

南黄海 MIS 3 时期古黄河三角洲沉积范围的研究



刘德政¹, 夏非^{2,*}, 张永战³

¹ 中山大学海洋工程与技术学院, 广东珠海 519800

² 江苏第二师范学院城市与资源环境学院, 江苏南京 211200

³ 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏南京 210023

摘要: 在南黄海西部海区废黄河三角洲之下存在一个分布范围较大、形成时间更早的 (MIS 3 时期) 古黄河三角洲。通过详细梳理近几十年来相关研究成果, 对本区 MIS 3 时期古黄河三角洲沉积范围主要有三类观点: 第一类认为其分布于 35°45'N~34°30'N, 123°E~124°E 之间, 前缘位于深水区; 第二类认为其分布于山东半岛南部 (36°N 附近) 至 34°45'N, 120°E~123°15'E 之间, 前缘位于浅水区; 第三类认为其南北方向上由海州湾至 33°15'N, 东西方向上由近岸至 123°E 之间, 前缘位于浅水区。综合分析浅地层地震剖面、钻孔沉积物年代及长江、黄河沉积物特征等资料表明, 目前存在对三角洲的判识依据有待商榷、研究分析所采用的钻孔时间分辨率偏低、三角洲物质来源不确定性等问题。为明确 MIS 3 时期古黄河三角洲沉积范围, 今后需在深入认识三角洲沉积反射层理与结构、提高钻孔时间分辨率、精细三角洲物质来源及加强陆域古三角洲分布情况的探索等方面进一步开展深入研究。

关键词: 古三角洲; 古黄河; 沉积范围; MIS 3; 南黄海陆架

DOI: [10.57237/j.res.2024.01.001](https://doi.org/10.57237/j.res.2024.01.001)

The Sedimentation Range of the MIS 3 Old Yellow River Delta, South Yellow Sea

Liu Dezheng¹, Xia Fei^{2,*}, Zhang Yongzhan³

¹ School of Ocean Engineering and Technology, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519000, China

² School of Urban, Resource and Environmental Sciences, Jiangsu Second Normal University, Nanjing, 211200, China

³ School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: An old Yellow River delta with a larger distribution and earlier formation (MIS 3) under the Abandoned Yellow River delta in the western part of the South Yellow Sea (SYS). Based on the published studies and relevant research in recent decades, there are three points of view on the sedimentation range of the MIS 3 old Yellow River Delta in SYS: (1) It is distributed from 35°45'N to 34°30'N, between 123°E and 124°E, with the front edge located in deep water; (2) It is distributed from the southern part of Shandong Peninsula (near 36°N) to 34°45'N, between 120°E and 123°15'E, with the front edge located in shallow water; (3) It is distributed from Haizhou Bay to 33°15'N in the north-south direction, and from near shore to 123°E in the east-west direction, with the front edge located in shallow

*通信作者: 夏非, xiafei@jssnu.edu.cn

water. The comprehensive analysis of the shallow stratigraphic seismic profiles, borehole sediment ages and sediment characteristics of the Yangtze rivers and Yellow rivers indicates that there is questionable basis for delta identification, such as low temporal resolution of the boreholes and uncertainty of the deltaic material sources. In order to clarify the depositional extent of the MIS 3 old Yellow River delta, we must conduct further in-depth research in understanding of the deltaic sedimentary reflection structure, improving the borehole time resolution, refining the source of deltaic material and strengthening the exploration of the distribution of the terrestrial old delta.

Keywords: Paleodelta; Old Yellow River; Sedimentation Range; MIS 3; South Yellow Sea

1 引言

南黄海位于中国大陆架和朝鲜半岛之间，北以山东半岛东端的成山头 and 朝鲜半岛的常山串之间的连线为界与北黄海分开，南以启东角与济州岛的连线为界与东海分开，西接山东半岛和苏北沿岸，东临朝鲜半岛，地理范围为 $37^{\circ}30' \sim 39^{\circ}50'N$ ， $119^{\circ}20' \sim 126^{\circ}50'E$ ，面积约 $30 \times 10^4 km^2$ ，平均水深约 46m，最大水深 140m，为一半封闭型的陆架浅海（图 1）[1]。黄河和长江这两条大河目前虽不直接注入南黄海，但晚更新世以来，它们都曾在相当长的时间里注入南黄海，在低海面时期南黄海海面曾后退到陆架的边缘，河口向陆架延伸并不断输送巨量的泥沙，造就了各种规模不同的堆积地貌，沉积了不同厚度的沉积物层。因此，从某种意义上说，南黄海是黄河和长江两大河流交汇沉积的盆地[2]。

晚更新世以来，全球气候波动频繁，海平面经历了多次幅度不等的升降变化，这种变化影响了南黄海海域，形成海陆交互式沉积[3-5]。沉积动力学研究表明，与东部相比，南黄海中西部具有相对稳定、低能的沉积环境[6]，并且有来自大陆河流和沿岸流携带的丰富沉积物质供应[7]，在海水进退的过程中，发育各种规模的河谷、湖泊、沙脊、三角洲等地貌。其中，地处海陆交互地带的三角洲，对气候变化、构造运动、海面波动等尤为敏感，沉积记录了其形成时期的气候和环境等关键信息，是各种沉积作用最为发育和相互影响的区域，是一类非常重要的沉积地貌。因此，研究三角洲及其沉积范围对理清沉积层序模式、源-汇过程、海面变化、沉积物运移机制、区域环境演化等研

究都具有重要意义[8-11]。

从上世纪 80 年代以来，南黄海陆架的海底地形地貌、沉积地层结构、演化过程、地质灾害和油气资源等问题一直受到诸多学者的关注[8, 12-14]，先后开展了“1:100 万南通幅海洋区域地质调查”、“长江口以北沙泥质海岸带地区环境地质调查与评价”、“扬子大三角洲演化与陆海交互作用过程及效应研究”等多次大范围的南黄海综合调查项目，并取得了丰硕的研究成果[15-18]。其中，众多研究学者在这些调查过程中发现，南黄海还曾发育除 AD1128-1855 废黄河三角洲之外，时间年代更早的 MIS3 时期古黄河三角洲。

相比于南黄海晚全新世发育的废黄河三角洲，受限于缺乏海陆联合的大比例尺、高分辨率的晚第四纪地质、地球物理综合调查研究，缺少长时间尺度、可供对比研究的晚第四纪钻孔，以及研究资料的分散性和不完整性等因素的限制，目前对 MIS3 时期古黄河三角洲的沉积范围尚未形成统一的认识。基于南黄海陆架的多次调查研究，现已积累大量浅地层地震剖面、钻孔等数据资料（图 1-2），有条件对 MIS3 时期古黄河三角洲沉积范围进行探讨。本文拟从现有研究成果出发，对 MIS3 时期古黄河三角洲的沉积范围的主要认识进行梳理和归纳分类，剖析现有研究成果存在的问题和不足，并据此进一步阐明今后研究的重点方向和聚焦的关键问题、提出未来研究的工作展望，为后续深入研究 MIS3 时期古黄河三角洲的沉积范围提供研究思路和参考价值。

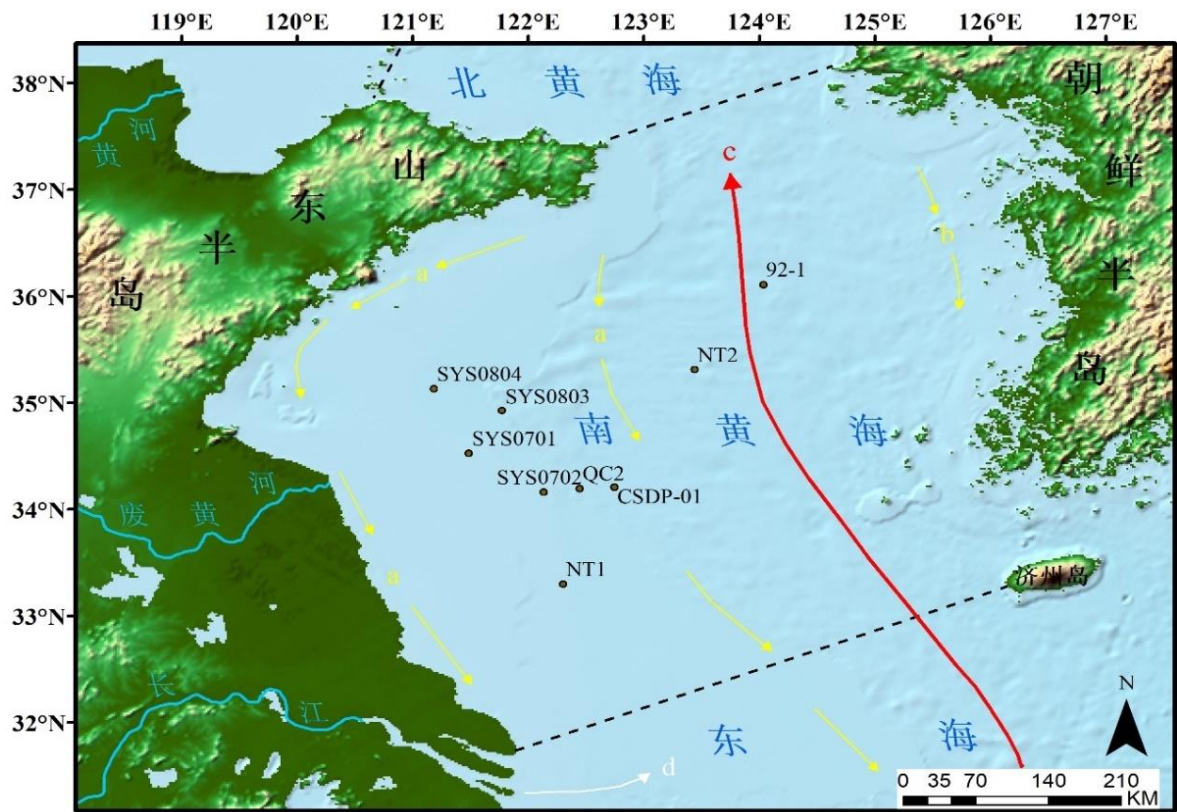


图 1 研究区概况图 (a: 黄海沿岸流; b: 朝鲜半岛西部沿岸流; c: 黄海暖流; d: 长江冲淡水)

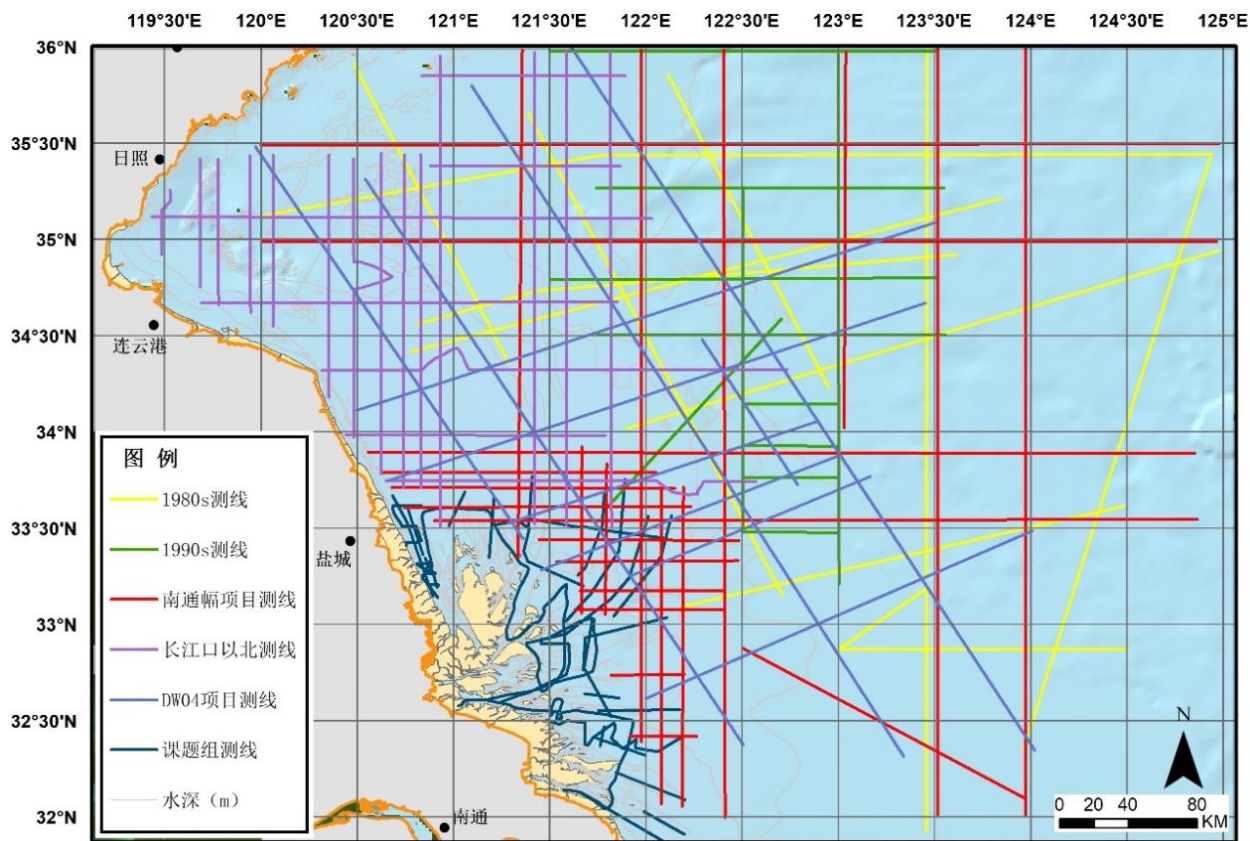


图 2 南黄海部分浅地层地震剖面测线

2 MIS 3 时期黄河三角洲沉积范围的认识及分类

2.1 认识

南黄海海域已开展了多次地质地貌-沉积调查, 积累了大量基础资料, 但受限于研究数据覆盖区域不同、研究数据质量差异、剖面解译主观性等各种主客观条件的影响, 目前, 对 MIS3 时期古黄河三角洲的沉积范围尚存在不同的观点与认识。李凡等[19]在南黄海中部浅地层地震剖面记录中, 在 70-80m 左右的深水区发现了埋藏古三角洲前缘堆积体, 并结合实测海底地形图、92-1 岩芯沉积相资料及前期对古黄河流路的研究[3], 认为其是距今 2.7 万 a 左右的黄河河口三角洲。赵月霞[20]根据南黄海西北部海域、山东半岛南部岸外 2000 多公里浅地层地震剖面的解译显示, 在东西向剖面上, 存在一由西向东前积角度逐渐变小至平行, 沉积厚度也逐渐变小的沉积单元 (U6), 该单元对应于 QC2 钻孔的 29.07~21.78m 段, 岩性和古生物揭示水深逐渐变小, 解释为海退时期形成的三角洲前缘-前三角洲沉积, 在浅地层剖面中分布于西北部和西南部。候方辉[21]基于地震剖面资料, 认为在玉木间冰期南黄海西北部和西南部各发育一个大型古三角洲, 推测西北部的古三角洲可能为古黄河流入南黄海所致。张志忠等[22]认为在南通幅调查区内, 按照古三角洲分布的相对位置可划分为 3 个区: 调查区西北部海州湾外区、苏北浅滩区和中北部深水区, 海州

湾外区的古三角洲极有可能为 MIS3 时期古黄河三角洲。陶倩倩[23]利用所获得的 3000 公里左右的高分辨率浅地层剖面资料, 揭示了海州湾及邻近区域在氧同位素 3 期形成了 3 期水下三角洲沉积体, 规模与全新世废黄河水下三角洲类似。顾兆峰和张志珣[24]依据层序地层学原理对南黄海西部地区采集的 5 600km 浅层地震剖面进行了层序划分与解释, 并与测区内的 QC2 孔联立对比, 晚更新世晚期古黄河水系在南黄海北部, 发育两期古黄河三角洲: 西部 I 期古黄河三角洲分布于 123°E 以西、34°50'N 以北的地区 (即海州湾外区), 分布较广泛, 发育较好, 三角洲相地层厚度较大。东部 II 期古黄河三角洲分布于 34°30'~35°35'N、123°30'~124°5'E 之间的区域。Liu 等[5]根据浅层地震剖面资料, 推断 MIS3 时期在南黄海西部陆架-50m 水深以内形成了一个大型古三角洲, 南北范围大致在 35.5°N~33.5°N 之间, 取自南黄海西部陆架的 SYS0701 岩心的粘土矿物学研究表明, 古三角洲由黄河沉积物形成。在前人 (Liu 等[5]) 对 MIS3 古黄河三角洲沉积范围认识的基础上, Huang 等[25]通过 CSDP01 孔及其南端的 NT2 孔物源分析表明, 古黄河三角洲南部边界应在 NT2 孔以北 (33°30'N 附近)。此外, 夏非等[26]发现辐射沙脊群西洋潮流通道的最北部浅层地震单元 U3 泥质沉积体顶板标高与 Liu 等[5]研究所发现的江苏北部岸外、南黄海西部的 MIS3 古黄河三角洲沉积体系近岸部分的顶板标高 (~25m) 一致, 推测 MIS3 古黄河三角洲的最南界一直延伸至大丰港一期 (33°19'N) 附近 (图 3)。

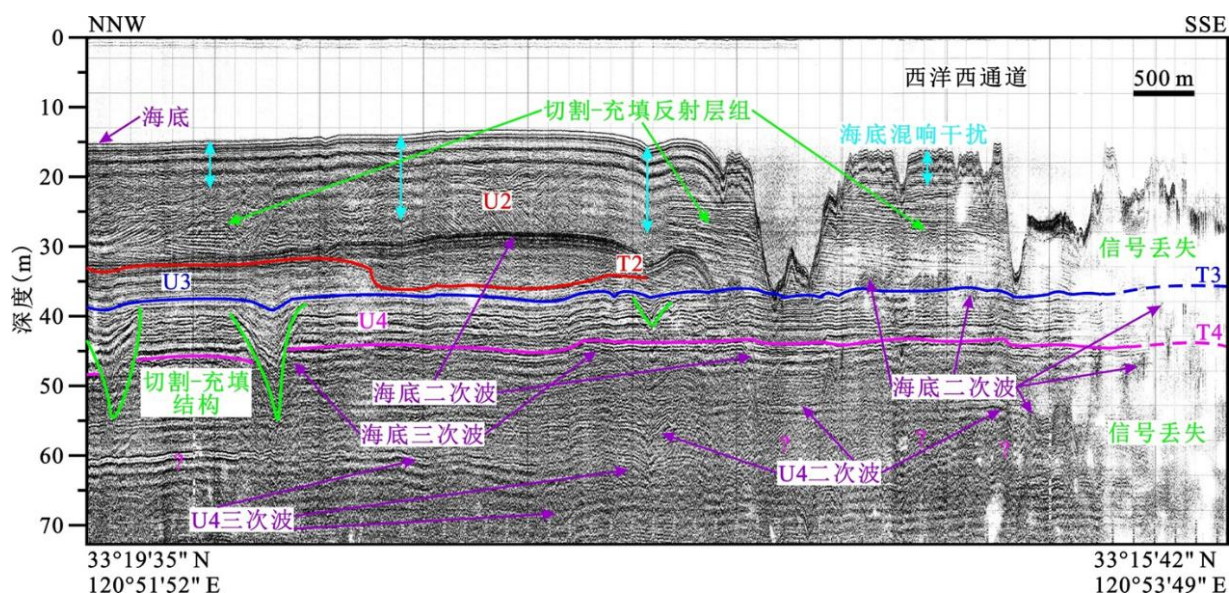


图3 江苏大丰港一期附近泥质沉积体 (U3) 典型地震剖面

2.2 分类

通过梳理和归纳上述研究认识,对 MIS3 时期古黄河三角洲的沉积范围主要为三类观点(图 4):第一类认为三角洲沉积范围界于 $35^{\circ}45'N\sim 34^{\circ}30'N$, $123^{\circ}E\sim 124^{\circ}E$ 之间,前缘位于深水区[3, 19, 24];第二

类认为三角洲沉积范围界于山东半岛南部($36^{\circ}N$ 附近)至 $34^{\circ}45'N$, $120^{\circ}E\sim 123^{\circ}15'E$ 之间,前缘位于浅水区以内[20-21, 23];第三类认为三角洲沉积范围南北方向上由海州湾至 $33^{\circ}15'N$,东西方向上由近岸至 $123^{\circ}E$ 之间,前缘位于浅水区以内[5, 22, 24-26]。

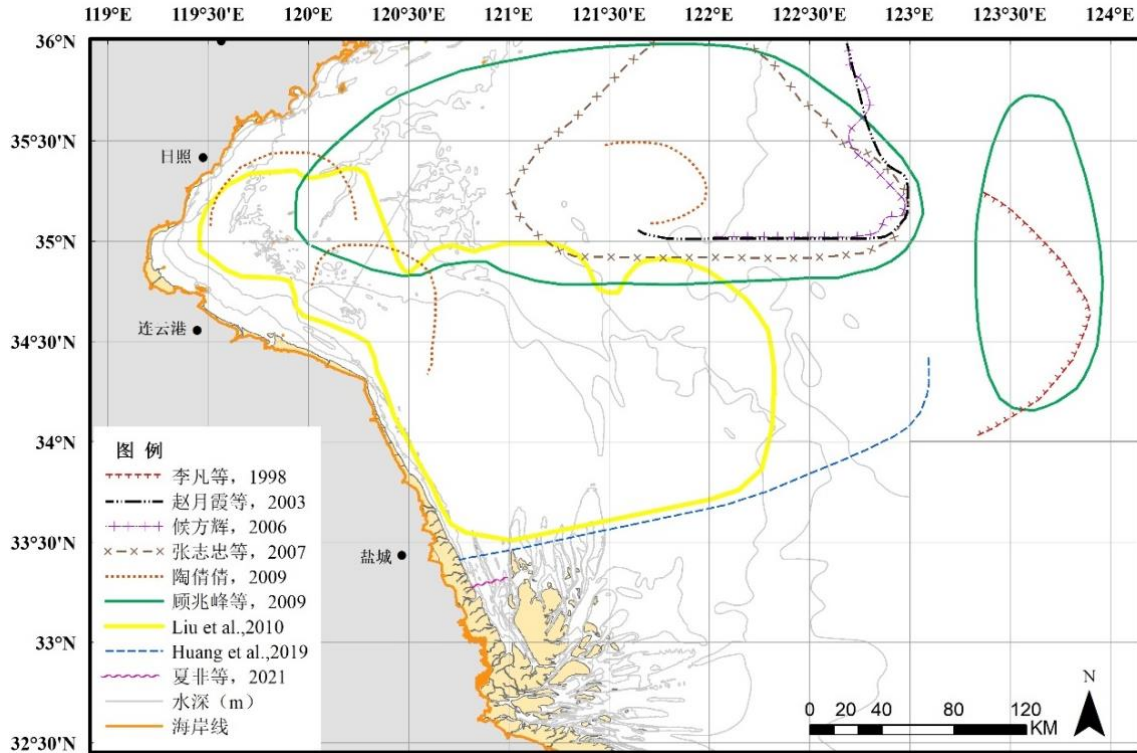


图 4 MIS3 时期古黄河三角洲沉积范围观点集成

3 存在问题与不足之处

3.1 古三角洲的判识依据有待商榷

一般而言,河流携带的沉积物沿地形坡度较大的三角洲前缘斜坡带逐渐向其下倾方向推进,沉积形成反射角度增大且呈斜层理的前积反射层(结构),是判断三角洲沉积相的主要标识[27]。然而,由于前积反射结构的复杂性,受到较多关注,其形成原因并非仅有三角洲前缘前积一种解释,还有多种解释:①重力流成因说,在特定条件下,前积斜层理的形成与重力流有关,高密度的浊流富集可导致沉积量的增大,形成围绕沉积中心辐聚的沉积层,当悬浮的泥沙逐渐沉淀,沉积层的坡度逐渐增大至某一程度时,高密度流越过坡顶转换为重力流,倾向于向下坡向海方向移动,

由此形成平行的前积斜层理[28](图 5A);②重力滑塌说,孙家淞等[29]认为,自 AD1855 黄河北归后,废黄河三角洲不断遭受冲刷侵蚀和重力作用,在三角洲前缘陡坡处受到波浪、潮流的侵蚀,坡度变得更陡,在重力作用下产生滑塌,由此产生了小凹槽,在潮流作用下凹槽进一步变为潮沟,此后又遭受波浪的冲刷,使东坡陡、西坡缓,一级滑塌体不断下降。潮流的往返作用,使潮沟加深变大,坡度更陡。在其内侧,由于外缘潮沟下切,坡度变陡,在重力作用下又产生了二级滑塌体和新的凹槽,以此类推往复进行,形成角度增大的前积层理(图 5B);③下伏地形说,李子星[30]发现废黄河三角洲内部层理倾角增大的转折点位置与其下伏地形的转折的位置保持同步,说明高角度的斜层理与地形有关;④小型阶梯状正断层说,当地震资料质量不太好和某些小型阶梯状断层中间断距大、上下断距小或无断距时,容易把断层现象误认为

前积现象[31] (图 5C)；⑤绕射波干涉说，地震剖面由于未偏移或偏移后未完全归位，不整合面上或断点处的绕射波残留下来与地层反射发生干涉，由于绕射

点两侧的地层不同，在地层反射强的一侧干涉后绕射波被压制，在地层反射弱的一侧，干涉后绕射波相对突出，形似前积反射[31]。

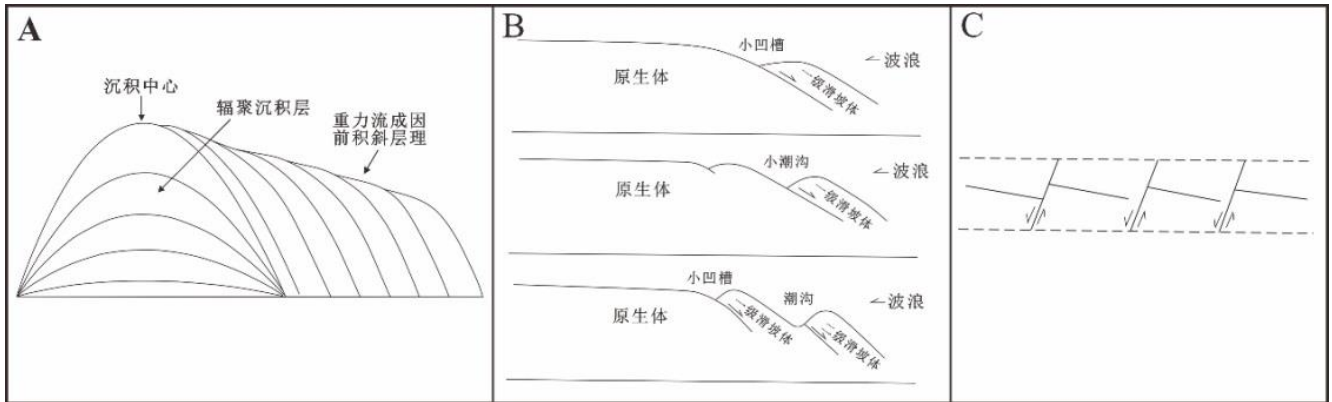


图 5 三角洲前缘斜层理反射层成因示意图

前积反射的复杂性表明，在浅层地震剖面中显示的前积斜层理反射并非一定指示着三角洲沉积相，仅单独依据前积反射斜层理在浅层地震剖面中识的三角洲沉积和圈定三角洲沉积边界范围是值得商榷和思考的。

然而，研究区大量的浅层地震剖面表明，三角洲在浅层地震剖面上的主要识别依据——典型的斜交前积反射结构、明显的下超和顶超现象、且层组内的前积角度不断变化，也并非是识别三角洲沉积的唯一标准。由于三角洲前缘厚度渐小，内部层理倾斜反射角度渐小，并逐步变为水平层理水平反射的前三角洲，最终消失[32]，故三角洲声学反射特征也可表现为由前积反射逐渐过渡为平行反射的结构。如，赵月霞[20]、陶倩倩[23]在南黄海陆架所识别的古三角洲便属于这种情况，三角洲前缘由前积斜层理反射逐渐过渡为平行反射，具有平行和亚平行反射结构，高连续性，低振幅相，厚度较薄（在 10m 以内且变化不大），大致为三角洲之前积层或底积层。

3.2 古三角洲物质来源的不确定性

对于古三角洲物质来源，最大的争议是其是古黄河输送物质形成还是古长江输送物质形成。根据黄河、长江、现代黄河三角洲和现代长江三角洲的沉积物特征与钻孔沉积物的特征进行对比，从而对古三角洲物源进行判断。已有众多学者利用重矿物[5, 33]、黏土矿物[5, 25]、元素地球化学[25]等方法对南黄海西部 MIS3 时期古三角洲的物源开展研究，并对黄河来源为主导

的认识是主流。但对于南黄海西部 $33^{\circ}30' \sim 34^{\circ}30'N$ ， $121^{\circ} \sim 123^{\circ}E$ 之间区域古三角洲的物质来源仍存在不同的看法。如顾兆峰和张志珣[24]依据古水系的分布和浅层地震剖面中沉积层的反射特征判断该区域发育的古三角洲也可能为古长江三角洲；Qin 等[34]同样根据浅层地震剖面中的沉积反射特征认为该处发育的三角洲可能同时受古黄河和古长江的影响，应为古黄河—古长江复合三角洲；Sun 等[35]收集了苏北岸外及长江口外多个钻孔的信息，进行比对分析认为，该处应为古长江三角洲发育的范围；Liu 等[5]利用钻孔进行碎屑矿物和黏土矿物物源分析，结果显示该区沉积物为黄河物质，明确指出该三角洲为古黄河三角洲。最近，中国大陆架钻探计划新获取且研究程度较高的 CSDP01 孔较好的揭示了这一区域三角洲物质来源的问题，该孔物源分析表明 MIS3 时期三角洲沉积层中、上段主要为黄河物质，向下逐渐演替为长江物质，认为 MIS3 时期南黄海形成了一个黄河和长江的复合三角洲，但是由于早期长江的物质很少，而这一时期以黄河的物质居多，稀释了长江的物质，所以也可理解为单一的古黄河三角洲[25]。由此表明，古黄河三角洲的建造可能不单只是受到黄河物质的影响，长江物质也对其有贡献。此外，位于 CSDP01 孔北侧的 NT1 孔 MIS3 时期层段的物源分析显示以黄河为主[36]，南侧的 NT2 孔则以长江为主[37]。综上所述，该区域为古长江、古黄河可共同影响的区域，现有物源分析方法难以确切揭示这一区域古三角洲的物质来源，但可以肯定的是越往北古黄河物质占主导，越往南古长江物质占主导。

长江和黄河物质的扩散范围、对三角洲建造的影响程度到底如何？亟须利用更多和更准确的特征指标开展更为高分辨率的定量研究。此外，还应注意的是，在缺少物源分析条件的情况下，仅依靠地震剖面中沉积体前积反射特征、叠加古水系分布图等判断古三角洲的物质来源，其结果仅属推测，虽具有一定的参考性但可靠性较低。如李凡等[19]根据古三角洲与古河道的分布与发育情况，绘制两者的分布图并以此进行比对判断物质来源；赵月霞等[20]、陶倩倩[23]根据浅层地震剖面中三角洲沉积体前积反射特征、进积方向等进行物源判断，认为古三角洲由古黄河不断向海输送物质，进积加积形成。

3.3 钻孔测年时间分辨率偏低

前人利用分布于南黄海中部和西部的钻孔进行了 ^{14}C 、ESR 和 OSL 测年，提供了可供参考的三角洲沉积层年代数据（表 1），为识别古黄河三角洲沉积范围与建立地层年代框架提供了依据。由表 1 可看出，测年

结果均是源于对不同深度样品进行测试获得的，测年结果倒置不多，可能指示古黄河三角洲沉积作用发生的年代。但是，值得注意的是，在研究区古黄河三角洲测年分析中使用最多的方法是 ^{14}C 测年法。绝大多数的 ^{14}C 测年结果显示 $>30000\text{a}$ ，而 $>30000\text{a}$ 的 ^{14}C 测年结果颇有偏差，需要慎重考虑和选择[38]。部分测年结果更是超过放射性碳测年的上限，故仅给出 $>42000\text{a}$ 、 $>43500\text{a}$ 、 $>47000\text{a}$ 的结果（不同实验室测试的放射性碳测年上限不同），这可能只反映其最大值，而非真实值，无法揭示其形成年代的确切时间。这同样也表现在邻近层位 OSL 测年结果往往比 ^{14}C 测年结果大，也说明 ^{14}C 的测年结果所指示的古三角洲沉积形成作用时间可能偏年轻。此外，越靠近放射性碳测年的极限，碳越容易被污染，年代误差很大[39]，测年结果不可靠。同时， ^{14}C 测年选区的测试材料不同，也会导致最终的测年结果大相径庭，特别是在沉积物质来源复杂的三角洲地区，有机碳的测定比无机碳要可靠，因为后者更容易受污染。

表 1 南黄海中西部主要钻孔浅部地层测年结果

钻孔编号	水深 (m)	埋深 (m)	测年材料	年龄 (yr BP)	^{14}C 校正年龄 (cal yr BP)	资料来源
92-1	-81	3.5~3.65	—	26820 \pm 2380	—	[19]
QC2	-49.05	28.68	粘土	28500 \pm 8200	—	[40]
		32.91	粘土质粉砂	36900*	—	
QC3	-39.23	—	—	28400 \pm 1040	—	[35]
SYS0701	-33	10.19	砂	41000 \pm 4000*	—	[5]
		10.70	砂	43000 \pm 4000*	—	
		15.22	砂	45000 \pm 5000*	—	
		16.64	软体动物壳	43640 \pm 1200	—	
		18.41	软体动物壳	43650 \pm 1200	—	
		20.30	软体动物壳	45820 \pm 1600	—	
		21.40	软体动物壳	>47000	—	
		22.955	砂	48000 \pm 5000*	—	
		23.02	软体动物壳	>47000	—	
		25.16	软体动物壳	>47000	—	
SYS0702	-32	39.36	植物碎屑	33770 \pm 340	—	[41]
		40.80	植物碎屑	40100 \pm 520	—	
		42.05	软体动物壳	>47000	—	
SYS0804	-38	13.72	螺	>42000	—	[41]
		15.60	贝壳碎片	>42000	—	
		22.13	螺	>42000	—	
		25.34	贝壳碎片	>42000	—	
		26.46	螺	>42000	—	
		39.28	贝壳碎片	>42000	—	
CSDP01	-52.5	4.82	底栖有孔虫	28380 \pm 130	31817	[42]
		5.70	底栖有孔虫	31090 \pm 30	34713	
		6.03	底栖有孔虫	>43500	—	
		6.70	底栖有孔虫	38500 \pm 360	42350	
		7.24	—	49140 \pm 7860*	—	

钻孔编号	水深 (m)	埋深 (m)	测年材料	年龄 (yr BP)	¹⁴ C 校正年龄 (cal yr BP)	资料来源
		7.72	底栖有孔虫	31630±180	35197	
		9.27	—	44330±4790*	—	
		14.66	—	33390±1048*	—	
		15.28	底栖有孔虫	>43500	—	

注：*代表 OSL 测年结果，**代表 ESR 测年结果，其余均为 ¹⁴C 测年结果。

除了上述文献直接给出测年结果外。陶倩倩[23]依据海平面变化曲线，结合不同测线的相同地层之间的对比，间接推断出三角洲形成于氧同位素 3 期；顾兆峰和张志珣[24]将识别的南黄海西部晚更新世三角洲、埋藏古河道相连，绘制了南黄海西部晚更新世古河道与三角洲分布图，并与邻近钻孔对比，推测氧同位素 5-3 时期在南黄海西部形成了两期的古黄河三角洲。应当注意，由于缺少直接的测年结果厘定，所以综合其它资料间接推断古三角洲形成的年代结果是具有很大的不确定性。

3.4 古三角洲沉积范围不连续性的问题

黄河以其巨量的泥沙和“善淤、善决、善徙”的特性，在近 2000 年来大规模的河道变迁超过 20 次，河口变迁至少 5 次，并在渤海和黄海形成了多期次的三角洲叶瓣[43]。同样，在晚更新世时期，冰期与间冰期相互交替，受气候和海面频繁波动的影响，黄河在南黄海陆架上改道频繁，随河口位置的变化，可形成多期三角洲叶瓣。另一方面，在末次冰盛期（LGM）海面比现今低 120m，岸线退至黄海外陆架，南黄海陆架区暴露为大面积的陆地，早期形成的三角洲地层可能被河流侵蚀而缺失，导致连续分布的三角洲被中断[5]。同时，受限于研究数据覆盖区域不同、研究数据质量差异、剖面解译主观性等各种主客观条件的影响，对厘定古三角洲的沉积范围造成了困难，三角洲的长距离连续分布更是难以识别。

4 研究展望

4.1 深入三角洲沉积反射层理与结构的认识

精确识别三角洲前缘沉积边界是研究古三角洲沉积范围的难点。三角洲沉积体前缘反射层理的问题，有待于后续进一步开展海洋沉积动力学和模型构建与模拟方面的研究，以期深入认识三角洲沉积演化的过程、沉积物输送模式和最终沉降所形成的沉积体结构

特征。另外，理想模式下的浅地层剖面分析解译是依据层序划分原则和反射界面的识别标志（上超、下超、削截和顶超等）及上下层间反射结构、形态、频率、振幅、连续性等参数的显著差异进行的，但由于浅地地震剖面仪穿透深度与分辨率呈负相关关系，而南黄海 MIS3 时期三角洲的沉积层位往往埋藏较深，剖面影像质量和分辨率较低，因此，为精确识别三角洲沉积体和明晰其沉积反射层理与结构，有必要采用宽带扫频技术开发深海宽带换能器和频率无缝合成技术浅层剖面系统，提高仪器分辨率，同时改善资料后处理技术，提高数据处理、解释的准确性和可靠性。

4.2 开展更精细化的物源研究

南黄海是东亚大陆边缘的半封闭陆架海，受到周边河流沉积物输入的强烈影响，尤其是长江和黄河。长江与黄河陆源碎屑物质的区分，前人已经通过重矿物、黏土矿物、U-Pb 锆石和元素地球化学等方法进行了区分，并已经取得卓有成效的成果，但目前单一的指标仍不能作为特指性判断指标，尤其是长江和黄河可共同影响的区域，必须借助于综合指标来加以判别，如安郁辉[44]测量了南黄海西部 SYS-1601 岩芯的沉积物粒度组成特征、沉积物中<2μm 组分的常量元素、稀土元素（REE）、Sr-Nd 同位素以及黏土矿物组成特征，综合探讨研究区的物质来源。同时，今后还应进一步探索和开展更先进的物源判别方法并本区使用，以提高物源示踪的效果。此外，在利用相关指标分析沉积物源时还应当充分考虑各种方法的适用性。确定长江和黄河物质在中国陆架边缘海的时空分布范围，以及在两种物源并存混合的沉积物中估算两种物源的比例，不仅将解决本文提及的古三角洲物源不确定性等关键问题，还将对于揭示中国陆架海的演化过程、了解其源-汇作用、阐述陆架海物质通量等具有关键性意义。

此外，作为曾经独立入海、历史上曾向黄海输入相当沉积物的淮河，由于后期遭受黄河侵袭和人工改造入海通道等影响，对其沉积物特征和与长江、黄河物质的差异的研究还非常少，以至于更难以判别淮河

物质是否也是古黄河三角洲建造时的潜在物质, 这一问题的解决更亟待今后获取更多淮河沉积物数据的支持, 以开展更多淮河沉积环境时-空演化历史、沉积物征分析等研究。

4.3 提高钻孔时间分辨率

虽然根据一些钻孔及周边的地球物理剖面地震相特征建立了层序地层年代框架, 但由于缺少精确可靠的绝对年龄约束, 未形成对三角洲沉积形成时间的统一认识。且如前所述, 相比于 OSL 测年, ^{14}C 测年结果所指示的古三角洲沉积形成作用时间偏年轻, 这对古三角洲是的形成时间提出了质疑, 是 MIS3 时期, 还是更早时期所形成? Lai 等[45]对晚第四纪 ^{14}C 和 OSL 测年进行了初步总结, ^{14}C 测年对全新世样品可靠性很好并与 OSL 测年有很好的一致性, 但年代超过 25ka 的 ^{14}C 测年结果都可能因为低估需要重新评价, 而光释光测年结果(年代可超过 10 万年)与地层、气候记录等有更好的一致性。此外, 相对于三角洲分布广泛的空间范围, 现有钻孔分布显得过于稀疏(尤其是深水区)且钻穿三角洲沉积最底层的钻孔十分有限, 难以揭示三角洲的形成过程, 因此今后有必要在关键部位获取更多、更高质量的钻孔(如在深水区钻取取芯率高、长度长、受次生扰动小的钻孔), 并尝试利用测年周期更长、精度更高的测年指标方法(如 OSL、 ^{10}Be 、 ^{26}Al 同位素)开展研究, 在有条件的情况下或尝试利用多种测年指标进行相互对比佐证, 以获取更精确、更高分辨率的年代数据, 明确三角洲沉积形成时间。

4.4 加强陆域埋藏古三角洲分布情况的探索

现有对南黄海 MIS3 时期古黄河三角洲沉积范围的研究集中在海区, 陆地上的分布情况尚不得而知。尤其是南黄海西侧的苏北平原, 作为中国东部沿海平原的重要组成部分, 第四纪以来长期持续沉降, 加之长江、黄河及淮河等大中型河流以不同时空组合方式不断影响这一地区, 因此该区对第四纪海面变化和海陆环境变迁反映十分敏感, 是全球陆海相互作用研究的典型地区之一。因此, 苏北平原广泛开展了第四纪尺度的科学研究, 但主要集中于贝壳沙堤形成的年代、过程与机制及指示意义; 全新世滨海平原的沉积记录及海陆变迁过程; 第四纪(尤其是晚第四纪)地层及环境演变; 石器时代环

境考古等方面。所以, 该区域虽然露头剖面 and 钻孔广泛分布, 但深度不大或受研究目的所限, 提供的有效信息十分有限, 真正钻探至 MIS3 时期层位和揭示这一时期海侵记录的钻孔并没有想象中的多。同时, 分布于苏北平原的钻孔并未揭示 MIS3 时期三角洲相沉积(尚未见陆区埋藏古三角洲的研究报道), 仅揭示了浅海相、潮滩相、潟湖-海湾相、河流相、河湖相等。推测造成这一现象的原因很可能在于对该时期陆上三角洲的分布情况一直没有研究, 很不清楚, 因此有些钻孔中的沉积相特征即使与海上钻孔中的三角洲相沉积特征相一致或相似, 也难以解释为三角洲相, 更多的是解释为海相、浅海相、潮滩相等。

此外, 值得注意的是 Liu 等[5]、夏非等[18]、陶倩倩[23]依据海区浅层地震剖面的研究表明, 古三角洲的沉积边界位于近岸, 可一直延伸至内陆, 因此有必要充分利用探地雷达(GPR)这一技术或利用遥感反演等方法在陆区广泛开展埋藏古地貌的研究, 获取更多陆区的古地貌信息, 并与海区埋藏古三角洲的研究认识进行联立对比, 进一步探明古三角洲在陆域的延伸分布情况, 这同时也将有助于深入对古海面和古河口的认识。

5 结论

- (1) 通过对南黄海已有控制性浅层地震剖面 and 地质钻孔等数据的分析, 对 MIS 3 古黄河三角洲的分布范围主要有三类观点: 第一类认为三角洲分布于 $35^{\circ}45'\text{N}\sim 34^{\circ}30'\text{N}$, $123^{\circ}\text{E}\sim 124^{\circ}\text{E}$ 之间, 前缘位于深水区; 第二类认为其分布界于山东半岛南部(36°N 附近)至 $34^{\circ}45'\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 123^{\circ}15'\text{E}$ 之间, 前缘位于浅水区; 第三类认为其在南北方向上由海州湾至 $33^{\circ}15'\text{N}$, 东西方向上由近岸至 123°E 之间, 前缘位于浅水区。
- (2) 受限于当前研究分析所采用的浅层地震剖面的解译存在多解性、钻孔时间分辨率偏低、三角洲物质来源不确定性等问题, 目前对三角洲的判识依据尚有待商榷。
- (3) 为明确三角洲的空间分布范围, 今后需进一步深入三角洲沉积反射层理与结构的认识、开展更精细化的物源测试分析、提高钻孔时间分辨率, 以及加强对邻近陆域埋藏古三角洲分布情况的探索。

参考文献

- [1] 石学法. 中国近海海洋: 海洋底质 [M]. 北京: 海洋出版社, 2012: 1-561.
- [2] Xia F, Zhang Y Z, Wang Q, et al. Evolution of sedimentary environments of the middle Jiangsu coast, South Yellow Sea since late MIS 3 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(5): 883-914.
- [3] 李凡, 姜秀珩, 宋怀龙. 晚更新世以来黄河、长江入海泥沙对南黄海沉积作用的影响 [J]. *海洋科学集刊*, 1993, 32: 61-72.
- [4] Yang J C, Li G X, Liu Y, et al. Evolution of sedimentary mode since Pleistocene in the central South Yellow Sea, China, based on seismic stratigraphy analysis [J]. *Quaternary International*, 2018, 482: 157-170.
- [5] Liu J, Saito Y, Kong X, 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.
- [6] Liu Z Q, Gan J P, Hu J Y, et al. Progress on circulation dynamics in the East China Sea and southern Yellow Sea: Origination, pathways, and destinations of shelf currents [J]. *Progress In Oceanography*, 2021: 102553.
- [7] Milliman J D, Farnsworth K L. Runoff, erosion, and delivery to the coastal ocean [M] // *In River Discharge to the Coastal Ocean*. Cambridge University Press, 2011: 13-69.
- [8] Milliman J D, Qin Y S, Ren M E, et al. Man's influence on the erosion and transport of sediment by Asian rivers: the Yellow River (Huanghe) example. *Journal of Geology* [J]. 1987, 95: 751-762.
- [9] Saito, Y. Holocene delta evolution and recent changes in Asia [J]. *Quaternary International*, 2012, 279-280: 423-423.
- [10] Liu J, Kong X H, Saito Y, et al. Subaqueous deltaic formation of the Old Yellow River (AD 1128-1855) on the western South Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2013, 344: 19-33.
- [11] Jia J J, Gao J H, Cai T L, et al. Sediment accumulation and retention of the Changjiang (Yangtze River) subaqueous delta and its distal muds over the last century [J]. *Marine Geology*, 2018: 2-16.
- [12] Alexander C R, DeMaster D J, Nittrouer C A. Sediment accumulation in a modern epicontinental-shelf setting: the Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 1991, 98: 51-72.
- [13] Wang Y, Zhang Y Z, Zou X Q, et al. The sand ridge field of the South Yellow Sea: Origin by river-sea interaction [J]. *Marine Geology*, 2012, 291-294: 132-146.
- [14] Lu J, Li A C, Huang P, et al. Mineral distributions in surface sediments of the western South Yellow Sea: implications for sediment provenance and transportation [J]. *Chinese Journal of Oceanology & Limnology*, 2015, 33, 510-524.
- [15] 中国地质调查局. 全国海洋地质调查进展与成果[R]. 北京: 中国地质调查局 基础调查部, 2010: 1-21.
- [16] 王颖, 邹欣庆, 殷勇, 等. 河海交互作用与黄东海域古扬子大三角洲体系研究 [J]. *第四纪研究*, 2012, 32(6): 1055-1064+2.
- [17] 江苏省 908 专项办公室. 江苏近海海洋综合调查与评价总报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1-885.
- [18] 夏非. 辐射沙脊群西洋潮流通道的浅部层序地层与沉积环境演化 [D]. 南京大学, 2016.
- [19] 李凡, 张秀荣, 李永植, 等. 南黄海埋藏古三角洲 [J]. *地理学报*, 1998b, 65(3): 3-5.
- [20] 赵月霞. 南黄海第四纪高分辨率地震地层学研究 [D]. 中国海洋大学, 2003.
- [21] 侯方辉. 南黄海晚第四纪地震地层学与新构造运动研究 [D]. 中国海洋大学, 2006.
- [22] 张志忠, 顾兆峰, 刘锡清, 等. 南黄海灾害地质及地质环境演变 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(5): 15-22.
- [23] 陶倩倩. 南黄海西部陆架埋藏古三角洲研究 [D]. 中国海洋大学, 2009.
- [24] 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.
- [25] Huang J, Wan S M, Zhang J, et al. Mineralogical and isotopic evidence for the sediment provenance of the western South Yellow Sea since MIS3 and implications for paleoenvironmental evolution [J]. *Marine Geology*, 2019, 414: 103-117.
- [26] 夏非, 张永战, 刘德政. 南黄海辐射沙脊群西洋潮流通道的浅部沉积层序及其形成演化再认识 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(4): 13-26.
- [27] Neill C F, Allison M A. Subaqueous deltaic formation on the Atchafalaya Shelf, Louisiana [J]. *Marine Geology*, 2005, 214(4): 411-430.
- [28] Gao S, Collins M B. Holocene sedimentary systems on continental shelves [J]. *Marine Geology*, 2014, 352(3): 268-294.
- [29] 孙家淞, 周长振. 南黄海全新世旧黄河水下三角洲的初步研究 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1984, 4(3): 57-67.
- [30] 李子星. 废黄河三角洲岸外全新世地层沉积结构研究 [D]. 南京大学, 2016.
- [31] 蒲仁海. 前积反射的地质解释 [J]. *石油地球物理勘探*, 1994, 29(4): 490-497+534.

- [32] 于兴河, 李胜利, 李顺利. 三角洲沉积的结构——成因分类与编图方法 [J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 782-797.
- [33] Zhang J Q, Liu J, Wang H X, et al. Characteristics and provenance implication of detrital minerals since Marine Isotope Stage 3 in Core SYS-0701 in the western South Huanghai Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 32(4): 49-58.
- [34] Qin Y S, Li F, Tang B J. Buried paleo-river system in the western South Yellow Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 1986, 33(6): 496-501.
- [35] Sun Z Y, Li G, Yin Y. The Yangtze River deposition in southern Yellow Sea during Marine Oxygen Isotope Stage 3 and its implications for sea-level changes [J]. Quaternary Research, 2015, 83(1): 204-215.
- [36] 蓝先洪, 张宪军, 赵广涛, 等. 南黄海 NT1 孔沉积物稀土元素组成与物源判别 [J]. 地球化学, 2009, 38(2): 123-132.
- [37] 蓝先洪, 张宪军, 王红霞, 等. 南黄海 NT2 孔沉积地球化学及其物源 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(1): 51-60.
- [38] Yim W, Ivanovich M, Yu K. Young age bias of radiocarbon dates in pre-holocene marine deposits of Hong Kong and implications for Pleistocene stratigraphy [J]. Geo-Marine Letters, 1990, 10(3): 165-172.
- [39] Nian X M, Zhang W G, Wang Z H, et al. The chronology of a sediment core from incised valley of the Yangtze River delta: Comparative OSL and AMS ^{14}C dating [J]. Marine Geology, 2017, 395: 320-330.
- [40] 郑光膺. 南黄海第四纪层型地层对比 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 2-229.
- [41] 张军强, 刘健, 孔祥淮, 等. 南黄海西部陆架区 SYS-0804 孔 MIS6 以来地层和沉积演化 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(1): 1-12.
- [42] 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.
- [43] Xue C T. Historical changes in the Yellow River Delta, China. Marine Geology, 1993, 113(3): 321-330.
- [44] 安郁辉. 苏北近岸中全新世以来楔形沉积体成因研究[D]. 山东科技大学, 2020.
- [45] Lai Z P, Mischke S, Madsen D B. Paleoenvironmental implications of new OSL dates on the formation of the “Shell Bar” in the Qaidam Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Journal of Paleolimnology, 2014, 51: 197-210.