

57-68

浙江花岗岩类地球化学与地壳演化

——II. 元古宙花岗岩类*

p588.121

王一先 赵振华[✓] 包志伟 李献华

(中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

摘 要 浙江元古宙花岗岩类包括神功期(1.8—1.9Ga)和晋宁晚期(0.6—0.9Ga)。研究了浙江元古宙花岗岩类的主元素、微量元素、稀土元素和 Rb、Sr 同位素组成特征及岩石成因,探讨了浙江地壳的演化。浙江地壳形成于太古宙和元古宙,地壳增生的时期为 2.6—2.7、0.8—1.1 和 0.1—0.12Ga。随时间演化浙江地壳组成有变化,但分异演化不明显。沿江—绍断裂分布的晋宁晚期幔源和壳幔混合中酸性岩是晋宁期俯冲碰撞的证据。加里东和印支期是两次规模不大的构造运动。

关键词 元古宙花岗岩 主元素 微量元素 稀土元素 同位素 地壳演化

稀土族

地球化学

1 元古宙花岗岩类的主元素、微量元素和稀土元素组成特征

1.1 神功期花岗岩

神功期的花岗岩主要分布在浙江龙泉和遂昌一带。遂昌大柘英云闪长岩锆石 U-Pb 一致线年龄为 $(1800 \pm 44) \text{ Ma}$ (2 σ ,下同;表1), Pb-Pb 等时线年龄为 $(1810 \pm 21) \text{ Ma}$ (图

表1 大柘英云闪长岩锆石 U-Pb 同位素年龄测定结果 (LG-211)

Table 1 U-Pb isotopic age of zircon from Dazhe granite (LG-211)

序号	样品情况 矿物特征	浓 度		同位素原子比值					表面年龄值 (Ma)		
		U ($\times 10^{-6}$)	Pb ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$
1	<100目,短柱状	145.94	58.60	353.0	0.31320	0.3027	4.549	0.14906	1705	1740	1773
2	>100目,板状	141.19	55.13	538.5	0.27205	0.3118	4.737	0.13565	1750	1774	1802
3	<100目,长柱状	162.87	65.26	1339	0.24168	0.3371	5.124	0.12046	1873	1840	1803
4	>100目,长柱状 自形晶	142.48	54.63	896.1	0.25302	0.3167	4.805	0.12531	1774	1786	1799

Pb-Pb等时线年龄为 $(1810 \pm 21) \text{ Ma}$, 一致线年龄为 $(1800 \pm 44) \text{ Ma}$ 。

注: 由中国科学院广州地球化学研究所 VG-354 组测定, 分析精度 0.02%—0.04%。

第一作者简介: 王一先 女 56岁 研究员 地球化学

*国家自然科学基金重大项目资助(9490011)和中关村测试中心资助

收稿日期 1996-05-09, 改回日期 1997-03-24

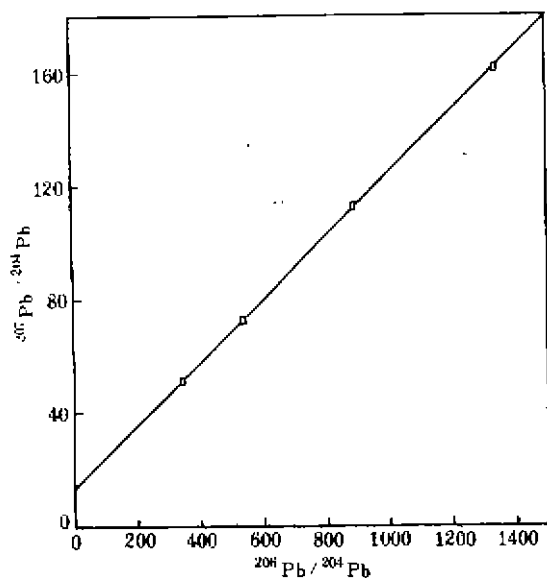


图 1 大柘英云闪长岩锆石 Pb-Pb 等时线

Fig. 1 Pb-Pb isochron for zircon from Dazhe tonalite
Pb-Pb 等时线年龄为 (1810 ± 21) Ma.

1). 龙泉淡竹英云闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 $1878\text{Ma}^{[1]}$, 龙泉坑眼二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 $1889\text{Ma}^{[2]}$, 龙泉下际二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 $(1975 \pm 80)\text{Ma}$, 松阳里庄二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 $(1870 \pm 36)\text{Ma}^{[1]}$.

神功期花岗岩的岩性为英云闪长岩和二长花岗岩。主元素含量变化大(表 2), 四个样品用 CIPW 计算, 在 Streckeisen 分类中为英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和碱长花岗岩。过渡元素 V、Cr、Co 相对富集, 为花岗岩平均值^[4]含量的 1—3 倍, 大离子不相容元素含量低, Rb、Ba、Nb 近于或低于平均值(表 3)。稀土分布模式为右倾直线型(图 2a), 稀土元素含量、LREE/HREE 和 δEu 值变化大(表 4)。

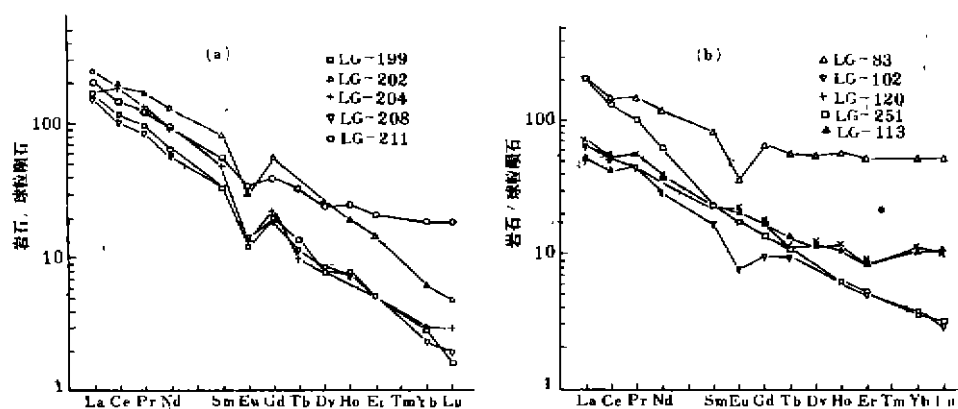


图 2 浙江元古宙花岗岩类稀土分布模式

Fig. 2 REE distribution patterns of Proterozoic granitoids from Zhejiang

a. 神功期花岗岩; b. 晋宁晚期中酸性岩。

1.2 晋宁晚期中酸性岩

晋宁晚期中酸性岩分布在江-绍断裂附近和浙皖交界处。西裘、桃红和道林山岩体侵入在双溪坞群中, 璜山和大成坞岩体侵入在陈蔡群中。罗家岩体侵入在八都群中。莲花山侵入在晚元古代井潭组中, 与花岗斑岩和流纹岩呈渐变关系。西裘石英闪长岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $(852.6 \pm 17.8)\text{Ma}^{[5]}$ 。璜山石英角闪岩角闪石 K-Ar 年龄为 $(888 \pm 10)\text{Ma}^{[6]}$ 。莲花山岩体锆石 U-Pb 年龄为 $753\text{Ma}^{[7]}$ 、白际山岩体锆石 U-Pb 年龄为 $766\text{Ma}^{[8]}$ 。道林山碱

表2 浙江元古宙花岗岩类岩石化学分析结果(%)
Table 2 Major element composition (%) of Proterozoic granitoids from Zhejiang

期	样号	产地	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	B ₂ O ₃	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	总量
神功期	LG-199	下 济	二长花岗岩	72.72	0.34	14.30	0.42	1.98	0.08	0.71	0.74	2.32	5.29	0.24	1.36	0.04	100.52
	LG-202	淡 竹	英云闪长岩	62.10	2.16	13.86	1.34	7.53	0.18	1.63	4.43	0.81	2.84	0.60	1.95	0.04	99.47
	LG-204	东 书	黑云母花岗岩	71.31	0.35	14.47	0.50	1.92	0.07	0.56	0.62	2.03	7.47	0.22	0.79	0.16	100.47
	LG-208	内 庄	片麻状花岗岩	68.60	0.45	14.76	0.72	3.71	0.07	1.89	1.44	1.89	3.49	0.22	2.21	0.16	99.61
	LG-211	大 拓	英云闪长岩	58.99	1.66	16.57	1.05	6.52	0.13	1.81	6.33	1.49	3.22	0.44	1.43	—	99.64
晋宁期	LG-83	道林山	碱性花岗岩	73.22	0.27	11.99	1.68	1.56	0.12	0.18	0.65	4.32	5.29	0.18	0.76	0.04	100.26
	LG-102	大成坞	二长花岗岩	73.99	0.20	13.44	0.88	0.85	0.06	0.42	1.42	3.65	3.49	0.17	1.24	0.08	99.89
	LG-113	桃 红	石英闪长岩	56.23	0.57	16.72	3.72	4.52	0.18	3.63	8.13	2.63	0.38	0.31	2.86	—	99.88
	LG-120	西 裘	石英闪长岩	58.92	0.69	14.17	4.37	4.30	0.12	3.57	4.55	3.50	0.63	0.34	4.56	—	99.72
	LG-123	任 蚕	混合花岗岩	74.49	0.31	14.79	0.80	0.55	0.04	0.34	0.16	0.13	6.55	0.24	1.38	—	99.78
期	LG-213	遂 昌	二长花岗岩	74.11	0.36	13.29	0.25	1.67	0.07	0.55	0.76	2.97	5.16	0.21	0.93	—	100.49
	LG-251	罗 家	变花岗岩	67.17	0.52	15.10	0.39	2.52	0.06	1.54	2.37	3.11	3.51	0.27	2.85	0.20	99.61
	LG-501	莲花山	片麻状花岗岩	78.02	0.08	12.07	0.51	0.83	0.03	0.11	0.17	2.97	4.74	0.12	0.40	—	100.05

注: 由北京大学地质系分析中心ICP测定, 分析精度优于2%, 相对标准偏差≤2%。

表3 浙江元古宙花岗岩类微量元素分析结果($\times 10^{-6}$)
Table 3 Trace element composition ($\times 10^{-6}$) of Proterozoic granitoids from Zhejiang

样号	Ba	Co	Cr	Cs	Hf	Ni	Rb	Sb	Se	Sr	Ta	Th	U	W	Zr	Nb	Cu	V
LG-201	529	14.3	40.4	13.9	12.6	<42.6	176	0.300	20.3	180	2.68	12.3	3.14	3.60	291	42	15	62
LG-204	786	3.98	24.4	1.38	7.40	<19.6	208	0.248	4.99	248	0.335	70.0	2.20	0.914	156	5	4	15
LG-208	872	17.1	95.9	3.36	5.72	53.6	170	0.614	4.66	276	0.67	14.2	1.71	1.12	112	10	32	87
LG-211	1110	12.4	58.1	1.15	11.4	60.1	83.2	0.412	5.49	269	1.67	4.01	0.52	1.62	263	28	9	58
LG-83	541	2.32	19.0	1.28	23.3	19.3	88.5	0.348	6.32	33.3	1.60	8.09	2.03	2.71	579	22	7	8
LG-102	757	3.17	13.9	0.938	5.29	<11.8	70.0	0.148	0.53	232	0.773	10.4	2.96	0.768	88.3	9	12	23
LG-113	185	25.0	45.8	0.829	3.89	40.5	7.0	0.38	2.40	503	0.106	1.06	0.642	<2.98	140	33	—	210
LG-120	151	14.9	26.0	3.17	2.58	69.5	17.1	0.857	2.28	305	0.139	1.29	1.13	0.831	111	2	12	235
LG-123	376	1.82	9.16	10.9	6.88	<17.5	379	0.969	3.64	64.5	1.67	49.2	8.56	1.85	138	21	12	14
LG-213	463	3.14	20.4	1.63	7.37	<20.4	225	0.473	4.33	153	1.49	44.0	3.41	1.86	136	20	4	25
LG-501	644	1.07	11.3	4.42	5.40	<21.6	203	0.198	3.55	37.6	1.17	17.7	2.93	0.913	56.5	12	5	6
平均值	830	5.1	25	5.1	1	8.1	200	0.26	0.06	310	3.5	18	3.5	1.5	210	21	21	41

注: Nb, Cu和V由中国科学院地球化学研究所X荧光组张亚文和李立测定, 分析精度10%~20%, 其他元素由中国科学院高能物理研究所核技术应用部仪器中子活化分析组杨瑞英测定, 一般元素分析精度优于10%。

表4 浙江元古宙花岗岩类稀土元素组成 ($\times 10^{-6}$)
Table 4 REE composition ($\times 10^{-6}$) of Proterozoic granitoids from Zhejiang

样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Y	Sc	Σ REE	$\frac{LREE}{HREE}$	δEu
LG-199	51.26	93.16	11.63	38.03	6.37	0.85	5.05	0.62	2.45	0.53	1.04	0.56	0.05	9.98	2.52	221.58	19.5	0.44
LG-202	77.09	153.10	20.47	76.90	15.57	2.17	14.18	1.71	8.31	1.34	2.95	1.26	0.15	34.61	12.03	409.27	11.8	0.44
LG-204	55.11	145.00	16.06	53.48	9.13	0.95	5.72	0.45	2.37	0.27	1.04	0.60	0.09	9.04	2.29	299.31	26.5	0.38
LG-208	46.16	80.57	10.03	33.46	6.34	1.02	4.76	0.51	2.59	0.51	1.03	0.46	0.06	10.59	2.50	198.09	17.9	0.55
LG-211	63.29	117.10	15.03	55.34	10.60	2.50	9.89	1.55	7.44	1.71	4.24	3.60	0.56	38.10	10.50	330.95	9.1	0.74
LG-83	63.88	119.30	18.05	71.35	15.93	2.67	16.62	2.64	17.35	4.00	10.67	10.56	1.63	100.40	0.92	455.05	4.6	0.74
LG-102	21.01	42.51	5.50	17.56	3.27	0.57	2.49	0.45	1.78	0.28	1.06	0.77	0.09	9.04	2.67	106.38	13.1	0.59
LG-113	15.92	33.50	5.57	20.56	4.27	1.53	4.48	0.61	3.61	0.75	1.73	2.23	0.33	20.78	23.97	115.87	5.9	1.07
LG-120	21.92	44.16	6.04	23.25	4.64	1.50	4.33	0.52	3.64	0.82	1.74	2.09	0.32	19.61	25.51	135.18	7.6	1.02
LG-123	86.30	147.50	21.78	65.26	10.17	0.86	6.52	0.82	3.04	0.37	1.11	0.74	0.11	11.70	3.28	356.28	26.1	0.32
LG-213	58.67	102.50	12.85	41.13	6.55	0.96	4.78	0.76	2.41	0.57	1.36	0.85	0.10	11.14	2.04	244.63	20.6	0.50
LG-251	65.80	107.10	12.43	37.60	4.66	1.29	3.57	0.52	1.70	0.46	1.11	0.73	0.10	8.16	3.80	245.23	28.0	0.93
LG-501	20.30	49.45	5.79	21.26	5.25	0.62	5.80	0.95	7.30	1.74	4.88	4.96	0.79	43.21	2.79	172.80	3.9	0.34

注: 由中国科学院地球化学研究所钱志鑫和北京大学地质系分析中心ICP测定。

表5 浙江元古宙花岗岩类的Sr、Nd同位素组成

Table 5 Sr-Nd isotopic composition of Proterozoic granitoids from Zhejiang

样号	岩体	岩性	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	年龄 (Ma)	$\epsilon_{Nd}(T)$	T_{DM}^{Nd} (Ga)	资料来源
LG-202	溪竹	英云闪长岩	197.247	203.43	2.8149	0.763332 \pm 36		16.140	79.343	0.1230	0.511428 \pm 5	1878	-5.94	2.9	本文
LG-211	大柘	英云闪长岩	89.923	304.98	0.8535	0.733939 \pm 54	0.7117	11.983	63.970	0.1133	0.511500 \pm 11	1800	-3.04	2.5	本文
Sr-W	花桥	石英二长岩	275.0	437.3	1.8291	0.759123 \pm 20	0.7418	7.25	38.88	0.1128	0.511374 \pm 12	2059	-2.61	2.7	文献[10]
LG-102	大成坞	二长花岗岩	150.117	227.18	1.9090	0.713203 \pm 26		3.028	17.783	0.1030	0.512351 \pm 9	635	+1.99	1.1	本文
LG-501	莲花山	花岗岩	196.744	17.10	34.1563	0.996114 \pm 86		5.325	21.269	0.1514	0.512359 \pm 9	753	-1.09	1.9	本文
LG-83	道林山	碱性花岗岩	88.231	57.92	4.4175	0.752472 \pm 54	0.7011	16.960	76.407	0.1342	0.512504 \pm 5	814	+3.88	1.2	本文
	横山	石英闪长岩				0.7031	0.7031	5.150	24.92	0.1250	0.512447	888	+4.40	1.2	文献[11]
	西塞	石英闪长岩				0.7024	0.7024	3.714	7.121	0.1319	0.512493	852	+4.22	1.2	文献[11]

注: 由中国科学院广州地球化学研究所VG-354实验室、中国科学院地质研究所同位素实验室、地矿部地质研究所张宗清和王进辉测定。Rb、Sr、Sm和Nd含量用同位素稀释法测定, 比值精度优于 $\pm 5\%$ 。测量的Sr、Rb比值标准化为 $^{87}Sr/^{86}Sr=0.1194$, $^{142}Nd/^{144}Nd=0.7129$ 。按亏损地幔模式计算, 亏损地幔模式年龄, 亏损地幔模式 $^{147}Sm/^{144}Nd=0.2137$, $^{143}Nd/^{144}Nd=0.51315$ 。

性花岗岩 锆石 $^{207}\text{Pb} / ^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $(814 \pm 3)\text{Ma}^{[6]}$ 。罗家花岗岩独居石 U-Pb 年龄为 $644\text{Ma}^{[9]}$ ，大成坞二长花岗岩 Rb-Sr 等时线年龄为 635Ma (徐步台面告)。

晋宁晚期中酸性岩岩石种类复杂，有石英闪长岩、二长花岗岩、花岗岩和碱性花岗岩。石英闪长岩 SiO_2 含量低， MgO 含量较高， Na_2O 含量高，而 K_2O 很低 ($< 1\%$)。二长花岗岩、花岗岩 SiO_2 增高，Fe、Mg、Ca 含量都显著降低，但仍有样品 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ 。道林山碱性花岗岩 $(\text{Na} + \text{K}) / \text{Al}$ 为 1.26， $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 达 9.6% (表 2)。

晋宁期中酸性岩的微量元素组成亦不同。石英闪长岩的 Ba、Rb 含量远低于花岗岩平均值。Sr、Cr、Sc、Co、V 含量高，为平均值的数倍 (表 3)。稀土含量较低， $\text{LREE} / \text{HREE}$ 小，为 5.9—7.6。Eu 无亏损， δEu 为 1.02—1.07 (图 2b，表 4)。二长花岗岩、花岗岩的 Ba、Rb 近于或小于花岗岩平均值。Sr、Zr、Co、Cr、V 含量都低于平均值。稀土含量增高， $\text{LREE} / \text{HREE}$ 增大，为 3.9—28.0，Eu 中等亏损至弱亏损， δEu 为 0.34—0.93。碱性花岗岩 Rb、Sr、U、Th、V、Cr、Co 均低于平均值，Zr 为平均值的 2 倍。稀土含量高， $\text{LREE} / \text{HREE}$ 较小，为 4.6。Eu 中等亏损， δEu 为 0.74。根据 $\text{LREE} / \text{HREE}$ 和 δEu 值，道林山碱性花岗岩比青田和桃花岛的碱性花岗岩分异程度差。

2 元古宙花岗岩类 Nd、Sr 同位素组成特征

浙江神功期英云闪长岩 $^{143}\text{Nd} / ^{144}\text{Nd}$ 为 0.511428—0.511500， $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 为 -5.94—-3.04， $(^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr})_i$ 为 0.7117 (表 5)。石英二长岩 $^{143}\text{Nd} / ^{144}\text{Nd}$ 为 0.511275—0.511374， $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 为 -2.19—-2.61， $(^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr})_i$ 为 0.7418^[10]。晋宁期石英闪长岩 $^{143}\text{Nd} / ^{144}\text{Nd}$ 为 0.512447—0.512493， $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 为 +4.22—+4.40， $(^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr})_i$ 为 0.7024—0.7031^[11]。花岗岩 $^{143}\text{Nd} / ^{144}\text{Nd}$ 为 0.512351—0.512504， $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 为 -1.09—+3.88。

3 岩石成因

3.1 神功期花岗岩

神功期花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 为 -5.94—-3.04，八都群副片麻岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(1.8\text{Ga})$ 为 -5.52—-6.56^[1]，神功期花岗岩与八都群片麻岩钨同位素组成相似，神功期花岗岩主元素和微量元素含量变化大，也说明花岗岩组成主要受原岩的控制。右倾直线型稀土分布模式也是部分熔融形成的岩浆的特征。所以，神功期花岗岩是八都群变质岩部分熔融产物。

3.2 晋宁晚期中酸性岩

3.2.1 幔源中酸性岩

西裘和璜山石英闪长岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 分别为 +4.22 和 +4.40， $(^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr})_i$ 分别为 0.7024 和 0.7031^[11]。 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为 6.7‰ 和 6.3‰^[5]， $T_{\text{DM}}^{\text{Nd}}$ 都为 1.2Ga。双溪坞群中细碧岩-角斑岩 Sm-Nd 等时线年龄为 978Ma， $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 为 +4.6^[12]， $T_{\text{DM}}^{\text{Nd}}$ 为 1.2—1.4Ga。 $(^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr})_i$ 为 0.7033^[11]。安山岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 为 5.00—6.18， $T_{\text{DM}}^{\text{Nd}}$ 为 1.1—1.2Ga^[13]。也就是说，西裘、璜山石英闪长岩形成时间略晚于双溪坞群中的火山岩，而 Nd、Sr 同位素组成和钨模式年龄都与双溪

均群中的火山岩一致,说明它们是同源的。中酸性岩的形成年龄与钨模式年龄相近,也证明了形成这些岩石的物质来源于地幔。石英闪长岩的 Fe、Mg、Na₂O 很高, K₂O 很低,这些都是洋壳火成岩的特征。LREE / HREE 小, Eu 不亏损或弱亏损, Sc、Co、Cr、V 含量高。也就是说,石英闪长岩的主元素、稀土分布模式和微量元素组成与岛弧火山岩都很相似^[14],说明石英闪长岩是岛弧火山岩部分熔融的产物。

3.2.2 壳幔混合花岗岩

道林山和大成坞花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 为 +3.88 和 +1.99。 $T_{\text{DM}}^{\text{Nd}}$ 分别为 1.2 和 1.1Ga。陈蔡群片麻岩和变粒岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(1\text{Ga})$ 为 -14.22—-1.26^[15]。上述花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 值介于元古宙变质岩与火山岩之间。莲花山花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 为 -1.09, $T_{\text{DM}}^{\text{Nd}}$ 为 1.9Ga。井潭组流纹岩 (Sm-Nd 等时线年龄为 828.7Ma) 的 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 值为 -0.63^[16]。因此,莲花山花岗岩与火山岩是同源的,随着 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 值的增大,钨模式年龄减小,说明随着花岗岩中所含地幔物质的量增多,钨模式年龄愈接近岩体形成年龄。这些花岗岩贫大离子不相容元素,也是幔源物质加入的证据。上述特征都表明这些花岗岩是岛弧火山岩部分熔融的岩浆和地壳物质混合的产物。

4 浙江地壳的演化历史

4.1 浙江地壳的增生时间

一般主要根据花岗岩和沉积变质岩的钨模式年龄讨论地壳生长。后来为了获得更接近真实的地壳形成年代,采用 Sm-Nd 和锆石 U-Pb 同位素综合制约的方法^[17]。但确定地壳生长时间的另一重要方面是必须有相应的构造运动使地幔物质加入到地壳中来。在地质上表现为岛弧向大陆拼贴或大陆内部有大量地幔物质的加入,即大量幔源或壳幔源混合火山岩和侵入岩出露是地壳增生的证据。钨模式年龄可以代表壳幔分离的年龄,对地壳增生有指示。因此要研究地壳增生,必须对构造运动、岩浆活动(包括侵入岩和火山岩)和钨模式年龄进行综合考虑。对浙江研究的结果表明,浙江的地壳增生主要有三个时期: 2.6—2.7Ga、0.8—1.1Ga 和 0.1—0.12Ga。

世界上 1.8Ga 是一次重要的地壳生长时期。在浙江虽然发现了较多 1.8Ga 年龄的花岗岩,但每个岩体出露面积很小,而且这些花岗岩是八都群部分熔融的产物。另外,也尚

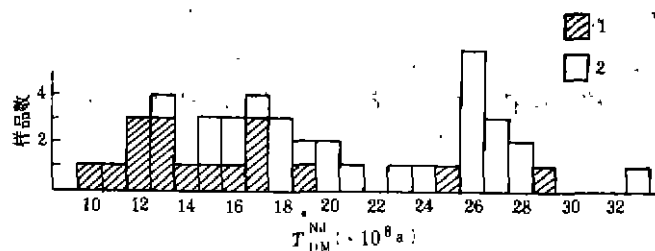


图3 浙江花岗岩类和沉积变质岩钨模式年龄直方图

Fig.3 Frequency of Nd model age for granitoids and sedimentary-metamorphic rocks from Zhejiang

数据来源: 花岗岩类, 见本文; 沉积变质岩, 据文献[1, 11, 14]。

1. 花岗岩; 2. 沉积变质岩。

未确定同时代的火山岩的分布。所以,关于浙江 1.8Ga 的地壳增生事件是值得进一步研究的问题。而神功期花岗岩和八都群变质岩 T_{DM}^{Nd} 主要集中在 2.6—2.7Ga (图 3)。这个时期反映了该地区一次地壳生长事件。

晋宁晚期,沿江-绍断裂分布着一系列幔源和壳幔混合中酸性岩以及巨厚的岛弧火山岩(包括上墅群、井潭组和双溪坞群),即有大量地幔物质上涌。幔源花岗岩的年龄为 852—888Ma,火山岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 829—1113Ma^[13]。上述中酸性岩和火山岩 T_{DM}^{Nd} 也为 1.0—1.1Ga,它们的形成年龄与铍模式年龄很接近,进一步说明它们代表了新生地壳的形成。这个时期的地壳增生是从大规模岛弧火山向大陆的拼贴开始,到壳幔混合花岗岩的形成结束。

在浙江,燕山期花岗岩广泛出露,它们是壳幔混合花岗岩,其中地幔物质所占比例为 38%—71%。并且它们是上升的地幔物质与地壳的混合,而不是源区混合。同时期的火山岩覆盖了浙江大部分地区,火山岩与花岗岩是同源的,反映了大量地幔物质上涌到大陆而形成的地壳增生。这期岩浆活动的时间为 0.1—0.12 亿年即为地壳增生的时间。

4.2 浙江地壳的形成时间

铍模式年龄反映地壳各个部分的“平均年龄”,所以由铍模式年龄可以反映出该地区基底的时代。

浙江西部神功期花岗岩和八都群、龙泉群变质岩的铍模式年龄为 2.6—3.3Ga (图 4),说明这个地区存在着太古宙基底。浙江东部花岗岩、火山岩和元古宙变质岩铍模式年龄为 1.2—1.8Ga (图 4),故这个地区存在元古宙基底。证明了华夏古陆是存在的。

4.3 不同时期地壳组成的演化

对地壳组成地研究,目前有二种方法:一是通过沉积岩如页岩来研究地壳的组成^[19],二是对大量地质样品的分析数据进行人工组合,然后用加权平均的方法计算^[20]。欲研究

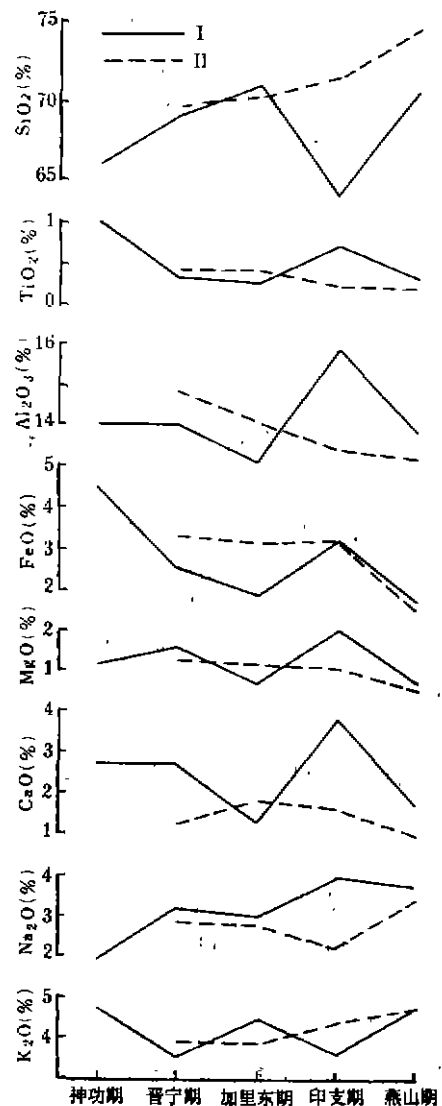


图 4 浙江花岗岩类岩石主元素含量 (%) 随时间的演化图

Fig. 4 Relation of content (%) of major element and formation time of granitoids from Zhejiang

I. 浙江花岗岩类岩石; II. 华南花岗岩平均值。

数据来源: 本文及文献 [1, 9, 18]。

地壳组成必须有代表性的样品,对地壳深部采样尤其困难。而形成花岗岩时必须有很大体积的岩石熔融,所以花岗岩是对源区均匀的大体积取样。DePaolo^[21]认为花岗岩是能真实反映地壳深部化学和同位素组成的平均取样。因此,不同时代的花岗岩的组成反映了不同时期地壳的特征。在工作中我们尽可能收集一些有关数据,由于人力和物力所限,尚不可能给出不同时期地壳的平均组成,但根据不同时代花岗岩的组成特征可以了解那个时代地壳的组成特征。

4.3.1 主元素

神功期(10个样品),晋宁期(7个样品),加里东期(4个样品),印支期(5个样品),燕山期(84个样品)花岗岩类的平均化学组成(图4)表明,神功期花岗岩 SiO_2 、 Na_2O 较低,而 TiO_2 、 FeO 、 CaO 明显高。从神功期→晋宁期→加里东期, SiO_2 、 Na_2O 逐渐增高, TiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 CaO 逐渐降低。晋宁期中酸性岩 MgO 、 Na_2O 高, K_2O 低,且 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$,这是很特征的。印支期花岗岩元素组成很特殊,如它们的 SiO_2 含量最低,而 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 最高。燕山期花岗岩类与华南花岗岩平均值^[22]比较, SiO_2 明显偏低, Al_2O_3 、 CaO 相对较高。随着时间的演化,华南花岗岩的 SiO_2 增高, TiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 MgO 、 K_2O 逐渐降低。浙江花岗岩类岩石与华南花岗岩不同,各个元素的演化则没有上述的演化规律性。浙江燕山期花岗岩类岩石相当于中国主要岩浆岩平均化学成分表^[4]中的黑云母花岗岩,华南燕山晚期花岗岩相当于二云母花岗岩。即浙江燕山期花岗岩类的组成比华南同期花岗岩相对基性。

随着时间的演化,浙江花岗岩类岩石的铝饱和度降低。神功期花岗岩主要是铝过饱和,晋宁期中酸性岩是铝过饱和到铝饱和,燕山期花岗岩是铝饱和到铝不饱和。

4.3.2 稀土元素

神功期花岗岩的稀土分布模式为右倾直线型,斜率较大,铈中等亏损,这是老的基底岩石部分熔融产物的特征。晋宁期中酸性岩曲线斜率较小,有的岩石铈没有异常,这是地幔物质加入的一种表现。加里东和印支期都为右倾直线型模式,但斜率不同,铈不亏损到中等亏损。主要反映了源岩的特征。燕山期花岗岩除碱性花岗岩以外,都为右倾直线型,曲线斜率较大,铈中等亏损。稀土分布模式的类型和铈亏损的程度对岩浆分异的程度有较强的指示意义。华南有些花岗岩岩体具有强分异的V型稀土分布模式,铈亏损很大,如西华山岩体、新圩岩体等^[23]。浙江燕山期花岗岩类岩石岩浆分异的程度显然比华南花岗岩弱,同时显示出它们的成因是不同的。

4.3.3 微量元素

神功期、加里东期和印支期花岗岩的微量元素组成比较相似,K、Rb、Ba、Th 相对富集,Ce、Sm 与 Ta、Nb、Hf、Y、Yb 比较,相对富集(图5a,c)。过渡族元素相对富集。晋宁晚期中酸性岩石不相容元素比其他时期花岗岩低一个数量级,曲线比较平坦,没有明显的异常(图5b)。晋宁晚期中酸性岩石微量元素分布图与 Pearce^[24]花岗岩构造分类中的火山弧花岗岩的分布模式很相似。并且它们的 Co、Cr、V、Sc 含量高,是花岗岩平均值的几倍。燕山期花岗岩 K、Rb、Th 相对 Nb、Ta 明显富集,Ba 有大的负异常,Ce、Sm、Ta、Nb、Hf、Y、Yb 含量逐渐降低,Y、Yb 是各时期花岗岩中最低的(图5d)。Hf、Yb 含量比板块内花岗岩低。强不相容元素 Rb、Nb、Y、Yb 含量是各时期花岗岩中最低的(图5d)。与华南燕山期花岗岩

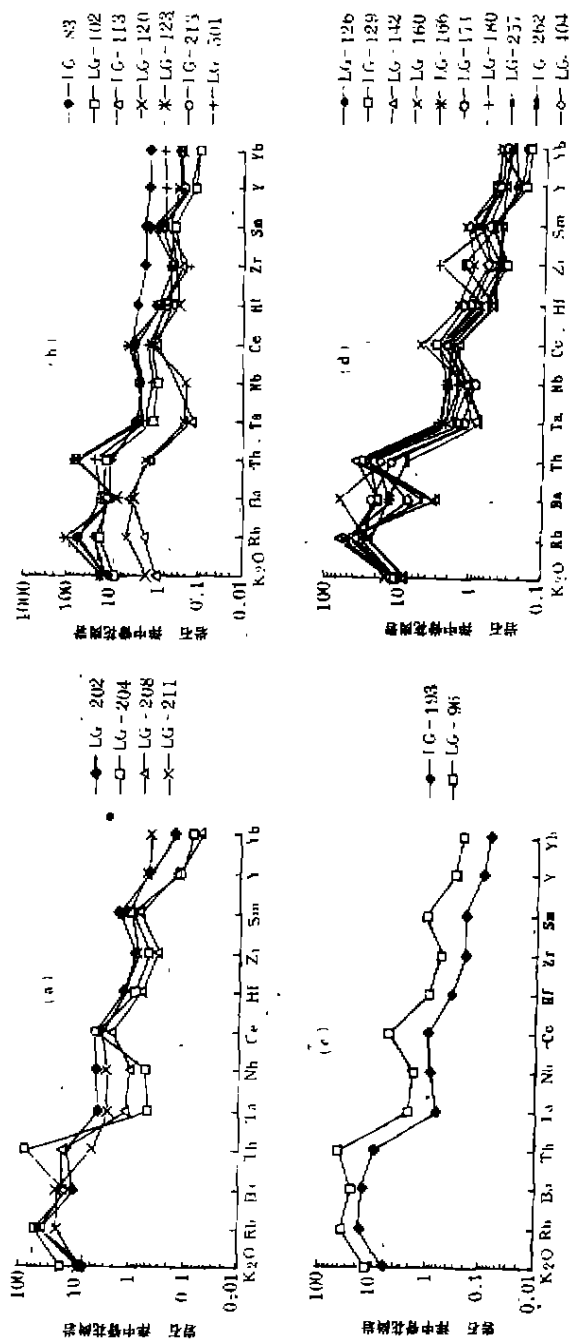


图 5 浙江花岗岩类微量元素分布模式图

Fig. 5. Trace element distribution patterns of granitoids from Zhejiang
a. 神功期花岗岩; b. 野宁晚期中酸性岩; c. 加里东和印支期花岗岩; d. 燕山期花岗岩.

相比^[22],强不相容元素 Rb、Nb 含量相对较低,而 Sr、Ba、Zr、V 的含量相对较高。Sr 高,Rb、Y、Yb 低是岩浆分异弱的表现。由此也表明浙江花岗岩类比华南花岗岩分异演化的程度差。

4.3.4 同位素

不同时代花岗岩长石铅同位素组成表明,浙江的老地壳放射成因铅低,燕山期的地壳放射成因铅很高。浙江基底的钨同位素组成接近地壳的平均值,表明它是一个成熟度高的基底。

浙江地壳在太古宙、元古宙形成以后,在晚元古代和中生代又有地壳增生,不断有地幔物质加入到地壳中,所以浙江地壳的主元素、微量元素和稀土元素的组成随时间演化有一定的演化,但变化的幅度相对是小的。与华南其他地区比较,浙江中生代地壳组成相对比较基性,分异演化程度低。

4.4 浙江地壳发展史

在中元古代,由于华南海向江南古陆俯冲,沿德兴—杭州一线形成古岛弧。在德兴婺源一带,北侧为弧后盆地,沉积了双桥山群和上溪群,南侧为华南洋盆。大约在晚元古初期,华夏古陆与古岛弧之间的华南洋壳向岛弧发生强烈俯冲运动,同时使双桥山群、上溪群褶皱变质,变为陆壳。晋宁晚期,华南海再次向古岛弧俯冲,在赣东北、皖南和浙江形成规模巨大的晚元古代火山岩带,时间持续近 100Ma,形成上墅群、井潭组和双溪坞群火山岩^[7]。在浙江,沿江—绍断裂带形成一系列幔源中酸性岩,如西裘、璜山岩体。华南海洋壳逐渐缩小,最后导致华夏古陆与江南古陆碰撞,岛弧部分熔融形成的岩浆与陆壳混合形成了道林山、大成坞、任岙和莲花山等壳幔混合花岗岩。晋宁晚期大规模岛弧火山岩的形成和向大陆拼贴,以及稍晚壳幔混合花岗岩的侵入,构成了 0.8—1.1Ga 的地壳增生。

燕山旋回,古太平洋封闭,西太平洋古陆与欧亚大陆碰接。中国东部,除四川、鄂尔多斯两个“最坚稳的”地区外,几乎全部受这一碰撞造山作用的影响,发生强烈的基底—盖层褶皱作用、大规模左旋挤压—剪切作用和最剧烈的钙碱性岩浆活动^[25]。大规模燕山期壳幔混合的花岗岩类和火山岩构成了 0.1—0.12Ga 的地壳增生。

白垩纪,特别是中—晚白垩世、第三纪以来,西太平洋古陆全面裂解、沉没。尽管沿西太平洋毕鸟夫带亚洲大陆与西太平洋之间呈显明的挤压状态,但总体上看,亚洲大陆东部边缘为裂陷—引张型动力学体系。浙江东部沿海碱性花岗岩就是在此条件下形成的。这些花岗岩中,虽有较多的地幔物质加入,如桃花岛碱性花岗岩地幔物质占 71%,但这类花岗岩出露很少。

5 结 论

(1) 浙江花岗岩类中神功期、加里东和印支期花岗岩是基底岩石部分熔融的产物,晋宁晚期中酸性岩和燕山期壳幔混合花岗岩类中都有同时代新的地幔物质加入。

(2) 浙江的地壳形成于太古宙和元古宙。地壳增生的时间为 2.6—2.7Ga、0.8—1.1Ga 和 0.1—0.12Ga。

(3) 地壳组成, 根据不同时代花岗岩的组成, 浙江地壳的主元素、微量元素和稀土元素的组成随时间演化有一定变化, 如铝饱和度逐渐降低, Si、Al、Na 增高, Ti、Fe、Mg、Ga 减少, 大离子不相容元素含量增高, 但变化的幅度小。根据稀土分布模式和微量元素组成可以看出, 浙江地壳的分异演化程度较差。尤其是燕山期, 浙江花岗岩的组成比华南其他地区相对基性。

不同时代花岗岩长石铅同位素组成表明, 浙江的老地壳放射成因铅低, 燕山期的地壳放射成因铅很高。

(4) 江-绍断裂带是晋宁期俯冲碰撞带, 沿江-绍断裂带分布着许多晋宁期中酸性岩, 它们的成因有幔源, 也有壳幔混合的, 这是俯冲碰撞的证据。

浙江存在加里东和印支运动, 但这两次构造运动的规模不大。

在野外考察期间得到浙江省区测队、浙江省第七地质大队和浙江省地质科学研究所的大力支持和帮助, 在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 胡雄健, 许金坤, 童朝旭等. 浙西南前寒武纪地质. 北京: 地质出版社, 1991. 30—45.
- 2 胡雄健, 许金坤, 陈程华等. 浙西南早元古代花岗岩、伟晶岩的单颗粒 U-Pb 年龄. 科学通报, 1992, 37(11): 1016—1018.
- 3 甘晓春, 李惠民, 孙大中等. 浙西南早元古代花岗岩质岩石的年代. 岩石矿物学杂志, 1995, 14(1): 1—8.
- 4 中国科学院贵阳地球化学研究所《简明地球化学手册》编译组. 简明地球化学手册. 北京: 科学出版社, 1977. 69—72.
- 5 祁 峤, 周新民, 王德滋. 浙江西裘细碧角斑岩成因与相关幔源花岗岩类的特征. 矿物岩石学杂志, 1986, 5(4): 299—303.
- 6 周新民, 朱云鹤. 江绍断裂带的岩浆混合作用及其两侧的前寒武纪地质. 中国科学(B 辑), 1992, (3): 296—303.
- 7 邢凤鸣, 徐 祥, 陈江峰等. 江南古陆东南缘晚元古代大陆增生史. 地质学报, 1992, 66(1): 59—71.
- 8 谢秉克, 张宗清. 东南沿海基底杂岩的同位素年代学研究. 中国地质科学院南京地质矿产研究所刊, 1989, 10(3): 24—34.
- 9 浙江省地质矿产局. 浙江省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1988. 243—440.
- 10 王银喜, 杨杰东, 郭令智等. 浙江龙泉早元古代花岗岩的发现及基底时代的讨论. 地质论评, 1992, 38(6): 525—531.
- 11 徐夕生. 华南前寒武纪花岗岩类及岩石包体成因. [博士学位论文]. 南京: 南京大学地球科学系, 1990.
- 12 章邦桐, 凌洪飞, 沈渭洲等. 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—14.
- 13 程 海. 浙西北晚元古代岛弧火山岩的地球化学研究. 地球化学, 1993, (1): 18—26.
- 14 程 海. 浙西北晚元古代早期碰撞带的初步研究. 地质论评, 1991, 37(3): 203—213.
- 15 凌洪飞. 浙赣前寒武纪地壳地球化学演化和 Sm-Nd 同位素地质研究. [博士学位论文]. 南京: 南京大学地球科学系, 1990.
- 16 徐 备, 郭令智, 施央甲. 皖浙赣地区元古代地体和多期碰撞造山带. 北京: 地质出版社, 1992. 51—58.
- 17 李献华, 赵振华, 桂训唐等. 华南前寒武纪地壳形成时代的 Sm-Nd 和锆石 U-Pb 同位素制约. 地球化学, 1991, (3): 255—264.
- 18 彭亚鸣, 董传万. 浙江青田碱性花岗岩研究. 南京大学学报, 1991, 3(2): 138—149.
- 19 Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Oxford: Blackwell Scientific Publication 1985 9—12.
- 20 Ронов А. Б., Ярошевский А. А. Химическое строение земной коры. Геохимия, 1967, (11): 1285—1309.
- 21 DePaolo D J. Age dependence of the composition of continental crust: Evidence from Nd isotopic variations

- in granitic rocks. *Earth Planet Sci Lett*, 1988, 90: 267—71.
- 22 中国科学院贵阳地球化学研究所. 华南花岗岩类的地球化学. 北京: 科学出版社, 1979. 199—204.
- 23 王一先. 我国稀土矿化花岗岩的成因. 见: 中国矿物岩石地球化学学会. 中国科学院贵阳地球化学研究所编. 开拓·创新·奋进——庆贺涂光炽教授从事地质工作五十周年. 重庆: 中国科学技术文献出版社重庆分社, 1990. 103—111.
- 24 Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J Petrol*, 1984, 25(4): 956—983.
- 25 任纪舜, 陈廷恩, 牛宝贵等. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社, 1990. 98—101.

GEOCHEMISTRY OF GRANITOIDS FROM ZHEJIANG PROVINCE AND CRUSTAL EVOLUTION—II. PROTEROZOIC GRANITOIDS

Wang Yixian Zhao Zhenhua Bao Zhiwei Li Xianhua

(Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of sciences, Guangzhou 510640)

Abstract

Proterozoic granitoids include Shengong period (1.8—1.9Ga) and Late Jinningian period (0.6—0.9Ga) median-acid rocks. Compositions of major, trace, rare earth elements, Nd-Sr isotope and petrogenesis of granitoids were studied. Shengong granites were formed by partial melting of the Badu Group. Late Jinningian median-acid rocks were derived from mantle or mixing of mantle and crust material. Using granite as a probe, crustal evolution in Zhejiang Province was discussed. Three periods of crustal growth at 2.6—2.7, 0.8—1.1 and 0.10—0.12Ga are recognized. The Archaean are considered as time of crust generation. Fractionation of crustal composition with time is not evident.

Key words: Proterozoic granitoids, major elements, trace elements, rare earth elements, isotope, crustal evolution