

MBBR 工艺强化工业园区废水处理的可行性分析及微生物特性研究

黄开龙^{1,2,3}, 糜雪², 丁新春², 杨庆³, 陈梦雪⁴, 王德朋^{2,*}, 张徐祥^{2,*}

(1. 南京大学宜兴环保研究院, 江苏宜兴 214200; 2. 南京大学环境学院水污染控制与资源绿色循环全国重点实验室, 江苏南京 210023; 3. 南京江岛环境科技研究院有限公司, 江苏南京 210019; 4. 南京高科环境科技有限公司, 江苏南京 210000)

摘要: 针对南京某工业园区污水处理厂面临的原位扩容与水质提标双重需求, 本研究采用移动床生物膜反应器(MBBR)工艺对传统厌氧-缺氧-好氧(AAO)系统进行强化改造, 系统评估了该技术在工业园区废水处理中的扩容与提标可行性, 并深入探究了其微生物群落特性。中试装置运行结果表明, 在夏季合适温度条件下, MBBR 系统可在 30 d 内快速形成稳定的生物膜, 并对化学需氧量(COD)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和总磷(TP)展现出良好的去除性能。在水力负荷提升至 150%(进水流量为 $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$)条件下, 夏秋季节出水水质稳定达到地表水准Ⅳ类标准; 而在冬春季节低温条件下, 除 COD 浓度略高于准Ⅳ类标准限值(30.87 ± 2.54) mg/L 外, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、总氮($\text{TN} \leq 10 \text{ mg/L}$)、TP 排放指标均满足准Ⅳ类标准要求, 验证了 MBBR 工艺的季节适应性与处理稳定性。微生物群落结构分析显示, 夏秋季节生物膜的群落多样性显著提升, 多种嗜热型异养菌显著富集; 而在冬春季节, 系统中富集了耐冷型微生物, 特别是硝化螺菌属的积累显著促进了低温条件下的脱氮效果。群落构建的生态过程分析进一步表明, 夏秋季节群落构建主要受到确定性过程主导, 而冬春季节则更受随机性过程驱动, 且群落更倾向于形成简化的种间互作网络, 以增强对低温扰动的生态稳定性。研究结果证实, MBBR 工艺在工业园区废水原位扩容与提标改造中具有良好的技术可行性与处理效能, 为低温条件下生物处理系统的优化运行提供了重要的实践参考。

关键词: MBBR; 工业园区废水; 强化处理; 低温脱氮; 微生物群落结构

中图分类号: X703

文献标识码: A

Feasibility Analysis and Microbial Characterization of MBBR-Enhanced Treatment for Industrial Park Wastewater

HUANG Kailong^{1,2,3}, MI Xue², DING Xinchun², YANG Qing³,
CHEN Mengxue⁴, WANG Depeng^{2,*}, ZHANG Xuxiang^{2,*}

(1. Yixing Environmental Protection Research Institute of Nanjing University, Yixing 214200, China; 2. State Key Laboratory of Water Pollution Control and Green Resource Recycling, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. Nanjing Jiangdao Institute of Environmental Research Co., Ltd., Nanjing 210019, China; 4. Nanjing Gaoke Environmental Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: The escalating challenges of rapid industrialization and increasingly stringent environmental regulations have placed immense pressure on existing wastewater treatment plants (WWTPs),

收稿日期: 2025-08-29

修回日期: 2025-10-21

接受日期: 2025-10-23

DOI: 10.20078/j.eep.20251009

基金项目: 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金资助项目(BE2022861); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52100068)

第一作者: 黄开龙(1988—), 男, 安徽滁州人, 高级工程师, 主要研究方向为废水低碳处理与资源化利用。E-mail: huangkl@nju.edu.cn

*通讯作者: 王德朋(1991—), 男, 山东聊城人, 副研究员, 主要研究方向为污水生物脱氮技术与微生物学调控研究。

E-mail: dpwang@nju.edu.cn

张徐祥(1978—), 男, 安徽天长人, 教授, 主要研究方向为水环境高风险污染物识别与控制理论、技术与装备。

E-mail: zhangxx@nju.edu.cn

particularly those within industrial parks. These facilities often face the dual imperative of expanding their treatment capacity to accommodate rising influent volumes and simultaneously upgrading their processes to meet higher effluent quality standards, while constrained by limited physical space. This study addresses these critical issues by presenting a comprehensive evaluation of an in situ upgrading strategy for a WWTP in a major industrial park in Nanjing, China. The technical approach involved the integration of a Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) process to enhance the performance of the traditional Anaerobic-Anoxic-Oxic (AAO) system. The study aimed to systematically evaluate the feasibility and efficacy of the MBBR-AAO hybrid for achieving significant capacity expansion and improving effluent quality to meet the stringent Class IV surface water standards. The results demonstrated a rapid and successful system start-up, with a mature and stable biofilm layer established on the MBBR carriers within 30 days during favorable summer temperatures. Under a demanding hydraulic loading rate increased to 150% of the original design capacity (corresponding to an influent flow rate of $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$), the hybrid system exhibited exceptional resilience. During warm seasons, the treated effluent consistently and reliably met all Class IV surface water quality standards. However, the system performance was most critically tested during cold seasons. Despite the inhibitory effects of low temperatures on microbial activity, the MBBR-enhanced process demonstrated remarkable robustness. The effluent chemical oxygen demand concentration was slightly elevated above the Class IV standard limit, with an average value of $(30.87 \pm 2.54) \text{ mg/L}$, while ammonia, total nitrogen, and total phosphorus concentrations all met the stringent requirements. This outcome confirms that the MBBR-enhanced process effectively achieved the dual goals of in situ capacity expansion and substantial effluent quality improvement for the complex industrial park wastewater. Analysis of the microbial community structure revealed a pronounced seasonal shift in community composition and assembly. During warm seasons, the biofilm community exhibited significantly higher α -diversity, with a notable enrichment of various thermophilic heterotrophic bacteria. Conversely, the microbial community shifted dramatically in cold seasons, with a clear enrichment of cold-tolerant microorganisms. Notably, the significant proliferation of the genus *Nitrospira* was crucial for sustaining effective nitrification under low-temperature conditions. The assembly of the microbial community in warm seasons was predominantly governed by deterministic processes. In contrast, community assembly during cold seasons shifted towards a greater influence of stochastic processes. Concurrently, microbial network analysis indicated that the interspecies interaction network became simplified in winter and spring, likely enhancing overall community resilience and stability. In conclusion, this study offers a robust and scalable solution applicable to WWTPs worldwide that are facing similar challenges of expansion and stringent effluent quality improvement.

Keywords: MBBR; Industrial park wastewater; Enhanced treatment; Low-temperature nitrogen removal; Microbial community structure

0 引 言

随着城市化进程加速, 污染物排放总量与种类持续攀升, 污水处理提标改造已成为水环境治理的必然趋势。回顾我国城镇污水排放标准演进历程, 其发展路径清晰体现了从综合到行业、从国家到地方的精细化管控转变, 总体呈现出污染物控制指标递增、排放要求持续趋严的特征。其中,

2023 年江苏省地方标准《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 32/4440—2022) 进一步要求长江沿线新建污水处理厂执行 A 标准(相当于地表水Ⅳ类)。

与此同时, 工业化进程的深化导致工业废水排放量及其水质复杂度持续增加, 处理难度显著提升。《城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021 年)》明确要求工业废水逐步由城市

生活污水处理厂转向工业园区集中处理。然而,随着园区企业聚集,部分现有污水处理厂已处于满负荷或超负荷运行状态。在土地资源日益紧张的背景下,传统依赖新增用地扩建处理单元的模式面临高昂成本或无地可用的困境,亟需开发工业园区污水处理厂的原位扩容提质技术^[1]。因此,面对日益严格的排放标准与持续增长的废水处理需求的双重压力,研发兼具高效脱氮除磷、经济可行性的废水处理工艺,是破解当前困境的关键路径^[2]。

与水质相对均一、可生化性较好的市政污水不同,工业园区废水来源复杂,常呈现出独特的环境胁迫特征。一方面,废水中通常含有高浓度的难降解或有毒有害有机物(如酚类、多环芳烃等)以及重金属,对微生物具有潜在的毒性效应,要求微生物群落具备特殊的降解代谢能力^[3]。另一方面,由于企业生产批次和周期的差异,园区废水的水质(如 pH、COD、盐度)和水量常呈现剧烈、无规律的波动,对处理系统构成频繁的冲击负荷^[4]。这些复合压力共同构成了一种强选择性的环境,可能筛选出与市政污水系统截然不同的微生物群落^[5]。因此,有必要探究在这种环境下,微生物群落如何构建、响应并维持系统功能。

生物膜强化污水处理技术通过在反应器中添加填料,显著提升生物膜附着量与微生物活性,该方法已成为提高污水处理效率的关键途径。近年来,已有部分研究揭示了生物膜群落在强化传统污水处理系统运行性能方面的重要贡献。例如,利用粉末载体促进生物膜形成,显著富集反硝化除磷菌,从而有助于系统高效脱氮除磷^[6]。而且,传统系统中活性污泥群落能够与生物膜群落协同合作,生态位差异分别富集了硝化菌和反硝化菌,从而提高总氮去除效率^[7-8]。此外,生物膜强化手段能够显著提升系统的抗负荷冲击能力,提高系统高负荷运行的性能^[9]。上述研究主要针对城市污水,然而在成分更为复杂的工业园区废水处理系统中,生物膜强化处理技术能否对系统起到原位扩容提质的作用,尚未有研究进行系统探讨。

基于此,本研究以南京某工业园区污水处理厂(设计规模 4 万 m³/d)为对象。该厂现有生物处理工艺为 AAO,出水稳定达到 GB 18918—2002 一级 A 标准。本研究聚焦于采用填料强化移动床生物膜反应器(MBBR)工艺效能,通过中试试验系统评估 MBBR 技术强化现有 AAO 工艺实现原

位扩容提标的可行性。同时,结合微生物群落结构及生态特征分析,揭示不同季节条件下 MBBR 填料强化处理效能的微生物学机制,旨在为工业园区污水处理厂的提标改造提供实用的技术支撑。

1 材料与方法

1.1 中试试验装置

MBBR 中试试验装置(设计处理量为 1~2 m³/h)模拟南京某园区污水处理厂处理工艺。其中,厌氧池、缺氧池和好氧池的有效体积为 1.890、5.670 和 7.155 m³。中试装置的总停留时间为 14.5 h。

1.2 试验水质、接种污泥及运行方案

试验用水为南京某园区污水处理厂细格栅出水, COD 为 (192.33 ± 52.33) mg/L, NH₄⁺-N 浓度 (7.83 ± 1.73) mg/L, TN 浓度 (12.88 ± 3.08) mg/L, TP 浓度 (2.13 ± 0.77) mg/L。接种污泥为园区污水处理厂的好氧池污泥,初始污泥浓度 (MLSS) 为 4 000 mg/L。自 2023 年 8 月—2024 年 1 月每日检测废水 4 个基础水质指标,包括 COD、NH₄⁺-N、TN 和 TP。在中试装置好氧池中投加 K3 填料,填充率为 30%(填料体积为 2.145 m³)。待挂膜成功后,逐步提高进水负荷从 150%(1.5 m³/h)至 200%(2 m³/h)。在中试装置运行至冬春季节后,进水水量重新调至 1.5 m³/h,进一步探究季节温度变化对中试装置的影响。

1.3 常规指标分析方法

中试装置运行期间,每日对进出水的 COD、氨氮、总氮、总磷进行检测,所采用的测定方法分别为 COD 快速消解法、钠氏试剂分光光度法、碱性过硫酸钾紫外分光光度法、钼酸铵分光光度法。此外,填料挂膜期间,采集生物膜样品并利用重量分析法监测生物量变化趋势。

1.4 高通量测序与数据处理方法

分别在夏秋季节和冬春季节的 2 个阶段的 3 个时间点采集生物膜样品,通过 FastDNA Spin 试剂盒提取生物膜污泥样品 DNA,并选用 16S rRNA 基因的 V3-V4 区域合成引物 338F 和 806R 进行 PCR 扩增和高通量测序。原始数据通过 QIIME2 中的 VSearch 方法进行质控,将质控后的序列进行操作分类单元(OTU)分类(相似度 97%)^[10],然后利用 MIDAS 数据库对 OTU 进行分类信息注释。微生物群落功能特征采用软件 PICRUST 方法预测^[11]。通过 R 语言 Vegan 程序包计算微生物群落的多样性指数^[12]。此外,利用 STAMP 软件对

组间的微生物群落进行结构差异的显著性分析。

1.5 微生物群落生态特征研究

为了探究夏秋和冬春季节微生物群落的生态特征,本研究利用 NST 程序包评估了随机性过程在群落组装中的贡献率^[13],并利用校正后的标准化随机性比率(MST)量化群落构建过程:当 MST < 50% 时,表明过程以确定性为主;当 MST > 50% 时,则表明以随机性为主。此外,利用 OTU 的相对丰度信息,依据随机矩阵原理在 MENA(<http://ieg4.rccc.ou.edu/mena>)上构建分子生态网络^[14],以探究不同季节之间微生物群落种间相互作用关系

的变化规律。

2 结果与讨论

2.1 MBBR 工艺挂膜过程

挂膜初期(1~8 d)采用间歇式进水,每日进水量为 4~5 m³,随后按 1 m³/h 连续进水,并在第 13 天后将进水量提升至 1.5 m³/h。整个挂膜周期生物膜污泥浓度和进出水水质情况如图 1 所示。其中,生物膜污泥浓度逐渐稳定在 600 mg/L 左右,表明生物膜可能逐渐发育成熟。

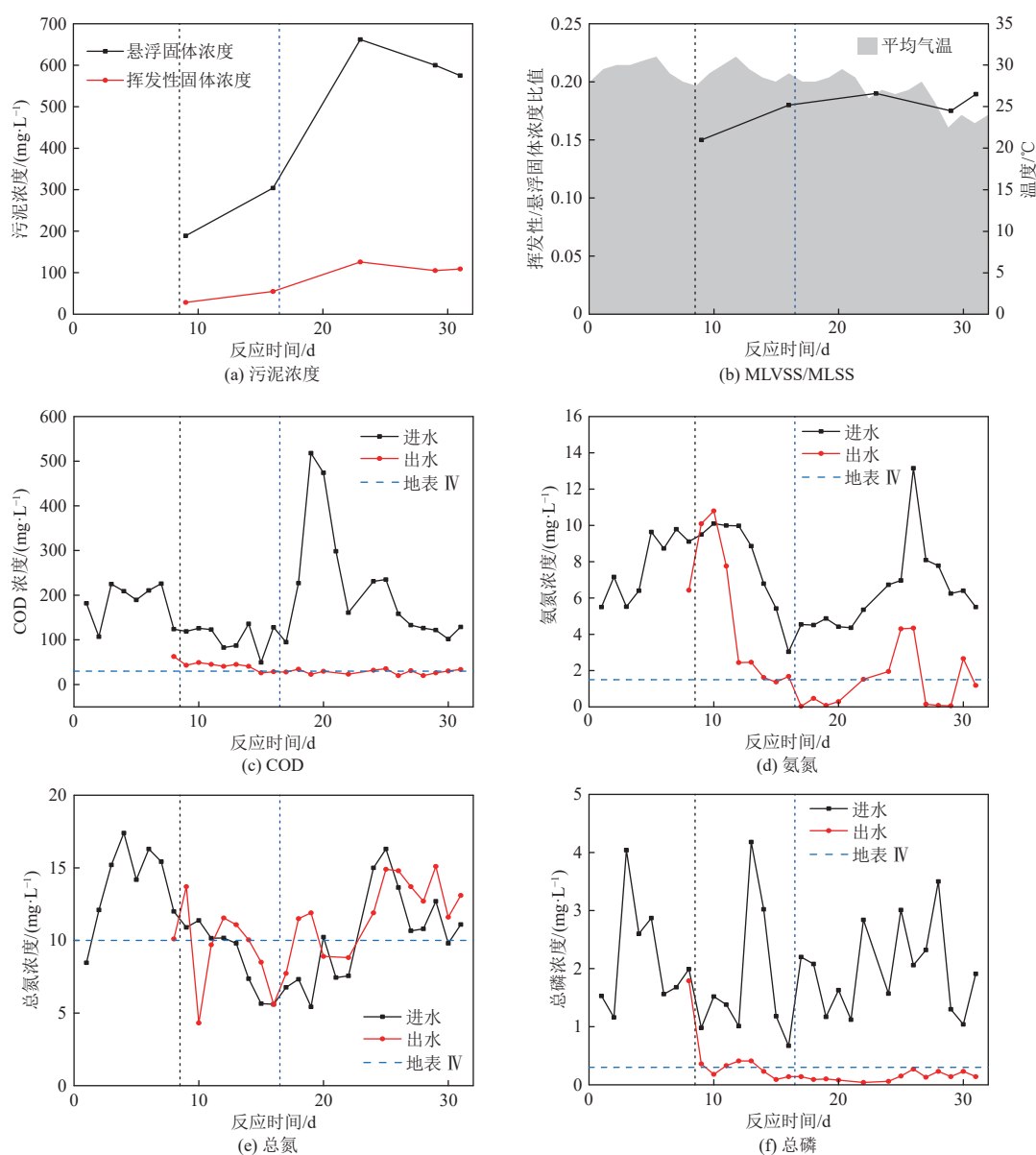


图 1 挂膜期间中试装置运行性能

Fig. 1 Operational performance of the pilot plant during biofilm formation

在生物挂膜初期(连续进水阶段),系统按设计流量(1 m³/h)运行。此阶段出水 COD 和 TP 可

稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。然而, NH₄⁺-N 去除效

果呈现显著波动,推测与硝化菌对外界环境变化敏感、尚处于适应期有关。研究表明,挂膜初期硝化菌的生长速率普遍低于其他异养菌群^[15-16]。随着运行的时间延长, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率逐步提升。运行至第 13 天后,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度可满足准Ⅳ类水质标准($C_{\text{NH}_4^+\text{-N}} \leq 1.5 \text{ mg/L}$),表明系统内硝化菌丰度已能满足脱氮需求。

进入挂膜中后期,进水流量提升至 $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。此阶段出水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 TP 仍能达标,但出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度受进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度波动影响显著,去除效率不稳定。此外,在挂膜期间,系统直接向好氧池进水,未设置硝化液回流,导致 TN 去除效率较低,出水 TN 无法达到准Ⅳ类标准($\text{TN} \leq 10 \text{ mg/L}$),但仍然满足一级 A 标准。值得注意的是,在运行第 19~20 天期间,进水 COD 浓度远高于平均水平,但出水 COD 仍保持稳定,均达到一级 A 标准,接近准Ⅳ类水质限值。综上,好氧池填

料经过 30 d 的启动,成功富集了高效成熟的生物膜。

2.2 基于 MBBR 工艺强化处理的可行性研究

当好氧池填料挂膜启动成功后,开始调试运行中试 AAO 工艺,具体运行性能如图 2 所示。其中,进水量由前 20 d 的 $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 增加到 20~45 d 的 $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 。当进水量为 $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,出水 TN 可达到准Ⅳ类水质标准($\leq 10 \text{ mg/L}$)。此时,出水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 浓度均值分别为 28.85、0.15、8.28 和 0.09 mg/L, COD 和氨氮去除率达到 85.63% 和 97.76%。当进水水量提升到 $2 \text{ m}^3/\text{h}$,出水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 浓度均值分别为 36.98、2.39、9.50、0.22 mg/L。在此条件下, COD 和 TP 去除率总体相对稳定,但系统对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的去除稳定性显著降低。结果表明,将水力负荷提升至原负荷的 2 倍会对系统产生较大冲击。因此,建议将 MBBR 工艺的水力负荷控制在 150%。

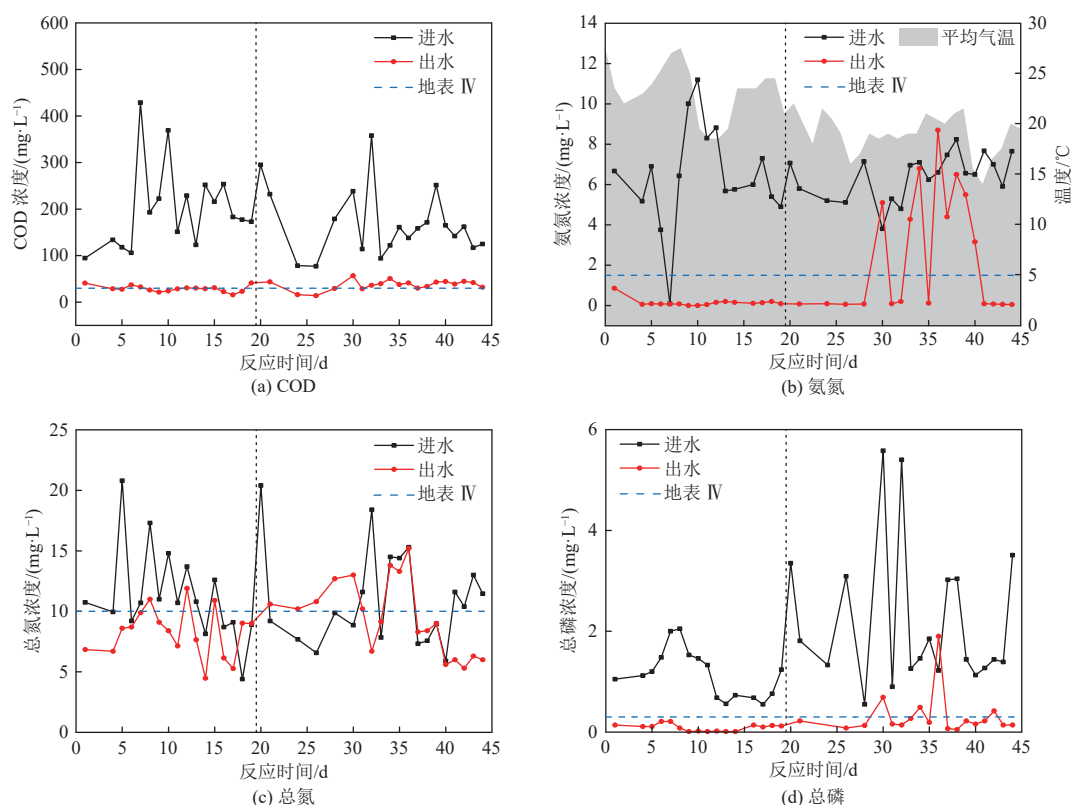


图 2 夏秋季节中试装置运行性能

Fig. 2 Operating performance of pilot plant in summer and autumn seasons

为考察冬春季节低温条件对 MBBR 工艺系统的影响,于 2023 年 11 月 23 日—12 月 15 日进行运行测试,此时进水量调整为 $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。出水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 浓度均值分别为 38.08、0.90、7.50、0.21 mg/L, COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率达到

79.15% 和 90.26%。系统氨氮去除率效果良好,但 COD 去除率相对夏秋季节有所降低。此阶段,除出水 COD 外, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 均满足准Ⅳ类标准(图 3)。

测试期间,曝气设施故障导致溶解氧波动较

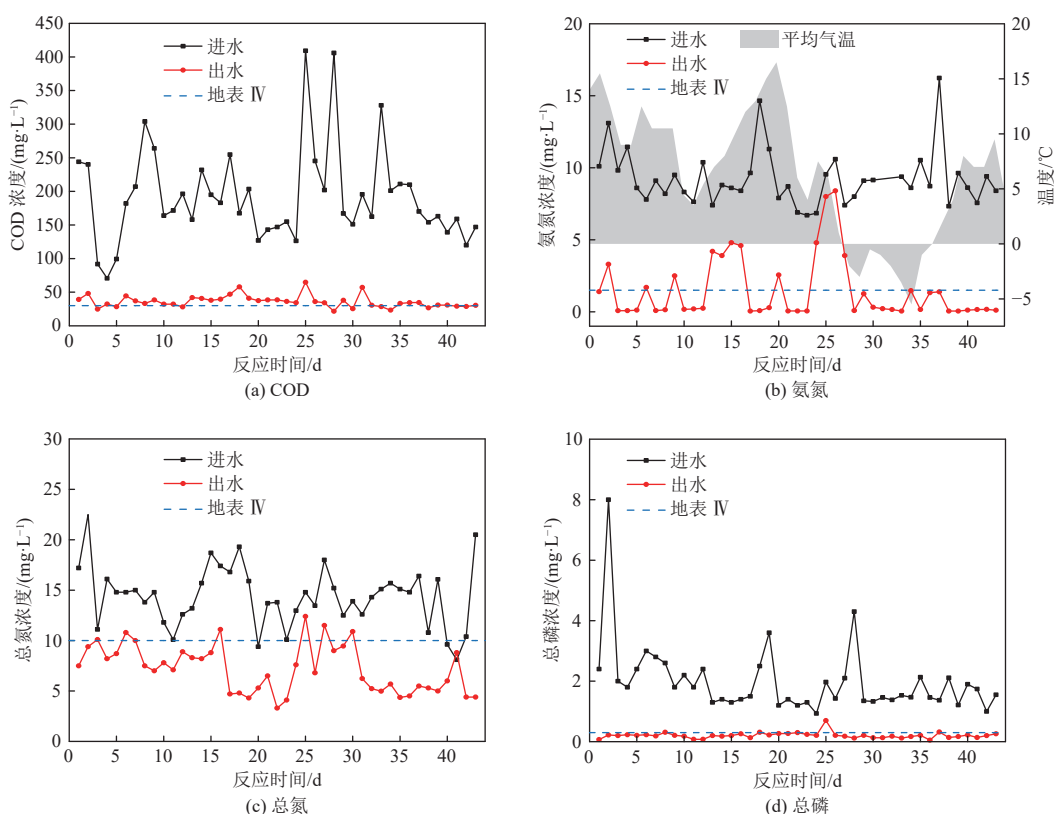


图3 冬春季节中试装置运行性能

Fig. 3 Operating performance of pilot plant in winter and spring seasons

大,抑制了系统硝化性能,致使运行后期出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度有所上升。此外,12月15日—25日期间气温骤降至 $-10\sim-2\text{ }^\circ\text{C}$,进一步抑制了硝化作用,导致出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及TN浓度出现显著波动。通过调控溶解氧后系统处理效能得以恢复,稳定运行(35~45 d)后,出水COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP浓度均值分别为30.87、0.50、5.76、0.22 mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP达到准Ⅳ类标准,COD浓度($(30.87 \pm 2.54)\text{ mg/L}$)接近准Ⅳ类标准。

最终,通过对比分析夏秋(9月8日—10月21日)与冬春(11月23日—1月4日)季节的运行数据表明:冬春低温条件下,COD去除效率有所下降; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率虽存在波动,但仍满足一级A标准。

2.3 MBBR 强化处理的微生物学群落分析

为探究MBBR强化处理过程中的微生物群落结构,本研究首先评估了季节环境变化对MBBR工艺微生物多样性的影响(图4)。研究显示,相较于夏秋季节,冬春季节MBBR微生物多样性(Shannon指数)显著降低,群落均匀度(Chao1指数)未呈现显著变化(图4(a)(b))。采用主坐标分析(PCoA)方法进一步探究不同季节生物膜群

落结构的差异(图4(c)),研究发现夏秋和冬春季节群落结构相距较大,而季节内部群落样本相似度更高,表明不同季节的群落构建机制存在显著差异。此外,基于群落功能预测的PCoA分析(图4(d)),发现这两项结构同时表明不同季节群落的代谢功能存在显著差异。

微生物群落组成如图5所示,变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidota)和硝化螺旋菌门(Nitrospirota)为群落中优势门(图5(a))。随着中试装置的运行,拟杆菌门的丰度逐渐升高,但冬春季节硝化螺旋菌门显著富集,其丰度超过40%。在群落Top 35属中(图5(b)),夏秋季节的优势菌包括中度嗜热双突柄菌属(*Amphiplicatus*)、黄杆菌属(*Flavobacterium*)、丝状菌(*Thiothrix*)、鞘脂单胞菌科(*Sphingomonadaceae*);而冬春季节的优势菌包括鞘脂单胞菌科、硝化螺旋菌(*Nitrospira*)、黄杆菌科(*Flavobacteriaceae*)和脱氮污物球菌(*Defluviimonas*)。这些优势菌属的丰度与整个群落结构及功能密切相关,进而影响污水处理效能^[17-18]。

本研究进一步比较分析了夏秋和冬春季节具有显著差异的物种(图5(c))。夏秋季节黄杆菌

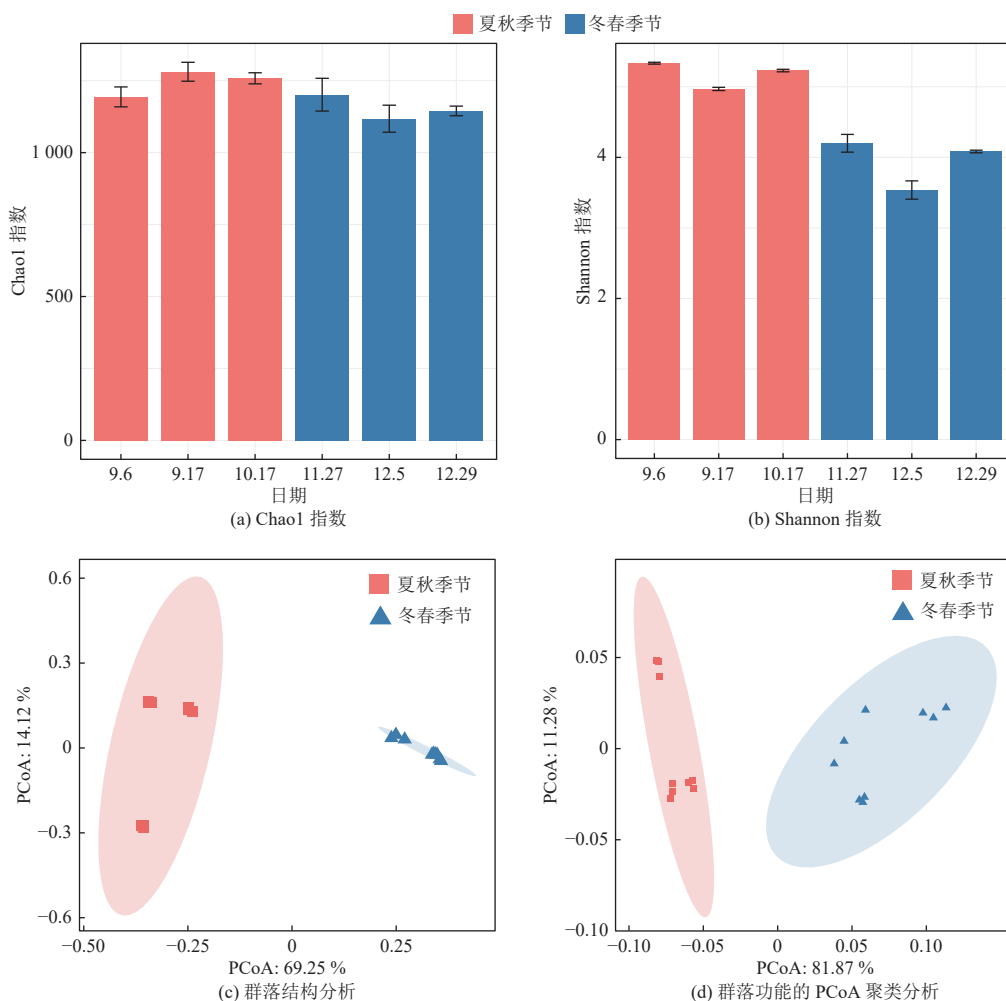


图 4 不同季节中试装置微生物多样性

Fig. 4 Microbial diversity of pilot plant in different seasons

属、丝状菌和中度嗜热双突柄菌属显著富集, 这些菌属高效富集与夏秋季节的环境因子(尤其是温度)密切相关。例如, 黄杆菌属和中度嗜热双突柄菌属均为嗜温水生菌, 在高温季节生长迅速^[19-21]。冬春季节硝化螺旋菌、鞘脂单胞菌科、黄杆菌科和脱氮污物球菌显著富集。这些富集的优势菌能够有效转化去除污水中的氮素和有机物, 从而保证了低温条件下中试装置的运行效能。其中, 硝化螺旋菌属丰度超过 35%, 显著促进了氨氮转化为硝酸盐氮。有研究发现, 硝化螺旋菌作为耐冷细菌, 能够在低温下的污水处理系统中呈现明显优势^[22-23], 从而促进了亚硝酸盐氮氧化为硝酸盐氮。

2.4 MBBR 强化处理的生态特征解析

为了探究不同季节生物膜群落的构建过程, 利用零模型量化了随机过程的重要性, 发现夏秋季节微生物群落 MST 指数为 0.367, 显著低于冬春季节的 0.667。夏秋季节 MST 指数低于 0.5,

说明确定性过程主导了群落构建, 此时环境选择和生物选择作用决定了群落结构^[24]。相比之下, 冬春季节 MST 指数超过 0.5, 说明随机性过程在群落构建过程发挥主要作用, 这一过程可能由细菌的出生和死亡、物种扩散等因素决定^[25]。

为深入探究群落构建过程中生物选择作用的重要性, 通过分子生态网络揭示了物种间的相互作用关系。图 6(a)(b)直观地展示了夏秋和冬春两阶段微生物群落的种间互作的生态网络, 夏秋季节复杂的生态网络表明生物选择作用在生物膜群落的构建过程中发挥了显著影响。2 个季节的网络呈现出差异的拓扑学特性(表 1)。夏秋季节的网络平均度显著高于冬春季节, 表明群落种间相互作用的复杂度更高, 且夏秋季节具有更高的模块性, 进一步说明模块内部物种间的共存或竞争关系更加紧密^[26]。平均聚类系数作为衡量所有节点聚类系数的平均值, 揭示了网络中节点聚集成小群体的程度。夏秋季节的平均聚类系数较

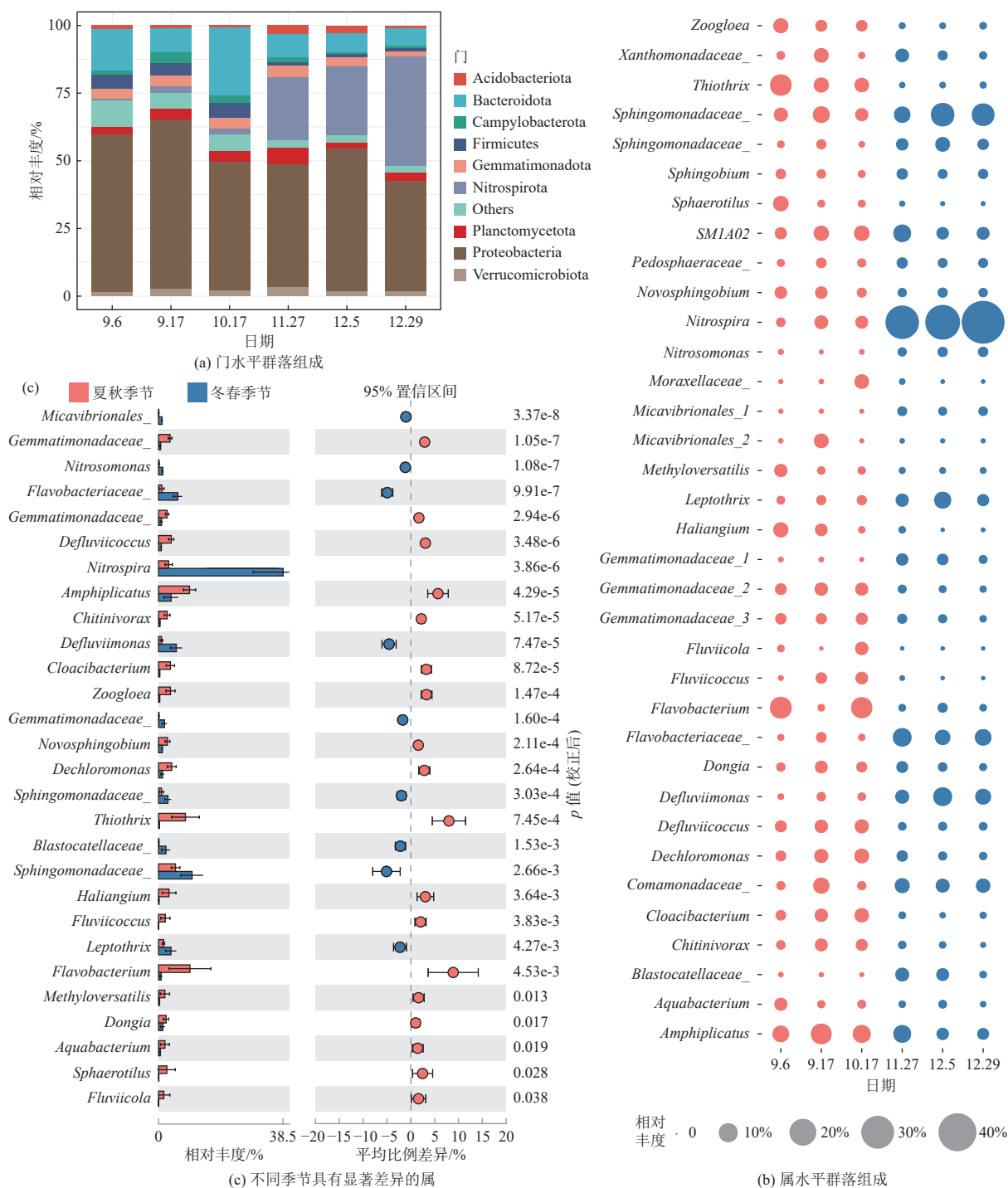


图 5 不同季节微生物群落组成

Fig. 5 Microbial community composition in different seasons

低,证实了生物膜群落在夏季更倾向于形成生态位分化,而不同功能组之间的相互影响相对较小。此外,平均路径距离越大,表示物种间的连接越疏远,信息传播的效率越低,而冬春季节生物膜物种间的相互作用效率更高,从而可能有助于整个群落更好地抵抗低温扰动。综上,在持续的低温胁迫下,环境筛选这一确定性过程完成了对微生物群落的优化调控。此时,微生物群落内部竞

争压力被系统性释放^[27],保留下来的耐冷菌不再面临激烈的生态位竞争,从而获得了宝贵的生存空间和资源,这是低温条件下中试装置维持高性能的关键前提。

利用 Zi(模块内连通度)-Pi(模块间连通度)深入剖析了网络节点的拓扑学角色(图 6(c)(d))。2 个生态网络中共发现 3 种类型的节点,包括外围节点(Peripherals)、模块枢纽(Module hubs)和连接

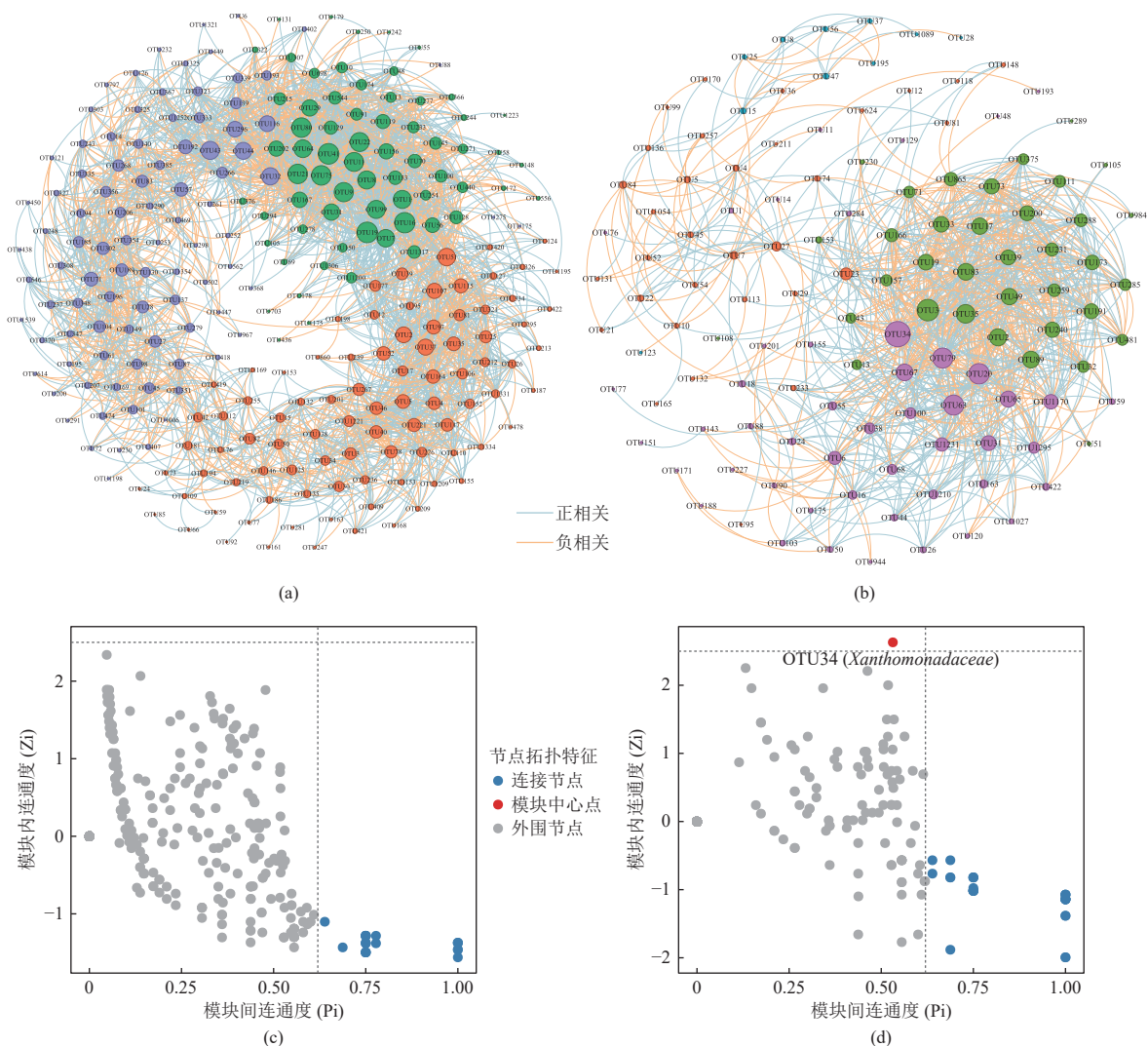


图 6 夏秋(a)和冬春(b)季节生态网络, 夏秋(c)和冬春(d)季节网络的关键物种

Fig. 6 Ecological networks in summer-autumn (a) and winter-spring (b) seasons. Keystone species in summer-autumn (c) and winter-spring (d) networks

节点(Connectors)。夏秋季节生态网络中主要为外围节点和连接节点,这表明群落生态位分化程度较高,群落模块间的联系相对较少^[28];而冬春季生态网络中模块枢纽和连接节点均有出现。值得注意的是, OTU34(*Xanthomonadaceae*)在冬春季的群落中扮演了模块枢纽的角色,这有助于促进群落模块间的信息传播。此外,冬春季的生态网络虽然结构相对简单,但发现了更多的连接节点(28个),这进一步提升了网络内部的信息传递效率。

综上,这种由随机性主导、结构简化但关键节点突出的群落生态,通过释放竞争压力和强化核心功能菌的作用,为耐冷菌在低温下的生存和功能发挥创造了有利条件,最终在宏观上表现为系统脱氮效能的稳定。这揭示了在低温环境下,生

态系统通过精简结构来换取功能韧性的重要机制。此外,本研究的发现对低温污水生物脱氮系统的运行管理具有重要指导意义。鉴于冬季群落构建受随机性主导,在低温期进行群落精准调控可能收效甚微,更有效的策略是进行前置性塑造。目前,低温条件对污水处理厂脱氮效率影响显著^[29]。在秋冬交替季节,通过优化运行工况,可提前主动富集和扩大耐冷的脱氮功能菌种子库^[30]。在冬季低温运行时,系统能够在具备脱氮功能菌种子库的基础上,维持高效脱氮性能,从而实现了对系统功能间接但稳健的调控。

3 结 论

(1)MBBR 挂膜过程仅需 30 d 就能够富集稳定的生物膜。系统对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 具有较好

表 1 微生物群落分子生态网络的拓扑特性
Table 1 Topological properties of microbial community molecular ecological networks

指数	夏秋季节网络	冬春季节网络
节点数	351	206
连接数	2 954	974
正相关率/%	58.97	57.39
网络密度	0.048	0.046
网络平均度	16.832	9.456
平均聚类系数	0.541	0.603
平均路径距离	2.992	2.848
网络直径	8	7
中心性	0.039	0.075
度中心性	0.140	0.256
模块性	0.501	0.313

的去除率。

(2)MBBR 强化工艺可实现工业园区废水的扩容提标。其中,当水力负荷控制在 150% 时(进水流量为 1.5 m³/h),夏秋时节出水可达到准Ⅳ类水质标准(TN ≤ 10 mg/L);冬春时节出水除 COD 外(接近准Ⅳ:(30.87 ± 2.54)mg/L),氨氮、总氮(TN ≤ 10 mg/L)、TP 可达准Ⅳ类水质标准。

(3)微生物群落分析发现,夏秋季节群落多样性显著增多,多种具有嗜热属性的异养菌显著富集;而冬春季节生物膜更容易富集耐冷微生物,例如促进脱氮过程的反硝化螺菌属。基于群落构建的生态层面分析发现,夏秋季节生物膜群落构建主要由确定性过程主导;冬春季节更多是随机性过程主导,且群落更容易形成简单高效的种间互作,从而抵抗环境低温扰动。

参考文献 (References) :

[1] 王乃丽,王金梅,田杰,等.工业园区污水厂水质特征及提标改造前景探析 [J]. 水处理技术, 2019, 45(7): 110-113.
WANG Naili, WANG Jinmei, TIAN Jie, et al. Characteristics of water quality and the path analysis to the upgrading reconstruction of industrial wastewater treatment plant[J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(7): 110-113.

[2] 黄新丽,赵健,谢迈迪.某制药化工工业园区污水处理厂提标改造工程设计 [J]. 给水排水, 2025, 61(5): 75-79.
HUANG Xinli, ZHAO Jian, XIE Maidi. The design of a pharmaceutical and chemical industrial park wastewater treatment plant upgrading project[J]. Water & Wastewater Engi-

neering, 2025, 61(5): 75-79.

[3] PARK J W, KIM S Y, NOH J H, et al. A shift from chemical oxygen demand to total organic carbon for stringent industrial wastewater regulations: Utilization of organic matter characteristics[J]. [Journal of Environmental Management](#), 2022, 305: 114412.

[4] HU Wanqiu, TIAN Jinping, ZANG Na, et al. Study of the development and performance of centralized wastewater treatment plants in Chinese industrial parks[J]. [Journal of Cleaner Production](#), 2019, 214: 939-951.

[5] TONG Tujun, TONG Juan, XUE Keni, et al. Microbial community structure and functional prediction in five full-scale industrial park wastewater treatment plants[J]. [Science of the Total Environment](#), 2023, 904: 166529.

[6] YANG Yi, ZHU Yuting, GAN Defu, et al. Enhancing biofilm formation with powder carriers for efficient nitrogen and phosphorus removal[J]. [Science of the Total Environment](#), 2024, 951: 175812.

[7] ZHANG Yujia, YIN Zhixuan, LIU Meng, et al. Enhancing simultaneous nitrification and denitrification in a plant-scale integrated fixed-film activated sludge system: Focusing on the cooperation between activated sludge and biofilm[J]. [Chemical Engineering Journal](#), 2024, 496: 154322.

[8] 赫俊国,江伟勋,何卓义,等. IFAS 工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析 [J]. 环境科学, 2022, 43(9): 4736-4747.
HE Junguo, JIANG Weixun, HE Zhuoyi, et al. Analysis of microbial interaction law of mud membrane in IFAS process for treating low carbon source sewage in South China[J]. Environmental Science, 2022, 43(9): 4736-4747.

[9] CORSINO S F, BRUNO F, DI BELLA G. Nutrients removal in overloaded WWTP by intermittently aerated IFAS: Effects of biofilm carrier and intermittent aeration cycle[J]. [Journal of Environmental Management](#), 2024, 365: 121516.

[10] BOLYEN E, RIDEOUT J R, DILLON M R, et al. Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2[J]. [Nature Biotechnology](#), 2019, 37(8): 852-857.

[11] DOUGLAS G M, MAFFEI V J, ZANEVELD J R, et al. PICRUSt2 for prediction of metagenome functions[J]. [Nature Biotechnology](#), 2020, 38(6): 685-688.

[12] DIXON P. VEGAN, a package of R functions for community ecology[J]. [Journal of Vegetation Science](#), 2003, 14(6): 927-930.

[13] NING Daliang, DENG Ye, TIEDJE J M, et al. A general framework for quantitatively assessing ecological stochasticity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(34): 16892-16898.

- [14] DENG Ye, JIANG Y H, YANG Yunfeng, et al. Molecular ecological network analyses[J]. *BMC Bioinformatics*, 2012, 13: 113.
- [15] HAVLÍČEK K, NECHANICKÁ M, LEDERER T, et al. Analysis of nitrifying bacteria growth on two new types of biomass carrier using respirometry and molecular genetic methods[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 225: 112795.
- [16] QI Wanhe, SKOV P V, DE JESUS GREGERSEN K J, et al. Estimation of nitrifying and heterotrophic bacterial activity in biofilm formed on RAS biofilter carriers by respirometry[J]. *Aquaculture*, 2022, 561: 738730.
- [17] SHI Yanping, LIU Tao, QUAN Xie, et al. Enhanced nitrogen removal in the upgrading of municipal wastewater treatment plants by using zero-valent iron-modified biofilm carriers and clinoptilolite-modified biofilm carriers[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 477: 146948.
- [18] MUÑOZ PALAZON B, ROSA MASEGOSA A, VILCHEZ VARGAS R, et al. Biological removal processes in aerobic granular sludge for treating synthetic hospital wastewater: Effect of temperature[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 47: 102691.
- [19] DAIMS H, WAGNER M. Nitrospira[J]. *Trends in Microbiology*, 2018, 26(5): 462–463.
- [20] TANG Gang, ZHENG Xing, HU Shiwen, et al. Microbial metabolism changes molecular compositions of riverine dissolved organic matter as regulated by temperature[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 306: 119416.
- [21] LI Shuxian, QIAN Zijin, GAO Shuo, et al. Effect of long-term temperature stress on the intestinal microbiome of an invasive snail[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 961502.
- [22] SU Zicheng, LIU Tao, GUO Jianhua, et al. Nitrite oxidation in wastewater treatment: Microbial adaptation and suppression challenges[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(34): 12557–12570.
- [23] WANG Zhiming, ZHENG Mengqi, HE Chunhua, et al. Enhanced treatment of low-temperature and low carbon/nitrogen ratio wastewater by corn-cob-based fixed bed bioreactor coupled sequencing batch reactor[J]. *Bioresour Technol*, 2022, 351: 126975.
- [24] CHEN Weidong, WEI Jie, SU Zhiguo, et al. Deterministic mechanisms drive bacterial communities assembly in industrial wastewater treatment system[J]. *Environment International*, 2022, 168: 107486.
- [25] NIEDERDORFER R, FRAGNER L, YUAN Ling, et al. Distinct growth stages controlled by the interplay of deterministic and stochastic processes in functional anammox biofilms[J]. *Water Research*, 2021, 200: 117225.
- [26] LI Changchao, JIN Ling, ZHANG Chao, et al. Destabilized microbial networks with distinct performances of abundant and rare biospheres in maintaining networks under increasing salinity stress[J]. *iMeta*, 2023, 2(1): e79.
- [27] RATZKE C, BARRERE J, GORE J. Strength of species interactions determines biodiversity and stability in microbial communities[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2020, 4(3): 376–383.
- [28] SHI Jia, SUN Yuanze, WANG Xiang, et al. Microplastics reduce soil microbial network complexity and ecological deterministic selection[J]. *Environmental Microbiology*, 2022, 24(4): 2157–2169.
- [29] 茹春, 张爽, 路晖, 等. 低温条件下污水处理厂的除污效果及运行调控分析 [J]. *中国给水排水*, 2021, 37(9): 1–6.
RU Chun, ZHANG Shuang, LU Hui, et al. Pollutants removal performance and operation regulation of urban wastewater treatment plant under low temperature condition[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(9): 1–6.
- [30] 仵晓辉, 刘真, 侯海明, 等. 西部高原某污水处理厂的MBBR改造效果分析 [J]. *净水技术*, 2023, 42(11): 166–172+190.
WU Xiaohui, LIU Zhen, HOU Haiming, et al. Performance analysis of MBBR process reconstruction for a western plateau WWTP[J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(11): 166–172+190.