

韩硕, 董大正, 史本伟, 等. 台风“烟花”作用下盐沼植被斑块对潮滩冲淤影响研究[J]. 海洋学报, 2025, 47(3): 39–50, doi:10.12284/hyxb2025044

Han Shuo, Dong Dazheng, Shi Benwei, et al. Study on the impact of salt marsh vegetation patches on tidal flat erosion and accretion under the influence of Typhoon In-Fa[J]. Haiyang Xuebao, 2025, 47(3): 39–50, doi:10.12284/hyxb2025044

台风“烟花”作用下盐沼植被斑块对潮滩冲淤影响研究

韩硕¹, 董大正², 史本伟^{1,3*}, 张新森⁴, 薛力铭¹, 李秀珍¹, 刘有才⁵

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241; 2. 上海市野生动植物和自然保护地研究中心, 上海, 202162; 3. 长江三角洲河口湿地生态系统教育部/上海市野外科学观测研究站, 上海 202162; 4. 南京大学环境规划设计研究院集团股份有限公司, 江苏南京, 2100185; 5. 河北省水文工程地质勘查院(河北省遥感中心), 河北石家庄, 050021)

摘要: 台风作为海岸带常见的自然灾害之一, 对潮滩造成严重影响。然而, 台风现场资料十分匮乏, 针对台风期间盐沼植被是如何保护潮滩的研究仍非常有限。本文选取长江口崇明东滩为研究对象, 在 2021 年 7 月台风“烟花”过境期间, 借助水动力仪器、无人机摄影测量技术(高程测量), 分别对盐沼和盐沼前缘区域进行水动力观测及台风前、后盐沼植被生态系统监测。研究发现: (1) 台风期间风速、水深、波高为台风前、后的 1.1~2.8 倍, 且盐沼植被前缘盐沼前缘区域的水动力均高于盐沼区域, 水深、波高和流速分别是盐沼区的 1.3 倍、1.2 倍和 1.9 倍; (2) 台风“烟花”影响下, 盐沼前缘植被斑块由于直接面对台风带来的强风和强浪, 水深、波高等水动力强度是盐沼区域的 1.1~1.9 倍, 导致在相同植被盖度情况下盐沼前缘植被斑块处的侵蚀占比是靠陆植被斑块的 1.2~1.8 倍; (3) 在盐沼前缘, 密集斑块区相对于稀疏斑块区的促淤能力更强, 其中密集斑块区域最大淤积厚度可达 45 cm, 而稀疏斑块区则主要以侵蚀为主, 最大侵蚀深度可达 17 cm。表明植被斑块的密集程度直接影响滩面冲淤变化。本研究揭示了在极端天气事件影响下, 植被斑块的排列方式和所处位置对潮滩冲淤的影响至关重要, 这对潮滩管理和生态保护具有重要启示, 同时也为应对极端天气如何建立坚实的自然屏障提供理论支持。

关键词: 台风; 植被斑块; 潮滩冲淤; 崇明东滩

中图分类号: P731.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2025)03-0039-12

1 引言

盐沼生态系统位于潮汐影响下的沿海区域, 特别是河口、潟湖、海湾和潮滩等低洼地带, 对于维持生物多样性、储碳固碳、过滤污染物以及消浪缓流护岸等具有极其重要的生态功能^[1-4]。盐沼生态系统的健康和稳定性对于缓解海岸线侵蚀、提高沿海地区的

生态安全具有关键作用^[5]。然而, 全球气候变化背景下, 极端天气事件的频率和强度增加, 台风作为海岸带最常见的自然灾害, 对盐沼生态系统构成了巨大威胁^[6-8]。其带来的强风和波浪会影响水动力环境, 进而对泥沙运动、潮滩演化产生极大的影响^[9-10]。

目前大量研究表明盐沼植被可以保护滩面。一方面, 盐沼植被通过地下根系固结泥沙, 保护潮滩免

收稿日期: 2024-10-23; 修订日期: 2025-01-24。

基金项目: 国家自然科学基金(42076170, 42176164); 上海市“国际科技合作伙伴计划”(23590780200); 河北省中央引导地方科技专项(236Z3303G)。

作者简介: 韩硕(2000—), 女, 辽宁省朝阳市人, 研究方向为河口海岸动力沉积与植被作用过程。E-mail: 51253904006@stu.ecnu.edu.cn

* 通信作者: 史本伟, 研究员, 主要研究沉积动力地貌过程及其与生态系统的相互作用。E-mail: bwshi@sklec.ecnu.edu.cn

受侵蚀。盐沼植被通过其根系稳定土壤,降低侵蚀风险。前人进行现场观测发现,植被根径在 0.5 mm 以下和 0.5~1.0 mm 的细根对岸滩抗侵蚀性的强化效应尤为显著^[10]。也有科研人员发现盐沼植被细根密度是影响盐沼抗侵蚀能力的关键因素,盐沼通过增加其下部生物量和有机物含量增加土壤的抗侵蚀能力^[11],这表明通过增加植被盖度可以显著增强滩面的抗侵蚀能力,从而保护滩面免受侵蚀^[12]。另一方面,盐沼植被通过地表枝叶拦截降雨以及消浪缓流,进而促进潮滩淤积。在相同距离下,盐沼内的波能损失是盐沼前缘的数倍,植被茎叶通过减小水流的湍流强度,促进悬浮泥沙的沉积,防止表面泥沙的再悬浮,从而促进潮滩淤积^[13]。植被的柔韧性和高度决定植被与波浪相互作用,低矮且柔韧的植被能够在高水位和长波周期下显著减小波浪速度,促进泥沙的沉积^[14]。尽管在极端风暴条件下波浪的能量极高,植被依然能够通过降低波浪的能量,从而有效减轻侵蚀作用^[15-18]。

以往有关于植被对潮滩影响的研究主要集中于植被类型、密度以及高度等方面^[19-21],但针对植被分布格局与冲淤关系的研究较少,且主要集中于流域坡面植被格局^[22-28]。现有研究表明,不同的植被斑块对泥沙侵蚀有不同的影响。例如,同是在裸地镶嵌时,植被集中、点状分布相较于植被破碎、带状分布更容易被侵蚀^[21, 23-24];而在相同植被覆盖率的情况下,植被均一带状分布的促淤能力强于植被斑块状分布^[25];在我国黄土高原地区,同样类型和密度的植被分布在相同降雨或上坡来水条件下,其下坡的侵蚀能力小于中坡和上坡^[26-28]。综上所述,这些研究表明植被格局在不同环境条件下对泥沙侵蚀和冲淤过程具有显著影响。探究植被分布格局对潮滩的影响机制,对于潮滩管理和生态保护具有重要科学意义。而针对对于植被格局与潮滩冲淤的关系研究极少,因此,本研究旨在填补植被格局对潮滩冲淤影响的研究空白,尤其是针对长江口淤泥质潮滩这一特定环境的作用机制。

为探究台风影响下植被斑块对潮滩冲淤的影响,本研究选择了台风“烟花”的影响下长江口崇明东滩盐沼-盐沼前缘作为研究对象,并进行水动力连续观测及台风前、后无人机同步航测,研究内容主要包括:(1)分析台风“烟花”前、中、后的水动力变化规律;(2)定量描述植被斑块对潮滩冲淤的影响;(3)分析植被斑块格局与潮滩冲淤的关系。本研究将为恢复盐沼生态系统、提高极端天气事件的应对能力提供科学参考。

2 研究区域及方法

2.1 研究区域

崇明东滩(31°25′~31°38′N, 121°50′~122°05′E)位于崇明岛最东端,是长江口发育最完善且规模最大的开敞型湿地,宽度可达 7~8 km,平均坡度 0.24‰,坡度极缓^[29-30],夏秋季易受台风影响^[31-32]。崇明东滩为中强潮滩,多年平均潮差 2.6 m;属于亚热带季风气候,风速受季风影响明显,多年平均风速为 5.73 m/s,最大风速为 21.99 m/s;多年平均有效波高为 0.62 m,最大有效波高为 3.05 m^[33]。崇明东滩由岸向海可分为潮上带、潮间带和潮下带,近岸处盐沼植被分布广泛,主要有芦苇、互花米草和海三棱藨草^[34-35],本研究区内的盐沼植被以海三棱藨草为主。潮滩由长江携带的大量泥沙堆积而成,是典型的淤泥质潮滩,其表层沉积物以粉砂为主,总体呈现由海向陆、由南向北变细的趋势^[36-37]。

2.2 台风“烟花”概况

台风“烟花”于 2021 年 7 月 18 日 2 时生成于西北太平洋洋面(22°12′N, 132°30′E),初始仅为热带风暴级,中心最大风速为 18 m/s,随后向西北方向移动,20 日 14 时达到台风级,21 日 11 时增强为强台风级,中心最大风速达到 42 m/s。25 日 13 时以台风级在浙江舟山群岛首次登陆,登陆后进入杭州湾,26 日 9 时以强热带风暴级在浙江平湖再次登陆,随后沿陆地北上,风速逐渐减弱,最终消失于渤海(图 1a)。从台风轨迹可以看出,台风在 7 月 26 日 12 时距研究区最短距离 128 km,该时段为天文大潮。台风登陆期间,风暴潮与天文大潮重合,使得台风对潮滩盐沼生态系统影响更大。

2.3 数据采集和处理

2.3.1 现场观测

2021 年 7 月 21-31 日,为观测台风前、中、后研究区内的水动力变化,在研究区设置 1 号点(盐沼区域)和 2 号点(盐沼前缘区域)两个水动力架子进行水动力观测(图 1c),共计观测 18 个潮周期(T1~T18)。利用 ADV(Acoustic Doppler Velocimeter, 6 MHz, Nortek 公司,挪威)观测近底部三维湍流流速(Poindexter, 2011),ADV 探头垂直向下放置,距底床 25 cm,采样时间间隔 5 min,采样频率 16 Hz, Burst 时长 256 s;利用 RBR-Wave(RBR-virtuoso- D-wave16, RBR 公司,加拿大)获取水深、波高等参数,探头距底床 10 cm,采样时间间隔 5 min,采样频率 4 Hz, Burst 时长 256 s(表 1)。

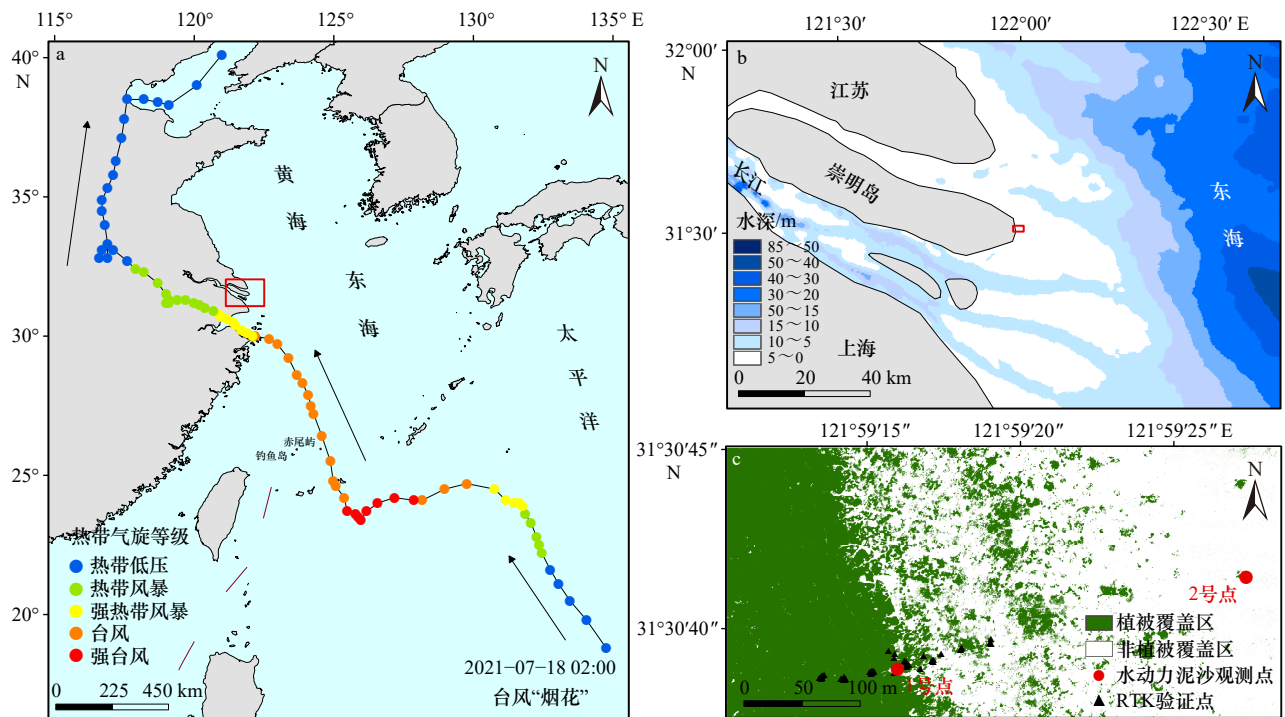


图1 研究区位置和台风路径(a)、崇明东滩示意图(红色矩形中)(b)、水动力泥沙观测点1、2号点(c)

Fig. 1 Location of the study area and typhoon paths (a), schematic diagram of Chongming Dongtan (within the red rectangle) (b), hydrodynamic and sediment observation points 1 and 2 (c)

表1 仪器选择与参数设置

Table 1 Instrument selection and parameter settings

仪器名称	测量物理参数	仪器位置	距床底高度/m	时间间隔/min	频率/Hz	Burst/s
ADV	流速	1、2号点	0.25	5	16	256
RBR-Wave	水深、波高	1、2号点	0.1	5	4	256

2021年7月20日和2021年7月30日2天利用RTK设备对研究区进行滩面高程测量,以RTK设备获取高程信息为真值,为后续RTK无人机进行精度验证。

2.3.2 无人机航测及冲淤反演

利用无人机(型号:DJI Phantom4)搭载GNSS-RTK(Global Navigation Satellite System Real-time Kinematic)定位系统,在台风前(2021年7月20日)和台风后(2021年7月30日)对研究区进行航空测量。为确保获得高质量测绘数据,设置无人机飞行高度为60 m,横向重叠率70%,纵向重叠率80%^[38]。无人机坐标系设置为CGCS2000、吴淞高程基面。

利用Pix4D Mapper(Pix4D,瑞士)软件对无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)影像进行三维重建,采用运动恢复结构(Structure from Motion, SFM)算法获得三维点云和正射遥感影像^[39-41]。通过CloudCompare软件手动剔除异常值,并运用CSF滤波(Cloth

Simulation Filtering)滤除植被^[42-43],CSF算法的思路是,将点云数据倒转,假设一块布料受到重力从上方落下盖住倒转的点云数据,那么布料的形状就是去除地物点后的地形,最终得到滤波后的点云数据。最后,使用ArcGIS对点云数据进行克里金插值^[44],最终得到潮滩DEM(Digital Elevation Model)。通过对台风前后DEM网格进行处理,得出台风前后的潮滩冲淤图。

2.3.3 植被信息提取

为获取台风前的植被分布图,利用Pix4D Mapper获取正射遥感影像,并使用ENVI软件提取无人机正射遥感影像的波段信息,其中包括红光、绿光和蓝光3个波段,基于红绿蓝波段像素值获得研究区的可见光差异植被指数(visible-band difference vegetation index, VDVI)^[45]。表达式如下:

$$VDVI = \frac{2\rho_{绿} - \rho_{红} - \rho_{蓝}}{2\rho_{绿} + \rho_{红} + \rho_{蓝}}, \quad (1)$$

式中: $\rho_{绿}$ 为绿光波段像素值, $\rho_{红}$ 为红光波段像素值, $\rho_{蓝}$ 为蓝光波段像素值。

利用 ArcGIS 将 VDVI 指数值确认植被点和非植被点的分类阈值,其统计直方图呈现双峰,分类阈值为双峰之间的波谷最低点,大于分类阈值即为植被点,小于分类阈值为非植被点。

为量化分析植被与滩面冲淤的关系,本研究选取 14 条剖面线,在每条剖面线上均匀选取 340 个点,提取并对比整条线上的植被与冲淤信息。剖面线选取位置如图 4c 所示,由海向陆分别为 L1-L14。为确保水动力条件一致性,剖面线垂直于涨落潮方向选取。盐沼前缘剖面线(L1-L6)间隔约 25 m,其余剖面线间隔约 15 m。

2.4 精度分析

以 RTK 野外现场测量的滩面高程数据为真值,提取无人机反演的 DEM 相同坐标点数据为测量值,反演精度为 7 cm,且光滩处反演精度高于盐沼;其中,光滩处验证点反演精度为 5.6 cm,盐沼处验证点反演精度为 9.4 cm。整体上 RTK 测量高程点与无人机反演高程点具有线性关系($R^2 \approx 0.99$),拟合直线斜率为 0.96,接近于 1(图 2)。

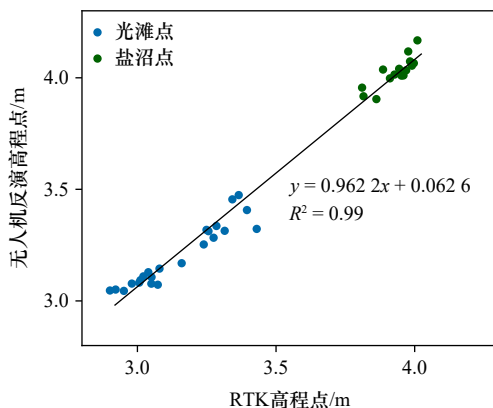


图 2 RTK 测量高程点与无人机反演高程点的拟合,
 R^2 为相关系数

Fig. 2 Fitting of RTK-measured elevation points and UAV-derived elevation points, with R^2 as the correlation coefficient

为检测基于 VDVI 指数区分的植被-非植被分类结果的精度,在影像中随机生成 100 个点,基于无人机正射影像水平分辨率高、盐沼植被与非盐沼植被易于区分的特点,对这些点进行目视解译。通过混淆矩阵计算得到盐沼植被与非植被分类总体精度为 97%,这表明盐沼植被提取精度高,植被与非植被分类结果可靠。

3 结果

3.1 水动力变化特征

台风“烟花”观测期间,研究区风速变化明显

(图 3a),台风期间风速高于台风前、后的风速。台风前(T1~T5)风速在 8.9~14.1 m/s 之间变化,平均风速为 10.8 m/s,风向为东北方向;台风期间(T6~T11)风速大幅度增加,风速在 13.9~22.8 m/s 之间变化,平均风速为 17.5 m/s,风向由东北方向逐渐转为东南方向;台风后(T12~T18)风速降低,风速在 1.1~13.6 m/s 之间变化,平均风速为 8.1 m/s,风向以东南方向和西南方向为主。

台风前 1 号点(盐沼区观测点)各潮周期最大水深在 0.5~1.7 m 之间变化;台风期间水深增加,各潮周期最大水深为 1.0~2.1 m;台风后水深减小,变化范围为 0.3~0.9 m。台风前 2 号点(盐沼前缘区观测点)各潮周期最大水深在 0.7~1.9 m 之间变化;台风期间高达 1.2~2.4 m;台风后在 0.6~1.2 m 之间变化。在台风观测期间,各潮周期 2 号点的最大水深均大于 1 号点(图 3b),其中最大水深均出现在台风期间的 T9 潮周期,且 2 号点最大水深为 1 号点最大水深的 1.14 倍。

观测期间,1 号点的有效波高低于 2 号点的有效波高(图 3c)。台风前 1、2 号点有效波高变化范围分别在 0~0.6 m、0~0.8 m 之间,平均有效波高为 0.2 m 和 0.3 m;台风期间,波高急速增加,1、2 号点变化范围在 0~0.9 m、0~1.0 m 之间,平均有效波高可达 0.4 m 和 0.5 m;台风后,有效波高下降,恢复至正常天气下水平,其变化范围在 0~0.3 m 和 0~0.4 m 之间,平均有效波高分别为 0.15 m、0.18 m。台风期间盐沼区域和盐沼前缘区域的平均有效波高是台风前、后的 2、2.7 倍和 1.7、2.8 倍。

台风期间,1、2 号点的平均流速为 0.11 m/s 和 0.20 m/s,高于台风前、后的平均流速,是其台风前、后的 1.28、1.45 倍和 1.46、1.27 倍。在观测期间,盐沼前缘区流速流向受影响程度比盐沼区显著,且台风前盐沼区和盐沼前缘区流速流向均较为紊乱,而在台风过境后呈现较为规律的趋势(图 3d、图 3e)。盐沼区在整个观测期间流向以西南和东南为主;盐沼前缘区流向变化幅度大,在台风前和台风影响前期期间,高潮(T1、T3、T5、T7)流向以西北和东北为主,低潮(T2、T4、T6、T8)流向以西南和东南为主;而在台风影响后期和台风后期间,流向呈现西北和东北方向,趋于稳定。

3.2 植被斑块情况

图 4a 为 7 月 20 日台风“烟花”前研究区盐沼植被分布图,盐沼植被总面积 43 203 m²,滩面盐沼植被呈现两种状态,以 L14 剖面线为界限,向陆方向盐沼植

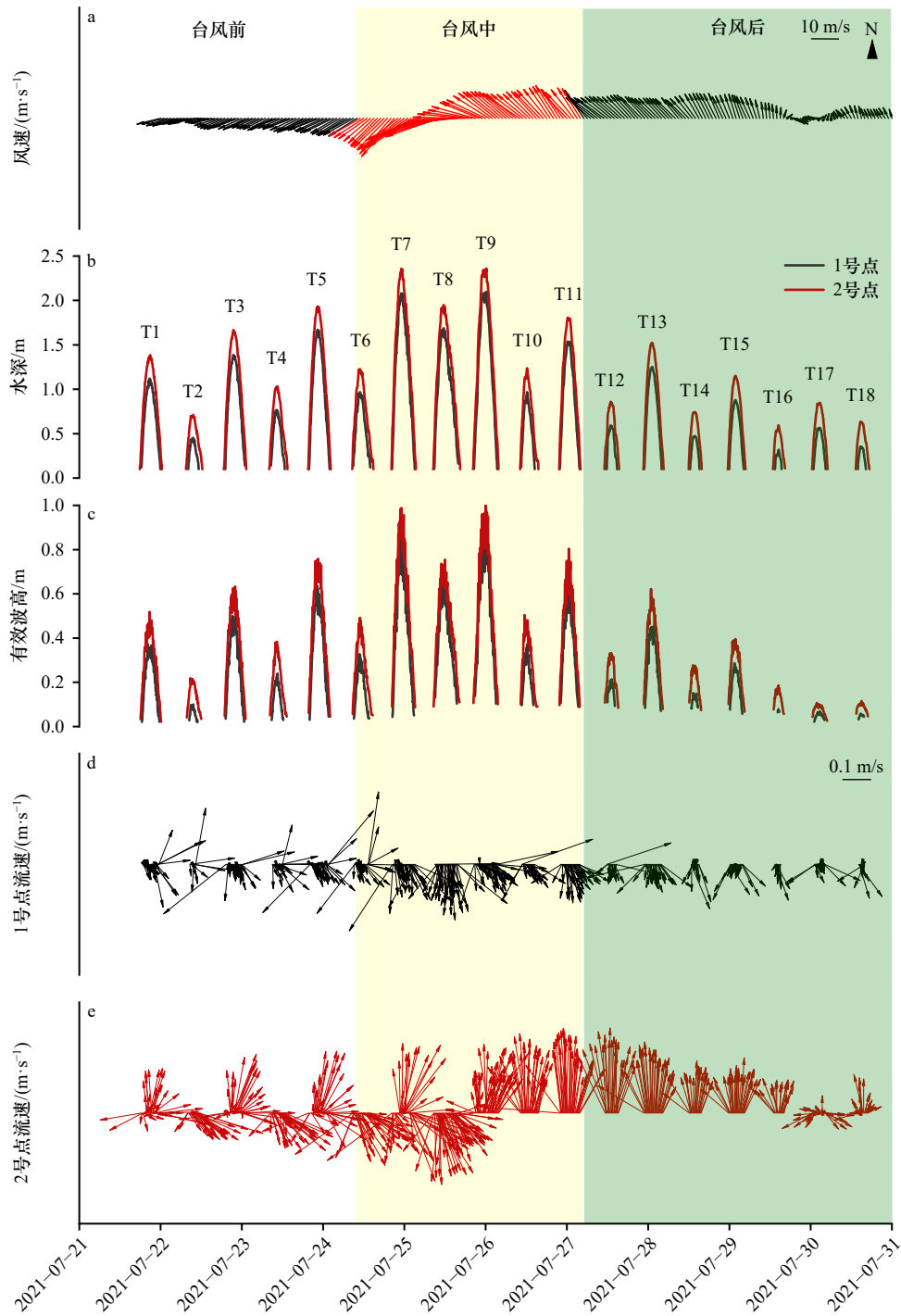


图3 2021年台风“烟花”前、中、后崇明东滩水动力变化,黄色部分表示台风中

Fig. 3 Hydrodynamic changes in Chongming Dongtan before, during and after Typhoon “In-Fa” in 2021.

The yellow part indicates the period during the typhoon

a. 风速矢量图, b. 水深, c. 有效波高, d. 1号点(盐沼区观测点)流速矢量图, e. 2号点(盐沼前缘区观测点)流速矢量图

a. Wind speed vector map, b. water depth, c. significant wave height, d. flow speed vector map at Point 1 (salt marsh observation point), e. flow speed vector map

at Point 2 (salt marsh edge observation point)

被呈现大片联结状态, 植被的覆盖非常密集, 形成了稳定的连续植被带; 向海方向的植被分布则显得破碎, 主要以斑块形式存在, 这些植被斑块较为分散, 面积较小且形状不规则。其中向海方向的植被斑块面积总和为 12 466 m², 占研究区盐沼植被总面积的

29%。在剖面线上, 植被的分布密度存在差异(图 4c), 在滩面剖面线 L1-L5 和 L9-L10 之间的盐沼植被较为稀疏, 剖面线上的植被占比分别为 3%、4%、14%、7%、11% 和 9%、12%, 均不超过 15%(图 5), 在此区域内的植被为稀疏斑块区, 斑块呈现点状分布, 较为破

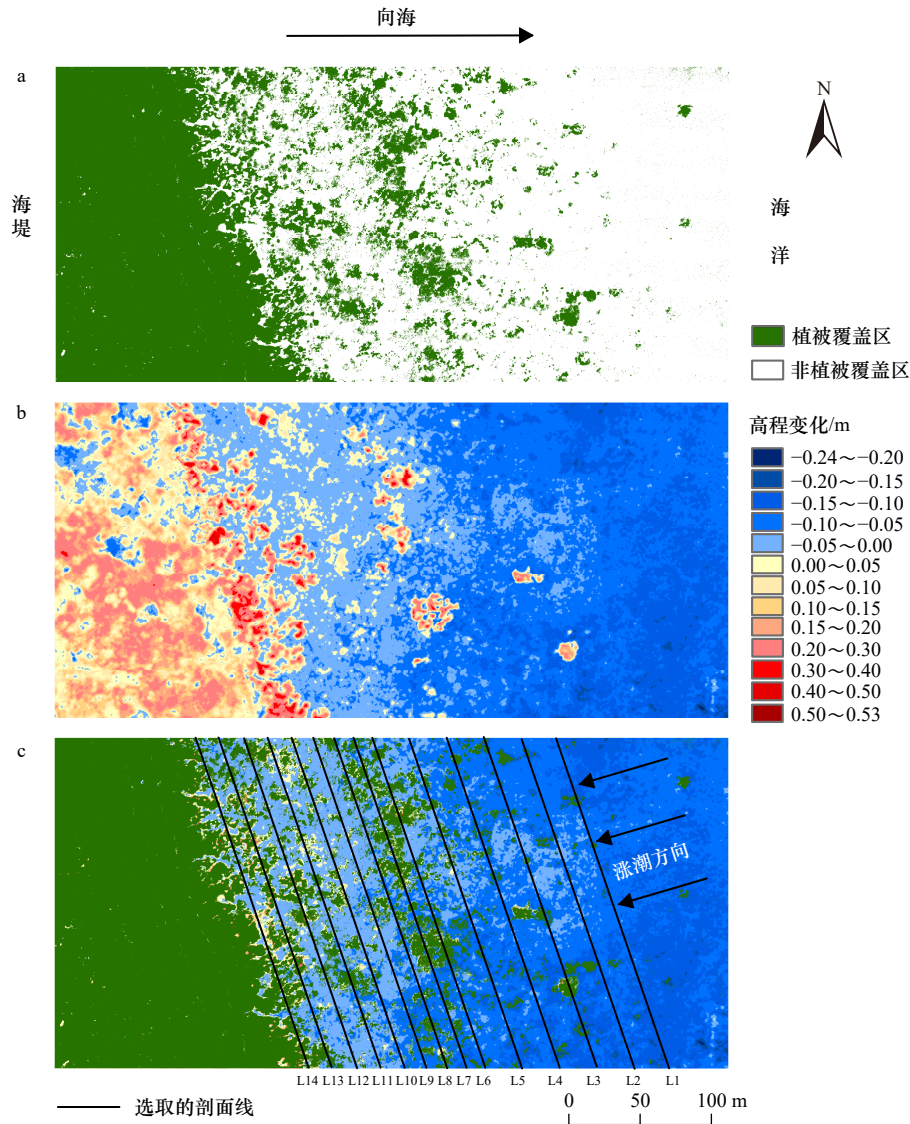


图 4 台风“烟花”前研究区植被覆盖图(a), 台风“烟花”前后滩面冲淤图(b), 正值表示淤积, 负值表示侵蚀、剖面线位置图(c), 底图为图 a 与图 b 叠合图

Fig. 4 Vegetation cover map of the study area before Typhoon “In-Fa”(a), sedimentation and erosion map of the tidal flat before and after Typhoon “In-Fa”(b), positive values indicate deposition and negative values indicate erosion, profile line location map(c), the base map is a composite of Figs a and b

碎,彼此之间距离较远,空间上呈现不连续性;相对而言,L6-L8和L11-L14植被则较为密集,剖面线上的植被占比分别为31%、40%、30%和19%、26%、37%、41%,均超过15%,这些区域的植被斑块为密集斑块区,表现为带状分布,形成了较为集中的植被带,斑块之间距离较小,具有较高的覆盖度和连续性。整体而言,研究区内的植被斑块由海向岸并不是呈现不断增加和均匀分布的状态,而是呈现一种点状植被斑块和带状植被斑块交叉分布的状态。

3.3 滩面冲淤格局

基于RTK无人机反演的数字高程地形图处理得出的滩面冲淤变化图(图4b),在台风观测期间,研究

区滩面发生了明显的冲淤现象,以L14剖面线为界限,向陆方向的盐沼植被联结区总体上呈现淤积状态,而向海方向的盐沼斑块前缘区则呈现大面积侵蚀状态,其中向海方向呈现淤积状态的区域主要集中于植被区(图4c)。在研究区内,最大淤积厚度为53 cm,其中淤积厚度达到40 cm以上的主要位于盐沼植被联结与植被斑块的交界处(L14附近)和植被斑块带状分布区(L6和L8之间);最大侵蚀深度为24 cm,位于研究区的东南部盐沼前缘地区;研究区内整体呈现净侵蚀状态,净侵蚀量为 2.53 m^3 。植被斑块前缘区域内呈现淤积状态的总面积为 8224.99 m^2 ,其中 4540.98 m^2 的淤积厚度为 $0\sim 5 \text{ cm}$, 1167 m^2 的淤

积厚度为 5~10 cm, 两者占比高达 69.4%; 区域内呈现侵蚀状态的总面积为 69 008 m², 其中侵蚀深度主要集中于 0~15 cm, 占比高达 99.3%; 植被斑块前缘区域内整体呈现净侵蚀状态, 净侵蚀量为 41.16 m³。此外, 每个剖面线上的侵蚀占比和侵蚀深度不同, 剖面线 L1~L14 上的侵蚀占比总体呈现波动下降的趋势, 波动点为 L3、L6、L7 以及 L10; 在 L1~L5 的区域内, L1 与 L2 剖面线上呈现完全侵蚀状态, 其他剖面线的侵蚀程度也达到 95%; 而靠近盐沼内部的 L13、L14 的侵蚀占比则下降为 55%、41%。此外, 其侵蚀深度也呈现下降趋势, L1~L5 剖面线上的最大侵蚀深度为 17 cm, 而靠近盐沼内部的 L13、L14 剖面线上的最大侵蚀深度仅为 7 cm、5 cm。

分析选取的 14 条剖面线(L1~L14)上提取的植被和冲淤数据, 可以将其分为无植被且侵蚀、无植被且

淤积、有植被且侵蚀和有植被且淤积四个部分(图 5)。整体上, 无植被且侵蚀在剖面线上占主导地位, 从 L1 到 L14 无植被且侵蚀的占比总体上呈现减小趋势, 无植被且淤积的占比则呈现上升趋势。在植被占比相近的情况下, 靠近陆地的剖面线上的有植被且淤积占比小于靠近大海的剖面线上的有植被且淤积占比, 有植被且侵蚀占比则相反。L4、L5 与 L9、L10 的植被占比约为 10% 左右, L9、L10 的有植被且淤积分别为 4%、9%, L4、L5 仅占 1%, L4、L5 与 L9、L10 的有植被且侵蚀占比则分别为 6%、10% 和 5%、4%; L6、L12 植被占比分别为 30% 左右, 有植被且淤积和有植被且侵蚀占比分别为 14%、15% 和 17%、11%; L7、L13 和 L14 植被占比为 40% 左右, 有植被且淤积的占比分别为 22%、28% 和 30%, 有植被且侵蚀占比为 18%、10% 和 11%。

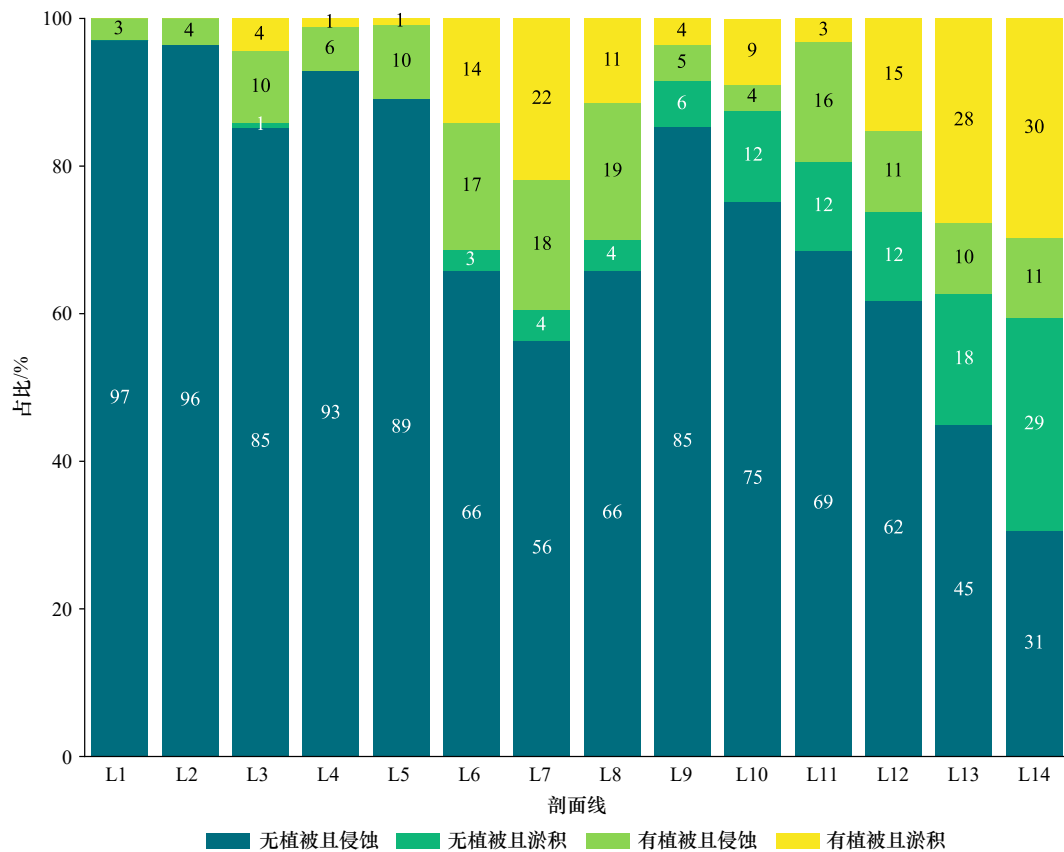


图 5 滩面剖面线上各部分占比

Fig. 5 Proportions of different sections along the tidal flat profile line

4 讨论

研究表明, 台风中的水深、波高、流速等均为台风前、后的 1.1~2.8 倍。台风前后盐沼内部的水动力强度始终低于盐沼前缘区域, 受台风影响较小。盐沼前缘的水深、波高和流速在台风期间最大可达

2.4 m、1.0 m、0.34 m/s 是盐沼内部的 1.3 倍、1.2 倍和 1.9 倍, 主要原因是盐沼内部相比于盐沼前缘, 离陆地更近, 高程较高, 水深较浅, 且盐沼植被起到了物理屏障的作用, 导致进入盐沼内部的水动力减弱^[13, 46-48]。在台风“烟花”的作用下, 盐沼前缘区域直接面对强烈的风浪和潮汐动力, 承受了台风带来的最大水动力冲

击。由于地形高程和水动力条件对泥沙沉积过程有直接的控制作用,前缘地势较低,无植被遮挡,台风期间水深、波高和流速显著增加,导致大量沉积物启动、侵蚀及再分配^[49]。强水动力使得前缘区域的沉积物易被冲刷并重新悬浮,形成显著的侵蚀作用,部分悬浮泥沙会被运移至更靠近陆地的区域。而在盐沼内部,地势较高、水深较浅,且波浪和水流经过植被前缘时,盐沼植被的枝叶有效减小了水流的动能,削弱了水流的冲击力,使得进入盐沼内部的水动力显著降低。同时,植被茎叶的存在也增加了水流的摩擦阻力,减缓了水流速度,促使悬浮泥沙颗粒沉降,进一步减少了沉积物的流失^[50]。因此,台风期间受水流的冲击力较小,水动力强度始终低于前缘区域。因此,盐沼前缘在台风期间表现出强烈的泥沙侵蚀和再分配,而盐沼内部则由于较弱的水动力环境,形成了相对稳定的沉积状态^[51]。

植被斑块的位置对潮滩的冲淤过程有着至关重要的影响。植被斑块位置不同,水动力环境不同,L1-L5区域内的植被斑块由于位于盐沼植被前缘,水动力环境极强,滩面容易被侵蚀。各剖面线的侵蚀占比总和均大于95%,最前缘的L1和L2的侵蚀占比达到100%。这表明强劲的水动力使得盐沼前缘的植被斑块的抗侵蚀能力甚微甚至失效,造成泥沙的大量流失和滩面侵蚀^[52]。相比之下,靠近陆地的植被斑块由于位置较为靠陆,受台风直接冲击的强度相对较低。在相同植被占比的情况下,靠陆的植被斑块的促淤能力要远大于靠海的植被斑块。剖面线L4、L5与L9、L10的植被占比相近,L9、L10的有植被且淤积分别为4%、9%,而L4、L5仅占1%;L7、L13和L14植被占比为40%左右,有植被且淤积的占比则呈现L7 < L13 < L14。而在相同侵蚀占比下,靠陆的植被盖度小于靠海的植被盖度。例如:L8与L11的侵蚀占比为15%左右,L8的植被占比为30%,而L11的植被占比仅为19%。因此,植被斑块的位置将直接决定其水动力条件,植被斑块位置越靠陆其促淤能力越强,靠近陆地的植被斑块受到较少潮流和波浪的冲击,更容易固结泥沙,形成稳定的沉积环境,增强了潮滩的抗侵蚀能力^[53]与此相对,盐沼前缘由于水动力强,泥沙容易被搬运和冲刷,导致沉积过程较为不稳定。这表明植被斑块的位置对于潮滩地形稳定性和泥沙沉积具有重要影响。

植被斑块的密集程度也对潮滩冲淤产生重要影响。L6-L8和L11-L14区域的之间的密集斑块区由于其连续的形态,能够形成有效的物理屏障,显著减

缓水流速度和波浪能量,从而促进泥沙沉积并减少侵蚀^[54]。其区域内最大淤积厚度可达45 cm,且在图5中明显看出,L6-L8剖面线上的侵蚀占比明显要低于L1-L5、L9;L1-L14的剖面线上的无植被且侵蚀的占比整体呈现下降趋势,而L6-L8和L10-L14则呈现明显的波动。这主要是由于密集斑块区在潮滩表面形成了稳定的泥沙沉积层,有助于维持潮滩的地形稳定性。这种形态的植被斑块能够更有效地拦截和固定泥沙,形成连续的植被带,对潮流和波浪的削弱效果显著,减弱了潮流和波浪对潮滩的冲击力。相较之下,L1-L5与L9-L10稀疏斑块区域的植被斑块由于形态不连续,对泥沙的固定效果较差,容易受到潮流和波浪的侵蚀,难以形成稳定的淤积层。其中L1-L5之间的区域内,L1与L2剖面线上呈现完全侵蚀状态,其他剖面线的侵蚀程度也达到95%;在水动力条件下,L9剖面线明显弱于L6-L8,但其剖面线上的侵蚀占比却是L6-L8的1.1~1.2倍。稀疏斑块区的植被斑块只能提供局部的泥沙固定效果,无法形成大范围的保护带,在面对强烈的潮流和波浪时,容易被侵蚀和破坏。研究区域内,稀疏斑块区侵蚀较为严重,泥沙固定效果差。由于其不规则性和分布散乱,难以形成连续的阻挡带,对潮流和波浪的阻挡效果有限,导致泥沙容易被冲走,盐沼前缘地区的稀疏斑块,侵蚀深度最大,可达17 cm,植被未能有效保护滩面。密集斑块区的植被斑块在潮滩保护中表现出最佳效果,这种形态的植被斑块能够提供全面的泥沙固定和潮滩保护作用。连续密集的植被斑块能够在整个潮滩区域形成稳定的泥沙沉积层,有效减缓潮流和波浪的冲击力,提供全面的泥沙固定效果,显著减少侵蚀^[21,55]。其植被斑块表现出显著的泥沙淤积效果,淤积厚度高于稀疏斑块区。Zhu等^[56]分析了中国江苏沿海砂泥混合潮间带中尺度地貌单元——隆起斑块的形成与发展及其相关的泥沙动力学,得出连续的植被斑块能够通过提供广泛的覆盖,减少潮流和波浪的直接冲击,从而有效保护整个潮滩表面,其结论证明密集斑块区在保护潮滩表面方面的有效性。

综上所述,在台风“烟花”作用下,影响植被斑块对滩面冲淤的影响因素主要有水动力环境、植被位置以及植被斑块密集程度。植被斑块的位置直接决定植被斑块的水动力环境,而植被斑块的位置和密集程度也直接影响其促淤能力。为了提高潮滩的抗侵蚀能力和泥沙固定效果,建议在潮滩管理和生态保护中,应重视植被斑块的科学布局,尤其是优化植被种植位置,通过增加植被斑块的盖度,形成有效的物理

屏障,减缓潮流和波浪的冲击力。同时,应通过合理规划 and 植被盖度调整,增强植被斑块的促淤能力,形成稳定的泥沙沉积层,保护潮滩地形的稳定性和生态环境的完整性^[57]。这不仅有助于提升沿海地区的生态安全,还能为应对台风等极端天气事件提供更加坚实的自然屏障。

5 结论

本文基于现场水沙观测以及 RTK 无人机航测,探究了台风事件“烟花”对潮滩水动力条件及植被格局对潮滩冲淤的影响机制。主要结论:(1)台风期间的风速、水深、波高为台风前后的 1.1~2.8 倍,且盐沼前缘的水动力条件高于盐沼区域,水深、波高和流速水动力条件是盐沼内部的 1.3 倍、1.2 倍和 1.9 倍。

(2)植被斑块的位置直接影响植被在潮滩保护中的作用,盐沼前缘的植被斑块的抗侵蚀能力低于靠陆的植被斑块,靠陆的植被斑块则相对于前缘的植被斑块更有助于促淤。在相同植被盖度情况下,盐沼前缘的侵蚀占比是靠陆植被的 1.2~1.8 倍;(3)在台风“烟花”事件下,植被斑块的密集程度对潮滩冲淤具有重要影响,密集斑块区相对于稀疏斑块区的促淤能力更强,其中密集斑块区域最大淤积厚度可达 45 cm,而稀疏斑块区则主要以侵蚀为主,最大侵蚀深度可达 17 cm。

致谢: 感谢李天佑在无人机航测和数据处理时提供的帮助,感谢崇明东滩国家自然保护区管理人员提供科研场地。

参考文献:

- [1] Gu Jiali, Luo Min, Zhang Xiujuan, et al. Losses of salt marsh in China: trends, threats and management[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 214: 98–109.
- [2] Shepard C C, Crain C M, Beck M W. The protective role of coastal marshes: a systematic review and meta-analysis[J]. *PLoS One*, 2011, 6(11): e27374.
- [3] Mury A, Collin A, Houet T, et al. Using multispectral drone imagery for spatially explicit modeling of wave attenuation through a salt marsh meadow[J]. *Drones*, 2020, 4(2): 25.
- [4] Drake K, Halifax H, Adamowicz S C, et al. Carbon sequestration in tidal salt marshes of the Northeast United States[J]. *Environmental Management*, 2015, 56(4): 998–1008.
- [5] Sheehan L, Sherwood E T, Moyer R P, et al. Blue carbon: an additional driver for restoring and preserving ecological services of coastal wetlands in Tampa Bay (Florida, USA)[J]. *Wetlands*, 2019, 39(6): 1317–1328.
- [6] Wang Xuming, Wang Weiqi, Tong Chuan. A review on impact of typhoons and hurricanes on coastal wetland ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(1): 23–29.
- [7] Chen H, Lu W, Yan G, et al. Typhoons exert significant but differential impacts on net ecosystem carbon exchange of subtropical mangrove forests in China[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(19): 5323–5333.
- [8] Babcock R C, Bustamante R H, Fulton E A, et al. Corrigendum: severe continental-scale impacts of climate change are happening now: extreme climate events impact marine habitat forming communities along 45% of Australia's coast[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 558.
- [9] Roman C T, Niering W A, Warren R S. Salt marsh vegetation change in response to tidal restriction[J]. *Environmental Management*, 1984, 8(2): 141–149.
- [10] 张金池, 臧廷亮, 曾锋. 岩质海岸防护林树木根系对土壤抗冲性的强化效应[J]. 南京林业大学学报, 2001, 25(1): 9–12.
Zhang Jinchi, Zang Tingliang, Zeng Feng. A study on soil anti-scourability intensification of protective forest root system in bedrock coast[J]. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2001, 25(1): 9–12.
- [11] Marin - Diaz B, Govers L L, van der Wal D, et al. The importance of marshes providing soil stabilization to resist fast - flow erosion in case of a dike breach[J]. *Ecological Applications*, 2022, 32(6): e2622.
- [12] Ford H, Garbutt A, Ladd C, et al. Soil stabilization linked to plant diversity and environmental context in coastal wetlands[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2016, 27(2): 259–268.
- [13] 李华, 杨世伦. 潮间带盐沼植物对海岸沉积动力过程影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2007, 22(6): 583–591.
Li Hua, Yang Shilun. A review of influences of saltmarsh vegetation on physical processes in intertidal wetlands[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(6): 583–591.
- [14] Rupprecht F, Möller I, Paul M, et al. Vegetation-wave interactions in salt marshes under storm surge conditions[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 100: 301–315.
- [15] Temmerman S, Horstman E M, Krauss K W, et al. Marshes and mangroves as nature-based coastal storm buffers[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2023, 15: 95–118.
- [16] 张振伟, 刘贞文, 刘必劲. 风暴潮与盐沼相互作用研究进展[J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(7): 42–48.
Zhang Zhenwei, Liu Zhenwen, Liu Bijin. A review of dynamic interactions between coastal storms and salt marshes[J]. *Ocean Develop-*

- ment and Management, 2019, 36(7): 42–48.
- [17] 任璘婧, 李秀珍, 杨世伦, 等. 崇明东滩盐沼植被变化对滩涂湿地促淤消浪功能的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3350–3358.
Ren Linjing, Li Xiuzhen, Yang Shilun, et al. The impact of salt marsh change on sediment accumulation and wave attenuation at the East Chongming Island[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(12): 3350–3358.
- [18] Barras J A. Land area changes in coastal Louisiana after Hurricanes Katrina and Rita[C]//Science and the Storms: the USGS Response to the Hurricanes of 2005. Dennis: USGS, 2005: 97–112.
- [19] Vandenbruwaene W, Bouma T J, Meire P, et al. Bio - geomorphic effects on tidal channel evolution: impact of vegetation establishment and tidal prism change[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(2): 122–132.
- [20] 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]. Haiyang Xuebao, 2001, 23(4): 75–80.
- [21] Ma Gangfeng, Han Yun, Niroomandi A, et al. Numerical study of sediment transport on a tidal flat with a patch of vegetation[J]. *Ocean Dynamics*, 2015, 65(2): 203–222.
- [22] 秦伟, 曹文洪, 郭乾坤, 等. 植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述[J]. 生态学报, 2017, 37(14): 4905–4912.
Qin Wei, Cao Wenhong, Guo Qiankun, et al. Review of the effects of vegetation patterns on soil erosion and sediment yield[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(14): 4905–4912.
- [23] Ludwig J A, Wilcox B P, Breshears D D, et al. Vegetation patches and runoff–erosion as interacting ecohydrological processes in semiarid landscapes[J]. *Ecology*, 2005, 86(2): 288–297.
- [24] Li Li, Xu Jiayang, Ren Yihan, et al. Effects of wave-current interactions on sediment dynamics in Hangzhou Bay during Typhoon Mitag[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 931472.
- [25] Boer M, Puigdefàbregas J. Effects of spatially structured vegetation patterns on hillslope erosion in a semiarid Mediterranean environment: a simulation study[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30(2): 149–167.
- [26] 沈中原. 坡面植被格局对水土流失影响的实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
Shen Zhongyuan. Study on the effect of vegetation slope pattern on soil and water loss[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.
- [27] 丁文峰, 李勉. 不同坡面植被空间布局对坡沟系统产流产沙影响的实验[J]. 地理研究, 2010, 29(10): 1870–1878.
Ding Wenfeng, Li Mian. Experimental study on the effect of slope vegetation distribution variation on runoff and sediment yield in slope-gully system[J]. Geographical Research, 2010, 29(10): 1870–1878.
- [28] 游珍, 李占斌, 蒋庆丰. 植被在坡面的不同位置对降雨产沙量影响[J]. 水土保持通报, 2006, 26(6): 28–31.
You Zhen, Li Zhanbin, Jiang Qingfeng. Effect of vegetation's position on slope on sediment yield induced by rainfall[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(6): 28–31.
- [29] 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, 26(5): 833–843.
Liu Hong, He Qing, Ji Xiaoqiang, 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, 26(5): 833–843.
- [30] Yang Shilun, 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.
- [31] Tian Bo, Zhang Liquan, Wang Xiangrong, et al. Forecasting the effects of sea-level rise at Chongming Dongtan Nature Reserve in the Yangtze Delta, Shanghai, China[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(10): 1383–1388.
- [32] 张智伟. 台风天气下长江冲淡水扩展的响应机制[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
Zhang Zhiwei. Dynamical response of Changjiang River plume extension to typhoon events[D]. Shanghai: East China Normal University, 2020.
- [33] 范吉庆. 台风对长江口潮间带湿地沉积动力过程的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
Fan Jiqing. Influence of typhoon on sedimentary dynamic process of intertidal wetland in Yangtze Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.
- [34] 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, 25(6): 631–635.
Yang Shilun, Chen Jiyu. The role of vegetation in mud coast processes[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1994, 25(6): 631–635.
- [35] 丁文慧, 姜俊彦, 李秀珍, 等. 崇明东滩南部盐沼植被空间分布及影响因素分析[J]. 植物生态学报, 2015, 39(7): 704–716.
Ding Wenhui, Jiang Junyan, Li Xiuzhen, et al. Spatial distribution of species and influencing factors across salt marsh in southern Chongming Dongtan[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(7): 704–716.
- [36] 杨世伦. 长江口沉积物粒度参数的统计规律及其沉积动力学解释[J]. 泥沙研究, 1994(3): 23–31.
Yang Shilun. Statistic features for grain-size parameters of the Yangtze River Estuary and their hydrodynamic explanation[J]. Journal of Sediment Research, 1994(3): 23–31.
- [37] 张莹鑫, 张文祥, 史本伟, 等. 淤泥质潮间带植被-光滩沉积物稳定性研究——以长江口崇明东滩为例[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2022(6): 169–177.
Zhang Yingxin, Zhang Wenxiang, Shi Benwei, et al. Study on sediment stability between vegetation and bare flats in a muddy intertidal

- flat: a case study for Chongming Dongtan in the Yangtze River Estuary[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2022(6): 169–177.
- [38] Li Tianyou, Xue Liming, Zhang Xinmiao, et al. Harvested *Spartina* area performs better than native *Scirpus* in sedimentation and carbon preservation under storm surge[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2024, 249: 107002.
- [39] Pei Haojie, Wan Peng, Li Changchun, et al. Accuracy analysis of UAV remote sensing imagery mosaicking based on structure-from-motion[C]//2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Fort Worth: IEEE, 2017: 5904-5907.
- [40] Genchi S A, Vitale A J, Perillo G M E, et al. Structure-from-motion approach for characterization of bioerosion patterns using UAV imagery[J]. *Sensors*, 2015, 15(2): 3593–3609.
- [41] Küng O, Strecha C, Fua P, et al. Simplified building models extraction from ultra-light UAV imagery[C]//International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22. Zurich: ISPRS Zurich 2011 Workshop, 2011: 217-222.
- [42] Karasaka L, Keleş S H. CSF (Cloth simulation filtering) algoritmasının zemin noktalarını Filtrelemedeki Performans Analizi[J]. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2020, 20(20): 267–275.
- [43] Li Yameng, Chen Qi, Li Chaokui, et al. Improvement of CSF based on a wide range of urban complex scenes[C]//Proceedings Volume 10779, Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring XVI. Honolulu: SPIE Asia-Pacific Remote Sensing, 2018: 1077911.
- [44] Oliver M A, Webster R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1990, 4(3): 313–332.
- [45] 汪小钦, 王苗苗, 王绍强, 等. 基于可见光波段无人机遥感的植被信息提取[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 152–159.
Wang Xiaoqin, Wang Miaomiao, Wang Shaoqiang, et al. Extraction of vegetation information from visible unmanned aerial vehicle images[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5): 152–159.
- [46] Chen Dezhi, Tang Jieping, Xing Fei, et al. Erosion and accretion of salt marsh in extremely shallow water stages[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1198536.
- [47] 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.
- [48] Figlus J, Sigren J M, Feagin R A, et al. The unique ability of fine roots to reduce vegetated coastal dune erosion during wave collision[J]. *Frontiers in Built Environment*, 2022, 8: 904837.
- [49] Hauser S, Meixler M S, Laba M. Quantification of impacts and ecosystem services loss in new jersey coastal wetlands due to hurricane sandy storm surge[J]. *Wetlands*, 2015, 35(6): 1137–1148.
- [50] Zhao Chunhong, Gao Jian'en, Huang Yuefei, et al. Effects of vegetation stems on hydraulics of overland flow under varying water discharges[J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(3): 748–757.
- [51] Kastler J A, Wiberg P L. Sedimentation and boundary changes of Virginia salt marshes[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, 42(6): 683–700.
- [52] Francalanci S, Bondoni M, Rinaldi M, et al. Ecomorphodynamic evolution of salt marshes: experimental observations of bank retreat processes[J]. *Geomorphology*, 2013, 195: 53–65.
- [53] Molina A, Govers G, Cisneros F, et al. Vegetation and topographic controls on sediment deposition and storage on gully beds in a degraded mountain area[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(6): 755–767.
- [54] Sun Ruoxiu, Ma Li, Zhang Shouhong, et al. Study on landscape patches influencing hillslope erosion processes and flow hydrodynamics in the Loess Plateau of western Shanxi Province, China[J]. *Water*, 2020, 12(11): 3201.
- [55] Zhou Zeng, Ye Qinghua, Coco G. A one-dimensional biomorphodynamic model of tidal flats: sediment sorting, marsh distribution, and carbon accumulation under sea level rise[J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 93: 288–302.
- [56] Zhu Shibing, Chen Yining, Yan Weibing, et al. The hummocky patches and associated sediment dynamics over an accretional intertidal flat[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 908351.
- [57] Zhang Xingchang, Shao Ming'an. Effects of vegetation coverage and management practice on soil nitrogen loss by erosion in a hilly region of the Loess Plateau in China[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(10): 1195–1203.

Study on the impact of salt marsh vegetation patches on tidal flat erosion and accretion under the influence of Typhoon In-Fa

Han Shuo¹, Dong Dazheng², Shi Benwei^{1,3}, Zhang Xinmiao⁴, Xue Liming¹, Li Xiuzhen¹, Liu Youcai⁵

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Shanghai Wild Animal and Plant Conservation Research Center, Shanghai 202100, China; 3. Ministry of Education/Shanghai Field Scientific Observation and Research Station for the Yangtze River Delta Estuarine Wetland Ecosystem, Shanghai 202162, China; 4. Nanjing University Environmental Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jiangsu Nanjing 210093, China; 5. Hebei Provincial Hydrological Engineering Geological Survey Institute (Hebei Provincial Remote Sensing Center), Shijiazhuang, Hebei, 050021, China)

Abstract: Typhoons, as one of the common natural disasters in coastal zones, have severe impacts on tidal flats. However, there is a significant lack of field data on typhoons, and studies on how salt marsh vegetation protects tidal flats during typhoon events are still very limited. This study selected Chongming Dongtan in the Changjiang River Estuary as the research site. During the passage of Typhoon In-Fa in July 2021, hydrodynamic instruments and UAV photogrammetry (elevation measurements) were used to monitor hydrodynamics and sediment in both salt marsh and the marsh front areas, as well as to monitor the salt marsh ecosystem before and after the typhoon. The findings are as follows: (1) During the typhoon, wind speed, water depth, and wave height were 1.1–2.8 times those before and after the typhoon, and the hydrodynamic forces in the marsh front area were higher than those in the salt marsh area, with water depth, wave height, and flow velocity being 1.3 times, 1.2 times, and 1.9 times those of the salt marsh area, respectively. (2) Under the influence of Typhoon In-Fa, vegetation patches at the marsh front, directly exposed to strong winds and waves, experienced hydrodynamic forces such as water depth and wave height that were 1.1–1.9 times those of the salt marsh area, resulting in erosion at the marsh front being 1.2–1.8 times that of the inland vegetation patches under the same vegetation coverage conditions. (3) In the marsh-front area, densely vegetated patches demonstrated stronger sediment accretion capacity compared to sparsely vegetated patches, with the maximum accretion thickness in densely vegetated areas reaching 45 cm, whereas sparse patches were mainly subject to erosion, with a maximum erosion depth of 17 cm. This indicates that the density of vegetation patches directly affects the sedimentation and erosion dynamics of the tidal flat. This study reveals that the arrangement and location of vegetation patches are crucial to the sedimentation and erosion of tidal flats under extreme weather events, which has significant implications for tidal flat management and ecological protection. It also provides theoretical support for establishing a robust natural barrier in response to extreme weather conditions.

Key words: typhoon; vegetation patches; tidal flat sedimentation and erosion; Chongming Dongtan