

· 专题:双清论坛“湿地保护和修复的基础理论及关键技术问题” ·

# 我国人工湿地的研究与应用进展及未来发展建议<sup>\*</sup>

祝 惠<sup>\*\*</sup> 阎百兴 王鑫壹

中国科学院 东北地理与农业生态研究所,长春 130102

**[摘 要]** 作为水环境保护体系的重要角色,人工湿地在我国发展迅速,被广泛应用于多种类型污染水体治理。本文系统总结了人工湿地研究的发展现状和存在的主要问题,梳理了近年来国内外在人工湿地方向的研究进展、取得的主要成果及发展趋势。当前的研究热点和挑战聚焦在复杂环境下净化能力提升、水—气污染协同调控、生态服务价值提升,以及运行与管理优化等方面。结合国际学术前沿与热点,以及国家生态文明建设和国际履约能力提升等重大战略需求,提出未来应聚焦人工湿地植物与微生物功能群对环境胁迫的响应机制、关键元素生物地球化学过程、多种生态服务功能提升与价值估算等关键科学与技术问题,强化多学科交叉,利用多种手段开展系统性研究,为我国人工湿地领域发展提供坚实的科学和实践依据。

**[关键词]** 人工湿地;面源污染;碳减排;生态服务价值;可持续发展

## 1 人工湿地生态净化技术研究的重要意义

水环境污染是目前全球面临的重要生态环境问题,也是制约我国经济社会可持续发展的重要因素。尽管自 2006 年以来,在全国生态环境保护和修复高强度投入下,地表水环境质量持续改善,但水环境质量提升依然存在区域和流域之间不平衡的现象,区域性、结构性污染问题依然突出。第二次全国污染源普查显示,农业源(种植业、畜禽养殖业、水产养殖业)排放的 COD、氨氮、TN、TP 占比就分别达到 49.7%、22.4%、46.5%和 67.2%,农村生活污水排放的 COD、氨氮、TN、TP 占比分别达到 23.3%、25.4%、14.7%和 11.7%。农业面源和农村生活污水的排放已成为制约我国地表水环境质量改善、影响人民生活福祉的重要因素。因此,有效控制农业面源污染和农村生活污水对于全面改善地表水环境质量具有重要意义。

传统污水处理工艺是我国大部分城市污水治理的主要技术,受限于农村地区经济发展水平、污水收



**祝惠** 中国科学院东北地理与农业生态研究所研究员,吉林省拔尖创新人才、中国科学院青年创新促进会优秀会员。现任中国科学院湿地生态与环境重点实验室常务副主任,兼任中国科学院青年创新促进会副理事长、中国科学院青年创新促进会地学分会会长、青年地学论坛副理事长及中国生态学会青年工作委员会副

主任。主要从事面源污染与防治、湿地生态功能等研究。以第一/通讯作者发表学术论文 70 余篇,以第一完成人获吉林省自然科学奖二等奖 1 项。受邀担任 *Wetlands* 副主编、*The Innovation* 青年编委、《湿地科学》和《应用生态学报》编委。

集、污水处理场运行成本、管理和技术人员短缺等方面的不足,其并不适合在村镇地区推广应用。因此,开发高效、简便、低耗的农村地区污水处理技术已迫在眉睫。人工湿地<sup>①</sup>是基于自然湿地生态系统中物质迁移转化的原理,由人工建造和运行的生态型污水处理技术,具有高效、低耗、抗水力冲击能力强等优势,是控制面源污染的一种高效率“绿色”技术,尤其在广大农村地区具有广阔的应用和发展前景。此外,人工湿地作为水环境保护体系中的重要角色,目

收稿日期:2022-02-27;修回日期:2022-06-13

<sup>\*</sup> 本文根据第 298 期“双清论坛”讨论的内容整理。

<sup>\*\*</sup> 通信作者,Email:zhuhui@iga.ac.cn

本文受到国家自然科学基金项目(U21A2037)、中国科学院创新交叉团队项目(JCTD-2020-14)和中国科学院青年创新促进会项目(Y2021068)的资助。

<sup>①</sup> 本文特指以水质净化为目的、人为建造和控制运行的人工湿地,不包含稻田、坑塘、沟渠等广义的人工湿地类型。

前也被广泛应用于生活污水、污水处理厂尾水以及各类工业废水等污水的净化处理。联合国《2018年世界水资源开发报告》强调,应将基于自然的解决方案(Nature-Based Solutions, NBS)作为改善水质的重要手段,应大力发展 NBS 并使其成为实现《2030年可持续发展议程》的关键。作为一种典型的 NBS,人工湿地在全球范围内的运行数量和污水处理规模持续快速增加,已成为重要的水污染处理技术和重要的湿地生态系统类型。在水质净化的同时,湿地通过吸收 CO<sub>2</sub>、释放 O<sub>2</sub> 调节局部区域微气候,有效调控大气组分;湿地生态系统具有复杂多样的植物群落,为鸟类、两栖类动物等提供生存、繁衍、迁徙的空间,有利于保护生物多样性。此外,人工湿地还能提供涵养水源、蓄洪防旱等多种生态服务功能,有效维持生态平衡,具有显著的环境、生态和经济效益。

中国共产党第十八次全国代表大会以来,生态文明建设和生态环境保护被提升到前所未有的战略高度。加强人工湿地技术研发和推广应用,将有效改善水环境质量,提升居民生存环境质量,直接服务于国家经济、社会、生态环境的可持续协调发展,服务于国家生态文明建设的重大战略需求。与此同时,在我国主动承担应对全球气候变化、推动全球可持续发展、保护全球生物多样性等责任大国担当的时代背景下,水污染处理领域也迎来新的挑战。在关注人工湿地水质净化功能的同时,系统研究其关键生态过程、碳源汇转化关系、多种生态服务功能等必然是未来的发展趋势和热点。在开展相关技术研发,服务国家重大战略需求的同时,揭示其内在的关键科学问题具有重要的理论价值,有望推动中国学者在该研究领域做出重要的学术贡献,占据国际学术制高点。

## 2 人工湿地研究和应用进展

### 2.1 人工湿地发展现状

人工湿地研究始于 20 世纪 50 年代,1953 年德国科学家 Seidel<sup>[1]</sup>发现芦苇能够去除大量有机物和无机物,认识到湿地具有净化水质的功能,并随后构建了栽种挺水植物的并联净水池,形成人工湿地的雏形。20 世纪 70 年代,Kickuth 博士<sup>[2]</sup>提出了“根区法”(RZM)理论,极大促进了人工湿地的研究与应用,标志着人工湿地作为一种新型污水生态处理技术正式进入水污染控制领域。20 世纪 80 年代后期,人工湿地逐步发展成为以人工建造为主、以不同

粒径的砂石为基质的处理系统,并由试验阶段进入大规模工程应用阶段,在欧洲、美国、加拿大、澳大利亚、日本等国得到广泛应用。此后,通过对各国人工湿地污水处理效果的调查和经验总结,科学家提出相关机理、设计规范和参考数据,推进了该技术的发展和可靠运行。至 20 世纪 90 年代后期,人工湿地的应用拓展到面源污染、工业废水等多种污染水体的治理中,且人工湿地的类型向多样化和复合型方向发展,运行方式、植物与基质组成与结构等都出现了新的变化。

人工湿地污水处理技术在我国的发展和应用起步较晚,直到 20 世纪 90 年代初期,才建成第一座人工湿地<sup>[2]</sup>。但近三十年来我国在相关技术与理论方面取得了大量科研成果,在人工湿地的应用领域与建设规模上发展迅速。截至 2006 年,全国拥有约 200 个人工湿地<sup>[3]</sup>,到 2011 年增加至 425 个<sup>[4]</sup>。作者团队通过文献、网站、媒体报道、相关重大项目宣传材料等多途径调查和统计,截至 2020 年底,全国人工湿地数量已达到 1171 个。对比前期文献数据,在最近 10 年人工湿地以每年新增 75 个的速度增长。统计发现,我国人工湿地分布广泛,全国各省(自治区、直辖市)均有分布,其中在经济发展水平较高的山东、广东、福建、浙江等数量居多,而边远省份西藏、甘肃、新疆、内蒙古等数量相对较少;整体上呈东南多、西北少的分布特征。在处理的污水类型上,包括受污染河流和湖泊、农村生活污水、污水处理厂尾水、城区地表径流、工业废水、养殖废水、农田排水等多种类型。在人工湿地植物的选择上,北方地区以芦苇、香蒲、菖蒲、千屈菜等为主,而南方地区植物种类更加丰富,常见物种包括美人蕉、风车草、再力花、芦苇、纸莎草、菖蒲、梭鱼草、狐尾藻等。

### 2.2 人工湿地领域当前的研究热点与挑战

#### 2.2.1 人工湿地在复杂环境下的净化能力提升

目前人工湿地已应用于多种类型污染水体的处理,涉及的目标污染物种类繁多,运行环境趋于多样化。但与传统污水处理技术比较,人工湿地普遍存在占地面积较大的缺陷,在有限的土地资源约束下,提升人工湿地的净化效率是当前以及未来关注的热点。特别是在北方低温、内陆和滨海盐渍化等胁迫环境下,人工湿地运行效率下降,给人工湿地的推广应用带来巨大挑战。

当水温低于 10 °C 时,人工湿地植物与微生物的活性和功能将明显受阻,人工湿地对有机物和含氮污染物的处理效率明显下降<sup>[5,6]</sup>,低温时还可能出

现湿地基质层顶端冻结,加剧湿地床体的缺氧状况,降低有机物的矿化分解和硝化反应。低温是限制湿地净化能力的重要因素,是人工湿地研究中不可回避的难点之一。当前除了物理保温措施以外,主要通过筛选耐低温植物,并基于不同植物生命周期和生态位互补性,以及植物根际微生物种类丰富度优势理论,将植物混种以提升湿地植物功能<sup>[7]</sup>;在微生物方面,通过补充缓释碳源<sup>[8]</sup>、曝气充氧<sup>[9]</sup>,或接种耐低温微生物菌剂<sup>[10]</sup>等途径强化湿地微生物功能;同时,也在湿地结构和运行参数优化、高吸附性能基质添加等方面开展了探索<sup>[11, 12]</sup>。整体而言,现有措施可在一定程度上提高人工湿地的净化能力,但出水水质冬夏季节相差仍然较大,而且大部分措施经济成本偏高,寒区人工湿地低温运行关键过程和强化净水技术的研发还需进一步加强。

在盐碱环境下,无机盐通过改变渗透压破坏细胞结构,抑制植物和微生物的活性与功能,从而限制人工湿地净化能力。国内外学者针对耐盐碱湿地的筛选及其在人工湿地中的应用开展了一些研究工作<sup>[13-15]</sup>,但仅有少数研究关注了湿地植物种子萌发—幼苗生长—成年植株发育—扩繁全生育期植物生理生态指标对不同盐碱胁迫的响应,只有通过不同植物耐盐、耐碱、耐污、降污能力的全面评价,才能为人工湿地建设提供精准的植被选择方案<sup>[16, 17]</sup>。在微生物方面,通过接种耐盐菌以强化人工湿地的耐盐性能力和净化功能是当前的研究热点。例如, Wang 等<sup>[18]</sup>筛选出一株耐盐脱氮菌 *Alishewanella* sp. F2, 将其接种至人工湿地中,不仅有效提高了湿地微生物的脱氮功能,还促进了湿地植物的生长和氮富集能力。此外,接种外源功能菌净化效果的持久性也是备受关注的问题, Wang 等人<sup>[19]</sup>通过微生物固定化技术,实现了外源功能菌的快速定植,保障了湿地长期的运行效率。但目前关于外源功能菌与土著微生物、湿地植物之间的交互作用研究还相对薄弱,不利于深入理解外源微生物介导下的湿地植物与微生物功能群响应机制。

### 2.2.2 人工湿地水—气污染协同调控

人工湿地在去除有机物和氮磷营养盐的过程中,有机物的氧化、微生物的氧化、动植物呼吸等过程都将释放出  $\text{CO}_2$ , 有机物的厌氧分解会产生  $\text{CH}_4$ , 硝化—反硝化过程会产生  $\text{N}_2\text{O}$ , 因此人工湿地也是重要的温室气体排放源。尽管人工湿地温室气体排放量受多种因素的影响,但普遍认为单位面积

人工湿地的温室气体排放量是天然湿地的 2~10 倍<sup>[20]</sup>。大气中温室气体浓度增加引起的气候变化不仅是人类生存和发展面临的重要环境问题,也是当前国际政治、经济、外交谈判中的热点问题。此外,氨挥发是人工湿地水体中氨氮去除的重要途径之一,特别是当污水中氨氮浓度较高时(如养殖废水),氨挥发对氨氮去除的贡献率可高达 44% 以上<sup>[21]</sup>。大气中的氨是雾霾形成的重要前体物质,可以与酸性气体反应形成硫酸铵、硝酸铵等铵盐气溶胶,是大气颗粒物的主要成分,严重影响大气能见度和人体健康。因此,人工湿地在发挥其水质净化功能的同时,存在将“水污染”转为“大气污染”的风险,在很大程度上削减了人工湿地的综合生态环境效益。鉴于不断增加的人工湿地面积及其较高的单位面积温室气体和氨气排放量,迫切需要开展人工湿地有害气体排放关键过程与机制、减排措施等方面的研究工作。

目前针对人工湿地温室气体和氨排放的研究,均集中在设计和运行参数对气体排放的定量影响方面。例如, Chen 等<sup>[22, 23]</sup>揭示了人工湿地结构、进水 C/N、植物种类等因素对温室气体排放的影响;也有学者针对湿地类型、植物种类与多样性、季节和水质等因素对湿地氨排放的影响开展了研究<sup>[24-26]</sup>。但现有研究主要是基于中宇宙模拟实验进行,缺乏野外实际监测数据,难以科学评估人工湿地大气污染的潜在风险。在人工湿地温室气体和氨减排技术方面,目前主要是通过优化湿地基质材料来实现。Chen 等人<sup>[27]</sup>研究发现添加生物炭的人工湿地与传统砾石床人工湿地相比较,对  $\text{CO}_2$  排放不产生影响,但显著促进了  $\text{CH}_4$  的排放,并显著减少了  $\text{N}_2\text{O}$  排放,最终使潜流人工湿地的 GWP 降低了 57.3%。Du 等人<sup>[28]</sup>发现,与石英砂基质相比较,斜发沸石基质能有效降低人工湿地氨挥发。微生物介导下的碳氮元素生物化学循环过程极其复杂,在水—土—气—生耦合过程驱动下,对温室气体或氨排放的调控将直接影响人工湿地的水质净化功能,反之亦然。但目前针对两类气体排放的关键过程与驱动机制、减排策略等研究彼此脱节,更缺乏可同步实现人工湿地高效水质净化与两类气体协同减排的有效技术措施。

### 2.2.3 人工湿地生态系统服务功能提升

以往人工湿地建设的主要目标是考虑其环保功能,而较少考虑其他生态服务功能,如碳固定、生物

多样性维持、休闲旅游、景观美化、科普教育等。因此,在人工湿地设计和建设过程中更多关注的是水质净化效果的最大化,与自然湿地相比,其植物配置和景观结构单一,生物多样性低,湿地的多种生态功能并未得到发挥。目前,碳固定和生物多样性维持已成为备受全球关注的人工湿地的重要生态功能。

我国一直积极承担国际责任、履行国际公约,2020年就率先提出了“2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和”的“双碳”目标,并制定了一系列措施,将用最短的时间实现从碳达峰到碳中和的任务。作为重要的湿地生态系统类型,人工湿地在碳收支评估和碳汇定量认证方面的重要角色不容忽视。有学者认为人工湿地是重要的碳汇<sup>[29, 30]</sup>,也有学者研究发现人工湿地是重要的碳源<sup>[31]</sup>,这主要是因为湿地的碳排放与碳累积通常会受到监测点位盐度、水位、植物种类与生产力、监测时间等因素的强烈影响<sup>[32]</sup>。整体而言,目前关于人工湿地碳源汇的研究还相对薄弱。面向国家“双碳”目标,揭示人工湿地碳源—汇转化机制,开展不同地区、不同类型人工湿地碳源汇强度评估,研发碳增汇减排关键技术将是人工湿地领域未来一段时期内亟需重点关注并极具挑战的任务。

人工湿地将人工设施融入自然原生系统中,是一个复杂而又整体的生态系统,理论上可为生物提供栖息地和迁徙廊道,起到保护和促进区域生物多样性的作用<sup>[33]</sup>。Strand和Weisner<sup>[34]</sup>研究发现,瑞典人工湿地建设对鸟类和两栖类物种数量和种群的影响足以改变其国家生物多样性红色名录中的物种清单,鸟类丰富度在湿地建设运行13年后达到了相对稳定状态,繁殖鸟类物种数在湿地建设运行3.8年后即达到最大;Hsu等<sup>[35]</sup>发现人工湿地的面积、水体理化性质和污染物浓度等因素将影响鸟类、鱼类和大型底栖无脊椎动物的多样性和种群结构,通过优化设计可以提高人工湿地的生物多样性。此外,也有学者开展了人工湿地植物多样性与水质净化功能的关系<sup>[36]</sup>、引进底栖动物对湿地净化功能的促进效应<sup>[37]</sup>、水鸟栖息对人工湿地氮磷输入负荷和净化效能的影响<sup>[38]</sup>、人工湿地中不同物种之间的捕食关系等<sup>[39]</sup>,深化了对人工湿地生态功能的认识。但综合现有研究,对于以水质净化为目标建设的人工湿地生态系统生物多样性调查研究的实例还很有限,现有数据不足以科学评估人工湿地在维持生物

多样性中的作用;对于人工湿地中不同类群生物之间的食物链关系、水质对重要生物特别是珍稀鸟类的生存安全影响等方面研究十分薄弱;更缺乏兼顾水质净化功能及促进生物多样性的人工湿地优化设计研究,这些都是当前人工湿地领域需要重点关注的方向。

#### 2.2.4 人工湿地设计、运行维护与管理

由于人工湿地作为污水处理技术的发展时间较短,在其设计中依然存在较多问题。目前大量研究总结了湿地中基质和植物的选择原则,例如应充分考虑基质的孔隙率、比表面积和植物的根系泌氧能力、物质转化能力等,也有研究不断提出更具有利用价值的湿地植物种类。但在人工湿地实际设计和建设过程中,往往缺少足够的选择依据和针对性。此外,我国目前在湿地类型、负荷的选择和计算依据上还比较粗放,不同温度带和自然环境条件下的设计需求不同,仍需要总结出更为合理、细致的设计参数。人工湿地处理污水的成本低,但并不代表不需要运行维护。虽然人工湿地在世界范围内被广泛使用,但绝大多数人工湿地缺少及时、科学合理的维护。随着湿地的长期运行,湿地中植物的管理和维护、堵塞、死区等问题应引起研究学者和工程技术人员的高度重视。目前除少量具有较高经济价值的人工湿地植物被收割用于饲料、造纸、工艺品加工外,大部分人工湿地植物还缺乏资源化利用技术,堵塞防治和死区消除还缺乏有效的办法,这些都已成为目前人工湿地长期稳定运行的限制因素。

### 3 关键科学与技术问题

在系统梳理国内外人工湿地领域研究进展与发展现状的基础上,结合当前国家重大战略需求,提出了如下亟需解决的关键科学问题:(1)人工湿地植物与微生物功能群、周丛生物群落对不同污染物与负荷、不同胁迫环境(如低温、盐碱等)、以及不同强化措施(如接种外源微生物)的响应机制是什么?(2)主要生物地球化学元素(碳、氮、磷)在人工湿地水—土—气—生不同介质间迁移转化的微观过程与驱动机制是什么?(3)人工湿地生态系统的碳源汇转化机制与驱动因素是什么?(4)如何建立适宜于人工湿地的生态系统服务价值计算方法?以及如何合理估算我国现有人工湿地的生态系统服务功能?

在技术研发与应用层面,亟需攻克以下难题:(1)研发提升人工湿地在极端/胁迫环境条件下净



图 1 人工湿地未来发展思路与建议

化效能的关键技术,以拓展其应用范围;(2) 面向联合国可持续发展目标,研发可发挥多种生态服务功能的人工湿地系统;(3) 优化人工湿地运行管理模式,以实现人工湿地长期稳定可持续运行;(4) 运用现代化信息技术、数据模拟和智慧化调控等技术建设智慧湿地管理平台,从而提高人工湿地的智能化管理水平和湿地生态环境的保障能力。

#### 4 未来研究思路与发展建议

人工湿地建设是解决我国地表水环境污染问题的重要途径,同时,人工湿地也是重要的湿地生态系统类型。中国是《国际湿地公约》和《生物多样性保护公约》履约国,也是国际上应对气候变化的先行者。加强人工湿地生态系统关键过程与功能研究,提升其生态系统服务价值,对推动我国生态文明建设和提升国际履约能力具有重要的战略意义。但我国人工湿地学科发展仍与国际研究趋势和国家需求不匹配,未来应结合现实需求,逐步完善学科理论和技术体系(图 1)。聚焦关键科学与技术问题,将工程与材料科学、地球科学、生命科学、管理科学、信息科学等多学科交叉融合,在研究尺度上将微观模拟和野外监测相结合,在技术上将精密观测采样、高精度分析测试和定量模拟方法等相结合,以人工湿地结构—过程—功能—管理基础理论体系建立为目标,宏拓和重构人工湿地学科方向的内涵。同时,加大国家自然科学基金对人工湿地方向涉及的多学科交叉研究的资助力度,鼓励聚焦净化能力提升、元素生物地球化学循环、减碳降污、生物多样性维持等热点和难点问题开展“从 0 到 1”的原创性研

究;支持构建不同地区典型人工湿地的联网观测系统,搭建人工湿地野外观测与数据库平台,为我国人工湿地学科方向的发展提供坚实的科学和实践依据。

#### 参 考 文 献

- [1] Seidel K, Happel H, Graue G. Contributions to revitalisation of waters. Stiftung Limnologische Arbeitsgruppe, 1978.
- [2] 白晓慧, 王宝贞, 余敏, 等. 人工湿地污水处理技术及其发展应用. 哈尔滨建筑大学学报, 1999(6): 88—92.
- [3] Liu D, Ge Y, Chang J, et al. Constructed wetlands in China: recent developments and future challenges. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(5): 261—268.
- [4] Zhang T, Xu D, He F, et al. Application of constructed wetland for water pollution control in China during 1990—2010. *Ecological Engineering*, 2012, 47: 189—197.
- [5] Zhu H, Zhou QW, Yan BX, et al. Influence of vegetation type and temperature on the performance of constructed wetlands for nutrient removal. *Water Science and Technology*, 2018, 77(3—4): 829—837.
- [6] Picard CR, Fraser LH, Steer D. The interacting effects of temperature and plant community type on nutrient removal in wetland microcosms. *Bioresource Technology*, 2005, 96(9): 1039—1047.
- [7] Zhou QW, Zhu H, Bañuelos G, et al. Effects of vegetation and temperature on nutrient removal and microbiology in horizontal subsurface flow constructed wetlands for treatment of domestic sewage. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2017, 228(3): 1—13.
- [8] Li H, Chi ZF, Yan BX, et al. An innovative wood-chip-framework substrate used as slow-release carbon source to treat high-strength nitrogen wastewater. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 51: 275—283.

- [9] Li H, Chi ZF, Yan BX, et al. Nitrogen removal in wood chip combined substrate baffled subsurface-flow constructed wetlands: impact of matrix arrangement and intermittent aeration. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(5): 5032—5038.
- [10] Zhao XY, Yang JX, Bai SW, et al. Microbial population dynamics in response to bioaugmentation in a constructed wetland system under 10 °C. *Bioresource Technology*, 2016, 205: 166—173.
- [11] 黄翔峰, 谢良林, 陆丽君, 等. 人工湿地在冬季低温地区的应用研究进展. *环境污染与防治*, 2008, 30(11): 84—89.
- [12] Yan YJ, Xu JC. Improving winter performance of constructed wetlands for wastewater treatment in Northern China: a review. *Wetlands*, 2014, 34(2): 243—253.
- [13] 宋凤鸣, 周健, 刘文竹, 等. 耐盐湿地植物筛选应用研究进展. *天津农业科学*, 2017, 23(9): 101—109.
- [14] Jesus JM, Cassoni AC, Danko AS, et al. Role of three different plants on simultaneous salt and nutrient reduction from saline synthetic wastewater in lab-scale constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 447—455.
- [15] Shelef O, Gross A, Rachmilevitch S. The use of *Bassia indica* for salt phytoremediation in constructed wetlands. *Water Research*, 2012, 46(13): 3967—3976.
- [16] Chen X, Cheng XW, Zhu H, et al. Influence of salt stress on propagation, growth and nutrient uptake of typical aquatic plant species. *Nordic Journal of Botany*, 2019, 37(12).
- [17] Cheng R, Zhu H, Cheng XW, et al. Saline and alkaline tolerance of wetland plants—what are the most representative evaluation indicators? *Sustainability*, 2020, 12(5): 1913.
- [18] Wang XY, Zhu H, Yan BX, et al. Bioaugmented constructed wetlands for denitrification of saline wastewater: a boost for both microorganisms and plants. *Environment International*, 2020, 138: 105628.
- [19] Wang XY, Zhu H, Yan BX, et al. Improving denitrification efficiency in constructed wetlands integrated with immobilized bacteria under high saline conditions. *Environmental Pollution*, 2021, 287: 117592.
- [20] Maltais-Landry G, Maranger R, Brisson J, et al. Greenhouse gas production and efficiency of planted and artificially aerated constructed wetlands. *Environmental Pollution*, 2009, 157(3): 748—754.
- [21] VanderZaag AC, Gordon RJ, Burton DL, et al. Ammonia emissions from surface flow and subsurface flow constructed wetlands treating dairy wastewater. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(6): 2028—2036.
- [22] Chen X, Zhu H, Yan BX, et al. Optimal influent COD/N ratio for obtaining low GHG emissions and high pollutant removal efficiency in constructed wetlands. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 267: 122003.
- [23] Chen X, Zhu H, Yan BX, et al. Greenhouse gas emissions and wastewater treatment performance by three plant species in subsurface flow constructed wetland mesocosms. *Chemosphere*, 2020, 239: 124795.
- [24] Plaza de los Reyes C, Vidal G. Effect of variations in the nitrogen loading rate and seasonality on the operation of a free water surface constructed wetland for treatment of swine wastewater. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2015, 50(13): 1324—1332.
- [25] Zhang SN, Xiao RL, Liu F, et al. Effect of vegetation on nitrogen removal and ammonia volatilization from wetland microcosms. *Ecological Engineering*, 2016, 97: 363—369.
- [26] Luo B, Ge Y, Han WJ, et al. Decreases in ammonia volatilization in response to greater plant diversity in microcosms of constructed wetlands. *Atmospheric Environment*, 2016, 142: 414—419.
- [27] Chen X, Zhu H, Bañuelos G, et al. Biochar reduces nitrous oxide but increases methane emissions in batch wetland mesocosms. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 392: 124842.
- [28] Du L, Trinh X, Chen Q, et al. Effect of clinoptilolite on ammonia emissions in integrated vertical-flow constructed wetlands (IVCWs) treating swine wastewater. *Ecological Engineering*, 2018, 122: 153—158.
- [29] Mander Ü, Löhmus K, Teiter S, et al. Gaseous fluxes in the nitrogen and carbon budgets of subsurface flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 2008, 404(2/3): 343—353.
- [30] Bu XY, Dong SC, Mi WB, et al. Spatial-temporal change of carbon storage and sink of wetland ecosystem in arid regions, Ningxia Plain. *Atmospheric Environment*, 2019, 204: 89—101.
- [31] Yang L, Yuan CS. Analysis of carbon sink effects for saline constructed wetlands vegetated with mangroves to treat mariculture wastewater and sewage. *Water Science and Technology*, 2019, 79(8): 1474—1483.
- [32] Sheng Q, Wang L, Wu JH. Vegetation alters the effects of salinity on greenhouse gas emissions and carbon sequestration in a newly created wetland. *Ecological Engineering*, 2015, 84: 542—550.
- [33] Murray CG, Hamilton AJ. Perspectives on wastewater treatment wetlands and waterbird conservation. *Journal of Applied Ecology*, 2010, 47(5): 976—985.

- [34] Strand JA, Weisner SEB. Effects of wetland construction on nitrogen transport and species richness in the agricultural landscape—Experiences from Sweden. *Ecological Engineering*, 2013, 56: 14—25.
- [35] Hsu CB, Hsieh HL, Yang L, et al. Biodiversity of constructed wetlands for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 2011, 37(10): 1533—1545.
- [36] 朱四喜. 人工湿地中生物多样性与生态系统功能关系研究. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [37] 康妍. 典型底栖动物人工湿地系统强化污染物去除机制研究. 济南: 山东大学, 2019.
- [38] Andersen DC, Sartoris JJ, Thullen JS, et al. The effects of bird use on nutrient removal in a constructed wastewater-treatment wetland. *Wetlands*, 2003, 23(2): 423—435.
- [39] Ashley MC, Robinson JA, Oring LW, et al. Dipteran standing stock biomass and effects of aquatic bird predation at a constructed wetland. *Wetlands*, 2000, 20(1): 84—90.

## Progress in Research and Applications of Constructed Wetlands in China and Suggestions for Future Development

Zhu Hui\* Yan Baixing Wang Xinyi

*Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102*

**Abstract** As an important component of the water environmental protection system, constructed wetlands have developed rapidly in China and are widely applied in the treatment of various types of wastewater. This manuscript reviews the development status and the shortcomings of constructed wetlands in China, and summarizes the progress of research, achievements and trends of development at home and abroad. The current research hotspots and challenges mainly include the enhancement of purification capacity in complex environmental conditions, the simultaneous removal of pollutants and reduction of harmful gases, the improvement of ecological service values and the optimization of operation and management, etc. Based on the academic frontiers and hotspots, as well as the major strategic needs in sustainable ecology and international compliance capacity, we highlight that future studies should focus on key science and technology issues including the response mechanisms of wetland plants and microorganisms to various environmental stresses, the biogeochemical processes of key elements, the improvement of multiple ecological functions and the assessment of ecological service values, etc. Strengthening multi-disciplinarity and taking advantage of multiple tools are recommended for implementing systematic research, thereby providing solid scientific and practical support for the development of constructed wetlands in China.

**Keywords** constructed wetland; non-point source pollution; carbon reduction; ecological service value; sustainable development

(责任编辑 吴征天)

\* Corresponding Author, Email: zhuhui@iga.ac.cn