

# 全球海浪数值预报业务化试验

闻 斌<sup>1</sup>, 于福江<sup>2</sup>, 程 明<sup>1</sup>, 孙 龙<sup>1</sup>

(1. 总参气象水文中心, 北京 100081; 2. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘 要: 本文应用 WAVEWATCH 海浪模式, 进行全球海浪数值预报试验, 通过同期 TOPEX/Poseidon 卫星观测有效波高的检验, 获得令人满意的结果。在模式移植时采用多种优化处理, 有效地节约了机时, 为我国的全球海浪数值预报业务化打下基础。

关键词: WAVEWATCH 模式; 有效波高; 高度计资料; 全球海浪场; 业务化

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1003 - 0239 (2007)3 - 0006 - 10

## 1 引言

海浪是海洋中由风产生的波浪, 包括风浪及其演变而成的涌浪。它给航海、海上施工、渔业、海上军事活动、沿海的堤岸、港口码头和各类建筑物等带来巨大威胁和灾害。

海浪的数值模拟发展到 20 世纪末已达到比较成熟的阶段, 第三代海浪模式的特征是直接计算波-波非线性相互作用, 通过积分能量平衡方程, 并且不对谱形预加任何约束; 另一优点为能够处理风速、风向的骤然变化。全谱空间的第三代海浪数值模式 WAVEWATCH (以下简称 WWATCH) 主要用于大尺度空间波浪传播过程。该模式对过去模式的控制方程、程序结构、数值和物理的处理方法等作了改进, 使得该模式不仅在考虑波流相互作用和风浪物理机制方面更加合理, 而且利于采用并行计算技术, 从而提高模式的性能和效率。目前美国国家海洋大气管理局 (NOAA) 运用 WWATCH 分别建立了全球 (分辨率为  $1.25^\circ$  经度  $\times 1^\circ$  纬度) 和阿拉斯加海域、西北大西洋、东北太平洋、北大西洋飓风 (区域模式的分辨率都为  $0.25^\circ$  经度  $\times 0.25^\circ$  纬度) 等海浪业务预报系统, 并取得了很好的效果。我国的全球海浪数值预报的业务化还处于起步阶段, 本文应用 WWATCH 对全球海浪数值预报业务化运行的可行性进行了有益的探讨。

## 2 WWATCH 模式简介

### 2.1 模式的控制方程

WWATCH 的控制方程是使用波作用量密度谱, 即  $N(k, \theta) \equiv F(k, \theta)/\sigma$ 。因此, 波浪的传播方程就可以表示为:

$$\frac{DN}{Dt} = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

$S$ 代表与海浪谱有关的源和汇的总和。在球坐标下方程(1)的欧拉形式的平衡方程可写为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{\cos\varphi} \frac{\partial}{\partial\varphi} \phi N \cos\theta + \frac{\partial}{\partial\lambda} \dot{\lambda} N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k} N + \frac{\partial}{\partial\theta} \dot{\theta}_g N &= \frac{S}{\sigma} \\ \dot{\phi} &= \frac{c_g \cos\theta + U_\varphi}{R} \\ \dot{\lambda} &= \frac{c_g \sin\theta + U_\lambda}{R \cos\varphi} \\ \dot{\theta}_g &= \dot{\theta} - \frac{c_g \tan\varphi \cos\theta}{R} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $R$ 是地球半径; $U_\lambda$ 和 $U_\varphi$ 分别是平均海流在经、纬度方向的分量; $\lambda$ , $\varphi$ 分别为经、纬度。

## 2.2 模式的源函数项

WWATCH 源函数项用公式表示：

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

式中 $S_{in}$ 表示风能量输入项<sup>[1]</sup>, $S_{nl}$ 表示波-波非线性相互作用项<sup>[2]</sup>, $S_{ds}$ 表示耗散(白冠)项<sup>[3]</sup>, $S_{bot}$ 表示浅水区的底摩擦项<sup>[4]</sup>。

# 3 模式计算结果分析

## 3.1 模式设置

WWATCH 是在波数和方向的二维谱空间上计算的,采用频率分段方法即 $\sigma_{m+1} = X_\sigma \sigma_m$ ,由频率和频散关系换算出波数的各个格点值,这样,波数空间的网格随水深变化(水深的函数),因此克服了由于水深变浅带来的谱空间分辨率降低的问题<sup>[5]</sup>。本文 $X_\sigma$ 取值1.1, $m$ 取值25, $\sigma_0$ 取值0.0418,频率分布从0.0418~0.41Hz,波向分辨率为 $15^\circ$ 。传播计算步长、地理空间传播步长和内部谱的传播步长都采用900秒,源函数的积分时间步长为600秒<sup>[6]</sup>。模式的计算区域为 $180^\circ\text{W} \sim 180^\circ\text{E}$ , $80^\circ\text{N} \sim 80^\circ\text{S}$ ,地理空间分辨率为 $1^\circ$ (经度) $\times 1^\circ$ (纬度),相应的网格水深使用全球 $5^\circ \times 5^\circ$ 水深数据形成相应精度的水深数据。输入风场为2004年12月31日06时至2005年2月1日00时,NCEP一天4次再分析全球风场,风场的空间分辨率为 $0.5^\circ$ (经度) $\times 0.5^\circ$ (纬度),在进行数值计算时,海面风场将在时间和空间两个方向线性插值到模式每个时间步长及网格点上。模式由2004年12月31日06时的海面风场及JONSWAP谱初始化,计算结果采用网格输出,时间间隔为每小时一次。计算的时间区域同输入风场,其中前18个小时为启动阶段,对2005年1月1日00时至2005年01月31日23时结果被用来进行分析。

### 3.2 模式结果与高度计风浪观测资料的对比分析

从图上可以看出,太平洋北部和大西洋北部为大浪区,在南半球的  $40^{\circ} \sim 70^{\circ}\text{S}$  也是一个大浪区,其它海区波高较小。

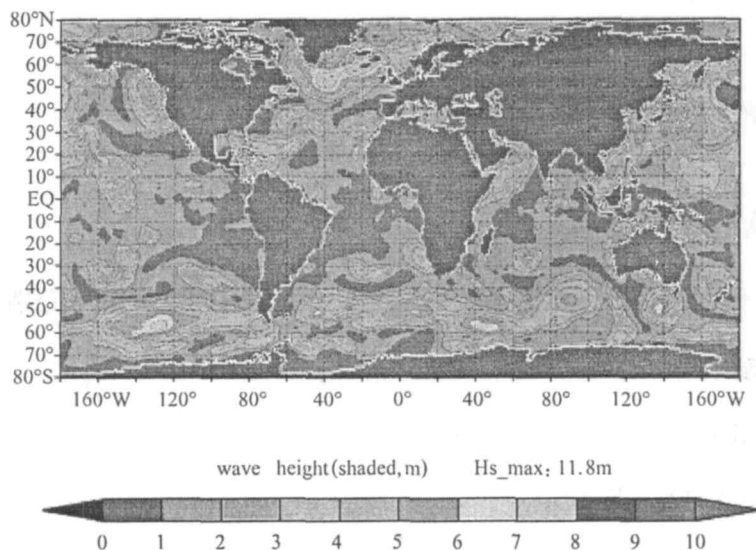


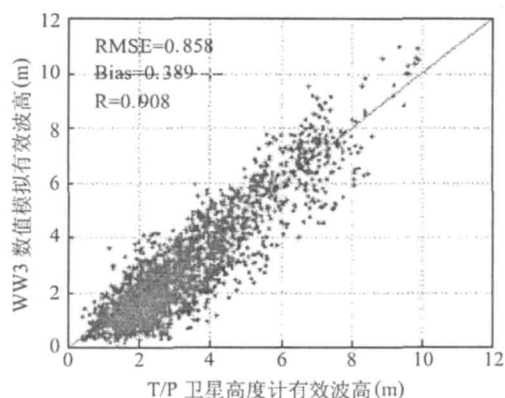
图 1 全球海浪数值模拟有效波高

图 1 为模式模拟的 2005 年 1 月 1 日 00 时的全球海浪有效波高图。在图中显示,太平洋北部和大西洋北部为大浪区,在南半球的  $40^{\circ} \sim 70^{\circ}\text{S}$  也是一个大浪区,其它海区波高较小。这和 1 月上旬全球海浪场的波侯特征是基本一致的。

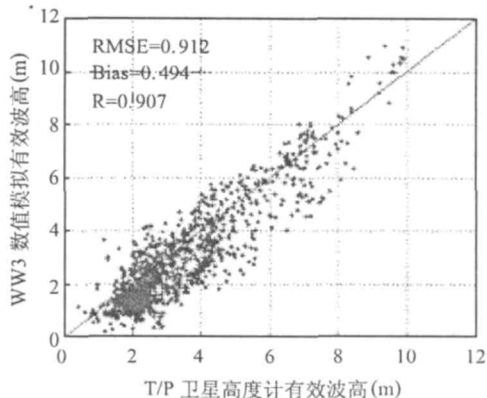
为了将后报结果与 T/P 卫星数据进行二维空间比较,首先将每一个网格内的模式后报结果进行四点平均,再对网格内同一时刻包含的所有卫星观测点的数据平均,最后得到网格平均的后报值和观测值。

图 2~5 分别给出了 2005 年 1 月 1、5、13、18 日模式后报值和高度计观测值的散布图以及对应的偏差(Bias)、均方根误差(RMSE)、和相关系数(R)。从图中可以看出,后报值和高度计的观测值相比有整体偏高的趋势,特别是在风时足够长以后,偏高趋势明显。每天的高度计观测值和后报值的均方根误差(RMSE)在  $0.5 \sim 0.8$  之间,偏差(Bias)以负为主,从他们的相关系数看,基本上都能达到或超过 90%,相对于高度计的观测精度,可以认为模式后报的结果与高度计的观测结果一致。

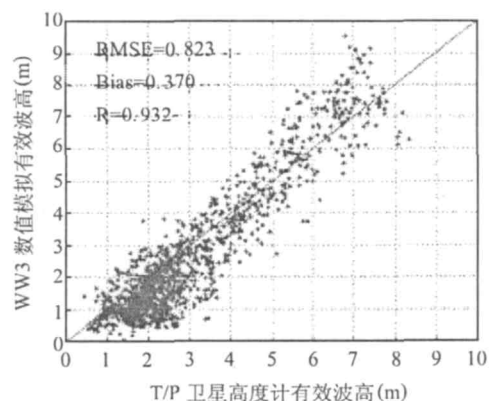
图中还显示,在较高海况时,模式后报值与高度计的观测值一致性较好,且后报的波高基本上为正偏差,可能反映了 WWATCH 模式在风时足够长的情况下,对较高海况的后报较好,但有整体偏高的趋势。



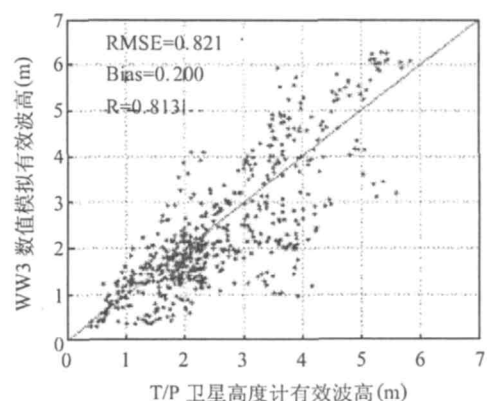
2005 年 1 月 1 日三大洋高度计波高与数值模拟的散布



2005 年 1 月 1 日太平洋高度计波高与数值模拟的散布

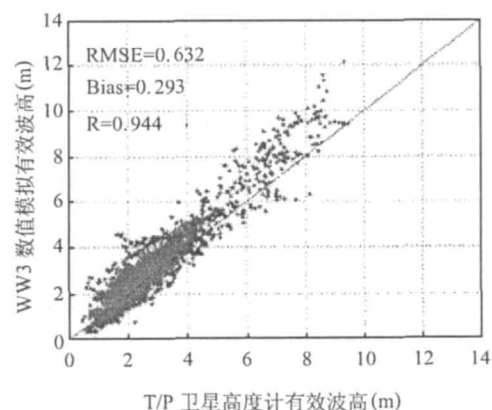


2005 年 1 月 1 日大西洋高度计波高与数值模拟的散布

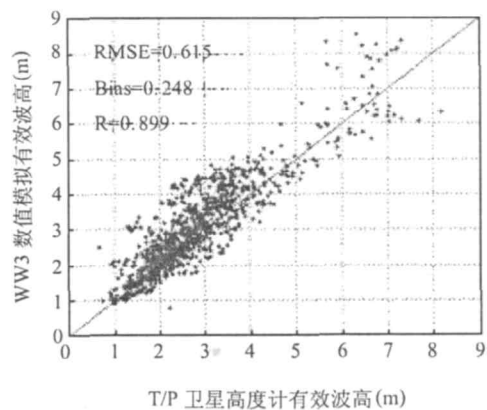


2005 年 1 月 1 日印度洋高度计波高与数值模拟的散布

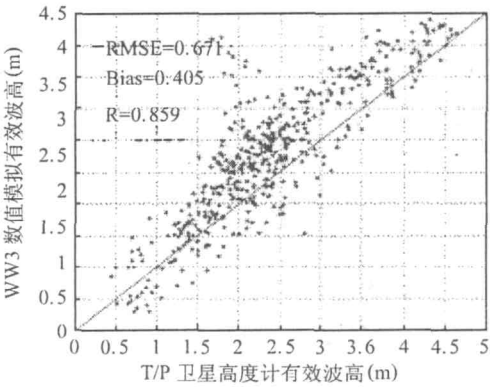
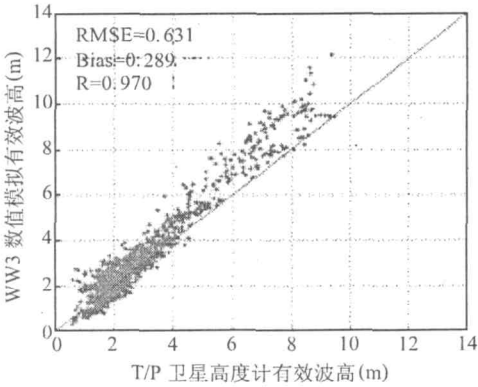
图 2 2005 年 1 月 1 日高度计有效波高和模式结果的散布



2005 年 1 月 5 日三大洋高度计波高与数值模拟的散布



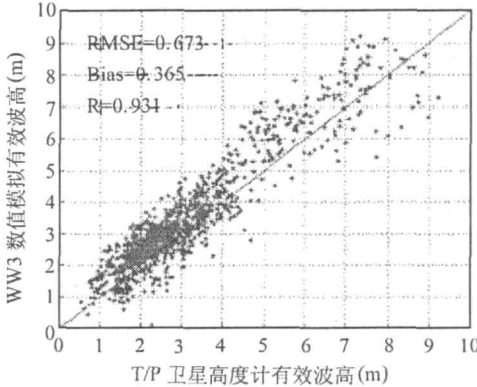
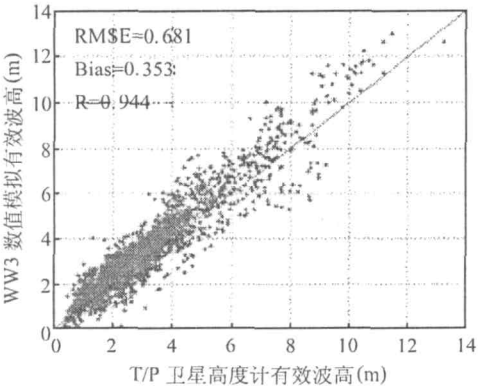
2005 年 1 月 5 日太平洋高度计波高与数值模拟的散布



2005 年 1 月 5 日大西洋高度计波高与数值模拟的散布

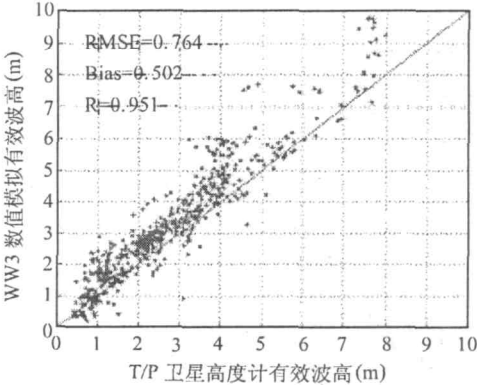
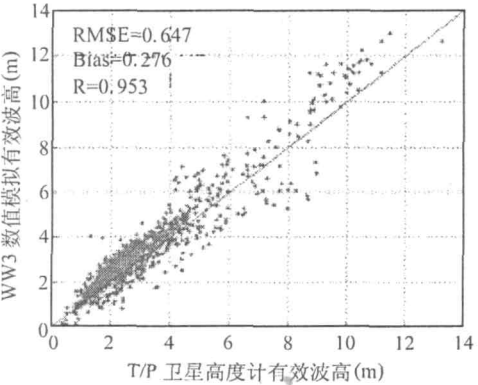
2005 年 1 月 5 日印度洋高度计波高与数值模拟的散布

图 3 2005 年 1 月 5 日高度计有效波高和模式结果的散布



2005 年 1 月 13 日三大洋高度计波高与数值模拟的散布

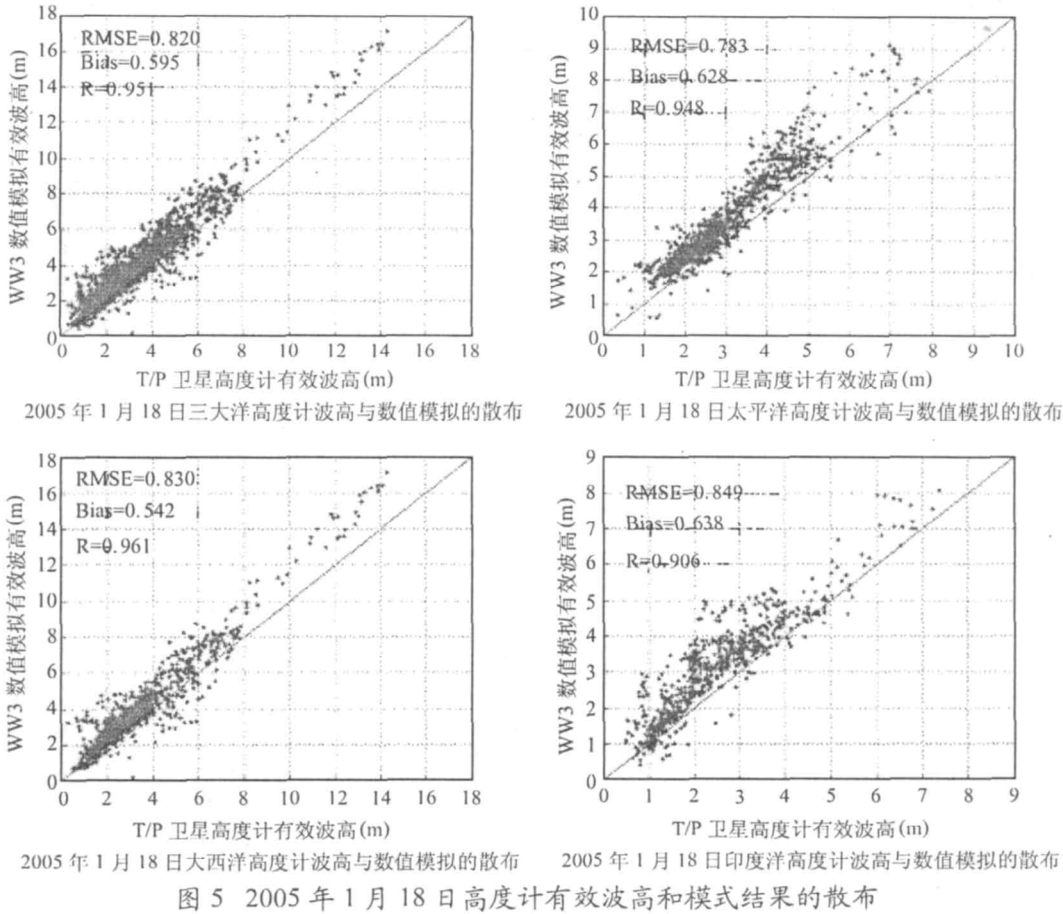
2005 年 1 月 13 日太平洋高度计波高与数值模拟的散布



2005 年 1 月 13 日大西洋高度计波高与数值模拟的散布

2005 年 1 月 13 日印度洋高度计波高与数值模拟的散布

图 4 2005 年 1 月 13 日高度计有效波高和模式结果的散布



从三个大洋的后报情况分析发现，模式对大西洋的海浪后报效果最好，对印度洋的海浪后报较差。图 6 为 2005 年 1 月份模式后报值和高度计观测值之间的相关系数，从图中可以看出，大西洋海域的相关系数较稳定，印度洋海域稳定性较差。

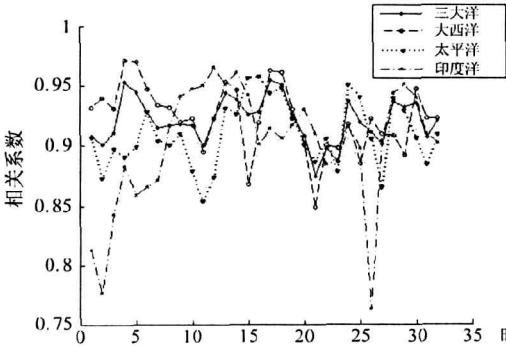


图 6 2005 年 1 月高度计有效波高和模式后报有效波高相关系数

表 1 为 2005 年 1 月模式后报值和高度计观测值之间的相关系数，可以看出，三大洋的海浪后报全月平均相关系数能够达到 0.92 以上，印度洋的后报最差相关系数月平均也能达到 0.90 以上。

表 1    WWATCH    后报值和高度计观测值相关系数

年	月	日	全球	大西洋	太平洋	印度洋
2005	1	1	0.908	0.932	0.907	0.813
2005	1	2	0.901	0.940	0.873	0.777
2005	1	3	0.911	0.931	0.897	0.843
2005	1	4	0.953	0.971	0.891	0.883
2005	1	5	0.944	0.970	0.899	0.859
2005	1	6	0.928	0.947	0.928	0.866
2005	1	7	0.915	0.934	0.904	0.872
2005	1	8	0.917	0.932	0.900	0.916
2005	1	9	0.918	0.920	0.910	0.941
2005	1	10	0.917	0.923	0.879	0.947
2005	1	11	0.900	0.895	0.854	0.950
2005	1	12	0.922	0.923	0.874	0.965
2005	1	13	0.944	0.953	0.931	0.951
2005	1	14	0.938	0.946	0.926	0.961
2005	1	15	0.926	0.868	0.956	0.942
2005	1	16	0.928	0.919	0.957	0.901
2005	1	17	0.954	0.962	0.943	0.914
2005	1	18	0.951	0.961	0.948	0.906
2005	1	19	0.925	0.930	0.922	0.917
2005	1	20	0.908	0.902	0.900	0.930
2005	1	21	0.875	0.849	0.886	0.910
2005	1	22	0.898	0.900	0.905	0.884
2005	1	23	0.886	0.898	0.878	0.888
2005	1	24	0.937	0.918	0.950	0.916
2005	1	25	0.919	0.885	0.940	0.897
2005	1	26	0.911	0.922	0.905	0.763
2005	1	27	0.901	0.910	0.865	0.904
2005	1	28	0.936	0.908	0.939	0.943
2005	1	29	0.932	0.892	0.929	0.951
2005	1	30	0.935	0.947	0.906	0.940
2005	1	31	0.907	0.923	0.884	0.910
月平均			0.9208	0.9229	0.9092	0.9019

图 7 是模式后报有效波高和高度计有效波高比较点相对误差频率分布图,可以看出在 10 万多个比较点中各点的相对误差主要分布在 10% ~ 20% 之间。

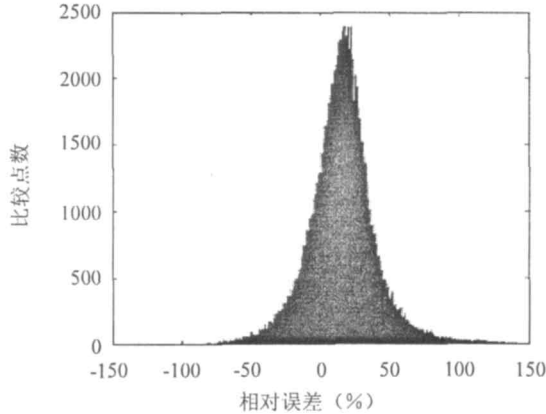


图 7 模式后报有效波高和高度计有效波高相对误差和绝对误差频率分布

## 4 模式优化处理

模式的普遍适用性、可移植性和计算所耗费时间的多少是能否业务化运行的一项重要内容。为便于模式在单台微机上运行,将模式从 Linux 操作系统下移植到 Windows 操作系统下;为尽量减少耗时,分别采用了 Compaq 和 Intel 的 Fortran 编译器对源程序进行编译,并对程序进行优化;OpenMP 作为共享内存结构的编程标准,具有良好的性能和可移植性,在模式的并行试验中,采用了 OpenMP 并行算法。

从模式的耗时来看(见表 2),其中,西北太平洋所指的计算区域是  $105^{\circ} \sim 155^{\circ}\text{E}$ ,  $10^{\circ} \sim 45^{\circ}\text{N}$ ,所采用的驱动风场是由国家海洋环境预报中心 MM5 提供的 72h 预报风场,加上前 12h 的启动阶段共 85 个时次,预报风场每一个小时输出一次,风场的空间分辨率为  $0.5^{\circ}$ (经度) $\times 0.5^{\circ}$ (纬度);模式的地理空间分辨率和风场相同。全球海域所指的计算区域是  $180^{\circ}\text{W} \sim 180^{\circ}\text{E}$ ,  $80^{\circ}\text{S} \sim 80^{\circ}\text{N}$ ,地理空间分辨率为  $1^{\circ}$ (经度) $\times 1^{\circ}$ (纬度);所采用的驱动风场是由中国气象局 T213 提供的 72h 预报风场,预报风场每三个小时输出一次,风场的空间分辨率为  $0.5625^{\circ}$ (经度) $\times 0.5625^{\circ}$ (纬度)。模式的计算步长、海浪谱网格设置和前面设置的一样,在计算结果完全相同的情况下,采用 Intel 的 Fortran 编译器对源程序进行编译后的模式计算西北太平洋海域海浪比在 Linux 操作系统下模式运行的时间几乎减少一半。采用并行算法时,如果是在双 CPU 的单机工作站运行,比在单 CPU 微机上运行耗时正好减少一半。使用国家海洋环境预报中心的 IBM-P690 计算机,只用单节点的 8 个 CPU,模式模拟西北太平洋海域的海浪在 2 ~ 3 分钟时间之内就能完成,而模拟全球海域的海浪也只需要十几分钟。



表 2 不同情况下模式耗时结果比较

		耗时	
		西北太平洋 ( 85 个时次, 地理空间分辨率 0.5°×0.5° )	全球海域 ( 73 个时次, 地理空间分辨率 1°×1° )
Windows 操作系统	Compaq Fortran 编译器	1915.91 秒	12020.21 秒
	Intel Fortran 编译器	1114.56 秒	8790.54 秒
Linux 操作系统		2055.31 秒	12974.25 秒
IBM-P690 计算机 ( 8 个 CPU )		150.61 秒	932.32 秒

5 结论

应用 WWATCH 海浪模式，对全球海浪进行连续不间断一个月的后报试验，通过与同时次卫星高度计有效波高观测资料比较，两者的相关系数达到或超过 0.9。同时，将海浪模式从 Linux 操作系统下移植到了 Windows 操作系统下，并采用多种优化处理和并行计算，有效地提高了模式的性能和效率，为全球海浪数值预报的业务化运行打下了良好的基础。

参考文献：

[1] Tolman H L and Chalikov D. Source terms in a third-generation wind-wave mode [J]. Phys Oceanogr, 1996 , 26 : 2497-2518.

[2] Webb D j. Non-linear transfers between sea waves. Deep-sea Res, 1978 , 25 : 279 ~ 298.

[3] Resio D T and Perrie W. A numerical study of nonlinear energy fluxes due to wave-eave interactions. Part 1 : Methodology and basic result [J]. Journal of Fluid Mechancis, 1991 , 223 : 609 ~ 629.

[4] Toloman H L. A third-generation model for wind waves on slowly varying unsteady and inhomogeneous depths and currents [J]. Journal of Physicals Oceanography, 1991 , 21 : 782 ~ 797.

[5] Tolman H L and BOOIJ N. Modeling wind waves using wavenumber-direction spectra and a variable wavenumber grid [J]. Global Atmosphere and Ocean System, 1998 , 6 : 295 ~ 309.

[6] User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version2002 , 2 : 22.

## A Operational Experimentation on the Numerical Modeling Wave Heights over the Global Ocean

WEN Bin<sup>1</sup>, YU Fu Jiang<sup>2</sup>, SUN Long<sup>1</sup>

(1. Hydrometeorological center of the general staff, Beijing 100081 China ; 2 . National Marine Environmental

Forecasting Center, Beijing 100081 China)

**Abstract :** Abstract In this paper, the numerical experiments were conducted on the global wave by use of ocean wave model WAVEWATCHIII. Verified against observations, the significant wave heights (SWH) from TOPEX/Poseidon altimeter were well reproduced. Optimized ocean wave model, and the computer time is saved effectively. This work can be regarded as the preliminary effort for operational application of WAVEWATCH III wave model in China.

**Key words :** WAVEWATCH model ; significant wave heights ; altimeter data ; global ocean wave ; operational