

基于数值模拟的2024年10月渤海和黄海沿岸海水倒灌事件成因分析

傅赐福^{1,2}, 于福江^{1,2*}, 董剑希^{1,2}, 高义^{1,2}, 李明杰^{1,2}

(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)

摘 要: 2024年10月18—21日, 渤海和黄海沿岸发生了罕见的强温带风暴潮过程, 导致辽宁、河北和天津部分低洼地区出现较严重的水体倒灌, 风暴增水分两个阶段, 第一阶段由强冷空气引起, 第二阶段由边缘波引起。为探究其成因, 采用美国国家环境预报中心再分析风场开展风暴潮数值模拟, 渤海和黄海海域浮标位置处再分析风速的均方根误差为2.1 m/s, 数值模拟的沿岸潮位站在第一阶段和第二阶段的最大增水平均相对误差分别为13.7%和8.2%, 证明数值模拟可以准确还原风暴潮运动和传播, 即边缘波自朝鲜半岛西部沿岸向我国黄海北部沿岸、渤海沿岸和黄海南部沿岸逆时针传播。采用数值模拟结果分析黄海南部断面和渤海海峡断面流量发现, 两个断面第二阶段的海水流入量比第一阶段的流出量分别高出66%和75%, 这也是第二阶段由边缘波引起的增水大、范围广且时间长的原因。此外, 边缘波和风对第二阶段风暴潮的贡献占比分别为94%和6%, 边缘波起绝对主导作用。

关键词: 渤海和黄海沿岸; 强冷空气; 风暴潮; 海水倒灌; 边缘波; 数值模拟; 半封闭陆架海

中图分类号: P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)01-0001-10

0 引言

风暴潮是指由于强烈的大气扰动, 如风暴或气压骤变所导致的海平面异常升高或降低的现象^[1]。当较大的风暴增水发生在天文大潮时, 沿岸潮位将超过堤防设计标准, 海水将淹没沿海港口、码头和海水养殖设施, 涌入沿岸的社区及街道, 造成巨大破坏, 并对沿海地区人民生命和财产安全构成重大威胁。历年的《中国海洋灾害公报》显示, 由风暴潮灾害造成的直接经济损失占海洋灾害直接经济损失的90%以上, 是最严重的海洋灾害。

众所周知, 气象因素是风暴潮最重要和最直接的驱动因素。在强天气系统(台风、温带气旋或强冷空气)的作用下, 风暴潮伴随强风和巨浪对沿岸堤防和基础设施造成巨大的冲击和破坏, 是风暴潮

灾害最常见和最严重的表现形式, 历史上发生的严重的风暴潮灾害基本上都是强天气系统引起的。例如, 2014年第9号超强台风“威马逊”于7月18日15时30分(北京时, 下同)前后在海南省文昌市翁田镇沿海登陆, 雷州半岛东岸、海南岛东北部和广西沿海普遍出现超过2.0 m的风暴增水, 海南省铺前湾沿岸发生严重风暴潮漫滩, 广东、广西和海南三地因灾直接经济损失合计80.8亿元^[2]; 2017年第13号超强台风“天鸽”于8月23日12时50分前后在广东省珠海市金湾区沿海登陆, 广东珠江口沿岸普遍出现超过1.5 m的风暴增水, 澳门特别行政区和广东省珠海市沿岸发生严重的风暴潮漫滩, 广东省因灾直接经济损失达51.51亿元^[3]。

风暴潮不仅在强天气系统影响时会发生, 在强天气系统减弱或结束后的无风浪情况下也可能发

收稿日期: 2024-12-30。

基金项目: 国家自然科学基金(42394134、42430407)。

作者简介: 傅赐福(1983-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事风暴潮数值模拟及预警研究。E-mail: fucf@nmefc.cn

*通信作者: 于福江(1965-), 男, 研究员, 硕士, 主要从事海洋灾害预警技术研究和业务化应用工作。E-mail: yvfjiang_2022@163.com

生,有些过程的最大增水甚至超过由强天气系统引起的主震增水,叠加天文高潮会导致总潮位超过当地警戒潮位,酿成风暴潮灾害,引起较大损失^[4]。这种情况常常出现在我国的渤海或类似的半封闭陆架海的沿岸。例如,1985年第9号台风“玛美”于8月18日中午—19日夜间沿华东沿海一路北上,连续登陆江苏启东、山东青岛和辽宁大连沿海,第三次登陆后台风强度减弱、移速加快,虽然台风主体对渤海和黄海沿岸的影响结束,但在辽东湾沿岸出现的增水沿逆时针向南传播,先后影响秦皇岛、塘沽、青岛和连云港等潮位站,上述各站由此引发的增水峰值普遍接近由台风主体引发的增水峰值,尤其是在台风移动至吉林省境内时,青岛潮位站观测到了1.07 m的最大增水,高于由台风本体引发的最大增水,叠加于天文高潮之上超过了当地警戒潮位^[5];2016年第10号台风“狮子山”于8月30日下午登陆日本东北部沿海,而后强度减弱,西折至我国东北地区并变性为温带气旋,8月31日,受该天气系统引起的西北风影响,渤海各站出现了约0.5 m的风暴减水过程,9月1—4日,该天气系统减弱消散,渤海风力减弱,但沿岸出现的增水沿逆时针传播,渤海各潮位站先后出现呈半日潮周期的0.5~1.0 m的震荡增水,共历时3天(6个半日潮周期),此增水过程才消散^[1]。

初步研究显示渤海和黄海沿岸此类无风浪情况下的增水现象是由边缘波引起的^[1]。边缘波是陆架拦获波的一种形式,也是惯性重力波,其能量显著地集中于海岸区域。渤海和黄海沿岸位于我国的大陆架,沿岸平均水深小于50 m,垂直水深与水平尺度比远小于1,属于超浅海范畴。根据超浅海理论中动量方程和连续方程的零级模式结论可知:以海水水位坡度表达的水平压强梯度力与湍流粘性力和科氏力平衡,在科氏力作用下,海水会向其右侧移动,在渤海和黄海沿岸,会以边缘波的形式沿逆时针传播^[6]。通常而言,在强天气系统影响沿海时,沿岸会出现明显的风暴增水或减水,当强天气系统远离沿海或减弱时常会诱发边缘波。当天气系统强度强、影响范围大时,这种波动的振幅较大且持续时间较长,在传播过程中受到沿岸的摩擦,振幅逐渐减小直至消失;当天气系统强度不强且影响范围较小时,这种波动振幅较小且持续时间较短,可能在一个潮周期内就消散。由于此类边缘

波引发的增水较小且成灾较少,国内学者对其的研究仅侧重于理论模型、实测资料的过程分析及传播时间模型方面^[6-8],深入的研究则较少,而2024年10月渤海和黄海沿岸发生的一次由此类边缘波引起的风暴潮过程导致了较严重的海水倒灌事件,值得好好探究。

受强冷空气和出海气旋的共同影响,从2024年10月18日上午开始,渤海和黄海沿岸发生了一次较强的温带风暴潮过程,19日中午风暴潮过程减弱结束,但在20日傍晚—21日下午,在无明天气系统影响的情况下,渤海和黄海沿岸出现了长时间、大范围的较强增水并叠加天文大潮,造成上述沿岸低洼地区出现海水倒灌。此次海水倒灌事件发生后引起社会广泛关注,各领域学者从不同角度发声分析其成因,众说纷纭。本研究将以渤海和黄海沿岸各潮位站实测风暴潮资料为基础开展数值模拟和分析,基于实测数据解释此次海水倒灌成因,以期对此类无明显征兆、预报难度大的风暴潮过程提供参考。

1 海水倒灌事件特征

在此次过程中,沿岸各潮位站出现“增水—减水—再增水”的风暴潮特征,部分潮位站第二次增水值高于第一次且持续了近1天的时间,从成因上可将此次风暴潮过程分为两个阶段。

第一阶段:10月18日上午—19日中午,渤海湾出现了0.9~1.9 m的风暴增水,莱州湾为1.4~2.9 m,山东半岛沿海为0.4~1.0 m,江苏沿海为1.0~1.7 m。江苏省南通市出现了达到当地红色警戒潮位的高潮位,山东省潍坊市和烟台市达到橙色警戒潮位,河北省沧州市、山东省滨州市、日照市和江苏省连云港市达到黄色警戒潮位。

第二阶段:在此次冷空气南下影响减弱后,20日傍晚—21日下午,渤海和黄海沿岸各站在无明显天气系统的情况下普遍出现了1.0~1.6 m的增水,辽宁省出现达到当地红色警戒潮位的高潮位,河北省秦皇岛市、唐山市和山东省烟台市达到橙色警戒潮位,天津市、河北省沧州市、山东省潍坊市和威海市达到黄色警戒潮位。

此次风暴潮过程具有3个特征:

①受影响岸段的天文潮较高。10月18日—21日正值农历九月十六—十九的天文大潮,渤海和黄海沿岸各站的天文高潮距蓝色警戒值为0.3~0.7 m。该岸段全年的最高天文潮普遍出现在8月前后,沿岸各主要潮位站10月20日夜间—21日上午的天文高潮并非为全年最高值,低于全年最高值0.2~0.4 m,其值为全年最高天文潮值的85%~95%。

②第一阶段的温带天气系统过程强,因此风暴增水大、实况级别高。18—19日,渤海、黄海海域出现8~10级的东北风,沿岸共有11个潮位站的过程最大增水超过1.0 m,最大值出现在莱州湾的山东潍坊潮位站,为2.85 m,是潍坊站自2008年建站以来的最大值。江苏省南通市出现了达到当地红色警戒潮位的高潮位,其中,吕四潮位站观测到建站以来的最高潮位。

③第二阶段的增水大、范围广、持续时间长且实况级别高,为历史罕见,环渤海沿岸低洼地区出现海水倒灌。20日傍晚—21日下午,在没有明显天气系统影响的情况下,渤海和黄海沿岸普遍出现了1.0~1.6 m的增水,有18个站的最大增水超过1 m,且持续时间超过20 h,叠加天文高潮导致20日夜间—

21日清晨辽宁省多数潮位站观测到建站以来的最高潮位,辽宁省营口市、盘锦市、锦州市,河北省唐山市和天津市等沿岸低洼地区的码头、街道、房屋出现海水倒灌,图1为现场拍摄的部分照片。

2 风暴潮数值模拟及分析

2.1 风暴潮模式及数据来源

为模拟渤海和黄海的风暴潮传播和运动,本研究利用了傅赐福等^[9]建立的风暴潮模式和主要参数设置,采用非结构三角形网格,网格区域包括渤海、黄海和东海北部海域,边界东至128°E,南至29.5°N。详细的模式介绍和参数设置等详见文献[9],本文不再赘述。

本研究用于模拟和验证渤海和黄海沿岸风暴潮的潮位站包括东港、小长山、老虎滩、长兴岛、鲅鱼圈、葫芦岛、止锚湾、秦皇岛、京唐港、曹妃甸、塘沽、黄骅、滨州、东营、潍坊、龙口、蓬莱、烟台、成山头、小麦岛、日照、连云港、洋口港和吕四;用于验证渤海和黄海海域风的浮标包括MF01001、MF01004、MF02001和MF02004;由于渤海和黄海



拍摄时间:2024年10月21日早晨

图1 辽宁省盘锦市沿岸海水倒灌

Fig.1 Seawater backward along the coast of Panjin City, Liaoning Province

为半封闭陆架海,本研究取渤海海峡断面和黄海南部断面用于研究风暴潮引起的海水流量,站点、浮标和断面位置见图2。为了准确还原2024年10月18—21日的风暴潮过程,本研究采用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的CFSR(Climate Forecast System Reanalysis)逐小时再分析风场(网址: <https://doi.org/10.5065/D6513W89>)驱动风暴潮模式。

2.2 数值模拟验证

风暴潮模式计算时间为2024年10月16—22日。首先检验渤海和黄海海域的再分析风场,4个浮标再分析风速与实测的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)为2.1 m/s。从实测值与再分析结果的对比(见图3)中可以看出,4个浮标的再分析风速和风向曲线与实测的吻合度较高,特别是在7级风以上的大风时段,再分析风速和风向与实测十

分接近,表明再分析结果的准确性很高,这为风暴潮模拟提供了较精准的风场。

在上述前提下,检验渤海和黄海沿岸风暴潮数值模拟的质量。图4为渤海和黄海主要潮位站风暴潮实测与模拟对比,从中可以看出,数值模拟曲线与实测基本吻合且准确模拟出了各潮位站“增水—减水—再增水”的风暴潮趋势。此外,最大风暴潮检验是风暴潮模拟质量的重要指标,表1为由第一阶段(18—19日)冷空气引起的风暴潮数值模拟误差统计,模拟的沿岸最大增水的平均相对误差为13.7%,表2为第二阶段(20—21日)由边缘波引起的风暴潮数值模拟误差统计,模拟的沿岸最大增水的平均相对误差为8.2%。由此可以看出,模式很好地模拟了此次风暴潮过程的发生和发展过程,特别是准确还原了20—21日由边缘波引起的风暴潮的运动和传播过程,数值模拟结果可用于风暴潮运动及传播的详细分析。

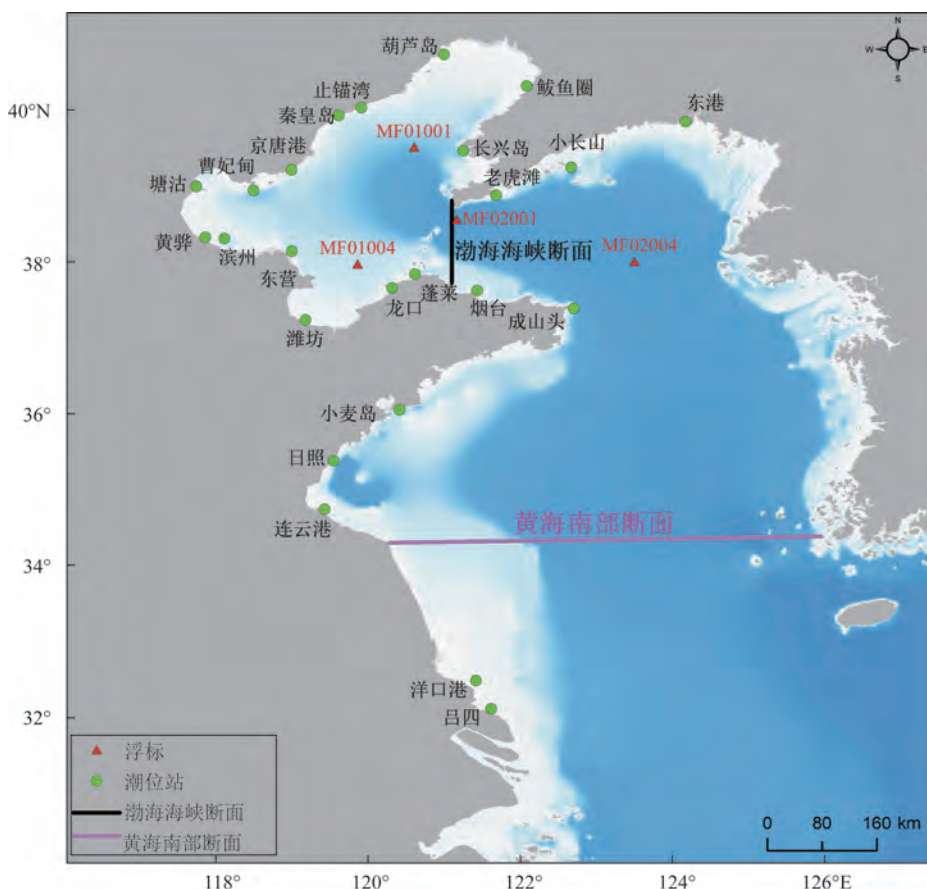


图2 渤海和黄海的潮位站、浮标和断面分布

Fig.2 Distribution of tidal gauges, buoys, and cross sections in the Bohai Sea and Yellow Sea

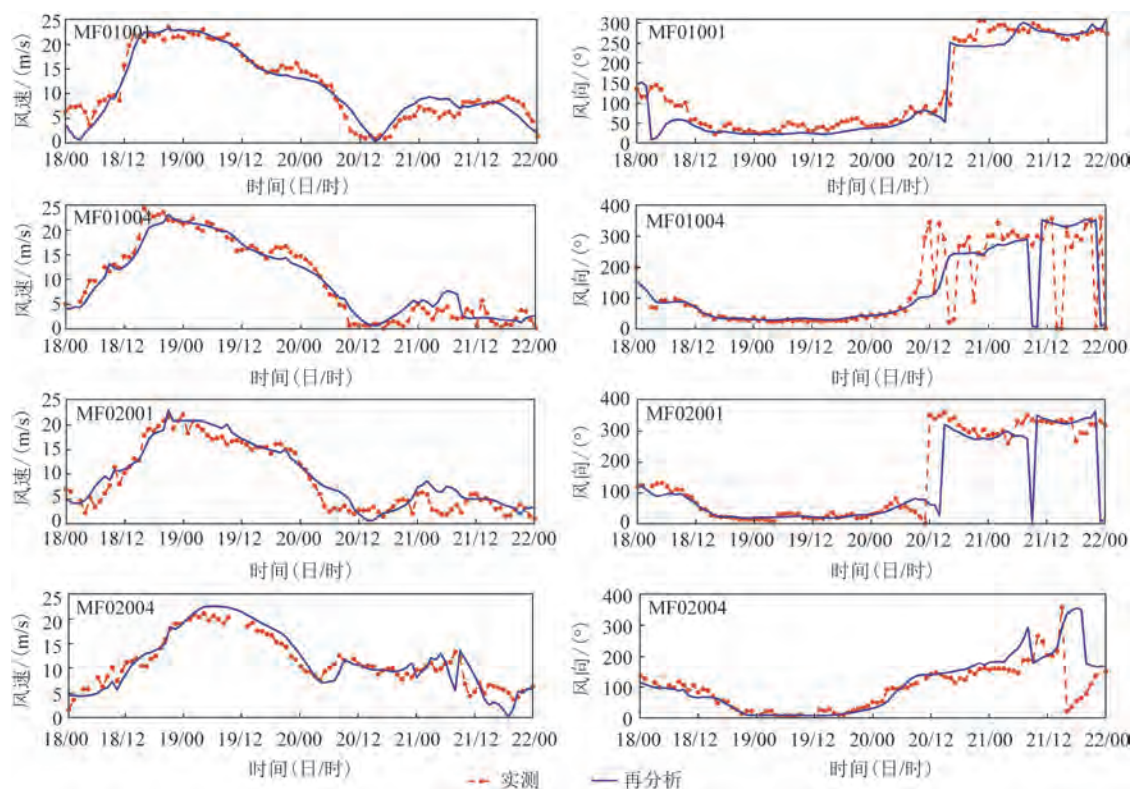


图3 渤海和黄海4个浮标实测风与再分析对比

Fig.3 Comparison of wind observation and reanalysis of four buoys in the Bohai Sea and Yellow Sea

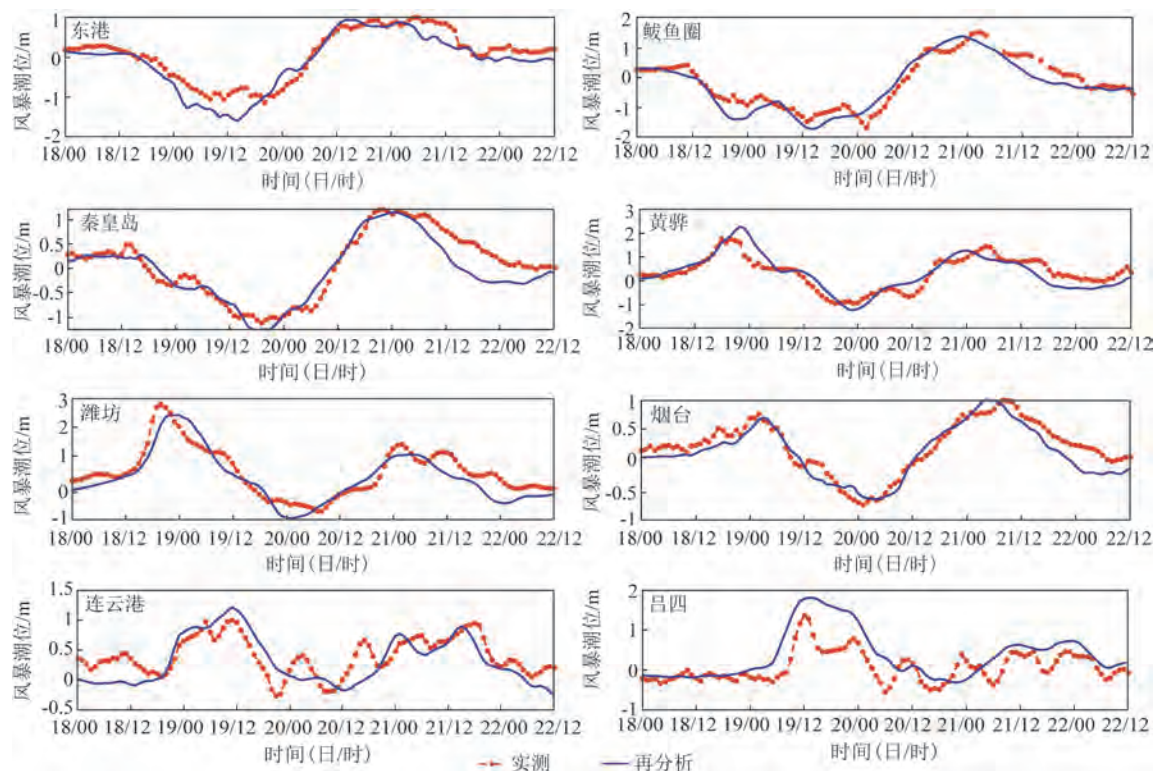


图4 渤海和黄海沿岸主要潮位站风暴潮实测与模拟对比

Fig.4 Observation and simulation comparison of storm surges at major tidal gauges along the Bohai Sea and Yellow Sea coasts

表 1 10 月 18—19 日由冷空气引起的风暴潮模拟误差统计

Tab.1 Error statistics of storm surge simulation caused by cold air from October 18th to 19th

潮位站	最大增水实况值/m	最大增水模拟值/m	相对误差/%
京唐港	0.94	0.96	2.1
曹妃甸	1.36	1.43	5.1
黄骅	1.73	2.19	26.6
塘沽	1.58	1.85	17.1
滨州	1.71	2.03	18.7
东营港	1.25	1.52	21.6
潍坊港	2.85	2.54	10.9
龙口	1.44	1.42	1.4
蓬莱	0.96	1.04	8.3
烟台	0.78	0.73	6.4
连云港	1.00	1.21	21.0
洋口港	1.61	1.74	8.1
吕四	1.36	1.77	30.1
平均相对误差			13.7

2.3 数值模拟结果分析

数值模拟结果可用于还原此次风暴潮波的运动和传播,并分析其成因。图 5 为数值模拟的 10 月 18—21 日主要时次的渤海和黄海风暴潮场,图中比较清晰地展示了此次风暴潮运动和传播的全过程。18 日上午一夜间,受东北大风影响,渤海的辽东湾出现较大减水,渤海湾、莱州湾和山东半岛则出现较大增水;19 日,受东北风影响,渤海沿岸的增水沿着地形传播至山东半岛南岸—杭州湾沿岸,渤海和黄海北部沿岸则出现大范围的减水;20 日上午,黄海南部和朝鲜半岛西部沿岸的增水较大;20 日中午—21 日上午,较大增水沿朝鲜半岛西部沿岸逆时针由南往北传播至黄海北部和渤海沿岸;21 日上午一夜间,渤海和黄海北部沿岸的较大增水沿逆时针再次传播至山东半岛南岸—杭州湾沿岸,而后风暴潮过程结束。

为了深入探究 20—21 日由边缘波引发的过程第二次增水大且持续时间长的原因,利用上述数值模拟结果计算了黄海南部断面和渤海海峡断面 18—21 日的过程流量,结果见图 6。在黄海南部断面,第一阶段由冷空气引发的海水流出量为 $261 \times 10^9 \text{ m}^3$,

表 2 10 月 20—21 日由边缘波引起的风暴潮模拟误差统计

Tab.2 Error statistics of storm surge simulation caused by edge waves from October 20th to 21st

潮位站	最大增水实况值/m	最大增水模拟值/m	相对误差/%
东港	1.00	0.94	6.0
小长山	0.92	0.90	2.2
老虎滩	1.03	0.92	10.7
长兴岛	1.28	1.16	9.4
鲅鱼圈	1.49	1.38	7.4
葫芦岛	1.45	1.27	12.4
止锚湾	1.09	1.15	5.5
秦皇岛	1.17	1.15	1.7
京唐港	1.07	1.12	4.7
曹妃甸	1.13	1.18	4.4
黄骅	1.41	1.26	10.6
塘沽	1.47	1.29	12.2
滨州	1.43	1.24	13.3
东营港	1.04	1.15	10.6
潍坊港	1.54	1.24	19.5
龙口	1.06	1.20	13.2
蓬莱	1.07	1.11	3.7
烟台	1.00	1.00	0
成山头	0.79	0.74	6.3
小麦岛	0.99	0.76	23.2
日照	0.80	0.83	3.8
连云港	0.94	0.90	4.3
洋口港	0.77	0.74	3.9
平均相对误差			8.2

第二阶段由边缘波引发的海水流入量为 $433 \times 10^9 \text{ m}^3$,后者比前者高 66%;在渤海海峡断面,第一阶段由冷空气引发的海水流出量为 $92 \times 10^9 \text{ m}^3$,第二阶段由边缘波引发的海水流入量为 $161 \times 10^9 \text{ m}^3$,后者比前者高 75%。由此可以看出,两个断面由第二阶段边缘波引发的海水流入量均远大于第一阶段由冷空气引发的海水流出量,如此大的回流流量导致超浅海的渤海沿岸近 20 h 内出现高达 1 m 的持续增水。

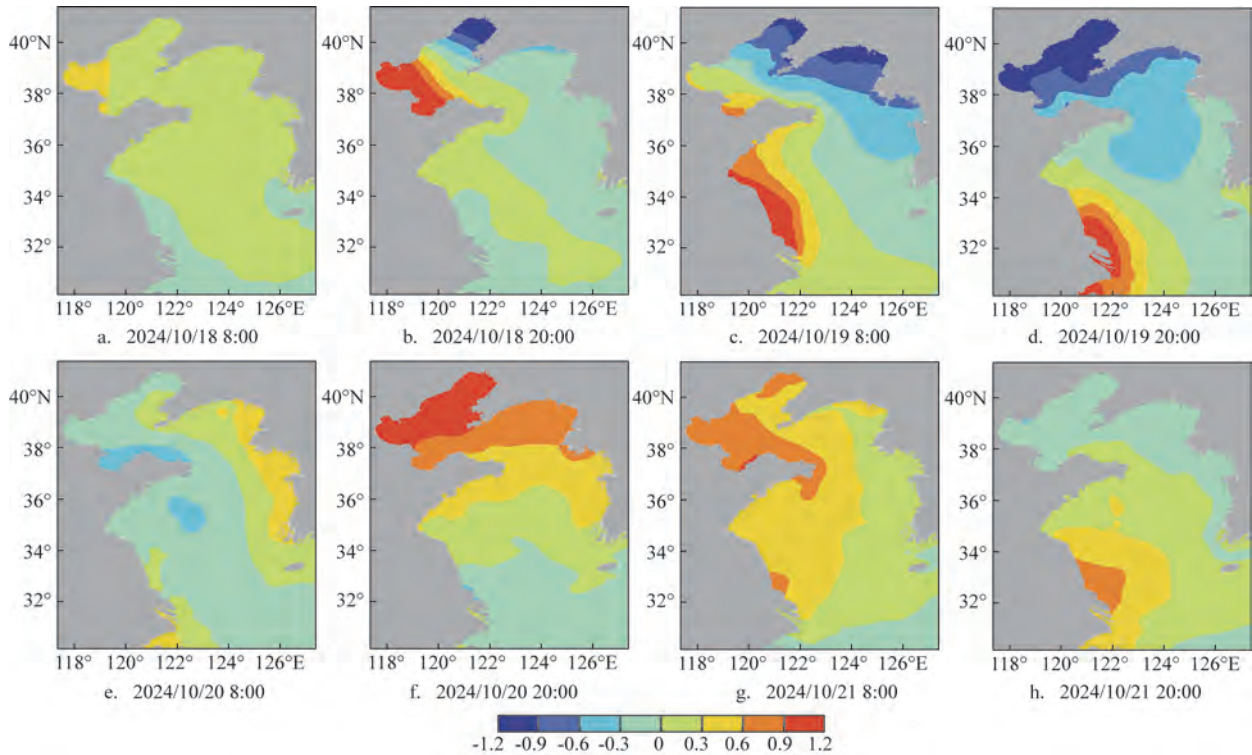


图5 数值模拟的10月18—21日渤海和黄海风暴潮场(单位:m)

Fig.5 Numerical simulation of storm surge fields in the Bohai Sea and Yellow Sea from October 18th to 21st (unit:m)

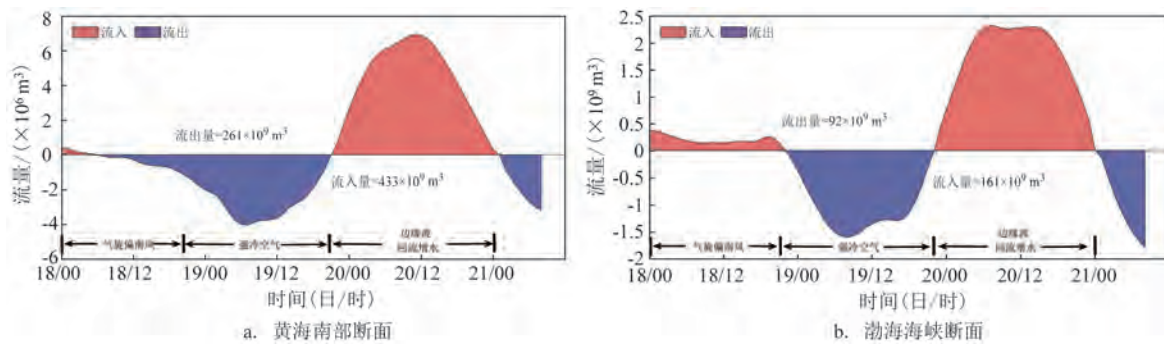


图6 数值模拟的10月18—21日黄海南部断面(a)和渤海海峡断面(b)流量统计

Fig.6 Numerical simulation of flow statistics for the southern Yellow Sea section (a) and the Bohai Strait section (b) from October 18th to 21st

3 海水倒灌事件成因分析及讨论

3.1 成因分析

上述数值模拟结果清晰地展示了风暴潮波的传播规律,从渤海和黄海各主要潮位站的实测资料同样也可以看出其特征(见图7)。图7a为两个阶段主要潮位站实况风暴潮曲线和较大增水出现时间

连线。绿线为第一阶段强冷空气自北向南影响下的辽宁葫芦岛—江苏吕四等主要潮位站较大增水的出现时间连线,可以看出风暴潮波在东北风的作用下自北向南传播,增水大且范围广;红线是第二阶段诱发的边缘波传播影响下的辽宁丹东—江苏吕四等主要潮位站较大增水的出现时间连线,诱发的边缘波自朝鲜半岛西岸—辽东半岛南岸—辽东湾、渤海湾、莱州湾—山东半岛—江苏沿岸逆时针

传播,边缘波引发的增水大、持续时间长且范围广。边缘波的传播示意图见图7b。

此外,本次风暴潮过程第二阶段(20—21日)的增水由边缘波和风二者共同引起,为了研究其主次作用,在数值模拟中设置在20日08时起停止风的驱动。结果显示,当风驱动停止后,渤海海峡断面第二阶段的海水流入量为 $152 \times 10^9 \text{ m}^3$,而边缘波和风二者共同引起的流入量为 $161 \times 10^9 \text{ m}^3$,可以看出,在第二阶段增水中边缘波的贡献占比为94%,起绝对主导作用,而风的贡献占比仅为6%,为次要因素。

经过风暴潮实况特征分析和数值模拟分析,可以归纳出此次渤海和黄海沿岸海水倒灌的成因。2024年10月18日—19日中午,受强冷空气和出海气旋的共同影响,渤海和黄海沿岸发生强风暴增水过程,19日下午—20日中午,沿岸各站出现持续风暴减水过程,渤海、黄海北部的风暴潮位低,而黄海南部的风暴潮位高,即形成“北低南高”的位势差,诱发的边缘波于20日下午—21日下午自朝鲜半岛

西岸—辽东半岛南岸—辽东湾、渤海湾、莱州湾—山东半岛—江苏沿岸逆时针传播,叠加21日凌晨前后的天文大潮,环渤海沿岸出现罕见高潮位,导致辽宁、河北和天津等沿海低洼地区出现海水倒灌。此次边缘波引发的增水强、范围广且持续时间长,为历史罕见,具有一定的极端性。

因此,此次海水倒灌事件主要由诱发的边缘波传播叠加天文大潮所致,一些学者提出的天文大潮、海平面上升或沿岸地表沉降等也可能是此次海水倒灌的成因,但从风暴潮实测数据和本研究的数值模拟分析来看,天文大潮、海平面上升或沿岸地表沉降等仅为次要因素。

3.2 结论和讨论

在强天气系统对渤海和黄海的影响减弱或结束后,常会诱发边缘波,由台风过境诱发的边缘波产生的增水较大,而由强冷空气诱发的边缘波产生的增水较小,一般小于1 m,例如2007年3月3—7日和2022年10月2—6日强冷空气过程的边缘波增水

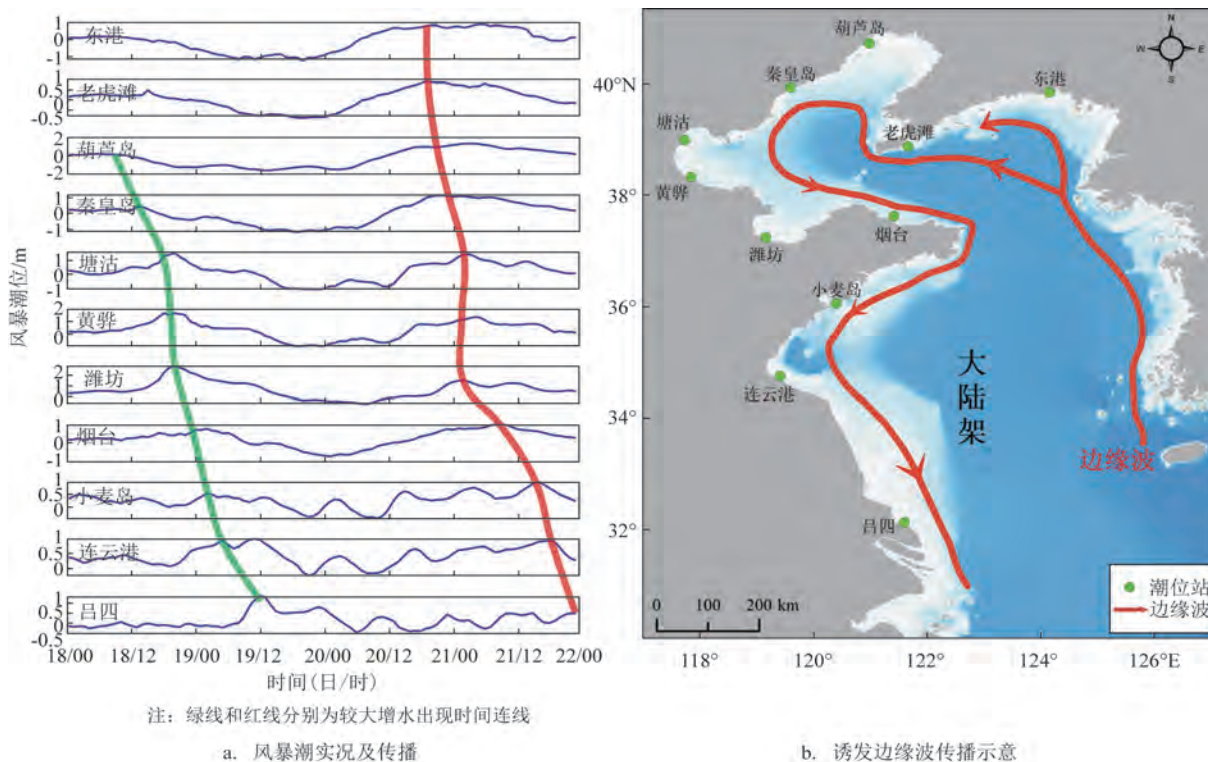


图7 2024年10月18—21日沿岸各潮位站风暴潮实况及传播和渤海和黄海沿岸诱发边缘波传播

Fig.7 Observation curve and propagation of storm surge at coastal tidal gauges from October 18th to 21st, 2024, and the propagation of storm surges along the coast of the Bohai Sea and Yellow Sea caused by edge waves

约为0.5 m。此次强冷空气影响结束后诱发的边缘波增水超过1 m,是较为罕见的,也超出了风暴潮预报员的预期,但风暴潮模式却能准确还原此次风暴潮的运动和传播过程,说明其发生机制和机理比较明确。然而,在此次海水倒灌事件中,尚有一些问题值得研究,例如:①此次边缘波在黄海南部断面和渤海海峡断面如此大的流量是否和强冷空气在渤海和黄海海域的风向和作用时间有关?②边缘波的形成是否与江苏中南部沿岸有利于增水堆积的辐射沙洲特殊地形有关?③高分辨率风暴潮漫滩模式能否准确模拟渤海沿岸,尤其是辽东湾岸段较严重的海水倒灌现象?以上问题均是笔者下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 中华人民共和国自然资源部. 2014年中国海洋灾害公报[EB/OL]. (2015-03-03). https://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619_1798018.html.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2014 China marine disaster bulletin[EB/OL]. (2015-03-03). https://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619_1798018.html.
- [3] 中华人民共和国自然资源部. 2017年中国海洋灾害公报[EB/OL]. (2018-04-23). https://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619_1798021.html.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2017 China marine disaster bulletin[EB/OL]. (2018-04-23). https://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619_1798021.html.
- [4] 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.
- [5] 于福江, 董剑希, 叶琳, 等. 中国风暴潮灾害史料集: 1949-2009[M]. 北京: 海洋出版社, 2015.
YU F J, DONG J X, YE L, et al. Collection of storm surge disasters historical data in China 1949-2009[M]. Beijing: China Ocean Press, 2015.
- [6] 冯士筭. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
FENG S Z. Introduction to storm surge[M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [7] 杨金湘, 袁方超, 李郅明, 等. EMD方法在中国沿岸风暴潮增水分析中的应用[J]. 海洋通报, 2016, 35(2): 157-162.
YANG J X, YUAN F C, LI Z M, et al. Application of the EMD method in the storm surges at the coast of China[J]. Marine Science Bulletin, 2016, 35(2): 157-162.
- [8] 傅赐福, 于福江, 吴少华, 等. 气旋引发渤海异常增水特征研究[J]. 海洋预报, 2018, 35(1): 37-43.
FU C F, YU F J, WU S H, et al. Study on the characteristic of abnormal storm surge caused by cyclone in the Bohai sea[J]. Marine Forecasts, 2018, 35(1): 37-43.
- [9] 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.

Causal analysis of the October 2024 seawater backflow event along the coasts of the Bohai Sea and the Yellow Sea based on numerical simulation

FU Cifu^{1,2}, YU Fujiang^{1,2*}, DONG Jianxi^{1,2}, GAO Yi^{1,2}, LI Mingjie^{1,2}

(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)

Abstract: A rare strong extratropical storm surge event occurred along the coasts of the Bohai Sea and the Yellow Sea from October 18 to 21, 2024, resulting in seawater backward in some low-lying areas of Liaoning Province, Hebei Province, and Tianjin City. The storm surge was divided into two stages: the first stage was caused by strong cold air, and the second stage was caused by edge waves. To explore its causes, this study conducted a

numerical simulation of the storm surge using NCEP(National Centers for Environmental Prediction) reanalysis wind fields. The root mean squared error of the reanalysis wind speed at the buoy locations in the Bohai Sea and the Yellow Sea was 2.1 m/s. The average relative errors of the simulated maximum storm surge at coastal tidal gauges in the first and second stages are 13.7% and 8.2% respectively, proving that the numerical simulation can accurately reproduce the movement and propagation of the storm surge, that is, the edge waves propagate counterclockwise from the western coast of the Korean Peninsula to the northern coast of the Yellow Sea, the coast of the Bohai Sea, and the southern coast of the Yellow Sea. Using the numerical simulation results to analyze the flow rates in the southern Yellow Sea section and the Bohai Strait section, it was found that the inflow of seawater in the second stage was 66% and 75% higher than the outflow in the first stage, which explains the reason why the storm surge caused by edge waves in the second stage is large, wide-ranging and long-lasting. In addition, the contributions of edge waves and winds to the storm surge in the second stage were 94% and 6%, respectively, with edge waves playing an absolutely dominant role.

Key words: coastal areas of Bohai and Yellow Seas; strong cold air; storm surge; seawater backflow; edge wave; numerical simulation; semi-closed continental shelf sea