

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.06.016

贝宁海滩上波浪传播演变特性研究

王广生¹, 童林龙^{2,3}, 罗梦岩^{2,3}, 张继生^{2,3}

(1. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027; 2. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为分析贝宁海滩上波浪传播演变特性, 基于开源波浪数值计算软件 COBRAS 建立了贝宁典型海滩剖面数值模型, 模型中采用 k -epsilon 紊流模型求解雷诺应力, 采用流体体积法捕捉自由液面, 并采用斜坡上波浪破碎试验结果对数值模型进行了验证。基于该模型对常浪条件和极端波浪条件下海滩上波浪传播规律的模拟结果表明: 常浪条件下波浪主要在沙坝附近发生破碎, 极端波浪条件下波浪在沙坝外侧 200 m 处开始发生破碎; 破碎区域内水质点速度较大, 常浪条件下沙坝周围的流速可达 7.5 m/s, 极端波浪条件下破波带内水质点速度可达 12.4 m/s, 且波浪回流与入射波浪在沙坝周围相互作用会形成较强的涡旋; 随着波浪非线性的增强, 波浪爬高也逐渐增大, 在极端波浪条件下, 沙丘上会发生越浪。

关键词: 波浪; 浅水变形; 波浪破碎; 流体体积法; 雷诺平均的纳维-斯托克斯方程; 贝宁海滩

中图分类号: TV139.2; P731.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)06-0123-07

Study on wave propagation and evolution characteristics over a beach in Benin

WANG Guangsheng¹, TONG Linlong^{2,3}, LUO Mengyan^{2,3}, ZHANG Jisheng^{2,3}

(1. China Harbor Engineering Company Limited, Beijing 100027, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on an open-source numerical software of wave, COBRAS, a two-dimensional numerical model is developed to study the wave propagation and evolution characteristics over a beach in Benin, in which the free surface is captured by the Volume-of-Fluid method and the Reynold stress is obtained by solving the k -epsilon equations. The numerical model is validated with the experimental data for the free surface of a solitary wave during the shoaling and breaking over a slope. The proposed model is then used to study the shoaling and breaking processes under ordinary and extreme wave conditions. The results show that the waves break near the sandbar under the ordinary wave condition. However, under the extreme wave condition, they start to break 200 m away from the sandbar, and during the interaction of the rundown water and the incident wave, vortexes shall be formed over the sandbar. In the breaking zone, the water velocity is relatively large, which can be 7.5 m/s under the ordinary wave condition and even reach 12.4 m/s under the extreme wave condition. With the increase of the nonlinearity of the incident wave, the runup height increases, and overtopping occurs under the extreme wave condition.

Key words: wave; wave shoaling; wave breaking; volume-of-fluid method; Reynold-averaged Navier-Stokes equations; beach in Benin

当波浪向海岸传播时, 受非线性效应和海滩坡度影响, 不可避免地变得越来越陡峭而最终破碎^[1-2]。波浪浅水变形和破碎是一种非常复杂的现象, 与海工结构稳定性、海岸泥沙输移、波浪爬坡、海底冲刷等海岸工程问题密切相关^[3], 掌握近岸地区波浪浅水变形和破碎规律是近岸泥沙运移研究和海洋构筑物周围基础设计的关键。

对波浪浅水变形规律和破碎现象已有大量研究, 如在自由变化规律方面, Ting 等^[4]采用模型试验方法

作者简介: 王广生(1980—), 男, 高级工程师, 主要从事波浪-海床-结构物相互作用研究。E-mail: gswang@chec.bj.cn

通信作者: 童林龙(1989—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事波浪-海床-结构物相互作用研究。E-mail: tllnj@hhu.edu.cn

引用本文: 王广生, 童林龙, 罗梦岩, 等. 贝宁海滩上波浪传播演变特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 123-129.

WANG Guangsheng, TONG Linlong, LUO Mengyan, et al. Study on wave propagation and evolution characteristics over a beach in Benin [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(6): 123-129.

研究了周期波在斜坡地形上的浅水变形规律,Goring^[5]采用模型试验方法研究了海啸波在岸滩上的传播演变规律。波浪传播过程中流速对泥沙稳定性具有重要影响^[6],传统的流速测量方法主要采用热膜流速仪和多普勒流速仪,Stive^[7]和 Mizuguchi^[8]分别采用热膜流速仪和多普勒流速仪在波浪水槽中研究了波浪浅化和破碎过程中的流速场和紊动特性。近年来,粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术和影像观测技术被广泛用于波浪场的测量和波高的观测。基于 PIV 流速测量方法,Chang 等^[9]研究了破碎条件下的紊流速度和紊动动能,观测结果表明波浪引起的紊动动能对破碎区域内流速分布规律具有重要作用;Almar 等^[10]基于影像观测技术研究了贝宁海滩上波浪波高和周期分布规律,观测结果显示贝宁地区长周期波浪作用较强,为主要的水动力因素,对岸线稳定具有重要作用。

数值模拟是研究波浪传播规律的另一重要手段,可以模拟实际尺度下波浪的运动过程^[11],已有多种数值模型在波浪传播规律数值模拟中得到应用,如浅水方程和布西内斯克 (Boussinesq) 方程。Wei 等^[12]基于非线性浅水方程模拟了孤立波在斜坡上的浅水变形规律;Wei 等^[13]提出了二阶精度的完全非线性布西内斯克方程,研究结果表明非线性项对波高、波速和动能均具有重要影响;张振伟等^[14]基于高阶布西内斯克方程研究了波浪在海滩上的浅水变形规律和频散特性。随着计算机计算能力的提高,更加精细的数值模型也逐渐被提出并用于近岸波浪的传播规律研究。Lin 等^[15]基于雷诺平均的纳维-斯托克斯方程 (RANS) 开发了开源波浪数值计算软件 COBRAS,研究了周期性波浪在斜坡上的变形和破碎过程。Hsiao 等^[16]基于 COBRAS 模型研究了孤立波在海堤上的越浪规律;Li 等^[17]基于 RANS 模型和 $k-\omega$ 紊流模型研究了崩破波和卷破波条件下水体内部黏性剪切应力的分布规律。

几内亚湾贝宁海域波浪动力较强^[18],且海滩上可能存在着越浪风险,严重威胁近岸居民的生命财产安全。但目前对贝宁海滩上长周期波浪的变形和破碎规律认识还不够清楚,这显著增加了当地波浪灾害防治工程设计与建设的难度。本文结合贝宁海滩地形特征,在 COBRAS 软件中建立海滩剖面数值模型,研究贝宁海滩上波浪的传播演变规律并评估波浪爬高与越浪风险,以为当地海岸灾害防治工程建设提供参考。

1 数值模型

1.1 模型构建

本文基于 COBRAS 软件建立贝宁沿海典型海滩剖面数值模型,模型中根据贝宁沿岸海滩剖面观测结果的平均值构建剖面地形,观测地点位于北纬 6.2°、东经 1.7°,海滩剖面如图 1 所示(图中 x 为空间位置与观测点的距离, z 为高程)。观测区域内波浪周期较长,常浪条件下观测区域内波浪谱峰周期介于 8~16 s 之间,有效波高介于 0.75~1.75 m 之间;极端波浪条件下有效波高为 3.1 m,谱峰周期可达 22 s^[18]。当地潮差较小,最高潮位为 0.8 m (图 1)^[18]。波流荷载作用下,在水平方向上 $x=100\sim150$ m 之间存在水下沙坝,沙坝外侧(向海侧)海床坡度较小,介于 0.01~0.03 之间。

海滩上波流运动通常为紊流,COBRAS 软件中采用 RANS 模型控制波浪的运动:

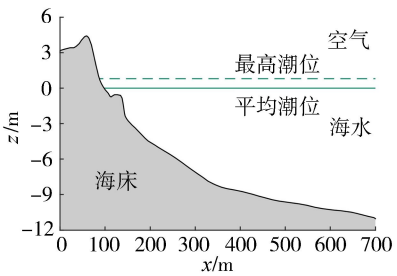


图1 贝宁沿海滩剖面
Fig.1 Profile of the Grand Popo beach in Benin

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) \tag{2}$$

式中: x_i 为笛卡尔坐标; $\bar{u}_i$ 为统计平均流速分量; t 为时间; ρ 为海水的密度; $\bar{p}$ 为统计平均压强; ν 为水体的运动黏度; g 为重力加速度。方程(2)中右侧最后一项为雷诺应力,软件中采用 k -epsilon 模型对雷诺应力进行求解^[19]。为了模拟波浪传播过程中自由液面的波动,本文采用流体体积 (volume of fluid, VOF) 方法捕捉自由液面,流体体积分数 F 满足的控制方程^[20]为

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial u_i F}{\partial x_i} = 0 \tag{3}$$

本文采用质量源造波法造波,采用矩形网格划分计算域,采用两步映射法对压强和速度变量解耦合。对

流项采用迎风格式离散,扩散项采用中心差分格式离散,时间项采用欧拉显示格式离散^[21]。数值模型中计算域为 $0 \leq x \leq 1\,500\text{ m}$ 、 $-12\text{ m} \leq z \leq 6\text{ m}$ 的矩形区域,测试后选定的网格为 $0.5\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 均匀矩形网格。现场观测资料中缺少 $x \geq 700\text{ m}$ 区域的水深数据,由测量结果可知 9 m 以下水深变化较小,因此本文假定 $700\text{ m} \leq x \leq 1\,500\text{ m}$ 时水深不变。

1.2 模型验证

采用 Synolakis^[22] 开展的斜坡上波浪破碎过程经典试验对数值模型进行验证。试验中斜坡坡度设置为 $1 : 19.85$,坡前水深在 $0.21 \sim 0.29\text{ m}$ 之间变化,研究了非线性参数(波幅 A 与坡前水深 h 之比)为 0.28 时孤立波在斜坡上的传播过程,测量了波浪运动过程中的水位。图 2 给出了不同时刻自由液面高程 η 数值模拟结果与试验结果,可见数值模拟结果与试验结果在不同时刻均较为吻合,表明数值模型可以较好模拟贝宁海滩上波浪的传播变形过程。

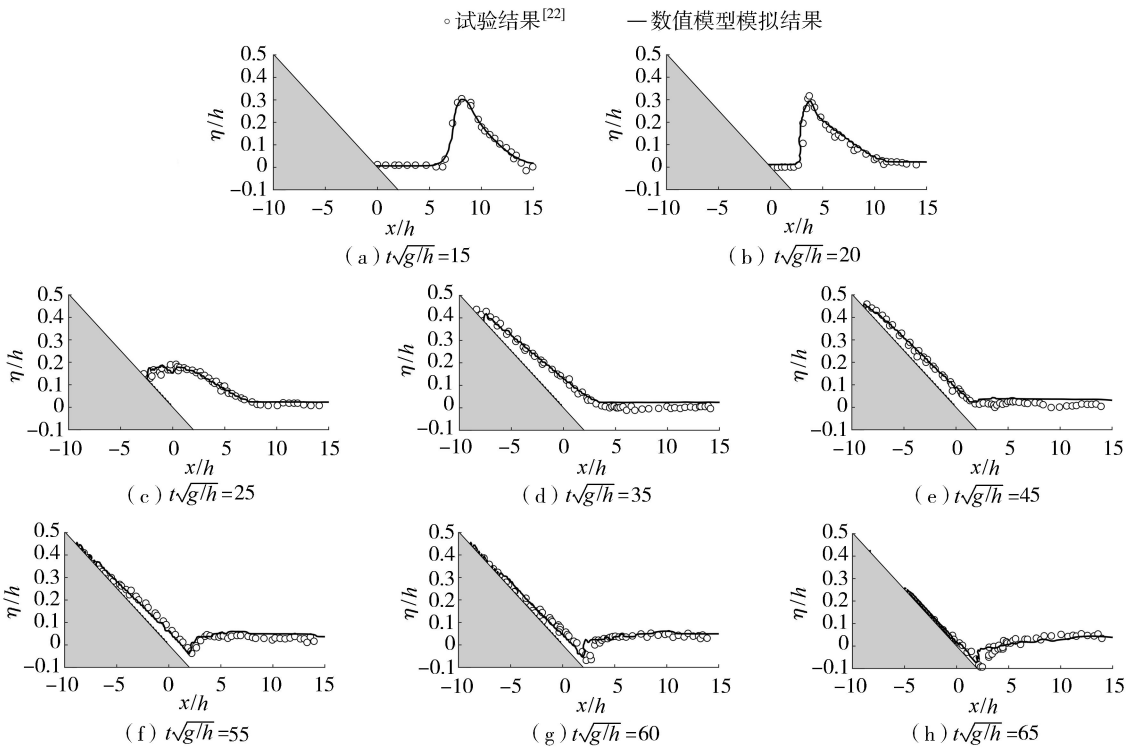


图 2 本文数值模型模拟结果与试验结果对比

Fig.2 Comparison of numerical results and experimental results

2 结果与分析

采用验证后的数值模型研究了周期性波浪在贝宁海滩上的传播过程。为了分析波浪周期和波高对波浪传播特性的影响,模型中入射波浪周期设置为 $8、16、22\text{ s}$,波高分别设置为 $1、2、3\text{ m}$ 。入射波浪条件详见表 1,其中特征波高为入射波浪波高,特征波长为入射波浪波长。

2.1 波高变化特性

波浪由深水区向浅水区传播过程中会发生浅水变形,图 3 为不同波浪条件下的波面包络线。由图 3 可见,在常浪条件下, 1 m 波高的波浪传播至沙坝附近时波高显著增大,例如周期 8 s 的波浪在沙坝外缘波高达到 1.9 m ,为入射波浪波高的 1.9 倍;而周期 16 s 的波浪在沙坝外缘波高达到 2.2 m ,为入射波浪波高的 2.2 倍。同时,沙坝附近水深较小,非线性

表 1 入射波浪条件

Table 1 Summary of incident wave conditions

编号	H/m	T/s	L/m	ζ/m	ϵ	μ^2
N1	1	8	73.5	0	0.0455	0.8842
N2	2	8	73.5	0	0.0909	0.8842
N3	3	8	73.5	0	0.1364	0.8842
N4	1	16	161.4	0	0.0455	0.1834
N5	2	16	161.4	0	0.0909	0.1834
N6	3	16	161.4	0	0.1364	0.1834
N7	3	8	75.4	0.8	0.0424	0.9669
N8	3	16	166.8	0.8	0.0847	0.1976
N9	3	22	232.8	0.8	0.1271	0.1014

注: H 为特征波高; L 为特征波长; T 为周期; ζ 为潮位; ϵ 为非线性参数, $\epsilon=A/h$; μ 为频散参数, $\mu=2\pi h/L$ 。

性参数 ϵ 达到临界值^[23],波浪会发生破碎,波浪破碎后,能量大量耗散,波高急剧减小。随着入射波浪波高的增大,波浪尚未传播至沙坝时,波陡已经达到临界值,进一步导致了波浪破碎带逐渐外移。以 8 s 周期波浪为例,1 m 波高条件下破碎带位于 140 ~ 170 m 之间,2 m 波高条件下破碎带位于 150 ~ 180 m 之间,当波高增大到 3 m 时,破碎带位于 170 ~ 280 m 之间。

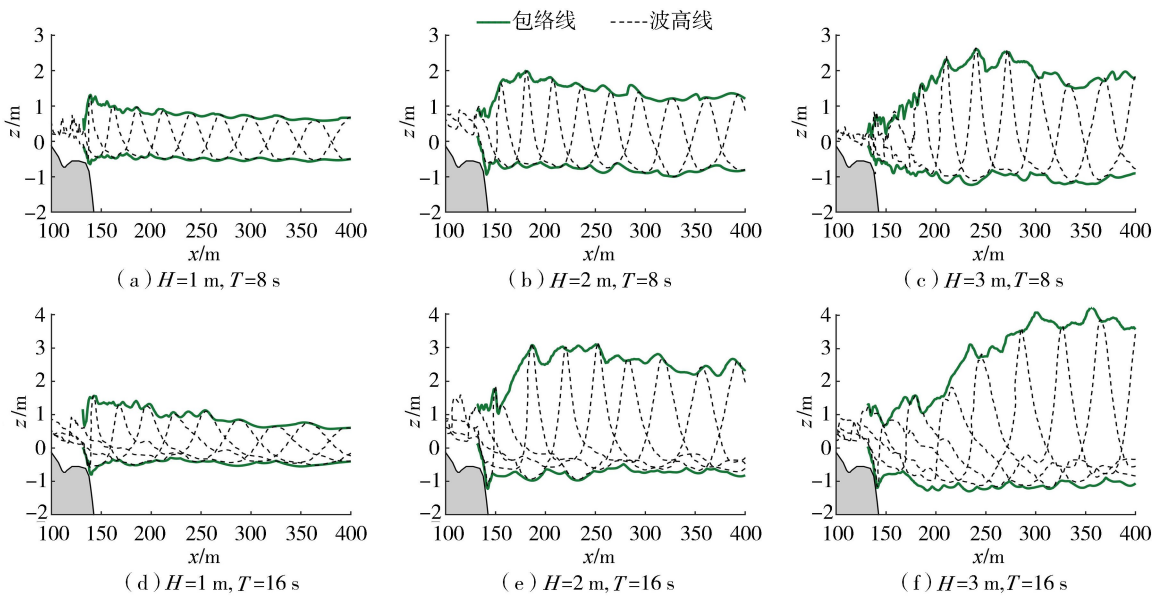


图 3 波浪传播过程中不同波浪条件下的波面包络线

Fig. 3 Envelope profile of water free surface in wave propagation under different wave conditions

模拟结果表明波浪周期对破碎带也具有重要影响。以 3 m 波高波浪为例,当周期为 8 s 时,波浪在 170 ~ 280 m 之间破碎且最大波高为 3.6 m,为入射波浪波高的 1.2 倍;而当周期为 16 s 时,波浪在 160 ~ 340 m 之间破碎且最大波高增大为 5.1 m,为入射波浪波高的 1.7 倍。这主要是因为随着波浪周期的增大,浅水变形系数也逐渐增大,因此,长周期波浪波高增大较快,比短周期波浪更早发生破碎。当破碎带外移时,破碎区域内的水深增大,极限波高也相应增大。

2.2 流速变化特性

波面变化的同时水体内流场也会发生变化。图 4 为常浪条件(N4)下不同时刻近岸流速的空间分布和

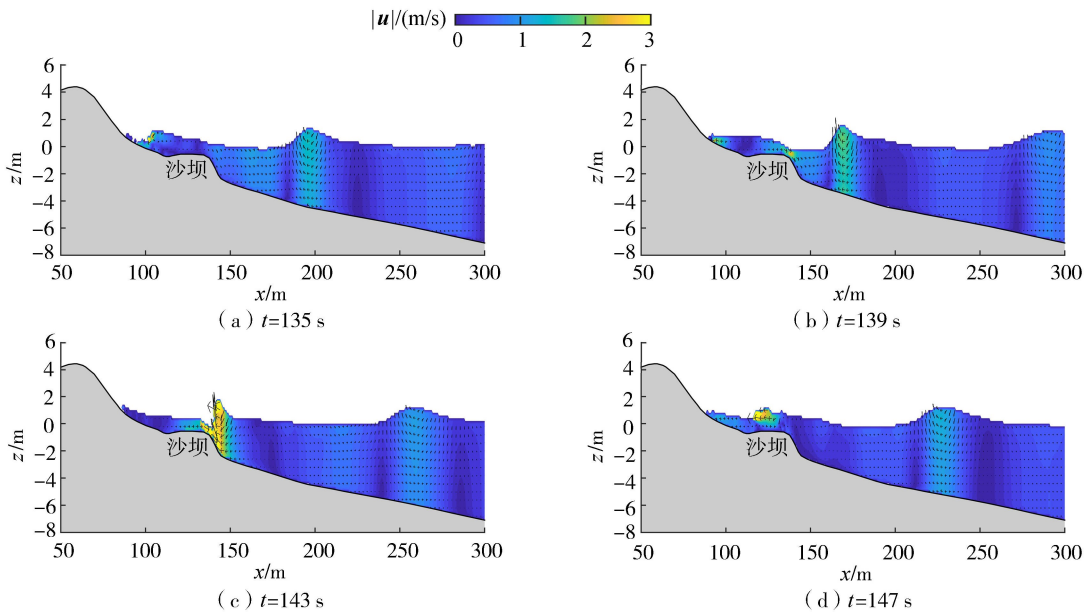


图 4 常浪条件下长周期波浪在近岸的流速分布 ($H=1\text{ m}$, $T=16\text{ s}$)

Fig. 4 Distributions of flow velocity field of long-period wave under the ordinary wave condition ($H=1\text{ m}$, $T=16\text{ s}$)

速率的等值线。由图 4 可知,在破碎带以外,虽然水深较大,但是流速相对较小,同时波峰周围流速比波谷周围流速大。在破碎带附近非线性作用较强,表层水体流速超过波浪相位速度,在波浪前锋形成水滚,水滚前端水体流速较大,最大值达到了 7.5 m/s,远大于波浪未发生破碎时的水质点速度和波浪相位速度。在破碎带以内,流动较为复杂,水体表层也会出现较大流速。随着入射波浪非线性的增强,流速的空间分布特征也会相应发生变化,图 5 为极端波浪条件(N6)下不同时刻水体内流速的空间分布。由图 5 可知,最大流速主要位于 180 ~ 340 m 之间,且主要分布在表层的破碎水滚周围。在图 5(d)中,水滚周围最大流速达到 12.4 m/s。

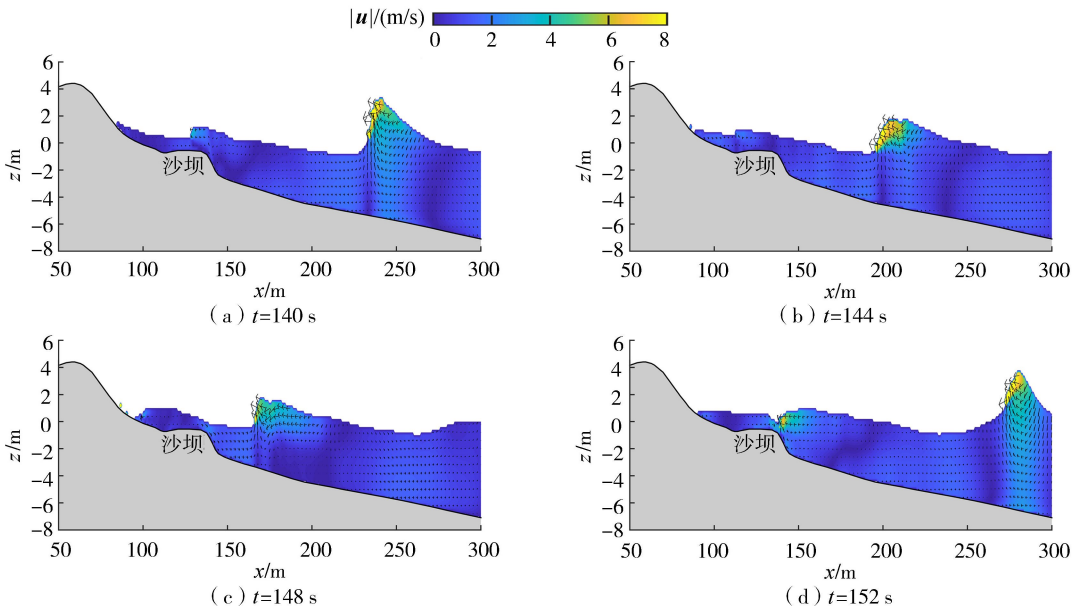


图 5 极端波浪条件下长周期波浪在近岸的流速分布 ($H=3\text{ m}$, $T=16\text{ s}$)

Fig. 5 Distributions of flow velocity field of long-period wave under the extreme wave condition($H=3\text{ m}$, $T=16\text{ s}$)

波浪爬高后形成的波浪回流会与入射波浪相互作用,这会对近岸泥沙运动和沙坝稳定性产生重要影响。图 6 为极端波浪条件(N9)下不同时刻沙坝周围水体内涡旋强度(Ω)和流速的空间分布。由图 6 可知,当波浪波峰离沙坝较远时,水体内涡旋强度较小,随着波浪向岸传播,波浪在沙坝右侧破碎,同时在水体表层产生涡旋。由图 6(c)可见,当波浪波峰传播至沙坝时,沙坝周围水体存在较强的涡旋,反向涡旋强度最大值可达 0.73 s^{-1} ,正向涡旋强度最大值为 0.57 s^{-1} 。对比不同时刻的涡旋强度空间分布可知,涡旋的形成主要是由波浪

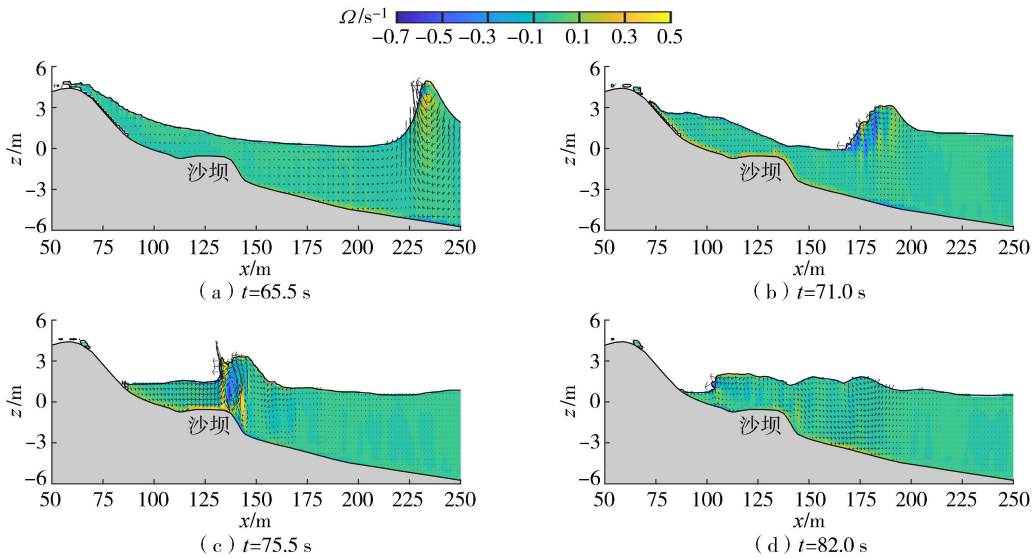


图 6 极端波浪条件下波浪回流与入射波浪相互作用在沙坝周围形成的涡旋 ($H=3\text{ m}$, $T=22\text{ s}$)

Fig. 6 Profile of vortexes around the sandbar induced by the interaction of incident wave and backwash under the extreme wave condition ($H=3\text{ m}$, $T=22\text{ s}$)

回流和波流相互作用产生的。近底波浪回流和涡旋的存在可能会对沙坝地形的稳定性产生重要影响。

2.3 波浪的爬高与越浪

长周期波浪伴随着较强波能流,会在近岸地区会产生较大的爬高,水流甚至可能越过沙丘形成越浪。因此,本文进一步研究了高潮位条件下波浪在近岸地区的爬高现象。模拟计算结果显示,短周期波浪在近岸地区的爬高较小,不会发生越浪现象;但当波浪周期增大到 16 s 时,波浪在沙滩上的爬高显著增大;在 22 s 的极端波浪条件下,沙丘上会发生越浪现象。图 7 为 N7、N8、N9 条件下波浪达到最大爬高时波面形态和流速的空间分布。由图 7 可知,波浪爬高随周期的增大而增大,这主要是因为长周期波浪产生的能量流较大。当周期为 8 s 时,波浪爬高为 3.1 m;周期增大到 16 s 时,波浪爬高增大到 4.4 m,十分接近沙丘的顶高程;在极端长周期波浪条件下,部分水体会越过沙丘,形成越浪(图 7(c))。沙丘上的越浪会威胁近岸居民的生命财产安全,因此亟须开展相关波浪灾害防治工程建设。

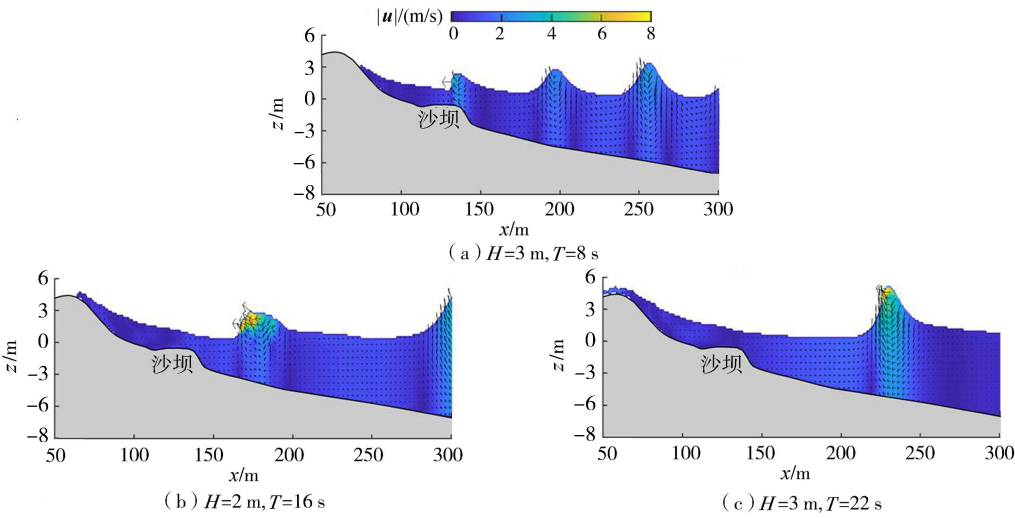


图 7 不同波浪周期条件下波浪的爬高
Fig. 7 Runup height of water under different wave period conditions

3 结 论

- a. 常浪条件下,贝宁海滩上波浪主要在沙坝附近破碎。随着周期和波高的增大,破碎带逐渐外移,16 s 周期 3 m 波高的极端条件下,波浪在距离沙坝 200 m 时就会发生破碎,极限波高可达到入射波浪波高的 1.7 倍。
- b. 在波浪破碎带内水质点速度远大于未破碎区域内水质点速度。常浪条件下,最大流速主要出现在沙坝周围,水质点速度最高可以达到 7.5 m/s;极端波浪条件下,在沙坝外侧(向海侧)表层水滚周围会出现较大流速,最大可达 12.4 m/s。极端波浪条件下,波浪回流和波流会发生相互作用,形成较强的涡旋。
- c. 常浪条件下,海滩上的沙丘可以起到较好的挡浪效果。但是强非线性的长周期波浪在海滩上具有较大爬高,在极端波浪条件下波浪会越过沙丘顶部形成越浪,威胁近岸居民的生命财产安全。
- d. 贝宁沿海波浪动力较强,为了减小长周期波浪对岸滩侵蚀和近岸居民生命财产安全的影响,建议在沙坝外侧修建可渗透性潜堤。通过潜堤反射部分波能,加速波浪破碎,同时可以起到一定的挡沙效果。

参考文献:

[1] 刘凡,陆小敏,徐丹,等. 海浪预报方法研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):387-393. (LIU Fan, LU Xiaomin, XU Dan, et al. Research progress of ocean waves forecasting method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5):387-393. (in Chinese))

[2] BATJES J A. Surf-zone dynamics[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1988, 20:257-291.

[3] LI Yuan, ZHANG Chi, CHEN Dake, et al. Barred beach profile equilibrium investigated with a process-based numerical model [J]. Continental Shelf Research, 2021, 222:104432.

- [4] TING F C K, KIRBY J T. Observation of undertow and turbulence in a laboratory surf zone[J]. Coastal Engineering, 1994, 24(1/2): 51-80.
- [5] GORING D G. Tsunamis: the propagation of long waves onto a shelf[D]. Pasadena: California Institute of Technology, 1979.
- [6] FUJII Y, SATAKE K, SAKAI S, et al. Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake[J]. Earth, Planets and Space, 2011, 63(7): 815-820.
- [7] STIVE M J F. Velocity and pressure field of spilling breakers[C]//Proceedings of the 17th International Conference on Coastal Engineering. New York: ASCE, 1980: 547-566.
- [8] MIZUGUCHI M. Experimental study on kinematics and dynamics of wave breaking[C]//Proceedings of the 20th International Conference on Coastal Engineering. New York: ASCE, 1986: 589-603.
- [9] CHANG K A, LIU P L F. Pseudo turbulence in PIV breaking-wave measurements[J]. Experiments in Fluids, 2000, 29(4): 331-338.
- [10] ALMAR R, CIENFUEGOS R, CATALAN P, et al. A new breaking wave height direct estimator from video imagery[J]. Coastal Engineering, 2012, 61: 42-48.
- [11] 冯卫兵, 华伟豪, 张俞. 基于 FUNWAVE-TVD 模型的岸礁次重力波数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 349-357. (FENG Weibing, HUA Weihao, ZHANG Yu. Numerical simulation of infragravity wave over fringing reef based on FUNWAVE-TVD model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(4): 349-357. (in Chinese))
- [12] WEI Y, MAO X Z, CHEUNG K F. Well-balanced finite-volume model for long-wave runup[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2006, 132(2): 114-124.
- [13] WEI Ge, KIRBY J T, GRILLI S T, et al. A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves(Part I): highly nonlinear unsteady waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1995, 294: 71-92.
- [14] 张振伟, 刘必劲, 邹志利, 等. 高阶 Boussinesq 型水波方程色散和变浅性能的改进[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 37-44. (ZHANG Zhenwei, LIU Bijin, ZOU Zhili, et al. Improvement of dispersion and shoaling property of a set of high-order Boussinesq-type equations[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(2): 37-44. (in Chinese))
- [15] LIN Pengzhi, LIU P L F. A numerical study of breaking waves in the surf zone[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 359: 239-264.
- [16] HSIAO S C, LIN T C. Tsunami-like solitary waves impinging and overtopping an impermeable seawall: experiment and RANS modeling[J]. Coastal Engineering, 2010, 57(1): 1-18.
- [17] LI Yuzhu, LARSEN B E, FUHRMAN D R. Reynolds stress turbulence modelling of surf zone breaking waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2022, 937: A7.
- [18] ALMAR R, HOUNKONNOU N, ANTHONY E J, et al. The Grand Popo beach 2013 experiment, Benin, west Africa: from short timescale processes to their integrated impact over long-term coastal evolution[J]. Journal of Coastal Research, 2014, 70: 651-656.
- [19] LAUNDER B E, REECE G J, RODI W. Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1975, 68(3): 537-566.
- [20] WEYMOUTH G D, YUE D K P. Conservative volume-of-fluid method for free-surface simulations on Cartesian-grids[J]. Journal of Computational Physics, 2010, 229(8): 2853-2865.
- [21] LIN Pengzhi, LIU P L F. Internal wave-maker for Navier-Stokes equations models[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1999, 125(4): 207-215.
- [22] SYNOLAKIS C E. The runup of long waves[D]. Pasadena, California: California Institute of Technology, 1986.
- [23] TISSIER M, BONNETON P, MARCHE F, et al. A new approach to handle wave breaking in fully non-linear Boussinesq models[J]. Coastal Engineering, 2012, 67: 54-66.

(收稿日期: 2022-12-04 编辑: 熊水斌)