

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

中国东南沿海中生代酸性火山岩的 锶和钕同位素特征与岩浆成因

薛怀民 陶奎元 沈加林

(中国地质科学院南京地质矿产研究所)



中国东南沿海中生代火山岩叠置在几个不同的基底构造单元之上,不同单元内的火山岩在锶、钕同位素组成上存在着很大的差异。其中隶属于下扬子亚板块的浙西-赣东北区火山岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值普遍较低,而 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始值则较高。华夏亚板块内的火山岩,以武夷山隆起为核心向沿海方向 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始值不断增高,而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值则呈下降趋势。火山岩中的同位素特征及其时空变化规律在很大程度上是其基底变质杂岩中同位素性质的再现。区内中生代酸性岩浆的形成是业已存在的地壳物质再循环的结果。

关键词 锶、钕同位素 地壳再循环 中国东南沿海

1 区域火山岩地质概况

中国东南部(包括浙江、福建、广东东部和江西东部)中生代火山岩沿海岸线方向展布,构成一长达1200km,宽约500km的滨太平洋巨型火山岩带。该火山岩带分别叠置在华夏和下扬子亚板块内几个不同的基底构造单元之上^[1,2],基底构造单元及其内变质杂岩的性质明显制约了中生代岩浆作用的分区性^[3]。由于不同单元内地壳的厚度、结构和成熟度明显不同^[4],以及基底变质杂岩的性质在纵向上和横向上极不均一,相应地火山岩的某些特征在空间上也具规律性变化。

1.1 火山活动的时代与迁移

区内燕山期火山活动起始于约175Ma前的中侏罗世,到晚侏罗世一早白垩世达到高潮,晚白垩世时则完全衰竭。火山岩的时空分布特征,显示了火山活动具明显的双向迁移性。表现在平行火山岩带方向,南端的粤东地区火山活动起始较早,持续时间较长(175—86Ma);而向北经闽东(155—78Ma)到浙东,火山活动起始较晚,持续时间较短(140—95Ma),火山活动自南向北呈递变性迁移特征。垂直火山岩带方向,早期火山岩遍布全区,并向西延展到江西境内;而晚期火山岩则主要限于沿海地区,显示了火山活动由内陆一侧向沿海随时间呈收缩性迁移的特征。

1.2 火山岩系列和组合面貌

东南沿海中生代火山岩的平均厚度超过2000m,根据同位素年龄资料、地层中各门类化石

注:本文为国家自然科学基金(编号49070162)和地质矿产部“七五”攻关项目(编号86017)联合资助。
本文1993年3月收到,1995年4月改回,刘淑春编辑。

的生物群组合面貌、火山岩相的岩石学特征、控岩构造线方向及区域应力场性质、区域不整合接触关系、古气候和古地理环境等,它们明显分为上、下两个岩系^①。其中下火山岩系(时代为中—晚侏罗世)主要属于亚碱性系列中的高钾部分,有些因其高的钾含量而进入钾玄岩系列范围内。它们总体上具有向酸性岩过渡的特点。岩石组合为高钾流纹岩—英安岩,仅有少量安山岩出露。在火山岩分异指数(D. I.)和斜长石牌号(*An*)频率图上均表现为强的酸性单峰(图 1A),这与典型挤压造山环境下所呈现的中性单峰^[5]存在差别。上火山岩系(时代为白垩纪)总体上属于亚碱性系列中的高钾部分,但具有向碱性系列过渡的特点,局部出现富含碱性暗色矿物(钠铁闪石)的碱性流纹岩^[6],并在一些断陷盆地的底部发育了一套由少量玄武质和大量流纹质岩石组成的非典型的双峰式岩石组合。表现在图 1B 上呈弱基性峰—强酸性峰的特征,指示其形成时的弱拉张环境。

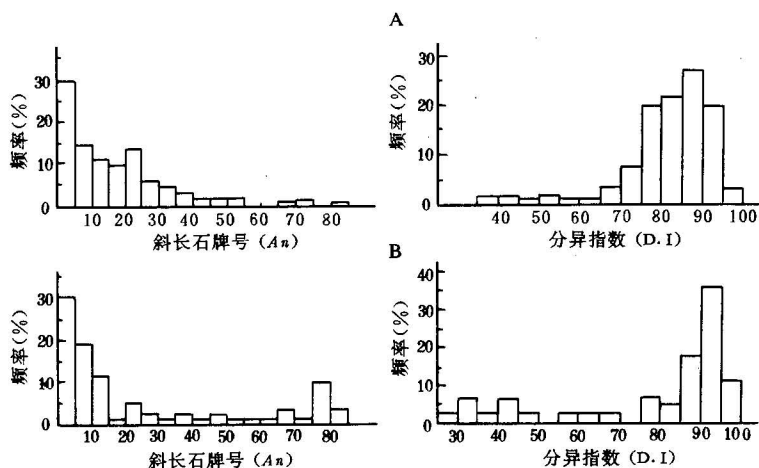


图 1 本区中生代火山岩的斜长石牌号与分异指数频率图

Fig. 1 *An* No. and D. I. frequencies for Mesozoic volcanic rocks along the coastal region of southeastern China

A 下火山岩系; B 上火山岩系

A Lower volcanic rock series; B upper volcanic rock series

总之,东南沿海中生代火山岩以流纹质(约占 70%)和英安质(约占 20%)岩石占绝对优势,而安山质和玄武质岩石只占很小的比例。如此规模巨大的酸性岩浆不可能由如此少量、且分布局限的中、基性岩浆分异形成,基性岩浆的存在只是为地壳中酸性岩浆的形成提供了热源^[7]。本文后面的讨论仅限于酸性岩浆,而对于玄武质岩浆的成因将另文讨论。

1.3 岩石地球化学特征及其时空变化

东南沿海中生代火山岩最大的特征是高硅富钾,火山岩 SiO_2 含量频率的高峰值为 73%,在 SiO_2 - K_2O 图解上大多处于亚碱性系列中的高钾部分,有些甚至进入钾玄岩系列范围(图 2)。相应地,区内火山岩富铷、钽、钼、钡;而贫钛、钒、铬、钴、镍等过渡元素及铈、钕、钐等;稀土元素分异程度较大,负钫异常较强,指示其形成时的构造环境具大陆边缘靠近板块内部的特

① 谢家莹等. 中国东南大陆中生代火山地质、火山-侵入杂岩演化及其与区域成矿作用的关系. 北京:地质出版社(待出版).

征^[3],且表现出时间上由早(下火山岩系)到晚(上火山岩系)板内的特征更明显些。

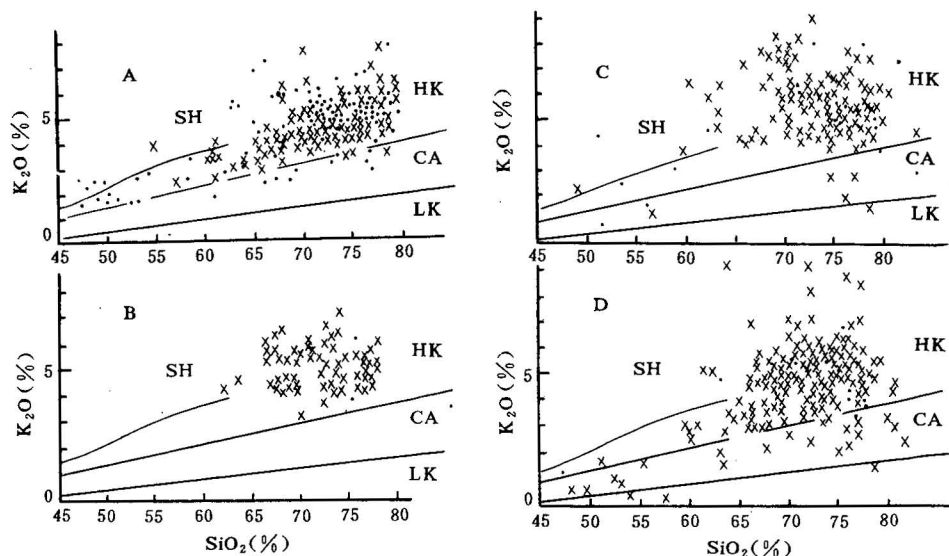


图2 本区各岩区火山岩的 K_2O-SiO_2 图解

(据陆志刚等,1994)

Fig. 2 K_2O versus SiO_2 diagram of Mesozoic volcanic rocks for various petrographic provinces in the region

(after Lu zhi gang et al., 1994)

A 浙东-闽东构造岩浆活动区; B 浙西-赣东北构造岩浆活动区; C 武夷山隆起区; D 粤东构造岩浆活动区; SH 钾玄岩系列; HK 高钾钙碱性系列; CA 钙碱性系列; LK 低钾钙碱性系列; × 下火山岩系; ● 上火山岩系

A Tectonomagmatic province of eastern Zhejiang and eastern Fujian; B tectonomagmatic province of western Zhejiang and northeastern Jiangxi; C Wuyishan uplifted area; D tectonomagmatic province of eastern Guangdong; SH shosholitic association (ass.); HK high-K calc-alkalic ass.; CA calc-alkalic ass.; LK low-K calc-alkalic ass.; × lower volcanic rock suite; ● upper volcanic rock suite

空间上,主要造岩元素及相关的一些微量元素丰度具规律性变化。一般地,从沿海向内陆,岩石中 SiO_2 , K_2O 和铷等的丰度不断增高,而 Na_2O , CaO 及钡、锶则逐渐降低。趋势面分析其等值线基本上平行于海岸线分布^①,这与地壳等厚线近于平行,并与地壳结构、地壳成熟度及壳、幔分异时间早晚^[2]的空间变化趋势相协调。

2 同位素组成及其时空变化特征

2.1 铯同位素

区内一些代表性火山岩样品的铷、铯含量及其同位素组成列于表1,图3标出了各样品铯同位素初始比值的大致地理位置。从图3和表1中可以看出,发育于不同基底构造单元之上的中生代火山岩在铯同位素组成上存在着很大的差异。其中隶属于下扬子亚板块的浙西-赣东北区主要发育下火山岩系,其铯同位素初始比值普遍较低,均 <0.7090 ,最低仅为0.7040(江西德兴);而发育于华夏亚板块之上的中生代火山岩(包括图3中的A、C和D区),其 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始值的

① 陆志刚等,中国东南大陆火山地质与矿产,北京:地质出版社(待出版)。

变化范围很广(0.7055—0.7145),且随时间和空间其变化具有一定的规律性:

表1 东南沿海各岩区火山岩的铷、锶含量及其同位素组成

Table 1 Rb and Sr contents and their isotopic compositions for the Mesozoic volcanic rocks along the coastal region of China

岩区	岩系	岩 性	采样地	Rb	Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	年龄 (Ma)	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	资料来源
A ₁	上火山 岩系	流纹质熔结凝灰岩	文成山门	151.27	127.83	3.986	0.71434	101.5	0.7087	
		流纹质凝灰岩	鄞县玄坛地	191.22	126.19	4.4485	0.71478	96.8	0.7087	
		流纹质熔结凝灰岩	天台山头郑	339.15	716.72	1.6291	0.71520	124.6	0.7122	
	下火山 岩系	流纹质凝灰岩	括苍山主峰	141.55	201.31	2.2213	0.71715	132.1	0.7138	
		流纹质熔结凝灰岩	芙蓉山	145.51	210.55	2.2389	0.71677	127.4	0.7127	
A ₂	上火山 岩系	英安质凝灰岩	福鼎	155.86	152.95	6.3411	0.71867	116	0.7082	[9]
		流纹岩	永泰 凤际	277.39	25.25	35.8653	0.76479	104.1	0.7116	
	下火山 岩系	流纹质凝灰岩		178.91	152.13	5.1396	0.71571	126.7	0.7065	
B	下火山 岩系	流纹质凝灰岩	寿昌			10.5473	0.72658	121.7	0.7083	[8]
		流纹质凝灰岩		225.17	184.02	15.8782	0.73640	127.9	0.7075	
		流纹质凝灰岩		138.32	52.13	14.60	0.73450	129.2	0.7070	
C	下火山 岩系	流纹质凝灰岩	永安	175.28	63.31	13.4802	0.73866	128.1	0.7141	
D	上火山 岩系	流纹质凝灰岩	和平长塘	281.46	40.19	21.7461	0.74228	89.5	0.7145	
		流纹质角砾凝灰岩	揭西良田	182.93	128.55	3.5777	0.71997	127.4	0.7135	
		流纹质凝灰岩	河源桂山			6.5073	0.72547	123.9	0.7140	
	下火山 岩系	流纹质熔结凝灰岩	饶平	199.02	188.32	4.4641	0.71906	136.8	0.7104	
		流纹质熔结凝灰岩	揭西良田	212.80	285.01	2.6596	0.71916	146.8	0.7131	
		流纹岩	惠东大蕉园	126.68	408.01	0.8104	0.71094	173.6	0.7089	
		流纹质凝灰岩	明热	280.91	183.90	5.1699	0.72678	154.9	0.7144	
		流纹质凝灰岩	海丰鸡母巢	190.41	235.37	2.6033	0.71359	173.3	0.7072	

注:1. 岩区代号参照图3.2. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值及年龄均为全岩 Rb-Sr 等时线结果,其他数值为同一等时线上各样品的平均值。

3. 表内未注明资料来源的为地质矿产部“七五”项目“中国东南大陆火山地质与矿产”成果。

同属浙东-闽东构造岩浆活动区的浙东亚区下火山岩系 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值普遍较高,均 >0.7094 ,且绝大多数在 0.7105 以上;而闽东亚区下火山岩系 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值普遍较低,大多数 <0.7070 。上火山岩系的情况则完全相反,浙东亚区上火山岩系(酸性端员)的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值显著减小,为 0.7087,不仅小于本区下火山岩系的锶同位素初始值,而且大多数还小于闽东地区上火山岩系同类岩石中的值(后者多数 >0.7085 ,最大可达 0.7116)。热力学计算结果表明区域下火山岩系岩浆形成的深度相对较浅,约 16—20km;而上火山岩系岩浆形成的深度相对较大,约 26km^[13]。浙东和闽东地区火山岩中锶同位素组成的这种差异及其随时间的变化特征不仅表明两地具不同性质的基底岩石,而且指示地壳岩石的性质在纵向上也是极不均一的。

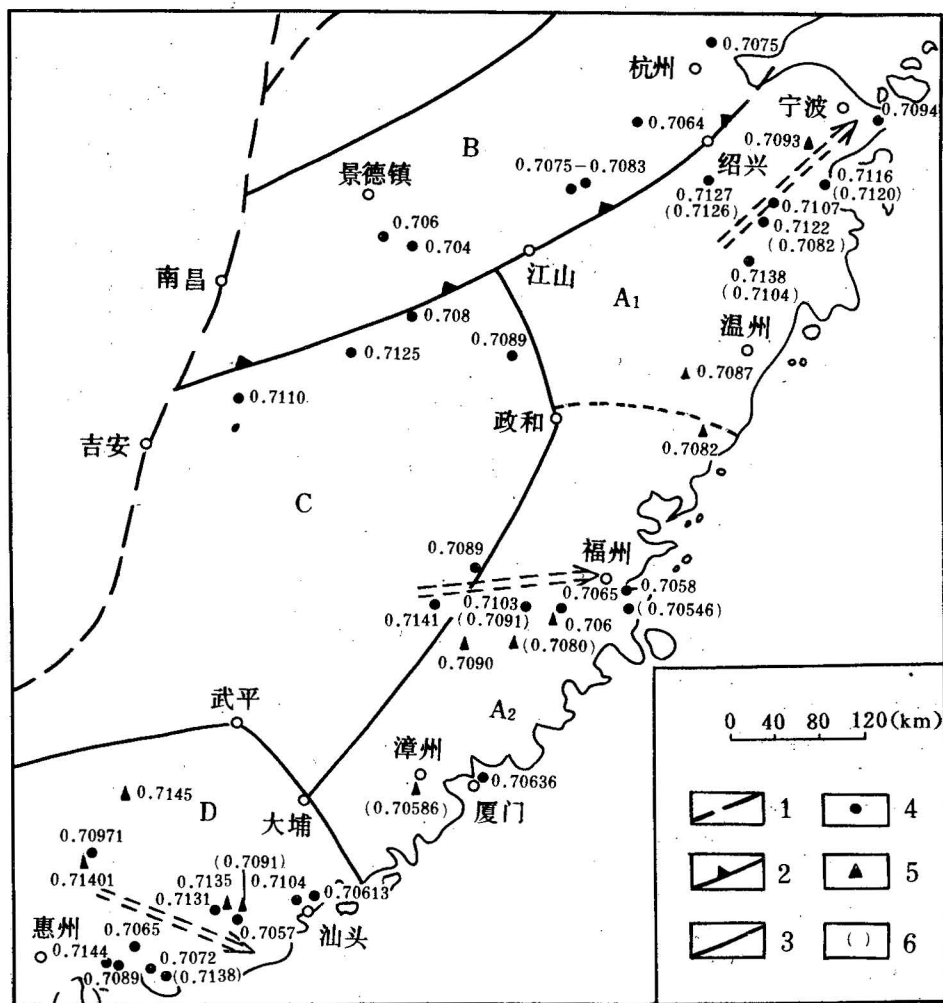


图3 本区中生代火山岩中锶同位素初始比值及其空间变化

Fig. 3 Initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios and their spatial variations for Mesozoic volcanic rocks

A 浙东-闽东构造岩浆活动区(A₁为浙东亚区,A₂为闽东亚区);B 浙西-赣东北构造岩浆活动区;C 武夷山隆起区;D 粤东构造岩浆活动区;1. 火山岩带边界;2. 亚板块界线;3. 岩区界线;4. 下火山岩系;5. 上火山岩系;6. 侵入岩中锶同位素初始比值.箭头指向锶同位素初始比值的降低方向;图中资料来源部分见表1,其余来自文献[11,12]

A Tectonomagmatic province of eastern Zhejiang and eastern Fujian (A₁ sub-province of eastern Zhejiang, A₂ sub-province of eastern Fujian); B tectonomagmatic province of western Zhejiang and northeastern Jiangxi; C Wuyishan uplifted area; D tectonomagmatic province of eastern Guangdong; 1. boundary of volcanic rock belt; 2. subplate boundary; 3. rock province boundary; 4. lower volcanic rock suite; 5. upper volcanic rock suite; 6. initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios for intrusive rocks. Arrowheads indicate the decrease directions of initial Sr ratios. Data sources: Table 1 and references [11,12]

Table 2 Nd isotope data and model ages for Mesozoic igneous rocks in the study region

[illegible]

闽西-赣 武夷山隆起区		F3015	黑云二长花岗岩	中村	145	0.1333	0.512197	-8.60	-7.40	1.81	[15]
		F3017	混合花岗岩	竹州		0.1112	0.512070	-11.08	-9.50	1.61	
		F3403	似斑状花岗岩	宁化		0.1202	0.511955	-13.32	-11.90	1.95	
		F3036	似斑状花岗岩	瑞埔		0.1186	0.511992	-12.60	-11.20	1.85	
	下火山 岩系		英安流纹岩	相山	130	0.1209	0.512094	-10.61	-9.36	1.74	[16]
			英安粗面岩	东乡		0.1132	0.512174	-9.05	-7.70	1.43	
			英安流纹岩	信江		0.1014	0.512097	-10.55	-7.40	1.81	
	上火山 岩系	HC3-1	流纹质凝灰岩	和平长塘	89.5	0.1219	0.512138	-9.75	-8.90	1.68	本文
		J7-1	熔结凝灰岩	揭西良田	127.4	0.1201	0.512345	-5.72	-4.47	1.32	
		86R2-1	碱性长石花岗岩	西坑	96.8	0.1185	0.512057	-11.33	-10.37	1.75	
		6757-1	流纹质凝灰岩	海丰	173.3	0.1162	0.512083	-10.83	-9.06	1.67	
浙西-赣 东北区	下火山 岩系	PII-8	熔结凝灰岩	揭西良田	146.8	0.1348	0.512161	-10.01	-8.14	1.91	[16]
		86HC7	黑云母花岗岩	葫芦田	125.5	0.1361	0.512125	-10.01	-9.04	2.02	
			碎斑熔岩	桐庐	130	0.0956	0.512229	-7.98	-6.30	1.19	
	下火山 岩系		闪长玢岩		130	0.0971	0.512235	-7.86	-6.22	1.20	[16]
			英安岩	银山	164	0.1170	0.512589	-0.96	+0.70	0.89	

注: T_{Cr} 单位为 10^9 年, 它是相对于亏损地幔 $\epsilon_{\text{Nd}}^{\text{f}} = 0$, $\epsilon_{\text{Nd}}^{\text{f}} = +10$ (Goldstein 等, 1984) 计算的。

闽西-赣东区(图3中C区)所发育的火山岩均含有高的放射性锶含量, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值 >0.7089 ,最高达 0.7141 ,这与闽东地区火山岩具较低的锶同位素初始比值正好相反,显示了自内陆侧至沿海火山岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值呈下降趋势。

位于华夏亚板块南缘的粤东区较特殊,其发育的中生代火山岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值的变化范围甚宽,为 $0.7057-0.7145$ 。岩石成因类型多具I-S过渡特征^[14],这与该区处于浙闽北东向构造带与南岭东西向构造带的复合部位有密切联系。该区岩石中的锶同位素组成特征也具一定的时空变化规律:时间上,上火山岩系总体上要比下火山岩系更富放射性锶;空间上,自内陆一侧向沿海方向,同时代岩石中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值略呈下降趋势,但这种趋势并非简单的线性关系,而是波动起伏的。

总之,在锶同位素组成上,除浙西-赣东北区和浙东地区以外,同一岩系的火山岩自西向东 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值呈下降趋势。发育有上、下两套火山岩系的沿海地区,除浙东下火山岩系的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值比上火山岩系的高外,闽东和粤东地区上火山岩系的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值均略比下火山岩系的高。锶同位素组成的这种时空变化特征与后两者的地壳基底分别是由武夷山隆起区向东(闽东)和向南(粤东)增生形成的^[2]不无关系。

2.2 钕同位素

表2列出了研究区内中生代火山岩中一些代表性样品的钕同位素资料。为了对比,将火山岩相对较贫乏的武夷山隆起区(图3中C区)内一些侵入岩的同位素组成也一同列出。由表2可以看出,区内岩石中 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始值的变化范围很广,为 $0.511754-0.512463$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 $-14.12-+0.70$,其时、空变化具明显的规律性:

与具较低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值相对应,发育于下扬子亚板块之上的浙西-赣东北区火山岩具较高的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始值, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 介于 -6.30 至 $+0.70$ 之间,平均为 -3.74 。

同一岩区内,浙东和闽东地区的火山岩钕同位素组成特征与锶同位素组成特征一样,也存在较大的差异。浙东下火山岩系的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始值较低, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 $-14.12- -10.46$,平均为 -11.69 ;而闽东下火山岩系 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始值明显高于浙东下火山岩系的, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 $-6.14- -10.74$,平均 -8.95 。浙东上火山岩系的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始值明显比下火山岩系的高, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 介于 -4.89 至 -6.17 之间,平均为 -5.53 ,这与下、上岩系间锶同位素组成的变化特征完全相协调;而闽东地区上火山岩系的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始值总体上则更高, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 介于 $-7.56- -2.20$ 之间,平均为 -3.78 。

相对靠内陆一侧的武夷山隆起区其火成岩中 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始值则很低, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的变化范围从 -7.40 至 -11.90 ,平均为 -9.12 ,明显低于闽东地区火山岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值。

粤东地区火山岩中钕同位素组成的变化范围与锶同位素一样,也较广,这与其所处的特殊构造环境有关。 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 从 -9.06 到 -4.47 ,其中下火山岩系的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较低($-8.14- -9.06$,平均 -8.60),而上火山岩系的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值则相对较高($-4.47- -8.90$,平均 -6.69)。

由此可见,区内中生代火山岩由早到晚, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始值明显增高;空间上由武夷山隆起区向东(闽东)、向南(粤东),火山岩中 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均呈增高趋势。钕同位素组成在时空上的变化特征总体上是与锶同位素组成的变化相协调的。

表2中 T_{CR} 为地壳保留年龄,它是相对于亏损地幔而言的,其物理意义是假设大陆地壳与亏损地幔在物质成分上具互补关系,地幔由于物质(如不相容元素)被萃取到地壳中而发生亏损。由于地壳岩石的Sm/Nd值(平均约为 0.12)远比地幔中的(约为 0.32)低,可以认为壳、幔

分异作用是使 Sm/Nd 发生变化的主要机理。又由于在地壳演化过程中(包括风化、沉积、变质、甚至重熔)岩石中的 Sm/Nd 值几乎不发生明显的改变^[17-19],因而无论是沉积岩、花岗岩、酸性火山岩,还是变质岩,它们的钕同位素地壳保留年龄能近似地代表其最初的原岩从地幔中分异出来的平均年龄。从表2中可以看出,不同单元之上的中生代火山岩其钕同位素的地壳保留年龄明显不同,表明它们具有各不相同的地壳形成与演化历史。

3 可能的岩浆源区及其同位素特征

中国东南部中生代岩浆可能的源区包括地壳和上地幔两部分。但除了那些少量的基性岩浆可能直接来源于上地幔外,对于本区这套规模巨大的酸性岩浆而言,很难想象它通过地幔极少量的部分熔融(<1%)或由基性岩浆分异形成,其可能的源区应为中、下地壳的变质基底。区内不仅在武夷山隆起区有较多的变质杂岩出露,在广大的中生代火山岩分布区也有许多变质杂岩以“天窗”的形式出露,它们是这些火山岩当然的基底和酸性岩浆最可能的源区。当然有些基底岩石,特别是下地壳的岩石可能根本就没有出露,但若它们对中生代岩浆的成因起到作用,在同位素方面就将会有所显示。

表3为各岩区内基底变质杂岩的钕、铈同位素组成及其变化范围。为便于与火山岩中的同位素资料对比,表3中将钕同位素以 $\epsilon_{\text{Nd}}(145)$ 的形式表示,因为本区大规模岩浆活动大致发生于145Ma 前后。尽管不同岩区间以及同一岩区内上、下岩系间岩浆作用的时间差异可达数十百万年,但 $\epsilon_{\text{Nd}}(145 \pm 45\text{Ma})$ 之间的差值除个别达0.6外,大多数<0.4,因此不会影响下面讨论的基础及由此所得出的结论。

表3 本区可能岩浆源区的钕、铈同位素组成平均值及其变化范围

Table 3 Average values and ranges of Nd and Sr isotope data for potential magma source areas in the study region

岩 区	可能的岩浆源区	$\epsilon_{\text{Nd}}(145)$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
	亏损地幔	+7.79	0.7025
		+4.55—+11.14	0.7021—0.7030
浙东亚区	陈蔡群片麻岩	-10	0.7370
闽东亚区	花岗片麻岩,变粒岩	-3.14	0.7071
		-1.90—-5.60	0.7060—0.7084
浙西-赣东北区	双溪坞群细碧角斑岩	+4.85	
		+4.40—+5.30	
武夷山隆起区	麻源群变粒岩、片岩、片麻岩	-12.69	0.7769
		-11.00—-15.90	0.7595—0.7932
粤东区	白云母片岩	-11.6	

注:资料来源,亏损地幔来自文献[19],基底变质杂岩来自文献[1,20,21]。

从表3中可以看出,不同岩区所出露的基底变质杂岩性质有很大的差异。浙西-赣东北区出露的变质基底岩石主要为中、上元古界双溪坞群,它是一套以细碧角斑岩和玄武岩为原岩的变质岩系,具高的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值, $\epsilon_{\text{Nd}}(145)$ 为+4.40—+5.30,平均+4.85。浙东地区,特别是南

部所出露的变质杂岩主要为陈蔡群,为一套副变质岩,岩性包括片岩、片麻岩、变粒岩、浅粒岩和大理岩等,岩石中具较高的放射性铈, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值高达0.7370^[1],而 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值则较低, $\epsilon_{\text{Nd}}(145)=-10$ 。闽东沿海地区中生代火山岩中有不少晚元古代到早古生代^[20]的变质岩“天窗”出露,这套变质岩中的放射性铈含量普遍较低,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值为0.7060—0.7084。相应地, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值则较高, $\epsilon_{\text{Nd}}(145)$ 为-1.90—-5.60,平均为-3.14。但靠近粤东的龙海深澳一带变质岩的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值则较低, $\epsilon_{\text{Nd}}(145)$ 为-4.00—-11.60,平均为-8.12,可作为粤东基底同位素组成的一个参考值。武夷山隆起区出露大面积的变质杂岩,且主要为副变质岩系,岩石中 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值普遍较低,而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值则很高。其中中、上元古界迪口组主要由黑云母斜长片麻岩、二云斜长片岩组成,岩石中的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值很低, $\epsilon_{\text{Nd}}(145)$ 为-15.9。麻源群原岩以砂岩、粉砂岩为主,夹数层基性火山岩。尽管由基性火山岩变质而成的斜长角闪岩中 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值较高, $\epsilon_{\text{Nd}}(145)$ 高达+0.23—+1.15,平均为+0.70;而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值则较低,为0.7085—0.7164。但占较大比例的由沉积岩变质而成的变粒岩 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值则很低, $\epsilon_{\text{Nd}}(145)$ 介于-11.30—-14.00之间,而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值则很高,为0.7575—0.7932^[21],使得整个麻源群具较高的放射性成因铈和低的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值。此外,该隆起区内龙北溪群、楼子坝群的原岩也为沉积岩(细粉砂岩、粉砂岩),其 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值较低, $\epsilon_{\text{Nd}}(145)$ 分别为-11.0—-12.9, -11.4—-14.0。

由此可见,不同岩区基底变质杂岩的同位素特征各不相同,其变化在空间上具有一定的规律性。而这种差异性及其空间变化规律完全可以与区内中生代酸性火山岩中的同位素特征相类比,表明中国东南中生代酸性火山岩继承了其基底变质杂岩的同位素特征。

4 岩浆成因

如前所述,本区中生代火山岩以富硅高钾为特征,酸性火山岩的岩石成因类型^[14]和地球化学性质的空间变化特征与本区包含了几个不同的基底构造单元、不同单元之上的地壳结构和地壳的成熟度不同,以及火山岩基底岩石的性质在纵向上和横向上极不均一的特点相协调,明显表明区内中生代火山岩与地壳基底变质杂岩之间的成因联系。

对比区内中生代酸性火山岩及其基底变质杂岩中的同位素特征,也可发现两者间具密切的内在联系。火山岩中的同位素特征及其空间变化规律在很大程度上是其基底变质杂岩中同位素性质的再现。

图4为本区各岩区火成岩与基底变质杂岩的 T_{CR} 值频率图, T_{CR} 表示岩石中钐和钕组分在大陆地壳环境下保留的平均年龄。尽管由于在挑选最可靠的地幔演化模型时还有些不确定性,计算所得到的 T_{CR} 值与其实际情况可能会有些偏差。但若本区中生代酸性火山岩是由地幔直接派生而来的,那么它们的 T_{CR} 值应相似于其实际的侵位时间。事实上,图4中所有中生代火山岩的钐同位素地壳保留年龄均远离其实际的侵位时间而与其所在地的基底变质杂岩的 T_{CR} 值类似,这表明了区内中生代酸性岩浆的形成是由业已存在的地壳物质(包括未直接出露的下地壳岩石)再循环的结果,而地幔物质的直接加入很少。

从图4中还可以看出,不同岩区具有不同的地壳形成与演化历史。其中隶属于下扬子亚板块的浙西-赣东北区(图4B)中生代火山岩与其基底变质杂岩具相似的钐同位素地壳保留年龄,它们在 T_{CR} 频率图上共同构成一个典型的“塔”,其峰值为1.2—1.3Ga,表明该地区的地壳主要是在1.2—1.3Ga前的中元古代“一次性”形成的。

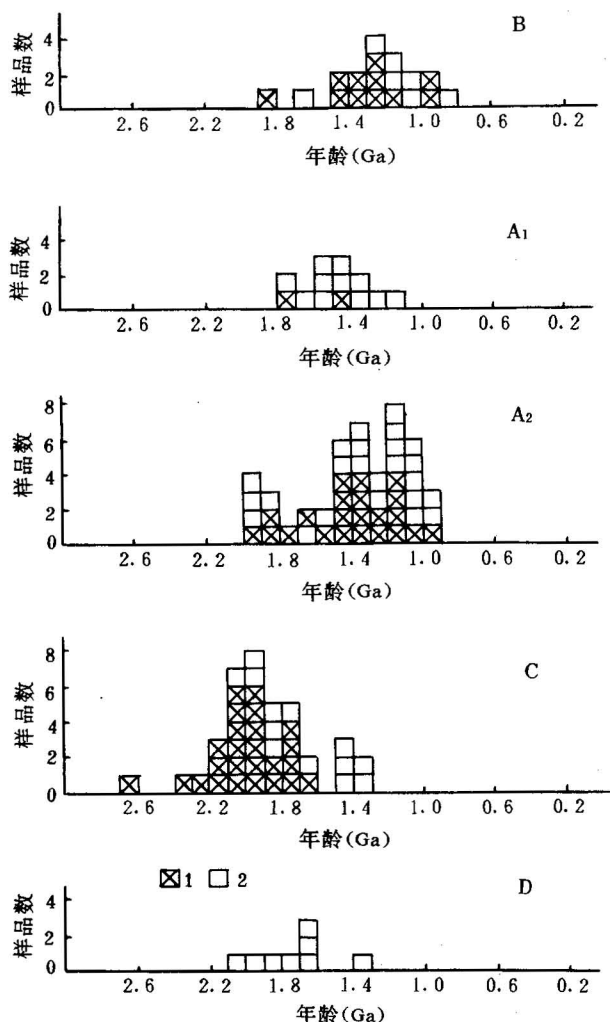


图4 本区各岩区火山岩与基底变质杂岩的钕同位素地壳保留年龄(相对于亏损地幔)对比图

Fig. 4 Comparison of Nd isotope crustal residence ages (calculated relative to a depleted mantle) for Mesozoic volcanic rocks and basement metamorphic complexes

1. 基底变质杂岩; 2. 中生代火山岩; 图中岩区代号同图3, 火山岩资料来源同表2, 变质岩资料来自文献[1, 20, 21, 23—25]

1. Basement metamorphic complexes. 2. Mesozoic volcanic rocks. Symbols for rock provinces refer to Fig. 3. Data sources: volcanic rock data from Table 2, metamorphic rock data from references [1, 20, 21, 23—25]

华夏亚板块内的情况则较复杂, 其中武夷山隆起区(图4C)的中生代火山岩与该区大量出露的前寒武纪变质杂岩在 T_{CR} 为1.9—2.0Ga处共同构成一个高强度峰, 并在约1.4Ga处有一弱峰, 表明该隆起区的地壳主要形成于约1.9—2.0Ga前的早元古代, 但在约1.4Ga前的中元古代又发生过一次较明显的壳、幔分异作用。福建沿海地区(图4A₂)中生代火山岩和一些基底变质杂岩“天窗”的钕同位素地壳保留年龄则构成3个强度不等的峰。其中前2个峰所指的值与武夷山隆起区的情况类似, 不同的是闽东地区 T_{CR} 在约1.4Ga处峰的强度远大于1.9—2.0Ga处的峰, 并在约1.1Ga处又出现了一个新的强峰。这清楚地表明, 闽东地区的地壳主要形成于约1.1—1.4Ga前的中、晚元古代, 而1.9—2.0Ga前的早元古代仅形成地壳的雏形。区内以武夷山隆起为核心, 地壳在中、晚元古代向沿海方向有明显的增生趋势。

综上所述, 中国东南部地壳主要形成于元古代, 而晚元古代以后, 地幔分异成新地壳的比例很少, 这与全球范围内大规模的地壳增生在元古代以后趋于停止^[17—19, 22], 整个地壳总体上

处于壳、幔再循环的动态平衡和缓慢增长的情况相同。

参考文献

- 1 谢舜克,郭坤一. 欧亚大陆东南缘大陆地壳基底研究与展望. 火山地质与矿产, 1991, 12(3): 15—24.
- 2 薛怀民,陶奎元. 中国东南大陆中生代火成岩的 Nd 模式年龄与区域地壳的形成、演化史. 江苏地质, 1992, 16(3/4): 137—140.
- 3 陶奎元. 论中国东南沿海火山带. 见: “七五”地质科技成果交流会论文选集. 北京: 科技出版社, 1992.
- 4 刘平山. 浙东南地球物理场和基底构造. 火山地质与矿产, 1992, 12(3): 25—36.
- 5 Petro W L, Vogel T A, Wilband J T. Major—element chemistry of plutonic rock suites from compressional and extensional plate boundaries, Chem. Geol. 1979, 26: 217—235.
- 6 冯宗帜, 亓润章. 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), 1—100.
- 7 薛怀民,陶奎元. 中国东南大陆中生代火山岩中的成分梯度. 中国东南沿海火山地质与矿产论文集. 北京: 地质出版社, 1992. 145—154页.
- 8 李坤英,王小平,沈加林. 浙江建德群的时代归属问题. 地质论评, 1988, 34(6): 485—495.
- 9 李坤英,沈加林,王小平. 浙闽赣中生代陆相火山岩同位素年代学. 南京地质矿产研究所所刊, 1989(增刊), 87—136.
- 10 俞云文,董尧鸿,何仲朗. 浙江芙蓉山破火山口地质及其找矿远景. 南京地质矿产研究所所刊, 1991(增刊), 101—196.
- 11 周珣若,陈安国,宋新华,吴克隆,严炳铨,吴再团. 福建漳州花岗岩侵入体的 Rb—Sr 同位素年龄及其成因的初步探讨. 南京地质矿产研究所所刊, 1988, 9(3): 56—67.
- 12 陈克荣,潘永伟,曾家湖. 浙江宁海储家上侏罗世喷出—侵入岩特征、演化及成因. 南京大学学报, 1988, 1: 84—91.
- 13 郑济林. 括苍山中生代火山岩构造环境及地壳热状态. 南京地质矿产研究所所刊, 1989, 10(2): 40—50.
- 14 薛怀民. 酸性火山侵入杂岩的成因分类——以东南沿海为例. 火山地质与矿产, 1991, 12(4): 53—59.
- 15 黄 萱, Depaolo D J, 孙世华, 吴克隆. 福建省白垩纪岩浆岩 Nd, Sr 同位素研究. 岩石学报, 1986, (2): 50—63.
- 16 王德滋,刘昌实,沈渭洲,陈繁荣. 桐庐 I 型和相山 S 型两类碎斑熔岩对比. 岩石学报, 1993, 9(1): 44—54.
- 17 McCulloch M T, Wasserbure G T. Sm-Nd and Rb-Sr chronology of continental crust formation. Science, 1978, 200: 1003—1011.
- 18 O'Nions R K, Hamilton P J, Hooker P J. A Nd isotope investigation of sediments related to crustal development in the British Isles. Earth. Planet. Sci. Lett. 1982, 63: 229—240.
- 19 Frost C D, O'Nions R K. Caledonian magma genesis and crustal recycling. J. Petrology. 1985, 26(2): 515—540.
- 20 黄 辉,李荣安,杨传夏. 平潭-南澳变质带的 Sm-Nd 年代学研究及其大地构造意义. 福建地质, 1989, 8(3): 169—180.
- 21 袁忠信,吴良士,张宗清,叶笑江. 闽北麻源群 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素年龄研究. 岩石矿物学杂志. 1992, 10(2): 127—132.
- 22 李献华. 湘赣粤交界地壳形成与演化模式——Sm-Nd, 锆石 U-Pb 同位素研究. 科技出版社重庆分社, 1990. 98—103 页.
- 23 徐 备,乔广生. 赣东北晚元古代蛇绿岩套的 Sm-Nd 同位素年龄及原始构造环境. 南京大学学报, 1989, (3): 108—118.
- 24 章邦桐,凌洪飞,沈渭洲. 浙江绍兴西裘双溪坞群细碧-角斑岩的 Sm-Nd 等时线年龄. 南京大学学报, 1990, (2): 9—13.
- 25 贺伯初,刘昌实,朱金初. 武夷山西坡含锡花岗岩时代及物质来源探讨. 南京大学学报, 1990, (1): 53—61.

SR AND ND ISOTOPIC CHARACTERISTICS AND MAGMA GENESIS OF MESOZOIC VOLCANIC ROCKS ALONG THE COASTAL REGION OF SOUTHEASTERN CHINA

Xue Huaimin, Tao Kuiyuan and Shen Jialin

(*Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Nanjing, Jiangsu*)

Abstract

Mesozoic volcanic rocks along the coastal region of southeastern China were superimposed on different basement tectonic units in the Cathausian and Lower Yangtze subplates. The regionalization of Mesozoic magmatism was controlled clearly by the relevant units and the characters of metamorphic complexes thereof. The Mesozoic volcanic rocks developed in different basement tectonic units have great difference in Sr and Nd isotopic compositions. The rocks in the western Zhejiang-northeastern Jiangxi region which belongs to the Lower Yangtze subplate have lower initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios (less than 0.707) but higher initial Nd isotopic ratios. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ is -3.47 on the average. The initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ values of the Mesozoic volcanic rocks developed in the Cathaysian subplate increase notably from early to late, and from the core of the Wuyi uplift coastward, the initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratios increase constantly, while the initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values decrease. As an exception, the isotopic features of the volcanic rocks in eastern Zhejiang are similar roughly to those in the Wuyi uplift, that is, they have higher initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and lower initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ values. The isotope features and their spatial variations in Mesozoic volcanic rocks in the study region are manifestations of the isotope features in basement metamorphic complexes to a great extent, and the crustal retention ages of Nd isotopes in volcanic rocks are far from their emplacement ages, but are close to the retention ages of Nd isotopes in basement metamorphic complexes, which show that the Mesozoic acid magmas in this region mainly resulted from recycling of pre-existing crustal materials.

Key words: Sr and Nd isotopic composition, crustal recycling, coastal region of southeastern China

作者简介

薛怀民, 生于1962年。1984年毕业于南京大学地球科学系, 1987年毕业于中国地质科学院研究生部, 获硕士学位。现为中国地质科学院南京地质矿产研究所助理研究员, 从事中国东南沿海火山岩区的研究工作。通讯处: 南京市中山东路534号南京地质矿产研究所, 邮政编码: 210016。