比, 晚中生代双峰式火山岩中玄武岩的 ΣREE 含量和 LREE/HREE 值明显偏高(图3d)。流纹岩的稀土元素总量及轻、重稀土元素比值变化较大, I、II 旋回流纹岩的 ΣREE 含量和 LREE/HREE 值分别变化于 $127.39 \times 10^{-6} \sim 452.72 \times 10^{-6}$ 、 $220.00 \times 10^{-6} \sim 448.48 \times 10^{-6}$ 和 $5.90 \sim 15.53$ 、 $8.02 \sim 9.71$ 。与基性端员的玄武质火山岩相比, 酸性端员的流纹质及石英粗面质火山岩具明显的铕负异常($\delta\text{Eu} = 0.16 \sim 0.44$, 表3, 图5), 且重稀土元素的分馏程度较低。

2.4 Sr、Nd 同位素

云山双峰式火山岩中玄武岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 值为明显的负值, 且 I、II 旋回玄武岩的钕同位素组成有较显著的差别, 其 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 值分别为 $-7.42 \sim -6.28$ 和 $-4.10 \sim -3.22$ (表4), 钕同位素组成的差异同样说明它们不可能为同一母岩浆分异演化的产物。二者的锶同位素组成也具有一定的变异, I、II 旋回玄武岩的 I_{Sr} 值分别为 0.70770 和 0.70682。上述 Nd、Sr 同位素组成明显不同于洋脊玄武岩、洋岛玄武岩^[13]及中国东部新生代钠质玄武岩^[14](图6), 浙闽沿海许多盆地中的晚中生代玄武岩(或相应成分的侵入岩)均具相似的同位素组成, 如浙江宁波玄坛地双峰式火山岩中玄武岩的 Nd、Sr 同位素组成为 $\epsilon_{\text{Nd}}(T) = -3.54 \sim -6.33$, $I_{\text{Sr}} = 0.7067 \sim 0.7081$ ^[4]; 浙江新昌拔茅火山盆地晚中生代玄武岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 为 -4.58 ^[5]; 福建漳州上房辉长苏长岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(T) = -3.12$, $I_{\text{Sr}} = 0.7059$ ^[15]; 美国黄石公园新生代双峰式火山岩中的玄武岩也具类似的同位素组成, 其 $\epsilon_{\text{Nd}}(T) = -2.4 \sim -7.9$, $I_{\text{Sr}} = 0.70377 \sim 0.70886$ ^[16], 根据上述 Nd、Sr 同位素组成, 多数学者均主张这些岩石应为壳幔混源岩浆派生的产物^[4-5, 15-16]。云山第 II 旋回玄武岩较之第 I 旋回玄武岩具有偏高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 值和略偏低的 I_{Sr} 值, 说明第 II 旋回玄武岩中幔源物质所占比例大于第 I 旋回玄武岩。双峰式火山岩

表2 永泰云山晚中生代双峰式火山岩微量元素含量($\times 10^{-6}$)

Table 2 Trace element contents of the Late Mesozoic bimodal volcanic rocks in Yunshan, Yongtai County($\times 10^{-6}$)

旋回	I	II	I	II
岩性	玄武岩	玄武岩	流纹岩	流纹岩
样号	Ys-15	Ys-12	Ys-14	Ys-11
Rb	104	47	216	199
Sr	1086	666	32	23
Ba	1248	759	76	121
U	—	0.3	4	4
Th	3	3	28	24
Nb	18	11	34	34
Zr	324	196	168	460
Hf	11	7	6	12
Ga	17	22	16	20
Y	27	25	35	62
Sc	25	24	4	4
Cr	88	36	18	4
Ni	38	41	3	7
Co	20	33	7	2
V	177	238	12	12
Cu	10	34	—	1
Pb	15	17	17	40
Zn	120	96	10	86
Rb/Sr	0.096	0.071	6.750	8.652
Ni/Co	1.90	1.24	0.43	3.50
Zr/Y	12.0	7.8	4.8	7.4

微量元素由南京大学现代分析中心用 XRF 方法测定。

表3 永泰云山晚中生代双峰式火山岩稀土元素含量($\times 10^{-6}$)Table 3 REE content of Late Mesozoic bimodal volcanic rocks in Yunshan, Yongtai County($\times 10^{-6}$)

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
样号	Ys-15	PI-10	PI-16	Ys-12	PI-27	PI-35	Ys-14	PI-20	PI-22	Ys-11	PI-54	PI-50	PI-51
旋回	I			II			I			II			
岩性	玄武岩						流纹岩			石英粗面岩			
La	60.24	39.20	56.20	27.90	21.50	38.80	27.28	81.80	110.00	105.30	43.30	56.10	37.00
Ce	106.50	169.00	112.00	53.05	46.20	78.80	53.02	149.00	170.00	180.70	92.20	129.00	80.80
Pr	13.64	8.73	12.70	7.71	6.07	9.30	5.56	15.00	24.40	21.01	10.60	13.10	8.31
Nd	55.81	34.00	48.20	30.17	22.50	35.70	18.89	53.00	91.20	83.74	40.30	49.90	29.50
Sm	9.54	6.44	7.95	6.05	4.98	6.25	3.97	8.11	15.70	14.75	8.46	9.35	5.82
Eu	2.39	1.49	1.91	1.96	1.22	1.59	0.21	0.59	2.05	1.11	0.75	0.49	0.73
Gd	7.45	5.68	6.30	5.81	5.27	5.50	4.12	6.07	12.10	12.75	7.09	7.61	4.40
Tb	0.95	0.85	0.81	0.85	0.85	0.73	0.71	0.81	1.84	1.90	1.16	1.16	0.83
Dy	4.90	4.12	4.04	4.58	3.99	4.10	4.76	5.01	10.20	10.98	6.26	7.19	3.88
Ho	0.98	0.93	0.88	0.93	0.99	0.97	1.09	1.03	2.04	2.34	1.31	1.49	0.90
Er	2.36	2.31	2.17	2.28	2.41	2.34	3.22	2.93	5.82	6.19	3.63	4.20	2.45
Tm	0.33	0.62	0.64	0.32	9.79	0.75	0.50	0.54	1.11	0.93	0.77	0.74	0.53
Yb	1.82	2.04	1.84	1.78	2.14	2.15	3.54	2.94	5.41	5.90	3.63	3.92	2.51
Lu	0.27	0.32	0.28	0.26	0.33	0.32	0.52	0.47	0.85	0.88	0.54	0.58	0.38
Y	22.88	20.90	18.90	21.63	20.00	20.40	32.61	26.40	51.40	58.06	34.10	37.80	21.50
Σ REE	267.18	275.73	255.92	143.64	128.23	187.30	127.39	327.31	452.72	448.48	220.00	284.82	178.04
LREE/HREE	13.02	15.34	14.09	7.55	3.98	10.11	5.90	15.53	10.50	9.71	8.02	9.59	10.21
(La/Yb) _N	23.75	13.78	21.91	11.26	7.21	12.94	5.52	19.96	14.58	12.81	8.56	10.27	10.57
(La/Sm) _N	4.08	3.93	4.56	2.98	2.79	4.01	4.43	6.51	4.52	4.61	3.30	3.87	4.10
(Gd/Yb) _N	3.39	2.30	2.83	2.70	2.04	2.12	0.96	1.71	1.85	1.79	1.62	1.61	1.45
δ Eu	0.83	0.74	0.80	1.00	0.72	0.81	0.16	0.25	0.44	0.24	0.29	0.17	0.42

1、4、7、10 为本文资料,由南京大学成矿作用国家重点实验室用 ICP 方法测定;其余引自参考文献[3]。

表4 永泰云山晚中生代双峰式火山岩 Nd-Sr 同位素组成

Table 4 Nd-Sr isotopic compositions of Late Mesozoic bimodal volcanic rocks in Yunshan, Yongtai County

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
样号	Ys-15		Ys-14	Ys-12		Ys-11			
岩性	玄武岩	玄武岩	流纹岩	玄武岩	玄武岩	流纹岩	流纹岩	流纹岩	石英粗面岩
年龄(Ma)	113.2	113.2	110 ^①	108 ^①	108 ^①	106.8	106.8	106.8	106.8
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	0.2738			0.2339					
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.70818			0.70718					
<i>I</i> _{Sr}	0.70770			0.70682					
ϵ _{Sr} (<i>T</i>)	47.29			34.78					
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.10450	0.0512	0.13350	0.12730	0.1129	0.11030	0.1125	0.1075	0.1130
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512189 \pm 8	0.512208	0.512288 \pm 9	0.512379 \pm 6	0.512414	0.512397 \pm 6	0.512466	0.512437	0.512448
<i>I</i> _{Nd}	0.512112	0.512170	0.512192	0.512289	0.512334	0.512320	0.512387	0.512362	0.512369
ϵ _{Nd} (<i>T</i>)	-7.42	-6.28	-5.93	-4.10	-3.22	-3.52	-2.22	-2.70	-2.57

① 为假定年龄。1、3、4、6 为本文资料,由中国科学院地质研究所同位素室测定;2、5、7、8、9 引自参考文献[3]。

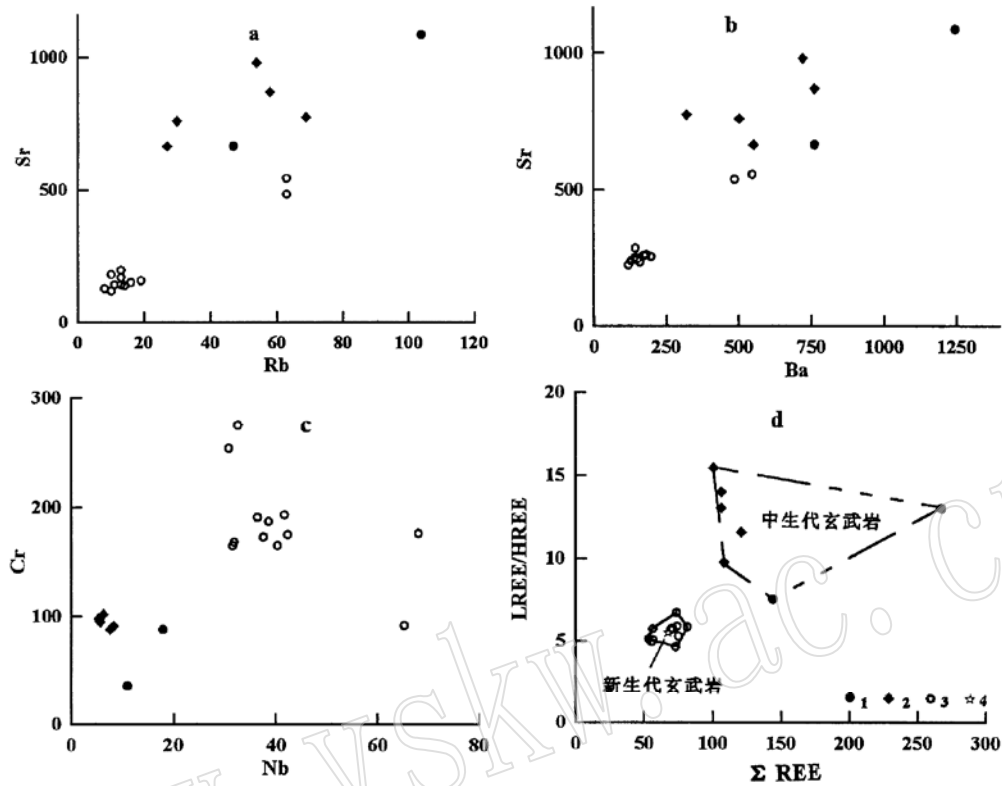


图 3 浙闽沿海晚中生代双峰式火山岩中玄武岩与新生代玄武岩

Rb - Sr(a)、Ba - Sr(b)、Nb - Cr(c)及 $\Sigma\text{REE} - \text{LREE}/\text{HREE}$ (d)关系对比图

Fig. 3 Rb - Sr(a)、Ba - Sr(b)、Nb - Cr(c) and $\Sigma\text{REE} - \text{LREE}/\text{HREE}$ (d) diagrams of basalt from Late Mesozoic bimodal volcanic rocks and Cenozoic basalts in Zhejiang-Fujian coastal areas
 1—福建云山晚中生代双峰式火山岩中的玄武岩；2—浙江玄坛地晚中生代双峰式火山岩中的玄武岩^[4]；
 3—福建龙海新生代玄武岩^[11]；4—福建龙海新生代拉斑玄武岩平均值

中流纹岩的钕同位素组成也具有相似的变化规律，I、II 旋回流纹岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 值分别为 -5.93 和 -3.52 ~ -2.22(表 4)，即第 II 旋回流纹岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 值高于第 I 旋回流纹岩。有意义的是同一旋回中流纹岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 值普遍高于玄武岩，对于这一现象目前尚缺乏令人信服的解释。

3 火山岩的成因

对双峰式火山岩的成因，前人已进行广泛研究，这套岩石组合由于存在明显的“戴里间断”(Daly gap)，因而目前普遍认为其玄武岩和流纹岩在整体上应起源于两个独立的岩浆房，而不是分离结晶的产物，其中玄武质岩石主要起源于上地幔物质的部分熔融，流纹质岩石为玄武质岩浆与地壳物质进行热及成分交换(壳-幔相互作用的一种形式)的结果。从前面以云山为代表的浙闽沿海晚中生代双峰式火山岩地球化学特征的讨论可看出，其玄武岩

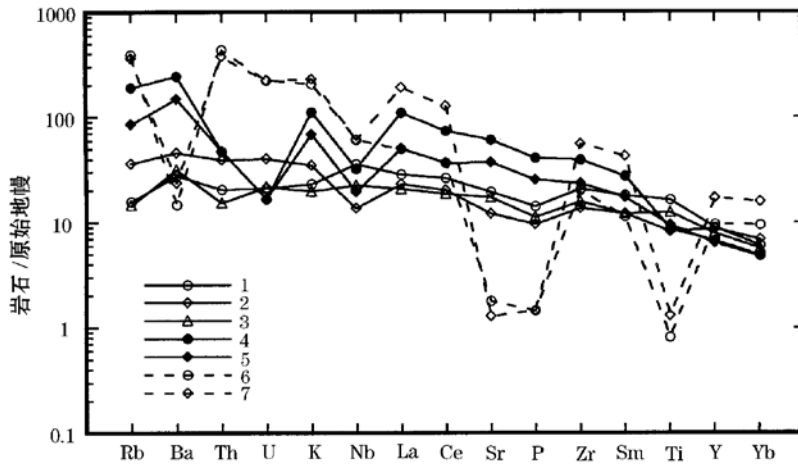


图4 云山晚中生代双峰式火山岩亲石元素相对于原始地幔标准化的配分型式

Fig. 4 Primitive mantle-normalized lithophile element patterns of Late Mesozoic bimodal volcanic rocks in Yushan

1—洋岛拉斑玄武岩；2—大陆拉斑玄武岩；3—初始裂谷拉斑玄武岩；4—云山石帽山群第Ⅰ旋回玄武岩；
5—云山石帽山群第Ⅱ旋回玄武岩；6—云山石帽山群第Ⅰ旋回流纹岩；7—云山石帽山群第Ⅱ旋回流纹岩
1、2、3资料引自参考文献[12]

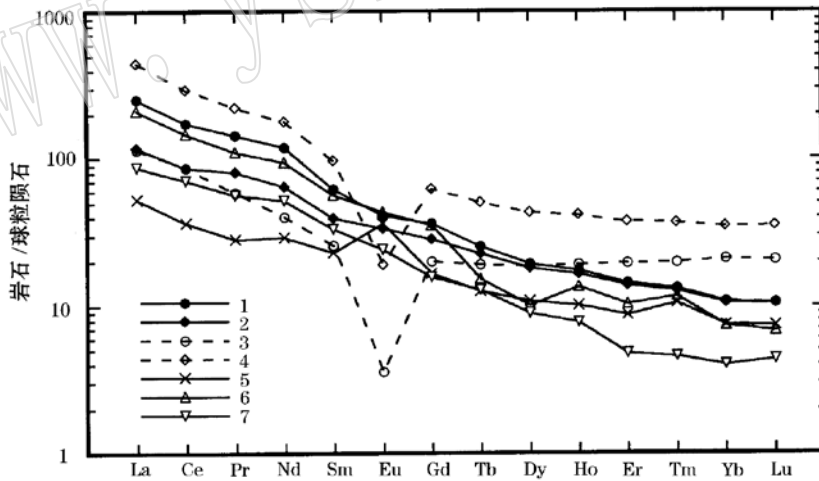


图5 云山晚中生代双峰式火山岩稀土元素球粒陨石标准化配分型式

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of late Mesozoic bimodal volcanic rocks in Yunshan
1—云山石帽山群第Ⅰ旋回玄武岩；2—云山石帽山群第Ⅱ旋回玄武岩；3—云山石帽山群第Ⅰ旋回流纹岩；
4—云山石帽山群第Ⅱ旋回流纹岩；5—福建新生代拉斑玄武岩^[11]；6—福建新生代碱性玄武岩^[11]；
7—浙江玄坛地晚中生代双峰式火山岩中的玄武岩^[4]

普遍富硅、铝， FeO^*/MgO 值较高，富碱，富大离子亲石元素，贫过渡族元素，并具偏高的 I_{Sr} 值和显著偏低的 $\epsilon_{Nd}(T)$ 值，上述特征明显不同于区内新生代典型的幔源玄武岩，说明它们

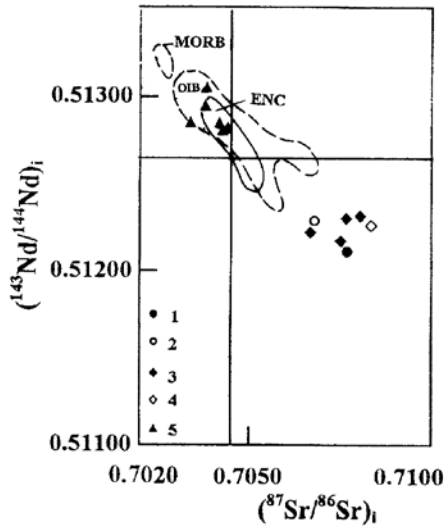


图 6 浙闽沿海晚中生代双峰式火山岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 对 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 关系图

Fig. 6 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ versus $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ diagram of Late Mesozoic bimodal volcanic rocks in Zhejiang-Fujian coastal area

1—云山石帽山群第 I 旋回玄武岩；2—云山石帽山群第 II 旋回玄武岩；3—浙江玄坛地晚中生代双峰式火山岩中的玄武岩^[4]；4—浙江玄坛地晚中生代双峰式火山岩中的流纹岩^[4]；5—福建龙海新生代玄武岩^[11] MORB—洋脊玄武岩^[12]；OIB—洋岛玄武岩^[12]；ENC—中国东部新生代钠质玄武岩^[13]

并非幔源原始岩浆派生的产物，为此，对这类岩石的成因提出了多种解释。亓润章等(1989)认为区内玄武岩是由于上地幔物质低程度部分熔融产生的岩浆被挤到距地表 3.5~5km 深处的过渡岩浆房内，经分离结晶和混染作用形成的进化岩浆结晶而成^[1]；杨祝良(1993)则认为玄武岩可能起源于富集地幔的部分熔融^[17]。对前一种观点，一般而言，原始地幔物质低程度部分熔融形成的岩浆经分离结晶难以产生区内玄武岩所具有的地球化学特征，而后一种观点目前尚缺乏足够的资料以佐证，因而对这类岩石的成因目前更强调地壳物质的混染作用。俞云文等(1993)通过对浙江玄坛地早白垩世晚期双峰式火山岩的研究，认为其玄武岩浆来源于岩石圈地幔的最顶部与下地壳交界处，即幔壳过渡区，此处岩石发生部分熔融可形成既具地幔岩浆特征，又有地壳印记的幔壳混熔岩浆^[4]，Hildreth 等(1991)对美国黄石公园新生代双峰式火山岩的研究也强调了壳源物质的混染在玄武岩的形成过程中起重要作用^[16]。东南沿海晚中生代玄武岩与新生代玄武岩的另一显著区别即是前者一般不含幔源包体，这种特征说明晚中生代玄武岩浆在下部地壳滞留的时间长，有较多的机会与地壳岩石发生相互作用，因此幔源岩浆与下部地壳岩石的相互作用应是区内晚中生代玄武岩形成的主要机制。云山晚中生代双峰式火山岩具

有多旋回活动的特征，不同旋回岩石之间的地球化学特征具明显变异，冯宗帜等(1991)认为是由于分异作用形成带状岩浆房喷发的结果^[3]，然而从前面地球化学特征的讨论可知，同一源区岩浆的分异演化不足以造成彼此之间 Nd、Sr 同位素组成的明显变异。笔者认为区内不同旋回岩石应具不同源区，第 II 旋回玄武岩较之第 I 旋回玄武岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 值偏高， I_{Sr} 值略低，说明前者岩浆起源深度更大，幔源岩浆卷入的比例更高，为此笔者将云山晚中生代双峰式火山岩的形成过程归结如下：相当于早白垩世晚期，由于区域性地幔隆起，构造应力由挤压向初始引张阶段转变，导致断裂切割深度加大，进而引起上地幔物质部分熔融形成的岩浆上涌，迁移到下地壳，并与下地壳物质发生相互作用形成壳幔混熔岩浆，同时由于其不断向上辐射热量，又使位于其上的中—上部地壳物质发生熔融，并与上升的玄武岩浆发生相互作用，产生酸性岩浆，它们喷出地表后即形成第 I 旋回的双峰式火山岩组合。随着引张作用的增强，断裂切割深度进一步增大，导致更深层次的地幔物质发生更广泛的熔融作用，并大量迁入下部地壳，在与下部地壳物质相互作用的基础上，形成新的混熔岩浆，这种混熔岩浆由于幔源岩浆起源深度及幔壳混入比例与第 I 旋回岩浆不同，因而造成了彼此之间地球化学特征的明显变异，新的混熔岩浆不断向上辐射热量，又导致其上部的地壳物质发生再次熔

融,在与上升的玄武岩浆相互作用的基础上,产生新的酸性岩浆,它们喷出地表后即形成第Ⅱ旋回的双峰式火山岩组合,笔者将这一成岩模式称之为多次脉动分层熔融模式,它较好地解释了区内不同旋回双峰式火山岩的地球化学变异特征。

参 考 文 献

- 1 亓润章,吴志勤,邹永兴等. 东南沿海陆相多旋回双峰式火山岩. 南京地质矿产研究所所刊, 1989, 10(3): 4~23.
- 2 毛建仁,程启芬. 东南大陆中生代玄武岩岩石系列及其构造意义. 南京地质矿产研究所所刊, 1990, 11(4): 29~43.
- 3 冯宗帜,亓润章,黄水兴,李进堂等. 福建永泰-德化地区火山地质及火山岩含矿性. 南京地质矿产研究所所刊, 1991, 增刊(9): 1~100.
- 4 俞云文,周泰禧,陈江峰. 浙江玄坛地早白垩世晚期双峰式火山岩特征及其成因. 南京大学学报(地球科学), 1993, 5(4): 420~429.
- 5 王德滋,周金城,邱检生,张海进. 东南沿海早白垩世火山活动中的岩浆混合及壳幔作用证据. 南京大学学报(地球科学), 1994, 6(4): 317~325.
- 6 MacDonald G A, Katsura T J. Chemical composition of Hawaiian lavas. *J. Petrol.*, 1964, 5(1): 82~133.
- 7 Le Maitre R W (editor in chief). A classification of igneous rocks and glossary of terms. Blackwell Scientific Publications, 1989.
- 8 赵海玲. 东南沿海地区晚第三纪-第四纪大陆裂谷火山作用及深部作用过程. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990.
- 9 Mysen B O. Magmatic silicate melts: relations between bulk composition structure and properties. *The Geochemical Society, Special Publication*, (1): 375~399.
- 10 Nockolds S R. Average chemical composition of some igneous rocks. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1954, 65: 1007~1032.
- 11 张剑波,陈道公. 福建省龙海和明溪地区玄武岩地球化学. 见: 中国新生代火山岩年代学与地球化学(主编: 刘若新), 北京: 地震出版社, 1992, 298~319.
- 12 Holm P E. The geochemical fingerprints of different tectonomagmatic environments using hygromagmatophile element abundances of tholeiitic basalts and basaltic andesites. *Chem. Geol.*, 1985, 51: 303~323.
- 13 White W M, Hofmann A W. Sr and Nd isotope geochemistry of oceanic basalts and mantle evolution. *Nature*, 1982, 296(5869): 821~825.
- 14 王俊文,解广轰, Tatsumoto 等. 五大连池钾质火山岩的 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学及岩浆的化学演化. *地球化学*, 1988, (4): 310~317.
- 15 周珣若,吴克隆. 漳洲 I-A 型花岗岩. 北京: 科学出版社, 1994.
- 16 Hildreth W, Halliday A N, Christiansen R L. Isotopic and chemical evidence concerning the genesis and contamination of basaltic and rhyolitic magma beneath the Yellowstone Plateau Volcanic Field. *J. Petrol.*, 1991, 32: 63~138.
- 17 杨祝良. 浙东中、新生代玄武岩起源、演化与地幔交代作用. *火山地质与矿产*, 1993, 14(3): 7~19.

Geochemistry and Petrogenesis of the Late Mesozoic Bimodal Volcanic Rocks at Yunshan Caldera, Yongtai County, Fujian Province

Qiu Jiansheng Wang Dezi Zhou Jincheng

(Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Key words: bimodal volcanic rock; geochemistry; petrogenesis; Yunshan caldera, Yongtai County, Fujian Province

Abstract

The rock associations of the first and second cycle of early Cretaceous Shimaoshan Group at Yunshan caldera, Yongtai County, are composed of sedimentary rocks-basic lava-acidic volcanic rocks. Intermediate volcanic rocks are absent in these rock associations; therefore, they can be classified as typical bimodal volcanic rock associations. Geochemically, basaltic volcanic rocks in these bimodal rock associations are rich in alkali (especially potassium), aluminum, iron, LILE and LREE and poor in magnesium, HFSE and siderophile elements, and have relatively high I_{sr} ratios and obviously low $\epsilon_{Nd}(T)$ values ($I_{sr} = 0.70682 \sim 0.70770$, $\epsilon_{Nd}(T) = -7.42 \sim -3.22$). Rhyolitic volcanic rocks are generally characterized by rich alkali, silicon, aluminum, and poor calcium, magnesium. They have relatively high Rb, Th and rather low Ba, Sr, Ti, P, and exhibit obviously negative europium anomaly ($\delta Eu = 0.16 \sim 0.44$). The $\epsilon_{Nd}(T)$ values of the rhyolitic volcanic rocks range from -5.93 to -2.22 . Basalts and rhyolites in different cycles show clear geochemical variance. On the basis of an integrated analysis of the geochemical features of these volcanic rock associations, this paper concludes that the basalts originated mainly from interaction between mantle-derived magma and low-crustal materials, and rhyolitic volcanic rocks resulted from thermal and chemical interaction between basaltic magma and the upper part of crustal materials. Basalts and rhyolites in different cycles have different source regions, and they are products of multiperiodic pulsive layer partial melting.