

南岭东段中生代强过铝花岗岩成因 及其大地构造意义*

孙 涛^① 周新民^{①**} 陈培荣^① 李惠民^②
周红英^② 王志成^① 沈渭洲^①

(^①南京大学地球科学系, 南京 210093; ^②国土资源部天津地质矿产研究所, 天津 300170)

摘要 南岭东段中生代强过铝花岗岩以含白云母±富铝黑云母±电气石±石榴石等高铝矿物、不含堇青石为显著特征。它们中的代表性岩体的岩相学、地球化学、Nd 同位素和颗粒锆石 U-Pb 年代学的研究表明, 它们形成于 228~225 Ma 和 159~156 Ma 两个时段, 分别属于印支期和燕山早期, 具有低 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-10.6~-11.1), 高 A/CNK, Rb/Sr 比值和 t_{DM} 值(1887~1817 Ma), 以及明显的稀土元素(REE)四分组效应($\text{TE}_{1,3} = 1.13 \sim 1.34$)等特点。结合邻区相关岩体的地质学、岩石学与年代学资料, 说明南岭东段印支期强过铝花岗岩形成于印支主碰撞运动(258~243 Ma, 发生在中南半岛)之后约 20 Ma 的后碰撞的伸展构造环境, 而燕山早期的则形成于由古太平洋构造域制约的弧后伸展环境; 两个时期强过铝花岗岩形成的间歇期 J_1 , 是华南从特提斯构造域向古太平洋构造域转换的过渡时期; 两个时期强过铝花岗岩具有类同的地质、地球化学特征, 因为它们都是当时被加厚的南岭地壳(约 ≤ 50 km)在减薄、降压、导水条件下, 由早元古代沉积变质岩部分熔融产生的岩浆结晶形成。

关键词 南岭 强过铝花岗岩 花岗岩成因

南岭山系是我国南方长江和珠江水系的分水岭^[1]。本文研究的南岭东段地域限于 24°N ~ 26°N, 113°E ~ 116°E 范围内的赣南和粤北地区。近 60 余年来, 在该地区发现了众多的与 W, Sn, U, REE 等大型矿床有关的强过铝花岗岩体^[2~6], 计 10 余个(如西华山、贵东、大吉山、张天堂岩体等), 其强过铝化学属性的矿物学标志是含高铝矿物白云母±富铝黑云母±电气石±石榴石, 全岩铝饱和指数($\text{ASI} = \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$, 分子数, 即 A/CNK)普遍大于 1.10。它们形成于两个地质时期, 即中-晚三叠纪的印支期和中-晚侏罗纪的燕山早期^[4~6], 但这两个时期的强过铝花岗岩在结构构造、矿物组合、主量-微量元素特征诸方面几乎难以区分。因此, 作者选取其中若干用同位素定年方法作进一步研究, 同时用综合的地质地球化学方法对它们的成因和上述诸多特征的类同性作出新解释。

近年来, Carter 等^[7]关于中南半岛上发生的印支运动的主碰撞-变质期为 258~243 Ma, 并波及华南和秦岭的见解, Zhou 和 Li^[8]关于中国东南燕山期岩浆活动由古太平洋板块对东南大

2003-04-21 收稿, 2003-06-09 收修改稿

* 国家自然科学基金项目(批准号: 40072025)和国家自然科学基金重点项目(批准号: 40132010)共同资助

** E-mail: xuezhou@nju.edu.cn

陆的消减所诱发和晚中生代普遍存在伸展构造环境的认识, 以及 Barbarin^[9]和 Sylvester^[10]关于强过铝花岗岩是后碰撞花岗岩的观点, 都对本文讨论南岭东段印支期和燕山早期强过铝花岗岩源的岩、成因、水热流体作用和构造环境有裨益。

1 地质、地化和同位素定年资料

根据岩体规模、含矿性和共生岩石, 作者选择赣南和粤北 6 个强过铝花岗岩为具体研究对象, 它们的岩体名称、地质简况和代表性样品编号如表 1, 相应的主量和微量元素测试结果、特征参数和用作对比研究的资料如表 2, 对其中 4 个岩体的颗粒锆石 U-Pb 同位素定年结果如表 3, U-Pb 一致性曲线见图 1. Nd 同位素资料如表 4. 数据的测试方法、条件和精度, 参见表 2, 3, 4 之脚注. 对上述数据和相应图件的一般性认识如下:

表 1 南岭东段 6 个中生代强过铝花岗岩体简介

岩体名称	样品号	位 置	面积/km ²	岩 性	被 侵 入 围 岩
下庄	GD04	粤北翁源县贵东复式岩体东部	157.0	二云母花岗岩	震旦系-奥陶系、泥盆系地层
长沙	ZG01-3	粤北仁化县城正东 18 km	98.0	含石榴石电气石白云母花岗岩	寒武-奥陶纪地层及白云圩-杨梅洞岩体
帽峰	GD06-3	粤北翁源县贵东复式岩体东部	20.0	二云母花岗岩	下庄岩体及震旦-寒武系地层
司前	GD08	粤北始兴县贵东复式岩体北部	9.5	白云母花岗岩	贵东岩体主体及寒武-奥陶系地层
张天堂	G99-2-3	赣南上犹县城西南 7.5 km	12.0	中粒含石榴石二云母花岗岩	震旦-寒武系地层
西华山	G99-3-3	赣南大余县城西北 8 km	19.0	含石榴石二云母花岗岩	寒武纪浅变质岩地层

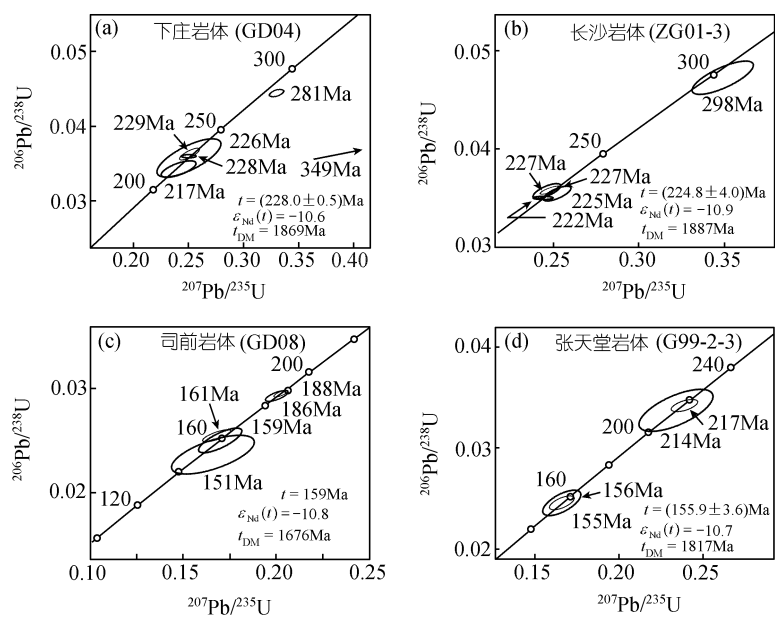


图 1 南岭东段中生代强过铝花岗岩锆石 U-Pb 同位素定年谐和图

表 2 南岭东段中生代强过铝花岗岩主量元素(质量%)、微量元素/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 含量分析结果^{a)}

岩体名称	下 庄	长 沙	帽 峰	司 前	张天堂	西华山	八达岭 ^{b)}
样品号	GD04	ZG01-3	GD06-3	GD08	G99-2-3	G99-3-3	(高 Ba-Sr)
顺序号	1	2	3	4	5	6	
SiO ₂	72.58	75.17	76.02	73.56	75.66	70.18	72.12
TiO ₂	0.14	0.03	0.04	0.14	0.01	0.03	0.37
Al ₂ O ₃	13.91	13.74	13.84	13.55	13.40	15.89	13.82
Fe ₂ O ₃	0.40	0.39	0.07	0.26	0.13	0.74	2.40
FeO	1.41	0.80	1.26	1.46	1.16	0.93	
MnO	0.03	0.08	0.04	0.04	0.25	0.10	0.05
MgO	0.35	0.08	0.24	0.27	0	0	0.90
CaO	0.89	0.31	0.28	0.96	0.37	0.60	1.93
Na ₂ O	2.99	3.61	3.79	3.07	3.79	3.80	4.12
K ₂ O	5.63	4.46	3.46	4.79	3.95	6.48	3.58
P ₂ O ₅	0.07	0.14	0.04	0.18	0.03	0.01	0.12
烧失量	1.52	0.52	0.91	1.34	0.83	0.87	0.45
总量	99.92	99.33	99.99	99.62	99.58	99.63	99.85
A/CNK	1.10	1.21	1.32	1.13	1.20	1.11	
c (norm)	1.43	2.73	3.46	1.97	2.30	1.55	
Rb	407	1164	819	472	884	1733	90.7
Sr	50.3	6.64	7.01	50.3	6.20	12.6	547
Y	74.3	4.05	44.6	32.0	85.0	170	6.43
Zr	96.8	5.54	24.3	89.9	24.7	55.4	121
Nb	19.7	50.7	91.4	26.4	38.4	24.6	10.6
Ba	121	26.2	22.9	214	13.1	23.8	1124
Hf	4.28	0.47	3.23	3.60	3.97	6.08	3.50
Ta	2.90	16.2	17.8	5.89	26.5	15.7	0.851
Th	44.6	6.39	9.86	32.0	18.2	30.6	7.86
U	43.6	3.82	13.0	26.5	20.3	31.9	1.86
La	36.9	1.50	8.13	27.6	19.5	11.7	38.6
Ce	85.2	4.77	24.6	61.3	68.4	31.1	61.9
Pr	10.3	0.47	3.88	6.95	10.4	4.37	
Nd	38.3	2.09	15.1	26.8	42.0	19.1	24.3
Sm	9.99	0.70	7.09	5.89	18.7	8.87	3.53
Eu	0.49	0.06	0.03	0.56	0.02	0.08	0.937
Gd	8.04	0.57	5.25	5.37	11.9	10.8	
Tb	1.93	0.16	1.40	1.00	2.63	2.56	0.293
Dy	12.3	0.85	8.18	6.64	15.5	20.6	
Ho	2.57	0.13	1.32	1.00	2.43	4.45	
Er	8.10	0.32	4.24	3.24	8.40	14.7	
Tm	1.14	0.07	0.73	0.42	1.68	2.34	
Yb	7.74	0.55	5.96	2.81	17.1	18.0	0.789
Lu	1.20	0.06	0.84	0.41	2.74	2.80	0.131
Σ REE	224.15	12.28	86.75	149.94	221.53	151.43	
ΣLREEΣY	1.54	1.42	0.81	2.44	1.08	0.31	
(La/Yb) _N	3.22	1.84	0.92	6.64	0.77	0.44	
(La/Sm) _N	2.32	1.35	0.72	2.95	0.66	0.83	
(Gd/Yb) _N	0.84	0.83	0.71	1.55	0.56	0.49	
δEu	0.168	0.274	0.017	0.304	0.003	0.025	
TE _{1,3}	1.15	1.34	1.33	1.15	1.32	1.13	
K/Rb	114.90	31.82	35.09	84.25	37.08	39.39	
Zr/Hf	22.64	11.78	7.54	25.01	6.22	9.11	
Nb/Ta	6.81	3.12	5.15	4.48	1.45	1.57	
Y/Ho	28.85	32.17	33.76	32.13	35.07	38.19	

a) 主量元素分析在南京大学地球科学系化学分析室完成, 采用湿化学分析法。微量元素及稀土元素(REE)测试在中国科学院地球化学研究所资源环境测试分析中心用 ICP-MS 完成, 以 AMH-1 和 GBPG-1 为参考标样, 相对标准偏差(RSD)均小于 10%, 且多次分析结果重现性好

b) 八达岭高 Ba-Sr 花岗岩资料引自文献[11]中 BB7, BB10, BB11, BB12, BB13, BB14, BB15 等 7 个数据平均值

表 3 南岭东段中生代强过铝花岗岩锆石 U-Pb 同位素分析结果^{a)}

岩体/样品号	序号	锆 石 特 征 ^{b)}	质量 /μg	U /μg · g ⁻¹	Pb /μg · g ⁻¹	Pb ^{c)} /ng	同 位 素 原 子 比 率 ^{d)}					表面年龄/Ma		
							²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb
下庄 GD04	1	浅黄色透明中长柱状(1)	10	994	43	0.087	280	0.08059	0.0362(7)	0.251(7)	0.0504(10)	229	228	214
	2	棕黄色透明粗短柱状(1)	15	3171	116	0.091	685	0.02626	0.0360(1)	0.250(6)	0.0504(11)	228	226	212
	3	浅黄色透明中长柱状(2)	10	179	10	0.038	125	0.08971	0.0357(21)	0.250(24)	0.0507(35)	226	226	228
	4	棕黄色透明短柱状(1)	10	623	25	0.055	262	0.01716	0.0342(11)	0.241(13)	0.0510(20)	217	219	242
	5	浅黄色透明中长柱状(1)	10	1527	82	0.170	267	0.05536	0.0445(4)	0.330(5)	0.0537(6)	281	289	360
	6	无色透明短柱状(5)	15	363	28	0.076	242	0.1861	0.0556(13)	0.944(24)	0.123(1)	349	675	2002
长沙 ZG01-3	7	浅黄色透明短柱状(2)	10	894	34	0.022	947	0.09011	0.0358(6)	0.247(7)	0.0501(10)	227	224	198
	8	浅黄色透明中长柱状(2)	10	1320	47	0.005	5583	0.08548	0.0358(4)	0.248(5)	0.0503(6)	227	225	210
	9	浅黄色透明短柱状(1)	15	816	29	0.007	4088	0.07624	0.0355(6)	0.252(7)	0.0516(10)	225	228	266
	10	棕黄色透明中长柱状(4)	15	2367	82	0.005	9542	0.09852	0.0350(1)	0.244(5)	0.0507(10)	222	222	226
	11	浅黄色透明中长柱状(1)	5	1024	52	0.021	757	0.08643	0.0473(14)	0.349(15)	0.0535(16)	298	304	352
司前 GD08	12	浅黄色透明半截柱状(1)	10	2243	64	0.006	7652	0.6127	0.0295(3)	0.203(4)	0.0499(6)	188	188	189
	13	浅黄色透明短柱状(3)	10	1064	31	0.009	2139	0.6478	0.0292(4)	0.200(5)	0.0495(9)	186	185	172
	14	棕黄色半透明中长柱状(1)	10	1311	33	0.010	2159	0.05718	0.0254(5)	0.168(6)	0.0479(11)	161	157	96
	15	棕黄色透明短柱状(2)	10	2168	55	0.019	1132	0.05741	0.0250(10)	0.170(10)	0.0492(27)	159	159	156
	16	淡黄色透明中长柱状(3)	10	484	12	0.007	1115	0.1427	0.0236(15)	0.166(18)	0.0511(41)	151	156	243
张天堂 G99-2-3	17	浅黄色透明柱状(6)	15	609	36	0.010	2092	0.9268	0.0342(5)	0.239(6)	0.0507(10)	217	218	229
	18	浅黄色透明柱状(5)	10	422	45	0.019	503	2.432	0.0337(17)	0.234(18)	0.0503(28)	214	213	209
	19	浅黄色透明不规则粒状(7)	10	1159	70	0.016	1135	1.751	0.0245(6)	0.166(6)	0.0490(13)	156	156	150
	20	浅黄色透明不规则粒状(6)	15	226	30	0.003	1703	5.227	0.0243(17)	0.164(20)	0.0489(38)	155	154	144

a) 锆石 U-Pb 定年用同位素稀释法进行, U 和 Pb 同位素比值测定在天津地质矿产研究所完成. 采用根据 Krogh(1973)^[12]改进的分析流程: 锆石在 0.25 mL 容积的氟塑料容器内用高纯氢氟酸-硝酸溶液溶解, 加入 ²⁰⁵Pb-²³⁵U 混合稀释剂和 1-2 滴磷酸溶液后浓缩, 将浓缩后的样品与少量磷酸-硅胶溶液混合后加在铯带灯丝上, 在 VG-354 型质谱仪上进行 U-Pb 同位素测定. 所有 U-Pb 同位素数据均对质量歧视效应进行校正. 实验室全流程 Pb 空白为 0.050ng, U 空白为 0.002ng. 数据使用 PBDAT^[13]和 ISOPLT^[14]软件进行处理

b) 括号内为锆石颗粒数

c) 总普通铅含量

d) ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 已对实验空白及稀释剂作了校正. 其他比率中的铅同位素均为放射成因铅同位素. 括号内的数字为 2σ绝对误差, 例如: 0.0342(5)表示 0.0342 ± 0.0005(2σ)

表 4 南岭东段中生代强过铝花岗岩 Nd 同位素分析结果^{a)}

岩 体	样品号	Sm/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Nd/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	t_{DM}/Ma ^{b)}
下庄	GD04	11.02	48.34	0.13790	0.512005 ± 06	-10.6	1869
长沙	ZG01-3	31.37	70.39	0.26950	0.512187 ± 09	-10.9	1887
帽峰 ^{c)}	GD06-3	10.40	19.79	0.31790	0.512257 ± 13	-10.6	1853
司前	GD08	9.485	48.00	0.11950	0.511989 ± 07	-11.1	1850
张天堂	G99-2-3	26.34	61.91	0.25730	0.512150 ± 05	-10.7	1817
西华山		8.93	32.98	0.16380	0.512054 ± 12	-10.7 ^{d)}	1818 ^{d)}

a) 全岩 Nd 同位素测定在中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室完成, 所用质谱仪为 VG-354 型, 详细分析流程见文献[15]. 本次测试过程中 Nd 同位素标样 BCR-1 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 测定值为 $0.512626 \pm 9(2\sigma)$, 质谱分析误差以 2σ 给出. Nd 同位素比值测定采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 进行标准化, 实验全流程 Sm、Nd 的本底约为 1ng

b) $t_{\text{DM}}=(1/\lambda)\ln\{1+[(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{m}}-(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}-((^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{m}}-(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{c}})(e^{\lambda t}-1)]/[(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{c}}-(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}]\}$, 采用两阶段模式进行计算^[16]. 下标 m 表示样品测定值, 下标 c 表示大陆地壳值, 下标 DM 表示亏损地幔值, 衰变常数 $\lambda = 6.54 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$, t 为岩石结晶年龄, 式中: $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.2136$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.513151$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{c}} = 0.118$

c) 岩体形成年龄采用 $(207.6 \pm 3.2) \text{ Ma}$ (据作者颗粒锆石 U-Pb 同位素定年实验初步结果)

d) 据沈渭洲等(1994)^[17]

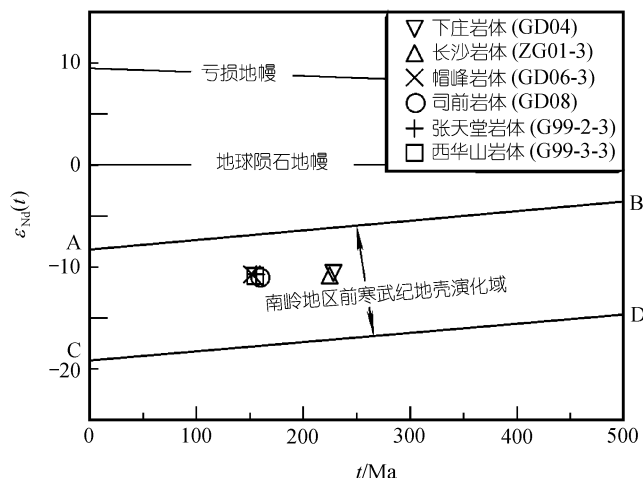
1.1 锆石 U-Pb 同位素年龄值和全岩 Nd 同位素组成

鉴于作颗粒锆石 U-Pb 定年的 4 岩体皆侵入于早古生代地层(表 1), A/CNK 值都大于 1.10(表 2), 并含高铝矿物(表 1), 因此它们是沉积起源花岗岩, 常含古老残留锆石(在晶形上往往与岩浆锆石难以区分). 按 U-Pb 同位素定年一般原则, 当三组表面年龄在误差范围内一致时(表 3 和图 1), 取其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄(或加权平均值)的低值为岩体结晶年龄: 下庄岩体(228.0 ± 0.5) Ma(表 3 之 1~3 号样品)、长沙岩体(224.8 ± 4.0) Ma(表 3 之 7~10)、司前岩体 159 Ma(表 3 之 15)和张天堂岩体(155.9 ± 3.6) Ma(表 3 之 19~20). 此外, 李亿斗等^[18]曾报道与张天堂岩体成岩、成矿相仿的西华山花岗岩 Rb-Sr 等时线年龄(155 ± 2) Ma(6 个全岩, MSWD = 1.62). 因此, 南岭东段中生代强过铝花岗岩主要形成于印支晚期(T_3)和燕山早期(J_{2-3})两个时段.

6 个岩体的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 t_{DM} 值十分相近(表 4), 平均值分别为 (10.8 ± 0.2) 和 $(1.85 \pm 0.03)\text{Ga}$ ($n = 6$). 据此并结合图 2, 清楚表明它们的源区为早元古代地壳岩石. 由于南岭东段强过铝花岗岩普遍地呈现以下共同点: (i) 呈浅色(色率一般 < 3), 含高铝矿物白云母、电气石、石榴石中若干或全部, 但不含堇青石, 全岩 A/CNK > 1.10 ; (ii) 均匀块状, 中细粒, 不含岩石包体; (iii) 分布零散, 印支期强过铝花岗岩在同期花岗岩中的面积比巨大, 而燕山早期则面积比则较小, 且呈独立岩体, 一般不与更大面积同期弱过铝、准铝花岗岩相邻共生, 如表 5 所示. 因此, 它们主要以古老的沉积变质岩经部分熔融-结晶的方式形成, 而不是其他准铝、弱过铝岩浆演化的产物.

1.2 不相容微量元素和稀土元素

图 3(a)显示了南岭东段强过铝花岗岩是典型的低 Ba-Sr 花岗岩^[25], 因此不象高 Ba-Sr 花岗岩那样与海底高原或底侵的高 Ba, Sr 玄武岩有成因联系^[25~26]; 同时, 又显示富 Rb, Th, U, Nb 的特点, 特别是 Rb 呈尖峰形($\text{Rb} = 400 \sim 1700 \mu\text{g/g}$, 表 2)和 $\text{Rb}/\text{Sr} > 2$, $\text{Sr}/\text{Ba} < 1$, 对比 Harris 和 Inger^[27]有关由泥质岩起源的花岗岩实验和对喜马拉雅浅色花岗岩研究(他们认为: 含最高量 Rb 的浅色花岗岩最好解释为低度部分熔融的产物), 可以进一步确认它们不仅起源于沉积源区, 且系低度部分熔融岩浆的产物.

图 2 南岭东段中生代强过铝花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - t 图

南岭地区前寒武纪地壳演化域(ABCD)据南岭及邻区前寒武纪地层的 Nd 同位素演化线分布范围确定。前寒武纪地层包括闽西长汀地区的楼子坝群^[19]、湘西地区的板溪群^[20]、桂北地区的四堡群^[21~23]和丹洲群^[23], 以及粤西云开地区的罗定云母片岩^[24]。图中 A, B, C, D 4 点的坐标依次为: (0, -9.34), (500, -5.79), (0, -19.19), (500, -14.69)

表 5 南岭地区印支期和燕山早期不同类型花岗岩分布情况^{a)}

		A/CNK 值			总面积/km ²
		≥ 1.10 强过铝花岗岩	1.10~1.00 弱过铝花岗岩	< 1.00 准铝花岗岩	
印支期	面积/km ²	2708	256	242	3260
	比例/%	84.5	8.0	7.5	
燕山早期	面积/km ²	10127	17228	4191	31546
	比例/%	32.1	54.6	13.3	

a) 据 110°00'E ~ 117°00'E 和 23°20'N ~ 26°40'N 范围内 35 幅 1:20 万区调地质资料和其他相关资料统计

图 3(b)显示了强过铝花岗岩的 REE 配分曲线呈现明显的“M”型四分组效应^[28], 四分组效应量化指数 $TE_{1,3} > 1.10$, 变化于 1.13 ~ 1.34 之间, 表明在花岗岩形成过程中存在熔体与富水和富卤族元素流体之间的相互作用^[29~30]。这种作用还造成 Eu 的强烈亏损和下列元素实际比值(表

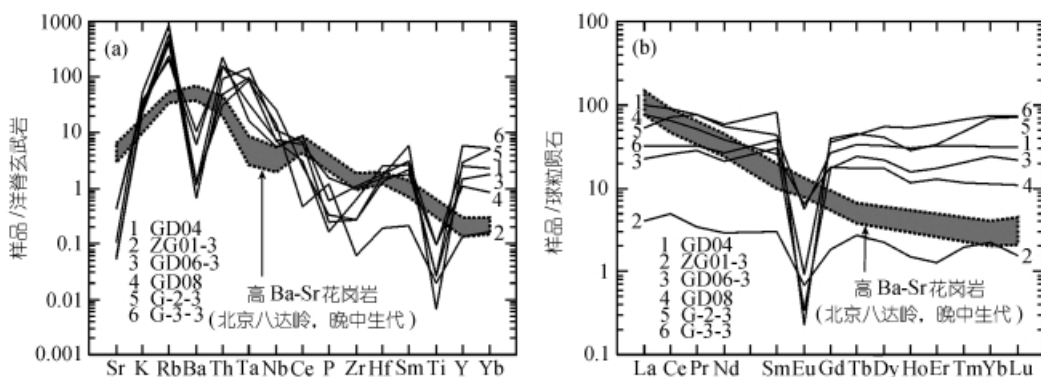


图 3 南岭东段中生代强过铝花岗岩微量元素(a)和稀土元素(b)图解

高 Ba-Sr 花岗岩数据引自文献[11]; 用于标准化的洋脊玄武岩值据文献[33], 球粒陨石值据文献[34]

2)明显地偏离一般花岗岩的正常值^[30,31]: 实际 $Zr/Hf = 6 \sim 25$ (正常值为 $36 \sim 40$), $Nb/Ta = 1 \sim 7$ (12), $Y/Ho = 29 \sim 38$ (28)和 $K/Rb = 29 \sim 38$ (230). 沉积物源区的富水^[32], 以及“花岗岩结晶晚阶段高温水热流体的释放”^[30], 可能是造成熔体与流体之间的相互作用的主要原因.

2 讨论: 南岭东段印支期与燕山早期强过铝花岗岩都形成于伸展构造环境, 但归属于两个不同构造域, J_1 正是两个构造域转换期

南岭及其邻区的印支期花岗岩在湘南-桂北、赣南-粤北、粤西南云开大山的东麓, 以及闽西等地均有分布, 计 20 余个岩体, 约 3260 km^2 (不包括大容山印支期含堇青石花岗岩类), 它们主要形成于距今 $230 \sim 200 \text{ Ma}$ 之间^[6,35~39], 由此说明它们形成于印支运动主碰撞期 $258 \sim 243 \text{ Ma}$ ^[7]之后约 20 Ma 的后碰撞的伸展构造环境. 可用作对比的是, 法国中央地块上海西推覆构造主幕发生在距今 $380 \sim 320 \text{ Ma}$, 伸展-塌陷过程形成的众多浅色二云母花岗岩滞后约 40 Ma , 为 $340 \sim 280 \text{ Ma}$ 时限^[40]. 喜马拉雅浅色强过铝花岗岩形成于变质峰期之后快速抬升和开始剥露的时候, 即 $24 \sim 14 \text{ Ma}$ ^[10]. 此外, 上述印支运动主碰撞的运动时限在华南也有充分响应: 云开大山东麓的 3 条糜棱岩带和扬子北缘安徽三界蓝片岩带形成年龄值, 分别是 $255 \sim 229 \text{ Ma}$ (白云母, $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄)^[41]和 245 Ma (多硅白云母, $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄)^[42]. 由此可见, 当时 $T_1 \sim T_2$ 以挤压为主的印支碰撞运动波及华南广泛地区, 其后 T_3 才开始应力伸展时期.

Turner 等^[43]研究了许多造山带岩浆岩套后认为, 它们明显晚于变质变形之后, 属于岩石圈减薄伸展体制下形成的岩石, 而且这种减薄是很快发生的, 是对加厚的自然均衡响应(isostatic responses). 鉴此, 可进一步确认 $230 \sim 200 \text{ Ma}$ 是南岭地区被加厚地壳的伸展、减薄和导水期, 早元古代沉积变质岩经减压条件下的深熔作用, 形成了印支期强过铝花岗岩, 这一时期又与北大别山含柯石英的榴辉岩形成时段相当, 即 $230 \sim 220 \text{ Ma}$ ^[44~46]. 此外, 可从地质上近似地估算当时被加厚后的地壳厚度: 现今的南岭地壳厚度约 $33 \sim 40 \text{ km}$ ^[47~48], 而南岭中生代花岗岩普遍地呈块状构造和中粒结构, 呈现中带侵入体特征, 它们当时正常埋深约 $6.5 \sim 13 \text{ km}$ ^[49]. 因而, 当时可能的地壳厚度是 $\leq 50 \text{ km} \pm$.

关于燕山早期强过铝花岗岩形成的构造体制, 宜作不同于印支期的另一类考虑, 原由是:

(i) 华南诸省皆缺少同位素年龄值为 $200 \sim 180 \text{ Ma} \pm$ ($\sim J_1$) 的火山岩和侵入岩.

(ii) 燕山早期(约 $180 \sim 140 \text{ Ma}$), 即中-晚侏罗纪的岩浆活动遍及南岭全区, 但在其东部, 特别是浙闽沿海则绝迹, 代之以更广泛的、更强烈的燕山晚期($140 \sim 90 \text{ Ma}$)的火山-侵入活动. 因此, 在花岗岩时空分布上, 呈现明确的岩浆活动向东南方向年轻化和带状迁移现象^[8,50].

近十余年来, 有多种观点解释华南晚中生代岩浆活动规律及其地球动力学问题^[8,51~53]. 本文作者之一 Zhou^[8]认为, 古太平洋板块自 J_2 起, 向中国东南大陆消减(古俯冲带位置在现今中央山脉东侧, 消减角随时间增大), 引起镁铁质岩浆底侵-中下地壳部分熔融, 以及伸展应力下的地壳深熔作用, 由此产生各类巨量花岗质岩浆. 这一模式较好地解释了形成花岗岩的热源起因、花岗岩的赋存空间和岩浆活动随时间向洋年轻化现象. 这一模式的基础在于确认浙闽沿海是燕山期火山-岩浆弧. 南岭的主体部分正是当时的弧后环境. 玄武质岩石微量元素资料被普遍认为能较好地反映构造环境^[54], 图 4 是作者编辑的反映构造环境时空变化的中国东南部晚中生代代表性玄武质岩石微量元素蛛网图. 图中浙东-闽东的橄榄玄武岩(K_1)的微量元素地球

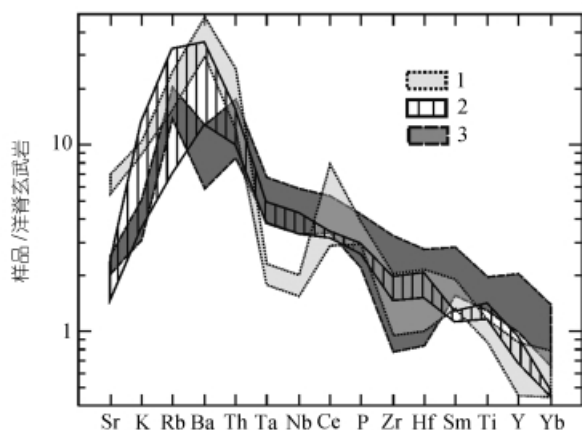


图 4 浙东-闽东、赣南和粤北晚中生代玄武质岩石微量元素蛛网图

1. 浙东奉化、新昌-闽东永泰橄辉玄武岩. 数据据文献[55]中 Xch-2(形成年龄为 110Ma, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -5.1$), 文献[56]中 B41(形成年龄为 96 Ma, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -5.1$), 以及文献[57]中 P1-35(形成年龄为 107 Ma, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -3.2$)等 3 个样品; 2. 赣南寻鄯白面石、龙南东坑石英拉斑玄武岩. 数据据陈培荣(1998)¹⁾中 64003-2(形成年龄为 173 Ma, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -0.15$), 64011(形成年龄为 173 Ma, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -0.13$), 以及 64047-2(形成年龄为 179 Ma, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -0.23$)等 3 个样品; 3. 粤北贵东花岗岩中辉绿岩墙群. 数据据文献[52]中 BD-24(形成年龄为 140 Ma, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +5$), BD-11(形成年龄为 105 Ma, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +4$), 以及 BD-30(形成年龄为 90 Ma, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +4$)等 3 个样品. 用于标准化的洋脊玄武岩值据文献[33]

含岩石包体, 均匀块状; 在主量元素上呈现强过铝($A/CNK > 1.10$), 在微量元素上属低 Ba-Sr 花岗岩, 并具明显的岩浆-流体间反应所造成的 REE 四分组效应, 以及低 K/Rb, Zr/Hf, Nb/Ta, 高 Y/Ho, Rb/Sr 比值; 在同位素地球化学上表现为低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($-10.6 \sim -11.1$)和高 t_{DM} 值(1887 ~ 1817 Ma)的特点.

上述种种特征及其在两个时期强过铝花岗岩中的一致性, 说明两时期强过铝花岗岩形成于相仿的构造环境、源区和形成方式中, 都是当时被加厚的南岭地壳($\leq 50 \text{ km} \pm$)在伸展、减薄、降压、导水条件下, 由其早元古代沉积变质岩, 经部分熔融后产生的岩浆, 在流体参与下结晶形成; 但其中印支期强过铝花岗岩, 形成于发生在中南半岛上印支主碰撞运动(258 ~ 243 Ma)之后的后碰撞的伸展构造环境(T_3), 而燕山早期的则形成于由古太平洋构造域制约的弧后伸展环境; 上述两个时期强过铝花岗岩形成的间歇期 J_1 , 是岩浆活动的相对平静期, 是华南从特提斯构造域向太平洋构造域转换的过渡时期.

化学曲线, 呈现典型的岛弧玄武岩, 亏 Nb-Ta, 贫 HFSE, 富 LILE; 赣南的拉斑玄武岩(J_2), 显示为弧后板内伸展或裂谷的环境, 没有 Na-Ta 亏损; 粤北的辉绿岩(K_{1-2})情况与赣南的石英拉斑玄武岩相仿. 由此说明, 南岭东段赣南-粤北的伸展体制从 J_2 延续到 K_2 , 贯穿整个晚中生代.

由此可以设想, 在华南, J_1 基本上是岩浆活动相对平静期, 是华南受中南半岛印支运动持续影响 (T_{1-2} 以挤压为主, T_3 以伸展为主), 转变为受古太平洋板块消减作用 ($J_2 \sim K_2$) 制约的过渡时期.

3 小结

研究的南岭东段 4 个中生代强过铝花岗岩的锆石 U-Pb 定年结果表明, 它们形成于 228 ~ 225 Ma 和 159 ~ 156 Ma 两个时段, 分别属于印支期和燕山早期. 结合研究的另两个岩体资料, 说明它们都是浅色花岗岩, 普遍含高铝矿物, 不

参 考 文 献

- 1 李四光. 南岭何在. 地质论评, 1942, 7(6): 253 ~ 266
- 2 徐克勤, 丁毅. 江西南部钨矿地质志. 经济部中央地质调查所, 地质专报, 甲种, 1943, 第 17 号, 1~359

1) 陈培荣. 赣南燕山早期双峰式火山侵入杂岩的构造动力学背景及其成因和演化. 南京大学博士学位论文. 1998. 1~126

- 3 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. 1~421
- 4 莫柱孙, 叶伯丹, 潘维祖, 等. 南岭花岗岩地质学. 北京: 地质出版社, 1980. 1~363
- 5 南京大学地质系. 华南不同时代花岗岩类及其与成矿关系. 北京: 科学出版社, 1981. 1~395
- 6 地矿部南岭项目花岗岩专题组. 南岭花岗岩地质及其成因和成矿作用. 北京: 地质出版社, 1989. 1~471
- 7 Carter A, Roques D, Bristow C, et al. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic thermotectonism (Indosinian orogeny) in Vietnam. *Geology*, 2001, 29: 211~214
- 8 Zhou X M, Li W X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in SE China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magma. *Tectonophysics*, 2000, 326: 269~287
- 9 Barbarin B. Genesis of the two main types of peraluminous granitoids. *Geology*, 1996, 24: 295~298
- 10 Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 1998, 45: 29~44
- 11 钱 青, 钟孙霖, 李通艺, 等. 八达岭基性岩和高 Ba-Sr 花岗岩地球化学特征及成因探讨: 华北和大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩的对比. *岩石学报*, 2002, 18(3): 275~292
- 12 Krogh T E. A low contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determinations. *Geochim et Cosmochim Acta*, 1973, 37: 485~494
- 13 Ludwig K R. PBDAT: A computer program for processing Pb-U-Th Isoplot data Version 1.24. United states geological survey open-file report 88~542. 1993. 1~34
- 14 Ludwig K R. Users manual for Isoplot/Ex rev. 2.49: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 1a. 2001. 1~59
- 15 黄 莹, 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): 53~63
- 16 陈江峰, 江博明. Nd, Sr, Pb 同位素示踪和中国东南大陆地壳演化. 见: 郑永飞, 主编. 化学地球动力学. 北京: 科学出版社, 1999. 262~287
- 17 沈渭洲, 徐士进, 王银喜, 等. 西华山花岗岩的 Nd-Sr 同位素研究. *科学通报*, 1994, 39(2): 154~156
- 18 李亿斗, 盛继福, Bel L Le, 等. 西华山花岗岩下陆壳起源的证据. *地质学报*, 1986, 60(3): 256~274
- 19 谢宝克, 马荣生, 张禹慎, 等. 华南大陆地壳生长过程与地幔柱构造. 北京: 地质出版社, 1996. 1~257
- 20 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. 见: 开拓·创新·奋进. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1990. 98~103
- 21 凌洪飞, 沈渭洲, 章邦桐, 等. 江西修水地区震旦纪前后沉积岩的 Nd 同位素组成和物质来源. *岩石学报*, 1992, 8(2): 190~194
- 22 李献华. 扬子块体南缘四堡群 Sm-Nd 同位素体系及其地壳演化意义. *地质科学*, 1996, 31(3): 218~227
- 23 李献华, McCulloch M T. 扬子南缘沉积岩的 Nd 同位素演化及其大地构造意义. *岩石学报*, 1996, 12(3): 359~370
- 24 于津生, 桂训唐, 黄 琳. 广东罗定泗纶混合岩同位素组成特征. *广东地质*, 1991, 6(3): 73~82
- 25 Tarney J, Jones C E. Trace element geochemistry of orogenic igneous rocks and crustal growth models. *J Geol Soc London*, 1994, 151: 855~868
- 26 Fowler M B, Henney P J, Darbyshire D P E, et al. Petrogenesis of high Ba-Sr granites: the Rogart Pluton, Sutherland. *J Geol Soc London*, 1996, 158: 521~534
- 27 Harris N B W, Inger S. Trace element modeling of pelite-derived granites. *Contr Mineral Petrol*, 1992, 110: 46~56
- 28 Masuda A, Kawakami O, Dohmoto Y, et al. Lanthanide tetrad effects in nature: Two mutually opposite types W and M. *Geochem J*, 1987, 21: 119~124
- 29 赵振华, 熊小林, 韩小东. 花岗岩稀土元素四分组效应形成机理探讨——以千里山和巴尔哲花岗岩为例. *中国科学*, D 辑, 1999, 29(4): 331~338
- 30 Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(3~4): 489~508
- 31 Dostal J, Chatterjee A K. Contrasting behaviour of Nb/Ta and Zr/Hf ratios in a peraluminous granitic pluton (Nova Scotia, Canada). *Chem Geol*, 2000, 63: 207~216
- 32 Strong D F, Hanmer S K. The leucogranites of southern Brittany: origin by faulting, frictional heating, fluid flux and fractional melting. *Can Mineral*, 1981, 19: 163~176
- 33 Pearce J A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth C J, Norry M J, Eds. *Continental basalts and mantle xenoliths*, Shiva Publ Nantwich, United Kingdom 1983. 230~249
- 34 Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution. Oxford: Blackwell Scientific, 1985. 1~312

- 35 湖南省地质矿产厅区域地质调查所. 湖南省花岗岩单元——超单元划分及其成矿专属性. 湖南地质, 增刊 8(及附件), 1995, 1~84
- 36 黄友义, 庄文明, 陈绍前, 等. 广东乌石岩体的地质地球化学特征及形成时代. 广东地质, 2000, 15(3): 13~19
- 37 陈纪承. 广州地区花岗岩地质特征. 广东地质, 1991, 6(1): 1~16
- 38 许业熙、庄文明. 广州地区瘦狗岭断裂 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素年龄及其地质意义. 广东地质, 2000, 15(3): 56~59
- 39 庄文明, 黄友义, 陈绍前. 粤中印支期花岗岩类的基本特征与成岩环境. 广东地质, 2000, 15(3): 33~39
- 40 Williamson B J, Shaw A, Downes H, et al. Geochemical constraints on the genesis of Hercynian two-mica leucogranites from the Massif Central, France. *Chem Geol*, 1996, 127: 25~42
- 41 邵建国, 彭少梅, 彭松柏. 云开地块周边断裂带 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 等时线定年. 广东地质, 1995, 10(2): 34~40
- 42 李曙光, 刘德良, 陈移之, 等. 中国中部蓝片岩的形成时代. 地质科学, 1993, 28(1): 21~27
- 43 Turner S, Sandiford M, Foden J. Some geodynamic and compositional constraints on “postorogenic” magmatism. *Geology*, 1992, 20: 931~934
- 44 Li S G, Xiao Y L, Liu P L, et al. Collision of the North China and Yangtze Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes. *Chem Geol*, 1993, 109: 89~111
- 45 李曙光, Jagouty E, 肖益林, 等. 大别山-苏鲁地体超高压变质年代学——I. Sm-Nd 同位素体系. 中国科学, D 辑, 1996, 26(3): 249~257
- 46 李曙光, 李惠民, 陈移之, 等. 大别山-苏鲁地体超高压变质年代学——II. 锆石 U-Pb 同位素体系. 中国科学, D 辑, 1997, 27(3): 200~206
- 47 袁学诚, 主编. 中国地球物理图集. 北京: 地质出版社, 1996. 1~200
- 48 梁新权, 郭定良. 湖南深部构造活化及其浅部响应. 地质科学, 2002, 37(3): 332~342
- 49 Buddington A F. Granite emplacement with special reference to North American. *Geol Soc Am Bull*, 1959, 70: 671~747
- 50 Chen J F, Jahn B M. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 1998, 284: 101~133
- 51 Jahn B M, Chen P Y, Yen T P. Rb-Sr ages of granitic rocks in Southeastern China and their tectonic significance. *Geol Soc Am Bull*, 1976, 86, 763~776
- 52 Li X H. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China. *J Asian Earth Sci*, 2000, 18: 293~305
- 53 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 等. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球化学背景. 中国科学, D 辑, 2002, 32(4): 279~289
- 54 McCulloch M T, Gamble A J. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth Planet Sci Lett*, 1991, 102(2~3): 358~374
- 55 冯宗帜, 亓润章, 黄水兴, 等. 福建永泰-德化地区火山地质与火山岩含矿性. 南京地质矿产研究所所刊, 1991, 增刊(9): 1~100
- 56 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. 岩石学报, 1994, 10(3): 236~247
- 57 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. 南京大学学报(地球科学), 1994, 6(4): 317~325