

# Prediction Analysis of Extreme Water Level of Storm Surge along the Coast of Bohai Sea

Xin Liu, Jingxuan Wang, Xiaozhuo Deng, Xintian Zheng, Zhihui Wang, Yumei Ding\*

School of Science, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin  
Email: [dingym@tust.edu.cn](mailto:dingym@tust.edu.cn)

Received: May 4<sup>th</sup>, 2020; accepted: May 20<sup>th</sup>, 2020; published: May 27<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Using the three-dimensional ocean model FVCOM, the storm surges happened in Bohai Sea during 20 years (1987-2006) were reproduced. The simulation data was statistically analyzed by using the general extreme value theory. The future prediction of the extreme water level along the coast of Bohai Sea was studied. The results showed that the extreme water level in different return periods changed significantly, especially at Tanggu and Huanghua Ports. At Tanggu Port, the extreme water level in 20-year and 30-year return periods increased by 7.76% and 10.53% which was higher than the current level. The probability of the serious storm surge at Tanggu Port would increase by 60% in 2030, 85% in 2050 and over 92% in 2100.

## Keywords

Storm Surge, Return Period, Extreme Water Level, General Extreme Value Theory, Prediction Analysis, Bohai Sea

---

# 渤海沿岸风暴潮极值水位的预测分析

刘欣, 王敬焜, 邓晓卓, 郑欣田, 王智慧, 丁玉梅\*

天津科技大学, 理学院, 天津  
Email: [dingym@tust.edu.cn](mailto:dingym@tust.edu.cn)

收稿日期: 2020年5月4日; 录用日期: 2020年5月20日; 发布日期: 2020年5月27日

---

## 摘要

利用三维FVCOM海洋动力学模型, 对渤海20年(1987~2006)风暴潮过程进行数值模拟, 利用GEV广义极值分布函数进行极值分析。结果表明, 不同重现期的极值水位变化显著, 尤其在塘沽和黄骅港。在塘沽港, 20年重现期和30年重现期的极值水位分别增加了7.76%和10.53%, 均高于当前水平。2030年、2050年和2100年塘沽港严重风暴潮发生的概率分别增加了60%、85%和超过92%。

\*通讯作者。

文章引用: 刘欣, 王敬焜, 邓晓卓, 郑欣田, 王智慧, 丁玉梅. 渤海沿岸风暴潮极值水位的预测分析[J]. 海洋科学前沿, 2020, 7(2): 37-43. DOI: [10.12677/ams.2020.72006](https://doi.org/10.12677/ams.2020.72006)

值理论对模拟数据进行统计分析,对渤海沿岸港口的风暴潮极值水位进行未来预测。结果表明,渤海沿岸的风暴潮重现期极值水位发生明显变化,特别是塘沽站和黄骅站重现期极值水位增加较大。在塘沽站,20年和30年重现期的风暴潮极值水位比目前增加了7.76%和10.53%。在塘沽站发生特大风暴潮的可能性在2030年内达到60%,在2050年内达到85%,而在2100年达到92%以上。

## 关键词

风暴潮, 重现期, 极值水位, 广义极值理论, 预测分析, 渤海

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

风暴潮灾害是全球范围内最严重的海洋灾害,在西北太平洋沿岸国家中,我国是风暴潮灾害发生次数最多、损失最严重的国家[1] [2] [3]。中国海洋灾害公报显示,我国每年由于风暴潮灾害造成的经济损失占海洋灾害总损失的80%以上。统计数据显示,2012年至2014年间平均每年海洋灾害引起的经济损失超过135亿元,其中由风暴潮灾害引起的经济损失超过126亿元。

风暴潮灾害的发生虽然是随机事件,但是也具有统计规律性。为减少风暴潮灾害造成的经济损失,国内外许多学者对风暴潮灾害规律进行了研究。吴少华等[4]采用1950至1998年塘沽验潮站的实测水位数据,研究了天津沿海风暴潮灾害的统计特征,指出天津沿海是世界上风暴潮频发区和最严重的海域之一,风暴潮灾害在一年四季均有发生。谢丽等[5]对20年(1989~2008)中国沿海风暴潮灾害的强度进行了统计分析,指出在全球气候变暖条件下,中国沿海地区的高潮位呈明显上升趋势,风暴潮灾害的频次、强度和时间尺度均有增加的趋势。Marta Marcos等[6]利用r-极值理论,对1960至2000年间南欧风暴潮的模拟数据进行统计分析,研究了气候变化对风暴潮灾害的影响。Wang Yanping等[7]利用ADCIRC模型和SWAN模型模拟了1985至2014年的32次风暴潮过程,并利用Gumbel模型对模拟数据进行统计分析,指出寒潮大风对莱州湾风暴潮的影响较大。

本文利用FVCOM浅海动力学模型[8],对渤海20年(1987~2006)的风暴潮灾害进行数值模拟,每年提取一次最大风暴潮过程,利用GEV广义极值理论对未来渤海风暴潮极值水位进行统计分析研究。

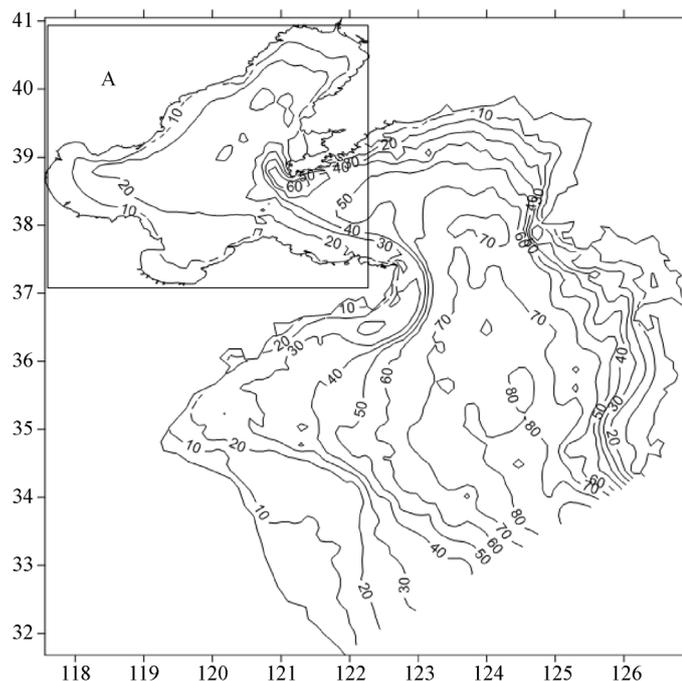
## 2. 模型设置与验证

FVCOM模型是由美国学者陈长胜博士团队开发的非结构网格海洋模型,模型采用有限体积法,该方法具有离散简单,计算高效,具有较强的适应性等优点,模型利用有限差分方法对控制方程进行离散,模型使用三角形网格便于实现对复杂海岸线的拟合[8]。FVCOM模型目前被广泛用于近岸河口等复杂岸线的模拟,如美国的乔治亚和麻州等河口地区和中国黄渤海海域。

### 2.1. 模型设置

本文中模型的研究区域是黄渤海海域如图1,其中A是渤海海域,计算区域的经纬度分别是北纬33.72°N~41.05°N,东经117.56°E~126.93°E,模型的开边界设置在长江口北岸到韩国济州岛连线。模型研究海域的空间分辨率在渤海湾近岸是1000 m,逐渐向外海增加,到开边界达到10,000 m。模型采用的是三角形网格,网格节点数为14,663个,三角形单元个数为28,236个,开边界节点个数为18个。采用正

压模型, 温度和盐度分别设为 10 度和 30。外模的时间步长设为 3 秒, 内模的时间步长设为 30 秒, 在开边界利用 OTPS 软件预报得到实时水位驱动, 对  $M_2$  和  $O_1$  等八个主要分潮进行调和分析, 提供海洋水边界条件[9]。



**Figure 1.** The topography and water depth of Yellow Sea and Bohai Sea  
**图 1.** 模型研究区域黄渤海海域的地形和水深图

## 2.2. 模型验证

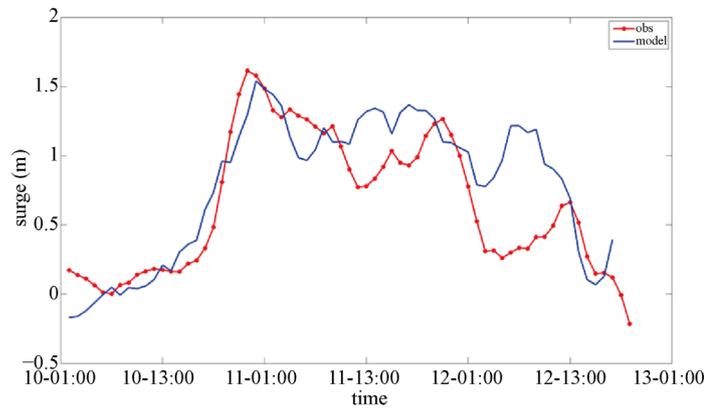
基于 FVCOM 模型, 建立渤海潮汐预报模型, 利用 OTPS 软件预报得到实时水位驱动, 模拟了 2003 年 10 月的渤海潮汐过程。收集各个验潮站记录的实测数据, 对潮汐模型进行校正, 使 FVCOM 模型能够较好反映渤海潮汐水位变化, 验证分析参见文献[9] [10]。

利用 WRF 中尺度气象预报模型模拟的风场数据, 利用 OTPS 模拟得到的潮汐数据作为海洋水边界条件, 对 2003 年 10 月的渤海寒潮风暴潮过程和 2005 年 8 月的台风风暴潮过程进行数值模拟, 并与实测数据进行对比分析, 验证模型的有效性。图 2 是 2003 年 10 月塘沽站风暴潮增水模拟与实测数据对比, 图 3 是 2005 年 8 月塘沽站风暴潮水位模拟与实测数据的对比。结果显示, 模拟的风暴潮过程在增水极值及时间上与实测数据基本吻合, 这说明模型能够用来较好模拟渤海风暴潮过程。

## 3. 模拟结果与分析

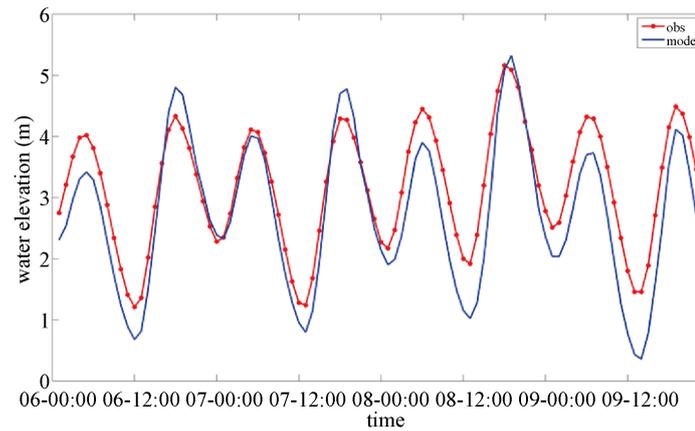
### 3.1. 广义极值理论

利用构建的 FVCOM 渤海风暴潮模型, 对 1987~2006 年的渤海风暴潮过程进行数值模拟, 利用广义极值理论对模拟数据进行统计分析。每年提取一次最大风暴潮过程, 记研究海域的每个格点最大风暴潮水位为  $x_i$ ,  $i=1,2,\dots,20$ , 20 年一共 20 个数据, 构造随机变量序列  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{20}\}$ , 设随机变量  $X$  服从  $G(x; \mu, \sigma, \zeta)$  广义极值分布, 假设随机变量相互独立且服从同一分布, 定义广义极值概率分布函数为(参见文献[11])。



**Figure 2.** The modeled and observed storm surge level at Tanggu Port in Oct. 2003

**图 2.** 2003 年 10 月塘沽站风暴潮增水模拟与实测数据的比较



**Figure 3.** The modeled and observed water elevation at Tanggu Port in Aug. 2005

**图 3.** 2005 年 8 月塘沽站风暴潮水位模拟与实测数据的比较

$$G(x_i; \mu, \sigma, \xi) = \exp \left[ - \left( 1 + \xi \frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^{\frac{1}{\xi}} \right] \quad (1)$$

其中,  $\mu, \sigma, \xi$  分别为位置参数、尺度参数和形状参数, 三个参数通过构造极大似然函数计算得到估计值。

记  $U(T)$  是  $T$  年观测重现期水位, 其中  $T$  表示时间, 单位是年, 计算得到重现期水位为(参见文献[11])

$$U(T) = \hat{G}^{-1} \left( 1 - \frac{1}{T} \right) = \mu - \frac{\sigma}{\xi} \left\{ 1 - \left[ -\log \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right]^{-\xi} \right\} \quad (2)$$

将塘沽站模拟计算的重现期风暴潮极值水位与文献[12]中塘沽站预测的重现期极值水位进行比较, 计算得到绝对误差均值是 0.11, 误差标准差是 0.10, 相对误差均值是 1.77%, 两组预测数据基本一致(见表 1)。说明利用广义极值理论进行统计分析的有效性, 能够用来预测渤海风暴潮未来的变化规律。

### 3.2. 渤海沿岸未来风暴潮极值水位统计分析

#### 3.2.1. 塘沽站风暴潮重现期极值水位分析

利用广义极值理论, 对塘沽站的风暴潮极值水位进行预测分析。表 2 是不同重现期塘沽站风暴潮重

现期极值水位的变化预测。研究发现,与历史数据相比,塘沽站的风暴潮极值水位增加明显,预测 10 年、20 年和 30 年的风暴潮极值水位分别增加了 2.91%、7.76%和 10.53%。

**Table 1.** Comparison of the prediction and literature extreme water level of storm surge in Tanggu Port  
**表 1.** 塘沽站风暴潮极值水位预测数据和文献数据比较(单位: m)

重现期(年)	5	10	20	50	100	200
本文预测	5.74	6.11	6.45	6.86	7.16	7.45
文献预测	6.01	6.30	6.57	6.92	7.18	7.44

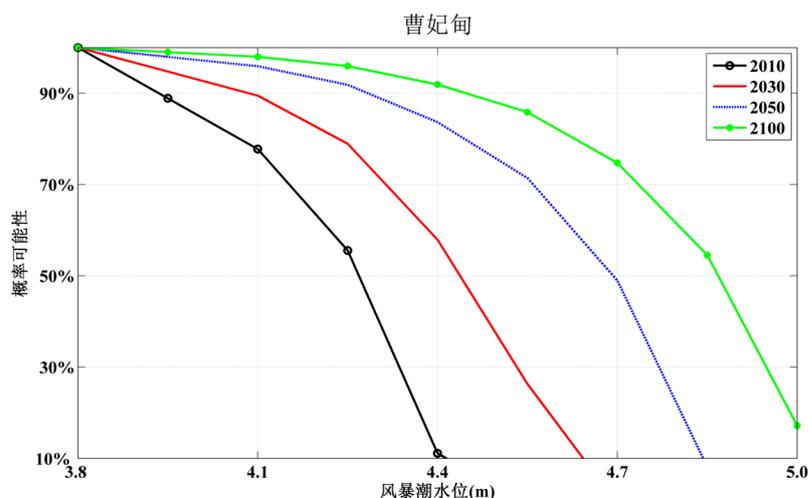
绝对误差均值 0.11 误差标准差 0.10 相对误差均值 1.77%

**Table 2.** Prediction of the extreme water level of storm surge in return periods at Tanggu Port  
**表 2.** 塘沽站的风暴潮重现期极值水位变化预测

历史数据及预测年份	最高水位/m	增长值/m	增长率/%
20 年历史数据	5.93	0	0
预测 10 年后	6.14	0.21	2.91
预测 20 年后	6.49	0.56	7.76
预测 30 年后	6.69	0.76	10.53

### 3.2.2. 渤海沿岸三个典型站位的风暴潮极值水位变化预测

图 4 显示的是曹妃甸港、塘沽港和黄骅港风暴潮极值水位的变化预测。在曹妃甸港,由于风暴潮水位不高,因此,未来百年内风暴潮极值水位增加不大,预计在 2030 年,风暴潮极值水位达到 4.4 m 的可能性为 55%,在 2050 年风暴潮极值水位达到 4.7 m 的可能性达到 50%,而在 2100 年,风暴潮极值水位达到 4.7 m 的可能性达到 75%。在塘沽港和黄骅港,未来百年风暴潮极值水位增加幅度较大。在塘沽港,目前的风暴潮警戒水位是 4.7 m,超过警戒水位 1.5 m 以上为特大风暴潮,预测风暴潮极值水位达到 6.2 m 特大风暴潮的可能性,在 2010 达到 10%,在 2030 年内达到 60%,在 2050 年内达到 85%,而在 2100 年达到 92%以上。在黄骅港,目前的风暴潮警戒水位是 4.8 m,特大风暴潮水位定义为 6.3 m 以上,预测风暴潮极值水位达到 6.3 m 以上的可能性,在 2010 是 17%,在 2030 年内达到 65%,在 2050 年内达到 86%,而在 2100 年达到 93%以上。



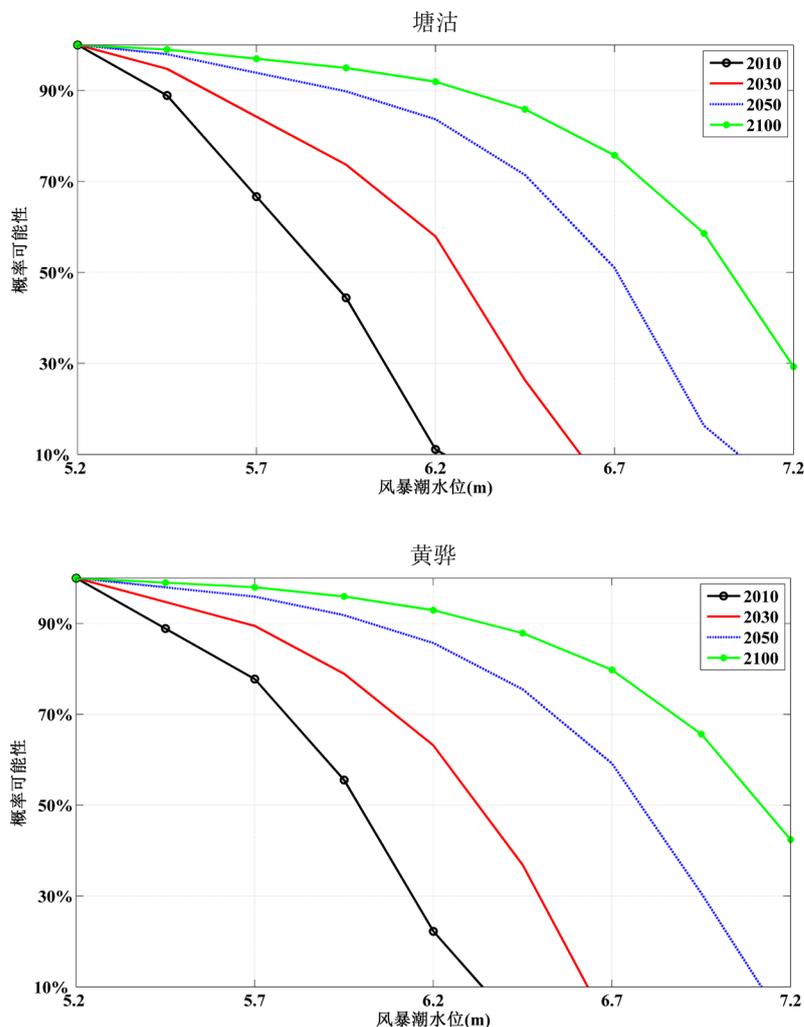


Figure 4. Expected fraction of years with extreme water levels of storm surge at Caofeidian, Tanggu and Huanghua Ports

图 4. 曹妃甸港、塘沽港和黄骅港风暴潮极值水位未来预测

#### 4. 结论与讨论

本文利用 FVCOM 浅海动力学模型, 对渤海 20 年风暴潮过程进行数值模拟, 利用广义极值理论研究了渤海沿岸站点风暴潮未来极值水位的变化。研究发现, 未来百年塘沽站和黄骅港未来风暴潮极值水位较高, 风暴潮灾害风险较大。预测塘沽站 10 年、20 年和 30 年的风暴潮极值水位相比历史数据分别增加了 2.91%、7.76% 和 10.53%。在塘沽站发生特大风暴潮的可能性在 2030 年内达到 60%, 在 2050 年内达到 85%, 而在 2100 年达到 92% 以上。

由于本文利用数值模拟的模型数据进行统计分析, 统计预测的结果具有一定的局限性, 今后将会利用更多的实测数据对模型进行改进, 为未来渤海风暴潮灾害预报和海堤防护建设提供指导。

#### 基金项目

天津科技大学大学生创新创业训练项目(201910057265); 天津市应用基础与前沿技术研究计划(19JCYBJC22000); 天津市高等学校基本科研业务费(2018KJ12)。

## 参考文献

- [1] 冯士筭. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [2] 冯士筭, 张经, 魏皓. 渤海环境动力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [3] 张志华, 郭伟, 魏皓. 黄渤海大风频次的年际变化及其影响因子分析[J]. 海洋预报, 2013, 30(1): 1-8.
- [4] 吴少华, 王喜年, 宋珊, 等. 天津沿海风暴潮灾害概述及统计分析[J]. 海洋预报, 2002, 19(1): 29-35.
- [5] 谢丽, 张振克. 近 20 年中国沿海风暴潮强度、时空分布与灾害损失[J]. 海洋通报, 2010, 29(6): 690-696.
- [6] Marcos, M., Jordà, G. and Gomis, D., *et al.* (2011) Changes in Storm Surges in Southern Europe from a Regional Model under Climate Change Scenarios. *Global and Planetary Change*, 77, 116-128. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.04.002>
- [7] Wang, Y.P., Mao, X.Y. and Jiang, W.S. (2018) Long-Term Hazard Analysis of Destructive Storm Surges Using the ADCIRC-SWAN Model: A Case Study of Bohai Sea, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 52-62. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.03.013>
- [8] Chen, C.S., Liu, H.D. and Beardsley, R.C. (2003) An Unstructured, Finite-Volume, Three-Dimensional, Primitive Equation Ocean Model: Application to Coastal Ocean and Estuaries. *Journal of Atmospheric and Ocean Technology*, 20, 159-186. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)020%3C0159:AUGFVT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)020%3C0159:AUGFVT%3E2.0.CO;2)
- [9] Ding, Y.M. and Wei, H. (2017) Modeling the Impact of Land Reclamation on Storm Surges in Bohai Sea, China. *Natural Hazards*, 85, 559-573. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2586-4>
- [10] 丁玉梅, 丁磊. 渤海风暴潮过程的数值模拟研究[J]. 天津科技大学学报, 2018, 33(3): 57-62.
- [11] 史道济. 实用极值统计方法[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 2006: 43-59.
- [12] 马筱迪, 张光宇, 袁德奎, 李原仪. 基于历史数据的天津沿岸风暴潮特性分析[J]. 海洋科学进展, 2016, 34(4): 516-522.