科学通报 2012 年 第 57 卷 第 31 期：2964 ~ 2971
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

华南晚古生代岩浆活动的新发现：岛弧还是陆内造山?

于津海[①②], 刘潜[①], 胡修棉[①], 王勤[①], O'REILLY Suzanne Y[②]

① 南京大学地球科学与工程学院, 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210093;
② GEMOC ARC National Key Centre, Department of Earth and Planetary Sciences, Macquarie University, Sydney, N.S.W. 2109, Australia
E-mail: jhyu@nju.edu.cn

2012-03-09 收稿, 2012-05-31 接受
国家重点基础研究发展计划(2012CB416701)、国家自然科学基金(40972127)和内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室基金(ZZKT-201106)资助

摘要 在福建省周宁县五凤楼村发现了一个形成于313±4 Ma的片麻状花岗岩. 该岩石具有高的 K_2O 和 Al_2O_3 含量和低的 SiO_2 和 Na_2O 含量, 其 A/CNK 比值高达 1.22, 指示其源区为经过化学风化的沉积岩, 因此属于 S 型花岗岩. 所含锆石为柱状自形形态, 其 U-Pb 年龄变化于 326~301 Ma(加权平均年龄为 313±4 Ma), 具有负的 $\varepsilon_{Hf}(t)$值(−8.35~−1.74)和 1.43~1.84 Ga 的二阶段 Hf 模式年龄. 这是首次在华南发现有确凿同位素年代学证据的晚石炭世 S 型花岗质岩浆活动. 该 S 型花岗岩最可能形成于陆内造山阶段, 源岩主要为古元古代晚期生长的地壳. 结合前人对岩相古地理、古生代盆地性质、早二叠世火山作用以及晚古生代-早中生代沉积岩中碎屑锆石的 U-Pb-Hf 同位素资料, 本文推断华夏东部可能曾经存在一个晚古生代造山带. 从晚石炭世(340~310 Ma)的挤压造山阶段演化到早二叠世(285~270 Ma)的后造山或板内伸展阶段, 华南东部经历了一个较为完整的晚古生代造山旋回, 所形成的晚古生代岩浆岩是陆内造山作用的产物, 而不是岛弧岩浆作用产物.

关键词
S 型花岗岩
锆石 U-Pb 年龄
锆石 Hf 同位素
晚古生代造山作用
华南东部

华南大陆可以分成扬子地块和华夏地块. 西北侧扬子地块的基底以崆岭地区出露的古老中-新太古代结晶核和周缘广泛发育的新元古代岩浆活动为特征[1~8]. 东南侧华夏地块已知的最早基底岩石是古元古代花岗岩和晚新太古代八都群变质岩[9~12], 少量的新元古代岩浆活动主要出现在武夷地区[13~15]. 但是, 华夏地块以三期强烈的显生宙花岗质岩浆活动为特征, 分别是早古生代的加里东期, 早中生代的印支期和晚中生代的燕山期[16]. 相比而言, 晚古生代海西期的岩浆活动尽管很早就有报道[17~19], 但由于缺乏确凿的年代学数据或定年方法精度不高, 准确性差而没有引起足够的重视. 近年来在海南岛, 广东罗定等地发现了一些海西晚期的花岗质或碱性岩浆活动(285~265 Ma)[20~22]和变质作用[23]. Li 等人[20]解释海南岛~265 Ma 的花岗质岩浆为古太平洋俯冲的产物; 而谢才富等人[21]认为 272 Ma 钾玄质岩浆是华南板块与印支-南海板块的后碰撞阶段早期(同逆冲期)形成的, 并与全球晚古生代 Pangea 超级大陆的聚合相联系. 最近, 在华南晚古生代沉积岩中发现了大量 340~280 Ma 的碎屑锆石[24,25], 引起了人们对海西期构造事件和岩浆活动的关注. 但由于沉积岩中碎屑锆石的来源及其源岩的性质均难以确定, 这些年龄所代表的地质含义仍有争议. 本次研究在福建省周宁县的五凤楼村发现了形成于晚古生代(海西期)的花岗质岩石, 这为揭示华南海西期岩浆活动的性质, 构造意义及其与晚古生代 Pangea 超大陆的联系打开了一个窗口.

1 地质背景和样品情况

福建省位于华南的东南端, 两条重要的北东向

英文版见: Yu J H, Liu Q, Hu X M, et al. Late Paleozoic magmatism in South China: Oceanic subduction or intracontinental orogeny? Chin Sci Bull, 2012, 57, doi: 10.1007/s11434-012-5376-8

断裂带(政和-大埔断裂带和长乐-南澳断裂带)将福建省划分为 3 部分(图 1(a)). 通常认为政和-大埔断裂带以西为加里东褶皱带, 发育前寒武基底, 早古生代地层和加里东期花岗岩, 其东侧广泛分布晚中生代的花岗岩、火山岩和沉积岩. 展布于福建沿海的长乐-南澳断裂带将东侧的平潭-东山变质带与内陆的中生代岩浆岩带分开[26]. 但是, 在政和-大埔断裂带的东侧还零星出露有一些变质程度较高的变质岩以及古生代沉积岩, 它们大多呈“内窗”(inlier)的形式出现. 值得注意的是, 这些零星出露的内窗局限于福安-南靖断裂带以西, 而非以政和-大埔断裂带为界. 由于火山岩的覆盖, 福安-南靖断裂带地表的构造形迹不清楚, 地质学家对它的认识有限. 然而, 地球物质资料显示, 福安-南靖断裂带二侧的布格重力和航磁差异明显[27]. 因此, 福安-南靖断裂带很可能是一条控制了基底分布的重要构造带.

本次研究的变质岩样品采自福建省周宁县五凤楼新村(图 1(b)), 位于政和-大埔断裂带以东. 根据福建省地质调查研究院的 1/25 万福州幅地质图 1), 这里零星出露的变质岩被划归为新元古代的龙北溪组. 出露面积约 2.3 km^2 的变质岩被早白垩世的玛坑花岗岩侵入体包围, 玛坑花岗岩也侵入于外围的晚侏罗世-早白垩世的南园组火山岩, 并被早白垩世的寨下组火山岩覆盖. 变质岩在野外出露较差, 风化强烈, 仅在五凤楼新村附近有新鲜样品出露(图 2(a)). 样品 FN10-5-2 为富黑云母的花岗质片麻岩. 但受到脆-韧性变形作用的影响, 岩石总体呈碎斑结构(图 2(b)). 石英显示静态重结晶的特征, 其细粒集合体的压扁拉长轮廓表明石英颗粒曾受到过韧性剪切作用; 黑云母也强烈细粒化, 而钾长石和少量斜长石都表现为脆性破碎(图 2(b)). 据岩石化学分析得到, 样品主要氧化物组分 SiO_2 为 65.49%, TiO_2 为 0.59%, Al_2O_3 为 16.20%, Fe_2O_3 为 4.17%, MnO 为 0.06%, MgO 为 1.74%, CaO 为 2.07%, Na_2O 为 1.83%, K_2O 为 6.06%, P_2O_5 为 0.12%. 这个岩石以较低的 SiO_2, Na_2O 和较高的 Al_2O_3, K_2O 含量为特征. 其 Na_2O/K_2O 比值为 0.30, 而 A/CNK=1.22, 显示出典型的 S 型花岗岩特征.

2 锆石 U-Pb 定年结果和 Hf 同位素组成

五凤楼片麻岩(FN10-5-2)的锆石呈柱状-短柱状, 无色-浅棕色, 透明无包裹体. 柱面发育(110)=(100), 而锥面(101)=(211)或(101)<(211). CL 图像显示这些锆石多具有韵律环带(图 3(a), (c)~(e)), 少量为面式分带(图 3(b)), 显示岩浆成因特征. 所有颗粒都没有明显的增生边, 少量锆石具有细小不规则

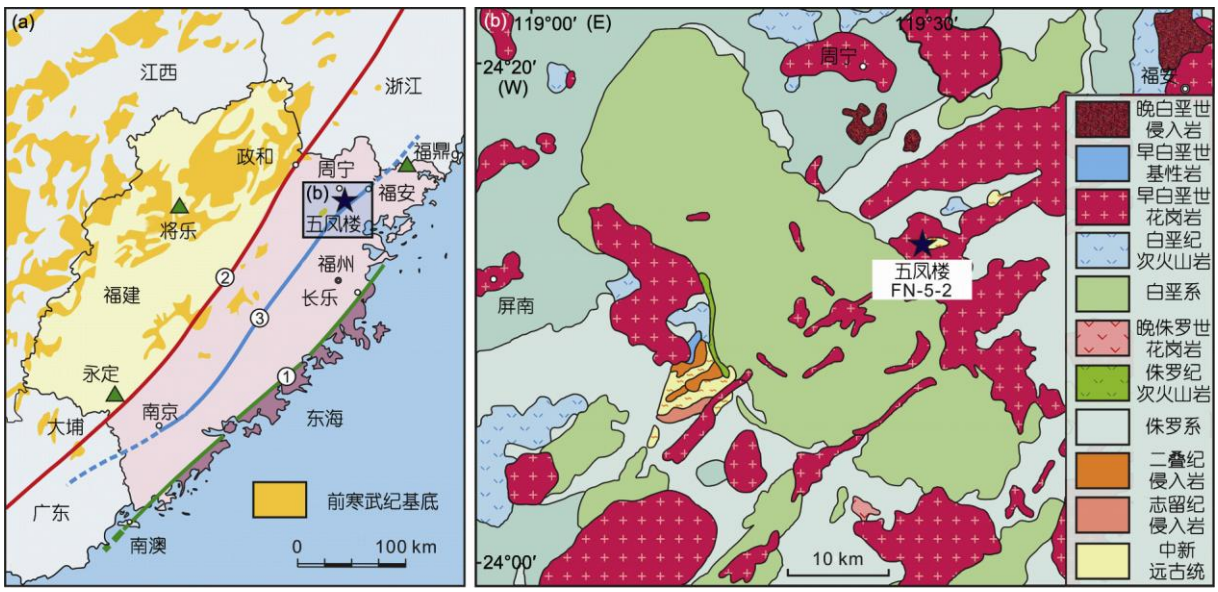

图 1 中国福建省地质框架图(a)及研究区地质简图(b)

据 1/25 万福州幅地质图修改 1). 断裂带: ① 长乐-南澳; ② 政和-大埔; ③ 福安-南靖. (a)中前寒武纪地层出露主要参考文献[26]

1) 福建省地质调查研究院. 1/25 万福州幅地质图. 2006

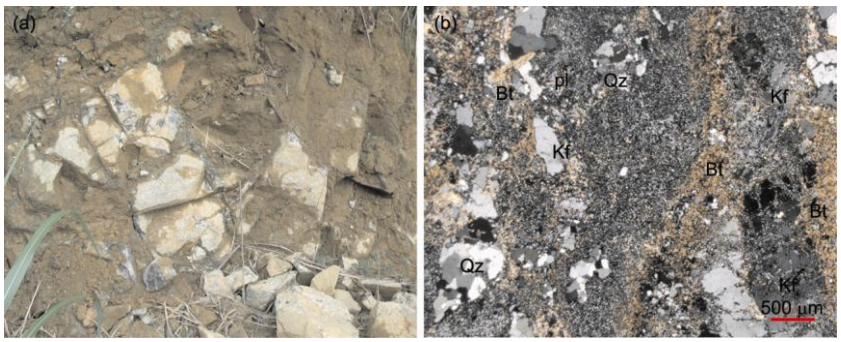

图 2 福建省周宁县五凤楼变质岩样品(FN10-5-2)的野外露头(a)和岩相学特征(b)

Bt, 黑云母; Kf, 钾长石; Pl, 斜长石; Qz, 石英

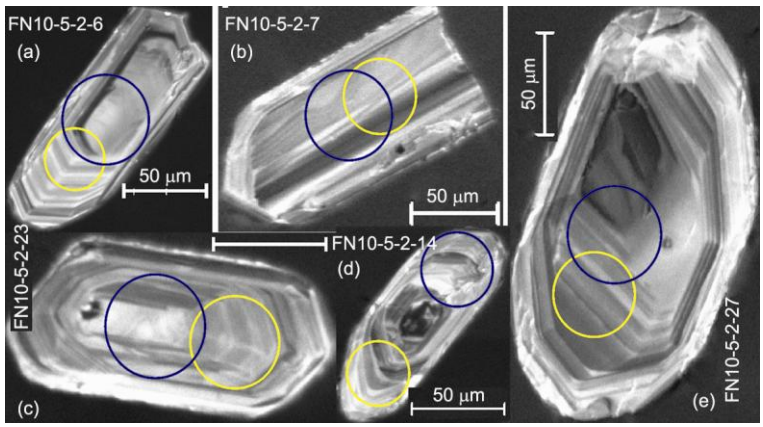

图 3 五凤楼片麻岩中锆石的 CL 图像

图中黄色小圈为定年点, 蓝色大圈为 Hf 同位素分析点, 线段长度 50 μm

的继承核(如图 3(d)). 锆石 Th/U 比值变化于 0.13~0.81, 平均 0.34, 也显示其岩浆成因特点. 锆石的 CL 图像分析, LA-ICPMS U-Pb 定年以及 MC-ICPMS 的 Hf 同位素分析均在澳大利亚 Macquarie 大学地球科学与空间科学系的 GEMOC 国家研究中心进行, 详细的分析程序和校正参见文献[12,28,29].

对 19 颗锆石的 U-Pb 定年结果显示了相对均一的年龄(表 1), 其中 17 颗锆石的年龄变化于 326~301 Ma, 加权平均年龄为 313±4 Ma (MSWD=1.5)(图 4). 该年龄代表此花岗质岩浆的侵位时代. 一颗年龄最小(285 Ma)的锆石具有异常低的 Th, U 含量以及很大的分析误差, 数据质量差; 而另一颗锆石的年龄偏高(334 Ma), 可能为激光剥蚀中混入了少量继承核的组分.

13 颗锆石的 MC-ICPMS 分析给出了相对均匀 Hf 同位素组成(表 2), $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值为 0.282354~0.282534, $\varepsilon_{Hf}(t)$值变化于−8.35~−1.74(平均−6.0); 二阶段 Hf 模式年龄是 1.43~1.84 Ga(平均 1.70 Ga). 这些结果表明, 形成锆石的花岗岩的源岩主要为古元古代晚期生长的地壳[12,14].

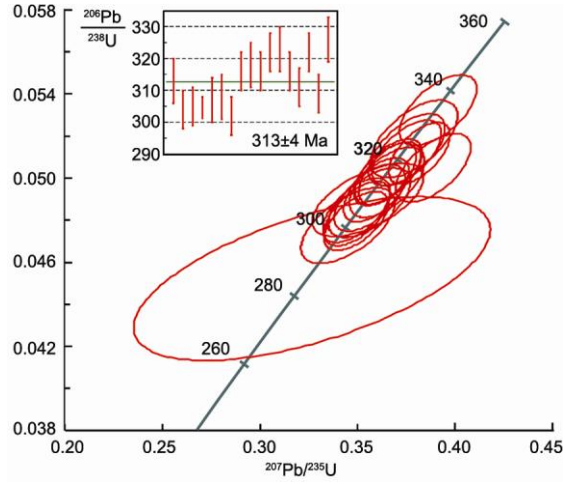

图 4 锆石的 U-Pb 谐和图

表 1　福建省五凤楼变质花岗岩的锆石 U-Pb 定年结果

分析点号	同位素比值						年龄(Ma)						Th (ppm)	U (ppm)	Th/U
	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$\pm\sigma$	$^{207}Pb/^{235}U$	$\pm\sigma$	$^{206}Pb/^{238}U$	$\pm\sigma$	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$\pm\sigma$	$^{207}Pb/^{235}U$	$\pm\sigma$	$^{206}Pb/^{238}U$	$\pm\sigma$			
1	0.05314	0.00119	0.36493	0.01272	0.04981	0.00110	335	52	316	9	313	7	80	404	0.20
2	0.05248	0.00107	0.34960	0.01110	0.04831	0.00101	306	48	304	8	304	6	311	404	0.77
2B	0.05225	0.00111	0.34916	0.01140	0.04847	0.00101	296	50	304	9	305	6	52	408	0.13
3B	0.05239	0.00160	0.34483	0.01587	0.04774	0.00119	302	71	301	12	301	7	81	407	0.20
4	0.05285	0.00137	0.35593	0.01392	0.04884	0.00109	322	60	309	10	307	7	87	541	0.16
5C	0.05264	0.00196	0.35505	0.01883	0.04897	0.00115	313	87	309	14	308	7	85	361	0.24
6	0.05279	0.00110	0.34910	0.01090	0.04796	0.00093	320	48	304	8	302	6	126	424	0.30
7	0.05272	0.00108	0.36500	0.01134	0.05021	0.00100	317	48	316	8	316	6	260	347	0.75
8	0.05583	0.00118	0.38857	0.01271	0.05049	0.00108	446	48	333	9	318	7	147	352	0.42
9	0.05274	0.00089	0.36519	0.00968	0.05022	0.00097	318	39	316	7	316	6	103	520	0.20
10	0.05406	0.00096	0.38153	0.01037	0.05119	0.00097	374	41	328	8	322	6	223	777	0.29
11	0.05296	0.00118	0.37504	0.01294	0.05136	0.00113	327	52	323	10	323	7	81	481	0.17
12	0.05273	0.00107	0.36568	0.01142	0.05031	0.00102	317	47	316	8	316	6	95	676	0.14
14	0.05272	0.00104	0.35938	0.01101	0.04945	0.00101	317	46	312	8	311	6	312	384	0.81
20	0.05312	0.00108	0.37496	0.01168	0.05120	0.00103	334	47	323	9	322	6	108	457	0.24
23	0.05264	0.00116	0.35598	0.01204	0.04906	0.00105	313	51	309	9	309	6	188	454	0.41
27	0.05296	0.00134	0.37875	0.01471	0.05187	0.00122	327	59	326	11	326	7	316	814	0.39
22	0.05329	0.00116	0.39109	0.01304	0.05324	0.00111	341	50	335	10	334	7	75	395	0.19
3	0.05236	0.00668	0.32644	0.06038	0.04522	0.00257	301	289	287	46	285	16	5	28	0.18

表 2　福建省五凤楼片麻状花岗岩中锆石 Hf 同位素组成

分析点号	$^{176}Hf/^{177}Hf$	1σ	$^{176}Lu/^{177}Hf$	1σ	$^{176}Yb/^{177}Hf$	年龄 (Ma)	Hf_i	$\varepsilon_{Hf}(t)$	$T_{(DM)}$ (Ga)	$T^C_{(DM)}$ (Ga)
2B	0.282408	0.000010	0.00174	0.00002	0.05967	305	0.282398	–6.53	1.22	1.73
3	0.282397	0.000011	0.00134	0.00001	0.05033	285	0.282390	–7.26	1.22	1.76
3B	0.282367	0.000012	0.00193	0.00005	0.07383	301	0.282356	–8.11	1.28	1.82
4	0.282354	0.000023	0.00153	0.00002	0.06641	307	0.282345	–8.35	1.29	1.84
6	0.282425	0.000010	0.00161	0.00002	0.06059	302	0.282416	–5.97	1.19	1.69
7	0.282534	0.000011	0.00121	0.00002	0.04627	316	0.282527	–1.74	1.02	1.43
9	0.282409	0.000012	0.00151	0.00002	0.06572	316	0.282400	–6.22	1.21	1.72
11	0.282431	0.000011	0.00164	0.00003	0.07008	323	0.282421	–5.32	1.18	1.67
14	0.282526	0.000016	0.00166	0.00002	0.07786	311	0.282516	–2.21	1.05	1.46
20	0.282423	0.000007	0.00141	0.00002	0.05684	322	0.282415	–5.58	1.19	1.68
22	0.282363	0.000016	0.00144	0.00002	0.05930	334	0.282354	–7.44	1.27	1.81
23	0.282382	0.000007	0.00150	0.00004	0.05682	309	0.282373	–7.32	1.25	1.78
27	0.282403	0.000010	0.00173	0.00003	0.06664	326	0.282392	–6.27	1.23	1.73

3　讨论和初步认识

由于受到后期变质变形的影响，岩相学鉴定已无法直接确定周宁县五凤楼花岗质片麻岩的原岩性质，因此岩石化学成分能否代表原岩的化学组成需要考证. 通常区域变质作用是一个封闭体系，不会明显改变原岩主量元素化学组成. 强烈的糜棱岩化有时会造成岩石 SiO_2 的升高(硅化)和其他组分相应的减少. 本文研究的花岗质片麻岩韧性变形较弱(主要是脆性变形)，且 SiO_2 含量很低(相对于正常花岗岩)，说明没有受到强烈的化学改造. 因此其岩石化学组成能够用来恢复原岩特征. 本岩石的岩石化学以高 K_2O 和 Al_2O_3(A/CNK=1.22)为特征，指示其原岩为 S 型花岗岩或沉积岩(如长石砂岩). 但该岩石中的锆石自形单一，内部结构具有典型岩浆成因特征，U-Pb 年代学研究也显示了均一的年龄值. 结合锆石短柱状的形貌特征，可以推断该长英质片麻岩的原岩是 S 型花岗岩. 因此，锆石 U-Pb 年龄 313±4 Ma 代表五凤楼片麻状花岗岩的形成时代. 这是首次在华南发现有确凿同位素年代学证据的晚石炭世 S 型花岗质岩浆

活动. 负的锆石$\varepsilon_{Hf}(t)$值及~1.7 Ga的Hf模式年龄指示该 S 型花岗岩的源岩主要是由晚古元古代地壳物质组成. 尽管 Hu 等人[24]和 Li 等人[25]分别报道了在华南可能存在 340~280 Ma 的岩浆活动, 但是由于他们测定的 U-Pb 年龄都测自沉积岩中的碎屑锆石, 因此这些锆石结晶自什么性质的岩浆及其岩浆岩侵位地点等都是不确定的.

Hu 等人[24]在位于周宁县五凤楼东北大约 90 km 的福鼎内窗的二叠系和侏罗系沉积岩中发现了大量晚古生代的碎屑锆石. 其中二叠系的沉积岩以富含 320~290 Ma碎屑锆石(U-Pb年龄主峰)为特征, 另有2个弱的U-Pb年龄峰是古元古代中晚期(1.9~1.7 Ga)和晚太古代-早古元古代(2.55~2.35 Ga). 而侏罗系沉积岩中碎屑锆石 U-Pb 年龄集中在 1.85~1.75 Ga 和 345~330 Ma(图 5). Hu 等人[24]认为, 这些碎屑物来自华夏地块东北部, 并倾向于将沉积物源区的这期晚古生代岩浆活动解释为大陆裂谷背景下的产物. 但是由于缺少源岩的岩石地球化学数据, 作者也无法排除另一种可能: 即大陆弧构造背景下的岩浆活动. Li 等人[25]在华南的韶关、耒阳、吉安和永定等地的二叠纪沉积岩中发现了一定数量 U-Pb 年龄为晚古生代(~280 Ma)和早古生代晚期(~370 Ma)的碎屑锆石(图 5), 并将~280 Ma 这期岩浆活动与华南印支期花岗质岩浆活动相关联, 认为从 280 Ma 开始华南便受到古太平洋板块平板俯冲的影响, 即~280 Ma 岩浆活动发生在火山弧背景下. 然而, 无论是大洋弧还是大陆弧岩浆岩都以相对亏损高场强元素为特征, 即弧型岩浆中 Nb, Ta, Zr 和 Hf 一般处于不饱和状态, 在熔体结晶分异过程中难以达到 Zr 饱和并结晶出锆石[30]. 因此, 这些晚古生代 U-Pb 年龄的碎屑锆石可能不是来自这个时期的原生弧型岩浆岩, 而可能来自于由弧型岩浆岩经过重熔改造的次生岩浆岩, 其中 Zr 达到饱和并结晶出锆石[31].

福鼎内窗二叠纪沉积岩中大量同时代的碎屑锆石也具有明显负的$\varepsilon_{Hf}(t)$值(−3.1~−19.9; 图 6), 表明这些碎屑沉积物最可能也是来自起源于古老陆壳风化沉积后重熔形成的S型花岗岩, 与本研究发现的五凤楼S型花岗岩正好吻合. 而S型花岗岩一般形成于大陆碰撞造山或陆内造山过程的同碰撞或碰撞后的构造背景[32~39]. 因此, 根据海西期S型花岗岩的确定以及没有同时代玄武质和安山质火山岩活动, 可以初步排除这期岩浆活动发生于与大洋俯冲相关的弧构造背景.

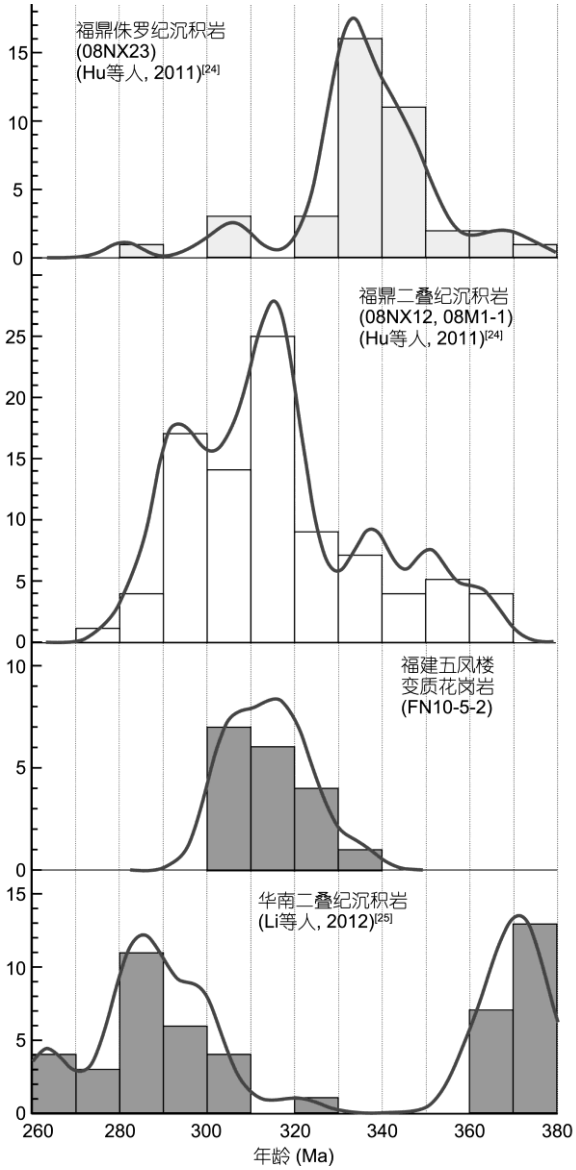

图 5 华南晚古生代锆石年龄的对比

实际上, 华南早古生代(加里东期)和早中生代(印支期)的岩浆活动也是以 S 型花岗质岩石为主, 几乎没有火山作用, 显示出典型的陆内造山或大陆碰撞造山的构造特点[40~44]. Li 等人[25]报道的早二叠世(~280 Ma)的碎屑锆石不仅在形成时间上滞后于本研究的花岗岩和 Hu 等人[24]报道的碎屑锆石, 而且这些锆石大多具有正的$\varepsilon_{Hf}(t)$值(图 6), 说明其源区有明显的新生地壳物质参与, 指示早二叠世岩浆活动源区性质不同于晚石炭世岩浆活动的源区性质.

在华南许多地方的二叠纪沉积岩中都发现有火

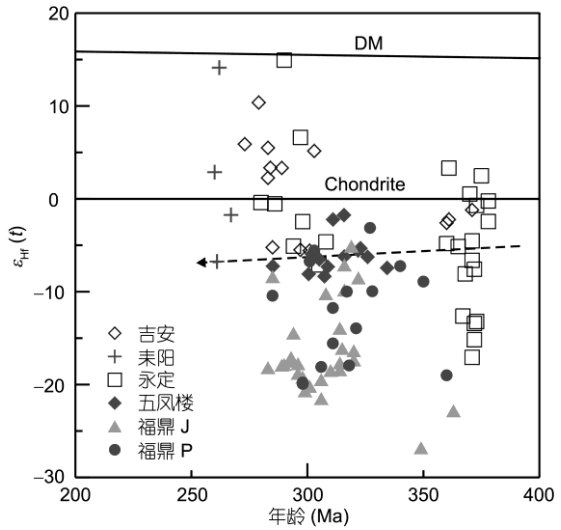

图 6　五凤楼片麻状花岗岩中锆石的 Hf 同位素

福鼎沉积岩中锆石数据来自文献[24]; 吉安、耒阳和永定沉积岩中锆石数据来自文献[25]

山岩的夹层[45~49], 甚至出现海底喷发的基性火山岩(Ar-Ar 年龄为 261 Ma)[50]. 在海南岛还存在 287~272 Ma 的碱性岩石[21], 与 Li 等人[25]报道的碎屑锆石 U-Pb 年龄一致. 这些岩石的形成多与伸展构造背景相关. 此外, 对古生代沉积盆地性质的分析研究也显示, 华南二叠纪沉积盆地为陆内裂陷盆地或裂谷盆地[51~53]. 岩相古地理研究指示, 华南东部的浙闽沿海从晚泥盆世到晚石炭世一直为"古陆", 而到了早二叠世整个华南才被海水覆盖[54~56]. 由于这一时期地球处于冰期[57~59], 因此华南早二叠世广泛的海相沉积不可能是全球海平面变化的结果, 而应是构造控制下的大陆边缘区域沉降的结果. 以上观察和解释均表明, 二叠纪早期华南处于伸展构造背景. 正是在这种拉张背景下, 碰撞造山带岩石圈发生构造垮塌, 引起地壳部分熔融产生火山作用[45~49], 并伴有岩石圈地幔部分熔融产生基性岩浆的直接喷发[50]. 因此, 具拉张背景的火山作用是华南早二叠世岩浆活动的特点, 其中新生地壳发生部分熔融形成 Zr 饱和的岩浆岩[30,31], 这与大多数~280 Ma 锆石具有正的 $\varepsilon_{Hf}(t)$值[25]相吻合. 因此, 我们推断从 340~310 Ma 的挤压造山阶段演化到 280~270 Ma 的后造山或板内伸展阶段, 华南经历了一个较完整的晚古生代造山旋回. 所形成的晚古生代岩浆岩是陆内造山作用的产物, 而不是岛弧岩浆作用产物.

这次造山作用主要发育在华南的东南部. 之所以这期岩浆岩目前很少被发现, 一方面是因为华南东南部被大量晚中生代火山岩所覆盖, 另一方面更可能是从早二叠世晚期开始华南东南部又开始处于抬升构造运动, 造成当时的古水流向主要往西[25,55,56]. 华南海西期造山带在快速隆升中不断剥蚀为其西侧的沉积盆地提供大量物源(如韶关、耒阳、吉安和永定地区), 并最终"消失". 本研究在福建省周宁地区发现的~313 Ma 花岗岩则是华南东部这个"消失"的海西造山带的最直接证据.

华南东部海西期的造山作用与欧洲典型的海西期岩浆活动的时间相当, 也与晚古生代 Pangea 超大陆的聚合-裂解的造山事件相吻合. 因此, 华南这期岩浆的分布规律, 特征以及与 Pangea 超大陆的关系还有待进一步深入研究和探讨.

致谢　感谢南京大学地球科学与工程学院苏斌、崔翔和许海在野外工作上的帮助. 样品测试得到了澳大利亚 Macquarie 大学地球与空间科学系 GEMOC 国家重点实验室的 Norman Pearson 和 E.A. Belousova 博士的帮助.

参考文献

1　Li X H. U-Pb zircon ages of granites from the southern margin of the Yangtze Block: Timing of Neoproterozoic Jinning: Orogeny in SE China and implications for Rodinia assembly. Precambrian Res, 1999, 97: 43–57

2　Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. Precambrian Res, 2003, 122: 85–109

3　Qiu Y M, Gao S, McNaughton N J, et al. First evidence of >3.2 Ga continental crust in the Yangtze Craton of South China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics. Geology, 2000, 28: 11–14

4　Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from Northern Guangxi, South China: Implications for tectonic evolution. Precambrian Res, 2006, 122: 85–109

5 Zheng Y F, Zhang S B, Zhao Z F, et al. Contrasting zircon Hf and O isotopes in the two episodes of Neoproterozoic granitoids in South China: Implications for growth and reworking of continental crust. Lithos, 2007, 96: 127–150
6 Zheng Y F, Wu R X, Wu Y B, et al. Rift melting of juvenile arc-derived crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan Orogen, South China. Precambrian Res, 2008, 163: 351–383
7 焦文放, 吴元保, 彭敏, 等. 扬子板块最古老岩石的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 7: 972–978
8 Gao S, Yang J, Zhou L, et al. Age and growth of the Archean Kongling terrain, South China, with emphasis on 3.3 Ga granitoid gneisses. Am J Sci, 2011, 311: 153–182
9 甘晓春, 李惠民, 孙大中, 等. 浙西南早元古代花岗质岩石的年代. 岩石矿物学杂志, 1995, 14: 1–8
10 Yu J H, Wang L J, O'Reilly S Y, et al. A Paleoproterozoic orogeny recorded in a long-lived cratonic remnant (Wuyishan terrane), eastern Cathaysia Block, China. Precambrian Res, 2009, 174: 347–363
11 刘锐, 周汉文, 张利, 等. 华夏地块古元古代陆壳再造: 锆石微量元素与 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素证据. 科学通报, 2009, 54: 906–917
12 Yu J H, O'Reilly S Y, Zhou M F, et al. U-Pb geochronology and Hf-Nd isotopic geochemistry of the Badu Complex, Southeastern China: Implications for the Precambrian crustal evolution and paleogeography of the Cathaysia Block. Precambrian Res, 2012, doi: 10.1016/J precamres.2011.07.014
13 Li W X, Li X H, Li Z X. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia Block of South China and its tectonic significance. Precambrian Res, 2005, 136: 51–66
14 Wan Y S, Liu D Y, Xu M H, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology and geochemistry of metavolcanic and metasedimentary rocks in Northwestern Fujian, Cathaysia Block, China: Tectonic implications and the need to redefine lithostratigraphic units. Gondwana Res, 2007, 12: 166–183
15 Shu L S, Faure M, Yu J H, et al. Geochronological and geochemical features of the Cathaysia Block (South China): New evidence for the Neoproterozoic breakup of Rodinia. Precambrian Res, 2011, 187: 263–276
16 Zhou X M, Sun T, Shen W Z, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. Episodes, 2006, 29: 26–33
17 袁奎荣, 杨心宜, 梁金城. 华南海西花岗岩的初步研究. 桂林冶金地质学院学报, 1981, 3: 1–28
18 夏邦栋, 于津海, 方中, 等. 海南岛石炭纪双峰式火山岩及其板块构造背景. 岩石学报, 1991, 1: 54–62
19 闵茂中, 孔令福, 张国文. 广西六陈花岗岩的同位素地球化学特征. 地质论评, 1995, 41: 48–51
20 Li X H, Li Z X, Li W X, et al. Initiation of the Indosinian orogeny in South China: Evidence for a Permian magmatic arc on Hainan Island. J Geol, 2006, 114: 341–353
21 谢才富, 朱金初, 丁式江, 等. 琼中海西期钾玄质侵入岩的厘定及其构造意义. 科学通报, 2006, 51: 1944–1954
22 夏斌, 林清茶, 张玉泉. 广东罗定龙塘碱性花岗岩锆石 SHRIMP 定年及地质意义. 地质科学, 2006, 41: 511–517
23 于津海, 王丽娟, 魏震洋. 华夏地块显生宙的变质作用期次和特征. 高校地质学报, 2007, 13: 474–483
24 Hu X M, Huang Z C, Wang J G, et al. Geology of the Fuding inlier in southeastern China: Implication for late Paleozoic Cathaysian paleogeography. Gondwana Res, 2011, 22: 507–518
25 Li X H, Li Z X, He B, et al. 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. Chem Geol, 2012, 328: 195–207
26 福建省地质矿产局. 福建省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1985
27 马金清, 徐维光. 福安-南靖断裂带特征及其地质意义讨论. 福建地质, 2010, 29: 67–72
28 Griffin W L, Belousova E A, Shee S R, et al. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons. Precambrian Res, 2004, 131: 231–282
29 Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, et al. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to *in-situ* U-Pb zircon geochronology. Chem Geol, 2004, 211: 47–69
30 Zheng Y F, Zhao Z F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in the Dabie orogen. Chem Geol, 2006, 231: 135–158
31 Zheng Y F, Xia Q X, Chen R X, et al. Partial melting, fluid supercriticality and element mobility in ultrahigh-pressure metamorphic rocks during continental collision. Earth Sci Rev, 2011, 107: 342–374
32 Pearce J A. Sources and settings of granitic rocks. Episodes, 1996, 19: 120–125
33 Searle M P, Parrish R R, Hodges K V, et al. Shisha Pangma leucogranite, South Tibetan Himalaya: Field relations, geochemistry, age, origin, and emplacement. J Geol, 1997, 105: 295–317
34 Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites. Lithos, 1998, 45: 29–44
35 Brown M. Crustal melting and granite magmatism: Key issues. Phys Chem Earth (A), 2001, 26: 201–212

36 Atherton M P, Ghani A A. Slab breakoff: A model for Caledonian, late granite syn-collisional magmatism in the orthotectonic (metamorphic) zone of Scotland and Donegal, Ireland. Lithos, 2002, 62: 65–85

37 Sheppard S, Occhipinti S A, Tyler I M. The relationship between tectonism and composition of granitoid magmas, Yarlarweelor gneiss complex, Western Australia. Lithos, 2003, 66: 133–154

38 Healy B, Collins W J, Richards S W. A hybrid origin for Lachlan S-type granites: The Murrumbidgee Batholith example. Lithos, 2004, 78: 197–216

39 Yu J H, O'Reilly S Y, Zhao L, et al. Origin and evolution of topaz-bearing granites from the Nanling Range, South China: A geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic study. Mineral Petrol, 2007, 90: 271–300

40 舒良树, 于津海, 贾东, 等. 华南东段早古生代造山带研究. 地质通报, 2008, 27: 1581–1593

41 Faure M, Shu L S, Wang B, et al. Intracontinental subduction: A possible mechanism for the Early Palaeozoic Orogen of SE China. Terra Nova, 2009, 21: 360–368

42 Charvet J, Shu L S, Faure M, et al. Structural development of the Lower Paleozoic belt of South China: Genesis of an intracontinental orogen. J Asian Earth Sci, 2010, 39: 309–330

43 Wang Y J, Fan W M, Cawood P A, et al. Indosinian high-strain deformation for the Yunkaidashan tectonic belt, south China: Kinematics and $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronological constraints. Tectonics, 2007, 26: TC6008, 21

44 Wang Y J, Fan W M, Zhao G C, et al. Zircon U-Pb geochronology of gneissic rocks in the Yunkai massif and its implications on the Caledonian event in the South China Block. Gondwana Res, 2007, 12: 404–416

45 杨万蓉, 江纳言. 浙江长兴组火山岩和放射虫的发现. 地层学杂志, 1980, 4: 64–67

46 李高章. 南京湖山上二叠统大隆组中火上碎屑岩的发现及其意义. 地质论评, 1983, 29: 586–587

47 夏邦栋, 钟立荣, 方中, 等. 下扬子区早二叠世孤峰期泥化火山岩. 地质论评, 1994, 40: 64–73

48 张德高. 广东二叠纪火山事件地层学研究. 中国煤田地质, 2000, 12: 5–9

49 龙文国, 童金南, 朱耀河, 等. 海南儋州-屯昌地区二叠纪地层的发现及其意义. 华南地质与矿产, 2007, 1: 38–45

50 张伯友, 张海祥, 赵振华, 等. 两广交界处岑溪二叠纪岛弧型玄武岩及其古特提斯性质的讨论. 南京大学学报(自然科学), 2003, 39: 46–54

51 陆彦邦, 王栋, 周永祥. 中国东部二叠纪沉积盆地演化. 岩相古地理, 1991, 2: 22–30

52 陈洪德, 王成善, 刘文均, 等. 华南二叠纪层序地层与盆地演化. 沉积学报, 1999, 17: 529–535

53 陈洪德, 侯明才, 刘文均, 等. 海西-印支期中国南方的盆地演化与层序格架. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, 31: 629–635

54 王鸿祯. 中国古地理图集. 北京: 地质出版社, 1985

55 刘宝珺, 许效松. 中国南方古地理图集. 北京: 科学出版社, 1994

56 冯增昭, 杨玉卿, 鲍志东. 中国南方石炭纪岩相古地理. 古地理学报, 1999, 1: 75–76

57 Crowley T J, Baum S K. Modeling of Late Paleozoic glaciation. Geology, 1992, 20: 507–510

58 Crowley T J. Pangean climates. In: Klein G D, ed. Pangea: Paleoclimate, Tectonics and Sedimentation During Accretion, Zenith and Breakup of a Supercontinent. Geol Soc Am Spec Pap, 1994, 228: 25–40

59 Crowell J C. The ending of the late Paleozoic ice age during the Permian period. In: Scholle P A, Peryt T M, Ulmer-Scholle D S, eds. The Permian of Northern Pangea, Vol. 1: Paleogeography, Paleoclimate, Stratigraphy. Berlin-Heidelberg-New York: Springer Verlag, 1995. 62–74