

北武夷资溪-光泽岩体锆石 U-Pb 年代学 ——对确定华南内陆印支期岩浆活动时空分布与形成环境的意义

覃晓云^{1,2}, 李武显^{1*}, 岑涛^{1,2}, 吕璞良^{1,2}, 陶继华³

(1.中国科学院 广州地球化学研究所 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2.中国科学院 大学 地球科学学院, 北京 100049; 3.东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 330013)

摘要:通过对北武夷地区资溪-光泽杂岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析, 获得资溪岩体的年龄为 236~238 Ma。结合收集的华南内陆地区已有的印支期岩浆岩的年龄资料, 观察其年龄在 SE-NW 向和 SW-NE 向的时空变化情况, 发现华南内陆印支期岩浆岩年龄分布具有从东南沿海到北西内陆地区呈逐渐年轻的趋势, 而在大致沿武夷山走向的南西到北东方向上呈宽阔的近水平的线性分布趋势。印支期沿海岩浆弧在~260 Ma 消失 20 Ma 之后, ~240 Ma 在距离海沟大约 400~500 km 的武夷山地区大规模出现, 是水平俯冲造成的华南内陆新生岩浆弧形成, 类似于新生代北美拉拉米造山和墨西哥中部的水平俯冲情况。由于加厚的中、下地壳温度较高, 少量水平俯冲前端脱水形成的地幔岩浆侵入中、下地壳, 带来的热很容易造成中、下地壳物质发生部分熔融, 形成北武夷地区大量印支期花岗质岩浆岩。

关键词:北武夷; 花岗岩; 印支期; 新生岩浆弧; 华南内陆

中图分类号: P597 文献标志码: A 文章编号: 1001-1552(2017)04-0753-015

0 引言

近年来, 随着锆石微区定年技术(SHRIMP, LA-ICPMS 和 Cameca 锆石 U-Pb 定年)的广泛应用, 华南确定了越来越多的印支期花岗岩, 获得了一批较准确年代数据, 为建立华南印支期花岗岩的时空分布格架提供了依据。华南印支期岩浆岩分布面积广, 大约 20900 km², 占华南各时代花岗岩出露总面积的 12.3%, 但岩石类型较简单, 以花岗岩为主, 基性岩和碱性岩少见(孙涛, 2006; Sun et al., 2011; 李万友等, 2012)。根据分布区域、年龄特点和岩石组合, 大致可将华南印支期岩浆活动划分为四个分布区, 即海南分布区、大容山分布区、武夷山以东分布区

和武夷山及以西的内陆分布区。海南分布区岩浆岩年龄集中在 235~270 Ma, 主要为黑云母二长花岗岩和含角闪石的黑云母二长花岗岩, 以及石榴霓辉正长岩、黑云母正长花岗岩(葛小月, 2003; 谢才富等, 2005, 2006; Li et al., 2006)。大容山地区的岩浆岩年龄集中在 230~260 Ma, 零星出露有 205~210 Ma 岩浆岩, 主要为一套含石榴石、堇青石、紫苏辉石的典型 S 型花岗岩(邓希光等, 2004; Peng et al., 2006; 祁昌实等, 2007; Chen et al., 2011)。武夷山以东分布区印支期岩浆活动较少, 仅零星地见少量超钾质碱性正长岩小岩体分布在福建西部(图 1a), 形成年龄 242~254 Ma (Wang et al., 2005a; Sun et al., 2011; 李万友等, 2012)。武夷山及其以西的华南内陆分布区

收稿日期: 2014-12-29; 改回日期: 2015-06-25

项目资助: 国家自然科学基金(41173039、41373033、41303020)联合资助。

第一作者简介: 覃晓云(1989-), 女, 硕士研究生, 地球化学专业。Email: 1030181667@qq.com

通信作者: 李武显(1964-), 男, 研究员, 从事岩石学、岩石地球化学方向研究。Email: liwx@gig.ac.cn

是印支期岩浆岩的主要分布区(图 1a), 它远离大陆边缘, 主要集中于湘中到赣南地区, 并与华南印支期陆内褶皱造山带相伴生(Li and Li, 2007)。上述四个地区的岩浆岩在岩石组合、形成时代和分布特征上有显著差别。它们可能代表一个大的构造背景的不同部位, 或者是不同时期的岩浆活动。因此, 要完整地理解华南印支期花岗岩成因, 建立华南早中生代大地构造背景, 需要先详细地研究各个部分的岩浆岩时空分布与成因, 在此基础上结合不同部分建立综合的构造模型。本文关注的是武夷山及以西的华南内陆分布区印支期岩浆岩的时空分布特征。

大量研究表明武夷山及以西的华南内陆地区印支期岩浆岩 90% 为过铝质 S 型花岗岩。这些岩浆岩形成年龄多 < 240 Ma, 岩石类型主要为一套中到粗粒的黑云母花岗岩和二云母花岗岩岩石组合(Xu et al., 2003; Wang et al., 2005b; Chen et al., 2007a, 2007b; Li and Li, 2007; Wang et al., 2007; Wang et al., 2013a)。前人对这些岩浆岩做过大量研究, 积累了丰富的资料, 发现该地区印支期岩浆活动缺乏同期火山岩和少量镁铁质岩分布(范蔚茗等, 2003; Zhou et al., 2006), 仅在湖南南部发现白垩纪玄武岩中有三叠纪辉长岩捕虏体(Guo et al., 1997; 范蔚茗等, 2003; Dai et al., 2008)。在中武夷地区, 发现有越来越多的 A 型花岗岩和少量基性岩出露, 如浙西南的翁山和靖居 A 型花岗岩(Sun et al., 2011; Li et al.,

2012a)和闽西北的夏茂(Xiamao)辉绿岩(Wang et al., 2013a)。

武夷山及以西的华南内陆地区大量的研究成果多集中在南岭东段和湘东南地区, 而对北武夷地区的岩浆作用研究相对较少。近年来, 在武夷山地区发现的一系列印支期岩浆岩, 使我们有可能更深入地理解华南内陆印支期岩浆活动的成因及其形成的构造背景。但是, 以下几个问题仍需厘清和解释: (1)印支期岩浆活动在空间上的分布规律还存在较大争议, 有的学者认为华南印支期岩浆活动年龄从东南沿海往内陆北西方向逐渐变年轻(Li and Li, 2007; 陶继华, 2012), 也有学者认为华南印支期岩浆活动呈面状分布, 其活动年龄可分为两个阶段(Zhou et al., 2006; 于津海等, 2007; Wang et al., 2007, 2013b; Mao et al., 2011, 2013); 第一阶段为主碰撞期, 在晚二叠世-早三叠世(258~243 Ma); 第二个阶段在 232~215 Ma, 为主碰撞期之后约 20 Ma。(2)为什么武夷山以东的沿海地区缺乏大量的印支期岩浆活动, 而是出现少量的高钾碱性岩? (3)为什么大规模的印支期岩浆岩在武夷山及其以西地区出现, 它们最初出现的时间, 如何解释它们广泛出现的原因? 为此, 本文系统研究了北武夷地区印支期资溪-光泽花岗杂岩体的锆石 U-Pb 年代学, 并在综合收集华南内陆已有印支期岩浆岩年龄资料的基础上, 结合水平俯冲模型, 讨论了印

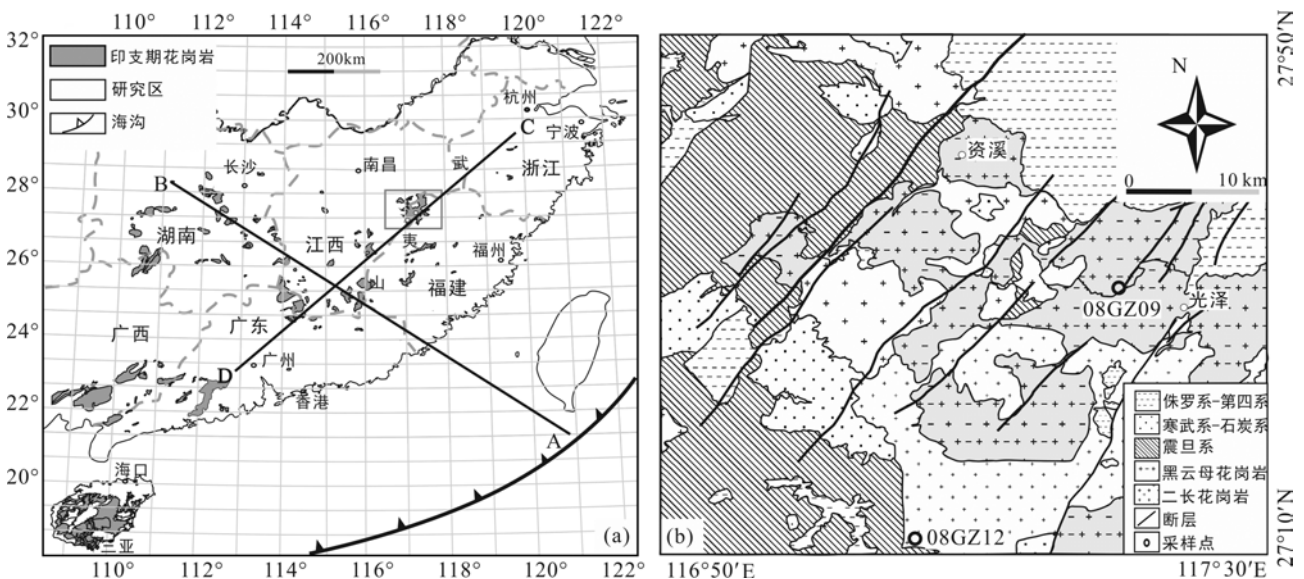


图 1 华南印支期岩体分布(a, 海沟修改自 Li et al., 2012b; A-B. 岩浆岩年龄分布在 SE-NW 方向的投影线, C-D. 岩浆岩年龄分布在 NE-SW 方向的投影线)和资溪-光泽杂岩体地质简图(b)

Fig.1 Distribution of the Indosinian granitoids in South China (a), and geological map of the Zixi-Guangze complexes (b)

支期岩浆活动的时空分布, 沿海地区出现高钾碱性岩以及武夷山地区大规模印支期岩浆岩出现的原因。

1 地质背景和样品特征

资溪-光泽花岗岩杂岩体位于武夷隆起带北部, 江山-绍兴断裂带南缘, 地理位置处于赣闽两省交界地区(图 1a)。该花岗岩杂岩体又称为大银厂岩体(Wang et al., 2013a), 主要由灰色的中-细粒、中粒、粗粒黑云母钾长花岗岩和浅红色中粒-粗粒钾长花岗岩组成, 出露面积约 1320 km² (Wang et al., 2013a)。资溪-光泽花岗岩杂岩体侵入志留纪变质岩中, 并被侏罗纪地层覆盖(图 1b), 岩石类型主要为黑云母钾长花岗岩、黑云母二长花岗岩和钾长花岗岩。Wang et al. (2013a)获得资溪杂岩体北部(光泽县城以北)2个黑云母花岗岩的年龄分别为 228 Ma 和 237 Ma。资溪-光泽花岗岩具有高 SiO₂, 高碱, 较低的 Al₂O₃ 含量, 大多数样品具有准铝质特征, 少量为弱过铝质, 并显示 I 型花岗岩特点(Wang et al., 2013a)。

本文定年样品采自资溪-光泽岩体中-南部(光泽县城以西和以南), 采样位置见图 1b, 样品为新鲜黑云母钾长花岗岩和钾长花岗岩, 显微特征如下:

黑云母钾长花岗岩(样品 08GZ09)以石英(~50%)、钾长石(~42%)和黑云母(~7%)为主, 并含有少量斜长石(~1%)。石英呈不规则它形粒状; 钾长石分为两期, 早期的呈半自形, 板状, 后期的呈它形粒状, 双晶纹不发育; 黑云母呈自形-半自形、片状;

斜长石呈自形, 发育聚片双晶(图 2a)。

钾长花岗岩(样品 08GZ12)以石英(~45%)、钾长石为主(~55%)。石英呈不规则它形粒状, 有裂理; 钾长石呈半自形-它形, 板状、不规则粒状, 表面混浊, 双晶纹不发育, 部分发生蚀变(图 2b)。

2 分析方法

通过野外地质调查, 采集了 2 个新鲜的花岗岩样品, 送河北廊坊宇能岩石矿物分选技术服务有限公司分选锆石。分选过程采用常规重磁选方法, 选出的锆石在中国科学院地质与地球物理研究所离子探针实验室制靶, 并进行了透射光、反射光和阴极发光(CL)照像, 用以选取最理想的锆石颗粒的最佳位置进行分析测试。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年样品在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室测试, 采用美国 Reson-etics 公司生产的 RESOLUTIONM-50 激光剥蚀系统和 Agilent 7500a 型的 ICP-MS 联机, 并带有一个独特的可以减少样品分馏的双室(two-volume cell)样品室和一个平滑激光剥蚀脉冲的 Squid 系统。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气, 用美国国家标准技术研究院人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610(Pearce et al., 1997)进行仪器最佳化调试, 使仪器的灵敏度达到最佳, 最小的氧化物产率(CeO/Ce<3%)和最低的背景值。实验采用标准锆石 TEMORA 作为测年外标(Black et al., 2003)。所测元素激光斑束直径主要为 31 μm, 能量为

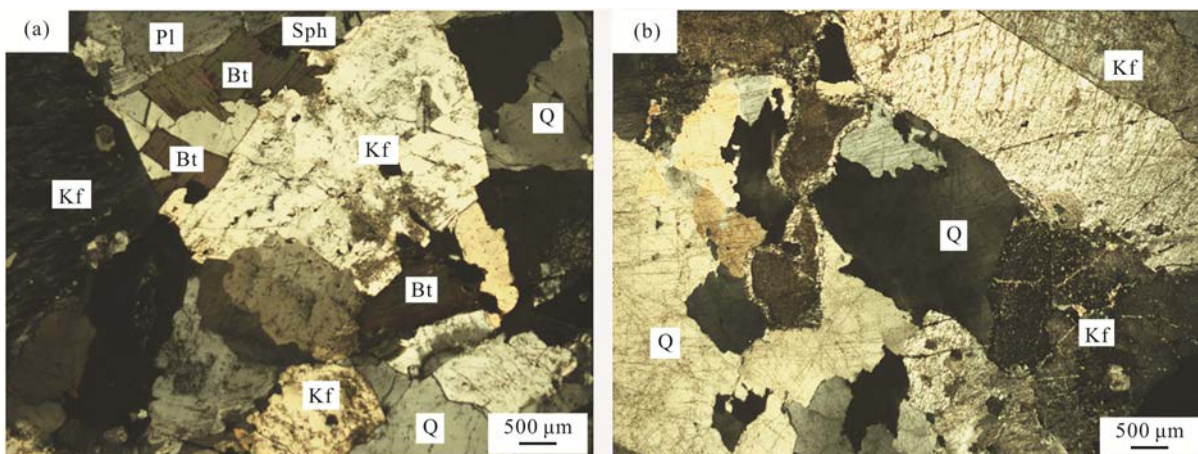


图 2 资溪-光泽岩体黑云母钾长花岗岩(a)和钾长花岗岩(b)显微照片(Kf. 钾长石; Bi. 黑云母; Q. 石英; Pl. 斜长石; Sph. 榍石)

Fig.2 Microphotographs of the biotite K-feldspar granite (a) and K-feldspar granite (b) from the Zixi-Guangze complex

80 mJ, 频率为 8 Hz, 剥蚀时间为 40 s。数据处理使用软件 ICP-MS DataCal 6.7(Liu et al., 2008)。

3 分析结果

从资溪-光泽岩体具有代表性的 2 个样品(08GZ09-1、08GZ12-1)中分别挑选了 20 和 19 颗锆石进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析, 结果见表 1。08GZ09-1 样品中锆石均呈柱状自形晶, 长 70~150 μm , 长宽比为 1~3, 锆石 CL 图像上见明显的岩浆结晶环带, 其中一些锆石呈黑色, 是由于 U 含量高造成。锆石 U、Th 含量变化于 79.8~1476 $\mu\text{g/g}$ 、55~722 $\mu\text{g/g}$, Th/U 比值变化于 0.45~1.17 之间。其中 9、16、17 和 20 号分析点具有明显偏高的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, 为继承或捕获锆石。剩余 16 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在 226~248 Ma, 加权平

均年龄为 238.0 ± 4.1 Ma(MSWD=1.6, 95%置信度)(图 3a)。

08GZ12-1 样品中的锆石也均呈柱状自形晶, 长 90~150 μm , 长宽比大多为 1~2, CL 图像上可见较好的岩浆结晶环带, 部分锆石有黑色边, 有些锆石完全呈黑色, 反映锆石 U 含量非常高。锆石 U、Th 含量变化于 180~3045 $\mu\text{g/g}$ 、336~2650 $\mu\text{g/g}$, Th/U 比值为 0.87~3.62。其中 1、3、4、6、7、11、12、15、16 和 18 号分析点的所得年龄偏老, 可能为继承或捕获锆石。剩余 9 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在 226~250 Ma, 加权平均年龄为 235.9 ± 5.3 Ma (MSWD=1.2, 95%置信度)(图 3b)。

综合上述花岗岩的定年结果和 Wang et al. (2013a)的定年结果, 表明资溪-光泽花岗岩杂岩体的主体形成于 236~238 Ma, 局部可以持续到~230 Ma。

表 1 资溪-光泽岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb dating results of zircons from the Zixi-Guangze granites

分析点	含量($\mu\text{g/g}$)			Th/U	同位素比值						表面年龄(Ma)			
	U	Th	Pb ^t		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
黑云母钾长花岗岩(08GZ09-1)														
01	118	104	6.42	0.89	0.0580	0.0140	0.2882	0.0684	0.03656	0.00251	257.1	53.9	231.5	15.6
02	579	259	28.3	0.45	0.0684	0.0120	0.3578	0.0629	0.03744	0.00199	310.6	47.1	237.0	12.4
03	417	259	20.8	0.62	0.0589	0.0079	0.2960	0.0393	0.03637	0.00142	263.3	30.8	230.3	8.8
04	181	124	9.71	0.69	0.0500	0.0041	0.2674	0.0215	0.03928	0.00077	240.6	17.2	248.4	4.8
05	79.8	55	4.99	0.68	0.0985	0.0093	0.5329	0.0552	0.03790	0.00140	433.7	36.6	239.8	8.7
06	247	193	12.5	0.78	0.0520	0.0036	0.2764	0.0193	0.03875	0.00092	247.8	15.4	245.1	5.7
07	139	136	7.77	0.98	0.0795	0.0075	0.4085	0.0429	0.03656	0.00099	347.8	30.9	231.5	6.1
08	1476	722	77.0	0.49	0.0960	0.0067	0.5083	0.0510	0.03585	0.00100	417.3	34.3	227.0	6.2
09*	174	127	18.8	0.73	0.1887	0.0310	2.2787	0.5194	0.05417	0.00486	1205.7	162.2	340.0	29.7
10	445	328	25.7	0.74	0.0755	0.0045	0.4200	0.0287	0.03928	0.00091	356.0	20.5	248.4	5.6
11	108	88	6.00	0.81	0.0541	0.0056	0.2934	0.0309	0.03920	0.00102	261.3	24.3	247.8	6.3
12	136	114	7.05	0.83	0.0471	0.0039	0.2356	0.0194	0.03567	0.00087	214.8	15.9	225.9	5.4
13	290	203	15.9	0.70	0.0671	0.0057	0.3503	0.0300	0.03683	0.00065	304.9	22.6	233.1	4.1
14	194	127	10.1	0.65	0.0503	0.0038	0.2618	0.0191	0.03750	0.00086	236.1	15.4	237.3	5.3
15	126	148	7.50	1.17	0.0702	0.0076	0.3854	0.0437	0.03764	0.00104	331.0	32.1	238.2	6.4
16*	257	152	57.5	0.59	0.2089	0.0354	3.5780	0.8414	0.06540	0.00762	1544.7	188.8	408.4	46.1
17*	270	155	40.4	0.57	0.3189	0.0241	3.0437	0.3012	0.06198	0.00240	1418.6	75.8	387.6	14.6
18	210	134	11.4	0.64	0.0644	0.0061	0.3280	0.0263	0.03779	0.00093	288.0	20.1	239.1	5.8
19	144	102	7.58	0.71	0.0479	0.0047	0.2545	0.0243	0.03778	0.00096	230.2	19.7	239.0	6.0
20*	429	205	26.5	0.48	0.1023	0.0092	0.6363	0.0630	0.04110	0.00132	500.0	39.1	259.6	8.1
钾长花岗岩(08GZ12-1)														
01*	905	1291	71.3	1.43	0.1765	0.0773	1.0850	0.4477	0.04165	0.00652	746.1	221.5	263.1	40.3
02	3045	2650	147	0.87	0.0480	0.0096	0.2448	0.0466	0.03572	0.00273	222.3	38.0	226.2	17.0
03*	2090	2380	327	1.14	0.3426	0.0452	2.5089	0.3296	0.05014	0.00243	1274.6	95.7	315.4	14.9
04*	453	962	55.4	2.12	0.2072	0.0167	1.4997	0.1768	0.04665	0.00228	930.3	71.9	293.9	14.0

续表 1:

分析点	含量(μg/g)			Th/U	同位素比值						表面年龄(Ma)			
	U	Th	Pb ^t		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
钾长花岗岩(08GZ12-1)														
05	318	519	21.2	1.63	0.0618	0.0049	0.3259	0.0291	0.03685	0.00100	286.4	22.3	233.3	6.2
06*	511	1805	58.0	3.53	0.1477	0.0161	0.9945	0.1309	0.04321	0.00175	701.0	66.8	272.7	10.8
07*	216	783	43.8	3.62	0.4031	0.0192	3.7370	0.2134	0.06511	0.00225	1579.3	45.8	406.6	13.6
08	407	456	22.7	1.12	0.0503	0.0033	0.2594	0.0174	0.03683	0.00083	234.2	14.0	233.2	5.2
09	346	360	19.2	1.04	0.0509	0.0038	0.2638	0.0198	0.03732	0.00091	237.7	15.9	236.2	5.6
10	938	1127	53.0	1.20	0.0583	0.0030	0.3018	0.0164	0.03693	0.00086	267.8	12.8	233.8	5.3
11*	306	372	20.3	1.22	0.0627	0.0044	0.3648	0.0248	0.04236	0.00119	315.8	18.4	267.5	7.4
12*	180	450	19.7	2.50	0.1850	0.0215	1.2175	0.1479	0.04623	0.00111	808.6	67.8	291.3	6.9
13	757	1177	53.4	1.55	0.0956	0.0065	0.5075	0.0315	0.03906	0.00105	416.7	21.2	247.0	6.5
14	435	481	25.2	1.11	0.0731	0.0060	0.3807	0.0380	0.03651	0.00093	327.6	27.9	231.1	5.8
15*	291	336	21.1	1.15	0.0938	0.0088	0.5428	0.0509	0.04157	0.00091	440.3	33.5	262.6	5.6
16*	532	516	35.0	0.97	0.0699	0.0042	0.4048	0.0249	0.04197	0.00109	345.1	18.0	265.0	6.8
17	407	423	22.4	1.04	0.0598	0.0044	0.3059	0.0240	0.03631	0.00102	271.0	18.7	229.9	6.4
18*	729	1755	64.6	2.41	0.1371	0.0095	0.8603	0.0661	0.04400	0.00136	630.3	36.1	277.6	8.4
19	213	419	15.4	1.97	0.0439	0.0039	0.2417	0.0220	0.03957	0.00110	219.8	18.0	250.2	6.8

注: 标注*数据没有参与加权平均年龄计算。

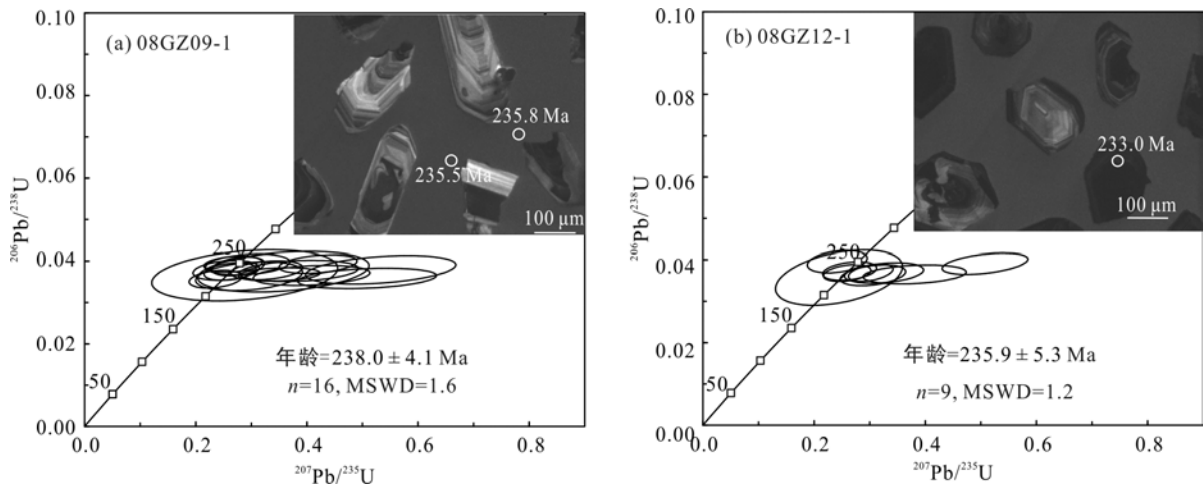


图 3 资溪-光泽岩体锆石 U-Pb 定年谐和图和锆石 CL 图像

Fig.3 U-Pb concordia diagrams and CL images of zircon grains from the Zixi-Guangze granites

4 讨论

华南内陆印支期岩浆岩的成因及其形成的大地构造背景, 一直是华南地质研究的热点问题之一, 目前存在的观点可以总结为 4 种: (1)地体碰撞模式(许靖华等, 1987; Hsü et al., 1988, 1990), 该模型认为扬子地体和华夏地体在早中生代发生碰撞, 期间的湘赣浙洋盆消失, 扬子地体边缘发育的板溪群是印支期冲断到台地边缘的构造混杂岩。但是, 这一模式与板溪群属前寒武纪的基本地质事实并不一致

(Rowley et al., 1989; 任纪舜, 1990; 陈旭和戎嘉余, 1995; Gilder et al., 1996; Chen and Jahn, 1998), 因此很快遭到众多学者的质疑; (2)印支板块与华南板块碰撞模式(Carter et al., 2001; Lepvrier et al., 2004; Wang et al., 2005b, 2007; Zhou et al., 2006; Shu et al., 2008; He et al., 2010), 该模式把印支板块与华南板块碰撞造山运动分为两个阶段: 第一阶段在晚二叠世-早三叠世(258~243 Ma), 印支板块自西南往北与华南板块碰撞, 导致华南地壳应力挤压加厚, 产生同碰撞岩浆岩; 第二个阶段在印支运动主碰撞期之后约 20 Ma, 加厚地壳发生热-应力松弛作用, 进入

以碰撞为主的局部伸展构造应力体制, 造山带垮塌, 软流圈上涌, 导致地壳发生部分熔融, 产生后碰撞花岗岩; (3)多板块汇聚模式(Mao et al., 2013), 该模式认为 258~243 Ma Sibumasu 地块与印支板块-华南板块发生碰撞, 地壳加厚, 古特提斯洋闭合; 253~239 Ma, 古太平洋板块与东亚大陆边缘发生碰撞, 产生同碰撞花岗岩, 随后 232~215 Ma 岩石圈发生局部垮塌, 产生 A 型花岗岩; (4)古太平洋板块向华南板块的俯冲模式(崔盛芹和李锦蓉, 1983; 任纪舜, 1990; Wang et al., 2005a; Li and Li, 2007; Carter and Clift, 2008), 这一模式认为华南东南边缘, 包括华南内陆印支期受古太平洋板块向北西俯冲影响, 宽广的印支造山带与岩浆岩共存是水平俯冲的结果, 该模式是建立在华南印支期岩浆岩时空分布、造山带走向和沉积岩相古地理演化等多方面地质事实的基础上。

岩浆岩时空分布特征是判断岩浆岩形成构造背景的重要指标之一。为此, 我们在充分收集现有资料的基础上, 探讨岩浆活动年龄在 SE-NW(垂直投影到图 1a A-B 线上)和 SW-NE(垂直投影到图 1a C-D 线上)方向的变化。

4.1 华南内陆印支期岩浆岩时空分布

4.1.1 SE-NW 向岩浆活动年龄分布的变化趋势

剔除湖南地区较老的(>230 Ma)年龄数据, 华南印支期岩浆岩分布总体上显示出从沿海地区向内陆地区逐渐变年轻的趋势(图 4)。整个区域上 SE-NW 向的年龄分布情况显示: >260 Ma 的岩浆活动仅分布在沿海地区的海南岛, 在东南沿海地区及内陆地区到目前都没有发现可靠的>260 Ma 的岩体出露, 但是福建的二叠纪砂岩和台湾大南澳片岩的碎屑

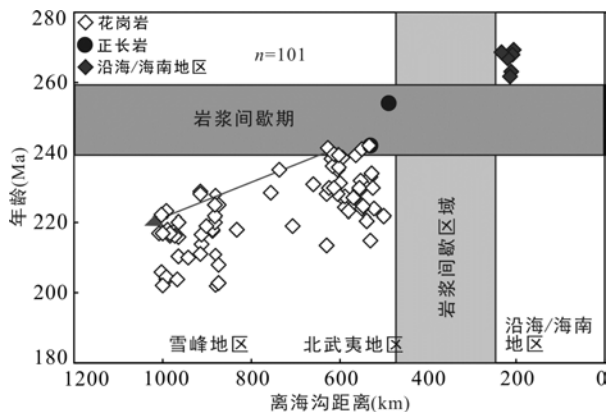


图 4 华南印支期岩体年龄分布在 SE-NW 向(A-B)的时空变化

Fig.4 The temporal and spatial variation of the crystallization ages of the Indosinian granites in SE-NW-direction

锆石都有~280 Ma 的岩浆锆石记录(Li et al., 2012a; Li et al., 2012b), 支持东南沿海地区存在早二叠纪的岩浆弧。距海沟 250~450 km 的地区只有少量富钾碱性岩浆活动(Wang et al., 2005a), 它们的年龄在 260~240 Ma 之间, 这个时期可以理解为岩浆活动间歇期, 闽西南和赣南地区的 T_3 - J_1 沉积岩中碎屑锆石也缺乏这个时间段的年龄记录(Li et al., 2006; Li et al., 2012a; 李武显等, 2013)。大约 240 Ma, 在距海沟~450 km 的武夷山地区开始出现大量的岩浆活动(表 2), 包括北武夷地区的资溪-光泽岩体(236~238 Ma), 赣南-粤北地区的贵东岩体(236~239 Ma), 桂坑岩体(黑云母花岗岩: 234 Ma), 龙源坝杂岩体(235~240 Ma)等。该地区的岩浆活动可以持续到大约 220 Ma, 如浙西南的翁山岩体(224 Ma)和靖居岩体(215 Ma), 赣东的蔡江岩体(228 Ma)和高溪岩体(~230 Ma), 以及赣南的桂坑岩体(黑云钾长花岗岩: 220 Ma)。岩浆活动在武夷山地区持续发生的同时, 也向西北湘中地区扩展, 并伴随弧形的褶皱断裂带(Li et al., 2007; 汪昌亮等, 2011; Chu et al., 2012a, 2012b)。最西部的湘中地区, 印支期岩浆活动出现的最早时间大约在 225 Ma(Chu et al., 2012c), 可以持续到~200 Ma, 晚期形成的主要是二云母花岗岩/含电气石的白云母花岗岩, 如白马山的龙藏湾二云母花岗岩和阳明山含电气石白云母花岗岩(~200 Ma), 关帝庙二云母花岗岩(208 Ma)和瓦屋塘黑云母花岗岩(202 Ma)(表 2)。尽管湘中地区有报道>230 Ma 的年龄(Wang et al., 2005b, 2007), 但后期系统的高精度定年并不支持湘中地区存在>230 Ma 年龄(Li and Li, 2007; 陶继华, 2012; Chu et al., 2012c)。

4.1.2 SW-NE 向岩浆活动年龄分布的变化趋势

SW-NE 向的年龄变化没有包括海南岛和大容山地区的岩浆岩, 南部起点大致从广州附近开始(图 1a, C-D), 北到浙江金华附近。原因是海南岛更可能代表的是东南沿海岩浆弧的南段(Li et al., 2006), 而大容山花岗岩在岩石组合上为典型的含石榴石/堇青石 S 型花岗岩, 与华南内陆黑云母花岗岩/二云母花岗岩组合存在明显的差别。大容山地区的花岗岩可能与峨眉山地幔柱活动引起的地壳熔融作用有关(Chen et al., 2011)。

华南内陆印支期岩浆活动在 SW-NE 向没有明显的年轻化趋势, 呈宽阔的近水平的线性分布(图 5)。岩浆活动最初出现的时间与整个武夷山地区基本一致, 大致在 240 Ma, 持续到~220 Ma(图 5 灰色

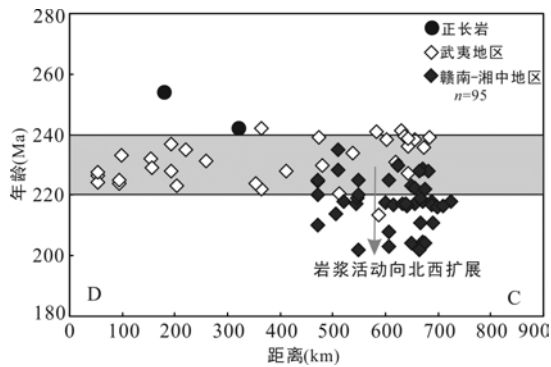


图 5 华南印支期岩体年龄分布在 SW-NE 向(C-D)的时空变化(不包含表 2 中五指山的数据)

Fig.5 The temporal and spatial variation of the crystallization ages of the Indosinian granites in SW-NE-direction

区), 时间跨度约 20 Ma。目前出露主要集中在南部的赣粤交界地区和北部的资溪-光泽地区, 中部断续有些小岩体出露。南部最初出现的岩体以贵东岩体(235~239 Ma, 表 2)为代表。北部最初出现的岩体以资溪-光泽岩体(228~238 Ma, 表 2)为代表。对应赣南到湘中地区, 岩浆活动明显向西扩展。但是在造山带的东北和西南方向并没有扩展的迹象。

从上述华南内陆印支期岩浆活动在 SE-NW 向和 SW-NE 向的时空变化可以看出, 岩浆活动在 SE-NW 方向存在明显的向北西年轻化的趋势, 而在 SW-NE 方向并没有明显的变化。值得注意的是华南内陆印支期岩浆活动为什么在距离古海沟(估计在台湾东部)大约 400~500 km 的武夷山地区突然大规模出现?

表 2 华南内陆印支期花岗岩年龄数据表

Table 2 Ages of the Indosinian magmatic rocks in the interior of South China

岩体	岩性	年龄(Ma)	2σ(Ma)	测试方法	参考文献
正长岩					
铁山正长岩	黑榴石/含黑榴石的辉石正长岩	254	4	SHRIMP 锆石U-Pb法	Wang et al., 2005a
洋坊正长岩	霓辉石正长岩	242	4	SHRIMP 锆石U-Pb法	Wang et al., 2005a
武夷地区					
蔡江岩体	斑状黑云母花岗岩	228	2	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Zhao et al., 2013
高溪岩体	黑云母花岗岩	232	2	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Zhao et al., 2013
	花岗岩	229	2	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Zhao et al., 2013
大爽岩体西部	正长岩	224.3	2.9	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Zhao et al., 2013
大爽岩体东部	石英二长岩	226.4	1.4	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Zhao et al., 2013
大爽岩体东部	石英二长岩	227.4	1.4	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Zhao et al., 2013
Dayinchang	花岗岩	228	2	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Wang et al., 2013a
	花岗岩	237	2	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Wang et al., 2013a
Xiaomao	辉绿岩	223	2	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Wang et al., 2013a
资溪岩体	花岗岩	235.1	2.9	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	本文数据
资溪岩体	花岗岩	231.3	8	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	本文数据
翁山岩体	中粗粒黑云母二长花岗岩	225	1	SHRIMP 锆石U-Pb法	Sun et al., 2011
翁山岩体	中粗粒黑云母二长花岗岩	224	3	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Sun et al., 2011
靖居	正长花岗岩	215	2	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Li et al., 2012c
靖居岩体	石英二长岩	233	1.8	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Li et al., 2012c
小陶	黑云母花岗岩	222	3	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	王丽娟等, 2007
武平(花岗岩墙)	花岗岩	229.8	2.2	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Xu et al., 2011
红山	含黄玉黑云母花岗岩	224.6	2.3	LAM-ICPMS 锆石U-Pb法	Yu et al., 2007
莒林	花岗岩	242	3	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Wang et al., 2013b
胡坊(清溪)	碱长花岗岩	224	2	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Li et al., 2012a
赣南-湘中地区					
大吉山岩体(五里亭)	黑云母花岗岩	238.4	1	锆石U-Pb同位素稀释法	张文兰等, 2004
大吉山岩体(五里亭)	中粗粒似斑状黑云母二长花岗岩	237.5	4.8	ELA-ICPMS 锆石U-Pb法	邱检生等, 2004
油山岩体	粗粒斑状黑云母二长花岗岩	213.4	3	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	孙立强等, 2010
坪田岩体(陂头)西北部	中粒斑状黑云母二长花岗岩	238.2	2.2	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	孙立强等, 2010
富城杂岩体(富城)	黑云母花岗岩	239	17	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	于津海等, 2007

续表 2:

岩体	岩性	年龄(Ma)	2 σ (Ma)	测试方法	参考文献
赣南-湘中地区					
富城杂岩体(珠长洞)	细粒含斑红柱石花岗岩	229	6.8	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	于津海等, 2007
富城杂岩体(粗石坝)	中细粒斑状二云母花岗岩	231	16	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	于津海等, 2007
龙源坝杂岩体	黑云母花岗岩	238.6	1.7	Cameca 锆石U-Pb法	陶继华, 2012
龙源坝杂岩体	二云母花岗岩	236.2	2.4	Cameca 锆石U-Pb法	陶继华, 2012
龙源坝杂岩体	石英二长岩	241.3	4.6	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	陶继华, 2012
利源岩体	中粒斑状黑云母二长花岗岩	227.2	4.4	SHRIMP 锆石U-Pb法	陈希清等, 2010
龙源坝岩体	黑云母花岗岩	239.4	1.4	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	He et al., 2010
棉土窝岩体(龙源坝北部)	黑云母二长花岗岩	230	2.3	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	孙立强等, 2011
白面石岩体	中细粒二云母花岗岩	241	7	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	董晨阳等, 2010
桂坑岩体	黑云母花岗岩	234	3	SHRIMP 锆石U-Pb法	Mao et al., 2011
桂坑岩体	富钾长石斑晶黑云母花岗岩	220.4	3.2	SHRIMP 锆石U-Pb法	Mao et al., 2011
贵东岩体(鲁溪)	含角闪石黑云母花岗岩	239	5	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Xu et al., 2003
贵东岩体(下庄)	二云母花岗岩	235.8	7.6	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Xu et al., 2003
贵东岩体(鲁溪)	黑云母花岗岩	238.2	2.7	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Gao et al., 2014
贵东岩体(下庄)	二云母花岗岩	238.3	2.5	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Gao et al., 2014
富城岩体	黑云母花岗岩	229.4	2.4	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Gao et al., 2014
蒙洞岩体	黑云母花岗闪长岩	231	3	SHRIMP 锆石U-Pb法	Li and Li, 2007
关帝庙(中心)	二云母花岗岩	208	3.2	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Chen et al., 2007b
关帝庙(边部)	黑云母花岗岩/花岗闪长岩	203	1.6	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Chen et al., 2007b
关帝庙	角闪石黑云母二长花岗岩	225	2	Cameca 锆石U-Pb法	Chu et al., 2012c
瓦屋堂	黑云母花岗岩	204	3	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Chen et al., 2007b
阳明山	二云母花岗岩	218	4	SHRIMP 锆石U-Pb法	Li and Li, 2007
阳明山	电气石白云母花岗岩	218.9	3.4	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	陈卫锋等, 2006
阳明山	二云母二长花岗岩	218	10	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	陈卫锋等, 2006
汾山(唐市)	含角闪石黑云母花岗岩	211	1.6	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Ding et al., 2006
汾山(唐市)	含角闪石黑云母花岗岩	215.7	1.9	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Ding et al., 2006
汾山	黑云母二长花岗岩	222	3	Cameca 锆石U-Pb法	Chu et al., 2012c
歇马		218	3	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Wang et al., 2007
汾山(巷子口)		210	5	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Wang et al., 2007
锡田(贺家田)(主体)	中粒斑状黑云母二长花岗岩	228.5	2.5	SHRIMP 锆石U-Pb法	马铁球等, 2005
歇马	黑云母二长花岗岩	217.8	2.9	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Peng et al., 2006
苗儿山-越城岭	黑云母花岗岩(岩基)	228.7	4.1	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	梁华英等, 2011
苗儿山-越城岭(云头界)	白云母花岗岩(赋矿岩体)	216.8	4.9	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	梁华英等, 2011
苗儿山-越城岭(粟木)	白云母碱长花岗岩(赋矿)	231.5	4.1	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	梁华英等, 2011
香草坪(苗儿山)	中粗粒斑状黑云母花岗岩	211	2	SHRIMP 锆石U-Pb法	李妮巍等, 2010
香草坪(苗儿山)	花岗岩	211	3	SHRIMP 锆石U-Pb法	Zhao et al., 2014
豆乍山(苗儿山)	花岗岩	228	11	SHRIMP 锆石U-Pb法	Zhao et al., 2014
豆乍山(苗儿山)	花岗岩	202	4	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Zhao et al., 2014
豆乍山(苗儿山)	中细粒二云母二长花岗岩	228	11	SHRIMP 锆石U-Pb法	谢晓华等, 2008
越城岭	黑云母花岗岩	219	2	Cameca 锆石U-Pb法	Chu et al., 2012c
王仙岭	电气石黑云母花岗岩	235	1.3	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	郑佳浩和郭春丽, 2012
桃江		210	3.2	SHRIMP 锆石U-Pb法	续海金等, 2004
桃江	角闪石黑云母花岗岩	220	2	Cameca 锆石U-Pb法	Chu et al., 2012c

续表 2:

岩体	岩性	年龄(Ma)	2 σ (Ma)	测试方法	参考文献
赣南-湘中地区					
大神山		217	2.5	SHRIMP 锆石U-Pb法	续海金等, 2004
阳明山	二云母花岗岩	218	4	SHRIMP 锆石U-Pb法	Li and Li, 2007
淋洋	二云母花岗岩	219.1	0.2	TIMS 锆石U-Pb法	李献华, 1990
紫云山(边缘相)	黑云母花岗岩	220		LA-ICPMS 锆石U-Pb法	王凯兴等, 2011
紫云山	黑云母二长花岗岩	225	2	Cameca 锆石U-Pb法	Chu et al., 2012c
塔山	黑云母花岗岩	224	4	Cameca 锆石U-Pb法	Chu et al., 2012c
崇阳坪	花岗岩	218	5	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	Wang et al., 2013b
白马山	黑云母二长花岗岩	223.3	1.4	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	罗志高等, 2010
白马山	黑云母花岗闪长岩	204.5	2.2	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	罗志高等, 2010
白马山(黄茅园)	黑云母花岗岩	222.3	1.7	SHRIMP 锆石U-Pb法	李华芹等, 2008
白马山(龙潭)	黑云母花岗闪长岩	209.2	3.8	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	陈卫锋等, 2007
白马山(龙潭)	细粒黑云母二长花岗岩	204.5	2.8	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	陈卫锋等, 2007
白马山(龙藏湾)	二云母花岗岩(锆石幔部)	204	12	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	陈卫锋等, 2007
白马山	角闪石黑云母二长花岗岩	217	2	SHRIMP 锆石U-Pb法	Li and Li, 2007
白马山(高坪)	角闪石黑云母二长花岗岩	217	2	Cameca 锆石U-Pb法	Chu et al., 2012c
白马山(小沙江)	黑云母花岗岩	216	2.7	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	陶继华, 2012
白马山(小沙江)	黑云母花岗岩	216.4	2.5	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	陶继华, 2012
白马山(龙潭)	角闪石黑云母花岗岩	217.5	2.6	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	陶继华, 2012
白马山(龙潭)	角闪石黑云母花岗岩	216.5	2.3	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	陶继华, 2012
白马山(龙潭)	角闪石黑云母花岗岩	216.9	1.7	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	陶继华, 2012
白马山(龙藏湾)	二云母花岗岩	202.1	3.2	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	陶继华, 2012
白马山(包体)	黑云母花岗闪长岩	217.1	1.5	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	陶继华, 2012
白马山(包体)		205.1	3.9	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	陈卫锋等, 2007
白马山(包体)		203.2	4.5	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	陈卫锋等, 2007
沿海/海南地区					
五指山	花岗片麻岩	269.3	7.9	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	陈新跃等, 2011
五指山	花岗片麻岩	267.9	2.7	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	陈新跃等, 2011
五指山	花岗片麻岩	263	3.9	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	陈新跃等, 2011
五指山	花岗片麻岩	268.7	3	LA-ICPMS 锆石U-Pb法	陈新跃等, 2011
五指山	花岗岩	261.6	3.1	SHRIMP 锆石U-Pb法	Li et al., 2006
五指山	花岗岩	266.9	2.8	SHRIMP 锆石U-Pb法	Li et al., 2006

4.2 华南内陆印支期新生的岩浆弧?

~240 Ma 大规模的资溪-光泽花岗岩体和贵东、龙源坝岩体在沿海岩浆弧消失约 20 Ma 之后在距离海沟大约 400~500 km 的武夷山南北两端几乎同时出现, 并且空间上与东南沿海近平行, 一个比较合理的解释是华南内陆新生的岩浆弧, 类似于水平俯冲导致北美晚中生代-新生代拉拉米造山带(Laramide Orogeny)的岩浆弧西移(Coney and Reynolds, 1977; Dickinson and Snyder, 1978; Bird, 1988), 以及晚新生代中墨西哥水平俯冲造成的岩浆弧北移(Skinner and Clayton, 2011)。因此, 可以认为武夷山

地区是华南内陆印支期新生的岩浆弧。但是, 如何解释华南内陆形成新生的岩浆弧?

近年来, 对墨西哥中部水平俯冲区的地球物理和热结构的实验模拟表明(Manea et al., 2011; Ferrari et al., 2012), 在正常角度的大洋俯冲过程中, 俯冲板片的前端进入到软流圈地幔中, 温度达到 1300 °C, 俯冲的大洋岩石圈发生脱水, 这些水向上进入上覆的地幔楔, 导致上覆地幔楔发生部分熔融, 在距离海沟大约 100~200 km 产生大量的弧岩浆。而水平俯冲过程中岩浆岩的产生与正常俯冲存在明显差异。水平俯冲各个阶段的温度和脱水的物质及水的含量

差别很大,在距离海沟<180 km 时,由于俯冲板片下方缺少软流圈地幔,地温梯度较低,脱水量也较低,仅有 0.5%的流体从矿物的裂解反应中释放,所以不会产生岩浆作用。在距海沟 200~250 km 之间蛇纹石化地幔、大洋沉积物、洋壳都发生脱水,但主要是大洋沉积物和洋壳脱水,这一阶段是平板俯冲过程中脱水量最大的(达到 5%),即使这一阶段脱水量很高,由于上覆地幔的温度较低,只有 300~400 °C,因此这一阶段也几乎没有岩浆活动。但是,局部由于摩擦热导致温度升高,造成上覆交代的岩石圈地幔发生小比例部分熔融,形成少量富钾碱性岩。随着俯冲作用的继续进行,在离海沟 300~400 km 处,俯冲板片的前端进入软流圈地幔,地温梯度急剧上升,达到~1100 °C,导致蛇纹石化地幔脱水,脱水量达到 4.5%,这些水向上进入上覆的高温地幔楔,从而导致在平板俯冲板片前端的上覆地幔楔发生部分熔融,产生一定量玄武质的弧岩浆(Mori et al., 2007; Manea and Manea, 2011)。

华南内陆印支期的弧岩浆作用不论在年龄变化趋势还是规模大小(NE-SW 向延伸~700 km)上都与墨西哥中部中新世岩浆活动相似。因此我们认为用墨西哥中部岩浆岩产生的模式可以较好地解释华南内陆新岩浆弧的出现。墨西哥中部新生代岩浆活动经历了长时间正常的弧岩浆活动,从晚渐新世开始(~25 Ma),水平俯冲造成岩浆活动远离海沟向北迁移,到晚中新世(~10 Ma),在远离海沟~500 km,形成 Palo Huérfano-La Joya-Zamorano(PH-LJ-Z)火山岩区(Mori et al., 2007, Skinner and Clayton, 2011)。PH-LJ-Z 火山岩区主要岩石为安山岩到英安岩,地球化学特征上具有埃达克岩的地球化学特征,显示高的 Sr/Y 和 La/Yb 比值,与华南印支期大爽岩体(Zhu et al., 2013)相似。但是,在武夷山地区及其以西的华南内陆,大规模的印支期岩浆活动为花岗质岩石,岩石组合上与北美晚中生代-新生代水平俯冲形成的拉拉米造山带共生的岩浆岩组合相似,以准铝质-弱铝质花岗岩和强过铝质二云母花岗岩组合为主(Miller and Barton, 1990)。华南印支期和墨西哥中新世岩浆岩组合的差别可能反映的是深层次和浅层次岩浆岩石组合的不同。

太平洋板块向华南板块俯冲的初始阶段为正常俯冲,俯冲板片存在软流圈地幔,温度达到 1300 °C,上覆地幔楔脱水熔融可以产生早二叠世弧岩浆。虽然在离海沟较近的东南沿海地区没有发现弧岩浆作

用,但是在海南岛有这个时期的岛弧岩浆岩(Li et al., 2006),在东南沿海地区沉积岩中有早二叠世的自形碎屑锆石(Li et al., 2012a)。之后俯冲角度变小,转变为水平俯冲,俯冲板片上方缺少上覆软流圈地幔,温度急剧降低,只有 400~500 °C,即使有大量的沉积物脱水也很难达到岩石圈地幔大量部分熔融的条件,但是这时候只要有一定量的摩擦热加入是可以使岩石圈地幔发生少量的部分熔融,形成武夷山东部地区一些少量的富钾碱性岩,如铁山和洋坊正长岩(254 Ma 和 242 Ma)。随着俯冲逐渐向内陆地区移动,俯冲板片的前锋也逐渐发生变质,最终在距离海沟大约 300~400 km 的武夷山地区俯冲板片的前锋发生相变,密度增大,俯冲板片的前端部分进入软流圈,温度上升,造成蛇纹石化的大洋岩石圈脱水,这些水上升进入上覆地幔楔,导致上覆的地幔楔发生部分熔融,产生岛弧岩浆岩。这些岛弧岩浆岩侵入加厚的中、下地壳,由于加厚的中下地壳温度较高,少量地幔岩浆带来的热增加,很容易造成中下地壳的部分熔融,形成武夷山地区大量的印支期岩浆岩。因此我们认为武夷山地区新生的弧岩浆作用主要是由水平俯冲板片(太平洋板片)前端的蛇纹石地幔楔脱水作用引发的。

5 结 论

(1) 华南内陆印支期岩浆活动在 SE-NW 方向上显示向 NW(向华南内陆)年轻化的趋势,而在沿武夷山的 SW-NE 方向上呈宽广的水平线性分布。

(2) 以资溪-光泽花岗岩和贵东、龙源坝花岗岩为代表的,大量的~240 Ma 的岩浆岩在武夷山地区出现,与太平洋板块水平俯冲造成的岩浆弧向内陆移动有关。武夷山地区印支期岩浆岩的出现代表华南内陆印支期新生岩浆弧的位置。

(3) 对比水平俯冲洋壳的热模拟实验,武夷山地区新生弧岩浆作用是由于这些岛弧岩浆岩侵入加厚的中、下地壳,由于加厚的中、下地壳温度较高,少量地幔岩浆带来的热增加,很容易造成中、下地壳的部分熔融,形成武夷山地区大量的印支期花岗质岩浆岩。

致谢: LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年工作得到中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室涂湘林老师的帮助,南京大学陈卫锋、孙涛副教授和另一位匿名评审专家提出的宝贵意见

提高了文章质量,对此表示衷心的感谢。

参考文献(References):

- 陈卫峰, 陈培荣, 黄宏业, 丁兴, 孙涛. 2007. 湖南白马山岩体花岗岩及其包体的年代学和地球化学研究. 中国科学(D辑), 37(7): 873-893.
- 陈卫峰, 陈培荣, 周新民, 黄宏业, 丁兴, 孙涛. 2006. 湖南阳明山岩体的La-ICP-MS锆石U-Pb定年及成因研究. 地质学报, 80(7): 1065-1077.
- 陈希清, 付建明, 程顺波, 徐德明, 马丽艳. 2010. 利源复式花岗岩锆石SHRIMP U-Pb定年研究. 大地构造与成矿学, 34(3): 429-434.
- 陈新跃, 王岳军, 范蔚茗, 张菲菲, 彭头平, 张玉芝. 2011. 海南五指山地区花岗岩片麻岩锆石LA-ICP-MS U-Pb年代学特征及其地质意义. 地球化学, 40(5): 454-463.
- 陈旭, 戎嘉余. 1995. 对华南早古生代板溪洋的质疑. 地质论评, 41(5): 389-400.
- 崔盛芹, 李锦蓉. 1983. 试论中国滨太平洋的印支运动. 地质学报, 57(1): 51-62.
- 邓希光, 陈志刚, 李献华, 刘敦一. 2004. 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, 50(4): 426-432.
- 董晨阳, 赵葵东, 蒋少涌, 陈卫峰, 陈培荣, 凌洪飞, 杨水源. 2010. 赣南白面石铀矿区花岗岩的锆石年代学、地球化学及成因研究. 高校地质学报, 16(2): 149-160.
- 范蔚茗, 王岳军, 郭锋, 彭头平. 2003. 湘赣地区中生代镁铁质岩浆作用与岩石圈伸展. 地学前缘, 10(3): 159-169.
- 葛小月. 2003. 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. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所博士学位论文: 1-87.
- 李华芹, 王登红, 陈富文, 梅玉萍, 蔡红. 2008. 湖南雪峰山地区铲子坪和大坪金矿成矿作用年代学研究. 地质学报, 82(7): 900-905.
- 李万友, 马昌前, 刘园园, Robinson P T. 2012. 浙江印支期铝质A型花岗岩的发现及其地质意义. 中国科学: 地球科学, 42(2): 164-177.
- 李妩巍, 王敢, 陈卫峰, 赵葵东. 2010. 香草坪花岗岩体年代学和地球化学特征. 铀矿地质, 26(4): 215-221.
- 李武显, 赵希林, 邢光福, 岑涛, 陶继华. 2013. 南岭东段早侏罗世沉积岩碎屑锆石U-Pb定年及其地质意义——以东坑盆地为例. 大地构造与成矿学, 37(1): 78-86.
- 李献华. 1990. 万洋山-诸广山花岗岩复式岩基的岩浆活动时代与地壳运动. 中国科学(B辑), 5(7): 747-755.
- 梁华英, 伍静, 孙卫东, 莫济海, 黄文婷. 2011. 华南印支成矿讨论. 矿物学报, 31(增刊): 53-54.
- 罗志高, 王岳军, 张菲菲, 张爱梅, 张玉芝. 2010. 金滩和白马山印支期花岗岩体LA-ICPMS锆石U-Pb定年及其成岩启示. 大地构造与成矿学, 34(2): 282-290.
- 马铁球, 柏道远, 邝军, 王先辉. 2005. 湘东南茶陵地区锡田岩体锆石SHRIMP定年及其地质意义. 地质通报, 24(5): 415-419.
- 祁昌实, 邓希光, 李武显, 李献华, 杨岳衡, 谢烈文. 2007. 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, 23(2): 403-412.
- 邱检生, McLnnes B, 徐夕生, Allen C. 2004. 赣南大吉山五里亭岩体的锆石ELA-ICP-MS定年及其与钨成矿关系的新认识. 地质论评, 50(2): 125-133.
- 任纪舜. 1990. 论中国南部的大地构造. 地质学报, 64(4): 275-288.
- 孙立强, 凌洪飞, 沈渭洲, 黄国龙, 谭正中. 2010. 南岭地区油山岩体和坪田岩体形成年龄及其地质意义. 高校地质学报, 16(2): 186-197.
- 孙立强, 凌洪飞, 沈渭洲, 黄国龙, 谭正中. 2011. 粤北棉土窝岩体的地球化学与成因研究. 矿物岩石地球化学通报, 30(增刊): 93.
- 孙涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明. 地质通报, 25(3): 332-335.
- 陶继华. 2012. 湘中-赣南地区印支期花岗岩时代、成因机制及其构造意义. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所博士学位论文: 1-175.
- 汪昌亮, 颜丹平, 张冰, 许延波, 汤双立. 2011. 雪峰山西部中生代厚皮逆冲推覆构造样式与变形特征研究. 现代地质, 25(6): 1021-1031.
- 王凯兴, 陈卫峰, 陈培荣, 赵葵东, 章健. 2011. 湖南歌马-紫云山岩体岩石成因研究. 矿物岩石地球化学通报, 30(增刊): 97.
- 王丽娟, 于津海, 徐夕生, 谢磊, 邱检生, 孙涛. 2007. 闽西南古田-小陶花岗质杂岩体的形成时代和成因. 岩石学报, 23(6): 1470-1484.
- 谢才富, 朱金初, 丁式江, 张业明, 陈沐龙, 付杨荣, 付太安, 李志宏. 2006. 海南尖峰岭花岗岩体的形成时代、成因及其与抱伦金矿的关系. 岩石学报, 22(10): 2493-2508.
- 谢才富, 朱金初, 赵子杰, 丁式江, 付太安, 李志宏, 张业明, 徐德明. 2005. 三亚石榴霓辉石正长岩的锆石SHRIMP U-Pb年龄: 对海南岛海西-印支期构造演化的制约. 高校地质学报, 11(1): 47-57.
- 谢晓华, 陈卫峰, 赵葵东, 孙涛, 陈培荣, 蒋少涌, 朱康任, 李妩巍. 2008. 桂东北豆乍山花岗岩年代学与地

- 球化学特征. 岩石学报, 24(6): 1302–1312.
- 许靖华, 孙枢, 李继亮. 1987. 是华南造山带而不是华南地台. 中国科学(B辑), 17(10): 1107–1115.
- 续海金, 马昌前, 钟玉芳, 余振兵. 2004. 湖南桃江、大神山花岗岩的锆石SHRIMP定年: 扬子与华夏拼合的时间下限 // 2004年全国岩石学与地球动力学研讨会论文集摘要集: 312–314.
- 于津海, 王丽娟, 王孝磊, 邱检生, 赵蕾. 2007. 赣东南富城杂岩体的地球化学和年代学研究. 岩石学报, 23(6): 1441–1456.
- 张文兰, 华仁民, 王汝成, 李惠民, 陈培荣. 2004. 江西大吉山五里亭花岗岩单颗粒锆石U-Pb同位素年龄及其地质意义探讨. 地质学报, 78(3): 352–358.
- 郑佳浩, 郭春丽. 2012. 湘南王仙岭花岗岩体的锆石U-Pb年代学、地球化学、锆石Hf同位素特征及其地质意义. 岩石学报, 28(1): 75–90.
- Bird P. 1988. Formation of the Rocky Mountains, western United States: A continuum computer model. *Science*, 239: 1501–1507.
- Black L P, Kamo S L, Allen C M, Aleinikoff J N, Davis D W, Korsch R J and Foudoulis C. 2003. A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 200(1–2): 155–170.
- Carter A and Clift P D. 2008. Was the Indosinian orogeny a Triassic mountain building or a thermotectonic reactivation event? *Comptes Rendus Geoscience*, 340(2–3): 83–93.
- Carter A, Roques D, Bristow C and Kinny P. 2001. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic thermotectonism (Indosinian orogeny) in Vietnam. *Geology*, 29(3): 211–214.
- Chen C H, Hsieh P S, Lee C Y and Zhou H W. 2011. Two episodes of the Indosinian thermal event on the South China Block: Constraints from LA-ICPMS U-Pb zircon and electron microprobe monazite ages of the Darongshan S-type granitic suite. *Gondwana Research*, 19(4): 1008–1023.
- Chen J F and Jahn B M. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284(1–2): 101–133.
- Chen W F, Chen P R, Huang H Y, Ding X and Sun T. 2007a. Chronological and geochemical studies of granite and enclave in Baimashan pluton, Hunan, South China. *Science in China (Series D)*, 50(11): 1606–1627.
- Chen W F, Chen P R, Zhou X M, Huang H Y, Ding X and Sun T. 2007b. Single zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of the Guandimiao and Wawutang granitic plutons in Hunan, South China and its petrogenetic significance. *Acta Geologica Sinica*, 81(1): 81–89.
- Chu Y, Faure M, Lin W and Wang Q C. 2012a. Early Mesozoic tectonics of the South China block: Insights from the Xuefengshan intracontinental orogen. *Journal of Asian Earth Sciences*, 61: 199–220.
- Chu Y, Faure M, Lin W, Wang Q C and Ji W. 2012b. Tectonics of the Middle Triassic intracontinental Xuefengshan Belt, South China: New insights from structural and chronological constraints on the basal décollement zone. *International Journal of Earth Sciences*, 101: 2125–2150.
- Chu Y, Lin W, Faure M, Wang Q C and Ji W. 2012c. Phanerozoic tectonothermal events of the Xuefengshan Belt, central South China: Implications from U-Pb age and Lu-Hf determinations of granites. *Lithos*, 150: 243–255.
- Coney P J and Reynolds S J. 1977. Cordilleran Benioff zones. *Nature*, 270: 403–406.
- Dai B Z, Jiang S Y, Jiang Y H, Zhao K D and Liu D Y. 2008. Geochronology, geochemistry and Hf-Sr-Nd isotopic compositions of Huziyan mafic xenoliths, southern Hunan Province, South China: Petrogenesis and implications for lower crust evolution. *Lithos*, 102(1–2): 65–87.
- Dickinson W R and Snyder W S. 1978. Plate tectonics of the Laramide Orogeny. *Geological Society of America, Memoirs*, 151: 355–366. DOI: <https://dx.doi.org/10.1130/MEM151-p355>
- Ding X, Chen P R, Chen W F, Huang H Y and Zhou X M. 2006. Single zircon LA-ICPMS U-Pb dating of Weishan granite (Hunan, South China) and its petrogenetic significance. *Science in China (Series D)*, 49(8): 816–827.
- Ferrari L, Esquivel T O, Manea V and Manea M. 2012. The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522–523: 122–149.
- Gao P, Zhao Z F and Zheng Y F. 2014. Petrogenesis of Triassic granites from the Nanling Range in South China: Implications for geochemical diversity in granites. *Lithos*, 210–211(1): 40–56.
- Gilder S A, Gill J, Coe R S, Zhao X X, Liu Z W, Wang G X, Yuan K R, Liu W L, Kuang G D and Wu H R. 1996. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B7): 16137–16154.
- Guo F, Fan W M, Lin G and Lin Y X. 1997. Sm-Nd isotopic

- age and genesis of gabbro xenoliths in Daoxian County, Hunan Province. *Chinese Science Bulletin*, 42(21): 1814–1817.
- He Z Y, Xu X S and Niu Y L. 2010. Petrogenesis and tectonic significance of a Mesozoic granite-syenite-gabbro association from inland South China. *Lithos*, 119(3–4): 621–641.
- Hsü K J, Li J L, Chen H H, Wang Q C, Sun S and Sengor A M C. 1990. Tectonics of South China—Key to understanding West Pacific geology. *Tectonophysics*, 183(1–4): 9–39.
- Hsü K J, Sun S, Li J L, Chen H H, Pen H P and Sengor A M C. 1988. Mesozoic overthrust tectonics in South China. *Geology*, 16(5): 418–421.
- King P L, Chappell B W, Allen C M and White A J R. 2001. Are A-type granites the high-temperature felsic granites? Evidence from fractionated granites of the Wangrah Suite. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 501–514.
- Lepvrier C, Maluski H, Van Tich V, Leyreloup A, Thi P T and Van Vuong N. 2004. The Early Triassic Indosinian orogeny in Vietnam (Truong Son Belt and Kontum Massif): Implications for the geodynamic evolution of Indochina. *Tectonophysics*, 393(1–4): 87–118.
- Li X H, Li Z X, He B, Li W X, Li Q L, Gao Y Y and Wang X C. 2012a. The Early Permian active continental margin and crustal growth of the Cathaysia Block: In situ U-Pb, Lu-Hf and O isotope analyses of detrital zircons. *Chemical Geology*, 328: 195–207.
- Li X H, Li Z X, Li W X, Liu Y, Yuan C, Wei G J and Qi C S. 2007. 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 response to foundering of a subducted flat-slab? *Lithos*, 96(1–2): 186–204.
- Li X H, Li Z X, Li W X and Wang Y J. 2006. Initiation of the Indosinian Orogeny in South China: Evidence for a Permian magmatic arc on Hainan Island. *Journal of Geology*, 114(3): 341–353.
- Li Z, Qiu J S and Zhou J C. 2012c. Geochronology, geochemistry, and Nd-Hf isotopes of early Palaeozoic-early Mesozoic I-type granites from the Hufang composite pluton, Fujian, South China: Crust-mantle interactions and tectonic implications. *International Geology Review*, 54(1): 15–32.
- Li Z X and Li X H. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2): 179–182. DOI: <https://doi.org/10.1130/G23193A.1>
- Li Z X, Li X H, Chung S L, Lo C H, Xu X S and Li W X. 2012b. Magmatic switch-on and switch-off along the South China continental margin since the Permian: Transition from an Andean-type to a Western Pacific-type plate boundary. *Tectonophysics*, 532–535: 271–290.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Gunther D, Xu J, Gao C G and Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43.
- Manea V C and Manea M. 2011. Flat-Slab thermal structure and evolution beneath Central Mexico. *Pure and Applied Geophysics*, 168(8–9): 1475–1487.
- Mao J R, Takahashi Y, Kee W S, Li Z L, Ye H M, Zhao X L, Liu K and Zhou J. 2011. Characteristics and geodynamic evolution of Indosinian magmatism in South China: A case study of the Guikeng pluton. *Lithos*, 127(3–4): 535–551.
- Mao J R, Ye H M, Liu K, Li Z L, Takahashi Y, Zhao X L and Kee W S. 2013. The Indosinian collision-extension event between the South China Block and the Palaeo-Pacific plate: Evidence from Indosinian alkaline granitic rocks in Dashuang, eastern Zhejiang, South China. *Lithos*, 127–173: 81–97.
- Miller C F and Barton M D. 1990. Phanerozoic plutonism in the Cordilleran interior, USA. *Geological Society of America*, 241: 213–231.
- Mori L, Gomez-Tuena A, Cai Y and Goldstein S L. 2007. Effects of prolonged flat subduction on the Miocene magmatic record of the central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Chemical Geology*, 244(3–4): 452–473.
- Pearce N J G, Perkins W T, Westgate J A, Gorton M P, Jackson S E, Neal C R and Chenery S P. 1997. A compilation of new and published major and trace element data for NIST SRM 610 and NIST SRM 612 glass reference materials. *Geostandards & Geoanalytical Research*, 21(1): 115–144.
- Peng B X, Wang Y J, Fan W M, Peng T P and Liang X Q. 2006. LA-ICPMS zircon U-Pb dating for three Indosinian granitic plutons from central Hunan and western Guangdong provinces and its petrogenetic implications. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 660–669.
- Rowley D B, Ziegler A M and Gyou N. 1989. Mesozoic

- Overthrust Tectonics in South China—Comment. *Geology*, 17(4): 384–386.
- Shu L S, Faure M, Wang B, Zhou X L and Song B. 2008. Late Palaeozoic–Early Mesozoic geological features of South China: Response to the Indosinian collision events in Southeast Asia. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(2–3): 151–165.
- Skinner S M and Clayton R W. 2011. An Evaluation of Proposed Mechanisms of Slab Flattening in Central Mexico. *Pure and Applied Geophysics*, 168(8–9): 1461–1474.
- Sun Y, Ma C, Liu Y and She Z. 2011. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of late Triassic aluminous A-type granites in southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(6): 1117–1131.
- Wang K X, Sun T, Chen P R, Ling H F and Xiang T F. 2013a. The geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of the Early Mesozoic A-type granite and diabase in northwestern Fujian province. *Lithos*, 179(1): 364–381.
- Wang Q, Li J W, Jian P, Zhao Z H, Xiong X L, Bao Z W, Xu J F, Li C F and Ma J L. 2005a. Alkaline syenites in eastern Cathaysia (South China): Link to Permian–Triassic transtension. *Earth and Planetary Science Letters*, 230(3–4): 339–354.
- Wang Y J, Fan W M, Liang X Q, Peng T P and Shi Y R. 2005b. SHRIMP zircon U–Pb geochronology of Indosinian granites in Hunan Province and its petrogenetic implications. *Chinese Science Bulletin*, 50(13): 1395–1403.
- Wang Y J, Fan W M, Sun M, Liang X Q, Zhang Y H and Peng T P. 2007. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: A case study in the Hunan Province. *Lithos*, 96(3–4): 475–502.
- Wang Y J, Fan W M, Zhang G W and Zhang Y H. 2013b. Phanerozoic tectonics of the South China Block: Key observations and controversies. *Gondwana Research*, 23(4): 1273–1305.
- Xu X B, Zhang Y Q, Shu L S and Jia D. 2011. La-ICP-MS U–Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the sheared metamorphic rocks in the Wuyishan: Constraints on the timing of Early Paleozoic and Early Mesozoic tectono-thermal events in SE China. *Tectonophysics*, 501(1–4): 71–86.
- Xu X S, Deng P, O'Reilly S Y, Griffin W L, Zhou X M and Tan Z Z. 2003. Single zircon LAM-ICPMS U–Pb dating of Guidong complex (SE China) and its petrogenetic significance. *Chinese Science Bulletin*, 48(17): 1892–1899.
- Yu J H, O'Reilly S Y, Zhao L, Griffin W L, Zhang M, Zhou X, Jiang S Y, Wang L J and Wang R C. 2007. Origin and evolution of topaz-bearing granites from the Nanling Range, South China: A geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic study. *Mineralogy and Petrology*, 90(3–4): 271–300.
- Zhao K D, Jiang S Y, Chen W F, Chen P R and Ling H F. 2013. Zircon U–Pb chronology and elemental and Sr–Nd–Hf isotope geochemistry of two Triassic A-type granites in South China: Implication for petrogenesis and Indosinian transtensional tectonism. *Lithos*, 160–161: 292–306.
- Zhao K D, Jiang Y S, Ling F H and Palmer M R. 2014. Reliability of LA-ICP-MS U–Pb dating of zircons with high U concentrations: A case study from the U-bearing Douzhashan Granite in South China. *Chemical Geology*, 389: 110–121.
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, Shu L S and Niu Y L. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 29(1): 26–33.
- Zhu K Y, Li Z X, Xu X S and Wilde S A. 2013. Late Triassic melting of a thickened crust in southeastern China: Evidence for flat-slab subduction of the Paleo-Pacific plate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74(25): 265–279.

Zircon U-Pb Geochronology of Zixi-Guangze Complexes in North Wuyishan Region: Implications for Temporal and Spatial Distribution and Tectonic Setting of the Indosinian Magmatism in South China Interior

QIN Xiaoyun^{1,2}, LI Wuxian^{1*}, CEN Tao^{1,2}, LV Puliang^{1,2} and TAO Jihua³

(1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. Institute of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract: Precise U-Pb zircon geochronological results show that the Zixi-Guangze granitic complexes were formed during 236–238 Ma. Combined with our new ages and compilation of age data of the Indosinian granites from the South China interior, the Indosinian magmatism in the South China shows a trend of NW-ward younger toward the cratonic interior, and a broad horizontal linear distribution from Southwest to Northeast along the Wuyishan region. A number of ca. 240 Ma granitic rocks occur in the Wuyishan region at a distance of approximately 400–500 km away from the trench, suggesting that a continental magmatic arc probably resumed since ca. 240 Ma along the Wuyishan region after a magmatic gap due to flat-slab subduction. Our analysis indicates that the renewed arc magmatism in the Wuyishan region is related to dehydration of serpentinization mantle wedge at front of the flat-slab.

Keywords: northern Wuyishan region; granites; Indosinian; renewed magmatic arc; South China interior