

台风路径及强度对马袅湾海域网箱养殖区的影响分析

崔嘉明¹, 刘长根¹, 张美玲¹, 王选志¹, 田雨¹, 徐晓甫², 孙健³

1. 天津大学机械工程学院力学系, 天津 300350

2. 天津水产研究所/中国水产科学研究院渤海水产研究中心, 天津 300457

3. 清华大学/水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084

摘要: 台风过境产生的巨浪和强流对网箱养殖区具有严重影响。为评估台风路径和强度对海南马袅湾内大型网箱养殖区的影响程度, 基于 Holland 风场模型和 Delft3D 软件构建了波流耦合模型, 并利用观测数据对模型进行了验证。依据历史台风路径及登陆位置, 将台风路径分为 4 种类型, 分别选取“威马逊”、“圆规”、“黄蜂”和“泰德”作为代表性台风, 通过平移和改变台风强度重构了 72 场台风过程, 模拟了台风期间波流场的变化, 统计分析了不同路径和强度的台风过境过程中马袅湾养殖区有效波高及流速的最大值, 将其作为评估网箱养殖区受影响强弱的因素, 探讨了台风路径和强度对网箱养殖区的影响, 并提出了不同强度台风过境时的预警路径范围。结果表明, 第 I 类台风路径的影响范围最广、程度最大, 其中“超强台风”等级时, R4 路径下有效波高最大值超过 5.5 m, 流速最大值超过 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 养殖区受严重影响; 第 II、第 III 类台风多数仅造成中等以下影响; 第 IV 类台风路径在所有强度下对网箱养殖区基本无影响。

关键词: 台风浪; 养殖网箱; 预警评估; Delft3D; 波流耦合模型

中图分类号: S 967.3

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of impact of typhoon track and intensity on cage aquaculture area in sea area of Maniao Bay

CUI Jiaming¹, LIU Changgen¹, ZHANG Meiling¹, WANG Xuanzhi¹, TIAN Yu¹, XU Xiaofu², SUN Jian³

1. Department of Mechanics, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China

2. Tianjin Fisheries Research Institute, Bohai Sea Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Tianjin 300457, China

3. Tsinghua University/State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Beijing 100084, China

Abstract: Extreme waves and currents generated by the passage of typhoons have an important impact on the cage culture area. In order to assess the degree of hazard of typhoons with different tracks and intensities on the large-scale aquaculture areas with in-cell nets in Maniao Bay, Hainan, we constructed a wave-current coupling model based on the Holland wind field model and the Delft3D software, and the model was validated by using observational data. The typhoon tracks were categorized into four types based on the tracks and landfall locations of the historical typhoons, and "Rammasun", "Kompasu", "Vongfong" and "Ted" were selected as the representative typhoons of the four types of tracks. Seventy-two typhoon processes were reconstructed by translating and changing the typhoon intensity, and we simulated the process of change in the wave current field during the typhoon, obtained the statistics of different tracks and intensity of the typhoon transit process of the maximum effec-

收稿日期: 2025-01-08; 修回日期: 2025-03-25

基金项目: 河北省创新能力提升计划(24463201D); 广西科技重大专项资助(桂科 AA23023009); 国家重点研发计划(2018YFD0900704)

作者简介: 崔嘉明(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为流体力学。E-mail: cjm1375233@tju.edu.cn

通信作者: 刘长根(1972—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为环境流体力学。E-mail: lcg@tju.edu.cn

tive wave height and current velocity in the Maniao Bay aquaculture area, which were used as an assessment of the strength of the influence of the Maniao Bay nets aquaculture area, the strength of the impacts of the factors. Moreover, we analyzed the impacts of different tracks and typhoon intensities on the net box aquaculture area, and proposed the range of warning tracks during the transit of typhoons of different intensities. The results show that among the four types of typhoon tracks, the first type of typhoon tracks had the widest and greatest impacts on the net-pen aquaculture area, in which the maximum effective wave height in the net-pen aquaculture area under the R4 track was higher than 5.5 m, and the maximum current velocity was more than $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ under the 'super typhoon' category, which severely affected the aquaculture area; the second and third types of typhoon tracks had the greatest impacts on the net-pen aquaculture area. Most of the tracks of Category II and III typhoons had less moderate impacts on the net-pen culture area; and the tracks of Category IV typhoons had basically no impacts on the net-pen culture area under the intensity of each typhoon.

Keywords: Typhoon wave; Aquaculture cages; Early warning assessment; Delft3D; Wave-current coupling model

台风是最严重的自然灾害之一，对渔业的影响尤为显著。中国南海台风频发^[1]，过去几十年来，台风过境严重威胁网箱养殖设施的安全^[2-3]，给水产养殖业造成了巨大损失。海南省马袅湾网箱养殖区共包含 72 口 HDPE (高密度聚乙烯) 圆形深水网箱^[4-5]，总养殖容积约 $12\,943 \text{ m}^3$ ^[6]，是海南省重要的网箱养殖区。马袅湾为“U”字形半封闭海湾，位于海南省澄迈县西北部，毗邻琼州海峡西南侧。由于琼州海峡是台风过境海南的高频区域，加之马袅湾网箱养殖区的特殊地理位置，已成为海南省内受台风影响最为严重的网箱养殖区之一。因此，分析不同路径和强度的台风对马袅湾网箱养殖区的影响，并建立相应的预警体系具有重要的现实意义。

目前有关台风对网箱养殖区影响的研究多集中于调查分析和数据统计方面。姜雨青^[7]基于 1989—2018 年西太平洋台风路径、设施渔业调研数据对我国沿海省市台风与设施渔业的关联性进行了评估；黄滨等^[8]通过实地调查，分析了台风“米雷”在山东省网箱养殖业的灾害影响程度；张润川^[9]指出台风浪导致的网箱破坏是福建省养殖渔业的重要致灾因子。但目前针对网箱养殖区的台风影响分析和灾害预警研究还极为匮乏。

由于过境台风的路径和强度不同，网箱养殖区的台风浪与流场特征存在明显差异^[10-12]。其中，台风浪是评估网箱养殖区是否受到的影响的关键因素。研究表明，台风浪可能导致网箱结构变形、系泊系统失效及网衣损坏等灾害^[13]；Zhang 等^[14]通过数值模拟和现场观测发现，循环波浪载荷引起的疲劳断裂是网箱受损的重要原因；Li 等^[15]分析了有效波高对系泊绳张力的影响，发现最大系泊绳张力随有效波高的增加而迅速增大；Yin 等^[16]指出，有效

波高超过 4 m 的海浪已属于灾害性海浪，对网箱结构造成严重威胁；孙熊雄^[17]基于 BP 神经网络建立了网箱致灾因子与破坏程度之间的定量关系，认为波高是导致锚绳断裂、浮架应力增大的主要因素，而流速的影响相对较小。但现有研究结果也表明，较大的流速也可能导致网箱失效或破坏^[18-19]。基于以上研究，本研究选择有效波高作为马袅湾网箱养殖区受影响的关键评估指标，同时考虑最大流速的影响。在波高分级方面，参考已有研究^[20]，将网箱养殖区受影响程度分为 3 个等级：当养殖区内有效波高最大值 $H_{S_{\max}} \geq 5.5 \text{ m}$ 时，网箱养殖区受到严重影响，需立即预警；当 $4 \text{ m} \leq H_{S_{\max}} < 5.5 \text{ m}$ 时，网箱养殖区受到中等程度影响，需快速预警；当 $2.5 \text{ m} \leq H_{S_{\max}} < 4 \text{ m}$ 时，网箱养殖区受到轻微影响，需适当预警。在流速方面，结合相关研究^[21]、抗风浪深水网箱养殖技术规程及马袅湾网箱设计标准，当养殖区内最大流速 $V_{\max} \geq 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，视为网箱养殖区受到严重影响；当 $V_{\max} < 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，以波高的影响为主，网箱养殖区相对安全。本研究以马袅湾大型网箱养殖区为主要研究区域，考虑到台风过境过程中风暴潮与波浪的较强相互作用^[22-25]，基于 Holland 台风模型和 Delft3D 软件构建了适用于该海域的波流耦合模型，并对模型进行验证。通过数值模拟方法分析了不同路径和强度台风过程对马袅湾网箱养殖区的有效波高及流速的影响规律，确定了不同强度台风过境时的预警路径范围，以期为该区域网箱养殖业的防灾减灾工作提供科学依据和预警参考。

1 数值模型的建立与验证

1.1 台风模型

风场数据的准确性是决定台风浪模拟精度的关

键因素。由于台风过境过程中天气条件恶劣，实测数据获取困难，而欧洲中期天气预报中心再分析数据(ERA)、交叉校准多平台数据集(CCMP)和美国国家环境预报中心(NCEP)等再分析数据普遍存在时空分辨率较低的问题，尤其在台风中心附近区域，其最大风速往往显著小于实际观测值。为此，目前普遍采用参数化台风模型^[26-28]。本研究选用国际通用的Holland^[29]台风模型来计算风场和气压场。其台风气压场分布公式为：

$$P(r) = P_c + (P_n - P_c) \cdot \exp\left(-\frac{R_{\max}}{r}\right)^B \quad (1)$$

台风风场分布公式为：

$$V_g(r) = \sqrt{\left(P_n - P_c\right) \frac{B}{\rho_A} \left(\frac{R_{\max}}{r}\right)^B \cdot \exp\left(-\frac{R_{\max}}{r}\right)^B + \left(\frac{rf}{2}\right)^2} - \frac{rf}{2} \quad (2)$$

式中： r 表示计算点与台风中心的距离； P_n 表示台风外围气压； P_c 表示台风中心气压； B 表示台风形状参数； R_{\max} 表示台风最大风速半径； f 表示柯氏系数； ρ_A 表示空气密度。

参数 B 采用 Vickery 等^[30] 的参数经验公式，计算公式为：

$$B=1.881-0.00557R_{\max}-0.01295\varphi \quad (3)$$

最大风速半径采用 Willoughby 和 Rahn^[31] 提出的风速半径公式，计算公式为：

$$R_{\max}=51.6\exp(-0.0223V_{\max}+0.0281\varphi) \quad (4)$$

式中： φ 表示地理纬度； V_{\max} 表示台风中心最大风速。

台风中心位置、中心气压、最大风速等信息采用中国气象局热带气旋资料中心所提供的CMA最佳路径集^[32-33]。

1.2 水动力模型

在正交曲线坐标系下，水动力基本方程^[34]为：

连续性方程：

$$\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left(\frac{\partial [(d+\zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{\partial [(d+\zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} \right) = (d+\zeta)Q - \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (5)$$

$$Q=(d+\zeta)\int_{-1}^0(q_{\text{in}}-q_{\text{out}})d\sigma+P-E \quad (6)$$

式中： ξ 、 η 表示正交曲线坐标系的方向； $\sqrt{G_{\xi\xi}}$ 、 $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ 分别表示 ξ 、 η 方向上的坐标转换系数； U 、 V 分别表示 ξ 、 η 方向上的平均速度； ζ 表示垂向上的自由面坐标； d 表示垂向上的水底坐标(即空间

参考平面以下的水深)； Q 表示单位面积流量； P 和 E 分别表示降水量和蒸发量，由于研究的是海湾水动力问题，不考虑降水量和蒸发量，故此处为 0。

动量方程：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{vv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} = \quad (7)$$

$$-\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi + fv - \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{uu}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} = \quad (8)$$

$$-\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta - fu - \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left(\frac{\partial [(d+\zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \zeta} + \frac{\partial [(d+\zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} \right) = (d+\zeta)(q_{\text{in}} - q_{\text{out}}) - \frac{\partial w}{\partial \sigma} - \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (9)$$

式中： v 、 u 、 w 分别表示 η 、 ξ 、 σ 方向上的流速； P_ξ 、 F_ξ 分别表示 ξ 方向上的静压梯度、雷诺应力梯度； F_η 、 P_η 分别表示 η 方向上的雷诺应力梯度、静压梯度； M_ξ 、 M_η 表示外部动量的源或汇； f 表示科氏力系数； v_v 表示垂向涡流黏度系数； q_{in} 和 q_{out} 分别表示单位体积的源项和汇项。

水动力模型的潮位边界采用 Tide Model Driver 软件获取 M2、S2、K1、O1、N2、P1、K2、Q1 共 8 个主要潮汐分潮的调和常数进行驱动。

1.3 波浪模型

Delft3D-WAVE 模块采用第三代波浪模型 SWAN^[35] 进行波浪过程模拟，它考虑了近岸波浪传播的物理过程，包括波浪浅化、绕射、折射和波浪破碎等。其动谱平衡方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (10)$$

式中： N 表示波作用密度； θ 表示波浪传播方向； σ 表示波浪相对频率； c_x 、 c_y 、 c_θ 和 c_σ 分别表示在 x 、 y 、 θ 和 σ 空间中的传播速度； S 表示能量作用量的源汇项，包括风能输入、波浪破碎、白浪耗散、底部摩擦引起的能量损耗等。

1.4 耦合模型及研究区域网格设置

马袅湾海域及部分琼州海峡区域的地形数据取自航保部电子海图 C151586 和 C1515819, 其余地形采用全球水深数据ETOPO1进行补充, 海南省马袅湾地理位置、网箱分布如图1所示。

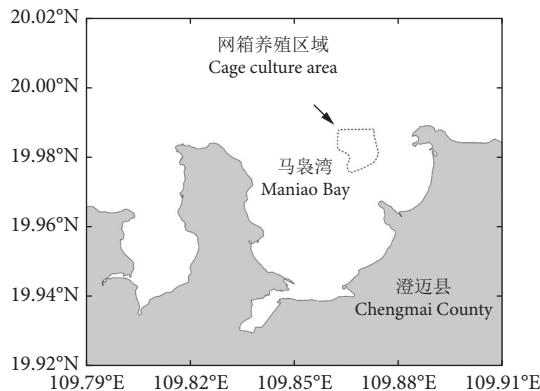


图1 海南省马袅湾网箱位置示意图

Fig. 1 Geographic location, distribution of cages in Maniao Bay, Hainan Province

台风过程的模拟需要考虑波流相互作用, 尤其是在浅水中^[36]。本研究采用 Delft3D FLOW & WAVE 模型耦合, 波对流的作用主要通过在水动力模型中加入由波浪作用所产生的辐射应力^[37]和波浪破碎^[38]产生的动量源项, 流对波的作用则体现为流对波浪的折射及频移等效应^[39-40]。

水动力模型和波浪模型共用一套结构化网格, 台风过程中影响海域的范围很大, 使用二重嵌套网格, 大模型网格计算范围为 105.5°E—118°E、

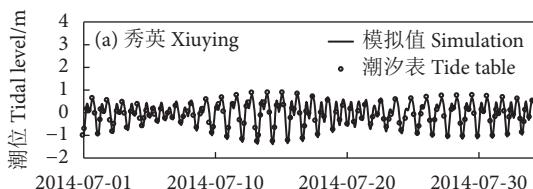


图3 各观测站天文潮潮位验证

Fig. 3 Astronomical tidal level verification

表1 天文潮模拟精度
Table 1 Simulation accuracy of astronomical tide

观测站 Observation station	平均绝对误差 MAE/m	均方根误差 RMSE/m	相关系数 CC
秀英 Xiuying	0.134	0.166	0.978
湛江 Zhanjiang	0.109	0.145	0.990

为了验证风暴潮增水的模拟效果, 将秀英站的计算结果与观测值^[41]进行对比验证。结果见图4。其 MAE 为 0.139 m, RMSE 为 0.180 m, 相关系数为 0.945。

15°N—24°N, 覆盖了大部分南海区域, 网格分辨率设置为 4 000 m; 小模型网格计算范围为 109.6°E—110.8°E、19.9°N—21.4°N, 主要区域为琼州海峡附近, 并在马袅湾海域进行局部加密, 最小网格分辨率约为 100 m, 如图2 所示。

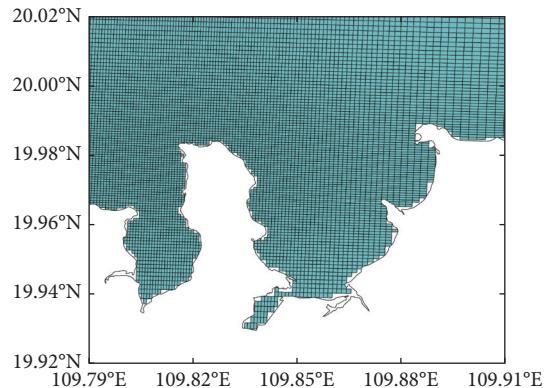


图2 马袅湾区域网格系统

Fig. 2 Grid system for Maniao Bay

1.5 模型验证

选取秀英站和湛江站天文潮的模拟结果与国家海洋信息中心编制的潮汐表数据进行对比, 结果如图3 所示。模拟结果与实测数据之间的平均绝对误差 (MAE)、均方根误差 (RMSE) 和相关系数 (CC), 结果如表1 所示。可以看出, 天文潮的模拟结果具有较好的一致性, 平均绝对误差小于 0.14 m, 均方根误差不超过 0.17 m, 相关系数均在 0.97 以上。

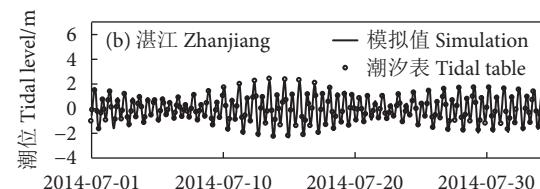


图3 各观测站天文潮潮位验证

Fig. 3 Astronomical tidal level verification

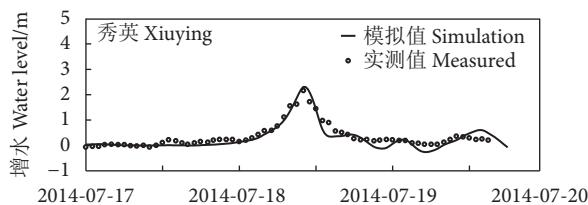


图4 观测站风暴增水验证

Fig. 4 Storm surge verification at observation stations

选择“威马逊”、“海鸥”和“启德”台风期间的秀英、东方站和浮标测点 Buoy2^[42] 实测浪高对

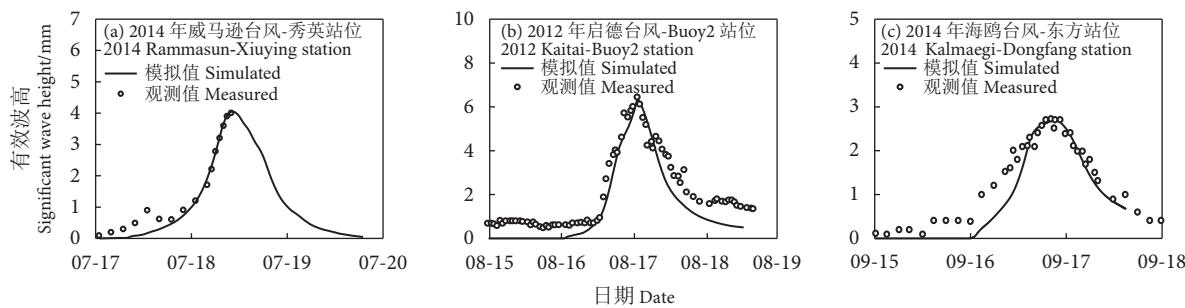


图5 “威马逊”、“启德”和“海鸥”台风有效波高结果比较

Fig. 5 Verification of significant wave height results for typhoons Rammasun, Kaitai and Kalmaegi

模型进行验证,结果见图5。模拟和实测误差的RMSE、MAE和平均绝对百分比误差(MAPE)见表2。

表2 台风浪模拟精度

Table 2 Significant wave height accuracy

观测站 Observation station	平均绝对 误差 MAE/m	均方根 误差 RMSE/m	平均绝对 百分比误差 MAPE/%	相关系数 Correlation coefficient
秀英 Xiuying	0.179	0.255	7.4	0.992
浮标测点 Buoy2	0.425	0.520	18.3	0.980
东方 Dongfang	0.238	0.335	14.6	0.934

模型在天文潮、风暴潮增水以及台风浪的模拟中,模拟结果均与实测值吻合较好,模型具有较高的准确性。

2 不同台风对网箱养殖区的影响

2.1 台风路径分类

依据马袅湾的地理位置,参考先前的研究^[43],将影响该区域的台风路径划分为4种类型(图6):第I类台风路径斜穿海南东北部或雷州半岛,然后向西北移动进入北部湾;第II类台风路径自东向西横穿过海南岛,然后进入北部湾;第III类台风路径沿海南省以东海域向北移动,最终在广东省附近登陆;第IV类台风路径从海南岛南部海域环绕海南岛向北发展进入北部湾。统计1995—2022年间对马袅湾产生显著影响的52场台风,各类台风路径的发生频次及强度如图7所示。结果表明,第I和第II类台风发生频次较高,均为18场(34.6%);第III类台风次之,11场(21.2%);第IV类台风最少,仅5场(9.6%)。在52场台风中,“强台风”和“超强台风”共10场,其中第I、第II类台风各4场;第III类2场;第IV类路径台风等级较低。由此可见,第I、第II类台风对马袅湾海域构成的潜在风险更大。

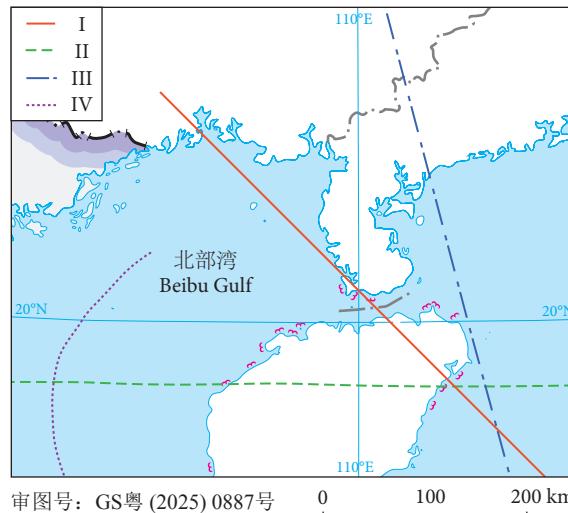


图6 台风路径分类

Fig. 6 Classification of typhoon track

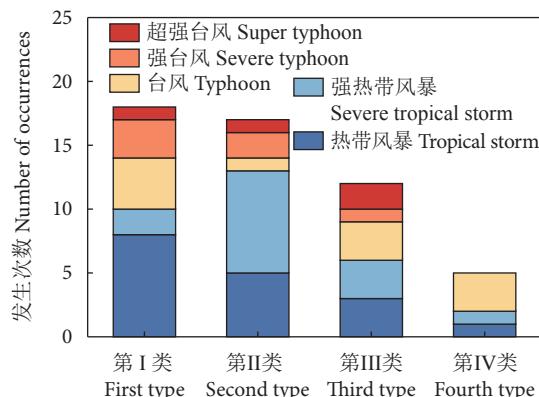


图7 不同台风路径下各等级台风发生次数

Fig. 7 Number of various levels of typhoons under different tracks

2.2 第I类台风对网箱养殖区的影响

本研究选取2014年第1409号台风“威马逊”(Rammasun)作为第I类路径的典型案例进行分析(图8)。该台风于2014年7月10日在西北太平洋海域生成,7月15日首次在菲律宾登陆,随后于7月18日以中心气压910 hPa、最大风速 $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的强度在中国海南省文昌市二次登陆。台风穿越

雷州半岛进入北部湾后，强度减弱至中心气压940 hPa、最大风速 $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。对“威马逊”台风过境期间的波流过程进行了模拟，获得了各网格点的有效波高和流场变化过程。进一步统计台风过程中

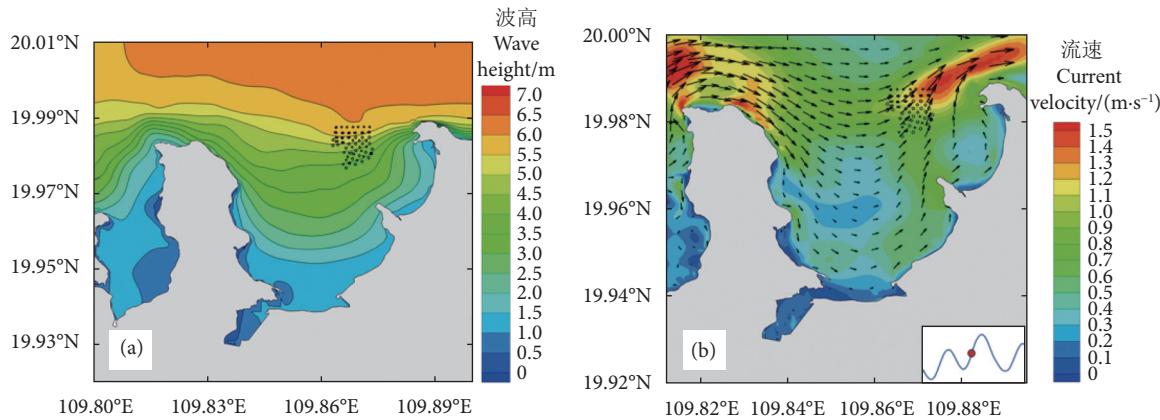


图8 “威马逊”台风下养殖区有效波高最大值分布及最大流速时刻流场

注: a. 养殖区有效波高最大值分布; b. 养殖区内最大流速时刻流场。

Fig. 8 Distribution of maximum significant wave height and maximum flow velocity moment flow field in aquaculture area under typhoon Rammasun

Note: a. Distribution of maximum significant wave height in the aquaculture area; b. Maximum flow velocity moment flow field in the aquaculture area.

以“威马逊”台风为模板，将原台风路径沿经度方向南北平移，平移间距为 0.3° ，构造出R1—R8共8场台风(图9)。以构造的路径为基础，将每条路径下台风的强度等级按GB/T 19201—2006《热带气旋等级》依次设置为“超强台风”、“强台风”和“台风”，不同强度台风对应的参数统一取值如表3所示，共构造出27场设计台风。图10为R1—R8路径不同强度作用下马袅湾养殖区内的有效波高及流速最大值。

总体而言，随着台风路径与养殖区距离的减

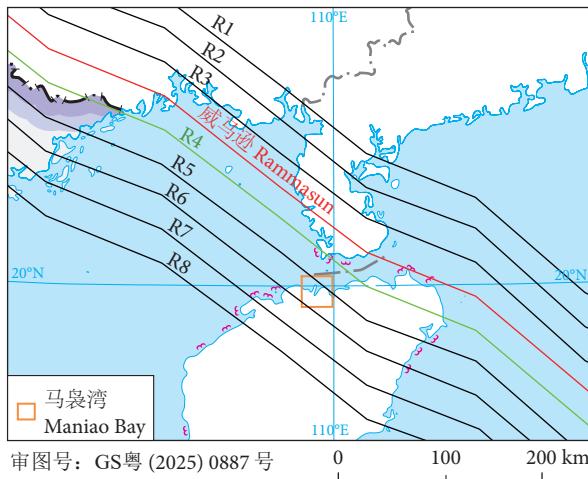


图9 “威马逊”台风路径及平移路径
Fig. 9 Track and projected track of typhoon Rammasun

各网格点有效波高的最大值，得到了研究区域有效波高最大值分布及养殖区内流速最大时刻流场(图8)。养殖区内有效波高范围为 $3.84\sim5.94 \text{ m}$ ，流速范围为 $0.62\sim1.42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

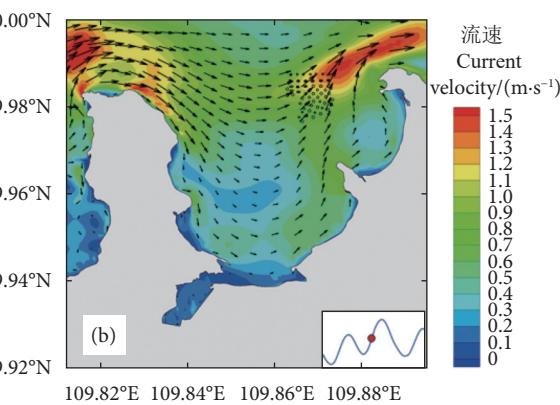


表3 台风等级相关参数信息
Table 3 Information on parameters related to typhoon levels

台风等级 Typhoon intensity level	最大风速 Maximum wind speed/(m·s ⁻¹)	中心气压 Central pressure/hPa
超强台风 Super Typhoon	51.0	944
强台风 Severe Typhoon	41.5	962
台风 Typhoon	32.7	977

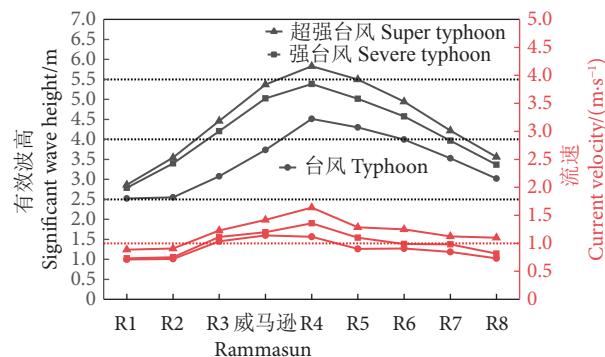


图10 马袅湾养殖区内有效波高及流速最大值
Fig. 10 Maximum significant wave height and current velocity in aquaculture area of Maniao Bay

小，各强度台风在养殖区内引发的 $H_{S_{\max}}$ 与 V_{\max} 均呈递增趋势。R4路径台风导致的 $H_{S_{\max}}$ 与 V_{\max} 均为最大，对养殖区的威胁最显著。这是由于R4台风路径位于马袅湾东北方向，台风中心距离

较近，其逆时针旋转风场驱动波浪自湾口向湾内传播所致。在相同路径条件下，台风强度是影响网箱养殖区的关键因素，当台风强度减弱时，养殖区 $H_{S_{\max}}$ 与 V_{\max} 均相应降低，威胁程度减小。在“台风”、“强台风”和“超强台风”等级下，路径每平移 0.3° ， $H_{S_{\max}}$ 平均变化幅度为 $12.77\% \sim 15.57\%$ ， V_{\max} 平均变化幅度为 $12.33\% \sim 14.45\%$ 。

当台风等级为“超强台风”时，R3—R8 路径下养殖区内 $V_{\max} \geq 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，为严重影响区域。其中，R4 路径台风引发的 $H_{S_{\max}} > 5.5 \text{ m}$ 且 $V_{\max} > 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，是影响程度最严重的路径。对于“强台风”等级，R3—R5 路径下 $V_{\max} \geq 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，养殖区受严重影响；R6 路径下网箱养殖区内 $V_{\max} < 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，但由于 $4 \text{ m} \leq H_{S_{\max}} < 5.5 \text{ m}$ ，养殖区受中等程度影响；

而在 R3 以北和 R6 以南路径下，养殖区内 $V_{\max} < 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 且 $2.5 \text{ m} \leq H_{S_{\max}} < 4 \text{ m}$ ，网箱养殖区受轻微影响。在“台风”等级情况下，“威马逊”至 R6 路径之间的范围均会导致养殖区内 $V_{\max} \geq 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，网箱养殖区受严重影响；而“威马逊”以北和 R6 以南路径下， $V_{\max} < 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 且 $2.5 \text{ m} \leq H_{S_{\max}} < 4 \text{ m}$ ，养殖区仅受轻微影响。

2.3 第 II 类台风对网箱养殖区的影响

选取 2021 年第 2118 号台风“圆规”(Kompasu)作为第 II 类台风路径的典型代表。图 11 为该台风下养殖区有效波高最大值分布及最大流速时刻流场，马袅湾内部有效波高较小，均在 4 m 以下，特别是在网箱养殖区，波高介于 2.5~3.3 m，流速介于 $0.33 \sim 0.65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

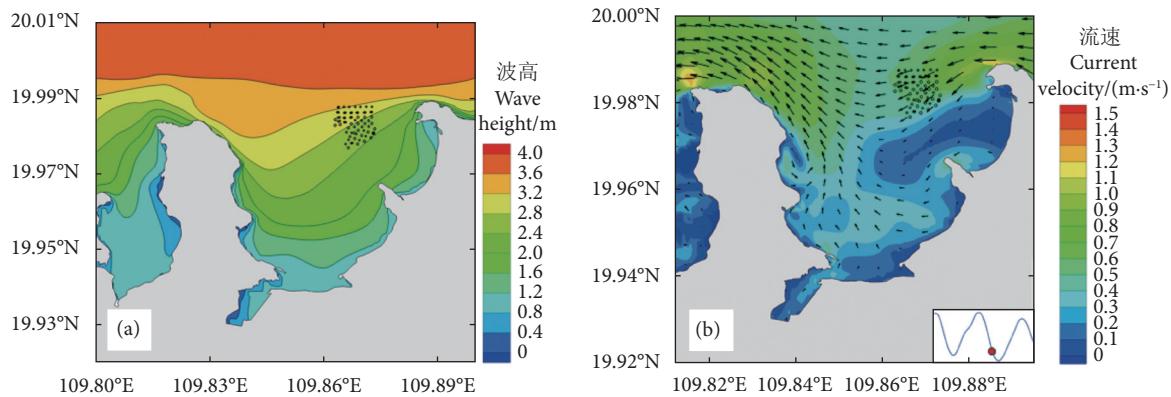


图11 “圆规”台风下养殖区有效波高最大值分布及最大流速时刻流场

注：a. 养殖区有效波高最大值分布；b. 养殖区内最大流速时刻流场。

Fig. 11 Distribution of maximum significant wave height and maximum flow velocity moment flow field in aquaculture area under typhoon Kompasu

Note: a. Distribution of maximum significant wave height in the aquaculture area; b. Maximum flow velocity moment flow field in the aquaculture area.

将次平移的间距设定为 0.3° ，构建了 K1、K2、K3、K4 和 K5 共 5 条设计台风路径，如图 12 所示。将每条路径的台风强度分别设定为“超强台风”、“强台风”和“台风”，共构建出 18 场设计台风。图 13 为不同强度和路径的台风作用下网箱养殖区内有效波高及流速最大值。整体上看，随着台风路径从南向北移动， $H_{S_{\max}}$ 与 V_{\max} 均随路径的北移呈先增后减的趋势。“台风”、“强台风”、“超强台风”等级下，每平移 0.3° ， $H_{S_{\max}}$ 平均变化幅度为 $13.91\% \sim 16.90\%$ ， V_{\max} 平均变化幅度为 $5.57\% \sim 14.55\%$ 。

当台风等级为“超强台风”时，K2 和 K3 路径下的网箱养殖区 $V_{\max} \geq 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，属于严重影响区域；K1 和 K4 路径下的养殖区 $V_{\max} < 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 且 $4 \text{ m} \leq H_{S_{\max}} < 5.5 \text{ m}$ ，属于中等影响区域；而“圆规”和

K5 路径下的 $V_{\max} < 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 且 $2.5 \text{ m} \leq H_{S_{\max}} < 4 \text{ m}$ ，属于轻微影响区域。当台风等级为“强台风”时，

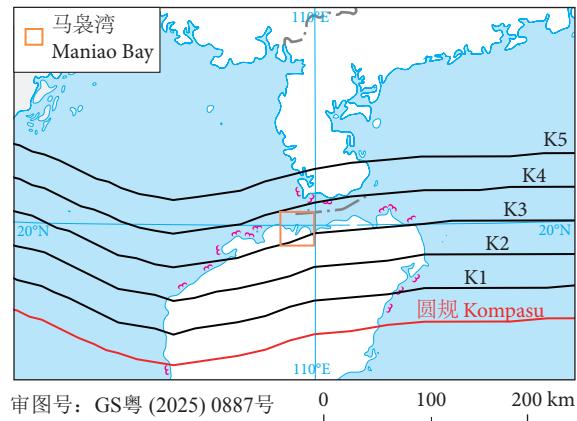


图12 “圆规”台风路径及平移路径

Fig. 12 Track and projected track of typhoon Kompasu

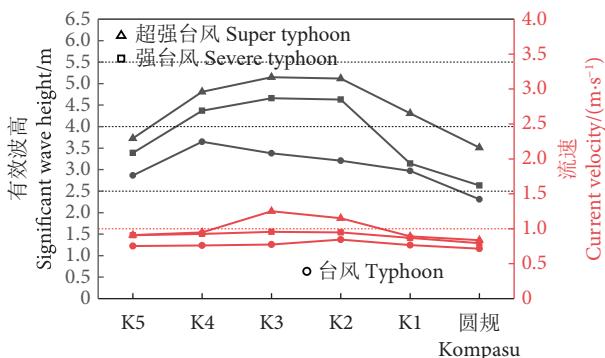


图13 马袅湾养殖区内有效波高及流速最大值

Fig. 13 Maximum significant wave height and current velocity in aquaculture area of Maniao Ba

各路径下的养殖区 V_{max} 均小于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 其中 K2—K4 路径下 $4 \text{ m} \leq H_{S_{max}} < 5.5 \text{ m}$, 网箱养殖区

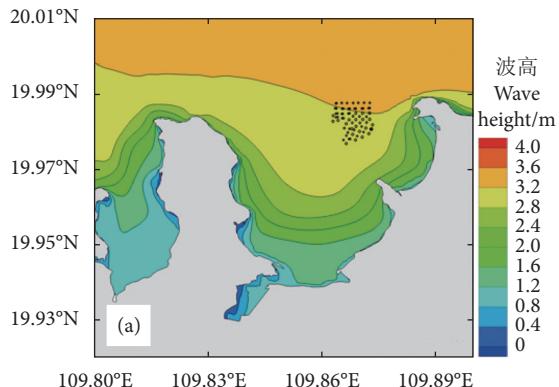


图14 “黄蜂”台风下养殖区有效波高最大值分布及最大流速时刻流场

注: a. 养殖区有效波高最大值分布; b. 养殖区内最大流速时刻流场。

Fig. 14 Distribution of maximum significant wave height and maximum flow velocity moment flow field in aquaculture area under typhoon Vongfong

Note: a. Distribution of maximum significant wave height in the aquaculture area; b. Maximum flow velocity moment flow field in the aquaculture area.

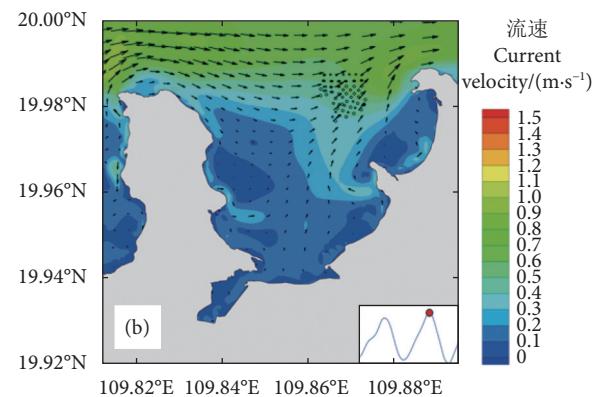
依据路径类型定义范围, 设置平移间距为 0.6° , 将原台风路径南向平移构建出 V1、V2 和 V3 共 3 条新的设计台风路径(图 15)。在此基础上, 将等级分别设置为“超强台风”、“强台风”和“台风”, 共构建出 12 场不同的设计台风。图 16 为不同强度和路径的台风作用下网箱养殖区内的 $H_{S_{max}}$ 和 V_{max} 。总体上看, 随着台风路径向南移动, $H_{S_{max}}$ 和 V_{max} 逐渐增大。“台风”、“强台风”和“超强台风”等级下, 每平移 0.6° , $H_{S_{max}}$ 平均变化幅度为 $9.17\% \sim 11.76\%$, V_{max} 平均变化幅度为 $4.01\% \sim 7.57\%$ 。

当台风等级为“超强台风”时, V2 和 V3 路径下的养殖区 $V_{max} \geq 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 属于严重影响区域; V1 路径下的养殖区 $V_{max} < 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 且 $4 \text{ m} \leq$

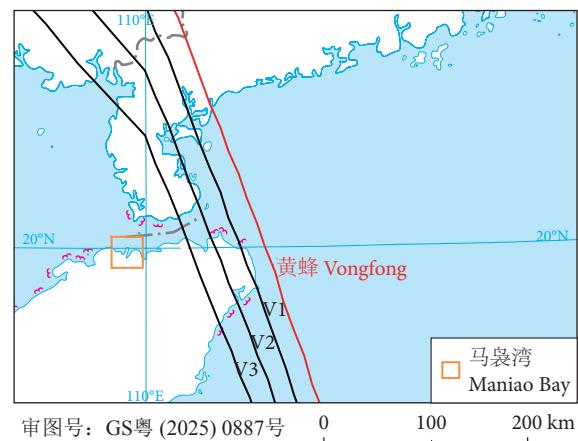
会受中等程度影响, “圆规”、K1 和 K5 路径下 $2.5 \text{ m} \leq H_{S_{max}} < 4 \text{ m}$, 网箱养殖区受轻微影响。台风等级为“台风”时, 各路径下的养殖区 V_{max} 均小于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, K1—K5 路径下 $2.5 \text{ m} \leq H_{S_{max}} < 4 \text{ m}$, 网箱养殖区受轻微影响, “圆规”路径下 $H_{S_{max}} < 2.5 \text{ m}$, 网箱养殖区不受影响。

2.4 第 III 类台风对网箱养殖区的影响

选取 2002 年第 0214 号强台风“黄蜂”(Vongfong)作为第 III 类路径的典型代表。“黄蜂”过境过程中在马袅湾引起的有效波高最大值分布及在养殖区内引起最大流速时刻的马袅湾流场如图 14 所示。可以看出, 在网箱养殖区内, 波高主要集中在 $3.0 \sim 3.3 \text{ m}$ 之间, 流速介于 $0.33 \sim 0.71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。



$H_{S_{max}} < 5.5 \text{ m}$, 属于中等影响区域; 而“黄蜂”路径下的养殖区 $2.5 \text{ m} \leq H_{S_{max}} < 4 \text{ m}$ 且 $V_{max} < 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,

图15 “黄蜂”路径及平移路径
Fig. 15 Track and projected track of typhoon Vongfong

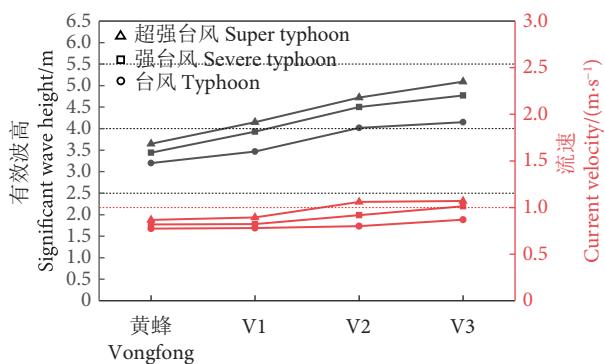


图16 马袅湾养殖区内有效波高及流速最大值

Fig. 16 Maximum significant wave height and current velocity in aquaculture area of Maniao Bay

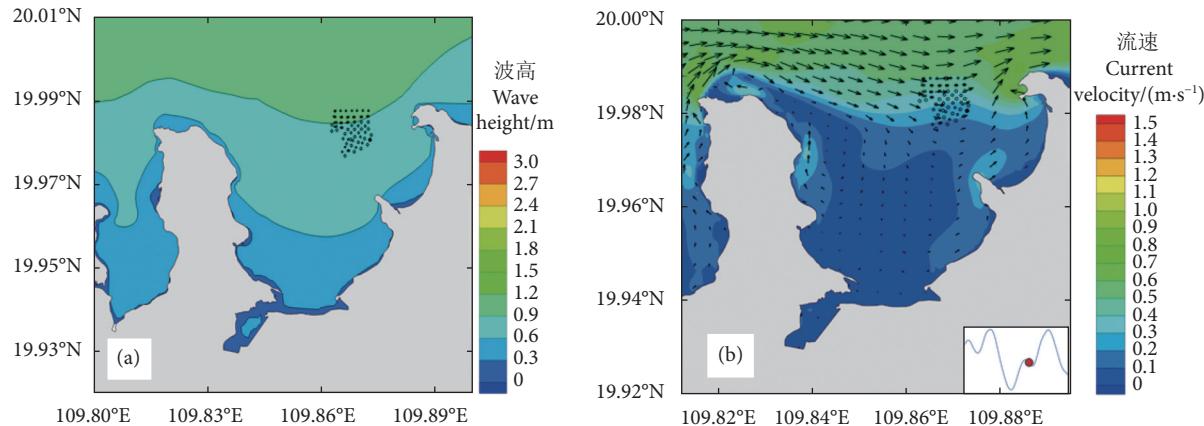


图17 “泰德”台风下养殖区有效波高最大值分布及最大流速时刻流场

注: a. 养殖区有效波高最大值分布; b. 养殖区内最大流速时刻流场。

Fig. 17 Distribution of maximum significant wave height and maximum flow velocity moment flow field in aquaculture area under typhoon Ted

Note: a. Distribution of maximum significant wave height in the aquaculture area; b. Maximum flow velocity moment flow field in the aquaculture area.

2.5 第IV类台风对网箱养殖区的影响

选取1995年第9516号台风“泰德”(Ted)作为第IV类台风路径的典型代表案例。图17为“泰德”台风下养殖区的有效波高最大值分布及最大流速时刻的流场。可以看出，该台风在养殖区引发的最大波高为0.8~0.9 m，流速范围为0.17~0.55 m·s⁻¹。

结合路径类型的定义范围，将原路径向东以0.3°为间距平移，构造出T1、T2、T3和T4共4条设计台风路径(图18)。将每条路径的台风强度分别设定为“超强台风”、“强台风”和“台风”，共构建出15场设计台风。图19为不同强度与路径台风作用下网箱养殖区的 $H_{S_{\max}}$ 和 V_{\max} 。总体上看，随着台风路径向东移动， $H_{S_{\max}}$ 和 V_{\max} 逐渐增大。在“台风”、“强台风”和“超强台风”等级下，每东移0.3°， $H_{S_{\max}}$ 平均变化幅度为22.32%~

属于轻微影响区域。当台风等级为“强台风”时，V3路径下的养殖区 $V_{\max} \geq 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，受严重影响；在“黄蜂”至V2路径范围内，养殖区 V_{\max} 均小于1 m·s⁻¹，其中V2路径下 $4 \text{ m} \leq H_{S_{\max}} < 5.5 \text{ m}$ ，网箱养殖区受中等程度影响；而“黄蜂”和V1路径下 $2.5 \text{ m} \leq H_{S_{\max}} < 4 \text{ m}$ ，网箱养殖区受轻微影响。在台风等级为“台风”时，各路径下的养殖区 V_{\max} 均小于1 m·s⁻¹。其中，V2和V3路径下网箱养殖区 $4 \text{ m} \leq H_{S_{\max}} < 5.5 \text{ m}$ ，受中等程度影响；而“黄蜂”和V1路径下 $2.5 \text{ m} \leq H_{S_{\max}} < 4 \text{ m}$ ，均受轻微影响。

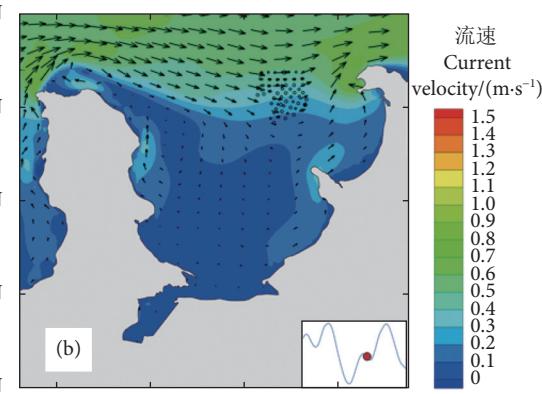


图18 “泰德”路径及平移路径

Fig. 18 Track and projected track of typhoon Ted

“强台风”等级的 T4 路径下, 养殖区出现 $V_{max} > 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。本研究表明, 第 IV 类台风对网箱养殖区安全构成的威胁相对较小。

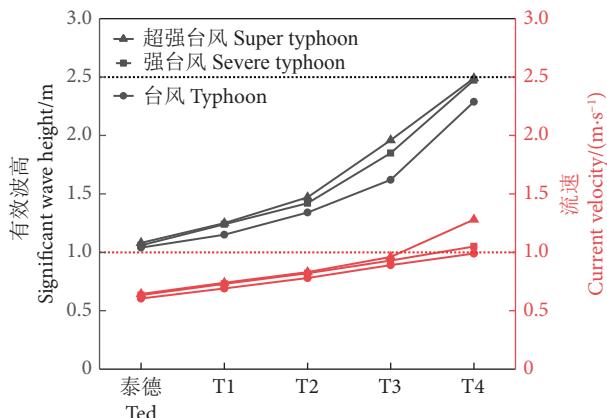


图19 马袅湾养殖区内有效波高及流速最大值
Fig. 19 Maximum significant wave height and current velocity in aquaculture area of Maniao Bay

3 结论

本研究基于 Holland 风场模型和 Delft3D 软件建立了适用于海南省马袅湾的台风波流耦合模型, 深入探究了台风路径及其强度对网箱养殖区的影响, 得到以下结论:

1) 第 I 类台风路径发生频率高, 覆盖范围广, 影响程度大。“超强台风”等级时, 路径每平移 0.3° , $H_{S_{max}}$ 平均变化 15.57%, V_{max} 平均变化 13.15%。R3—R8 路径均会使马袅湾养殖区受到严重影响, 其中 R4 路径下, 养殖区 $H_{S_{max}} > 5.5 \text{ m}$, $V_{max} > 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 遇到类似台风时应立即预警并做好周全保护措施, 而 R3 以北路径台风对网箱养殖区影响轻微; 当等级为“强台风”时, $H_{S_{max}}$ 平均变化 14.45%, V_{max} 平均变化 14.84%, 在 R3—R5 路径下, 网箱养殖区受严重影响, 应立即预警, R6 路径下, 养殖区受中等程度影响, R3 以北和 R6 以南路径的台风, 对网箱养殖区的影响轻微; 当等级降至“台风”时, $H_{S_{max}}$ 平均变化 12.77%, V_{max} 平均变化 12.33%, “威马逊”至 R6 路径的范围会使网箱养殖区受严重影响, 均应立即预警, 而“威马逊”以北和 R6 以南路径台风的影响程度轻微, 可适度预警。

2) 第 II 类台风作用下, “台风”、“强台风”、“超强台风”等级下, 每平移 0.3° , $H_{S_{max}}$ 平均变化幅度为 13.91%~16.90%, V_{max} 平均变化幅度为 5.57%~14.55%。“超强台风”等级时 K2—K3 路径

下, 网箱养殖区受严重影响; “超强台风”等级时 K1 与 K4 路径、“强台风”等级时 K2—K4 路径, 网箱养殖区受中等程度影响, 应快速预警; 其余情况下, 网箱养殖区受轻微及以下影响, 可适度预警并采取设施检查等措施。

3) 第 III 类台风作用下, “台风”、“强台风”和“超强台风”等级下, 每平移 0.6° , $H_{S_{max}}$ 平均变化幅度为 9.17%~11.76%, V_{max} 平均变化幅度为 4.01%~7.57%。等级为“超强台风”时的 V2 与 V3 路径下、“强台风”等级的 V3 路径下, 网箱养殖区受严重影响; 等级为“超强台风”时的 V1 路径、“强台风”和“台风”等级的 V2 路径、“台风”等级的 V3 路径下, 网箱养殖区受中等程度影响, 应快速预警, 可采取设施加固等措施; 其余情况下, 网箱养殖区受轻微影响, 应适度预警。

4) 第 IV 类台风作用下, “台风”、“强台风”和“超强台风”等级下, 每平移 0.3° , $H_{S_{max}}$ 平均变化幅度为 22.32%~23.88%, V_{max} 平均变化幅度为 13.11%~19.02%。第 IV 类台风中心距马袅湾较远, 仅在“超强台风”和“强台风”等级的 T4 路径下, 养殖区 $V_{max} > 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 对养殖区影响严重。其余情况下, 养殖区处于安全状态, 无需预警。

本研究采用有效波高最大值和流速最大值作为预警依据, 所得结果可为后续建立马袅湾网箱养殖区的台风防灾减灾快速预警系统提供依据。然而, 网箱破坏是一个复杂的过程, 后续将依据马袅湾不同的波流工况对网箱承载能力进行研究, 以获得更科学的预警判据, 提升预警的精度。

参考文献:

- [1] 赵广生, 牛小静. 海南岛历史风暴潮模拟和灾害风险评估[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2022, 37(6): 831-836.
- [2] SHI X W, ZHENG S X, LIU Q, et al. Research on numerical simulation of typhoon waves with different return periods in nearshore areas: case study of Guishan Island waters in Guangdong Province, China[J]. Stoch Environ Res Risk Assess, 2021, 35: 1771-1781.
- [3] 姜雨青, 张俊波, 国志兴, 等. 我国沿海渔业养殖设施空间分布与台风影响关联性研究[J]. 海洋湖沼通报, 2023, 45(1): 183-192.
- [4] 石振强. 深水网箱浮圈水动力特性理论及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015: 1-2.
- [5] 黄小华, 郭根喜, 陶启友, 等. HDPE 圆形重力式网箱受力变形特性的数值模拟[J]. 南方水产科学, 2013, 9(5): 126-131.

- [6] 刘春宏. 海水网箱养殖区周围流场特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2020: 34-35.
- [7] 姜雨青. 台风对我国沿海设施渔业影响的关联性及灾害评估[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021: 53-55.
- [8] 黄滨, 关长涛, 崔勇, 等. 台风“米雷”对山东网箱养殖业灾害性影响的调查与技术解析[J]. 渔业现代化, 2011, 38(4): 17-21.
- [9] 张润川. 台风灾害链网络构建及其演化特征研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2023: 34-44.
- [10] 吴亚男, 左军成, 吕晓凤, 等. 舟山海域风暴潮增水数值分析: 台风“灿鸿”为例[J]. 海洋湖沼通报, 2017(6): 38-45.
- [11] 原楠, 陈新平, 陈学恩, 等. 罗源湾海域台风风暴潮数值模拟研究[J]. 海洋通报, 2019, 38(1): 20-30.
- [12] 罗志发, 黄本胜, 邱静, 等. 粤港澳大湾区风暴潮时空分布特征及影响因素[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 72-79, 153.
- [13] BI C W, ZHAO Y P, SUN X X, et al. An efficient artificial neural network model to predict the structural failure of high-density polyethylene offshore net cages in typhoon waves[J]. *Ocean Engin*, 2020, 196: 106793.
- [14] ZHANG Y, GUO H S, LIU S, et al. Fatigue vulnerability of sea cage to storm wave loads[J]. *J Mar Sci Technol*, 2022, 28(1): 153-164.
- [15] LI L, FU S X, XU Y W. Nonlinear hydro-elastic analysis of an aquaculture fish cage in irregular waves[J]. *Mar Struc*, 2013, 34: 56-73.
- [16] YIN C, HUANG H J, WANG D R, et al. The characteristics of storm wave behavior and its effect on cage culture using the AD-CIRC+SWAN model in Houhai Bay, China[J]. *J Ocean Univ China*, 2020, 19(2): 307-319.
- [17] 孙熊雄. 基于机器学习的重力式深水网箱受灾风险评估分析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019: 26-31.
- [18] 刘圣聪, 黄六一, 倪益, 等. 水下圆形重力式网箱缆绳张力对波、流的响应特性[J]. 水产学报, 2019, 43(6): 1518-1526.
- [19] 孟范兵. 波流作用下深水重力式网箱水动力特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014: 44-53.
- [20] 黄婉茹, 郭敬, 谭骏, 等. 风暴潮灾害承灾体风险预警技术研究[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(4): 85-93.
- [21] 于松辰. 波流作用下重力式网箱动力响应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019: 1-3.
- [22] 朱磊, 刘会欣. 基于Delft3D模型的风暴潮增减水模拟研究: “9711”号台风为例[J]. 海洋湖沼通报, 2018(5): 1-10.
- [23] 孙志林, 王辰, 钟虹虹, 等. 波浪耦合的舟山渔港台风风暴潮数值模拟[J]. 海洋通报, 2019, 38(2): 150-158.
- [24] HU K, MESELHE E, RHODE R, et al. The impact of levee openings on storm surge: a numerical analysis in Coastal Louisiana[J]. *Appl Sci*, 2022, 12(21): 10884.
- [25] MCLAUGHLIN C, LAW B, MULLIGAN R. Modeling surface waves and tide-surge interactions leading to enhanced total water levels in a macrotidal bay[J]. *Coast Engin J*, 2022, 64(1): 24-41.
- [26] FUJITA T. Pressure distribution within typhoon[J]. *Geophys Mag*, 1952, 23: 437-451.
- [27] MYERS V A. Maximum hurricane winds[J]. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1957, 38: 227-228.
- [28] JELESNIANSKI C P. A numerical calculation of storm tides induced by a tropical storm impinging on a continental shelf[J]. *Mon Weather Rev*, 1965, 93(6): 343-358.
- [29] HOLLAND G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes[J]. *Mon Weather Rev*, 1980, 108(8): 1212-1218.
- [30] VICKERY P J, SKERLJ P F, STECKLEY A C, et al. Hurricane wind field model for use in hurricane simulations[J]. *J Struct Eng*, 2000, 126(10): 1203-1221.
- [31] WILLOUGHBY H E, RAHN M E. Parametric representation of the primary hurricane vortex. part I: observations and evaluation of the Holland (1980) model[J]. *Mon Weather Rev*, 2004, 132(12): 3033-3048.
- [32] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 2014, 31(2): 287-301.
- [33] LU X Q, YU H, YING M, et al. Western north pacific tropical cyclone database created by the China meteorological administration[J]. *Adv Atmos Sci*, 2021, 38(4): 1-10.
- [34] PHILLIPS N A. A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting[J]. *J Meteorol Res*, 1957, 14: 184-185.
- [35] BOOIJ N, RIS R C, HOLTHUIJSEN L H. A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation[J]. *J Geophys Res Atmos*, 1999, 104(4): 7649-7666.
- [36] WU G X, SHI F Y, KIRBY J T, et al. Modeling wave effects on storm surge and coastal inundation[J]. *Coast Engin*, 2018, 140: 371-382.
- [37] 徐亚男. 风暴潮与波浪耦合数值预报模型的研究[D]. 天津: 天津大学, 2012: 26-27.
- [38] PINDSOO K, SOOMERE T. Contribution of wave set-up into the total water level in the Tallinn area[J]. *Proc Est Acad Sci*, 2015, 64(3): 338-348.
- [39] 薛鸿超, 顾家龙, 任汝述. 海岸动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 1980: 129-167.
- [40] BROWN M J, WOLF J. Coupled wave and surge modelling for the eastern Irish Sea and implications for model wind-stress[J]. *Cont Shelf Res*, 2009, 29(10): 1329-1342.
- [41] 黄山. 琼州海峡风暴潮数值模拟与不同台风路径对增水的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 31-32.
- [42] 石青. 近岸台风浪及植被水流环境中的风浪数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020: 39-42.
- [43] 尹超. 海南岛近海热带气旋引起的台风浪风险评估研究[D]. 青岛: 中国科学院大学 (中国科学院海洋研究所), 2020: 43-45.