DOI: 10.3724/j.1007-6336.2025-0027

台风“利奇马”影响下莱州湾氮、磷营养盐时空变化及其生态效应的数值模拟研究

刘万景[1,2]， 辛 力[1,3]， 张 宝[1,2]， 张学庆[1,2]

[1.中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2.中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 3.华澜海(青岛)海洋科技有限公司, 山东 青岛 266100]

摘 要: 台风对半封闭海湾生态环境具有显著影响。本文以 2019 年 8 月的台风“利奇马”对莱州湾的影响为例, 通过构建莱州湾的物理−生物耦合数值模型, 研究台风影响下溶解无机氮（dissolved inorganic nitrogen, DIN）和溶解无机磷（dissolved inorganic phosphorus, DIP）的时空分布及其生态效应。研究结果表明: 台风期间, 环莱州湾河流脉冲式输入氮、磷营养盐, 使莱州湾营养盐得到相应的补充。台风后, 河口附近海域 DIN 和 DIP 浓度都有一定程度的升高, 弥河口最为显著, 分别达到 4 mg/L 和 0.15 mg/L; 同时, 弥河口叶绿素 *a*（Chlorophyll *a*, Chl *a*）浓度超过 10 μg/L, 伴随出现藻华暴发现象。Chl *a* 浓度对浮游植物的最大生长率、P-I 曲线初始斜率和死亡率较为敏感。本研究定量分析了台风对半封闭海湾生态过程的影响, 为莱州湾的环境管理与生态灾害防控提供了科学参考。

关键词: 台风; 莱州湾; 物质输运; 营养盐; 藻华

中图分类号: X143 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-6336(2026)01-0106-10

Numerical simulation of nitrogen-phosphorus nutrient dynamics and ecological responses in Laizhou Bay during typhoon Lekima

Liu Wanjing[1,2], Xin Li[1,3], Zhang Bao[1,2], Zhang Xueqing[1,2]

[1.College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2.Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education of China, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3.Hualanhai(Qingdao) Ocean Technology Co., Ltd, Qingdao 266100, China]

Abstract: Typhoons have a significant impact on the ecological environment of semi enclosed bays. This article takes the impact of typhoon Lekima on Laizhou Bay in August 2019 as an example, and constructs a physical biological coupled numerical model of Laizhou Bay to study the spatiotemporal distribution and ecological effects of dissolved inorganic nitrogen (DIN) and dissolved inorganic phosphorus (DIP) under the influence of typhoons. The research results indicate that during typhoons, the pulse type input of nitrogen and phosphorus nutrients into the rivers around Laizhou Bay leads to corresponding supplementation of nutrients in Laizhou Bay. After the typhoon, the concentrations of DIN and DIP in the waters near the estuary increased to a certain extent, with the most significant increase in the Mihe estuary, reaching 4 mg/L and 0.15 mg/L, respectively; At the same time, the concentration of chlorophyll *a* (Chl *a*) in the Mihe estuary exceeded 10 μg/L, accompanied by algal blooms. Chl *a* concentration is sensitive to the maximum growth rate, initial slope of P-I curve, and

收稿日期: 2025-02-22, **修订日期:** 2025-04-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2803803)

作者简介: 刘万景(2000−), 男, 山东东营人, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋环境数值模拟, E-mail: liuwanjing@stu.ouc.edu.cn

通信作者: 张学庆(1973−), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为海洋环境动力学, E-mail: zxq@ouc.edu.cn

mortality rate of phytoplankton. This study quantitatively analyzed the response of typhoons to ecological processes in semi enclosed bays, providing scientific reference for environmental management and ecological disaster prevention and control in Laizhou Bay.

Key words: typhoon; Laizhou Bay; material transport; nutrients; algal bloom

近年来，全球气候变化加剧了极端气象事件（如台风、强降雨）的频率与强度[1]，对近海生态环境造成极大破坏[2]。海湾作为陆海相互作用的敏感区域，兼具高生物多样性与生态脆弱性的特征，其水环境质量受陆源输入（如冲淡水、营养盐）与极端天气的协同影响[3]。半封闭海湾水体交换能力弱，对台风引发的物理扰动和物质输运响应尤为敏感[4]。台风对海湾的影响呈现多尺度耦合的特征：大风增强垂向与水平混合，改变环流结构，从而改变营养盐输运路径[5]；强降雨导致河流脉冲式营养盐输入海湾，为藻类暴发提供物质基础[6]。

2019 年 8 月，台风“利奇马”横跨华东多地，于 8 月 12 日进入莱州湾并滞留 30 h，随后向东北方向移动并减弱，最终到达渤海海峡附近，并于 8 月 13 日 14 时左右消失。本文以莱州湾为例，通过数值模拟研究台风“利奇马”对莱州湾营养盐输运以及生态过程的影响。莱州湾位于渤海南部，近年来富营养化程度加重[7]。《2023 年中国海洋生态环境质量状况公报》显示，莱州湾内水质较差，黄河口和小清河口附近海域为劣四类水质。溶解无机氮（DIN）和溶解无机磷（DIP）是富营养化的主要诱发因素[8]。近年来，径流携带的总氮输入量的增幅远高于总磷，导致浮游植物的生长限制由氮限制转向磷限制[9]。

台风“利奇马”期间，大量陆源污染物通过河流进入莱州湾，总氮和总磷入湾总量占全年的 17% 和 35%[10]，触发了硅藻−甲藻优势种藻华，湾内叶绿素 *a*（Chl *a*）浓度均超过 10 μg/L[11]。台风显著改变了湾内环流结构，使营养盐难以向外海扩散[12]。然而，现有研究多集中在物理或生物单一过程，对台风下营养盐输运与藻华动态的耦合机制缺乏系统解析。

莱州湾的生态模拟已有大量研究，例如，罗辰奕等[13]探讨了渤海生态模型的参数敏感性问题；Yi 等[14]模拟了黄河输入营养盐对河口的生态效应。然而，现有生态模型多聚焦于气候态，对台风等复杂情景下的模拟较少。本研究运用非结构有限体积海洋模型（Finite-Volume Community Ocean Model, FVCOM）与欧洲区域海生态模型（European Regional Sea Ecosystem Model, ERSEM）耦合模型，探究台风“利奇马”对莱州湾氮、磷营养盐和 Chl *a* 时空分布的影响机制，为莱州湾的生态环境保护提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　FVCOM 水动力模型

本研究采用 FVCOM 进行水动力场模拟。FVCOM 的原始控制方程包含连续方程、动量方程以及温度、盐度和密度方程，具体参见文献 [15]。FVCOM 利用有限体积法对控制方程进行离散，水平涡黏系数通过 Smagorinsky 公式计算，垂向湍流扩散系数使用 Mellor-Yamada 2.5 阶湍流封闭方案。FVCOM 可以模拟潮汐、径流、风应力、热通量和降雨等驱动因素对海洋环境的影响，能够较好地模拟台风过程[16]。

模型计算区域涵盖整个渤海及北黄海部分海域，海岸线数据提取自天地图的高分辨率卫星图像 [审图号：GS (2024) 0650 号]，开边界设定为成山头（37.28°N, 117.67°E）至丹东（39.80°N, 124.00°E）连线。模型水深数据采用最新版海军电子海图和海军航保部出版的海图。水平方向采用非结构三角形网格进行空间离散，共有 23387 个节点和 12790 个网格单元。垂向采用 σ 坐标，均匀分成 5 个 σ 层。模型计算区域网格及水深分布如图 1 所示。

模型开边界采用潮位边界条件，潮位通过 8 个主要分潮（M_2、S_2、O_1、K_1、N_2、K_2、P_1、Q_1）的调和常数预报得到，调和常数来自潮汐模型 EOT20（Empirical Ocean Tide Model），预报公式如下：

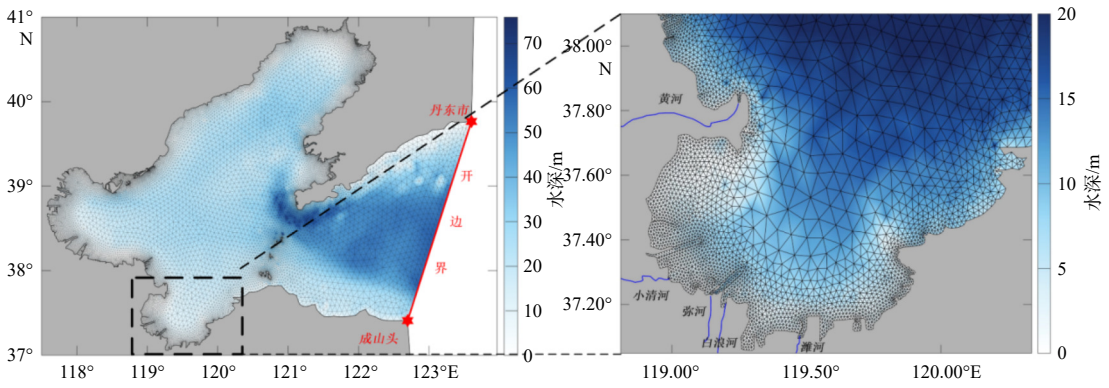


图 1 模型计算区域的网格及水深分布

Fig. 1 The grid and water depth distribution of the computational domain

$$\eta = \sum_{i=1}^{8} f_i \cdot h_i \cdot \cos(\omega_i \cdot t + V_{oi} + u_i - g_i) \quad (1)$$

式中：η 表示潮位；t 为时间；h_i、g_i、ω_i、f_i、V_{0i}、u_i 分别为第 i 个分潮的振幅、位相、角速度、交点因子、初位相和交点订正角。

模型初始场的海水温度数据来自 HYCOM（Hybrid Coordinate Ocean Model）数据集，空间分辨率为 1/12°。海水盐度数据来自英国气象局 OSTIA（Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis）数据集，空间分辨率为 1/12°。DIN 和 DIP 浓度参考 2019 年 8 月实测资料，Chl *a* 浓度设为 2 μg/L[10]。大气强迫数据来源于欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis v5, ERA5）再分析数据集，时间分辨率为 1 h，空间分辨率为 0.25°，能够很好地再现台风“利奇马”期间的风场[17]。河流边界考虑了黄河、小清河、弥河、白浪河和潍河的河流径流和营养盐通量，数据参考了相关文献[10]。

1.2 ERSEM 生态模型

本研究采用 ERSEM 进行生物过程模拟。ERSEM 涵盖生物过程较多，是目前对海洋生态系统描述最全面的生态动力学模型之一。ERSEM 将生化过程简化为 9 个模块，分别为营养盐、浮游植物、浮游动物、底栖系统、细菌、铁循环、光衰减、钙化和碱度，并将海洋生态系统划分为浮游生态系统和底栖生态系统。ERSEM 各状态变量的控制方程[18] 如下：

$$\frac{\partial C_p}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial C_p}{\partial x} + W_{sed}^{C_p} \cdot \frac{\partial C_p}{\partial z} = v\frac{\partial^2 C_p}{\partial x^2} + \frac{\partial C_p}{\partial t}|_{bgc} \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_b}{\partial t} = \frac{\partial C_b}{\partial t}|_{bgc} \quad (3)$$

式中：C_p 和 C_b 分别为浮游生态系统和底栖生态系统中 DIN、DIP 等物质的浓度；u 为海水流速；v 为扩散系数；bgc 为生物地球化学过程；W_{sed} 为水体中颗粒物的重力沉降速度。

ERSEM 中浮游植物的生物量以 Chl *a* 为指标，水体中 Chl *a* 浓度受到对流、扩散等物理过程以及浮游植物总生产力（gross primary production, gpp）、浮游植物排泄（excretion, exc）、呼吸（respiration, resp）、死亡（mortality, mort）和浮游动物捕食（predation, pred）等生物过程的影响，控制方程如下：

$$\frac{\partial P_{chl}}{\partial t}|_{bgc} = \frac{\partial P_{chl}}{\partial t}|_{gpp} - \frac{\partial P_{chl}}{\partial t}|_{exc} - \frac{\partial P_{chl}}{\partial t}|_{resp} - \frac{\partial P_{chl}}{\partial t}|_{mort} - \frac{\partial P_{chl}}{\partial t}|_{pred} \quad (4)$$

生态模型的关键参数设置，如浮游植物和浮游动物生长、死亡速率常数和营养盐吸收摄食速率等，参考莱州湾现场围隔生态实验结果[19]。其他参数采用文献中的值[20] 及 ERSEM 默认值。

1.3 模型验证数据

本研究对模拟的水位、流速流向、表层水温、盐度和无机氮进行了验证，监测数据分别来自国家海洋科学数据中心、现场观测、OSTIA 数据集和现场取样，监测站位如图 2 所示，海岸线来自天地图的高分辨率卫星图像 [审图号：GS(2024)0650 号]。

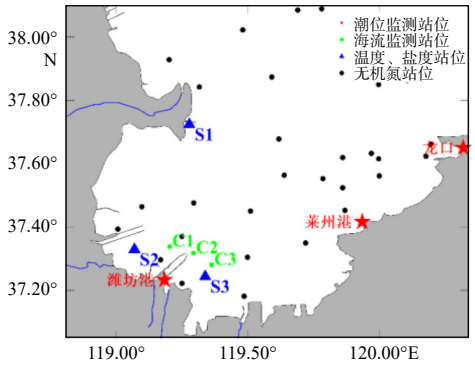


图 2　莱州湾监测站位分布

Fig. 2　Distribution of monitoring stations in Laizhou Bay

2　结果与讨论

2.1　模型验证

2.1.1　潮位验证

选取莱州湾海域的 3 个潮位监测站位(潍坊港、莱州港、龙口)进行水位验证，数据来源于国家海洋科学数据中心，验证时间为 2019 年 8 月 10 日至 20 日。水位模拟值与实际观测值比对情况如图 3 所示。

选取相关系数(correlation coefficient, *CC*)对水位验证进行量化评价，计算公式如下：

$$CC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_{\mathrm{m}} - \overline{X_{\mathrm{m}}})(X_0 - \overline{X_{\mathrm{m}}})}{\left[\sum_{i=1}^{n}(X_{\mathrm{m}} - \overline{X_{\mathrm{m}}})^2 \sum_{i=1}^{n}(X_0 - \overline{X_0})^2\right]^{1/2}} \quad (5)$$

式中：X_{m}为模型模拟值；$\overline{X_{\mathrm{m}}}$为模型模拟值的平均值；$X_0$为实际观测值；$\overline{X_0}$为实际观测值的平均值；$n$表示统计变量个数。

3 个潮位监测站位的 *CC* 值分别为 0.9271、0.9388、0.9328，均大于 0.9，表明模拟效果较好。

2.1.2　流速流向验证

选取莱州湾的 3 个海流观测站位进行流速和流向验证，数据来源为现场观测，监测站位如图 2 所示。监测时间为 2019 年 8 月 17 日至 18 日。流速流向的模拟值与实际观测值对比情况如图 4 所示。

流速和流向的模拟值与实际观测值变化趋势一致，流速、高低潮时刻及转流时刻的模拟值与实际观测值也吻合良好。选取 *skill* 系数对流速、流向验证进行量化评价，计算公式如下：

$$skill = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(|X_{\mathrm{m}} - X_o|)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(|X_{\mathrm{m}} - \overline{X}_{\mathrm{o}}| + |X_o - \overline{X}_o|\right)^2} \quad (6)$$

观测站位 C1、C2、C3 的流速 *skill* 系数分别为 0.9950、0.9748、0.9371，流向 *skill* 系数分别为 0.9962、0.9895、0.9430，均大于 0.9，表明流速和流向的模拟效果较好。

2.1.3　水温和盐度验证

选取黄河口、小清河口和潍河口 3 个站位(图 2)，对海水表层水温和盐度进行验证，观测数据来源于 OSTIA 数据集，验证时间为 2019 年

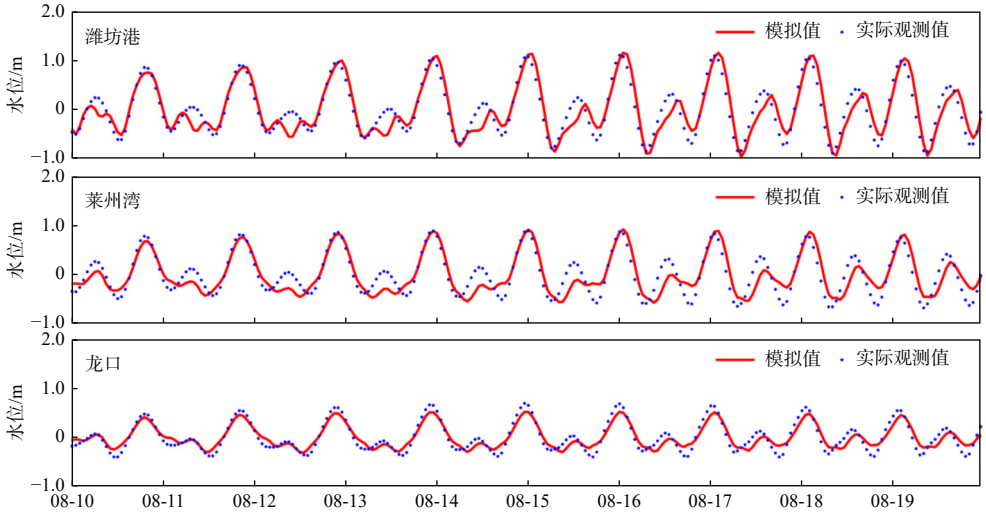


图 3　水位模拟值与实际观测值对比

Fig. 3　Comparison between simulated and measured water level values

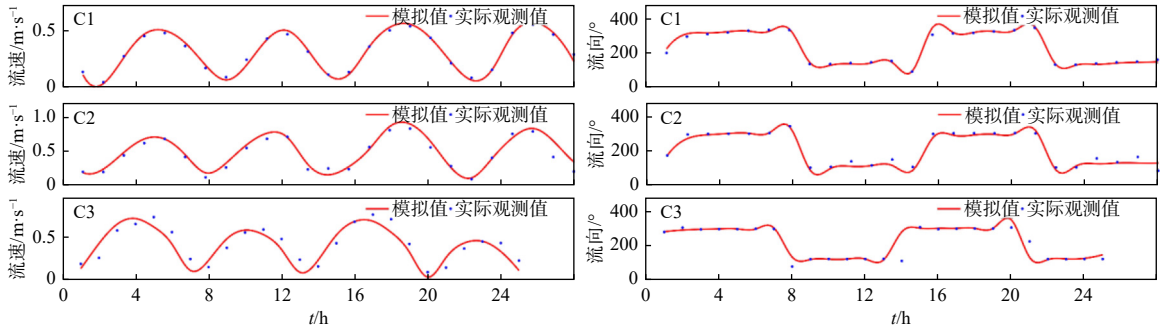


图 4 流速和流向的模拟值与实际观测值对比

Fig. 4 Comparison between simulated and measured values of flow velocity and direction

8 月 1 日至 30 日。模拟结果与实测结果对比情况如图 5 所示。水温和盐度的模拟值与实际观测值变化趋势基本一致，水温差异最大不超过 1 ℃，盐度差异最大不超过 2，模型模拟结果能较好地反映莱州湾在台风“利奇马”期间的温盐变化特征。

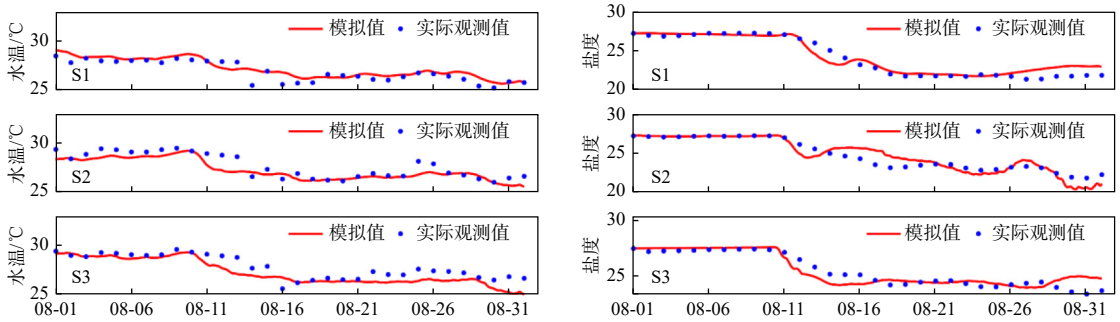


图 5 水温和盐度的模拟值与实际观测值对比

Fig. 5 Comparison between simulated and measured values of water temperature and salinity

2.1.4 无机氮模拟结果验证

本文采用台风“利奇马”过后的水质调查结果[10]对营养盐模拟结果进行验证，水质监测站位如图 2 所示。以 DIN 为例进行验证，如图 6 所示，DIN 模拟值与实际观测值的空间分布基本一致，*CC* 值为 0.9120，表明模拟值和实际观测值拟合良好。然而，由于小清河口和莱州湾南部近岸海域附近站位较少，实际观测值未能反映出这些区域的营养盐高浓度状况。

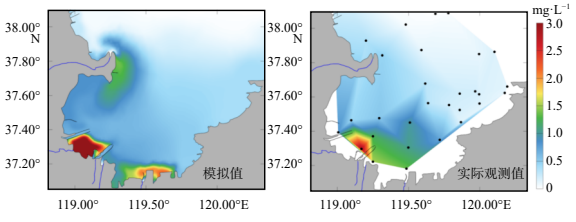


图 6 无机氮模拟值与实际观测值的比较结果

Fig. 6 Comparison between simulated and observed values of DIN

2.2 台风期间水动力特征

海流对营养盐输运起主导作用。台风前及台风期间一个潮周期内的流场如图 7 所示。

台风前，莱州湾海域涨落流主要呈东北−西南向往复运动，涨潮阶段流向为西南，落潮阶段流向为东北，最大流速均为 0.4 m/s。台风期间，莱州湾内流速明显增大，涨急时莱州湾西部和南部海域流速最大可达 1.2 m/s，落急时流速达 0.8 m/s。

2.3 台风期间营养盐输运及其生态效应

2.3.1 河口生源要素的时间变化

台风过程环莱州湾径流脉冲式输入，相当程度上补充了河口及其邻近海域氮、磷营养盐。为深入了解该过程，本研究在 4 个河口（黄河口、小清河口、弥河口和潍河口）各选取一个代表点进行分析，各代表点的 DIN、DIP、Chl *a* 浓度及

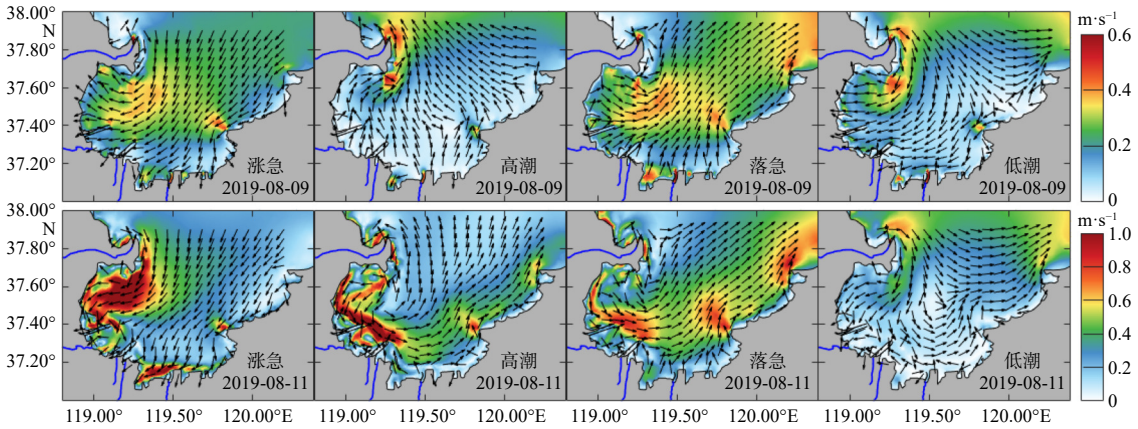


图 7　莱州湾涨急、高潮、落急、低潮时的流场

Fig. 7　Current fields in Laizhou Bay during flood tide, high tide, ebb tide, and low tide

N/P 变化特征如图 8 所示。

台风前，各河口 DIN、DIP 和 Chl *a* 浓度较低，N/P 较高。台风后一周内，DIN、DIP 浓度显著增加，N/P 下降，Chl *a* 的增长滞后于 DIN 和 DIP 浓度的增长。台风一周后，DIN 保持较高浓度，DIP 和 Chl *a* 浓度迅速降低，但仍高于台风前的水平。

各河口附近海域的 DIN、DIP 和 Chl *a* 浓度变化表现出显著差异，台风后弥河口附近海域生源要素浓度增加幅度最大，小清河口附近海域生源要素浓度在较长一段时间内保持高值，具体如下：

（1）黄河口：台风期间，黄河 DIN、DIP 入海通量达 500 t/d、10 t/d，台风后一周内 DIN、DIP 浓度上升至 1.51 mg/L、0.012 mg/L，N/P 降至 100，Chl *a* 浓度达 3.56 μg/L。

（2）小清河口：台风期间，小清河的 DIN、DIP 入海通量小于黄河，为 100 t/d、10 t/d，但由于小清河口附近为水深较浅的浅滩，环境容量较小，台风后一周内 DIN、DIP 浓度高于黄河口，达 1.8 mg/L、0.04 mg/L，N/P 降至 50，Chl *a* 浓度升至 8.99 μg/L。值得注意的是，台风一周后，由于小清河营养盐入海通量没有明显下降，DIN、DIP 浓度继续升至 4.07 mg/L、0.109 mg/L，N/P 降低至 34，Chl *a* 浓度保持在 5 μg/L 以上。

（3）弥河口：台风期间，弥河 DIN、DIP 入海通量均高于其他河流，分别为 1000 t/d、30 t/d，且受附近潍坊港的阻挡，营养盐难以扩散并在此聚集，台风后一周内 DIN、DIP 浓度远高于其他区域，高达 4.40 mg/L、0.136 mg/L，N/P 降至 81，Chl *a* 浓度高达 14.42 μg/L。

（4）潍河口：台风期间，潍河 DIN、DIP 入海通量为 400 t/d、8 t/d，台风后一周内 DIN、DIP 浓度升至 2.26 mg/L、0.012 mg/L，N/P 降至 100，Chl *a* 浓度升至 9.05 μg/L。

2.3.2　莱州湾生源要素的空间分布

台风前（8 月 6 日）、台风期间（8 月 13 日）、台风后一周（8 月 18 日）和台风后两周（8 月 24 日），莱州湾内 DIN、DIP、Chl *a* 浓度和 N/P 的空间分布变化如图 9 所示。

（1）DIN 浓度分布

台风前，DIN 浓度主要受小清河和黄河调控，小清河口和黄河口北部 DIN 浓度最高，为 1 mg/L。台风后，DIN 浓度主要受小清河和弥河调控。台风后，小清河和弥河输入的 DIN 受潍坊港阻拦而只能向东北扩散，使得小清河口东北部 DIN 浓度超过 4 mg/L。

（2）DIP 浓度分布

台风前，莱州湾内 DIP 浓度整体偏低，最高也仅为 0.02 mg/L。台风后，DIP 浓度主要受小清河和弥河调控，小清河口和弥河口附近海域的 DIP 浓度超过 0.1 mg/L，远高于其他海域。台风后在这两个河口处 DIP 的扩散特征与 DIN 相似，但扩散面积小于 DIN，表明 DIP 相比于 DIN 被浮游植物吸收利用得更多。

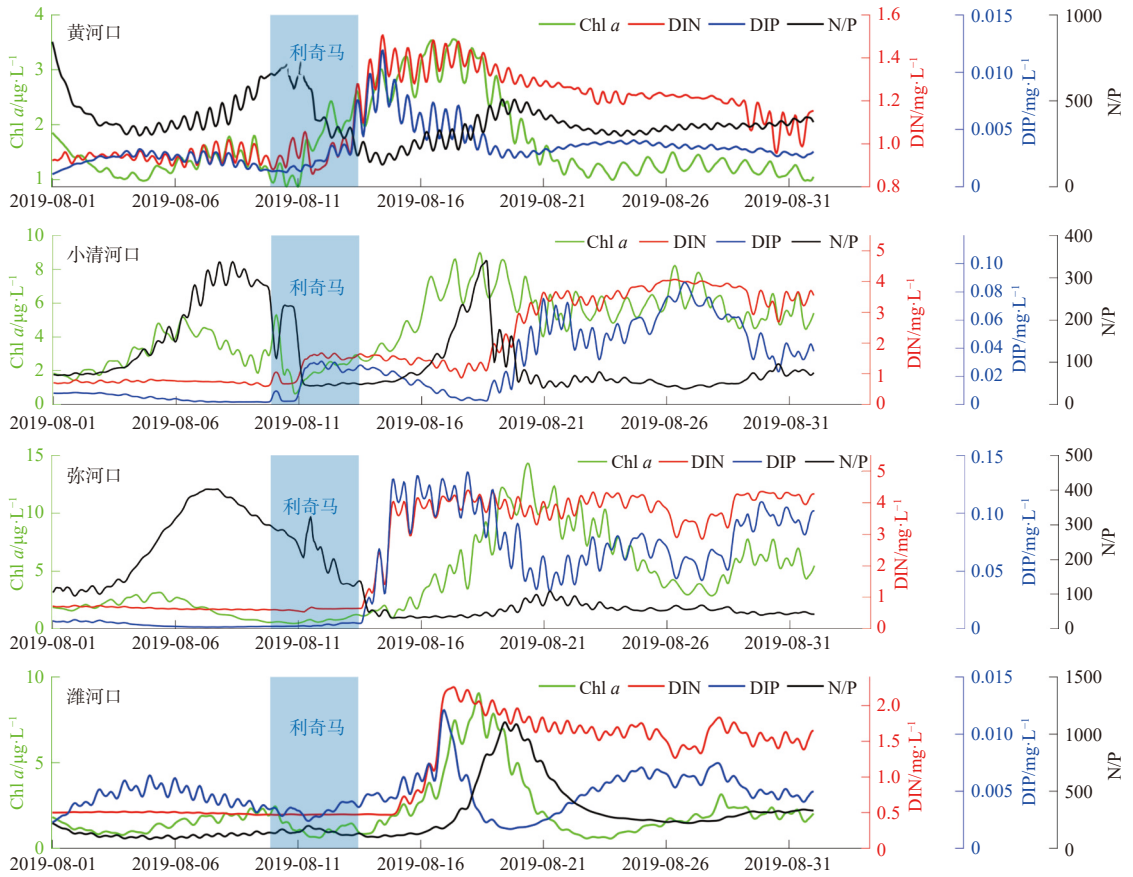


图 8 不同河口的 DIN、DIP 和 Chl *a* 变化

Fig. 8 Variations in DIN, DIP and Chl *a* in different estuaries

(3)N/P 分布

台风后，小清河口和弥河口附近海域的 N/P 明显偏低，为 80 左右，表明这两个河口的磷限制得到一定程度的缓解。而在黄河口东南部和潍河口北部 N/P 较高，可达 700 左右。

(4)Chl *a* 浓度分布

台风前，小清河口的 Chl *a* 浓度为 4 μg/L。台风期间，莱州湾 Chl *a* 浓度较低，主要受强降雨的影响。台风后，河口附近海域 Chl *a* 浓度有明显的上升，比如小清河口、弥河口和潍河口附近海域可达到 10 μg/L；随后一周 Chl *a* 浓度有所降低，但小清河口和弥河口附近海域仍保持在 5 μg/L 以上。

2.4 台风影响下，莱州湾物质输运的动力机制

本研究通过拉格朗日余流（lagrangian residual current, LRC）对氮、磷营养盐输运的动力机制进行分析。拉格朗日余流定义为一个或若干个潮周期内标识流体微团的净位移与潮周期的比值，对海洋中物质长期输运和分布起决定性作用[21]，计算公式如下：

$$\vec{v} = \frac{\vec{x}(t+nT) - \vec{x}(t)}{nT} \tag{7}$$

式中：$\vec{x}(t)$为初始时刻水质点的位移；n为潮周期的个数；T 为潮周期；$\vec{x}(t+nT)$为水质点在 n个潮周期后的位移。

本研究选择积分两个潮周期(24 h)，得到台风前、台风期间和台风后莱州湾的拉格朗日余流，如图 10 所示。台风前，湾内余流方向为西北向，余流速度约为 0.03 m/s。台风期间，余流结构明显改变，西岸余流方向为南向，流速可达 0.8 m/s，南岸余流方向为东向，余流速度为 0.2 m/s。台风后，湾内余流速度减小至 0.04 m/s，值得注意的是，黄河口和小清河口处的余流速度仍较大，为 0.1 m/s 左右。

2.5 Chl *a* 浓度阈值法提取藻华信息

有害藻类水华(harmful algal blooms, HABs)，

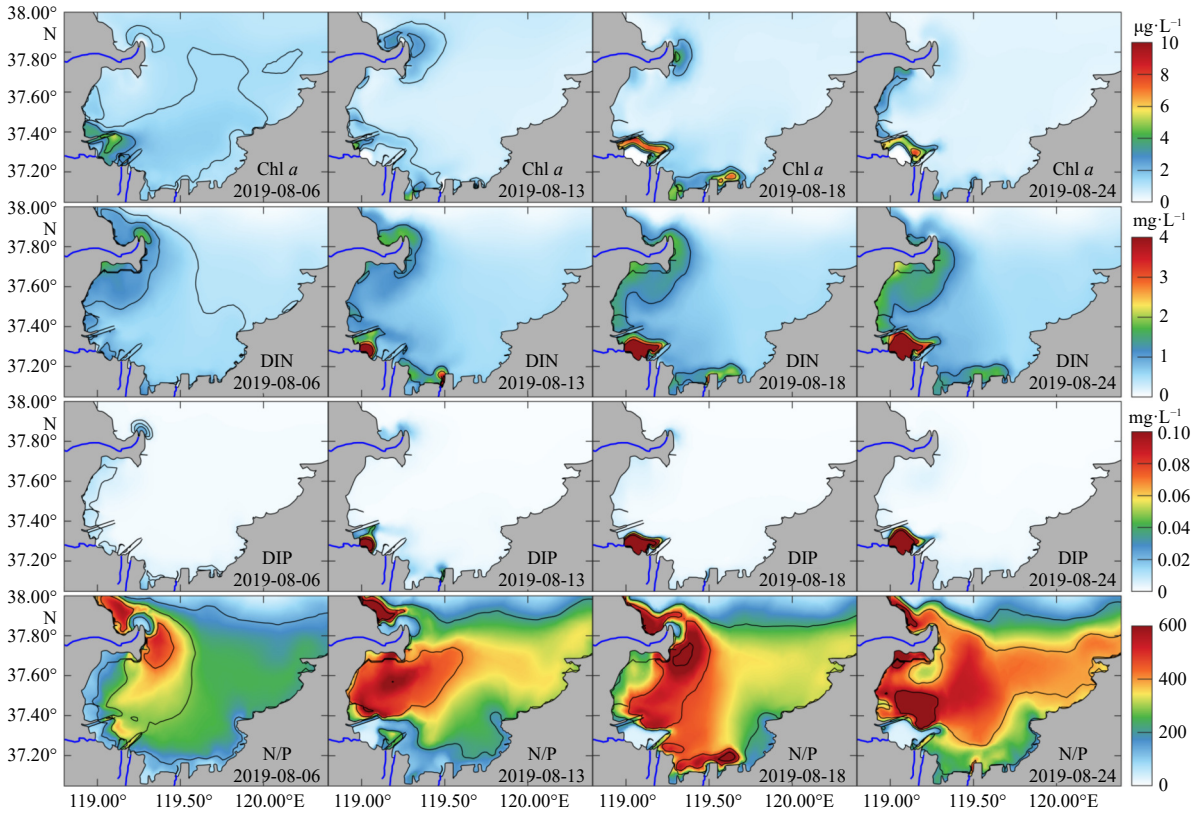


图 9　莱州湾内 DIN、DIP 和 Chl *a* 变化

Fig. 9　Variations in DIN, DIP and Chl *a* in Laizhou Bay

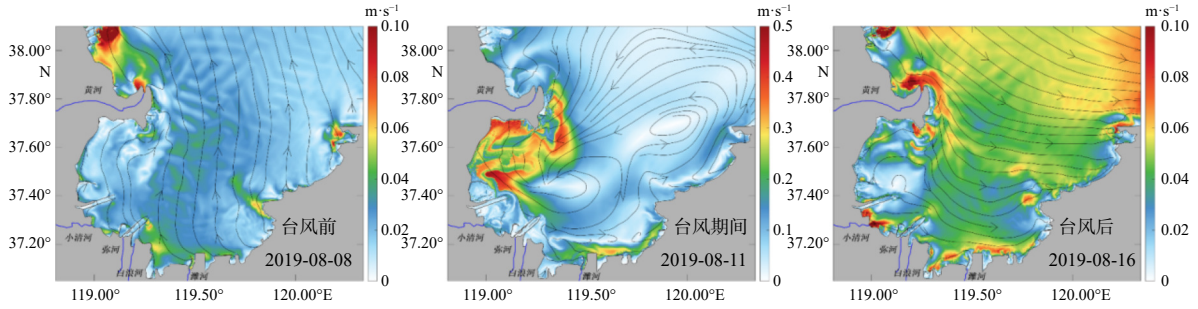


图 10　台风前(8 月 8 日)、台风期间(8 月 11 日)和台风后(8 月 16 日)的拉格朗日余流

Fig. 10　Lagrangian residual currents before (August 8), during (August 11), and after (August 16) the typhoon

是由海水中某些浮游植物在一定环境条件下暴发性增殖，导致水质恶化的生态异常现象[22]。近年来，许多研究使用 Chl *a* 浓度阈值法预测藻华发生、研究藻华发展机制和提取藻华信息[23]。

本文将 10 μg/L 作为莱州湾海域藻华的 Chl *a* 浓度阈值，如图 11 所示。弥河口处 Chl *a* 浓度在台风一周内均超过 10 μg/L，一定程度上表明会发生藻华现象。台风一周后，小清河口和弥河口附近海域的 Chl *a* 水平虽有所下降但仍保持在 5 μg/L 以上，也说明发生藻华的可能性较高。

2.6　参数敏感性分析

本研究进行了生态模型参数的敏感性分析，将部分参数的值(表 1)修改为初始值的 50%，然后对比修改前(对照组)和修改后(实验组)的浮游植物生物量。表层 Chl *a* 浓度作为浮游植物生物量的指标，敏感度计算公式如下：

$$S_{c,x}=\frac{C_x-C_{x+\%}}{C_x}\Big/\frac{X-X_{+\%}}{X} \qquad (8)$$

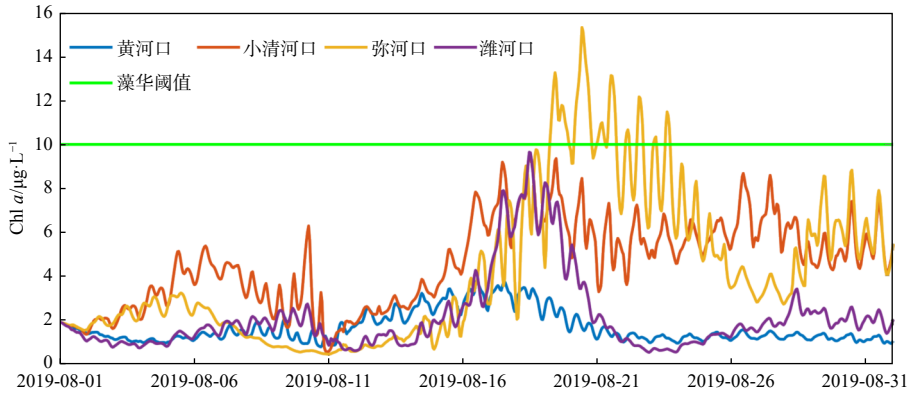


图 11 各河口 Chl *a* 浓度与藻华阈值对比

Fig. 11 Comparison of Chl *a* concentration and Chl *a* threshold in various estuaries

式中：$S_{c,x}$为敏感度，其中x为选取的敏感参数；X为对照组的参数值；$X_{+\%}$为实验组的参数值；C_x为对照组的 Chl *a* 浓度；$C_{x+\%}$为实验组的 Chl *a* 浓度。

根据敏感度绝对值大小，可将敏感程度划分为 3 类：（1）+++/---（特别敏感，$|S_{c,x}|\geqslant 100\%$）；（2）++/--（较为敏感，$20\%\leqslant|S_{c,x}|<100\%$）；（3）+/–（一般敏感，$|S_{c,x}|<20\%$）。敏感参数及敏感度计算结果列于表 1。

表 1 Chl *a* 浓度对模型参数的敏感性

Tab.1 Sensitivity of Chl *a* concentration to model parameters

敏感参数	对照组Chl *a*浓度/μg·L^{-1}	实验组Chl *a*浓度/μg·L^{-1}	变化率/%	敏感度/%	敏感程度
最大生长速率	15.42	2.16	−86.0	172.0	+++
P-I曲线初始斜率		10.00	−35.1	70.3	++
氮吸收率		14.68	−4.80	9.6	+
磷吸收率		13.89	9.93	19.9	+
死亡率		18.35	19.0	−38.0	−−

Chl *a* 浓度对浮游植物的生长速率、P-I 曲线初始速率和死亡率最为敏感，敏感度分别为 172.0、70.3 和−38.0。高会旺等[24]发现 Chl *a* 浓度对浮游植物最大生长率等变量较为敏感；罗辰奕等[13]发现 Chl *a* 浓度对浮游植物的 P-I 曲线初始斜率、生长率、死亡率等变量较为敏感。

3 结 论

（1）台风期间莱州湾内流速明显增大，呈逆时针环流。台风前，莱州湾海域涨落流主要呈东北−西南向往复运动，涨潮阶段流向为西南，落潮阶段流向为东北，最大流速均为 0.4 m/s。台风期间，莱州湾内流速明显增大，涨急时莱州湾西部和南部海域流速最大可达 1.2 m/s，落急时流速达 0.8 m/s。

（2）台风过程径流脉冲式输入极大程度地补充了莱州湾内氮、磷营养盐。台风期间，小清河口 DIN、DIP 向东迁移至弥河口北部。强降雨携带陆源营养盐随河口脉冲式输入，弥河口 DIN、DIP 浓度变化最为显著，浓度分别可达到 4.40 mg/L 和 0.136 mg/L，为藻华提供了一定的营养基础。

（3）台风过后河口附近海域的 Chl *a* 浓度增长，但滞后于营养盐约 3 d。台风过后的一周内弥河口处 Chl *a* 浓度超过 10 μg/L，最高可达 14.42 μg/L，出现藻华；一周后，小清河口和弥河口 Chl *a* 浓度仍高于 5 μg/L，有发生藻华暴发的倾向。

（4）台风影响下，莱州湾生态模型敏感度最大的生态参数为浮游植物最大生长率，敏感度为 172.0；其次为浮游植物 P-I 曲线初始斜率和死亡率，敏感度分别为 70.3 和−38.0。

参考文献：

[1] Chan J C L. Frequency and intensity of Landfalling tropical cyclones in east Asia: past variations and future projections[J]. Meteorology, 2023, 2(2): 171-190.

[2] Zhang P, Long H Z, Li Z H, et al. Effects of typhoon events on coastal hydrology, nutrients, and algal bloom dynamics: Insights from continuous observation and machine learning in semi-enclosed Zhanjiang Bay, China[J]. Science of the Total Environment, 2024, 924: 171676.

[3] Santhikrishnan S, Jyothibabu R, Sajeev R, et al. Impact of river discharge and suspended sediments on the nearshore benthic environment along the Indian southwest coast[J]. Science of the Total Environment, 2024, 954: 176455.

[4] Davis T R, Larkin M F, Forbes A, et al. Extreme flooding and reduced salinity causes mass mortality of nearshore kelp forests[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2022, 275: 107960.

[5] Zhao H, Tang D, Wang Y. Comparison of phytoplankton blooms triggered by two typhoons with different intensities and translation speeds in the South China Sea[J]. Marine Ecology Progress Series, 2008, 365: 57-65.

[6] Wang Y, Wang F F, Fang Y, et al. Storm-induced nitrogen transport via surface runoff, interflow and groundwater in a pomelo agricultural watershed, southeast China[J]. Environmental Pollution, 2024, 346: 123629.

[7] Xin M, Wang B D, Xie L P, et al. Long-term changes in nutrient regimes and their ecological effects in the Bohai Sea, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, 146: 562-573.

[8] Zhang F F, Fu H R, Lou H W, et al. Assessment of eutrophication from Xiaoqing River estuary to Laizhou Bay: further warning of ecosystem degradation in typically polluted estuary[J]. Marine Pollution Bulletin, 2023, 193: 115209.

[9] Ding X K, Shi J, Guo X Y, et al. Interannual variations in the nutrient cycle in the central Bohai Sea in response to anthropogenic inputs[J]. Chemosphere, 2023, 313: 137620.

[10] Li H G, Li S S, Zhang M Z, et al. Typhoon-induced stormwater drives nutrient dynamics and triggers phytoplankton blooms in Laizhou Bay, China[J]. Marine Environmental Research, 2024, 198: 106473.

[11] Jiang T, Wu G N, Niu P L, et al. Short-term changes in algal blooms and phytoplankton community after the passage of Super Typhoon Lekima in a temperate and inner sea (Bohai Sea) in China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 232: 113223.

[12] Lou Q, Li Z Y, Zhang Y W, et al. Impact of typhoon Lekima (2019) on material transport in Laizhou Bay using Lagrangian coherent structures[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2020, 40(3): 922-933.

[13] 罗辰奕, 聂红涛, 张海彦. 渤、黄海生态环境模拟的参数敏感度空间差异分析 [J]. 海洋学报, 2019, 41(8): 85-96.

[14] Yi Y J, Gao Y N, Wu X F, et al. Modeling the effect of artificial flow and sediment flux on the environment and plankton of an estuary[J]. International Journal of Sediment Research, 2023, 38(3): 335-348.

[15] Beardsley R C, Cowles G W, Qi J H. An unstructured-grid, finite-volume community ocean model: FVCOM user manual[M]. 3rd ed. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2012.

[16] Zhang M L, Zhu X S, Wang Y J, et al. A numerical study of hydrodynamic characteristics and hydrological processes in the coastal wetlands during extreme events[J]. Journal of Hydrodynamics, 2023, 35(5): 963-979.

[17] 连达军, 何琦敏, 李　黎, 等. 中国区域 ERA5-ZTD/PWV 精度评估与台风事件响应研究 [J]. 灾害学, 2024, 39(1): 23-28.

[18] Butenschön M, Clark J, Aldridge J N, et al. ERSEM 15.06: a generic model for marine biogeochemistry and the ecosystem dynamics of the lower trophic levels[J]. Geoscientific Model Development, 2016, 9(4): 1293-1339.

[19] 虞兰兰. 基于三维海洋生态动力学模式的莱州湾氮、磷营养盐环境容量研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.

[20] Chapelle A, Lazure P, Ménesguen A. Modelling eutrophication events in a coastal ecosystem. Sensitivity analysis[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1994, 39(6): 529-548.

[21] 冯依蕾, 张学庆, 于金珍. 基于拉格朗日方法的胶州湾物质输运特征研究 [J]. 海洋环境科学, 2020, 39(1): 106-113.

[22] Song C U, Purnaningtyas D W, Choi H, et al. Do red tide events promote an increase in zooplankton biodiversity?[J]. Environmental Pollution, 2024, 361: 124880.

[23] 陈　曦, 汪小钦, 陈芸芝. 赤潮水体水质遥感参数时空变化分析 [J]. 遥感信息, 2014, 29(3): 88-93.

[24] 高会旺, 孙文心, 翟雪梅. 水层生态系统动力学模式参数的敏感性分析 [J]. 青岛海洋大学学报 (自然科学版), 1999(3): 59-65.

（本文编辑：曲丽梅）