

基于入海河流陆源污染削减的入海排污口设置研究

崔小爱 李乐 吴一亚¹

(江苏环保产业技术研究院股份公司, 南京 210036)

【摘要】: 为缓解海洋水环境特征污染物严重超标对区域经济与环境协调发展的限制, 以江苏省盐城市海域某排污口为例, 从陆海协同联控的角度出发, 采用二维潮流数学模型, 基于污染物浓度场响应关系, 选取海洋特征污染物无机氮和活性磷酸盐作为研究对象, 在入海河流陆源污染物削减的情况下, 给出了 90%水质保证率下拟建海洋排污口无机氮和活性磷酸盐的最大允许排放量, 分别为 196.03t/a 和 254.59t/a, 结果表明污染物最大允许排放量均高于排污口近、远期的排放总量, 排污口建成后能保证海水水质不低于现状水质标准, 证实了拟建排污口的设置可行性。研究成果为指导沿海城市排污口管理和污染源的削减提供了科学的理论依据, 对排污口的优化设置及最大允许排放量的计算起到参考作用。

【关键词】: 二维潮流模型 浓度响应 保证率 陆海联控 陆源削减

【中图分类号】: X55 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1001-3644(2022)03-0034-10

前言

由于海洋具有巨大的自净能力优势, 近年来沿海城市尾水入海排放日益成为研究和工程热点。入海排污口设置对于缓解城市污水处理负担, 促进区域经济和环境协调发展具有重要意义^[1]。陆源污染作为海洋环境污染的最大来源, 占海洋污染物总量的 85%以上^[2,3]。陆源污染主要包括工业污染源、生活污染源、农业污染源等, 其中陆源入海河道和入海排污口作为最典型的陆源入海排放点源, 由于其可控性相对较强, 并且与人类活动密切相关, 一直以来都是防止陆域人类活动污染近岸海洋环境的主要控制对象^[4]。

杨磊等^[5]采用二维潮流数学模型对入海排污口的水环境影响进行了预测分析, 对污水厂扩建工程中尾水排放的氮磷等营养盐的排放要求起到了一定的指导作用。但是, 海洋水环境氮磷营养盐尤其是无机氮浓度目前已严重超过二类海水水质标准限值^[6], 污水厂扩建工程的尾水排放要求不仅大大提高了单个排污单元的减排负担, 而且会进一步加重海水水质的恶化, 与现阶段实际情况不符。冯存岸等^[7]通过聚类分析的方法将渤海湾和莱州湾沿岸的入海排放口进行分类归并, 较好地实现了海洋污染的陆源追溯, 使得海洋中的污染状况与陆源入海排放口有效的联系起来, 为实现陆海统筹和海洋污染物的有效控制提供了科学参考。本文选取海洋特征污染物无机氮和活性磷酸盐作为研究对象, 根据研究区域的陆海关系、入海河道及相关海域的水文条件, 采用二维潮流数学模型, 基于污染物浓度场响应关系^[8,9], 统筹陆海污染物排放, 在陆源污染物减排的情况下, 以保证海水水质不劣于现状为前提, 分析了海洋排污口设置的可行性, 为充分利用海洋水资源, 协调区域环保矛盾, 指导沿海城市排污和陆海协同提供科学的理论依据。

作者简介: 崔小爱(1975-), 女, 河北保定人, 毕业于南京农业大学环境工程专业, 硕士, 高级工程师, 主要从事环境规划管理、环境影响评价研究。

基金项目: 基于水环境质量的太湖流域排污许可证管理技术及制度研究(2018ZX07208-2003)

1 材料与方法

1.1 研究范围

以江苏省为例，2019 年全省近岸海域 78 个国控水质监测点位中，达到或优于《海水水质标准》(GB3097-1997) 二类标准标准的面积比例为 89.7%，三类面积比例为 8.3%，四类面积比例为 1.2%，劣四类面积比例为 0.8%。与 2018 年相比，一、二类标准的面积比例上升 41.2%，劣四类面积下降 5%。总体来说，近岸海域海水水质总体向好，但是仍存在无机氮和活性磷酸盐超标的现象，严重制约了区域经济与环境的协调发展^[10]。

本文选取江苏省盐城市近岸海域某排海口附近海域和相关入海河流为研究对象，主要包括灌河、中山河、翻身河和淤黄河。为保证二位潮流模型不受边界范围的影响，扩大模型预测范围为 170km×120km，见图 1。

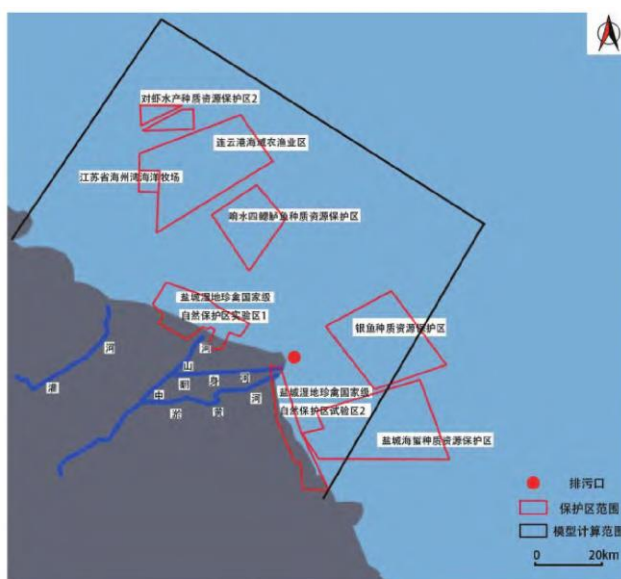


图 1 研究区域及排海口位置

1.2 污染物浓度场响应系数确定

$$\begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & \cdots & \alpha_{1,n} \\ \alpha_{2,1} & \cdots & \alpha_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{m,1} & \cdots & \alpha_{m,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:C 为控制点处污染物浓度值(mg/L);P 为入海河流污染物浓度值(mg/L);m 为控制点个数;α 矩阵为浓度响应系数;n 为入海河流个数。

根据海洋污染物迁移转化特征，对特定海域，给定控制点的污染物浓度与计算海域入流边界流量及污染物浓度、点源污染物

排放强度等因素相关。对于特定的研究时段，控制点污染物浓度时间变化过程是入流边界污染物通量、点源污染源排放等在控制点产生的浓度贡献时间变化过程的线性叠加。

控制点水质与污染源的响应关系是指在一定的设计水文条件下和污染负荷排放条件下，由一定的污染负荷量引起的控制点污染物浓度变化的函数关系。在实际计算中，污染负荷与控制点水质响应关系一般通过水质响应系数表达。通过对海域现状水质及入海污染源的分析，建立污染源与控制点水质之间的响应关系是计算污染物允许排放量的关键步骤。通过假设各入湖河流浓度，利用二维潮流水动力-水质响应模型计算控制点处相应的浓度场求得浓度响应系数矩阵。为了方便计算，不妨将各个入湖河流浓度设为 1，通过二维潮流水动力-水质模型模型得出其对应的响应系数。

1.3 水质保证率

控制断面(或控制点位)水质保证率指以年为统计时段的控制断面(或控制点位)水质达标频率。例如，当水质保证率为 90%时，即认为控制断面(或控制点位)监测过程中 10%的污染物样本所对用的最低浓度值 $C_{90\%}$ 是尚可接收的污染物最大浓度。由于现有的环境容量的计算方法研究中大多无法确保水体水质稳定达标，因此下文水质模型模拟预测值均为典型断面(或典型点位)90%水质保证率下的浓度值，能够更好实现水体水质稳定达标的要求。

1.4 二维潮流水动力-水质模型

1.4.1 二维潮流模型

采用平面二维数值模型研究排污口附近海域的潮流场运动，模型采用非结构三角网格剖分计算域;采用标准 Galerkin 有限元法进行水平空间离散，在时间上，采用显式迎风差分格式离散动量方程与输运方程。

1.4.1.1 模型控制方程

质量守恒方程：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

动量方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ - fv + \frac{gu \sqrt{u^2 + v^2}}{C_z^2 H} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ + fu + \frac{gv \sqrt{u^2 + v^2}}{C_z^2 H} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:

ζ —水位; h —静水深; H —总水深, $H=h+\zeta$; u — x 方向平均流速; v — y 方向平均流速; g —重力加速度; f —科氏力参数 ($f=2\omega \sin \phi$, ϕ 为计算海域所处地理纬度); C_z —谢才系数; ε_x 、 ε_y — x 、 y 方向水平涡动粘滞系数。

1.4.1.2 定解条件

初始条件:

$$\begin{cases} \zeta(x, y, t) |_{t=t_0} = \zeta(x, y, t_0) = 0 \\ u(x, y, t) |_{t=t_0} = v(x, y, t) |_{t=t_0} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

边界条件:

固定边界取法向流速为零, 即 $V \cdot n = 0$; 在潮滩区采用动边界处理; 开边界采用预报潮位控制。

1.4.1.3 计算范围及网格设置

模拟采用三角网格。数值模拟计算海域见图 2, 网格分布见图 3。为了能清楚了解排污口附近海域的潮流状况, 并准确计算污染物扩散过程, 将排污口附近海域进行局部加密, 最小空间步长约为 50m。

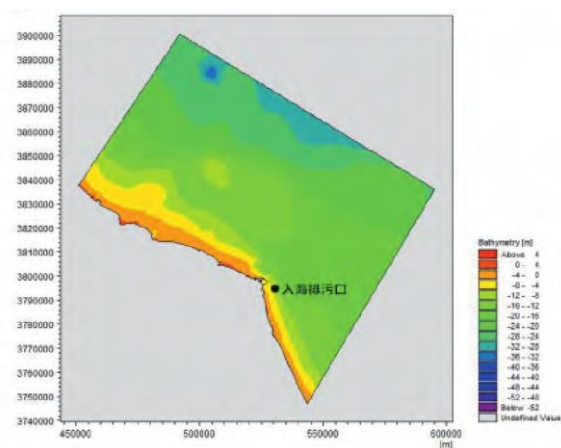


图 2 计算范围及地形

1.4.1.4 床底糙率

床底糙率通过曼宁系数控制, 曼宁系数 n 取 0.03。

1.4.1.5 潮流数值模拟及验证

模型中对潮位、潮流的验证计算采用 2014 年 9 月 10 日~9 月 19 日的大潮实测资料，包括 4 个测点的测流、测向资料，以及 2 个潮位站的同步潮位资料。各测点位置见图 4。

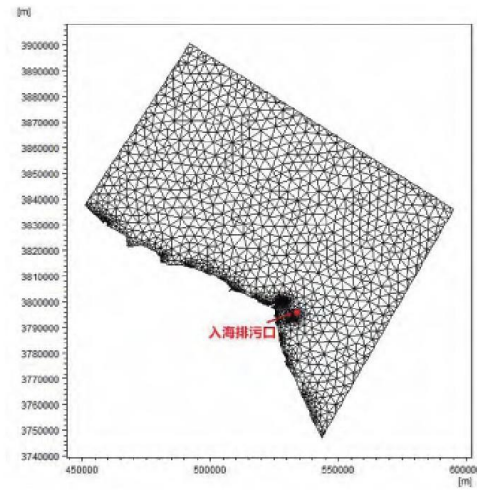


图 3 计算网格划分

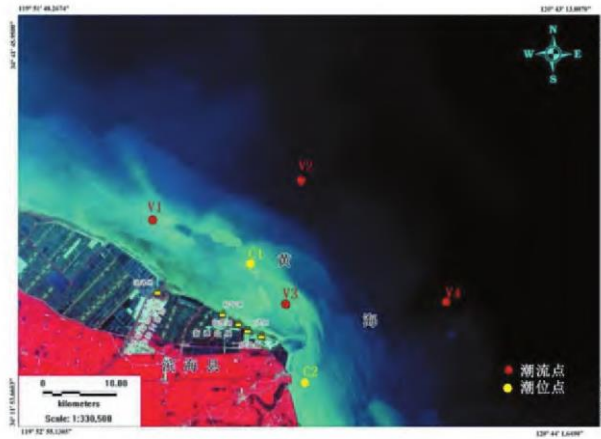


图 4 潮流、潮位监测点位

1.4.2 二维水质模型

1.4.2.1 模型控制方程

采用二维水质模型，即二维对流、扩散模型模拟预测污染物在海水中的迁移扩散过程。

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + u \frac{\partial C_i}{\partial x} + v \frac{\partial C_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + K_i C_i + S_i \quad (6)$$

式中: C_i —污染物浓度; u 、 v — x 、 y 方向上的流速分量; E_x 、 E_y — x 、 y 方向上的扩散系数; K_i —污染物降解系数; S_i —污染物源汇项。

1.4.2.2 定解条件

闭边界上没有物质通量, 即 $C/t=0$;

开边界, $C(x, y, t)=0$ 。

2 结果与讨论

2.1 水动力模型验证及结果分析

提出二维潮流水动力模型中潮位站 (C1、C2) 的潮位结果和潮流点 (V1、V2、V3) 的潮流结果, 其中潮位验证结果见图 5, 流速验证结果见图 6。

从各潮位站的潮位验证结果来看, 模型计算值与实测值吻合程度良好。从各测点流速、流向验证结果来看, 模型计算值与实测值也基本保持一致。本模型能较好地反映实际情况、较准确地预测工程附近海域的水动力特征。

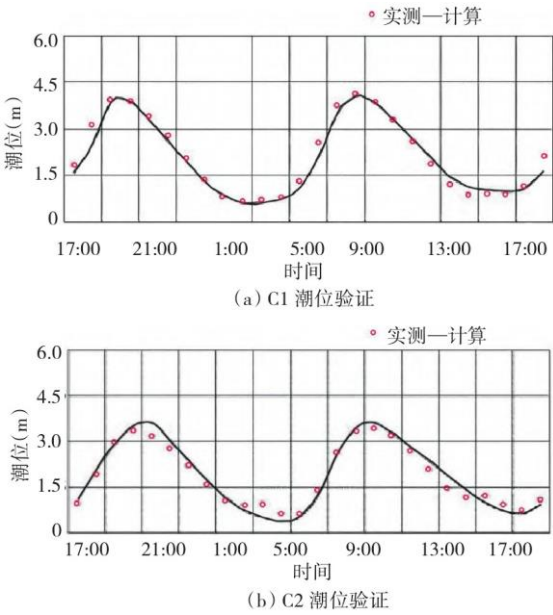


图 5 潮位验证图

总体来说, 预测海域主要为正规半日潮, 每日两涨两落, 往复流特征明显, 主要以南北往复顺岸流为主, 涨潮时, 潮流基本为由北往南方向;落潮时, 潮流基本为由南往北方向。涨落潮流的主轴方向与等深线的走向较为一致。模拟海域范围内大潮期涨急、落急流场见图 7, 小潮期涨急、落急流场见图 8。

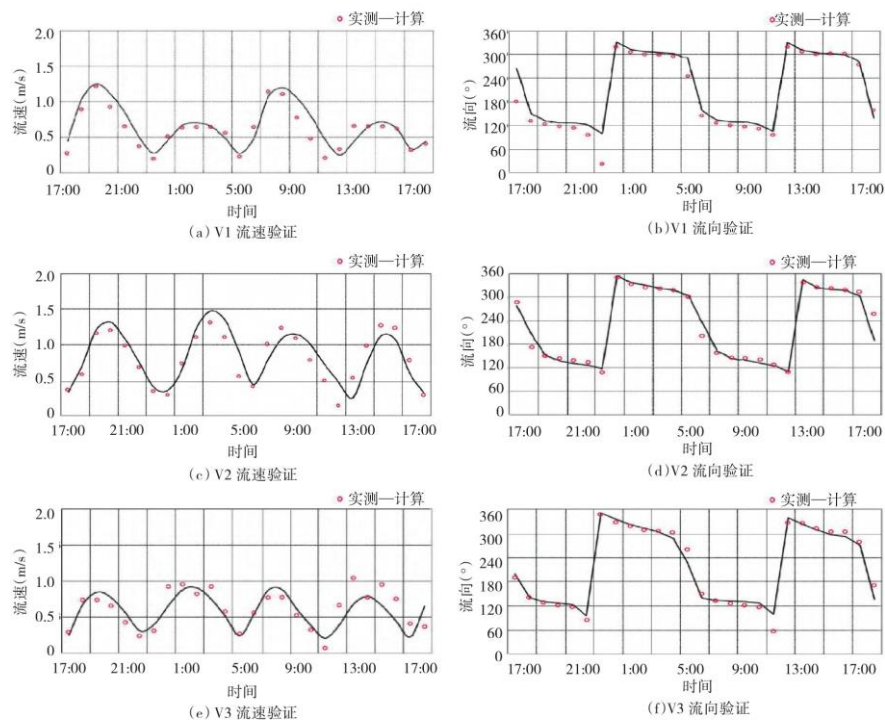


图 6 潮流验证图

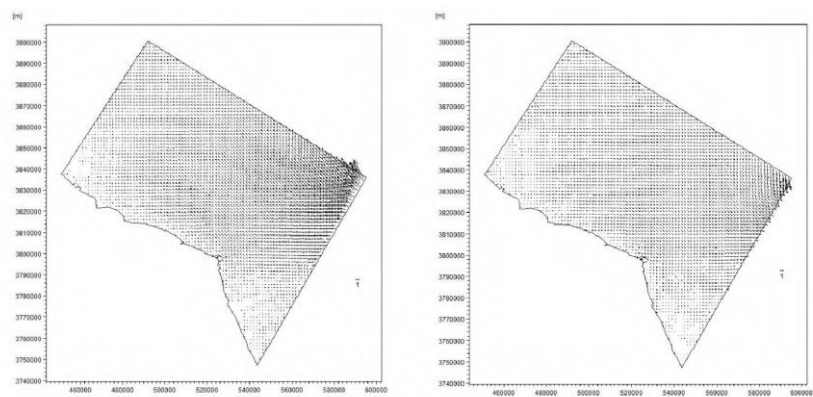


图 7 模拟范围大潮期潮流场(涨潮(左)、落潮(右))

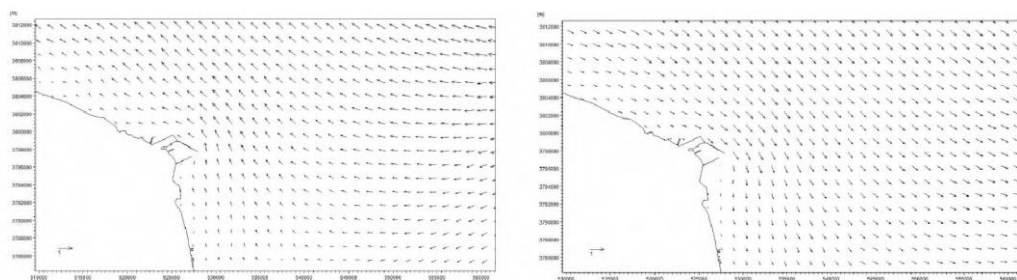


图 7 模拟范围大潮期潮流场(涨潮(左)、落潮(右))

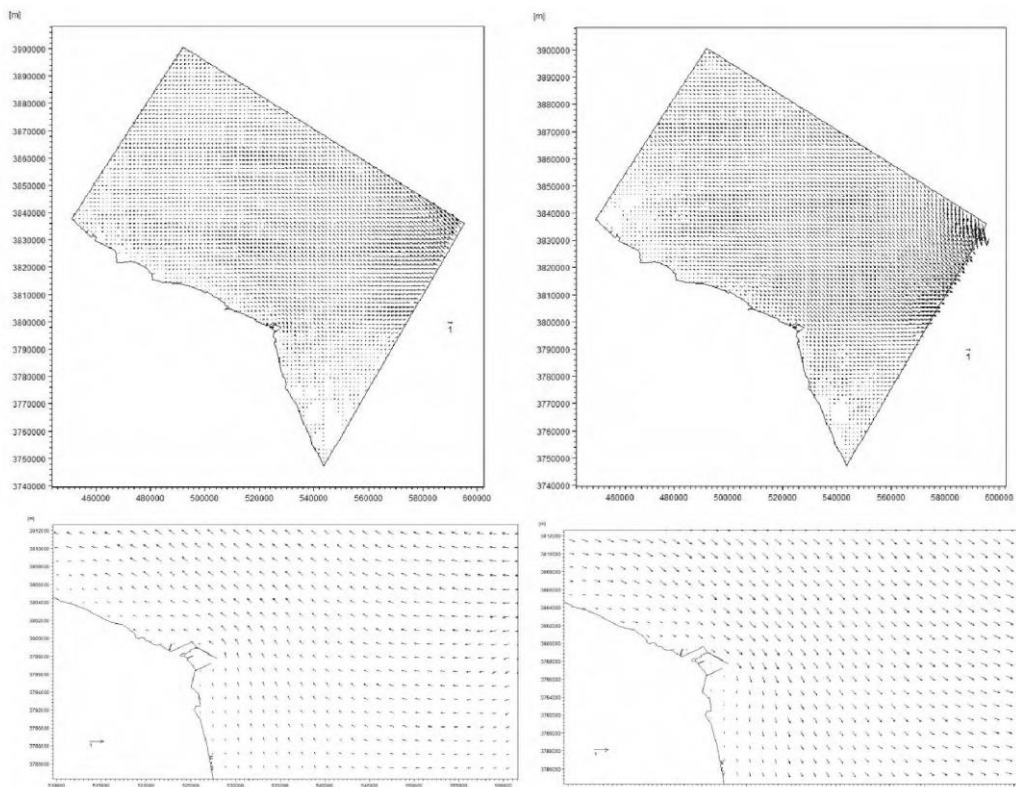


图 8 模拟范围小潮期潮流场(涨潮(左)、落潮(右))

2.2 入海河道污染物排放浓度响应场模拟及结果分析

在二维潮流数学模型的基础上耦合二维水质模型进行离岸排放口的污染物扩散数值模拟。离岸排放口为连续点源，污染物排放源强为单位源强，计算连续稳定排放条件下污染物扩散场，确定最大影响扩散场，即平衡稳定扩散场，见图 9。

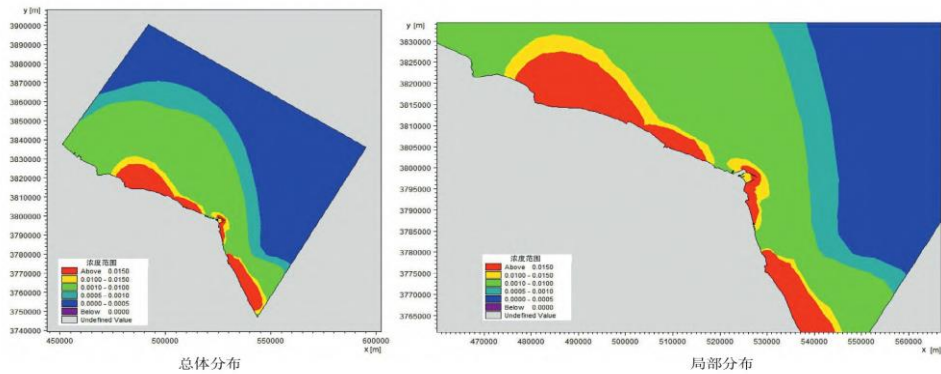


图 9 入海河道无机氮削减浓度变化包络线

考虑到污染物的累计影响，模型采用实际的潮位变化资料，连续计算至污染物浓度达到稳定，分析连续稳定排放条件下，入海河道污染物排放后，附近海域平衡稳定扩散场。

平衡稳定扩散场分布特征为附近高浓度污染物集聚，集中区域范围较小；与污染物排放点达到一定距离之后，污染物稀释扩散明显；距离排放点越远，污染物浓度越低，低浓度污染物分布范围较大。

2.3 排海口污染物排放浓度响应场模拟及结果分析

2.3.1 近期正常排放 5.6 万 t/d

排海口附近的无机氮本底值为 0.484mg/L，排海口附近区域的无机氮本底值均已超过二类海水水质标准限值（二类水质标准为 0.3mg/L），排海口排放的无机氮最大贡献浓度为 0.011mg/L，与本底值的比值为 0.023。从增量影响面积可知，增量超过 0.01mg/L 的影响面积为 1 公顷。详见图 10。

虽然排海口的无机氮最大贡献值与本底值的比值较小，但区域海水无机氮浓度严重超过二类海水水质标准，区域内无机氮已无排放容量，排污口设置需要结合区域入海河道的污染削减置换出无机氮排放容量，保证水质不劣于现状水质，使得水质向良性方向发展。

在排海口附近的活性磷酸盐本底值为 0.024mg/L，最大贡献浓度为 0.00036mg/L，排海口附近无浓度大于 0.03mg/L（超二、三类水质标准）的区域。从增量影响面积可知，增量超过 0.0003mg/L 的影响面积为 3.8 公顷。

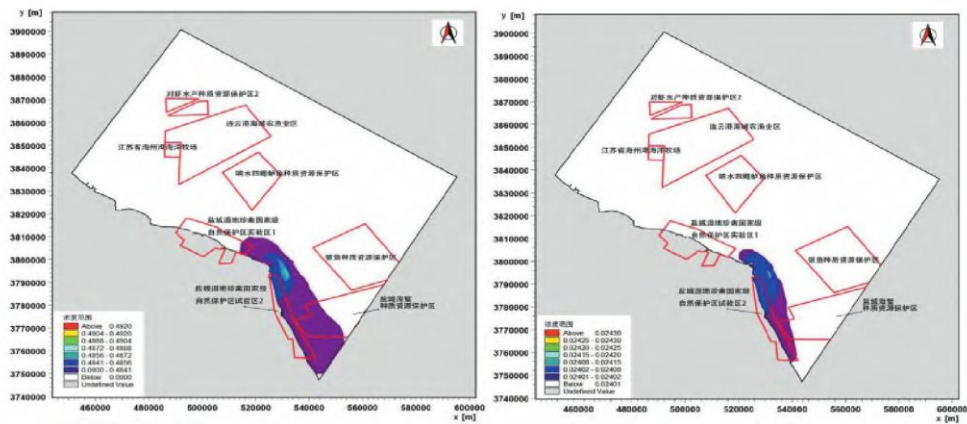


图 10 无机氮(左)和活性磷酸盐(右)浓度增量包络线

2.3.2 远期正常排放 9.8 万 t/d

排海口附近的无机氮本底值为 0.484mg/L，排海口附近区域的无机氮本底值均已超过二类海水水质标准限值（二类水质标准为 0.3mg/L），排海口排放的无机氮最大贡献浓度为 0.019mg/L，与本底值的比值为 0.039。从增量影响面积可知，增量超过 0.015mg/L 的影响面积为 6.4 公顷。详见图 11。

虽然排海口的无机氮最大贡献值与本底值的比值较小，但区域海水无机氮浓度严重超过二类海水水质标准，区域内无机氮

已无排放容量，排污口设置需要结合区域入海河道的污染削减方案置换出无机氮排放容量，保证水质不劣于现状水质，使得水质向良性方向发展。

在排海口附近的活性磷酸盐本底值为 0.024mg/L，最大贡献浓度为 0.0006mg/L，排海口附近无浓度大于 0.03mg/L(超二、三类水质标准)的区域。从增量影响面积可知，增量超过 0.0006mg/L 的影响面积为 0.31 公顷。

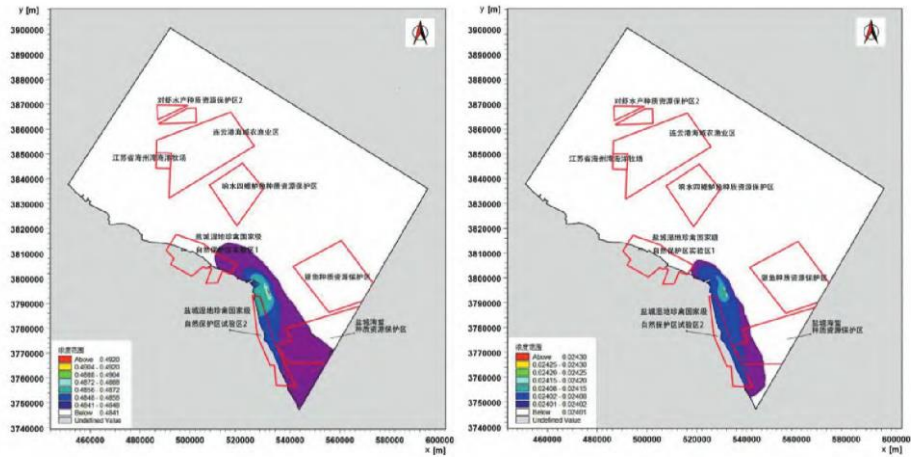


图 11 无机氮(左)和活性磷酸盐(右)浓度增量包线

2.4 排海口设置可行性分析

根据推荐排口海域水质调查结果显示，排口海域主要污染物为无机氮。该片区海域活性磷酸盐状况较好，符合二类海水水质标准；无机氮因受陆源污染的影响，超标现象较为普遍，但无机氮均符合四类海水水质标准。考虑到调查海域污染现状和排放口海域实际情况，排口海域的无机氮控制目标按照不劣于现状海水水质标准确定，活性磷酸盐控制目标按照二类海水水质标准确定。排海口排放的污染物中，氮磷污染物主要以总氮、总磷计，然而海洋水质标准中，氮磷污染物以无机氮、活性磷酸盐计，其相互间的转换关系为无机氮/总氮=0.6，活性磷酸盐/总磷=0.7。

根据《污水海洋处置工程污染控制标准》对污水海洋处置工程污染物的混合区规定，若污水排往开敞海域或面积 $\geq 600\text{km}^2$ 的海湾及广阔河口，允许混合区范围： $Aa \leq 3.0\text{km}^2$ 。

根据确定的海域无机氮和活性磷酸盐的控制目标，综合考虑入海河流陆源污染物的削减效应和排放口污染物的浓度场分布，通过控制混合区边界浓度，利用潮流数值模拟和污染物扩散数值模拟的污染物浓度响应场推求排放口的最大允许排放量。

滨海港附近海域无机氮现状严重超过二类标准限值，无机氮已无环境容量，即使调整排污口混合区的功能区划为四类水质标准，由于混合区边界以外海域严重超标，区域无机氮仍无排放容量，需要对排污口附近海域的无机氮进行减量或等量置换。海洋环境的污染物浓度场是受海洋水动力和陆源污染物排放双重影响长期作用的结果，即使对排污口附近海域的陆源污染物进行减量排放仍需要很长一段时间来实现大范围浓度场的变化，根据江苏省近岸排污口设置相关规范要求，在保证不劣于现状水质标准的前提下，可以对超标污染物进行减量或等量置换处理，使得海洋水质稳定趋好发展。目前，研究区域范围海域无机氮现状浓度严重超过二类海水水质标准，甚至超过四类水质标准，陆源污染物的集中收集处理排放本就是降低区域污染物排放负荷，缓解区域水环境恶化的途径，本文主旨也是探讨在现阶段我国近岸海域无机氮明显大范围超标的情况下，通过陆源减排等量替换实现无机氮陆海协同，防止近岸海域超标污染物恶化，并不断转好，改善海洋水质的可行性。因此在不劣于无机氮现状水质

的原则下，确定以无机氮的背景浓度作为其混合边界控制浓度，为 0.418mg/L。活性磷酸盐控制浓度以《海水水质标准》中的二类标准限值控制，浓度为 0.03mg/L。

研究范围内灌河、中山河、翻身河、於黄河等相关入海河道无机氮的现状排污负荷为 6965.7t/a、1681.6t/a、354.9t/a、282.5t/a，需要排污负荷削减量分别为 34.6%、19.0%、29.6%、29.9%。目前，陆源无机氮超标的原因主要是流域农业面源引起的，且普遍存在于近岸区域，为了进一步降低无机氮超标情况，相关职能部门已经开始采取相应的行政强制管控政策，以期实现无机氮的大幅度削减，根据《滨海港工业园海域近岸无机氮削减实施方案》可知，在理想状态下，灌河控制单元(灌河)、中山河控制单元(中山河)、翻身河於黄河控制单元(翻身河、於黄河)总氮削减率分别可达到 35.2%、34.1%、31.2%，完全满足相应的削减要求。在考虑灌河、中山河、翻身河、於黄河等主要入海河道无机氮削减方案情况下，近岸海域(离岸 18km)范围内无机氮平均浓度下降至 0.410mg/L。此外，入海河道无机氮污染物的削减，对于近岸海域的影响更显著，近岸海域(离岸 5km)范围内的无机氮本底值平均下降了 0.019mg/L，无机氮浓度降至 0.399mg/L。

在考虑各水质因子环境背景值和控制混合区边界水质条件下，通过污染物扩散数值模拟估算排放口海域各污染物的最大允许排放量。其中，排污口排放势必会造成混合区边界无机氮的浓度升高，要使得混合区边界无机氮实现不劣于现状水质要求，就需要进行区域入海河道污染物削减来置换出排放量，即在入海河道无机氮削减和排污口无机氮排放的共同作用下，排污口混合区边界的无机氮浓度仍保持在现状浓度 0.484mg/L。在考虑研究范围内灌河、中山河、翻身河、於黄河等相关入海河道无机氮削减方案后，排放口无机氮的最大允许排放量为 196.03t/a。活性磷酸盐在满足混合区边界浓度控制要求的情况下，最大允许排放量分别为 254.59t/a。

本工程无机氮、活性磷酸盐近期排放量分别为 110.37t/a、3.58t/a;远期排放量分别为 193.15t/a、6.26t/a。通过数值模拟计算，在满足混合区边界浓度控制要求的条件下，排放口海域的最大允许入海量分别为 196.03t/a、254.59t/a。

综上，考虑入海河道污染物削减的前提下，排海口排放的活性磷酸盐总量低于其海水环境容量，其浓度低于海洋水质二类标准限制;无机氮可以保持现状浓度水平不恶化。通过陆海污染物的联控实现了排海口特征污染物的置换排放，为排海口的设置可行性提供了必要的支撑。

3 结论

3.1 目前我国海洋污染排放总量控制研究尚在探索阶段，而陆域污染是海洋无机氮及活性磷酸盐污染的重要来源。因此，针对污染源排污削减工作，需要建立有效的区域联动机制。区域间协同减排、优化减排是实现海域水环境质量不断向好的一个重要手段。

3.2 本文以江苏省盐城市海域为例，研究了在区域实施污染物减排方案、滨海港工业园区海域沿岸陆源污染排入海域的污染物总负荷比现状有明显削减、外海污染源强保持不变的前提下排污口排放总量设置问题。规划排污口附近海域由于入海总负荷的增加致使局部水质有所升高，但由于区域内入海污染负荷的削减，海域水环境质量总体有所改善，实现了良好的陆海联防联控。对于优于水质标准的污染因子(如活性磷酸盐)来说，陆源污染物的减排可以尽可能的提高相关污染物的排放强度，使海洋环境的稀释降解能力得到充分利用，优化空间排放，最大限度的缓解河道入海口附近海域的污染负荷。对于劣于水质标准的污染因子(如无机氮)来说，陆源污染物减排是排海口设置并排放的唯一出路，通过陆源污染物的减排，置换出适量的排污容量，并且在保证海水水质现状的前提下，充分利用海洋的稀释自净能力，实现陆海污染物的优化排放，降低海水水质向更劣的方向发展，有效地改善海水水质。

3.3 在保护海洋生态环境的大前提下，设置入海排污口可以减少陆域面源污染，充分利用海洋环境的稀释降解能力。本文采用二维水动力水质模型模拟海洋污染物的迁移扩散，使用响应系数法计算海洋排污口的最大允许排放量，结果表明在保证现状

水质稳定向好发展的条件下,排海口的设置是可行的,而且具有较好的环境改善效益,可以为滨海城市海洋排污口管理政策提供一定的参考。

参考文献:

- [1]林雪萍,胡泽建,张永强,等.董家口尾水排海环境影响数值预测及排放口比选研究[J].应用海洋学学报,2017,36(1):31-40.
- [2]陶旭,唐议,褚晓琳.我国近岸海域环境陆源污染问题研究[C].2017年中国水产学会学术年会论文摘要集.北京:中国水产学会,2017:1.
- [3]杨玉洁.中国陆海跨界污染统筹治理机制研究[D].大连:大连海事大学,2020.
- [4]张昀昊.中国海洋环境陆源污染现状及对策分[C].中国太平洋学会海洋维权与执法研究分会暨辽宁省法学会海洋法学研究会2018年年会论文集.辽宁省法学会海洋法学研究会、中国太平洋学会海洋维权与执法研究分会、大连市国际法学会:大连海洋大学法学院,2018:7.
- [5]杨磊,贾会超.污水处理厂尾水排放对近岸海域水环境影响分析[J].污染防治技术,2019,32(4):46-51,60.
- [6]康敏捷.环渤海氮污染的陆海统筹管理分区研究[D].大连:大连海事大学,2013.
- [7]冯存岸,于金珍,冯依蕾,等.陆海统筹下的陆源排放口聚类分析[J].水动力学研究与进展(A辑),2020,35(3):314-320.
- [8]张茜,韩龙喜.基于水质响应系数的浅水湖泊水环境容量计算方法[J].四川环境,2017,36(1):47-52.
- [9]刘娟,马启敏,孙常青.胶州湾东岸典型河口区COD浓度响应系数分布探讨[J].海洋环境科学,2008,(1):20-24.
- [10]张云峰,周梦佳,刘玉卿.江苏省近岸海域水环境因子现状评价研究[J].环境科学与管理,2018,43(12):171-175.