

近期长江口崇明岛周边 岸滩沉积特征及影响机制¹

朱绳祖，张国安*，张卫国，李茂田，葛建忠

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室，上海 200241)

【摘要】大河入海河口由于巨量泥沙堆积以及潮汐作用，往往发育着河口沙岛。崇明岛是世界上典型的河口沙岛，近年来，随着长江流域泥沙来源锐减以及河口大型水利工程建设等，给崇明岛周边岸滩沉积环境带来深刻影响。研究依据 2015 年 9 月~2018 年 4 月对崇明岛周边 14 个岸滩断面的表层沉积物采样数据和定点水文观测资料，分析崇明岛周边岸滩沉积环境特征和区域性差异，探讨不同岸滩断面沉积过程和作用机制。结果表明：崇明岛岸滩沉积物以砂质粉砂和粉砂质砂为主，沉积物中值粒径总体表现为南岸>北岸>东滩，平均为 $48 \mu\text{m}$ 。南、北岸岸滩总体表现为坡陡、滩窄，沉积物自西向东逐渐变细的特征，北岸岸滩坡度略缓，南岸崇头至庙镇之间存在局部细颗粒物质沉积区；东部岸滩滩宽、坡缓，整体表现为“北细南粗”的沉积特征。岸滩沉积断面上，上细下粗，高潮滩处粘土组分含量相对较高，水下斜坡和河槽底部粉砂含量较高。南、北支河势演变形成了崇明岛“南坍北涨”沉积环境的分布格局；径、潮流作用对岸滩断面沉积物分布特征影响明显；风浪对崇明东滩浅滩沉积物具有强烈的分选作用；潮滩植被主要影响细颗粒沉积物在潮间带的分布；流域来沙减少对崇明东滩前沿沉积环境趋势影响显著。

【关键词】 崇明岛；岸滩；沉积环境；影响机制

【中图分类号】 P737. 1；P736.21 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1004-8227(2019)10-2441-11

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201910016

大河入海口由于巨量泥沙堆积以及潮汐作用，往往发育着河口沙岛，同时河口沙岛的形成又影响了河口动力沉积环境、河口分汊、主泓摆动、潮滩发育。河口沙岛沉积环境与流域来沙及河势演变密切相关，同时受到潮汐、径流、风浪及泥沙输运和沉降过程等多种因子综合影响，沉积环境十分复杂^[1~4]。崇明岛是世界上典型的河口沙岛，近期随着长江流域上游来沙的锐减^[18, 19]，在复杂的径、潮流和风浪的作用下，其周边的沉积环境发生了显著变化，因此研究河口沙岛周边沉积环境特征及其影响机制，对了解河口河势演变、丰富河口潮滩沉积理论以及保护河口资源与环境具有重要意义。

早在 20 世纪 80 年代开展的全国海岸带调查中，诸多学者已对崇明岛周边沉积环境进行了初步分析和研究^[7~12]。近年来，人们关于崇明岛岸滩沉积特征的研究主要集中在沉积物粒度特征^[8, 12~14]、时空分布特征^[9~12]、沉积动力环境^[7, 16]和影响因子探讨^[7, 9, 17]等方面，但多集中在崇明东滩。如刘玉清等^[11, 12]通过对崇明东滩沉积物粒度分析，总结了东滩沉积物北细南粗、上细下粗的分布特征；刘红等^[7]通过分析崇明东滩南北两个海滩剖面沉积物沿程的变化特征，探讨了崇明东滩在波流共同作用下其潮滩剖面沉

¹收稿日期：2019-01-04；修回日期：2019-04-12

基金项目：国家重点研发计划（2017YFE0107400），“中美大河三角洲侵蚀灾害与应对策略比较研究”

作者简介：朱绳祖（1994~），男，硕士研究生，主要从事动力沉积与地貌研究。E-mail: 729269746@qq.com

*通讯作者 E-mail : gazhang@sklec.ecnu.edu.cn

积物和地貌的分异规律。崇明岛作为长江口典型的河口沙岛，岸滩沉积特征空间分布差异显著，因此系统地开展崇明岛周边岸滩沉积特征的研究，可以为河势演变的研究和大型工程的建设提供科学的依据。本文通过对崇明岛周边 14 个典型断面沉积物调查和定点水文泥沙观测，分析崇明岛周边潮滩沉积环境特征和区域性差异，探讨不同潮滩断面沉积过程和作用机制，深化大型潮汐分汊河口沙岛演变规律的认识。

1 区域概况及研究方法

1. 1 区域概况

崇明岛于公元 618 年开始相继露出水面，之后由于江潮的浸袭，屡经变迁，直至明末清初各个沙岛相互涨接，形成崇明岛的基本轮廓^[5]。在长江巨量来沙沉积作用下，崇明岛不断顺江下移，下涨上坍^[6]，目前全岛面积 1 267 km²，东西长约 80 km，南北宽约 13~18 km。崇明岛周边潮滩主要集中在崇明东滩和崇明北侧，崇明西部和崇明南部（东风西沙和崇明西滩）也有少量潮滩发育。

长江口是中等潮汐强度的分汊型河口，崇明岛上端崇头处于长江口一级分汊点，长江径流在此被分为南支、北支，下端崇明东滩延伸至口外。研究区域为非正规半日潮，平均潮差南支为 2.0~2.5 m，北支为 2.6~3.1m，东滩外侧余山站的平均潮差为 2.5 m。研究区域潮波主要受东海潮波影响，口外为旋转流，潮流长轴方向呈 SSE-NNW；口内为往复流，涨落潮的传播方向与河槽轴线一致，涨潮历时少于落潮历时。长江口波浪以风浪为主，春、夏季为 SSE 和 SE 风浪，秋、冬季为 NNE 和 NE 风浪，波浪传入口内，波高迅速衰减，其中口外引水船平均波高为 1.0m，口内高桥处平均波高仅为 0.2 m^[20]。

1. 2 资料来源

沉积物资料来源于 2015 年 9 月~2018 年沉积物样品分析结果，共计 14 条垂直于海岸线的取样断面（北岸 4 条；南岸 7 条；东滩 3 条），每条断面在高潮滩至河槽主泓或水下岸坡 10 m 等深线之间进行等高程采样，采样点数为 7~13 个（图 1），共计样品 115 个，样品使用密封袋保存，并通过 GPS 在采样点进行定位。水沙资料主要来 S2013~2014 年长江口洪、枯季进行的大、小潮定点水文泥沙调查。波浪统计数据来源欧洲中期天气预报中心（ECMWF）。地形断面数据资料来源于中国人民解放军海军司令部航海保证部测量的 2013 年长江口北部（120 000）的海图资料。长江口 1990~2017 年泥沙通量数据从中华人民共和国水利部发布的《中国河流泥沙公报》中获得。

1. 3 样品分析

沉积物样品于实验室统一编号、烘干、混匀后，取少量样品滴加 5 mL 浓度为 10% 的 H₂O₂ 以及 5 mL 浓度为 10% 的 HCl 以去除样品中的有机质、碳酸盐，再将样品经六偏磷酸钠溶液和超声波分散后，使用 Coulter (LS-13320) 激光粒度仪进行测试分析（粒度范围 0.04~2 000 μm），得到各沉积物样品的各类参数。

1. 4 数据处理

沉积物分类：根据美国地球物理（AGU）泥沙分类的标准对沉积物的粒度进行分类。采用 Folk 全面图解计算法^[21]计算分选系数（σ）、偏态（Sk）、峰态（Kg）等粒度参数，采用 Shepherd 分类法^[22]对沉积物进行分类和命名。

区域划分：根据崇明岛潮滩地貌形态和区域位置，将崇明岛周边潮滩分为崇明岛南岸（崇头-新桥）、崇明岛北岸（崇头-前哨农场）及崇明东滩（新桥-前哨农场）3 个部分。

岸滩断面：水深和地形数据以海图资料为依据，断面范围包括潮间带和潮下带部分，其中平均大潮高潮位和平均大潮低潮位之间为潮间带，平均大潮低潮位以下至河槽主泓或水下浅滩 10 m 等深线为潮下带。根据潮位又可以将潮间带分为高、中和低潮滩，其中高潮滩位于大潮高潮位和小潮高潮位之间；中潮滩位于小潮高潮位和小潮低潮位之间；低潮滩位于小潮低潮位和大潮低潮位之间。崇明岛周边潮滩由于潮位不同，潮间带位置略有差异。

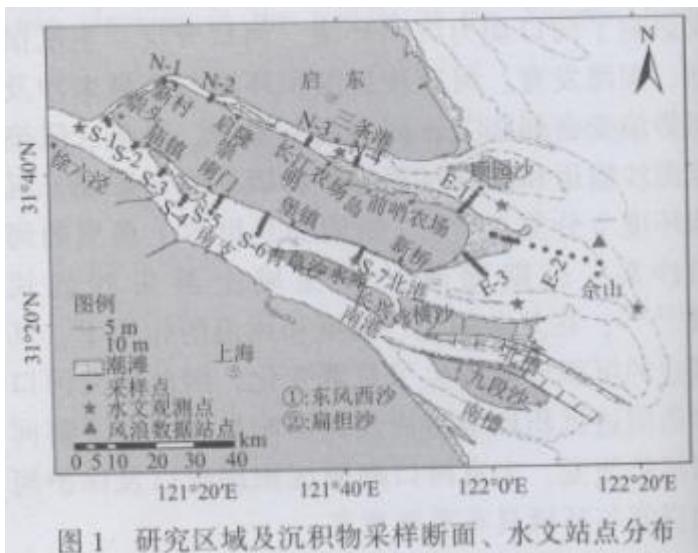


图 1 研究区域及沉积物采样断面、水文站点分布

2 崇明岛岸滩沉积特征

2.1 崇明岛岸滩沉积物粒度分布

崇明岛岸滩沉积物中值粒径介于 $9.1 \sim 134.9 \mu\text{m}$ ($6.8 \sim 2.9 \Phi$) 之间，平均中值粒径为 $48.1 \mu\text{m}$ (4.4Φ)。对上述沉积物数据按照尤登-温德华等比制粒级标准对中值粒径进行分级（图 2），从粒径分布频率曲线上可以看出崇明岛潮滩沉积物粒径在 $22.1 \sim 31.2 \mu\text{m}$ ($5 \sim 5.5 \Phi$) 之间的样品数量最多，占总数的 23%；其次为 $31.2 \sim 44.2 \mu\text{m}$ ($4.5 \sim 5 \Phi$) 之间，占样品总量的 19%； $7.8 \sim 11.0 \mu\text{m}$ ($6.5 \sim 7 \Phi$) 粒径范围内的样品数量最少，只占总量的 1%。粒径分布出现一粗一细两个峰值，分别对应的沉积物粒径范围为 $88.4 \sim 125.0 \mu\text{m}$ ($3 \sim 3.5 \Phi$) 和 $22.1 \sim 44.2 \mu\text{m}$ ($4.5 \sim 5.5 \Phi$)。其中粗颗粒峰值主要位于崇明岛北岸上段 (N-1、N-2 断面) 和南岸中上段 (S-3~S-6 断面) 潮下带，主要表现为粗颗粒物质的沉积作用；细颗粒峰值主要位于崇明东滩北侧 (E-1 断面) 及崇明岛南侧上段 (S-2 断面) 的潮间带，主要表现为细颗粒泥沙的沉积作用。从累积频率曲线上看出 25% 分位数对应的中值粒径为 $28.2 \mu\text{m}$ (5.1Φ) 左右，50% 分位数对应的中值粒径为 $35.5 \mu\text{m}$ (4.8Φ)，75% 分位数对应的中值粒径为 $66.2 \mu\text{m}$ (3.9Φ)，总体表现为粉砂含量高，易于泥沙的起动和沉降。

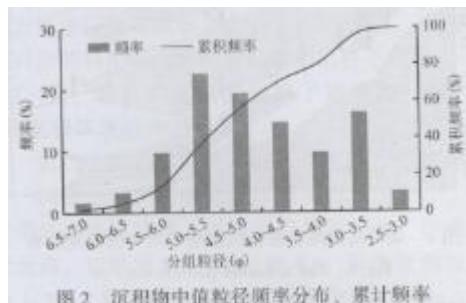


图 2 沉积物中值粒径频率分布、累计频率

2.2 崇明岛岸滩沉积物类型及分布

以 Shepard 分类法作为分类标准, 绘制崇明岛岸滩沉积物的 Shepard 三角图(图 3), 沉积物类型共有 6 种, 包括粉砂 (Z)、粉砂质砂 (ZS)、砂 (S)、砂-粉砂-粘土 (S-Z-C)、砂质粉砂 (SZ) 和粘土质粉砂 (CZ)。其中砂质粉砂的数量最多占所有样品的 45.2%, 其次为粉砂质砂和粘土质粉砂, 分别占 17.3% 和 13.0%。其中砂质粉砂在崇明岛周边均有分布, 粉砂质砂主要分布在崇明岛北岸上段和南岸中段的浅滩处, 粘土质粉砂则主要位于崇明岛北岸下段和东滩北侧的潮间带处。

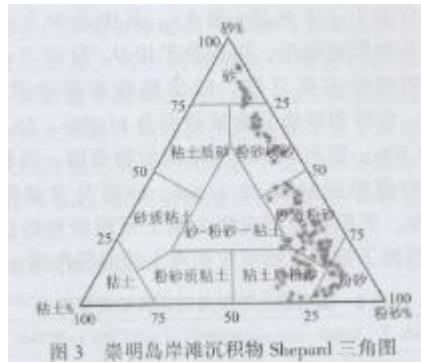


图 3 崇明岛岸滩沉积物 Shepard 三角图

2.3 崇明岛岸滩沉积特征平面分布

崇明岛周边岸滩沉积物中值粒径整体表现为南岸>北岸>东滩, 其中南、北岸中值粒径分别为 $58.8 \mu\text{m}$ 、 $44.6 \mu\text{m}$, 东滩为 $40.6 \mu\text{m}$, 各区域沉积特征分布各不相同(图 4)。

崇明岛南岸岸滩坡度约为 1.2%, 潮间带宽度介于 150~300 m 之间, 表层沉积物总体较粗, 中、下段略有变细, 根据各岸滩断面沉积物平均粒度参数分布及其所处位置, 大致以庙镇和堡镇为节点, 将崇明岛南岸分为上、中、下三段(表 1)。南岸上段(崇头-庙镇)岸滩表层沉积物相对较细, 平均中值粒径为 $37.5 \mu\text{m}$, 主要是由于崇头至西沙湿地存在局部细颗粒物质的影响。南岸中段(庙镇-堡镇)沉积物颗粒最粗, 平均中值粒径为 $66.9 \mu\text{m}$, 沉积物类型主要以砂质粉砂和粉砂质砂为主, 砂组分含量较高, 其值为 54.4%; 南岸下段(堡镇-新桥)沉积物略有细化, 平均中值粒径为 $50.7 \mu\text{m}$, 粉砂和砂组分含量较高, 沉积物类型主要为粉砂质砂和粘土质粉砂。

表 1 崇明岛南岸岸滩沉积物粒度参数

| 区域 | D_{50} (μm) | 组分含量 (%) | | | 主要沉积物类型 |
|------|-------------------------------|----------|------|------|-----------|
| | | 粘土 | 粉砂 | 砂 | |
| 南岸上段 | 37.5 | 11.5 | 63.2 | 25.3 | SZ, CZ |
| 南岸中段 | 66.9 | 9.4 | 36.3 | 54.4 | SZ, ZS, S |
| 南岸下段 | 50.7 | 16.2 | 51.2 | 32.6 | ZS, CZ |

崇明北岸岸滩坡度约为 0.8%, 潮间带宽度约为 300 m 左右, 岸滩沉积物沿程自西向东呈逐渐变细特征, 根据岸滩断面沉积物平均粒度参数分布不同, 以长江农场为节点, 将崇明岛北岸分为上、下两段(表 2)。其中北岸上段岸滩沉积物颗粒较粗, 沉积物平均 D_{50} 为 $49.7 \mu\text{m}$, 沉积物类型主要有砂、砂质粉砂和粉砂质砂, 粘土、粉砂和砂组分含量分别为 11.3%、58.8% 和 29.9%; 至北岸下段岸滩沉积物变细, 沉积物平均中值粒径只有 $29.1 \mu\text{m}$, 砂组分含量降至 20.5%, 沉积物类型主要为粘土质粉砂和砂质粉砂, 反映了细颗粒物质在岸滩上的沉积作用。

表 2 崇明岛北岸岸滩沉积物粒度参数

| 区域 | D_{50} (μm) | 组分含量 (%) | | | 主要沉积 物类型 |
|----|-------------------------------|----------|------|------|--------------|
| | | 粘土 | 粉砂 | 砂 | |
| 上段 | 49.7 | 11.3 | 58.8 | 29.9 | ZS、S、SZ |
| 下段 | 29.1 | 15.5 | 64.1 | 20.5 | SZ、CZ, S-Z-C |

崇明东滩岸滩坡度约为 1.3‰，潮间带宽度介于 2~5 km 之间。岸滩表层沉积物颗粒整体最细，且其南、北两侧岸滩沉积环境差异显著（表 3），整体表现为北粗南细的特征。其中北侧岸滩断面沉积物中值粒径为 $21.3 \mu\text{m}$ ，粘土组分含量高达 21.8%，沉积物类型主要包括粘土质粉砂和砂质粉砂，沉积物颗粒细，反映崇明东滩北部整体处于细颗粒泥沙淤积的沉积环境；中部岸滩沉积物中值粒径为 $47.3 \mu\text{m}$ ，相比北部粒径有了明显增大，砂组分含量（35.5%）也相应的增大，沉积物类型中粉砂质砂的比重有了明显提升；南侧沉积物平均中值粒径最大，其值为 $53.4 \mu\text{m}$ ，砂组分含量进一步增加至 40.3%，沉积物类型主要为粉砂质砂。

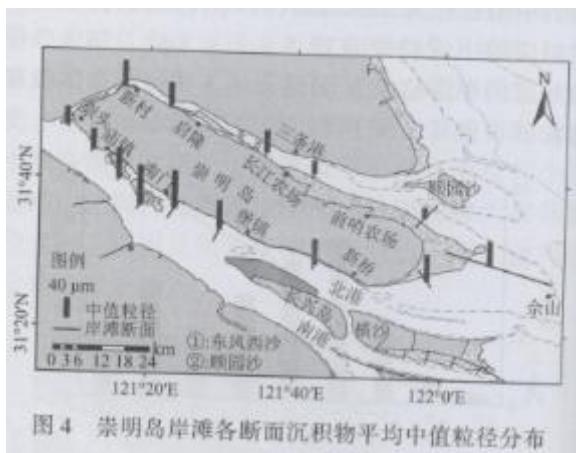


图 4 崇明岛岸滩各断面沉积物平均中值粒径分布

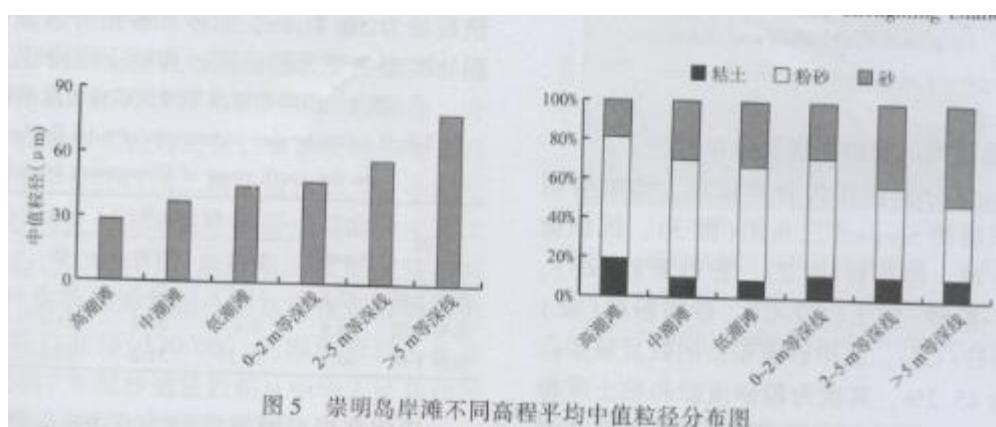


图 5 崇明岛岸滩不同高程平均中值粒径分布图

2.4 崇明岛岸滩断面沉积特征

崇明岛岸滩断面沉积特征从高潮滩至主泓呈现明显的粗化趋势，沉积物中值粒径整体上随着水深的增大而增大（图 5）。由高潮滩至主泓处，沉积物平均中值粒径由 $28.6 \mu\text{m}$ 增至 $79.2 \mu\text{m}$ ，砂组分含量由 18.9% 增至 51.0%，粉砂含量则整体呈减小趋势，此外高潮滩处表层沉积物粘土组分含量高于中、低潮滩。整个岸滩断面上下沉积物类型呈“粘土质粉砂、砂质粉砂-粉

砂质砂-砂”分布。

表 3 崇明东滩沉积物粒度参数

| 区域 | D_{50} (μm) | 组分含量 (%) | | | 主要沉积 物类型 |
|----|-------------------------------|----------|------|------|-------------|
| | | 粘土 | 粉砂 | 砂 | |
| 北侧 | 21.3 | 21.8 | 61.8 | 17.4 | CZ、SZ、S-Z-C |
| 中部 | 47.3 | 10.9 | 53.6 | 35.5 | SZ、ZS、CZ |
| 南侧 | 53.4 | 9.4 | 50.3 | 40.3 | ZS、SZ |

崇明岛不同区域岸滩断面沉积特征各不相同。南岸岸滩断面潮间带与潮下带沉积物粒度差异明显(表 4)，潮间带区域内沉积物粒度差异不大，中值粒径介于 $31.2\sim37.2\mu\text{m}$ 之间，沉积物类型以砂质粉砂为主，潮下带沉积物颗粒相对较粗，沉积物中值粒径大于 $65.6\mu\text{m}$ ，沉积物类型主要为粉砂质砂和砂；崇明岛北岸岸滩断面由随水深增加沉积物颗粒逐渐变粗，高、中潮滩表层沉积物中值粒径分别为 24.4 和 $29.1\mu\text{m}$ ，沉积物类型主要为粉砂和砂质粉砂，深泓处表层沉积物中值粒径为 $81.9\mu\text{m}$ ，沉积物类型以砂和粉砂质砂为主；崇明东滩断面沉积物与崇明岛南、北岸有较大差异，其中高潮滩沉积物仍以细颗粒为主，沉积物中值粒径为 $17.3\mu\text{m}$ ，沉积物类型主要为粘土质粉砂和粉砂，而低潮滩至 2 m 等深线处沉积物粗化明显，沉积物中值粒径分别为 64.0 和 $42.9\mu\text{m}$ ，沉积物类型以砂质粉砂和粉砂质砂为主。

表 4 崇明岛不同区域岸滩断面沉积特征

| | 南岸 | | 北岸 | | 东滩 | |
|----------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|----------|
| | D_{50} (μm) | 沉积物类型 | D_{50} (μm) | 沉积物类型 | D_{50} (μm) | 沉积物类型 |
| 高潮滩 | 31.2 | SZ | 24.4 | SZ、Z | 17.3 | CZ、Z |
| 中潮滩 | 37.2 | SZ、ZS | 29.1 | SZ、Z | 31.9 | SZ |
| 低潮滩 | 34.8 | SZ、ZS | 33.1 | SZ、ZS | 64.0 | ZS、SZ |
| 0~2m 等深线 | 65.6 | SZ、ZS | 38.5 | SZ、CZ | 42.9 | SZ、CZ |
| 2~5m 等深线 | 77.6 | S、ZS | 60.9 | SZ、ZS | 34.4 | SZ、S-Z-C |
| >5m 等深线 | 95.3 | S、ZS | 81.9 | S、ZS | 60.8 | SZ、ZS |

3 崇明岛岸滩沉积环境影响因子

崇明岛岸滩沉积环境受长江口河势演变、水动力环境、潮滩植被及上游来沙的影响，不同因素对崇明岛岸滩沉积环境的影响也各不相同。

3.1 南、北支河势演变形成了崇明岛“南坍北涨”沉积环境的分布格局

长江主泓的南偏使得南支主槽整体呈冲刷态势，河槽加深，崇明岛南岸潮间带宽度较小，潮下带部分滩面陡峭，岸滩沉积物颗粒粗，砂组分含量高。以断面 S-3 为例(图 6)，岸滩断面坡度为 1.2% ，沉积物平均中值粒径为 $73.2\mu\text{m}$ ，潮间带和潮下带沉积物区域性差异明显，其中潮间带沉积物较细，粉砂含量较高，而潮下带由于整体呈现冲刷的态势，细颗粒泥沙被带走，导致沉积物整体以粗颗粒为主，砂组分含量均位于 53% 以上。

崇明岛北岸淤涨，滩地不断被围垦，河床淤浅、束窄，目前整个岸滩断面相比南岸略缓，沉积物颗粒也相对较细。以断面 N-2 为例(图 7)，岸滩断面坡度为 0.8% ，主泓水深较浅，约为 5 m 。岸滩沉积物整体较粗，平均中值粒径为 $50.5\mu\text{m}$ 。由于整

体处于淤涨态势，2 m等深线上以上区域潮滩沉积物颗粒较细，沉积物平均中值粒径为 $28.7 \mu\text{m}$ ，粘土和粉砂组分含量高达87%。

3.2 水动力环境对崇明岛岸滩沉积环境的影响

3.2.1 径、潮流作用对岸滩断面沉积物分布特征影响明显

径、潮流的沿程的变化是造成崇明岛岸滩沉积物整体上自西向东逐渐变细主要因素。长江口南支上段，以徐六泾站为例（表5），落潮流速约为涨潮流速对1.5倍，落潮历时约为涨潮历时的2.4倍，而涨落潮含沙量相近，仅为 $0.1\text{kg}/\text{m}^3$ ，含沙量低，除局部受地形（东风西沙潮滩）影响外，细颗粒泥沙不宜沉积，岸滩剖面沉积物主要为河流作用下的底沙沉积（图6），岸滩沉积物整体较粗，潮下带沉积物中砂组分含量高。崇明东滩南侧站位，涨、落潮流速和历时基本接近，含沙量高，其中涨潮含沙量为 $0.8\text{kg}/\text{m}^3$ ，落潮含沙量为 $0.7\text{kg}/\text{m}^3$ ，潮流作用对岸滩剖面的影响加强，潮间带沉积物粘土和粉砂含量相对较高，潮下带则由于深水靠岸，沉积物颗粒较粗，河床沉积物与上游差异不大（图8）。

北支河段上段，以三条港附近水文观测为例（表5），总体表现为涨落潮流速强劲，含沙量高，物质来源丰富，利于潮滩发育，自上世纪80年代以来，崇明岛北岸先后进行了大规模围垦工程建设，围垦面积近 330 km^2 ，大面积的滩涂消失、河道束窄，在水流作用下，潮下带沉积物分选作用加强，颗粒较粗，而潮间带物质较细（图7）。北支下段，以崇明东滩北侧站位为例，流速较小，含沙量较高，滩面宽阔，坡度平缓，流路分异，水流分散，利于细颗粒泥沙的沉降，整个东滩北侧岸滩表面沉积物颗粒细，潮间带与潮下带沉积物变化不大，平均中值粒径为 $21.3\mu\text{m}$ ，粘土和粉砂组分含量82.6%，沉积物类型以粉砂质粘土和砂质粉砂为主（图9），反映潮流对岸滩断面塑造作用加强。

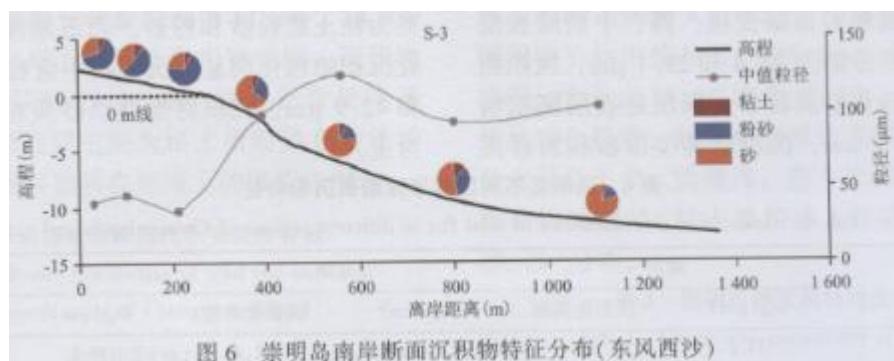


图6 崇明岛南岸断面沉积物特征分布(东风西沙)

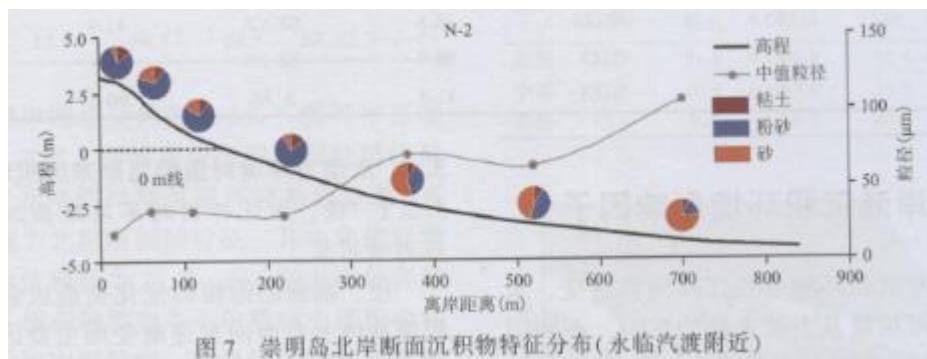


图7 崇明岛北岸断面沉积物特征分布(水临汽渡附近)

表 5 各站点涨落潮平均流速、含沙量和历时

| 位置 | 涨潮平均流速 (cm/s) | 落潮平均流速 (cm/s) | 涨潮平均含沙量 (kg/m ³) | 落潮平均含沙量 (kg/m ³) | 涨潮平均历时 (H) | 落潮平均历时 (H) |
|------|------------------|------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------|---------------|
| 徐六泾 | 64.1 | 94.1 | 0.1 | 0.1 | 3.7 | 8.8 |
| 北港上段 | 80.5 | 88.5 | 0.2 | 0.2 | 5.2 | 7.3 |
| 东滩南侧 | 81.2 | 86.3 | 0.8 | 0.7 | 5.8 | 6.7 |
| 三条港 | 90.3 | 78.4 | 1.4 | 1.1 | 5.2 | 7.3 |
| 东滩北侧 | 72.2 | 64.6 | 0.5 | 0.5 | 5.6 | 6.9 |

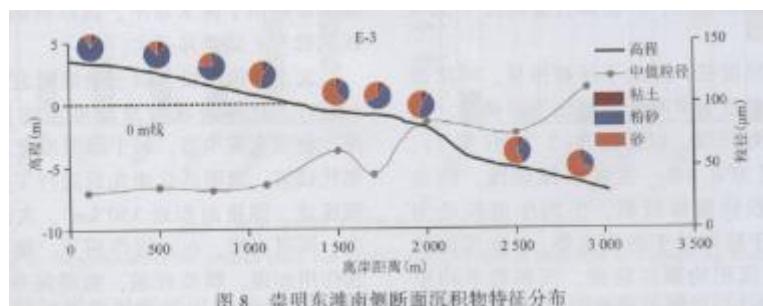


图 8 崇明东滩南侧断面沉积物特征分布

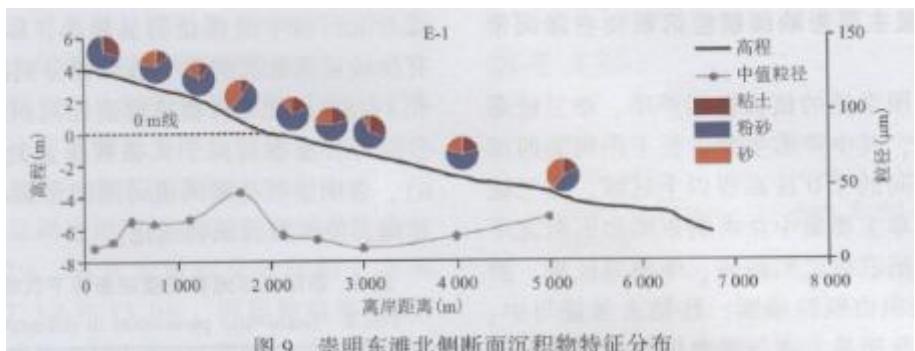


图 9 崇明东滩北侧断面沉积物特征分布

3.2.2 风浪对崇明东滩浅滩沉积物具有强烈的分选作用

崇明东滩位于长江口开敞地带，岸滩沉积物受风浪影响显著。由图 10 可知，在高潮滩处沉积物颗粒细，中值粒径为 17.2 μm ，粘土粉砂含量高达 90.0%，中潮滩处沉积物略粗，中值粒径为 42.8 μm ，在低潮滩和 0 m 线附近，表层沉积物进一步变粗，中值粒径达 110.0 μm ，砂组分含量达到了 86.5%，之后随着水深的加深，又逐渐变细，直至 5 m 等深线附近，表层沉积物又重新变粗。沉积物粒度分布频率曲线上（图 11），低潮滩至 2 m 等深线之间处的粒度分布曲线最为陡峭，表明在该区间滩面沉积物受到强烈扰动和分选，粗颗粒物质分布集中，分选性好。根据欧洲中期天气预报中心（ECMWF）2015–2017 年崇明东滩外侧站点（31.50° N、122.15° E）每 6 h 的波高数据统计，平均有效波高为 0.6 m，对应的波浪破碎水深在 1.0 m 附近，与潮滩沉积物粗化区域相一致，表明风浪对崇明东滩浅滩沉积物具有强烈的分选作用。

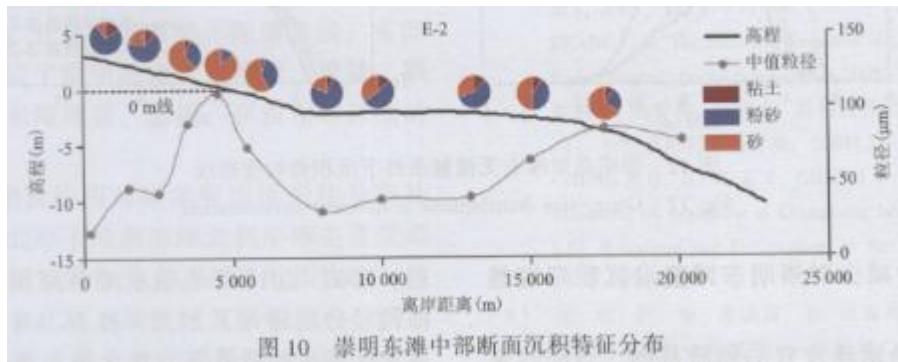


图 10 崇明东滩中部断面沉积特征分布

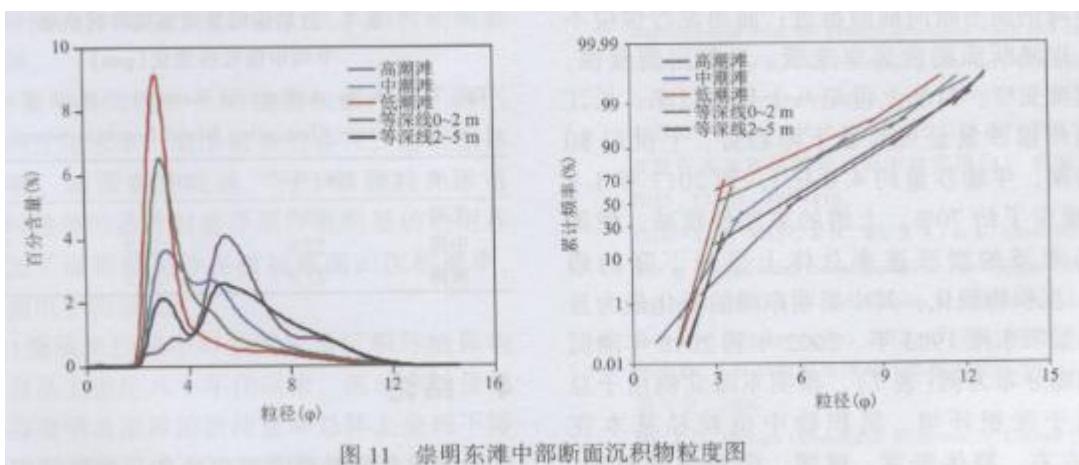


图 11 崇明东滩中部断面沉积物粒度图

3.3 潮滩植被主要影响细颗粒沉积物在潮间带的分布

崇明岛周围常见的植被包括芦苇、海三棱藨草和互花米草，其中芦华主要生长于崇明岛西部启隆到南门之间的 3.0 m 高程以上区域，海三棱藨草和互花米草主要集中在崇明东滩和崇明北岸长江农场和前哨农场之间的高、中潮滩区域。崇明岛高潮滩沉积物颗粒最细，且粘土含量与中、低潮滩含量差异明显，这与潮滩植被分布具有较高的对应关系。潮滩植被主要通过改变水动力条件、粘附细颗粒泥沙以及控制滩面冲淤变化来改变潮滩表层沉积物的特征^[23~25]。在崇明岛岸滩植被覆盖交界处的两侧（E-3 和 N-2 断面），各选取表层沉积物样品进行分析对比（图 12），有植被覆盖处沉积物中值粒径明显较小，E-3 和 N-2 断面有植被覆盖处沉积物中值粒径分别减小了 35.6% 和 17.5%。此外有植被覆盖处沉积物的粘土和粉砂组分含量也均高于无植被覆盖处的沉积物（表 6），表明崇明岛潮滩植被对潮间带沉积物具有促淤作用，使滩面沉积物细化。

表 6 崇明岛岸滩有无植被条件下沉积物粒度参数

| 区域 | 有无植被 被覆盖 | D ₅₀ (μ m) | 粘土 (%) | 粉砂 (%) | 砂 (%) |
|-----|-------------|--------------------------|-----------|-----------|----------|
| E-3 | 有 | 25.5 | 17.5 | 76.8 | 5.7 |
| | 无 | 39.7 | 11.3 | 65.8 | 22.9 |
| N-2 | 有 | 41.1 | 16.5 | 79.9 | 3.6 |
| | 无 | 49.8 | 13.1 | 73 | 13.9 |

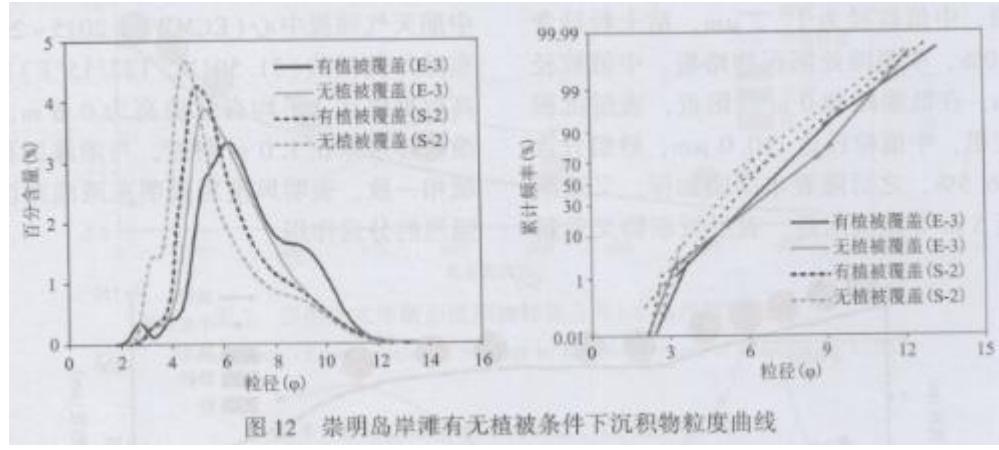


图 12 崇明岛岸滩有无植被条件下沉积物粒度曲线

3.4 流域来沙减少对崇明东滩前沿沉积环境趋势影响显著

泥沙来源是岸滩发育的物质基础。当泥沙来源充足时，潮滩断面滩宽、坡缓，沉积物总体较细，岸滩剖面不断向前推进；而当泥沙供应不足时，岸滩断面淤涨速率变缓、局部出现侵蚀，潮滩宽度变窄。自从上世纪八十年代以来，长江大通站年输沙量呈现显著下降趋势，上世纪 80 年代初期，年输沙量约 4.8 亿 t，到 2017 年 1.4 亿 t，减少了约 70%。上游的来沙量锐减，使得崇明岛潮滩的淤涨速率总体上呈现下降的趋势^[15]、沉积物粗化，其中崇明东滩的变化最为显着。以崇明东滩 1983 年、2002 年和 2018 年潮间带沉积物分布为例（表 7），崇明东滩北侧由于总体仍处于淤积环境，沉积物中值粒径基本在 20 μm 左右，整体滩宽、坡缓，沉积物颗粒细；崇明东滩前沿和南侧，沉积物中值粒径明显变粗，2002~2018 年崇明东滩中部和南部沉积物中值粒径分别增大了 27.2% 和 26.8%，反映了在流域来沙减少的背景下，在水流、波浪等水动力作用下，滩面沉积物分选加剧，物质粗化。

表 7 近期崇明东滩潮间带沉积物平均中值粒径变化 (μm)

| 区域 | 1983 年 ^[20] | 2002 年 ^[12] | 2018 年 |
|----|------------------------|------------------------|--------|
| 北侧 | 20.0 | 12.6 | 17.9 |
| 中部 | 22.6 | 21.7 | 27.6 |
| 南侧 | 27.0 | 31.3 | 39.7 |

4 结论

崇明岛是典型的河口沙岛，在流域泥沙来源减少背景下，其沉积特征和趋势对大河河口沉积环境演变具有重要意义。研究基于崇明岛周围 14 个岸滩断面的表层沉积物采样和周边洪枯季定点水文泥沙观测资料，分析了崇明岛周围岸滩沉积环境特征，讨论了不同动力因子对岸滩沉积环境的作用过程和趋势。得到以下结论：

(1) 崇明岛周边岸滩沉积物类型以砂质粉砂为主，占 45.2%，其次为粉砂质砂和粘土质粉砂，分别占 17.3% 和 13.0%。沉积物整体较粗，中值粒径介于 9.1~134.9 μm 之间，平均中值粒径为 48 μm，沉积物中值粒径分布为南岸>北岸>东滩，南岸岸滩坡陡、滩窄，除局部细颗粒物质沉积区外，沉积物整体上自西向东逐渐变细；由于大规模滩涂围垦工程建设，北岸岸滩同样坡陡、滩窄，潮间带宽度在 300 m 以内，坡度略缓，沉积物自西向东逐渐变细；东滩岸滩滩宽、坡缓，整体呈现“北细南粗”的分布特征。岸滩断面上，沉积物总体上细下粗，高潮滩处粘土组分含量相对较高，崇明东滩前沿和南侧 0~2 m 浅滩处沉积物粗化明显。

(2) 南、北支河势演变成了崇明岛周围岸滩整体沉积环境的分布格局。近年来南支主槽冲刷、河槽加深；北支河道束窄，深槽变浅；东滩不断延伸。造成了崇明岛南北岸滩窄、坡陡，颗粒相对较粗；东滩滩宽、坡缓，颗粒相对较细的分布格局。

(3) 径、潮流作用对岸滩断面沉积物分布特征影响明显。北岸下段和东滩北侧岸滩主要受潮流控制，以细颗粒泥沙为主，潮滩沉积物相对较细；南岸中段和北岸上段受径流影响较大，沉积物相对较粗。风浪的分选作用导致崇明东滩 0~2 m 浅滩处沉积物粗化明显。崇明岛东滩南侧受强劲的涨潮流和风浪作用影响，沉积物粒径明显粗于北侧。

(4) 崇明岛周围常见的植被包括芦苇、海三棱草和互花米草。潮滩植被的存在，造成水体局部紊流，减缓水体流速，利于细颗粒泥沙落淤；同时植被的茎叶对悬浮泥沙有明显的粘附作用，增加了细颗粒泥沙在植被滩面的沉积速率，促使滩面沉积物细化。

(5) 流域来沙减小对崇明东滩沉积环境影响显著。自从上世纪八十年代以来，流域来沙量锐减，使得崇明岛潮滩的淤涨速率总体上呈现下降的趋势、沉积物粗化，其中崇明东滩的变化最为显著。

参考文献：

- [1] PEJRUP M. The triangular diagram used for classification of estuarine sediments: a new approach [J]. Tide-influenced sedimentary environments and facies. Reidel, Dordrecht, 1988 : 289-300.
- [2] 陈吉余, 恽才兴, 徐海根, 等. 两千年来长江河口发育的模式[J]. 海洋学报(中文版), 1979(1): 103-111. CHEN J Y, YUN C X, XU H G, et al. The Developmental Model of the Chang Jiang River Estuary during last 2000 years[J], Acta Oceanologica Sinica, 1979(1) : 103-111.
- [3] 杨世伦, 徐海根. 长江口长兴、横沙岛潮滩沉积特征及其影响机制[J]. 地理学报, 1994(5): 449-456. YANG S L, Xu H G. Tidal flat sediments and sedimentation on the Changxin and Hengsa Islands at the Mouth of Changjiang River[J]. Acta Geographica Sinica, 1994(5) : 449-456.
- [4] 谢小平, 王兆印, 沈焕庭. 长江口九段沙现代潮滩沉积特征[J]. 沉积学报, 2005(4): 566-573. XIE X P, WHANG Z Y, SHEN H T. Sedimentary characteristics of the modern tidal flat of Jiuduansha Shoal in Changjiang Estuary [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005(4) : 566 -573.
- [5] 张修桂. 崇明岛形成的历史过程[J]. 复旦学报(社会科学版), 2005, 12(3) : 57-66. ZHANG G X. The historical formation of Chongming Island[J]. Fudan Journal(Social sciences) , 2003 , 12(3) : 57-66.
- [6] 程和琴, 蒋智勇, 陈吉余. 崇明岛开发的自然秉赋与制约[J]. 长江流域资源与环境, 2003(5): 417-421. CHENG H Q, JIANG Z Y, CHEN J Y. Natural Property and Limitation on exploitation of Chongming Island, Yangtze Estuary[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2003(5) : 417-421.
- [7] 刘红, 何青, 吉晓强, 等. 波流共同作用下潮滩剖面沉积物和地貌分异规律——以长江口崇明东滩为例[J]. 沉积学报, 2008(5) : 1833-843. LIU h, HE Q, JI X Q, et al. Sediment and geomorphology differentiation of tidal flat profiles combined wave and current actions : a case of the east Chongming tidal flat, Changjiang Estuary [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008(5) : 833-843.

[8] 赵亚楠, 王张华, 吴绪旭, 等. 长江口现代潮滩沉积物粒度特征及其在沉积相识别中的应用 [J]. 古地理学报, 2015, 17(3) : 405-416. ZHAO Y N, WANG Z H, WU X X, et al. Grain size distribution of modern tidal flat sediments at the Yangtze River mouth and its application to identification of sedimentary facies [J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(3) : 405-416.

[9] 何小勤. 长江口崇明东滩现代地貌过程研究[D]. 华东师范大学, 2004. HE X Q. Modern Geomorphic Processes of Eastern chongming Island, the Yangtze Estuary[D]. East China Normal University, 2004.

[10] 张雯雯, 舛勇, 黄家祥, 等. 崇明岛现代潮滩地貌和生态环境问题分析[J]. 海洋通报, 2008(4) : 81-87. ZHANG W W, YIN Y, HUANG J X, et al. Analysis of geomorphology and ecology of modern tidal flat in the Chongming Is-land , Shanghai, East China [J]. Marine Science Bulletin, 2008(4) : 81-87.

[11] 刘清玉, 戴雪荣, 何小勤. 崇明东滩沉积环境探讨 [J]. 海洋地质动态, 2003(12) : 1-4. LIU Q Y, DAI X R, HE X Q. i' he sedimentary environment of the east tidal flat of the Chongming Island[J]. Marine Geology Letters, 2003(12) : 1-4.

[12] 刘清玉, 戴雪荣, 何小勤. 崇明东滩表层沉积物的粒度空间分布特征 [J]. 上海地质, 2003(4) : 5-8. LIU Q Y, DAI X R, HE X Q. The spatial distribution characteristics of sediment grain size on the east tidal flat Chongming Is-land[J]. Shanghai Geology, 2003(4) : 5-8.

[13] 计娜, 程和琴, 杨忠勇, 等. 近 30 年来长江口岸滩沉积物与地貌演变特征 [J]. 地理学报, 2013, 68(7) : 945-954. JI N, CHENG H Q, YANG Z Y, et al. Sedimentary and morphological evolution of near shore coast of Yangtze Estuary in the last 30 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2013 , 68(7) : 945-954.

[14] 何小勤, 戴雪荣, 顾成军. 崇明东滩不同部位的季节性沉积研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2) : 157-162. HE X Q, DAI X R, GU C J. A study on seasonal erosion-accretion cycle of Chongming East tidal flat, The Yangtze Estuary. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(2) : 157-162.

[15] 赵常青, 茅志昌, 虞志英, 等. 长江口崇明东滩冲淤演变分析 [J]. 海洋湖沼通报, 2008(3) : 27-34. ZHAO C Q, MAO Z C, YU Z Y, et al. The analysis of the eastern Chongming tidal flats evolution in the Yangtze River Es-tuary. Transactions of Oceanology and Limnology, 2008 (3) : 27-34.

[16] 朱琴. 基于现场观测和数值模拟的淤泥质潮滩沉积动力过程研究 [D]. 华东师范大学, 2017. ZHU Q. Sediment dynamics on intertidal mudflats : A study based on in situ measurements and numerical modelling [D]. East China Normal University, 2017.

[17] 徐晓君. 淤泥质潮间带沉积动力过程 [D]. 华东师范大学, 2009. XU X J. Sediment dynamic process in the intertidal flat : a case of the Chongming East land[D]. East China Normal University, 2009.

[18] 李明, 杨世伦, 李鹏, 等. 长江来沙锐减与海岸滩涂资源的危机 [J]. 地理学报, 2006(3) : 282-288. LI M, YANG S L, LI P , et al. Drastic decrease in sediment supply from Yangtze River and coastal crisis [J]. Acta Geo-graphica Sinica, 2006(3) : 282-288.

[19]杨世伦, 朱骇, 李鹏. 长江口前沿潮滩对来沙锐减和海面上升的响应[J]. 海洋科学进展, 2005(2): 152-158. YANG S L, ZHU J, LI P. Response of tidal bank on the Changjiang River Mouth foreland to drastic decline in riverine sediment supply and sea level rise[J]. Advance in Marine Sci-ence, 2005(2) : 152-158.

[20]上海市海岛资源综合调查报告编写组. 上海市海岛资源综合调查报告 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1996: 23-30. Compiling Group of Integrated investigation Report of Shanghai Island Resources. Integrated investigation report of Shanghai Is-land Resources [M]. Shanghai : Shanghai Scientific and Techni-cal Publishing, 1996: 23-30.

[21]FOLK R L, WARD W C. Brazos River bar; A study in the significance of grain size parameters. Jour Sediment Petrol, 1957, 27(1) : 3-26.

[22]FOLK R L, ANDREWS P B, LEWIS D W. Detrital sedimenta-ry rock classification and nomenclature for use in New Zealand. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 1970, 13(4) : 937-968.

[23]FRENCH JONATHAN R. “ Numerical simulation of verticalmarsh growth and adjustment to accelerated sea level rise, northNorfolk, UK.” Earth Surface Processes and Landforms 18. 1(1993) : 63-81.

[24]YANG S L. “The Role of ScirpusMarsh in Attenuation of Hydro-dynamics and Retention of Fine Sediment in the Yangtze Estuar-y.” Estuarine, Coastal and Shelf Science 47. 2 (1998) : 227-233.

[25]杨世伦, 陈吉余. 试论植物在潮滩发育演变中的作用[J]. 海洋与湖沼, 1994(6): 631-635. YANG S L, CHEN J Y. The role of Vegetation in mud coast processes [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1994 (6): 631-635.