

李晶晶, 史本伟, 彭忠, 等. 台风“梅花”对潮滩大型底栖动物群落的影响研究[J]. 海洋学报, 2024, 46(7): 29–40. doi:10.12284/hyxb2024068  
Li Jingjing, Shi Benwei, Peng Zhong, et al. Study on the influence of Typhoon “Muifa” on the macrobenthic community of tidal flat[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(7): 29–40. doi:10.12284/hyxb2024068

# 台风“梅花”对潮滩大型底栖动物群落的影响研究

李晶晶<sup>1</sup>, 史本伟<sup>1,2,3\*</sup>, 彭忠<sup>1</sup>, 张文祥<sup>1</sup>, 彭彪彪<sup>1</sup>

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241; 2. 自然资源部海洋空间资源管理技术重点实验室, 浙江 杭州 310012; 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)

**摘要:** 台风会对潮滩生态系统造成严重影响, 特别是对大型底栖动物群落组成及分布影响显著。台风期间现场资料匮乏, 导致人们对台风如何影响生态系统的认识仍十分有限。为此, 本研究选取长江口崇明东滩盐沼-光滩断面于 2022 年 9 月台风“梅花”前、中、后进行水动力观测和大型底栖动物同步采样。研究发现: (1) 台风“梅花”期间, 盐沼中有效波高是正常天气下的 2~4 倍, 浪流联合剪切应力是正常天气下的 10 倍; (2) 台风“梅花”过后 1 周内, 盐沼中底栖动物的物种数、丰度、生物量分别是台风前的 1.9 倍、3.8 倍、3.0 倍, 优势种种类 (谭氏泥蟹 (*Ilyoplax deschampsii*)、拟沼螺 (*Assiminea* sp.)、董拟沼螺 (*Assiminea violacea*)、河蚶 (*Corbicula fluminea*)) 比台风过境前 (拟沼螺、谭氏泥蟹、河蚶) 增加了一种 (董拟沼螺), 第一优势种由拟沼螺变为谭氏泥蟹; (3) 台风“梅花”过后 1 周内, 盐沼中大型底栖动物的物种数、丰度和生物量均增加, 而盐沼前缘光滩上大型底栖动物的丰度降低, 原因是盐沼前缘光滩上的底栖动物 (谭氏泥蟹、拟沼螺、河蚶) 在台风导致的强水动力胁迫下, 迅速迁移至水动力相对弱的盐沼中; (4) 台风“梅花”过后 2 周, 盐沼中大型底栖动物的丰度恢复。本研究结果表明盐沼植被不仅具有消浪缓流、保滩护岸等生态服务功能, 还可在台风期间为底栖动物提供避难所。

**关键词:** 台风; 水动力; 大型底栖动物群落; 崇明东滩

中图分类号: P714.5

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)07-0029-12

## 1 引言

台风是世界上破坏性最强的自然灾害之一。西北太平洋生成的台风数量颇多, 约占全球总数的三分之一, 在全球变暖背景下, 西北太平洋副热带高压变率增大, 登陆强台风的频率和强度显著增加<sup>[1-3]</sup>, 导致我国沿海地区受灾尤为严重<sup>[4]</sup>。潮滩位于海洋和陆地的交界地带, 具有周期性淹没、暴露的特点<sup>[5-6]</sup>, 其上部通常生长耐盐性植物群落, 生产力极为丰富<sup>[7-9]</sup>。潮滩生态环境独特<sup>[10-11]</sup>, 是鸟类、鱼类和大型底栖动

物的栖息地<sup>[12-15]</sup>, 不仅能够维持生物多样性, 还提供了重要的社会和经济价值<sup>[16-18]</sup>。潮滩上大型底栖动物主要包括软体动物、环节动物以及节肢动物 (水生昆虫和大型甲壳动物)。大型底栖动物作为潮滩生态系统中的消费者, 在营养物质循环、能量流动、污染物净化、动植物碎屑分解、有机质降解等方面起着重要作用<sup>[19-22]</sup>。大型底栖动物分布广、物种多样、生活相对稳定、对外界胁迫响应敏感, 常作为环境和水生生态健康的重要评价指标, 对周围环境变化具有重要的指示作用, 对剧烈的扰动事件响应更加敏感。台风会造

收稿日期: 2024-01-18; 修订日期: 2024-03-22。

**基金项目:** 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作专项 (2023YFE0113100); 国家自然科学基金 (42076170); 自然资源部海洋空间资源管理技术重点实验室开放基金 (KF-2022-105); 上海市“一带一路国际联合实验室”项目 (21230750600)。

**作者简介:** 李晶晶 (1999—), 女, 辽宁省沈阳市人, 研究方向为河口海岸动力沉积与生物作用过程。E-mail: 15140297657@163.com

\* **通信作者:** 史本伟 (1979—), 男, 上海市人, 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

成潮滩水位抬升,波浪破碎加剧,潮滩表层沉积物扰动加重,从而影响潮滩上大型底栖动物群落。研究表明台风影响下底栖动物会寻找新的栖息地,导致原栖息地生物量降低,甚至发生短期内不可恢复的死亡事件<sup>[23-24]</sup>。因此,台风等极端天气事件对潮滩大型底栖动物带来怎样的影响需进行深入研究<sup>[25]</sup>,如大型底栖动物的丰度和生物量发生怎样的改变,这对深刻认识潮滩底栖生态系统的稳定性和可持续性具有科学意义。

以往大量研究表明潮滩大型底栖动物的活动行为影响其周围物理环境<sup>[26]</sup>,如螃蟹的掘穴行为,增加了潮滩滩面的粗糙度,影响潮滩侵蚀淤积过程和泥沙输运方式<sup>[27-29]</sup>。同时,大型底栖动物周围物理环境的改变,尤其是极端天气事件引起的物理环境骤变直接影响底栖动物的生存、生活及栖息,但目前研究台风对大型底栖动物的影响多数考虑沉积物性质和水温变化等参数<sup>[30-31]</sup>,关于水动力变化对底栖动物影响的研究较少。潮滩大型底栖动物一般生活在潮滩沉积物表层 0~15 cm 范围内<sup>[32-33]</sup>,台风引起的强物理扰动会影响生活在沉积物中的底栖动物,可能导致它们迁移或死亡<sup>[25,34]</sup>,如波浪导致沉积物再分配<sup>[35]</sup>,使得大型底栖动物的丰度和生物量减小<sup>[36]</sup>;浪流联合剪切作用力引起沉积物输运和重新分配,导致台风过后光滩上文蛤(*Meretrix meretrix*)的丰度和生物量降低<sup>[37]</sup>;双壳类动物欧洲鸟蛤(*Cerastoderma edule*)在侵蚀事件后浮出水面,被波浪和潮流运输转移<sup>[38]</sup>。总之,台风引起潮滩动力沉积地貌改变<sup>[39-40]</sup>,导致底栖动物丰度和生物量变化,进而影响濒危动物、生物多样性、生态系统功能<sup>[41-42]</sup>等。

长江口崇明东滩位于西北太平洋西岸,属于开敞型潮滩,极易受到风浪的影响。当前潮滩大型底栖动物的研究局限于对底栖动物的慢性影响,如围垦、大型工程等引起的潮滩冲淤变化对大型底栖动物群落结构和分布格局的影响分析<sup>[43-47]</sup>。有关短期台风引起的强水动力事件对大型底栖动物影响的研究较少,亟需进行深入探究。

本研究选取台风“梅花”影响下长江口崇明东滩盐沼-光滩断面进行水动力过程连续观测和大型底栖动物同步采样,研究内容包括:(1)分析台风“梅花”前、中、后盐沼中水动力变化的全过程;(2)剖析台风“梅花”前、后盐沼-光滩断面大型底栖动物的群落结构和优势种变化特征;(3)探究台风事件对大型底栖动物群落的影响机制。本研究可为潮滩湿地生态保护与修复、海岸防灾减灾及应对气候变化措施的制

定提供科学理论支撑。

## 2 研究区域及方法

### 2.1 研究区域

崇明东滩地处长江入海口,是长江河口规模最大、发育最完善的淤涨型潮滩<sup>[48]</sup>,多年平均潮差为 2.4~3.1 m,年平均风速为 3.5~4.5 m/s,潮汐类型为非正规半日潮。该地属亚热带季风气候,降水主要集中在 6~10 月,夏、秋季受台风影响显著<sup>[49]</sup>。崇明东滩表层沉积物以粉砂为主<sup>[50]</sup>,从植被带外缘向水线边缘延伸,沉积物逐渐变粗<sup>[51]</sup>。本研究于崇明东滩湿地鸟类保护区南部区域进行观测、采样,设置 2 个大型底栖动物采样站点,站点 A 位于盐沼中,周围植被以海三棱藨草为主,站点 B 位于光滩,水动力观测点在站点 A 附近(图 1)。

### 2.2 台风“梅花”

2022 年 9 月 8 日 8 时,台风“梅花”在 17.4°N, 132.9°E 的西北太平洋生成,中心最大风速为 18 m/s,随后向西北方向移动,台风中心最大风速提升至 40 m/s,9 月 11 日台风中心最大风速增大为 42 m/s,达到强台风级别(图 1)。9 月 14 日 20 时 30 分在浙江舟山登陆,此时为强台风级别,9 月 15 日凌晨以台风级别在上海奉贤登陆,台风中心最大风速约为 35 m/s,随后中心最大风速逐渐减小,9 月 16 日在山东、辽宁登陆,最终于 9 月 16 日晚在辽宁东北部变为温带气旋后消失(图 1a)。

### 2.3 调查方法

#### 2.3.1 物理参数的数据采集

本研究在崇明东滩盐沼中布设水动力观测架(图 1),观测台风前、中、后(2022 年 9 月 8-19 日)的水动力过程。观测架上利用专用装置固定三维多普勒流速仪(Acoustic Doppler Velocimetry, ADV)和波潮仪(RBR-wave)各 1 台(图 2)。利用 ADV 观测近底床三维湍流速度<sup>[52]</sup>,其探头朝下置于底床上方 25 cm 处,以 64 Hz 的采样频率每隔 5 min 采集 3 840 组数据(表 1),得到的流速数据用来计算底部剪切应力。RBR-wave 探头朝下,距离底床 10 cm,采样频率为 16 Hz,时间间隔为 5 min,记录 1 024 组数据,获取的数据包括水深和波高等波浪参数(表 1)。每次在观测架周围取表层沉积物 3 个,带回实验室后采用盐酸和过氧化氢去除碳酸盐与有机质,滴入分散剂后用超声波分散,再利用贝克曼激光粒度分析仪(LS13320)测量沉积物粒度。研究区风速数据来自于附近风速监测站。

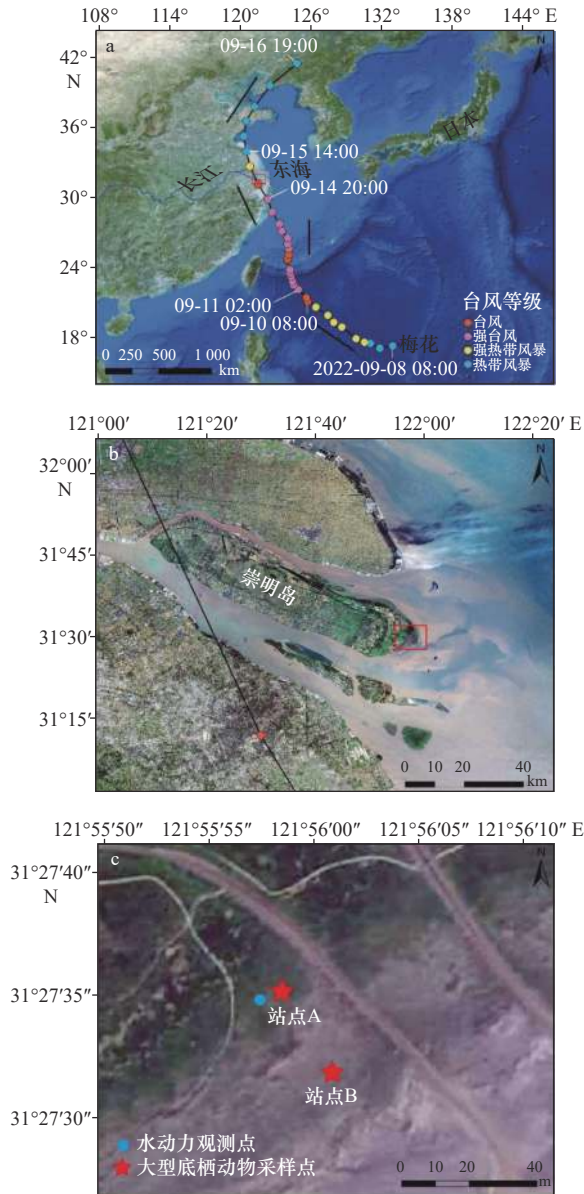


图1 研究区位置和台风路径(a),崇明东滩示意图(红色矩形中)(b),盐沼-光滩大型底栖动物采样站点A、站点B和水动力观测点(c)

Fig. 1 Location of the study area and typhoon path (a), schematic diagram of Chongming Dongtan (within the red rectangle) (b), and the macrobenthic sampling stations A and B, as well as the hydrodynamic observation point in the salt marsh-mudflat (c)

### 2.3.2 大型底栖动物的采集与分析

2022年9月8日、9月10日、9月18日、9月27日的低潮位期间对光滩上和盐沼中的大型底栖动物进行取样。在站点A(距水动力观测架20 m内)附近随机选择3个采样点(图1),4次共采集12个样品。9月10日、9月18日半日潮后的低潮期间采集光滩处的大型底栖动物,在站点B附近选取3个采样点(图1),2次共采集6个样品。依据《海洋调查规范》

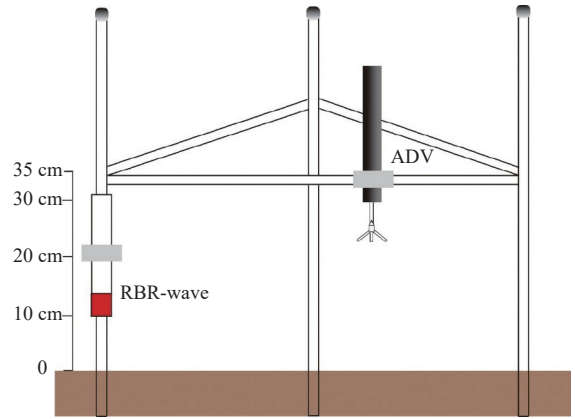


图2 水动力观测仪器布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the arrangement of hydrodynamic observation instruments

ADV、RBR-wave 探头分别位于底床上方25 cm、10 cm处  
ADV and RBR-wave probes are located 25 cm and 10 cm above the bottom bed, respectively

表1 水动力观测仪器的设置参数

Table 1 Setting parameters of hydrodynamic observation instruments

仪器	距底床高度/cm	频率/Hz	测量物理参数	间隔/min	每burst采样数量
ADV	25	64	流速	5	3 840
RBR-wave	10	16	水深、波高	5	1 024

(GB/T 12763.6-2007)进行大型底栖动物采样、室内物种鉴定和数据统计。采样样方的长、宽、高分别设置为0.25 m × 0.25 m × 0.2 m,用孔径为0.5 mm的筛网对所采沉积物进行冲洗和筛分,将底栖动物及残渣混合在一起后放入白色广口瓶,并加入75%的酒精固定保存。样品带回实验室后,所有个体在体视显微镜下分类、鉴定,记录各物种数量,利用感量为0.001 g的电子天平称重得到生物量。

## 2.4 数据分析

### 2.4.1 水动力参数分析

近底流速剖面满足对数分布规律<sup>[53]</sup>,采用平均对数流速剖面法(LP-mean)求得流致剪切应力( $\tau_c$ , N/m<sup>2</sup>)<sup>[54]</sup>:

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

式中, $\bar{U}_z$ 代表平均流速; $u_*$ 指的是摩阻流速;高度距离表示为 $z$ ; $\kappa$ 代表卡门常数(取值为0.4); $z_0$ 是指底床粗糙高度,和尼古拉斯颗粒粗糙度 $k_s$ 有关, $z_0 = k_s/30$ , $k_s = 2.5D_{50}$ , $D_{50}$ 代表沉积物中值粒径。

$$\tau_c = \rho u_*^2, \quad (2)$$

式中, $\rho$ 指的是流体密度。

浪致剪切应力 ( $\tau_w$ , N/m<sup>2</sup>) 的计算采用以下公式<sup>[35]</sup>:

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho_w f_w U_\delta^2, \quad (3)$$

$$U_\delta = \omega A_\delta = \frac{\pi H}{T \sin(kh)}, \quad (4)$$

$$A_\delta = \frac{H}{2 \sin(kh)}, \quad (5)$$

式中,  $U_\delta$  指的是波浪轨迹速度;  $A_\delta$  指的是波浪轨迹位移;  $T$  代表波浪周期 (s);  $H$  代表波浪高度 (m);  $h$  代表水深 (m);  $k = (2\pi/L)$  为波数;  $L = (gT^2/2\pi) \tanh(kh)$  为波长 (m);  $\omega = (2\pi/T)$  为角速度 (s<sup>-1</sup>);  $g = (9.8 \text{ m/s}^2)$  为重力加速度。

波浪摩擦系数  $f_w$  与波浪雷诺数有关, 计算如下<sup>[53]</sup>:

$$f_w = \begin{cases} 2Re_w^{-0.5}, & Re_w \leq 10^5 \text{ (层流)} \\ 0.0521Re_w^{-0.187}, & Re_w > 10^5 \text{ (光滑湍流)} \\ 0.237r^{-0.52}, & \text{(粗糙湍流)} \end{cases}, \quad (6)$$

式中,  $Re_w = \left(\frac{U_\delta A_\delta}{\nu}\right)$  为波浪雷诺数;  $\nu = (1.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$  为海水动黏系数;  $r = \left(\frac{A_\delta}{k_s}\right)$  为相对糙率;  $k_s = 2.5D_{50}$  为尼古拉斯粗糙系数。

依据 Soulsby 浪流模型<sup>[53]</sup> 得到浪流联合剪切应力 ( $\tau_{cw}$ , 单位: N/m<sup>2</sup>):

$$\tau_{cw} = \tau_c \left[ 1 + 1.2 \left( \frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right], \quad (7)$$

式中,  $\tau_c$  指的是流致剪切应力;  $\tau_w$  指的是浪致剪切应力。

### 2.4.2 大型底栖动物数据分析

为削弱个体大小和生物量的显著差异, 利用相对重要性指数 (IRI)<sup>[55]</sup> 确定群落的优势种, 计算公式为

$$IRI = F \cdot (N + W), \quad (8)$$

式中,  $N$  和  $W$  分别为各物种的丰度百分比与生物量百分比;  $F$  为该物种在各采样点出现的频率百分比。当  $IRI > 2000$  时, 物种被认定为优势种。

运用 IBM SPSS Statistics V23.0 软件中的单因素方差分析 (one-way ANOVA), 检验台风前、后盐沼中大型底栖动物物种数、丰度和生物量的分布差异 ( $p < 0.05$  为差异显著)。

## 3 研究结果

### 3.1 水动力特征

观测期间, 研究区风速变化大 (图 3a), 台风前至后风速变化范围为 1.0~29.6 m/s, 各潮周期平均风速在 2.0~21.2 m/s 之间波动 (表 2)。台风前 (T1-T8), 风速变化范围为 1.7~6.0 m/s, 平均风速在 3.1~4.7 m/s 之间变化, 以西南风和西北风为主; 台风期间 (T9-T13), 风速大幅度增加, 在 1.1~29.6 m/s 之间变化, 最大风速出现在 T13 期间, 该潮周期内平均风速高达 21.2 m/s, 风向主要为西南风; 台风后 (T14-T19), 风速显著降低, 风速变化范围为 1.0~13.9 m/s, 平均风速

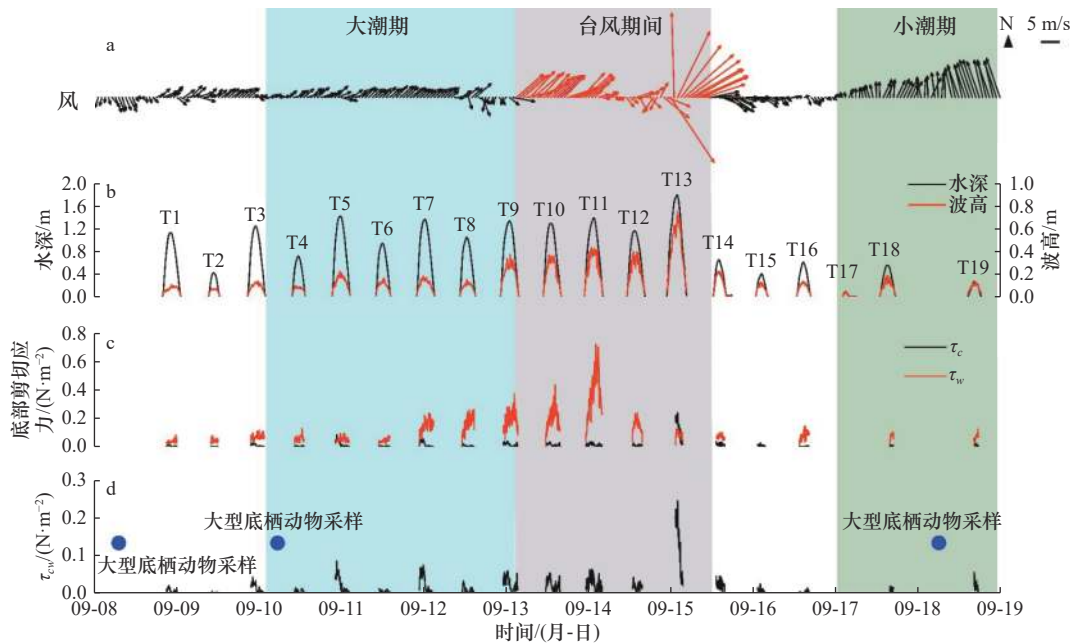


图 3 2022 年台风“梅花”前、中、后崇明东滩盐沼站点 A 水动力变化

Fig. 3 Hydrodynamic variation diagram of Chongming Dongtan Salt Marsh Site A before, during and after Typhoon “Muifa” in 2022

a. 风速和风向; b. 水深和波高; c. 流致剪切应力  $\tau_c$  和浪致剪切应力  $\tau_w$ ; d. 浪流联合剪切应力  $\tau_{cw}$ ; 灰色部分表示台风期间

a. Wind speed and direction; b. water depth and wave height; c. flow-induced shear stress  $\tau_c$  and wave-induced shear stress  $\tau_w$ ; d. combined wave-current shear stress;

the gray part indicating the typhoon period

表 2 2022 年台风“梅花”前、中、后崇明东滩盐沼站点 A 各潮周期风速、最大水深、有效波高、流致剪切应力、浪致剪切应力、浪流联合剪切应力

Table 2 Wind speed, maximum water depth, effective wave height, flow-induced shear stress, wave-induced shear stress, and combined wave-current shear stress for different tidal cycles before, during, and after Typhoon Muifa in 2022 at Site A in the Chongming Dongtan salt marsh

潮		风速/(m·s <sup>-1</sup> )		最大水深/m		有效波高/m		流致剪切应力/(10 <sup>-2</sup> N·m <sup>-2</sup> )		浪致剪切应力/(10 <sup>-2</sup> N·m <sup>-2</sup> )		浪流联合剪切应力/(10 <sup>-2</sup> N·m <sup>-2</sup> )	
		变化范围	平均	变化范围	平均	变化范围	平均	变化范围	平均	变化范围	平均	变化范围	平均
台风前	T1	3.4~5.8	4.7	0.0~1.1	0.7	0.0~0.1	0.1	0~1	0	2~8	4	0~2	0
	T2	3.9~5.7	4.6	0.0~0.4	0.3	0.0~0.1	0.1	0	0	2~8	4	0~1	0
	T3	1.7~5.1	3.1	0.0~1.3	0.8	0.0~0.1	0.1	0~3	1	3~12	7	0~4	1
	T4	3.2~4.5	3.7	0.0~0.7	0.4	0.0~0.1	0.1	0~1	0	2~13	6	0~2	1
	T5	3.4~6.0	4.4	0.0~1.4	0.9	0.0~0.2	0.1	0~8	2	2~9	5	0~9	2
	T6	3.8~4.9	4.4	0.0~1.0	0.6	0.0~0.2	0.1	0~1	0	2~8	4	0~1	1
	T7	4.0~5.3	4.5	0.0~1.4	0.9	0.0~0.2	0.1	0~5	2	3~24	15	0~8	2
	T8	4.0~5.9	4.6	0.0~1.1	0.7	0.0~0.2	0.1	0~2	1	2~26	17	0~3	1
台风期间	<b>T9</b>	<b>2.6~12.3</b>	<b>5.5</b>	<b>0.0~1.3</b>	<b>0.9</b>	<b>0.0~0.4</b>	<b>0.2</b>	<b>0~4</b>	<b>1</b>	<b>5~38</b>	<b>19</b>	<b>0~6</b>	<b>3</b>
	<b>T10</b>	<b>11.0~12.0</b>	<b>11.5</b>	<b>0.0~1.3</b>	<b>0.8</b>	<b>0.0~0.4</b>	<b>0.2</b>	<b>0~3</b>	<b>1</b>	<b>0~44</b>	<b>19</b>	<b>0~5</b>	<b>2</b>
	<b>T11</b>	<b>2.9~12.4</b>	<b>8.6</b>	<b>0.0~1.4</b>	<b>0.9</b>	<b>0.0~0.4</b>	<b>0.3</b>	<b>0~3</b>	<b>1</b>	<b>4~73</b>	<b>37</b>	<b>0~6</b>	<b>3</b>
	<b>T12</b>	<b>1.1~6.1</b>	<b>4.2</b>	<b>0.0~1.2</b>	<b>0.7</b>	<b>0.0~0.4</b>	<b>0.2</b>	<b>0~3</b>	<b>1</b>	<b>3~24</b>	<b>15</b>	<b>0~4</b>	<b>2</b>
	<b>T13</b>	<b>8.6~29.6</b>	<b>21.2</b>	<b>0.0~1.8</b>	<b>1.1</b>	<b>0.0~0.8</b>	<b>0.4</b>	<b>2~24</b>	<b>12</b>	<b>1~12</b>	<b>8</b>	<b>0~25</b>	<b>13</b>
台风后	T14	6.9~9.6	8.4	0.0~0.7	0.3	0.0~0.2	0.1	0~4	2	4~10	7	0~5	3
	T15	3.3~6.1	4.8	0.0~0.4	0.2	0.0~0.1	0.1	0~3	1	—	—	0~3	1
	T16	1.0~3.1	2.0	0.0~0.6	0.4	0.0~0.1	0.1	0~1	0	1~15	8	0~1	0
	T17	1.5~3.2	2.2	0.0~0.1	0.1	0.0	0.0	—	—	—	—	—	—
	T18	5.4~6.8	6.0	0.0~0.6	0.3	0.0~0.2	0.1	0~1	1	1~10	7	0~2	1
	T19	12~13.9	13.1	0.0~0.3	0.2	0.0~0.1	0.1	0~6	1	2~12	6	0~6	2

注: —表示数据缺失, 加粗字体表示台风期间。

在 2.0~13.1 m/s 之间波动, 多为西南风和偏南风(图 3a, 表 2)。

观测结果表明, 台风前, 盐沼中的水深在 0.0~1.4 m 之间变化; 台风期间, 水深最大值可达 1.8 m, 各潮周期平均水深高达 0.7~1.1 m; 台风后, 水深减小, 变化范围为 0.0~0.7 m(图 3b, 表 2)。台风“梅花”过境期间属于中潮期, 但水深超过了大潮期(T4-T8)(图 3b, 表 2), 说明盐沼中发生的异常增水由台风过境导致。

台风前盐沼中的有效波高始终较小, 变化范围为 0~0.2 m, 各潮周期平均波高均为 0.1 m; 台风期间有效波高在 0~0.8 m 之间波动, 各潮周期的平均波高为 0.2~0.4 m; 台风后, 有效波高恢复到台风前正常天气下的数值, 在 0~0.2 m 范围内波动, 除 T17 外, 各潮

周期有效波高的平均值均为 0.1 m(图 3b, 表 2)。台风影响下的有效波高是台风前、后正常天气下的 2~4 倍。

台风期间, 浪致剪切应力( $\tau_w$ )远大于流致剪切应力( $\tau_c$ ), 二者最大值分别为 0.73 N/m<sup>2</sup> 和 0.24 N/m<sup>2</sup>, 同时  $\tau_w$  的增幅大于  $\tau_c$ (图 3c, 表 2), 说明台风期间浪所起的作用更强。由浪流联合模型计算出的浪流联合剪切应力  $\tau_{cw}$  变化范围为 0~0.25 N/m<sup>2</sup>, 台风期间各潮周期  $\tau_{cw}$  的平均值为 0.02~0.13 N/m<sup>2</sup>, T13 达到最大, 可达正常天气下的 10 倍(图 3d, 表 2)。

### 3.2 大型底栖动物群落组成及其分布特征

台风“梅花”前第一次采样(2022 年 9 月 8 日)盐沼中大型底栖动物的平均物种数为 5.7 种, 丰度为

709.3 ind./m<sup>2</sup>, 生物量为 10.8 g/m<sup>2</sup>; 台风“梅花”前第二次采样(9月10日)平均物种数、丰度和生物量分别为 5.0 种、960 ind./m<sup>2</sup>、19.0 g/m<sup>2</sup>, 台风“梅花”过境前, 两次采样得到的大型底栖动物群落差异不显著; 台风“梅花”过后 1 周内, 盐沼中大型底栖动物的平均物种数、丰度、生物量显著增加, 分别高达 9.3 种、3 685.3 ind./m<sup>2</sup>、57.6 g/m<sup>2</sup>, 分别是台风前(9月10日)的 1.9 倍、3.8 倍、3.0 倍, 与台风前形成显著差异( $p < 0.05$ ); 台风“梅花”过后两周, 盐沼中底栖动物的平均物种数、丰度和生物量分别为 5.3 种、885.3 ind./m<sup>2</sup> 和 19.1 g/m<sup>2</sup>(图 4)。台风“梅花”前光滩中大型底栖动物的丰度和生物量分别为 220 ind./m<sup>2</sup>、105.9 g/m<sup>2</sup>, 台风“梅花”过后为 126 ind./m<sup>2</sup>、174.8 g/m<sup>2</sup>(表 3)。台风“梅花”过后, 光滩中大型底栖动物的丰度减小近一半, 生

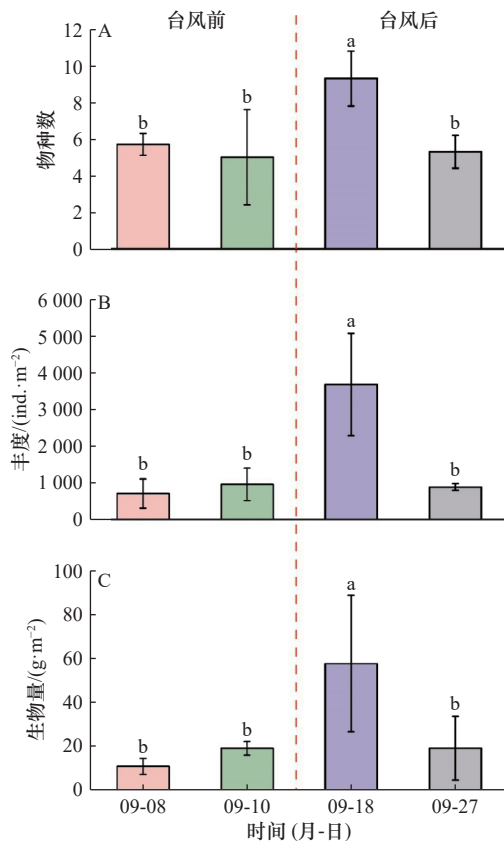


图 4 2022 年台风“梅花”前、后崇明东滩盐沼站点 A 大型底栖动物的物种数(A)、丰度(B)、生物量(C)

Fig. 4 Species number (A), abundance (B) and biomass (C) of macrobenthos at Chongming Dongtan Salt Marsh Site A before and after Typhoon “Muifa” in 2022

柱状图顶部的字母表示 ANOVA 检验结果, 不同的字母表示两次采样结果差异显著( $p < 0.05$ )

The letters at the top of the bar chart represent ANOVA test results, and different letters indicate significant differences between the two sampling results ( $p < 0.05$ )

物量为台风前的 1.7 倍。台风“梅花”前、后, 盐沼中大型底栖动物的丰度始终远高于光滩中, 由于缢蛏个体大, 光滩中底栖动物生物量始终可达盐沼中的 3 倍以上。

台风“梅花”前、后, 盐沼中共采集到 15 种大型底栖动物, 包括环节动物、节肢动物、软体动物 3 大门类。台风“梅花”前(9月10日), 盐沼中共有 9 种底栖动物, 包括 5 种软体动物、2 种节肢动物、2 种环节动物。台风“梅花”过后 1 周, 盐沼中共采集到 12 种底栖动物, 包括 6 种软体动物、1 种节肢动物、5 种环节动物。相对于台风前, 台风“梅花”后盐沼中的物种数增加, 软体动物增加 1 种, 环节动物增加 3 种, 节肢动物减少 1 种(表 4)。台风“梅花”过后 2 周, 盐沼中采集了 6 种底栖动物, 其中有 5 种软体动物和 1 种节肢动物(表 4)。台风“梅花”前、后, 光滩中共采集到 10 种大型底栖动物。台风“梅花”前由 3 种软体动物、2 种节肢动物、2 种环节动物共 7 种底栖动物组成, 台风“梅花”后由 2 种软体动物、2 种节肢动物、4 种环节动物共 8 种底栖动物组成。与台风前对比, 台风“梅花”后光滩中的物种总数增加 1 种, 软体动物减少 1 种, 节肢动物物种数未改变, 环节动物增加 2 种(表 3)。

台风“梅花”前、后盐沼中大型底栖动物的优势种类和优势地位都发生改变。在盐沼中, 台风“梅花”前一直是优势种(IRI > 2 000)的大型底栖动物物种共有 3 种, 第一、第二、第三优势种分别为拟沼螺(*Assiminea* sp.)、谭氏泥蟹(*Ilyoplax deschampsii*)、河蚬(*Corbicula fluminea*)。台风“梅花”后优势种增加了 1 种, 为堇拟沼螺(*Assiminea violacea*)(表 4)。其他物种的丰度与生物量占比始终小于 10%, 最后计算出的相对重要性指数(IRI)数值低。盐沼中的优势种拟沼螺、谭氏泥蟹、河蚬在光滩中也被发现。台风“梅花”前, 光滩中河蚬的丰度和生物量分别为 107 ind./m<sup>2</sup> 和 37.477 g/m<sup>2</sup>, 台风“梅花”后, 其丰度和生物量锐减至 32 ind./m<sup>2</sup> 和 11.263 g/m<sup>2</sup>。台风“梅花”前, 拟沼螺和谭氏泥蟹的丰度分别为 11 ind./m<sup>2</sup> 和 27 ind./m<sup>2</sup>, 台风“梅花”后未采集到这两个物种(表 3)。

## 4 讨论

研究结果表明, 台风“梅花”导致潮滩水动力条件和生态系统发生剧烈变化<sup>[97]</sup>。台风“梅花”期间, 其携带的能量导致盐沼的水深、波高、浪流联合剪切应力增大至正常天气下的 1.2~10 倍(表 2)。因为盐沼具有促淤消浪功能, 所以台风“梅花”前、后光滩上的水

表3 2022年台风“梅花”前、后崇明东滩光滩站点B大型底栖动物的丰度(ind./m<sup>2</sup>)、生物量(g/m<sup>2</sup>)

Table 3 Abundance (ind./m<sup>2</sup>) and biomass (g/m<sup>2</sup>) of macrobenthos at Chongming Dongtan mudflat Station B before and after Typhoon “Muifa” in 2022.

门类	物种	台风前		台风后	
		2022年9月10日		2022年9月18日	
		丰度	生物量	丰度	生物量
软体动物	河蚬	107	37.477	32	11.263
	拟沼螺	11	0.007	/	/
	缢蛭	16	67.840	27	162.330
节肢动物	谭氏泥蟹	27	0.277	/	/
	安氏白虾	/	/	16	0.673
	日本旋卷螺赢蛭	11	0.060	13	0.047
环节动物	背蚓虫	43	0.133	11	0.007
	小头虫	/	/	11	0.007
	足刺拟单指虫	/	/	5	0.233
	疣吻沙蚕	5	0.087	11	0.267
	总数	220	105.881	126	174.827

注: /表示未采集到该物种。

动力强度始终大于盐沼中。台风强度、路径及登陆位置的不同对潮滩水动力和生态系统造成的影响也会存在较大差异<sup>[56-57]</sup>。本研究中秋风“梅花”登陆时距离研究区37 km,造成大型底栖动物群落结构发生改变(表3,表4)。已有研究表明,即使台风中心距离潮滩远至1400 km时,高能事件仍能快速改变水动力条件,致使大型底栖动物受到灾害性损失,在潮滩前沿可观察到大型底栖动物残骸<sup>[37]</sup>。随着台风路径转变和强度削弱,水深和波高随之减小,滩面逐渐恢复,大型底栖动物又重新寻求栖息地<sup>[25]</sup>,潮滩生态系统趋于稳定。

台风“梅花”前、后盐沼中大型底栖动物的丰度高于光滩上(图4,表3),台风“梅花”导致盐沼中大型底栖动物的物种数、丰度和生物量增加(图4)。崇明东滩具有良好的自然资源条件和极其丰富的营养物质,为大型底栖动物提供了适宜的生存环境<sup>[58]</sup>。大型底栖动物的分布特征与潮滩的物理、化学性质和动力地貌密切相关<sup>[31,59]</sup>,因此潮滩上不同部位的底栖动物分布特征不同。盐沼中植株的根茎为摄食植物根系的大型底栖动物提供食物来源;盐沼可提高沉积物中的氧化活性水平,为环节动物提供集聚空间;盐沼中

的植物具有消浪缓流作用,为底栖动物提供稳定生境;盐沼还可以提供躲避捕食者的庇护所,因此在一般情况下光滩中底栖动物的丰度小于盐沼中<sup>[60]</sup>。台风等极端天气事件通过水动力条件变化扰动盐沼和光滩环境,强风增加了波高和光滩区域的水动力强度<sup>[34]</sup>。但由于植被具有消浪缓流作用,潮滩上部盐沼区的水动力强度在台风期间增幅小<sup>[39]</sup>。相对于光滩,盐沼具有为底栖动物提供食物、稳定生境的作用。在本研究中,台风“梅花”前(9月10日)盐沼中大型底栖动物的平均物种数、丰度和生物量分别为5.0种、960 ind./m<sup>2</sup>、19.0 g/m<sup>2</sup>,台风后(9月18日)大型底栖动物的平均物种数、丰度、生物量分别为9.3种、3685.3 ind./m<sup>2</sup>、57.6 g/m<sup>2</sup>(图4),均增加至台风前的1.5倍以上。台风“梅花”前光滩中大型底栖动物的丰度分别为220 ind./m<sup>2</sup>,台风后为126 ind./m<sup>2</sup>(表3)。台风期间潮水将远处光滩上的沉积物侵蚀并输运至盐沼中,同时携带大型底栖动物中的小型个体至盐沼中<sup>[61-63]</sup>,引起盐沼中底栖动物的物种数、丰度和生物量增加(图4)。廖一波等<sup>[64]</sup>分析了2006年夏季发生的8号超强台风“桑美”对浙江省苍南县大渔湾海域大型底栖动物的影响,认为台风后底栖动物的丰度和生物量均明显高于正常天气,与本研究盐沼中底栖动物在台风前、后的变化规律一致(图4)。

本研究结果表明,台风“梅花”前、后崇明东滩盐沼中软体动物的丰度最高,其次是节肢动物、环节动物(表4)。在台风“梅花”的影响下,不同门类表现出不同的响应方式(表4)。本研究中个体小的软体动物(缢拟沼螺(*Assiminea latericea*)、光滑狭口螺(*Stenothyra glabra*)、河蚬、董拟沼螺、拟沼螺、微小螺(*Elachisina* sp.))容易被潮水从光滩携带到盐沼中,导致盐沼中软体动物的丰度和生物量增加;节肢动物(谭氏泥蟹)行动敏捷,向水动力相对较小的盐沼区快速移动,导致节肢动物的丰度和生物量也增加;盐沼中环节动物在台风前、后物种数变化大,但出现频率低、丰度小且生物量小,对水动力的响应不敏感(表4)。

相比于台风“梅花”前,台风“梅花”后盐沼中大型底栖动物优势种类增加,优势地位发生变化,台风后盐沼中增加的河蚬、拟沼螺和谭氏泥蟹来自于光滩。台风“梅花”前,盐沼中两次采样得到的大型底栖动物的优势种相同(表4)。台风后,盐沼中大型底栖动物的优势种增加且优势地位改变。按照优势地位顺序,台风前优势种为拟沼螺、谭氏泥蟹、河蚬,台风后1周内优势种为谭氏泥蟹、拟沼螺、董拟沼螺、河蚬(表4)。优势种变化的原因主要为大型底栖动物

表 4 2022 年台风“梅花”前、后崇明东滩盐沼站点 A 大型底栖动物的丰度 (单位: ind./m<sup>2</sup>)、生物量 (单位: g/m<sup>2</sup>)、相对重要性指数 IRI

Table 4 Abundance (unit: ind./m<sup>2</sup>), biomass (unit: g/m<sup>2</sup>) and relative importance index (IRI) of macrobenthos at Chongming Dongtan Salt Marsh Site A before and after Typhoon “Muifa” in 2022

门类	物种	台风前						台风后					
		2022年9月8日			2022年9月10日			2022年9月18日			2022年9月27日		
		丰度	生物量	IRI	丰度	生物量	IRI	丰度	生物量	IRI	丰度	生物量	IRI
软体动物	缙拟沼螺	64	0.181	1 067	5	0.005	58	80	0.027	222	155	0.245	1876
	光滑狭口螺	27	0.123	489	27	0.186	376	75	0.187	235	21	0.021	252
	河蚬	59	4.085	<b>4 604</b>	43	7.915	<b>4 602</b>	107	12.315	<b>2 427</b>	107	9.499	<b>6 191</b>
	董拟沼螺	85	0.656	1 810	11	0.005	114	960	7.680	<b>3 938</b>	149	0.811	<b>2 112</b>
	拟沼螺	373	1.819	<b>6 945</b>	672	4.741	<b>9 491</b>	1 696	8.133	<b>6 014</b>	336	2.811	<b>5 271</b>
	微小螺	/	/	/	/	/	/	133	0.005	363	/	/	/
节肢动物	谭氏泥蟹	91	3.883	<b>4 868</b>	181	5.851	<b>4 963</b>	544	29.205	<b>6 546</b>	117	5.664	<b>4 298</b>
	安氏白虾	/	/	/	5	0.096	106	/	/	/	/	/	/
环节动物	多眼虫	11	0.069	214	11	0.064	145	/	/	/	/	/	/
	白毛钩虫	/	/	/	5	0.171	145	/	/	/	/	/	/
	背蚓虫	/	/	/	/	/	/	16	0.011	45	/	/	/
	多齿围沙蚕	/	/	/	/	/	/	5	0.005	15	/	/	/
	尖叶长手沙蚕	/	/	/	/	/	/	5	0.005	15	/	/	/
	软背鳞虫	/	/	/	/	/	/	59	0.021	163	/	/	/
	小头虫	/	/	/	/	/	/	5	0.005	15	/	/	/

注: /表示未采集到该物种; IRI > 2 000时为优势种, IRI列字体加粗的物种为优势种。

的个体大小和生活方式会影响其栖息地选择<sup>[62]</sup>。本研究中采集到的拟沼螺、董拟沼螺、河蚬生物量小, 通常生活在表层沉积物中, 受潮水携带影响更大。台风“梅花”后 1 周内盐沼中这 3 种物种的丰度和生物量增加(表 4), 而光滩中河蚬的丰度和生物量减小至台风前的一半以上, 拟沼螺消失(表 3), 说明台风“梅花”后盐沼中增加的河蚬和拟沼螺是受潮水冲刷作用从光滩到盐沼中。此外, 台风后盐沼中优势种谭氏泥蟹丰度从 181 ind./m<sup>2</sup> 增大至 544 ind./m<sup>2</sup>, 同时生物量激增, 其生物量占比达 50% 以上(表 4)。但在台风“梅花”前发现光滩中谭氏泥蟹的丰度为 27 ind./m<sup>2</sup>, 台风后却没有采集到谭氏泥蟹(表 3), 推测台风“梅花”过境后盐沼中增加的谭氏泥蟹来自于光滩, 主要原因为: 第一, 蟹类一般主要以浮游植物和有机碎屑为食, 水动力较小的盐沼中有较多促进浮游植物生长的营养物质, 如沉积物中的营养盐和有机物, 更多的食物来源促进谭氏泥蟹丰度和生物量增加; 第二, 台风影响下, 光滩水动力增幅远大于盐沼, 盐沼淹水时间较

短, 同时沉积物相对稳定, 提供了繁殖、护卵以及躲避捕食者的环境, 适合穴居型蟹类生存栖息<sup>[65]</sup>; 第三, 台风导致海水混合, 不利于谭氏泥蟹生存, 幼虫为增大存活几率逃离到盐沼中避难。

不同种类的大型底栖动物对台风的响应有所不同。摄食相同的物种由于移动能力差异对台风的应对策略会有所不同。同为食草动物, 叉牙鲷(*Sarpa salpa*)移动能力强, 台风扰动后逃离到更深的水域或移动到其他区域, 存活率高, 而青灰拟球海胆(*Paracentrotus lividus*)移动性差, 台风导致其丰度急剧下降<sup>[66]</sup>。不是所有的物种在遭受台风事件扰动后都会迁移或死亡, 有些物种甚至在极端事件中生存, 如多毛纲物种小头虫(*Capitella* spp.)和丝异须虫(*Heteromastus filiformis*)在风暴后丰度增加<sup>[25]</sup>。一些底栖动物利用水流和泥沙运动来获取食物, 还有的物种则表现出超强的掘穴能力, 不容易受到表层沉积物改变的干扰<sup>[36, 38]</sup>。

台风“梅花”过后 2 周, 光滩中大型底栖动物的总生物量大幅度增加, 这是由于缙螺单个个体生物量较

大,对总生物量产生干扰,所以本研究根据丰度判断大型底栖动物是否恢复(到台风前的水平)。研究结果发现,台风“梅花”过后2周大型底栖动物的丰度与台风“梅花”前接近,即台风“梅花”过后2周,崇明东滩盐沼中大型底栖动物的丰度恢复。风暴“梅花”过后,崇明东滩的水动力迅速恢复到正常天气下类似潮况状态,因此适应能力强的大型底栖动物在短期内恢复。与本研究一致,当大型底栖动物物种适应了高能环境时,其在极端天气事件后能够快速恢复<sup>[67]</sup>。例如,在巴西南部潮滩中,冷锋通过期间底栖动物的丰度下降,但仅仅在1天内就恢复到锋前状态<sup>[68]</sup>。潮滩上水动力变化、泥沙运输等物理过程影响潮滩地貌变化,从而影响底栖生物的生存环境。生物通过改变自身行为以适应潮滩上的潮汐淹没、动力等环境条件,调节生物-物理反馈过程,维持生态系统稳定<sup>[69]</sup>。

## 5 结论

本文探究了台风“梅花”对崇明东滩水动力过程

及大型底栖动物群落结构组成和分布特征的影响。主要结论:(1)台风“梅花”期间盐沼中的有效波高是正常天气下的2~4倍,浪流联合剪切应力是正常天气下的10倍;(2)台风“梅花”过后1周内,盐沼中大型底栖动物的物种数、丰度、生物量和优势种类均增加,优势地位也发生改变,而盐沼前缘光滩上的大型底栖动物丰度减少,其原因是盐沼前缘光滩上的底栖动物(谭氏泥蟹、拟沼螺、河蚬)在台风“梅花”导致的强水动力胁迫下,迅速迁移至水动力相对弱的盐沼中;(3)台风“梅花”过后2周,盐沼中的大型底栖动物恢复。全球变暖背景下,台风强度和频率逐渐增加,对潮滩大型底栖动物的影响可能会增加,厘清台风对大型底栖动物群落的影响过程与机制,能够更好地服务于海岸带生态系统的管理和规划。

**致谢:** 感谢孙剑雄、马浩在作图时提供的帮助,感谢赵颖、于海升、陈仙金、朱植阳、邓珂、卢奎、李徜徉等在野外观测期间提供的帮助。

## 参考文献:

- [1] Mei Wei, Xie Shangping, Primeau F, et al. Northwestern Pacific typhoon intensity controlled by changes in ocean temperatures[J]. *Science Advances*, 2015, 1(4): e1500014.
- [2] Chen Xiaolong, Zhou Tianjun, Wu Peili, et al. Emergent constraints on future projections of the western North Pacific Subtropical High[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 2802.
- [3] Wang Haili, Wang Chunzai. What caused the increase of tropical cyclones in the western North Pacific during the period of 2011–2020? [J]. *Climate Dynamics*, 2023, 60(1/2): 165–177.
- [4] Yin Jie, Yin Zhane, Xu Shiyuan. Composite risk assessment of typhoon-induced disaster for China's coastal area[J]. *Natural Hazards*, 2013, 69(3): 1423–1434.
- [5] Hawkes D D. Erosion of tidal flats near Georgetown, British Guiana[J]. *Nature*, 1962, 196(4850): 128–130.
- [6] Xu Chao, Liu Weibo. Integrating a three-Level GIS framework and a graph model to Track, represent, and analyze the dynamic activities of tidal flats[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(2): 61.
- [7] Egres A G, Martins C C, de Oliveira V M, et al. Effects of an experimental *in situ* diesel oil spill on the benthic community of unvegetated tidal flats in a subtropical estuary (Paranaguá Bay, Brazil)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(12): 2681–2691.
- [8] Gao Shu, Du Yongfen, Xie Wenjing, et al. Environment-ecosystem dynamic processes of *Spartina alterniflora* salt-marshes along the eastern China coastlines[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(11): 2567–2586.
- [9] Jung R, Adolph W, Ehlers M, et al. A multi-sensor approach for detecting the different land covers of tidal flats in the German Wadden Sea—A case study at Norderney[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 170: 188–202.
- [10] Hallberg R O. Metal distribution along a profile of an inter-tidal area[J]. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 1974, 2(2): 153–170.
- [11] Pilotto F, Harvey G L, Wharton G, et al. Simple large wood structures promote hydromorphological heterogeneity and benthic macroinvertebrate diversity in low-gradient rivers[J]. *Aquatic Sciences*, 2016, 78(4): 755–766.
- [12] Nehls G, Tiedemann R. What determines the densities of feeding birds on tidal flats? A case study on dunlin, *Calidris alpina*, in the Wadden Sea[J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1993, 31(4): 375–384.
- [13] Zhou Zhichao, Meng Han, Liu Yang, et al. Stratified bacterial and archaeal community in mangrove and intertidal wetland mudflats revealed by high throughput 16S rRNA gene sequencing[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8: 2148.
- [14] Pichler H A, Spach H L, Gray C A, et al. Environmental influences on resident and transient fishes across shallow estuarine beaches and tidal flats in a Brazilian World Heritage area[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 164: 482–492.
- [15] Beukema J J. Biomass and species richness of the macro-benthic animals living on the tidal flats of the Dutch Wadden Sea[J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1976, 10(2): 236–261.
- [16] Li Haifu, Li Lifeng, Su Fangli, et al. Ecological stability evaluation of tidal flat in coastal estuary: a case study of Liaohe estuary wetland, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108032.

- [17] Zhang Rong, Chen Yongping, Chen Peixiong, et al. Impacts of tidal flat reclamation on suspended sediment dynamics in the tidal-dominated Wenzhou Coast, China[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1097177.
- [18] Song Weiwei, Li Yi. Tidal flat microbial communities between the Huaihe estuary and Yangtze River estuary[J]. *Environmental Research*, 2023, 238: 117141.
- [19] Covich A P, Palmer M A, Crowl T A. The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems: zoobenthic species influence energy flows and nutrient cycling[J]. *BioScience*, 1999, 49(2): 119–127.
- [20] Devine J A, Vanni M J. Spatial and seasonal variation in nutrient excretion by benthic invertebrates in a eutrophic reservoir[J]. *Freshwater Biology*, 2002, 47(6): 1107–1121.
- [21] Ostendorp W, Hofmann H, Teufel L, et al. Effects of a retaining wall and an artificial embankment on nearshore littoral habitats and biota in a large Alpine lake[J]. *Hydrobiologia*, 2020, 847(2): 365–389.
- [22] Cozzoli F, Gjoni V, Del Pasqua M, et al. A process based model of cohesive sediment resuspension under bioturbators' influence[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 670: 18–30.
- [23] Patrick C J, Yeager L, Armitage A R, et al. A system level analysis of coastal ecosystem responses to hurricane impacts[J]. *Estuaries and Coasts*, 2020, 43(5): 943–959.
- [24] Fan Daidu, Guo Yanxia, Wang Ping, et al. Cross-shore variations in morphodynamic processes of an open-coast mudflat in the Changjiang Delta, China: with an emphasis on storm impacts[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(4): 517–538.
- [25] Corte G N, Schlacher T A, Checon H H, et al. Storm effects on intertidal invertebrates: increased beta diversity of few individuals and species[J]. *PeerJ*, 2017, 5: e3360.
- [26] Shi Benwei, Pratolongo P D, Du Yongfen, et al. Influence of macrobenthos (*Meretrix meretrix* Linnaeus) on erosion - accretion processes in intertidal flats: a case study from a cultivation zone[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125(1): e2019JG005345.
- [27] Escapa M, Minkoff D R, Perillo G M E, et al. Direct and indirect effects of burrowing crab *Chasmagnathus granulatus* activities on erosion of southwest Atlantic *Sarcocornia* - dominated marshes[J]. *Limnology and Oceanography*, 2007, 52(6): 2340–2349.
- [28] Farron S J, Hughes Z J, FitzGerald D M, et al. The impacts of bioturbation by common marsh crabs on sediment erodibility: a laboratory flume investigation[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 238: 106710.
- [29] 陈雪, 贺强, 辛沛, 等. 河口海岸滩涂蟹类生物扰动行为过程研究进展 [J]. 海洋科学, 2021, 45(10): 113–122.  
Chen Xue, He Qiang, Xin Pei, et al. Research progress on the biological disturbed behavior process of crabs in the tidal flats of estuaries and coasts[J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(10): 113–122.
- [30] Mistri M, Pitacco V, Granata T, et al. When the levee breaks: effects of flood on offshore water contamination and benthic community in the Mediterranean (Ionian Sea)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 140: 588–596.
- [31] Kon K, Goto A, Tanita I, et al. Multiple effects of a typhoon strike and wastewater effluent on benthic macrofaunal communities in a mangrove estuary[J]. *Hydrobiologia*, 2022, 849(11): 2569–2579.
- [32] 杨明生. 武汉市南湖大型底栖动物群落结构与生态功能的研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.  
Yang Mingsheng. Studies on the community structure and ecological function of macrozoobenthos in Lake Nanhu, Wuhan City, China[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.
- [33] 林良羽. 崇明东滩大型底栖动物功能群与沉积物理化因子关系研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2015.  
Lin Liangyu. Study on the relationships between the benthic macroinvertebrate functional groups and sediment physicochemical factors in Chongming Dongtan[D]. Shanghai: East China Normal University, 2015.
- [34] Walsh W J. Stability of a coral reef fish community following a catastrophic storm[J]. *Coral Reefs*, 1983, 2(1): 49–63.
- [35] van Rijn L C. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas[R]. Amsterdam, The Netherlands: Aqua Publications, 1993.
- [36] Hinchey E K, Schaffner L C, Hoar C C, et al. Responses of estuarine benthic invertebrates to sediment burial: the importance of mobility and adaptation[J]. *Hydrobiologia*, 2006, 556(1): 85–98.
- [37] Shi Benwei, Yang Shilun, Temmerman S, et al. Effect of typhoon - induced intertidal - flat erosion on dominant macrobenthic species (*Meretrix meretrix*)[J]. *Limnology and Oceanography*, 2021, 66(12): 4197–4209.
- [38] Wiesebron L, Teeuw L, van Dalen J, et al. Contrasting strategies to cope with storm - induced erosion events: a flume study comparing a native vs. introduced bivalve[J]. *Limnology and Oceanography*, 2022, 67(11): 2572–2585.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 田家怡, 谢文军, 孙景宽. 黄河三角洲贝壳堤岛脆弱生态系统破坏现状及保护对策 [J]. 环境科学与管理, 2009, 34(8): 138–143.  
Tian Jiayi, Xie Wenjun, Sun Jingkuan. Current status of vulnerable ecosystem of shell islands and protection measures in Yellow River

- Delta[J]. *Environmental Science and Management*, 2009, 34(8): 138–143.
- [42] Price B A, Harvey E S, Mangubhai S, et al. Responses of benthic habitat and fish to severe tropical cyclone Winston in Fiji[J]. *Coral Reefs*, 2021, 40(3): 807–819.
- [43] Chessman B C. Prediction of riverine fish assemblages through the concept of environmental filters[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2006, 57(6): 601–609.
- [44] Voelz N J, McArthur J V. An exploration of factors influencing lotic insect species richness[J]. *Biodiversity & Conservation*, 2000, 9(11): 1543–1570.
- [45] Lu L, Goh B P L, Chou L M. Effects of coastal reclamation on riverine macrobenthic infauna (Sungei Punggol) in Singapore[J]. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery*, 2002, 9(2): 127–135.
- [46] Suo Aning, Cao Ke, Zhao Jianhua, et al. Study on impacts of sea reclamation on fish community in adjacent waters: a case in Caofeidian, North China[J]. *Journal of Coastal Research*, 2015, 73(S1): 183–187.
- [47] 袁兴中, 陆健健. 围垦对长江口南岸底栖动物群落结构及多样性的影响[J]. *生态学报*, 2001, 21(10): 1642–1647.  
Yuan Xingzhong, Lu Jianjian. Influence of diking on the benthic macro-invertebrate community structure and diversity in the south bank of the Changjiang Estuary[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(10): 1642–1647.
- [48] 杨世伦, 姚炎明, 贺松林. 长江口冲积岛岸滩剖面形态和冲淤规律[J]. *海洋与湖沼*, 1999, 30(6): 764–769.  
Yang Shilun, Yao Yanming, He Songlin. Coastal profile shape and erosion-accretion changes of the sediment islands in the Changjiang River Estuary[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1999, 30(6): 764–769.
- [49] 张衡, 何文珊, 童春富, 等. 长江口低盐淡水区潮间带鱼类群落结构季节及半月相变化[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1110–1116.  
Zhang Heng, He Wenshan, Tong Chunfu, et al. Seasonal and semi-lunar changes in fish community structure in low salinity intertidal area of Yangtze estuary[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5): 1110–1116.
- [50] 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.
- [51] 王琰, 童春富, 汤琳, 等. 崇明东滩盐沼湿地大型底栖动物功能群分布特征及其影响因子[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(3): 880–892.  
Wang Yan, Tong Chunfu, Tang Lin, et al. Distribution characteristics and influencing factors of the benthic macroinvertebrate functional groups in the salt marshes of Chongming Dongtan[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(3): 880–892.
- [52] Poindexter C M, Rusello P J, Variano E A. Acoustic Doppler velocimeter-induced acoustic streaming and its implications for measurement[J]. *Experiments in Fluids*, 2011, 50(5): 1429–1442.
- [53] Soulsby R L, Clarke S. *Bed shear-stresses under combined waves and currents on smooth and rough beds*[R]. Oxford, UK: HR Wallingford, 2005.
- [54] Salehi M, Strom K. Measurement of critical shear stress for mud mixtures in the San Jacinto estuary under different wave and current combinations[J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 47: 78–92.
- [55] Pinkas L, Oliphant M S, Iverson I L K. *Fish bulletin 152. Food habits of albacore, Bluefin tuna, and bonito in California waters*[J]. UC San Diego: Library-Scripps Collection, 1970.
- [56] Harley M D, Turner I L, Kinsela M A, et al. Extreme coastal erosion enhanced by anomalous extratropical storm wave direction[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 6033.
- [57] Yin Chengtuan, Zhang Weisheng, Xiong Mengjie, et al. Storm surge responses to the representative tracks and storm timing in the Yangtze Estuary, China[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 233: 109020.
- [58] Liu Zhiqian, Fan Bin, Huang Youhui, et al. Assessing the ecological health of the Chongming Dongtan Nature Reserve, China, using different benthic biotic indices[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 146: 76–84.
- [59] Boulenger A. *Effects of a newly created mussel bed and hydrodynamic conditions on the biodiversity and functioning of macrobenthic communities*[R]. Ghent: Ghent University, 2021.
- [60] 袁兴中, 陆健健, 刘红. 河口盐沼植物对大型底栖动物群落的影响[J]. *生态学报*, 2002, 22(3): 326–333.  
Yuan Xingzhong, Lu Jianjian, Liu Hong. Influence of characteristics of scirpus mariqueter community on the benthic macro-invertebrate in a salt marsh of the Changjiang estuary[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(3): 326–333.
- [61] Wildsmith M D, Potter I C, Valesini F J, et al. Do the assemblages of benthic macroinvertebrates in nearshore waters of Western Australia vary among habitat types, zones and seasons?[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2005, 85(2): 217–232.
- [62] Zhang Longhui, Chen Dezhi, Gao Shu, et al. Distribution of benthic macrofaunal communities in intertidal flat under hydrodynamic influence: a case study of Jiangsu coast, East China[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2023, 41(3): 1024–1038.
- [63] 张衡, 张瑛瑛, 刁山洲, 等. 长江口盐沼湿地不同亚生境的大型底栖动物群落组成和多样性差异[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(10): 3102–3109.  
Zhang Heng, Zhang Yingying, Diao Shanzhou, et al. Difference of macrobenthos community composition and diversity in different sub-habitats in salt marsh wetland of the Yangtze River Estuary[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(10): 3102–3109.
- [64] 廖一波, 曾江宁, 陆延, 等. 台风扰动后大渔湾大型底栖动物的生态特征[J]. *海洋学研究*, 2009, 27(1): 50–55.  
Liao Yibo, Zeng Jiangning, Lu Yan, et al. Ecological characteristics of the macrobenthos in the Dayuwan Bay after the typhoon[J]. *Journ-*

- al of Marine Sciences, 2009, 27(1): 50–55.
- [65] 杨泽华, 童春富, 陆健健. 长江口湿地三个演替阶段大型底栖动物群落特征 [J]. 动物学研究, 2006, 27(4): 411–418.  
Yang Zehua, Tong Chunfu, Lu Jianjian. Characteristics of macrobenthic fauna communities in three successional stages of the new emergent salt marsh in an estuary of the Yangtze River[J]. *Zoological Research*, 2006, 27(4): 411–418.
- [66] Pagès J F, Gera A, Romero J, et al. The Mediterranean benthic herbivores show diverse responses to extreme storm disturbances[J]. *PLoS One*, 2013, 8(5): e62719.
- [67] Harris L, Nel R, Smale M, et al. Swashed away? Storm impacts on sandy beach macrofaunal communities[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 94(3): 210–221.
- [68] Gallucci F, Netto S A. Effects of the passage of cold fronts over a coastal site: an ecosystem approach[J]. *Marine ecology progress series*, 2004, 281: 79–92.
- [69] 张荷悦, 周怡, 孙涛, 等. 潮滩生物-物理互馈机制与系统稳态效应研究进展 [J]. 科学通报, 2023, 68(5): 457–468.  
Zhang Heyi, Zhou Yi, Sun Tao, et al. Advances in biophysical feedbacks and the resulting stable states in tidal flat systems[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(5): 457–468.

## Study on the influence of Typhoon “Muifa” on the macrobenthic community of tidal flat

Li Jingjing<sup>1</sup>, Shi Benwei<sup>1,2,3</sup>, Peng Zhong<sup>1</sup>, Zhang Wenxiang<sup>1</sup>, Peng Biaobiao<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Key Laboratory of Marine Space Resources Management Technology, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China; 3. Yangtze Delta Estuarine Wetland Ecosystem Observation and Research Station (Ministry of Education & Shanghai Science and Technology Committee), Shanghai 202162, China)

**Abstract:** Typhoons can have serious impacts on tidal flat ecosystems, particularly on the composition and distribution of macrobenthic communities. However, there is a lack of field data during typhoons, and the understanding of how typhoons affect the ecosystem is still limited. Therefore, this study conducted hydrodynamic observations and synchronous sampling of macrobenthic organisms before, during, and after Typhoon “Muifa” in September 2022, along the salt marsh-mudflat transect in the Chongming Dongtan area of the Changjiang River estuary. The study found: (1) During Typhoon “Muifa”, the effective wave height in the salt marshes was 2–4 times that of normal weather, and the combined wave-current shear stress was 10 times higher. (2) Within a week after Typhoon “Muifa”, the species number, abundance, and biomass of macrobenthic organisms in the salt marshes were 1.9, 3.8, and 3.0 times higher than before the typhoon, respectively. The dominant species of the salt marsh (*Ilyoplax deschampsi*, *Assiminea* sp., *Assiminea violacea*, *Corbicula fluminea*) increased by one (*Assiminea violacea*) compared with that before the typhoon (*Assiminea* sp., *Ilyoplax deschampsi*, *Corbicula fluminea*), and the primary dominant species shifting from *Assiminea* sp. to *Ilyoplax deschampsi*. (3) Within a week after Typhoon “Muifa”, the indicators of species number, abundance, and biomass of macrobenthos in the salt marsh increased, while the abundance of macrobenthic organisms on the mudflats at the forefront of the salt marsh decreased. This is attributed to the macrobenthic organisms (*Ilyoplax deschampsi*, *Assiminea* sp., *Corbicula fluminea*) on the mudflats migrating rapidly to the relatively less hydrodynamically stressed salt marshes during the strong hydrodynamic stress caused by the typhoon. (4) Two weeks after Typhoon “Muifa”, the abundance of macrobenthos in salt marshes recovered. The results of this study indicate that salt marsh vegetation not only provides ecological services such as wave attenuation, flow reduction, and shoreline protection, but also serves as a refuge for macrobenthic organisms during typhoons.

**Key words:** typhoon; hydrodynamic force; macrobenthic community; Chongming Dongtan