

文章编号: 1000-0550(2013)02-0315-10

台风期间港湾海岸湿地侵蚀、淤积的环境动力学机制初探^①

——以福建罗源湾为例

王爱军 叶翔 李云海

(国家海洋局第三海洋研究所 海洋与海岸地质环境开放实验室 福建厦门 361005)

摘要 为了探讨港湾海岸湿地在台风期间发生冲淤变化的过程和机制,利用流速仪观测了台风“凤凰”过境期间福建罗源湾海岸湿地(包括盐沼中下部和光滩)的环境动力过程。结果表明,台风登陆期间盐沼中下部和光滩的滩面淹没时间增长约2 h,近底层流速平均值变化很小,但流速波动变化幅度很大,底部切应力显著增大,滩面发生侵蚀;台风登陆后,随着风浪作用的减弱,流速波动显著减小,底部切应力逐渐减小,悬沙发生沉降,滩面表现为淤积。台风期间的滩面侵蚀、淤积主要受底部切应力的控制。

关键字 港湾海岸湿地 台风 侵蚀 淤积 环境动力学

第一作者简介 王爱军 男 1977年出生 博士 海洋沉积学 E-mail: ajwang@163.com

中图分类号 P731.2 **文献标志码** A

近年来,全球台风(台风是热带气旋在西太平洋的俗称,北美地区称之为飓风)的发生频率和强度异常,给沿海人民生命财产安全和社会经济发展带来了严重影响,如2009年8月的台风“莫拉克”(Morakot)肆虐台湾,给台湾地区造成了很大的灾难;10月份的台风“芭玛”(Parma)三次登陆菲律宾北部,给当地造成了严重的灾难。台风发生频率和强度的异常是全球气候变暖的必然结果^[1-3],还是台风周期性变化的反映^[4,5],亦或者是没有明显趋势的变化^[6],成为当前争论的焦点。尽管最新的模拟研究表明,目前全球正处于千年来的又一个高发期,并且全球变暖还可能进一步导致台风活动增加^[7],但该结论缺乏地质记录的证据,有待于进一步的验证。研究表明,通过地质记录和历史文献,可以分析历史上台风发生的规律,为当前台风发生频率异常的解释提供依据^[8]。

海岸湿地作为陆地与海洋的过渡地区,是台风由海上向陆地推进的转折点,在台风登陆期间可以起到削弱水动力、降低台风增水的效果^[9-13],在海岸湿地地区形成了不同的沉积结构和沉积特征^[14-16]。研究表明,台风登陆后将会在潮间带地区形成沉积物平均粒径变粗、分选性增强、含泥量减少、潮间带内粒度参数差距缩小、沉积物粒度自下向上有增大的趋势等沉

积结构^[17-19]。但是,这些沉积结构是否是台风事件的特殊标志?其粗颗粒物来源于何处?这些沉积结构形成的动力学机制是什么?台风过程导致的岸滩冲刷与淤积动态变化的环境动力学机制是什么?目前对这些问题还不清楚^[20]。研究表明,开敞型海岸湿地、河口湿地及港湾湿地由于其物质来源、区域水动力等因素的差异,台风影响期间的冲淤变化也表现出显著的不同^[10,17,18,21-23],但对台风过程中岸滩冲淤动态变化的环境动力学机制还不清楚。福建省是我国遭受台风最为严重的沿海省市之一,沿海港湾众多,湾内多发育淤泥质海岸湿地,是进行台风环境动力过程研究的理想场所。本文通过分析台风“凤凰”登陆期间在罗源湾进行的现场观测数据,初步分析了台风过程导致的港湾湿地滩面侵蚀、淤积的环境动力学机制。

1 研究区概况

罗源湾位于福建省东北部沿海,整个海湾被罗源半岛和黄歧半岛环抱,湾口宽仅2 km,是一个典型的半封闭海湾,属构造成因海湾。湾内海底地貌较为单调,主要为潮滩、水下浅滩和潮汐通道,潮滩和水下浅滩沉积物主要为粘土质粉砂组成,潮汐通道底部沉积

^①国家自然科学基金项目(批准号:41076035 40606012)、福建省908专项(编号:FJ908-04-01)资助、国家908专项(编号:908-ZC-1-40)资助。
收稿日期:2012-02-20;收修改稿日期:2012-05-24

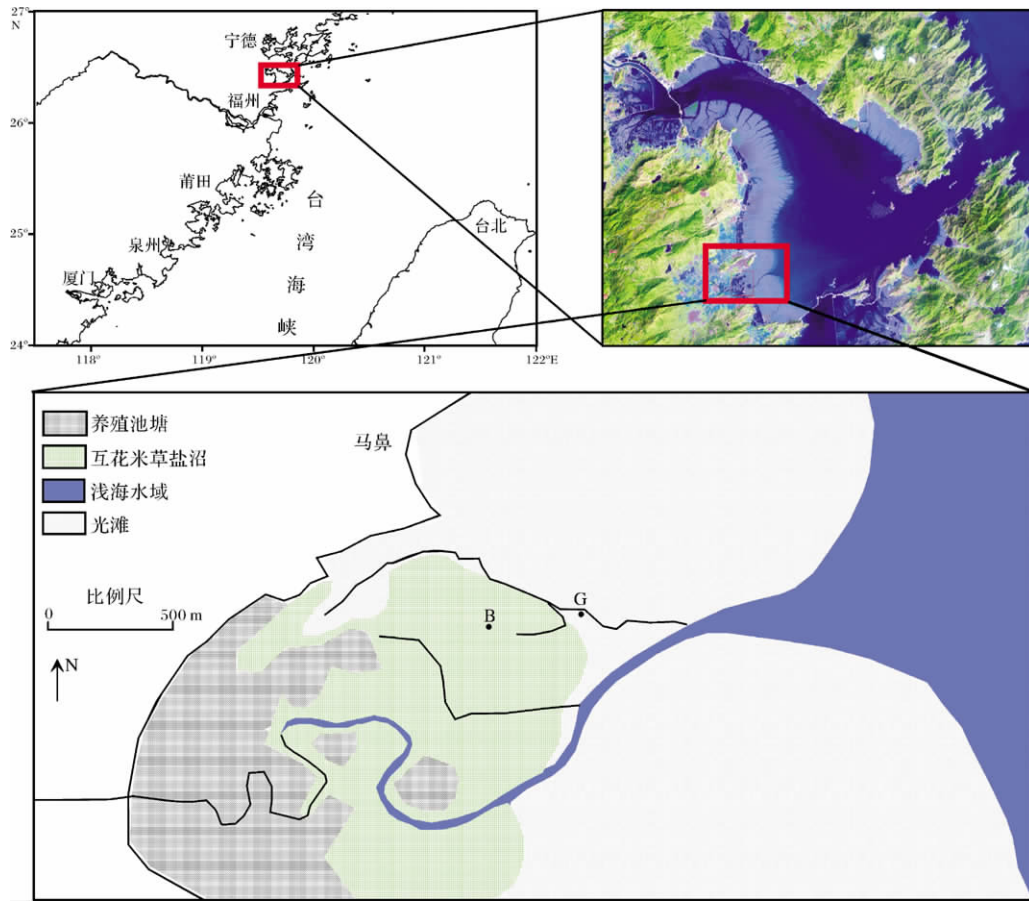


图 1 研究区位置及观测站位示意图

Fig. 1 Location of the study area and observation sites

物多基岩裸露,局部有砂砾堆积物。根据历史观测资料,罗源湾属正规半日潮,平均潮差为 4.98 m,平均涨潮历时为 6 h 21 min,平均落潮历时为 6 h 4 min,平均每年有 5~6 次强热带风暴影响罗源湾;罗源湾的潮流系地形控制的稳定的往复流,潮流流速由湾口向湾内逐渐减小;年平均波高为 0.7 m,平均周期为 3.9 s,最大平均波高为 1.5 m,北东向^[24]。现场调查表明,罗源湾西南及南侧淤泥质潮滩大面积发育,宽度一般约为 2~5 km,滩面平缓,坡度一般小于 0.1%,潮水沟比较发育,多呈树枝状分布,沉积物主要由黏土质粉砂组成,沉积地貌分带性不显著,微地貌形态单一;在潮间带中上部形成了大面积的互花米草盐沼,并且已有大片的盐沼被围垦(图 1),在潮间带中下部多养殖蛭、牡蛎、紫菜等。

2 研究方法

2.1 现场观测

2008 年 7 月 18—8 月 1 日在罗源湾连江县马鼻

镇附近互花米草盐沼湿地中下部(站位 B)和互花米草盐沼前缘的光滩湿地(站位 G)进行了定点流速观测(观测站位见图 1),观测高度为距离海底 10 cm 高度处。站位 B 底层流速观测采用 Nortek 公司生产的声学点式流速仪(ADV)进行观测,站位 G 底层流速均采用日本 ALEC 公司生产的电磁式海流计(EMCM)观测,具体观测设置见表 1。大潮期间(7 月 19 日—20 日)和小潮期间(7 月 26 日—27 日),在 G 站位用 ADV 和 EMCM 进行同步、同层位观测;此外,观测期间站位 B 仪器在 7 月 23 日—25 日之间出现数据记录出现故障;因此,站位 B 在上述三个时段没有实测数据。各观测站位在台风显著影响之前设置观测桩,并且在台风登陆前 2 天、台风登陆后 1 天、3 天及 3 个月等时刻分别测量了观测桩的高度。

2.2 数据处理

在任意时间序列内仪器观测得到的瞬时流速 u 可以写为该时间序列内的平均流速 u_a 和流速脉动 u' , 即: $u = u_a + u'$, $v = v_a + v'$, $w = w_a + w'$ 。紊动能

表 1 观测仪器及数据采集设置
Table 1 The Characteristics and setup of the instruments

位置	观测仪器及性能				采样频率/Hz	采样时间/s	脉冲间隔/min
	名称	测量范围	精确度	分辨率			
站点 B	ADV	0 ~ 1 m/s	±0.005 m/s	0.0001 m/s	8	128	10
站点 G	EMCM	0 ~ 5 m/s	±0.01 m/s	0.001 m/s	2	60	10

(Turbulent Kinetic Energy, 缩写为 TKE) 是表征瞬时流速偏离平均流速的绝对强度, 在三维空间尺度上定义为:

$$TKE = \rho(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) / 2$$

式中 $\overline{u'^2}$ 、 $\overline{v'^2}$ 、 $\overline{w'^2}$ 分别为三个方向流速脉动取平方后的平均值。研究表明, 近底层的紊动能 TKE 和底部切应力 τ_b 的比值是一个常数^[25, 26]:

$$\tau_b = C_1 TKE$$

其中 C_1 是比例常数, 在流速变化比较大的情况下 C_1 约为 0.19^[26]。

由于研究区表层沉积物多为细颗粒物, 平均粒径在 $7 \sim 8 \phi$ 之间^[23]。因此, 在计算临界侵蚀切应力 (τ_{cr}) 时采用了适合粘性沉积物的计算公式^[27]:

$$\tau_{cr} = 0.05 + \beta \left\{ \frac{1}{[(\pi/6)(1+sW)]^{1/3} - 1} \right\}^2$$

式中 $s = \rho_s / \rho_w - 1$, ρ_w 为海水密度, ρ_s 为沉积物颗粒密度, β 是与颗粒粒径有关的系数, 根据 Taki2001

年的试验资料, 在中值粒径小于几十微米且表层沉积物含水量较大时取 $\beta = 0.3$, W 为含水量(定义为样品中水的质量与沉积物质量之比), 根据采集的现场表层底质样品的分析获得。悬沙临界沉降切应力 (τ_{crd}) 介于 $0.06 \sim 0.1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间, 但一般为临界侵蚀切应力的一半^[28]。本文取 $\tau_{crd} = 0.08 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, 其值适用于细颗粒悬浮泥沙^[28]。

3 结果与讨论

3.1 台风“凤凰”期间的环境特征

根据中央气象台发布的消息, 2008 年第 8 号热带风暴“凤凰”于 7 月 25 日下午在台湾以东的西北太平洋洋面上生成, 27 日 20:00 加强为强台风, 28 日 06:30 在台湾省花莲县南部沿海登陆, 登陆时台风中心附近最大风力为 14 级 (45 m/s); 于 28 日 22:00 在福建省福清市东瀚镇登陆, 登陆时中心附近最大风力

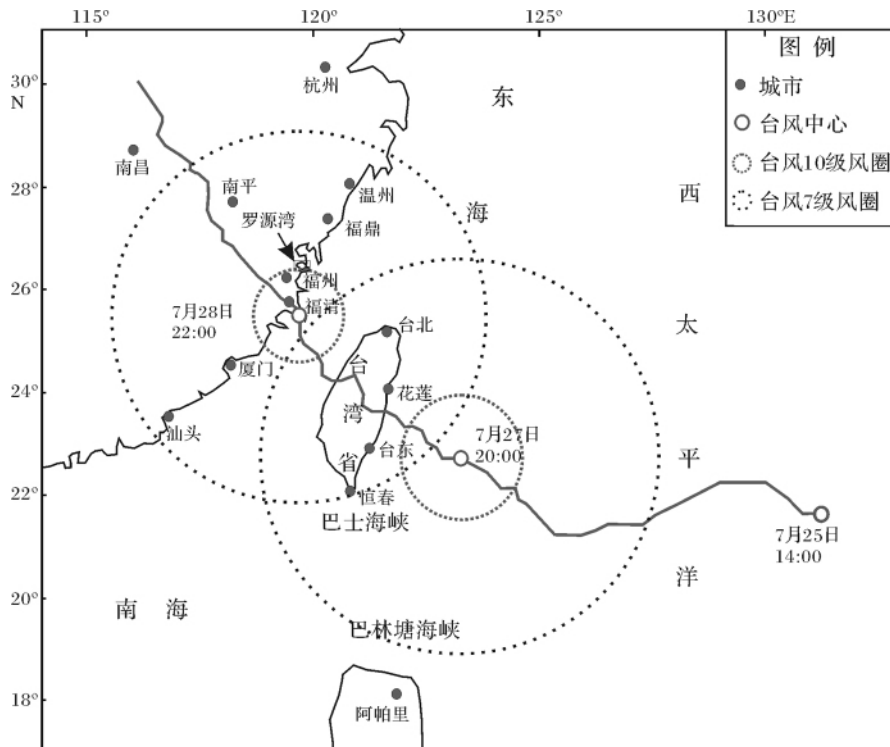


图 2 台风“凤凰”行进路线图

Fig. 2 Location map of path and landing site of typhoon “Fung-wong” (Data from <http://www.fjwater.gov.cn>)

为12级(33 m/s);29日10:00在福建省南平境内减弱为热带风暴,外围最大风力为9级(23 m/s)。根据台风行进路线及风力影响范围,台风7级风圈于7月28日04:00开始影响罗源湾(图2)。

观测结果表明^[23],观测期间在正常天气情况下的平均风速一般小于6.0 m/s,台风显著影响时的平均风速和最大风速分别为10.4 m/s和18.1 m/s,台风登陆时的最大风速在20 m/s以上,台风登陆后风速明显减弱;同样地,正常天气情况下观测站位附近的十分之一最大波高(H_{10})一般小于0.22 m,台风影响期间波高明显加大,而在台风登陆期间水深约为4 m时的 H_{10} 达到了1.54 m,台风登陆后随着风速的逐渐减弱, H_{10} 也逐渐减弱。此次台风影响期间,罗源县气象站记录的24 h内最大降雨量可达到380 mm^[29],在台风登陆后第2天(7月29日)10:00~13:00,利用自制的雨量装置观测到3个小时的降雨量为36 mm。

根据观测期间的风速及波浪观测结果^[23],台风开始显著影响研究区的时间为7月27日至7月28日,即台风登陆前的2个潮周期(滩面每淹没一露出一次为一个潮周期)。

水深观测结果表明(图3a、图4a),观测站位水深总体表现为由大潮向小潮变化,淹没水深总体减小,但受台风影响,站位B和站位G在台风登陆期间的

潮周期内最大水位显著高于台风前一个潮周期最大水位约0.7 m。

3.2 近底层流速

近底层流速观测结果显示,盐沼中下部(站位B)潮流流速很小(图3b),大潮期间最大流速不超过 7 cm s^{-1} ,小潮期间流速小于大潮;涨潮期间滩面刚被涨潮水流淹没期间和落潮后期滩面即将出露期间的流速较大,高平潮期间流速最小,最大流速一般出现在落潮后期滩面即将出露期间。台风登陆前的两个潮周期,正好位于小潮向中潮转换期间,台风影响显著,整个潮周期内潮流流速变化趋势没有明显变化,在每个观测脉冲期间的流速平均值较正常天气情况下小,但最大流速出现在涨潮水流刚淹没滩面时刻。台风登陆期间,正好处于小潮转为中潮的初期,每个观测脉冲期间的流速平均值也比较小,并且在整个潮周期内没有明显变化,但潮周期内潮流变化趋势与正常天气情况下的显著不同,并且潮周期时间长度明显增长,观测站位B潮水淹没时间较正常情况下大,小潮时间长约2 h以上(图3a、b)。

盐沼前缘光滩(站位G)潮流流速很小(图4b),大潮期间最大流速不超过22 cm/s,小潮期间流速平均值小于大潮,涨潮期间滩面刚被涨潮水流淹没期间和落潮后期滩面即将出露期间的流速较大,高平潮期

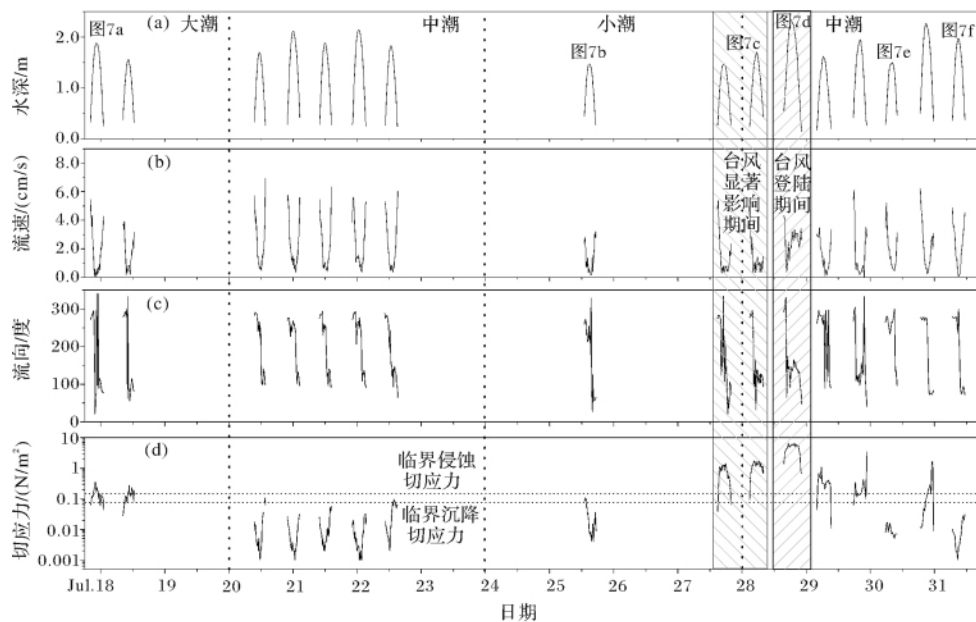


图3. 罗源湾互花米草盐沼中下部(站位B)水深、近底层流速、流向及切应力的变化
(a. 水深; b. 潮流流速; c. 流向; d. 切应力)

注:图中不同潮周期水深之间的不连续空白区为滩面出露时刻。下同

Fig. 3 Variations of water depth, near-bed current speed, direction and shear stress at site B
(a. water depth; b. current speed; c. flow direction; d. shear stress)

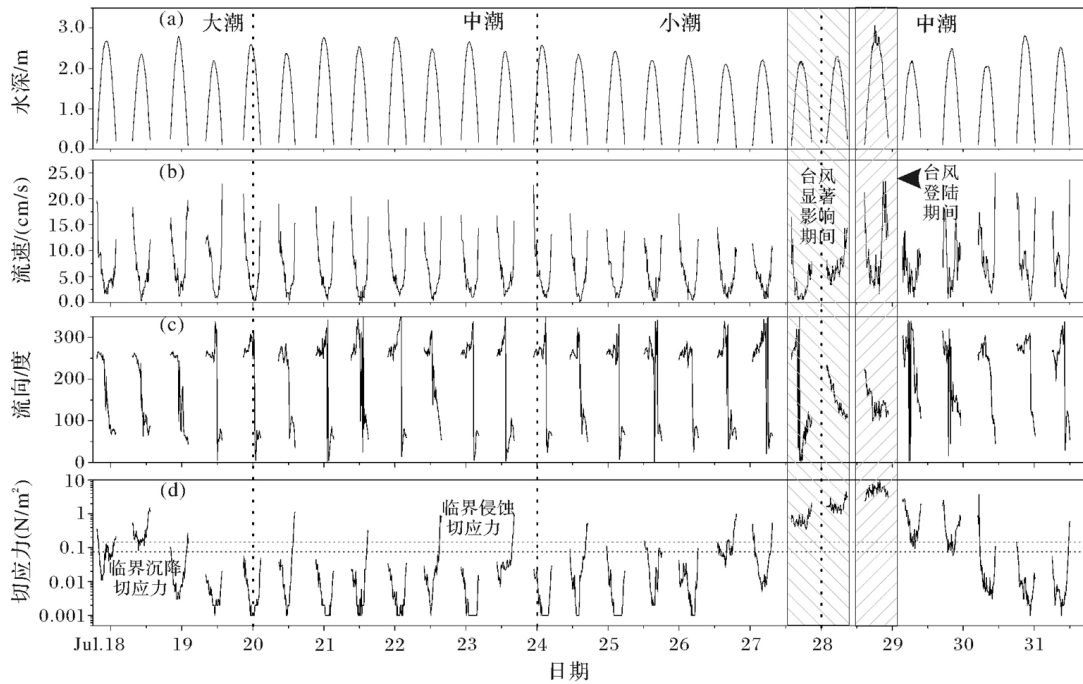


图 4. 罗源湾互花草盐沼前缘光滩(站位 G) 水深、近底层流速、流向及切应力的变化
(a. 水深; b. 潮流流速; c. 流向; d. 切应力)

Fig. 4 Variations of water depth , near-bed current speed , direction and shear stress at site G
(a. water depth; b. current speed; c. flow direction; d. shear stress)

间流速最小, 最大流速一般出现在涨潮流刚淹没滩面期间; 台风显著影响期间(台风登陆前的 2 个潮周期) 整个潮周期潮流流速变化趋势没有明显变化, 但最大流速出现在落潮期间滩面即将出露时刻; 在台风登陆期间, 潮流流速表现出落潮后期潮流流速显著增大, 最大流速为 23.5 cm/s, 并且出现较高流速(近底层流速大于 10 cm/s) 的持续时间约 2.5 h。

虽然台风显著影响和台风登陆期间潮流流速平均值的大小没有明显变化, 但其瞬时波动变化非常显著。图 5 给出了站位 B 和站位 G 在不同潮周期内高平潮后 1.5 h 时刻观测时间段内的瞬时流速波动变化。由图 5 可以看出, 正常天气情况下的流速波动都很小, 但在台风显著影响时刻(台风登陆前 1 天) 的流速波动范围显著变大, 而台风登陆期间的流速波动范围更为显著; 台风登陆后, 随着天气逐渐恢复正常, 流速波动变化幅度显著减小。

3.3 底部切应力

样品分析结果显示, 站位 B 和站位 G 的含水量分别为 0.24 和 0.39, 根据黏性沉积物临界侵蚀切应力计算公式, 计算得到两个站位的 τ_{cr} 分别为 $0.149 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0.112 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

站位 B 的底部切应力计算结果表明(图 3d), 由于观测大潮期间的风速和波浪相对平常较大^[23], τ_b 较大, 多大于 τ_{crd} , 表明大潮期间悬沙很少发生沉降; 尤其是在水位相对较高的时刻, τ_b 大于 τ_{cr} , 这可能与风浪作用有关; 波浪观测结果表明, 水深淹没较大时刻, 波高也相对较大^[23]; 在波浪作用下, 瞬时流速的波动变化相对较大(图 5), 导致计算得到的 τ_b 也相对较大。中潮及小潮期间 τ_b 很小, 一般都小于 τ_{crd} , 表明中潮和小潮期间整个潮周期的近底层悬沙多处于沉降状态。台风显著影响期间, τ_b 显著增大, 并且在潮周期内的变化趋势与中潮及小潮期间的明显不同, 与大潮风浪较大时的 τ_b 变化趋势相似, 说明受风浪作用显著, 瞬时流速变化幅度相对较大(图 5); 此时 τ_b 多大于 τ_{cr} , 表明滩面发生侵蚀。台风登陆期间, 瞬时流速变化幅度非常大(图 5), τ_b 显著大于其它时刻, 整个潮周期内的最小值为 $0.684 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, 最大值可达到 $6.693 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, 表明整个潮周期内海底始终处于侵蚀状态。台风登陆后, 随着风浪作用的减弱, τ_b 逐渐变小, 并且多小于 τ_{crd} , 表明台风过后悬沙多处于沉降状态。

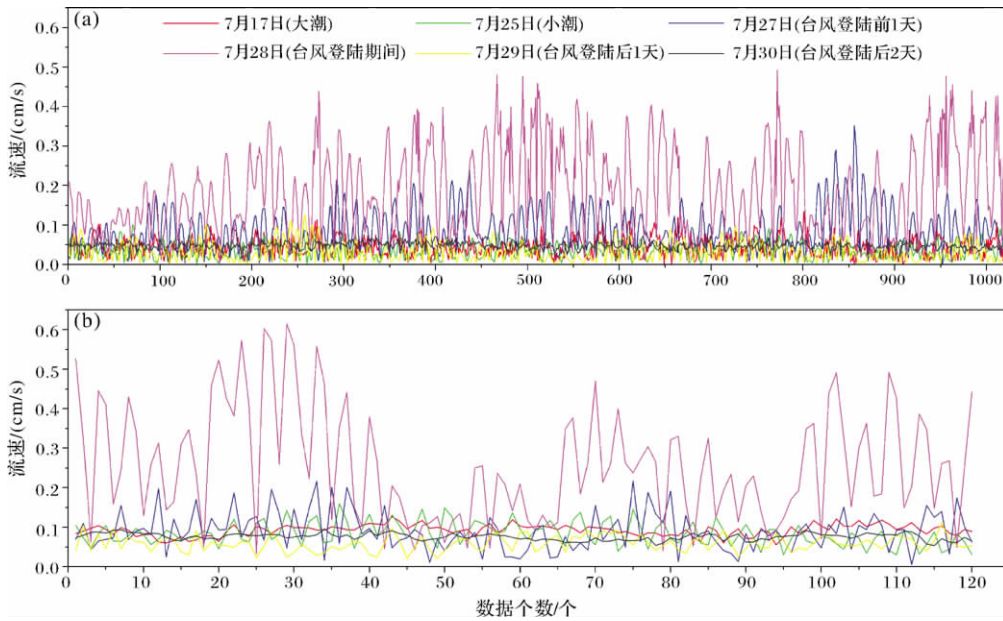


图 5 罗源湾互花米草盐沼及前缘光滩不同潮周期内高平潮后 1.5 h 观测时段内的流速波动
(a. 站位 B; b. 站位 G)

Fig. 5 Fluctuating instantaneous current speed at 1.5 hours after high water level
in different tidal cycles over site B and site G
(a: site B; b: site G)

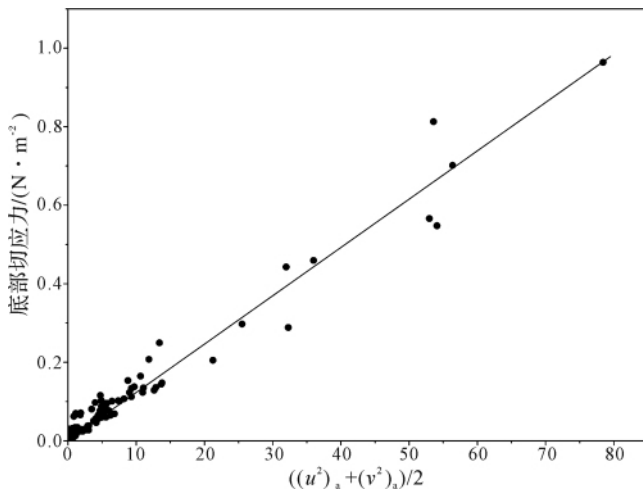


图 6 光滩站位 G 底部切应力与二维流速脉动的关系
Fig. 6 The relationship between bottom shear stress and
fluctuating two-dimensional current velocity over the site G

由于站位 G 底层流速采用的是 EMCM,只能测量平面二维流速,无法计算 TKE 和 τ_b 。由于二维流速的脉动强度也可以在一定程度上反映出水动力的能量变化。因此,根据正常天气情况下的不同潮相利用 ADV 和 EMCM 在站位 G 进行的同层位同步观测数据,进行相关分析,建立 τ_b 与 EMCM 观测得到的二维流速脉动之间的关系。结果表明,根据 ADV 计算

得到的 τ_b 与 EMCM 测量得到的二维流速脉动的平方之间具有非常显著的线性关系(图 6)。根据该统计关系,可以计算出站位 G 在观测期间的连续的 τ_b (图 4d)。由图 4d 可以看出,光滩地区在正常天气情况下,大潮期间的 τ_b 大于小潮,潮周期内涨潮初期和落潮后期的 τ_b 较大,高平潮期间最小,并且涨潮期间的 τ_b 小于落潮;随着台风影响程度的逐渐增大, τ_b 逐渐增大,并且潮周期内的差别逐渐减小;台风登陆期间,整个潮周期内的 τ_b 最大接近 $10 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$,并且涨潮初期和落潮后期相对较小,中间时刻相对较大;台风登陆后随着风浪作用的减弱, τ_b 也逐渐减小。但需要说明的是,由于图 6 的相关分析是在正常天气情况下建立的,是以潮流作用为主的统计关系;而在台风期间,波浪作用非常显著,因此根据该统计关系计算台风期间的 τ_b ,虽然其量级与变化趋势没有大的变化,但其数值的精确度必然受到一定程度的影响。

3.4 台风登陆前后滩面冲淤变化过程

研究表明,台风期间不仅光滩表面会发生侵蚀^[17 21 22],在盐沼下部也会发生侵蚀^[10]。ADV 能够测量探头到滩面的距离,其测量分辨率可达到 0.1 mm,而本次观测期间 ADV 处于刚性固定,因此,测量得到的距离变化可以指示滩面变化情况,这为精确测

量潮周期内滩面冲淤变化提供了可能。由于在观测过程中, ADV 经常要从安装架卸下进行数据下载与仪器维护, 然后再安装上去, 在距离海底高度上必然存在少许误差, 这个误差对于计算底层流速来讲误差很大, 但对于用 ADV 做高分辨率的海底冲淤变化, 则显得误差过大。因此, 在作图过程中, 只能对典型潮周期内的测量数据进行作图分析。

盐沼中下部(站位 B) 的观测结果表明, 观测期间大潮探头距离滩面的高度在稳定中略有增大, 说明在该时段盐沼滩面可能发生了轻微侵蚀(图 7a); 正常天气小潮期间(7 月 25 日) 探头距离滩面高度在波动中总体减小, 说明滩面略有淤积, 整个潮周期内的净淤积厚度为 5.0 mm(图 7b); 在台风登陆前 1 个潮周期, 盐沼滩面表现为阶段性侵蚀, 整个潮周期内的净侵蚀深度为 3.2 mm(图 7c); 而在台风登陆期间, 整个潮周期均表现为连续侵蚀, 在整个潮周期内的净侵蚀深度可达到 18.1 mm(图 7d); 台风登陆后第 3 个潮周期, 天气逐渐恢复平静, 整个潮周期内滩面表现为淤积, 并且淤积主要发生在涨潮期间, 全潮滩面净淤积厚度为 4.4 mm(图 7e); 台风登陆第 6 个潮周期, 在涨潮初期滩面发生淤积, 之后处于稳定的不冲不淤状态, 到落潮中后期, 滩面出现了快速淤积, 但在

落后后期又出现了侵蚀, 整个潮周期内的净淤积厚度为 1.4 mm(图 7f)。

根据对两个观测站位台风前后观测桩的测量结果(图 8), 台风刚登陆后, 两个观测点附近滩面都发生侵蚀, 并且盐沼中下部的侵蚀深度(45.0 mm) 大于光滩(32.0 mm); 台风登陆后 6 个潮周期后(7 月 31 日), 两个站位滩面均发生了淤积, 其中盐沼内淤积厚度为 5.0 mm, 大于光滩的淤积厚度(2.0 mm)。观测桩得到的台风登陆后盐沼中下部的侵蚀深度远大于利用 ADV 观测得到的净侵蚀深度(23.4 mm), 而台风过后的至第 6 个潮周期, 观测桩得到的滩面净淤积厚度略小于 ADV 观测得到的净淤积厚度(10.8 mm)。ADV 观测得到的台风期间侵蚀深度小于观测桩的测量值, 这可能与植被作用有关。ADV 探头安装的海底附近没有植被覆盖, 而观测桩所在位置为植被环绕。由于盐沼植被根系能够起到固结沉积物的作用, 从而保护滩面不受侵蚀^[30], 但台风登陆后的现场调查发现, 观测站位 B 附近原本完整、连续的盐沼被分割的支离破碎, 许多地方出现了互花米草植被在贴近地面的根部被折断, 折断的植物残屑连同附着的沉积物被水流带走, 从而造成滩面侵蚀^[23], 这也可能是盐沼中下部的侵蚀深度大于光滩的原因。台风过

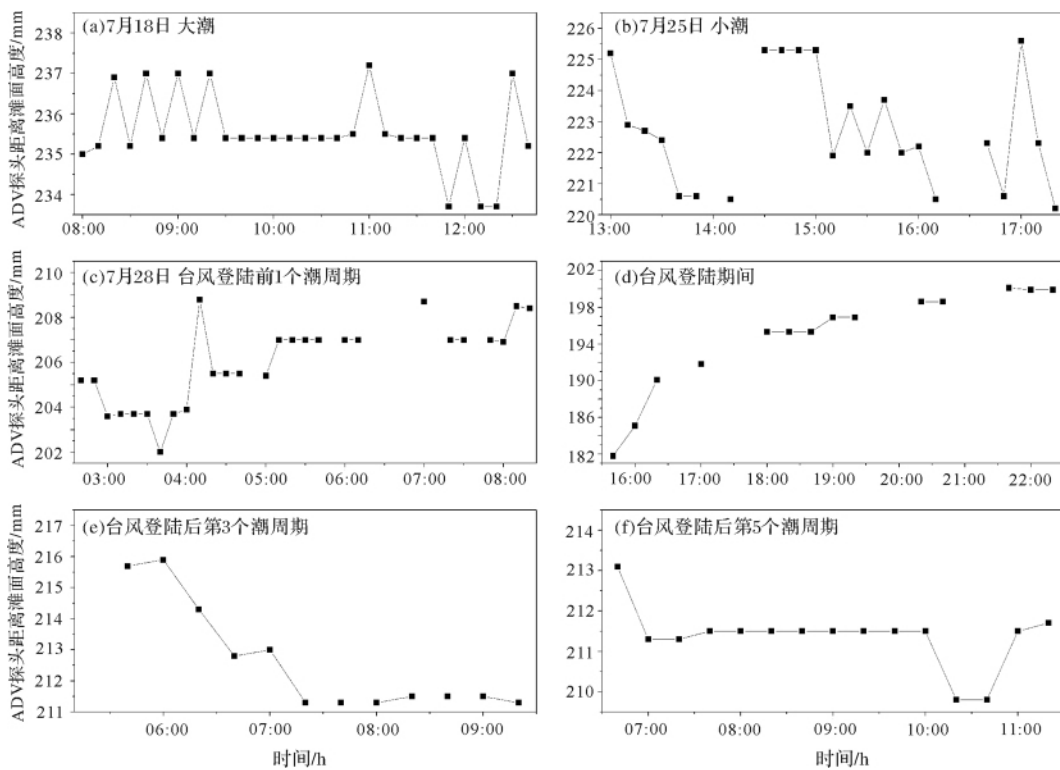


图 7 互花米草盐沼中下部 B 站位 ADV 探头距离滩面高度变化

Fig. 7 Variations of the distance from ADV sensor to seabed over the site B

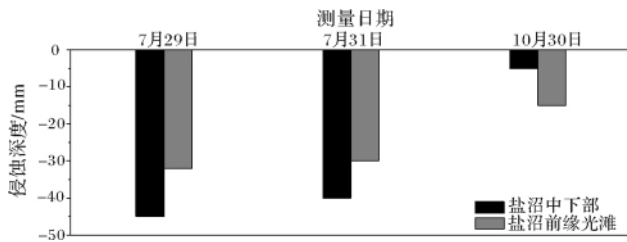


图8 观测站位台风登陆后不同时期的滩面侵蚀深度
Fig. 8 Variations of the erosion depth over the seabed after the typhoon event

后 ADV 观测得到的淤积厚度是海水淹没期间悬沙沉降后初始厚度,此时的沉积物孔隙度和含水量都非常高;在滩面暴露在空气中后,沉积物逐渐脱水,孔隙度下降,导致沉降到滩面的沉积物产生压缩^[31],从而使观测桩测量得到的数据偏小。

根据 ADV 测量得到的侵蚀深度的变化,与底部切应力的时空变化基本一致,即大潮期间多处于不冲不淤状态,仅在少数时刻会发生轻微侵蚀;台风显著影响期间、台风登陆期间及台风登陆后的变化都与底部切应力的变化一致,表明台风期间的滩面侵蚀、淤积主要受底部切应力的控制。对比底部潮流流速的变化,发现台风影响期间潮流流速平均值变化不明显,但流速脉动显著增大,引起底部切应力增大,从而使得表层沉积物发生再悬浮,导致滩面发生侵蚀。台风登陆后,随着风浪的减弱,流速波动幅度显著减小,底部切应力也逐渐减小,悬沙多处于沉降状态,水体中的泥沙大量沉降,导致滩面淤积。

台风过后多久滩面会恢复到台风前的高程?不同区域由于其环境动力特征不同,所需要的时间也不同。英国 Essex 海岸盐沼在台风期间发生侵蚀,大约 2 年后才恢复到台风影响前的滩面高程,如考虑滩面的自然演化趋势,则在台风影响后 5 年才能恢复到正常演化的高程^[32]。浙江三门湾的研究表明,单次台风造成的侵蚀,大约在两个月左右的时间即可恢复;但在多次台风连续作用造成的侵蚀则在 6 个月后仍然没有完全恢复^[21]。本次台风过后 3 个月的测量结果表明(图 8),滩面仍然没有恢复到台风前的高度,但盐沼的恢复速度明显大于光滩。

4 结论

台风显著影响期间的环境动力条件显著加强,对海岸湿地的沉积过程产生重要影响。

(1) 现场观测结果表明,大潮期间盐沼中下部近

底层(距离滩面 10 cm 高度)流速最大值不超过 7 cm/s,盐沼前缘光滩近底层流速不超过 22 cm/s;台风登陆期间流速平均值变化很小,但流速波动变化幅度很大,滩面淹没时间增长约 2 h 左右。

(2) 底部切应力的计算结果表明,台风显著影响期间的底部切应力显著大于正常天气情况下的数值,滩面在整个潮周期内均表现为侵蚀状态;在台风影响减弱后,底部切应力迅速减小,底部切应力在整个潮周期内绝大部分时段都小于临界沉降切应力,水中的悬浮颗粒物发生快速沉降。

(3) 冲淤变化分析表明,观测期间盐沼中下部滩面在大潮期间处于冲淤平衡状态,在台风显著影响、台风登陆期间及台风登陆后初期,滩面处于侵蚀状态,而随着台风的逐渐减弱,滩面开始淤积;但侵蚀深度在台风登陆后 3 个月仍然未恢复到台风登陆前的高程。

(4) 台风期间的滩面侵蚀、淤积主要受底部切应力的控制,台风影响期间近底层潮流流速平均值变化不明显,但流速脉动显著增大,引起底部切应力增大,表层沉积物发生再悬浮,导致滩面发生侵蚀;台风登陆后,随着风浪的减弱,流速波动幅度显著减小,底部切应力也逐渐减小,悬沙多处于沉降状态,水体中的泥沙大量沉降,导致滩面淤积。

致谢 当地居民陈海深参与了项目的野外工作,谨致谢忱!

参考文献(References)

- 1 Knutson T R, Tuleya R E, Kurihara Y. Simulated increase of hurricane intensities in a CO₂-warmed climate [J]. *Science*, 1998, 279: 1018-1020
- 2 Webster P J, Holland G J, Curry J A, et al. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment [J]. *Science*, 2005, 309: 1844-1846
- 3 Webster P J, Curry J A, Liu J, et al. Response to comment on "Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment" [J]. *Science*, 2006, 311: 1713c
- 4 Goldenberg S B, Landsea C W, Mestas-Nu ez A M, et al. The recent increase in Atlantic hurricane activity: causes and implications [J]. *Science*, 2001, 293: 474-479
- 5 Chan J C L. Comment on "Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment" [J]. *Science*, 2006, 311: 1713b
- 6 Landsea C W, Harper B A, Hoarau K, et al. Can we detect trends in extreme tropical cyclones? [J]. *Science*, 2006, 313: 452-454
- 7 Mann M E, Woodruff J D, Donnelly J P, et al. Atlantic hurricanes and climate over the past 1500 years [J]. *Nature*, 2009, 460: 880-883

- 8 廖淦标, 范代读. 全球变暖是否导致台风增强: 古风暴学研究进展与启示[J]. 科学通报, 2008, 53(13): 1489-1502 [Liu Ganbiao, Fan Daidu. Perspectives on the linkage between typhoon activity and global warming from recent research advances in paleotempestology[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(13): 1489-1502]
- 9 Christiansen T, Wiberg P L, Milligan T G. Flow and sediment transport on a tidal salt marsh surface[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2000, 50: 315-331
- 10 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
- 11 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 [Wang Aijun, Gao Shu, Chen Jian, et al. Sediment dynamic responses of coastal salt marsh to typhoon “KAEMI” in Quanzhou Bay, Fujian Province, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(22): 2814-2823]
- 12 Loder N M, Irish J L, Cialone M A, et al. Sensitivity of hurricane surge to morphological parameters of coastal wetlands [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, 84: 625-636
- 13 Wamsley T V, Cialone M A, Smith J M, et al. The potential of wetlands in reducing storm surge [J]. Ocean Engineering, 2009, doi: 10.1016/j.oceaneng.2009.07.018
- 14 Turner R E, Baustian J J, Swenson M, et al. Wetland sedimentation from hurricanes Katrina and Rita[J]. Science, 2006, 314: 449-452
- 15 Fan D D, Guo Y X, Wang P, 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: 517-538
- 16 Feagin R A, Williams A M. Sediment spatial patterns in a hurricane Katrina overwash fan on Dauphin Island, Alabama, U. S. A [J]. Journal of Coastal Research, 2008, 24: 1063-1070
- 17 任美镔, 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 [Ren Meibin, Zhang Renshun, Yang Juhai, et al. The influence of storm tide on mud plain coast: with special reference to Jiangsu Province [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1983, 3(4): 1-24]
- 18 许世远. 长江三角洲地区风暴沉积研究[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 150 [Xu Shiyuan. Study on Storm Deposits in Changjiang Estuary Delta[M]. Beijing: Science Press, 1997: 150]
- 19 Hippensteel S P. Preservation potential of storm deposits in south Carolina back-barrier marshes [J]. Journal of Coastal Research, 2008, 24: 594-601
- 20 Collins E S, Scott D B, Gayes P T. Hurricane records on the South Carolina coast: can they be detected in the sediment record? [J]. Quaternary International, 1999, 56: 15-26
- 21 夏晓明, 谢钦春, 李炎, 等. 港湾淤泥质潮滩的周期变化[J]. 海洋学报, 1997, 19(4): 100-108 [Xia Xiaoming, Xie Qinchun, Li Yan, et al. Cycle variations of embayment mud inter-tidal flat [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1997, 19(4): 100-108]
- 22 谢钦春, 马黎明, 李伯根, 等. 浙江三门湾猫头深潭风暴快速沉积研究[J]. 海洋学报, 2001, 23(5): 78-86 [Xie Qinchun, Ma Liming, Li Boyin, et al. Storm rapid sedimentation of Maotou deep trough in the Sanmen Bay of Zhejiang [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(5): 78-86]
- 23 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. Effect of typhoon on sedimentary processes of embayment tidal flat: A case study from the “Fenghuang” typhoon in 2008 [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(6): 77-86]
- 24 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第七分册) [M]. 北京: 海洋出版社, 1994: 104-154 [State Oceanic Administration. China's Coastal Embayment (V. 7: Northern Fujian Coastline) [M]. Beijing: China Ocean Press, 1994: 104-154]
- 25 Soulsby R L, Dyer K R. The form of the near-bed velocity profiles in a tidally accelerating flow [J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86: 8067-8074
- 26 Stapleton K R, Huntley D A. Seabed stress determinations using the inertial dissipation method and the turbulent kinetic energy method [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1995, 20: 807-815
- 27 Taki K. Critical shear stress for cohesive sediment transport [C] // McAnally W H, Mehta A J Ed. Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes. Elsevier Science, 2001: 53-61
- 28 Whitehouse R, Soulsby R, Roberts W, et al. Dynamics of Estuarine Muds[M]. London: Thomas Telford, 210
- 29 李景阳. “凤凰”挟风裹雨 专家透视解析 [N]. 中国天气网, 2008, 2008-07-29, <http://www.weather.com.cn/static/html/article/20080729/10338.shtml> [Li Jingyang. Expert's deep explanation: strong wind and heavy rain with “Fenghuang” [N]. China Weather Web, 2008, 2008-07-29, <http://www.weather.com.cn/static/html/article/20080729/10338.shtml>]
- 30 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: 679-682
- 31 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: 1155-1231
- 32 Pethick J S. Saltmarsh Geomorphology [C] // Allen J R L, Pye K, ed. Saltmarshes: Morphodynamics, Conservation and Engineering Significance. Cambridge, Cambridge University Press, 1992: 41-62

Environmental Dynamic Mechanisms for Sediment Erosion and Accretion over Embayment Coastal Wetland during Typhoon Event: A case study from Luoyuan Bay , Fujian China

WANG Ai-jun YE Xiang LI Yun-hai

(Open Lab of Coast and Ocean Environmental Geology , Third Institute of Oceanography , State Oceanic Administration , Xiamen Fujian 361005)

Abstract: In order to understand the processes and mechanisms of sediment erosion and accretion caused by typhoon event , in situ measurements of water level , tidal current speed and direction were carried out using Acoustic Doppler Velocimeter (ADV , Vector by Nortek) , Electromagnetic Current Meter (EMCM , AM HR by ALEC) , and miniature pressure sensor (MkV/D by ALEC) at two sites over coastal wetlands in Luoyuan Bay , during the period when typhoon " FUNG-WONG" was impacting region. Observed results showed that the water inundation time increased about 2 h in the tidal cycle during the typhoon landing , and the mean value of current speed varied slightly , but the fluctuation of current speed during a short time significantly increased , then the bottom shear stress also increased obviously , which brought about seabed erosion. After the typhoon landed , the current speed fluctuation decreased significantly , and the bottom shear stress also decreased obviously , then the suspended sediment settled on the seabed heavily , which resulted in seabed accretion. The sediment erosion and accretion during the typhoon event over embayment coastal wetlands was controlled by the variations of bottom shear stress.

Key words: embayment coastal wetland; typhoon event; erosion; accretion; environmental dynamic