

湖南印支期花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其成因启示

王岳军^① 范蔚茗^① 梁新权^① 彭头平^① 石玉若^②

(^①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; ^②中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心, 北京 100037. E-mail: yjwang@gig.ac.cn)

摘要 针对湖南印支期花岗岩 3 个典型代表性岩体(沅山、关帝庙唐市超单元岩体和白马山龙潭超单元岩体)系统的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测定表明: 上述 3 个黑云母二长花岗岩体的代表性样品分别给出了 244 ± 4 , 239 ± 3 和 243 ± 3 Ma 的谐和年龄, 代表了区内印支期典型花岗岩体的形成时代. 表明区内传统上被认为属印支期的过铝质花岗岩有着更局限的形成时代. 结合其他年代学资料认为华南内陆印支期花岗岩很可能是同一次构造热事件的产物, 其空间分布整体上似面状展布, 其形成与陆内地壳物质叠置加厚作用有关, 这为深入理解华南印支期花岗岩的精细时空格架及早中生代演化的动力学机制提供了重要依据.

关键词 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年 印支期花岗岩 湖南

自 Deprat^[1]和 Fromaget^[2]针对越南三叠纪 Pre-Norian 和 Pre-Rhaetian 间的两个不整合面提出印支运动以来, 众多学者对华南印支运动所引起的构造-岩浆-沉积作用开展了广泛的研究, 有研究者试图通过识别华南内部印支期洋(海)盆的存在以重建华南印支期俯冲/碰撞造山动力学格局及机制^[3,4], 而有的研究者则试图通过太平洋板块的西向俯冲来解释华南早中生代造山作用的复杂构造-岩浆-沉积响应^[5,6]. 华南印支期地质构造的复杂性长期以来令国内外地质学者困惑不解^[3-6], 甚至有研究者对华南是否存在印支运动也提出了质疑^[7]. 因此深入研究华南内陆地区印支事件典型产物的花岗岩浆作用对理解华南早中生代构造演化有着重要意义.

自 20 世纪 70 年代以来针对华南印支期花岗岩开展了大量研究, 认为华南印支期花岗岩主要分布于湘桂地区, 由一套强过铝质-准铝质高钾花岗岩、二长花岗岩及花岗闪长岩组成, 其形成与碰撞造山作用关系密切^[3,6,8], 但较汇聚板块边缘形成的相对有限时空范围内的岩浆作用差异明显. 而湖南印支期花岗岩是华南内陆同期花岗岩的主要发育地区, 是其典型代表, 由一套强过铝质-弱过铝质($A/CNK > 1.00$)花岗岩类岩石组成, 多呈岩基或较大岩株沿深大断裂或断裂交汇部位分布^[9](图 1). 在地球化学上呈现出

明显的铕负异常($\delta Eu = 0.18 \sim 0.56$), 其 δO^{18} 变化于 $8.35\text{‰} \sim 17.36\text{‰}$ 之间, $Rb/Sr > 1$, $(^{87}Sr/^{86}Sr)_{(i)} = 0.7136 \sim 0.7239$, $\epsilon_{Nd}(t) = -9 \sim -14$ ^[9-12], 因此剖析湖南印支期花岗岩具有典型意义. 尤其是最近粤赣交界的贵东岩体给出的单颗粒锆石高精度 LA-ICPMS 年龄为 $236 \sim 239$ Ma^[13], 桂东南大容山、旧州和台马岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 233, 230 和 236 Ma^[14], 表明传统上被认为属海西-印支期的过铝质花岗岩可能有着更局限的形成时代, 且空间分布更涉及到湘桂粤赣琼等省^[13,14]¹⁾, 这更要求对具典型代表性的湖南印支期花岗岩做更为精细的年代学研究. 但以往借助于矿物 K-Ar, 独居石 U-Th-Pb, 全岩 Rb-Sr 和锆石 U-Pb 法对湖南印支期花岗岩所获得的年代学资料有着较大的区间变化($163 \sim 267$ Ma)^[9], 不利于精细理解华南内陆地区印支期花岗岩时空格架. 因此本文选择 3 个典型的湖南印支期代表性花岗岩体(沅山、关帝庙和白马山)开展了精细的年代学研究, 以便为深入理解其时序格架和成因动力学机制, 进而为剖析华南陆块早中生代大地构造演化及其与华南周缘印支期花岗岩时空格架的对比提供年代学依据.

1 地质背景与岩石学特征

湖南印支期中酸性侵入岩分布众多, 岩性上以

1) 葛小月. 海南岛中生代岩浆作用及其构造意义: 年代学、地球化学及 Sr-Nd 同位素证据. 中国科学院广州地球化学研究所博士学位论文. 2003

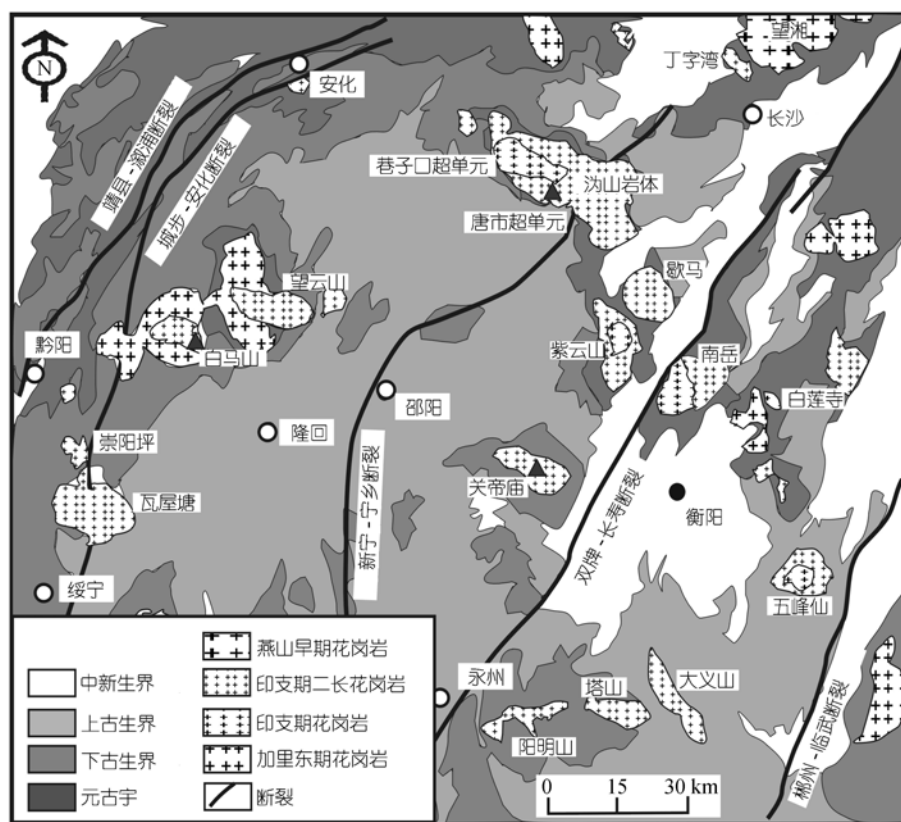


图1 湖南主要花岗岩分布地质图(据文献[9])

三角形代表 SHRIMP 定年样品采样位置

花岗岩为主,大致分布于以郴州-临武断裂和溆浦-靖县断裂为限的省内各个地区,以面状展布为特征,出露面积超过 5600 km^2 (图1),包括沧水铺、洑山、大神山、白马山、紫云山、歇马、关帝庙、瓦屋塘、塔山、阳明山、大义山、鸡笼街、将军庙、川口、五峰仙等岩体,上述岩体多呈岩基产出,主要侵位于板溪群-泥盆系中,个别岩体侵位入上二叠统(图1),如五峰仙岩体东部可见大理岩化上二叠统呈残留顶盖保留于五峰仙岩体之上^[9~11]。针对上述岩体所开展的矿物K-Ar,全岩Rb-Sr,锆石U-Pb和独居石U-Th-Pb法给出的年龄变化于 $163 \sim 267 \text{ Ma}$,集中变化区间在 $185 \sim 232 \text{ Ma}$ ^[9~12]。主要岩性包括中细粒斑状(角闪石)黑云母二长花岗岩、(斑状)黑云母花岗岩、二云母花岗岩、中细粒(角闪)黑云母花岗岩、(石榴石)白云母花岗岩,个别岩体发育中细粒斑状黑云母花岗闪长岩。以中细粒-中粒似斑状结构和中细粒花岗结构为特征,斑晶矿物主要有半自形-自形板状钾长石(微斜长石和少量条纹长石),在洑山和关帝庙中斑晶还包

括有少量斜长石(更-中长石),一般粒径 $1 \sim 2.5 \text{ cm}$ 。基质粒径以 $1 \sim 4 \text{ mm}$ 为主,主要有他形钾长石(微斜长石、条纹长石、微纹长石和微斜-微纹长石)、发育正韵律环带的他形-半自形板状斜长石(更中长石、以中长石为主)、他形石英和自形-半自形片(板)状黑云母,其中鸡笼街和五峰仙岩体含少量角闪石,在洑山岩体可见到黑云母和磷灰石等矿物包含嵌晶,在黑云母普遍有锆石和磷灰石矿物嵌晶。在显微镜下观察,上述岩体发育典型的挤压变形构造,如石英波状消光、斜长石发育碎裂构造、黑云母常扭折弯曲。

本次研究选择了湘中地区洑山、关帝庙和白马山三个典型花岗岩体(图1),其中洑山岩体位于宁乡-韶山-湘乡-安化交界处,出露面积约 1240 km^2 ,由以黑云母($\pm$ 角闪石)二长花岗岩为特征的唐市超单元和以二云母二长花岗岩为特征的巷子口超单元组成^[15],在唐市超单元内普遍发育线理和由长石斑晶构成的页理^[9~11,15]。关帝庙岩体位于衡阳-祁东-邵东交界处,出露面积约 290 km^2 ,包括近东西向延伸的唐市超单

元(黑云母二长花岗岩)和北西西向长条状延伸的巷子口超单元(二云母二长花岗岩)^[15]. 而白马山花岗岩体位于新化-隆回-溆浦境内, 出露面积约 1600 km², 是由志留纪水车、中三叠世龙潭、晚三叠世小沙江和早侏罗世龙藏湾 4 个超单元组成的一个复式岩体^[12,16]; 其中水车和龙潭超单元岩体内普遍发育挤压变形石英闪长质包体, 小沙江超单元发育似片麻状构造而明显有别于未变形的龙藏湾超单元岩体^[9~11,15].

2 分析方法

通过人工重砂法从新鲜的样品中分选出锆石, 然后在双目显微镜下挑选出无裂隙、无包体、透明干净的自形锆石颗粒, 将其与一片 RSES 参考样 SL13 及数粒标准锆石 Temrra(年龄为 417 Ma)在玻璃板上用环氧树脂固定、抛光, 然后进行反射光和透射光照相, 并用阴极发光扫描电子显微镜进行图像分析以检查锆石内部的结构. 锆石 U-Pb 同位素分析在中国地质科学院地质研究所离子探针中心用 SHRIMP-II 型离子探针测定, 详细的分析流程和原理参考文献^[16,17]. 分析时一次离子为 4.5 nA, 10 kV 的 O⁻², 束斑 25~30 μm. 应用 RSES 参考锆石进行元素间的分馏校正^[18], Temrra(年龄为 417 Ma)做二次校正. Temrra 测定重现性 2%. 数据处理采用 Ludwig^[19] SQUID1.0

及 ISOPLOT 程序. 年龄计算采用 IUGS(1977)推荐值.

3 样品描述与定年结果

此次 SHRIMP 锆石定年所选择的样品分别来自沩山(02QSH06)、关帝庙岩体(01GD09)的唐市超单元和白马山岩体的龙潭超单元(02JH03). 其中 02QSH06 样品采自于宁乡青山桥, 岩性为似斑状黑云母二长花岗岩, 斑晶为钾长石和少量斜长石; 其矿物组成有钾长石(约 25%)、斜长石(约 32%)、石英(约 38%)、黑云母(约 5%)及锆石、磷灰石、榍石、磁铁矿等. 样品 01GD09 采自祁东关帝庙, 为似斑状黑云母二长花岗岩, 斑晶为钾长石, 相应的矿物组成包括钾长石(约 33%)、斜长石(约 30%)、石英(约 30%)、黑云母(约 7%)及锆石、磷灰石、榍石、磁铁矿等副矿物. 样品 02JH03 采自白马山岩体的金场坪, 岩性为中细粒黑云母二长花岗岩, 主要矿物组成有斜长石(约 45%)、钾长石(约 16%)、石英(约 37%)、黑云母(约 8%). 在岩石化学上, 上述岩体以高钾(K₂O>Na₂O)、弱过铝质-强过铝质为特征(A/CNK=1.05~1.13), 而白马山龙潭超单元岩体相对沩山和关帝庙唐市超单元而言更富 MgO 和 CaO, 贫 K₂O 和 SiO₂, 对应岩体代表性样品的岩石化学如表 1 所示. 上述 3 个代表性样品的采样位置见图 1, 代表性锆石颗粒的 SHRIMP U-Pb 测试结果列于表 2.

表 1 典型岩体代表性样品的岩石化学分析结果(%)

	沩山岩体唐市超单元				关帝庙岩体唐市超单元			白马山岩体龙潭超单元		
	02QSH02	02QSH06	02TSH01	02TSH05	01GD01	01GD09	01GD18	02JSH03	02JSH05	02JSH07
SiO ₂	70.64	70.61	73.34	73.71	71.59	71.81	71.51	69.96	68.81	69.95
Al ₂ O ₃	14.5	14.03	13.88	13.70	14.04	13.90	14.55	14.36	13.87	14.77
Fe ₂ O ₃	0.42	0.44	0.11	0.14	0.26	0.21	0.49	0.28	0.38	0.30
FeO	2.32	2.37	1.55	1.60	2.13	2.03	1.76	2.33	2.57	2.33
MgO	1.18	1.21	0.70	0.72	1.33	1.25	1.24	1.56	2.30	1.60
CaO	2.71	2.06	1.82	1.45	2.27	2.14	2.23	2.92	3.23	2.96
Na ₂ O	3.16	2.59	2.77	2.94	2.71	2.71	2.87	2.82	2.23	2.78
K ₂ O	3.25	4.72	4.38	4.38	4.04	4.36	3.81	3.14	3.44	3.77
MnO	0.05	0.06	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.14	0.05
TiO ₂	0.38	0.40	0.24	0.24	0.34	0.33	0.34	0.39	0.83	0.40
P ₂ O ₅	0.11	0.12	0.09	0.08	0.14	0.12	0.10	0.12	0.21	0.11
LOI	0.99	1.19	0.84	0.75	0.79	0.62	0.60	0.67	0.99	0.52
Total	99.71	99.8	99.75	99.75	99.68	99.53	99.55	98.6	99.8	99.54
A/CNK ^{a)}	1.06	1.07	1.10	1.12	1.08	1.06	1.13	1.07	1.14	1.05
K ₂ O/Na ₂ O	1.03	1.82	1.58	1.49	1.49	1.61	1.33	1.11	1.45	1.36

a) A/CNK= Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)分子数

表 2 湖南印支期花岗岩代表性样品锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分析结果

分析点	U / $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Th / $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*$ / $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}^*$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ $\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ $\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ $\pm\%$	不谐和度 /%	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ $\pm 1\sigma/\text{Ma}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$ $\pm 1\sigma/\text{Ma}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ $\pm 1\sigma/\text{Ma}$
浏山黑云母二长花岗岩体(唐市超单元): 02QSH06												
HC1.1	1589	389	0.25	50.5	27.09	0.0488 $\pm$ 2.4	0.2481 $\pm$ 3.7	0.0369 $\pm$ 2.8	-72	233.7 $\pm$ 6.4	225.0 $\pm$ 7.5	136 $\pm$ 56
HC2.1	3811	799	0.22	131	25.08	0.0495 $\pm$ 1.5	0.2720 $\pm$ 3.1	0.0399 $\pm$ 2.7	-48	252.1 $\pm$ 6.8	244.3 $\pm$ 6.7	170 $\pm$ 36
HC3.1	3133	598	0.20	104	25.88	0.0503 $\pm$ 2.0	0.2680 $\pm$ 3.4	0.0386 $\pm$ 2.7	-17	244.4 $\pm$ 6.6	241.1 $\pm$ 7.3	210 $\pm$ 46
HC4.1	4918	839	0.18	176	24.11	0.0503 $\pm$ 1.2	0.2877 $\pm$ 3.0	0.0415 $\pm$ 2.7	-25	262.0 $\pm$ 7.0	256.7 $\pm$ 6.8	209 $\pm$ 29
HC5.1	3148	546	0.18	107	25.38	0.0493 $\pm$ 1.6	0.2676 $\pm$ 3.2	0.0394 $\pm$ 2.8	-56	249.1 $\pm$ 6.7	240.8 $\pm$ 6.9	160 $\pm$ 38
HC6.1	4866	552	0.12	170	24.81	0.0490 $\pm$ 2.6	0.2720 $\pm$ 3.8	0.0403 $\pm$ 2.8	-72	254.7 $\pm$ 6.9	244.3 $\pm$ 8.3	148 $\pm$ 61
HC7.1	1758	406	0.24	58.0	26.23	0.0499 $\pm$ 2.5	0.2621 $\pm$ 3.7	0.0381 $\pm$ 2.8	-28	241.2 $\pm$ 6.5	236.4 $\pm$ 7.8	189 $\pm$ 57
HC8.1	5212	765	0.15	191	23.47	0.0506 $\pm$ 1.4	0.2972 $\pm$ 3.0	0.0426 $\pm$ 2.7	-21	269.0 $\pm$ 7.2	262.2 $\pm$ 7.0	222 $\pm$ 30
HC9.1	4337	852	0.20	168	23.56	0.0584 $\pm$ 6.7	0.3020 $\pm$ 7.2	0.0424 $\pm$ 2.8	51	267.8 $\pm$ 7.3	267.4 $\pm$ 19	544 $\pm$ 150
HC10.1	2866	519	0.19	95.2	26.56	0.0523 $\pm$ 4.7	0.2720 $\pm$ 5.4	0.0377 $\pm$ 2.8	21	238.3 $\pm$ 6.5	244.0 $\pm$ 12	300 $\pm$ 110
HC10.2	2175	417	0.20	69.8	27.06	0.0482 $\pm$ 3.8	0.2450 $\pm$ 4.7	0.0370 $\pm$ 2.8	-118	233.9 $\pm$ 6.4	222.5 $\pm$ 9.4	107 $\pm$ 90
HC11.1	2125	440	0.21	69.5	26.68	0.0499 $\pm$ 4.1	0.2580 $\pm$ 5.0	0.0375 $\pm$ 2.8	-25	237.2 $\pm$ 6.4	233.0 $\pm$ 10	190 $\pm$ 96
HC12.1	3032	444	0.15	105	24.94	0.0489 $\pm$ 1.6	0.2704 $\pm$ 3.2	0.0401 $\pm$ 2.8	-76	253.4 $\pm$ 6.8	243.0 $\pm$ 6.9	144 $\pm$ 37
HC13.1	1556	565	0.38	51.5	26.12	0.0483 $\pm$ 3.2	0.2550 $\pm$ 4.2	0.0383 $\pm$ 2.8	-117	242.2 $\pm$ 6.6	230.6 $\pm$ 8.7	112 $\pm$ 76
HC14.1	1735	626	0.37	59.2	25.30	0.0486 $\pm$ 2.4	0.2647 $\pm$ 3.7	0.0395 $\pm$ 2.8	-98	249.9 $\pm$ 6.8	238.4 $\pm$ 7.9	126 $\pm$ 57
HC15.1	1858	611	0.34	64.8	24.76	0.0503 $\pm$ 2.5	0.2800 $\pm$ 3.8	0.0404 $\pm$ 2.8	-23	255.3 $\pm$ 6.9	250.7 $\pm$ 7.4	208 $\pm$ 59
HC16.1	2896	589	0.21	99.3	25.09	0.0514 $\pm$ 1.6	0.2822 $\pm$ 3.2	0.0399 $\pm$ 2.7	2	252.0 $\pm$ 6.8	252.4 $\pm$ 7.2	257 $\pm$ 36
HC17.1	3952	639	0.17	121	28.46	0.0492 $\pm$ 3.3	0.2380 $\pm$ 4.3	0.0351 $\pm$ 2.8	-43	222.6 $\pm$ 6.0	216.8 $\pm$ 8.4	155 $\pm$ 77
关帝庙黑云母二长花岗岩体(唐市超单元): 01GD09												
HE1.1	1029	356	0.36	33.4	26.64	0.0486 $\pm$ 4.7	0.2510 $\pm$ 5.5	0.0375 $\pm$ 2.8	-88	237.5 $\pm$ 6.6	227.0 $\pm$ 11	126 $\pm$ 110
HE2.1	1168	605	0.54	38.8	26.12	0.0505 $\pm$ 4.3	0.2670 $\pm$ 5.1	0.0383 $\pm$ 2.8	-11	242.2 $\pm$ 6.7	240.2 $\pm$ 11	218 $\pm$ 99
HE3.1	925	640	0.71	29.1	27.55	0.0506 $\pm$ 4.5	0.2531 $\pm$ 5.3	0.0363 $\pm$ 2.8	-3	229.9 $\pm$ 6.4	229.0 $\pm$ 11	223 $\pm$ 100
HE4.1	6157	13044	2.19	24.8	21.48	0.0516 $\pm$ 2.2	0.3310 $\pm$ 3.8	0.0466 $\pm$ 3.1	-10	293.4 $\pm$ 9.0	290.3 $\pm$ 9.6	267 $\pm$ 50
HE5.1	1139	610	0.55	38.6	25.61	0.0455 $\pm$ 5.1	0.2451 $\pm$ 5.8	0.0390 $\pm$ 2.8	1003	246.9 $\pm$ 6.8	223.0 $\pm$ 12	-27 $\pm$ 120
HE6.1	475	315	0.69	14.9	27.9	0.0463 $\pm$ 11	0.2290 $\pm$ 11	0.0359 $\pm$ 3.7	-1560	227.1 $\pm$ 8.2	209.1 $\pm$ 21	14 $\pm$ 260
HE7.1	2148	1256	0.60	73.8	25.21	0.0478 $\pm$ 3.3	0.2610 $\pm$ 4.3	0.0397 $\pm$ 2.8	-183	250.8 $\pm$ 6.8	235.5 $\pm$ 9.0	89 $\pm$ 79
HE8.1	1539	1218	0.82	51.2	26.16	0.0490 $\pm$ 4.4	0.2581 $\pm$ 5.2	0.0382 $\pm$ 2.8	-65	241.8 $\pm$ 6.6	233.0 $\pm$ 11	146 $\pm$ 100
HE9.1	721	502	0.72	22.8	27.49	0.0453 $\pm$ 8.1	0.2270 $\pm$ 8.5	0.0364 $\pm$ 2.9	654	230.3 $\pm$ 6.5	208.0 $\pm$ 16	-42 $\pm$ 200
HE101	804	488	0.63	26.6	26.19	0.0477 $\pm$ 5.4	0.2510 $\pm$ 6.1	0.0382 $\pm$ 2.8	-192	241.5 $\pm$ 6.7	227.0 $\pm$ 12	83 $\pm$ 130
HE11.1	1803	808	0.46	61.9	25.09	0.0492 $\pm$ 2.4	0.2706 $\pm$ 3.7	0.0399 $\pm$ 2.8	-58	252.0 $\pm$ 6.8	243.1 $\pm$ 8.8	159 $\pm$ 56
HE12.1	1348	841	0.64	44.3	26.27	0.0530 $\pm$ 2.9	0.2781 $\pm$ 4.0	0.0381 $\pm$ 2.8	27	240.8 $\pm$ 6.6	249.1 $\pm$ 8.8	329 $\pm$ 65
HE12.2	1221	598	0.51	40.0	26.44	0.0496 $\pm$ 4.2	0.2590 $\pm$ 5.0	0.0378 $\pm$ 2.8	-35	239.4 $\pm$ 6.6	234.0 $\pm$ 10	177 $\pm$ 97
HE13.1	1879	845	0.46	63.8	25.46	0.0500 $\pm$ 2.8	0.2700 $\pm$ 4.0	0.0393 $\pm$ 2.8	-29	248.4 $\pm$ 6.8	242.7 $\pm$ 8.6	193 $\pm$ 66
HE14.2	1418	1082	0.79	47.9	25.63	0.0492 $\pm$ 3.9	0.2650 $\pm$ 4.8	0.0390 $\pm$ 2.8	-59	246.8 $\pm$ 6.8	239.0 $\pm$ 10	156 $\pm$ 91
白马山二长花岗岩体(龙潭超单元): 02JSH03												
HA1.1	3292	856	0.27	110	25.64	0.05198 $\pm$ 1.4	0.2796 $\pm$ 2.7	0.0390 $\pm$ 2.4	13	246.7 $\pm$ 5.7	250.3 $\pm$ 6.0	285 $\pm$ 31
HA2.1	1360	407	0.31	48.6	25.18	0.1145 $\pm$ 3.8	0.6270 $\pm$ 4.5	0.0397 $\pm$ 2.4	87	251.1 $\pm$ 6.0	494.0 $\pm$ 18	1871 $\pm$ 68
HA3.1	1691	474	0.29	55.5	26.26	0.0698 $\pm$ 4.3	0.3670 $\pm$ 5.0	0.0381 $\pm$ 2.5	74	241.0 $\pm$ 6.0	317.0 $\pm$ 14	922 $\pm$ 89
HA4.1	2212	460	0.21	74.2	25.68	0.0518 $\pm$ 1.8	0.2780 $\pm$ 3.0	0.0389 $\pm$ 2.4	11	246.3 $\pm$ 5.7	249.1 $\pm$ 6.6	277 $\pm$ 42
HA5.1	3102	821	0.27	106	25.14	0.0527 $\pm$ 1.5	0.2890 $\pm$ 2.8	0.0398 $\pm$ 2.3	20	251.5 $\pm$ 5.8	257.8 $\pm$ 6.4	315 $\pm$ 34
HA6.1	2558	904	0.37	83.0	26.53	0.0518 $\pm$ 1.6	0.2691 $\pm$ 2.8	0.0377 $\pm$ 2.4	14	238.5 $\pm$ 5.5	242.0 $\pm$ 6.0	276 $\pm$ 36
HA7.1	2464	675	0.28	86.6	24.51	0.0513 $\pm$ 1.7	0.2884 $\pm$ 2.9	0.0408 $\pm$ 2.4	-2	253.8 $\pm$ 6.0	257.3 $\pm$ 6.6	252 $\pm$ 39
HA8.1	2032	565	0.29	65.8	26.60	0.0582 $\pm$ 1.8	0.3019 $\pm$ 3.0	0.0376 $\pm$ 2.4	56	237.9 $\pm$ 5.5	267.9 $\pm$ 7.1	539 $\pm$ 39
HA9.1	2100	488	0.24	69.8	25.93	0.0548 $\pm$ 2.2	0.2916 $\pm$ 3.2	0.0386 $\pm$ 2.4	40	244.0 $\pm$ 5.7	259.8 $\pm$ 7.3	405 $\pm$ 49
HA10.1	2132	1157	0.56	72.6	25.42	0.0889 $\pm$ 1.8	0.4820 $\pm$ 3.0	0.0393 $\pm$ 2.4	82	248.8 $\pm$ 5.8	399.4 $\pm$ 9.9	1402 $\pm$ 34
HA11.1	1257	412	0.34	41.2	26.26	0.0541 $\pm$ 2.3	0.2840 $\pm$ 3.3	0.0381 $\pm$ 2.4	36	240.9 $\pm$ 5.7	253.9 $\pm$ 7.4	375 $\pm$ 51
HA11.2	2088	524	0.26	68.9	26.05	0.0523 $\pm$ 1.6	0.2768 $\pm$ 2.9	0.0384 $\pm$ 2.4	19	242.8 $\pm$ 5.6	248.1 $\pm$ 6.4	299 $\pm$ 36
HA12.1	4552	1148	0.26	153	25.58	0.0553 $\pm$ 1.1	0.2981 $\pm$ 2.6	0.0391 $\pm$ 2.3	42	247.2 $\pm$ 5.7	264.4 $\pm$ 6.1	425 $\pm$ 24
HA13.1	1887	772	0.42	64.4	25.30	0.0733 $\pm$ 2.1	0.3990 $\pm$ 3.2	0.0396 $\pm$ 2.4	76	249.9 $\pm$ 5.8	340.9 $\pm$ 9.3	1022 $\pm$ 42
HA14.1	3876	1223	0.33	128	25.98	0.0603 $\pm$ 1.3	0.3099 $\pm$ 2.7	0.0385 $\pm$ 2.3	60	243.5 $\pm$ 5.6	258.1 $\pm$ 6.7	613 $\pm$ 28
HA15.1	1598	550	0.36	57.3	24.15	0.1243 $\pm$ 4.1	0.7100 $\pm$ 4.8	0.0414 $\pm$ 2.4	87	261.5 $\pm$ 6.1	545.0 $\pm$ 20	2019 $\pm$ 73
HA16.1	2815	1721	0.63	95.3	25.42	0.0557 $\pm$ 1.6	0.3023 $\pm$ 2.8	0.0393 $\pm$ 2.4	44	248.7 $\pm$ 5.7	261.2 $\pm$ 6.6	442 $\pm$ 35
HA17.1	2612	620	0.25	92.4	24.44	0.0939 $\pm$ 2.0	0.5300 $\pm$ 3.1	0.0409 $\pm$ 2.4	83	250.5 $\pm$ 6.0	432.0 $\pm$ 11	1506 $\pm$ 38

分选自上述 3 个样品的锆石以浅棕、浅褐及褐色为特征, 紫色和无色锆石少见, 半透明至透明, 以半透明为主, 柱状, 长宽比为 $1/2 \sim 1/4$, 长 $150 \sim 350 \mu\text{m}$. 浏山岩体唐市超单元 02QSH06 样品、白马山岩体龙潭超单元 02JH03 样品锆石晶形以 $\{100\}$ 和 $\{111\}$ 面普遍发育为特征, 而关帝庙岩体唐市超单元 01GD09 样品大部分锆石 $\{100\}$ 和 $\{111\}$ 面发育、部分锆石 $\{110\}$ 和 $\{311\}$ 面发育, 以锥柱状晶体为主. 在阴极发光图像上部分锆石核部呈不均匀斑点状或港湾状, 其边缘为较弱的振荡环带结构, 与经历重结晶作用而成的岩浆锆石特征类似(应代表早阶段之结晶锆石), 而大部分锆石表现为一个小的核部和边缘具强烈振荡韵律环带的结构面貌, 显示典型岩浆成因锆石特征(如图 2(a)~(c)所示). 02QSH06 样品 18 个分析点的 Th 含量变化于 $389 \sim 852 \mu\text{g/g}$, U 变化于 $1556 \sim 4866 \mu\text{g/g}$, Th/U 比值变化于 $0.12 \sim 0.38$; 02JSH03 样品 18 个分析点的 $U = 1257 \sim 4552 \mu\text{g/g}$, Th= $407 \sim 1721 \mu\text{g/g}$, Th/U= $0.21 \sim 0.60$; 而 01GD09 样品中所测 15 个分析点中的 HE4.1 有着异常高的 Th, U 含量(Th= $13044 \mu\text{g/g}$, U= $6157 \mu\text{g/g}$), 其他 14 个分析点的 $U=475 \sim 2148 \mu\text{g/g}$, Th= $315 \sim 1256 \mu\text{g/g}$, Th/U= $0.36 \sim 0.82$. 其相应的测年结果表明: 02QSH06 样品中 18 分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $222.6 \sim 269.0 \text{ Ma}$, 其中 HC4.1, HC8.1, HC9.1 和 HC17.1 四个分析点由于其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄明显偏离正态分布特征, 在数据处理中没有考虑, 其他 14 个分析点得到 $245 \pm 7 \text{ Ma}$ (95%置信度, MSWD = 2.83) 的加权平均值(图 3(a)). 01GD09 样品中 HE4.1 具有较为复杂的内部结构, 可能因含有继承的放射性成因 Pb 而具有明显偏高的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄($293.4 \pm 9.0 \text{ Ma}$), 推测为残留锆石或继承锆石, 而其他 14 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄变化于 $227.1 \sim 252.0 \text{ Ma}$ 之间, 其加权平均值为 $241 \pm 7 \text{ Ma}$ (95%置信度, MSWD = 0.93, 图 3(b)). 这两个样品的锆石有着相近的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 表观年龄, 中生代样品由于 ^{207}Pb 计数原因导致 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表观年龄变化较大. 02JH03 样品中 18 分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄变化于 $237.9 \sim 261.5 \text{ Ma}$, 其加权平均值为 $247 \pm 6 \text{ Ma}$ (95%置信度, MSWD = 0.94, 图 3(c)), 如果剔除 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 表观年龄不一致的 HA2.1, HA3.1, HA8.1, HA10.1, HA15.1, HA17.1 分析点, 其他 12 个分析点给出了 $244 \pm 6 \text{ Ma}$ 的加权平均年龄. 在谐和曲线图上 3 个样品的锆石颗粒均投影在谐和线上或谐和线附近(图 3).

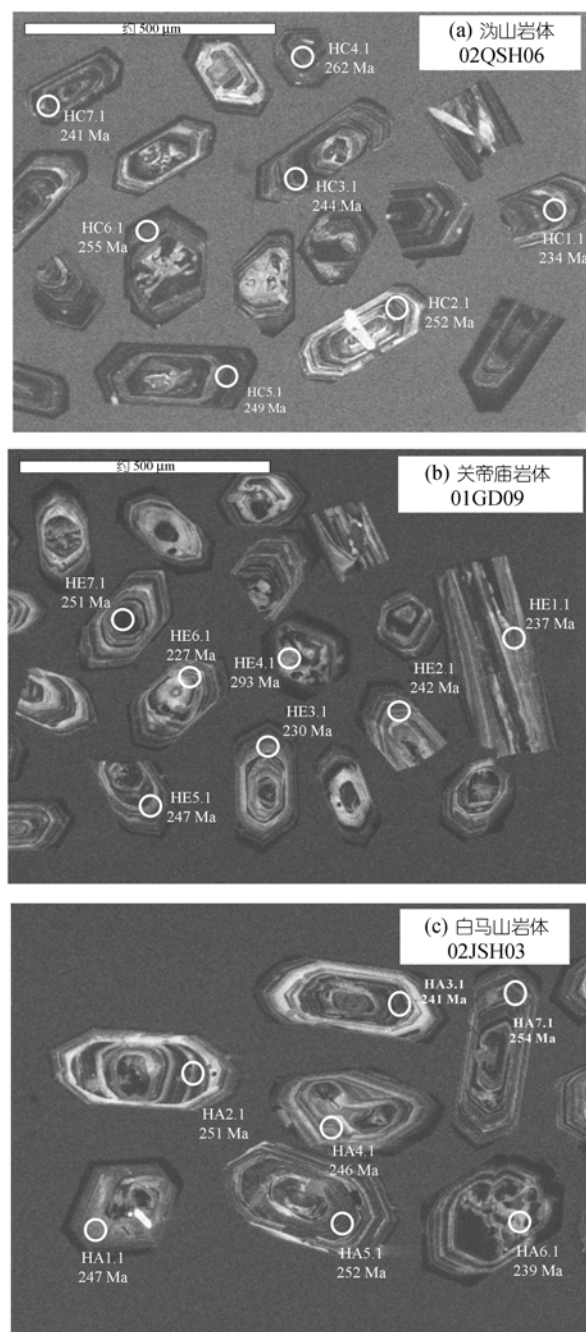


图 2 湖南浏山(a)、关帝庙(b)、白帝马山(c)岩体代表性锆石的背散射电子图像
圆圈和数字表示分析位置、测量编号和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄

这些特征表明上述锆石结晶后 U-Pb 同位素体系是封闭的, 基本没有 Pb 同位素的丢失或 U 的加入, 分别给出了 $244 \pm 4 \text{ Ma}$ ($n = 14$, MSWD = 1.20, 02QSH06), $239 \pm 3 \text{ Ma}$ ($n = 14$, MSWD = 0.93, 01GD09) 和 $243 \pm 3 \text{ Ma}$ ($n = 18$, MSWD = 0.94, 02JH03) 的谐和年龄.

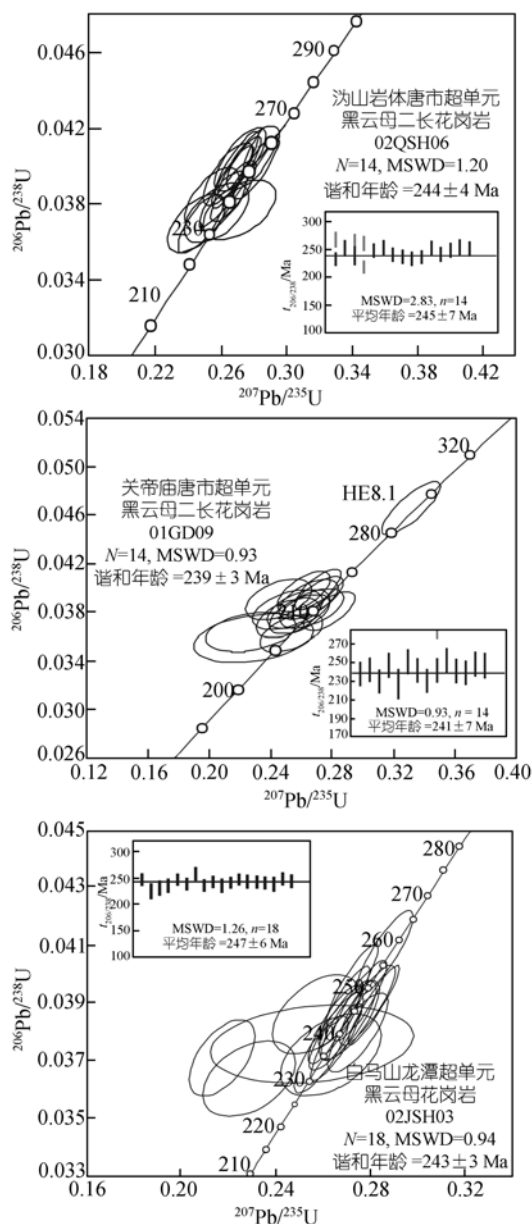


图3 湖南印支期沅山(a)、关庙(b)、白马山(c)代表性样品的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄谱

4 讨论

沅山岩体侵入最新地层为泥盆系,并为白垩系所覆盖,已往的K-Ar法、全岩Rb-Sr法、锆石U-Pb法和独居石U-Th-Pb法等给出了 193~257 Ma的年龄变化区间^[9~11,15],被归属于印支-燕山早期;关帝庙唐市超单元花岗岩体以往的矿物K-Ar和U-Pb法给出了 198~230 Ma的年龄^[9~12,15],而白马山龙潭超单元

花岗岩体围岩为志留纪水车超单元花岗岩、板溪群和古生代地层,以往的年代学资料变化于 217~267 Ma之间(云母K-Ar和颗粒锆石U-Pb)^[9~11,15].上述3个岩体代表性样品分别给出的 244 ± 4 , 243 ± 3 和 239 ± 3 Ma 锆石SHRIMP U-Pb年龄,代表了区内以黑云母二长花岗岩为特征的唐市和龙潭超单元典型花岗岩体的形成时代.徐夕生等人^[13]报道位于赣南-粤北贵东杂岩体中的鲁溪和下庄岩体锆石LA-ICPMS U-Pb年龄为 239 ± 5 和 236 ± 8 Ma;邓希光等人^[14]得到桂东南大容山、旧州和台马岩体的SHRIMP锆石U-Pb年龄分别为 233 ± 5 , 230 ± 4 和 236 ± 4 Ma,而葛小月¹⁾在海南琼中岩体获得的SHRIMP锆石U-Pb年龄为 237 ± 3 Ma,这表明华南内陆地区传统上被认为属印支早期或海西-印支期的过铝质花岗岩有着局限的形成时代,是同一构造热事件的产物,尽管南岭地区的印支期花岗岩总体上呈EW向展布^[13],但就华南内陆而言印支期花岗岩的空间分布很可能并不是传统上所认为的呈北东向展布于湘桂地区^[9],相反其范围涉及到湘桂粤赣琼等省,整体上似面状展布^[20].

对华南印支期大地构造演化及印支期花岗岩的形成机制长期以来有着不同的理解.如早中生代碰撞造山作用模式^[3,4],视印支期花岗岩为岛弧环境的产物,但是越来越多的资料不支持华南内部存在早中生代洋盆或洋陆俯冲事件^[21,22],而且印支期华南是否受到古太平洋板块的俯冲作用并不清楚,更可能的是太平洋板块对华南陆块的西向俯冲直到晚中生代才开始启动^[23],华南印支期花岗岩的整体面状分布及区内同期火山作用的相对缺乏^[20],也不支持其成因与俯冲/碰撞有直接关联的观点.近年的研究显示华南早中生代以来存在着多次的岩石圈伸展-减薄^[24~27],但目前区内惟一发现的印支期基性岩浆作用只有湘南道县辉长岩包体及虎子岩基性岩,其形成时间在 204~224 Ma^[28,29],该基性岩的发育暗示 204~224 Ma期间该区可能存在着诱发印支期过铝质花岗岩形成的岩浆底侵作用^[28,30],但大量的研究表明底侵基性岩浆通过热传导效应与围岩达到温度稳态平衡的时间尺度在 5~20 Ma^[30,31],也就是说由上述岩浆底侵作用诱发过铝质花岗岩形成的时间应小于 224 Ma (更可能在 210~224 Ma之间).但区内印支期花岗岩所给出的精细年代学数据变化于 230~244 Ma,即道县辉长岩底侵作用发生之前.另外一种可能则

1) 见 1259 页脚注

是:区内印支期花岗岩可能是印支期陆壳叠置加厚作用的结果^[14,30],目前的研究表明华南内陆地区印支期花岗岩以强过铝质-弱过铝质($A/CNK > 1.00$)、富钾($K_2O > 3.0\%$)为特征,具华南片麻岩类岩石类似的同位素组成^[9~12],其形成与中上地壳中低级变质岩中白云母-黑云母矿物的脱水熔融有关^[8~11,30].王岳军等人^[30]的数值模拟研究也显示当陆壳叠置加厚到一定比例时,地壳内温度场的扰动足以导致云母类矿物脱水熔融而生成花岗岩基.事实上除钦防海槽一带中二叠世~早三叠世发育浅海-半深海碎屑岩建造以外,其他赣湘桂粤地区以浅海相台地沉积为特征,缺失中三叠统;华南内陆地区早三叠世以前的地层普遍褶皱变形并伴随一系列逆冲推覆构造^[32,33],韧性推覆(走滑)断裂带内云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄介于 249~195 Ma 之间^[34,35](以及作者未刊资料),均表明印支期区内存在广泛的印支事件且陆壳叠置作用强烈;如前所述,沱山和关帝庙岩体唐市超单元以及白马山龙潭超单元岩体内普遍发育挤压变形石英闪长质包体或似片麻状构造,以及石英波状消光、云母扭曲等特征也表明其形成于区域挤压应变体制(区内早-中侏罗世以来以伸展体制为主^[12,24~27]).

与华南内陆地区 230~244 Ma 花岗岩形成相同时,在华南周缘地区存在强烈的俯冲/碰撞造山作用.在北缘扬子陆块与秦岭-大别-苏鲁造山带于印支期(约 240 Ma)发生深俯冲/碰撞作用或顺时钟旋转俯冲/碰撞^[36~38],在西南缘 Bentong-Raub 缝合带及昌宁-孟连一带蓝片岩中蓝闪石 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄在约 270 Ma^[39],暗示古特提斯洋沿昌宁-孟连一带于海西期(晚二叠世左右)俯冲消减,景洪-临沧-白马雪山碰撞后花岗岩和忙怀组火山岩 241~229 Ma 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄^[40,41](以及作者未刊资料)表明在印支期该地区有着强烈的碰撞造山作用^[39,42,43];在南缘越南中北部(如 Song Chay, Day Nui Con Voi, Da Nang-Khe Sanh, Kontum 地块及 Truong Son 带)和泰国北部的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 和锆石 U-Pb 热年代学定年证实了 Indochina 陆块于 258~240 Ma 在越南北部与华南陆块首先拼合,并顺时钟旋转碰撞,至 220 Ma 左右泰国北部与华南陆块拼合完成^[44~47].这表明华南内陆地区由于陆内地壳物质叠置加厚作用形成的印支期花岗岩(230~244 Ma)与华南周缘造山作用具有很好的时序耦合,这为我们深入理解华南印支事件的动力学机制提供了新的思路,而且国外研究也表明陆缘碰撞作用对陆块内

部的影响距离可达 1600 km 以上,陆缘边界作用不仅对陆块内部先存构造格架存在改造与反转作用,而且也明显影响陆块内部岩浆的生成^[48~50].

致谢 衷心感谢在文稿撰写过程中李献华教授所给予的热心帮助,感谢两位评审人和特邀编辑所提出的建设性意见和批评.本工作受国家自然科学基金(批准号:40334039,40421303,40473019)和中国科学院知识创新项目(KZCX1-102)资助.

参 考 文 献

- 1 Deprat J. Etude des plissements et des zones décrasement de la moyenne et de la basse Rivière Noire. *Mémoire du Service Géologique Indochine*, 1914, 3: 59
- 2 Fromagat J. Sur la structure des Indosinides. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 1932, 195: 538
- 3 Hsü K J, Li J L, Chen H H, et al. Tectonics of South China: Key to understanding west Pacific geology. *Tectonophysics*, 1990, 183: 9~39[DOI]
- 4 李继亮主编. 东南大陆岩石圈结构与地质演化. 北京: 冶金工业出版社, 1993. 47~123
- 5 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 等. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社, 1990
- 6 郭令智, 施央申, 马瑞士. 西太平洋中、新生代活动大陆边缘和岛弧构造的形成与演化. *地质学报*, 1983, 57(1): 51~61
- 7 郭福祥. 中国南方中新代大地构造属性和南华造山带褶皱过程. *地质学报*, 1998, 72(1): 22~33
- 8 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 扬子陆块的陆内俯冲与大陆的缩小-由白云母(二云母花岗岩推导). *高校地质学报*, 1995, 1(1): 50~57
- 9 湖南省地质矿产局. 湖南省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1988
- 10 庄锦良, 刘钟伟, 谭必祥, 等. 湘南地区小岩体与成矿关系及隐伏矿床预测. *湖南地质*, 1988, 增刊 4: 1~198
- 11 贾宝华. 湖南花岗岩体侵位机制初步研究. *湖南地质*, 1998, 增刊 10: 1~164
- 12 Chen J F, Jahn B M. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 1998, 284: 101~133[DOI]
- 13 徐永生, 邓平, O'Reilly S Y, 等. 华南贵东杂岩体单颗粒锆石激光探针 ICPMS U-Pb 定年及其成岩意义. *科学通报*, 2003, 48(12): 1328~1334
- 14 邓希光, 陈志刚, 李献华, 等. 桂东南地区大容山-十万大山花岗岩带 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年. *地质论评*, 2004, 50(4): 426~432
- 15 湖南省地矿局区调所. 湖南省花岗岩单元-超单元划分及其成矿专属性. *湖南地质*, 1995, 增刊 8: 1~84
- 16 李彪, 张玉海, 万渝生. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质论评*, 2002, 48(增刊): 26~30
- 17 Williams I S, Claesson S. Isotope evidence for the Precambrian province and Caledonian metamorphism of high grade paragneiss from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides, II. Ion microprobe zircon U-Th-Pb. *Contrib Mineral Petrol*, 1987, 97: 205~217[DOI]

- 18 Claoue-Long J C, Compston J, Roberts C M F. Two Carboniferous ages: A comparison of SHRIMP zircon dating with conventional zircon ages and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analysis. In: *Geochronology Time Scales and Global Stratigraphic Correlation 54*, SEPM Special Publication, 1995. 3~21
- 19 Ludwig K R. SQUID 1.02: A user manual. Berkeley Geochronological Center Special Publication, 2001. 1~219
- 20 周新民. 对华南花岗岩研究的若干思考. *高校地质学报*, 2003, 9(4): 556~565
- 21 Rowley D B, Ziegler A M, Nie G. Comment on "Mesozoic overthrust tectonics in South China". *Geology*, 1997, 17: 384~386[DOI]
- 22 Gilder S A, Gill J, Coe R S, et al. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of South China. *J Geophys Res*, 1996, 107(B7): 16137~16154[DOI]
- 23 Engebretson D C, Cox A, Gordon R G. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basins. *Geol Soc Amer Spec Paper*, 1985, 206: 1~59
- 24 Wang Y J, Fan W M, Peng T P, et al. Element and Sr-Nd systematics of early Mesozoic volcanic sequence in southern Jiang Province, South China: Petrogenesis and tectonic implications. *International Journal of Earth Sciences*, 2005, 43(1): 53~65[DOI]
- 25 Wang Y J, Fan W M, Guo F, et al. Geochemistry of Mesozoic mafic rocks around the Chenzhou-Linwu fault in South China: Implication for the lithospheric boundary between the Yangtze and the Cathaysia Blocks. *Inter'l Geol Rev*, 2003, 45(3): 263~286
- 26 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(4): 379~383
- 27 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*. *Geol Soc Lon, Spec Pub*, 2004, 226: 193~216
- 28 郭锋, 范蔚茗, 林舸, 等. 湘南道县中生代辉长岩包体的 Sm-Nd 定年和岩石成因. *科学通报*, 1997, 42(17): 1661~1663
- 29 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*, 1998, 28(增刊): 7~14
- 30 王岳军, Zhang Y H, 范蔚茗, 等. 湖南印支期过铝质花岗岩的形成: 岩浆底侵与地壳加厚热效应的数值模拟. *中国科学, D 辑*, 2002, 32(6): 491~499
- 31 Koyaguchi T, Kaneko K. A two-stage thermal evolution model of magmas in continental crust. *J Petrol*, 1999, 40(2): 241~254[DOI]
- 32 Li Z X. Tectonic history of the major East Asian lithospheric blocks since the mid-Proterozoic: A synthesis. In: Flower M F J, Chung S L, Lo C H, et al. eds. *Mantle dynamics and plate interactions in East Asia*. *Amer Geophys Union (Geodynamic series)*, 1998, 27: 221~243
- 33 Chen A. Mirror-image thrusting in the South China orogenic belt: Tectonic evidence from western Fujian, southeastern China. *Tectonophysics*, 1999, 305: 497~519[DOI]
- 34 彭少梅, 符力奋, 周国强. 云开陆块构造演化及片麻状花岗岩岩石的剪切深熔成因. 武汉: 中国地质大学出版社, 1995. 1~165
- 35 Wang Y J, Zhang Y H, Fan W M, et al. Structural signatures and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Indosinian Xuefengshan tectonic belt, South China. *Journal Structure of Geology*, 2005 (in press)
- 36 Ames L, Zhou G, Xiong B. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, Central China. *Tectonics*, 1996, 15: 472~489[DOI]
- 37 Li S G, Xiao Y L, Liou D L, et al. Collision of the North China and Yangtze Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and Processes, *Chem Geol*, 1993, 109: 89~111[DOI]
- 38 Zhang K J. North and South China collision along the eastern and southern North China margins. *Tectonophysics*, 1997, 270: 145~156[DOI]
- 39 钟大赉. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社, 1998. 1~230
- 40 简平, 刘敦一, 孙晓猛. 滇西白马雪山和鲁甸花岗岩基 SHRIMP 锆石 U-P 年龄及其地质意义. *地质学报*, 2003, 24(4): 338~342
- 41 赵成峰. 云南腾冲北部华力西期印支期花岗岩. *中国区域地质*, 1999, 18(3): 260~263
- 42 Metcalfe I. Gondwanaland orogen, dispersion, and accretion of East and Southeast Asian continental terranes. *J South Amer Earth Sci*, 1994, 7: 333~347[DOI]
- 43 莫宣学, 沈上越, 朱勤文, 等. 三江中南段火山岩-蛇绿岩与成矿. 北京: 地质出版社, 1998. 1~128
- 44 Carter A, Roques D, Bristow C, et al. Understanding Mesozoic accretion in southeast Asia: Significance of Triassic thermotectonism (Indosinian orogen) in Vietnam. *Geology*, 2001, 29(3): 211~214[DOI]
- 45 Lepvrier C, Maluski H, van Vuong N, et al. Indosinian NW-trending shear zone within the Truong Son belt (Vietnam): $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ Triassic/Cretaceous to Cenozoic overprints. *Tectonophysics*, 1997, 283: 105~128[DOI]
- 46 Nam T N, Toriumi M, Itaya T. P-T-t paths and postmetamorphic exhumation of the Day Nui Con Voi shear zone in Vietnam. *Tectonophysics*, 1998, 290: 299~318[DOI]
- 47 Singharajwarapan S, Berry R. Tectonic implications of the Nan suture zone and its relationship to the Sukhothai fold belt, northern Thailand. *J Asian Earth Sci*, 2000, 18: 663~673[DOI]
- 48 de Graiansky P C. The inverted margin of the French Alps and foreland basin inversion. In: Copper M A, Williams M, eds. *Inversion Tectonics*. *Geol Assoc Lond Spec Pub*, 1989, 44: 41~59
- 49 Kieinschrodt K, Voll G. Deformation and metamorphic evolution of a large-scale fold in the lower crust: The Dembara synforms, Sri Lanka. *J Struct Geol*, 1994, 16(11): 1495~1508[DOI]
- 50 Ziegler P A, Cloetingh S, van Wees J D. Dynamics of intra-plate compressional deformation: The Alpine foreland and other examples. *Tectonophysics*, 1995, 252: 7~59[DOI]

(2005-01-07 收稿, 2005-03-29 收修改稿)