

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230421001

文章编号: 1672-9331(2023)04-0117-10

引用格式: 刘晓建, 侯棚, 胡晓张, 等. 超强台风“山竹”风浪过程数值模拟研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(4): 117-126.

Citation: LIU Xiaojian, HOU Peng, HU Xiaozhang, et al. Numerical simulation of wind wave process of super typhoon "Mangkhut" [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(4): 117-126.

# 超强台风“山竹”风浪过程数值模拟研究

刘晓建<sup>1,2</sup>, 侯棚<sup>1,2</sup>, 胡晓张<sup>1,2</sup>, 陈俊昂<sup>3</sup>, 张鹏<sup>4</sup>, 朱小伟<sup>1,2</sup>, 王强<sup>1,2</sup>, 梁美仪<sup>5</sup>

(1. 水利部珠江水利委员会 珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611; 2. 水利部珠江河口治理与保护重点实验室, 广东 广州 510611; 3. 广东省水利电力勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510611; 4. 广州珠科院工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510611; 5. 香港城市大学, 香港 999077)

**摘要:** [目的]探究台风浪传播过程,提升风暴潮防御能力。[方法]提出了基于中心节点优化算法的叠加风场优化方法和基于非结构网格的浪潮耦合模型,以华南1822号超强台风“山竹”为例,模拟其台风场及波浪场。[结果]将模拟值与珠江河口浮标实测值进行对比,发现风速、风向、有效波高等关键参数的误差总体较小。这表明该模型可以准确模拟台风过程中台风浪的传播过程,同时计算发现台风“山竹”过菲律宾后有效波高增大,至16日凌晨达到较大值(约14.0 m),之后传播至珠江河口及外部海域,受台风强度减弱、岛群遮蔽和水深减小的影响有效波高降低。[结论]本研究提出的中心节点优化算法可有效降低叠加风场过渡区风场误差,相较于单纯风浪模型,浪潮耦合模型波浪模拟精度提高了约15%。超强台风“山竹”右半圆波高明显大于左半圆波高,符合台风“危险半圆”规律,故位于“山竹”右半圆的香港的波高(约4.5 m)大于与台风路径更近的澳门的波高(约3.6 m)、珠海及台山一带的波高(约2.3 m)。本研究相关成果可为华南沿海风暴潮研究提供参考。

**关键词:** 台风“山竹”; 台风场; 台风浪; 中心节点优化算法; 浪潮耦合模型

**中图分类号:** P731.22

**文献标志码:** A

## 0 引言

近年来,随着全球气候变暖,台风发生的频率和强度逐渐增加,台风诱发的海洋灾害已成为影响滨海国家最严重的自然灾害之一。根据国家海洋局发布的《中国海洋灾害公报》,我国每年平均遭遇十多次台风,是遭遇台风灾害最多的国家之一。2018年第22号(1822号)超强台风“山竹”紧随第23号台风“百里嘉”在广东、海南、香港等华南沿海一带登陆,登陆时强度达到强台风级或超强台风级。据不完全统计,台风“山竹”对华南沿海城市造成的直接经济损失达到了336亿元<sup>[1]</sup>。

针对台风风场的研究,国内做了很多工作,谢

鑒晔<sup>[2]</sup>将5个台风风场模型模拟的风场应用于中国南海海域的台风浪数值模拟中,证明了台风风场模型可为台风浪模拟提供风场。蒋昌波等<sup>[3]</sup>使用Holland台风模型,模拟了1409号台风“威马逊”和1415号台风“海鸥”,验证了Holland台风模型模拟台风过程的准确性。朱贞锦等<sup>[4]</sup>采用藤田气压模型与背景风场构造合成风场,在对比分析模拟结果之后,提出了权重系数的改进措施,有效地优化了风场的构造方式。王其松等<sup>[5]</sup>结合经验风场与NCEP(national centers for environmental prediction)再分析风场的优点,采用两者叠加的方式构造了一种混合风场,与实测风速资料对比后发现该风场精度较高。SHAO等<sup>[6]</sup>根据多年实测风场数据,将ERA(ECMWF Re-Analysis)再分析风

收稿日期: 2023-04-20; 修回日期: 2023-08-07; 接受日期: 2023-08-08

基金项目: 广东省促进经济高质量发展海洋六大产业专项(GDNRC[2021]41); 广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515110428); 广州市基础与应用基础研究项目(202102021286); 国家重点研发计划项目(2021YFC3001000); 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室开放基金资助项目(2020SS02)

通信作者: 刘晓建(1990—)(ORCID: 0000-0002-4990-1614), 男, 高级工程师, 主要从事河口海岸治理与保护方面的研究。E-mail: lxiaojian2010@163.com

场与Holland模型风场叠加提出了参数化的风场叠加公式。石洪源等<sup>[7]</sup>对比了在南海相关研究中常用的3种台风场模型(Fujita-Takahashi模型、Holland模型、Jelesnianski模型)的特点,采用NCEP-CFSR(national centers for environmental prediction-climate forecast system reanalysis)作为背景风场构造混合风场,将混合风场的风速与实际观测风速对比后发现,在南海地区采用Jelesnianski模型得出的风场和实际风场吻合度最好。

台风会导致高强度的台风浪(灾害性海浪),是我国主要海洋灾害之一,对海洋工程造成极大的破坏<sup>[8]</sup>。国内外学者对台风浪进行了一系列研究,IZAGUIRRE等<sup>[9]</sup>利用SWAN(simulating waves nearshore)模型对中美洲、南美洲海域极端海浪气候变化进行了分析;LIANG等<sup>[10]</sup>采用SWAN模型对1990—2011年的渤海、黄海和东海的波浪进行了模拟;HE等<sup>[11]</sup>运用第三代海浪模型WW3(wavewatch III)对1988—2002年的东海波浪进行了高分辨率后报;STOPA<sup>[12]</sup>采用WW3模型以波浪后报的方式校正了10个再分析数据集和两个卫星数据集,并建议提供精确的风数据进行波浪后报分析。

波浪在传播过程中不仅会引起风暴潮位的变化,而且会在近岸产生波生流。同时,风暴潮会使波浪发生变形。因此,要准确模拟风暴潮和波浪的实际过程,有必要在数值模型中考虑浪潮耦合作用。LONGUET-HIGGINS等<sup>[13]</sup>提出的辐射应力概念很好地解释了波浪增减水和波生流现象,为浪潮耦合模型的建立提供了理论基础。随着理论知识和计算机技术的进步,学者们已经实现了风暴潮和波浪的耦合运算,且耦合形式越来越多元化。SEBASTIAN等<sup>[14]</sup>利用ADCIRC(the advanced circulation model)与SWAN两个模型建立浅水环流系统,模拟了在不同虚拟台风影响下克萨斯湾的风暴潮过程,发现当风速增加15%时,风暴潮增水可提高20%~26%。杨静思<sup>[15]</sup>基于FVCOM(finite-volume coastal ocean model)和SWAN两个模型实现了波流耦合实时运算,模拟了0713号台风期连云港海域的潮流和波浪场,发现辐射应力和风应力对表层潮流场均会产生影响且风应力的影响更加明显。WU等<sup>[16]</sup>提出了包含WRF(weather research and forecasting model)、ROMS(regional ocean modeling system)及SWAN三

个模型的大气—波浪—海洋耦合模拟系统,分析了多重耦合作用对台风浪的影响。

综上可知,针对台风浪过程学者们已开展了部分研究工作,其中风场的准确反演是开展研究的关键,但已有成果指出叠加风场在过渡区存在失真问题<sup>[17]</sup>。针对超强台风“山竹”,本研究提出了基于全域中心节点优化算法的台风风场快速重构方法及台风浪潮耦合模拟方法,实现了超强台风“山竹”及其诱发的台风浪在华南海域运动过程的有效模拟,相关成果可为华南沿海风暴潮研究提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 台风场重构

#### 1.1.1 台风理论风场

本研究采用YOUNG和SOBEY(1981)<sup>[18]</sup>理论公式模拟台风风场,其公式如下:

$$V_e(r) = V_{\max} \times \left(\frac{r}{R_{\text{mw}}}\right)^7 \times \exp\left(7g\left(1 - \frac{r}{R_{\text{mw}}}\right)\right), \quad r < R_{\text{mw}} \quad (1)$$

$$V_e(r) = V_{\max} \times \exp\left((0.0025R_{\text{mw}} + 0.05)\left(1 - \frac{r}{R_{\text{mw}}}\right)\right), \quad r \geq R_{\text{mw}} \quad (2)$$

式中: $r$ 为风场任意点到台风中心的距离; $V_e(r)$ 为距离台风中心 $r$ 处的风速; $V_{\max}$ 为最大风速; $g$ 为重力加速度; $R_{\text{mw}}$ 为最大风速半径,其计算式如下<sup>[19]</sup>:

$$R_{\text{mw}} = 28.52 \tanh(0.0873(\varphi - 28)) +$$

$$12.22/\exp((p_n - p_c)/33.86) + 0.2V_t + 37.22 \quad (3)$$

式中: $\varphi$ 为纬度; $V_t$ 为台风移动速度; $p_c$ 为台风中心气压; $p_n$ 为台风外部气压,约等于1 013.2 hPa。此外,距离台风中心 $r$ 处的大气压 $P_r$ 计算公式如下:

$$P_r = p_c + (p_n - p_c) \times \exp\left(-\frac{R_{\text{mw}}}{r}\right) \quad (4)$$

#### 1.1.2 再分析风场

再分析数据是对观测资料(包括地面观测、卫星,还有雷达、探空、浮标、飞机、船舶等观测资料)进行质量控制,然后再同化入全球模式后所获得的资料,在一定程度上可近似地反映实际的大气状况。常用风场有NCEP风场、ERA-40海表10 m风场、QN(QuikSCAT/NCEP)混合风场、CCMP(cross calibrated multi-platform)风场。NCEP风场和

ERA-40海表10 m风场的分辨率较低;QN混合风场具有较高精度,但时间序列较短,仅有10 a;CCMP风场则具有分辨率高,时间序列长等优点。本研究所用风场为CCMP风场。

本文资料来自美国国家航空航天局地球科学事业部(ESE),它结合了日本高级地球观测卫星ADEOS-II、快速散射计QuikSCAT、热带降水观测系统上搭载的微波成像仪TRMM TMI、先进的多

频双偏振微波辐射计AMSR-E、多波段微波辐射扫描仪SSM/I几种资料,利用变分方法得到。CCMP风场具有很高的精度和时空分辨率,其空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

## 1.2 浪潮耦合方法

### 1.2.1 海洋模型

在水平笛卡尔坐标系及垂向坐标系下,海洋模型的动量方程如式(5)~(7)所示:

$$\frac{\partial(H_z u)}{\partial t} + \frac{\partial(u H_z u)}{\partial x} + \frac{\partial(v H_z u)}{\partial y} + \frac{\partial(w H_z u)}{\partial z} - f H_z v = -\frac{H_z}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} - H_z g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \left( \overline{u'w'} - \frac{\gamma}{H_z} \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial(H_z S_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial(H_z S_{xy})}{\partial y} + \frac{\partial S_{px}}{\partial z} \quad (5)$$

$$\frac{\partial(H_z v)}{\partial t} + \frac{\partial(u H_z v)}{\partial x} + \frac{\partial(v H_z v)}{\partial y} + \frac{\partial(w H_z v)}{\partial z} - f H_z u = -\frac{H_z}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - H_z g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \left( \overline{v'w'} - \frac{\gamma}{H_z} \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial(H_z S_{yx})}{\partial x} - \frac{\partial(H_z S_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial S_{py}}{\partial z} \quad (6)$$

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{g}{\rho_0} H_z \rho = 0 \quad (7)$$

连续性方程为:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(H_z u)}{\partial x} + \frac{\partial(H_z v)}{\partial y} + \frac{\partial(H_z w)}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

对流扩散方程为:

$$\frac{\partial(H_z C)}{\partial t} + \frac{\partial(u H_z C)}{\partial x} + \frac{\partial(v H_z C)}{\partial y} + \frac{\partial(w H_z C)}{\partial z} = C_{\text{source}} - \frac{\partial}{\partial z} \left( \overline{C'w'} - \frac{\gamma_\theta}{H_z} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (9)$$

式中: $t$ 为时间项; $u$ 、 $v$ 和 $w$ 分别代表 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 轴3个方向上的流速; $u'$ 、 $v'$ 和 $w'$ 为3个方向的脉动流速,上横线表示其时间平均值; $z$ 为垂直坐标,在底部 $z=-1$ ,表面 $z=0$ ; $\eta$ 为海洋自由表面; $f$ 为科氏力参数; $H_z$ 为网格单元厚度; $p$ 为压强; $\rho$ 和 $\rho_0$ 分别为海水的总密度和参考密度; $g$ 为重力加速度; $\gamma$ 和 $\gamma_\theta$ 分别为分子黏滞系数和扩散系数; $C$ 为温盐等参数标量; $C'$ 为温盐等脉动参数,上横线表示其时间平均值; $C_{\text{source}}$ 为源/汇项; $S_{xx}$ 、 $S_{xy}$ 、 $S_{yx}$ 、 $S_{yy}$ 为水平辐射应力; $S_{px}$ 、 $S_{py}$ 分别为与 $x$ 、 $y$ 轴垂直的辐射应力。

### 1.2.2 海浪模型

基于能量平衡方程的海浪模型SWAN可以用于大范围、长时序的波浪计算模拟中。SWAN模型通过在谱波浪能量平衡方程源/汇项中综合考虑波浪浅水变形、折射、绕射、反射等传播变形过程,能够模拟海底摩擦、破碎、白浪、风能输入以及波浪非线性效应等影响,可以准确描述在复杂的

潮流、地形、风场环境下风浪从生成到成长,直至大风过后衰减的全过程。

SWAN模型采用二维波作用量描述风浪生成及其在近岸区的演化过程。在笛卡尔直角坐标系中,模型控制方程即动谱平衡方程可表示如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (10)$$

式中: $\sigma$ 为波浪的相对频率(在随水流运动的坐标系中观测到的频率); $\theta$ 为波向(各谱分量中垂直于波峰线的方向); $C_x$ 、 $C_y$ 分别为 $x$ 、 $y$ 方向的波浪传播速度; $C_\sigma$ 、 $C_\theta$ 分别为 $\sigma$ 、 $\theta$ 空间的波浪传播速度; $S$ 为谱密度表示的源项; $N$ 为波作用密度谱。

### 1.2.3 波流实时双向耦合方法

海洋模型通过在控制方程中加入三维辐射应力项,模拟近岸海域内波流的相互作用。在进行波流耦合计算时,早期的研究主要是将波浪辐射应力作为条件引入海洋模型中,而海洋模型对海浪模型无反馈作用,这种耦合被称为单向耦合。从20世纪90年代开始,随着对海浪和海洋数值模拟理解的深入,学者们开始同时考虑海浪模型对海洋模型的影响以及海洋模型对海浪模型的反馈作用,并称之为海浪-海洋双向耦合模型<sup>[20]</sup>。

为进行波流实时双向耦合计算,本研究将海浪模型和海洋模型通过MCT(model coupling toolkit)耦合器进行耦合,综合考虑海浪和海洋之



间的相互影响,建立浪潮耦合模型系统,该模型系统的耦合机制如图1所示。

从图1可以看出,浪潮耦合模型通过耦合器将海浪模型与海洋模型之间的数据进行实时传递,实现了实时双向耦合。海浪模型将计算得到的波高、波向、波长、波周期等通过耦合器传递给海洋模型;海洋模型将计算得到的水位、水深、平均流速等反馈给海浪模型。

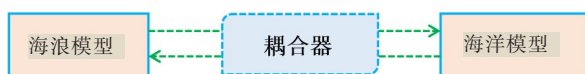


图1 浪潮耦合示意图

Fig. 1 A schematic diagram of wave-current coupling

## 2 台风场模拟

2018年9月7日20时,台风“山竹”在西北太平洋洋面上生成,9月15日,台风“山竹”从菲律宾北部登陆,随后沿我国南部海域向北移动,9月16日17时在广东台山海宴镇登陆,登陆时其中心附近最大风力为14级,中心最低气压为955 hPa,台风“山竹”的移动路径如图2所示。本研究采用珠江河口原型观测平台实测数据对模型模拟精度进行验证,平台安装了声学多普勒流速仪,声学多普勒波浪测量仪,泥沙、水质、盐度多参数测量仪,以及风速、风向仪等设备,可实现对珠江河口风况、水深、潮流、波浪、泥沙、盐度、水质等多要素的实时同步观测及自动传输。

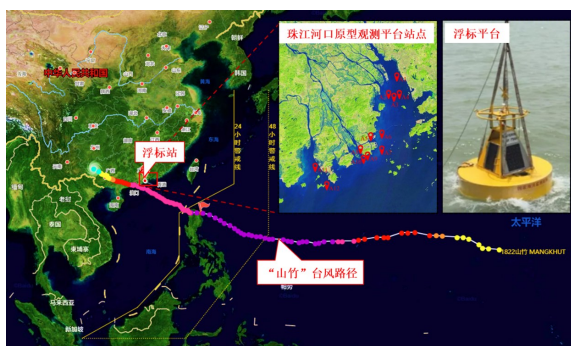


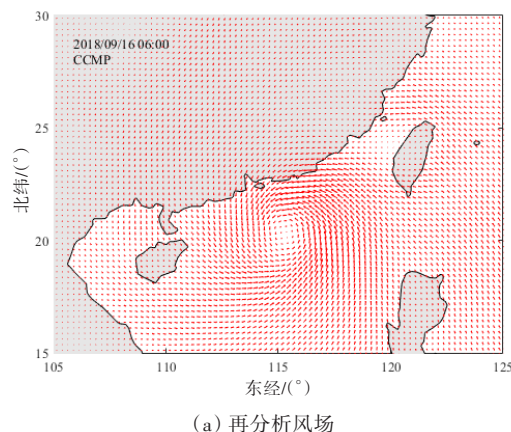
图2 台风“山竹”移动路径和浮标站

Fig. 2 Typhoon "Mangkhut" moving path and buoy station

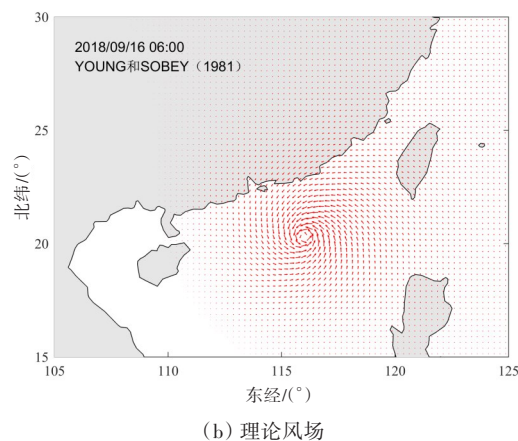
### 2.1 风场结果

图3为同一典型时刻台风“山竹”CCMP再分析风场和理论风场对比图。从图3可以看出,理论风场可以较好地模拟台风中心附近的旋转风,但

在距离台风中心比较远的区域,风场值偏小,而CCMP再分析风场则较好地弥补了这一缺陷,它在远离台风中心的位置具有很好的不对称性,可以较好地反映背景风场。



(a) 再分析风场



(b) 理论风场

图3 CCMP再分析风场和理论风场对比图

Fig. 3 Comparison of CCMP reanalysis wind field and theoretical wind field

### 2.2 风速验证

图4为两个典型位置——伶仃洋站点3和澳门水域站点7的YOUNG和SOBEY(1981)理论风速、CCMP风速与实测风速的对比图,图中两条垂直于横坐标轴的直线用于标记理论风速和CCMP风速之间的过渡区域。从图4可以看出,台风到达珠江口后,风速急剧增加,澳门水域最高风速达到了35 m/s,明显大于伶仃洋海域的风速。此外,从图4还可以看出,理论公式对台风中心风速的模拟结果较好,而对远离台风中心位置的风速的模拟结果偏差较大,这与CCMP再分析数据的模拟结果相反。因此,为了弥补上述不足,本研究综合考虑理论风场和再分析风场的优点,对台风风场进行改进。

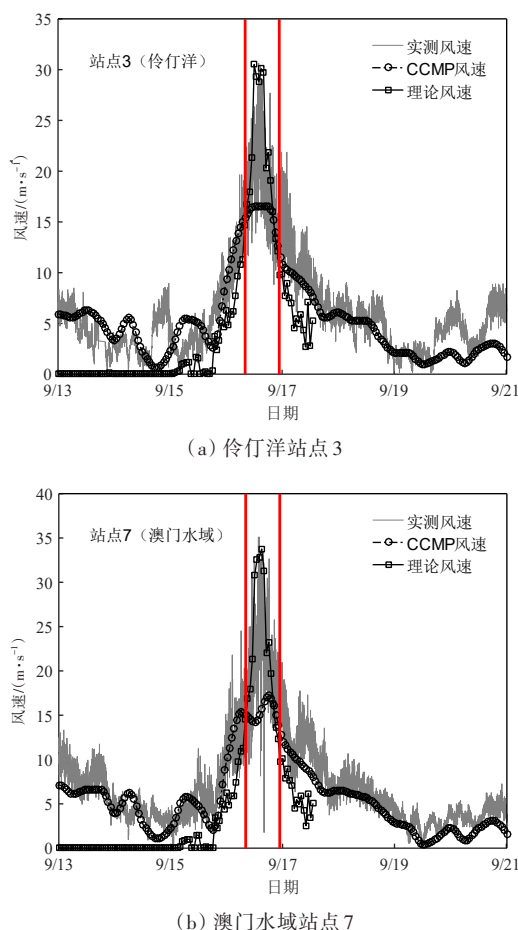


图4 浮标站风速时间序列对比

Fig. 4 Comparison of time series of wind speed at buoy stations

### 2.3 叠加风场优化算法

根据 YOUNG 和 SOBEY (1981) 理论风场和 CCMP 再分析风场的对比结果,本研究综合应用两者数据优势,提高台风风场模拟的准确性。在叠加之前,使用相同的网格对上述两种方法的风场进行插值,该方法与需要考虑优化半径的传统方法不同<sup>[21]</sup>,叠加风场直接评估风速,即在经验风速高于再分析风场风速的区域,使用经验风场的结果;在再分析风场风速高于经验风场风速的区域,使用再分析风场的结果。

图5展示了2018年9月15日12时这一典型时刻的优化风场。从图5可以看出,综合使用理论风场和CCMP再分析风场使台风“山竹”的模拟风场更加真实和准确。然而,当这两个数据集之间的过渡区域突然转换时,会导致风场的不连续,如图5(b)虚线附近所示。因此,需要对理论风场和CCMP再分析风场之间的过渡风场进行平滑处理。

为了保证过渡风场的连续性,本研究采用了中心节点优化算法,其计算公式如下:

$$u(i,j) = (u(i,j+1) + u(i,j-1) + u(i+1,j) + u(i-1,j)) / 4$$

$$v(i,j) = (v(i,j+1) + v(i,j-1) + v(i+1,j) + v(i-1,j)) / 4$$

$$(11)$$

式中: $i$ 和 $j$ 为风场行列索引号; $u(i,j)$ 和 $v(i,j)$ 为点 $(i,j)$ 在经纬度方向上的风场。

图5还展示了使用优化函数前后典型时刻风场的对比情况。从图5可以看出,使用优化函数后过渡区风向得到调整,相邻风矢量间未出现畸变,风场具有较好的连续性。选择伶仃洋和澳门附近海域浮标站的风速和风向资料,对叠加风场的准确性进行验证,如图6所示。总体而言,现场数据与叠加风场数据整体吻合较好,精度明显提高,仅在2018年9月16日风向数据出现了偏差,这一偏差可能是台风“山竹”传播至珠江口近岸水域时,浮标站在超强台风强大的冲击力下发生不规则运动所致。

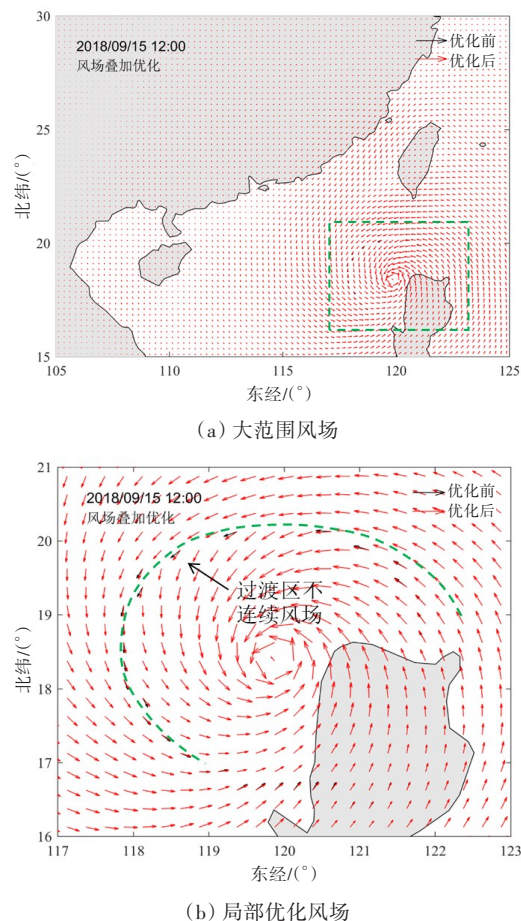


图5 典型时刻优化风场

Fig. 5 The optimized wind field at typical time

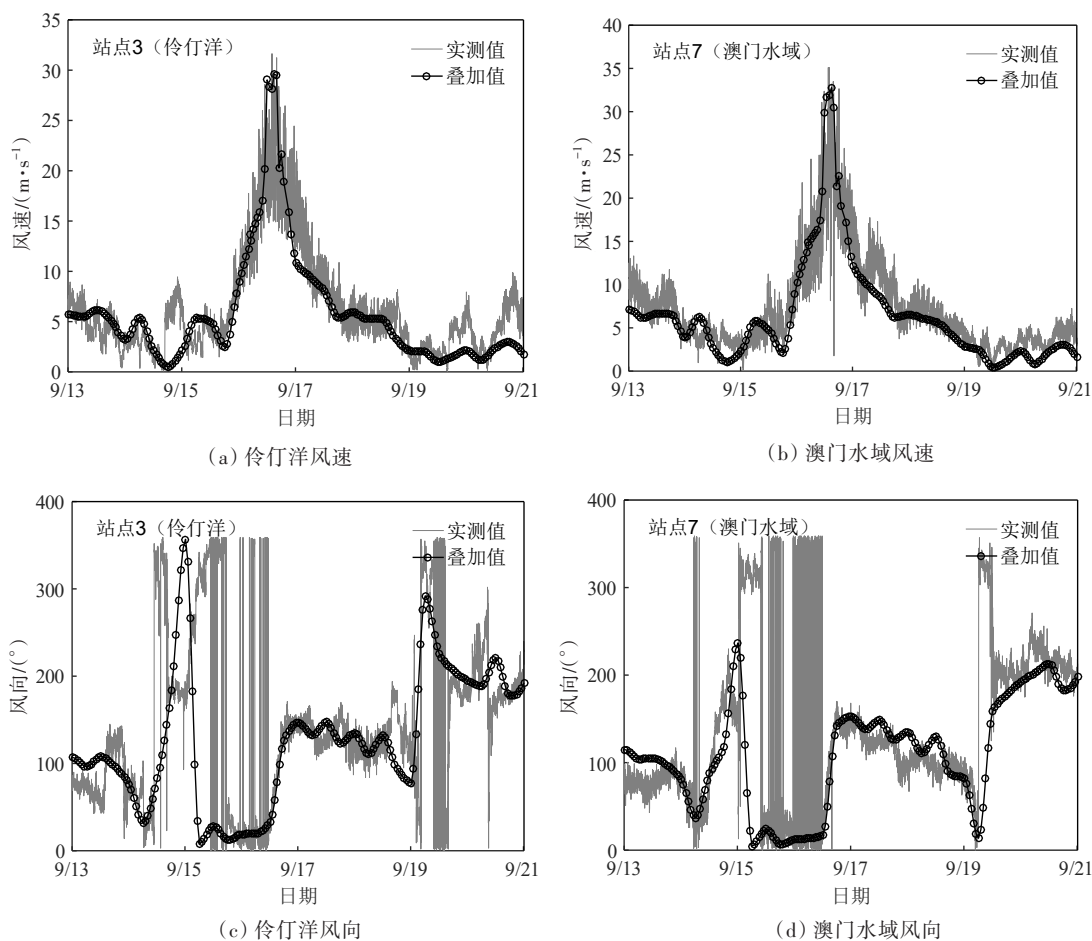


图6 站点风速和风向时间序列对比

Fig. 6 Comparison of time series of wind speed and wind direction at buoy stations

### 3 台风浪模拟

#### 3.1 计算区域及时空分辨率

针对整个南海海域建立计算模型,计算区域范围为北纬 $12.7^{\circ}\sim 29.4^{\circ}$ ,东经 $105.6^{\circ}\sim 124.5^{\circ}$ ,采用非结构三角形网格对计算区域进行剖分,最大网格精度为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ ,最小网格精度为 $0.3^{\circ}\times 0.3^{\circ}$ 。整个计算海域水深采用全球水深地形数据库(Earth Topography 1, ETOPO1)中的资料,并结合河口和河网实测地形数据插值而成,模型计算采用的内模计算时间步长为10 s,内外模时间步长比为5。

#### 3.2 台风浪验证

本研究选择含有波浪数据的浮标站点7(位于澳门水域)和站点11(位于黄茅海水域)的现场观测数据验证模型的可靠性。台风“山竹”过境时,站点7和站点11的数值计算与现场观测结果对比

分别如图7、图8所示。从图7、图8可以看出,该模型计算的有效波高过程值和现场观测值吻合较好,表明该模型参数设置较为合理。此外,还可以看出基于浪潮耦合模型的计算结果较纯风浪模型的更好,表明浪潮耦合模型纳入台风增减水和辐射应力效应,可以准确反映海流对波浪产生的Doppler效应和能量交换<sup>[22]</sup>,有效提高了台风浪的计算精度(约提高15%)。

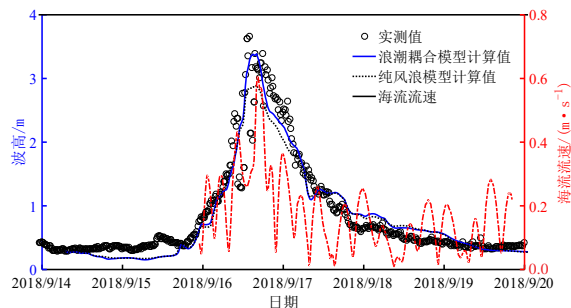


图7 站点7的波浪及海流变化

Fig. 7 Time series of wave height and current speed at buoy station 7



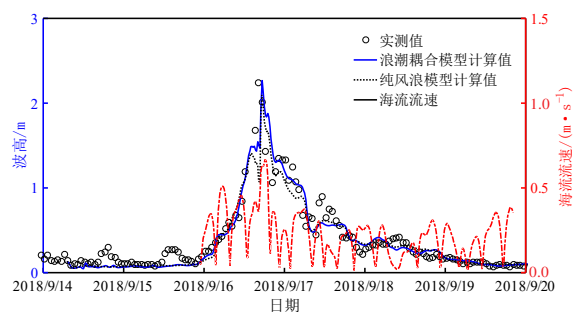
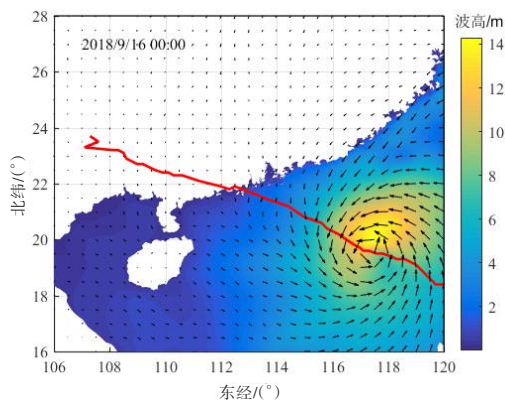


图8 站点11的波浪波浪及海流变化

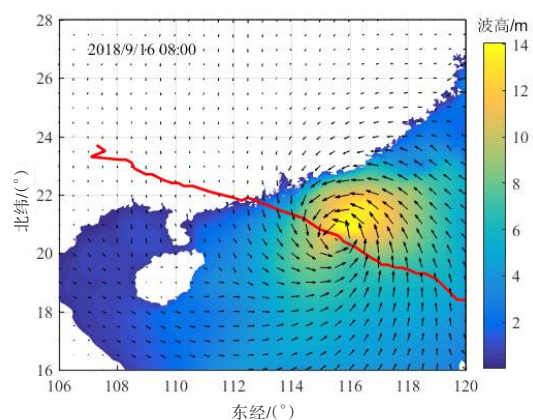
Fig. 8 Time series of wave height and current speed at buoy station 11

### 3.3 台风浪过程

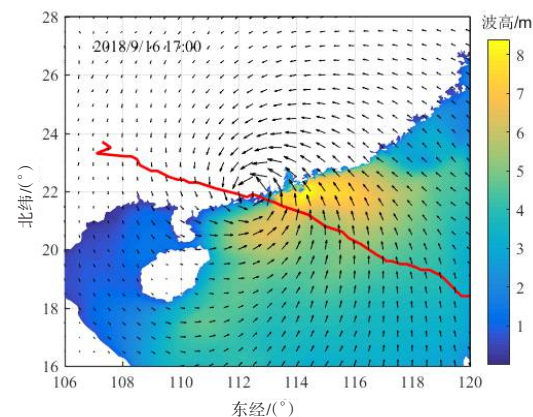
本研究应用已验证的台风浪模型,对台风“山竹”过境期间的台风浪传播情况进行了模拟。图9展示了台风“山竹”期间模拟海域在不同典型时刻的有效波高分布情况。从图9可以看出,有效波高的分布受台风系统强度和移动路径的影响较大,有效波高最大值出现在台风中心移动方向右侧风速最大值处,波高等值线呈不对称状。具体而言,9月14日台风形成后,有效波高最大值逐渐增大,直到9月16日凌晨其最大值达到14.0 m,之后台风传播至珠江三角洲区域,受台风强度减弱、岛群遮蔽和水深减小的影响,有效波高最大值逐渐减小,到9月16日14时左右在广东省沿海登陆时,发现“山竹”台风的右半圆波高明显大于左半圆波高,符合台风“危险半圆”规律,故在长时间位于“山竹”右半圆的香港产生的波高(约4.5 m)大于在华南沿海与台风路径更近的澳门产生的波高(约3.6 m),以及在珠海、台山一带产生的波高(约2.3 m),9月17日上午台风虽然已移动至我国内陆,但受风场尾迹的影响,珠江河口仍普遍存在一定的波高分布,波高约为1.0~1.5 m。



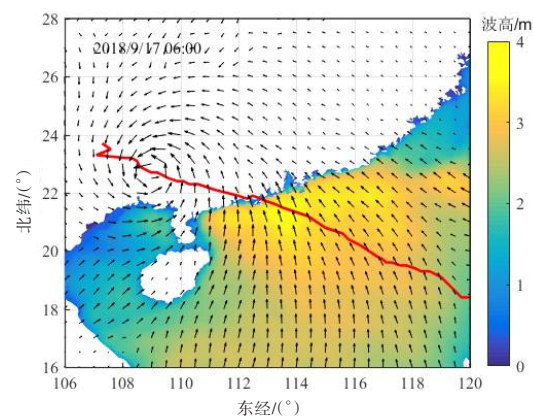
(a) 典型时刻 2018/9/16 00:00



(b) 典型时刻 2018/9/16 08:00



(c) 典型时刻 2018/9/16 17:00



(d) 典型时刻 2018/9/17 06:00

图9 台风“山竹”期间风场矢量及波高

Fig. 9 Wind field vector and wave height during typhoon "Mangkhut"

## 4 结论

本文基于叠加风场的方法以及浪潮耦合模型,研究了1822号超强台风“山竹”在华南沿海的风场和波浪场传播特征,主要结论如下:

1) 考虑理论风场中心风场精度高和CCMP再分析风场背景风场精度高的优点,通过叠加风场的方法重构了台风风场,进一步提出了全域中心节点优化算法,降低了叠加风场过渡区的风场误差,实现了台风“山竹”风场的有效重构,所模拟的测点风速和风向与实测结果均较为一致。

2) 基于非结构网格及浪潮耦合作用,建立了可以模拟珠江河口复杂岸线形态的台风浪模型。通过纳入台风增减水和辐射应力效应,准确反映了海流对波浪产生的Doppler效应和能量交换,有效提高了台风浪的计算精度。相较于单纯风浪模型,浪潮耦合模型波浪模拟精度提高了约15%。

3) 模型计算发现台风“山竹”由菲律宾海域传播至华南海域时,受台风强度减弱、岛群遮蔽和水深减小的影响,台风浪有效波高逐渐减小。同时发现台风“山竹”右半圆波高明显大于左半圆波高,符合台风“危险半圆”规律,故位于台风“山竹”右半圆的香港的波高(约4.5 m)大于与台风路径更接近的澳门的波高(约3.6 m),以及珠海、台山一带的波高(约2.3 m)。

#### [参考文献]

- [1] 闫绪娴, 范玲, 阮嘉珺. “一带一路”沿线国家台风灾害关联经济损失研究: 以2018年“山竹”台风灾害为例[J]. 灾害学, 2021, 36(1): 7-12, 23. DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.01.002.  
YAN Xuxian, FAN Ling, RUAN Jiajun. The relational economic losses assessment of typhoon disaster among the Belt and Road countries: taking the typhoon mangkhut in 2018 as an example [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(1): 7-12, 23. DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.01.002.
- [2] 谢鉴晔. 台风风场与波浪场的数值模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.  
XIE Liuye. Numerical simulation of typhoon wind field and waves [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [3] 蒋昌波, 赵兵兵, 邓斌, 等. 铁山湾海域风暴潮的数值模拟[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2017, 14(2): 49-54.  
JIANG Changbo, ZHAO Bingbing, DENG Bin, et al. Numerical simulation of storm surge in Tieshan Bay[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2017, 14(2): 49-54.
- [4] 朱贞锦, 李瑞杰, 陈鹏超, 等. 台风浪数值模拟中风场权重系数分析[J]. 水道港口, 2018, 39(1): 31-37. DOI: 10.3969/j.issn.1005-8443.2018.01.006.  
ZHU Zhenjin, LI Ruijie, CHEN Pengchao, et al. Analysis of weight coefficients of wind field in numerical simulation of typhoon waves [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, 39(1): 31-37. DOI: 10.3969/j.issn.1005-8443.2018.01.006.
- [5] 王其松, 邓家泉, 刘诚, 等. 叠加风场在南海台风浪数值后报中的应用研究[J]. 海洋学报, 2017, 39(7): 70-79. DOI: 10.3969/j.issn.0253-4193.2017.07.007.  
WANG Qisong, DENG Jiaquan, LIU Cheng, et al. Application of superimposed wind fields to the hindcast modelling of typhoon-induced waves in the South China Sea [J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(7): 70-79. DOI: 10.3969/j.issn.0253-4193.2017.07.007.
- [6] SHAO Z X, LIANG B C, LI H J, et al. Blended wind fields for wave modeling of tropical cyclones in the South China Sea and East China Sea [J]. Applied Ocean Research, 2018, 71: 20-33. DOI: 10.1016/j.apor.2017.11.012.
- [7] 石洪源, 尤再进, 胡聪, 等. 不同台风合成风场方案在南海的适用性研究[J]. 海洋湖沼通报, 2018(6): 17-23. DOI: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2018.06.003.  
SHI Hongyuan, YOU Zaijin, HU Cong, et al. A study on the applicability of different typhoon synthetic wind fields in the South China Sea [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2018(6): 17-23. DOI: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2018.06.003.
- [8] 孙瑞. 南海北部台风浪的时空变化规律和动力机制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.  
SUN Rui. Temporal and spatial variation law and dynamic mechanism of typhoon waves in the northern South China Sea [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [9] IZAGUIRRE C, MENÉNDEZ M, CAMUS P, et al. Exploring the interannual variability of extreme wave climate in the Northeast Atlantic Ocean [J]. Ocean Modelling, 2012, 59-60: 31-40. DOI: 10.1016/j.ocemod.2012.09.007.
- [10] LIANG B C, LIU X, LI H J, et al. Wave climate hindcasts for the Bohai Sea, Yellow sea, and East China Sea [J]. Journal of Coastal Research, 2016, 32(1): 172-180. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-14-00017.1.
- [11] HE H L, SONG J B, BAI Y F, et al. Climate and extrema of ocean waves in the East China Sea [J]. Science China (Earth Sciences), 2018, 61(7): 980-994.
- [12] STOPA J E. Wind forcing calibration and wave hindcast comparison using multiple reanalysis and merged satellite wind datasets [J]. Ocean Modelling, 2018, 127: 55-69. DOI: 10.1016/j.ocemod.2018.04.008.
- [13] LONGUET-HIGGINS M S, STEWART R W. Radiation



- stresses in water waves: a physical discussion, with applications[J]. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, 1964, 11 (4): 529–562. DOI: 10.1016/0011-7471(64)90001-4.
- [14] SEBASTIAN A, PROFT J, DIETRICH J C, et al. Characterizing hurricane storm surge behavior in Galveston Bay using the SWAN + ADCIRC model[J]. Coastal Engineering, 2014, 88: 171–181. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2014.03.002.
- [15] 杨静思. 波流实时耦合模式的建立及应用[D]. 天津: 天津大学, 2012.  
YANG Jingsi. Development and application of a dynamically coupled wave-current model[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [16] WU Z Y, JIANG C B, DENG B, et al. Numerical investigation of Typhoon Kai-tak (1213) using a mesoscale coupled WRF-ROMS model [J]. Ocean Engineering, 2019, 175: 1–15. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.01.053.
- [17] 马艳, 张庆华. 关于台风风场研究进展的若干问题探讨[J]. 黄渤海海洋, 1999, 17(1): 61–64. DOI: 10.1088/0256-307X/15/8/013.  
MA Yan, ZHANG Qinghua. Approaches to several problems about progress in the study of typhoon [J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1999, 17(1): 61–64. DOI: 10.1088/0256-307X/15/8/013.
- [18] YOUNG I R, SOBEY R J. The numerical prediction of tropical cyclone wind-waves [R]. Queensland: Department of Civil and Systems Engineering, James Cook University of North Queensland, 1981.
- [19] GRAHAM H E, NUNN D E. Meteorological conditions pertinent to standard project hurricane [R]. Washington: Weather Bureau, US Department of Commerce, 1959.
- [20] 伍志元, 蒋昌波, 邓斌, 等. 波流耦合模式及其在理想潮汐通道中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40 (8): 1420–1426. DOI: 10.11990/jheu.201805127.  
WU Zhiyuan, JIANG Changbo, DENG Bin, et al. SWAN-ROMS coupling model and its application in idealized tidal inlets[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(8): 1420–1426. DOI: 10.11990/jheu.201805127.
- [21] PAN Y, CHEN Y P, LI J X, et al. Improvement of wind field hindcasts for tropical cyclones [J]. Water Science and Engineering, 2016, 9(1): 58–66. DOI: 10.1016/j.wse.2016.02.002.
- [22] 赵理工, 梁书秀. 波流耦合作用下台风浪的模拟[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(6): 100–103.  
ZHAO Ligong, LIANG Shuxiu. Simulation of typhoon waves under wave-current coupling [J]. China Water Transport, 2016, 16(6): 100–103.

## Numerical simulation of wind wave process of super typhoon "Mangkhut"

LIU Xiaojian<sup>1,2</sup>, HOU Peng<sup>1,2</sup>, HU Xiaozhang<sup>1,2</sup>, CHEN Jun'ang<sup>3</sup>, ZHANG Peng<sup>4</sup>,  
ZHU Xiaowei<sup>1,2</sup>, WANG Qiang<sup>1,2</sup>, Kenneth Mei Yee Leung<sup>5</sup>

(1. Pearl River Hydraulic Research Institute, Pearl River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China; 2. Key Laboratory of the Pearl River Estuary Regulation and Protection of Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China; 3. Guangdong Hydropower Planning & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510611, China; 4. Guangzhou PRHRI Engineering Survey & Design Co., Ltd., Guangzhou 510611, China; 5. City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

**Abstract:** [Purposes] This study explored the process of typhoon wave propagation with an aim to improve the storm surge defense capability. [Methods] This study proposed a superimposed wind field optimization method based on central node optimization algorithm and a wave-tide coupling model based on unstructured grid, the typhoon field and wave field of No. 1822 super typhoon "Mangkhut" in South China were simulated as an example. [Findings] The simulated values were compared with the measured values of buoys in the Pearl River estuary, the errors of key parameters of wind speed, wind direction, and effective wave height were generally small, indicating that the model accurately simulated the propagation process of typhoon waves during the typhoon process. Model simulation results showed that the effective wave height increased after Typhoon Mangkhut passed the Philippines and reached the maximum value of about 14.0 m in the early morning of 16th.

After that, the wave spread to the Pearl River estuary and the outer sea area. Affected by the weakening of typhoon intensity, the shelter of island groups, and the decrease of water depth, the effective wave height gradually decreased. **[Conclusions]** The central node optimization algorithm proposed in this study can effectively reduce the wind field error in the transition region of the superposed wind field, and the wave simulation accuracy of the wave coupling model was improved by about 15% compared with the simple wind wave model. The wave height of the right semicircle of super typhoon "Mangkhut" was obviously larger than that of the left semicircle, which accorded with the law of typhoon "dangerous semicircle". Therefore, the wave height of Hong Kong (about 4.5 m) located in the right semicircle of "Mangkhut" was larger than that of Macao (about 3.6 m), Zhuhai and Taishan (about 2.3 m) which were closer to the typhoon path. The relevant results can provide reference for the study of storm surge along the coast of South China.

**Key words:** typhoon "Mangkhut"; typhoon field; typhoon wave; central node optimization algorithm; wave-tide coupling model

---

**Manuscript received:** 2023-04-20; **revised:** 2023-08-07; **accepted:** 2023-08-08

**Foundation item:** Project (GDNRC[2021]41) supported by the Marine Economic Development of Marine Six Industries Special Fund of Guangdong Province; Project (2021A1515110428) supported by Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation; Project (202102021286) supported by Basic and the Applied Basic Research Programs of Guangzhou; Project (2021YFC3001000) supported by the National Key R&D Program of China; Project (2020SS02) supported by the Open Foundation of Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province

**Corresponding author:** LIU Xiaojian (1990—) (ORCID: 0000-0002-4990-1614), male, senior engineer, research interest: estuarine and coastal governance and protection. E-mail: lxiaojian2010@163.com

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:黄志勇)