

# 小凌河典型污染物入海通量变化与海域水质响应研究

葛心韵<sup>1,2</sup>, 苏莹<sup>1,2</sup>, 任慧博<sup>2,3</sup>

(1.生态环境部海洋生态环境整治修复重点实验室, 辽宁 大连 116000; 2.大连理工大学 化工海洋与生命学院, 辽宁 盘锦 124221; 3.北京大学 城市规划与设计学院, 广东 深圳 518055)

**摘要:**辽东湾近岸海域富营养化情况严重,特别是湾底部重要入海河口附近水质超标问题突出,因此,探究入海河流污染物排放特征及其对近岸海域水质的影响,对流域及近海水环境治理具有重要意义。本研究以小凌河为例,应用 LOADEST 模型对 2022 年小凌河几种典型污染物入海通量进行了估算,并应用渤海水质模型对污染物入海排放通量变化与海域水质的响应关系进行了深入分析。结果表明,2022 年小凌河污染物逐月入海通量呈先上升后下降趋势,受径流及农业育种期影响,7 月的高锰酸钾指数(COD<sub>Mn</sub>)、总磷(TP)和氨氮(NH<sub>3</sub>-N)月通量最大,分别为 910 t、30.38 t 和 222 t,8 月通量日变化波动最剧烈,且不同月份入海通量具有显著差异。流域污染物入海通量显著影响近岸海域水质,7 月—8 月河口区海域污染物浓度最高且影响范围最大,与小凌河污染物通量峰值相符。但不同污染物的水质响应区演变规律有所不同,因此,在制定相应的污染管控措施时,应充分考虑不同污染物的类型及其对近岸海域水质的影响规律,进而进行差异化管理。

**关键词:**小凌河; 入海通量; 辽东湾; 水质响应关系; 影响因素

中图分类号:X131; X55

文献标识码:A

文章编号:1007-6336(2025)04-0598-08

## Study on the relationship between typical pollutant flux changes of Xiaoling river and the response of sea water quality

GE Xinyun<sup>1,2</sup>, SU Ying<sup>1,2</sup>, REN Huibo<sup>2,3</sup>

(1.Key Laboratory of Marine Ecosystem Restoration, Ministry of Ecology and environment, Dalian 116000, China; 2.School of Chemical Engineering, Ocean and Life Sciences, Dalian University of Technology, Panjin 124221, China; 3.School of Urban Planning and Design, Peking University, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** The eutrophication situation in the nearshore waters of Liaodong Bay is severe, especially the problem of excessive water pollution near the important estuary at the bottom of the bay. Therefore, it is of great significance to explore the spatiotemporal distribution characteristics of river pollution entering the sea and its impact on the water quality of nearshore waters for the management of river basins and seawater environments. This study takes Xiaoling river as an example and applies the LOADEST model to estimate the fluxes of several typical pollutants from Xiaoling river into the sea in 2022. Moreover, a Bohai water quality model developed based on the HAMSOM model was applied to conduct in-depth analysis of the relationship between typical pollutant flux changes of Xiaoling river and the response of sea water quality. The results indicate that the monthly flux of pollutants from Xiaoling river into the sea shows an upward trend followed by

收稿日期:2024-10-13, 修订日期:2025-01-11

基金项目:国家环境保护海洋生态环境整治修复重点实验室基金项目(2023-01);大连理工大学基本科研业务费项目[DUT21RC(3)035]

作者简介:葛心韵(2003—),女,安徽安庆人,本科生,主要研究方向为环境生态工程, E-mail: xinyun\_2003@163.com

通信作者:苏莹(1986—),女,内蒙古包头人,副教授,博士,主要研究方向为海洋污染生态化学, E-mail: yingsu@dlut.edu.cn

a downward trend. Due to the influence of runoff and agricultural breeding period, the total phosphorus, potassium permanganate index, and ammonia nitrogen monthly inflow in July were the highest, at 30.38 t, 910 t, and 222 t, respectively. The analysis of water quality response in Bohai Sea shows that the flux of pollutants entering the sea in the basin significantly affects the water quality of nearshore waters. The highest pollution concentration and the largest impact range in the estuary area from July to August are consistent with the peak pollution flux of Xiaoling river. However, the evolution patterns of water quality response zones for different pollutants vary. Based on the calculation results of the pollution sharing rate of Xiaoling river, it is found that in order to improve the water quality of the nearshore waters in the long run, various pollutants should be given equal attention. Moreover, when formulating corresponding pollution control measures, differential management should be fully considered for different pollution source sharing rates.

**Key words:** Xiaoling river; pollution flux; Liaodong Bay; water quality response relationship; influence factor

河流是连接陆海生态系统的天然纽带,然而,随着城市社会经济的迅速发展和人口的不断增加,人类活动对流域环境造成的影响日益显著,导致流域污染的时空演变日益复杂,进一步导致河口及近海生态系统的响应也愈加难以预测<sup>[1]</sup>。因此,量化解析河流污染物入海排放情况及其对近岸海域水质影响的时空演变规律,可为陆海污染防治和水环境保护提供重要支撑。

简单的污染物入海通量估算方法一般是对径流量和浓度监测数据进行简单的处理,如月单值法、线性插值法<sup>[2]</sup>等。但对于较大的流域而言,河流水文、水质过程复杂,时空差异显著,简单的估算结果会产生严重偏差<sup>[3]</sup>,进而先后发展出了 LOADEST(load estimator)、SWAT(soil and water analysis tools)、HSPF(hydrological simulation program-FORTRAN)、等流域模型,可用于计算更为复杂情况下高时空分辨率的污染物入海通量。其中,SWAT、HSPF等模型需要大量的土壤及气象数据<sup>[4-6]</sup>,而 LOADEST模型在对监测数据及地形数据要求均较低的同时,又能得出相对于简单估算法更为连续的入海通量计算结果,因而更适用于相关信息较为缺乏但对于通量计算结果需求较高的研究<sup>[7]</sup>。

辽东湾底部海域富营养化情况严重,生态环境问题突出<sup>[8]</sup>。为此,辽宁省先后实施了《辽东湾湾长制实施方案》《深化渤海(辽宁段)综合治理攻坚战实施方案》等相关政策,在辽宁省、锦州市等相关责任主体的努力推动下,小凌河流域基本完成了入海排污口整治、国控河流和重点省控河流入海断面基本消除劣V类水质等任务,

小凌河流域国控断面水质可基本保持在地表水Ⅲ类标准<sup>[9]</sup>。然而,由于小凌河两岸人口密集、工农业发展程度较高,生活污水及工矿企业废水通过管沟、暗渠、支流汇入等不同方式排入河流,最终进入海洋,导致小凌河入海口附近海域水质为劣四类,主要超标指标为无机氮和活性磷酸盐<sup>[9]</sup>,小凌河污染问题亟待解决。

目前,对小凌河流域水质展开深入分析的研究相对较少。Zhang等<sup>[10]</sup>应用克里金插值法分析了小凌河入海口海水中重金属污染时空演变特点;张悦<sup>[11]</sup>运用季节性 Kendall 检验法分析了小凌河流域 2006—2014 年水质指标变化趋势。但以上研究工作仅关注流域或海域的水质变化,忽略了对河流污染与海域水质响应关系的系统分析。因此,为了全面探讨小凌河入海污染特征及其对辽东湾海域水质的影响,本研究首先应用 LOADEST 模型,基于径流及污染物浓度监测结果,模拟计算了 2022 年小凌河几种典型污染物入海通量相关演变过程,并深入探讨了导致污染物入海通量变化的影响因素;然后将计算结果输入渤海水质模型,计算了小凌河污染物入海排放对辽东湾水质的影响,并在此基础上,量化分析了小凌河污染物排放影响的海域面积,研究结果可为小凌河流域及其近海海域污染治理工作提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

小凌河地处 120°06'E—121°21'E, 40°55'N—41°21'N,发源于辽宁省朝阳市助安喀喇山,流经

辽宁省朝阳、锦州、葫芦岛等地,最终汇入辽东湾海域。其干流全长 206 km,流域面积 5475 km<sup>2</sup>。流域及其近岸海域受冰封期影响显著。小凌河初冰日为 11 月底至 12 月初,终冰日为次年 3 月初,封冻期约 80 d<sup>[12]</sup>。

### 1.2 数据来源

本研究基于 2022 年小凌河流域的水文、水质监测结果,其中,小凌河水文数据来自锦州(南桥)水文站,为逐日流量数据,水质监测数据来自西树林国控断面,监测指标有高锰酸钾指数、总氮、总磷、氨氮,为逐月监测数据。本研究中氨氮的测定方法为纳氏试剂分光光度法,分析设备为紫外可见分光光度计,检出限为 0.025 mg/L。

### 1.3 污染物入海通量估算方法

一般而言,一段时间内污染物入海通量计算公式如下<sup>[13]</sup>:

$$L_{\tau} = \int_0^{\tau} QC dt \quad (1)$$

式中:  $L_{\tau}$  为  $\tau$  时间段内污染物通量;  $Q$  为瞬时流量;  $C$  为污染物浓度。

但是,大量水质监测仍处于低频、离散状态。有限离散的低频水质数据无法应用于传统的入海通量估算,不能反映水质的波动状况。因此,对公式(1)进一步简化<sup>[13]</sup>:

$$\hat{L}_{\tau} = \Delta t \sum_{i=1}^{NP} (\overline{QC})_i = \Delta t \sum_{i=1}^{NP} \hat{L}_i \quad (2)$$

式中:  $\hat{L}_{\tau}$  为污染物总通量;  $\Delta t$  为时间间隔;  $NP$  为离散时间间隔数;  $\hat{L}_i$  为瞬时污染物通量。

在公式(2)基础上,LOADEST 模型采用的多元线性核心公式如下<sup>[13]</sup>:

$$\ln(\hat{L}) = a_0 + \sum_{j=1}^{NV} a_j X_j \quad \hat{L} = \exp \left( a_0 + \sum_{j=1}^{NV} a_j X_j \right) \quad (3)$$

式中:  $a_0$ 、 $a_j$  为方程系数;  $X_j$  为自变量;  $NV$  为自变量个数。

模型内嵌了 11 种估算污染物通量的回归方程<sup>[14]</sup>,在模型中输入水文及水质监测数据后通过 AIC 信息准则和 SPCC 概率准则对回归方程进行优选,AIC 和 SPCC 都是衡量统计模型复杂度和拟合精度的标准,AIC 越小、SPCC 越大表示模型越精确,因此,取最小 AIC 值和最大 SPCC 值的方程为最优方程<sup>[15-16]</sup>。随后,通过渐

进极大似然估计(AMLE)、最小方差无偏估计(MLE)、最小绝对偏差(LAD)方法进行模型方程参数优化<sup>[17]</sup>,当通量估算结果的残差符合正态分布时,删失型数据(水质数据非特定数值,而是落在某观测区间内)采用 AMLE 进行参数优化,非删失型数据采用 MLE 进行参数优化<sup>[18]</sup>;当残差不符合正态分布时,采用 LAD 进行参数优化。

### 1.4 渤海水质模型

HAMSOM 模式 (Hamburg Shelf Ocean Model) 是由德国汉堡大学海洋研究所 Backhaus 教授等开发的三维斜压陆架海模式<sup>[19]</sup>,该模型可以准确模拟污染物平流扩散等迁移过程<sup>[20]</sup>。本文采用的渤海水质模型是在 HAMSOM 模式的基础上添加了各类污染物的生物地球化学过程模块,该模块涵盖了营养盐(如氮、磷等)以及与其密切相关的浮游植物、浮游动物、碎屑等变量,充分考虑了浮游植物对营养物质的吸收、浮游动物对浮游植物的捕食、浮游植物与浮游动物的死亡和排泄,以及死亡有机物通过再矿化过程转化为营养物质等生物地球化学循环过程<sup>[21]</sup>。

该模型首先与 LOADEST 模型偶联,以模拟小凌河入海污染物排放下海域水质响应的全过程。基于模拟结果,可量化分析小凌河污染物排放影响的海域面积的时空演变过程。

## 2 结果与讨论

### 2.1 小凌河污染物入海通量

基于 2022 年小凌河监测数据(图 1),应用 LOADEST 模型对典型污染物的入海通量进行计算,并基于拟合参数 AIC 和 SPCC 优选出通量计算方程。根据拟合参数 AIC 最小、SPCC 最大的原则,最终选出小凌河流域高锰酸钾指数(COD<sub>Mn</sub>)、总磷(TP)和氨氮(NH<sub>3</sub>-N)入海通量计算的最佳回归方程(表 1)。回归方程中:  $L$  为污染物通量;  $Q$  为瞬时流量;  $dtime$  为中心化后的十进制时间<sup>[22]</sup>。

入海通量方程及变量系数的评价结果列于表 2。COD<sub>Mn</sub>、TP 和 NH<sub>3</sub>-N 入海通量方程的相关系数  $R^2$  分别为 0.993、0.963 和 0.786,均大于 0.7,表明通量方程拟合效果较好;残差系数  $PPCC$

均大于 0.95,  $p$  值基本小于 0.05, 表明残差符合正态分布; 残差序列相关系数  $SCR$  在  $-0.091$  至  $-0.039$  之间, 无序列相关性; 方程系数  $a_0 \sim a_3$  的  $p$  值和标准偏差  $Std.Dev$  相对较小;  $t$ -ratio 的拟合绝对值均大于 1。上述结果表明, 优选方程在拟合 3 种典型污染物的入海通量时, 其残差之间呈现出相对独立性, 符合模型的基本假设, 从而表明模型结果具有较高的可靠性。此外, 该方程与通量拟合的残差具有较低的不确定性, 意味着模型预测值与真实值之间的差异较小, 因此模型的预测精度较高<sup>[23-24]</sup>。所涉及的模型变量之间不存在多重共线性, 回归方程系数具有统计学意义<sup>[25]</sup>。因此, 本研究所构建的模型对计算小凌河典型污染物的入海通量及时间变化规律具有良好的适用性, 其计算结果可用于进一步分析

讨论小凌河污染物入海通量演变特征。

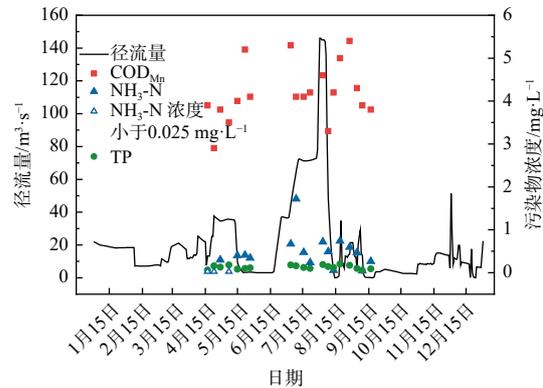


图 1 小凌河流量及浓度监测数据

Fig. 1 Flow and concentration monitoring data of Xiaoling river

表 1 COD<sub>Mn</sub>、TP 和 NH<sub>3</sub>-N 污染物入海通量的回归方程

Tab.1 The fitting equations of COD<sub>Mn</sub>, TP and NH<sub>3</sub>-N pollutants fluxes

指标	AIC	SPCC	回归方程
COD <sub>Mn</sub>	-0.764	5.365	$\ln(L) = 7.3716 + 0.9742\ln Q + 0.0584 \sin(2\pi dtime) + 0.3181 \cos(2\pi dtime)$
TP	0.919	-9.674	$\ln(L) = 3.9149 + 1.0986\ln Q$
NH <sub>3</sub> -N	3.175	-32.052	$\ln(L) = 2.0213 + 0.8031\ln Q + 0.7721 \sin(2\pi dtime) + 4.1412 \cos(2\pi dtime)$

表 2 COD<sub>Mn</sub>、TP 和 NH<sub>3</sub>-N 污染物入海通量方程及变量系数的评价结果

Tab.2 Test parameters of COD<sub>Mn</sub>, TP and NH<sub>3</sub>-N pollutant flux equations

相关评价结果		$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	
COD <sub>Mn</sub>	$R^2=0.993$	Std.Dev	0.103	0.026	0.049	0.167
	$PPCC=0.989$	$t$ -ratio	71.40	38.25	1.180	1.910
	$SCR=-0.091$	$p$ -Value	0.000	0.000	0.192	0.042
TP	$R^2=0.963$	Std.Dev	0.100	0.052		
	$PPCC=0.956$	$t$ -ratio	39.15	21.09		
	$SCR=-0.041$	$p$ -Value	0.000	0.000		
NH <sub>3</sub> -N	$R^2=0.786$	Std.Dev	0.863	0.205	0.403	1.372
	$PPCC=0.959$	$t$ -ratio	2.340	3.920	1.920	3.020
	$SCR=-0.039$	$p$ -Value	0.037	0.000	0.038	0.002

2.2 流域污染物入海排放通量演变趋势分析

小凌河主要污染物入海排放通量模拟和监测结果如图 2 所示, 其中, 图 2a—图 2c 为入海通量逐日变化模拟和监测情况, 图 2d—图 2f 为污染物月通量模拟结果。图 2d—图 2f 中, 各个箱体描述了该月 50% 的日通量数据分布情况。以 4 月为例, 将该月 30 d 的日污染物通量计算结果

由小至大排序, 以大小位于 25% ~ 75% 的 15 d 的日通量数据绘制箱体。箱体中的点划线代表该月逐日通量的平均值, 实线代表该月逐日通量的中位数。箱体越扁, 点划线与实线之间的距离越近, 说明数据分布越集中, 该月的日通量波动越小; 箱体越宽, 点划线与实线之间的距离越远, 说明数据离散性越大, 日通量波动越大<sup>[26]</sup>。箱

体所在位置越高,则说明该月总体通量越大,反之总体通量越小。 $IQR$ 为数据的四分位距,若

数据点落于 $1.5IQR$ 范围外,则说明该数据为异常值<sup>[27]</sup>。

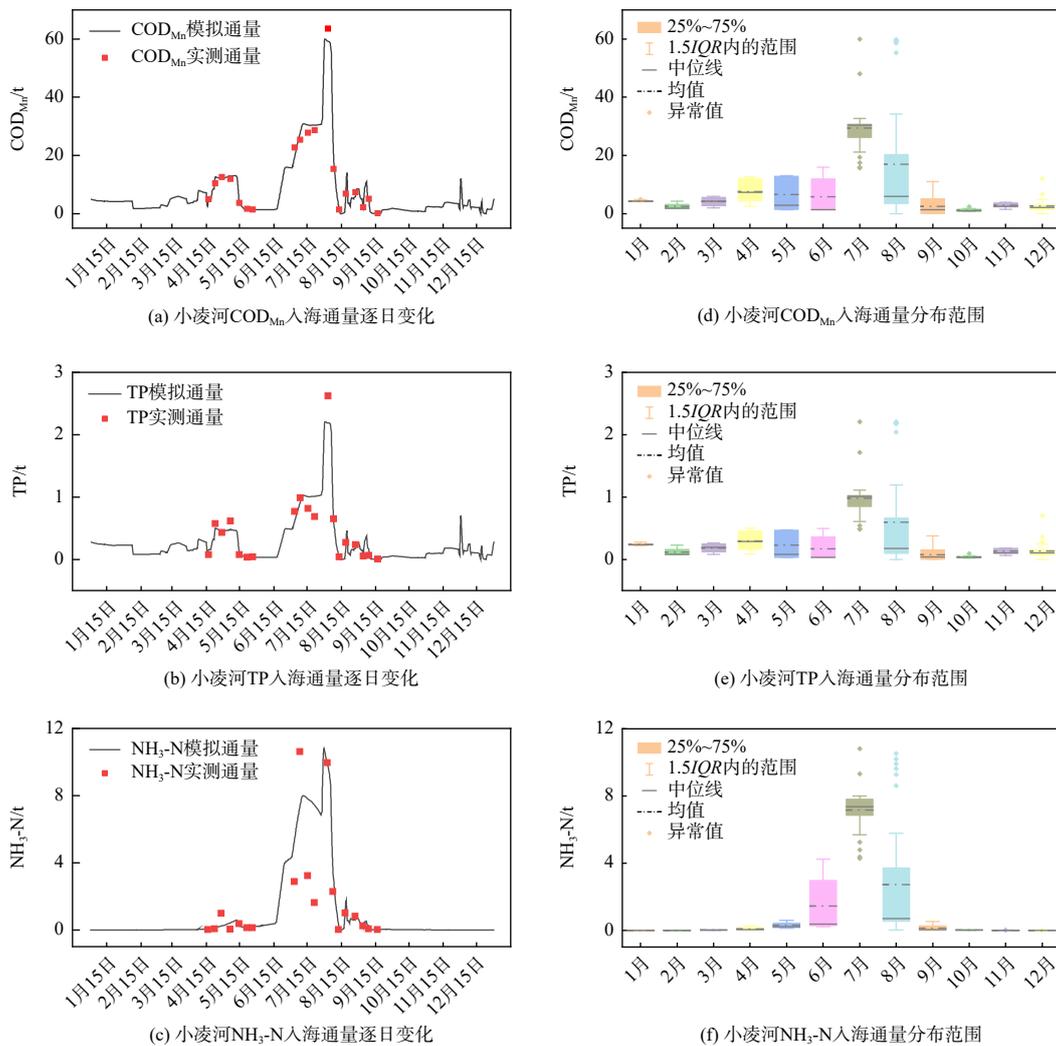


图2 小凌河主要污染物入海通量

Fig. 2 Fluxes of major pollutants in the Xiaoling river

图2a—图2c中监测结果和模拟结果的对比表明,模型计算结果与监测结果吻合较好,同时图2d—图2f中所有数据均未落在 $IQR$ 四分位距范围外,以上结果再一次印证了模型的准确性。

进一步分析入海通量结果可知,2022年小凌河 $COD_{Mn}$ 逐日入海通量总体呈先上升后下降的变化趋势,平均值为 $7.24\text{ t/d}$ ,最大值出现在7月底,为 $60\text{ t/d}$ (图2a),与7月底至8月初出现的径流量峰值(日均 $146\text{ m}^3/\text{s}$ )同步<sup>[28]</sup>。且7月至8月为农业育种期,河道两岸分布大面积农田,农药受雨水冲刷进入河道,导致污染物通量增加。月

通量模拟结果显示,7月通量值最大,为 $910\text{ t/mon}$ ,10月通量值最小,为 $35\text{ t/mon}$ 。结合图2d,从各箱体长短、均值与中位数距离来看,8月箱体最长,说明 $COD_{Mn}$ 通量在8月波动最大,日通量值较分散,有两极分化趋势。1月—3月及10月—12月的日通量值变化较小,其中,虽然12月的箱体长度较短,日通量值总体较集中,但存在个别日通量值较分散的情况。

TP通量变化趋势与 $COD_{Mn}$ 基本一致,逐日通量呈先上升后降低的变化趋势,平均值为 $0.27\text{ t/d}$ ,最大值出现在7月底至8月初,为 $2.21\text{ t/d}$ (图2b)。月通量模拟结果显示,7月通量

值最大, 为 30.38 t/mon, 10月通量值最小, 为 1.149 t/mon。由图 2e 可知, TP 通量值在 8月波动最大, 月中日通量值较分散, 1月 TP 通量值分布最集中, 2月及 10月—11月通量值分布较为集中。12月箱体长度较短, 但存在个别日通量值较分散的情况, 可能是 12月出现的部分极大流量值对其通量结果产生了影响。

NH<sub>3</sub>-N 逐日通量变化趋势与 COD<sub>Mn</sub>、TP 基本一致, 通量日平均值为 1.0 t/d, 最大值出现在 7月底, 为 10.8 t/d(图 2c)。月通量模拟结果显示, 7月通量值最大, 为 222 t/mon, 1月通量值最小, 为 0.85 kg/mon。结合图 2f, 2022年 7月 NH<sub>3</sub>-N 总体通量最大, 8月日通量值波动最大, 1月—4月及 10月—12月箱体分布位置普遍极低, 箱体长度极短, 箱体变化趋势不明显。

### 2.3 小凌河污染物入海排放通量对近海水质的影响

水质响应区是指某污染源入海排放可以影响的海域范围, 一般取海域污染物浓度降至混合区浓度 1% 时的浓度梯度线范围<sup>[29]</sup>。将小凌河污染物日通量计算结果输入渤海水质模型, 可得到在小凌河污染物排放下, 辽东湾近海水质及水质响应区的时空演变情况。仅将小凌河作为唯

一的陆源输入, 假定渤海其他所有入海排污口的污染物排放通量均为零。小凌河 COD<sub>Mn</sub>、TP 和 NH<sub>3</sub>-N 水质响应区的逐月变化如图 3—图 5 所示, 需要说明的是, 每月均选取影响范围最大的一天做图, 以呈现小凌河污染物排放可影响的\*\*最大海域范围\*\*。

结果显示, COD<sub>Mn</sub> 浓度在空间分布上呈由河口向外海递减的特征。且流域污染物入海通量会对近岸海域水质分布产生明显影响。具体而言, 河口区海域 COD<sub>Mn</sub> 浓度在 7月—8月较高, 且水质响应区域面积也最大, 与小凌河 COD<sub>Mn</sub> 入海排放通量变化同步。1月—3月及 9月—12月的污染物入海通量均较小, 河口区海域 COD<sub>Mn</sub> 浓度和水质响应区域面积也同步变小, 其中 1月—2月的最小, 分析原因可能是 1月—2月为辽东湾的封冻期, 大面积海冰降低了海水的交换能力, 使得污染物无法及时向外扩散<sup>[30]</sup>。

TP 和 NH<sub>3</sub>-N 的浓度空间分布特征及逐月演变规律与 COD<sub>Mn</sub> 基本一致, 但变化幅度明显偏小, 特别是水质响应区域范围很小(图 4 和图 5), 可能是流域氮污染管控一直以来以 NH<sub>3</sub>-N 为主, 且较为严格, 导致 NH<sub>3</sub>-N 入海排放量相对较

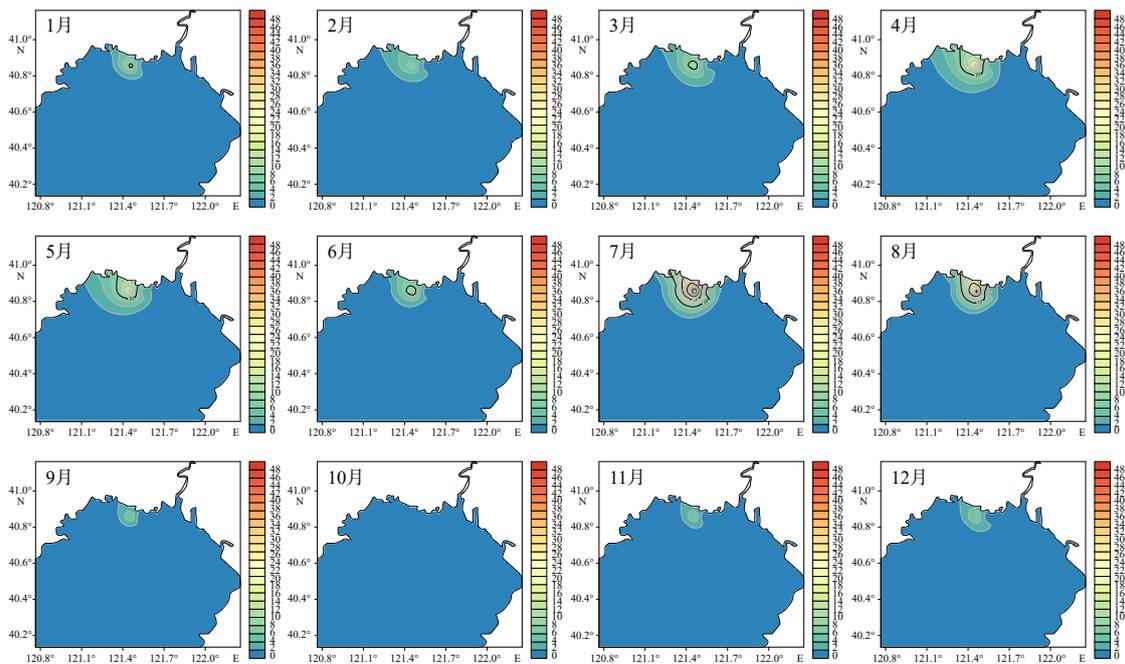


图 3 小凌河 COD<sub>Mn</sub> 水质响应区逐月分布结果

Fig. 3 Monthly distribution results of COD<sub>Mn</sub> in Xiaoling river

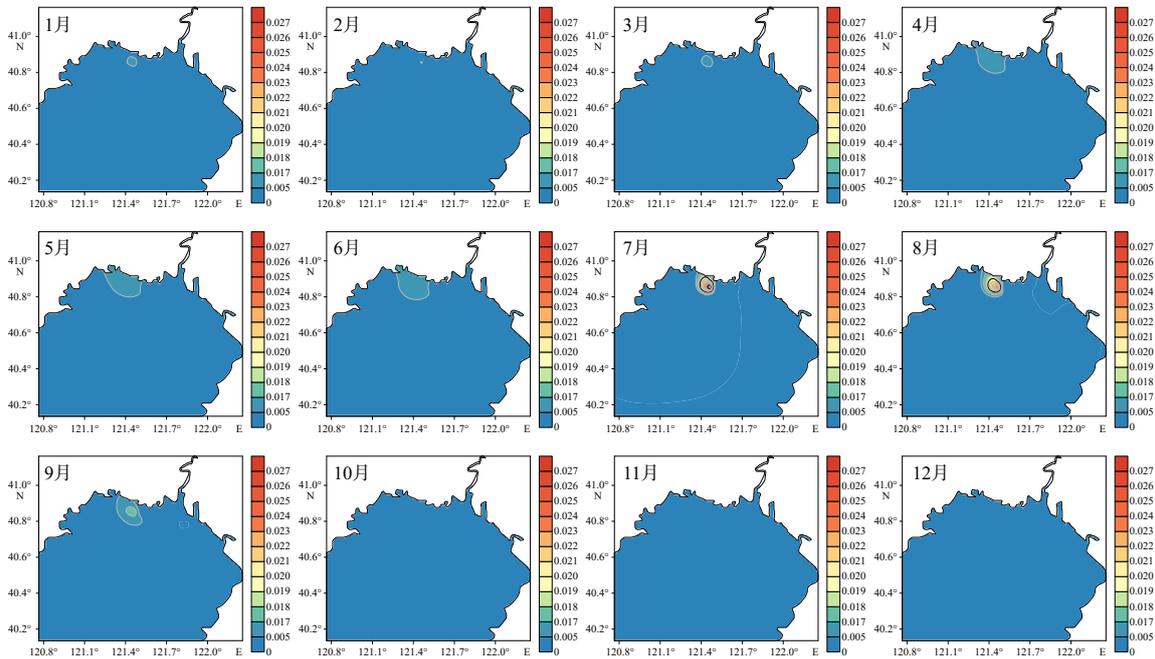


图 4 小凌河 TP 水质响应区逐月分布结果

Fig. 4 Monthly distribution results of TP in Xiaoling river

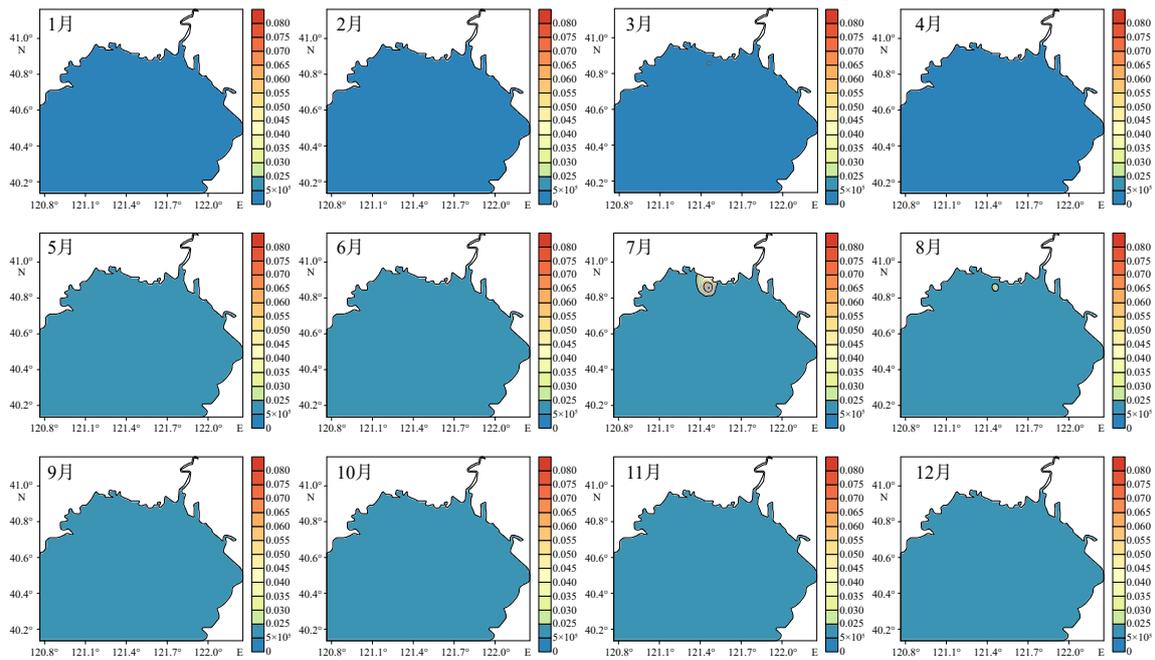


图 5 小凌河 NH<sub>3</sub>-N 水质响应区逐月分布结果

Fig. 5 Monthly distribution results of NH<sub>3</sub>-N in Xiaoling river

低,而环境中磷的浓度相对于 COD 和氮本来就偏低,因此,二者在排入海域之后迅速降解,故而两种污染物的影响范围较小。由此可见,流域氮污染管控应尽快实现以 TN 为指标,从而更能反应氮污染的情况。

### 3 结论

(1)本研究应用 LOADEST 模型估算了小凌河 2022 年 COD<sub>Mn</sub>、TP 和 NH<sub>3</sub>-N 的入海排放量,分别为 2643 t/a、99 t/a 和 365 t/a。3 种污染

物的通量均呈先升高后降低的变化趋势, 不同月份入海通量具有显著差异。受河流径流量及农业育种期影响, 7月入海通量最大, 分别为910 t/mon、30.38 t/mon和222 t/mon。8月通量日变化波动最剧烈。

(2) 流域污染物入海通量显著影响近岸海域水质。河口区海域污染物浓度在7月—8月较高且水质响应区域面积也最大, 与小凌河污染物入海排放通量变化同步。但不同污染物的水质响应区演变规律有所不同。因此, 在制定相应的污染管控措施时, 应充分考虑不同污染物类型及其对近岸海域水质的影响规律来进行差异化

#### 参考文献:

- [1] ZHANG P, RUAN H M, DAI P D, et al. Spatiotemporal river flux and composition of nutrients affecting adjacent coastal water quality in Hainan Island, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 591: 125293.
- [2] 陈炼钢, 陈俊鸿, 陈黎明, 等. 基于 LOADEST 和卡尔曼滤波的河流污染通量过程估算 [J]. *水利水电技术*, 2019, 50(10): 138-144.
- [3] APPLING A P, LEON M C, MCDOWELL W H. Reducing bias and quantifying uncertainty in watershed flux estimates: the R package loadflex[J]. *Ecosphere*, 2015, 6(12): 1-25.
- [4] MALAGÓ A, BOURAOUI F, VIGIAK O, et al. Modelling water and nutrient fluxes in the Danube River Basin with SWAT[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 603/604: 196-218.
- [5] 樊荣. 基于 HSPF 模型甬江入海总氮排放控制路径研究 [D]. 沈阳: 沈阳大学, 2022.
- [6] 高燕. 基于 SWAT 模型的流域土壤侵蚀及 POC 入海通量研究: 以我国南方地区为例 [D]. 南京: 南京师范大学, 2019.
- [7] 金亚楠, 张柏发, 郝韵, 等. 基于 LOADEST 模型和小波变换的河流氮磷污染动态分析 [J]. *浙江农业学报*, 2020, 32(9): 1692-1701.
- [8] 张媛媛, 刘建卫, 田晶, 等. 辽东湾北部河流氮磷入海通量及污染源解析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2024, 35(04): 29-37+46.
- [9] 生态环境部. 2022 年中国海洋生态环境状况公报 [EB/OL]. [2024-11-21]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/jagb/202305/P020230529583634743092.pdf>.
- [10] ZHANG A G, WANG L L, ZHAO S L, et al. Heavy metals in seawater and sediments from the northern Liaodong Bay of China: levels, distribution and potential risks[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2017, 11: 32-42.
- [11] 张悦. 辽西大、小凌河流域水功能区达标评价和水质变化趋势分析 [J]. *水利技术监督*, 2018, 26(1): 103-105, 109.
- [12] 自然资源部北海局. 2021 年北海区海洋灾害公报 [EB/OL]. [2025-01-21]. <https://ncs.mnr.gov.cn/n1/n550/n554/n557/241022140348292456.html>.
- [13] 李娜, 盛虎, 何成杰, 等. 基于统计模型 LOADEST 的宝象河污染物通量估算 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2012, 20(3): 355-366.
- [14] KIM K, KANG M S, SONG J H, et al. Estimation of LOAD-EST coefficients according to watershed characteristics[J]. *Journal of Korea Water Resources Association*, 2018, 51(2): 151-163.
- [15] AKAIKE H. A new look at the statistical model identification[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, 19(6): 716-723.
- [16] SCHWARZ G. Estimating the dimension of a model[J]. *The Annals of Statistics*, 1978, 6(2): 461-464.
- [17] CHEN J H, SHI W F, JIN X. Pollutant flux estimation of the Lijiang River based on an improved prediction-correction method[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 868404.
- [18] 杜青平, 程浩, 高伟, 等. 2014—2019 年东江干流氮磷通量传输特征与源解析 [J]. *环境科学学报*, 2024, 44(03): 139-149.
- [19] BACKHAUS J O. A semi-implicit scheme for the shallow water equations for application to shelf sea modelling[J]. *Continental Shelf Research*, 1983, 2(4): 243-254.
- [20] DAEWEL U, YAKUSHEV E V, SCHRUM C, et al. Understanding the role of organic matter cycling for the spatio-temporal structure of PCBs in the North Sea[J]. *Water*, 2020, 12(3): 817.
- [21] DAI A Q, LI K Q, DING D S, et al. Total maximum allocated load calculation of nitrogen pollutants by linking a 3D biogeochemical-hydrodynamic model with a programming model in Bohai Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2015, 111: 197-210.
- [22] 黄洁钰, 庞树江, 王晓燕. 基于浓度与流量突变的河流总磷通量估算 [J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(03): 644-653.
- [23] GOSWAMI A, PAUL P K, RUDRA R, et al. Evaluation of statistical models: Perspective of water quality load estimation[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 616: 128721.
- [24] SAHA G, SHEN C, DUNCAN J, et al. Performance evaluation of deep learning based stream nitrate concentration prediction model to fill stream nitrate data gaps at low-frequency nitrate monitoring basins[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 357: 120721.
- [25] 鲁栋梁, 钟复双, 杨斌, 等. 2014—2019 年钦江河口典型污染物的入海通量研究 [J]. *海洋环境科学*, 2022, 41(2): 245-252.

- [20] 狄乾斌, 韩雨汐, 曹可. 基于PSR模型的中国海洋生态安全评价研究[J]. 海洋开发与管理, 2014, 31(7): 87-92.
- [21] 厉丞烜, 张朝晖, 陈力群, 等. 我国海洋生态环境状况综合分析[J]. 海洋开发与管理, 2014, 31(3): 87-95.
- [22] 龚佳丽, 李红波, 杨和平. 生态安全格局与生态脆弱性视角下的武汉城市圈国土空间生态修复区识别与分类[J]. 地理科学, 2024, 44(10): 1809-1817.
- [23] 王根绪, 程国栋, 钱鞠. 生态安全评价研究中的若干问题[J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1551-1556.
- [24] 赵有益, 龙瑞军, 林慧龙, 等. 草地生态系统安全及其评价研究[J]. 草业学报, 2008, 17(2): 143-150.
- [25] Pan NH, Du QQ, Guan QY, et al. Ecological security assessment and pattern construction in arid and semi-arid areas: A case study of the Hexi Region, NW China[J]. Ecological Indicators, 2022, 138: 108797.
- [26] 汤旭, 宋璇, 曾玉林, 等. 长江经济带森林生态安全评价及时空演变研究[J]. 生态学报, 2021, 41(5): 1693-1704.
- [27] 陆保一, 明庆忠, 史鹏飞, 等. 基于DPSIR-SBM框架的旅游生态安全时空动态及影响路径: 以云南省为例[J]. 地理与地理信息科学, 2023, 39(6): 134-142.
- [28] 严莉, 曹广超, 康利刚, 等. 基于InVEST模型的共和县生境质量时空变化及驱动因素[J]. 干旱区研究, 2024, 41(2): 314-325.
- [29] 陈小龙, 狄乾斌, 梁晨露, 等. “双碳”目标下减污降碳与经济高质量发展的协同机理与实证探讨: 以中国沿海城市群为例[J/OL]. 世界地理研究, 1-16(2024-03-10)[2025-02-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1626.P.20240308.1650.006.html>.
- [30] 吕雅诗, 刘敏, 闫旭纲. 汾河流域旅游生态安全时空格局演变与影响因素[J]. 地域研究与开发, 2023, 42(5): 87-93.

(本文编辑: 曲丽梅)

(上接第605页)

- [26] 艾娇燕, 郑剑武, 刘高焯. 基于GF-LSTM和GAN网络的小样本集人工水体溶解氧浓度预测[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(01): 426-434.
- [27] 徐浩, 刘怀利, 瞿暄. 基于孤立森林的取水数据异常值检测[J]. 水电能源科学, 2024, 42(09): 29-32+59.
- [28] 李双营. 辽东湾入海河流污染物通量特征及来源分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [29] 苏莹. 山东省入海污染物分配容量计算: 精准化近海三维水质数值模拟数学规划法[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [30] YUAN S, XU N, CHEN Y, et al. Analysis of the influences of seawater freezing and melting on the water quality of sea surface based on monitoring data[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2021, 31(4): 429-434.

(本文编辑: 胡莹莹)