文章编号:0379 - 1726(2000)04 - 0313 - 09

福建沿海铝质 A 型花岗岩的地球化学及岩石成因

邱检生[1,2], 王德滋[2], 蟹泽聪史[3], Brent I A McInnes[4]

(1. 南京大学 成矿作用国家重点实验室, 江苏 南京　210093; 2. 南京大学 地球科学系, 江苏 南京　210093; 3. 日本东北大学 理学院 矿物岩石矿床研究所, 仙台　980-8578; 4. CSIRO Division of Exploration and Mining, P.O. Box 136, North Ryde, NSW 2113, Australia)

摘　要:以乌山、金刚山和新村三个典型岩体为例,系统研究了福建沿海铝质 A 型花岗岩的地质和地球化学特征。研究结果表明,铝质 A 型花岗岩常含有锰铝榴石、富锰白云母等特征的富铝矿物,化学成分上相对富铝,为一套准铝到弱过铝的岩石组合,并具有贫磷、贫钛,氧化指数较低等特征。与碱性花岗岩相比,其 Nb、Ta、Zr、Hf、Ga、Y 和 Zn 等元素的含量及稀土总量和 Ga/Al 比值均偏低,但轻、重稀土的分馏程度(尤其是重稀土的分馏程度)较高。两类岩石具有相似的稀土和微量元素分布模式,并具有相似的钕同位素组成,$\varepsilon_{Nd}(t)$ 值分别变化于 - 4.28～ - 6.12 和 - 3.45～ - 5.21 之间,表明两者具有相似的岩浆源区,均为壳幔物质混熔的产物。根据对两类岩石矿物组合及地球化学特征的综合分析,推测岩浆体系中 F、Cl 含量的差异引起的岩浆分异演化途径的不同是导致两者具不同地球化学特征的主要原因。

关键词:铝质 A 型花岗岩;地球化学;岩石成因论;福建省

中图分类号:P594;P581　　**文献标识码**:A

0　引　言

福建沿海 A 型花岗岩分布在政和 - 大埔断裂以东的中生代火山岩区,有大小岩体近百个,构成一条展布方向与海岸线近于平行的 NNE 向岩带(图 1)。按岩石组合特点,该岩带的岩石类型主要可区分为两类,一类为含有碱性铁镁矿物的碱性花岗岩,在区内分布较少,岩石以富碱或过碱为特征;另一类为碱长(或钾长)花岗岩,是区内 A 型花岗岩的主体岩性,岩体中常含有锰铝榴石或白云母,岩石以富铝或过铝为特征。前人对区内 A 型花岗岩曾进行过不同程度的研究[1～4],特别是对以魁歧岩体为代表的碱性花岗岩已有相当丰富的资料积累。洪大卫等[2]在对区内晶洞花岗岩进行专题研究时注意到该 A 型岩带占压倒优势的岩石类型是偏碱性过铝质含黑云母晶洞花岗岩,并对其与魁歧等典型碱性花岗岩的地球化学差别及产生的原因进研了一定探讨;周若等[3]也系统对比了新村岩体与魁歧岩体地球化学特征的差异,但对产生差异的原因未作深入研究。总的来看,与碱性花岗岩相比,区内铝质 A 型花岗岩的研究相对薄弱。本文拟以乌山、金刚山和新村三个典型岩体为例,在与魁歧岩体综合对比的基础上,对区内铝质 A 型花岗岩的地球化学特征进行系统总结,并探讨岩石的成因。

1　岩体地质

铝质 A 型花岗岩主要分布在福建南部,濒海作 NE 向展布,其中以乌山、金刚山和新村岩体规模最大,出露面积分别为 144.8、165.1 和 74 km^2 [1)],是区内铝质 A 型花岗岩的典型代表(图 1)。岩体与围岩呈明显的侵入接触关系,接触面多内倾,侵入的最新地层为早白垩世石帽山群火山岩。根据已有的同位素年龄资料,金刚山岩体的全岩 Rb-Sr 等时年龄为(92 ±3) Ma[2],新村岩体的全岩 - 矿物 Rb-Sr 等时年龄为(97.12 ±2.32) Ma[3],与魁歧岩体的侵位年龄(93 ±1) Ma(Rb-Sr 法)[4]相似,表明它们均为晚白垩世岩浆活动的产物。铝质 A 型花岗岩和碱性花岗岩在空间上多与 I 型花岗岩共生,构成 I-A 型复

收稿日期:2000 - 01 - 02;**修订日期**:2000 - 04 - 20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(49632080)

作者简介:邱检生(1965 -),男,博士、副教授,岩石学及地球化学专业。

1) 福建地质局区测队,漳州幅、东山幅区域地质调查报告(1 ∶20 万),1974。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

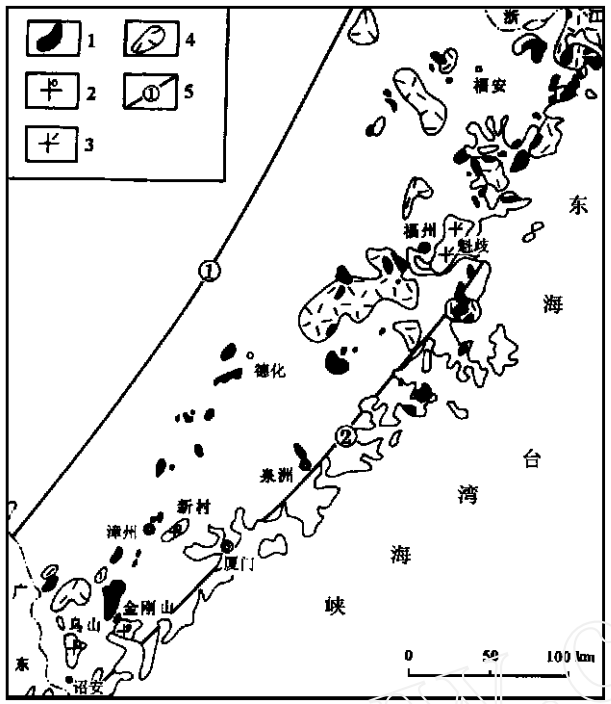


图 1 福建沿海 A 型花岗岩分布略图(据刘金全等[1]底图改绘)

Fig. 1 Geological sketch map showing the distribution of A-type granites in the coastal area of Fujian Province

1. A 型花岗岩; 2. 典型铝质 A 型花岗岩; 3. 典型碱性花岗岩; 4. 白垩纪火山岩; 5. 断裂。

合岩体,如新村岩体是漳州复式岩体的组成部分,魁岐岩体是福州复式岩体的组成部分,在 A 型花岗岩体定位之前均有早期的花岗闪长岩及二长花岗岩等 I 型岩体侵入,两类 A 型花岗岩均作为复式岩体的晚期相产出。

2 岩石学和矿物学

铝质 A 型花岗岩的组成矿物主要为石英 (> 30 %)、钾长石 (50 %～65 %) 和斜长石 (10 %～20 %),铁镁矿物的含量很低(< 2 %),且主要为黑云母。按 QAP 定量矿物分类,区内铝质 A 型花岗岩的岩石类型主要为钾长花岗岩。岩石普遍发育显微文象结构和晶洞构造,表明岩体定位较浅。晶洞中常充填有各种矿物,晶洞中的矿物组合与碱性花岗岩有较明显的区别,铝质 A 型花岗岩的晶洞中或其副矿物组合中常有石榴子石、白云母等富铝矿物,在金刚山、乌山岩体中还发现有刚玉 1),而碱性花岗岩的晶洞中常充填碱性铁镁矿物。铝质 A 型花岗岩中的石榴子石呈褐红 - 棕红色,多与萤石、白云母共生,充填在石英与钾长石的间隙中,在晶洞中石榴子石尤为发育,呈完好的晶型长在石英或钾长石的表面。化学成分上具有明显的富锰特征,MnO 含量变化于 35. 62 %～39. 23 %之间,计算的端员组分中锰铝榴石分子多在 90 %以上 (表 1),表明其种属应为锰铝榴石。这种石榴子石与 S 型过铝质花岗岩中的石榴子石明显不同,后者多为铁铝榴石。由于在结晶分异过程中,岩浆体系的 Mn/ (Mg + Fe) 比值随分异作用而递增[5],区内锰铝榴石的出现一方面反映其为岩浆晚期结晶的产物,另一方面也说明铝质 A 型花岗质岩浆经历了高程度的分异演化作用。白云母除与萤石、石榴子石及红钛锰矿共生外,更多地出现在岩体内部的晶洞中,与石英、钾长石等构成伟晶岩囊状体。其化学成分也具富锰特征,MnO 含量变化于 1. 08 %～1. 96 %,并富氟,氟含量介于 2. 29 %～2. 50 %(表 2)。乌山、金刚山岩体中偶见霓石,表明区内铝质 A 型花岗岩兼具富铝和富碱特征,而碱性花岗岩的铝通常是不饱和的[6]。

3 岩石化学

表 3 列出了区内铝质 A 型花岗岩典型岩体代表性岩石样品的化学成分及主要岩石化学参数。由表 3 可知:铝质 A 型花岗岩具有富硅、富碱、富氟,贫钙、镁、铁的主元素特征,是一类超酸富碱的高分异花岗岩。结合前人已有的资料[1～4,7,8],我们着重对比了铝质 A 型花岗岩与碱性花岗岩在化学成分上的差异。与碱性花岗岩相比,铝质 A 型花岗岩的化学成分具有以下特点: (1) 相对富铝,绝大多数样品的 Al_2O_3 含量在 12 %以上,A/ NKC 值一般大于 0. 95,属准铝质或弱过铝质 A 型花岗岩,而碱性花岗岩的 Al_2O_3 含量则普遍低于 12 %, A/ NKC 值变化范围较大,但一般小于 0. 95。(2) 过碱指数 (AKI 值) 较低,均在 1. 0 以下,而碱性花岗岩则多大于 1. 0,在 AKI 值对 A/ NKC 值关系图上,两类花岗岩的 AKI 值与A/ NKC 值之间均具较明显的反消长关系 (图 2a)。(3) Fe_2O_3 含量普遍低于碱性花岗岩(图 2b),氧化指数 (W 值) 变化范围较大,但总体低于碱性花岗岩,统计资料表明:铝质 A 型花岗岩的 W 值主要变化于 0. 30～0. 80, 而碱性花岗岩的 W 值则多变化于 0. 60～0. 90,说明碱性花岗岩形成于相对氧化的介质环境。(4) 多阳离子参数 R_2 值较高, 主要变

1) 刘金全,吴克隆,严炳诠,福建省晶洞花岗岩的研究,福建省地质矿产局科研报告,1985。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　福建沿海铝质 A 型花岗岩中石榴子石探针成分

Table 1　Microprobe compositions of garnets from aluminous A-type granites in the coastal area of Fujian Province

产地		乌山				金刚山					新村	
样号		Ws-5(1)	Ws-5(2)	Ws-6(1)	Ws-6(2)	Jg-8(1)	Jg-8(2)	Jg-8(3)	Jg-8(4)	Jg-8(5)	c-2-3a	c-2-3b
测定点数		2	2	5	4	4	4	6	3	6	1	1
化学成分(%)	SiO_2	34.68	35.04	35.02	34.71	34.34	34.49	34.66	35.01	34.34	34.63	34.54
	TiO_2	0.07	0.08	0.07	0.06	0.14	0.07	0.14	0.20	0.11	0.18	0.20
	Al_2O_3	20.33	20.66	20.80	20.68	20.43	20.42	19.98	19.85	20.26	19.21	18.86
	TFeO	5.62	5.75	4.88	4.65	4.91	5.31	5.82	5.99	5.36	8.76	8.07
	MnO	39.23	38.75	38.67	38.76	38.27	38.51	38.09	37.93	38.55	35.62	36.61
	MgO	0.05	0.05	0.11	0.13	0.08	0.11	0.14	0.15	0.11	0.09	0.10
	CaO	0.25	0.23	0.88	0.99	0.59	0.57	0.72	0.73	0.68	0.77	1.02
	Na_2O	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01	0.03		
	总量	100.25	100.58	100.44	100.00	98.78	99.49	99.58	99.87	99.44	99.26	99.40
端员组分(%)	Alm	4.99	6.82	6.00	5.18	6.19	5.76	4.72	4.54	4.98	9.88	4.79
	And	0.76	0.69	0.90	0.86	0.91	0.99	1.10	1.14	1.01	1.67	1.55
	Gro			1.72	2.10	0.87	0.74	1.12	1.12	1.06	0.72	1.68
	Pyr	0.21	0.21	0.46	0.54	0.34	0.46	0.60	0.64	0.47	0.39	0.44
	Spe	94.04	92.28	90.92	91.33	91.69	92.05	92.47	92.57	92.49	87.34	91.55

注:Alm. 铁铝榴石;And. 钙铁榴石;Gro. 钙铝榴石;Pyr. 镁铝榴石;Spe. 锰铝榴石。新村岩体中石榴子石成分引自文献[3],其余为本文资料,数据由日本东北大学理学院矿物岩石矿床研究所电子探针室测定。

样号一行括号内数字为同一薄片内不同矿物颗粒的编号。

表 2　福建沿海铝质 A 型花岗岩中白云母探针成分(%)

Table 2　Microprobe compositions (%) of muscovites from aluminous A-type granites in the coastal area of Fujian Province

产地	样号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	TFeO	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	Rb_2O	总量	F	资料来源
乌山	Ws-5-1-1	50.19	0.10	28.14	6.39	1.81	0.45	0.14	9.66	0.37	97.25	2.50	本文
乌山	Ws-5-1-2	49.65	0.17	27.89	6.19	1.89	0.37	0.13	9.78	0.33	96.40	2.29	本文
乌山	Ws-5-1-3	46.69	0.14	29.10	6.58	1.96	0.11	0.15	9.92	0.28	94.93	2.38	本文
乌山	Ws-5-2-1	49.47	0.09	26.41	5.80	1.32	1.26	0.11	9.91	0.21	94.58	2.44	本文
乌山	Ws-5-2-2	48.90	0.13	28.69	6.06	1.08	0.87	0.12	9.97	0.20	96.02	2.31	本文
金刚山	F3444	46.53	0.36	25.71	5.68	1.60	2.71	0.32	11.32		94.23		文献[2]
新村	FQ18	46.04	0.37	25.76	6.77	1.71	1.62	0.32	10.82		93.41		文献[2]
新村	1	48.61	0.16	27.07	6.16	1.65	1.94	0.41	9.31		95.31		文献[3]

注:表内乌山数据由日本东北大学理学院矿物岩石矿床研究所电子探针室测定。

化于 280～340 之间,而碱性花岗岩的 R_2 值变化范围较大,但多数样品小于 280。(5) Ti 和 P 的含量均很低,有相当比例样品的 P_2O_5 含量在 0.01 %以下,这点与相对富铝的 S 型花岗岩明显有别,后者常具较高的 P_2O_5 含量(一般大于 0.10 %),且随分异作用的进行 P_2O_5 有递增的趋势[9],因此,铝质 A 型花岗岩与 S 型花岗岩富铝的内在原因可能存在本质差别,其 Ti 和 P 显著偏低的特点反映岩浆经历了高程度的钛铁矿、磷灰石等矿物的分离结晶作用。

4　稀土元素及微量元素地球化学

铝质 A 型花岗岩的 ΣREE 值变化于 91.41～160.50 μg/ g 之间,稀土总量较之魁歧碱性花岗岩偏低(表 4);LREE/ HREE 比值介于 5.38～9.27 之间,轻、重稀土的分馏程度低于尼日利亚及我国山海关等地产于裂谷、类裂谷环境的钠闪石花岗岩[10,11],但普遍高于魁歧碱性花岗岩,其中尤以重稀土的分

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3 福建沿海铝质 A 型花岗岩代表性岩石样品的岩石化学成分(%)、主要岩石化学参数及其与碱性花岗岩的对比

Table 3 Petrochemical compositions (%) and predominant petrochemical parameters of the representative samples from the typical aluminous A-type granites in the coastal area of Fujian Province, and their comparisons with alkaline granites

岩性	铝质 A 型花岗岩									碱性花岗岩		
产地	新 村			金 刚 山				乌 山		魁 岐		
样号	Xc-3	Xc-5	Xc-8	Jg-3	Jg-5	Jg-6	Jg-9	Ws-2	Ws-3	Fz-1	Fz-7	Fz-22
SiO_2	77.11	77.46	76.83	77.47	77.13	77.21	77.34	78.04	78.79	76.48	77.55	77.68
TiO_2	0.12	0.12	0.13	0.12	0.12	0.13	0.13	0.09	0.07	0.15	0.15	0.15
Al_2O_3	12.58	12.26	12.62	12.37	12.26	12.26	12.15	12.06	11.56	11.49	11.49	11.27
Fe_2O_3	0.40	0.48	0.53	0.68	0.63	0.71	0.69	0.66	0.52	1.38	1.39	1.32
FeO	0.27	0.26	0.23	0.10	0.17	0.12	0.15	0.07	0.1	0.22	0.13	0.20
MnO	0.05	0.06	0.04	0.06	0.07	0.05	0.06	0.08	0.06	0.08	0.05	0.05
MgO	0.05	0.05	0.10	0.05	0.05	0.05	0.10	0.16	0.14	0.40	0.05	0.05
CaO	0.86	0.75	0.75	0.68	0.68	0.68	0.61	0.42	0.32	0.96	0.51	0.33
Na_2O	4.17	4.04	4.04	4.32	4.39	4.24	4.39	4.04	3.84	4.32	4.53	4.49
K_2O	4.55	4.34	4.59	4.22	4.22	4.28	4.22	3.98	3.88	4.40	4.28	4.04
P_2O_5	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01
烧失	0.25	0.25	0.22	0.22	0.25	0.35	0.21	0.18	0.25	0.60	0.29	0.31
总量	100.41	100.07	100.08	100.29	99.97	100.08	100.05	99.81	99.56	100.50	100.42	99.89
F($\times 10^{-6}$)	1 026	1 327	913	1 102	1 134	1 296	1 263	1 472	1 567	976	1 149	1 282
ALK	8.72	8.38	8.63	8.54	8.61	8.52	8.61	8.02	7.72	8.72	8.81	8.53
N/K	0.92	0.93	0.88	1.02	1.04	0.99	1.04	1.02	0.99	0.98	1.06	1.11
AKI	0.94	0.93	0.92	0.94	0.96	0.95	0.97	0.91	0.91	1.03	1.05	1.04
A/NKC	0.94	0.96	0.97	0.96	0.94	0.95	0.94	1.03	1.04	0.84	0.88	0.91
W	0.60	0.65	0.70	0.87	0.79	0.86	0.82	0.90	0.84	0.86	0.91	0.87
R_1	2 570	2 687	2 586	2 616	2 567	2 611	2 580	2 811	2 958	2 486	2 513	2 592
R_2	341	323	333	318	316	316	309	289	268	348	282	259
DI	95.7	95.6	95.3	96.1	96.3	96.1	96.5	96.0	96.6	93.5	95.3	95.8

注: 1. ALK = $K_2O + Na_2O$; N/K = Na_2O/K_2O; AKI = $(K_2O + Na_2O)/Al_2O_3$, 分子比; A/NKC = $Al_2O_3/(Na_2O + K_2O + CaO)$, 分子比; W = $Fe_2O_3/(Fe_2O_3 + FeO)$; $R_1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)$, 原子比之和; $R_2 = 6Ca + 2Mg + Al$, 原子比之和; DI. 分异指数。

2. F 在日本东北大学理学院矿物岩石矿床研究所用选择性离子电极法测定, 其余由南京大学地球科学系用湿法化学分析法测定。

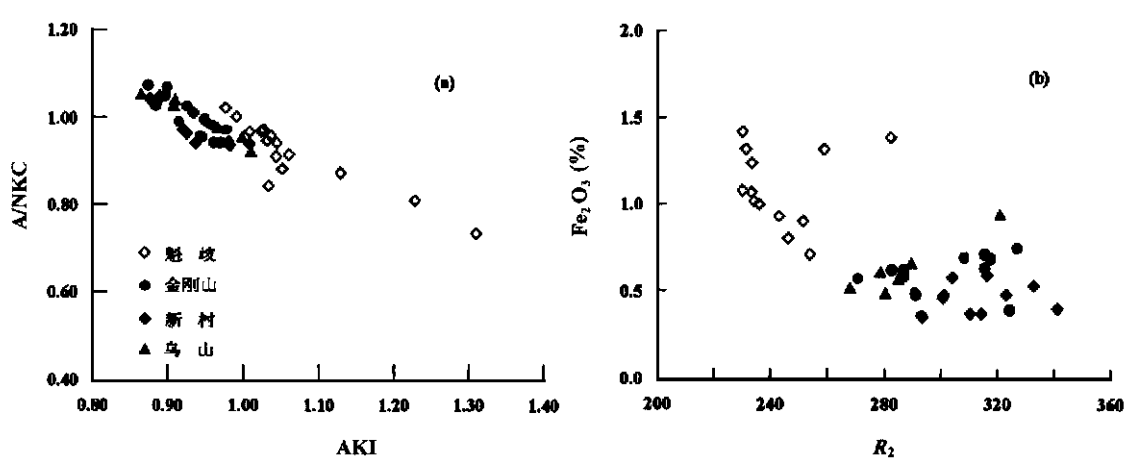


图 2 铝质 A 型花岗岩与碱性花岗岩 A/NKC-AKI (a) 及 Fe_2O_3-R_2 (b) 关系图

Fig. 2 A/NKC versus AKI (a) and Fe_2O_3 *versus* R_2 (b) diagrams of aluminous A-type granites and alkaline granites in the coastal area of Fujian Province

除本文资料外,图中尚引用了文献[2,3,7,8]的资料。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

馏程度更明显,两者的 $(Gd/Yb)_N$ 值分别变化于 0.74～1.42 和 0.22～0.88 之间(图 3),表明铝质 A 型花岗岩在成岩过程中有较多的富重稀土矿物(如角闪石、辉石等)发生分离,这与这类岩石中铁镁矿物含量很低的矿物组成特点一致。铝质 A 型花岗岩与碱性花岗岩均具有较显著的铕负异常,δEu 值分别变化于 0.15～0.35 之间和 0.28～0.36 之间,两者相对于球粒陨石标准化的分布模式也相似(图 4),说明两类花岗岩的源区组成及成岩方式不存在本质差别,稀土总量及轻、重稀土比值的差异可能主要与岩浆演化的具体途径不同有关。

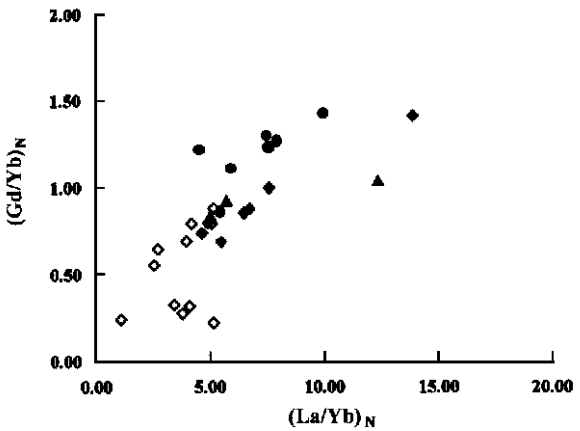


图 3　铝质 A 型花岗岩与碱性花岗岩 $(Gd/Yb)_N$-$(LaYb)_N$ 关系图

Fig. 3　$(Gd/Yb)_N$ versus $(LaYb)_N$ diagram of aluminous A-type granites and alkaline granites in the coastal area of Fujian Province

图例同图 2。除本文资料外,图中尚引用了文献[2,3,7,8]资料。

微量元素特征上,铝质 A 型花岗岩富 Rb,贫 Sr、Ba,其 Rb/Sr 及 Rb/Ba 比值分别为 37.83～243.00 和 3.03～35.71(表 5),这同样反映岩石经历了高程度的分异演化作用。岩石富 U、Th 等放射性生热元素,贫 V、Co、Ni 等过渡族元素,10 000 ×Ga/Al 比值变化于 2.42～3.16,较 I 型、S 型花岗岩的平均值(分别为 2.1 和 2.28)[12]适度偏高,在 Whalen *et al*.[12]提出的以 Ga/Al 比值为基础的多种判别图

表 4　福建沿海典型铝质 A 型花岗岩代表性岩石样品的稀土元素含量(μg/g)及其与碱性花岗岩的对比

Table 4　REE abundance (μg/g) of the representative samples from the typical aluminous A-type granites in the coastal area of Fujian Province, and their comparison with alkaline granites

岩性	铝质 A 型花岗岩									碱性花岗岩		
产地	新　村			金　刚　山				乌　山		魁　歧		
样号	Xc-3	Xc-5	Xc-8	Jg-3	Jg-5	Jg-6	Jg-9	Ws-2	Ws-3	Fz-1	Fz-7	Fz-22
La	32.38	33.92	35.70	33.76	37.93	24.36	23.94	25.34	21.78	43.00	43.09	46.38
Ce	58.96	62.32	64.92	60.39	67.41	45.19	44.73	45.3	35.88	77.91	76.86	81.13
Pr	7.19	7.18	7.50	6.57	7.34	5.07	5.07	4.91	3.93	9.21	9.41	8.80
Nd	24.18	25.56	25.47	21.94	25.20	15.75	15.78	16.18	12.71	30.10	30.44	28.49
Sm	4.65	4.92	4.92	4.06	4.57	3.18	3.23	3.43	2.65	5.66	6.27	6.01
Eu	0.50	0.53	0.52	0.41	0.51	0.20	0.20	0.19	0.14	0.69	0.69	0.60
Gd	4.53	4.66	4.40	3.82	4.32	3.36	3.37	3.68	3.07	5.83	7.10	7.03
Tb	0.71	0.72	0.66	0.61	0.69	0.57	0.56	0.66	0.55	0.97	1.21	1.20
Dy	4.01	4.05	3.49	3.52	3.97	3.60	3.45	4.34	3.67	5.92	7.60	7.54
Ho	0.92	0.92	0.79	0.88	0.95	0.92	0.87	1.03	0.86	1.51	1.93	1.92
Er	2.75	2.74	2.36	2.82	2.99	3.01	2.83	3.16	2.62	4.98	6.36	6.31
Tm	0.45	0.45	0.38	0.50	0.51	0.53	0.49	0.51	0.40	0.86	1.06	1.14
Yb	3.05	3.05	2.56	3.60	3.58	3.77	3.50	3.63	2.74	6.08	7.39	8.41
Lu	0.42	0.43	0.36	0.53	0.53	0.55	0.51	0.58	0.42	0.93	1.11	1.32
Y	25.86	24.91	21.43	26.09	27.43	28.03	26.64	32.73	28.64	44.22	65.53	57.48
ΣREE	144.70	151.45	154.03	143.41	160.50	110.06	108.53	112.94	91.41	193.65	200.52	206.28
LREE/REE	7.59	7.90	9.27	7.81	8.15	5.75	5.97	5.42	5.38	6.15	4.94	4.92
$(La/Yb)_N$	7.62	7.98	10.00	6.73	7.60	4.63	4.91	5.00	5.71	5.07	4.18	3.96
$(La/Sm)_N$	4.50	4.45	4.68	5.37	5.36	4.95	4.78	4.76	5.30	4.90	4.44	4.98
$(Gd/Yb)_N$	1.23	1.26	1.42	0.88	1.00	0.74	0.80	0.84	0.93	0.79	0.79	0.69
δEu	0.33	0.33	0.33	0.31	0.35	0.19	0.18	0.16	0.15	0.36	0.32	0.28

注:由南京大学成矿作用国家重点实验室用 ICP-AES 方法测定。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

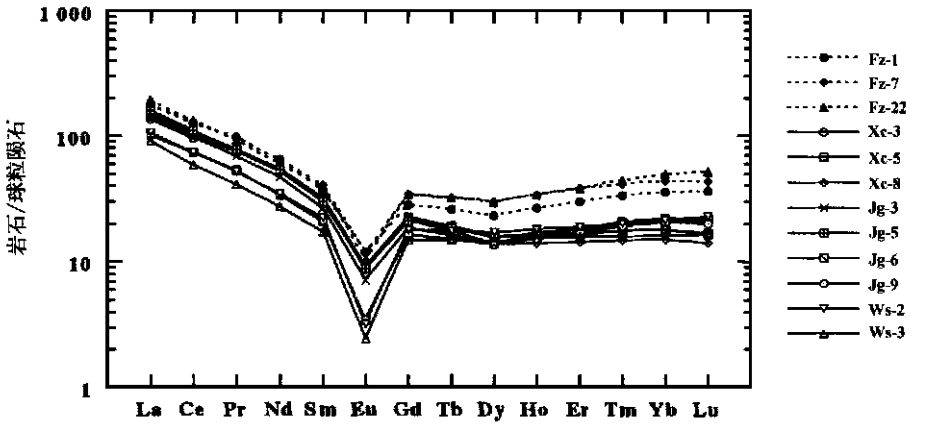


图 4 铝质 A 型花岗岩与碱性花岗岩稀土元素球粒陨石标准化分布模式

Fig. 4 Chondrite-normalized REE distribution patterns of aluminous A-type granites and alkaline granites in the coastal area of Fujian Province

表 5 福建沿海典型铝质 A 型花岗岩代表性岩石样品的微量元素含量(μg/g)及其与碱性花岗岩的对比

Table 5 Trace element contents (μg/g) of the representative samples from the typical aluminous A-type granites in the coastal area of Fujian Province, and their comparison with alkaline granites

岩性	铝质 A 型花岗岩									碱性花岗岩		
产地	新村			金刚山				乌山		魁歧		
样号	Xc-3	Xc-5	Xc-8	Jg-3	Jg-5	Jg-6	Jg-9	Ws-2	Ws-3	Fz-1	Fz-7	Fz-22
Rb	241	244	243	269	227	250	240	224	229	243	264	232
Sr	1	3	1	2	6	6	3	5	5	34	7	5
Ba	< 34	< 46	< 25	< 8	< 18	7	< 15	74	74	16	2	< 21
U	12.80	9.80	10.50	10.60	10.40	10.40	9.05	6.00	6.00	5.02	6.55	12.10
Th	36.40	35.30	35.80	36.70	35.20	36.90	35.60	26.00	25.00	28.40	22.00	64.50
Nb	24	21	17	32	26	29	22	25	25	31	34	45
Ta	2.24	2.24	1.85	2.88	2.38	2.55	2.26			2.70	3.11	4.37
Zr	66	70	72	88	93	82	85	90	78	281	260	496
Hf	4.20	4.10	3.85	5.78	5.41	5.47	5.12	3.00	3.00	12.40	11.80	22.20
Ga	16	18	17	21	18	21	19	17	17	21	22	23
Sc	2.15	2.19	2.02	2.42	1.91	2.04	2.06	6.00	4.00	4.89	5.09	6.22
Y	26	28	24	31	32	31	31	32	33	44	68	66
V	1	6	5	6	4	2	3	7	7	< 4	< 2	4
Co	< 1	3	2	5	1	1	1	5	5	4	< 1	3
Ni	< 5	< 6	< 8	4	< 4	< 7	< 8	2	3	2	< 7	4
Pb	43	43	42	43	38	39	36	35	23	76	40	63
Zn	39	32	32	40	39	49	40	23	27	136	137	150
Ga/Al*	2.42	2.70	2.49	3.16	2.70	3.18	2.89	2.66	2.78	3.40	3.59	3.19
Rb/Sr	241.00	81.33	243.00	134.50	37.83	41.67	80.00	44.80	45.80	7.15	37.71	46.40
Rb/Ba	> 7.09	> 5.30	> 9.72	> 33.63	> 12.61	35.71	> 16.00	3.03	3.09	15.19	132.00	11.05

注：乌山岩体样品微量元素由南京大学现代分析中心用 XRF 方法测定，其余样品由 Australia CSIRO Division of Exploration and Mining 测定，其中 Rb、Sr、Ba、Nb、Zr、Ga、Y、V、Co、Ni、Pb、Zn 采用 XRF 方法，U、Th、Ta、Hf、Sc 采用 INAA 方法；Ga/Al* 表示 10 000 × Ga/Al。

上，绝大多数样品落入 A 型花岗岩区(图 5a～e)，在 A KI-Ga/Al 关系图上则全部落在 A 型花岗岩区(图 5f)。其微量元素相对于原始地幔标准化的分布模式与魁歧碱性花岗岩也相似(图 6)，但 Nb、Ta、Zr、Hf、Ga、Zn 等元素的含量及 Ga/Al 比值均低于碱性花岗岩(表 5)。根据已有的成岩温度估测资料，两类花岗岩的成岩温度均较高，如魁歧、新村和乌山岩体石英熔融包裹体的均一温度都在 800 ℃以上[1)]，表明源区岩石均经历了较充分的熔融。因此，上述微量

1) 刘金全，吴克隆，严炳诠，福建省晶洞花岗岩的研究，福建省地质矿产局科研报告，1985。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

元素含量的差异并非由源区残留相组成的不同所引起，而更可能是岩浆分异演化的具体途径不同所致。洪大卫等[2]也主张两类岩石都是岩浆充分分异演化的产物，但分异演化的具体途径可能不同。另外,实验资料表明,这些元素在过碱性熔体中的溶解度大于铝质熔体中的溶解度[13]，这也可能是导致它们在两类花岗岩中含量不同的原因之一。

5　Sr、Nd 同位素地球化学

区内铝质 A 型花岗岩的 I_{Sr} 值具有较大的变化范围,个别样品甚至出现低于 0.700 0 的不合理结果,显然这是由于 A 型花岗岩具有低的锶含量和高的 Rb/Sr 比值,使得年龄对 I_{Sr} 值的校正极为敏感,且测试过程中易产生误差所致。因此,我们认为 A 型花岗岩的锶同位素组成不具有明确的成因意义,在使用中应特别谨慎,而钕同位素组成则能有效地反映 A 型花岗岩的岩浆源区性质。由表 6 知,铝质A型花岗岩的 I_{Nd} 值变化于 0.512 200～0.512 300,$\varepsilon_{Nd}(t)$ 值介于 -4.28～-6.12,其钕同位素组成与魁歧碱性花岗岩不存在明显差别，说明两者的岩浆源区相似,均为壳幔物质混熔作用的产物。按黄萱

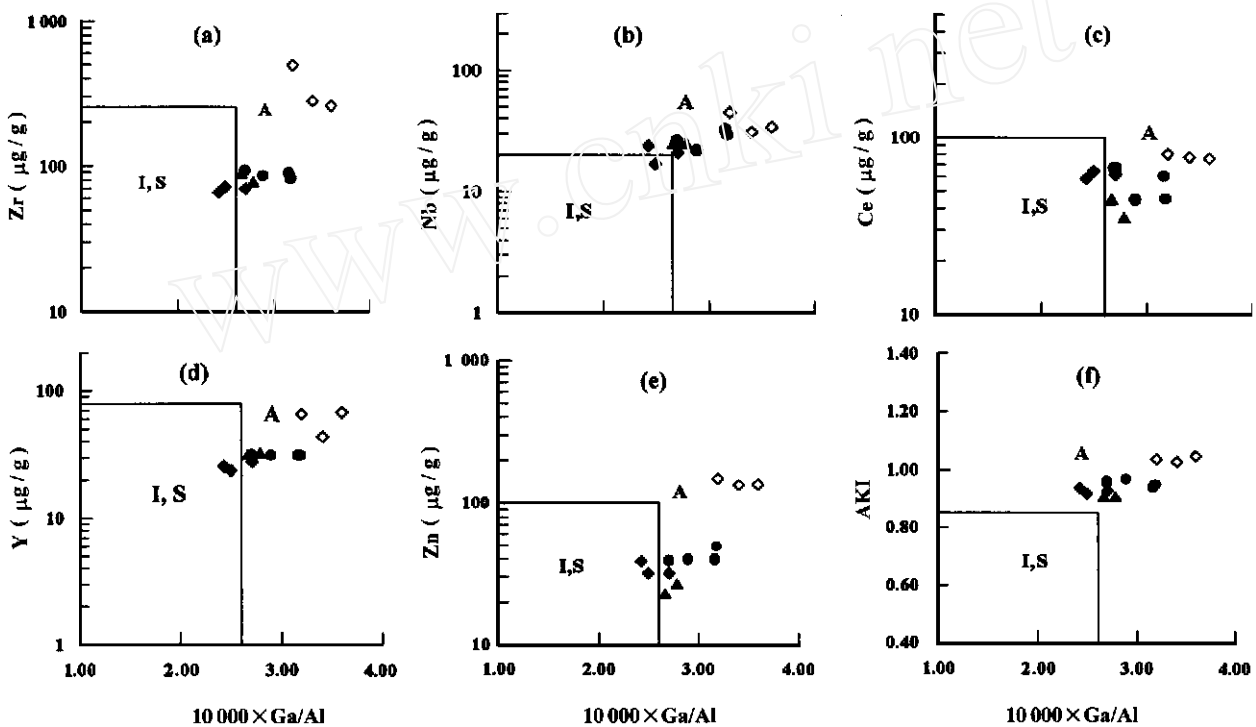


图 5　铝质 A 型花岗岩 Zr、Nb、Ce、Y、Zn 含量及 AKI 值 - 10 000×Ga/Al 关系图

Fig. 5　Zr, Nb, Ce, Y, Zn and AKI *versus* 10 000×Ga/Al plots of aluminous A-type granites in the coastal area of Fujian province

底图据文献[12]，图例同图 2。

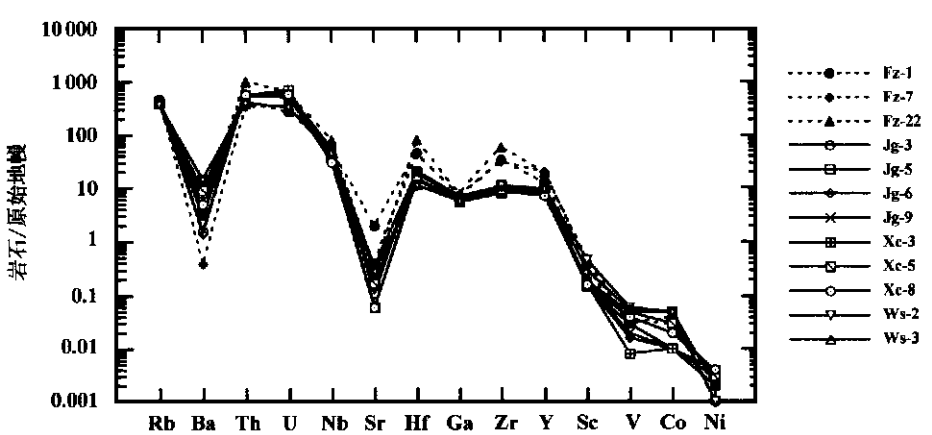


图 6　铝质 A 型花岗岩与碱性花岗岩微量元素相对于原始地幔标准化的分布模式

Fig. 6　Primordial mantle-normalized trace element distribution patterns of aluminous A-type granites and alkaline granites in the coastal area of Fujian Province

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 6 福建沿海典型铝质 A 型花岗岩代表性岩石样品的 Sr、Nd 同位素组成及其与碱性花岗岩的对比

Table 6 Sr and Nd isotopic compositions of the representative samples from the typical aluminous A-type granites in the coastal area of Fujian Province, and their comparison with alkaline granites

样 号	产 地	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	t(Ma)	I_{Sr}	I_{Nd}	$\varepsilon_{Nd}(t)$	地幔比例(%)
Xc-5	新 村	150.4	0.913 555 ± 18	0.145 4	0.512 292 ± 7	97.1	0.706 04	0.512 200	−6.12	53.7
Jg-5	金刚山	157.1	0.909 648 ± 20	0.126 0	0.512 372 ± 8	92.0	0.704 28	0.512 296	−4.36	64.9
Jg-9	金刚山	157.0	0.915 681 ± 23	0.125 8	0.512 376 ± 8	92.0	0.710 44	0.512 300	−4.28	65.4
Ws-3	乌 山	253.5	1.040 680 ± 16	0.131 0	0.512 342 ± 7	95.0	0.698 48	0.512 261	−4.98	61.4
Fz-22(1)	魁 岐	102.9	0.838 989 ± 24	0.165 9	0.512 352 ± 8	93.0	0.703 01	0.512 251	−5.21	59.9
Xkq-2	魁 岐	54.1	0.779 504 ± 22	0.122 2	0.512 416 ± 9	93.0	0.707 96	0.512 342	−3.45	69.6

注：1. 地幔物质比例按文献[14]方法计算；2. 样号为 Ws-3 的模式年龄 95.0 是根据区内类似岩体年龄推测值的。

同位素数据由中国科学院地质研究所同位素实验室测定。

等[14]对福建白垩纪岩浆岩研究提出的幔壳物质比例估算方法，区内铝质 A 型花岗岩中地幔物质的混入比例为 53.7%～65.4%(表 5)。

6 岩石成因讨论

以富碱、贫水和非造山三方面特点为标志的 A 型花岗岩一般是碱过饱和，而铝则不饱和[6]，但许多学者注意到 A 型花岗岩常常包括碱过饱和的碱性花岗岩和准铝、弱过铝、有时甚至是强过铝的铝质 A 型花岗岩[9,15～17]。King *et al*.[9]认为铝质 A 型花岗岩不应与碱性花岗岩归为同一类，两者具不同的地球化学特征，并有不同的成因，其中铝质 A 型花岗岩起源于具正常水含量的长英质下地壳的部分熔融，而碱性花岗岩则为相对“干”的幔源镁铁质岩浆分异的产物。Poitrasson *et al*.[15,16]也主张铝质 A 型花岗岩起源于下部地壳物质的部分熔融，但他们认为下地壳源区的成分应主要是镁铁质的，而碱性花岗岩则为幔源岩浆与下地壳物质相互作用的产物。Anderson *et al*.[17]认为铝质 A 型花岗岩应起源于低 f_{H_2O}、高 f_O 的过铝质下地壳变质沉积岩的部分熔融。尽管各家观点对铝质 A 型花岗岩的源区物质组成的认识存在一定分歧，但他们均一致主张铝质 A 型花岗岩与碱性花岗岩有不同的源区，而钕同位素资料显示，福建沿海铝质 A 型花岗岩与碱性花岗岩有相似的岩浆源区，两者均为幔壳物质混熔的产物。由于岩石的钕同位素组成不受岩浆分异演化的影响，因此区内两类岩石地球化学特征的差异最可能为岩浆分异演化的具体途径不同所致，而并非由岩浆源区的差异所引起，前面稀土元素及微量元素的研究也得出类似的结论。从两类岩石的矿物组合来看，铝质 A 型花岗岩铁镁矿物含量很低，且主要为黑云母，并有一定的斜长石含量（10%～20%）及锰铝榴石和白云母等富铝矿物，而碱性花岗岩斜长石含量极低，但有一定量的碱性铁镁矿物，这一矿物组合的差别充分显示两者的分异演化途径不同。众多的研究资料[18～20]表明，岩浆体系中 F、Cl 含量的差异可显著地影响岩浆的分异演化方向，如果 A 型岩浆富氟，则有利于角闪石的分离结晶而使岩浆向过铝质方向演化；如果富 Cl，则有利于斜长石的分离结晶而使岩浆向过碱性方向演化，这些研究结果与本区两类花岗岩的矿物组合一致，因此，我们认为岩浆体系中 F、Cl 含量的差异而引起的岩浆分异演化途径的不同可能是导致本区两类岩石具不同地球化学特征的主要原因。

日本学术振兴会（Japan Society for the Promotion of Science）为第一作者赴日合作研究提供经费资助；日本东北大学理学院矿物岩石矿床研究所电子探针室伊藤嘉纪先生协助进行了探针成分测定，谨此一并致谢。

参考文献：

[1] 王德滋，彭亚鸣，袁朴. 福建魁岐花岗岩的岩石学和地球化学及成因探讨[J]. 地球化学，1985，14(3)：197～205.

[2] 洪大卫，郭文岐，李戈晶，等. 福建沿海晶洞花岗岩带的岩石学和成因演化[M]. 北京：北京科学技术出版社，1987. 128p.

[3] 周珣若，吴克隆. 漳洲 I-A 型花岗岩[M]. 北京：科学出版社，1994. 1～148.

[4] Martin H, Bonin B, Didier J, *et al*. 中国东南部福州花岗质杂岩的岩石学和地球化学[J]. 地球化学，1991，20(2)：101～111.

[5] Miller C F, Stoddard E F. The role of manganese in the paragenesis of magmatic garnet: An example from the old Woman-Piute range, California [J]. J Geol, 1981, 89: 233～246.

[6] Loiselle M C, Wones D R. Characteristics and origin of anoro-

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

genicgranites [J]. Geol S Am Abstracts, 1979, 11: 468.

[7] 彭亚鸣, 袁朴. 福建魁歧碱性花岗岩特征及其成因类型 [J]. 南京大学学报, 1984, 20(4): 740～752.

[8] 吴郭泉. 福州复式岩体的组成及其演化[J]. 岩石学报, 1991,(2): 81～88.

[9] King P L, White A J R, Chappell B W, *et al*. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia [J]. J Petrol, 1997, 38(3):371～391.

[10] Bowden P, Kinnaird J A. The petrology and geochemistry of alkaline granites from Nigeria [J]. Phys Earth Planet Int, 1984, 35:199 ～211.

[11] 许保良, 黄福生, 王式. 山海关碱性花岗岩 (A 型) 岩石学和地球化学特征及其成因类型[A]. 北京大学地质学系. 岩石圈地质科学[C]. 北京: 北京大学出版社, 1990. 158～170.

[12] Whalen J B, Currie K, Chappell B W. A-type Granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contrib Mineral Petrol, 1987, 95: 407～419.

[13] Watson E B. Zircon saturation in felsic liquids: Experimental data and applications to trace element geochemistry [J]. Contrib Mineral Petrol, 1979, 70: 407～419.

[14] 黄萱, 孙世华, DePaolo D J. 福建省白垩纪岩浆岩 Nd、Sr 同位素研究[J]. 岩石学报, 1986, 2(2):50～63.

[15] Poitrasson F, Pin C, Duthou J-L, et al. Aluminous subsolvus anorogenic granite genesis in the light of Nd isotopic heterogeneity[J]. Chem Geol, 1994, 112: 199～219.

[16] Poitrasson F, Duthou J-L, Pin C. The relationship between petrology and Nd isotopes as evidences for contrasting anorogenic granite genesis: example of theCorsican Province (SE France) [J]. J Petrol, 1995, 36:1 251～1 274.

[17] Anderson J L, Thomas W M. Proterozoic anorogenic two-mica granites: Silver Plume and St. Vrain batholiths [J]. Geology, 1985, 13:177～180.

[18] Whalen J B. A-type granites in New Brounswick [J]. Geol Surv Can Paper, 1986, 1A: 297～300.

[19] Clemens J D, Holloway J R, White A J R. Origin of an A-type granite: Experimental contraints [J]. Am Minerd. 1986, 71: 317～324.

[20] Charoy B, Raimbault L. Zr-, Th-, and REE-rich biotite differentiates inthe A-type granite pluton of Suzhou (Eastern China): the key role of fluorine[J]. J Petrol, 1994, 35(4): 919～962.

Geochemistry and petrogenesis of aluminous A-type granites in the coastal area of Fujian Province

QIU Jian-sheng[1,2], WANG De-zi[2], Satoshi Kanisawa[3], Brent I A McInnes[4]

(1. *State Key Laboratory of Mineral Deposit Research of Nanjing University, Nanjing* 210093, *China*; 2. *Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing* 210093, *China*; 3. *Institute of Mineralogy, Petrology and Economic Geology, Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan*; 4. *CSIRO Division of Exploration and Mining, P.O. Box* 136, *North Ryde, NSW* 2113, *Australia*)

Abstract: The geological and geochemical characteristics of aluminous A-type granites in the coastal area of Fujian Province have been studied systematically by citing three rock masses of Wushan, Jingangshan and Xincun as typical examples. Investigation results have shown that the aluminous A-type granites often contain aluminous-rich minerals, such as spessartine and manganese-rich muscovite, etc. Chemically, they are relatively rich in aluminum, and can be ascribed to a suite of metaluminous to weakly peraluminous rock association. They arealso poor in phosphorus and titanium, and have lower $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+FeO)$ ratios. Compared with the alkaline granites, aluminous A-type granites have lower Nb, Ta, Zr, Hf, Ga, Y and Zn contents, ΣREE values and Ga/Al ratios, but higher LREE/HREE ratios, especially $(Gd/Yb)_N$ ratios, and display similar REE and trace element distribution patterns. The Nd isotope compositions of aluminous A-type granites and alkaline granites are also similar, with $\varepsilon_{Nd}(t)$ values ranging from - 4.28～- 6.12 and - 3.45～- 5.21, respectively, which indicates that the source components of them are similar and both were originated from the partial meltingof crust-mantle mixing materials. Based on a comprehensive analysis of the mineral associations and geochemical features of the two types of granites, it is conjectured that the different differentiation tendencies resulted from the variant F, Cl contents in magmas may be the main reason that cause the different geochemical characteristics of the two type granites.

Key words: aluminous A-type granite; geochemistry; petrogenesis; Fujian Province

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net