

黄雨菡, 范代读, 吴伊婧. 长江口外砂泥过渡带沉积粗化趋势与成因分析[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(4): 47-59.

HUANG Yuhang, FAN Daidu, WU Yijing. Sediment coarsening trend and genetic analysis of the sandy-muddy transitional zone off the Yangtze River Estuary[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(4): 47-59.

长江口外砂泥过渡带沉积粗化趋势与成因分析

黄雨菡, 范代读*, 吴伊婧

(同济大学海洋地质全国重点实验室, 上海 200092)

摘要:长江口外存在一狭长的砂泥过渡带将长江水下三角洲泥质区与东海陆架砂质区隔开, 其对长江入海泥沙量和陆架海洋动力变化非常敏感。本文分析了近十年来长江口外表层沉积物粒度变化, 以及砂泥过渡带 YE16 站位连续两年获取的柱状样沉积物粒度、特征元素比值、有机元素和放射性核素组成特征。结果表明, 近期砂泥过渡带外边界不断向陆移动, 表层沉积物粗化明显, YE16 站位近年出现顶部砂质层直接覆盖在底部泥质层上, 且砂质层厚度增加较快。基于粒度-标准偏差法与组分分析法的粒度端元 (EM) 特征发现, YE16 柱状样 EM3 端元 (中细砂端元) 占比显著升高, 以 EM3 为主的沉积物具有较低的 C/N 比值和较高的 Sr/Ba、Ca/Ti 比值, ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 放射性活度低, 指示其母源沉积物年龄较老且以海源生源组分占主导。综合分析认为, EM3 端元占比增加可归因于强风浪等高能事件驱动下, 中陆架变余砂质沉积发生再悬移和向岸搬运所致。这一外源输入机制与长江入海泥沙锐减共同构成了沉积物粗化的双重驱动: 前者通过砂质沉积的外源补偿直接增加粗粒沉积占比, 后者通过减少泥沙供应削弱了细粒沉积对粗化的稀释效应, 两者共同导致了长江口外砂泥过渡带近期向陆迁移、表层沉积物粗化和砂质层增厚等现象。在极端气候事件和流域人类活动影响不断增强的背景下, 长江口外砂泥过渡带变迁及其环境效值得持续关注。

关键词:砂泥过渡带; 沉积物粗化; 粒度端元分析; 流域人类活动影响; 强风浪

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2025.039

0 引言

三角洲占地球陆地面积不足 0.5%, 却承载了全球超过 5% 的人口, 是全球社会发展的重要区域^[1-6]。在强烈的人类活动与气候变化影响下, 多数大河三角洲会出现因泥沙减少而发生海岸侵蚀的问题^[3,6-9]。自中全新世以来, 长江携带巨量泥沙入海, 不仅发育了广袤的三角洲平原, 而且水下三角

洲也不断向中陆架延展^[10-12]。但近期受流域人类活动影响, 尤其在 2003 年三峡大坝合拢以来, 长江入海泥沙已锐减了 70% 以上^[13-16]。受此影响, 长江水下三角洲浅水区已出现严重的海床侵蚀^[13,17], 且随着时间延长, 侵蚀区已由浅水的三角洲前缘扩展至更深的前三角洲^[18]。

长江口外砂泥过渡带介于长江水下三角洲泥质区与中外陆架变余沉积砂质区之间, 目前大致沿东经 123°呈 SN 向分布。其中, 泥质区主要是中全新世高海平面以来长江入海的细粒沉积^[10-11], 而变余沉积砂质区则是母质形成于末次冰期低海平面或海侵早期的河流相、河口湾相或滨海相沉积, 后经海侵淹没并受到长期强烈的波流改造而成^[19-21]。已有研究发现, 近期长江入海泥沙大幅下降已导致砂泥过渡带沉积物变粗^[22-25], 以特定砂质含量定义的砂泥过渡带外边界不断向陆移动^[18,23]。但上述

收稿日期: 2025-02-20

资助项目: 国家自然科学基金(42330411); 上海市教委科研创新计划自然科学基金重大项目(2021-01-07-00-07-E00093); 亚洲合作资金项目“长江三角洲与红河三角洲海洋地质环境与灾害合作研究”

第一作者: 黄雨菡(2000—), 女, 在读硕士, 主要从事海洋沉积方面的研究工作. E-mail: 2231647@tongji.edu.cn

* 通讯作者: 范代读(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋沉积和有机碳汇机制方面的研究工作. E-mail: ddfan@tongji.edu.cn

变化也可能是近期不断增多和变强的台风作用所致,或是多种因素共同影响的结果^[26]。为了进一步分析砂泥过渡带近期沉积变化特征及控制机理,本文选取近十年长江口3个航次获取的表层沉积物样和近期连续两年在同一位置采集的重力柱状沉积物样,开展粒度、元素、有机元素和放射性核素等组成特征的对比研究,以期揭示近期砂泥过渡带沉积变化的主控因素。

1 材料与方法

1.1 沉积物样品来源

本次研究的2根重力柱状样由同济大学资助的KPP-YEC夏季航次在YE16站位取得。YE16位于长江口外砂泥过渡带,分别于2021和2022年8月取样获得YE16-21和YE16-22柱状样,长度分

别为131和67 cm,具体站位分别为30°39.362'N、123°15.020'E和30°39.262'N、123°15.118'E,二者相距仅293 m(图1)。根据最近的崂山验潮站数据校正后的采样水深分别为54.2和55.0 m,差别也很小。重力柱状样封装于PVC管内,低温运输至实验室后保存于岩芯冷库中。

表层沉积物共183个,分别来自国家自然科学基金委资助的2014年(91个)、2019年(32个)、2024年(34个)长江口公共航次夏季航段,和2019年KPP-YEC航次(26个),采样范围覆盖长江口及周边海域29.0°—32.0°N和121.0°—124.5°E,具体采样位置见图1。表层沉积物样封装于塑料密封袋内进行冷藏保存。

1.2 样品预处理与实验分析

重力柱状样在实验室内对半剖开,一半岩芯用薄膜密封包装后继续冷藏保存,另一半岩芯先进行

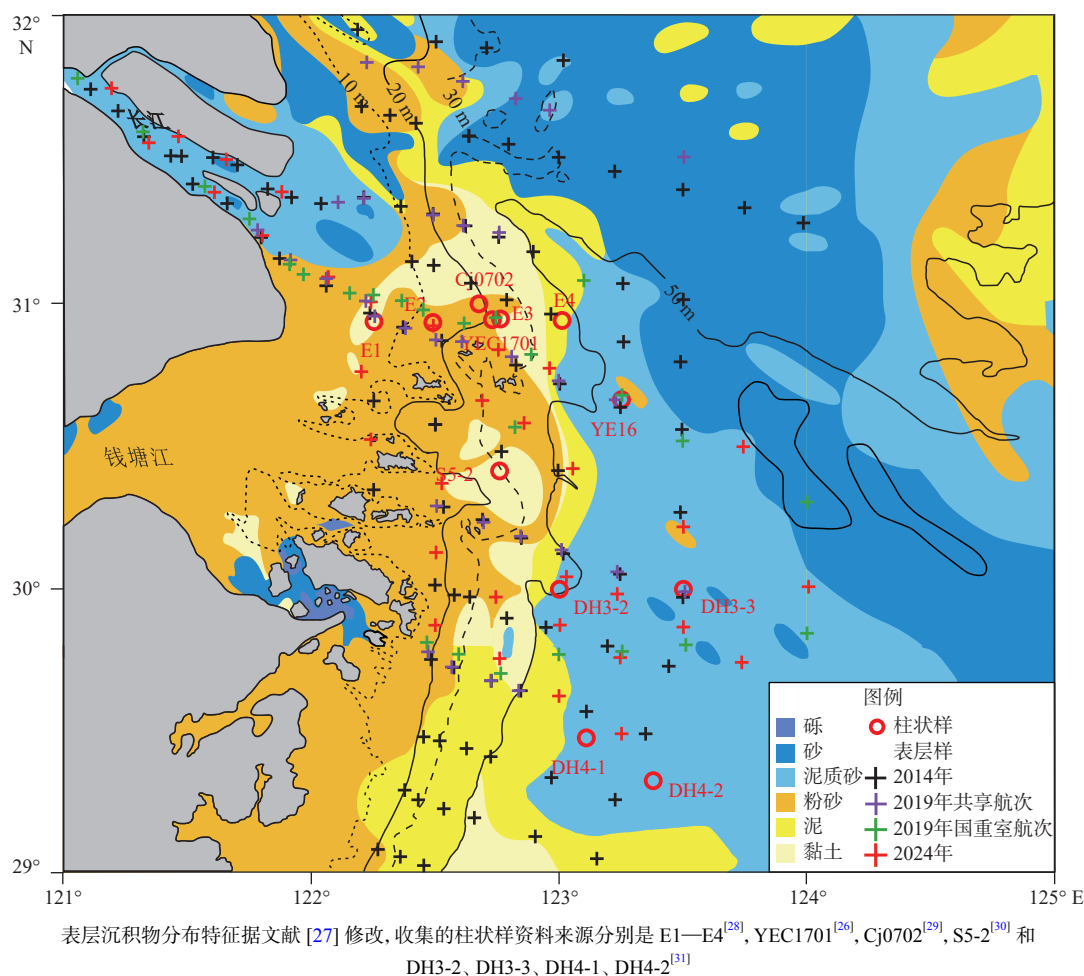


图1 长江口及邻近海域表层沉积物分布特征与样品位置

Fig.1 Surface sediment distribution pattern in the Yangtze subaqueous delta and adjacent sea, and locations of surficial sediment sampling sites and cores used in this study

岩性观测与描述, 然后开展 XRF 岩芯无损元素扫描, 再按 1 cm 间距分样, 低温烘干后装入塑料密封袋进行冷藏保存, 以备后续分析。

岩芯无损元素扫描使用 Avaatech 公司的 XRF 岩芯扫描仪, 本次只扫描了岩芯表面较规整的 YE16-21 柱状样。岩芯表面经平整后覆上专用薄膜, 放置在样槽上依次设置电压为 10、30 和 50 kV, 按 2 mm 步长进行元素扫描, 获得除顶部 40 mm 外的柱状样共 25 种元素相对含量数据。

2 根柱状样以 2~5 cm 不等间距挑选 20 个层位样品进行 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 定年分析。每个样品称量 10 g 干样, 用玛瑙研钵磨至样品无明显颗粒感, 装入样品密封盒, 封存 20 d, 以达到 ^{226}Ra 母子体之间的放射性平衡。样品测试使用 Ortec 公司井式低本底高纯锗探头的 γ 能谱仪 (GWL-120-15-LB-AWT) 测量 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 、 ^{226}Ra 的放射性活度, 每个样品的测试时间为 48 h。

粒度测试包括 183 个表层沉积物样和 198 个柱状沉积物样, 后者是按 1 cm 间距取自 YE16-21 和 YE16-22 柱状样。每个样品称取 0.3~1 g 置于 50 mL 离心管中, 先后加入 15 mL 浓度为 30% 的 H_2O_2 和 15 mL 浓度为 1 mol/L 的稀盐酸, 并进行水浴加热分别去除有机质与碳酸盐, 反复用去离子水清洗和离心直至上清液呈中性。上机测试前加入少量六偏磷酸钠溶液并震荡使颗粒分散。2024 年的 34 个表层样品使用 Mastersizer 3000 激光粒度仪测试, 测量范围为 0.01~3 500 μm , 重复测试误差 < 0.5%; 其余样品使用 Beckman Coulter LS230 型全自动激光粒度仪测试, 测量值范围为 0.375~2 000 μm , 重复测试误差 < 1%。粒度参数采用 Friedman-Johnson 矩值法进行计算^[32]。

开展 TOC、TN 测试的 131 个样品取自 YE16-21 柱样, 按 1 cm 间距分样获得。每个样品取约 1 g 干样置于 50 mL 离心管中, 加入 15 mL 浓度为 1 mol/L 的稀盐酸并水浴加热去除碳酸盐, 反复用去离子水清洗和离心直至上清液呈中性, 后将样品放入 40 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干, 烘干后进行研磨, 用锡箔包裹样品进行上机测试。测试使用 Elementar 公司 Vario Cube CN 系列有机元素分析仪, TOC 与 TN 的测试精度分别为 0.1% 与 0.02%。

以上实验除 2024 年表层沉积物的粒度测试是在同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室完成外, 其余测试分析均在同济大学海洋地质全国重点实验室完成。

2 结果

2.1 近期长江口外海域表层沉积物粒度变化特征

目前, 已有研究多聚焦于 2003—2013 年间三峡蓄水初期长江水下三角洲表层沉积物的变化^[13,33-34], 本文则衔接 2014 年后的数据, 对 2014、2019 和 2024 年表层沉积物采样站位均有覆盖区域开展粒度组成的对比研究, 以延长受人类活动影响分析的时间序列。以 50% 砂含量确定的砂泥过渡带外边界近期不断向陆移动, 2014 年该界线在 YE16 东侧, 2019 年已西移至 YE16 附近, 而 2024 年进一步移至 YE16 西侧十余公里 (图 2a—c)。伴随此变化, 由 2014—2024 年间外边界变迁所界定的区域内沉积物粗化显著。此外, 通过中值粒径 (D_{50}) 对比分析发现, 除研究区北侧局部海域外, 期间表层沉积物 D_{50} 值均发生一定程度的增大, 反映在 Φ 值对比上出现较大范围的负值 (图 2f), 其中, YE16 站位南侧变粗最显著。两个阶段沉积物粗化有所不同, 2014—2019 年间 YE16 站位东侧和东南侧沉积物粗化很显著 (图 2d), 而 2019—2024 年间沉积物粗化主要发生在 YE16 站位的西侧, 但变粗幅度较小 (图 2e)。

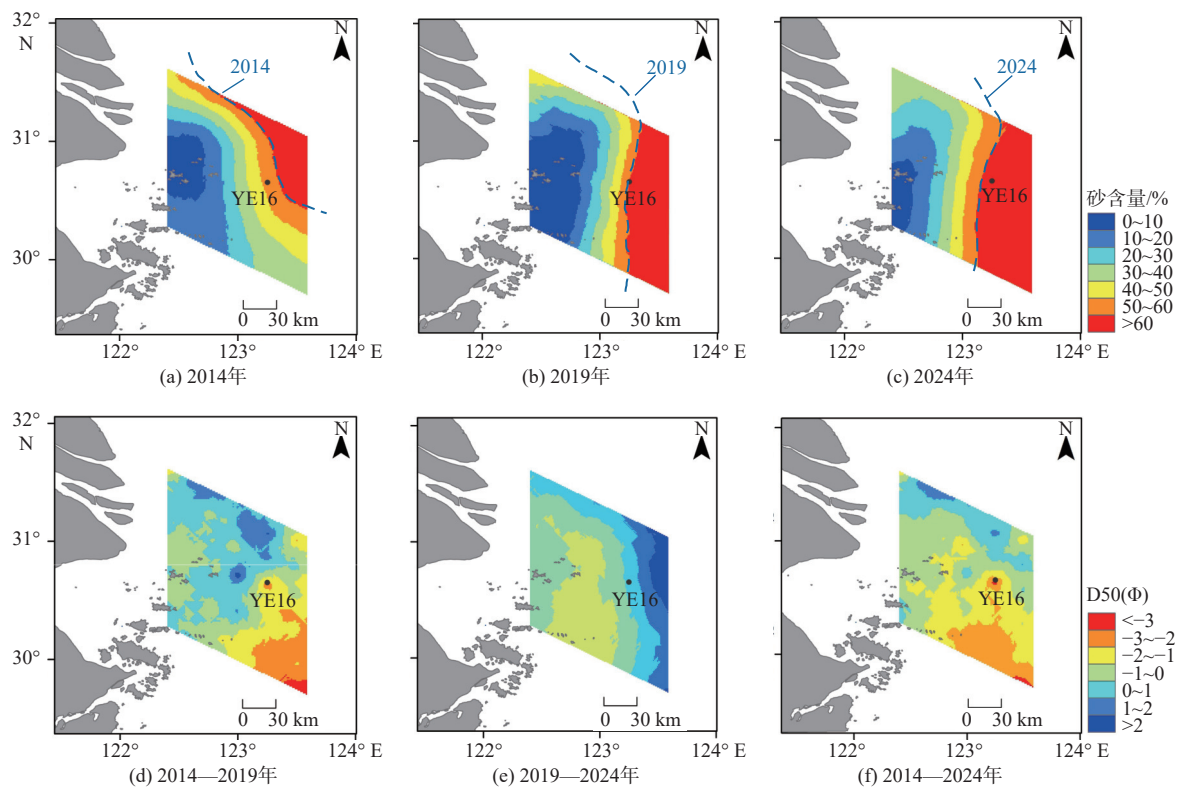
2.2 柱状样岩性及粒度组成剖面特征

YE16-21 柱样总体呈暗灰色, 以深度 33 cm 为界分为上下两段, 沉积物颜色和粒度组成均出现较大差异 (图 3a、g)。下段岩性以块状黏土质粉砂为主, 夹有中细砂质纹层, 粉砂和黏土含量均值为 72.3% 和 23.1%, 平均粒径为 6.70 Φ , 分选系数为 1.65。上段为粉砂质砂, 层理不发育, 含有较多的贝壳碎片, 岩芯表面不平整; 砂和粉砂含量均值为 64.1% 和 30.5%, 平均粒径为 3.86 Φ , 分选系数为 2.21。

YE16-22 柱样总体呈暗灰色, 岩性较均一, 均为粉砂质砂, 砂和粉砂含量平均值分别为 69.3% 和 21.7%, 平均粒径为 3.86 Φ , 分选系数为 2.36。YE16-22 岩性和粒度特征与 YE16-21 上段基本一致, 但该砂质层厚度由 2021 年的 33 cm 增加至 2022 年的约 67 cm。

2.3 YE16-21 柱样 TOC、TN 与剖面变化特征

YE16-21 上下两段 TOC、TN 与 C/N 比值均存



图中蓝色虚线表示不同年份 50% 含砂量为代表的砂泥过渡带外边界

图 2 2014、2019、2024 年长江口外海域表层沉积物砂含量和 2014—2019、2019—2024、2014—2024 年表层沉积物 D50 变化趋势

Fig.2 Sand content of surficial sediments in 2014, 2019, and 2024 and median size variation of surficial sediments off the Yangtze River Estuary from 2014-2019, 2019-2024, and 2014-2024

在较为明显的差异。下段 TOC、TN、C/N 的值分别为 $(0.536 \pm 0.126)\%$ 、 $(0.082 \pm 0.018)\%$ 、 6.550 ± 0.026 ；而上段 TOC、TN、C/N 的值分别为 $(0.257 \pm 0.065)\%$ 、 $(0.049 \pm 0.011)\%$ 、 5.170 ± 0.723 (图 3b—d)。其中，上段较小的 TOC 和 TN 含量应与较粗的沉积物有关，较低的 C/N 比值可能指示海源物质输入相对增加。

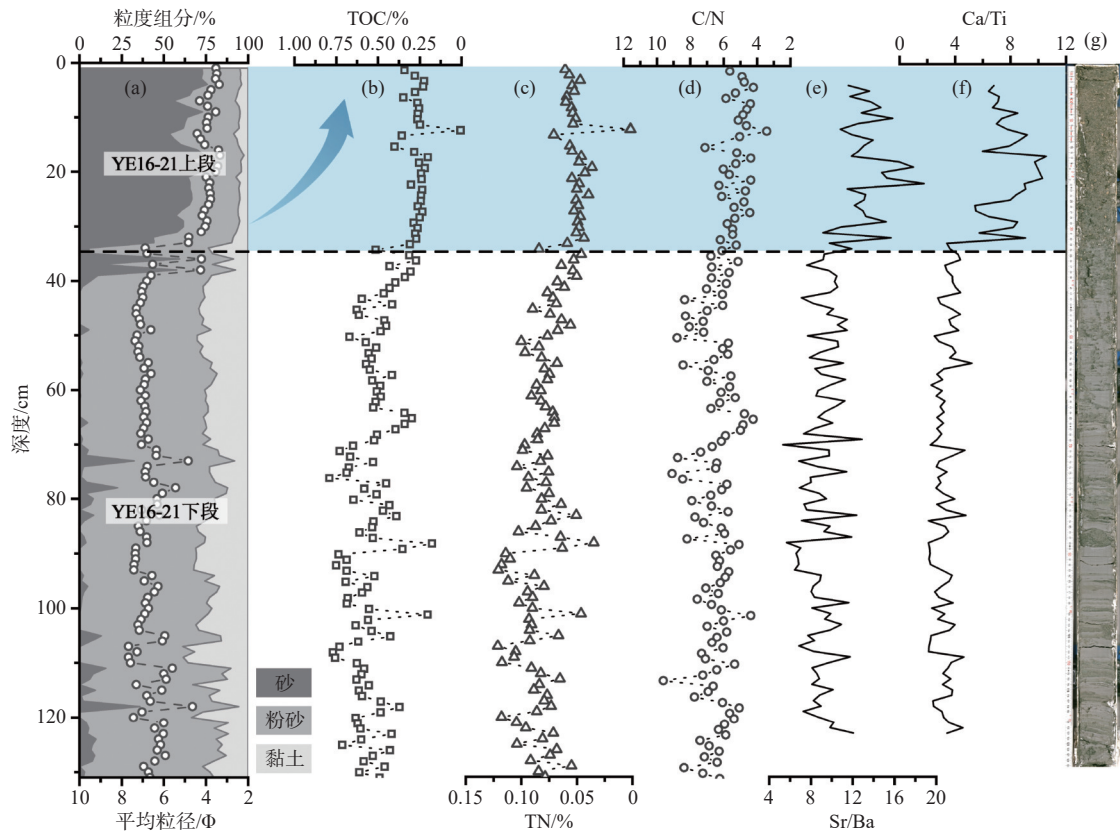
2.4 YE16-21 柱样 Sr/Ba、Ca/Ti 比值剖面变化特征

Sr、Ca 元素主要存在于碳酸盐岩中，主要由海洋生物的钙化作用分泌的碳酸盐壳体形成。Ba 主要来源于含 Ba 矿物的风化产物，经河流搬运容易在河口区域被陆源有机质吸附，形成有机-金属络合物沉降，能够保存陆源信息^[35]。Ti 元素则主要赋存在陆源碎屑矿物中，受物理搬运控制，在风化、搬运与沉积过程中体现化学惰性，能够直接反映陆源碎屑的输入强度，因此，两者都能作为陆源物质的指标^[36]。目前，Sr/Ba、Ca/Ti 比值已广泛应用于长江口风暴沉积的判别，反映海源沉积的影响^[37-39]。

YE16-21 上、下两段的 Sr/Ba、Ca/Ti 存在明显差异，下段 Sr/Ba、Ca/Ti 比值较低，上段显著升高，与其中富含贝壳碎片有关 (图 3e—g)。

2.5 柱状样放射性核素剖面特征

沉积物的补偿²¹⁰Pb(²¹⁰Pb_{su})由母体核素²²⁶Ra 原位衰变产生，通过测量²²⁶Ra 获得²¹⁰Pb_{su}的值，过剩²¹⁰Pb(²¹⁰Pb_{ex})由总²¹⁰Pb(²¹⁰Pb_{tot})扣除²¹⁰Pb_{su}获得 (图 4)。YE16-21 在 70 cm 以上实测到的²¹⁰Pb_{tot}大于²¹⁰Pb_{su}，反映²¹⁰Pb_{ex}的存在；70 cm 以下²¹⁰Pb_{tot}与²¹⁰Pb_{su}在误差范围内一致，判断达到本底 (图 4a)。而在 YE16-22 中，在 26 cm 处已达到本底 (图 4c)。¹³⁷Cs 的时标常与²¹⁰Pb 的定年结果进行对比，以检验后者定年结果的可靠性。但两根柱状样的¹³⁷Cs 含量皆低于检出限 (图 4b、d)。由于²¹⁰Pb_{ex}容易在细粒沉积中富集，因此，基于黏土含量对²¹⁰Pb_{ex}的比活度进行了归一化处理，结果显示，经过粒度校正后的 YE16-21 上部 40 cm 的²¹⁰Pb_{ex}比活度有所升高，表层²¹⁰Pb_{ex}由 27 Bq/kg 升高到 106 Bq/kg，表明粒度对 YE16-21 的²¹⁰Pb_{ex}存在明显影响 (图 4e)；而



蓝色阴影区域指示呈现出粗化趋势的沉积物

图 3 YE16-21 柱样粒度组成与平均粒径 (a)、TOC (b)、TN (c)、C/N (d)、Sr/Ba (e)、Ca/Ti (f)、随深度变化特征和岩芯照片 (g)

Fig.3 Downcore variations of grain-size compositions and mean size (a), TOC (b), TN (c), C/N (d), Sr/Ba (e), Ca/Ti (f), and core photo (g) of YE16-21

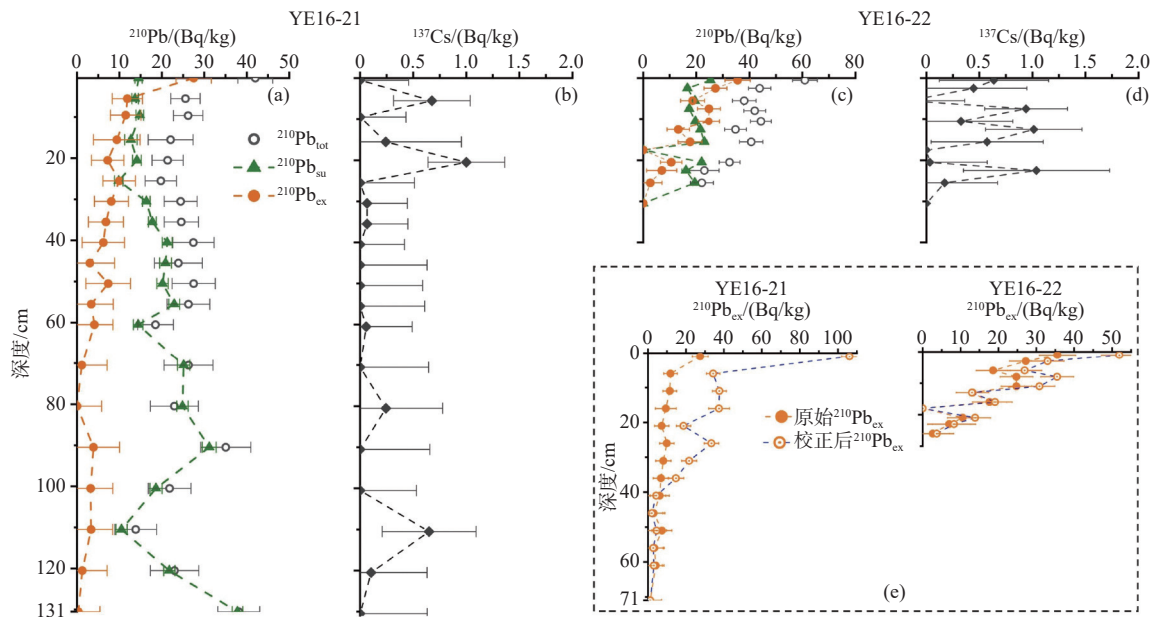


图 4 YE16-21 与 YE16-22 柱状样 ^{210}Pb (a、c) 与 ^{137}Cs (b、d) 深度剖面特征以及粒度校正后的 YE16-21 (e) 与 YE16-22 (f) 的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$

Fig.4 Depth-profile of ^{210}Pb (a, c) and ^{137}Cs (b, d) activities in cores YE16-21 and YE16-22, and comparison of original and normalized $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ in cores YE16-21 (e) and YE16-22 (f)

YE16-22 顶部的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 由 36 Bq/kg 升高到 52 Bq/kg, YE16-22 粒度组成较 YE16-21 更为均一, 因此, 校正前后 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 变化较小(图 4f)。两者校正前后的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度与砂质区其余同样经过黏土含量校正的柱状样对比^[40], YE16 站位的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度仍较低, 表明 YE16 较低的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度水平主要受本身性质的影响, 可由此判断 YE16-21 顶部 70 cm 和 YE16-22 顶部 26 cm 砂质层均形成于近期强风浪事件对邻近老沉积物进行改造、搬运和再沉积而成。

3 讨论

3.1 柱状样沉积物粒度端元特征分析

粒级-标准偏差法与组分分析法能从复杂的粒

度数据中提取出粒度端元特征, 指示沉积物来源与水动力变化^[41-42]。粒级-标准偏差法利用不同粒级颗粒对环境变化的敏感程度来判别端元组分, 即标准偏差越大所对应的粒级对环境则越敏感^[41,43]。组分分析法认为沉积物粒度分布通常是由多个“动力组分”按照不同比例组合而成(图 5), 可以运用分布函数, 如高斯分布等反演解析出不同粒度组分的分布^[44-47]。上述两种方法已应用于黄土沉积物源识别与古气候重建^[48]、东亚冬季风强度重建^[49-50]、台风与洪水事件的识别与特征提取^[26,51-52]等。本文分别以粒级-标准偏差法(公式 1)和基于高斯分布函数的组分分析法(公式 2), 对 YE16-21 上、下段和 YE16-22 柱状样沉积物粒度端元特征进行提取, 并与区域其他柱状样的结果进行比较, 深入讨论砂泥过渡带不同粒度组分的形成机制。

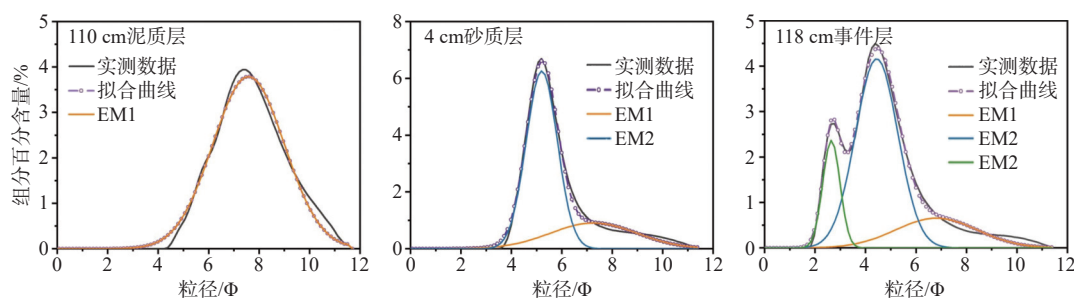


图 5 代表性层位组分分析结果示例

Fig.5 Comparison between measured and simulated grain-size distribution of representative samples

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中: s 为每一粒级对应的标准偏差;
 x_i 为每一粒级对应的体积百分数;
 $\bar{x}$ 为平均体积百分数。

$$f(x) = p_1 \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) + p_2 \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) + p_3 \frac{1}{\sigma_3 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu_3)^2}{2\sigma_3^2}\right) \quad (2)$$

公式(2)为高斯分布函数的拟合公式。基于样品的粒度频率分布特征, 本文在计算时设置为 1 个(p_1)、2 个(p_1 与 p_2)或 3 个(p_1 、 p_2 与 p_3)主要端元, 总和为 100%。 μ 为各端元的粒径均值, σ 值为各端元的标准偏差值。

粒级-标准偏差法分析结果显示, 本次分析的 2 根柱状样沉积物粒度组成可识别出 3 个敏感粒级:

黏土-细粉砂峰值(敏感粒级 1)范围 6.49Φ~7.61Φ; 中-粗粉砂峰值(敏感粒级 2)范围 4.62Φ~5.54Φ; 中细砂峰值(敏感粒级 3)范围 2.03Φ~2.76Φ(图 6a—c、e)。其中, YE16-21 下段(除 36、38、73 和 118 cm 4 个含量较高的事件层外)以敏感粒级 1 和 2 组成为主(图 6a), 这与其他长江水下三角洲泥质区柱状样的敏感粒级组成特征基本一致(图 6d—e)^[26,28-30]。YE16-21 上段与 YE16-22 都由敏感粒级 1 和 3 组成, 与其他中陆架砂质区柱状样的端元组成特征相一致(图 6e—f)^[28,31,53]。

组分分析结果同样识别出 3 个粒度端元: 细粉砂粒级端元(EM1)范围 6.17Φ~6.99Φ; 粗粉砂粒级端元(EM2)粒径范围 5.04Φ~5.65Φ; 中细砂粒级(EM3)粒径范围 2.11Φ~2.40Φ。其中, YE16-21 下段 EM1 与 EM2 为主要端元, 80 cm 以上层位主要由 EM1 单端元组成, 而 80 cm 以下层位多为 EM1 与 EM2 双端元组成(图 7a)。其中, YE16-21 下段事件层的端元组成较特殊, 36、38 cm 事件层由

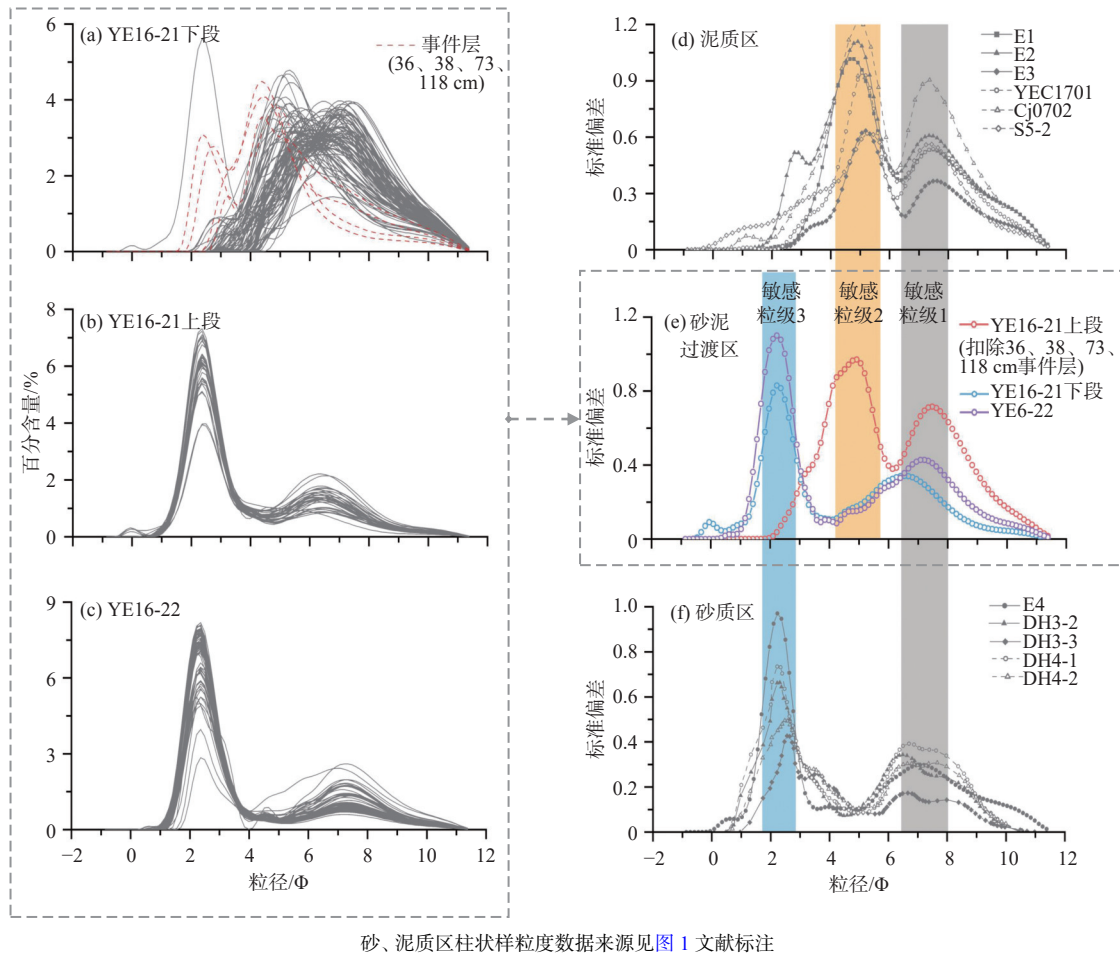


图 6 YE16-21 (a,b) 与 YE16-22 (c) 的沉积物粒度频率分布及泥质区 (d)、砂泥过渡区 (e)、砂质区 (f) 粒级-标准偏差曲线对比

Fig.6 Grain-size frequency distribution curves of sediments in cores YE16-21(a, b) and YE16-22 (c); grain size-standard deviation curves of sediments in muddy zone (d), sand-mud transition zone (e), and sand zone (f)

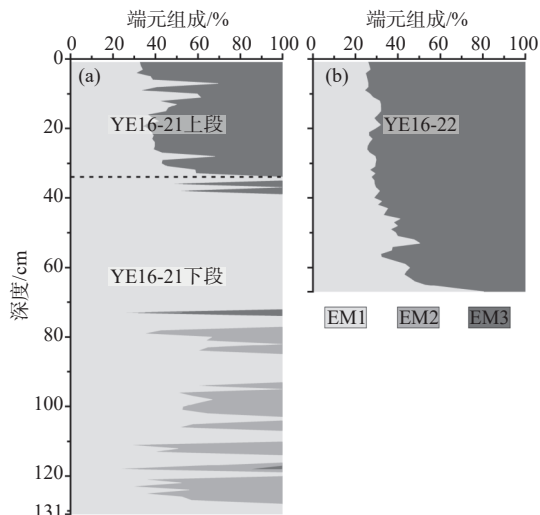
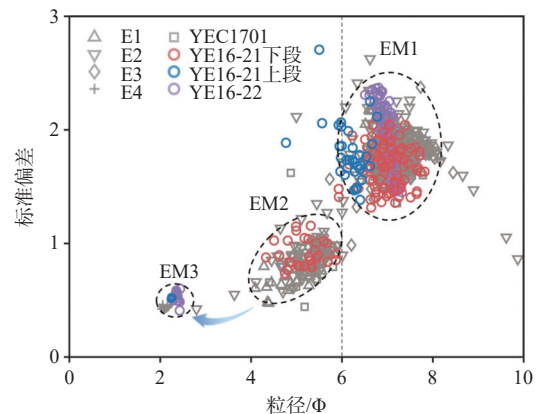


图 7 YE16-21 (a) 与 YE16-22 (b) 柱状样组分分析法端元组成

Fig.7 End-member compositions of cores YE16-21 (a) and YE16-22 (b)

EM1、EM3 组成, 73、118 cm 事件层由 EM1、EM2、EM3 三端元组成; 而 YE16-21 上段与 YE16-22 砂

质沉积均由 EM1 与 EM3 组成(图 7a—b), 与中陆架砂质区柱状样的粒度端元组成相一致(图 8), 且 EM3 的占比整体呈现增长趋势。



柱状样粒度资料来源见图 1 文献标注

图 8 长江口外泥质区、砂泥过渡区和砂质区沉积物粒度组分分析法端元组成特征对比

Fig.8 End-member analysis of sediments from cores in muddy, sand-mud transition, and sand zones

粒级-标准偏差法与组分分析法的端元划分结果基本一致,互相印证了划分结果,且表明两者在端元的划分与识别上有较好的适用性。其中,粒级-标准偏差法基于体积百分数做整体分析,对异常值敏感,易受事件影响,敏感粒级峰值范围较大,更适于用作初步分析;而组分分析法所提供的组分信息描述更为详细,结合其显示的端元占比,更易于展开后续的分析。因此,在验证适用性的基础上,主要基于组分分析法的结果,对端元的含义进行解释与分析。

EM1 所指示的细粉砂粒级端元与长江口悬沙主体成分的粒度组成相接近^[23,54];因其颗粒较细,通常以悬移质方式搬运和絮凝方式沉降,对水动力反映不敏感,因而广泛分布于长江口外不同沉积环境中(图 8)。EM2 指示的粗粉砂粒级端元,通常以单颗粒方式进行搬运和沉降,对水动力变化敏感^[55],已有研究认为,该端元是长江水下三角洲洪水事件沉积的重要标志^[26,29-30]。EM3 所指示的中细砂粒级为主端元,标准偏差均比 EM1 和 EM2 小很多,表明分选性较好,这可能与中外陆架变余砂质沉积物经长期再侵蚀、搬运和沉积作用有关,其在 YE16 站位所反映的沉积动力机制在下节详细分析。

3.2 长江口外砂泥过渡带近期沉积物粗化原因分析

表层沉积物与 YE16 柱状沉积物端元特征的演化均显示出明显的粗化趋势。2014—2024 年间长江口外表层沉积物明显发生变粗,并且以 50% 含砂量界定的砂泥过渡带外边界不断向陆迁移。值得注意的是,近期砂泥过渡带西迁有所加速,这可从其外边界相对于 YE16 站位的距离进行判断,2019—2024 年间西迁距离超过了 2014—2019 年间

(图 2a—c)。此外,柱状样也呈现粗化趋势, YE16 站位原先处于水下三角洲泥质沉积区,随着砂泥过渡带持续西迁,顶部砂质层厚度迅速增加,在 2021 年 8 月—2022 年 8 月,其厚度由 YE16-21 的 33 cm 增加至 YE16-22 的 67 cm。

粗化可能与近期长江入海泥沙减少相关。长江水下三角洲的沉积地貌演化主要受控于长江入海泥沙量与河口水动力对沉积物再分配作用的平衡^[11-12]。近期流域建坝和河口大型促淤工程导致长江入海泥沙锐减,水下三角洲已发生大范围侵蚀,因细颗粒被侵蚀带走而粗颗粒被留下导致表层沉积物粗化^[13,24-25],研究区内的表层沉积物与柱状沉积物粒度对比研究延续了此前发现,同样体现出粗化趋势^[22-23]。

此外,中陆架砂质沉积的向岸输入对砂泥过渡带沉积物粗化发挥了重要影响。端元特征分析显示, EM3 端元占比分布同样呈条带状,由河口向外表层沉积物中 EM3 端元占比逐渐升高。2014—2024 年间砂泥过渡带的 EM3 端元占比整体呈上升趋势(图 9a—c),尤以 2014—2019 年间的上升最为显著(图 9a—b)。此外, YE16 柱状样 EM3 平均含量也由 YE16-21 上段的 56.5% 增加至 YE16-22 的 66.0%,而 EM3 端元以中细砂为主成分的特征与中陆架砂质区的 EM3 端元特征基本一致(图 8),表明 YE16 柱状样受到砂质区的外源输入影响,且近期影响持续增强。沉积物的放射性核素组成与特征元素比值进一步证明了其来源于中陆架变余沉积砂质区的特性, YE16-21 和 YE16-22 两根柱状样的 ^{137}Cs 含量皆低于检出限,且 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 也含量较低,表明它们是较老的沉积物经改造后再沉积所致^[19-20]。并且 YE16-21 上下段沉积物 C/N、Sr/Ca 和 Ca/Ti 比值也差异明显(图 10a—c)。与下段相比,上段砂质

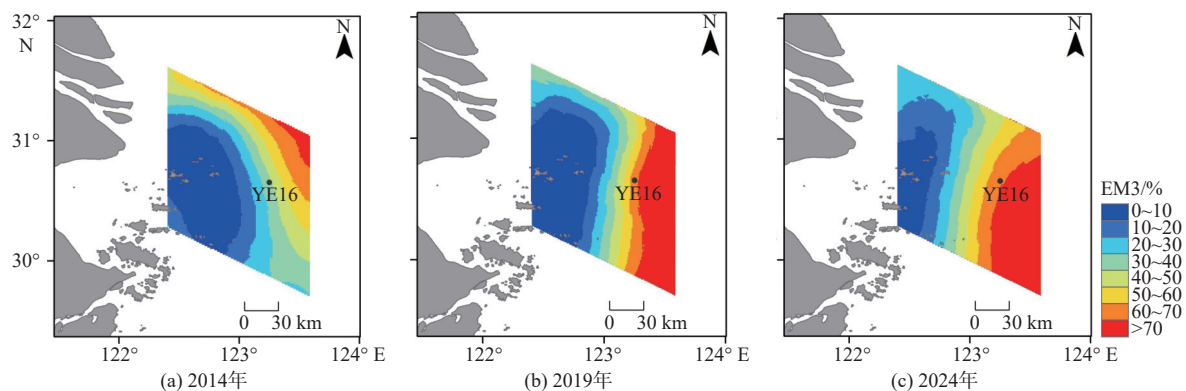


图 9 2014、2019、2024 年长江口外海域表层沉积物 EM3 端元占比

Fig.9 Proportion of the EM3 end-member in surficial sediments off the Yangtze River Estuary in 2014, 2019, and 2024

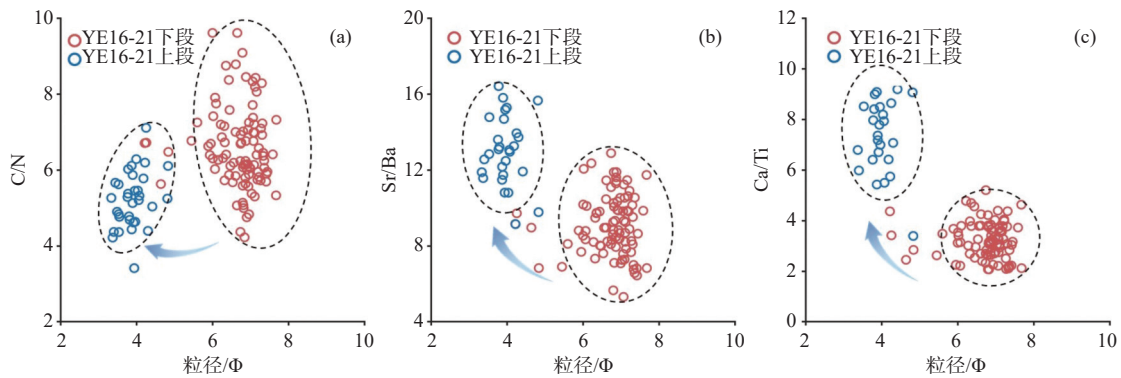


图 10 YE16-21 上、下两段 C/N (a)、Sr/Ba (b)、Ca/Ti (c) 比值变化特征

Fig.10 Variations of C/N (a), Sr/Ba (b), and Ca/Ti (c) ratios along with grain size of sediments in core YE16-21

沉积具有较低的 C/N 比值和较高的 Sr/Ba、Ca/Ti 比值, 均反映上段沉积时海源物质输入在增加^[37,56-58]。上述特征与中陆架砂质区的沉积物特征相符, 表明来自砂质区的老的粗颗粒沉积物对 YE16 站位的影响显著。

中陆架砂质粗颗粒沉积物被搬运至砂泥过渡区可能受到了风暴事件的影响。在风暴浪的强烈影响下, 陆架区砂质沉积物能够被侵蚀和向岸搬运, 造成内陆架泥质沉积物粗化^[51,59-61]。风暴的持续时间虽然短, 但其能量很强且波动较大, 所造成的影响不容忽视。如 YANG 等^[52]估算了 2015 年 Chan-Hom 台风的影响, 其波流联合剪切应力可达 0.26 N/m^2 , 能使平均粒度约 $500 \mu\text{m}$ 的粗砂启动搬运。XU 等^[62]发现 Danas 台风通过东海陆架时, 强风浪作用的影响深度可至 110 m 水深。YE16 站位水深约 55 m, EM3 端元以中细砂成分为主, 若要启动和向陆搬运该粒级沉积物, 需强台风过境此海域时才有可能发生^[39,50]。在气候变化的背景之下, 西北太平洋生成的 4~5 级强台风年发生数量与持续天数均在升高^[63-64], 很可能是导致砂泥过渡带西迁加速和砂质沉积层变厚的原因。由于 YE16 柱状样上段受到生物扰动和重力柱采样等影响, 砂质层沉积构造并不发育(图 3), 未能看到典型的台风暴沉积构造, 但根据 YE16 站位的水深条件和周边沉积环境, 结合上述的砂质层粒度组成、特征元素比值和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度分析, 均表明该砂质沉积物来源于站位东侧的变余砂质区, 而台风暴强动力是造成中陆架粗砂沉积物能够被再搬运至砂泥过渡带沉积的主要动力机制。

综上所述, 研究区表层沉积物与 YE16 柱状沉积物的粗化可归因于中陆架砂质沉积输入增强与长江入海泥沙减少的双重影响。前者通过极端高能事件输入粗粒沉积, 主要影响砂泥过渡带西迁和

粗化, 后者则通过减少陆源供给削弱细粒沉积的稀释效应, 共同导致了研究区沉积物持续粗化。在长江泥沙通量减少与极端事件影响增强的共同作用下, 未来砂泥过渡带沉积物粗化趋势可能会持续。

4 结论

本文详细研究了长江口外砂泥过渡带沉积物粒度及端元组成变化特征, 结合有机元素和特征元素比值分析, 探讨了砂泥过渡带沉积物粗化趋势和控制因素, 得出以下主要认识:

(1) 利用粒级-标准偏差法与组分分析法划分出沉积物粒度组成的 3 个端元, 其中, EM1 与 EM2 分别是现代长江入海沉积物的悬移质和底移质组分, 而 EM3 代表陆架砂质沉积经台风等高能事件再悬移、向岸搬运的组分。EM3 组分为主的沉积物 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 放射性活度低, 且具有较低的 C/N 比值和较高的 Sr/Ba、Ca/Ti 比值, 说明其母源沉积物年龄较老且以海源生源组分占主导, 进一步佐证 EM3 组分来源于中陆架变余砂质区。

(2) 时间序列表层沉积物粒度组成对比结果表明, 近期砂泥过渡带不断向岸迁移; 对过渡带上 YE16 站位不同年份获取的柱状样沉积物特征开展对比研究发现, 柱状样顶部砂质沉积层以实变的界面上覆于下部的泥质沉积层, 且近年砂质沉积物粒度快速变粗且厚度增加较快, 这与近期因长江入海泥沙减少和较多强台风影响该海区相关, 二者共同作用导致砂泥过渡带外边界加速向陆迁移。

参考文献:

- [1] DUNN F E, DARBY S E, NICHOLLS R J, et al. Projections of declining fluvial sediment delivery to major deltas worldwide in response to climate change and anthropogenic stress[J]. Envir-

- onmental Research Letters, 2019, 14: 084034.
- [2] DETHIER E N, RENSHAW C E, MAGILLIGAN F J. Rapid changes to global river suspended sediment flux by humans[J]. Science, 2022, 376(6600): 1447-1452.
- [3] SYVITSKI J P M, KETTNER A J, OVEREEM I, et al. Sinking deltas due to human activities[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(10): 681-686.
- [4] SYVITSKI J P M, SAITO Y. Morphodynamics of deltas under the influence of humans[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 57(3/4): 261-282.
- [5] VOROSMARTY C J, SYVITSKI J, DAY J, et al. Battling to save the world's river deltas[J]. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 2009, 65(2): 31-43.
- [6] NIENHUIS J H, ASHTON A D, EDMONDS D A, et al. Global-scale human impact on delta morphology has led to net land area gain[J]. *Nature*, 2020, 577: 514-518.
- [7] VOROSMARTY C J, MEYBECK M, FEKETE B, et al. Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments[J]. *Global and Planetary Change*, 2003, 39(1/2): 169-190.
- [8] GIOSAN L, SYVITSKI J, CONSTANTINESCU S, et al. Climate change: protect the world's deltas[J]. *Nature*, 2014, 516(7529): 31-33.
- [9] WALLING D E. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers[J]. *Geomorphology*, 2006, 79(3/4): 192-216.
- [10] LIU J P, XU K H, LI A C, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea[J]. *Geomorphology*, 2007, 85(3/4): 208-224.
- [11] XU K H, LI A C, LIU J P, et al. Provenance, structure, and formation of the mud wedge along inner continental shelf of the East China Sea: a synthesis of the Yangtze dispersal system[J]. *Marine Geology*, 2012, 291: 176-191.
- [12] FAN D D, WU Y J, ZHANG Y, et al. South Flank of the Yangtze Delta: past, present, and future[J]. *Marine Geology*, 2017, 392: 78-93.
- [13] YANG S L, MILLIMAN J D, LI P, et al. 50, 000 dams later: erosion of the Yangtze River and its delta[J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 75(1/2): 14-20.
- [14] DAI Z J, MEI X F, FAGHERAZZI S, et al. Decline in suspended sediment concentration delivered by the Changjiang (Yangtze) River into the East China Sea between 1956 and 2013[J]. *Geomorphology*, 2016, 268: 123-132.
- [15] LUAN H L, DING P X, WANG Z B, et al. Decadal morphological evolution of the Yangtze Estuary in response to river input changes and estuarine engineering projects[J]. *Geomorphology*, 2016, 265: 12-23.
- [16] 左书华, 杨春松, 付桂, 等. 长江口入海水沙通量变化及其影响分析 [J]. *海洋地质前沿*, 2022, 38(11): 56-64.
- ZUO S H, YANG C S, FU G, et al. Variation of water and sediment flux and its influence on the Yangtze River Estuary[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(11): 56-64.
- [17] GUO X J, FAN D D, ZHENG S W, et al. Revisited sediment budget with latest bathymetric data in the highly altered Yangtze (Changjiang) Estuary[J]. *Geomorphology*, 2021, 391: 107873.
- [18] WU Y J, FAN D D, SU J F. Cascading erosion in the tide-dominated Changjiang Delta: a novel radionuclide approach[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51: e2024GL113057.
- [19] 沈华梯, 梁居廷, 王秀昌. 东海陆架残留沉积物的改造 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1984, 4(2): 67-76.
- SHEN H T, LIANG J T, WANG X C. Reworking of relict sediments on the continental shelf of the East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1984, 4(2): 67-76.
- [20] 沈华梯. 东海陆架残留沉积时代和成因模式 [J]. *海洋学报 (中文版)*, 1985, 7(1): 67-77.
- SHEN H T. The time and genetic model of the relict sediment on the continental shelf of East China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1985, 7(1): 67-77.
- [21] 刘振夏, 印萍, BERNE S, 等. 第四纪东海的海进层序和海退层序 [J]. *科学通报*, 2001(S1): 74-79.
- LIU Z X, YIN P, BERNE S. Transgressive and regressive sequences in the East China Sea during the Quaternary[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001(S1): 74-79.
- [22] LUO X X, YANG S L, WANG R S, et al. New evidence of Yangtze Delta recession after closing of the Three Gorges Dam[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 41735.
- [23] LUO X X, YANG S L, ZHANG J. The impact of the Three Gorges Dam on the downstream distribution and texture of sediments along the middle and lower Yangtze River (Changjiang) and its estuary, and subsequent sediment dispersal in the East China Sea[J]. *Geomorphology*, 2012, 179: 126-140.
- [24] YANG H F, YANG S L, XU K H, et al. Erosion potential of the Yangtze Delta under sediment starvation and climate change[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 10535.
- [25] ZHAN Q, LI M T, LIU X Q, et al. Sedimentary transition of the Yangtze subaqueous delta during the past century: inspiration for delta response to future decline of sediment supply[J]. *Marine Geology*, 2020, 428: 106279.
- [26] 韦璐, 范代读, 吴伊婧, 等. 近百年来长江水下三角洲洪水记录与控制机理 [J]. *地质通报*, 2021, 40(5): 707-720.
- WEI L, FAN D D, WU Y J, et al. High resolution flood records in the Yangtze subaqueous delta during the past century and control mechanism[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(5): 707-720.
- [27] RICHARD A D J, ROBERT W D. Principle of Tidal Sedimentology[M]/FAN D D. Open-coastal tidal flats. Dordrecht: Springer, 2012: 187-229.
- [28] WU Y J, FAN D D, WANG D L, et al. Increasing hypoxia in the Changjiang Estuary during the last three decades deciphered from sedimentary redox-sensitive elements[J]. *Marine Geology*, 2020, 419: 106044.
- [29] HU G, LI A C, LIU J, et al. High resolution records of flood deposition in the mud area off the Changjiang River Mouth during the past century[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limno-*

- logy, 2014, 32(4): 909-920.
- [30] ZHAO Y F, ZOU X Q, GAO J H, et al. Recent sedimentary record of storms and floods within the estuarine-inner shelf region of the East China Sea[J]. *Holocene*, 2016, 27: 439-449.
- [31] ZHANG K D, LI A C, ZHANG J, et al. Recent sedimentary records in the East China Sea inner shelf and their response to environmental change and human activities[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, 36: 1537-1555.
- [32] 蔡国富, 范代读, 尚帅, 等. 图解法与矩值法计算的潮汐沉积粒度参数之差异及其原因解析 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(1): 195-204.
- CAI G F, FAN D D, SHANG S, et al. Difference in grain-size parameters of tidal deposits derived from the graphic and its potential causes[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(1): 195-204.
- [33] DAI Z J, LIU J T, WEI W, et al. Detection of the Three Gorges Dam influence on the Changjiang (Yangtze River) submerged delta[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 6600.
- [34] YANG H F, YANG S L, MENG Y, et al. Recent coarsening of sediments on the southern Yangtze subaqueous delta front: a response to river damming[J]. *Continental Shelf Research*, 2018, 155: 45-51.
- [35] SOLOVEV V, KIREVA N, OVCHINNIKOVA S, et al. The complexation of metal ions with various organic ligands in water: prediction of stability constants by QSPR ensemble modeling[J]. *Journal of Incl Phenom Macrocycl Chem*, 2015, 83: 89-101.
- [36] WEI G J, LIU Y, LI X H, et al. Climatic impact on Al, K, Sc and Ti in marine sediments: evidence from ODP Site 1144, South China Sea[J]. *Geochemical Journal*, 2003, 37(5): 593-602.
- [37] 高抒, 贾建军, 杨阳, 等. 陆架海岸台风沉积记录及信息提取 [J]. *海洋学报*, 2019, 41(10): 141-159.
- GAO S, JIA J J, YANG Y, et al. Obtaining typhoon information from sedimentary records in coastal-shelf waters[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 41(10): 141-160.
- [38] TIAN Y, FAN D J, ZHANG X L, et al. Event deposits of intense typhoons in the muddy wedge of the East China Sea over the past 150 years[J]. *Marine Geology*, 2019, 410: 109-121.
- [39] LU J, LI A C, ZHANG J, et al. Sedimentary record off the Yangtze River Estuary and its response to typhoons and human activities over the past 70 years[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2023, 65: 103074.
- [40] SUN X S, FAN D J, TIAN Y, et al. Normalization of excess ^{210}Pb with grain size in the sediment cores from the Yangtze River Estuary and adjacent areas: implications for sedimentary processes[J]. *The Holocene*, 2017, 28(4): 545-557.
- [41] 肖尚斌, 李安春. 东海内陆架泥区沉积物的环境敏感粒度组分 [J]. *沉积学报*, 2005, 23(1): 122-129.
- XIAO S B, LI A C. A study on environmentally sensitive grain size population in inner shelf of the East China Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(1): 122-129.
- [42] 赵松, 常凤鸣, 李铁刚, 等. 粒度端元法在东海内陆架古环境重建中的应用 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(3): 187-195.
- ZHAO S, CHANG F M, LI T G, et al. The application of grain-size end member algorithm to paleoenvironmental reconstruction on inner shelf of the East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(3): 187-195.
- [43] BOULAY S, COLIN C, TRENTESUAX A. Mineralogy and sedimentology of Pleistocene sediment in the SCS (ODP site 114)[J]. *Pleistocene Mineralogy and Sedimentology*, 2003, 184: 1-21.
- [44] WELTJE G J. End-member modeling of compositional data: numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem[J]. *Mathematical Geology*, 1997, 29(4): 503-549.
- [45] DIETZE E, HARTMANN K, DIEKMANN B, et al. An end-member algorithm for deciphering modern detrital processes from lake sediments of Lake Donggi Cona, NE Tibetan Plateau, China[J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 243: 169-180.
- [46] YU S Y, COLMAN S M, LI L X. BEMMA: a hierarchical Bayesian end-member modeling analysis of sediment grain-size distributions[J]. *Mathematical Geosciences*, 2016, 48(6): 723-741.
- [47] VRIEND M, PRINS M A. Calibration of modelled mixing patterns in loess grain-size distributions: an example from the north-eastern margin of the Tibetan Plateau, China[J]. *Sedimentology*, 2005, 52(6): 1361-1374.
- [48] 李帅, 杨胜利, 梁敏豪, 等. 青藏高原东部黄土粒度分布的端元模型研究 [J]. *地球与环境*, 2018, 46(4): 331-338.
- LI S, YANG S L, LIANG M H, et al. The end member model analysis on grain size of loess in the eastern Tibetan Plateau[J]. *Earth and Environment*, 2018, 46(4): 331-338.
- [49] 孙有斌, 高抒, 李军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析 [J]. *科学通报*, 2003, 48(1): 83-86.
- SUN Y B, GAO S, LI J. Preliminary analysis of environmentally sensitive grain-size components in terrigenous materials from marginal seas[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(1): 83-86.
- [50] LIN T W, KABOTH-BAHR S, YAMOAH K A, et al. East Asian winter monsoon variation during the last 3 000 years as recorded in a subtropical mountain lake, northeastern Taiwan[J]. *Holocene*, 2021, 31(9): 1430-1442.
- [51] LU J, LI A C, DONG J, et al. Impact of Typhoon Talim on surface sediment records on the East China Sea continental shelf[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2021, 259: 107479.
- [52] YANG Y, PIPER D J W, XU M, et al. Northwestern Pacific tropical cyclone activity enhanced by increased Asian dust emissions during the Little Ice Age[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1712.
- [53] 宁泽, 徐磊, 林学辉, 等. 东海东北部陆架表层沉积物碎屑矿物分布及其物源分析 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(5): 58-69.
- NING Z, XU L, LIN X H, et al. Distribution and provenance of detrital minerals in surface sediments of the northeastern East

- China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(5): 58-69.
- [54] 刘升发, 刘焱光, 朱爱美, 等. 东海内陆架表层沉积物粒度及其净输运模式 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(1): 1-6.
- LIU S F, LIU Y G, ZHU A M, et al. Grain size trends and net transport patterns of surface sediments in the East China Sea inner continental shelf[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(1): 1-6.
- [55] FAN D D, SHANG S, CAI G F, et al. Distinction and grain-size characteristics of intertidal heterolithic deposits in the middle Qiantang Estuary[J]. *Geo-Marine Letters*, 2014, 35: 161-174.
- [56] MEYERS P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes[J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27(5/6): 213-250.
- [57] LAMB A L, WILSON G P, LENG M J. A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios in organic material[J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 75(1/4): 29-57.
- [58] XIAN H B, DONG X H, LI Y, et al. High-resolution reconstruction of typhoon events since ~1850 CE based on multi-proxy sediment records in a coastal lagoon, South China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 803: 150063.
- [59] 卢健, 姜静波, 李安春, 等. 东海内陆架夏季台风与冬季寒潮沉积动力过程的差异: 基于现场观测的认识 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2023, 43(5): 96-105.
- LU J, JIANG J B, LI A C, et al. Differences in sedimentary dynamic processes between summer typhoons and winter cold waves on the inner shelf of the East China Sea: insights from in-situ observations[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023, 43(5): 96-105.
- [60] 丛帅, 吴晓, 齐富康, 等. 台风期间东海内陆架跨陆架沉积物输运及其调控机制 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2024, 44(5): 38-49.
- CONG S, WU X, QI F K, et al. Cross-shelf sediment transport and its regulatory mechanisms on the inner shelf of the East China Sea during typhoon events[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2024, 44(5): 38-49.
- [61] LI W J, WANG Z Y, LEE G H, et al. Ecological and sediment dynamics response to typhoons passing from the east and west sides of the Changjiang (Yangtze River) Estuary and its adjacent sea area[J]. *Marine Geology*, 2024, 467: 107188.
- [62] XU J S, WANG N, LI G X, et al. The dynamic responses of flow and near-bed turbidity to typhoons on the continental shelf of the East China Sea: field observations[J]. *Geological Journal*, 2016, 51: 12-21.
- [63] KNUTSON T R, SIRUTIS J J, ZHAO M, et al. Global projections of intense tropical cyclone activity for the late twenty-first century from dynamical downscaling of CMIP5/RCP4.5 scenarios[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(18): 7203-7224.
- [64] MEI W, XIE S P. Intensification of landfalling typhoons over the northwest Pacific since the late 1970s[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(10): 753-757.

Sediment coarsening trend and genetic analysis of the sandy-muddy transitional zone off the Yangtze River Estuary

HUANG Yuhan, FAN Daidu*, WU Yijing

(State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A narrow sandy-muddy transitional zone exists offshore the Yangtze River Estuary, separating the muddy subaqueous delta from the sandy East China Sea shelf, which is highly sensitive to the changes in fluvial sediment supply and marine hydrodynamic dynamics. We investigated decadal-scale changes in surface sediment grain size offshore the estuary and examined two sediment cores in YE16 site collected in two consecutive years from the transitional zone, focusing on grain size, elemental ratios, organic compositions, and radionuclides. Results reveal a recent landward migration of the outer boundary of the transitional zone, obvious surface sediment coarsening, and rapid thickening of sandy layers overlying muddy deposits in YE16 site. Grain-size end-member (EM) analysis via the grain size-standard deviation method and component partitioning identified a pronounced increase in EM3 (medium-fine sand end-member) in YE16 cores. Sediments dominated by EM3 display lower C/N ratios, elevated Sr/Ba and Ca/Ti ratios, and depleted excess ^{210}Pb and ^{137}Cs activities, indicating older provenance with marine biogenic dominance. Integrated analysis attributes the EM3 increase to resuspension and on-shore transport of relict mid-shelf sandy sediments driven by high-energy events (e.g., storm waves). This mechanism of exogenic input coupled with drastic reductions in Yangtze-derived sediment, forms a dual driver for coarsening: exogenic sand compensates coarse fractions directly, while diminished fine sediment supply weakens the dilution effects. These combined processes explain recent landward migration, surface coarsening, and sandy layer thickening. Against intensifying extreme climatic events and watershed human activities, ongoing monitoring of the transitional zone's evolution and environmental impacts is imperative.

Key words: sandy-muddy transitional zone; sediment coarsening; grain-size end-member analysis; watershed anthropogenic disturbance; high-energy storm wave events