



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20240224

网络首发日期: 2025-10-27; 网络首发地址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.N.20251027.1401.008>

百年重现期渤海风暴潮灾害统计分析与风险评估

丁玉梅¹, 叶子凡²

(1. 天津科技大学理学院, 天津 300457; 2. 天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457)

摘要: 基于FVCOM(finite volume coastal ocean model)海洋动力学模型,利用WRF(regional weather research forecasting model)中尺度气象预报模型的模拟数据,对渤海20年(1987—2006年)风暴潮过程进行长期数值模拟,利用广义极值(general extreme value, GEV)理论对模拟数据进行统计分析,对渤海风暴潮灾害风险进行统计分析。分析了100年重现期塘沽站、黄骅站等站位的最大风暴潮的累积概率,指出10年重现期塘沽站风暴潮最高水位超过5.1 m的概率为100%,超过5.9 m的概率为41%,超过6.1 m的概率为10%。100年重现期,塘沽站风暴潮最高水位超过5.1 m的概率为100%,超过6.9 m的概率为59%。数据统计分析指出,300年重现期水平,在95%的置信水平下塘沽、黄骅、曹妃甸和羊角沟站位的风暴潮重现期水位在前20年增加较快,之后缓慢增加并逐渐趋于稳定,其中黄骅、塘沽两个站位的涨幅较大。给出100年重现期渤海风暴潮最高水位的空间分布特征,100年重现期风暴潮最大水位发生在渤海湾西部海岸,最高水位达到7.0~7.5 m,需要引起足够重视。对渤海风暴潮灾害风险进行预测评估,给出渤海风暴潮灾害预警级别的空间分布,10年重现期,渤海湾近岸的风暴潮灾害预警级别最大,属于红色预警级别,辽东湾湾顶和莱州湾湾底次之,属于橙色预警级别;100年重现期,渤海湾风暴潮灾害等级为红色预警级别,辽东湾海域属于橙色预警级别,辽东湾湾顶属于红色预警级别,而莱州湾大部分海域属于橙色预警级别。

关键词: 风暴潮; 风险评估; 数值模拟; 统计分析; FVCOM; 渤海

中图分类号: P731.23

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2026)03-0073-08

Statistical Analysis and Risk Assessment of Storm Surge Disasters in the Bohai Sea with a 100-Year Return Period

DING Yumei¹, YE Zifan²

(1. College of Sciences, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;

2. College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Based on the finite volume coastal ocean model (FVCOM) and simulation data obtained from the weather research and forecasting (WRF) mesoscale meteorological forecasting model, a long-term numerical simulation of storm surge processes in the Bohai Sea over 20 years (1987-2006) was conducted in this current study. The simulated data were statistically analyzed by using the generalized extreme value (GEV) theory, and the future storm surge disaster risk in the Bohai Sea was statistically assessed. The cumulative probabilities of the highest water levels of storm surge at stations including Tanggu and Huanghua under a 100-years return period were analyzed. The results indicate that for a 10-year return period at Tanggu Station, the probability of the highest storm surge level exceeding 5.1 m is 100%, exceeding 5.9 m is 41%, and exceeding 6.1 m is 10%. For a 100-year return period at Tanggu Station, the probability of exceeding 5.1 m remains 100%, while the probability of exceeding 6.9 m is 59%. Statistical analysis of the data shows that at the 300-year return level and with a 95% confidence level, the storm surge return levels at Tanggu, Huanghua, Caofeidian, and Yangjiagou stations increase rapidly during the first 20 years, followed by a slower increase that gradually stabilizes. Among these, notably, Tanggu and Huanghua stations exhibit the most significant increases. The spatial distribution characteristics of the highest storm surge levels in the

收稿日期: 2024-11-07; 修回日期: 2025-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41876018, 41606098); 天津市自然科学基金项目(19JCYBJC22000)

作者简介: 丁玉梅(1972—), 女, 山东烟台人, 教授, dingym@tust.edu.cn

Bohai Sea under a 100-year return period are presented. The highest surge levels (7.0–7.5 m) occur along the western coast of Bohai Bay, which warrants significant attention. The storm surge disaster risk in the Bohai Sea is predicted and assessed, and the spatial distribution of storm surge disaster warning levels is provided. Under a 10-year return period, the nearshore areas of Bohai Bay face the highest storm surge hazard risk, classified as red warning level (the most severe). The innermost zone of Liaodong Bay and the bottom part of Laizhou Bay follow, categorized as orange (high risk), indicating secondary but significant threats. Under a 100-year return period, the storm surge disaster level in Bohai Bay is classified as red, the waters of Liaodong Bay are orange, the innermost zone of Liaodong Bay escalates to red, and most areas of Laizhou Bay are orange.

Key words: storm surge; risk assessment; numerical simulation; statistical analysis; FVCOM; Bohai Sea

引文格式:

丁玉梅, 叶子凡. 百年重现期渤海风暴潮灾害统计分析与风险评估[J]. 天津科技大学学报, 2026, 41 (3): 73–80.

DING Y M, YE Z F. Statistical analysis and risk assessment of storm surge disasters in the Bohai Sea with a 100-year return period[J]. Journal of Tianjin university of science and technology, 2026, 41 (3): 73–80.

风暴潮灾害居于世界海洋灾害之首,我国是受风暴潮灾害影响极为严重的国家之一^[1-2]。近20年来由风暴潮灾害造成的经济损失高达2500亿元,约占全部海洋灾害损失的94%^[3-4]。渤海是典型的半封闭海湾型陆架浅海,北部的辽东湾、西部的渤海湾、南部的莱州湾和中央海区通过渤海海峡与黄海相连。风暴潮通常分为由温带气旋或寒潮引起的温带风暴潮和热带气旋(台风)风暴潮,而在渤海和黄海北部,很容易受到寒潮大风的影响,形成温带风暴潮。因此,环渤海沿海地区的风暴潮一年四季均有发生,且造成的直接经济损失比较大^[1-2]。

为了减少风暴潮灾害带来的经济损失,国内外许多学者对风暴潮灾害的长期规律进行研究^[5-8]。Butler等^[9]研究1955—2000年北海中部和南部风暴潮极值水位的分布变化,给出各站位风暴潮50年重现期极值水位的变化趋势,并给出极值水位的空间分布特征。Marcos等^[10]利用联合国政府间气候变化专门委员会的数据和全球温室气体排放数据,对1960—2000年南欧风暴潮模拟数据进行统计分析,利用 r -极值理论,研究风暴潮灾害对气候变化的响应,研究结果显示:2060—2100年,在地中海海域的东部,中等强度风暴潮有增加趋势,发生较大强度风暴潮的可能性不大。Guo等^[11]对2001—2020年舟山群岛海域台风风暴潮进行数值模拟,探究了舟山群岛风暴潮的时空分布特征,指出靠近大陆的岛屿通常比偏远离岸岛屿的风暴潮水位更高。吴亚楠等^[12]利用ADCIRC模式模拟了1960—2011年间的风暴潮过程,对山东省成灾台风进行基础性的风险评估,给出了山东部分城市海域百年一遇风暴潮增水极值,指出青岛、东营及海阳的百年一遇风暴潮增水值较大,都超过了3.50 m。Wang等^[13]利用ADCIRC和SWAN模型模

拟了1985—2014年间的32次风暴潮过程,利用Gumbel统计模型进行数据统计分析,指出寒潮大风对莱州湾风暴潮的影响较大,导致的风暴潮灾害风险也较大。

风暴潮灾害是随机性的极端事件,需要进行长期统计规律性研究。本文模拟了20年(1987—2006年)的渤海风暴潮过程,提取每年的最大风暴潮过程,利用广义极值理论对渤海风暴潮进行长期规律的统计分析与灾害风险预测研究。

1 模型设置与验证

本文的研究区域为黄海、渤海海域,模型的开边界设在长江口北岸到韩国济州岛连线处,研究区域的地形和水深如图1所示,有关地形及水深数据的处理方法参见文献[14]。利用三维FVCOM(finite volume coastal ocean model)海洋动力学模型进行渤海潮汐和风暴潮过程的数值模拟,有关模型的控制方程参见文献[15]。

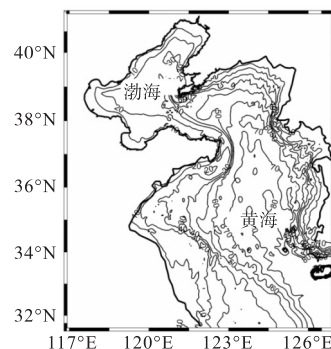


图1 研究区域的地形和水深

Fig. 1 Terrain and water depth map of the study area

1.1 模型设置

对黄海、渤海研究区域进行三角形网格划分, 网格分辨率由渤海湾近海处的 1 000 m, 逐渐增加到外海开边界附近的 10 000 m。设置网格节点数 14 663 个, 三角形网格单元共 28 236 个, 开边界节点数为 18 个。采用正压模型, 模型考虑了 8 个主要分潮 (M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1), 以 OTPS (OSU tidal prediction software) 潮汐预报模式预报的实时水位为开边界条件^[16-17]。模型采用的风场数据是 WRF (regional weather research forecasting model) 中尺度气象预报模型模拟的风场数据, 时间分辨率为每 3 h 一次, 空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。模型的温度和盐度分别设置为 10°C 和 30, 外模时间步长为 3 s, 内模时间步长为 30 s。模型采用冷启动, 初始计算从 2003 年 10 月 1 日 0 时开始, 计算 30 d。在模式达到稳定后, 模拟从 1987 年到 2006 年连续 20 年的风暴潮水位数据, 模型输出时间以小时为单位。

1.2 模型验证

首先利用 FVCOM 潮汐模型对黄海、渤海潮汐过程进行数值模拟, 并进行验证。利用 T-tide 软件对渤海各个主要分潮进行调和分析, 得到的调和常数与文献基本吻合。模拟的黄渤海海域 M_2 分潮和 K_1 分潮的等振幅和等迟角图如图 2 所示, 模拟的同潮时图与海图对比基本一致。

利用 FVCOM 风暴潮模型对渤海风暴潮进行数值模拟, 利用实测风暴潮增水数据与模拟数据时间序列进行对比分析, 得到实测水位数据与模拟水位数据在趋势变化上大体一致, 特别是模拟的极值点水位与实测极值数据在时间和相位上基本一致^[18], 这体现了 FVCOM 风暴潮模型的有效性。

对渤海 20 年 (1987—2006 年) 风暴潮过程进行数值模拟, 选取塘沽站每年一次的风暴潮最大水位, 并与验潮站实测水位数据 (见表 1) 进行对比, 通过计算误差, 对模型模拟效果进行评估。绝对误差的均值表示为

$$\bar{e} = \text{mean}(|M - O|) \quad (1)$$

其中: $\bar{e}$ 为绝对误差的均值, M 和 O 分别为模拟数据和实测数据。绝对误差均值越小, 模拟误差越小。

计算实测数据和模拟数据的差值的方差与实测数据的方差的比值, 用来评价模型模拟的效果, 比值越接近 0, 模拟效果越好。计算结果显示模型模拟数据误差较小, 模拟效果较好。

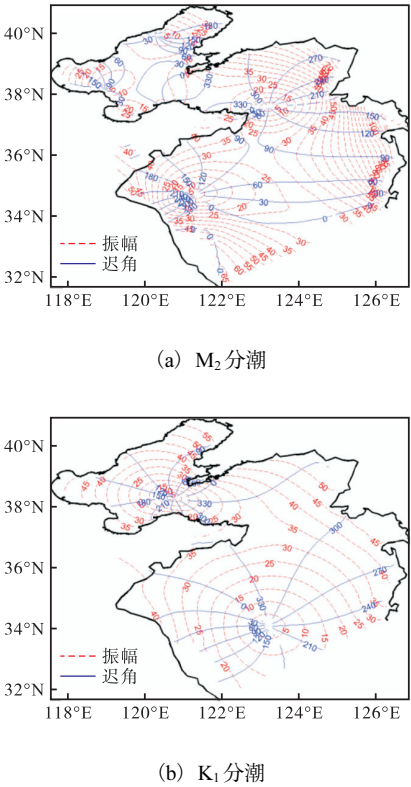


图 2 模拟的黄海、渤海海域 M_2 分潮和 K_1 分潮的等振幅 (cm) 和等迟角 ($^\circ$) 图
Fig. 2 Co-amplitude (in centimeters) and co-phase (in degrees) maps of the simulated M_2 and K_1 tidal elevations in the Yellow Sea and Bohai Sea

表 1 塘沽站实测最大水位和模拟最大水位的对比分析
Tab. 1 Comparative analysis of observed and simulated maximum water levels at Tanggu Station

日期	水位/m		$\bar{e}$	γ^2
	实测	模拟		
1987-11-27	4.97	5.12	0.153	0.000 892
1988-03-14	4.85	5.00	0.153	0.000 935
1989-06-03	4.75	4.89	0.145	0.000 877
1990-05-02	4.60	4.79	0.197	0.001 687
1991-03-19	4.77	5.00	0.239	0.002 277
1992-09-01	5.93	6.19	0.265	0.001 830
1993-11-16	4.86	5.04	0.183	0.001 317
1994-08-15	5.18	5.24	0.064	0.000 149
1995-02-26	—	4.54	—	—
1996-10-03	5.10	5.28	0.184	0.001 213
1997-08-20	5.59	5.62	0.033	0.000 034
1998-11-02	4.58	4.50	0.077	0.000 292
1999-08-11	—	5.05	—	—
2000-11-13	—	4.89	—	—
2001-01-11	4.30	4.49	0.199	0.001 956
2002-10-17	—	5.19	—	—
2003-10-12	5.33	5.44	0.113	0.000 431
2004-09-15	4.92	5.04	0.124	0.000 604
2005-08-08	5.20	5.24	0.047	0.000 080
2006-11-01	—	4.28	—	—

$$\gamma^2 = \frac{\text{Var}(M-O)}{\text{Var}(O)} \quad (2)$$

2 研究方法

利用 20 年的渤海风暴潮模拟数据,提取每年一次的最大风暴潮过程,利用广义极值理论,对渤海风暴潮最大水位进行概率统计分析。

广义极值(general extreme value, GEV)理论^[19]是一种对极值事件进行拟合分析时适应性很强的方法,该方法将概率统计中常用的 3 种概率分布函数 Gumbel 分布、Weibull 分布和 Frechet 分布进行统一,解决了只能用一种极值分布函数表达的局限性。

广义极值分布的参数可用极大似然估计、最小二乘法估计和线性矩估计等估计方法。本文采用极大似然估计的方法对拟合参数进行估计。提取每年一次的最大风暴潮过程,构造随机变量序列 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{20}\}$,研究随机变量服从的概率分布函数,计算概率密度函数,构造联合概率密度函数,通过联合极大似然函数估计方法(MLE),对概率分布函数中的未知参数进行估计,记广义概率分布函数为

$$G(x; \mu, \sigma, \xi) = \exp \left[- \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\xi}} \right] \quad (3)$$

其中: μ 为位置参数, σ 为尺度参数, ξ 为形状参数。

记广义极值分布的联合对数极大似然函数为

$$l(\theta) = \begin{cases} -n \log \sigma - \sum_{i=1}^n \left(1 + \xi \frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\xi}} - \\ \quad \left(1 + \frac{1}{\xi} \right) \sum_{i=1}^n \log \left(1 + \xi \frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) & (\xi \neq 0) \\ -n \log \sigma - \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) - \\ \quad \sum_{i=1}^n \exp \left[- \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) \right] & (\xi = 0) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, 20$, $n = 20$ 。

根据模拟的水位数据,计算黄海、渤海海域全部网格点在 1987—2006 年每一年的水位极值,根据每个网格点的水位极值序列进行广义极值分布拟合。利用极大似然估计的方法计算得到每个格点的广义极值分布的 3 个参数,根据参数估计值得到广义极值分布函数 $\hat{G}(x)$,计算得到重现期水位函数为

$$U(T) = \hat{G}^{-1} \left(1 - \frac{1}{T} \right) = \mu - \frac{\sigma}{\xi} \left\{ 1 - \left[-\log \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]^{-\xi} \right\} \quad (5)$$

进行后续工作前,需要对广义极值理论模型是否能够合理地描述模拟数据的统计特征进行检查。分位数图(概率 Q-Q 图)是一种广泛使用的诊断工具,用于评价拟合得到的统计模型的分布与模拟数据的经验分布的合理性。由于概率 Q-Q 图中考察的是统计模型中极值水位的分布,因此概率 Q-Q 图特别适合评估广义极值模型模拟的准确性。

假设由极大似然估计得到的分布函数为 $\hat{G}(x)$,记样本的次序统计量为 $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_{20}$,概率 Q-Q 图由点 $\left\{ \hat{G}^{-1} \left(\frac{i}{n+1} \right), x_i, i = 1, 2, \dots, 20 \right\}$ 组成。

$$\hat{G}^{-1}(x) = \mu - \frac{\sigma}{\xi} \left\{ 1 - [-\log(x)]^{-\xi} \right\} \quad (6)$$

如果风暴潮极值水位样本服从广义极值分布,则计算得到的概率 Q-Q 图近似为一条直线,通过上述分析得到模型诊断图,塘沽站风暴潮极值水位的概率 Q-Q 图如图 3 所示。图 3 中经验值来自表 1 的实测值,经验值和模拟值基本一致,数据点分布在一条直线附近。这说明本文选取的风暴潮极值水位随机变量服从广义极值分布函数,可以用来预测不同重现期渤海风暴潮极值水位的变化规律。

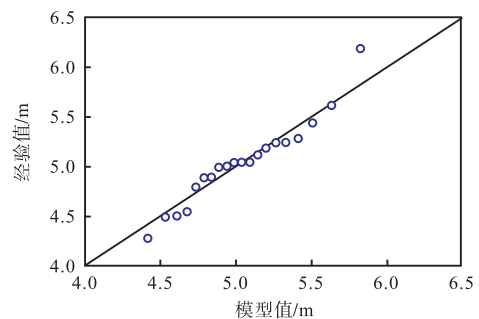


图3 塘沽站风暴潮极值水位的概率 Q-Q 图

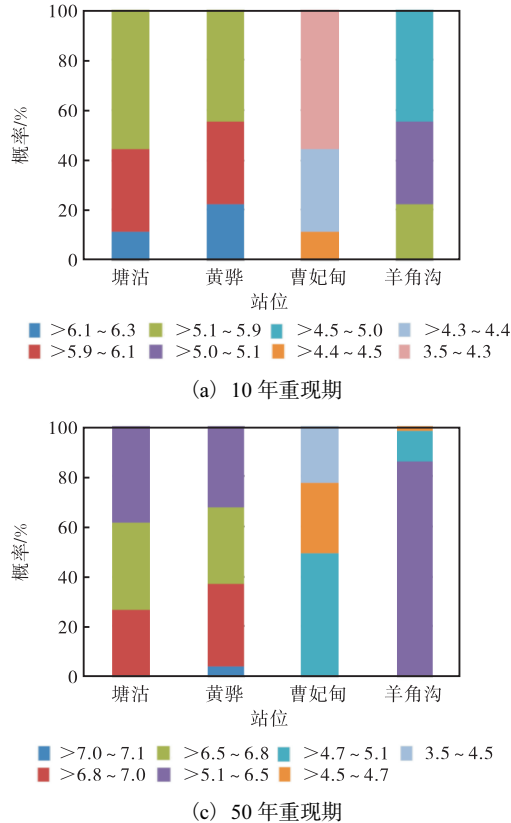
Fig. 3 Probability Q-Q plot for extreme water levels at Tanggu Station

3 渤海海域风暴潮灾害预测分析

3.1 渤海典型站位的风暴潮灾害预测

为了尽可能准确地预报风暴潮的水位,根据美国国家气象中心(NWS)采用的概率集合预报方式,最终预报结果有两种发布方式。一种是超过某一预定水位的概率分布图,即在每个个例情景中,如果增水超过这一预定水位值,便结合其所占的比例,将其考虑到综合效应的结果中,最终给出超过这一水位的概率分布图;另一种是发生概率高于设定值的水位分布图,这种方法设定一个可能发生的概率值,然后将每

个情景某处的水位值的发生概率与其所占的比例进行加权求和, 得到这一水位可能发生的概率, 再分别按 10% ~ 90% 的概率 (步长为 10%) 给出在某种可能概率下的水位分布图^[20]。



通过对模拟数据的统计分析, 本文利用上述第二种方式, 对不同重现期的渤海风暴潮灾害进行预测分析。不同重现期渤海典型站位风暴潮最大水位的累积概率如图 4 所示。

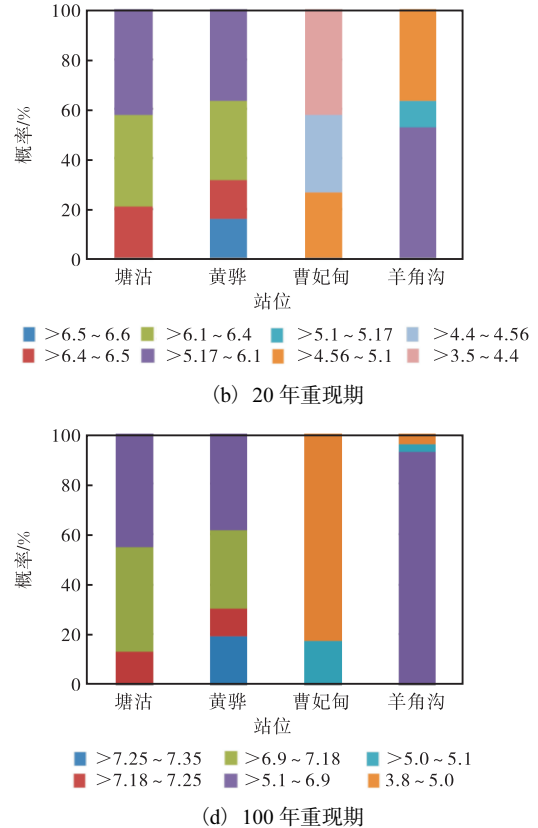


图 4 不同重现期渤海典型站位风暴潮最大水位的累积概率图

Fig. 4 Cumulative probability plots of maximum surge levels at typical Bohai Sea stations for different return periods

图中不同颜色代表最大风暴潮水位的大小, 每种颜色条的上界表示风暴潮水位达到对应水位值的最大概率。重现期为 10 年时, 塘沽站风暴潮最高水位超过 5.1 m 的概率为 100%, 超过 5.9 m 的概率为 41%, 超过 6.1 m 的概率为 10%。黄骅站风暴潮最高水位超过 5.1 m 的概率是 100%, 超过 5.9 m 的概率是 55%, 超过 6.1 m 的概率为 22%。由于塘沽站和黄骅站的风暴潮预警水位分别是 4.7 m 和 4.8 m, 因此 10 年重现期塘沽站和黄骅站的风暴潮预警级别都达到橙色预警级别 (Ⅱ级)。在 100 年重现期内, 塘沽站和黄骅站发生风暴潮灾害的风险较大。100 年重现期, 塘沽站风暴潮最高水位超过 5.1 m 的概率为 100%, 超过 6.9 m 的概率是 59%; 而在黄骅站风暴潮最高水位超过 5.1 m 的概率是 100%, 超过 6.9 m 的概率是 60%。以塘沽站、黄骅站、曹妃甸站和羊角沟站为例, 计算了 95% 的置信水平下, 不同重现期的风暴潮极值水位的变化 (图 5)。从 300 年重现期内 4 个

站位的最大风暴潮水位变化趋势可以看出, 风暴潮极值水位在前 20 年增加较快, 之后缓慢增加并逐渐趋于稳定, 其中黄骅站和塘沽站的涨幅较大, 因此灾害风险较大。20 年重现期, 黄骅站、塘沽站、羊角沟站和曹妃甸站的重现期水位分别达到 6.5 m、6.6 m、4.6 m 和 5.3 m; 而在 300 年重现期, 4 个站位的重现

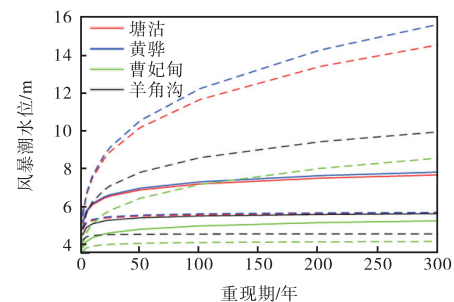


图 5 渤海典型站位不同重现期下风暴潮水位变化趋势 (虚线表示 95% 的置信水平)

Fig. 5 Variation trend of surge levels at typical Bohai Sea stations under different return periods (Dashed line represents the 95% confidence level)

期水位分别是 7.7 m、7.9 m、5.3 m 和 5.7 m, 灾害风险基本趋于稳定。

3.2 渤海风暴潮灾害空间分布预测

根据 20 年的数值模拟数据, 计算了渤海不同重现期风暴潮最大水位分布, 结果如图 6 所示。

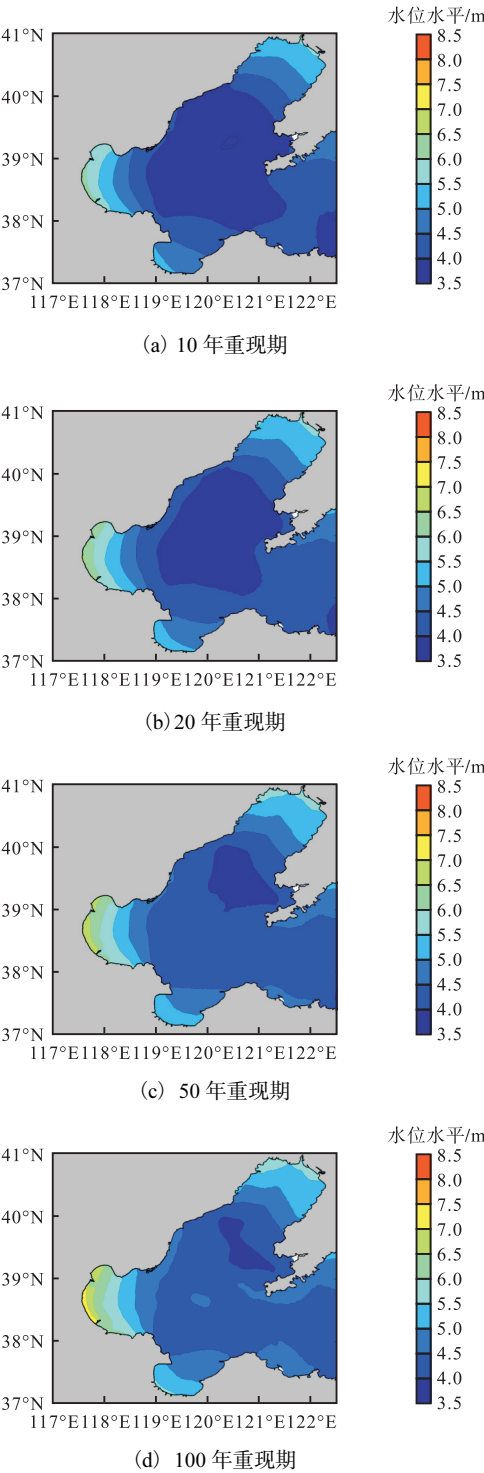


图 6 不同重现期渤海风暴潮最大水位空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of maximum surge levels in the Bohai Sea under different return periods

综合考虑渤海寒潮风暴潮和台风风暴潮的影响, 风暴潮最大水位发生在渤海湾的可能性最大, 其次是辽东湾和莱州湾。10 年重现期, 渤海湾西部海岸风暴潮最大水位为 6.0 ~ 6.5 m。50 ~ 100 年重现期, 渤海湾西部海岸和湾顶最大风暴潮最大水位达到 7.0 ~ 7.5 m, 而辽东湾和莱州湾的风暴潮最大水位为 5.5 ~ 6.0 m。

4 渤海风暴潮灾害风险评估

GB/T 17839—2011《警戒潮位核定规范》显示, 风暴潮灾害应急响应分为 I、II、III、IV 四级, 分别对应特别重大海洋灾害、重大海洋灾害、较大海洋灾害和一般海洋灾害, 颜色依次为红色、橙色、黄色和蓝色。基于超过近岸监测站位风暴潮警戒水位的程度大小, 将沿海的风暴潮预警级别分成红色、橙色、黄色和蓝色 4 个等级, 分别对应于 I、II、III 和 IV 4 个等级, 核定的四色风暴潮灾害预警等级划分标准见表 2。

表 2 四色风暴潮灾害预警等级划分标准

Tab. 2 Classification criteria for four-color storm surge disaster warning level

颜色	级别	增水/cm
红	I	>80
橙	II	30 ~ <80
黄	III	0 ~ <30
蓝	IV	-30 ~ <0

塘沽站和黄骅站的警戒潮位分别是 470 cm 和 480 cm, 由于缺少其他网格点的警戒潮位观测数据, 因此利用塘沽站的警戒潮位作为渤海的警戒潮位标准, 进行重现期风暴潮灾害的预警级别评估。

利用广义极值理论, 计算了渤海风暴潮水位极值, 基于超过警戒潮位 470 cm 的水位增加, 研究渤海风暴潮预警级别的空间分布特征, 结果如图 7 所示。10 年重现期, 渤海湾近岸的风暴潮灾害预警级别最大, 属于 I 级红色预警级别; 辽东湾湾顶和莱州湾湾底次之, 风暴潮灾害预警级别较大, 属于 II 级橙色预警级别; 渤海中部和渤海海峡的风暴潮灾害的预警级别较低, 属于 IV 级蓝色预警级别。100 年重现期, 整个渤海湾风暴潮灾害属于 I 级红色预警级别, 辽东湾风暴潮灾害属于 II 级橙色预警级别, 辽东湾湾顶达到红色预警级别, 莱州湾大部分区域风暴潮灾害属于 II 级橙色预警级别。

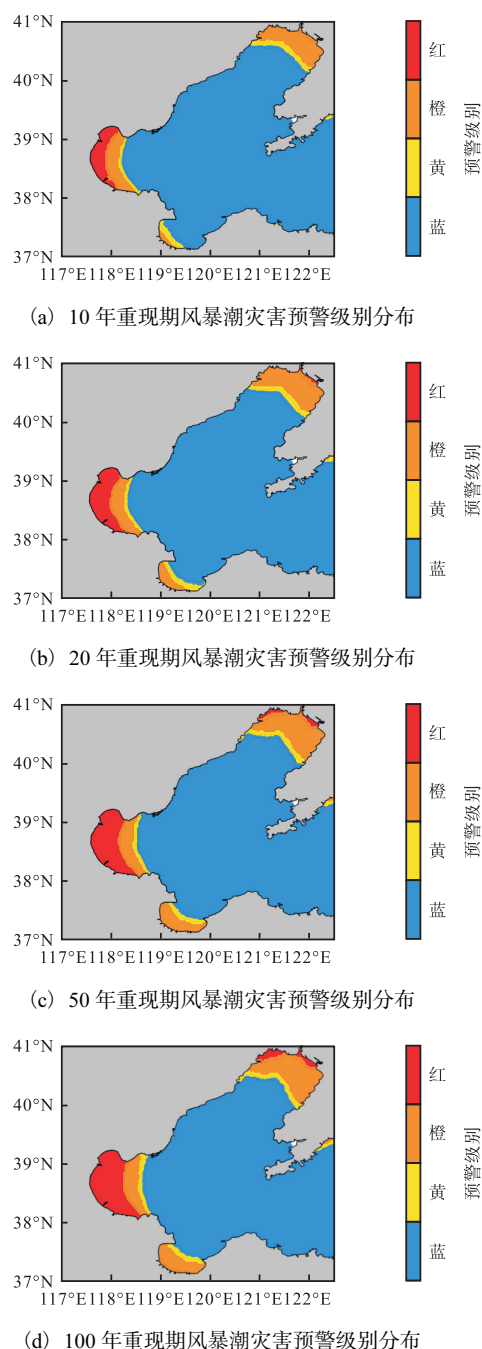


图 7 不同重现期渤海风暴潮预警级别的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of storm surge warning levels in the Bohai Sea under different return periods

5 结 语

利用 FVCOM 海洋动力学模型模拟计算了 20 年 (1987—2006 年) 渤海寒潮风暴潮和台风风暴潮过程; 通过广义极值理论, 根据渤海风暴潮的特点, 提取每年一次的最大风暴潮过程; 利用最大水位值, 构造联合概率密度函数, 利用极大似然估计法, 对概率分布函数的参数进行估计, 计算渤海海域不同重现期

的风暴潮水位。统计分析了 100 年重现期条件下塘沽站、黄骅港等站位的最大风暴潮的累积概率, 指出 10 年重现期, 塘沽站风暴潮最高水位超过 5.1 m 的概率为 100%, 超过 5.9 m 的概率为 41%, 超过 6.1 m 的概率为 10%。100 年重现期, 塘沽站风暴潮最高水位超过 5.1 m 的概率是 100%, 超过 6.9 m 的概率是 59%。统计分析发现, 300 年重现期, 在 95% 的置信水平下塘沽站、黄骅站、曹妃甸站和羊角沟站的风暴潮重现期水位在前 20 年增加较快, 之后缓慢增加并逐渐趋于稳定, 其中塘沽站和黄骅站两个站位的涨幅较大, 灾害风险程度较大。最后, 给出 100 年重现期渤海风暴潮最大水位的空间分布, 综合考虑渤海寒潮风暴潮和台风风暴潮的影响, 风暴潮极值水位发生在渤海湾西部海岸的可能性最大, 其次是辽东湾和莱州湾。10 年重现期渤海湾西部海岸风暴潮最大水位在 6.0 ~ 6.5 m。50 ~ 100 年重现期, 渤海湾西部海岸最大风暴潮最大水位达到 7.0 ~ 7.5 m, 而辽东湾和莱州湾的风暴潮最大水位在 5.5 ~ 6.0 m 之间。对渤海风暴潮灾害风险进行预测评估, 给出不同重现期水平下, 渤海风暴潮预警级别的空间分布。10 年重现期, 渤海湾近岸的风暴潮灾害预警级别最大, 属于红色预警级别, 辽东湾湾顶和莱州湾湾底次之, 风暴潮灾害预警级别较大, 属于橙色预警级别。100 年重现期水平下, 渤海湾风暴潮灾害风险等级为红色预警级别, 辽东湾属于橙色预警级别, 辽东湾湾顶局部海域是红色预警级别, 而莱州湾大部分海域属于橙色预警级别。统计分析的结果可以为渤海风暴潮灾害预防与堤防建设工作提供一定的理论依据和决策支持。

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, 2007.
- [3] 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.
- [4] 侯京明, 于福江, 原野, 等. 影响我国的重大台风风暴潮时空分布[J]. 海洋通报, 2011, 30(5): 535-539.
- [5] YIN C T, ZHANG W S, XIONG M J, et al. Storm surge responses to the representative tracks and storm timing in the Yangtze Estuary, China[J]. Ocean engineering, 2021, 233: 109020.
- [6] CHEN W, LIU W L, LIANG H D, et al. Response of storm surge and M2 tide to typhoon speeds along coastal Zhejiang Province[J]. Ocean engineering, 2023, 270:

- 113646.
- [7] FENG J L, JIANG W S, LI D L, et al. Characteristics of tide-surge interaction and its roles in the distribution of surge residuals along the coast of China[J]. Journal of oceanography, 2019, 75: 225–234.
- [8] FENG J L, LI D L, DANG W, et al. Changes in storm surges based on a bias-adjusted reconstruction dataset from 1900 to 2010[J]. Journal of hydrology, 2023, 617: 128759.
- [9] BUTLER A, HEFFERNAN J E, TAWN J A, et al. Extreme value analysis of decadal variations in storm surge elevations[J]. Journal of marine systems, 2007, 67(1/2): 189–200.
- [10] MARCOS M, JORDÀ G, GOMIS D, et al. Changes in storm surges in southern Europe from a regional model under climate change scenarios[J]. Global and planetary change, 2011, 77(3/4): 116–128.
- [11] GUO Z, CAO A Z, MA W Y, et al. Spatiotemporal features of storm surges in the Zhoushan Archipelago from 2001 to 2020[J]. Continental shelf research, 2025, 291: 105492.
- [12] 吴亚楠, 王智峰, 董胜, 等. 山东沿海台风暴潮数值模拟与统计分析[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(3): 169–176.
- [13] WANG Y P, MAO X Y, JIANG W S. Long-term hazard analysis of destructive storm surges using the ADCIRC-SWAN model: a case study of Bohai Sea, China[J]. International journal of applied earth observation and geoinformation, 2018, 73: 52–62.
- [14] CHOI B H, KIM K O, EUM H M. Digital bathymetric and topographic data for neighboring seas of Korea[J]. Journal of Korean society of coastal and ocean engineers, 2002, 14(1): 41–50.
- [15] CHEN C S, LIU H D, BEARDSLEY R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2003, 20(1): 159–186.
- [16] 陈波昌, 魏皓. FVCOM 模型在渤海湾潮流潮汐模拟中的应用[J]. 天津科技大学学报, 2013, 28(4): 40–43.
- [17] DING Y M, WEI H. Modeling the impact of land reclamation on storm surges in Bohai Sea, China[J]. Natural hazards, 2017, 85: 559–573.
- [18] 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.
- [19] 史道济. 实用极值统计方法[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 2006.
- [20] 赵鹏. 渤海寒潮风暴潮增水风险的数值研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.

责任编辑: 周建军

(上接第 26 页)

- stein generative adversarial networks[C]//PMLR. International Conference on Machine Learning. New York: PMLR, 2017: 214–223.
- [15] XIE Y J, WANG X F, WANG R J, et al. A fast proximal point method for computing exact Wasserstein distance[C]//PMLR. Uncertainty in Artificial Intelligence. New York: PMLR, 2020: 433–453.
- [16] FUSTERO-TORRE C, JIMÉNEZ-SANTOS M J, GARCÍA-MARTÍN S, et al. Beyondcell: targeting cancer therapeutic heterogeneity in single-cell RNA-seq data[J]. Genome medicine, 2021, 13(1): 187.
- [17] PELLECCIA S, VISCIDO G, FRANCHINI M, et al. Predicting drug response from single-cell expression profiles of tumours[J]. BMC Medicine, 2023, 21(1): 476.
- [18] GOODFELLOW I, POUGET-ABADIE J, MIRZA M, et al. Generative adversarial networks[J]. Communications of the ACM, 2020, 63(11): 139–144.
- [19] CHAWLA N V, BOWYER K W, HALL L O, et al. SMOTE: synthetic minority over-sampling technique[J]. Journal of artificial intelligence research, 2002, 16: 321–357.
- [20] KINKER G S, GREENWALD A C, TAL R, et al. Pan-cancer single-cell RNA-seq identifies recurring programs of cellular heterogeneity[J]. Nature genetics, 2020, 52(1): 1208–1218.
- [21] SINHA S, VEGESNA R, MUKHERJEE S, et al. Perception predicts patient response and resistance to treatment using single-cell transcriptomics of their tumors[J]. Nature cancer, 2024, 5(6): 938–952.

责任编辑: 郎婧