下扬子砂岩物源分析提供东南沿海晚古生代大陆弧新证据

李超, 吕璇, 胡修棉*, 于津海, 孙高远

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 210023

* 联系人, E-mail: huxm@nju.edu.cn

2017-03-06 收稿, 2017-04-02 修回, 2017-04-05 接受, 2017-07-03 网络版发表

国家杰出青年科学基金(41525007)和国家自然科学基金(41272085)资助

摘要 运用碎屑组分统计、锆石U-Pb年代学、锆石Hf同位素分析等方法, 对下扬子巢湖-南京地区古生代碎屑岩进行沉积岩石学和物源分析。下扬子地区志留系坟头组砂岩为长石石英砂岩, 岩屑以火成岩岩屑和低级变质岩岩屑为主; 泥盆系五通组砂岩为石英砂岩, 岩屑含量少, 以变石英岩岩屑为主。五通组和坟头组具有相似的碎屑锆石年龄分布模式, 主峰为465~420和838~812 Ma, 表明泥盆纪沉积继承了志留纪沉积的物源特征。早古生代下扬子巢湖-南京地区的碎屑来自其南侧的华夏地块武夷地体。巢湖-南京地区二叠系龙潭组砂岩分别为岩屑石英砂岩和长石石英砂岩, 成熟度低, 岩屑均以中酸性喷出岩岩屑为主, 巢湖地区龙潭组具有指示武夷地体古元古代基底的1866 Ma峰值年龄, 南京地区龙潭组具有与早古生代砂岩相似的445和970 Ma峰值年龄。结合前人岩相古地理和地球物理资料, 认为下扬子地区龙潭组物源区仍位于南侧的华夏地块武夷地体。此外, 下扬子地区龙潭组具有341~254 Ma(石炭纪-二叠纪)碎屑锆石, 其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布在-19.80~+14.90之间, 代表碎屑物源区一次新的岩浆事件, 该事件具有影响范围大、活动持续频繁、中酸性火成岩为主、岩浆来自古老地壳与新生地壳混合熔融等特征。结合区域地质资料, 推测华南板块武夷地体在石炭纪-二叠纪(341~254 Ma)的构造背景为大陆弧。

关键词 物源分析, 砂岩岩石学, 大陆弧, 二叠纪, 华南板块, 下扬子地区

沉积物源分析是研究盆地沉积格局、源区性质及盆地演化的必要手段, 可以为探索大地构造演化提供重要信息。综合运用砂岩碎屑组分统计、重矿物分析及单矿物分析等手段能够有效进行物源分析, 获取源区信息^[1]。

下扬子地区位于华南板块东北部, 是我国现代地质学的摇篮, 同时是我国南方重要的油气勘探区之一。前人对下扬子地区的研究主要集中在沉积环境^[2,3]、构造样式与变形^[4,5]、油气资源^[6-8]等方面, 已有的大地构造研究和物源分析多集中于前泥盆纪地层和中生代地层^[9-12], 对晚古生代地层的物源分析相

对较少。近年来, 有学者通过对华夏地块晚古生代碎屑岩和岩体的研究, 认为中国东南沿海存在晚古生代海西期的岩浆活动, 但由于岩体露头的缺乏, 有关此次岩浆活动的性质仍存在争论^[13], 有学者认为是与古太平洋板块俯冲有关的大陆弧^[14,15], 也有学者认为是陆内造山作用^[16]。这些研究集中在华夏地块中部和西南部, 东部则存在空白, 这制约了对此次岩浆活动的全面了解。安徽巢湖地区和江苏南京地区在晚古生代处于北海南陆的古地理格局, 向南即为华夏地块东部, 沉积环境比较稳定, 针对该地区古生代沉积地层展开详细的物源分析, 对于了解中国东

引用格式: 李超, 吕璇, 胡修棉, 等. 下扬子砂岩物源分析提供东南沿海晚古生代大陆弧新证据. 科学通报, 2017, 62: 2951-2966

Li C, Lü X, Hu X M, et al. Sandstone memory of a Late Paleozoic continental arc in southeast China (Lower Yangtze region) (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 2951-2966, doi: 10.1360/N972016-01356

南沿海晚古生代海西期岩浆活动的规模和性质具有重要意义. 因此, 本文对两地区展开野外地质调查, 对代表性碎屑岩地层采样, 进行详细的砂岩碎屑统计、碎屑锆石U-Pb定年及原位Hf同位素分析, 以确定这些沉积岩的物源区位置和基本特征, 为华南板块大地构造演化提供新的信息.

1 地质背景

1.1 区域构造背景

下扬子地区位于扬子板块东部, 南接华夏地块, 以北东走向的江山-绍兴断裂带为界^[17,18]; 西北侧为华北板块和秦岭-大别超高压变质带, 以北北东走向的郯庐断裂带为界^[19,20]; 东临环太平洋构造带. 形态上呈南西窄-北东宽的“V”字型. 下扬子地区所在

的扬子板块具有早于3.2 Ga的太古代基底以及1~0.8 Ga的新元古代基底^[21~23], 与华夏地块在新元古代晋宁运动中碰撞拼贴成为统一的华南海块, 不同研究认为此次陆-陆碰撞发生在860~800^[24], 880^[25,26]或1000~825 Ma^[27]等. 华夏地块东部出露古元古代花岗岩基底, 年龄约2.0~1.8 Ga^[28], 中部偏东武夷地区则发育新元古代基底, 年龄约850~800 Ma^[11](图1(a)). 华南海块与华北板块拼贴于三叠纪, 而在晚古生代, 下扬子地区北部为下扬子古海, 华北古陆与之相距尚远^[38,39]. 加里东期广西运动(又称武夷-云开造山运动)是华南海块拼贴完成后的一次陆内造山运动^[40], 此次运动直接导致了华南海块泥盆系与下伏地层的不整合^[10,41,42]. 另外, 下扬子地区西南部以北东走向的常州-阳新断裂为界与江南造山带相隔, 江南造山带为新元古代华夏地块与扬子板块拼贴过程

图1 (网络版彩色)下扬子地区大地构造背景图(a)^[26]及研究区综合地层柱状图(b)^[36,37]

Figure 1 (Color online) Sketch map of the tectonic setting of Lower Yangtze region (a) and stratigraphic column (b)

中形成的造山带^[43]。

1.2 地层格架及沉积环境

巢湖-南京地区位于下扬子中部, 自志留系至二叠系, 发育下志留统坟头组(S_{1f})、上泥盆统五通组(D_3C_{1w})、下石炭统金陵组(C_{1j})、高骊山组(C_{1g})、和州组(C_{1h})、上石炭统黄龙组(C_2h)、船山组(C_2P_{1c})、下二叠统梁山组(P_{1l})、中二叠统栖霞组(P_2q)、孤峰组(P_2g)、上二叠统龙潭组(P_3l)、大隆组(P_3d)(图1(b)), 主要碎屑岩地层中以细-中粒砂岩为主, 有下述4套地层。

下志留统坟头组(S_{1f}): 下部为灰绿、黄绿色厚层细砂岩夹黄绿色泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、长石石英砂岩。砂岩粒度由下到上增大, 并发育对称波痕和大型斜层理; 上部以灰黄色中层泥质粉砂岩为主, 夹细砂岩。坟头组沉积相自下而上为: 潮控陆棚沉积相、陆棚沉积相、潮坪沉积相, 总体为滨浅海-陆棚沉积^[3,44,45]。

上泥盆统五通组(D_3C_{1w}): 主要为分选较好的中-细粒石英砂岩。自下而上为灰白色中-厚层含砾石英砂岩、灰白色中-厚层石英砂岩及厚层泥岩、页岩夹粉砂岩。五通组为滨岸相沉积环境, 自下而上可识别出后滨-前滨砾石海滩、前滨-上临滨砂质海滩、混合坪、泥坪、滨岸沼泽等沉积相^[46]。在研究区, 五通组地层与下伏志留系坟头组呈平行不整合接触。

下石炭统高骊山组(C_{1g}): 出露厚度不足20 m。该组主体为杂色页岩及薄层细砂岩, 顶部为细粒石英砂岩。沉积相为滨海相, 有明显沉积间断^[47]。高骊山组岩相变化复杂, 且厚度不大, 各地区剖面之间的可对比性不显著^[48]; 高骊山组与石炭系底部金陵组

灰岩呈假整合接触, 金陵组与下伏泥盆系五通组地层呈整合接触。

上二叠统龙潭组(P_3l): 本组以长石石英砂岩、泥岩、粉砂岩以及煤层为特征。碎屑岩厚度占总厚度90%。岩性自下而上分为4段: 薄层泥岩夹粉砂岩, 中-厚层砂岩, 厚层泥岩夹煤线以及顶部生物碎屑微晶灰岩(俗称压煤灰岩), 与下伏孤峰组富燧石地层呈整合接触。巢湖地区龙潭组沉积相自下至上依次为潟湖、潮坪和三角洲相^[49]; 江苏黄桥地区龙潭组自下而上为前三三角洲相、三角洲前缘相^[8]; 赣东北地区龙潭组自下而上为障壁海岸、潮坪、障壁海岸^[7]。因此, 龙潭组地层总体为滨岸碎屑沉积^[50]。二叠系底部梁山组与石炭系顶部船山组灰岩为假整合接触。

2 分析方法

本次研究对巢湖-南京地区古生代砂岩进行野外考察(图S1~S3), 采集了代表性层位的砂岩样品。根据野外观察和室内的薄片鉴定, 选择了11件砂岩样品进行碎屑组分统计, 并对其中4件样品进行碎屑锆石U-Pb定年, 对部分碎屑锆石进行原位Hf同位素分析。

2.1 样品信息

本次研究采集样品的具体GPS位置信息见表1。如前所述, 由于石炭系高骊山组经历明显沉积间断, 厚度较薄, 不同地区的剖面之间难以对比, 样品不具有代表性, 因此本文集中研究二叠系、泥盆系、志留系地层。

2.2 砂岩碎屑组分统计

本文使用Gazzi-Dickinson法^[51]对样品进行栅格

表1 样品位置信息

Table 1 Samples information

地层	地点	样品编号	纬度(N)	经度(E)
二叠系龙潭组	南京	12LT01	32°04'57.70"	119°01'16.90"
	巢湖	12CX03~12CX05	31°37'57.36"	117°49'34.32"
泥盆系五通组	南京	12ZC05	32°06'50.40"	119°01'3.30"
	巢湖	12CX11	31°38'33.36"	117°51'22.57"
	巢湖	12CX12	31°38'32.53"	117°51'23.62"
	巢湖	12CX13	31°38'29.22"	117°51'23.69"
志留系坟头组	巢湖	12CX06	31°38'50.39"	117°51'20.30"
	巢湖	12CX07	31°38'50.39"	117°51'20.30"
	巢湖	12CX08	31°38'50.39"	117°51'20.30"

结点统计. 根据砂质的粒径选择合适的栅格间距, 对于岩石中所有砂级(大于62.5 μm)矿物颗粒单独计数. 当十字丝落在岩屑中大于62.5 μm 的矿物时, 直接计入该矿物端元, 而非岩屑端元. 每个样品统计400颗以上(表2). 需要说明的是, 400颗以上的统计点中包括严重蚀变矿物、重矿物、杂基(胶结物)、孔隙等, 而这些点不计入投图端元, 因此在表2中未列出. 另外, 由于投图时部分端元(如Ls)存在百分比值为0的情况, 本文对统计数据整体使用Nonparametric Imputation方法进行“去零”处理, 以确保投图结果能够正确反映碎屑组分模式^[52].

2.3 碎屑锆石U-Pb定年

本文对二叠系龙潭组(12LT01, 12CX05), 泥盆系五通组(12ZC05, 12CX12)和志留系坟头组(12CX08)5个样品中的碎屑锆石进行了U-Pb定年测试. 首先将砂岩样品粉碎至约280 μm , 经水淘洗分离出重矿物. 然后进行磁选, 并在双目显微镜下挑选出锆石, 将其固定在环氧树脂靶上, 待固结后抛光至中心部位备用. 锆石U-Pb年龄测定工作在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成. 所用仪器为连接New Wave UP213固体激光剥蚀系统(LA)的Agilent 7500a型等离子质谱仪(ICP-MS), 测试方法见参考文献[53].

2.4 碎屑锆石Hf同位素分析

本文对二叠系龙潭组样品12LT01, 12CX05和泥

盆系五通组样品12ZC05共3个样品进行了碎屑锆石原位Hf同位素分析. 分析实验在南京大学内生金属成矿机制研究国家重点实验室完成, 所用仪器为安装GeoLas PLUS 193激光剥蚀系统的Neptune多接收等离子质谱仪(MC-ICPMS), 详细的仪器参数和实验方法见参考文献[54].

3 结果

3.1 砂岩碎屑组分特征

志留系坟头组砂岩为细粒砂状结构的长石石英砂岩, 颗粒粒径变化范围30~300 μm , 主要集中在80~150 μm ; 分选中等至较差, 颗粒磨圆为次棱角-次圆状. 颗粒间杂基接触与颗粒接触关系同时存在. 碎屑中, 石英含量为68%~77%(单晶石英54%~60%, 多晶石英9%~18%), 部分石英具有波状消光, 部分因压力作用而碎裂, 部分有次生加大现象; 长石含量为15%~22%(斜长石5%~10%, 钾长石9%~15%), 斜长石常见绢云母化, 钾长石表面呈特征性褐色斑点及雾状污浊; 岩屑含量为5%~11%, 主要为火成岩岩屑和低级变质岩岩屑, 火成岩岩屑以酸性喷出岩岩屑为主, 低级变质岩岩屑主要为弱变沉积岩. 样品具有强烈的假杂基化现象(图2(a)). 样品12CX08比其他样品有更多变质岩岩屑, 是由于统计过程中将少量严重蚀变的岩屑处理成了变质岩岩屑(表2; 图3).

泥盆系五通组砂岩为细粒砂状结构石英砂岩, 颗粒粒径变化范围80~300 μm , 主要分布在100~

表2 巢湖-南京地区古生代砂岩样品碎屑颗粒组分^{a)}

Table 2 Detrital mode of Paleozoic sandstone from Chaohu and Nanjing area

地层	地点	样品号	Q		F		L			Chert	合计(颗)
			Qm	Qp	Pl	Kf	Lv	Lm	Ls		
龙潭组	南京	12LT01	219	89	7	30	25	4	0	2	376
	巢湖	12CX05	157	36	33	36	15	3	0	2	282
	巢湖	12CX04	149	59	29	61	27	2	5	1	333
	巢湖	12CX03	166	66	30	66	15	6	7	1	357
五通组	南京	12ZC05	250	81	1	10	2	2	0	8	354
	巢湖	12CX13	293	26	3	11	0	1	0	5	339
	巢湖	12CX12	273	57	1	10	9	4	1	14	369
	巢湖	12CX11	280	33	3	18	4	3	3	28	372
坟头组	巢湖	12CX08	194	53	16	33	14	9	0	0	319
	巢湖	12CX07	142	48	20	39	1	11	1	0	262
	巢湖	12CX06	161	25	30	26	21	5	5	0	273

a) Qm-单晶石英; Qp-多晶石英; Q-石英; Pl-斜长石; Kf-钾长石; F-长石; Lv-火成岩岩屑; Lm-变质岩岩屑; Ls-沉积岩岩屑; Chert-燧石

图 2 南京-巢湖地区古生代砂岩显微照片(正交偏光; (c), (d) 添加单偏光镜下照片). (a) 12CX07 (志留系坟头组, 巢湖); (b) 12CX12 (泥盆系五通组, 巢湖); (c) 12CX05 (二叠系龙潭组, 安山岩岩屑, 巢湖); (d) 12CX04 (二叠系龙潭组, 疑似流纹岩岩屑, 巢湖); (e) 12LT01 (二叠系龙潭组, 石英斑岩岩屑, 南京); (f) 12LT01 (二叠系龙潭组, 二长闪长岩岩屑, 南京). Lv, 火成岩岩屑; Q, 石英; Pl, 斜长石; Kf, 钾长石; Amp, 角闪石

Figure 2 Nanjing-Chaohu Paleozoic sandstone photomicrography(cross-polarized light; plane-polarized light added for (c), (d)). (a) 12CX07 (Silurian Fentou Formation, Chaohu); (b) 12CX12 (Devonian Wutong Formation, Chaohu); (c) 12CX05 (Permian Longtan Formation, andesite lithic fragments, Chaohu); (d) 12CX04 (Permian Longtan Formation, likely rhyolite lithic fragment, Chaohu); (e) 12LT01 (Permian Longtan Formation, quartz porphyry lithic fragment, Nanjing); (f) 12LT01 (Permian Longtan Formation, monzodiorite, Nanjing). Q, quartz; Pl, plagioclase; Kf, K-feldspar; Lv, volcanic lithic fragment; Amp, amphibole

150 μm 之间;分选性一般至较好,磨圆度以次棱角-棱角状为主,呈颗粒接触关系.其中石英含量为90%~95%(单晶石英72%~87%,多晶石英9%~23%),石英颗粒常有次生加大现象;长石含量为3%~6%(斜长石0.3%~0.9%,钾长石3%~5%),斜长石发育双晶,钾长石表面呈特征性褐色斑点;岩屑含量为0.2%~4%,以变质岩岩屑为主,主要为变石英岩.不同于志留系坟头组,泥盆系五通组样品表现较好分选性,成分成熟

度很高,说明在滨岸相沉积环境下,沉积物经历了较强的淘洗分选作用(表2;图2和3).

二叠系龙潭组的砂岩样品为中-细粒砂状结构长石石英砂岩,颗粒粒径变化范围100~400 μm ,主要分布在150~250 μm 之间;分选一般,磨圆度为次棱角-棱角状.石英含量为62%~82%(单晶石英45%~58%,多晶石英13%~23%),长石含量为6%~10%(斜长石占2%~12%,钾长石占8%~18%),多呈短柱状晶

图3 (网络版彩色)Q-F-L三角图解(底图改自参考文献[1])(a)和Lm-Lv-Ls三角图解(b)

Figure 3 (Color online) Q-F-L triangle plot (according to Ref. [1]) (a) and Lm-Lv-Ls triangle plot (b)

形; 岩屑含量为6%~10%, 以火成岩岩屑为主(图3), 中酸性喷出岩岩屑占火成岩岩屑78%~84%。在碎屑统计过程中, 识别出的主要火成岩岩屑有: (1) 安山岩岩屑、二长闪长岩岩屑。安山岩岩屑偶见长石斑晶, 由弱定向斜长石细晶组成, 二长闪长岩岩屑具有自型柱状角闪石, 长石严重蚀变(图2(c), 12CX05, 巢湖; 图2(f), 12LT01, 南京; 图S4(a), 12CX03, 巢湖); (2) 疑似流纹岩屑, 基质蚀变强烈, 长石、石英斑晶发育反应边(图2(d), 12CX04, 巢湖); (3) 石英斑岩岩屑, 石英斑晶边缘可见熔蚀边, 基质为长英质, 呈霏细结构, 蚀变程度较低, 偶见角闪石斑晶(图2(e), 12LT01, 南京; 图S4(b), 12CX03, 巢湖)。根据前人报道, 江苏黄桥地区、江西分宜地区龙潭组砂岩也均以石英为主要成分, 长石、岩屑为次要组分, 且黄桥地区溪2井砂岩中的火成岩岩屑中以安山岩和流纹岩为主^[8,56,57]。

3.2 碎屑锆石U-Pb年龄

本次研究对巢湖地区3件砂岩样品及南京地区2件砂岩样品的351颗碎屑锆石进行了U-Pb定年。将其中不协和度大于10%, 1σ 大于45的数据去除, 获得317个谐和年龄(表S1)。其特征介绍如下。

巢湖志留系坟头组样品12CX08(图4(c))进行了72颗锆石U-Pb年龄分析, 获得68个谐和年龄。锆石年龄主要可分为579~443 Ma(17颗), 1187~735 Ma(36颗), 1663~1648 Ma(3颗), 2655~2300 Ma(10颗) 4组, 主峰值为465和838 Ma, 弱峰值为1648和2538 Ma。另有2颗锆石年龄分别为1466±24和2030±18 Ma。最年轻的锆石为443±12和445±10 Ma等。

巢湖泥盆系五通组样品12CX12(图4(a))83颗锆石U-Pb年龄分析, 获得63个谐和年龄。这些锆石主要分布在578~392 Ma(25颗), 1001~643 Ma(31颗), 峰值为420, 819及970 Ma, 另有3颗年龄在1661~1488 Ma之间, 4颗在2641~2082 Ma之间。最年轻的锆石为392±34和398±15 Ma; 南京泥盆系五通组12ZC05(图4(b))进行了45颗锆石U-Pb年龄分析, 获得43个谐和年龄, 主要分布在544~423 Ma(6颗), 1377~675 Ma(22颗), 2062~1881 Ma(8颗), 2547~2390 Ma(6颗)之间, 另有1颗锆石为1572±27 Ma。主峰值为422和827 Ma, 两个弱峰值分别1892和2457 Ma, 最年轻锆石年龄为423±6 Ma。

巢湖二叠系龙潭组样品12CX05(图5(a))的81颗锆石U-Pb年龄分析, 获得74个谐和年龄, 明显分为晚古生代和古元古代两组: 年轻一组锆石年龄集中在341~260 Ma(23颗), 峰值为267 Ma, 最年轻的锆石年龄260±4 Ma; 较老一组锆石年龄集中在2001~1827 Ma(39颗), 峰值为1866 Ma。另有1颗为1531±16 Ma, 3颗在2285~2205 Ma之间, 7颗在2564~2461 Ma之间, 峰值为2522 Ma, 1颗为2766±14 Ma; 南京龙潭组12LT01(图5(c))共对70颗碎屑锆石U-Pb年龄分析, 获得69个谐和年龄。其锆石年龄主要分布在334~254 Ma(13颗), 503~415 Ma(10颗), 1180~671 Ma(29颗)之间, 另有17颗锆石零星分布于2727~1274 Ma之间。主要年龄峰值为277, 445, 970和2743 Ma。最年轻锆石为254±4 Ma。由上述可见巢湖地区和南京地区龙潭组碎屑锆石年龄谱存在明显的异同点: (1) 两者都具有较多二叠纪中期270 Ma左右年龄的碎屑锆石; (2) 巢湖地区出现古元古代碎屑锆石年龄峰值, 南京

图4 (网络版彩色)巢湖-南京地区泥盆系、志留系砂岩碎屑锆石U-Pb年龄及前人资料^[10,11]

Figure 4 (Color online) Devonian and Silurian sandstone detrital zircon age patterns of Nanjing and Chaohu area, with previous studies^[10,11]

地区则出现晚奥陶世和新元古代早期碎屑锆石年龄峰值。

3.3 碎屑锆石原位Hf同位素

巢湖地区二叠系龙潭组341~260 Ma之间的碎屑锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于-19.8~+14.9之间; 2001~1827 Ma之间的碎屑锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-8.30~+23.3; 南京地区二叠系龙潭组310~254 Ma之间的碎屑锆石只获得3个有效Hf同位素值, 其中 $\varepsilon_{\text{Hf}}(254 \text{ Ma})$ 为+14.03, $\varepsilon_{\text{Hf}}(276 \text{ Ma})$ 为-4.58, $\varepsilon_{\text{Hf}}(282 \text{ Ma})$ 为-0.71; 478~415 Ma之间的碎屑锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-17.0~-5.92; 1180~738 Ma之间碎屑锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-15.9~+13.7。两地碎屑锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 正值主要分布在290~254 Ma之间(图6(a)和(b))。

南京地区泥盆系五通组碎屑锆石中, 439 Ma的碎屑锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-7.86, 1377~675 Ma的碎屑锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-11.31~+11.07, 2062~1881 Ma的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-13.42~

-3.84, 2547~2390 Ma的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-2.81~+2.30 (图6(a))。详细数据见表S2。

4 讨论

4.1 早古生代下扬子地区碎屑物源特征

研究区内早古生代地层中志留统坟头组 and 上泥盆统五通组的沉积与华南板块加里东期广西运动密切相关^[40,58,59]。

巢湖地区坟头组砂岩为长石石英砂岩, 成熟度低。其岩屑成分以火成岩岩屑为主, 其次为低级变质岩岩屑。指示物源区可能主要为岩浆岩及变质岩区。强烈的假杂基化可能是由于板岩岩屑受到挤压发生变形、破裂。

坟头组砂岩除了有小部分古元古代、新太古代年龄的碎屑锆石零星出现, 多数碎屑锆石的年龄分布

图5 (网络版彩色)巢湖-南京地区二叠系龙潭组砂岩碎屑锆石U-Pb年龄及前人资料^[14,33]

Figure 5 (Color online) Permian Longtan Formation sandstone detrital zircon age patterns of Nanjing and Chaochu area, with previous studies^[14,33]

在579~443和1187~735 Ma之间, 主要峰值为465和838 Ma(图4(c)).

在579~443 Ma中的碎屑锆石中, 有65%集中分布在474~443 Ma之间, 35%分布在579~499 Ma之间. 华南板块上发生的广西运动被认为发生在>460~415 Ma之间^[10-12,29,40,60,61]. 集中分布在474~443 Ma之间的碎屑锆石反映了广西运动早期到中期的同造山岩浆岩的剥蚀. 在华夏地块上, 579~499 Ma年龄段的岩浆岩体未有报道, 但多处早古生代地层中却含有该年龄段的碎屑锆石, 如浙江衢州地区志留系样品、广东韶关地区寒武系样品等^[10,61], 可能的解释有两种: 一是由于这些碎屑锆石的源区已被掩埋或剥蚀殆尽^[10]; 二是其源区不在华南板块内部, 属于外来碎屑^[61], 因此对于少数位于579~499 Ma之间的碎屑锆石, 其物源并不清楚, 但这并不影响主峰值465 Ma的碎屑锆石来自广西运动同造山岩浆岩剥蚀的判断.

在1187~735 Ma年龄区间中, 有50%集中于849~815 Ma之间, 25%的碎屑锆石分布于1091~935 Ma之间. 前者与华夏地块中部偏东的新元古代辉长岩、流纹岩基底年龄相当^[10,11](图1(a)), 而扬子板块东

部的新元古代基底在志留纪仍处于海平面下^[61], 因此华夏地块中部的新元古代基底提供了峰值为~838 Ma左右的碎屑锆石, 该基底的抬升可能受控于广西运动. 对于少量在1091~935 Ma之间的碎屑锆石, 其岩浆岩体露头在华夏地块上少有报道, 但在南岭-云开地区早古生代基底沉积岩中存在类似的1100~900 Ma年龄的碎屑锆石, 与印度板块北部同期沉积岩相似, 被认为来自华南板块的外部^[61-63].

前人对浙西杭州、衢州地区中下志留统砂岩做过详细的物源分析, 认为物源区为下扬子地区南部的武夷地体^[10,11]. 古地理上, 中志留统下扬子地区为滨浅海-陆棚沉积相, 南部华夏古陆在海平面之上, 遭受剥蚀^[3,44,45], 碎屑物质被由南向北的水系运移并沉积到下扬子滨海地带. 本文样品与上述两地砂岩同期沉积, 沉积环境相似, 碎屑锆石U-Pb年龄分布模式相同, 加之三地地理距离相近(图1, 4(c)~(e)), 因此, 以坟头组为代表的下扬子早-中志留世沉积物源应主要为华夏地块武夷地体, 即广西运动抬升的武夷地体新元古代Tonian阶中期火成岩、同造山的岩浆岩共同由南向北提供物源(图7(a)).

图6 (网络版彩色)下扬子地区泥盆系五通组、二叠系龙潭组砂岩碎屑锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -U-Pb年龄图及前人资料

Figure 6 (Color online) $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs U-Pb age plot of detrital zircons from Wutong Formation and Longtan Formation sandstone in Lower Yangtze region

泥盆系五通组砂岩表现较高成熟度, 岩屑、长石含量均较少, 可能是在沉积过程中淘洗分选作用导致. 变石英岩岩屑作为主要岩屑成分, 指示其物源可能包括变质岩区和沉积岩区. 泥盆系五通组继承了志留系坟头组的年龄分布特征: 巢湖、南京上泥盆统五通组以~420和~820 Ma为主要年龄, 均有少量2~1.85和2.5 Ga锆石年龄出现. 与下伏志留系坟头组相似, ~420 Ma年龄的碎屑锆石来自广西运动同造山岩浆带, 而~820 Ma年龄的碎屑锆石则代表武夷地体在造山过程中被抬升的新元古代基底.

两地泥盆系五通组碎屑锆石年龄模式的区别在于: 巢湖地区比南京地区富~965 Ma年龄的碎屑锆石; 南京地区则比巢湖地区富古元古代至新太古代的古老锆石, 这些古老锆石很可能来自华夏古陆基

底^[12,64,65]. ~965 Ma的岩浆岩体在扬子板块和华夏地块武夷地体都少见^[14]. 前人报道过的具有该年龄段岩浆岩有浙江北部双溪坞群岩浆岩^[22,66,67](U-Pb年龄在970~890 Ma之间)和广东径南流纹岩^[20,68](U-Pb年龄972±8 Ma; 图1). 前者锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为+9%~+15%, 与本文泥盆系五通组的 $\epsilon_{\text{Hf}}(970 \text{ Ma})$ 值明显不同^[25,69,70](图6(a)). 径南流纹岩体被认为应曾在更大范围内出露^[14], 可能是五通组~965 Ma年龄碎屑锆石的源区, 另外一种可能则是来自于华南板块外部的板块^[61]. 南京地区相对较多古元古代至新太古代锆石的出现则说明其可能接受了较多的古老沉积岩再旋回沉积. 虽然两地碎屑锆石在次要年龄峰值上有一定差异, 但主要年龄峰值与分布基本一致.

泥盆系五通组与下伏志留系坟头组碎屑锆石年

图7 (网络版彩色)岩相古地理简图。(a) 志留系坟头组沉积时期;(b) 泥盆系五通组沉积时期;(c) 二叠系龙潭组沉积时期(根据参考文献[2,3,33,50,63])
Figure 7 (Color online) Lithofacies and palaeogeography sketch map. (a) Deposition period of Silurian Fentou Formation; (b) deposition period of Devonian Wutong Formation; (c) deposition period of Permian Longtan Formation (according to Refs. [2,3,33,50,63])

龄分布特征相似,且主要峰值由465 Ma偏移至420 Ma,体现了广西运动中武夷地体持续性的抬升剥蚀作用^[10]。两组地层呈平行不整合接触,说明研究区在志留纪末期受广西运动影响一度发生抬升,但是并未经历强烈的构造变形^[71]。在五通组沉积期,巢湖-南京地区为近海河流至滨岸沉积,南部为隆起剥蚀区。综上,可以推断自志留系坟头组到泥盆系五通组,研究区物源未发生本质变更,广西运动造成了华夏地块元古代Tonian阶基底岩体、造山运动同期形成的岩浆岩体的抬升,接受剥蚀,伴随部分古老沉积地层再旋回,碎屑物质由南向北运移,最终沉积在下扬子区(图7(a)和(b))。

4.2 东南沿海晚古生代火山活动性质

晚二叠世下扬子地区沉积的源区性质与下伏地层相比,发生了明显的变化。主要表现在:(1)砂岩成熟度降低,火成岩岩屑明显多于泥盆系五通组和志留系坟头组;(2)出现了连续分布在341~254 Ma之间的年轻锆石。华南板块区域上,此年龄段内的岩体露头很少,已报道的仅有海南岛五指山地区、福建五凤楼地区、福建政和地区的小范围露头,以及上扬子地区的峨眉山大火成岩省(图1(a)),年龄分别为267~262, 313±4, 254±4, 260~257 Ma^[16,30~32],但此年龄段

内的碎屑锆石却广泛存在于华南板块二叠系陆源碎屑岩中,如广西防城港、广东韶关、福建福鼎、适中、将乐、江西吉安以及本文的巢湖、南京等地区^[13,14,33,34](图1(a), 5(b)和(d))。说明从341 Ma起,物源区开始了新一期岩浆活动事件,且至少持续到254 Ma,并为华南板块南部大部分地区的二叠系沉积提供物源。

值得注意的是,在龙潭组碎屑岩早于341 Ma的碎屑锆石中,南京地区碎屑锆石的次要峰值出现在478~415 Ma间,这些碎屑锆石来自于广西运动岩浆活动带,而1180~671 Ma年龄则是继承了下伏泥盆系、志留系地层的年龄分布特征;巢湖地区龙潭组碎屑锆石的2001~1827 Ma的碎屑锆石年龄以及相应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,与出露于浙闽一带的武夷地体古元古代花岗岩基底一致^[28,72,73]。另外,龙潭组沉积环境为三角洲相,呈现北海南陆的古地理格局,说明这些早于341 Ma的碎屑锆石可能均来自于南部华夏古陆武夷地体的隆起剥蚀区。两地早于341 Ma的碎屑锆石年龄分布模式存在差异,可能是由于局部水系流域的不同所导致,但两地物源区都位于南部武夷地体。另外一种可能则是下伏地层的再旋回沉积,考虑到砂岩样品中的沉积岩屑甚少,再旋回沉积不会是主要的沉积作用。

前人工作也为我们的物源解释提供了重要依据: (1) 江西分宜地区龙潭组的肉红色碎屑锆石和独居石被认为来自浙闽地区出露的华夏地块片麻花岗岩基底, 且重矿物含量由东南向西北减少, 说明物源来自东部或东南^[74]; (2) 江苏黄桥地区龙潭组地震波反演识别出3个由东南向西北展布的三角洲前缘朵状体, 具有河口坝-席状砂的分布特点, 指示物源来自东南部^[8]; (3) 下扬子地区龙潭组以长兴地区为沉积中心, 厚度由东南向西北变薄, 整体属于北海南陆的滨海碎屑沉积, 而南部的古陆自东向西有华夏古陆、云开古陆、康滇古陆^[2,15,33,50,75,76](图7(c)). 由于峨眉山大火成岩省位于下扬子地区以西, 活动时间小于2 Ma^[32], 且主要提供基性火成岩岩屑, 与前人资料和本文样品的岩屑性质及碎屑锆石年龄模式均不一致, 另外根据古地理分析, 二叠纪时期峨眉山地区和下扬子区均低于海平面, 中间隔着古扬子海及滨海区域, 峨眉山大火成岩省的碎屑物质不具备由西向东长距离搬运的条件, 因此可以排除其作为物源区的可能性. 综上, 下扬子地区龙潭组物源区最可能为较近的华夏武夷地体, 在北海南陆的古地理格局下, 华夏古陆作为古剥蚀区, 其岩浆活动带和部分古老沉积地层接受风化剥蚀, 碎屑物质由南向北被运移到下扬子沉积区.

341~254 Ma之间的碎屑锆石代表华夏地块的新一期岩浆事件. 本文结合前人资料, 认为此次岩浆事件具有下述基本特征: (1) 中酸性火成岩为主要成分, 缺乏基性火成岩. 下扬子地区龙潭组出现一定量的火成岩岩屑(6%~10%), 以安山岩、石英斑岩等中酸性喷出岩岩屑为主, 未见基性火成岩岩屑. 前人也在安徽铜陵地区龙潭组下部发现爆发相的弧型火山角砾岩及英安岩^[77]. (2) 岩浆活动持续且频繁. 碎屑锆石年龄连续分布在341~254 Ma之间(图5(a)和(c)). 巢湖地区二叠系孤峰组整合下伏于龙潭组, 其底部火山灰层锆石具有272 Ma左右的U-Pb年龄, 且由底至顶均有火山灰层产出, 表明该时期火山喷发活动持续且频繁^[78,79]. (3) 作为物源区, 影响范围广泛. 沿北东-南西方向, 东至江苏, 西至广西, 二叠系碎屑岩中多有同期碎屑锆石产出(图1), 但在后期构造、剥蚀历史中几乎被剥蚀殆尽, 或被后期地层掩盖. (4) 碎屑锆石Hf同位素表现该时期的岩浆活动既有新生地壳或幔源物质的产生, 也有古老地壳的再造混熔的特征. 305 Ma以后开始出现明显的正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 部分

260 Ma左右的碎屑锆石受到幔源物质端元的明显影响(图6(b)), 说明古老地壳端元在早期影响较大, 而后期新生地壳或幔源物质所占比重则逐渐增大. (5) 锆石年龄分布模式指示沉积盆地为挤压性质盆地. 碎屑锆石结晶年龄与沉积年龄的差值年龄累积概率曲线可以用于判断沉积盆地性质^[80], 根据国际年代地层表, 吴家坪阶龙潭组沉积年龄应早于 254.14 ± 0.07 Ma^[81], 而本文龙潭组样品最年轻锆石为 254 ± 4 Ma, 因此将254 Ma作为龙潭组样品的沉积时间. 龙潭组碎屑锆石差值年龄累积概率曲线显示, 前5%的年轻碎屑锆石结晶与沉积年龄差值均小于150 Ma, 前30%的年轻碎屑锆石结晶与沉积年龄差值在南京地区小于100 Ma, 在巢湖大于100 Ma, 分别指示汇聚型和碰撞型盆地性质(图S5).

关于此次岩浆活动的性质, 前人曾提出陆内造山运动模型^[16], 认为华夏地块二叠系碎屑岩中340~310 Ma的碎屑锆石代表一期陆内造山运动, 而280 Ma左右的碎屑锆石代表造山旋回后期拉伸环境下的造山带构造垮塌重熔. 在福建五凤楼地区发现的313 Ma的花岗质片麻岩被认为是此期陆内造山运动岩浆的残留. 本文样品碎屑锆石年龄在341~254 Ma之间连续分布, 其年龄分布特征指示二叠纪下扬子盆地具有汇聚型或碰撞型盆地性质, 并且年轻锆石Hf同位素表现明显幔源作用, 与上述陆内造山模型不相符; 另外一种可能性是板内火山活动, 与已经排除的峨眉山大火成岩省类似, 板内火山活动难以提供341~254 Ma之间持续性的锆石, 与下扬子汇聚型盆地性质也不一致, 而且同期发生在华夏地块的大规模板内火山活动尚未有过报道^[33], 因此也被排除.

结合上述岩浆活动特征, 本文认为华夏地块武夷地体在341~254 Ma的岩浆活动最可能为大陆弧, 活动早期以古老地壳熔融为主, 随后幔源物质上升, 并伴随有弧型中酸性火山岩喷发. 前人曾论述可能有一大陆弧分布在华夏地块沿海区域甚至板块界线以外, 作为物源剥蚀区, 影响范围西至海南, 东至福建东北部, 并将其与中生代古太平洋板块向华夏地块的俯冲运动联系起来^[14,30,31,33]. 本文通过对巢湖-南京地区砂岩的物源分析, 为东南沿海大陆弧的存在提供了新的证据, 认为该大陆弧为华南板块北东部的下扬子地区晚古生代沉积盆地提供了物源(图7(c)), 并在后期构造、剥蚀历史中几乎被剥蚀殆尽, 或被后期地层所掩盖.

5 结论

(1) 巢湖-南京地区在志留纪和泥盆纪的沉积主要受控于发生在>460~415 Ma间的广西运动. 华夏地块武夷地体元古代Tonian阶的基底岩体在此次造山运动中被抬升并接受剥蚀, 并与同造山岩浆岩和古老再旋回地层共同为下扬子地区沉积提供物源. 广西运动虽然造成了在华南板块上广泛存在的泥盆系底部不整合面, 但并未导致下扬子地区陆源碎屑岩

的物源变化.

(2) 巢湖-南京地区在二叠纪的沉积物源仍为华夏古陆. 结合前人研究及本文的岩相学资料、碎屑锆石U-Pb年龄分布特征、Hf同位素特征等新证据, 推测华南板块东南沿海曾存在一个晚古生代大陆弧, 起始活动时间为341 Ma, 可能一直持续到早中生代. 作为物源剥蚀区, 该大陆弧影响范围沿北东-南西走向贯穿华南板块南部, 但在后期的构造、剥蚀过程中被剥蚀殆尽, 或被中生代岩浆活动和沉积盖层掩盖.

致谢 感谢两位审稿人对本文的肯定及宝贵意见, 使本文能够得到进一步完善; 感谢米兰比可卡大学Eduardo Garzanti教授对本文的修改和建议; 感谢南京大学张德华、马晓丹、韩中、赖文、马安林协助本次工作的野外调查和实验分析, 并在写作过程中进行了有益讨论.

参考文献

- Garzanti E. From static to dynamic provenance analysis—Sedimentary petrology upgraded. *Sediment Geol*, 2015, 336: 3–13
- Feng Z Z, He Y B, Wu S H. Lithofacies and Palaeogeography of Permian of Middle and Lower Yangtze Region (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1991 [冯增昭, 何幼斌, 吴胜和. 中下扬子地区二叠纪岩相古地理. 北京: 地质出版社, 1991]
- Rong J Y, Chen X, Su Y Z, et al. Silurian paleogeography of China, Silurian lands and seas paleogeography outside of *Laurentia*. *N Y State Mus Bull*, 2003, 493: 243–298
- Mei L F, Dai S W, Shen C B, et al. Formation and disintegration of Mesozoic-Cenozoic Intra-Continental ramp zone in Middle and Lower Yangtze Region (in Chinese). *Geol Sci Tech Inform*, 2008, 27: 1–7 [梅廉夫, 戴少武, 沈传波, 等. 中、下扬子区中、新生代陆内对冲带的形成及解体. 地质科技情报, 2008, 27: 1–7]
- Ding D G, Wang D Y, Liu Y L. Transformation and deformation of the Paleozoic basins in lower Yangtze areas (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2009, 4: 61–73 [丁道桂, 王东燕, 刘运黎. 下扬子地区古生代盆地的改造变形. 地学前缘, 2009, 4: 61–73]
- Pan Y, Dong P. The Lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, East Central China: Intrusion- and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits. *Ore Geol Rev*, 1999, 15: 177–242
- Xu K D. Upper Permian Longtan sequence stratigraphy, paleogeography and Leping coal in Northeastern Jiangxi Province (in Chinese). *Mar Origin Petrol Geol*, 2012, 17: 34–44 [徐克定. 浅谈赣东北上二叠统龙潭组层序地层、古地理与乐平煤. 海相油气地质, 2012, 17: 34–44]
- Li J Q, Pu R H, Wu Y, et al. Sedimentary characteristics and favorable reservoir prediction of Longtan Formation in Huangqiao area, Jiangsu Province (in Chinese). *Petrol Geol Exp*, 2012, 34: 395–399 [李建青, 蒲仁海, 武岳, 等. 江苏黄桥地区龙潭组沉积相与有利储层预测. 石油实验地质, 2012, 34: 395–399]
- Li Z X, Li X H. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 2007, 35: 179–182
- Xu Y, Du Y, Cawood P A, et al. Detrital zircon provenance of Upper Ordovician and Silurian strata in the northeastern Yangtze Block: Response to orogenesis in South China. *Sediment Geol*, 2012, 267–268: 63–72
- Li H B, Jia D, Wu L, et al. Detrital zircon provenance of the Lower Yangtze foreland basin deposits: Constraints on the evolution of the early Palaeozoic Wuyi-Yunkai orogenic belt in South China. *Geol Mag*, 2013, 150: 959–974
- Yao W H, Li Z X, Li W X, et al. Detrital provenance evolution of the Ediacaran-Silurian Nanhua foreland basin, South China. *Gondwana Res*, 2015, 28: 1449–1465
- Hu X, Huang Z, Wang J, et al. Geology of the Fuding inlier in southeastern China: Implication for late Paleozoic Cathaysian paleogeography. *Gondwana Res*, 2012, 22: 507–518
- 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
- Hu L, Du Y, Cawood P A, et al. Drivers for late Paleozoic to early Mesozoic orogenesis in South China: Constraints from the sedimentary record. *Tectonophysics*, 2014, 618: 107–120
- Yu J H, Liu Q, Hu X M, et al. Late Paleozoic magmatism in South China: Oceanic subduction or intracontinental orogeny? *Chin Sci Bull*,

- 2013, 58: 788–795 [于津海, 刘潜, 胡修棉, 等. 华南晚古生代岩浆活动的新发现: 岛弧还是陆内造山? 科学通报, 2012, 57: 2964–2971]
- 17 Charvet J, Shu L, Shi Y, et al. The building of south China: Collision of Yangzi and Cathaysia blocks, problems and tentative answers. *J Asian Earth Sci*, 1996, 13: 223–235
- 18 Xu X, Li Y, Tang S, et al. Neoproterozoic to Early Paleozoic polyorogenic deformation in the southeastern margin of the Yangtze Block: Constraints from structural analysis and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology. *J Asian Earth Sci*, 2015, 98: 141–151
- 19 Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 161: 215–230
- 20 Shu L S, Faure M, Wang B, et al. Late Palaeozoic-Early Mesozoic geological features of South China: Response to the Indosinian collision events in Southeast Asia. *C R Geosci*, 2008, 340: 151–165
- 21 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
- 22 Jiao W F, Wu Y B, Yang S H, et al. The oldest basement rock in the Yangtze Craton revealed by zircon U-Pb age and Hf isotope composition. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2009, 52: 1393–1399
- 23 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
- 24 Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, et al. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: Dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks. *Precambrian Res*, 2007, 159: 117–131
- 25 Li X H, Li W X, Li Z X, et al. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon ages, geochemistry and Nd-Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks. *Precambrian Res*, 2009, 174: 117–128
- 26 Charvet J. The Neoproterozoic-Early Paleozoic tectonic evolution of the South China Block: An overview. *J Asian Earth Sci*, 2013, 74: 198–209
- 27 Zhao G. Jiangnan Orogen in South China: Developing from divergent double subduction. *Gondwana Res*, 2014, 27: 1173–1180
- 28 Xia Y, Xu X S, Zhu K Y. Paleoproterozoic S- and A-type granites in southwestern Zhejiang: Magmatism, metamorphism and implications for the crustal evolution of the Cathaysia basement. *Precambrian Res*, 2012, 216–219: 177–207
- 29 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
- 30 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
- 31 Wang Q, Li J W, Jian P, et al. Alkaline syenites in eastern Cathaysia (South China): Link to Permian-Triassic transtension. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 230: 339–354
- 32 Shellnutt J G, Denysyn S W, Mundil R. Precise age determination of mafic and felsic intrusive rocks from the Permian Emeishan large igneous province (SW China). *Gondwana Res*, 2012, 22: 118–126
- 33 Hu L, Cawood P A, Du Y, et al. Late Paleozoic to Early Mesozoic provenance record of Paleo-Pacific subduction beneath South China. *Tectonics*, 2015, 34: 986–1008
- 34 Liang X Q, Zhou Y, Jiang Y, et al. Difference of sedimentary response to Dongwu movement: Study on LA-ICP-MS U-Pb ages of detrital zircons from Upper Permian Wujiaping or Longtan Formation from the Yangtze and Cathaysia blocks (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2013, 29: 3592–3606 [梁新权, 周云, 蒋英, 等. 二叠纪东吴运动的沉积响应差异: 来自扬子和华夏地块吴家坪组或龙潭组碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄研究. 岩石学报, 2013, 29: 3592–3606]
- 35 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
- 36 Bureau of Geology and Mineral Resources of Jiangsu Province (BGMJRP). *Regional Geology of the Jiangsu and Shanghai Province* (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1984 [江苏省地质矿产局. 江苏省及上海市区域地质志. 北京: 地质出版社, 1984]
- 37 Bureau of Geology and Mineral Resources of Anhui Province (BGMRAP). *Regional Geology of the Anhui Province* (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1987 [安徽省地质矿产局. 安徽省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1987]
- 38 Meng Q R, Zhang G W. Timing of collision of the North and South China blocks: Controversy and reconciliation. *Geology*, 1999, 27: 123–126
- 39 Xue H M, Ma F, Song Y Q, et al. Geochronology and geochemistry of the Neoproterozoic granitoid association from eastern segment of the Jiangnan orogen, China: Constraints on the timing and process of amalgamation between the Yangtze and Cathaysia blocks (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2010, 26: 3215–3244 [薛怀民, 马芳, 宋永勤, 等. 江南造山带东段新元古代花岗岩组合的年代学和地球化学: 对扬子与华夏地块拼合时间与过程的约束. 岩石学报, 2010, 26: 3215–3244]
- 40 Li Z X, Li X H, Wartho J A, et al. Magmatic and metamorphic events during the early Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny, southeastern South China: New age constraints and pressure-temperature conditions. *Geol Soc Am Bull*, 2010, 122: 772–793
- 41 Chen X, Zhang Y D, Fan J X, et al. Onset of the Kwangsi Orogeny as evidenced by biofacies and lithofacies. *Sci China Earth Sci*, 2012, 55: 1592–1600 [陈旭, 张元动, 樊隽轩, 等. 广西运动的进程: 来自生物相和岩相带的证据. 中国科学: 地球科学, 2012, 42: 1617–1626]
- 42 Chen X, Fan J X, Chen Q, et al. Toward a stepwise Kwangsi Orogeny. *Sci China Earth Sci*, 2014, 57: 379–387 [陈旭, 樊隽轩, 陈清,

- 等. 论广西运动的阶段性. 中国科学: 地球科学, 2014, 44: 842–850]
- 43 Yang Z, He B. Transform of Jurassic tectonic configuration of South China block: Evidence from U-Pb ages of detrital zircons. *Geotech Metal*, 2013, 37: 580–591
- 44 Wang Y, Zeng Y, Chen S. Analysis of sedimentary environment of the Fentou Formation of lower Silurian in the northern Chaohu area, Anhui (in Chinese). *Geol Anhui*, 2007, 17: 166–170 [王茵, 曾勇, 陈松. 安徽巢北地区下志留统坟头组沉积环境分析. *安徽地质*, 2007, 17: 166–170]
- 45 Li D P, Han Z Z, Li A L, et al. Research on sedimentary facies and paleoenvironment of Fentou Formation, middle Silurian in north Chaohu area (in Chinese). *Trans Oceanol Limnol*, 2010, 3: 126–130 [李德平, 韩宗珠, 李安龙, 等. 巢北地区中志留统坟头组沉积相与古环境研究. *海洋湖沼通报*, 2010, 3: 126–130]
- 46 Zhao L Y, Lü D W, Liu H Y, et al. The analysis on the depositional environment of Wutong Formation in northern Chaohu area, Anhui (in Chinese). *Acta Sediment Sin*, 2015, 33: 470–479 [赵鲁阳, 吕大炜, 刘海燕, 等. 安徽巢北地区五通组沉积环境分析. *沉积学报*, 2015, 33: 470–479]
- 47 Hu Q, Song C Z. The carbonic marine carbonate rocks types character and the sedimentary environment of north Chaoxian of Anhui Province (in Chinese). *J Hefei Univ Tech*, 1986, 2: 121–134 [胡祈, 宋传中. 安徽巢北地区石炭系碳酸盐岩石学特征及形成环境讨论. *合肥工业大学学报*, 1986, 2: 121–134]
- 48 Li S Y, Jin F Q, Huang Q S, et al. Study of the carboniferous sequence strata and evolution of the lower Yangtze basin (in Chinese). *Geol Anhui*, 2000, 4: 241–247 [李双应, 金福全, 黄其胜, 等. 下扬子盆地石炭纪层序地层研究及盆地演化. *安徽地质*, 2000, 4: 241–247]
- 49 Jin X B, Li Z F, Feng L, et al. Study on sedimentary environment and coal accumulation characteristics of Longtan Formation in Chaohu area (in Chinese). *Coal Sci Tech*, 2014, 42: 92–96 [靳学斌, 李壮福, 冯乐, 等. 巢湖地区龙潭组沉积环境与聚煤特征研究. *煤炭科学技术*, 2014, 42: 92–96]
- 50 Wang Y, Jin Y. Permian palaeogeographic evolution of the Jiangnan Basin, South China. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoeconol*, 2000, 160: 35–44
- 51 Ingersoll R V, Bullard T F, Ford R L, et al. The effect of grain size on detrital modes: A test of the Gazzi-Dickinson point-counting method. *J Sediment Res*, 1984, 54: 103–116
- 52 Martín-Fernández J A, Barceló-Vidal C, Pawlowsky-Glahn V. Dealing with zeros and missing values in compositional data sets using nonparametric imputation. *Math Geosci*, 2003, 35: 253–278
- 53 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
- 54 Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, et al. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chem Geol*, 2006, 234: 105–126
- 55 Du Y L, Li S Y, Kong W L, et al. Sandstone detrital composition and provenance analysis of the Permian Longtan Formation in south-eastern Anhui Province (in Chinese). *Geol J China Univ*, 2010, 16: 509–516 [杜叶龙, 李双应, 孔为伦, 等. 安徽东南部二叠系龙潭组砂岩碎屑组分及物源分析. *高校地质学报*, 2010, 16: 509–516]
- 56 Qiu M, Wu X J, Zhang P F. Sandstone type and heavy mineral characteristics of Longtan Formation, late Permian of Yangqiao, Jiangxi (in Chinese). *J Coal Sci*, 1989, 1: 66–75 [邱明, 吴学军, 张鹏飞. 江西省杨桥矿区晚二叠世龙潭组砂岩类型及重矿物特征. *煤炭学报*, 1989, 1: 66–75]
- 57 Chen S Y. Reservoir characteristics and petroleum accumulation of Permian Longtan Formation in Xiqiao tectonic belt of Huangqiao region, Lower Yangtze basin (in Chinese). Master Dissertation. Nanjing: Nanjing University, 2014 [陈顺勇. 下扬子黄桥地区溪桥构造带二叠系龙潭组储层特征及油气成藏期研究. 硕士学位论文. 南京: 南京大学, 2014]
- 58 Liu B J, Xu X S. Atlas of Lithofacies and Palaeogeography of South China (Sinian to Triassic) (in Chinese). Beijing: Science Press, 1994 [刘宝珺, 许效松. 中国南方岩相古地理图集: 震旦纪—三叠纪. 北京: 科学出版社, 1994]
- 59 Chen X, Rowley D, Rong J Y, et al. Late Precambrian through early Palaeozoic stratigraphic and tectonic evolution of the Nanling region, Hunan Province, South China. *Int Geol Rev*, 1997, 39: 469–478
- 60 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
- 61 Yao W H, Li Z X, Li W X, et al. From Rodinia to Gondwanaland: A tale of detrital zircon provenance analyses from the southern Nanhua Basin, South China. *Am J Sci*, 2014, 314: 278–313
- 62 Yu J H, O'Reilly S Y, Wang L, et al. Components and episodic growth of Precambrian crust in the Cathaysia Block, South China: Evidence from U-Pb ages and Hf isotopes of zircons in Neoproterozoic sediments. *Precambrian Res*, 2010, 181: 97–114
- 63 Ma X P, Liao W, Wang D. The Devonian System of China, with a discussion on sea-level change in South China. *Geol Soc Lon Spec Pub*, 2009, 314: 241–262
- 64 Shen L, Yu J H, O'Reilly S Y, et al. Widespread Paleoproterozoic basement in the eastern Cathaysia Block: Evidence from metasedimentary rocks of the Pingtan-Dongshan metamorphic belt, in southeastern China. *Precambrian Res*, 2016, 285: 91–108
- 65 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, 222: 424–449

- 66 Zhang B T, Ling H F, Shen W Z, et al. Research of Sm-Nd dating of spilite-keratophyre of Shuangxiwu in Xiqiu, Shaoxing, Zhejiang (in Chinese). *Nanjing Univ Sin*, 1990, 2: 9–14 [章邦桐, 凌洪飞, 沈渭洲, 等. 浙江绍兴西裘双溪坞群细碧-角斑岩的 Sm-Nd 等时年龄的研究. *南京大学学报*, 1990, 2: 9–14]
- 67 Ye M F, Li X H, Li W X, et al. SHRIMP zircon U-Pb geochronological and whole-rock geochemical evidence for an early Neoproterozoic Sibaoan magmatic arc along the southeastern margin of the Yangtze Block. *Gondwana Res*, 2007, 12: 144–156
- 68 Shu L S, Deng P, Yu J H, et al. The age and tectonic environment of the rhyolitic rocks on the western side of Wuyi Mountain, South China. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2008, 51: 1053–1063 [舒良树, 邓平, 于津海, 等. 武夷山西缘流纹岩的形成时代及其地球化学特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38: 950–959]
- 69 Chen Z H, Guo K Y, Dong Y G, et al. Possible early Neoproterozoic magmatism associated with slab window in the Pingshui segment of the Jiangshan-Shaoxing suture zone: Evidence from zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronology and geochemistry. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2009, 52: 925–939
- 70 Chen Z H, Xing G F, Guo K Y, et al. Petrogenesis of keratophyes in the Pingshui Group, Zhejiang: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes. *Chin Sci Bull*, 2009, 54: 1570–1578 [陈志洪, 邢光福, 郭坤一, 等. 浙江平水群角斑岩的成因: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约. *科学通报*, 2009, 54: 610–617]
- 71 Li S Z, Li A L, Fan D J, et al. Mesozoic structure deformation of the Chaobei region, Anhui Province and its tectonic setting (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2009, 83: 208–217 [李三忠, 李安龙, 范德江, 等. 安徽巢北地区的中生代构造变形及其大地构造背景. *地质学报*, 2009, 83: 208–217]
- 72 Yu J H, Wang L, 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
- 73 Liu Q, Yu J H, O'Reilly S Y, et al. Origin and geological significance of Paleoproterozoic granites in the northeastern Cathaysia Block, South China. *Precambrian Res*, 2014, 248: 72–95
- 74 Wu X J. Heavy mineral characteristics of Longtan Formation in Yangqiao, Jiangxi (in Chinese). *J Stratigr*, 1984, 3: 215–219 [吴学军. 江西杨桥矿区龙潭组重矿物特征. *地层学杂志*, 1984, 3: 215–219]
- 75 Xu Z Q. The sedimentary characteristics of Longtan Formation of north-Zhejiang (in Chinese). *J Stratigr*, 1993, 3: 215–218 [徐自强. 浙江北部龙潭组的沉积特征. *地层学杂志*, 1993, 3: 215–218]
- 76 Pan J P, Qiao D W, Li S Z, et al. Shale-gas geological conditions and exploration prospect of the Paleozoic marine strata in lower Yangtze area, China (in Chinese). *Geol Bull China*, 2011, 30: 337–343 [潘继平, 乔德武, 李世臻, 等. 下扬子地区古生界页岩气地质条件与勘探前景. *地质通报*, 2011, 30: 337–343]
- 77 Lü P J, Jin F Q. The discovery of volcanic rocks in Longtan Formation on Permian system in Tongling, Anhui and the geological significance (in Chinese). *J Hefei Univ Tech*, 1993, 2: 147–150 [吕培基, 金福全. 安徽铜陵二叠系龙潭组火山岩的发现及其意义. *合肥工业大学学报*, 1993, 2: 147–150]
- 78 Zhu Z Y, Jiang S Y, Liu G X, et al. Precise dating of the Middle Permian: Zircon U-Pb geochronology from volcanic ash beds in the basal Gufeng Formation, Yangtze region, South China. *Gondwana Res*, 2013, 23: 1599–1606
- 79 Xia B D, Zhong L R, Fang Z, et al. Early Permian Gufengian argillized volcanics in the lower Yangtze region (in Chinese). *Geol Rev*, 1994, 40: 64–73 [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]
- 80 Cawood P A, Hawkesworth C J, Dhuime B. Detrital zircon record and tectonic setting. *Geology*, 2012, 40: 875–878
- 81 Cohen K M, Finney S C, Gibbard P L, et al. The ICS international chronostratigraphic chart. *Episodes*, 2013, 36: 199–204

补充材料

- 图S1** 安徽巢湖地区野外照片(S₁f、D₃C₁w)
- 图S2** 安徽巢湖地区野外照片(C₁g)
- 图S3** 安徽巢湖、江苏南京地区野外照片(P₃l)
- 图S4** 上二叠统龙潭组砂岩显微镜下照片(P₃l)
- 图S5** 上二叠统龙潭组碎屑锆石差值年龄累积概率曲线图
- 表S1** 样品碎屑锆石U-Pb年龄数据表
- 表S2** 样品碎屑锆石原位Hf同位素数据表

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “下扬子砂岩物源分析提供东南沿海晚古生代大陆弧新证据”

Sandstone memory of a Late Paleozoic continental arc in southeast China (Lower Yangtze region)

LI Chao, LÜ Xuan, HU XiuMian*, YU JinHai & SUN GaoYuan

State Key Laboratory of Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

* Corresponding author, E-mail: huxm@nju.edu.cn

Provenance analysis was carried out on Paleozoic siliciclastic rocks exposed in the South China Block (Lower Yangtze region, Chaohu and Nanjing areas) by sandstone petrography, U-Pb detrital-zircon geochronology, and zircon Hf isotopes. Sandstones of the Silurian Fentou Formation are feldspatho-quartzose with a few igneous and low-grade metamorphic rock fragments. Sandstones of the Devonian Wutong Formation are quartzose with a few quartz-rich metamorphic rock fragments. The Fentou and Wutong formations share similar detrital-zircon age spectra, with peaks mainly at 465–420 and 838–812 Ma. Zircons of Early Paleozoic age were with all likelihood derived from magmatic rocks associated with the Kwangsian orogeny, documented by a widespread unconformity across the South China Block. Neoproterozoic zircons were probably shed from Proterozoic basement of the Wuyi terrane in the Cathaysian block, interpreted to have been uplifted south of the Lower Yangtze region during the Kwangsian orogeny. The Permian Longtan Formation in Chaohu area and Nanjing area are litho-quartzose and feldspatho-quartzose, respectively, with dominant felsic and intermediate volcanic lithic fragments, indicating that detrital source areas did not change markedly after the Kwangsian orogeny.

Zircon-age spectra from the Longtan Formation in the Chaohu area display a diagnostic peak at ~1866 Ma, indicating provenance from the Paleoproterozoic basement of the Wuyi terrane. Instead, detrital zircons in the Longtan Formation in the Nanjing area display peaks at ~445 and ~970 Ma, similar to those in the underlying Paleozoic sandstones. The Wuyi terrane in the Cathaysian block thus remained as a major source area for long, as supported by independent sedimentological and seismic evidence. The Longtan Formation in both Chaohu and Nanjing areas also contain detrital zircons with ages distributed continuously from 341 to 254 Ma and a major peak around 270 Ma, reflecting renewed intermediate and felsic magmatism in the source area. These zircons have $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ ranging from –19.8 to +14.9, indicating melting of old crust and mixing with crustal magmas. Such a continuously magmatic source supplied sediments all across the South China Block from east to west. These and other lines of evidence including probability accumulation-curve analysis favor deposition in a convergent plate-tectonic setting. We suggest that source rocks were part of a continental arc developed along the southeast coast of China during the Late Paleozoic, shedding sediments to as far as north as the northern South China Block. According to previous studies, such continental arc would be related to the subduction of the paleo-Pacific plate. Magmatism generated at first by melting of old crust was mixed later on with felsic and intermediate magma newly generated during mantle upwelling and associated uplift. The continental arc remained as the main detrital source to the Lower Yangtze region and other parts of the South China Block until it was eventually denuded or buried by the Mesozoic times.

provenance analysis, sandstone petrography, continental arc, Permian, South China Block, Lower Yangtze region

doi: 10.1360/N972016-01356