

湖南南岳岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 及其地球化学特征

马铁球 李 彬 陈焰明 周柯军 查建章

(湖南省地质调查院, 湖南 长沙 410011)

摘要: 分布于湖南衡山的南岳岩体, 侵位于新元古代冷家溪群中, 为复式岩体。通过锆石 U-Pb 年龄测定, 其锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 (215.5 ± 1.5) Ma, 主体形成于晚三叠世; 其中部分小岩体形成于早白垩世, 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 (140.6 ± 0.8) Ma。晚三叠世花岗岩由三个岩石单元组成, 第一期细中粒斑状角闪石黑云母二长花岗岩、第二期中细粒黑云母二长花岗岩、第三期二云母二长花岗岩; 早白垩世花岗岩为二云母二长花岗岩。晚三叠世花岗岩属过铝质高钾钙碱性系列; 早白垩世花岗岩属强过铝质高钾钙碱性系列。岩石明显富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素; $\sum \text{REE}$ 中等 ($92.88 \times 10^{-6} \sim 296.56 \times 10^{-6}$), Eu 均为弱负异常 ($\delta \text{Eu} = 0.28 \sim 0.87$), 其中早白垩世花岗岩 Eu 亏损更大; I_{Sr} 值较大 (0.7093~0.7189); 低 ε_{Nd} ($-8.04 \sim -11.38$), 高 $T_{2\text{DM}}$ (1.63~1.90 Ga)。综合研究表明, 南岳花岗岩为壳源含白云母过铝花岗岩类 (MPG), 为华南前寒武系基底重熔而成, 晚三叠世花岗岩有少量下地壳或地幔物质加入; 其形成的构造背景应为碰撞造山作用晚期或结束时期, 是陆内碰撞造山作用增温减压体制下的产物。

关键词: 花岗岩; 锆石 U-Pb 定年; LA-ICP-MS; 地球化学; 南岳

中图分类号: P597; P595; P588.12

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2013)06-1712-13

南岳岩体位于湖南中东部地区, 分布于“钦杭结合带”南东侧连云山—衡东—双牌—一线扬子地块与华夏地块的接合带附近^[1], 即俗称的江南造山带北东部位。江南造山带大致经历了新元古代早期 (825 Ma 左右) 扬子地块与华夏地块的碰撞、南华纪的裂解、晚志留世随后的聚合, 晚三叠华南地块和华北地块的最后碰撞以及中侏罗世—白垩纪时期太平洋板块向欧亚大陆的斜向俯冲等重大的构造事件^[2-4]。同时南岳岩体分布区在多期次、多类型陆缘、陆间和陆内造山作用的影响下^[5-7], 岩浆活动频繁, 从早志留世开始至早白垩世均有岩浆活动的记录, 其中尤以早志留世—晚三叠世岩浆活动较为强烈。这些花岗质岩体呈岩基、岩株状产出, 广泛侵位于新元古代浅变质沉积岩中, 被晚白垩世地层沉积覆盖。而有关该区大规模花岗质岩浆作用的研究总体较为薄弱,

南岳岩体仅有 1:20 万区调对其进行了初步岩相划分及时代归并, 缺少高精度的分析测试数据, 岩体成因及形成的构造背景不清。

近年来笔者在 1:25 万株洲市幅区域地质调查过程中, 对南岳出露的花岗岩体进行了详细的岩基解体和岩石地球化学、同位素等方面的研究, 研究表明南岳岩体主体侵位时间为晚三叠世, 次为早白垩世, 而不是前人所认为的中、晚侏罗世。本文就南岳岩体锆石 LA-ICP-MS 测年及岩体岩石地球化学特征作详细介绍, 并在此基础上简单讨论花岗质岩浆活动的构造背景。

1 岩体地质

南岳岩体位于南岳衡山风景区内, 呈较大的岩基出露。主要由南岳、白石峰岩体及其北侧琵琶山、

收稿日期: 2012-12-17; 改回日期: 2013-05-10

基金项目: 中国地质调查局项目 (1212011120816) 资助。

作者简介: 马铁球, 1956 生, 男, 高级工程师, 长期从事区域地质调查工作; E-mail: matieqiu18@sina.com。

庙湾、金宝冲、福田铺等小岩体组成, 出露面积约 420 km²。岩体侵入于新元古代板溪群浅变质系及泥盆—二叠纪地层中, 西侧被晚白垩世红层沉积覆盖(图 1)。由于受岩体西侧大型走滑断裂的影响, 岩体中片麻理构造及暗色闪长质包体较发育, 包体及片麻理方向一致, 形成的叶理构造清晰可见。

岩体主要由晚三叠世和早白垩世两个时代的侵入体组成。晚三叠世花岗岩有三个侵入期次, 第一期($\eta\gamma T_3^a$)岩性主要为细中粒斑状角闪石黑云母二长花岗岩—花岗闪长岩; 第二期($\eta\gamma T_3^b$)岩性为中细粒(少)斑状黑云母二长花岗岩; 第三期($\eta\gamma T_3^c$)岩性为细粒黑(二)云母二长花岗岩; 岩石多具弱片麻状构

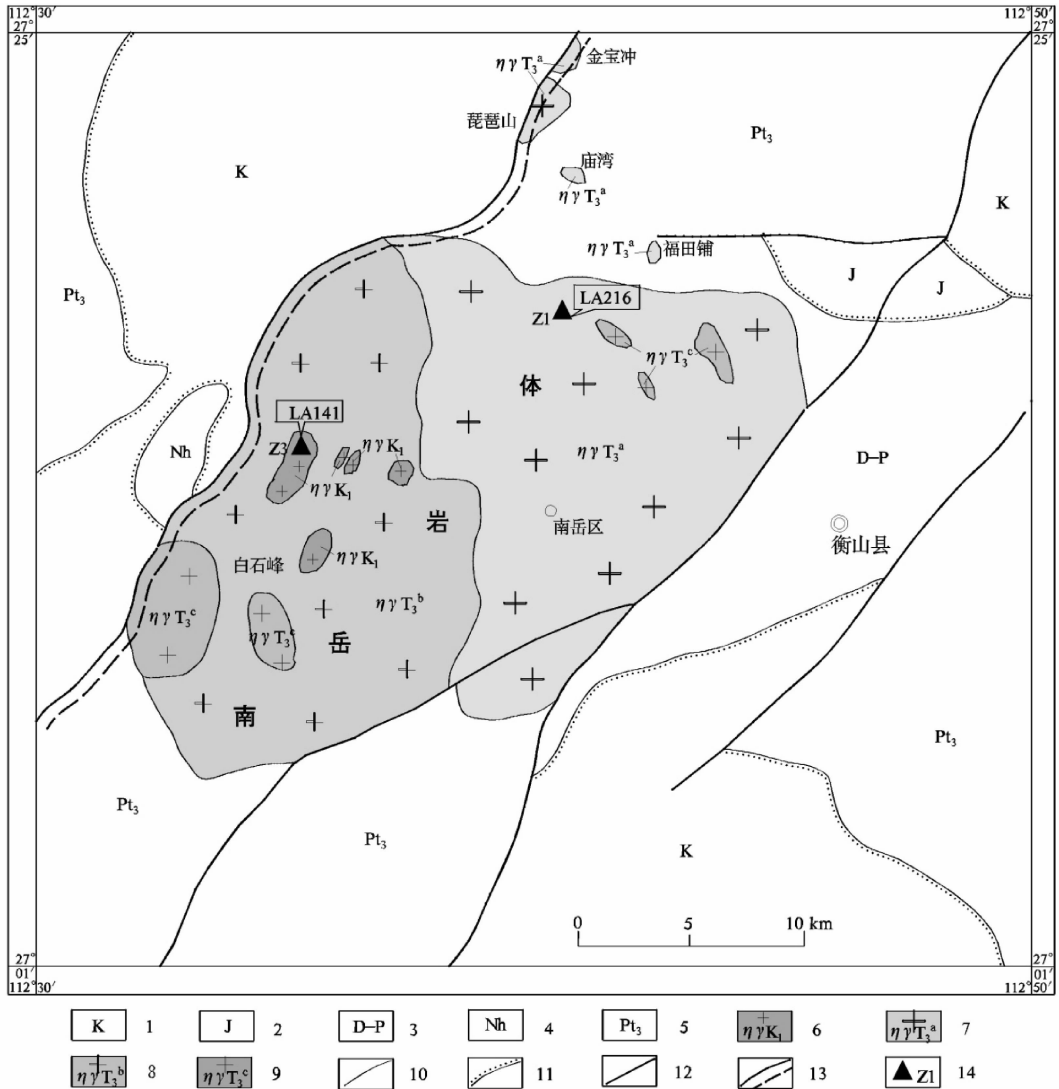


图 1 南岳花岗岩体地质简图

- 1—白垩系; 2—侏罗系; 3—泥盆—二叠系; 4—南华系; 5—新元古界; 6—早白垩世二长花岗岩; 7—晚三叠世第一期斑状二长花岗岩; 8—晚三叠世第二期(少)斑状黑云母二长花岗岩; 9—晚三叠世第三期二长花岗岩; 10—地质界线; 11—不整合地质界线; 12—断裂; 13—韧性剪切带; 14—年龄样位置及编号

Fig.1 Geological sketch map of Nanyue granitic pluton

- 1—Cretaceous; 2—Jurassic; 3—Devonian—Permian; 4—Nanhuaian; 5—Neo-proterozoic; 6—Early Cretaceous monzonitic granite; 7—Late Triassic first monzonitic granite; 8—Late Triassic second monzonitic granite; 9—Late Triassic third monzonitic granite; 10—Geological boundary; 11—Unconformity; 12—fault; 13—Ductile shear zone; 14—Sampling location and serial number

造。早白垩世花岗岩出露一次侵入体($\eta \gamma K_1$),岩性为细粒二云母二长花岗岩。

2 样品特征、分析方法及结果

南岳岩体的形成时代研究相对较薄弱,早在20世纪60年代曾对该岩体内的不同岩性进行过锆石U-Pb年龄和黑云母K-Ar法年龄测定,分别测得年龄区间为180~125 Ma,岩体侵入时代置于中、晚侏罗世。由于测年的年代久远,加之黑云母K-Ar法测年本身存在一定的局限性,笔者根据岩体的野外地质特征及与邻近岩体相比较,认为时代有误,故采用锆石LA-ICP-MS U-Pb定年法重新测年。样品取自岩体北部细中粒斑状角闪石黑云母二长花岗岩(样号Z1)和中部细粒二云母二长花岗岩(样号Z3)中。

花岗岩碎样和锆石挑选工作在湖南省地质调查院实验室完成,锆石样品的制靶工作由中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成。在室内先将岩石样品粉碎至120目以下,用常规的人工淘洗和电磁选方法富集锆石,再在双目显微镜下手工逐个精选锆石颗粒。锆石的阴极发光图像在中国地质科学院地质研究所的HITACHI S3000-N型扫

描电子显微镜并配有GATAN公司Chroma阴极发光探头分析仪器上完成。LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb定年测试分析在中国地质科学院矿产资源研究所MC-ICP-MS实验室完成,锆石定年分析所用仪器为Finnigan Neptune型MC-ICP-MS及与之配套的Newwave UP 213激光剥蚀系统。激光剥蚀所用斑束直径为25 μ m,频率为10 Hz,能量密度约为2.5 J \cdot cm⁻²,以He为载气。LA-MC-ICP-MS激光剥蚀采用单点剥蚀的方法,数据分析前用锆石GJ-1为外标,U,Th含量以锆石M127^[8]为外标进行校正。数据处理采用ICOMSDaCal程序^[9],锆石年龄谐和图由Isoplot 3.0程序完成^[10]。详细实验测试过程可参见侯可军等(2009)^[11]。样品分析过程中,Plesovice标样作为未知样品的分析结果为337 Ma,对应的年龄推荐为(337.13 \pm 0.37)Ma (2 σ)^[12],两者在误差范围内完全一致。

用于定年的2个样品中多数锆石为透明的自形晶体,锆石颗粒大部分呈无色透明,少部分为黄褐色或玫瑰色,分柱状和圆状两种,阴极发光图像均显示出岩浆结晶^[13,14]的振荡环带和均质结构(图2)。锆石CL图像色律强弱不等,部分呈黑色,这种差异可能

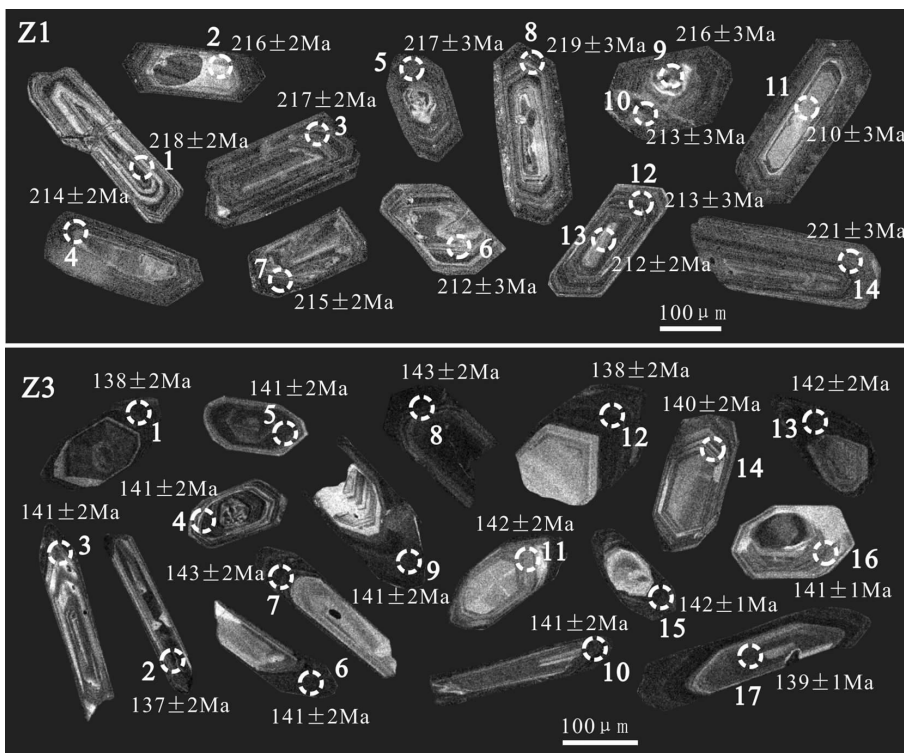


图2 锆石阴极发光照片

Fig.2 Cathodoluminescence images of zircons

反映了不同锆石颗粒之间 Th、U 等元素的不同。

在对锆石 CL 图像分析研究的基础上,选择了不同形貌、不同发光强度、核-边发育锆石的不同部位,对样品 Z1 和 Z3 分别测得 14、17 个 U-Th-Pb 同位素数据(表 1)。对应锆石的谐和图和年龄频谱

见图 3~4。Z1 中 14 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值变化于 210~219 Ma, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(215.5\pm 1.5)\text{Ma}(2\sigma, \text{MSWD}=1.18)$ 。Z3 中 17 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值变化于 137~143 Ma, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(140.6\pm 0.8)\text{Ma}(2\sigma, \text{MSWD}=1.4)$,

表 1 锆石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U- Th-Pb analytical data

测点号	含量/ 10^{-6}			同位素比值								年龄/Ma							
	Pb	Th	U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	1σ
Z1-1	63.9	894.8	2154.8	0.05074	0.00015	0.24022	0.00214	0.03432	0.00028	0.00037	0.00010	227.8	0.9	218.6	1.7	217.6	1.7	7.4	2.1
Z1-2	83.3	676.2	1873.2	0.05317	0.00021	0.24982	0.00214	0.03411	0.00028	0.00044	0.00013	344.5	9.3	226.4	1.7	216.2	1.8	8.9	2.5
Z1-3	59.3	701.4	1952.0	0.05163	0.00015	0.24315	0.00250	0.03418	0.00035	0.00053	0.00015	333.4	7.4	221.0	2.0	216.7	2.2	10.7	3.1
Z1-4	47.2	705.5	1368.4	0.05068	0.00017	0.23561	0.00220	0.03375	0.00032	0.00076	0.00023	233.4	7.4	214.8	1.8	214.0	2.0	15.5	4.7
Z1-5	52.1	477.9	1864.9	0.05117	0.00016	0.24128	0.00309	0.03418	0.00041	0.00083	0.00026	255.6	7.4	219.5	2.5	216.7	2.6	16.8	5.2
Z1-6	33.2	415.7	1245.0	0.05097	0.00024	0.23492	0.00381	0.03346	0.00054	0.00079	0.00025	239.0	11.1	214.3	3.1	212.2	3.4	16.0	5.1
Z1-7	56.8	391.3	2233.7	0.05169	0.00016	0.24111	0.00272	0.03384	0.00038	0.00111	0.00035	272.3	7.4	219.3	2.2	214.5	2.4	22.4	7.1
Z1-8	54.4	582.3	1669.8	0.05182	0.00019	0.24710	0.00309	0.03459	0.00042	0.00091	0.00025	276.0	-23.1	224.2	2.5	219.2	2.6	18.4	5.0
Z1-9	31.5	150.2	791.1	0.05178	0.00024	0.24315	0.00351	0.03407	0.00047	0.00150	0.00039	276.0	11.1	221.0	2.9	215.9	2.9	30.4	7.8
Z1-10	42.1	331.2	2203.1	0.05109	0.00015	0.23680	0.00299	0.03362	0.00042	0.00107	0.00026	255.6	5.6	215.8	2.5	213.2	2.6	21.5	5.2
Z1-11	23.9	358.0	854.8	0.05072	0.00029	0.23142	0.00392	0.03312	0.00054	0.00106	0.00025	227.8	13.0	211.4	3.2	210.0	3.4	21.4	5.0
Z1-12	122.0	1830.9	2659.8	0.05302	0.00017	0.24518	0.00390	0.03357	0.00055	0.00088	0.00021	327.8	12.0	222.7	3.2	212.9	3.4	17.8	4.3
Z1-13	14.9	175.9	343.1	0.05066	0.00030	0.23316	0.00288	0.03341	0.00038	0.00112	0.00030	233.4	13.0	212.8	2.4	211.9	2.4	22.6	6.1
Z1-14	24.2	256.1	596.9	0.05355	0.00035	0.25694	0.00378	0.03489	0.00051	0.00115	0.00033	353.8	12.0	232.2	3.1	221.1	3.2	23.3	6.6
Z3-1	10.0	231.1	576.7	0.04811	0.00023	0.14317	0.00169	0.02159	0.00023	0.00117	0.00019	105.6	8.3	135.9	1.5	137.7	1.5	23.6	3.8
Z3-2	17.5	88.9	1661.8	0.04917	0.00016	0.14599	0.00169	0.02154	0.00024	0.00171	0.00039	166.8	7.4	138.4	1.5	137.4	1.5	34.6	7.8
Z3-3	23.2	475.5	1272.5	0.04834	0.00014	0.14710	0.00174	0.02206	0.00025	0.00091	0.00024	122.3	7.4	139.3	1.5	140.7	1.6	18.3	4.8
Z3-4	16.9	29.6	1661.2	0.04910	0.00014	0.14930	0.00196	0.02205	0.00028	0.00482	0.00186	153.8	10.2	141.3	1.7	140.6	1.8	97.1	37.4
Z3-5	16.9	248.0	1123.9	0.04890	0.00018	0.14875	0.00197	0.02207	0.00029	0.00082	0.00037	142.7	-25.0	140.8	1.7	140.7	1.8	16.5	7.5
Z3-6	10.2	207.8	538.7	0.04852	0.00026	0.14759	0.00208	0.02204	0.00027	0.00082	0.00045	124.2	38.9	139.8	1.8	140.5	1.7	16.6	9.1
Z3-7	8.3	42.0	582.9	0.04694	0.00026	0.14516	0.00176	0.02245	0.00025	0.00368	0.00100	55.7	13.0	137.6	1.6	143.1	1.6	74.2	20.2
Z3-8	29.4	12.7	3218.2	0.04830	0.00011	0.14884	0.00179	0.02235	0.00026	0.01433	0.00491	122.3	5.6	140.9	1.6	142.5	1.6	287.7	97.9
Z3-9	139.5	4639.6	2823.0	0.04928	0.00012	0.15072	0.00183	0.02219	0.00027	0.00133	0.00024	161.2	7.4	142.6	1.6	141.5	1.7	26.9	4.8
Z3-10	9.8	218.7	624.0	0.04756	0.00020	0.14501	0.00185	0.02211	0.00026	0.00123	0.00021	76.0	4.6	137.5	1.6	141.0	1.7	24.8	4.3
Z3-11	9.9	43.4	732.1	0.04814	0.00020	0.14780	0.00170	0.02229	0.00025	0.00407	0.00070	105.6	13.9	140.0	1.5	142.1	1.6	82.0	14.0
Z3-12	32.8	20.8	3110.4	0.05107	0.00013	0.15275	0.00184	0.02170	0.00026	0.00893	0.00161	242.7	5.6	144.3	1.6	138.4	1.6	179.7	32.2
Z3-13	34.4	153.7	3410.6	0.04861	0.00013	0.14918	0.00181	0.02227	0.00027	0.00247	0.00043	127.9	38.0	141.2	1.6	142.0	1.7	49.9	8.6
Z3-14	13.6	142.0	1000.6	0.04833	0.00016	0.14637	0.00191	0.02196	0.00028	0.00141	0.00025	122.3	7.4	138.7	1.7	140.1	1.7	28.5	5.0
Z3-15	51.2	122.9	4072.6	0.05151	0.00025	0.15737	0.00119	0.02223	0.00019	0.00230	0.00044	264.9	11.1	148.4	1.0	141.7	1.2	46.3	8.9
Z3-16	8.2	39.3	901.6	0.04824	0.00017	0.14669	0.00154	0.02205	0.00022	0.00258	0.00058	122.3	9.3	139.0	1.4	140.6	1.4	52.1	11.8
Z3-17	19.9	436.0	1037.1	0.04885	0.00019	0.14658	0.00120	0.02176	0.00016	0.00077	0.00022	139.0	9.3	138.9	1.1	138.8	1.0	15.5	4.4

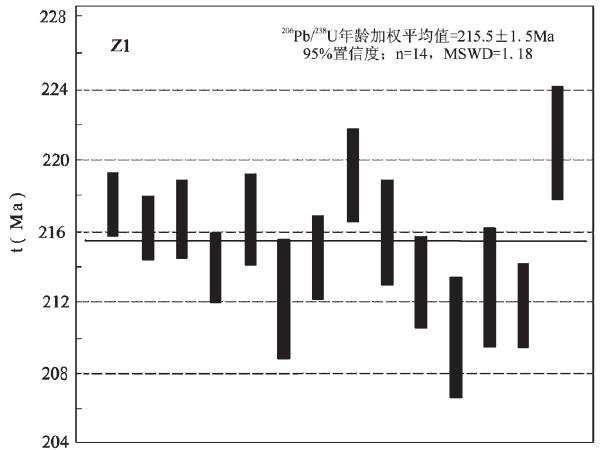
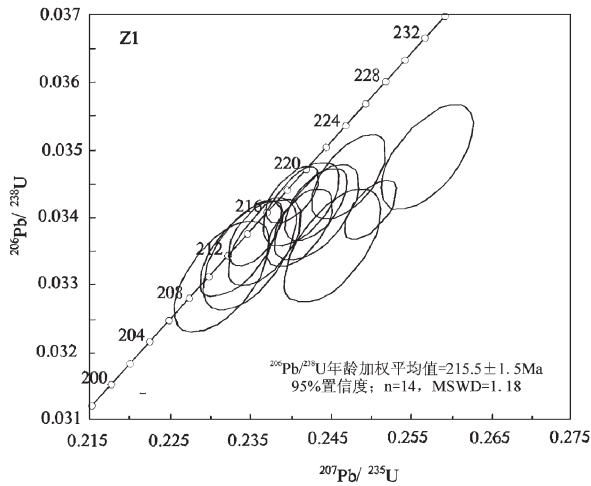


图3 样品锆石 U-Pb 谐和图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄图
 Fig.3 Zircon U-Pb concordia and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age diagram of sample

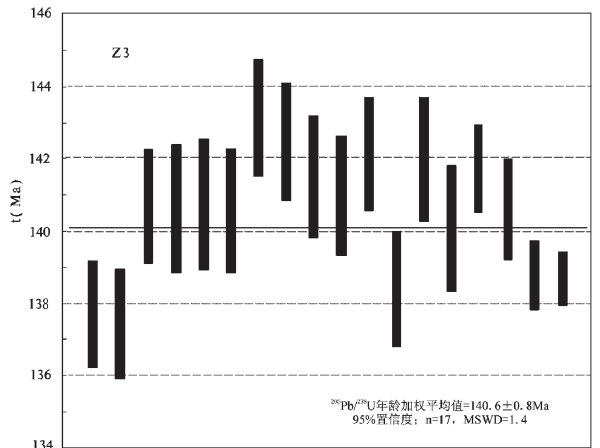
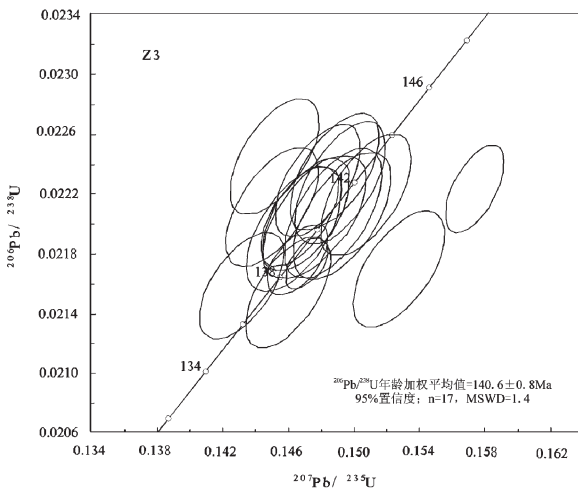


图4 样品锆石 U-Pb 谐和图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄图
 Fig.4 Zircon U-Pb concordia and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age diagram of sample

应为花岗岩的成岩年龄。

3 岩石地球化学特征

岩石主量元素、微量元素和稀土元素分析结果(表2)显示:晚三叠世花岗岩岩石酸性程度较低, SiO_2 含量 67.28%~73.89%, 平均为 71.12%; 全碱较高, $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 含量 6.36%~8.47%, 平均为 7.55%, 多数 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 0.89~2.71; 铁、镁、钙等含量相对较低。ASI 值均大于 1.06(1~1.26), 平均 1.16。早白垩世花岗岩相对晚三叠世花岗岩酸性程度更高, SiO_2 含量 73.39%~74.49%; 平均为 74.08%; 全

碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)含量 7.24%~8.85%, 平均为 7.99%, $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 1.78~2.45。ASI 值均大于 1.16(1.16~1.45), 平均 1.33。在主量元素及特征参数判别图解中(图5), 晚三叠世第一期为镁质(第三期有向铁质过渡趋势), 为过铝质、高钾钙碱性岩系; 而早白垩世花岗岩向铁质过渡, 为强过铝质、高钾钙碱性岩系。

两时代花岗岩岩石微量元素以高亲铜成矿元素及稀有、稀土等元素及低 Cr、Ni、Co、Ba、Sr 等亲石元素为特征。部分微量元素比值: 晚三叠世花岗岩 Rb/Sr 比值较低且变化较大(0.94~8.98); 低 Rb/Ba

表 2 主量元素、微量元素和稀土元素分析结果
Table 2 Major elements, trace elements and REE analytical data

分析项目	晚三叠世细中粒斑状黑(二)云母二长花岗岩										早白垩世细粒二云母二长花岗岩					
	Z1	D12-2	D13	D14	D0010	D0013	D9	D9-3	D0003-4	D0004	Z3	D3-4	D0009	D0007	D0008-1	
SiO ₂	72.16	68.62	67.28	67.34	73.63	68.56	73.45	73.22	73.89	73.02	74.4	73.39	74.19	74.49	73.91	
TiO ₂	0.29	0.44	0.48	0.55	0.19	0.48	0.17	0.21	0.24	0.27	0.15	0.24	0.21	0.15	0.12	
Al ₂ O ₃	15.22	15.82	16.47	15.94	14.59	16.09	15.09	14.56	14.79	14.82	14.65	14.55	15.07	14.89	15.51	
Fe ₂ O ₃	0.67	0.78	0.57	0.7	0.25	0.52	0.24	0.31	0.24	0.57	0.28	0.39	0.26	0.38	0.40	
主量元素	FeO	1.58	2.26	2.74	2.98	1.8	2.95	1.31	1.39	1.69	1.67	1.07	1.38	1.65	1.16	1.24
	MnO	0.07	0.07	0.08	0.08	0.03	0.06	0.05	0.06	0.03	0.06	0.05	0.03	0.03	0.02	
	MgO	0.91	1.49	1.67	1.79	0.44	1.55	0.39	0.45	0.46	0.41	0.33	0.45	0.41	0.36	0.33
	CaO	1.67	3.3	3.56	3.38	1.00	3.29	0.83	1.13	0.87	0.88	0.86	1.03	0.7	0.78	0.92
	Na ₂ O	2.68	3.37	3.7	3.36	2.48	3.13	2.71	2.92	2.32	2.21	2.90	2.76	2.23	2.51	2.10
	K ₂ O	4.67	3.70	3.31	3.73	5.43	3.23	5.63	5.55	5.41	5.99	5.15	5.68	5.14	5.06	5.14
	P ₂ O ₅	0.09	0.13	0.14	0.15	0.16	0.14	0.12	0.19	0.06	0.13	0.15	0.07	0.11	0.18	0.32
	灼失	1.14	0.39	0.43	0.45	0.54	0.46	0.90	0.48	0.82	0.76	0.59	0.70	0.32	0.84	0.98
	总量	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
稀土元素	La	17.4	26.6	36.8	40.4	39.5	42.0	28.5	43.4	51.2	68.8	26.0	45.3	34.3	22.5	12.7
	Ce	43.0	52.7	76.8	80.0	82.3	81.9	53.3	85.6	94.7	132	44.7	93.7	75.0	39.9	26.9
	Pr	3.73	5.46	7.12	8.20	9.15	8.14	6.54	10.1	11.0	15.6	5.80	10.1	7.91	5.14	3.24
	Nd	12.7	18.8	24.0	27.8	30.6	26.4	22.8	36.9	36.8	52.6	20.9	34.4	26.7	17.4	11.4
	Sm	2.84	3.79	4.26	4.79	5.94	4.81	4.40	7.24	6.93	8.68	4.50	6.59	4.85	3.86	3.34
	Eu	0.53	0.95	0.91	0.88	0.60	0.85	0.40	0.64	0.91	0.78	0.42	0.75	0.51	0.47	0.30
	Gd	2.40	3.39	3.48	3.98	4.13	4.38	2.94	4.66	4.44	4.84	2.99	4.05	3.64	3.15	3.83
	Tb	0.37	0.50	0.58	0.56	0.49	0.67	0.38	0.63	0.43	0.51	0.43	0.45	0.44	0.41	0.71
	Dy	2.27	2.91	3.32	3.02	2.13	4.11	1.68	2.47	1.57	2.03	1.84	1.46	1.95	1.94	4.26
	Ho	0.44	0.54	0.67	0.55	0.32	0.80	0.25	0.35	0.20	0.32	0.28	0.20	0.29	0.30	0.70
	Er	1.47	1.73	2.03	1.66	0.68	2.23	0.66	1.08	0.44	0.73	0.75	0.54	0.63	0.67	1.71
	Tm	0.21	0.21	0.29	0.22	0.10	0.36	0.06	0.13	0.06	0.12	0.08	0.06	0.09	0.10	0.25
	Yb	1.47	1.43	1.98	1.35	0.62	2.29	0.46	0.76	0.45	0.79	0.61	0.38	0.57	0.63	1.44
	Lu	0.23	0.19	0.30	0.19	0.09	0.34	0.07	0.10	0.07	0.11	0.08	0.05	0.08	0.09	0.20
Y	11.7	16.4	20.8	16.8	8.53	22.9	6.61	11.4	5.50	8.66	8.26	5.64	7.42	8.58	21.9	
	ΣREE	100.76	135.6	183.34	190.4	185.17	202.17	129.05	205.5	214.72	296.56	117.64	203.7	164.38	105.13	92.88
	ΣCe/ΣY	3.90	3.97	4.48	5.72	9.84	4.31	8.84	8.52	15.30	15.39	6.68	14.87	9.88	5.63	1.65
	(La/Yb) _N	7.03	11.04	11.04	17.77	37.77	10.89	36.79	33.91	67.11	51.71	25.31	70.78	36.05	21.24	5.24
	δEu	0.66	0.87	0.77	0.66	0.38	0.61	0.35	0.34	0.51	0.36	0.36	0.45	0.39	0.43	0.28
微量元素	Sc	6.51	9.77	9.43	10.3	2.79	9011	2.85	3.87	2.81	4.80	4.11	3.27	3.57	3.75	4.97
	V	26.1	41.9	46.7	58.4	11.4	53.1	9.49	10.4	10.9	15.2	5.70	9.96	12.9	5.97	2.22
	Cr	22.0	39.6	45.8	49.1	16.7	33.8	8.26	8.16	7.91	7.97	6.34	8.70	11.4	7.57	6.45
	Ni	9.37	20.7	21.3	27.6	10.4	19.8	3.39	4.08	2.92	2.99	2.54	3.20	3.89	3.23	2.76
	Cu	12.7	23.8	16.8	20.2	18.1	19.1	4.97	18.8	7.15	15.1	4.32	5.63	12.5	16.1	10.8
	Zn	38.4	53.2	54.7	66.6	66.1	60.2	51.9	69.8	72.9	71.8	48.9	62.1	71.1	48.0	41.0
	Sr	122	219	224	210	67.4	208	50.9	59.0	112	93.9	43.1	105	71.1	67.7	52.5
	Co	5.02	8.85	9.52	11.6	5.06	10.2	2.51	2.71	3.14	3.81	1.51	2.81	3.78	1.97	1.49
	Rb	339	206	264	295	356	227	448	530	388	384	442	458	401	216	313
	Zr	96.4	161	240	208	112	180	111	127	126	172	90.0	175	120	55.5	63.5
	Nb	9.06	8.32	11.9	10.8	14.9	14.5	14.7	18.1	10.4	14.7	13.4	8.12	17	11.3	20.1
	Ta	1.67	0.94	1.37	1.02	3.03	3.27	1.74	3.25	1.26	4.01	1.91	0.55	3.26	2.76	3.12
	Pb	63.5	42.2	45.8	38.5	55.5	45.8	59.3	55.3	65.9	67.8	44.4	65.5	57.1	48.5	51.1
	Th	25.2	18.8	22.6	28.2	25.2	21.3	25.5	33.7	34.8	46.4	18.4	34.3	28.4	12.0	7.51
U	3.90	3.73	4.16	4.03	5.82	3.19	4.34	4.73	3.96	6.26	4.12	4.36	4.53	2.61	5.88	
Ga	18.1	19.6	21.6	22.1	22.6	21.4	22.5	27.3	22.2	21.4	27.3	21.6	24.9	24.4	30.4	
Hf	3.04	4.17	6.17	5.51	4.95	3.16	3.61	4.51	5.75	1.91	3.24	5.15	4.12	2.56	3.10	
Ba					274	576			635	490			293	271	87.9	

注:空白为未分析;主元素含量已去水化处理,总量不含灼失;分析单位:Ba 有结果的样为武汉综合岩矿测试中心,其余为国家地质实验测试中心;测试方法:主量元素采用四硼酸锂熔片-XRF 分析法,在 X 荧光光谱仪 PW4400 上完成;微量元素、稀土元素等在等离子质谱(X-series)上完成。

比值(0.39~1.30);低 Sr/Ba 比值(0.3~0.5);高 Nb/Ta 比值(3.67~10.59)。早白垩世花岗岩 Rb/Sr 比值较低且变化较大,变化于 3.19~10.26;低 Rb/Ba 比值(0.80~3.56);低 Sr/Ba 比值(0.24~0.6);高 Nb/Ta 比值(4.09~14.76)。Sr*、Nb* 值均小于 1,为铯和铌亏损型,说明岩石为花岗质成分;K* 大于 1,为钾富集型,表明岩浆物质成分可能来源于下地壳或地幔^[5]。

在微量元素比值蛛网图上(图 6),两时代花岗岩各岩石单元曲线相似,总体具 Ba、Nb、Sr、P、Ti 等元素负异常,显示 S 型花岗岩特征,同时具 Th 高度富集,又反映有 I 型花岗岩曲线的特点。早白垩世花岗岩比晚三叠世花岗岩 Ba、Nb、Sr 等元素负异常更明显,反映其物质成分更具地壳特征。

在岩石稀土元素总量方面;晚三叠世花岗岩略高,一般为 $129 \times 10^{-6} \sim 297 \times 10^{-6}$,平均 184.7×10^{-6} ;早白垩世花岗岩 $93 \times 10^{-6} \sim 204 \times 10^{-6}$,平均 137×10^{-6} 。轻重稀土比值($\Sigma Ce / \Sigma Y$):晚三叠世花岗岩较大,为 3.90~15.39(平均 8.03);早白垩世花岗岩较小,为 1.65~14.87(平均 7.74)。(La/Yb)_N 值:晚三叠世花岗岩较小,为 7.03~37.77(平均 28.51);早白垩世花岗岩较大,为 5.24~70.78(平均 31.72)。两者均为轻稀土富集型。 δEu 值晚三叠世花岗岩较大,在 0.34~0.87 之间,平均为 0.55;而早白垩世花岗岩较小,在 0.28~0.45 之间,平均为 0.38;表明大多数钕为中度亏损。在稀土元素配分型式图(图 7)中,各时代花岗岩岩石单元曲线大致相似,总体为向右倾斜曲线,晚三叠世花岗岩钕谷较小,重稀土一侧较平缓;而早白垩世花岗岩钕谷较大,重稀土一侧为较陡倾斜曲线。

Rb-Sr 及 Sm-Nd 同位素由中国地质科学院地质研究所同位素实验室用 Nu Plasam HR MC-ICP-MS(Nu Instruments)仪器测试完成,标准测定结果:JMC Nd₂O₃ ¹⁴³Sm/¹⁴⁴Nd=0.511125, ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 变化于 0.08813~0.1097, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 在 0.512040~0.512132,以 $\pm(2\sigma)$;Nd 同位素质量分馏采用 ¹⁴³Sm/¹⁴⁴Nd=0.7219 校正,其结果见表 3。岩石分别以 216 Ma 和 140 Ma 计算出的 Rb-Sr 初始值(I_{Sr})两时代花岗岩相对较大,晚三叠世花岗岩为 0.7093~0.7189,平均 0.7147;早白垩世花岗岩在 0.7172~0.7185,平均 0.7179。 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值均较小,其中晚三叠世花岗岩略大,为 -7.86~-11.13,平均 -9.20;早白垩世花岗岩较小,为 -11.12~-11.38,平均 -11.25; T_{DM} 值晚三叠世花岗岩为 1.63~1.90 Ga,平均为 1.74 Ga;早白垩

世花岗岩为 1.85~1.90 Ga,平均为 1.87 Ga。

4 花岗岩成因及形成构造环境探讨

野外调查及室内综合研究表明,两时代各期次花岗岩岩石单元均具花岗结构,岩体与围岩呈侵入接触,界线突变,热接触变质现象明显,表明花岗岩岩石单元均为岩浆结晶作用下的产物。花岗岩岩石酸性程度较高,岩石类型变化简单,从早到晚由黑云母二长花岗岩—二云母二长花岗岩组成,晚三叠世早期有少数岩石为花岗闪长岩,含较多的角闪石,并含有较多的暗色镁铁质微粒包体;晚期和早白垩世花岗岩中含典型的原生白云母矿物。岩石中副矿物主要有磷灰石、电气石、锆石、钛铁矿。CIPW 标准矿物中两时代花岗岩均出现较多的刚玉分子,并多数为 1%~5%。在花岗岩 $\varepsilon_{Sr}(t) - \varepsilon_{Nd}(t)$ 图解中(图 8),晚三叠世花岗岩早期岩石单元样点落在 I 型花岗岩区域,其余均落在 S 型花岗岩范围之内,表明晚三叠世早期花岗岩具 I 型花岗岩特征,晚期及早白垩世花岗岩具 S 型花岗岩特征,总体应为下地壳物质和上地壳物质混合而成。花岗岩属过铝质—强过铝质,有较高的分异指数 DI(晚三叠世花岗岩平均为 81.83;早白垩世花岗岩平均为 88.80);高 Al₂O₃,低 CaO, K₂O+Na₂O 中等,低 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(-7.86~-11.38)。晚三叠世早期岩石单元片麻理作用明显,片麻理方向与岩体西部韧性剪切带走向一致。综合上述特征,南岳岩体花岗质岩石应属于 Barbarin 分类中的 MPG^[19-21]。MPG 花岗岩主要通过地壳岩石的“湿”深熔作用和岩浆的结晶分馏作用形成,主要产在受大型的地壳剪切构造或逆掩断层构造使地壳加厚造山带中^[22],这与实际地质特征相吻合。

在 Sr-Nd 同位素组成上,南岳花岗岩具有高 I_{Sr} 值(0.7093~0.7189),低 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(-8.04~-11.38),在 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_t - $\varepsilon_{Nd}(t)$ 图解中(图 9),多数花岗岩样品分布于新地壳一侧,而晚三叠世部分岩石向地幔方向演化,可能说明花岗岩物质成分有下地壳物质的参与。在花岗岩的 $t - \varepsilon_{Nd}(t)$ 图解中,样品投影于 1 800 Ma 地壳附近(图 10),表明南岳花岗岩可能是华南前寒武纪的基底岩石部分熔融形成的。

有研究表明华南印支期形成于同造山阶段的后碰撞构造环境。在湘东及湘东南,中三叠世后期为印支运动陆内俯冲造山作用的主要时期,其造成区内泥盆纪—中三叠世早期地层褶皱回返,海洋盆地封

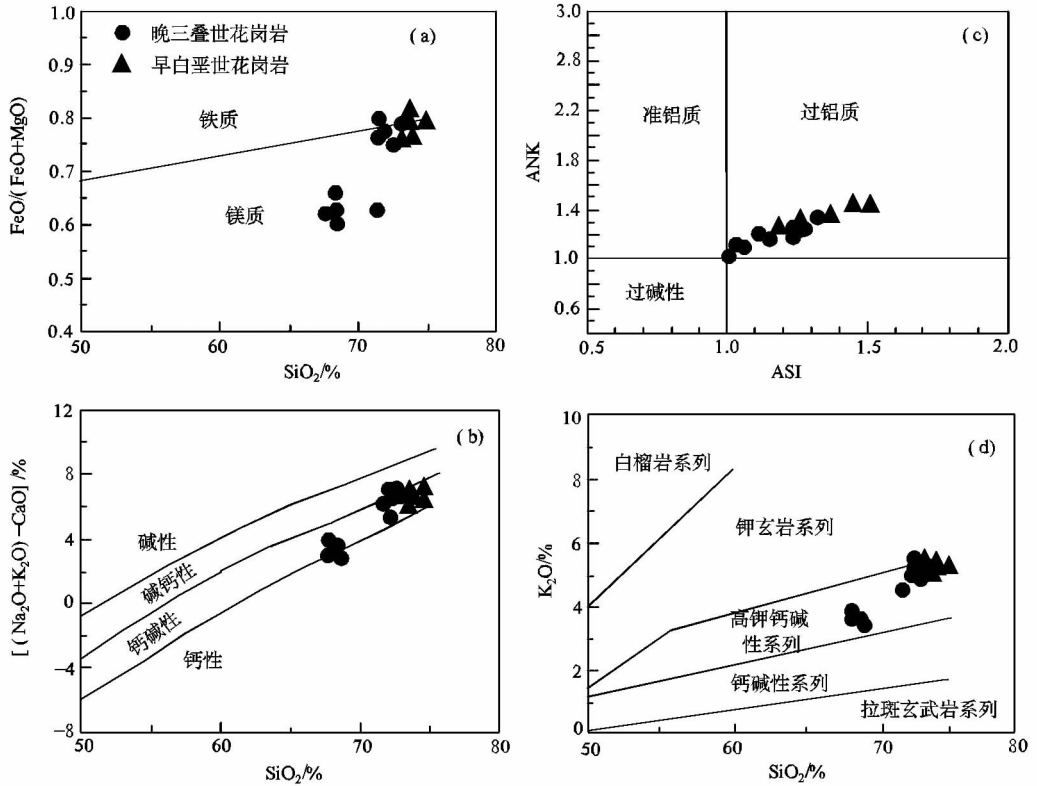


图 5 南岳花岗岩 SiO_2 - $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ (a), SiO_2 - $[(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{CaO}]$ (b), $\text{ASI}-\text{ANK}$ (c), SiO_2 - K_2O (d)图解

(a-c 据 Frost 等,2001^[15]; d 据 Peccerillo 等,1976^[16])

Fig.5 SiO_2 - $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ (a), SiO_2 - $[(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{CaO}]$ (b), $\text{ASI}-\text{ANK}$ (c), SiO_2 - K_2O -(d) diagrams of Nanyue granites

(a-c after Frost et al, 2001^[15]; d after Peccerillo et al,1976^[16])

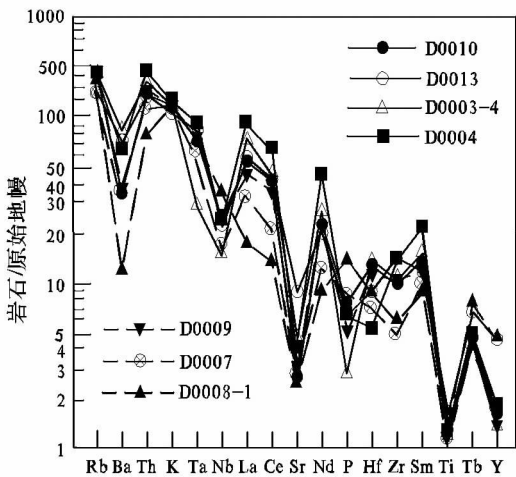


图 6 南岳花岗岩微量元素原始地幔标准化蛛网图 (原始地幔数据自 Wood(1979),转引自李昌年, 1992^[17])

Fig.6 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram for Nanyue granites (primitive mantle data after Wood (1979), from Li Changnian1992^[17])

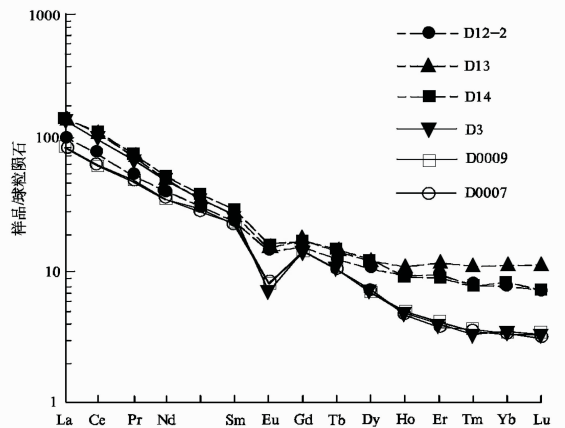


图 7 南岳花岗岩稀土元素配分型式图

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns for Nanyue granites

表3 南岳花岗岩 Rb-Sr 及 Sm-Nd 同位素组成
Table 3 Rb-Sr and Sm-Nd isotope compositions of Nanyue granites

序号	样号	年龄	Rb/10 ⁻⁶	Sr/10 ⁻⁶	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	±2σ	ε _{Sr}	I _{Sr}
1	Z1	216	149	99.1	4.356	0.731772	14	127.71	0.7184
2	D12-2	216	111	139	2.305	0.723876	15	29.58	0.7093
3	D13	216	111	139	2.305	0.723876	15	174.52	0.7158
4	D14	216	142	127	3.236	0.725198	15	160.47	0.7153
5	D9	216	343	57.3	17.396	0.753813	13	-4951.79	0.7189
6	D9-3	216	293	48.5	17.576	0.760923	15	30.14	0.7105
7	Z3	140	330	43.3	22.161	0.762548	14	138.23	0.7185
8	D3-4	140	261	87.5	8.664	0.743857	14	169.46	0.7172

序号	Sm/10 ⁻⁶	Nd/10 ⁻⁶	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	±2σ	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd (t)	ε _{Nd} (t)	T _{DM} /Ma	T _{DM} ² /Ma
1	2.395	10.912	0.1327	0.512074	7	0.51189	-9.24	2018	1742
2	3.477	17.507	0.1201	0.512127	12	0.51196	-7.86	1662	1631
3	3.566	19.562	0.1103	0.512104	5	0.51195	-8.04	1539	1645
4	4.032	22.726	0.1073	0.5121	9	0.51177	-8.04	1502	1645
5	4.752	26.158	0.1099	0.511945	7	0.51179	-11.13	1765	1896
6	6.423	33.254	0.1168	0.511966	8	0.5118	-10.91	1857	1878
7	4.567	21.568	0.1281	0.511992	9	0.51187	-11.38	2055	1854
8	6.495	34.293	0.1146	0.511952	5	0.51179	-11.12	1837	1895

注: ε_{Nd} (t)、ε_{Sr} (t)、I_{Sr} 和 T_{DM} 的计算据陈江峰和江博明 (1999)^[18]; 计算参数为: t=420 Ma, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} = 0.512638, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} = 0.1967, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_{UR} = 0.7045, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{CC} = 0.118, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{DM} = 0.2137, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{DM} = 0.513151, λ_{Sm} = 6.54 × 10⁻¹² a⁻¹, λ_{Rb} = 1.42 × 10⁻¹¹ a⁻¹。参数中下角字母代表的含义: UR—铀同位素均一储库; CHUR—球粒陨石均一储库; DM—亏损地幔; CC—大陆地壳。

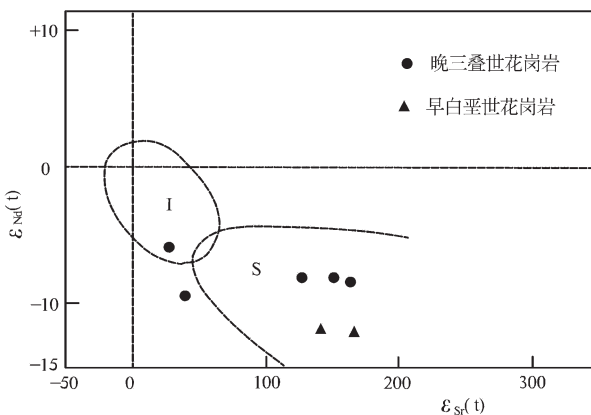


图8 南岳花岗岩的 ε_{Sr}(t) - ε_{Nd}(t)图解
Fig.8 ε_{Sr}(t) - ε_{Nd}(t) diagram of Nanyue granites

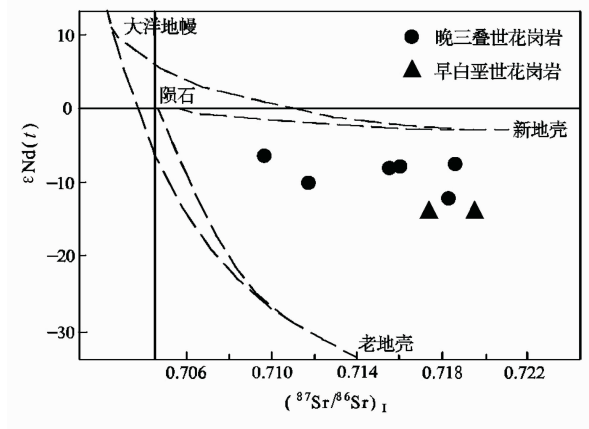


图9 南岳花岗岩的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_t - ε_{Nd}(t)图解
Fig.9 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_t - ε_{Nd}(t) - diagram of Nanyue granites

闭, 以及晚三叠世—侏罗纪陆相盆地沉积与中三叠世早期地层的角度不整合; 而该区印支期花岗岩的具体时限为中三叠世末—晚三叠世后期 (230~205 Ma)。湘东南印支期花岗岩也是在挤压峰期之后才形成和侵位^[23-25]。

花岗岩地球化学特征既可以反映其源区的性质, 同时也可提供构造环境方面的信息^[26-27]。南岳岩体晚三叠世及早白垩世花岗岩主元素均反映出岩石具高钾钙碱性、过铝质—强过铝质特性, 矿物组合和化学成份又类似于 MPG 类型。高钾钙碱性、过铝质

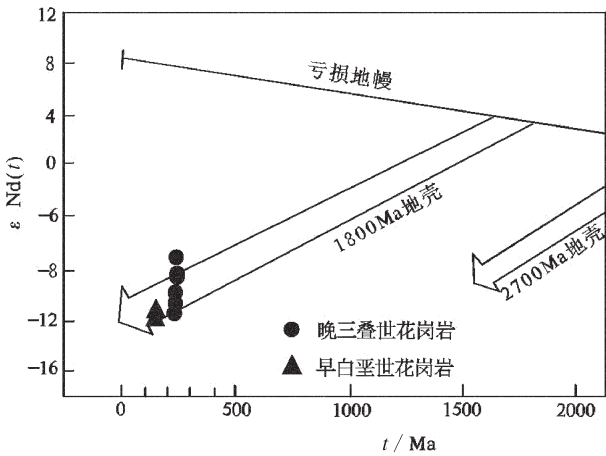


图 10 花岗岩的 $t-\epsilon_{Nd}(t)$ 图解

Fig.10 $t-\epsilon_{Nd}(t)$ diagram of Nanyue granites

花岗岩主要产于大陆碰撞环境^[28],代表了大陆碰撞事件的结束,指示大陆汇聚向离散的转折;白云母二云母花岗岩是与陆-陆碰撞作用有关的陆壳岩石熔融产物^[29]。在 Maniar 和 Piccoli (1989)提出的多组

主元素构造环境判别图解中(图 11)^[30-31],岩石样品点投影清楚显示为 IAG+CAG+CCG 一侧的 POG 特征。以一些蚀变过程中不活泼的元素进行构造环境判别(图 12),样品点总体位于同碰撞花岗岩区与火山弧花岗岩交界线附近的同碰撞花岗岩一侧,暗示形成于碰撞造山向非造山转化过渡的后造山环境。结合华南及湘东地区印支期陆内造山地球动力学特点,笔者推断南岳岩体晚三叠世及早白垩世花岗岩形成的构造背景大体相似,相当于碰撞造山作用晚期或结束时期。

5 结论

(1)南岳岩体为复式岩体,主体形成于晚三叠世,其锆石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(215.5±1.5)Ma;部分小岩体形成于早白垩世,锆石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(140.6±0.8)Ma。

(2)晚三叠世花岗岩岩石属镁质、过铝质、高钾钙碱性花岗岩系列;早白垩世花岗岩岩石属铁质、强过铝质、高钾钙碱性花岗岩系列。均具典型 MPG 型花岗岩特征(含白云母过铝质花岗岩类),其成因主

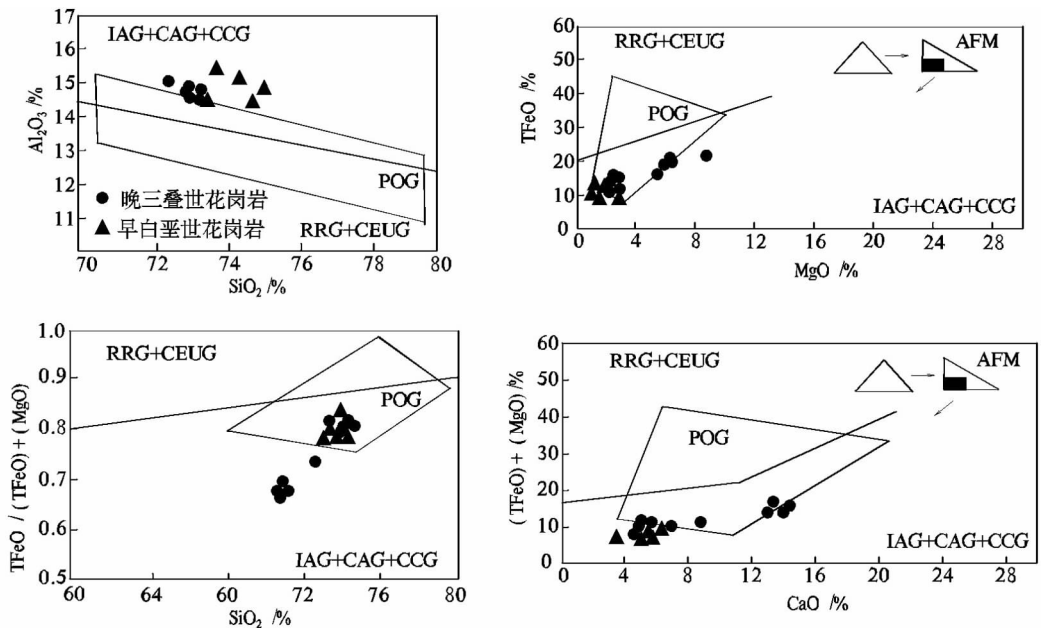


图 11 南岳花岗岩形成的构造环境判别图(据 Maniar 和 Piccoli,1989^[31])

IAG—岛弧花岗岩;RRG—与裂谷有关的花岗岩;CAG—大陆弧花岗岩类;CEUG—大陆的造陆抬升花岗岩类;CCG—大陆碰撞花岗岩类;POG—后造山花岗岩类

Fig.11 Diagrams for discrimination of structural environment of Nanyue granites (after Maniar and Piccoli, 1989^[31])

IAG—Island-arc granite; RRG—Granite related to rift; CAG—Continent-arc granite; CEUG—Continent emerge-uplift granite; CCG—Continent-collision granite; POG—Post-orogenic granite

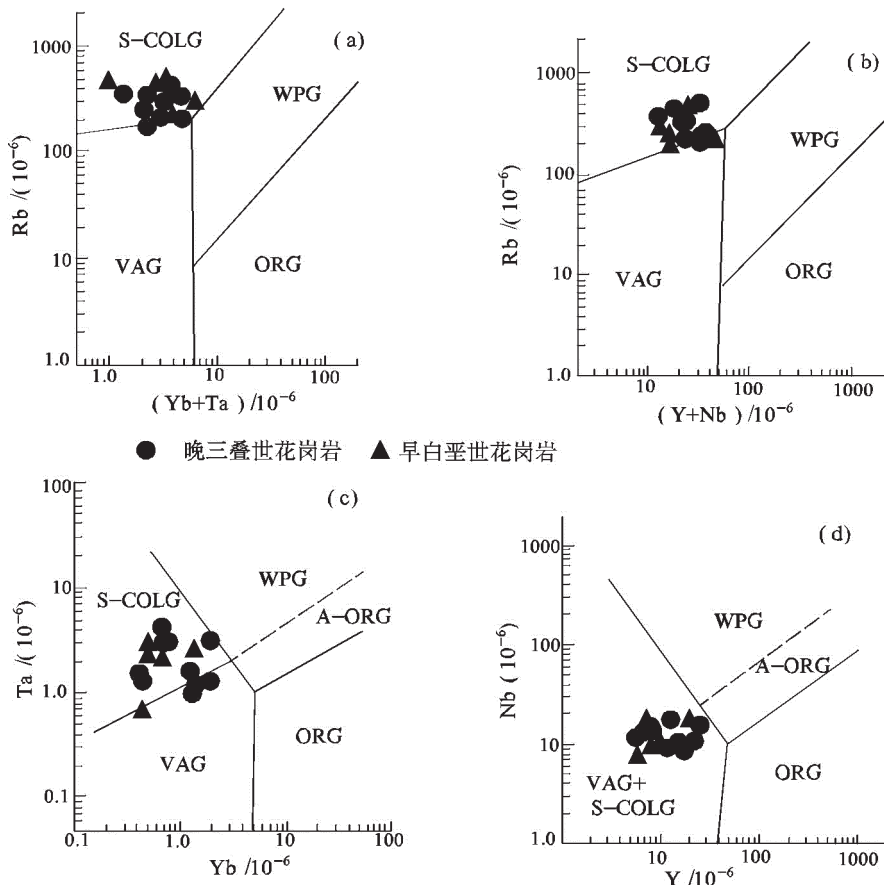


图 12 花岗岩微量元素构造环境判别图解(据 Pearce 等,1984^[26])

VAG—火山弧花岗岩;WPG—板内花岗岩;S-COLG—同碰撞花岗岩;ORG—洋中脊花岗岩; A-ORG—异常洋中脊花岗岩

Fig.12 Discrimination diagrams for granites (after Pearce et al., 1984^[26])

VAG—Volcanic-arc granite; WPG—Intraplate granite; S-COLG—Syncollision granite; ORG—Ocean-ridge granite; A-ORG—abnormal Ocean-ridge granite

要为前寒武纪的基底岩石或中、下地壳物质部分熔融形成的,同时晚三叠世花岗岩有少量的地幔物质加入。

(3)综合华南及湘东地区中生代以来陆内造山地球动力学特点,结合花岗岩体自身地球化学特征,南岳花岗岩体形成于碰撞造山作用晚期或结束时期,是陆内碰撞造山作用增温减压体制下的产物。

参考文献 (References):

[1] 饶家荣,肖海云,刘耀荣,等. 扬子、华夏古板块会聚带在湖南的位置[J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 484-502.
 Raojiarong, Xiao Haiyun, Liu Yaorong, et al. Location of the Yangtze-Cathaysia plate convergence zone in Hunan [J]. Chinese J. Geophys. 2012, 55(2): 484-502(in Chinese).

[2] 杨明桂,黄水保,楼法生,等. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模

成矿作用[J]. 中国地质, 2009, 36(3): 528-543.
 Yang Minggui, Huang Shuibao, Lou Fasheng, et al. Lithospheric structure and large-scale metallogenic process in Southeast China continental area [J]. Geology in China, 2009, 36 (3): 528-543(in Chinese with English abstract).

[3] 李鹏春,许德如,陈广浩,等. 湘东北金井地区花岗岩成因及地球动力学暗示岩石学、地球化学和 Sr-Nd 同位素制约 [J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 921-934.
 Li Pengchun, Xu Deru, Chen Guanghao, et al. Constraints of petrography, geochemistry and Sr-Nd isotopes on the Jinjing granitoids from northeastern Hunan province, China: implications for petrogenesis and geodynamic setting [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3): 921-934(in Chinese with English abstract).

[4] 马铁球,李纲,柏道远,等. 湘北华容地区小墨山花岗岩体 SHRIMP U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. 资源调查与环境, 2012, 31(1): 1-11.
 Ma Tieqiu, Li Gang, Bai Daoyuan, et al. Zircon SHRIMP age and

- geochemical characteristics of Xiaomoshan granites in Huarong county, northern Hunan [J]. Resources Survey & Environment, 2010, 31(1): 1-11(in Chinese with English abstract).
- [5] 傅昭仁, 李紫金, 郑大瑜. 湘赣边 NNE 向走滑造山带构造发展样式[J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 263-272.
Fu Zhaoren, Li Zijin, Zheng Dayu. Structural pattern and tectonic evolution of NNE-trending strike-slip orogenic belt in the border region of Hunan and Jiangxi provinces [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(4): 263-272 (in Chinese with English abstract).
- [6] 贾大成, 胡瑞忠. 湘东北燕山晚期花岗岩构造环境判别 [J]. 地质地球化学, 2002, 30(2): 10-14.
Jia Dacheng, Hu Ruizhong. Tectonic setting discrimination of late Yanshanian granites in northeast Hunan Province [J]. Geology - Geochemistry, 2002, 30 (2): 10-14 (in Chinese with English abstract).
- [7] 贾大成, 胡瑞忠, 赵军红, 等. 湘东北中生代望湘花岗岩体岩石地球化学特征及其构造环境[J]. 地质学报, 2003, 77(1):98-103.
Jia Dacheng, Hu Ruizhong, Zhao Junhong, et al. Lithogeochemical characteristics of the Mesozoic granitic intrusion from the Wangxiang area in northeastern Hunan Province and its tectonic setting[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(1): 98-103 (in Chinese with English abstract).
- [8] Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N. Zircon M257: A homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon [J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2008, 32: 247-265.
- [9] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb age, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths [J]. Journal of Petrology, 2009, 51 (1/2): 537-571.
- [10] Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.0: Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 4: 1-70.
- [11] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 2009, 28(4): 481-192.
Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS [J]. Mineral Deposits, 2009, 28(4): 481-192(in Chinese with English abstract).
- [12] Sláma J, Kosler J, Condon D J. Plesovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis [J]. Chemical Geology, 2008, 249: 1-35.
- [13] Corfu F, Hancher J M, Hoskin P W O, et al. Atlas of zircon textures [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53: 469-500.
- [14] Wu Y B, Zheng Y F. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49: 1554-1569.
- [15] Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. A geochemical classification for granitic rocks [J]. Journal of Petrology, 2001, 42 (11): 2033-2048.
- [16] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. Contrib. Mineral Petrol. 1976, 58(1): 63-81.
- [17] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992: 09.
Li Changnian. Trace Element Lithology of Magmatic Rock [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1992(in Chinese).
- [18] 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 [C] //郑永飞. 化学地球动力学. 北京: 科学出版社, 1999: 262-287.
Chen Jiangfeng, Jiang Boming. Nd, Sr, Pb isotope traces and evolution of continental crust of SE China [C]// Zheng Yongfei. Chemical Geodynamics. Beijing: Science Press, 1999: 262-287 (in Chinese with English abstract).
- [19] Barbarin B. Granitoids: Main petrogenetic classifications in relation to origin and tectonic setting [J]. Geology Journal, 1990, 25: 227-238.
- [20] Barbarin B. Genesis of the two main types of peraluminous granitoids [J]. Geology, 1996, 24: 295-298.
- [21] Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments [J]. Lithos, 1999, 46: 605-626.
- [22] 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 72-75.
Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, et al. The Methods of Investigation on Granitoids [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 72-75 (in Chinese).
- [23] 柏道远, 汪永清, 王先辉, 等. 湖南衡阳燕山早期川口过铝花岗岩地球化学特征、成因与构造环境 [J]. 沉积与特提斯区地质, 2007, 27(2): 49-59.
Bai Daoyuan, Wang Yongqing, Wang Xianhui, et al. Geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of the early Yanshanian peraluminous granites in the Chuankou region, Hengyang, Hunan [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2007, 27(2): 49-59(in Chinese with English abstract).
- [24] 柏道远, 陈建成, 马铁球, 等. 王仙岭岩体地质地球化学特征及其对湘东南印支晚期构造环境的制约[J]. 地球化学, 2006, 35(2): 113-125.
Bai Daoyuan, Chen Jiancheng, Ma Tieqiu, et al. Geochemical characteristics of Wangxianling granitic pluton and its constraints on Late Indosinian tectonic setting of Southeast Hunan [J]. Geochimica, 2006, 35(2): 113-125(in Chinese with English abstract).
- [25] 柏道远, 马铁球, 王先辉, 等. 南岭中段中生代构造-岩浆活动与成矿作用研究进展[J]. 中国地质, 2008, 35(3): 436-455.
Bai Daoyuan, Ma Tieqiu, Wang Xianhui, et al. Progress in the study of Mesozoic tectono-magmatism and mineralization in the central segment of the Nanling Mountains—Summary of major achievements of the 1:250,000 geological survey in southeastern

- Hunan [J]. *Geology in China*, 2008, 35 (3): 436–455 (in Chinese with English abstract).
- [26] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic cointerpretation of granitic rocks[J]. *Petrology*, 1984, 25: 956–983.
- [27] Forster H J, Tischendorf G, Trumbull R B. An evaluation of the Rb vs. (Y+Nb) discrimination diagram to infer tectonic setting of silicic igneous rocks[J]. *Lithos*, 1997, 40: 261–293.
- [28] 王德滋, 周金城. 我国花岗岩研究的回顾与展望 [J]. *岩石学报*, 1999, 15(2): 161–169.
Wang Dezi, Zhou Jincheng. Look back and look forward to granite research[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15(2): 161–169 (in Chinese with English abstract).
- [29] Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. Geochemical characteristics of collision zone magmatism [C]//Coward M P, Rise A C (eds.). *Collision tectonics*. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, 1986, 19: 67–81.
- [30] 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 21–30.
Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, et al. *The Methods of Investigation on Granitoids* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 21–30(in Chinese).
- [31] Maniar P D, Piccolo P M. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 1987, 101: 653–643.

LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemical characteristics of Nanyue granites in Hunan Province

MA Tie-qiu, LI Bin, CHEN Yan-ming, ZHOU Ke-jun, CHA Jian-zhang

(*Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410011, Hunan, China*)

Abstract: Located in Hengshan of Hunan Province, Nanyue complex pluton intruded in the Neoproterozoic Lengjiaxi Group. The LA-ICP MS zircon U-Pb ages indicate that the main pluton was formed in the Triassic with a weighted mean age of 215.5 ± 1.5 Ma. However, some small granitic plutons were formed in the early Cretaceous with a $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 140.6 ± 0.8 Ma. The late Triassic granites are composed of three individual rock units, being mainly fine- and medium-grained porphyritic hornblende biotite monzonitic granite and subordinately two-mica monzonitic granite. The early Cretaceous granite is two-mica monzonitic granite. The major and trace element analyses show that the late Triassic granites are of the peraluminous high-K calc-alkaline series, while the early Cretaceous granite is of the high-peraluminous high-K calc-alkaline series. The rocks are enriched in large-ion lithophile elements and depleted in high field-strength elements, with the data $\sum \text{REE} = 92.88\text{--}296.56$ and weak negative Eu anomaly ($\delta \text{Eu} = 0.28\text{--}0.87$). The Sr-Nd isotope analyses indicate high ISr values (0.7093–0.7189), low ϵ_{Nd} values (–8.04––11.38) and high $T_{2\text{DM}}$ values (1.63 Ga–1.90 Ga). The results obtained by the authors show that the Nanyue muscovite-bearing peraluminous granitoids were derived from remelting of Precambrian basement, the magma source of late Triassic granites had the mixed mantle and lower crust materials, and the lithogenesis was related to the lithospheric extension after the orogenesis.

Key words: granite; zircon U-Pb age; LA-ICP-MS; geochemistry; Nanyue

About the first author: MA Tie-qiu, male, born in 1956, senior engineer, engages in regional geological survey; E-mail: matieqiu18@sina.com.