

# 浅滩湿地生态系统的构建 与圩区排涝泵站的协同效应研究

吴人杰, 王琪, 朱初阳, 姜子岳, 朱超

(江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215100)

**摘要:**以白屈港综合整治工程为例,以圩区排涝设施作为浅滩湿地的水动力来源,采用数值模拟的方式对湿地整体布置进行优化研究,通过设置局部导流水道的方式提升湿地内部水体循环,为后续河道治理工程中浅滩湿地的水动力特性研究提出创新性解决方案。

**关键词:**浅滩湿地; 水流结构; 圩区排涝; 水体循环

中图分类号:TV85;X171.4 文献标识码:A 文章编号:1007-7839(2025)08-0031-0004

## Study on the synergistic effects between shoal wetland ecosystem construction and polder drainage pumping stations

WU Renjie, WANG Qi, ZHU Chuyang, JIANG Ziyue, ZHU Chao

(Jiangsu Taihu Water Conservancy Planning and Design Institute Co., Ltd., Suzhou 215100, China)

**Abstract:** Taking the comprehensive improvement project of Baiqu Port as an example, taking the drainage facilities in the polder area as the hydrodynamic source of the shallow wetland, numerical simulation was used to optimize the overall layout of the wetland. By setting up local diversion channels, the internal water circulation of the wetland was improved, and innovative solutions were proposed for the study of the hydrodynamic characteristics of shallow wetlands in subsequent river treatment projects.

**Key words:** shallow wetlands; water flow structure; drainage in polder areas; water circulation

湿地作为全球三大生态系统之一,其生态学特征表现为季节性或永久性水文饱和状态,构成了典型的水陆过渡带生态系统。这类特殊生境通过水文-土壤-生物复合系统的协同作用,孕育了丰富的生物多样性,不仅为两栖类、水生昆虫等典型湿地生物提供核心栖息地,更在鸟类迁徙路线中承担着关键的觅食驿站功能。在区域骨干河道生态治理工程中,基于生态工程学原理和景观生态学理论,创新提出了“水工-生态协同治理”策略。该策略的核心技术路径体现为:在确保防洪标准和通航等级

双重约束条件下,通过建立三维水动力模型对河道断面进行生态水力学优化设计,重点在水域展宽段实施“浅滩微地形塑造”工程<sup>[1]</sup>。具体技术措施包括:运用疏浚弃土进行底质改良,通过高程梯度控制(设计高差0.5~1.2 m)构建多级浅滩结构,配合沉水植物群落(优选苦草、黑藻等本土物种)的模块化配置,最终形成包含深潭-浅滩-缓坡的复合河道地貌系统。这种基于自然解决方案的生态修复模式,成功构建了“水文过程-地貌形态-生物群落”三要素协同演替的良性机制,为流域尺度下的生态基础

收稿日期: 2025-06-12

作者简介: 吴人杰(1993—),男,硕士,工程师,主要从事水利规划设计相关工作。E-mail: 674846561@qq.com

设施网络建设提供了创新性技术范式,目前在吴淞江整治工程、白屈港整治工程中得到广泛应用。

在区域骨干河道的综合治理中,浅滩湿地作为重要的生态修复手段,其平面布局通常遵循航道功能与防洪排涝需求,多选址于湖荡段河道的凹岸区域<sup>[2]</sup>。然而现行设计范式存在显著的技术缺陷:现有工程实践过度聚焦于植物群落配置和景观形态塑造,而对湿地生态系统服务功能与河道水动力条件的耦合机制研究不足<sup>[3]</sup>。这种设计理念的偏差导致已建湿地普遍存在物质输移阻滞、生态功能失调等问题。通过水动力-水质耦合模型的数值模拟发现,凹岸湿地的低效运行本质源于其特殊的流场结构<sup>[4]</sup>。这种水动力条件导致湿地单元呈现特征性的“三区”结构——入口紊动区、中部滞流区和出口沉积区<sup>[5]</sup>。其中滞流区的水力停留时间可达主河道的8~12倍,造成溶解氧水平降至缺氧状态,显著抑制了微生物的硝化/反硝化作用。针对上述问题,锡澄运河等景观工程尝试采用微动力调控技术,通过设置液压式可调堰门配合轴流泵组构建人工水循环系统<sup>[6-7]</sup>。现场监测表明,该措施可使湿地单元的平均流速提升至0.15~0.25 m/s, TN去除率提高至28.7%。但技术经济分析显示:初始建设成本增加约320万元/km,运维能耗达18.5 kWh/d,全生命周期成本折现率(NPV)较传统湿地高37.6%。这种高投入模式严重制约了技术推广,特别是在经济欠发达或管养困难区域的应用前景,故河道湿地系统应立足于现状河道地形,充分结合现状河道运行调度及周边情况开展设计工作。

本文以白屈港整治工程为例,基于水动力学模型与景观生态学原理<sup>[8]</sup>,采用计算流体力学(CFD)三维数值模拟技术,建立白屈港河道-湿地复合系统的水动力学模型,研究浅滩湿地生态系统的构建与河道沿线圩区排涝泵站的协同效应,从而优化湿地地形塑造方案<sup>[9]</sup>。这种基于自然解决方案的工程范式,成功实现了防洪排涝基础设施与蓝绿生态空间的功能整合,为滨河圩区构建弹性水文系统提供了创新性设计路径。

## 1 工程概况

白屈港整治工程全长49.23 km,北接长江口门,南衔太湖水域,西邻太湖湖西区,东抵望虞河生态廊道,构成了武澄锡引排工程体系的枢纽性节点。在白屈港综合治理方案中,基于生态水力学原理创造性规划了三处大型浅滩湿地系统,通过构建多级

水力梯度地形,在实现水质净化功能的同时,运用流体形态学方法塑造多样化的河道生境;创新性结合工程弃土资源化利用技术,将传统弃土处理转化为生态修复材料,既满足水力调控需求,又达成景观美学提升。

根据类似工程经验,如何减缓湿地物质输移阻滞,提升湿地水动力是湿地运行管护遇到的主要问题<sup>[10]</sup>。本文基于区域圩区防洪排涝工程体系的空间布局特征,采用水动力数值模型构建多情景模拟方案<sup>[11]</sup>,系统探究浅滩湿地生态单元与圩区排涝泵站系统的水动力耦合机制,具体布置如图1所示。在河道汛期行洪过程中,通过对不同的局部地形塑造方案进行计算比选分析<sup>[12]</sup>,选择最优的湿地水流疏导措施<sup>[13]</sup>,既减小水流对湿地的冲刷,又可以使主流水体与湿地内水体进行充分交换<sup>[14]</sup>,从而为圩区防洪排涝系统与湿地生态修复工程的协同优化设计提供了量化决策依据。

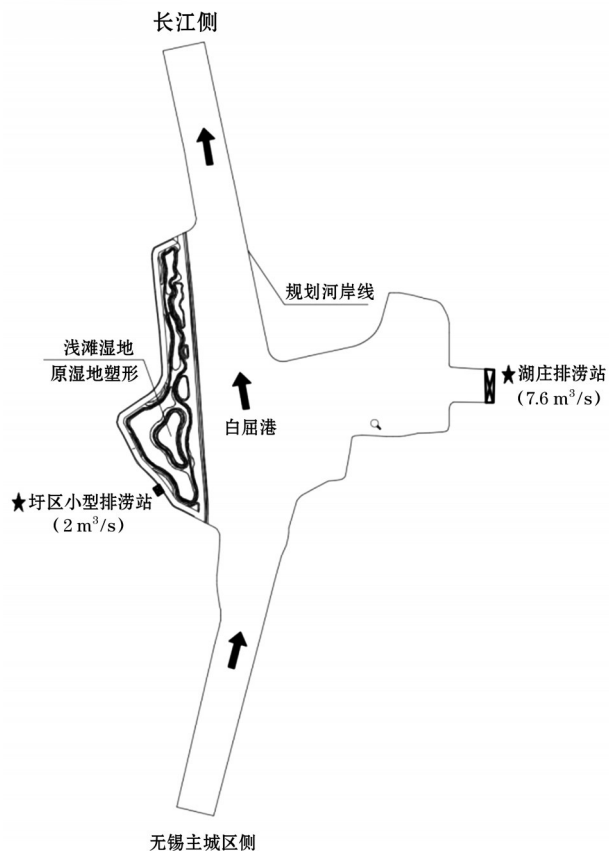


图1 湿地平面布置

## 2 数值模拟

### 2.1 数学模型基本控制方程

连续方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \gamma \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

式中: $u_i$ 为 $(x, y, z)$ 方向上的速度分量, m/s;  $p$ 为动态压强, Pa;  $\rho$ 为流体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $f_i$ 为单位质量的质量力, N;  $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}$ 为单位质量的压强梯度力, N;  $\gamma \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$ 为单位质量的黏性力, N。

## 2.2 数值求解方法

本工程数值模拟基于有限体积法构建控制方程的离散体系,其中动量方程中对流项采用二阶迎风差分格式进行离散化处理。针对非定常流动中速度-压力耦合问题,采用改进型SIMPLEC算法实施压力修正,计算过程中采用变松弛因子技术动态调整动量方程(0.4-0.7)和压力修正方程(0.8-1.2)的收敛速度,所有物理量(速度分量、压力、湍动能等)均采用双精度求解,残差监控收敛准则严格控制在 $1.0 \times 10^{-6}$ 量级,确保各控制方程的质量守恒误差小于0.5%。空间离散采用非结构化网格下的梯度重构技术,时间推进使用二阶隐式格式<sup>[15]</sup>,整体求解策略满足 Gauss 散度定理的守恒特性要求。

## 2.3 计算区域、边界条件和网格划分

本工程主要选取无锡市向长江行洪时作为计算工况,无锡侧模型采用流速入口边界,给定入口过水断面的平均流速,长江侧采用压力出口边界,圩区泵站采用速度入口边界,给定入口过水断面的平均流速,整体计算采用钢盖假定<sup>[16]</sup>。

计算区域采用结构化网格进行剖分,对浅滩湿地计算区域进行局部加密处理以提高计算精度。

# 3 圩区排涝时浅滩湿地处水动力特性分析

## 3.1 湿地周边场地影响因素分析

白屈港作为无锡市重要的通江骨干河道和武澄锡虞片区关键的行洪排涝通道,在区域水安全保障和生态系统中具有重要地位。本研究以位于江阴市徐霞客镇的典型湖荡湿地为研究对象,该区域地处马镇湿地生态管控区与马镇城市更新项目规划区的交汇地带,兼具显著的生态服务功能和景观美学价值。从水文地质特征来看,研究区河道两侧属于江阴市万亩圩田农业区,现有排涝泵站2座,其中1座小型排涝泵站直接位于湿地规划范围内。

经研究发现,湿地物质输移阻滞、生态功能失调等问题多发生于汛期,且汛期圩区排涝泵站运行较为频繁,泵站排水产生的水动力冲击对湿地基质稳定性和植被群落结构造成明显破坏。基于此,本研究提出以水利工程安全为基本前提,通过构建湿地生态防护及疏导体系,优化湿地水动力环境,实现水文过程与生态过程的协同调控。

## 3.2 计算结果分析

本工程湿地地形布置已充分考虑到湿地内部水动力特征,故由图2可知,在天然水文条件下,湿地内部已形成明确的水力梯度,主槽区流速呈现0.05~0.15 m/s的典型缓流特征,然而,受河道断面宽深比过大( $B/H=25\sim40$ )的影响,导致整体水动力条件显著弱于设计标准值,可能影响污染物的迁移转化效率及生态系统服务功能。

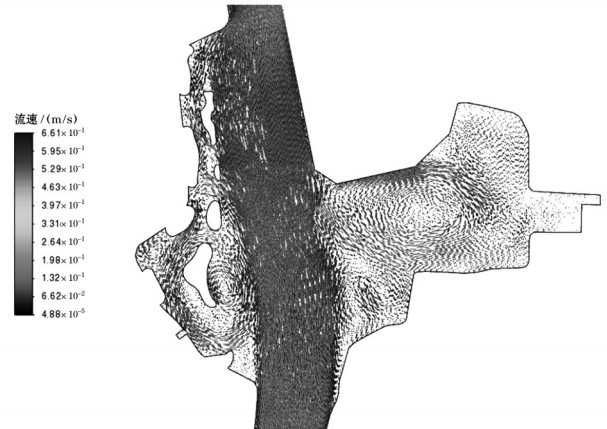


图2 排涝泵站未运行时浅滩湿地段水流结构

考虑到圩区排涝站运行时,整体水流特征如图3所示。当排涝泵站启动后,外来水体输入形成0.15~0.35 m/s的强驱动力场,局部区域流速峰值达到0.42 m/s,但通过数据分析表明,现有地形条件

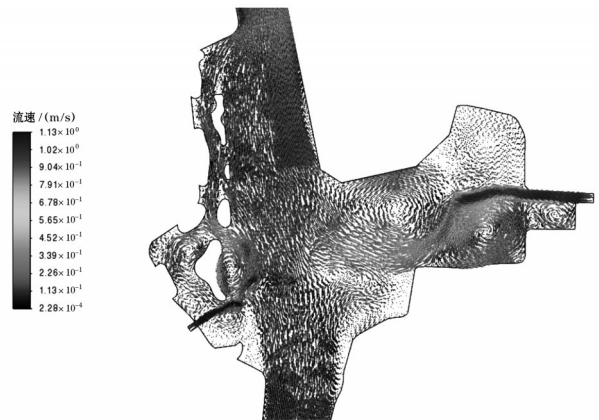


图3 排涝泵站运行时浅滩湿地段水流结构

下,新增动能约68%转化为紊流耗散,仅32%有效作用于湿地主流路径强化,需进一步采取导流措施进行引导以提升整体水动力效果。

#### 4 不同结构的导流构筑物对水动力的影响分析

基于排涝站运行过程中的流场结构特征分析,为优化湿地生态系统水动力条件,本研究提出采用导流墩结构进行水力调控的技术方案。结合浅滩区地形地貌特征与排涝站空间布局的耦合关系,通过水力学模型模拟与数值分析,构建了半疏导式与全疏导式2种导流体系。全疏导模式通过系统布置导流墩阵列对排涝站出流实施全域流场干预,采用连续渐变式墩体结构实现水流动力轴线向湿地核心区定向迁移;半疏导模式则依托地形梯度特征建立导流墩-天然河床协同调控机制,通过非对称墩体布局形成主次流道分异系统。两者计算结果如图4~5所示。



图4 半疏导布置浅滩湿地段水流结构



图5 全疏导布置浅滩湿地段水流结构

根据水动力学模型计算结果,湿地内部流场在导流构筑物作用下呈现出显著的流态优化特征。半疏导布置方案通过引导外来水体沿主槽方向形

成0.30~0.55 m/s的稳定流速带,在近岸区域观测到0.75 m/s的瞬时流速极值。全疏导布置方案虽能建立0.55~0.80 m/s的强驱动力场,局部峰值流速达1.20 m/s,此时床面剪切应力已达天然湿地基质临界起动值,存在明显的床面冲刷风险。基于多目标优化分析,建议采用半疏导导流堤组合方案,利用现存浅滩地形构建天然分流节点,既保证了湿地的运行安全,又提升了湿地的水动力,为后续类似工程设计提供设计参考。

#### 5 结论

河道内浅滩湿地的地形构建,可通过水力特性模拟确定湿地单元的平面形态参数,提升湿地内水动力特征,从而解决湿地内部污染物的迁移转化等相关难题。湿地设计应充分考虑与周边构建物的整体运行情况相结合,实现水文过程与生态过程的协同调控;基于多目标优化分析,建议采用半疏导导流堤组合方案,利用现存浅滩地形构建天然分流节点,既保证了湿地的运行安全,又提升了湿地的水动力。

#### 参考文献:

- [1] 高术仙. 河流典型弯段水流结构及动力特性研究[D]. 天津:天津大学,2007.
- [2] 丰小华. 浅滩湿地水深对氮、磷去除的影响及其在河道治理中的应用[J]. 环境工程,2020,38(9):7.
- [3] 李润清. 关于强弯河道水流结构及离散特性分析[J]. 水利规划与设计,2017(6):94-95.
- [4] 吴人杰,李昱,姜子岳,等. 浅滩湿地在河道凹岸冲刷防护中的应用研究[J]. 江苏水利,2023(7):8-11.
- [5] 李根. 浅滩湿地生态修复设计——以衢州坑西湿地为例[J]. 安徽农业科学,2019,47(16):87-89.
- [6] 冯媛. 表面流人工湿地水动力—水质模拟与分析[D]. 济南:山东大学,2016.
- [7] 赵丹. 弯道水流调整池结构参数对流态改善能力的影响[J]. 水利技术监督,2018(3):6.
- [8] 张伟星. 曹妃甸湿地水动力及水体交换特性研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学(原名:石家庄铁道学院),2019.
- [9] 崔庚,佟守正,吕宪国,等. 洪泛湿地潜流带水动力过程研究综述[J]. 湿地科学,2024,22(2):282-290.
- [10] 汪仲琼. 湿地植物床-沟壕系统中水动力和物质迁移效应研究[D]. 北京:中国科学院生态环境研究中心,2011.
- [11] 王生愿,张万顺,王永桂,等. 湖泊湿地生态系统水动力水生态数学模型[C]//第十二届中国水论坛. 武汉:武汉大学资源与环境科学学院,2014:347-351.

(下转第38页)

有益微生物降解协同作用,有效促进了有机污染物的去除。COD质量浓度的降低趋势随距离递增而逐步减缓,0~2 m范围内净化效率提升明显,而5 m以外污染物质量浓度趋于平稳。

$\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 作为水体中氮污染的主要形态,其质量浓度变化亦体现出良好的净化梯度。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在浮床边缘质量浓度为1.11 mg/L,至15 m处上升至2.02 mg/L,总体降低幅度约45.0%。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的变化趋势与之相似,由0 m处的1.63 mg/L增加至15 m处的2.76 mg/L,降低幅度约为40.9%。这说明浮床系统中植物根际区域可能存在硝化—反硝化作用路径,有效促进了氮素转化与脱除。同时,植物对氨氮和硝态氮的直接吸收也是一个重要路径。TN的空间分布与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 类似,但去除幅度相对较小,从浮床边缘的4.12 mg/L逐步上升至15 m处的6.40 mg/L,净化幅度约为35.6%。TN作为复合型指标,除包含无机氮外,还包含一定比例的有机氮与微颗粒态氮成分。由于有机氮转化为无机氮需一定时间及微生物参与,导致TN的整体去除效率相对较低,但其质量浓度仍显示出随着距离而逐步上升的趋势,验证了浮床对总氮具有较好的净化能力。相比之下,TP的去除效率最高,在浮床边缘质量浓度为0.12 mg/L,至15 m处上升至0.26 mg/L,下降了约53.8%。

值得注意的是,本研究中生态浮床对TP的去除效果优于对COD和氮类污染物的处理能力。这可能是因为,磷主要以颗粒态或吸附态形式存在,可通过浮岛基质的物理吸附与沉降实现较为稳定的去除;而COD及溶解性氮素主要以可溶性形态存在,需依赖微生物代谢转化及植物吸收,其净化效率受溶解氧、温度等环境条件及根际区微生态系统

活性显著影响。污染物检测工作仅安排在生态浮床应用的3个月后,且河道水流较缓,因此,在浮床运行初期,根系生物量有限,使得磷的表观净化率高于氮素与COD。

### 3 结 语

研究通过工程现场试验,评估了生态浮床在城市河道中的净水效果。试验结果表明,生态浮床能够有效降低COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN及TP等污染物质量浓度,净化效果在浮床边缘2~3 m范围内尤为显著。生态浮床作为一种集生态修复与景观美化于一体的绿色水体治理技术,具有结构简单、维护方便、适应性强等优势,展现出良好的工程实用性与推广前景。未来可结合不同水体类型和季节变化,进一步优化浮床设计与植物配置,以提升其水质净化与生态服务功能。

#### 参考文献:

- [1] 梁瑞珂,严蕊,郭丹辉,等.生态浮床技术在农业农村水体污染治理中的应用进展[J].水处理技术,2025,51(4):29-34.
  - [2] 胡诗瑶,王沛芳,胡斌,等.农田退水中氮磷与吡虫啉的光催化水循环协同净化试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):35-42.
  - [3] 汪真,蒋彬,张澳.强化型生态浮床净化富营养化水体的效能与机制[J].中国给水排水,2025,41(7):17-23.
  - [4] 郑志杰,彭波,何鑫,等.生态浮床的水质净化效果及其甲藻抑制作用[J].水生态学杂志,2022,43(5):67-72.
  - [5] 廉雨,李大鹏,吴益义.生态修复技术在景观湖治理中的应用[J].水科学与工程,2023(4):34-37.
  - [6] 洪文旭,骆心钰,李沛翰,等.生态浮床修复景观水的研究与应用[J].能源与环境,2024(6):146-148.
- 
- (上接第32页)
- [12] 王飞,李昱,吴人杰,等.区域骨干河道内浅滩湿地水动力特性研究[J].水利规划与设计,2024(7):125-127.
  - [13] 万荻,崔远来,郭长强,等.环境流体动力学模拟优选人工湿地设计中隔板湿地长度比[J].农业工程学报,2019,35(18):62-69.
  - [14] 杨永森,高鹏杰.基于二维水动力模型的湿地生态补水研究与应用[J].湿地科学与管理,2015(3):5.
  - [15] 王飞,李昱,朱超,等.“以深代宽”模式在区域骨干河道治理工程中的应用研究[J].水利技术监督,2024(7):159-161.
  - [16] 杨校礼,李昱,孙永明,等.弧形短导墙对船闸引航道水流结构影响的研究[J].水动力学研究与进展:A辑,2016,31(5):5.