

# 夏季黄海中北部孤立气旋对渤海风暴潮影响模拟研究

梁森栋<sup>1,2</sup>, 傅赐福<sup>1,2\*</sup>

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 应用经验风场模型刻画夏季黄海中北部孤立气旋的风场, 利用数值模拟开展孤立气旋强度和移动路径对渤海内风暴潮的定量影响研究。结果表明: 受黄海中北部孤立气旋的影响, 渤海中3个海湾的最大风暴潮分别发生在各湾顶附近的葫芦岛站、黄骅站和潍坊站, 渤海海峡内最大风暴潮对气旋路径的敏感性较小。渤海沿岸潜在最大风暴潮与黄海中北部孤立气旋强度存在幂指数相关关系  $\tilde{S} = \tilde{V}_m^{2.391}$ 。初步分析得出造成渤海内海湾和海峡较大风暴潮的孤立气旋的移动关键区域分别为威海市东南附近海域、烟台市东部及威海市北部沿海海域、烟台市东部沿海海域、青岛市东部—威海市南部沿海海域。

**关键词:** 风暴潮; 孤立气旋; 渤海; 黄海; 数值模拟

**中图分类号:** P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)01-0001-09

## 1 引言

我国渤海沿岸易受温带天气系统影响而发生温带风暴潮, 其中孤立气旋是引发温带风暴潮的主要天气系统之一<sup>[1-3]</sup>。渤海沿岸7—9月天文潮较高, 温带气旋影响频繁<sup>[4-5]</sup>, 当引发的风暴潮与天文高潮叠加时, 容易出现达到警戒潮位的高潮位并造成灾害<sup>[2-3]</sup>。例如, 2008年8月22日, 一个黄海气旋由江苏连云港附近出海, 沿山东半岛南岸东北向移动<sup>[6]</sup>, 渤海内辽东湾、渤海湾和莱州湾均有潮位站出现约1.0 m的最大风暴增水, 致使天津和河北沿海发生风暴潮灾害<sup>[3]</sup>。

在类似路径的孤立气旋影响下, 渤海海峡和黄海北部的增水波传向渤海沿岸, 经常会导致渤海湾和辽东湾沿岸在已经转为离岸风时, 仍出现明显的风暴增水现象, 这种情形下采用经验预报难度较大。傅赐福等<sup>[7]</sup>分析了这类风暴潮过程, 使用开尔文波的沿岸传播模式解释了最大风暴潮发生时机, 但对于沿岸各区域的最大风暴潮未开展定量分析。

在全球气候变化的背景下, 我国沿海海平面处于上升趋势<sup>[8]</sup>, 近30 a影响我国北部海区的气旋数量也表现出增加的趋势<sup>[4]</sup>, 这势必增加渤海沿岸出现较高潮位并引发风暴潮灾害的几率。对此类孤立气旋导致的风暴潮开展量化研究, 有助于提高预报准确性, 减轻灾害影响。

本文应用一个经验风场模型刻画了黄海中北部出海的孤立气旋的风场, 开展了孤立气旋强度和移动路径对渤海风暴潮的定量影响研究, 归纳了渤海沿岸潜在最大风暴潮与黄海中北部孤立气旋强度的定量关系, 初步分析出造成渤海沿岸较大风暴潮的孤立气旋的移动关键区域。

## 2 夏季黄海中北部孤立气旋风场特征与模拟

黄海中北部出海的温带气旋主要源于江淮气旋和黄河气旋东移入海, 少数由台风北上后变性生成<sup>[4,9]</sup>。统计显示气旋主要的移动路径为东北行方

收稿日期: 2022-06-21; 修回日期: 2022-08-25。

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3900405)。

作者简介: 梁森栋(1984-), 男, 工程师, 博士, 主要从事风暴潮预警及研究。E-mail: liangsd@nmefc.cn

\*通信作者: 傅赐福(1983-), 男, 副研究员, 硕士, 主要从事风暴潮预警及研究。E-mail: fucf@nmefc.cn

向<sup>[10-11]</sup>,大致平行于山东半岛南岸岸线,气旋北侧的偏东风和东侧的偏南风均易造成渤海和黄海北部沿海发生大范围的风暴增水。

孤立气旋的移动速度对风暴潮有较大影响。使用韩国气象厅(Korea Meteorological Administration, KMA)发布的天气分析图分析了2019—2020年夏季10次黄海中北部出海的温带气旋,其移速为22~38 km/h,平均值为30 km/h。吴少华等<sup>[12]</sup>统计了黄海南部和东海北部温带气旋的移动速度,指出温带气旋移动速度在30 km/h左右时对江苏连云港的风暴潮影响最大。于福江等<sup>[3]</sup>例举了由黄海中北部孤立气旋引发的5次灾害性风暴潮事件,气旋中心的移速在25~40 km/h之间,平均值为32 km/h,与吴少华等<sup>[12]</sup>模拟最大风暴潮使用的温带气旋移速接近。

黄渤海海域夏季出海气旋强度较弱,中心气压多为990~1 000 hPa<sup>[4]</sup>,最大风力一般在6~8级,偶有气旋最大风力达到9~10级。该区域孤立气旋的最大风速半径一般为100~250 km。孤立气旋刚形成时,大风分布对称性较差,在气旋入海的移动过程中,海面风速分布的对称性有所改善<sup>[11]</sup>,近似呈圆形分布,因此对此类孤立气旋可采用圆形风场模型进行刻画。

大量研究提出并比较了用于模拟热带气旋的经验风场<sup>[1,13]</sup>。本文利用陈孔沚<sup>[13]</sup>提出的一个形式简单的经验风场进行模拟。公式为:

$$V(r) = V_m [2(Rr)^{3/2} / (R^3 + r^3)] \quad (1)$$

式中: $V(r)$ 为计算点的风速, $r$ 为计算点距气旋中心的距离; $V_m$ 为气旋内的最大风速; $R$ 为气旋的最大风速半径。

利用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的分析风场(Analysis Atmospheric Fields),选取了2020年数个形态较好的出海孤立气旋,提取其风速沿径向的分布数据。将选取的 $V$ 和 $r$ 分别使用 $V_m$ 和 $R$ 进行无量纲化,绘出的数据点较为均匀地分布在式(1)表示的曲线附近(见图1),可见式(1)可以有效代表此区域孤立气旋的风速分布特点。

在参考文献[13]和[14]中,将海面上风向与等压线之间的入流夹角设定为20°。当确定了每个时次气旋中心和计算点的坐标后,可以利用式(1)得到

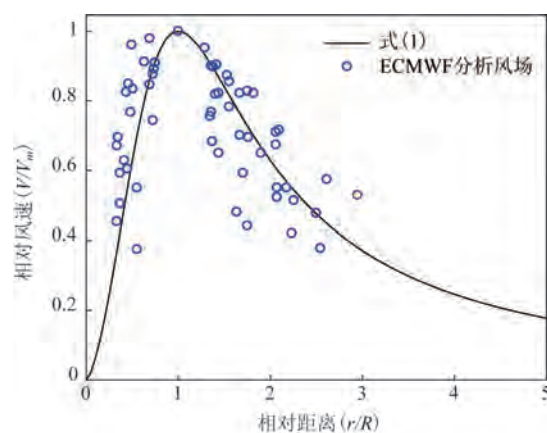


图1 ECMWF分析风场中气旋风速分布与式(1)对比  
Fig.1 Comparison of wind speed distribution in ECMWF analysis wind field and equation (1)

每个计算点的风速标量 $V$ ,再由式(2)计算每个时次单点的风速分量。

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -V(y - y_0)/r \\ V(x - x_0)/r \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $v_x$ 和 $v_y$ 分别为经度和纬度方向的风速分量; $(x_0, y_0)$ 为气旋中心坐标; $(x, y)$ 为计算点的坐标; $\theta$ 为入流夹角,取为20°。

### 3 风暴潮数值模型的构建和验证

为模拟黄海中北部孤立气旋对渤海的风暴潮影响,本研究利用了傅赐福等<sup>[15]</sup>建立的非结构三角网格。该网格中的海域包括渤海、黄海和东海部分区域,边界东至128°E,南至29.5°N。

计算使用 ADCIRC (an Advanced Circulation Model for Oceanic, Coastal and Estuarine Waters) 模式进行模拟,潮位边界采用潮汐数据集<sup>[16]</sup>中的8个主要分潮( $K_1$ 、 $K_2$ 、 $M_2$ 、 $N_2$ 、 $O_1$ 、 $P_1$ 、 $Q_1$ 、 $S_1$ );水体底部切应力采用阻力平方假设,经调试摩阻系数确定为0.001;海面风的切应力沿用GARRATT等<sup>[17]</sup>提出的曳力系数公式:

$$C_d = 0.001(0.75 + 0.067|V|) \quad (3)$$

式中: $C_d$ 为曳力系数; $V$ 为风速。

首先采用本模型模拟了渤海及附近沿岸主要潮位站2020年8月的天文潮,相应站点天文潮模拟的逐时平均绝对误差为7.5~18.5 cm(见表1)。

表 1 典型潮位站天文潮模拟误差

Tab.1 Astronomical tide simulation error of typical tide stations

潮位站	逐时平均绝对误差/cm
老虎滩	11.6
鲅鱼圈	16.1
葫芦岛	18.4
秦皇岛	14.7
曹妃甸	11.9
塘沽	15.7
黄骅	18.5
黄河海港	10.2
潍坊	13.7
龙口	8.7
蓬莱	7.5
北隍城	9.8
芝罘岛	9.0

利用上述率定后的模型和参数,采用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的CFSR(Climate Forecast System Reanalysis)逐小时再分析风场(网址:https://doi.org/10.5065/D6513W89)驱动,模拟了“080822”风暴潮过程。利用该再分析风场中的气压场和风场确定了不同时间孤立气旋的中心位置、最大风速以及最大风速半径,结果见图2和表2(时间均为北京时,下同),

图片采用M\_Map(网址:https://www.eoas.ubc.ca/~rich/map.html)绘制;使用经验风场构造了模型风场,再次模拟了本次温带风暴潮过程。黄海北部和渤海沿岸几个主要站点的风暴潮模拟值与实测值<sup>[3]</sup>的对比见图3,不同风场的模拟结果和误差见表3。

表 2 模拟“080822”风暴潮采用的气旋参数

Tab.2 Cyclone parameters used to simulate the "080822" storm surge

时刻	中心位置	最大风速/ (m/s)	最大风速 半径/km
21日23时	120.1°E, 35.7°N	15	170
22日02时	121.4°E, 36.1°N	15	170
22日05时	122.4°E, 36.6°N	18	170
22日08时	123.2°E, 36.9°N	24	180
22日11时	124.1°E, 36.8°N	22	220
22日14时	124.4°E, 36.8°N	18	220
22日17时	125.1°E, 36.8°N	15	220
22日20时	125.5°E, 37.0°N	12	250
22日23时	126.2°E, 37.0°N	10	250

两种风场驱动的模拟结果均较好地重现了风暴潮过程和量值。再分析风场模拟的最大风暴潮平均绝对误差为0.09 m,经验风场为0.09 m;经验风场的模拟结果在辽宁沿海潮位站的误差较大,其余区域与再分析风场结果接近。采用经验风场模拟孤立气旋可以得出与再分析风场精度相近的风暴潮模拟结果。

#### 4 孤立气旋移动路径和强度对渤海风暴潮影响

研究表明<sup>[3,10-11]</sup>,夏季在黄海中部出海的孤立气旋的出海位置多在山东烟台—江苏连云港之间,移动方向以东北行为主。本研究利用前述的数值模型和经验风场,模拟分析了黄海中部出海的孤立气旋在不同移动路径和强度下对渤海内风暴潮的影响。

在本研究中,假想孤立气旋移动路径为直线,移动方向分别选择NNE、NE和ENE,通过在南北方向平行移动构造一系列的气旋移动路径并绘制在图4中,假想的系列路径以烟台市芝罘岛(121.4°E,



图 2 “080822”气旋路径示意图

Fig.2 "080822" extratropical cyclone track



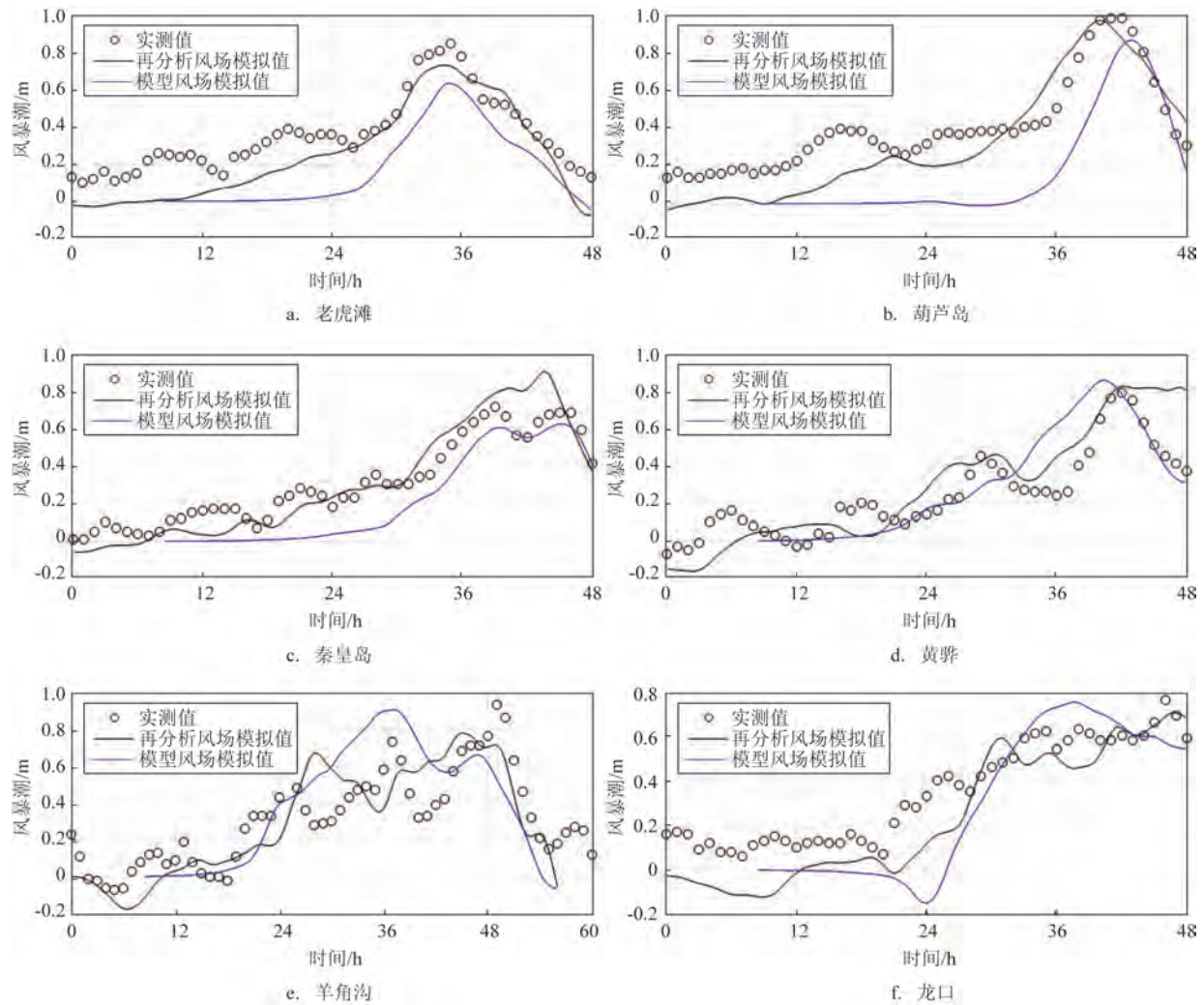


图3 “080822”风暴潮过程模拟与观测对比

Fig.3 Comparison of simulations and observations of "080822" storm surge process

表3 “080822”风暴潮过程模拟与观测对比

Tab.3 Comparison of simulations and observations of "080822" storm surge process

潮位站	风暴潮最大 观测值/m	风暴潮最大模拟值/m	
		再分析风场	模型风场
老虎滩	0.85	0.73	0.64
葫芦岛	0.99	0.98	0.87
秦皇岛	0.71	0.90	0.62
黄骅	0.79	0.83	0.86
羊角沟	0.93	0.78	0.90
龙口	0.76	0.70	0.75
平均绝对误差	—	0.09	0.09

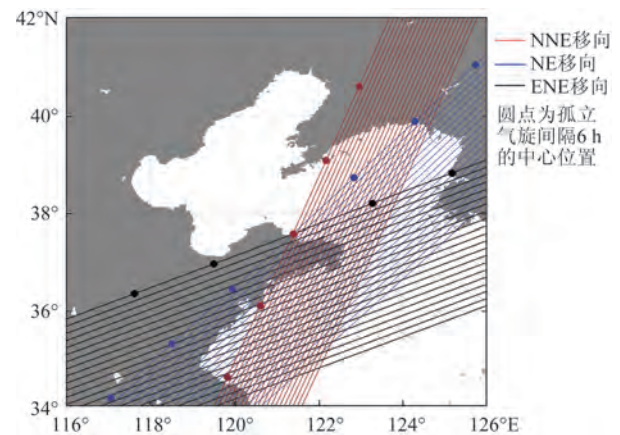


图4 假想孤立气旋移动路径示意

Fig.4 Hypothetical solitary cyclone tracks

37.6°N)为出海位置的北界限。假想气旋移动速度为30 km/h,最大风速半径为180 km,最大风速分别为6~10级风速的中值(见《GB/T 28591—2012》)。3种不同移向(NNE、NE和ENE)系列假想路径的南北平移间隔分别为0.2°、0.15°和0.15°。在图4中还绘出3种不同移向路径中孤立气旋间隔6 h的中心位置。系列气旋路径覆盖了黄海中北部出海孤立气旋移动的大部分区域。

#### 4.1 孤立气旋移动路径对最大风暴潮的影响

在不同强度的孤立气旋的影响下,渤海沿岸站点的最大风暴潮变化趋势类似。以最大风速为8级的假想孤立气旋为例,分析孤立气旋在不同移动路径下对渤海沿岸风暴潮的影响。在渤海内的辽东湾、渤海湾、莱州湾和渤海海峡中,共选择区域内或者临近的9个典型站点,分别为老虎滩、葫芦岛、秦皇岛、塘沽、黄骅、黄河海港、潍坊、蓬莱和北隍城。图5绘出了上述站点在不同气旋移动方向下最大风

暴潮随路径的偏移发生的变化。

数值模拟结果显示,在最大风速为8级的黄海中北部孤立气旋影响下,辽东湾沿海出现0.45~0.72 m的风暴增水,渤海湾出现0.77~1.23 m的风暴增水,莱州湾出现1.40~1.66 m的风暴增水,渤海海峡出现0.68~1.10 m的风暴增水。3个海湾中最大风暴潮分别发生在各湾顶附近的葫芦岛站、黄骅站和潍坊站,引起最大风暴潮的气旋移向主要为ENE向。

各站点在孤立气旋的影响下,最大风暴潮随孤立气旋的向南移动发生规律性变化,即辽东湾沿海的风暴潮呈现先增大后减小的变化规律,渤海湾和莱州湾整体逐渐减小。渤海海峡内风暴潮随孤立气旋路径的向南移动也呈现先增大后减小的变化规律,但量值变化较小。

#### 4.2 孤立气旋强度对最大风暴潮的影响

渤海沿海最大风暴潮的数值随孤立气旋的强度变化而变化。表4统计了代表站点在特定强度和

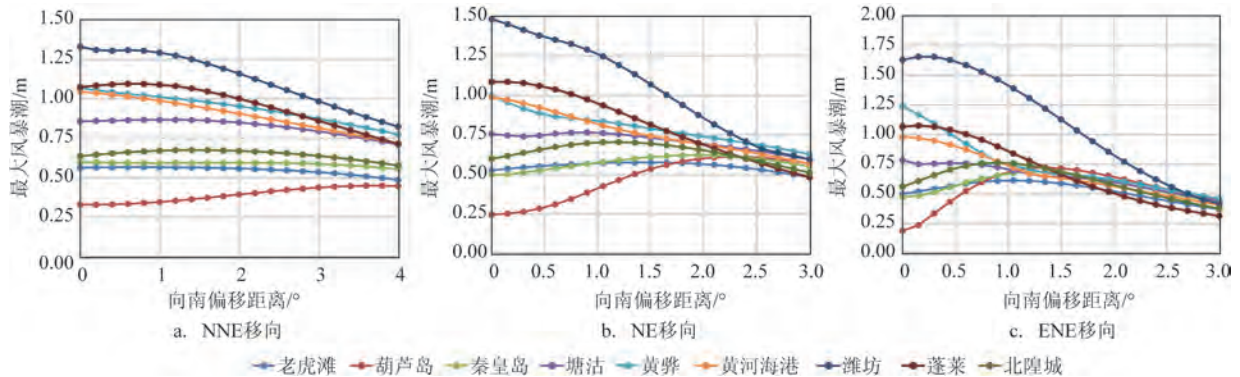


图5 不同移向假想孤立气旋最大风暴潮随路径向南偏移变化

Fig.5 The variation of maximum storm surge with the distance moving southward of hypothetical solitary cyclone with different moving directions

表4 代表站点受不同移向各级强度气旋影响的最大风暴潮(单位:m)

Tab. 4 The maximum storm surge of typical stations caused by cyclones with different tracks and wind speed(unit:m)

站名	6级			7级			8级			9级			10级		
	NNE	NE	ENE	NNE	NE	ENE	NNE	NE	ENE	NNE	NE	ENE	NNE	NE	ENE
老虎滩	0.20	0.21	0.22	0.35	0.36	0.38	0.57	0.58	0.61	0.87	0.88	0.94	1.27	1.28	1.35
葫芦岛	0.16	0.22	0.26	0.28	0.38	0.45	0.45	0.61	0.72	0.69	0.94	1.11	1.00	1.37	1.62
秦皇岛	0.22	0.22	0.25	0.38	0.39	0.43	0.60	0.62	0.69	0.91	0.96	1.05	1.31	1.39	1.53
塘沽	0.31	0.27	0.28	0.54	0.47	0.48	0.87	0.77	0.78	1.33	1.18	1.22	1.92	1.72	1.79
黄骅	0.39	0.36	0.43	0.67	0.62	0.76	1.07	1.00	1.24	1.63	1.53	1.91	2.33	2.21	2.76
黄河海港	0.37	0.35	0.34	0.65	0.61	0.60	1.04	0.99	0.98	1.60	1.53	1.51	2.32	2.22	2.19
潍坊	0.48	0.54	0.60	0.83	0.93	1.04	1.33	1.48	1.66	2.04	2.25	2.50	2.95	3.23	3.57
蓬莱	0.38	0.39	0.38	0.67	0.67	0.66	1.10	1.09	1.08	1.70	1.67	1.66	2.47	2.43	2.40
北隍城	0.24	0.25	0.28	0.42	0.44	0.48	0.68	0.70	0.76	1.04	1.08	1.16	1.52	1.56	1.68

移向的孤立气旋的作用下,由系列平移路径模拟得到的风暴潮的最大值。

模拟数据显示,各站点的最大风暴潮均随风级增强而增加。利用式(4)和(5)将各个站点每种情景下的最大风暴潮和对应的孤立气旋的最大风速无量纲化,将其绘制在图6中,并拟合得到无量纲的最大风暴潮 $\tilde{S}$ 与最大风速 $\tilde{V}_m$ 的关系(见式6)。

$$\tilde{S} = S(i)/S(10) \quad (4)$$

$$\tilde{V}_m = V_m(i)/V_m(10) \quad (5)$$

$$\tilde{S} = \tilde{V}_m^{2.391} \quad (6)$$

式中: $\tilde{S}$ 为无量纲的最大风暴潮; $S(i)$ 和 $S(10)$ 分别为*i*级和10级风力孤立气旋影响的最大风暴潮(单位:m); $\tilde{V}_m$ 为无量纲的最大风速; $V_m(i)$ 和 $V_m(10)$ 分别为构造的*i*级和10级风力孤立气旋的最大风速(单位:m/s)。

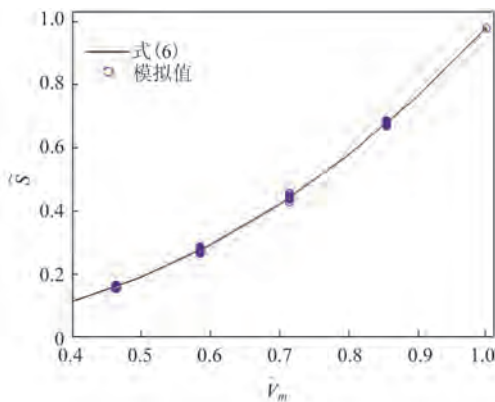


图6 最大风暴潮 $\tilde{S}$ 与孤立气旋最大风速值 $\tilde{V}_m$ 关系

Fig.6 Relationship between of the maximum storm surge and the maximum wind speed of solitary cyclone

### 4.3 孤立气旋移动关键区域

由上述分析可知,渤海沿海在特定的孤立气旋路径的影响下,将发生严重的风暴潮。从每种移向的系列平移路径中选出造成最严重风暴潮的路径,将其绘制在一起,其重合区域可以提示对指定区域造成较大风暴潮影响的孤立气旋移动关键区域。

对渤海的辽东湾、渤海湾、莱州湾和渤海海峡分别选用湾顶和海峡中间的站点为代表点,选择的4个代表站点分别为葫芦岛、塘沽、潍坊和北隍城。仍以最大风速为8级的假想孤立气旋为研究对象,选出每种移向系列平移路径中最大风暴潮大于该系列极值的95%的路径,将其绘制在图7中,用红色

线条标注其重合区域,并在图中标识出每条路径下发生最大风暴潮时孤立气旋的中心位置。

从图7可见,造成辽东湾、渤海湾、莱州湾和渤海海峡较大风暴潮的孤立气旋移动关键区域分别为威海市东南附近海域、烟台市东部及威海市北部沿海海域、烟台市东部沿海海域、青岛市东部—威海市南部沿海海域。

造成辽东湾较大风暴潮的孤立气旋的移动关键区域的中心位置约为(122.7°E, 36.7°N),在ENE、NE和NNE移向下,辽东湾葫芦岛站出现最大风暴潮距气旋中心经过此位置的时间间隔分别为7.3 h、8.8 h和5.2 h。孤立气旋中心在影响辽东湾的关键区域时,其北侧最大风速位置与渤海海峡中部纬度相近,受气旋北部和东部大风的影响,产生的增水波先传到渤海海峡,再传至辽东湾沿海。考虑到波动传播距离在黄海北部和渤海内分别约为280 km和210 km,黄海北部平均水深约为40 m,渤海内平均水深约为25 m,利用重力波传播速度公式<sup>[7]</sup>,可估算出最大风暴潮传播至葫芦岛站所需时间约为7.7 h,接近前述统计的时间间隔。

造成渤海湾较大风暴潮的孤立气旋的移动关键区域的中心位置约为(122.0°E, 37.5°N),在ENE、NE和NNE移向下,渤海湾塘沽站出现最大风暴潮距气旋中心经过此位置的时间间隔分别为4.5 h、5.1 h和3.4 h。孤立气旋中心在影响渤海湾的关键区域时,其东北象限的大风中心位置(以最大风速半径对应东北向位置计)恰好在黄海北部海域的中心位置附近,气旋北部和东部大风均可以对该海域造成最大的风拖曳力影响。增水波经渤海海峡传播至渤海湾沿岸,以渤海海峡—塘沽站的距离270 km估算,传播时间约为4.8 h,接近前述统计的时间间隔。

造成莱州湾较大风暴潮的孤立气旋的移动关键区域的中心位置约为(121.5°E, 37.5°N),在ENE、NE和NNE移向下,莱州湾潍坊站出现最大风暴潮距气旋中心经过此位置的时间间隔分别为2.1 h、3.4 h和1.0 h。孤立气旋中心在影响莱州湾的关键区域时,距离潍坊站仅为200 km左右,与假设的最大风速半径180 km接近,气旋西北象限的东北风会直接影响莱州湾并导致此处发生风暴潮。孤立气旋中心在关键区域时,西北象限大风中心位置(以最大风速半径对应西北向位置计)距离潍坊站约



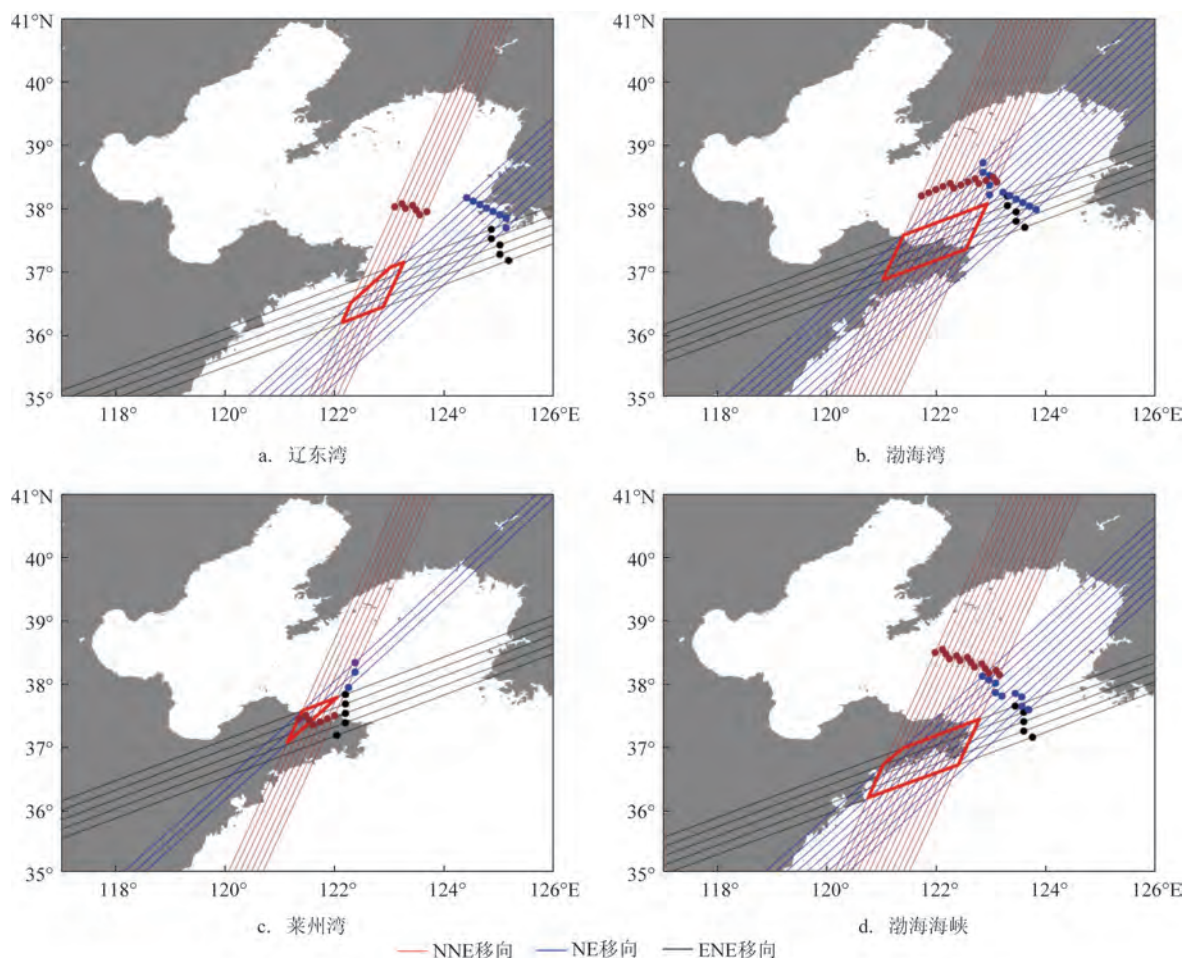


图7 引起渤海各区域较大风暴潮的孤立气旋移动关键区域及发生最大风暴潮时孤立气旋中心位置

Fig.7 Key areas of solitary cyclone tracks causing large storm surges in the Bohai Sea and the locations of solitary cyclones center when the maximum storm surges occurs

为170 km,最大风暴潮到达潍坊站需要的时间约为3.0 h,接近ENE和NE移向路径统计的传播时间。NNE移向的孤立气旋由于其西北象限大风区出海后距离莱州湾更近,在出海时间前后即可造成莱州湾出现最大风暴增水。

造成渤海海峡较大风暴潮的孤立气旋的移动关键区域的中心位置约为(121.8°E, 36.9°N),在ENE、NE和NNE移向下,渤海海峡北隍城站出现最大风暴潮距气旋中心经过此位置的时间间隔分别为5.7 h、6.1 h和6.0 h。假设孤立气旋中心在影响渤海海峡的关键区域时,其东北侧的大风导致了最大风暴潮,并经辽东半岛东南岸向渤海海峡传播,则传播距离约为420 km,估算出的最大风暴潮到达北隍城站需要的时间约为5.9 h,亦与前述统计的时间间

隔较接近。

回顾“080822”风暴潮过程可以发现,本次过程的孤立气旋恰好经过了影响渤海海峡和辽东湾的关键区域,对照此位置孤立气旋的最大风速值(约为9级风),查询表4得到在该强度孤立气旋影响下,辽东湾和渤海海峡主要站点的最大风暴潮值为0.94~1.16 m,与实际观测到的风暴潮数值相近。

由于模拟中采用的孤立气旋系列路径互相重叠的区域有限,故本研究中标记出的关键区域有一定的局限性。

## 5 结论

本文开展了夏季黄海中部孤立气旋强度和

移动路径对渤海内风暴潮的定量影响研究。结论如下:

(1)夏季黄海中部孤立气旋对称性较好,其风场可以使用圆形经验风场模型进行刻画。本文使用  $V(r) = V_m [2(Rr)^{3/2} / (R^3 + r^3)]$  来模拟孤立气旋的风速分布。采用该经验风场模拟典型孤立气旋导致的渤海沿海温带风暴潮过程,模拟精度与采用再分析风场模拟的精度相近。

(2)受黄海中部孤立气旋的影响,渤海中3个海湾的最大风暴潮分别发生在各湾顶附近的葫芦岛站、黄骅站和潍坊站,引起最大风暴潮的气旋移向主要为ENE向。各站点在孤立气旋的影响下,最大风暴潮随孤立气旋的向南移动发生规律性变化。渤海海峡内最大风暴潮对气旋路径的敏感性较小。

(3)各站点的最大风暴潮都随风力的增强而增加。统计各站点在每种情景下的潜在最大风暴潮,并与孤立气旋的最大风速进行相关分析,拟合得到无量纲的最大风暴潮  $\tilde{S}$  与最大风速  $\tilde{V}_m$  的关系为  $\tilde{S} = \tilde{V}_m^{2.391}$ 。

(4)综合每种孤立气旋移向中引发较大风暴潮的路径分布区域,初步分析出造成渤海沿岸较大风暴潮的孤立气旋移动关键区域,并使用重力波传播速度公式对渤海沿岸最大风暴潮的发生时间予以验证。造成辽东湾、渤海湾、莱州湾和渤海海峡较大风暴潮影响的孤立气旋移动关键区域分别为威海市东南附近海域、烟台市东部及威海市北部沿海海域、烟台市东部沿海海域、青岛市东部—威海市南部沿海海域。

## 参考文献:

- [1] 于福江,傅赐福,郭洪琳,等.现代风暴潮预报技术及应用[M].北京:科学出版社,2020.  
YU F J, FU C F, GUO H L, et al. Modern storm surge prediction technology and its application[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [2] 吴少华,王喜年,戴明瑞,等.渤海风暴潮概况及温带风暴潮数值模拟[J].海洋学报,2002,24(3): 28-34.  
WU S H, WANG X N, DAI M R, et al. The general status of storm surges and the simulation of extratropical storm surges in the Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(3): 28-34.
- [3] 于福江,董剑希,李明杰,等.中国温带风暴潮灾害史料集[M].北京:海洋出版社,2018.  
YU F J, DONG J X, LI M J, et al. Collection of extratropical storm surge disasters historical data in China[M]. Beijing: China Ocean Press, 2018.
- [4] 秦昕,魏立新.中国近海温带气旋的时空变化特征[J].海洋学报,2015,37(1): 43-52.  
QIN T, WEI L X. The statistic and variance of cyclones entering coastal waters of China in 1979-2021[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(1): 43-52.
- [5] 吕爱民,杨柳妮,黄彬,等.中国近海大风的天气学分型[J].海洋气象学报,2018,38(1): 43-50.  
LYU A M, YANG L N, HUANG B, et al. Classification of synoptic patterns for China offshore gales[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(1): 43-50.
- [6] 徐明娥,赵玉洁,刘建军,等.滨海新区一次气旋型风暴潮的成因分析[J].安徽农业科学,2013,41(5): 2141-2142, 2171.  
XU M E, ZHAO Y J, LIU J J, et al. Analysis of a storm surge in Binhai new area[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(5): 2141-2142, 2171.
- [7] 傅赐福,于福江,吴少华,等.气旋引发渤海异常增水特征研究[J].海洋预报,2018,35(1): 37-43.  
FU C F, YU F J, WU S H, et al. Study on the characteristic of abnormal storm surge caused by cyclone in the Bohai sea[J]. Marine Forecasts, 2018, 35(1): 37-43.
- [8] 王慧,刘秋林,李欢,等.海平面变化研究进展[J].海洋信息,2018,33(3): 19-25, 54.  
WANG H, LIU Q L, LI H, et al. Latest research and progress on sea level change[J]. Marine Information, 2018, 33(3): 19-25, 54.
- [9] 王冰,王娜.影响山东海域的温带气旋的年代际变化分析[J].云南大学学报(自然科学版),2014,36(S1): 86-94.  
WANG B, WANG N. Interannual and decadal variations of tropical cyclone on Shandong adjacent waters[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2014, 36(S1): 86-94.
- [10] 王黎娟,张海燕,陈爽.4-6月江淮流域不同尺度温带气旋发展率及移动特征[J].大气科学学报,2019,42(3): 399-408.  
WANG L J, ZHANG H Y, CHEN S. Development rate and movement characteristics of extratropical cyclones at different scales in the Changjiang-Huaihe River Valley from April to June [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2019, 42(3): 399-408.
- [11] 宋萍.春夏黄河气旋发展机制及黄渤海影响对比研究[D].南京:南京信息工程大学,2015.  
SONG P. A comparative study of development mechanism of Yellow River cyclone and impact of Huang-Bohai Sea between summer and spring[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2015.
- [12] 吴少华,王喜年,于福江,等.连云港温带风暴潮及可能最大温带风暴潮的计算[J].海洋学报,2002,24(5): 8-18.  
WU S H, WANG X N, YU F J, et al. Extratropical storm surge and calculation of probable maximum extratropical storm surge in Lianyungang[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(5): 8-18.
- [13] 陈孔沫.一种计算台风风场的方法[J].热带海洋,1994,13(2): 41-48.  
CHEN K M. A computation method for typhoon wind field[J].



- Tropic Oceanology, 1994, 13(2): 41-48.
- [14] 于福江, 王喜年, 宋珊, 等. 渤海“9216”特大风暴潮过程的数值模拟[J]. 海洋预报, 2000, 17(4): 9-15.
- YU F J, WANG X N, SONG S, et al. The numerical simulation of storm surge in Bohai Sea caused by tropical storm Polly[J]. Marine Forecasts, 2000, 17(4): 9-15.
- [15] 傅赐福, 付翔, 吴少华, 等. 渤海风暴减水特征及其对深水航路影响的数值模拟[J]. 海洋学报, 2014, 36(3): 30-38.
- FU C F, FU X, WU S H, et al. Numerical simulation study on deepwater channel influenced by negative storm surge and its features in Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(3): 30-38.
- [16] LE PROVOST C, LYARD F, MOLINES J M, et al. A hydrodynamic ocean tide model improved by assimilating a satellite altimeter-derived data set[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(C3): 5513-5529.
- [17] GARRATT J R. Review of drag coefficients over oceans and continents[J]. Monthly Weather Review, 1977, 105(7): 915-929.

## Numerical simulation of the impact of solitary cyclones in the central and northern Yellow Sea on the storm surge in the Bohai Sea in summer

LIANG Sendong<sup>1,2</sup>, FU Cifu<sup>1,2\*</sup>

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In this paper, the empirical wind field model is applied to describe the solitary cyclones in the central and northern Yellow Sea in summer, and the numerical simulation is used to carry out a quantitative study on the impact of the solitary cyclones' intensity and tracks on the storm surge in the Bohai Sea. The results show that due to the solitary cyclones in the central and northern Yellow Sea, the largest storm surge in the three bays of the Bohai Sea occurs near Huludao, Huanghua and Weifang stations respectively, and the largest storm surge in the Bohai Strait is less sensitive to the cyclone tracks. A power exponential function is found to represent the potential maximum storm surge in the Bohai Sea due to the solitary cyclones in the central and northern Yellow Sea:  $\tilde{S} = \tilde{V}_m^{2.391}$ . It is preliminarily analyzed that the key areas of solitary cyclone tracks that cause large storm surges in the Bohai Sea are the waters near the southeast of Weihai City, the eastern coastal waters of Yantai City and the northern coastal waters of Weihai City, the eastern coastal waters of Yantai City, and the coastal waters from eastern part of Qingdao City to the southern part of Weihai City.

**Key words:** storm surge; solitary cyclone; Bohai Sea; Yellow Sea; numerical simulation