



闽江河口潮滩季节性冲淤变化格局及其控制机制

王爱军, 李海琪, 叶翔, 梁灏深, 张望泽, 吴水兰, 冉畅, 陶舒琴, 刘子同, 于谦

Patterns and controlling factors of seasonal erosion and accretion of estuarine tidal flat in the Minjiang River estuary

WANG Aijun, LI Haiqi, YE Xiang, LIANG Haoshen, ZHANG Wangze, WU Shuilan, RAN Chang, TAO Shuqin, LIU Zitong, and YU Qian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023091101>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中强潮海滩剖面冲淤过程研究——以北海银滩为例

Erosion and accretion of a meso-macro-tidal beach profile—A case from the Yintan Beach of Beihai

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 36–47

菲律宾海中部海域声速剖面结构及季节性变化

Structures and seasonal variation of sound velocity profiles in the central Philippine Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 147–157

闽江河口表层沉积物重矿物特征与物源示踪

Heavy mineral composition in surface sediments of the Minjiang River estuary and its implications for provenance

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(1): 87–95

闽北附近海域悬浮体输运及通量的季节变化

Seasonal variations of suspended sediments in transport and flux in the coastal area of the northern Fujian Province

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(5): 30–40

全球变化下九龙江河流-河口系统营养盐循环过程、通量与效应

Nutrient cycling processes, fluxes and effects in the Jiulong river-estuary system under global change

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(1): 23–31

苏北废黄河口表层沉积物分布特征及其控制因素

Distribution pattern of surface sediments around the abandoned Yellow River estuary of North Jiangsu Province and its controlling factors

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(1): 118–126



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王爱军, 李海琪, 叶翔, 等. 闽江河口潮滩季节性冲淤变化格局及其控制机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(6): 1-13.

WANG Aijun, LI Haiqi, YE Xiang, et al. Patterns and controlling factors of seasonal erosion and accretion of estuarine tidal flat in the Minjiang River estuary[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(6): 1-13.

闽江河口潮滩季节性冲淤变化格局及其控制机制

王爱军^{1,2,3}, 李海琪^{1,4}, 叶翔^{1,2}, 梁灏深¹, 张望泽^{1,5}, 吴水兰^{1,6}, 冉畅¹, 陶舒琴^{1,2}, 刘子同^{1,7}, 于谦⁸

1. 自然资源部第三海洋研究所海洋与海岸地质研究室, 厦门 361005
2. 福建省海洋物理与地质过程重点实验室, 厦门 361005
3. 自然资源部海峡西岸海岛海岸带生态系统野外科学观测研究站, 厦门 361005
4. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 200090
5. 福州大学先进制造学院, 泉州 362251
6. 南京信息工程大学海洋科学学院, 南京 210044
7. 汕头大学海洋科学研究院, 汕头 515063
8. 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210023

摘要:潮滩是潮汐作用下形成的细颗粒沉积物堆积体, 在世界范围内分布广泛, 在碳汇和海岸防护中发挥着十分重要的作用。随着河流输沙的减少, 河口潮滩冲淤格局发生了变化, 直接影响了潮滩功能发挥, 亟需开展河口潮滩短周期的冲淤变化过程研究, 为评估潮滩功能提供科学依据。根据在福建闽江口琅岐岛潮滩开展的不同季节沉积动力要素(水深、流速、波浪、悬沙浓度)和现场冲淤观测及表层沉积物的粒度分析结果, 琅岐岛潮滩表层沉积物在夏季主要以粉砂和黏土组成的细颗粒沉积物为主, 冬季则主要以砂和粉砂组成的粗颗粒沉积物为主; 潮间带上部的互花米草盐沼总体以持续淤积为主, 潮间带中部和下部表现出周期性的冲淤特征, 总体以夏季淤积、冬季侵蚀为总特征, 并且潮间带中部的冲淤变化幅度较潮间带下部大; 冬季潮流流速、波浪作用及悬沙浓度均大于夏季, 冬季潮周期内近底部悬沙以净向海输运为主, 而夏季则以净向岸输运为主。综上所述, 闽江河口潮滩冲淤变化主要受动力过程控制, 冬季波浪作用导致表层沉积物发生再悬浮, 并被较强的潮流净向海输运, 导致滩面发生侵蚀; 夏季, 波浪作用较弱, 水体中的悬沙易发生沉降, 较弱的潮流将泥沙净向岸输运, 导致潮间带发生淤积。

关键词:河口潮滩; 冲淤格局; 盐沼; 动力过程; 季节变化

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023091101

Patterns and controlling factors of seasonal erosion and accretion of estuarine tidal flat in the Minjiang River estuary

WANG Aijun^{1,2,3}, LI Haiqi^{1,4}, YE Xiang^{1,2}, LIANG Haoshen¹, ZHANG Wangze^{1,5}, WU Shuilan^{1,6}, RAN Chang¹, TAO Shuqin^{1,2}, LIU Zitong^{1,7}, YU Qian⁸

1. Laboratory of Coastal and Marine Geology, Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China
2. Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Physical and Geological Processes, Xiamen 361005, China
3. Observation and Research Station of Island and Coastal Ecosystem in the Western Taiwan Strait, Ministry of Natural Resources, China, Xiamen 361005, China
4. College of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 200090, China
5. School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou 362251, China
6. School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China
7. Institute of Marine Sciences, Shantou University, Shantou 515063, China
8. Ministry of Education Key Laboratory for Coast and Island Development, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: Tidal flats are fine-grained sediment deposits formed under tidal action, widely distributed worldwide, and play a crucial role in carbon sinks and coastal protection. With the reduction of sediment flux from river to ocean, patterns and factors of erosion-accretion in

资助项目:国家自然科学基金项目“闽江河口-毗邻海岸的地貌沉积互馈过程及环境演变”(U22A20585), “中小型山溪性河口水下三角洲沉积体系演化及其对人类活动与极端事件的响应”(41776099); 自然资源部第三海洋研究所科研业务费专项资金资助项目(海三科 2019018、海三科 2019017)

作者简介: 王爱军(1977—), 男, 博士, 研究员, 主要从事海洋沉积动力学研究, E-mail: wangaijun@tio.org.cn

收稿日期: 2023-09-11; **改回日期:** 2023-11-28. 文凤英编辑

estuarine tidal flats have been changed, which directly affects the function of tidal flats. It is urgent to study the short-term erosion-accretion process of estuarine tidal flats to provide scientific supports to understand functions of tidal flats. The tidal flat of Langqi Island at the Minjiang River estuary in Fujian Province was scrutinized in terms of the sediment dynamic parameters (including: inundation height, tidal current velocity, wave height, suspended sediment concentration, and grain size distribution) and on-site observations in different seasons. Results show that, the surficial sediments of the tidal flat are mainly composed of fine particles of silt and clay in summer, and coarse particles of sand and silt in winter. The marsh areas covered with *Spartina alterniflora* in the upper intertidal zone were characterized by mainly continuous accretion, while the middle-lower intertidal zone exhibited periodic erosion and accretion. The general pattern of erosion-accretion in the tidal flats was characterized by accretion in summer and erosion in winter, and the variations in erosion and accretion in the middle intertidal zone were greater than those in the lower intertidal zone. The tidal current velocity, wave height, and suspended sediment concentration in winter were all greater than those in summer. In winter, the net flux of suspended sediment near bottom was mainly transported seaward within a tidal cycle, while in summer, it was mainly transported landward. Therefore, the seasonal variations of erosion-accretion pattern of the tidal flats in Minjiang River estuary were mainly controlled by hydrodynamic processes. In winter, strong wave action caused significant resuspension of surficial sediment and seaward transportation by tidal currents, leading to erosion of the tidal flat; in summer, the wave action was weak, and the suspended sediment settled due to low bottom shear stress and was transported landward by tidal current, leading to accretion in the intertidal zone.

Key words: estuarine tidal flat; erosion-accretion pattern; salt marsh; hydrodynamic processes; seasonal variations

潮滩是在潮汐作用显著、细颗粒沉积物供应丰富条件下形成的一种地貌类型,位于陆地、海洋、大气及人类活动相互作用的敏感地带。潮滩广泛分布在除基岩海岸和高纬度(70°~73°以上)海岸外的沿海地区,并且随着潮差、波浪、物质供应、植被类型等不同而表现出显著的空间差异^[1-4]。目前全球潮滩面积约为 127921 km²,主要分布在亚太地区,如印尼、中国、印度等国家^[5]。我国的潮滩规模大且分布广泛,其中长江口-杭州湾及以北沿海地区主要为平原型潮滩,而长江口-杭州湾以南的浙、闽、粤、桂等沿海地区主要为港湾型潮滩^[6]。从 20 世纪初开始,各国学者对潮滩沉积和地貌特征、潮滩沉积物输运和堆积的过程、盐沼植被对潮滩沉积过程的影响、极端事件对潮滩地貌演化影响等方面进行了系统研究和总结^[7-16]。进入 21 世纪,随着现场观测技术和数值模拟的不断改进,我国科研人员开始关注潮滩沉积过程及其控制机制、植被-泥沙-地貌耦合的生物地貌过程、极端事件影响下的潮滩沉积物输运与地貌演化过程、潮滩沉积层序成因机制及潮滩演化趋势模拟等方面,取得了丰硕的成果^[17-33]。

潮滩作为重要的海岸带生态系统,不仅在蓝色碳汇方面发挥着重要作用^[34-35],而且在海岸防护方面起到至关重要的作用^[36]。然而,随着海平面不断上升、地面沉降、流域及海岸带人类活动的不断加剧,潮滩面积逐渐减少^[5],其中人类活动是主要驱动因素^[37]。潮滩面积的减少不仅导致蓝色碳汇能力减弱^[5, 35],而且引起诸多地区海岸遭受不同程度侵蚀^[38]。高强度的人类活动显著影响了潮滩局部沉积物输运过程及地貌演化过程^[20, 24],而流域输沙量

的锐减则引起了潮滩冲淤格局的改变^[39]。随着流域及河口地区人类活动强度的不断增大,河口系统状态正在发生转换^[40],直接影响着河口潮滩未来演化趋势及其功能发挥。

本文选择我国东南沿海典型的山溪性中小型河流河口潮滩作为研究区域,通过沉积物采样、定点冲淤观测和沉积动力学观测等手段,初步分析了河口潮滩的季节性冲淤变化过程及其控制机制,以期科学评估潮滩的海岸防护和潮滩生态系统保护与修复能力提供科学依据。

1 研究区概况

闽江发源于福建与江西省交界的武夷山东麓及仙霞岭南麓,总体呈 NW-SE 向横贯福建中北部,经福州汇入东海南部,全长 2872 km,其中干流全长近 577 km,流域面积为 60992 km²,多年平均径流量为 605.5×10⁸ m³,多年平均输沙量为 750×10⁴ t,并且表现出明显的洪、枯季变化,即洪季(3—8 月)径流量约占全年的 76%,输沙量约占全年的 92%^[41]。近年来随着流域水库建设的不断增加,平均输沙量已经下降为原来的三分之一^[42]。

受地转偏向力及台湾海峡地形效应作用,闽江河口区潮汐作用强,实测最大潮差达到 7.04 m,平均潮差 4.46 m(梅花站),属正规半日潮,河口内潮流基本呈往复流,其流向与河槽线一致,河口外潮流具有一定的旋转流特征^[41]。闽江口外海面开阔,夏季以西南风为主,冬季以东北风为主,波浪作用强,波浪的主要形式为风浪及涌浪同时存在的混合浪,多年平均波高为 1.1 m,历史最大波高为 6.5 m^[41]。

此外,闽江口海域是我国东南沿海地区遭受台风影响最为严重的区域之一,平均每年影响的台风次数为5.7个,最大台风增水值可达2.52 m^[43]。

闽江河口地区的潮滩主要分布在川石岛南部、琅岐岛东部以及梅花水道南侧海岸(图1a),其中琅岐岛潮滩宽度为600~1100 m(图1b),滩面平缓。现场调查结果显示(图1c),琅岐岛潮滩由岸向海主要分布有互花米草、海三棱藨草、光滩等,其中互花米草盐沼滩面平均坡度约为0.36°,海三棱藨草盐沼滩面平均坡度约为0.14°,潮间带中下部的光滩平均坡度约为0.08°,河道边缘地区的滩面坡度约为1.84°。

2 研究方法

2.1 野外采样与观测

在琅岐岛东部潮滩选择一条剖面利用RTK对剖面进行了滩面高程测量,并在剖面上由岸向海设

置了10个采样站位(图1b),分别于2022年8月和2023年2月采集了表层1 cm厚度的沉积物。为了掌握潮间带不同空间位置的冲淤变化特征,在互花米草盐沼边缘(L03站)、海三棱藨草盐沼中部(L05站)及光滩外缘(L09站)设置了3个站位,安装了冲淤观测架,在观测架上设置12个点,定期测量每个点距离滩面的高度,然后对各站位每次的测量数据进行平均,获得各站位的冲淤变化信息(图1c)。

为了解研究区水动力状况,在海三棱藨草内部靠近互花米草边缘设置一个沉积动力学观测站位(图1c, L04站),利用 Nortek 公司生产的声学多普勒海流计(ADV, VECTOR 6MHz)分别于2022年1月25日至2月1日、7月21—31日开展近底部潮流观测,仪器探头距离滩面30 cm,观测点位于滩面以上15 cm处;观测设置为脉冲模式进行采样,采样间隔为10 min,其中冬季采样频率为4 Hz,每次采集1024组数据,夏季采样频率为16 Hz,每次采集4096组数据;冬季利用北京海洲赛维科技有限公司生产的波潮仪(TWaves)进行淹没水深观测,以脉冲模式

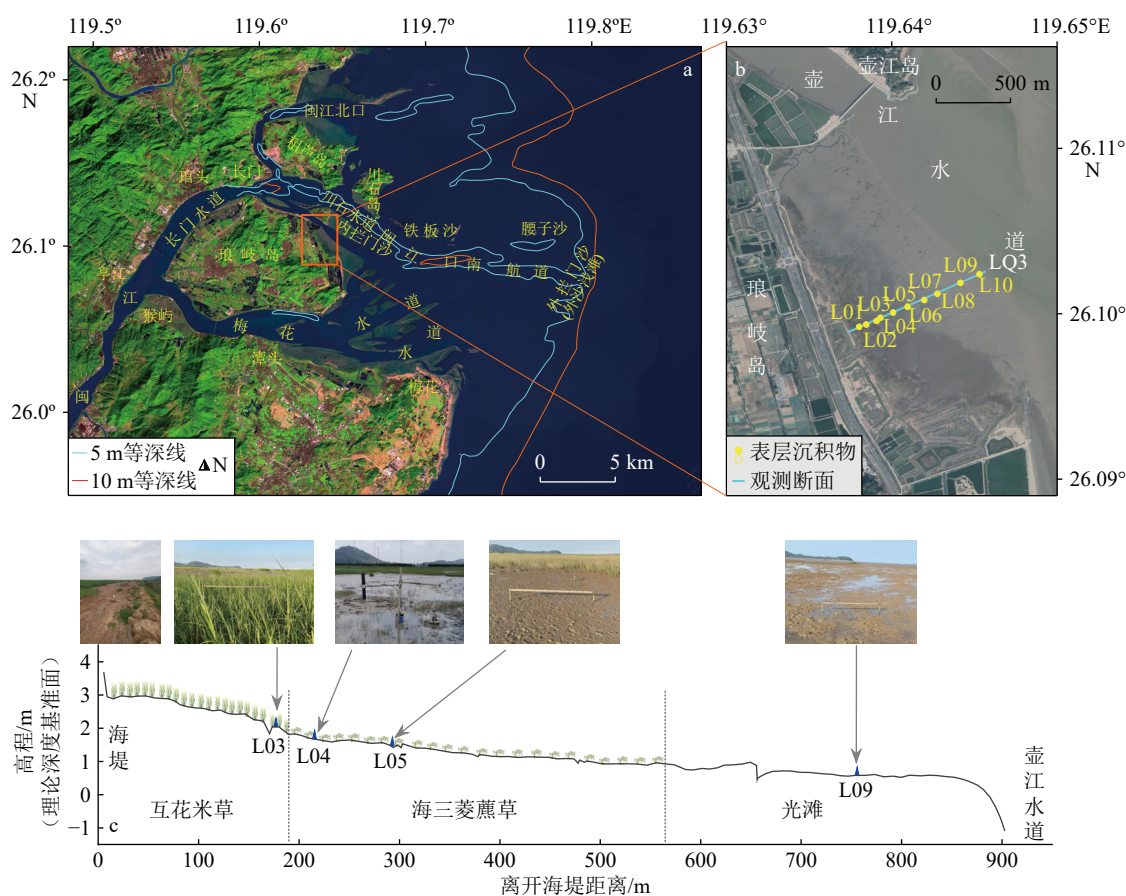


图1 研究区位置(a)、沉积物采样站位(b)、剖面形态及观测站位图(c)

Fig.1 Sketch map of study area (a), sediment sampling sites (b), morphological character of profile and observation sites of tidal flat of Langqi Island (c)

进行采样,以 10 min 为采样间隔,采样频率设置为 8 Hz,每次采集时长为 5 min,取平均值。

2.2 样品分析与数据处理

2.2.1 沉积物粒度分析

在实验室内将采集回来的常温保存样品充分混合,取约 2 g 重的沉积物加入浓度为 5% 的 H_2O_2 溶液以去除有机质,再加入浓度为 1 mol/L 的 HCl 溶液以去除碳酸盐,用蒸馏水清洗至溶液为中性,加入浓度为 5‰ 的六偏磷酸钠溶液 ($(NaPO_3)_6$) 浸泡 24 h,并利用超声波震荡 1 min,使样品充分混和、分散后,用英国马尔文公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪进行粒度分析,并用仪器自带软件导出中值粒径和各粒级组分数数据,采用谢帕德分类体系对沉积物进行分类^[44]。

2.2.2 悬沙浓度校对

利用在 L04 站采集的表层沉积物在室内配置不同悬沙浓度 (SSC) 的水体与 ADV 采集的声学信号进行相关分析,结果发现两者之间具有很好的相关性(图 2)。因此,根据该回归方程可以将 ADV 观测获得的信噪比 (Signal-Noise Ratio, SNR) 转化成时间序列的 SSC。

2.2.3 沉积动力学参数计算

利用仪器自带软件将观测数据导出,然后再利用该软件的数据转换功能,将原始数据转换成数据文件以便计算水平方向上的平均流速和波浪参数。

潮间带地区作为极浅水环境,整个水层都属于边界层范围内,平均水平流速在垂向上的分布遵循对数分布^[45]:

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (1)$$

$$\tau_b = \rho_w u_*^2 \quad (2)$$

其中, $U(z)$ 是平均水平流速度, u_* 是摩阻速度; κ 是卡门常数 ($\kappa=0.4$); z 是距底床高度, z_0 是底部粗糙长度, τ_b 是潮流引起的底部切应力, ρ_w 是海水的密度。一般在边界层范围内,可以利用对数剖面方法计算潮流引起的底部切应力。

有效波高 (H_s) 采用如下公式计算^[46]:

$$H_s = 4 \sqrt{\int S_\eta(f) df} \quad (3)$$

式中, S_η 是水位的功率谱。将 ADV 测得的压力转换到水位时,需要考虑衰减,根据线性波理论,衰减系数可以表示为^[47]:

$$Kf = \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh kh} \quad (4)$$

其中, k 是波数, h 是平均水深, z 是压力传感器的深度 (负值)。波浪引起的底部切应力 (τ_w) 可以用如下公式计算^[45]:

$$\tau_w = 0.5 \rho f_w U_w^2 \quad (5)$$

其中, f_w 为波浪摩擦因子, U_w 为波浪轨迹速度,可以表达为波高 (H_s)、波周期 (T) 和水深 (h) 的函数^[45]:

$$U_w = \pi H_s / [T \sinh(kh)] \quad (6)$$

其中 k 为波数,可以表达为: $k = 2\pi/L$, L 为波长,可以用图解法计算得到^[48]。波浪摩擦因子可以表达为:

$$f_w = 1.39(A/z_0) - 0.52 \quad (7)$$

式中 A 为半轨迹距离,可以表达为: $A = U_w T / 2\pi$ 。

由流速和悬沙浓度数据计算近底层悬沙瞬时水平输运率 $f(t)$ 及潮周期内悬沙净水平输运通量 $F(t)$ ^[45]:

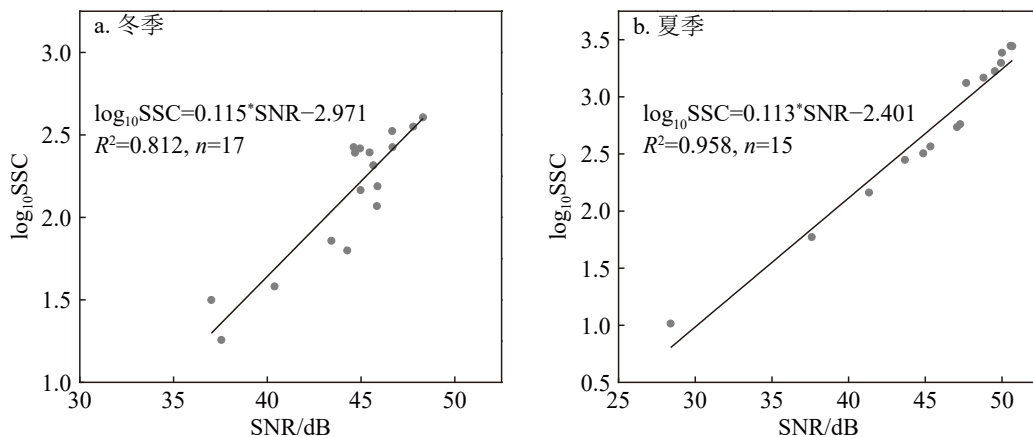


图 2 悬沙浓度与 ADV 观测获得的信噪比的相关关系

Fig.2 Relationship between SSC and SNR recorded by ADV

$$f(t) = U(z, t) \times C(z, t) \quad (8)$$

$$F(t) = \int_0^T f(t) dt = \sum_1^j \Delta t f_j(t) \quad (9)$$

其中 $U(z, t)$ 和 $C(z, t)$ 分别表示距离海底高度 $z(\text{m})$ 处 t 时刻的瞬时水平流速 ($u_a, \text{m/s}$) 和悬沙浓度 ($\text{SSC}, \text{mg/L}$), Δt 表示实测时刻代表时间长度。

研究区表层沉积物冬季以粗颗粒沉积物为主, 夏季以细颗粒沉积物为主, 因此, 在计算沉积物临界侵蚀切应力时分别选择适合非粘性沉积物和粘性沉积物的计算公式。非粘性沉积物临界侵蚀切应力时选择如下计算公式^[45]:

$$\theta = \tau_b / [g\rho(s-1)d] \quad (10)$$

$$\theta_{cr} = \frac{0.30}{1 + 1.2D_*} + 0.055(1 - e^{-0.020D_*}) \quad (11)$$

$$D_* = [g(s-1)/\nu^2]^{1/3} d \quad (12)$$

其中, θ 是 Shields 参数, θ_{cr} 是沉积物临界起动 Shields 参数, $s = \rho_s/\rho_w$, ρ_s 是沉积物密度 (取值为 2650 kg/m^3), ρ_w 是海水密度 (取值为 1025 kg/m^3), d 是沉积物粒径, g 是重力加速度 (取值为 9.81 m/s^2), D_* 是一个与沉积物粒径有关的无量纲参数, ν 是水体的运动黏滞系数, 取值为 $1.36 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。对于黏性沉积物, 其临界侵蚀切应力计算用如下公式^[49]:

$$\tau_{cr} = 0.05 + \beta \left\{ \frac{1}{[(\pi/6)(1 + sW)]^{1/3} - 1} \right\}^2 \quad (13)$$

其中, β 是与颗粒粒径有关的系数, 根据试验资料^[49], 在中值粒径小且表层沉积物含水量较大时, 取 $\beta=0.3$, W 为含水量, 定义为样品中水的质量与沉积物质量之比, 根据采集的现场表层底质样品的分析获得。

3 研究结果

3.1 沉积物粒度的季节分布特征

粒度分析结果显示 (图 3、图 4), 琅岐岛潮滩表层沉积物粒度组分以粉砂和砂为主, 黏土含量相对较少, 呈现出显著的时空差异。从季节方面看, 冬季表层沉积物砂含量显著增大, 黏土含量显著减小, 沉积物中值粒径 Φ 值较小; 夏季则相反, 砂含量显著减小, 黏土含量和粉砂明显增大, 沉积物中值粒径 Φ 值较大 (表 1)。从空间上看, 潮间带上部的互花米草盐沼内表层沉积物组分以粉砂为主, 平均含量为 60.6%, 砂含量平均为 21.0%, 黏土含量平均为 18.4%, 中值粒径平均为 5.60 Φ ; 在潮间带中部的海三棱藨草盐沼, 沉积物组分以砂为主, 平均含量为 57.1%, 粉砂含量平均为 32.4%, 黏土含量平均为 10.5%, 中值粒径平均为 4.31 Φ ; 在潮间带下部的光滩地区, 表层沉积物组分以粉砂为主, 平均含量为 58.7%, 砂含量平均为 23.0%, 黏土含量平均为 18.3%, 中值粒径平均为 5.56 Φ (图 3、图 4)。

根据 Shepard 三角分类图, 琅岐岛潮间带表层沉积物类型以黏土质粉砂 (YT) 为主, 并且呈现出显著的季节变化, 其中夏季表层沉积物黏土质粉砂占 80%, 仅在潮间带中部出现砂质粉砂 (ST) 和砂-粉砂-黏土 (STY); 冬季以砂 (S) 和砂质粉砂为主, 其次为粉砂质砂 (TS) (图 5)。

3.2 潮滩侵蚀-淤积的时空变化特征

潮间带不同空间位置的冲淤观测结果显示, 琅岐岛潮间带滩面冲淤表现出显著的时空变化特征。互花米草盐沼边缘滩面表现出总体持续淤积

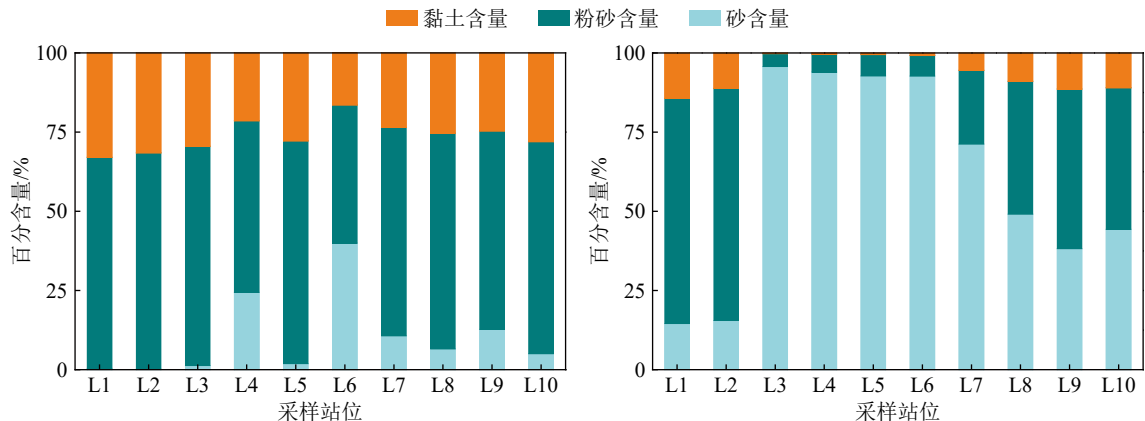


图 3 琅岐岛潮滩夏季 (左) 和冬季 (右) 表层沉积物粒度组成

Fig.3 Surficial sediment composition along the profile of tidal flat in summer (left) and winter (right)

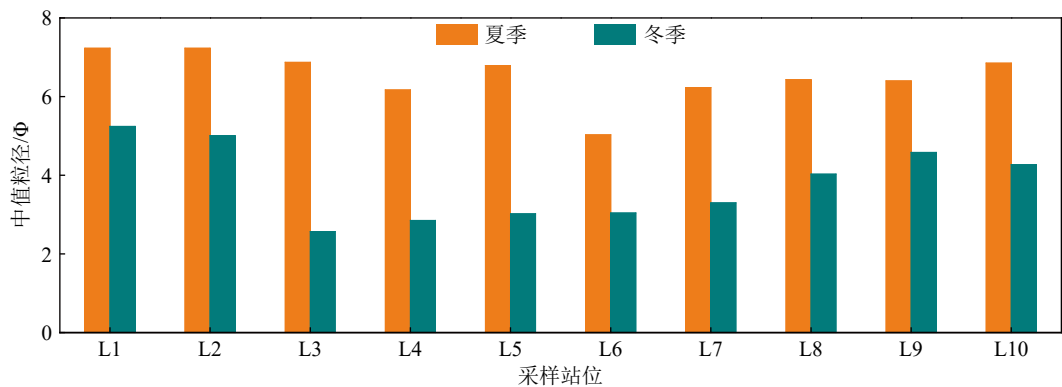


图 4 琅岐岛潮滩不同季节表层沉积物中值粒径

Fig.4 Seasonal variations of median grain-size of surficial sediment along the profile of tidal flat

表 1 琅岐岛潮间带不同季节表层沉积物粒度组分及中值粒径

Table 1 Seasonal variations of composition and median grain-size of surficial sediment

采样时间	砂含量/%		粉砂含量/%		黏土含量/%		中值粒径/Φ	
	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值
2022年8月	0.2~39.9	10.3	43.6~70.3	63.6	16.4~32.9	26.1	5.03~7.23	6.52
2023年2月	14.6~95.7	60.8	4.0~73.3	32.8	0.2~14.4	6.4	2.57~5.24	3.79

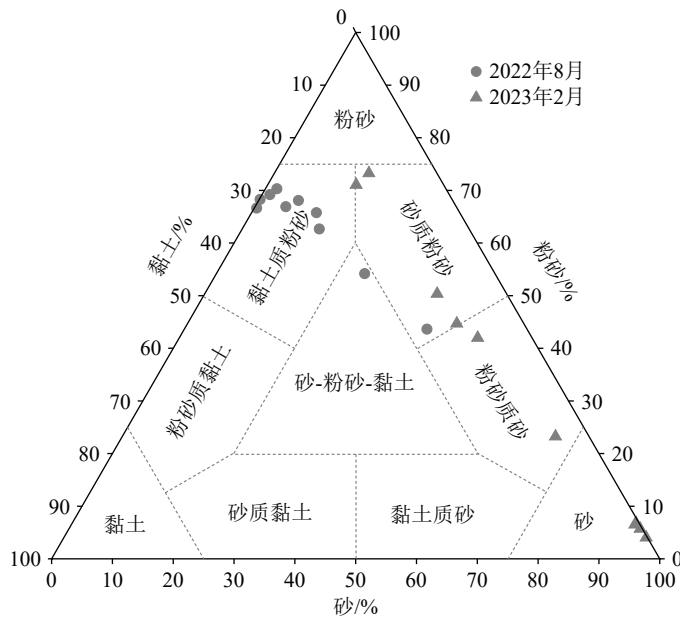


图 5 琅岐岛潮滩不同季节表层沉积物类型

Fig.5 Seasonal variations of surficial sediment type along the profile of tidal flat based on Shepard classification

的变化特征, 仅在冬末至初春季节出现轻微侵蚀 (0.55 cm), 观测期间年淤积厚度为 1.22 cm(图 6a)。海三棱藨草中部滩面在初夏至初秋季节表现为持续淤积, 淤积厚度为 14.13 cm; 初秋至冬末季节表现为持续侵蚀, 侵蚀深度为 20.13 cm; 冬末至春末期间呈现出缓慢淤积, 淤积厚度为 2.54 cm; 整个初夏至翌年春末表现为净侵蚀, 侵蚀深度为 3.42 cm(图 6b)。光滩外缘滩面在初夏至秋末季节表现为持续侵蚀,

侵蚀深度为 5.90 cm; 秋末至翌年春末季节表现为持续淤积, 侵蚀深度为 5.38 cm, 整个初夏至翌年春末表现为净侵蚀, 侵蚀深度为 0.52 cm(图 6c)。

3.3 潮间带水动力特征

琅岐岛潮间带中上部 L04 站位淹没水深观测结果显示(图 7a、8a), 冬季和夏季观测期间大潮最大淹没水深分别为 2.20 和 1.86 m, 小潮最大淹没水深

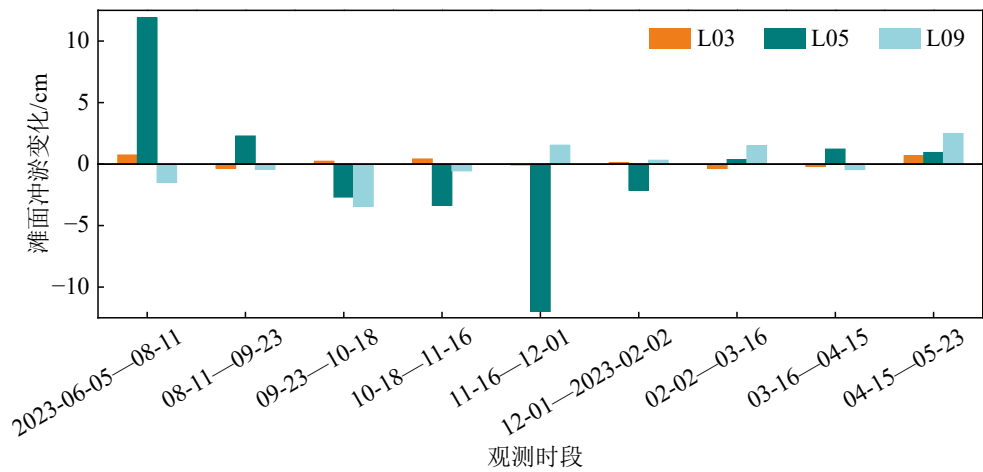


图 6 潮间带不同站位冲淤变化过程
正值为淤积, 负值为冲刷。

Fig.6 Variations of erosion and accretion along the section in different stations
Positive value means accretion, negative value means erosion.

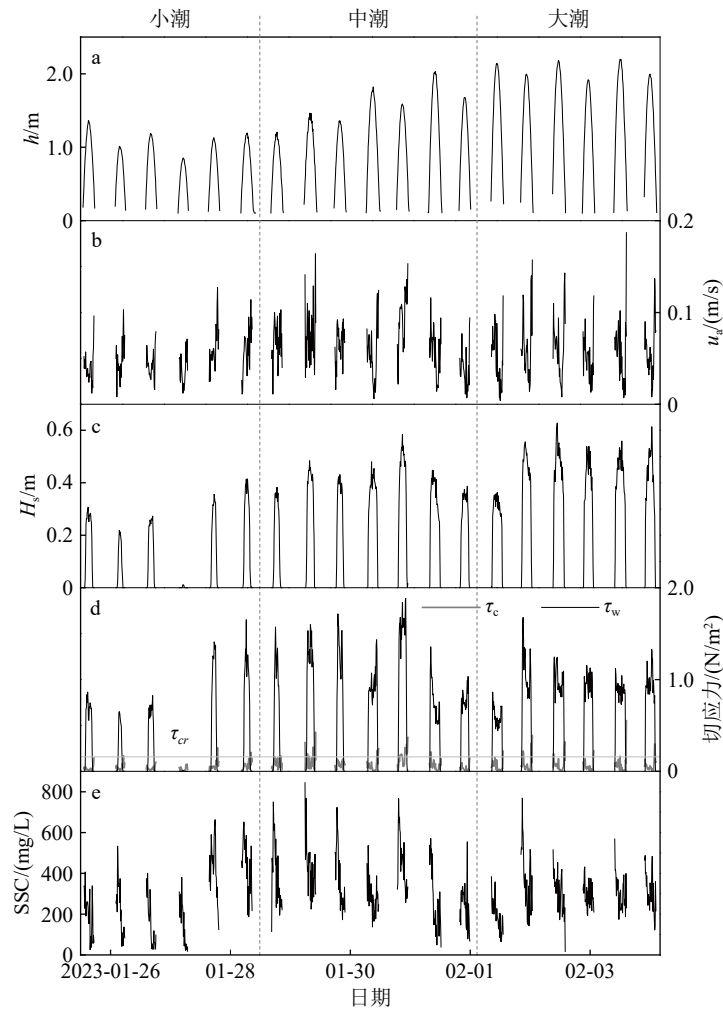


图 7 潮滩中上部光滩冬季近底部水动力时间序列变化过程
a: 淹没水深, b: 近底部流速, c: 有效波高, d: 底部切应力, e: 近底部悬沙浓度。

Fig.7 Time-series of near-bottom hydrodynamic processes in winter on the mid-upper tidal flat

a: Inundation height, b: near-bottom mean current speed, c: significant wave height, d: bottom shear stress induced by tidal current and wave, e: near-bottom suspended sediment concentration.

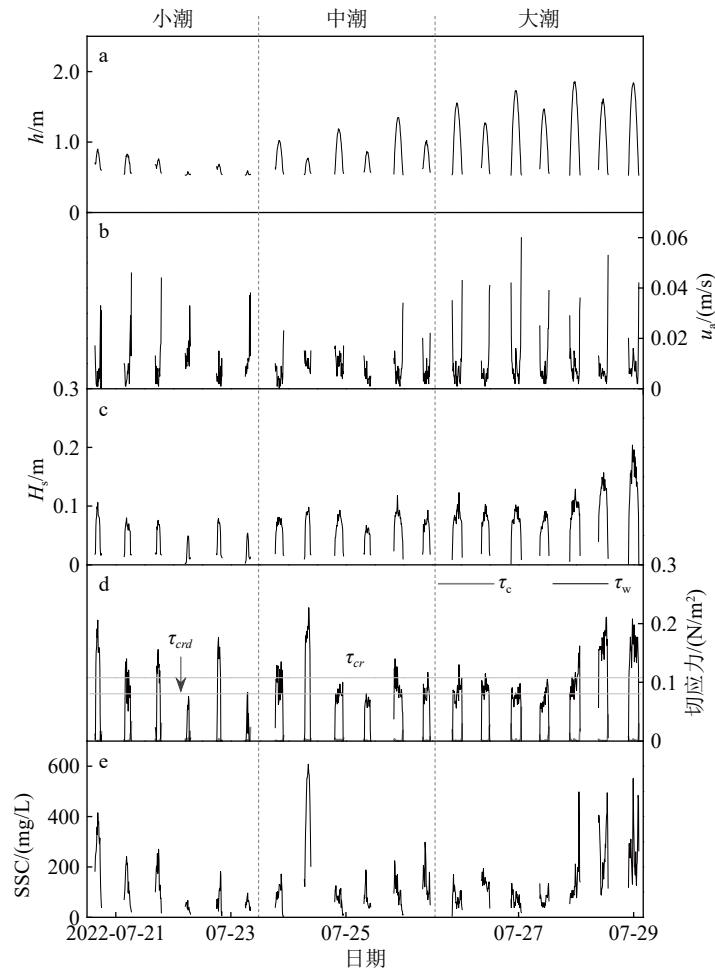


图 8 潮滩中上部光滩夏季近底部水动力时间序列变化过程

a: 淹没水深, b: 近底部流速, c: 有效波高, d: 底部切应力, e: 近底部悬沙浓度。

Fig.8 Time-series of near-bottom hydrodynamic processes in summer on the mid-upper tidal flat

a: Inundation height, b: near-bottom mean current speed, c: significant wave height, d: bottom shear stress induced by tidal current and wave, e: near-bottom suspended sediment concentration.

分别为 1.37 和 0.90 m。潮流观测结果显示(图 7b、8b), 冬季小潮观测期间近底部潮流流速为 0.008 ~ 0.127 m/s, 大潮期间为 0.004 ~ 0.187 m/s; 夏季小潮观测期间近底部潮流流速为 0.001 ~ 0.046 m/s, 大潮期间为 0.001 ~ 0.060 m/s; 无论冬季还是夏季, 潮周期内潮流流速最大值均出现在落潮后期。波浪计算结果显示(图 7c、8c), 冬季和夏季观测期间有效波高最大值分别为 0.63 和 0.20 m, 平均值分别为 0.26 和 0.07 m, 冬季波浪明显较夏季强。底部切应力计算结果显示(图 7d、8d), 冬季和夏季观测期间潮流引起的底部切应力最大值分别为 0.551 和 0.057 N/m², 平均值分别为 0.067 和 0.003 N/m²; 波浪引起的底部切应力最大值分别为 1.885 和 0.293 N/m², 平均值分别为 0.652 和 0.097 N/m², 冬季潮流和波浪引起的底部切应力明显大于夏季。

3.4 潮间带近底部悬沙浓度变化

悬沙浓度计算结果显示, 琅岐岛潮间带中上部 L04 站位近底部悬沙浓度呈现出显著的时间变化特征(图 7e、8e)。在季节尺度上, 冬季观测期间近底部悬沙浓度为 17.4 ~ 844.5 mg/L, 平均值为 306.8 mg/L, 而夏季观测期间近底部悬沙浓度为 3.4 ~ 607.8 mg/L, 平均值为 138.5 mg/L, 冬季悬沙浓度显著高于夏季。在大-小潮周期尺度上, 小潮期间近底部悬沙浓度相对较低, 大潮期间相对较高, 但潮周期平均值相差不大, 如冬季大潮和小潮观测期间近底部悬沙浓度平均值分别为 296.5 和 268.6 mg/L, 而夏季大潮和小潮观测期间近底部悬沙浓度平均值分别为 158.1 和 123.7 mg/L。在潮周期尺度上, 涨潮初期和落潮后期相对较高, 高平潮期间悬沙浓度相对较低。

3.5 潮间带近底部悬沙输运

近底部悬沙东向水平输运率计算结果呈现出显著的时间变化特征(图 9), 冬季观测期间近底部悬沙在东向上水平输运率为 $-0.118 \sim 0.051 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值为 $0.011 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 夏季观测期间近底部悬沙水平输运率为 $-0.006 \sim 0.009 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值为 $0.001 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

每个潮周期内的东-西方向上的净悬沙输运量计算结果显示(图 9), 琅岐岛潮间带中部潮周期内近底部悬沙水平净输运通量呈现出明显的时间变化特征。在大-小潮时间尺度上, 小潮期间潮周期内悬沙净水平输运通量显著小于大潮, 而净输运方向则呈现出季节性差异: 小潮期间冬季呈现出向岸净输运和向海净输运交替出现, 而夏季则整体呈现向海净输运的变化特征; 中潮期间冬季总体表现为向海净输运, 而夏季则整体呈现向陆净输运的变化特征; 大潮期间冬季总体呈现向岸净输运, 而夏季则呈现向岸净输运和向海净输运交替出现的变化特征。在季节尺度上, 冬季潮周期内悬沙净水平输运通量为 $-124.30 \sim 243.24 \text{ kg/m}$, 观测期间净输运通量为 289.49 kg/m ; 夏季周期内悬沙净水平输运通量仅为 $-38.07 \sim 4.13 \text{ kg/m}$, 观测期间净输运通量仅为 -58.73 kg/m , 即冬季潮周期内净水平输运通量显著大于夏季, 并且冬季悬沙净向海输运, 而夏季净向陆输运。

4 讨论

河口潮滩是由地质过程以及水动力过程、沉积

物供应和生态过程的相互作用形成的, 其地貌形态及沉积物组成受动力、物源及生物活动控制, 具有高度的时空变化特征^[4, 50]。大量的河流入海泥沙进入河口后, 在水动力的作用下发育了广泛的潮滩^[6, 51], 但由于我国河流泥沙入海主要集中在夏季, 冬季入海泥沙通量很小^[41], 因此, 潮滩表层沉积物也表现出显著的季节差异^[52-54]。闽江河流泥沙入海通量也主要集中在夏季^[55], 本文断面表层沉积物分析结果(图 3、图 4)和冲淤观测结果(图 6)也显示, 夏季期间河口潮滩捕获了大量的河流入海沉积物, 潮滩为淤积状态, 潮滩表层沉积物以粉砂和黏土为主, 平均粒径较小; 冬季期间河流入海泥沙很少, 河口潮滩很少能捕获来自河流的泥沙, 潮滩表层沉积物在水动力的作用下不断发生改造, 最终细颗粒沉积物被搬运带走, 潮滩发生侵蚀, 表层沉积物以砂和粉砂为主。关于沉积物供应变化对闽江口潮滩沉积物组成的影响综合分析详见李海琪等^[56], 本文不再赘述, 但需要指出的是, 随着闽江入海泥沙通量的显著减少^[55], 河流输沙季节变化对琅岐岛潮滩季节性冲淤变化的影响将会减小。本文将主要从水动力方面阐述闽江河口潮滩冲淤的季节性变化机制。

影响潮滩沉积和地貌演化的动力过程主要包括潮汐、波浪、跨岸/沿岸流、风致环流、潮不对称等^[50, 57], 尤其是在极浅水环境下, 潮流、波浪是影响潮滩沉积物分布的主要动力因素^[27-28]。沉积物是否发生侵蚀和淤积, 主要是看水动力引起的底部切应力是否会超过临界切应力, 当水动力引起的底部切应力大于沉积物的临界侵蚀切应力, 则沉积物发生再悬浮, 滩面呈现侵蚀状态; 当水动力引起的底部切应力小于泥沙临界沉降切应力, 则泥沙发生沉

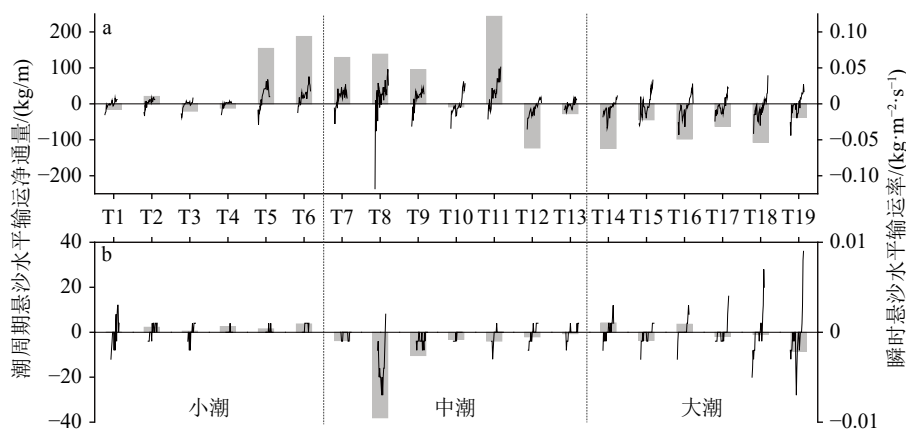


图 9 近底部瞬时悬沙水平输运率及潮周期内悬沙水平输运净通量
a: 冬季, b: 夏季。正值为向海输运, 负值为向岸输运; T1—T19 为观测期间的潮周期数。

Fig.9 Seaward transport rate and net flux of near-bottom instantaneous suspended sediment in a tidal cycle in winter (a) and summer (b)

Positive values indicate seaward transport, negative ones are landward transport; T1—T19: the number of tidal cycle during the observation.

降,滩面呈现淤积状态。根据本文观测期间采集的表层沉积物粒度分析结果,冬季表层沉积物砂含量达到了93.9%,中值粒径为 2.85Φ ,属于典型的非粘性沉积物,而夏季表层沉积物砂、粉砂和黏土含量分别为24.4%、54.2%和21.4%,中值粒径为 6.17Φ ,属于典型的粘性沉积物。因此,根据相应的计算公式可知,观测站位冬季和夏季表层沉积物临界侵蚀切应力分别为 0.158 和 0.107 N/m^2 。对比结果发现(图7d、8d),琅岐岛潮滩中上部地区近底层流速相对较小,由此产生的底部切应力也相对较小,对沉积物的活动性影响不明显,但冬季观测期间波浪引起的底部切应力显著大于表层沉积物的临界侵蚀切应力,表明冬季观测期间观测站位附近滩面发生强烈的侵蚀;夏季观测期间波浪引起的底部切应力的变化大部分时刻均小于表层沉积物临界侵蚀切应力,表明夏季观测期间观测站位附近滩面表层沉积物不易发生侵蚀。在长江口及江苏沿海潮间带观测结果也显示,在这种极浅水环境下波浪作用显著影响潮滩冲淤过程^[28, 58]。研究表明^[59],悬沙临界沉降切应力(τ_{crd})一般为 $0.06\sim 0.1\text{ N/m}^2$,根据Whitehouse等的推荐,本文取 $\tau_{\text{crd}}=0.08\text{ N/m}^2$ (其值适用于细颗粒泥沙),则对比结果显示(图8d),夏季观测期间大部分时刻由潮流和波浪引起的底部切应力小于临界沉降切应力,表明观测期间观测站位附近水体悬沙易发生沉降,导致滩面出现淤积。近底部悬沙净输运通量计算结果显示,冬季观测期间泥沙净向海输运,而夏季则净向岸输运。该结果表明,波浪是引起潮间带表层沉积物发生侵蚀的主要动力,而潮流则是搬运泥沙的主要动力。涨落潮不对称现象是河口海岸地区重要的水动力特征,是影响区域泥沙不对称输运的重要因素^[60],在河口海岸地区泥沙输运和地貌演变过程中扮演着十分重要的角色^[57, 61]。由图8和图9可知,冬季涨潮期间悬沙浓度总体大于落潮,但由于波浪引起的底部切应力显著大于悬沙临界沉降切应力,导致悬沙很少发生沉降,涨潮流带来的悬沙除部分被潮间带上部的互花米草盐沼植被捕获外,其他悬沙又在落潮流的作用下向海输运,而研究区无论冬季还是夏季,潮流均以落潮流占优,因此,落潮期间的底层悬沙输运通量总体大于涨潮,潮周期内表现为净向海输运;夏季,虽然是落潮流占优,但涨潮期间的底层悬沙浓度总体大于落潮,仅在大潮期间波浪作用较强时期出现落潮悬沙浓度大于涨潮的情况,因此涨潮期间的悬沙输运通量总体大于落潮,并且在多数时刻底部切应力小于临界沉降切应力,悬沙沿途发生

沉降。该结论得到了本文现场冲淤观测结果的支持(图6),同时也与其他河口地区潮滩冲淤过程一致^[52, 62]。

本文观测结果显示,琅岐岛潮间带中部地区,冬季观测期间的潮流和波浪作用(图7b、c)均明显较夏季强(图8b、c),这主要一方面是由于研究区冬季主要受东北季风控制,而夏季主要受西南季风控制,冬季期间风速大于夏季,由此引起研究区冬季期间潮流和波浪作用较夏季强^[43, 63];另一方面,则与潮间带地貌的季节性变化有关。现场调查发现,琅岐岛潮间带中部夏季被海三棱藨草覆盖,而冬季则变为光滩。现场观测和数值模拟结果均表明,盐沼植被具有显著的弱流、消波作用^[64-66]。琅岐岛潮滩夏季由于生长了大面积的海三棱藨草,起到了一定的缓流作用,因此,夏季观测期间最大潮流流速和平均潮流流速均小于没有盐沼植被覆盖的冬季,波浪作用也是夏季显著小于冬季,表明琅岐岛潮间带海三棱藨草的生长具有一定弱流和显著的消波作用。根据不同站位冲淤变化对比分析(图6),在观测期间互花米草盐沼边缘滩面冲淤变化幅度很小,并且与其他两个站位的冲淤变化趋势没有明显的一致性,说明该地区滩面冲淤主要受水动力和互花米草的影响。位于海三棱藨草覆盖区域和光滩区域滩面冲淤变化总体表现为相反的变化趋势,这可能与海三棱藨草生长和消亡会引起潮间带中部地区冲淤变化有关,即在有海三棱藨草覆盖时,在动力-植被-泥沙的耦合作用下,涨潮带来的泥沙被植被捕获并沉积下来^[30],退潮水体悬沙浓度降低,导致在光滩地区退潮水流携沙能力有所增强,在一定程度上可能会引起潮间带下部光滩的侵蚀;当没有植被覆盖时,潮间带中部遭受显著侵蚀,侵蚀下来的泥沙在被落潮流携带至河口的过程中沿途发生沉降,引起潮间带下部滩面淤积。上述分析表明,盐沼植被在潮滩冲淤变化过程和潮滩发育演变中发挥着重要作用。

综上所述,琅岐岛潮间带中上部潮滩冲淤变化的动力学机制为:冬季,由于潮间带中部的海三棱藨草消失,潮间带被水淹没期间的波浪作用强,由此引起的底部切应力显著大于表层沉积物的临界侵蚀切应力,表层沉积物发生再悬浮,再悬浮起来的泥沙在潮流的作用下向海输运,导致滩面发生侵蚀;夏季潮间带中部被海三棱藨草覆盖,潮流和波浪均减弱,由此引起的底部切应力在大部分时刻小于表层沉积物的临界侵蚀切应力和临界沉降切应力,水体中的悬沙易发生沉降,导致滩面发生淤积。

5 结论

(1)琅岐岛潮滩表层沉积物粒度组分以粉砂和砂为主,黏土含量相对较少,呈现出显著的时空差异,夏季主要以粉砂和黏土组成的细颗粒沉积物为主,冬季则主要以砂和粉砂组成的粗颗粒沉积物为主。

(2)琅岐岛潮间带上部的互花米草盐沼总体以持续淤积为主,潮间带中部和下部表现出周期性的冲淤特征,总体以夏季淤积、冬季侵蚀为总特征,并且潮间带中部的冲淤变化幅度较潮间带下部大。

(3)沉积动力观测与计算结果表明,琅岐岛潮间带中上部近底部潮流流速相对较小,但波浪作用强,近底部悬沙浓度相对较高,其中冬季潮流流速、波浪作用及悬沙浓度均大于夏季,冬季潮周期内近底部悬沙以净向海输运为主,而夏季则以净向岸输运为主。

(4)琅岐岛潮滩冲淤变化主要受动力过程控制,冬季因潮间带海三棱藨草消失,波浪作用强,导致表层沉积物易发生再悬浮,再悬浮的泥沙在较强的潮流作用下净向海输运;夏季因潮间带有海三棱藨草生长,波浪作用较弱,水体中的悬沙易发生沉降,较弱的潮流将泥沙净向岸输运,导致潮间带发生淤积。

致谢: 黄书仁、黄思添、余永泽、陈海煌、刘三善参与了野外采样工作,黄书仁参与了实验室样品分析,谨致谢忱!

参考文献 (References)

- [1] Eisma D. Intertidal Deposits: River Mouths, Tidal Flats, and Coastal Lagoons[M]. Boca Raton: CRC Press, 1998: 1-525.
- [2] Dyer K R, Christie M C, Wright E W. The classification of intertidal mudflats[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(10-11): 1039-1060.
- [3] Fan D D. Open-coast tidal flats[M]//Davis R A Jr, Dalrymple R W. Principles of Tidal Sedimentology. New York: Springer, 2012: 187-229.
- [4] Gao S. Geomorphology and sedimentology of tidal flats[M]//Perillo G M E, Wolanski E, Cahoon D R, et al. Coastal Wetlands: An Ecosystem Integrated Approach. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2019: 359-381.
- [5] Murray N J, Phinn S R, DeWitt M, et al. The global distribution and trajectory of tidal flats[J]. *Nature*, 2019, 565(7738): 222-225.
- [6] 王颖, 朱大奎. 中国的潮滩[J]. *第四纪研究*, 1990, 10(4): 291-300. [WANG Ying, ZHU Dakui. Tidal flats of China[J]. *Quaternary Sciences*, 1990, 10(4): 291-300.]
- [7] 王颖. 渤海湾西部贝壳堤与古海岸线问题[J]. 南京大学学报:自然科学版, 1964, 8(3): 424-440. [WANG Ying. The shell coast ridges and the old coastlines of the west coast of the Bohai bay[J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 1964, 8(3): 424-440.]
- [8] Evans G. Intertidal flat sediments and their environments of deposition in the Wash[J]. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 1965, 121: 209-240.
- [9] Stumpf R P. The process of sedimentation on the surface of a salt marsh[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1983, 17(5): 495-508.
- [10] 任美镔, 张忍顺, 杨巨海. 江苏王港地区淤泥质潮滩的沉积作用[J]. 海洋通报, 1984, 3(1): 40-54. [REN Mei'e, ZHANG Renshun, YANG Juhai. Sedimentation on tidal mud flat in Wanggang Area, Jiangsu province, China[J]. *Marine Science Bulletin*, 1984, 3(1): 40-54.]
- [11] 张忍顺. 江苏省淤泥质潮滩的潮流特征及悬移质沉积过程[J]. 海洋与湖沼, 1986, 17(3): 235-245. [ZHANG Renshun. Characteristics of tidal current and sedimentation of suspended load on tidal mud flat in Jiangsu Province[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1986, 17(3): 235-245.]
- [12] Amos C L. Fine-grained sediment transport in Chignecto Bay, Bay of Fundy, Canada[J]. *Continental Shelf Research*, 1987, 7(11-12): 1295-1300.
- [13] 高抒, 朱大奎. 江苏淤泥质海岸剖面的初步研究[J]. 南京大学学报:自然科学版, 1988, 24(1): 75-84. [GAO Shu, ZHU Dakui. The profile of Jiangsu's mud coast[J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 1988, 24(1): 75-84.]
- [14] Shi Z, Chen J Y. Morphodynamics and sediment dynamics on intertidal mudflats in China (1961-1994)[J]. *Continental Shelf Research*, 1996, 16(15): 1909-1926.
- [15] Yang S L. The role of *Scirpus* marsh in attenuation of hydrodynamics and retention of fine sediment in the Yangtze estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, 47(2): 227-233.
- [16] Allen J R L. Morphodynamics of Holocene salt marshes: a review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(12): 1155-1231.
- [17] 范代读, 李从先, 邓兵, 等. 潮汐周期在潮坪沉积中的记录[J]. 同济大学学报, 2002, 30(3): 281-285. [FAN Daidu, LI Congxian, DENG Bing, et al. Tidal cycles recorded in tidal-flat deposits[J]. *Journal of Tongji University*, 2002, 30(3): 281-285.]
- [18] 贾建军, 汪亚平, 高抒, 等. 江苏大丰潮滩推移质输运与粒度趋势信息解译[J]. 科学通报, 2005, 50(22): 2546-2554. [JIA Jianjun, WANG Yaping, GAO Shu, et al. Interpreting grain-size trends associated with bedload transport on the intertidal flats at Dafeng, central Jiangsu coast[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(3): 341-351.]
- [19] 高抒. 潮滩沉积记录正演模拟初探[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(5): 750-755. [GAO Shu. Determination of preservation potential in tidal flat sedimentary records: A forward modeling approach[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(5): 750-755.]
- [20] 王爱军, 高抒, 贾建军. 互花米草对江苏潮滩沉积和地貌演化的影响[J]. 海洋学报, 2006, 28(1): 92-99. [WANG Aijun, GAO Shu, JIA Jianjun. Impact of *Spartina alterniflora* on sedimentary and morpho-

- gical evolution of tidal salt marshes of Jiangsu, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(1): 92-99.]
- [21] 王爱军, 高抒, 陈坚, 等. 福建泉州湾盐沼对台风“格美”的沉积动力响应[J]. *科学通报*, 2008, 53(22): 2814-2823. [WANG Aijun, GAO Shu, CHEN Jian, et al. Sediment dynamic responses of coastal salt marsh to typhoon “KAEMI” in Quanzhou Bay, Fujian Province, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(1): 120-130.]
- [22] 王爱军, 叶翔, 陈坚. 台风作用下的港湾型潮滩沉积过程: 以 2008 年“凤凰”台风对福建省罗源湾的影响为例[J]. *海洋学报*, 2009, 31(6): 77-86. [WANG Aijun, YE Xiang, CHEN Jian. Effects of typhoon on sedimentary processes of embayment tidal flat: A case study from the “Fenghuang” typhoon in 2008[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(6): 77-86.]
- [23] 王爱军, 叶翔, 李云海. 台风期间港湾海岸湿地侵蚀、淤积的环境动力学机制初探: 以福建罗源湾为例[J]. *沉积学报*, 2013, 31(2): 315-324. [WANG Aijun, YE Xiang, LI Yunhai. Environmental dynamic mechanisms for sediment erosion and accretion over embayment coastal wetland during typhoon event: A case study from Luoyuan Bay, Fujian, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(2): 315-324.]
- [24] Wang Y P, Gao S, Jia J J, et al. Sediment transport over an accretional intertidal flat with influences of reclamation, Jiangsu coast, China[J]. *Marine Geology*, 2012, 291-294: 147-161.
- [25] Fan D D, Wang Y, Liu M. Classifications, sedimentary features and facies associations of tidal flats[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2013, 2(1): 66-80.
- [26] Yu Q, Wang Y W, Shi B W, et al. Physical and sedimentary processes on the tidal flat of central Jiangsu Coast, China: Headland induced tidal eddies and benthic fluid mud layers[J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 133: 26-36.
- [27] Shi B W, Cooper J R, Pratolongo P D, et al. Erosion and accretion on a mudflat: The importance of very shallow-water effects[J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2017, 122(12): 9476-9499.
- [28] Shi B W, Cooper J R, Li J S, et al. Hydrodynamics, erosion and accretion of intertidal mudflats in extremely shallow waters[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 573: 31-39.
- [29] 龚政, 黄诗涵, 徐贝贝, 等. 江苏中部沿海潮滩对台风风暴潮的响应[J]. *水科学进展*, 2019, 30(2): 243-254. [GONG Zheng, HUANG Shihan, XU Beibei, et al. Evolution of tidal flat in response to storm surges: a case study from the central Jiangsu Coast[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(2): 243-254.]
- [30] 龚政, 陈欣迪, 周曾, 等. 生物作用对海岸带泥沙运动的影响[J]. *科学通报*, 2021, 66(1): 53-62. [GONG Zheng, CHEN Xindi, ZHOU Zeng, et al. The roles of biological factors in coastal sediment transport: A review[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(1): 53-62.]
- [31] Zhou Z, Liu Q, Fan D D, et al. Simulating the role of tides and sediment characteristics on tidal flat sorting and bedding dynamics[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2021, 46(11): 2163-2176.
- [32] Zhou Z, Wu Y M, Fan D D, et al. Sediment sorting and bedding dynamics of tidal flat wetlands: Modeling the signature of storms[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: 127913.
- [33] Liu X Y, Xing F, Shi B W, et al. Erosion and accretion patterns on intertidal mudflats of the Yangtze River Estuary in response to storm conditions[J]. *Anthropocene Coasts*, 2023, 6: 6.
- [34] Chen J, Wang D Q, Li Y J, et al. The carbon stock and sequestration rate in tidal flats from coastal China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2020, 34(11): e2020GB006772.
- [35] Chen Z L, Lee S Y. Tidal flats as a significant carbon reservoir in global coastal ecosystems[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 900896.
- [36] Schuerch M, Spencer T, Temmerman S, et al. Future response of global coastal wetlands to sea-level rise[J]. *Nature*, 2018, 561(7722): 231-234.
- [37] Li X Z, Bellerby R, Craft C, et al. Coastal wetland loss, consequences, and challenges for restoration[J]. *Anthropocene Coasts*, 2018, 1: 1-15.
- [38] Walter R K, O’Leary J K, Vitousek S, et al. Large-scale erosion driven by intertidal eelgrass loss in an estuarine environment[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 243: 106910.
- [39] Yang S L, Luo X X, Temmerman S, et al. Role of delta-front erosion in sustaining salt marshes under sea-level rise and fluvial sediment decline[J]. *Limnology and Oceanography*, 2020, 65(9): 1990-2009.
- [40] 汪亚平, 贾建军, 杨阳, 等. 长江三角洲蓝图重绘的基础科学问题: 进展与未来研究[J]. *海洋科学*, 2019, 43(10): 2-12. [WANG Yaping, JIA Jianjun, YANG Yang, et al. Fundamental scientific issues for the Changjiang River delta associated with the new blueprint of future development: overview and prospect[J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(10): 2-12.]
- [41] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志 (第十四分册: 重要河口)[M]. 北京: 海洋出版社, 1998: 626-691. [State Oceanic Administration. China Embayment (No. 14: Important River Estuaries)[M]. Beijing, Marine Press, 1998: 626-691.]
- [42] Wang A J, Ye X, Lin Z K, et al. Response of sedimentation processes in the Minjiang River subaqueous delta to anthropogenic activities in the river basin[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 232: 106484.
- [43] 陈坚, 汤军健, 李东义. 闽江入海物质对闽江口及沿海地区的影响[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 1-172. [CHEN Jian, TANG Junjian, LI Dongyi. Influence of Outflows from the Minjiang River on the Estuary and Adjacent Coastal Areas[M]. Beijing: Science Press, 2015: 1-172.]
- [44] Shepard F P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1954, 24(3): 151-158.
- [45] Soulsby R. Dynamics of Marine Sands: A Manual for Practical Applications[M]. London: Thomas Telford, 1997: 1-249.
- [46] Longuet-Higgins M S. On the statistical distribution of the heights of sea waves[J]. *Journal of Marine Research*, 1952, 11(3): 245-266.
- [47] Karimpour A, Chen Q. Wind wave analysis in depth limited water using OCEANLYZ, A MATLAB toolbox[J]. *Computers & Geosciences*, 2017, 106: 181-189.
- [48] Dyer K R. Coastal and Estuarine Sediment Dynamics[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 1986: 1-342.
- [49] Taki K. Critical shear stress for cohesive sediment transport[M]// McAnally W H, Mehta A J. Proceedings in Marine Science: Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes. Amsterdam: Elsevier, 2000, 3: 53-61.

- [50] Roberts W, Le Hir P, Whitehouse R J S. Investigation using simple mathematical models of the effect of tidal currents and waves on the profile shape of intertidal mudflats[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(10-11): 1079-1097.
- [51] Gao S, Collins M B. Holocene sedimentary systems on continental shelves[J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 268-294.
- [52] 杨世伦. 长江三角洲潮滩季节性冲淤循环的多因子分析 [J]. *地理学报*, 1997, 52(2): 123-130. [YANG Shilun. Multi-factor analysis of the annually cyclic erosion deposition of the Changjiang River Deltaic[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(2): 123-130.]
- [53] Yang S L, Li H, Ysebaert T, et al. Spatial and temporal variations in sediment grain size in tidal wetlands, Yangtze Delta: On the role of physical and biotic controls[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 77(4): 657-671.
- [54] Folmer E O, Bijleveld A I, Holthuijsen S, et al. Space-time analyses of sediment composition reveals synchronized dynamics at all intertidal flats in the Dutch Wadden Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2023, 285: 108308.
- [55] 王爱军, 叶翔, 徐晓晖, 等. 亚热带中小型山溪性河流—宽陆架系统“源-汇”过程: 以闽江—东海陆架系统为例 [J]. *沉积学报*, 2022, 40(6): 1615-1634. [WANG Aijun, YE Xiang, XU Xiaohui, et al. “Source-to-sink” processes of a subtropical mid-small mountainous river-wide continental shelf system: A case study from the Minjiang River-east China Sea system[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(6): 1615-1634.]
- [56] 李海琪, 王爱军, 叶翔, 等. 闽江口琅岐岛潮滩沉积物粒度时空变化特征研究 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2023, 待刊. [LI Haiqi, WANG Aijun, YE Xiang, et al. Spatio-temporal variations of surficial sediment grain-size of tidal flat in Minjiang estuary[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023, in press.]
- [57] Le Hir P, Roberts W, Cazaillet O, et al. Characterization of intertidal flat hydrodynamics[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(12-13): 1433-1459.
- [58] Chen D Z, Tang J P, Xing F, et al. Erosion and accretion of salt marsh in extremely shallow water stages[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1198536.
- [59] Whitehouse R J S, Soulsby R L, Roberts W, et al. Dynamics of Estuarine Muds: A Manual for Practical Applications[M]. London: Thomas Telford, 2000: 1-210.
- [60] De Swart H E, Zimmerman J T F. Morphodynamics of tidal inlet systems[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2009, 41: 203-229.
- [61] 杨洋, 陈沈良, 徐丛亮. 黄河口滨海区冲淤演变与潮流不对称 [J]. *海洋学报*, 2021, 43(6): 13-25. [YANG Yang, CHEN Shenliang, XU Congliang. Morphodynamics and tidal flow asymmetry of the Huanghe River Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(6): 13-25.]
- [62] 赵建春, 李九发, 李占海, 等. 长江口南汇嘴潮滩短期冲淤演变及其动力机制研究 [J]. *海洋学报*, 2009, 31(4): 103-111. [ZHAO Jianchun, LI Jiufu, LI Zhanhai, et al. Researches on characteristics and dynamic mechanism of short-term scouring and silting changes of the tidal flat on Nanhui Spit in the Changjiang Estuary in China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(4): 103-111.]
- [63] 陈祥锋, 马淑燕, 刘苍宇. 闽江口动力沉积特征的探讨 [J]. *海洋通报*, 1998, 17(6): 40-47. [CHEN Xiangfeng, MA Shuyan, LIU Cangzi. Dynamic deposition characteristics of the Minjiang Estuary[J]. *Marine Science Bulletin*, 1998, 17(6): 40-47.]
- [64] 杨世伦, 时钟, 赵庆英. 长江口潮沼植物对动力沉积过程的影响 [J]. *海洋学报*, 2001, 23(4): 75-80. [YANG Shilun, SHI Zhong, ZHAO Qingying. Influence of tidal marsh vegetations on hydrodynamics and sedimentation in the Changjiang Estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(4): 75-80.]
- [65] Yang S L, Shi B W, Bouma T J, et al. Wave attenuation at a salt marsh margin: A case study of an exposed coast on the Yangtze Estuary[J]. *Estuaries and Coasts*, 2012, 35(1): 169-182.
- [66] Zhao Y, Peng Z, He Q, et al. Wave attenuation over combined salt marsh vegetation[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 267: 113234.