

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.02.005

人工湿地CH₄排放机理、调控及抗堵塞减排研究进展

李易霖¹, 吴涵之¹, 阳旭², 张力铭³, 周磊³, 马洪运³,
李子千⁴, 张沛¹, 李凌¹, 魏俊², 成水平³, 施文卿⁴,
孔令为^{1,5}

(1. 西湖大学工学院 浙江省海岸带环境与资源研究重点实验室, 浙江 杭州 310030;
2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 3. 同济大学环境科学与工程学院 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092; 4. 南京信息工程大学 环境科学与工程学院, 江苏 南京 210044; 5. 西湖生态环境<杭州>有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘要: 在落实国家“双碳”目标的大背景下,人工湿地CH₄的排放及其调控越来越受到关注。系统性地探讨了人工湿地中CH₄排放的机理、调控方法以及抗堵塞减排技术的研究进展,重点介绍了人工湿地中湿地类型、进水条件、温度、基质种类、植被类型等影响CH₄排放的关键因素,综述和评估了水位调控、运行方式改变、新基质选用等针对CH₄排放的调控方法,介绍了国内外人工湿地堵塞问题对CH₄排放的影响以及相应的解决方案,特别是模块化抗堵塞人工湿地技术,为解决湿地堵塞问题提供了新的思路和方法。最后提出了未来研究的方向和挑战,尤其是在环境因素对CH₄产生和排放的影响机制、新型抗堵塞人工湿地技术低CH₄排放机理的进一步探索,以及传统人工湿地的低碳化改造等方面提出了具体的研究方向。这些工作将进一步加深对人工湿地CH₄排放问题的理解,为湿地生态系统的保护和可持续发展提供重要的理论支持和技术指导。

关键词: 人工湿地; 抗堵塞; 模块化抗堵塞人工湿地

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)02-0031-08

Research Progress on CH₄ Emission Mechanism, Regulation, Reduction and Clog Mitigation in Constructed Wetlands

LI Yilin¹, WU Hanzhi¹, YANG Xu², ZHANG Liming³, ZHOU Lei³,
MA Hongyun³, LI Ziqian⁴, ZHANG Pei¹, LI Ling¹, WEI Jun²,
CHENG Shuiping³, SHI Wenqing⁴, KONG Lingwei^{1,5}

(1. Key Laboratory of Coastal Environment and Resources of Zhejiang Province, School of Engineering, Westlake University, Hangzhou 310030, China; 2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 3. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(32471696); 浙江省科技厅“领雁”计划项目(2023C03133、2025C04017);
浙江省自然科学基金联合基金重点资助项目(LHZ22E090001); 杭州市重点研发计划项目(2024SZD1B25)

通信作者: 孔令为 E-mail: konglingwei@westlake.edu.cn

5. Westlake Ecological Environment <Hangzhou> Co. Ltd., Hangzhou 310030, China)

Abstract: In the context of implementing the “Carbon Peak and Carbon Neutralization” national strategic goals, CH₄ emissions and regulation in constructed wetlands have received increasing attention. This paper systematically reviews the research progress on CH₄ emission mechanisms, regulation strategies, reduction techniques, and clog mitigation technologies in constructed wetlands. It focuses on key factors influencing CH₄ emissions, including wetland type, inflow condition, temperature, substrate type and vegetation type. Regulating measures for CH₄ emissions, such as water-level management, adjustments to operational methods, and the selection of novel substrates, are also reviewed and evaluated. The impacts of the clogging issue on CH₄ emissions in both domestic and overseas constructed wetlands, along with mitigation solutions, are discussed. Particular emphasis is placed on the modular moving bed constructed wetlands (MMB-CWs) technology, which offers new perspectives and approaches. Finally, this paper proposed future research directions and challenges, particularly focusing on the mechanisms by which environmental factors influence CH₄ generation and emissions, and the low-emission mechanisms of MMB-CWs technology. Specific research directions of the low-carbon transformation of traditional constructed wetlands are also provided. These efforts will further deepen the understanding of CH₄ emissions in constructed wetlands and provide important theoretical support and technical guidance for wetland ecosystems’ protection and sustainable development.

Keywords: constructed wetlands; clog mitigation; MMB-CWs

人工湿地是一种绿色有效的污水处理和水生态修复强化技术,在受污染河湖修复、污水厂尾水深度处理、村镇污水治理等领域获得了越来越多的研究和应用^[1-3],但是人工湿地存在占地面积大、冬季运行效果差以及易堵塞等问题,不利于其广泛应用和推广。此外,环境污染物与碳排放强度同根同源,人工湿地在削减污染物过程中会产生一定量的CO₂、CH₄和N₂O等温室气体(GHG)。全球湿地每年排放的GHG(约5 Gt CO₂-eq)相当于自然生态系统排放量的17.20%、全球总排放量的7.66%^[4],其中人工湿地碳排放通量是自然湿地的2~10倍^[5]。人工湿地已经被证明是一种“碳源”^[6],且不同类型的传统人工湿地其GHG具有明显的排放差异。为推动甲烷减排,欧美等国发起《全球甲烷承诺》,我国也已制定“双碳”目标。随着人工湿地技术的推广和工程数量的增加,规模化人工湿地GHG排放存在巨大的碳排放风险,与国家实现“双碳”目标相悖。如何通过技术革新有效降低人工湿地的碳排放量,将人工湿地“碳源”属性转变为“低碳”“零碳”甚至“负碳”,对我国“双碳”目标的加速实现具有重要的指导意义。

有研究表明,CH₄增温潜势是CO₂的25倍,是大

气环境中继CO₂之后的第二种主要GHG,而在人工湿地系统所释放的3种主要GHG(CO₂、N₂O、CH₄)中,CH₄贡献率占60%以上^[6],控制CH₄排放是减少人工湿地系统GHG排放的关键。为控制和减少人工湿地CH₄排放量,世界各国已从CH₄排放机理及调控等方面针对不同类型传统人工湿地开展了基础研究。从应用上看,堵塞后的壅水是导致人工湿地CH₄排放量增加的重要原因之一^[7]。人工湿地堵塞后会造成出水不达标,壅水严重时易产生蚊虫滋生、发臭等环境卫生问题,进一步增大湿地床体内部的厌氧环境,促进CH₄的排放。在协同减污降碳的大背景下,基于人工湿地CH₄减排对“双碳”目标实现的重要性,重点着眼于阐述人工湿地CH₄的产生-转化-排放过程和机理、影响因素以及减排调控方法,并综述笔者团队前期在人工湿地CH₄减排及解决人工湿地堵塞问题等方面的系列协同创新工作,力求为该领域未来的研究探索新方向。

1 人工湿地CH₄产生及排放机理研究进展

1.1 CH₄产生、转化、排放机理

笔者团队前期基于Web of Science数据库和CiteSpace软件(以人工湿地和温室气体为关键词)对检索的557篇文献进行了大数据分析^[8],重点研

究了传统类型人工湿地GHG排放文献全球分布、研究演变和热点分析以及3种类型人工湿地的CH₄排放通量对比,研究结果与郝晓地等^[6]的结论一致,垂直流人工湿地CH₄排放量最低。人工湿地通过植物光合作用固定CO₂,但植物呼吸和微生物氧化分解消耗有机物产生CO₂,通过水-大气/植物-大气/基质-大气等传输途径释放到大气环境中。人工湿地CH₄排放是CH₄的产生、消耗、传输过程的综合结果,人工湿地CH₄的产生主要由水解微生物、发酵细菌、专性产醋酸菌(*Homoacetogens*)、综合营养型菌和产甲烷菌5类微生物完成^[9-10],不同湿地中微生物群落结构、有机物种类及含量不同,CH₄产生方式不尽相同。Chasar等^[11]通过同位素示踪法发现70%的CH₄都由醋酸发酵产生,由CO₂还原产生的CH₄仅占30%。Bonetti等^[9]对CH₄功能微生物群落进行连续监测,在引起β-多样性差异的微生物功能群中,甲烷氧化菌占3.6%,氮循环微生物占44.5%,硫酸盐/铁循环微生物占13.5%。

笔者团队总结了人工湿地中温室气体产生、迁移及转化机制^[12],认为人工湿地产生的CH₄部分通过好氧化和厌氧氧化方式被氧化为CO₂。CH₄好氧化是CH₄氧化菌以CH₄为碳源,将其氧化为CO₂的过程,主要发生在人工湿地好氧区和植物根系泌氧区。CH₄厌氧氧化是由CH₄厌氧氧化菌以CH₄为唯一电子供体,以SO₄²⁻、NO₂⁻、NO₃⁻、Mn⁴⁺和Fe³⁺等为电子受体^[13],在厌氧环境下将CH₄转化为CO₂的过程。人工湿地CH₄传输方式有植物组织传输、气泡扩散及液相扩散3种,其中植物组织传输是最为重要的方式,是植物收割后湿地CH₄排放通量明显上升的主要诱因。

1.2 CH₄产生、转化、排放过程的监测与评估

监测和预测人工湿地的CH₄排放量对研究人工湿地CH₄排放的影响因素、后续调控策略以及理解人工湿地对GHG贡献及全面评估人工湿地的生态效应具有重要意义。目前,静态气室法、动态气室法等已广泛应用于人工湿地CH₄排放的研究^[14-15],这些方法有助于了解人工湿地中CH₄在一定周期内的排放规律,但在解释机理方面仍存在不足。随着技术手段的逐渐成熟,通过分子生物学技术和水质分析相结合可深入分析CH₄产生和消耗机制^[16-17]。分子生物学技术可帮助识别参与人工湿地CH₄生产和消耗的微生物群落,还可用于跟踪微生物群落随

时间变化以及对不同环境条件的响应。测定水体中的CH₄浓度和δ¹³C等指标,可了解CH₄产生和消耗情况。虽然结合微生物和水质数据分析可以更全面地了解人工湿地CH₄排放机制,但无法准确估算CH₄的排放通量。

以数值模型为模拟工具,描述污染物在人工湿地中的转化和降解过程,不仅有助于加深对湿地系统中复杂反应过程的理解以揭示除污机理,还能辅助解释GHG的排放过程。目前,研究中主要利用统计学或人工智能等技术对人工湿地CH₄排放量进行预测和模拟。人工湿地中CH₄排放受到多种环境因素的影响,如温度、水位、水流速度、有机物负荷等。数值模型有助于量化这些因素对CH₄排放的影响,并对不同情景下CH₄排放量进行估算^[18]。目前,数值模型主要有3种:第一种即常用建模方法为基于生物地球化学模型模拟人工湿地CH₄的生产和传输过程;第二种建模方法为基于机器学习算法如人工神经网络(ANN)和支持向量回归(SVR),可根据历史数据预测人工湿地的CH₄排放量^[15,19-20],这类模型通常需要大量的CH₄排放和环境变量数据集来训练;第三种是基于过程的模型,如DayCent和DNDC等模型也可用于估算人工湿地CH₄排放量。数值模型存在一些不足,如未考虑多孔介质的流体动力学、植物的影响,颗粒/悬浮物质的运输、吸附和解吸过程以及物理通风的影响,单一模型或复合模型不能完全揭示反应过程,当前认知的模型和参数大部分是交互的,无法定量确定,因此要完全了解人工湿地中污染物降解及CH₄排放机理还需要深入研究。为更准确地描述湿地系统中的反应过程,未来模型参数应尽可能量化,并从颗粒尺度(微观)和连续尺度(小试、中试等)开展模型构建,并需要不断验证和优化以提升准确度。笔者团队曾用格子玻尔兹曼方法(LBM)对引起堵塞的细颗粒基质沉降过程进行研究^[21],并模拟污水在某人工湿地系统运动时与基质接触的流场和浓度场,辅助诠释了污染物降解机理,为LBM模型未来用于描述CH₄排放过程奠定了基础。

其他技术如遥感(热成像、高光谱成像)等,也可用于检测和绘制人工湿地的CH₄排放变化,但在小尺度监测定量分析方面存在不足。稳定同位素探测是一种成熟且有前途的技术,可用于识别人工湿地中参与CH₄生产和消耗的微生物。实施时将标

记的底物(如 ^{13}C 标记的 CH_4)添加到湿地样品中,并随着时间推移跟踪这些标记物与微生物DNA的结合,通过分析标记的DNA,可识别参与湿地 CH_4 循环的特定微生物,有助于解释和验证 CH_4 的产生过程和排放机理。不同的研究方法和手段具有各自的优缺点和适用性,因此应根据研究目的和实际情况

进行选择,以更准确地揭示人工湿地 CH_4 产生及排放机理。

2 人工湿地 CH_4 排放影响因素及调控方法

2.1 影响因素

以“人工湿地”和“ CH_4 排放”为关键词,通过软件CiteSpace获得了如图1所示的结果^[22-23]。

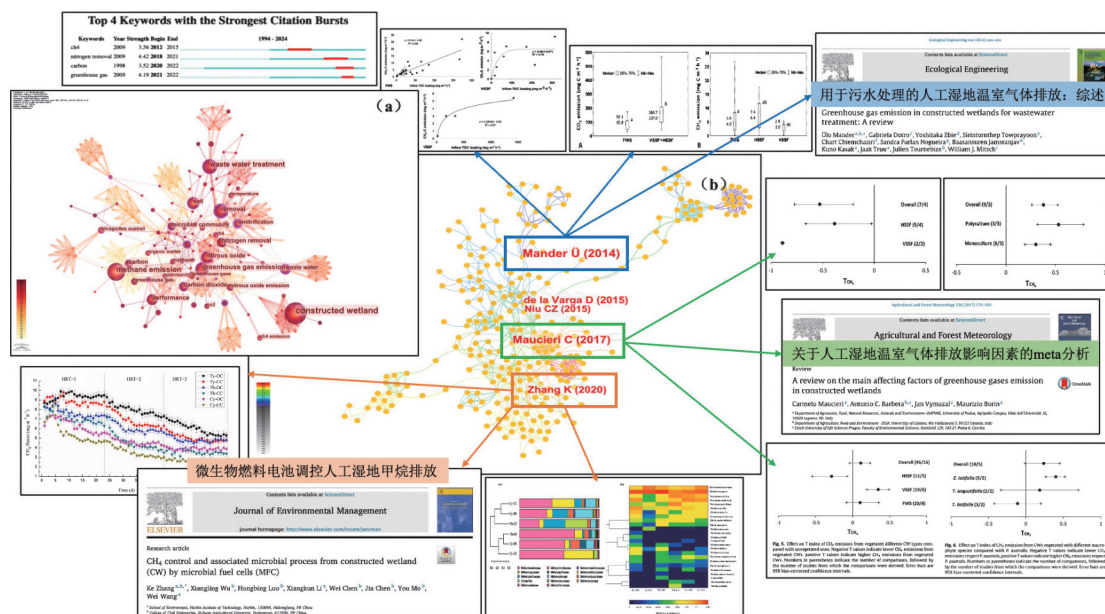


图1 人工湿地系统 CH_4 产生及排放关键词和高被引作者、文献分析

Fig.1 Keywords of CH_4 generation and emission in constructed wetland system and high-cited authors, literature analysis

具体而言,湿地类型,进水组成及流向,基质类型、配比及填充度,植物种类及丰度,植物收获时间及频率,水位及温度等条件对人工湿地系统产生及排放GHG具有较大影响^[23]。不同类型人工湿地的 CH_4 排放通量存在一定差异,表面流人工湿地 CH_4 排放量高于潜流人工湿地,而水平潜流人工湿地 CH_4 排放量高于垂直潜流人工湿地,且其入口区 CH_4 排放量明显高于出口区^[24]。人工湿地进水有机物负荷是影响 CH_4 排放的一个重要因素。有研究表明, CH_4 排放与进水总有机碳(TOC)呈显著的正线性关系^[22]。当进水C/N比为5时,GHG排放量最低且污染物去除效果最好;也有研究发现,进水C/N比为10时减污降碳效果最佳^[25]。人工湿地基质类型、配比及填充度以及水位均会对温室气体排放产生影响。添加新型填料生物炭会显著减少人工湿地系统的 CH_4 排放量,生物炭的加入增加了与反硝化相关功能基因的丰度,抑制了与 CH_4 生成相关功能基因的丰度^[26]。水位的变化和控制与湿地系统的运行方式有关,湿地系统的运行方式主要分为间歇

运行和连续运行两种。连续式进水的人工湿地内基质通常处于饱和状态,复氧能力较差,易形成厌氧环境促进 CH_4 的生成;间歇式进水模拟自然湿地水位波动状况,可强化传氧效能,改善人工湿地的处理效果并降低 CH_4 排放量^[6]。基于此,水力负荷(HLR)的变化则易导致水位的波动,从而间接影响 CH_4 的生成和排放。温度可以通过影响 CH_4 功能微生物的丰度和活性来影响人工湿地温室气体的排放^[27]。研究发现,夏季人工湿地的 CH_4 排放量同样显著高于其他季节,且 CH_4 排放量受温度影响最大^[28]。植物的光合作用和人工湿地中嗜热微生物的活动均属嗜热过程,两者之间的相互作用会影响 CH_4 的动态变化。因此,温度不仅影响 CH_4 氧化和 CH_4 生成的微生物群落,还会影响其活性水平。此外,是否种植植物,植物的种类及丰度,植物收割时间及频率,对人工湿地温室气体产生、迁移及转化也有重要影响。与未种植植物的情况相比,植物的存在增加了 CH_4 排放量,种植菖蒲、莎草或灯芯草的人工湿地其 CH_4 排放值相对较低^[29]。

人工湿地植物收割的频率与温室气体排放密切相关,没有收割的人工湿地检测到的CH₄排放通量最低^[30]。种植芦苇、宽叶紫草和宽叶香蒲的混养系统相比于单个植物种植系统,产甲烷菌数量较高、甲烷营养菌数量较低。植物通气组织在温室气体传输到大气过程中起到重要作用,植物传输可以转运约70%的CH₄^[31]。其他影响因素如进水方式、系统内部溶解氧(DO)浓度、堵塞等同样会对温室气体排放产生一定的影响。DO浓度较低时,硝化过程主要作用菌种氨氧化细菌(AOB)和亚硝酸盐氧化细菌(NO₂-OB)的活性会受到影响,同时更多有机物发生厌氧降解;DO浓度高于0.5 mg/L时,反硝化过程则受到抑制^[32]。人工湿地系统出现堵塞会降低其使用寿命,使出水水质不达标,同时可能产生更多的厌氧区域,造成CH₄大量排放^[7]。

综上,尽管有许多因素影响人工湿地中CH₄的产生、转化和排放,但其中一个主要的控制因素是进水有机物负荷,即碳源的供应情况。C/N比直接影响湿地内微生物的代谢过程,进而影响CH₄的产生和排放。虽然微生物群落的组成和活性水平以及厌氧和好氧条件的变化都会对CH₄的产生和转化产生影响,但其最终主要来源仍是有机物的降解产物。因此,进水有机物负荷是人工湿地中CH₄排放的主要控制因素之一,是碳源/碳汇的重要控制因素。

2.2 调控方法

人工湿地CH₄排放调控策略方法的选择应考虑前述外界因素的影响,但其仍取决于湿地碳排放水平与碳分解方式。人工湿地有机碳可以好氧分解产生CO₂,也可以厌氧分解产生CH₄。由于百年尺度内CH₄增温潜能值为CO₂的28倍^[33],因此在同样有机碳分解条件下,若调控人工湿地微环境减少有机碳厌氧产生CH₄,则可以实现人工湿地碳减排。现阶段文献调研发现,相关措施主要包括间歇运行、进水曝气、水位波动、C/N、新基质选用、植物选配及种植方式等。Xu等^[17]发现将锰矿作为湿地填料时,COD、TN与TP去除率较高,且CH₄排放通量较低,分析认为其原因为锰矿的引入改变了系统原来的氧化还原环境,调控了微生物群落结构。Ji等^[34]发现生物炭基质丰富了*pmoA/mcrA*与*nosZ*/(*nirK*+*nirS*)基因丰度,实现了氮强化去除与CH₄排放削减。

通过水位调控、运行方式改变、优化湿地植物

等可以科学调控人工湿地系统内部生化过程,提升水质净化与生态环境效益。考虑到人工湿地类型、进水条件、环境温度等因素的复杂性,各影响因素之间并非相互割裂,但如何协同驱动系统CH₄产生、转化和低排放的机制尚未明晰,因此通过数据分析揭示它们之间的联系和规律,有助于进一步探索该技术低CH₄排放机理,并挖掘其CH₄深度减排调控潜力。

3 基于CH₄减排导向的人工湿地抗堵塞研究

如前所述,堵塞作为人工湿地长期以来的一个“卡脖子”问题,会导致导水率下降,使填料的孔隙逐渐被填满;堵塞后的人工湿地净水功能逐步丧失,不能达到设计的出水水质、水量考核目标;堵塞严重时需要开挖填料进行冲洗或者更换,大大增加了人力、物力、财力的消耗,其运维投入不可持续。有报道指出,美国50%的已建成人工湿地系统运行不到5年就已经出现堵塞;我国人工湿地的堵塞案例也逐渐增多,尤其是一些大型人工湿地系统,往往运行不足3年便出现堵塞问题。此外,部分湿地因进水条件不适宜、建设不规范、管理维护不善等而在运行1年甚至6个月内即发生堵塞,从而出现系统设计寿命缩短、氮磷等污染物去除效率降低等问题^[35]。更重要的是,湿地堵塞还会扩大系统中的缺氧和厌氧区域,产生环境卫生问题(如气味难闻以及滋生蚊蝇),最终使CH₄等温室气体排放量显著增加,不利于“双碳”目标的实现。笔者团队于2023年夏季和冬季调研了全国8个万m³/d规模大型尾水人工湿地工程案例,涵盖浙江、湖北、深圳、云南等地的代表性人工湿地,初步分析结果显示,人工湿地CH₄排放通量高于其他两种GHG气体,佐证了人工湿地是碳排放源的结论。综上,解决人工湿地堵塞问题对大幅降低CH₄排放量、实现协同减污降碳具有重要意义。

目前,世界范围内不少学者在湿地堵塞领域开展基础和应用研究,但尚未见到有效解决人工湿地堵塞难题的报道。笔者团队研发了模块化抗堵塞人工湿地(MMB-CWs),并对该技术进行中试规模的示范,获得了优异的水处理效果^[3,27,36]。在高悬浮物特征的地表劣V类水河道生态修复中,MMB-CWs中试系统运行稳定,对COD、NH₃-N和TP的去除率分别达到81.7%、96.1%和74.7%,抗堵塞效果

显著,而对比研究的传统人工湿地不到8个月即已堵塞。此外,在池塘水产养殖废水处理系统中,MMB-CWs的 CH_4 释放通量为3种传统类型人工湿地的 $1/284.6 \sim 1/111.5$;笔者团队采用MMB-CWs处理模拟低C/N比污水处理厂的尾水,研究发现未种植植物的小试系统的 $\text{CH}_4/\text{CO}_2 < 0.000\ 01$,而传统垂直流人工湿地的 CH_4/CO_2 为0.02,水平潜流人工湿地的 CH_4/CO_2 为0.07,表面流人工湿地的 CH_4/CO_2 为0.16。由此可见,MMB-CWs技术具有较低的 CH_4 排放通量(传统人工湿地相对高出2 000~16 000倍),其推广应用对人工湿地碳减排具有重要的促进作用。MMB-CWs技术从湿地结构、基质选配、水流通道等方面对传统人工湿地进行集成创新^[3],特别是内部折流形成多个时空上的连续复氧区域,以及基质选配和不饱和填充所实现的下层轻质基质流态化运动方式(轻质基质碰撞使悬浮物沉降、细胞膜脱落实现抗堵塞)等,均不同于传统人工湿地,但其 CH_4 产生、排放影响因素及低 CH_4 排放通量的驱动机制更复杂,如何调控以进一步减少其排放的对策尚未可知。因此,下一步工作应聚焦于探明环境因素对 CH_4 产生、排放的影响及其作用机制,为科学解释MMB-CWs技术低 CH_4 排放机理和调控方法提供理论基础,并为传统人工湿地低碳化改造及推动“双碳”目标的加速实现提供普适性技术指导。

4 建议及未来展望

为减少人工湿地 CH_4 排放、转变人工湿地的“碳源”属性,建议未来在人工湿地项目的设计和施工中采取以下措施和技术流程:

① 选择适当的湿地类型和配置。根据进水条件、处理需求和地理环境等因素选择合适的人工湿地类型,如表面流湿地、潜流湿地或混合型湿地,以及可解决堵塞问题的模块化湿地,并优化湿地的配置和设计,最大程度地降低碳排放。

② 优化进水方式。对进水进行预处理,降低有机物负荷和C/N比,以减少有机碳的供应。

③ 调控水位和改变运行方式。采用间歇运行模式,促进有机物的好氧降解,降低厌氧环境的形成,进一步减少 CH_4 的排放量。

④ 选择适宜的植物种类及定期收割。选择生长适应力强、对 CH_4 产生抑制作用的植物种类,如芦苇、莎草或灯芯草等,也可考虑尝试竹子的固碳

效果。混养不同种类植物及定期收割,可以促进有机物的生物降解,降低 CH_4 的生成。

⑤ 优化基质材料。选择适合的基质材料如硫铁矿、锰矿等,改变微生物群落结构,降低 CH_4 生成;添加生物炭等新型材料,也有助于降低 CH_4 排放量,提高碳的捕获能力。

参考文献:

- [1] WANG X, LIU Y, ZHANG Y, et al. Study on the application and optimization of domestic sewage treatment demonstration based on a novel biofilter-constructed wetland coupling system [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2023, 20(1):909-920.
- [2] 祝惠, 阎百兴, 王鑫壹. 我国人工湿地的研究与应用进展及未来发展建议[J]. 中国科学基金, 2022, 36(3):391-397.
ZHU H, YAN B X, WANG X Y. Progress in research and applications of constructed wetlands in China and suggestions for future development [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2022, 36(3):391-397(in Chinese).
- [3] FANG Y X, KONG L W, ZHANG P, et al. Fifteen-year analysis of constructed wetland clogging: a critical review [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 365: 132755.
- [4] YUE X L, GAO Q X. Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gas emissions [J]. Advances in Climate Change Research, 2018, 9(4): 243-252.
- [5] MALTAIS-LANDRY G, MARANGER R, BRISSON J, et al. Greenhouse gas production and efficiency of planted and artificially aerated constructed wetlands [J]. Environmental Pollution, 2009, 157(3):748-754.
- [6] 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. Emissions, influence and control of greenhouse gases in constructed wetlands [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(22):39-47(in Chinese).
- [7] NIVALA J, KNOWLES P, DOTRO G, et al. Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: measurement, modeling and management [J]. Water Research, 2012, 46(6):1625-1640.

- [8] LI Z Q, KONG L W, HU L P, et al. Greenhouse gas emissions from constructed wetlands: a bibliometric analysis and mini-review [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 906:167582.
- [9] BONETTI G, TREVATHAN-TACKETT S M, HEBERT N, et al. Microbial community dynamics behind major release of methane in constructed wetlands [J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 167:104163.
- [10] PEREZ-CORONEL E, BEMAN M J. Multiple sources of aerobic methane production in aquatic ecosystems include bacterial photosynthesis[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1):6454.
- [11] CHASAR L S, CHANTON J P, GLASER P H, et al. Radiocarbon and stable carbon isotopic evidence for transport and transformation of dissolved organic carbon, dissolved inorganic carbon, and CH₄ in a northern Minnesota peatland [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(4):1095–1108.
- [12] 马洪运,周磊,张雪琦,等. 人工湿地温室气体排放研究进展与减污降碳优化[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(6):2043–2052.
- MA H Y, ZHOU L, ZHANG X Q, et al. Research progress of greenhouse gas emissions and optimization of pollution removal and carbon reduction in constructed wetland [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(6):2043–2052(in Chinese).
- [13] ZHANG K, WU X L, WANG W, et al. Anaerobic oxidation of methane (AOM) driven by multiple electron acceptors in constructed wetland and the related mechanisms of carbon, nitrogen, sulfur cycles [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 433:133663.
- [14] KASAK K, VALACH A C, REY-SANCHEZ C, et al. Experimental harvesting of wetland plants to evaluate trade-offs between reducing methane emissions and removing nutrients accumulated to the biomass in constructed wetlands [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 715:136960.
- [15] IRVIN J, ZHOU S, MCNICOL G, et al. Gap-filling eddy covariance methane fluxes: comparison of machine learning model predictions and uncertainties at FLUXNET-CH₄ wetlands [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 308/309:108528.
- [16] LIU W B, XIAO H W, MA H P, et al. Reduction of methane emissions from manganese-rich constructed wetlands: role of manganese-dependent anaerobic methane oxidation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 387:123402.
- [17] XU H, SONG H L, SINGH R P, et al. Simultaneous reduction of antibiotics leakage and methane emission from constructed wetland by integrating microbial fuel cell [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 320:124285.
- [18] LIU X L, FU X Y, PU A P, et al. Impact of external carbon source addition on methane emissions from a vertical subsurface-flow constructed wetland [J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2019, 9(2):331–348.
- [19] HUANG R X, MA C X, MA J, et al. Machine learning in natural and engineered water systems [J]. *Water Research*, 2021, 205:117666.
- [20] YUAN K X J, ZHU Q, LI F, et al. Causality guided machine learning model on wetland CH₄ emissions across global wetlands [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 324 : 109115.
- [21] ZHANG P, QIU L, CHEN Y L, et al. Coupled metaball discrete element lattice Boltzmann method for fluid-particle systems with non-spherical particle shapes: a sharp interface coupling scheme [J]. *Journal of Computational Physics*, 2023, 479:112005.
- [22] MANDER Ü, DOTRO G, EBIE Y, et al. Greenhouse gas emission in constructed wetlands for wastewater treatment; a review [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 66:19–35.
- [23] MAUCIERI C, BARBERA A C, VYMAZAL J, et al. A review on the main affecting factors of greenhouse gases emission in constructed wetlands [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 236:175–193.
- [24] BATEGANYA N L, MENTLER A, LANGERGRABER G, et al. Carbon and nitrogen gaseous fluxes from subsurface flow wetland buffer strips at mesocosm scale in East Africa [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 85: 173–184.
- [25] CHEN X, ZHU H, YAN B X, et al. Optimal influent COD/N ratio for obtaining low GHG emissions and high pollutant removal efficiency in constructed wetlands [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 267:122003.
- [26] 陈鑫童,郝庆菊,熊艳芳,等. 铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(3): 1492–1499.
- CHEN X T, HAO Q J, XIONG Y F, et al. Effects of hematite and biochar addition on wastewater treatment efficiency, greenhouse gas emission, and microbial

- community in subsurface flow constructed wetland [J]. *Environmental Science*, 2022, 43 (3) : 1492-1499 (in Chinese).
- [27] 向晓琴, 孔令为, 余少乐, 等. 不同基质填充度模块化人工湿地强化脱氮除磷效果研究[J]. *杭州师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 20(6):603-609.
- XIANG X Q, KONG L W, YU S L, et al. Nitrogen and phosphorus removal effect of a novel modular constructed wetland with different substrate filling factors [J]. *Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 20(6):603-609(in Chinese).
- [28] WU H M, LIN L, ZHANG J, et al. Purification ability and carbon dioxide flux from surface flow constructed wetlands treating sewage treatment plant effluent [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 219 : 768-772.
- [29] XU G M, LI Y, WANG S, et al. An overview of methane emissions in constructed wetlands: how do plants influence methane flux during the wastewater treatment? [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2019, 34(1):333-350.
- [30] NUTANONG S, CHIEMCHAI SRI C, CHIEMCHAI SRI W, et al. Effect of plant harvesting on greenhouse gas emission from vertical subsurface flow constructed wetlands treating low-strength sewage [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2018, 127 : 297-308.
- [31] FENG L K, HE S F, 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.
- [32] LIANG Y K, WANG Q H, HUANG L, et al. Insight into the mechanisms of biochar addition on pollutant removal enhancement and nitrous oxide emission reduction in subsurface flow constructed wetlands: microbial community structure, functional genes and enzyme activity [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 307:123249.
- [33] KOFFI E N, BERGAMASCHI P, ALKAMA R, et al. An observation-constrained assessment of the climate sensitivity and future trajectories of wetland methane emissions [J]. *Science Advances*, 2020, 6 (15) : eaay4444.
- [34] JI B, CHEN J, LI W, et al. Greenhouse gas emissions from constructed wetlands are mitigated by biochar substrates and distinctly affected by tidal flow and intermittent aeration modes [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 271 : 116328.
- [35] 孔令为, 邵卫伟, 梅荣武, 等. 浙江省城镇污水处理厂尾水人工湿地深度提标研究[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(2) : 39-43.
- KONG L W, SHAO W W, MEI R W, et al. Study on constructed wetland for advanced treatment of terminal effluent of wastewater treatment plant in Zhejiang Province [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(2) : 39-43(in Chinese).
- [36] KONG L W, WANG Y, XIANG X Q, et al. Study on the impact of hydraulic loading rate (HLR) on removal of nitrogen under low C/N condition by modular moving bed constructed wetland (MMB-CW) system [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2024, 34:103579.

作者简介:李易霖(1996—),男,山西长治人,硕士研究生,研究方向为环境科学。

E-mail:liyilin05@westlake.edu.cn

收稿日期:2024-03-08

修回日期:2024-04-02

(编辑:丁彩娟)

强化依法治水,携手共护母亲河