

珊瑚礁地形上波浪传播变形的非静压数值模拟

张其一¹, 史宏达¹, 高伟², 李金峰²

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 中交天津航道局有限公司, 天津 300450)

摘要: 珊瑚礁广泛分布于我国南海等海域, 具有重要的生态、旅游、港口和军事价值。波浪是珊瑚礁环境最重要的动力因素之一。基于非静压浅水方程波浪模型 SWASH, 模拟了典型岸礁地形上的波浪传播过程, 并采用 Demirbilek 等的水槽实验数据分别对有效波高、波浪增水与爬高进行了验证, 模拟结果与实测数据符合良好, 展示了非静压模型在珊瑚礁地形上良好的适用性。通过波浪频率谱和波面小波谱, 分析了波浪谱在该珊瑚礁地形上的演化规律, 并揭示了礁坪上波浪能量从高频向低频转移的现象。本研究结果可为珊瑚礁环境动力研究以及相关的工程建设提供有益的参考依据。

关键词: 珊瑚礁; 波浪传播; 非静压模型; SWASH; 小波分析

中图分类号: P731.22

文献标识码: A

文章编号: 1002-3682(2017)04-0001-09

doi: 10.3969/j.issn.1002-3682.2017.04.001

珊瑚礁作为一种典型的海洋地貌形态, 在深海和浅海区域均有分布。根据其形式一般可以分为环礁、岸礁和堡礁。珊瑚礁地形广泛分布于我国的台湾岛附近及南海海域, 具有重要的港口、航运、生态、旅游、科研和军事价值。近年来, 随着国家对南海岛礁开发力度的提升, 珊瑚礁动力环境的研究也逐步加深。然而, 由于珊瑚礁地形地貌特殊而复杂, 其动力特点和形成机制尚待系统、深入地探究。

作为珊瑚礁环境的最主要动力, 波浪在珊瑚礁地形上的传播和变形得到了国内外学者广泛的关注。Gourlay^[1]较早开展了规则波在珊瑚礁地形上传播变形的物理模型实验, 并提出了非线性系数 $F_{\infty} = g^{1.25} H_0^{0.5} T^{2.5} / h_c^{1.75}$ 来描述相对波高的变化规律: 当非线性系数 F_{∞} 越小时, 相对波高也越小。Demirbilek 等^①开展了大量的物理模型实验, 研究了随机波浪和风作用下的波浪传播、礁坪增水和礁后波浪爬高问题。Yao 等^[2]采用物理模型实验, 较为系统地研究了破碎波的特征随礁坪水深和礁前斜坡坡度的变化规律。陈或超^[3]基于波浪绕射理论研究了潜没岛礁上的波浪运动, 分析了岛礁的潜深、排布数量、岛礁间距和环礁潟湖水深等因素对岛礁消波的影响。数值模拟方面, Boussinesq 方程模型和近年来发展的三维非静压模型被广泛用于珊瑚礁地形的波浪传播模拟。Yao 等^[4]利用一维完全非线性 Boussinesq 模型, 采用涡黏模型考虑波浪破碎, 展示了该类模型对珊瑚礁上强烈的波浪破碎过程具有良好的模拟能力。Yao 等^[5]进一步考虑了礁坪掘坑对波浪传播的影响, 发现掘坑会增加岸线处的风浪和涌浪波高, 而会减小次重力波的波高。刘思^[6]针对岸礁地形, 采用 Boussinesq 方程模型 FUNWAVE-TVD^[7]模拟了波浪在礁坪上的传播, 并改进了方程中对破碎项的处理。Ma 等^[8]采用非静压模型 NHWAVE 模拟了我国南海太平岛礁坪上的波浪运动, 发现珊瑚礁退化会大大增加岸线处波浪能量。Buckley 等^[9]对比了非静压波浪解析模型 SWASH、波浪平均谱模型 SWAN 和波浪平均波流耦合模型 XBeach 模拟陡坡岸礁地形上波浪传播变形的能力, 认为波浪破碎指

收稿日期: 2017-05-24

资助项目: 国家科技支撑计划项目——珊瑚礁港池开挖、航道疏浚技术研究(2014BAB16B03); 国家自然科学基金项目——复合加载下自升式平台桩土耦合作用机理及其承载力研究(51679224)

作者简介: 张其一(1977-), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩土力学数值计算与试验分析、海洋土工程特性等方面研究。E-mail: zhangqiyi@163.com

(李燕 编辑)

① DEMIRBILEK Z, NWOGU O G, WARD D L. Laboratory study of wind effect on runup over fringing reefs. Report 1: Data Report. 2007.

标是准确模拟的关键,并指出单纯的波浪平均谱模型对礁坪的次重力波模拟准确度欠佳。

近年来,含非静压项的非线性浅水方程被越来越多地用来模拟近岸波浪的传播变形^[10-14]。非静压模型在垂向上往往仅需要 2~3 层^[10, 12-13]即可较为准确地反映波浪的非线性和色散性,与 Boussinesq 类和 RANS-VOF 类模型相比大大提高了计算效率,具有良好的应用前景。本文采用非静压波浪模型 SWASH^[10],模拟波浪在珊瑚礁礁坪上的传播变形,并采用小波变换^[15-16]研究礁坪上波浪能量的转换规律。相关研究结果可为珊瑚礁海岸开发利用与工程建设提供参考依据。

1 数值模型

非静压波浪模型 SWASH 的控制方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial u w}{\partial x} + \frac{\partial w^2}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

式中: u, v 和 w 分别为速度在 x, y 和 z 方向上的分量; η 为自由水面; d 为静水深; h 为总水深, $h = \eta + d$; g 为重力加速度; q 为动压。

表面和底床的运动学边界条件分别为

$$w|_{z=\eta} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y}, \quad (5)$$

$$w|_{z=-d} = -u \frac{\partial d}{\partial x} - v \frac{\partial d}{\partial y}. \quad (6)$$

自由表面可通过将连续方程(1)沿水深积分,并结合式(5)进行求解:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial Q_x}{\partial x} + v \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0, \quad (7)$$

式中: Q_x, Q_y 分别为 x 和 y 方向的流量,分别可写为

$$Q_x = \int_{-d}^{\eta} u dz, \quad (8)$$

$$Q_y = \int_{-d}^{\eta} v dz. \quad (9)$$

表面边界条件为

$$q|_{z=\eta} = 0. \quad (10)$$

底部边界条件为

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial u}{\partial z} = 0. \quad (11)$$

2 实验地形及模型配置

2.1 实验介绍

Demirbilek 等^②在密歇根大学的波浪水槽开展了岸礁地形上波浪传播变形及爬高的物理模型实验。本

② 同①

文基于非静压波浪模型 SWASH 建立该实验的数值模型,并采用实验数据对模型进行验证。如图 1 所示,该实验地形是对关岛一处珊瑚礁海岸实际地形以 64 : 1 的比例尺进行缩放而得,从岸到海方向分别为一段坡度为 1 : 12 的沙滩,一段长度为 4.8 m、水深为 5.1 cm 的礁坪和由三段坡度不同的斜坡组成的复合式礁缘。外海水深为 0.551 m。从造波机至沙滩的总长度为 30 m。

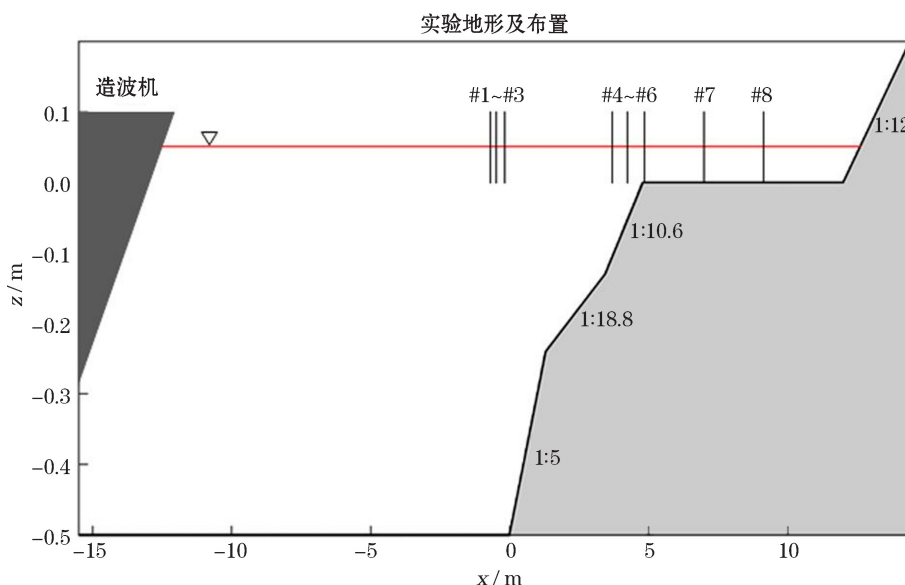


图 1 物理模型实验地形及波高仪布置位置^[2]

Fig.1 The terrain and the position layout of wave-height gauges^[2] for the physical model experiment

礁缘和礁坪上布置了共计 8 个波高仪,其中 3 个位于礁缘外侧,2 个位于礁缘上,3 个位于礁坪上,记录波面升高的频率为 20 Hz。造波机以 JONSWAP 谱为靶谱,生成波高为 8.5 cm,周期为 2 s 的不规则波。沙滩斜坡上采用电导率传感器记录了最大爬高的位置。

2.2 模型参数

SWASH 模型的计算区域为 $-15.5 \sim 14.5$ m,空间分辨率为 2 cm,水平计算网格数为 1 501 个。为了有效考虑波浪的非线性和色散性,垂向上采用了 3 层 Sigma 层。计算时间为 900 s,初始水位为 0,边界处采用站位 #1 的波面升高时间序列作为输入条件,采用弱反射型边界条件。实际珊瑚礁海域中,底摩阻系数随时间、空间、水深和床面粗糙度的变化而变化。本文中,考虑到物理模型实验中的底床较为光滑,故床面糙率采用恒定值,取无量纲床面摩阻系数 $C_f = 0.002$ 。

3 模型验证

图 2 展示了模拟结果和实验结果的波高和增水的对比验证。可以看出,模拟结果和实验实测结果均吻合良好,波浪在传向岸边的过程中,在礁缘处波高略有增加(图 2a),在礁缘和礁坪的交界处发生破碎,波高迅速衰减,礁坪中后部分波高保持稳定。在水深较大处,发生减水现象,但是减水幅值很小;进入礁坪后,增水迅速增加,在岸滩上的最大波浪增水可达 4.5 cm,约为入射波高 (8.5 cm) 的 52.9%。

图 3 给出了波浪爬高的对比验证。可以看出模拟结果与实验数据符合较好,而且波浪爬高显示了较为明显的低频特性。

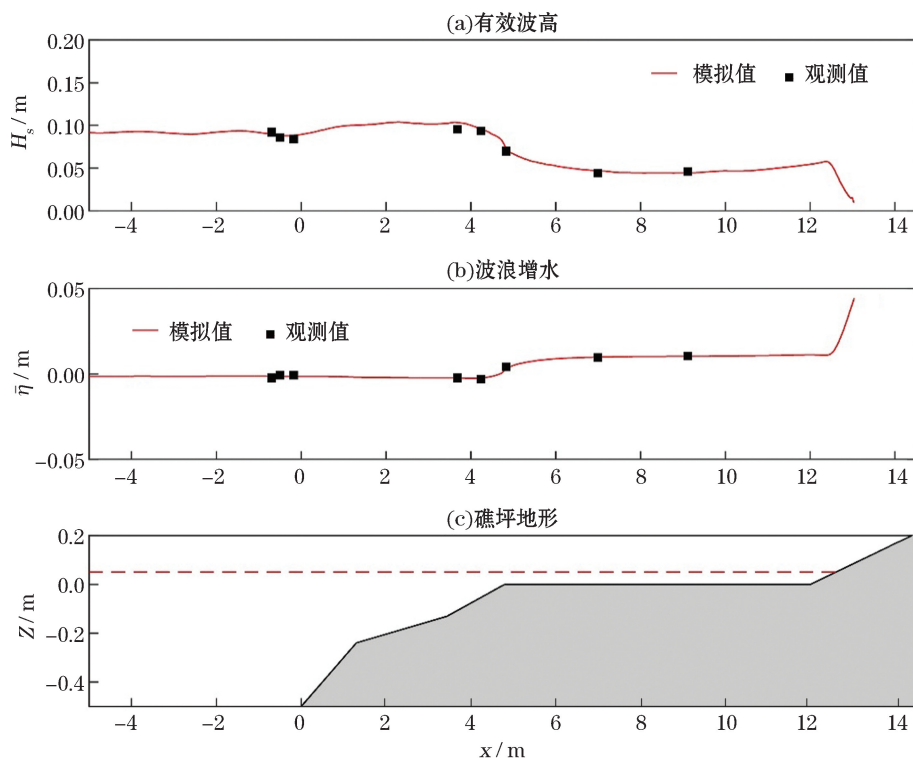


图 2 波高和增水的验证

Fig.2 Validation of the wave heights and the wave setup

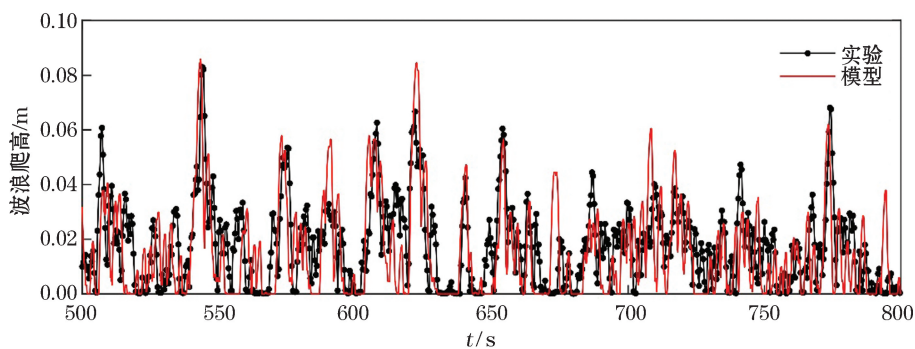


图 3 波浪爬高的验证

Fig.3 Validation of the wave run-up

4 结果与分析

波浪在浅水地区的传播变形过程中,高频能量在与底床的相互作用过程中逐渐耗散,并向低频转化。将实验实测数据和模型模拟结果的后 800 s 波面时间序列进行傅里叶变换,可获得波浪在频率空间的能量谱。图 4 给出了站位 #1、#5、#7(分别位于外海、礁缘斜坡、礁坪中段)的波浪频率谱的对比与演化,其中黑色点线代表实验数据,红色实线代表模拟结果。从实验数据来看,外海处(#1)的波浪能量主要集中在 0.4~0.6 Hz 左右,与入射波浪频率(0.5 Hz)一致。当波浪传至礁缘斜坡(#5)时,0.4~0.6 Hz 区间的波浪能量大幅

衰减,这是由于波浪在水深较浅的礁缘处发生剧烈破碎所导致;同时小于 0.1 Hz 的波浪能量大幅增加,说明波浪能量向低频转移。到了礁坪中段(# 7),受波浪持续破碎影响和水深限制,入射波浪频率附近的能量进一步减小。总体来讲,模型模拟结果与实测结果符号较好,说明非静压模型成功地模拟了珊瑚礁地形上波浪谱的演化过程。模型对波浪破碎发生后的礁缘和礁坪处波浪低频能量有所高估,可能的原因包括:1)非静压模型假设波面为空间的单值函数,不能精细地捕捉波浪破碎(尤其是卷破波)时复杂的自由表面运动过程;2)床面摩阻系数的影响。本文中床面摩阻系数为恒定值($C_f = 0.002$),虽然可以对有效波高等变量取得较好的率定效果,然而实际中床面摩阻系数跟水深有一定关系^[17],下一步应改进模型中对礁坪底摩阻的描述方法。

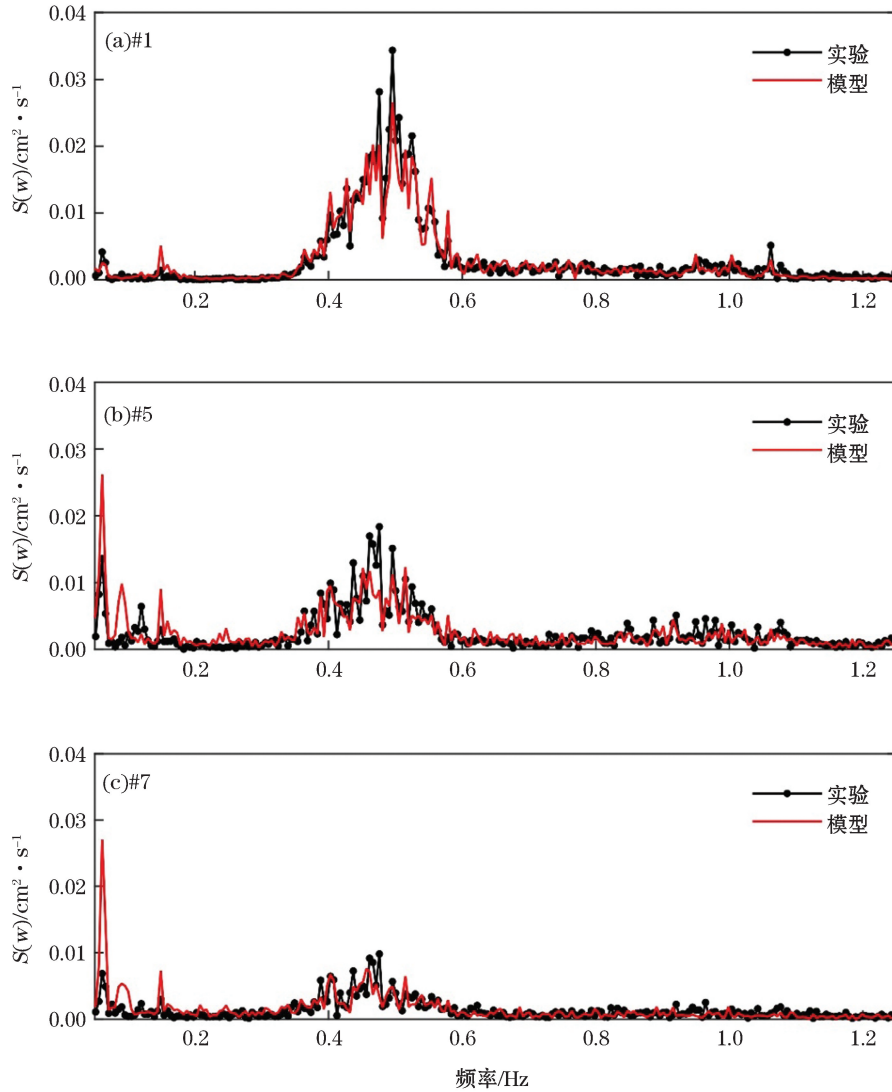


图 4 站点 #1、#5、#7 处的波浪频谱验证

Fig.4 Validation of the wave spectra at station #1、#5、#7

小波变换^[15-16]可以更为直观的反映出波浪能量在频率空间的分布与转化。根据波面升高的时间序列,可计算其小波谱和小波全谱。图 5~7 分别展示了站点 #1、#5、#7 的波面高度时间序列、小波谱和小波全谱。可以看出,在外海处(站点 #1,图 5),波浪能量主要集中在 2 s 左右,与入射波浪的谱峰周期一致,低频

成分波浪能量较弱;而在礁缘上(站位#5,图6),波浪能量开始向更低频率、更长周期上转移,小波全谱也显示能量除了在入射周期2 s附近以外,还较多集中在16 s周期附近,呈现出双峰谱的形态,2个峰对应的谱功率相当,说明在该站位处于高频带(1~4 s)和低频带(8~32 s)的波浪能量相当;在礁坪上(站位#7,图7),2 s周期附近的波浪能量已经很小,能量主要集中于16~64 s的低频带内,而这种波浪能量转移主要通过波浪破碎、底部摩阻耗散和非线性波-波相互作用实现。

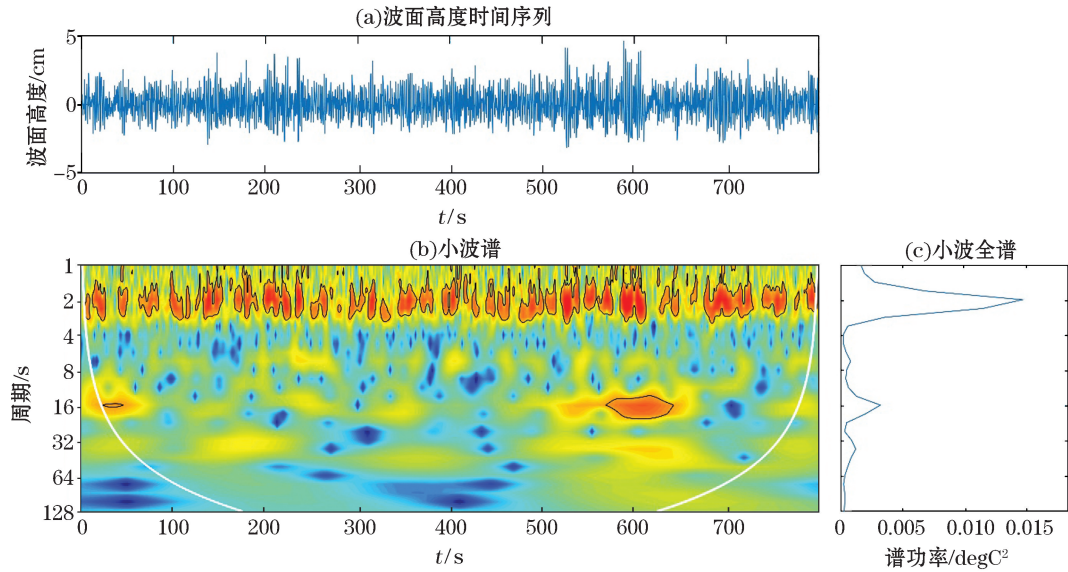


图5 站位#1处的波面序列和小波谱

Fig.5 Wave surface elevation time series and wavelet spectra at station #1

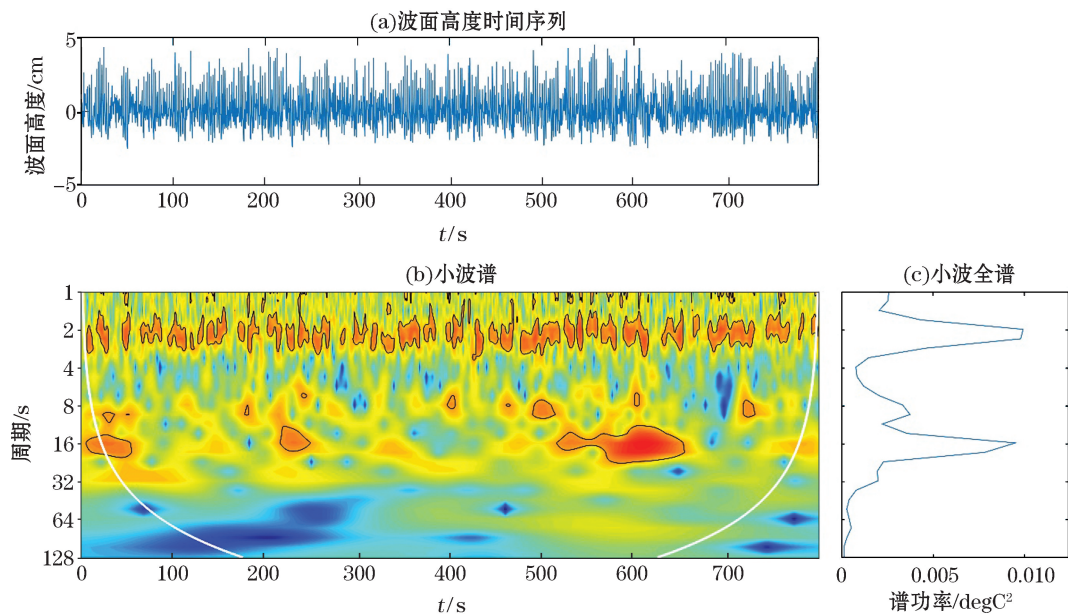


图6 站位#5处的波面序列和小波谱

Fig.6 Wave surface elevation time series and wavelet spectra at station #5

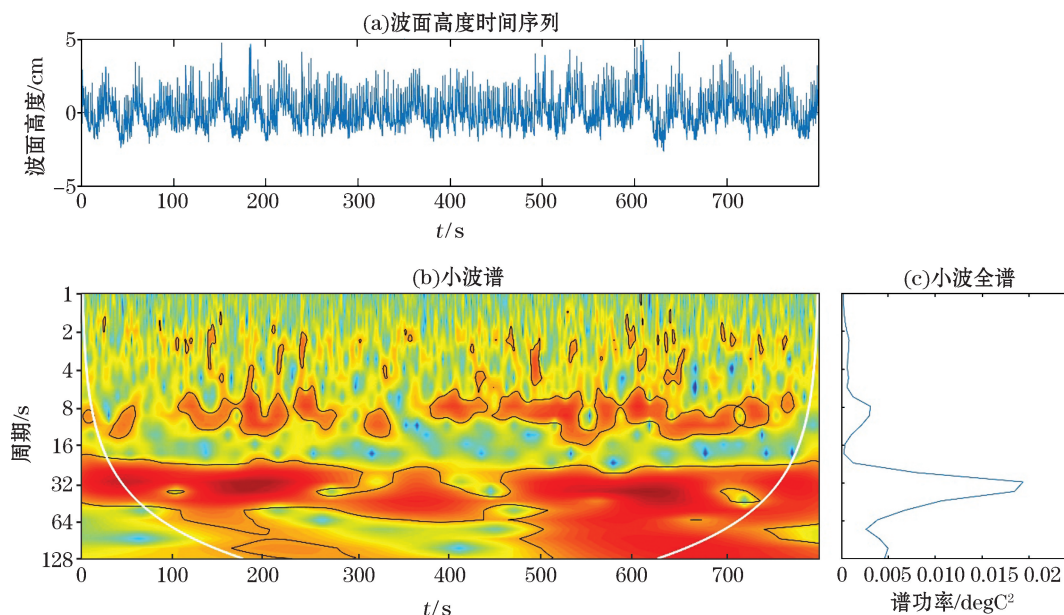


图7 站位#7处的波面序列和小波谱

Fig.7 Wave surface elevation time series and wavelet spectra at station #7

4 结 论

珊瑚礁海岸是一种重要的生物海岸类型。作为珊瑚礁海岸最重要的水动力要素,波浪的传播变形是珊瑚礁研究的热点之一。本文基于近几年国际上流行的非静压浅水方程波浪模型 SWASH,对岸礁地形上的波浪传播过程开展了数值研究。研究内容和结论总结如下:

1)依据 Demirbilek 等所开展的珊瑚礁物理模型实验地形,建立了 SWASH 数值模型,成功地模拟了波浪在珊瑚礁地形中的波浪传播、波浪增减水和爬高过程;模拟结果与实验数据吻合良好,说明非静压模型适用于珊瑚礁动力环境的模拟。

2)通过对波面高度序列进行傅里叶变换,计算了外海、礁缘斜坡和礁坪上的波浪频率谱,结果显示,在波浪由外海传向岸线的过程中,由于波浪破碎和底部摩擦耗散的作用,处于入射波浪谱峰频率附件的波浪能量大幅减小,而低频波浪能量逐渐增加。对波面高度进一步进行小波变换,揭示了珊瑚礁地形中波浪能量向低频转移的现象,在礁缘处,波浪能量呈现为双峰谱形态;而在礁坪上,波浪能量则集中于低频带。

波浪是珊瑚礁环境系统中的水交换、物质运输的主要动力因素,也是珊瑚礁海岸防护和工程建设的主要致灾因素。本文采用先进数值手段,对珊瑚礁地形中的波浪传播过程进行了研究,有关结果可为珊瑚礁海岸波浪动力及其影响下的生态环境动力研究,以及岛礁资源的开发利用如筑港、采掘、堤防等工程建设提供有益的参考依据。

参考文献(References):

- [1] GOURLAY M R. Wave transformation on a coral reef[J]. Coastal Engineering, 1994, 23(1-2): 17-42.
- [2] YAO Y, HUANG Z, MONISMITH S G, et al. Characteristics of monochromatic waves breaking over fringing reefs[J]. Journal of Coastal Research, 2013, 29(1): 94-104.
- [3] CHEN Y C. Study on wave motion over submerged reefs[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. 陈彧超. 岛礁环境下的波浪

运动研究[D]. 大连:大连理工大学, 2015.

- [4] YAO Y, HUANG Z, MONISMITH S G, et al. 1DH Boussinesq modeling of wave transformation over fringing reefs[J]. *Ocean Engineering*, 2012, 47(2): 30-42.
- [5] YAO Y, BECKER J M, FORD M R, et al. Modeling wave processes over fringing reefs with an excavation pit[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 109: 9-19.
- [6] LIU S. The numerical simulation of wave propagation on the reefs terrain by the numerical model based on Boussinesq Equations[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. 刘思. 基于 Boussinesq 方程数值模型对岛礁地形上波浪传播的模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [7] SHI F Y, KIRBY J T, JEFFREY C. Harris. A high-order adaptive time-stepping TVD solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation[J]. *Ocean Modelling*, 2012, 43-44(2): 36-51.
- [8] MA G F, SU S F, LIU S G, et al. Numerical simulation of infragravity waves in fringing reefs using a shock-capturing non-hydrostatic model[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 85(3): 54-64.
- [9] BUCKLEY M, LOWE R, HANSEN J. Evaluation of nearshore wave models in steep reef environments[J]. *Ocean Dynamics*, 2014, 64(6): 847-862.
- [10] ZIJLEMA M, STELLING G, SMIT P. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters[J]. *Coastal Engineering*, 2011, 58(10): 992-1012.
- [11] BAI Y, CHEUNG K F. Depth-integrated free-surface flow with a two-layer non-hydrostatic formulation[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2012, 69(2): 411-429.
- [12] MA G F, SHI F Y, KIRBY J T. Shock-capturing non-hydrostatic model for fully dispersive surface wave processes[J]. *Ocean Modelling*, 2012 (43-44): 22-35.
- [13] AI C F, JIN S. A multi-layer non-hydrostatic model for wave breaking and run-up[J]. *Coastal Engineering*, 2012, 62(4): 1-8.
- [14] YOUNG C C, WU C H, LIU W C, et al. A higher-order non-hydrostatic σ model for simulating non-linear refraction-diffraction of water waves[J]. *Coastal Engineering*, 2009, 56(9): 919-930.
- [15] ZOU L, WANG A M, ZONG Z, et al. Experiment and wavelet analysis of the evolution process of freak waves waves around reefs[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2017, 38(3): 344-350. 邹丽, 王爱民, 宗智, 等. 岛礁地形畸形波演化过程的试验及小波谱分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2017, 38(3): 344-350.
- [16] MA Y X. Study on nonlinearity of waves by continuous wavelet transform[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. 马玉祥. 基于连续小波变换的波浪非线性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [17] LENTZ S J, DAVIS K A, CHURCHILL J H, et al. Coral reef drag coefficients-water depth dependence[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2017, 47(5): 1061-1075.

Non-Hydrostatic Numerical Simulation of Wave Propagation Deformation on Coral Reef Terrain

ZHANG Qi-yi¹, SHI Hong-da¹, GAO Wei², LI Jin-feng²

(1. *College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;*

2. *Tianjin Dredging Company Limited, China Communications Construction Company Limited, Tianjing 300461, China*)

Abstract: Coral reefs are widely distributed in the South China Sea and have an important value in ecology, tourism, harbor and military affairs. Waves are one of the most important dynamic factors in coral reef environment. By using the wave model of non-hydrostatic pressure shallow water equation SWASH, the wave propagation process on a typical fringing reef terrain is simulated and the significant wave heights and the wave setup and run-up are respectively tested and verified by using the flume experimental data pairs published by Demirbilek et al.. It is shown that the simulation results are in good agreement with the measured data, reflecting a good applicability of non hydrostatic pressure model on the coral reef terrain. By means of wave frequency spectrum calculation and wavelet analysis, the evolution law of wave spectra on the coral reef terrain is analyzed and a phenomenon of wave energy shifting from high frequency to low frequency during the propagation on the coral reef flat is revealed. All these results could provide useful references for the study on hydrodynamics in the coral reef environment and the relevant engineering constructions.

Key words: coral reef; wave propagation; non-hydrostatic model; SWASH; wavelet analysis

Received: May 24, 2017