

文章编号: 1000-2022(2002) 06-0779-08

湛江港邻近海域台风浪的模拟研究

陈 希¹, 沙文钰¹, 闵锦忠², 李 妍¹

(1. 解放军理工大学 气象学院 海洋气象教研室, 江苏 南京 211101;

2. 南京气象学院 气象灾害和环境变化开放研究实验室, 江苏 南京 210044)

摘 要: 对第三代近岸海浪数值模式 SWAN 及包含的物理过程进行了简要介绍, 利用该模式对影响南海湛江港海域的二次台风浪过程进行了模拟研究: 由藤田台风风场模型同化相应时刻的台风要素、NCAR/NCEP 网格点资料、单站观测资料后, 提供模式所需风场; 利用自嵌套的方式, 提供模式波谱边界条件; 两次模拟结果与实际海浪观测资料相符较好, 可以为该海域台风浪的模拟预报提供较为重要的参考。

关键词: 台风浪; 台风风场; 第三代近岸海浪模式; 数值模拟

中图分类号: P731.33 **文献标识码:** A

我国的海岸线较长, 经常遭受不同程度台风浪的袭击。研究表明^[1]: 由台风海浪引发的海难在我国年平均有 70 余次, 损失约 1 亿元, 死亡 500 人左右。在 1949—1982 年的 34 a 里, 仅被交通部门和海军救助的船只就达 6 295 艘次, 其中约 1 500 艘船的海难事故是狂风巨浪引起的; 另外, 从 1950—1987 年的 38 a 里, 我海军舰艇因海况条件造成的数百次事故中, 有 74 % 是由台风浪造成的, 可见台风浪对于经济建设和国防现代化建设影响极大。因此, 对于灾害性台风浪的正确估计与预报, 对于重点海域台风来临时海浪分布时空特征的了解、认识与研究具有重要的现实意义。

关于海浪的研究, 一般采用多种手段进行, 有统计的方法, 也有数值模拟研究的方法; 我国湛江港邻近海域, 地形、地貌复杂, 深度诱导波破碎、底摩擦作用、非线性波—波相互作用等物理过程在该海域作用显著, 用经验的方法来预报海浪显然有它的局限性, 对海浪生成的物理机制和物理过程也不能很好地进行了解、研究。基于能量平衡方程建立起来的第三代近岸海浪数值模式中, 各源函数的物理过程已研究得较为深入, 利用它对海浪的模拟和预报已成为可能。

因此, 本文利用该模式物理过程考虑得较为全面的特点, 用真实、合理的台风风场来驱动并模拟研究台风对湛江港邻近海域浪的影响, 对台风来临时该海域台风浪的预报意义重大。

1 物理过程

模式采用二维波作用密度谱平衡方程作为控制方程^[1], 具有如下形式

收稿日期: 2002-04-08; 改回日期: 2002-06-06

基金项目: 总参重点项目“军用码头、避风港风暴潮、流、浪的模拟研究”; [2000] 参作气字第 61 号

第一作者简介: 陈 希(1974-), 男, 重庆潼南人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 海洋环境及海气相互作用。

1) 参见 Delft 理工大学土木工程系 Holthuijsen 等编制的 SWAN 用户手册。

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x}(C_x N) + \frac{\partial}{\partial y}(C_y N) + \frac{\partial}{\partial \omega}(C_\omega N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(C_\theta N) = \frac{S}{\sigma}$$

$N = N(\sigma, \theta)$ 是波作用密度谱。方程左边项分别代表波作用密度的局地变化, 波作用密度在物理空间 x, y 方向上以 C_x, C_y 的速度传播, 在 σ (相对频率) 空间由于水深及流的变化而导致相对频率 σ 的转移以及由于水深及流的诱导而产生的折射传播等。方程右边是浪生成、耗散及波一波相互作用的源与汇项。下面简述该模式所包含的物理过程。

1. 1 风—浪间的相互作用

风生浪的计算方案采用 Phillips 1957 年提出的“共振”机制^[2]及 Miles 1957 年提出的平行流不稳定性风浪生成理论^[3]的结合形式。

1. 2 耗散作用

海浪成长、消亡过程中, 耗散机制作用显著, 它也是决定海浪能否充分发展的重要因素。该模式主要考虑 3 种耗散机制即: 白帽耗散、底摩擦作用及深度诱导波破碎所引起的能量耗散。

(1) 白帽耗散

海面在风的持续作用下, 风浪不断产生、发展, 其中一部分破碎, 波破碎直接形成海洋白帽, 白帽在海—气交换中起着重要作用。本文白帽耗散的表达式用 $S_w(\sigma, \theta)$ 来表示:

$$S_w(\sigma, \theta) = -\alpha \tilde{\sigma} \frac{k}{k} E(\sigma, \theta)$$

式中, $\tilde{\sigma}, k$ 分别表示平均频率和平均波数, α 是波陡系数, 依赖于所有波的波陡及风源函数计算方案。平均频率及平均波数的具体表达式如下

$$\tilde{\sigma} = (E_{\text{tot}}^{-1})_{00}^{-1} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sigma} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta^{-1},$$

$$\tilde{k} = (E_{\text{tot}}^{-1})_{00}^{-1} \int_0^{2\pi} \frac{1}{k} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta^{-2}.$$

式中, E_{tot} 代表波动总能量, $E(\sigma, \theta)$ 为波活动密度谱, k 为波数。

(2) 底摩擦

底摩擦作用与海底地形及粗糙度有关, 本文底摩擦物理过程计算方案选取 Hasselmann 的表达式^[4], 底摩擦系数取为 $0.038 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ 。

(3) 深度诱导波破碎作用

深度诱导波破碎取文献[5]的表达方式。水平方向上, 由于波破碎导致单位面积上能量的平均耗散率为

$$D_{\text{tot}} = -\frac{1}{4} \alpha_{\text{bl}} Q_{\text{b}} \left(\frac{\tilde{\sigma}}{2\pi} \right) H_{\text{m}}^2.$$

其中, $\alpha_{\text{bl}} = 1$, $\tilde{\sigma}$ 为平均频率 (同上定义), H_{m} 为给定深度的最大波高, Q_{b} 是由破碎的波所决定,

$E_{\text{tot}} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} E(\sigma, \theta) d\theta d\sigma$ 。由于深度诱导波破碎主要是由波活动密度谱 $E(\sigma, \theta)$ 以及 D_{tot} 所决定的, 因此, 波破碎源函数的表达式可写为 $S_{\text{b}}(\sigma, \theta) = -D_{\text{tot}} \frac{E(\sigma, \theta)}{E_{\text{tot}}}$ 。

1. 3 非线性波—波相互作用

波浪从风中获得能量后增长, 其能量又在不同波之间再分配。因此, 波—波相互作用是海浪生成、成长的重要机制。同时考虑三波和四波间的相互作用。四波相互作用的计算较为复杂,

本文采用 Hassenlmann 所提出的方案^[6], 而三波相互作用则根据 Eldeberky 的方案获得, 并利用 LTA (Lumped Trida Approximation) 的方式求解^[7]。

1.4 台风风场

对台风浪的模拟, 台风风场正确、合理的给出十分重要。本文台风风场是在经典藤田台风风场模型中引入相应时次台风特征等压线, 并由对应时次的 NCAR/NCEP 网格点资料提供台风背景风场, 同时辅以同时段的单站(硃洲岛) 风场观测资料进行同化所得。

2 模式波谱边界条件的提供

在湛江港邻近海域台风浪的模拟研究中, 模式所需边界条件通过自嵌套获得: 首先选取分辨率为 $15 \text{ km} \times 16 \text{ km}$, 范围为 $(109.070 \sim 120.608 \text{ E}, 3.070 \sim 22.560 \text{ N})$ 的计算区域(以下简称 I 区), 通过 I 区模式运行结果提供嵌套区域 $(109.810 \sim 112.000 \text{ E}, 19.800 \sim 22.125 \text{ N})$ (以下简称 II 区) 的波谱边界条件, 然后以 $3.9 \text{ km} \times 4.3 \text{ km}$ 的分辨率计算 II 区的风浪场; II 区计算的结果提供湛江港内计算范围为 $(110.252 \sim 110.715 \text{ E}, 20.902 \sim 21.407 \text{ N})$ (以下简称 III 区) 的波谱边界条件, 然后以 $400 \text{ m} \times 400 \text{ m}$ 的空间分辨率计算 III 区的风浪场。模式时间积分步长在 I、II、III 区都取为 120 s 。

3 湛江港海域台风浪模拟

为了检验该模式对湛江港海域台风浪的模拟能力, 选取袭击湛江港邻近海域的 7513 号台风和 8907 号台风过程进行模拟研究。选择这两个台风过程是因为 7513 号台风是较为典型的北上型, 而 8907 号台风过程是较为典型的西北型, 对这两个台风浪过程进行模拟研究具有较好的代表性。

图 1 是 7513 号及 8907 号台风路径示意图, 该图中 7513 号台风的起始时间为 1975 年 10 月 3 日 14 时, 此时台风中心位于 $113.000 \text{ E}, 14.600 \text{ N}$; 终止时间为 1975 年 10 月 6 日 14 时, 此时的台风中心位于 $113.500 \text{ E}, 24.200 \text{ N}$; 8907 号台风的起始时间为 1987 年 7 月 8 日 20 时, 中心位置为 $122.000 \text{ E}, 16.700 \text{ N}$; 到 1987 年 7 月 11 日 20 时为止, 台风中心位置为 $107.000 \text{ E}, 22.000 \text{ N}$ 。图中台风中心位置时间间隔为每天的 02, 08, 14, 20 时, 箭头代表台风的移动方向。从该图可以清楚地看出 7513 号台风是典型的北上型路径, 而 8907 号台风起源于菲律宾东南部 $(130.000 \text{ E}, 14.500 \text{ N})$, 途经菲律宾, 直袭我国的海南岛, 然后在 $107.900 \text{ E}, 21.200 \text{ N}$ 登陆, 这是影响我国南海湛江港邻近海域典型的西北型路径。

模拟研究海域 III 区的范围及水深分布表明(图略): 该海区, 水深都在 100 m 以内, 且水深变化的梯度较大, 地形、地势较为复杂, 近岸海浪的各种物理过程在该海域作用较强。图 2 为模

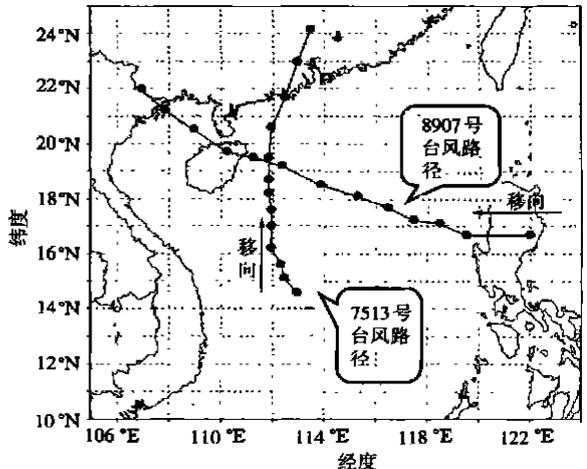


图 1 1975 年 13 号及 1989 年 07 号台风路径示意

Fig. 1 The sketch map of typhoon No. 8907 and No. 7513 tracks

拟研究海域 区(湛江港及邻近海域) 的计算范围和水深分布, 从中可以清楚地看到该海域为天然避风港, 港内的水深较浅, 一般在 20 m 内。

3.1 8907 号台风浪过程的模拟

利用前面提到的台风风场计算方案提供风场, 用以驱动该模式, 模式的物理过程包括四波相互作用、三波相互作用、白帽耗散、底摩擦效应、深度诱导波破碎等, 风—浪间的相互作用计算方案采用 Komen 的计算方案^[8], 模式时间积分步长为 120 s。对 8907 号台风浪过程, 模式从 1989 年 7 月 9 日 05 时开始积分, 到 1989 年 7 月 12 日 08 时共 75 h; 模式的边界条件由上述的自嵌套方案提供。该模式对外强迫等响应很快, 积分 3 小时后基本达到稳定。图 3 是同时次在藤田台风风场模型中加入了实际台风特征等压线, 并同化了站点资料、NCAR/NCEP 网格点资料后的台风风场分布, 图 4 是模式积分 36 h 后即 1989 年 7 月

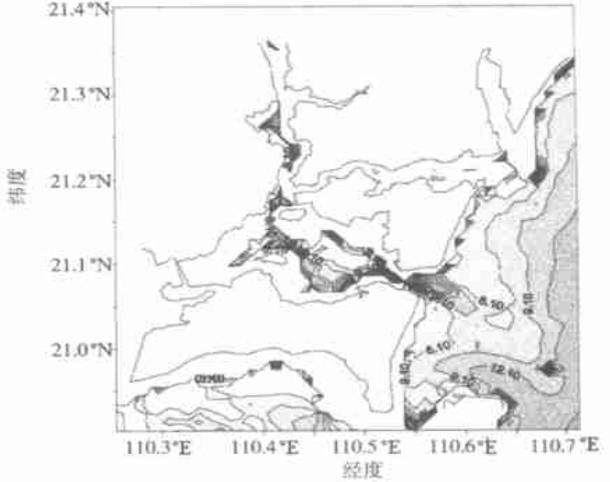


图 2 模拟海域(区) 的计算范围及水深分布(单位: m)

Fig. 2 Calculated range and water-depth distribution in simulated sea area (units:m)

10 日 17 时 区有效波高的模拟。对比两张图可知, 在 区, 最大浪高位于以 111. 200 E, 20. 200 N 为中心的海域, 最大浪高值超过 3. 9 m。而此时, 台风中心则位于 112. 000 E, 19. 000 ° N。由此可见, 最大台风浪高中心在近岸处不是由台风风场单独决定的, 而是众多因素的综合效果。

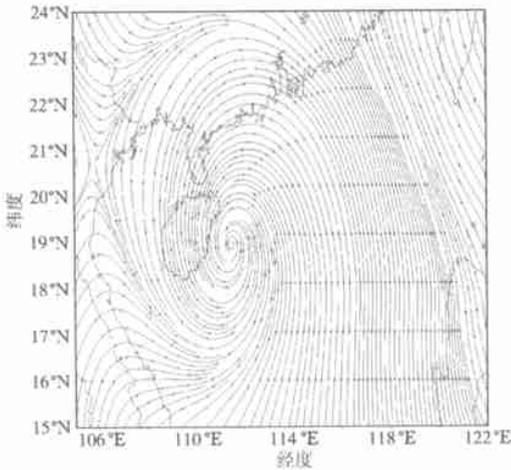


图 3 1989 年 7 月 10 日 17 时经过同化后的风场分布

Fig. 3 Distribution of assimilated wind field at 17: 00, July 10, 1989

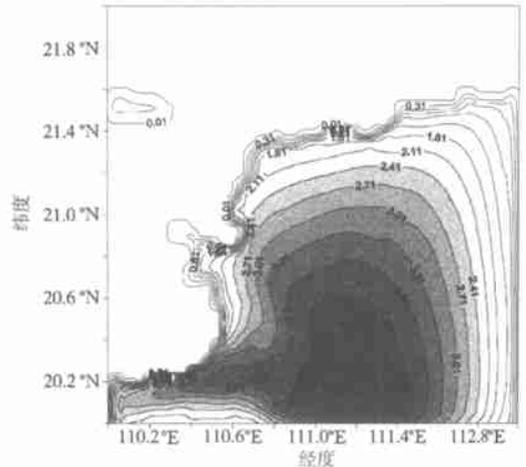


图 4 1989 年 7 月 10 日 17 时 区台风浪有效波高模拟(单位: m)

Fig. 4 Simulated wave height of typhoon at 17:00, July 10, 1989 in area

由图 4 可结合该海区的水深分布(图略)可知,在最大浪高中心的向北方向,地形深度变化梯度较小,与此对应,浪高的变化梯度也较小;而在最大浪高中心的西南、西北方向,水深变化梯度较大,相应海区模拟浪高的等值线分布密集,梯度变化也较大。由此可见,近岸地区地形对台风浪的影响较大。图 5 是 区模式积分 36 h 后的有效波高分布图,该图清楚地表明,港口内的浪高值较小,最大值不足 1.0 m,而港口外的浪高则超过 1.6 m,浪高在以 110.500 E, 21.080 N 为中心的海域衰减最快。这表明,该港口确实能够起到避浪的作用。对比图 2 可知,由于该港口的水深较浅,近岸海浪的生成、传播等物理机制在该海域的作用相当强烈,致使港口内的浪高值较小,由最大波高为 0.8 m 左右向岸边很快减小。

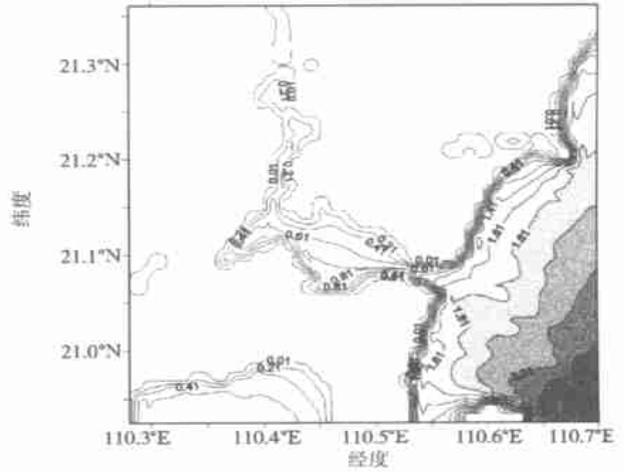


图 5 1989 年 7 月 10 日 17 时 区
台风浪有效波高模拟(单位:m)

Fig.5 Simulated wave height of typhoon
at 17: 00, July 10, 1989 in area

为了检验该次台风浪的模拟效果,选出位于 110.617 E, 20.900 N 的硃洲岛测站从 1989 年 7 月 10 日 08 时至 7 月 11 日 17 时 8 个观测记录的最大波高、平均波高与该海区模拟的有效波高进行比较(表 1),

模式输出的浪高为有效波高,有效波高 H_s 。由下述方程计算所得 $H_s = 4 \iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta$, 其中 $E(\omega, \theta)$ 为波活动密度谱。从表 1 中可以看出,对于该次台风浪的模拟结果,模式模拟的效果还是比较理想的。

表 1 8907 号台风硃洲岛海域模拟的有效波高与实测的最大波高、平均波高的比较

Table 1 Comparison of simulated wave height on Naozhou with
real maximum wave height and average wave height for typhoon No. 8907

时间	实测平均波高 / m	实测最大波高 / m	模拟有效浪高 / m
07-10T 08	0.3	0.4	0.22
07-10T 11	0.5	0.6	0.23
07-10T 14	1.1	1.1	0.92
07-10T 17	1.6	1.9	1.85
07-11T 08	2.1	2.7	1.86
07-11T 11	1.5	1.8	1.22
07-11T 14	1.4	1.6	1.12
07-11T 17	1.3	1.36	1.08

3.2 7513 号台风浪过程的模拟

从上面的分析可以看出,该模式及相应台风风场计算方案在模拟研究 8907 号台风浪的过

程中效果是理想的。为了更进一步验证该模式对台风浪过程的模拟效果,选取典型的北上路径袭击湛江港邻近海域的 7513 号台风过程进行模拟研究,7513 号台风与 8907 号台风都经过了以 112.000 E, 19.800 N 为中心的海域,研究两种不同台风过程路过同一海区时浪的分布状况是有意义的。

对 7513 号台风浪过程的模拟计算,采用模拟 8907 号台风浪时相同的台风风场计算方案、物理过程、模式边界条件及风—浪间相互作用计算方案和时间步长,模式从 1975 年 10 月 3 日 08 时开始,积分到 10 月 6 日 17 时共 81 h。为了方便起见,只分析台风中心与 8907 号台风(1989 年 7 月 10 日 17 时)位置相近的 1975 年 10 月 5 日 08 时的情况。图 6 是该时次同化后的台风风场分布,该图与图 3 比较表明:两个时次台风中心的位置是十分相近的,并在湛江港邻近海区台风环流形式具有相似的特征。

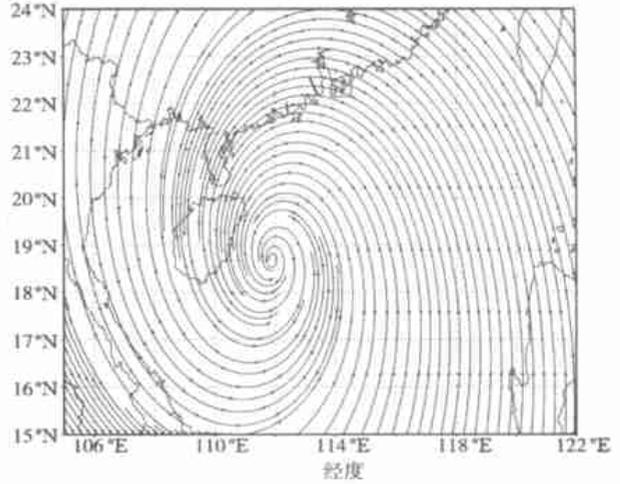


图 6 1975 年 10 月 5 日 08 时经过同化后的风场分布
Fig. 6 Assimilated wind field at 08:00, October 5, 1975

图 7 是模式积分 48 h 后,即 1975 年 10 月 5 日 08 时 区有效波高的模拟图。从该图中可以看出,在该海区台风最大浪高位于以 111.800 E, 20.800 N 为中心的海域,最大浪高超过了 8.0 m,而与此位置相对应的 8907 号台风 1989 年 7 月 10 日 17 时,在 区最大浪高位于以 111.200 E, 20.200 N 为中心的海域,最大浪高值为 3.9 m。可见台风风场及结构的复杂性对台风浪高的大小、台风浪高中心位置的影响都是极为显著。图 8 是模式积分 48 h 后 区有效波高模拟图,此时湛江港口内的台风浪高最大值超过了 1.5 m。

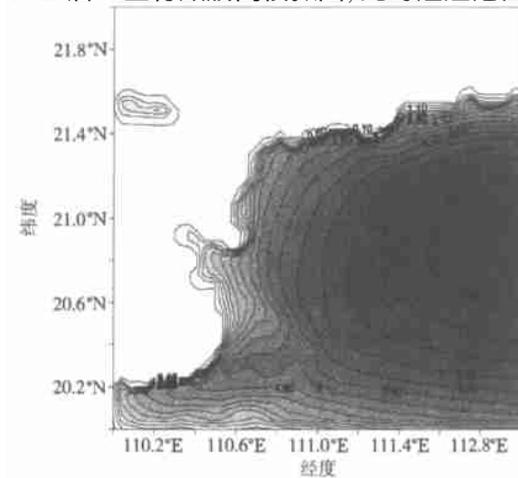


图 7 1975 年 10 月 05 日 08 时 区
台风浪有效波高模拟(单位:m)

Fig. 7 Simulated wave height of typhoon at 08:00, October 5, 1975 in area

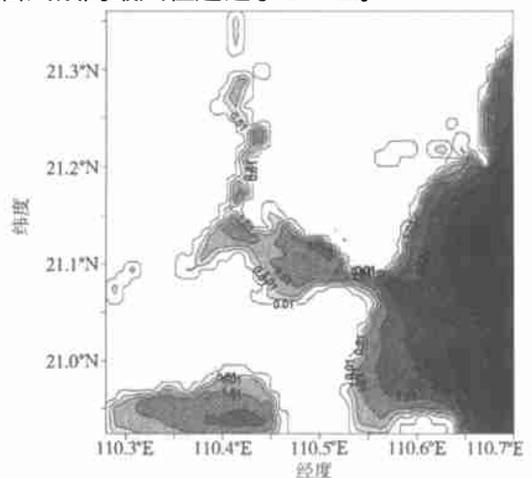


图 8 1975 年 10 月 05 日 08 时 区
台风浪有效波高模拟(单位:m)

Fig. 8 Simulated wave height of typhoon at 08:00, October 5, 1975 in area

对比上述结果表明: 最大台风浪高中心在近岸处不是由台风中心位置单独决定, 而是众多因素的综合效果。表 2 是 7513 号台风浪过程的模拟值、实测值的比较图, 从中可以看出, 模拟结果也是较为理想的。

表 2 7513 号台风硃洲岛海域模拟的有效波高与实测的最大波高、平均波高的比较

Table 2 Comparison of simulated wave height on Naozhou with real maximum wave height and average wave height for typhoon No. 7513

时间	实测平均波高 / m	实测最大波高 / m	模拟有效浪高 / m
10-04T 08	1.8	2.1	1.52
10-04T 11	1.3	1.5	1.33
10-04T 14	1.3	1.5	1.17
10-04T 17	1.3	1.5	1.06
10-05T 08	1.7	2.2	1.63
10-05T 11	1.5	1.8	1.32
10-05T 14	1.4	1.8	1.52
10-05T 17	1.4	1.8	1.03

4 结束语

本文基于物理过程考虑得较为全面的第三代近岸海浪模式, 利用藤田台风风场模型, 加上实际天气图的特征等压线, 并结合 N CAR/NCEP 再分析场资料、站点资料进行同化后的风场驱动该模式, 并利用自嵌套的方式提供模式的波谱边界条件, 对 8907 和 7513 号台风浪过程进行了模拟, 并与实测的台风浪进行了对比, 结果较为理想。同时, 比较了两次台风中心位于相近海区台风浪最大浪高的中心位置以及强度, 结果表明: 尽管台风中心位置近乎相同、台风流场结构极为近似, 但是, 所产生海浪的分布特征、浪高等要素由于风场结构、风力大小等的影响差别极大。

需要说明的是: 本文的模拟仅限于影响湛江港邻近海域的二次台风浪个例研究, 是否具有普遍的代表性, 还有待于作更多的个例进行研究说明; 另外, 本文模拟研究的对象也仅限于有效波高, 影响近岸海浪的物理过程对浪的其它要素的影响也是值得研究的。由于海浪实测资料的限制, 对海浪浪高模拟值的验证仅限于硃洲岛一个观测站, 还应当找更多的观测值与模拟值进行比较分析, 以便得出更为合理可信的结论。

参考文献:

- [1] 许富祥. 中国近海及其邻近海域灾害性海浪的时空分布[J]. 海洋学报, 1996, 18(2): 26-31.
- [2] Phillips O M. on the generation of waves by turbulent wind[J]. J Fluid Mech, 1957, 2: 417-445.
- [3] Miles J W. On the generation of surface waves by shear flow[J]. J Fluid Mech, 1957, 3: 185-204.
- [4] Hasselmann K. On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecap[J]. Boundary layer Met, 1974, 6(1): 107-127.
- [5] Battjes J A, Jansen J P F M. Energy loss and set-up due to breaking of random waves[J]. Proc 16th Int Conf Coastal Engineering, ASCE, 1978: 569-587.
- [6] Hasselman S K, Hasselman J H, Barnett T P, et al. Computations and parameterizations of the linear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part 1: Parameterizations of the nonlinear transfer for application in wave models[J]. J Phys

Oceanogr, 1985, 15(11): 1 378-1 391.

- [7] Eldeberky. Spectral modeling of wave breaking: Application to Boussinesq equations[J]. J Geophys Res, 1996, 101(11): 1 253-1 264.
- [8] Komen G J, Hasselmann S, Hasselmann K. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum[J]. J Phys Oceanogr, 1984, 14: 1 271-1 285.

A Simulation of Typhoon Waves near Zhanjiang Port

CHEN Xi¹, SHA Wen-yu¹, MIN Jin-zhong², LI Yan¹

(1. Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;

2. Key Laboratory for Meteorological Disaster and Environmental Variation Studies, NIM, Nanjing 210044, China)

Abstract: A simulative study is made to the process of two typhoon waves that affected the sea area near Zhanjiang port based on the third generation of nearshore-seawave numerical model SWAN. The wind field demanded by the model is provided after the corresponding typhoon elements, data at gridpoint of NCAR/NCEP, and measurements at individual station are assimilated by the virtue of Tengtian model of typhoon wind field. A boundary of the model's wave spectrum is obtained by the use of self-nested method. The results of the two simulations conform well to the observed data, which can provide an important reference for modeling forecast of typhoon waves on the sea.

Key words: typhoon wave; wind field of typhoon; the third generation of nearshore-seawave model; numerical simulation