

# 冷空气东北大风在渤海西岸引发风暴潮的统计与模拟研究

梁森栋<sup>1,2</sup>, 张聿柏<sup>3\*</sup>, 付翔<sup>1,2</sup>, 朱现晔<sup>3</sup>

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081; 3. 山东省海洋预报减灾中心, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 利用美国国家环境预报中心CFSv2逐小时分析预报场产品挑选出2018—2023年共5个冬半年内的64次冷空气东北大风过程,并整理了相应的温带风暴潮极值;以“221003”温带风暴潮为基准,构造了渤海区域内最大风速分别为7~12级的温带天气风场,计算了各情形下渤海西岸典型潮位站的最大风暴增水,归纳了渤海湾和莱州湾代表站黄骅和潍坊站的最大风暴增水与最大风速的幂指数关系;以此定量关系为基准建立了黄骅站和潍坊站50%及80%累积频率下风暴增水与CFSv2区域最大风速的定量关系。

**关键词:** 风暴潮;冷空气;渤海;数值模拟

**中图分类号:** P731.34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)03-0012-10

## 0 引言

渤海是我国的一个半封闭内海,冬半年易受到冷空气影响,出现东北向为主的大风天气,渤海西岸的渤海湾和莱州湾也会因此出现明显风暴增水<sup>[1-3]</sup>,若冷空气与低压系统配合,则风力增大,风暴潮更为显著。1969年4月23日,受强冷空气和江淮气旋的共同影响,莱州湾羊角沟出现了35 m/s的极大风速,并观测到了3.55 m的最大风暴增水,受此次特强风暴潮的影响,黄河三角洲沿岸发生了最远达到40 km的潮水入侵<sup>[4-5]</sup>。

冷空气主要从西路、西北路和北路影响我国,较强的冷锋活动会造成大风灾害<sup>[6]</sup>,其影响时段主要在冬半年(10月—次年4月)<sup>[7-10]</sup>。在冬半年中,以单次降温超过6℃为标准,渤海区域受冷空气影响平均为8~12次<sup>[8]</sup>;以观测站出现6级及以上大风为标准,渤海区域受冷空气影响平均为20次左右<sup>[7,9]</sup>。在这些冷空气中,西北路和北路冷空气占比在9成左右,渤海产生的大风以东北风为主<sup>[7,9]</sup>。于福江等<sup>[4]</sup>选取了1950—2016年典型的温带风暴潮灾害过

程,其中约55%的个例为冷空气东北大风引发的温带风暴潮。为评价冷空气大风在渤海造成的风暴潮影响,赵鹏<sup>[11]</sup>构建了均匀气压梯度的气压场和海面风场,评估了在不同风向7~9级大风影响下渤海沿岸的最大风暴增水。莫冬雪<sup>[10]</sup>构建了强度随时间变化的均匀风场,忽略气压场的影响,模拟了6~9级大风对渤海沿岸风暴潮的影响,并建立了典型潮位站最大风暴增水与风速的经验关系。以上研究揭示了理想情况下风速、风向和风暴增水的定量关系,但模拟的风速范围上限较低,同时基于实际风暴潮观测结果与风速关系的分析也较少。

本文利用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的CFSv2逐小时分析预报场产品(Climat Forecast System Version 2 Selected Hourly Time-Series Products),挑选出2018—2023年共5个冬半年内的64次冷空气东北大风过程,整理了相应的温带风暴潮极值数据;以“221003”温带风暴潮为基准,构造了渤海区域内最大风速分别为7~12级的温带天气风场,计算了各情形下渤海西岸典型潮位站的最大

收稿日期: 2023-07-17。

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3900405)。

作者简介: 梁森栋(1984-),男,高级工程师,博士,主要从事风暴潮预警及研究。E-mail: liangsd@nmefc.cn

\*通信作者: 张聿柏(1983-),男,副研究员,博士,主要从事海洋观测预报及研究。E-mail: zhangyubai@shandong.cn

风暴增水,归纳了渤海湾和莱州湾代表潮位站最大风暴增水与最大风速的定量关系。

## 1 冷空气东北大风引发温带风暴潮的统计

### 1.1 资料 and 标准

本文采用的风速提取自NCEP的CFSv2逐小时分析预报场产品中的10 m高度风速(水平分辨率为 $0.2^\circ$ ),涵盖了2018年10月—2023年4月共5个冬半年(10月—次年4月)内的数据。

大风常指6级及以上的风<sup>[7-9]</sup>,考虑到一般强度的风暴增水下限为0.5 m(参考《GB/T 39418—2020》),而一次天气过程中风速低于12 m/s时较少在渤海沿岸引起超过0.5 m的风暴增水,故本文挑选出辽东湾(统计数据范围: $120.5^\circ\sim 122.5^\circ\text{E}$ , $39.4^\circ\sim 41.0^\circ\text{N}$ )—山东东营市沿海(统计数据范围: $118.3^\circ\sim 119.1^\circ\text{E}$ , $37.2^\circ\sim 38.2^\circ\text{N}$ )先后均出现12 m/s及以上东北风(风向NNE—ENE)的冷空气过程,并以辽东湾内开始达到12 m/s风速的日期标记该次风暴潮过程。选用易在东北大风下发生风暴潮的黄骅站和潍坊站<sup>[1,4,10-11]</sup>为渤海湾和莱州湾的代表潮位站。利用国家海洋环境预报中心对这两个潮位站的风暴潮观测资料,剔除了个别风速满足要求但风暴增水在两个站均小于0.5 m的天气过程。

### 1.2 冷空气东北大风引发风暴潮的统计

依据上述标准,挑选并汇总了64次温带风暴潮数据和冷空气的路径种类,并提取了相应过程中东营沿海、渤海湾( $117.5^\circ\sim 118.9^\circ\text{E}$ , $38.0^\circ\sim 39.2^\circ\text{N}$ )和莱州湾( $118.9^\circ\sim 120.5^\circ\text{E}$ , $37.0^\circ\sim 37.8^\circ\text{N}$ )的最大风速值(见表1)。

由表1可以得出,西北路冷空气数量最多,占比达到77%;北路冷空气数量次之,占比为20%;由于西路冷空气多在渤海产生偏西北向大风,因此西路冷空气数量最少,占比仅为3%。符合标准的东北大风平均每年约有13次,略多于单次降温超过 $6^\circ\text{C}$ 的冷空气频次,其中10月—次年2月频次较高,月均多为2~3次,3月和4月频次明显降低,月均1次左右(见图1)。图1还绘出近5个冬半年中黄骅和潍坊站受上述冷空气影响发生的风暴增水的月平

均值、最大值和最小值,由图可见两个站冬半年风暴增水平均值的月际变化不大,4月风暴增水平均值和最大值均相对较小。但于福江等<sup>[4]</sup>的统计显示,在更长时间范围的样本中,渤海湾和莱州湾冬半年中几乎每个月都出现过接近或超过2.0 m的风暴增水。

## 2 不同强度冷空气东北大风引起的温带风暴潮

### 2.1 典型过程模拟

2022年10月2—6日,受“横槽转竖”型西北路冷空气影响,我国发生了一次全国性的寒潮过程,造成了全国范围的降温和大风天气,渤海沿岸降温达到 $12^\circ\text{C}$ 以上<sup>[12]</sup>。渤海沿岸的观测站(见图2)观测到了10级大风(见表2)。受此影响,渤海湾、莱州湾和山东半岛北部沿海出现了一次强温带风暴潮过程,多个潮位站出现了超过1 m的风暴增水,其中莱州湾和渤海湾中的潍坊和黄骅站分别出现了2.30 m和1.58 m的风暴增水,海洋灾害造成了超过11亿元的直接经济损失(数据引自《2022年中国海洋灾害公报》)。该过程是一次典型的冷空气东北大风在渤海西岸造成的风暴潮过程。

本研究使用ADCIRC(an Advanced Circulation Model for Oceanic, Coastal and Estuarine Waters)模式对“221003”温带风暴潮过程进行模拟。该模式可以较好地模拟天文潮和风暴潮,模型中利用了傅赐福等<sup>[13]</sup>建立的包括渤海、黄海和东海部分区域的非结构三角网格,模式中的摩阻系数、海面风切应力参数以及模拟天文潮误差见文献[14]—[16]。

北半球海域再分析风场资料的风速一般与真实风速接近,但会呈现出系统性的低估,比如从刘解明等<sup>[17]</sup>的对比中可以看出,CFSR/CFSv2风场对10~15 m/s的风速平均存在约10%的低估。表2中列出了“221003”温带风暴潮在观测站点出现风速极值时刻 $\pm 2\text{ h}$ 范围内数值风场对应位置附近格点的风速极值,可见数值风场中的风速极值较观测值平均偏低约11%。为准确模拟本过程,参考曾晓青等<sup>[18]</sup>的风场订正思路,将表2中的风速极值分为东西和南北两个分量分别进行订正。采用线性拟合方法,将东西方向和南北方向的风速分别订正为原始风场的1.06倍和1.10倍。风场的原始风向以及

表 1 2018—2023 年冬半年渤海冷空气东北大风风速及风暴增水

Tab. 1 Maximum northeast wind speed and corresponding Maximum storm surges in the west coast of the Bohai Sea caused in wintertime half-years during 2018—2023

日期	数值风场最大风速/(m/s)			最大增水/m		路径 种类	日期	数值风场最大风速/(m/s)			最大增水/m		路径 种类
	东营	渤海湾	莱州湾	黄骅	潍坊			东营	渤海湾	莱州湾	黄骅	潍坊	
20181009	13.4	14.6	14.7	0.91	0.84	西北	20210228	19.8	20.3	19.2	1.43	1.57	北
20181115	14.1	13.4	15.5	0.73	0.95	西北	20210305	19.1	19.8	18.9	1.97	1.33	北
20181203	13.9	12.7	15.2	0.77	1.42	西北	20210403	16.9	13.3	18.7	—	1.03	西北
20181206	13.0	13.2	14.7	0.76	0.68	西北	20211003	17.8	17.6	17.8	1.83	1.47	西北
20190130	14.0	13.2	13.7	1.14	1.24	西北	20211018	14.9	15.4	15.3	1.24	0.94	西北
20190205	13.3	14.8	12.2	2.06	1.65	西北	20211031	12.9	13.3	12.5	0.78	0.76	西北
20190327	12.4	12.0	13.8	0.72	0.81	西北	20211106	18.8	19.8	18.6	1.90	1.57	西
20190418	17.0	16.9	17.2	1.22	1.05	西北	20211119	12.8	14.1	12.3	1.07	0.91	北
20190424	16.6	17.0	15.1	0.80	1.16	北	20211129	14.2	16.8	15.5	0.62	0.70	西
20191003	15.0	14.9	16.1	0.74	1.43	西北	20211206	13.1	12.9	14.2	0.75	0.99	西北
20191012	14.2	14.7	14.0	0.89	1.46	西北	20211223	18.4	17.7	19.1	1.10	1.69	西北
20191102	14.1	14.8	13.6	0.85	1.00	北	20220101	13.0	12.3	14.4	0.75	1.00	西北
20191106	16.3	16.8	16.3	1.20	1.20	西北	20220118	13.4	13.8	13.5	0.80	1.06	北
20191114	12.0	13.6	11.8	1.23	1.06	北	20220212	12.5	13.9	12.1	0.65	0.75	北
20191123	14.8	17.2	16.6	0.85	1.39	西北	20220315	16.8	17.8	17.1	1.32	1.23	西北
20191126	16.2	16.5	16.4	1.08	1.51	西北	20220405	13.3	16.5	13.2	0.56	—	北
20191204	12.5	13.4	13.1	0.50	0.60	北	20220421	15.4	13.1	17.0	—	0.87	西北
20191229	15.1	16.1	15.3	1.38	1.36	西北	20221003	20.4	19.4	22.3	1.58	2.30	西北
20200107	15.9	15.1	17.3	1.26	1.46	西北	20221016	15.0	16.6	16.1	1.19	1.07	西北
20200204	14.8	14.8	13.9	0.79	1.05	北	20221026	12.5	14.1	11.1	0.75	0.84	西北
20200213	18.3	19.5	17.5	1.44	1.44	西北	20221102	15.4	16.0	15.0	1.02	1.25	西北
20200312	14.8	16.4	15.6	0.75	0.90	西北	20221112	16.1	18.1	18.9	1.50	1.68	西北
20200326	18.9	15.3	20.4	0.61	1.53	西北	20221128	13.1	14.1	13.3	0.96	1.26	西北
20201013	13.1	14.4	12.9	0.92	0.61	西北	20221210	13.1	14.6	14.7	0.62	0.99	西北
20201121	14.0	13.2	13.7	0.82	0.94	西北	20221215	14.3	13.5	16.4	1.01	1.38	西北
20201212	18.0	16.5	19.7	1.01	1.35	西北	20230108	12.3	13.1	11.6	0.91	0.86	西北
20201227	15.7	14.5	17.2	0.73	1.54	西北	20230113	17.8	17.0	20.1	1.72	2.22	西北
20210118	13.1	13.8	13.2	1.02	0.53	北	20230122	14.6	15.7	15.4	0.97	1.19	西北
20210201	12.6	13.2	13.2	0.80	0.65	西北	20230212	15.2	15.7	15.5	1.15	1.21	西北
20210206	14.3	15.2	13.6	0.85	0.75	西北	20230218	13.0	12.9	13.9	—	0.69	西北
20210214	13.5	14.4	13.8	0.82	1.13	西北	20230224	13.5	13.4	13.6	—	0.77	北
20210221	17.4	16.7	18.5	1.08	1.07	西北	20230310	19.5	19.7	18.5	1.07	1.67	西北

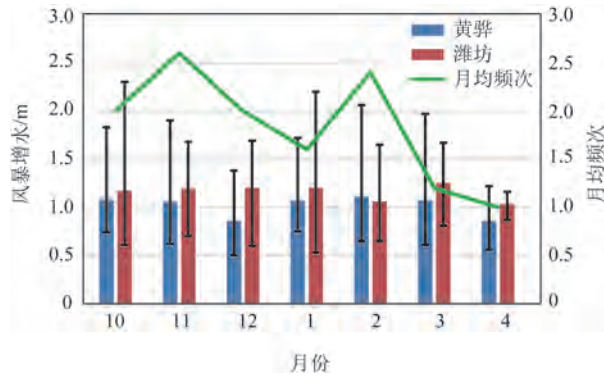


图1 黄骅站和潍坊站的近5个冬半年的月均风暴增水平均值、最大值和最小值

Fig.1 Monthly average, maximum and minimum storm surges at Huanghua and Weifang stations in the past 5 wintertime half-years

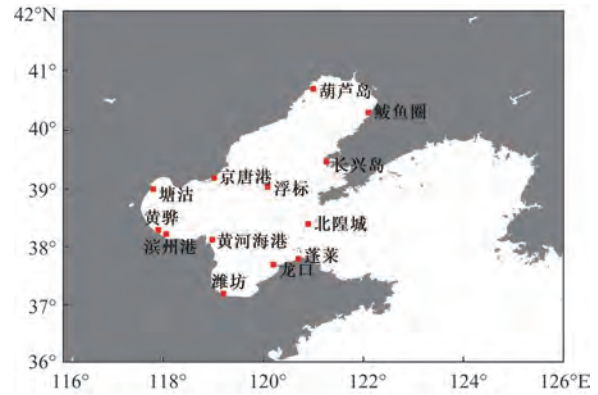


图2 渤海沿岸典型观测站位置

Fig.2 Location of typical observation stations along the coast of the Bohai Sea

表2 渤海沿岸观测站“221003”风暴潮过程期间观测到的最大风速及数值风场中的最大风速和订正风速

Tab.2 Maximum wind speed and direction in the observations, original, and corrected numerical wind fields during the "221003" storm surge process

观测站	观测风速/(m/s)	观测风向/(°)	风场风速/(m/s)	风场风向/(°)	订正风速/(m/s)	订正风向/(°)
浮标	23.4	27	22.4	26.6	24.4	25.7
长兴岛	21.0	40	18.8	20.5	20.6	19.8
鲅鱼圈	13.1	4	12.2	15.8	13.4	15.2
葫芦岛	13.0	8	12.5	11.0	13.7	10.6
京唐港	9.6	24	8.2	29.3	9.0	28.4
滨州港	17.4	24	15.3	32.5	16.7	31.5
潍坊	19.4	17	16.8	26.5	18.4	25.6
龙口	21.8	31	19.4	22.9	21.2	22.1
蓬莱	21.3	28	18.6	16.5	20.4	15.9
北隍城	24.9	350	20.7	14.7	21.7	14.2

订正后的风向与观测风向的偏差大多小于 $22.5^{\circ}$ ,订正结果较为准确<sup>[18]</sup>。订正后的风场和气压场见图3。使用订正后的风场和气压场驱动模式模拟“221003”温带风暴潮过程。

模拟的过程最大风暴增水分布见图4,渤海湾和莱州湾的最大风暴增水分别出现在黄骅站和潍坊站附近,最大值分别约为1.6 m和2.3 m。模拟结果与辽东湾、渤海湾和莱州湾内典型潮位站观测数据的对比见图5和表3,同时表3中也列出了10月3日全天风暴增水模拟值与实测值的平均绝对误差。对比可见订正后的风场及气压场可以用来准确模

拟本次风暴潮过程,典型潮位站的最大风暴增水误差为0.01~0.06 m。

## 2.2 不同强度冷空气东北大风温带风场的构造

根据《HY/T 0273—2019》技术导则建议,以典型温带风暴潮过程为基准构造不同强度的温带风场,可以评价不同强度的温带天气系统造成的风暴潮的影响。“221003”温带风暴潮是近5年来对莱州湾影响最严重的温带风暴潮过程,本文以该过程为基准构造不同强度的温带风场。以订正后的风速为基准,通过整体乘以一个常数,将过程中渤海内



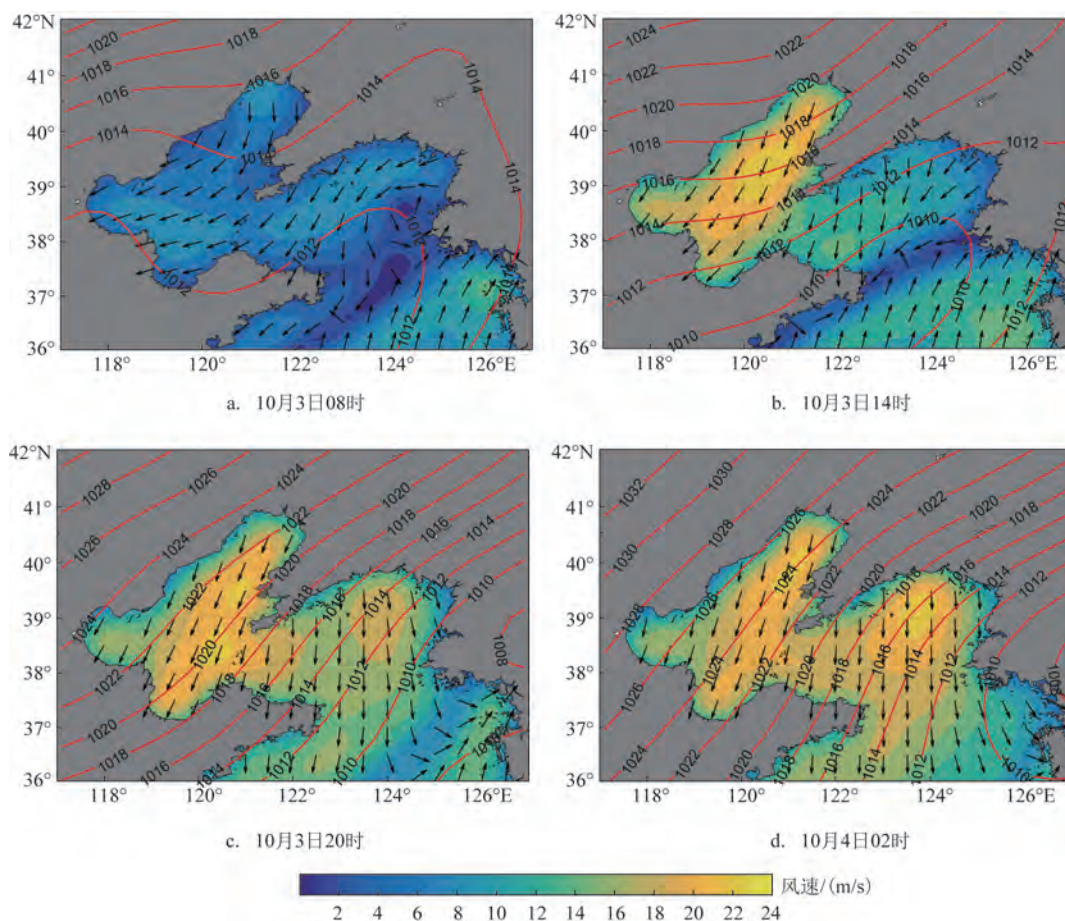


图3 订正后的“221003”风暴潮过程风场和气压场

Fig.3 Corrected wind and MSL pressure fields during the "221003" storm surge process

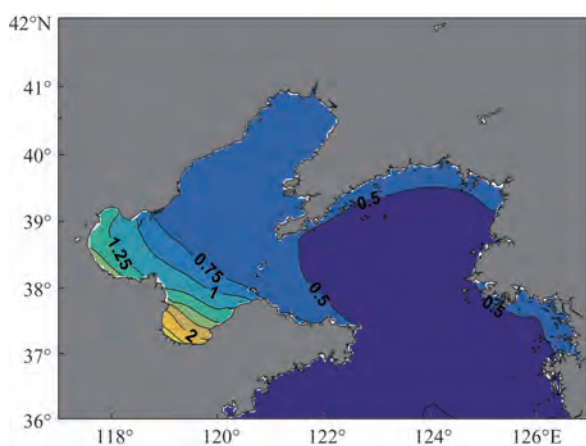


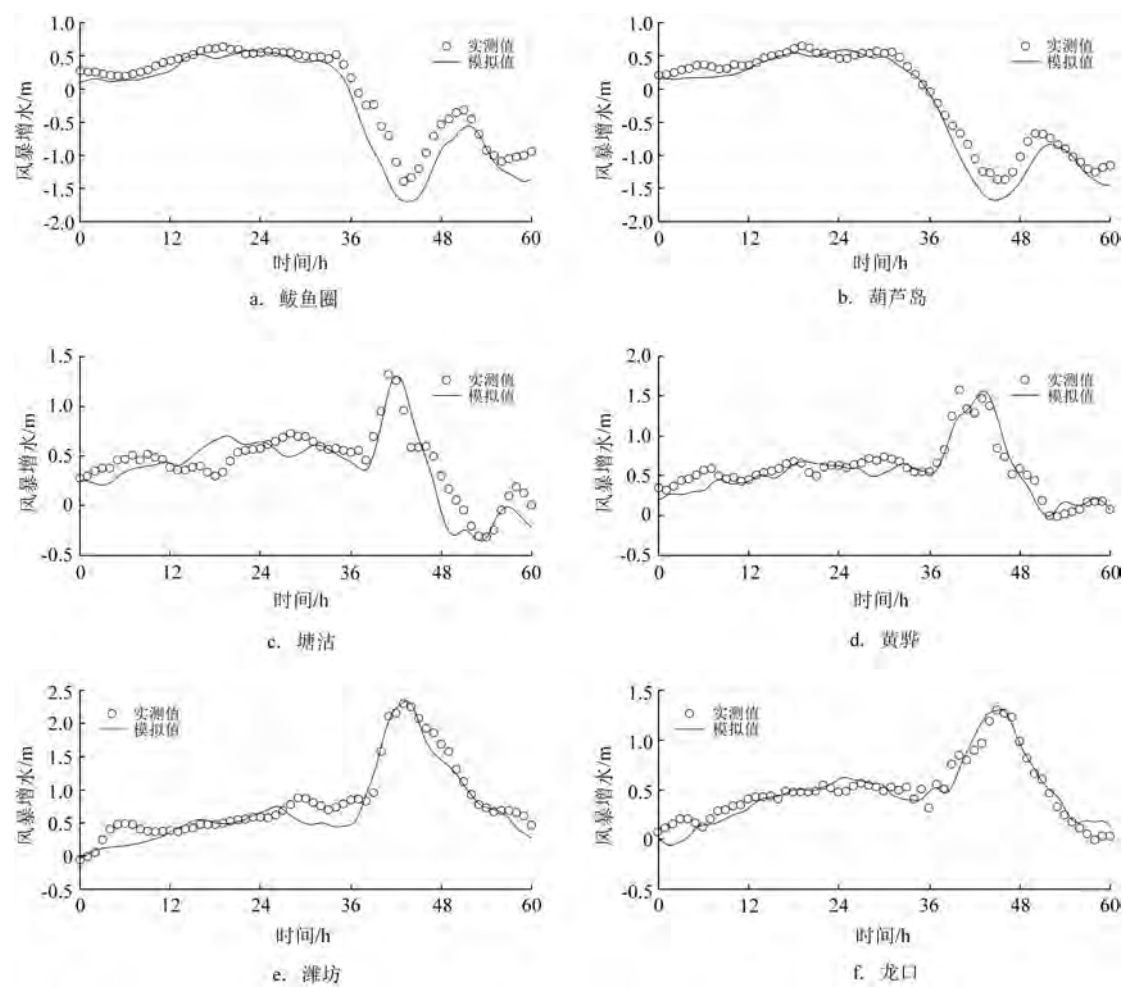
图4 “221003”风暴潮过程最大风暴增水分布模拟结果  
(单位:m)

Fig.4 Distribution of the simulated maximum storm surge during the "221003" storm surge process (unit:m)

出现的最大风速依次设置为 15 m/s、18 m/s、22 m/s、27 m/s、32 m/s、36 m/s, 分别对应 7~12 级风的典型风速, 构造风场中东营、渤海湾和莱州湾的最大风速一并列在表 4 中。从表 4 数据可见, 在该构造风场中, 莱州湾与渤海内的最大风级相同, 渤海湾和东营沿海的风速低 1 级。

虽然冷空气影响期间渤海主要受高压影响, 但其对风暴潮的影响不可作为负影响一概而论, 其气压梯度仍能产生较风速影响数量级低一级的风暴增水。以“221003”温带风暴潮过程为例, 若在计算中不考虑实际气压分布, 仅输入均匀气压场, 风暴增水会减小约 5%。故本文在构造不同强度风场的过程中, 以 CFSv2 产品中的海平面气压场为基准进行变换, 构造出相应的海平面气压场。

在冷空气影响过程中, 地转风与气压分布的关系为:



注:时间0点为2022年10月2日00时(北京时)

图5 渤海沿岸典型潮位站“221003”风暴潮过程模拟结果对比

Fig.5 Comparison of storm surge between simulations and observations at typical stations during the "221003" storm surge process

表3 渤海沿岸典型潮位站“221003”风暴潮过程模拟结果对比(单位:m)

Tab.3 Comparison of storm surge between simulations and observations at typical stations during the "221003" storm surge process(unit:m)				
观测站	最大风暴潮观测值	最大风暴潮模拟值	最大风暴潮误差	风暴潮平均绝对误差
鲅鱼圈	0.64	0.58	0.06	0.18
葫芦岛	0.65	0.59	0.06	0.13
塘沽	1.32	1.30	0.02	0.13
黄骅	1.59	1.56	0.02	0.10
潍坊	2.30	2.34	0.04	0.15
龙口	1.30	1.31	0.01	0.08

表4 构造风场的典型区域最大风速(单位:m/s)  
Tab.4 Maximum wind speed at typical regions in the restructured wind fields(unit:m/s)

渤海最大风级	渤海	东营	渤海湾	莱州湾
7	15.0	13.3	12.6	14.6
8	18.0	16.0	15.1	17.5
9	22.0	19.5	18.5	21.4
10	27.0	24.0	22.7	26.2
11	32.0	28.4	26.9	31.1
12	36.0	31.9	30.2	34.9

$$U_g = -\frac{1}{2\rho\Omega\sin\varphi}\frac{\partial p}{\partial n}$$

(1)

式中:  $U_g$  为地转风风速;  $\rho$  为空气密度;  $\Omega$  为地球自转角速度;  $\varphi$  为纬度;  $\partial p / \partial n$  为气压梯度。

依《港口建筑物设计标准》的推荐参数, 在  $40^\circ\text{N}$  附近可由地转风计算出海面风速<sup>[19]</sup>, 计算公式为:

$$U = 0.67U_g \quad (2)$$

式中:  $U$  为海面风速。

假设调整后的风速  $U_{\text{cor}}$  和调整后的气压  $p_{\text{cor}}$  依然满足式(1)和式(2)的约束, 对渤海区域纬度取为  $40^\circ\text{N}$ , 则有:

$$\frac{U_{\text{cor}}}{U_0} = \frac{\Delta p_{\text{cor}}}{\Delta p_0} \quad (3)$$

式中:  $U_0$  为调整前的风速;  $\Delta p_0$  和  $\Delta p_{\text{cor}}$  分别为调整前后的气压差。

保持气压场中 1 010 hPa 的位置不变, 则每个点:

$$\frac{U_{\text{cor}}}{U_0} = \frac{p_{\text{cor}} - 1\,010}{p_0 - 1\,010} \quad (4)$$

进行整理, 得到:

$$p_{\text{cor}} = \frac{U_{\text{cor}}}{U_0} (p_0 - 1\,010) + 1\,010 \quad (5)$$

式中:  $p_{\text{cor}}$  为调整后的气压, 单位为 hPa。

利用式(5)可以根据渤海内最大风速的变化倍数  $U_{\text{cor}}/U_0$ , 将基准风场中的气压变换为调整后的气压值。

### 2.3 不同强度冷空气东北大风温带风暴潮模拟

使用以“221003”过程为基准构造的各强度温带风场驱动数值模式, 模拟了渤海西岸典型潮位站的风暴增水过程, 各主要站点最大风暴增水见表5。

表5 渤海西岸典型潮位站在不同强度风场影响下的最大风暴增水(单位:m)

Tab.5 Maximum storm surge at typical stations in the west coast of the Bohai Sea under different restructured wind fields(unit:m)

渤海最大 风级	京唐港	塘沽	黄骅	黄河 海港	潍坊	龙口
7	0.21	0.38	0.46	0.34	0.73	0.39
8	0.30	0.59	0.71	0.51	1.09	0.59
9	0.48	0.95	1.15	0.81	1.73	0.95
10	0.76	1.56	1.86	1.34	2.78	1.58
11	1.13	2.31	2.76	2.06	4.09	2.42
12	1.49	3.03	3.60	2.77	5.33	3.23

数值模拟结果显示, 各站点的最大风暴增水均随风级增强而增加。对渤海湾的黄骅站和莱州湾的潍坊站, 采用文献[14]中的方法, 将两个站点每种情景下的最大风暴增水和对应的渤海内最大风速无量纲化。计算公式为:

$$\tilde{S} = S(i)/S(12) \quad (6)$$

$$\tilde{U} = U(i)/U(12) \quad (7)$$

将结果绘制在图6中, 拟合得到无量纲的最大风暴增水  $\tilde{S}$  与渤海最大风速  $\tilde{U}$  的关系。拟合公式为:

$$\tilde{S} = \tilde{U}^{2.302} \quad (8)$$

式中:  $\tilde{S}$  为无量纲的最大风暴增水;  $S(i)$  为渤海内最大风速为  $i$  级时该站点的最大风暴增水(单位:m);  $\tilde{U}$  为无量纲的最大风速;  $U(i)$  为渤海内最大风速为  $i$  级时的最大风速(单位:m/s), 数值见表4。

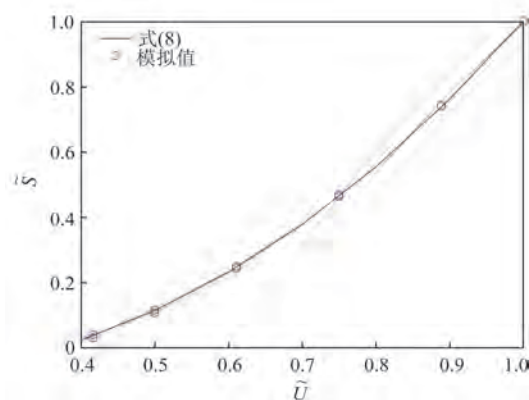


图6 最大风暴增水  $\tilde{S}$  与渤海最大风速  $\tilde{U}$  关系

Fig.6 Relationship between maximum storm surge  $\tilde{S}$  and maximum wind speed  $\tilde{U}$  in the Bohai Sea

式(8)中得到的幂指数与莫冬雪<sup>[10]</sup>的分析结果相近, 略微偏大。有观测记录以来莱州湾温带风暴潮的历史极值出现在“690423”温带风暴潮过程中, 其天气形势与本研究使用的基准天气系统类似。参考刘桂才等<sup>[20]</sup>的研究结果, 莱州湾近岸区域的极大风速约为最大风速的 1.3 倍, 以莱州湾羊角沟出现的 35 m/s 的极大风速进行估算, 其最大风速约为 26.9 m/s (10 级风)。羊角沟站附近最大风速与东营沿海的最大风速相近, 使用表 4、表 5 中的数据和式(8)可以估算出该风速下潍坊站最大风暴增水为 3.60 m, 与附近羊角沟站的观测极值 3.55 m 相近。



## 2.4 最大风暴增水与最大风速定量关系释用

本文第1部分中利用CFSv2数值风场挑选并汇总了64次温带风暴潮过程的数据,其中黄骅站样本

60例,潍坊站样本63例。图7分别绘制了渤海湾数值风场最大风速和黄骅站最大风暴增水,以及莱州湾数值风场最大风速和潍坊站最大风暴增水对应关系的散点图。

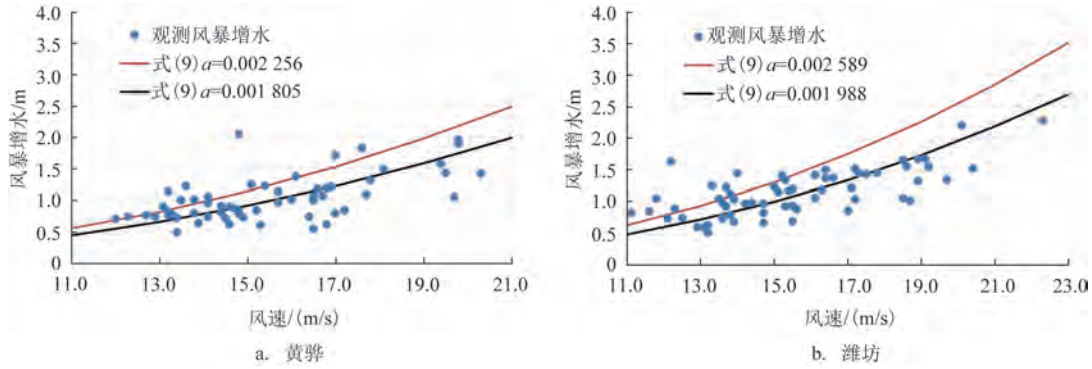


图7 渤海湾和莱州湾内典型潮位站的最大风暴增水与海湾内最大风速关系图

Fig.7 Relationship between maximum storm surge at typical stations and maximum wind speed in the Bohai Bay and Laizhou Bay

沿用式(8)确定的站点最大风暴增水 $S$ 与区域最大风速 $U$ 的幂指数关系,可将其一般表达形式写为:

$$S = aU^{2.302} \quad (9)$$

式中: $a$ 为待定系数; $S$ 的单位为m; $U$ 的单位为m/s。

表1中的观测风暴增水对应的区域最大风速中位数为15 m/s左右,将 $U$ 取为15 m/s;以 $\pm 10\%$ 偏差筛选13.5~16.5 m/s风速对应的最大风暴增水的中位数作为 $S$ 带入式(9)以率定系数 $a$ 。在该风速段内,黄骅站和潍坊站观测的风暴增水的中位数分别为0.92 m和1.03 m,将其分别带入式(9),得出黄骅站和潍坊站的最大风暴增水与渤海湾和莱州湾内最大风速的关系式中的系数 $a$ 分别为0.001 805和0.001 988(见图7)。在样本数据范围内,黄骅站和潍坊站的观测数据与式(9)计算数据的平均偏差均为0.02 m。

鉴于CFSv2风场资料与风速观测数据对应关系的离散性以及渤海区域风速分布、大风影响时长和黄海低压系统等多种因素对渤海沿岸最大风暴增水的影响<sup>[4,7,10-11,13-14,17,21]</sup>,以上确定的关系式表示50%累积频率的风暴增水与海湾内最大风速的对应关系,其确定的风暴增水值处于该风速下的平均水平。常见风速范围内更大累积频率的风暴增水估计值在预报中也有相当的实用价值。以13.5~16.5 m/s风速对应的最大风暴增水序列的80%累积

频率增水值再次计算系数 $a$ ,黄骅站和潍坊站相应的风暴增水值分别为1.15 m和1.32 m,得出其对应式(9)的系数 $a$ 分别为0.002 256和0.002 589(见图7)。新的关系曲线在黄骅站和潍坊站分别大于77%和83%的风暴增水观测值,在12~17 m/s风速范围内可作为风暴增水的上限参考值。

## 3 结论

本文整理了2018—2023年5个冬半年中的冷空气东北大风造成的风暴潮过程数据,并以典型冷空气天气过程为基准构造了渤海区域不同强度的风场,模拟并归纳了渤海湾和莱州湾代表潮位站最大风暴增水与最大风速的定量关系。结论如下:

①在渤海冬半年的冷空气东北大风过程中,辽东湾—山东东营沿海均有12 m/s及以上东北风出现,最大风暴增水大于0.5 m的过程平均每年约有13次,其中西北路冷空气占比为77%,北路冷空气占比为20%,西路冷空气占比为3%。每年10月—次年2月冷空气东北大风出现频次较高,3月和4月频次略低,渤海湾和莱州湾内代表站的风暴增水月平均值在冬半年内变化不大。

②以“221003”温带风暴潮为基准构造了渤海区域最大风速分别为7~12级的冷空气东北大风天



气过程,并模拟了其在渤海西岸造成的温带风暴潮过程。拟合出的渤海湾和莱州湾的代表潮位站黄骅站和潍坊站的无量纲最大风暴增水 $\tilde{S}$ 与渤海的无量纲最大风速 $\tilde{U}$ 存在幂指数关系 $\tilde{S} = \tilde{U}^{2.302}$ 。

③利用黄骅站和潍坊站的实测最大风暴增水和CFSv2风场提取的过程最大风速,建立了两个站点最大风暴增水 $S$ 与区域风场最大风速 $U$ 的一般关系 $S = aU^{2.302}$ ,并确定了50%累积频率下的系数 $a$ 分别为0.001 805和0.001 988,80%累积频率下的系数 $a$ 分别为0.002 256和0.002 589,以上对应关系在常见风速范围内(12~17 m/s)可以为经验预报提供参考。

### 参考文献:

- [1] 于福江,董剑希,李涛,等. 风暴潮对我国沿海影响评价[M]. 北京: 海洋出版社, 2015.  
YU F J, DONG J X, LI T, et al. Assessment of the impact of storm surge on coastal areas in China[M]. Beijing: China Ocean Press, 2015.
- [2] 于福江,傅赐福,郭洪琳,等. 现代风暴潮预报技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2020.  
YU F J, FU C F, GUO H L, et al. Modern technologies and application in storm surge forecasting[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [3] 吴少华,王喜年,戴明瑞,等. 渤海风暴潮概况及温带风暴潮数值模拟[J]. 海洋学报, 2002, 24(3): 28-34.  
WU S H, WANG X N, DAI M R, et al. The general status of storm surges and the simulation of extratropical storm surges in the Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(3): 28-34.
- [4] 于福江,董剑希,李明杰,等. 中国温带风暴潮灾害史料集[M]. 北京: 海洋出版社, 2018.  
YU F J, DONG J X, LI M J, et al. Collection of extratropical storm surge disasters historical data in China[M]. Beijing: Ocean Press, 2018.
- [5] 刘凤岳. 风暴潮对黄河三角洲的影响及其一般规律[J]. 海岸工程, 1987, 6(1): 79-83.  
LIU F Y. The influence of storm surge on Huanghe Delta and its general rule[J]. Coastal Engineering, 1987, 6(1): 79-83.
- [6] 陶诗言. 十年来我国对东亚寒潮的研究[J]. 气象学报, 1959, 30(3): 226-230.  
TAO S Y. Research on the East Asian cold wave in China over the past decade[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1959, 30(3): 226-230.
- [7] 张晓慧. 渤海大风统计特征及物理机制分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003.  
ZHANG X H. The statistical characteristics and physical mechanics of strong winds in Bohai Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2003.
- [8] 周琳,孙照渤. 1961—2010年我国冷空气的活动特征[J]. 大气科学学报, 2015, 38(3): 342-353.  
ZHOU L, SUN Z B. Activity characteristics of cold air in China from 1961 to 2010[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2015, 38(3): 342-353.
- [9] 吕爱民,杨柳妮,黄彬,等. 中国近海大风的天气学分型[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(1): 43-50.  
LYU A M, YANG L N, HUANG B, et al. Classification of synoptic patterns for China offshore gales[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(1): 43-50.
- [10] 莫冬雪. 中国近海寒潮影响下的灾害性海洋动力环境研究[D]. 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2018.  
MO D X. Study on disastrous ocean dynamical environment under the influence of cold waves in the northern East China Sea [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [11] 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.  
ZHAO P. Numerical study on risk of storm surge induced by cold-air outbreak in the Bohai Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [12] 渠鸿宇,黄彬,高拴柱,等. 2022年10月大气环流和天气分析[J]. 气象, 2023, 49(1): 122-128.  
QU H Y, HUANG B, GAO S Z, et al. Analysis of the October 2022 atmospheric circulation and weather[J]. Meteorological Monthly, 2023, 49(1): 122-128.
- [13] 傅赐福,付翔,吴少华,等. 渤海风暴减水特征及其对深水航路影响的数值模拟[J]. 海洋学报, 2014, 36(3): 30-38.  
FU C F, FU X, WU S H, et al. Numerical simulation study on deepwater channel influenced by negative storm surge and its features in Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(3): 30-38.
- [14] 梁森栋,傅赐福. 夏季黄海中部孤立气旋对渤海风暴潮影响模拟研究[J]. 海洋预报, 2023, 40(1): 1-9.  
LIANG S D, FU C F. Numerical simulation of the impact of solitary cyclones in the central and northern Yellow Sea on the storm surge in the Bohai Sea in summer[J]. Marine Forecasts, 2023, 40(1): 1-9.
- [15] LE PROVOST C, LYARD F, MOLINES J M, et al. A hydrodynamic ocean tide model improved by assimilating a satellite altimeter-derived data set[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1998, 103(C3): 5513-5529.
- [16] GARRATT J R. Review of drag coefficients over oceans and continents[J]. Monthly Weather Review, 1977, 105(7): 915-929.
- [17] 刘解明,熊学军,宫庆龙,等. 4种表层风场资料在北半球海域的适用性评估[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(1): 38-50.  
LIU X M, XIONG X J, GONG Q L, et al. Applicability evaluation of four surface wind products in the northern

- hemisphere sea area[J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38(1): 38-50.
- [18] 曾晓青, 赵声蓉, 段云霞. 基于 MOS 方法的风向预测方案对比研究[J]. *气象与环境学报*, 2013, 29(6): 140-144.
- ZENG X Q, ZHAO S R, DUAN Y X. Comparison of wind direction forecast schemes based on MOS method[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2013, 29(6): 140-144.
- [19] 王喜年. 第三讲 风暴潮数值模式计算中气压场和风场的处理[J]. *海洋预报*, 1986, 3(4): 56-64.
- WANG X N. Lesson 3: Treatment of pressure and wind field in storm surge numerical model[J]. *Marine Forecasts*, 1986, 3(4): 56-64.
- [20] 刘桂才, 王善芳, 周树华, 等. 莱州湾海区与内陆大风对比分析[J]. *海洋预报*, 2010, 27(4): 53-58.
- LIU G C, WANG S F, ZHOU S H, et al. The comparative analysis of the gale between Laizhou Bay and inland[J]. *Marine Forecasts*, 2010, 27(4): 53-58.
- [21] 李健, 侯一筠, 莫冬雪, 等. 黄、东海天气系统对渤海风暴潮影响[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(2): 219-227.
- LI J, HOU Y J, MO D X, et al. Storm surge in the Bohai Sea affected by the Yellow Sea and east China Sea weather systems[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(2): 219-227.

## Statistics and numerical simulation on the storm surge in the west coast of the Bohai Sea caused by cold-air-induced northeast strong wind

LIANG Sendong<sup>1,2</sup>, ZHANG Yubai<sup>3\*</sup>, FU Xiang<sup>1,2</sup>, ZHU Xianye<sup>3</sup>

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 3. Shandong Marine Forecast and Hazard Mitigation Service, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** 64 storm surge processes in the west coast of the Bohai Sea caused by cold-air-induced northeast strong wind in wintertime half-years of 2018—2023 are selected based on Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) Selected Hourly Time-Series Products of National Centers for Environmental Prediction. Taking the "221003" storm surge as a reference, different wind fields with maximum wind speed at 7~12 wind scales in the Bohai Sea region are restructured, and the maximum storm surge at typical stations in the west coast of the Bohai Sea is simulated. The power exponent relationship between the maximum storm surge and the maximum wind speed at Huanghua and Weifang stations is established. Using this relationship, the quantitative relationships at Huanghua and Weifang stations between maximum storm surge at 50% and 80% cumulative frequencies and maximum wind speed in the CFSv2 products are proposed.

**Key words:** storm surge; cold air; Bohai Sea; numerical simulation