

范吉庆,杨世伦,史本伟,等.风暴对滨海湿地潮沟水沙运输的影响——以长江口崇明东滩为例[J].海洋地质前沿,2019,35(10):11-22.

风暴对滨海湿地潮沟水沙运输的影响

——以长江口崇明东滩为例

范吉庆¹,杨世伦^{1,2*},史本伟¹,杨海飞^{1,3},王浩斌¹,张赛赛¹,吴秋原¹

(1 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室,上海 200241;2 华东师范大学崇明生态研究院,上海 200062;3 长江水利委员会水文局长江口水文水资源勘测局,上海 200136)

摘要:为了探知风暴事件对滨海湿地潮沟水沙运输的影响,分别于平静天气和风暴天气(“摩羯”和“温比亚”台风)条件下,在崇明东滩一典型潮沟进行了现场水沙数据观测。结果表明:台风期间近岸平均风速较平静天气增大 3~4 倍,有效波高增大 7~15 倍,盐沼前缘光滩和潮沟遭受强烈侵蚀,潮滩表层沉积物粗化 1~2.1 倍,水体悬沙浓度增大 3~11 倍,潮沟潮周期单宽泥沙运输通量增大 4~33 倍,单宽泥沙净输沙量增大 8~17 倍。风暴天气下,潮沟水沙运输呈现“大进大出”的特点,在盐沼潮滩内受盐沼植被消波、缓流和捕沙作用下,潮周期内单宽泥沙净通量指向盐沼潮滩,促进了盐沼滩内部泥沙的淤积。

关键词:风暴;潮沟;水沙运输;水动力;长江口

中图分类号:P736.2

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2019.10002

0 引言

潮沟是潮滩的重要组成部分,在潮间带湿地中起着输水输沙、营养物质和能量交换等重要作用,是潮滩与外海沉积物交换的重要通道^[1]。已有的研究表明,在平静天气下退潮效应主导盐沼潮沟地貌演变,而风暴天气下则是受涨潮效应控制^[2-3]。任美镠等^[4]研究了风暴潮对江苏省淤泥

质海岸的影响,发现风暴潮期间潮汐水道普遍拓宽,旁蚀作用加强,沟头淤积严重甚至淤塞,邻近主要潮汐水道趋于衰亡或淤闭的水道,在台风风暴潮期间可以重新活跃起来。谢卫明等^[5]研究了平静天气下崇明东滩潮沟系统的水沙运输情况,研究表明潮周期内净输沙方向指向滩地。李鹏等^[6]研究发现九段沙潮沟不论冬夏季或大小潮,潮沟在潮周期内的净输沙方向均指向陆。李占海等^[7]研究了江苏大丰潮滩及潮沟水沙运输,研究表明滩面归槽水占潮沟落潮水量的 33%,由此造成的悬沙输运量占落潮输运量的 20%。风暴影响下的动力沉积,对潮间带湿地地貌具有重大影响^[8-13]。

崇明东滩潮滩广阔,潮沟十分发育,已有的研究大多集中于平静天气下潮滩、潮沟水动力和泥沙运输研究,对风暴天气影响下潮沟水动力和泥沙运输变化及地形影响了解不够全面。笔者基于平静天气和风暴天气潮沟水动力、悬沙、泥沙运输和地形数据进行对比研究,以期探讨风暴影响下

收稿日期:2018-12-25

基金项目:国家自然科学基金“风暴过程中三角洲淤泥质海岸泥沙运动探讨”(41576092);国家自然科学基金委-山东省联合基金“海洋地质过程与环境”(U1606401);科技部重点专项“大型水库影响下河流水文泥沙动力过程与水沙运输通量变化”(2016YFA0600901)和“应对转型中的河口三角洲”(2016YFE0133700)

作者简介:范吉庆(1992—),男,在读硕士,主要从事沉积动力学研究.E-mail:jqfan1992@163.com

* 通讯作者:杨世伦(1954—),男,教授,博士生导师,主要从事河口海岸沉积动力学和地貌研究.E-mail:slyang@sklec.ecnu.edu.cn

潮沟潮流、悬沙和地形动态变化及风暴影响下潮沟泥沙输运对潮滩地貌的影响,为今后的相关研究提供参考。

1 研究区域

崇明东滩位于长江口崇明岛最东部,介于北港水道与北支之间(图1)。崇明东滩潮汐为非正规半日浅海潮,即1天中2个潮汐的潮差显著不等,崇明岛以东约20 km处佘山站多年平均潮差2.6 m,属于中强潮潮滩。崇明东滩多年平均风速为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(据

欧洲中长期天气预报中心2000—2017年资料统计)。崇明东滩滩宽坡缓,−5 m以上平均坡度为0.24‰^[14],沉积物以粉砂为主^[15-16]。自大堤向外依次分布着芦苇、白茅、海三棱藨草^[17-18]。东滩潮沟非常发育,2009年潮沟密度达981 m/km²,潮沟一般分布在盐沼内部,延伸方向大致与岸线垂直,呈树枝状分布,北部和中部潮沟分布较稀疏,南部潮沟分布非常密集^[19]。东滩潮沟成因类型为滩面水流冲刷型,是由于落潮后潮滩表层径流逐渐冲刷而形成,潮沟在潮间带中上部变宽、变浅,最终消失^[20]。本文观测点位于崇明东滩东南部一条宽约20 m、长逾2 km的中等潮沟内(图1c),测点位于盐沼滩侧,距光滩约200 m。

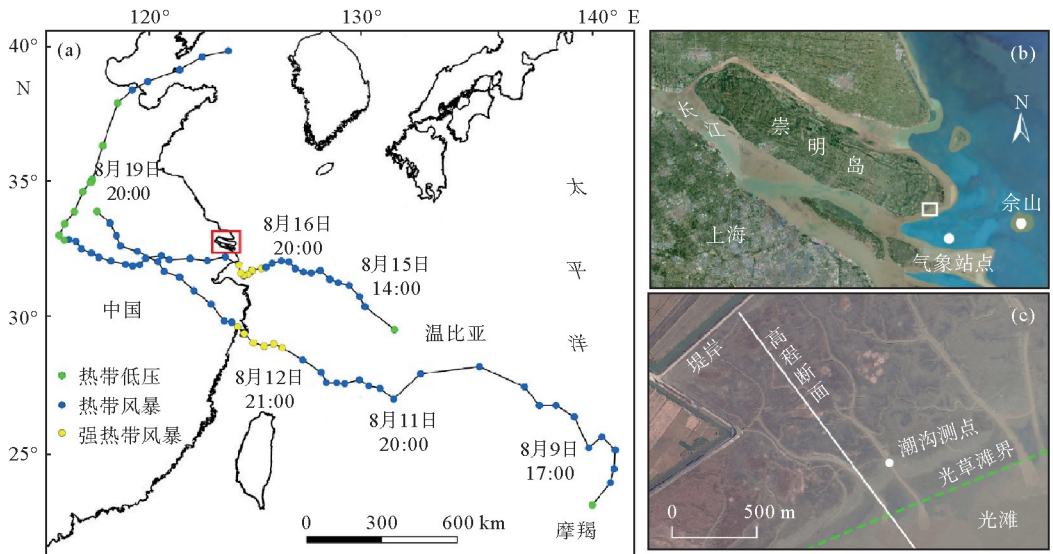


图1 研究区域及台风路径

Fig.1 Sketch maps of study area and some typhoon tracks

2 资料来源与研究方法

2.1 强热带风暴“摩羯”和“温比亚”概况

强热带风暴“摩羯”(Yagi)于2018年8月7日14时在台湾岛东南方向约1300 km的海面生成,随后沿西北方向进入中国东海海域(图1a)。8月12日23时在浙江温岭登陆,登陆时等级为强热带风暴,中心附近最大风力为10级(24.5~28.4 m/s),7级风圈(13.9~17.1 m/s)距离研究区域180 km。强热带风暴“温比亚”(Rumbia)于2018年8月15日8时在冲绳岛附近海域生成,16日18时7级风圈已

影响到崇明东滩。17日4时“温比亚”在上海浦东新区登陆,登陆时中心附近最大风力9级(20.8~24.4 m/s),7级风圈覆盖整个崇明岛(数据来源于中央气象台台风网:<http://typhoon.nmc.cn/>)。

2.2 野外观测

为了揭示风暴事件对潮沟泥沙输运的影响,2017年夏季设计了贯穿风暴前、中、后的观测计划,但是2017年6月22—28日实际观测期间没有遇到风暴发生。2018年8月11—18日大潮期间,抓住台风机会进行了补充观测。利用目前世界上先进的自容式、高分辨率野外观测仪器,分别于风暴和平静天气下,在潮沟中进行水动力和含

沙量连续观测。光学后向散射浊度计 OBS-3A (Optical Back-scatter Sensor, 简称 OBS, 美国 Compbell 公司生产, 浊度测量范围 $0 \sim 4\ 000$ NTU, 测量精度 $< 2\%$) 固定在距底床 0.7 m 高度处, 用于获取潮沟水深、浊度数据, 采样间隔为 1 min ; 电磁式海流计 AEM-USB (日本 ALEC 公司生产, 测量范围为 $-500 \sim 500\text{ cm/s}$, 测量精度为 $\pm 1\text{ cm/s}$) 固定在相同高度, 以获取潮沟二维流速、流向数据, 采样频率为每 5 min 记录 30 个数据。观测点潮沟底部高程(理论最低潮位以上)为 2.3 m 。涨潮时在潮沟内采集水样约 100 L , 用于室内 OBS 标定实验。在垂直于岸线方向上, 以大约 100 m 的间隔建立一条长约 1.9 km 的高程观测断面(图 1c), 其中光滩部分长约 0.5 km , 盐沼滩约 1.4 km 。风暴前后潮滩高程变化的测量采用美国 Trimble 公司生产的 RTK-GPS (Global Positioning System Real-Time Kinematic), 水平定位精度为 $\pm 16\text{ mm}$, 高程测量精度为 $\pm 20\text{ mm}$ 。RTK 断面测量时, 在每个测量点附近取潮滩表层 ($1 \sim 2\text{ mm}$) 沉积物样进行粒度分析。粒径测量采

样用美国 Coulter LS-100Q 激光粒度仪进行分析, 该仪器粒径测量范围为 $0.4 \sim 2\ 000\ \mu\text{m}$, 分析精度 $\leq 2\%$ 。观测期间风速、风向、降水量、气压、波向及有效波高数据来自欧洲中长期天气预报中心 (<https://www.ecmwf.int/>) 气象站点(图 1b)。

2.3 悬沙浓度及单宽输沙量计算

现场采集的浑浊水体, 经过沉淀后浓缩成更高浊度的水体, 并在室内对 OBS 进行一一标定。通过建立 OBS 浊度与悬沙浓度关系曲线, 进而可以算出野外观测浊度的悬沙浓度值。标定结果如图 2 所示, 浊度值与悬沙浓度之间的相关系数均在 0.99 以上。

单宽输沙量 ($Q_s, \text{kg/m} \cdot \text{s}^{-1}$) 公式为:

$$Q_s = \int_0^t U(t)C(t)h(t)dt \quad (1)$$

式中: U 为实测流速, m/s ;

C 为悬沙浓度, kg/m^3 ;

t 为采样时间, s ;

h 为实时水深, m 。

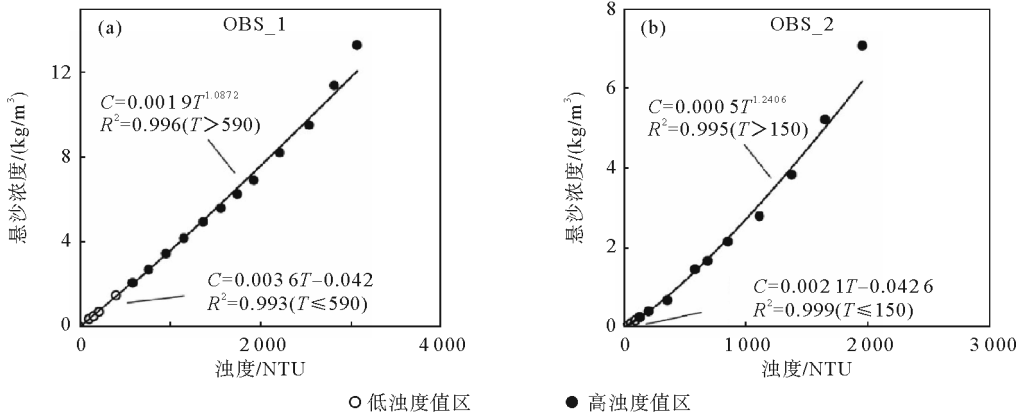


图 2 OBS-3A 浊度 (T) 与悬沙浓度 (C) 的回归关系

Fig.2 Regression relationship between water turbidity (T) and suspended sediment concentration (C)

3 结果和讨论

3.1 风暴对水动力和悬沙浓度的影响

3.1.1 风暴对近岸波高的影响

2017 年 6 月观测期间, 平均风速为 3.7 m/s , 最大风速为 6.1 m/s (图 3a); 平均有效波高为

0.29 m , 最大有效波高为 0.53 m , 浪向为偏南浪。2018 年台风影响前, 风速 $< 4\text{ m/s}$, 风向大致为偏北风(离岸风)。台风“摩羯”影响期间, 风速增大到 $10.2 \sim 13.6\text{ m/s}$ (3 小时平均), 风向转为东南风(向岸风)(图 3b)。“温比亚”台风影响初期风向为偏北风, 台风登陆后风向转为偏南风, 风速再次增大到 $10.5 \sim 16.2\text{ m/s}$ 。强烈的向岸风速, 产生了巨大的向岸波高。“摩羯”影响期间平均有效波

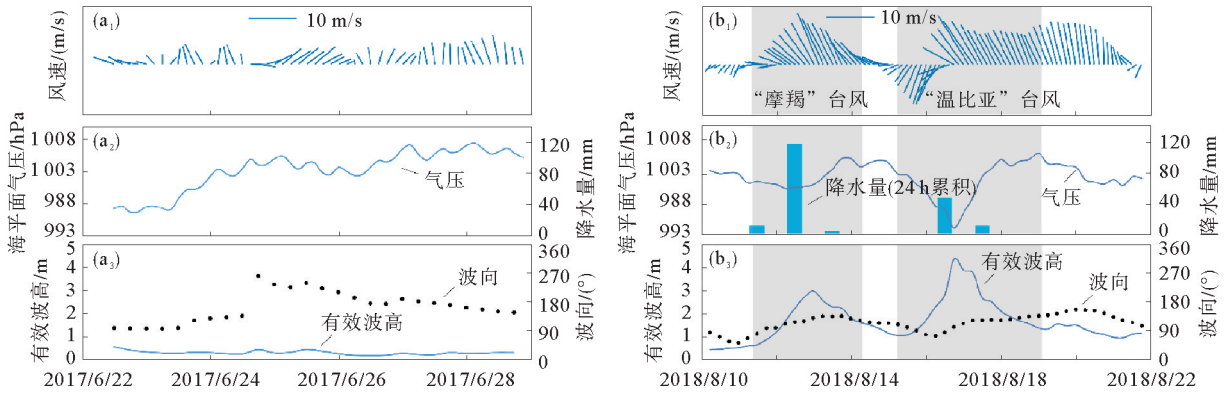


图3 平静天气(a)和风暴天气(b)风速、气压、降水量、有效波高和波向对比

Fig.3 Comparison of wind vectors, mean sea level pressure, precipitation, significant wave height and wave directions during calm weather and storm weather

高为 1.95 m,最大有效波高达 2.96 m,分别是平静天气下(0.29 m)的 6.7 倍和 10.2 倍。“温比亚”影响期间平均有效波高为 2.68 m,最大有效波高为 4.34 m,分别是平静天气下的 9.2 倍和 14.9 倍。

3.1.2 风暴对潮沟水动力和悬沙浓度的影响

3.1.2.1 平静天气下的潮沟水动力和悬沙浓度

观测期间,日潮不等现象明显,日潮最大水深均小于夜潮(图 4a)。日潮最大水深 1.85 m,出现在 6 月 26 日(t_8);夜潮最大水深 2.59 m,出现在 6 月 25 日(t_7)。涨潮期间水位变化率大于落潮期间,平均涨潮水位变化率为 0.013~0.020 cm/s,平均落潮水位变化率为-0.010~-0.013 cm/s(图 4c)。

潮波受地形影响在浅水区变形,造成了潮时的不对称性。观测期间,潮沟涨潮历时短于落潮历时,平均涨落潮历时之比为 0.76。受潮沟地形影响,潮流以往复流为主,涨落潮流方向与潮沟走向一致,涨潮流向约为 334° ,落潮流向约为 150° 。受不规则半日潮特征影响,观测期间日潮和夜潮的潮差、涨落潮历时及涨落潮流速差异明显。日潮、夜潮平均潮差分别为 3.1 m 和 3.9 m,平均涨潮历时分别为 2.0 h 和 3.2 h,平均落潮历时分别为 2.8 h 和 3.9 h,平均涨潮流速分别为 0.22 m/s 和 0.43 m/s,平均落潮流速分别为 0.22 m/s 和 0.89 m/s。日潮因涨落

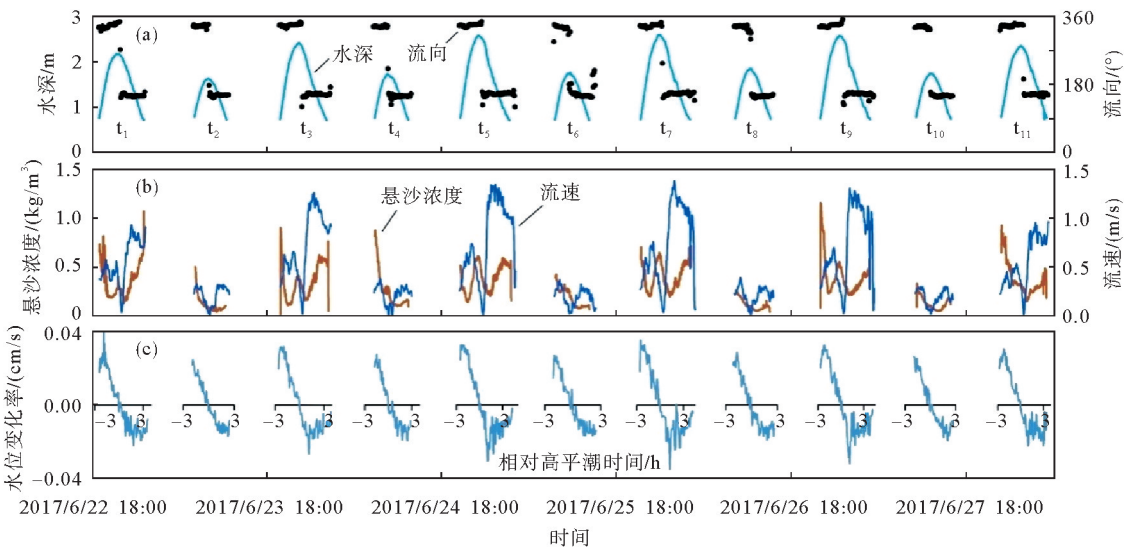


图4 平静天气下潮沟水深、流速、流向、悬沙浓度和水位变化率图

Fig.4 Water depth, tidal current velocity, current directions, SSC and rates of water level change under calm weather condition

潮历时短,潮周期内流速分布呈准“V”型(图 4b);夜潮因涨落潮历时较长,潮周期内流速分布呈准“M”型(图 4b)。日潮涨、落潮最大流速均值分别为 0.36 m/s 和 0.32 m/s;夜潮最大涨、落潮流速均值分别为 0.66 m/s 和 1.19 m/s,分别是日潮涨、落潮最大流速均值的 1.8 倍和 3.7 倍。造成日潮与夜潮涨、落潮流速与比值差异明显的重要原因是夜潮受潮沟溢流和滩面归槽水流影响,涨、落潮流速大大提高^[21-24]。日潮转流阶段出现在高潮位后约 0~10 min,憩流(流速 < 0.05 m/s)时长约 20~30 min,而夜潮转流阶段出现在高潮位后约 25~35 min,憩流时间比日潮短,仅有约 5 分钟。

与潮流特征一样,悬沙浓度亦有日潮、夜潮差异。潮周期内,日潮悬沙浓度大致呈“L”型特征,只有一个峰值,且峰值均出现在涨潮初期(图 4b);而夜潮悬沙浓度呈“W”型或“V”型,即潮周期内有 3 个峰值或 2 个峰值。“V”型悬沙浓度分布特征出现在涨潮初期和落潮中后期的滩面归槽阶段,而“W”型除了涨潮初期和落潮中后期出现峰值外,在高平潮阶段还有一个相对较小的峰值,其主要是由于转流阶段水动力弱,悬浮泥沙出现沉降所致。日潮潮周期平均悬沙浓度为 0.118~0.25 kg/m³,夜潮平均悬沙浓度为 0.351~0.409 kg/m³,最大悬沙浓度分别为 0.27~0.87 kg/m³和 0.62~1.15 kg/m³。日潮与夜潮

涨潮悬沙浓度几乎都大于落潮。

3.1.2.2 风暴天气下的潮沟水动力和悬沙浓度

风暴期间潮沟涨、落潮平均水位变化率分别为 0.017~0.029 cm/s 和 -0.012~-0.018 cm/s,涨潮平均水位变化率比平静天气下显著增大,主要是受向岸风的影响。风暴显著影响期间,高平潮后水位变化率甚至出现正值,这主要是受风暴浪及向岸风导致的增水影响。

风暴影响期间,潮沟流向受风向变化影响出现了一定的紊乱,尤其是在“温比亚”台风显著影响期间(图 5a)。风暴期间,潮沟涨潮历时仍短于落潮,平均涨、落潮历时之比为 0.75。风暴期间日潮平均涨潮流速小于平均落潮流速,平均涨、落潮流速分别为 0.28 m/s 和 0.48 m/s(平静天气下分别为 0.23 m/s 和 0.22 m/s),平均涨、落潮流速之比为 0.64,而平静天气下日潮平均涨、落潮流速之比为 1.06。造成这种巨大反差的原因可能是由于风暴期间的强降水产生了归槽效应,加大了潮沟落潮流速。风暴期间,夜潮平均涨、落潮流速分别为 0.46 m/s 和 1.12 m/s(平静天气下分别为 0.43 m/s 和 0.89 m/s),涨落潮流速之比为 0.42,小于平静天气下的比值(0.49),涨、落潮流不对称性更加明显。风暴影响期间,日潮与夜潮憩流时间变短或无明显憩流;转流时间与平静天气下相比延后,通常在高平潮后 30 分钟,这可能与风暴雍水有关。

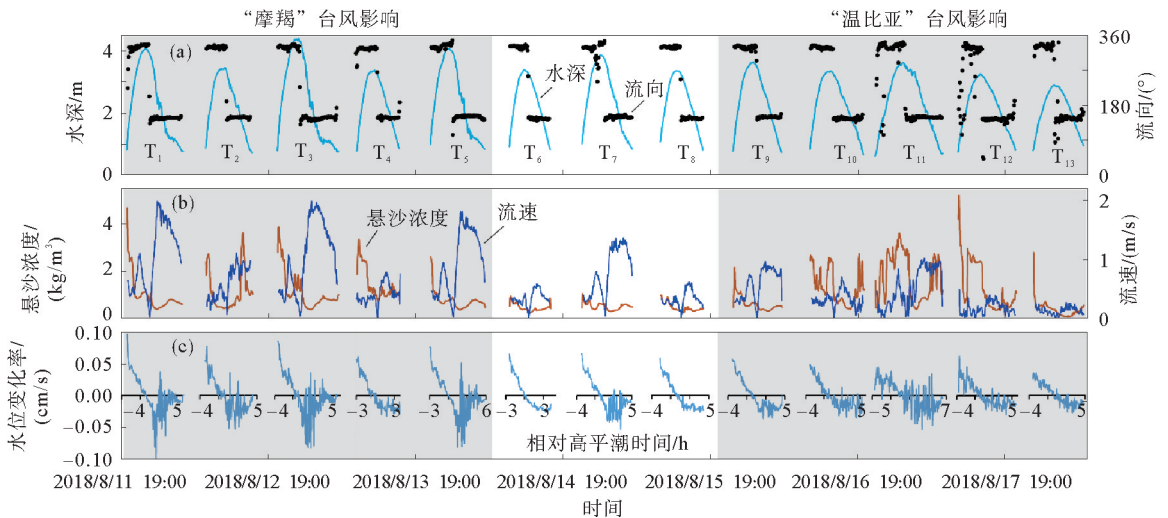


图 5 风暴天气下潮沟水深、流速、流向、悬沙浓度和水位变化率图

Fig.5 Water depth, tidal current velocity, current directions, SSC and rates of water level change under storm weather conditions

2018年8月11—18日观测期间,为天文大潮转小潮时期,最大潮4.3 m出现在 T_3 潮周期内。“摩羯”台风影响期间(T_1-T_5),潮周期平均悬沙浓度为 $0.78\sim 1.47\text{ kg/m}^3$,潮周期平均悬沙浓度最大值出现在 T_4 ,而台风“温比亚”影响期间(T_9-T_{13})潮周期平均悬沙浓度为 $0.4\sim 1.76\text{ kg/m}^3$,潮周期平均悬沙浓度最大值出现在 T_{11} 。也就是说,“温比亚”台风对潮沟悬沙浓度的影响超过了“摩羯”台风、天文大潮的叠加影响。

3.1.2.3 相似天文潮条件下风暴天气与平静天气潮沟动力泥沙对比

为了定量分析风暴对潮流和悬沙的影响,特选取潮差相近的平静天气和风暴天气潮周期进行

对比研究(图6a₁、6b₁)。研究表明,“摩羯”影响期间,潮周期平均流速为 1.07 m/s ,是相同潮况(t_7 与 T_3 潮差分别为 4.14 m 和 4.3 m)平静天气下 0.74 m/s 的 1.44 倍;最大流速 1.97 m/s ,是平静天气下 1.37 m/s 的 1.43 倍;风暴期间平均悬沙浓度为 1.14 kg/m^3 ,最大悬沙浓度 3.86 kg/m^3 ,分别是平静天气下的 2.79 倍和 5.38 倍。“温比亚”影响期间,潮周期平均流速为 0.33 m/s ,最大流速为 0.71 m/s ,分别是相同潮况(t_2 与 T_{10} 潮差分别为 2.9 m 和 2.82 m)下平静天气的 1.5 倍和 2.1 倍;平均悬沙浓度为 1.32 kg/m^3 ,是平静天气下 0.12 kg/m^3 的 11.2 倍;最大悬沙浓度为 2.74 kg/m^3 ,是平静天气下 0.51 kg/m^3 的 5.42 倍。

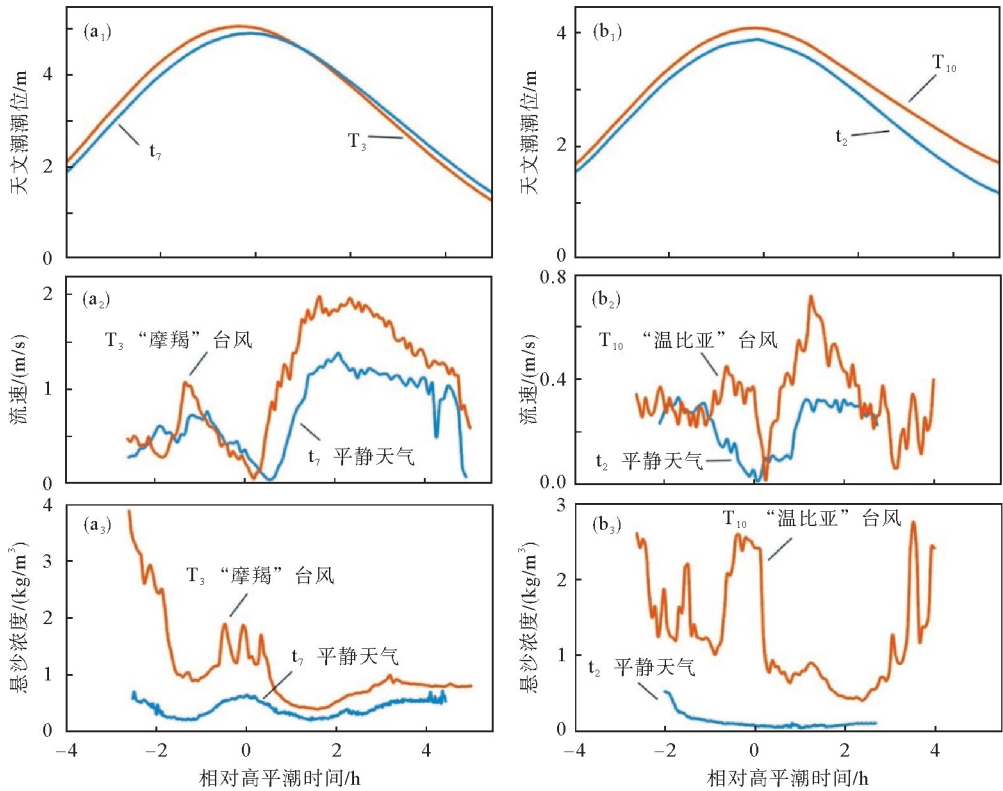


图6 相似潮况下平静天气(a)与风暴天气(b)流速、悬沙浓度对比

Fig.6 Comparison of current velocity and suspended sediment concentration between two tides (similar tide range) under storm weather and calm weather, respectively

3.2 风暴对潮滩表层沉积物的影响

风暴期间,潮滩潮流流速、风暴浪等水动力因素极大增强,潮滩底床沉积物在水流的强烈扰动下悬浮进入水体,随涨落潮流输运再分布。盐沼

前缘光滩、潮沟沟底及沟坡细颗粒沉积物被大量带入水体,表层残留的松散沉积物粗化明显,其中光滩(离岸距离 $>1\ 400\text{ m}$)表层沉积物粗化最为显著(图7、8)。“摩羯”影响期间,光滩表层平均粒径由风暴前的 $23.6\ \mu\text{m}$ 增大到风暴影响后的

49.4 μm , 平均增大 25.8 μm , 是原来粒径的 2.1 倍。“温比亚”影响期间, 平均粒径由风暴影响前的 52.8 μm , 增大到风暴影响后的 61.7 μm , 平均增大 8.8 μm , 增幅 16.8%。相比之下, 盐沼滩中上部及潮间带下部, 由于水流扰动相对较小, 水体中携带的大量细颗粒沉积物便逐渐沉积, 致使底床沉积物变化较小(图 7)。

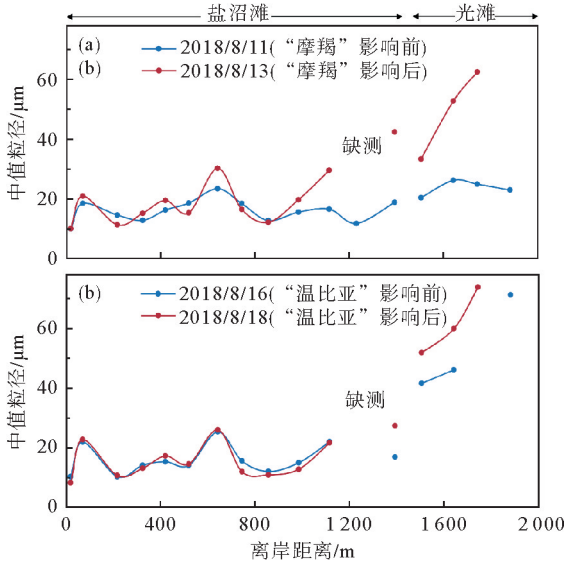


图 7 风暴影响前后潮滩表层沉积物粒径变化

Fig.7 Changes in particle size of surface sediments on tidal flat before and after a storm

3.3 风暴对滩面冲淤的影响

平静天气下, 崇明东滩在单个潮周期内的底床冲淤变化幅度为 0.7~3.8 cm, 大小潮周期内底床冲淤幅度可达 10 cm^[25], 季节性冲淤变幅为 10~20 cm 量级^[19]。本次观测结果表明, 崇明东滩观测断面不同部位风暴前后高程变化有所差异, 光滩、光滩-草滩交界处以侵蚀作用为主, 而盐沼滩内部以淤积为主(图 9)。“摩羯”影响期间正值天文大潮, 水动力大大增强, 加剧了风暴对滩面地形塑造的影响。结果表明, 盐沼-光滩交界处侵蚀严重, 其中最大侵蚀出现潮沟沟口附近, 达 48 cm(图 10)。这主要是由于潮沟沟口两侧地形和植被影响, 导致潮流能量汇集沿沟流动, 流速增强, 潮沟沟底刷深^[26]; 加之潮沟组成物质细腻, 含水量大, 泥沙易于起动, 随水流输运。盐沼滩前缘在风暴浪的强水动力影响下, 大片植被倒伏, 根部被水流冲刷而裸露。光滩上部靠近盐沼区域处于侵蚀状态, 侵蚀幅度为 1~3 cm, 光滩下部局部淤积, 淤积厚度为 3.8 cm。光滩上总体冲淤幅度不是很大, 主要是由于大潮期间该处水深较大, 波浪对底层的扰动较小。盐沼滩内部总体处于淤积状态, 平均淤积厚度 1.58 cm, 最大淤积厚度达 5.8 cm。盐沼滩内靠近潮沟的地方处于侵蚀状

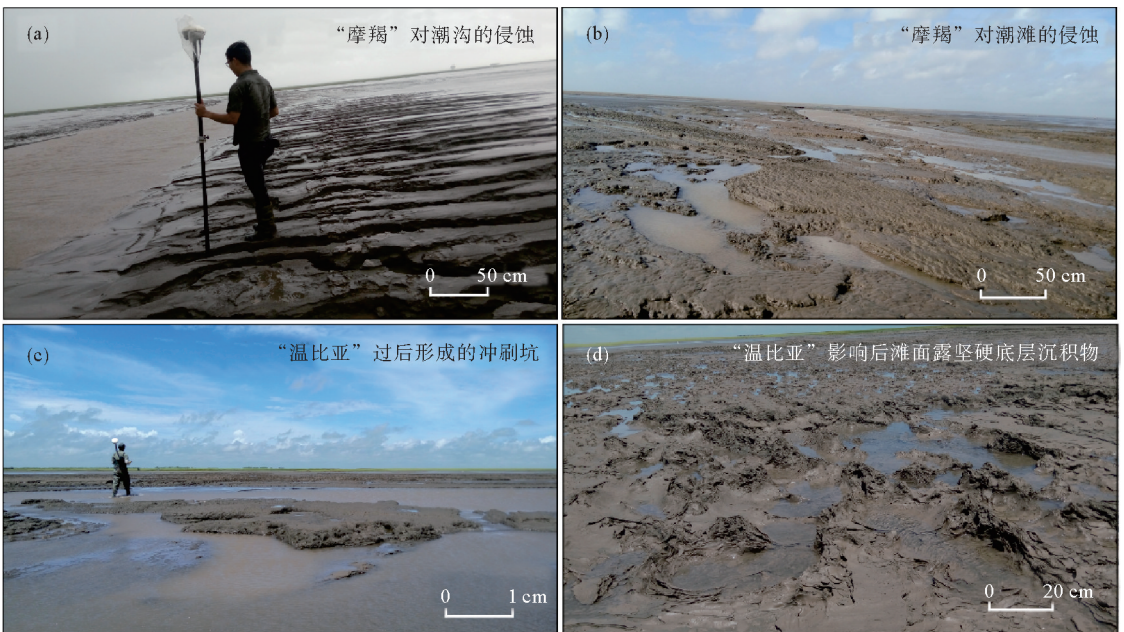


图 8 “摩羯”和“温比亚”对潮滩的冲刷

Fig.8 The impact of storm Yagi and Rumbia on tidal flat

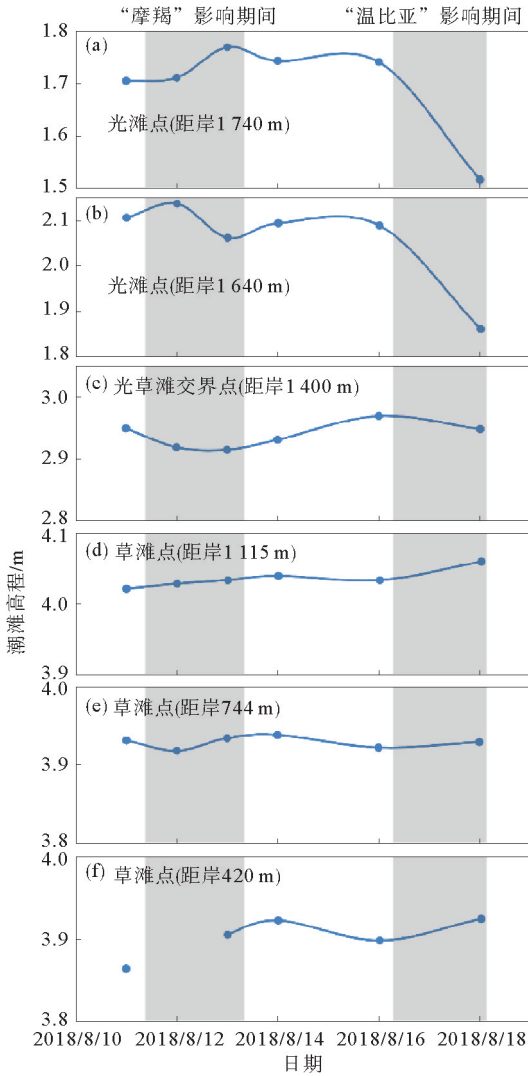
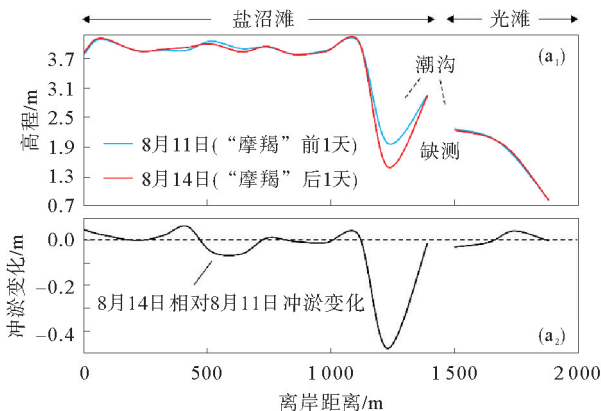


图9 风暴影响前后崇明东滩观测断面不同部位高程变化差异

Fig.9 Differences in elevation change on different parts of observation profile before, during and after the storm



态,如距堤岸 500 m 处断面观测结果显示,最大侵蚀深度可达 6.3 cm。这主要是受“摩羯”影响期间带来的强降水及滩面汇流切割的影响。光滩上缺少植被保护,直接受到雨水的击打、冲刷,加之粉砂质沉积物颗粒粘结性差,故退潮时形成了众多垂直于潮沟的深十几厘米宽几厘米的新冲刷沟(图 8a)。观测期间还发现沟壁受强潮流冲刷后产生大量塌陷,潮沟底床细颗粒物完全冲刷殆尽。

“温比亚”影响期间为天文潮小潮,潮间带下部水深较浅,处于破波带区域,风暴浪的能量主要聚集于此,因此滩面高程发生了很大变化。“温比亚”影响前后高程对比表明(图 10),潮间带下部光滩遭受强烈侵蚀,平均侵蚀深度 16 cm,最大侵蚀深度达 23 cm,形成了一百多米的冲刷破碎带,原本平缓的滩面留下了很多冲刷坑(图 8c),有些区域裸露出坚硬的旧沉积层(图 8d)。相反,潮间带中上部即盐沼滩内,滩面处于淤积状态,平均淤积厚度为 1.2 cm,最大淤积厚度为 2.6 cm(图 9)。

上述结果与前人在国内外其他地区的研究结论相吻合^[9,27-30],即风暴导致盐沼前缘和光滩侵蚀,而盐沼的中上部受植被保护则处于淤积或稳定状态,这可能是盐沼-光滩系统地貌对风暴事件响应的普适性规律。

3.4 风暴对湿地潮沟水沙输运的影响

3.4.1 潮沟单宽水沙通量

由于日潮与夜潮的潮位差异,潮沟涨潮时漫出潮滩水量和落潮时潮滩归槽水量均不相同。平静天气下,日潮涨潮单宽输沙量大于落潮输沙量,而夜潮受归槽水流影响较大,落槽单宽输沙通量

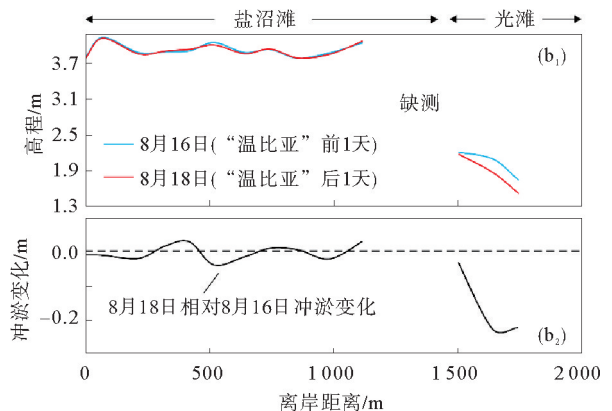


图10 风暴前后潮滩冲淤对比

Fig.10 Comparison of tidal elevation before and after a storm

远大于涨潮通量。风暴天气下潮沟涨落潮单宽输沙通量远大于平静天气,形成“大进大出”的特点,涨潮单宽输沙量几乎均小于落潮单宽输沙量。风暴天气下平均涨潮单宽输沙通量是平静天气下的 5.1 倍,平均落潮单宽输沙通量是平静天气下的 3.5 倍。由于潮沟受滩面归槽水流影响,故潮沟单宽净输沙量的计算还需要排除此影响。

假设涨潮时通过潮沟输入的水,落潮时由潮沟全部输出,那么潮沟系统水量平衡公式为

$$Q_e = Q_f + Q_l \quad (2)$$

式中: Q_e 为落潮时潮沟输出水量;

Q_f 为涨潮时潮沟输入水量;

Q_l 为涨潮时通过潮沟进入到盐沼滩面而在落潮时通过潮沟流出的水量,即滩面归槽水量。

以潮周期 T_1 为例,通过计算可得 T_1 涨、落潮单宽输水量分别为 $7\,516\text{ m}^2$ 和 $25\,943\text{ m}^2$,据公式(2)可计算出滩面归槽水量为 $18\,427\text{ m}^2$ 。利用 T_1 落潮时潮沟平均悬沙浓度与 T_1 归槽水量相乘,则得出落潮时从滩面输出的单宽输沙量,计算结果为 $11\,843\text{ kg/m}$ 。潮沟落潮时的单

宽输沙量 $16\,208\text{ kg/m}$ 减去滩面归槽单宽输沙量 $11\,843\text{ kg/m}$,则是潮沟落潮时真正的单宽输沙量,计算值为 $4\,365\text{ kg/m}$ 。而 T_1 潮周期的涨潮单宽输沙量为 $9\,030\text{ kg/m}$,实际真正输出的只有 $4\,365\text{ kg/m}$,说明在此潮周期内有 $4\,665\text{ kg/m}$ 泥沙淤落在了潮沟或滩面上。同理,其余潮周期单宽泥沙净通量亦可算出,计算结果如表 1 和表 2 所示。计算结果表明,平静天气下泥沙单宽净通量总体以向陆输运为主,风暴天气下潮沟单宽泥沙净通量除了 T_2 外皆为向岸输运(T_2 可能是受风暴带来的强降雨(图 3b₂)、天文大潮和风暴浪对潮沟及潮沟附近滩面冲刷影响),平均单宽泥沙净通量是平静天气下的 12 倍。平静天气下,平均滩面归槽单宽输水量和输沙量分别占落潮单宽输水量、输沙量的 41% 和 43%,而风暴天气下却分别能达到 56% 和 57%;风暴影响下平均滩面归槽单宽输水量和输沙量是平静天气下的 2.2 倍和 4.4 倍,这主要反映了风暴期间潮沟附近滩面及潮沟自身受风暴浪、暴雨、归槽水流的冲刷、切割侵蚀影响。

表 1 平静天气下潮周期内潮沟单宽输水、输沙特征

Table 1 Water and sediment flux per unit width for each tidal cycle under calm weather conditions

潮周期	涨潮单宽 输沙量/(kg/m)	落潮单宽 输沙量/(kg/m)	涨潮单宽 输水量/m ²	落潮单宽 输水量/m ²	归槽单宽 水量/m ²	单宽泥沙 净通量/(kg/m)
t ₁	1 496	3 213	4 626	7 597	1 291	-426
t ₂	279	145	1 406	1 849	34	168
t ₃	1 412	5 209	4 988	12 482	3 404	-393
t ₄	730	290	1 550	2 142	82	522
t ₅	1 796	6 045	5 182	14 650	4 162	-86
t ₆	486	213	1 668	1 971	37	309
t ₇	1 978	5 488	5 054	13 976	3 757	247
t ₈	303	175	1 641	2 090	37	164
t ₉	2 280	4 069	5 013	12 735	2 588	800
t ₁₀	284	202	1 364	1 930	57	138
t ₁₁	1 926	2 349	4 159	8 006	1 187	764

注:单宽泥沙净通量正值表示泥沙向岸输送,负值表示向海输送。

3.4.2 相似潮况下单宽输沙通量对比

王爱军等^[29]的研究表明,“格美”台风期间泉州湾光滩-盐沼的悬沙输运通量较平静天气下大 4 倍左右^[29]。“摩羯”影响期间(T_3),涨、落潮单宽泥沙通量分别为 $9\,317\text{ kg/m}$ 和 $20\,917\text{ kg/m}$,

分别是相似潮况平静天气下(t_7) $1\,978\text{ kg/m}$ 和 $5\,488\text{ kg/m}$ 的 4.7 倍和 3.8 倍;潮周期单宽净输沙量 T_3 是 t_7 的 8.2 倍。“温比亚”影响期间(T_{10}),涨、落潮单宽输沙通量分别为 $6\,064\text{ kg/m}$ 和 $4\,831\text{ kg/m}$,分别是相似潮况平静天气下(t_2)

279 kg/m和145 kg/m的22倍和33倍;潮周期单宽净输沙通量是平静天气下的18倍。上述系列结果表明,风暴期间潮间带湿地的泥沙输运通

量可较平静天气下的泥沙输运通量大数倍乃至一个数量级以上,其差异可能与风暴的强度以及潮间带湿地的沉积物组成以及地貌形态有关。

表2 风暴天气下潮沟潮周期内单宽输水、输沙特征

Table 2 Water and sediment flux per unit width for each tidal cycle under storm weather conditions

潮周期	涨潮单宽 输沙量/(kg/m)	落潮单宽 输沙量/(kg/m)	涨潮单宽 输水量/m ²	落潮单宽 输水量/m ²	滩面归槽 水量/m ²	单宽泥沙 净通量/(kg/m)
T ₁	9 030	16 208	7 516	25 943	18 427	4 665
T ₂	3 606	13 895	4 409	11 473	7 064	-1 857
T ₃	9 317	20 917	6 299	24 804	18 505	2 014
T ₄	6 171	7 146	3 829	6 742	2 914	2 144
T ₅	5 320	14 678	6 331	24 093	17 762	1 548
T ₆	1 768	2 011	3 134	5 056	1 922	557
T ₇	3 364	8 102	5 878	17 322	11 443	597
T ₈	1 902	2 009	3 203	5 072	1 869	636
T ₉	4 059	4 864	5 407	11 037	5 630	1 717
T ₁₀	6 064	4 831	4 037	6 056	2 019	2 985
T ₁₁	12 072	18 287	5 107	15 647	10 540	6 353
T ₁₂	4 064	2 387	1 939	4 086	2 147	3 022
T ₁₃	839	533	1 559	2 486	926	530

注:单宽泥沙净通量正值表示泥沙向岸输送,负值表示向海输送。

4 结论

风暴影响下,潮沟潮流不对称性更加明显,落潮流速增大,憩流时间变短或无明显憩流。与平静天气相比,风暴期间风速增大3~4倍,有效波高增大7~15倍,潮流流速增大1~2倍。风暴浪、强降雨和潮流流速的增强,加大了对水体的扰动,潮滩底床沉积物被大量悬浮进入水体,使水体悬沙浓度比相似潮况平静天气下大3~11倍。进入水体的沉积物,随着涨、落潮潮流搬离了原地,使盐沼外光滩、潮沟及其附近盐沼滩遭受侵蚀,潮滩表层沉积物粗化。含沙量增大的水体,随着涨、落潮潮流输入和输出盐沼潮沟内部,呈现“大进大出”的特点。但由于盐沼内部水动力较弱,茂密的盐沼植被具有捕沙和防止滩面侵蚀的作用,使得潮周期内泥沙单宽净通量指向盐沼潮滩,促进了盐沼滩内部泥沙的淤积。

参考文献:

[1] Fagherazzi S, Hannion M, D'Odorico P. Geomorphic struc-

ture of tidal hydrodynamics in salt marsh creeks[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(2): W02419.

[2] Jakobsen B. The tidal area in South-Western Jutland and the process of the salt marsh formation[J]. *Geografisk Tidsskrift*, 1954, 53: 49-61.

[3] Boon I J D. Tidal discharge asymmetry in a salt marsh drainage system[J]. *Limnology and Oceanography*, 1975, 20(1): 71-80.

[4] 任美镠,张忍顺,杨巨海,等. 风暴潮对淤泥质海岸的影响——以江苏省淤泥质海岸为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1983, 3(4): 1-24.

[5] 谢卫明,何青,王宪业,等. 潮沟系统水沙输运研究——以长江口崇明东滩为例[J]. *海洋学报*, 2017, 39(7): 80-91.

[6] 李鹏,杨世伦,秦渭华. 基于潮沟定点观测的潮间带水、沙、盐交换研究——以长江口九段沙一潮沟为例[J]. *海洋与湖沼*, 2014, 45(1): 126-133.

[7] 李占海,高抒,柯贤坤,等. 江苏大丰海岸碱蓬滩潮沟及滩面的沉积动力特征[J]. *海洋学报(中文版)*, 2005, 27(6): 77-84.

[8] Williams H F L, Flanagan W M. Contribution of hurricane storm surge deposition to long-term sedimentation in Louisiana coastal woodlands and marshes[J]. *Journal of Coastal Research*, 2009, 56(4): 1671-1675.

[9] Yang S L, Friedrichs C T, Shi Z, 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.
- [10] 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.
- [11] Goodbred S L, Hine A C. Coastal storm deposition: salt-marsh response to a severe extratropical storm, March 1993, west-central Florida [J]. *Geology*, 1995, 23(8): 679-682.
- [12] Denlinger E E. Contribution of hurricane Ike storm surge sedimentation to long-term aggradation of coastal marshes in southeastern Texas and southwestern Louisiana [J]. *Dissertations and Theses-Gradworks*, 2013, 35(1): 17-30.
- [13] Xiong H X, Huang G Q, Fu S Q, et al. Progress in the study of coastal storm deposits [J]. *Ocean Science Journal*, 2018, 53(2): 149-164.
- [14] 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.
- [15] 杨世伦,吴秋原,张赛赛,等. 崇明海岸湿地现状及其在生态岛建设中的作用 [J]. *上海国土资源*, 2018, 39(3): 34-37.
- [16] Yang S L, Li H, Ysebaert T, et al. Spatial and temporal variations in sediment grain size in tidal wetlands, Yangtze Delta; on the role of physical and biotic controls [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2008, 77(4): 657-671.
- [17] 李 华. 潮间带盐沼植物的沉积动力学效应研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- [18] 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.
- [19] 刘建华,杨世伦,史本伟,等. 长江口崇明东滩潮沟地貌形态和演变 [J]. *海洋学研究*, 2012, 30(2): 43-50.
- [20] 邵虚生. 潮沟成因类型及其影响因素的探讨 [J]. *地理学报*, 1988, 55(1): 35-43.
- [21] Hughes Z J. Tidal Channels on Tidal Flats and Marshes [M]. Netherlands: Springer, 2012: 269-300.
- [22] Bayliss-Smith T P, Healey R, Lailey R, et al. Tidal flows in salt marsh creeks [J]. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 1979, 9(3): 235-255.
- [23] 杨 旻,汪亚平,高 抒. 江苏王港盐沼潮沟的水动力和悬沙输运过程 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(4): 23-28.
- [24] 汪亚平,高 抒,张忍顺. 论盐沼-潮沟系统的地貌动力响应 [J]. *科学通报*, 1998, 43(21): 2315-2320.
- [25] 朱 琴,杨世伦. 淤泥质潮滩底床冲淤过程的多途径研究 [C]//中国海洋湖沼学会.“全球变化下的海洋与湖沼生态安全”学术交流会论文摘要集. 南京:中国海洋湖沼学会, 2014: 1.
- [26] 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.
- [27] Morton R A, Barras J A. Hurricane impacts on coastal wetlands: a half-century record of storm-generated features from Southern Louisiana [J]. *Journal of Coastal Research*, 2011, 27(6A): 27-43.
- [28] Terwindt J H J, Hulsbergen C H, Kohsiek L H M. Structures in deposits from beach recovery, after erosion by swell waves around the southwestern coast of Aruba (Netherlands Antilles) [J]. *Marine Geology*, 1984, 60(1): 283-311.
- [29] 王爱军,高 抒,陈 坚,等. 福建泉州湾盐沼对台风“格美”的沉积动力响应 [J]. *科学通报*, 2008, 53(22): 2814-2823.
- [30] 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(中文版)*, 2009, 31(6): 77-86.

IMPACTS OF STORM ON WATER AND SEDIMENT TRANSPORTATION THROUGH TIDAL CREEKS OF COASTAL WETLANDS: A CASE FROM EASTERN CHONGMING TIDAL FLAT, YANGTZE ESTUARY

FAN Jiqing¹, YANG Shilun^{1,2*}, SHI Benwei¹, YANG Haifei^{1,3},
WANG Haobin¹, ZHANG Saisai¹, WU Qiuyuan¹

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

2 Institute of Eco-Chongming, Shanghai 200062, China; 3 Survey Bureau of Hydrology and Water Resources of the Changjiang Estuary, Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Shanghai 200136, China)

Abstract: In order to investigate the impacts of storm event on water and sediment transportations through tidal creeks of coastal wetlands, in-situ measurements were carried out in a typical tidal creek in the Eastern Chongming tidal flat under both the conditions of calm weather and stormy weather (during the typhoons of “Yagi” and “Rumbia”). The facts show that the average wind speed near the shore during typhoon period was 3~4 times higher than that in calm weather, while the significant wave height increased by 7~15 times. During the storm event, mudflat and saltmarsh at the tidal front were strongly eroded, surface sediment coarsened for 1~2.1 times, suspended sediment concentration increased by 3~11 times, the sediment transport flux per unit width for each tidal cycle increased by 4~33 times, and the net sediment flux per unit width for each tidal cycle increased by 8~17 times. The transportation of water and sediment during flood and ebb tides under storm weather conditions were much greater than those under calm weather conditions. The net sediment flux was moving towards saltmarsh flats and deposit there due to attenuation of wave, retarding of current flow and trapping of mud.

Key words: storm; tidal creek; water and sediment transportation; hydrodynamic; Yangtze Estuary