



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20180424

数字出版日期: 2020-05-20; 数字出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1355.N.20200519.1312.003.html>

SWAN 模型中不同破碎指标对波浪模拟的影响

丁磊^{1,2}, 张鑫³, 张晶¹

(1. 天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457; 2. 天津市海洋环境与修复技术工程中心, 天津 300457;
3. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 选择在波浪破碎模拟中表现较好的破碎指标 GOMOD15 和 SAMOD17 进行比较. 首先将两者分别引入 SWAN 模型, 然后利用实验室水槽试验(包括斜坡和平底条件)和现场观测数据比较两者对 SWAN 模型波浪模拟的影响. 总体来看, 随着坡度的逐渐变缓, SAMOD17 与 GOMOD15 的结果差异逐渐显著, 对于文中的所有算例, 采用 GOMOD15 的模拟结果均更接近实测值. 鉴于 GOMOD15 的更好表现且在模型计算时不需要人为调整其参数, 因此在采用 SWAN 模型模拟波浪破碎时推荐使用.

关键词: 波浪破碎; 破碎指标; 波高; 数值模拟; SWAN 模型

中图分类号: P731.22 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2020)04-0036-05

Influence of Different Breaker Indexes on Wave Simulation of SWAN Model

DING Lei^{1,2}, ZHANG Xin³, ZHANG Jing¹

(1. College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;
2. Tianjin Marine Environmental Protection and Restoration Technology Engineering Center, Tianjin 300457, China;
3. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: GOMOD15 and SAMOD17, well-performed breaker indexes in wave breaking simulation, were selected for comparison. Firstly, the two breaker indexes were introduced to the SWAN model, and then their effects on the wave simulation of the SWAN model were evaluated by comparing the computational results with the laboratory (including both sloping and flat bottom cases) and field observed data. On the whole, the difference between SAMOD17 and GOMOD15 is gradually significant with the decrease of the bottom slope. The simulation results using GOMOD15 are closer to the measured values of all the cases in this research. As GOMOD15 gives better performance and does not need to adjust its parameters artificially in simulation, it is recommended as the breaker index when the SWAN model is used to simulate wave breaking.

Key words: wave breaking; breaker index; wave height; numerical simulation; SWAN model

利用 SWAN 模型进行近岸波浪模拟时, 波浪破碎的描述对结果有显著影响, 因此, 选择合适的破碎指标使得模型能够较为合理地反映破碎前后的波高变化便具有重要的意义.

最常用的破碎指标为常数模式, 通常取值为 0.73^[1](以下简称 BJ78). 然而, 仅用常数来计算波浪破碎往往存在缺陷. 因此, 后来的研究者考虑了更多影响波浪破碎的因素. Nelson^[2]根据一系列坡度小于

0.01 的实验室试验测得的波高值和水深之比的包络线提出了破碎指标与坡度之间的关系(以下简称 NE87). Ruessink 等^[3]基于现场观测建立了破碎指标与相对水深的线性关系(以下简称 RU03). Goda^[4]通过分析其他研究者的波浪破碎试验数据提出考虑坡度影响的破碎指标(以下简称 GO70), 目前在国际海岸工程界被广泛采用. 2010 年 Goda^[5]重新对 GO70 进行评估, 提出了改进形式(以下简称 GO10).

收稿日期: 2018-11-15; 修回日期: 2019-03-07

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(18JCQNJC77600); 天津市高等学校基本科研业务费资助项目(2018KJ101)

作者简介: 丁磊(1983—), 男, 天津人, 副研究员, leiding2012@tust.edu.cn

Salmon 等^[6]将坡度与相对水深结合得到破碎指标(以下简称 SA15)。

申翼^[7]在 GO70 基础上建立了可调参数 A 与深水波陡的关系式,避免了人为调整系数的不便性,从而给出了新的 Goda 修正公式,即 GOMOD15. 之后,在 SWAN 模型中分别采用 BJ78、NE87、RU03、SA15 和 GOMOD15 进行计算,并与试验和现场观测结果相比较,表明 GOMOD15 的计算精度最高. Lin 等^[8]通过模型计算分别比较了 BJ78、NE87、SA15、RU03、GO10 以及 Thornton 等^[9]1983 年提出的破碎指标(以下简称 TG83),结果表明:BJ78 的不足在于平底条件下会低估局地生成波浪的有效波高,而高估外海生成波浪的有效波高;TG83 由于过多计入了破波带外的能量耗散而低估了波高;RU03 在浅水区的破碎指标值相对较低,从而低估了除平底外其他情况的有效波高;NE87 在陡坡上的破碎指标值过大,从而会高估该条件下的有效波高;GO10 在斜坡上的表现令人满意,但在平底上有较大误差;SA15 显著减小了平底条件下有效波高的模拟误差,但在斜坡上的表现则不及 BJ78. 于是,作者对 SA15 进行改进,将其浅水条件下破碎指标与坡度的线性关系转变成非线性关系,得到 SAMOD17,从而在 SA15 基础上又进一步提高了波浪谱模型在斜坡上的模拟精度。

综上,GOMOD15 和 SAMOD17 在波浪破碎模拟中的表现均优于 SWAN 模型中可供选择的破碎指标,即 BJ78、NE87、RU03、TG83 和 SA15,然而目前尚未见关于对比 GOMOD15 和 SAMOD17 的工作,因此,本文将两者分别引入 SWAN 模型进行再比较,为今后模型使用过程中破碎指标的选择提供参考。

1 模型简介

SWAN 模型是基于动谱平衡方程的第三代波浪模型^[10],综合考虑了波浪传播过程中的浅水变形、折射、绕射、底摩擦以及波浪破碎等多种因素的影响。

1.1 波浪破碎项

为了模拟波浪向岸传播过程中由于水深变浅引起的波浪破碎,SWAN 模型采用 Battjes 等^[1]提出的波浪破碎耗能函数 $S_{db}(\sigma, \theta)$ 表达式,即

$$S_{db}(\sigma, \theta) = (D_{tot} / E_{tot}) E(\sigma, \theta) \quad (1)$$

式中: σ 为频率; θ 为方向角; E_{tot} 为总波能; D_{tot} 为单位面积上波浪破碎导致的能量平均损耗率; $E(\sigma, \theta)$ 为能量密度。

$$D_{tot} = -\frac{1}{4} \alpha_{bj} Q_b \left(\frac{\bar{\sigma}}{2\pi} \right) H_b^2 \quad (2)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为平均频率. H_b 为当地水深处波浪临近破碎时的最大波高;在 SWAN 模型中,由 $H_b = \gamma d$ 来确定,其中 d 为当地水深, γ 是破碎指标,如前所述,其在 SWAN 模型中有不同的选择. α_{bj} 是一个可调参数,一般取 1. Q_b 为破波概率,由式(3)计算得到。

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{H_b^2} \quad (3)$$

1.2 新破碎指标的引入

在 SWAN 模型中引入新的破碎指标 SAMOD17 和 GOMOD15,其具体形式如下:

SAMOD17 表达式为

$$\gamma = \gamma_1(m) / \tanh[\gamma_1(m) / \gamma_2(kd)] \quad (4)$$

式中 γ_1 和 γ_2 分别与坡度 m 和相对水深 kd (k 为波数) 相关,即

$$\gamma_1(m) = b_0 + b_1 \exp(-b_2 / m) \quad (5)$$

$$\gamma_2(kd) = a_2 + a_3 kd \quad (6)$$

其中 b_0 、 b_1 、 b_2 、 a_2 和 a_3 为可调参数, Lin 等^[8]建议分别取值为 0.54、0.47、0.018、-8.06 和 8.09, 后文计算时将采用这些数值。

GOMOD15 表达式为

$$\gamma = \frac{A}{d / L_0} \left\{ 1 - \exp \left[-1.5\pi \frac{d}{L_0} (1 + 15m^{4/3}) \right] \right\} \quad (7)$$

式中: 深水波长 $L_0 = gT_{1/3}^2 / 2\pi$, 其中有效波周期 $T_{1/3} = 0.93T_p$, T_p 为谱峰周期. A 为可调参数,根据申翼^[7]的工作,其表达式为

$$A = 0.228 \times \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{0.108} \quad (8)$$

式中 H_0 为深水波高。

2 模型验证

本文选择 Bowen 等^[11]斜坡上的不规则波水槽试验数据进行 SWAN 模型的验证. 该试验的斜坡坡度为 1:35, 其布置图详见文献[11]. 选择正向入射, 均方根波高为 0.07 m, 谱峰周期为 2.0 s 的波浪条件(以下简称 BK7cm), 入射波浪处的水深为 0.44 m, 波浪谱取为 JONSWAP 谱, 由此得到深水波陡为 0.0187, 则 $A = 0.148$.

另外,为了定量反映 SWAN 模型模拟结果与实测波高值之间的拟合程度,本文采用 Wilmott^[12]提出

的用来衡量模型精确性的统计方法

$$Skill = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |X_{mod,i} - X_{obs,i}|^2}{\sum_{i=1}^N (|X_{mod,i} - \bar{X}_{obs}| + |X_{obs,i} - \bar{X}_{obs}|)^2} \quad (9)$$

式中: X 表示要进行比较的变量, \bar{X} 为该变量的平均值, 下标 mod 和 obs 则分别用来表示 SWAN 模型的计算结果与实测数据. 当 $Skill$ 值越接近 1.0 时, 表示模型与实际符合程度越好, 接近 0 时, 则表示模型与实际不符合.

图 1 显示了均方根波高 (H_{rms}) 随水深 (d) 变化的实测值与 SWAN 模型分别采用 SAMOD17 和 GOMOD15 所得计算值的比较结果. 需要说明的是, SWAN 模型输出的波高为有效波高 H_s , 文中采用 $H_{rms} = H_s / \sqrt{2}$ 的关系式^[13] 将其转换成均方根波高 H_{rms} . 结果表明, 两种破碎指标对应的结果均较好地反映了波浪破碎前后波高演变的全过程, 可用于下文研究. 同时, 使用 SAMOD17 计算得到的 $Skill$ 值为 0.96, 而 GOMOD15 对应的 $Skill$ 值则达到 0.98, 更接近于 1.0.

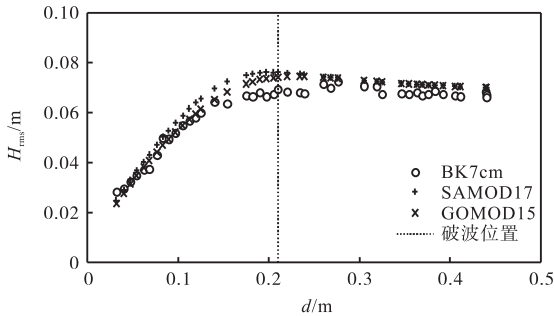


图 1 均方根波高实测值与模拟结果的比较

Fig. 1 Measured and simulated root-mean-square wave height

3 结果与分析

为了进一步比较 SAMOD17 和 GOMOD15 对波浪模拟的影响, 本文还收集了其他 4 组实验室试验和现场观测数据. 第 1 组数据来自常艳玲^[14]关于波浪水槽中的不规则波试验(以下简称 CYL), 第 2 组数据来自 Wood 等^[15]关于 LWI 波浪水槽中的不规则波试验(以下简称 LWI), 第 3 组数据是从 Wu 等^[16]文献中选取的 1980 年 2 月 2 日现场观测数据(以下简称 NSTS-2.2), 第 4 组数据是从 Ris 等^[17]的文献中提取的荷兰哈灵水道海区的观测数据(以下简称

Haringvliet).

3.1 实验室试验

CYL 的试验段地形主要由一段坡度为 1 : 15 的斜坡连接一段平底构成, 试验布置图见文献[14]. 该试验的波浪为正向入射, 选取的入射有效波高为 0.115 m, 有效周期为 1.4 s, 入射波浪处水深为 0.45 m, 平底处水深为 0.20 m, 波浪谱取为 JONSWAP 谱, 由此得到深水波陡为 0.054, 则 $A = 0.166$. 由试验结果可知, 此时的波浪破碎发生在平底处, 从而可以用来检验 SAMOD17 和 GOMOD15 在平底地形上的表现. 有效波高 (H_s) 随与造波机距离 (l) 变化的实测值与分别采用 SAMOD17 和 GOMOD15 的模拟结果比较如图 2 所示.

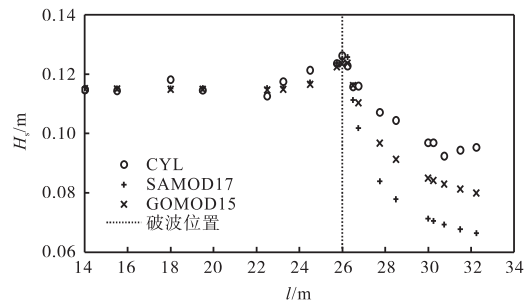


图 2 有效波高实测值与模拟结果的比较

Fig. 2 Measured and simulated significant wave height

结果表明, 在平底条件下, 波浪破碎发生后, SAMOD17 与 GOMOD15 的结果差异较为显著, 而采用 GOMOD15 的模拟结果更接近实测值. 从 $Skill$ 的数值来看, 使用 SAMOD17 计算得到的 $Skill$ 值为 0.78, 而 GOMOD15 的则达到 0.91, 更接近于 1.0.

对于 LWI, 其斜坡是由 4 个坡度近似为 1 : 12、1 : 20、1 : 30、1 : ∞ 的坡连接而成的, 试验布置图详见文献[15]. 该试验的波浪为正向入射, 入射有效波高为 0.17 m, 谱峰周期为 1.7 s, 入射波浪处的水深为 0.7 m, 波浪谱取为 JONSWAP 谱, 由此得到深水波陡为 0.07, 则 $A = 0.171$. 有效波高 (H_s) 随与造波机距离 (l) 变化的实测值与分别采用 SAMOD17 和 GOMOD15 的模拟结果比较如图 3 所示. 结果表明: 实测有效波高在离造波机大约 57 m 的位置开始逐渐减小, 并且在该位置之前, 采用 SAMOD17 与 GOMOD15 得到的模拟结果与实测值都较为接近. 在这个位置之后, 随着坡度的逐渐变缓, SAMOD17 与 GOMOD15 的结果差异逐渐显著, 而采用 GOMOD15 的模拟结果更接近实测值. 这从 $Skill$ 的数值也可以看出, 使用 SAMOD17 计算得到的 $Skill$

值为 0.93, 而 GOMOD15 对应的 *Skill* 值则达到 0.98, 更接近于 1.0, 同时结合 BK7cm 和 CYL 的结果, 说明引入 GOMOD15 破碎指标的 SWAN 模型较 SAMOD17 可以更好地模拟实验室尺度的不规则波浪的破碎过程.

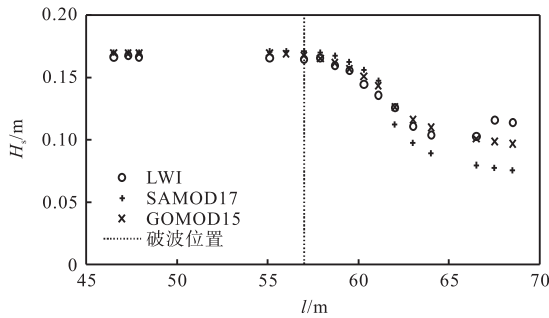


图 3 有效波高实测值与模拟结果的比较

Fig. 3 Measured and simulated significant wave height

3.2 现场观测

对于 NSTS-2.2, 观测地点位于美国加州的 Leadbetter 海滩, 该海滩东西向分布, 海滩地形和观测点位置如图 4 所示, 图中横轴 (x) 表示沿岸距离, 纵轴 (y) 为离岸距离.

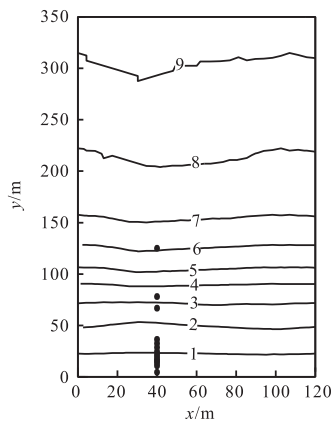


图 4 Leadbetter 沙滩 1980 年 2 月的近岸地形

Fig. 4 Nearshore bathymetry at Leadbetter Beach in February 1980

该海滩外海大约 9 m 水深处的波浪条件如下: 入射均方根波高为 0.37 m, 谱峰周期为 16.0 s, 入射角度为 15.2° , 波浪谱取为 JONSWAP 谱, 由此得到深水波陡为 0.002 1, 则 $A=0.117$.

NSTS-2.2 均方根波高实测值与模型结果比较如图 5 所示, 使用 SAMOD17 和 GOMOD15 对应的结果均与实测值符合较好, 由 SAMOD17 计算得到的 *Skill* 值为 0.92, 而 GOMOD15 对应的 *Skill* 值则达到

0.93, 更接近于 1.0.

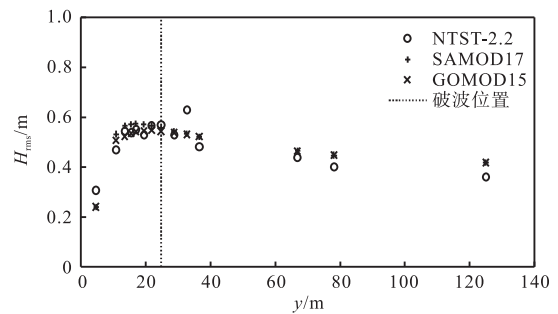


图 5 均方根波高实测值与模拟结果的比较

Fig. 5 Measured and simulated root-mean-square wave height

对于 Haringvliet, 该海区是位于荷兰西南部的一个海湾, 它的入口处有一个相对平坦的浅滩, 浅滩在平均波浪方向上的坡度从 1 : 500 到水平 (在浅滩顶部) 变化. 海域地形和观测点位置如图 6 所示. 选取 1982 年 10 月 14 日 23:00 UTC 时刻的海况条件, 波浪边界条件由 JONSWAP 谱生成, 对应的波浪要素为有效波高 3.56 m, 平均周期 6.7 s, 平均波向 306° , 入射波浪处的水深为 16.78 m, 由此得到深水波陡为 0.055, 则 $A=0.170$. 模型由定常风场驱动, 设置风速为 14.0 m/s, 风向为 300° , 结合作者之前的工作^[18], 其风拖曳力系数采用 SWAN 模型的默认选项 FIT.

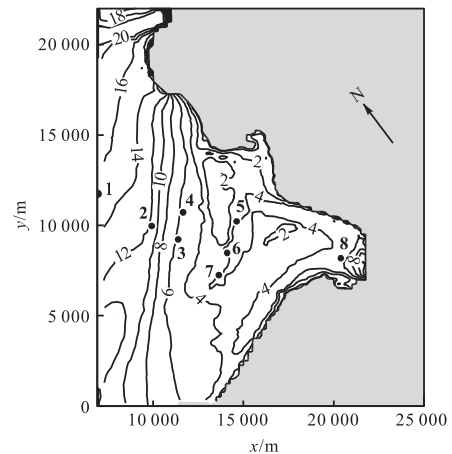


图 6 海域地形

Fig. 6 Bathymetry of sea area

图 7 显示了有效波高实测值与 SWAN 模型计算值的比较结果, 此时由 SAMOD17 计算得到的 *Skill* 值为 0.97, 而 GOMOD15 对应的 *Skill* 值则达到 0.99, 更接近于 1.0, 即使用 GOMOD15 的模拟结果更接近实测值. 综合 NSTS-2.2 和 Haringvliet 的结果, 可以看到引入 GOMOD15 破碎指标的 SWAN 模型较

SAMOD17 可以更好地模拟现场条件下近岸波浪的破碎过程.

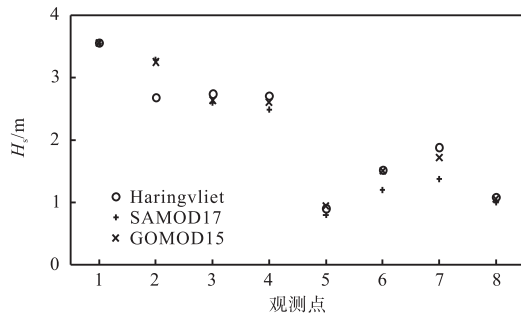


图7 有效波高实测值与模拟结果的比较

Fig. 7 Measured and simulated significant wave height

4 结 语

选择经过比较目前常用的波浪破碎指标后推荐的 SAMOD17 和 GOMOD15 进行再比较. 将两者分别引入 SWAN 模型, 利用实验室水槽试验(包括斜坡和平底条件)和现场观测数据比较两者对 SWAN 模型波浪模拟的影响. 总体来看, 随着坡度的逐渐变缓, SAMOD17 与 GOMOD15 的结果差异逐渐变大, 特别是在平底条件下, 这种差异更为显著. 同时, 无论是与实验室水槽试验还是现场观测数据对比, 采用 GOMOD15 得到的 *Skill* 值均比采用 SAMOD17 得到的 *Skill* 值更接近于 1.0, 即 GOMOD15 的模拟结果更接近实测值. 相比于 SAMOD17, 引入 GOMOD15 的 SWAN 模型可以更加合理地模拟实验室尺度的不规则波浪以及现场条件下近岸波浪的破碎过程, 且不需要人为调整其参数, 故在采用 SWAN 模型模拟波浪破碎时推荐使用 GOMOD15 破碎指标.

参考文献:

- [1] Battjes J A, Janssen J P F M. Energy loss and set-up due to breaking of random waves[C]//Proceedings of the 16th International Conference on Coastal Engineering. Hamburg: American Society of Civil Engineers, 1978: 569–587.
- [2] Nelson R C. Design wave heights on very mild slopes: An experimental study[J]. Transactions of the Institution of Engineers, Australia: Civil Engineering, 1987, 29(3): 157–161.
- [3] Ruessink B G, Walstra D J R, Southgate H N. Calibration and verification of a parametric wave model on barred beaches[J]. Coastal Engineering, 2003, 48(3): 139–149.
- [4] Goda Y. A synthesis of breaker indices[J]. Transactions of the Japan Society of Civil Engineers, 1970, 2(2): 227–230.
- [5] Goda Y. Reanalysis of regular and random breaking wave statistics[J]. Coastal Engineering Journal, 2010, 52(1): 71–106.
- [6] Salmon J E, Holthuijsen L H, Zijlema M, et al. Scaling depth-induced wave-breaking in two-dimensional spectral wave models[J]. Ocean Modelling, 2015, 87: 30–47.
- [7] 申翼. 泻湖潮汐通道地形演变数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [8] Lin S, Sheng J. Assessing the performance of wave breaking parameterizations in shallow waters in spectral wave models[J]. Ocean Modelling, 2017, 120: 41–59.
- [9] Thornton E B, Guza R T. Transformation of wave height distribution[J]. Journal of Geophysical Research, 1983, 88(C10): 5925–5938.
- [10] Booij N, Ris R C, Holthuijsen L H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(C4): 7649–7666.
- [11] Bowen G D, Kirby J T. Shoaling and breaking random waves on a 1 : 35 laboratory beach[R]. Newark: Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering, University of Delaware, 1994.
- [12] Willmott C J. On the validation of models[J]. Physical Geography, 1981, 2(2): 184–194.
- [13] Katsardi V. Surface water waves in intermediate and shallow water depths[D]. London: Imperial College London, 2007.
- [14] 常艳玲. 波浪破碎过程周期演化特征的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [15] Wood D J, Muttray M, Oumeraci H. The SWAN model used to study wave evolution in a flume[J]. Ocean Engineering, 2001, 28(7): 805–823.
- [16] Wu C S, Thornton E B, Guza R T. Waves and longshore currents: Comparison of a numerical model with field data[J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 90(C3): 4951–4985.
- [17] Ris R C, Holthuijsen L H, Booij N. A third-generation wave model for coastal regions 2. Verification[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(C4): 7667–7681.
- [18] 丁磊, 于博. SWAN 模型中不同风拖曳力系数对风浪模拟的影响[J]. 海洋学报, 2017, 39(11): 14–23.

责任编辑: 周建军