

# 台风“利奇马”对长江口水通量影响的数值模拟研究

姚鼎<sup>1</sup>, 李钺<sup>2</sup>, 张凤林<sup>1</sup>, 葛建忠<sup>3</sup>, 张洪生<sup>1</sup>, 郭文云<sup>1\*</sup>

(1.上海海事大学海洋科学与工程学院,上海 201300; 2.上海市海洋监测预报中心,上海 200062; 3.华东师范大学河口海岸学国家重点实验室,上海 200062)

**摘要:** 在台风等极端天气影响下,河口水通量可能会在短时间内发生强烈变化。利用无结构有限体积海岸海洋模型 FVCOM,研究了1909号台风“利奇马”对长江口水通量及分流比的影响。结果表明:台风“利奇马”可造成南槽持续30 h的净向陆水通量;受台风影响,北支、北港、北槽和南槽4个入海口台风的入海净水通量都呈现相似的减小—增大—减小—恢复的变化规律,总净入海通量也呈现类似规律,且变化幅度可超过60%;台风总体上增大了北侧支汊的净分流比,减小了南侧支汊的净分流比。

**关键词:** FVCOM; 台风影响; 水通量; 分流比; 长江口

**中图分类号:** P444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)04-0066-11

## 0 引言

台风是发端于热带海洋上的强烈非线性气旋系统,对海洋水动力和热动力具有重要影响<sup>[1]</sup>。当台风接近陆地时,强烈的风速和伴随的强降雨不仅会引发风暴潮、风暴浪和洪水等自然灾害<sup>[2,3]</sup>,严重威胁沿海地区居民的生活安全和经济生产,还会引起海岸水沙动力的强烈扰动,导致海岸环境发生剧烈变化<sup>[4-5]</sup>。例如,有研究显示台风可以减弱(约50%)洪季高径流量给长江口带来的强烈冲刷<sup>[6]</sup>,这是维持长江口地形稳定的重要动力因素。

然而,受制于台风期间恶劣的观测条件,对极端天气影响下河口海岸动力过程的研究一直进展缓慢。台风所引起的盐水入侵直接关系着河口城市的取水安全,而其引起的泥沙输运又直接关系着河口航运安全,最近有关这两方面的研究已有较多进展。LI等<sup>[5]</sup>指出即使在高径流量( $\approx 24\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ )时,台风过境引起的风暴潮和向陆 Ekman 输运仍然能导致盐

生不同方向的风应力作用,并导致相反的增减水效应,进而改变盐度输运过程。台风对河口沉积物和悬浮物质也会产生深远影响。REN等<sup>[8]</sup>认为即使台风离海岸地区较远,其产生的涌浪也能冲刷海岸地区的底床沉积物,造成海域地形的快速变化。王浩斌等<sup>[9]</sup>认为台风风速以及引起的波高变化是促使悬沙浓度短期变化的主要因素,但在长时间尺度中,风级越大,相应的悬沙浓度变化越明显。

除上述局地影响之外,台风也会造成河口环流的显著调整,从而影响物质输运过程,进而改变河口或河口汊道的水通量和分流比,然而对此方面的研究却不多见。KUANG等<sup>[10]</sup>将台风分为上升期、稳定期、降落期3个阶段,研究得出台风“凤凰”(1415)增强了长江口北支的涨潮通量,同时显著减少了落潮通量。实际上,河口特别是分汊河口的水通量对维持河口航道水深、保护河口湿地生态和推动河口地形的长期演变等具有重要作用。在潮汐的影响下,分汊口会产生纵向环流,其与非感潮河段汊口动力存在明显不同<sup>[11-12]</sup>。在台风这种强烈非

收稿日期: 2022-12-25。

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(41906143);上海市青年科技英才扬帆计划项(19YF1418500);国家自然科学基金(51679132);上海市科委地方高校基地能力建设项目(17040501600、21ZR1427000);上海市“全渗透”深远海离岸能源动力前沿科学研究基地。

作者简介: 姚鼎(1999-),男,硕士,主要从事河口海岸水动力学研究。E-mail: ding572911737@163.com

\*通信作者: 郭文云(1989-),男,讲师,博士,主要从事河口海岸水沙动力和海洋灾害预报技术研究。E-mail: wyguo@shmtu.edu.cn

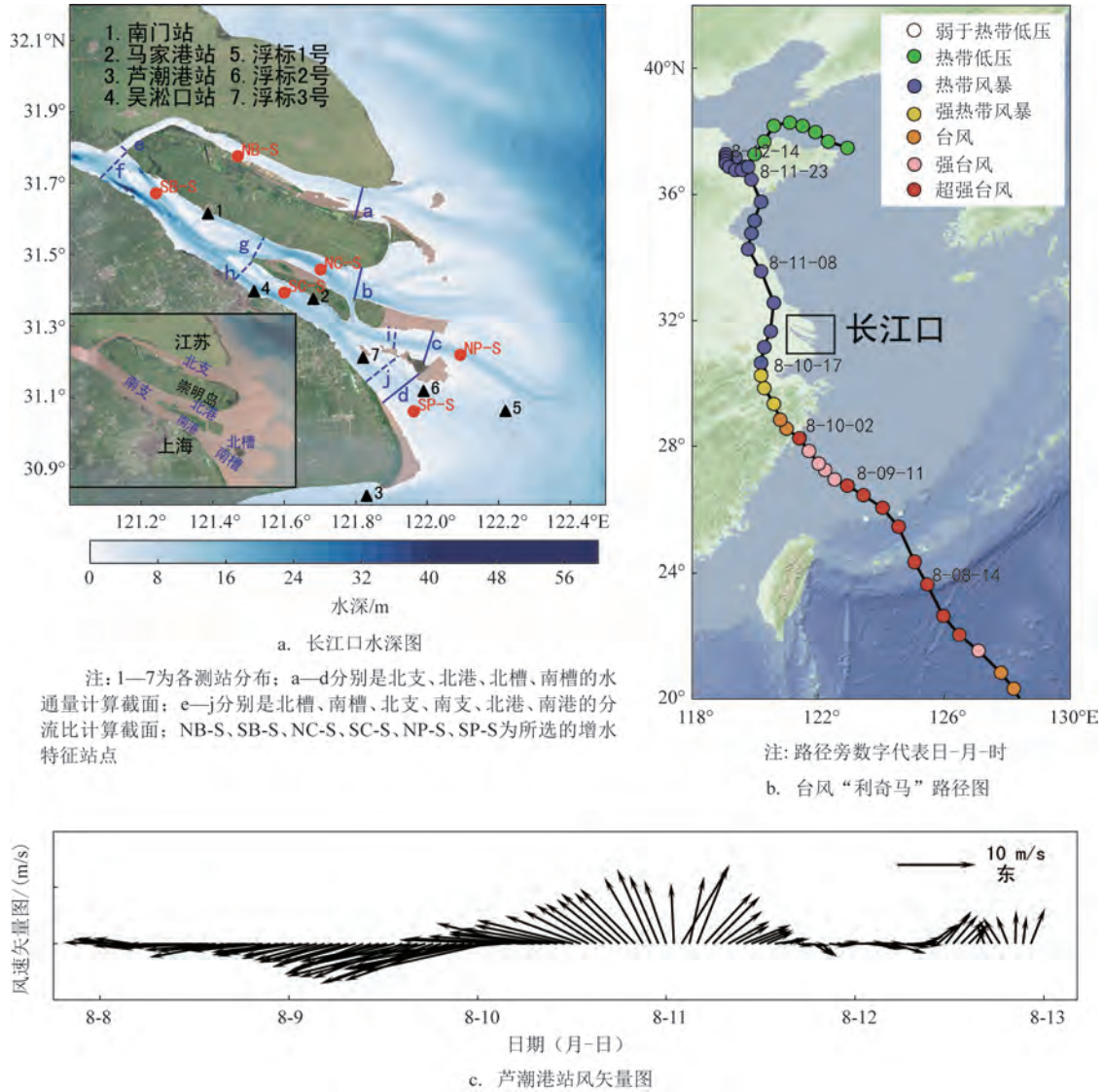


图1 台风路径及长江口概况图

Fig.1 Map of typhoon track and the Changjiang Estuary

线性系统的影响下,分汊河口的水通量和分流比可能会在短时间内发生剧变,导致水沙输运路径发生显著变化。

综上,在极端天气影响下河口海岸动力过程研究方面仍存在很多待深入的问题,如分汊河口的水通量变化等。本文以长江口为例,基于国际先进的无结构有限体积海岸海洋模型(Finite-Volume Coastal Ocean model, FVCOM)建立长江口风暴潮模型,选择近年来显著影响长江口的超强台风“利奇马”过程,对其影响下的长江口主要汊道的水通量变化过程进行详细分析,探索台风期间分汊河口

的水通量和分流比变化规律。

## 1 研究区域及台风“利奇马”概况

### 1.1 长江口概况

长江口位于中国上海与江苏的交界处(见图1a),是径流量世界第三的河流——长江的出海口,年径流量达 $9.0 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。河口地形复杂,支汊众多,呈现“三级分汊,四口入海”的格局,在崇明岛分为北支和南支,南支往下在长兴岛分为北港和南港,南港往下在九段沙分为北槽和南槽。长江河口属于

中等潮差河口,海域潮差变化范围为 1.9~3.9 m,其中北支的喇叭口形状(上端最窄仅 1 km)使得潮差得以增强,最大可达 5.95 m<sup>[13-14]</sup>。长江口平均每年遭受 2~3 次台风,据《中国海洋灾害公报》显示,近 5 年台风风暴潮每年会在长江口造成 4~7 次危害,经济损失高达上百亿元,占海洋总损失的 95% 以上,引起的航道淤淤量可占年回淤总量的 50%<sup>[15-16]</sup>。长江河口特殊且复杂的地形地貌加上其位处中国发达地区,探究台风对河口潮流水动力的影响对该地区的气象预报、河口规划、防灾减灾等具有重要意义。

## 1.2 台风“利奇马”概况

2019 年第 9 号台风“利奇马”(1909)于 2019 年 8 月 4 日 14 时(北京时,下同)在菲律宾以东洋面上生成(见图 1b),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 1 天内连跳三级记录。10 日 01 时 45 分维持超强台风级在浙江台州温岭城南沿海登陆,在浙江境内滞留达 20 h,登陆时台风近中心最大风力为 16 级。登陆后台风继续向西北偏北方向移动,并于 11 日 21 时左右进入黄海并再次登陆山东<sup>[17]</sup>。

台风“利奇马”的强度在 1949 年以来登陆我国大陆地区的所有台风中排名第五。其特点是持续时间长,影响范围广,台风在陆地的滞留时间长达 44 h,100 mm 以上台风暴雨覆盖的国土面积达 36.1 万平方公里,所引起的降雨强度在浙江排历史第二。台风“利奇马”期间,浙江省海门站观测到的最大增水达 312 mm,受台风影响,长江口海域吴淞站和芦潮港站也分别观测到超过 100 mm 的风暴增水(最大风暴增水分别为 118 mm 和 102 mm)。台风“利奇马”造成的直接经济损失达 515.3 亿元,导致 1 402.4 万人受灾<sup>[18-20]</sup>。

## 2 数值模型

### 2.1 模型建立

采用 FVCOM 建立长江口高分辨率三维海洋模型。模型计算区域覆盖长江口、杭州湾、舟山群岛、东海内陆架及邻近海域(见图 2),河流上边界位于潮区界大通附近。开边界处分辨率约为 15 km,徐六泾一口门区域的地形岸线十分复杂,模型在此处

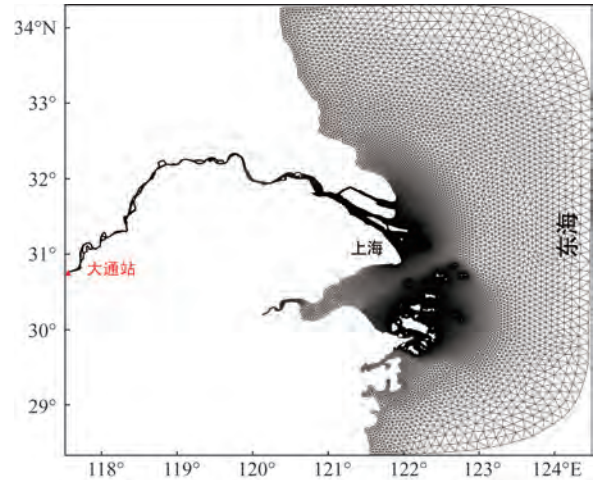


图2 模型计算范围及网格

Fig.2 Model domain and grid

采用最高达 150 m 的网格分辨率。计算区域共分成 50 098 个节点,94 345 个单元。模型水深采用标准海图数据。通过将海图数字化,并将每幅图的基面都调整统一到平均海平面,最后再插值到模型网格上。模型外海开边界受 13 个天文潮驱动( $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 、 $N_2$ 、 $K_2$ 、 $P_1$ 、 $Q_1$ 、 $M_4$ 、 $MS_4$ 、 $M_f$ 、 $M_m$  和  $MN_4$ ),河流边界由大通站实测逐日径流量得出。设计两个模拟实验,以探讨台风“利奇马”对长江水通量的影响。实验一计算了 2019 年 8 月真实台风影响下的长江口水动力过程;为了定量计算台风的影响,实验二在模型设置中不考虑风场的作用,其他动力因素不变。

### 2.2 水通量和分流比的计算

水体单宽通量计算公式为:

$$\vec{q}_r = \int_{-1}^0 (h + \zeta) \vec{V} d\sigma \quad (1)$$

式中: $h$  是水深; $\zeta$  是水位; $\vec{V}$  是水体速度矢量; $\sigma$  是相对深度,表层为 0,底层为 -1。将水体输运进行断面面积积分可得到断面水体通量为:

$$F_q = \iint u dA = \int_0^L \int_{-1}^0 (h + \zeta) u d\sigma dy \quad (2)$$

式中: $A$  是断面面积,会随着潮汐变化; $L$  是河道宽度; $u$  是垂直截面方向流速。

分流比为两汉流量占总流量的百分比,河流汉道分流比计算公式为:



$$\eta_m = \frac{Q_m}{Q_m + Q_n} \quad (3)$$

式中:  $Q$  为汊道水通量;  $m, n$  表示两个支汊。

### 2.3 模型验证

长江口 FVCOM 模型已经经过多年的检验,并广泛应用于长江口水沙动力和生态环境动力的研究中<sup>[21-25]</sup>,基于该模型建立的风暴潮概率预报系统也对台风期间的风暴增水过程进行了详细检验<sup>[2, 26]</sup>。本文根据上海市海洋监测预报中心提供的观测数据,针对台风期间的水动力过程进行进一步检验,结果见图3。

从图3可以看出,模型较好地模拟了台风“利奇马”期间长江口的潮位、增水和流速的变化过程。采用相关系数  $r$  和均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)定量判断模型对水位和流速过程的模拟精度。计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

$$\text{RMSE}(x, h) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (hx_i - y_i)^2} \quad (5)$$

式中:  $x_i, y_i$  分别为模拟值和实测值;  $\bar{x}, \bar{y}$  分别为模拟值和实测值的均值;  $n$  为样本个数。

长江口 FVCOM 模型模拟的均方根误差和相关系数检测结果见表1。从表中可以看出,模拟水位与实测水位的相关系数都在0.9以上,均方根误差在0.40 m左右,总体误差较为合理。增水过程与实测增水过程的相关系数也在0.65以上,均方根误差在0.15 m左右,表明模型能准确合理地模拟出台风过程下的增水变化。模型流速结果与实测表层流速的相关系数都在0.8以上,浮标1号、2号和3号的均方根误差分别为0.38 m/s、0.47 m/s 和 0.29 m/s。

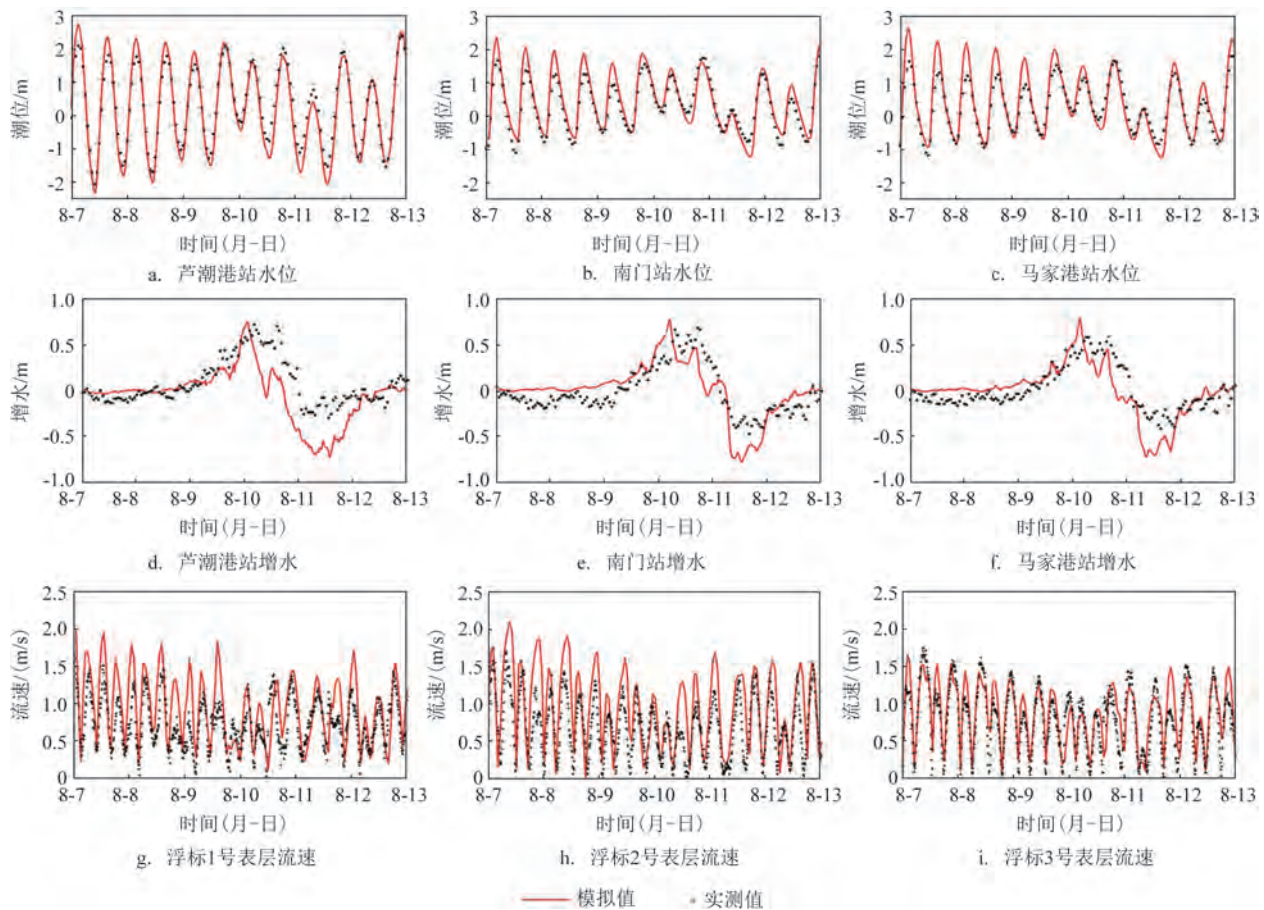


图3 模型验证

Fig.3 Model validation

表1 均方根误差和相关系数检测结果

Tab.1 Root mean square error (RMSE) and correlation coefficient ( $r$ ) test results

对比要素	站点	RMSE	$r$
水位	芦潮港站	0.34 m	0.99
	南门站	0.36 m	0.96
	马家港站	0.42 m	0.96
增水	芦潮港站	0.17 m	0.65
	南门站	0.15 m	0.71
	马家港站	0.14 m	0.70
流速	浮标1号	0.38 m/s	0.84
	浮标2号	0.47 m/s	0.80
	浮标3号	0.29 m/s	0.83

模型对浮标3号的模拟误差较小,但对浮标2号的模拟误差较大。总体误差也较为合理。

### 3 结果分析

基于高分辨率FVCOM数值模型,模拟了在台风“利奇马”期间有台风作用和无台风作用两种情形下的水动力变化过程,下面对长江口4个汉道的水通量和3个分汉口的分流比变化进行详细分析。

#### 3.1 台风“利奇马”期间长江口水动力过程

在北支、南支、北港、南港、北槽和南槽这6个汉道中选取6个增水特征点NB-S、SB-S、NC-S、SC-S、NP-S、SP-S(位置见图1a),对比分析各点的增水变化过程。各个特征点选在各支汉靠近中段的位置,北支受潮流影响较大,选位在中段上部;北槽因为深水航道的存在,选择在深水航道的中段。特征点的增水结果见图4。从图中可以看出,台风“利奇马”在长江口以西自南向北运动,位于南槽的SP-S站最先受到影响并最先达到最大增水。8月10日00时左右SP-S站已达到最大增水0.75 m,其他5个特征站位均在10日01时左右达到最大增水。6个特征站位的最大增水发生在位于南港的SC-S站,为0.83 m(见图4e)。在潮汐-增水相互作用下,每个特征站位的增水过程都呈现出多峰特征。8月10日12~18时,6个支汉均出现较强的二次增水峰值,尤其是位于北支内部的NB-S站,其二次增水峰值达到0.58 m(见图4a),接近于0.65 m的最大增水。

图5为长江口涨急和落急时的流速矢量及分布图。8月9日—10日前期,风向为东北偏东风(见图1c),台风增加了近海地区的水体速度以及水体在涨潮流中向河口运输的速度(见图5a、5e),减小了水体落潮流时向海运输的速度(见图5i、5m),风应力增加并将水推向陆地,向岸风也会引发强风暴潮,

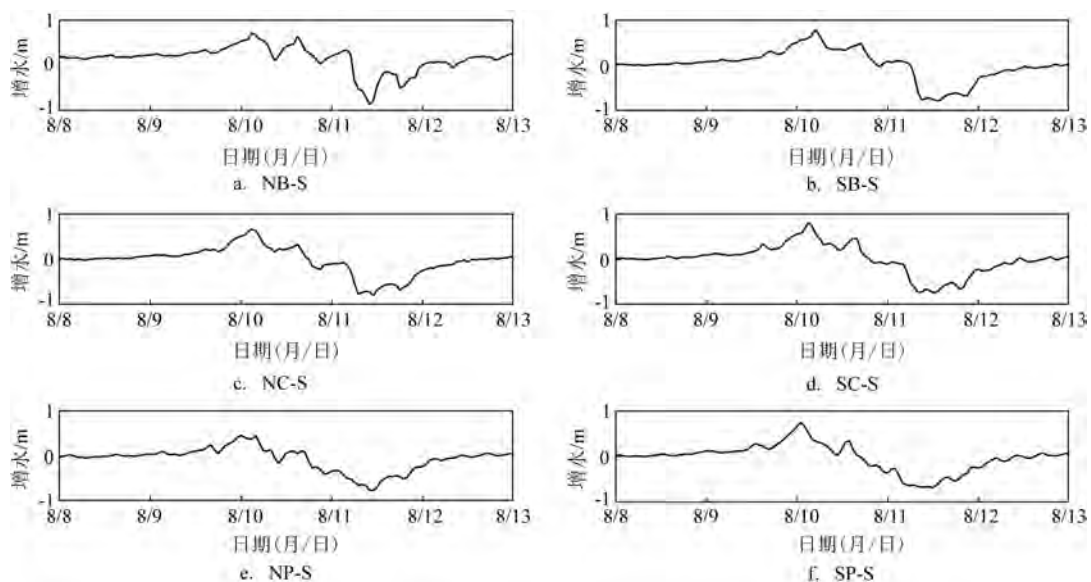
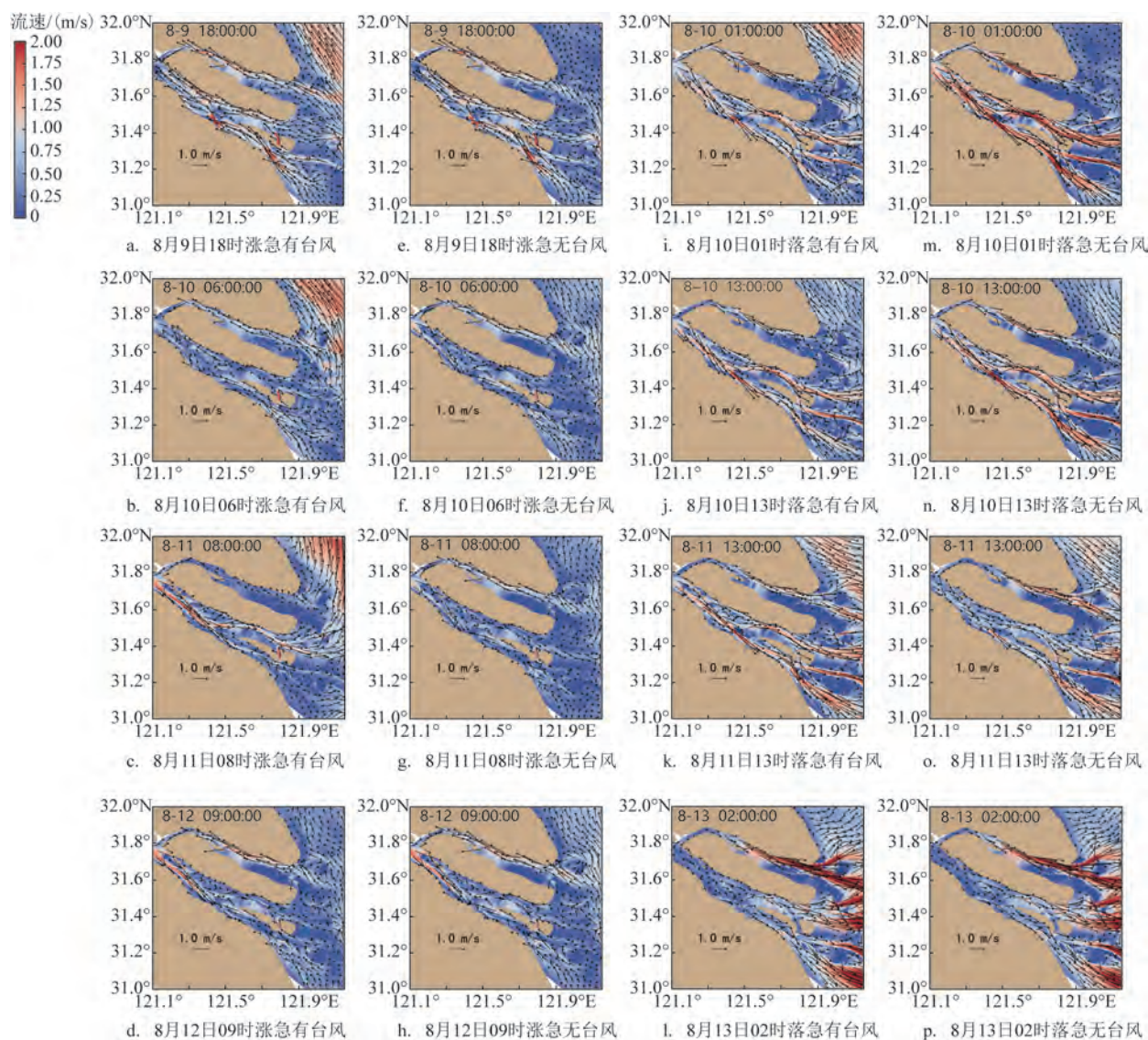


图4 特征点增水时间序列图

Fig.4 Evolution of water augmentation at the feature points





注:“有台风”和“无台风”分别代表模拟有台风和无台风作用两种情形

图5 长江口流速矢量图(箭头)及流速分布图(填色)

Fig.5 Flow velocity vector (arrows) and flow velocity distribution map (color) in the Changjiang Estuary

长江河口附近潮位增高。8月10日后期,风速保持在较高水平(约17 m/s),但是随着台风向北行进,风向逐渐向西南风转变,水体向河口运输的速度逐渐减弱(见图5j、5n)。8月11日,水体加速向河口外流出,长江河口发生减水(见图5c、5g),13时后,台风逐渐远离长江口,风速持续下降,河口流速较无台风时的差距逐渐减小(见图5k、5o)。8月12日,台风对河口的影响基本消失,但是河口处的流速仍未完全恢复正常,经过水体的流入和流出,长江口水通量总体向海的输运量增加,河口内的

水位较正常情况偏低,在正压力的影响下,需要通过几个潮周期来恢复到正常水位。8月13日左右,长江口水体变化恢复到正常水平(见图5l、5p)。

### 3.2 台风对入海水通量的影响

采用式(2)基于模型结果计算通过不同断面的水通量。图6为长江口北支、北港、北槽和南槽4个入海支汊(计算断面详见图1a)的水通量经36 h低通滤波后的时间变化曲线。无台风影响时,长江口

4个入海口的水通量经滤波后相对稳定。北支入海水通量很小,只占长江口总入海水通量的不到2%,甚至在潮差较大时表现为净向陆的水通量。北港、北槽和南槽分别占总入海水通量的60%、29%和10%,与唐川敏<sup>[27]</sup>采用三维海洋数值模式 ECOM-si 的模拟结果相近。

台风对长江口4个入海口净水通量的影响都呈现类似的模态。8月8日00时—8月9日18时称为减缓期。这一时期内,随着台风的逐渐靠近,长江口逐渐受到强烈向岸风的影响,4个入海口的向海净水通量逐渐减小,直至8月9日18时,各入海口的向海净水通量分别降低了 $1.1 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ (北支)、 $2.7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ (北港)、 $2.7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ (北槽)和 $9.2 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ (南槽)。这导致北支和南槽的水通量由净向海输运转变为净向陆输运;北港和北槽的净水通量分别减少为无风时的89.4%和78.6%,此时,长江口总入海水通量减少为无风时的65.8%。

从8月9日18时开始,随着台风进一步靠近长

江口水域,长江口的风向逐渐由偏东风向西南风转变,4个入海口的向海净水通量逐渐增加;8月11日05时左右,向海净水通量显著大于无风时的净水通量,此时北支、北港、北槽和南槽4个入海口的向海净水通量分别增加了 $3.6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $22.0 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $5.6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $2.6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ ,整个长江口的向海水通量也较无风时增大了69.6%。这一时段长江口受台风影响最为强烈,称之为增长期。

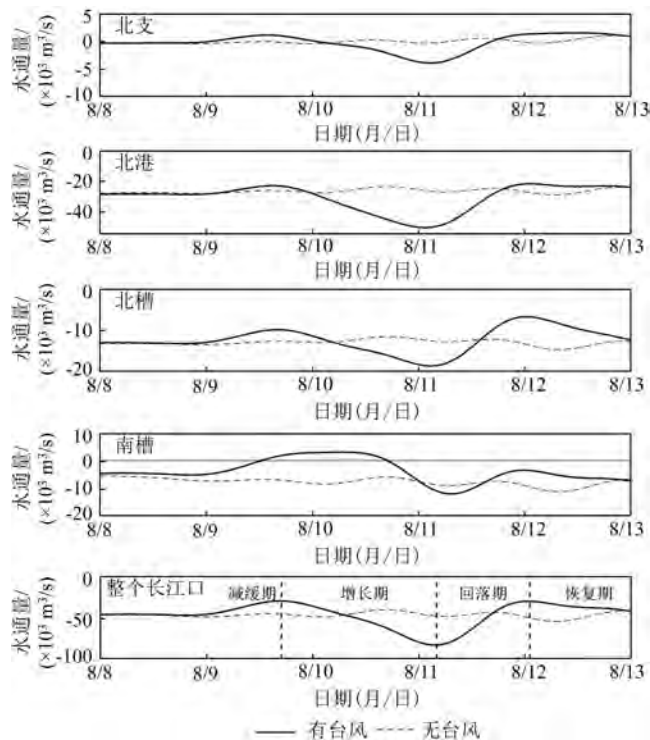
8月11日05时之后,随着台风的远离,离岸风减弱,长江口向海净水通量逐渐减小,直至8月12日01时,各入海口净向海水通量再次达到小于无风净水通量的极值,称之为回落期。此时,北支水通量由净向海输运转变为净向陆输运;北港、北槽和南槽的净水通量分别减少为无风时的79.4%、49.7%和37.3%,整个长江口的入海水通量也减少为无风时的60.5%。

8月12日01时之后,虽然台风对长江口的直接影响已十分微弱,但长江口的净水通量仍需1天左右的时间才恢复正常,称之为恢复期。

在整个台风影响期间(8月8日—8月13日),相对于无风情况,台风“利奇马”显著增加了北支( $1.02 \times 10^8 \text{ m}^3$ )和北港( $1.86 \times 10^9 \text{ m}^3$ )的水量,但减小了北槽( $2.51 \times 10^8 \text{ m}^3$ )和南槽( $1.69 \times 10^9 \text{ m}^3$ )的水量。北港、北槽和南槽的水量变化分别为16.3%、-4.5%和-51.5%。台风对南槽水量的影响特别大,但对北槽的影响却很小,这可能与两者的地形有关。北槽受深水航道导堤丁坝的限制,河道宽度变化不大,向岸风引起的向陆输运有限;但南槽在出九段沙后,断面迅速展宽,非常有利于向岸风引起的向陆输运。从图6可以看到,在向岸风影响期间,台风“利奇马”甚至引起了南槽持续达30 h(8月9日12时—8月10日18时)的净向陆水输运过程。在此时段内,台风明显增强了涨潮时期南槽向陆的流速,并且降低了落潮时向海的流速(见图7),南槽净向陆输运了 $2.32 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的水量。这种输运方向的转变可能对盐水入侵、泥沙输运等过程产生重要影响。

### 3.3 台风对分流比的影响

图8为在台风“利奇马”期间,长江口4个分汉口中北支、北港、北槽和南槽的净水通量分流比变化过程。无台风影响时,各分汉口净分流比相对稳

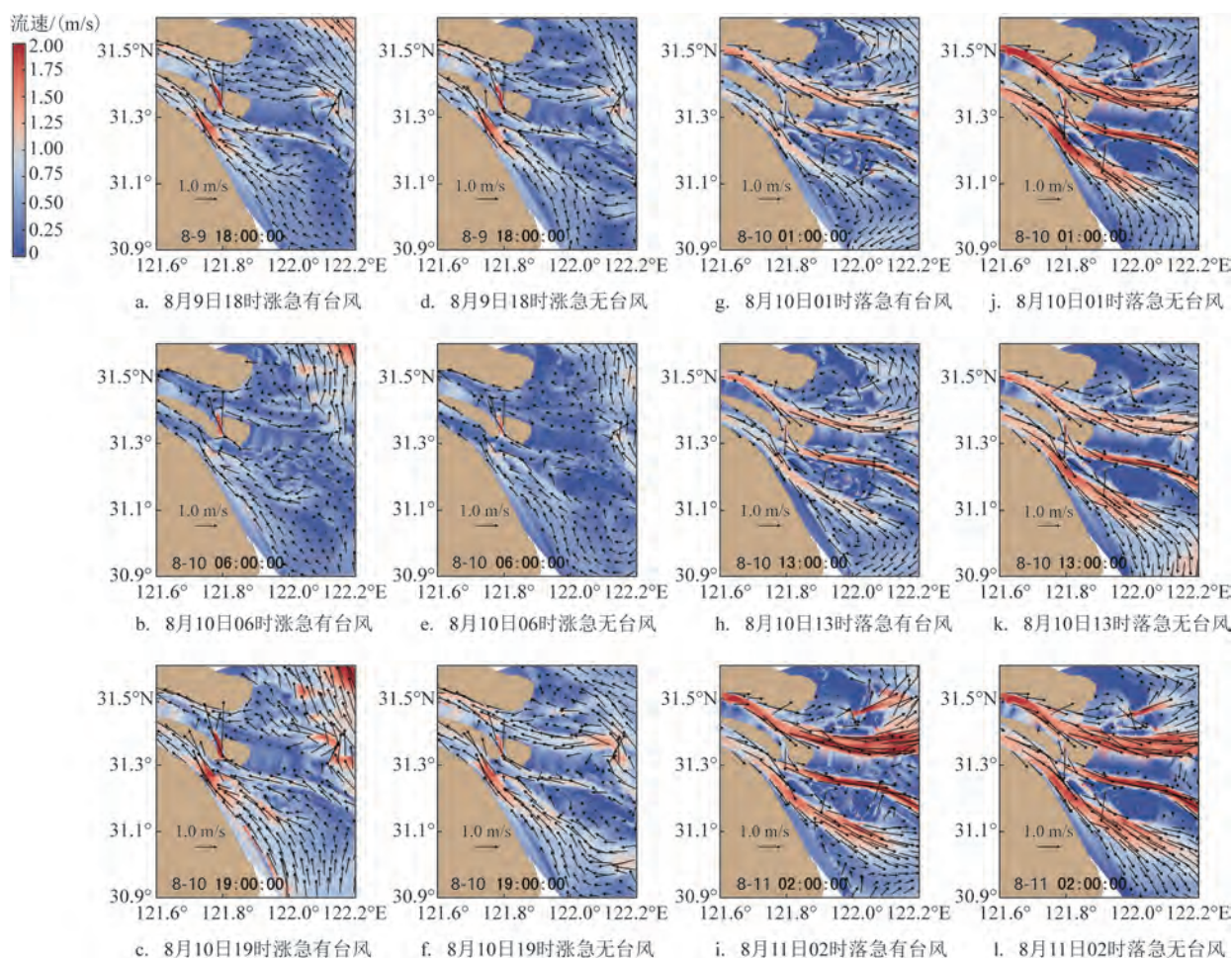


注:根据入海水通量变化情况将其分为减缓期、增长期、回落期和恢复期

图6 长江口水通量36 h低通滤波后时间变化图

Fig.6 Evolution of water flux after 36 h low-pass filtering in the Changjiang Estuary





注:“有台风”和“无台风”分别代表模拟有台风和无台风作用两种情形

图7 北槽和南槽流速矢量图(箭头)和流速分布图(填色)

Fig.7 Flow velocity vector (arrows) and Flow velocity distribution map (color) in the North Passage and South Passage

定。在台风影响下,各个支汉的分流比都出现了一个明显的峰值,且峰值发生的时间由南向北逐渐延后。北槽分流比在8月10日03时达到145.7%的峰值,此时台风处于长江口以南300 km处,长江口整体风向正好与南槽走向基本一致,导致南槽净输入水量增加,但此时台风并没有使得北槽的向海流速增大(见图7g、7j),强烈的东南风使得水流向北部聚集,加上南槽涌入的大量海水,北槽的分流比显著增大。北港分流比在8月10日12时达到72.7%的峰值,此时台风处于长江口西南方约220 km处,长江口依然处于强烈离岸风的影响中,整体风向正好与南港走向基本一致。北支净分流比在8月11日17时达到2.9%的峰值,此时台风已进入黄海,长江口刚经历过强烈的离岸风影响,整体水位较低,处

于减水状态,由于台风由南向北运动,减水在喇叭地形的北支更为显著,在向海正压梯度力的影响下,北支的分流比显著增大。

整个台风影响期间(8月8—13日),北支、北港和南槽的分流比分别增加了0.5%、5.4%和17.3%(见图9),南槽减少了17.3%。台风增强了北侧支汉的分流比,减小了南侧支汉的分流比,且变化量在最下游分汉口最大,最上游分汉口最小。

## 4 结论

基于经过多次检验的长江口FVCOM数值模型,模拟研究了1909号台风“利奇马”对长江口入海汉道水通量和分流比的影响。结果表明:



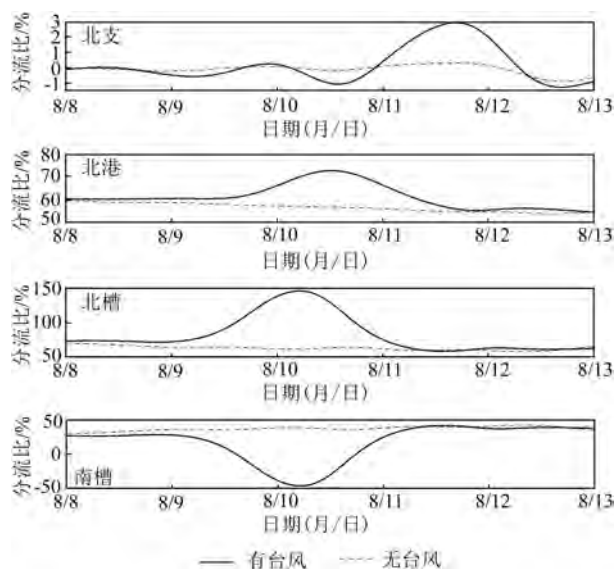


图8 分流比时间序列图

Fig.8 Evolution of net water flux split ratio in the four branches

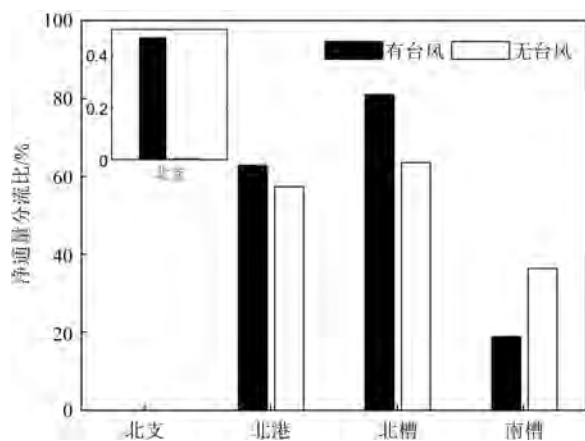


图9 总净水通量分流比

Fig.9 Total net water flux split ratio in the four branches

①在台风“利奇马”的影响下,北支、北港、北槽和南槽4个入海口的入海净水通量都呈现相似的减小—增大—减少—恢复的变化规律。总净入海通量也呈现类似规律,且变化幅度可超过60%,其中南槽的变化幅度达-51.5%,贡献向陆净水量  $1.69 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。根据这一规律可把台风的影响分成4个阶段:减缓期、增长期、回落期和恢复期,期望能为今后更深入的研究提供便利。台风总体上增加了通过北支和北港的入海净通量,减小了通过北槽和南槽的入海净通量。

②台风“利奇马”影响较大时处于长江口的南部,导致风速由南向北逐渐变小,总体上增大了北侧支汊的净分流比,减小了南侧支汊的净分流比,变化量在最下游分汊口最大,在最上游分汊口最小。

③在台风“利奇马”强烈的向岸风影响下,南槽可发生持续超过30 h的净向陆水通量,可能对台风期间的盐水入侵和泥沙输运等过程造成重要影响。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG H, CHEN D K, ZHOU L, et al. Upper ocean response to typhoon Kalmaegi (2014) [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2016, 121(8): 6520-6535.
- [2] 郭文云, 安佰超, 裘诚, 等. 基于多源数据的台风风暴潮概率预报研究: 数值预报系统[J]. 海洋预报, 2021, 38(2): 1-11.  
GUO W Y, AN B C, QIU C, et al. Probabilistic forecast for typhoon storm surge based on multi-source data: numerical forecast system[J]. Marine Forecasts, 2021, 38(2): 1-11.
- [3] 贾宁, 刘强, 石先武, 等. 基于现场调查的台风“天鸽”(1713)和台风“山竹”(1822)风暴潮灾害影响和致灾对比分析[J]. 海洋预报, 2022, 39(5): 94-99.  
JIA N, LIU Q, SHI X W, et al. Comparative analysis of the impact of typhoon storm surge disaster and the disaster-causing difference between typhoon "Hato" (1713) and "Mangkhut" (1822) based on field survey[J]. Marine Forecasts, 2022, 39(5): 94-99.
- [4] HUANG Y G, YANG H F, WANG Y P, et al. Swell-driven sediment resuspension in the Yangtze Estuary during tropical cyclone events[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2022, 267: 107765.
- [5] LI L J, WANG C N, PAREJA-ROMAN L F, et al. Effects of typhoon on saltwater intrusion in a high discharge estuary[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2022, 127(8): e2021JC018206.
- [6] WANG J, DAI Z J, MEI X F, et al. Tropical cyclones significantly alleviate mega-deltaic erosion induced by high riverine flow[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(19): e2020GL089065.
- [7] 潘明婕, 孔俊, 杨芳, 等. 台风路径对磨刀门水道咸潮上溯动力过程的影响机制[J]. 热带海洋学报, 2019, 38(3): 53-67.  
PAN M J, KONG J, YANG F, et al. The particular influence caused by typhoon path on salt intrusion in the Modaomen Waterway, China[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2019, 38(3): 53-67.
- [8] REN J B, XU F, HE Q, et al. The role of a remote tropical cyclone in sediment resuspension over the subaqueous delta front in the Changjiang Estuary, China[J]. Geomorphology, 2020, 377: 107564.
- [9] 王浩斌, 杨世伦, 杨海飞. 台风对长江口表层悬浮浓度的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2019(2): 195-208.  
WANG H B, YANG S L, YANG H F. A study of the surficial

- suspended sediment concentration in response to typhoons in the Yangtze Estuary[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2019(2): 195-208.
- [10] KUANG C P, CHEN K, WANG J, et al. Responses of hydrodynamics and saline water intrusion to typhoon Fongwong in the north Branch of the Yangtze river estuary[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(19): 8986.
- [11] ZHANG W, FENG H C, HOITINK A J F, et al. Tidal impacts on the subtidal flow division at the main bifurcation in the Yangtze River Delta[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, 196: 301-314.
- [12] 张蔚, 傅雨洁, 过津侃, 等. 潮波运动对长江口分流的影响[J]. *水科学进展*, 2018, 29(4): 551-556.
- ZHANG W, FU Y J, GUO J K, et al. Influence of tidal motion on discharge distribution in Yangtze Estuary[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(4): 551-556.
- [13] 徐圣. 台风“兰恩”期间长江口南槽沉积动力过程[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
- XU S. Sediment dynamical processes in the South Passage of the Yangtze Estuary during the typhoon Lan[D]. Shanghai: East China Normal University, 2020.
- [14] 张赛赛. 长江口潮差的时空变化及其环境意义[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- ZHANG S S. Temporal and spatial variation of tidal range in the Changjiang Estuary and its environmental significance[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.
- [15] 丁平兴, 葛建忠. 长江口横沙浅滩及邻近海域灾害性天气分析[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2013(4): 72-78.
- DING P X, GE J Z. Analysis of disastrous weather in the Hengsha Shoal and adjacent waters of the Yangtze Estuary[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2013(4): 72-78.
- [16] 任剑波, 何青, 沈健, 等. 远区台风“三巴”对长江口波浪动力场的作用机制[J]. *海洋科学*, 2020, 44(5): 12-23.
- REN J B, HE Q, SHEN J, et al. The effect mechanism of a remote typhoon "Sanba" on wave dynamics in the Changjiang Estuary[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(5): 12-23.
- [17] 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 L J, DENG F J, SHI H Y, 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.
- [18] 章震宇, 马磊. 上海市防御台风“利奇马”工作评估[J]. *中国防汛抗旱*, 2019, 29(11): 14-15.
- ZHANG Z Y, MA B. Assessment of typhoon Lekima No.201909 in Shanghai[J]. *China Flood & Drought Management*, 2019, 29(11): 14-15.
- [19] 赵宁. 我国海洋灾害防御能力进一步提升[N]. *中国自然资源报*, 2020-05-06(05).
- ZHAO N. China's marine disaster defense capabilities to further enhance[N]. *China Natural Resources News*, 2020-05-06(05).
- [20] 李健, 侯一筠, 刘清容, 等. 台风“利奇马”对渤海风暴潮影响研究[J]. *海洋预报*, 2021, 38(1): 35-43.
- LI J, HOU Y J, LIU Q R, et al. Research on the impact of typhoon "Lekima" on storm surges in the Bohai Sea[J]. *Marine Forecasts*, 2021, 38(1): 35-43.
- [21] GE J Z, YI J X, ZHANG J T, et al. Impact of vegetation on lateral exchanges in a salt marsh-tidal creek system[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2021, 126(8): e2020JF-005856.
- [22] 窦润青, 郭文云, 葛建忠, 等. 长江口北槽落潮分流比变化原因分析[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2014(3): 93-104.
- DOU R Q, GUO W Y, GE J Z, et al. Analysis for variation of the ebb flow diversion ratios in the North Passage of the Yangtze River Estuary[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2014(3): 93-104.
- [23] 葛建忠, 郭文云, 丁平兴. 长江口横沙浅滩挖入式港池对流场的影响分析I: 数值模型和验证[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2013(4): 79-90.
- GE J Z, GUO W Y, DING P X. Hydrodynamic influence of proposed excavated-in harbor in the Hengsha Shoal of the Yangtze Estuary I: numerical model and validations[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2013(4): 79-90.
- [24] 栾华龙, 柯科腾, 葛建忠, 等. 长江口规划工程影响下的咸潮入侵数值模拟[J]. *海洋科学进展*, 2018, 36(4): 525-539.
- LUAN H L, KE K T, GE J Z, et al. 3D Numerical simulation of the impacts of planned estuarine projects on saltwater intrusion in the Yangtze Estuary[J]. *Advances in Marine Science*, 2018, 36(4): 525-539.
- [25] 陶英佳, 葛建忠, 丁平兴. 长江口咸潮入侵预报系统的设计与应用[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2016(2): 128-143.
- TAO Y J, GE J Z, DING P X. Design and application of saltwater intrusion forecasting system in the Changjiang estuary[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2016(2): 128-143.
- [26] 郭文云, 安佰超, 裘诚, 等. 基于多源数据的台风风暴潮概率预报研究: 台风集合的构建[J]. *海洋预报*, 2021, 38(1): 26-33.
- GUO W Y, AN B C, QIU C, et al. Probabilistic forecast for typhoon storm surge based on multi-source data: Creation of typhoon ensemble[J]. *Marine Forecasts*, 2021, 38(1): 26-33.
- [27] 唐川敏. 流域重大工程和气候变化对长江河口净分流比和盐通量的影响研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- TANG C M. The influence of the major projects and climate change on water diversion ratio and salt fluxes in the Changjiang River Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.



## Numerical simulation of the impact of Typhoon "Lekima" on water flux in the Changjiang Estuary

YAO Ding<sup>1</sup>, LI Cheng<sup>2</sup>, ZHANG Fenglin<sup>1</sup>, GE Jianzhong<sup>3</sup>, ZHANG Hongsheng<sup>1</sup>, GUO Wenyun<sup>1\*</sup>

(1. Shanghai Maritime University, Shanghai 201300, China; 2. Shanghai Marine monitoring and forecasting center, Shanghai 200062, China; 3. State key laboratory of estuarine and coastal research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** Under the influence of extreme weather, such as typhoons, the estuarine water flux may change strongly in a short time. In this study, the effects of Typhoon 1909 "Lekima" on the water flux and split ratio in the Changjiang Estuary are investigated using the FVCOM model. The results show that Typhoon "Lekima" can cause the net landward water flux of the South Passage for more than 30 hours. At the net water fluxes in the four inlets, i.e. North Branch, North Channel, North Passage and South Passage, show similar decrease-increase-decrease-recovery evolutions under the influence of the typhoon. The total net seaward water flux shows a similar evolution with its magnitude varying by more than 60%. The typhoon generally leads to the increase of net split ratio in the northern branch and the decrease of net split ratio in the southern branch.

**Key words:** FVCOM; typhoon; water flux; split ratio; Changjiang Estuary