

# 卫星高度计波高资料的同化试验分析

张志旭<sup>1</sup>, 齐义泉<sup>1</sup>, 施 平<sup>1</sup>, 李志伟<sup>2</sup>, 李毓湘<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 南海海洋研究所 LED 实验室, 广东 广州 510301; 2 香港理工大学, 香港)

**摘要:** 结合经验的台风风场模型和 NCEP 再分析资料构造了南海台风风场, 并以此作为一个第三代海浪模式的输入模拟了 1999 年约克(York)台风经过南海时所产生的台风浪场. 模拟结果显示, 尽管文中构造的南海台风风场比较接近真实的风场, 但模拟出的台风浪场相对于 TOPEX/Poseidon 高度计的观测波高仍有一定差异, 因此进而采用了一种简单的最优插值同化方法, 开展了波高资料的初步同化试验. 试验结果显示, 资料同化显著地改进了海浪模式的(后)预报精度, 而这种改进在涌浪区更加显著, 同化有效维持时间大约是 43 h.

**关键词:** 台风浪; 数值模拟; 高度计; 同化

中图分类号: P731.33

文献标识码: A

文章编号: 0253-4193(2003)05-0021-08

## 1 引言

从 Gelci 等<sup>[1]</sup> 1957 年明确采用二维波谱的基本传播方程到今日, 海浪的数值模拟已达到非常成熟的阶段<sup>[2]</sup>. 为进一步提高海浪场的预报精度, 利用同化技术将观测资料引入海浪模式以改进初始场的分析是重要途径之一, 而通常的传统观测资料, 如来源于船舶报、海洋站和浮标等的观测资料总是存在精度较低或者空间分布有限等缺点, 卫星微波遥感技术的发展, 为海浪的大面观测和资料同化提供了可能性. Komen<sup>[3]</sup> 首先利用一组 SEASAT 高度计资料描述了资料同化方法对改进波浪场模拟的有效性. Thomas<sup>[4]</sup> 结合第二代海浪模式探讨了波能转化方案, 并作为卫星遥感海浪资料的一种潜在应用对卫星资料同化做了一般性的分析. Haselmann 等<sup>[5]</sup> 和 Bauer 等<sup>[6]</sup> 利用 30 d 的 Seasat 高度计波高开展的全球资料同化尝试在卫星资料同化方面具有划时代的意义. 尽管在他们的同化方案中仅根据高度计波高与模式第一猜测波高之差来确定变化尺度, 其结果对涌浪占优的海域具有很好的效果, 但正是没有考虑风驱动误差的影响, 其同化方法对风浪效果不明显. Janssen 等<sup>[7]</sup> 利用高度计波高资料将海浪谱分成

收稿日期: 2002-10-09; 修订日期: 2003-05-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49976006); 中国科学院创新工程资助项目(KZCX2-202); 广东省基金资助项目(990314).

作者简介: 张志旭(1971-), 男, 山东省青岛市人, 硕士研究生, 从事物理海洋学研究. E-mail: zhangzx@scsio.ac.cn

©1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.>

风浪和涌浪两部分并同时考虑浪场和风场的修正,涌浪谱的调整是在保持谱形和谱峰频率不变的情况下通过改变能量尺度而实现,对风浪谱的修正采用了类似 Thomas<sup>[4]</sup> 的处理方法,即采用 JONSWAP 型的有限风时成长关系. 由于相邻的卫星轨道间距较大,或者说经过修正的海域范围较小,轨道间没有修正的波能就很快传播到被修正的海域范围,使同化的效果降低,所以 Janssen 等的同化方法的效果往往只能持续 1 d. 为发展可使卫星波浪资料用于业务化工作的同化方法, Lionello 等<sup>[8]</sup> 在 Janssen 等研究成果的基础上,通过调整修正量的影响范围和尺度因子,并采用相同于 Esteva<sup>[9]</sup> 和 Tomas<sup>[4]</sup> 提出的方法将卫星高度计资料用于分析波浪谱<sup>[4,9]</sup>,两组同化试验的结果显示,同化卫星资料可以很好地改正海浪模式的不足. 为充分发挥第三代海浪模式的优势, Bauer 等<sup>[10]</sup> 提出了一种格林函数同化方法,其基本思路是估计出线性化系统中与反映风场湍动平衡的谱能量相响应的脉冲响应(格林)函数. 在同化方面,有一种通过修正模式的控制变量而不是模式输出结果,使模式预报值适应于观测值的方法——伴随(adjoint)模式方法. 这种方法的基本概念是通过确定控制变量的变化来获得所期望的模式输出. 伴随模式方法在同化波浪资料方面已有许多成功个例<sup>[11,12]</sup>. 最近把 Hersbach<sup>[13]</sup> 将伴随方法应用于优化模式源函数项的有关参数,取得了很有启发意义的结果. 若伴随方法应用于较大的海域,则在实施过程中将会遇到所需计算工作量大的困难.

总的来说,目前的很多同化试验研究都是基于全球模式,而区域性的同化试验主要在观测资料较多的欧洲北海海域附近,在我国附近海域波高同化研究还处于起步阶段. 本文利用一个第三代海浪模式,采用最优插值方法,初步探讨 TOPEX/Poseidon 卫星高度计波高资料同化在南海海域的效果.

## 2 本文使用的海浪模式及有关数据

本文采用一个第三代海浪模式<sup>[14,15]</sup>. 该模式与通常的第三代海浪模式一样,除了考虑了风输入项、非线性相互作用和耗散项外,也考虑了浅水效应. 为提高计算效率,在模式中利用一种数字过滤技术来抑制计算不稳定性,海浪模式的控制方程如下:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(c_g \cos \theta F) + \frac{\partial}{\partial y}(c_g \sin \theta F) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \frac{c_g}{c} (\sin \theta \frac{\partial c}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial c}{\partial y}) F \right] = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bf}, \quad (1)$$

式中,  $F(f, \theta, x, y, t)$  是在  $t$  时、 $(x, y)$  点的谱密度;  $c_g$  为群速度;  $c$  为相速度; 右端是诸项输入源函数, 其中  $S_{in}$  为风输入源函数,  $S_{nl}$  为非线性相互作用源函数,  $S_{ds}$  为白冠耗散源函数,  $S_{bf}$  为底摩擦耗散源函数.

本文的地理空间网格采用了经度乘以纬度:  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  的分辨率,模式的计算时间步长是 5 min, 计算范围为  $0^\circ \sim 23^\circ \text{N}$ ,  $105^\circ \sim 122^\circ \text{E}$ . 在频率和方向的二维谱空间上,频率以对数分布分成 25 个,从 0.05 到 0.40 Hz, 方向的分段采用 12, 即  $30^\circ$  的分辨率. 初始场采用峰频为 0.3 Hz 的 JONSWAP 谱.

## 3 本文模式中输入风场的构造

模式中风场的计算方案为:通过一个权重系数,用 Holland<sup>[16]</sup> 经验台风公式计算台风风场和 NCEP(National Centers for Environmental Prediction) 的再分析风场相加得到,这样做既保

证了背景风场的可靠性,也提高了台风最大风速附近的分辨率. NCEP再分析风场的空间分辨率是纬度乘以经度:  $1.905^\circ \times 1.875^\circ$ , 利用插值得到时间步长5 min和空间分辨率  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的模式输入风场. Holland<sup>[16]</sup>经验台风风场由旋转风和台风中心移动产生的风场两部分构成,其中旋转风的计算公式为

$$V_g = [AB(p_n - p_c) \exp(-A/r^B) / (\rho r^B + r^2 f^2 / 4)]^{1/2} - rf/2, \quad (2)$$

式中,  $V_g$ 为离台风中心距离为  $r$ 处的旋转风速;  $f$ 为科氏力参量(地转参数);  $\rho$ 为空气密度;  $A, B$ 是两个系数,  $B = 1.1 + (980 - p_0)/120$ ,  $A = R_w^B$ ,  $R_w$ 是最大风速半径,本文利用经验的  $R_w$ 和7级风风速半径的关系得出,即  $R_w$ 是7级风速半径的1/10. 台风移动速度通过预报的台风中心的移动速度得到.

NCEP再分析风场和经验台风公式计算的台风风场通过权重系数  $e$ 相结合构造新输入风场,这样保证了两个风场的平滑过渡,两者结合的公式为

$$V_{\text{new}} = V_{\text{TY}}(1 - e) + eV_{\text{NCEP}}, \quad (3)$$

式中,权重系数  $e$ 的取法参考了文献[17],为

$$e = C^4 / (1 + C^4), \quad (4)$$

其中  $C = r / (10 \times R_w)$ .

## 4 同化方法简介

本文使用一种简单逐时同化方法对模式进行同化,即在有卫星观测资料的时刻,利用高度计观测到的有效波高值修正模式中相应时刻的海浪谱值的方法<sup>[6]</sup>. 这种方法通常称作最优插值方法. 具体为:以卫星资料测量点为中心,在一定的影响半径  $L$ 内(考虑到南海的空间尺度,  $L$ 取7个经纬距),通过系数  $c_{ij}$ 修正模式中相应网格点上的能量谱,即

$$F_{\text{new}}(f, \theta) = c_{ij}F(f, \theta), \quad (5)$$

式中,  $c_{ij} = (1 + W_{ij} \frac{H_A - H_M}{H_M})^2$ ,  $H_A$ 和  $H_M$ 分别代表卫星高度计资料测量点的波高和在该点通过插值求得的模式的波高,系数  $W_{ij}$ 由下式给出:

$$W_{ij} = 1 - R, \quad R \leq 1,$$

$$W_{ij} = 1, \quad R > 1,$$

其中  $R$ 为

$$R = \{0.5[(x_i/L_x)^2 + (y_i/L_y)^2]\}^{1/2},$$

$x_i$ 和  $y_i$ 分别代表在经度和纬度方向模式中网格点到卫星资料测量点的距离,  $L_x$ 和  $L_y$ 分别是经度方向的影响范围,取为7个经纬距. 由于在同化的时刻,卫星高度计资料沿地面轨道直线有许多点,因此某一计算网格点  $(i, j)$ 有可能在多个测量点的影响范围内,所以此  $(i, j)$ 点的  $c_{ij}$ 取离轨道直线最近的点求得,即用同化时对它影响最大的观测点求得.

本文同化试验采用的波高资料来源于美国和法国于1992年联合发射的 TOPEX/Poseidon 卫星高度计. 卫星的全球覆盖周期是10 d,轨道倾角大约为  $66^\circ$ ,有效波高的测量精度为0.5 m或10%,同时它也可以观测海面标量风速,风速的观测精度为1.7 m/s或  $10\%$ <sup>[18]</sup>.

## 5 试验结果的比较和讨论

计算选用 1999 年约克(York)台风, 约克在 1999 年 9 月 12 日于马尼拉东北部发展为一热带低气压, 向西移动, 横过吕宋岛北部, 进入南海后在 9 月 13 日增强为热带风暴, 然后向西北方向移动, 于 17 日前后在香港附近登陆, 台风移动路径见图 1. 模式计算时间为 9 月 13 日 17:00 到 9 月 17 日 05:00. 在此时间内 TOPEX/Poseidon 卫星有 5 条轨道通过计算海域(图 2), 轨道通过的具体时间见表 1.

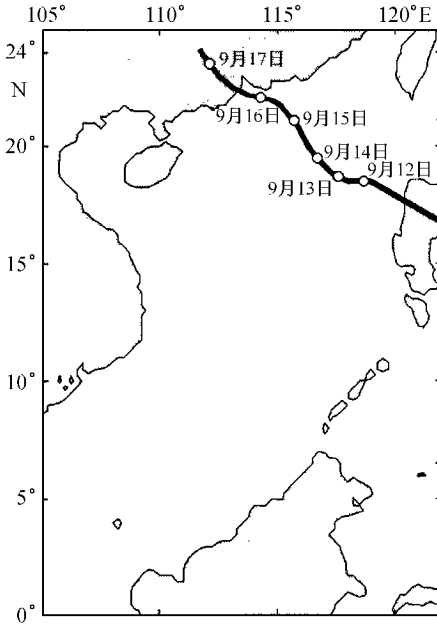


图 1 1999 年台风约克的移动路径

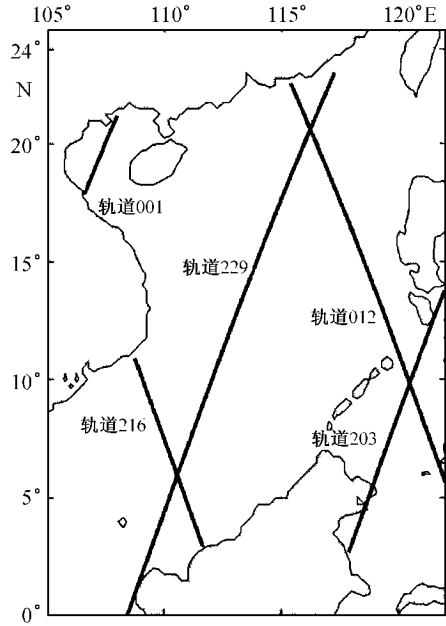


图 2 计算期间卫星轨道示意图

表 1 台风约克的期间经过的卫星高度计轨道及具体时间

轨道号	203	216	229	001	012
时间	9 月 13 日 19: 08	9 月 14 日 07: 13	9 月 14 日 19: 33	9 月 15 日 19: 54	9 月 16 日 06: 03

利用现场观测资料检验同化对下一时刻的影响程度和同化效果是最直接的方法, 但是在南海海域缺乏这种常规观测资料, 为此通过如下试验来检验同化的效果: 运行模式两次, 一次是不对模式进行同化, 一次是利用计算期间的 5 条轨道中的前 4 条的观测资料对模式进行同化, 保留最后一条, 即轨道 012 的数据不同化到模式中, 对两次试验的结果进行比较, 轨道 012 的观测资料作为实测资料检验同化效果.

因为轨道 229 和 012 经过台风中心附近, 所以与这两条轨道的观测资料比较更有意义. 图 3 是卫星高度计经过南海时星下点的轨道以及利用本文的方法构造的此时刻的风场矢量图, 此时台风中心位于  $20^{\circ}\text{N}$ ,  $116.5^{\circ}\text{E}$  附近. 为分析本文构造的风场的效果, 图 4 给出了此刻沿卫星高度计轨迹的几种风速的比较图. 由图 4 可以看出, 在台风中心附近约 200 km 范围内, NCEP 再分析风速很低, 而 Holland 台风模式在台风中心附近却较好地刻画了台风风场特

征;在距离台风中心较远的区域,NCEP再分析资料与高度计观测风速比较一致,而Holland台风模式的误差显然就很大.本文构造的模式风场利用了台风模式在台风中心附近风场较精确的特点,从而克服了NCEP再分析风场在台风中心因分辨率低所导致的误差较大的缺陷.由图4也可看出,沿轨道229新构造的风场在台风眼附近最大风速达到 $18\text{ m/s}$ 左右,而整个计算区域内的最大风速是 $19.1\text{ m/s}$ ,这与台风年鉴给出的此时刻的最大风速 $20\text{ m/s}$ 基本一致.

为了说明同化对初始场的影响效果,图5和6分别给出了考虑同化和不考虑同化情况下的波高断面分布和二维空间海浪场的分布.图5显示,海浪模式的模拟值(第一猜测值)要小于高度计观测值,但经过最优插值同化这一时刻的观测值后,相当于海浪场得到了重新初始化,而在卫星高度计星下点附近的模拟值得到了最大程度的修正,未同化的模式结果和高度计观测值的均方根误差是 $1.12\text{ m}$ ,同化后是 $0.31\text{ m}$ .图6

的结果显示,本文的最优插值同化明显地改变了二维空间海浪的分布形式.

图7分别给出了不同化和同化观测资料情况下模式在1999年9月16日06:00(轨道012通过时刻)的海浪场分布.由图可见,同化观测资料后对模式中34.5h后的海浪场仍有影响,这种影响主要反映在有效波高小于 $5\text{ m}$ 以上的台风外围,而对台风附近 $5\text{ m}$ 以上大浪区的影响较小,这个结果符合台风浪的性质,因为在台风中心附近的大浪区主要是风浪控制,风浪的大小主要决定于风速的大小.图8给出的轨道012的有效波高分布不仅揭示了图7同样的结果,而且与高度计有效波高相比较,同化和未同化的结果均小于观测值.

未同化模式和观测的均方根误差是 $0.78\text{ m}$ ,同化后在预报阶段(模式中同化最后一条轨道的观测资料以后的计算时间)是 $0.57\text{ m}$ ,说明同化有效地提高了预报的精度.同时也发现,未同化模式中沿轨道012的波高比沿轨道229的波高更接近实测,可能原因是模式中台风浪达到

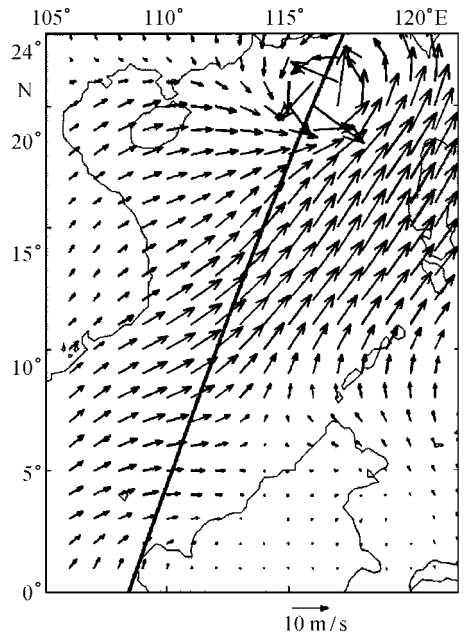


图3 轨道229经过南海时的海面风场

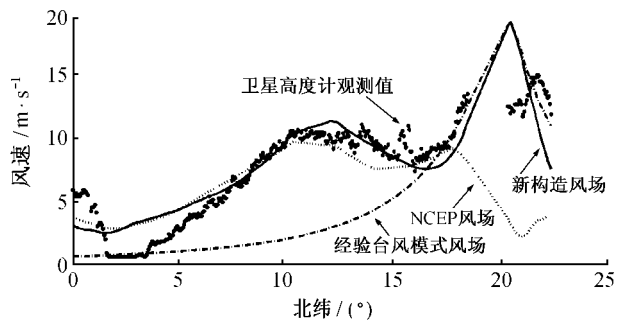


图4 沿轨道229风速的比较

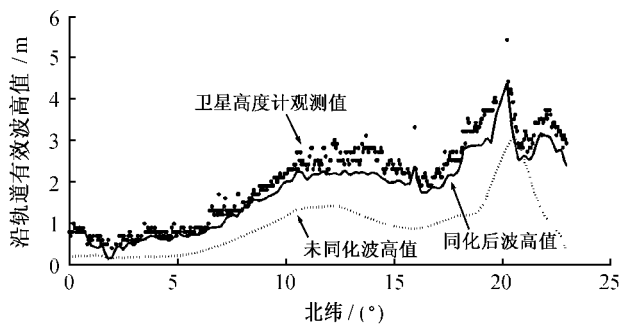


图5 沿轨道229的有效波高比较

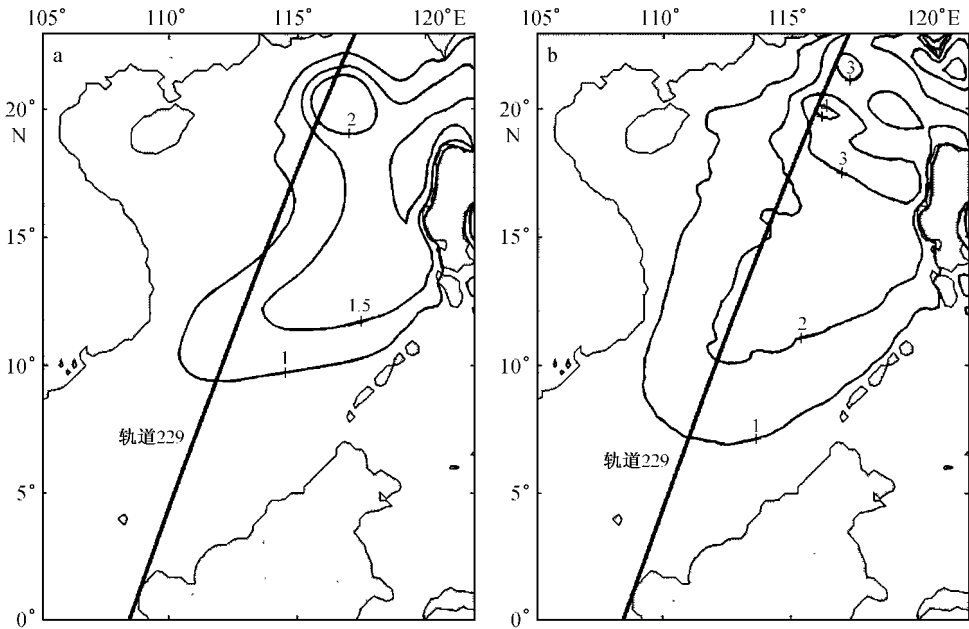


图6 轨道229通过时未同化(a)和同化后(b)模式输出波高场空间分布(等值线的单位:m)

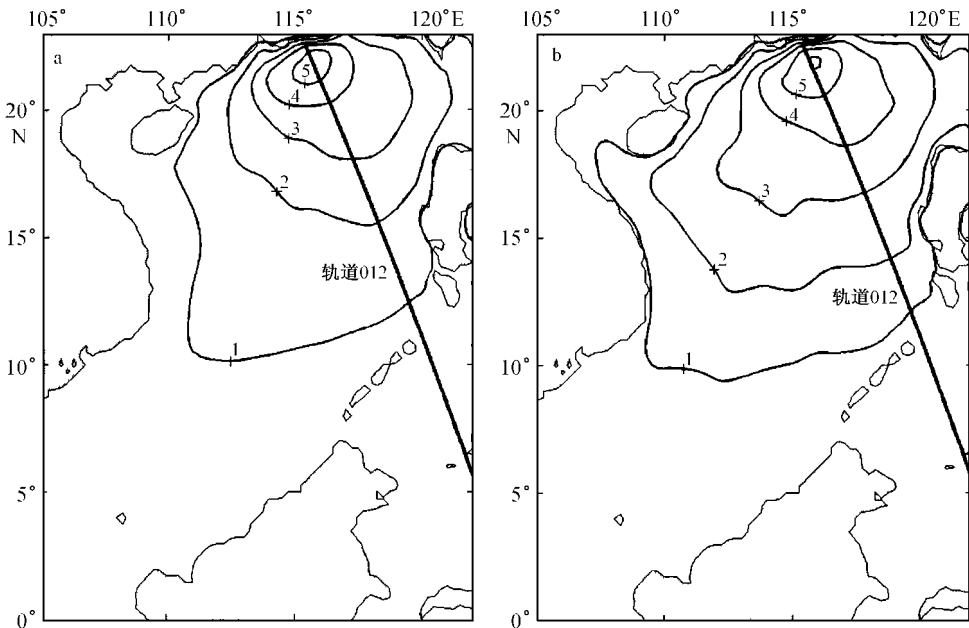


图7 轨道012通过南海时未同化(a)和同化后(b)模式输出的海浪场分布(等值线的单位:m)

充分成长需要运行较长时间,而模式运行到轨道229通过的時刻还未达到台风浪充分成长所需要的时间。

为了考察同化信息维持时间的长短,只把轨道229的资料同化到模式中,画两条全场平均波高的过程曲线,分别对应未同化和同化轨道229观测资料的结果(图9)。从图9可以看出,

从同化时刻的第 27 小时开始,

50%,  
70 小时, 2%,  
43 h. 9 还可以看  
出,

起到了既修正风浪也修正涌浪的作用,

### 6

南海台风风场的结构,

43 h.

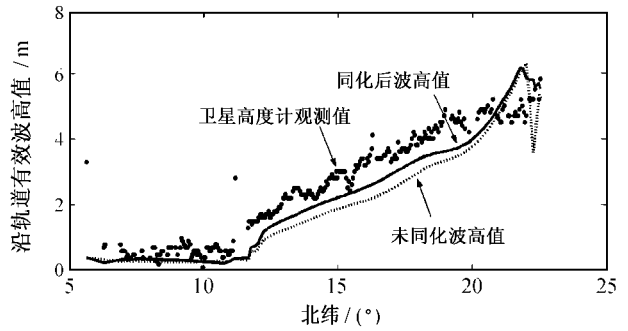
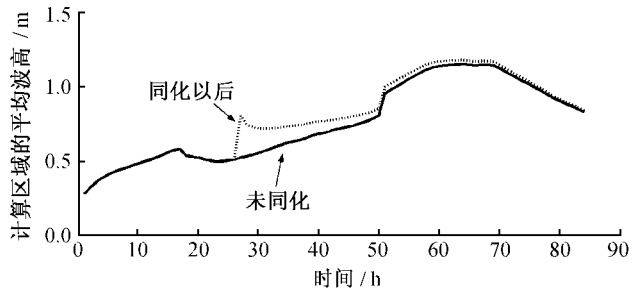


图 8 沿轨道 012 的有效波高比较



9 229 模式输出的平均有效波高过程曲线

NCEP 再分析风场构造的南海台风风场比较真实地反映了

[1]

[ 1 ] GELCI R, CAZALE H, VASAL J. Prevision de la houle. La méthode de s densites spectroangularires [ J ] . Bull Inform Comié Central Oceanogr, D' Etude Côtes. 1957, 9: 416—435.

[ 2 ] LIU P C, SCHWAB D J, JENSEN R E. Has wind-wave modeling reached its limit? [ J ] . Ocean Engineering, 2002, 29(1): 81—98.

[ 3 ] KOMEN G J. 1985 Introduction to wave models and assimilation of satellite data in wave models[ A ] . The Use of Satellite Data in Climate Models; Proc Alpbach Conference[ C ] . ESA.SP 244; ESA Publ. 1985. 21—26.

[ 4 ] THOMAS J. Retrieval of energy spectra from measured data for assimilation into a wave model[ J ] . Q J R Meteorol Soc, 1988, 114: 781—800.

[ 5 ] HASSELMANN K, HASSELMANN S, BAUERE, et al. Development of a satellite SAR image spectra and altimeter wave height data assimilation system for ER—1. ESA Report[ R ] . Hamburg; Max-Planck-Institute fur Meteorologie Nr. 19, 1988. 155.

- [6] BAUER E, HASSELMANN S, HASSELMANN K. Validation and assimilation of Seasat altimeter wave heights using the WAM wave model[J]. *J Geophys Res*, 1992, 97: 12 671—12 682.
- [7] JANSSEN P A E M, LIONELLO P, FEISTAD M, et al. Hindcasts and data assimilation studies with the WAM model during the Seasat period[J]. *J Geophys Res*, 1992, 94: 973—993.
- [8] LIONELLO P, GUNTHER H, JANSSEN P A E M. Assimilation of altimeter data in a global third-generation wave model [J]. *J Geophys Res* 1992, 97: 14 453—14 474.
- [9] ESTEVA D C. Evaluation of preliminary experiments assimilating Seasat significant wave heights into a spectral wave model [J]. *J Geophys Res* 1988, 93: 14 099—13 106.
- [10] BAUER E, HASSELMANN K, YOUNG I R, et al. Assimilation of wave data into the wave model WAM using an impulse response function method[J]. *J Geophys Res*, 1996, 101: 3 801—3 816.
- [11] VALK DE, CALKOEN C J. Wave Data assimilation in a Third-generation Wave Prediction Model for the North Sea[R]. Delft, Netherlands: Delft Hydraul Lab, 1989.
- [12] De las HERAS M M, JANSSEN P A E M. Data assimilation with a coupled wind-wave model [J]. *J Geophys Res* 1992, 97: 20 261—20 270.
- [13] HERBACH H. Application of the adjoint of the WAM model to inverse wave modeling[J]. *J Geophys Res* 1998, 103: 10 469—10 487.
- [14] LI C W, MAO M. Spectral modeling of typhoon-generated waves in shallow waters[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1992, 30(5): 611—622.
- [15] LI C W. A split operator scheme for ocean wave simulation[J]. *International Journal for Numerical Methods in fluids*, 1992, 15: 579—593.
- [16] HOLLAND G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes[J]. *Mon Wea Rev* 1980, 108: 421—427.
- [17] CARR III L E, ELSBERRY L. Models of tropical cyclone wind distribution and beta-effect propagation for application to tropical cyclone track forecasting [J]. *Mon Wea Rev*, 1997, 125: 3 190—3 209.
- [18] CALLAHAN P S, MORRIS C S, HSIAO S V. Comparison of TOPEX/POSEIDON sigma-0 and significant wave height distributions to Geosat[J]. *J Geophys Res*, 1994, 99: 25 015—25 024.

## Preliminary study on assimilation of significant wave heights from T/P altimeter

ZHANG Zhi-xu<sup>1</sup>, QI Yi-quan<sup>1</sup>, SHI Ping<sup>1</sup>, Li Chi-wai<sup>2</sup>, LI Yok-sheung<sup>2</sup>

(1. *LED, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China*; 2. *Department of Civil Structural Engineering, the Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China*)

**Abstract** Combining the NCEP re-analysis wind data with an empirical typhoon wind model, the wind fields are formed and compared with the TOPEX/Poseidon altimetric wind speeds, there is generally consistency between them. The wind fields are used to drive a third-generation wind wave model to simulate the wave fields in the South China Sea during the period of Typhoon York in 1999. The significant wave heights from the wave model are underestimated while compared with the TOPEX/Poseidon altimetric data. Then, a simple optimal interpolation assimilation technology is employed in the wave model, the result shows that the performance of the wave model is improved and its impact of assimilation is obvious especially in the swell part. The lasting time of the assimilation is about 43 h.

**Key words:** typhoon waves; numerical simulation; altimeter; assimilation