

台风“利奇马”对渤海风暴潮影响研究

李健^{1,2,3,4}, 侯一筠^{1,2,3,5}, 刘清容⁴, 姜涛⁶, 焦艳⁴

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 国家海洋局北海预报中心, 山东 青岛 266061; 5. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋动力过程与气候功能实验室, 山东 青岛 266237; 6. 中国人民解放军91033部队, 山东 青岛 266011)

摘要: 利用实测资料对比和FVCOM数值模拟等方法, 研究了“利奇马”台风风暴潮在渤海的演变规律。研究表明: 渤海沿岸的风暴潮过程是由局地风“直接作用”及外部天气系统“间接影响”共同作用引起的, 且它们引起的风暴潮时空分布明显不同。在“利奇马”台风风暴潮中, “直接作用”引起的风暴增水在渤海湾和莱州湾沿岸分别约占总风暴增水的2/3和1/2。

关键词: 台风“利奇马”; 渤海; 台风风暴潮; FVCOM

中图分类号: P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2021)01-0034-09

1 引言

海洋动力灾害(包括风暴潮和巨浪等)是对全球沿海各国危害最大的自然灾害^[1]。科学家们很早就开始对这些动力灾害的成因和演变机制进行研究, 并将成果应用到相关预报及防灾减灾工作中。国际上自20世纪70年代起发展了海洋动力灾害数值预报预警技术^[2], 至90年代已经形成了较完善的预警预报系统^[3-4], 特别是美国、欧洲和日本等发达国家, 对热带气旋^[5]、风暴潮和海浪等各灾种已具备较成熟的业务预报预警能力。我国预警报发展起步较晚, 1974年5月国家海洋局在厦门召开了中国首次风暴潮经验与预报交流会, 并首次开展风暴潮预报工作^[6]。

早期的预报和评估工作主要采用经验方式进行, 如多元线性回归方法和相似性方法^[7]。随着计算机技术的发展, 风暴潮预报逐渐向数值预报转变。目前, 三维数值模型不断发展并被应用于风暴潮数值模拟中, 如美国的ECOM(Estuarine Continental and Ocean Model)、POM(Princeton Ocean

Model)、FVCOM(An Unstructured Grid, Finite-Volume Coastal Ocean Model)模型、德国的HAM-SOM(HAMburg Shelf Ocean Model)模型、荷兰的Delft-3D模型等^[8]。在风暴潮模式优化及影响因素的研究方面也有长足发展, 如自适应网格法^[9]和干湿网格技术^[10]实现对复杂岸线的拟合研究, 差分方法、计算域选取和风应力拖曳系数^[11-12]对模拟的影响研究, 风场模型对风暴潮模拟影响研究^[13], 风暴潮和天文潮之间的非线性作用研究^[14], 风浪对风暴潮影响模拟研究^[15]等。

但在台风风暴潮数值预报中, 通常因为台风预报存在多种不确定性, 导致预报结果不尽人意。目前, 台风风暴潮预警报仍以经验预报为主、数值预报为辅的方式开展工作。经验预报除了根据天气图和数值预报结果进行风暴增水预测外, 还需参考相似台风引起的风暴增水。准确的相似台风选择能够有效提高预报精度、缩短预报时间并提高预报效率。此外, 风暴潮预报不仅受自然因素变化影响, 如全球变暖和海平面上升导致影响东、黄海的北上台风增多^[16]、强度加大等, 还与沿海岸线和地形

收稿日期: 2019-11-27; 修回日期: 2020-02-14。

基金项目: 国家自然科学基金(U1706216、U1806227); 北海分局海洋科技项目(2018B04、201903)。

作者简介: 李健(1986-), 男, 工程师, 博士在读, 主要从事风暴潮预报机理和风险评估研究。E-mail: ylijian7@126.com

通讯作者: 侯一筠(1956-), 男, 研究员, 博士, 主要从事海洋动力灾害和近岸水动力学研究。E-mail: yjhou@qdio.ac.cn

变化、天文潮性质以及堤坝高程和经济变化等导致的沿岸警戒潮位变化等因素有关。1909号台风“利奇马”具有强度大、持续时间长和移动速度慢等特点,引起的风暴潮极值较大且持续时间长,又与天文高潮叠加较好而造成了沿海严重的经济损失,因此,它可以作为典型风暴潮进行研究。通过此次过程的研究,不仅能够建立台风灾害数据库,为以后台风预报提供参考,还能为及时总结预报经验、提高预报技能、明确预报相关要素做出贡献。

2 台风过程和数据简介

2.1 台风情况

2019年8月4日14时(北京时,下同),第9号台风“利奇马”在菲律宾以东洋面生成。7日05时加强为台风级,17时继续加强为强台风级,23时加强为超强台风级,实现了1 d内连跳三级记录。随后台风“利奇马”向西北方向移动,10日01时45分前后,在浙江省温岭市沿海登陆,登陆时中心附近最大风力16级(超强台风级)。登陆后台风“利奇马”沿海

岸线北上^[17],11日20时50分前后,在山东省青岛市黄岛区沿海再次登陆,登陆时中心附近最大风力9级(热带风暴级)。12日04时前后台风在莱州湾出海,强度维持在热带风暴级。随后台风在莱州湾滞留,于13日11时停止编号。

此次台风“利奇马”强度大、影响时间长、影响范围广、造成的损失严重,因此成为2019年“风王”。台风“利奇马”是近30 a影响渤海最严重的台风,尤其是其北上后移动速度减慢,甚至出现原地打转现象,导致渤海沿岸出现强的风暴潮过程,因此造成严重的灾害。据应急管理部的不完全统计,截至8月14日,台风“利奇马”已经造成浙江、上海、江苏、安徽、山东和福建等省市1 402.4万人受灾,56人死亡,14人失踪,5 000余间房屋倒塌,农作物受灾面积113.7万公顷,其中绝收面积9.25万公顷,直接经济损失515.3亿。

2.2 实测数据情况

台风影响期间的实测风数据来自沿岸验潮站和海上浮标,实测潮位数据来自沿岸验潮站,具体位置见图1。实测风数据是符合观测标准的10 m风

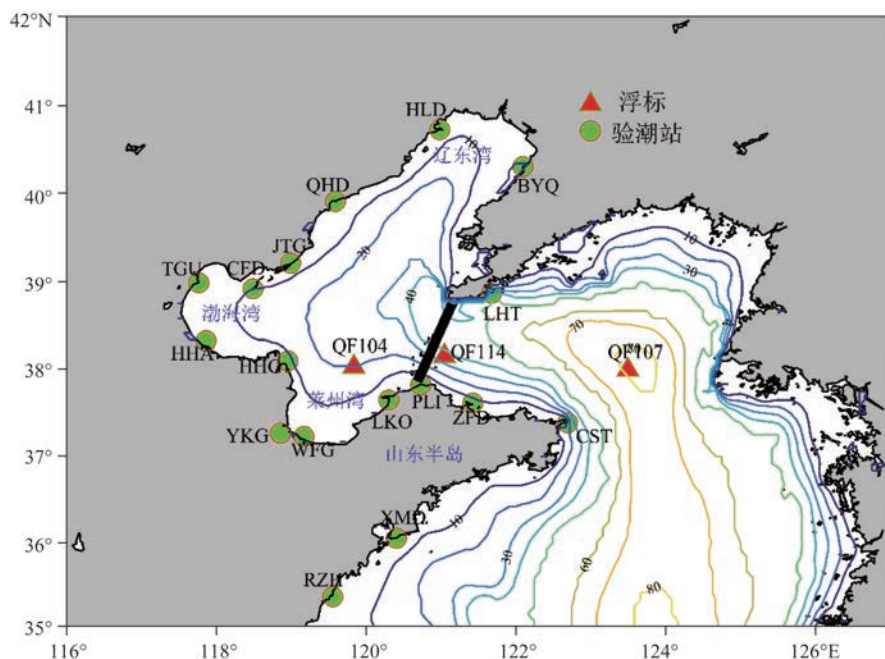


图1 渤、黄海沿岸验潮站和浮标位置分布图

(LHT:老虎滩验潮站, BYQ:鲅鱼圈验潮站, HLD:葫芦岛验潮站, QHD:秦皇岛验潮站, JTG:京唐港验潮站, CFD:曹妃甸验潮站, TGU:塘沽验潮站, HHA:黄骅验潮站, HHG:黄河海港验潮站, YKG:羊口港验潮站, WFG:潍坊港验潮站, LKO:龙口验潮站, PLI:蓬莱验潮站, ZFD:芝罘岛验潮站, CST:成山头验潮站, XMD:小麦岛验潮站, RZJ:日照验潮站; QF***:浮标站名称; 黑色实线是渤海海峡分界线)

数据,时间分辨率是1 h;实测潮位数据均是验潮井中压力式浮球观测的数据,时间分辨率是1 h。由于实测潮位数据是包括天文潮的综合潮位数据,因此计算由台风引起的风暴增水,必须将天文潮从综合潮位中分离出去,本文使用的天文潮是利用多年实测数据调和分析获得的调和常数进行预测的。

3 模式设置和验证

风暴潮数值模拟采用的是FVCOM海洋模式。FVCOM是由美国麻省大学和美国伍兹霍尔(Woods Hole)海洋研究所于2000年建立的水平非结构网格海洋环流与生态模型^[18],2006年由UMASS-D/WHOI模式开发团队进一步完善。此模型综合了现有海洋有限差分 and 有限元模型的优点,解决了数值计算中浅海岸界拟合、质量守恒及计算有效性等问题,目前被广泛应用于风暴潮研究^[19]。

模式采用三角网格,其中格点数89 541个,从

模拟外围向渤海沿岸逐渐加密,最小分辨率约100 m(见图2)。模式时间分辨率为外模态1.5 s,内模态15 s。模式水深和岸线是以ETOPO1全球地形模型(网址:<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>)为基础,在北海区(约33°N以北区域)沿岸按照1:50 000的电子海图进行修正。输入风场是基于气候预测系统(Climae Forecast System, CFS)的再分析风场(网址:<http://apdrc.soest.hawaii.edu/>),空间分辨率为1/2°,时间分辨率为1 h,再分析风场数据与实测数据吻合较好(见图3)。风拖曳系数由与风速成分段函数关系的公式计算^[20],具体见式(1)。温度和盐度设置为固定值,即取渤海8月近似均值18 °C和35 psu。开边界输入为零。

利用FVCOM对1909号台风“利奇马”引起的风暴潮进行模拟。通过与实测验潮站数据对比发现,两者变化趋势和极值大小基本一致(见图4)。这表明数值模式设置比较合理,适合渤、黄海区域的风暴潮模拟。

$$C_d \times 10^3 = \begin{cases} 0.040v^4 - 0.5241v^3 + 2.4631v^2 - 5.3025v + 6.1763 & v \leq 6 \\ -1.3405 \times 10^{-5}v^4 + 0.0010v^3 - 0.0264v^2 + 0.3428v - 0.0755 & 6 < v \leq 31 \\ 1.8701 \times 10^{-7}v^4 - 4.3336v^3 + 0.0043v^2 - 0.2308v + 6.8709 & v > 31 \end{cases} \quad (1)$$

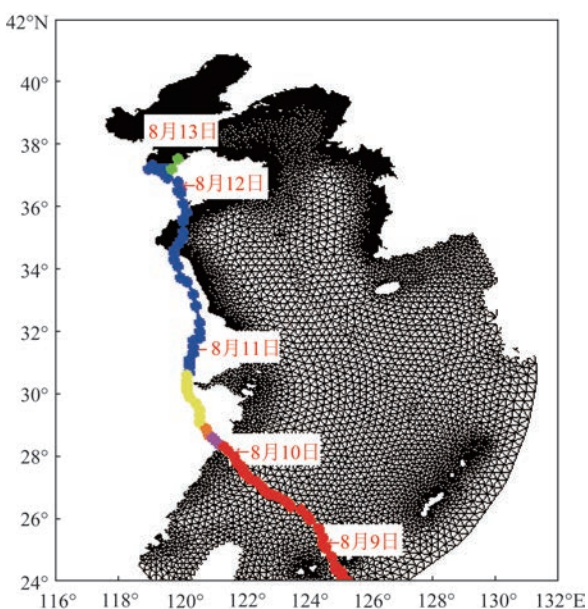


图2 模式网格和台风路径示意图

4 研究结果

4.1 风暴潮演变过程

台风“利奇马”于2019年8月4日生成。9日,台风逐渐接近浙闽沿岸,此时渤海风力较小,潮位基本正常。10日,台风逐渐北上,开始影响山东半岛南部,产生的表面重力波向北传播,同时将东海水向北输送,使得渤海沿岸出现全海域增水(见图5a)。从11日0时开始,台风开始影响渤海(见图3)。受台风强迫影响,渤海沿岸风暴增水逐渐呈现空间分布差异,即渤海湾和莱州湾附近沿岸区域开始出现大幅度风暴增水,而辽东湾附近沿岸区域风暴增水幅度相对较小(见图5b)。11日20—22时,渤海风速达到极值(见图3),风向以东北向为主,局地风引起风暴增水约3 h后达到最大(见图4),此时渤海海域风暴增水出现明显地域差异,即渤海湾和

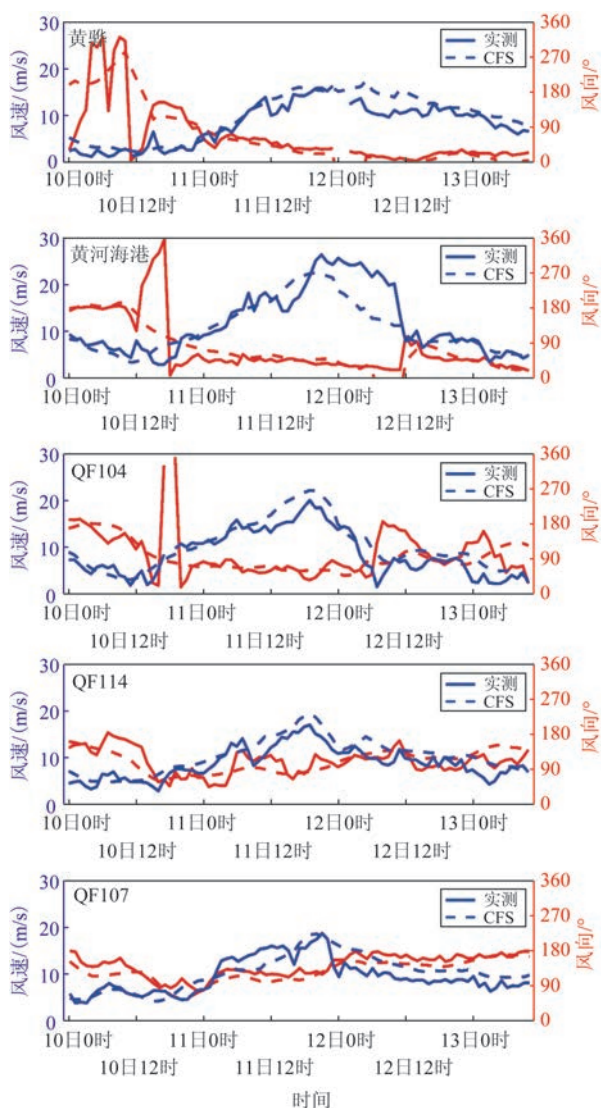


图3 CFS再分析风与实测风对比曲线

莱州湾附近沿岸区域的风暴增水值与辽东湾附近相差较大(见图5c)。12日04时左右,台风进入莱州湾,莱州湾风速开始逐渐变小,但渤海海峡风速继续维持较大值(见图3),导致表面重力波仍在渤海中震荡,所以风暴增水继续维持但略有减少(见图5d)。12日中午前后,渤海海峡风力逐渐减少,表面重力波和渤海海水均流出渤海,渤海沿岸潮位震荡幅度减小,山东南岸再次出现风暴增水(见图5e)。13日11时台风停止编号,局地风作用减弱,表面重力波能量逐渐消失,潮位逐渐恢复正常(见图5f)。

从台风“利奇马”引起的渤海风暴增水演变过程中可以看到:针对渤海沿岸风暴潮的研究不能只关注局地风变化,还需要注意渤海海峡风场变化。

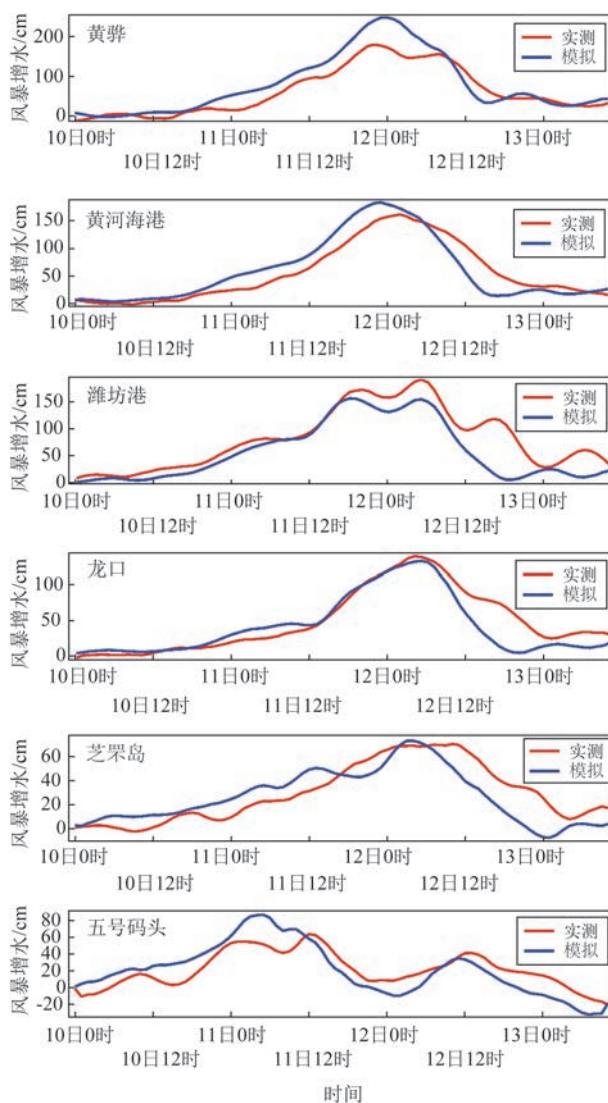


图4 模拟与实测风暴增水对比曲线图

渤海海峡持续偏东大风导致渤海内部海水和能量不能流出,引发持续较高的风暴增水,从而形成灾害。

4.2 风暴潮组成分析

渤海是半封闭海,其沿岸风暴潮通常由两个部分组成:一部分是由局地风作用形成风暴潮,即风直接作用于渤海产生的风暴潮,简称“直接作用”;另一部分是由外部天气系统(作用于黄、东海的天气系统)通过表面重力波和海水移动等方式间接影响渤海潮位变化,简称“间接影响”。明确“直接作用”或“间接影响”引起风暴增水的关系和空间分布,对于应对由不同天气系统引发的风暴潮是必要的。

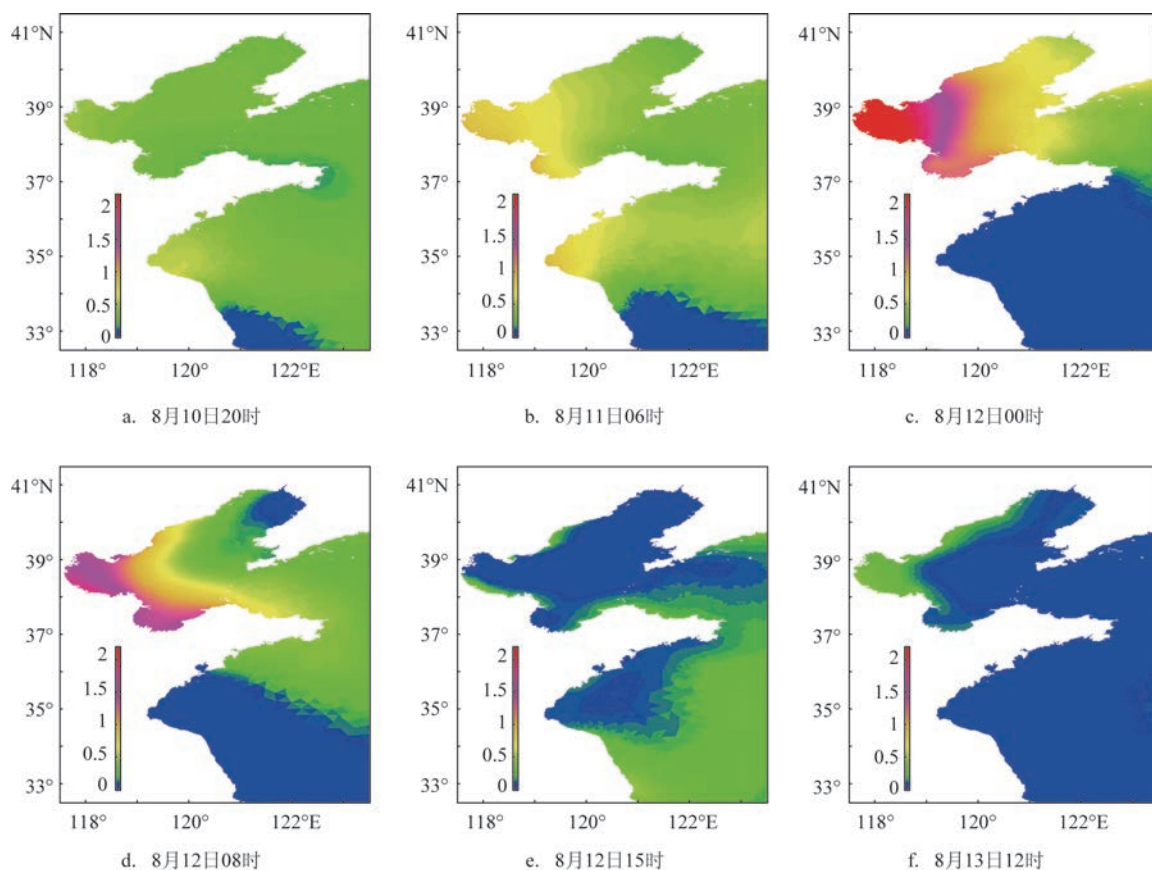


图5 “利奇马”台风风暴潮不同时刻空间分布图(单位:m)

以“利奇马”台风风暴潮为基础设计对比试验。具体为:以“利奇马”台风风暴潮数值模拟作为原始试验;以仅考虑“直接作用”于渤海区域的“利奇马”台风风场引起的风暴潮作为对比试验,即以渤海内部风速是台风“利奇马”影响期间的真实风速,渤海海峡(见图1黑线位置)以外区域风速是零的风场作为输入场。因此,对比试验代表“直接作用”于渤海产生的风暴潮,而“间接影响”引起的渤海增水值等于原始试验模拟值减去对比试验模拟值。

两个试验结果对比发现(见图6),8月11日前台风“利奇马”位于东、黄海区域,“间接影响”渤海,引起渤海沿岸出现风暴增水;8月11日起台风“利奇马”外围开始“直接作用”于渤海,产生风暴增水,且空间分布逐渐呈现差异,即渤海湾和莱州湾沿岸开始出现大幅增水,而辽东湾沿岸出现小幅增水。图7是“直接作用”和“间接影响”在渤海沿岸引起的风暴增水极值空间分布,图8是渤海沿岸多数验潮站出现风暴增水极值前后(约在8月11日22时),“直

接作用”与“间接影响”引起的风暴增水比值,即“直接作用”引起的风暴增水值比“间接影响”引起的风暴增水值。从图7和8发现:在台风“利奇马”影响期间,渤海湾的风暴增水极值主要来自局地风“直接作用”引起的风暴增水,且“直接作用”引起的风暴增水极值约占总增水极值的2/3;莱州湾的风暴增水极值来自“直接作用”和“间接影响”的共同作用,两者贡献相当;辽东湾的风暴增水极值主要来自“间接影响”,而局地风的“直接作用”主要引起风暴减水,减水极值小于“间接影响”引起的增水极值。“直接作用”引起的风暴增水在渤海具有空间分布不一致性,即渤海湾和莱州湾沿岸出现风暴增水,辽东湾出现风暴减水,且风暴增水幅度受局地风分布影响较大;“间接影响”引起渤海水位整体变化,风暴增水的空间分布和变化幅度基本一致,而“间接影响”在辽东湾引起增水略偏多的原因可能与表面重力波率先传入辽东湾及与局地风引起风暴减水相互作用有关。表面重力波能量传播方向通常

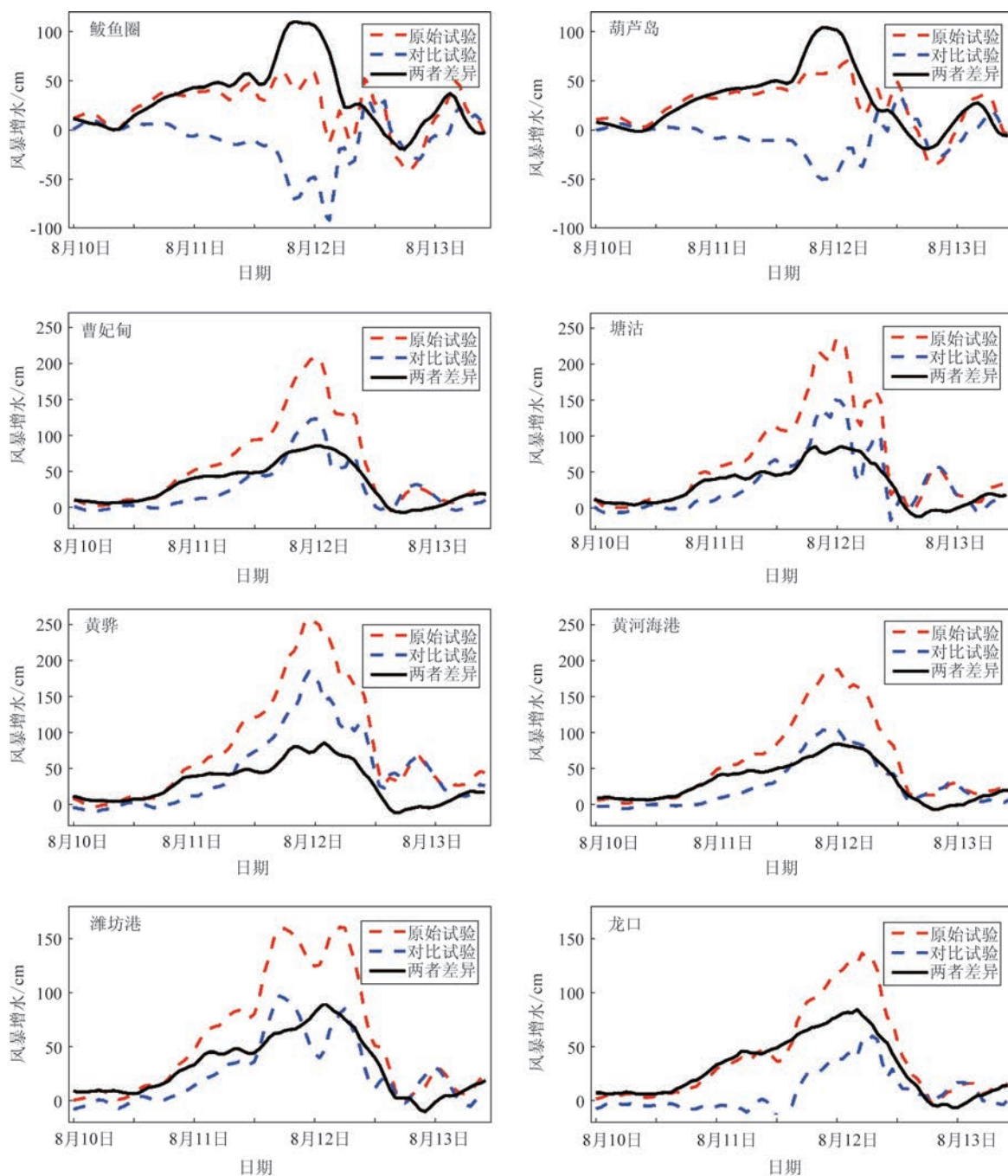


图6 不同试验风暴增水随时间变化曲线

与海水进入渤海的方向垂直向右,所以其能量首先到达辽东湾,然后受到地形反射影响传入渤海湾和莱州湾。

从图6还可以看出“间接影响”和“直接作用”引起的传入渤海的风暴增水极值叠加较好,且“间接影响”引起风暴增水(约50 cm以上)超过24 h,这也是此次台风风暴潮造成较大灾害的一个原因。

4.3 其他因素对风暴潮预警报影响

台风“利奇马”在渤海区域引发长时间和高水位的风暴潮,与天文高潮叠加,形成极高的综合潮位,尤其在渤海湾区域,两者极值出现时间基本相同。值得一提的是黄河海港验潮站,风暴增水极值出现时间与天文高潮时相差约6 h,但仍出现达到当

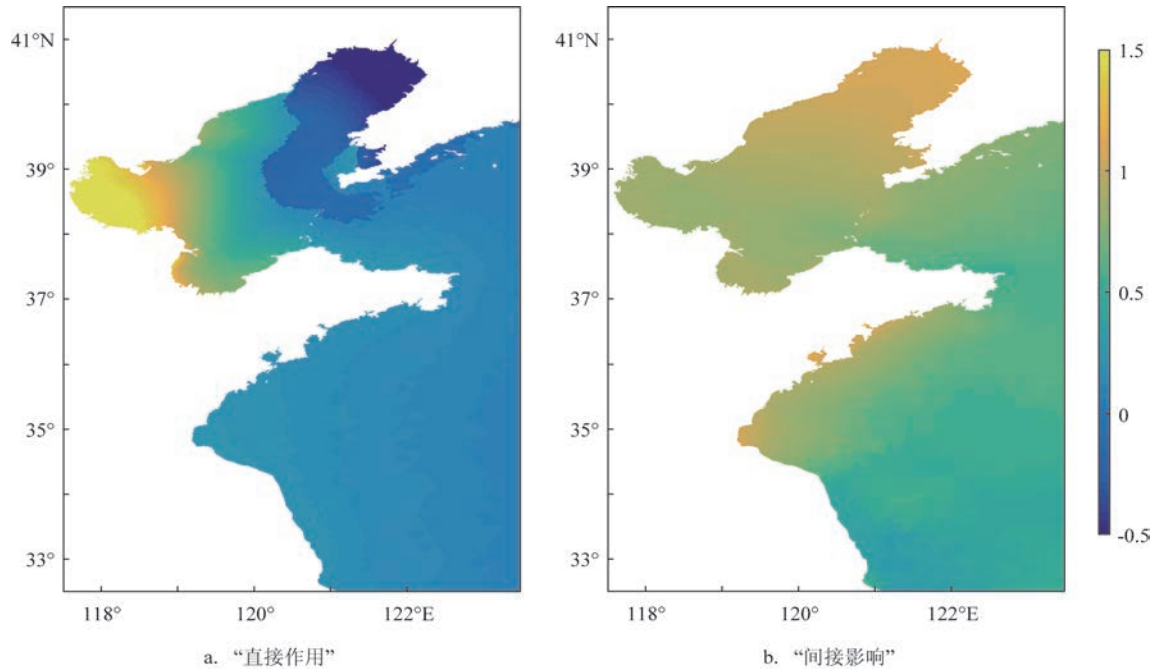


图7 “直接作用”和“间接影响”引起风暴增水极值分布图(单位:m)

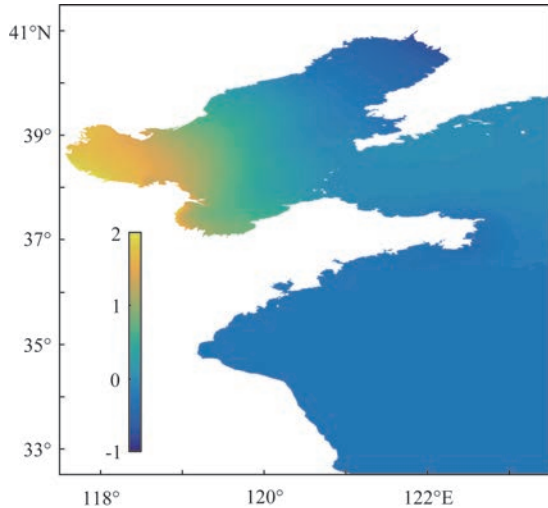


图8 8月11日22时“直接作用”和“间接影响”引起风暴增水比值图

地红色警戒潮位级别高潮位,原因是黄河海港验潮站潮汐属性是正规日潮,且潮差较小,导致高潮时前后的潮位变化平缓。在风暴增水极值出现时,天文潮位仍较高,两者叠加就会形成极高综合潮位(见图9)。因此在风暴潮研究中,不仅要考虑最大风暴增水首次与天文高潮的叠加情况,还要注意风暴增水下降速度、天文潮性质、高潮时前后潮位下

降状况及大小潮期等因素的影响,尤其需要关注天文高潮时前后潮位下降较慢的验潮站。

在风暴潮预警和防灾减灾中,实际灾害级别是由可能出现的高潮位结合当地警戒潮位进行判定的。警戒潮位是指防护区沿岸可能出现险情或潮灾,需进入戒备或救灾状态的潮位既定值,它与历史潮位、提防状态和当地经济有关。关注警戒潮位值变化至关重要,它的大小直接关系到预警级别和防灾减灾策略的制定。“利奇马”台风风暴潮导致多地达到当地红色警报级别,这与各地新颁布的警戒潮位值密切相关。例如,按照原警戒潮位值和发布标准,曹妃甸、京唐港和黄河海港验潮站均达不到红色警报级别,而按照新颁布的四色警戒潮位和发布标准,它们均达到了红色警报级别。通过对比新旧警戒潮位及警报发布标准发现(见表1),除黄骅和潍坊港验潮站外,渤海其余验潮站达到红色警报级别所需的潮位值均下降,这也是“利奇马”台风风暴潮出现多地达到红色警报级别的一个原因。

此外,风暴潮研究还需要考虑微地形的影响。例如2018年前,黄河海港验潮站直接面向外海,但随着沿岸港口发展,其北侧已建成堤坝,其微环境由开放海域变成湾口海域,更容易出现较高风暴增

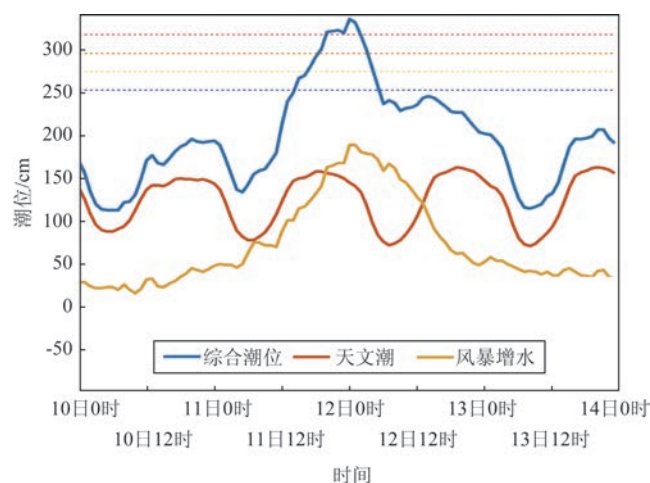


图9 黄河海港验潮站潮位变化曲线(虚线为四色警戒潮位值)

表1 新旧警戒潮位对比表(1985 黄海高程基准,单位:cm)

站位	原警戒	蓝色	黄色	橙色	红色
京唐港	171	141	158	175	191
曹妃甸	206	176	202	229	256
塘沽	223	213	238	263	283
黄骅	244	234	267	301	334
黄河海港	180	155	177	198	220
潍坊港	260	262	297	331	366
龙口	183	161	185	210	234
蓬莱	162	150	172	194	216
芝罘岛	189	179	195	212	228
成山头	132	118	139	159	180

水,这也是台风“利奇马”导致黄河海港验潮站出现达到当地红色警戒潮位高潮位的一个原因。

5 结论

由“利奇马”台风风暴潮在渤海的演变过程发现,当莱州湾风速减少而渤海海峡风速继续维持时,渤海沿岸风暴潮会继续维持较高水位,所以针对渤海风暴潮的研究需要同时关注局地风和渤海海峡风场变化。

利用FVCOM模式设计对比数值试验发现,渤海风暴潮可分为“直接作用”和“间接影响”引起两部分。“利奇马”台风风暴潮的空间分布为:渤海湾以“直接作用”引起风暴增水为主,约占总风暴增水

的2/3,辽东湾以“间接影响”引起风暴增水为主,而莱州湾两者引起风暴增水大小相当。“直接作用”引起的风暴增水在渤海具有空间分布及增水幅度不一致性,与作用于渤海的局地风风速和风向有关;而“间接影响”由于不直接作用于渤海,仅由海水灌入和重力表面波传入渤海,因此引起渤海水位整体变化,且风暴增水幅度基本一致。

通过对“利奇马”台风风暴潮影响的验潮站综合潮位数据分析发现,造成多地出现较高预警级别潮位的原因是风暴增水较高,且与天文高潮叠加较好;在部分验潮站即使两者不能很好地叠加,但仍形成较高水位,这与潮汐性质、潮差和高潮时附近潮位下降较慢有关。预警级别还与警戒潮位值的变化有关。新颁布的四色警戒潮位除部分湾口区域验潮站外,其余达到红色警戒级别所需潮位值均有所降低,需额外关注。

渤海风暴潮的研究表明:风暴潮的研究既要关注“直接作用”影响,也要关注“间接影响”带来的海水变化和能量输送,同时还需要考虑与天文潮叠加状况及不同区域警戒潮位值变化等情况。只有准确考虑影响风暴潮灾害的各项因素,才能制定准确的预警报,为防灾减灾和辅助决策提供有力依据,有效减少风暴潮造成的经济损失。

参考文献:

- [1] Hou Y J, Jiang X W, Liu Y H. China coastal seas under severe sea state: remote sensing and dynamics studies[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2015, 33(5): 1101-1103.
- [2] Heaps N S. Storm surges, 1967 - 1982[J]. Geophysical Journal International, 1983, 74(1): 331-376.
- [3] Davies A M, Jones J E. A three-dimensional wind driven circulation model of the Celtic and Irish Seas[J]. Continental Shelf Research, 1992, 12(1): 159-188.
- [4] Jones J E, Davies A M. Storm surge computations for the Irish Sea using a three-dimensional numerical model including wave-current interaction[J]. Continental Shelf Research, 1998, 18(2-4): 201-251.
- [5] 李菁楠, 李响, 张蕴斐, 等. 热带气旋季节预报业务进展[J]. 海洋预报, 2018, 35(6): 92-99.
- [6] 刘清容, 于建生, 韩笑. 风暴潮研究综述及防灾减灾对策[J]. 应用科技, 2009(12): 226-227.
- [7] 吴少华, 王喜年, 尹庆江. 台风风暴潮极值高潮位的统计预报[J]. 海洋预报, 1994, 11(2): 69-72.
- [8] 董剑希, 付翔, 吴玮, 等. 中国海高分辨率业务化风暴潮模式的业务化预报检验[J]. 海洋预报, 2008, 25(2): 11-17.
- [9] Shi F Y, Sun W X. A variable boundary model of storm surge

- flooding in generalized curvilinear grids[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1995, 21(8): 641-651.
- [10] Shi F Y, Sun W X, Wei G S. A WDM method on a generalized curvilinear grid for calculation of storm surge flooding[J]. Applied Ocean Research, 1997, 19(5-6): 275-282.
- [11] 王秀芹, 钱成春, 王伟. 计算域的选取对风暴潮数值模拟的影响[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(3): 319-324.
- [12] 王秀芹, 钱成春, 王伟. 风应力拖曳系数选取对风暴潮数值模拟的影响[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(5): 640-646.
- [13] 李健, 侯一筠, 孙瑞. 台风模型风场建立及其模式验证[J]. 海洋科学, 2013, 37(11): 95-102.
- [14] Haigh I D, Wijeratne E M S, MacPherson L R, et al. Estimating present day extreme water level exceedance probabilities around the coastline of Australia: Tides, extra-tropical storm surges and mean sea level[J]. Climate Dynamics, 2014, 42(1-2): 121-138.
- [15] Mo D X, Hou Y J, Li J, et al. Study on the storm surges induced by cold waves in the Northern East China Sea[J]. Journal of Marine Systems, 2016, 160: 26-39.
- [16] Wu L G, Wang B. Assessing impacts of global warming on tropical cyclone tracks[J]. Journal of Climate, 2004, 17(8): 1686-1698.
- [17] 孙密娜, 杨洋, 姜皓严. 影响黄渤海区域两次北上台风的对比分析[J]. 海洋预报, 2018, 35(5): 74-84.
- [18] Chen C S, Liu H D, Beardsley R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(1): 159-186.
- [19] 冯兴如, 杨德周, 尹宝树. FVCOM在龙口海域潮汐潮流模拟中的应用研究[J]. 海洋科学, 2010, 34(6): 94-99.
- [20] Powell M D, Vickery P J, Reinhold T A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones[J]. Nature, 2003, 422(6929): 279-283.

Research on the impact of typhoon “Lekima” on storm surges in the Bohai Sea

LI Jian^{1,2,3,4}, HOU Yi-jun^{1,2,3,5}, LIU Qing-rong⁴, JIANG Tao⁶, Jiao Yan⁴

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071 China; 2. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071 China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049 China; 4. North China Sea Marine Forecasting center of State Oceanic Administration, Qingdao 266061 China; 5. Laboratory for Ocean and Climate Dynamics, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237 China; 6. 91033 troops, People's Liberation Army, China, Qingdao 266011 China)

Abstract: In this paper, the evolution mechanism of the storm surge caused by typhoon “Likima” in the Bohai Sea is studied based on the in-situ observation data and FVCOM. The results show that the storm surge in the Bohai Sea is jointly caused by direct-effect of local wind and indirect-effect of the marginal weather system with different spatial and temporal distribution. For the storm surge caused by typhoon “Lekima”, the direct-effect accounts for 2/3 and 1/2 of the total storm surge in the Bohai Bay and Laizhou Bay, respectively.

Key words: typhoon “Lekima”; Bohai Sea; storm surge; FVCOM