

张鑫鑫, 冯民权, 王毅博. 人工水草对低碳氮比黑臭水体的强化脱氮效果和机理[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(11): 97–105. Zhang Xinxin, Feng Minquan, Wang Yibo. Artificial waterweed for enhanced denitrification of black and odorous water-body with low carbon/nitrogen ratio: effectiveness and mechanism[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(11): 97–105.

# 人工水草对低碳氮比黑臭水体的强化脱氮效果和机理

张鑫鑫<sup>1</sup>, 冯民权<sup>1\*</sup>, 王毅博<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 西安工程大学环境与化学工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 人工水草有良好的物理吸附性和生物亲和性, 能够克服北方地区冬季植物枯萎的劣势, 在黑臭水体治理中常被用于为水生生物提供栖息地, 增加生物多样性, 以达到改善水质的目的。为探明不同人工水草强化微生物菌剂对低碳氮比黑臭水体的处理效果和机理, 该文对阿科蔓生态基、生物绳、组合水草和弹性立体纤维水草4种人工水草组合微生物菌剂处理低碳氮比黑臭水体进行实验, 对比分析系统脱氮效果和微生物多样性。结果表明, 生物绳组合微生物菌剂处理低碳氮比黑臭水体效果最佳, TN、NH<sub>3</sub>-N 和 COD 的去除率分别达到 82.75%、85.93%、86.24%, 比单纯用微生物菌剂的处理效果分别提高了 21.70、25.02、6.96 个百分点。微生物多样性表明, 生物绳比其他3种人工水草表面附着的细菌丰度更高, 变形杆菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteriota)为优势菌门, 红杆菌属(*Rhodanobacter*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)为优势菌属。厚壁菌门(Firmicutes)丰度与 NH<sub>3</sub>-N 浓度显著负相关, 丛毛单胞菌属(*Comamonas*)丰度与 COD 浓度显著负相关, 蛭弧菌属(*Bdellovibrio*)和 norank\_f\_\_Blastocatellaceae 丰度与 COD 浓度显著正相关。研究结果可为低碳氮比黑臭水体的处理提供参考价值。

**关键词:** 人工水草; 微生物菌; 低碳氮比; 黑臭水体; 脱氮

中图分类号: X52 文献标志码: A doi: 10.19672/j.cnki.1003-6504.1166.24.338 文章编号: 1003-6504(2024)11-0097-09

## Artificial Waterweed for Enhanced Denitrification of Black and Odorous Water-body with Low Carbon/Nitrogen Ratio: Effectiveness and Mechanism

ZHANG Xinxin<sup>1</sup>, FENG Minquan<sup>1\*</sup>, WANG Yibo<sup>2</sup>

(1. State Key Lab of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Environment and Chemical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Artificial waterweed, having good physical adsorption and biological affinity, can overcome the disadvantage of natural aquatic plants withering in winter, especially in northern areas. Therefore, in the treatment of black and odorous water bodies, artificial waterweed, which is able to provide habitats for aquatic organisms and increase biodiversity, has been frequently used to achieve the objective of improving water quality. In order to explore the treatment effect and mechanism of different artificial waterweed enhanced microorganisms on low-carbon/nitrogen ratio black and odorous water bodies, experiments were conducted using four types of artificial waterweed which was combined with microbial strains, i.e., Akoman ecological base, biological rope, integrated water-plant, and elastic three-dimensional fiber waterweed, to treat low-carbon/nitrogen ratio black and odorous water bodies, and the denitrification effectiveness and the relevant microbial diversity of them in the system were analyzed and compared one another. The findings of the experiments showed that the biological rope combined with microbial strains had the best effect on mitigating low-carbon/nitrogen black and odorous water bodies, with the removal rates of TN, NH<sub>3</sub>-N, and COD attaining 82.75%, 85.93%, and 86.24%, respectively, being 21.70, 25.02, and 6.96 percentage points higher than the removal rates (TN, NH<sub>3</sub>-N, and COD) of using microbial strains alone. Microbial diversity indicates that the abundance of bacteria attached to the surface of biological ropes was higher than that of the other three types of artificial waterweed, and Proteobacteria and Actinobacteriota were the dominant bacterial phyla, while *Rhodanobacter* and *Bacillus* the dominant bacterial genera, the abundance of Firmicutes was significantly negatively correlated with NH<sub>3</sub>-N concentration, while the abundance of *Comamonas* was notably negatively correlated with COD concentration; on the other hand, the abundance of *Bdellovibrio* and norank\_f\_\_Blastocatellaceae was remarkably positive-

ly correlated with COD concentration. It is hoped that the experimental results could provide reference for the treatment of black and odorous water bodies with low carbon/nitrogen ratios.

**Key words:** artificial waterweed; microbial bacteria; low carbon/nitrogen ratio; black and odorous water bodies; denitrification

随着城镇化和工业化的快速发展,大量含氮物质排入水体,超过了水体自净能力,引发黑臭现象<sup>[1]</sup>。黑臭水体不仅破坏区域生态系统,而且严重影响居民正常生活<sup>[2]</sup>。虽然治理工作取得了一定成效,但“十四五”期间基本消除黑臭水体的任务依然艰巨<sup>[3]</sup>。因此针对黑臭水体的高效治理十分必要。

生物法处理黑臭水体操作简单,污染小,但是若没有填料附着,无法形成较高的生物量降解污染物,人工水草填料可克服北方地区冬季植物枯萎的劣势,吸附性能良好<sup>[4]</sup>,两者结合可以提高黑臭水体的处理效果。梁益聪等<sup>[5]</sup>用人工水草处理黑臭河水,发现人工水草挂膜后对 TN 去除率达到 55.13%,但是需要额外补充碳源,增加成本。张华俊等<sup>[6]</sup>在试验中发现绳状人工水草对黑臭河水污染物有较强处理能力,但研究缺少水体优势菌群落组成分析。Xie 等<sup>[7]</sup>采用阿科蔓生态基、生物绳等组合微生物菌处理黑臭水体后,氨氮去除率为 43%~45%,但对于微生物和环境因子的相关关系不明确。因此,目前人工水草和微生物在低碳源环境下处理黑臭水体的效果尚不明确,且以往研究对优势菌及其和环境因子的相关性分析较少,需要

深入研究。

本研究响应低碳政策,在不外加碳源的情况下,将阿科蔓生态基、生物绳、组合水草、弹性立体纤维水草分别与微生物菌剂组合深度处理模拟黑臭水体,对比 4 种人工水草与微生物菌剂组合系统的脱氮效果及填料差异对处理效果的影响,以期为处理低碳氮比黑臭水体填料选择提供依据。本研究在分析水质指标的基础上,着重分析人工水草表面微生物组成情况,以期更深入地探究优势菌种在低碳氮比黑臭水体处理过程中的作用。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 实验用水

实验用水为模拟废水,参照相关研究对陕西省某城镇的实际黑臭水体检测指标范围进行人工配水<sup>[8]</sup>,模拟废水各污染物浓度范围见表 1, C/N 为 2.2,通常将 C/N<5 的黑臭水体称为低碳氮比黑臭水体<sup>[9]</sup>。配水所用药品包括氯化铵、葡萄糖、硝酸钾以及磷酸二氢钾,以上药品均为分析纯。

表 1 模拟废水水质指标

Table 1 Water quality indicators of simulated wastewater

| 项目 | TN/(mg·L <sup>-1</sup> ) | NH <sub>3</sub> -N/(mg·L <sup>-1</sup> ) | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/(mg·L <sup>-1</sup> ) | COD/(mg·L <sup>-1</sup> ) | pH      |
|----|--------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------|---------|
| 数值 | 110.50                   | 105.20                                   | 4.217                                                 | 240.6                     | 7.0~7.5 |

1.1.2 活性污泥

实验所用活性污泥取自陕西省某污水处理厂二沉池。

1.1.3 微生物菌剂

实验所用微生物菌剂为灰色粉末状,采购于中国宜春某生物科技有限公司,主要成分有反硝化菌、硝

化菌等。

1.1.4 人工水草

实验所用 4 种人工水草分别是阿科蔓生态基、生物绳、组合水草、弹性立体纤维水草,如图 1 所示。人工水草均采购于中国江苏某环保科技有限公司。

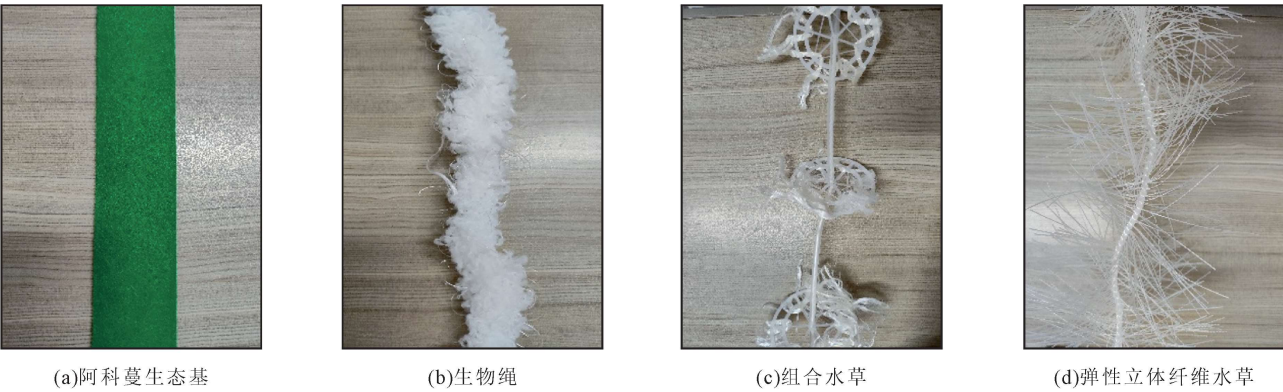


图1 人工水草实物图  
Fig.1 Physical diagram of artificial aquatic plants

## 1.2 方法

### 1.2.1 反应器的建立和运行

实验装置由恒温水浴锅、插座、氧气泵、气石、亚克力圆柱桶(内径10 cm,高35 cm,容积2.75 L)、氧气管、4种人工水草等组成,反应器装置见图2。氧气管连接氧气泵与纳米气盘,发挥曝气作用,为水体供氧。将亚克力圆柱桶放置在水浴锅中,以保持恒温。向各反应器加入模拟废水2.0 L,同时将30 g 活性污泥用

0.2 L 模拟废水化成糊状倒入反应器中,以便人工水草挂膜。然后将微生物菌剂投入反应器,并搅拌均匀。用细绳将人工水草悬挂在长条支架上,底部用玻璃块垂着保持人工水草直立。在投加量为0.05 g/L,温度为25 ℃,DO为3~4 mg/L,pH为8,曝停时间比3 h:2 h的环境条件下运行反应器<sup>[10-13]</sup>,每隔24 h取水样20 mL检测TN、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、COD的浓度,并加入等量的新鲜模拟废水。

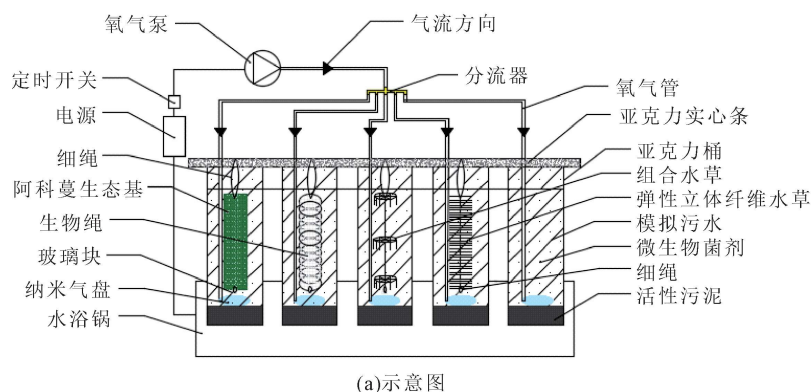


图2 人工水草组合微生物菌剂反应器  
Fig.2 Reactor of artificial aquatic weed combined microbial agent

### 1.2.2 分析与检测

采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定总氮(TN),采用纳氏试剂分光光度法测定氨氮(NH<sub>3</sub>-N),采用紫外分光光度法测定硝酸盐氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N),采用重铬酸钾滴定法测定化学需氧量(COD),采用溶氧仪(HQ30d)测定溶解氧DO,采用pH计(pH60-Z)测定pH值。采用Origin 2018制图并分析数据。负载生物量使用重量法进行测定。SEM扫描电镜检测由杭州研趣信息技术有限公司完成,微生物多样性检测由上海美吉生物医药科技公司完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 人工水草与微生物菌剂组合系统处理效果

#### 2.1.1 不同人工水草与微生物菌剂组合系统对TN处理效果对比

阿科曼生态基、生物绳、组合水草、弹性立体纤维水草4组系统稳定后TN去除率依次为73.59%、82.75%、68.71%、69.18%,分别高出空白组12.24、21.70、7.66、8.13个百分点,相同条件下,TN去除率表现为生物绳组>阿科曼生态基组>弹性立体纤维水草组>组合水草组,这与王靖楠<sup>[14]</sup>的研究结果一致。各组TN总体呈下降趋势,在第8~12天,TN略微增加,可能是由于生物膜脱落造成<sup>[15]</sup>。生物绳比表面

积大,有利于微生物挂膜,当生物膜达到一定厚度,其表层及内部会分别形成好氧、缺氧及厌氧的微环境,硝化和反硝化作用可以同时在生物膜上进行,提高TN的去除率<sup>[5]</sup>。

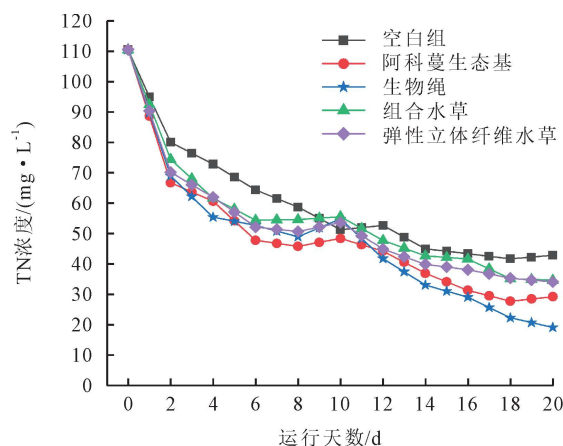


图3 人工水草组合微生物菌剂对TN去除效果  
Fig.3 Removal effect of artificial aquatic weed combined microbial agents on TN

#### 2.1.2 不同人工水草与微生物菌剂组合系统对NH<sub>3</sub>-N处理效果对比

阿科曼生态基、生物绳、组合水草、弹性立体纤维水草与微生物菌剂组合系统对NH<sub>3</sub>-N的去除效果对比见图4。由于低碳氮比黑臭水体治理以脱氮为主要目的,与反硝化细菌相比,硝化细菌生长速度相对缓慢,因此以氨氮去除率稳定作为人工水草表面生物膜稳定的标志<sup>[16]</sup>。实验结果显示,阿科曼生态基、生物绳、组合水草、弹性立体纤维水草4组系统NH<sub>3</sub>-N浓

度基本在18 d达到稳定,而后2 d变化幅度较小,说明4种人工水草表面的生物膜已达到稳定状态。最终第20天阿科蔓生态基、生物绳、组合水草、弹性立体纤维水草4组系统 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率依次为78.40%、85.93%、76.01%、73.27%,分别高出空白组17.49、25.02、15.10、12.36个百分点。相同条件下, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率表现为生物绳组>阿科蔓生态基组>弹性立体纤维水草组>组合水草组,这与张华俊等<sup>[6]</sup>的研究结果一致。在实验初期,氨氮下降速率较快,充分曝气使水中DO充足,产生的好氧环境有益于硝化反应的进行,随后各组 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度下降速率减慢,可能由于微生物相互竞争和营养物质的减少,但总体呈现下降趋势,这与李芃林<sup>[17]</sup>的研究有相似的变化规律。

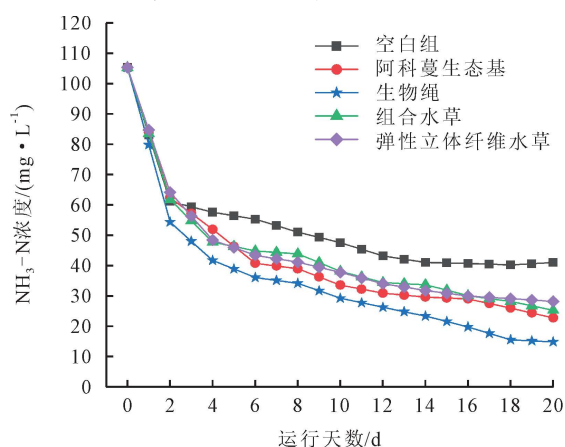


图4 人工水草组合微生物菌剂对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果  
Fig.4 Removal effect of artificial aquatic weed combined microbial agents on  $\text{NH}_3\text{-N}$

### 2.1.3 不同人工水草与微生物菌剂组合系统对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 处理效果对比

阿科蔓生态基、生物绳、组合水草、弹性立体纤维水草与微生物菌剂组合系统对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除效果对比见图5,阿科蔓生态基组、生物绳组、组合水草组和弹性立体纤维水草组的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 出水浓度分别为3.536、3.154、5.544和4.084 mg/L,差别不大。系统运行过程中均保持在10 mg/L以内。空白组 $\text{NO}_3\text{-N}$ 出水浓

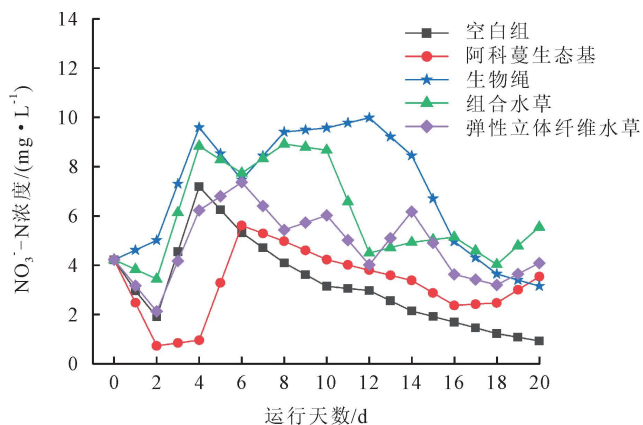


图5 人工水草组合微生物菌剂对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除效果  
Fig.5 Removal effect of artificial aquatic weed combined microbial agents on  $\text{NO}_3\text{-N}$

度为0.93 mg/L,可能因为空白组硝化细菌含量少,硝化作用弱于4组组合系统,不利于氨氮转化为硝酸盐氮。在实验过程中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 变化幅度较小,基本呈现先降再升最后下降逐渐趋于稳定的变化规律,这与樊笑等<sup>[18]</sup>的研究有类似的变化规律。

### 2.1.4 不同人工水草与微生物菌剂组合系统对COD处理效果对比

阿科蔓生态基、生物绳、组合水草、弹性立体纤维水草与微生物菌剂组合系统对COD的去除效果对比见图6。结果显示,阿科蔓生态基、生物绳、组合水草、弹性立体纤维水草4组系统稳定后COD去除率依次为86.24%、86.24%、87.49%、88.12%,分别高出空白组6.96、6.96、8.21、8.84个百分点,相同条件下,组合水草组和弹性立体纤维水草组的COD去除率组略高于阿科蔓生态基组和生物绳组,但差别不显著,这与肖玉春<sup>[19]</sup>的部分研究结果一致。COD去除与微生物有关,水中微生物在人工水草表面形成生物膜,膜上微生物生长、繁殖需要吸附降解水中的有机物,使水中的COD浓度呈现迅速下降的趋势。虽然在14 d后出现轻微波动,但总体呈下降趋势,这与微生物种群生长和消亡动态过程有关<sup>[20]</sup>。

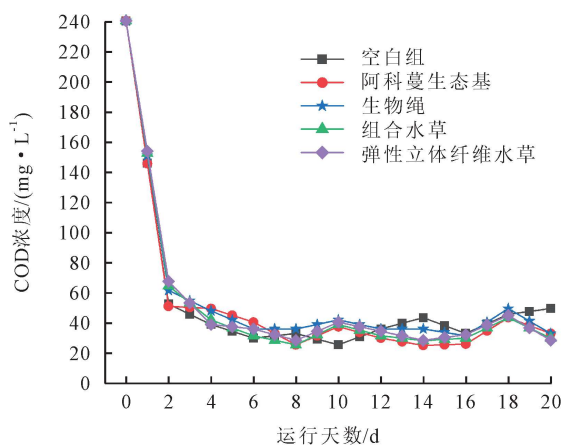


图6 人工水草组合微生物菌剂对COD去除效果  
Fig.6 Removal effect of artificial aquatic weed combined microbial agents on COD

考虑到黑臭水体具有高氨氮的水质特点,因此以TN和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 作为主要水质指标,在相同的环境条件下,阿科蔓生态基组、生物绳组、组合水草组、弹性立体纤维水草组4组系统中生物绳组处理低碳氮比黑臭水体效果最佳,TN和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率分别为82.75%、85.93%,比空白组提高了21.70、25.02个百分点,这与相关研究结果一致<sup>[20]</sup>。

### 2.2 人工水草负载生物量比较

负载生物量是衡量人工水草性能的一个重要指标,第20天阿科蔓生态基、生物绳、组合水草、弹性立体纤维水草的负载生物量结果如图7所示,分别为31.5、34.4、17.1、7.4 mg/g。4种人工水草相比,生物绳

和阿科蔓生态基单位质量负载的生物量接近,均显著高于组合水草和弹性立体纤维水草。原因在于生物绳和阿科蔓生态基比表面积相对较大、内部间隙多,有助于提高氧从气相向液相的转移效率,促进微生物生长和繁殖<sup>[21]</sup>。结合污染物去除效果可以得出,在低碳氮比黑臭水体治理中,生物绳填料单位质量负载的生物量较多,对污染物的去除效果更好。

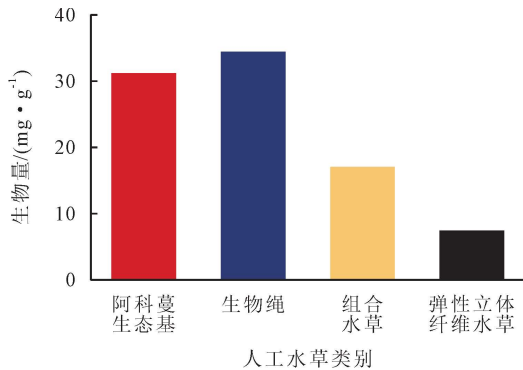


图7 人工水草负载生物量  
Fig.7 Biomass of artificial aquatic weed loads

2.3 人工水草生物膜表面结构分析

人工水草的表面结构有利于微生物菌的附着、生长和繁殖,但结构的不同也会影响水体微生物菌种的生长代谢活动,进而导致处理效果呈现差异。为了更好地观察4种人工水草填料的挂膜情况,分别在1 000倍下对阿科蔓生态基、生物绳、组合水草、弹性立体纤维水草第20天挂膜状态进行扫描电子显微镜观察分析。

阿科蔓生态基、生物绳、组合水草、弹性立体纤维水草的SEM结果如图8所示,可以清晰地观察到4种人工水草表面都已附着大量微生物,主要包括球菌、杆菌、螺旋菌、丝状菌等,这些微生物与胞外聚合物一起构成了菌胶团,包裹在人工水草的纤维丝上。其中,阿科蔓生态基和生物绳表面形成了厚厚的生物膜,组合水草和弹性立体纤维水草形成的生物膜较薄。生物绳上形成的生物膜最为松散,利于传质,球菌和杆菌数量明显比其他3种人工水草多,在曲萌<sup>[22]</sup>的研究中也发现了相同的结果。

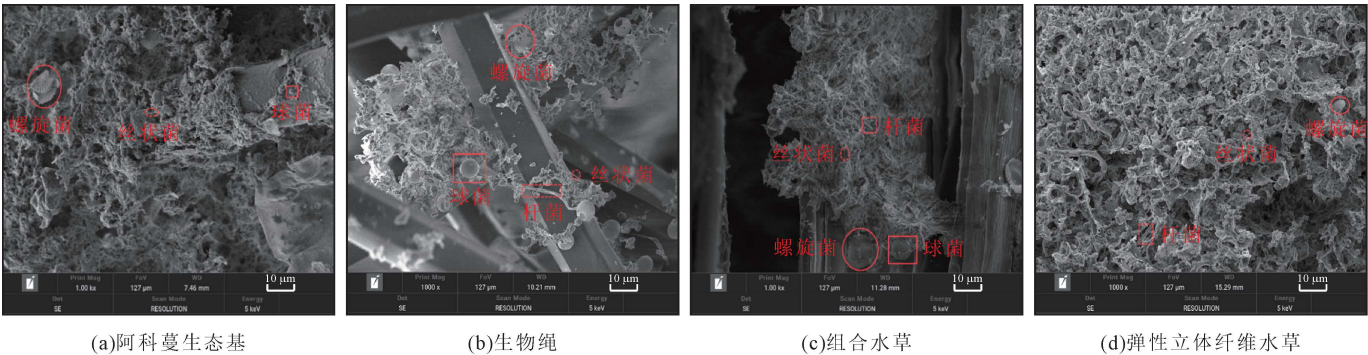


图8 人工水草表面结构SEM图  
Fig.8 SEM diagram of the surface structure of artificial aquatic weeds

2.4 人工水草与微生物菌剂组合系统的微生物多样性分析

通过 Alpha 多样性分析比较4种人工水草表面微生物群落的丰富度和多样性(表2),由数据结果可知,生物绳的 Sobs、Chao、Ace 指数均高于其余3种类型的人工水草,表明生物绳上覆盖的微生物群落丰富度最高,阿科蔓生态基、生物绳、组合水草的 Shannon 指

数显著高于弹性立体纤维水草,而 Simpson 指数均比弹性立体纤维水草低,表明阿科蔓生态基、生物绳、组合水草的群落多样性较高,弹性立体纤维水草群落多样性偏低。表2中4个样本的 Coverage 均大于0.99,说明样品可靠性非常高。由此可知,生物绳表面微生物群落组成更加丰富,多样性更高,生物膜结构更加稳定,有利于污染物的降解。

表 2 人工水草表面微生物多样性指数统计表  
Table 2 Statistical table of surface microbial diversity index of artificial aquatic plants

| 样品 | Sobs  | Chao        | Ace         | Shannon | Simpson | Coverage |
|----|-------|-------------|-------------|---------|---------|----------|
| A  | 952   | 1 012.450 0 | 1 051.605 1 | 4.867 5 | 0.019 1 | 0.995 9  |
| B  | 1 114 | 1 158.112 2 | 1 214.520 8 | 4.721 7 | 0.026 1 | 0.995 7  |
| C  | 1 066 | 1 099.882 1 | 1 141.948 5 | 4.986 3 | 0.022 2 | 0.996 5  |
| D  | 694   | 773.694 6   | 806.950 0   | 3.961 6 | 0.059 6 | 0.996 2  |

注:A:阿科蔓生态基;B:生物绳;C:组合水草;D:弹性立体纤维水草。下同。

OTUs Venn 图用于统计多个样本中所共有和独有的物种数目,能直观表现样本的物种组成相似性及重叠情况。由图9可知,阿科蔓生态基、生物绳、组合水草、弹性立体纤维水草所特有的 OTUs 数目分别为171、

287、231、60,生物绳表面 OTUs 数目最多,弹性立体纤维水草表面 OTUs 数目最少。4种人工水草上共有的细菌 OTUs 数目为451,高于各自特有的 OTUs 数目,说明4种人工水草表面微生物群落组成相似性较高。

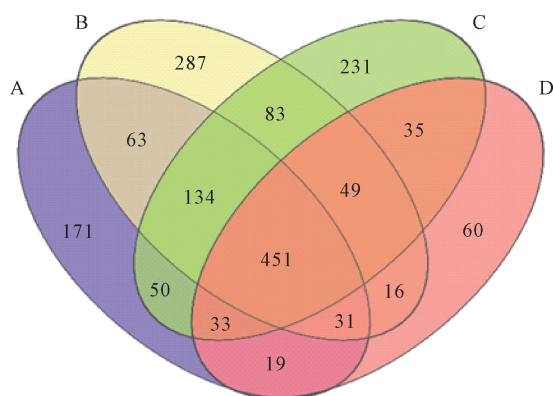


图9 人工水草表面细菌组间OTU<sub>s</sub> Venn图  
Fig.9 OTU<sub>s</sub> Venn diagram of bacteria on the surface of artificial aquatic plants

## 2.5 人工水草表面微生物群落组成结构分析

### 2.5.1 人工水草表面微生物门水平群落组成结构分析

阿科蔓生态基、生物绳、组合水草和弹性立体纤维水草表面微生物在门水平上群落组成结构见图10。结果显示,4种人工水草表面微生物组成在门水平具有相似性,优势菌门包括变形杆菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteriota)、绿弯菌门(Chloroflexi)、拟

杆菌门(Bacteroidota)、厚壁菌门(Firmicutes)等,这与之前学者对黑臭水体的微生物组成研究一致<sup>[23,24]</sup>。变形杆菌门在弹性立体纤维水草占比高于其他3种人工水草,相关研究表明,变形杆菌门含有多种能够去除有机物和氮的细菌,在多种水环境条件下占主导地位<sup>[25]</sup>。放线菌门在阿科蔓生态基和生物绳中占比高于其他2种人工水草,已有研究证明其对细菌生物膜的形成和成熟至关重要<sup>[26]</sup>。绿弯菌门在组合水草占比高于其他3种人工水草,是兼性厌氧菌,具有较好的硝化性能<sup>[27]</sup>。拟杆菌门在阿科蔓生态基占比高于其他3种人工水草,拟杆菌可以利用变形菌从裂解细胞中释放的细胞内物质在厌氧条件下增殖,并通过反硝化过程提高氮的去除率<sup>[28]</sup>。厚壁菌门(Firmicutes)在生物绳占比高于其他3种人工水草,已被证明与反硝化和复杂有机物降解有关<sup>[29]</sup>。另外,4种人工水草表面还检测到了蛭弧菌门(Bdellovibrionota)、酸杆菌门(Acidobacteriota)等,它们可以通过生物絮凝、生物膜形成和有机物降解等方式改善水质<sup>[30]</sup>。

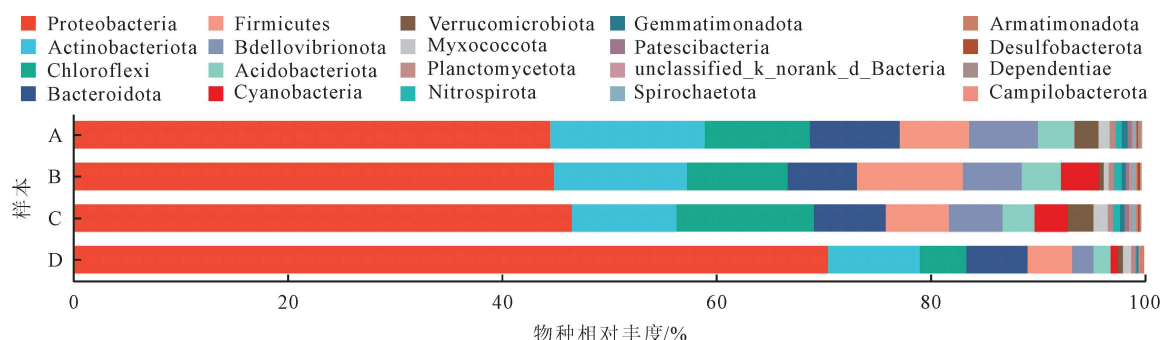


图10 门水平微生物群落组成结构分析  
Fig.10 Analysis of the composition and structure of microbial communities at the phylum level

### 2.5.2 人工水草表面微生物属水平群落组成结构分析

由图11可知,阿科蔓生态基、生物绳、组合水草、弹性立体纤维水草的表面微生物组成在属水平具有差异性,按照相对丰度由高到低,阿科蔓生态基表面优势菌属为红杆菌属(*Rhodanobacter*, 6.85%)、类节杆菌属(*Paenarthrobacter*, 6.62%);生物绳表面优势菌属为红杆菌属(*Rhodanobacter*, 10.16%)、芽孢杆菌属

(*Bacillus*, 6.67%);组合水草表面优势菌属为丛毛单胞菌属(*Comamonas*, 12.47%)、蛭弧菌属(*Bdellovibrio*, 3.69%);弹性立体纤维水草表面优势菌属为丛毛单胞菌属(*Comamonas*, 17.29%)、不动杆菌属(*Acinetobacter*, 13.73%)。丛毛单胞菌属在组合水草和弹性立体纤维水草中占比高于阿科蔓生态基和生物绳,主要发挥生物降解、增强生物膜形成的作用<sup>[31]</sup>。红杆菌属和芽

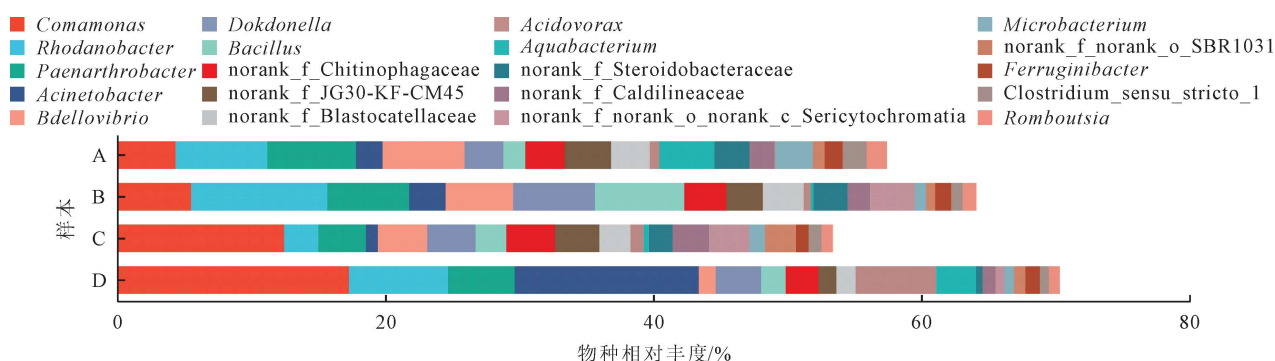


图11 属水平微生物群落组成结构分析  
Fig.11 Analysis of the composition structure of genus level microbial communities

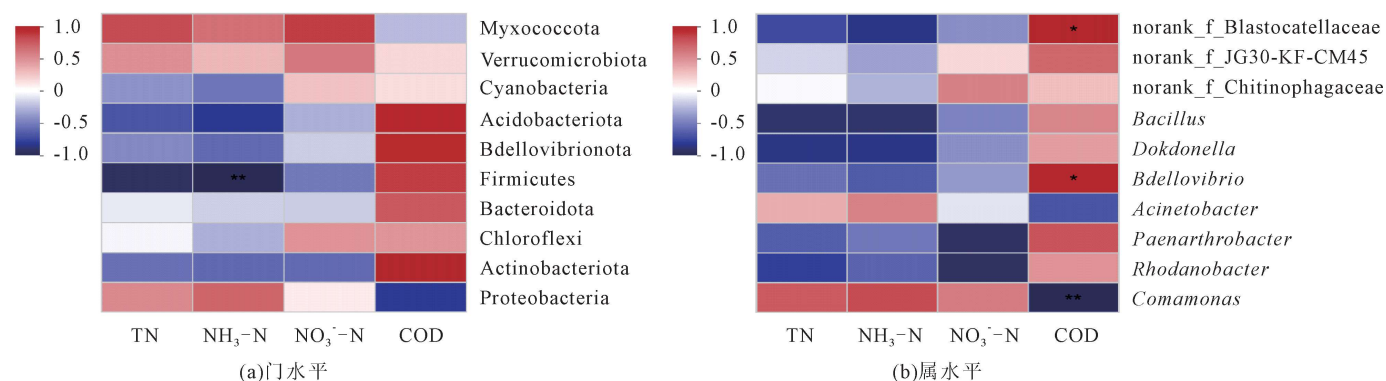
孢杆菌属在生物绳中占比高于其余3种人工水草,相关研究表明,红杆菌属有利于微生物聚集体的形成<sup>[32,33]</sup>,芽孢杆菌属是好氧菌,具有优良的脱氮活性<sup>[34]</sup>。蛭弧菌属在阿科蔓生态基和生物绳中占比高于其他2种人工水草,属于寄生性革兰氏阴性菌,可通过寄生裂解其他细菌从而达到控制有害菌的目的<sup>[35]</sup>。

## 2.6 人工水草表面微生物群落与环境因子相关性分析

优势微生物的丰度与污染物含量表现出很强的相关性,表明养分浓度的变化可能导致微生物群落组成的改变<sup>[36]</sup>。对门水平优势微生物和环境因子进行 Pearson 相关性分析,见图 12(a)。结果显示,厚壁菌门(Firmicutes)丰度与 TN 浓度负相关( $r=-0.946\ 1$ ,  $P=0.053\ 9$ ),与  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度显著负相关( $r=-0.995\ 4$ ,  $P=$

$0.004\ 6$ )。粘球菌门(Myxococcota)丰度与  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度正相关( $r=0.812\ 0$ ,  $P=0.188\ 0$ ),但相关性不强。放线菌门(Actinobacteriota)丰度与 COD 浓度正相关( $r=0.948\ 6$ ,  $P=0.051\ 4$ )。

属水平优势微生物和环境因子 Pearson 相关性分析结果见图 12(b)。芽孢杆菌属(*Bacillus*)丰度与 TN 浓度负相关( $r=-0.905\ 2$ ,  $P=0.094\ 8$ ),与  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度也负相关( $r=-0.908\ 3$ ,  $P=0.091\ 7$ )。红杆菌属(*Rhodanobacter*)丰度与  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度负相关( $r=-0.945\ 9$ ,  $P=0.054\ 1$ )。丛毛单胞菌属(*Comamonas*)与 COD 浓度显著负相关( $r=-0.995\ 5$ ,  $P=0.004\ 5$ ),蛭弧菌属(*Bdellovibrio*)和 norank\_f\_\_Blastocatellaceae 与 COD 浓度显著正相关( $r=0.953\ 9$ ,  $P=0.046\ 1$ ;  $r=0.967\ 8$ ,  $P=0.032\ 2$ )。



注:  $r>0$ 表示正相关,  $r<0$ 表示负相关,  $r=0$ 表示两个变量无线性关系; \*表示  $P\leq 0.05$ , \*\*表示  $P\leq 0.01$ ,  $P<0.05$ 表示显著相关。

图12 微生物和环境因子的Pearson相关系数热图

Fig.12 Pearson correlation coefficient heatmap of microorganisms and environmental factors

## 3 结论

(1)从污染物去除的整体效果来看,生物绳组合微生物菌剂处理低碳氮比黑臭水体效果最好,系统稳定后 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 的去除率分别为 82.75%、85.93%、86.24%,和单纯用微生物菌剂的处理效果相比, TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 的去除率分别提高了 21.70%、25.02%、6.96个百分点。

(2)挂膜稳定后生物绳表面微生物群落丰富度和多样性大于阿科蔓生态基、组合水草和弹性立体纤维水草。门水平上,变形杆菌门(Proteobacteria)和放线菌门(Actinobacteriota)为优势菌门;属水平上,红杆菌属(*Rhodanobacter*)和芽孢杆菌属(*Bacillus*)为优势菌属,优势物种发挥着高效脱氮的作用。

(3)人工水草表面微生物与环境因子的相关性表明,厚壁菌门(Firmicutes)丰度与  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度显著负相关,丛毛单胞菌属(*Comamonas*)丰度与 COD 浓度显著负相关,蛭弧菌属(*Bdellovibrio*)和 norank\_f\_\_Blastocatellaceae 丰度与 COD 浓度显著正相关。

(4)提升人工水草微生物群落聚集性能的关键在

于优化人工水草表面结构特性和增加优势微生物的多样性,建议对人工水草材料的粗糙度、比表面积和形状结构进行改进,以吸引更多微生物附着生长。未来可以深入探究微生物种群关系及其相互作用,促进优势微生物在人工水草上的聚集和生长。

## 【参考文献】

- [1] 王浩,孟现勇,林晨. 黑臭河道治理关键技术及其应用[J]. 人民长江, 2020,51(11):1-9.  
Wang Hao, Meng Xianrong, Lin Chen. Key technology and practice of black-odor river regulation[J]. Yangtze River, 2020,51(11):1-9.
- [2] 宁梓洁,王鑫. 黑臭水体治理技术研究进展[J]. 环境工程, 2018,36(8):26-29.  
Ning Zijie, Wang Xin. Overview of the black-odorous waters treatment technologies[J]. Environmental Engineering, 2018,36(8):26-29.
- [3] 生态环境部:到2025年县级城市建成区黑臭水体基本消除[J]. 给水排水, 2022,58(5):75.  
Ministry of Ecology and Environment: by 2025, the black and odorous water bodies in the built-up areas of county-

- level cities will be basically eliminated[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022,58(5):75.
- [4] Raj Deena S, Kumar G, Vickram A S, et al. Efficiency of various biofilm carriers and microbial interactions with substrate in moving bed-biofilm reactor for environmental wastewater treatment[J]. Bioresource Technology, 2022,359: 127421.
- [5] 梁益聪,胡湛波,涂玮灵,等. 碳素纤维生态基技术对城市黑臭水体的修复效果[J]. 环境工程学报, 2015,9(2):603-608. Liang Yicong, Hu Zhanbo, Tu Weiling, et al. Effectiveness of carbon fiber based biofilm carrier remediation technology on urban black-odorous water[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015,9(2):603-608.
- [6] 张华俊,刘敏,陈海峰,等. 黑臭河道生态修复工程人工水草处理效果研究[J]. 湖北农业科学, 2018,57(15):54-57. Zhang Huajun, Liu Min, Chen Haifeng, et al. Treatment effects of different types of artificial plants in the ecological restoration of the malodorous river[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2018,57(15):54-57.
- [7] Xie Y T, Huang Y B, Huang J Y, et al. Demonstration research on the combined technology of aeration and biofilm in the *in situ* treatment of black smelly water[J]. Journal of Environmental Engineering, 2020,146(11):05020008.
- [8] Wang Y B, Chen Z H, Feng M Q, et al. Enhanced nitrogen removal performance of microorganisms to low C/N ratio black-odorous water by coupling with iron-carbon micro-electrolysis[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023,11(5):110893.
- [9] Liu T, Li Q, Quan X. Step-feed sequence batch reactor filled with surface-modified carriers can enhance nitrogen removal from low C/N ratio wastewater[J]. Biochemical Engineering Journal, 2023,192:108848.
- [10] 戚科美. 人工水草对污染河流中氮磷等污染物的去除效果研究[D]. 济南:山东师范大学, 2017. Qi Kemei. Study on the Removal Effect of Artificial Aquatic Plants on Pollutants Such as Nitrogen and Phosphorus in Polluted Rivers[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2017.
- [11] 丁仁伟,徐兴,纪荣平. 一体化悬浮填料床-人工湿地处理农村污水研究[J]. 水处理技术, 2020,46(8):116-120. Ding Renwei, Xu Xing, Ji Rongping. Study on treatment of rural sewage by integrated suspended packed bed-constructed wetland[J]. Technology of Water Treatment, 2020,46(8): 116-120.
- [12] 魏冉. 一株异养硝化-好氧反硝化细菌 *Pseudomonas aeruginosa* P-1 的筛选及脱氮特性研究[D]. 杭州:浙江大学, 2020. Wei Ran. Screening and Denitrification Characteristics of a Heterotrophic Nitrifying Aerobic Denitrifying Bacterium *Pseudomonas aeruginosa* P-1[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [13] 苏东霞,李冬,张肖静,等. 曝停时间比对间歇曝气 SBR 短程硝化的影响[J]. 中国环境科学, 2014,34(5):1152-1158. Su Dongxia, Li Dong, Zhang Xiaojing, et al. Effects of different ratios of aeration time and anaerobic time on shortcut nitrification in the intermittent aeration SBR[J]. China Environmental Science, 2014,34(5):1152-1158.
- [14] 王靖楠. 碳纤维填料处理单元处理低污染水脱氮特性研究[D]. 西安:长安大学, 2015. Wang Jingnan. Study on Nitrogen Removal Characteristics of Low Pollution Water Treated by Carbon Fiber Packing Treatment Unit[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [15] 安雅敏,王法理,彭图恒,等. 不同材质及结构的人工水草在水质修复模拟试验中的影响研究[J]. 山东化工, 2015,44(12):133-135. An Yamin, Wang Fali, Peng Tuheng, et al. Effects of artificial plants of different materials and structures in water restoration simulation test[J]. Shandong Chemical Industry, 2015,44(12):133-135.
- [16] 康晓峰,王黎声,刘春,等. 膜曝气生物膜反应器生物脱氮研究进展[J]. 环境工程, 2021,39(7):38-45. Kang Xiaofeng, Wang Lisheng, Liu Chun, et al. Research progress of biological nitrogen removal in membrane aerated biofilm reactor[J]. Environmental Engineering, 2021,39(7):38-45.
- [17] 李芑林. 人工生态水草对城市水体水质的净化效果研究[D]. 郑州:郑州大学, 2018. Li Penglin. Study on Purification Effect of Artificial Ecological Aquatic Plants on Urban Water Quality[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [18] 樊笑,胡子涵,刘国,等. 异养硝化-好氧反硝化菌的分离及脱氮特性[J]. 环境科学与技术, 2022,45(11):1-9. Fan Xiao, Hu Zihan, Liu Guo, et al. Isolation and identification of two heterotrophic nitrification-aerobic denitrification strains and their nitrogen removal characteristics[J]. Environmental Science & Technology, 2022,45(11):1-9.
- [19] 肖玉春. 人工水草与微生物菌剂组合处理黑臭水体的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2021. Xiao Yuchun. Study on Treatment of Black and Odorous Water by Combination of Artificial Aquatic Plants and Microbial Agents[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [20] 陈庆锋,杨红艳,马君健,等. 人工水草在重污染河流生态修复中的应用进展[J]. 中国给水排水, 2014,30(20):54-58. Chen Qingfeng, Yang Hongyan, Ma Junjian, et al. Application of artificial plants to ecological restoration of heavily polluted river[J]. China Water & Wastewater, 2014,30(20): 54-58.
- [21] 王帆,孙雪健,康华,等. 填料尺寸对不同温度下 SBBR 工艺稳定性影响[J]. 环境科学与技术, 2021,44(3):157-162.

- Wang Fan, Sun Xuejian, Kang Hua, et al. The influence of packing size on SBBR process stability at different temperatures[J]. Environmental Science & Technology, 2021,44(3): 157–162.
- [22] 曲萌. 黑臭水体净化菌剂的构建及其生物强化效能[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2019.
- Qu Meng. Construction of Microbial Inoculum for Purifying Black and Odorous Water and Its Bioaugmentation Efficiency[D]. Shenyang: Liaoning University, 2019.
- [23] Ibekwe A M, Ma J, Murinda S, et al. Bacterial community dynamics in surface flow constructed wetlands for the treatment of swine waste[J]. Science of the Total Environment, 2016,544:68–76.
- [24] 彭丽萍, 刘云根, 伏川东, 等. 外场强化生物与生态耦合工艺对生活污水氨氮处理适应性研究[J]. 水处理技术, 2024,50(4):98–104.
- Peng Liping, Liu Yungen, Fu Chuandong, et al. Study on the adaptability of outfield-enhanced bio-ecological coupling process for the treatment of ammonia nitrogen in domestic wastewater[J]. Technology of Water Treatment, 2024,50(4):98–104.
- [25] Feng J W, Cui B H, Yuan B X, et al. Purification mechanism of low-pollution water in three submerged plants and analysis of bacterial community structure in plant rhizospheres[J]. Environmental Engineering Science, 2020,37(8): 560–571.
- [26] Zhu Y, Zhang Y, Ren H Q, et al. Physicochemical characteristics and microbial community evolution of biofilms during the start-up period in a moving bed biofilm reactor[J]. Bioresource Technology, 2015,180:345–351.
- [27] 金宝丹, 刘叶, 钮劲涛, 等. 不同 C/N 对高氮废水高效脱氮处理的影响[J]. 环境污染与防治, 2024,46(3):334–338.
- Jin Baodan, Liu Ye, Niu Jintao, et al. Effects of different C/N ratios on high-efficiency denitrification of high-nitrogen wastewater[J]. Environmental Pollution & Control, 2024,46(3):334–338.
- [28] An Y, Wang M Y, Zhou Z, et al. Enhancing biodegradability of industrial park wastewater by packing carriers and limited aeration in the hydrolysis process[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,264:121638.
- [29] Jia L X, Sun H M, Zhou Q, et al. Pilot-scale two-stage constructed wetlands based on novel solid carbon for rural wastewater treatment in southern China: enhanced nitrogen removal and mechanism[J]. Journal of Environmental Management, 2021,292:112750.
- [30] Han X M, Wang Z W, Ma J X, et al. Membrane bioreactors fed with different COD/N ratio wastewater: impacts on microbial community, microbial products, and membrane fouling[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2015,22(15):11436–11445.
- [31] Yan Y, Han I L, Lee J, et al. Revisiting the role of *Acinetobacter* spp. in side-stream enhanced biological phosphorus removal (S2EBPR) systems[J]. Water Research, 2024,251: 121089.
- [32] Szabó E, Liébana R, Hermansson M, et al. Microbial population dynamics and ecosystem functions of anoxic/aerobic granular sludge in sequencing batch reactors operated at different organic loading rates[J]. Frontiers in Microbiology, 2017,8:770.
- [33] Ai N, Yang Z H, Lou B C, et al. Impact of stepwisely reducing settling time on the formation and performance of aerobic granular sludge[J]. Journal of Water Process Engineering, 2024,60:105117.
- [34] 龚深, 巢传鑫, 邹冬生, 等. 人工湿地中植物对污染物去除机理研究进展[J]. 湿地科学, 2023,21(6):927–935.
- Gong Shen, Chao Chuanxin, Zou Dongsheng, et al. Research progress on removal mechanism of pollutants by plants in constructed wetlands[J]. Wetland Science, 2023,21(6):927–935.
- [35] 李敏佳, 郭衍彪, 吴冰, 等. 蛭弧菌(类群)研究现状及最新进展[J]. 水产科学, 2017,36(3):377–382.
- Li Minjia, Guo Yanbiao, Wu Bing, et al. Research status and advances in *Bdellovibrios*: a review[J]. Fisheries Science, 2017,36(3):377–382.
- [36] Gao Y T, Zhang Y X, Wei Q Y, et al. Response and synergistic effect of microbial community to submerged macrophyte in restoring urban black and smelly water bodies[J]. Journal of Water Process Engineering, 2023,53:103906.