

近40年来长江口沉积物粒度变化及其对底床冲淤的响应

陈雅望, 盛辉, 许庆华, 曲玉冰, 邢飞, 李占海, 汪亚平

Analysis of sediment grain size change and its response to erosion and deposition pattern within the Yangtze River Estuary for the past 40 years

CHEN Yawang, SHENG Hui, XU Qinghua, QU Yubing, XING Fei, LI Zhanhai, WANG Yaping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20210628002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

流域水沙变化和人类活动对长江口河槽演变的影响

New trends of river channel evolution of the Yangtze River estuary under the influences of inflow and sediment variations and human activities

水利水运工程学报. 2021(2): 1 <https://doi.org/10.12170/20200313001>

2015年长江口航道运行维护特征分析

Characteristic analysis of dredging maintenance for Yangtze River estuary deepwater navigation channel in 2015

水利水运工程学报. 2017(2): 82 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.02.011>

1958年以来长江口南、北支河段河床演变及影响因素研究

Riverbed evolution and its influencing factors in the South Branch and the North Branch of the Yangtze River estuary since 1958

水利水运工程学报. 2021(2): 27 <https://doi.org/10.12170/20210105003>

长江口水源地取水口盐度对径潮动力的响应

Response of salinity at water source intakes to runoff and tidal dynamics of Yangtze River estuary

水利水运工程学报. 2018(5): 14 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.003>

浙江沿海及长江口同步潮位数据比较分析

Comparative analysis of synchronous tidal data from Zhejiang coast and Yangtze River estuary

水利水运工程学报. 2017(2): 100 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.02.013>

地形变异条件下长江口南港河段水动力变化

Hydrodynamic changes in south channel of Yangtze River estuary under topographic variation conditions

水利水运工程学报. 2020(1): 51 <https://doi.org/10.12170/20181223001>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20210628002

陈雅望, 盛辉, 许庆华, 等. 近40年来长江口沉积物粒度变化及其对底床冲淤的响应[J]. 水利水运工程学报, 2021(5): 8-18. (CHEN Yawang, SHENG Hui, XU Qinghua, et al. Analysis of sediment grain size change and its response to erosion and deposition pattern within the Yangtze River Estuary for the past 40 years[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(5): 8-18. (in Chinese))

近40年来长江口沉积物粒度变化及其对底床冲淤的响应

陈雅望¹, 盛辉¹, 许庆华², 曲玉冰³, 邢飞¹, 李占海¹, 汪亚平^{1,3}

(1. 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200241; 2. 有色金属华东地质勘查局地球化学勘查与海洋地质调查研究院, 江苏南京 210007; 3. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏南京 210023)

摘要: 在全球变化和人类活动的双重驱动下, 长江口的沉积物来源、输运和河床冲淤正在经历持续性调整。为了探索近40年长江口沉积物输运和海底冲淤时空变化趋势, 基于1980—2020年长江口海底沉积物粒度和水下地形数据, 采用沉积物粒径趋势模型和多种空间分辨率网格统计分析方法开展研究。结果表明, 长江口北支沉积物总体向河道中下部汇聚, 南支则在南、北港分流处靠近崇明岛区域形成沉积中心, 该结果与基于2012—2020年地形计算的冲淤变化基本相符, 沉积中心具有较大的淤积幅度。多年统计结果表明: 1980—2003年为高强度输沙时期, 整个河口区处于淤积状态, 沉积物粒径变细但整体变幅较小; 2003—2012年河流输沙量快速降低背景下, 2009年前河口区整体依然处于淤积状态, 粒径变化不显著; 2009—2012年是由淤积转为冲刷的过渡期, 口外区域首先出现了小范围侵蚀和沉积物粗化现象; 2012—2020年, 河口区整体出现大面积侵蚀和粒径粗化现象, 粒径与侵蚀变化间呈显著相关。研究发现, 高分辨统计网格可以更有效地捕捉到小范围地貌由淤转冲的信号。总体而言, 近40年来, 长江口已经由显著淤积转为局部侵蚀, 未来可能面临持续性的海岸侵蚀灾害。

关键词: 长江口; 粒度; 海底冲淤; 拦门沙; 水下三角洲; 粒径趋势分析

中图分类号: TV856

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2021)05-0008-11

在全球变化和人类工程建设的影响下, 长江流域水沙关系变化显著, 特别是三峡大坝开始蓄水以后, 流域来沙呈现急剧减少趋势。长江口深水航道工程^[1]、围填海工程^[2]和水库建设^[3]显著改变了原有的水沙关系。在已有研究中, 李一鸣等^[4]基于2016年长江口表层沉积物发现长江口沉积物中值粒径存在明显的空间差异性, 其中北港、北支口外及南北支上段沉积物颗粒较粗, 细颗粒沉积物则主要集中在北支中段及南北槽下段区域, 相较1980年代发生了显著变化。朱强等^[5]发现在上游来沙减少和人类活动的影响下, 近年来长江口沉积物粒度整体呈现自上游向下游变细趋势。代炳珂等^[6]认为南、北支河段冲淤差异显著, 在径流和水沙变化的影响下河床逐渐向平衡态势发展。刘杰等^[7]则发现在流域减沙和人类活动等因素影响下滩槽格局基本稳定, 2002—2003年为长江口河槽由淤转冲的转折时期。Gao等^[8]认为2003年三峡大坝蓄水后整个长江水下三角洲在短时间内从淤积转变为侵蚀, 长江中下游及其水下三角洲转化为净沉积物源。

综上所述, 前人虽然对长江口表层沉积物粒度变化或者河床演变单因素变化取得了一些研究成果, 但对河口内沉积物粒度的40年长期变化及其对流域过程、河口局地冲淤的响应关系尚缺乏综合性深入研究。为此, 本文在获取40年来长江口水下地形和表层沉积物粒度的基础上, 对沉积物粒度变化及其对流域

收稿日期: 2021-06-28

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年科学基金项目(41625021); 上海市教育委员会科研创新计划自然科学重大项目(2019-01-07-00-05-E00027)

作者简介: 陈雅望(1997—), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要从事河口动力与演化研究。

E-mail: 17866638645@163.com 通信作者: 汪亚平(E-mail: ypwang@nju.edu.cn)

过程和河口冲淤变化的响应进行定量分析, 从而加深对长江口演变过程和趋势的认识, 为区域环境保护和可持续发展提供科学依据。

1 研究区域概况

本文主要研究区域为徐六泾以东至水深约 20 m(东经 122.5°)海域(图 1), 包括北支、徐六泾-横沙、横沙-九段沙及口外区域。长江口径流量丰沛且洪枯季变化显著, 多年平均径流量 29 300 m³/s, 其中洪季占比约 70%。研究区所在海域波浪类型以风浪为主, 拦门沙以外多为旋转流, 以正规半日潮占优, 多年平均潮差 2.7 m, 最大潮差为 4.6 m^[9]。自 1950 年以来, 进入北支的径流量减少, 涨潮分流比由 25% 下降到近年的 10%, 落潮分流比从 10% 左右下降至 3% 左右^[6]。近年来长江流域和河口人类活动加剧, 长江流域兴修闸坝水库工程及流域水土保持工程拦截沉积物, 使得流域来沙量急剧减少; 长江口深水航道建设工程以及促淤圈围工程在稳定岸滩的同时也改变了局部河槽形态。

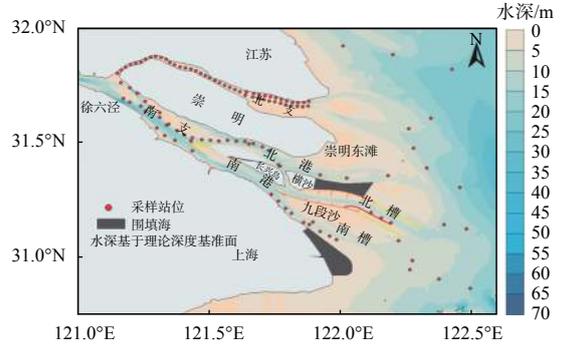


图 1 长江口平面形态和采样站位

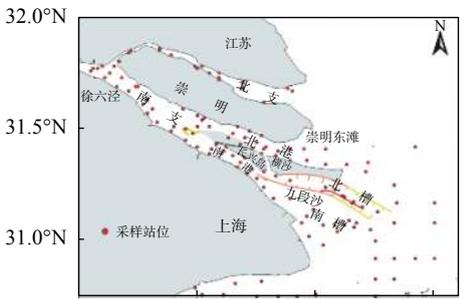
Fig. 1 Map of Yangtze River Estuary showing locations of surface sediment sampling

2 材料与方 法

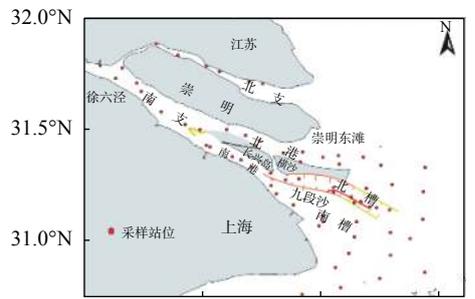
2.1 样品采集与分析

2020 年 4—6 月, 采用抓斗式采泥器在长江口及其邻近海域(30.7° N~31.8° N, 121.1° E~122.5° E)(图 1)取得 153 个站位的表层沉积物样品(底床以下 5~10 cm)。这些样品取回实验室后, 使用 Mastersizer 2000 激光粒度仪测量其粒度分布; 为了方便与前人的数据对比, 相关的粒度参数计算则使用 Folk 和 Ward 图解法^[10]。

本研究还搜集了长江口 1982 年(月份不详)、2003 年 2 月、2007 年 4 月—2009 年 7 月、2012 年 3 月和 2020 年 4 月等 5 个时段对应的 145、88、255、145 和 153 个采样点的沉积物中值粒径数据^[5, 11-13]。采样点站位具体分布见图 2。其中 1982 年、2003 年和 2009 年粒度试验采用的是吸管-筛析法, 2012 年数据则通过激光粒度仪测量。为获取统一标准的粒度数据, 本文基于杨海飞等^[14]研究将吸管-筛析法获取的粒度数据统一校正到激光粒度仪标准。数据校正后采用地统计 Kriging 方法插值, 获取同样分辨率下规则网格的中值粒径空间分布, 使用 Surfer 的 Grid 模块计算特定年份间的中值粒径年平均变化值(即中值粒径变化率)。



(a) 1982 年采样站位



(b) 2003 年 2 月采样站位

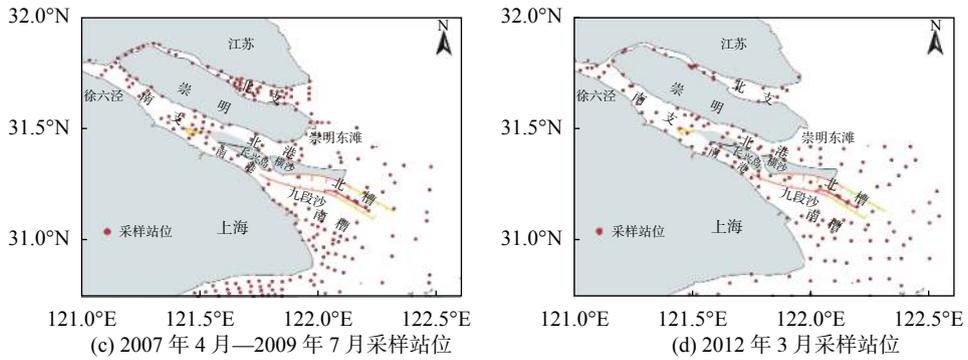


图 2 不同年份表层沉积物采样站位

Fig. 2 Locations of surface sediment sampling in different periods

2.2 长江口地形数据

基于长江大通输沙量变化的时间节点,本文搜集了1985、2001、2005、2009、2012、2020年6期海图资料(来源于上海海事局和上海市地质调查研究院,详见表1)。使用ArcGIS软件分别将上述资料进行数字化处理获取水深数据,统一转换到WGS84大地坐标系和理论深度基准面。采用地统计Kriging方法插值,获取同样空间分辨率规则网格的长江口海底地形,插值后使用Surfer中的Grid和Volume模块计算出特定年份间对应的总冲淤量和冲淤速率。长江口为浅水海域,实测水深数据点密集,通过数据对比判定由于插值造成的误差小于1%^[15]。

表 1 实测海图数据资料来源

Tab. 1 Sources of measured bathymetry data from sea charts

年份	海图名称	比例尺	坐标系	深度基准面
1985	北水道及海门水道	1 : 120 000	1954北京坐标系	理论深度基准面
2001	长江口北部	1 : 120 000	1954北京坐标系	理论最低潮面
	长江口及附近	1 : 120 000	1954北京坐标系	理论最低潮面
2005	长江口北部	1 : 120 000	2000国家大地坐标系	理论最低潮面
	长江口及附近	1 : 120 000	2000国家大地坐标系	理论最低潮面
2009	长江口北部	1 : 120 000	2000国家大地坐标系	理论最低潮面
	长江口及附近	1 : 150 000	2000国家大地坐标系	理论最低潮面
2012	长江口北支水道	1 : 60 000	2000国家大地坐标系	理论最低潮面
	长江口及附近	1 : 150 000	2000国家大地坐标系	理论最低潮面
2020	长江口北部	1 : 120 000	2000国家大地坐标系	理论最低潮面
	长江口及附近	1 : 130 000	2000国家大地坐标系	理论最低潮面

2.3 沉积物粒径趋势分析

本文采用粒径趋势分析模型计算沉积物净输运方向。此方法依据沉积物粒度参数的二维分布来判断沉积物输运趋势,已经被广泛运用在河口海岸等多种环境^[16-17]。具体算法如下:根据粒度参数的空间分布,首先计算从一个采样点指向另一个采样点的粒径趋势矢量,两点之间的特征距离通常为最大采样间距;然后将每一个采样点的所有趋势矢量求和,得到一个新矢量;最后对所有矢量进行平滑处理,消除噪声,得到最终的粒径趋势图像。值得注意的是,矢量方向代表沉积物净输运方向,矢量不代表沉积物输运强度。

2.4 区域统计分析

为便于对比不同时期长江口内沉积物粒度变化和河床冲淤变化,使用不同分辨率将整个研究区剖分为若干正方形网格,根据Kriging方法空间插值得到相同空间分辨率规则网格下的底床冲淤和中值粒径空间分布,使用Surfer软件的Grid模块统计不同分辨率下每个正方形网格内不同时期中值粒径和水深变化值。本文采用了2种网格划分方法:0.1°×0.1°(图3(a))和0.2°×0.2°(图3(b))。根据划分结果,选择数据覆盖面积

超过 40% 的网格计算每个网格内的平均中值粒径变化和冲淤深度变化, 进而探究沉积物粒度对海底冲淤变化的响应。

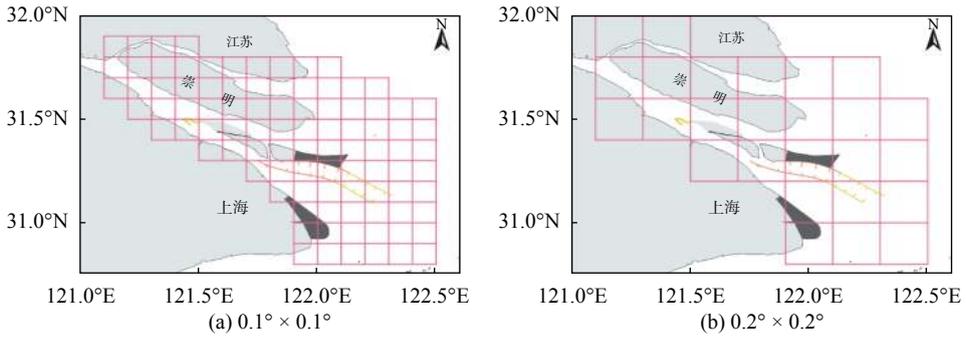


图 3 长江口不同空间分辨率网格划分方法

Fig. 3 Grids with different spatial resolutions for sediment grain size analysis within Yangtze River Estuary

3 结果分析

3.1 沉积物粒度特征

近 40 年来长江河口区表层沉积物中值粒径经发生了显著变化(图 4(a) 和 (b))。1982—2003 年, 中值粒径年平均变化较小, 大部分区域中值粒径变化率小于 $5 \mu\text{m}/\text{a}$, 无明显的高值变化区域(图 4(c))。2003—2009 年, 整个海域表层沉积物中值粒径变化率与前期相似, 南支上段沉积物有变细趋势, 中值粒径变化率在 $5 \mu\text{m}/\text{a}$ 以内; 口外部分区域沉积物也呈现出变细趋势; 沉积物中值粒径粗化主要集中在长兴岛头部和南北港分流处, 中值粒径变化率最大值约为 $10 \mu\text{m}/\text{a}$ (图 4(d))。2009—2012 年, 除南、北支上段部分区域外, 大部分区域中值粒径变化率在 $10 \mu\text{m}/\text{a}$ 以内, 整体呈现略微粗化的趋势(图 4(e))。2012—2020 年, 研究区域中值粒径整体呈现迅速粗化的趋势, 粗化最快区域为北港下段, 中值粒径变化率约为 $15 \mu\text{m}/\text{a}$ (图 4(f))。

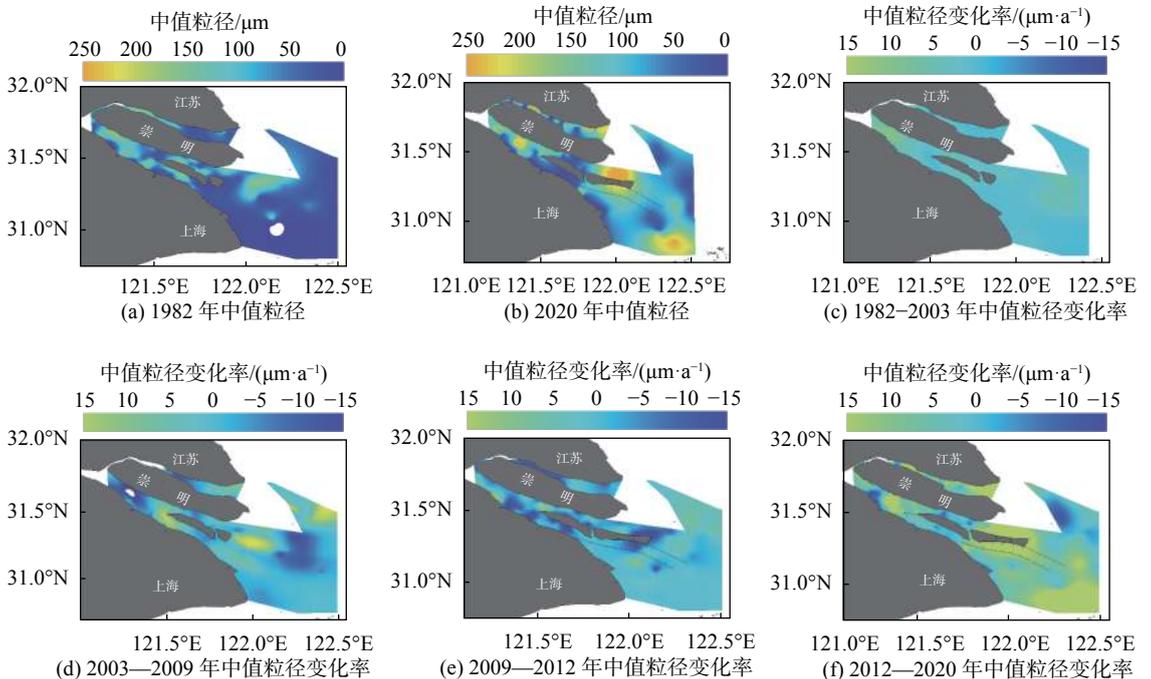


图 4 中值粒径空间分布(正值变粗, 负值变细)

Fig. 4 Spatial distribution of median grain size and annual changes (positive value means coarse)

3.2 河床冲淤特征演变

从年平均冲淤变化(图5)和不同时期冲淤面积图(图6)上可以看出,1985—2001年期间,80%以上的长江口海域处于淤积状态,淤积强度较高的区域位于北槽口拦门沙地区,淤积速率可超过0.3 m/a。2001—2005年期间,约65%的区域处于淤积状态,南支和北支整体处于淤积状态,口外区域的淤积速率有所降低,淤积强度较高的区域位于北支口门处;总体上看,整个海域淤积速率约为0.3 m/a(图5(b))。2005—2009年,淤积区域面积比例相较于2001—2005年略小,淤积面积所占比例约为60%;虽然整体仍呈现淤积态势,淤积强度较高的区域位于南槽拦门沙附近;与此同时,北港口外首先出现了小范围侵蚀区域(图5(c))。2009—2012年,研究区淤积区域面积比例降至52%,开始进入由淤转冲的过渡阶段,但总体上仍大致呈现为冲淤平衡状态;局部区域具有不同的冲淤态势,其中北支口门和九段沙呈淤积状态,长江口水下三角洲则为侵蚀(图5(d))。2012—2020年,研究区冲刷面积比例达到过去40年的最大值,约为70%,除了崇明东滩外和南支上段部分区域外,大部分地区处于侵蚀状态,区域内年平均冲刷速率达到了0.2 m/a(图5(e)),其中水下三角洲侵蚀显著加剧,北支也由淤积转为冲刷。

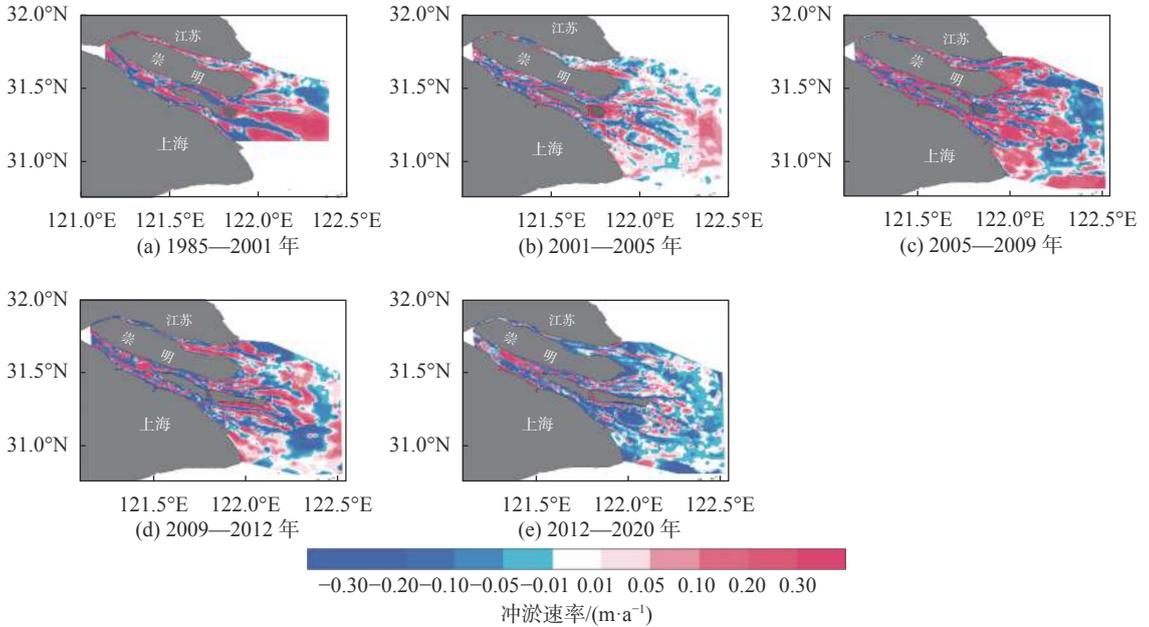


图5 年平均冲淤速率

Fig. 5 Annual average erosion and deposition rate

2009—2012年,研究区淤积区域面积比例降至52%,开始进入由淤转冲的过渡阶段,但总体上仍大致呈现为冲淤平衡状态;局部区域具有不同的冲淤态势,其中北支口门和九段沙呈淤积状态,长江口水下三角洲则为侵蚀(图5(d))。2012—2020年,研究区冲刷面积比例达到过去40年的最大值,约为70%,除了崇明东滩外和南支上段部分区域外,大部分地区处于侵蚀状态,区域内年平均冲刷速率达到了0.2 m/a(图5(e)),其中水下三角洲侵蚀显著加剧,北支也由淤积转为冲刷。

3.3 沉积物粒径趋势分析结果

在研究区域内,根据北支、徐六泾-横沙、横沙-九段沙及口外区域等不同地貌区分别选择合适的特征距离进行沉积物沉积物粒径趋势计算,同时在模型中考虑了“边缘效应”的影响,利用Gao-Collins模型计算沉积物粒径趋势,结果如图7所示。

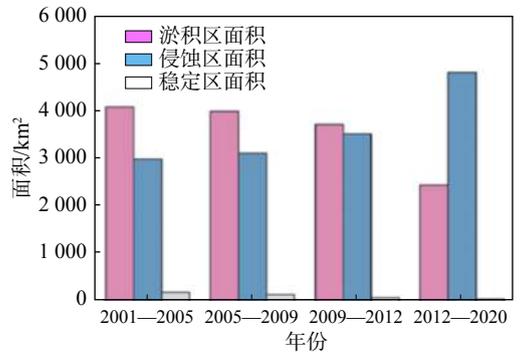


图6 不同时期冲淤面积(水深年际变化5 cm内为稳定区)
Fig. 6 Estimated erosion and deposition areas within Yangtze River Estuary for different time periods (locations with averaged annual changing rate of water depth less than 5 cm are considered as stable zones)

基于图 7(a) 的结果, 2020 年北支上游入口处沉积物有向下游输运的趋势, 这种趋势持续到大洪港一带; 大洪港至三和港之间沉积物有沿河道向上游输运的趋势; 在三和港和三条港之间, 沉积物的输运趋势又转为向下游输运; 北支口外的沉积物有向口内输运的趋势(图 7(b))。可见, 大洪港和三条港河段为堆积中心, 呈淤积状态; 而三和港河段为沉积物输运矢量的辐散区, 呈侵蚀状态, 这与海底地形冲淤结果一致(图 5(e))。与此相比, 闵凤阳等^[18] 在 2007 年基于北支表层沉积物的研究中, 发现总体上北支上段沉积物有向下游输运的趋势, 北支下段沉积物则有向中、上段输运的趋势, 整体向北支河道中部汇集; 具体来说, 大洪港至三和港之间为沉积物汇聚区(堆积中心), 而三条港为辐散区(侵蚀)(图 7(c)), 局部冲淤态势(图 5(b) 和 (c)) 有很大差异。南支上段沉积物呈现明显向下游输运的趋势, 在北港和南槽区域沉积物则向上游输运, 在南、北港分流处, 尤其是靠近崇明岛中上部海域有一个沉积物汇聚中心(图 7(b)), 该区域地形也呈显著淤积状态(图 5(e))。口外沉积物则大致沿从南向北的方向输运(图 7(a)), 可能与沿岸流的南向输运有关。

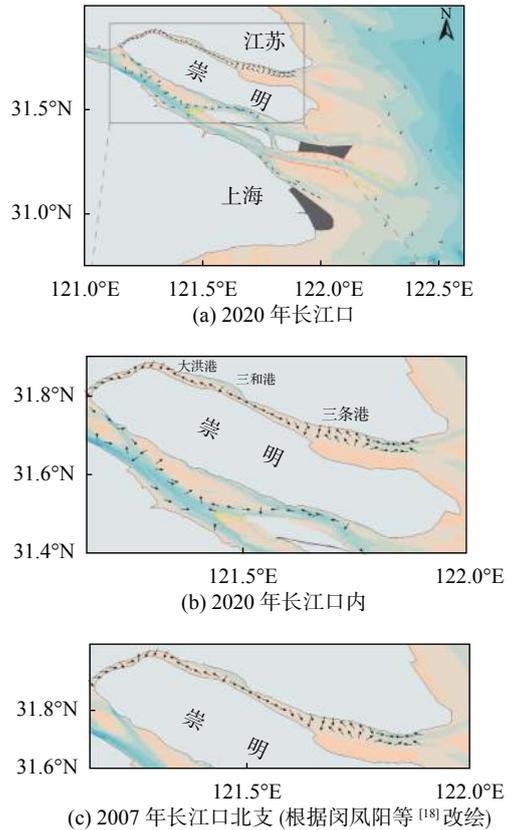
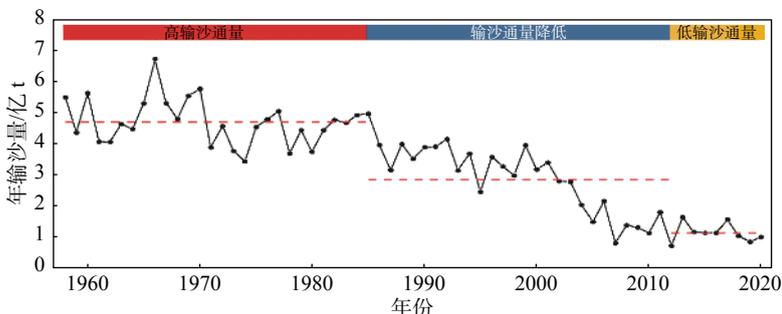


图 7 沉积物粒径趋势分析显示的长江口沉积物净输运方向
Fig. 7 Net sediment transport patterns shown by grain size trend analysis in the Yangtze River Estuary

4 讨论

4.1 粒度变化及其影响因素探讨

沉积物粒度变化与区域内诸多因素相关, 包括该区域内复杂的动力条件、物源供应和冲淤转换。物源方面, 沉积物在流域来沙充足的情况下, 总体上沉积物粒度变化不显著(图 8)。2003 年三峡大坝开始蓄水拦沙, 进入河口冲淤过渡阶段, 沉积物粒度变化趋势不显著。2009—2012 年间, 该时间段内流域来沙量进一步减小, 三峡大坝所带来影响的滞后效应开始显现, 表层细颗粒沉积物发生侵蚀, 特别是口外海域沉积物开始变粗。北支沉积物自 2012 年后迅速粗化与 2003 年前基本稳定的趋势形成鲜明的对比, 可能与该时间段内口外沉积物迅速粗化、涨潮流从口外携带粗颗粒沉积物进入北支有关。



(a) 长江大通站输沙量变化

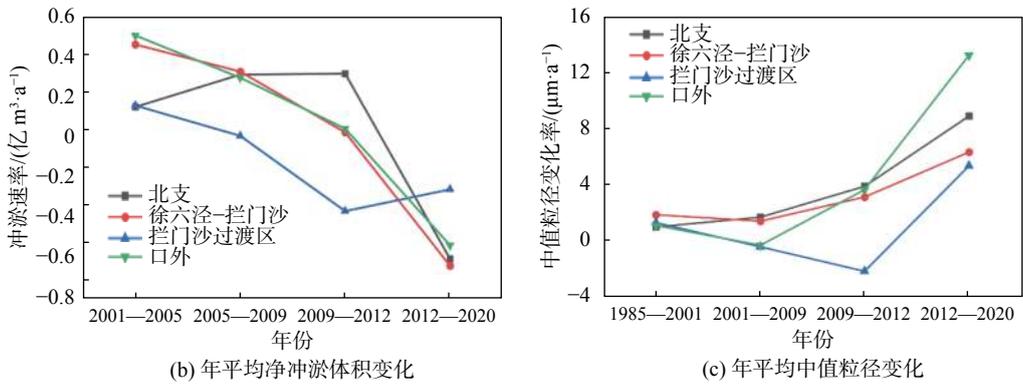


图 8 1958—2020 年长江大通站输沙量变化及不同时间段内各区域净冲淤体积和中值粒径变化

Fig. 8 Changes in fluvial sediment flux at Datong Station from 1958 to 2020; annual averaged volume of erosion/deposition; and median grain size within Yangtze River Estuary

人类工程导致的局部水动力变化同样影响着沉积物粒度的变化。青草沙水库的建设影响了南北港处的水动力和分沙比,可能导致南北港分流处小范围沉积物粗化(图 4(d));深水航道回淤带来的细颗粒沉积物,横沙东滩促淤圈围工程的影响也使得该时间段内九段沙区域沉积物有变细的趋势,特别是北港下段。近年来沉积物迅速粗化也是由于流域来沙的进一步减少,河口区总体上呈侵蚀状态,沉积物被冲刷、迅速粗化。

4.2 冲淤变化及其影响因素

长江口动力环境复杂,人类活动剧烈,其底床冲淤变化是在多种因素综合作用的结果,其中流域来沙和人类活动更是其主要影响因素。20 世纪 80 年代前,长江流域来沙量充足,长江口格局基本稳定,整体长时间处于大范围的淤积状态(图 5)。2003 年后,长江口来沙量持续减少,2012 年后年平均输沙量仅为 1.5 亿 t(图 8(a)),底床冲淤变化显著。但 2001—2005 年处于冲淤转换的过渡期,总体上依旧呈现整体淤积,与过去长江口水下三角洲向海淤进的趋势相吻合,说明长江口外的冲淤相对于三峡大坝蓄水具有一定的滞后效应。可能因素还包括:长江流域下游流域气候^[19]、人类活动^[20]和沿程泥沙补给等带来的沉积物在一定程度上弥补了流域来沙的不足。随着流域来沙量的进一步减小,2012 年侵蚀范围进一步扩大,长江口水下三角洲前沿的冲刷速率明显加快。统计结果表明,2012—2020 年间口外年平均冲刷体积达到 0.8 亿 m^3 (图 8(b))。流域大坝建设是 2012 年后水下三角洲侵蚀加剧的主要原因。

1980 年代以来,长江口兴建水库、海滩堤防和围填海等工程也是影响底床冲淤变化的重要原因。北支的围填海工程使得河道淤积状况进一步加剧,青草沙水库的建设、南沙头通道潜堤工程的建设 and 崇明岛周边的圈围工程,使局部区域水动力发生变化^[21];深水航道工程实施后丁坝的束水作用,北槽河段的水流变得相对集中,主河段发生普遍侵蚀(图 4);双导堤使得堤内形成弱水动力环境,并造成了北通道两侧的沉积^[22],研究表明未来盐水入侵可能加剧深水航道的回淤强度^[23]。

4.3 沉积物粒度变化对河口底床冲淤的响应

基于沉积物输运趋势分析的结果(图 7(a)),北支上游的沉积物和口外的沉积物都有向北支河道内部输运的趋势,这与北支近年来长期处于淤积状态的结果相吻合。北支的综合整治工程改变了北支的河势及水动力条件,虽然一直保持沉积物向北支内部净输运的大趋势,但是在人类活动影响下局部的输运趋势发生了显著变化。

2001—2012 年,在人类活动导致入海泥沙通量快速降低的背景下,河口区沉积物粒度,底床冲淤及两者间的相关关系发生了剧烈的变化(图 9)。其中,从 2001—2009 年相关性散点图可以看出低分辨率下,3 个区域散点位于 X 轴上方,同时中值粒径的变化在 2~5 μm ,变幅小,这表明在该段时间区域整体保持持续淤

积, 整体沉积环境较为稳定(图 9(a)). 中分辨率和高分辨率下, 70% 的散点均位于 X 轴上方且沉积物粒度整体呈现细化的趋势, 口外区域的散点主要集中在 X 轴附近, 基本处于冲淤平衡的状态, 在物源减少的背景下最先开始侵蚀(图 9(d) 和 (g)). 该时期内影响底床冲淤的主要因素是流域来沙, 沉积物粒度对地形变化的响应并不显著。

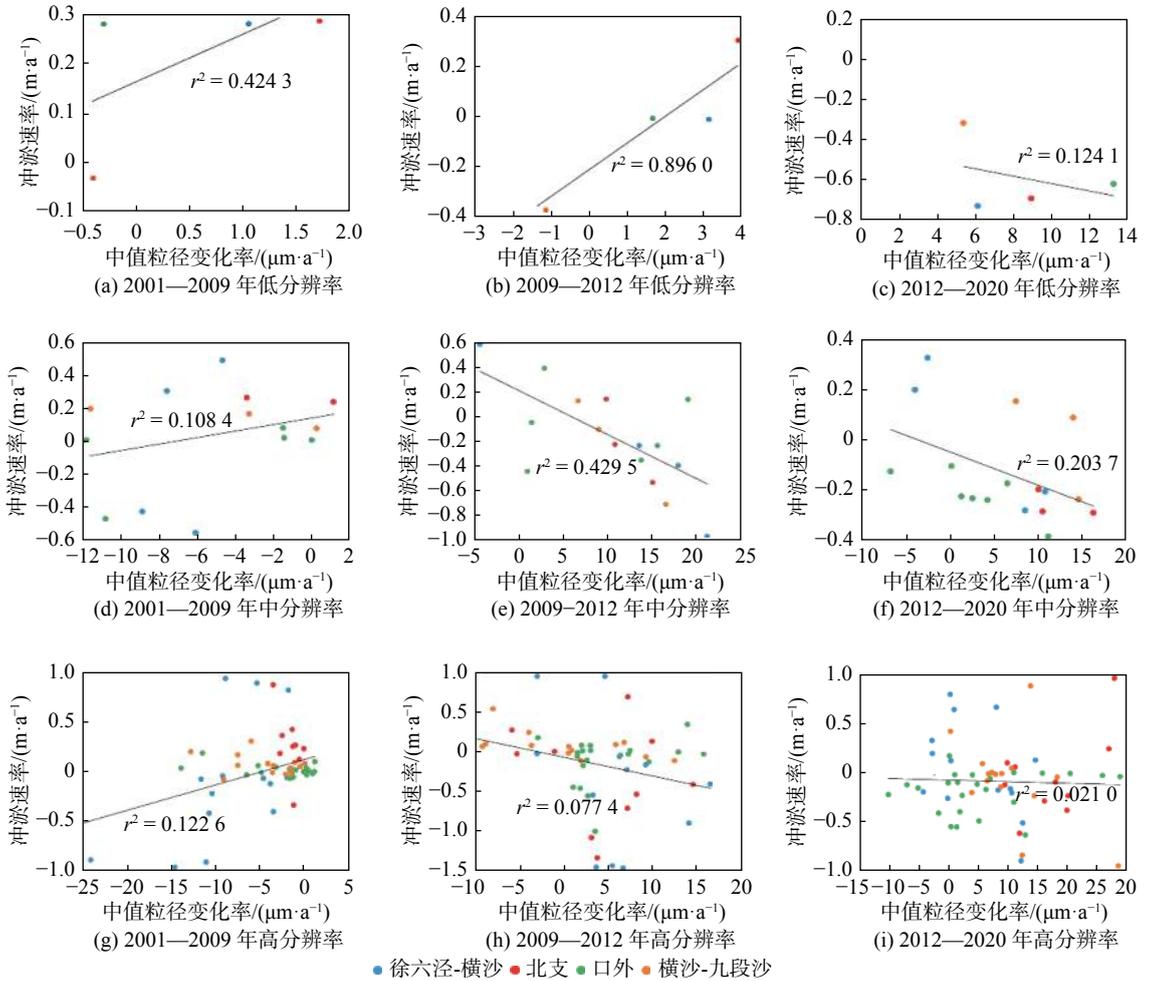


图 9 不同空间分辨率条件下中值粒径变化与冲淤深度的相关性分析

Fig. 9 Correlation between median grain size and annual erosion/deposition rate for different resolutions of grid within different time periods

2009—2012 年是河口区沉积物粒度、冲淤变化的敏感期也是两者关系发生变化的过渡期, 地貌由淤积为主逐渐转为冲刷, 沉积物则开始出现粗化趋势。该阶段低分辨率大区域网格指示长江口粒径变化与冲淤变化仍维持正相关, 但高分辨率统计网格指示的信息则相反。基于 2009—2012 年的散点图, 低网格分辨率显示口外区域与徐六泾-拦门沙区域冲淤平衡, 沉积物粒度普遍粗化, 整体处在由淤转冲的转折时期(图 9(b)). 但高分辨率网格显示大部分散点集中在 X 轴附近且主要位于第一、四象限, 整体处于冲淤平衡且沉积物存在小范围粗化, 由于持续性物源减少, 口外区首先出现小范围侵蚀。可见, 高分辨率网格能够更好地捕捉小范围内的变化信息。在粒度和地形变化的敏感时期, 沉积物粒度对河床冲淤变化的响应关系较为显著(图 9(e) 和 (h))。

2012—2020 年为流域低输沙通量时期, 河口区范围内整体开始出现大范围冲刷且中值粒径迅速粗化, 在不同分辨率下, 中值粒径与冲淤变化都呈现负相关(图 9(c), (f) 和 (i))。当输沙量持续降低且保持低值状

态,区域内沉积物粒度粗化明显,沉积物粒度和河床冲淤变化呈现负相关。

5 结 语

本文采用沉积物粒径趋势模型和区域统计分析,分别从时间和空间角度分析了近40年来的海底冲淤和相应的沉积物粒度变化特征,得到主要结论如下:

(1)长江口典型的地貌单元包括北支、徐六泾-横沙、横沙-九段沙及口外区域,由于这些区域的水动力条件差异较大,底床冲淤和沉积物粒度的空间分布也差异较大。1980—2020年,北支径流动力逐渐减弱、潮汐作用增强,是北支逐渐淤积的主要原因;徐六泾-拦门沙地区和口外区域的主要物源是流域来沙,三峡大坝蓄水后并没有即刻发生侵蚀,2009—2012年是过渡转折期,受流域来沙减少和人类活动影响,整体呈现出由淤转冲的态势。在来沙量持续减少的背景下,未来长江口区域可能遭受更加严重的侵蚀危害。

(2)早期长江中上游水沙供应充裕时期,河口整体处于淤积状态时,沉积物粒度与冲淤变化关系不显著,该时段主要控制因素是流域来水来沙。2009—2012年,长江流域输沙量大幅降低时,长江口开始出现局地小范围侵蚀且沉积物粒度有粗化趋势,中值粒径变化率与冲淤速率相关性由正转负;近年来输沙量持续降低且保持低值状态,区域内沉积物粒度粗化明显。未来随着侵蚀继续发展,沉积物粒度将会愈加粗化。

致谢:感谢冯威、徐超然同学在野外沉积物采样和室内粒度分析试验提供的帮助。

参 考 文 献:

- [1] 刘杰,赵德招,程海峰.长江口南支河床近期冲淤演变机制[J].*水运工程*,2011(7):113-118.(LIU Jie,ZHAO Dezhao,CHENG Haifeng.Recent erosion-accretion evolution mechanism of South Branch in the Yangtze Estuary[J].*Port & Waterway Engineering*,2011(7):113-118.(in Chinese))
- [2] 李林江,朱建荣.长江口南汇边滩围垦工程对流场和盐水入侵的影响[J].*华东师范大学学报(自然科学版)*,2015(4):77-86.(LI Linjiang,ZHU Jianrong.Impacts of the reclamation project of Nanhui tidal flat on the currents and saltwater intrusion in the Changjiang estuary[J].*Journal of East China Normal University (Natural Science)*,2015(4):77-86.(in Chinese))
- [3] 陈伟伦,王伟.青草沙水库工程对河床冲淤演变的影响[J].*水利水电科技进展*,2018,38(4):44-50.(CHEN Weilun,WANG Wei.Influence of Qingcaosha Reservoir Project on riverbed erosion and deposition[J].*Advances in Science and Technology of Water Resources*,2018,38(4):44-50.(in Chinese))
- [4] 李一鸣.近三十年来长江口河槽沉积特征及其影响因子研究[D].上海:华东师范大学,2018.(LI Yiming.Studies on sediment characteristics and the influencing factors in the Yangtze Estuary Riverbed during the recent 30 years[D].Shanghai:East China Normal University,2018.(in Chinese))
- [5] 朱强.长江口及其邻近海域表层沉积物粒度的空间格局和近期变化[D].上海:华东师范大学,2016.(ZHU Qiang.Grain size of surficial sediments in the Yangtze Estuary and adjacent sea areas: Spatial pattern and recent changes[D].Shanghai:East China Normal University,2016.(in Chinese))
- [6] 代炳珂,路川藤,韩玉芳,等.1958年以来长江口南、北支河段河床演变及影响因素研究[J].*水利水运工程学报*,2021(2):27-37.(DAI Bingke,LU Chuanteng,HAN Yufang,et al.Riverbed evolution and its influencing factors in the South Branch and the North Branch of the Yangtze River estuary since 1958[J].*Hydro-Science and Engineering*,2021(2):27-37.(in Chinese))
- [7] 刘杰,程海峰,韩露,等.流域水沙变化和人类活动对长江口河槽演变的影响[J].*水利水运工程学报*,2021(2):1-9.(LIU Jie,CHENG Haifeng,HAN Lu,et al.New trends of river channel evolution of the Yangtze River estuary under the influences of inflow and sediment variations and human activities[J].*Hydro-Science and Engineering*,2021(2):1-9.(in Chinese))
- [8] GAO J H, SHI Y, SHENG H, et al. Rapid response of the Changjiang (Yangtze) River and East China Sea source-to-sink

- conveying system to human induced catchment perturbations[J]. *Marine Geology*, 2019, 414: 1-17.
- [9] 恽才兴. 长江河口近期演变基本规律[M]. 北京: 海洋出版社, 2004: 1-2. (YUN Caixing. Basic law of recent evolution of the Yangtze River Estuary[M]. Beijing: Ocean Publishers, 2004: 1-2. (in Chinese))
- [10] FOLK R L, WARD W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27(1): 3-26.
- [11] 陈祥禄, 陈吉余. 上海市海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988. (CHEN Xianglu, CHEN Jiyu. Comprehensive investigation report on coastal zone and coastal resources in Shanghai[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publishers, 1988. (in Chinese))
- [12] 刘红. 长江河口泥沙混合和交换过程研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009. (LIU Hong. Sediment mixing and exchange processes in the Yangtze Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2009. (in Chinese))
- [13] 陈沈良, 严肃庄, 李玉中. 长江口及其邻近海域表层沉积物分布特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(2): 152-156. (CHEN Shenliang, YAN Suzhuang, LI Yuzhong. Characteristics of surface sediment distribution in the Yangtze Estuary and its adjacent waters[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(2): 152-156. (in Chinese))
- [14] 杨海飞, 杨世伦, 孟翊, 等. 长江口底床沉积物粒度分布特征及测定方法对比研究[J]. *上海国土资源*, 2017, 38(4): 75-79. (YANG Haifei, YANG Shilun, MENG Yi, et al. Sediment distribution patterns in the Yangtze Estuary and comparison of particle size measurement methods[J]. *Shanghai Land and Resources*, 2017, 38(4): 75-79. (in Chinese))
- [15] 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(1): 31-33.
- [16] GAO S, COLLINS M B. Grain size trends associated with net sediment transport patterns: An example from the Belgian continental shelf[J]. *Marine Geology*, 1994, 12(1): 171-185.
- [17] 吕纪轩, 胡日军, 李毅, 等. 烟台北部近岸海域表层沉积物粒度分布及沉积动力环境特征[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(4): 27-36. (LÜ Jixuan, HU Rijun, LI Yi, et al. Grain size distribution pattern of surface sediments in the northern Yantai coastal waters and its bearing on hydrodynamic environment[J]. *Marine Geological Frontiers*, 2020, 36(4): 27-36. (in Chinese))
- [18] 闵凤阳, 汪亚平, 高建华, 等. 长江口北支的沉积物输运趋势[J]. *海洋通报*, 2010, 29(3): 264-270. (MIN Fengyang, WANG Yaping, GAO Jianhua, et al. Sediment transport pathway within the North Branch, Changjiang Estuary[J]. *Marine Science Bulletin*, 2010, 29(3): 264-270. (in Chinese))
- [19] GUO J L, GUO S L, LI Y, et al. Spatial and temporal variation of extreme precipitation indices in the Yangtze River Basin, China[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2013, 27: 459-475.
- [20] YANG S L, MILLIMAN J D, XU K H, et al. Downstream sedimentary and geomorphic impacts of the Three Gorges Dam on the Yangtze River[J]. *Earth-Science Review*, 2014, 138: 469-486.
- [21] 张俊勇, 陈立, 吴华林, 等. 长江口近期河道演变特征[J]. *泥沙研究*, 2015(2): 74-80. (ZHANG Junyong, CHEN Li, WU Hualin, et al. Study on recent evolution characteristics of the Yangtze River Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2015(2): 74-80. (in Chinese))
- [22] 潘灵芝, 肖文军, 李曰嵩, 等. 长江口深水航道整治工程不同阶段北槽河床冲淤特征的动力机制分析[J]. *海洋湖沼通报*, 2019, 4(1): 21-30. (PAN Lingzhi, XIAO Wenjun, LI Yuesong, et al. Influence of deep waterway project on the morphological change of North Passage of Changjiang Estuary[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2019, 4(1): 21-30. (in Chinese))
- [23] 应铭, 季岚, 周海. 长江口北槽12.5 m深水航道回淤的物理过程[J]. *水运工程*, 2017(11): 77-85. (YING Ming, JI Lan, ZHOU Hai. Siltation physical process of the Yangtze Estuary North Passage 12.5 m Deep-draft Channel[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2017(11): 77-85. (in Chinese))

Analysis of sediment grain size change and its response to erosion and deposition pattern within the Yangtze River Estuary for the past 40 years

CHEN Yawang¹, SHENG Hui¹, XU Qinghua², QU Yubing³, XING Fei¹, LI Zhanhai¹, WANG Yaping^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Institute of Geochemical Exploration and Marine Geological Survey, East China Mineral Exploration and Development Bureau, Nanjing 210007, China; 3. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Driven by global changes and human activities, the sediment source/transport, and riverbed erosion and deposition pattern of the Yangtze River Basin are undergoing continuous adjustments, which influence both magnitude and property of fluvial sediment to the estuary. In order to explore sediment transport and correlated topographic changes of the Yangtze River Estuary within 40 years in response to variations of fluvial sediment discharge from the upstream basin, this study uses sediment grain size trend models and multi-year zonal analysis methods to predict temporal and spatial variations of morphological changes within the Yangtze Estuary, based on grain size data and topographic data from 1980 to 2020. The results show that sediments converge toward the center of the channel within the northern branch, and a deposition center forms close to the south and north channel diversion area within the southern branch, consistent with the morphological changes between 2012 to 2020 calculated from sea maps, validating the effectiveness of the grain size trend model in predicting morphological changes within the Yangtze River Estuary. The results of the multi-year zonal analysis show that: 1980—2003 was characterized by a high volume of fluvial sediment discharge, and the entire estuary area was dominated by deposition with slightly finer sediment. Fluvial sediment discharge experienced a rapid decrease from 2003 to 2012, while the estuary area was still dominated by deposition before 2009 with similar grain size. 2009—2012, however, was a transitional period when erosion and sediment coarsening started to appear out of the estuary, although limited to small areas. From 2012 to 2020, large-scale erosion and grain size coarsening occurred widely in the estuary, and a significant correlation was found between the particle size and the magnitude of erosion. Our study shows that high-resolution zonal analysis can effectively catch the local morphological change signals in the Yangtze River Estuary. In the past 40 years, the Yangtze River Estuary has changed from deposition-dominant mode to partially erosion mode, and it may face continuous coastal erosion in the future.

Key words: Yangtze River Estuary; sediment grain size; erosion and deposition; river mouth bar; subaqueous delta; grain size trend analysis