

水质净化型生态缓冲湿地应用及其 数值模拟方法的研究进展

周驰誉¹, 孙浩晖², 刘茗¹, 李想³, 姚瀚申³, 冯艳玲³, 吴义锋³

(1. 江苏水利科教中心, 江苏南京 210029; 2. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏南京 210029;

3. 东南大学能源与环境学院, 江苏南京 210096)

摘要: 文章综述了生态湿地的应用动态、工艺复合方法及其数值模拟研究进展。近年来, 复合型湿地工艺(如水平-垂直潜流湿地、自由水面型湿地和梯级生态湿地)逐渐兴起, 通过优化组合不同湿地类型, 显著提升了污染物去除效率。数值模拟方法在湿地研究中日益重要, 有助于解析湿地净化机理, 指导湿地流场优化, 提升水质净化效益, 为实际工程设计提供技术支持。

关键词: 水质净化; 生态缓冲湿地; 数值模拟

中图分类号: X52

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2025)07-0057-0003

Research progress on the application and numerical simulation methods of water purification ecological buffer wetlands

ZHOU Chiyu¹, SUN Haohui², LIU Ming¹, LI Xiang¹, YAO Hanshen³,
FENG Yanling², WU Yifeng¹

(1. Jiangsu Province Water Resources Scientific Education Center, Nanjing 210029, China;

2. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China;

3. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The article summarizes the application dynamics, process composite methods, and numerical simulation research progress of ecological wetlands. In recent years, composite wetland processes (such as horizontal vertical subsurface flow wetlands, free surface wetlands, and cascade ecological wetlands) have gradually emerged. By optimizing the combination of different wetland types, the pollutant removal efficiency has been significantly improved. Numerical simulation methods have become increasingly important in wetland research, helping to analyze the purification mechanism of wetlands, guide the optimization of wetland flow fields, enhance water purification benefits, and provide technical support for actual engineering design.

Key words: water purification; ecological buffer wetland; numerical simulation

与传统污水处理技术相比,生态湿地水质净化技术存在占地面积较大的问题,提升生态湿地水质净化效率成为当前的研究热点。我国湿地设计在

类型、负荷选择及计算依据上多依赖经验,缺乏精细化参数方案,人工湿地植物资源化利用不足、堵塞防治困难以及工业污染对河道自净功能的影响

收稿日期: 2025-04-03

作者简介: 周驰誉(1990—),男,硕士,主要从事水利工程施工、管理及运行工作。E-mail:464214874@qq.com

等问题,制约着生态湿地的长期稳定运行。

1 生态湿地应用动态

生态湿地适用于处理污水处理厂尾水、微污染河水、农田退水等低污染水体,可加强水生态环境保护与修复,促进区域再生水循环利用^[1]。30余年来,生态湿地在我国广泛应用于生活污水处理、尾水水质提升、工业废水处理、农业面源污染控制及饮用水源水质改善等领域,其中尾水深度处理是重要发展方向。湿地不仅能净化水质,还能调节局部微气候、保护生物多样性,并提供涵养水源、蓄洪防旱等生态服务功能,具有显著的环境、生态和经济效益。

近年来,我国先后颁布了人工湿地污水处理技术导则(RISN-TG006—2009)和人工湿地污水处理工程技术规范(HJ 2005—2010)等文件,为湿地建设提供了指导。在湿地建设过程中,科学规划至关重要,同时需加强管理、控制和维护,水动力条件、植物配置、基质选择和水温等因素对湿地处理效果有重要影响。作为解决地表水环境污染问题的重要途径,人工湿地生态系统的研究对于推动生态文明建设和提升国际履约能力具有战略意义。

人工湿地按水流方式和结构可分为垂直潜流湿地(VF)、水平潜流湿地(HF)和表流湿地(FWS)。潜流湿地水力负荷大、污染物去除效果好,但基建投资高、维护复杂且易堵塞;表流湿地结构简单、成本低、维护容易,但占地面积大、水力负荷小。随着技术进步,复合型湿地工艺(hybrid CW)应运而生,通过将FWS、HF和VF等单元有机组合,综合各类型优势,能更有效脱氮除磷,降低污染物浓度,从而提升水质,该工艺在欧洲和亚洲被广泛应用。

2 生态湿地工艺复合方法及应用

2.1 水平-垂直潜流湿地

水平-垂直潜流湿地是最常见的复合型湿地,通过串联HF和VF形成,主要应用于市政污水的深度净化。Melian等^[2]构建了水平-垂直潜流湿地系统处理市政污水,结果显示系统对BOD、COD、NH₃-N和TSS(总悬浮颗粒物)均有着很好的去除效果,去除率分别为84%、74%、95%和91%。为适应高浓度进水水质,现已发展出多级水平-垂直潜流湿地,将多个HF或VF串联组合,常用于处理高浓度工业废水,能有效去除COD、NH₃-N、TN和TP等污染物。

2.2 自由水面型人工湿地

自由水面型人工湿地由塘、表流湿地(FWS)、HF或VF组成,具有连续水面,适用于城镇污水处理厂尾水深度净化和河水生态修复。Yeh等^[3]构建了由预处理氧化塘、两个串联FWS和一个HF组成的自由水面型人工湿地系统处理尾水,出水水质达到当地地表水补给标准;Liu等^[4]构建FWS-HF-FWS-HF-VF湿地系统提升北京永定河水质,在水力停留时间为34h时,对污染物有较好去除效果。

2.3 强化预处理型复合湿地

强化预处理型复合湿地是在湿地前端增设人工强化单元,通过高效沉淀法、接触氧化法等深度处理工艺削减尾水冲击负荷,去除污染物,减小湿地处理负荷。如深圳市新建的“生态氧化塘-高效沉淀池-VF-FWS”湿地系统,使出水水质由一级B标准(GB 18918—2002)提升至地表Ⅳ类水标准^[5]。

潮汐流人工湿地(TF CW)是新型湿地系统,采用“瞬时进、瞬时出”方式,在排水间隙吸入空气,增加内部含氧量,提升氧化还原条件,强化脱氮除磷功能。研究显示,TF CW对TN和NH₃-N的去除效果明显优于传统湿地。

2.4 自由水面型梯级生态湿地

梯级生态湿地集生态塘、表流湿地和潜流湿地优点于一体,形成自由水面型梯级系统,污水以重力流通过,实现尾水污染物去除。该技术在污水处理厂尾水深度净化项目中广泛应用,运行稳定,去除效果好。例如,在泗洪城北污水处理厂末端建立的阶式功能强化的梯级生态湿地,出水达到地表Ⅳ类水标准,处理成本低^[6];在长江经济带某污水处理厂南侧空地建立的尾水深度处理的高适应性梯级生态湿地,运行效果良好,处理成本仅为0.042元/m³^[7]。

人工湿地技术从单一类型向新型、复合型系统转变,在尾水深度净化、工业废水处理、河水生态修复等领域应用广泛,发展为成熟的尾水水质提升工艺,具有运行效果好、出水水质稳定、污染物去除效果好等优点。

3 数值模拟在生态湿地的研究动态

随着计算机技术的不断进步,数值模拟在水环境研究中的应用日益广泛。面对地表水体富营养化及河道“黑臭水体”等问题,数值模拟成为重要的研究手段。目前,常用的数值模拟软件有MIKE21、

MIKE11、MIKE HYDRO River、MIKE SHE、Delft3D、EFDC 等。

在水动力模拟方面,MIKE SHE 是一款功能强大的分布式水文系统模拟软件,适用于涉及地下水与地表水相互作用的生态湿地研究。MIKE HYDRO River 则是最全面的河流水动力学和水环境模拟软件之一,可与 MIKE SHE 耦合,扩展研究范围至整个流域,并与城市排水模型 MIKE URBAN 结合,实现城市排水系统与河道的一体化模拟。目前,许多河流水动力数值模拟研究集中于一、二维层面,但三维紊流数值模型能够更精确地模拟自由水面、水深及流速,具有良好的稳定性和灵活性,能够适应复杂地形边界,为河流水质模拟提供坚实基础。

水质模型是研究水体污染物运移规律、自净能力和水质变化的重要工具。水动力-水质耦合模拟研究主要运用 MIKE11、Delft3D、EFDC 和 MIKE21 等软件。MIKE11 是一款多功能的一维水动力学软件,可用于建立河流的水动力和水质模型,通过结合相关数据,能够进行区域概况分析、河网概化、污染负荷计算等一系列工作,为河道综合整治和水污染控制提供科学决策依据。Delft3D 软件由荷兰 Delft 大学开发,能够进行二维和三维的水流、波浪、水质、生态、泥沙输移模拟,各模块之间可在线耦合。EFDC 模型是由威廉玛丽大学维吉尼亚海洋研究所开发的三维地表水水质模型,主要用于模拟河流、湖泊、水库、湿地系统等水体的水动力学和水质。MIKE21 软件适用于模拟二维流场,可模拟水流、波浪、泥沙和环境,分为水动力模块和水质模块两部分。其水动力模型基于特定方程组,服从于相关假定,而水质模型为 ECO Lab 模块,提供多种解决方案和模板。MIKE21 在河流水库水动力模拟研究中具有重要参考价值,可与 GIS 结合用于湿地模拟研究,通过调整模型参数明确植物分布对流场的影响。

此外,通过耦合 MIKE21 的 HD 模块和 ECO Lab 中的“WQ with nutrients”模块,构建的水动力耦合水质模型能够模拟不同工况,指导工程优化措施设计。例如,焦瑾玲等^[8]以山东平阴县湿地为例,利用该模型对湿地示范区进行二维流场数值模拟,分析流场分布并改进湿地设计方案。王宁^[9]利用 MIKE21 对复合型湿地进行水质模拟,以 COD、NH₃-N、TN、TP 等为水质指标,叶绿素 a 为富营养化评价指标,结果准确呈现湿地水质情况,优化措施可降低湿地沿程污染物浓度,改善水体富营养化程

度。王丹丹等^[10]以汾河一人工湿地为研究对象,构建水动力及水质模型并进行参数率定及验证,模拟得到精度较高的模型,可模拟预测湿地中污染物的迁移降解情况。Wang 等^[11]利用 MIKE21 模拟湿地的短流情况,得出水深和植物密集处会造成内部短流,影响湿地净水效果。李添雨等^[12]以昌平区沙河水库为研究对象,基于 MIKE21 模型构建库区二维水动力水质模型,模拟水库水量水质变化情况,并确定最合适的水位调控区间。张叶等^[13]利用 MIKE21 模型对潮白河顺义区段进行模拟,分析不同引补水方案下该河段水质改善情况。Zhu 等^[14]利用 MIKE21 的 AD 模块模拟洱海的水动力和水质,明确洱海流域的环境容量,为后续保护和管理洱海水环境提供理论基础。

4 结 论

生态湿地技术在水质净化领域的应用呈现出从单一类型向复合型系统转变的发展趋势。水平-垂直潜流湿地、自由水面型湿地、强化预处理型复合湿地及自由水面型梯级生态湿地等工艺,因集成多种湿地单元优势,已被广泛应用于尾水深度净化、工业废水处理和河水生态修复等工程,且运行效果良好、出水水质稳定、污染物去除效果显著。与此同时,数值模拟方法在生态湿地研究中的应用不断深化,从流场研究拓展到与水质模型的耦合模拟,借助 MIKE21、Delft3D、EFDC 等软件,能够深入探究湿地内部的水动力条件、水质变化规律及污染物迁移降解情况,为湿地的设计、优化与管理提供了科学支持。

然而,当前研究仍面临诸多挑战。湿地植物的资源化利用技术发展缓慢,多数人工湿地植物未能有效转化为经济资源;湿地堵塞防治与死区消除的方法也亟待完善。在数值模拟领域,尽管模拟软件功能日益强大,但在应对湿地复杂环境时,模拟能力仍有提升空间,模型参数的优化与精准化问题亟待解决。未来,生态湿地的发展将重点关注以下几个方向:深入挖掘湿地植物的经济价值,开发更多资源化利用技术以降低成本;研发高效的堵塞防治与死区消除方法,保障湿地长期稳定运行;提升数值模拟模型的精度与可靠性,增强其在湿地精细化设计与管理中的应用效果;加强多学科交叉融合,推动生态湿地技术创新,实现更高效的水质净化目标。

(下转第64页)

5 结 语

淮阴区积极开展水系连通及水美乡村建设项目,旨在全面恢复农村河湖的自然功能,修复河道空间形态,改善河湖水生态环境,打造安全、生态、美丽、人文的农村水系。随着社会发展,乡村振兴、农村人居环境整治等政策的推进实施,既为农村水系综合整治指明了方向、明确了策略,也为农村水系改善提供了全新的时代机遇。淮阴区水系连通及水美乡村建设项目,是进一步改善农村人居环境的需要,是推动农村发展的需要,是加快美丽乡村建设的需要,是全面推行落实河湖长制的需要,同时也是保障农村水安全的需要。

(上接第59页)

参考文献:

- [1] 陆帅帅,周念清,蔡奕,等.洞庭湖湿地潜流带地下水中氮磷迁移转化过程及驱动机制分析[J].水资源保护,2024,40(5):122-130.
- [2] MELIÁN JAH, ALBERTO J M, ARANA J, et al. Hybrid constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in the Canary Islands [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(7):891-899.
- [3] YEH T Y, WU C H. Pollutant removal within hybrid constructed wetland systems in tropical regions [J]. Water Science and Technology, 2009, 59(2):233-240.
- [4] LIU C, DU G, HUANG B, et al. Biodiversity and water quality variations in constructed wetland of Yongding River system [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(9):3670-3677.
- [5] 魏俊,赵梦飞,刘伟荣,等.我国尾水型人工湿地发展现状[J].中国给水排水,2019(2):29-33.
- [6] 袁园,吴义锋,浦秋芬,等.污水厂尾水阶式功能强化型湿地生态水质净化工艺[J].净水技术,2019,38(11):46-53.
- [7] 许坤,吴义锋,肖宁,等.高适应性复合人工湿地处理某污水处理厂尾水[J].中国给水排水,2019,35(22):58-61.

参考文献:

- [1] 李原园,杨晓茹,黄火键,等.乡村振兴视角下农村水系综合整治思路与对策研究[J].中国水利,2019(9):29-32.
- [2] 杨志成.水美乡村建设中水系连通治理的实践[J].水上安全,2024(1):76-78.
- [3] 刘丽.铁岭市清河区水系连通及水美乡村建设机制初探[J].黑龙江水利科技,2024,52(8):145-148.
- [4] 吴强,刘品,刘汗,等.水系连通及水美乡村试点建设进展、问题及建议[J].水利发展研究,2023,23(11):14-17.
- [5] 王宁,许玥,李慧.恢复河湖生态环境,助力水美乡村建设——以高青县河湖生态治理为例[J].水利发展研究,2024,24(4):67-72.
- [6] 张继松,吴文霞.高安市水系连通及水美乡村建设试点经验与思考[J].中国水利,2021(22):64-65.

- [8] 焦瑾玲,王昊,李永顺,等.人工湿地数值模拟研究——以山东平阴湿地示范区为例[J].南水北调与水利科技,2008,6(6):87-89.
- [9] 王宁.基于MIKE模型的海绵型湿地公园方案设计研究[C]//规划60年:成就与挑战——2016中国城市规划年会论文集.沈阳:中国城市规划学会,2016:323-333.
- [10] 王丹丹,冯民权,孙小平,等.湿地污染物迁移扩散数值模拟[J].西安:西安理工大学学报,2018,34(3):314-320.
- [11] WANG Q X, PENG W Q, DONG F, et al. Simulating flow of an urban river course with complex cross sections based on the MIKE21 FM model [J]. Water, 2020, 12(3):761.
- [12] 李添雨,李振华,黄炳彬,等.基于MIKE21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.
- [13] 张叶,孟德娟,于子铖,等.基于MIKE21的城市河流水质改善与达标分析[J].水电能源科学,2020,38(9):48-52.
- [14] ZHU C J, LIANG Q, YAN F, et al. Reduction of waste water in erhai lake based on MIKE21 hydrodynamic and water quality model [J]. Scientific World Journal, 2013 (2013):958506.