第63卷第3期
2023年5月

大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology

Vol. 63, No. 3
May 2023

文章编号：1000-8608(2023)03-0256-09

基于线性规划的大连湾海域环境容量分析

谭　馨[1]，项学敏*[1]，高　范[2]，环久峰[3]，安津诺[1]

（1.大连理工大学 环境学院，辽宁 大连　116024；
2.国家海洋环境监测中心，辽宁 大连　116023；
3.大连市生态环境局，辽宁 大连　116007）

摘要： 基于非结构化网格的 MIKE 21 模型，在水动力(HD)模型的基础上叠加对流扩散(Transport)模块，考虑陆源排污口的影响，建立了大连湾海域二维污染物输运模型，对化学需氧量(COD)、溶解无机氮(DIN)、活性磷酸盐 (PO_4^{3-}-P)环境容量进行了数值模拟. 综合海洋功能区划要求和环境现状，采用线性规划的排海通量最优化法计算了各排污口的环境容量，提出了排污治理建议. 结果表明大连湾内排污口的 COD、DIN、PO_4^{3-}-P 环境容量分别为 17 349.1、1 532.7、148.7 t/a. COD 仍有排污空间，多个排污口的 DIN 和 PO_4^{3-}-P 呈超负荷状态. 污水处理厂是主要的超标排放源，需优先进行削减控制. 研究为合理有效利用海域环境容量资源、制定环境管理决策提供了参考.

关键词： 大连湾；环境容量；排污治理；最优化法；数值模拟

中图分类号： X55　　**文献标识码：** A　　**doi：** 10.7511/dllgxb202303005

0　引　言

大连湾位于黄海北部辽东半岛南端，是天然形成的半封闭型海湾，三面被陆地环绕，湾口有三山岛为屏障，全湾总面积为 174 km^2，自西向东分布着臭水套、甜水套、红土堆子 3 个较大的子湾[1]. 大连湾自然条件优越，是中国北方最大的水产品交易中心及现代装备制造业基地，同时也是大连市多数城市生活污水、工业废水的排放地，多年来水质一直处于亚健康状态[2]. 实现近岸海湾水质达标的关键是减少陆源污染物的流入. 然而随着主城区经济和人口的增长，生活、生产污水负荷增加，大量污水流入湾内. 由于大连湾是半封闭海湾，湾内特别是子湾的水体交换速度慢[3]，致使污染物长期滞留，加剧了湾内海域富营养化. 因此，在环境容量的基础上进行陆源入海污染物总量控制和分配是十分必要的. 目前，关于海洋水环境容量的计算方法主要有标准自净容量法[4-5]、模型试算法[6-7]、分担率法[8-9]、最优化法[10]等. 对于大连湾环境容量的研究，前人多采用分担率法[11-12]，分担率法虽计算简便，但只能用当时排放状况下的分担率求解允许排放量，导致计算结果只是在当时排放量的基础上按比例变化，而不考虑排污量在污染源之间的分配，这是不合理的[13]. 排海通量最优化法[13-15]针对该方法的不足，借用线性规划思想，考虑排污口的布局，通过优化分配，得到总和最大的海洋环境容量，充分利用了海域的纳污能力. 鉴于此，本文将排海通量最优化法应用于大连湾，在数值模拟的基础上计算主要污染物的环境容量，探讨陆源污染控制和污染物排放削减的问题，为合理利用海洋资源，实现海洋环境管理精准化、发展规划科学化提供理论依据.

1　研究方法

1.1　模型构建及验证

1.1.1　模型介绍　本文应用 MIKE 21 FM 模拟系统中的水动力(hydro-dynamic)和对流扩散

收稿日期： 2022-03-16；　**修回日期：** 2023-03-20.
基金项目： 辽宁省生态环境厅政府采购项目(LNZC2018-0189).
作者简介： 谭　馨(1997—)，女，硕士生，E-mail：1173523340@qq.com；项学敏*(1968—)，女，博士，副教授，E-mail：hjyjs@dlut.edu.cn.

(Transport)模块进行大连湾二维水动力和水质的模拟. MIKE 21 是一款专业的水体数值模拟软件工具包，在海洋水质模拟和水环境管理规划中有着广泛应用[16-17]. 其数值求解是在空间上采用单元中心的有限体积法离散，在时间上采用二阶龙格-库塔方法进行积分[18]. 水动力模块控制方程为垂向平均的二维浅水方程组[19]：

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{u}}{\partial x}+\frac{\partial h\bar{v}}{\partial y}=hS \tag{1}$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x}+\frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y}=f\bar{v}h-gh\frac{\partial\eta}{\partial x}-\frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial\rho}{\partial x}+\frac{\tau_{sx}}{\rho_0}-\frac{\tau_{bx}}{\rho_0}+\frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx})+\frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy})+hu_sS \tag{2}$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial x}+\frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y}=-f\bar{u}h-gh\frac{\partial\eta}{\partial y}-\frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial\rho}{\partial y}+\frac{\tau_{sy}}{\rho_0}-\frac{\tau_{by}}{\rho_0}+\frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy})+\frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy})+hv_sS \tag{3}$$

式中：η为水位；$h=\eta+d$，为总水深；$f=2\omega\sin\phi$，为流体柯氏力；g 为重力加速度；u、v 分别为 x、y 方向的流速分量；t 为时间；ρ为流体密度；ρ_0为水的密度；S 为源项；τ_{sx}和τ_{bx}为底床剪切应力；T_{xx}、T_{xy}、T_{yy}为涡动黏滞系数.

水质控制方程为污染物的对流-扩散方程[20]：

$$\frac{\partial\rho_i}{\partial t}+u\frac{\partial\rho_i}{\partial x}+v\frac{\partial\rho_i}{\partial y}-\frac{\partial}{\partial x}\left(D_x\frac{\partial\rho_i}{\partial x}\right)-\frac{\partial}{\partial y}\left(D_y\frac{\partial\rho_i}{\partial y}\right)-K=s \tag{4}$$

式中：ρ_i为污染物浓度，D_x、D_y 为 x、y 方向紊动分散系数，K 为污染源降解项，s 为污染源单位体积的排放速率.

1.1.2　模型设置　模拟的范围包括大连湾及大、小窑湾周边海域(121.585°E～122.014°E，38.820°N～39.075°N)，模拟区域总面积约为 698.64 km^2. 水深通过海图提取. 大连湾内地势平缓，水深在 5～15 m 变化缓慢. 湾内岸线崎岖，有较多港口和人为构筑物. 将区域划分为不规则的三角形，以适应曲折的岸线与岛屿. 网格沿外海向内加密，陆域划分边长范围为 100～250 m，最复杂区域网格最小边长为 50 m，开边界网格边长范围为 300～600 m. 共划分计算网格 31 501 个，节点总数 16 481. 模拟区域范围的网格和水深分布如图 1 所示.

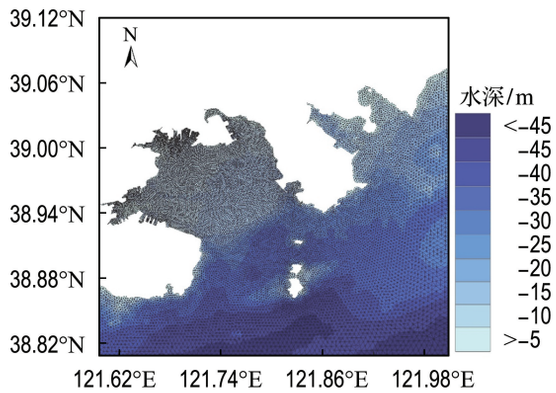


图 1　模拟区域网格和水深分布

Fig. 1　Grid and water depth distribution in simulation area

模型采用软启动，即设置启动时流速、流向为零. 外海开边界采用水位强迫，水位数据由 DHI MIKE 内置的潮汐预报程序生成，包含 K_1、O_1、P_1、Q_1、M_2、S_2、K_2、N_2 共 8 个分潮. 模型考虑了潮汐、陆源排污口和风场的作用. 温盐采用正压方程计算，糙率 n 经率定后取为 0.028～0.032. 计算时间步长为 30 s. 将陆源排污口设为点源，输入日均排水量和污染物排放量. 将 COD 视作非保守性物质，其降解符合一维降解方程[21]. 无机氮和磷酸盐在海洋中的迁移转化复杂，目前无法用简单的系数来表达，计算中设置为保守性物质.

1.1.3　模型验证及分析　本次模型验证资料是由国家海洋环境监测中心在 2015 年 10 月测得的潮位和潮流资料，在海景路码头和黄白咀设置两个潮位验证站点，在湾口处设置两个潮流验证站点(V_1、V_2)，验证站点具体位置如图 2 所示.

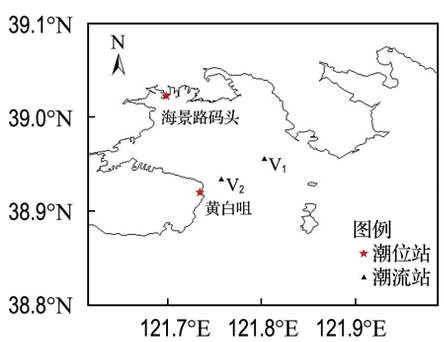
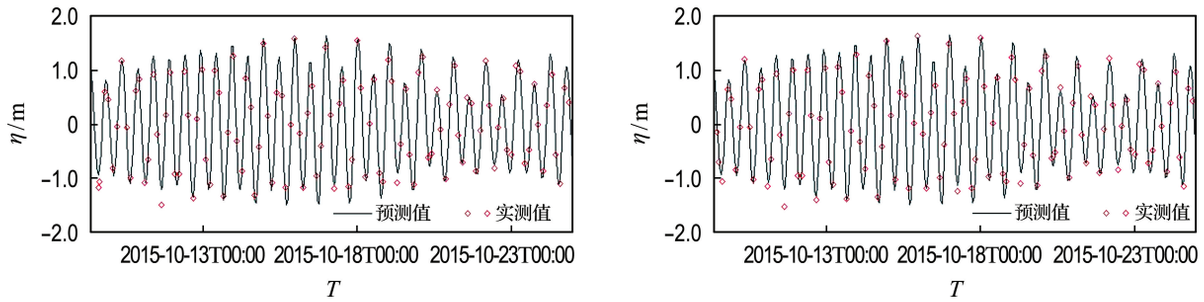


图 2　潮位、潮流验证站点分布

Fig. 2　Distribution of tide level and tide verification sites

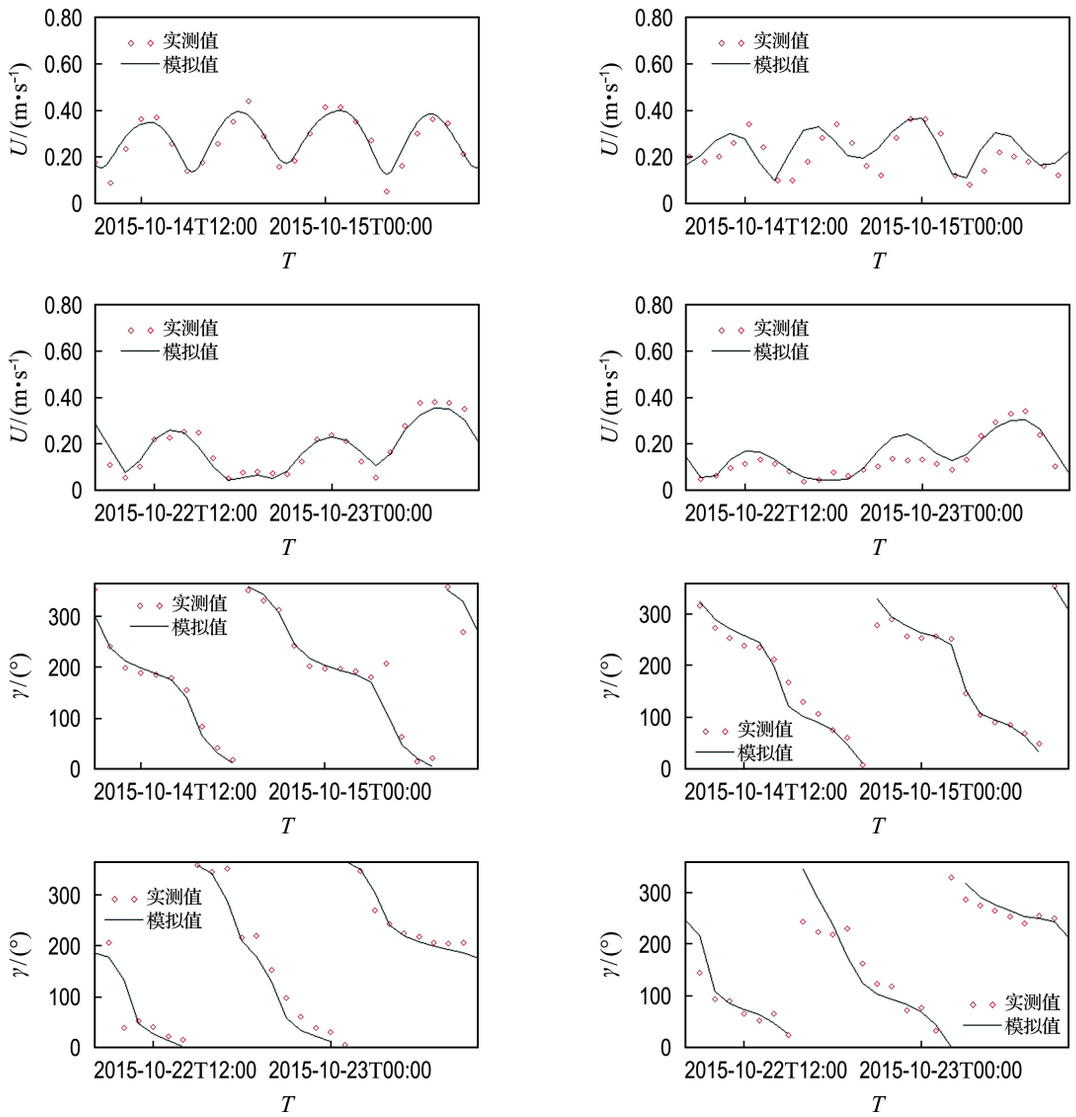
大潮期为 2015-10-09～2015-10-10，小潮期为 2015-10-22～2015-10-23，期间的潮位及潮流验证曲线如图 3、4 所示. 从图上看，模拟的潮位和潮流与实际相似，用平均绝对误差(E_{ma})和相关系数(r)



(a) 黄白咀　　(b) 海景路码头

图 3　潮位验证曲线

Fig. 3　Tide level verification curves



(a) V_2　　(b) V_1

图 4　流速 U、流向 γ 验证曲线

Fig. 4　Flow velocity U and direction γ verification curves

来进一步评估模拟情况，r 越接近1，表示模型与实际相关性越高，模拟结果越好. 根据计算结果，黄白咀、海景路码头潮位的 r 均为0.99，E_{ma} 分别为0.098、0.097 m；两个潮流站点 V_1、V_2 流速的 r 分别为0.85、0.92，E_{ma} 分别为0.045、0.035 m/s；流向的 r 分别为0.82、0.97，E_{ma} 分别为29.25°、17.36°. 总体上潮位的峰值、相位和潮流的流速、流向都与实际拟合较好，符合相关规范要求. 因此可认为模型的参数设置合理，可用于接下来环境容量的研究. 分析大连湾的流场可得，湾口处流速最大，平均为0.3 m/s，流速由湾口向内递减. 整体上海水流速较小，不利于污染物的稀释与扩散.

1.2　环境容量计算方法与条件

1.2.1　*排海通量最优化法*　排海通量最优化法是一种总量最优计算方法，根据控制入海污染物总量的实际需求，在确定目标海域海洋环境容量阈值的前提下，在各水质控制点处污染物达标的情况下，通过优化污染物来源的分布，使排入海洋的污染物量达到允许的最大值. 该方法充分考虑了海域的自然属性对污染物排放量的要求和人为可控的主观属性对水质的要求. 在海洋环境中，污染物发生的衰减、扩散、迁移是各种物理、化学和生物过程共同作用的结果，因此在海域自然条件不变的情况下，污染物的浓度分布存在平衡状态，污染源单独排放形成的浓度场是多个污染源排放浓度场的线性叠加. 水质控制点处的污染物浓度与污染源排放浓度存在响应关系，各污染源的污染物排放变化量与浓度场的变化量呈线性关系.

根据响应叠加原理，环境容量的计算即为求解以满足水质目标为约束，以排放总量最大为目标函数的线性规划方程[14].

目标函数：

$$\max Q = \sum_{i=1}^{n} Q_i \tag{5}$$

约束条件：

$$\begin{pmatrix} c_1^0 \\ c_2^0 \\ \vdots \\ c_m^0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \alpha_{1,1} & \alpha_{1,2} & \cdots & \alpha_{1,n} \\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2} & \cdots & \alpha_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{m,1} & \alpha_{m,2} & \cdots & \alpha_{m,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{pmatrix} \leqslant \begin{pmatrix} c_1^s \\ c_2^s \\ \vdots \\ c_m^s \end{pmatrix}$$

$$Q_i \geqslant 0 \tag{6}$$

式中：c_m^s 为控制点 m 处海域的污染物标准浓度；c_m^0 为控制点 m 处海域的污染物背景浓度；$\alpha_{i,j}$ 为第 i 个污染源在第 j 个水质控制点处的响应系数；Q_i 为第 i 个污染源的最大排海通量，即环境容量.

排海通量最优化法将环境容量的计算转化为单纯的数学问题，结果可能会出现排污口排放量为零的情况，这在数学上是可行的，在实际中难以实现. 因此，对优化计算结果为零的排污口进行二次优化，对其设置下限值，即 $Q_i \geqslant Q_{di}$，Q_{di} 为第 i 个污染源达标的污染物排放量. 由于海水的潮汐作用会对污染源与水质的响应关系产生周期性影响，取模拟1 a后运行稳定时的潮均值进行计算.

1.2.2　*削减分配*　当污染排放总负荷大于该排放点在特定水质要求下的环境容量时，该海域就不能实现要求的水质目标，因此需要对超过环境容量的部分进行削减. 削减量的计算方法为

$$\Delta Q_i = Q_i - Q_{si} \tag{7}$$

当 $\Delta Q_i < 0$ 时，该排污口有盈余，不需要削减；当 $\Delta Q_i > 0$ 时，排污口已无排放余量，需要进行削减，削减率 $q = \Delta Q_i / Q_i$.

1.2.3　*污染物核算*　以黄白咀至大孤山连线作为大连湾海域环境容量计算的分界线，目前大连湾内在用入海排污口共有21个，包括污水处理厂、工业废水排污口和海水冷排口. 将同一管理单位的排污口合并处理，剔除海水冷排口，最终形成13个计算排污口. 通过数据统计法及汇污浓度监测法计算各排污口的排污总量[22-23]，按日均值输入源强到模型中. 参考数据包括2018年大连市污水处理厂监测月报、2017年环境统计数据以及第二次污染物普查数据. 由于陆源排污监测指标为 COD_{Cr}、总氮(TN)和总磷(TP)，而海洋的水质指标为 COD_{Mn}、溶解无机氮(DIN)和活性磷酸盐(PO_4^{3-}-P)，两类指标间的浓度折算关系为 $\rho(COD_{Mn}) = \frac{1}{3}\rho(COD_{Cr})$，$\rho(DIN) = 0.6\,\rho(TN)$，$\rho(PO_4^{3-}\text{-}P) = 0.7\,\rho(TP)$[24-25].

1.2.4　*水质要求及控制点设置*　研究区域环境容量计算的污染物浓度限值综合考虑海洋环境功能区划所对应的水质标准和区域的环境现状. 大连湾内大部分海域为港口航运区、工业与城镇用海区，环保要求为三类水质，对于大连湾保留区要

求水质不劣于现状[26]. 根据 2017 年近岸海域水质监测信息，大连湾海域各监测点的 COD 均满足《海水水质标准》(GB 3097—1997)[27]中二类水质标准，部分点位的 DIN 浓度和 PO_4^{3-}-P 浓度超过三类水质标准. 综上，计算过程中对 COD、DIN、PO_4^{3-}-P 浓度分别按照二类、三类、二类标准进行限制，即 3、0.4、0.03 mg/L. 设定开边界污染物浓度为零，将 2017 年大连湾区域各监测点位污染物均值通过普通克里金法插值到网格文件中作为环境背景值，从而减少无法考虑非点源污染造成的误差，并考虑不同位置的水质历史差异性.

污水自排放口或扩散器排出后，各个瞬时造成附近水域污染物浓度超过该水域水质目标限值，这一平面范围的包络区称为混合区. 污染物浓度分布往往呈由混合区外边界向外海递减的规律. 因此将控制点设在混合区边界，对混合区内的污染物浓度不限制，当控制点处的水质达标时，就视为排污口在该排放负荷下能满足计算规定的水质要求. 本文的要求是较为严格的情况，求得的结果相对安全，更利于海域管理者参考. 混合区的计算通过 Mackenthun 公式，并加入单宽流量强度系数修正[22]. 共设置 20 个水质控制点，其在海湾内的分布如图 5 所示.

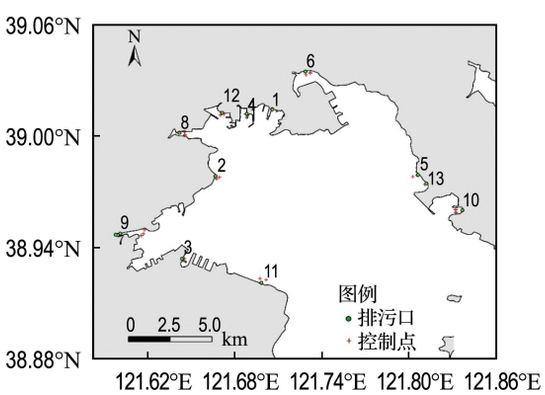


图 5 排污口与水质控制点分布

Fig. 5 Distribution of pollutant outlets and water quality control points

2 计算结果与分析

2.1 排污量与环境容量计算结果

在数值模拟的基础上，求解线性规划方程，得到大连湾内各排污口污染物优化计算的环境容量. 相比于前人的计算结果[12]，在更加严格的水质要求下，通过排海通量最优化法计算的环境容量更大，充分利用了海湾纳污能力. 由表 1 可知，2018 年大连湾内 13 个排污口的 COD、DIN、PO_4^{3-}-P 环境容量分别为 17 349.1、1 532.7、148.7 t/a. 总体来看各排污口 COD 仍有余量，5 号和 11 号排污口因靠近湾口位置，水体流速较大，水体交换更活跃，理论环境容量较大. COD 的排放主要来自 7 号排污口(春柳河污水处理厂一期、二期)、8 号排污口(泉水河污水处理厂一期、二期)和 6 号排污口(大连大开污水处理有限公司). 对于 DIN 而言，各排污口排放量总和超过环境容量，大连湾内已无环境余量. 对于 PO_4^{3-}-P 而言，大连湾总体仍有余量，但部分排污口排放量超标. DIN 和 PO_4^{3-}-P 的排放主要来自 7 号和 8 号排污口. 5 号排污口的环境容量最大，可能是污染排放负荷小和水体交换活跃的共同作用.

2.2 污染物削减分析

结合计算所得的污染物排放量和环境容量得到各排污口的污染物削减量和削减率. 从表 2 中可知：所有排污口的 COD 均有排污空间. DIN 和 PO_4^{3-}-P 的情况较为严峻. 对于 DIN，7 号、8 号、9 号排污口的削减率超过 90%，8 号排污口的削减率最大，为 95.0%. PO_4^{3-}-P 需要进行削减的有 7 号、8 号、9 号和 12 号排污口(大连湾污水处理厂-大连湾临海装备制造业聚集区及配套园区)，8 号和 9 号排污口削减率较高，分别为 89.6% 和 81.4%.

2.3 排污治理建议

从计算结果来看，大连湾内各排污口 COD 仍有纳污空间，可根据环境容量结果建立合理的控制目标，对 DIN 和 PO_4^{3-}-P 需要制定严格的管控措施. 需要削减的排污口均为污水处理厂出水，污染来源突出. 污水处理厂的出水污染物浓度虽满足直排标准，但排污总量大，对接纳的水体造成极大压力. 因此，亟需加大污水处理厂的投资建设，对其扩容改造，提高其对氮和磷的处理能力. 提高出水回用比例，减少污水排放量. 推进主城区排水管网建设和污水分流进程，合理分配污水处理厂的排污负荷.

表 1　大连湾内排污口环境容量和污染物排放量

Tab. 1　Environmental capacity and pollutant discharge flux in pollutant outlet of Dalian Bay

排污口	COD		DIN		PO_4^{3-}-P	
	排放量/(t·a^{-1})	环境容量/(t·a^{-1})	排放量/(t·a^{-1})	环境容量/(t·a^{-1})	排放量/(t·a^{-1})	环境容量/(t·a^{-1})
1 号	2.0	495.2	0.6	41.8	0.1	3.6
2 号	57.5	2 807.0	8.7	251.5	0.5	30.4
3 号	8.2	442.4	0.5	23.6	0.1	4.9
4 号	0.1	599.2	0.1	45.2	0	4.8
5 号	0.9	5 418.3	0.4	608.3	0.1	39.3
6 号	188.3	421.8	91.0	28.5	1.3	3.5
7 号	722.1	768.7	744.7	38.4	15.8	7.9
8 号	207.2	229.3	305.1	15.3	21.2	2.2
9 号	87.4	93.1	205.3	10.6	11.8	2.2
10 号	159.0	1 712.8	80.9	195.0	2.1	11.1
11 号	139.6	3 705.9	91.3	231.6	3.0	32.8
12 号	51.6	655.2	7.8	42.8	8.8	6.0
13 号	0.1	0.2	0	0.1	0	0
总计	1 624.0	17 349.1	1 536.4	1 532.7	64.8	148.7

表 2　大连湾内排污口污染物削减计算结果

Tab. 2　Pollutant reduction calculation results in pollutant outlet of Dalian Bay

排污口	COD		DIN		PO_4^{3-}-P	
	削减量/(t·a^{-1})	削减率/%	削减量/(t·a^{-1})	削减率/%	削减量/(t·a^{-1})	削减率/%
1 号	−493.3	—	−41.2	—	−3.5	—
2 号	−2 749.5	—	−242.8	—	−29.9	—
3 号	−434.2	—	−23.1	—	−4.8	—
4 号	−599.1	—	−45.1	—	−4.8	—
5 号	−5 417.4	—	−607.9	—	−39.2	—
6 号	−233.5	—	62.5	68.7	−2.2	—
7 号	−46.6	—	706.3	94.8	7.9	50.0
8 号	−22.1	—	289.8	95.0	19.0	89.6
9 号	−5.7	—	194.7	94.8	9.6	81.4
10 号	−1 553.8	—	−114.1	—	−9.0	—
11 号	−3 566.3	—	−140.3	—	−29.8	—
12 号	−603.6	—	−35.0	—	2.8	31.8
13 号	−0.1	—	−0.1	—	0	—

注：—表示排污口仍有余量，无须削减.

超标最严重的 7 号、8 号、9 号排污口位于大连湾顶部的臭水套湾和甜水套湾，这部分海域水深较小，流速较低，水体呆滞，以致污染物长时间滞留，难于向外海输运. 因此建议未来的发展规划中，新建排污口选在靠近湾口位置，不再向湾顶新建排污口，从而减轻湾顶处水体的负担，合理利用

大连湾的纳污能力.在排污口的管理方面需要健全入海排污口管理制度体系,建立入海排污口动态化、信息化监管系统,落实“一口一策”.

3 结 语

本文在数值模拟和实测数据的基础上,通过排海通量最优化法计算了大连湾内排污口环境容量的总量最优结果.COD、DIN、PO_4^{3-}-P的环境容量分别为17 349.1、1 532.7、148.7 t/a.沿岸排污口COD、DIN、PO_4^{3-}-P的排放总量分别为1 624.0、1 536.4、64.8 t/a.各排污口COD均有排放余量,DIN和PO_4^{3-}-P有不同程度的超标.

污水处理厂是最主要的超标污染源,7号、8号和9号排污口的超标程度最严重,是排污口水体条件和排污负荷两方面因素共同作用的结果,需要优先进行削减控制.建议对污水处理厂进行扩容改建、分流处理,尽可能利用湾口海域的纳污能力,以降低污染负荷,实现水质达标.

参考文献:

[1] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志:第一分册. 辽东半岛东部海湾[M]. 北京:海洋出版社,1991.
China Gulf Journal Compilation Committee. **Gulf of China: The First Volume. Eastern Gulf of Liaodong Peninsula**[M]. Beijing: Ocean Press, 1991. (in Chinese)

[2] 杨永俊,韩成伟,胡展铭,等. “十一五”和“十二五”期间大连市陆源入海排污状况分析[J]. 环境保护科学,2020,**46**(5):105-111.
YANG Yongjun, HAN Chengwei, HU Zhanming, *et al*. Analysis of land-based sewage into the sea in Dalian during the 11th and 12th five-year plans periods[J]. **Environmental Protection Science**, 2020, **46**(5): 105-111. (in Chinese)

[3] 曹雪峰,张宇铭,张淑芳,等. 基于数值模拟的大连湾水交换能力研究[J]. 海洋环境科学,2020,**39**(1):114-120.
CAO Xuefeng, ZHANG Yuming, ZHANG Shufang, *et al*. Numerical simulation of water exchange in Dalian Bay of China[J]. **Marine Environmental Science**, 2020, **39**(1): 114-120. (in Chinese)

[4] 张 静,刘 玉,马志华,等. 流沙湾海域潮汐潮流的三维数值模拟和海域环境容量研究[J]. 海洋通报,2013,**32**(1):34-44.
ZHANG Jing, LIU Yu, MA Zhihua, *et al*. Three-dimensional numerical simulation of tide and tidal currents in Liusha Bay and the study on its sea environmental capacity[J]. **Marine Science Bulletin**, 2013, **32**(1): 34-44. (in Chinese)

[5] 张文亮,刘 泓,冯剑丰,等. 渤海湾入海溶解无机氮总量控制研究[J]. 中国环境监测,2015,**31**(1):41-44.
ZHANG Wenliang, LIU Hong, FENG Jianfeng, *et al*. Research on the total dissolved inorganic nitrogen flux into the Bohai Bay[J]. **Environmental Monitoring in China**, 2015, **31**(1): 41-44. (in Chinese)

[6] 石泳昊,贾良文,张 恒,等. 湛江湾内湾环境容量计算与排污治理[J]. 热带海洋学报,2021,**40**(4):134-142.
SHI Yonghao, JIA Liangwen, ZHANG Heng, *et al*. Environmental capacity calculation and sewage treatment in Inner Zhanjiang Bay[J]. **Journal of Tropical Oceanography**, 2021, **40**(4): 134-142. (in Chinese)

[7] 龙颖贤,陈 隽,韩保新. 环北部湾经济区近岸海域环境容量研究[J]. 中山大学学报(自然科学版),2014,**53**(1):83-88.
LONG Yingxian, CHEN Jun, HAN Baoxin. Research on marine environmental capacity in the Beibu Gulf Economic Zone[J]. **Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni**, 2014, **53**(1): 83-88. (in Chinese)

[8] SUN Lei, WANG Jing, ZHANG Haifeng, *et al*. The characteristics and mechanism of changes in the marine environmental capacity of the estuaries of Haizhou Bay in Northern Jiangsu from 2006 to 2016[J]. **Journal of Marine Science and Engineering**, 2020, **8**(10): 787.

[9] 王 峰. 基于海陆统筹的渤海入海污染物总量控制研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2015.
WANG Feng. Research on total amount control of pollutant leaking into the Bohai sea based on the sea-land integrated planning[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. (in Chinese)

[10] 陈 昊. 普兰店湾海洋环境容量分析与研究[D].

大连：大连海洋大学，2015.
CHEN Hao. The analysis and research of the marine environmental capacity of Pulandian Bay [D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2015. (in Chinese)

[11] 兰冬东，梁　斌，马明辉，等. 海洋环境容量分析在规划环境影响评价中的应用 [J]. 海洋开发与管理，2013，**30**(8)：62-65.
LAN Dongdong, LIANG Bin, MA Minghui, *et al*. Application of marine environmental capacity analysis in planning environmental impact assessment [J]. **Ocean Development and Management**, 2013, **30**(8): 62-65. (in Chinese)

[12] 张存智，韩　康，张砚峰，等. 大连湾污染排放总量控制研究——海湾纳污能力计算模型 [J]. 海洋环境科学，1998，**17**(3)：1-5.
ZHANG Cunzhi, HAN Kang, ZHANG Yanfeng, *et al*. Study on the total mass control of the pollutants into Dalian Bay - Numerical computing models of the receiving ability for the pollutants into the bay [J]. **Marine Environmental Science**, 1998, **17**(3): 1-5. (in Chinese)

[13] 董娇娇. 天津近岸海域污染物迁移转化规律及环境容量研究 [D]. 天津：天津大学，2019.
DONG Jiaojiao. Study on the migration and transformation of pollutants and their environmental capacity in Tianjin Coastal Waters [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)

[14] 郑军勇，毛新燕，生小萱，等. 象山港溶解无机氮环境容量研究 [J]. 海洋科学，2020，**44**(4)：13-20.
ZHENG Junyong, MAO Xinyan, SHENG Xiaoxuan, *et al*. Environmental capacity assessment of dissolved inorganic nitrogen in the Xiangshan Bay [J]. **Marine Sciences**, 2020, **44**(4): 13-20. (in Chinese)

[15] HAN Hongyan, LI Keqiang, WANG Xiulin, *et al*. Environmental capacity of nitrogen and phosphorus pollutions in Jiaozhou Bay, China: Modeling and assessing [J]. **Marine Pollution Bulletin**, 2011, **63**(5): 262-266.

[16] HUANG Wei, MA Wei, LIU Xiaobo, *et al*. Numerical study of hydrodynamics and water quality in Qinhuangdao Coastal Waters, China: Implication for pollutant loadings management [J]. **Environmental Modeling and Assessment**, 2021, **26**(1): 63-76.

[17] 顾　杰，李正尧，冒小丹，等. 夏季北戴河海域 COD 环境容量研究 [J]. 海洋环境科学，2017，**36**(5)：682-687.
GU Jie, LI Zhengyao, MAO Xiaodan, *et al*. Study of COD environmental capacity in coastal waters of Beidaihe in summer [J]. **Marine Environmental Science**, 2017, **36**(5): 682-687. (in Chinese)

[18] DHI. **Mike 21 Flow Model FM User Guide** [M]. Danish: DHI, 2014.

[19] 李添雨，李振华，黄炳彬，等. 基于 MIKE 21 模型的沙河水库水量水质响应模拟研究 [J]. 环境科学学报，2021，**41**(1)：293-300.
LI Tianyu, LI Zhenhua, HUANG Bingbin, *et al*. Simulation on water quality and quality of Shahe reservoir by MIKE 21 model [J]. **Acta Scientiae Circumstantiae**, 2021, **41**(1): 293-300. (in Chinese)

[20] 刘晨辉，刘思飏，李　丹，等. 基于 MIKE 21 模型的长江中环排污口水质影响分析 [J]. 中国农村水利水电，2020(1)：72-76.
LIU Chenhui, LIU Sisi, LI Dan, *et al*. An analysis of the impact of Zhonghuan sewage outlet on water quality of Yangtze River based on MIKE 21 model [J]. **China Rural Water and Hydropower**, 2020(1): 72-76. (in Chinese)

[21] 季　民，孙志伟，王泽良，等. 污水排海有机物的生化降解动力学系数测定及水质模拟 [J]. 中国给水排水，1999(11)：62-65.
JI Min, SUN Zhiwei, WANG Zeliang, *et al*. Determination of biochemical degradation kinetic coefficients and water quality simulation of organic matter in sewage discharge [J]. **China Water and Wastewater**, 1999 (11): 62-65. (in Chinese)

[22] 国家海洋环境监测中心. 陆源入海排污口及邻近海域环境监测与评价技术规程(试行) [S]. 北京：国家海洋局，2015.
National Marine Environmental Monitoring Center. Technical Procedures for Environmental Monitoring and Evaluation of Land-Based Outfalls and Adjacent Sea Areas (for Trial Implementation) [S]. Beijing: State Oceanic Administration, 2015. (in Chinese)

[23] 鞠　烨. 辽东沿海诸河流域污染负荷核算及水环境容量分析 [D]. 大连：大连理工大学，2021.
JU Ye. Pollution loading accounting and water environmental capacity analysis of Liaodong coastal river basin [D]. Dalian: Dalian University of

Technology, 2021. (in Chinese)

[24] 姜恒志，崔 雷，于大涛，等. 大连长兴岛马家咀排污口海域环境容量研究 [J]. 应用海洋学学报，2017，**36**(2)：202-209.
JIANG Hengzhi, CUI Lei, YU Datao, *et al*. Study on marine environmental capacity around sewage outfall in Majiazui of Changxingdao Island, Dalian [J]. **Journal of Applied Oceanography**, 2017, **36**(2): 202-209. (in Chinese)

[25] 吴煌荣. 江苏滨海工业园区排污口海域 COD 环境容量 [J]. 应用海洋学学报，2016，**35**(1)：47-57.
WU Huangrong. Sea environmental capacity about COD in wastewater discharge area of industrial park in Jiangsu Binhai city [J]. **Journal of Applied Oceanography**, 2016, **35**(1): 47-57. (in Chinese)

[26] 辽宁省人民政府. 辽宁省海洋功能区划(2011—2020 年)[Z]. 沈阳：辽宁省人民政府，2014-2021.
The People's Government of Liaoning Province. Marine functional zoning of Liaoning Province (2011-2020) [Z]. Shenyang: The People's Government of Liaoning Province, 2014-2021. (in Chinese)

[27] 国家海洋局第三海洋研究所，青岛海洋大学. 海水水质标准：GB 3097—1997 [S]. 北京：国家环境保护局，1997.
Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao Ocean University. Sea Water Quality Standard: GB 3097-1997 [S]. Beijing: State Environmental Protection Administration, 1997. (in Chinese)

Marine environmental capacity analysis in Dalian Bay based on linear programming

TAN Xin[1], XIANG Xuemin[*1], GAO Fan[2], HUAN Jiufeng[3], AN Jinnuo[1]

(1. School of Environmental Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China;
3. Dalian Municipal Bureau of Ecological Environment, Dalian 116007, China)

Abstract: Based on non-structural grid MIKE 21 model, a convection diffusion module (Transport) is stacked with the hydro-dynamic (HD) model. Considering the affection of land-based pollution outlet, 2D pollutant transportation model in Dalian Bay sea area is established, and the numerical simulation is done for environmental capacity of chemistry oxygen demand (COD), dissolved inorganic nitrogen (DIN) and labile phosphate (PO_4^{3-}-P). Integrating the sea regional function requirements and the current environmental situation, the linear programming sea outlet optimization method is proposed to calculate environmental capacity of each pollutant outlet. Suggestions of pollution treatment are given. The results show that COD, DIN and PO_4^{3-}-P environmental capacities in pollutant outlets are 17 349.1, 1 532.7 and 148.7 t/a, respectively. There is still more capacity for COD, but several outlets are overloaded with DIN and PO_4^{3-}-P. Pollutant treatment factories are the main sources for overload, which should be controlled first. The research provides reference for effectively using marine environmental capacity and making environmental regulation policies.

Key words: Dalian Bay; environmental capacity; discharge management; optimization method; numerical simulation