



## 表面流人工湿地减污降碳影响因素及优化调控

于海晨 侯聪宇 白静 赵健 李嘉欣 宋永会

### Influencing factors and optimization strategies for pollution reduction and carbon mitigation in surface-flow constructed wetlands

YU Haichen, HOU Congyu, BAI Jing, ZHAO Jian, LI Jiabin, SONG Yonghui

在线阅读 View online: <https://www.hjgcjsxb.org.cn/article/doi/10.12153/j.issn.1674-991X.20260060>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 人工湿地温室气体排放研究进展与减污降碳优化

Research progress of greenhouse gas emissions and optimization of pollution removal and carbon reduction in constructed wetland  
环境工程技术学报. 2023, 13(6): 2043-2052. <https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20230175>

#### 填料对生物滞留设施温室气体排放特征的影响及减污降碳效果

Impact of fillers on greenhouse gas emission characteristics of bioretention facilities and their pollution and carbon reduction effect  
环境工程技术学报. 2025, 15(4): 1105-1111. <https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20250117>

#### 城镇污水处理厂碳排放现状及减污降碳协同增效路径探讨

Carbon emission analysis of municipal wastewater treatment plants and discussion on synergistic path of pollution and carbon reduction  
环境工程技术学报. 2023, 13(6): 2053-2062. <https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20230040>

#### 北京市城市生活垃圾处理温室气体排放特征及减排策略

Greenhouse gas emission characteristics and emission reduction strategies of municipal solid waste treatment in Beijing  
环境工程技术学报. 2022, 12(4): 1041-1047. <https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20210820>

#### 我国减污降碳协同效应的时空特征与策略

Spatiotemporal characteristics and strategies of synergistic effect of pollution and carbon reduction in China  
环境工程技术学报. 2025, 15(2): 465-473. <https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20250051>

#### 京津冀城市群减污降碳时空特征及影响因素异质性分析

Spatial and temporal characteristics and the heterogeneity of influencing factors of the synergism of pollution and carbon emissions reduction in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration  
环境工程技术学报. 2023, 13(6): 2006-2015. <https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20230269>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

于海晨,侯聪宇,白静,等.表面流人工湿地减污降碳影响因素及优化调控[J].环境工程技术学报,2026,16(3):862-872.

YU H C,HOU C Y,BAI J,et al.Influencing factors and optimization strategies for pollution reduction and carbon mitigation in surface-flow constructed wetlands[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2026, 16(3): 862-872.

## 表面流人工湿地减污降碳影响因素及优化调控

于海晨<sup>1,2</sup>,侯聪宇<sup>1</sup>,白静<sup>1\*</sup>,赵健<sup>1</sup>,李嘉欣<sup>1</sup>,宋永会<sup>1\*</sup>

1.中国环境科学研究院水生态环境研究所

2.辽宁大学环境学院

**摘要** 表面流人工湿地在净化污水过程中,伴随有温室气体产生和排放,如何实现减污降碳之间的平衡在全球气候变暖背景下受到关注。系统综述了表面流人工湿地植物特性、温度、水力停留时间(HRT)和碳氮比(C/N)等因素对氮磷去除与温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O)排放的影响,归纳了温室气体代谢路径及功能基因,提出湿地减污降碳协同优化路径。结果表明:植物特性、温度、HRT及C/N等关键因素通过协同调控湿地的氧化还原环境、碳源供给以及微生物活性与代谢过程,影响氮磷去除效率和温室气体的产排过程。表面流人工湿地CO<sub>2</sub>产生路径主要为有机物分解及微生物呼吸作用等,而其去除主要通过植物光合作用固定实现;CH<sub>4</sub>主要产生于有机物厌氧分解过程,其去除主要路径为好氧化过程;N<sub>2</sub>O主要产生于硝化和反硝化过程,其去除主要依赖反硝化过程将其还原为N<sub>2</sub>。针对表面流人工湿地氮磷去除和温室气体减排协同优化路径,提出植物配置和管理、C/N和水力调控、人工曝气等措施。未来应重点围绕多组学融合的微生物过程与机制解析、全生命周期评价与系统碳效益综合量化、数据驱动的智能模拟与优化调控等方向开展研究,为强化表面流人工湿地减污降碳协同、提升表面流人工湿地运行与调控水平提供支撑。

**关键词** 表面流人工湿地;氮磷去除;温室气体;优化路径;减污降碳

中图分类号:X703 文章编号:1674-991X(2026)03-0862-11 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20260060

## Influencing factors and optimization strategies for pollution reduction and carbon mitigation in surface-flow constructed wetlands

YU Haichen<sup>1,2</sup>, HOU Congyu<sup>1</sup>, BAI Jing<sup>1\*</sup>, ZHAO Jian<sup>1</sup>, LI Jiabin<sup>1</sup>, SONG Yonghui<sup>1\*</sup>

1.Institute of Water Ecology and Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2.School of Environment, Liaoning University

**Abstract** During wastewater treatment in surface-flow constructed wetlands (SFCWs), greenhouse gases (GHGs) are simultaneously produced and emitted. Achieving a balance between pollution reduction and carbon mitigation has therefore attracted increasing attention in the context of global climate change. This study systematically reviews the effects of key factors—including plant characteristics, temperature, hydraulic retention time (HRT), and carbon-to-nitrogen ratio (C/N)—on nitrogen and phosphorus removal as well as GHGs (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O) emissions in SFCWs. It further summarizes the metabolic pathways and associated functional genes of GHGs, and proposes synergistic optimization strategies for pollution reduction and carbon mitigation. The results indicate that key factors, including plant characteristics, temperature, HRT, and C/N ratio, jointly regulate the redox environment, carbon availability, and microbial activity and metabolic processes in SFCWs, thereby influencing nitrogen and phosphorus removal efficiency as well as GHG production and emissions. CO<sub>2</sub> in SFCWs is primarily generated through organic matter decomposition and microbial respiration, while its removal is mainly achieved *via* fixation through plant photosynthesis. CH<sub>4</sub> is predominantly produced during anaerobic decomposition of organic matter, and its removal mainly occurs through aerobic oxidation. N<sub>2</sub>O is mainly generated during nitrification and denitrification processes, and its removal largely depends on further reduction to N<sub>2</sub> *via* denitrification. To achieve

收稿日期:2026-01-23

基金项目:海南省国际科技合作研发项目(GHYF2025003);国家重点研发计划项目(2021YFC3201500)

作者简介:于海晨(1998—),女,硕士研究生,主要从事水污染治理技术研究, yhc7826@163.com

\*通信作者:1.白静(1986—),女,高级工程师,博士,主要从事水环境模拟研究, baijing@caes.org.cn

2.宋永会(1967—),男,研究员,博士,主要从事水污染控制与流域治理技术研究, songyh@caes.org.cn

synergistic optimization of nitrogen and phosphorus removal and GHG mitigation in SFCWs, strategies such as optimized vegetation configuration and management, regulation of C/N ratio and hydraulic conditions, and artificial aeration are proposed. Future research should focus on integrating multi-omics approaches to elucidate microbial processes and mechanisms, conducting life cycle assessment for comprehensive quantification of system-level carbon benefits, and developing data-driven modeling for intelligent simulation and optimization. These efforts will support the synergistic enhancement of pollution reduction and carbon mitigation, and thereby improve the operation and regulation of SFCWs.

**Key words** surface-flow constructed wetland; nitrogen and phosphorus removal; greenhouse gas; optimization strategy; pollution reduction and carbon mitigation

氮(N)和磷(P)等营养盐通过降雨径流、农业排水、生活污水和工业废水等多种途径进入水库、湖泊等水体,导致水体富营养化问题日益突出。基于约120万条河流监测数据的最新评估显示,与无显著人类干扰的参考状态相比,全球河流总氮(TN)和总磷(TP)浓度分别提高约35%和14%,世界约1/2人口受到藻华威胁<sup>[1]</sup>。在“双碳”目标背景下,人工湿地作为一种基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS),在水体污染治理方面展现出独特优势。其中表面流人工湿地是一种模拟天然湿地结构与功能的人工水处理系统,不仅能有效削减氮磷,还兼具碳汇、景观和生物多样性保护等多重生态功能,并常用于多种微污染水和废水的处理,包括河流微污染水体、城镇污水处理厂尾水、农村生活污水、养殖废水等。在表面流人工湿地中,自由水流经湿地,通过物理、化学和生物过程去除氮磷污染物,具体包括悬浮物沉降、植物吸收、微生物转化和降解等过程<sup>[2]</sup>。而这些过程与碳循环及温室气体排放密切相关,表面流人工湿地内部复杂的微生物代谢及氧化还原环境变化驱动温室气体的产生与排放,使其在发挥生态净化功能的同时可能成为CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的重要排放源。因此,如何在保障污染物去除效率的同时有效调控温室气体排放,成为表面流人工湿地优化运行需解决的问题。

在实际运行中,表面流人工湿地因具有自由水面特征,在高营养盐负荷条件下易发生藻类过度繁殖;同时,底栖动物活动也可能通过扰动水-沉积物界面,改变局部溶解氧(DO)分布及界面物质交换过程,进而对氮磷去除效率产生影响<sup>[3-4]</sup>。此外,水力条件不均、可利用有机碳不足及环境因子波动等问题,同样限制湿地的污染物去除效率并可能加剧温室气体排放<sup>[5]</sup>。表面流人工湿地的净化效能受多因素共同影响,包括植物特性、水力停留时间(HRT)、湿地面积与水深等设计参数,以及温度、pH与DO等运行环境条件。这些因素通过调控氮磷迁移转化路径

及温室气体产生与转化过程,决定湿地的净化性能及其温室气体排放特征。因此,本文在总结表面流人工湿地氮磷去除与温室气体排放影响因素基础上,归纳温室气体代谢路径及功能基因,提出表面流人工湿地减污降碳协同优化路径,以期对表面流人工湿地减污降碳协同管理和优化提供重要参考。

## 1 表面流人工湿地氮磷去除与温室气体排放的影响因素

表面流人工湿地中氮磷去除由植物、微生物与基质协同作用实现,受DO浓度及氧化还原分区共同影响,并与温室气体的产生与转化过程耦合。在好氧区,有机氮经矿化与硝化作用转化为硝酸盐(NO<sub>3</sub>-N),同时伴随CO<sub>2</sub>的产生;在厌氧区,NO<sub>3</sub>-N通过反硝化及厌氧氨氧化转化为氮气(N<sub>2</sub>)实现永久去除,但在不完全反硝化条件下可能产生N<sub>2</sub>O排放。同时,厌氧环境促进有机质分解及产CH<sub>4</sub>过程,而界面及根际供氧可驱动CH<sub>4</sub>氧化,降低其净排放。磷以颗粒沉降截留和基质吸附、化学沉淀固持为主,植物与微生物同化为辅,缺氧或扰动条件下能发生再释放。此外,植物对氮、磷的直接吸收及沉积物滞留多为暂存,需通过收割移除或长期稳定埋藏才能实现净去除。关键过程见图1<sup>[6]</sup>。

### 1.1 植物特性

植物直接吸收氮磷等营养盐,并通过根系泌氧、分泌有机物以及为微生物提供附着空间,形成有利于硝化与反硝化的氧化还原微环境,进而强化氮的生物转化。同时,根系及凋落物增加沉积物中的有机质含量和表面活性位点,增强磷的吸附与固定,整体上提高表面流人工湿地对氮磷的去除效率<sup>[7]</sup>。大型表面流人工湿地的长期试验结果表明,在相同水力与污染物负荷条件下种植芦苇,湿地的TN去除率(40%)较无植物水体提高20%<sup>[8]</sup>。植物氮磷吸收能力差异、根际特征及其周围微生物群落结构不同,造成表面流人工湿地中氮磷的去除效率差异<sup>[9]</sup>。在相

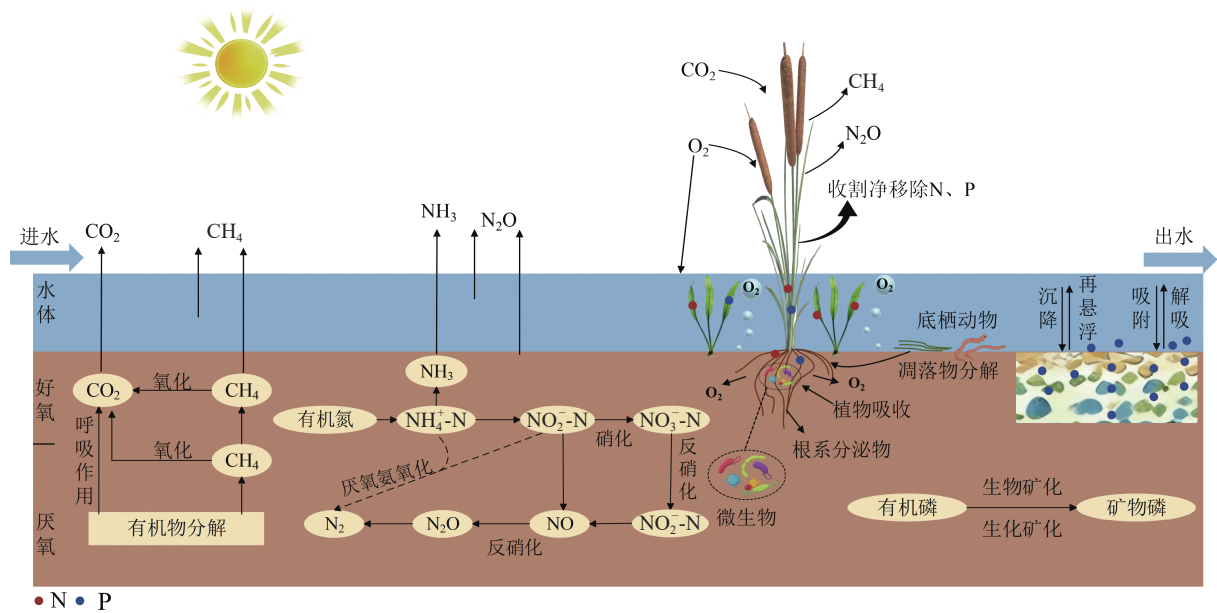


图 1 表面流人工湿地氮磷去除与温室气体排放过程示意<sup>[6]</sup>

Fig.1 Schematic of nitrogen and phosphorus removal and GHG emissions in surface-flow constructed wetlands

同水深和进水浓度等运行条件下,种植香蒲的表面流人工湿地具有较高的生物量和致密的冠层结构,降低了水体 DO 浓度并提高水温,增加水体中缺氧区的比例,从而促进反硝化过程,使其 TN 去除率(40.0%)显著高于种植茭白(15.3%)和荷花(13.6%)的湿地;但香蒲与荷花的根系分泌物促进了基质对磷的吸附与固定作用,使湿地具有较高的 TP 去除率,分别为 44.1% 和 29.7%<sup>[10]</sup>。此外,不同植物组合和植物覆盖度通过增强湿地内微生物过程和营养盐转化途径的功能多样性和冗余度,从而影响氮磷去除效率<sup>[11]</sup>。湿地中挺水植物与沉水植物组合配置,相比单一植物种植的湿地, TN 去除率提升 10%~15%, TP 去除率提升 8%~12%<sup>[12]</sup>。适度的植物覆盖有助于维持湿地中水体、空气、植被与基质之间的多界面接触,改善通气和传质条件,促进 DO 扩散、水体循环及微生物代谢过程,进而提高氮磷的去除效率<sup>[13]</sup>。

表面流人工湿地中植物影响 CO<sub>2</sub> 通量排放特征。在年尺度上,种植植物的湿地整体上表现为 CO<sub>2</sub> 的净汇,而未种植植物的水体则表现为 CO<sub>2</sub> 的净源;并且不同植物类型造成湿地温室气体排放具有特异性,种植芦苇的湿地表现出更强的固碳能力,其 CO<sub>2</sub> 通量可达 -552.13 mg/(m<sup>2</sup>·h),低于种植香附子的湿地[-88.26 mg/(m<sup>2</sup>·h)]<sup>[14]</sup>。此外,不同种类植物的效应差异与植物的根系泌氧能力、通气组织发达程度和有机质分泌量密切相关。漂浮植物(如浮萍)覆盖水面后,会抑制大气复氧,导致水体缺氧,从而增强产 CH<sub>4</sub> 过程并促进 CH<sub>4</sub> 的积累和排放<sup>[15]</sup>。

湿地植物对 CH<sub>4</sub> 通量的影响机制较复杂,与 CH<sub>4</sub> 气体的产生、消耗和输送等过程均有密切的关系。在表面流人工湿地中,以鸢尾为优势种的区域中 CH<sub>4</sub> 排放通量[318 mg/(m<sup>2</sup>·d)]显著高于以宽叶香蒲或甜茅为优势种的区域[160 mg/(m<sup>2</sup>·d)]<sup>[16]</sup>。

## 1.2 温度

温度直接影响微生物代谢活性、植物吸收速率、DO 浓度及物理化学过程速率,进而影响氮磷的去除效率<sup>[17]</sup>。不同温度下表面流人工湿地氮磷去除效果见表 1。在低温区间(<10 °C),微生物活性受限,植物生长基本停滞,DO 传质能力受限,上覆水体、界面及表层沉积物的 DO 分布与氧化还原梯度减弱,从而使氮的去除效率下降, TN 去除率为 10%~30%<sup>[18-22]</sup>。在该温度条件下,磷去除主要依赖于物理吸附与化学沉淀, TP 去除率为 20%~40%<sup>[21-24]</sup>。在中温区间(15~25 °C),微生物代谢活性增强,硝化与反硝化过程增强, TN 去除率提升 20%~30%<sup>[25-28]</sup>。植物处于旺盛生长期,根际泌氧量增加 30%~50%,根系周围的氧化还原梯度强化硝化与反硝化过程<sup>[29]</sup>。同时,温度升高提高分子扩散系数和界面反应速率,促进磷酸根(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)与金属离子在基质表面的接触与反应,加快磷的吸附和沉淀过程,使 TP 去除率提升约 20%<sup>[26-27,30-31]</sup>。当温度超过 30 °C,微生物群落结构改变,氮代谢途径变化,过度氨化使氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)积累<sup>[32]</sup>。同时温度升高,DO 浓度下降、根际泌氧不足与耗氧增加,抑制硝化过程<sup>[35]</sup>。此外,高温促进铁、铝氧化物的还原溶解和结合态磷的再释放,削弱基

表1 不同温度和 HRT 条件下表面流人工湿地氮磷去除影响汇总

Table 1 Summary of nitrogen and phosphorus removal in surface-flow constructed wetlands under different temperature and hydraulic retention time conditions

湿地面积/m <sup>2</sup>	运行时间	植物种类	处理的污水	温度/°C	HRT/d	进水浓度/(mg/L)			去除率/%			数据来源
						TN	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TP	TN	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TP	
34	2年	芦苇	微污染河水	2.2	1.8	26.98	20.73	0.53	17.2	36.2	37.6	文献[22]
183.6	2年	狐尾藻	养殖废水	22.3	2.7	331.43	252.86	—	50.4	53.7	—	文献[28]
319.6	2年	狐尾藻	养殖废水	21.4	7.1	87.14	61.43	—	52.5	51.2	—	文献[28]
490	6年	香蒲	农田退水	27.7	0.41	6.69	—	1.00	23.4	—	38.1	文献[10]
					0.83	12.09	—	1.86	27.8	—	37.1	
850	3年	莲、香蒲、茭白、水芹	污水处理厂尾水	1	—	15.29	6.85	0.81	19.0	27.1	28.0	文献[21]
				9.8	—	12.23	2.70	0.76	33.0	44.6	40.0	
				22.3	—	15.13	7.19	0.82	30.9	32.5	33.3	
900	1年	芦苇、香蒲	城市生活污水和工业废水	19.7	6	39.60	29.10	3.60	59.9	65.0	61.1	文献[26]
				<15	0.7	—	—	—	10.3	30.4	29.1	文献[27]
				15~25	0.7	—	—	—	26.4	56.1	46.2	
8 861	8个月	芦苇、香蒲	农田退水	>25	0.7	—	—	—	19.1	55.9	48.1	文献[27]
				0.6	—	—	—	18.7	37.8	—		
				1	—	—	—	22.4	38.5	—		
1 140	1.5年	鸢尾、狐尾藻、芦苇、莲、再力花	微污染河水	27	3	—	—	—	24.1	40.9	—	文献[33]
				5	—	—	—	31.9	38.8	—		
				7	—	—	—	33.5	39.9	—		
				0.6	—	—	—	20.1	21.8	—		
				1	—	—	—	21.2	24.2	—		
				8.5	3	—	—	22.0	25.3	—		
14 000	1年	芦苇、香蒲等	微污染河水	8.6	2.43	—	10.68	1.78	—	55.7	36.0	文献[24]
				16.3	3.18	—	6.09	0.81	—	70.1	55.6	
				21.3	1.71	—	5.97	0.75	—	45.8	27.5	
18 000	5年	梭鱼草、香蒲、伞形天胡荽、蘆草	园地退水	—	3	—	1.46	—	—	64.4	—	文献[34]
24 100	3年	芦苇、莲	微污染河水	1~11	1.17	1.63	0.62	—	16.4	67.9	—	文献[20]
				15~17	—	1.50	0.50	—	36.3	77.9	—	
38 000	16年	梭鱼草、美人蕉、慈姑、灯心草、蘆草、沼地黍、	园地退水	23~28	—	1.61	0.48	—	63.1	81.2	—	文献[34]
				—	5.5	—	3.51	—	—	77.2	—	

注:—表示文献中未说明。

质通过化学沉淀和吸附作用对磷的固定能力<sup>[36-37]</sup>。

表面流人工湿地 CO<sub>2</sub> 排放在季节尺度上呈现源汇交替特征。研究表明,在植物生长季节,CO<sub>2</sub> 通量达到最低,为-1 308.36 mg/(m<sup>2</sup>·h);而在冬季(12月),由于植物凋亡及微生物活性降低,湿地转变为

CO<sub>2</sub> 源,CO<sub>2</sub> 排放速率最高可达 126.49 mg/(m<sup>2</sup>·h)。在为期 2 年的监测过程中表面流人工湿地 CO<sub>2</sub> 通量与季节性气温呈显著正相关关系<sup>[14]</sup>。基于长时间序列监测数据及机器学习模型分析结果,温度是驱动表面流人工湿地 CH<sub>4</sub> 排放的关键环境因子之一。温

度升高促进产甲烷菌活性,提高有机质厌氧分解速率。在温度与水位的协同作用下,夏季湿地  $\text{CH}_4$  排放显著增强并形成全年峰值<sup>[38]</sup>。温度对表面流人工湿地  $\text{CH}_4$  排放具有调控作用,在低温条件( $<9.5\text{ }^\circ\text{C}$ )下,微生物活性受到抑制, $\text{CH}_4$  排放通量维持在较低水平 $[0.05\sim 0.34\text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})]$ ;而当温度高于  $14.5\text{ }^\circ\text{C}$  时,产甲烷菌活性增强并加速底物转化, $\text{CH}_4$  排放通量显著增加 $[0.6\sim 19.1\text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})]$ <sup>[39]</sup>。

### 1.3 水力停留时间

氮磷去除效率与 HRT 密切相关,HRT 是影响表面流人工湿地净化效果的重要水力参数之一<sup>[40]</sup>。HRT 较短时,水流在湿地中停留不足,氮磷与基质、植物及微生物的接触时间受限,硝化、反硝化等氮转化过程难以充分进行,同时限制了颗粒沉降、基质吸附和植物吸收等磷去除过程,从而降低氮磷去除性能<sup>[41]</sup>。适宜的 HRT 有助于在湿地中维持稳定的氧化还原梯度,促进有机氮矿化和硝化过程的进行,并为反硝化及其他还原反应提供适宜的反应条件;同时强化基质吸附、化学沉淀和植物吸收等途径,保障氮磷去除效率<sup>[41]</sup>。在高纬度地区的表面流人工湿地中,当水温超过  $16\text{ }^\circ\text{C}$  且 HRT 超过 3 d、植物生长良好时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率为 70.1%,TP 去除率为 55.6%,而在 HRT 缩短至 1.71 d 时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TP 去除率较前者降低 20~30 个百分点<sup>[24]</sup>(表 1)。夏季运行期的表面流人工湿地处理微污染河水的试验结果表明,当 HRT 为 3 d 时,TN 去除率为 24.1%,HRT 延长至 5 d 时,TN 的去除效果较好,去除率达到 31.9%,而 HRT 延长至 7 d 时去除率提升有限<sup>[33]</sup>。

然而,当 HRT 过长,水流速度降低,湿地中 DO 浓度下降,易形成缺氧环境,抑制硝化作用,同时可能因缺乏碳源使反硝化过程受限,导致 TN 去除率下降;而植被凋落物分解释放和鸟类排泄等外源输入,在还原条件下与沉积物中磷的再解吸相叠加,可能导致磷去除率下降,甚至引起出水 TP 浓度升高<sup>[42-43]</sup>。此外,长期运行监测也表明,最佳 HRT 应结合季节和温度因素进行动态调控:夏季高温条件下反硝化速率较快,适当延长 HRT 能提高氮的去除效率;而在冬季,低温抑制微生物活性,延长 HRT 对氮去除效果影响有限<sup>[44]</sup>。

### 1.4 C/N

进水 C/N 是影响湿地反硝化过程及温室气体排放的重要控制因子。理论上,当废水中可利用有机碳源不足时,反硝化过程受限,易导致  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  或  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  的积累,并诱导  $\text{N}_2\text{O}$  的产生与释放。基于表

面流人工湿地的小试试验表明,微生物对氮去除贡献占据主导地位(51.43%~77.74%),当进水 C/N 为 4 时,湿地对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  及 TN 表现出较优的去除效果;当进水 C/N 低于 3.5 时,进水中高达 20%~30% 的氮素会以  $\text{N}_2\text{O}$  的形式直接释放,并且  $^{15}\text{N}$  同位素示踪结果表明该  $\text{N}_2\text{O}$  主要来源于缺氧阶段的反硝化过程<sup>[45]</sup>。提高进水 C/N 可增加湿地中可利用碳源供给,从而为反硝化过程提供充足的电子供体,促进  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  向  $\text{N}_2$  的还原转化,进而显著提高氮去除效率<sup>[46]</sup>。表面流人工湿地现场试验表明,当进水 C/N 为 5:1~10:1 时 TN 去除率最高,达到 70.4%,并且  $\text{N}_2\text{O}$  的排放通量降至最低,为  $4.12\text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ;进一步的微生物分析表明,C/N 的变化改变了反硝化功能菌群的相对丰度,驱动了湿地脱氮效率的大幅提升<sup>[47-48]</sup>。基于表面流人工湿地温室气体排放的荟萃分析表明, $\text{CH}_4$  排放量与进水总有机碳(TOC)负荷呈显著的正相关性,其排放量占进水 TOC 负荷的 16.9%; $\text{N}_2\text{O}$  排放量与进水 TN 负荷存在显著的正相关性,其排放量占进水 TOC 负荷的 0.13%<sup>[49]</sup>。此外,甲烷厌氧氧化过程可与反硝化过程发生耦合,在无氧条件下以  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  或  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  作为电子受体,使  $\text{CH}_4$  氧化为  $\text{CO}_2$  并完成反硝化反应。在表面流人工湿地中,当  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度升高时,甲烷氧化过程增强,导致  $\text{CO}_2$  排放增加而  $\text{CH}_4$  排放降低<sup>[50]</sup>。在处理农田排水的表面流人工湿地中,发现在  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度接近 0 时,湿地  $\text{CH}_4$  通量出现峰值<sup>[51]</sup>。

## 2 表面流人工湿地温室气体的代谢路径及功能基因

### 2.1 $\text{CO}_2$

表面流人工湿地的植物通过光合作用吸收并固定大气中的  $\text{CO}_2$ ,植物的呼吸作用和微生物的氧化分解作用将部分有机物重新转化为  $\text{CO}_2$  并释放至环境中<sup>[52]</sup>。同时在有机物的分解过程中以及微生物的代谢活动中也会产生  $\text{CO}_2$ 。不同过程的关键功能基因见表 2。 $\text{CO}_2$  主要通过植物-大气、水-气界面排放到大气中。植物通过影响根系呼吸作用、积累有机碳源、提供微生物附着场所等途径影响  $\text{CO}_2$  的产生与排放过程<sup>[53]</sup>。表面流人工湿地  $\text{CO}_2$  通量因植物的长势在季节尺度上呈现源-汇交替特征<sup>[54]</sup>。此外,植物种植的密度及物种丰富度在影响氮磷去除效率的同时,也会引起  $\text{CO}_2$  排放量的变化<sup>[55]</sup>。

### 2.2 $\text{CH}_4$

湿地中  $\text{CH}_4$  的产生与转化主要受微生物过程调

表 2 CO<sub>2</sub> 的主要功能基因及相关代谢类型

Table 2 Major functional genes of CO<sub>2</sub> and their associated metabolic pathways

主要代谢类型	功能基因	过程
卡尔文循环	<i>cbbL(rbcL)</i> 、 <i>cbbM</i>	CO <sub>2</sub> 固定(光合作用)
异养固碳	<i>pyc</i> 、 <i>accA</i>	CO <sub>2</sub> 固定(兼性碳固定)
丙酮酸好氧化	<i>pdh</i> 基因簇( <i>aceE</i> 、 <i>aceF</i> 、 <i>lpdA</i> )	CO <sub>2</sub> 产生(有氧呼吸过程之一)
TCA循环	<i>gltA</i> 、 <i>icd</i> 、 <i>sucA</i>	CO <sub>2</sub> 产生(有氧呼吸过程之一)
丙酮酸厌氧氧化	<i>por</i>	CO <sub>2</sub> 产生

控(图 2)。在严格厌氧条件下,产甲烷古菌以乙酸、甲基化合物及 H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 为底物生成 CH<sub>4</sub><sup>[56]</sup>。根据底物类型的不同,产 CH<sub>4</sub> 途径可分为乙酸营养型、氢营养型和甲基营养型等,其关键功能基因见表 3<sup>[57]</sup>。CH<sub>4</sub> 的产生过程受底物的种类和数量、微生物活性等诸多因素的影响<sup>[58]</sup>。此外,温度、地理位置、有机碳浓度及植被类型等均影响产甲烷古菌群落结构及代谢活性,从而影响 CH<sub>4</sub> 生成路径和通量<sup>[57]</sup>。氢营养型产甲烷古菌在湿地沉积物和高浓度有机碳环境中占优势,而乙酸营养型产甲烷古菌在湿地浅层土和低浓度有机碳环境中占优势<sup>[59-60]</sup>。

CH<sub>4</sub> 的消耗主要通过好氧化途径实现,最终

转化为 CO<sub>2</sub><sup>[61]</sup>。此外,植物根际区域可形成局部好氧环境,从而增强 CH<sub>4</sub> 氧化作用并抑制 CH<sub>4</sub> 向大气释放<sup>[62]</sup>。同时,有机碳输入及 pH 变化通过驱动微生物群落结构及其互作网络的重组,进一步影响 CH<sub>4</sub> 的生成与排放强度,且 CH<sub>4</sub> 排放与微生物网络复杂度密切相关<sup>[63]</sup>。由于在 100 年的尺度上,CH<sub>4</sub> 的全球增温潜势是 CO<sub>2</sub> 的 27 倍<sup>[64]</sup>,在表面流人工湿地运行与调控过程中,应通过降低产 CH<sub>4</sub> 速率或增强 CH<sub>4</sub> 氧化过程,实现对 CH<sub>4</sub> 排放的有效控制。

### 2.3 N<sub>2</sub>O

微生物驱动的氮代谢过程是表流人工湿地中 N<sub>2</sub>O 产生的主要来源。在氮循环过程中,多种生物化学反应均可能产生 N<sub>2</sub>O(图 3)。其中 N<sub>2</sub>O 主要产生于硝化和反硝化过程,而其去除主要通过反硝化过程还原为 N<sub>2</sub> 实现,涉及的主要功能基因及相关代谢类型见表 4。在湿地表层水体及植物根际等相对富氧环境中,硝化作用占主导地位。在 NH<sub>3</sub>-N 氧化过程中,中间产物(如 NH<sub>2</sub>OH)在羟胺氧化酶(*hao*)催化下,由于电子传递不完全可能发生歧化反应,从而生成并释放 N<sub>2</sub>O<sup>[66]</sup>。此外,在低氧条件下,部分氨氧化微生物可利用 NO<sub>2</sub>-N 作为电子受体,将其还原为 N<sub>2</sub>O,本质上为硝化细菌介导的反硝化作用<sup>[67]</sup>。

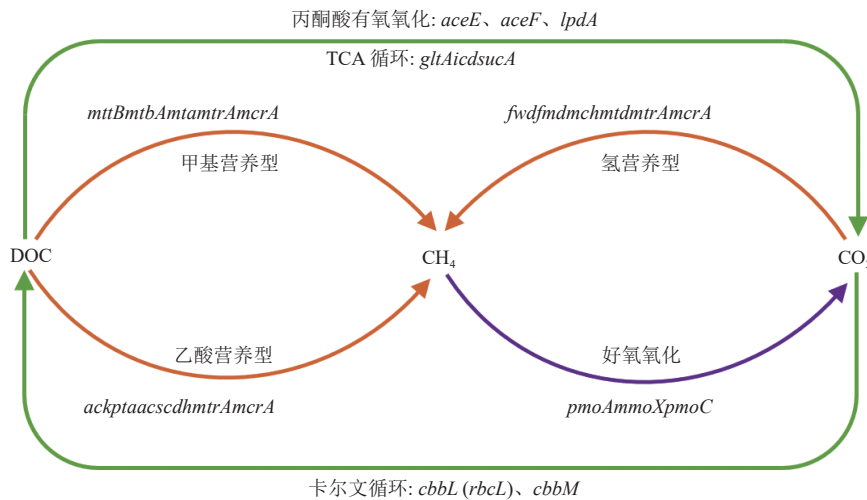


图 2 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 的代谢途径及相关功能基因<sup>[65]</sup>

Fig.2 Metabolic pathways and associated functional genes of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>

表 3 CH<sub>4</sub> 的主要功能基因及相关代谢类型

Table 3 Major functional genes of CH<sub>4</sub> and their associated metabolic pathways

主要代谢类型	功能基因	过程类型	关键底物
甲基营养型	<i>mtmB</i> 、 <i>mtbA</i> 、 <i>mttB</i> 、 <i>mta</i> 基因族(活化甲胺类、甲醇)、 <i>mtrA</i> (甲基转移)、 <i>mcrA</i> (最终产 CH <sub>4</sub> )	CH <sub>4</sub> 产生过程	甲胺类、甲醇(间接电子供体)、H <sub>2</sub>
氢营养型	<i>fwdfmd</i> (活化)、 <i>mch</i> (转移与环化)、 <i>mtd</i> (还原反应)、 <i>mtrA</i> (甲基转移)、 <i>mcrA</i> (最终产 CH <sub>4</sub> )	CH <sub>4</sub> 产生过程	H <sub>2</sub> (电子供体)、CO <sub>2</sub>
乙酸营养型	<i>ack</i> 、 <i>pta</i> 、 <i>acs</i> (乙酸活化)、 <i>cdh</i> (中间产物裂解)、 <i>mtrA</i> (甲基转移)、 <i>mcrA</i> (最终产 CH <sub>4</sub> )	CH <sub>4</sub> 产生过程	乙酸(间接电子供体)
CH <sub>4</sub> 好氧化	<i>pmoA</i> (膜结合)、 <i>mmoX</i> (活化 CH <sub>4</sub> )、 <i>mmoC</i> (电子传递)	CH <sub>4</sub> 消耗过程	O <sub>2</sub> (电子受体)

在缺氧环境中,反硝化过程是将 $\text{NO}_3^-$ -N 逐步还原为 $\text{N}_2$ 的关键途径,其中 $\text{N}_2\text{O}$ 为重要中间产物<sup>[68]</sup>。当环境条件(如低 pH、 $\text{NO}_2^-$ -N 积累或碳源不足)不利时,氧化亚氮还原酶( $\text{N}_2\text{O}$  reductase)的活性受到抑制,导致 $\text{N}_2\text{O}$ 无法进一步还原为 $\text{N}_2$ ,从而在系统中积累并最终释放至大气<sup>[69]</sup>。

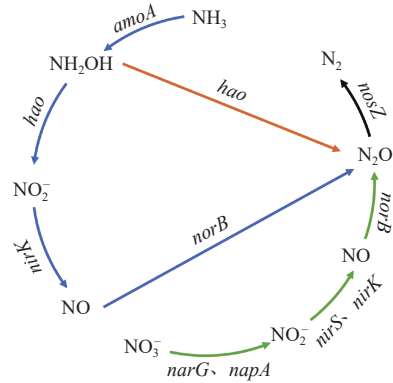


图 3  $\text{N}_2\text{O}$  的代谢途径及相关功能基因

Fig.3 Metabolic pathways and associated functional genes of  $\text{N}_2\text{O}$

表 4  $\text{N}_2\text{O}$  的主要功能基因及相关代谢类型

Table 4 Major functional genes of  $\text{N}_2\text{O}$  and their associated metabolic pathways

主要代谢类型	功能基因	过程类型
$\text{NH}_2\text{OH}$ 不完全氧化	<i>amoA</i> ( $\text{NH}_3\text{-N}\rightarrow\text{NH}_2\text{OH}$ )、 <i>hao</i> ( $\text{NH}_2\text{OH}\rightarrow\text{N}_2\text{O}$ )	$\text{N}_2\text{O}$ 产生过程
硝化菌反硝化	<i>amoA</i> ( $\text{NH}_3\text{-N}\rightarrow\text{NH}_2\text{OH}$ )、 <i>hao</i> ( $\text{NH}_2\text{OH}\rightarrow\text{NO}_2^-$ -N)、 <i>nirK</i> ( $\text{NO}_2^-$ -N $\rightarrow$ NO)、 <i>norB</i> (NO $\rightarrow$ $\text{N}_2\text{O}$ )	$\text{N}_2\text{O}$ 产生过程
反硝化菌反硝化	<i>narG</i> 、 <i>napA</i> ( $\text{NO}_3^-$ -N $\rightarrow$ $\text{NO}_2^-$ -N)、 <i>nirS</i> 、 <i>nirK</i> ( $\text{NO}_2^-$ -N $\rightarrow$ NO)、 <i>norB</i> (NO $\rightarrow$ $\text{N}_2\text{O}$ )	$\text{N}_2\text{O}$ 产生过程
$\text{N}_2\text{O}$ 还原	<i>nosZ</i> ( $\text{N}_2\text{O}\rightarrow\text{N}_2$ )	$\text{N}_2\text{O}$ 消耗过程

### 3 表面流人工湿地减污降碳协同优化路径

#### 3.1 优化植物配置和管理

优化植物配置和管理是实现表面流人工湿地减污降碳协同的重要路径。优化植物配置和组合可提高群落多样性,增加 DO 释放路径,维持较高的微生物附着量与酶活性,从而在一定程度上提高硝化与反硝化反应速率<sup>[70]</sup>。试验研究表明,植物的空间分布格局可以优化湿地内的水力流态分布,密集区以植物吸收和颗粒物沉降为主要去除途径,缓流区则以反硝化和进一步沉积为相对主导过程<sup>[71]</sup>。此外,针对表面流人工湿地中藻类过度繁殖及底栖动物扰动等生态干扰问题,可通过优化植物配置与群落结构提高遮光程度,并结合群落结构优化抑制藻类及

底栖动物过度繁殖,从而维持湿地氧化还原环境稳定,保障氮磷去除效率并降低温室气体排放风险<sup>[72]</sup>。

植物通过光合作用直接吸收和固定 $\text{CO}_2$ ,是表面流人工湿地中最主要的碳汇机制之一,湿地植物通过根际泌氧形成微氧带,促进 $\text{CH}_4$ 氧化,从而削弱 $\text{CH}_4$ 直排效应<sup>[73]</sup>。不同湿地植物生理生态特征影响根系分泌特征和泌氧能力,试验研究表明优化后的千屈菜与芦苇植物组合显著提高了根际微生物群落的丰富度与多样性,其对氮、磷的去除率较其他植物组合提高 11%~24%,同时 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 的平均排放通量分别降低约 5%、21%和 30%<sup>[74]</sup>。因此,优化植物配置可在提升污染物去除效率的同时,实现温室气体减排的协同效应,并提升生态系统稳定性与景观价值。

植物收割是维持湿地长期稳定运行的重要管理措施。植物收割通过移除枯落物及其所携带的氮、磷和有机碳,有效减少其在沉积物中的长期累积,从而缓解磷饱和效应并降低内源负荷,延缓湿地功能退化<sup>[75]</sup>。同时,收割可减少外源有机碳输入并改善根区氧化环境,抑制有机物分解及不完全反硝化过程,从而在维持氮磷去除效率的同时,间接降低 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放风险<sup>[76-77]</sup>。

#### 3.2 C/N 和水力调控

进水 C/N 是调控表面流人工湿地脱氮效果与温室气体排放的重要控制因子,其通过影响电子供体供给及碳氮转化路径,决定湿地的减污降碳协同效应。研究表明,当 C/N 维持在 5~10 时,反硝化过程能够充分进行,从而实现较高的氮去除效率,并有效减少中间产物 $\text{N}_2\text{O}$ 的积累,湿地整体全球增温潜势相对较低。在湿地运行初期或处理城镇污水尾水等低碳条件下,适度补充外源碳源有助于提升反硝化效率,实现污染物去除与温室气体减排的协同优化。此外,通过动态调控进水流量、保持适度水力负荷,可调节湿地水体的 HRT 和 DO 分布特征,维持相对富氧区与缺氧区的合理空间格局,从而避免湿地长期处于完全缺氧状态,抑制 $\text{CH}_4$ 生成<sup>[78]</sup>。较低或动态水位可在水体表层形成有利于硝化与甲烷氧化过程的氧化层,减少 $\text{N}_2\text{O}$ 和 $\text{CH}_4$ 的排放<sup>[79]</sup>。同时,合理的水力调控还可减少局部滞流区及营养盐富集,从而在一定程度上抑制藻类过度繁殖风险,维持湿地运行稳定性<sup>[80]</sup>。并且 HRT 对系统性能具有显著的双重效应:适当延长 HRT 有助于提高污染物去除效率,但可能强化厌氧环境并促进 $\text{CH}_4$ 生成;而过短的 HRT 虽可在一定程度上抑制 $\text{CH}_4$ 排放,却可能导致污染物停留时间不足,降低出水水质。

### 3.3 人工曝气

DO 是表面流人工湿地氮磷去除性能的重要限制因素。受复氧、光合作用产氧及耗氧反应的共同影响, 湿地 DO 浓度呈空间异质性: 上覆水体在复氧与光合产氧作用下 DO 浓度相对较高, 而沉积物及水-沉积物界面因耗氧强且扩散受限, DO 浓度相对较低, 同时植物根系径向泌氧在根际区形成好氧区。DO 浓度沿程变化取决于产氧-耗氧平衡: 高有机负荷、高温或强遮阴条件下耗氧增强、复氧受限, DO 浓度易下降; 当复氧与光合作用占优时, DO 浓度出现回升<sup>[81]</sup>。当进水水量增大或污染物负荷升高时, 在低温条件下植物供氧与微生物活性减弱, 导致湿地 DO 浓度下降, 硝化与有机物降解等过程受限, 从而降低 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 及有机物等去除效果, 并可能增加释磷风险<sup>[82]</sup>。研究发现, 适度曝气能改善湿地水体及根际的 DO 分布, 强化 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 硝化和有机物降解, 同时在空间上形成相邻的好氧区-厌氧区, 促进硝化与反硝化的协同作用, 也减少 N<sub>2</sub>O 的积累, 从而提升污染物去除效率<sup>[83]</sup>。

采用间歇曝气通过周期性调节湿地中 DO 浓度水平, 在时间尺度上交替形成以硝化为主的相对富氧阶段和以反硝化为主的缺氧阶段, 促进同步硝化反硝化过程, 提高 TN 去除效率; 同时, 间歇曝气通过改善氧化还原状态和传质条件, 增强基质表面金属氧化物等活性组分对磷的吸附与沉淀作用, 并促进微生物和植物生长, 提高对氮磷的生物同化和转化能力<sup>[84]</sup>。同时, 周期性氧环境的构建不仅能够有效抑制厌氧条件下的产 CH<sub>4</sub> 过程, 降低 CH<sub>4</sub> 排放量, 还可避免持续高 DO 条件下不完全反硝化引起的 N<sub>2</sub>O 积累, 从而实现污染物去除与温室气体减排的协同优化。

## 4 结语与展望

表面流人工湿地通过植物、基质与微生物耦合作用, 构建了以氧化还原分区为核心的多界面反应体系, 实现氮磷污染物的迁移转化与去除, 并伴随 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 等温室气体的产生。本文系统梳理了影响表面流人工湿地氮磷去除及温室气体排放的关键因素, 在阐明植物特性、温度、HRT 及进水 C/N 对湿地氮磷迁移转化与去除过程和温室气体排放的影响基础上, 解析温室气体代谢路径及功能基因, 最后归纳了优化植物配置和管理、C/N 和水力调控及人工曝气多维协同调控路径, 为实现污染物去除与温室气体排放之间的动态平衡提供依据。

未来研究可从以下 3 个方面开展: 1) 多组学融

合的微生物过程与机制解析。整合宏基因组、转录组及代谢组等多组学技术, 系统揭示功能微生物群落在氮转化(硝化/反硝化)与碳代谢(产 CH<sub>4</sub>/CH<sub>4</sub> 氧化)等关键过程中的动态响应、相互作用与调控网络。推动研究从宏观“过程表征”向微观“功能机制”的深化, 为减污降碳协同提供理论依据。2) 全生命周期评价与系统碳效益综合量化。构建涵盖污染物去除效能、温室气体排放与运行能耗的综合评价体系, 通过生命周期评价(LCA)方法, 从“建造—运行—维护”全生命周期定量评估表面流人工湿地的净环境效益与碳足迹, 明确其在污水治理与碳中和战略中的实际贡献与优化潜力。3) 数据驱动的智能模拟与优化调控。融合机器学习与机理模型, 实现应对去除效率波动与温室气体排放峰值的智能调控与优化, 实现表面流人工湿地减污降碳平衡。

### 参考文献

- [1] McDOWELL R W, LUO D W, PLETNYAKOV P, et al. Anthropogenic nutrient inputs cause excessive algal growth for nearly half the world's population[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 1830.
- [2] WANG J W, LONG Y N, YU G L, et al. A review on microorganisms in constructed wetlands for typical pollutant removal: species, function, and diversity[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 845725.
- [3] KANG Y, ZHANG J, XIE H J, et al. Enhanced nutrient removal and mechanisms study in benthic fauna added surface-flow constructed wetlands: the role of *Tubifex tubifex*[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 224: 157-165.
- [4] ZHAO X Y, ZHANG T S, CHEN X, et al. Exploring the resilience of constructed wetlands to harmful algal blooms disturbances: a study on microbial response mechanisms[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 383: 129251.
- [5] CHEN G G, MO Y Y, GU X, et al. Sustainability of global small-scale constructed wetlands for multiple pollutant control[J]. *npj Clean Water*, 2024, 7: 45.
- [6] WU H M, WANG R G, YAN P H, et al. Constructed wetlands for pollution control[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(4): 218-234.
- [7] BAI S W, CHEN J T, GUO M R, et al. Vertical-scale spatial influence of radial oxygen loss on rhizosphere microbial community in constructed wetland[J]. *Environment International*, 2023, 171: 107690.
- [8] MAURICE N, POCHE C, ADOUANI N, et al. Role of seasons in the fate of dissolved organic carbon and nutrients in a large-scale surface flow constructed wetland[J]. *Water*, 2022, 14(9): 1474.
- [9] KULSHRESHTHA N M, VERMA V, SOTI A, et al. Exploring the contribution of plant species in the performance of constructed wetlands for domestic wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology Reports*, 2022, 18: 101038.

- [10] SHU Y H, CUI Y L, GUO C Q, et al. Improving treatment performance in mature wetlands: the impact of emergent plant species[J]. *Ecological Engineering*, 2024, 206: 107325.
- [11] CHEN X W, DENG S J, JI B H, et al. Seasonal purification efficiency, greenhouse gas emissions and microbial community characteristics of a field-scale surface-flow constructed wetland treating agricultural runoff[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118871.
- [12] LUO Y M, CHEN Q, LIU F, et al. Both species richness and growth forms affect nutrient removal in constructed wetlands: a mesocosm experiment[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023, 11: 1139053.
- [13] HANNA R A, BORNE K E, ANDRÈS Y, et al. Effect of floating treatment wetland coverage ratio and operating parameters on nitrogen removal: toward design optimization[J]. *Water Science & Technology*, 2024, 89(6): 1466-1481.
- [14] 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.
- [15] RIBAUDO C, BENELLI S, BOLPAGNI R, et al. Macrophyte growth forms and hydrological connectivity affect greenhouse gas concentration in small eutrophic wetlands[J]. *Aquatic Botany*, 2023, 188: 103660.
- [16] JOHANSSON A E, GUSTAVSSON A M, ÖQUIST M G, et al. Methane emissions from a constructed wetland treating wastewater: seasonal and spatial distribution and dependence on edaphic factors[J]. *Water Research*, 2004, 38(18): 3960-3970.
- [17] MA Z, CUI Y L, GUO C Q, et al. Consistency analysis of the optimal combination of free water surface constructed wetland design optimization over different seasons[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 155: 105928.
- [18] LIU S T, ZHANG Y C, FENG X J, et al. Current problems and countermeasures of constructed wetland for wastewater treatment: a review[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 57: 104569.
- [19] FANG Y K, WANG H C, HAN J L, et al. Enhanced nitrogen removal of constructed wetlands by coupling with the bioelectrochemical system under low temperature: performance and mechanism[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 350: 131365.
- [20] WANG H Y, XU Y X, CHAI B B. Effect of temperature on microorganisms and nitrogen removal in a multi-stage surface flow constructed wetland[J]. *Water*, 2023, 15(7): 1256.
- [21] NSENGA KUMWIMBA M, DZAKPASU M, LI X Z, et al. Sequential detention pond-biogeochemical barrier-free water surface wetland system for effluent purification and river eutrophication control[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 41: 102075.
- [22] ZHENG Y C, WANG X C, GE Y, et al. Effects of annual harvesting on plants growth and nutrients removal in surface-flow constructed wetlands in northwestern China[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 83: 268-275.
- [23] KILL K, GRINBERGA L, KOSKIAHO J, et al. Phosphorus removal efficiency by in-stream constructed wetlands treating agricultural runoff: Influence of vegetation and design[J]. *Ecological Engineering*, 2022, 180: 106664.
- [24] ZHAO Z G, ZHANG Y X, PENG S J, et al. Study on surface flow constructed wetland treating slightly polluted river water in the high latitude and cold region[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 726/727/728/729/730/731: 3501-3505.
- [25] HU J, VARDANYAN L G, VILLAPANDO O, et al. Seasonal and spatial patterns of surface water quality in large-scale treatment wetlands with different vegetation communities[J]. *Ecological Engineering*, 2023, 197: 107125.
- [26] DZAKPASU M, WANG X C, ZHENG Y C, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus removal by a surface-flow constructed wetland for polluted river water treatment[J]. *Water Science and Technology*, 2015, 71(6): 904-912.
- [27] MANIQUIZ M C, LEE S Y, CHOI J Y, et al. Treatment performance of a constructed wetland during storm and non-storm events in Korea[J]. *Water Science and Technology*, 2012, 65(1): 119-126.
- [28] WANG L S, HE Z B. Enhanced nitrogen removal and quantitative molecular mechanisms in a pilot-scale multistage constructed wetlands planted with *Myriophyllum aquaticum* treating lagoon swine wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2022, 174: 106433.
- [29] WU K Y, CHEN L, WANG Q, et al. Seasonal dynamics of nitrogen and phosphorus in wetland plants: implications for efficient eutrophication control[J]. *Sustainability*, 2025, 17(8): 3443.
- [30] LI Y P, ZHANG H K, ZHU L Q, et al. Evaluation of the long-term performance in a large-scale integrated surface flow constructed wetland-pond system: a case study[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 309: 123310.
- [31] VYMAZAL J. Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(1): 61-69.
- [32] YU L F, LI R, PENG D C, et al. Rapid transition from complete nitrification to partial nitrification-anammox at low temperatures via thermal inactivation of nitrite oxidoreductase[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 490: 151762.
- [33] WEI D B, SINGH R P, LI Y K, et al. Nitrogen removal efficiency of surface flow constructed wetland for treating slightly polluted river water[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(20): 24902-24913.
- [34] WHITE S A. Design and season influence nitrogen dynamics in two surface flow constructed wetlands treating nursery irrigation runoff[J]. *Water*, 2018, 10(1): 8.
- [35] WANG Q, HU Y B, XIE H J, et al. Constructed wetlands: a review on the role of radial oxygen loss in the rhizosphere by macrophytes[J]. *Water*, 2018, 10(6): 678.
- [36] SÁNCHEZ-CARRILLO S, CATALÁN M, SADEGHI-NASSAJ S M, et al. Sediment phosphorus mobility in a semi-arid wetland with highly fluctuating hydrology[J]. *Ecological Processes*, 2025, 14(1): 77.
- [37] GIBBONS K J, BRIDGEMAN T B. Effect of temperature on

- phosphorus flux from anoxic western Lake Erie sediments[J]. *Water Research*, 2020, 182: 116022.
- [ 38 ] HE K Q, LI W H, ZHANG Y, et al. Temperature and water levels collectively regulate methane emissions from subtropical freshwater wetlands[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2025, 39(3): e2024GB008372.
- [ 39 ] ZHU N W, AN P, KRISHNAKUMAR B, et al. Effect of plant harvest on methane emission from two constructed wetlands designed for the treatment of wastewater[J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(4): 936-943.
- [ 40 ] VYMAZAL J. Do laboratory scale experiments improve constructed wetland treatment technology[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(22): 12956-12957.
- [ 41 ] ZHAO F X, ZHANG X W, XU Z H, et al. Review of hydraulic conditions optimization for constructed wetlands[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 370: 122377.
- [ 42 ] EL HANANDEH A, AKRAMI K. Assessment of nutrient removal in surface flow constructed wetland treating secondary effluent with low organic, nitrogen and phosphorus loads[J]. *Environments*, 2023, 10(5): 89.
- [ 43 ] NIU S H, GAO S W, ZHANG K, et al. Effects of hydraulic retention time and influent nitrate concentration on solid-phase denitrification system using wheat husk as carbon source[J]. *PeerJ*, 2023, 11: e15756.
- [ 44 ] PU Y S, LI Y P, ZHU L Q, et al. Long-term assessment on performance and seasonal optimal operation of a full-scale integrated multiple constructed wetland-pond system[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 862: 161219.
- [ 45 ] ITOKAWA H, HANAOKI K, MATSUO T. Nitrous oxide production in high-loading biological nitrogen removal process under low COD/N ratio condition[J]. *Water Research*, 2001, 35(3): 657-664.
- [ 46 ] NGUYEN T N P, CHAO S J, CHEN P C, et al. Effects of C/N ratio on nitrate removal and floc morphology of autohydrogenotrophic bacteria in a nitrate-containing wastewater treatment process[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 69: 52-60.
- [ 47 ] LI H F, LIU F, LUO P, et al. Stimulation of optimized influent C:N ratios on nitrogen removal in surface flow constructed wetlands: performance and microbial mechanisms[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 694: 133575.
- [ 48 ] WU J, ZHANG J, JIA W L, et al. Impact of COD/N ratio on nitrous oxide emission from microcosm wetlands and their performance in removing nitrogen from wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(12): 2910-2917.
- [ 49 ] MANDER Ü, TOURNEBIZE J, KASAK K, et al. Climate regulation by free water surface constructed wetlands for wastewater treatment and created riverine wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 72: 103-115.
- [ 50 ] RAGHOEBARSING A A, POL A, van de PAS-SCHOONEN K T, et al. A microbial consortium couples anaerobic methane oxidation to denitrification[J]. *Nature*, 2006, 440(7086): 918-921.
- [ 51 ] GROH T A, GENTRY L E, DAVID M B. Nitrogen removal and greenhouse gas emissions from constructed wetlands receiving tile drainage water[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2015, 44(3): 1001-1010.
- [ 52 ] MOINET G Y K, CIERAAD E, TURNBULL M H, et al. Effects of irrigation and addition of nitrogen fertiliser on net ecosystem carbon balance for a grassland[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 1715-1725.
- [ 53 ] BARBERA A C, BORIN M, CIRELLI G L, et al. Comparison of carbon balance in Mediterranean pilot constructed wetlands vegetated with different C4 plant species[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(4): 2372-2383.
- [ 54 ] SYED K H, FLANAGAN L B, CARLSON P J, et al. Environmental control of net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in a treed, moderately rich Fen in northern Alberta[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140(1/2/3/4): 97-114.
- [ 55 ] HAN W J, LUO G Y, LUO B, et al. Effects of plant diversity on greenhouse gas emissions in microcosms simulating vertical constructed wetlands with high ammonium loading[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 77: 229-237.
- [ 56 ] EVANS P N, BOYD J A, LEU A O, et al. An evolving view of methane metabolism in the Archaea[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2019, 17(4): 219-232.
- [ 57 ] 欧亚飞. 甲烷代谢古菌的地理分布格局及其新类群生态基因组学研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2024.
- [ 58 ] 冯小平, 王义东, 王博祺, 等. 盐分对湿地甲烷排放影响的研究进展[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(1): 237-246.
- FENG X P, WANG Y D, WANG B Q, et al. Effect of salts on methane emission from wetlands: a review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(1): 237-246.
- [ 59 ] LIU Y Q, YAO T D, GLEIXNER G, et al. Methanogenic pathways, <sup>13</sup>C isotope fractionation, and archaeal community composition in lake sediments and wetland soils on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, 118(2): 650-664.
- [ 60 ] 易悦, 周卓, 黄艳, 等. 我国产甲烷古菌研究进展与展望[J]. *微生物学报*, 2023, 63(5): 1796-1814.
- YI Y, ZHOU Z, HUANG Y, et al. Methanogen research in China: current status and prospective[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2023, 63(5): 1796-1814.
- [ 61 ] 陈欣. 人工湿地污水处理系统温室气体排放影响因素及减排措施研究[D]. 哈尔滨: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2020.
- [ 62 ] ZHANG K, WU X L, LUO H B, et al. CH<sub>4</sub> control and associated microbial process from constructed wetland (CW) by microbial fuel cells (MFC)[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 260: 110071.
- [ 63 ] LIN Y W, YI X Y, NING C, et al. Microbial mechanisms underlying differences of methane emissions between urban and rural wetlands[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2026, 212: 109993.
- [ 64 ] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2021: the physical science basis: working group I. contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge:

- Cambridge University Press, 2023.
- [ 65 ] CHEN K, FAN Y F, WEI Q Q, et al. Rural river reaches are emission hotspots for greenhouse gases[J]. *Journal of Hydrology*, 2026, 664: 134420.
- [ 66 ] WUNDERLIN P, MOHN J, JOSS A, et al. Mechanisms of N<sub>2</sub>O production in biological wastewater treatment under nitrifying and denitrifying conditions[J]. *Water Research*, 2012, 46(4): 1027-1037.
- [ 67 ] ROTHANS N, PABST M, van DIEMEN M, et al. Long-term multi-meta-omics resolves the ecophysiological controls of seasonal N<sub>2</sub>O emissions during wastewater treatment[J]. *Nature Water*, 2025, 3(5): 590-604.
- [ 68 ] POLD G, SAGHAÏ A, JONES C M, et al. Denitrification is a community trait with partial pathways dominating across microbial genomes and biomes[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 9495.
- [ 69 ] LIU Y R, HE Y Y, REN S Q, et al. Selective organic carbon enrichment influences nitrous oxide reduction by denitrifiers: electron competition insights[J]. *ACS ES&T Water*, 2022, 2(7): 1265-1275.
- [ 70 ] YANG L P, SHEN L Q, TAO J W, et al. Effects of plant species diversity and density of *Acorus calamus* and *Reineckea carnea* on nitrogen removal and plant growth in constructed wetlands during the cold season[J]. *Environmental Engineering Research*, 2024, 29(6): 220297.
- [ 71 ] JIANG L, CHUI T F M. Performance and sustainability of a multi-stage free water surface constructed wetland under seasonal change and shock loading[J]. *Ecological Engineering*, 2023, 186: 106834.
- [ 72 ] WEST M, FENNER N, GOUGH R, et al. Evaluation of algal bloom mitigation and nutrient removal in floating constructed wetlands with different macrophyte species[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 108: 581-588.
- [ 73 ] 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.
- [ 74 ] 高紫荆. 不同植物组合根际微环境对人工湿地性能及温室气体减排的影响研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2023.
- [ 75 ] LUO P, LIU F, LIU X L, et al. Phosphorus removal from lagoon-pretreated swine wastewater by pilot-scale surface flow constructed wetlands planted with *Myriophyllum aquaticum*[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 490-497.
- [ 76 ] 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.
- [ 77 ] MANDER Ü, MADDISON M, VALACH A C, et al. High methane emissions as trade-off for phosphorus removal in surface flow treatment wetlands[J]. *Aquatic Botany*, 2024, 190: 103719.
- [ 78 ] DYKES C A, PEARSON J, BENDING G D, et al. Spatial and temporal dynamics of methane and carbon dioxide fluxes in a constructed wetland[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 76: 108130.
- [ 79 ] CUI S H, LIU P F, GUO H N, et al. Wetland hydrological dynamics and methane emissions[J]. *Communications Earth & Environment*, 2024, 5: 470.
- [ 80 ] MARTÍN M, OLIVER N, HERNÁNDEZ-CRESPO C, et al. The use of free water surface constructed wetland to treat the eutrophicated waters of lake L'Albufera de Valencia (Spain)[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 50: 52-61.
- [ 81 ] DYKES C, PEARSON J, BENDING G D, et al. Hydraulic efficiency and mixing dynamics in surface flow constructed wetlands: Influence of design, vegetation phenology, and climate variability[J]. *Water Research*, 2025, 285: 124110.
- [ 82 ] ALLEN D J, FARRELL M, HUANG J Y, et al. Artificial aeration of an overloaded constructed wetland improves hypoxia but does not ameliorate high nitrogen loads[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 326: 116625.
- [ 83 ] WU S B, KUSCHK P, BRIX H, et al. Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: a nitrogen and organic matter targeted review[J]. *Water Research*, 2014, 57: 40-55.
- [ 84 ] HU Y S, ZHAO Y Q, ZHAO X H, et al. High rate nitrogen removal in an alum sludge-based intermittent aeration constructed wetland[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(8): 4583-4590. ◇