

# 黄、东海天气系统对渤海风暴潮影响\*

李 健<sup>1, 2, 3, 4</sup> 侯一筠<sup>1, 2, 5</sup> 莫冬雪<sup>1, 2</sup> 刘清容<sup>4</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋环境与波动重点实验室 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 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 青岛 266237)

**摘要** 渤海沿岸是风暴潮多发区域。研究者多关心渤海局地风引起风暴潮变化,而忽略黄、东海天气系统对渤海风暴潮的影响。为研究外围天气系统对局地风暴潮的影响,本文采用实测资料对比和设计理想数值试验等方法,对黄、东海天气系统影响的渤海风暴潮进行了研究。结果表明: 1、TY1814“摩羯”和 TY1818“温比亚”台风风暴潮的实测资料呈现当黄、东海风力较大,而渤海风力较小时,渤海沿岸也会出现较大风暴潮现象; 2、从 FVCOM(Finite-Volume Coastal Ocean Model)模拟的理想数值试验中发现,黄、东海风向是东南风时,引起渤海沿岸风暴增水极值最大; 3、以入海气旋和登陆北上台风两种类型天气系统风向变化设计理想数值试验,发现黄、东海的东南风持续时间对渤海沿岸风暴潮极值大小和出现时间影响较大。理想试验获得的结论不仅能为渤海风暴潮预测和防灾减灾提供理论依据,还能够有效减少预警应急中漏报的现象,降低沿海经济损失。

**关键词** 渤海; 风暴潮; 理想试验; 入海气旋; 登陆北上台风

**中图分类号** O141.4; P444 doi: 10.11693/hyhz20190900164

海洋动力灾害(包括风暴潮、巨浪等)是对全球沿海各国危害最大的自然灾害之一(Hou *et al.*, 2015),其中风暴潮灾害作为海洋动力灾害重中之重,一直是海洋学家研究焦点。随着科技发展,风暴潮研究已从早期理论研究向数值化、智能化方向发展;数值模型从早期的零阶、一阶模型(孙文心等, 1979),向二维、三维模型发展,如美国的 ECOM(Estuarine Coastal and Ocean Model)、POM(Princeton Ocean Model)、FVCOM(Finite-Volume Coastal Ocean Model)模型、德国的 HAMSOM(HAMBURG Shelf Ocean Model)模型、荷兰的 Delft-3D 模型等等(董剑希等, 2008)。风暴潮研究不仅模式方面发展迅速,而且考虑因素也越来越多,如 Olbert 等(2013)、Xu 等(2016)研究了天文潮对风暴潮影响, Feng 等(2011)、Olabarrieta 等(2011)研究了波浪与风暴潮之间的相互影响, Muis 等(2016)、张平等(2017)研究了海平面变化对风暴潮影响;考虑

角度越来越全面,如 Zhong 等(2010)、李健等(2018)研究了台风路径对风暴潮影响, Mo 等(2016)研究了寒潮变化对风暴潮影响, Powell 等(2003)、史剑等(2013)研究了风拖曳系数对风暴潮影响。但目前多数研究者仅聚焦局地风对沿岸风暴潮影响,很少考虑外部天气系统引起的风暴潮,而风暴潮是一个全局响应的过程,仅考虑局地风引起的海水变化,往往会导致结果偏低。因此为提高模拟和预报的准确性,外部天气系统对风暴潮的影响不能被忽略。

渤海是一个半封闭海域,容易受到黄、东海天气系统影响,从而导致渤海沿岸出现风暴潮。本文利用台风期间验潮站和浮标的实测数据,分析黄、东海天气系统引起渤海沿岸风暴潮的现象,并通过数值模拟的手段进一步探索不同黄、东海天气系统对渤海沿岸风暴潮的影响。获得的研究结果不仅为渤海风暴潮预测和防灾减灾提供理论依据,还在灾害预警和防

\* NFSC-山东省联合基金重点支持项目, U1706216 号;北海分局海洋科技项目, 201903 号。李 健, 博士研究生, E-mail: ylijian7@126.com

通信作者: 侯一筠, 博士生导师, 研究员, E-mail: yjhou@qdio.ac.cn

收稿日期: 2019-09-02, 收修改稿日期: 2019-12-12

治起到重要作用,尤其是能够有效的提高渤海沿岸潮位预报准确性,降低预警应急中漏报率。

### 1 台风和数据简介

#### 1.1 台风简介

2018年8月渤海区接连受到两个北上台风(具体台风路径见图1)影响,造成严重经济损失,仅1814号台风“摩羯”北上引起风暴潮造成直接损失(指山东以北区域的经济损失)就高达1.363亿元(自然资源部北海局,2019)。1814号台风“摩羯”于2018年8月8日11时在西北太平洋面生成。12日11时35分在浙江温岭沿海登陆,登陆时中心附近最大风力10级(28m/s,强热带风暴级)。登陆后强度逐渐减弱,并变性(谢骏等,2018)为温带气旋,路径偏西北上。15日进入渤海,此时最大风力8级。进入渤海后,强度加强,并与北部冷空气相配合,形成强的东北风,造成莱州湾和渤海湾的一次风暴潮过程。1818号台风“温比亚”于2018年8月15日11时在我国东海附近生成。17日4时5分在上海浦东新区南部沿海登陆,登陆时中心附近最大风力9级(23m/s),中心最低气压985百帕。登陆后台风沿着副高外缘,先向西北移动,后变性转向东北方向移动,于8月20日7时左右进入渤海,此时最大风力8级。由于两次台风相继影响渤海,

使渤海沿岸出现持续风暴增水,而且黄、东海天气系统间接影响渤海,造成渤海整体水位上升,进一步加重了渤海沿岸风暴潮灾害。

#### 1.2 数据简介及处理

台风影响期间的实测风数据来自海上浮标;实测潮位数据来自沿岸验潮站,具体位置见图2。实测风数据是符合观测标准的10m风数据,时间分辨率是1h;实测潮位数据均是验潮井中压力浮球式观测的数据,时间分辨率是1h。由于实测潮位数据是包括天文潮的综合潮位数据,因此计算风暴增水时,必须将天文潮从综合潮位中分离出去,其中本文使用的天文潮是利用多年实测数据调和和分析获得调和常数进行预测的。

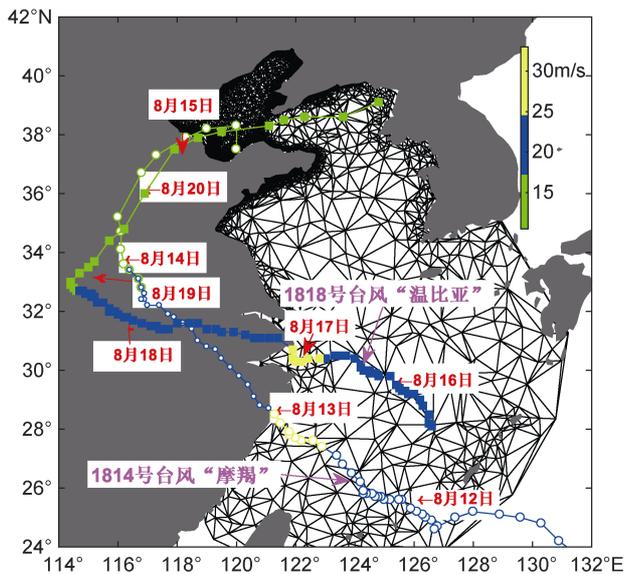


图1 模式网格和台风路径示意图

Fig.1 Simplified diagram of the model grids and the typhoon paths

注:绿色:热带低压级台风;蓝色:热带风暴级台风;黄色:强热带风暴级台风;空心:1814号台风“摩羯”;实心:1818号台风“温比亚”

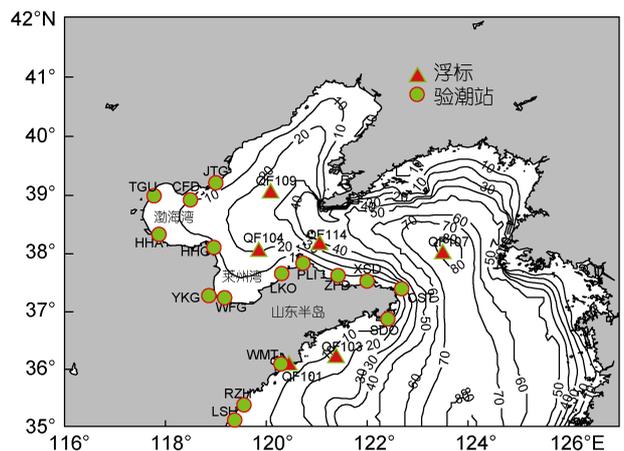


图2 渤、黄海沿岸验潮站和浮标位置分布图

Fig.2 Deployment of tidal stations and buoys along the coast of the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea

注:等值线表示水深

### 2 模式简介、设置及验证

FVCOM(An Unstructured Grid, Finite-Volume Coastal Ocean Model)海洋模式是由美国麻省大学和 美国伍兹霍尔海洋研究所(UMASS-D/WHOI),于2000年建立的水平非结构网格海洋环流与生态模型(Chen et al, 2003)。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和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(冯兴如等,2010)。

模式采用三角网格,其中格点数89541个,从模拟外围向渤海沿岸逐渐加密,最小分辨率约100m(图1)。模式时间分辨率是外模态为1.5s,内模态为15s。模式水深和岸线是以etopo1(<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 1:50000 的电子海图进行修正。输入风场是在台风中心附近以 DUAL(Dual-Exponential Wind Profile)模型风场(Willoughby *et al*, 2006)为主,在远离台风中心区域,利用欧洲中心(European Centre for Medium-Range

Weather Forecasts, ECMWF)再分析风场(http://apdrc.soest.hawaii.edu/)进行修正(公式见表 1)(闻斌等,2008)。风拖曳系数是由与风速成分段函数关系的公式计算的(Powell *et al*, 2003),具体公式见表 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。开边界输入是 0。

表 1 DUAL 模型风场、叠加公式和拖曳系数  
Tab.1 The DUAL model wind formula, combined formula and drag coefficient

名称	公式
DUAL 公式	$V_{TY} = V_i = V_s + V_{\max} \left( \frac{r}{R_{\max}} \right)^n, \quad (0 < r < R_1)$ $V_{TY} = V_s + V_i(1-w) + V_o w, \quad (R_1 < r < R_2)$ $V_{TY} = V_o = V_s + V_{\max} \left[ (1-A) \exp \left( -\frac{r-R_{\max}}{X_1} \right) + A \exp \left( -\frac{r-R_{\max}}{X_2} \right) \right], \quad (R_2 < r)$
参数	$X_1 = 317.1 - 2.026V_{\max} + 1.915\phi$ $n = 0.406 + 0.0144V_{\max} - 0.0038\phi$ $w = \frac{nX_1}{nX_1 + R_{\max}}$ $A = 0.069 + 0.0049V_{\max} - 0.0064\phi$ $R_{\max} = 46.4 \exp(-0.0155V_{\max} + 0.0169\phi)$ $V_{\text{new}} = V_{TY}(1-e) + V_b e$
叠加公式	$e = \frac{C^4}{1+C^4}$ $C = \frac{r}{NR_{\max}}$
拖曳系数	$C_d \times 10^3 = \begin{cases} 0.040v^4 - 0.5241v^3 + 2.4631v^2 - 5.3025v + 6.1763, & v < 6 \\ -1.3405 \times 10^{-5}v^4 + 0.0010v^3 - 0.0264v^2 + 0.3428v + 0.0755, & 6 \leq v \leq 31 \\ 1.8701 \times 10^{-7}v^4 - 4.3336v^3 + 0.0043v^2 - 0.2308v + 6.8709, & v > 31 \end{cases}$

注:  $r$  表示与台风中心的距离;  $V_{TY}$  表示风速;  $V_s$  表示台风前进速度;  $V_{\max}$  表示最大风速;  $R_{\max}$  表示最大风速半径;  $R_1$  和  $R_2$  代表与台风中心固定距离,这两个参数主要作用是将模型风场分成三段函数;  $V_i$  和  $V_o$  代表与台风中心不同距离的风速,其中  $V_i$  表示从台风中心到  $R_1$  之间的风速,  $V_o$  表示从  $R_2$  到外围之间的风速;  $\phi$  表示台风中心纬度;  $n$  和  $w$  是公式系数,其中  $n$  直接由公式计算获得,而  $w$  是优化距离系数,具体参见(Willoughby *et al*, 2006);  $A$  是相关系数;  $V_b$  代表背景风场;  $V_{\text{new}}$  代表合成风场;  $e$ 、 $C$  和  $N$  是合成系数,具体取值参见(闻斌等, 2008);  $C_d$  代表拖曳系数;  $v$  是风速

利用 FVCOM 对 1814 号台风“摩羯”和 1818 号台风“温比亚”引起的风暴潮进行模拟。通过与实测验潮站数据对比发现,两者变化趋势相同(图 3),且极值大小基本一致,极值相对误差除潍坊港验潮站(25%)外,其余渤海沿岸验潮站均在 20%以内。出现偏差可能原因是台风北上变性,强度减弱,风场轮廓不规则,导致模型风场很难完全准确刻画实际风场。综上对比结果说明数值模式设置比较合理,能够适合渤、黄海区的风暴潮模拟。

### 3 实测对比和理想试验

#### 3.1 实测数据分析

渤、黄海区验潮站和浮标数据变化曲线显示(图 3, 4): 在 1814 号台风“摩羯”和 1818 号台风“温比亚”影响期间,当山东半岛南部风速较大且风向以偏东风为主,而渤海区域风速较小时,渤海沿岸验潮站出现较大风暴增水极值。8 月 17—18 日,山东半岛南部的黄海区域风速较大,风向是偏东风(图 4, QF103),

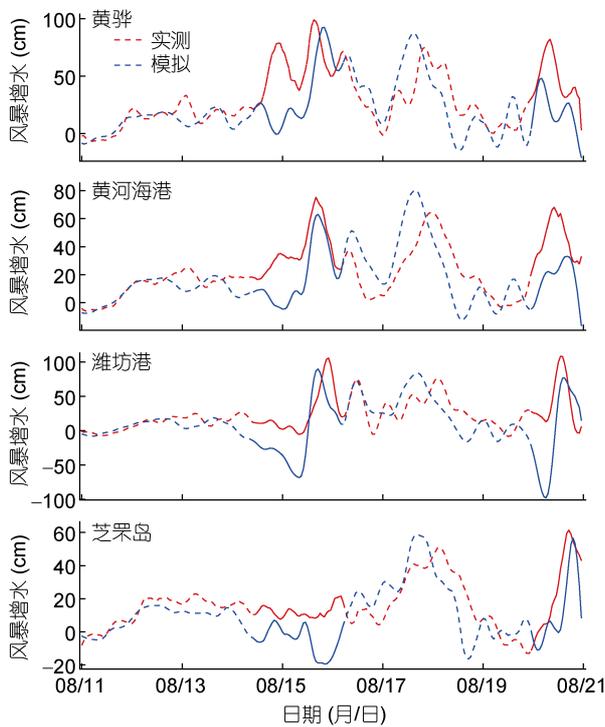


图3 模拟与实测风暴增水对比曲线图

Fig.3 Comparison between simulated (blue lines) and observed (red lines) time series of storm surges

注: 实线部分表示台风作用于渤海时, 风暴增水随时间变化

而渤海区域风速较小时(图4, QF104), 渤海沿岸风暴潮均出现50cm左右增水(图3)。出现此现象原因可能是受8月15—17日台风“摩羯”引起风暴潮二次振荡影响, 但在山东半岛北部(图3, 芝罘岛验潮站), 8月17—19日的风暴增水极值明显大于8月13—15日风暴增水极值, 这与二次振荡形成风暴增水极值通常小于等于初次风暴增水极值的事实不符。综上说明, 8月17—18日渤海沿岸风暴增水不仅是回振引起的, 还可能受到黄、东海天气系统影响, 出现海水涌入渤海形成的风暴潮现象。

根据实测数据资料和数值结果, 推演出两个台风引起渤海风暴潮演变过程: 8月12—14日, 1814号台风“摩羯”登陆北上, 在黄、东海区产生东南风, 形成表面重力波(尹丽萍等, 2018), 其能量向东北方向传播, 一部分遇到山东半岛南部, 形成风暴增水, 另一部分传入渤海, 同时与灌入渤海的黄、东海水的配合, 形成风暴增水。8月15—16日, 1814号台风“摩羯”作用于渤海(图4), 形成局地风暴增水(图3)。8月17日台风“摩羯”作用逐渐消失, 局地风减弱, 此时渤海表面重力波和渤海海水应传出渤海, 但由于同时

间(8月15—18日)1818号台风“温比亚”, 在黄、东海区产生偏东风, 形成新的表面重力波, 再次传入渤海, 阻止因1814号台风“摩羯”作用消失后表面重力波的能量和渤海海水传出渤海, 且1818号台风“温比亚”中心位置更偏北, 形成表面重力波向北传播时, 能量耗散较少, 形成风暴增水更大(图3, 8月17—18日)。8月19—20日, 1818号台风“温比亚”作用于渤海, 局地风与传入的表面重力波共同作用形成风暴增水。8月21日, 1818号台风“温比亚”作用逐渐消失, 表面重力波能量和海水传出渤海, 在山东半岛南部形成二次增水。

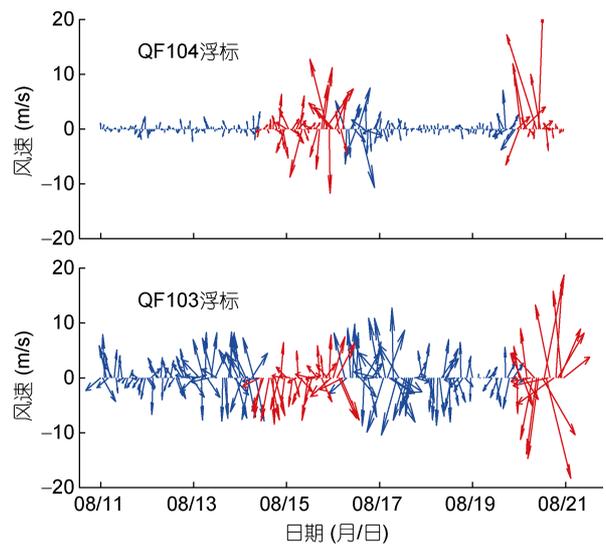


图4 浮标观测风随时间变化曲线

Fig.4 Wind time curves of buoys

注: 红色部分表示台风作用于渤海时, 浮标测量风随时间变化

由于黄、东海天气系统不直接作用于渤海, 所以其引起渤海风暴潮通常具有一定的隐蔽性, 这给研究和预报带来一定困难。为进一步研究黄、东海天气系统对渤海风暴潮影响, 利用数值模式模拟和设计理想试验进行探索是有必要的。

### 3.2 理想试验

为进一步确定黄、东海天气系统在渤海沿岸引起风暴潮现象, 探索位于黄、东海区域的不同风向和不同天气系统对渤海沿岸风暴潮的影响, 设计理想场景: 在 $37^{\circ}\text{N}$ 以南区域输入固定风速(20m/s)的恒定风,  $37^{\circ}\text{N}$ 以北区域输入风速为0, 其中固定风速取值是根据两次台风到达黄、东海区域和渤海区域中心附近最大风力(8级)确定的。

#### 3.2.1 黄、东海不同风向的风对渤海风暴潮影响

以理想场景为基础, 通过改变风向, 设计理想试验。具体是在黄、东海区域设定东、南、西、北以及东南、东北、西南和西北 8 个固定风向的理想输入场, 利用 FVCOM 模式模拟 72h, 研究不同风向理想场景对渤海风暴潮影响。

通过对比不同验潮站的相同风向理想试验结果发现, 渤海区域各验潮站风暴增水曲线变化趋势较为一致, 只是变化幅度略有不同。因此可以利用黄河海港验潮站风暴增水随时间变化(图 5)代表渤海沿岸风暴增水变化。图 5 显示, 位于黄、东海区域的风是东南风时, 引起的渤海沿岸风暴增水极值最大, 其次是东风, 而对应的黄、东海区域出现恒定西北风或西风时, 渤海沿岸出现风暴减水极值最大。图 6 是理想试验 30h 的风暴增水空间分布图。从图中可以发现位于黄、东海区域的恒定风向理想试验引起渤海沿岸风暴潮变化呈现全海域整体变化趋势, 这与局地东北

风引起渤海沿岸风暴潮空间分布(通常渤海湾和莱州湾附近区域出现风暴增水, 辽东湾附近出现风暴减水)不同。

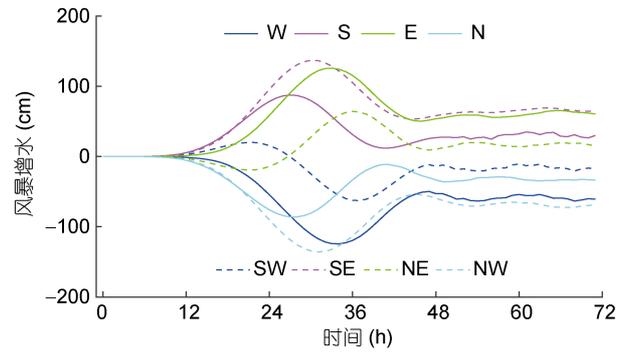


图 5 不同风向理想试验(黄河海港)的风暴潮随时间变化曲线

Fig.5 Storm surge time curves of the HHG in different wind direction ideal test

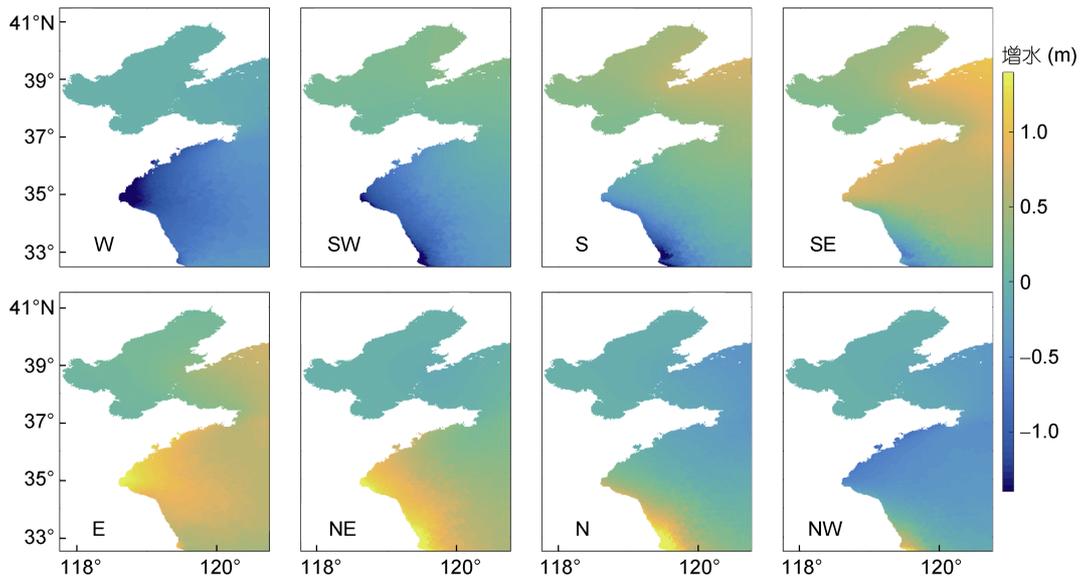


图 6 不同风向理想试验 30h 风暴潮空间分布图

Fig.6 Spatial distribution of storm surge at 30h in ideal test in different wind directions

**3.2.2 黄、东海不同类型天气系统对渤海沿岸风暴潮影响** 为了更贴近于实际, 根据影响黄、东海的天气系统——入海气旋型和登陆北上台风型两类天气系统的风向变化, 结合理想场景的风速设置, 设计理想试验, 探索位于黄、东海区域的不同风向持续时间对渤海沿岸风暴潮影响。

入海气旋型天气系统通常是由江淮气旋(是指发生在长江中下游和淮河流域的锋面气旋)进入黄、东海后影响渤海区域, 所以在黄、东海区域首先出现东南

风, 然后转东风, 最后转为东北风(图 7)。登陆北上台风型天气系统是类似于 1818 号台风“温比亚”路径的天气系统, 台风从西北太平洋或我国沿海向江浙一带方向行进, 登陆后转向北上, 所以在黄、东海区域首先出现东北风, 然后转为东风, 最后转为东南风(图 7)。

由于位于黄、东海区域的天气系统引起渤海沿岸风暴潮变化是全海域变化, 只是增水幅度略有不同, 因此选择黄河海港(HHG)验潮站风暴潮变化代表渤海沿岸风暴潮变化。

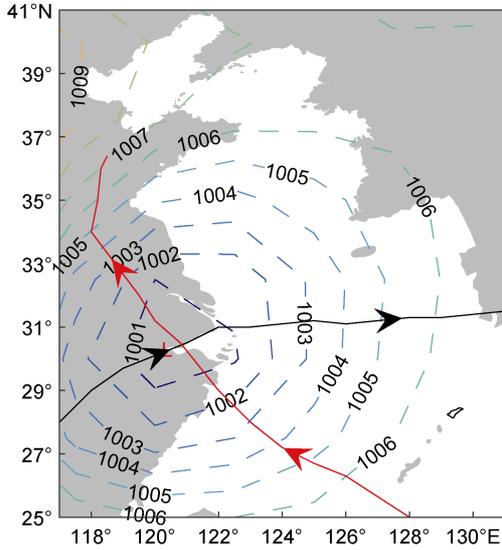


图 7 入海气旋和登陆北上台风型天气系统示意图

Fig.7 Schematic weather system of seaward cyclone and northward typhoon after landing

注: 虚线表示气压等值线(单位: P); 黑色实线表示入海气旋型天气系统中心气压大致移动路径; 红色实线表示登陆北上台风型天气系统中心气压大致移动路径

(1) 入海气旋型理想试验

根据入海气旋型天气系统在黄、东海区域风向变化顺序, 结合理想场景风速设置, 通过改变气旋行进速度, 即不同风向持续时间, 设计理想试验, 具体风向持续时间见表 2。

第一组试验是研究位于黄、东海区域的东南风持续时间与渤海风暴潮关系。通过改变东南风持续时间设计的理想试验, 即第一个试验是东南风持续 12h, 然后转东风持续 24h, 最后转东北风 36h, 共模拟 72h, 其他试验类推, 共设计 6 个试验(见表 2)。第二、三组试验是研究入海气旋型天气系统, 转东风持续时间对渤海风暴增水影响, 即由东南风转东风后, 东风持续时间对渤海增水影响, 其中第二组是试验东南风持续 12h 后转东风, 此时东南风还未使渤海风暴增水出现极值时转风, 而第三组试验是东南风持续 24h, 此时东南风已使渤海风暴增水出现极值后转风, 研究转东风持续时间对风暴潮的影响, 具体设计见表 2。

表 2 入海气旋型天气系统理想试验

Tab.2 Ideal test on the weather system of cyclone to the sea

试验组别	第一组持续时间(h)			第二组持续时间(h)			第三组持续时间(h)		
	东南风	东风	东北风	东南风	东风	东北风	东南风	东风	东北风
试验 1	12	24	36	12	6	54	24	6	42
试验 2	18	24	30	12	12	48	24	12	36
试验 3	24	24	24	12	18	42	24	18	30
试验 4	30	24	18	12	24	36	24	24	24
试验 5	36	24	12	12	30	30	24	30	12
试验 6	72	0	0	12	36	24	24	36	6

从第一组理想试验(图 8)模拟曲线可以看出, 当东南风持续 24h, 渤海风暴增水极值最大。持续时间继续增加, 不改变风暴增水极值, 只改变风暴增水二次极值出现时间。风暴增水约 30h 出现极值。

从第二组理想试验(图 8)可以看出, 当东南风持续 12h 后转东风, 东风持续 12h, 风暴增水极值达到最大, 此时风暴增水极值小于东南风持续 24h 形成风暴增水极值。东风持续时间越长, 风暴增水二次极值越大。除了东风持续 6h(第一个试验), 风暴增水极值出现时间较早外, 其余风暴增水极值均出现在 28h 左右。

第三组理想试验结果(图 8)显示: 当东南风持续 24h 后, 渤海风暴增水就已出现极值, 与转东风持续时间无关, 转东风持续时间仅影响二次风暴增水极值高度和出现时间。风暴增水均在 30h 左右出现极值,

与第一组试验结果相同。与第二组试验不同的是, 东风持续时间变化引起二次振荡增水幅度明显低于首次增水。

(2) 登陆北上台风型理想试验

按照登陆北上台风型天气系统在黄、东海区域的风向变化顺序, 结合理想场景风速设置, 通过改变台风行进速度, 即不同风向持续时间变化, 设计理想试验。理想试验设计思路与入海气旋型理想试验设计思路相同, 其中第一组试验是研究位于黄、东海区域的东北风持续时间与渤海风暴潮关系, 第二、三组试验研究由东北风转东风后, 东风持续时间对渤海风暴潮影响(表 3)。

第一组试验结果(图 9)显示, 在黄、东海区域东北风持续时间越短, 渤海风暴增水极值越大且出现

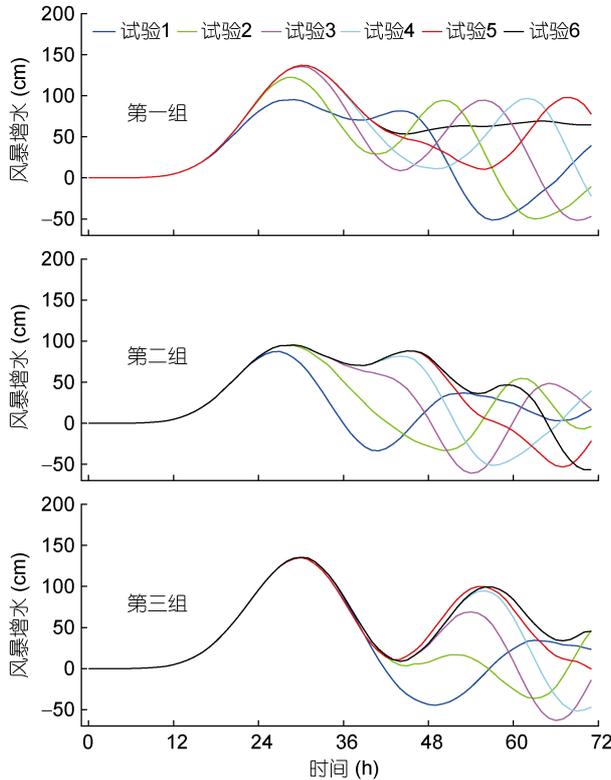


图 8 入海气旋型天气系统理想试验中黄河海港(HHG)验潮站风暴潮随时间变化曲线

Fig.8 Storm surge time curves of the HHG in the ideal test for the weather system of seaward cyclone

时间越早。可能原因是东北风持续时间越短, 转东风和东南风持续时间越长, 表面重力波能量传播方向偏北时间越长, 更易传入渤海, 形成风暴增水。风暴增水极值出现在转风后 23h 左右。东北风持续时间对风暴增水二次极值大小影响不大。

第二组理想试验结果显示(图 9), 黄、东海区域东风持续时间越短, 渤海沿岸风暴增水极值越大。可能原因是东北风和东风时间越短, 剩下东南风时间越长, 更容易将黄、东海海水及能量传入渤海, 形成风暴潮。同时发现试验 1(东风持续 6h)和试验 2(东风持续 12h)引起渤海风暴增水极值比单纯东南风(图 5)引起风暴增水极值大。可能的原因是在第二组试验中的东南风引起风暴增水与开始东北风引起风暴减水形成的海水振荡引起回升的潮位进行叠加, 使得总体风暴增水极值更大。风暴增水极值均出现在转东风后 23h 左右。

从第三组理想试验结果(图 9)显示, 东风时间越短, 出现风暴增水极值越大, 这与东风转东南风后, 东南风持续时间有关。风暴增水极值出现在转东风后约 23h, 与第二组试验结论相同。从第二组和第三组试验还可以发现东风持续时间影响二次风暴增水极值大小及出现时间。

表 3 登陆北上台风型天气系统理想试验

Tab.3 Ideal test for the weather system of northward typhoon after landing

试验组别	第一组持续时间(h)			第二组持续时间(h)			第三组持续时间(h)		
	东南风	东风	东北风	东南风	东风	东北风	东南风	东风	东北风
试验 1	12	24	36	12	6	54	24	6	42
试验 2	18	24	30	12	12	48	24	12	36
试验 3	24	24	24	12	18	42	24	18	30
试验 4	30	24	18	12	24	36	24	24	24
试验 5	36	24	12	12	30	30	24	30	12
试验 6	72	0	0	12	36	24	24	36	6

## 4 结论

分析渤、黄海区验潮站和浮标的实测数据, 结果表明: 在 1814 号台风“摩羯”和 1818 号台风“温比亚”影响期间, 当黄、东海区域以偏东风为主且风速较大, 渤海区域风速较小时, 渤海沿岸验潮站出现较大的风暴潮现象, 其原因是位于黄、东海区域的天气系统促使黄、东海水及能量传入渤海, 引起渤海沿岸的风

暴潮。

通过定义理想场景风速设置和改变风向, 设计理想试验, 并利用 FVCOM 进行数值模拟。结果显示位于黄、东海区域的东南向风引起的渤海沿岸风暴增水极值最大, 其次是东风, 且渤海沿岸风暴潮空间呈现整体一致变化趋势, 这与局地风引起风暴潮空间分布不同。

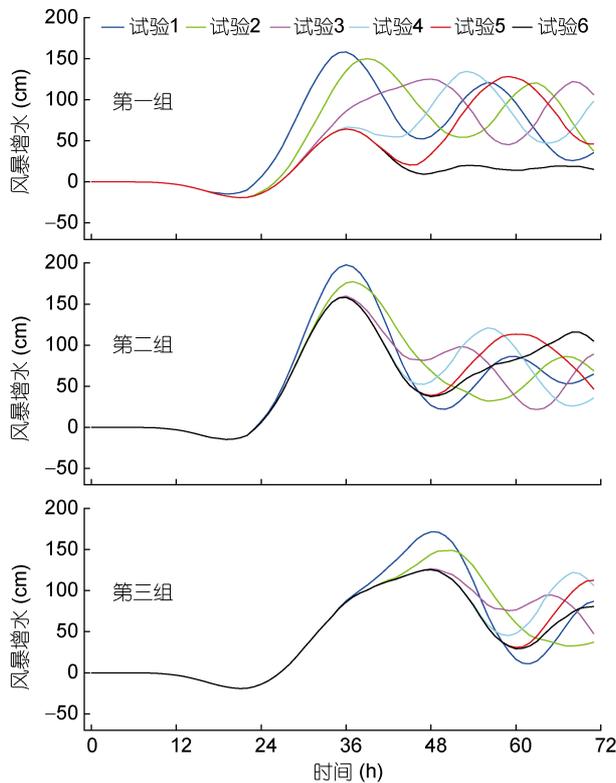


图9 登陆北上台风型天气系统理想试验中黄河海港验潮站风暴增水随时间变化曲线

Fig.9 Storm surge time curves of the HHG in the ideal test for the weather system of northward typhoon after landing

入海气旋型天气系统理想试验结果显示: 当位于黄、东海区域的东南风持续 24h 时, 渤海沿岸风暴增水极值最大, 东南风持续时间对风暴增水二次极值大小无影响。当东南风持续超过 24h, 再转东风, 东风持续时间长短对风暴增水极值无影响, 只与风暴增水二次极值大小和出现时间有关。当东南风持续时间不足 24h, 转东风, 东风持续时间对风暴增水极值大小和二次振荡增水均有影响, 且风暴增水极值小于东南风持续 24h 引起的风暴增水极值。

登陆北上台风型天气系统理想试验结果显示: 位于黄、东海区域的东北风持续时间越短, 引起渤海沿岸风暴增水极值越大且达到极值的时间越早, 东北风持续时间对风暴增水二次极值大小没有影响。转东风持续时间越短, 引起风暴增水极值越大, 且大于单独东南风引起渤海沿岸风暴增水极值。风暴增水最大值均出现在转东风后约 23h。转东风持续时间对风暴增水二次极值大小和出现时间均有影响。

通过实测分析和理想试验, 初步明确了位于黄、东海区域的不同天气系统对渤海风暴潮影响。获得结

论一方面有助于风暴潮机理研究, 另一方面对提高灾害预警报准确度和减少风暴潮造成灾害损失, 具有重要意义。

### 参 考 文 献

- 尹丽萍, 郭景松, 乔方利, 2018. 地形对陆架拦截波性质及机制的影响. 海洋与湖沼, 49(2): 263—270
- 史 剑, 周 林, 杨隆颖, 2013. 高风速下海洋飞沫水滴对拖曳系数的影响. 物理学报, 62(3): 039201.
- 冯兴如, 杨德周, 尹宝树, 2010. FVCOM 在龙口海域潮汐潮流模拟中的应用研究. 海洋科学, 34(6): 94—99
- 自然资源部北海局, 2019. 2018 年北海区海洋灾害公报. 青岛: 自然资源部北海局
- 孙文心, 冯士筌, 秦曾灏, 1979. 超浅海风暴潮的数值模拟(一)——零阶模型对渤海风潮的初步应用. 海洋学报, 1(2): 193—211
- 李 健, 刘清容, 阮成卿等, 2018. 南海风暴潮对风场和外围海水敏感性研究. 海洋科学, 42(2): 99—107
- 张 平, 孔 昊, 王代锋等, 2017. 海平面上升叠加风暴潮对 2050 年中国海洋经济的影响研究. 海洋环境科学, 36(1): 129—135
- 闻 斌, 汪 鹏, 万 雷等, 2008. 中国近海海域台风浪模拟试验. 海洋通报, 27(3): 1—6
- 董剑希, 付 翔, 吴 玮等, 2008. 中国海高分辨率业务化风暴潮模式的业务化预报检验. 海洋预报, 25(2): 11—17
- 谢 骏, 朱先德, 高大鲁等, 2018. 我国东部海域不同类型的登陆再发展变性台风的统计分析. 海洋与湖沼, 49(2): 251—262
- Chen C S, Liu H D, Beardsley R C, 2003. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 20(1): 159—186, doi: 10.1175/1520-0426(2003)020<0159:AUGFVT>2.0.CO;2
- Feng X R, Yin B S, Yang D Z *et al*, 2011. The effect of wave-induced radiation stress on storm surge during Typhoon Saomai (2006). Acta Oceanologica Sinica, 30(3): 20—26, doi: 10.1007/s13131-011-0115-6
- Hou Y J, Jiang X W, Liu Y H, 2015. China coastal seas under severe sea state: remote sensing and dynamics studies. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 33(5): 1101—1103, doi: 10.1007/s00343-015-4406-1
- Mo D X, Hou Y J, Li J *et al*, 2016. Study on the storm surges induced by cold waves in the Northern East China Sea. Journal of Marine Systems, 160: 26—39, doi: 10.1016/j.jmarsys.2016.04.002
- Muis S, Verlaan M, Winsemius H C *et al*, 2016. A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels. Nature Communications, 7: 11969, doi: 10.1038/ncomms11969
- Olabarrieta M, Warner J C, Kumar N, 2011. Wave-current interaction in Willapa Bay. Journal of Geophysical Research: Oceans, 116(C12): C12014, doi: 10.1029/2011JC007387
- Olbert A I, Nash S, Cunnane C *et al*, 2013. Tide-surge interactions and their effects on total sea levels in Irish coastal waters. Ocean Dynamics, 63(6): 599—614, doi:

- 10.1007/s10236-013-0618-0
- Powell M D, Vickery P J, Reinhold T A, 2003. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones. *Nature*, 422(6929): 279—283, doi: 10.1038/nature01481
- Willoughby H E, Darling R, Rahn M, 2006. Parametric representation of the primary hurricane vortex. part II: a new family of sectionally continuous profiles. *Monthly Weather Review*, 134(4): 1102—1120, doi: 10.1175/mwr3106.1
- Xu J L, Zhang Y H, Cao A Z *et al*, 2016. Effects of tide-surge interactions on storm surges along the coast of the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea. *Science China Earth Sciences*, 59(6): 1308—1316, doi: 10.1007/s11430-015-5251-y
- Zhong L J, Li M, Zhang D L, 2010. How do uncertainties in hurricane model forecasts affect storm surge predictions in a semi-enclosed bay? *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 90(2): 61—72, doi: 10.1016/j.ecss.2010.07.001

## STORM SURGE IN THE BOHAI SEA AFFECTED BY THE YELLOW SEA AND EAST CHINA SEA WEATHER SYSTEMS

LI Jian<sup>1, 2, 3, 4</sup>, HOU Yi-Jun<sup>1, 2, 5</sup>, MO Dong-Xue<sup>1, 2</sup>, LIU Qing-Rong<sup>4</sup>

(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*)

**Abstract** The coast of the Bohai Sea is a region of frequent storm surges. Previous studies focused on the impact of storm surge in the Bohai Sea caused by local wind, but often ignored the influence of the winds in the Yellow Sea and East China Sea. To study the influence, the measured data of the storm surges caused by TY1814 “Yagi” and TY1818 “Rumiba” and designed ideal tests using the FVCOM (Finite-Volume Coastal Ocean Model) were compared. The weather observation data and this analysis show that a large storm surge along the Bohai Sea would occur when winds are large in the Yellow Sea but small in the Bohai Sea. By setting the ideal test of zero wind speed in the Bohai Sea and constant wind speed in the Yellow Sea and East China Sea, the influence of different wind directions on the storm surge was explored. It was found that the maximum storm surge in the Bohai Sea caused by the southeast wind in the Yellow Sea and East China Sea. Meanwhile, by setting the ideal test for reference changing wind directions of cyclone to the sea and northward typhoon after landing. It was found that when the wind direction of the Yellow Sea and the East China Sea is southeast, the storm along the Bohai Sea coast would appear. The results provide a theoretical basis for the prediction of storm surge in the Bohai Sea and disaster prevention and mitigation. The findings can effectively reduce the phenomenon of underreporting in early warning and emergency and reduce coastal economic losses.

**Key words** Bohai Sea; storm surge; ideal test; cyclone to the sea; northward typhoon after landing