

嘉兴海域主要污染物环境容量及总量控制研究

刘星璐, 郭江泓, 张亚力, 罗小峰, 路川藤

Research on the environmental capacity and total control of main pollutants in the Jiaxing waters

LIU Xinglu, GUO Jianghong, ZHANG Yali, LUO Xiaofeng, LU Chuanteng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20230824002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

潜流湿地对微污染水体中氮磷去除效果的中试研究

Pilot experiment on effects of subsurface artificial wetland on nitrogen and phosphorus removal in slightly-polluted surface water body

水利水运工程学报. 2018(4): 81 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.04.012>

围垦工程对沙枉河口污染物输运影响分析

Numerical analysis of influences of reclamation works on pollutant transportation along Shawang River estuary

水利水运工程学报. 2017(2): 115 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.02.015>

基于变频控制的实体模型流量控制

Discharge control of physical model based on frequency converter

水利水运工程学报. 2018(1): 23 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.01.004>

基于水龄抑制蓝藻水华的供水水库取水方案优选

Optimization of reservoir cycling water scheme based on water age to reduce algal bloom risk

水利水运工程学报. 2020(2): 85 <https://doi.org/10.12170/20190226004>

白石水库饮用水水源保护区划分合理性研究

Rationality evaluation of the delineation of drinking water source protection areas in the Baishi Reservoir

水利水运工程学报. 2020(2): 66 <https://doi.org/10.12170/20190612002>

不同发展情景下雄安新区用水强度及需水量预测

Water use intensity and water demand prediction of Xiongan New Area under different development scenarios

水利水运工程学报. 2021(1): 18 <https://doi.org/10.12170/2020040100>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20230824002

刘星璐, 郭江泓, 张亚力, 等. 嘉兴海域主要污染物环境容量及总量控制研究 [J]. 水利水运工程学报, 2024(4): 15-26. (LIU Xinglu, GUO Jianghong, ZHANG Yali, et al. Research on the environmental capacity and total control of main pollutants in the Jiaxing waters[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(4): 15-26. (in Chinese))

嘉兴海域主要污染物环境容量及总量控制研究

刘星璐¹, 郭江泓², 张亚力², 罗小峰¹, 路川藤¹

(1. 南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 嘉兴海域近年来海洋生态环境质量明显退化, 实施污染物总量控制作为保证海域环境质量的根本措施之一, 有助于嘉兴海域污染物的减排与治理工作, 保障嘉兴海域可持续发展能力。基于嘉兴临近海域水动力-水质模型与现场监测结果, 依据浙江省近岸海域环境功能区划的水质要求, 采用响应系数法与线性规划方法, 计算了该海域重要排放口的化学需氧量 COD、无机氮与磷酸盐环境容量, 并针对削减扩容影响的总量控制措施进行计算与评估。结果表明, 研究海域 COD 总环境容量为 2.97×10^5 t/a, 仍有较大富余, 而无机氮与活性磷酸盐含量均超四类海水水质标准, 超过海域无机氮与磷酸盐环境容量。对现有规划进行合理的量化数值模拟, 削减措施尽管减少了一部分扩容引起的 COD、无机氮与磷酸盐含量的增加, 使其保持平稳, 但仍需继续优化污水处理能力, 减少氮磷营养盐的排放。研究结果可为沿海城市陆源污染物总量控制研究提供科学依据。

关键词: 环境容量; 氮磷营养盐; 总量控制; CJK3D-WEM; 嘉兴海域

中图分类号: P76

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2024)04-0015-12

随着嘉兴市社会经济的高速发展, 化学污染物排海总量不断增加, 导致嘉兴近岸海域环境污染压力日趋凸显。嘉兴海域临近长江口及杭州湾区域, 承接了长江流域和周边水系输入的巨量污染物^[1], 陆源污染^[2]、滩涂围垦^[3]和沿海开发等人类活动又导致杭州湾海域生态环境质量恶化, 海域处于严重富营养化状态^[4]。近年来监测结果表明, 嘉兴海域海洋生态环境质量明显退化, 主要污染物为无机氮和活性磷酸盐^[5], 严重影响海洋资源和经济社会的可持续发展, 实施污染物总量控制是保证海域环境质量的根本措施之一^[6], 可为后期污染物总量控制规划与较优排污方案制定提供参考。

美国早于 1972 年通过了著名的《联邦水污染控制法修正案》(PL92-500), 实现了以水质为基础的排放总量限制, 1985 年修订了《清洁水法》, 实施每日最大污染负荷总量计划^[7]。日本出台的污染物负荷总量控制计划^[8], 使东京湾、濑户内海^[9]等海域的水质都得到了改善^[10]。欧盟制定的《欧盟水框架指令》核心思想是建立综合的一体化水环境管理体系, 实质是一种基于最佳技术的总量控制方法^[11]。评估污染物海洋环境容量是污染物排海总量控制指标制定的基础, 环境容量计算可采用沃伦威德模型^[12]、狄龙模型^[13]、OECD 模型和合田健模型^[14]等, 但大多先建立基于研究区域水动力-水质数学模型^[15], 再设定不同污染物排放口^[16]、水质控制点位置和控制浓度标准, 采用积分自净过程计算^[17], 或者依据分区达标法采用线性规划模型^[18], 亦或构建基于“DPRSR”的流域水环境承载力评价模型^[19], 以此来计算污染物环境总量, 并实现污染物的总量控制。目前这种方法已成功应用于苏北灌河口临近海域^[17]、渤海湾^[20]、钦州湾^[21]、汉江中上游流域^[19]及胶州湾^[22]等区域的污染物总量计算与控制。

针对嘉兴海域前期调查的污染现状, 并根据《嘉兴市域污水系统专项规划(2020—2035)》, 嘉兴市海域不新增排污口, 计划对现有排污口进行扩容, 势必会对海域内的污染物含量产生更深的负面影响, 迫切需要

收稿日期: 2023-08-24

作者简介: 刘星璐(1997—), 男, 江苏盐城人, 博士研究生, 主要从事河口海岸泥沙研究。

E-mail: 15850679021@163.com 通信作者: 罗小峰(E-mail: cjk3d@126.com)

科学计算高锰酸盐指数 COD_{Mn} 、无机氮及磷酸盐等污染物的海洋环境容量,为嘉兴海域排海污染物总量控制提供科学依据。因此,基于 CJK3D-WEM 水环境数值模型,建立嘉兴临近海域水动力-水质模型,采用响应系数法计算环境容量,再转化为线性规划求最大值问题;依据《浙江省近岸海域环境功能区划》和《海水水质标准》,使海域水质控制点的污染物含量不超过各自区域对应的环境标准,同时保证海域各排污口的污染负荷排放量之和最大。研究结果有助于嘉兴海域污染物的减排与治理工作,保障嘉兴海域可持续发展能力,实现社会、经济与环境的协调发展,并与其他类似海湾的污染物总量控制研究提供参考。

1 研究方法

杭州湾位于中国浙江省东北部,地理位置为 $120^{\circ}45'E\sim121^{\circ}30'E$, $30^{\circ}15'N\sim30^{\circ}45'N$,既是海湾也是钱塘江的入海口。杭州湾西起浙江海盐县澉浦镇和上虞区之间的曹娥江收闸断面,东至扬子角到镇海角连线,与舟山、北仑港海域为邻;西接绍兴市,东连宁波市,北接嘉兴市、上海市。有钱塘江、曹娥江注入,是一个喇叭形海湾。汇入研究区域的河流包括钱塘江及嘉兴市域内的入海河流,主要包括长山河、海盐塘、独山港河、上塘河、盐官下河。结合《浙江省近岸海域环境功能区划》及《浙江省海洋功能区划(2011—2020)》,嘉兴海域范围内嘉兴市海盐县、平湖市近岸海域执行第四类海水水质标准;平湖市九龙山风景名胜区附近海域执行第三类海水水质标准;外海区域执行第一类海水水质标准,嘉兴海域环境功能区划见图 1。近年来,为了准确评估嘉兴海域的海洋生态环境质量,针对嘉兴海域的水环境质量监测较为频繁。

1.1 水环境质量监测

自然资源部第二海洋研究所于 2021 年 4 月 24—30 日在杭州湾海域开展了水环境质量监测,监测站点见图 1。海水水质监测项目为 COD_{Mn} 、无机氮与磷酸盐含量,三者在嘉兴海域的质量浓度分布如图 2 所示。监测结果表明,仅 COD_{Mn} 满足功能区划要求,均小于第一类海水水质标准(2.0 mg/L),质量浓度多为 $1.0\sim1.5\text{ mg/L}$,慈溪市东侧附近海域为 $0.5\sim1.0\text{ mg/L}$ 。无机氮浓度超过第四类海水标准(0.5 mg/L),嘉兴市西侧无机氮质量浓度为 $1.5\sim2.0\text{ mg/L}$,东侧质量浓度为 $1.0\sim1.5\text{ mg/L}$,不满足功能区划要求。活性磷酸盐分布较均匀,但质量浓度为 $0.04\sim0.06\text{ mg/L}$,超过第三类海水标准,不满足功能区划要求。若后续进行排污口扩容,应当计算污染物环境容量,以保证污染物浓度仍满足功能区划要求。

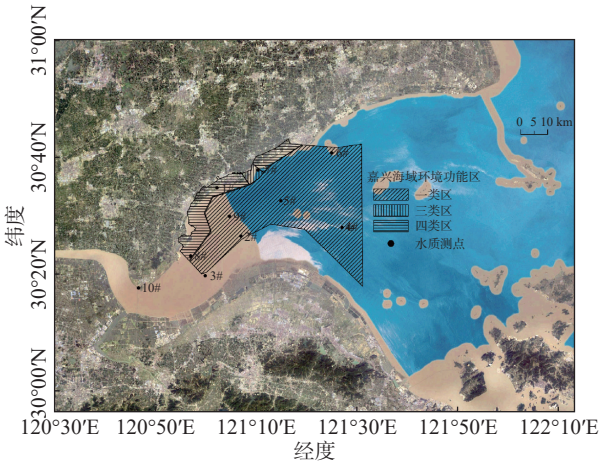


图 1 研究区域、环境功能区划与监测站位

Fig. 1 Study area, environmental functional zoning, and monitoring stations

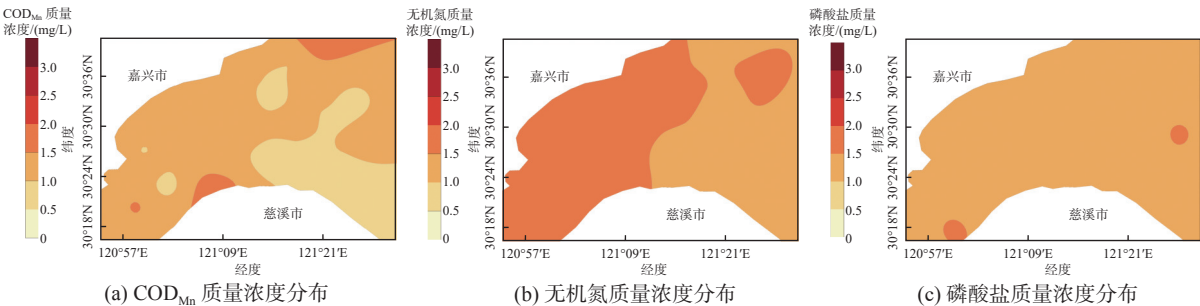


图 2 水质质量浓度分布

Fig. 2 Distribution of water quality concentrations

1.2 环境容量计算方法

本文采用的技术路线如下:

(1)基于CJK3D-WEM水环境数值模型,建立嘉兴临近海域水动力-水质模型。

(2)采用熵值法,全面考虑技术、经济和生态等多因素,确定各排污口各指标的权重,确保排污口最大允许排污量的合理分配。

(3)根据嘉兴水体主要污染物特性、主要污染源特点及功能区水质控制目标,同时根据熵值法计算的排污分配权重,采用响应系数法和线性规划法确定污染物计算环境容量。

熵值法可以根据各项指标观测值来确定指标权重,根据计算熵值判断某指标的离散程度,指标离散程度越大,该指标对综合评价的影响越大,其权重也就越大。计算步骤如下:

(1)数据标准化:

$$\text{正向指标: } f_{ij} = (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$$\text{负向指标: } f_{ij} = (X_{\max} - X_{ij}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

(2)计算第 j 项指标的信息效用值 d_j :

$$d_j = 1 + c \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (3)$$

式中: $p_{ij} = f_{ij} / \sum_{i=1}^n f_{ij}$; $c = 1 / \ln n$ 。

(3)确定评价指标的权重。某指标的信息效用越大,其权重也越大。第 j 项指标的权重可表示为:

$$w_j = d_j / \sum_{j=1}^m d_j。$$

响应系数法是在流速和扩散系数已知的前提下,将水质对流扩散方程视为线性方程,满足叠加原理,从而多个污染源共同作用下所形成的平衡浓度场 $C(x, y, z)$ 等于各个污染源单独存在时形成的浓度场的线性叠加,即:

$$C(x, y, z) = \sum_{i=1}^m C_i(x, y, z) \quad (4)$$

式中: $C_i(x, y, z)$ 为第 i 个污染源排放影响下的各位置点质量浓度增量(mg/L)。

每个点源单独形成的浓度场,又可以看作该点源单位源强排放时所形成的浓度场(响应系数场)的倍数,即:

$$C_i(x, y, z) = Q_i \alpha_i(x, y, z) \quad (5)$$

式中: Q_i 为第 i 个污染源排放量; α_i 为第 i 个污染源的响应系数场,表示在单位源强下点 (x, y, z) 的质量浓度增量,反映了该点对第 i 个污染源的响应程度。

根据各污染源的响应系数和各控制点的控制目标,采用线性规划方法^[23]求出环境容量。根据嘉兴周边地区环境功能区的划分、污染源计算点的分布及污染源调查结果,利用已建立的污染物浓度场模型,计算嘉兴海域各环境功能区污染物排放的响应系数场,分析嘉兴环境容量计算污染物排放源强变化与海域浓度场变化之间的响应规律。计算污染物在海域中的现状浓度,未超过海水水质标准的,允许增加一定程度的污染源排放量,即为环境容量。因此,结合现有监测资料建立嘉兴海域水环境数学模型,对环境总量计算与总量控制削减起着至关重要的作用。

2 嘉兴海域二维水环境数学模型

2.1 二维水环境模型

基于二维有限体积法的水环境数学模型 CJK3D-WEM, 建立嘉兴海域二维 COD_{Mn}、氮及磷酸盐水质模型, 水流、水质运动方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} - fu + g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} = N_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + fv + g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} = N_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \\ \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = A_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + S - HkC \end{cases} \quad (6)$$

式中: z 为水位; t 为时间; H 为总水深; u 、 v 为流速矢量沿 x 、 y 方向的速度分量; f 为科氏系数; g 为重力加速度; N_x 、 N_y 为 x 、 y 向水流紊动黏性系数; C 为污染物浓度; A_x 、 A_y 为 x 、 y 向水质扩散系数; S 为水质源汇项; k 为水质衰减系数。水动力模型主要为水质模型提供水动力场, 驱动 COD_{Mn}、氮及磷酸盐在时间和空间上产生变化, 采用三角形网格对计算区域进行离散, 将单一的网格单元作为控制单元, 采用有限体积法对式(6)进行离散求解, 具体求解过程见文献^[24-25]。

模型采用嘉兴海域最新实测地形与海图进行拼接, 模型西侧包含钱塘江及富春江上游, 东侧至杭州湾口的开阔水域, 模型东西两侧距离约 200 km。模拟区域采用三角形网格为计算单元, 模型网格总数为 62 272 个, 最大边长 1 741 m, 最小网格边长 93 m, 计算基面统一采用当地理论最低潮面。开边界给定潮位、温度、盐度、COD_{Mn}、氮及活性磷酸盐污染物质量浓度值, 上游边界采用流量控制, 外海边界采用潮位过程控制。其中, 时间步长为 2 s, 水流紊动黏性系数在 x 、 y 方向上均为 0.1 m²/s, 水质扩散系数为 15 m²/s, COD_{Mn} 降解系数为 0.08 /d, 无机氮降解系数为 0.07 /d, 活性磷酸盐降解系数为 0.06 /d。水动力模型验证资料选取 2021 年杭州湾大范围整体水文测验资料, 水质模型验证资料选取 2019 年春季大范围水质采样资料。

2.2 模型模拟验证

2.2.1 水动力验证 采用 2021 年自然资源部第二海洋研究所在杭州湾开展的大范围整体水文测验结果进行验证, 站点位置见图 1, 1#与 2#站点潮位变化如图 3 所示, 点为实测值, 曲线为模拟值。由图 3 可知, 两个潮位站高低潮位偏差基本在 0.1 m 以内, 所模拟的潮位与实测值基本一致。

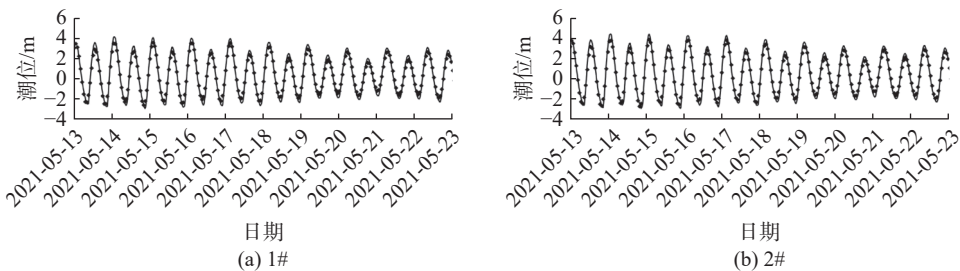


图 3 1#站与 2#站潮位验证

Fig. 3 Verification of the tidal levels of the station 1# and the station 2#

由图 4 和图 5 可知, 嘉兴海域处于中心位置的典型站点 4#站与 5#站大小潮期间的流速流向模拟值与实测值变化趋势基本吻合(点为实测值, 曲线为模拟值), 这表明建立的水动力模型可以较好地反映嘉兴海域的真实水动力情况, 为水质模型的建立提供基础。

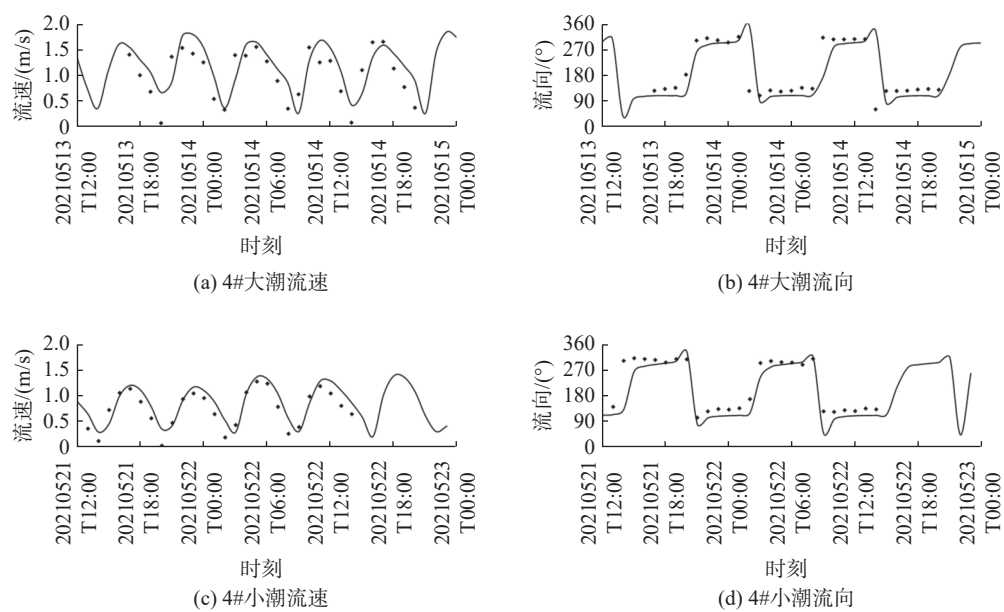


图 4 4#站大潮小潮流速流向验证

Fig. 4 Verification of velocity and direction during spring tide and neap tide at the station 4#

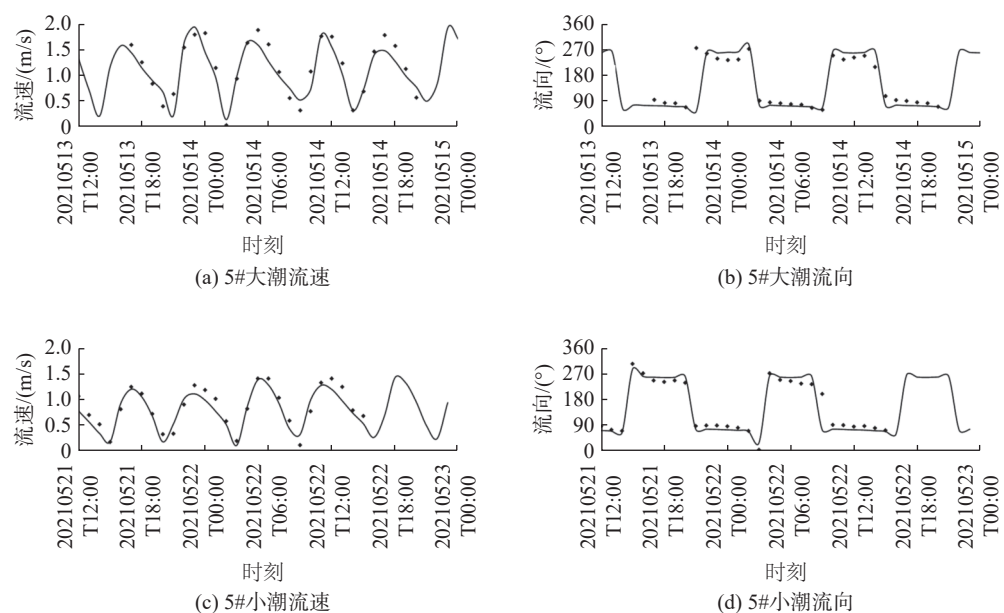


图 5 5#站大潮小潮流速流向验证

Fig. 5 Verification of velocity and direction during spring tides and neap tides at the station 5#

2.2.2 水质验证 根据嘉兴海域 2016 年测站的资料, 只有春季无机氮、活性磷酸盐均劣于第四类海水水质标准, 根据环境容量的定义, 重点计算嘉兴海域春季的环境容量以实现总量控制。采用 2019 年春季大范围水质采样进行验证。表 1 为嘉兴海域 COD 排放数据, 模型验证时, 将其作为现状污染源输入模型中。根据污水处理厂尾水水质及海水水质标准要求, 计算因子选取为 COD_{Mn} 、无机氮和活性磷酸盐, 尾水中 COD 指标为重铬酸盐指数 COD_{Cr} , 根据通常的换算方法, 计算时取 COD_{Cr} 为 2.5 倍的 COD_{Mn} 。对于 N、P, 尾水排放指标为总氮、总磷, 而海水水质评价指标为无机氮和活性磷酸盐。根据崔江瑞等^[26]测定的厦门污水处理厂、杏林污水处理厂、集美污水处理厂、同安污水处理厂尾水中无机氮和总氮、无机磷和总磷的比例关系, 无机氮占总氮比例以集美污水厂最大为 60.9%, 其他 3 个污水处理厂尾水无机氮占总氮比例为 16.2%~

39.3%; 活性磷酸盐占总磷比例以厦门污水处理厂最大为 85.2%, 其他 3 个污水处理厂尾水活性磷酸盐占总磷比例为 64.5%~75.6%, 从保守角度本文无机氮占总氮比例、活性磷酸盐占总磷比例分别取 61% 和 85%。

表 1 现状各排污口水质

Tab. 1 Current water quality of each discharge outlet

单位: t

排污口	化学需氧量总量	总磷总量	总氮总量	排污口	化学需氧量总量	总磷总量	总氮总量
1#				10#	0.252	0.002	0.255
2#	10.809		0.096	11#	0.092	0.001	0.152
3#				12#	0.063	0.001	0.098
4#	830.242	3.655	209.453	13#	6 984.482	21.060	1 523.148
5#	147.198	0.606	18.319	14#			
6#	3.692	0.043	2.833	15#	1 167.128	5.464	330.699
7#	0.525	0.004	0.229	16#	533.733	2.385	190.065
8#	1.065	0.015	0.151	17#	2 232.812	12.553	630.368
9#	0.140	0.001	0.049	18#	1 521.536	5.737	582.364

由图 6~7 可以发现数学模型计算 COD_{Mn} 分布与实测 COD_{Mn} 分布总体上均呈现西高东低的趋势, 西侧整体属于高浓度区域, 实测分布主要由 1.5~2.0 mg/L、2.0~2.5 mg/L 及 2.5~3.0 mg/L 区间构成, 自西向东平均质量浓度逐渐减小, 但 2.0~2.5 mg/L 与 2.5~3.0 mg/L 的相对高浓度区域范围较小, 且主要分布在实际排污口附近。数学模型计算分布主要由 1.5~2.0 mg/L 与 2.0~2.5 mg/L 区间构成, 整体呈阶梯状, 自西向东平均质量浓度逐渐减小, 但分布相较于实测更均匀, 原因是数学模型采用响应系数法进行浓度叠加, 靠近九龙山旅游休闲区的 3#、14#排污口监测数据缺失, 使得该区域受上游大排量排污口 17#与 18#污染物扩散影响较大, 自西向东污染物浓度阶梯减小。相较于西侧, 东侧区域整体为低浓度区域, 实测值与计算值均为 1.0~1.5 mg/L。

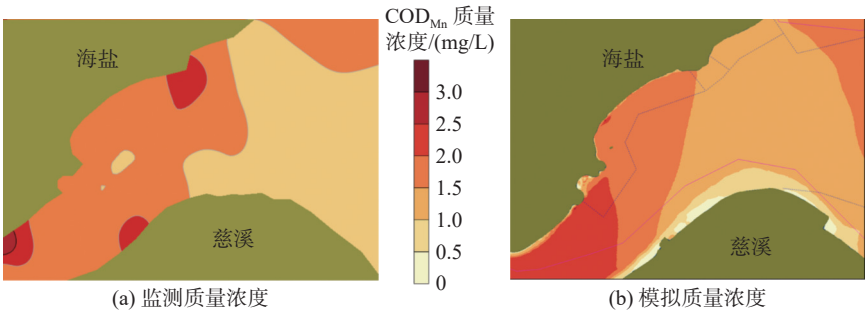


图 6 2019 年春季 COD_{Mn} 质量浓度分布

Fig. 6 Distribution of COD_{Mn} mass concentrations in Spring 2019

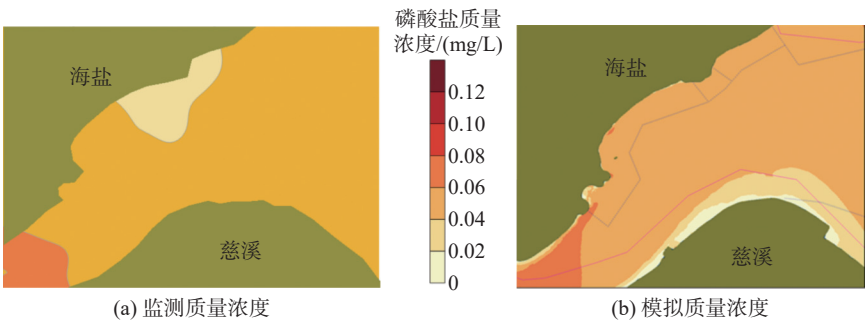


图 7 2019 年春季磷酸盐质量浓度分布

Fig. 7 Distribution of phosphate mass concentrations in Spring 2019

活性磷酸盐的计算值与实测值基本一致, 计算海域的磷酸盐质量浓度基本为 0.04~0.06 mg/L, 西南侧

为 0.06~0.08 mg/L, 九龙山旅游休闲区附近的活性磷酸盐计算质量浓度为 0.04~0.06 mg/L, 略大于实测值, 主要因为靠近该区域的 3#、14#排污口监测数据缺失, 使得该区域磷酸盐实测值稍有降低。模拟结果表明, 研究海域所构建的二维水质模型基本可以满足环境容量计算的要求。

3 结果与讨论

3.1 水质控制目标与控制点

依据《浙江省近岸海域环境功能区划》, 嘉兴海域包括一类、三类和四类环境功能区, 嘉兴市近岸排污口大都属于四类环境功能区, 九龙湖及海宁市近岸属于三类环境功能区, 外海属于一类环境功能区。控制点的设置应以反映海域功能区的管理要求为原则, 全局控制海域海水水质, 控制点对应 18 个排污口位置(图 8)。

根据 2021 年水质监测结果, 嘉兴海域 COD 浓度均满足一类水质标准, COD 环境容量较大, COD 环境容量根据水质类别不下降(及未来嘉兴海域 COD 浓度不高于一类海水水质标准)为管理目标, 进行环境容量计算。根据嘉兴市入海排污口的规划情况, 环境容量计算重点选择嘉兴港区某污水处理公司入海排污口(3#)、平湖市某污水处理公司入海排污口(4#)、海盐县某污水集中处理排污口(13#)、海盐县某污水集中处理设施排污口(14#)、海宁某排污口三期(15#)、桐乡市某水质净化公司入海排污口(17#)、海宁某水务公司入海排污口(18#)等 7 个入海排污口进行环境容量计算。其他排污口作为背景污染源, 其环境容量不计算在内, 3#、4#、13#及 14#排污口需满足四类功能区水质标准, 15#、17#及 18#需满足三类功能区水质标准。

3.2 环境容量

根据响应系数法原理, 首先计算各个汇水单元污染源的响应系数场, 即各污染源单位源强排放时所形成的浓度场。响应系数场亦采用污染物扩散模型进行计算, 计算区域、模型网格与污染物输移扩散模型相同, 计算条件有所不同。为了排除其他源强对各汇水单元污染物源强形成的浓度场的影响, 计算时边界条件和初始条件都取 0。计算某个汇水单元的响应系数场时, 该汇水单元污染物排放取单位源强为 1 t/d, 其余各汇水单元污染物源强取 0, 计算污染物扩散情况, 结果见表 2。

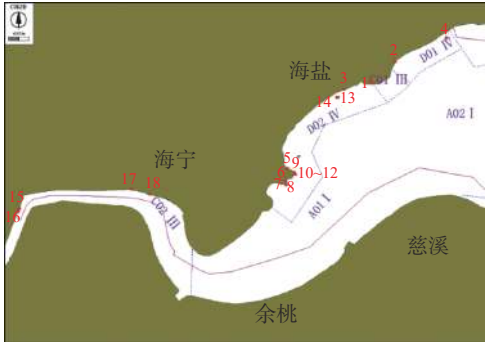


图 8 嘉兴海域排污口位置

Fig. 8 Locations of discharge outlets in the Jiaxing waters

表 2 各单元污染源对各控制点的 COD_{Mn} 浓度响应系数

Tab. 2 Response coefficients of COD_{Mn} concentrations for each pollution source at various control points

排污口	排污口3#	排污口4#	排污口13#	排污口14#	排污口15#	排污口17#	排污口18#	计算值	目标值
3#	0.014 6	0.000 8	0	0	0.002 1	0.002 1	0.002 0	0.799 1	0.799 1
4#	0.000 7	0.012 2	0	0	0.001 4	0.001 4	0.001 4	0.799 4	0.799 4
13#	0.000 2	0.000 2	0.008 7	0	0.000 5	0.000 6	0.000 6	0.599 8	0.599 8
14#	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.009 8	0.000 1	0.000 2	0.000 2	0.599 9	0.599 9
15#	0.000 1	0.000 1	0.000 2	0.000 2	0.016 7	0	0	0.599 9	0.599 9
17#	0	0	0.000 1	0.000 1	0	0.010 5	0	0.600 0	0.600 0
18#	0	0	0.000 1	0.000 1	0	0	0.016 0	0.600 0	0.600 0

根据线性规划原理, 求取各个汇水单元的 COD_{Mn} 允许排放量。取嘉兴海域 2021 年春季调查 COD_{Mn} 平均质量浓度为背景浓度进行容量估算, 则各控制点背景浓度与控制目标见表 9。

结合嘉兴地区的技术、经济与生态等多个影响因素,划分污染物总量分配指标及熵权为人均 GDP(0.110)、单位 GDP 排放强度(0.055)、污染物水环境容量利用率(0.382)、工业废水污染物去除率(0.102)、生活污水污染物去除率(0.044)、功能区类型指数(0.090)及水体自净能力(0.217)。

利用响应系数与熵权值确定的权重系数计算环境容量,13#排污口 COD_{Mn} 环境容量最大,达到 59.30 t/d;其次为 14#排污口,COD_{Mn} 环境容量达到 58.02 t/d;15#排污口环境容量最小,为 32.87 t/d,各排污口 COD_{Mn} 日环境容量与年环境容量见表 3。

表 3 各排污口 COD_{Mn} 环境容量
Tab. 3 Environmental capacity of COD_{Mn} for each discharge outlet

排污口	天环境容量COD _{Mn} /t	年环境容量COD _{Mn} /t	年环境容量COD _{Cr} /t	扩容后设计COD _{Cr} 年排放量/t
3#	37	13 394	33 486	1 821
4#	46	16 762	41 906	1 916
13#	59	21 656	54 139	16 425
14#	58	21 190	52 975	3 650
15#	33	12 003	30 007	4 563
17#	55	20 005	50 013	7 665
18#	37	13 684	34 209	6 351
合计	325	118 694	296 736	42 391

通过换算,计算时取 COD_{Cr} 为 2.5 倍 COD_{Mn},拟进行扩容的入海排污口 COD_{Cr} 总环境容量为 296 736 t/a。根据该海域的长期监测资料,将实际排污与设计排污进行对比,现状排放量均小于设计排放量。扩容后入海排污口 COD_{Cr} 总环境容量远大于排放量 42 391 t/a,各排污口环境容量与设计排放量对比如图 10 所示,这说明该海域 COD_{Cr} 有较大的环境容量,对现有排污口进行扩容后仍然未超出环境容量,并且还有较大剩余空间。

根据监测结果,嘉兴市西侧无机氮质量浓度为 1.5~2.0 mg/L,东侧为 1.0~1.5 mg/L。嘉兴海域活性磷酸盐分步较均匀,质量浓度为 0.04~0.06 mg/L。无机氮与活性磷酸盐均出现了超四类海水水质标准的情况。无机氮主要来自于总氮,活性磷酸盐主要来自于总磷,可见,嘉兴海域边界来水与近岸排污口总氮、总磷排放量已远超海域环境容量。汇入嘉兴近海域的陆源污染物主要为钱塘江径流污染物、入海河流污染物及排污口入海污染物。根据 2020 年嘉兴海域污染物入海量统计,现状污染源中,钱塘江径流总氮入海量占海域总氮排放的 88.2%,径流总磷占海域总磷排放的 80.9%,可见钱塘江径流的无机氮和磷酸盐污染物通量起着决定性影响,即使海域近岸零排放,再加上地表水环境质量标准与海水水质标准要求不同,由于钱塘江径流影响,海域无机氮、磷酸盐浓度也难以达标。尽管嘉兴海域 COD 仍有较大环境容量,但仍需考虑削减排污口扩容后污染物浓度增加的负面影响,同时由于嘉兴海域总氮、总磷排放量已超环境容量,必须采取科学合理的削减统筹安排,提高治理标准与上游来水水质,保证嘉兴海域污染物浓度的平稳,制止无机氮与活性磷酸盐浓度的继续增加,并在未来实现浓度达标。

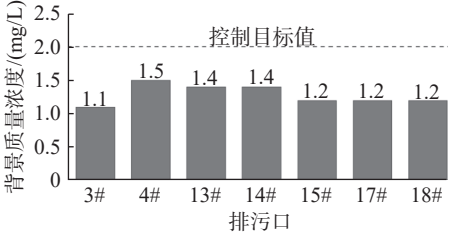


图 9 各排污口背景质量浓度与控制目标

Fig. 9 Background quality concentrations and control targets for each discharge outlet

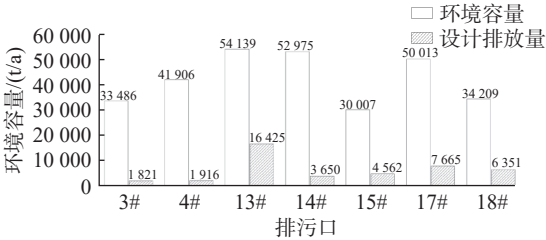


图 10 主要排污口 COD_{Cr} 环境容量与设计排放量

Fig. 10 Environmental capacity and designed emission of COD_{Cr} for major discharge outlets

3.3 削减措施及效果

选取化学需氧量 COD_{Mn}、总氮和总磷作为入海排污总量控制因子, 通过控制嘉兴沿海化学需氧量 (COD_{Mn})、总氮和总磷的入海量, 使嘉兴海域各功能区 COD_{Mn} 平均浓度保持在一类水质标准以内, 无机氮、活性磷酸盐浓度总体保持稳定。嘉兴入海污染主要来自于入海河流及入海排污口, 对此分别提出了相应的总量控制措施, 根据嘉兴地区经济发展状况, 针对本次提出的总量控制方案, 建议分阶段实施。

第一阶段, 根据《关于推进城镇污水处理厂清洁排放标准技术改造的指导意见》的要求, 在 2022 年以前城镇污水处理厂主要污染物出水浓度全面提标至《浙江标准》(及“清排标准”)。

第二阶段, 在第一阶段的基础上, 进一步推进入海河流污染物控制, 逐步建立入海河流总氮、总磷控制体系。入海河流总氮在现状基础上削减 10%, 总磷指标逐步降低。根据各个尾水入海污水处理厂的实际地理情况, 在污水处理设施附近因地制宜建设生态蓄水池、人工湿地等生态处理设施, 进一步提升污水处理厂出水水质。

第三阶段, 在《浙江标准》的基础上, 推动各地提升总氮排放要求, 实现总氮出水质量浓度不高于 10 mg/L 的目标。同时控制总磷出水质量浓度不高于 0.3 mg/L。

在排污口扩容前, 嘉兴海域环境功能区中的三类区 C01Ⅲ(九龙山近岸海域)、四类区 D02Ⅳ(海盐近岸海域)、四类区 D01Ⅳ(平湖近岸海域)、一类区 A01Ⅰ(海盐海域)、一类区 A02Ⅰ(平湖海域)等 5 个近岸海域环境功能区 COD 平均质量浓度分别为 1.176、1.209、1.146、1.276、1.037 mg/L, 均达到一类水水质标准, 满足各自功能区水质要求。排污口扩容后, 如果仍然执行当前的水质标准, COD_{Mn} 平均质量浓度增幅分别为 4.93%、3.97%、5.15%、2.98% 和 1.74%, 采取 3 个阶段总量控制措施后, COD_{Mn} 质量浓度增幅明显减小, 分别为 0.64%、0.82%、1.40%、0.06% 和 0.26%, 各实施阶段 COD_{Mn} 质量浓度见图 11。

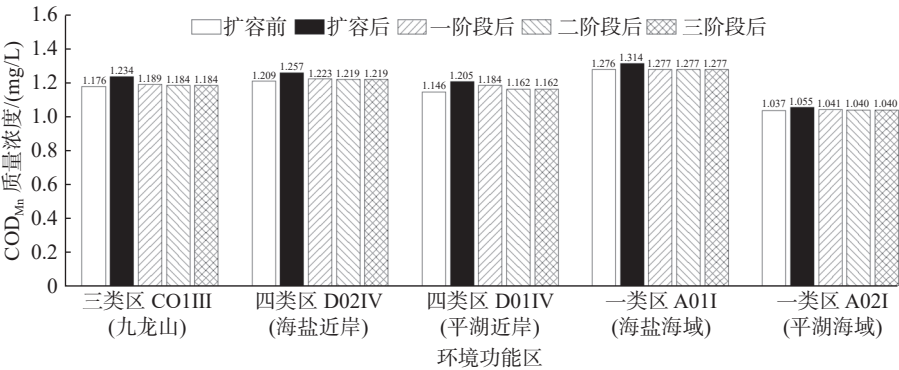


图 11 各功能区不同阶段 COD_{Mn} 质量浓度

Fig. 11 Mass concentrations of COD_{Mn} in different stages for various functional zones

无机氮平均质量浓度分别为 1.700、1.668、1.741、1.641 和 1.469 mg/L, 均超出各自功能区水质要求; 无机氮平均质量浓度增幅分别为 3.05%、2.62%、3.29%、2.05% 和 1.23%, 无机氮质量浓度较现状有所减小, 与现状相比变幅分别为 -0.98%、-0.81%、-1.10%、-0.89% 和 -0.37%, 各实施阶段无机氮质量浓度见图 12。

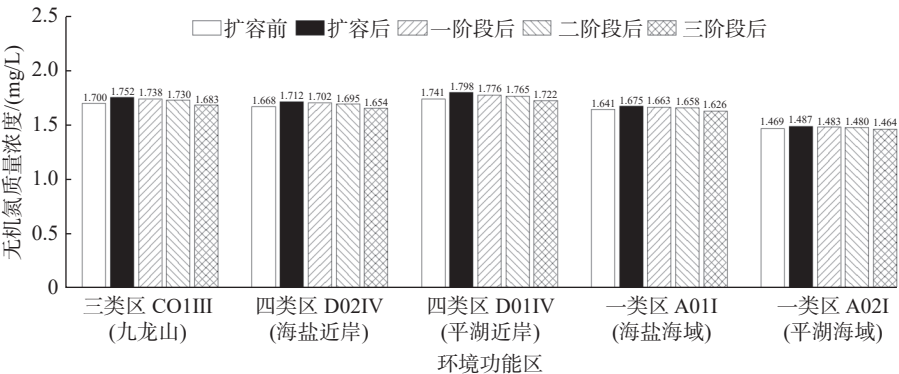


图 12 各功能区不同阶段无机氮质量浓度

Fig. 12 Mass concentrations of inorganic nitrogen in different stages for various functional zones

磷酸盐平均质量浓度分别为 0.050、0.053、0.053、0.054 和 0.057 mg/L, 均超出各自功能区水质要求, 扩容后磷酸盐平均质量浓度增幅分别为 2.00%、3.77%、3.77%、1.85% 和 1.75%, 经过 3 个阶段的总量控制措施后, 磷酸盐质量浓度较现状有所减小, 但基本与现状相同, 各实施阶段磷酸盐质量浓度见图 13。

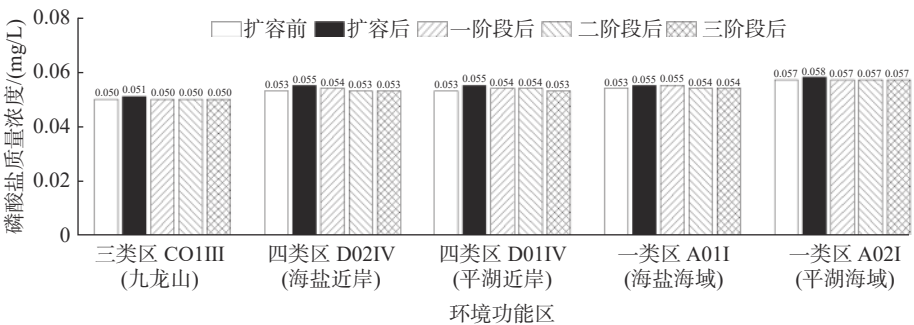


图 13 各功能区不同阶段磷酸盐质量浓度
Fig. 13 Mass concentrations of phosphate in different stages for various functional zones

综上所述, 削减措施虽然在达到排污口扩容目的的同时一定程度上保证了 COD_{Mn} 、无机氮及磷酸盐的浓度平稳, 但考虑到目前嘉兴海域无机氮与磷酸盐通量已远超海域环境容量, 无机氮与磷酸盐通量受钱塘江径流影响较大, 应提升钱塘江径流来水水质, 削减钱塘江径流无机氮与磷酸盐浓度。未来还应继续提升嘉兴市域生活、工业污水处理能力, 包括加大污水处理规模及提升尾水排放标准, 同时, 加大农业面源治理, 减少河流总氮、总磷的农业面源输入, 保证扩容后的无机氮与磷酸盐浓度达到较高的水质标准。

4 结 语

本文基于 CJK3D-WEM 建立了嘉兴海域水动力-水质模型, 模拟结果与监测结果基本吻合, 在此基础上, 采用响应系数法计算环境容量, 再转化为线性规划求最大值问题, 计算各排污口分配的 COD 、无机氮与活性磷酸盐的环境容量, 利用已建立的水质模型对入海排污口扩容制定的一系列阶段性总量控制措施进行水质浓度计算, 结果表明:

(1) 嘉兴海域无机氮与活性磷酸盐均出现了超四类海水水质标准的情况, 总氮、总磷排放量已远超海域环境容量, 钱塘江径流的无机氮和磷酸盐污染物通量起着决定性影响, 即使海域近岸零排放, 海域无机氮、磷酸盐浓度也难以达标。

(2) 拟进行扩容的入海排污口 COD_{Cr} 总环境容量为 296 736 t/a, 远大于扩容后的 COD_{Cr} 排放量 42 391 t/a, 说明该海域 COD 有较大的环境容量, 对现有排污口进行扩容后仍然未超出环境容量, 并且还有较大剩余空间。

(3) 针对本次扩容提出的总量控制措施分阶段实行, 实施后均在一定程度上削弱了扩容带来的负面影响, 嘉兴海域环境功能区中的三类区 C01III、四类区 D02IV、四类区 D01IV、一类区 A01 I 与一类区 A02 I 共 5 个近岸海域环境功能区 COD_{Mn} 浓度增幅分别减小 0.64%、0.82%、1.40%、0.06%、0.26%, 无机氮浓度增幅减小 0.98%、0.81%、1.10%、0.89%、0.37%, 磷酸盐虽有减小但变化幅度不大。

虽然随着各项总量控制措施的实施, 嘉兴海域海洋环境质量中无机氮与活性磷酸盐浓度能够总体保持平稳, 但仍需继续加强治理, 重点提升钱塘江径流来水水质, 削减钱塘江径流无机氮与磷酸盐浓度, 实现无机氮与磷酸盐浓度总体达标的目标。

参 考 文 献:

[1] 刘鹏霞, 邵晓静, 时俊, 等. 长江口—杭州湾区域生态环境问题与综合治理途径: 以上海市为例[J]. 环境保护, 2022,

- 50(19): 45-51. (LIU Pengxia, SHAO Xiaojing, SHI Jun, et al. Eco-environmental problems and the comprehensive treatment in the region of Yangtze Estuary and Hangzhou Bay: a case study of Shanghai[J]. Environmental Protection, 2022, 50(19): 45-51. (in Chinese))
- [2] 柴小平, 魏娜, 任世军, 等. 杭州湾及其邻近海域表层沉积物的沉积环境分区及重金属污染特征分析[J]. 海洋科学, 2019, 43(8): 29-35. (CHAI Xiaoping, WEI Na, REN Shijun, et al. Analysis of surface sediment environment division and heavy metal pollution character in Hangzhou Bay and its adjacent areas[J]. Marine Sciences, 2019, 43(8): 29-35. (in Chinese))
- [3] 黄赛花, 章琪宇, 严军, 等. 杭州湾围垦工程引起的岸线变化对水环境的影响分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 32-41. (HUANG Saihua, ZHANG Qiyu, YAN Jun, et al. Impact of shoreline changes caused by Hangzhou Bay reclamation project on water environment[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(2): 32-41. (in Chinese))
- [4] 贾海波, 邵君波, 曹柳燕. 杭州湾海域生态环境的变化及其发展趋势分析[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(3): 14-19, 25. (JIA Haibo, SHAO Junbo, CAO Liuyan. Analysis of the changes and development trend of ecological environment in Hangzhou Bay[J]. Environmental Pollution & Control, 2014, 36(3): 14-19, 25. (in Chinese))
- [5] 张玉荣, 王炬, 朱剑. 嘉兴附近海域海洋环境现状调查[J]. 广州化工, 2019, 47(20): 122-125, 150. (ZHANG Yurong, WANG Heng, ZHU Jian. Investigation on current situation of marine environment in the sea area near Jiaxing[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2019, 47(20): 122-125, 150. (in Chinese))
- [6] 张学庆, 孙英兰. 胶州湾入海污染物总量控制研究[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(4): 347-350, 359. (ZHANG Xueqing, SUN Yinglan. Study on the environmental capacity in Jiaozhou Bay[J]. Marine Environmental Science, 2007, 26(4): 347-350, 359. (in Chinese))
- [7] LUNG B W S. Water quality modeling for wasteload allocations and TMDLs[M]. New York: Wiley, 2001.
- [8] TSUZUKI Y. An index directly indicates land-based pollutant load contributions of domestic wastewater to the water pollution and its application[J]. Science of the Total Environment, 2006, 370(2/3): 425-440.
- [9] 马彩华, 游奎, 高金田. 濠户内海环境治理对中国的启迪[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2008(4): 12-14. (MA Caihua, YOU Kui, GAO Jintian. Enlightenment of Seto inland sea environmental management to China[J]. Journal of Ocean University of China (Social Sciences), 2008(4): 12-14. (in Chinese))
- [10] 孟伟, 张楠, 张远, 等. 流域水质目标管理技术研究(I): 控制单元的总量控制技术[J]. 环境科学研究, 2007, 20(4): 1-8. (MENG Wei, ZHANG Nan, ZHANG Yuan, et al. The study on technique of basin water quality target management I: pollutant total amount control technique in control unit[J]. Research of Environmental Sciences, 2007, 20(4): 1-8. (in Chinese))
- [11] 张义钧. 《欧盟海洋战略框架指令》评析[J]. 海洋信息, 2011(4): 27-30. (ZHANG Yijun. Comment on EU marine strategic framework directive[J]. Marine Information, 2011(4): 27-30. (in Chinese))
- [12] MUNAWAR M, FITZPATRICK M. The application of Vollenweider's eutrophication models for assessing ecosystem health: Hamilton Harbour (Lake Ontario) example[J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 2011, 14(2): 204-208.
- [13] 王宪恩, 张海亮, 李杰, 等. 不确定性条件下的湖泊总磷允许输入量分析[J]. 吉林大学学报(理学版), 2005, 43(3): 384-387. (WANG Xian'en, ZHANG Hailiang, LI Jie, et al. Analysis on permissible input of lake total phosphorus under uncertain conditions[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2005, 43(3): 384-387. (in Chinese))
- [14] 李卫平, 李畅游, 王丽, 等. 不同数学模型下的乌梁素海水环境氮磷容量模拟计算[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊2): 379-385. (LI Weiping, LI Changyou, WANG Li, et al. Analog calculation of nitrogen and phosphorus capacities in Wuliangsuhai water environment under different mathematic models[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(Suppl2): 379-385. (in Chinese))
- [15] HUANG W, MA W, LIU X B, et al. Numerical study of hydrodynamics and water quality in Qinhuangdao coastal waters, China: implication for pollutant loadings management[J]. Environmental Modeling & Assessment, 2021, 26(1): 63-76.
- [16] HAN H Y, LI K Q, WANG X L, et al. Environmental capacity of nitrogen and phosphorus pollutions in Jiaozhou Bay, China: modeling and assessing[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 63(5/12): 262-266.
- [17] 王艳, 魏爱泓, 张丽, 等. 苏北灌河口邻近海域氮、磷污染物环境容量研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(6): 78-84. (WANG Yan, WEI Aihong, ZHANG Li, et al. The environmental capacity of the nitrogen, phosphorus pollutants in Guan River estuary and adjacent coastal area, Northern Jiangsu province[J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(6): 78-84. (in Chinese))
- [18] 黄华坚, 周劲风, 李岚, 等. 基于海洋环境容量的人海排污口选址优化研究[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(11): 1497-1502. (HUANG Huajian, ZHOU Jinfeng, LI Lan, et al. Optimization of site selection of marine outfalls based on environmental capacity[J]. Environmental Pollution & Control, 2022, 44(11): 1497-1502. (in Chinese))
- [19] 申诗嘉, 彭虹, 夏函, 等. 基于环境质量底线的污染物总量控制研究: 以汉江中上游为例[J]. 人民长江, 2020, 51(7): 52-57. (SHEN Shijia, PENG Hong, XIA Han, et al. Study on total pollutant control in middle-lower Hanjiang River based on

environment quality baseline[J]. Yangtze River, 2020, 51(7): 52-57. (in Chinese))

[20] 刘浩, 戴明新, 彭士涛, 等. 渤海湾主要污染物环境容量的估算[J]. 海洋通报, 2011, 30(4): 451-455. (LIU Hao, DAI Mingxin, PENG Shitao, et al. Estimation of the environment capacity of the major pollutants in the Bohai Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(4): 451-455. (in Chinese))

[21] 郭森, 韩保新, 杨静, 等. 纳污海域水环境容量计算与总量分配方法研究——以钦州湾为例[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(增刊 1): 19-22. (GUO Sen, HAN Baoxin, YANG Jing, et al. A study of water environmental capacity in pollution receiving area and total load allocation: taking Qinzhou Bay for example[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 29(Suppl1): 19-22. (in Chinese))

[22] 李克强, 王修林, 阎菊, 等. 胶州湾石油烃污染物环境容量计算[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(4): 13-17. (LI Keqiang, WANG Xiulin, YAN Ju, et al. Calculation on environmental capacities of petroleum hydrocarbon in Jiaozhou Bay[J]. Marine Environmental Science, 2003, 22(4): 13-17. (in Chinese))

[23] 荆海晓, 李小宝, 房怀阳, 等. 基于线性规划模型的河流水环境容量分配研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3): 34-38, 44. (JING Haixiao, LI Xiaobao, FANG Huaiyang, et al. Investigation of the river water environment capacity allocation by using linear programming model[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29(3): 34-38, 44. (in Chinese))

[24] 路川藤, 罗小峰. 基于非结构网格的高分辨率隐式算法研究及应用[J]. 海洋通报, 2015, 34(1): 59-64. (LU Chuanteng, LUO Xiaofeng. Study of the unstructured grid implicit algorithm and its application[J]. Marine Science Bulletin, 2015, 34(1): 59-64. (in Chinese))

[25] 路川藤. 长江口潮波传播[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2009. (LU Chuanteng. Tidal wave propagation in the Yangtze Estuary[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009. (in Chinese))

[26] 崔江瑞. 污染物在海洋中的迁移转化及其在海湾环境容量研究中的应用[D]. 厦门: 厦门大学, 2009. (CUI Jiangrui. Pollutant transfer and transformation in marine environment and application in the study of marine environmental capacity[D]. Xiamen: Xiamen University, 2009. (in Chinese))

Research on the environmental capacity and total control of main pollutants in the Jiaxing waters

LIU Xinglu¹, GUO Jianghong², ZHANG Yali², LUO Xiaofeng¹, LU Chuanteng¹

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: In recent years, the marine ecological environment quality in the Jiaxing waters has significantly deteriorated. Implementing total pollutant control measures as one of the fundamental measures to ensure the quality of the marine environment is conducive to reducing emissions and controlling pollutants in the Jiaxing waters, thereby safeguarding the sustainable development capacity of the area. Based on the hydrodynamic-water quality model of the adjacent waters of Jiaxing and field monitoring results, and in accordance with the water quality requirements of the environmental functional zoning of coastal waters in Zhejiang Province, the response coefficient method and linear programming method were adopted to calculate the environmental capacity of chemical oxygen demand (COD), inorganic nitrogen, and phosphate for the important discharge outlets in the area. Calculations and evaluations were carried out for the total control measures affecting reduction and expansion. The results indicate that the total environmental capacity of COD in the research area is 2.97×10^5 tons/year, with a considerable surplus. However, the content of inorganic nitrogen and phosphate exceeds the fourth-class seawater quality standards, surpassing the environmental capacity of inorganic nitrogen and phosphate in the area. Rational quantified numerical simulations of existing plans show that although reduction measures have stabilized the increase in COD, inorganic nitrogen, and phosphate caused by expansion to some extent, it is still necessary to continue optimizing sewage treatment capacity and reducing the discharge of nitrogen and phosphorus nutrients. The research results can provide a scientific basis for the study of total pollutant control in coastal cities.

Key words: environmental capacity; nitrogen and phosphorus nutrients; total control; CJK3D-WEM; Jiaxing waters