

文章编号: 1000- 6524 (2003) 01- 0001- 10

广东龙口南昆山铝质 A 型花岗岩的成因

刘昌实, 陈小明, 王汝成, 胡 欢

(南京大学 地球科学系 内生金属矿床成矿作用国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

摘要: 南昆山花岗岩出露面积约 200 km², 为一等轴状岩体。具中粒等粒结构, 由黑鳞云母、钠长石、条纹长石和石英组成。弱过铝质, MgO 和 CaO 含量极低, 亚碱质, 碱度率和 NK/A 值偏高; 富 F 贫 Cl, 具较高 F/Cl 值; 具较高的锆石饱和(液相线)温度(810~ 847 °C), 与澳大利亚 A 型花岗岩的平均值(839 °C)基本相当。在微量元素特征上, 具有高的 10⁴ Ga/Al 值和 (Zr+ Nb+ Ce+ Y) 元素组合值, 分别高于 A 型花岗岩下限值的 2.6 和 350 × 10⁻⁶。在同位素组成特征上, 具有较高的 ε_{Nd}(t) 值(- 1.54~ - 2.87) 和较低的 δ¹⁸O 值(7.9‰~ 9.8‰)。按幔-壳混合模型计算, 其源区地幔组分约占 63%~ 69%。上述特征表明, 南昆山花岗岩与国内外典型铝质 A 型花岗岩(如苏州花岗岩和澳大利亚 Lachlan 褶皱带 A 型花岗岩)很相似。这一发现对阐明南岭东段燕山晚期地壳伸展构造的发育具有重要意义。

关键词: 铝质 A 型花岗岩; 广东; 南昆山; 成因

中图分类号: P588. 12⁺ 1; P581

文献标识码: A

Origin of Nankunshan aluminous A-type granite, Longkou County, Guangdong Province

LIU Chang-shi, CHEN Xiao-ming, WANG Ru-cheng and HU Huan

(State Key Laboratory of Mineral Deposits, Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Nankunshan aluminous A-type granite occurs in Longkou County of Guangdong Province, with a outcrop area of about 200 km². With medium-grained texture, the granite is composed of protolithionite, albite plagioclase, perthite and quartz. The rock usually is weakly peraluminous and subalkaline with high alkali ratio range and NK/A values. The granite contains markedly low MgO and CaO and extremely high (FeO+ Fe₂O₃) with a high FeO^{*} / (FeO^{*} + MgO) ratio. Nankunshan granite is evidently rich in F and poor in Cl, having a high F/Cl ratio range. Based on its high Zr contents, the calculated zircon saturation temperatures of the rock are relatively high (810~ 847 °C), consistent with those of A-type granites in Australia (839 °C, on average). In terms of trace element data, the granite has high 10⁴ Ga/Al and (Zr+ Nb+ Ce+ Y) values. These values are higher than the low-limited values of 2.6 and 350(× 10⁻⁶) for aluminous A-type granites in Lachlan Fold Belt of Australia respectively. The rock has higher total REE contents and strongly Eu negative anomalies, showing a sea-gull shaped REE partition patterns on its chondrite-normalized diagrams, and Rb, U, Th, Nb, Ta, Zr, Hf, Sm elements show evidently positive anomalies on the primitive mantle-normalized trace element spider diagrams. The granite possesses relatively high ε_{Nd}(t) values (- 1.54~ - 2.87) and low δ¹⁸O values (7.9‰~ 9.8‰), indicating that its source rocks are located in the interaction belts between the mantle and the crust. Mantle component accounts for about 63%~ 69% in its total source materials, as calculated by the mixing model of the mantle

收稿日期: 2002- 07- 04; 修订日期: 2002- 09- 24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40132010, 40073009, 40025209)

作者简介: 刘昌实(1936-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事火成岩岩石学教学和科研工作。

and the crust end members on the basis of the isotopic data. These features are obviously similar to those of aluminous A-type granites elsewhere in the world. The discovery is important for study on the extensional structure of late Yanshanian crust in eastern part of Nanling Mountain.

Key words: aluminous A-type granite; Guangdong Province; Nankunshan; genesis

Loisell 和 Wones (1979) 以三“*A*”为特征, 即碱性(alkaline)、缺水(anhydrous)、非造山(anorogenic), 把*A*型花岗岩类引入地质文献已有20余年, 得到世人广泛重视。许多学者从地球化学角度提出一系列判别图解(Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1990, 1992), 强调高Ga/Al和富HFSE元素是这一类岩石的主要判别标志, 试图将它与分异的I或S型花岗岩区分开, 对这一类岩石的深入研究起了重要推动作用。近年来King等(1997)在积累大量澳大利亚Lachlan褶皱带*A*型花岗岩数据基础上提出, 在Lachlan褶皱带中过碱的*A*型花岗岩(含钠铁闪石)只是少数, 大量存在的是铝质*A*型花岗岩, 后者是一种中等碱质、并不缺水(黑云母是其主要铁镁矿物)、准铝-过铝质的岩石。这一类岩石虽然和分异的I或S型花岗岩在地球化学特征上有某些重叠, 但彼此还是可以分开的(Whalen *et al.*, 1987)。华南地区*A*型花岗岩分布情况与澳大利亚Lachlan也有相似之处。福建沿海长数百千米的*A*型花岗岩带经洪大卫等(1987)邱检生等(2000)研究, 也认为占压倒优势的岩石类型仍然是亚碱性过铝质的黑云母晶洞花岗岩(晶洞内含铝质矿物锰铝榴石和白云母)。最近, 在桐柏-大别造山带中也发现存在一些铝质*A*型花岗岩(王强等, 2000)。因此, 铝质*A*型花岗岩是*A*型花岗岩中一种十分重要的岩石类型, 在今后研究中应给予更多的关注。

南昆山铝质*A*型花岗岩是巨型佛冈花岗质杂岩体组成部分, 后者由5个岩石单元组成: 吊里花岗闪长岩、腊埔黑云母二长花岗岩、佛冈黑云母花岗岩、南昆山铝质*A*型花岗岩和石岭方钠石正长岩。南昆山花岗岩出露于广东省龙口县南昆山自然保护区内, 赵子杰等(1986)对其进行过岩石学方面研究。本文在大量新数据基础上, 对南昆山铝质*A*型花岗岩的特征加以更全面的阐述和厘定, 并与澳大利亚铝质*A*型花岗岩(King *et al.*, 1997)和国内同类的苏州(Charoy *et al.*, 1994)和福建乌山(邱检生等, 2000)*A*型花岗岩进行系统对比, 在此基础上探讨其成因模式。

1 岩石学和矿物学特征

南昆山岩体平面上为等轴状, 出露面积约200 km², 侵入最新地层为J₂-J₃火山岩(高基坪组), 岩体内常见火山岩的残留捕虏体, 南侧侵入于角闪二长花岗岩的太坳顶岩体中。岩体中心有一部分岩性与佛冈粗粒黑云母花岗岩相似, 疑是佛冈花岗岩的残留顶锥体, 赵子杰等(1986)将其另行划出, 称焦坑岩体(图1)。

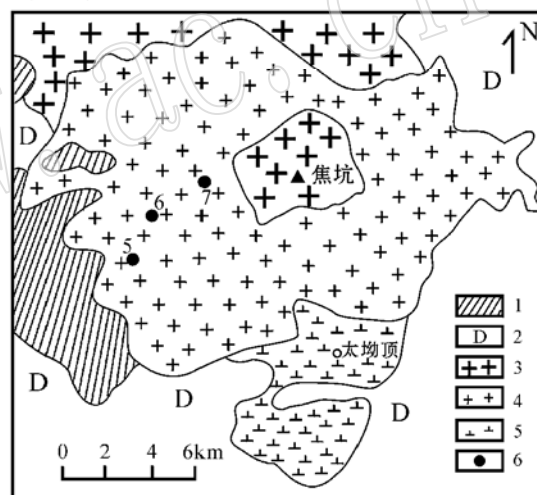


图1 南昆山花岗岩地质简图(据赵子杰等, 1986)

Fig. 1 Schematic geological map of Nankunshan granite
1—J₂-J₃ volcanic rock; 2—Devonian; 3—coarse-grained biotite granite (Fagang); 4—medium-grained sodalite granite (Nankunshan); 5—amphibolite monzonitic granite (Tai'ao); 6—sampling location and number

1—J₂-J₃ volcanic rock; 2—Devonian; 3—coarse-grained biotite granite (Fagang); 4—medium-grained sodalite granite (Nankunshan); 5—amphibolite monzonitic granite (Tai'ao); 6—sampling location and number

南昆山岩体为灰白-浅肉红色, 除边缘相粒径变细外, 其主要部分具中粒等粒结构, 块状构造, 主要由黑鳞云母(2.4%~4.7%)、钠长石($An=0\sim 5$)(14.3%~17.5%)、条纹长石(43.9%~48.3%)、石英(33.8%~35.7%)和少量白云母(0.3%~0.5%)组成。依定量矿物分类应为钠长花岗岩。

1.1 黑云母

少数为自形-半自形,大多数为间粒,粒径 1~0.5 mm,镜下呈浅绿色,弱多色性,可见其二级顶鲜艳干涉色。常见成分环带,不同色调的黑云母在 \perp (001) 方向上呈韵律生长。单矿物湿化学分析(赵子杰等, 1986) 和电子探针分析结果列于表 1。从表 1 可见,黑云母极富 Fe 贫 Mg, $Mg^{\#} [Mg/(Mg+Fe^*)]$ 为 0.02~0.06, 与全岩成分贫 MgO 相匹配。八面体层内富 Li (0.43~1.18 pfu)^①、 ^{VI}Al (1.18~1.53 pfu) Fe^* (2.83~3.35 pfu), 按 Foster (1960) 分类应为含锂铁叶云母或黑鳞云母, 均属于铁锂云母系列, 其八面体内类质同象替换类型主要是 $Li^{VI}Al(Fe, Mg)_2$ 。按 Wones (1965) 方法计算其氧逸度极低 ($\log f_{O_2} = -18$ bar), 水逸度也较低 ($f_{H_2O} = 371 \sim 565$ bar) (赵子杰等, 1986)。在 $Fe^{3+} - Fe^{2+} - Mg$ 图解中位于 NiO-Ni 缓冲线附近, 表明其在贫水且还原环境下结晶, 与苏州铝质 A 型花岗岩黑云母成分相当 (Charoy *et al.*, 1994)。

1.2 白云母

白云母含量小于 0.5%, 多数为粒间他形, 无色。4 个样品 12 点探针分析平均结果列于表 1。以 24 个氧为基准计算的阳离子数表明其富 Si, 为“多硅型”白云母, 四面体层内 $Si = 6.81$ pfu, 大于理论值的 6。八面体层内 $^{VI}Al = 3.32$ pfu, 接近于二八面体白云母理论值的 4。八面体层内还含有少量 Fe^{2+} (0.68 pfu), 与福建乌山晶洞花岗岩内产出白云母相比, 除氟低外, 其余组分极其相似(邱检生等, 2000)。

1.3 斜长石

镜下判断应有两个世代: 早世代粒径较粗, 约 0.5~0.2 mm, 钠长石律双晶发育, 自形-半自形, 轻微绢云母化, 无成分环带显示, 3 个样品 10 点探针 (表 1, Pl₁) 分析显示 CaO 含量低 (0.12%~0.48%), 成分接近钠长石端员 ($An_1Ab_{98}Or_1$); 晚世代斜长石粒径小 (0.2~0.1 mm), 新鲜透明, 3 个样品 12 点分析 (表 1, Pl₂) 显示 CaO 含量更低 (0.01%~0.09%), 成分为 $An_0Ab_{99}Or_1$, 是纯的钠长石。

1.4 条纹长石

粒径 0.2~3.0 mm, 出溶的钠长石叶片宽度大,

表 1 南昆山铝质 A 型花岗岩主要造岩矿物化学成分电子探针分析结果

w_B / %

Table 1 Microprobe analyses of main rock forming minerals in Nankunshan aluminous A type granite

序号 产地 矿物	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	南 昆 山							苏 州		乌 山
	Bi	Bi	Bi	Mu	Pl ₁	Pl ₂	Kf	Ab	Bi	Mu
SiO ₂	40.19	36.63	36.85	51.14	68.00	68.67	63.83	68.71	38.88	48.98
TiO ₂	0.87	1.00	1.84	0.13	0.00	0.01	0.01	0.01	1.63	0.13
Al ₂ O ₃	20.12	19.50	19.45	28.77	19.52	19.47	19.05	19.47	15.69	28.05
Fe ₂ O ₃	nd	4.11	3.99	nd	nd	nd	nd	nd	1.43	nd
FeO	22.69	22.36	22.55	6.08	0.03	0.04	0.03	0.04	21.68	6.20
MnO	0.85	0.51	0.75	0.13	0.03	0.01	0.03	0.01	0.84	1.61
MgO	0.22	1.05	0.97	0.27	0.00	0.00	0.00	0.02	2.42	0.61
CaO	0.04	0.43	0.17	0.04	0.27	0.04	0.01	0.02	0.64	nd
Na ₂ O	0.13	0.43	0.40	0.06	11.23	11.34	0.23	11.55	0.19	0.13
K ₂ O	9.51	9.33	9.51	9.72	0.20	0.14	16.08	0.16	9.14	9.85
H ₂ O	3.75 ^①	2.05	2.11	4.39 ^①					3.85	3.06 ^①
F	0.51	3.42	1.70	0.25						2.38
2F= O	-0.21	-1.43	-0.71	-0.10						-0.99
总量	98.72	99.39	99.58	100.88	99.28	99.72	99.27	99.99	96.39	100.01
Li ₂ O	1.98 ^②	1.07	0.68	-	-	-	-	-	1.26	-

注: 南昆山样品除 2 3 引自赵子杰等 (1986) 外, 均为本文采用 JEOL-JXA8800 M 电子探针仪有标样分析; 9 为苏州 A 型花岗岩平均数据, 引自 Charoy 等 (1994); 10 为乌山 A 型花岗岩平均数据, 引自邱检生等 (2000); Bi—黑云母; Mu—白云母; Pl₁—早世代斜长石; Pl₂—晚世代斜长石; Kf—一条纹长石中主晶钾长石; Ab—一条纹长石中出溶钠长石叶片; ①—H₂O 含量由 40H-F 计算; ②Li₂O 含量由 0.287 SiO₂-9.522 计算 (Tindle, 1990); nd—未检出。

① Pfu 为以 24 个氧为基准计算的晶胞阳离子数。

在粗化作用下相互连成一片,其面积有时超过主晶钾长石。结晶好的钠长石叶片通常可见钠长石律双晶。3个样品13点分析表明,钠长石叶片CaO含量低(0.02%),成分为 $An_0Ab_{99}Or_1$ (表1)。主晶钾长石为微斜长石,3个样品19点分析其成分为 $An_0Ab_2Or_{98}$ (表1),接近于纯的钾长石端员。单矿物样经X光粉晶分析测得: $d(131) = 3.040 \text{ \AA}$, $d(\bar{1}31) = 2.969 \text{ \AA}$, $2\theta(131) = 29.352^\circ$, $2\theta(\bar{1}31) = 30.063^\circ$, $2\theta(060) = 41.699^\circ$, $2\theta(\bar{2}04) = 50.452^\circ$, 计算三斜度 $\Delta = 0.89$, 有序度 $\delta = 0.91$, $t_{10} = 0.94$, $t_{1m} = 0.04$, $t_{20} = t_{2m} = 0.01$, 为最大微斜长石。

1.5 次要矿物和副矿物

萤石有原生和次生两种:原生为半自形,粒径约0.2 mm,包在长石中;次生为不规则形状,分布于长英质矿物粒间。方解石主要分布于黑云母解理中,为黑云母碳酸盐化产物。副矿物主要有锆石,在重砂样中明显可见二个世代:早世代为茶黄色,微透明,粒径0.1~0.09 mm,常与铌铁矿连生;晚世代为细粒(0.01~0.05 mm),无色透明。独居石在重砂矿物中为四方双锥状,粒径0.09~0.05 mm。其他副矿物有含钨铌铁矿、褐帘石和磷灰石等。

2 地球化学特征

2.1 主量元素

南昆山花岗岩化学成分列于表2。其主要特点为:①弱过铝质,全岩 $A/NKC = 1.01 \sim 1.04$,主要表现为黑鳞云母成分中富 ^{VI}Al ,黑鳞云母的 $A/NKC = 1.681 \sim 1.887$,是对全岩铝过饱和的主要贡献者;②含极低MgO和CaO,(FeO+Fe₂O₃)含量高,其 $FeO^*/(FeO^* + MgO) > 0.9$;③亚碱质,赖特碱度率 $AR = 3.3 \sim 3.9$, $AlK = 8.23 \sim 9.16$, $NK/A = 0.869 \sim 0.898$,略高于A型花岗岩划分下限0.85(Whalen *et al.*, 1987);④相对K略富Na, Na/K (原子比) > 1 (1.36~1.44);⑤富F贫Cl,F含量($5.536 \sim 9.054$) $\times 10^{-6}$,主要存在于云母和原生萤石中,应是岩浆成因。在F-Cl投影图(图2)中,南昆山花岗岩位于高氟低氯区($F/Cl > 1$),石岭方钠石正长岩位于低氟高氯区($F/Cl < 1$),而佛冈S型花岗岩位于低氟低氯区。高氟含量对A型花岗岩的地球化学特征产生一系列重要影响(Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987),表现为:① F^- 代替聚合的铝硅酸盐熔体中的

表2 南昆山铝质A型花岗岩岩石化学成分及其与同类岩石的对比

w_B/%

Table 2 Petrochemical compositions of aluminous A-type Nankunshan granite and its comparison with the same type of granites elsewhere

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
样号	FG5-1	FG6-1	FG7-1	1493	1460	suG1	suG2	Wu
SiO ₂	76.25	74.86	74.08	72.46	74.08	74.56	76.23	77.49
TiO ₂	0.05	0.08	0.12	0.06	0.63	0.19	0.08	0.11
Al ₂ O ₃	12.67	12.65	12.51	13.80	13.10	12.90	12.55	12.24
Fe ₂ O ₃	0.45	0.30	0.47	0.12	0.94	0.82	0.66	0.59
FeO	0.80	1.17	1.63	1.58	1.64	1.20	0.85	0.16
MnO	0.01	0.05	0.08	0.05	0.49	0.04	0.03	0.06
MgO	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.18	0.11	0.22	0.06	0.08
CaO	0.57	0.67	0.80	0.34	0.25	0.76	0.45	0.64
Na ₂ O	3.90	3.57	3.57	4.16	3.70	3.66	3.77	4.16
K ₂ O	4.33	4.74	4.62	5.00	5.25	4.87	4.38	4.25
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02	0.01	0.00	0.01
F/10 ⁻⁶	5.537	5.536	9.054	nd	nd	2.800	4.500	1.233
Cl/10 ⁻⁶	1.080	725	725	nd	nd	nd	nd	nd
烧失	0.55	1.19	1.40	2.4	0.50	0.64	0.66	0.24
F, Cl= O	-0.26	-0.25	-0.39			-0.12	-0.19	-0.05
总和	100.0	99.67	99.88	100.19	100.71	100.03	99.98	100.10
<i>t_m</i> /°C	810	847	843					

注:1~3为本文数据;4~5取自1/20万从化幅地质图说明书;6为苏州第一期花岗岩平均值(n=5),7为苏州第二期花岗岩平均值(n=5),引自Charoy等(1994);8为福建乌山A型花岗岩平均值(n=9),引自邱检生等(2000);*t_m*为计算的锆石饱和温度;nd-未检出。

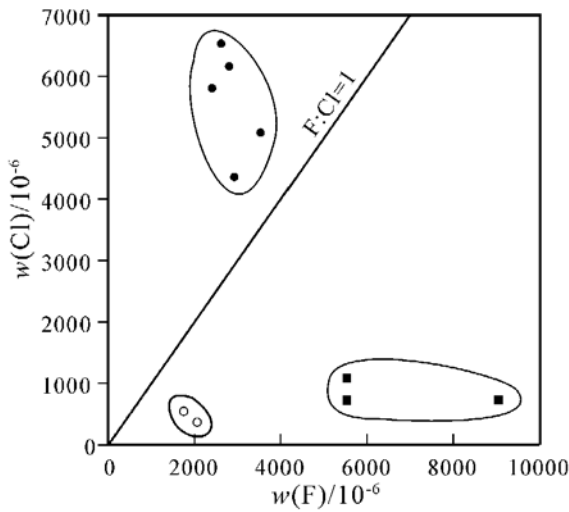


图 2 佛冈花岗质杂岩体 F- Cl 图解

Fig. 2 F- Cl diagram of Fogang granitic complex

- 佛冈粗粒黑云母花岗岩(S 型) (陈小明等, 2002);
- ⊗—石岭方钠石正长岩 (刘昌实等, 2003);
- 南昆山铝质 A 型花岗岩
- Fogang coarse grained biotite granite(S_type);
- ⊗—Shiling sodalite syenite;
- Nankunshan aluminous A_type granite

桥氧(O⁰), 形成 Si—F、Al—F 键, 使熔体解聚, 大大降低熔体的粘度, 使其具有更高的活动能力而形成高位侵入体。②解聚作用可大大降低富氟花岗岩体系的固相线温度(降至 570℃), 使其成分趋同于花岗岩体系中低熔组分。③氟是负电性最强的元素(3.9), 能以共价键形式与其他元素, 特别是镧系、铀系和稀有金属元素等组成高配位的复杂络合物, 如 MoF₆、GaF₃、(NbF₅)₂、(TaF₅)₂、YbF₃、UF₃、LaOF 等。佛冈杂岩体(包括南昆山 A 型花岗岩、石岭方钠石正长岩和佛冈 S 型花岗岩)中氟对上述元素相关系数计算表明, F—Y(r= 0.96)、F—Ta(r= 0.98)、F—Yb(r= 0.97)、F—Sn(r= 0.90)、F—Ga(r= 0.64)、F—U(r= 0.65) 等之间存在显著的正相关(图 3, 其中 F—Y 与 F—U 关系图省略), 直接证明氟对这些元素的络合作用对其在熔体中具有高浓度起着极其重要的作用。这些络合物在有平衡离子 Na⁺ 存在的情况下在熔体中更加稳定, 因而使 A 型花岗岩有别于其他成因类型花岗岩, 其 Ga、Zr、镧系、铀系和稀有金属元素具有很高的丰度。

2.2 微量元素

南昆山花岗岩微量元素分析结果列于表 3。其总特点是: ①Ga 丰度高(29 × 10⁻⁶ ~ 48 × 10⁻⁶), 具有高的 Ga/Al 值(4.36 × 10⁻⁴ ~ 7.26 × 10⁻⁴), 明显

大于 A 型花岗岩下限值的 2.6 × 10⁻⁴ (whalen *et al*, 1987); ②HFSE 元素含量高, 元素组合(Zr+ Nb + Ce+ Y) = 456 × 10⁻⁶ ~ 585 × 10⁻⁶, 明显大于 A 型花岗岩下限值的 350 × 10⁻⁶ (whalen *et al*, 1987)。在 10⁴Ga/Al—(Zr+ Nb+ Ce+ Y) 判别图解(图 4)中, 南昆山、苏州 A 型花岗岩均落入 A 型域(whalen

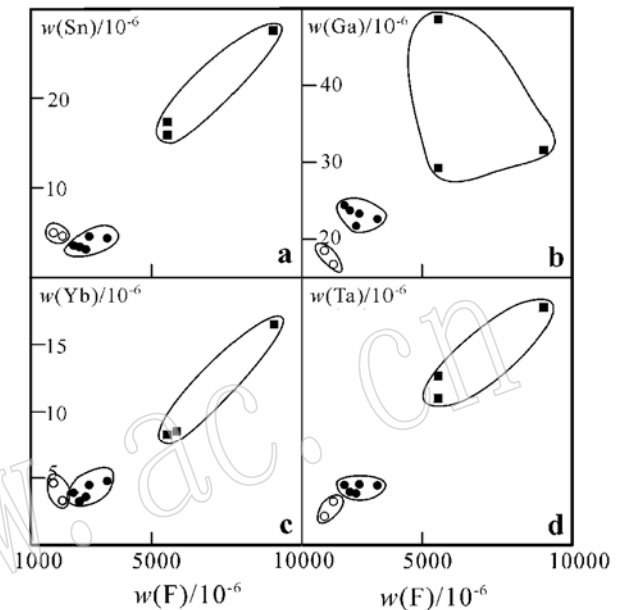


图 3 佛冈花岗质杂岩体 F- Sn、F- Ga、F- Yb、F- Ta 相关图解

Fig. 3 The F- Sn (a), - Ga (b), - Yb (c), - Ta (d) correlation diagrams of Fogang granitic complex

图例同图 2

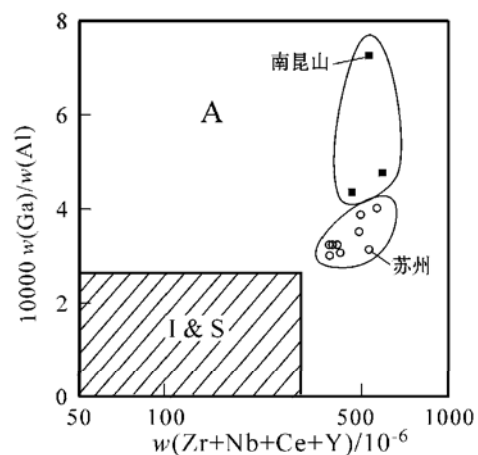


图 4 南昆山铝质 A 型花岗岩 10⁴Ga/Al—(Zr + Nb+ Ce+ Y) 图解

Fig. 4 The 10⁴ Ga/Al—(Zr+ Nb+ Ce+ Y) diagram of Nankunshan aluminous A_type granite

表3 南昆山铝质A型花岗岩微量元素含量及其与同类花岗岩的对比
 Table 3 Trace element contents of aluminous A-type Nankunshan granite and its comparison
 with the same type of granites elsewhere

 $w_B/10^{-6}$

序号	1	2	3	4	5	6
样号	FG5- 1	FG6- 1	FG7- 1	SuG1	SuG2	Wu
Li	161.62	158.82	271.65	45.80	144.00	nd
Be	5.04	3.33	4.07	9.04	9.34	nd
Sc	0.27	29.49	1.52	2.84	0.95	2.75
Sn	17.35	15.87	27.55	4.76	7.00	nd
Cs	9.07	9.51	13.08	8.11	9.25	nd
Ga	29.23	48.61	31.59	22.48	23.88	18.22
Rb	779.77	692.09	781.01	270.20	519.40	240.78
Sr	7.82	6.90	18.02	53.20	12.20	3.56
Y	85.96	76.61	140.24	83.34	123.16	26.86
Zr	184.24	282.28	284.12	233.60	287.20	80.44
Hf	12.67	13.82	12.79	8.90	16.84	4.44
Nb	106.61	86.39	138.38	39.70	103.06	24.56
Ta	11.01	12.65	17.75	4.88	9.97	2.34
Th	55.79	64.79	112.00	29.90	110.52	33.60
U	21.53	24.64	30.31	11.03	15.76	9.51
Ba	559.24	611.89	44.29	265.80	40.60	33.44
La	39.76	41.41	153.28	53.96	37.62	31.00
Ce	79.29	78.99	242.89	100.08	74.74	53.90
Pr	9.56	10.86	27.26	10.70	7.76	6.08
Nd	40.90	39.87	87.59	43.14	29.94	20.31
Sm	10.66	10.23	19.29	9.93	9.12	3.96
Eu	0.12	0.03	0.23	0.50	0.17	0.36
Gd	10.18	9.40	19.53	8.54	7.76	3.91
Tb	1.84	1.89	3.33	1.52	1.74	0.64
Dy	12.72	13.18	23.21	10.86	13.08	3.79
Ho	2.48	2.52	4.88	2.35*	3.51*	0.90
Er	8.18	8.17	16.04	5.60	11.36	2.80
Tm	1.24	1.31	2.60	1.08*	1.08*	0.47
Yb	8.21	8.30	16.55	7.41	17.03	3.28
Lu	1.10	1.10	2.22	1.31	3.09	0.48
样品数	1	1	1	5	5	9

注: 1 2 3 为本文数据, 由南京大学内生金属矿床成矿作用国家重点实验采用 ICP- MS 方法测定; 4 5 分别为苏州花岗岩第一、二期平均值(据 Charoy 等, 1994); 6 为乌山 A 型花岗岩平均值(据邱检生等, 2000); * 由内插值计算。

et al, 1987); ③在原始地幔标准化蛛网图(图5)上, 与相邻元素比较, 表现为 Ba、Sr、P、(Eu+ Ti) 的强烈亏损, 表明它是一种高演化成分的 A 型花岗岩。相反, 对于 Rb、(U+ Th)、(Nb+ Ta)、(Zr+ Hf+ Sm)、(Y+ Yb+ Lu) 等与相邻元素相比强烈增益。重稀土元素部分的峰(Y+ Yb+ Lu) 与轻稀土元素(Ce) 峰接近持平, 这与其海鸥型的球粒陨石稀土元素配分模式(见后)相一致。如与本区佛冈 S 型花岗岩平均值比较, 南昆山花岗岩 Nb(4~ 6 倍)、Ta(3~ 5 倍)、Rb(2.0 倍)、Zr(1.2~ 1.8 倍)、Hf(2.2~ 2.4 倍)、Y(2.3~ 4.3 倍)、Yb(2.0~ 4.0 倍) 高于佛冈 S 型花岗岩, 显示 A 型花岗岩富含高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf、

Y、Yb 等特点。④稀土元素总量高, $\Sigma\text{REE}(14) = 226 \times 10^{-6} \sim 618 \times 10^{-6}$, LREE/HREE = 3.9~ 6.0, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 2.88 \sim 5.50$, 轻稀土元素部分分馏明显, $(\text{La}/\text{Sm})_N = 2.33 \sim 4.97$, 而中、重稀土元素部分分馏差, $(\text{Gd}/\text{Dy})_N = 0.71 \sim 0.84$, $(\text{Er}/\text{Yb})_N = 0.88 \sim 0.90$ 。强 Eu 亏损, $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.01 \sim 0.04$, 这与斜长石贫 Ca 相一致。球粒陨石标准化模式图为典型的 A 型花岗岩所特有的海鸥式, 与苏州 A 型花岗岩极其相似(图6)。⑤具有高的 Nb、Y、Rb 含量, 在 Nb-Y 和 Rb-(Y+ Nb) 构造环境判别图中均落在板内花岗岩区(WPG) (Pearce et al, 1984), 表明其成因与非造山拉张环境有关。⑥La/Nb 值低, 南昆山

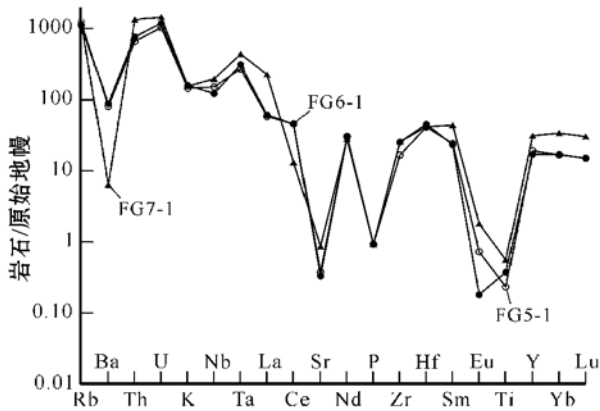


图 5 南昆山铝质 A 型花岗岩微量元素蛛网图

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram for aluminous A-type Nankunshan granite

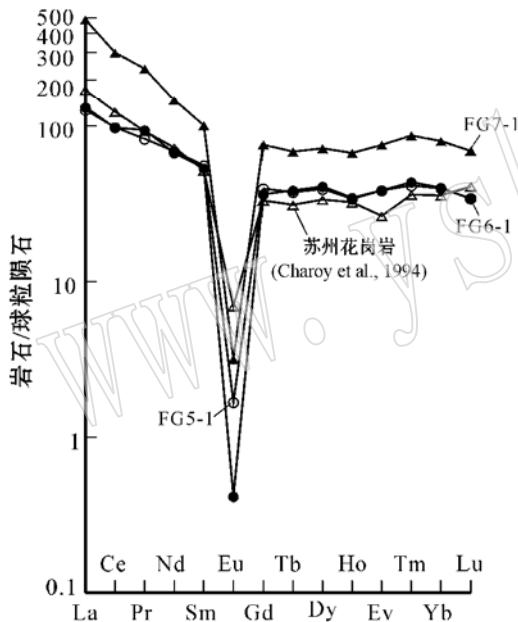


图 6 南昆山铝质 A 型花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分图解

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns for aluminous A-type Nankunshan granite

花岗岩 $La/Nb = 0.37 \sim 1.11$, 与原始地幔比值 0.96 极其接近。Rudnick (1995) 和 Sun & McDonough (1989) 提出, 可用 La/Nb 值区分板内和会聚边缘环境岩浆岩: 前者 La/Nb 低 (< 1.0), 后者 La/Nb 高, 据此可认为南昆山花岗岩是板内环境形成的。

2.3 计算的锆石饱和温度

Watson (1979) 实验显示, $D_{\text{锆石/熔体}}^Zr$ 分配系数是全岩主成分参数 $M = (Na + K + 2Ca) / (Si \times Al)$ 和熔体温度的函数。已知 M 值和全岩 Zr 丰度 (表 3), 可计

算熔体锆石饱和温度 (接近于液相线温度)。南昆山 A 型花岗岩的锆石饱和温度为 $810 \sim 847 \text{ }^\circ\text{C}$, 平均 $833 \text{ }^\circ\text{C}$ ($n = 3$), 接近于澳大利亚 Lachlan 褶皱带铝质 A 型花岗岩的平均值 $839 \text{ }^\circ\text{C}$ ($n = 55$) (King *et al.*, 1997)。

3 Sr Nd Pb O 同位素组成

矿物-全岩 Rb-Sr、全岩 Sm-Nd 同位素成分分析由中国科学院地质研究所同位素实验室采用 VG350 质谱仪测定, 钨模式年龄用两阶段演化公式计算。全岩铅同位素组成测定由宜昌地质矿产研究所同位素实验室完成, 结果列于表 4。

3.1 Rb-Sr 等时线年龄

南昆山花岗岩侵入于佛冈 S 型花岗岩和最新地层 $J_2 - J_3$ 的高基坪组火山岩中, 岩体内常见火山岩大块径的捕虏体, 可能为本区最晚一期的花岗质岩浆活动的产物。本次矿物-全岩 Rb-Sr 等时线用 isoplot 程序计算, 其结果 $t = 111 \pm 16 \text{ Ma}$, $I_{sr} = 0.94 \pm 0.26$, $MSWD = 3.6$ (图 7)。过高的 I_{sr} 值表明晚期热液蚀变, 特别是黑云母碳酸盐化作用使外来的放射成因 ^{87}Sr (替换 Ca^{2+}) 带入, 并在矿物规模上均一化。因此, I_{sr} 值可能不具有实际地质意义。如果其年龄值还有参考意义的话, 那么南昆山花岗岩应是早白垩晚期侵入, 与沿海地区晶洞花岗岩 ($90 \text{ Ma} \pm$) 接近同期, 代表华南因岩石圈拉张作用导致 A 型花岗质岩浆活动的重要时期之一。

3.2 物源示踪

2 个全岩样品计算的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值比较高, 为 $-1.54 \sim -2.87$, 按刘昌实等 (1990) 模拟计算, 其物源中地幔端元所占比例为 $63\% \sim 69\%$, 与福建晶洞花岗岩地幔组分占 $53.7\% \sim 65.4\%$ 相当 (邱检生等, 2000), 说明地幔组分在其源区岩石中起重要作用。据赵子杰 (1986) 测定, 南昆山花岗岩氧同位素组成为 $\delta^{18}\text{O} = 7.9\% \sim 9.8\%$, 平均为 8.9% ($n = 3$), 如以地幔和地壳 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为 6% 和 12% 计算 (郑永飞, 1999), 8.9% 相当于地幔组分占 $52\% \pm$ (图 8), 与钨同位素组成分析结果基本一致, 这表明铝质 A 型花岗岩源区可能处在壳-幔边界上的地幔物质与地壳物质相互作用带内。高 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值 ($19.377 \sim 19.502$) 和高 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值 ($15.741 \sim 15.835$) 反映这一壳-幔作用带长期在地幔上涌流体交代下具有“富集型”元素组合的特点 (Zindler *et al.*, 1986)。

表4 南昆山花岗岩 Sr、Nd、Pb 同位素组成

Table 4 Sr, Nd, Pb isotopic compositions of Nankunshan granite

样号	$w(\text{Rb})/10^{-6}$	$w(\text{Sr})/10^{-6}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	结果			
FG5-1Bi	5407	6.780	3666.0	6.76449 ± 99	$t = 111 \pm 16\text{Ma}$			
FG5-1Kf	1497	5.896	844.4	2.25387 ± 99	$I_{\text{Sr}} = 0.94 \pm 0.26$			
FG5-1WR	765.1	16.230	142.3	1.17329 ± 50	MSWD=3.6			
样号	$w(\text{Sm})/10^{-6}$	$w(\text{Nd})/10^{-6}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	t/Ma	I_{Nd}	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	t_{DM}/Ga
FG5-1WR	53.38	269.4	0.11980	0.512435 ± 15	111	0.51235	-2.87	1.14
FG6-1WR	38.70	227.0	0.10310	0.512491 ± 11	111	0.51242	-1.54	1.03
样号	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	μ	Th/U			
FG5-1WR	19.337 ± 0.01	15.835 ± 0.01	39.791 ± 0.01	9.84	3.85			
FG6-1WR	19.502 ± 0.01	15.741 ± 0.01	39.642 ± 0.01	9.65	3.69			

注: Bi—黑云母单矿物; Kf—钾长石单矿物; WR—全岩。

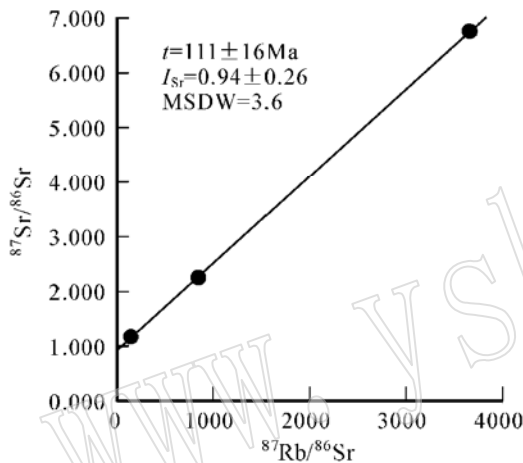


图7 南昆山铝质A型花岗岩 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解
Fig. 7 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ diagram of aluminous A-type Nankunshan granite

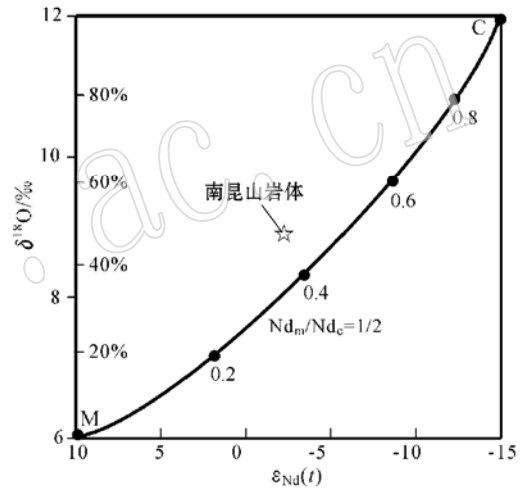


图8 $\delta^{18}\text{O} \text{‰}$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(据郑永飞, 1999)
Fig. 8 $\delta^{18}\text{O} \text{‰}$ versus $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram(after Zheng Yongfei, 1999)

4 成岩模拟

许多学者尽管看法上有差异(Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1990; Eby, 1992), 但几乎一致认为铝质A型花岗岩源区应处在下地壳位置(King *et al.*, 1997)。但与I型源区不同,A型源区应是经过地幔流体交代而成为饱满型源区(fertile)(King *et al.*, 1997; Zindler *et al.*, 1986), 即富集碱质和HFSE元素。最理想的源区岩石应是饱满型长英质麻粒岩(King *et al.*, 1997)。考虑到Nb、Ta在熔体形成后的斜长石分离结晶过程中丰度不会受到分离结晶的干扰, 本文以Nb、Ta作为简单的部分熔融地球化学模拟的例子。以Rudnick & Fountain (1995)给出的后太古宙地壳长英质麻粒岩化学成分

和微量元素数据为依据, 计算的源区岩石标准矿物组合为: Il 0.9%, Ap 0.25%, Cpx 0.99%, Pl 41.94%, Kf 14.89%, Q 30.11%, $\text{Co}^{\text{Nb}} 13 \times 10^{-6}$, $\text{Co}^{\text{Ta}} 0.8 \times 10^{-6}$ 。南昆山花岗岩熔体(FG5-1)标准矿物组合为 Il 0.09%, Ap 0.05%, Cpx 0.26%, Pl 35.70%, Kf 24.09%, Q 35.72%, $\text{Ce}^{\text{Nb}} 106 \times 10^{-6}$, $\text{Ce}^{\text{Ta}} 11 \times 10^{-6}$ 。据Nash & Crecraft (1985)提供的英安质熔体元素的矿物/熔体分配系数, 计算总体分配系数 $D_{\text{Nb}} = 0.033$, $P_{\text{Nb}} = 0.024$, $D_{\text{Ta}} = 0.049$, $P_{\text{Ta}} = 0.021$, 以批式熔融公式 $f = (C_0/C_e - D)/(1 - P)$ 计算, 得熔体分数 $f_{\text{Nb}} = 0.09$, $f_{\text{Ta}} = 0.03$, 表明这种熔融应是低度熔融或称近固相线熔融。在地幔物质上涌而不断提供足够流体(CO_2 、 H_2O 、F等)的情况下和在拉张构造环境里这种低度熔融使熔体可以离开残留体上升到地壳高位(King *et al.*, 1997)。最

近, Pin 等(2001)在超镁铁岩体中发现较大规模的富 Si、Al、Na 的硅铝质岩脉, 表明在以二辉橄榄岩为源岩情况下, 0.5%~0.7% 的批式熔融也可以产生富 Na ($\text{Na}_2\text{O} = 9.84\% \sim 10.2\%$)、Si ($\text{SiO}_2 = 63.3\% \sim 64.1\%$) 的过铝质熔体(含刚玉)。这种熔体极富 HFSE 元素, 证明地幔岩的低度熔融可以形成富碱富

HFSE 的过铝熔体。由此引伸, 在壳-幔作用带, 不同成分麻粒岩低度熔融形成过铝 A 型熔体是一种最合理的解释。批式熔融在南昆山铝质 A 型花岗岩元素协变关系中也有所反映, 如 Ga-Al、Ba-La 变异中(图 9) 都呈现出很好的线性关系, 再次证明低度批式熔融的真实可信性。

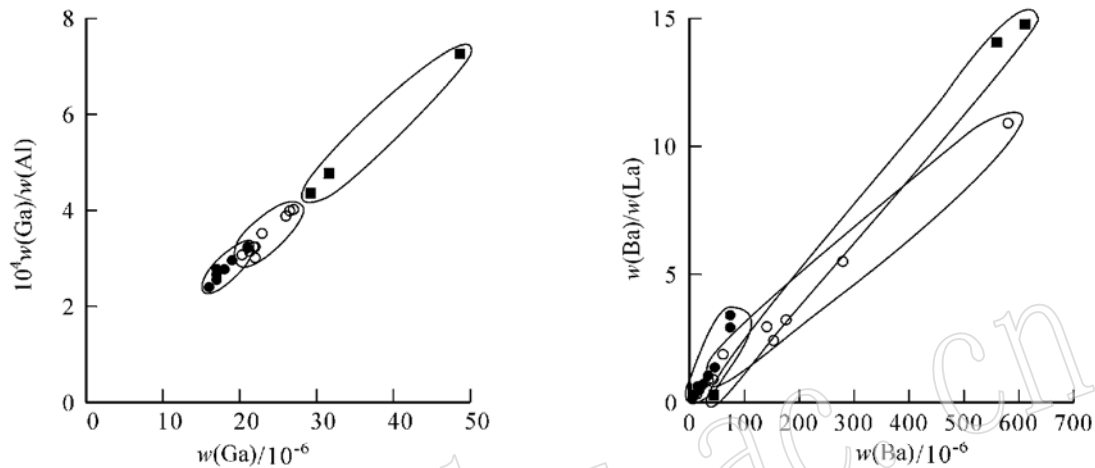


图 9 南昆山、苏州、乌山铝质 A 型花岗岩 $10^4 \text{Ga}/\text{Al}$ -Ga 和 Ba/La-Ba 相关图解

Fig. 9 $10^4 \text{Ga}/\text{Al}$ -Ga and Ba/La-Ba correlation diagram for Nankunshan, Suzhou and Wushan aluminous A-type granites

○—苏州花岗岩; ⊗—乌山花岗岩; ■—南昆山花岗岩
○—Suzhou granite; ⊗—Wushan granite; ■—Nankunshan granite

5 小 结

(1) 南昆山花岗岩在化学成分上为弱过铝质 ($\text{A}/\text{NKC} = 1.01 \sim 1.04$), 略富碱质 ($\text{NK}/\text{A} = 0.869 \sim 0.898$), 富 F ($5.536 \times 10^{-6} \sim 9.054 \times 10^{-6}$), 锆石饱和温度高(平均 833°C), $10^4 \text{Ga}/\text{Al}$ 值 ($4.36 \sim 7.36$) 和 ($\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$) 值 ($456 \times 10^{-6} \sim 585 \times 10^{-6}$) 高, 富钒系、钽系和稀有金属元素(Nb、Ta)等。这些特征与世界各地非造山铝质 A 型花岗岩相似。

(2) 据矿物-全岩 Rb-Sr 等时线测定, 南昆山花岗岩形成年龄为 $111 \pm 16 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 3.6$), 是早白垩世晚期花岗质侵入体, 与福建沿海晶洞 A 型花岗岩形成年龄 ($90 \text{ Ma} \pm$) 极其接近。

(3) 南昆山花岗岩具有高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 ($-1.54 \sim -2.87$) 和略低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 ($7.9\% \sim 9.8\%$), 按模拟计算其源区岩石中地幔组分占 $63\% \sim 69\%$ (钕同位素数据) 和 52% (氧同位素数据), 表明源区位于幔-壳边界相互作用带内。以饱满型长英质麻粒岩为源岩, 约 3% (对于 Ta) $\sim 9\%$ (对于 Nb) 低度部分熔

融可以形成南昆山花岗质熔体。

致 谢 在野外工作中得到中科院广州地球化学研究所夏斌、赵振华、李献华、牛贺才、熊小林研究员和黄小龙博士的协助和指导, 在此表示衷心感谢。

References

- Charoy B, Raimbault L. 1994. Zr, Th, and REE-rich biotite differentiates in the A-type granite pluton of Suzhou (Eastern China): the key role of fluorine [J]. *J. Petrol.*, 35: 919~962.
- Chen Xiaoming, Wang Rucheng, Liu Changshi, et al. 2002. Isotopic dating and genesis for Fogang biotite granites of Conghua area, Guangdong Province [J]. *Geological Journal of China Universities*, 8 (3): 293~307 (in Chinese with English abstract).
- Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to south-eastern Australia [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80: 189~200.
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations of their petrogenesis [J]. *Lithos*, 26: 115~134.
- Eby G N. 1992. Chemical Subdivision of the A-type granitoids: Petro-

- genetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20: 641~ 644.
- Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas [M]. U. S. Geol. Survey Prof Paper, 354~ B.
- Hong Dawei, Guo Wenqi, Li Gejing, *et al.* 1987. Petrology and Genetic Evolutions of Mirolitic Granite Belts in Fujian Coastal Area [M]. Beijing: Beijing Science Technical Press, 1~ 50 (in Chinese with English abstract).
- King P L, White A J R, Chappell B W, *et al.* 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, Southeastern Australia [J]. *J. Petrol.*, 38: 371~ 391.
- Liu Changshi, Zhu Jinchu, Shen Weizhou, *et al.* 1990. Classification and source materials of continental crust transformation series granitoids in south China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 3(3): 287~ 298.
- Loiselle M C, Wones D R. 1979. Characteristics of anorogenic granite [J]. *Geological Society of America Abstracts with programs*, 11: 468.
- Nash W P, Crecraft H R. 1985. Partition coefficients for trace elements in silicic magmas[J]. *Geochim Cosmochim. Acta*, 49: 2 309~ 2 322.
- Pearce J A, Harris P N, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *J. Petrol.*, 25(4): 956~ 983.
- Pin C, Paquette J L, Monchoux P, *et al.* 2001. First field scale occurrence of Si₂Al₂Na₂ rich low degree partial melt from the upper mantle [J]. *Geology*. 29: 451~ 454.
- Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Satoshi Kanisawa, *et al.* 2000. Geochemistry and petrogenesis of aluminous A-type granite in the coastal area of Fujian Province [J]. *Geochimica*. 29(4): 313~ 320 (in Chinese with English abstract).
- Rudnick R L, Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective[J]. *Rev. Geophys.*, 33: 267~ 309.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and process[A]. Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basin*[C]. Geological Society Special Publication, 313~ 345.
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin. 2002. The ascertainment of Late_Yanshanian A-type granite in Tong bai_Dabie orogenic belt [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(4): 297~ 306 (in Chinese with English abstract).
- Watson E B. 1979. Zircon saturation in felsic liquids: experimental data and applications to trace element geochemistry [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 70: 407~ 419.
- Whalen J B, Carre K L, Chappell B W. 1987. A type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 95: 407~ 419.
- Wones D R, Eugster H P. 1965. Stability of biotite [J]. *Amer. Mineral.*, 50: 1 228~ 1 272.
- Zhao Zijie, Ma Daquan, Liu Huikun, *et al.* 1986. The geochemical characteristics and geological setting of the formation of Longwo and Fogan granitoids batholith, Guangdong Province[A]. *Select Paper for Investigations of Geology and Mineral Resource in Nanling area* [C]. Wuhan: Press of Wuhan Geological College, 28~ 68 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei. 1999. Geochemistry of stable isotopes in the mantle [A]. Zheng yonfei. *Chemical Geodynamics* [C]. Beijing: Beijing Science Press (in Chinese with English abstract).
- Zindler A. 1986. Chemical geodynamics[J]. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14: 493~ 571.

附中文参考文献

- 陈小明, 王汝成, 刘昌实, 等. 2002. 广东从化佛冈(主体)黑云母花岗岩定年和成因[J]. *高校地质学报*, 8(3): 293~ 307.
- 洪大卫, 郭文岐, 李戈晶. 1987. 福建沿海晶洞花岗岩带的岩石学和成因演化 [M]. 北京: 北京科技出版社.
- 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 等. 2003. 广东从化石岭方钠石正长岩岩石学特征和起源[J]. *地质评论* (待刊).
- 刘昌实, 朱金初, 沈渭洲, 等. 1990. 华南陆壳改造系列花岗岩类型划分和成岩物质来源[J]. *地质学报*, 6(41): 43~ 51.
- 邱检生, 王德滋, 蟹泽聪史, 等. 2000. 福建沿海铝质 A 型花岗岩体地球化学和岩石成因 [J]. *地球化学*, 29(4): 313~ 321.
- 王 强, 赵振华, 熊小林. 2002. 桐柏- 大别造山带燕山晚期 A 型花岗岩的厘定[J]. *岩石矿物学杂志*, 19(4): 297~ 306.
- 赵子杰, 马大铨, 林惠坤, 等. 1986. 广东龙窝、佛冈花岗岩类岩体地球化学特征及其形成地质背景[A]. *南岭地质矿产科研报告集* [C]. 武汉地质学院出版社, 28~ 68.
- 郑永飞. 1999. 地幔稳定同位素地球化学[A]. 郑永飞. *化学地球动力学* [C]. 北京: 科学出版社, 62~ 119.