

再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义

李献华 李武显 李正祥

(中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室, 广州 510640; 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029; Institute of Geoscience Research, Department of Applied Geology, Curtin University of Technology, GPO Box U1987, Perth WA 6845, Australia. E-mail: lixh@gig.ac.cn)

摘要 中国东南部南岭地区广泛出露的燕山早期(侏罗纪)花岗岩与稀有金属成矿作用有非常密切的关系, 这些花岗岩以弱过铝质黑云母二长花岗岩和黑云母钾长花岗岩为主, 并和一些规模较小的含角闪石花岗岩和含白云母±石榴子石的浅色花岗岩在时-空上密切共生。在以往的文献中, 这些黑云母花岗岩一般被认为是陆壳改造型(相当于 S 型)花岗岩, 是区域元古代变质沉积岩重熔的产物。对南岭燕山早期一些代表性花岗岩的岩石化学特征和 $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ 相关关系进行了系统的分析研究, 结果显示这些花岗岩的 $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ 均呈明显的负相关关系, 表明南岭燕山早期的含角闪石花岗岩-黑云母二长花岗岩-黑云母钾长花岗岩-二(白)云母花岗岩为准铝质-弱过铝质的 I 型/分异 I 型花岗岩演化系列, 其源岩主要为元古代火成岩, 少量新生地壳和/或地幔分异物质很可能参与了花岗岩的形成。同时, 这些 I 型/分异 I 型花岗岩在时空上和 A 型酸性、基性火山/侵入岩以及碱性岩密切共生, 构成了一个比较典型的板内非造山火成岩组合, 反映了燕山早期南岭及邻区大陆岩石圈以伸展背景为主。

关键词 花岗岩 成因分类 燕山早期 南岭 华南 岩石圈伸展

南岭地区广泛出露花岗岩, 其中大部分是燕山早期(侏罗纪)花岗岩(图 1), 与稀有金属矿产有非常密切的关系, 是中国花岗岩与成矿作用研究的摇篮。在 20 世纪 80 年代, 南岭花岗岩的成因分类研究基本上与国际同类研究同步, 如 Xu 等人^[1]提出的同熔型、陆壳改造型和幔源型, 在中国的花岗岩研究中得到比较广泛的应用; 王联魁等人^[2]提出的“南岭系列”和“长江系列”两个花岗岩成岩成矿序列, 则侧重于花岗岩的演化系列及其与成矿作用的关系。20 世纪 90 年代以后, 随着大量同位素地球化学资料的积累, 对同熔型和改造型花岗岩的物质来源研究有了长足的进步。目前一般的认识是同熔型花岗岩是指地幔和地壳物质的“混源”和两个端元物质的相互作用形成的, 相当于 I 型花岗岩, 而改造型花岗岩主要由元古代变质沉积岩经部分熔融形成, 相当于 S 型花岗岩^[3,4]。

随着同位素年代学分析技术的进步, 特别是近年来高分辨率高灵敏度离子探针的引进和应用, 华南各类火成岩积累了相当数量的高质量年代学数据资料。图 2 是南岭及邻区燕山早期火成岩高精度年龄的汇总^[5], 显示主要集中在两个阶段, 即第 1 阶段的

180~170 Ma 和第 2 阶段的 165~150 Ma。

燕山早期最早的花岗岩浆活动记录是赣南的柯树北岩体(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 (189 ± 3) Ma^[6])和湖南沅山巷子口岩体(LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄为 (187 ± 4) Ma^[7])。

第 1 阶段(180~170 Ma)的岩浆活动规模比较小。目前可靠的年代学资料显示这个阶段的岩浆活动主要是陆续分布于湘南-赣南-闽西南的双峰式火山岩、赣南地区的铝质 A 型花岗岩和共生的辉长岩^[8-12]、以及湘东南与铜多金属矿有关的一些花岗闪长岩小岩体^[13]和赣东北赋存超大型斑岩铜矿的德兴石英闪长质-花岗闪长质斑岩^[14]。

第 2 阶段(165~150 Ma)花岗岩规模巨大, 构成南岭及邻区燕山早期花岗岩的主体。岩石类型以黑云母花岗岩为主(包括许多出露面积 >500 km² 的大型花岗岩基), 同时伴有少量偏中性的花岗闪长岩、超酸性的二(白)云母花岗岩、A 型花岗岩和钾质碱性正长岩侵入体以及湘南道县地区很小规模的“高镁玄武岩”^[15]。

值得注意的是南岭燕山早期花岗岩一个重要的岩相学特征是黑云母花岗岩占绝大多数。这些花岗

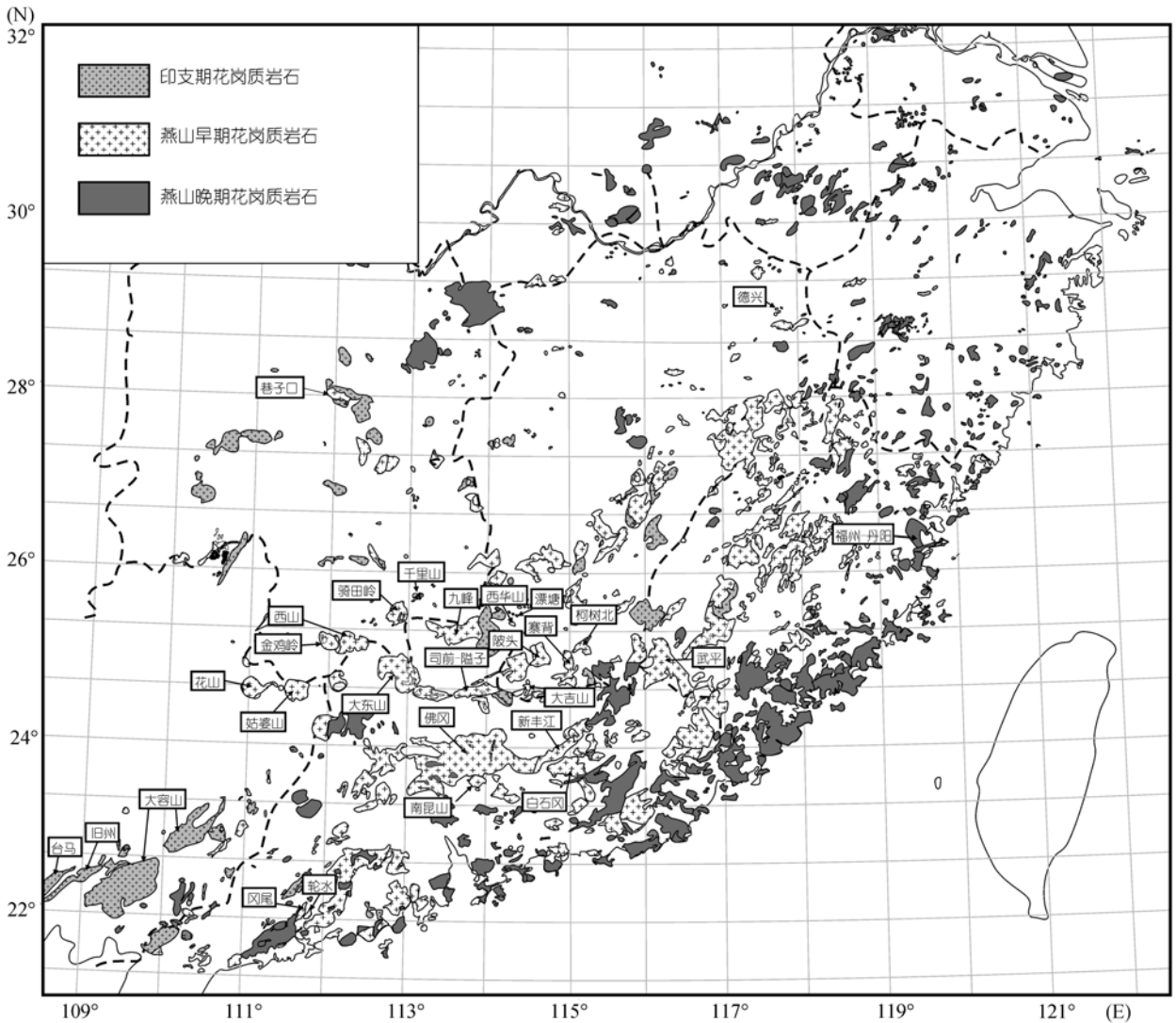


图1 南岭及邻区中生代花岗岩分布概图及本研究涉及的岩体

岩在岩石化学上通常为弱过铝质，造岩矿物为黑云母、石英和两种长石，既不含I型花岗岩的特征矿物角闪石，也没有S型花岗岩的特征富铝矿物。同时，黑云母花岗岩也常常和一些出露规模较小的含角闪石的花岗闪长岩/二长花岗岩和含白云母±石榴子石的浅色花岗岩在时-空上密切共生，组成典型的“南岭系列”花岗岩 [2]，即：二长花岗岩→黑云母花岗岩→浅色(白云母或二云母)花岗岩→花岗斑岩/石英斑岩系列，其中含角闪石的花岗闪长岩/二长花岗岩和浅色(白云母或二云母)花岗岩的矿物组成和铝饱和指数分别和I型和S型花岗岩相对应。这个系列的花岗岩在岩石地球化学上常显示出与典型I型或S型花岗岩一些不同或过渡的特征，因此造成了成因类型划分

上的困难和争议，例如对佛冈花岗岩(出露面积>6000 km²，是南岭最大和最有代表性的花岗岩基)就有S型、I型和铝质A型花岗岩的不同认识 [15-18]。

本文将根据磷灰石在准铝质和强过铝质花岗岩浆中溶解度不同的性质，通过花岗岩的 SiO₂ 与 P₂O₅ 的相关性判断其母岩浆的铝饱和度，为南岭燕山早期花岗岩的成因分类提供进一步的岩石化学依据，并探讨这些花岗岩形成的地球动力学背景。

1 花岗质岩浆中磷灰石的溶解度

1.1 前人的实验结果

磷灰石富集 REE, Th 和 U，是花岗岩中的主要副矿物之一。在花岗岩浆结晶分异演化过程中，磷灰石

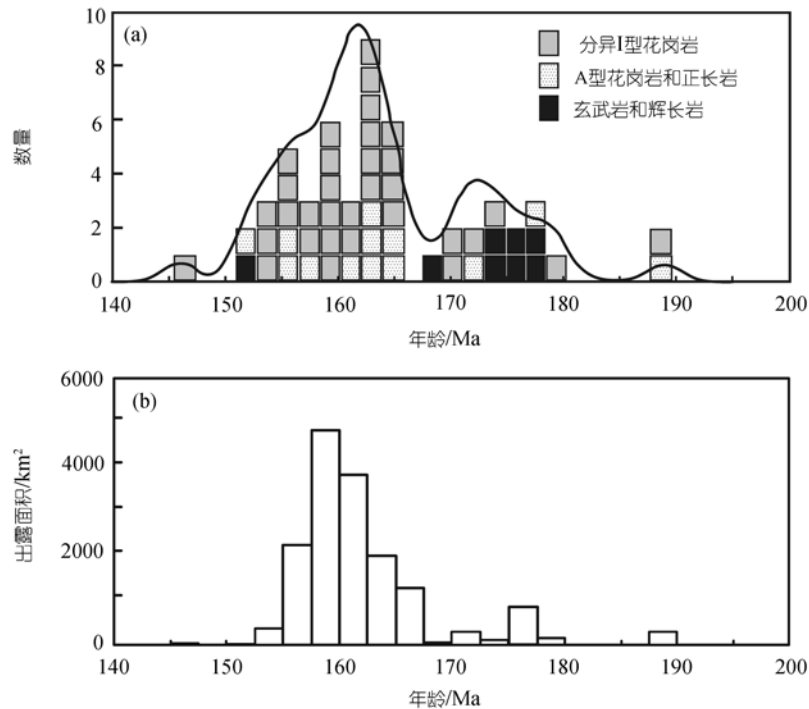


图 2 南岭及邻区燕山早期花岗岩的年龄统计图(a)和相应岩体的出露面积统计图(b) (据Li 等人 [15])

对REE, Th和U等元素的变化有非常重要的影响. 大量的实验研究表明, 在准铝质/弱过铝质(A/CNK < 1.1)和过碱性花岗岩浆中, 磷灰石的溶解度很低, 大约只有 0.1 wt% (wt%表示质量分数, 下同) P₂O₅, 并且磷灰石的溶解度随着温度的降低和岩浆的分异演化SiO₂的增加而降低; 相反, 在强过铝质岩浆中 (A/CNK为 1.1~1.3), 磷灰石的溶解度随A/CNK的增加而呈线形增加, 当A/CNK为 1.3 时, P₂O₅可高达 0.63 wt% [19-23]. 这些实验结果的重要意义是证明了磷灰石在准铝质/弱过铝质和过碱性花岗岩浆中总是优先结晶的矿物, 而残余岩浆的P₂O₅越来越低, 因此I型和A型花岗岩的P₂O₅将随着SiO₂的增高而降低, 并导致强分异I型和A型花岗岩的P₂O₅含量非常低; 相反, 高的溶解度使磷灰石在强过铝质花岗岩浆中主要呈不饱和状态而不会优先结晶(花岗岩中的P₂O₅一般小于 0.4%, 很少达到P₂O₅的最高饱和浓度), 因此S型花岗岩的P₂O₅将随着SiO₂的增加而呈增高或基本不变的趋势. S型花岗岩高度分异后的残余熔浆中, Al³⁺ + P⁵⁺ 置换 2Si⁴⁺, P可以进入到碱性长石, 使少数强分异S型花岗岩和花岗质伟晶岩有很高的P₂O₅含量 [24,25].

1.2 典型 I 型和 S 型花岗岩的 SiO₂-P₂O₅ 相关关系

Chappell [26]系统总结了澳大利亚Lachlan褶皱带

中I型和S型花岗岩的SiO₂-P₂O₅相关关系(图 3), 所有I型花岗岩的P₂O₅随SiO₂增加而降低, 特别是当SiO₂ > 75%时, 绝大多数样品的P₂O₅ < 0.05%; 而S型花岗岩的SiO₂和P₂O₅分布在一个非常分散的“三角形”区域, 从偏基性端的P₂O₅ ≈ 0.15%向超酸性端的两个方向演化, P₂O₅从~0.02%变化到~0.42%. 大多数酸性S型花岗岩的P₂O₅ > 0.1%. 只有很少酸性S型花岗岩的P₂O₅ < 0.05%是例外, 这些花岗岩样品均来自Bullenbalong超单元, 是从低P₂O₅岩浆中结晶的, 而其母岩浆中的残留体含有很高的P₂O₅. 欧洲西Carpathian山脉的海西期I型和S型花岗岩也有类似的SiO₂-P₂O₅相关关系 [25].

本文对华南一些典型的I型和S型花岗岩的岩石化学数据做了总结, 其中I型花岗岩包括三峡地区的新元古代黄陵TTG岩套 [27]、粤西阳春侏罗纪的岗尾-轮水高钾钙碱性花岗闪长岩 [28]以及福建沿海的白垩纪福州-丹阳钙碱系列花岗岩 [29]; S型花岗岩包括新元古代~820 Ma的江西九岭和安徽董青石花岗岩 [27]以及三叠纪的广西大容山(包括旧州、台马等)董青石花岗岩 [30]. 图 3 显示了这些典型I型和S型花岗岩的SiO₂-P₂O₅相关关系, 可以看出单个岩基或岩套I型花岗岩的SiO₂-P₂O₅呈非常好的负相关关系, 黄陵TTG

岩套和岗尾-轮水花岗闪长岩的SiO₂变化范围非常大(SiO₂ = 61%~76%), P₂O₅从偏基性时的~0.2%降低到酸性时的~0.04%; 福州-丹阳花岗岩也有类似的SiO₂变化范围, SiO₂-P₂O₅也呈明显的负相关关系, 只是P₂O₅的变化范围更大一些, 从偏基性时的~0.24%降低到酸性时的~0.02%(图3(a)). 九岭-皖南以及大容山S型堇青石花岗岩样品的SiO₂ = 65%~75%, 与I型花岗岩相反, 所有这些堇青石花岗岩P₂O₅在0.1%~0.2%之间波动, 与SiO₂没有相关关系(图3(b)).

型S型花岗岩^[27]. 与高分异I型花岗岩相比, 这些淡色花岗岩的P₂O₅明显较高(0.1%~0.2%), 而且与SiO₂无相关关系. 黑云母花岗岩包括本洞、蒙洞、寨滚、龙有等岩体, 出露面积较小(约85 km²), 其造岩矿物包括石英、钾长石、斜长石和10%~17%黑云母, 但不含角闪石, 化学成分从中性变化到酸性(SiO₂ = 60%~70%), 均为过铝质(A/CNK = 1.0~1.3), 有较高的CaO/Na₂O (>0.3)和较低的Rb/Sr (0.6~1.9)与Rb/Ba (0.2~0.5), 是富长石的砂屑质沉积岩重熔形成的S型花岗岩^[27]. 这些黑云母花岗岩的P₂O₅含量与淡色花岗岩相当, P₂O₅与SiO₂呈现弱的正相关关系, 其基性端元的P₂O₅约为0.09%~0.13%、酸性端元的P₂O₅约为0.12%~0.2%, 明显不同于高分异I型花岗岩.

2 南岭燕山早期代表性花岗岩体的成因类型

2.1 ~190 Ma 柯树北花岗岩

柯树北岩体出露于赣南信丰、安远交界, 出露面积约300 km², 岩性主要为中粒黑云母二长花岗岩和黑云母钾长花岗岩, 造岩矿物组成为20%~30%石英、45%~55%钾长石、15%~25%奥长石(An=15~30)和5%~10%黑云母; 副矿物主要有锆石、磷灰石、磷钇矿和黄铁矿. 分析结果(表1)显示出柯树北花岗岩样品的SiO₂介于69%~78%, 过铝质(A/CNK = 1.01~1.28, 图3(b)), P₂O₅含量<0.08%. SiO₂与P₂O₅呈弱的负相关关系(图4(a)). 样品的Ga, Nb, Zr和Y含量高, 10000×Ga/Al = 2.7~4.3, 是典型的铝质A型花岗岩(图4(b), (c)).

2.2 第阶段A型花岗岩

代表性的A型花岗岩是赣南的寨背和陂头岩体. 寨背花岗岩位于柯树北岩体之南, 出露面积约300 km², 岩性主要为粗粒钾长花岗岩, SHRIMP锆石U-Pb年龄为(172±5) Ma, 与共生的车步辉长岩的SHRIMP锆石U-Pb年龄(173±4) Ma完全一致^[10]; 陂头岩体位于粤北-赣南交界、寨背岩体之西, 出露面积约1250 km², Rb-Sr全岩等时线年龄约178 Ma^[31]. 寨背和陂头花岗岩在岩性、矿物组合、岩石化学和地球化学特征上与柯树北岩体非常相似(图4(a), (b)), 10000×Ga/Al = 2.7~4.3, 也是典型的铝质A型花岗岩(图4(c)).

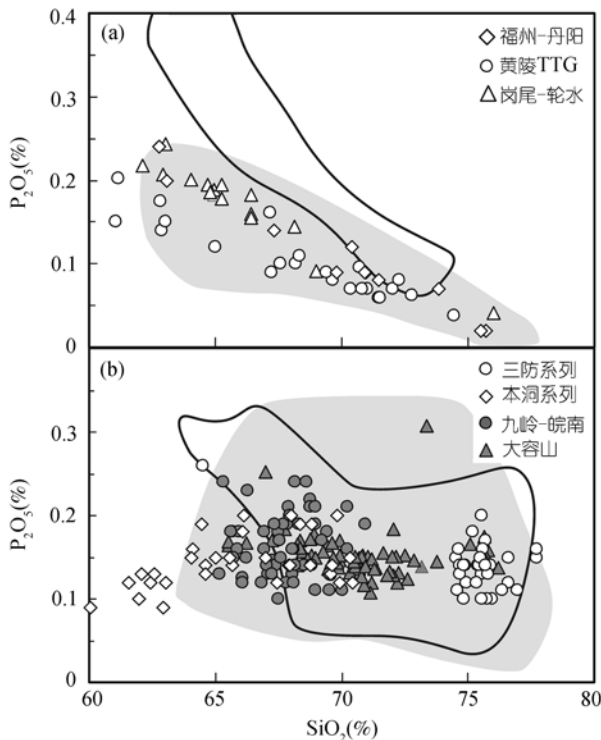


图3 华南一些代表性I型和S型花岗岩的SiO₂-P₂O₅相关关系图

阴影区和线框区分别是澳大利亚Lachlan褶皱带早古生代I型和S型花岗岩以及欧洲西Carpathian山脉的海西期I型和S型花岗岩的分布范围(数据来源: 文献^[25, 27~30])

图3(b)还显示了广西北部新元古代~820 Ma的二云母淡色花岗岩和黑云母花岗岩的数据, 二云母淡色花岗岩包括三防、元宝山、平英、田蓬等岩体, 总出露面积超过1300 km², 造岩矿物包括石英、钾长石、钠质斜长石、2%~6%黑云母和1%~5%白云母. 这些淡色花岗岩普遍富SiO₂ (74%~78%), 强过铝(A/CNK = 1.08~1.24)、低CaO/Na₂O (<0.3)、高Rb/Sr (3.4~330)、Rb/Ba (1.1~170), 是泥质沉积岩来源的典

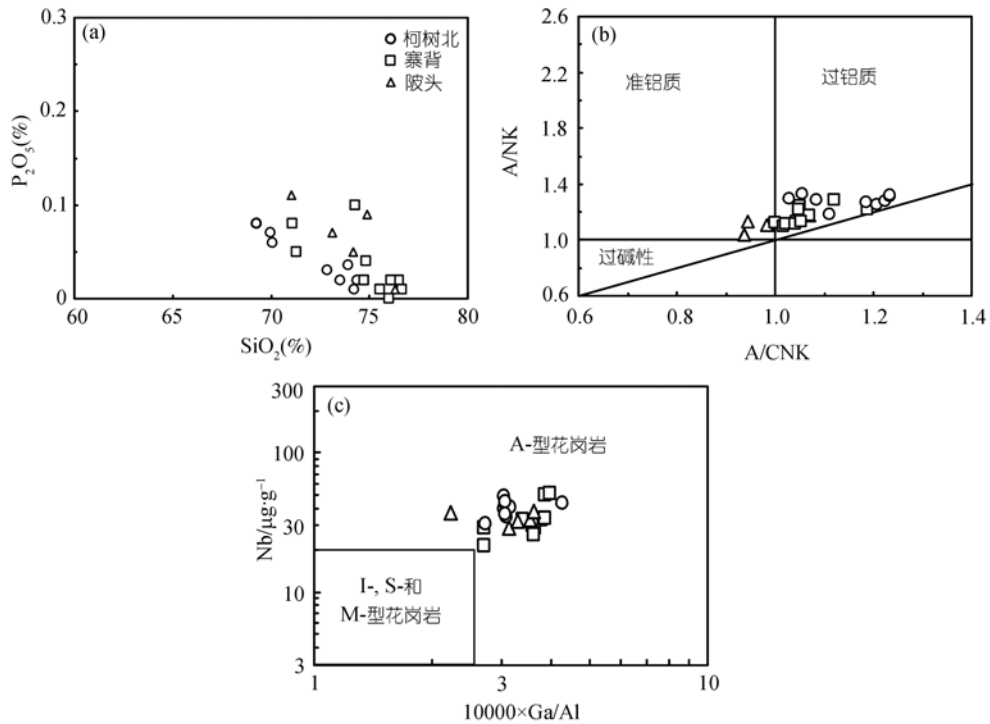


图 4 ~190 Ma柯树北岩体和南岭第 阶段A型花岗岩的SiO₂-P₂O₅相关图(a)、A/CNK-A/NK图(b)和 Ga/Al-Nb相关图(c) (数据来源: 文献 [10, 31]、本文)

表 1 柯树北岩体主量元素和微量元素分析结果^{a)}

	2KGN38.1	2KGN38.2	2KGN38.4	2KGN39.1	2KGN39.2	2KGN40.3	2KGN40.4	2KGN40.5	2KGN40.7
主量元素(%)									
SiO ₂	69.27	69.97	70.09	74.25	74.4	72.85	73.53	73.93	72.86
TiO ₂	0.37	0.31	0.32	0.14	0.16	0.2	0.17	0.19	0.21
Al ₂ O ₃	13.73	13.71	14.15	13.84	13.45	14.36	14.18	13.67	14.22
Fe ₂ O ₃ ^T	3.78	3.18	3.29	1.6	1.63	2.19	2.03	2.03	2.05
MnO	0.07	0.06	0.05	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
MgO	0.44	0.31	0.35	0.17	0.2	0.22	0.19	0.21	0.23
CaO	1.48	1.51	1.14	0.24	0.25	0.4	0.45	0.44	0.41
Na ₂ O	3.28	3.35	3.56	2.94	2.94	3.29	3.39	3.61	3.09
K ₂ O	4.54	4.69	4.73	5.73	5.27	5.09	5.15	5.16	5.26
P ₂ O ₅	0.08	0.07	0.06	0.01	0.02	0.03	0.02	0.04	0.03
LOI	2.61	2.48	1.94	0.71	1.16	1.37	1.20	1.06	1.35
总量	99.65	99.64	99.68	99.64	99.50	100.02	100.33	100.35	99.73
微量元素/µg·g ⁻¹									
Ga	22	22	23	20	22	24	23	31	23
Rb	176	192	193	274	249	248	251	245	254
Sr	79	74	78	36	37	27	29	27	26
Ba	389	385	332	293	257	322	317	310	288
Zr	304	265	261	139	169	241	200	240	240
Nb	49	40	42	31	35	41	36	43	44
Th	27	23	18	56	71	18	16	24	20
Y	56	50	51	25	30	46	42	55	47
Ce	161	158	145	78	100	107	118	104	110

a) 主量元素和微量元素均在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室的 Rigaku ZSX100e X-荧光光谱仪上分析。主量元素分析精度为 1%~5% (P₂O₅ 的分析精度约 10%~30%); 微量元素分析精度好于 10%

2.3 第 阶段“南岭系列”花岗岩

“南岭系列”花岗岩的岩石类型以黑云母二长花岗岩和黑云母钾长花岗岩为主，以及少量花岗闪长岩、二云母花岗岩和(含石榴子石)白云母花岗岩等。黑云母二长花岗岩和黑云母钾长花岗岩占有出露花岗岩面积的 85%以上，高精度锆石U-Pb年龄主要集中在 155 ~ 165 Ma之间 [32]。我们收集了既有准确的年龄、又有比较系统的岩石化学分析资料的一些代表性岩体进行分析，包括花山-姑婆山 [33,34]、骑田岭 [35]、武平 [36]、佛冈-新丰江 [5,37]、九峰 [38]、大东山 [39]、白石岗 [40]、金鸡岭 [41,42]和司前-隘子 [43]等岩体。这些岩体所有样品的SiO₂ 为 63% ~ 78%(其中有约一半样品的SiO₂ 73%)，P₂O₅ 0.36%，SiO₂-P₂O₅ 呈明显的负相关关系，其中绝大多数超酸性(SiO₂>75%)花岗岩样品的P₂O₅ 0.05%(图 5(a))。所有样品的A/CNK = 0.86 ~ 1.47，其中绝大多数样品集中在A/CNK = 0.90 ~ 1.15(图 5(b))，总体上为准铝质到弱过铝质，A/CNK与SiO₂ 呈弱的正相关关系(图略)，SiO₂ >73%高硅花岗岩样品的 A/CNK = 0.93 ~ 1.47，变化范围几乎相当于所有花岗岩样品，但其中只有少数为强过铝质花岗岩(A/CNK >1.15)。

2.4 第 阶段铝质 A 型花岗岩

代表性的A型花岗岩是南昆山和西山两个岩体。南昆山岩体位于广东龙口县(佛冈岩体东南侧)，出露面积约 200 km²，是一个典型的碱性花岗岩，造岩矿物组成为 23% ~ 36%石英，24% ~ 48%条纹长石，14% ~ 18%钠长石(An_{0.5})，2% ~ 5%黑鳞云母、0.3% ~ 0.5%白云母 [44]，并且含铌铁矿和铁橄榄石 [18]，岩体的SHRIMP锆石U-Pb年龄为 158 Ma [5]。西山岩体位于湘-粤交界的九嶷山花岗岩带东部，出露面积约为 700 km²，为一规模较大的中浅成-喷发过渡类型的火山-侵入杂岩，包括中细粒斑状黑云母二长和正长花

岗岩、花岗斑岩、微细粒花岗质碎斑熔和英安流纹(斑)岩，含少量铁橄榄石和铁辉石，属于一个剥蚀较深的破火山机构中不同产状的一套岩石，SHRIMP锆石U-Pb和Rb-Sr等时线年龄为 156 Ma [45]。这两个岩体矿物组成类似，特别都含有少量铁橄榄石，属于典型的碱性花岗质岩石。

西山岩体的 SiO₂ 为 66% ~ 75%，P₂O₅ 为 0.06% ~ 0.3%，变化范围较大而且两者具有很好的负相关关系，显示出从中酸性到强酸性的完整演化趋势，大多数样品的 A/CNK 为 1.0 ~ 1.1(图 6)；而南昆山花岗岩则都是高度分异的强酸性岩石，岩石化学成分相当均一，SiO₂ 为 76.6% ± 0.4%，P₂O₅ <0.1%，A/CNK 为 0.996±0.024 (图 6)。两个岩体的样品均高度富集高场强元素、REE 和 Ga，西山岩体和南昆山岩体的 10000 × Ga/Al 分别为 2.6 ~ 3.4 和 4.0 ~ 5.5，是典型的铝质 A 型花岗岩。

2.5 第 阶段成矿花岗岩

一些“南岭系列”花岗岩的高分异相与W, Sn, Mo, Bi, Nb, Ta等稀有多金属超大型矿床有非常密切的关系，如千里山 [46]、大吉山-漂塘 [47,48]和西华山 [49]等，均以小岩株形式产出，例如千里山花岗岩约为 9.8 km²、大吉山和漂塘花岗岩为隐伏岩体，矿区面积均约为 4.8 km²、西华山花岗岩约为 19.1 km²。这些花岗岩的主要岩性是黑云母花岗岩、二云母花岗岩和白云母花岗岩，以石英脉、夕卡岩和云英岩等成矿类型为主，成岩和成矿年龄非常一致，主要集中在 150 ~ 160 Ma [50-52]。

在岩石化学上，千里山、大吉山-漂塘和西华山都是超酸性过铝质花岗岩，绝大多数样品 SiO₂ 为 73% ~ 78%，A/CNK 为 1.0 ~ 1.3，P₂O₅ 含量很低，大多数样品 P₂O₅ 0.05%，并且与 SiO₂ 呈弱的负相关关系

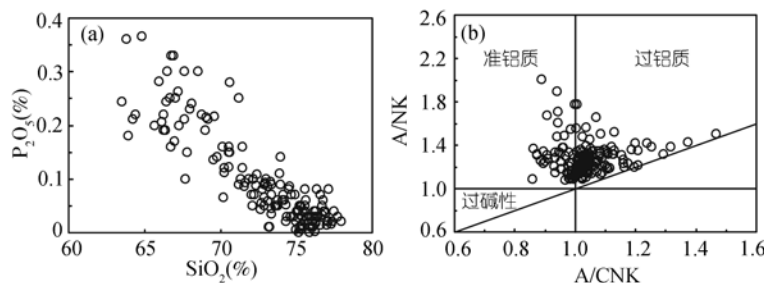


图5 南岭第 阶段“南岭系列”花岗岩代表性岩体的SiO₂-P₂O₅ 相关图(a)和A/CNK-A/NK图(b) (数据来源: 文献 [5, 33~43])

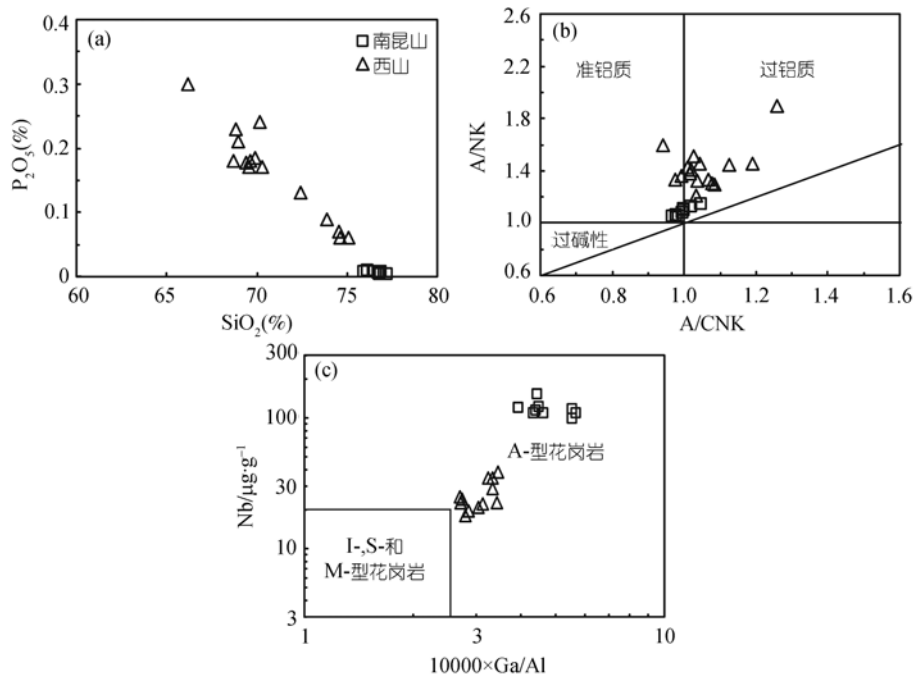


图 6 南岭第一阶段A型花岗岩代表性岩体的SiO₂-P₂O₅相关图(a)、A/CNK- A/NK图(b)和Ga/Al-Nb相关图(c)
(数据来源: 文献 [5, 45])

(图 7). 二云母和白云母花岗岩通常有很高含量的Li, Be, Rb, Nb, Th, U 以及HREE, 在球粒陨石标准化图上, REE呈“V型”(或“海鸥式”)的分布形式, 并有明显的“四分组”效应 [46, 53], 表明岩石经历了很高程度的分异演化和岩浆-流体相互作用.

3 讨论

3.1 燕山早期“南岭系列”花岗岩的成因类型

在“南岭系列”花岗岩里, 只有少数含有角闪石的花岗闪长岩和二长花岗岩可以确认为 I 型花岗岩. 出露面积占绝大多数的是不含角闪石的黑云母二长花岗岩、黑云母钾长花岗岩, 同时还有少数高演化的二云母和白云母花岗岩, 在许多文献中一般把这些黑云母二长花岗岩→黑云母钾长花岗岩→二云母花岗岩→白云母花岗岩系列划分成“陆壳改造型”花岗岩, 相当于 S 型花岗岩. 然而, 本文的分析表明, 这些“南岭系列”花岗岩的 P₂O₅ 和 SiO₂ 呈明显的负相关关系, 高硅强分异花岗岩不仅 P₂O₅ 含量很低(大多数小于 0.05%), 而且大多数为准铝质-弱过铝质(A/CNK 为 0.93 ~ 1.15), 只有极少数样品(特别是部分成矿花岗岩)的 A/CNK >1.15. “南岭系列”花岗岩的 P₂O₅-SiO₂ 相关关系与准铝质-弱过铝质 I 型花岗岩非常类似, 表

明在岩浆演化早期发生了磷灰石的分离结晶, 它们的母岩浆应该是准铝质/弱过铝质的, 因此“南岭系列”花岗岩应该属于分异 I 型花岗岩, 而不是强过铝质 S 型花岗岩. 极少数高硅强分异花岗岩有高的 A/CNK 值(>1.2), 可能和岩浆演化晚期的岩浆-流体相互作用有关(表现出“海鸥式”的 REE 分布图形和“四分组”效应). 此外, 蚀变/交代作用也有可能导致 K, Na 的降低而使 A/CNK 值增高. 这些高硅强分异花岗岩的化学组成非常接近“最低共熔点”成分, 因此不适合用矿物学和岩石化学特征简单地进行成因类型分类, 最好是和其他同期共生的花岗岩一起进行共生成因类型组合研究.

高SiO₂、低P₂O₅(或P₂O₅-SiO₂负相关关系)并不是判断分异I型花岗岩的唯一依据, Th和Y随岩浆结晶分异演化的趋势也是区分花岗质岩浆是准铝质或过铝质的有效判据 [26]. 由于Th和Y在过铝质岩浆演化早期优先进入Th和Y富集的矿物(如独居石), 分异S型花岗岩(Rb>200 μg·g⁻¹)的Th和Y含量低, 并随着Rb增加而降低; 相反, Th和Y富集的矿物不在准铝质岩浆演化早期优先结晶, 所以分异I型花岗岩的Th和Y含量高, 并与Rb含量呈正相关关系. 图 8 显示了南岭最大的花岗岩基——佛冈-新丰江花岗岩样

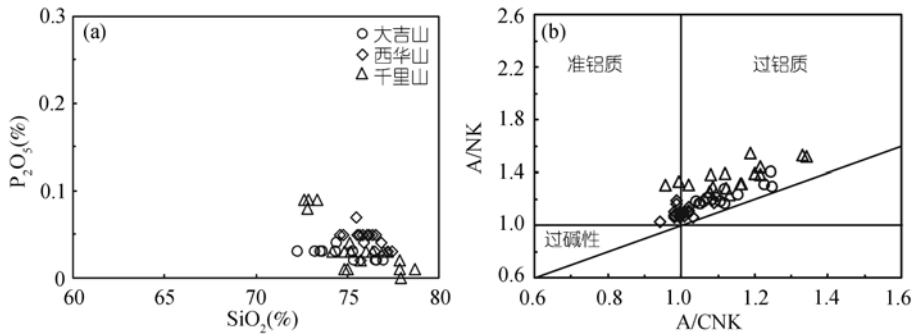


图7 南岭第 阶段成矿花岗岩代表性岩体的SiO₂-P₂O₅相关图(a)和A/CNK-A/NK图(b)(数据来源:文献 [46~49])

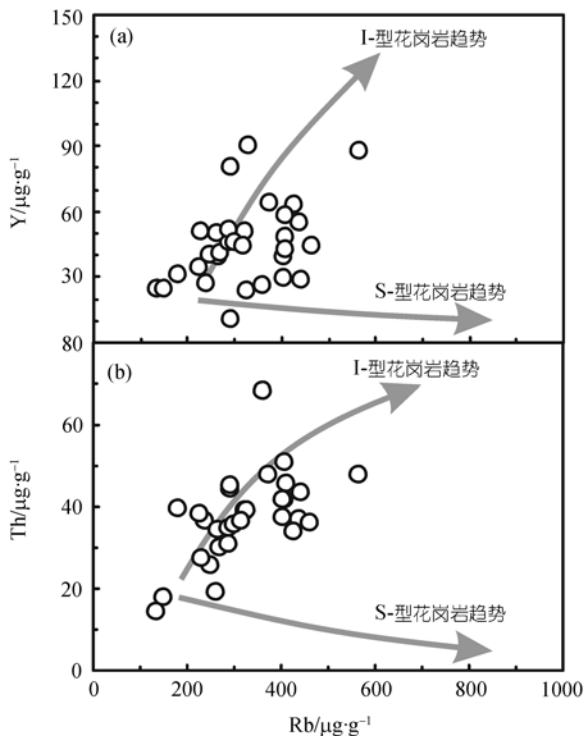


图8 佛冈花岗岩基的Rb-Y(a)和Rb-Th相关图(b)(据Li等 [51] 其中Lachlan褶皱带的I型和S型花岗岩趋势引自Chappell [26])

品 Rb 和 Th, Y 之间均为正相关关系, Rb 含量高(即结晶分异程度高)的样品有很高的 Th 和 Y 含量, 与 Lachlan 褶皱带中的 I 型花岗岩的演化趋势一致。

堇青石、白云母和石榴子石等富铝矿物的出现通常是作为 S 型花岗岩的重要矿物学依据, 例如 Lachlan 褶皱带中大规模的早古生代堇青石花岗岩、扬子块体南缘新元古代九岭-皖南堇青石花岗岩和桂北二云母淡色花岗岩以及大容山(包括旧州、台马等)三叠纪堇青石和石榴子石花岗岩等大型花岗岩岩基(图 3)。而在燕山早期“南岭系列”花岗岩中出现

的含白云母花岗岩(包括成矿花岗岩)与上述典型的 S 型花岗岩基不同, 大多数规模很小, 出露面积一般只有数十或数百平方公里, 而且在时-空上与黑云母二长花岗岩、钾长花岗岩密切共生。这些花岗岩通常只含有白云母±石榴子石, 均未出现堇青石或矽线石。对这类含白云母±石榴子石花岗岩的成因类型划分常常有不同意见 [54~56], 因为准铝质和过铝质岩浆经过分异结晶后都可能形成白云母±石榴子石。于津海等人 [57]通过详细的矿物学研究, 论证了闽东南一些含原生白云母和石榴子石的花岗岩属于 I 型花岗岩, 这些花岗岩中的石榴子石以富 Mn, Fe 和贫 Mg, Ca 为特征, 白云母以高 Fe 和低 Al, Na 为特征, 它们是岩浆高度结晶分异演化的产物。因此对“南岭系列”花岗岩中的含白云母花岗岩的成因类型划分的关键是在于如何判断其源岩是火成岩还是沉积岩。一般说来, 堇青石是划分 S 型花岗岩最有用的(但不是充分和唯一的)矿物学标志 [55], 通过对花岗岩的野外地质、岩石共生组合关系、矿物学、岩石化学、地球化学和同位素组成的系统研究, 以确定花岗岩的源岩性质, 才能准确划分花岗岩的成因类型。

I 型和 S 型花岗岩成因分类的岩石化学基础是 Na, Ca, Sr 在长石风化形成粘土的过程中发生丢失而使沉积岩成为过铝质(并非 Al 增高), 因此 S 型花岗岩的岩石化学继承了源岩的过铝质特征, 其 Na, Ca, Sr 明显低于 I 型花岗岩。本文以磷灰石在强过铝质和准铝质/弱过铝质花岗岩浆中溶解度的差异为基础, 通过系统研究一套共生演化系列花岗岩样品的 SiO₂-P₂O₅ 相关关系, 对分异花岗岩的原始岩浆性质进行判断。结果表明, “南岭系列”中一些含白云母花岗岩应是准铝质/弱过铝质岩浆经过高度结晶分异演化的产物, 它们和共生的黑云母花岗岩同属于分异 I

型花岗岩,明显不同于桂北新元古代 S 型淡色花岗岩。

南岭及邻区燕山早期大规模分异 I 型花岗岩厘定的一个重要意义是,这些花岗岩的源岩应该是以火成岩为主,而不是(变质)沉积岩。锆石 Hf 同位素结果显示,少量新生地壳和/或地幔分异物质很可能参与了这些花岗岩的形成^[15,36,58]。因此,这些分异 I 型花岗岩的地球化学和同位素组成代表的是其火成岩源岩的组成,但不能完全代表华南陆壳变质基底的组成。

3.2 南岭燕山早期火成岩组合

花岗岩成因分类、物质来源和形成演化研究的一个重要的地球动力学意义是了解花岗岩形成的构造背景,有许多学者在这方面进行了大量的研究,例如花岗岩构造环境分类^[59,60]和花岗岩形成构造环境的微量元素地球化学判别图^[61,62]。然而大量的研究表明,单纯依靠花岗岩成因类型和地球化学组成来判别花岗岩形成的构造背景是很困难和不确定的,一个重要的原因在于花岗岩的地球化学往往是其源岩以及部分熔融和结晶分异演化历史的综合反应,花岗岩的地球化学判别常常给出的是其源岩的构造环境而不是花岗岩本身的形成环境,或者没有明确的构造意义^[63]。例如, I 型花岗岩可以形成在前造山、同造山、晚造山甚至非造山等许多不同的构造背景,即便是过去一般认为形成于“同碰撞”造山环境的 S 型花岗岩很多情况下可能是形成于晚造山和后造山期的地壳伸展阶段^[64],甚至有可能形成于非造山环境^[27]。A 型花岗岩可能有不同的物质来源和成因,但都要求高温-低压的条件,对应于岩石圈伸展的构造背景。值得强调的是在研究花岗岩物质来源的同时,应该更加关注花岗岩形成的热来源,因为正常的地温梯度很难提供足够的热使地壳发生部分熔融。因此,综合的地质(包括构造、变质、沉积、盆地演化)、地球化学和地质年代学研究才有可能对花岗岩形成的构造背景做出比较可靠的判断,就岩石地球化学本身而言,应该特别注重火成岩组合的研究,特别是幔源玄武质岩石和碱性岩的研究。

南岭燕山早期的火成岩是华南约 270 ~ 190 Ma 印支期造山运动^[6,65]后的板内岩浆活动,起始于约 190 Ma,以赣南的柯树北 A 型花岗岩的形成代表。在 180 ~ 170 Ma 期间出现了以玄武岩和 A 型酸性火山岩及其侵入相辉长岩和 A 型花岗岩的“双峰式”火成岩组合为特征的第 阶段火成岩。这些火成岩虽然规

模较小,但分布非常广泛,包括湘南宁远-新田碱性玄武岩^[11]、湘东南宜章长城岭拉斑玄武岩^[66]、赣南龙南东坑-临江盆地和寻乌白面石-菖蒲盆地拉斑玄武岩^[8,9]、赣中吉安安塘碱性玄武岩^[67]和闽西南永定盆地拉斑玄武岩^[68]。这些玄武岩均显示出洋岛玄武岩(OIB)的地球化学和同位素组成特征,为典型的陆内裂谷玄武岩。因此,南岭燕山早期第 阶段火成岩完全不同于活动大陆边缘火成岩组合,而和板内非造山型火成岩组合完全一致。

紧随而来的第 阶段(165 ~ 150 Ma)大规模岩浆活动以分异 I 型花岗岩为主,并伴随小规模 A 型花岗岩和正长岩。桂东南和赣南正长岩的元素和同位素地球化学特征与陆内“裂谷型”正长岩非常相似^[10,11],完全不同于形成于造山带的“俯冲型”正长岩;南昆山 A 型花岗岩也显示出陆内裂谷 A₁-型花岗岩的地球化学特征^[5]。这些陆内裂谷型碱性火成岩的形成指示南岭地区在这个时期应处于岩石圈伸展的构造背景。大量分异 I 型花岗岩的形成暗示这个时期有很高的地热,很可能与幔源岩浆的底侵和侵入有关。值得注意的是,南岭及邻区(包括从桂东南-湘南到赣南-赣中)燕山早期的幔源玄武岩和碱性岩都一致地表现出 OIB 的地球化学特征,而不是岛弧岩石的地球化学特征,表明其地幔源区没有受到俯冲带流体/熔体的交代和改造,暗示南岭中西部地区早中生代很可能不存在一个俯冲带之上的地幔楔。这对于解释华南中生代构造演化是一个重要的岩石地球化学制约。

4 小结

磷灰石在准铝质/弱过铝质和强过铝质花岗岩浆中的溶解度有明显的差异,因此 I 型和 S 型花岗岩有明显不同的岩石化学和 SiO₂-P₂O₅ 相关关系特征,即 I 型花岗岩的 SiO₂-P₂O₅ 呈明显的负相关关系,而 S 型花岗岩的 P₂O₅ 随 SiO₂ 的增加无明显降低的趋势。南岭地区燕山早期大规模的黑云母二长花岗岩和黑云母钾长花岗岩的 SiO₂ 和 P₂O₅ 呈明显的负相关关系,属于分异 I 型花岗岩,它们和密切共生的小规模花岗闪长岩、二(白)云母花岗岩等构成了一个完整的准铝质-弱过铝质的 I 型/分异 I 型花岗岩演化系列,其源岩主要为元古代火成岩,少量新生地壳和/或地幔分异物质可能参与了花岗岩的形成。这些 I 型/分异 I 型花岗岩在时空上和小规模 A 型酸性、基性火山/侵入岩以及碱性岩密切共生,构成一典型的板内非造山型

火成岩组合. 南岭燕山早期大规模 I 型/分异 I 型花岗岩的确认, 对深入认识南岭及邻区中生代地球动力学背景有重要的意义.

致谢 黄会清协助数据收集整理; 刘颖帮助柯树北岩体的地球化学分析; 三位匿名审稿人对文章提出了重要的意见和建议, 在此一并致谢.

参 考 文 献

- Xu K, Sun N, Wang D, et al. On the origin and metallogeny of the granites in South China. In: Xu K, Tu G, eds. *Geology of Granites and Their Metallogenic Relations*. Proceeding of International, Nanjing University. Beijing: Science Press, 1982. 1—3
- 王联魁, 张绍立, 杨文金, 等. 华南花岗岩系列类型的 Sr、O、Pb、Nd 同位素与形成环境. *地质与勘探*, 1989, 25: 29—33
- 王德滋. 华南花岗岩研究的回顾与展望. *高校地质学报*, 2004, 10: 305—314
- 王德滋, 沈渭洲. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化. *地学前缘*, 2003, 10: 209—220
- Li X H, Li Z X, Li W X, et al. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in respond to foundering of a subducted flat-slab? *Lithos*, 2007, doi:10.1016/j.lithos.2006.09.018
- Li Z X, Li X H. Formation of the 1300 km-wide intra-continental orogen and post-orogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 2007, 35: 179—182 [DOI](#)
- 丁兴, 陈培荣, 陈卫锋, 等. 湖南沅山花岗岩中锆石 LAICPMS U-Pb 定年: 成岩启示和意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(7): 606—616
- 陈培荣, 孔兴功, 王银喜, 等. 赣南燕山早期双峰式火山-侵入杂岩的 Rb-Sr 同位素定年及意义. *高校地质学报*, 1999, 5: 367—383
- 陈培荣, 孔兴功, 倪琦生, 等. 赣南燕山早期双峰式火山的厘定和意义. *地质论评*, 1999, 45(增刊): 734—741
- Li X H, Chen Z G, Liu D Y, et al. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from southern Jiangxi Province, SE China: Age, origin and tectonic significance. *Int Geol Rev*, 2003, 45: 898—921
- Li X H, Chung S L, Zhou H W, et al. Jurassic intraplate magmatism in southern Hunan-eastern Guangxi: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, geochemistry, Sr-Nd isotopes and implications for tectonic evolution of SE China. In: Malpas J, Fletcher C J, Aitchison J C, et al, eds. *Aspects of the Tectonic Evolution of China*. London: Geological Society London Special Publications, 2004. 193—216
- 谢昕, 徐夕生, 邹海波, 等. 中国东南部晚中生代大规模岩浆作用序幕: J_2 早期玄武岩. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(7): 587—605
- 王岳军, 范蔚茗, 郭锋, 等. 湘东南中生代花岗闪长岩锆石 U-Pb 法定年及其成因指示. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2001, 31(9): 745—751
- Wang Q, Xu J F, Jian P, et al. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *J Petrol*, 2006, 47: 119—141 [DOI](#)
- 赵子杰, 马大铨, 林惠坤, 等. 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. 南岭地质矿产科研报告集(第一集). 武汉: 武汉地质学院出版社, 1986. 28—67
- 庄文明, 陈绍前, 黄友义. 佛冈复式岩体地质地球化学特征及其成岩源岩. *广东地质*, 2000, 15: 1—12
- 陈小明, 王汝成, 刘昌实, 等. 广东从化佛冈(主体)黑云母花岗岩定年和成因. *高校地质学报*, 2002, 8: 293—307
- 包志伟, 赵振华. 佛冈铝质 A 型花岗岩的地球化学及其形成环境初探. *地质地球化学*, 2003, 31: 52—61
- Watson E B. Apatite saturation in basic to intermediate magmas. *Geophys Res Lett*, 1979, 6: 937—940
- Watson E B, Capobianco C J. Phosphorus and the rare earth elements in felsic magmas: An assessment of the role of apatite. *Geochim Cosmochim Acta*, 1981, 45: 2349—2358 [DOI](#)
- Green T H, Watson E B. Crystallization of apatite in natural magmas under high pressure, hydrous conditions, with particular reference to "orogenic" rock series. *Contrib Mineral Petrol*, 1982, 79: 96—105 [DOI](#)
- Harrison T M, Watson E B. The behavior of apatite during crustal anatexis: Equilibrium and kinetic considerations. *Geochim Cosmochim Acta*, 1984, 48: 1468—1477 [DOI](#)
- Wolf M B, London D. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: An experimental study of solubilities and mechanism. *Geochim Cosmochim Acta*, 1994, 58: 4127—4145 [DOI](#)
- London D, Wolf M B, Morgan V I, et al. Experimental silicate-phosphate equilibria in peraluminous granitic magmas, with a case study of the alburquerque batholith at Tres Arroyos, Badajoz, Spain. *J Petrol*, 1999, 40: 215—240 [DOI](#)
- Broska I, Williams C T, Uher P. The geochemistry of phosphorus in different granite suites of the western Carpathians, Slovakia: The role of apatite and P-bearing feldspar. *Chem Geol*, 2004, 205: 1—15 [DOI](#)
- Chappell B W. Aluminium saturation in I and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos*, 1999, 46: 535—551 [DOI](#)
- Li X H, Li Z X, Ge W, et al. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma? *Precambrian Res*, 2003, 122: 45—83 [DOI](#)
- 李献华, 周汉文, 刘颖, 等. 粤西阳春中生代钾玄质侵入岩及其构造意义: 岩石学和同位素地质年代学. *地球化学*, 2000, 29: 513—520
- Martin H, Bonin B, Capdevila R, et al. The Kuiqi peralkaline granitic complex (SE China)-petrology and geochemistry. *J Petrol*, 1994, 35: 983—1015
- 祁昌实, 邓希光, 李武显, 等. 桂东南大容山-十万大山 S 型花岗岩带的成因: 地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约. *岩石学报*, 2007, 23: 403—412
- 范春方, 陈培荣. 赣南陂头花岗岩体 Nd-Sr 同位素特征及其意义. *地质找矿论丛*, 2000, 15: 282—287
- Li X H. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China. *J Asian Earth Sci*, 2000, 18: 293—305 [DOI](#)
- 朱金初, 李向东, 沈渭洲, 等. 广西花山复式花岗岩体成因的锶、钕和氧同位素研究. *地质学报*, 1989, 3: 225—235
- 朱金初, 李向东. 广西花山花岗岩的岩石学和地球化学特征及

- 成岩物质来源地探讨. 岩石矿物学杂志, 1988, 7: 28—38
- 35 邓希光, 李献华, 刘义茂, 等. 骑田岭花岗岩体的地球化学特征及其对成矿的制约. 岩石矿物学杂志, 2005, 24: 93—102
- 36 于津海, 周新民, 赵蕾, 等. 壳幔作用导致武平花岗岩形成——Sr-Nd-Hf-U-Pb 同位素证据. 岩石学报, 2005, 21: 651—664
- 37 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 等. 下地壳部分熔融的产物: 燕山早期广东腊圃花岗岩成因. 高校地质学报, 2005, 11(3): 343—357
- 38 袁忠信, 倪云祥, 吴澄宇, 等. 湘南粤北花岗岩类岩石成因的痕量元素模拟. 岩石矿物学杂志, 1993, 12: 97—107
- 39 张敏, 陈培荣, 张文兰, 等. 南岭中段大东山花岗岩体的地球化学特征和成因. 地球化学, 2003, 32: 529—539
- 40 邱检生, 胡建, 王孝磊, 等. 广东河源白石冈岩体: 一个高分异的 I 型花岗岩. 地质学报, 2005, 79: 504—514
- 41 付建明, 马昌前, 谢才富, 等. 湖南金鸡岭铝质 A 型花岗岩的厘定及构造环境分析. 地球化学, 2005, 34: 215—226
- 42 章邦桐, 戴永善, 王驹, 等. 南岭西段金鸡岭复式花岗岩基地质及岩浆动力学特征. 高校地质学报, 2001, 7: 50—61
- 43 李建红, 卫三元, 梁良, 等. 贵东岩体地质地球化学特征及其形成的构造环境识别. 铀矿地质, 2004, 20: 321—329
- 44 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 等. 广东龙口南昆山铝质 A 型花岗岩的成因. 岩石矿物学杂志, 2003, 22: 1—10
- 45 付建明, 马昌前, 谢才富, 等. 湘南西山铝质 A 型花岗质火山侵入杂岩的地球化学及其形成环境. 地球科学与环境学报, 2004, 26: 15—23
- 46 毛景文, 李红艳, 裴荣富. 千里山花岗岩体地质地球化学及与成矿关系. 矿床地质, 1995, 14: 12—25
- 47 孙恭安, 史明魁, 张宏良, 等. 大吉山花岗岩体岩石学、地球化学及成矿作用的研究. 南岭地质矿产科研报告集(第二集). 武汉: 中国地质大学出版社, 1989. 326—363
- 48 华仁民, 张文兰, 陈培荣, 等. 赣南大吉山与漂塘花岗岩及有关成矿作用特征对比. 高校地质学报, 2003, 9: 609—619
- 49 吴永乐, 梅勇文, 刘鹏程, 等. 西华山钨矿地质. 北京: 地质出版社, 1987. 319
- 50 Maruejol P, Cuney M, Turpin L. Magmatic and hydrothermal REE fractionation in the Xihuashan granites (SE China). *Contrib Mineral Petrology*, 1990, 104: 668—680 [\[DOI\]](#)
- 51 Li X H, Liu D Y, Sun M, et al. Precise Sm-Nd and U-Pb isotopic dating of the super-giant Shizhuyuan polymetallic deposit and its host granite, Southeast China. *Geol Mag*, 2004, 141: 225—231 [\[DOI\]](#)
- 52 蒋国豪, 胡瑞忠, 谢桂青, 等. 江西大吉山钨矿成矿年代学研究. 矿物学报, 2004, 24: 253—256
- 53 Zhao Z H, Xiong X L, Han X D, et al. Controls on the REE tetrad effect in granites: Evidence from the Qianlishan and Baerzhe granites, China. *Geochem J*, 2002, 36: 527—543
- 54 White A J R, Clemens J D, Holloway J R, et al. S-type granites and their probable absence in southwestern North America. *Geology*, 1986, 14: 115—118 [\[DOI\]](#)
- 55 White A J R, Clemens J D, Holloway J R, et al. Comment and reply on “S-type granites and their probable absence in southwestern North America”. *Geology*, 1986, 14: 805—806 [\[DOI\]](#)
- 56 Miller C F. Comment and reply on “S-type granites and their probable absence in southwestern North America”. *Geology*, 1986, 14: 804—805 [\[DOI\]](#)
- 57 于津海, 赵蕾, 周旋. 闽东南含石榴子石 I 型花岗岩的矿物学特征及成因. 高校地质学报, 2004, 10: 365—377
- 58 汪相, Griffin W L, 王志成, 等. 湖南丫江桥花岗岩中锆石的 Hf 同位素地球化学. 科学通报, 2003, 48(4): 379—382
- 59 Pitcher W S. Granite type and tectonic environment. In: Hsü K, ed. *Mountain Building Processes*. London: Academic Press, 1983. 19—40
- 60 Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 1999, 46: 605—626 [\[DOI\]](#)
- 61 Pearce J A, Harris B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J Petrol*, 1984, 25: 956—983
- 62 Harris N B, Pearce J A, Tindle A G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward M P, Reis A C, eds. *Collision Tectonics*. *Geol Soc Spec Publ*, 1986, 19: 67—81
- 63 Frost B R, Barnes C, Collins W J, et al. A geochemical classification for granitic rocks. *J Petrol*, 2001, 42: 2033—2048 [\[DOI\]](#)
- 64 Clemens J D. S-type granitic magmas——petrogenetic issues, models and evidence. *Earth-Sci Rev*, 2003, 61: 1—18 [\[DOI\]](#)
- 65 Li X H, Li Z X, Li W X, et al. Initiation of the indosinian orogeny in South China: Evidence for a Permian magmatic arc on the Hainan Island. *J Geol*, 2006, 114: 341—353 [\[DOI\]](#)
- 66 赵振华, 包志伟, 张伯友. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1998, 28(增刊): 7—14
- 67 王岳军, 廖超林, 范蔚茗, 等. 赣中地区早中生代 OIB 碱性玄武岩的厘定及构造意义. 地球化学, 2004, 33: 109—117
- 68 Zhou J C, Jiang S Y, Wang X L, et al. Re-Os isochron age of Fankeng basalts from Fujian of SE China and its geological significance. *Geochem J*, 2005, 39: 497—502 [\[DOI\]](#)