

长江口潮间带沉积对台风过程的响应

章馨谣, 戴志军, 陈 云, 李九发

(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

摘要: 位于陆海交汇区的河口潮滩对台风作用的响应极为敏感。台风大浪极可能构成河口潮滩沉积过程的快速变化, 进而不利于潮滩保护、开发及利用。基于此, 本文利用 200509 号“麦莎”台风作用前后长江口南汇潮滩采集的沉积物样品及水文资料, 探讨台风高能事件作用下河口潮滩动力沉积过程及其主控因素。结果表明长江口潮间带不同区域沉积作用对于“麦莎”台风具有不同的响应: 台风前潮滩沉积物以粗粉砂和细砂为主, 台风后粗粉砂减少及细砂增加, 潮滩沉积物中值粒径 ϕ 值减小, 沉积物粗化; 高潮滩处沉积物变细, 分选性变差, 而中潮滩和低潮滩沉积物的变化特性为沉积物粗化, 分选变好; 台风所引起的风暴增水以及潮流、波浪作用的增强是引发潮滩沉积过程发生改变的主要因素。

关键词: 动力沉积过程; 台风; 南汇潮滩; 长江口

中图分类号: P737.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2022)1-0102-10

DOI: 10.11759/hyxx20210512002

潮滩作为陆地生态系统向海洋生态系统的自然过渡, 通常指淤泥质海岸潮间带浅滩^[1], 作为海洋与陆地分界的重要标志区域, 是研究海陆相互作用的重要地带。潮滩为人类活动与生态环境系统可持续发展提供了充足的国土资源与空间保障, 同时潮滩在沿岸区域抵御风暴潮等灾害发挥重要缓冲功能^[2-3]。然而, 在流域来沙急剧减少、近海台风及风暴潮等高能事件加剧的影响下, 潮滩很可能处于快速冲淤变化状态^[4-5], 特别是全球变暖已导致台风风暴潮日趋增多且强度加大^[6], 这必将对潮滩动力沉积产生重要影响。一次台风登陆产生的潮滩沉积作用有可能为非风暴情况下数十年发生的沉积作用^[7-10], 但多数情景下的台风将构成潮滩侵蚀, 其导致潮滩侵蚀的量级高达数十年潮滩沉积厚度^[11], 已有一些研究围绕台风影响下的潮滩沉积速率^[12]、沉积结构与特征^[13-15]、输运模式^[16-17]及地貌格局变化^[7]等做出较多贡献, 尤其是长江河口, 当前入海泥沙已减少约 70%, 三角洲南翼淤泥质潮滩淤涨速度可能发生改变, 每年 1~2 次的台风则可能进一步减缓潮滩的淤积作用^[9], 因此很有必要开展对台风影响的长江口粉砂质细砂潮滩沉积过程进行研究。

南汇潮滩位于长江口与杭州湾交界地带, 是长江口目前最大、淤长最快的陆源潮滩, 同时南汇潮滩为上海市重要的后备土地资源, 周围建设有临港自由贸易区、东海大桥及浦东机场等重大港口与交

通枢纽区。然而, 该区域频繁遭受台风大浪作用的影响^[18-19], 这又增加区域潮滩变化的复杂性。基于此, 本文通过分析 200509 号台风“麦莎”过境前后的南汇粉砂质细砂潮滩的沉积过程, 试图揭示南汇潮滩如何响应台风大浪的变动力沉积机制, 为高能事件作用的区域潮滩保护、开发及利用提供科学决策。

1 研究区域及台风概况

1.1 研究区域概况

南汇潮滩位于长江三角洲南翼, 以石皮勒断面为界分为南汇东滩与南汇南滩。本文选择南汇东滩与南滩交界的向海凸出的典型潮滩为研究对象, 属于开敞型粉砂质细砂潮滩, 滩面较为平缓(图 1)。区域近岸潮流为非正规浅海半日潮, 水流运动形式为东西方向往复流。涨潮流速、含沙量均大于落潮, 涨

收稿日期: 2021-05-12; 修回日期: 2021-07-31

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中华人民共和国水利部-中国长江三峡集团有限公司长江水科学联合基金项目 (U2040202); 上海市国际科技合作基金项目(19230712400); 上海市科委项目(20dz1204701)

[Foundation: Joint Funds of the International Natural Science Foundation of China, No. U2040202; International Science and Technology Cooperation Foundation Projects of Shanghai, No. 19230742700; Science and Technology Commission of Shanghai project, No. 20dz1204701]

作者简介: 章馨谣(1997—), 女, 河北秦皇岛人, 硕士研究生, 主要从事河口海岸动力地貌方面研究, E-mail: 51193904012@stu.ecnu.edu.cn; 戴志军(1973—), 通信作者, E-mail: zjdai@sklec.ecnu.edu.cn

潮输沙占优势, 涨落潮流方向大致与岸平行, 有利于泥沙向岸输送^[20]。涨落潮平均流速自潮下带至潮

上带减弱, 流速比增大^[21]。常态波浪作用较弱, SE 和 NS 向的风浪过程对潮滩地貌变化影响明显^[20]。

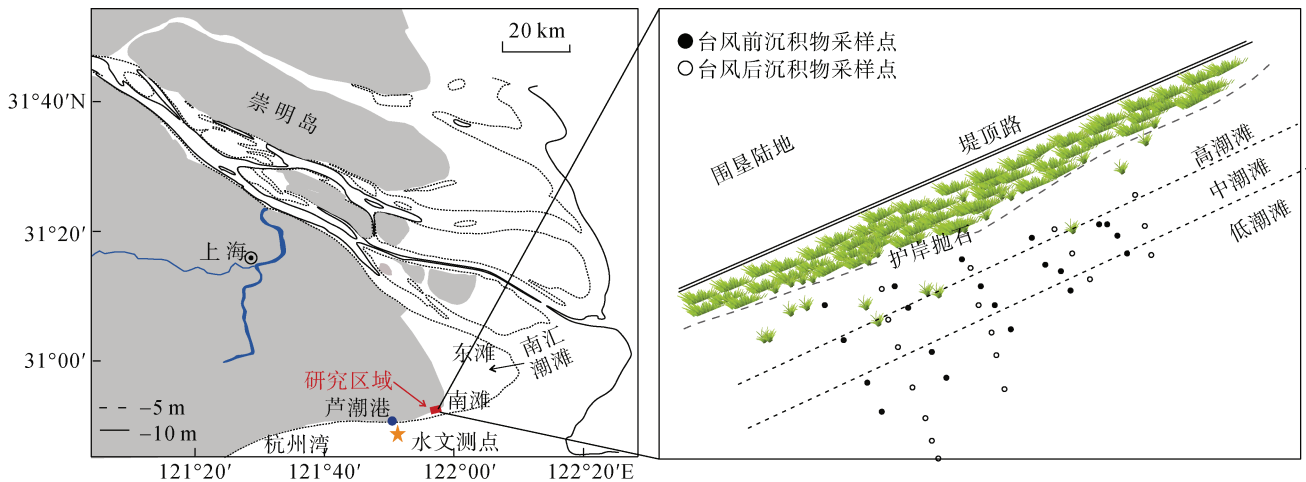


图1 长江入海河段及研究区域

Fig. 1 Map of the Changjiang (Yangtze) River estuary and the study area

1.2 台风“麦莎”概况

“麦莎”台风于2005年7月31日, 在菲律宾以东洋面生成。8月6日3时于浙江省玉环县沿海登陆, 登陆时中心附近最大风力达14级(45 m/s, 强台风级别)。台风登陆地点据上海市较近约350 km, 影响上海的时间为8月5日—8日, 且此期间恰逢天文大潮, 使得上海出现大风、暴雨、高潮位和长江流域局部洪水四碰头的严峻局面。南汇局地最大风力达12级以上, 全区普遍出现大暴雨, 局部地区为特大暴雨, 过程总雨量在100~250 mm(最大的芦潮港镇达263 mm)。根据芦潮港水文测站实测潮位数据及南京水利科学研究院实测波浪、潮流数据^[7, 22-23], 正常水文气象条件下多年平均潮位为3.49 m, 台风期间最高潮位达4.82 m, 增 values 达0.82 m。海域全潮平均流速约0.55 m/s, 年平均波高为0.42 m, 平均波周期为2.9 s。“麦莎”台风期间海域平均流速为1.05 m/s, 平均波高为1.86 m, 平均波周期为5.64 s。

2 材料与方法

2.1 样品采集与处理

本研究团队分别于“麦莎”台风作用前2005年6月14日、台风后2005年9月10日采集南汇潮滩表层沉积物20个及18个, 表层沉积物垂直向下采集约5 cm。随后在实验室内对沉积物样品进行处理, 取3 g左右样品放入烧杯, 加入4 mL浓度30%的双氧

水去除沉积物中的有机质, 静置24 h后加入5 mL浓度为10%的盐酸去除碳酸钙物质, 再加入6 mL浓度为0.0003 mol/L的六偏磷酸钠溶液后放入超声波仪器使样品充分分散。随后, 利用Coulter LS-13320型激光粒度仪对沉积物样品进行粒度分析, 获得沉积物粒径组分。利用Folk等^[24]系列公式计算沉积物粒度参数, 即包括平均粒径(MZ)、分选系数(σ)、偏态(SK)和峰态(K)。根据美国地球物理学会的沉积物分类标准^[25]对沉积物粒径进行划分。

利用Folk等^[26]沉积物结构分类方法对沉积物进行分类及命名, Folk分类方法具有3个地位不等的端元, 砂/泥比反映动力强度的大小, 粉砂/黏土比反映介质的混浊度, 两种比值参数的结合可以科学地反映沉积区动力学条件^[27]。

波浪资料由欧洲中长期预报(ECMWF)网站获得(<https://www.ecmwf.int/>), 实测潮位数据由芦潮港水文观测站获得。

2.2 潮滩分带

根据当地特定的潮位过程线, 可将研究区潮滩划分为3个区段^[28]: 潮上带, 位于大潮高潮位至特大潮汛之间被淹没的地带; 潮间带, 位于大潮平均高潮位与大潮平均低潮位之间, 在潮汐的作用下周期性的淹没与出落; 潮下带, 位于大潮平均低潮位之下, 罕有露出水面。进一步可将潮间带划分为高潮滩、中潮滩与低潮滩: 高潮滩为位于大小潮平均高潮

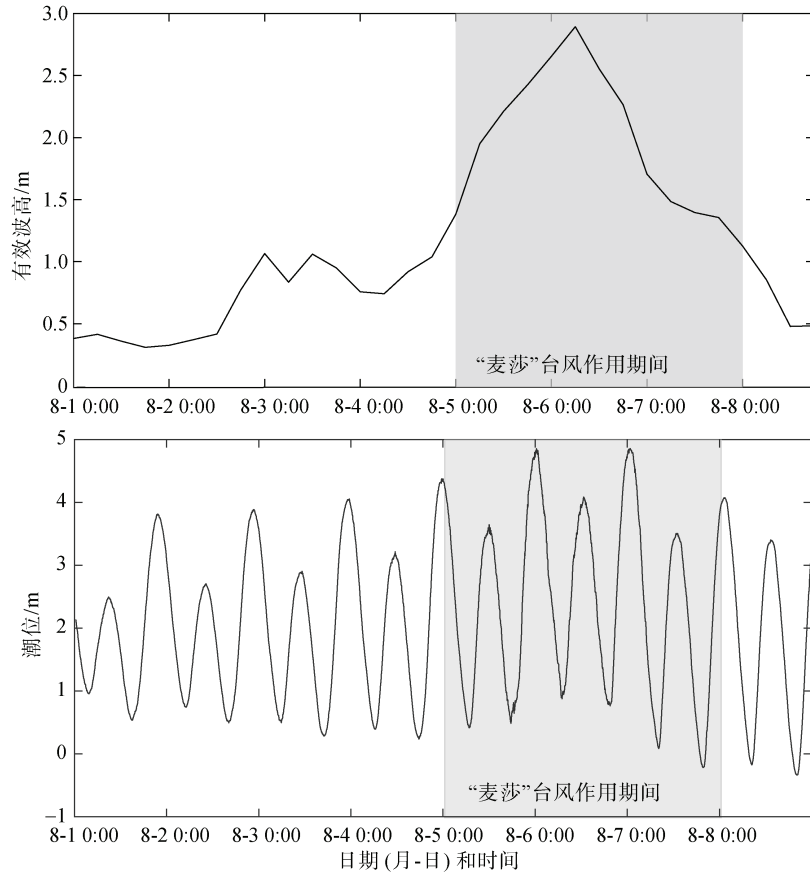


图2 “麦莎”台风作用前后水位及波浪变化过程

Fig. 2 Changes in the water level and wave height before and after typhoon “Matsa”

位之间的滩地，出露时间最长且生长有大量耐盐植被；中潮滩位于小潮平均高低潮位之间，随着潮位的变化稳定的淹没与出露，较之于高潮滩植被稀疏；低潮滩位于大小潮平均低潮位之间，仅于大潮时间露出水面。

2.3 泥沙起动流速及波浪作用下泥沙起动的临近水深计算

利用窦国仁^[29]公式计算由垂线平均流速表示的泥沙启动流速，探求不同情形下泥沙的启动能力，公式为：

$$u_c = 0.32 \cdot \left(\ln 11 \frac{h}{K} \right) \cdot \sqrt{\frac{d_1}{d_2}} \cdot \sqrt{3.6 \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g D_{50} + \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2} \right)^{\frac{5}{2}} \cdot \frac{\varepsilon_0 + gh \delta \left(\frac{\delta}{D_{50}} \right)^{\frac{1}{2}}}{D_{50}}}, \quad (1)$$

式中： u_c 为泥沙启动流动； h 为水深； K 为床面粗糙度，研究区域内 $D_{50} \leq 0.5$ mm， K 取1 mm， d_1 取0.5 mm； d_1 为 w 参考粒径取10 mm； ρ_s 和 ρ 分别为沙粒与水的密度，分别取2.65 g/cm³和1.02 g/cm³； γ_1 为床面泥沙干容重， γ_2 为泥沙颗粒的稳定干容重(床面稳定时间较长时可认为 $\gamma_1 = \gamma_2$)； ε_0 为综合黏结力参数，根据实验资料一般取 $\varepsilon_0 = 1.75$ cm³/s²； δ 为薄膜水厚度参数，通常取 2.31×10^{-5} 。

在波浪作用下，泥沙会产生不同程度的运动。本

研究计算不同波况下泥沙启动临界水深分析台风期间波浪对于泥沙活动能力的影响。首先利用平均波周期、水深数据计算得出对应的浅水波波长，之后利用Silvester公式^[30]，计算不同波浪状态下的泥沙最大涡动水深：

$$\text{sh} \left(\frac{2\pi h_3}{L} \right) = H_1 \frac{128 D_{50}^{\frac{1}{2}}}{3}, \quad (2)$$

式中， h_3 为最大涡动水深(m)， H_1 为有效波高(m)， L 为对应处的波长(m)， D_{50} 为泥沙中值粒径。

利用佐藤公式计算运动的推移临界水深, 表面推移临界水深公式:

$$\frac{L_0}{H_0} = 1.35 \left(\frac{D_{50}}{L_0} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{H_0}{H} \right) \text{sh}(kh_1), \quad (3)$$

全面推移临界水深公式:

$$\frac{L_0}{H_0} = 2.4 \left(\frac{D_{50}}{L_0} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{H_0}{H} \right) \text{sh}(kh_2), \quad (4)$$

式中, L_0 为深水波波长(m), H_0 为深水波波高(m), H 为波高, h_1 、 h_2 分别为表面推移水深和全面推移临界水深。

3 结果分析

3.1 沉积物组分及粒度参数

台风前后潮滩不同区位表层沉积物含量变化体现出明显差异趋势(表 1), 其中高潮滩各组分沉积的变化趋势恰与中潮滩及低潮滩沉积物组分的变化相反, 主要表现为黏土百分含量由 4.69%增加至 7.92%, 细粉砂由 3.97%增至 6.45%, 而细砂和中砂的百分含量均减少了 4%左右。相反, 中潮滩和低潮滩沉积物中细粉砂和粗粉砂含量减少, 台风后中潮滩粗粉砂含量由 10.02%下降至 4.29%, 低潮滩粉砂含量下降约 9%; 细砂含量增加值均在 8.5%以上。

就其空间分布而言, 台风作用前南汇潮滩表层沉积物中沉积物组分自陆向海展现为粗粉砂含量自陆向海增加。高潮滩粗砂组分低于 5%, 中潮滩东侧粗粉砂组分较西侧高, 中潮滩西部及低潮滩粗粉砂组分在 10%以上, 而细砂的含量变化展现出相反的趋势。台风作用后的潮滩沉积物中, 粗粉砂和细砂自陆向海的变化都趋于平缓。

表 1 台风作用前后 5 组分含量变化

Tab. 1 Variations of sediment before and after typhoon matsa

沉积物组分/%	采样时间	高潮滩	中潮滩	低潮滩
黏土(8φ~12 φ)	台风前	4.69	6.20	5.27
	台风后	7.92	4.22	5.31
细粉砂(6φ~8 φ)	台风前	3.97	6.43	4.96
	台风后	6.45	4.22	4.62
粗粉砂(4φ~6 φ)	台风前	2.69	10.02	12.46
	台风后	4.13	4.29	3.53
细砂(2φ~4 φ)	台风前	81.42	74.08	74.56
	台风后	78.07	82.92	83.14
中砂(1φ~2 φ)	台风前	7.15	3.23	2.67
	台风后	3.16	3.42	3.27

台风作用前潮滩沉积物中值粒径 ϕ 值体现出自陆向海增大的趋势(图 3a), 沉积物粒径由高潮带至低潮带变细, 台风作用后沉积物中值粒径大小分布具有对称性, 自高潮滩向低潮滩增大, 中潮滩至低潮滩中值粒径的值减小(图 3b)。高潮滩沉积物粒径变细, 中潮滩及低潮滩中值粒径 ϕ 值减小, 沉积物粗化(表 2)。整体而言, 台风过后潮滩沉积物平均中值粒径减小, 潮滩沉积物整体粗化。台风前潮滩沉积物分选系数介于 1.0~1.6(图 3c), 台风后高潮滩处大部分区域分选性变差, 而在中潮滩和低潮滩处, 大范围区域分选系数减小, 分选性变好, 分选系数为 1.6~2.0(图 3d)。台风作用前后沉积物偏态均为正偏, 但台风后正偏值增大(图 3e, 3f)。

3.2 沉积物类型分布

据图 4, 台风前沉积物类型主要以粗粉砂和细砂为主(图 4), 其中细砂百分含量均在 60%以上, 高潮滩及中潮滩大部分区域细砂含量在 80%左右。粗粉砂主要分布于低潮滩及中潮滩西部, 其他组分的百分含量通常在 10%以下。台风作用后潮滩表层沉积物组分产生显著变化, 粗粉砂百分含量由台风前 9.64%减小至 3.91%(图 4e, 4f); 细砂含量由台风前 75.56%增加至台风后的 81.60%(图 4g, 4h)。同时, 台风过后滩面沉积物组分分布较为均匀。简而言之, 台风前南汇潮滩表层沉积物以粗粉砂和细砂类型为主, 台风后南汇潮滩整体粗粉砂含量显著减少, 细砂含量明显增加。

沉积物类型及区域分布可以综合反应研究区域内动力以及沉积物颗粒性质, 基于此, 根据粒度分析结果, 绘制沉积物福克三角图示以及沉积物类型空间分布。台风作用前研究区域内沉积物以泥质砂和粉砂质砂为主(图 5a), 高潮滩沉积物类型较多, 分布有少量砂以及砂质粉砂。同时沉积物粒度自陆向海变细, 中潮滩及低潮滩表层沉积物主要为粉砂质砂和泥质砂(图 5b)。麦莎台风过境后的沉积物为砂以及泥质砂, 高潮滩以泥质砂为主, 中潮滩表层沉积物为泥质砂和砂, 低潮滩表层沉积物主要为砂(图 6b)。

4 讨论

台风作用期间水动力条件变化剧烈, 导致潮滩表面沉积物运动出现大的变化。“麦莎”台风将大量能量传递给表层海水, 期间平均波高为 1.89 m, 最大有效波高达到 2.9 m, 波浪动能增大。利用佐藤公式计算常浪状态下及台风期间海床泥沙发生运动的

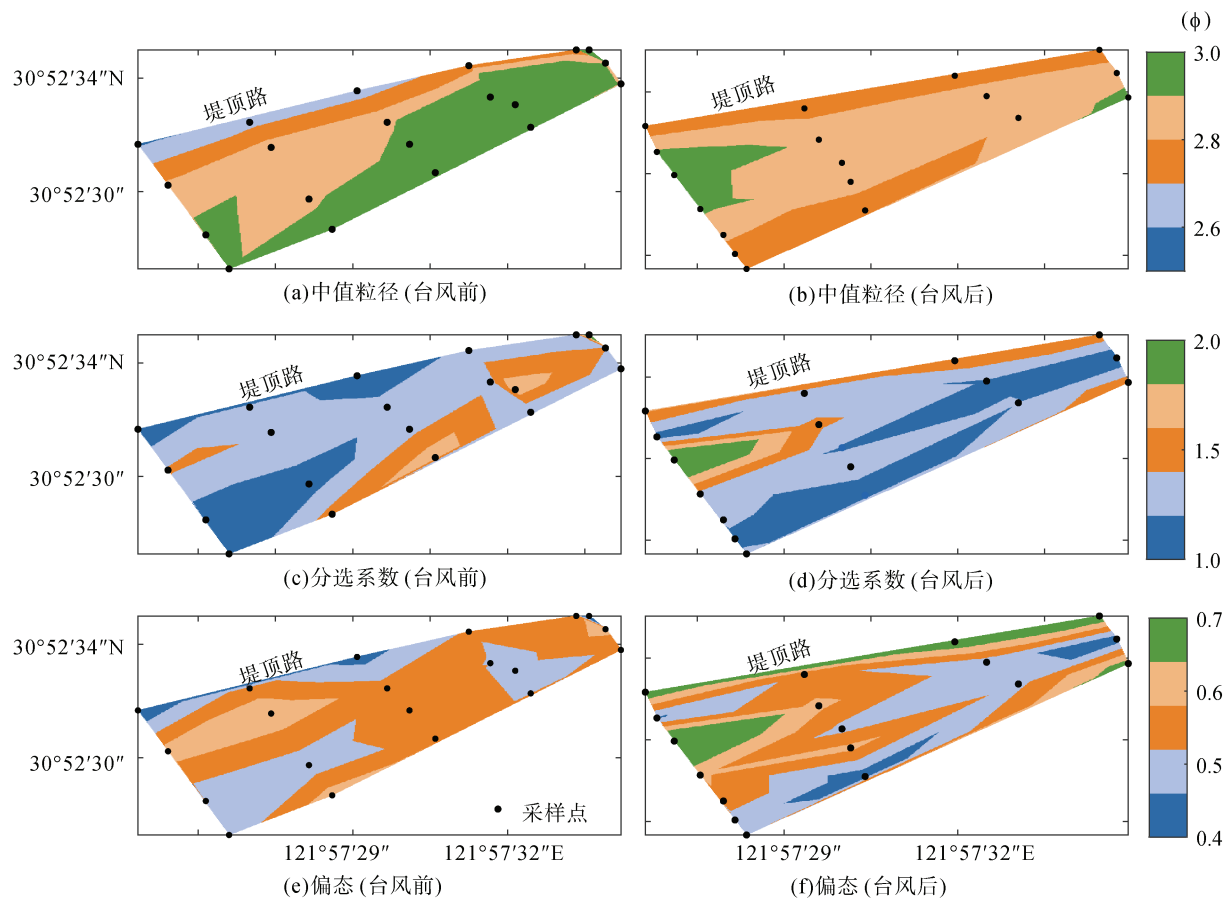


图3 台风作用前后粒度参数变化

Fig. 3 Variations of sediment grain size parameters before and after typhoon "Matsa"

表2 台风作用前后潮滩粒度参数变化

Tab. 2 Variations of sediment grain size parameters before and after typhoon matsa

粒径参数	采样时间	高潮滩	中潮滩	低潮滩
中值粒径(ϕ)	台风前	2.66	3.15	3.12
	台风后	2.79	2.89	2.81
分选系数	台风前	1.17	1.41	1.37
	台风后	1.66	1.27	1.24
偏态	台风前	0.48	0.52	0.53
	台风后	0.68	0.54	0.53

表面推移临界水深与全面推移临界水深。结果如表3所示,常浪状态下海底泥沙表面发生运动的范围为-1.93 m以浅区域,全面推移水深为-1.19 m。台风期间,在强波浪作用下,-5.99 m以浅的水深可发生全面推移,导致沉积物组分较常浪作用下差别巨大。

同时,研究区处在南汇潮滩凸出地带,常年直接受到外海波流影响,其潮滩沉积物组成比相邻区域略粗,在常年不同动力的改造下,横向上表层沉

积物粒径自陆向海变细的分布规律(图3a)^[31-32]。由美国仁泥沙起动公式计算得到芦潮港海域泥沙起动流速为0.92 m/s,常规天气下潮流对于床底泥沙的起动能力较弱。台风期间强风将大量能量传递给表层海水,水动力作用增强,该区域平均流动达到1.05 m/s,达到泥沙起动条件。可见,波浪掀动底层泥沙,而台风期间强劲的潮流进一步将泥沙向岸输移。

此外,台风作用所引发的风暴浪与离岸流引发潮滩沉积物的离岸运动,使沉积物在潮滩上重新进行分配。高潮滩沉积物细颗粒组分黏土、细粉砂、粗粉砂的百分含量增加,细砂中砂百分含量减小,整体沉积物变细。中潮滩和低潮滩细颗粒组分减少,表层沉积物粗化(图3、表1)。颗粒较粗沉积物被携带至中潮滩及低潮滩,由于波能耗损,粗颗粒沉积物在此沉降,无法再次回到海域,潮滩表层沉积物中值粒径 ϕ 值减小,沉积物粗化细砂组分增加。且波浪反复冲刷可以使粒度分布更加集中,因此台风作用后潮滩整体呈现分选更好特点。

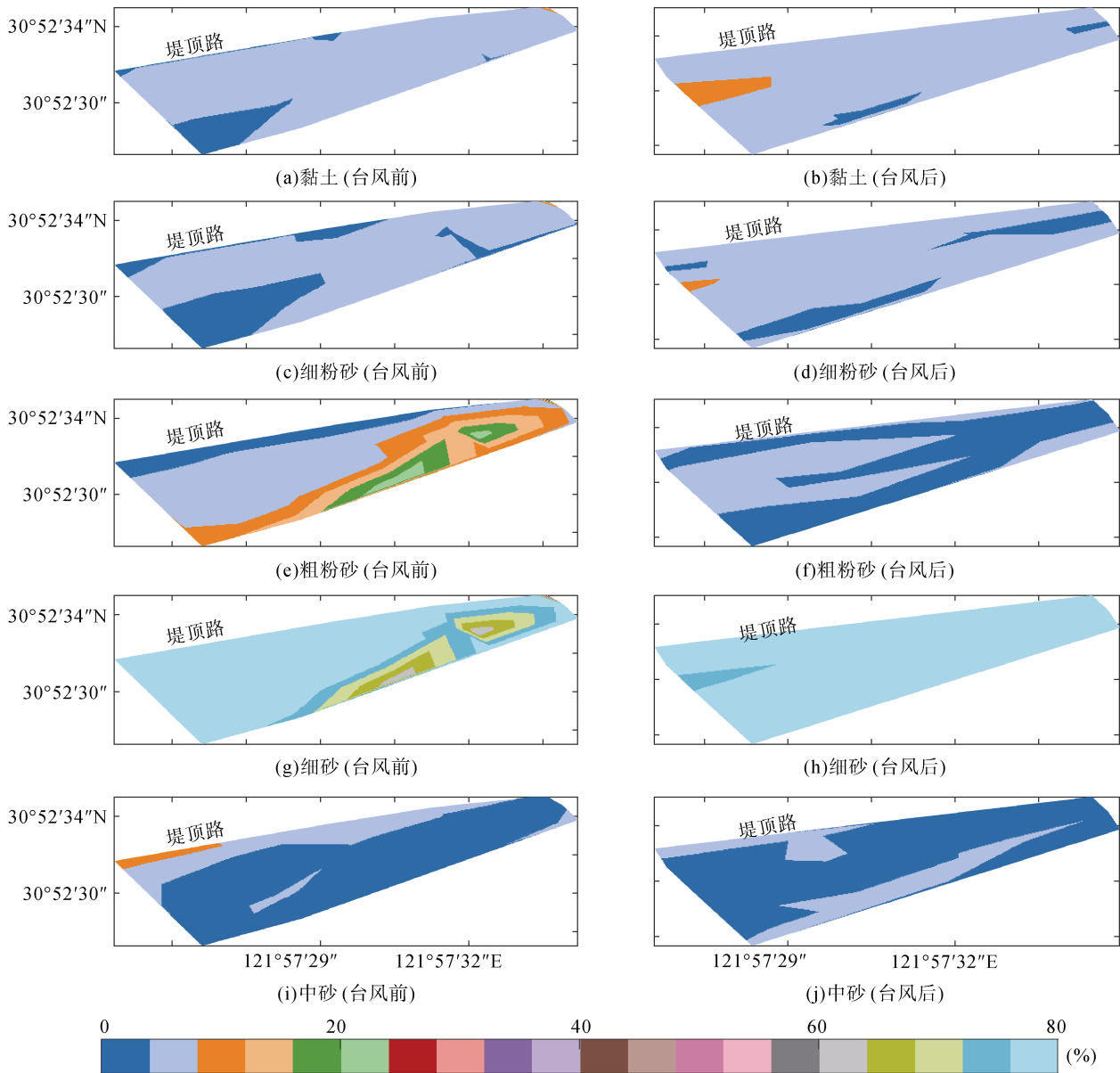


图4 “麦莎”台风作用前后沉积物组分空间分布
Fig. 4 Diagram of surface sediment types before and after typhoon "Matsa"

台风所引起的风暴期间增水而抬高高潮位水边线对改变当地潮滩沉积环境起着较重要作用,由此显著影响风暴作用潮滩的范围与强度。麦莎台风影响研究区恰逢汛期第五次天文大潮汛,潮位较高,最高潮位为 4.82 m,增水值达 0.82 m (图 2a)。台风增水通过影响滩面水深影响床底沉积物运动。利用 Silvester 公式计算最大涡动水深,结果如表 3 所示,若滩面水深大于最大涡动水深,则滩面泥沙不受掀动,反之滩面泥沙能被掀动。台风前研究区域内最大涡动水深为 1.24 m,台风作用期间最大涡动水深达 11.05 m。掀沙能力大幅增加,由此掀动床底相对细的泥沙悬浮,引

起中值粒径 ϕ 的平均值较台风前减小,沉积物粗化。高潮滩因滩面高程高且大潮期间潮位偏高,波浪传输到岸边动力有所消耗,即使波浪仍可掀动底层细颗粒泥沙,但受涨潮动力作用的影响,该部分泥沙将会再次沉降,同时波浪于离岸较深处搅起的大部分细颗粒泥沙随涨潮输运也会沉降在高潮滩,由此导致高潮滩沉积物中值粒径 ϕ 值增大,表层沉积物变细。台风后受潮位的变化引起的潮滩沉积物在高潮滩分选性变差,中潮滩和低潮滩分选性变好。有必要提出的是,潮位的变动扩大或减弱了波浪搅动底床的强度和范围,从而导致潮滩沉积物发生粗细与分选差异。

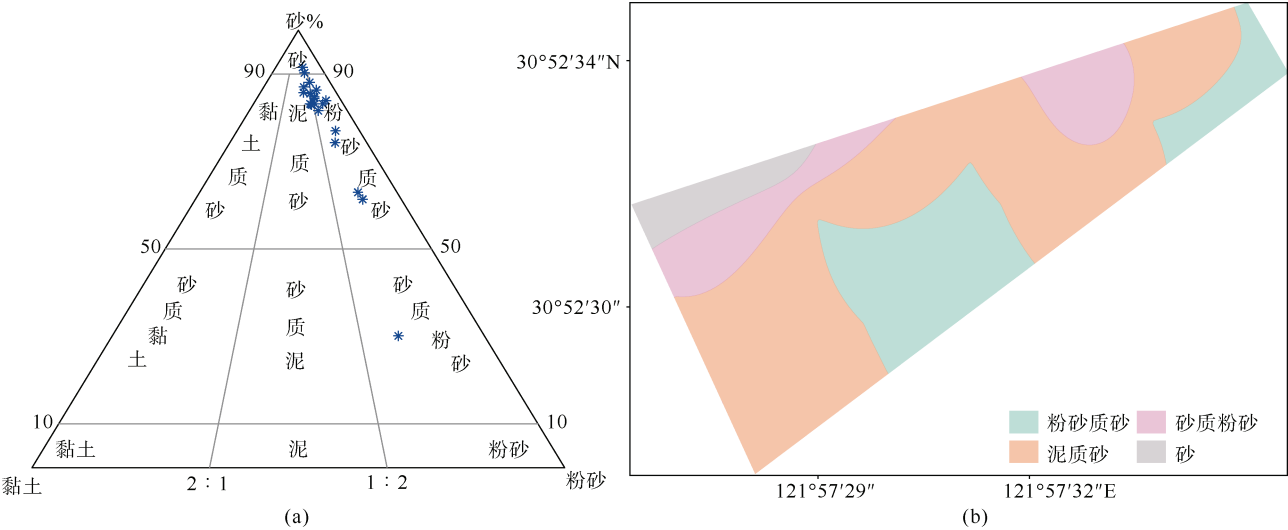


图 5 台风作用前沉积物三角分类及类型分布
Fig. 5 Classification and triangular diagram before the typhoon

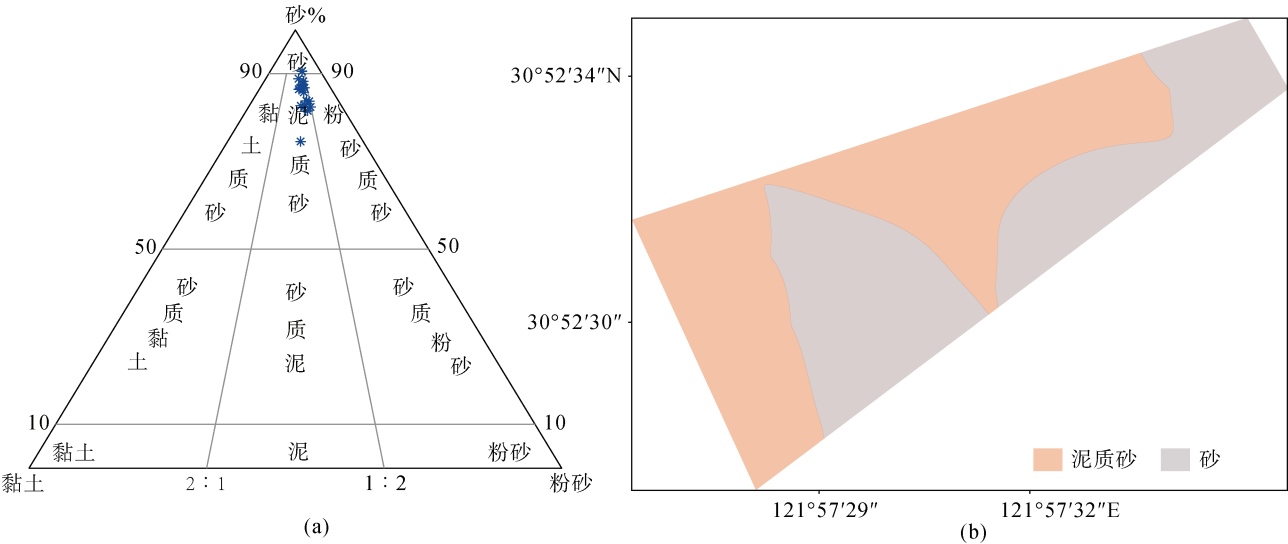


图 6 台风作用后沉积物三角分类及类型分布
Fig. 6 Classification and triangular diagram after the typhoon

表 3 泥沙活动临界水深
Tab. 3 Critical water depth of the sediment activity

	h_1/m	h_2/m	h_3/m
常态	1.93	1.19	1.24
“麦莎”台风期间	8.97	5.99	11.05

5 结论

潮间带动力沉积过程是影响潮滩地貌演化的重要因素，台风登陆期间所引发的动力条件的改变会对淤泥质潮滩动力沉积过程产生较重要影响。本文基于 2005 年麦莎台风作用下的南汇粉砂质细砂潮滩

沉积物动力沉积变化过程的分析，主要结论如下：
1) 台风作用前南汇潮滩沉积物的主要组分为粗粉砂和细砂，沉积物类型以泥质砂和粉砂质砂为主。台风作用后表层沉积物受到扰动，粗粉砂含量减少，细砂含量显著增加。潮滩整体中值粒径 ϕ 值减小，沉积物类型为砂以及泥质砂两类。
2) 潮滩不同区位对于台风作用具有不同的响应特征，高潮滩细砂、中砂百分含量减少；沉积物粒级变细，分选性变差；中潮滩及低潮滩表现出相反的变化趋势，细砂、中砂含量增加沉积物粗化，分选性变化好。

3) 台风所引起的风暴增水以及潮流、波浪作用的增强导致床底泥沙活动范围增大是引发潮滩沉积过程发生改变的主要因素。

参考文献:

- [1] 王颖, 朱大奎. 中国的潮滩[J]. 第四纪研究, 1990, 4: 291-300.
WANG Ying, ZHU Dakui. Tidal flats of China[J]. Quaternary Sciences, 1990, 4: 291-300.
- [2] COSTANZA R, DE G R, SUTTON P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. Global Environmental Change, 2014, 26: 152-158.
- [3] MARTINEZ-GARCIA E, CARLSSON M S, SANCHEZ-JEREZ P, et al. Effect of sediment grain size and bioturbation on decomposition of organic matter from aquaculture[J]. Biogeochemistry, 2015, 125(1): 133-148.
- [4] MEI X F, DAI Z J, STEPHEN E, et al. Landward shifts of the maximum accretion zone in the tidal reach of the Changjiang estuary following construction of the Three Gorges Dam[J]. Journal of Hydrology, 2021, 592: 125789.
- [5] DAI Z J, FAGHERAZZI S, MEI X F, et al. Decline in suspended sediment concentration delivered by the Changjiang (Yangtze) River into the East China Sea between 1956 and 2013[J]. Geomorphology, 2016, 268: 123-132.
- [6] FILGUEIRA R, GUYONDET T, COMEAU LA, et al. Storm - induced changes in coastal geomorphology control estuarine secondary productivity[J]. Earth's Future, 2014, 2(1): 1-6.
- [7] 戴志军, 张小玲, 闫虹, 等. 台风作用下淤泥质海岸动力地貌响应[J]. 海洋工程, 2009, 27(2): 63-69, 95.
DAI Zhijun, ZHANG Xiaoling, YAN Hong, et al. Morphodynamic behavior of the mud coast in response to typhoon action[J]. The Ocean Engineering, 2009, 27(2): 63-69, 95.
- [8] 王爱军, 叶翔. 福建罗源湾潮滩沉积过程对人类活动和台风事件的响应[J]. 沉积学报, 2013, 31(4): 639-645.
WANG Aijun, YE Xiang. Sedimentary processes of tidal flat and the responses to typhoon events and anthropogenic influences in the Luoyuan Bay of China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 639-645.
- [9] WANG J, DAI Z J, MEI X F, et al. Tropical cyclones significantly alleviate mega-deltaic erosion induced by high riverine flow[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(19): e2020GL089065.
- [10] YANG S L, FRI ED RICHES C T, ZHONG S, 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.
- [11] MISELIS J L, ANDREWS B D, NICHOLSON R S, et al. Evolution of Mid-Atlantic coastal and Back-Barrier Estuary environments in response to a hurricane: implications for Barrier-Estuary connectivity[J]. Estuaries and Coasts, 2016, 39(4): 1-19.
- [12] TURNER R, BAUSTIAN J, SWENSON E, et al. Wetland sedimentation from hurricanes Katrina and Rita[J]. Science, 2006, 314(5798): 449-452.
- [13] 王建, 柏春广, 徐永辉. 江苏中部淤泥质潮滩潮汐层理成因机理和风暴沉积判别标志[J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 562-562.
WANG Jian, BAI Chunguang, XU Yonghui. Mechanism of silt-mud couplet of mud tidal flat and discrimination criteria of storm surge sedimentation in the middle Jiangsu Province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4): 562-562.
- [14] 赵秧秧, 高抒. 台风风暴潮影响下潮滩沉积动力模拟初探——以江苏如东海岸为例[J]. 沉积学报, 2015, 33(1): 79-90.
ZHAO Yangyang, GAO Shu. Simulation of tidal flat sedimentation in response to typhoon-induced storm surges: A case study from Rudong coast, Jiangsu, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(1): 79-90.
- [15] MA B B, DAI Z J, PAN W H, et al. Dramatic typhoon-induced variability in the grain size characteristics of sediments at a meso-macrotidal beach[J]. Continental Shelf Research, 2019, 191: 1-9.
- [16] WESSELMAN D, WINTER R, ENGELSTAD A, et al. The effect of tides and storms on the sediment transport across a Dutch barrier island[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018, 43(3): 579-592.
- [17] 范吉庆, 杨世伦, 史本伟, 等. 风暴对滨海湿地潮沟水沙输运的影响——以长江口崇明东滩为例[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(10): 11-22.
FAN Jiqing, YANG Shilun, SHI Benwei, et al. Impacts of storm on water and sediment transportation through tidal creeks of coastal wetlands: a case from eastern Chongming tidal flat, Yangtze esuary[J]. Marine Geology Frontiers, 2019, 35(10): 11-22.
- [18] WANG T, LIU G, GAO L, et al. Biological and nutrient responses to a typhoon in the Yangtze Estuary and the adjacent sea[J]. Journal of Coastal Research, 2016, 32: 323-332.
- [19] 史军, 肖风劲, 穆海振, 等. 上海地区台风灾害损失评估[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(7): 952-957.
SHI Jun, XIAO Fengjin, MU Haizhen, et al. Losses assessment of typhoon disaster in Shanghai during 1949-2009[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin. 2013, 22(7): 952-957.
- [20] 李九发. 长江河口南汇潮滩泥沙输移规律探讨[J]. 海洋学报, 1990, 1: 75-82.

- LI Jiufa. Sediment transport law in Nanhui tidal flat of Changjiang Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 1990, 1: 75-82.
- [21] 冯凌旋, 李占海, 李九发, 等. 基于机制分解法长江口南汇潮滩悬移质泥沙通量研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 8: 944-950.
- FENG Lingxuan, LI Zhanhai, LI Jiufa, et al. Fluxes of suspended sediment in the Nanhui tidal flat of the Yangtze estuary with mechanism decomposition method[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 8: 944-950.
- [22] 余小建, 崔峥, 徐啸. 上海临港工业区芦潮港海域水文泥沙分析[J]. 水利水运工程学报, 2009, 1: 76-80.
- SHE Xiaojian, CUI Zheng, XU Xiao. Analysis of hydrological and sediment field data in Luchaogang sea area of Shanghai[J]. Hydro-Science and Engineering, 2009, 1: 76-80.
- [23] 胡泽浦. 2005 年“麦莎”和“卡努”台风影响上海的特点分析及对策建议[J]. 城市道桥与防洪, 2007, 4: 9-14, 11.
- HU Zepu. Characteristic analysis of influence of typhoons “Maisha” and “Kanu” on Shanghai in 2005 and countermeasure suggestion[J]. Urban Roads, Bridges & Flood Control, 2007, 4: 9-14, 11.
- [24] FOLK R L, WARD W C. Brazos River Bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3-26.
- [25] LANE E W. Report of the subcommittee on sediment terminology[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1947, 28(6): 936-938.
- [26] FOLK R L, ANDREWS P B, LEWIS D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand[J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 1970, 13(4): 937-968.
- [27] 王中波, 何起祥, 杨守业, 等. 谢帕德和福克碎屑沉积物分类方法在南黄海表层沉积物编图中的应用与比较[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 1: 1-8.
- WANG Zhongbo, HE Qixiang, YANG Shouye, et al. Composition and application of Shepard's and Folk's classifications to the subsurface mapping in the south Yellow Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 1: 1-8.
- [28] AMOS C L, DABORN G R, CHRISTIAN H A, et al. In situ erosion measurements on fine-grained sediments from the Bay of Fundy[J]. Marine Geology, 1992, 108(2): 175-196.
- [29] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究, 1999, 6: 1-9.
- DOU Guoren. Incipient motion of coarse and fine sediment[J]. Journal of Sediment Research, 1999, 6: 1-9.
- [30] SILVESTER R. Coastal engineering(Vol. II)[M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1974: 338.
- [31] 左书华, 时连强. 南汇嘴潮滩沉积物粒度特征研究[J]. 水道港口, 2008, 2: 88-93.
- ZUO Shuhua, SHI Lianqiang. Hydrodynamic explanation and characteristic of sediment granularity of Nanhui foreland in Changjiang Estuary[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2008, 2: 88-93.
- [32] 戴志军, 陈吉余, 程和琴, 等. 南汇边滩的沉积特征和沉积物输运趋势[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(6): 735-739.
- DAI Zhijun, CHEN Jiyu, CHENG Heqin, et al. Sediment characteristics and transport patterns in Nanhui joint area[J]. Resources and Environment in The Yangtze Basin, 2005, 14(6): 735-739.

Deposition response of the intertidal zone in the Yangtze Estuary to typhoon action

ZHANG Xin-yao, DAI Zhi-jun, CHEN Yun, LI Jiu-fa

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Received: May 12, 2021

Key words: sediment dynamic processes; typhoon; Nanhui tidal flat; Yangtze Estuary

Abstract: The tidal flat of the estuary located in the confluence of land and sea is extremely sensitive to the response of typhoons. Typhoons and surges are likely to constitute a rapid change in the sediment dynamics of the tidal flats in the estuary. Furthermore, it is not conducive for the protection, development, and utilization of tidal flats. Here, based on the sediments and hydrology of the Nanhui silty fine sand tidal flat in the Changjiang Estuary before and after Typhoon Matsa (TM), this work studies the impact of typhoons on the sediment dynamics of the tidal flat. The main results show that sedimentation in different areas of the Changjiang Estuary intertidal zone had different responses to TM: 1) The sediments were mainly coarse silt and fine sand before TM, which became coarser after TM. 2) The sediments at the high tidal flats became finer, and the sortability deteriorated, which is opposite to the change characteristics of the middle and low tidal flats after TM. 3) The storm surge elevation and enhancement of tidal current and wave action during TM are the main factors that cause the change in the tidal flat deposition process.

(本文编辑: 谭雪静)