

李高如, 龚国宁, 张生乐, 等. 台风过程影响下的滨海湿地物理变量观测及湿地系统响应[J]. 海洋学报, 2022, 44(12): 116–125, doi:10.12284/hyxb2022155

Li Gaoru, Gong Guoning, Zhang Shengle, et al. Observation of physical variables of coastal wetland and response of wetland system under the influence of typhoon process[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(12): 116–125, doi:10.12284/hyxb2022155

# 台风过程影响下的滨海湿地物理变量 观测及湿地系统响应

李高如<sup>1,2</sup>, 龚国宁<sup>1,2</sup>, 张生乐<sup>1,2</sup>, 高美华<sup>1,2</sup>, 张伯伦<sup>1,2</sup>,  
马煜曦<sup>3</sup>, 何培民<sup>1,2</sup>, 方淑波<sup>1,2\*</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 上海高校水域环境生态工程研究中心, 上海 201306; 3. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

**摘要:** 如何研究台风等极端天气事件影响下的湿地系统响应过程, 进而提出有效的生态完整性维护和管理方案, 对关键区域的湿地管理及生态安全维护具有重要意义。本文于 2021 年 9 月“灿都”台风期间在南汇东滩南岸设置水动力观测点, 采集表层沉积物、测量滩面高程并用无人机获得植被影像, 运用 ArcGIS 空间分析, 探讨了台风过程影响下的南汇东滩水动力、滩面沉积变化与植被分布面积响应。结果表明: 台风中, 观测点近底层平均流速为 0.23 m/s, 植被边缘平均有效波高和波能是台风前后的 1.54 倍和 2.14 倍, 近底层 1 m 的滩面出现“高悬沙浓度层”(>10 g/L) 且存在时长为 8.13 h。台风后高程低于 4 m 的稀疏海三棱藨草和互花米草滩面侵蚀 0~4.8 cm, 高程高于 4 m 的茂盛互花米草和芦苇滩面淤积 0~14.7 cm; 研究区植被分布面积共减少 1 827.67 m<sup>2</sup>, 减少量占台风前植被总量的 1.63%, 其中侵蚀滩面植被分布面积减少 31.9%, 淤积滩面减少 68.1%。对台风过程影响后的湿地管理, 可以总结为: (1) 湿地在台风过程后滩面基本表现为明显的侵蚀、淤积区域共存的特征; (2) 对高程低于 4 m 的侵蚀滩面, 建议确定植被适宜生长的高程, 结合台风过程冲淤变化通过“微生物膜”和植被斑块移植的方法消浪、固滩和促淤, 加速湿地在台风过程影响后的修复。

**关键词:** 台风; 滨海湿地; 水动力; 沉积; 响应过程

中图分类号: P748

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)12-0116-10

## 1 引言

滨海湿地是连接陆地和海洋的生态系统, 具有缓解风暴侵袭、维持生物多样性、降解污染和维持景观等价值<sup>[1-2]</sup>。联合国政府间气候变化专门委员会报告指出, 未来在全球尺度增温预期下, 风暴潮、干旱与洪涝<sup>[3]</sup>等灾害性天气事件<sup>[4]</sup>将会大幅增加<sup>[5]</sup>。如何应对增多的极端天气事件对关键地段生态安全影响, 是

未来生态管理及可持续发展的关键问题<sup>[6]</sup>。滨海湿地生态完整性的维护对滨海区域城市及关键地段生态安全具有重要价值, 如何评估湿地系统在台风等极端天气事件影响下的响应过程与方式是海岸带管理的重要内容。

滨海湿地生态系统对台风等极端事件的响应表现在流速、有效波高等水动力条件、悬浮泥沙浓度 (Suspended Sediment Concentration, SSC)、滩面高程及

收稿日期: 2022-04-01; 修订日期: 2022-06-10。

基金项目: 国家重大科技专项(2017YFC0506002); 自然资源部海洋生态监测与修复技术重点实验室开放基金(MEMRT202003)。

作者简介: 李高如(1997—), 女, 安徽省阜阳市人, 主要从事潮滩水动力观测及生态效应模拟研究。E-mail: 1239125156@qq.com

\* 通信作者: 方淑波, 副教授, 硕士生导师, 主要从事滨海湿地生态修复研究。E-mail: bsfang@fudan.edu.cn

沉积物、滩面植被等其他因素的改变<sup>[7-9]</sup>。Do 和 Yoo<sup>[10]</sup>研究了风暴过程防护海滩泥沙运输及滩面变化; Aung 等<sup>[11]</sup>研究了台风天气根茎科与非茎科植被的响应; 王爱军等<sup>[12]</sup>研究了台风前后福建泉州湾盐沼沉积物特征; Yang 等<sup>[13]</sup>研究了台风过程的滨海湿地滩面切应力变化过程。但现有的研究着重于台风过程滨海湿地的响应, 而根据滨海湿地生态系统响应过程对后期管理提出有针对性的生态修复方案比较少。

本文为探索台风过程南汇东滩南岸生态修复和管理方案, 研究了2021年9月台风“灿都”期间水动力、滩面高程及沉积变化和植被响应过程, 监测了台风过程流速、流向及有效波高等水动力因子和滩面近底层 SSC 变化等物理变量, 以期为台风等极端天气影响后滨海湿地和植被分布面积的变化、滩面高程与沉积变化引起植被定值条件改变等生态系统的修复工作提供参考。

## 2 研究地区与研究方法

### 2.1 研究区概况

南汇东滩位于长江口与杭州湾交汇处, 是我国最大的湿地之一, 年均温度为 15~16℃<sup>[14]</sup>。南汇东滩潮汐为非正规半日潮, 平静天气下波浪主要受风驱动, 以风浪为主<sup>[15]</sup>。南汇东滩的冲淤变化受到围垦工程的影响, 南岸以冲刷为主, 东岸则以淤积为主<sup>[16]</sup>。每年 7-9 月长江口都会迎来平均 2~3 个热带气旋<sup>[17]</sup>。本研究区南汇东滩南岸(图 1), 位于 30°51'~30°52'N, 121°55'~121°56'E, 多年最大潮差为 5.14 m, 平均潮差为 3.2 m<sup>[18]</sup>。多年平均有效波高为 0.6 m, 水域悬沙浓度变化范围在 0.1~2 g/L。滩面高程由低到高主要分布海三棱藨草 (*Scirpus mariqueter*)、互花米草 (*Spartina alterniflora*)、芦苇(*Phragmites australis*)等植被。

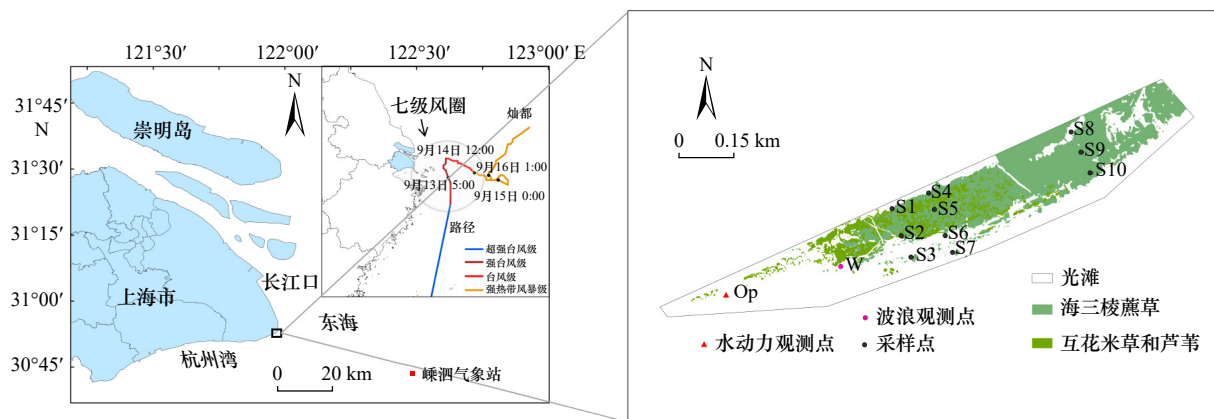


图 1 研究区位置及采样点

Fig. 1 Location and sampling sites of the study area

### 2.2 现场观测与数据处理

风速、气压和降水数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>) 嵊泗气象基站。“灿都”台风路径如图 1 所示, 观测期间, 中央气象台台风实时预报 2021 年 9 月 13 日 8 时至 2021 年 9 月 14 日 12 时 7 级风圈影响研究区, 将该时段定为台风中对应 T5-T7 潮周期, 11 日为台风前对应 T1 和 T2 潮周期, 16 日为台风后对应于 T11 和 T12 潮周期。

台风过程采用自容式、高分辨率和高精确度的野外水动力观测器, 定点观测水动力变化情况。声学多普勒三维点式流速仪 (Acoustic Doppler three-dimensional point current meter: ADV, 型号: VECTOR FIXED STEM, 挪威 Nortek, 6 MHz, 精度  $\pm 0.5\% \pm 0.5$  mm/s) 采样间隔为 10 min, 采集 160 个数据, 频率为 16 Hz, 观测点距离滩面 0.2 m<sup>[19]</sup>。波潮仪 (型号: Tide Wave Re-

corder-2050, 加拿大 RBR, 精确度 0.005%) 采样间隔为 5 min, 固定离滩面 0.1 m 高度<sup>[20]</sup>。边界悬浮泥沙剖面仪 (Argus Surface Meter: ASM-IV, 型号: Asma4, 德国 ARGUS, 量程 0~4 095 FTU) 共有 96 个浊度传感器, 相邻传感器之间距离为 0.01 m, 采样频率为 1 Hz, 固定离滩面 0.05 m 处<sup>[21]</sup>。

本文采用室内标定法对 ASM-IV 浊度探头标定。将现场采集的水样及距离滩面 0.01 m 土样进行沉淀, 在自制标定桶内配置悬沙溶液<sup>[22]</sup>。先确定 96 个传感器测量浊度的一致性<sup>[23]</sup>, 再将 ASM-IV 垂直放置在自制标定桶内, 采样频率设定为 1 Hz, 待配置的溶液搅拌均匀后, 取传感器所在水层溶液 500 mL, 最后将溶液采用双膜法<sup>[24]</sup>抽滤、烘干、称重。将测得的浊度值与悬沙浓度建立回归关系<sup>[25]</sup>, 相关系数均大于 0.98 (图 2)。

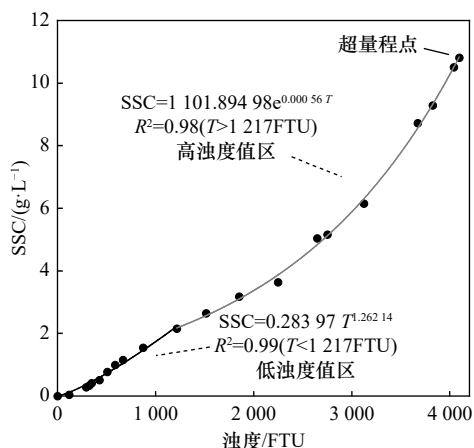


图2 浊度( $T$ )与悬沙浓度(SSC)的回归关系

Fig. 2 Regression relationship between turbidity ( $T$ ) and suspended sediment concentration (SSC)

因噪声过大或水中气泡会降低流速值的准确性及ADV探头暴露在空气中的数据需要剔除,数据处理过程如下:

(1)剔除信噪比小于15 dB,相关性低于90的数据。(2)流速异常值的检测(图3)。运用三维相空间法<sup>[26]</sup>对潮周期流速数据进行筛查。以T3潮周期流速数据为例,将流速标准值 $u$ 、 $\Delta u$ 和 $\Delta^2 u$ ,构成椭球体阈值,椭球体外的流速点判定为异常值,用迭代法不断地收缩阈值检测异常值<sup>[27]</sup>,提高数据的精度。(3)用样条曲线插值替换异常值。

### 2.3 土壤样品与植被影像图获取与处理

在植被内部、边缘及光滩使用GPS定位了10个采样点。S7及S8采样点淤泥较深,又因台风天气较

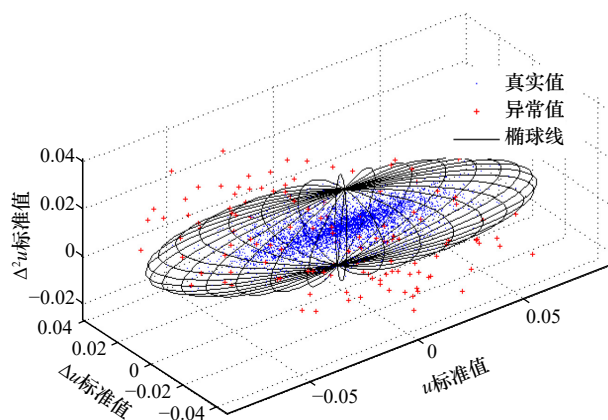


图3 T3潮周期 $u$ 方向流速分量三维相空间异常值筛选效果

Fig. 3 Screening effect of three-dimensional phase space outliers of velocity component in  $u$  direction of T3 tidal cycle

$\Delta u$ : 速度分量 $u$ 的一阶导数;  $\Delta^2 u$ : 速度分量 $u$ 的二阶导数  
 $\Delta u$ : First derivative of velocity component  $u$ ;  $\Delta^2 u$ : second derivative of velocity component  $u$

差未能采集到样品。采集面积为 $5\text{ cm}\times 5\text{ cm}$ ,深度为 $0\sim 5\text{ cm}$ 的土样,将样品放在不超过 $60^\circ\text{C}$ 烘箱内连续烘干 $72\text{ h}$ <sup>[28]</sup>。使用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000,英国Malvern,粒度范围: $0.02\sim 2000\ \mu\text{m}$ )对样品进行分析,实验过程参考Zhu等<sup>[29]</sup>的方法。按照国际标准的粒度分级方法Udden-Wentworth将表层沉积物进行分类<sup>[30]</sup>,采用McManus矩法计算表层沉积物粒度参数<sup>[31]</sup>。

台风前后用海星达高程测量仪(型号:iRTK2 BX,中国广州中海达测绘仪器有限公司,DGPS定位误差: $\pm 0.25\text{ m}$ ,高程测量精度: $\pm 5\text{ mm}$ )以吴淞高程基准沿垂直于海堤方向每 $10\text{ m}$ 测量高程。运用Arcgis10.2对台风前后高程值进行反距离加权法插值<sup>[32]</sup>,平均值误差为 $0.06\text{ m}$ ,再使用3D Analyst工具栅格计算得出台风前后滩面高程变化值。

台风前后使用无人机(Mavic Air 2,型号L1P,中国深圳市大疆创新科技有限公司)对研究区航拍监测,航高为 $150\text{ m}$ ,地面分辨率为 $5.5\text{ cm}$ 。采用目视解译法<sup>[33]</sup>将植被分布影像图在Arcgis10.2中矢量化,台风后植被斑块消失的面积定义为台风过程植被的损失,再运用叠加分析计算台风前后植被损失的面积。

## 3 结果与分析

### 3.1 台风过程滩面水动力与沉积变化

#### 3.1.1 台风过程滩面水动力的响应

观测期间,风向主要为北风,属于离岸风(图4a)。台风前平均风速为 $4\text{ m/s}$ ,台风中平均风速可达 $17.73\text{ m/s}$ ,台风后平均风速为 $10.52\text{ m/s}$ 。降水量在12个潮周期内先增大后减小,台风中T6潮周期内累积降水量可达 $82.1\text{ mm}$ 。

在潮周期内(图4b),台风前T1和T2平均流速约为 $0.15\text{ m/s}$ 增至台风中T6潮周期的 $0.23\text{ m/s}$ ,台风后T11和T12的平均流速为 $0.19\text{ m/s}$ 。台风前后最大流速在T12潮周期为 $0.38\text{ m/s}$ ,台风中T6潮周期最大流速可达 $0.42\text{ m/s}$ 。台风前后涨落潮初期流速逐渐增大,高平潮阶段流速变小,台风中高平潮期流速没有明显变小趋势。台风前后滩面近底层涨落潮流向主要为西北-东南,台风中因东北风作用流速流向比较紊乱,涨落潮流向主要为西北-西南。

观测点滩面水位高于 $2\text{ m}$ 可将整个滩面淹没。台风中处于天文潮小潮,T6潮周期水位观测点水位达到了最高 $2.66\text{ m}$ ,台风前后最高水位在T1潮周期为 $2.26\text{ m}$ 。台风前后潮周期内滩面淹没平均时长为 $2.67\text{ h}$ ,台风中滩面淹没时长为 $3.91\text{ h}$ 。

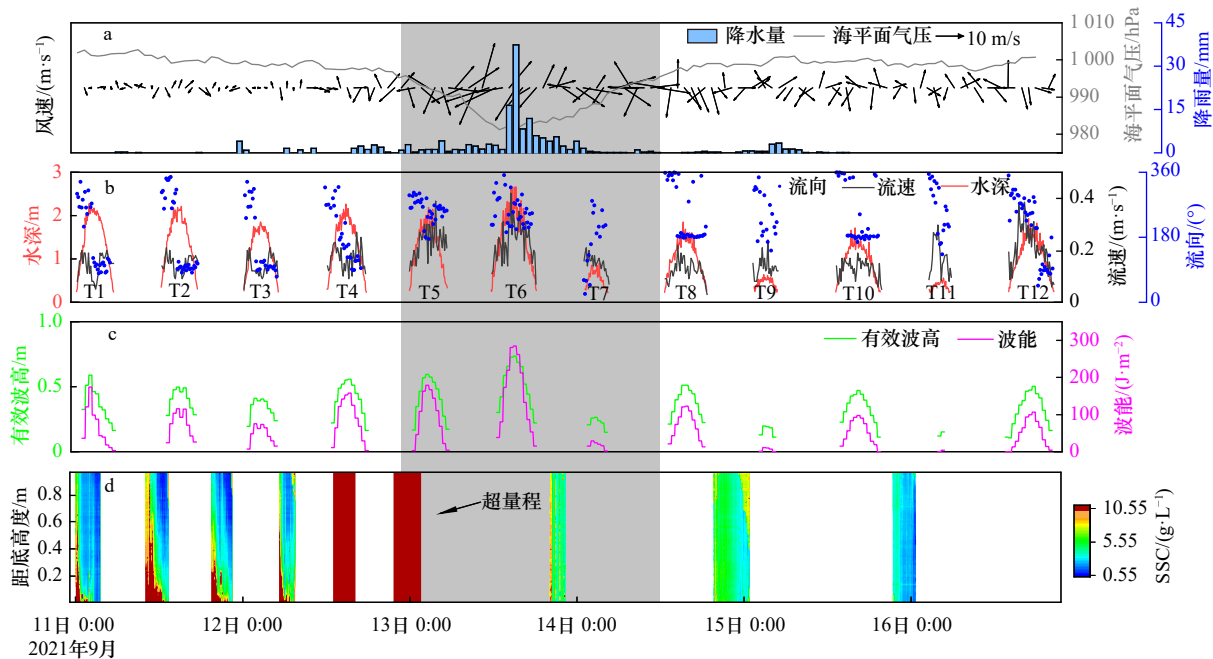


图4 台风过程气象及近底层水动力和沉积变化

Fig. 4 Meteorological and near bottom hydrodynamic and sedimentary changes during typhoon

- a. 风向风速、海平面气压、降水量图; b. T1-T12 潮周期水动力观测点水深、流速和流向; c. 植被边缘观测点有效波高和波能; d. 悬沙浓度剖面变化过程。灰色区域为台风中
- a. Wind direction, wind speed, sea level pressure and precipitation; b. water depth, velocity and direction at hydrodynamic observation points of T1-T12 tidal cycle; c. significant wave height and wave energy at observation points on the edge of vegetation; d. variation process of suspended sediment concentration profile. The gray area is in typhoon

台风前后植被边缘滩面(图4c)平均有效波高和平均波能为0.24 m和57.94 J/m<sup>2</sup>,最大有效波高为0.49 m,最大波能为174.37 J/m<sup>2</sup>;台风中植被边缘滩面平均有效波高为0.37 m和平均波能124.1 J/m<sup>2</sup>,最大有效波高为0.64 m,最大波能可达到284.95 J/m<sup>2</sup>,平均有效波高和平均波能是台风前后的1.54倍和2.14倍。

### 3.1.2 台风过程滩面近底层悬沙浓度

台风前,SSC自底层向上层递减(图4d),距离滩面0.05 m、0.2 m、0.4 m、0.6 m和0.8 m平均SSC为8.00 g/L、5.69 g/L、4.75 g/L、3.95 g/L和3.73 g/L。T1和T2潮周期涨潮初期距离滩面0.3 m和0.5 m高度出现“高悬沙浓度层(大于10 g/L)”<sup>[34]</sup>。台风中T5和T6潮周期内距离滩面1 m高度平均SSC大于10 g/L,高悬沙浓度层存在时长为8.13 h。台风后SSC显著降低,距离滩面0.05 m、0.2 m、0.4 m、0.6 m和0.8 m高度平均SSC依次为2.81 g/L、2.90 g/L、2.78 g/L、2.80 g/L和3.14 g/L。

台风过程T1-T6潮周期悬沙浓度递增,T8-T12潮周期悬沙浓度下降。台风前T1和T2潮周期水位到达高平潮时,SSC自滩面向上层递减,水中悬沙沉降形成“浮泥层(大于10 g/L)”<sup>[35]</sup>。台风后T12潮周期在涨潮初期悬沙浓度高于落潮期。台风中T5和

T6潮周期,风浪作用导致近底层悬沙浓度是台风前后的3~4倍。

## 3.2 台风过程滩面高程及表层沉积物的响应

### 3.2.1 台风过程滩面高程的响应

台风后滩面高程发生了显著变化(图5)。台风后植被分布区冲淤共存,高程低于4 m海三棱藨草和互花米草分布稀疏的滩面主要呈现侵蚀的态势,滩面刷低0~4.8 cm,而高程高于4 m互花米草和芦苇分布茂盛的滩面淤积了0~14.7 cm。

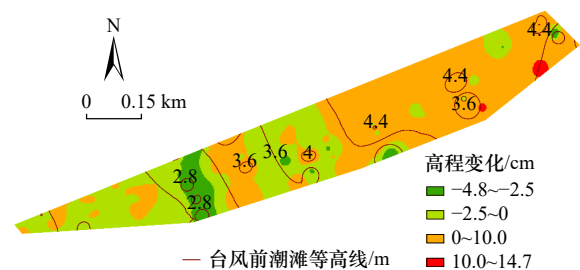


图5 台风后滩面高程变化

Fig. 5 Change of tidal elevation after typhoon

台风期间光滩-植被过渡区高程对台风的响应比较明显,位于S2与S5之间与海堤平行的植被前缘沙堤在台风前相对高度为0.42 m,台风后沙堤相对高度变化不大,沙堤前缘向岸延伸了约50 cm的距离,沙

堤坡度减缓。台风后盐沼下部的光滩主要为侵蚀,海三棱藨草分布的先锋滩面侵蚀可达 2 cm,而互花米草和芦苇的前缘沙堤淤积了 2~5 cm 的高度。

### 3.2.2 台风过程滩面表层沉积物的响应

台风前表层沉积物颗粒以砂和粉砂为主,自岸向海高程降低,表层沉积物砂含量越多,植被内部黏土含量越高(图 6)。台风后植被边缘 S3、S7 和 S10 表层沉积物粒组含量无变化,砂含量仍为 100%,但中值

粒径( $Mz_{\phi}$ )值平均增大 0.11,沉积物颗粒变细;植被边缘的分选系数值增大,分选性变差。台风后,植被内部因植被密度不同,滩面沉积物组分变化各异。植被分布稀疏滩面如 S1、S4 和 S6 表层沉积物黏土含量减少,砂含量总体增加,表层沉积物颗粒变粗;分选系数明显减小,分选性增强。而植被分布茂盛滩面 S2 和 S5,表层沉积物砂含量减少,粉砂和黏土明显增多, $Mz_{\phi}$ 值平均增大 0.35,颗粒变细,分选系数变大,分选性变差。

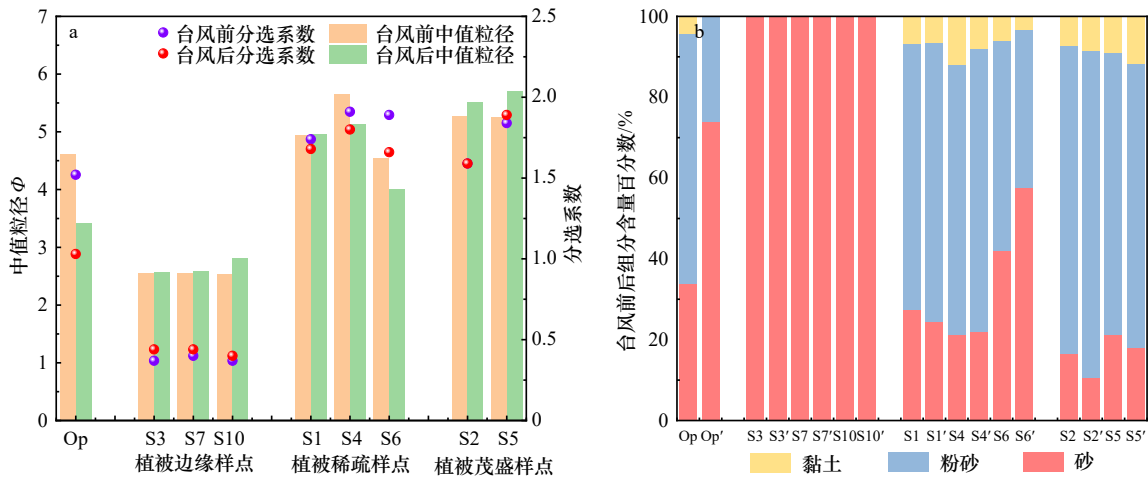


图 6 台风前后表层沉积物粒度参数及颗粒组分含量变化

Fig. 6 Changes of particle size parameters of surface sediments and particle composition after typhoon

以采样点 Op 为例,Op 为台风前,Op' 为台风后

Taking the sampling site Op as an example, Op is before the typhoon and Op' is after the typhoon

台风期间高程小于 3 m 的光滩,表层沉积物粉砂占主导,滩面沉积变化强烈,如 Op 采样点,台风后砂含量增加了 39.9%,沉积物颗粒粗化,分选性明显增强,水动力能量较强。

### 3.2.3 台风过程滩面沉积与植被的响应

台风以多种形式影响滨海湿地植被生存<sup>[36]</sup>。台风后植被分布面积有所减少(图 7),植被分布面积共减少了 1 827.67 m<sup>2</sup>,其中海三棱藨草减少了 923.31 m<sup>2</sup>,芦苇和互花米草共减少了 904.36 m<sup>2</sup>。向海方向的盐沼边缘植被减少量最多,这使得植被边缘向岸方向后退;其次植被分布面积减少多发生在潮沟附近,台风期间潮沟的过水断面面积增加,潮流动能增大,潮沟两岸植物根系易因潮沟侧蚀或摆动而发生暴露<sup>[37]</sup>,植物存活能力降低。

台风中滩面侵蚀和淤积都会引起植被分布面积减少<sup>[38]</sup>,台风后滩面侵蚀和淤积减少的植被分布面积占总植被减少量的 31.9% 和 68.1%。海三棱藨草因滩面淤积和侵蚀减少面积分别为 514.96 m<sup>2</sup> 和 408.35 m<sup>2</sup>;互花米草和芦苇因滩面淤积和侵蚀分布面积减少为 681.81 m<sup>2</sup> 和 222.55 m<sup>2</sup>。

## 4 讨论

### 4.1 台风过程滩面沉积和植被响应的过程及机理

研究表明,台风过程滨海湿地植被和波浪的联合增加湍流作用可以改变滩面的沉积动力<sup>[39]</sup>,滩面形态的变化会影响植被分布面积变化<sup>[40]</sup>。对比 12 个潮周

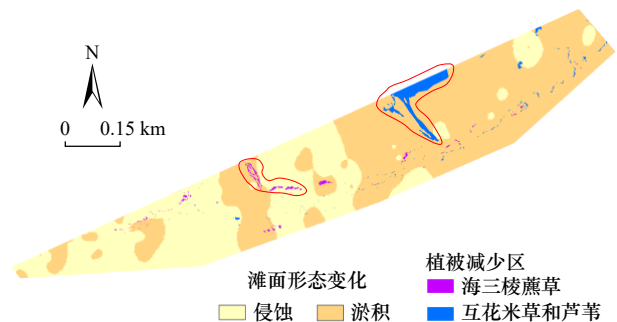


图 7 台风过程减少的植被分布与滩面形态变化

Fig. 7 Reduced vegetation distribution and tidal flat surface change during typhoon

红色范围主要为因海堤建设植被减少分布面积

The red areas are mainly decrease of the distribution areas of vegetation due to the construction of seawall

期的近底层悬沙浓度变化过程, 台风期间风驱动下形成的涌浪增高和沿岸流速增大, 使得滩面表层泥沙启动<sup>[41]</sup>, 台风中 T5-T7 潮周期观测点滩面平均刷低 0.8 cm (图 8), 滩面表层沉积物与中上层水强烈混合<sup>[38]</sup>, 形成“高悬沙浓度层”。台风中 T5、T6 潮周期内强劲的东北风促成沿岸流, 涨落潮流向转变为西北-西南, 盐沼下部光滩因暴雨冲刷表层沉积物含水量升高, 滩面易侵蚀, 在涨潮流速增大的同时输沙强度明显增强<sup>[42]</sup>。涨潮时高浓度的 SSC 被输送到高程大于 4 m 且分布芦苇和互花米草茂盛的滩面, 互花米草和芦苇的截留作用明显, 退潮时植被区内水动力较弱, 颗粒小的沉积物易于淤积<sup>[43]</sup>, 表层沉积物中值粒径变小。植被前缘沙堤淤积高度变化不大, 植被前缘向陆方向后退, 这与风暴潮会增加侵蚀物重新分布到盐沼表面<sup>[44]</sup>和植被边缘向陆方向后退结论相一致<sup>[13]</sup>。盐沼下部光滩滩面侵蚀且沉积物颗粒变粗, 盐沼下部与植被前缘沙堤的高程差增大, 进而导致波浪增强。稀疏的根茎科植物在台风期间使近底层流速脉动增强<sup>[45]</sup>, 高程低于 4 m 且分布稀疏海三棱藨草与簇状互花米草的滩面表层沉积物泥沙进入水体不易沉降<sup>[46]</sup>, 落潮沿岸流在东北风作用下泥沙向海方向输送, 滩面发生侵蚀。

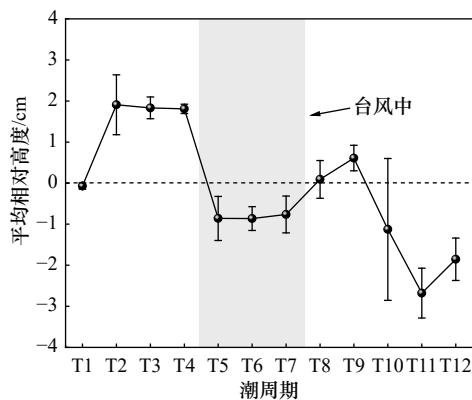


图 8 潮周期内观测点 ADV 测量滩面平均相对高度变化

Fig. 8 Variation of average relative height of tidal flat measured by ADV at observation point in tidal cycle

#### 4.2 台风过程滨海湿地生态修复与管理

台风过程滨海湿地生态系统的管理与健康维护不仅要考虑台风前的预警和台风中生态系统的响应机制研究, 也要加强台风后生态系统修复方案的探索<sup>[47]</sup>。基于成本效益, “绿色海堤”可以作为应对风暴潮对海岸侵袭的一种方式<sup>[48]</sup>。本研究台风过程风驱动波流增大, 滩面高程低于 4 m 植被稀疏滩面刷低, 海三棱藨草根部侵蚀暴露 2 cm, 而植被茂盛的滩面流速和泥沙启动能力较弱, 滩面易于淤积。滩面植被的种类、分布的密度、带宽、高度不同, 消减有效波高和波能

的能力各异<sup>[49]</sup>。本文高程在 2~4 m 的滩面适合海三棱藨草生长<sup>[50]</sup>, 移植海三棱藨草斑块增加植被密度、宽度可达到消浪、促淤和固滩的效果<sup>[51-52]</sup>。确定适合植被生长高程的同时, 植被斑块移植位置的水动力、沉积环境也不容忽视<sup>[53]</sup>。台风中盐沼下部表层沉积物因波流增大泥沙启动, 涨潮流作用下淤积于植被前缘的沙堤, 在沙堤上移植的植被斑块易被砂质沉积物掩埋。台风中高程低于 4 m 无植被分布的滩面表层沉积物悬浮形成高悬沙浓度层后被输送到各处, 滩面主要发生侵蚀。台风后可通过微生物膜黏附泥沙的“生物稳定性”抑制泥沙侵蚀<sup>[54]</sup>。未来, 就湿地生态系统的韧性问题, 应该持续观测滨海湿地植被和滩面沉积的动态变化, 从而回答台风后滨海湿地生态系统恢复到台风前所需要的时间, 以及应该采取的生态修复和管理策略, 从而维护湿地系统服务功能的可持续性。

此外台风过程滩面的形态变化也与大小潮周期和潮差等因素相关, 如台风后滩面在 T8、T9 潮周期逐渐恢复淤积的态势, 但在 T11 潮周期滩面刷低约 2.8 cm。对于台风过程整个滩面水动力变化及沉积动态响应, 应当结合数值模拟来论证台风的滨海湿地响应过程, 进而提出有效的修复和管理意见。

## 5 结论

本文基于水动力观测和 ArcGIS 空间分析探究 2021 年台风“灿都”过程南汇东滩水动力、滩面沉积、植被分布生态系统响应过程。主要结论如下:

台风中风速是台风前后的 2.4 倍, 植被边缘平均有效波高是台风前后的 1.54 倍。风浪驱动台风中 T6 潮周期平均流速达到 0.23 m/s, 滩面近底层悬沙浓度与表层沉积物强烈混合, 出现时长为 8.13 h 厚度为 1 m 的“高悬沙浓度层”。

根据表层沉积物和高程变化, 可知台风期间高程小于 4 m 的稀疏海三棱藨草和互花米草滩面水动力能量强于高程大于 4 m 的茂盛互花米草和芦苇滩面。台风过后, 研究区植被分布面积共减少 1 827.67 m<sup>2</sup>, 其中侵蚀滩面植被减少 31.9%, 淤积滩面植被减少 68.1%。

台风后高程低于 4 m 的滩面, 确定植被适宜生长的高程后, 结合台风过程冲淤变化可通过“微生物膜”和植被斑块移植的方法消浪、固滩和促淤。

**致谢:** 感谢上海海洋大学海洋生态与环境学院林军教授和华东师范大学河口海岸学国家重点实验室李为华高级工程师对课题研究提供的指导。

## 参考文献:

- [1] Chen Chen, Ma Yi, Ren Guangbo, et al. Aboveground biomass of salt-marsh vegetation in coastal wetlands: sample expansion of *in situ* hyperspectral and Sentinel-2 data using a generative adversarial network[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 270: 112885.
- [2] Breithaupt J L, Hurst N, Steinmuller H E, et al. Comparing the biogeochemistry of storm surge sediments and pre-storm soils in coastal wetlands: hurricane Irma and the Florida everglades[J]. *Estuaries and Coasts*, 2020, 43(5): 1090–1103.
- [3] Crosby S C, Sax D F, Palmer M E, et al. Salt marsh persistence is threatened by predicted sea-level rise[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 181: 93–99.
- [4] 陈崇贤, 刘京一. 气候变化影响下国外沿海城市应对海平面上升的景观策略与启示[J]. *风景园林*, 2020, 27(12): 32–37.  
Chen Chongxian, Liu Jingyi. Landscape strategies and enlightenment of foreign coastal cities to cope with sea level rise under impact of climate change[J]. *Landscape Architecture*, 2020, 27(12): 32–37.
- [5] Razi M A M, Daud H Z B H, Mokhtar A, et al. Climate change, tsunami and biodiversity endangered at the South China Sea, past, current and prediction models for the future: a comprehensive study[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 175: 113255.
- [6] IPCC Working Group I. Climate change 2013: the physical science basis-conclusions[J]. *Bulletin fur Angewandte Geologie*, 2013, 18(2): 5–19.
- [7] Turner R E, Baustian J J, Swenson E M, et al. Wetland sedimentation from hurricanes Katrina and Rita[J]. *Science*, 2006, 314(5798): 449–452.
- [8] Mo Yu, Kearney M S, Turner R E. The resilience of coastal marshes to hurricanes: the potential impact of excess nutrients[J]. *Environment International*, 2020, 138: 105409.
- [9] Douglas S H, Bernier J C, Smith K E L. Analysis of multi-decadal wetland changes, and cumulative impact of multiple storms 1984 to 2017[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2018, 26(6): 1121–1142.
- [10] Do K, Yoo J. Morphological response to storms in an embayed beach having limited sediment thickness[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 234: 106636.
- [11] Aung T T, Mochida Y, Than M M. Prediction of recovery pathways of cyclone-disturbed mangroves in the mega delta of Myanmar[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 293: 103–113.
- [12] 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.
- [13] Yang Shilun, Friedrichs C T, Shi Zhong, et al. Morphological response of tidal marshes, flats and channels of the outer Yangtze River Mouth to a major storm[J]. *Estuaries*, 2003, 26(6): 1416–1425.
- [14] Wu Mingxun, Hu Yang, Wu Pengling, et al. Does soil pore water salinity or elevation influence vegetation spatial patterns along coasts? a case study of restored coastal wetlands in Nanhui, Shanghai[J]. *Wetlands*, 2020, 40(6): 2691–2700.
- [15] 陈沈良, 张国安, 谷国传. 长江口南汇边滩的演变及其沉积动力机制[J]. *上海地质*, 2003, 4: 1–4.  
Chen Shenliang, Zhang Guoan, Gu Guochuan. Geomorphic evolution of Nanhui nearshore of the Yangtze Estuary and its sediment dynamic mechanism[J]. *Shanghai Geology*, 2003, 4: 1–4.
- [16] 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 Jiufa, 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]. *Haiyang Xuebao*, 2009, 31(4): 103–111.
- [17] 丁平兴, 葛建忠. 长江口横沙浅滩及邻近海域灾害性天气分析[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 4: 72–78.  
Ding Pingxing, Ge Jianzhong. Analysis of disastrous weather in the Hengsha Shoal and adjacent waters of the Yangtze Estuary[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2013, 4: 72–78.
- [18] 郜昂, 赵华云, 杨世伦, 等. 径流、潮流和风浪共同作用下近岸悬沙浓度变化的周期性探讨——以杭湾和长江口交汇处的南汇嘴为例[J]. *海洋科学进展*, 2008, 26(1): 44–50.  
Gao Ang, Zhao Huayun, Yang Shilun, et al. Seasonal and tidal variations in suspended sediment concentration under the influence of river runoff, tidal current and wind waves—taking the Nanhui headland, the joint area between Changjiang Estuary and Hangzhou Bay as an example[J]. *Advances in Marine Science*, 2008, 26(1): 44–50.
- [19] Chen Dezhi, Li Mingliang, Zhang Yiyi, et al. Effects of diatoms on erosion and accretion processes in saltmarsh inferred from field observations of hydrodynamic and sedimentary processes[J]. *Ecohydrology*, 2020, 13(8): e2246.
- [20] 马焯贝, 戴志军, 庞文鸿, 等. 崇明岛南侧盐沼潮滩消能状态研究[J]. *海洋工程*, 2021, 39(5): 162–170.  
Ma Yebei, Dai Zhijun, Pang Wenhong, et al. Research on the wave energy dissipation over salt marsh tidal flat in the south of Chongming Island[J]. *The Ocean Engineering*, 2021, 39(5): 162–170.
- [21] 周晓妍, 戴志军, 庞文鸿, 等. ASM-IV 仪器在河口近底层悬沙浓度观测分析中的应用研究[J]. *应用海洋学学报*, 2020, 39(2): 221–228.  
Zhou Xiaoyan, Dai Zhijun, Pang Wenhong, et al. Application study of ASM-IV instrument at the near-bed suspended sediment concen-

- tration measurement in estuary[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2020, 39(2): 221–228.
- [22] Chen Yining, Li Yan, Thompson C, et al. Differential sediment trapping abilities of mangrove and saltmarsh vegetation in a subtropical estuary[J]. *Geomorphology*, 2018, 318: 270–282.
- [23] 魏晓, 汪亚平, 杨旻, 等. 浅海悬沙浓度观测方法的对比研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(1): 161–170.  
Wei Xiao, Wang Yaping, Yang Yang, et al. Suspended sediment concentrations in shallow sea: comparative study of methods[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(1): 161–170.
- [24] 刘建华, 陈沈良, 杨世伦, 等. 长江口门附近海域潮周期内悬沙质量浓度变化及其动力机制探讨[J]. *海洋科学进展*, 2014, 32(2): 188–199.  
Liu Jianhua, Chen Shenliang, Yang Shilun, et al. Study on the change of suspended sediment concentration during tidal cycle and its dynamic mechanism near the Changjiang Estuary[J]. *Advances in Marine Science*, 2014, 32(2): 188–199.
- [25] 张文祥, 杨世伦. OBS浊度标定与悬沙浓度误差分析[J]. *海洋技术*, 2008, 27(4): 5–8.  
Zhang Wenxiang, Yang Shilun. Turbidity calibration of OBS and errors analysis of suspended sediment concentration[J]. *Ocean Technology*, 2008, 27(4): 5–8.
- [26] Lemmin U, Lhermitte R, Nikora V I, et al. ADV measurements of turbulence: can we improve their interpretation?[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125(9): 987–988.
- [27] 钟纯铎, 张俊波, 杨振昊, 等. 基于三维相空间法和稳健估算法的ADV流速数据后置处理效果研究[J]. *海洋学报*, 2021, 43(8): 152–159.  
Zhong Chunyu, Zhang Junbo, Yang Zhenhao, et al. Research on the detection effect of post-processing method of Acoustic Doppler Velocimetry data based on three-dimensional phase space thresholding method and robust estimation method[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(8): 152–159.
- [28] Fang Shubo, Jia Xiaobo, Qian Qingteng, et al. Reclamation history and development intensity determine soil and vegetation characteristics on developed coasts[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 1263–1271.
- [29] Zhu Qin, van Prooijen B C, Maan D C, et al. The heterogeneity of mudflat erodibility[J]. *Geomorphology*, 2019, 345: 106834.
- [30] 侯俊, 王超, 王沛芳, 等. 太湖表层沉积物粒度组成时空分布特征及分类命名[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(2): 114–119.  
Hou Jun, Wang Chao, Wang Peifang, et al. Temporal variability and spatial distribution of granulometric composition of surface sediments and classification in Taihu Lake[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2013, 41(2): 114–119.
- [31] 刘志杰, 公衍芬, 周松望, 等. 海洋沉积物粒度参数3种计算方法的对比研究[J]. *海洋学报*, 2013, 35(3): 179–188.  
Liu Zhijie, Gong Yanfen, Zhou Songwang, et al. A comparative study on the grain-size parameters of marine sediments derived from three different computing methods[J]. *Haiyang Xuebao*, 2013, 35(3): 179–188.
- [32] 张锦明, 郭丽萍, 张小丹. 反距离加权插值算法中插值参数对DEM插值误差的影响[J]. *测绘科学技术学报*, 2012, 29(1): 51–56.  
Zhang Jinming, Guo Liping, Zhang Xiaodan. Effects of interpolation parameters in inverse distance weighted method on DEM accuracy[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2012, 29(1): 51–56.
- [33] 满卫东, 王宗明, 刘明月, 等. 1990–2013年东北地区耕地时空变化遥感分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 34(7): 1–10.  
Man Weidong, Wang Zongming, Liu Mingyue, et al. Spatio-temporal dynamics analysis of cropland in Northeast China during 1990–2013 based on remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 34(7): 1–10.
- [34] 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]. 上海: 华东师范大学, 2017.  
Zhu Qin. Sediment dynamics on intertidal mudflats: a study based on *in situ* measurements and numerical modelling[D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.
- [35] 苗丽敏, 杨世伦, 朱琴, 等. 风暴过程中潮滩悬沙浓度和悬沙输运的变化及其动力机制——以长江三角洲南汇潮滩为例[J]. *海洋学报*, 2016, 38(5): 158–167.  
Miao Limin, Yang Shilun, Zhu Qin, et al. Variations of suspended sediment concentrations and transport in response to a storm and its dynamic mechanism—A study case of Nanhui tidal flat of the Yangtze River Delta[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(5): 158–167.
- [36] Wang Teng, Liu Guangpeng, Gao Lei, et al. Biological and nutrient responses to a typhoon in the Yangtze Estuary and the adjacent sea[J]. *Journal of Coastal Research*, 2016, 32(2): 323–332.
- [37] Wang Feifei, Yu Zhigang, Xu Bochao, et al. Nepartak typhoon influenced bottom sediments from the Yangtze River Estuary and adjacent East China Sea-foraminiferal evidence[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19(4): 1049–1063.
- [38] 王浩斌, 杨世伦, 杨海飞. 台风对长江口表层悬沙浓度的影响[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2019(2): 195–208.  
Wang Haobin, Yang Shilun, Yang Haifei. A study of the surficial suspended sediment concentration in response to typhoons in the Yangtze Estuaries[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2019(2): 195–208.
- [39] 高抒, 贾建军, 于谦. 绿色海堤的沉积地貌与生态系统动力学原理: 研究综述[J]. *热带海洋学报*, 2022, 41(4): 1–19.  
Gao Shu, Jia Jianjun, Yu Qian. Green sea dykes: an overview of their principles of sediment, geomorphology and ecosystem dynamics[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2022, 41(4): 1–19.
- [40] 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.
- [41] Héquette A, Hemdane Y, Anthony E J. Sediment transport under wave and current combined flows on a tide-dominated shoreface, north-

- ern coast of France[J]. *Marine Geology*, 2008, 249(3/4): 226–242.
- [42] 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]. *Haiyang Xuebao*, 2009, 31(6): 77–86.
- [43] Wang Xianye, Xie Weiming, Zhang D, et al. Wave and vegetation effects on flow and suspended sediment characteristics: a flume study[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 182: 1–11.
- [44] Yang Wankang, Feng Xingru, Yin Baoshu. The impact of coastal reclamation on tidal and storm surge level in Sanmen Bay, China[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2019, 37(6): 1971–1982.
- [45] Leonardi N, Carnacina I, Donatelli C, et al. Dynamic interactions between coastal storms and salt marshes: a review[J]. *Geomorphology*, 2018, 301: 62–107.
- [46] Lagomasino D, Fatoyinbo T, Castañeda-Moya E, et al. Storm surge and ponding explain mangrove dieback in Southwest Florida following Hurricane Irma[J]. *Nature Communications* 2021, 12(1): 4003.
- [47] Smith T J, Anderson G H, Balentine K, et al. Cumulative impacts of hurricanes on Florida mangrove ecosystems: sediment deposition, storm surges and vegetation[J]. *Wetlands*, 2009, 29(1): 24–34.
- [48] Castagno K A, Tomiczek T, Shepard C C, et al. Resistance, resilience, and recovery of salt marshes in the Florida Panhandle following Hurricane Michael[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 20381.
- [49] 葛芳, 田波, 周云轩, 等. 海岸带典型盐沼植被消浪功能观测研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(8): 1784–1792.  
Ge Fang, Tian Bo, Zhou Yunxuan, et al. Analyzing the role of salt marshes on attenuating waves with Rb16-2050 mesearues in Changjiang Estuary[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(8): 1784–1792.
- [50] 谢泽昊, 史本伟, 田波, 等. 盐沼植被缓流能力观测研究——以崇明东滩海三棱藨草盐沼区为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(2): 571–581.  
Xie Zehao, Shi Benwei, Tian Bo, et al. Observation and study on flow attention capacity of saltmarsh: a case study of scirpus mariqueter in Chongming Dongtan[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(2): 571–581.
- [51] 陈雅慧, 袁琳, 曹浩冰, 等. 基于胁迫梯度假说和互惠理论的海三棱藨草种群恢复技术[J]. *生态学报*, 2019, 39(12): 4233–4241.  
Chen Yahui, Yuan Lin, Cao Haobing, et al. The stress-gradient hypothesis and facilitation theory-based restoration technique for *Scirpus mariqueter* population[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(12): 4233–4241.
- [52] 陶燕东, 于克锋, 何培民, 等. 围垦后南汇东滩海三棱藨草的空间分布及其影响因子研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(7): 1032–1041.  
Tao Yandong, Yu Kefeng, He Peimin, et al. Distribution of *Scirpus mariqueter* on Nanhui coasts after reclamation and the associated affecting factors[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(7): 1032–1041.
- [53] 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 Development and Management*, 2019, 36(7): 42–48.
- [54] Gerbersdorf S U, Wieprecht S. Biostabilization of cohesive sediments: revisiting the role of abiotic conditions, physiology and diversity of microbes, polymeric secretion, and biofilm architecture[J]. *Geobiology*, 2015, 13(1): 68–97.

## Observation of physical variables of coastal wetland and response of wetland system under the influence of typhoon process

Li Gaoru<sup>1,2</sup>, Gong Guoning<sup>1,2</sup>, Zhang Shengle<sup>1,2</sup>, Gao Meihua<sup>1,2</sup>, Zhang Bolun<sup>1,2</sup>,  
Ma Yuxi<sup>3</sup>, He Peimin<sup>1,2</sup>, Fang Shubo<sup>1,2</sup>

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Research Center of Water Environment & Ecological Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** How to study the response process of wetland system under the influence of extreme weather events such as typhoon, and then put forward effective ecological integrity maintenance and management schemes is of great significance to wetland management and ecological security maintenance in key areas. In this paper, during the process of “Chanthu” Typhoon in September 2021, hydrodynamic observation points were set up on the South Bank of

Nanhui east tidal flat, surface sediments were collected, tidal flat surface elevation was measured, and vegetation images were obtained by unmanned aerial vehicle. Using ArcGIS spatial analysis, the hydrodynamic and sedimentary changes of Nanhui east tidal flat and the response of tidal flat surface elevation, surface sediments and vegetation distribution area were discussed. The results show that the average effective wave height and wave energy at the edge of the vegetation are 1.54 times and 2.14 times in the typhoon, the average current velocity near the bottom layer is 0.23 m/s, and a “high suspended sediment concentration layer” ( $>10$  g/L) with a thickness of more than 1 m appears on the tidal flat for 8.13 h. After the typhoon, the tidal flat surface of *Scirpus mariqueter* and *Spartina alterniflora* distributed sparsely below 4 m eroded 0–4.8 cm, and the tidal flat surface with lush growth of *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis* above 4 m deposited 0–14.7 cm. The distribution area of vegetation in the study area decreased by 1 827.67 m<sup>2</sup>, accounting for 1.63% of the total vegetation before the typhoon, including 31.9% of the eroded tidal flat vegetation and 68.1% of the deposited tidal flat vegetation. The wetland management after the typhoon process can be summarized as follows: (1) The wetland basically shows the characteristics of co-existence of erosion and accretion areas after the typhoon process; (2) For the tidal flat surface with an elevation lower than 4 m, it is suggested to determine the elevation suitable for vegetation growth, combine the erosion and deposition changes during the typhoon process, and use the “microbial film” and vegetation patch transplantation to dissipate waves, consolidate the tidal flat and promote accretion, so as to accelerate the rapid restoration of the wetland after the impact of the typhoon process.

**Key words:** typhoon; coastal wetlands; hydrodynamic force; deposition; response process