

赵子越, 刘雪梅, 章光新, 等. 湿地水质净化功能及其定量评估研究进展[J]. 湿地科学, 2025, 23(3): 634-644. [Zhao Z Y, Liu X M, Zhang G X, et al. Research progress on water purification function of wetland and its quantitative evaluation. Wetland Science, 2025, 23(3): 634-644.] DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.20240157; CSTR: 32178.14.wetlandscience.20240157

湿地水质净化功能及其定量评估研究进展

赵子越^{1,2}, 刘雪梅^{1*}, 章光新^{1*}, 吴燕锋¹, 戴长雷², 夏春龙³

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102; 2. 黑龙江大学水利电力学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;
3. 辽宁省抚顺水文局, 辽宁 抚顺 113005)

摘要: 湿地水质净化功能的定量评估对于湿地生态恢复和区域水环境管理意义重大。通过对已发表的相关中英文文献进行整理分析, 总结了湿地对悬浮物、有机质和营养盐的去除机制, 系统分析了人工湿地的类型、适用对象、优缺点和限制因素, 进一步发现关于人工湿地新污染物去除及减少温室气体排放方面的研究有待进一步加强。此外, 梳理了自然湿地水质净化功能定量评估过程与方法, 总结了数值模拟过程中水文、水动力和植被吸收模块的驱动要素和限制性因子, 阐明了流域“湿地群”水质净化评估在湿地生态恢复、流域水质改善和引调水工程水质控制阈值中的应用。基于湿地水质净化功能研究的热点与不足, 提出了未来湿地水质净化评估的研究区域应从单块湿地转向流域“湿地群”的研究。构建大规模流域“湿地群”综合网络与湿地水文-水动力-水质-生态综合模型, 将有利于提升中国全流域生态建设水平和湿地水质净化能力。

关键词: 人工湿地; 自然湿地; 水质净化; 定量评估; 流域水管理

中图分类号: P941.78; X52; G353.11

文献标识码: A

文章编号: 1672-5948(2025)03-634-11

湿地在水质净化、调洪蓄水、调节气候等方面发挥着重大作用, 为自然界与人类社会的可持续发展提供了重要支撑^[1-2]。湿地水质净化功能的充分发挥可同时满足环境保护与资源可持续发展, 有益于基于自然条件的水环境治理^[3]。近年来受人类活动加剧与气候条件显著变化的双重影响, 湿地面临着面积萎缩、景观破碎、功能退化等严峻挑战, 内部生物地球化学过程发生变化, 加剧了湿地水质净化效率和效果的不确定性^[4]。为了提升湿地水质净化效率, 亟需揭示湿地水质净化原理及影响湿地净化功能的可能性因素^[5-6]。

湿地利用植物、微生物、细菌与基质等对输入的污染物进行充分沉淀、分解与转化, 主要包括物理过滤、化学反应与生物吸收^[7]。相较于传统的人工污水处理方法, 增加了环境保护与生物培育的作用。20世纪50年代, 研究人员首次提出了利用

人工湿地净化污水中悬浮物与其他营养盐的相关概念^[8], 之后有学者分析了湿地中单一植物与多植物组合栽种的水质净化效果差异^[9], 并初步从微生物角度探讨了植物与根部真菌组合使用的净水效果^[10-11]。目前中国主要在长江与黄河流域、太湖和鄱阳湖等典型湖泊以及红树林、微山湖等自然保护区开展了针对传统氮、磷营养盐与颗粒物、悬浮物去除的相关研究^[12-13], 国外则在北美密西西比河三角洲、欧洲多瑙河三角洲等大面积滩涂湿地开展了相关研究^[14-15]。尽管研究人员已经运用多种手段对人工湿地净化抗生素、微塑料等新污染物、温室气体排放等过程进行研究论证, 但对湿地净化效率定量评价方面的探索仍显不足。随着对湿地水质净化过程和机理的深入认识与计算机技术的快速发展, 水质净化定量评估从室内模拟、野外监测等方法逐步发展到数值模拟, 研究区域也

收稿日期: 2024-06-05; 修订日期: 2024-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42207088、U23A2008、42101051) 和中国工程院战略研究与咨询项目 (JL2023-17) 资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (42207088, U23A2008, 42101051), and Chinese Academy of Engineering Strategic Research and Consulting Program (JL2023-17).]

作者简介: 赵子越(1997—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 硕士研究生, 从事水文水资源研究。E-mail: zhaoyiyue@iga.ac.cn

*通信作者: 刘雪梅, 助理研究员; 章光新, 研究员。E-mail: liuxuemei@iga.ac.cn; zhgx@iga.ac.cn

由过去的局部湿地转移到全流域湿地网络群^[16]。利用数值模拟进行湿地水质净化功能定量评估需要进行参数本地化研究和对多环境因子(气象、水文、水动力等)协同作用下湿地水质净化机制的进一步认识^[17]。然而不同气候模式与水质净化数值模拟技术的耦合作用尚待开发, 桎梏着湿地净化对气候响应机制的认识, 难以有效提升湿地应对变化环境下的水环境治理效率和效果^[18]。

以往研究人员大多从湿地对特定污染物的净化原理与处置手段上进行探索, 缺乏对各类污染物复合净化机制和实际净化效率定量评估的系统归纳, 难以梳理湿地净化研究的热点和不足, 限制了湿地水质净化研究的科学发展。本文通过系统总结湿地水质净化功能及其定量评估方法相关的中英文文献(中国知网的学术期刊库和 Web of Science 核心合集数据库), 阐述了从数值模型方向深入开展湿地水质净化定量评估的必要性, 并进一步指出湿地水质净化及其定量评估在维护流域水安全和恢复湿地生态建设等方面的重要作用。

1 湿地水质净化功能研究

1.1 湿地水质净化机制与影响因素

湿地水质净化原理是将污水中的悬浮物、营养物等通过内部基质、植被、微生物等组成部分, 进行沉积过滤、生物吸收、生化转变等物理化学过程, 从而将污染物从污水中去除^[19]。基质作为湿地植物和微生物的栖息地, 其粒径大小影响着植物根系的延伸状况和根系对污染物的吸附效率(表 1); 湿地植物群落结构复杂且对水分梯度与盐分变化高度敏感, 一方面植物可通过叶片的光合作用吸收氮、磷等污染物以促进自身生长发育, 另一方面植物可利用根须将水中的颗粒物过滤、富集, 从而抑制低等藻类繁殖, 阻止沉积物再悬浮; 湿地动物可通过富集与吸附直接去除水体污染物, 也可通过捕食和竞争来优化植物与微生物的生境分布, 间接提高净化效果^[20]; 微生物是有机质降解及氮、磷等污染物转化过程的主要驱动者, 影响湿地物理、化学与生物作用的发生速率。

表 1 湿地各组成部分及其对水质净化过程的影响机制

Table 1 Components of wetlands and their influence mechanisms on water purification processes

组成部分		影响机制	参考文献
湿地内部	基质	在湿地生态系统综合作用下影响悬浮物吸附与氧化还原过程	[21-22]
	植物	光合作用、过滤、富集	[23-25]
	微生物	分解、降解、硝化、反硝化	[26-29]
	动物	富集、生物多样性维护、营养级层次调节	[30-32]
湿地外部	水文条件	在湿地生物生存环境中通过改变水体滞留时间、植物淹没水深等影响湿地生物地球化学过程	[33-36]
	地理属性	湿地面积、位置、水体深度、形状	[37-38]

1.2 湿地水质净化类型

当前, 湿地水质净化方案可分为自然湿地水质净化和人工湿地水质净化两类: 自然湿地水质净化是指在自然界中经长时间的生境演替自发形成并且可以直接或间接通过特定净化程序对污水进行净化的过程^[39]。湿地本身所具有的特征决定着去污效果的迥异, 包括湿地覆盖面积、空间结构、承担污染物负荷、所处地区地形与气候条件等多个因素^[40]。同时, 部分湿地的净化效果会受到湿地自身的水力负荷影响^[41]。在自然湿地长期的自我演替过程中, 内部植物与微生物群落不断变化, 最终高度适应其所处地区的气候环境。

人工湿地水质净化是指通过人工构建填充基质、引种植物并科学调整水力条件, 使用复合生态

系统来处理废水中污染物质的过程, 即污水处理装置的生态化表现。人工湿地不但具备自然资源管理和环境保护的双重功效, 还拥有净化出流水质、增加湿地生产力、提升生态景观效能等重要生态价值^[42]。不同类型人工湿地对污染物的去除效果及优缺点见表 2。

1.3 自然湿地对污染物的去除

不同区域自然湿地所对应的气候环境存在差异, 因而对其土壤基质、植物、微生物等提出统一、标准的水质净化方案难度较大, 故从宏观角度出发探讨湿地特征与水质净化功能间的耦合关系, 更有利于自然湿地的存续发展与水质净化功能的提升。就其对外来污染物净化的流程而言, 主要可分为如下几步^[51-52]。

表 2 人工湿地类型及基本属性特征

Table 2 Types and basic attribute characteristics of artificial wetlands

类型	适用对象	优点	缺点	限制因素	参考文献
表面流人工湿地(FWS)	污水厂排污清洁 畜牧业废水净化 降雨与径流污染控制	操作简单 成熟期短 维护费用少	承载力弱 净化能力弱	水位深度 建设成本	[43-44]
水平潜流人工湿地(HSSF)	生活污水二级清洁 有机工业废水处理	占地面积小 卫生条件好 低温适用	造价高 易堵塞 管理复杂	施工难度 管理难度	[45-47]
垂直潜流人工湿地(VF)	高浓度污水水体净化 氨氮含量高的水体	硝化能力强 氧气传递好 水力负荷高	造价高昂 系统复杂 蚊蝇易滋生	建设成本 管理难度	[48-50]

(1) 沉积过程: 水体中较大粒径的悬浮颗粒及胶体在运动过程中逐渐沉积, 降落到底部的基质表层, 该过程受流速、难溶物与不溶物粒径、滞留时间及温度等多种条件复合影响。

(2) 筛选过滤: 水体流经浮水植物根系密集处和沉水植物集中区域时, 未发生沉降的悬浮固体被筛选过滤以进一步去除污染物质, 该过程与其他净水处理过程同步发生。

(3) 吸附沉淀: 污染物中部分溶解颗粒因分子间作用力不同, 被填充基质与水生植物根、茎、叶等吸附到表面, 与吸附媒介间接接触时间及接触面积的大小将直接影响污染物质的去除效率。吸附类型差异、表面电荷、自由离子百分比等同样会对最终吸附效果产生影响。污染物中的无机磷与铝、钙、铁及基质中的矿物质等发生反应, 最终生成沉积物沉淀到土壤表层。

(4) 生化转化: 湿地水体中的生化反应和氧化还原过程会导致化合物形态发生转化, 微生物是参与该反应的重要媒介。典型的生物化学反应包括氨化作用、硝化作用、反硝化作用等。

1.4 人工湿地对悬浮物和营养盐的去除

悬浮物主要通过外部水源汇入、大气沉降和内源沉积物再悬浮等过程进入湿地^[53]。湿地对无机悬浮物的净化主要通过物理沉降和生物吸附, 对有机悬浮物的净化增加了微生物分解^[54]。湿地植物对悬浮物的去除则多发生在浮水植物根系密集处和沉水植物集中区域^[55]。因分子间作用力不平衡, 部分溶解颗粒被填充基质与湿地水生植物根、茎、叶等吸附到自身表面, 而不同吸附类型与表面电荷、自由离子百分比等也会影响最终的吸附效果^[56]。

湿地对氮元素的净化包括吸附过滤、氨挥发、

吸收矿化和硝化-反硝化等(图 1), 主要利用植物的根、茎、叶等组织对氮进行吸收利用和微生物催化下的硝化-反硝化^[57]。当溶解氧含量(DO)充足时, 硝化反应可顺利进行; 反硝化反应则取决于碳源含量是否充足。人工湿地在自然湿地脱氮的基础上, 利用多种除氮效果较好的植被物种搭配和空间组合, 配合湿地填充基质进行氮素吸附, 在单位面积上最大程度实现氮净化。

1.5 人工湿地对新污染物的去除

目前各类药物、个人护理产品(PPCPs)、内分泌干扰物(EDCs)、微塑料、环境激素等缺乏相关法规或排放标准控制的污染物大量排入水体, 这类物质易使生物富集且严重威胁水生生物健康, 被统称为新型污染物(Emerging Contaminants)^[58]。新污染物通过如下几种途径进入水体: ①污水系统排污。污水处理厂的傳統处理工艺对新型内分泌干扰物去除效率较低, 导致痕量内分泌干扰物排入地表水体。②工农业排污。工厂与耕田产生的含新型污染物的污水与化肥排入水体。③垃圾填埋场渗滤液。个人护理产品、含有添加剂的日常用品废弃物等填埋处理不当造成水源污染。④医疗废物。医院废弃污水中含有各类药物、放射性核素、溶剂及消毒剂等, 会造成水源污染^[59]。常规污水处理方案对新型污染物的去除效率较低, 当前针对性的新污染物处理方案有膜过滤法、高级氧化法、活性炭吸附法、人工湿地去除法等。通过改良人工曝气混合型人工湿地, 对抗生素的去除效率可达到 87.9%~99.1%^[60]; 使用较大粒径填充基质的多层介质改良型水平潜流人工湿地系统对微塑料的去除率最高可达 44.83%^[61-62]。国内关于新污染物去除的研究尚处于初级阶段, 未来对新污染物种类和数量的认识会随着生态监测技

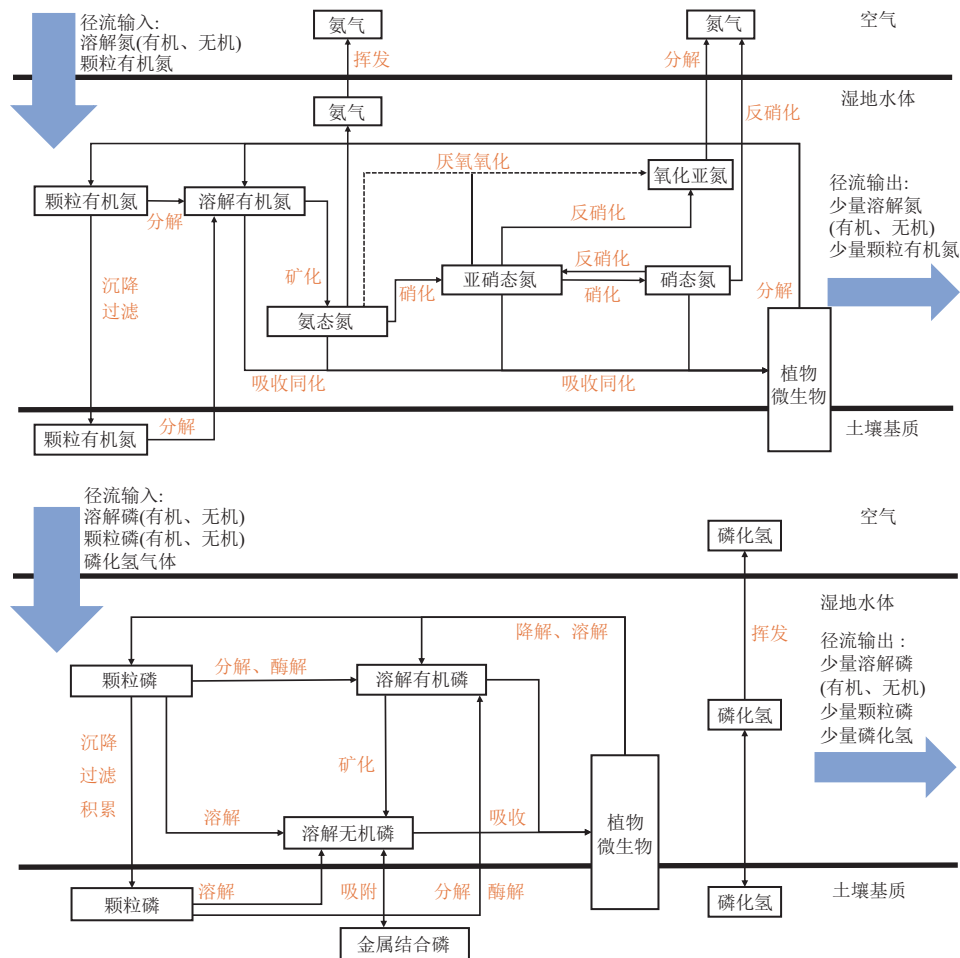


图1 湿地脱氮(a)、除磷(b)流程(改编自文献[56])

Fig.1 Process of wetland nitrogen (a) and phosphorus (b) removal (Image adapted from literature [56])

术的发展而不断加深,因此,亟需构建湿地新污染物名录,细化完善新污染物环境风险评估管控制度,全面掌握新污染物来源和迁移转化特征,了解新污染物的毒理毒性并研发针对性净化去除方法。政府部门可通过将环境治理手段与相关政策法规相结合,对新污染物造成的生态损害进行规制。这种举措与湿地水污染现状下所需解决的生态问题不谋而合,是中国现代化环境治理能力的实际体现。

2 湿地水质净化定量评估及在流域水管理中的应用

对湿地的水质净化能力进行定量评估,有助于研究人员较为科学全面地掌握湿地环境承载能力和当前水生动物、浮游生物与微生物间的协调状态,同时也可为湿地可持续发展、局部地区湿地生态服务功能价值评估提供理论依据,而模拟实

验和数值模拟是湿地水质净化功能定量评估的有效手段^[63]。模拟实验能确定特定情境下湿地的净化效果,但受限于实验规模、植物种类等因素,难以进行大面积和长时间尺度下的情景预测,近年来利用数学模型进行大范围、长时间的湿地模拟预测成为主流,将室内实验与大数据模型结合使用,能够较为合理准确地预测模拟湿地水质净化能力的变化^[64]。

2.1 基于室内模拟实验的水质净化定量评估

模拟实验根据与自然状态相近的程度,大致可分为室内模拟实验和自然(野外)模拟实验2类。室内模拟实验是指在实验室中开展的小规模实验,实验室中植物与微生物的生长发育和活动范围受到限制,且生长环境与自然生境差异较大,最终的研究结果与实际的生态学现象往往有较大差异;自然模拟实验是指在自然(野外)条件下开展的模拟实验,因为采用真实的生态系统,减

少了因实验控制对非目标环境条件的改变, 研究结果更能反映自然界中实际的生态学现象^[65]。

室内模拟实验分为野外调查与模拟实验 2 个步骤, 首先对目标湿地进行现场调查, 包括区位概况调查和水体、土壤与植物采样, 将样本进行检验分析后取得初步数据, 根据所得数据设计实验方案, 包括试验装置设计、土壤基质、湿地植物与污水水体等部分的选取配置, 在改变水文、气象、水质、生物等各类影响因子的前提下, 以结构方程模型为基础来检测各情景中污染水体的净化效果, 进而判断目标湿地的实际净水效果^[66, 67]。室内模拟实验受制于模拟装置、净化机理不明确等, 模拟结果难以全面展示野外真实情景, 模拟时长较长。目前, 研究人员将结构方程模型引入水质评价过程, 能够有效分析各因子的关联程度并识别关键驱动要素, 可为湿地科学管理和有效修复提

供针对性指导意见。

2.2 基于湿地水文-水动力-水质-生态综合模型的水质净化定量评估

数值模拟在快速实现湿地生态水文多情景模拟、揭示湿地生态-水文过程互馈机制及变化环境下湿地生态水文响应预测等方面优势显著, 但由于水文、生态模块间耦合机制不足及监测数据量缺乏, 无法实现不同模型间数据的实时传递, 精度与适用性存在缺陷^[68], 未来需要深入探讨湿地水盐运移模型、植被结构和空间格局间的相互关系, 综合考虑湿地水文循环、生态模式、气候变化与人类活动, 建立湿地水文-水动力-水质-生态综合模型(图 2)。在所构建模型的基础上通过协调多情景状况, 确定各影响因素在湿地水质净化过程中的贡献, 并经由该复合模型预测未来气候情景下湿地水质净化状况的演变趋势^[69]。

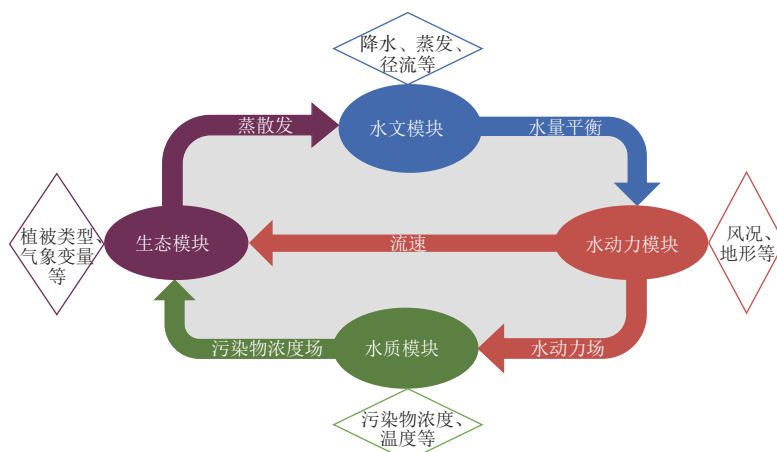


图 2 湿地水文-水动力-水质-生态综合模型示意

Fig.2 Schematic diagram of wetland hydrology-hydrodynamic-water quality-ecological comprehensive model

2.2.1 水动力模块

水动力学在湿地净化过程中作用显著, 影响着水体中浮游生物演替与微生物种群稳定性。水动力数值模拟是一种基于水动力学的模拟技术, 能够模拟水体中氮、磷元素、悬浮物等污染物的迁移, 适用于高时空分辨率下湿地水文情势的预测模拟^[70]。一维水动力模型源于 Hansen 和 Rattay 求解垂向速度和盐度时使用的 Navier-Stokes 方程^[71], 目前被广泛应用在 WASP、QUAL 及 MIKE 系列的相关软件中; 二维水动力模型源自探究底部地形限制下摩擦系数对水动力场的影响而构建的安大略湖冬季环流水动力场^[72]。目前 Saint-Venant 水动力控制模型的应用较为广泛:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gA \frac{Q|Q|}{K^2} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, x 、 t 分别为距离 (m) 和时间坐标 (s); A 为过水断面面积 (m^2); Q 为流量 (m^3/s); Z 为水位 (m); q 为单位河段长度的旁侧入流流量 (m^3/s); K 为流量模数; α 为动量校正系数; g 为重力加速度。

过去水动力模型研究集中于单因子对水动力形成特征的模拟^[73], 目前其应用范围正在向地形更复杂、面积更广阔的流域湿地扩展。未来湿地水质净化评估要综合考虑水文情势与水资源配置, 开展基于多影响因子、多试验方法的长序列、

表 3 常用的水动力-水质净化评估模型

Table 3 Commonly used hydrodynamic-water quality purification assessment models

模型	适用空间	变量	优点	不足
WASP	三维	藻类、叶绿素a、溶解氧、营养盐、浮游植物	结构灵活、功能强大	计算配置要求高、沉积物模块简化
MIKE3	三维	溶解氧、浮游动物、藻类、营养盐	对大型水体的模拟精度高	无反硝化过程解析、不能解释藻类爆发
ERSEM	三维	细菌、藻类、营养盐、浮游动植物、有机物、鱼类	可以进行浮游层与地层模拟	只用于大型水体与湖泊湿地
EFDC	三维	水位、温度、溶解氧、水生植被、藻类、碳	模拟水动力、水质、水生态过程	要求基础数据种类多数量大
MOHID	三维	浮游动植物、藻类、营养盐、溶解氧、有机物	模拟方式灵活	未将营养盐与重金属间的关系联系
CE-QUAL-W2	二维	藻类、营养盐、溶解氧、有机碳、水生植被、碎屑	模拟沉积层与沉积物的交互关系	未考虑微生物影响

大流域、多尺度情境下的综合研究。

2.2.2 湿地水质模块

近年来随着计算机技术的不断发展,数值模拟逐渐成为模拟湿地水质变化情况的主流手段。当前湿地水质净化评估模型可分为一维模型、二维模型、植物吸收动力模型与水动力模型^[74](表 3):

湿地水质净化能力评价二维模型:

$$\mu \frac{\delta_c}{\delta_x} = \frac{\delta}{\delta_y} \left(E_y \frac{\delta_c}{\delta_y} \right) - KC \tag{2}$$

式中, μ 为动力粘度系数 (m^2/s); c 为污染物浓度 (mg/L); x 和 y 分别为单元纵向和横向距离 (m); E_y 为沿 y 方向的扩散系数 (m^2/s); K 为污染物反应速率常数; C 为反应项常数。

当湿地断面为矩形断面时上式的解析解为:

$$C(x,y) = \left[C_0 + \frac{m}{h \sqrt{\pi E_y x v}} \exp \left(-\frac{v}{4x} \times \frac{y^2}{E_y} \right) \right] \exp \left(-k \frac{x}{v} \right) \tag{3}$$

式中, $C(x,y)$ 表示湿地单元池纵向距离为 x 、横向距离为 y 处的污染物浓度 (mg/L); C_0 为湿地单元入口断面污染物浓度 (mg/L); m 为湿地单元入口污染物质量流速 (g/s); h 为湿地单元平均水深 (m); x 为湿地单元纵向距离 (m); y 为湿地单元横向距离 (m); v 为湿地单元水域的平均流速 (m/s); E_y 为湿地单元污染物横向扩散系数 (m^2/s)。

2.2.3 植物吸收动力模块

植物吸收动力模型常应用于沼泽湿地与湖泊湿地等,作为当前湿地水质净化研究领域的主要工具之一,能有效揭示湿地植物对氮、磷营养盐的作用机制,确定湿地净化阈值^[75]。

植物对氮、磷元素的吸收动力学研究源于 20 世纪 50 年代初,研究人员将米氏方程 (Michaelis-Menten) 应用到植物离子吸收动力学领域,引入最大吸收速率和离子亲和力参数,实现了

不同植物各生长阶段下对氮、磷等营养物质吸收差异性的量化模拟^[76]。Nielsen 和 Barber 率先提出最低平衡浓度 ($C_{\min}$) 相关概念,首次使用耗竭法得到动力学方程的各种参数,测定水培植物培养液中离子浓度随时间变化的动态过程^[77]。目前 Michaelis-Menten 模型较为常用:

$$U_{\text{tot-dyn}} = \frac{U_{\max-X} \times [X_{\text{tot-dyn}}]}{K_{m-X} + [X_{\text{tot-dyn}}]} \tag{4}$$

式中, $U_{\text{tot-dyn}}$ 为添加营养盐总动态吸收速率 [$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; $U_{\max-X}$ 为营养盐 X 的最大吸收效率 [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; K_{m-X} 为营养盐 X 的半饱和常数,即 $U_{\text{tot-dyn}} = 1/2 U_{\max-X}$ 时对应的总动态浓度 (mg/L); $X_{\text{tot-dyn}}$ 含义同上。

随着不同植物对营养盐吸收状况下动力学试验的广泛开展,逐步量化气温、光照、降水和 pH 等影响因子对植被营养盐吸收的作用,或只利用耗竭法来探究植物在不同离子浓度下对营养物质的吸收特性^[78]。未来植物吸收动力学模型需要增强植物间协同吸收氮磷的效率刻画,揭示植物营养吸收特性与湿地系统总去除效果间的耦合关系。

2.3 流域湿地水质净化评估在水管理中的应用

近年来,受全球气候变化与高强度人类活动的复合影响,全流域尺度上水文情势的改变严重影响局部湿地的水文调蓄和水质净化功能,而各湿地间的水文连通状况则反映了“湿地群”生态系统的健康特征,因此在流域“湿地群”乃至全流域尺度上进行水文过程时空演变机制研究的重要性不言而喻^[79]。一般来说,湿地因具有净化水体中污染物与营养物质的特殊功能、属性与结构,能够有效维持水环境稳定及流域间的生态平衡^[80]。自然尺度下经分水岭与外界区分后的流域界线明显,流域内江河、湿地、滩涂等一体化水文结构稳定。湿地在流域内作为基本单元,其水质净化能

力受气候、地貌、降水等因素的影响显著,从流域尺度研究湿地净化功能对生态系统恢复的作用意义重大。应积极探索流域“湿地群”的水文调蓄和全流域在水文过程中的累积影响效应,未来可采用湿地水文耦合模型、流量监测预警与各子流域湿地单元间地表径流和地下水连通性预测等多种手段,对各流域综合水质净化能力进行合理评估的方案,将成为流域内污染物治理管控与湿地生态恢复建设的前沿手段,进一步强化全流域水资源综合管控能力,保障全流域用水安全^[1]。

湿地拥有截留非点源污染物、维持与改良中下游河段水质的功能^[81],进行湿地水质净化能力定量评估可确定湿地最大净化能力。通过在湿地上游区域生态补水过程中设置水污染最大许可范围,限定水体污染物浓度控制阈值,科学调控外源径流的允许进入量和周边农田退水的最大承载量,在确保下游水质安全的前提下,最大程度发挥湿地的净化能力。通过引入常规水资源、洪水资源与农田退水,可减缓湿地自身水资源流失与需水量增大的问题;蓄滞上述水资源,维持基流量以减缓农田退水出路及跨区域调水问题,有利于保证农业-生态协同发展与生态补水工程的高效实施。

3 问题与展望

3.1 存在问题

本文首先通过对湿地各组成部分净化原理及其影响因素进行探讨,总结了多类型人工湿地水质净化的主要适用对象、优缺点和限制性因素。同时梳理了基于室内模拟实验和数值模拟模型的过程与方法,提出了水文、水动力、水质和生态模块驱动要素和互馈机制的限制性因子。基于目前的研究现状,当前还存在如下问题:①主要研究人工湿地对悬浮物、营养盐和有机质等传统污染物的去除,而对人工湿地去除新污染物及减少温室气体排放等方面的研究较为不足;②目前选用的水质净化模拟模型具有区域性限制,受地理位置与气候环境等因素影响较大;③现行条件下湿地水质净化的研究区域集中于局部地区,对全流域“湿地群”的水文调蓄和协调净化的研究较少。

3.2 展 望

为推进流域湿地水质净化机制和定量评估研

究,基于已有成果和存在的问题,提出以下3方面建议与展望:①将湿地新污染物去除机制和温室气体吸收效率纳入国家生态安全与“双碳”目标的考虑范畴,制定更科学的生态保护和碳排放标准;②提高数据监测密度与样品采集频率,掌握特定区域内的主要环境因子和水文数据,提升湿地水质净化模拟的区域适配度;③加强流域“湿地群”综合网络与湿地水文-水动力-水质-生态综合模型的构建,提升流域水质净化效率。

参考文献

- [1]章光新,武瑶,吴燕锋,等.湿地生态水文学研究综述[J].水科学进展,2018,29(5):737-749. [Zhang G X, Wu Y, Wu Y F, et al. A review of wetland ecohydrology research. *Advances in Water Science*, 2018, 29(5): 737-749.]
- [2]Ajaero C, Peru K M, Simair M, et al. Fate and behavior of oil sands naphthenic acids in a pilot-scale treatment wetland as characterized by negative-ion electrospray ionization Orbitrap mass spectrometry[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 631/632: 829-839.
- [3]Liu Y, Wei L, Yu H, et al. Negative impacts of nanoplastics on the purification function of submerged plants in constructed wetlands: responses of oxidative stress and metabolic processes[J]. *Water Research*, 2022, 227: 119339.
- [4]Xu Z, Zhao Y, Xu Z, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi enhanced the drinking water treatment residue-based vertical flow constructed wetlands on the purification of arsenic-containing wastewater[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 465: 133241.
- [5]Zhang J, Wang M, Ren K, et al. The relationship between mountain wetland health and water quality: a case study of the upper Hanjiang River Basin, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 346: 118998.
- [6]Ahmed M B, J L Zhou, N Huu Hao, et al. Progress in the biological and chemical treatment technologies for emerging contaminant removal from wastewater: a critical review[J]. *Journal of Hazardous Materials*. 2017, 323: 274-298.
- [7]Chen J, Guo F, Wu F, et al. Costs and benefits of constructed wetlands for meeting new water quality standards from China's wastewater treatment plants[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 199: 107248.
- [8]Mitsch W J, Zhang L, Anderson C J, et al. Creating riverine wetlands: Ecological succession, nutrient retention, and pulsing effects[J]. *Ecological Engineering*, 2005, 25(5): 510-527.
- [9]于鲁冀,罗宗镔,汤鹏,等.不同生活型水生植物组合对碳氮磷微污染水体净化的研究[J].环境污染与防治,2023,45(7):917-922. [Yu L J, Luo Z B, Tang P, et al. Study on the purification of carbon, nitrogen and phosphorus micro-polluted water by different combinations of living aquatic plants. *Environmental Pollution & Control*, 2023, 45(7):

- 917-922.]
- [10]刘宁, 刘洋, 续京平, 等. 丛枝菌根真菌对人工湿地植物生长及水质净化的影响研究[J]. 生态环境学报, 2022, 31(7): 1434-1441. [Liu N, Liu Y, Xu J P, et al. Study on the effect of tufted mycorrhizal fungi on plant growth and water purification in artificial wetlands. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(7): 1434-1441.]
- [11]Ramírez-Viga T K, Aguilar R, Castillo-Argüero S, et al. Wetland plant species improve performance when inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi: a meta-analysis of experimental pot studies[J]. *Mycorrhiza*, 2018, 28(5/6): 477-493.
- [12]罗元, 王钧. 中国沿海三大城市群湿地时空演变及其驱动因素对比研究[J]. 湿地科学, 2024, 22(5): 617-629. [Luo Y, Wang J. Comparative study of spatial and temporal evolution of wetlands and their drivers in three major coastal urban agglomerations in China. *Wetland science*, 2024, 22(5): 617-629.]
- [13]岳恩馨, 刘意, 李相虎, 等. 鄱阳湖洪泛系统水文连通性演变特征及对湿地植被生长的影响[J]. 生态学报, 2025, 45(4): 1938-1949. [Yue N X, Liu Y, Li X H, et al. Evolutionary characteristics of hydrological connectivity in the floodplain system of Poyang Lake and its impact on the growth of wetland vegetation. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(4): 1938-1949.]
- [14]Day J W, Conner W H, Delaune R D, et al. A review of 50 years of study of hydrology, wetland dynamics, aquatic metabolism, water quality and trophic status, and nutrient biogeochemistry in the Barataria Basin, Mississippi Delta-system functioning, human impacts and restoration approaches[J]. *Water*, 2021, 13(5): 1-31.
- [15]Renaud F G, Syvitski J P M, Sebesvari Z, et al. Tipping from the Holocene to the Anthropocene: how threatened are major world deltas?[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(6): 644-654.
- [16]Li D, Chu Z, Li P, et al. Impacts of landscape spatial configuration of integrated multi-pond constructed wetlands in a basin on the treatment of non-point source pollution[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 383: 135-389.
- [17]Henzler A F, Greskowiak J, Massmann G. Modeling the fate of organic micropollutants during river bank filtration (Berlin, Germany)[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2014, 156(1): 78-92.
- [18]谭志强, 李云良, 张奇, 等. 湖泊湿地水文过程研究进展[J]. 湖泊科学, 2022, 34(1): 18-37. [Tan Z Q, Li Y L, Zhang Q, et al. Progress in the study of hydrological processes in lake wetlands. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(1): 18-37.]
- [19]Wang H, Xu J, Sheng L. Preparation of straw biochar and application of constructed wetland in China: a review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 273: 123131.
- [20]Zhang W, Chen L, Xu Y, et al. Amphibian (*Rana nigromaculata*) exposed to cyproconazole: changes in growth index, behavioral endpoints, antioxidant biomarkers, thyroid and gonad development[J]. *Aquatic Toxicology*, 2019, 208: 62-70.
- [21]赵东源, 张生, 赵胜男, 等. 人工湿地基质组合去除氨氮方案筛选及影响因素的动力学分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(4): 121-126. [Zhao D Y, Zhang S, Zhao S N, et al. Screening of artificial wetland substrate combination program for ammonia nitrogen removal and kinetic analysis of influencing factors. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(4): 121-126.]
- [22]Lu S, Zhang X, Wang J, et al. Impacts of different media on constructed wetlands for rural household sewage treatment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 127(127): 325-330.
- [23]赵德华, 吕丽萍, 刘哲, 等. 湿地植物供碳功能与优化[J]. 生态学报, 2018, 38(16): 5961-5969. [Zhao D H, Lu L P, Liu Z, et al. Carbon supply function and optimization of wetland plants. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(16): 5961-5969.]
- [24]夏星辰, 孙志高, 胡星云, 等. 氮负荷增强对闽江河口湿地植物-土壤系统硫分布及其转运特征的影响[J]. 环境科学学报, 2023, 43(6): 483-493. [Xia X C, Sun Z G, Hu X Y, et al. Effects of enhanced nitrogen loading on sulfur distribution in the plant-soil system and its transport characteristics in the wetlands of the Minjiang River estuary. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(6): 483-493.]
- [25]Feng L, He S, Yu H, et al. A novel plant-girdling study in constructed wetland microcosms: Insight into the role of plants in oxygen and greenhouse gas transport[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 431: 133911.
- [26]赖巧晖, 张浩, 刘治鹏. 不同植物配置下人工湿地微生物群落特征及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 89-94, 99. [Lai Q H, Zhang H, Liu Z P. Characteristics of microbial communities in artificial wetlands under different plant configurations and their influencing factors. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(5): 89-94, 99.]
- [27]Wang Y, Bai J, Zhang L, et al. Advances in studies on the plant rhizosphere microorganisms in wetlands: a visualization analysis based on CiteSpace[J]. *Chemosphere*, 2023, 317: 137860.
- [28]Li X, Zhang M, Liu F, et al. Seasonality distribution of the abundance and activity of nitrification and denitrification microorganisms in sediments of surface flow constructed wetlands planted with *Myriophyllum elatinooides* during swine wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 248: 89-97.
- [29]李金业, 陈庆锋, 李青, 等. 黄河三角洲滨海湿地微生物多样性及其驱动因子[J]. 生态学报, 2021, 41(15): 6103-6114. [Li J Y, Chen Q F, Li Q, et al. Microbial diversity and its drivers in the coastal wetlands of the Yellow River Delta. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(15): 6103-6114.]
- [30]Barton M B, Goeke J A, Dorn N J, et al. Evaluation of the impact of aquatic-animal excretion on nutrient recycling and retention in stormwater treatment wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2023, 197: 107104.
- [31]龚海峰, 白雪原, 陈朋龙, 等. 基于水生动物评价持续高余氯尾水排放对湿地水体的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(20): 8516-8531. [Gong H F, Bai X Y, Chen P L, et al. Aquatic animal-based evaluation of the impacts of sustained high residual chlorine tailwater discharges on wetland waters. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(20): 8516-8531.]

- [32] 商书芹, 贾丽, 王帅帅, 等. 济南济西湿地公园浮游动物功能类群及其对环境因子的响应[J]. 水生态学杂志, 2023, 44(6): 113-121. [Shang S Q, Jia L, Wang S S, et al. Functional zooplankton taxa and their responses to environmental factors in Jinan Jixi Wetland Park, Jinan, China. *Journal of Hydroecology*, 2023, 44(6): 113-121.]
- [33] 章光新, 尹雄锐, 冯夏清. 湿地水文研究的若干热点问题[J]. 湿地科学, 2008, 6(2): 105-115. [Zhang G X, Yin X R, Feng X Q. Some hot issues in wetland hydrology research. *Wetland science*, 2008, 6(2): 105-115.]
- [34] 董李勤, 章光新. 全球气候变化对湿地生态水文的影响研究综述[J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 429-436. [Dong L Q, Zhang G X. A review of research on the impacts of global climate change on wetland ecohydrology. *Advances in Water Science*, 2011, 22(3): 429-436.]
- [35] 吴燕锋, 章光新. 流域湿地水文调蓄功能研究综述[J]. 水科学进展, 2021, 32(3): 458-469. [Wu Y F, Zhang G X. A review of hydrologic storage functions in watershed wetlands. *Advances in Water Science*, 2021, 32(3): 458-469.]
- [36] Zhang Y M, Naafs BDA, Huang X Y, et al. Variations in wetland hydrology drive rapid changes in the microbial community, carbon metabolic activity, and greenhouse gas fluxes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2022, 317: 269-285.
- [37] 朱新胜, 林琳, 杨永峰, 等. 我国国家重要湿地建设现状及分布特征[J]. 环境保护科学, 2023, 2(1): 1-9. [Zhu X S, Lin L, Yang Y F, et al. Current situation and distribution characteristics of construction of nationally important wetlands in China. *Environmental Protection Science*, 2023, 2(1): 1-9.]
- [38] Cosentino B J, Schooley R L, Phillips C A. Wetland hydrology, area, and isolation influence occupancy and spatial turnover of the painted turtle, *Chrysemys picta*[J]. *Landscape Ecology*, 2010, 25(10): 1589-1600.
- [39] Zhu X, Jiao L, Wu X, et al. Ecosystem health assessment and comparison of natural and constructed wetlands in the arid zone of northwest China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110576.
- [40] Kundu S, Kundu B, Rana N K, et al. Wetland degradation and its impacts on livelihoods and sustainable development goals: an overview[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2024, 48: 419-434.
- [41] Idris N N, Chua L H C, Mustafa Z, et al. A review study on the association between hydraulic performance and treatment effectiveness in free surface flow constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2024, 203: 107258.
- [42] Stefanakis A I, Tshirintzis V A. Effects of loading, resting period, temperature, porous media, vegetation and aeration on performance of pilot-scale vertical flow constructed wetlands[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 181: 416-430.
- [43] 乔厦, 郑学良. 表面流人工湿地对城市径流水质的净化研究[J]. 水土保持研究, 2019(3): 9. [Qiao X, Zheng X L. Study on the purification of urban runoff water quality by surface flow artificial wetland. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019(3): 353-361.]
- [44] Guan M Y, Zeng L, Jiang W Q, et al. Effects of wind on transient dispersion of active particles in a free-surface wetland flow[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2022, 115: 106766.
- [45] 廖雪珂, 严晗璐, 王智源, 等. 低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5509-5517. [Liao X K, Yan H L, Wang Z Y, et al. Pilot test on deep treatment of tailwater in horizontal and vertical submerged artificial wetland during low temperature season. *Environmental Science*, 2020, 41(12): 5509-5517.]
- [46] 肖海文, 刘馨瞳, 翟俊, 等. 人工湿地类型的选择及案例分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(22): 11-17. [Xiao H W, Liu X T, Zhai J, et al. Selection of artificial wetland types and case studies. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(22): 11-17.]
- [47] Li P, Zheng T, Li L, et al. Simulating and predicting the performance of a horizontal subsurface flow constructed wetland using a fully connected neural network[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 380: 134959.
- [48] 郝晓地, 孟祥挺, 胡沅胜. 人工湿地温室气体释放、影响及其控制[J]. 中国给水排水, 2016, 32(22): 39-47. [Hao X D, Meng X T, Hu Y S. Greenhouse gas release from artificial wetlands, impacts and their control. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(22): 39-47.]
- [49] 陆岚琳, 刘东升, 廖雪珂, 等. 垂直潜流人工湿地低温净化效果及其与微生物作用关系[J]. 环境科学学报, 2021, 41(10): 4039-4048. [Wei F L, Liu D S, Liao X K, et al. Effect of low-temperature purification in vertical submersible artificial wetland and its relationship with the role of microorganisms. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(10): 4039-4048.]
- [50] Chu P P, Han Y C, Easa S M, et al. Analysis of pollutant removal effect using innovative ridge-shaped constructed wetland[J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2020, 18(2): 107-113.
- [51] Nsenga Kumwimba M, Batool A, Li X. How to enhance the purification performance of traditional floating treatment wetlands (FTWs) at low temperatures: strengthening strategies[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 766: 142608.
- [52] 崔俊, 王莉霞, 欧阳, 等. 湿地生态系统磷迁移转化机制研究进展[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(2): 105-112. [Cui H, Wang L X, Ou Y, et al. Advances in phosphorus transport and transformation mechanisms in wetland ecosystems. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 41(2): 105-112.]
- [53] Chang H, Makido Y, Foster E. Effects of land use change, wetland fragmentation, and best management practices on total suspended solids concentrations in an urbanizing Oregon watershed, USA[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 282: 111962.
- [54] Liu X H, Guo X C, Li Y, et al. A review on removing antibiotics and antibiotic resistance genes from wastewater by constructed wetlands: performance and microbial response[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 254.
- [55] 赵德华, 吕丽萍, 刘哲, 等. 湿地植物供碳功能与优化[J]. 生态学报, 2018, 38(16): 5961-5969. [Zhao D H, Lv L P, Liu Z, et al. The carbon

- source function of constructed wetland macrophytes and its improvement strategy. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(16): 5961-5969.]
- [56]李莹, 张洲, 杨高明, 等. 湿地植物根系泌氧能力和根表铁膜与根系吸收重金属的关系[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(8): 1657-1666. [Li Y, Zhang Z, Yang G M, et al. The relationship between the radial oxygen loss and the iron plaque on root surfaces to wetland plants absorb heavy metals. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(8): 1657-1666.]
- [57]姚鑫, 杨桂山. 自然湿地水质净化研究进展[J]. *地理科学进展*, 2009, 28(5): 825-832. [Yao X, Yang G S. Progress of water purification research in natural wetlands. *Progress in Geosciences*, 2009, 28(5): 825-832.]
- [58]Venditti S, Brunhoferova H, Hansen J. Behaviour of 27 selected emerging contaminants in vertical flow constructed wetlands as post-treatment for municipal wastewater[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 819: 153234.
- [59]韦晓竹, 顾平, 张光辉. 水中新型污染物及去除研究进展[J]. *工业水处理*, 2014, 34(5): 8-12. [Wei X Z, Gu P, Zhang G H. Advances in the study of novel contaminants and their removal from water. *Industrial Water Treatment*, 2014, 34(5): 8-12.]
- [60]Chen J, Deng W J, Liu Y S, et al. Fate and removal of antibiotics and antibiotic resistance genes in hybrid constructed wetlands[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 249: 894-903.
- [61]姚亮, 张峰, 贲睿, 等. 多层介质水平潜流人工湿地对微塑料的去除研究[J]. *环境污染与防治*, 2023, 45(2): 199-205. [Yao L, Zhang F, Ben R, et al. Study on the removal of microplastics in a horizontal submerged artificial wetland with multilayer media. *Environmental Pollution & Control*, 2023, 45(2): 199-205.]
- [62]Mofijur M, Hasan M M, Ahmed S F, et al. Advances in identifying and managing emerging contaminants in aquatic ecosystems: analytical approaches, toxicity assessment, transformation pathways, environmental fate, and remediation strategies[J]. *Environmental Pollution*, 2024, 341: 122889.
- [63]Brassard P, Waddington J M, Hill A R, et al. Modelling groundwater-surface water mixing in a headwater wetland: implications for hydrograph separation[J]. *Hydrol Process*, 2000, 14(15): 2697-2710.
- [64]Wang N, Li J M, Xu Z H. Public preference for the ecological restoration of coastal wetlands in Jiaozhou Bay in China based on a choice experiment[J]. *Marine Policy*, 2021, 128(1): 104487.
- [65]王效科, 赵露, 任玉芬, 等. 城市生态学自然模拟实验研究进展[J]. *生态学报*, 2023, 43(5): 1763-1774. [Wang X K, Zhao L, Ren Y F, et al. Progress of experimental research on nature simulation in urban ecology. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(5): 1763-1774.]
- [66]Guo J, Hu Y, Qian Y, et al. Review analysis and challenges of sludge-conditioner interactions: promoting the harmonious integration of experiments and simulations[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 496: 153983.
- [67]Wu J, Gao T, Guo H, et al. Application of molecular dynamics simulation for exploring the roles of plant biomolecules in promoting environmental health[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 869: 161871.
- [68]吴燕峰, 章光新. 湿地生态水文模型研究综述[J]. *生态学报*, 2018, 38(7): 2588-2598. [Wu Y F, Zhang G X. A review of wetland ecohydrological modeling studies. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(7): 2588-2598.]
- [69]Twomey A J, Nunez K, Carr J A, et al. Planning hydrological restoration of coastal wetlands: key model considerations and solutions[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 915: 169881.
- [70]Qu Y, Zheng Y, Gong P, et al. Estimation of wetland biodiversity based on the hydrological patterns and connectivity and its potential application in change detection and monitoring: a case study of the Sanjiang Plain, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 805: 150291.
- [71]汪晨辉, 张汇明. 含滩地交汇河道水动力特性与掺混特征数值模拟[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(2): 89-98. [Wang C H, Zhang H M. Numerical simulation of hydrodynamic properties and mixing characteristics of river channel with beach confluence. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(2): 89-98.]
- [72]Rostoker G. Implications of the hydrodynamic analogue for the solar-terrestrial interaction and the mapping of high latitude convection pattern into the magnetotail[J]. *Geophysical Research Letters*, 1984, 11(3): 251-254.
- [73]Casulli V. Semi-implicit finite difference methods for the two-dimensional shallow water equations[J]. *Journal of Computational Physics*, 1990, 86(1): 56-74.
- [74]李红艳, 章光新, 李绪谦, 等. 扎龙湿地水质净化机理分析[J]. *地理科学*, 2012, 32(1): 87-93. [Li H Y, Zhang G X, Li X Q, et al. Analysis of water purification mechanism in Zalong wetland. *Geographical Science*, 2012, 32(1): 87-93.]
- [75]Ma C, Bai D, Wu C, et al. The uptake, transportation, and chemical speciation of Sb(III) and Sb(V) by wetland plants *Arundinoideae* (*Phragmites australis*) and *Potamogetonaceae* (*Potamogeton crispus*)[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 918: 170606.
- [76]植可翔, 关欣, 李仁山, 等. 杉木林下植物氮磷重吸收对微尺度土壤养分异质性的响应[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(5): 1187-1193. [Zhi K X, Guan X, Li R S, et al. Response of nitrogen and phosphorus reabsorption by fir understory plants to microscale soil nutrient heterogeneity. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(5): 1187-1193.]
- [77]张熙灵, 王立新, 刘华民, 等. 芦苇、香蒲和蘆草 3 种挺水植物的养分吸收动力学[J]. *生态学报*, 2014, 34(9): 2238-2245. [Zhang X L, Wang L X, Liu H M, et al. Nutrient uptake kinetics of three water-supporting plants, reed, balsam and cassis. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(9): 2238-2245.]
- [78]谢静, 吕锡武, 李洁. 6 种湿地植物吸收污水中氮和磷的动力学[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(8): 4067-4072. [Xie J, Lu X W, Li J. Kinetics of nitrogen and phosphorus uptake from sewage by six wetland plants. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(8): 4067-4072.]
- [79]Yang S, Wan R, Yang G, et al. A novel framework to assess the

- hydrological connectivity of lake wetlands in plain river networks with dense hydraulic facilities: comparing natural and disturbed states over a century[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 630: 130787.
- [80] 郗敏, 刘红玉, 吕宪国. 流域湿地水质净化功能研究进展[J]. *水科学进展*, 2006(4): 566-573. [Xi M, Liu H Y, Lu X G. Progress of research on water purification function of watershed wetlands. *Advances in Water Science*, 2006(4): 566-573.]
- [81] 阮家进, 刘平, 刘晓南, 等. 三种类型人工湿地在非点源污染中的治理效果[J]. *环境工程*, 2015, 33(9): 16-19, 24. [Ruan J J, Liu P, Liu X N, et al. Effectiveness of three types of artificial wetlands in the management of nonpoint source pollution. *Environmental Engineering*, 2015, 33(9): 16-19, 24.]

Research progress on water purification function of wetland and its quantitative evaluation

Zhao Ziyue^{1,2}, Liu Xuemei¹, Zhang Guangxin¹, Wu Yanfeng¹, Dai Changlei², Xia Chunlong³

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, Jilin, P.R.China;

2. School of Hydraulic and Electric Power, Heilongjiang University, Harbin 150080, Heilongjiang, P.R.China; 3. Fushun Hydrographic Bureau, Liaoning Province, Fushun 113005, Liaoning, P.R.China)

Abstract: The quantitative assessment of wetland water purification functions is important for wetland restoration and water environment management. Based on the literature review, the purification mechanisms of wetlands for suspended solids, organic matter and nutrients have been summarized. The types, advantages and disadvantages, and limiting factors of constructed wetlands were analyzed. The functions of constructed wetlands in purifying new pollutants and reducing greenhouse gas emissions need to be further enhanced. In addition, the quantitative assessment methods for the water purification function of natural wetlands have been summarized, and the driving factors and limiting factors of the hydrological, hydrodynamic and vegetation modules in the numerical simulation have been sorted out. Additionally, a notable contribution of this review is its focus on the advantages of assessing water purification functions from the perspective of wetland complexes within a watershed. This approach provides valuable insights for establishing appropriate pollutant concentration control thresholds, which are particularly relevant in the context of wetland ecological restoration projects, comprehensive water quality improvement efforts across entire watersheds, and the planning and implementation of water transfer projects for lake wetlands. Finally, the review proposes future research directions based on an analysis of current research trends and identified gaps in the field of wetland water purification studies. It suggests a strategic shift in focus from single wetland research to a broader watershed scale perspective that considers wetland complexes. The review also advocates for increasing the density of data monitoring in key water quality areas, establishing long-term and large-scale ecological databases, and developing integrated models of large-scale wetland complexes. These initiatives are conducive to enhancing the ecological construction level of the entire river watershed in China and the water purification capacity of wetlands.

Keywords: constructed wetlands; natural wetlands; water purification; quantitative assessment; watershed water management