

飓风“桑迪”登陆期间纽约长岛附近海域 风暴潮数值模拟

任成才^{1,2}, 沈瑞杰^{1,2}, 屠泽杰^{1,2}, 宿殿鹏^{1,2}, 阳凡林^{1,2}

(1. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590;

2. 自然资源部 海洋测绘重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘要: 纽约位于美国东海岸, 属于飓风频发地区, 在过去 20 年中, 飓风“桑迪”、“艾琳”、“弗朗西斯”等在该地区造成大量生命和财产损失。为给纽约长岛地区风暴潮漫滩研究和防潮抗灾部署提供依据, 利用 IBTrACS 数据集提供的飓风风场资料和 MIKE21 水动力模块, 建立高分辨率风暴潮模型并分析不同飓风路径对纽约长岛附近海域增水分布的影响。结果表明: 长岛海峡地形会影响飓风登陆期间海水流向, 是造成该区域增水差异的重要因素之一; 长岛海峡西侧在风暴潮期间更易产生严重潮水漫滩且持续时间更长; 受天文潮影响, 低等级预警水位持续较短, 只有在飓风登陆前后才会引起水位持续性增长。

关键词: 飓风; 风暴潮; 数值模拟; 洪水预警

中图分类号: P229

文献标志码: A

Numerical simulation of storm surge in Long Island, New York during Hurricane Sandy's landfall

REN Chengcai^{1,2}, SHEN Ruijie^{1,2}, TU Zejie^{1,2}, SU Dianpeng^{1,2}, YANG Fanlin^{1,2}

(1. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Key Laboratory of Ocean Geomatics, Ministry of Natural Resources of China, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: New York, located on the east coast of the United States, is often hit by hurricanes. In the past two decades, hurricanes “Sandy”, “Irene”, and “Francis” have caused great loss of life and property in this area. In order to provide a scientific basis for study of storm surge flood plain and the development of tide prevention and disaster resistance in Long Island, New York, this paper uses the hurricane by using the hurricane wind data from the IBTrACS dataset and the MIKE21 hydrodynamic module, a high-resolution storm surge model is constructed to analyze the influence of different hurricane paths on the distribution of water level increase in the sea near Long Island, New York. The experimental results have shown that the topography of the Long Island Strait will affect the direction of seawater flow during the landing of hurricanes, which is one of the important factors causing the difference of water level increase in the area; that the west side of the Long Island Strait is more prone to severe flooding during storm surges which last longer; and that affected by astronomical tides, the low-grade warning water level lasts for a short time and will lead to the continuous increase of water level only before and after the landfall of hurricanes.

Key words: hurricane; storm surge; numerical simulation; flood warning

风暴潮指由强烈大气扰动, 如热带气旋(台风、飓风)、温带气旋(寒潮)等引起的海面异常升降现象^[1]。21 世纪以来, 伴随着纽约人口和经济的快速增长以及全球海平面的上升, 飓风(如“IRENE”、“SANDY”和

收稿日期: 2021-08-03

基金项目: 山东省研究生教育创新计划建设项目(SDYJG19083)

作者简介: 任成才(1997—), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要从事 GNSS 验潮及海洋垂直基准方面的研究。

阳凡林(1974—), 男, 湖北荆州人, 教授, 博士生导师, 主要从事多波束海洋测绘及 GNSS 定位系统应用等方面的研究, 本文通信作者。E-mail: yang723@163.com

“FAY”)引起的风暴潮在该地区造成的损失日益严重^[2]。美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)根据验潮站监测水位对纽约附近风暴潮洪水淹没情况进行了统计和预测,当水位超过平均低-低潮位(mean lower-low water, MLLW)2.977 m时会出现洪水,2000年共有5天出现了洪水淹没现象,2020年增加到13天,预计2050年产生洪水的天数将增加至40~110天。因此,建立精细化风暴潮数值模型对该地区风暴潮的预报预警、河口规划和防灾减灾等具有重要现实意义。

目前,基于数值模拟建立高精度风暴潮模型依然是研究风暴潮最有效的手段,常用的数值模拟系统有:风暴潮业务预报模式(sea, lake and over land surges from hurricanes, SLOSH)^[3],海洋、沿海和河口水域的先进环流模式(an advanced circulation model for oceanic, coastal and estuarine waters, ADCIRC)^[4],有限体积海岸和海洋模型(finite volume coast and ocean model, FVCOM)^[5-6]、MIKE^[7]等。通过历史数据分析,美国国家飓风中心(National Hurricane Center, NHC)列出了影响风暴潮增水的几个因素,包括飓风强度、表面压力、前进速度、路径、登陆时的位置和角度以及附近海域的水深等。国内外许多学者对上述因素进行了研究, Du等^[8]利用同化风压模式和 ADCIRC+SWAN(simulating wave nearshore)^[9]模型,建立了浙江沿海风暴潮模拟系统,并用该系统研究了23条新建台风路径对温州市风暴潮的敏感性,发现风暴潮最大增水往往发生在最大风速半径处。韩树宗等^[10]基于FVCOM模式对杭州湾附近海域进行了风暴潮模拟,分析了1995—2010年间16个台风登陆期间该区域增水变化情况,结果表明,飓风以不同的方向登陆时作用效果不同。另外,海岸线的形状对风暴潮增水也会产生显著影响,当飓风在向内弯曲的凹形海岸线(如佛罗里达州的阿巴拉契湾)登陆时,风暴潮增水更高;相反,在向外弯曲的凸形海岸线(如北卡罗来纳州的外河岸)登陆时,风暴潮增水更低^[11-12]。

为分析纽约长岛海峡的特殊地形和不同飓风路径对风暴潮增水的影响,本研究通过Holland^[13]飓风模型与MIKE21FM(Flow Model)水动力模型的耦合,构建了纽约长岛及其周围海域的风暴潮模型。并从风暴潮预警等级出发,对比分析水位对历史飓风的响应,从而定性评估不同飓风路径的风暴潮危害。

1 实验区域及数据来源

实验区域位于北美东海岸边,包括纽约长岛及其附近海域(39.5°~42°N, 70°~74.5°W)。长岛北面与海岸间隔着长岛海峡,南面和东面则是北大西洋海域。沿岸从西至东分布有4个验潮站(图1),水位数据源于美国国家海洋和大气管理局。图2展示了在飓风到来之前(10月17日—27日)4个验潮站同期水位变化情况,可以看出正常情况下长岛海峡西侧的水位明显高于东侧。

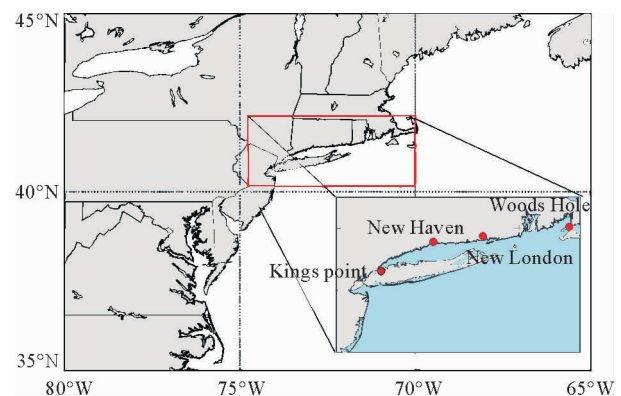


图1 实验区域及验潮站位置

Fig. 1 Experimental area and location of tide station

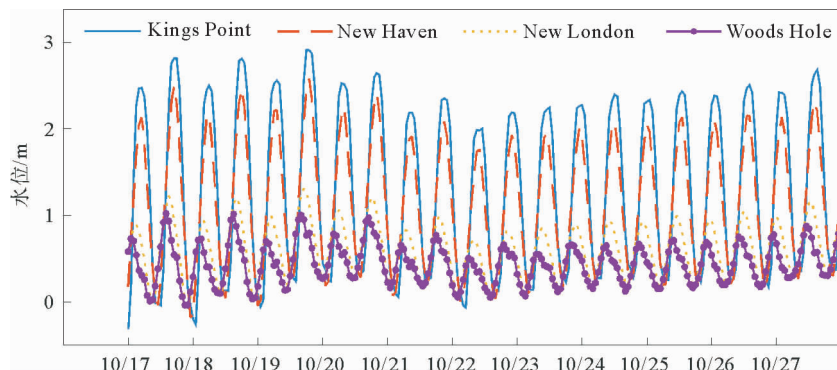


图2 正常情况下各验潮站的水位变化

Fig. 2 Data on water level changes not affected by storm surge

美国国家环境信息中心(National Centers for Environmental Information, NCEI)提供的 GEODAS-NG 软件可提取较精细的岸线数据,模型的水深数据^[14]源于 NOAA 提供的 ETOPO1 全球水深模型($1' \times 1'$)。为了使模拟结果更加准确,融合了欧洲中期天气预报中心(European centre for medium-range weather forecasts, ECMWF)提供的降水数据集($15' \times 15'$)。开边界水位由 FES2014(finite element solution)潮汐模型中的 8 个分潮组合水位驱动。飓风风场资料(包括飓风位置、风速、中心气压、最大风速半径等信息)由 IBTrACS(international best track archive for climate steward ship)数据集提供,该数据集将多个单位和个人的风暴数据合并到一个产品中,形成全球最完整的热带历史气旋数据集,并将数据存档供公众使用。

2 模型构建方法

在风暴潮登陆过程中,海面的总水位由天文潮和风暴增水(飓风因素强迫)两部分组成。首先,采用 Holland 经验气旋模型构建实验区域的风场模型;然后根据水深数据和岸线数据生成区域水深模型;最后,将得到的水深模型和风场模型输入 MIKE21 Flow 模型中,并设置边界条件及模型参数,从而构建风暴潮模型,具体技术路线如图 3 所示。

在构建风场模型时,首先根据 Young 等^[15]提出的热带气旋数值预测模型,计算距气旋中心 r 处的飓风梯度风速 V_g :

$$V_g(r) = V_{\max} \cdot \left(\frac{r}{R_{MW}}\right)^7 \cdot \exp\left(1 - \frac{r}{R_{MW}}\right), r < R_{MW}, \quad (1)$$

$$V_g(r) = V_{\max} \cdot \exp(0.0025R_{MW} + 0.05)\left(1 - \frac{r}{R_{MW}}\right), r \geq R_{MW}. \quad (2)$$

式中, V_{\max} 为最大风速, R_{MW} 为最大风速半径。

压力 p 由 Holland^[13] 模型给出的公式计算:

$$p(r) = p_c + (p_n - p_c) \cdot \exp\left(-\frac{R_{MW}}{r}\right)^B. \quad (3)$$

式中: r 表示到飓风中心的距离, $p(r)$ 表示距离飓风中心 r 处的压力, p_c 为飓风中心处的压力, p_n 为飓风风场边缘区域的压力(或中性压力), B 为确定飓风气压剖面和风速剖面的关系的参数。

B 参数与飓风的中心气压、外围气压、最大风速半径甚至飓风路径均有关系。林伟等^[16]研究了多种 B 参数计算方法对风场模拟结果的影响,总结了不同海域 B 参数的计算公式,本研究采用式(4)计算该参数。

$$B = 1.881 - 0.00557R_{MW} - 0.01097\phi. \quad (4)$$

其中, ϕ 为飓风所在位置的纬度。将飓风参数输入 Holland 模型后,即可生成飓风风场。

3 风暴潮模型的构建与率定

结合岸线数据在实验区域生成非结构化三角网格,并在沿岸进行加密,然后将水深数据内插到网格中生成实验区域的水深模型,如图 4 所示。

在进行后续的实验之前,首先应对模型进行率定。为此,使用历史飓风“桑迪”(1 级)来模拟水位变化。飓风“桑迪”形成于加勒比海西南部并在平行于美国东南部海岸向东北方向移动时获得加强^[17],同时异常的天气条件使得风暴向西转向,最终于 2012 年 10 月 29 日 23:30 在新泽西州登陆,最大持续地表

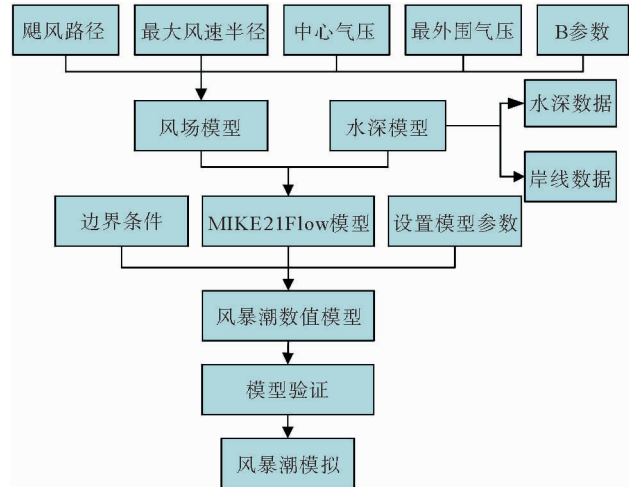


图 3 风暴潮模型构建流程图

Fig. 3 Flow chart of storm surge model construction

风速达 6 m/s, 最大风速半径可达 150 km, 在新泽西州和纽约州海岸引起了高强度风暴潮。在率定时, 以沿岸验潮站实测水位为基准, 通过不断调节模型参数, 以达到模拟水位与实测水位的最佳匹配效果。最终, 模型的 Smagorinsky 常数设置为 0.28, 河床糙率值 (曼宁系数) 设置为 $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, 边界初始水位流速均为 0, 模型开边界水位通过 8 个主要天文分潮 (K1、O1、P1、Q1、M2、S2、N2、K2) 调和分析获得。

率定结果表明 (图 5), 实验区域西侧验潮站处模拟水位与实测水位基本吻合, 相比之下, 东侧验潮站处的模拟水位在高低潮处存在一定偏差, 同时对比图 5 中未受风暴潮影响的水位 (水位的预报值) 可以看出, 在飓风登陆过程中, 4 个验潮站均出现了明显的增水。表 1 对 4 个验潮站风暴潮模拟结果进行了更为精细的精度评估。从表 1 中可以看出模拟最大风暴潮的绝对误差和相对误差均较小, 绝对误差和相对误差最大值均发生在 Kings Point 站, 分别为 0.23 m 和 5.01%。另外, 模拟最大风暴潮与实际观测值之间存在一定的相位误差, 最大相位误差发生在 Woods Hole 站, 比实测值晚了近 3 h。从计算结果可以看出, 模拟风暴潮的均方根误差整体较小, 且误差很大程度上是由相位误差引起的。Woods Hole 站风暴潮模拟值与实测值的相关性最低, 相关系数为 0.87 (大于 0.8 即可认为具有强相关性), 可能是由于 IBTrACS 数据集在飓风消散时的参数精度不高所致。整体而言, 构建的风暴潮模型参数可以准确模拟飓风期间的水位变化情况。

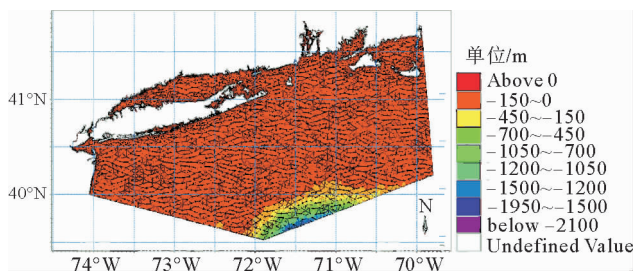


图 4 实验区域水深模型

Fig. 4 Water depth model of the experimental area

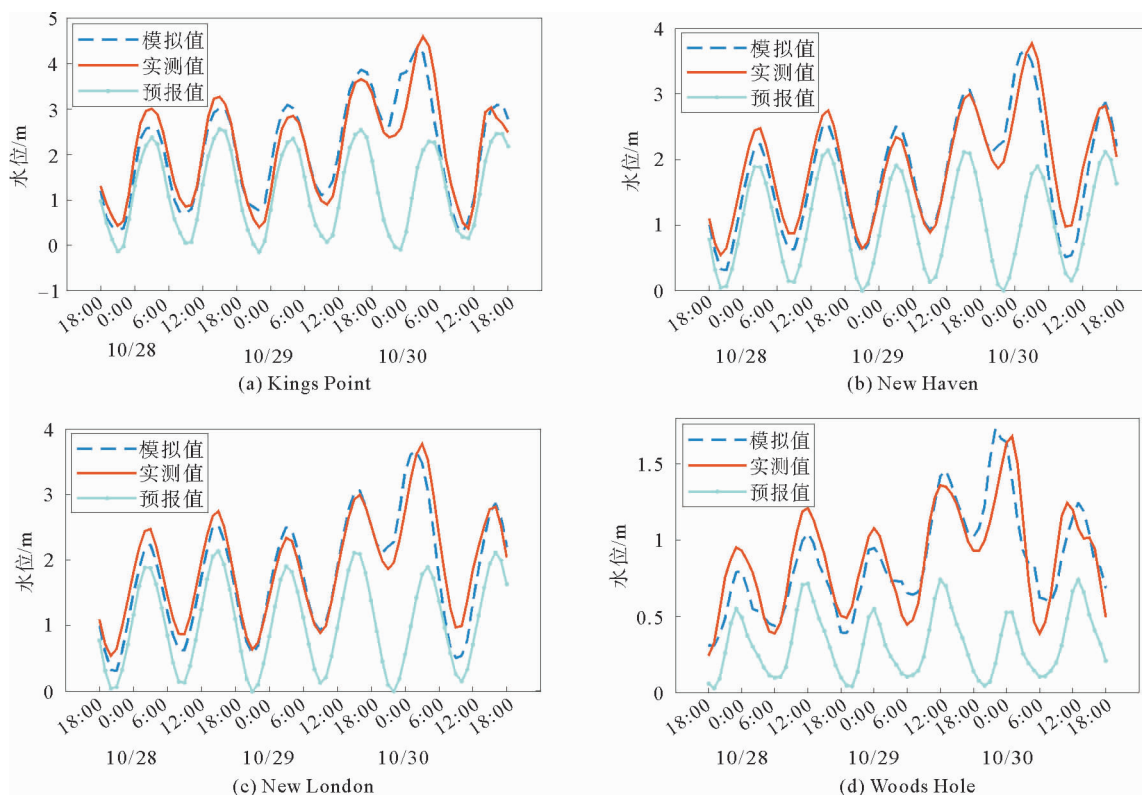


图 5 “桑迪”飓风登陆期间模拟水位与实测水位对比

Fig. 5 Comparison of water level between simulated and measured during Hurricane Sandy's landfall

表 1 风暴潮模拟结果精度评估

Tab. 1 Accuracy assessment of storm surge simulation results

验潮站	风暴潮最大值误差		风暴潮整体误差	
	绝对误差/m	相对误差/%	均方根误差/m	相关系数
Kings Point	0.23	5.01	0.37	0.94
New Haven	0.11	2.91	0.28	0.96
New London	0.08	3.32	0.19	0.93
Woods Hole	0.05	2.89	0.17	0.87

4 结果与讨论

4.1 长岛海峡增水时空变化规律

为深入分析飓风“桑迪”登陆过程中长岛海峡特殊地形对风暴潮增水分布的影响,从风暴潮模型得到的模拟水位中去除水位预报值,得到仅由飓风引发的增水数据。图 6 和图 7 分别显示了飓风登陆期间不同验潮站增水值变化情况以及飓风登陆时刻实验区域增水分布情况。可以看出,在飓风登陆前后,长岛海峡西侧区域的增水始终高于东侧。不同验潮站最大增水时刻相近,均在飓风登陆约 1 h 后,但增水最大值相差较大,且最大值由东往西递增,最大增水发生在 Kings Point 站,为 2.71 m。图 8 是最大增水时刻实验区域内的风场分布情况,从图 8 中可以看出,在飓风登陆时测区内主要为东南向岸风,持续的强风将海水吹向海峡西侧,同时由于长岛海峡两侧通道口东宽西窄的特征,西侧短时间内水流量小,致使海水迅速累积,最终形成较高水位。纽约长岛东部和南部海域距离岸边较远,飓风引起的最大增水在 0.5 m 左右,所受影响较小。

4.2 不同飓风路径下的水位预警

为探究飓风不同路径可能对长岛造成的灾害,将 10 月 29 日 18 时之后(18 时之后飓风对实验区域内水位的影响较为强烈)的原始路径每隔 10°顺时针旋转一次从而得到 4 条不同的飓风路径,如图 9 所示。实验中,只改变飓风的移动轨迹,最大风速、最大风速半径、中心气压等其他参数保持不变^[18]。

美国国家气象局(National Weather Service, NWS)按照不

同淹没程度和范围设定了低、中、高三种等级的水位警戒线。图 10 显示了 4 个验潮站不同路径下的水位值,可以看出飓风以不同路径登陆时,水位最高点发生的时间没有明显变化,但对水位值的大小较为明显的影

响。观察各验潮站的水位变化可以看出,飓风由西侧登陆时各验潮站水位明显较高,在 Kings Point 和 New Haven 站,水位最高点超过高级水位预警线,而飓风由东侧登陆时水位值不会超过高级水位预警线。相比

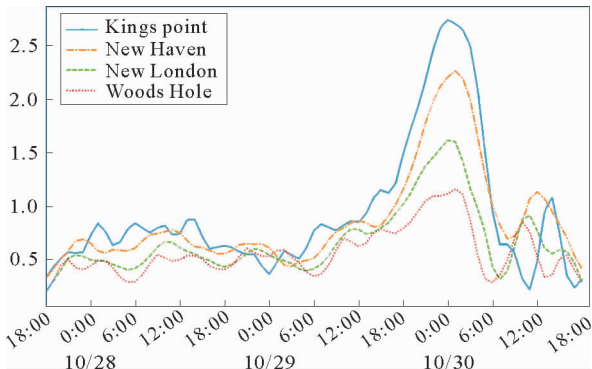


图 6 飓风桑迪登陆期间各验潮站处增水值变化

Fig. 6 Changes in water level increase at different tide stations during Hurricane Sandy's landfall

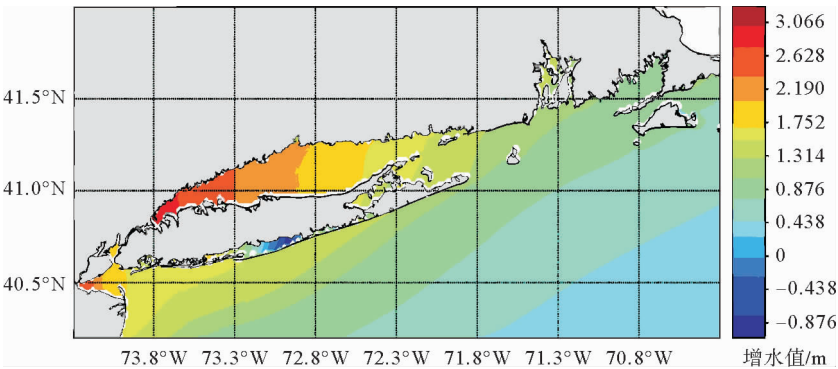


图 7 飓风登陆时刻实验区增水值大小分布

Fig. 7 Distribution of water level increase at the moment of Hurricane landing on the experimental area

之下,长岛海峡东侧 Woods Hole 站在不同路径飓风登陆期间水位均不会超过警戒线。

值得注意的是,由于潮汐现象,增水时长并不连续。从图 10 中可以看出,在 10 月 28 日 3 时和 15 时左右,长岛海峡内水位两次跃过低级水位预警线,持续时间约为 2~3 h,均发生在高潮时,随后由于受落潮的影响,水位持续下降,主要是由于该段时间内飓风距离实验区域较远,水位变化仍主要受潮汐的影响。而 10 月 29 日 23 时起(即飓风登陆后),水位出现了明显的上升,超过低级水位预警线的持续时间增加到 7~8 h,该段时间内飓风对水位的变化起主导作用。

图 11 显示了各实验区域发生低级和高级风暴潮淹没时飓风位置。当飓风移动至橙色轨迹和区域时,沿岸水位会超过低级水位预警线,淹没深度 0.3~0.6 m。当飓风位于红色区域时将超过高级水位预警线,此时淹没深度将达 0.9 m 以上。因此,飓风到达不同的“淹

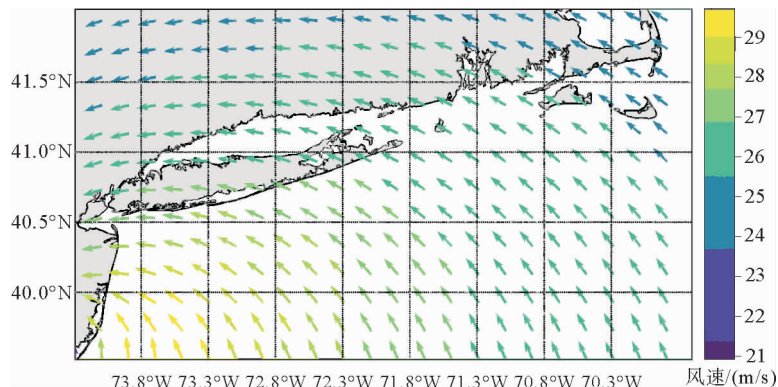


图 8 实验区最大增水时刻风场分布

Fig. 8 Wind field distribution at the time of maximum water level increase on the experimental area

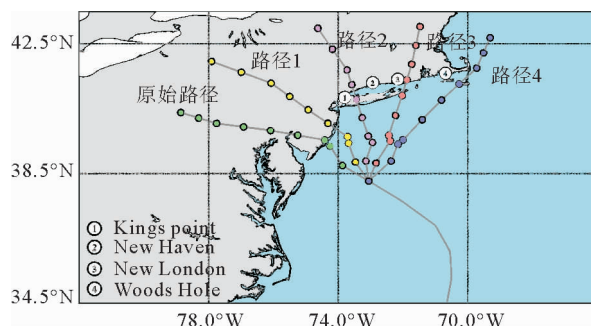


图 9 不同路径下飓风移动示意图

Fig. 9 Schematic diagram of different hurricane paths

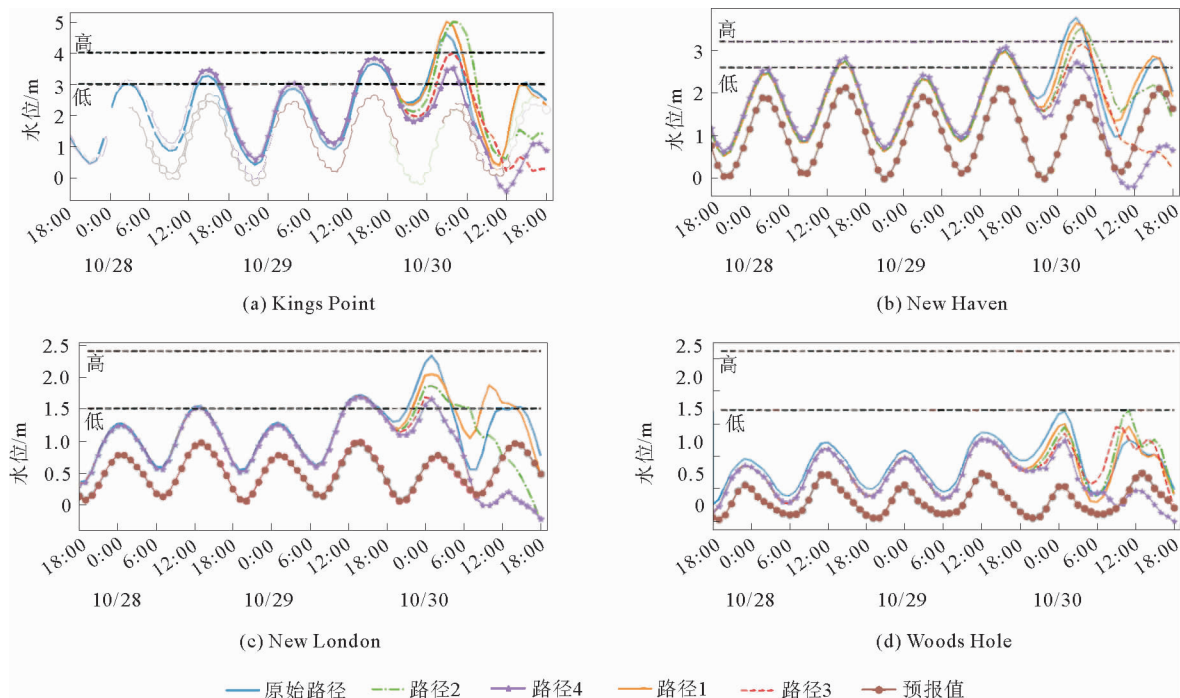


图 10 飓风不同移动路径下的水位变化

Fig. 10 Water level monitoring under different paths

没预警区域”(图 11 中的红色和橙色区域)时,会在沿岸造成不同程度的洪水灾害。之后,飓风将以不同方向登陆长岛,东部沿岸率先产生洪水,且淹没持续时间较长,但水位不会超过高级水位预警线,而西部区域洪水持续时间虽短,但淹没情况更为严重。另外,对于实验区域内同一位置,飓风由西侧登陆时,洪水到来时间会更早且持续时间也 longer,飓风由东侧登陆时,情况正好相反。

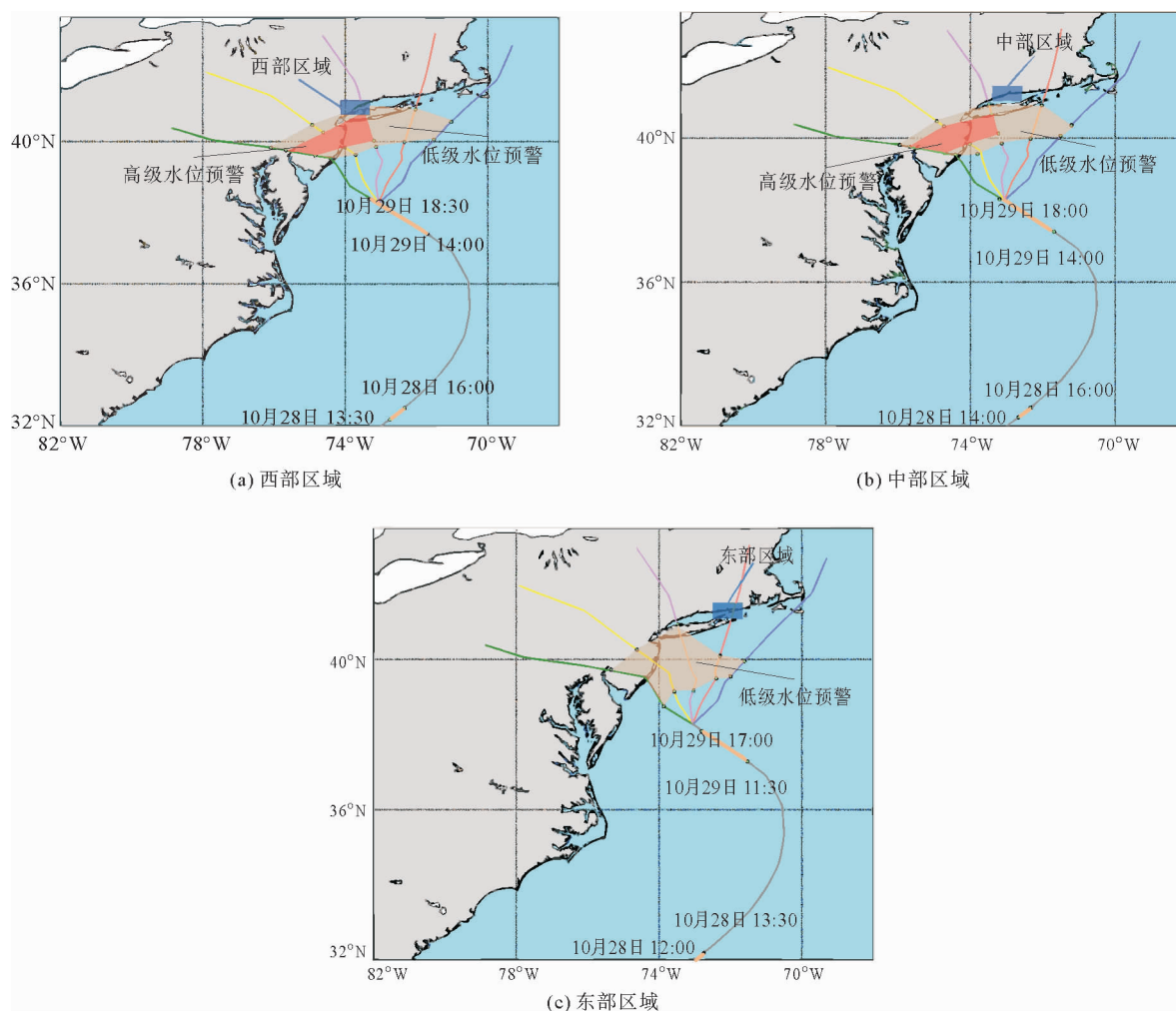


图 11 不同水位警戒等级下飓风所处位置

Fig. 11 Position of hurricane under different warning levels of water level

5 结论

本研究利用 MIKE21 水动力模型实现了纽约长岛地区的风暴潮数值模拟,通过两组对比实验,得到以下结论:

1) 飓风“桑迪”登陆期间长岛海峡西侧增水始终高于东侧,表明海峡地形对海水流动起着重要作用,是影响风暴潮增水分布的关键因素。

2) 飓风由长岛西部登陆时在长岛海峡内引起的增水较高,水位将超过高级水位预警线,在沿岸造成严重的淹没现象,而由东部登陆时对风暴潮增水影响较小,只会引发轻微洪水。

3) 长岛海峡西侧容易产生潮水淹没现象。通过风暴潮数值模拟,计算得到纽约沿岸不同等级潮水淹没发生的时间,进而划分出不同路径飓风的“淹没预警区域”,实现沿岸不同位置风暴潮预警,为人口和物资的转移提供依据。

参考文献:

- [1]冯士侗.风暴潮导论[M].北京:科学出版社,1982:1-2.
FENG Shizuo.Introduction to storm surge[M].Beijing:Science Press,1982:1-2.
- [2]AMANTE C J.Uncertain seas:Probabilistic modeling of future coastal flood zones[J].International Journal of Geographical Information Science,2019,33(12):2188-2217.
- [3]JELESNIANSKI C P,CHEN J,SHAFFER W A.Slosh: Sea,lake and overland surges from hurricanes[M].Boulder:National Weather Service,1992:1-4.
- [4]SHIM J S,KIM J,KIM D C,et al.Storm surge inundation simulations comparing three-dimensional with two-dimensional models based on Typhoon Maemi over Masan Bay of South Korea[J].Journal of Coastal Research,2013,65:392-397.
- [5]唐燕玲.基于波流耦合模型的洋山海域风暴潮水动力特性研究[D].杭州:浙江大学,2018:20-45.
TANG Yanling.Numerical simulation of characteristics of storm tide in Yangshan Harbor based on tide-surge-wave model [D].Hangzhou:Zhejiang University,2018:20-45.
- [6]朱志夏,熊伟.台风浪风暴潮作用下三维潮流数值模拟[J].哈尔滨工程大学学报,2019,40(10):1675-1681.
ZHU Zhixia,XIONG Wei.Numerical simulation of 3-D tidal current under the actions of typhoon waves and storm surge[J].Journal of Harbin Engineering University,2019,40(10):1675-1681.
- [7]WARREN I R ,BACH H K,MIKE 21:A modelling system for estuaries,coastal waters and seas[J].Environmental Software,1992,7(4):229-240.
- [8]DU M,HOU Y J,QI P,et al.The impact of different historical typhoon tracks on storm surge:A case study of Zhejiang, China[J/OL].Journal of Marine Systems,2020,206.DOI:10.1016/j.jmarsys.2020.103318.
- [9]谢友鸽,郭金运,朱金山,等.基于SWAN模型的东沙岛海域有效波高模拟与分析[J].山东科技大学学报(自然科学版),2016,35(3):17-24.
XIE Youge,GUO Jinyun,ZHU Jinshan,et al.Simulation and analysis of significant wave height over seas of Dongsha Island based on SWAN model[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2016,35(3):17-24.
- [10]韩树宗,潘嵩.杭州湾台风风暴潮增水过程的数值分析[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2013,43(7):1-6.
HAN Shuzong,PAN Song.Numerical simulation and analysis of storm surge in the Hangzhou Bay[J].Periodical of Ocean University of China(Natural Science),2013,43(7):1-6.
- [11]朱婧,叶龙彬,陈德花,等.1614号台风“莫兰蒂”在厦门湾及其周边海域引发风暴潮的数值模拟[J].海洋预报,2020,37(6):20-30.
ZHU Jing,YE Longbin,CHEN Dehua,et al.Numerical simulation of storm surge in Xiamen Bay and its adjacent seas caused by typhoon “Moranti”(1614)[J].Marine Forecasts,2020,37(6):20-30.
- [12]ANTONY C,UNNIKRISHNAN A S,KRIEN Y,et al.Tide-surge interaction at the head of the Bay of Bengal during cyclone Aila[J/OL].Regional Studies in Marine Science,2020,35.DOI:10.1016/j.rsma.2020.101133.
- [13]HOLLAND G J.An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes[J].Monthly Weather Review,1980,108(8):1212-1218.
- [14]郭金运,魏志杰,祝程程,等.基于重力异常迭代延拓的南海海底地形反演[J].山东科技大学学报(自然科学版),2021,40(4):1-10.
GUO Jinyun,WEI Zhijie,ZHU Chengcheng,et al.Bathymetry inversion of South China Sea based on iterative continuation of gravity anomalies[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2021,40(4):1-10.
- [15]YOUNG I R,SOBEY R J.A predictive model of tropical cyclone wind-waves[C]// Australasian Conference on Hydraulics and Fluid Mechanics,Barton:Institution of Engineers,Australia,1980,80(4):480-483.
- [16]林伟,方伟华.西北太平洋台风风场模型中 Holland B系数区域特征研究[J].热带地理,2013,33(2):124-132.
LIN Wei,FANG Weihua.Regional characteristics of holland B parameter in typhoon wind field model for Northwest Pacific [J].Tropical Geography,2013,33(2):124-132.
- [17]ROSENZWEIG C,SOLECKI W.Hurricane Sandy and adaptation pathways in New York:Lessons from a first-responder city[J].Global Environmental Change,2014,28(5):395-408.
- [18]MUSINGUZI A,AKBAR M K.Effect of varying wind intensity,forward speed,and surface pressure on storm surges of hurricane Rita[J/OL].Journal of Marine Science and Engineering,2021,9(2):128.DOI:10.3390/jmse9020128.

(责任编辑:高丽华)