

福建泉州湾盐沼对台风“格美”的沉积动力响应

王爱军^{*}, 高抒^{*}, 陈坚^{*}, 李东义^{*}

南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210093;

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

E-mail: ajwang@163.com

2008-04-29 收稿, 2008-06-27 接受

国家自然科学基金(批准号: 40606012)和福建省自然科学基金(批准号: D0510025)资助项目

摘要 为了探讨海岸盐沼在台风条件下的海岸防护机制, 利用小型压力传感器、电磁式流速仪、Seapoint 浊度计观测了互花米草盐沼、光滩在 2006 年“格美”台风登陆前后的水位、流速、流向、悬沙浓度等沉积动力参数。结果显示: 互花米草盐沼内底层流速一般小于 $5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 明显低于光滩($5 \sim 35 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$); 互花米草盐沼内底层流速大小对台风的响应不显著, 但其流向随台风作用强度的不同而出现较大差异; 台风过境对附近海域悬沙浓度的影响非常显著, 悬沙浓度达到正常天气情况下的 13~19 倍, 台风影响后期互花米草盐沼底层悬沙浓度高于光滩。计算结果表明, 台风期间互花米草盐沼和光滩底层悬沙输运量是平常天气情况下的 4 倍左右; 落潮期间, 光滩底部切应力在大部分时间大于临界切应力, 滩面发生侵蚀, 台风登陆后的侵蚀通量为正常天气情况下的 2~3 倍不等, 而互花米草盐沼底层切应力一般小于临界侵蚀切应力, 符合悬沙沉降条件的时间段也比较长, 整个滩面很少发生侵蚀, 以沉降为主, 台风显著影响期间的悬沙沉降通量是正常天气情况下的 3~6 倍, 落潮期间的沉降通量是涨潮期间的 1~2 倍。根据台风期间互花米草盐沼和光滩的沉积动力过程的对比, 前者有利于悬沙的堆积, 而光滩的沉积动力过程则使滩面发生侵蚀。

关键词

盐沼

沉积动力过程

台风

互花米草

福建海岸

海岸盐沼是介于陆地和海洋之间的过渡地区, 不仅为潮间带生物提供了栖息场所^[1], 而且可以起到加速淤积、防止海岸侵蚀的作用, 尤其是在极端天气事件(如台风、大浪等)发生的情况下, 盐沼的海岸防护作用更为显著^[2,3]。台风发生时经常伴随着沉积物输运强度和沉积物来源的变化。国外研究表明, 盐沼植被对台风大浪具有较强的缓冲作用, 这是由于盐沼细颗粒沉积物被盐沼植被根系所固定^[4], 正常潮汐情况下盐沼淤积主要发生在中下部, 而在台风期间盐沼上部的淤积很显著^[5], 且海岸盐沼沉积物主要来源于岸外, 陆地洪水和河流输入物质相对较少^[3]。台风对海岸沉积过程的影响受台风强弱、台风登陆时的潮汐位相等因素的影响^[6,7]。我国是受台风影响较为严重的国家, 由于海岸类型的多样化, 台风作用下的冲淤状况各有不同。例如, 在台风的作

用下, 三角洲高潮线陡坎后退并形成了贝壳滩或贝壳堤^[8], 江苏淤泥质海岸地区的潮间带一次侵蚀深度可达到 0.6 m, 改变了潮滩的正常淤积模式^[9]; 长江三角洲地区的台风沉积层厚度在沉积剖面中所占比例可高达 30%~40%^[10]; 浙江三门湾内潮滩的一次侵蚀量可达到 0.1 m 量级^[11]。福建是我国遭受台风袭击最为严重的沿海省市之一, 海岸沉积过程对台风响应的研究主要集中在砂质海岸^[12], 而淤泥质海岸的冲淤观测至今尚未进行。

由于现场观测难度大, 台风登陆期间的现场观测数据十分缺乏, 使得滩面冲淤过程和台风沉积体系形成过程的研究难以深入。近年来随着观测手段的不断改进, 先进的电磁式流速仪、光学后向散射浊度计(OBS)、声学多普勒流速仪(ADV)等观测仪器不断成功应用到海岸环境^[13~15], 为台风期间盐沼沉积

动力学的观测研究提供了技术手段^[13]。本文的目的是根据 2006 年 7 月台风“格美”(KAEMI)登陆前后在泉州湾南部潮间带进行的电磁式流速仪、光学后向散射浊度计(OBS)及小型压力传感器观测,分析盐沼湿地在台风影响下的沉积动力过程,并与邻近的无盐沼植被覆盖的滩面进行对比,以解释盐沼湿地在台风作用时的促淤功能。

1 研究区概况

本文选择福建泉州湾南部的海岸盐沼作为研究区,采样和水文观测站位于盐沼中上部的互花米草盐沼和附近的光滩(图 1)。泉州湾位于福建东南部沿海,湾口向东开敞。泉州湾潮汐为正规半日潮,平均潮差 4.27 m,属强潮海湾;潮流性质为正规半日潮流,潮流运动表现为往复运动,实测最大流速出现在晋江河口,最大可达 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上;波浪常年以 NNE-NE 向、SSW 向风浪与 SE 向的涌浪所形成的混合浪为主,深水区平均波高多在 0.7~1.1 m 之间;每年 7~9 月为台风季节,对泉州湾的影响较为频繁,统计资料显示平均每年影响泉州湾的台风次数为 5.7 次^[16]。研究区的潮间带宽度约为 3 km,滩面坡度较小,淤泥厚度较大。泉州湾海岸的盐沼植被主要有红树林和互花米草,互花米草分布范围较广,占据了潮间带中上部的大部分滩涂,形成了大片斑块状分布的互花米草盐沼,其间有小片光滩分布。

2 材料与方法

2.1 台风“格美”概况

根据中央气象台 2006 年 7 月 25 日发布的台风登陆消息,2006 年第 5 号台风“格美”(KAEMI)的中心于 25 日 15:50 在福建晋江围头镇沿海登陆(图 2),登陆时中心附近最大风力为 12 级($33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。根据台风登陆前后厦门气象站记录的观测(图 3),从 7 月 24 日开始,气压逐渐降低,但风速变化不大;到 7 月 25 日上午,气压迅速降低、风速显著增大,到 11:00 时,10 级风范围已经覆盖了研究区。7 月 26 日凌晨,风速显著减弱。

2.2 现场观测

于 2006 年 7 月 24 日(农历六月二十九)~7 月 27 日(农历七月初三),在研究区潮滩上部选择了互花米草盐沼和附近的光滩进行了沉积动力综合观测(观测站位见图 1),其中互花米草盐沼站位北侧 5 m 为潮水沟,西侧 6 m 为光滩;光滩站位到互花米草盐沼边缘的距离为 4~6 m。使用小型自容式电磁流速仪(AEM HR)、超小型自容式深度仪(MDS-MkV/D)、OBS 浊度计采集了 6 次漫滩期间的流速、流向、水位及浊度变化过程;观测期间以仪器观测架(图 4)为参照高度,目测了台风登陆前后的波浪变化状况。

观测中共使用了 4 个电磁式流速仪、2 个小型深

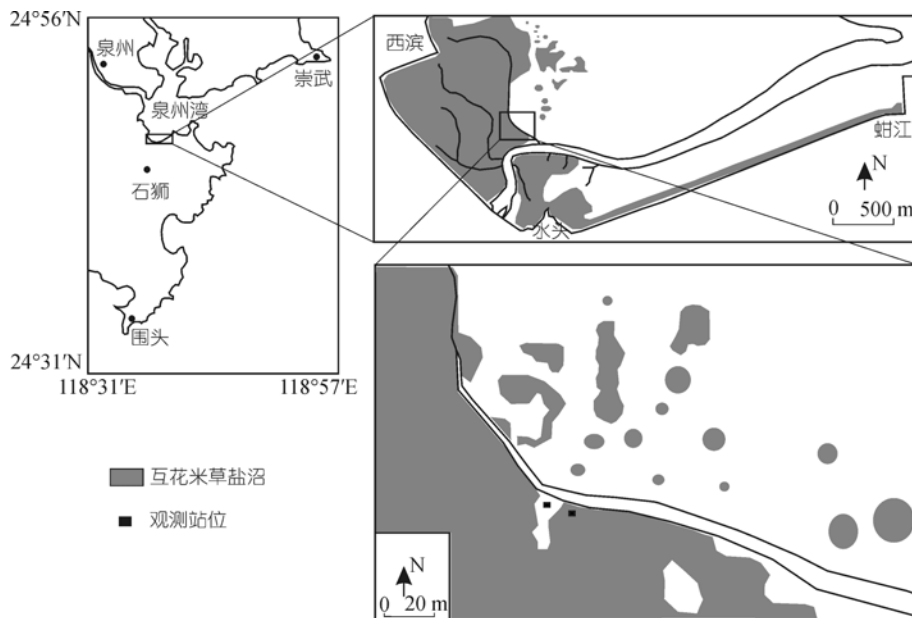


图 1 研究区位置及观测站位

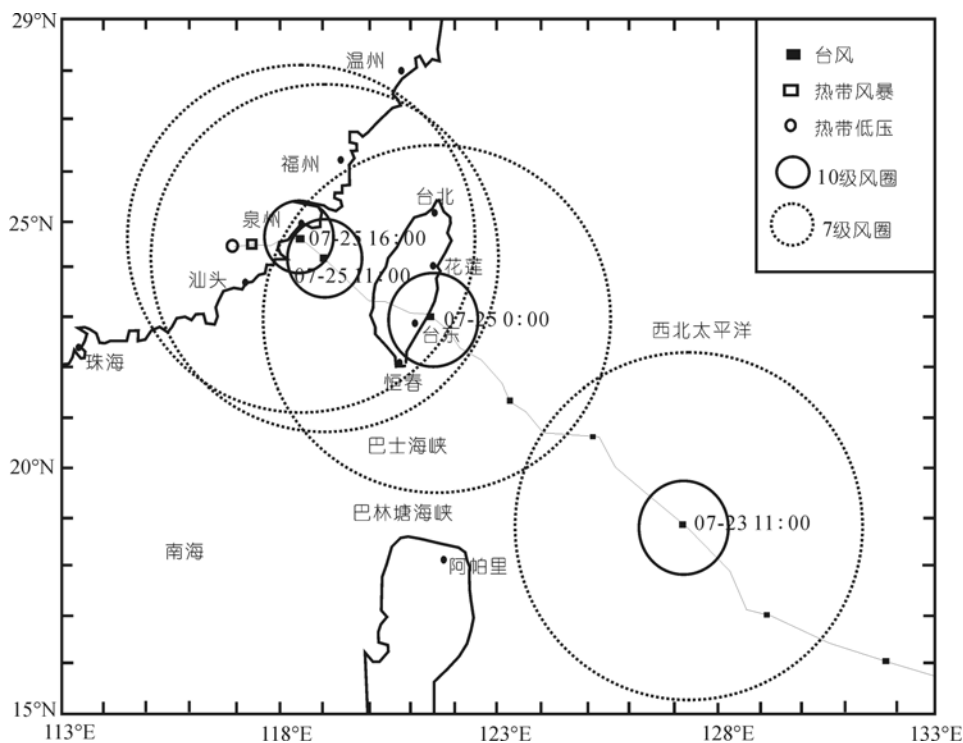


图 2 2006 年台风“格美”行进路径及登陆位置示意图

数据来源: <http://218.108.15.77/typhoneweb/>

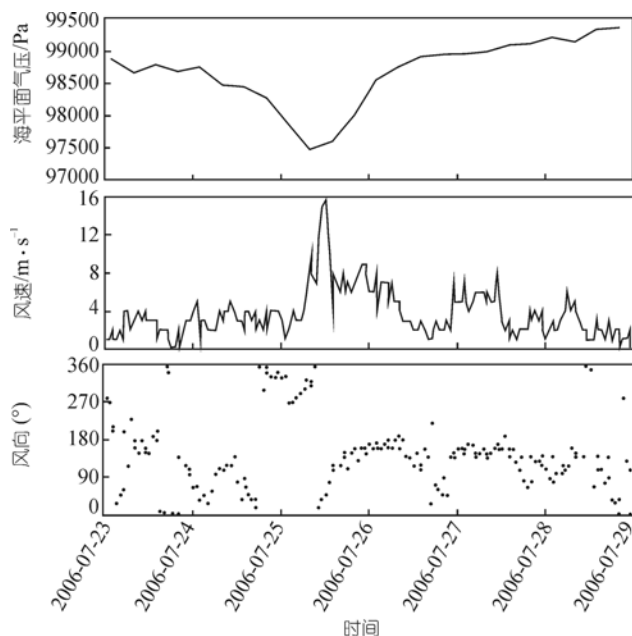


图 3 台风“格美”期间厦门附近海域气压、风速、风向

数据来源: <http://envf.ust.hk/dataview/gts/current/>

度仪、2 个含有 OBS 浊度计的 SD204CTD(传感器安装及采样频率设置见表 1), 所有传感器均固定在不锈钢观测架上(图 4)。电磁式流速仪的流速和流向测

量范围分别为 $0\sim5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0^\circ\sim360^\circ$, 分辨率分别为 $0.02\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 0.01° ; 深度仪的测量范围为 $0\sim100\text{ m}$, 分辨率和精度分别为 2.5 cm 和 $\pm 1\%$; OBS 浊度传感器是通过探测水体中悬浮颗粒散射后的光强, 记录水体浊度。

2.3 样品分析

在观测中, 用自制采水器在两个站位共采集了 47 个底层水样, 在 7 月 27 日上午落潮后采集了两个站位的表层沉积物样品。采集的水样在室内用 $0.045\text{ }\mu\text{m}$ 的滤纸过滤, 低温烘干后, 经空白膜校正后计算出悬沙浓度; 对台风影响前及台风显著影响期间互花米草盐沼内的悬沙样品经超声波振荡后用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪进行了粒度分析; 从采集的表层沉积物样品中分别取出 2 g 左右的子样放入小烧杯, 加入 0.5% 的六偏磷酸钠溶液浸泡 24 h , 经过超声波振荡后在激光粒度仪上进行粒度分析。沉积物平均粒径采用矩法计算^[17]。

2.4 数据处理与计算

导出观测获得的浊度数据, 将浊度与悬沙浓度进行相关分析, 建立悬沙浓度与浊度之间的计算关

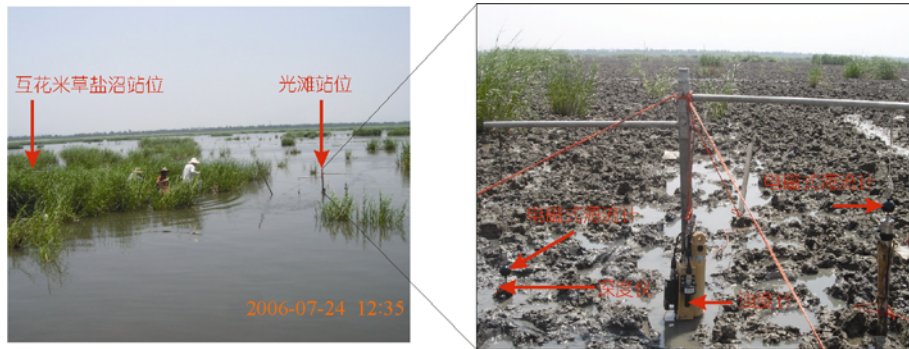


图4 滩面观测仪器的设置方式

表1 传感器安装及采样设置

仪器类型	距地面高度/cm	地貌位置	采样时间间隔	获取数据时间段(2006 年)
AEM HR	50	互花米草盐沼	1 次/10 s	07-24 23:00~07-27 02:25
AEM HR	50	光滩	1 次/10 s	07-24 10:50~07-27 02:20
AEM HR	15	互花米草盐沼	1 次/1 s	07-24 10:22~07-26 13:50
AEM HR	15	光滩	1 次/10 s	07-24 10:32~07-27 02:50
MDS-MkV/D	15	互花米草盐沼	1 次/60 s	07-24 10:20~07-27 03:00
MDS-MkV/D	15	光滩	1 次/60 s	07-24 10:20~07-27 03:00
SD204 CTD	15	互花米草盐沼	1 次/20 s	07-24 10:30~07-27 03:00
SD204 CTD	15	光滩	1 次/20 s	07-24 10:30~07-27 03:00

系式, 将浊度信息转化为悬沙浓度数据. 用所获流速和悬沙浓度数据计算悬沙水平通量:

$$q_s = C \cdot u, \quad (1)$$

其中, q_s 为悬沙运输的水平通量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), u 和 C 分别为某一固定水层的流速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和悬沙浓度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), 在一个潮周期内对式(1)进行积分, 即可得到流速所在层位的悬沙的潮周期输运总量(即净输运量).

判断悬浮泥沙沉降和表层沉积物侵蚀的方法是: 对比底部切应力与临界沉降切应力(τ_{crd})及临界侵蚀切应力(τ_{cr}), 具体计算采用以下针对河口海岸地区细颗粒沉积物的计算公式^[18]:

$$\tau = \rho_w \left(\frac{\kappa}{\ln(Z/z_0)} \right) u_Z^2, \quad (2)$$

$$F_E = E \cdot \left(\frac{\tau}{\tau_{\text{cr}}} - 1 \right), \quad \tau > \tau_{\text{cr}}, \quad (3)$$

$$F_D = \omega_s \cdot C \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{\text{crd}}} \right), \quad \tau < \tau_{\text{crd}}, \quad (4)$$

其中, τ 为底部切应力($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$), κ 为卡门常数(取 $\kappa = 0.4$), ρ_w 为海水密度, Z 为距离滩面高度(m), z_0 为底部粗糙长度(研究区表层沉积物为泥, 根据 Soulsby^[19] 的统计分析, 取 $z_0 = 0.2 \text{ mm}$), u_Z 为距离滩面高度 Z 处的流

速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), F_E 为侵蚀通量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), F_D 为沉降通量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), E 为再悬浮系数($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), τ_{cr} 为临界侵蚀切应力, ω_s 为悬沙沉降速率($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), C 为底层悬沙浓度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), τ_{crd} 为悬沙临界沉降切应力. E 的大小与沉积物组分有关, 根据 Houwing^[20] 对黏性沉积物的研究结果, 其值介于 $4 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-3}$, 根据本研究区沉积物中泥的含量及 Robert 和 Whitehouse^[21] 的推荐, 取 $E = 5 \times 10^{-5}$. 由于研究区表层沉积物多为细颗粒物质, 在计算临界切应力时采用了适合黏性沉积物的计算公式^[22]:

$$\tau_{\text{cr}} = 0.05 + \beta \left\{ \frac{1}{[(\pi/6)(1+sW)]^{1/3} - 1} \right\}^2, \quad (5)$$

其中, $s = \rho_s/\rho_w - 1$, ρ_s 为沉积物颗粒密度, β 是与颗粒粒径有关的系数, 根据 Taki^[22] 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^[21]), 根据采集的现场表层底质样品的分析获得. 根据 Lumborg^[23] 的统计分析, τ_{crd} 介于 $0.01 \sim 0.1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间, 本文取 $\tau_{\text{crd}} = 0.05 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, 其值适用于细颗粒悬浮泥沙. 由于潮滩地区细颗粒悬浮泥沙在水流紊动的情况下容易发生絮凝, 从而使悬沙的输运和沉降过

程发生改变^[24], 而絮凝体的形成和沉降过程受盐度、水温、悬沙浓度、流速等环境要素的影响显著^[25], 因此, 在计算沉降速率的过程中采用适合絮凝体沉降速率的公式^[26]:

$$\omega_s = \omega_{s0} \frac{1 + c_2 C^{m_2}}{1 + c_1 u^{m_1}} k'_s, \quad (6)$$

式中, ω_s 为悬沙絮凝体沉降速率, c_1 , c_2 , m_1 , m_2 均为实验得到的系数, 取值各为 $c_1=0.06$, $c_2=4.6$, $m_1=0.75$, $m_2=0.6$; k'_s 为与盐度有关的系数, 当盐度为 30 时, $k'_s=3.8$; ω_{s0} 为单颗粒中值粒径 d_{50} 的 Stokes 沉降速率; C 为悬沙浓度, u 为流速.

3 结果

3.1 水样及表层沉积物粒度组成

粒度分析结果显示(图 5), 光滩和互花米草盐沼表层沉积物黏土($<4\mu\text{m}$)含量分别为 21.95% 和 20.90%, 粉砂($4\sim63\mu\text{m}$)含量分别为 79.26% 和 59.43%, 平均粒径分别为 8.9 和 $15.1\mu\text{m}$. 台风影响初期悬浮泥沙平均粒径为 $10.5\mu\text{m}$, 黏土和粉砂含量分别为 16.08% 和 79.46%, 而台风影响较显著时平均粒径为 $13.9\mu\text{m}$, 黏土和粉砂含量分别为 13.34% 和 77.15%, 说明随着台风影响逐渐增强, 悬沙粒径明显增大. 已有研究表明, 互花米草盐沼内的沉积物较相邻其他类型盐沼及光滩表层沉积物细^[27,28], 在通常情况下泉州湾互花米草盐沼表层沉积物也较光滩表层细^[29]. 本项研究中台风期间的表层样粒度分析结果正好与之相反, 这是由于台风影响显著时水流带来的粗颗粒物在植被的作用下发生沉降, 导致台风过后采集的盐沼表层沉积物平均粒径较粗. 图 5 显示, 互花米草盐沼表层沉积物中粗颗粒部分含量较高, 分选程

度较差, 与台风显著影响时的悬沙组分有较好的对应, 而光滩沉积物粒度分布与台风影响初期悬沙粒度组分一致, 说明其主要来源于正常天气情况下的悬沙沉降.

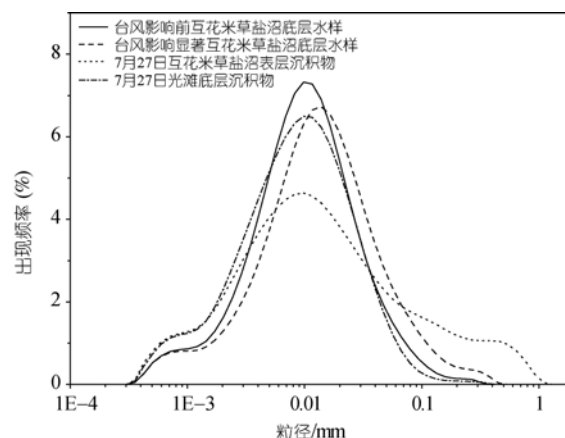


图 5 互花米草盐沼内底层悬沙及表层沉积物粒径分布

3.2 水位、流速、流向和悬沙浓度

水位观测结果显示(图 6), 泉州湾潮间带上部水深由中潮后期(7月24日为农历六月二十九)向大潮期逐渐增大. 水位变化率计算结果显示(图 7), 在台风显著影响的潮周期内, 光滩和互花米草盐沼水位在高平潮后 15~30 min 及 60~75 min 之间的水位变化率为正值(表示水位上升), 并且中层(距离滩面 50 cm)水流流向在这两个时刻也发生了转向(图 8, 9), 说明在落潮期间出现了水流复涨的现象. 这可能是由于在落潮期间, 台风逼近岸边, 10 级风半径圈逐渐覆盖了研究区附近海域(图 2), 致使岸边水流发生了短暂的转向.

互花米草盐沼中层(距滩面 50 cm)、底层(距滩面

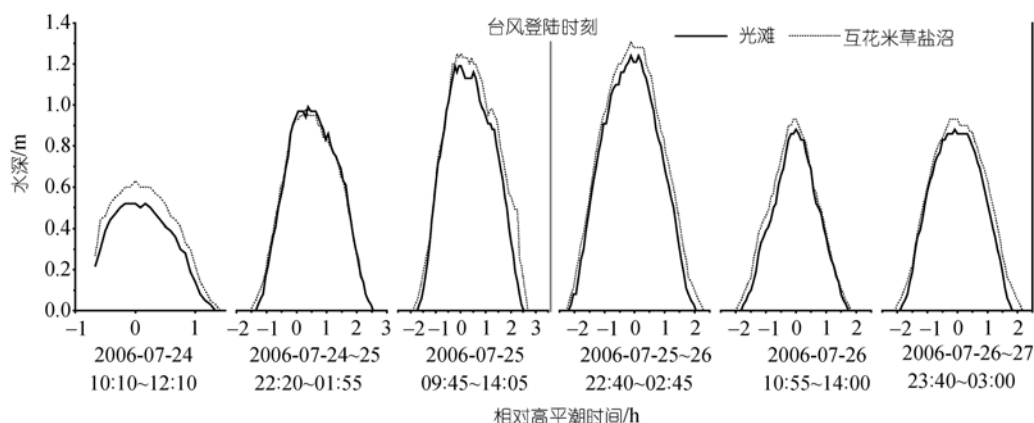


图 6 台风登陆前后互花米草盐沼与相邻光滩水位变化过程

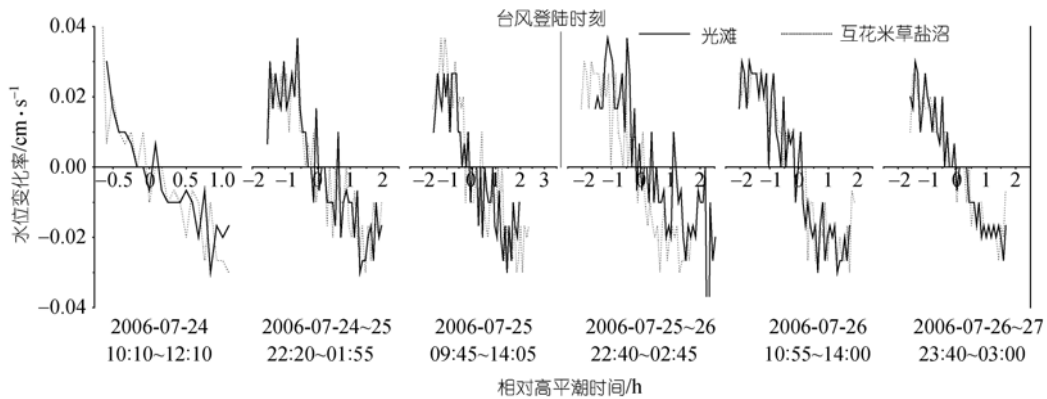


图7 台风登陆前后互花米草盐沼与相邻光滩水位变化率

15 cm)流速与光滩流速变化趋势一致(图 8, 9), 但互花米草底层流速一般小于 $5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 显著小于相邻光滩底层(一般介于 $5 \sim 35 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$), 这与前人在别处的观测结果一致^[30-33]。观测结果还显示, 互花米草盐沼测站最大流速一般出现在落潮期间, 这可能是由于该站靠近潮水沟而导致的, 这种现象Christiansen等人^[13]曾进行过研究。互花米草盐沼底层水流转向滞后于光滩, 并且随着台风作用强度的增大, 水流转向滞后更为显著(图 9)。

根据水样过滤得到的悬沙浓度与 Seapoint 浊度计数据之间具有很好的线性相关性, 互花米草盐沼和光滩的相关系数分别达到 0.853(23 个水样)和 0.928(24 个水样)。因此, 我们据此将光滩和互花米草盐沼水体的浊度换算为悬沙浓度(图 8, 9)。在正常天气情况下, 互花米草盐沼和光滩的悬沙浓度值均较小(落潮平均悬沙浓度分别为 47.73 和 $35.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 随着台风逐渐增强, 悬沙浓度值迅速增大, 互花米草盐沼和光滩的潮周期平均悬沙浓度最大时分别达到了 640.33 和 $678.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 比正常天气提高了一个数量级。台风过境后强度逐渐减弱, 但水体仍然保持了较高的悬沙浓度(图 9), 说明台风过境对附近海域悬沙浓度有非常显著的影响。

落潮期间互花米草盐沼底层悬沙浓度大于光滩底层, 这与以往研究结果不一致^[30,32,33], 可能与局部的沉积动力过程有关。光滩站位的落潮流速指向互花米草盐沼(图 10(a)), 落潮流携带的悬浮物质进入盐沼后受水流的阻滞而发生沉降, 导致底部悬沙浓度的提高。

3.3 底层悬沙输运量

底层悬沙输运量的计算结果如图 10 所示。光滩

底层悬沙输运量在正常天气情况下净向岸输运, 而在台风影响期间, 悬沙输运量是平常天气情况下的 4~5 倍, 净输运方向变为向海; 互花米草盐沼底层悬沙输运量在显著小于光滩底层, 台风影响期间的底层悬沙输运量是正常天气情况下的 3~4 倍, 净向岸输运。

悬沙输运量的差异主要与流速和悬沙浓度因素有关。在互花米草盐沼, 受台风的影响, 虽然落潮流速大于涨潮流速, 但因涨潮输运时间长于落潮, 使得台风影响期间的悬沙向岸输运。在光滩的站位, 正常天气情况下涨落潮历时接近, 虽然流速以落潮流速占优, 但涨潮悬沙浓度大于落潮, 使得底层净输沙指向海岸; 在台风影响期间, 落潮历时得到延长, 因而出现向海的悬沙净输运。

3.4 床面冲淤通量

互花米草盐沼和光滩表层沉积物的含水量分别为 0.82 和 0.54, 通过公式(5)计算, 光滩和互花米草盐沼临界底部切应力约为 $0.1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, 与已有报道一致^[20,34]。利用本文实测底层流速数据, 根据式(2)计算得到底部切应力, 计算结果显示(图 11), 互花米草盐沼和光滩底部切应力的变化范围分别在 $8 \times 10^{-5} \sim 1.3 \times 10^{-1} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $2.9 \times 10^{-3} \sim 2.0 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间。

互花米草盐沼底部切应力随潮水涨落及台风强度的不同而出现变化, 仅在台风影响减弱时的退潮后期, 滩面底部切应力大于临界切应力(图 11(a)), 滩面发生短暂的侵蚀, 根据式(3)的计算, 其侵蚀通量约为 $0.297 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 其他时刻均不发生侵蚀; 光滩底部切应力在大部分时刻大于临界切应力(图 11(b)), 滩面出现侵蚀。侵蚀通量计算结果(表 2)表明, 光滩滩面侵蚀最大强度并不是出现在台风影响最显著的 7 月 25 日, 这可能与台风作用与潮汐的位相有关。本

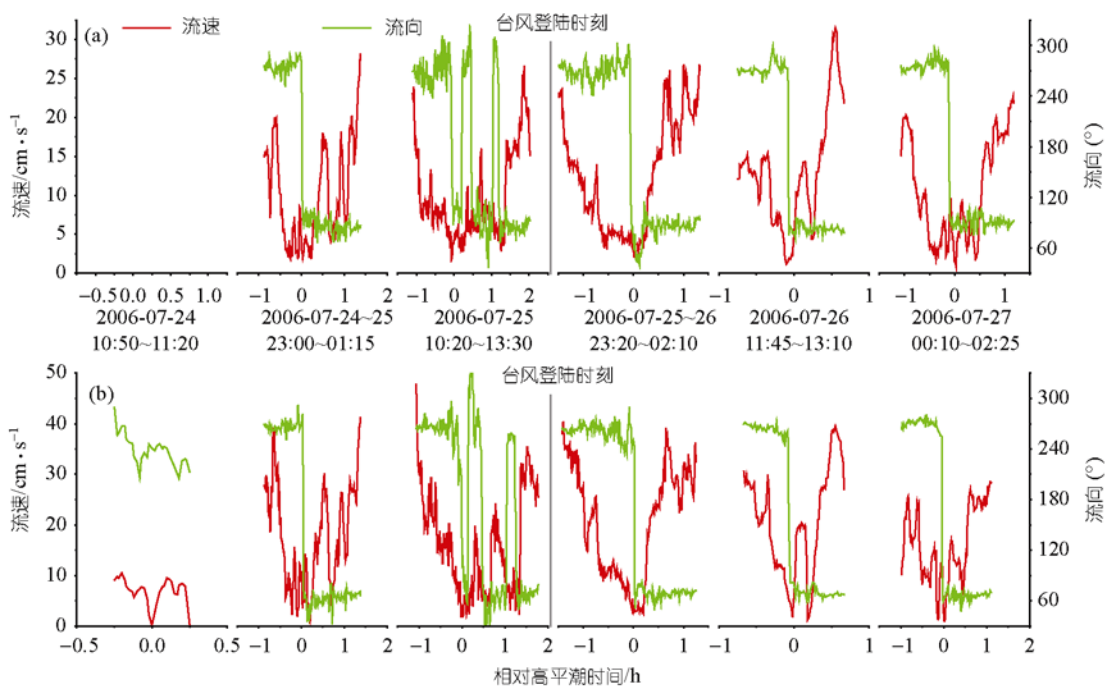


图 8 台风登陆前后互花米草盐沼与相邻光滩中层(距床面 50 cm)流速变化过程
(a) 互花米草盐沼; (b) 光滩

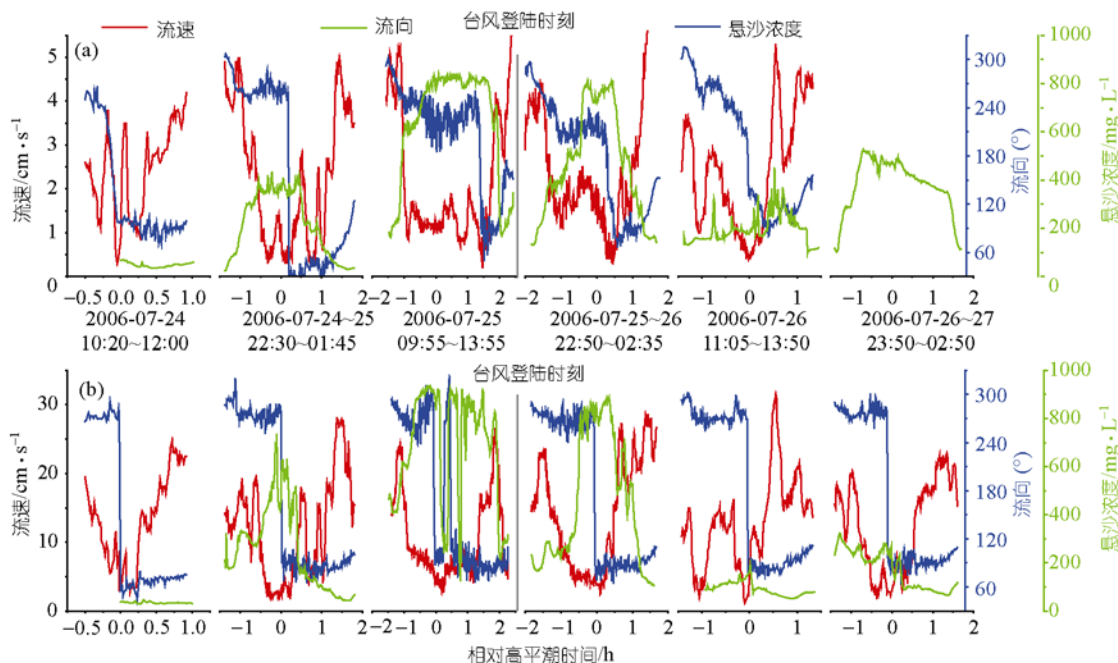


图 9 台风登陆前后互花米草盐沼与相邻光滩底层(距床面 15 cm)流速变化过程
(a) 互花米草盐沼; (b) 光滩

次台风登陆是在 7 月 25 日下午, 而当时正值落潮, 台风的顶托作用较大, 导致落潮水流流速减弱, 侵蚀强度降低; 之后, 台风引起的增水较大(图 6), 导致水流

流速增大, 增强了滩面的侵蚀强度, 而且在互花米草盐沼内也发生了短暂的侵蚀. 沉降通量计算结果表明(表 2), 互花米草盐沼的沉降通量是光滩的 2~50 倍

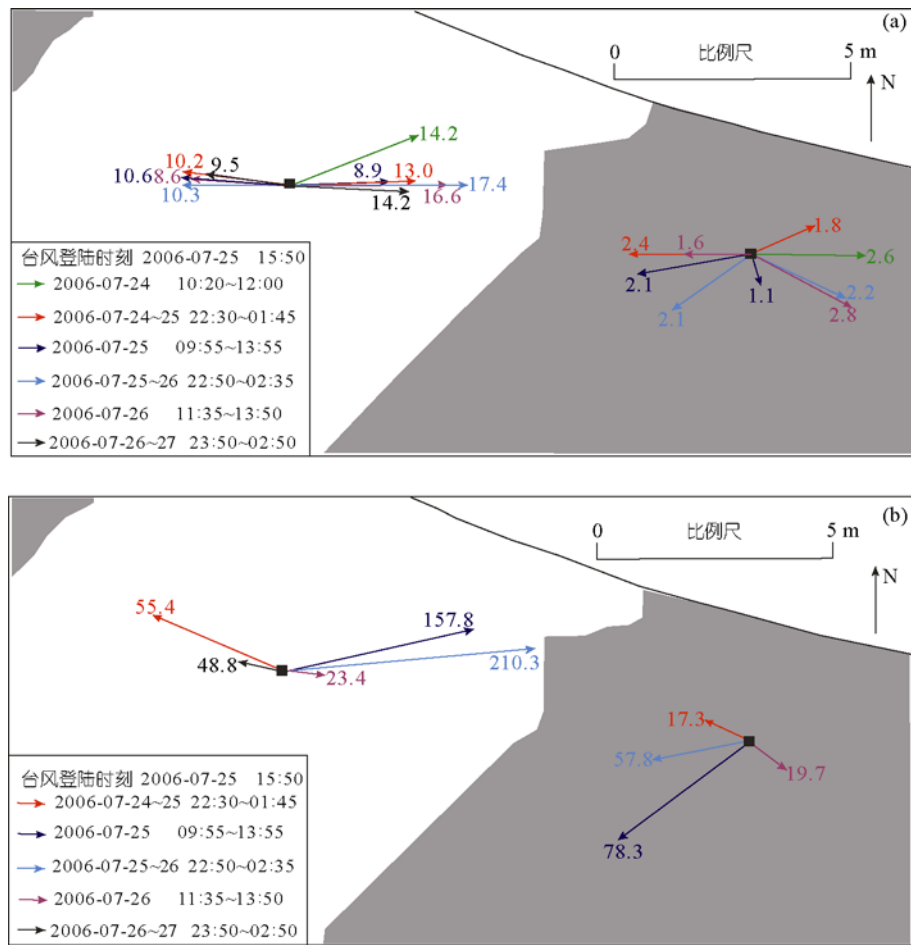


图 10 底层平均流速和悬沙净输运量

(a) 底层涨、落潮平均流速(单位: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) 底层悬沙净输运量(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

不等,说明盐沼植被的促淤功能。在台风作用的盛期,互花米草盐沼落潮期间的沉降通量是涨潮期间的1~2倍,悬沙净通量是正常天气情况下的3~6倍。在其他盐沼环境,Christiansen等人^[13]也得到过类似的观测结果。

在应用式(4)计算沉降通量时,沉速是一个重要参数,不同学者选取的参数不同,如Robert和Whitehouse^[21]在进行潮滩剖面模拟时将沉积速率确定为一个常数,其数值为 $\omega_s = 1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,Lumborg^[23]在计算过程中取 $\omega_s = 0.19 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$;沉降速率的计算结果表明,互花米草盐沼底层悬沙沉降速率介于 $0.53 \sim 1.83 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,而光滩底层则介于 $0.55 \sim 1.92 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,该数值较长江口细颗粒悬沙絮凝体的沉积速率低^[35],但由于在计算中考虑了当地沉积物及水体特性,因此应该更适合于本研究地点的环境。

波浪是台风期间作用在海岸盐沼上的一种非常

重要的动力要素,但本次台风期间未设置波浪观测仪器,在现场仅以仪器观测架为参照目测了短时间的波高。目测结果显示,在正常天气情况下,互花米草盐沼植被内的波高仅为0.05 m左右,大约是光滩的50%,与前人在相似环境下的结果一致^[36,37],但在台风显著影响下,波浪作用有所增大,光滩波高大约为0.3 m左右,在潮水没有没过植被冠层时,互花米草盐沼内的波高约为0.15 m左右,但在潮水没过植被冠层后,波高明显增大,可达到0.4 m左右。台风作用下波高明显增大,对悬沙沉降和表层沉积物侵蚀可能有较大的影响,需要进一步研究。

4 结论

台风对海岸沉积动力过程有着重要的影响。泉州湾现场观测结果表明,在台风“格美”的影响下,海岸盐沼的流速、流向、悬沙浓度均出现显著变化;底

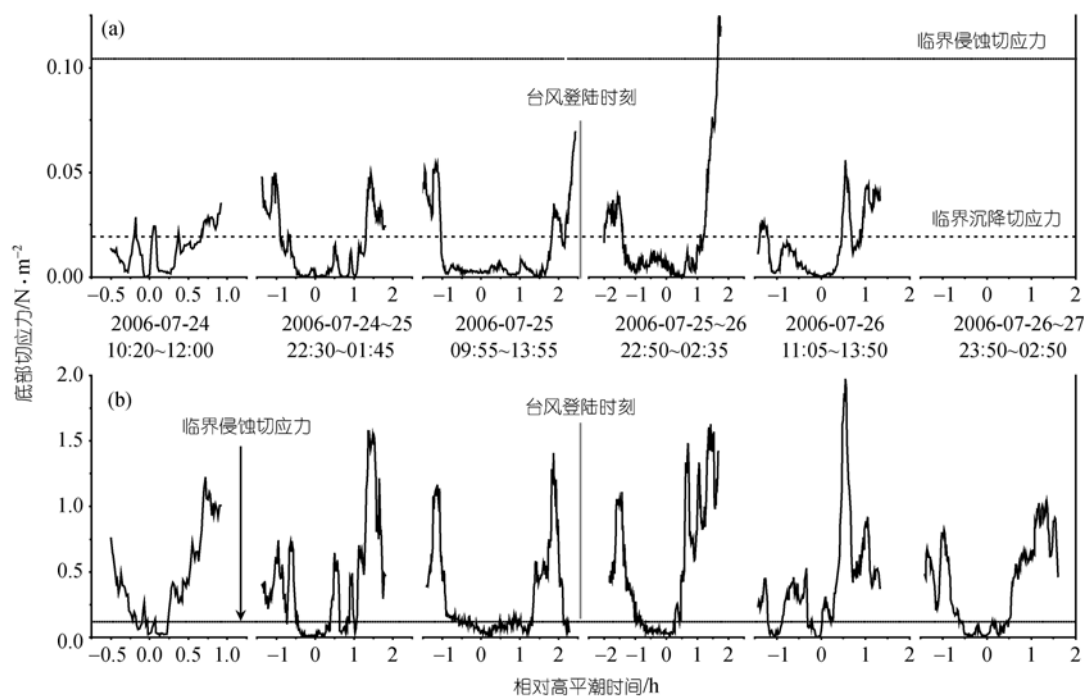


图 11 互花米草盐沼和光滩底部切应力变化
(a) 互花米草盐沼; (b) 光滩

表 2 观测期间互花米草盐沼和光滩悬沙沉降、侵蚀通量

日期	时间	互花米草盐沼悬沙沉降、侵蚀通量(kg·m ⁻²)					光滩悬沙沉降、侵蚀通量(kg·m ⁻²)				
		涨潮		落潮		净通量	涨潮		落潮		净通量
		沉降通量	侵蚀通量	沉降通量	侵蚀通量		沉降通量	侵蚀通量	沉降通量	侵蚀通量	
2006-07-24	10:20~12:00	—	—	0.067	0	—	—	—	0.006	-0.702	—
2006-07-24~25	22:30~01:45	1.251	0	1.209	0	2.460	0.731	-0.517	0.391	-1.284	-0.679
2006-07-25	09:55~13:55	4.235	0	9.136	0	13.371	0.088	-0.590	0.326	-0.778	-0.954
2006-07-25~26	22:50~02:35	3.674	0	3.822	-0.297	7.199	0.458	-0.755	0.486	-1.918	-1.729
2006-07-26	11:05~13:50	0.676	0	0.630	0	1.306	0.058	-0.243	0	-1.285	-1.470
2006-07-26~27	23:50~02:50	—	—	—	—	—	0.221	-0.506	0.023	-1.172	-1.434

a) “+”表示悬沙沉降,“-”表示滩面侵蚀

层流速大小对台风的响应不显著,但互花米草盐沼底层流向受台风影响显著;台风过境对附近海域悬沙浓度的影响非常显著,可使光滩和互花米草盐沼内的悬沙浓度分别增大 15 和 20 倍。计算结果表明,台风期间光滩和互花米草盐沼底层悬沙输运量是平常天气情况下的 4 倍左右,台风影响后期落潮流由光滩向互花米草盐沼输运导致了互花米草底层悬沙浓度较光滩高;底部切应力计算结果表明,落潮期间光滩底部切应力在大部分时刻大于临界切应力,滩面

发生侵蚀,台风登陆后的侵蚀通量为正常天气情况下的 2~3 倍不等;互花米草盐沼底层切应力一般小于临界侵蚀切应力,小于悬沙临界沉降切应力的时间段也比较长,使得整个滩面很少发生侵蚀,以沉降为主,并且台风显著影响期间的悬沙沉降通量是正常天气情况下的 3~6 倍,落潮期间的沉降通量贡献大于涨潮期间。上述观察表明,台风期间互花米草盐沼和光滩的沉积动力过程很不相同,互花米草盐沼的动力过程有利于悬沙的堆积。

致谢 审稿人提出了宝贵的意见和建议,国家海洋局第三海洋研究所邝炳焕参加了野外工作,章文琼协助进行水样过滤,于力、刘静萍协助进行了粒度分析,谨致谢忱。

参考文献

- 1 Zedler J B, Callaway J C. Tidal wetland functioning. *J Coast Res*, 2001, 27(Suppl): 38—64
- 2 Stumpf R P. The process of sedimentation on the surface of a salt marsh. *Estuar Coast Shelf Sci*, 1983, 17: 495—508[doi]
- 3 Turner R E, Baustian J J, Swenson E M, et al. Wetland sedimentation from hurricanes Katrina and Rita. *Science*, 2006, 314: 449—452[doi]
- 4 Goodbred S L, Hine A C. Coastal storm deposition: Salt marsh response to a severe extratropical storm, March 1993, west central Florida. *Geology*, 1995, 23: 679—682[doi]
- 5 French J R, Spencer T. Dynamics of sedimentation in a tide-dominated backbarrier salt marsh, Norfolk, UK. *Mar Geol*, 1993, 100: 315—331[doi]
- 6 Rankey E C, Enos P, Steffen K, et al. Lack of impact of hurricane Michelle on tidal flats, Andros Island, Bahamas: Integrated remote sensing and field observations. *J Sediment Res*, 2004, 74(5): 654—661[doi]
- 7 Fan D D, Guo Y, 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. *Cont Shelf Res*, 2006, 26: 517—538[doi]
- 8 丁东, 任于灿, 李绍全, 等. 黄河三角洲及邻区的风暴潮沉积. *海洋地质与第四纪地质*, 1995, 15(3): 25—34
- 9 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. *海洋地质与第四纪地质*, 1983, 3(4): 1—24
- 10 许世远, 邵虚生, 陈中原, 等. 长江三角洲风暴沉积系列研究. *中国科学 B 辑*, 1989, (7): 767—773
- 11 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. *海洋学报*, 2001, 23(5): 78—86
- 12 蔡锋, 雷刚, 苏贤泽, 等. 台风“艾利”对福建沙质海滩影响过程研究. *海洋工程*, 2006, 24(1): 98—109
- 13 Christiansen T, Wiberg P L, Milligan T G. Flow and sediment transport on a tidal salt marsh surface. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2000, 50: 315—331[doi]
- 14 汪亚平, 高抒, 贾建军. 浪流联合作用下潮滩沉积动力过程的高分辨率数据采集与分析. *科学通报*, 2006, 51(3): 339—348
- 15 杨世伦, 李鹏, 郜昂, 等. 基于 ADP-XR 和 OBS-3A 的潮滩水文泥沙过程研究. *海洋学报*, 2006, 28(5): 56—63
- 16 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第八分册). 北京: 海洋出版社, 1993. 49—92
- 17 McManus J. *Techniques in Sedimentology*. Oxford: Black-well, 1988. 63—85
- 18 Dyer K R. *Coastal and Estuarine Sediment Dynamics*. Chichester: John Wiley & Sons, 1986. 341
- 19 Soulsby R. *Dynamics of Marine Sands: A Manual for Practical Applications*. London: Thomas Telford Publications, 1997. 249
- 20 Houwing E J. Determination of the critical erosion threshold of cohesive sediments on intertidal mudflats along the Dutch Wadden Sea coast. *Estuar Coast Shelf Sci*, 1999, 49: 545—555[doi]
- 21 Robert W, Whitehouse R J S. Predicting the profile of intertidal mudflats formed by crossshore tidal currents. In: McNally W H, Mehta A J, ed. *Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes*. Elsevier Science, 2001. 263—285
- 22 Taki K. Critical shear stress for cohesive sediment transport. In: McNally W H, Mehta A J, ed. *Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes*. Elsevier Science, 2001. 53—61
- 23 Lumborg U. Modelling the deposition, erosion, and flux of cohesive sediment through Øresund. *J Marine Syst*, 2005, 56: 179—193[doi]
- 24 Chang T S, Joerdel O, Flemming B W, et al. The role of particle aggregation/disaggregation in muddy sediment dynamics and seasonal sediment turnover in a back-barrier tidal basin, East Frisian Wadden Sea, southern North Sea. *Mar Geol*, 2006, 235: 49—61[doi]
- 25 蒋国俊, 姚炎明, 唐子文. 长江口细颗粒泥沙絮凝沉降影响因素分析. *海洋学报*, 2002, 24(4): 51—57
- 26 曹祖德, 王运洪. *水动力泥沙数值模拟*. 天津: 天津大学出版社, 1994. 347
- 27 Netto S A, Lana P C. Influence of *Spartina alterniflora* on superficial sediment characteristics of tidal flats in Paranaguá Bay (south-eastern Brazil). *Estuar Coast Shelf Sci*, 1997, 44: 641—648[doi]
- 28 王爱军, 高抒, 贾建军. 互花米草对江苏潮滩沉积和地貌演化的影响. *海洋学报*, 2006, 28(1): 92—99
- 29 Wang A J. Impact of human activities on depositional process of tidal flat in Quanzhou Bay. *Chin Geog Sci*, 2007, 17(3): 127—134[doi]
- 30 庄武艺, 谢佩尔 J. 海草对潮滩沉积作用的影响. *海洋学报*, 1991, 13(2): 230—239
- 31 Leonard L A, Luther M E. Flow hydrodynamics in tidal marsh canopies. *Limnol Oceanogr*, 1995, 40: 1474—1484
- 32 Shi Z, Hamilton L J, Wolanski E. Near-bed currents and suspended sediment transport in saltmarsh canopies. *J Coast Res*, 2000, 16(3): 909—914
- 33 杨世伦, 时钟, 赵庆英. 长江口潮沼植物对动力沉积过程的影响. *海洋学报*, 2001, 23(4): 75—80
- 34 Mitchener H J, O'Brien D J. Seasonal variability of sediment erodibility and properties on a macrotidal mudflats, Peterstone Wentlooge, Severn estuary, UK. In: McNally W H, Mehta A J, ed. *Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes*. Elsevier Science, 2001. 301—322
- 35 时钟. 长江口北槽细颗粒泥沙絮凝体的沉降速率的近似估算. *海洋通报*, 2004, 23(5): 51—58
- 36 Yang S L. The role of *Scirpus* marsh in attenuation of hydrodynamics and retention of fine sediment in the Yangtze Estuary. *Estuar Coast Shelf Sci*, 1998, 47: 227—233[doi]
- 37 Möller I, Spencer T. Wave dissipation over macro-tidal saltmarshes: Effects of marsh edge typology and vegetation change. *J Coast Res*, 2002, 36(Suppl): 506—521