

文章编号:1005-9865(2023)02-0107-12

北部湾防城港东湾白骨壤潮滩近底层 动力响应台风作用的耗散过程

黄祖明¹,戴志军¹,周晓妍¹,龙楚琪¹,冯炳斌²,罗杰骏¹,喜扬扬^{1,3}

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 2. 自然资源部第四海洋研究所, 广西北海 536015; 3. 广西科学院广西北部湾海洋研究中心, 广西南宁 530007)

摘 要:揭示极端天气影响的红树林潮滩潮流能量耗散过程是理解生物海岸演变及滨海湿地生态修复工程的核心内容。以北部湾防城港东湾白骨壤红树林潮滩为例,基于声学多普勒流速仪(ADV)获取区域2020年8月连续6天的水动力和白骨壤红树林下垫面植被实测数据,分析白骨壤潮滩近底层动力响应台风“森拉克”的耗散过程。结果表明:1)正常天气涨、落潮期间,自光滩到白骨壤红树林林内近底层湍流动能变化具有潮汐不对称性特征。涨潮期间光滩—白骨壤红树林边缘、白骨壤红树林边缘—林内潮流挟沙能量分别通过泥沙沉降以及搬运泥沙两种方式沿程消耗,落潮期间潮流挟沙能量主要以泥沙净沉降的方式消耗。2)白骨壤通过其潮滩表层向上发育长约10 cm的呼吸根以降低湍流垂向紊动;红树林边缘的枝、叶通过影响水平方向上的水流动力,致使潮流挟沙能耗降低。3)与正常天气比较,台风“森拉克”期间东湾自光滩到白骨壤红树林林内近底层水体流速无明显变化,但流向偏转幅度明显变大。同时湍流动能的耗散率和用以搬运泥沙为主的潮流挟沙能耗亦均增大。

关键词:近底层动力;湍流动能;潮流挟沙能耗;白骨壤;台风“森拉克”

中图分类号:P753 文献标志码:A DOI:10.16483/j.issn.1005-9865.2023.02.011

Dissipation process of the near-bed hydrodynamics over *Avicennia marina* tidal flat in response to typhoon action

HUANG Zuming¹, DAI Zhijun¹, ZHOU Xiaoyan¹, LONG Chuqi¹, FENG Bingbin², LUO Jiejun¹, XI Yangyang^{1,3}

(1. State Key Lab of Estuarine & Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Fourth Institute of Oceanography, Ministry of Natural Research, Beihai 536015, China; 3. Guangxi Beibu Gulf Marine Research Center, Guangxi Academy of Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract: The process of tidal current energy dissipation in mangroves over spring-middle tidal coasts under extreme weather is one of the significant topics for understanding biological coasts evolution and coastal wetland restoration project. In this study, based on the measured hydrodynamic data by ADV and the underlying surface vegetation data of *Avicennia marina* for 6 consecutive days in August 2020, the hydrodynamical dissipation process of the tidal flat near the bottom of Dongwan's *Avicennia marina* in response to typhoon Sinlaku was analyzed. The results show that: 1) During the flood and ebb tides, the changes of the turbulent kinetic energy from bared flat to *Avicennia marina* exhibited the characteristics of tidal asymmetry under the normal weather. Tidal current energy by carrying sediments from bared flat to *Avicennia marina*'s edge and from *Avicennia marina*'s edge to *Avicennia marina*'s area was dissipated by transportation and settlement of sediment. And the energy of carrying sediment by tidal current during ebb tide was mainly consumed for net settlement in sediments. 2) The *Avicennia marina*'s pneumatophores of about 10 cm can attenuate the vertical turbulent kinetic energy, while the branches and leaves at the edge can reduce the tidal current energy consumption by attenuating the horizontal flow. 3) Compared to those of the normal weather, there was no obvious change in the flow velocity near the bottom from bared flat to

收稿日期:2022-04-01

基金项目:国家自然科学基金重点基金资助项目(41930537);广西重点研发计划项目(桂科AD19245158)

作者简介:黄祖明(1997—),硕士研究生,主要从事河口海岸动力地貌方面研究。E-mail:zmhuang129@163.com

通信作者:戴志军,教授,博士生导师。E-mail:zjdai@sklec.ecnu.edu.cn

Avicennia marina during the period of typhoon Sinlaku, but the flow direction deflection was larger than that of the normal weather. Meanwhile, the dissipation rates of turbulent kinetic energy and sediment transport energy consumption were larger those in the normal weather.

Keywords: hydrodynamics near the bottom; turbulent kinetic energy; sediment transport energy consumption; *Avicennia marina*; Sinlaku typhoon

传统硬质堤防工程一直在抵御台风及其引起的风暴潮等极端气候方面发挥着重要作用^[1]。然而,随着沿海地区对防潮减灾要求提高,海堤建设存在标准相对降低或结构不稳等问题^[2]。同时,海平面上升使得堤前水深变大,这不仅增加波浪越顶风险,其堤脚受水动力的掏蚀现象亦会加剧,但目前尚未实施有效方法以阻止近底层水流冲刷^[3-4]。近年来,沿海地区堤前植被如红树林、海草床及盐沼等生态修复工程的实施,可实现部分抵消台风大浪而达到防护海堤和保障城市安全的目的^[5-8]。随后,不少学者开展风暴潮条件下波浪沿滩地盐沼传递时的耗散程度研究^[9-11]。如 Moller 等^[12]试验发现即使风暴潮下水位增至最高,天然盐沼也可消耗高达 60% 风暴潮引起的波浪。Narayan 等^[13]基于全球多个沿海地区现场植被波浪实测数据,估计红树林、盐沼和珊瑚礁等能降低近岸波浪高度 35%~70%。Romañach 等^[14]指出,如果没有 6~30 km 宽的红树林区保护,2005 年美国佛罗里达州飓风“威尔玛”造成的洪灾区将向内陆延伸 70%。然而,也有研究表明,潮流的存在极大地削弱海草模拟物对波浪的衰减能力,由此 Paul 等^[15]强调潮流作用在植被消能中的重要性,江锐捷等^[16]在福建漳江口红树林进行现场观测,揭示了红树林对潮流底边界层中流速的阻滞机制。纵观先前成果,主要聚焦在植物特征对波浪耗散的影响过程,潮流作用的影响通常被忽略^[17],特别是较少探讨极端天气和正常天气对比下的光滩—红树林林内近底层水动力耗散过程。涉及我国西南区域的北部湾红树林潮滩,至今亦未有类似报道。

广西北部湾由沿海防城港、钦州和北海三市组成,区域红树林分布面积在我国高居 38% 以上,种类包括白骨壤、桐花树、秋茄等,占全国同种类数量 44%,是我国重大生态修复工程“南红北柳”红树林重点修复区域。区域内红树林潮滩在有效抵御台风大浪、减缓海岸灾损方面发挥重要价值^[18]。由于红树林现场观测条件困难,横向上红树林潮滩剖面如何消耗近底层潮流以及湍流作用如何变化的研究成果极为缺乏,尤其是存在极端天气情况下的近底层水动力耗散甚少。基于此,本文通过分析防城港东湾 2020 年夏季中一大潮和台风“森拉克”过境期间的实测近底层水动力数据,着重探讨光滩—白骨壤红树林内部近底层潮流挟沙能量及湍流动能变化,进而揭示东湾红树林潮滩对水动力作用耗散机制,为海岸工程建设与抵御环境灾害提供科学依据。

1 研究区域概况

防城港位于北部湾北部,属于亚热带季风气候,夏季极端天气频发,月平均降雨量高值主要分布在 5—10 月^[19]。区域潮汐类型属于混合潮型,大、中潮为正规日潮,小潮为不正规半日潮,潮差较大,最大潮差超过 4.5 m,平均潮差超过 2.5 m,涨潮延时为 13~15 h,落潮延时 7~9 h。海湾落潮流速大于涨潮流速,涨潮平均流速为 0.2~0.5 m/s,落潮平均流速为 0.3~0.75 m/s^[20]。防城港内因受两侧半岛拱卫及拦门沙消能影响,波浪传入湾内时能量较弱,故潮流成为控制湾内沉积动力变化过程的主要因素^[20]。研究区东湾红树林位于防城港渔万岛东岸,自海堤向海方向分布宽度约为 800 m 的白骨壤红树林,植株呈低矮丛状且品种单一(图 1)。

2 资料收集与研究方法

2.1 资料收集

为探讨红树林潮滩自外缘裸滩到林内近底层潮流的变化状态,在防城港港口区东湾红树林潮滩布设 3 个测点,测点 A 和 B 分别位于白骨壤红树林内 25 m 以及白骨壤红树林边缘,测点 C 位于白骨壤红树林边缘外的光滩处(图 1)。时间跨度为 2020 年 8 月 1 日至 8 月 6 日,观测持续 6 个连续完整的中一大潮周期循环,其中 8 月 1—3 日为中潮,8 月 4—6 日为大潮。在观测期间,3 个测点均使用声学多普勒流速仪(Acoustic Doppler Velocimeter,简称 ADV)以测量三维高分辨率流速(u, v, w),速度分量 u 向东为正, v 向北为正, w 向上为正。在观测开始前,把 ADV 固定在铝型材上,并将探头朝下,测点位于底部上方约 30 cm,频率设置为 16 Hz,以每

20 min 作为一个脉动记录。观测期间恰处台风“森拉克”经过,该台风在 8 月 1 日进入北部湾海域,8 月 1—2 日台风中心最大风速高达 65 km/h,8 月 3 日离开此区域。显然,研究区白骨壤红树林潮滩近底层经历了自台风影响到台风后恢复为正常天气的变化过程。

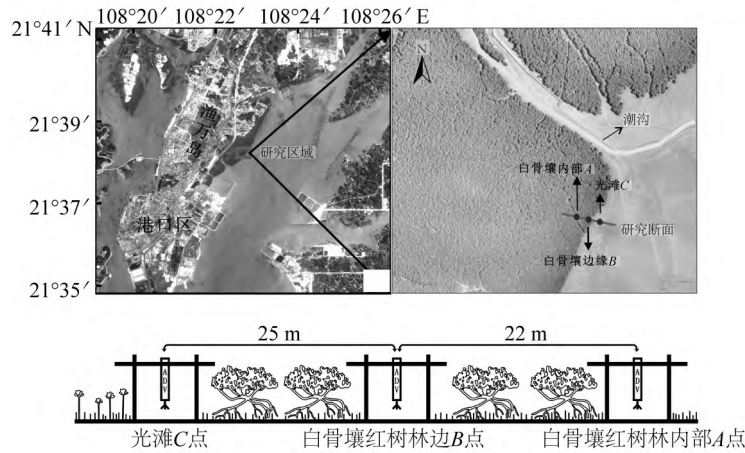


图 1 研究区域和测点布置

Fig. 1 Research area and observation stations

2.2 研究方法

2.2.1 ADV 流速观测数据质量控制

河口近底边界层流的认识依赖于现场观测技术的发展。其中,流速观测仪 ADV 具有非接触、采样体积小、采样频率高、流速精度高等特点^[21]。由于高频数据极易受噪声污染,ADV 的高频湍流信号在进行湍流特征参数计算前,需要进行质量控制。这里通过对原始数据进行 1) 信号质量检查,将低信噪比(<5 dB)和低相关性样本(<70%)流速数据清除^[22]; 2) 剔除毛刺点,采用阈值法对异常值去除^[23]; 3) 对大于 3 倍标准差的流速数据进行修正,大于 2 倍局部样本标准差的数据进行插值修正^[24]处理,得到一系列比较规整的数据(图 2)。

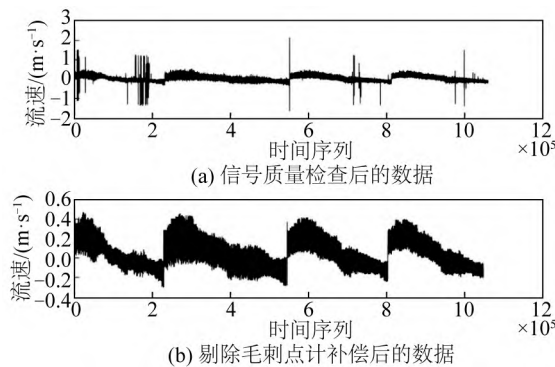


图 2 ADV 实测原始流速数据和剔除异常值后真实流速数据

Fig. 2 Original velocity data and real velocity data after excluding outliers

2.2.2 潮流挟沙能量消耗计算

潮流能量的耗散过程可通过其输移水体沿程挟沙能量的高低体现^[25]。通过对比研究区域 3 个测点近底层流速、流向及水位变化,结合糙率系数计算白骨壤红树林潮滩横向沿程的潮流挟沙能量消耗。单位时间潮流的时均能量消耗可通过潮流时均能量方程计算^[25]。

在水深为 h 时,单位底面积上潮流的时均能量方程式具有下述形式:

$$\frac{\partial K}{\partial t} + v \frac{\partial K}{\partial x} = -\gamma h \frac{\partial Z}{\partial x} v - \varepsilon_f \quad (1)$$

$$\varepsilon_f = \gamma i_f h v = \gamma \frac{v^2}{c^2 h} h v = \gamma \frac{v^3}{c^2} \quad (2)$$

式中: K 为动能, kg/s^2 ; v 为流速, m/s ; γ 为海水容重, $\gamma = \rho g$, 取 $10\,055 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$; Z 为潮位, m ; ε_f 为潮流在单位时间的能量消耗, kg/s^3 ; i_f 为摩阻比降; c 为谢才系数。此外,文中流速 v 用 ADV 实测数据 u, v 进行二维合成。

结合曼宁公式(3),将式(2)推导成式(4)。

$$c = \frac{h^{\frac{1}{6}}}{n} \tag{3}$$

$$\varepsilon_{\text{turb}} = \gamma \frac{v^3 n^2}{h^{1/3}} = \gamma n^2 \sum \frac{v^3}{h^{1/3}} \tag{4}$$

式中: n 为糙率系数,结合野外观测,根据《曼宁系数选取指南》^[26]和曼宁系数修正表^[27],将测点A、B、C糙率系数 n_A 、 n_B 、 n_C 分别赋值为0.145、0.14、0.02,据此凸显台风及正常天气下光滩—白骨壤红树林林内潮流挟沙能耗的变化特征。

2.2.3 湍流动能计算和能量谱分析

潮滩上水流受底摩擦影响,形成近底湍动边界层,这种近底边界层在浅水环境下可延伸至整个水柱^[28],基于湍流动能法,通过从高频水平和垂直速度中提取湍流分量,进而分析光滩—白骨壤红树林内部底部床能量的湍动程度。湍流动能TKE的具体计算公式为:

$$E_T = \frac{1}{2} \rho (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \tag{5}$$

式中: u 、 v 和 w 分别指速度 x 、 y 和 z 方向上的分量,而上标'表示湍流脉动分量。 ρ 为海水密度,取1 025 kg/m³。

在有限的时间区域内,利用FFT-IFFT将频率低于0.5 Hz的频域去除,即滤波后的垂向速度 w 分量实值记录 $X_w(t)$ 进行有限傅里叶变换得出能量密度谱,公式为:

$$X_w(F, T) = \int_0^T x_w(t) e^{-j2\pi ft} dt \tag{6}$$

X_{w_k} 为傅里叶分量:

$$X_{w_k} = \frac{X_w(f_k, T)}{h} = \sum x_{w_k} \exp[-j \frac{2\pi kn}{N}], \quad k = 1, 2, \dots, N - 1 \tag{7}$$

式中: f 为频率,Hz; T 为一个脉动内的时间,s; N 为采样数; k 为 $N/2$ 。

3 结果分析

3.1 台风影响的东湾近底层水动力变化特征

2020年8月1—3日3个潮周期内,ADV在测点A、B、C分别记录76(T1)、83(T2)及96(T3)个有效脉动数据,将每个脉动水位与流速平均后绘制图3。

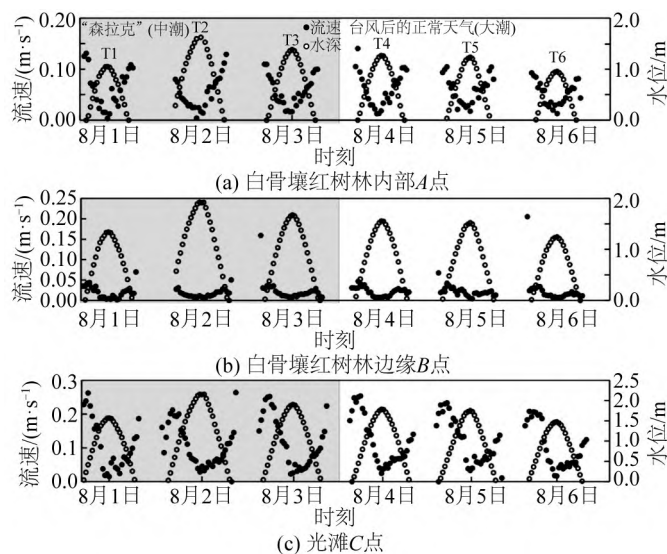


图3 东湾潮滩水体流速和水位变化

Fig. 3 Variations of both flow velocity and water level in tidal flat of Dongwan

随每日潮汐涨落,自光滩到白骨壤红树林间横向上的水位在每个潮周期均呈现先升后降的变化特征。然而,中潮期间防城港东湾受台风“森拉克”影响,测点水位均明显升高,尤其是8月2日T2水位值均增加

0.6 m,较8月1日T1增长超55%(图3)。同时,对比台风后的正常天气T4、T2增水程度由白骨壤红树林内部向海逐渐减弱,测点A、B、C增幅分别为29%、23.8%、20.8%。随后,8月3日T3仍保持一个相对高水位状态(图3)。

同时,测点的近底层流速变化和在水位有所差异,其中最大流速出现在最大水位约1/4处的涨、落急阶段。在台风期间,白骨壤红树林内部A点流速变化过程呈“V”形,T1、T3涨、落急峰值较大潮T5、T6略大。T2期间白骨壤红树林内部的落急流速较涨急流速大40%,达0.15 m/s(图3(a))。白骨壤红树林边缘B点流速在3个测点中最小,在T2涨潮时受水位影响,流速曲线与白骨壤红树林内部的A点流速升降趋势一致,T1、T3期间的流速变化大致相近(图3(b))。光滩C点流速变化涨潮呈现先上升后下降,落潮时流速又缓慢上升三个阶段,形成“双极值”的余弦函数形状,其峰值在台风影响的3天内持续处于高流速状态(图3(c))。

此外,东湾水体流向沿光滩—白骨壤红树林林间展现明显的偏转现象。台风涨潮期间,水流在光滩C点时涨潮流平均流向为 337° ,流向范围主要在集中 $330^\circ\sim 340^\circ$ (图4(a))。随后,水流进入白骨壤红树林边缘B点,流向发生大幅度往东北向偏转,平均转角为 90° 。同时,B点流向明显在 $20^\circ\sim 120^\circ$ 之间分散(图4(a)),且随水位上涨以顺时针转角旋转幅度具有变大趋势。在白骨壤红树林内部A点,涨潮流流向仍呈现分散状态,但流向相对集中且主要位于 $10^\circ\sim 40^\circ$ 。同时,与B点比较,3个潮周期内涨潮流在A点平均流向逆时针偏转 36° 。台风落潮期间,落潮流沿白骨壤红树林林内到光滩,在白骨壤红树林边缘处明显分散,流向分布在 $150^\circ\sim 250^\circ$ 间(图4(a))。落潮流抵达光滩C点时,较涨潮时流向分布幅度明显变大,总体由南偏西南向偏东逆时针偏转。总体而言,涨潮期间的水体从光滩进入白骨壤红树林内部发生顺时针偏转,落潮期间,水体从白骨壤红树林内部到光滩发生逆时针偏转,涨、落潮期间的水体流向均由集中到分散。

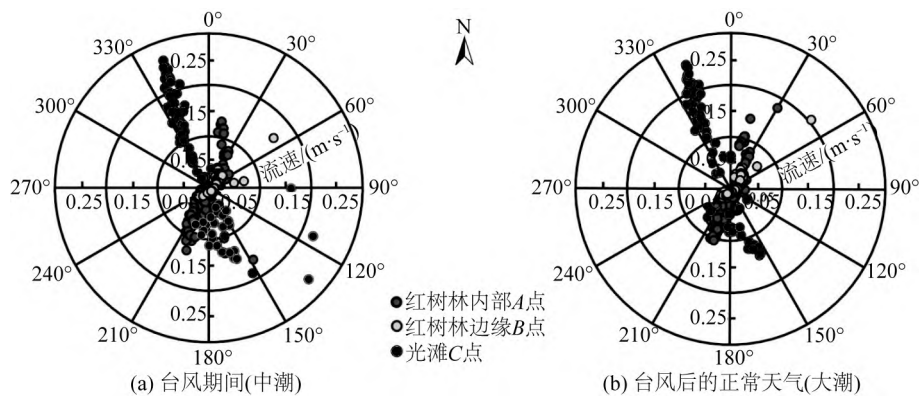


图4 东湾潮滩水体流向变化

Fig. 4 Variations of both flow direction in tidal flat of Dongwan

3.2 正常天气影响的潮滩近底层水动力变化特征

8月4—6日为台风过后的正常天气。在此观测期间内,测点A、B、C分别记录ADV的有效脉动个数为75(T4)、83(T5)、93(T6)。由图3可知,涨、落潮期间光滩—白骨壤红树林林内近底层平均流速呈现相对有规律的变化特征。其中白骨壤红树林内部A点水体流速随潮水涨落而出现一个对称的“V”字形特征,8月4日T4最大流速达到0.16 m/s,而在涨憩时达到最小值0.025 m/s,随后在落潮阶段流速又快速升高,并在落憩时刻达到峰值(图3(a))。白骨壤红树林边缘B点的水体流速持续处于低值状态,变化曲线形似“微幅波”轨迹,除个别异常点外,最大流速不超过0.05 m/s。光滩C点的水体流速波动范围均在0.02~0.27 m/s。然而,与台风期间比较,光滩C点水体的涨急流速高于落急流速(图3(c))。

此外,正常天气下的东湾潮滩上水流运动轨迹在光滩—白骨壤红树林内部也具有沿程偏转现象。然而,水体沿程流向的转角分布范围和偏转程度与台风天气具有明显差异。当涨潮水体刚进入白骨壤红树林时,在边缘B点同样出现随水位增加而水体涨潮流向呈顺时针增大趋势,但其平均转角幅度较台风期间小30%,为 64° 。与台风天气相比,白骨壤红树林内部A点的涨潮流向分布范围则逆时针缩小30%,主要集中于 $11^\circ\sim 32^\circ$ 。落潮期间,水流在白骨壤红树林内部—边缘发生顺时针偏转现象,平均转角 22° 。当落潮流流出白骨壤红树林边界达光滩时,近底层流向同样明显往逆时针分散,然而分布范围较台风天气大33%(图4(b))。

3.3 潮流挟沙能量的消耗特征

潮流能量主要用于泥沙的悬浮和输移作用^[25]。在6个全日潮周期内,光滩—白骨壤红树林间单位时间挟沙能量消耗受水位和涨、落潮流挟沙方向不同的影响,造成两个相邻点截沙程度亦有差异(图5)。图5展现了台风和非台风期间白骨壤红树林林内的挟沙能量消耗呈现开口向上的抛物线变化趋势(图5)。涨潮期间光滩C点处潮流平均挟沙能量总体消耗范围在0~0.3 kg/s³,且在初期始终存在净搬运能耗(图5(b))。台风期间,涨急—涨憩期间光滩潮流平均挟沙能量小于白骨壤红树林边缘B点,使得两测点间始终存在用于搬运向岸净输沙的沿程能量损耗。该能耗值在8月2日T2最大,搬运所用能耗大于沉降所用能耗近37%,沿程能耗总和为-19.5 kg/(m·s²)(表1),潮流输沙为搬运模式。正常天气涨潮期间,C-B潮流输沙为沉降模式,T5最大,沿程净消耗为21.6 kg/(m·s²)(表1)。同样地,对于白骨壤红树林边缘—内部岸段,涨潮流起始亦存在净沉降能量消耗(图5(a) S2)。当水位淹没研究区域白骨壤红树林呼吸根后,白骨壤红树林内部的单位时间沿程挟沙能量消耗均大于边缘(图5(a) T2:S1),泥沙可能受潮流搬运至高潮带或潮上带淤积。其中,T2~T6沿程净能耗均为搬运模式,T2潮流能耗最大,为-33.6 kg/(m·s²)(表1)。

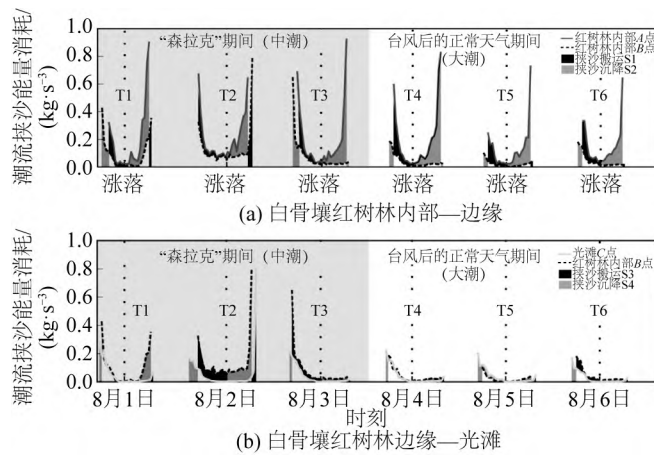


图5 东湾潮流挟沙能量损耗

Fig. 5 Tidal current energy loss by carrying sand in tidal flat of Dongwan

表1 东湾光滩—白骨壤红树林涨、落潮流能挟沙沿程净消耗

Tab. 1 Flow net energy consumption along the way in bared tidal flat-Avicennia marina of Dongwan 单位: kg/(m·s²)

涨落潮	测点	挟沙沿程净消耗					
		8月1日	8月2日	8月3日	8月4日	8月5日	8月6日
涨潮	C-B	4.1	-19.5	-19.7	6.1	21.6	5.4
	B-A	3.4	-33.6	-16.1	-29.2	-23.1	-28.9
落潮	A-B	82.6	45.0	92.5	117.2	66.4	65.0
	B-C	34.0	65.9	11.1	7.2	3.9	4.8

落潮时水体离岸运动,3个测点的潮流挟沙能量由白骨壤红树林内部向外逐渐递减(图5),意味着受潮流作用影响时主要产生自高潮滩向海泥沙沉降所用能耗。其中,白骨壤红树林内部A点至边缘B点潮流挟沙所需净沉降能耗较大,正常天气下沿程平均为82.9 kg/(m·s²),比台风“森拉克”期间大13.1%,说明极端事件加强了泥沙搬运所需能耗(图5(a) T2:S1)。再者,离岸流挟沉积物自白骨壤红树林边缘搬运至光滩,其中台风T1~T2期间白骨壤红树林边缘潮流用以净沉降的能耗明显高于常规天气,可能补给涨潮时侵蚀位置(图5(b) T1至T2:S4)。T4~T6期间两测点挟沙潮流能耗较低,均小于8 kg/(m·s²)(表1)。综上,涨潮流挟沙能耗用于泥沙向岸搬运迁移,落潮流挟沙沉降在白骨壤边缘—内部岸段。

3.4 光滩—白骨壤红树林内部湍流动能变化特征

流体作不规则垂向混合运动而产生湍流,并通过剪切应力使得底床泥沙起悬^[29],进而影响近底层潮流挟沙能量耗散。基于此,这里计算三维流速脉动分量求得湍流动能。

东湾湍流动能变化在涨、落潮阶段出现显著潮汐不对称性现象,尤其在台风后的正常天气阶段。在研

究期间,3个测点湍流动能均小于 $8 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$ (图 6)。在涨潮阶段,光滩 C 点处 TKE 最大,在台风天气和台风后的正常天气期间波动范围分别为 $1\sim 8 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$ 、 $1\sim 4 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$ (图 6)。随后,湍流抵达白骨壤红树林边缘 B 点时动能减少 $10.3\%\sim 74.3\%$,白骨壤红树林内部 A 点较 B 点减少 $2\%\sim 38\%$ 。当涨潮历时过半,白骨壤红树林内部水位相对较小,部分时段湍流动能大于边缘区域(图 6)。在落潮阶段,T1~T3 三个测点湍流动能随时间变化趋势一致,均逐渐增大。与台风期间不同,台风后常规天气下研究区域 T4~T6 期间 TKE 小于涨潮时期近 50%,其中白骨壤红树林边缘 B 点湍流动能值最小,均低于 $0.05 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$,而光滩与白骨壤红树林内部 TKE 变化处于交替下降趋势。

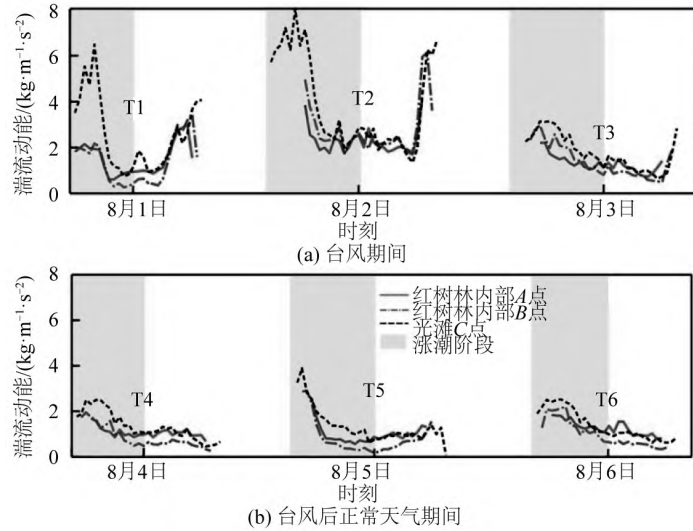


图 6 东湾湍流动能变化

Fig. 6 The characteristic of turbulent kinetic energy of Dongwan

由图 6 可见,落潮阶段白骨壤红树林内部—光滩区域湍流动能值较小、变化特征较涨潮阶段不明显。因此,在此利用快速傅里叶变换进行涨潮时垂向速度分量能量谱分析以凸显白骨壤红树林湍流耗散程度(图 7)。

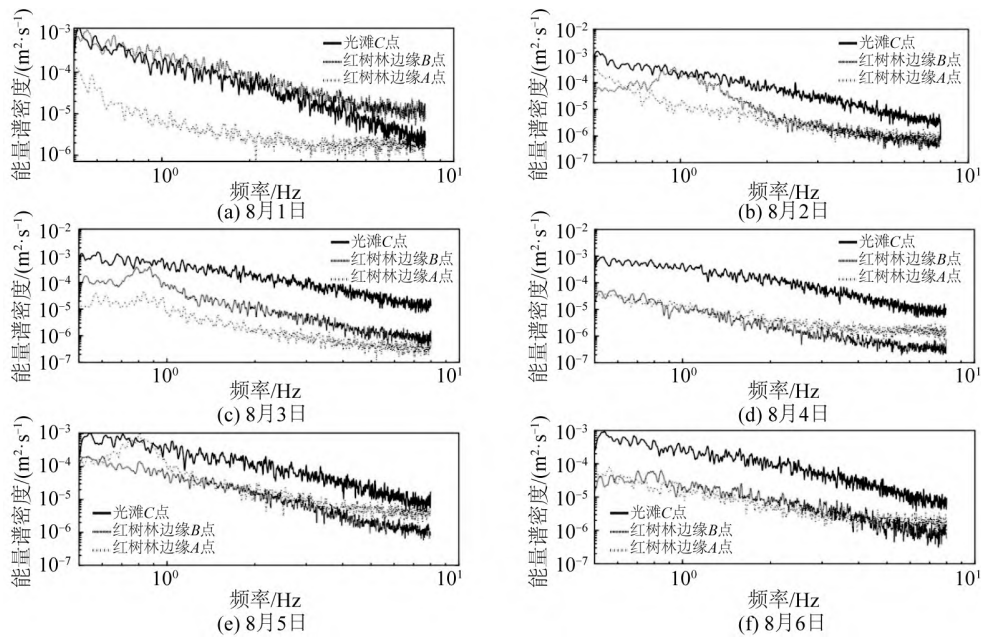


图 7 涨潮阶段垂向流速能量谱密度

Fig. 7 Vertical velocity energy spectral density during the flood period

台风期间和正常天气期间能量谱密度曲线变化最明显的为白骨壤红树林 B 点,其密度值在 T1 期间整体高于光滩 C 点,T2 峰值与 C 点相近,随后在 T3 整体下降至 $10^{-6}\sim 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (图 7(c))。正常天气下光滩 C 点能谱密度值明显高于其余两测点,除 T5 外白骨壤红树林边缘 B 点和内部 A 点密度值范围在 $10^{-7}\sim 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$,频率大

于4 Hz后A点密度值高于红树林B点(图7(d)~(f))。

4 讨论

4.1 东湾光滩—白骨壤红树林内部下垫面影响

波流在潮滩上的递变过程受床面阻力、植被及涨落潮水位等多种因素影响^[30-31]。其中,红树林中植被阻力引起的能量损失远大于裸滩上的底部摩擦所引起的能量耗散^[31]。部分研究发现,红树林树干、树枝和地上呼吸根组成的密集网络可被视为床面粗糙度增加,植物内部的水面坡度亦随树木密度增加而提高,最终影响植被耗散水流的拖曳能力^[32-34]。水文监测期间,利用载波相位差分技术(RTK)对3个站点高程进行了3次测量,A-B段和B-C段的平均坡度分别为3.24‰和6.6‰。同时,通过筛析法得到A、B、C站点的平均粒径大小 D_{50} 分别为2.48、2.42、2.36 ϕ ,均属于中砂,因此在文中认为地形坡度和沉积物差异对水流耗散的影响显著低于植被影响。水流耗散在东湾白骨壤红树林边缘—内部并未呈现一致的递增或递减现象。通过测量3个站点的铝型架底下呼吸根数量、多棵典型幼苗直径及高度和典型白骨壤树干胸径大小,分析东湾白骨壤红树林下垫面变化对水动力作用耗散过程的影响。

白骨壤属我国本土红树林物种,具有发达的指状呼吸根,高度可达10~30 cm。在研究区域内,光滩C点存在稀疏呼吸根和幼苗,其中幼苗平均直径为2 mm,高10 cm。东湾光滩—白骨壤内部下垫面呼吸根分布自海向陆逐渐密集(图8)。文中仪器ADV布置离底床30 cm处,恰是呼吸根达到最高位置。呼吸根通过阻挡作用降低水体垂向湍动^[35],使得涨潮阶段TKE在光滩—白骨壤红树林内部主要呈现空间上不同程度地非线性递减状态(图6)。然而,水流运动过程中挟沙输移能耗随湍流动能降低反而增加,说明东湾呼吸根不同密度的分布状态可能并非是近底层潮流水平方向上耗散的主导因素。



图8 研究区域测点下垫面分布

Fig. 8 The distribution of underlying surface of observation stations

生物三维结构以吸收能量为主,一定程度上,植物的叶、茎及根亦是水流摩擦源^[36],其通过影响水体能量导致流速降低。现场实测得出边缘B点和内部A点白骨壤平均胸径大小分别为73、82 mm,东湾自海向陆分布白骨壤幼苗—成树(图8)。与B点相比,A点仪器布设在植被密度较低的位置(图8(c))。通过计算3个站点在6个潮周期内流向平均标准差,发现白骨壤边缘B点流向始终最为分散(表2)。

表2 东湾光滩—白骨壤流向标准差

Tab. 2 The standard deviation of flow direction of Dongwan

单位:(°)

涨/落潮	测点	台风期间(中潮)			台风后的正常天气期间(大潮)		
		8月1日	8月2日	8月3日	8月4日	8月5日	8月6日
涨潮	光滩C点	5.093	3.887	4.834	6.629	2.851	7.480
	白骨壤边缘B点	22.095	30.623	29.419	34.378	22.405	26.828
	白骨壤内部A点	22.363	16.630	25.905	26.480	28.097	20.479
落潮	白骨壤内部A点	28.389	22.491	12.066	16.138	12.005	15.657
	白骨壤边缘B点	61.269	28.748	34.483	25.221	20.706	25.350
	光滩C点	17.992	20.036	23.142	22.710	26.543	23.225

涨潮过程水体经过植被边缘时,底质突变加剧潮流流向分散程度,复杂植被结构从而减缓水流作用。潮流进入边缘时主要受枝、叶影响(图 8(a)),使得流速低于白骨壤红树林内部(图 3)。同时潮流挟沙输移能耗由于水平流速降低亦同步减少(图 5(a))。然而,结合文中垂向流速谱密度分析,发现除 T1 外涨潮时期 C-B 段能量耗散程度远高于 B-A(图 7 (b)~(f)),这与靠近水边的红树林边缘地区带走最多能量有关^[37]。简而言之,白骨壤呼吸根将主要影响小于其高度范围的浅水动力垂向衰减,当水位到达一定高度时,白骨壤的枝、叶又加大其能量耗散率^[38]。

4.2 水动力耗散过程的台风作用影响

7—9月是北部湾发生热带风暴等极端天气事件的高峰月^[39],台风期间风暴增水、湍流加强等现象会改变海岸带水动力环境。研究期间内北部湾经历台风 2003 号“森拉克”事件,防城港市受其影响在 8 月 1、2 日出现暴雨现象,东湾增水近 0.6 m,使得中潮时水位高于大潮(图 3)。同时,东湾光滩—白骨壤红树林内部水动力变化过程响应台风作用展现不同的耗散过程。在台风“森拉克”期间,近底层流速总体变化范围相对于正常天气没有显著差异,可能与红树林生长地形有关。许多红树林生长在泻湖或内湾尽头,风暴作用下流速可能受到泻湖形状和湾外地形的影响而降低^[40],防城港东湾正是如此。此外,台风期间涨潮过程中水体流向受风向影响,在白骨壤红树林边缘—内部先后存在更大幅度的顺时针—逆时针偏转现象(图 4(a))。同时,流向在光滩—白骨壤红树林内部更加集中,3 个测点流向平均标准差较小,落潮则相反(表 2)。因此,台风“森拉克”期间东湾白骨壤红树林内流速变化不大,但流向变化显著,这与 Wang 等^[41]发现风暴作用下盐沼内部近底层流速变化小、流向受较大影响结果类似。

在台风“森拉克”期间,光滩湍流动能明显大于台风后的正常天气,尤其在 8 月 1、2 日,分别为 6.5、8.0 kg/(m·s²),其中 8 月 2 日光滩 TKE 峰值是正常天气最大值的两倍。水体进入白骨壤红树林后湍流能量大幅度下降,最大减小率发生在 8 月 1 日涨急时刻,为 74.3%(图 6(a))。相对应地,台风“森拉克”期间湍流能量谱密度最大高于正常天气 10 倍,白骨壤红树林对能量耗散程度亦显著大于常规条件(图 7)。同时,通过拟合湍流动能 TKE 和潮流挟沙能量消耗关系曲线,发现两者在 3 个测点均具有显著相关性(图 9(a)、(c)~(f))。

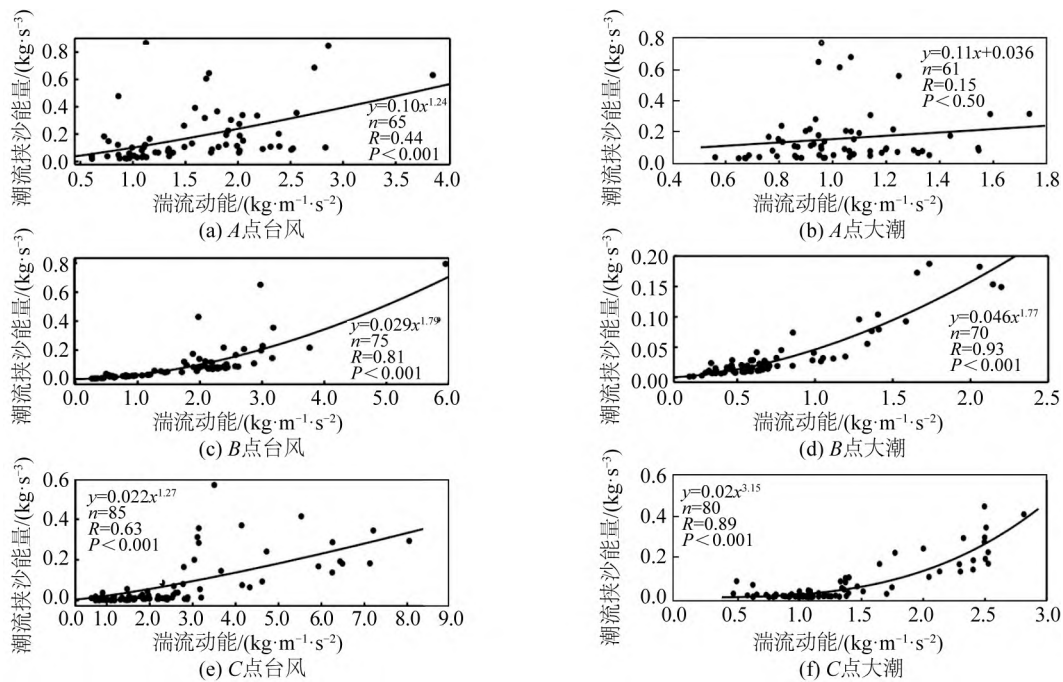


图 9 湍流动能和潮流挟沙能量消耗关系

Fig. 9 Correlation between turbulent kinetic energy and energy consumption of current by carrying sand

拟合幂函数公式正相关通过 99.9% 检验,说明东湾光滩—白骨壤红树林边缘湍流通过增强底剪切应力影响悬沙总量加剧潮流挟沙能耗。再者,由图 5(a)得知,水流在白骨壤红树林边缘—内部区域挟沙能耗较光滩反而增加,说明正常天气下湍流在白骨壤红树林内部紊动强度较低,使得两者相关性较差(图 9(b))。

然而,台风期间白骨壤红树林内部挟沙能量和湍动能相关性增强(图9(a)),处于净搬运能耗状态(图5、表1),可能造成侵蚀现象。在涨潮垂向流速能量谱中亦可看到,台风期间光滩—白骨壤红树林边缘的耗散程度低于正常天气(图7),尽管其在湍动能值上存在较大的耗散(图6(a))。因此,在风暴作用下白骨壤红树林抵御涨潮水动力效果显著,但水体湍动仍较强进而可能破坏潮滩地貌,涨、落潮时东湾—白骨壤红树林水动力作用耗散过程如图10所示。

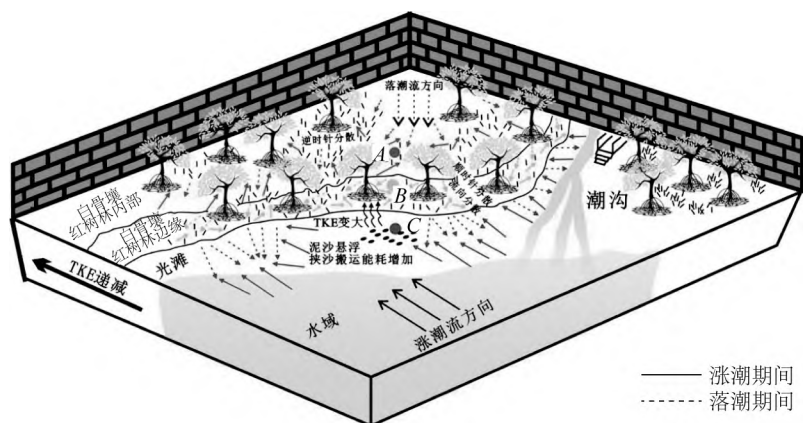


图10 东湾光滩—白骨壤红树林潮流耗散机制模式

Fig. 10 The pattern of tidal current dissipation in bared flat—*Avicennia marina* of Dongwan

在落潮阶段,落憩时光滩湍流能量略大于白骨壤红树林边缘及内部。随后落急流在3个测点TKE均增大,其中T2增幅近4倍,达 $6.7 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$,然而其值仍低于涨急湍流动能(图6(a))。同时,台风落潮期间TKE响应白骨壤红树林变化较小,最大不超过50%。综上,相较于正常天气期间,台风增大落急时湍流强度,随时间变化特征的不对称性现象消失。台风期间白骨壤红树林涨潮流能量减小率大于落潮,台风后的正常天气则相反。

5 结 语

基于ADV获取东湾2020年8月连续6日水动力实测数据和部分植被特征参数,研究台风“森拉克”期间及随后的正常天气下白骨壤红树林近底层水动力耗散过程,主要结论包括:

1) 光滩—白骨壤红树林内部近底层水体流向由涨潮到落潮发生顺时针—逆时针偏转。台风天气下水体流速无明显变化,流向在白骨壤红树林边缘顺时针偏转幅度变大。

2) 正常天气下,光滩—白骨壤红树林内部涨、落潮过程湍动能变化具有潮汐不对称性,涨潮时自海向陆逐渐递减,在光滩—白骨壤红树林边缘耗散湍动能最多。东湾光滩—白骨壤红树林边缘、白骨壤红树林边缘—内部涨潮时沿程挟沙能量耗散分别主要以向岸净沉降和净搬运为主,落潮时各测点间能耗均以向海净沉降为主。

3) 东湾白骨壤呼吸根主要降低湍流的垂向紊动强度,同时水平方向上的水体在白骨壤边缘受枝、叶影响而扩散,从而使得潮流挟沙输移能耗降低。

4) 台风“森拉克”主要影响红树林中近底层流向变化而非流速,光滩—白骨壤红树林内部TKE增大,最大达正常天气两倍。然而,白骨壤红树林中湍流和用以悬沙搬运的潮流挟沙能耗同时增大。

参考文献:

- [1] MA Z, MELVILLE D S, LIU J, et al. Rethinking China's new great wall[J]. Science, 2014, 346(6212): 912-914.
- [2] MIKAMI T, MATSUBA S, SHIBAYAMA T. Flow geometry of overflowing tsunamis around coastal dykes [C]//Proceedings of the Coastal Engineering Conference. ASCE, 2014:15.
- [3] MULCAHY M G, JACKSON L A, CORBETT B B. Rock seawall design and construction with deeper toes for climate change [C]//Proceedings of the 23rd Australasian Conference on Coastal and Ocean Engineering. 2017.
- [4] GODA Y. Random seas and design of maritime structures[M]. Tokyo: University of Tokyo Press, 1985.

- [5] SUTTON-GRIER A E, WOWK K, BAMFORD H. Future of our coasts: The potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems[J]. *Environmental Science & Policy*, 2015, 51: 137-148.
- [6] MOOSAVI S. Ecological coastal protection: Pathways to living shore lines[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 196: 930-938.
- [7] 廖宝文, 李玫, 陈玉军, 等. 红树林快速恢复与重建技术研究[R]. 广州: 中国林业科学研究院热带林业研究所, 2013. (LIAO Baowen, LI Mei, CHEN Yujun, et al. Rapid restoration and reconstruction of mangrove forests [R]. Guangzhou: Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, 2013. (in Chinese))
- [8] SURESHO H S, SAHU S C. Mangrove area assessment in India: Implications of loss of mangroves [J]. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 2015, 6(5):1000280.
- [9] DANIELSEN F, SORENSEN M K, OLWIG M F, et al. The Asian tsunami: A protective role for coastal vegetation [J]. *Science*, 2005, 310:643.
- [10] TEMMERMAN S, MEIRE P, BOUMA T J, et al. Ecosystem-based coastal defence in the face of global change [J]. *Nature*, 2013, 504(7478): 79-83.
- [11] MONTGOMERY J M, BRYAN K R, MULLARNEY J C, et al. Attenuation of storm surges by coastal mangroves [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(5): 2680-2689.
- [12] MOLLER I, KUDELLA M, RUPPRECHT F, et al. Addendum: Wave attenuation over coastal salt marshes under storm surge conditions[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(10): 727-731.
- [13] NARAYAN S, BECK M W, REGUERO B G, et al. The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences[J]. *Plos One*, 2016, 11(5): e0154735.
- [14] ROMANACH S S, DEANGELIS D L, KOH H L, et al. Conservation and restoration of mangroves: Global status, perspectives, and prognosis[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2018, 154:72-82.
- [15] PAUL M, BOUMA T J, AMOS C L. Wave attenuation by submerged vegetation: Combining the effect of organism traits and tidal current[J]. *Marine Ecology Progress*, 2012, 444: 31-41.
- [16] 江锐捷, 程鹏, 高建华, 等. 红树林对潮流底边界层动力过程的影响[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(4):37-44. (JIANG Ruijie, CHENG Peng, GAO Jianhua, et al. Impacts of mangrove on the dynamic process of bottom boundary layer[J]. *Marine Geological Frontiers*, 2020, 36(4):37-44. (in Chinese))
- [17] HU Z, SUZUKI T, ZITMAN T, et al. Laboratory study on wave dissipation by vegetation in combined current-wave flow[J]. *Coastal Engineering*, 2014, 88:131-142.
- [18] 李信贤. 广西海岸防护体系中防护林的作用与树种选择[J]. *广西科学院学报*, 2001(2):82-86. (LI Xinxian. Functions and species choice of shelter forests in the protection system of coast in Guangxi [J]. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 2001(2):82-86. (in Chinese))
- [19] 黎树式, 黄鹄, 戴志军. 近60年来广西北部湾气候变化及其适应研究[J]. *海洋开发与管理*, 2017, 34(4):50-55. (LI Shushi, HUANG Hu, DAI Zhijun. Climate change and its adaptation in Beibu Gulf of Guangxi in recent 60 years[J]. *Ocean Development and Management*, 2017, 34(4):50-55. (in Chinese))
- [20] 罗章仁, 应秩甫. 华南港湾[M]. 广州: 中山大学出版社, 1992. (LUO Zhangren, YING Zhifu. The harbours in South China [M]. Guangzhou: Sun Yat-sen University Press, 1992. (in Chinese))
- [21] 鲁远征, 吴加学, 刘欢. 河口底边界层湍流观测后处理技术方法分析[J]. *海洋学报*, 2012, 34(5): 39-49. (LU Yuanzheng, WU Jiaxue, LIU Huan. An integrated post-processing technique for turbulent flows in estuarine bottom boundary layer[J]. *Haiyang Xuebao*, 2012, 34(5):39-49. (in Chinese))
- [22] HUBERT C, MARK T, SHIN-ICHI A. Acoustic Doppler Velocimetry (ADV) in small estuary: Field experience and signal post-processing[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2008, 19(5): 307-313.
- [23] GORING D G, NIKORA V I. Despiking acoustic doppler velocimeter data[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 128(1):117-126.
- [24] 张鹏, 杨胜发, 胡江, 等. 声学多普勒流速仪测量湍流流速的峰值降噪方法[J]. *人民长江*, 2016, 47(8):76-79. (ZHANG Peng, YANG Shengfa, HU Jiang, et al. Study on despiking method of turbulent flow velocity measured by ADV[J]. *Yangtze River*, 2016, 47(8):76-79. (in Chinese))
- [25] 窦国仁, 董凤舞, DOU X B. 潮流和波浪的挟沙能力[J]. *科学通报*, 1995(5):443-446. (DOU Guoren, DONG Fengwu,

- DOU X B. The capacity of tidal currents and waves to carry sand [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995 (5) : 443-446. (in Chinese))
- [26] ARCEMENT G J, SCHNEIDER V R. Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and floodplains [R]. United States Geological Survey Water-supply Paper 2339, 1989.
- [27] CRAIG M, CRISTINA F. A real-time, event-triggered storm surge forecasting system for the state of North Carolina [J]. *Ocean Modelling*, 2008, 25(3/4) : 95-119.
- [28] WHITEHOUSE R, SOULSBY R, ROBERTS W, et al. Dynamics of estuarine muds (A manual for practical applications) // 4. Erosion [J]. Institution of Civil Engineers, 2000, 28647:193-203.
- [29] PANG W, DAI Z, MA B, et al. Linkage between turbulent kinetic energy, waves and suspended sediment concentrations in the nearshore zone [J]. *Marine Geology*, 2020, 425:106190.
- [30] FOSTER-MARTINEZ M R, LACY J R, FERNER M C, et al. Wave attenuation across a tidal marsh in San Francisco Bay [J]. *Coastal Engineering*, 2018, 136:26-40.
- [31] HORSTMAN E M, DOHMEN-JANSSEN C M, NARRA P M F, et al. Wave attenuation in mangroves: A quantitative approach to field observations [J]. *Coastal Engineering*, 2014, 94: 47-62.
- [32] MAZDA Y, MAGI M, KOGO M, et al. Mangroves as a coastal protection from waves in the Tong King delta, Vietnam [J]. *Mangroves and Salt Marshes*, 1997, 1(2) : 127-135.
- [33] QUARTEL S, KROON A, AUGUSTINUS P, et al. Wave attenuation in coastal mangroves in the Red River Delta, Vietnam [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29(4) :576-584.
- [34] 田野, 陈玉军, 侯琳, 等. 广东湛江白骨壤红树人工林消波效应初步研究 [J]. *地球环境学报*, 2014, 5(1) :30-35. (TIAN Ye, CHEN Yujun, HOU Lin, et al. A preliminary study on wave attenuation effect of artificial mangrove *Avicennia marina* in Zhanjiang, Guangdong Province [J]. *Journal of Earth Environment*, 2014, 5(1) :30-35. (in Chinese))
- [35] 戴志军, 周晓妍, 王杰, 等. 红树林潮滩沉积动力研究进展与展望 [J]. *热带海洋学报*, 2021, 40(3) :69-75. (DAI Zhijun, ZHOU Xiaoyan, WANG Jie, et al. Review and prospect of mangrove tidal flat sedimentary dynamics [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2021, 40(3) :69-75. (in Chinese))
- [36] MASSEL S R, FURUKAWA K, BRINKMAN R M. Surface wave propagation in mangrove forests [J]. *Fluid Dynamics Research*, 1999, 24(4) :219-249.
- [37] DAHDOUH-GUEBAS F, JAYATISSA L P, DI N D, et al. How effective were mangroves as a defence against the recent tsunami? [J]. *Current Biology*, 2005, 15(12) : 443-447.
- [38] MAZDA Y, MAGI M, IKEDA Y, et al. Wave reduction in a mangrove forest dominated by *Sonneratia* sp [J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2006, 14(4) : 365-378.
- [39] 梁经萍, 周飞. 广西热带气旋统计分析 [J]. *中山大学学报论丛*, 1994(5) :7-13. (LIANG Jingping, ZHOU Fei. The statistical analysis of tropical cyclones in Guangxi [J]. *Sun Yatsen University Forum*, 1994(5) :7-13. (in Chinese))
- [40] HIMURA K, TANAKA N. Numerical simulation estimating effects of tree density distribution in coastal forest on tsunami mitigation [J]. *Ocean Engineering*, 2012, 54(4) :223-232.
- [41] WANG A J, GAO S, CHEN J, et al. Sediment dynamic responses of coastal salt marsh to typhoon "KAEMI" in Quanzhou Bay, Fujian Province, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(1) : 120-130.