

浙江省西北部白垩纪火山岩 Nd-Sr 同位素特征

颜铁增¹ 俞云文¹ 陈江峰² 许兴苗¹
汪建国¹ 蔡子华¹ 董尧鸿¹

(1. 浙江省地质调查院, 浙江 萧山 311203;
2. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

摘要:浙江省白垩纪火山岩叠置在扬子地块和华夏地块两个不同的基底构造单元之上, 不同构造单元的火山岩 Nd 同位素组成存在重大差异, 其中扬子地块火山岩 Nd 初始值较高, ϵ_{Nd} 值介于 -8.9~-0.9 之间, 平均为 -4.6 (n=33); 华夏地块火山岩 ϵ_{Nd} 值介于 -14.1~+1.2 之间, 平均为 -6.7 (n=69)。同时, 两个地块火山岩的 ϵ_{Nd} 值均随时间增高、模式年龄均随时间降低的趋势十分明显。扬子地块区从 135~124 Ma 形成的第 I 旋回至 110~90 Ma 形成的第 III 旋回酸性火山岩 ϵ_{Nd} 和 $t_{2\text{DM}}$ 平均值分别为 -6.2、-2.4、-2.2 和 1.42 Ga、1.11 Ga、1.09 Ga; 华夏地块区内同时代 3 个旋回酸性火山岩的 ϵ_{Nd} 和 $t_{2\text{DM}}$ 平均值则为 -10.1、-7.2、-5.5 和 1.75 Ga、1.49 Ga、1.35 Ga。推测浙江省广泛发育的白垩纪流纹质火山岩可能是基底变质岩部分熔融形成, 由于持续的玄武岩底侵作用, 造成幔源物质的加入量显著地随时间增加。

关键词: Nd-Sr 同位素; 火山岩; 白垩纪; 浙江省西北部

中图分类号: P597 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2005)03-0417-07

浙江省白垩纪岩浆活动十分强烈, 以火山岩为主。研究这些火山岩的物质来源与成因, 对于了解浙江省乃至中国东南部大陆壳的形成与演化具有十分重要的意义。近 10 余年来, 许多学者^[1-12]对包括浙江省在内的中国东南部晚中生代火成岩的 Sr、Nd 同位素组成特征做了不同程度的研究, 为探讨火成岩的成因及其大地构造环境提供了重要信息。陈江峰等^[13]首次提出浙江省东南部磨石山群下部和上部火山岩有两组不同的 ϵ_{Nd} 值; 周金城等^[14]指出浙江省桐庐地区同时代的火山岩和侵入岩 Nd 同位素初始比值十分一致; 沈渭洲等^[15]认为浙江省西北部扬子地块和东南部华夏地块中生代火成岩的 Nd 同位素组成有一定差异; 前者 ϵ_{Nd} 值较高, 且变化不大; 后者 ϵ_{Nd} 值相对较低, 变化也较大。但以往工作, 绝大部分样品采自浙江省东南部华夏地块, 仅少量样品采自浙江省西北部的扬子地块区, 且集中于桐庐盆地的较小范围内。为了对浙江省内两个不同大地构造单元白垩纪火山岩 Nd、Sr 同位素特征做进一步的对比研究, 笔者又在本区白垩纪火山岩中采集了 17 个样品, 作 Nd、Sr 同位素测试分析, 在结合前人同位素

资料^[13-15]基础上, 对浙江省西北部白垩纪火山岩的 Nd、Sr 同位素特征及其时空变化规律进行了初步探讨。

1 区域地质背景

以北东向的江山—绍兴断裂带为界, 浙江分属两个不同大地构造单元: 西北部属扬子地块, 基底为中元古代平水群细碧—角斑岩系及双溪坞群陆相钙碱性火山岩和火山碎屑沉积岩, 其上覆盖南华系—三叠系海相沉积岩; 东南部属华夏地块, 基底为元古代八都群及中元古代陈蔡群, 出露零星, 均为中深变质岩, 主要岩性为片岩、变粒岩、片麻岩和少量的斜长角闪岩、大理岩, 被巨厚白垩系火山—沉积岩系覆盖。

白垩系火山—沉积岩分上下两个岩系, 下岩系包括建德群和磨石山群; 上岩系为永康群、天台群和衢江群。自下而上可以分为 3 个火山旋回(表 1):

第 I 旋回: 为西北部的建德群下部劳村组和黄尖组; 东南部的磨石山群下部大爽组、高坞组和西山头组。劳村组和大爽组均以沉积岩为主, 夹玄武岩和英安质、流纹质火山岩;

收稿日期: 2004-02-18; 改回日期: 2004-12-30

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(200113000032)资助。

作者简介: 颜铁增, 男, 1956 年生, 高级工程师, 长期从事区域地质调查工作; E-mail: ytz195684@163.com。

表 1 浙江省白垩纪火山岩旋回划分
Table 1 Cretaceous volcanic cycles in Zhejiang Province

地质时代	火山旋回	同位素年龄 /Ma	岩石地层单位					
			西北部			东南部		
K ₂	III	90	衢江群	衢县组	永康群	方岩组	天台群	赤城山组
				金华组		朝川组		两头塘组
				中戴组		馆头组		塘上组
K ₁	II	115	建德群	寿昌组	磨石山群	九里坪组	茶湾组	西山头组
		122						
		124						
K ₁	I	135	建德群	黄尖组	劳村组	高坞组	大爽组	西山头组



图 1 工作区火山岩 ϵ_{Nd} 和 t_{2DM} 值空间分布特征

Fig.1 Spatial distribution of ϵ_{Nd} and t_{2DM} values of volcanic rocks in the work area

黄尖组和高坞组、西山头组为巨厚的流纹质、英安质火山岩，夹少量沉积岩。火山岩年龄为 135~124 Ma。

第 II 旋回：为建德群上部寿昌组和磨石山群上部茶湾组、九里坪组。寿昌组下段和茶湾组以沉积岩与第 I 旋回顶部火山岩分开，且普遍夹有玄武岩或玄武安山岩层；寿昌组上段和九里坪组则以流纹岩为主，或流纹岩与流纹质火山碎屑岩互层产出，岩石以高硅、高钾为特征。同位素年龄为 122~115 Ma。

第 III 旋回：为永康群、天台群、衢江群。分布于近 50 个大小不等的盆地和断块中。不同盆地火山岩发育程度不同，从西北到东南沿海，火山岩厚度增大的趋势十分明显。主要岩石为玄武岩-流纹质火山岩组合，具双峰式特征。火山岩年龄为 113~90 Ma。

2 样品分析和 Nd、Sr 同位素组成

对野外采集的新鲜样品经室内岩石学的初步研究后，选

表 2 浙江省西北部白垩纪火山岩—侵入岩 Nd-Sr 同位素组成
Table 2 Nd and Sr isotopic compositions of Cretaceous volcanic-intrusive rocks from northwestern Zhejiang

序号	样品号	采样地	岩性 ^①	地层 ^②	<i>t</i> /Ma	Rb/10 ⁶	Sr/10 ⁶	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr ±/−	<i>I</i> _{Sr}	Sm/10 ⁶	Nd/10 ⁶	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd ±/−	<i>f</i> (Nd)	ϵ_{Nd}	<i>T</i> _{DM}	资料来源	
1	1382	龙游	B	K _{1z}	110	21.00	496.9	0.122	0.70613	1	0.70594	4.22	18.17	0.1405	0.512551	6	0.512450	-0.9	0.98	本文
2	3617	淳安	RT	K _{1h/s}	110	171.97	107.04	4.653	0.71862	3	0.71135	17.16	71.22	0.1457	0.512488	12	0.512383	-2.2	1.09	本文
3	5017	浦江	B	K _{1h/s}	110	49.02	774.54	0.183	0.70591	2	0.70562	4.90	21.85	0.1357	0.512532	10	0.512434	-1.2	1.01	本文
4	5015	浦江	R	K _{1s}	122	205.93	12.53	47.963	0.79243	7	18.84	91.70	0.1242	0.512487	9	0.512388	-1.8	1.07	本文	
5	5014	浦江	R	K _{1s}	122	194.51	20.62	27.435	0.76130	4	7.93	39.82	0.1204	0.512511	15	0.512415	-1.3	1.02	本文	
6	5010	建德	R	K _{1s}	122	143.86	23.65	17.658	0.74131	2	14.31	73.81	0.1172	0.512443	11	0.512349	-2.6	1.13	本文	
7	92Z08	寿昌	R	K _{1s}	122	129.40	56.81	6.585	0.72056	2	0.70914	12.04	39.08	0.1862	0.512378	5	0.512229	-4.9	1.32	[4]
8	92Z05	寿昌	R	K _{1s}	122	184.50	12.12	44.29	0.78527	7	14.24	72.98	0.1180	0.512479	7	0.512385	-1.9	1.07	[4]	
9	5013	建德	GP	浅成侵入岩	122	110.50	41.30	7.753	0.72341	3	0.71019	12.18	61.63	0.1205	0.512482	9	0.512386	-1.9	1.07	本文
10	1264	富阳	QD	浅成侵入岩	122	83.80	85.89	2.823	0.71776	2	0.70783	8.11	43.94	0.0994	0.512503	11	0.812424	-1.1	1.07	本文
11	3558	淳安	D	K _{1h}	128	178.00	200.80	2.567	0.71651	2	0.71184	12.34	58.48	0.1276	0.512286	9	0.512179	-5.7	1.01	本文
12	5002	建德	RI	K _{1h}	128	168.10	283.79	1.715	0.71188	2	0.70876	7.30	34.26	0.1289	0.512281	13	0.512173	-5.9	1.39	本文
13	5018	兰溪	RI	K _{1h}	128	230.23	120.79	5.514	0.71842	3	0.70839	6.63	39.15	0.1024	0.512104	10	0.512018	-8.9	1.40	本文
14	91Z43	临安	RI	K _{1h}	128	518.39	149.92	9.992	0.71620	2	5.21	30.71	0.1026	0.512166	15	0.512080	-7.7	1.64	[4]	
15	TL-4	桐庐	DP	K _{1h}	135	130.35	274.10	1.411	0.71081		0.70810	8.36	40.38	0.1229	0.512298		0.512189	-5.4	1.55	[2]
16	TL-9	桐庐	R	K _{1h}	135	136.68	169.55	2.461	0.71318		0.70847	7.88	34.82	0.1315	0.512244		0.512128	-6.6	1.36	[2]
17	TL-1	桐庐	RI	K _{1h}	135	147.30	275.87	1.647	0.71119		0.70804	8.10	39.96	0.1246	0.512302		0.512192	-5.3	1.46	[2]
18	TL-2	桐庐	DP	K _{1h}	135	159.27	187.45	2.495	0.71264		0.70785	7.68	35.04	0.1340	0.512270		0.512152	-6.1	1.36	[2]
19	5111	建德	RT	K _{1l}	135	106.50	53.34	5.784	0.71776	2	0.70666	6.70	22.28	0.1819	0.512462	14	0.512301	-3.2	1.42	本文
20	5005	淳安	B	K _{1l}	135	16.92	437.07	0.112	0.70978	2	0.70958	10.46	51.87	0.1220	0.512269	9	0.512161	-5.9	1.18	本文
21	5006	淳安	RI	K _{1l}	135	136.23	189.91	2.077	0.71379	2	0.71001	6.81	34.02	0.1211	0.512298	16	0.512191	-5.3	1.41	本文
22	92Z03	寿昌	D	K _{1l}	135	55.09	216.00	0.737	0.71057	3	0.70923	7.534	36.52	0.1248	0.512289	6	0.512289	-6.4	1.38	[4]
23	5019	金华	AT	K _{1l}	135	61.75	546.03	0.327	0.70846	2	0.70587	8.16	36.81	0.134	0.512355	12	0.512237	-4.4	1.45	本文
24	0225	建德	R	K _{1l}	135	168.70	57.16	8.550	0.72228	2	0.70907	9.95	60.45	0.0996	0.512261	14	0.512178	-5.8	1.29	本文
25	5003	常山	G	浅成侵入岩	128	137.23	140.04	2.837	0.71423	2	0.70849	11.06	52.01	0.1248	0.512269		0.512159	-6.0	1.39	[2]
26	TLH-6	桐庐	QMD	浅成侵入岩	135	116.53	415.27	0.793	0.71001		0.70843	10.31	53.02	0.1188	0.512266		0.512161	-5.9	1.41	[2]
27	TLH-6-2	桐庐	QMD	浅成侵入岩	135	99.50	379.49	0.732	0.70983		0.70843	12.55	53.28	0.1459	0.512330		0.512201	-5.1	1.35	[2]
28	TLH-6-2	桐庐	MD	包体	135	82.66	397.82	0.566	0.70982		0.70873	12.55	53.28	0.1459	0.512330		0.512201	-5.1	1.35	[2]
29	Z-9a	桐庐	QMD	浅成侵入岩	124	135.70	250.60	1.567	0.71070	1	0.70794	7.44	35.68	0.1261	0.512338	5	0.512236	-4.7	1.30	[5]
30	Z-10	桐庐	QMD	浅成侵入岩	124	109.00	498.00	0.634	0.70950	1	0.70838	6.76	31.68	0.1290	0.512318	5	0.512213	-5.2	1.34	[5]
31	Z10-b	桐庐	MD	包体	124	100.50	587.80	0.495	0.70912	1	0.70825	7.72	36.70	0.1272	0.512311	5	0.512208	-5.3	1.35	[5]
32	91Z39	桐庐	QMD	浅成侵入岩	128	205.60	559.10	1.062	0.71036	3	0.70843	9.871	36.03	0.1657	0.512269	16	0.512130	-6.7	1.47	[4]
33	91Z41	桐庐	QMD	浅成侵入岩	128	193.40	286.60	1.950	0.71151	7	0.70796	8.087	41.27	0.1185	0.512232	22	0.512133	-6.6	1.46	[4]

注:中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室乔广生测定。

①B—玄武岩;RT—流纹质凝灰岩;R—流纹岩;GP—花岗斑岩;QD—花岗岩;D—英安岩;RI—流纹质熔结凝灰岩;DP—碎斑英安斑岩(侵出相);

AT—安山质凝灰岩;G—花岗岩;QMD—石英二长闪长岩;MD—二长闪长岩。

②K_{1z}—中戴组;K_{1s}—寿昌组;K_{1h}—黄尖组;K_{1l}—劳村组。

择具代表性的样品作同位素分析,其中包括部分与火山岩密切相关的浅成侵入岩。样品由中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室分析,采用 AG50W×8 (H⁺) 阳离子交换柱和 P507 萃淋树脂分离出纯净的 Rb、Sr 和 Sm、Nd。同位素测量在 VG354 固体同位素质谱计上进行。Sr 同位素质量分馏用 $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}=0.1194$ 、Nd 同位素比值测定采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 进行标准化。实验室全流程本底: Rb、Sr 为 $2\times 10^{-10}\sim 5\times 10^{-10}\text{g}$ 、Sm、Nd 为 $5\times 10^{-11}\text{g}$ 。国际标样结果是, NBS987: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710254\pm 16$ (2σ), NBS607: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=1.200270\pm 40$ (2σ); La Jolla: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.511862\pm 7$ (2σ)。样品的初始 Nd、Sr 同位素组成采用 ϵ_{Nd} 和 I_{Sr} 值表示(表 2),根据地层年龄和测定的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值扣除放射性成因组分求得初始比值。

从表 2 可见,除个别样品外,绝大多数火山岩的 I_{Sr} 值介于 0.707~0.710 之间, ϵ_{Nd} 值介于 -6.6~-1.0 之间,不同旋回火山岩的 ϵ_{Nd} 值有一定的分布范围,其值变化范围不大(图 1)。

第 I 旋回: 样品采自浦江、金华、桐庐、建德、常山和淳安等不同的地点,岩性包括玄武岩、安山质凝灰岩、英安岩、流纹岩、流纹质火山碎屑岩及同时代的浅成侵入岩。23 个样品的 ϵ_{Nd} 值介于 -8.9~-3.2 间,平均为 -5.82,其中 18 个样品的 ϵ_{Nd} 值在 -6.6~-5.1 之间,较为一致。 I_{Sr} 值介于 0.706~0.712 之间,绝大多数样品的 I_{Sr} 值为 0.708~0.709。

第 II 旋回: 样品采自建德和浦江等地的流纹岩,样品的 ϵ_{Nd} 值在 -4.9~-1.1 之间,平均为 -2.2 ($n=7$); $I_{\text{Sr}}=0.709$, 2 个同时代的浅成侵入岩的 I_{Sr} 分别为 0.708 和 0.710。

第 III 旋回: 本旋回火山岩不发育,在巨厚的红层中夹有厚度不大的玄武岩和流纹质凝灰岩,其中玄武岩的 ϵ_{Nd} 为 -1.2 和 -0.9, I_{Sr} 值均为 0.706; 流纹质凝灰岩的 ϵ_{Nd} 值为 -2.2, I_{Sr} 值为 0.711。

浙江省西北部白垩纪火山岩 Nd、Sr 同位素组成有两个明显的特征:(1)不同旋回的火山岩同位素组成不同,从早到晚的 3 个旋回火山岩的 ϵ_{Nd} 渐次增大,平均值依次为 -5.82 ($n=23$)、-2.2 ($n=7$) 和 -1.4 ($n=3$); (2)不同地区内的同一旋回的火山岩和侵入岩具有类似的同位素组成。如桐庐盆地第 I 旋回火山岩 ϵ_{Nd} 值在 -5.3~-6.6 之间,平均 -5.9 ($n=4$),同一时代的石英二长闪长岩的 ϵ_{Nd} 值在 -4.7~-6.7 之间,平均为 -5.7 ($n=8$); 常山白菊花尖花岗岩 ϵ_{Nd} 值为 -5.8; 又如建德寿昌一带第 II 旋回火山岩 ϵ_{Nd} 值在 -1.3~-4.9 之间,平均 -2.8 ($n=4$),而同一时代侵入的华家塘花岗岩斑岩 ϵ_{Nd} 值在 -1.1~-1.9 之间,平均 -1.5 ($n=2$)。这两个特征与浙江省东南部火山-侵入杂岩的 Sr、Nd 同位素组成十分相似^[9]。

3 Nd 模式年龄

火成岩的 Nd 模式年龄通常可近似代表它们源岩的地壳存留年龄,可以把 Nd 同位素演化与地壳演化的时间联系起来。沈渭洲等^[9]、陈江峰等^[7]研究表明:地壳岩石的 Sm/Nd 分馏会对计算的 Nd 模式年龄产生十分明显的影响,甚至会给

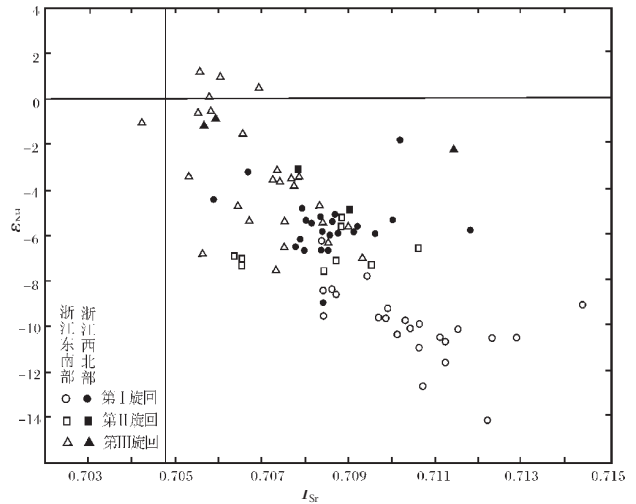


图 2 浙江省白垩纪火山岩的 ϵ_{Nd} — I_{Sr} 图

图内浙江省西北部 ϵ_{Nd} 和 I_{Sr} 数据同表 2, 东南部数据引自参考文献 [1, 3~6, 9~14]

Fig. 2 ϵ_{Nd} vs. I_{Sr} plot of Cretaceous volcanic rocks in Zhejiang. ϵ_{Nd} and I_{Sr} data of northwestern Zhejiang same as in Table 2 and the data in southeastern Zhejiang from references [1, 3~6, 9~14]

出不合理或负的模式年龄。为了最大程度减少因地壳演化阶段内 Sm/Nd 分馏对 Nd 模式年龄计算值产生的影响,本文采用 Liew 等^[13]给出的两阶段演化模式参数计算火山岩的 Nd 模式年龄 ($t_{2\text{DM}}$)。

浙江西北扬子地块区白垩纪火山岩的 Nd 模式年龄 ($t_{2\text{DM}}$) 均小于 1.6 Ga。第 I 旋回火山岩的 $t_{2\text{DM}}$ 值绝大多数在 1.30~1.45 Ga, 平均 1.40 Ga ($n=23$); 第 II 旋回火山岩的 $t_{2\text{DM}}$ 值, 在 1.02~1.32 Ga 之间, 平均 1.11 Ga ($n=7$); 第 III 旋回火山岩的 $t_{2\text{DM}}$ 为 0.98~1.09 Ga 之间, 平均为 1.02 Ga。由此可见, 浙江西北部白垩纪 3 个旋回火山岩, 从第 I 旋回到第 III 旋回火山岩形成期间, Nd 模式年龄年轻化趋势十分明显。

4 Nd、Sr 同位素组成和 Nd 模式年龄的空间变化

白垩纪火山岩 Nd、Sr 初始值变化较大, 投影点较为分散(图 2), 同时也清楚地显示出浙江省西北部扬子地块区和浙江省东南部华夏地块区 Nd、Sr 同位素组成的差异: 前者投影点相对集中, ϵ_{Nd} 和 I_{Sr} 相关性不明显; 后者投影点比较分散, ϵ_{Nd} 和 I_{Sr} 负相关性明显。

4.1 基底构造对白垩纪火山岩 Nd 同位素组成的制约

浙江省西北部扬子地块区和东南部华夏地块区白垩纪火山岩 Nd 同位素组成的差异, 主要表现在西北部扬子地块区的火山岩 ϵ_{Nd} 值相对较高(平均为 -4.6, $n=33$), 变化较小(-8.9~-1.0), I_{Sr} 值虽有一定变化, 但多数集中在 0.708~0.710 之间, 投影点位于第 4 象限上方; 东南部华夏地块区火

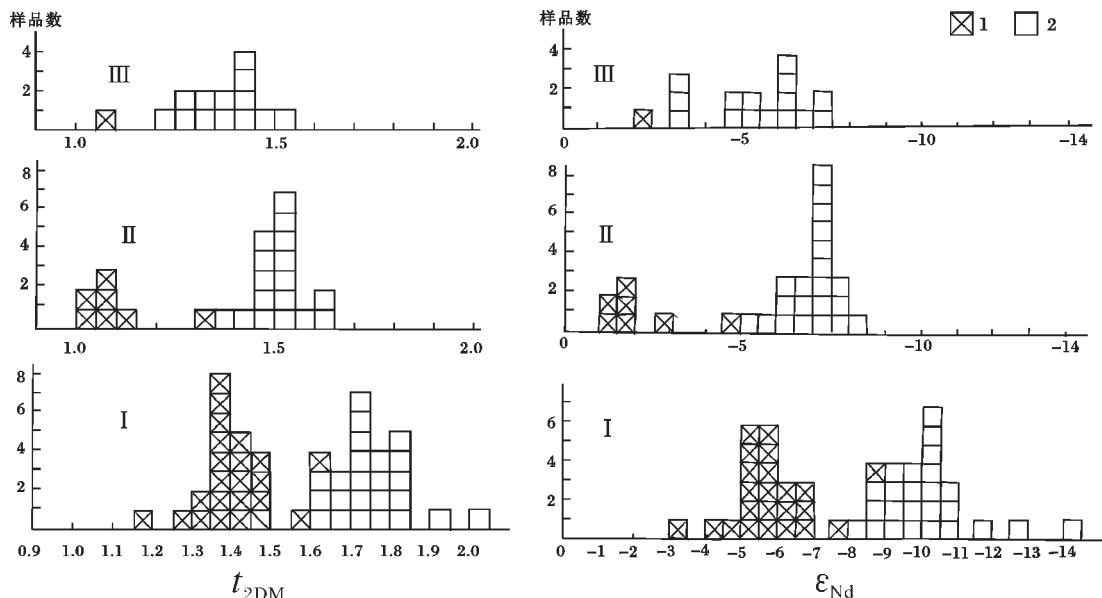


图 3 浙江省白垩纪酸性火山岩的 t_{2DM} 和 ϵ_{Nd} 直方图

1—浙西北扬子地块;2—浙东南华夏地块; I—第 I 火山旋回; II—第 II 火山旋回; III—第 III 火山旋回

Fig.3 Histograms of t_{2DM} and ϵ_{Nd} of Cretaceous acid volcanic rocks in Zhejiang

1—Northwestern Zhejiang (Yangtze block); 2—Southeastern Zhejiang (Cathaysian block); I—Cycle I; II—Cycle II; III—Cycle III

山岩 ϵ_{Nd} 值变化大,介于 $-14.1 \sim +1.2$ 之间^[4],投影点位于第 4 象限较下位置,且较为分散(图 2)。如果按不同旋回对比,扬子地块和华夏地块白垩纪火山岩 Nd 同位素组成及模式年龄的差异明显,尤其是第 I 旋回差异更为明显:扬子地块区劳村组、黄尖组火山岩及同时代浅成侵入岩的 23 个样品 ϵ_{Nd} 值介于 $-8.9 \sim -3.2$ 之间,平均为 -5.8 ;Nd 模式年龄介于 $1.18 \sim 1.64$ Ga 之间,平均 1.40 Ga; 华夏地块内同一旋回火山岩的 ϵ_{Nd} 值在 $-14.1 \sim -8.9$ 之间,平均为 -10.1 , t_{2DM} 值为 $1.64 \sim 2.14$ Ga,平均为 1.75 Ga^[4]。这种差异可能与两大地块基底变质岩的原岩成分有关。

4.2 幔源物质的加入量随时间增加

前已述及,浙西北部扬子地块区白垩纪 3 个不同旋回火山岩的 ϵ_{Nd} 和 t_{2DM} 有明显的差异,而且有 ϵ_{Nd} 值随时间依次增大,Nd 模式年龄降低的趋势。不同旋回酸性火山岩的 ϵ_{Nd} 值和 t_{2DM} 值随时间变化的趋势在两个地块之间的差异显示更为清楚(图 3)。同一大地构造单元内,虽然不同地区同一旋回火山岩的 Nd 同位素组成也有一定差异,但这种差异远较同一地区不同旋回火山岩之间的差异要小得多,如扬子地块区内,第 I 旋回劳村组、黄尖组 23 个样品分布范围为 $120 \text{ km} \times 80 \text{ km}$ 的不同火山岩带上。除 4 个样品的 ϵ_{Nd} 分别为 -8.9 、 -7.7 和 -3.2 、 -4.4 外,其余 19 个样品 ϵ_{Nd} 均在 $-6.6 \sim -4.7$ 之间,变化幅度不大。但同一地段或同一剖面,不同旋回火山岩, ϵ_{Nd} 值差异较大,如建德寿昌盆地中,第 I 旋回的劳村组英安岩和黄尖组流纹质熔结凝灰岩的 ϵ_{Nd} 值分别为 -5.6

和 -5.9 ,而第 II 旋回寿昌组流纹岩的 ϵ_{Nd} 为 -1.9 ;在建德、浦江一带的寿昌组火山-侵入杂岩 7 个样品,除一个样品 ϵ_{Nd} 值为 -4.9 外,其余均在 $-2.6 \sim -1.1$ 之间,平均为 -2.2 ,与寿昌盆地寿昌组流纹岩差异不大。Nd 模式年龄则由第 I 旋回火山岩大于 1.4 Ga,到第 III 旋回降低至 1.0 Ga。上述例子说明本区白垩纪火山岩 ϵ_{Nd} 值随时间增大,而 t_{2DM} 随时间降低不是偶然现象,从 $135 \sim 124$ Ma 第 I 旋回火山岩的形成时至 $110 \sim 90$ Ma 第 III 旋回火山岩形成时,幔源物质的加入量显著地随时间增加。由于第 III 旋回火山岩出现双峰式组合以及同时形成红色盆地,因而这种幔源物质的加入很可能与地壳的进一步拉张有关。

5 浙江省白垩纪火山岩的物质来源与成因探讨

浙江省白垩纪火成岩主要为流纹岩和花岗岩,玄武岩和辉长岩很少,就它们的成因关系而言,不可能由小体积的基性岩浆演化出大体积的酸性岩浆。白垩纪流纹岩和花岗岩,以巨大的体积、准铝质、钙碱性-高钾钙碱性为特征,稀土元素和微量元素丰度与陆壳平均值相近,而更富大离子亲石元素 K、Ba、Sr、Rb、Th 和 Zr、Hf。产生这种花岗质岩浆的最合适源岩物质,主要是地壳深部含水的钙碱性和富钾钙碱性安山质-玄武安山质火成变质岩^[15]。西北部扬子地块的基底主要是钙碱性的细碧角斑岩。绍兴平水地区的细碧角斑岩,在 $t=130$ Ma 火山岩形成时的 ϵ_{Nd} 值为 $-4.3 \sim +4.5$,平均为 -0.9

($n=13$)。浙江省平水群浅变质沉积岩没有 Nd、Sr 同位素资料,但其形成时代与岩石组合可与毗邻的皖南地区上溪群相类比,上溪群千枚岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(130\text{Ma})$ 值为 $-5.6\sim -8.2$, $t_{2\text{DM}}$ 为 $1.4\sim 1.6\text{Ga}^{[10]}$ 。这表明形成扬子地块区内白垩纪流纹岩和花岗岩的花岗质岩浆的源岩,主要是类似于平水群细碧角斑岩和浅变质沉积岩的中下地壳岩石。华夏地块的基底变质岩中,陈蔡群片岩、石英岩在 130 Ma 时的 ϵ_{Nd} 值介于 $-25.1\sim -13.1$ 之间,平均为 -19.9 ;片麻岩类的 $\epsilon_{\text{Nd}}(130\text{Ma})$ 值在 $-8.4\sim -2.7$,平均为 $-5.1^{[9]}$ 。华夏地块区内的白垩纪火山岩低 ϵ_{Nd} 值表明其源区物质组分与陈蔡群变质岩密切相关。上述表明:分布于浙江省两大块上的白垩纪酸性火山岩各自继承了基底变质岩的 Nd 同位素特征。

浙江省白垩纪 3 个不同旋回火山岩 ϵ_{Nd} 值随时间依次增大和 $t_{2\text{DM}}$ 值随时间依次变小的规律,根据周新民等^[11]近年提出的“岩石圈消减作用和玄武岩底侵作用相结合”的观点,解释浙江省白垩纪时花岗质岩浆的产生和变化。古太平洋岩石圈向西俯冲,地幔橄榄岩的底辟产生玄武岩浆,玄武岩的底侵,诱发了中下地壳中变质岩的部分熔融,产生了钙碱性和高钾钙碱性酸性花岗质岩浆。鉴于岩浆的化学成分主要取决于源岩性质^[12],扬子地块和华夏地块基底变质岩成分的不同,是导致浙江省两大块区内白垩纪火山岩 Nd、Sr 同位素组成不同的主要原因。玄武岩持续的底侵,花岗质岩浆中幔源物质的不断增加,致使两大块区内白垩纪火山岩 ϵ_{Nd} 值随时间依次增大和 $t_{2\text{DM}}$ 值随时间逐渐变小。

参考文献 (References):

[1] 陈江峰,周泰禧,李学明,等.中国东南地区中生代岩浆岩的 Sr、Nd 同位素组成及其大地构造意义[A].见:李继亮主编.中国东南海陆岩石圈结构与演化研究 [C].北京:中国科学技术出版社,1992.119~130.
Chen Jiangfeng,Zhou Taixi,Li Xueming,et al. Sr and Nd isotopic compositions of Mesozoic magmatic rocks from southeastern China and its tectonic significance[A].In:Li Jiliang (ed.).Studies of Structure and Evolution of the Continental and Oceanic Lithosphere of SE China[C],Beijing: China Sci.Technol. Publ. House, 1992.119~130(in Chinese).

[2] 周金城,王德滋,汪相,等.对桐庐早白垩世火山-侵入岩成因的几点认识[J].岩石学报,1999,15(2):263~271.
Zhou Jincheng, Wang Dezi, Wang Xiang, et al. A few studies of the Tonglu volcanic-intrusive rocks of Early Cretaceous [J].Acta Petrologica Sinica 1999,15 (2):263~271 (in Chinese with English abstract).

[3] 沈渭洲,凌洪飞,王德滋,等.浙江省中生代火成岩的 Nd-Sr 同位素研究[J].地质科学,1999,34(2):223~232.
Shen Weizhou, Ling Hongfei, Wang Dezi, et al. Study on Nd-Sr isotopes of Mesozoic igneous rocks in Zhejiang, China [J]. Scientia Geologica Sinica, 1999,34(2):223~232 (in Chinese with English abstract).

[4] Chen J F,Jahn B M. Crustal evolution of Southeastern China: evidence from Nd and Sr isotopic compositions of rocks [J]. Tectonophysics,1998,284:101~183.

[5] Lapiere H,Jahn B M,Charvet J,et al. Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiites in Zhejiang Province and their relationship with the tectonic activity in southeastern China [J]. Tectonophysics, 1997,274:321~338.

[6] 俞云文,徐步台,陈江峰,等.浙东南中生代晚期火山岩 Nd 同位素组成及其地质学意义[J].高校地质学报,2001,7(1):62~69.
Yu Yunwen,Xu Butai,Chen Jiangfeng,et al. Nd isotopic systematics of the Late Mesozoic volcanic rocks from Southeastern Zhejiang Province, China: implications for stratigraphic study [J]. Geological Journal of China Universities, 2001,7 (1):62~69 (in Chinese with English abstract).

[7] 陈江峰,江博明.铍锶铅同位素示踪和中国东南大陆地壳演化[A].见:郑永飞主编.化学地球动力学 [C].北京:科学出版社,1999.262~287.
Chen Jiangfeng,Jiang Boming. Nd, Sr, Pb isotope tracer and continental crust evolution of SE China [A].In:Zheng Y F (ed.). Chemical Geodynamics[C]. Beijing:Science Press,1999.262~287(in Chinese).

[8] 杨祝良,沈渭洲,陶奎元,等.浙闽沿海早白垩世玄武岩锶、钕、铅同位素特征——古老富集型地幔的证据 [J].地质科学,1999,34(1):59~68.
Yang Zhuliang, Shen Weizhou, Tao Kuiyuan,et al. Sr, Nd and Pb isotopic characteristics of Early Cretaceous basaltic rocks from the coast of Zhejiang and Fujian: evidences for ancient enriched mantle source [J]. Scientia Geologica Sinica, 1990,34(1):59~68(in Chinese with English abstract).

[9] 薛怀民,陶奎元,沈加林.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[J].地质学报,1996,70(1):35~47.
Xue Huaimin,Tao Kuiyuan, Shen Jialin. Sr and Nd isotopic characteristics and magma genesis of Mesozoic volcanic rocks along the coastal region of southeastern China [J].Acta Geologica Sinica, 1996, 70(1):35~47(in Chinese with English abstract).

[10] 罗以达,俞云文.试论永康群时代及区域地层对比[J].中国地质,2004,31(4):395~399.
Luo Yida,Yu Yunwen. Age of the Yongkang Group and regional stratigraphic correlation [J]. Geology in China,2004,31(4):395~399(in Chinese with English abstract).

[11] 王德滋,周金城,邱检生,等.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 [J].南京大学学报(地球科学),1994,6(4):317~325.
Wang Dezi,Zhou Jincheng, Qiu Jiansheng,et al. The magma mixing in early Cretaceous volcanic activities and evidence for crust-mantle interaction in southeastern coast of China [J]. Journal of Nanjing University (Earth Sciences),1994,6 (4):317~325 (in Chinese with English abstract).

[12] 周金城,张海进,俞云文.浙江新昌早白垩世复合岩流中的岩浆混合作用[J].岩石学报,1994,10(3):236~247.

- Zhou Jincheng, Zhang Haijin, Yu Yunwen. Magma mixing in early Cretaceous composite lava flows in Xinchang, Zhejiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1994, 10(3): 236~247 (in Chinese with English abstract).
- [13] Liew T C, Hofmann A W. Precambrian crustal components, plutonic assimilations, plate environment of the Hercynian fold belt of central Europe: indications from a Nd and Sr isotopic study [J]. *Mineral*, 1988, 98: 129~138.
- [14] 陈荣, 周金城. 浙东早白垩世复合岩流和岩墙中蕴含的壳幔作用信息[J]. *地质论评*, 1999, 45(增刊): 784~795.
- Chen Rong, Zhou Jincheng. Information of crust-mantle interaction implied in early Cretaceous composite lavas and dikes from eastern Zhejiang [J]. *Geological Review*, 1999, 45 (Supp.): 784~795 (in Chinese with English abstract).
- [15] 李武显, 周新民. 浙闽沿海晚中生代火成岩成因的地球化学制约 [J]. *自然科学进展*, 2000, 10(7): 630~641.
- Li Wuxian, Zhou Xinmin. Geochemistry constraint on the origin of Late Mesozoic igneous rocks along the coastal region of Zhejiang and Fujian Province [J]. *Progress in Natural Science*, 2000, 10(7): 630~641 (in Chinese).
- [16] 陈江峰, 周泰禧, 邢凤鸣, 等. 皖南浅变质岩和沉积岩的钕同位素组成及沉积物源区 [J]. *科学通报*, 1989, 20: 1572~1574.
- Chen Jiangfeng, Zhou Taixi, Xing Fengming, et al. Nd isotopic ratios of low grade metamorphic and sedimentary rocks on material sources from southern Anhui Province [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1989, 20: 1572~1574 (in Chinese).
- [17] 周新民, 李武显. 中国东南部晚中生代火成岩成因: 岩石圈消减和玄武岩底侵相结合的模式 [J]. *自然科学进展*, 2000, 10(3): 240~247.
- Zhou Xinmin, Li Wuxian. Late Mesozoic volcanic genesis in SE-China: a model combining lithosphere subduction with basaltic magma underplating [J]. *Progress in Natural Science*, 2000, 10(3): 240~247 (in Chinese).
- Li Wuxian, Zhou Xinmin. Geochemistry constraint on the origin of

Nd-Sr isotope features of Cretaceous volcanic rocks in northwestern Zhejiang

YAN Tie-zeng¹, YU Yun-wen¹, CHEN Jiang-feng², XU Xing-miao¹,
WANG Jian-guo¹, CAI Zi-hua¹, DONG Yao-hong¹

(1. Zhejiang Institute of Geological survey, Xiaoshan 311203, Zhejiang, China;

2. School of Earth and Space Science, China University of Technology, Hefei 230026, Anhui, China)

Abstract: Cretaceous volcanic rocks in Zhejiang Province occur on two different basement tectonic units: the Yangtze block and Cathaysian block. There is great difference in Nd isotopic composition between volcanic rocks of the two different tectonic units. The ϵ_{Nd} values of volcanic rocks of the Yangtze block are higher, ranging between -8.9 and -0.9 with a mean of -4.6 (n=33), whereas the ϵ_{Nd} values of volcanic rocks of the Cathaysian block range from -1.41 to +1.2 with a mean of -6.7 (n=69). Furthermore, the ϵ_{Nd} values of volcanic rocks of the two blocks increase with time and the model ages show a very marked trend of decrease with time. In the Yangtze block the mean ϵ_{Nd} and $t_{2\text{DM}}$ values of acid volcanic rocks from cycle I formed at 135-124 Ma B.P. to cycle III formed at 110-900 Ma B.P. are -6.2, -2.4 and -2.2 and 1.42, 1.11 and 1.09 Ga respectively. In the Cathaysian block the mean ϵ_{Nd} and $t_{2\text{DM}}$ values of acid volcanic rocks of the contemporaneous three cycles are -10.1, -7.2 and -5.5 and 1.75, 1.49 and 1.35 Ga respectively. It is inferred that the Cretaceous rhyolitic rocks developed widely in Zhejiang Province probably originated by partial melting of the basement metamorphic rocks. Continuous underplating of basalt resulted in significant increase of introduced mantle-derived materials with time.

Key words: Nd and Sr isotopes; volcanic rocks; Cretaceous; northwestern Zhejiang

About the first author: YAN Tie-zeng, male, born in 1956, senior engineer, being engaged in region geology survey long-term; E-mail: ytz195684@163.com.