

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.06.017

相似路径台风风暴潮过程对比

罗 锋^{1,2,3}, 汪 忆¹, 杨 洁^{1,3}, 张 杰¹, 张义丰^{1,3}

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南通河海大学海洋与近海工程研究院, 江苏 南通 226000;
3. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于 MIKE 21 模型和 Holland 台风风场模型, 构建了 1909 号利奇马和 0509 号麦莎 2 次相似路径台风期间的风场和气压场, 并模拟了相应的风暴潮过程。结果表明: 台风中心附近增水变化显著, 浙江东北部海域在台风登陆期间的增水更大; 受台风强度影响, 台风利奇马期间增水高值区更大, 部分海域 2 次台风期间最大增水差值接近 1.0 m; 潮致欧拉余流速度较大值主要分布在 100 m 水深以浅的海域, 量值超过 20 cm/s, 江苏沿海、台湾东北部海域存在欧拉余环流; 台风利奇马期间近海斯托克斯余流值普遍小于麦莎期间; 斯托克斯余流项对台风期间长江口、浙闽等近海浅水区短期物质输运过程起一定主导作用。用 EMD 方法和 Hilbert 变换分析了典型站点风暴潮位的特征, 发现站点 IMF1 模态和天文潮位较吻合; 水深和 IMF3 模态的最大功率谱密度呈现出较高的相关性, 并且随着水深的增加, IMF3 模态的最大功率谱密度逐步变大。

关键词: 台风; 风暴潮; 相似路径; 潮致余流; EMD 方法

中图分类号: P731.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)06-0130-11

Comparative study on storm surge processes caused by typhoons with similar tracks

LUO Feng^{1,2,3}, WANG Yi¹, YANG Jie^{1,3}, ZHANG Jie¹, ZHANG Yifeng^{1,3}

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Nantong Ocean and Coastal Engineering Research Institute, Hohai University, Nantong 226000, China;

3. Key Laboratory of Coastal Disaster and Protection (Hohai University), Ministry of Education, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on MIKE 21 model and Holland typhoon wind field model, the wind field and pressure field during No. 1909 Typhoon Lekima and No. 0509 Typhoon Matsa are constructed, and the corresponding storm surge process is simulated. The results show that the increase of water near the typhoon center changes significantly and the storm surge in the northeast of Zhejiang Province is greater during the typhoon landing. Affected by the typhoon intensity, the high value area of storm surge during Typhoon Lekima is larger, and the maximum difference of storm surge during two typhoons in some sea areas is close to 1.0 m. The large value of tidal Euler residual current is mainly distributed in the sea area within a depth of 100 m and a velocity of more than 20 cm/s. Meanwhile, the Euler residual circulation exists in the coastal sea areas of Jiangsu Province and the northeastern sea areas of Taiwan Province. The value of Stokes residual current in the offshore during Typhoon Lekima is generally lower than that during Typhoon Matsa. The Stokes residual current term plays a certain leading role in the short-term transport process of net material in the coastal shallow water areas such as the Yangtze River Estuary, Zhejiang Province and Fujian Province during the typhoon. The empirical mode decomposition (EMD) method and Hilbert transform are used to analyze the characteristics of storm tide level at typical stations. It is found that the IMF1 mode at stations is in good agreement with the astronomical tide level. The water depth and the maximum power spectral density of IMF3 mode show a high correlation, and with the increase of water depth, the maximum power spectral density of IMF3 mode gradually increases.

Key words: typhoon; storm surge; similar tracks; tidal residual current; EMD method

风暴潮是一种由于大气扰动和热带气旋引起气压剧变而引发海面异常升降的现象。多年来, 台风风暴潮灾害给我国沿海地区造成了严重的人员伤亡和经济财产损失。国内外学者研究发现, 台风强度^[1-2]、路径^[1-6]、移速^[7]和地形^[8]等都会对风暴增水造成影响。

基金项目: 江苏省海洋科技创新项目(JSZRHYKJ202105); 南通社会民生科技计划项目(MS12022009, MS22022082, MS22022083); 河海大学优秀研究生学位论文培育项目(422003470)

作者简介: 罗锋(1979—), 男, 副教授, 博士, 主要从事河口海岸动力及物质输运研究。E-mail: fluo@hhu.edu.cn

通信作者: 汪忆(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事河口海岸水动力学研究。E-mail: yilixinbai@163.com

引用本文: 罗锋, 汪忆, 杨洁, 等. 相似路径台风风暴潮过程对比[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 130-140.

LUO Feng, WANG Yi, YANG Jie, et al. Comparative study on storm surge processes caused by typhoons with similar tracks[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(6): 130-140.

针对台风路径对风暴潮的影响,已有研究多是基于历史典型台风过程,从相似路径或不同路径等角度展开的。针对不同路径的台风风暴潮过程,学者们常常以路径不同的典型历史台风过程或者依据已有路径,人为设计出新的平行台风路径为研究对象,同时考虑台风强度、移速和海平面变化等要素,探讨对于区域风暴潮位危险性较高^[1]的台风路径。针对不同路径台风过程的研究,吴亚男等^[1]基于 1509 号台风,构造了多条不同路径台风分别模拟风暴潮过程,并进行了危险性分析。原楠等^[3]分析了 2 种不同路径台风对罗源湾海域风暴潮增减水的影响。罗志发等^[4]通过构建不同的平行路径,探讨了台风路径对风暴潮增水的影响。关于相似路径台风过程的研究,谭家辉等^[5]通过对比典型台风期间江苏沿海波浪增水特征,发现 1909 号利奇马、1810 号安比等同类类型路径的台风在江苏南部沿海形成团状波浪增水区域。江剑等^[6]分析了相似路径台风威马逊和海鸥期间气压和风速等要素对增水的影响,结果发现,台风期间典型站点增水变化主要由气压场单独导致。

关于相似路径台风过境期间区域气象要素的响应机制研究^[9-10]已取得了诸多进展,相关理论和手段越发成熟和完善,但是有关风暴潮等海洋动力过程特征的研究仍然相对较少。1909 号利奇马和 0509 号麦莎等^[10]沿西北方向移动的典型路径台风,在浙江沿海登陆后北上,引起中国东部沿海较大范围的风暴增水,并造成多个沿海省份严重的人员财产损失。本文利用构建的台风风压场模型和 MIKE 21 水动力模型,比较相似路径台风过境期间近海风暴潮过程的特征,选取风暴增水等作为研究对象,对比分析 2 次台风过境期间中国东部海域风暴增水、余流场和风暴潮位等的特征。

1 研究数据

台风利奇马和麦莎的路径资料来自中国气象局 CMA 提供的热带气旋最佳路径数据集 (https://tcdata.typhoon.org.cn/dlrdqx_zl.html),主要参数包括台风中心经纬度和中心气压等^[11-12]。计算网格水深数据外海部分主要采用 ETOPO1^[13] (<https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/wcs-client/>),空间精度为 1',并在近岸区域采用海军司令部航海保证部提供的海图数据进行加密。模型岸线数据采用 GSHHG^[14] (<http://www.soest.hawaii.edu/pwessel/gshhg/>) 资料。

2 利奇马和麦莎的路径、强度特点

从台风生成地、行进路线、登陆点、季节等角度看,1909 号台风利奇马与 0509 号台风麦莎路径均于菲律宾东侧洋面上生成,且在浙江沿海登陆,经过江苏、安徽、山东最后进入渤海湾,相似程度较高,影响范围涉及整个中国东部海域。2019 年 8 月 4 日下午,利奇马于菲律宾东侧洋面生成,7 日 17:00 强度为强台风,23:00 加强为超强台风;10 日 2:00 前后,在浙江温岭沿海登陆。11 日 12:00 左右,利奇马离开江苏进入黄海,21:00 左右登陆青岛。2005 年 7 月 31 日晚,麦莎也于菲律宾东侧洋面生成,约 6 日 4:00 在浙江玉环登陆。登陆后,向西北方向移动,先后穿过浙、皖、苏、鲁四省,8 日中午进入渤海,9 日 7:00 前后在大连二次登陆。

2019 年 8 月 3—9 日利奇马的中心气压逐渐降低至 915 hPa,然后逐渐回升到正常水平;麦莎的中心气压是先逐步降至 950 hPa,然后基本保持不变,然后缓慢升高(图 1)。总体上,2 次台风期间,利奇马的近中心最大风速最大值大于麦莎,利奇马的强度等级(超强台风)高于麦莎(强台风)。

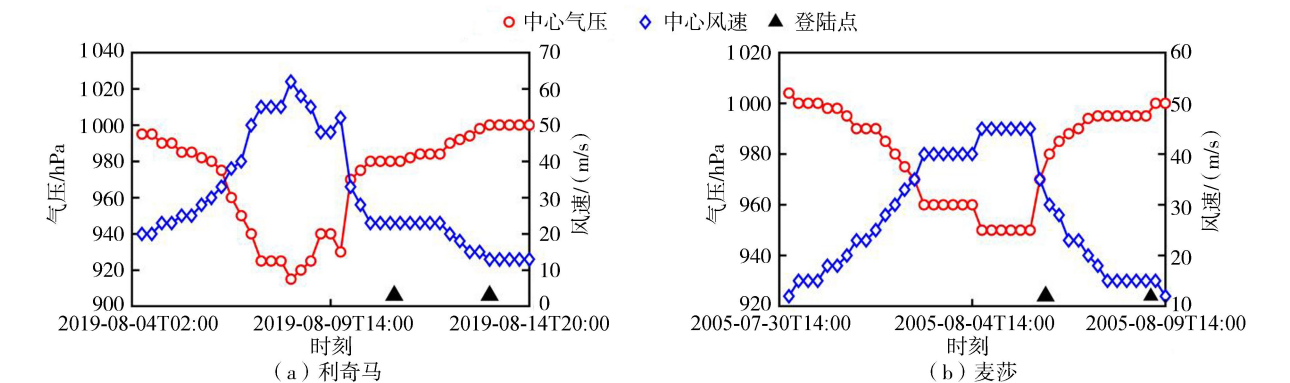


图 1 台风中心风速和中心气压时间序列

Fig. 1 Time series of central wind speed and central pressure during two typhoons

3 台风风场模型构建与验证

3.1 模型构建

台风风场可以由理论风场计算得到,用来驱动模型。理论风场模型采用在国内外台风风暴潮研究中广泛应用^[15-16]的Holland解析模型^[17]。

Holland提出的台风期间气压场的经验分布模型^[17-19]为

$$P(r) = P_0 + (P_\infty - P_0) \exp \left[- \left(\frac{R}{r} \right)^B \right]$$
 (1)

式中: P_0 为台风中心气压; P_∞ 为台风外围气压; B 为形状参数; R 为最大风速半径; r 为计算点到台风中心的距离。将Holland气压模型代入到梯度风公式,可以得到相应的风场模型:

$$v_g = \sqrt{\frac{B}{\rho_a} (P_\infty - P_0) \exp \left[- \left(\frac{R}{r} \right)^B \right] + \left(\frac{rf}{2} \right)^2} - \frac{r|f|}{2}$$
 (2)

其中

$$B = 1.881 - 0.00557R - 0.01295\varphi$$
$$R = 56.92 - 0.1541 v_{\max} + 0.7372(\varphi - 25)$$

式中: v_g 为解析模型风速; ρ_a 为空气密度,取 1.293 kg/m^3 ; f 为科氏力参数; φ 为台风中心纬度; $v_{\max}$ 为中心最大风速。

台风移行风速(采用Ueno公式^[20])和合成风速分别为

$$v_d = v \exp \left(- \frac{\pi}{4} \frac{|r - R|}{R} \right)$$
 (3)

$$v_T = c_1 v_g \left[\frac{-\sin(\theta + \beta)}{\cos(\theta + \beta)} \right] + c_2 v_d$$
 (4)

式中: v 为台风中心移速; θ 为计算点与台风中心的连线与 x 轴的夹角; β 为流入角,取 25° ; c_1 、 c_2 为订正系数,根据验证分别取 $0.6, 0.8$; v_d 为移行风速; v_T 为合成风速。

3.2 台风风场、气压场验证

选取台风利奇马、麦莎路径附近的气象站点,对第3.1节计算的风速和气压时间序列进行验证(图2)。

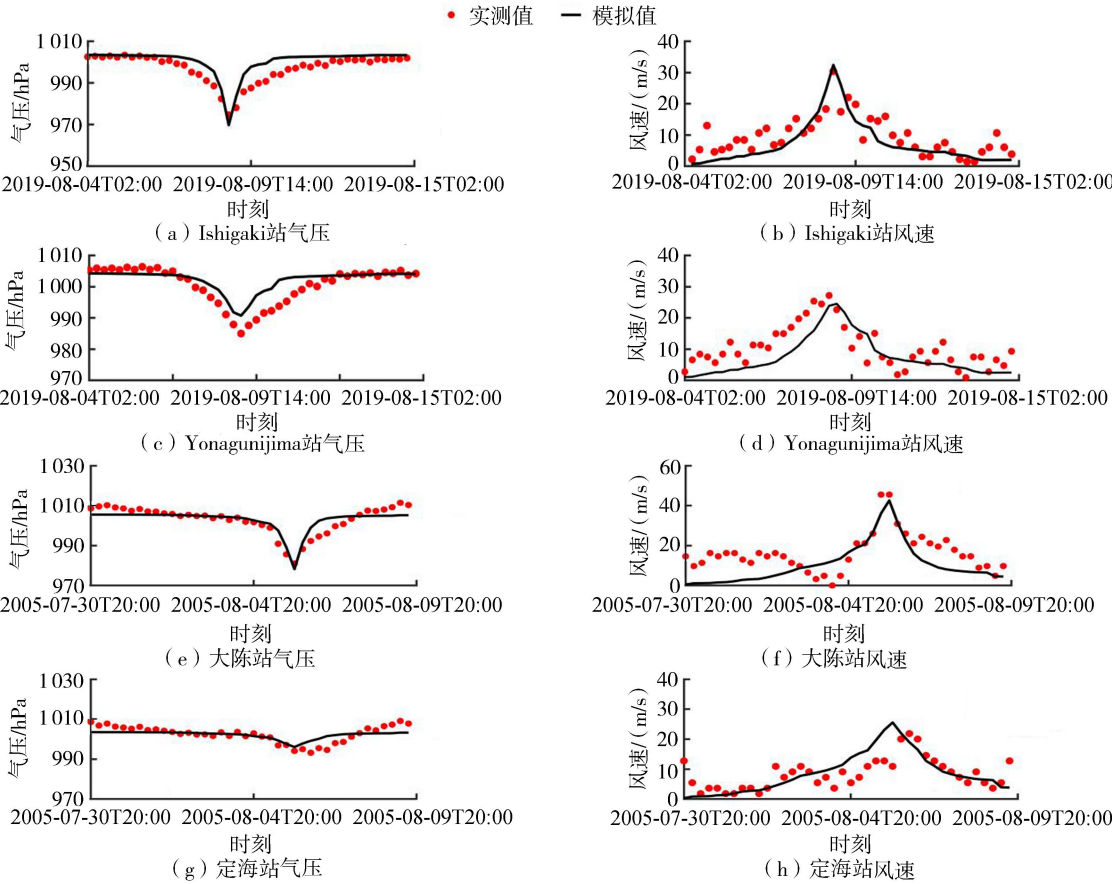


图2 台风期间站点模拟风速、气压与实测值的比较

Fig.2 Comparison of simulated wind speed, air pressure and measurements at stations during two typhoons

气压的最低值在 4 个站点均模拟得较好,计算风速的峰值略小于实测风速峰值。结果表明,本文构造的风场和气压场能较好地再现台风过境期间风速和气压的变化过程,可为风暴潮的模拟提供风应力。

4 风暴潮数值模拟与验证

4.1 模式设置

为了对比分析 2 个相似路径台风利奇马和麦莎引起的风暴增水特征,采用 MIKE 21 FM 模块计算台风风暴潮过程并进行相关验证。本文研究范围覆盖了整个中国东部海域(21°N ~ 42°N, 117°E ~ 133°E)(图 3)。模型计算采用非结构网格,沿海岸线在渤海湾沿岸空间分辨率为 8.0 km,在江苏、浙江等重点岸段及部分岛屿进行加密,达到 1.0 km,在外海开边界节点间距最大约为 60 ~ 65 km。模型共含 59 268 个节点,109 588 个单元,并且设置两条开边界,分别为中国福建东南沿着台湾岛、冲绳群岛外侧海域至日本九州岛东南部、日本海。外海开边界水位过程由 Nao. 99 潮汐模型^[21]提供。海底摩阻采用二次率形式;海表面风应力采用 Pond 和 Pickard 公式^[22]。长江口上游边界采用时段内大通站日均流量给定。模型采用冷启动,启动时间间隔设置为 43 200 s。

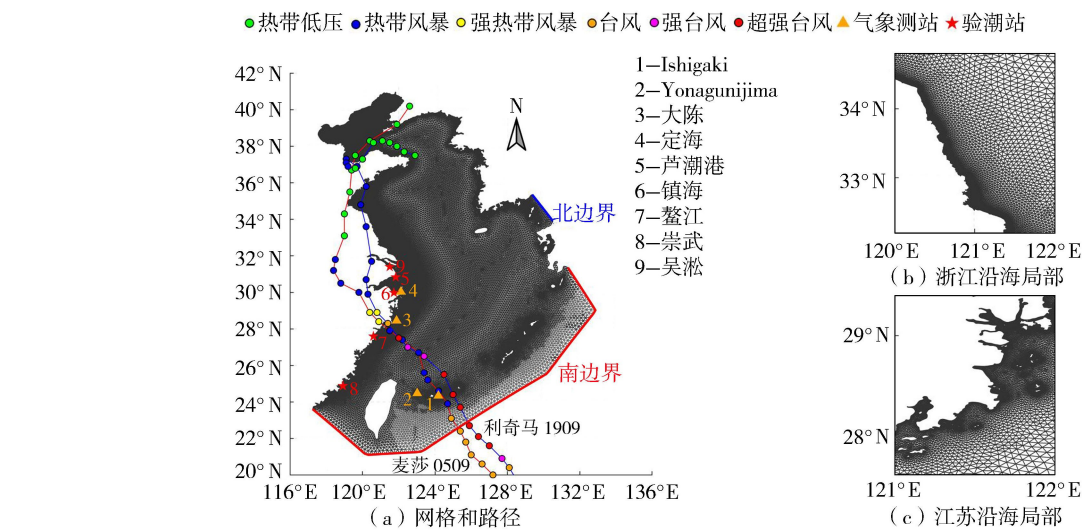


图 3 台风路径、站点位置和计算区域网格
Fig.3 Typhoon tracks, locations of stations, and grids of calculation domain

4.2 天文潮位验证

天文潮位的准确模拟是台风风暴潮过程模拟的前提,选取 2014 年 6 月镇海、芦潮港、崇武、鳌江等 4 个中国东部沿海站点的实测潮位资料^[23]作为验证数据。模拟了天文潮单独作用下的潮位过程,并与实测数据进行对比验证(图 4),结果表明天文潮过程误差较小。

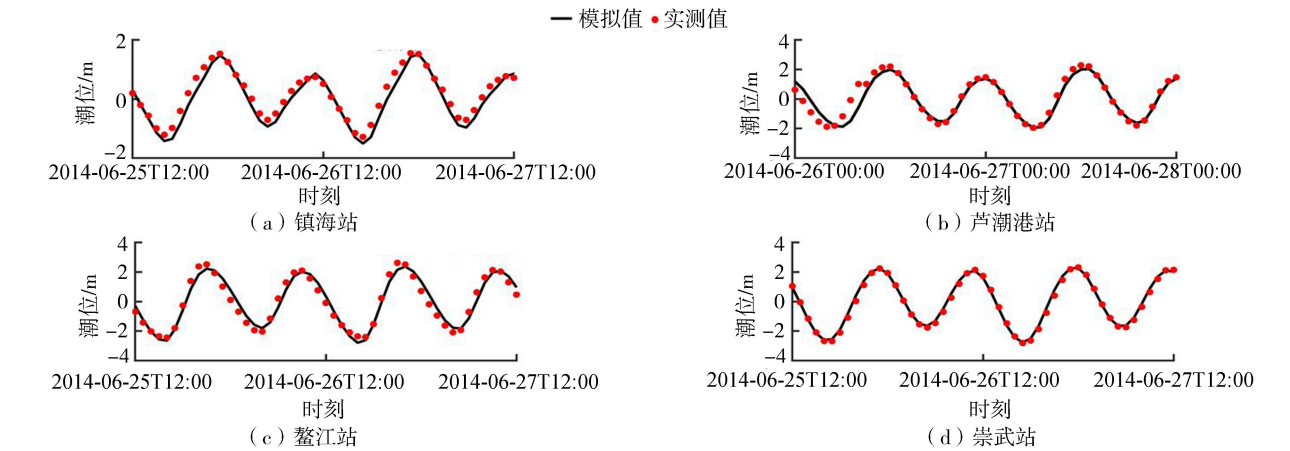


图 4 典型站点天文潮位模拟值与实测值的比较
Fig.4 Comparison between simulations and measurements of astronomical tidal level at typical stations

4.3 风暴增水验证

台风利奇马期间的大陈^[24]、芦潮港、吴淞和麦莎期间的芦潮港站的模拟风暴潮位与实测的对比(图5)表明,风暴潮模拟结果与实测值吻合较好。利奇马台风登陆期间,大陈站的天文潮处于涨潮初始时段,台风风场在该站引起的增水没有超过2.0 m。4个站点台风期间最大风暴潮位均小于4.0 m。

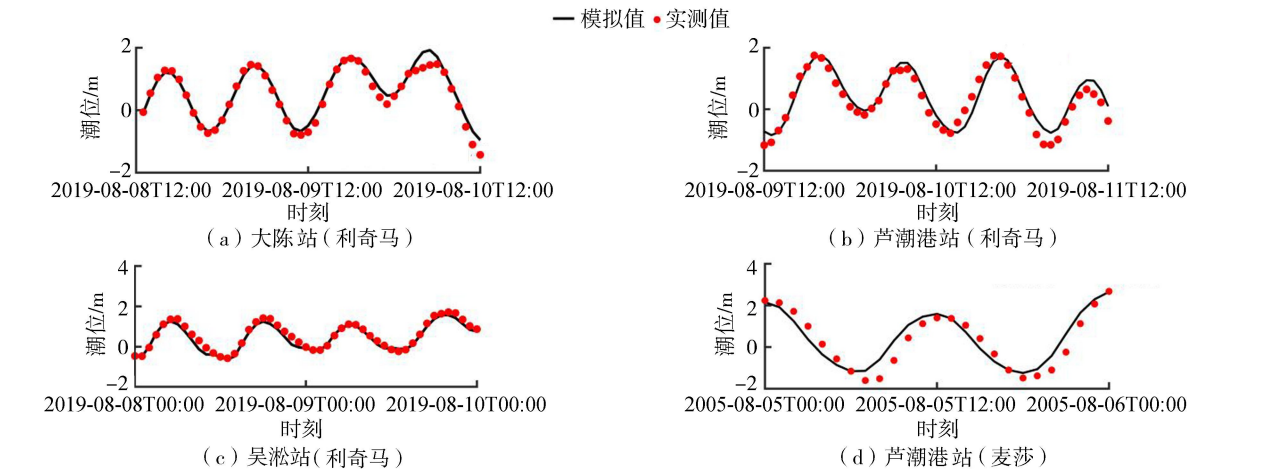


图5 台风期间模拟风暴潮位与实测值的比较

Fig.5 Comparison between simulated storm tides and measurements during two typhoons

5 风暴潮特征对比分析

5.1 风暴增水时空分布

为了分析台风利奇马和麦莎过程中增水时空分布特征,选取江苏、浙江以及福建的部分海域进行重点分析,利用模型计算得到风暴增水时空数据。选取2次台风登陆前、后2个时段对天文潮位、台风风场和风暴增水三者的时空变化特征进行分析,结果如图6和图7所示(底图所用矢量数据来源于审图号GS(2022)3124号图件,下同)。

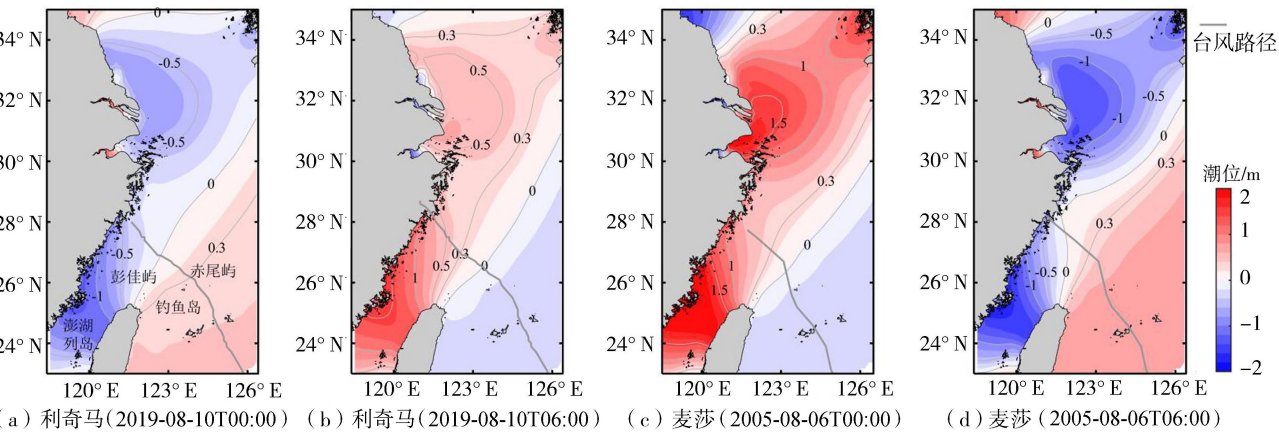


图6 台风期间天文潮位分布

Fig.6 Distribution of astronomical tidal level during two typhoons

2019年8月10日0:00左右,台风利奇马尚未登陆,浙江、福建海域处于落潮、涨潮转换状态,三门湾、台州湾、杭州湾外侧、辐射沙洲等海域天文潮位均为负值。8月10日1:45前后,利奇马登陆浙江温岭。10日6:00,台风进一步北上,登陆点附近海域仍有少量增水,但增水高值区域随台风中心继续向北移动。2005年8月6日0:00左右,台风麦莎尚未登陆,浙江、福建沿海潮位大多在0~0.5 m以上。6日4:00,麦莎登陆浙江玉环。6日6:00,台风进一步向西北方向移动,浙江沿海大部处于落潮状态,风暴潮位减小(图6和图7)。

5.2 最大风暴增水分分布对比

为比较路径相似台风利奇马和麦莎对风暴增水分布的影响,分别计算了2次台风期间近海的最大增水

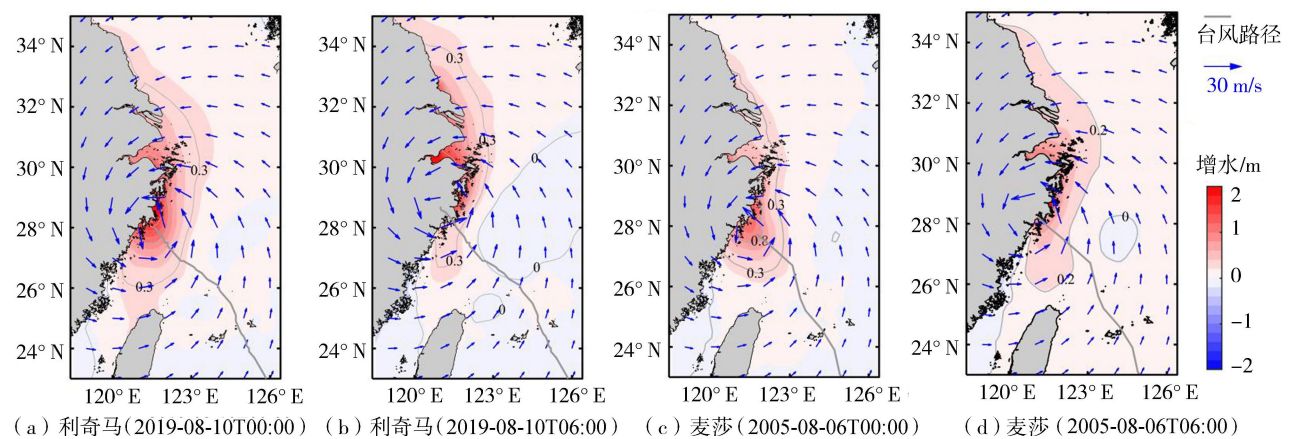


图7 台风期间风暴增水分布

Fig.7 Distribution of storm surge during two typhoons

空间分布,结果如图8所示(图中空心圆是最大风速半径圈,红色和蓝色线为台风路径)。台风登陆前,中心最大风速半径圈附近的风暴增水较大,利奇马在较短时间内发展成为超强台风^[25],并且较长时间内保持较高台风强度,致使其沿途最大增水的高值区域较大,超过1.0 m。登陆点附近,右侧增水显著大于左侧。登陆浙江前后,利奇马强度为台风,并且路径右侧的台州湾、杭州湾海域出现较大增水,最大可以达到3.0 m。

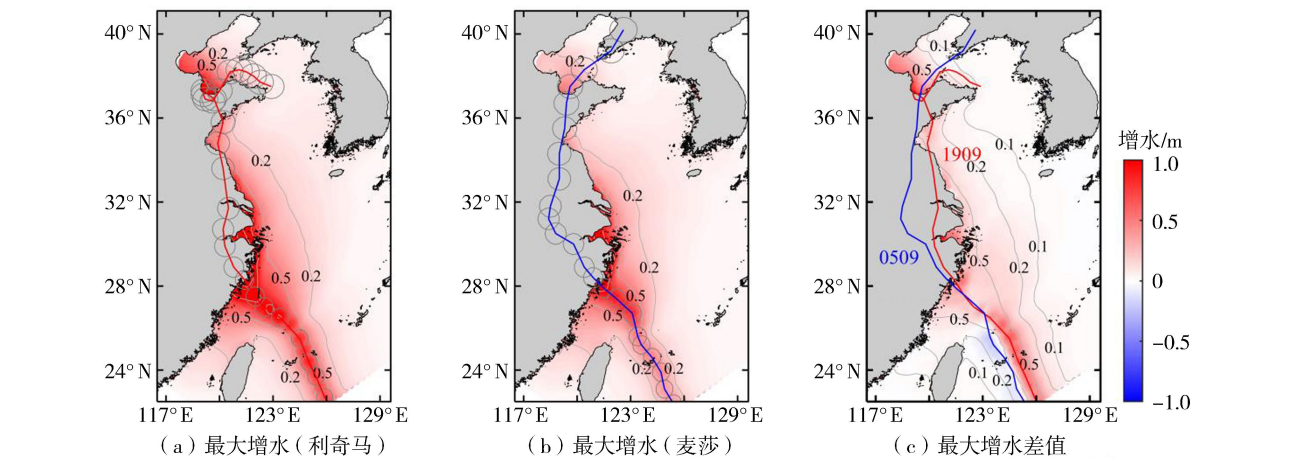


图8 台风期间最大风暴增水和最大增水差值分布

Fig.8 Distribution of maximum storm surge, and difference of maximum storm surge during two typhoons

登陆后,利奇马转向北折,途径浙江北部低海拔地区,导致后续中心强度减弱比麦莎慢^[26]。进入江苏境内,麦莎减弱为热带低压,利奇马仍保持热带风暴强度,利奇马对江苏沿海增水的影响比麦莎台风更显著,并且受路径和登陆点的影响,江苏沿海海域的最大增水高值区小于浙江沿海(图8(a))。在渤海湾海域,利奇马路径出现“回环”,延长了利奇马在莱州湾海域的滞留时间,且利奇马在该时段由热带风暴逐步减弱为热带低压,总体强度上高于麦莎,导致利奇马在该区域的增水极值较大,最大超过1.5 m,大于台风麦莎期间增水极值。台风麦莎过境期间,风暴增水主要分布在浙江中北部台州湾海域,最大增水超过3.0 m。福建东部、台湾岛附近部分海域在2次台风期间也出现少量增水,最大接近0.5 m;渤海海域沿岸在台风麦莎的影响下增水较小,最大接近1.0 m。对于台风路径右侧,利奇马期间的最大增水大于麦莎期间的最大增水,台风中心附近、杭州湾、台州湾外侧、莱州湾等海域最大增水的差值显著大于其他地区,差值接近1.0 m(图8(c))。

5.3 风暴潮致余流场特征对比

潮汐余流对海域物质输运过程具有重要作用。受风暴流场带来的巨大能量影响,近岸海域会发生较强的物质输运过程。根据风暴潮过程的模拟计算结果,选取台风利奇马和麦莎对江苏、浙江沿海影响较大的时段2019年8月8日0:00—12日23:00和2005年8月3日0:00—7日23:00为计算时段,得到台风过境期间区域深度平均的潮致拉格朗日余流:

$$\boldsymbol{U}_L = \boldsymbol{U}_E + \boldsymbol{U}_S = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \boldsymbol{u} dt + \frac{1}{hT} \int_t^{t+T} \boldsymbol{u} \eta dt$$

(5)

式中: $\boldsymbol{U}_L$ 为拉格朗日余流速度; $\boldsymbol{U}_S$ 为斯托克斯余流速度; $\boldsymbol{U}_E$ 为欧拉余流速度; $\boldsymbol{u}$ 为某一时刻潮流速度; η 为某一时刻水位; h 为当地水深。

2 次台风期间,近岸区由于受到地形等因素影响,100 m 等深线向内侧海域,尤其是浙江东部至 50 m 等深线之间的沿海海域,欧拉余流流速标量值较大,最大接近 24 cm/s。利奇马和麦莎台风期间,外海潮流近岸处的余流总体上沿岸线方向运动。江苏盐城海域存在一个反气旋余环流,流速为 2~8 cm/s,在该海域附近向岸方向流分为两部分,一部分沿岸线向北,一部分沿南通沿海向南,绕过长江口,与口外向外的余流继续向南在杭州湾内形成较小的反气旋余环流;在浙江、福建沿海区域,余流沿岸线向北,并与浙江北部海域南下、东海外侧逆时针的余环流沿台湾岛东北部向东南行进;其中一部沿外侧冲绳群岛与外海侧的来流共同在台湾岛东北部海域形成一个气旋式余环流(图 9(a)(b))。近海 50 m 和 100 m 等深线之间海域,台风利奇马期间的余流流速量值大于麦莎,但在登陆点附近、台湾岛东北部 100 m 等深线以外、江苏盐城和舟山群岛内侧等其他海域结果相反(图 9(c))。结合陈元杰等^[27]的研究结果,浙江东北部海域在台风利奇马和麦莎期间的余流流速显著大于常规天气下的余流流速。

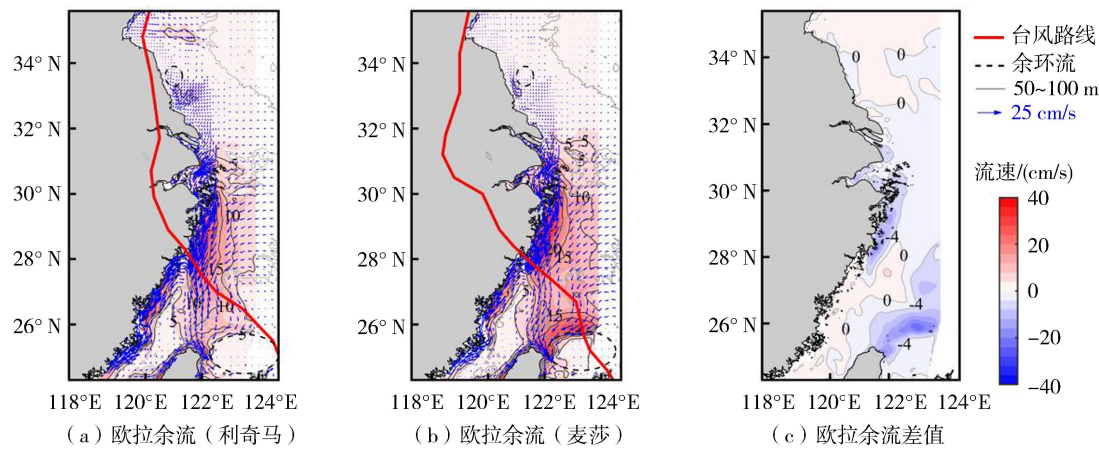


图 9 台风期间欧拉余流以及差值分布

Fig. 9 Distribution of Euler residual currents during two typhoons and distribution of scalar difference

在水深较大的海域, η/h 趋近于 0,斯托克斯余流量值较小^[27]。台风登陆点附近,南北两侧两股径向沿岸斯托克斯余流交汇(图 10(a)(b))。在台风对中国东部有显著影响的潮周期内,潮致斯托克斯余流高值区主要分布在近海 20 m 等深线以内,并且与利奇马过境期间悬浮物浓度^[28] 分布大致接近。与台风麦莎相比,台风利奇马期间的斯托克斯余流相对较小(图 10(c))。斯托克斯余流在杭州湾、长江口、南黄海辐射沙脊南端、浙闽沿海等指向陆侧,容易形成部分近岸物质高浓度区。斯托克斯余流高值区域可以反映近海浅水

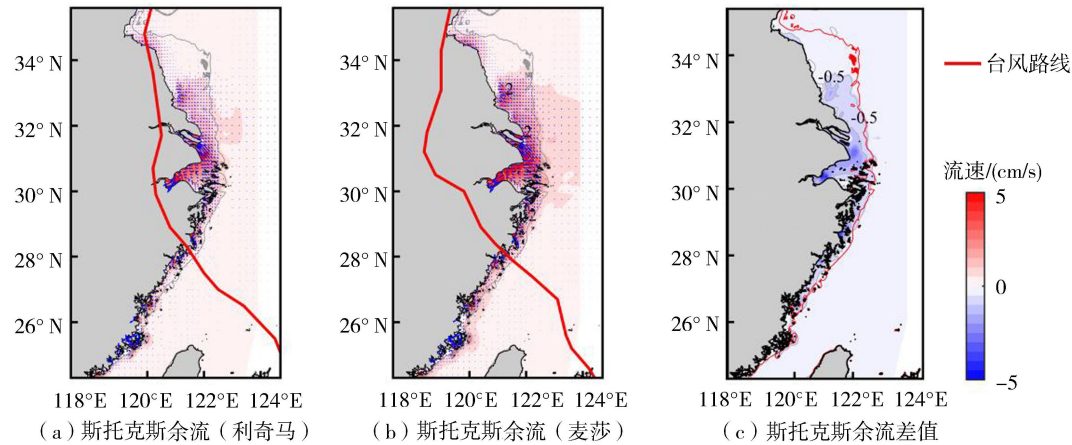


图 10 台风期间斯托克斯余流以及差值分布

Fig. 10 Distribution of Stokes residual currents during typhoons, and distribution of scalar difference

区台风期间物质向岸净输运过程。拉格朗日余流标量分布与欧拉余流标量分布趋势大致相同,两次台风期间拉格朗日输运余流标量差值分布与欧拉余流标量差值分布大致相同(图 11(a)~(c))。根据悬浮物浓度的分布特征^[29],斯托克斯余流项对悬浮物的短期输运和分布起着一定的主导作用,对风暴条件下物质输运的研究有一定的参考价值。

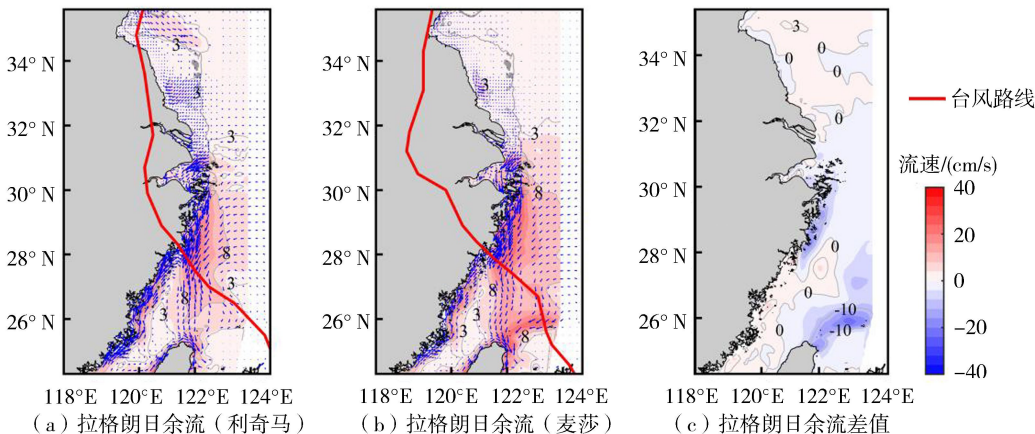


图 11 台风期间拉格朗日余流以及差值分布

Fig. 11 Distribution of Lagrangian residual currents during typhoons, and distribution of scalar difference

5.4 典型站点处风暴潮位特征对比

经验模态分解(EMD)方法是 Huang 等^[30]提出的一种信号时频分析方法,近年来在水文资料分析上应用广泛^[29-31]。EMD 方法可以依据数据自身的时间尺度特征进行信号分解,无须预先设定任何基函数^[29]。因此,这里采用 EMD 方法将原始的风暴潮位曲线分解成多个内在模态函数(IMF)时间序列曲线和趋势项(Residual),以分析 2 次台风期间典型站点坎门站、大陈站沿岸径向断面点的风暴潮位特征。

分解得到的模态按频率高低排列,IMF1 与 IMF2 呈现出较高频率的波动,IMF3、IMF4 做低频波动,IMF5 为趋势项(图 12)。利用希尔伯特(Hilbert)变换得到 2 个站点在台风利奇马期间的 IMF1 模态对应的瞬时频率,结果发现模型正常运行阶段计算得到的 IMF1 瞬时频率接近该时段内天文潮位序列对应的瞬时频率(图 13),IMF1 和天文潮位序列吻合度较高。2 次台风期间,IMF3 等高频模态对应的周期呈现出了明显差异。沿着径向方向,选取典型断面上不同点,进行进一步的功率谱分析。结果显示,IMF2、IMF3 和 IMF4 等模态中,IMF2、IMF4 模态最大功率谱密度和水深之间的相关性较弱,IMF3 模态序列的最大功率谱密度和水深呈

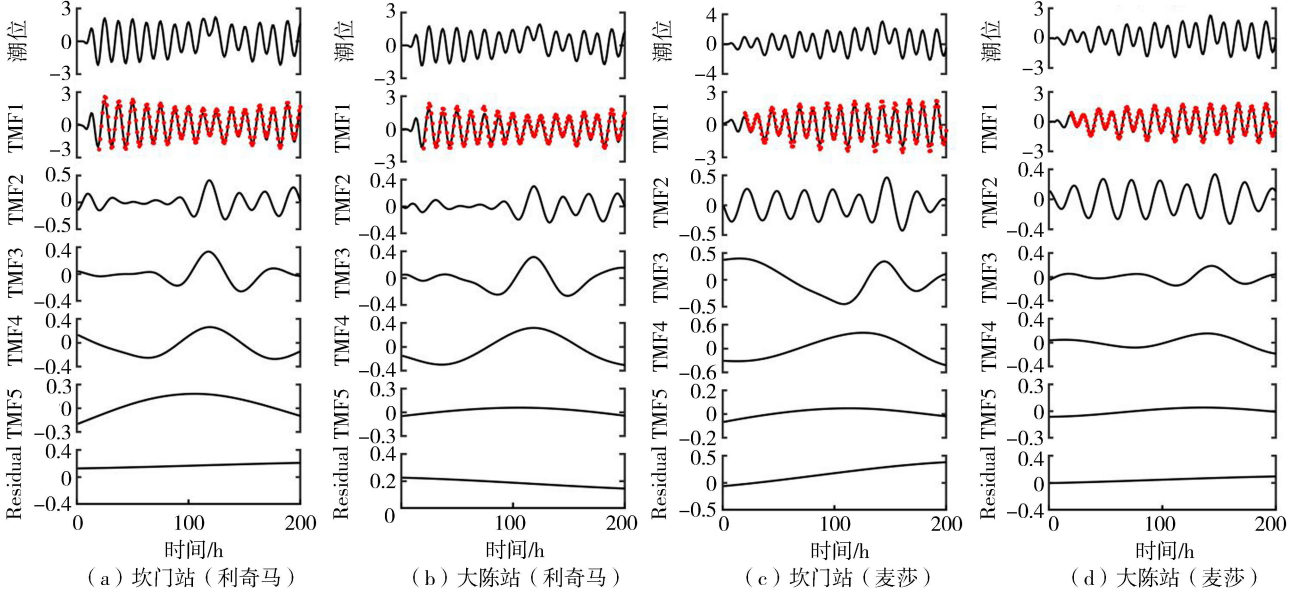


图 12 台风期间站点的风暴潮位 EMD 结果(单位:m)

Fig. 12 EMD results of storm tide from stations during two typhoons(unit:m)

现出较强的正相关性,随着水深的增加,最大功率谱密度逐渐变大(图 14 和图 15)。

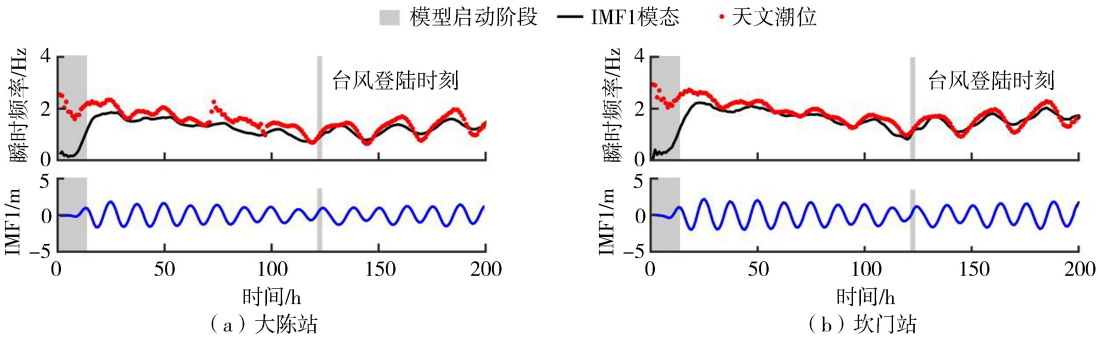


图 13 台风利奇马期间站点 IMF1 模态和天文潮位的瞬时频率分析

Fig. 13 Instantaneous frequency analysis of IMF1 mode and astronomical tide at stations during typhoon Lekima

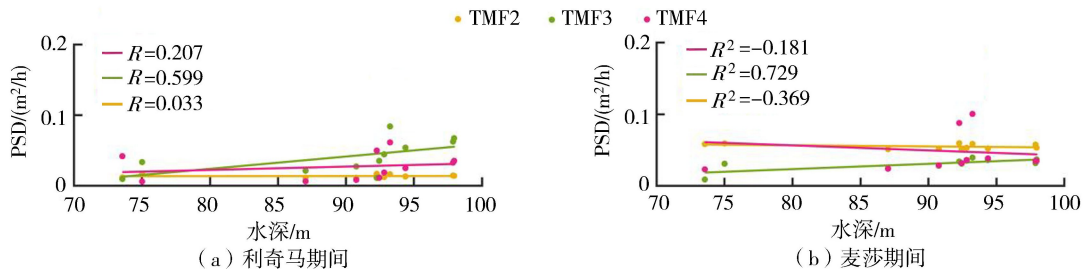


图 14 台风期间风暴潮位模态最大功率谱密度和水深的相关性

Fig. 14 Correlation between maximum power spectral density of storm tide modes and water depth during two typhoons

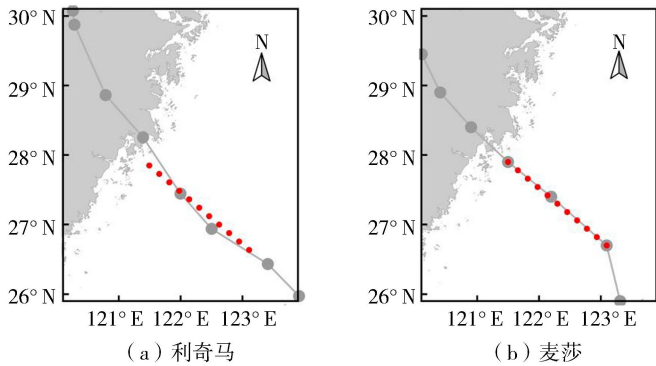


图 15 典型断面点和台风路径

Fig. 15 Typical points in the profile, and typhoon tracks

6 结 论

- a. 台风利奇马和麦莎最大风速半径圈附近增水较大,登陆点右侧台州湾、杭州湾等地的增水大于其他区域,增水最大超过 3.0 m。受台风强度的影响,利奇马台风期间右侧海域最大增水均比麦莎期间较大些。
- b. 受台风登陆点的影响,2 次台风期间余流流速较大值主要集中在浙江沿海,并且最大接近 24 cm/s,在江苏盐城海域、福建北部海域存在顺时针余环流。台风利奇马期间,近海大部分海域的余流流速量值大于麦莎期间的量值,福建北部海域等局部地区相反。斯托克斯余流在杭州湾、长江口、南黄海辐射沙脊南端、浙闽沿海等指向陆侧,这与台风期间悬浮物的分布大致重合。并且,斯托克斯余流项对 2 次台风期间长江口、浙闽等近海浅水区短期物质输运过程起一定的主导作用。
- c. 对模型计算得到的风暴潮位进行经验模态分解,并对模态组分进行分析。并用希尔伯特变换计算模态序列对应的瞬时频率,选取典型站点,发现风暴潮位序列的 IMF1 模态和天文潮序列非常接近。通过对径向断面上典型点的分析,水深和 IMF3 模态序列的最大功率谱密度呈现出较高的相关性,和 IMF2、IMF4 的最大功率谱密度的相关性较小,并且随着水深的增加,IMF3 模态的最大功率谱密度逐步变大。EMD 方法可以

用于分析风暴潮位的过程特征,并可以加深对其特征的理解。

参考文献:

[1] 吴亚男,左军成,吕晓凤,等. 舟山海域风暴潮增水数值分析:以台风“灿鸿”为例[J]. 海洋湖沼通报,2017(6):38-45. (WU Yanan,ZUO Juncheng,LYU Xiaofeng,et al. Numerical simulation and analysis of storm surge in Zhoushan sea area: a case study of typhoon Chanhom[J]. Transactions of Oceanology and Limnology,2017(6):38-45. (in Chinese))

[2] 潘存鸿,郑君,吴修广,等. 杭州湾年最高潮位时空变化及其抬升原因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):394-400. (PAN Cunhong, ZHENG Jun,WU Xiuguang,et al. Spatiotemporal variation of annual maximum high tide levels and reason analysis for their uplifting in Hangzhou Bay[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(5):394-400. (in Chinese))

[3] 原楠,陈新平,陈学恩,等. 罗源湾海域台风风暴潮数值模拟研究[J]. 海洋通报,2019,38(1):20-30. (YUAN Nan, CHEN Xinping, CHEN Xueen, et al. Numerical simulation of typhoon storm surge at the Luoyuan Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2019,38(1):20-30. (in Chinese))

[4] 罗志发,黄本胜,邱静,等. 粤港澳大湾区风暴潮时空分布特征及影响因素[J]. 水资源保护,2022,38(3):72-79. (LUO Zhifa,HUANG Bensheng,QIU Jing,et al. Spatio-temporal distribution characteristics and influencing mechanisms of storm surge in Guangdong,Hong Kong and Macao Greater Bay Area[J]. Water Resources Protection,2022,38(3):72-79. (in Chinese))

[5] 谭家辉,潘毅,于普兵,等. 江苏沿海台风风暴潮过程中的波浪增水分布研究[J]. 海洋预报,2022,39(1):48-55. (TAN Jiahui,PAN Yi,YU Pubing,et al. Study on the distribution of wave-induced setup along the coast of Jiangsu Province during typhoon processes[J]. Marine Forecasts,2022,39(1):48-55. (in Chinese))

[6] 江剑,牛小静. 相似路径台风的增水差异影响因子分析[C]//《水动力学研究与进展》编委会,中国力学学会,中国造船工程学会,河海大学. 第二十七届全国水动力学研讨会文集(下册). 海洋出版社,2015:456-461.

[7] 梁连松,张钊,顾冬明,等. 典型路径下台风移速调整对鳌江站增水的数值分析[J]. 海洋预报,2020,37(5):59-66. (LIANG Liansong,ZHANG Zhao,GU Dongming,et al. Numerical analysis of typhoon's moving speed adjustment influence on storm surge of Aojiang Station under typical route[J]. Marine Forecasts,2020,37(5):59-66. (in Chinese))

[8] 陈波,董德信,陈宪云,等. 南海北部台风引起的广西近岸增减水研究[J]. 海洋湖沼通报,2017(2):1-11. (CHEN Bo, DONG Dexin, CHEN Xianyun, et al. A research on fluctuations of water level in Guangxi coast caused by typhoons in the northern south China sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology,2017(2):1-11. (in Chinese))

[9] 沈晓琳,胡艺,张恒德,等. 台风“美莎克”致洪暴雨精细化特征及成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):23-30. (SHEN Xiaolin,HU Yi,ZHANG Hengde,et al. Analysis on refined characteristics and causes of flooding rainstorm caused by typhoon MAYSACK[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):23-30. (in Chinese))

[10] LIN X H, YIN S Y, CAI Y Y, et al. Comparative analysis of dry intrusion in the different position of Pre-TC squall line on typhoon Lekima(1909) and Matsa(0509)[J]. Tropical Cyclone Research and Review,2021,10(1):43-53.

[11] LU X, YU H, YING M, et al. Western north pacific tropical cyclone database created by the China meteorological administration [J]. Advances in Atmospheric Sciences,2021,38(4):690-699.

[12] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2014,31(2):287-301.

[13] AMANTE C, EAKINS B W. ETOPO1 arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis[J]. Psychologist, 2009,16(3):20-25.

[14] WESSEL P, SMITH W H F. A global self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database[J]. Geophysical Research Letters,1996,101:8741-8743.

[15] 杨万康,杨青莹,张峰,等. 典型海湾风暴潮特征数值模拟与研究[J]. 海洋通报,2018,37(5):537-547. (YANG Wankang, YANG Qingying,ZHANG Feng,et al. Study and numerical simulation of typhoon storm surge characteristics at the typical bay [J]. Marine Science Bulletin,2018,37(5):537-547. (in Chinese))

[16] 罗锋,盛建明,潘锡山,等. 江苏沿海精细化风暴潮模式研究与应用[J]. 南京大学学报(自然科学),2014,50(5):687-694. (LUO Feng,SHENG Jianming,PAN Xishan,et al. Studies and applications of refined storm surge model for Jaingsu coast [J]. Journal of Nanjing University (National Sciences),2014,50(5):687-694. (in Chinese))

[17] HOLLAND G J. An analytical model of the wind and pressure profiles in hurricanes [J]. Monthly Weather Review,1980,108(8):1212-1218.

[18] VICKERY P J, SKERLJ P F, STECKLEY A C, et al. Hurricane wind field model for use in hurricane simulations[J]. Journal of

Structural Engineering,2000,126(10): 1203-1221.

[19] KNAFF A J, SAMPSON C R, DEMARIA M, et al. Statistical tropical cyclone wind radii prediction using climatology and persistence[J]. Weather Forecast,2007,22(4): 781-791.

[20] UENO T. Numerical computations of the storm surges in Tosa Bay[J]. Journal of the Oceanographical Society of Japan,1981,37: 61-73.

[21] MATSUMOTO K, TAKANEZAWA T, OOE M. Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan[J]. Journal of Oceanography,2000,56: 567-581.

[22] POND S, PICKARD G L. Introductory dynamical oceanography[M]. 2nd edition. Oxford: Butterworth-Heinemann,1983.

[23] 刘克强,袁杰颖,陈文召,等. 基于 ADCIRC 水动力模型的台风风暴潮预报模型验证[J]. 水利水电快报,2019,40(4): 27-34. (LIU Keqiang, YUAN Jieying, CHEN Wenzhao, et al. Verification of typhoon storm surge forecast model based on ADCIRC hydrodynamic model[J]. Express Water Resources & Hydropower Information,2019,40(4): 27-34. (in Chinese))

[24] YANG W K, YANG B, YANG Q Y, et al. Simulation of storm surge and wave due to Typhoon Lekima in 2019[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2021,787(1): 1-10.

[25] 王海平,董林,许映龙,等. 2019 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象,2021,47(8): 1009-1020. (WANG Haiping, DONG Lin, XU Yinglong, et al. Analysis on the characteristics of typhoon activity and forecasting difficulties in Western North Pacific in 2019[J]. Meteorological Monthly,2021,47(8): 1009-1020. (in Chinese))

[26] 王丽娟,邓方俊,史珩瑜,等. 1909 号台风“利奇马”影响期间浙江大风分布特征及成因分析[J]. 海洋预报,2020,37(6): 83-95. (WANG Lijuan, DENG Fangjun, SHI Hengyu, et al. Distribution characteristics and causes of gale winds in Zhejiang province affected by typhoon“Lekima”(1909)[J]. Marine Forecasts,2020,37(6): 83-95. (in Chinese))

[27] 陈元杰,程鹏. 中国东部海域潮汐余流特征及其动力分析[J]. 海洋通报,2021,40(4): 396-409. (CHEN Yuanjie, CHENG Peng. Characteristics and dynamics of tidal residual circulations in the eastern China seas[J]. Marine Science Bulletin,2021,40(4): 396-409. (in Chinese))

[28] 李治,周舟,江文胜,等. 台风“利奇马”对东中国海表层悬浮物浓度变化的影响[J]. 海洋科学,2021,45(11): 1-9. (LI Zhi, ZHOU Zhou, JIANG Wensheng, et al. Effect of Typhoon Lekima on variations of surface-suspended sediment concentration in the East China Seas[J]. Marine Sciences,2021,45(11): 1-9. (in Chinese))

[29] 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 Jinxiang, YUAN Fangchao, LI Zhiming, 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. (in Chinese))

[30] HUANG N E, WU M C, LONG S R, et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A,2003,459(2037): 2317-2345.

[31] 张金萍,肖宏林,张鑫. 基于经验模态分解方法和信息熵的水沙关系研究[J]. 水资源保护,2019,35(4): 30-34. (ZHANG Jinping, XIAO Honglin, ZHANG Xin. Study on relationship between water and sediment based on empirical mode decomposition and information entropy[J]. Water Resources Protection,2019,35(4): 30-34. (in Chinese))

(收稿日期:2023 - 02 - 13 编辑:刘晓艳)