

# WAVEWATCHIII 模式中风能输入项和耗散项函数对比分析

孔丛颖<sup>1,2</sup>, 李泽<sup>1,2</sup>, 孙运佳<sup>1,2</sup>

(1. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461; 2. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222)

**摘要:** 采用第三代海浪模型 WAVEWATCHIII, 模拟了中国沿海的台风浪过程, 以实测浮标数据作为验证, 比较了不同的风能输入项和能量耗散方案对台风浪模拟精度影响, 结果表明风能输入项与耗散源项选用 Tolman and Chalikov 方案计算得到的结果与实测值更加吻合, 3 种方案中该方案更适合中国沿海台风浪的计算。

**关键词:** 台风浪; 风能量输入项; 耗散项

中图分类号: U652.5; P731.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2017)12-0001-06

doi: 10.7640/zggwjs201712001

## Comparative analysis of wind energy input term and dissipation term source functions of WAVEWATCHIII model

KONG Cong-ying<sup>1,2</sup>, LI Ze<sup>1,2</sup>, SUN Yun-jia<sup>1,2</sup>

(1. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2. CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

**Abstract:** The third generation wind-wave model WAVEWATCH III is applied to simulate typhoon wave process in coastal China, by the validation of the measured data from the buoy, we compared the effects of different wind energy input and dissipation schemes on the simulation accuracy of typhoon waves. The results show that the outcome are more consistent with the measured values, which can be obtained by calculating wind energy input and dissipation adopted by the Tolman and Chalikov scheme and give the fact that this scheme is more suitable for the calculation of typhoon waves in China's coastal areas.

**Key words:** typhoon wave; wind energy input term; dissipation

## 0 引言

海浪在研究海洋动力环境和海气相互作用等领域有着重要的地位, 对海浪进行数值模拟不仅是海浪研究的一个重要手段, 也是海浪预报和分析的重要工具。WAVEWATCHIII 基于波作用密度谱传输方程开发, 该方程与风强迫作用、非线性波-波相互作用和由于破碎与底摩擦造成的能量耗散有关(Komen 等, 1994)。数十年来, Snyder、

Janssen 和 Komen<sup>[1]</sup>等数位学者对于源项及耗散项过程进行了广泛的研究, 其中 Janssen、Rogers、Babanin、Cavaleri 等专家均表示在第三代海浪模式中, 把海浪耗散项作为一个最不确定的物理过程加以调整和改正, 对于提高海浪模式精度有很大的帮助。黄必桂<sup>[2]</sup>、王毅<sup>[3]</sup>等人通过分别控制海浪模式各源项开关进行了相关实验及统计分析, 研究结果均表明在水深较大时, 白冠耗散项起主要作用。

WAVEWATCHIII 海浪模式中风能量输入项  $S_{in}$  和白冠耗散项  $S_{dk}$  代表着不同的物理过程, 但是两者的平衡决定着波浪模型的整个成长特性,

收稿日期: 2017-01-16 修回日期: 2017-10-26

基金项目: 天津市企业博士后创新项目择优资助计划 (LP1409)

作者简介: 孔丛颖 (1987—), 女, 河北衡水市人, 硕士, 工程师, 主要从事港口航道近海工程、海洋灾害方面的研究。

E-mail: kongzi200@126.com

WAVEWATCHIII 模型中将其一起考虑,并提供了3种风能量输入和耗散方案。本文通过模拟台风浪过程,比较了模型中3种风输入和耗散源函数方案对台风浪模拟精度的影响,对提高台风浪模拟精度、研究台风期间各海区波浪的变化规律有重要的现实意义。

## 1 WAVEWATCHIII 海浪模式介绍

### 1.1 WAVEWATCHIII 模式介绍

模式的控制方程采用波作用量密度谱,即  $N(k, \theta) \equiv F(k, \theta) / \sigma$ , 这样,波浪的传播可描述为:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

式中:  $N$  代表波作用量密度谱;  $d/dt$  表示全导数;  $F$  代表海浪谱;  $k$  为波数;  $\theta$  为波向;  $\sigma$  为固有频率。  $S$  代表与海浪谱  $F$  的源和汇的总和<sup>[4]</sup>, 可表示为:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{in} + S_{db} + S_{tr} + S_{sc} + S_{xx} \quad (2)$$

式中: 源函数项包括风能量输入项  $S_{in}$ 、非线性波-波相互作用项  $S_{nl}$ 、白冠耗散项  $S_{ds}$  和底摩擦项  $S_{bot}$ 。 WAVEWATCHIII (version 3.14) 新加入了线性输入项  $S_{in}$ , 在极浅水域还考虑了水深诱导破碎项  $S_{db}$  和三波相互作用项  $S_{tr}$ , 同时还包含有受地形影响的散射项  $S_{sc}$  以及用户自定义的源项  $S_{xx}$ 。

### 1.2 WAVEWATCHIII 中风能输入项和耗散项方案介绍

#### 1) 方案一: Tolman and Chalikov 方案

Tolman 和 Chalikov (1996)<sup>[5]</sup> 风能量输入项基于 Belevich (1993) 和 Chalikov (1995) 输入源项, 耗散项由高频耗散和低频耗散组成。风能量输入项:

$$S_{in}(k, \theta) = \sigma \beta N(k, \theta) \quad (3)$$

式中:  $\beta$  为风浪作用无量纲参数;  $\tilde{\sigma}_a$  是一个谱分量的无因次频率,  $\tilde{\sigma}_a = \frac{\sigma u_{\lambda}}{g} \cos(\theta - \theta_w)$ ;  $\theta_w$  为风向;  $u_{\lambda}$  为高度等于具有“显著”波长  $\lambda_a$  海面高度处的风速。

低频耗散表示为:

$$S_{ds,l}(k, \theta) = -2u_* h k^2 \phi N(k, \theta) \quad (4)$$

$$h = 4 \left( \int_0^{2\pi} \int_{\theta_h}^{\infty} F(f, \theta) df d\theta \right)^{1/2} \quad (5)$$

$$\phi = b_0 + b_1 \tilde{f}_{p,i} + b_2 \tilde{f}_{p,i}^{-b_3} \quad (6)$$

式中:  $\phi$  为描述波发展的经验变量;  $h$  为由高频能量决定的混合尺度。其中:

$$b_2 = \tilde{f}_{p,i,\min}^{b_3} (\phi_{\min} - b_0 - b_1 \tilde{f}_{p,i,\min}) \quad (7)$$

$$b_3 = 8 \quad (8)$$

高频耗散表示为:

$$S_{ds,h}(k, \theta) = -a_0 \left( \frac{u_*}{g} \right)^2 f^3 a_n^B N(k, \theta)$$

$$B = a_1 \left( \frac{f u_*}{g} \right)^{-a_2} \quad (9)$$

$$a_n = \frac{\sigma^6}{c_g g^2 a_r} \int_0^{2\pi} N(k, \theta) d\theta$$

式中:  $a_n$  为  $a_r$  标准化的 Phillips 无量纲化高频能量;  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  和  $a_r$  为经验常数。

耗散源项的两部分线性拟合后为:

$$S_{ds}(k, \theta) = A S_{ds,l} + (1 - A) S_{ds,h}$$

$$A = \begin{cases} 1 & f < f_1 \\ \frac{f - f_2}{f_1 - f_2} & f_1 \leq f < f_2 \\ 0 & f_2 \leq f \end{cases} \quad (10)$$

#### 2) 方案二: WAM3 方案

基于 Snyder<sup>[6]</sup> (1981) 等和 Komen<sup>[1]</sup> (1984) (也可参照 WAMDIG, 1988) 等的方法, 风能量输入项:

$$S_{in}(k, \theta) = C_{in} \frac{\rho_a}{\rho_w} \max[0, \left( \frac{28u_*}{c} \cos(\theta - \theta_w) - 1 \right)] \cdot \sigma N(k, \theta) \quad (11)$$

$$u_* = u_{10} \sqrt{(0.8 + 0.065 u_{10}) \times 10^{-3}} \quad (12)$$

式中:  $\rho_a$  ( $\rho_w$ ) 为空气 (水) 的密度;  $u_*$  为风摩擦速度 (Charnock, 1995; Wu, 1982);  $C_{in}$  为常数,  $C_{in} = 0.25$ ;  $c$  为波相速,  $c = \sigma / k$ ;  $u_{10}$  为平均海平面的 10 m 高的风速;  $\theta_w$  为平均风向。

相应的耗散项为:

$$S_{ds}(k, \theta) = C_{ds} \hat{\sigma} \frac{k}{\hat{k}} \left( \frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}_{PM}} \right)^2 N(k, \theta) \quad (13)$$

$$\hat{\sigma} = (\bar{\sigma}^{-1})^{-1} \quad (14)$$

$$\hat{\alpha} = E \hat{k}^2 g^{-2} \quad (15)$$

式中:  $C_{ds}$  为常数,  $C_{ds} = -2.36 \times 10^{-5}$ ;  $\hat{\alpha}_{PM}$  为 P-M 谱的  $\hat{\alpha}$  值,  $\hat{\alpha}_{PM} = 3.02 \times 10^{-3}$ ;  $\hat{k} = (1/\sqrt{k})^{-2}$ 。

#### 3) 方案三: WAM4 方案

基于 Miles (1957) 波浪成长理论, 由 Janssen (1991) 模式化<sup>[4]</sup>。

风能量输入项:

$$S_{in}(k, \theta) = \frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{\beta_{\max}}{\kappa^2} e^{Z^2} Z^4 \left( \frac{u_*}{C} \right)^2 \cos^{P_{in}}(\theta - \theta_u) \cdot$$

$$\sigma N(k, \theta) + S_{\text{out}}(k, \theta) \quad (16)$$

式中:  $\rho_a$  和  $\rho_w$  分别为空气和水的密度;  $\beta_{\text{max}}$  为无量纲生长参数(常数);  $\kappa$  为冯卡门常数;  $P_{\text{in}}$  为控制  $S_{\text{in}}$  方向分量的常数值。

WAM4 的耗散项:

$$S_{\text{ds}}(k, \theta)^{\text{WAM}} = C_{\text{ds}} \bar{\alpha}^2 \bar{\sigma} \left[ \delta_1 \frac{k}{k} + \delta_2 \left( \frac{k}{k} \right)^2 \right] N(k, \theta) \quad (17)$$

式中:  $C_{\text{ds}}$  为无量纲常数;  $\delta_1$  和  $\delta_2$  为重量参数。

$$\bar{k} = \left[ \frac{\int k^p N(k, \theta) d\theta}{\int N(k, \theta) d\theta} \right]^{1/p} \quad (18)$$

式中:  $p$  为常数幂。同理, 平均频率  $\bar{\sigma}$  定义为:

$$\bar{\sigma} = \left[ \frac{\int \sigma^p N(k, \theta) d\theta}{\int N(k, \theta) d\theta} \right]^{1/p} \quad (19)$$

那么  $\bar{\alpha} = E k^{-2}$ 。

Tolman and Chalikov 参数化方案公式(11)是采用了高频饱和门限型耗散和低频涡黏型耗散以及根据动力湍流边界理论得出的涌浪耗散<sup>[9]</sup>, 包括白冠、涡黏、饱和的复合耗散模型(Tolman 2009)及 Ardhuin 的涌耗散模型(Tolman 2009; Ardhuin 等 2009)。Banner 和 Young(1994)在研究时发现采

用 Komen 方案传统的 WAM3 模式耗散项公式(13)中引进的相对波数  $\frac{k}{k}$  是为了调整风浪谱中高频部分和低频部分的耗散率, 该模式中为一次幂, 导致了风浪谱高频耗散不足, 计算海浪谱高频部分就会出现高频高估和低频低估的现象<sup>[2]</sup>; WAM4 参数化方案公式(17)中增加了波数  $\frac{k}{k}$  的平方项, 有助于缓解海浪频谱高频高估和低频低估现象, 并且在 WAM4 中采用了风浪谱的高频截断, 避免了海浪谱高频部分过度耗散。

## 2 资料及模式参数设置

### 2.1 模型设置

为了比较风能输入项与耗散项 3 种参数化方案的模拟效果, 本文选取了合理的台风过程来对比。计算时间从 2011 年 6 月 20—27 日, 期间包括 2 次台风过程。如图 1 所示。台风“米雷”于 2011 年 6 月 22 日生成, 24 日下午加强为强热带风暴, 26 日晚在山东登陆, 27 日上午减弱后于朝鲜再次登陆, 同时段的台风“海马”于 6 月 21 日加强为热带风暴, 后继续向西北方向移动, 25 日凌晨减弱为热带低压。

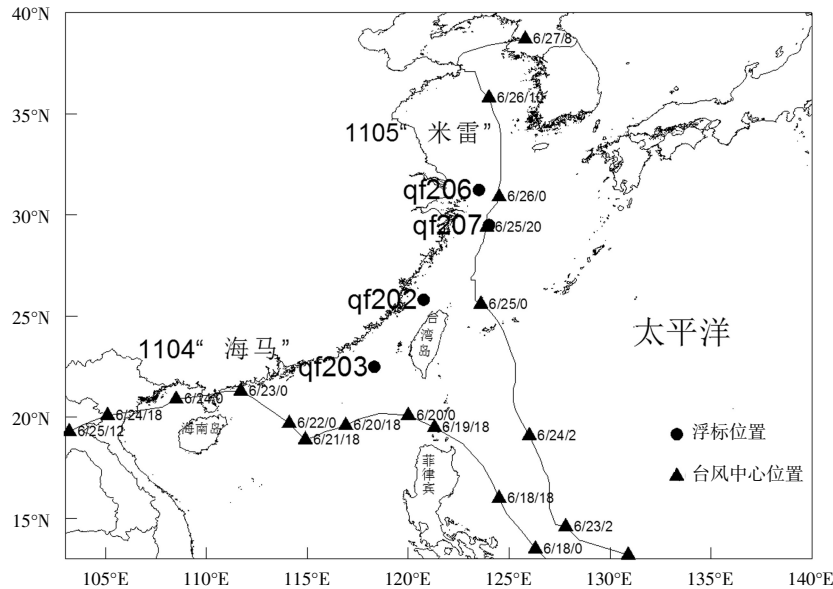


图 1 台风的移动路径、浮标位置及模型计算范围

Fig. 1 The moving path of the typhoon, the buoy position and calculation range of the model

设置的 3 个试验中, 除了风能量输入项与耗散项不同以外, 其他如网格分辨率、时间步长及各种源函数的设置均相同。具体操作步骤如下: WAVEWATCHIII 海浪模式中打开控制模型源项的

switch 开关后, 修改成需要的源项, 再对模型进行重新编译。

模型计算范围为 103°E—139°E, 13°N—40°N, 网格点数 360×269, 空间分辨率 6'×6'。采用频率

和方向的二维谱, 频率分布从 0.041 8~0.410 0 Hz, 共 25 个频率; 波向分 24 个, 分辨率为 15°。最大全局时间步长设为 900 s, 最小源函数项积分步长设为 300 s。

## 2.2 输入风场

输入风场采用高分辨率的 CCMP 卫星风场数据<sup>[7]</sup>, 该风场几乎覆盖全球海洋, 分辨率为 0.25°×0.25°, 时间间隔为 6 h。张鹏<sup>[8]</sup>、邓波<sup>[9]</sup>等多位学者对 CCMP 风场进行过计算和对比, 该风场模拟精度满足波浪场的模拟计算。本人也在先前的研

究<sup>[10]</sup>中证明过该风场的适用性。图 2 表示浮标实测风速与输入风场(简称计算风速)对比图, 考虑到模式启动的不稳定性, 将计算开始的前 24 h 作为启动时间, 从计算的第二天开始输出, 定为验证的初始时刻。浮标实测资料来自于国家海洋局。WAVEWATCHIII 模式计算风速的变化趋势与实测风速的变化趋势基本吻合。模型所使用的地形资料来自于 ETOPO2 全球地形数据集<sup>[11]</sup>。台风路径以及中心气压来源于中国气象局热带气旋资料中心的 CMA 最佳路径数据集<sup>[12]</sup>。

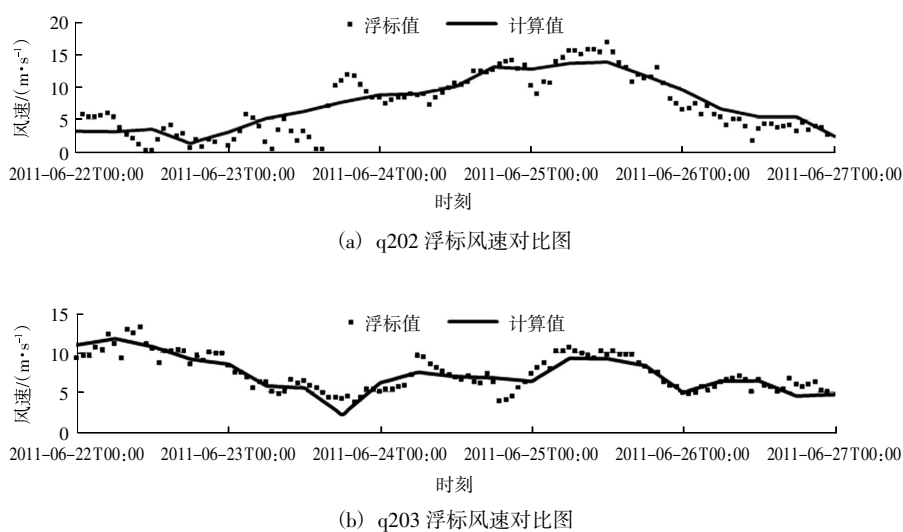


图 2 海面 10 m 处实测风速与计算风速比较图

Fig. 2 The comparison of the measured and calculated wind speed on 10 m of the sea surface

## 3 3 种方案结果对比分析

为比较不同的风能输入项及耗散项设置对台风浪模拟精度的影响, 文中设置了 3 种实验方案, 除风能输入项和耗散项不同之外, 其余设置均一致。通过 3 种方案下有效波高、平均周期与浮标实测值的对比, 比较了 3 种参数化方案中风能输入项与耗散源项的模拟效果。图 3 和图 4 分别为 6 月 22 日 0 时—27 日 18 时 3 种方案下有效波高、平均周期计算值和浮标实测值的对比图。从有效波高和平均周期随时间的过程曲线来看, 3 种方案计算值大小都有所差别, 但模拟曲线与浮标实测值变化趋势均较一致, 同时实测值波动较大, 而计算值波动较小; 这应该与模型计算风浪场过程中, 是通过数值积分得到的有效波高有关, 积分方法使得曲线较平滑、波动幅度较小。图 2 中 6 月 24—26 日间有一次大风过程, 台风风速较

大, 对照图 3 中 3 种方案同时段有效波高也达到了最大值, 说明风速直接对波高大小产生影响。

为定量分析 3 种方案对有效波高的模拟水平, 选取相关系数  $r$ 、均方根误差  $RMSE$  来统计分析实测值和计算值之间的误差。

统计学中规定当相关系数  $r = 1$  时, 两变量完全线性相关。统计学里认为当相关系数  $r \geq 0.8$  时, 可认为两变量相关度较高。均方根误差  $RMSE$  是反映样本数据与真值的整体误差, 均方根误差值越小说明样本整体越接近真值。偏差值越小, 说明计算结果越好。如表 1 所示, 浮标处相关系数均大于 0.8, 说明 3 种方案的模拟效果均较好, 结果差异较小, WAVEWATCHIII 模式计算结果可信。只有在 q202 浮标处相关系数较小、均方根误差较大, 这可能与该浮标靠近台湾海峡, 使得浮标被遮挡所致, 也可能与台湾岛附近涌浪传入有关<sup>[13]</sup>。

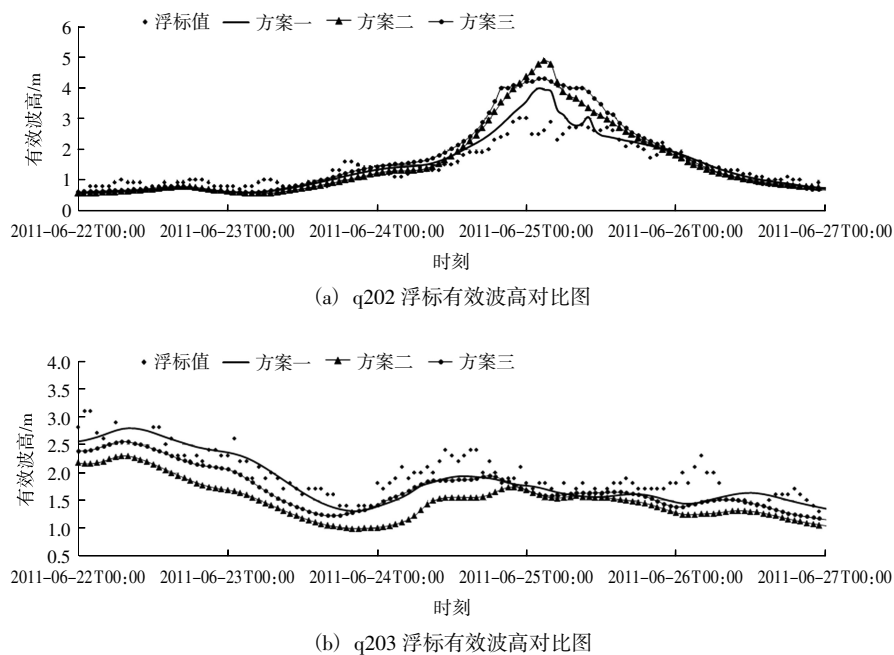


图3 3种方案下的有效波高计算值与浮标实测值对比图

Fig. 3 The comparison of the measured and calculated significant wave height in the 3 scenarios

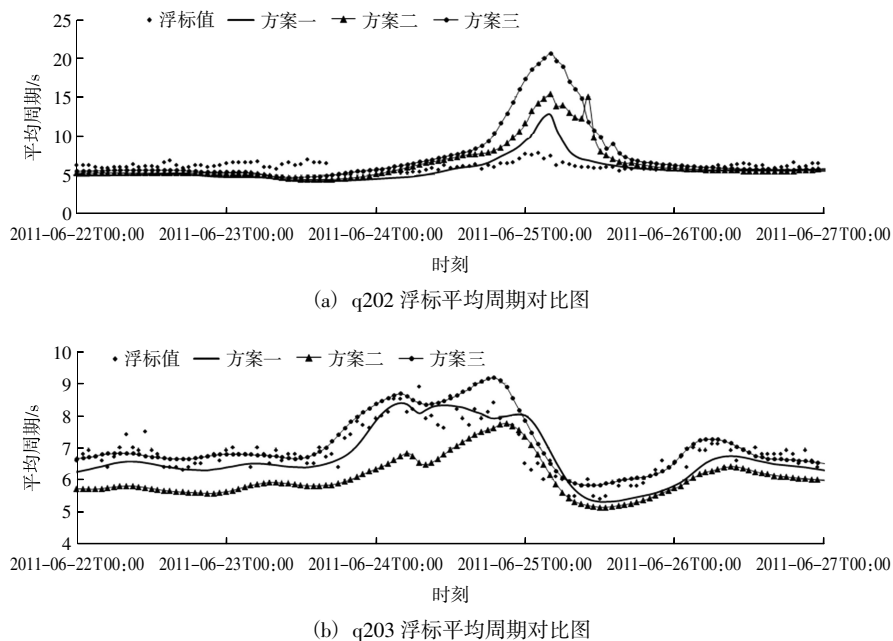


图4 3种方案下的平均周期计算值与浮标实测值对比图

Fig. 4 The comparison of the measured and calculated average period in the 3 scenarios

图3中在波浪较大时刻,方案二 WAM3 计算结果误差偏大,这与该方案高频时刻耗散不足有关,方案三 WAM4 避免了高频高估和低频低估,但是在海浪谱高频使用固定截断,是导致高频低估的另一个原因<sup>[2]</sup>,方案二采用了高频饱和型耗散函数(饱和参数是变化的),同时考虑了涌浪耗散,

适用范围更加广泛。从表1中也可以看出方案二的计算误差相对较大,方案一和方案三则更与实测值相接近;从均方根误差 *RMSE* 来看,方案一的均方根误差更小,计算结果更优。

总体来看,对比3种方案计算结果,表1中斜体加粗的数据表示3种方案中的模拟最优结果,

各种误差最优值在方案一即 Tolman and Chalikov 参数化方案中最多, 方案一的模拟结果与实测值更接近, 模拟效果较另外 2 种方案更好, 更适合该海域台风浪的数值模拟。

表 1 3 种方案下的有效波高及平均周期模拟值与浮标值的相关系数、均方根误差

Table 1 Correlation coefficient and RMSE of the measured and calculated significant wave height and average period

浮标点	方案	有效波高		平均周期	
		相关系数	均方根误差/m	相关系数	均方根误差/s
q202	方案一	<b>0.956</b>	<b>0.331</b>	0.403	2.252
	方案二	0.950	0.554	<b>0.524</b>	<b>1.365</b>
	方案三	0.852	1.417	0.432	3.553
q203	方案一	0.849	<b>0.284</b>	0.882	<b>0.428</b>
	方案二	0.806	0.543	0.790	0.912
	方案三	<b>0.872</b>	0.347	<b>0.913</b>	0.435
q206	方案一	0.962	<b>0.304</b>	<b>0.944</b>	<b>0.869</b>
	方案二	0.963	0.495	0.908	1.010
	方案三	<b>0.965</b>	0.341	0.925	1.341
q207	方案一	<b>0.971</b>	<b>0.368</b>	<b>0.936</b>	0.922
	方案二	0.963	0.670	0.929	<b>0.870</b>
	方案三	0.956	0.506	0.923	1.320

#### 4 结语

本文比较 WAVEWATCHIII 模型中 3 种不同风能输入项和耗散源函数方案对计算结果的影响, 通过对比 3 种方案计算出的有效波高和平均波周期可知采用方案一即风能输入项与耗散项选用 Tolman and Chalikov 进行计算得到的结果与实测值更加吻合。试验结果对指导该模型的使用, 进而提高中国沿海海岸工程中大范围波浪场的模拟准确度, 具有一定的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] SNYDER R L, DOBSON F W, ELLIOTT J A, et al. Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1981, 102(7): 1-59.
- [2] 黄必桂. 渤海海浪的数值模拟和涌浪对风浪的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.  
HUANG Bi-gui. Numerical simulation of wave in Bohai Sea and research on the influence of swells on wind waves [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.
- [3] 王毅. SWAN 模式及数据同化技术在海浪预报中的试验研究和应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.  
WANG Yi. Study and application of SWAN model and data assimilation technology in wave forecast[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [4] TOLMAN H L. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III TM version 3.14[M]. National Oceanic and Atmospheric Administration, 2009.
- [5] TOLMAN H L. A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents [J]. Journal of Physical Oceanography, 1991, 21(11): 782-797.
- [6] CHALIKOV D V. The parameterization of the wave boundary layer [J]. Journal of Physical Oceanography, 1995, 25(4): 1 333-1 349.
- [7] NASA Earth Science Enterprise. QSCAT/NCEP blended ocean winds from colorado research associates[DB/OL]. [2011-06].<https://rda.ucar.edu/datasets/ds744.4>.
- [8] 张鹏. 基于 CCMP 卫星遥感海面风场数据的渤海风浪模拟研究[J]. 海洋通报, 2011, 30(3): 266-271.  
ZHANG Peng. Research on wave simulation of Bohai Sea based on the CCMP remotely sensed sea winds[J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(3): 266-271.
- [9] 邓波. 驱动大洋海浪模式的两种海面风场对比分析研究[J]. 海洋预报, 2014, 31(3): 29-36.  
DENG Bo. Comparison between two kinds of sea surface wind filed applied in ocean wave simulation[J]. Marine Forecasts, 2014, 31(3): 29-36.
- [10] 孔丛颖, 史剑, 李瑞杰, 等. 基于 WAVEWATCH 对台风“海马”和“米雷”台风浪的数值模拟[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(3): 419-423.  
KONG Cong-ying, SHI Jian, LI Rui-jie, et al. Numerical simulation of typhoon waves around the waters in China's offshore[J]. Marine Environmental Science, 2013, 32(3): 419-423.
- [11] National Oceanic Administration. The GSHHG is a high-resolution geography data[DB/OL]. [2000-11]. <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines>.
- [12] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone data base[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2014, 31(2): 287-301.
- [13] 王彩欣, 张占海, 王可光, 等. 9914 号(Dan)台风浪的后报试验研究[J]. 海洋通报, 2003, 22(1): 9-16.  
WANG Cai-xin, ZHANG Zhan-hai, WANG Ke-guang, et al. A hindcast study of waves generated by typhoon 9914[J]. Marine Science Bulletin, 2003, 22(1): 9-16.