



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20210012

海平面上升对渤海风暴潮增水的影响 ——以“0310”寒潮风暴潮为例

李琮¹, 丁玉梅², 赵亮¹

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

摘要: 基于非结构有限体积近岸海洋动力学模型(Finite Volume Costal Ocean Model, FVCOM), 利用潮汐和风场强迫, 建立渤海风暴潮模型, 研究海平面变化对渤海风暴潮增水的影响. 基于联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第5次报告数据, 在代表性浓度路径(representative concentration pathways, RCP)4.5情景下, 模拟预测了在2030年、2050年和2100年海平面上升后, 渤海寒潮风暴潮增水的空间分布. 结果显示, 海平面上升导致渤海近岸风暴潮极值增水有减少的趋势, 渤海湾近岸典型站位风暴潮增水出现不同程度减少, 其中2030年风暴潮增水将减少5%左右, 到2050年风暴潮增水减少5%~8%, 2100年风暴潮增水将减少10%~20%. 主要原因是由于海平面上升改变了潮波的运动, 使渤海潮汐高潮位上升, 另外渤海风暴潮的浅水效应明显, 海平面上升使水深相对增加, 导致渤海近岸风暴潮增水的减少. 但由于海平面上升后渤海风暴潮极值增水的减少量较小, 因此海平面上升对渤海风暴潮过程的影响有限.

关键词: 海平面变化; 风暴潮; 数值模拟; FVCOM; 渤海

中图分类号: P731.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2021)05-0041-07

Influence of Sea Level Rise on Storm Surge in the Bohai Sea ——A Case study of “0310” Extratropical Storm Surge

LI Cong¹, DING Yumei², ZHAO Liang¹

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

2. College of Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Based on the unstructured Grid Finite Volume Costal Ocean Model (FVCOM), we constructed a storm surge model of the Bohai Sea by the tide and wind forcing to study the influence of sea level rise on the storm surge in the Bohai Sea. Based on the data in the Fifth Assessment Report of IPCC, we simulated and predicted the spatial distribution of storm surge elevation in the Bohai Sea after sea level rise in 2030, 2050 and 2100 under the scenarios of representative concentration pathways (RCP) 4.5. The result of simulation shows that sea level rise will lead to a decrease of the extreme storm surge in the coastal area of the Bohai Sea, and the storm surge at the typical inshore stations in the Bohai Bay will decrease in varying degrees. Among them, the storm surge will decrease by about 5% in 2030, 5%-8% in 2050, and 10%-20% in 2100 respectively. The main reason is that sea level rise will change the movement of tidal waves, which will increase the maximum tidal level in the Bohai Sea. Moreover, the shallow water effect of the the Bohai Sea storm surge is obvious. The relative increase of water depth caused by sea level rise will lead to the decrease of the maximum surge height. However, since the reduction of the surge height is smaller, the impact of sea level rise will have a modest impact on the storm surge in the Bohai Sea.

Key words: sea level change; storm surge; numerical simulation; FVCOM; the Bohai Sea

收稿日期: 2021-01-19; 修回日期: 2021-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41876018, 41606098); 天津市自然科学基金资助项目(19JCZDJC40600, 19JCYBJC22000)

作者简介: 李琮(1995—), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生; 通信作者: 丁玉梅, 副教授, dingym@tust.edu.cn

风暴潮是大气异常扰动造成的海水剧烈升降现象,包括由强风引起的温带或者寒潮风暴潮和由热带气旋导致的气压骤变引起的台风风暴潮^[1]. 风暴潮灾害是我国沿海地区最严重的海洋灾害. 渤海是典型的半封闭海湾型内陆架浅海,由于其地理位置的特殊性,渤海更容易遭受台风风暴潮和寒潮风暴潮的威胁^[2-3]. 随着环渤海经济圈的不断发展,对渤海风暴潮的防灾减灾需求也在增加.

受气候变化影响,全球平均海平面持续表现为上升趋势. 海平面上升将严重影响沿海地区的生产建设活动,也通过影响近海潮波,引起主要分潮的迟角和潮差发生变化,对风暴潮增水产生一定的影响^[4-7],张平等^[8]预测,海平面上升叠加风暴潮对 2050 年中国海洋经济损失影响较大. 国内外学者^[9-12]对海平面变化和风暴潮过程进行了很多研究. Kopp 等^[13]基于联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第 5 次评估报告,针对未来温室气体排放不同情景,对全球平均海平面的变化概率进行了预测分析. Zhang 等^[14]以 2003 年的伊莎贝尔(Isabel)飓风为例,研究了海平面变化对半封闭切萨皮克湾(Chesapeake Bay)风暴潮的影响,预测在 2050 年和 2100 年气候条件下,海平面变化对风暴潮增水的影响较小. 张吉等^[15]利用海洋环流模式(parallel ocean program, POP),在代表性浓度路径 RCP 4.5 情景下,预测 21 世纪南海平均海平面在 10 年间上升 15~39 cm. 于宜法等^[16]研究了海平面上升对东中国海潮波变化的影响,指出海平面上升导致风暴潮灾害加剧. 高志刚^[17]指出,东中国海风暴潮受海平面上升的影响,海平面上升导致风暴潮增减水效应也随之增加,风暴潮增水极值随海平面上升而减小,由于量值较小因此对风暴潮影响不大. 仇天宇等^[18]指出,海平面上升导致河北黄骅台风风暴潮漫滩风险增加. 宗虎城等^[19]指出,海平面上升后,与风暴潮和天文潮产生非线性作用,引起超高水位,黄浦江口风暴潮的净升高值大于海平面上升的值. 谢洋^[20]指出,海平面上升导致的风暴潮增水极值差值空间分布不一致,海平面上升导致珠江口风暴潮增水极值减少了 3%~5%. 庄圆等^[21]基于验潮站数据,根据皮尔森统计模型指出,代表性浓度路径 RCP8.5 情景下,海平面上升显著缩短中国沿海地区极值水位的重现期.

海平面变化对不同海域风暴潮增水的影响存在差异,但是对其动力机制的分析很少,未来海平面上升对渤海海域风暴潮变化的影响也鲜有报道. 渤海“0310”风暴潮是渤海周边海域近年来遭受的一次较

为严重的寒潮风暴潮,具有典型的寒潮风暴潮特征. 本文利用有限体积近岸海洋动力学模型 FVCOM, 以对应时段的模拟风场作为强迫条件,对渤海“0310”寒潮风暴潮进行数值模拟,研究海平面上升对渤海寒潮风暴潮增水的影响.

1 计算区域和模型设置

1.1 模型设置

FVCOM 模型是基于三角网格和有限体积法的三维近海海洋模式,适用于对河口和复杂岸线的模拟,模型所使用的有限体积法能够从通量的角度考虑水体的运动,保证水体动量、质量和能量的守恒^[22].

模型研究的渤海区域如图 1 所示,模型的计算区域包括整个渤海,开边界设在渤海海峡以东的 122.9°E 附近. 计算使用的水深数据采用分辨率为 1'×1'的东中国海的水深数据插值到网格点上^[23],渤海湾海域的岸线数据是通过卫星反演获得的 2010 年高分辨率岸线,分辨率为 0.001°×0.001°. 模型所使用的非结构化网格如图 2 所示.

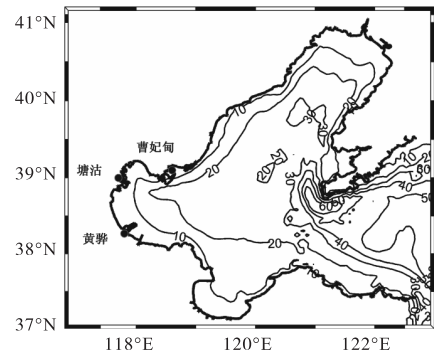


图 1 模型研究的渤海区域
Fig. 1 Model region in the Bohai Sea

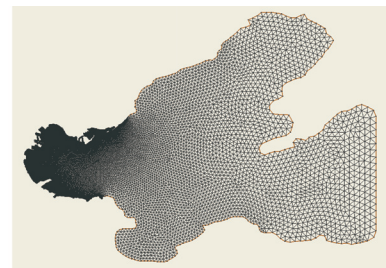


图 2 模拟使用的非结构化网格
Fig. 2 Unstructured grids used for the simulations

在渤海湾近岸的空间分辨率为 300 m;随着离岸距离的不断增大,逐渐变化为 1 000 m、2 000 m、4 000 m 和 8 000 m;到开边界处达到 10 000 m. 网格

节点数为 12 824 个,单元个数为 24 656 个,模型采用正压模型,温度和盐度分别为 10 °C 和 30。外模时间步长为 3 s,内模时间步长为 30 s。采用美国俄勒冈大学潮汐预报模式(OSU tidal prediction software, OTPS)预报的实时水位进行驱动,选取 8 个主要分潮 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 合成模型开边界潮位。风场使用中尺度天气预报模型(weather research forecast, WRF)模拟的风场数据^[24-25],时间分辨率为每 3 h 一次,空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。

1.2 情景设置

《2019 年中国海平面公报》^[26]数据显示,我国沿海海平面变化总体呈波动上升趋势,1980—2019 年平均上升速率为 3.4 mm/a,渤海海域上升速率 3.7 mm/a,高于其他海域,且呈逐年增大趋势。预计未来 30 年,渤海沿海海平面将上升 55 ~ 180 mm。IPCC 第 5 次评估报告分析了代表性浓度路径 RCPs,其中 RCP4.5 是中短期适应气候变化的新情景,相对于其它路径,RCP4.5 是代表性浓度中间稳定路径,比较符合当今的减排措施和效果^[27]。Kopp 等^[13]基于 IPCC 第 5 次评估报告,设置未来温室气体排放不同路径,预测了全球平均海平面的变化。本文参考文献^[13]和文献^[27],以 2002 年渤海海平面高度为基准,选取中等温室排放代表性浓度路径 RCP4.5 情景,研究海平面变化对渤海未来风暴潮的影响(表 1)。

表 1 各情境下渤海海平面高度上升数值

Tab. 1 Sea level rise under each scenario in the Bohai Sea

情景	对应年	上升数值/cm
1	2030	30
2	2050	50
3	2100	100

在纬度比较高的渤海海域,受台风或者热带气旋影响的概率较小,在秋冬过渡或者冬春过渡季节容易受到寒潮大风的影响,造成寒潮风暴潮增水。2003 年 10 月,受北方强冷空气影响,渤海沿岸发生了近 10 年来最强的一次寒潮风暴潮的过程。在不同海平面上升情景设置中,利用 2003 年“0310”风暴潮的风场和潮汐过程作为强迫场进行数值模拟。

2 模型验证

对渤海潮汐进行数值模拟,模拟时间是从 2003 年 10 月 1 日到 10 月 31 日,选取后 25 天的模拟数据进行调和,并与实测数据进行对比,对模型进行

校正。调和得到的 M_2 分潮等振幅和等迟角图如图 3 所示,与海图对比基本特征相符。模拟得到的渤海海域的 M_2 分潮的振幅和迟角数据与实测数据的对比分析见表 2,振幅绝对误差均值为 2.7 cm,迟角绝对误差均值 5.9°,模拟得到的调和常数与实测数据对比基本吻合^[28]。

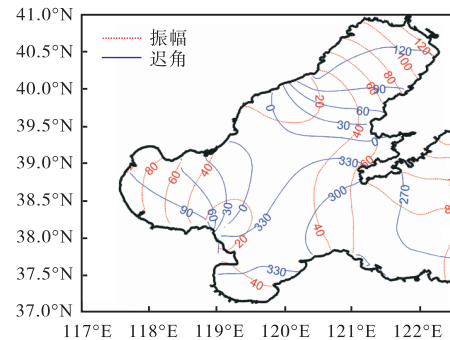


图 3 模拟的渤海 M_2 分潮的等振幅(cm)和等迟角($^\circ$)图
Fig. 3 Simulated co-amplitude(in centimeters) and co-phase(in degrees)maps of M_2 constituent in the Bohai Sea

表 2 渤海 M_2 分潮调和常数观测值和模拟值的比较

Tab. 2 Comparison between the observed and simulated harmonic constants of M_2 constituent in the Bohai Sea

验潮站	振幅/cm			迟角/ $^\circ$		
	模拟值	观测值	误差	模拟值	观测值	误差
塘沽	117.3	117.0	0.3	89.0	90.9	-1.9
大口河	115.0	112.0	3.0	109.5	109.0	0.5
哇啦沟	81.4	84.0	-2.6	113.9	127.0	-13.1
曹妃甸	66.1	73.0	-6.9	67.6	74.0	-6.4
秦皇岛	15.8	11.0	4.8	306.7	311.0	-4.3
龙口	36.8	40.0	-3.2	328.5	316.0	12.5
娘娘庙	24.2	25.0	-0.8	157.9	162.0	-4.1
蓬莱	55.5	53.0	2.5	286.3	292.0	-5.7
葫芦岛	96.9	96.0	0.9	145.0	150.0	-5.0

对渤海 2003 年 10 月的“0310”寒潮风暴潮过程进行数值模拟,模拟时间是从 2003 年 10 月 1 日到 2003 年 10 月 17 日,取 10 月 10 日到 10 月 13 日的数据进行分析,对模型进行验证。图 4 为塘沽站模拟与实测风暴潮增水时间序列的对比分析。由图 4 可知:对于风暴潮增水过程中的变化趋势和极值增水出现的时间点,模拟结果与实测数据基本一致,绝对误差均值为 0.27 m。模拟数据在第一次增水极值发生时略低于实测数据,这可能是由于网格精度和局部水深精确度不够所致,但不影响本文关于风暴潮极值增水的比较研究。

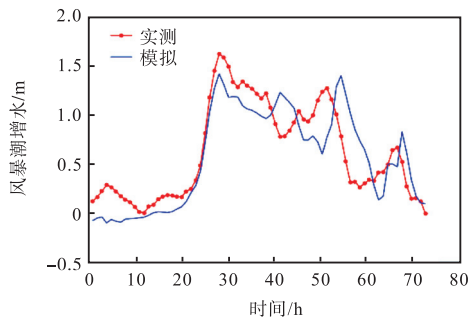


图4 塘沽2003年10月风暴潮增水模拟与实测数据对比
Fig. 4 Simulated and observed storm surge heights at Tanggu Station in October 2003

3 结果分析

3.1 渤海风暴潮增水过程分析

渤海“0310”寒潮风暴潮的主要增水过程发生在2003年10月10日至13日,影响范围覆盖整个渤海海域,在渤海西岸的渤海湾和西南岸的莱州湾造成了明显的风暴潮增水。

模拟的渤海寒潮风暴潮增水的空间分布如图5所示。

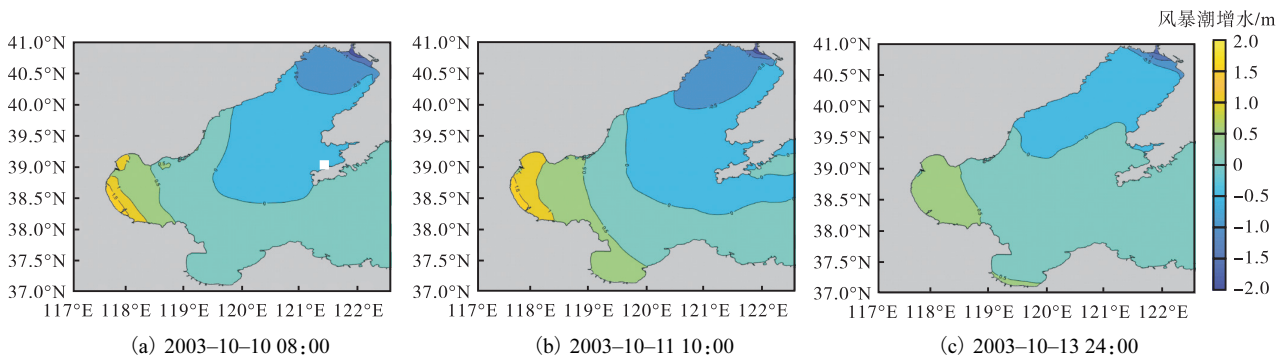


图5 模拟的渤海寒潮风暴潮增水的空间分布
Fig. 5 Distribution of extratropical storm surge height in the Bohai Sea

由图5可知:在风暴初振阶段,渤海3个湾内增减水数值均在0.8m以下;在风暴潮激振阶段,在东北大风的作用下,渤海湾和莱州湾增水明显,渤海湾沿岸增水超过1.0m,莱州湾沿岸增水接近1.0m,辽东湾沿岸出现明显的减水过程;直到11日10时,渤海西南部增水数值继续增大,渤海湾西部近岸区域出现超过1.5m的增水,其中最大增水达到1.8m,莱州湾湾底近岸区域增水也接近1.0m;在风暴潮后期,渤海湾及莱州湾的增水明显下降,辽东湾区域的减水分布消失。

3.2 海平面变化对渤海风暴潮增水的影响

为直观理解风暴潮增水在不同海平面条件下的改变,将海平面上升后的塘沽站风暴潮增水极值与原有海平面情况下的风暴潮增水极值相减,得出海平面上升后的增水变化量图(图6)。预测结果显示,在渤海西部沿海地区,风暴潮增水明显减少,在风暴潮过程中发生减水的辽东湾海域、渤海湾以东开阔海域和渤海中部开阔海域则出现了不同程度的正值分布,这反映出这些海域的减水数值也有所减少。

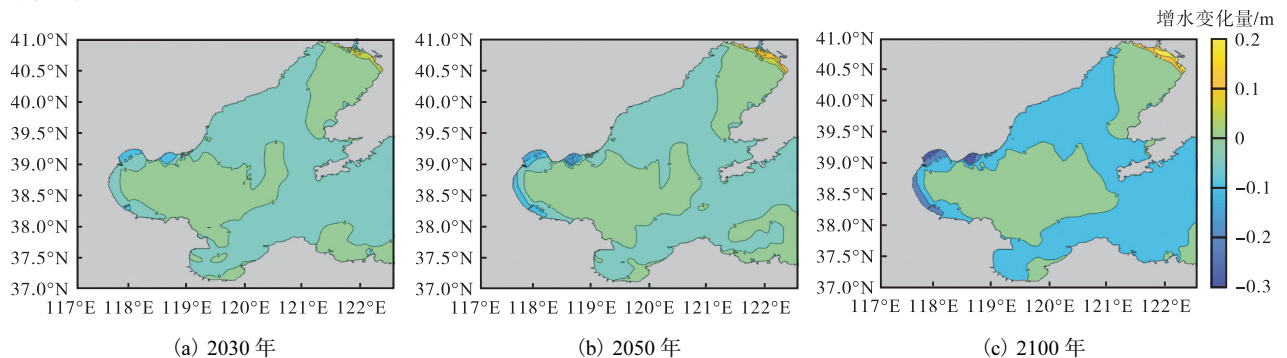


图6 各情景下渤海风暴潮增水变化量的分布
Fig. 6 Distribution of the difference of storm surge height under each scenario

图6显示:2030年,海平面上升后,渤海湾西部沿海风暴潮增水减少了0.1~0.2m,减幅为5%左

右,其中塘沽和黄骅站较为明显,莱州湾海域增水值变化较小,在辽东湾东北沿岸减水过程减弱,降低幅

度为 0.1~0.2 m;在 2050 年,渤海湾西岸风暴潮增水减少的区域发生了小幅的扩大,莱州湾海域变化仍不明显,辽东湾海域东北沿岸风暴潮减水显著减少,减少值为 0.1~0.2 m;在 2100 年,渤海湾内风暴潮增水减少的区域进一步增大,莱州湾西部沿岸的风暴潮增水出现了小范围的下降,东部的减水区域则出现了减水幅度减少的现象,辽东湾海域风暴潮减水幅度达到 0.2 m 的海域向西北方向扩大。

3.3 海平面变化对渤海湾 3 个典型站位风暴潮增水的影响

渤海寒潮风暴潮期间,受影响最大的是渤海湾和莱州湾。塘沽、黄骅和曹妃甸站位是位于渤海湾西部的典型重要港口,受风暴潮威胁较大。图 7 显示,在渤海湾典型站位,随着海平面升高风暴潮增水极值有稍微下降的趋势。

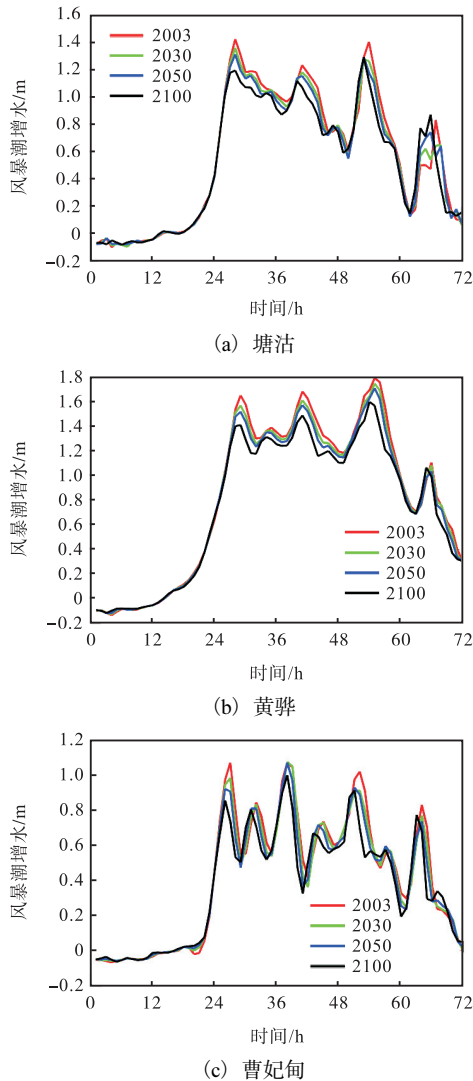


图 7 海平面上升后渤海湾典型站位风暴潮增水的变化
Fig. 7 Changes in storm surge height at typical stations in Bohai Bay after sea level rise

渤海湾典型站位未来海平面上升后风暴潮极值增水和极值水位的变化趋势见表 3。

表 3 渤海湾典型站位在海平面上升情景中风暴潮极值增水和极值水位的变化趋势

Tab. 3 Variation of maximum storm surge elevation and the first maximum water level at typical stations in Bohai Bay under sea level rise scenarios

验潮站	年份	极值增水/m	减少量/m	减幅/%	极值水位/m	减少量/m	减幅/%
塘沽	2003	1.41	—	—	4.71	—	—
	2030	1.35	0.06	4.26	4.71	0	0
	2050	1.30	0.11	7.80	4.71	0	0
	2100	1.18	0.23	16.31	4.63	0.08	1.70
黄骅	2003	1.78	—	—	4.79	—	—
	2030	1.74	0.04	2.25	4.74	0.05	1.04
	2050	1.69	0.09	5.06	4.71	0.08	1.67
	2100	1.59	0.19	10.67	4.70	0.09	1.88
曹妃甸	2003	1.06	—	—	3.64	—	—
	2030	0.97	0.09	8.49	3.61	0.03	0.82
	2050	0.90	0.16	15.09	3.56	0.08	2.20
	2100	0.85	0.21	19.81	3.51	0.13	3.57

从表 3 可以看出:渤海未来海平面上升后,渤海湾典型站位的风暴潮极值增水和极值水位都有减少的趋势,其中风暴潮极值增水减少的幅度较大。塘沽站地处渤海湾西端,是我国北方重要的国际贸易港口,在 2030 年,风暴潮极值增水减少的幅度为 4.26%,在 2100 年,风暴潮极值增水减少的幅度达到 16% 以上。黄骅站位于天津港以南的渤海湾西南沿岸,在寒潮风暴潮过程中,增水持续时间更长,水位更高,在 2030 年,风暴潮极值增水减少的幅度为 2.25%,到 2100 年,风暴潮极值增水减少的幅度达到 10% 以上。曹妃甸站位于渤海湾湾口北侧,风暴潮增水自东向西逐渐增大,2030 年风暴潮极值增水减少的幅度为 8.49%,在 2100 年,风暴潮极值增水减少的幅度达到 19% 以上。

3.4 影响机制分析

海平面上升改变了潮波系统的振幅和迟角,造成海面活动发生变化。由于渤海不规则半日潮占优,因此主要研究海平面上升情景对 M_2 分潮的振幅和迟角的影响。图 8 为模拟的 2030 年、2050 年、2100 年的渤海 M_2 分潮的等振幅和等迟角图。

随着海平面上升,在渤海湾, M_2 分潮的等振幅线表现出向无潮点收缩的趋势,振幅有增加的趋势。 M_2 分潮等迟角线呈逆时针旋转的趋势,其旋转角度可以达到约 10° 。在莱州湾内的同潮时线发生顺时针偏转。同潮时线的偏转,致使半日分潮在渤海湾、莱州湾等海域的潮汐位相提前。这与文献[17, 29]中的结

论一致. 风暴潮产生的主要原因是由于潮汐和风暴潮的非线性作用, 由于潮汐水位和相位的改变导致渤海风暴潮水位的变化, 使风暴潮增水出现改变, 这与文献[30–31]的分析一致. 海平面上升后, 由于潮汐振幅的增加, 使渤海湾近岸潮汐高潮位升高. 由于海平面上升后风暴潮极值水位有减少的趋势(见表 3), 因此对应的风暴潮极值增水有相对减少的趋势, 但是对于海平面上升, 风暴潮水位减少的量值较小.

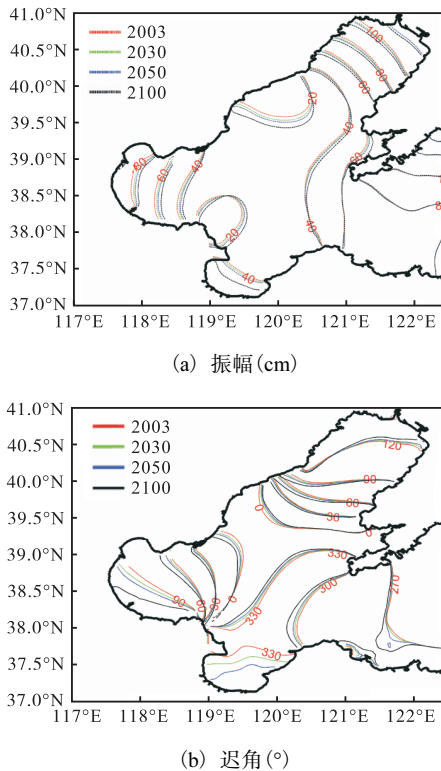


图 8 各情景下渤海 M_2 分潮等振幅和等迟角图
 Fig. 8 Simulated co-amplitude(in centimeters)and co-phase(in degrees) maps of M_2 constituent in the Bohai Sea under each scenario

海平面的变化影响了渤海的地形和水深, 并对渤海风暴潮造成一定的影响^[9]. 渤海属于半封闭的浅海, 平均水深只有 18 m, 风暴潮的浅水效应明显. Dean 等^[32]利用方程(1)解释了风暴潮增水(ζ)、风应力(τ_a)、底应力(τ_b)、海平面的尺度(L)和整个的风暴潮水位($h + \zeta$)相关.

$$\zeta = k \frac{(\tau_a - \tau_b)L}{\rho g(h + \zeta)} \quad (1)$$

式中: 参数 k 为经验常数; ρ 为空气密度; g 为重力加速度; h 为水深.

如上面方程所示, 风暴潮增水与风暴潮水位成反比, 如果风应力和底应力是常数, 海平面水位升高使渤海海域相对水深增加, 导致渤海近岸海域的风暴潮

增水减少.

4 结 语

基于 FVCOM 海洋动力学模型, 建立了渤海风暴潮模型, 以渤海寒潮风暴潮为例, 在代表性浓度路径 RCP4.5 情景下, 设置敏感实验, 模拟分析了海平面上升对渤海风暴潮增水的影响. 结果显示, 海平面上升情景下, 渤海湾近岸和莱州湾西部海域风暴潮极值增水有减少的趋势, 辽东湾等渤海东北部海域风暴潮减水也有减少的趋势. 渤海湾 3 个典型站位的风暴潮增水随着海平面上升有减少的趋势, 预测到 2100 年, 减小幅度约为 10% ~ 20%. 分析原因主要是由于海平面上升改变了潮波的运动, 使潮汐水位增加, 同时海平面的上升使渤海水深相对增加, 导致渤海近岸风暴潮增水有减少的趋势. 模拟发现, 海平面上升后风暴潮极值水位减少的量远小于海平面上升量, 因此海平面的上升对风暴潮极值水位的影响较小. 未来的风暴潮灾害, 应主要考虑海平面上升导致的风暴潮水位的相对抬升的影响.

参考文献:

- [1] 冯士筴. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [2] 冯士筴, 张经, 魏皓. 渤海环境动力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] 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.
- [4] 宗虎城, 章卫胜, 张金善. 中国近海海平面上升研究进展及对策[J]. 水利水运工程学报, 2010(4): 43–50.
- [5] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 10–18.
- [6] 姜兆敏. 有关风暴潮近似解的研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [7] 章卫胜, 张金善, 林瑞栋, 等. 中国近海潮汐变化对外海海平面上升的响应[J]. 水科学进展, 2013(2): 243–250.
- [8] 张平, 孔昊, 王代锋, 等. 海平面上升叠加风暴潮对 2050 年中国海洋经济的影响研究[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(1): 129–135.
- [9] DING Y M, WEI H. Modeling the impact of land reclamation on storm surges in Bohai Sea, China[J]. Natural hazards, 2017, 85(1): 559–573.
- [10] 张静. 近 20 年中国和全球海域海平面上升趋势特征

- 分析及相互关系的初步研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.
- [11] WATSON P J. A new perspective on global mean sea level(GMSL) acceleration[J]. *Geophysical research letters*, 2016, 43(12): 6478–6484.
- [12] HAY C C, MORROW E, KOPP R E, et al. Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise[J]. *Nature*, 2015, 517(7535): 481–484.
- [13] KOPP R E, HORTON R M, LITTLE C M, et al. Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites[J]. *Earth's future*, 2014, 2(8): 383–406.
- [14] ZHANG F, LI M. Impacts of ocean warming, sea level rise, and coastline management on storm surge in a semienclosed bay[J]. *Journal of geophysical research: oceans*, 2019, 124: 6498–6514.
- [15] 张吉,左军成,李娟,等. RCP4.5 情景下预测 21 世纪南海海平面变化[J]. *海洋学报*, 2014, 36(11): 21–29.
- [16] 于宜法,郭明克,刘兰. 海平面上升导致渤、黄、东海潮波变化的数值研究 I: 现有的渤、黄、东海潮波的数值模拟[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2006, 36(6): 859–867.
- [17] 高志刚. 平均海平面上升对东中国海潮汐、风暴潮影响的数值模拟研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2008.
- [18] 仇天宇,于福江,董剑希,等. 海平面上升对河北黄骅台风风暴潮漫滩影响的数值研究[J]. *海洋通报*, 2010, 29(5): 499–503.
- [19] 宗虎城,章卫胜,张金善. 海平面上升对黄浦江风暴潮水位影响研究[J]. *人民长江*, 2014(9): 1–3.
- [20] 谢洋. 海平面上升对珠江口风暴潮增水和波浪的影响研究[D]. 南京:东南大学,2015.
- [21] 庄圆,纪棋严,左军成,等. 海平面上升对中国沿海地区极值水位重现期的影响[J]. *海洋科学进展*, 2021, 39(1): 20–29.
- [22] CHEN C, LIU H, BEARDSLEY R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries[J]. *Journal of atmospheric & oceanic technology*, 2003, 20(1): 159–186.
- [23] 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.
- [24] 高山红,吴增茂,谢红琴. Kalman 滤波在气象数据同化中的发展与应用[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(5): 571–575.
- [25] 高山红,谢红琴,吴增茂,等. 台风影响下渤海及邻域海面风场演变过程的 MM5 模拟分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2001, 31(3): 325–331.
- [26] 中华人民共和国自然资源部. 2019 年中国海平面公报[EB/OL]. (2020–04–30) [2020–10–10] http://gi.mnr.gov.cn/202004/t20200430_2510978.html.
- [27] STOKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [28] 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.
- [29] 孟云,娄安刚,刘亚飞,等. 渤海岸线地形变化对潮汐系统和潮流性质的影响[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(12): 1–7.
- [30] HORSBURGH K J, WILSON C. Tide-surge interaction and its role in the distribution of surge residuals in the North Sea[J]. *Journal of geophysical research oceans*, 2007, 112: 1–13.
- [31] FENG J L, JIANG W S, LI D D, 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*, 2018, 75(4): 225–234.
- [32] DEAN K G, DALRYMPLE R A. Coastal Processes with Engineering Applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

责任编辑:周建军