

杨晓君,何金海,吕江津,等. 海面风场订正对风暴潮数值模拟的影响[J]. 气象,2011,37(3):270-275.

# 海面风场订正对风暴潮数值模拟的影响<sup>\* 1</sup>

杨晓君<sup>1,2</sup> 何金海<sup>1</sup> 吕江津<sup>2</sup> 王 颖<sup>2</sup> 何群英<sup>2</sup>

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

2 天津市气象台, 天津 300074

**提 要:** 海洋模式在模拟风暴增水时对于风场的依赖性比较大, 准确的风场模拟是正确模拟风暴潮的重要前提。用渤海海域 4 次典型的风暴潮个例, 检验改良的渤海风场推算模式对风暴潮数值模拟的影响, 分别用订正前后的风场驱动风暴潮数值模式得到逐时的渤海增水场, 并与塘沽实测值比较表明: 在 4 个过程中海面风场订正后风暴潮模式的模拟结果均得到了明显的改进, 模拟的风暴潮增水极值、增水过程曲线以及渤海增水场都与实测值吻合很好。与风场订正前相比, 计算结果的精度均有明显提高。研究结果表明通过采用合适的海面风场订正办法提高数值模式模拟的风场精度后, 海洋模式可以模拟出与实际比较接近的强风暴增水。

**关键词:** 海洋气象, 风暴潮, 风场订正, 数值模拟

## Impacts of the Sea-Level Wind Field Correction on the Numerical Simulation of Storm Surges

YANG Xiaojun<sup>1,2</sup> HE Jinghai<sup>1</sup> LV Jiangjin<sup>2</sup> WANG Ying<sup>2</sup> HE Qunying<sup>2</sup>

1 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074

**Abstract:** Simulated storm surge elevation by the oceanic model is strongly dependent on the wind field, thus the correct simulation of wind field is the important prerequisite. Four typical cases are used to test the impacts of the modified Bohai Sea calculated wind field models on the numerical simulation of storm surges. The hourly Bohai Sea elevation fields before and after the correction are obtained by the numerical model driven by the wind field. Compared to the observed values of Tanggu Station, we can conclude that the simulated results are obviously improved. The simulated extreme values, process curves and the elevation correspond well to the observed values. The accuracy of the calculation results is enhanced significantly after the correction. Results show that by using the appropriate method of sea-level wind field correction, the accuracy of the simulated wind field is enhanced and the oceanic model can simulate the strong storm surge elevation that is close to the reality.

**Key words:** marine meteorology, storm surges, wind field correction, numerical simulation

## 引 言

冯士祯院士在其所著的《风暴潮导论》中指出<sup>[1]</sup>, 浅水风暴潮的一个重要特征是: 风应力与气压

变化相比较, 风应力是风暴潮的主要强迫力。准确模拟风暴潮, 关键是要有精确的大气强迫场<sup>[2-14]</sup>。

渤海是半环形内海, 地形复杂, 大风分布的中尺度特征显著。多次不同类型天气过程模拟结果表明, MM5 模式模拟的地面风速场在岸边界与实际

\* 2006 年中国气象局业务建设项目《渤海海洋气象预报服务系统》资助  
2009 年 12 月 9 日收稿; 2010 年 7 月 19 日收修定稿  
第一作者: 杨晓君, 主要从事海洋气象研究. Email: boluo0127@sohu.com

比较接近,但在海上常常比实际偏小,特别是在强冷空气和台风影响时就更为突出,这与龚强得出的结论基本一致<sup>[15]</sup>。直接将 MM5 模式模拟的风场作为外强迫,应用于海洋模式模拟强风暴潮往往会有较大偏差。为了得到更接近实况的海上风场,提高渤海风暴潮数值预报精度,需要对 MM5 模式模拟的风场做一些改进。由于 MM5 模拟的风场在岸边界与实况比较接近,因此可利用沿岸陆地测站的风速来推算海上风速。对于海风的推算已经有大量的研究工作<sup>[16-20]</sup>,Hsu 在 1981 年提出根据陆地站测风推算近海风动力模式<sup>[21]</sup>;辛宝恒在其基础上提出渤海近海风场的一种近似推算模式<sup>[22]</sup>;何群英等<sup>[23]</sup>又利用更新的资料,按不同的季节、风向对海陆风速重新进行统计分析,提出了渤海风场推算模式对中尺度风场预报的新的订正办法。本文采用何群英等统计得到的热力和动力订正方程,结合数值预报应用的处理需要,建立了渤海数值预报风场订正方法。

本文以渤海海域 4 次典型风暴潮过程(2003 年 10 月 10 日的冷空气和倒槽共同引发的风暴潮,2004 年 9 月 15 日和 2005 年 8 月 8 日的台风风暴潮,2007 年 3 月 4 日寒潮风暴潮过程)为例,用改良后的渤海风场推算模式对 MM5 模拟的海上风场进行订正,分别用订正前后的风场来驱动 HAMSOM 海洋模式模拟风暴增水,比较海面风场订正对风暴潮数值模拟的影响。

## 1 风场订正方法

### 1.1 渤海风场推算模式

#### 1.1.1 动力推算模式

研究表明,在行星边界层内,气流掠过海岸线时,风场不仅受到海陆下垫面粗糙度变化的动力影响,也会受到海陆温差产生的热力影响。海风可以表示为: $U_{海} = U_{动力推算} + \Delta U_{热力订正}$ 。

风速推算模式的动力部分主要考虑海陆摩擦的差异,根据陆地站测风推算近海风动力模式:

$$\frac{U_{动力推算}}{U_{陆}} = \left( \frac{H_{海} C_{d陆}}{H_{陆} C_{d海}} \right)^{\frac{1}{2}}$$
 式中  $U$  为风速,  $H_{海}$  和  $H_{陆}$  分别为渤海海面和陆地(渤海沿岸)的边界层高度,  $C_{d海}$  和  $C_{d陆}$  分别为海洋和陆地的阻力系数。根据辛宝恒的研究,取渤海海面边界层高度  $H_{海} = 620 \text{ m}$ ,渤海沿岸边界层高度  $H_{陆} = 1014 \text{ m}$ ,沿岸陆地  $C_{d陆}$

$= 0.0075$ ,得到渤海海面  $C_{d海}$  的表达式:  $C_{d海} = 0.0015 \left[ 1 + \exp \left( -\frac{BU_{陆} - 12.5}{1.56} \right) \right]^{-1} + C$ , 式中  $B$  为海风和陆风的比值,  $C$  为用最小二乘法得到的常数项。何群英等利用 1990—2001 年 A 平台、塘沽、长岛、大连的风向、风速、温度资料对模式作了进一步的改进,按不同的季节、风向,并兼顾渤海的季风气候特征,对海陆风速重新进行统计分析,得出了与改进前有很大不同的  $B$  值和  $C$  值。再代入公式,得到海风的动力推算结果  $U_{动力推算}$ 。

#### 1.1.2 热力订正模式

$\Delta U_{热力订正}$  与海陆温差  $\Delta T$  有关。用最小二乘法建立不同时次的海陆风速差  $\Delta U_{热力订正}$  与海陆温差  $\Delta T$  统计关系:  $\Delta U_{热力订正} = b_0 + b_1 \Delta T$ , 其中  $b_0$  和  $b_1$  为系数。渤海西部海面用 A 平台与塘沽站的温差按不同时间、不同季节、不同风向建立热力订正统计方程,渤海东部海面用长岛与大连的温差建立方程。得到渤海西部和东部海区在不同季节、时次和风向下的  $b_0$  和  $b_1$  值。

#### 1.1.3 渤海风场应用处理方案

检验表明,MM5 模拟的海面风场在弱风( $< 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )时接近实际风速,大风( $> 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )时偏小,因此订正时采用弱风时不进行风场订正,大风时订正的应用处理方案。

由于以海岸为界订正海面风场会人为造成风场梯度过大,考虑到海陆风速差异与岸距相关,对模拟风场做了海深订正处理,采用海深  $< 10 \text{ m}$  区域不进行风场订正,海深  $> 10 \text{ m}$  区域订正的应用处理方案。

应用 NCEP 客观分析风场资料与订正后风场比较发现,采用以上方法订正后的风场基本能反映渤海海陆风场的特征,但订正后的风速较实际偏大。使用 NCEP 再分析资料提供的  $10 \text{ m}$  海深以上格点的风场,通过对渤海中不同区域的历史风场资料、MM5 模拟值以及订正值之间的关系拟合得到平滑系数  $K$ ,将系数  $K$  代入订正方程。

### 1.2 MM5 中尺度风场订正结果分析

由于 MM5 中尺度模式模拟的海面风速较实际偏小,因此采用改良的风速推算模式对 4 次过程中 MM5 的风速预报产品进行订正。由于海上气象资料缺乏,这里用 A 平台(地理坐标为  $38.27^\circ \text{N}$ 、 $118.25^\circ \text{E}$ )的逐时风场资料来检验订正前后 MM5 模拟的风场结果。将订正前后 MM5 模拟风速结果与实测风速进行对比(见图 1),可以看出,渤海风场

推算模式并没有改变 MM5 模式预报的起风时间和风速的变化,只是对大风速时段进行了量级上的订正;4 次过程中订正后的风速明显比订正前有所增

大,在最大风速时订正的风场是 MM5 直接模拟风场的 1.5 倍左右,增幅为  $7 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。试验表明,修订后的风场在量级上比订正前更接近实况。

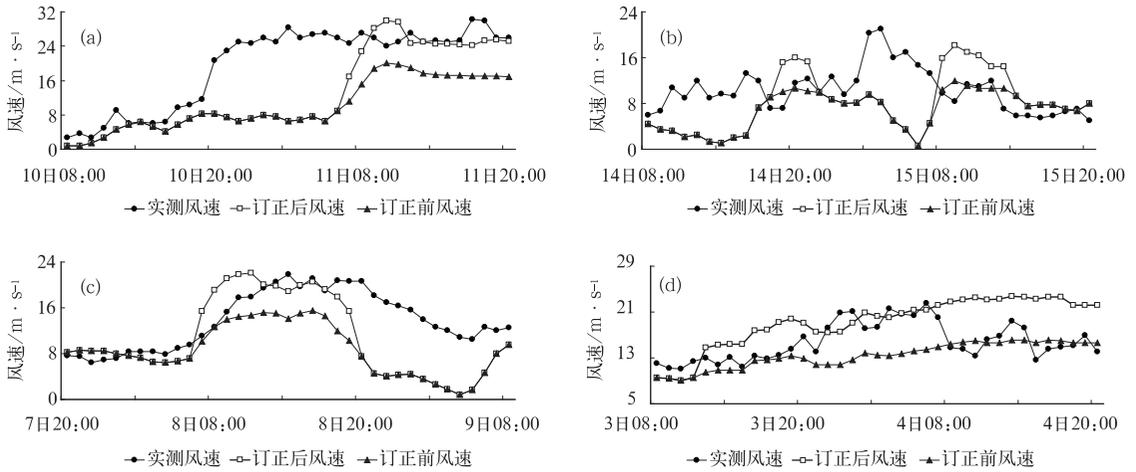


图 1 4 次过程 A 平台的实测风速与海面风场订正前后模拟风速的对比曲线  
(a) 2003 年 10 月 10 日 08 时—11 日 20 时; (b) 2004 年 9 月 14 日 08 时—15 日 20 时;  
(c) 2005 年 8 月 7 日 20 时—9 日 08 时; (d) 2007 年 3 月 3 日 08 时—4 日 20 时)

Fig. 1 Contrast curves of the Platform A's observed wind speed and simulated wind speeds before and after the sea level wind correction for 4 processes

(a) 08:00 BT October 10 to 20:00 BT October 11, 2003, (b) 08:00 BT September 14 to 20:00 BT September 15, 2004, (c) 20:00 BT August 7 to 08:00 August 9, 2005, and (d) 08:00 BT March 3 to 20:00 BT March 4, 2007

## 2 风暴潮数值模拟与结果分析

### 2.1 HAMSOM 模式简介

三维斜压陆架海模式——HAMSOM 是一个半隐式的差分模式,是通过改进由德国汉堡大学海洋研究所 Backhaus 提出的一个三维斜压原始方程模式而成的。HAMSOM 海洋模式需要 MM5 模式输出的风场、气压场资料来驱动,得到逐时的渤海增水场、渤海风暴潮流场。本地化过程中对模式计算区域的设置为:模式大区的计算区域是  $41^{\circ} \sim 31^{\circ}56' \text{N}$ 、 $117^{\circ}28' \sim 126^{\circ}52' \text{E}$ ,网格距在经向和纬向都是  $1/15^{\circ}$ ,垂向分为 5 层,时间步长为 360 s。小区的计算区域是  $41^{\circ} \sim 37^{\circ}5' \text{N}$ 、 $117^{\circ}30' \sim 122^{\circ}29' \text{E}$ ,网格距在经向和纬向都是  $1/60^{\circ}$ ,垂向分为 5 层,时间步长为 360 s。模式采用大小区双重嵌套网格,第一套网格为第二套网格提供边界值。

### 2.2 海面风场订正对 HAMSOM 模式模拟结果的影响分析

#### 2.2.1 渤海增水场结果检验

由于渤海观测资料的匮乏,选用塘沽、秦皇岛、

大连、烟台 4 个验潮站的实际观测资料,采用克里格插值方法画出 4 次过程中渤海的增水场,以此来粗略地代表渤海实际的增水场,用于对海面风场订正前后 HAMSOM 模拟的增水场结果进行检验。

对 4 次过程(2004 年 9 月 15 日和 2007 年 3 月 4 日的图略)分别做试验,将海面风场订正前后 HAMSOM 模拟的增水场结果与实际增水场进行比较(见图 2、图 3),可以看出,由于订正后加大了风的强迫作用,使得模拟结果的增水梯度有所加大,风的强迫作用更强,对于我们关心的渤海湾的最大增水比订正前的模拟结果增大了  $50 \sim 110 \text{ cm}$ ,与实际观测结果更加吻合。总体来说,风场修订对于风暴潮的数值模拟有十分积极的作用,订正后的整个增水场更逼近实测值,结果更令人满意。

#### 2.2.2 塘沽验潮站增水结果检验

用塘沽验潮站的观测数据对海面风场订正前后 HAMSOM 数值模拟结果进行检验。对比塘沽验潮站实际增水曲线与海面风场订正前后 HAMSOM 模拟增水曲线(图 4)可以看出,模拟的增水曲线常常表现出比实测曲线滞后的现象,这是由于 MM5 预报的起风时间通常偏晚造成的。风场订正前模拟的增水与实测值差距较大,订正后 4 次过程的增水

均有大幅提升,与实测值的偏差有所减小,明显优于订正前的模拟效果。4次过程中只有2005年8月8日“麦莎”台风引起的风暴潮过程订正后的模拟结果较实际偏大,这是由于这次过程中订正前MM5模拟的风场就与实况很接近,订正后的风场较实况有

些偏大导致的。2003年10月11日和2007年3月3日两次过程订正后的增水曲线与实测曲线在量级上很接近了,表现出风场订正的优越性;2004年9月15日的过程订正后模拟的增水较实测值略偏小,但已经比订正前有了很大的进步。

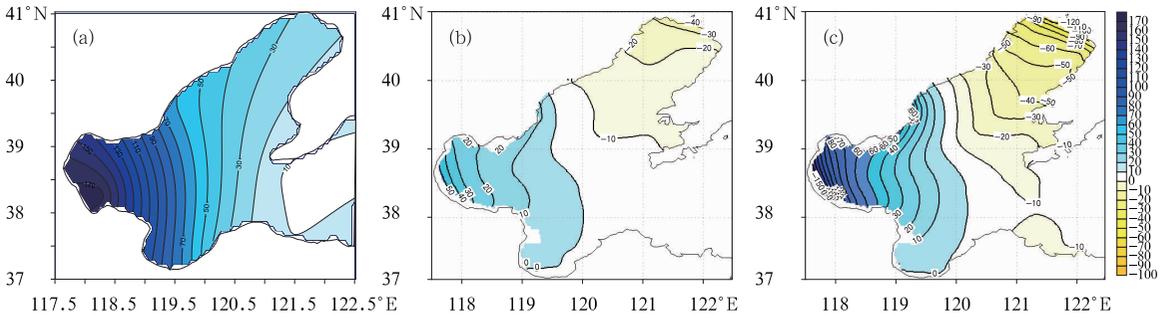


图 2 2003 年 10 月 11 日 00 时渤海实际增水场(a)、订正前模拟增水场(b)和订正后模拟增水场(c)

Fig. 2 Observed elevation (a), simulated elevation before correction (b) and simulated elevation after correction (c) of the Bohai Sea at 00:00 BT October 11, 2003

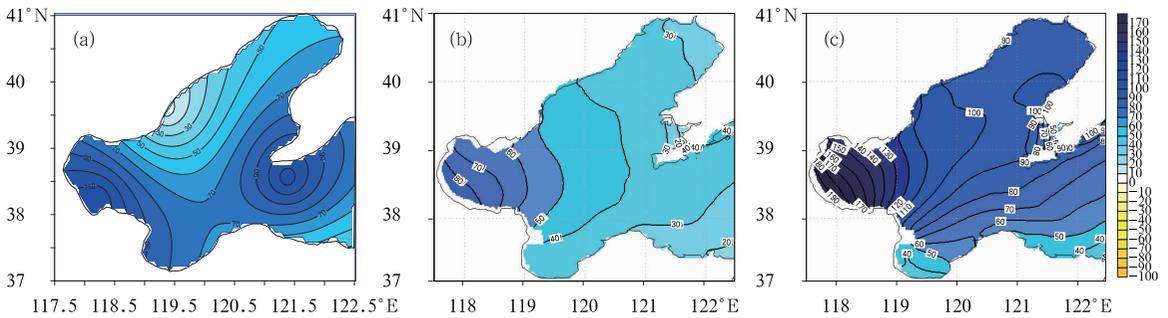


图 3 2004 年 9 月 15 日 00 时渤海实际增水场(a)、订正前模拟增水场(b)和订正后模拟增水场(c)

Fig. 3 Observed elevation (a), simulated elevation before correction (b) and simulated elevation after correction (c) of the Bohai Sea at 00:00 BT September 15, 2004

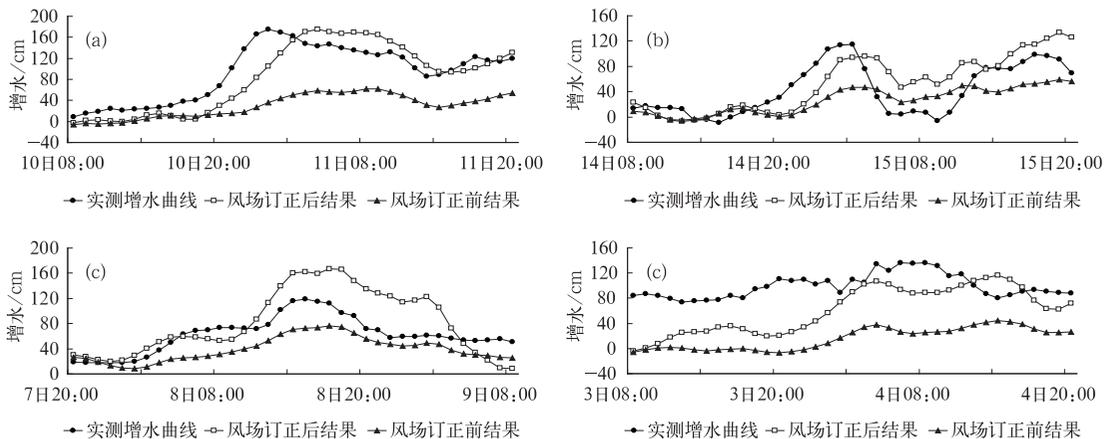


图 4 4 次过程塘沽测站的实测增水与海面风场订正前后模拟增水的对比曲线

(a) 2003 年 10 月 10 日 08 时至 11 日 20 时; (b) 2004 年 9 月 14 日 08 时至 15 日 20 时; (c) 2005 年 8 月 7 日 20 时至 9 日 08 时; (d) 2007 年 3 月 3 日 08 时至 4 日 20 时

Fig. 4 Contrast curves of Tanggu Station's observed wind speed and simulated wind speeds before and after the sea level wind correction for 4 processes

(a) 08:00 BT October 10 to 20:00 BT October 11, 2003, (b) 08:00 BT September 14 to 20:00 BT September 15, 2004, (c) 20:00 BT August 7 to 08:00 BT August 9, 2005, and (d) 08:00 BT March 3 to 20:00 BT March 4, 2007

由于风暴潮过程的最大增水在实际业务应用中最为重要,采取求相对误差的方法对实际观测值与海面风场订正前后模拟的塘沽最大增水值进行对比,分析订正前后模拟结果的精度。结果列于表 1,可以看出除 2005 年 8 月 8 日的台风风暴潮过程,订正后的增水极值较实况偏大;其他 3 次过程订正后增水极值的相对误差明显小于订正前,表明采用海面风场订正后,风暴潮模式模拟的增水极值更贴近实测值。

许多研究已经证实,由气象因子影响产生的增水与天文高潮相叠加,才能产生风暴潮。因此将风速订正前后 HAMSOM 模拟的塘沽增水结果与天

文潮叠加得到模拟潮位,与塘沽实测潮位进行比较。从图 5 中可以看出,由于 2005 年 8 月 8 日过程的最大增水比实际偏大,叠加了天文潮之后,它的潮位曲

表 1 塘沽测站 4 次过程订正前后模拟的增水极值和实测值的相对误差

Table 1 Relative errors of Tanggu Station's observed values and simulated extreme values before and after correction for 4 processes

风暴潮过程时间/年.月.日	订正前相对误差/%	订正后相对误差/%
2003. 10. 10	64.6	0
2004. 9. 15	59	17
2005. 8. 8	36	40
2007. 3. 3	68	14

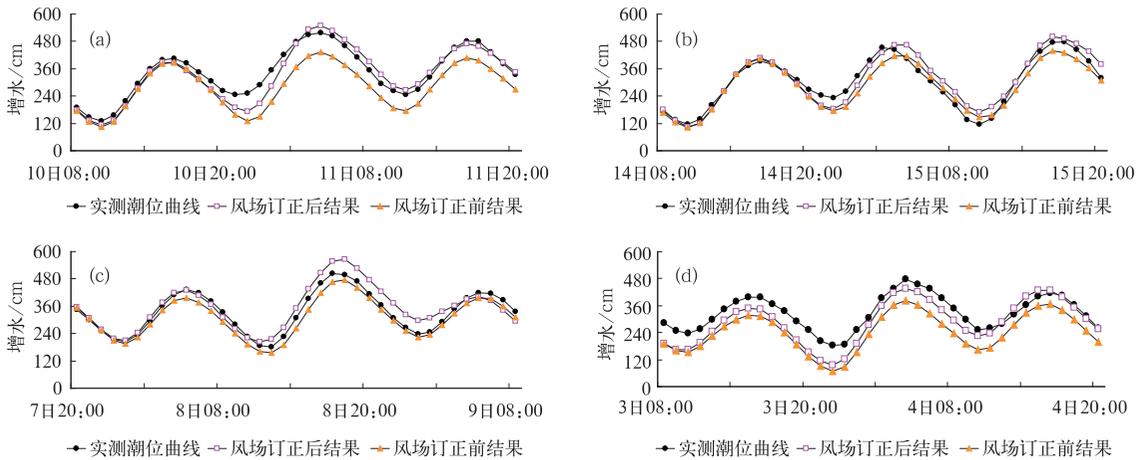


图 5 4 次过程塘沽测站的实测潮位与订正前后模拟潮位对比曲线

(a) 2003 年 10 月 10 日 08 时至 11 日 20 时; (b) 2004 年 9 月 14 日 08 时至 15 日 20 时;  
(c) 2005 年 8 月 7 日 20 时至 9 日 08 时; (d) 2007 年 3 月 3 日 08 时至 4 日 20 时

Fig. 5 Contrast curves of Tanggu Station's observed tide level and simulated tide level before and after correction for 4 processes

(a) 08:00 BT October 10 to 20:00 BT October 11, 2003, (b) 08:00 BT September 14 to 20:00 BT September 15, 2004, (c) 20:00 BT August 7 to 08:00 BT August 9, 2005, and (d) 08:00 BT March 3 to 20:00 BT March 4, 2007

线仍然略高于实况;其他 3 个过程尽管模拟的最大增水均比实况增水偏小且滞后,但叠加了天文潮之后,订正后的潮位曲线却与实际潮位曲线非常贴近,基本能够真实反映天津沿海风暴潮水位变化情况,滞后的现象也基本没有了,这对于业务中风暴潮预报具有较高的参考价值。

### 3 结论

(1) 在分析渤海海陆风速的动力与热力差异的基础上,根据水深的不同,采用新的渤海风速推算模

式对 MM5 中尺度数值模式预报的风速场进行订正后的结果表明,历史拟合情况较好,订正后,风速有了明显提高,结果更接近实际风场。

(2) 海洋模式在模拟风暴增水时对于风场的依赖性比较大,准确的风场要素预报是风暴潮预报的重要前提。对 4 次典型个例进行初步检验表明通过修订 MM5 海面风场,风暴潮模式的数值模拟结果明显优于订正前的模拟结果。订正后测站的风暴潮增水极值、增水过程曲线以及渤海增水场,都与实测值符合较好,模拟精度较订正前明显提高。本文的研究结果表明通过采用合适的海面风场订正办法提

高数值模式模拟的风场精度后,海洋模式可以模拟出与实际比较接近的强风暴增水。

### 参考文献

- [1] 冯士筭. 风暴潮导论[M]. 北京:科学出版社,1982:241.
- [2] 冯士筭.  $f$ -平面上的宽陆架诱导阻尼波[J]. 海洋学报,1979,1(2):177-192.
- [3] 冯士筭. 常底坡有限宽陆架诱导阻尼波的一种模型[J]. 海洋与湖沼,1981,12(1):1-8.
- [4] 孙文心,冯士筭,秦曾灏. 超浅海风暴潮的数值模拟(I)[J]. 海洋学报,1979,1(2):193-211.
- [5] 孙文心,秦曾灏,冯士筭. 超浅海风暴潮的数值模拟(II)[J]. 山东海洋学院学报,1980,10(2):7-19.
- [6] 冯士筭,施平. 含变涡动系数的超浅海风暴潮模型[J]. 海洋学报,1980,2(3):1-11.
- [7] Chin T, Feng S. A preliminary study on the mechanism of shallow water storm surges[J]. Scientia Sinica,1975,18(2):242-261.
- [8] Shi Fengyan and Sun Wenxin. A variable boundary model of storm surge flooding in generalized curvilinear grids[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids,1995,21:641-651.
- [9] Shi F, Sun W, Wei G. A WDM method on a generalized curvilinear grid for calculation of storm surge flooding[J]. Applied Ocean Research,1997,19:275-282.
- [10] Liu Juan, Jiang Wensheng, and Sun Wenxin. A high resolution forecast model of storm surge inundation[J]. Journal of Ocean University of China (Oceanic and Coastal Sea Research),2005,4(2):108-114.
- [11] 孙文心. 超浅海风暴潮的进一步研究[J]. 山东海洋学院学报,1987,17(1):34-45.
- [12] 唐永明,孙文心,冯士筭. 三维浅海流体动力学模型的流速分解法[J]. 海洋学报,1990,12(2):148-158.
- [13] 王正林,孙文心. 一种渤海风暴潮数值预报模式与试验[J]. 中国海洋大学学报,1993,23(1):1-12.
- [14] 王秀芹,钱成春,王伟. 计算域的选取对风暴潮数值模拟的影响[J]. 青岛海洋大学学报.2001,31(3):319-324.
- [15] 龚强. 应用 MM5 模式对地面大风过程的模拟试验[J]. 气象,2005,31(4):53-57.
- [16] 辛宝恒. 黄海渤海大风场概论[M]. 北京:气象出版社,1991:122-126.
- [17] 张志云,刘月昆. 渤海湾海陆热力差异对局地天气系统的影响[J]. 气象,1994,20(1):21-26.
- [18] 张新玲,吴增茂. 渤海海上测站与沿岸实测风的对比分析. 海洋预报,1998,15(4):24-30.
- [19] 高山红,张新玲,吴增茂. 渤海海面风场的一种动力诊断方法[J]. 海洋学报,2001,23(6):51-58.
- [20] 徐灵芝,赵玉洁,宋国辉,等. 离岸风背景下风暴潮异常增水特征分析[J]. 气象,2010,36(5):56-63.
- [21] Hsu S A. Models for estimating off shore winds from onshore meteorological measurements[J]. Boundary-Layer Meteorology,1981,20:341-351.
- [22] 辛宝恒. 渤海近海风场的一种近似推算模式[J]. 气象学报,1987,45(2):195-201.
- [23] 何群英,谢以扬,孟冬梅,等. 利用渤海风场推算模式对中尺度风场预报进行订正试验[J]. 天津气象,2006(下):10-16.