

97, 26(5), 1997/12/9/1005 · p588.12/

1-15 浙江花岗岩类地球化学与地壳演化 p547

——I. 显生宙花岗岩类*

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 浙江显生宙花岗岩包括加里东期、印支期和燕山期。用锆石 U-Pb 年龄确定了加里东、印支期花岗岩的存在,并讨论了各期花岗岩的主元素、稀土元素、微量元素和铍、锶、铅同位素组成的特征,以及它们的岩石成因。加里东和印支期花岗岩是元古宙基底岩石部分熔融的产物,燕山期花岗岩类是壳幔混合花岗岩。加里东和印支期两次构造运动较弱。大面积出露的燕山期花岗岩和火山岩意味着中生代发生了地壳增生。

关键词 显生宙花岗岩, 主元素, 微量元素, 稀土元素, 同位素, 岩石成因论

地球化学, 地壳演化

要研究地壳组成必须有代表地壳的样品,但对地壳深部采样是很困难的,而形成花岗岩时必须有很大体积的岩石熔融,花岗岩是对其源岩均匀的大体积取样。所以我们通过对浙江各时代花岗岩的主元素、微量元素、稀土元素、同位素组成和岩石成因的系统研究来探讨地壳的组成和演化。花岗岩不仅是成分标志,而且是时间的标志。通过对花岗岩的年龄测定可将花岗岩与特定的地球动力学环境联系在一起,可以作为地球发展史中地壳演化的标准建造。因此,我们对一些比较重要的花岗岩进行了年龄测定。借助花岗岩研究地壳组成与演化是一种新的尝试。

浙江省的基底岩石为元古宙,仅有零星出露。在浙西南为八都群(年龄大约为 2.05—2.40Ga)和龙泉群(年龄大约为 1.3—0.98Ga)^[1],主要分布在龙泉、遂昌和龙游一带。浙西北为双溪坞群和陈蔡群(年龄大约为 0.8—1.4Ga)^[2,3],主要分布在富阳、诸暨和绍兴一带。寒武系一二叠系仅在浙西北少量出露。中生代火山岩覆盖了浙江省大部分面积。神功期和加里东期花岗岩主要出露在浙西南,晋宁晚期中酸性岩主要沿江绍断裂分布,印支期花岗岩仅局限在江-绍断裂西北侧常山-诸暨一带。燕山期花岗岩在全省广泛分布。江-绍大断裂横穿东西,是本省最重要的构造带(图 1)。

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

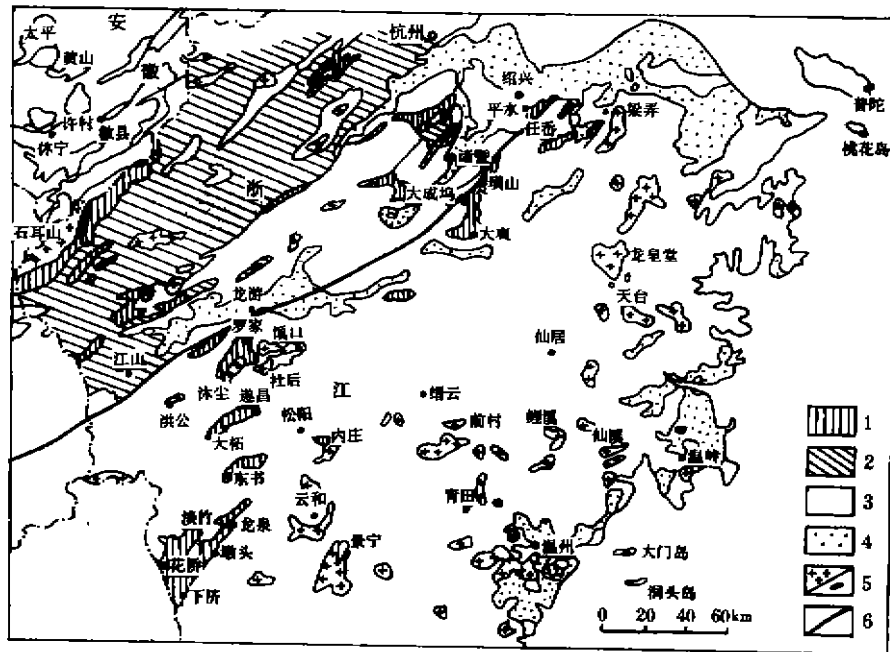


图 1 浙江省地质简图

Fig.1 Geological sketch map of Zhejiang Province

1. 前震旦系和震旦系; 2. 寒武系—二叠系; 3. 侏罗系和白垩系; 4. 第四系; 5. 花岗岩; 6. 大断裂

1 主要元素和微量元素组成特征

1.1 加里东期花岗岩

加里东期花岗岩主要分布在浙西南, 如墩头、下湾岩体。浙江龙泉墩头角闪石花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 $(409.8 \pm 0.8) \text{Ma}$ (2σ) (表 1、图 2)。

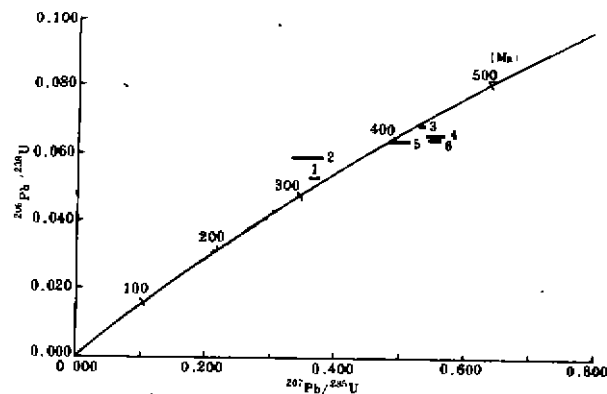


图 2 墩头角闪石花岗岩锆石 U-Pb 年龄一致图解

Fig 2 U-Pb concordia diagram for zircons from Duntou granite

1—6 同表 1。3—6 号点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 $(409.8 \pm 0.8) \text{Ma}$ 。

表 1 墩头花岗岩 (LG-193) 锆石铀-铅法同位素年龄测定结果

Table 1 U-Pb isotopic age of zircon from Duntou granite (LG-193)

序 号		1	2	3	4	5	6
样 品 情 况	矿物特征	无色透明细 长针状晶体	无色透明细 长针状晶体	无色透明短 柱状自形晶	无色透明短 柱状自形晶	无色透明短 柱状自形晶	无色透明短 柱状自形晶
	质量 (μg)	5	10	5	5	5	5
浓 度	$\text{U}(\times 10^{-6})$	383	1239	2068	3116	2638	5016
	$\text{Pb}(\times 10^{-6})$	21	77	149	218	243	357
样品中普通铅含量 (ng)		0.0078	0.025	0.120	0.028	0.15	0.075
同 位 素 原 子 比 值	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	4506	1128	2512	1193	167	726
	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	0.1582	0.1136	0.1401	0.1169	0.1348	0.1219
	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	0.05285	0.05895	0.06810	0.06549	0.06371	0.06426
	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	0.3660	0.3559	0.5317	0.5520	0.4910	0.5520
	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	0.05023	0.04379	0.05662	0.06113	0.05589	0.06230
表 面 年 龄 值 (Ma)	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	332.0	369.2	424.7	408.9	398.2	401.5
	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	316.7	309.2	432.9	446.3	405.6	446.3
	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	205.6		476.7	644.0	448.1	684.5
3—6号点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 $(409.8 \pm 0.8) \text{ Ma}$							

注: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 已对空白 ($\text{Pb}=50\text{pg}$, $\text{U}=8\text{pg}$) 及稀释剂作了校正, 其他同位素原子比值中的铅同位素均为放射成因铅同位素。

锆石质量是根据颗粒数及其大小估计的质量, 不是准确称量值, 故锆石的 U、Pb 浓度是估计值, 仅供参考。

由地质矿产部天津地质研究所李惠民测定。

浙江加里东期花岗岩为角闪石花岗岩和二长花岗岩。FeO + Fe₂O₃、CaO 和 MgO 含量都较低, 有的样品 Na₂O < K₂O, 有的样品 Na₂O > K₂O (表 2)。Ba、Sr、Co 含量近于花岗岩平均值^[4], Rb、Sc、Cr、V、Cu、Zr、U、Th、Ta 和 Nb 都低于平均值 (表 3)。稀土元素含量变化大, ΣREE 为 86×10^{-6} — 165×10^{-6} , 稀土分布模式为右倾直线型, LREE / HREE 比值为 10.2—14.7。Eu 不亏损至中等亏损, $\delta\text{Eu} = 0.53$ —1.05 (表 4, 图 3)。

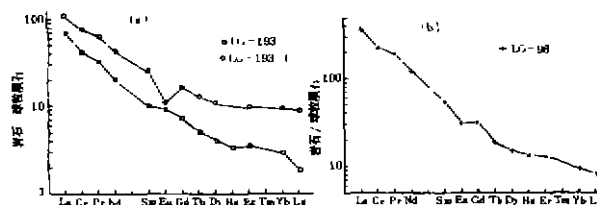


图3 加里东和印支期花岗岩稀土分布模式

Fig.3 REE distribution patterns of Caledonian and Indosinian granites

a. 加里东期花岗岩; b. 印支期花岗岩。

1.2 印支期花岗岩

印支期花岗岩仅局限在江-绍断裂西北侧常山—诸暨一带,岩性为花岗闪长岩和二长花岗岩。东阳大爽巨斑状黑云母花岗岩与混合石英正长岩、石英二长岩、正长岩等岩体一起组成一条长20km,宽1—5km,北东走向的混合花岗岩带,大爽岩体位于该带西南部,与陈蔡群变质岩呈交代接触关系。大爽黑云母花岗岩锆石 U-Pb年龄为 (239.6 ± 0.6) Ma(2 σ) (表5,图4)。上侏罗统大爽组地层覆盖于岩体上^[5]。绍兴珊溪花岗闪长岩黑云母 K-Ar年龄为 197.1Ma^[2]。黑云母花岗岩 SiO₂低, Al₂O₃、(FeO + Fe₂O₃)、CaO 和 MgO 含量高。Na₂O < K₂O(表2)。Ba 和 Sr 的含量分别为花岗岩平均值的 1.5 和 2.9 倍。Co、Cr、Th 都高于花岗岩平均值。Rb、Zr、Nb、Ta、U 含量都低于平均值(表3)。稀土含量高, Σ REE 为 436×10^{-6} , 稀土分布模式都为右倾直线型, 曲线斜率大(图3), LREE/HREE = 20.4。Eu 亏损小, δ Eu 为 0.72(表4)。珊溪和江山等花岗闪长岩富钠, Na₂O > K₂O。Cu、Pb、Zn、V 含量高^[5]。

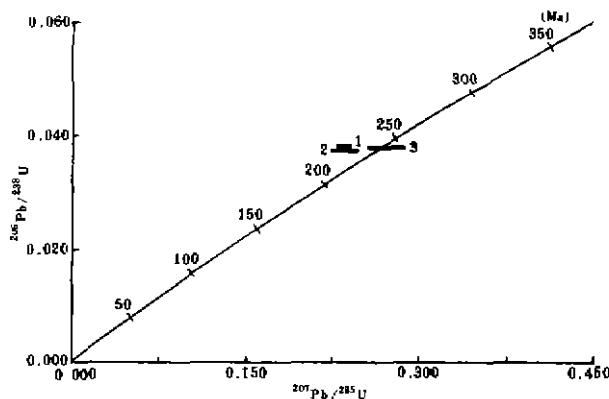


图4 大爽花岗岩锆石 U-Pb年龄一致图解

Fig.4 U-Pb concordia diagram for zircons from Dashuang granite

1—3 同表5。1—3号点²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄的加权平均值为 (239.6 ± 0.6) Ma。

表 2 花岗岩类岩石化学分析结果(%)

Table 2 Major element composition (%) of granitoids															
时 代	样品号	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	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺
加里东期	LG-193	墩头	角闪石花岗岩	72.03	0.23	14.65	0.36	1.75	0.08	0.59	2.44	4.19	2.45	0.24	0.94
	LG-1931	墩头	角闪石花岗岩	71.94	0.29	13.32	0.54	1.56	0.23	0.50	1.80	2.16	5.15	0.21	2.44
	LG-96	大爽	黑云母花岗岩	64.58	0.69	15.86	1.45	2.49	0.08	1.57	2.88	2.84	5.15	0.34	1.41
印支期	LG-126	梁弄	花岗岩长岩	65.09	0.66	15.36	2.06	2.20	0.10	1.87	3.84	3.88	4.05	0.33	0.32
	LG-129	梁弄	黑云母花岗岩	71.09	0.33	14.42	1.14	1.25	0.07	0.69	2.40	3.88	4.38	0.24	0.14
	LG-142	龙皇堂	黑云母花岗岩	77.42	0.12	11.95	0.52	0.60	0.08	0.10	0.45	3.50	5.00	0.14	0.07
	LG-160	仙溪	正长斑岩	65.76	0.60	16.52	1.85	1.04	0.13	0.60	1.66	5.13	5.67	0.25	1.10
	LG-166	鲤鱼村	钾长花岗岩	73.69	0.29	13.59	0.90	0.84	0.10	0.20	0.66	3.92	5.41	0.13	0.44
	LG-171	温州大岙	花岗岩长岩	69.60	0.46	14.88	1.31	1.75	0.17	0.74	0.72	4.32	4.38	0.23	0.90
	LG-177	温州藤村	黑云母二长花岗岩	67.69	0.56	15.36	1.66	2.10	0.12	1.10	2.98	3.24	4.77	0.27	0.45
	LG-180	青田	钾长花岗岩	76.27	0.14	12.52	0.44	0.77	0.10	0.10	0.32	4.05	4.90	0.15	0.20
	LG-221	社后	黑云母花岗岩	67.57	0.52	15.84	1.70	1.70	0.11	1.07	2.77	3.78	4.38	0.31	0.45
	LG-224	沐尘	花岗岩长岩	63.30	0.46	16.36	1.85	2.86	0.25	1.09	2.49	3.65	5.30	0.39	1.73
燕山期	LG-252	遂昌溪口	花岗岩长岩	60.94	0.84	16.83	2.18	3.44	0.14	1.84	4.16	2.84	5.29	0.39	0.96
	LG-257	前村	钾长花岗岩	75.84	0.15	12.87	0.70	0.65	0.12	0.11	0.47	3.65	4.90	0.18	0.22
	LG-262	前村	石英闪长岩	56.28	0.93	17.34	3.35	4.25	0.19	3.69	5.45	3.14	3.12	0.39	1.82
	LG-404	洞头岛	钾长花岗岩	71.67	0.40	14.43	1.35	1.22	0.14	0.51	1.46	4.19	4.38	0.22	0.44
	LG-406	大门岛	钾长花岗岩	73.62	0.14	13.85	1.17	0.92	0.07	0.43	1.09	4.05	4.16	0.17	0.43
	华南燕山晚期花岗岩平均值 ⁽¹⁾			73.80	0.20	13.15	0.89	1.48	0.06	0.46	0.97	3.36	4.69	0.05	0.59

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 花岗岩类微量元素分析结果 ($\times 10^{-6}$)

Table 3 Trace element composition ($\times 10^{-6}$) of granitoids

样品号	Ba	Co	Cr	Cs	Hf	Ni	Rb	Sb	Se	Sr	Ta	Th	U	W	Zr	Nb	Cu	V
LG-193	783	4.52	16.0	1.70	3.27	<15.8	68.4	0.176	4.35	305	0.466	7.58	1.10	0.953	69.7	9	2	29
LG-96	1215	9.31	27.3	5.11	8.88	29.6	144	0.122	0.647	909	1.53	35.6	2.70	1.01	191	18	13	69
LG-126	925	4.68	17.5	6.7	5.92	12.5	178	0.134	0.307	475	1.19	28.9	7.69	1.58	122	11	12	32
LG-129	914	11.9	31.1	7.79	5.87	<24.6	156	0.26	1.15	615	0.906	20.3	5.09	1.84	112	9	108	88
LG-142	148	1.08	16.2	3.29	4.85	16.8	257	0.0896	3.47	30	1.95	30.4	6.94	3.68	143	22	—	18
LG-160	3117	2.48	10.1	2.15	13.8	<28.3	113	0.235	0.472	262	0.673	12.0	1.62	2.28	331	13	5	25
LG-166	636	1.78	11.5	2.31	7.82	<23	198	0.140	0.525	70.3	1.72	16.0	1.81	2.70	140	22	4	12
LG-171	1173	3.5	15.4	1.97	9.02	<23.3	113	0.203	0.474	261	0.72	9.82	2.02	0.86	196	12	4	28
LG-180	149	1.64	19.5	3.89	6.07	<19.2	230	0.186	1.15	51.6	1.57	24.6	8.11	2.44	86.4	15	3	8
LG-257	226	0.985	10.8	2.44	5.76	37.0	209	0.498	3.64	20.6	1.44	19.6	2.42	1.66	977	21	3	9
LG-262	667	20.1	17.8	2.06	4.67	<47.5	91.9	0.0921	2.09	571	0.501	6.03	3.06	1.10	142	12	34	175
LG-404	861	3.45	15.9	1.09	11.6	<36.9	150	0.0549	0.136	255	1.30	17.7	3.90	2.36	469	14	6	33
平均值 ¹⁾	830	5.1	25	5.1	1	8.1	200	0.26	0.05	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 花岗岩类稀土元素组成 ($\times 10^{-6}$)
Table 4 Rare earth element composition ($\times 10^{-6}$) of granitoids

样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Cd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Y	Sc	Σ REE	LREE/HREE	δ Eu
LG-193	21.34	33.63	3.93	12.04	1.94	0.66	1.84	0.24	1.31	0.24	0.73	0.60	0.06	7.02	1.34	85.58	14.7	1.05
LG-193-I	33.25	61.03	7.60	25.04	4.73	0.79	4.21	0.59	3.43	0.54	2.00	1.93	0.28	19.67	2.18	165.09	10.2	0.53
LG-96	111.00	176.00	22.66	70.78	10.25	2.20	7.91	0.87	4.76	0.94	2.66	1.90	0.26	23.71	1.59	435.90	20.4	0.72
LG-126	52.34	90.15	11.96	34.22	4.94	1.24	3.93	0.59	2.67	0.42	1.29	1.50	0.24	15.10	3.52	220.59	18.3	0.86
LG-129	40.40	71.34	10.13	30.71	4.85	1.19	3.66	0.63	2.50	0.40	1.17	1.27	0.71	13.48	5.93	181.90	16.2	0.86
LG-142	30.85	53.05	7.00	19.06	3.63	0.38	3.52	0.69	3.67	0.63	2.00	2.78	0.41	24.71	1.47	152.41	8.3	0.33
LG 160	106.40	172.40	21.87	72.60	10.29	3.10	8.22	1.00	5.02	1.13	2.92	2.47	0.38	25.03	4.40	432.83	18.3	1.00
LG-166	61.69	99.55	12.68	42.22	7.17	1.31	6.67	0.93	5.48	1.24	3.46	3.34	0.47	33.94	2.70	280.15	10.4	0.57
LG-171	51.52	90.41	11.61	39.46	6.80	1.49	6.58	0.95	5.15	1.21	3.20	3.03	0.46	29.31	4.97	251.81	9.8	0.67
LG-177	54.99	99.35	12.47	40.67	6.69	1.29	5.80	0.62	4.53	0.97	2.79	2.68	0.43	26.28	4.18	259.36	12.1	0.62
LG-180	36.63	62.91	8.37	26.51	5.31	0.62	4.81	0.66	4.43	0.99	2.71	2.59	0.38	25.93	2.46	182.85	8.5	0.37
LG-221	47.36	84.16	10.17	31.94	5.01	1.29	4.14	0.70	2.90	0.69	1.82	1.66	0.27	15.16	2.45	207.27	14.8	0.84
LG-224	59.17	104.70	12.74	41.51	7.37	1.45	6.41	1.09	5.03	1.09	3.06	3.00	0.50	27.62	3.40	274.74	11.3	0.63
LG-252	57.90	102.90	12.69	43.41	7.85	1.96	6.97	1.37	5.11	1.24	3.15	2.81	0.42	27.70	6.51	275.48	10.8	0.79
LG-257	40.14	68.68	8.02	22.79	3.93	0.51	3.40	0.67	2.88	0.72	2.04	2.18	0.37	18.41	1.32	174.74	11.8	0.42
LG-262	29.93	55.45	7.00	24.81	4.67	1.43	4.07	0.67	3.04	0.75	1.86	3.61	0.22	15.81	11.39	153.32	8.7	0.98
LG-404	60.91	109.80	14.48	51.70	9.91	1.60	8.72	1.45	6.87	1.55	3.90	3.34	0.52	34.85	4.04	308.97	9.4	0.52
LG-406	45.45	81.93	10.01	32.17	5.61	0.92	4.98	0.92	4.11	1.04	2.72	2.60	0.42	24.60	2.10	217.48	10.5	0.52

注: 由中国科学院地球化学研究所姚志鑫和北京大学地质系分析中心ICP组测定,分析精度约10%.

1.3 燕山期花岗岩类

燕山期花岗岩类在浙江广泛分布。余姚梁弄、天台龙皇堂花岗岩黑云母 $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ 年龄为 101Ma, 天台山头郑花岗岩角闪石 $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ 年龄为 108Ma, 江山洪公花岗岩黑云母 $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ 年龄为 124Ma^[6]。青田碱性花岗岩角闪石 K-Ar 年龄为 109Ma^[7]。

浙江燕山花岗岩类岩性多样, 有石英闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩、钾长花岗岩、碱性花岗岩和石英正长岩等, 用 CIPW 计算, 在 Streckeisen 分类^[8]中, 主要属于二长花岗岩, 其次为钾长花岗岩和碱长花岗岩。 SiO_2 、 Al_2O_3 、 $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$ 、 MgO 和 CaO 的含量变化大, $\text{Na}_2\text{O} < \text{K}_2\text{O}$ (表 2)。与华南燕山晚期花岗岩比较 (表 2), SiO_2 相对低, Al_2O_3 、 CaO 相对较高。

浙江燕山期花岗岩类, Ba、Th 含量接近或高于花岗岩平均值, Rb、Sr、Zr、Nb、V、Co、Cr 的含量低于花岗岩平均值 (表 3)。稀土含量变化大, ΣREE 为 $152 \times 10^{-6} - 436 \times 10^{-6}$ (表 4), 但它们的稀土分布模式主要为右倾直线型 (图 5a, b)。轻重稀土比值差别大, $\text{LREE} / \text{HREE} = 8.3 - 18.3$, Eu 为不亏损到弱亏损, δEu 为 0.33—1.0。仅分布面积很小的碱性花岗岩的 Eu 亏损大, 如青田 (Q1-3)、桃岛花 (Tah-1) 和普陀山 (Pu-4) 碱性花岗岩 δEu 为 0.12—0.15 (图 5c)。不相容元素含量低和右倾直线型稀土分布模式都说明形成花岗岩的岩浆分异演化程度弱。

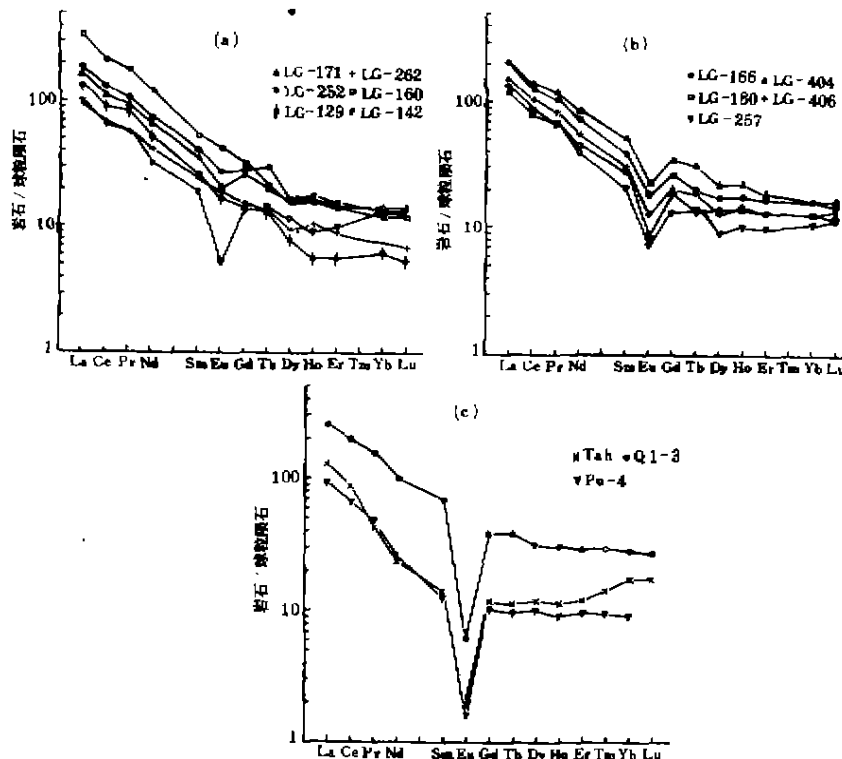


图 5 燕山期花岗岩类稀土分布模式

Fig.5 REE distribution patterns of Yanshanian granite

a, b 花岗岩; c. 碱性花岗岩。

表5 大英花岗岩锆石铀-铅同位素年龄测定结果 (LG-94)
Table 5 U-Pb isotopic age of zircon from Dashing granite (LG-94)

序 号	样品情况		浓度		样品中 普通铅 含量 (ng)	同位素原子比值					表面年龄值 (Ma)	
	矿物特征	质量 (μg)	U ($\times 10^{-6}$)	Pb ($\times 10^{-6}$)		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$
1	无色透明长 柱状自形晶	50	1923	90	0.15	768.2	0.03826	0.2344	0.04444	242.0	213.9	
2	无色透明长 柱状自形晶	20	480	24	0.011	1213	0.03744	0.2360	0.04571	237.0	215.1	
3	无色透明长 柱状自形晶	20	742	40	0.073	303.7	0.03786	0.2713	0.05196	239.6	243.7	283.7

1-3号点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 $(239.6 \pm 0.6)\text{Ma}$

注: 市地质矿产部天津地质研究所李惠民测定。

表6 花岗岩类的Sr、Nd同位素组成

Table 6 Sr-Nd isotopic composition of granitoids from Zhejiang

样号	岩体	岩性	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	年龄 (Ma)	$\epsilon_{\text{Nd}}(T)$	$T_{\text{DM}}^{\text{Nd}}$ (Ga)
LG-193	塘头	角闪石花岗岩	61.911	294.59	0.6071	0.712132 \pm 48	0.7086	2.109	12.169	0.1048	0.512290 \pm 8	-1.98	1.2
LG-96	大英	黑云母花岗岩	140.951	920.45	0.4424	0.713028 \pm 44	0.7115	10.884	72.576	0.0907	0.511845 \pm 3	12.41	
Tah 1	桃花岛	碱性花岗岩						2.13	10.21	0.1261	0.512434 \pm 8	-3.08	1.3
LG-166	雁荡山	钾长花岗岩	189.019	88.88	6.1461	0.717259 \pm 82	0.7083	7.339	42.751	0.1038	0.512243 \pm 4	-6.52	1.3
LG-171	温州	花岗岩闪长岩	110.916	263.51	1.2158	0.711060 \pm 17	0.7093	7.551	42.354	0.1082	0.512169 \pm 5	-8.02	1.4
LG-180	青田	黑云母花岗岩	237.319	18.61	37.0398	0.766383 \pm 40	0.7085	5.553	28.456	0.1180	0.512085 \pm 3	-9.68	1.7
LG-181	青田	碱性花岗岩	228.929	14.54	45.7640	0.773712 \pm 45	0.7028	13.101	63.974	0.1239	0.512224 \pm 10	-7.05	1.6
LG-221	社后	黑云母花岗岩	144.365	622.24	0.6700	0.708781 \pm 43	0.7076	5.011	31.449	0.0964	0.512241 \pm 8	-6.16	
IG-252	溪口	花岗岩闪长岩	188.000	529.43	1.0255	0.709153 \pm 29	0.7074	8.512	44.045	0.1169	0.512318 \pm 9	-4.98	1.3
LG-404	洞头岛	钾长花岗岩	150.930	197.39	2.2088	0.712057 \pm 37	0.7089	10.537	54.193	0.1185	0.512187 \pm 8	-7.80	1.5

注: 由中国科学院广州地球化学研究所VG354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, Nd含量用同位素稀释法测定, 比值精度大
于 $\pm 5\%$, 测量的Sr、Nd比值标准误差为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.1194$, $^{147}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7129$, 故亏损地幔线性演化模式计算模式年龄, 亏损地幔现代比值 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.2137$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.51315$ 。

2 花岗岩类的同位素组成

2.1 花岗岩类 Nd、Sr 同位素组成

加里东期花岗岩 $^{143}\text{Nd} / ^{144}\text{Nd}$ 为0.512290, $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 为-1.98, $(^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr})_i$ 为0.7086。印支期花岗岩 $^{143}\text{Nd} / ^{144}\text{Nd}$ 为0.511845, $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 为-12.41, $(^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr})_i$ 为0.7115。燕山期花岗岩类的 $^{143}\text{Nd} / ^{144}\text{Nd}$ 为0.512085—0.512357, $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 为-3.1—-9.7, $(^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr})_i$ 为0.7004—0.7093(表6)。

2.2 花岗岩类长石铅同位素组成

对浙江不同时代花岗岩类长石铅同位素组成进行了较系统的工作(表7)。岩体形成时代越年轻,越富放射成因铅。神功期花岗岩放射成因铅最低,且分散。 $^{206}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$ 为16.508—17.588, $^{207}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$ 为15.525—15.658, $^{208}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$ 为36.576—39.386。表明源岩

表7 浙江花岗岩类长石铅同位素组成

Table 7 Pb isotopic composition of granitoids from Zhejiang Province

时代	样品号	产地	岩性	$^{206}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$
神功期	LG-211	遂昌大柘	英云闪长岩	16.508	15.525	36.576
	LG-202	龙泉淡竹	英云闪长岩	17.588	15.658	39.386
晋 宁 期	LG-204	龙泉上书	二长花岗岩	17.316	15.593	39.386
	LG-102	诸暨大成坞	二长花岗岩	18.416	15.570	38.325
	LG-208	松阳内庄	片麻状花岗岩	17.416	15.570	38.578
	LG-213	遂昌	片麻状花岗岩	17.628	15.646	38.320
	LG-501	开化石耳山	片麻状花岗岩	18.074	15.593	38.028
	LG-113	绍兴桃红	石英角闪岩	18.881	15.712	38.941
	LG-83	富阳道林山	碱性花岗岩	17.860	15.403	37.500
加里东期	LG-193	龙泉墩头	角闪石花岗岩	17.977	15.644	38.011
	LG-193-1	龙泉墩头	角闪石花岗岩	18.521	15.673	38.924
印支期	LG-96	东阳大爽	黑云母花岗岩	17.548	15.523	38.089
燕 山 期	LG-160	黄岩仙溪	正长斑岩	18.410	15.578	38.600
	LG-180	青田	钾长花岗岩	18.610	15.664	39.019
	LG-257	缙云前村	钾长花岗岩	18.423	15.604	38.667
	LG-262	缙云前村	石英闪长岩	18.462	15.615	38.738
	LG-171	温州	花岗闪长岩	18.554	15.640	38.816
	LG-221	龙游社后	黑云母花岗岩	18.423	15.590	38.648
	LG-126	余姚梁弄	花岗闪长岩	18.463	15.698	38.964
	LG-129	余姚梁弄	黑云母花岗岩	18.365	15.623	38.692
	LG-404	温州洞头岛	钾长花岗岩	18.516	15.611	38.718

注: 由中国科学院广州地球化学研究所VG354质谱实验室测定, 分析精度0.02%—0.04%。

为前寒武纪基底岩石。晋宁晚期花岗岩 $^{206}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$ 为 17.316—18.881, $^{207}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$ 为 15.403—15.712, $^{208}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$ 为 37.500—39.386。加里东期花岗岩 $^{206}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$ 为 17.977—18.521, $^{207}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$ 为 15.644—15.673, $^{208}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$ 为 38.011—38.924。印支期花岗岩的 $^{206}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$ 为 17.548, $^{207}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$ 为 15.523, $^{208}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$ 为 38.089。燕山期花岗岩最富放射成因铅, 并分布在一个狭小区域内, $^{206}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$ 为 18.365—18.610, $^{207}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$ 为 15.578—15.698, $^{208}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$ 为 38.600—39.019 (图 6)。表明铅的来源化学分异较少或在较长时间内没有明显的 U / Th 分馏。

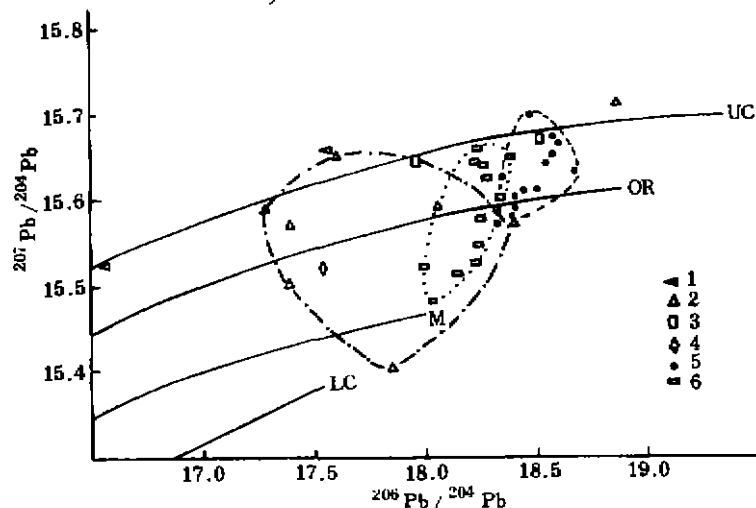


图 6 不同时代花岗岩类铅同位素分布图

Fig. 6 Diagram of $^{206}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$ — $^{207}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$ for granitoids of different periods

1. 神功期; 2. 晋宁期; 3. 加里东期; 4. 印支期; 5. 燕山期; 6. 皖南燕山期 (作者未发表数据和文献 [9])。

UC. 上地壳; OR. 造山带; LC. 下地壳; M. 地幔。

浙江燕山期花岗岩类比皖南燕山期花岗岩更富放射成因铅, 反映出在燕山期浙江和皖南的源岩组成是不同的。

3 岩石成因和地壳演化

3.1 加里东期花岗岩

浙江加里东期花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 为 -1.98。龙泉群副变质岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}^I(0.4\text{Ga})$ 为 -10.98—-8.75, 变玄武岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(0.4\text{Ga})$ 为 -2.36—6.6^[1]。即加里东期花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 值是落在龙泉群变质岩的范围内。龙泉群属于过渡型地壳的拉斑玄武岩^[10], 这种类型的岩石部分熔融形成的岩石的化学组成亦具过渡性质。加里东期花岗岩有的样品 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, 反映了洋壳源岩的特征。稀土元素分布模式是弱分异的直线型, 贫大离子不相容元素, 也说明了该岩石是老地层部分熔融的产物。而且浙江省加里东期火山活动十分微弱, 所以加里东期没有使地幔物质上涌的构造环境, 加里东期花岗岩只可能是龙泉群部分熔融的产物。

3.2 印支期花岗岩

浙江印支期大爽花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 为 -12.41, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为 0.7115。该花岗岩侵入的陈蔡群的沉积变质岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0.24\text{Ga})$ 为 -23.16—-5.32^[11], 大爽花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 介于其之间。花岗岩具直线型稀土分布模式, 花岗闪长岩 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ ^[5] 和相对富过渡族元素而贫大离子不相容元素。这些特征都显示出它们与岛弧火山岩有成因联系, 并且它们的组成受源岩控制, 它们是基底岩石部分熔融的产物。

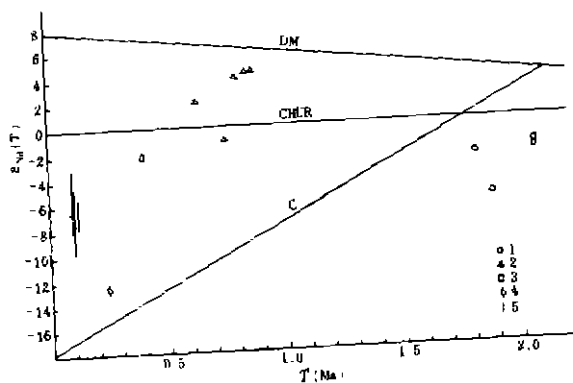


图7 不同时代花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 分布图

Fig.7 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ vs. geological age for granitic rocks

1. 神功期(数据见文献[13]); 2. 晋宁期(同前); 3. 加里东期,
4. 印支期; 5. 燕山期。

DM. 亏损地幔; CHUR. 球粒陨石地幔; C. 浙江元古宙基底
(根据文献[1, [1, 12]中沉积变质岩平均值)。

3.3 燕山期花岗岩类

浙江燕山花岗岩类岩石的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值均小于 0.710。浙江燕山花岗岩类的 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 变化小, 大部分集中在 -4.6—-8.0 之间。花岗岩可能的源区物质 $\epsilon_{\text{Nd}}(0.1\text{Ga})$ 相差甚大, 双溪坞群细碧岩—角斑岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(0.1\text{Ga})$ 为 -1.69—-4.58, 陈蔡群为 -26.79—+7.10^[11], 龙泉群为 -14.2—+8.6, 八都群为 -25.5—+24.5^[11]。因此, 这些地壳物质熔融形成的熔体必须有大量幔源物质加入, 才可能使所形成的燕山期花岗岩具有这样均匀的钕同素组成。图7中也清楚地看出, 燕山期花岗岩的钕同

位素值位于浙江基底之上, 需较多的地幔物质加入。

同一地区同时代火山岩和侵入岩钕同位素初始比值、微量元素组成、稀土元素分布模式都十分相似, 如龙皇堂花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 为 -4.6—-6.2, 附近的天台九里坪流纹岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 为 -6.4。北雁荡山流纹岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 为 -7.4, 侵入其中的石英正长斑岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 为 -7.1^[13]。浙江沿海燕山晚期火山岩与花岗岩经地幔标准化的微量元素分布模式也十分一致^[14]。这些都说明花岗岩与火山岩同源。

同一花岗岩或复式岩体不同期产物 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 值有较大变化, 如洪公岩体为 -5.6—-8.0, 龙皇堂为 -4.6—-6.4, 梁弄岩体为 -4.6—-7.4^[15]。这种 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 的变化意味着, 花岗岩形成时混入的幔源物质数量不同, 源区混合很难在同一岩体造成钕同位素的这样大的差异。

以陈蔡群、双溪坞群、龙泉群、八都群的沉积变质岩^[1, 12, 15] 作为花岗岩物源区的地壳端元与地幔物质混合, 采用文献[16]方法大致估算花岗岩中地幔物质所占比例结果为龙皇堂 54%—67%、梁弄 44%—63%、洪公 38%—57%、嵊泗 37%—59%、山头郑 55%—57%、雁荡山 42%—51%、桃花岛 71%、洞头岛 40%、温州 38%。

浙江花岗岩在 Streckeisen 分类中主要属于二长花岗岩, 稀土分布模式为右倾直线型。

与华南燕山期花岗岩微量元素平均值 ($Ba = 240 \times 10^{-6}$, $Rb = 358 \times 10^{-6}$, $Sr = 147 \times 10^{-6}$, $Zr = 133 \times 10^{-6}$, $Nb = 35 \times 10^{-6}$, $V = 16 \times 10^{-6}$)^[17] 比较, 浙江花岗岩中强不相容元素 Rb、Nb 等含量较低, 而 Sr、Ba、Zr、V 等含量相对较高。上述特征都说明花岗岩分异演化程度差, 这也是壳幔混合成因花岗岩的一个特征。浙江燕山期花岗岩长石铅同位素的组成与皖南燕山期花岗岩不同, 也意味着浙江花岗岩物质来源与地壳重熔形成的皖南花岗岩^[18] 是不同的。

总之, 浙江燕山期花岗岩的主元素、微量元素、稀土元素、Rb、Sr、Pb 同位素组成特征都显示出, 其组成是较多幔源物质加入到地壳中混合的结果。

3.4 显生宙地壳演化

在燕山旋回, 古太平洋封闭, 西太平洋古陆与亚洲大陆碰接。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^[19]。从古地磁数据变化看, 中国东部侏罗纪时处于强烈挤压阶段^[20]。浙江大部分燕山期花岗岩是在这样的条件下形成的。

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, 亚洲大陆东部边缘是裂隙-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。

在浙江, 加里东岩浆活动弱, 除花岗岩外, 主要表现在各种变质年龄, 如遂昌八都群变质岩 K-Ar 等时线年龄为 488Ma^[1]。印支期花岗岩仅沿江-绍断裂西北有少量出露, 这个时期变质年龄亦很少。所以加里东和印支期构造活动相对是比较弱的。

浙江燕山期花岗岩规模最大, 遍布全省。它们是壳幔混合花岗岩, 其中地幔物质所占比例为 38%—71%。同时期的火山岩覆盖了浙江大部分地区。这期岩浆活动的时间为 0.1—0.12Ga。这是在大陆内部由于构造作用引起的地幔物质上涌而产生地壳增生事件。

4 结 论

浙江加里东期花岗岩和印支期花岗岩是元古宙地层部分熔融的产物, 它们的主元素、微量元素、稀土元素和同位素的组成都受源岩的影响很大。从岩浆活动看, 这是两次比较弱的构造运动。

燕山期花岗岩类岩石是壳幔混合花岗岩, 由于在燕山期有大量地幔物质加入, 它们的主元素、微量元素和稀土元素组成比较相似, 岩浆分异程度弱。同位素组成相对均匀, $\epsilon_{Nd}(T)$ 值较高, 为 -4—-8, 富放射成因铅。浙江大量燕山期花岗岩和火山岩的出露, 反映了一次地壳增生事件。

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 水 涛,徐步台,梁如华等.中国浙闽变质基底地质.北京:科学出版社,1988.49—57.
- 3 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—27.
- 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 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.
- 6 陈江峰,周泰禧,印春生等.浙东南某些中生代侵入体的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测定.岩石学报,1991,(3):37—43.
- 7 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—147.
- 8 Streckeisen A. Plutonic rocks—classification and nomenclature by an IUGS subcommission. Geotimes, 1973, 18: 10.
- 9 张理刚,邢凤鸣.安徽中生代花岗岩铅同位素组成与铅同位素省划分.岩石学报,1993,9(2):105—114.
- 10 程 海.浙西北晚元古代早期碰撞造山带的初步研究.地质论评,1991,37(3):203—213.
- 11 凌洪飞.浙江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.
- 12 王一先,赵振华,包志伟等.浙江花岗岩类地球化学与地壳演化——II.元古宙花岗岩类.地球化学,1997,26(6).
- 13 周新华,胡世玲,任胜利等.东南陆壳超多阶段构造演化同位素年代学制约.见:李继亮主编.东南大陆岩石圈结构与地壳演化.北京:冶金工业出版社,1993.69—77.
- 14 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.见:李继亮主编.中国东南海陆岩石圈结构与演化研究.北京:中国科学技术出版社,1992.119—130.
- 15 徐步台,胡永和,李长江等.浙东沿海燕山晚期岩浆岩的稳定同位素和微量元素地球化学研究.矿物岩石,1990,10(4):57—65.
- 16 黄 萱,孙世华,DePaolo D J等.福建省白垩纪岩浆岩Nd,Sr同位素研究.岩石学报,1986,2(2):50—63.
- 17 中国科学院地球化学研究所.华南花岗岩类的地球化学.北京:科学出版社,1979.228—238.
- 18 陈江峰,周泰禧,李学明等.安徽南部燕山期中酸性侵入岩和源区锆、钨同位素制约.地球化学,1993,(3):261—268.
- 19 任纪舜,陈廷愚,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.
- 20 周姚秀.古地磁与大陆漂移——初探中国大陆的形成.见:中国地质科学院编.岩石圈研究的基本问题和方法.北京:冶金工业出版社,1990.231—241.

GEOCHEMISTRY OF GRANITOIDS FROM ZHEJIANG PROVINCE AND CRUSTAL EVOLUTION—I. PHANEROZOIC GRANITOIDS

Wang Yixian Zhao Zhenhua Bao Zhiwei Li Xianhua

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

Abstract

Phanerozoic granitoids involve Caledonian, Indosinian and Yanshanian granitoids. Existence of Caledonian and Indosinian granites was confirmed by U-Pb age of zircon. The study on the characteristics of major, trace, rare earth elements, isotopic composition and petrogenesis for granitoids was carried out. Caledonian and Indosinian granites were derived from partial melting of the Proterozoic basement rocks and the two structure activities were weak. Yanshanian granitoids were derived from mixing of mantle and crustal matter. It implies that the crustal growth took place in Mesozoic.

Key words: Phanerozoic granitoids, major elements, trace elements, rare earth elements, isotope, petrogenesis