

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020040101

苏北-南黄海西部第四纪长江埋藏古河道分布研究进展

陈影影^{1,3}, 夏非², 张振克⁴, 胥勤勉⁵, 陈诗越¹

1. 江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 徐州 221116
2. 江苏第二师范学院城市与资源环境学院, 南京 211200
3. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061
4. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023
5. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

摘要:长江作为连接青藏高原与西太平洋边缘海的最重要水系之一,其形成演化研究备受学者关注。详细梳理了近几十年来苏北-南黄海西部埋藏古河道的相关研究成果,对本区第四纪以来长江古河道的埋藏分布状况进行了综述。研究显示,本区长江埋藏古河道特别发育,并在第四纪期间经历了多次迁移、往返摆动。由于本区面积广大且古地貌条件复杂、研究分析所采用的钻孔空间分辨率偏低、高质量的岩芯缺乏和采样密度不够以及测年方法局限等因素限制,目前对长江古河道迁移路线的认识仍存在较多争议:一种观点认为受新构造运动的影响,第四纪以来长江古河道大致在扬州-泰州-姜堰-海安-淤港一线以南摆动,但对于其具体入海位置仍存在较多争议;另一种观点认为受长江三角洲地区差异性构造沉降与地形障碍影响,长江古河道自苏北平原、经北翼地区而逐渐南迁。此外,在毗邻的南黄海西部陆架区也发现了一系列形成于晚更新世末期近东西向的长江古河道。作为长江古河道变迁的一个关键研究区,今后需在提高钻孔研究分辨率、建立第四纪高精度可靠年代标尺、加强长时间尺度物源及海陆记录对比研究等方面进一步开展深入研究。查明长江古河道的埋藏分布规律,将有助于深入认识第四纪长江沉积物源-汇系统的形成演化过程和机制,丰富该区古地貌与沉积环境演化信息,对于资源环境的合理开发利用和工程建设选址亦可提供重要的基础科学依据。

关键词:长江埋藏古河道;沉积环境;第四纪;苏北-南黄海西部

中图分类号:P531 **文献标识码:**A

Research progress on distribution of Quaternary buried paleo-Yangtze River channels in the North Jiangsu-western South Yellow Sea

CHEN Yingying^{1,3}, XIA Fei², ZHANG Zhenke⁴, XU Qinqian⁵, CHEN Shiyue¹

1. School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China
2. School of Urban, Resource and Environmental Sciences, Jiangsu Second Normal University, Nanjing 211200, China
3. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China
4. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China
5. Tianjin Center of Geological Survey, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

Abstract: Based on published literatures, a thorough review is made on the distribution of Quaternary buried paleo-Yangtze River channels in the region of North Jiangsu and western South Yellow Sea (NJ-WSYS). The review suggests that Quaternary paleo-river channels are particularly developed in the region left behind by the paleo-Yangtze River. Owing to its wide distribution and complex paleogeomorphology, in addition to lack of high-quality sediment cores, low sampling density and limited dating data, there still remains many disputes on the migration pattern of the Yangtze River paleochannels. One view believes that subject to the neotectonic movement, the Quaternary Yangtze River channel flowed into the sea following the variable paths to the south of a line that through Yangzhou, Taizhou, Jiangyan, Haian and Jianggang, however,

资助项目:国家自然科学基金“东平湖沉积物物源示踪及黄河洪水事件判识”(41701101),“辐射沙脊群西洋潮流通道的浅部沉积层序及其形成演化”(41901107),“辐射沙脊群典型潮道-沙脊过渡带短尺度沉积与地貌变化过程”(41371024);黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金“东平湖沉积物中的黄河洪水事件判识”(SKLLQG1902);江苏省高等学校自然科学研究面上项目“辐射沙脊群东北翼浅层沉积结构南北分异研究”(18KJB170003);江苏师范大学博士人才项目“东平湖沉积物元素地球化学特征及物源识别”(17XLR003);江苏第二师范学院引进高层次人才科研启动经费项目(919801);江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介:陈影影(1984—),女,博士,讲师,从事第四纪环境演变研究, E-mail: chenyingying@jsnu.edu.cn

通讯作者:张振克(1963—),男,博士,教授,博士生导师,从事地貌与第四纪环境演变研究, E-mail: zhangzk@nju.edu.cn

收稿日期:2020-04-01; **改回日期:**2020-05-09 周立君编辑

there are many controversies on the exact location of the estuary for a specific river course. Another view, however, suggests that due to the effect of differential tectonic subsidence and topographic barrier, the paleo-Yangtze River, shifting from the North Jiangsu Plain, flowed towards south and through the northern flank of Yangtze River delta. In addition, a series of nearly EW-trending Yangtze River paleochannels have also been found on the adjacent continental shelf of the western South Yellow Sea, which were formed at the end of Late Pleistocene. As a key research area for the paleo-Yangtze River channel migration, therefore, it is still needed to increase the research resolution of sediment cores, to improve the dating accuracy and resolution of the ages to establish reliable chronostratigraphic frameworks, and to reinforce the analysis of sediment provenance in long time scale and correlation of land-sea sedimentary record in the NJ-WSYS. To ascertain the distribution of buried Yangtze River paleochannels in this area will contribute to the further understanding of the evolution processes and mechanisms of the Quaternary Yangtze River sediment source-to-sink system, enrich the knowledge on the evolution of paleogeomorphology and sedimentary environments, and provide the scientific basis for rational exploitation and utilization of resources and engineering constructions.

Key words: buried paleo-Yangtze River channels; sedimentary environment; Quaternary; North Jiangsu-western South Yellow Sea

古河道是在自然或人为因素影响下引起的河道变化过程中产生的废弃河道的形态物质体,在地面上仍有遗迹显露的古河道称为地面古河道;在地面上已无遗迹显露而被埋藏在地下深处的古河道称为埋藏古河道^[1]。已有研究表明,我国东部洪-冲积泛滥平原^[1-2]、浅海大陆架^[3-7]等地区,广泛发育第四纪的埋藏古河道,众多研究者对这些埋藏古河道进行了广泛研究,获得了大量研究成果,不仅可以为国民经济建设提供基础数据,而且可以重建古水文网,复原古河型、古水文,为重建古地貌及古环境演变过程提供重要的科学依据。

苏北-南黄海盆地是长江下游在中、新生代发育的断陷盆地,作为黄河和长江两条大河以及其他一些河流搬运物质的重要汇集区和输运通道,是记录宏观构造地貌和水系演化的最佳场所之一。前人通过对苏北盆地 XH1 孔^[8]及长江三角洲地区 PD-99^[9]、DY03^[10]、TZK3 孔^[11]利用多种物源分析法已较好地限定长江贯通的时间约在上新世晚期—早更新世。近几十年来众多学者利用大量钻孔资料^[12-15]、卫片解译^[16]、浅地层剖面探测资料^[17-18]等,发现在苏北-南黄海西部第四纪地层内发育许多不同规模、不同时代的古河道,并初步复原了其分布情况、埋深与组成物质,对古河道进行了分期、断代。这些古河道主要是地质历史时期长江、黄河、淮河及一些近源河流等水系演变的产物,特别是长江埋藏古河道尤其发育。通过搜集苏北-南黄海西部古河道研究有关的成果资料,本文对该区第四纪长江埋藏古河道的分布特征、形成时代等进行了详细梳理,并对当前长江埋藏古河道研究存在的主要问题与难点进行了探讨。这些埋藏古河道的形态、结构、空间分布、形成时代以及填充物特征等包含了大量的沉积环境特征和演化过程的信息。查明苏北-南黄海西部古河道的埋藏分布规律,将有助于深入认识第四纪长江沉积物源-汇系统的形成演化过

程和机制,丰富该区古地貌与沉积环境演化信息,对于资源环境的合理开发利用和工程建设选址亦可提供重要的基础科学依据。

1 区域地质概况

苏北-南黄海盆地位于下扬子地台东北部,北界为苏鲁-千里岩隆起区,南界为苏南-勿南沙隆起区,西以郯庐断裂为界,东邻朝鲜半岛,该区陆域被称为苏北盆地,海域被称为南黄海盆地^[19]。自下而上,盆地发育较完整的海相震旦系-中下三叠统、陆相中上三叠统-新近系和第四系,沉积地层总厚超万米^[19]。按新生代的沉积和构造特征,苏北和南黄海可划分为 5 个一级构造单元,自北向南分别为:千里岩隆起区、北部盆地、中部隆起区、苏北-南黄海南部盆地和苏南-勿南沙隆起区。新近纪以来,研究区新构造运动主要表现为强烈的持续沉降,苏北-南黄海拗陷区不断扩大,沉降中心持续南移^[20]。

第四纪时期周期性的冷暖气候变化造成海平面升降和海岸变迁,对苏北-南黄海盆地的古地理、古环境变迁产生了极大的影响。其中,苏北盆地在第四纪曾经历了 4 次海水淹覆,海-陆交互堆积作用明显,经滨浅海→潟湖→湖泊→洼地,最后由河流冲积物覆盖成陆^[21]。南黄海陆架区的第四纪地层,岩性、岩相变化复杂,在距今~3.50 Ma 以来的地层中出现了 7 个海侵层,3.50~1.66 Ma 为陆相的河流沉积,发育典型的河道和河漫滩沉积;1.66~0.83 Ma 为河流相夹 3 个薄的滨海相地层(主要为潮滩沉积);0.83 Ma 至今以海相地层为主,发育了 4 个厚的海相地层^[22]。目前本区做过较为详细沉积学综合研究(包括详细岩芯描述、¹⁴C 测年、粒度和微体古生物分析等)的代表性长钻孔,苏北盆地主要有 XH1、BY1、T8、T11、M、Y 和 YZ08 孔,南黄海西部地区主要有 QC2、CSDP-1 孔等(图 1,表 1)。此外,

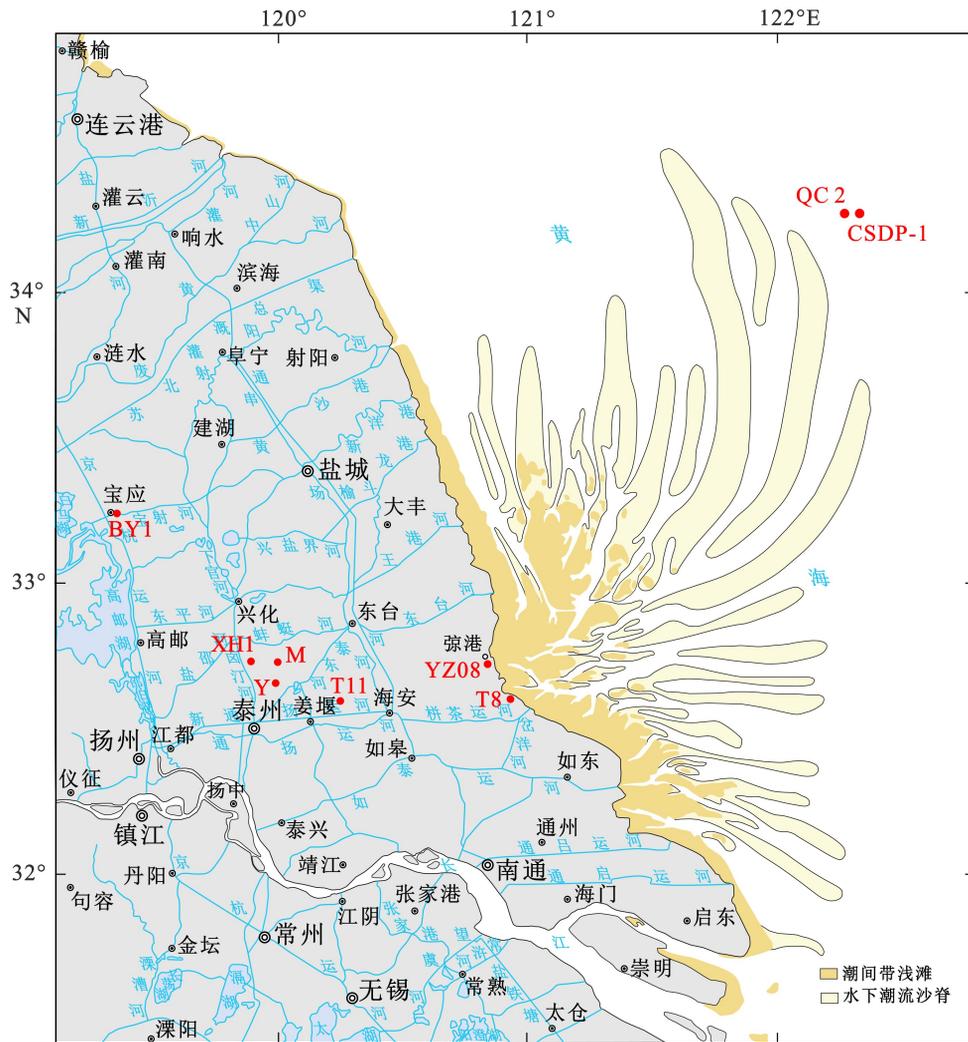


图1 苏北-南黄海西部代表性研究钻孔位置分布图
(底图据文献 [23] 改绘)

Fig.1 Distribution of typical sediment cores in the North Jiangsu and western South Yellow Sea
(Base map modified after reference [23])

表1 苏北-南黄海西部代表性研究钻孔信息表

Table 1 Details of typical sediment cores in the North Jiangsu and western South Yellow Sea

钻孔	钻孔位置		钻探深度/m	取芯率/%	资料来源
	北纬	东经			
XH1	32°45'	119°51'	350	80	[8]
BY1	33°14'21"	119°22'41"	146	66.44	[21]
T8	32°35'	120°49'	50.8	-	[24]
T11	32°36'	120°16'	38.9	-	[24]
M	32°45.051'	120°00.623'	90	93.52	[25]
Y	32°38.713'	120°02.389'	92	92.38	[25]
YZ08	32°42'16.32"	120°53'7.06"	131	93.12	[26]
QC2	34°18'	122°16'	108.83	90.40	[27]
CSDP-1	34°18'	122°22'	300.10	80	[22]

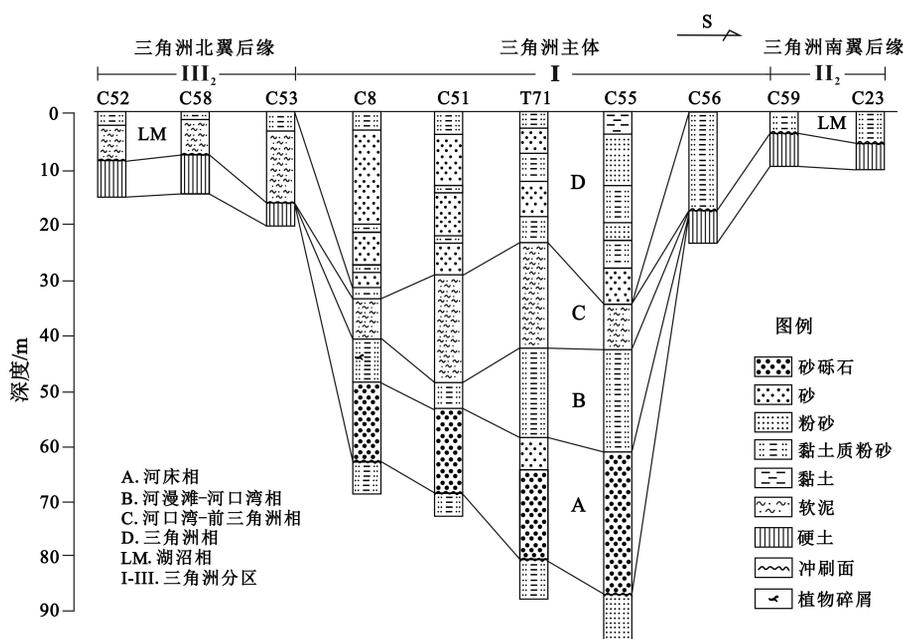


图 2 长江三角洲地区横切长江河谷的晚第四纪地层层序图 (据文献 [28] 改绘)

Fig.2 Late Quaternary stratigraphic correlation of sediment cores in the cross-section of the Yangtze River delta (modified after reference [28])

长江三角洲沉积和地层也已开展了广泛的研究, 对其晚第四纪沉积和地层研究尤为重视^[24]。长江三角洲晚第四纪沉积地层中间断众多, 相变频繁, 结构复杂, 三角洲主体和两翼以及两翼的前缘和后缘同一层序的沉积相组合差异也很明显(图 2)。

2 苏北-南黄海西部第四纪长江埋藏古河道分布

2.1 早更新世长江埋藏古河道分布

在苏北盆地区域已发现的大量埋藏古河道中, 对于早更新世时期长江古河道的位置, 目前主要有两种观点: 一种观点认为当时古长江流经苏北平原中部于盐城附近地区入黄海(图 3)。如江苏省地质矿产局第二水文地质工程地质大队^[29]基于多个地质钻孔资料的分析, 揭示了在早更新世—中更新世时期长江主河道经过长江三角洲北翼、毗邻盐城和东台地区向东北流入黄海。Chen and Stanley^[14]综合分析典型钻孔岩芯的岩性、粒度、重矿物组合特征等, 并参考本区几十个地质钻孔资料, 也认为当时长江古河道流经苏北平原经盐城等地区向北东方向入海。顾家伟^[30]利用回剥分析定量恢复了上新世以来苏北盆地与长江三角洲的构造沉降速率, 研究表明上新世以来苏北盆地呈现缓慢沉降的特点, 而长江三角洲则表现为间歇式沉降, 且速率较苏北

盆地高, 认为两盆地差异沉降表明长江可能最早于苏北地区入海。

另一种观点则认为当时长江古河道主要在扬州-泰州-姜堰-海安-三仓一线以南摆动, 但对于其具体入海位置则存在较多争议, 可能曾于川东港、弥港、小洋口、十八总、北坎、吕四港、启东等地区入海(图 3)。吴标云和李从先^[31]通过大量水文地质钻孔多指标综合分析, 认为早更新世时期的长江古河道基本在扬州-泰州-姜堰-海安-弥港一线以南, 古河床位置在扬州、江都、泰州、泰县(今姜堰)、海安、栟茶、如东一线, 与以南的镇江、大桥、黄桥、石庄、南通、四甲、启东一线之间摆动; 进入早更新世中期后, 河床不断开拓, 自西向东逐渐加宽成不规则喇叭形曲流; 至早更新世晚期, 于泰县(今姜堰)、顾高庄、靖江一带形成马蹄形河曲, 分南北两支长江古河床分流并分别于弥港、启东入海。沈国俊^[13]通过对大量地质钻孔多指标综合分析, 认为第四纪长江五条古河道似手掌、手指状在长江三角洲地区分布, 早更新世的长江古河床比较宽广, 受古地形影响, 在河口段河道分出泰州北、溱潼、东台到川东港一线以南四条古河道, 其中三条在北翼地区, 自北向南分别在川东港、小洋口、启东入海。江苏省地质调查研究院^[32]则根据大量钻孔岩芯中河床沉积物的分布资料, 揭示出早更新世早期长江随着西部山地的抬升贯穿一系列盆地后东流入海, 此时从北向南主河道有三条并以石庄-新丰-季市-双甸-

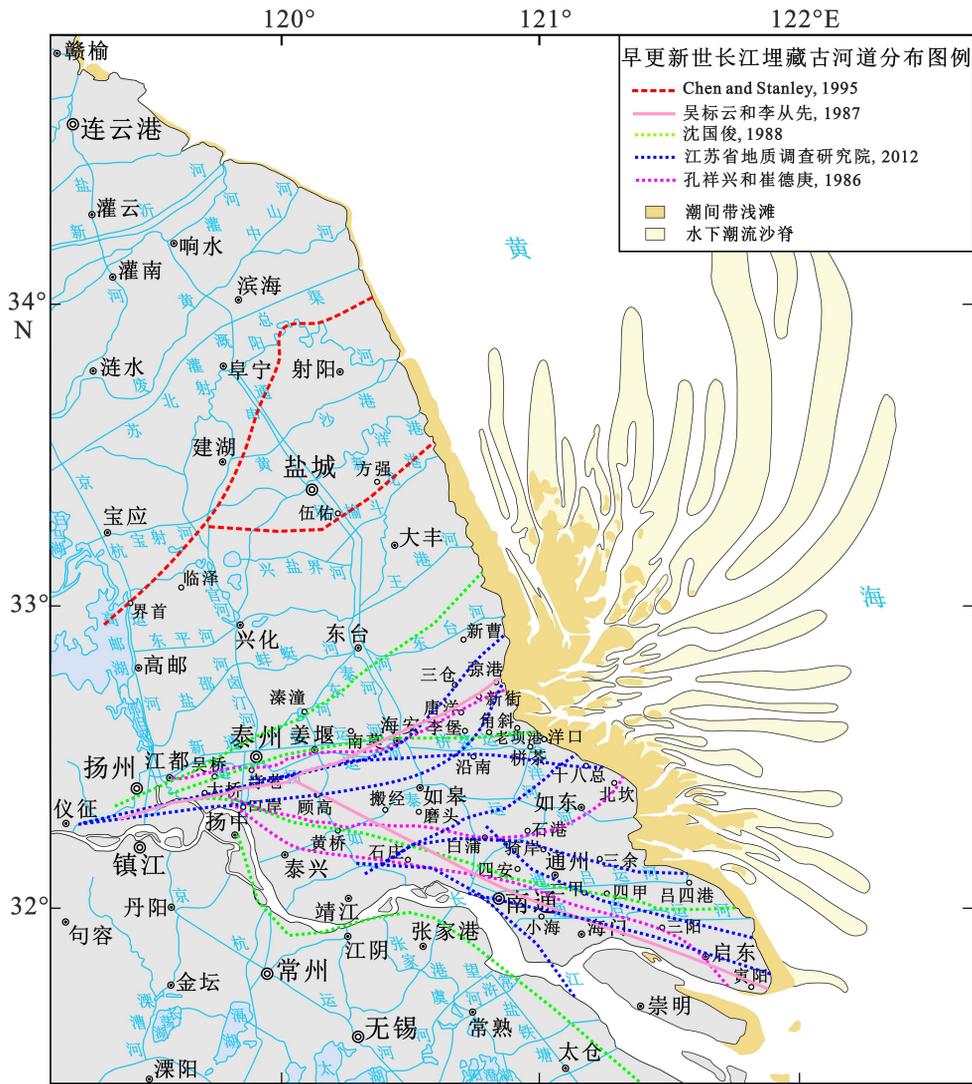


图3 苏北-南黄海西部早更新世长江埋藏古河道分布图(底图据文献[23]改绘)

Fig.3 Distribution of buried paleo-Yangtze River channels in the North Jiangsu and western South Yellow Sea during the Early Pleistocene (Base map modified after reference [23])

十八总入海的河道带来的物质最多;进入早更新世中期后,主河道由南向北转移,范围较早期有所扩大,主河道有三条,从北向南分别于十八总、吕四、鹿河入海;早更新世晚期以后,河道范围缩小,古河床位置发生迁移,主要有两条古河道分别于琼港、启东入海。此外,根据钻孔岩性、矿物学特征等资料,孔祥兴和崔德庚^[12]在长江北岸泰州寺巷-泰县(今姜堰)-海安-唐洋-琼港一线以南初步查明了三支长江古河道,并分别于琼港、北坎、启东入海,推测为第四纪时期形成。江苏地质局第一水文地质队^[33]在对镇江、高邮地区进行水文地质普查时,根据物探、钻探资料,发现测区长江段经过多次变迁、摆动,早更新世后期至中更新世中期,为淮河、长江均发育的旺盛阶段,长江古河床主流线大致为仪征南-施桥-大桥-口岸;河道在镇扬以西为喇叭形

谷地,镇扬以东长江呈扇形散开,具有较宽的河床摆动区间。

南黄海陆架在第四纪时期是海水进退反应灵敏区,第四纪冰期时代,每一次海面下降而导致的古海岸线后退、河口伸展,都会在大陆架刻切出主流与支流河谷,形成纵横交织的河网水系,在间冰期海面回升以后,迅即遭受沉积掩埋^[34]。研究表明,自早更新世晚期开始,古长江长期对南黄海陆架的沉积起作用,在南黄海西部的QC2孔中发现了较厚的早更新世晚期(0.97~0.73 MaBP)古长江三角洲的三角洲前缘相沉积^[35]。但是,对于南黄海西部的早更新世长江埋藏古河道的研究报道目前还极少。

2.2 中更新世长江埋藏古河道分布

目前钻孔研究揭示的中更新世长江古河道主

要在扬州-泰州-姜堰-海安-弼港一线以南摆动, 曾于弼港、栟茶、十八总、如东、吕四港、寅阳等地区入海(图 4)。吴标云和李从先^[31]认为中更新世早期长江侧向侵蚀堆积发展迅速, 古河道不断增宽, 形成泰县(今姜堰)、黄桥、靖江之间的宽阔江面, 河床不断由北向南、由西向东推移, 此时主河床在大桥、口岸、顾高庄、黄桥、伴今(今搬经)、糜头、如皋、白蒲、双甸、骑岸一带。江苏省地质调查研究院^[32]则认为该阶段长江古河道加宽, 北部岸线与前期大致相当, 南界大致位于现长江以南, 在如皋-南通以西有两条主要河道, 以东分叉为四条, 分别在弼港、十八总、鹿河、寅阳入海。进入中更新晚期, 吴标云和李从先^[31]的研究表明流水侵蚀加剧, 长江河床深切, 形成了侵蚀型河谷, 河床比中更新世早期有显著退缩、河面变窄, 且往北迁移, 古河道主弘

线在红桥、大桥、口岸、伴今(今搬经)、如皋、双甸、马塘、丰利、光荣等呈带状延伸, 形成近东西向流入大陆架。江苏省地质调查研究院^[32]认为该时期形成了第四纪以来最窄的侵蚀型河谷, 主河道主要分布于红桥-黄桥-双甸, 在双甸分叉, 一条折向十八总入海, 一条折向如东入海。沈国俊^[13]指出中更新世长江有五条古河道, 除了早更新世四条仍在上述地段摆动发育外, 第五条是上述第四条古河道在现今常州分叉, 沿无锡、苏州、昆山南进入上海市区。Chen and Stanley^[14]则认为中更新世古长江流经苏北平原中部地区并分别于弼港北和新洋港附近入海。此外, 在南黄海陆架地区也发现了中更新世时期的长江埋藏古河道(图 4), 顾兆峰和张志珣^[36]对南黄海西部浅层地震剖面的研究表明, 中更新世晚期古长江水系自南黄海南部入海, 分布范围偏西

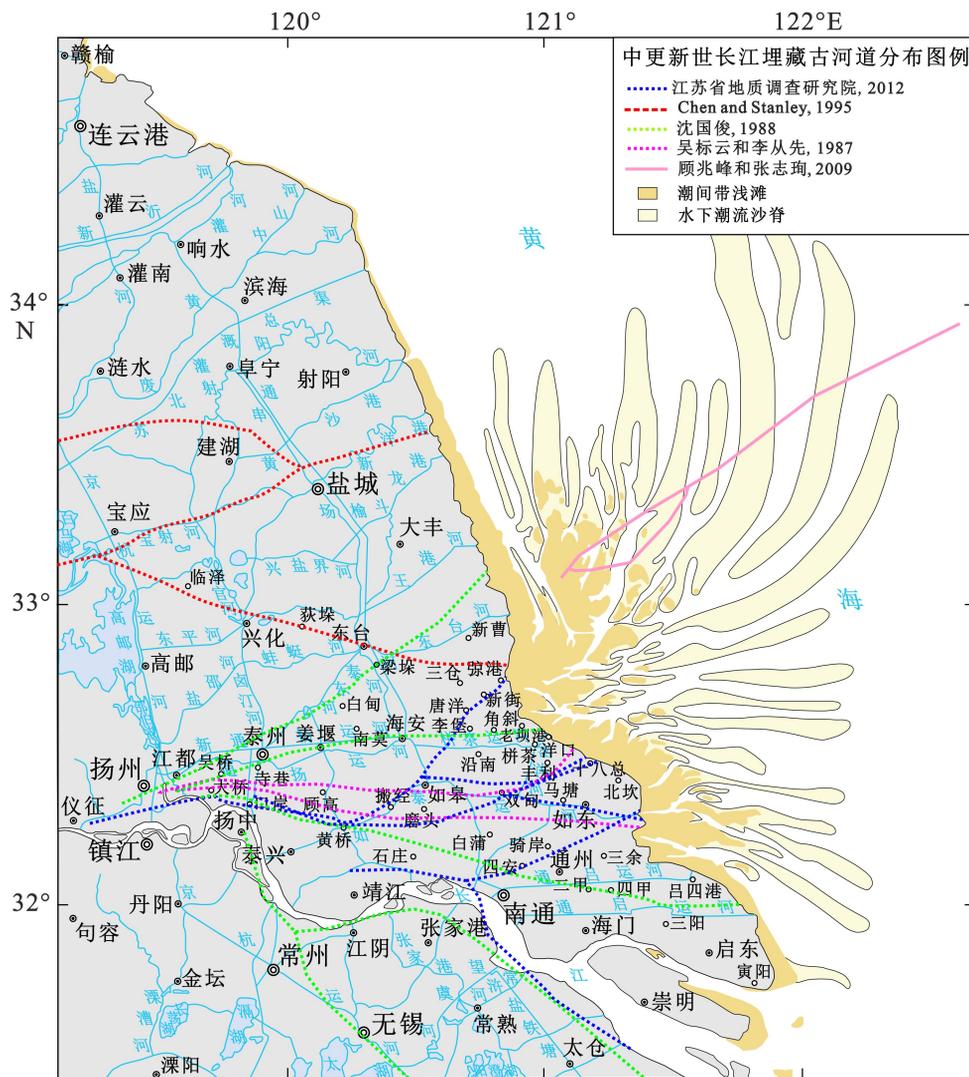


图 4 苏北-南黄海西部中更新世长江埋藏古河道分布图 (底图据文献 [23] 改绘)

Fig.4 Distribution of buried paleo-Yangtze River channels in the North Jiangsu and western South Yellow Sea during the Middle Pleistocene (Base map modified after reference [23])

且较小,仅发育一条宽深主河道。

2.3 晚更新世长江埋藏古河道分布

2.3.1 苏北东南部长江埋藏古河道分布

钻孔揭示晚更新世以来长江古河道主要在扬州-泰州-姜堰-海安-琼港一线以南摆动,曾于琼港、老坝港、栟茶、十八总、北坎、东灶港等地区入海(图5)。吴标云和李从先^[31]研究认为,晚更新世早期,气候普遍回暖,长江河床摆动较频繁,此时古河床北岸于江都、泰州、泰县(今姜堰)、如皋、南通县(今通州)、海门四甲、启东一线以南,南岸于红桥、八桥、靖江、沙洲、太仓、上海一线以北,组成自北西向东南呈宽带状河流东流入海。晚更新世晚期,随着大理冰期的到来,河流侵蚀能力加剧,长江再次进入垂向侵蚀为主的发育阶段,主河道在大

桥、口岸、黄桥、伴今(今搬经)、糜头(今磨头)、石庄、南通、三阳、南阳、东海一线^[31]。江苏省地质调查研究院^[32]则认为晚更新世晚期长江主河道改道频繁,早时主河道位于六圩-红桥-黄桥,在黄桥分汊,一条汊向北东方向于十八总入海,另一条向南于东元入海;中时仪征-红桥-扬中-泰州-如皋-如东-南通-海门地区处于主河道位置;晚时长江河道的侵蚀下切作用强烈,此时主河道分布于营房-红桥-扬中-泰兴-四安,在四安分汊,一条汊向北东方向经骑岸-北坎入海,另一条向东南经通州-余东-吕四和启东两处入海,还有一条向南经小海-鹿河入海。继大理冰期海退以后,海水又一次接踵而来,大约 $(2.5\sim 3.9)\times 10^4$ aBP,海水自东向西推进,长江古河道北岸仍在仪征、江都、泰州、海安一线以南,南岸在镇江、扬中、江阴、福山、浏河、上海一线以北,

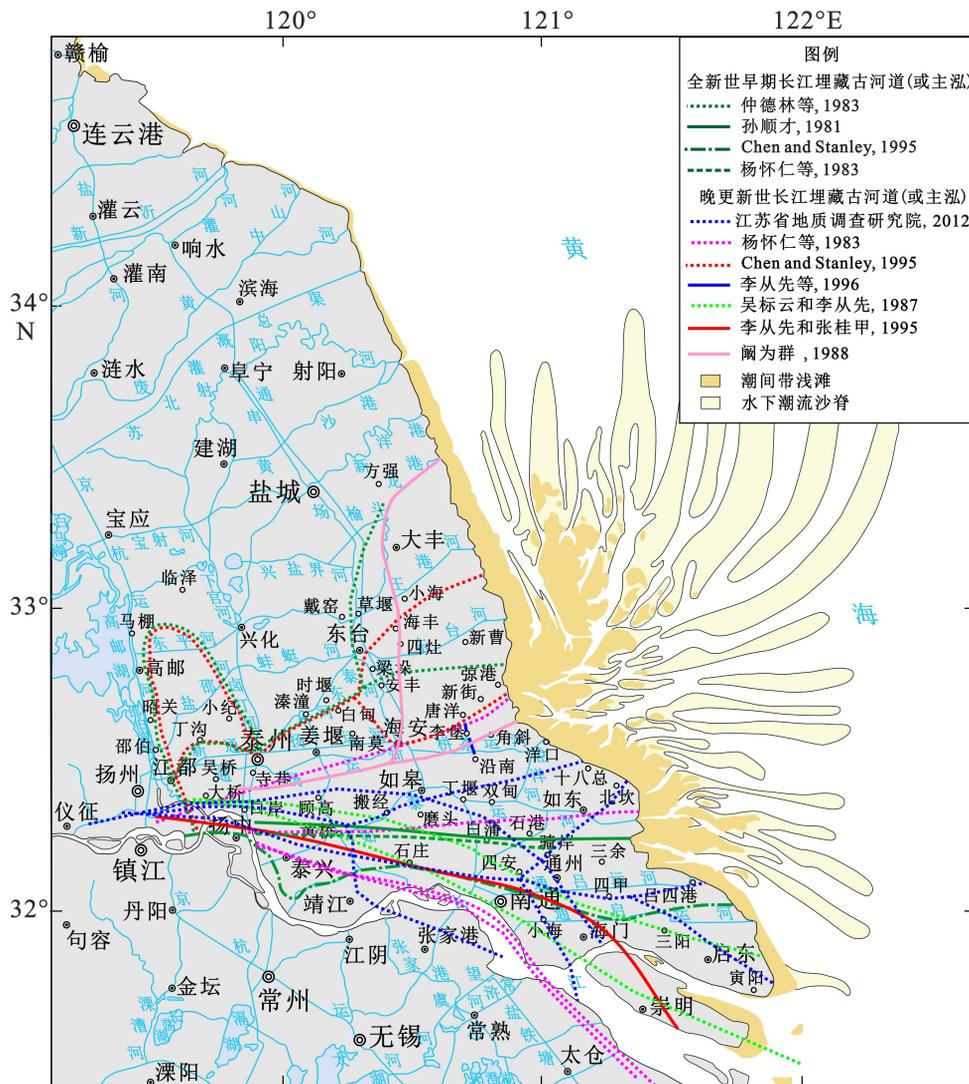


图5 苏北平原东南部晚更新世以来长江埋藏古河道分布图(底图据文献[23]改绘)

Fig.5 Distribution of buried paleo-Yangtze River channels in the southeastern North Jiangsu Plain since the Late Pleistocene

(Base map modified after reference [23])

形成东西向南偏转的宽阔的河流^[31]。大理晚期海面开始下降, 海岸逐渐东退, 大约 $(1.5\sim 2)\times 10^4$ aBP, 世界性海面下降到最大幅度, 形成长江深切型侵蚀河谷自然景观, 此时长江古河床经红桥、口岸、黄桥、南通、崇明呈带状, 自西北向东南延伸, 一直伸向东海大陆架^[31]。此外, 沈国俊^[13]指出本阶段长江共有四条古河道, 在中更新世五条河道范围内摆动发育时, 其中第三条与第四条古河道逐渐拓宽合并成一条主河道, 形成与今南京以东大体一致的长江干流, 而其它河道则被逐渐掩盖在全新世沉积之下。Chen and Stanley^[14]则认为晚更新世时期长江古河道经溱潼至后港处分为南北两支, 分别于琼港、川东港附近入海。阚为群^[37]的研究还发现古长江北支谷地, 位于盐城-大丰、东台-小海、海安-头灶一带硬土层缺失的狭长地带。李从先和张桂甲^[38]根据大量钻孔资料, 也揭示出晚第四纪现今长江三角洲地区存在自镇江、扬州向东南延伸至海的长江古河谷, 主河谷走向 NWW-SEE, 宽数十至百千米, 主河谷的深度由镇江、扬州地区的 50~60 m 至河口地区的 80~90 m, 古河谷形成于末次冰期低海面时期。另外, 地质雷达探测资料表明, 在苏北沿南-李堡-唐洋-三仓一线存在 3 处长江支汊河谷, 古河

谷主要在李堡之南, 一处宽 1 300 m, 最大深度 30 m, 另一处宽 4 550 m, 第三处古河谷在李堡以北, 宽 1 850 m, 深度小于 20 m^[15]。

2.3.2 南黄海西部长江埋藏古河道分布

自耿秀山^[34]首次勾勒出中国东部陆架残留古河道网系以来, 黄东海陆架古河道不断有新的发现。特别是对于长江埋藏古河道, 在南黄海陆架区被大量发现, 这些古河道主要形成于 MIS3 晚期至末次冰期极盛期, 具有区域性发育的特点, 多从江苏海岸的辐射沙脊群一带进入, 向北北东方向延伸, 流入黄海盆地(图 6)。目前对这些古河道已经深入到古水系河型^[18]、古水流估算^[7]等的研究。

这些陆架区埋藏古河道主要依据浅地层剖面探测资料及部分钻孔来识别, 如秦蕴珊等^[39]通过浅地层剖面记录在南黄海西部发现形成于晚更新世末或全新世初低海面时期的埋藏古河道 60 多处, 包括古黄河、古长江等水系, 认为古长江水系位于琼港以东的浅海区, 由苏北近岸浅海区向东或东北、东南方向延伸。杨子庚^[17]根据浅地层剖面, 并结合海上钻孔与柱状样等资料, 也发现南黄海陆架在 $(4\sim 2)\times 10^4$ aBP 期间广泛发育了古长江水系及古长江三角洲, 古长江由两条近于平行的主要河道带

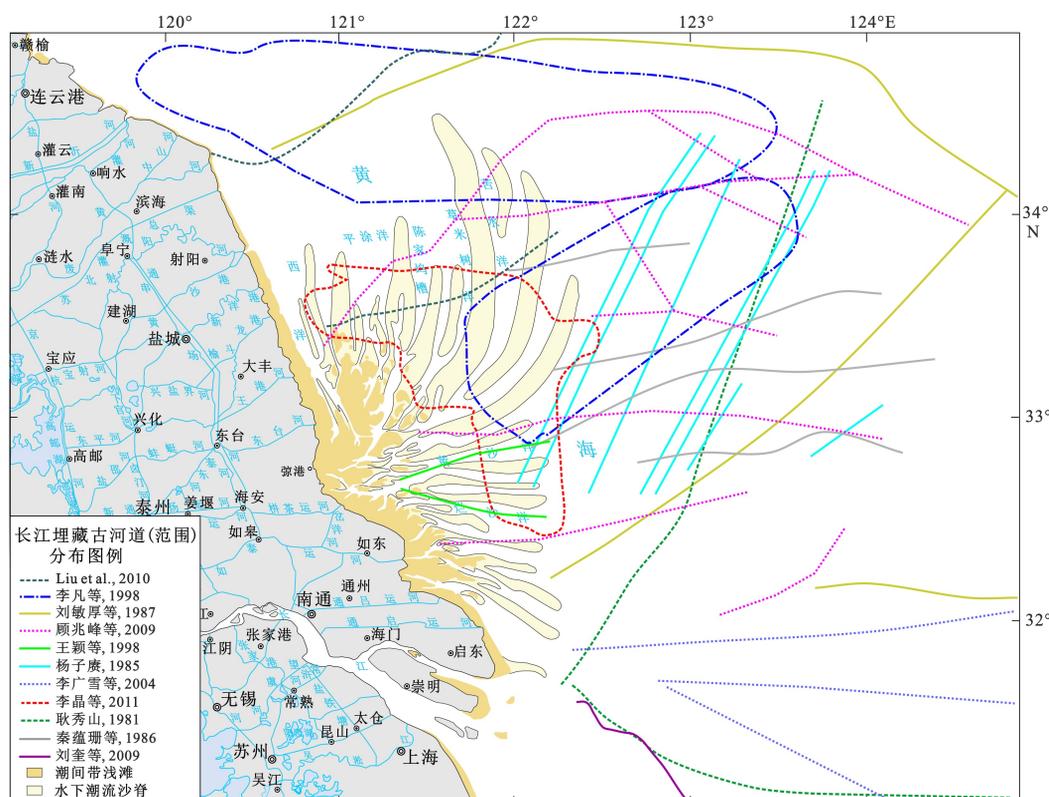


图 6 南黄海西部晚更新世长江埋藏古河道分布图(底图据文献[23]改绘)

Fig.6 Distribution of buried paleo-Yangtze River channels in the western South Yellow Sea during the Late Pleistocene

(Base map modified after reference [23])

组成,还有一些平行于主河道带的单独的河道,从现代长江口及苏北的如东一带开始向北北东方向延伸,流入黄海盆地。王颖等^[40]根据地震剖面与钻孔资料,发现埋藏谷普遍存在于南黄海西部近岸地区,并形成规模的体系分布,认为古长江晚更新世与全新世在江苏海岸的出口位于黄沙洋-烂沙洋一带。李凡等^[41]通过大量高分辨率浅层地震剖面,在黄海发现了100多处理藏古河道断面,认为北部古河道为古黄河水系,南部为古长江水系,二者有可能一度汇合于南黄海中部,推测这些古河道可能形成于 $(2.5\sim 0.9)\times 10^4$ aBP的低海面时期。李晶等^[42]也发现南黄海浅部大范围存在埋藏古河道、埋藏古三角洲等古地貌形态,晚更新世中晚期埋藏古河道主要分布于研究区西北部的射阳河口外、中部与东北部,具有区域性发育的特点。以上研究表明,末次冰期长江入海主流路应该曾经经过南黄海地区,但对于长江主流路的方向问题还存在较多争议,未有定论。但也存在不同意见,如夏东兴和刘振夏^[4]通过浅地层剖面及钻孔资料,认为长江盛冰期入海流路为目前黄海、东海交界地区,在济州岛附近注入冲绳海槽北端。而李广雪等^[5]则认为长江口外的6条大型古河道系统是末次冰期长江在东海陆架平原上的主要流路,古河道分布与现在海底带状高地形有对应关系。

此外,刘敏厚等^[43]研究认为 1.5×10^4 aBP整个中国东部陆架发育了纵横交织的古河网,在宽阔的陆架谷中常有数条河流成因的埋藏谷并列存在,并且其中位于南黄海西部的古黄河南系和古长江北系陆架谷在 $(7\sim 4.2)\times 10^4$ aBP就为河流谷道。Liu et al^[6]和孔祥淮等^[7]利用4 100 km高分辨率浅层地震剖面资料,揭示出南黄海西部埋藏着复杂的树枝状古河道网,古河道形成于 $\sim 4.4\times 10^4$ aBP,分为北部、南部河道网,并推测研究区的古环境与当时的长江流域相似。顾兆峰和张志珣^[36]利用5 600 km浅层地震剖面资料,揭示了MIS6—MIS2阶段南黄海西部发育了3期埋藏古河道,古长江水系在南黄海西南部还发育多期古长江三角洲。王辉等^[44]利用380 km浅层地震剖面数据,并结合钻孔资料,也揭示了南黄海西部近岸西洋潮流通道区域存在数条沿北东方向延伸的古水道,推测为某古水系的一部分,很可能为古长江支流。

2.4 全新世长江埋藏古河道分布

对全新世时期长江古河道位置目前也存在不少争议(图5)。孙顺才^[45]认为全新世早期古长江河

口位于丁堰-白蒲一线入海。仲德林等^[16]通过卫片解译资料也发现早全新世长江古河道遗迹,认为西起仪征,经扬州东至江都,宽度一般在8~10 km,由江都向北到邵伯分为两条,一条由邵伯向东经丁沟至泰州;另一条由邵伯继续向北至高邮附近,然后向东再折向南,几乎呈“几”字形至泰州,汇合后再向东经溱潼至东台处又分为南北两支,分别在弶港和大丰以北入海。吴标云和李从先^[31]指出全新世早期长江古河床北岸在扬州、江都、泰州一线南缘,南岸在镇江、口岸、泰兴、靖江、石庄一线。杨怀仁等^[46]根据卫片及古地貌分析,提出晚更新世至全新世间,可能受科氏力及沿海地壳的持续掀斜运动等因素的影响,长江河道位置逐渐向南迁移,大理冰期前,古长江主流于镇江以东,经黄桥-海安-李堡一线入海;10 100±160 aBP前后,古长江河口干流则偏南经丁堰-白蒲一线入海。Chen and Stanley^[14]则认为全新世古长江干流流经泰兴-黄桥-石庄-通州-吕四港一线入海。

3 研究存在的主要问题

3.1 钻孔空间分辨率偏低

在已发表的研究区第四纪埋藏古河道研究成果中,有的研究采用几百个钻孔的联合剖面进行分析,有的研究则采用几个或几十个钻孔进行分析,但相对于研究区的面积而言,这些钻孔数量仍然偏少,空间分辨率偏低,难以揭示出沉积环境变化过程的细节,特别是短时间尺度下变化过程的细节,从而影响古地理环境解释。这也是不同学者对长江古河道认识存在较大争议的主要原因之一。我们在长江三角洲北翼与苏北盆地过渡区获取了两个钻孔(M孔、Y孔,进尺均为90 m左右,孔位见图1)并进行过详细沉积学研究,尽管两个钻孔相距仅12 km左右,但研究结果表明两个钻孔记录的沉积环境差异非常大,其中南侧的Y孔曾发育长江古河道沉积,而北侧的M孔却记录了该处自中更新世以来一直处于古河间地位置^[25]。可见,在水动力条件复杂且面积如此广大的长江三角洲地区,地貌形态复杂多变,由于河床摆动和横向相变,相邻钻孔的地层记录都可能明显不同,因而仅根据少量钻孔则很难准确恢复古河谷的形态并揭示出不同时期长江古河道的准确位置^[47]。

已有研究也表明,在地层中追踪单独的一条河道非常困难,不但在平面图上是各种岩相带互相重

叠、互相切割,而且在纵剖面上也是交互混合的,古河道的最后一幕在后期快速沉降掩埋的条件下才可以被保留下来^[48]。此外,长江三角洲位于构造沉降带,年均沉降速率为1~2 mm^[31],苏北盆地第四纪以来不仅受长江改道迁移影响,同时也多次受黄河、淮河改道侵扰,加之多次海侵、海退的变动影响,造成了本区第四纪沉积环境演化与地貌变化更加复杂,出现复杂的水平相变和垂直层序,又因河口地区易遭受后期改造,地层缺失和间断较为常见,且间断时间长,因此在地层中判识长江古河道的准确位置会更加困难。

3.2 古河道判识依据有待商榷

对于长江古河道沉积一般依据钻孔中含砾砂层来判断和恢复,例如目前通常认为埋深70~90 m的含砾砂层是末次盛冰期时的长江古河床位置^[31-32]。在缺乏明确的绝对年代数据的情况下,以这些“砾石层”作为长江古河道划分的标志是惯常做法。但是王富葆等^[49]通过对上海高分辨率钻孔资料(2400余个钻孔)的综合研究却对此提出了质疑,研究结果显示上海埋深70~90 m的含砾砂层其成因与长江无关,而应属海面较低时的滨岸沉积,部分可能为近源坡麓洪积。由于这些研究钻孔多为工程地质与水文地质钻孔,通常很长一个层段采一个代表样分析,采样密度较低,代表地层厚度过大,且很多钻孔仅留有岩性描述,缺乏绝对测年资料,很难评价和使用。即使对部分钻孔尝试使用一些绝对测年方法,但在海陆交互作用地区沉积过程中,由于暴风浪、强潮流等动力改造容易导致不同成因的剥蚀和沉积间断,造成沉积层缺失,很难找到完整和连续的剖面。因此,在长江三角洲地区仅根据钻孔砾砂层对比来判断长江古河床位置仍值得进一步商榷,结合可靠的年代地层框架与沉积物源判断结果会更加准确。

3.3 古河道形成时代存在争议

精确测年是海岸第四纪地层研究的难点,当前长江古河道研究中精确测年的钻孔很少,这也是目前对长江古河道位置认识存在较大差异的重要原因之一。近年来,随着传统测年方法精度的不断提高,以及新测年方法的不断出现和运用,长江三角洲地区埋藏古河道研究已经积累了一系列年龄数据,包括¹⁴C、光释光(OSL)、热释光(TL)、电子自旋共振(ESR)、古地磁等年龄,这为进一步认识本区古河道变迁提供了重要参考。然而,由于长江三角

洲地区沉积物来源的多样性及沉积环境的复杂性,如老沉积物再搬运、再沉积,使得测年结果多出现上、下层位年龄的倒转,测年结果不一定可靠。陈影影^[25]通过对长江三角洲北翼及邻区已有钻孔和柱状样地层¹⁴C测年数据进行系统梳理,发现测年材料多为含有机质的黏土质粉砂,其中不少测年结果并不可靠,可能是由于陆源碎屑沉积物中老碳再搬运沉积的混入,此时,¹⁴C测定的是沉积物的初始年龄,即沉积物被侵蚀和搬运之前的年龄,而不是堆积事件的年龄,堆积事件是更加晚近的事情^[50-51]。

由于受到测年的限制,对于MIS3之前的长江古河道,可靠的测年数据很少。如陈影影^[25]对长江三角洲北翼与苏北盆地过渡区M孔、Y孔分别选取2个样品进行了ESR测年,结果显示M孔样品的年龄倒置且偏年轻很多,而Y孔样品的年龄均偏老很多。江苏省地质调查研究院^[32]对长江三角洲地区部分钻孔选取了26个样品进行ESR测年,结果也发现约三分之一样品年代测试结果偏小。由于ESR还是一种比较年轻的测年技术,影响因素较多,有些机理还不十分明了;另外沉积物中的石英来源和搬运途径可能相异,埋藏时间也可能有先后,石英内可能含有不同的杂质(Ge、Al、Ti等),这些因素均会影响应用ESR技术测定沉积物沉积时的年龄^[52]。另外,在缺乏明确的绝对年代数据的情况下,将苏北和长江三角洲地区地层中存在的2~3层硬黏土层作为晚第四纪地层划分的标志是惯常做法。然而有的学者认为长江三角洲地区自上而下的第一硬黏土层形成于LGM^[53-54],有的学者则认为第二硬黏土层形成于LGM,而第一硬黏土层的形成与全新世中期的一次海退事件(对应于北大西洋第4冷事件,约5.5 kaBP)有关,并且苏北平原的第一硬黏土层是由该海退期间黄河南徙泛滥堆积而成^[55],还有学者认为要根据各地钻孔实际情况来判断第一和第二硬黏土层的年代归属^[56]。可见,依据钻孔硬黏土层这样的标志层来对比构建年代框架,也可能出现偏差。在陆架区,尽管钻孔与浅地层剖面对比分析已证明低海面时期南黄海陆架存在大量古河道系统,但是由于陆架区还缺少较深的钻孔资料,将埋藏古河道的发育与地层时代一一对应起来仍存在不少难度。

此外,迄今为止在长江东流水系建立的时限等问题上仍无法形成共识,存在重大争议,计有古近纪、渐新世/中新世之交、新近纪、晚上新世—早更新世、早更新世和晚更新世等多种观点。这就引发了一个有趣的问题:如果长江是一条古老的河流,

那么在长江三角洲地区发现早更新世、中更新世的长江埋藏古河道不足为奇。但如果长江是一条很年轻的河流,如Chen等^[57]认为长江在晚更新世早期(~120 kaBP)开始影响到现代三角洲河口地区,那么已发现的这些晚更新世之前的长江古河道从何而来?是判识有误?还是长江本身贯通较早,这些古河道实际存在?很多问题还需要今后进一步研究厘清。

4 研究建议

4.1 提高钻孔研究分辨率

本研究区尽管已有不少贯穿第四系的水文地质钻孔,但相对于本区几万平方千米的面积而言,这些钻孔数量仍然过于稀疏,难以揭示出变化过程的细节,分析所采用的空间分辨率还有待于进一步提高。而且一些早期的研究钻孔取芯率不高,取样间距很大,代表地层厚度过大,也难以真实和较高分辨率地揭示区域气候环境变化的过程和特征。此外,第四纪以来受新构造运动、气候变化、海面波动以及历史时期长江、黄河和淮河的变迁等因素影响,区内古地理古环境演化复杂,钻孔揭示的沉积地层纵横相变剧烈。海陆交互作用地区在沉积过程中由于暴风浪、强潮流等动力频繁改造,容易导致不同成因的剥蚀和沉积间断,故很难找到完整和连续的剖面,给古地理和古环境研究带来种种困难^[24]。在沉积层易缺失的海陆交互作用地区,今后可以尝试把不同地点的高分辨率沉积片段连接在一起,形成环境演化分析的理想沉积记录^[50]。因此,鉴于本区沉积环境演变的复杂性,建议进一步加强基础沉积学研究,不断提高分析的空间分辨率,加强多钻孔系统研究,并对区域典型钻孔高密度采样,精准判别沉积相,通过对高分辨率沉积记录的分析与解读,或许有望弄清本区的古河流地貌格局并查明第四纪长江古河道的埋藏分布特征。另外,还可以在本区现有钻孔资料积累的基础上,正确取舍数据资料,形成可靠数据集,进一步加强集成研究,也能够深化长江古河道分布和形成演变的认识。

4.2 建立第四纪高精度可靠年代标尺

作为一条源远流长的大河,古长江贯通以后流经的河口三角洲盆地必然留下相应的沉积地层和古地貌。因此,苏北-南黄海西部是研究长江古河道

变迁的一个关键研究区,但本区贯穿第四系的典型研究钻孔并不多,而具有精确年代标尺的钻孔更少。在区域大范围内对更多具有较好年代控制的钻孔进行系统的沉积学研究是解决研究区沉积过程复杂性等问题的关键。目前,对本区第四纪以来海侵层年代的确定,早更新世以古地磁资料为依据;中更新世及晚更新世主要依据古地磁及少量的光/热释光、铀系法测年,也有根据上、下海侵层的时代来推断;晚更新世晚期及全新世则有大量的¹⁴C测年资料及考古资料可以利用。前已述及,第四纪以来本区不仅受长江频繁改道迁移影响,同时多次受黄河、淮河改道侵扰,加之海侵、海退的变动影响,造成第四纪沉积环境变化非常复杂。因此,沉积物可能经历了多次的侵蚀、搬运与再沉积,沉积相复杂多变,地层往往不连续,很难获得较好的古地磁剖面,且¹⁴C、ESR等绝对测年数据也不一定可靠,而在没有测年数据的情况下如果仅依据钻孔里见到的硬黏土层或海侵层来划分对比地层也可能造成年代框架的不同认识,故年代问题依然是本区研究的难点,也是确定古河道形成时代的一大障碍。可靠年代地层框架的建立是研究和解释诸多地质问题的前提和基础,今后仍需加强应用和开发新的测年技术对海岸地区地层格架进行精确定年,也可结合不同时期河流入海物质通量变化、生物地层(孢粉)、沉积相和古环境等开展年代学综合研究。

4.3 加强长时间尺度物源研究

苏北盆地作为长江上游物质下泄的重要接纳场所,在流域演化历史与沉积物源-汇等研究方面具有独特的地区优势。过去主要从长江上游盆地^[58-59]、边缘海盆地^[60]沉积中寻找长江形成和演化的证据,明显缺乏下游苏北盆地中高分辨率长钻孔研究,仅有的部分长时间尺度物源研究钻孔也主要集中在长江河口及三角洲南翼部分地区,如上海浦东PD-99孔^[9]、Pd孔^[57]、上海奉贤DY03孔^[10]、苏州Sk10孔^[61]等,这几个钻孔均钻穿了晚新生代地层,可作为研究长江三角洲地区物源演化的代表性钻孔,并已通过古地磁的方法建立了精确的年代框架。相比之下,长江三角洲北翼及苏北盆地地区长时间尺度物源相关研究则显得比较薄弱,目前还鲜有研究对该区200~400 m厚的第四纪沉积物源及其与长江、黄河、淮河演化的关系做系统深入探讨,仅有XH-1孔(利用粒度和磁化率的相关性变化特征)^[8]、M孔和Y孔(利用矿物学与元素地球化学方法)^[25]、

TZK3孔(利用锆石 U-Pb 年龄)^[1],但这几个孔的物源示踪方法相对较单一、传统,近期物源分析方法发展较快,更多先进的物源判识方法有待在本区使用,以提高物源示踪的效果。尽管本研究区也有不少其他贯穿第四系的钻孔,但多为非第四纪研究钻孔,研究工作主要集中在地层、构造和石油地质、水文地质方面,研究程度相对较低,还有受研究目的和材料的限制,研究较粗略,很多钻孔资料仅留有岩性描述。建议今后进一步开展更多的深钻研究,加强本区长时间尺度钻孔沉积物源研究,以及钻孔间的对比,在本研究区大范围内对具有较好年代控制的钻孔进行系统的沉积物源研究也是解决区域沉积环境演变及长江贯通入海时间等问题的关键之一。

4.4 加强海陆记录对比研究

针对长江水系的贯通与演化历史,学者们已经在苏北和长江三角洲陆上地区进行了大量的研究,积累了丰富的资料。相比而言,对长江水系贯通与演化的长时间尺度海洋记录的研究还比较薄弱。目前,南黄海地区研究较详细的长钻孔主要有 QC2孔(108.83 m)和 CSDP-1孔(300.10 m),其中 CSDP-1孔贯穿第四系,钻孔底界年龄约为 3.5 Ma,该孔的磁性地层结果首次揭示了南黄海第四系底界(对应于该孔的深度为 227.16 m)^[6],可作为南黄海第四纪沉积层序的代表。海洋沉积提供了研究长江演化历史不可或缺的一环,长江古河道的迁移改道应该也在海洋沉积中保存记录,只有加强海陆记录的对比研究,将陆区与海区埋藏古河道的发育与地层时代一一对应起来,才能更准确地理解长江古河道迁移和演化机理。

5 结语

苏北-南黄海西部不同深度内埋藏着大量第四纪不同时期的长江古河道已经被许多研究所证实,其中以末次盛冰期至早全新世古河道最为发育,研究也最为深入。长江古河道在第四纪期间经历了多次迁移、往返摆动。各个时期的古河道总体表现为,温暖期河道扩张、多汊,以侧向侵蚀堆积为主,河床宽而广,且偏南;寒冷期以下切侵蚀为主,阶地发育,河床比较窄,且偏北^[31]。

由于不同学者对长江古河道研究的程度和认识还不平衡,所依据的材料也有差别,目前对本研究区第四纪以来长江古河道的变迁仍然有不少分

歧:一种观点认为受新构造运动的影响,第四纪以来长江古河道大致在扬州-泰州-姜堰-海安-琼港一线以南摆动,对于其具体入海位置则存在较多争议;另一种观点认为受长江三角洲地区差异性构造沉降与地形障碍影响,长江古河道自苏北平原、经北翼地区而逐渐南迁。此外,由于高分辨率地震剖面等先进海洋调查技术手段的使用,在南黄海西部也发现了一系列形成于晚更新世末期近东西向的长江海底古河道,但这些海底古河道是否可能与苏北陆上古河道对应,为长江陆上古河道在海里的延伸?尚有待于今后进一步深入探究。

苏北-南黄海西部面积广大且古地貌条件复杂,当前对长江埋藏古河道的研究仍然存在不少问题与难点,如钻孔空间分辨率偏低、古河道判识依据及形成时代还存在争议等,这也是造成目前对长江古河道位置认识存在较大差异的主要原因。作为长江上游物质下泄的重要接纳场所及研究长江古河道变迁的一个关键研究区,建议今后从提高钻孔研究分辨率、建立第四纪高精度可靠年代标尺、加强长时间尺度物源及海陆记录对比研究等方面进一步在本区开展深入研究。

致谢:江苏省地质资料馆在资料搜集过程中提供部分帮助,审稿专家提出了宝贵的修改意见,特此感谢!

参考文献 (References)

- [1] 吴忱. 华北平原古河道研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991. [WU Chen. Study on Paleo-Channels of the North China Plain[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1991.]
- [2] 赵艳霞, 徐全洪, 刘芳圆, 等. 近20年来中国古河道研究进展[J]. 地理科学进展, 2013, 32(1): 3-19. [ZHAO Yanxia, XU Quanhong, LIU Fangyuan, et al. Progresses of palaeochannel studies in China in the past 20 years [J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(1): 3-19.]
- [3] 鲍才旺. 珠江口陆架区埋藏古河道与古三角洲[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1995, 15(2): 25-34. [BAO Caiwang. Buried ancient channels and deltas in the Zhujiang River mouth shelf area [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1995, 15(2): 25-34.]
- [4] 夏东兴, 刘振夏. 末次冰期盛期长江入海流路探讨[J]. 海洋学报, 2001, 23(5): 87-94. [XIA Dongxing, LIU Zhenxia. Tracing the Changjiang River's flowing route entering the sea during the last ice age maximum [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(5): 87-94.]
- [5] 李广雪, 刘勇, 杨子庚, 等. 末次冰期东海陆架平原上的长江古河道[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 35(3): 284-289. [LI Guangxue, LIU Yong, YANG Zigeng, et al. Ancient Changjiang channel system in the East China Sea continental shelf during the last

- glaciation [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 35 (3): 284-289.]
- [6] Liu J, Saito Y, Kong X H, et al. Delta development and channel incision during marine isotope stages 3 and 2 in the western South Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2010, 278 (1-4): 54-76.
- [7] 孔祥淮, 刘健, 张勇, 等. 南黄海西部滨浅海区埋藏古河道研究[J]. *海洋科学进展*, 2013, 31 (3): 367-376. [KONG Xianghuai, LIU Jian, ZHANG Yong, et al. Study on buried channel systems in the western South Yellow Sea [J]. *Advances in Marine Science*, 2013, 31 (3): 367-376.]
- [8] 舒强, 张茂恒, 赵志军, 等. 苏北盆地XH-1钻孔晚新生代沉积记录特征及其与长江贯通时间的关联[J]. *地层学杂志*, 2008, 32 (3): 308-314. [SHU Qiang, ZHANG Maoheng, ZHAO Zhijun, et al. Sedimentary record from the XH-1 core in north Jiangsu Basin and its implication on the Yangtze River run-through time [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2008, 32 (3): 308-314.]
- [9] 范代读, 李从先, Yokoyama K, et al. 长江三角洲晚新生代地层独居石年龄谱与长江贯通时间研究[J]. *中国科学D辑: 地球科学*, 2004, 34 (11): 1015-1022. [FAN Daidu, LI Congxian, Yokoyama K, et al. Monazite age spectra in the Late Cenozoic of the Changjiang Delta and its implication on the Changjiang run-through time [J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 34 (11): 1015-1022.]
- [10] 黄湘通, 郑洪波, 杨守业, 等. 长江三角洲DY03孔沉积物元素地球化学及其物源示踪意义[J]. *第四纪研究*, 2009, 29 (2): 299-307. [HUANG Xiangtong, ZHENG Hongbo, YANG Shouye, et al. Investigation of sedimentary geochemistry of Core DY03 in the Yangtze Delta: implications to tracing provenance [J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29 (2): 299-307.]
- [11] 程瑜, 李向前, 赵增玉, 等. 长江三角洲地区TZK3孔碎屑锆石U-Pb年龄及其物源意义[J]. *地质力学学报*, 2018, 24 (5): 635-644. [CHENG Yu, LI Xiangqian, ZHAO Zengyu, et al. Detrital zircon U-Pb ages and its provenance significance in the TZK3 Core from the Yangtze River delta [J]. *Journal of Geomechanics*, 2018, 24 (5): 635-644.]
- [12] 孔祥兴, 崔德庚. 江苏省平原区晚新生代以来的古河道[J]. *江苏地质*, 1986 (2): 61-64. [KONG Xiangxing, CUI Degeng. Paleochannels on plain regions of Jiangsu Province since Late Cenozoic [J]. *Jiangsu Geology*, 1986 (2): 61-64.]
- [13] 沈国俊. 长江古河道的发现[C]//中国地质学会第四纪冰川与第四纪地质专业委员会. 第四纪冰川与第四纪地质论文集. 北京: 地质出版社, 1988: 203-206. [SHEN Guojun. Discovery of paleo-channels of the Yangtze River[C]//Commission on Quaternary Glaciology and Geology of the Geological Society of China. Contribution to the Quaternary Glaciology and Quaternary Geology. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 203-206.]
- [14] Chen Z Y, Stanley D J. Quaternary subsidence and river channel migration in the Yangtze delta plain, eastern China [J]. *Journal of Coastal Research*, 1995, 11 (3): 927-945.
- [15] 李从先, 万明浩, 陈庆强. 苏北沿南-三仓地区的古河谷及其地质意义[J]. *科学通报*, 1996, 41 (23): 2168-2170. [LI Congxian, WAN Minghao, CHEN Qingqiang. Paleovalley in the Yannan-Sancang area of Jiangsu Province and its geological significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41 (23): 2168-2170.]
- [16] 仲德林, 申宪忠, 夏东兴, 等. 全新世早期古长江海侵三角洲卫片初步解释[J]. *海洋科学*, 1983 (2): 16-17. [ZHONG Delin, SHEN Xianzhong, XIA Dongxing, et al. Explanation of satellite photography of the ancient Changjiang Delta region in early Holocene [J]. *Marine Sciences*, 1983 (2): 16-17.]
- [17] 杨子庚. 南黄海陆架晚更新世以来的沉积及环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1985, 5 (4): 1-19. [YANG Zigeng. Sedimentology and environment in South Yellow Sea shelf since late Pleistocene [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1985, 5 (4): 1-19.]
- [18] 刘奎, 庄振业, 刘冬雁, 等. 长江口外陆架区埋藏古河道研究[J]. *海洋学报*, 2009, 31 (5): 80-88. [LIU Kui, ZHUANG Zhenye, LIU Dongyan, et al. Study of the buried ancient channels in the continental shelf area out of the mouth of the Changjiang River in China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31 (5): 80-88.]
- [19] 雷宝华, 陈建文, 梁杰, 等. 印支运动以来南黄海盆地的构造变形与演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38 (3): 45-54. [LEI Baohua, CHEN Jianwen, LIANG Jie, et al. Tectonic deformation and evolution of the South Yellow Sea basin since Indosinian movement [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38 (3): 45-54.]
- [20] 郑光膺. 黄海第四纪地质[M]. 北京: 科学出版社, 1991. [ZHENG Guangying. Quaternary Geology of the South Yellow Sea[M]. Beijing: Science Press, 1991.]
- [21] 王颖, 张振克, 朱大奎, 等. 河海交互作用与苏北平原成因[J]. *第四纪研究*, 2006, 26 (3): 301-320. [WANG Ying, ZHANG Zhenke, ZHU Dakui, et al. River-sea interaction and the north Jiangsu Plain formation [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26 (3): 301-320.]
- [22] Liu J, Zhang X H, Mei X, et al. The sedimentary succession of the last~3.50 Myr in the western South Yellow Sea: Paleoenvironmental and tectonic implications [J]. *Marine Geology*, 2018, 399: 47-65.
- [23] 中国地图出版社. 江苏省地图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 2004. [China Map Press. Atlas of the Jiangsu Province[M]. Beijing: China Cartographic Publishing House, 2004.]
- [24] 李从先, 汪品先. 长江晚第四纪河口地层学研究[M]. 北京: 科学出版社, 1998. [LI Congxian, WANG Pinxian. Late Quaternary Stratigraphy of the Changjiang Delta[M]. Beijing: Science Press, 1998.]
- [25] 陈影影. 中更新世以来长江三角洲北翼沉积环境与物源演变[D]. 南京大学博士学位论文, 2016. [CHEN Yingying. Evolution of depositional environment and sediment sources of the northern Yangtze River Delta since the middle Pleistocene[D]. Doctor Dissertation of Nanjing University, 2016.]
- [26] 季云. 苏北海岸带弥港钻孔沉积相及沉积环境演化[D]. 南京大学硕士学位论文, 2015. [JI Yun. The core-recorded and sedimentary facies of late Pleistocene-Holocene environment evolution, Jianggang, northern Jiangsu coast, South Yellow Sea, eastern China[D]. Master Dissertation of Nanjing University, 2015.]
- [27] 郑光膺. 南黄海第四纪层型地层对比[M]. 北京: 科学出版社, 1989. [ZHENG Guangying. The Stratigraphic Correlation of the Quaternary Stratotype in the South Yellow Sea[M]. Beijing: Science Press, 1989.]
- [28] Li C X, Wang P, Sun H P, et al. Late Quaternary incised-valley fill of

- the Yangtze delta (China): its stratigraphic framework and evolution [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152(1-2): 133-158.
- [29] 江苏省地质矿产局第二水文地质工程地质大队. 江苏省徐淮盐地区水文地质工程地质综合评价报告(1: 50万)[R]. 1985. [The Second Hydrological Engineering Team of Jiangsu Geology and Mine Bureau. Comprehensive evaluation report of hydrogeology and engineering geology of Xuzhou-Huai'an-Yancheng, Jiangsu Province (1/500000)[R]. 1985.]
- [30] 顾家伟. 上新世以来苏北盆地与长江三角洲构造沉降史分析[J]. 地质科技情报, 2015, 34(1): 95-99, 106. [GU Jiawei. Tectonic subsidence analysis of Subei Basin and Yangtze Delta from the pliocene [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2015, 34(1): 95-99, 106.]
- [31] 吴标云, 李从先. 长江三角洲第四纪地质[M]. 北京: 海洋出版社, 1987. [WU Biaoyun, LI Congxian. Quaternary Geology of the Yangtze River Delta[M]. Beijing: China Ocean Press, 1987.]
- [32] 江苏省地质调查研究院. 长江三角洲地区(长江以北)环境地质综合调查评价报告[R]. 2012. [Geological Survey of Jiangsu Province. Comprehensive investigation and evaluation report of environmental geology of the Yangtze River Delta (northern Yangtze River)[R]. 2012.]
- [33] 江苏地质局第一水文地质队. 镇江幅、高邮幅1: 20万区域水文地质普查报告[R]. 1980. [The First Hydrological Engineering Team of Jiangsu Geology Bureau. 1/200000 regional hydrogeological survey report of Zhenjiang and Gaoyou[R]. 1980.]
- [34] 耿秀山. 中国东部陆架的海底古河系[J]. 海洋科学, 1981(2): 21-26. [GENG Xiushan. Submarine paleochannel systems on the continental shelf of eastern China [J]. *Marine Sciences*, 1981(2): 21-26.]
- [35] 杨子康. 晚松山时南黄海的古长江三角洲[J]. 第四纪研究, 1994(1): 13-23. [YANG Zigeng. Palaeo-Yangtze River Delta in the South Yellow Sea during late Matuyama chron [J]. *Quaternary Sciences*, 1994(1): 13-23.]
- [36] 顾兆峰, 张志珣. 南黄海西部浅部地层地震层序及其沉积特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(4): 95-106. [GU Zhaofeng, ZHANG Zhixun. Shallow seismic stratigraphy and sedimentary character in the western South Yellow Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(4): 95-106.]
- [37] 阚为群. 苏北中部沿海平原全新世沉积环境演变[D]. 华东师范大学, 1988. [KAN Weiqun. Evolution of the Holocene sedimentary environment of the coast plain in the middle-north of Jiangsu Province[D]. East China Normal University, 1988.]
- [38] 李从先, 张桂甲. 末次冰期时存在入海的长江吗?[J]. 地理学报, 1995, 50(5): 459-463. [LI Congxian, ZHANG Guijia. A sea-running Changjiang River during the last glaciation? [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1995, 50(5): 459-463.]
- [39] 秦蕴珊, 李凡, 唐宝珏, 等. 南黄海西部埋藏古河系[J]. 科学通报, 1986(24): 1887-1890. [QIN Yunshan, LI Fan, TANG Baojue, et al. Buried paleo-channels in the South Yellow Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1986(24): 1887-1890.]
- [40] 王颖, 朱大奎, 周旅英, 等. 南黄海辐射沙脊群沉积特点及其演变[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(5): 385-393. [WANG Ying, ZHU Dakui, ZHOU Lvfu, et al. Evolution of radiative sand ridge field of the South Yellow Sea and its sedimentary characteristics [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1998, 28(5): 385-393.]
- [41] 李凡, 于建军, 姜秀珩, 等. 南黄海埋藏古河系研究[J]. 海洋与湖沼, 1991, 22(6): 501-508. [LI Fan, YU Jianjun, JIANG Xiuhang, et al. Study on buried paleo-channel system in the South Yellow sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1991, 22(6): 501-508.]
- [42] 李晶, 张志, 张维冈, 等. 南黄海浅部埋藏古地貌的特征、分布及其工程影响[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(8): 48-52. [LI Jing, ZHANG Zhi, ZHANG Weigang, et al. Shallowly-buried paleo-geomorphological features and distribution in the South Yellow Sea and their influence on marine engineering [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2011, 27(8): 48-52.]
- [43] 刘敏厚, 吴世迎, 王永吉. 黄海晚第四纪沉积[M]. 北京: 海洋出版社, 1987. [LIU Minhou, WU Shiyong, WANG Yongji. Sedimentology of the Yellow Sea During the Late Quaternary[M]. Beijing: China Ocean Press, 1987.]
- [44] 王辉, 夏非, 张永战, 等. 江苏中部海岸西洋潮流通道区域晚更新世古地貌与沉积体系研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(3): 134-142. [WANG Hui, XIA Fei, ZHANG Yongzhan, et al. Paleo-geomorphology and sedimentary systems of the Xiyang tidal channel on the central Jiangsu coast at the late Pleistocene [J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(3): 134-142.]
- [45] 孙顺才. 长江三角洲全新世沉积特征[J]. 海洋学报, 1981, 3(1): 97-113. [SUN Shunca. Deltaic sediments of the Changjing delta and its characteristics [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1981, 3(1): 97-113.]
- [46] 杨怀仁, 韩同春, 杨达源, 等. 长江下游晚更新世以来河道变迁的类型与机制[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 1983(2): 341-350. [YANG Huairan, HAN Tongchun, YANG Dayuan, et al. Processes and causal mechanism of migrations of the Changjiang (Yangtze river) since late pleistocene [J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 1983(2): 341-350.]
- [47] 曹光杰, 王建, 屈贵贤. 末次盛冰期以来长江河口段河道演变研究综述[J]. 地球科学进展, 2006, 21(10): 1039-1045. [CAO Guangjie, WANG Jian, QU Guixian. An overview of the research on channel evolution in the Yangtze River mouth region since the Last Glacial Maximum [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(10): 1039-1045.]
- [48] 李庆忠. 近代河流沉积与地震地层学解释[J]. 石油物探, 1994, 33(2): 26-41. [LI Qingzhong. Recent river sediments and seismic stratigraphic interpretation [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 1994, 33(2): 26-41.]
- [49] 王富葆, 曹琼英, 李弘, 等. 上海市15-17 kaBP的古地貌与工程地质条件[J]. 上海地质, 2002(83): 19-24. [WANG Fubao, CAO Qiongying, LI Hong, et al. Paleogeomorphology and its engineering geological significance during 15-17 kaBP in Shanghai urban area [J]. *Shanghai Geology*, 2002(83): 19-24.]
- [50] 高抒. 中国东部陆架全新世沉积体系: 过程—产物关系研究进展评述[J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 845-855. [GAO Shu. Holocene sedimentary systems over the Bohai, Yellow and East China Sea region: recent progress in the study of process-product relationships [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(5): 845-855.]

- [51] Liu Z X, Xia D X, Berne S, et al. Tidal deposition systems of China's continental shelf, with special reference to the eastern Bohai Sea [J]. *Marine Geology*, 1998, 145 (3-4): 225-253.
- [52] 业渝光, 刁少波, 和杰, 等. 南黄海QC₂孔的ESR年代学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(1): 95-102. [YE Yuguang, DIAO Shaobo, HE Jie, et al. ESR chronology of well QC₂ in the South Yellow Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1996, 16(1): 95-102.]
- [53] 夏非, 张永战. 苏北平原龙冈LG孔晚第四纪地层与环境演化记录[J]. 地理研究, 2018, 37(2): 433-446. [XIA Fei, ZHANG Yongzhan. Late Quaternary strata and environmental evolution record of core LG in Longgang, north Jiangsu plain, China [J]. *Geographical Research*, 2018, 37(2): 433-446.]
- [54] 张振克, 谢丽, 张云峰, 等. 苏北平原MIS 3阶段海侵事件的沉积记录[J]. 第四纪研究, 2010, 30(5): 883-891. [ZHANG Zhenke, XIE Li, ZHANG Yunfeng, et al. Sedimentary records of the MIS 3 transgression event in the north Jiangsu plain, China [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(5): 883-891.]
- [55] 谢志仁. 江浙沿海平原及相邻陆架区一万八千年以来的海面变化[D]. 南京大学硕士学位论文, 1981. [XIE Zhiren. Sea level changes since 18 ka BP in the coastal plain of Jiangsu and Zhejiang province and its adjacent continental shelf area[D]. Master Dissertation of Nanjing University, 1981.]
- [56] 陈报章, 李从先, 业治铮. 长江三角洲北翼全新统底界和“硬粘土层”的讨论[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1991, 11(2): 37-46. [CHEN Baozhang, LI Congxian, YE Zhizheng. Holocene bottom boundary and “hardclay band” in the northern flank of the Changjiang River Delta [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1991, 11(2): 37-46.]
- [57] Chen J, Wang Z H, Chen Z Y, et al. Diagnostic heavy minerals in Plio-Pleistocene sediments of the Yangtze Coast, China with special reference to the Yangtze River connection into the sea [J]. *Geomorphology*, 2009, 113 (3-4): 129-136.
- [58] 张玉芬, 李长安, 王秋良, 等. 江汉平原沉积物磁学特征及对长江三峡贯通的指示[J]. 科学通报, 2008, 53(5): 577-582. [ZHANG Yufen, LI Changan, WANG Qiuliang, et al. Magnetism parameters characteristics of drilling deposits in Jianghan Plain and indication for forming of the Yangtze River Three Gorges [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(5): 577-582.]
- [59] 王节涛, 李长安, 杨勇, 等. 江汉平原周老孔中碎屑锆石LA-ICPMS定年及物源示踪[J]. 第四纪研究, 2009, 29(2): 343-351. [WANG Jietao, LI Changan, YANG Yong, et al. The LA-ICPMS U-Pb detrital zircon geochronology and provenance study of sedimentary core in the Zhoulao town, the Jianghan Plain, China [J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(2): 343-351.]
- [60] Zhang J, Wan S M, Clift P D, et al. History of Yellow River and Yangtze River delivering sediment to the Yellow Sea since 3.5 Ma: Tectonic or climate forcing? [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 216: 74-88.
- [61] 陈静, 王哲, 王张华, 等. 长江三角洲东西部晚新生代地层中的重矿物差异及其物源意义[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 700-708. [CHEN Jing, WANG Zhe, WANG Zhanghua, et al. Heavy mineral distribution and its provenance implication in late Cenozoic sediments in western and eastern area of the Changjiang River Delta [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(5): 700-708.]