

DOI: 10.19479/j.2095-719x.2405339

曝气-生态浮床联合技术净化河道水质效果及机理研究

李亚静¹, 张健¹, 田鹏飞², 于静洁¹

(1. 天津城建大学, 天津 300384; 2. 天津东丽区水务局, 天津 300300)

摘要: 为提升东减河水体质量, 探究了曝气增氧-生态浮床联合技术对河道水体中氮磷及有机物的去除效果及机理。实验结果表明, 联合技术对主汛期河道水体的 COD 去除率达到 65%, 总氮和磷酸盐去除率分别达到 72% 和 46%。常规水质指标的相关性分析得出, 氨氮、硝酸盐和亚硝酸盐是水体富营养化的主控因子。河道水温和藻类生长呈显著正相关, 和溶解氧呈显著负相关。同时, 在 7—9 月河道表层沉积物的有机氮和有机磷矿化释放作用增强且具有持续性, 这些是造成该时段河道水质状况较差的关键因素。曝气-生态浮床联合技术既可以有效地去除河道水体中氨氮、总磷等污染物, 还可以提高水体溶解氧含量, 抑制水中藻类的生长。联合技术增加了河道底泥细菌群落的多样性和功能菌群的丰度, 多种丰度较高的菌属与脱氮更为相关。其中脱氮功能菌有 *Thiobacillus*、*Sphingopyxis*、*Nitrospira*、*Pseudomonas*、*Thermomonas*。除磷功能菌有 *Bacillus*、*Rhodobacter*、*Acinetobacter*。同时检测出高丰度的黄杆菌属(*Luteolibacter*)是良好水质水体的指示生物。

关键词: 河道水质净化; 曝气-生态浮床联合工艺; 脱氮除磷; 表层沉积物; 功能菌群

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-719X(2024)05-0339-07

Research on the Water Purification Effect and Mechanism of River Course by Using Aeration-Ecological Floating Bed Technology

LI Yajing¹, ZHANG Jian¹, TIAN Pengfei², YU Jingjie¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, TCU, Tianjin 300384, China;

2. Tianjin Dongli District Water Bureau, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to improve the water quality of Dongjian River, the removal effect and mechanism of aeration-ecological floating bed technology on nitrogen, phosphorus and organic matter in water body was investigated. The experimental results showed that the removal rate of COD, TN and phosphate reached 65%, 72% and 46% respectively in major flood period by the combined technology. The correlation analysis of conventional water quality indexes showed that ammonia nitrogen, nitrate and nitrite were main controlling factors of water body eutrophication. There was a significant positive correlation between water temperature and algae growth, and a significant negative correlation between water temperature and dissolved oxygen. At the same time, the release of organic nitrogen and organic phosphate mineralization in surface sediments was enhanced and sustained from July to September. These were the key factors causing poor water quality in these periods. Aeration-ecological floating bed technology can not only effectively remove ammonia nitrogen, total phosphorus and other pollutants in river course, but can also improve the concentration of dissolved oxygen and inhibit the growth of algae in water body. The combined technology increased the diversity of bacterial community and the abundance of functional bacteria in river sediment, and the bacteria with higher abundance were more related to nitrogen removal. The nitrogen removal functional bacteria were *Thiobacillus*, *Sphingopyxis*, *Nitrospira*, *Pseudomonas* and *Thermomonas*. The phosphorus removal functional bacteria were *Bacillus*, *Rhodobacter* and *Acinetobacter*. Meanwhile, *Luteolibacter* with high abundance was found to be an indicator of good water quality.

Key words: purify water quality; aeration-ecological floating bed technology; nitrogen and phosphorus removal; surface sediment; functional flora

收稿日期: 2023-04-12; 修订日期: 2023-05-17

基金项目: 天津市教委科研项目(2016CJ09); 天津市自然科学基金重点项目(18JCZDJC10080)

作者简介: 李亚静(1979—), 女, 河北沧州人, 天津城建大学副教授, 博士。

通讯作者: 于静洁(1978—), 女, 教授, 博士, 从事污水资源化研究。yjj.mary@163.com

东减河为跨区河道,河道现状全长 36 km,南北两段位于东丽区,中段位于滨海新区天津港保税区空港经济区。东减河是沟通南部海河和北部新开河—金钟河的一条兼具排沥、景观功能的河道,也是张贵庄污水处理厂再生水排放的输水河道。

目前,东减河水体各监测断面年平均值基本优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)V类标准。但汛前5月、6月及汛期内7月至8月,COD(化学需氧量)、 NH_4^+-N (氨氮)、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ (磷酸盐)等指标存在劣于(GB 3838—2002)V类标准的情况。针对这种情况,选择适合的污染治理技术来进一步提升河流水体质量及对水体生态环境进行修复迫在眉睫。

目前,水环境质量修复的技术多种多样,主要有物理法、化学法、生物法和生态修复技术4类^[1-3]。由于水体受污染情况复杂,单用一种修复方法往往不能达到理想的效果^[4-6]。因此,本文结合相关研究^[7-10],探讨采用曝气-生态浮床联合技术应用于东减河河道水环境提升中的治理效果。首先通过测定水体中 NH_4^+-N 、 NO_3^--N (硝酸盐氮)、 NO_2^--N (亚硝酸盐氮)、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 等含量,探明曝气条件下受纳水体氮磷的转化特征,揭示曝气-生态浮床技术能否作为河流修复的有效措施。然后利用分子生物学方法表征氮磷转化功能微生物群落特征、丰度及其对环境因子的响应,揭示氮磷转化的微生物学机制,以期为构建高效的曝气浮床系统,改善和维护水生态平衡提供科学参考。

1 样品采集与分析

1.1 样点布设与样品采集

采样点及联合系统位置如图1所示。沿东减河流向特征,共布设4个采样点,曝气浮床设备前后各布设2个采样点。2022年5月至11月期间,每2周在采样点采集新鲜的河道水样和泥样,每一个采样点沿河道横断面从中间到两岸均匀采集3个平行样。用水样采样器采集水面以下0.5 m处地表水,样品存储于1 L的聚丙烯(PP)采样瓶中。采用不锈钢沉积物采样器采集表层沉积物样品,保存于500 mL的聚氯乙烯采样罐中,低温储藏运回实验室进行下一步的分析测试。采集过程中记录水体水温、pH、DO(溶解氧)等指标,并记录周边环境状况。

1.2 样品分析

水体样品主要测定水温、pH、DO、COD、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 、Chla(叶绿素a)。其中水温、pH、DO通过德国的WTW Multi 3430便携式水质参数



图1 采样点布置

仪现场测定。其它指标采用国标法测定^[11]。

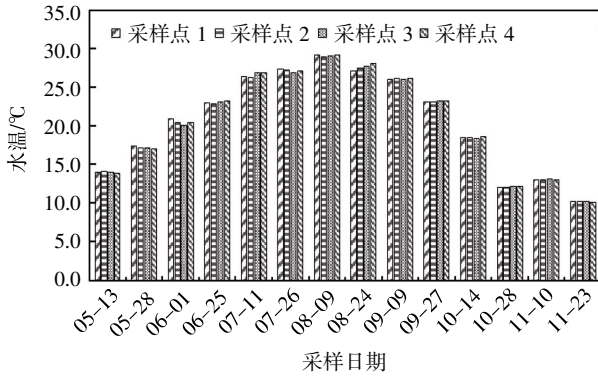
沉积物样品分两部分,一部分进行常规理化指标分析:采用国标法测定TN(总氮)、TP(总磷),通过Q600同步热分析仪分析沉积物中有机质的含量。剩余沉积物样品于-4℃下保存,用于微生物群落多样性分析。采用上海生工生物技术有限公司的Illumina MiSeq系统进行16S rRNA高通量测序。在Illumina MiSeq平台上进行PCR扩增、扩增子的提取纯化和测序。微生物DNA提取是根据制造商的协议进行的。通过聚合酶链反应(PCR),用正向引物341F: CCTACGGGNGGCWGCAG和修正引物805R: GACTACHVGGGTATCTAATCC筛选16S rRNA基因的V3-V4区。

2 结果与分析

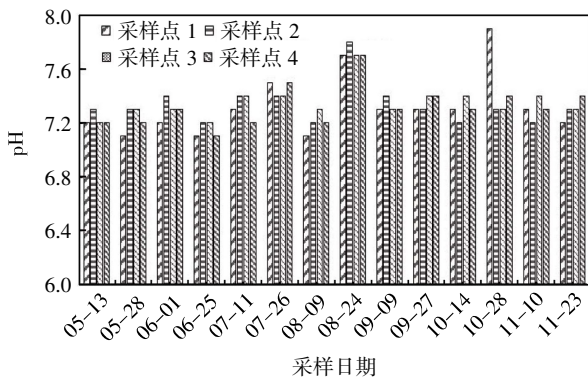
2.1 水体中理化指标的变化规律

水体中理化指标变化如图2所示。由图2可知,同一时间4个采样点水温相差不大。整体看来温度在5月至8月处于上升趋势,从8月到11月呈递减的趋势,此水温均和当时气温变化相一致。4个采样点pH值的平均值为 7.3 ± 0.3 ,变化范围为7.0~7.9,最大值出现在8月底,最小值出现在6月底。采样点1处的pH值在10月底达到最高7.9,分析可能是河道沿途接收了碱性稍强的农业或绿化用水。全部采样点检测时间段内整体看来DO从5月至8月处于下降趋势,从8月至11月呈增加的趋势。采样点1在8月底DO最低达到3.18 mg/L。在8月份发生的较大幅度的波动是因为此时当地居民生产生活用水量较大,雨水量也较大且向河流输入,大量有机物排入河流,导致需氧型细菌大量繁殖,细菌分解有机物消耗氧气,结果会使局部河段DO大量减少,影响了水体DO含量的稳定性。与此同时水体中的Chla含量随时间的变化波动较大,由图2可知7月和8月的含量较高,最大值150 $\mu\text{g/L}$

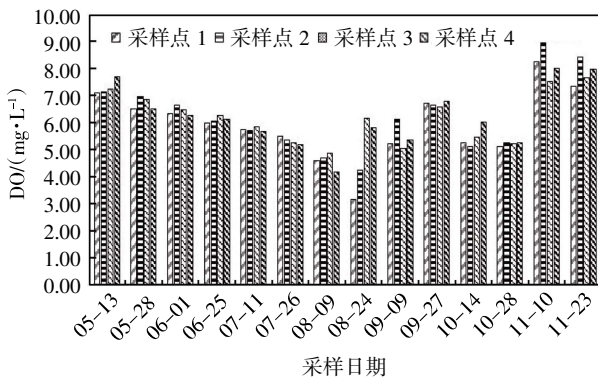
出现在8月底,说明此时水体发生了富营养化.通过曝气-浮床处理工艺后的水体溶解氧升高至6.15 mg/L, Chla 含量也降低到25 $\mu\text{g/L}$,由此可以看出曝气-浮床处理工艺能对河道的藻类生长加以控制,可以有效减轻河道的富营养化状况.



(a) 水体水温变化



(b) 水体 pH 值变化



(c) 水体 DO 变化

图2 水体理化指标变化

2.2 水体中碳氮磷的时空变化规律

水体中碳氮磷及叶绿素 a 含量的时空变化规律见图3.由图3可以看出,全部采样点的COD变化范围为20~84 mg/L,均值为45 mg/L.整体来看均符合《污水综合排放标准》一级排放标准.8月份的COD含量

有了较明显的升高,主要是主汛期高有机物含量的雨水排入此河道所致.以8月底的监测数据来看,2,3点位的水质变化可以看出,曝气-浮床处理工艺能有效地去除水体中的COD,去除率可以达到64.7%.

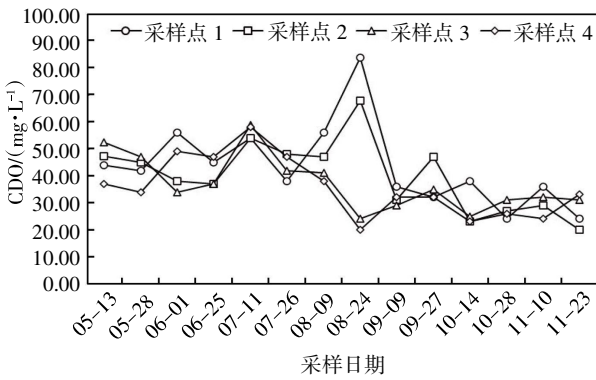
由图3可知,全部监测点位TP含量很低而且随时间变化不大,一直维持在0.10~0.64 mg/L之间,其均值为 0.35 ± 0.16 mg/L,7月出现峰值,最小值出现在11月.总体来说符合《污水综合排放标准》一级排放标准.2,3点位的磷监测数据说明浮床植物对磷的吸收起到了良好的效果.采样点1,2在9月底和10月中旬有小幅的升高,可能是沉积在底泥中的磷对水体的释放作用.

全部监测点位在5月至8月期间水体中 NH_4^+-N 的波动不大,从8月底到10月中旬期间各取样点 NH_4^+-N 含量开始急剧上升,采样点1在8月24日上升到最高值8.51 mg/L.分析其原因是由于此时天津恰逢雨季,大雨过后雨水径流造成河内 NH_4^+-N 含量急剧增高至使水体恶化.同期采样点2,3的 NH_4^+-N 含量明显下降是由于曝气将 NH_4^+-N 转化成 NO_3^--N 所致.10月份以后各个采样点的 NH_4^+-N 含量比前几个月有所上升,可能是底泥氮污染加重后对水体释放的后果.

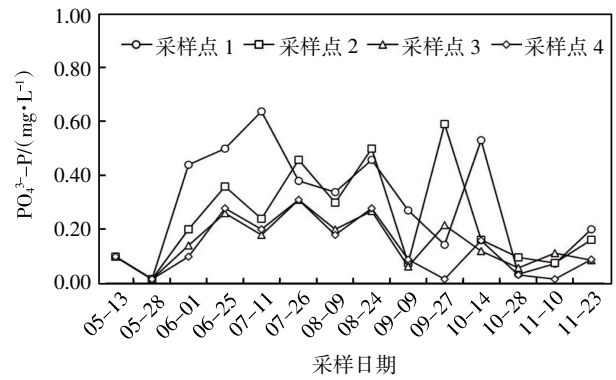
水体中 NO_3^--N 含量变化和 NH_4^+-N 趋同,在时间上有所滞后.9月初达到最高值4.37 mg/L.综合DO分析原因是8月底 NH_4^+-N 达到最大值,较高含量的DO使硝化反应比较彻底,硝 NO_3^--N 迅速上升. NO_2^--N 含量5月至8月期间随着气温的增高而增加,后面开始降低,在10月底还出现了峰值.与 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 变化不同, NO_2^--N 在硝化和反硝化作用过程中都可以产生,水体中 NO_2^--N 含量增加,应该是水体中硝化细菌和反硝化细菌活动同步增加的原因.

2.3 表层沉积物的污染特征

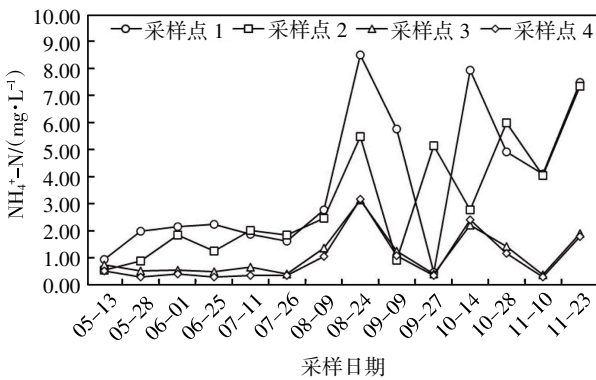
为考察河流内源污染物是否会通过溶解、解析及微生物分解转化作用不断从底泥中释放出来成为二次污染源,本文进行沉积物的采样分析.沉积物采样分三次:5月,8月和11月的上旬分别取样.分析项目:TN、TP、有机质含量.不同采样点沉积物特征分析见图4.由图4可知,4个采样点的有机质含量在8.22%~13.74%,其中2,3点位的有机质含量较高.分析通过曝气-浮床处理工艺,导致河道沉积层不断产生新的微生物以适应新的环境,微生物增长速度快,增加了样本的生物多样性和丰度^[12],因此提高了沉积物中有机质的含量.同时发现河道沉积物中TN、TP含量出现了夏季明显低于春秋的现象,结合相关研究进展^[13-14],分析主要是高温季节表层底泥的有机氮和有机磷矿



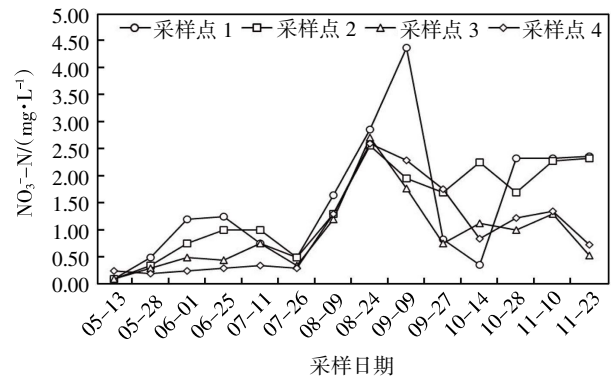
(a) 水体中CDO的时空变化



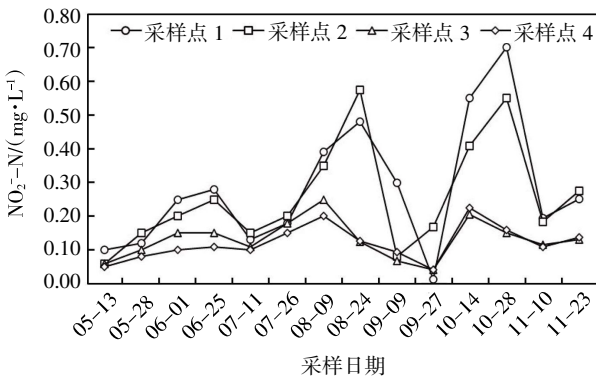
(b) 水体中PO₄³⁻-P的时空变化



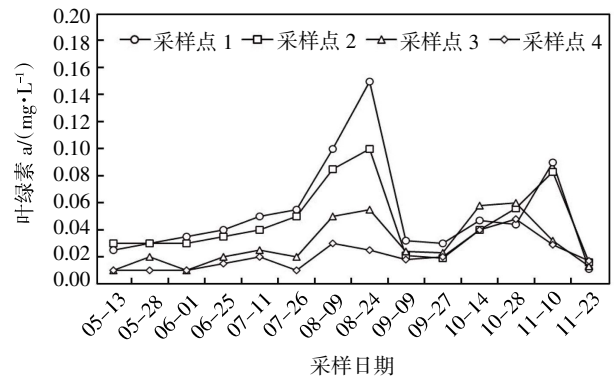
(c) 水体中NH₄⁺-N的时空变化



(d) 水体中NO₃⁻-N的时空变化



(e) 水体中NO₂⁻-N的时空变化



(f) 水体中叶绿素a的时空变化

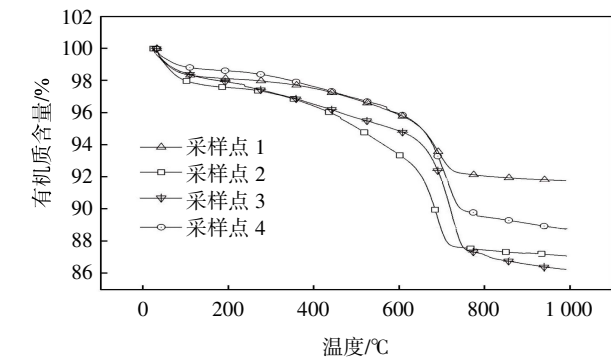
图3 水体中碳、氮、磷及叶绿素a含量的时空变化规律

化释放作用增强所致. 在外源污染源得到控制的条件下(排除暴雨时段),7、8月份水体中NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N达到峰值,说明内源污染是造成河流水质状况较差的关键因素. 这种释放作用具有持续性,使氮磷指标在10月中下旬有小幅升高.

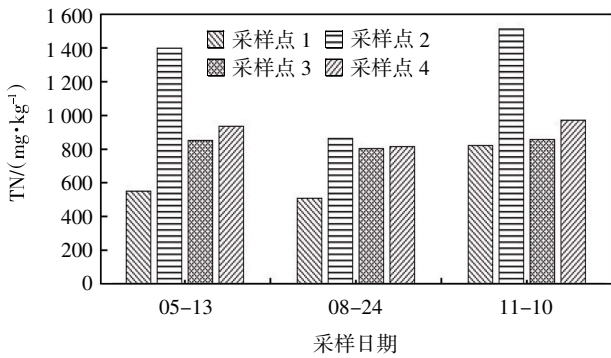
2.4 各指标的相关性分析

常规水质指标相关性分析如图5所示. 由图5可知,对东减河4个取样点水体监测的9个指标进行了两两之间的相关分析(每个指标均有2022年5月至

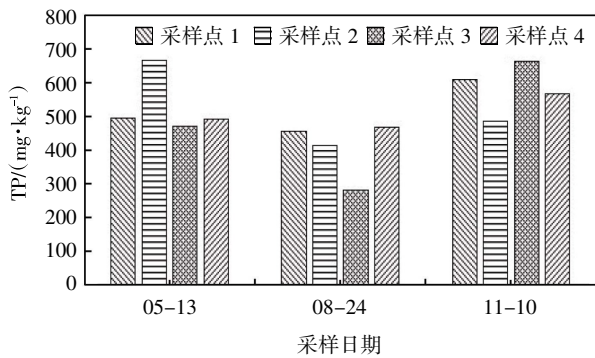
11月14次的数据,因此相关分析的样本数n=14). 分析结果表明,水体中Chla和温度为显著的正相关(r=0.561;P<0.05),温度和DO为显著的负相关(r=-0.645;P<0.05). Chla和DO为显著的负相关(r=-0.574;P<0.05). 以上分析结果表明,4个取样点处藻类的爆发受水体中温度因子的影响相对最大,夏季东减河的高水温可能是导致水体富营养化的主要诱因. 多项研究表明氮磷营养盐是富营养化的主控因子^[15-17],就东减河水体特点看,Chla、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、



(a) 不同采样点沉积物有机质含量



(b) 不同采样点沉积物 TN 含量



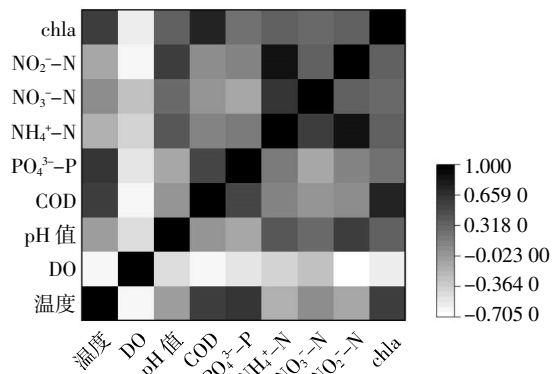
(c) 不同采样点沉积物 TP 含量

图4 不同采样点沉积物特征分析

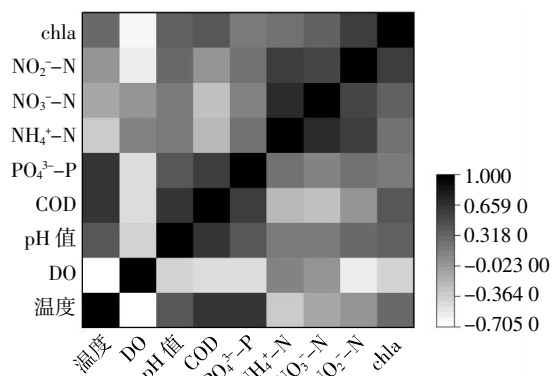
NO₂-N 均为不同程度的正相关,其中在采样点 3,4 为显著的正相关.因此得出氮是富营养化的主控因子.本研究中磷与 Chla 没有良好的线性关系.

2.5 微生物群落及优势功能菌群

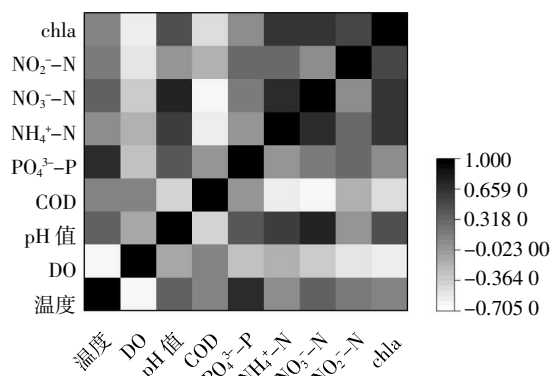
不同采样点功能菌群变化如图 6 所示.4 个采样点的细菌组成在属水平上不同,各物种所占比例差异也较大.从图 6 看出,与采样点 1,2 相比,采样点 3,4 生物多样性更为丰富,这和曝气-浮床工艺关系密切.比较丰富的物种多样性是维持河道生态系统功能正常的前提条件^[18],且底泥中氮磷循环、有机物降解与底泥细菌群落的多样性和丰富度之间也存在着极其重要的关联性^[9].本研究中与氮循环相关的优势菌种包括 *Thiobacillus*、*Sphingopyxis*、*Nitrospira*、*Pseudomonas*、*Thermomonas* 等.在采样点 3 中丰度分别为 6.04%、



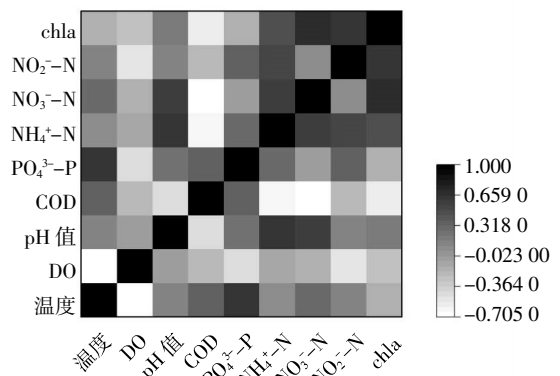
(a) 采样点 1



(b) 采样点 2



(c) 采样点 3



(d) 采样点 4

图5 常规水质指标相关性分析

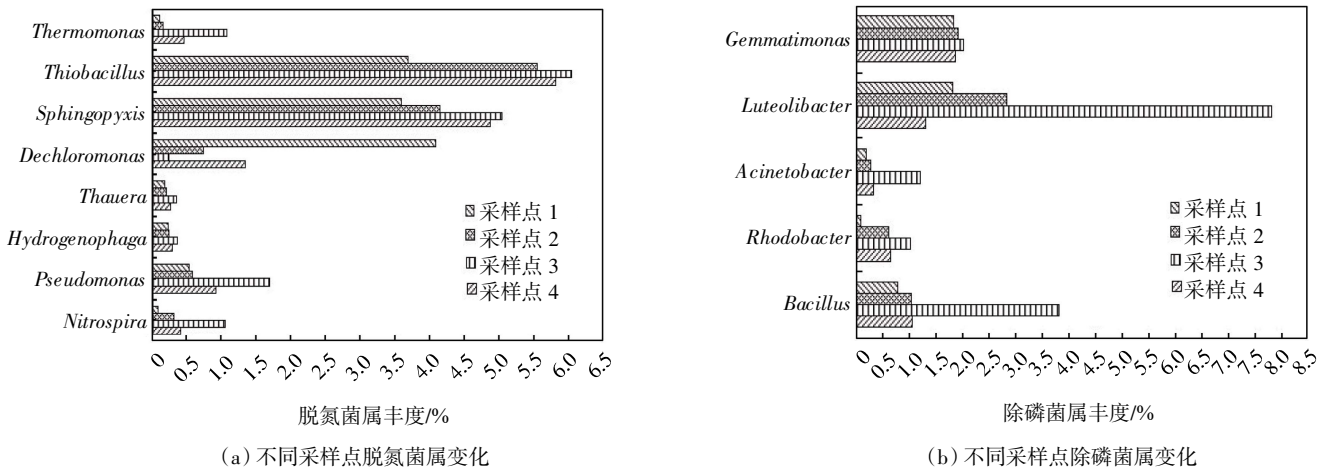


图6 不同采样点功能菌群变化

5.03%、1.04%、1.68%和 1.07%，具有显著优势，在一定程度上反映了曝气-浮床组对氮去除的优势。*Spingopyxis* (鞘脂单胞菌属)是新型微生物资源，可以降解单环芳烃、联苯、取代芳香化合物及 PAHs 等有毒物质，对污染严重的水体修复具有较大潜力^[20-21]。与磷去除相关的优势菌种有 *Bacillus* (芽孢杆菌属)，*Rhodobacter* 和 *Acinetobacter* 等，在采样点 3 中丰度分别为 3.82%、1.01%和 1.21%，说明该菌属更适应曝气-

浮床后期的生存环境。

值得注意的是黄杆菌属(*Luteolibacter*)丰度高达 7.80%，此菌属对于抑制水体富营养化以及水体自净修复具有促进作用，能够抑制微囊藻的生长，是良好水质水体的指示生物^[22-23]。东减河整治后春、夏、秋季效果见图 7，可见曝气-浮床工艺的增设使河道水体自净能力不断提升，河道水环境面貌持续改善，促进了河道生态修复。



图7 河道修复后不同季节景观效果

3 结 语

曝气-生态浮岛联合技术在短期内对河道水体中的氮磷及有机物均具有较高的去除率。此工艺对河道底泥中微生物群落的丰富度、多样性及优势菌种均有显著影响。其中多种丰度较高的菌属与脱氮相关性高，并出现高丰度的良好水体指示生物。可见应用曝气-生态浮岛修复技术兼具水体净化和景观环境美化作用，有利于构建健康的河道生态系统。另外在外源

污染源得到控制的条件下，沉积物污染引起的内源污染问题应引起重视，在如何有效削减沉积物污染程度上还需做进一步地深入研究。

参考文献:

[1] 米艳杰.伊通河水体污染生态修复及效益评价[D].吉林:东北师范大学,2015.

[2] 丁 源,姜翠玲.基于幸福河湖目标的城市河道生态修复技术研究[J].水利规划与设计,2023,2:40-45.

[3] 李 新,蒋 辉,孙 源,等.基于生态近自然理论的城市河流修复技术[J].水科学与工程技术,2022,1:16-19.

- [4] WANG W H, WANG Y, LI Z, et al. Effect of a strengthened ecological floating bed on the purification of urban landscape water supplied with reclaimed water[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622 /623: 1630–1639.
- [5] 张择瑞, 田 创, 方 超, 等. 浮床技术组合工艺净化人工废水中氮素的试验研究[J]. 安徽: 安徽工业大学学报(自然科学版), 2018, 35(1): 79–84.
- [6] 戴谨微, 陈 盛, 曾歆花, 等. 复合型生态浮床净化污水厂尾水的效能研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(3): 77–81.
- [7] 郭 晖, 杜 航, 廖生焱. 单一型植物生态浮岛对乡村河道水质的净化效果研究[J]. 农业与技术, 2023, 43(1): 76–79.
- [8] 吴 卿, 马梦醒, 莫文君, 等. 太阳能曝气-生物强化浮床对景观水体中氮素的去除[J]. 中国给水排水, 2021, 37(13): 92–97.
- [9] 曾德芳. 基于复氧型生态浮岛对河道水环境的研究[J]. 天津化工, 2021, 35(1): 109–111.
- [10] 潘 俊, 孙舶洋, 魏 炜, 等. 微纳米曝气-生态浮岛联合技术处理氮磷污染水体[J]. 环境工程, 2020, 38(5): 49–53.
- [11] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [12] 何 岩, 姚丽平, 李文超, 等. 黑臭河道底泥细菌群落结构对人工曝气响应的 DGGE 分析[J]. 上海: 华东师范大学学报(自然科学版), 2015, 2(3): 84–90.
- [13] 张志斌, 王书义, 张彦浩, 等. 南四湖消落带底泥有机磷赋存形态及分布特征[J]. 湖泊科学, 2023, 35(5): 1–15.
- [14] 项文霞, 陈金国, 李 钊, 等. 白潭湖表层沉积物氮磷污染评价及其释放强度影响因素研究[J]. 资源环境与工程, 2022, 36(6): 782–786.
- [15] 赵 磊. 用于沙河水库水质净化的生态浮岛构建与实验研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [16] 董怡华, 张新月, 陈 峰, 等. 生态浮岛的构建及其修复校园富营养化人工湖水试验[J]. 环境工程, 2021, 39(3): 90–96.
- [17] 樊 欢. 生态浮岛修复富营养化水体的实验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [18] GEMMA A, ARROYO P, LESD M. Characterisation of the soil bacterial community structure and composition of natural and constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 473/474: 63–71.
- [19] RIBEIRO D C, MARTINS G, NOGUEIRA R, et al. Mineral cycling and pH gradient related with biological activity under transient anoxic-oxic conditions: effect on P mobility in volcanic lake sediments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(16): 9205–9210.
- [20] 苟 敏, 曲媛媛, 杨 桦, 等. 鞘氨醇单胞菌: 降解芳香化合物的新型微生物资源[J]. 应用与环境生物学报, 2008, 14(2): 276–282.
- [21] 李阳阳, 王月杰, 于鲁冀, 等. 复合生态浮岛处理微污染河水[J]. 环境工程, 2018, 36(1): 1–5.
- [22] 彭 飞, 周彦锋, 王晨赫, 等. 2019年春季淮河中下游水体微生物的空间异质性[J]. 辽宁: 大连海洋大学学报, 2022, 37(5): 830–840.
- [23] 李 杨, 王 芳, 杨海滢, 等. 高通量测序研究李氏禾生态浮床净化污水的微生物群落结构变化[J]. 中国给水排水, 2021, 37(13): 92–97.