

SWAN 浅水波浪模式在渤海的应用研究 ——Phillips 线性增长比例系数的改进

杨德周^{1,2}, 尹宝树¹, 徐艳青^{1,2}, 王 津^{1,2}, 莎日娜^{1,2}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 将国际上通用的 SWAN 波浪数值模式应用到渤海, 以检验其适应性。通过对由风引起的波浪的增长和耗散作用源函数的实验研究, 发现 SWAN 中所采用的 Phillips 线性增长部分的比例系数和波浪成长有较大的关系, 此比例系数随摩擦速度变化(原模式取此系数为一常数)。基于模式试验, 引入了一个新的 Phillips 线性增长项公式, 并且利用 3 个风过程对模式的改进进行了验证。3 个风过程的计算结果和实测值比较表明, 计算结果在 3 个过程当中都得到了明显的改进。

关键词: 渤海; SWAN 模式; Phillips 线性增长

中图分类号: P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2005)05-0710-05

SWAN(Simulating Waves Nearshore) 是像 WAM 等一样的第 3 代波浪数值模式, 自从发布以来 (<http://swan.ct.tudelft.nl/>), 在国际上得到了广泛的应用。此波浪数值模式适用于海岸区、湖泊和河口区, 在给定风场、水深、和流场的情况下可获得理想的波浪参数估计。Shan-Hwei 等^[1]利用 SWAN 模型对台湾岛海域的台风波浪进行过模拟, 对湛江港邻近海域的 2 个台风波浪过程进行了模拟研究, 并与实际海浪观测资料相符较好。陈希等^[2]对中国东海的台风波浪进行过研究, 利用该模式对影响杭州湾 - 长江口沿岸海域的一个台风波浪过程进行了模拟研究, 利用自嵌套的方式提供波谱边界条件; 模式模拟的结果与实际海浪观测资料吻合较好, 并在此基础上, 研究了底摩擦、深度诱导波破碎、三波相互作用等物理过程联合对近岸台风浪的影响。

从目前我国对 SWAN 模式的研究和使用看, 主要都是针对台风过程, 其对应的风速都很大。没有对一般的风速(小于 30 m/s)的天气过程进行模式验证, 并且模式的利用, 主要集中于东海、南海以及台湾海域, 未见在渤海海域使用 SWAN 模式的有关研究。在对渤海一般风速(< 30 m/s)的天气过程进行波浪数值计算时发现: 计算所得的最大波高明显偏低。本文的目的就是通过改进 SWAN 模式在渤海建立起适应各种强度天气过程的浅海海浪数值预报模式, 进一步推动我国浅海海浪数值预报模式的发展。

1 SWAN 的风能输入和白帽破碎

SWAN 不是以二维能谱密度而是以二维作用谱密度(Action density)来表示随机波, 因为在流场中, 作用谱密度守恒而能谱密度不守恒。作用谱密度等于能量密度除以相对频率: $N(\omega, \theta) = E(\omega, \theta) / \omega$ 。

波谱的演化, 利用作用谱密度平衡方程, 在笛卡尔坐标下描述为

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \omega} c N + \frac{\partial}{\partial \theta} c N = S \quad (1)$$

式中 左边的第 1 项代表作用谱密度在时间上的局地变化; 第 2 和第 3 项代表在空间的传播, 其中 c_x 和 c_y 代表在 x 和 y 空间的传播速度; 第 4 项代表由于水深和流速的变化引起的相对频率的频移, c 为 ω 在空间的传播速度; 第 5 项表示深度和海流引起的折射, c 为 θ 空间的传播速度; 这些传播速度的表达式取自线性波理论。波作用平衡方程的右端项 $S = S(\omega, \theta)$, 是以能量密度形式表达的源项, 表明了产生、耗散和波 - 波相互作用机制过程。

收稿日期: 2004-06-08; 修订日期: 2004-09-10

基金项目: 国家“十五”科技攻关资助项目(2001BA603B-02); 中国科学院海洋研究所领域前沿项目(L390221103)

作者简介: 杨德周(1979-), 男, 山东泰安人, 中国科学院海洋研究所助理研究员, 主要从事海洋环境数值模拟研究。

E-mail: bsyin@ms.qdio.ac.cn

1.1 风的能量输入

在 SWAN 模式当中,风能的输入分为两部分,线性增长和指数增长项:

$$S_{in}(\omega, \theta) = A + B \times E(\omega, \theta) \quad (2)$$

式中 $S_{in}(\omega, \theta)$ 为风的能量输入源项; A 代表线性增长项,它和波的频率 ω 以及方向 θ 有关, $B \times E(\omega, \theta)$ 代表指数增长项,其中

$$A = \frac{1}{g^2} [U_* \max(0, \cos(\theta - \theta_w))]^4 H \quad (3)$$

$H = \exp(-(\omega / \omega_{PM}^*)^{-4})$, 为 Phillips 线性增长比例系数

$$\omega_{PM}^* = \frac{0.13g}{28U_*^2}$$

$$U_*^2 = C_D \times U_{10}^2$$

$$C_D(U_{10}) = \begin{cases} 1.2875 \times 10^{-3} & U_{10} < 7.5 \text{ m/s} \\ (0.8 + 0.065 \times U_{10}) \times 10^{-3} & U_{10} \geq 7.5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (4)$$

风能输入公式中指数增长部分:

Komen 等^[3]的指数增长项表达式

$$B = \max \left[0, 0.25^{-d} \left[28 \frac{U_*}{C_{ph}} \cos(\theta - \theta_w) - 1 \right] \right] \times \quad (5)$$

式中 U_* 为摩擦速度; θ_w 为风向; C_{ph} 为相速度; ρ_a 和 ρ_w 为空气和水的密度。

1.2 白帽破碎

在 SWAN 中默认使用 Komen 白帽破碎表达式。白帽破碎主要由波陡控制,在目前的第3代海浪模式中白帽破碎公式主要基于 pulse-based model^[4], WAMDI 对之进行了修改。

$$S_{ds, w}(\omega, \theta) = - \frac{k}{k} E(\omega, \theta) \quad (6)$$

式中 k 为波数; ω 为平均频率; k 为平均波数。Komen 等研究表明 $S_{ds, w}$ 和波陡的关系(如下式),它的值依赖于所使用的风输入公式。

$$S_{ds, w} = c_{ds} \left[(1 - \tilde{s}) + \frac{k}{k} \left(\frac{\tilde{s}}{s_{PM}} \right)^p \right] \quad (7)$$

式中 c_{ds} 、 \tilde{s} 和 p 为可调参数,其中 \tilde{s} 为总波陡; \tilde{s}_{PM} 为 Pierson-Moskowitz 谱的 \tilde{s} 值。

Komen 对应其风的输入公式给出了上式中的 c_{ds} 、 \tilde{s} 和 p 的对应值。对应 Komen 的风输入公式 $c_{ds} = 2.36 \times 10^{-5}$ 、 $\tilde{s} = 0.0$ 、 $p = 4$, 在计算中取 $\tilde{s} = 0.5$, 此值反映了波浪的状态,在渤海 0.5 时是比较合适的。

2 模式的改进

风的输入能量,在 SWAN 当中主要体现在线性输入项和指数增长项(见式(3))。在 SWAN 模式中,线性增长项中的比例系数 c_{ds} 取为常数,其默认值 $c_{ds} = 0.0015$ 。SWAN 模式本身认为此系数是可调的(tunable),即给定一个风过程就可以对此风过程设定一个值,但是一旦给定比例系数 c_{ds} 的值,则对该过程内的任何风速其值不再发生变化,即对任何风速都是常量。然而我们所做的大量的试验表明其值在给定的风过程中为常数是合理的。

通过大量的敏感性试验发现,在线性项中的比例系数 c_{ds} , 在风速低于 15 m/s 或大于 7.5 m/s 时,改变其值,会对风的能量输入产生很大的影响,而大于 15 m/s 和低于 7.5 m/s 则影响不大。因而对一个给定的风过程, SWAN 模式默认为该系数为常数是合理的。借鉴于高频区平衡域的 Phillips 系数和摩擦速度的关系^[5], 基于模式试验,我们认为 Phillips 线性成长项中的系数 c_{ds} 也应与摩擦速度有关。本文在 SWAN 模式原来公式的

基础上，基于渤海3个不同强度风过程(一个强的寒潮、一个较弱寒潮以及一个较弱南风过程)的模式试验，引入一个抛物线函数来描述比例系数和摩擦速度的关系。我们对比例系数进行了改进：

$$= \begin{cases} 0.0015 & U_{10} < 7.5 \text{ m/s} \\ -6.1834 \times U_*^2 + 5.899 \times U_* - 1.2568 & 7.5 \text{ m/s} \leq U_{10} < 15 \text{ m/s} \\ 0.0015 & U_{10} \geq 15 \text{ m/s} \end{cases} \quad (8)$$

式中 U_{10} 为海平面上 10 m 处的风速； U_* 为摩擦速度。从上式可以看出，对强风过程采用和原来模式的默认系数一样的设置，这样对台风

这样的强风过程，利用 SWAN 进行计算时本文的设置对计算结果影响不会太大，对于一般较弱的天气过程，采用本文给出的设置对计算结果影响比较大。

3 数值模拟与结果

3.1 计算海区

本文计算海区为渤海，117°35'E~122°10'E，37°05'N~40°30'N，网格分辨率为 $\left(\frac{1}{12}\right)^\circ \times \left(\frac{1}{12}\right)^\circ$ ，即(5'×5')。计算网格见图1。

3.2 观测点位置及风场过程

根据渤海地理分布，从渤海现有的波浪观测资料中，选取了3个具有代表性的观测过程作为模式检验的基础资料见表1。

从风场特征来看，1987年10月29日，是一次较大的寒潮过程，用该过程的3d实

测资料来检验模式。本次过程中，实测最大风速为26.5 m/s(38.3 m高度处)。最大有效波高为3.9 m。

1988年5月26日的风过程是一次较小的偏南风过程，在用于模式检验的3d实测资料中，最大风速为16.80 m/s(10 m高度处)，最大有效波高为2.7 m。

1998年4月22号的风过程为一次寒潮过程，最大风速为21.53 m/s(10 m高度处)，最大有效波高为2.94 m。

全部风场资料由中国海洋大学国家“九五”科技攻关项目提供。

图2~图4分别给出了这3个天气过程默认、改进SWAN模式的结果与实测结果的波高及跨零周期比较9804过程没有实测的周期资料可以比较。

从图中结果比较可以看到，无论对较强的寒潮过程8710，还是中等强度的偏南风过程8805，以及中等强度的天气过程9804，也无论是位于辽东湾的较深的实测点(8710)，还是位于近岸的浅水实测点(9804)，改进后的SWAN模式的结果无论是波高还是周期都得到了非常明显的改进，与实测符合得很好。

表1 模式检验的基础资料

Table 1 Basic data for the model test

序号	检验过程	计算起止时间	观测点位置	水深/m
1	8710	1987-10-29-02 00~1987-11-01-02 00	120°45'E 39°54'N	31
2	8805	1988-05-26-08 00~1988-05-29-08 00	121°7.2'E 40°12.48'N	25
3	9804	1998-04-22-20 00~1998-04-25-02 00	118°49.02'E 38°13.02'N	10

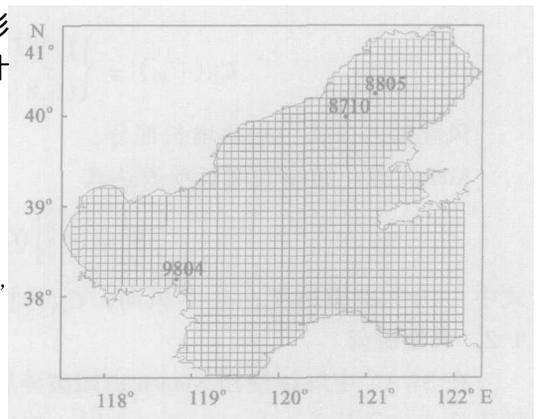


图1 渤海的计算网格和观测点位置

Fig.1 Location of the observation points and the computational grid in Bohai Sea

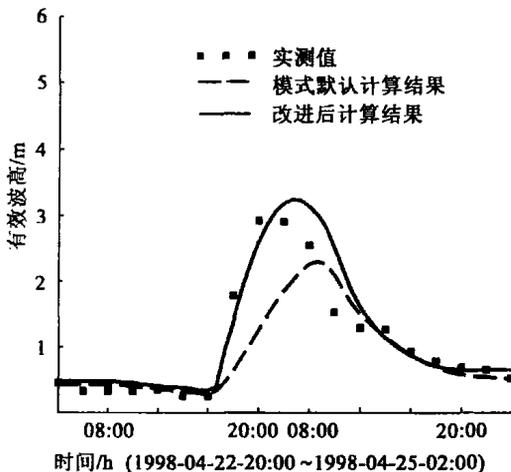


图2 9804过程，改进后模式的波高后报曲线和实测曲线的比较(观测点的位置:118°49.02'E 38°13.02'N)

Fig.2 Comparison of the curve of measured data and the hind-casting curve of significant wave height computed from amended the SWAN model in the 9804 process

这无疑表明本研究对 SWAN 模式的改进是合理正确的。笔者也采用 Jassen 的风输入项,对模式进行了验证,同样改进后模式的结果比原来模式的结果也有很大改进,篇幅所限,未在文章中列出。

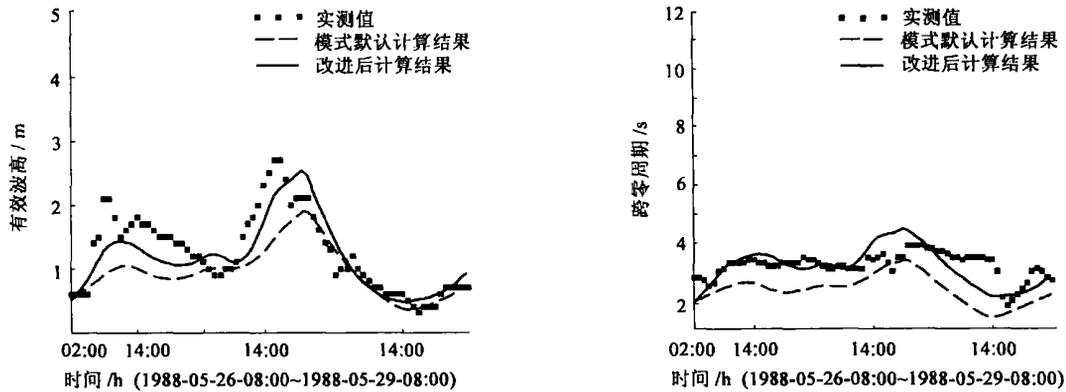


图3 8805过程,模式改进后的波高后报曲线以及跨零周期后报曲线和实测曲线的比较(观测点的位置:121°7.2 E 40°12.48 N)

Fig. 3 Comparison of the curve of measured data, the hind-casting curves of significant wave height, and the cross-zero periods computed from amended the SWAN model in the 8805 process

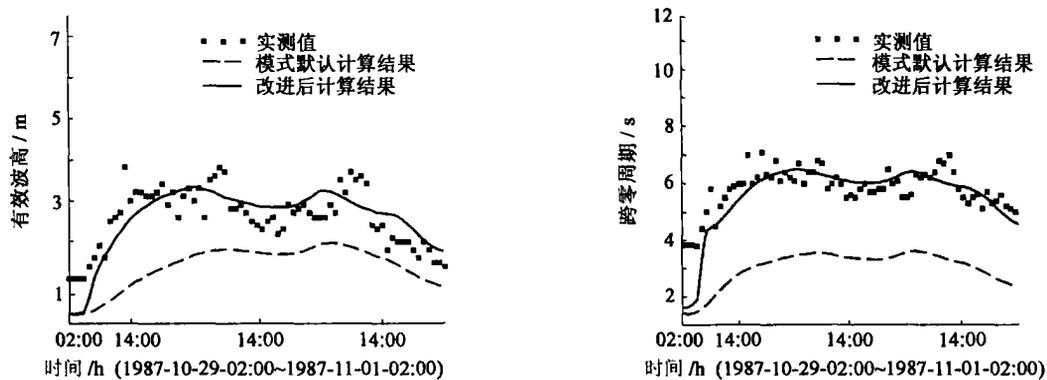


图4 8710过程,模式改进后的有效波高后报曲线以及跨零周期后报曲线和实测曲线的比较(观测点的位置:120°45 E 39°56 N)

Fig. 4 Comparison of the curve of measured data, the hind-casting curves of significant wave height and the cross-zero periods computed from amended the SWAN model in the 8710 process

4 结 论

通过分析 SWAN 海浪数值模式在渤海适应性的不足,提出了一个新的 Phillips 线性项系数的表达式,改进了风能量输入源函数。

利用3个风过程对改进的 SWAN 模式进行了检验,结果表明,在3种风的情况下,改进后的模式结果,和原来的 SWAN 默认情况相比都明显得到了改善,与实测符合很好。

改进后的程序对大风速(如台风)的情况和原来的 SWAN 计算结果几乎一样,而对一般风速的情况有了明显的改善。改进后的程序通过编译可以直接提供给别人使用,并且使用起来和用原来的 SWAN 一样方便,如果对输入文件不加说明,在默认情况下则为原来的风场波浪能量输入公式;只要在输入文件中加入一个特定的参数说明就会利用本文给出的公式进行计算。

本文通过对 SWAN 模式的改进,建立了适应于各种天气状况的渤海海浪数值预报模式,对我国浅海海浪数值预报模式的发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] Shan-Hwei Ou, Jiarr-Ming Liao, Tai-Wen Hsu, *et al.* Simulating typhoon waves by Swan wave model in coastal waters of Taiwan[J]. *Ocean Engineering*, 2002, 29:947 - 971.
- [2] 陈 希, 沙文钰, 闵锦忠. 台湾岛邻近海域台风浪的模拟研究[J]. *海洋学报*, 2002, 19(4):1 - 9.
- [3] Komen GJ, Hasselmann S, Hasselmann K. On the existence of a fully developed wind sea spectrum[J]. *J Phys Oceanography*, 1984, 14:1271 - 1285.
- [4] Hasselmann K. On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping[J]. *Bound-layer Meteor*, 1974, 6(1 - 2):107 - 127.
- [5] Pierson WJ Jr. The interpretation of wave spectrums in terms of wind profile instead of the wind measured at a constant height[J]. *J Geophys Res*, 1964, 69(24):5191 - 5203.
- [6] 文圣常, 余宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 北京:科学出版社, 1984.308 - 312.

Application of the SWAN wave model to Bohai Sea : Improvement of Phillips linear growth term^{*}

YANG De-zhou^{1,2}, YIN Bao-shu¹, XU Yan-qing^{1,2}, WANG Jin^{1,2}, SHA Ri-na^{1,2}

(1. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;*

2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract : The SWAN (Simulating Wave Nearshore) wave model is put into use to examine its applicability in Bohai Sea. By means of the experiments of wind-induced ocean wave, we find that the proportionality coefficient in linear growth term of wind growth source function plays an important role in the process of wave development and changes along with friction velocity (in default SWAN model, it is a constant). Therefore, based on the experiments, we introduce a new formula of into the linear growth term of wind growth source function in the SWAN model. We experience with the three processes of wind (two cold waves and a south wind) to validate the improvement in the linear growth term. In conclusion, the results from the improved SWAN wave model agree much better with the measurements than those from the previous the SWAN model. The improved SWAN wave model makes a solid foundation for setting up a proper model of wave numerical forecasting in Bohai Sea.

Key words : Bohai Sea ; SWAN wave model ; Phillips linear growth term

* The study is financially supported by the National Key Technologies R & D Program of China during the 10th Five-year Plan Period (No. 2001BA603B-02).