

## WAVEWATCH III模式在全球海域的数值 模拟试验及结果分析

吴萌萌<sup>1</sup>, 王毅<sup>1,2</sup>, 万莉颖<sup>1,2</sup>, 秦英豪<sup>1</sup>, 蔡琼琼<sup>1</sup>

(1.国家海洋环境预报中心,北京 100081; 2.国家海洋局海洋灾害预报技术研究重点实验室,北京 100081)

**摘要:** 基于第三代海浪数值预报模式 WAVEWATCH III(v3.14), 构建了全球区域海浪数值预报系统, 采用 1999 年 9 月—2009 年 7 月的 QuikSCAT/NCEP 混合风场作为驱动场, 对模式进行了 10 a 的积分。利用 NDBC 浮标数据及 Jason-1 卫星高度计资料对模式模拟结果进行了检验, 结果表明: 模式对全球海浪模拟效果较好。通过对模式误差的分析, 为后续开展全球海浪同化工作中背景误差协方差矩阵的构建及集合样本的选取提供了依据。

**关键词:** WAVEWATCH III; 背景误差; NDBC; Jason-1; 全球海浪

**中图分类号:** P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2016)05-0031-10

### 1 引言

海浪是一种复杂的海水波动现象, 与我们的生产、生活密切相关, 也是重要的海洋灾害因素之一。由于观测资料的匮乏和海浪的重要性, 海浪数值预报一直受到人们的密切关注。为了减少海浪灾害, 从 19 世纪开始人们就着手研究如何科学地预报海浪。我国对海浪理论及预报的研究始于新中国成立时期<sup>[1]</sup>, 是海洋预报业务中开展较早的项目之一。国家海洋环境预报中心从“七五”、“八五”开始, 历经“十五”、“十一五”、“十二五”, 海浪数值预报技术取得突破性进展, 预报范围也从西北太平洋扩展到全球、三大洋以及重要海上交通通道。

目前, 国家海洋环境预报中心已经建立了基于 WAVEWATCH III(v3.14)模式的全球海浪业务化预报系统。WAVEWATCH III 海浪模式是美国国家海洋大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)开发的第三代海浪数值模式<sup>[2]</sup>。该模式是在荷兰 Delft 大学发展的

WAVEWATCH I<sup>[3]</sup>和美国航空航天局 Goddard 空间飞行中心发展的 WAVEWATCH II<sup>[4]</sup>的基础上开发的波数谱模式。WAVEWATCH III 模式采用了与其他第三代海浪模式不同的物理过程, 数值方法上采用了精度较高的三阶差分格式, 并发展了一种空间平均法解决 GSE 效应, 适合于较大尺度的海浪预报。目前采用的 WAVEWATCH III 3.14 版本引进了多重尺度网格技术, 可以根据计算需要提高部分计算区域的空间分辨率, 能够反映出一些粗网格无法分辨的次网格地形, 可以较好的处理复杂岸线、岛屿对波浪传播的阻挡。

本文主要阐述研制 WAVEWATCH III(v3.14)模式全球海浪集合最优插值同化系统的前期工作。集合最优插值同化方法是由 Evensen<sup>[5]</sup>提出的作为集合卡尔曼滤波的次优方法, 以最优插值法为基础, 利用集合样本来估计背景误差。背景误差信息在资料同化中是至关重要的, 在开展同化前须对模式误差有充分的认识。为此, 本文基于 WAVEWATCH III(v3.14)海浪模式, 构建了全球区域海浪数值预报系统, 通过对模式多年积分结果的分析得到

收稿日期: 2015-07-28

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41406042); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2011CB403505); 热带海洋环境国家重点实验室开放课题(LTO1303)

作者简介: 吴萌萌(1989-), 女, 研究实习员, 硕士, 从事海浪数值预报及海浪同化研究。E-mail: wumm@nmefc.gov.cn

了有效的模式误差,为后续开展全球海浪同化工作中背景误差协方差矩阵的构建及集合样本的选取提供了依据。

## 2 方案设计及数据资料

### 2.1 方案设计

本文模式计算区域位于 $78^{\circ}\text{S}$ — $78^{\circ}\text{N}$ , $0^{\circ}$ — $360^{\circ}\text{E}$ ,南北向边界条件为零,东西向采用周期边界条件,模式空间分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 。波谱频率分布从 $0.0418\text{ Hz}$ 至 $0.4114\text{ Hz}$ 共24个频段,各频段关系为 $f^{n+1}=1.1\times f^n$ ,波向共24个,分辨率为 $15^{\circ}$ 。最大全局时间步长、地理空间及波数空间的CFL条件时间步长均为 $900\text{ s}$ ,最小源函数积分时间步长为 $300\text{ s}$ 。风能量输入方案采用Tolman和Chalikov参数化方案。主要物理过程包括风输入、耗散、非线性波-波相互作用,在近岸区域考虑了拍岸浪破碎和底摩擦等近岸物理过程(见表1)。

表1 模式的主要物理过程和算法选择

参数	WAVEWATCH III(v3.14)
线性成长	Cavaleri和Malanotte-Rizzoli参数化, Tolman截断
指数成长	Tolman和Chalikov参数化, 稳定边界层参数选择
四波相互作用	DIA参数化(Tolman调整)
深水波浪耗散	低频涡粘型、高频饱和型、 涌浪边界层经验拟合参数化
拍岸浪破碎耗散	Battjes-Janssen参数化
底摩擦	Jonswap参数化
平流算法	3阶交替隐式差分
GSE修正	Booij和Holthuijsen, Tolman平均、 隐式差分扩散

### 2.2 数据资料

#### 2.2.1 风场数据

本文模式驱动场采用QuikSCAT/NCEP混合风场(下载地址:<http://dss.ucar.edu/datasets/ds744.4/data>)。该风场是对高分辨率的QuikSCAT卫星散射计观测资料(QSCAT)及NCEP的分析数据进行时空混合分析,保留QuikSCAT沿轨风场数据的基础

上,在其空白区域加入低波NCEP分析场数据。混合风场给出的是距海平面 $10\text{ m}$ 高度处风场沿经向和纬向的速度分量,时间分辨率为 $6\text{ h}$ ,空间范围为: $180^{\circ}\text{W}$ — $180^{\circ}\text{E}$ , $88^{\circ}\text{S}$ — $88^{\circ}\text{N}$ ,空间分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ ,被广泛用于海浪模式的驱动场<sup>[6-9]</sup>。卫星观测从1999年7月19日开始,本文采用1999年9月—2009年7月的QuikSCAT/NCEP混合风场驱动WAVEWATCH III模式进行10 a的积分。

#### 2.2.2 NDBC浮标数据

本文用于检验的浮标资料来自于美国NOAA国家浮标资料中心(National Data Buoy Center, NDBC,网址:<http://ww3.ndbc.noaa.gov/>)。NDBC浮标可提供标准气象输出资料、连续风资料、海浪一维频谱资料等。标准气象输出资料包括风向、风速、气温、波高、波向等14个要素,其中波高为连续观测 $20\text{ min}$ 内所有波浪的 $1/3$ 大波平均波高。浮标在每个整点前 $20\text{ min}$ 开始工作,连续测量 $20\text{ min}$ 并于每个整点时记录一次数据。本文采用的是浮标观测风速及海浪有效波高资料。

#### 2.2.3 卫星高度计有效波高资料

本文所用的卫星高度计资料为Jason-1卫星高度计沿轨有效波高数据。Jason-1是Topex/Poseidon(T/P)的后继星,由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space, NASA)和法国空间研究中心(Centre National d'Etudes Spatiales, CNES)联合研制,于2001年12月7日发射升空。其搭载的Poseidon-2双频雷达高度计是一种星下主动式雷达,工作在Ku波段 $13.575\text{ GHz}$ 和C波段 $5.3\text{ GHz}$ ,通过向下发送脉冲信号,经地球表面反射后返回接收天线,分析返回脉冲的波形和强度从而反演出有效波高的信息<sup>[10]</sup>。轨道类型为太阳同步圆形轨道,重复周期为 $9.9156\text{ d}$ ,每个周期有254条轨道,可以覆盖纬度 $66.03^{\circ}\text{N}$ — $66.03^{\circ}\text{S}$ 的全球海域。赤道上的轨道间隔为 $315\text{ km}$ ,每条地面轨迹上相邻两采样点的空间间隔约为 $6\text{ km}$ ,时间间隔约为 $1\text{ s}$ 。

## 3 模式误差分析

用于检验的海浪数据是选取NDBC浮标观测有效波高和Jason-1卫星高度计观测有效波高数据。虽然浮标数据可信度高一些,但是浮标的位置

大多位于大西洋和太平洋,有很大的局限性,因此更系统的检验需要用到覆盖面更广泛的卫星高度计数据在全球范围内进行比较。

### 3.1 QuikSCAT/NCEP 混合风场检验

风场是海浪生成、发展的重要机制,也是海浪模拟中误差的主要来源之一,因此对于提高海浪数值预报准确度来说,高质量的海面强迫风场是首要前提。本文所用的 QuikSCAT/NCEP 混合风场,无论时空分辨率还是精度都比较高。现分别选取 NDBC 位于大西洋的浮标 41041 (14.329°N, 46.082°W) 及太平洋的浮标 51001 (23.445°N, 162.279°W), 利用双线性插值法得到浮标所在位置的混合风场数据,对 2008 年 8 月的混合风场进行了检验。由于这两个浮标的风速计高度均为海平面以上 5 m, 为保证混合风场与观测要素在空间上的一致性,采用 Young<sup>[11]</sup> 的算法,假设海洋边界层为一个对数模型,根据以下公式将浮标观测风速转换至距海平面 10 m 高度后用于检验。

$$U_{10} = u \sqrt{\frac{\kappa^2}{C_d}} \ln^{-1}\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

式中:  $z$  为测风高度,  $u$  指在  $z$  高度处测得的风速,  $z_0$  为糙度系数,  $k$  为 Karman 常数,  $C_d$  为阻力系数。阻力系数与风速和海况有关<sup>[11]</sup>, 实地测量的阻力系数一般分散于一个数量级。考虑到风速误差的主要来源为浮标测量本身存在的误差, 因此, 一般把  $C_d$  设定为常数。目前的研究应用中,  $C_d$  取值为  $1.5 \times 10^{-3}$ , 相应的 Karman 常数  $k$  取值为 0.4,  $z_0$  的取值为  $3.271 \times 10^{-4}$  m。

将 2008 年 8 月的混合风场风速与两个浮标观测风速在时间序列上进行比较(见图 1), 并做了风速的散布图及相应的误差分析和相关分析(见图 2)。从图中可以看出: 在时间序列上, 混合风场与浮标观测趋势非常一致, 浮标 41041 处 RMS 误差为 1.36 m/s, 相关系数达 85%; 浮标 51001 处的 RMS 误差仅为 1.02 m/s, 相关系数为 80%。可见, 混合风场的精度和相关性也是比较高的, 这就为我们海浪场的模拟打下了良好的基础。

### 3.2 模式模拟结果与 NDBC 浮标有效波高数据比较

由于本文是针对全球海浪预报开展的研究, 离岸较近的浮标对大洋不具备代表性, 因此选取了较远离岸边的 8 个 NDBC 浮标用于对比检验, 分别包括 1 个南太平洋浮标, 2 个北太平洋浮标, 2 个北大西洋浮标及 3 个夏威夷浮标(见表 2)。8 个浮标资料的时间间隔均为 1 h, 具体位置分布如图 3 所示。

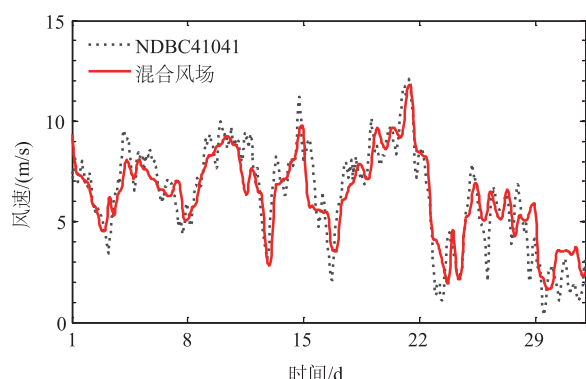
检验统计量包括偏差、均方根误差、相关系数、相对误差和绝对误差, 本文中若无特别说明, 对这 5 个统计量的计算均采用以下公式:

偏差:

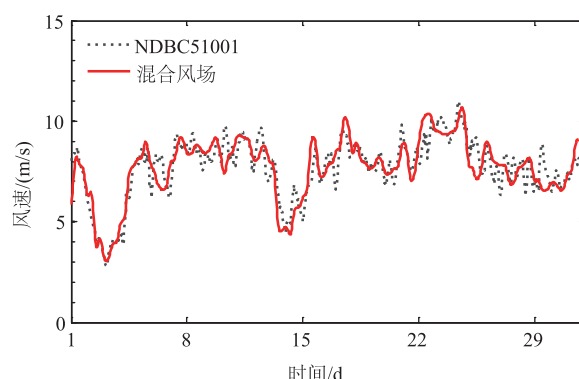
$$\bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad (2)$$

均方差:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (3)$$



a. 大西洋浮标41041



b. 太平洋浮标51001

图1 2008年8月混合风场与浮标观测比较

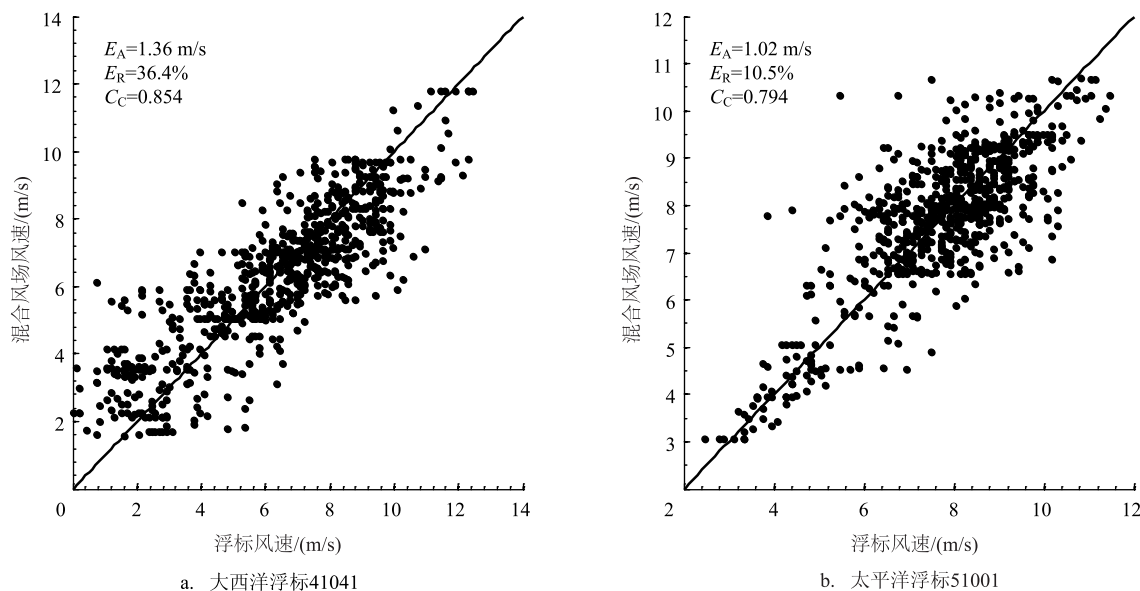


图2 风速的散布比较( $E_A$ 表示均方根误差, $E_R$ 表示平均相对误差, $C_C$ 表示相关系数。)

表2 用于检验的NDBC浮标

名称	位置	水深/m	资料长度
浮标32012	南太平洋 19.691°S, 85.567°W	4 460	2007年10月—2009年12月
浮标46006	北太平洋 40.754°N, 137.464°W	4 151.4	2007年9月—2009年12月
浮标46066	北太平洋 52.785°N, 155.047°W	4 541.5	2000年5月—2009年12月
浮标41041	北大西洋 14.329°N, 46.082°W	3 502	2005年5月—2009年12月
浮标41048	北大西洋 31.950°N, 69.497°W	5 261	2009年1—12月
浮标46047	夏威夷附近 32.403°N, 119.536°W	1 399	1999—2009年
浮标51001	夏威夷附近 23.445°N, 162.279°W	3 430	1999—2009年
浮标51002	夏威夷附近 17.094°N, 157.808°W	5 002	1999—2009年

相关系数:

$$Corr = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2]^{1/2}} \quad (4)$$

相对误差:

$$RE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \right| \quad (5)$$

绝对误差:

$$AE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad (6)$$

式中: $P_i$ 为模拟值, $O_i$ 为观测值, $N$ 为样本个数。

通过双线性插值得到1999年9月—2009年7月每个浮标位置的模式模拟有效波高,并与相对应的浮标观测有效波高数据进行比较,得到在该浮标资

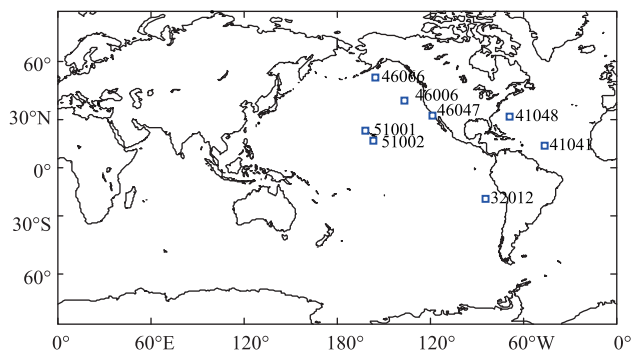


图3 用于检验的NDBC浮标位置

料长度时间内每个月的模式模拟偏差、均方根误差、相对误差及相关系数,然后对其不同年份间相同的月份求平均,从而得到每个浮标处模式模拟的



月平均偏差、均方根误差、相对误差及相关系数。我们按不同的浮标位置分别对北太平洋、北大西洋、南太平洋和夏威夷的模式误差进行分析。

通过以上8个浮标的检验结果可以看出模式模拟的均方根误差大多小于0.6 m(见图4),且存在明显的季节变化。夏季模式模拟误差较小,均不超过0.4 m,其中北大西洋夏季误差控制在0.2 m左右,北太平洋、南太平洋夏季的模式误差也都在0.3 m左右;冬季误差较大,最高均可达到0.6 m。这是由于各大洋的海浪场均存在季节变化特征,冬季平均波高较大,夏季较小。模式存在0.2 m左右的正偏差,南太平洋和夏威夷冬季最大的模拟偏差可至0.6 m(见图5)。模式模拟的月平均相对误差基本都在20%以下(见图6),相关系数大多不小于80%,并且可达90%以上(见图7)。

### 3.3 模式模拟结果与 Jason-1 高度计有效波高资料比较

选取2008年8月—2009年7月 Jason-1 高度计

测得的全球60°S—60°N范围的有效波高数据对模式模拟结果进行了检验。该数据为沿轨散点数据,在时间和空间上分布不规则,而模式输出结果为每小时一次的 $1^\circ \times 1^\circ$ 格点数据。因此,先读取每小时的高度计数据,对其进行网格平均,得到每个时刻格点上的高度计观测,然后读取相应时刻和格点的模式模拟值,使观测和数值模拟在时相与位相上相匹配后再进行检验。

图8给出了2月、5月、8月、11月的模式模拟绝对误差分布,图9给出了相应月份模式模拟有效波高与 Jason-1 沿轨有效波高之间的散点图,表3列出了各月及全年的均方根误差。通过进行误差分析和相关分析可以发现,WAVEWATCH III 模式对全球海浪的模拟效果较好,平均误差在0.6 m左右。其中,对大西洋海浪的模拟效果最好,误差大多小于0.5 m;2月、11月北大西洋海浪的模拟误差相对较大,5月、8月则较小。这是因为北大西洋是世界典型的季风气候区,每年11月至翌年3月为冬季季风时期,海区北部大部分洋面受冰岛低压控制,南

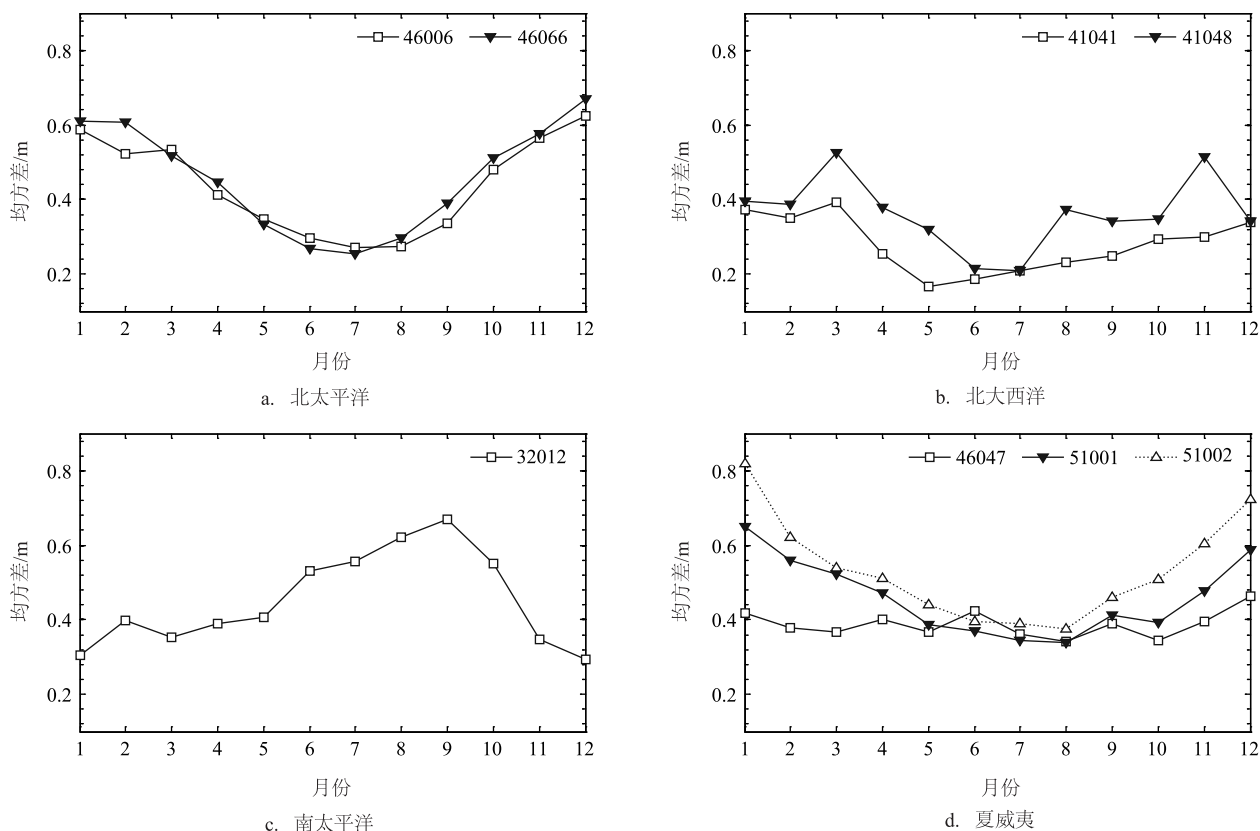


图4 模式模拟的月均方根误差

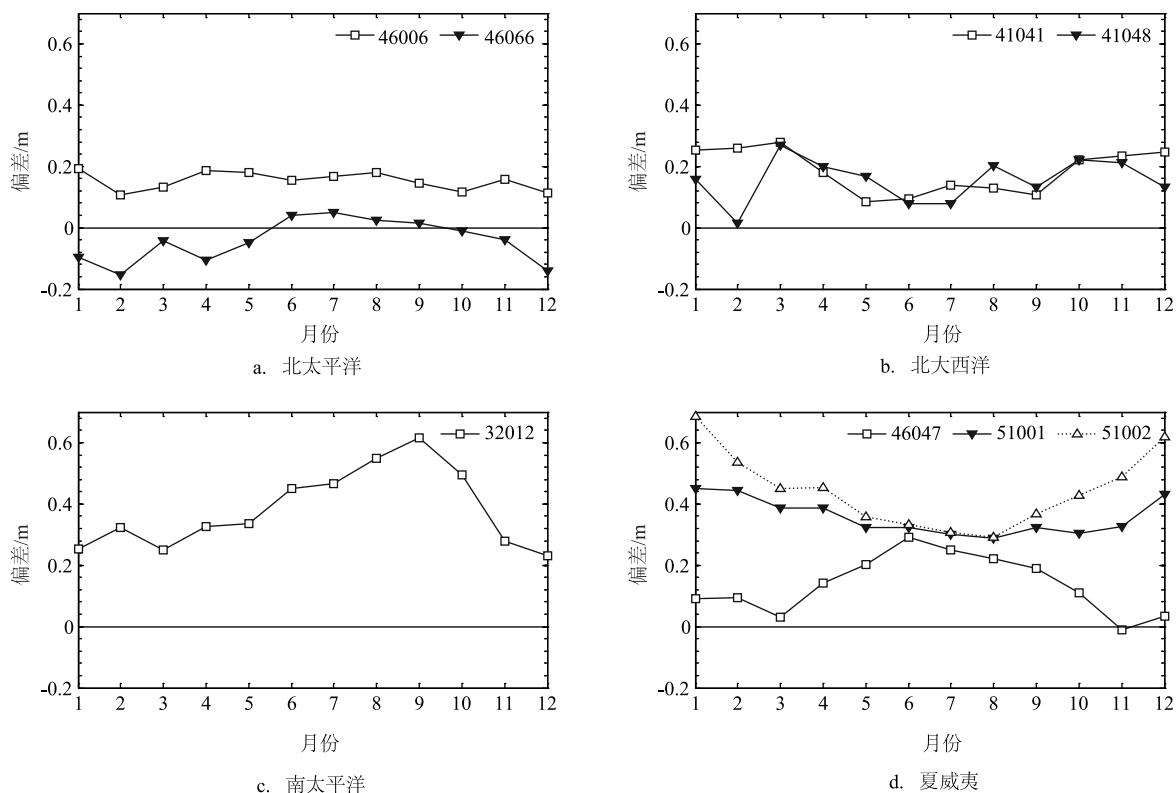


图5 模式模拟的月平均偏差

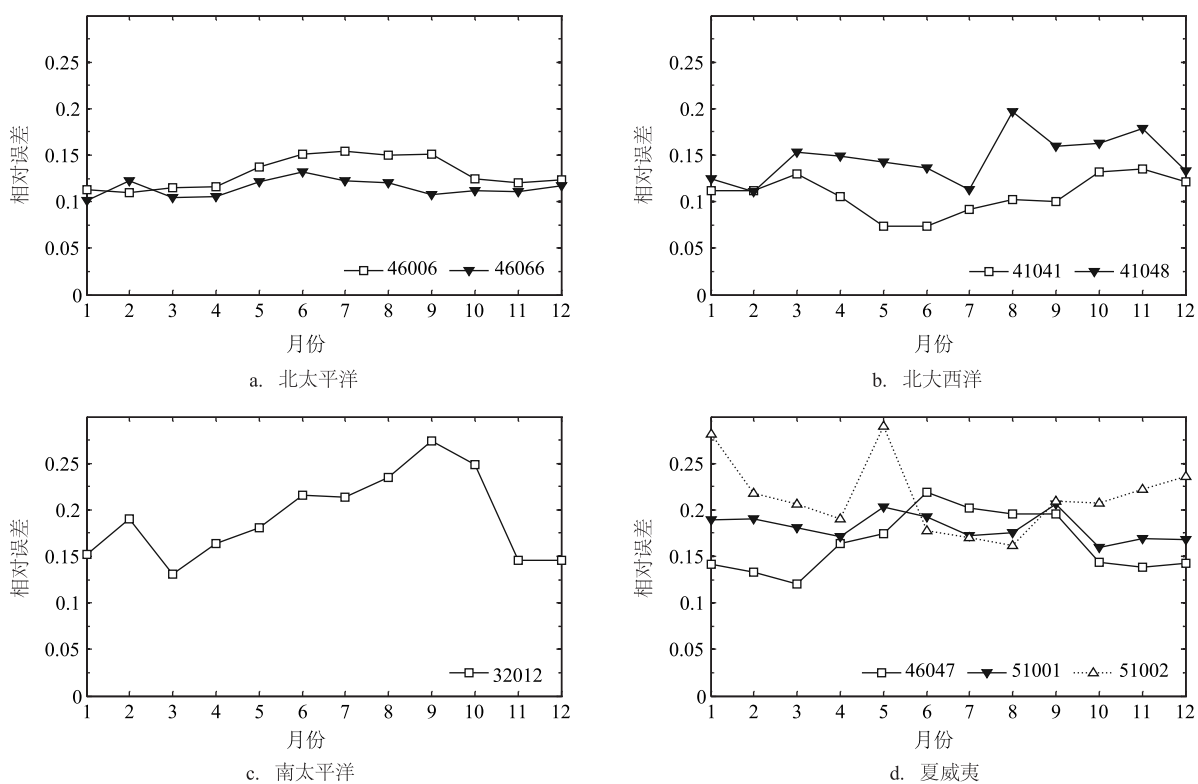


图6 模式模拟的月平均相对误差

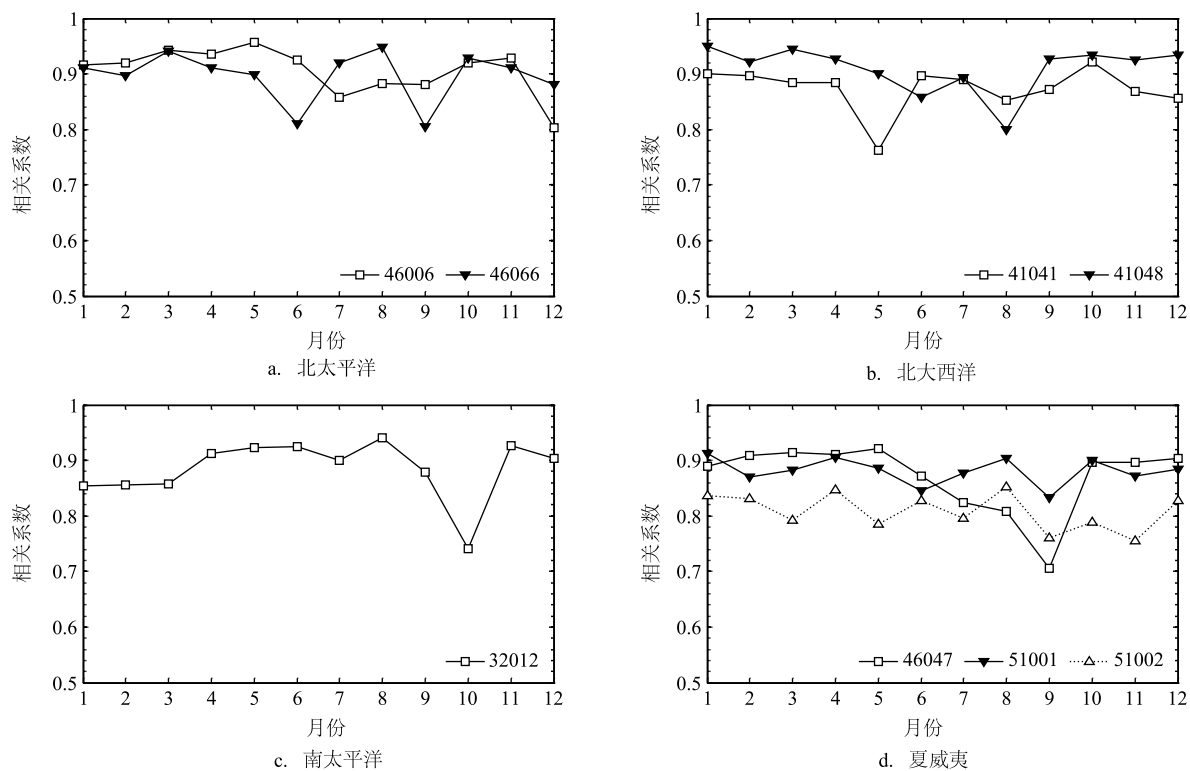


图7 模式模拟的月平均相关系数

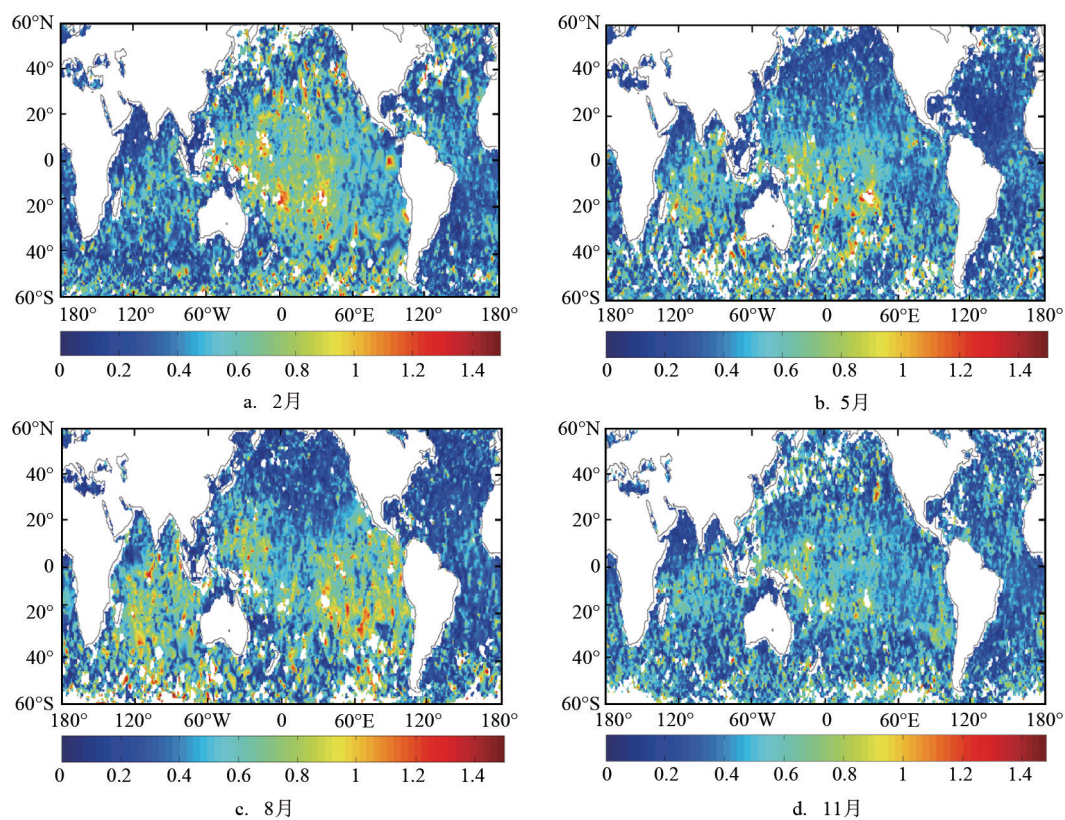


图8 模式模拟绝对误差(m)分布

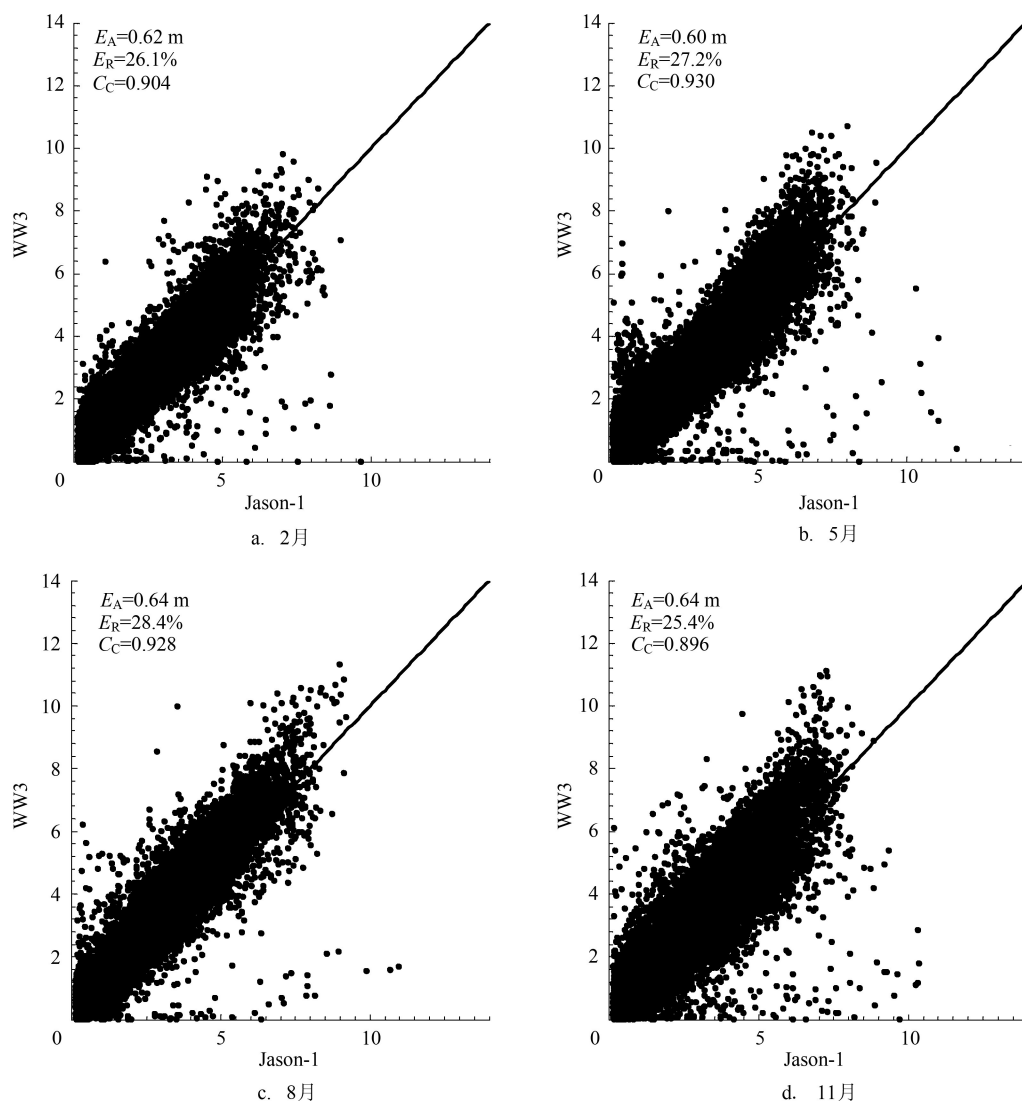


图9 模式模拟SWH与Jason-1有效波高(SWH,单位:m)的散布

表3 Jason-1 检验的均方根误差

时间	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
RMSE/m	0.657	0.621	0.646	0.621	0.596	0.599	0.592	0.644	0.683	0.651	0.636	0.639	0.632

部受亚速尔高压影响,西风带抵达全年最低纬度区域,从 $30^{\circ}$ — $60^{\circ}$ N整个中高纬地区盛行偏西风,此时风浪为全年最强盛的季节,平均风浪浪高最大,大浪频率较高,范围较全年最广,同时也是全年涌浪最强盛的时期;5—9月为夏季季风时期,整个海区受亚速尔高压控制,是全年风浪和涌浪最弱的季节,大浪和大涌频率最低,范围最小。南大西洋的海浪场特征为全年冬季平均波高较大,夏季较小,

季节性差异不显著,因此南大西洋各月模拟误差相差不大,5月、8月的模拟效果稍差一些。模式对北太平洋2月、11月的模拟误差较大,可达0.8 m左右,对南太平洋模拟效果普遍比北太平洋差。因为北太平洋较南太平洋风浪、涌浪具有更明显的季节变化特征,夏季,北太平洋整个区域波高偏小,冬季,北太平洋波高达到最大值;整体上,南太平洋风浪和涌浪均强于北太平洋。模式对印度洋5月、8月模



拟误差也较大,同样可以达到0.8 m。因为北印度洋同属季风气候区,5—9月,西南季风爆发,北印度洋区域风浪较大;南印度洋海浪场季节变化特点不如北半球各大洋显著,但仍有较明显的季节变化,冬季(5—9月)比夏季(11月—翌年3月)海浪强盛,相应的平均波高、大浪大涌频率也较大。西风带区域高度计数据较少,但仍可以看出模拟误差较大,多在0.8 m以上,这是由于常年的大风浪所致。

## 4 结论

本文作为研制WAVEWATCH III模式全球海浪同化系统的前期工作,基于第三代海浪数值预报模式WAVEWATCH III(v3.14),构建了全球区域海浪数值预报系统,采用NDBC浮标数据及Jason-1高度计数据分别对模式模拟结果的单点和全场进行了检验,得到以下结论:

(1)模式对全球海浪的模拟效果较好,平均误差约为0.6 m,存在0.2 m左右的正偏差,月平均相对误差基本小于20%,相关系数多在80%以上;

(2)模式模拟呈现出明显的季节特征和区域差异。大西洋海浪的模拟效果最好,误差多小于0.5 m;北大西洋海浪冬季模拟误差较大,夏季较小;南大西洋海浪模拟效果的季节变化特征不如北大西洋显著,但仍存在一定的季节差异,冬季模拟效果稍差。模式对北太平洋冬季的模拟误差较大,可达0.8 m,南太平洋的模拟效果普遍比北太平洋差。模式对印度洋冬季的模拟误差也较大,同样可以达到0.8 m。

由此可见,后续开展全球海浪同化工作选取集合样本时应充分考虑模式在全球海浪模拟中呈现出的季节特征和区域差异。

## 参考文献:

- [1] 管长龙. 我国海浪理论及预报研究的回顾与展望[J]. 青岛海洋大学学报, 2000, 30(4): 549-556.
- [2] Tolman H L. User manual and system documentation of WAVEWATCH III™ version 3.14[R]. Technical Note 276, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 2009: 194.
- [3] Tolman H L. A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents[J]. Journal of Physical Oceanography, 1991, 21(6): 782-797.
- [4] Tolman H L. Effects of numerics on the physics in a third-generation wind-wave model[J]. Journal of Physical Oceanography, 1992, 22(10): 1095-1111.
- [5] Evensen G. The ensemble Kalman filter: theoretical formulation and practical implementation[J]. Ocean Dynamics, 2003, 53(4): 343-367.
- [6] 郑崇伟, 张霞. 基于WAVEWATCH-III模式的近10年南海波候统计分析[J]. 气象与减灾研究, 2011, 34(1): 48-55.
- [7] 杨永增, 孙玉娟, 王关锁, 等. 基于MASNUM海浪预报系统的北印度洋波浪特征模拟与预报分析[J]. 海洋科学进展, 2011, 29(1): 1-9.
- [8] 刘成, 郑崇伟, 李荣波, 等. 东中国海大浪频率和极值波高统计分析[J]. 海洋预报, 2014, 31(2): 8-13.
- [9] 刘铁军, 郑崇伟, 周林, 等. 基于QN混合风场和SWAN模式的一次冷空气海浪场模拟分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2013, (3): 8-12.
- [10] 林琿, 陈戈. 利用TOPEX卫星高度计观测全球海面风速和有效波高的季节变化[J]. 科学通报, 2000, 45(4): 411-416.
- [11] Young I R. Wind-generated ocean waves[M]//Bhattacharyya R, McCormick M E. Elsevier Ocean Engineering Book Series. Amsterdam: Elsevier Science, 1999, 2: 306.

## Numerical simulation experiments and analysis using WAVEWATCH III in the global ocean

WU Meng-meng<sup>1</sup>, WANG Yi<sup>1,2</sup>, WAN Li-ying<sup>1,2</sup>, QIN Ying-hao<sup>1</sup>, CAI Qiong-qiong<sup>1</sup>

(1. National Marine Environment Forecasting Center, Beijing 100081 China; 2. Key Laboratory of Research on Marine Environmental  
Forecasting Center, Beijing 100081 China)

**Abstract:** Based on the third-generation wind-wave model called WAVEWATCH III, the global ocean wave numerical prediction system is established. A 10-year global experiment is designed using QuikSCAT/NCEP blended wind field from September 1999 to July 2009 as atmospheric forcing field. By comparing with NDBC buoy data and Jason-1 satellite altimeter ocean wave data, the results indicate that WAVEWATCH III works well in the simulation of global ocean wave. Through the analysis of the model error, it also provides effective model error which is a reliable basis in building background error covariance matrix and choosing ensemble members in the global ocean wave data assimilation later.

**Key words:** WAVEWATCH III; background error; NDBC; Jason-1; global ocean wave