

强台风“珍珠”引起的近岸波浪场数值分析

赵凯, 栾曙光, 张瑞瑾

(大连海洋大学, 辽宁 大连 116023)

摘 要: 台风浪的研究对于船舶航行、避风以及港口、海洋和近岸建筑物的安全有着重要的现实意义。本文基于考虑波浪折射、底部损耗及波浪破碎等的波谱模型, 在充分考虑风能量输入、白帽耗散、水深诱导以及波-波间的非线性相互作用等物理过程, 对袭击广东省和福建省沿海的0601号强台风“珍珠”引起的台风浪过程进行了数值模拟计算, 计算结果与云澳海洋站和遮浪海洋站的观测资料基本吻合。经分析得到了近岸台风浪场有效波高分布的变化规律, 为近岸海域台风浪场模拟与预报提供了一种有效的方法, 为船舶和港口的防灾减灾提供了较为重要的参考依据。

关键词: 波谱模型; 波浪场; 有效波高

中图分类号: P444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2011)04-0035-08

1 引言

中国位于太平洋西岸, 拥有广阔的领海和漫长的海岸线。因而在台风多发的西北太平洋海域, 每年台风引发的灾害都非常严重。研究表明, 台风引起的巨大波浪的破坏力远比台风本身大, 每年由海浪造成的直接经济损失达数亿元。因此对台风浪场进行数值计算与分析对于防灾减灾、保障灾区人民的生命财产安全是十分必要的。

2 数学模型简介

2.1 模型控制方程

波浪要素采用丹麦水力研究所(DHI Water & Environment)研制的计算软件 MIKE21 SW (Spectral Waves FM)模型进行推算。该软件是波谱模型, 可以考虑波浪的折射、底部损耗、波浪破碎、波流联合作用及风等因素对波浪传播的影响, 可以用来进行大范围的波浪场的推算, 也可以满足大尺度波浪推算的要求。

SW模型基于波作用守恒方程, 采用波作用密度谱 $N(\sigma, \theta)$ 来描述波浪。模型的自变量为相对波频率 σ 和波向 θ 。波作用密度与波能谱密度 $E(\sigma, \theta)$ 的关系为:

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma \quad (1)$$

式中 σ 为相对频率, θ 为波向。

在笛卡尔坐标系下, MIKE21 SW 的控制方程, 即波作用守恒方程可以表示为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla(\vec{V}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (2)$$

式中 \vec{V} 指波群速度, $\vec{V} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$, c_x, c_y 分别表示波作用在地理空间(x, y)中传播时的变化, c_σ 表示由于水深和水流变化造成的相对频率的变化, c_θ 表示由水深和水流引起的折射。

S指能量平衡方程中以谱密度表示的源函数:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (3)$$

式中, S_{in} 指风输入的能量, S_{nl} 指波与波之间的非线性作用引起的能量耗散, S_{ds} 指有白帽引起的能量耗散, S_{bot} 指由底摩阻引起的能量耗散, S_{surf} 指由于水深变化引起的波浪破碎产生的能量

耗散。

式中传播速度均采用线性波理论计算：

$$c_x = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] \frac{\sigma k_x}{k^2} + U_x \quad (4)$$

$$c_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] \frac{\sigma k_y}{k^2} + U_y \quad (5)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla d \right] - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \quad (6)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right] \quad (7)$$

式中 d 为水深； \vec{U} 为流速， $\vec{U} = (U_x, U_y)$ ； $\vec{k} = (k_x, k_y)$ 为波数； s 为 θ 方向空间坐标； m 为垂直于 s 的坐标。

2.1.1 风能输入

风能输入项 S_{in} 根据 Janssen^[1] (1989) 和 Janssen^[2] (1991) 的研究显示：

$$S_{in}(f, \theta) = \gamma E(f, \theta) \quad (8)$$

式中 γ 为增长率，

$$\gamma = \varepsilon \beta \sigma \chi^2 \quad (9)$$

这里 ε 指大气与水体的密度比， $\varepsilon = \rho_a / \rho_w$ ； σ 指相对圆频率； χ 由下式给出：

$$\chi = \left(\frac{u_*}{c} + z_a \right) \cos(\theta - \theta_w) \quad (10)$$

式中 u_* 为风的摩擦速度； c 指相速度， $c = \sigma / k$ ， k 为波数； θ 和 θ_w 分别指波向和风向； $z_a = 0.011$ 。

2.1.2 非线性作用

对于给定频率和方向的波谱，在有限水深中的传播与在深水中的传播有一定的关系^[3]：

$$S_{nl}(\text{有限水深}) = R(\bar{k}h) S_{nl}(\text{深水})$$

这里指 k 平均波数； $\bar{k}h > 1$

$$R(x) = 1 + \frac{5.5}{x} \left(1 - \frac{5x}{6} \right) \exp \left(-\frac{5x}{4} \right) \quad (11)$$

$x = (3/4)\bar{k}h$ ，这是模型中所用的近似值。

2.1.3 白帽耗散

白帽耗散源函数为：

$$S_{ds}(f, \theta) = -C'_{ds} \left(\frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}_{PM}} \right)^m \left\{ \left(1 - \delta \right) \frac{k}{\bar{k}} + \delta \left(\frac{k}{\bar{k}} \right)^2 \right\} \bar{\sigma} E(f, \theta) \quad (12)$$

式中 C'_{ds} ， δ 以及 m 为常数。

$$C'_{ds} = 4.5 \times 10^{-5}, \quad \delta = 0.5, \quad m = 4.$$

2.1.4 底摩阻耗散

由底摩阻引起的耗散公式为：

$$S_{bot}(f, \theta) = -(C_f + f_c(\bar{u} \cdot \vec{k}/k)) \frac{k}{\sin 2kd} E(f, \theta) \quad (13)$$

这里 C_f 为底摩擦系数； k 为波数； d 为水深； f_c 为水流的摩擦系数； u 为水流速度。系数 C_f 依赖于底床和水流条件，一般为 0.001—0.01 m/s。

2.1.5 波浪破碎

波浪向浅水区域传播时，由于水深不足以支持波高，波浪会发生破碎。MIKE 21 SW 模块中所用的是 Batjes 和 Janssen 推导的波浪破碎公式。源函数形式为：

$$S_{surf}(f, \theta) = -\frac{2\alpha_{BJ} Q_b \bar{f}}{X} E(f, \theta) \quad (14)$$

这里 $\alpha_{BJ} \approx 1.0$ 为校准常数； Q_b 为波浪破碎分数； \bar{f} 为平均频率； X 为波浪传播时总能量与最大允许波高的波浪能量的比率。

2.1.6 边界条件

在地理空间的陆地边界上采用全吸收边界，入射量(以传播速度垂直于小单元正向为正)设置为零，透射边界不需要边界条件；在开边界处需要指定能量谱。在频率空间，所有的边界都为全吸收边界；在方向空间不需要边界条件。

2.2 最大风速半径的计算

应用 MIKE 21 数值计算软件中的 SW(Spectral Waves) 模块进行台风浪场数值计算时，需要输入的台风参数有台风中心的经纬度、最大风速半径、最大风速、中心气压和标准气压。台风中心的经纬度、最大风速、中心气压和标准气压可从气象台站提供的台风基本参数资料中获得。最大风速半径 R 采用 Graham 和 Nunn 提出的台风经验公式(15)计算。式(15)除了考虑台风中心气压以外，还考虑了地理纬度和台风中心移动速度的影响。

$$R = 28.52 \operatorname{th}[0.0873(\varphi - 28^\circ)] + 12.22 \cdot \exp \left[\frac{[(P_0 - 1013.2)/33.86] + 0.2V_F + 37.22}{100} \right] \quad (15)$$

式中： V_F 为台风中心移动的速度 (km/h)， φ 为地理纬度， P_0 为台风中心气压 (hPa)。

3 强台风“珍珠”数值模拟验证

强台风“珍珠”是2006年我国编号的首个热带气旋。它于5月9日20时在西北太平洋贝劳群岛附近(8.3°N, 132.1°E)由热带低压发展成热带风暴,移动过程中不断加强,15日02时中心气压为950 hPa,近中心风速增强到45 m/s,发展成强台风等级。之后以每小时15 km的速度在10°—20°N的低纬度洋面上北行,越过20°N后“珍珠”的移动速度加快,风力等级降低,中心气压升高,方向为NNE。本文选取的“珍珠”风场资料从20°N沿NNE方向行至登陆,再沿着NE方向的海岸线行直至26.5°N处,即2006年5月17日8时—2006年5月18日15时的全部风场资料(见图1)。输入的风场参数有“珍珠”每一时间步的中心经纬度、最大风速半径、最大风速、中心气压和标准气压。其

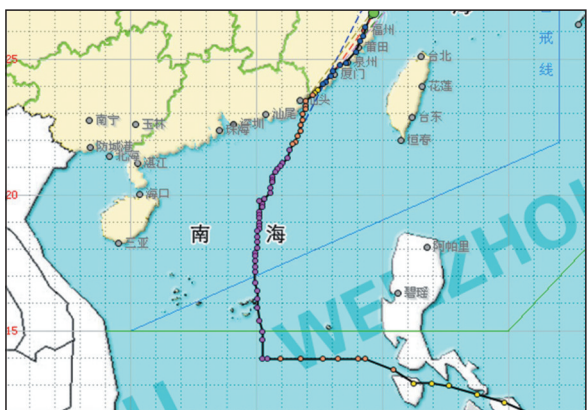


图1 强台风“珍珠”移动路径图

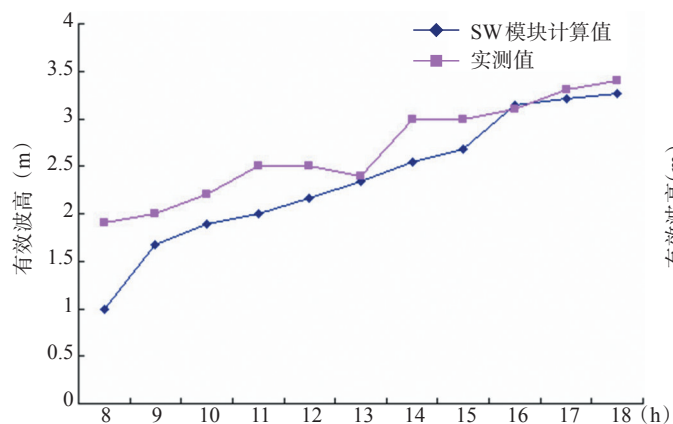


图2 有效波高计算值与云澳海洋站观测值的比较

中最大风速从45 m/s降低至18 m/s,中心气压从945 hPa升至995 hPa,移动速度从15 km/h增至30 km/h,最大风速半径从45 km降至25 km,热带气旋的等级从强台风降至为低气压。所取的时间步为31步,时间步长为3600 s(见表1)。

在17日08时,台风中心越过20°N接近广东沿海,云澳海洋站和遮浪海洋站都观测到有效波高在3 m以上的大浪^[4]。为了验证MIKE 21SW模型对“珍珠”台风浪的模拟计算结果,将SW模型计算的结果与云澳海洋站(117°5.959'E, 23°23.78'N)和遮浪海洋站(115°34.2'E, 22°39'N)的同步观测资料进行了对比分析。图2是由风场资料推算的有效波高值和云澳海洋站观测到的有效波高值的比较,计算值与实测值的最大误差小于0.5 m,吻合性较好。图3是由风场资料推算的有效波高值和遮浪海洋站观测到的有效波高值的比较,在最初的2小时实测的有效波高值偏大,之后计算值与实测值的最大误差均小于0.5 m。波浪平均周期5—9 s。

4 强台风“珍珠”的波浪场特征分析

在广东汕尾至福建厦门近岸沿海区域-30 m等深线上,分别选取14个点。其中1点位于汕尾市近岸沿海地区,是台风行进路径上的点;2—6点位于汕尾至汕头之间的沿海区域,在强台风“珍珠”移动路径的左边;7—14点位于汕头至厦门之间的沿海区域,在强台风“珍珠”移动路径的右边;且各点之间的距离均为30 km,图4给出了选点位置图。

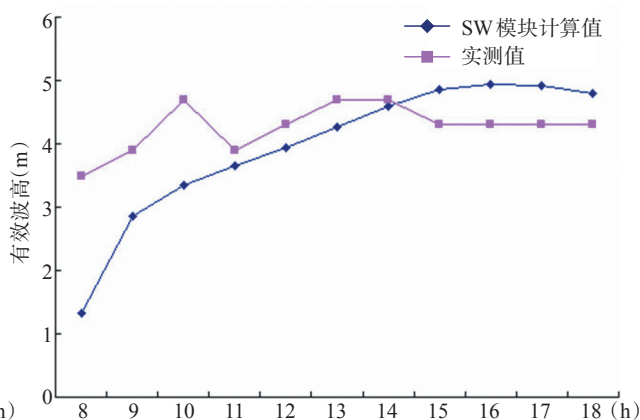


图3 有效波高计算值与遮浪海洋站观测值的比较

表 1 强台风“珍珠”风场参数一览表

时间	东经	北纬	R (km)	最大风速 (m/s)	中心气压 (百帕)	标准气压 (百帕)
2006-5-17 8:00	115.6	20.5	45	45	945	1013
2006-5-17 9:00	115.6	20.6	45	45	945	1013
2006-5-17 10:00	115.6	20.7	45	45	945	1013
2006-5-17 11:00	115.7	20.9	45	45	945	1013
2006-5-17 12:00	115.8	21	45	45	945	1013
2006-5-17 13:00	115.9	21.1	45	45	945	1013
2006-5-17 14:00	116	21.2	45	45	945	1013
2006-5-17 15:00	116.2	21.4	45	45	945	1013
2006-5-17 16:00	116.3	21.7	45	45	945	1013
2006-5-17 17:00	116.4	21.9	42	40	955	1013
2006-5-17 18:00	116.5	22	42	40	955	1013
2006-5-17 19:00	116.6	22.2	42	40	955	1013
2006-5-17 20:00	116.7	22.4	42	40	955	1013
2006-5-17 21:00	116.7	22.6	42	40	955	1013
2006-5-17 22:00	116.8	22.8	42	40	955	1013
2006-5-17 23:00	116.8	23	42	40	955	1013
2006-5-18 0:00	116.9	23.2	42	40	955	1013
2006-5-18 1:00	116.9	23.3	42	40	955	1013
2006-5-18 2:00	116.9	23.5	40	35	960	1013
2006-5-18 3:00	117.2	23.7	40	35	960	1013
2006-5-18 4:00	117.3	23.8	38	30	970	1013
2006-5-18 5:00	117.4	23.9	35	25	980	1013
2006-5-18 6:00	117.6	24.1	33	23	985	1015
2006-5-18 7:00	117.7	24.2	33	23	985	1015
2006-5-18 8:00	117.9	24.4	30	20	990	1015
2006-5-18 9:00	118	24.6	30	20	990	1015
2006-5-18 10:00	118.3	24.8	30	20	990	1015
2006-5-18 11:00	118.5	24.9	30	20	990	1015
2006-5-18 12:00	118.9	25.3	25	18	995	1015
2006-5-18 13:00	119.1	25.7	25	18	995	1015
2006-5-18 14:00	119.2	25.9	25	18	995	1015
2006-5-18 15:00	119.3	26.2	25	18	995	1015

图5为受强台风“珍珠”影响1—6点有效波高变化曲线;图6为受强台风“珍珠”影响7—14点有效波高变化曲线。强台风“珍珠”行进路径上1点的有效波高随时间的变化特征呈现出四个阶段,

第一阶段从开始模拟的时刻到5月17日21时,“珍珠”逐渐从外海深水向近岸浅水1点位置移动,“珍珠”在海上聚集了大量能量,图5可以看出,5月17日8时1点有效波高为1.98 m,5月17日21时“珍珠”移动到台风中心距1点位置43 km处,即“珍珠”前眼壁刚好与1点重合,此时风速达到最大值,1点位置处有效波高也达到最大值7.58 m。

第二阶段从5月17日21时—5月18日0时,这个阶段随着“珍珠”向前移动,1点从风速极大值的前眼壁处逐渐移动到风速较小的风眼中心区域,有效波高从21时的最大值7.58 m,逐渐降低到18日0时的5.23 m,此时台风中心超过1点位置约27 km,1点仍位于风眼中心区域。风眼中心风速迅速减小,使得波高也迅速减小。但是由于台风中心区域气压较低以及受外围涌浪的影响,有效波高不会降到很低。但海况也十分恶劣,有巨大的金字塔浪,俗称三角浪,它具有驻波的性质。

第三阶段从5月18日0时—1时,这个阶段“珍珠”继续向前移动,1点又从风速较小的风眼中心区域逐渐移动到风速极大值的后眼壁处。此时1点位置的有效波高从0时的5.23 m,迅速增大到1时的6.02 m。

第四阶段从5月18日1时到台风消失,“珍珠”于18日2时15分在饶平县和汕头澄海区交界的沿海地区登陆。登陆后移速进一步加快,并在福建省沿岸东北行,中心强度逐渐减弱,于18日17时在福建省宁德附近减弱为低气压。这个阶段台风等级逐渐降低,并且随着台风的移动,1点距离“珍珠”的距离越来越远,有效波高从1时的6.02 m,迅速降低到正常情况下的有效波高。

从图5—6中还可以看出,2点和7点的有效波高变化曲线与1点的有效波高变化曲线有相同的变化规律,也经历了上述四个阶段。因为2点和7点距1点的距离为30 km,均小于台风眼的半径43 km,所以2点和7点也先后经历了“珍珠”的从前眼壁到风眼中心区域再到后眼壁的变化过程。其有效波高值经历了升高、降低、再升高、再降低四个阶

段。7点位于台风中心区域的右半圈,由于风向和“珍珠”移动方向一致,移速和风速相互叠加,造成移动方向右半圈的风力较左半圈大,其产生的有效波高最大值略大于2点。

3—6点和8—14点距离“珍珠”路径上的1点均大于或等于60 km,大于风眼半径,即“珍珠”移动路径左边3—6点及移动路径右边8—14点均不经历台风眼中心区域,其有效波高的变化曲线与经历台风眼中心区域的1点、2点和7点有明显的不同。有效波高变化曲线只经历上升和下降两个阶段。曲线类似于向下开口的抛物线型,抛物线上的最大值出现在各选取点距台风路径最短距离的时刻,此时该选取点产生有效波高的最大值,且选取点距离台风中心越近产生的有效波高最大值越大(见图5—6)。

强台风“珍珠”沿NNE方向行进,首先影响到的是3—6点,有效波高随时间变化曲线在开始阶段陡峭上升,5点和6点最先接近“珍珠”中心区域,在17日17时曲线达到峰值点,其有效波高均为6.6 m;而之后4点和3点接近“珍珠”中心区域,在18时和19时其曲线分别达到各自的峰值点,有效波高分别为7.5 m和7.6 m。可见选取点与台风中心距离达到最小时产生的有效波高值最大,且随着距离的增大,有效波高呈现逐渐降低的趋势。强台风“珍珠”于18日凌晨2点在广东汕头澄海和饶平之间登陆,登陆后10小时3—6点的有效波高从5 m逐渐降低至2 m以下,距离台风中心越远的选取点有效波高值越小(见图5)。

强台风“珍珠”继续沿NNE(北东北)方向行进,17日24时中心区域接近1点位置,距离为60 km的8点的有效波高曲线首先达到峰值,其有效波高为7.1 m。之后9—14点的曲线依次达到各自的峰值点,随选取点距离台风中心越来越远,各点的有效波高最大值是依次降低的。图6与图5相比,移动路径右边8—14点达到有效波高最大值经历了16个小时,有效波高变化曲线的上升段表现为平缓上升;而移动路径左边3—6点达到有效波高最大值经历了9个小时,有效波高变化曲线的上升段表现为陡峭上升。

由于8—14点依次距离“珍珠”行进路径越来越远,各点的有效波高值是依次降低的。离台风移

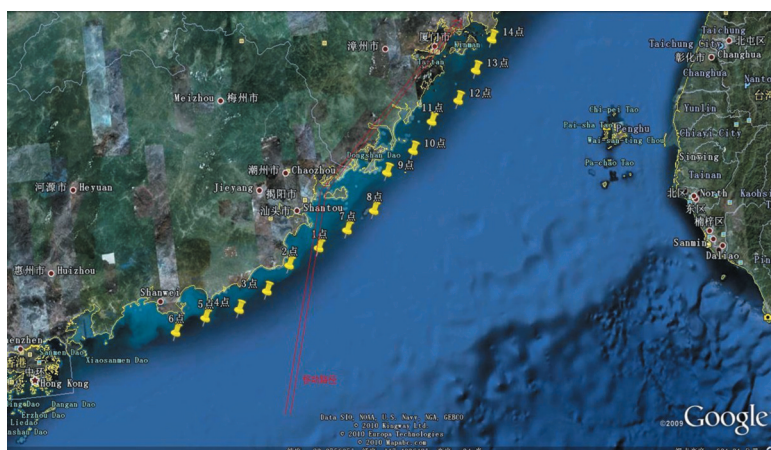


图4 选取点位置图

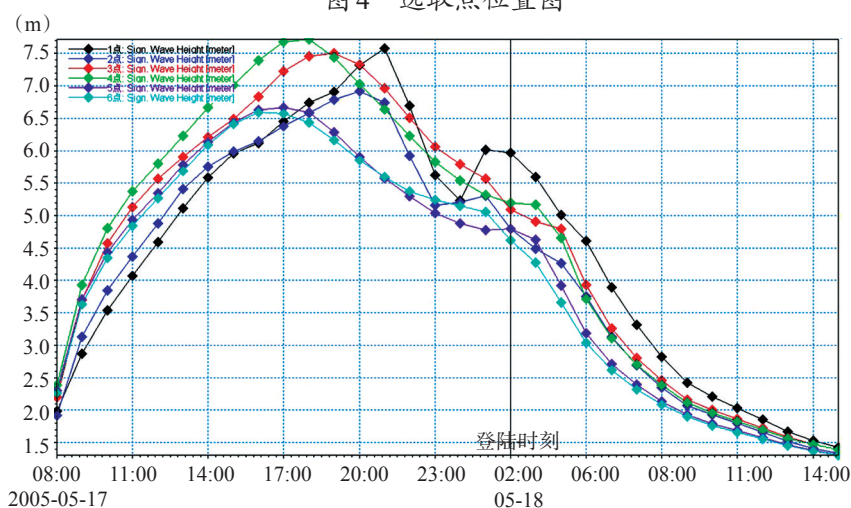


图5 强台风“珍珠”移动路径左边1—6点有效波高变化曲线

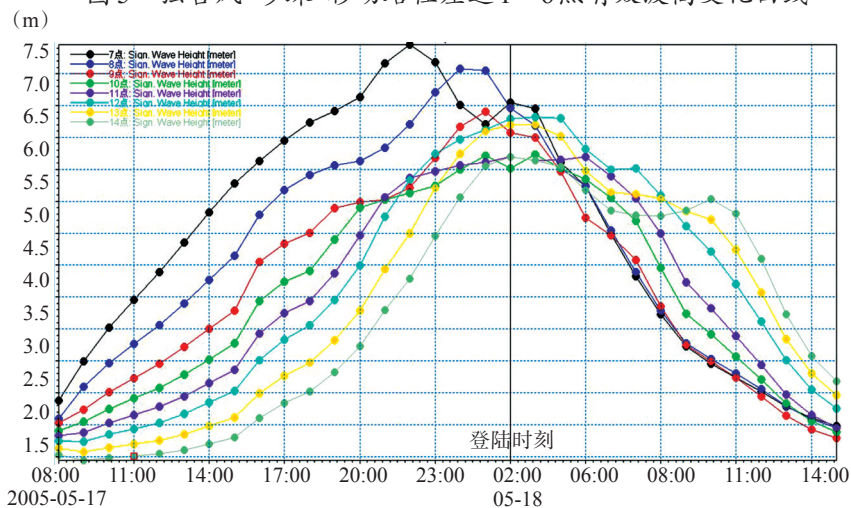


图6 强台风“珍珠”移动路径右边7—14点有效波高变化曲线

动路径最近的8点的有效波高最大值达到7 m，发生在17日24时。之后9—14点从18日1时至“珍珠”登录各点依次出现了5.5—6.5 m有效波高最大

值。“珍珠”登陆后，移动速度进一步加快，中心强度逐渐减弱，并在福建省沿岸东北行，又依次接近8—14点，接近时刻各点的有效波高变化曲线

有平缓的上升,然后再平稳的下降。见图6有效波高变化曲线下降段。

综上所述,强台风“珍珠”由于其特殊的路径,在登陆前9小时,移动路径左边汕尾至汕头之间近岸沿海-30 m等深线附近区域离台风中心的距离较近,有效波高率先达到最大值,属于危险区域。在登陆前2小时,“珍珠”临近岸边,移动路径右边汕头至厦门近岸沿海-30 m等深线附近区域的有效波高达到最大值,也属于危险区域。所以对强台风“珍珠”来说,无论其移动路径左边或者右边,十级风圈范围内均可能产生6 m以上的巨浪,不适于船舶航行或锚泊,船舶应优先选择十级风圈以外的避风锚地避风。

台风“珍珠”在行进过程中的有效波高数值模拟计算,得知台风浪场的有效波高在由眼壁处达到最大值,向外风力等级逐渐降低,有效波高值逐渐减小;自眼壁向内有效波高却有降低的趋势。

5 结论

本文利用目前国际上较先进的MIKE21 SW模型,对0601号强台风“珍珠”的台风浪进行了数值模拟计算,得到如下结论。

(1) MIKE21 SW模型模拟的强台风“珍珠”的有效波高与云澳海洋站($117^{\circ}5.959'E$, $23^{\circ}23.78'N$)和遮浪海洋站($115^{\circ}34.2'E$, $22^{\circ}39'N$)的观测资料吻合性较好。表明应用Graham和Nunn提出的台风经验公式计算的最大风速半径R,再输入台风风场的相关参数,借助MIKE21 SW模型模拟台风浪场的计算是可行的;

(2) 在台风眼中心区域的点其有效波高经历了升高、降低、再升高、再降低四个阶段;而在台风眼中心区域之外的点其有效波高只经历了升高和降低2个阶段。上升、下降;

(3) 在台风眼中心区域的台风浪是由眼壁处形成的波浪传播所致,是波高值较小,波向较复杂的海域;而在眼壁的外围区域,台风浪高与台风中心的距离成正比,距离越近产生的有效波高值越大。北半球台风前进方向右侧的波浪发展迅速,浪高增大较快,形成危险半圈。所以当台风临近时船舶应优先选择其路径的左半圈并尽量远离十级风圈;

(4) 由于台风的行进路径复杂、强度等级不同,而且台风浪由深水传至浅水时,岸边水深及地形复杂,波浪变化特征复杂化,特别是波浪的传播方向与深海有很大的差异,有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] Janssen P A E M. Wave induced stress and the drag of airflow over sea waves[J]. J Phys Oceanogr, 1989, 19: 745-754.
- [2] Janssen P A E M. Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting[J]. J Phys Oceanogr, 1991, 21: 1631-1642.
- [3] Hasselmann S, Hasselmann K. Computation and parameterizations of Non-linear Energy Transfer in a Gravity-wave Spectrum, Part 2: Parameterisations of non-linear energy transfer for applications in wave models[J]. J Phys Oceanogr, 1985, 15: 1778-1391.
- [4] 邓文君, 宋萍萍, 冯伟忠等. 强台风“珍珠”引发广东沿岸灾害性海浪调查分析[J]. 海洋预报, 2007, 24(2): 52-59.
- [5] 姬厚德. 台湾海峡及附近港湾的风浪场数值模拟研究[D]. 厦门大学硕士学位论文, 2007.

Numerical analysis on the offshore wave field induced by the strong typhoon “Pearl”

ZHAO Kai, LUAN Shu-guang, ZHANG Rui-jin

(Dalian Ocean University, DaLian Liaoning 116023 China)

Abstract: It has most important realistic significance that the research of typhoon and waves to ship navigation, shelter and the safety of the port, marine and coastal buildings. In this paper, based on the wave spectrum model with the wave refraction, bottom friction and wave breaking, full considering the wind forcing input, white capping, and quadruplet- wave interaction between such physical process, the waves' process by no. 0601 “pearl” typhoon, which attacked to the coast of Guangdong and Fujian provinces, is simulated. The calculated wave heights of the strong typhoon “pearl” are basically same to the wave observation data at Yunao ocean station and Zhelang ocean station. By analyzing the model output, we got the variation of effective wave height by the typhoon. It provides a kind of effective method for the wave simulation platform. It also provides important reference for the ship and port disaster-reduction.

Key words: wave spectrum model; wave field; significant wave height