

风暴潮对海浪影响的数值研究

程 展 吴少华 蓝 曦

(国家海洋环境预报中心, 北京)

摘 要

采用第三代海浪模式和线性全流风暴潮模式计算封闭海域内风暴潮对风浪的影响。海浪模式中包含水深变化及平均流变化引起的波浪绕射项。计算了不同风速和不同静水深情况下风暴潮引起的风浪波高的变化。计算结果表明: 静水深为10m及风速为30m/s时, 风暴潮引起的风浪波高的相对变化的最大值达39%; 而静水深超过40m时, 即使风速为40m/s, 风暴潮引起的风浪波高的相对变化的最大值小于5%。

关键词: 海浪模式, 风暴潮

当台风或气旋扫过浅海或沿岸海域, 总是同时产生海浪和风暴潮。这两种现象相互作用, 共同作用在离岸结构物和海岸设施上, 造成巨大的人员伤亡和经济损失。较为理想的情况是建立海浪-风暴潮耦合模式同时对这两种过程进行预报, 本文研究正是为达到这一目的而开展的前期工作。

风暴潮对海浪的影响主要体现在风暴潮引起的增水和平均流上。Wolf等^[1]的计算结果表明在浅水区域风暴潮所致的水深变化和平均流引起的海浪绕射是十分明显的, 特别是对于周期较长的风浪。Hubbert和Wolf^[2]设计了大量的理想情况, 以探讨水深和平均流的时空变化引起海浪的绕射情况。采用包含水深和平均流所致海浪绕射项的第三代海浪模式计算结果显示: 水深和平均流对海浪的绕射作用不光限于改变波浪的传播方向, 而且使得海浪谱形发生变化。Wu等^[3]计算了英国西南沿海区域风暴潮对海浪的作用, 他们的算例表明: 考虑风暴潮的影响与否造成预报的海浪波高的最大差异达0.8m。同时他们还分别计算水深的影响和平均流的影响, 发现水深变化的影响在整个绕射项中起主要作用。

本文采用数值方法研究不同风速和不同静水深下风暴潮对海浪的影响。为使研究的问题明确, 风速和计算域都取为理想化的。海浪模式采用包含水深和海浪流时空变化的第三代海浪模式, 风暴潮模式为线性全流模式。后者为前者提供计算中所需的增水和平均流数据。该研究的目的之一是为未来的高级数值预报模式提供时空区域划分的理论依据。

一、海浪模式

当海中存在流时, 海浪的能量 E 不再是基本守恒量, 但波作用量 $N=E/\omega_0$ 仍保持守恒, 其中 ω_0 为海浪的本征圆频率。因此我们需把WAM模式中的能谱守恒方程改写成如下描写波作用量谱方程 (Hubbert和Wolf):

$$\frac{dN}{dt} + \frac{\partial}{\partial \theta} (N \dot{\theta}) + \frac{\partial}{\partial \omega_0} (N \dot{\omega}_0) = \frac{S}{\omega_0} \quad (1)$$

在球极坐标中为

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\partial N}{\partial t} + (\cos \varphi)^{-1} \frac{\partial}{\partial \varphi} (N \dot{\varphi} \cos \varphi) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (N \dot{\lambda}) \quad (2)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{1}{R} (V + C_s \cos \theta) \quad (3)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{R \cos \varphi} (U + C_s \sin \theta) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{\theta} = & \frac{C_s}{R} \sin \theta \tan \varphi + \frac{\omega_0}{R \operatorname{sh} 2kD} \left(\sin \theta \frac{\partial D}{\partial \varphi} - \frac{\cos \theta}{\cos \varphi} \frac{\partial D}{\partial \lambda} \right) \\ & + \frac{\sin \theta}{R} \left(\sin \theta \frac{\partial U}{\partial \varphi} + \cos \theta \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right) - \frac{\cos \theta}{R \cos \varphi} \left(\sin \theta \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \cos \theta \frac{\partial V}{\partial \lambda} \right) \\ & - \frac{\cos \theta}{R} \tan \varphi \left(U \cos \theta - V \sin \theta \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_0 = & -\frac{C_s k}{R} \left[\frac{\omega_0 D}{C_s \operatorname{sh} 2kD} \left(\frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{\partial V}{\partial \varphi} - V \tan \varphi \right) \right. \\ & + \cos \theta \left(\sin \theta \frac{\partial U}{\partial \varphi} + \cos \theta \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right) + \frac{\sin \theta}{\cos \varphi} \left(\sin \theta \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \cos \theta \frac{\partial V}{\partial \lambda} \right) \\ & \left. + \sin \theta \tan \varphi \left(U \cos \theta - V \sin \theta \right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

式中 φ 为纬度, λ 为经度, C_s 为波的群速度, k 为波数; D 为总水深, R 为地球半径; U , V 分别为平均流速度在经向和纬向的分量。

源项 $S=S_{1,0}+S_{1,1}+S_{2,0}+S_{2,1}$ 分别代表风输入项、非线性波——波相互作用项、白帽引起的耗散项及底摩擦项。对方程进行数值积分时, 源函数采用隐式积分格式, 对流项采用迎风格式。具体方案参见WAMDIG^[4],

二、风暴潮模式

由于本文的主要目的在于研究风暴潮对风浪的影响, 因此我们采用较为简单的线性全流风暴潮模式:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = fV - \frac{g}{R \cos \varphi} \frac{\partial \xi}{\partial \lambda} + \frac{\tau_{\lambda}}{D \rho_w} \quad (7)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -fU - \frac{g}{R} \frac{\partial \xi}{\partial \varphi} + \frac{\tau_{\varphi}}{D \rho_w} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left[\frac{\partial}{\partial \lambda} (DU) + \frac{\partial}{\partial \varphi} (DV \cos \varphi) \right] = 0 \quad (9)$$

其中 $\tau = \tau_s - \tau_b$, τ_s 和 τ_b 分别为海面风应力和海底摩擦应力; f 为科氏参数, ξ 为风暴潮引起的增水。应用常用的C型差分格式离散上面方程组。计算域取为封闭海域, 这样计算中的边界条件易于处理。当要把该模式应用于开阔海的近岸区域时, 需对开边界的边界条件做特殊处理, Wu^[6] 对这个问题进行了专门探讨。数值计算中空间步长取为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 风暴潮模式的时间步长取为 600s, 海浪模式的时间步长取为 1200s。整个计算区域为 $5^\circ \times 5^\circ$, 积分时间为 24h。

三、数值结果

(一) 海浪模式和风暴潮模式的检验

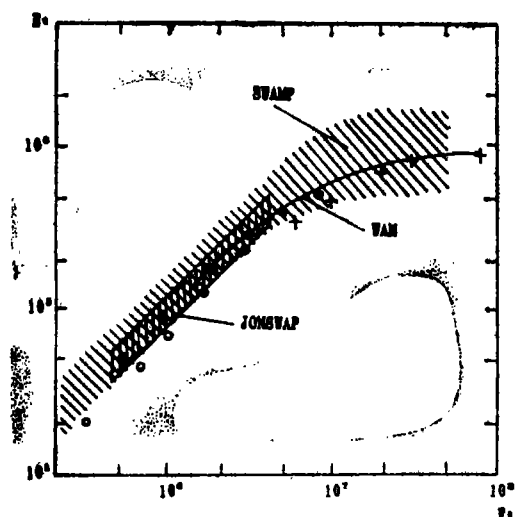


图1 风浪的能量与风区关系

风速 (m/s): + 6.0, ● 16.8, ○ 25.0

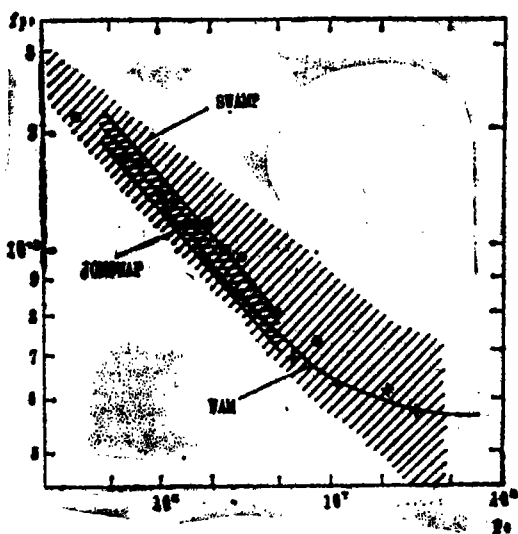


图2 风浪的峰值频率与风区的关系

(符号同图1)

首先我们对这两个模式进行了检验。在海浪模式的检验中我们计算了与WAMDIG (1988) 相同的算例。海浪的能量和谱峰频率随风程的变化分别见图1和图2。图中 $E_* = g^2 E / (u_*)^4$, $f_{p*} = u_* f_p / g$, $F_* = g F / (u_*)^2$; E 为风浪的能量, u_* 为海面风摩擦速度, f_p 为风浪的谱峰频率, F 为风区。在计算中选用的三种风速下本文的结果与WAMDIG的基本符合。我们用风速为20m/s, 静水深为20m的算例检验风暴潮模式。计算得到的振荡周期为21小时, 同王喜年^[6]的结果是一致的, 两者计算的增水也符合较好。

(二) 均匀静水深的数值结果

数值计算中风速分别取为10, 20, 30和40m/s, 静水深分别取为10, 20和40m。不考虑风暴潮影响时计算得到的风浪的波高为 H_0 , 而考虑风暴潮影响时计算得到的风浪的波高为 H_1 。我们用下面两参数描述风暴潮对风浪的影响:

$$(|\Delta H|/H_0)_{max} \quad (10)$$

$$(|\Delta H|/H_0)_{max} \quad (11)$$

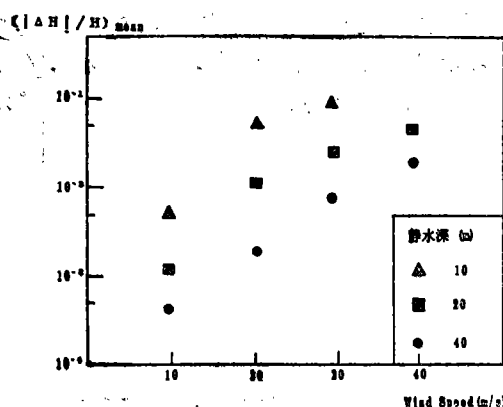


图3 风暴潮引起风浪波高变化的平均值与风速、静水深的关系

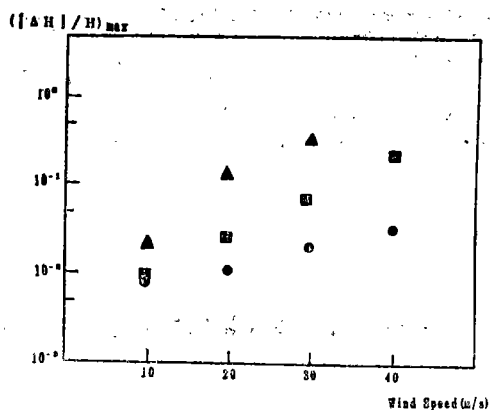


图4 风暴潮引起风浪波高变化的最大值与风速静水深关系

(符号同图3)

其中 $\Delta H = H_1 - H_0$, $(\quad)_{max}$ 为各计算点的平均值, $(\quad)_{max}$ 为各计算点中最大值。在不同风速和不同静水深下计算得到的上述两参数分别见图3、图4。随着风速的增加及静水深的减小, 风暴潮对海浪的影响变得更加突出。在极端的算例条件下, 即风速为30m/s, 水深为10m时, 由风暴潮引起的波高的相对变化的平均值为9%, 最大值达39%。当风速为40m/s, 静水深为10m时, 在风暴潮的计算中出现上风处的水被吹干, 即该处的减水大于静水深, 造成计算不收敛。当静水深超过40m时, 即使风速为40m/s, 波高的相对变化的最大值也不到5%。另外, 在上面提到的极端算例条件下, 我们分别计算了水深变化和平均流变化对风浪波高的影响, 发现水深变化项的作用的确比潮流变化项的大5到6倍, 但平均流变化项引起的波高相对变化的最大值达7%, 我们认为一般不能忽略此项。

当风速为30m/s和静水深为10m时风暴潮引起风浪波高改变如图5所示, 在上风区域

波高减小, 最大减小值超过 0.8m ; 而在下风区域波高增大, 最大增加值接近 1.0m 。波高变化的分布在风的断面方向不对称。这是由于在科氏力的作用下, 风暴潮引起的增水和平均流在风的断面方向不对称, 进而使得波高变化的分布也不对称。

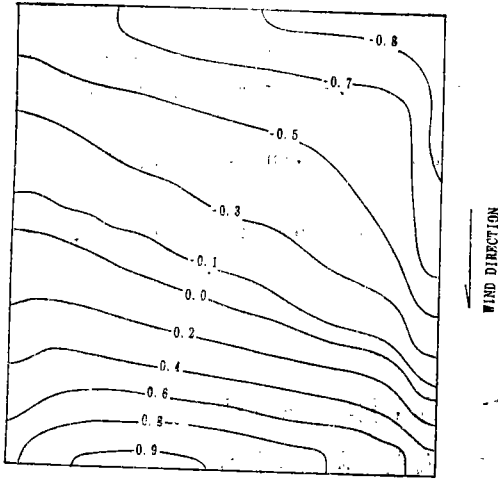


图5 风暴潮引起风浪波高变化分布

风速: 30m/s , 静水深: 10m

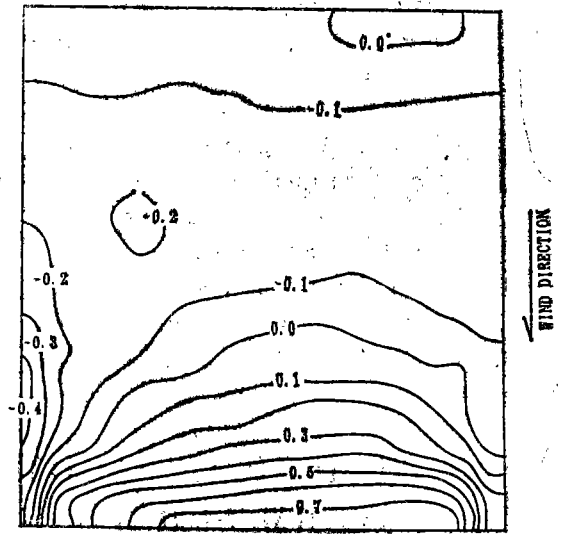


图6 非均匀静水深下风暴潮引起风浪波高变化分布

风速: 30m/s

(三) 非均匀静水深的数值结果

最后我们模拟了近岸海域向岸风的情况, 计算了非均匀静水深时风暴潮对风浪的影响。静水深在五个纬度的范围内从 5m 线性变化到 40m , 风速为 30m/s , 风向由深水区域指向浅水区域。考虑风暴潮的作用与否造成风浪的波高差别如图6所示。在深水区域, 波高的变化很小, 不超过 0.1m 。而在浅水区域波高的增大非常明显, 其最大值超过 0.7m 。另外, 由于科氏力和侧岸的作用, 造成波高变化的分布在经度方向失去对称性, 表现为在图的左下方出现负值区域。

四、结 论

采用第三代海浪模式和线性全流风暴潮模式计算封闭海域内风暴潮对风浪的影响。海浪模式中包含了水深变化及平均流变化引起的波浪绕射项。计算了不同风速和不同静水深情况下风暴潮引起的风浪波高的变化。计算结果表明: 静水深为 10m 及风速为 30m/s 时, 风暴潮引起的风浪波高的相对变化的最大值达 39% ; 而静水深超过 40m 时, 即使风速为 40m/s , 风暴潮引起的风浪波高的相对变化的最大值小于 5% 。虽然水深变化对风浪波高的影响大于潮流变化的影响, 但平均流变化的影响是不可忽视的。

参 考 文 献

- [1] Wolf, J., Hubbert, K. P. and R. A. Flather, A feasibility study for the development of a joint surge and wave model, Proudman Oceanographic Laboratory, Report No. 1 (1988), 109pp.
- [2] Hubbert, K. P. and J. Wolf, Numerical investigation of depth and current refraction of waves, *J. Geophys. Res.-Oceans*, 96 (1991), 2737~2748.
- [3] Wu, X. and R. A. Flather, Hindcasting waves using a coupled wavetide-surge model, Proceedings of the 3rd International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Montreal, Canada (1992), 159~170.
- [4] The WAMDI Group, The WAM model-a third generation ocean wave prediction model, *J. Phy. Oceanography*, 18 (1988), 1775~1810.
- [5] Wu, X., Intercomparison study of modeled and measured waves and winds during the storm of October 1987, *private communications* (1992).
- [6] 王喜年, 等深封闭海风潮数值计算, 海洋预报, 4, 1~6. (1987).

NUMERICAL STUDY ON EFFECTS OF
STORM SURGES ON OCEAN WAVES

Cheng zhan Wu Shaohua Lan Xi

(National Research Center for Marine Environment Forecasts)

Abstract

The third-generation ocean wave model and a linear storm surge model are adopted to investigate effects of storm surges on ocean waves in a closed rectangular basin. Refractions of ocean wave caused by temporal and spatial variations of water depth and currents are included in the wave model. Computational tests at different wind speed and water depth indicate that when water depth is 10m and wind speed 30m/s, the maximal relative change in wave height is up to 39%; while water depth exceeds 40m, even if wind speed is 40m/s, the maximal relative change is less than 5%.

Key words: ocean wave modelling, storm surges.