

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.041



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



## 增强型生态浮床填料筛选及工况优化

何强<sup>1</sup>, 吕存浩<sup>1</sup>, 王辛戈<sup>1</sup>, 陈治池<sup>1</sup>, 胡美珩<sup>1</sup>, 蔡然<sup>2,3</sup>, 张功良<sup>2,4</sup>, 宋忱馨<sup>3</sup>,  
李德祥<sup>2,3</sup>, 程鸿<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 北京首创生态环保集团股份有限公司, 北京 100044; 3. 四川水汇生态环境治理有限公司, 四川 内江 641199; 4. 北京水星环境有限公司, 北京 101599)

**摘要:**生态浮床作为一种经济、环保的黑臭水体处理工艺得到广泛应用,但其处理能力受制于植物根系深度及表面积。通过悬浮球、生物绳、弹性和组合填料分别与间种的粉绿狐尾藻(*Myriophyllum aquaticum*)和西伯利亚鸢尾(*Iris sibirica*)植物构建生态浮床,探究不同填料对生态浮床效能的强化作用及微生物机制;并在优选填料的基础上进一步探究优选填料的最优添加工况及其强化下浮床对污染物去除的动力学模型。填料优选实验结果显示,生物绳填料对COD、氨氮和总磷的去除率最佳,分别为>99%、43.85%和14.03%;高通量测序分析显示,生物绳填料表面生物膜微生物丰富度最高、物种组成分布最均匀、微生物多样性最高,且生物绳填料可定向富集*Flavobacterium*、*Exiguobacterium*、*Chryseobacterium*、*Microbacterium*、*Caulobacter*等脱氮除磷相关功能菌。生物绳工况优化结果显示,修复轻度黑臭水体的最佳生物绳填料投加量为12.5 m/m<sup>3</sup>,其对COD、氨氮和总磷的去除率分别为96.4%、38.5%和56.6%;动力学模型拟合显示,一级动力学模型能更好地拟合生物绳强化生态浮床的氨氮及COD降解规律。

**关键词:**生态浮床;强化填料;微生物群落结构;反应动力学;生物绳

中图分类号:X703.1 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2024)04-0211-09

## The filler selection and working condition optimization of enhanced ecological floating bed

HE Qiang<sup>1</sup>, LV Cunhao<sup>1</sup>, WANG Xingge<sup>1</sup>, CHEN Zhichi<sup>1</sup>, HU Meiheng<sup>1</sup>, CAI Ran<sup>2,3</sup>,  
ZHANG Gongliang<sup>2,4</sup>, SONG Chenxin<sup>3</sup>, LI Dexiang<sup>2,3</sup>, CHENG Hong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Beijing Capital Eco-Environment Protection Group Co., Ltd., Beijing 100044, P. R. China; 3. Sichuan Shuihui Ecological Environment Management Co., Ltd., Neijiang 641199, Sichuan, P. R. China; 4. Beijing Mercury Environment Co., Ltd., Beijing 101599, P. R. China)

**Abstract:** Ecological floating beds are widely used as an economical and environmentally friendly technology for the treatment of black smelly water bodies, while their treatment capacity is limited by the plant root area and

收稿日期:2023-03-17

基金项目:重庆市自然科学基金(CSTB2022NSCQ-BHX0038);住房和城乡建设部科学技术计划项目(2020-R-027)

作者简介:何强(1965-),男,博士,教授,主要从事水污染控制研究,E-mail:hq0980@126.com.

程鸿(通信作者),男,博士,E-mail:hong.cheng@cqu.edu.cn.

Received: 2023-03-17

**Foundation items:** Chongqing Natural Science Foundation (No. CSTB2022NSCQ-BHX0038); Science and Technology Plan Project of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development (No. 2020-R-027)

**Author brief:** HE Qiang (1965-), PhD, professor, main research interest: water pollution control, E-mail: hq0980@126.com.

CHENG Hong (corresponding author), PhD, E-mail: hong.cheng@cqu.edu.cn.

the depth of plants reaching the water body. In this study, the enhancement effects and microbial mechanism of different fillers on the treatment capacity of ecological floating beds were investigated by constructing ecological floating beds with interspecies of *Myriophyllum aquaticum* and *Iris sibirica* plants through suspension balls, biological ropes, elastic and combined fillers respectively. Furthermore, the optimal addition of selected filter and its kinetic model of pollutant removal from the floating bed was investigated. The results showed that the best removal rates of COD, ammonia nitrogen and total phosphorus were  $>99\%$ ,  $43.85\%$  and  $14.03\%$ , respectively. The highest microbial abundance, the most uniform species composition distribution and the highest microbial diversity on the surface of the bio-rope filler have been observed, and the bio-rope filler can enrich nitrogen and phosphorus removal functional bacteria such as *Flavobacterium*, *Exiguobacterium*, *Chryseobacterium*, *Microbacterium* and *Caulobacter*.  $12.5 \text{ m/m}^3$  is the best amount of bio-rope filler for the remediation of mild black smelly water bodies, and the corresponding removal rates of COD, ammonia nitrogen, and total phosphorus are respectively  $96.4\%$ ,  $38.5\%$  and  $56.6\%$ . The kinetic model fitting revealed that the primary kinetic model could better fit the ammonia nitrogen and COD degradation patterns of bio-rope-enhanced ecological floating bed.

**Keywords:** ecological floating bed; strengthen fillers; microbial community structure; reaction dynamics; bio-rope filler

随着城镇化、工业化进程不断加快,水体富营养化引起的黑臭现象时有发生,严重影响居民正常生活和景观生态。现有的黑臭水体治理技术包括底泥疏浚、人工曝气、化学药剂法、微生物强化技术、植物修复技术等<sup>[1]</sup>,其中,植物修复技术因其兼具原位修复和运维费用低等优点被广泛应用。生态浮床是植物修复技术的重要代表,主要由浮床垫以及植物组成,植物以水培方式生长,其根系直接从水体中获取养分,植物广阔茂密的根系促进了其下方的水体流动,同时利用截留、捕集沉降等物理作用以及微生物代谢作用等方式处理污染物<sup>[2]</sup>。

近年来,相关研究围绕生态浮床广泛开展。Chang等<sup>[3]</sup>在美国佛罗里达州展开了生态浮床的长期实验,实验结果表明,生态浮床对总氮(TN)和总磷(TP)的去除率分别为 $15.7\%$ 和 $47.7\%$ 。Ning等<sup>[4]</sup>在中国常州市区河流进行了为期两年的研究,发现生态浮床明显降低了河流的化学需氧量和总氮水平,且提高了水体的溶解氧和透明度。然而,由于植物根系面积和到达水体的深度有限,传统生态浮床在去除率上受到一定程度的限制<sup>[5]</sup>。因此,提高传统浮床的去除效率成了近年来的研究热点。增强型生态浮床是一种传统生态浮床的强化装置,主要由微生物载体填料和水生植物组成<sup>[6]</sup>。该强化装置可利用水生植物和微生物的协同作用来完成生态恢复功能,以实现快速高效的处理。植物和微生物是强化生态浮床的重要生态因子,植物可以吸收水中的氮、磷和一些无机盐,但植物吸收效率有限;而微生物通过吸附在载体填料表面,提高生长速率和微生物量,从而加速污染物降解速率<sup>[7]</sup>。因

此,选择适宜的填料对增强型生态浮床效能至关重要。然而,目前针对填料的系统筛选及优化的相关研究鲜有报道。

笔者比较了不同填料辅助下增强型生态浮床对轻度黑臭水体污染物去除效果,筛选出增强效果最佳填料,并进一步优化该种填料的增强型生态浮床最优参数及工况,探究增强型生态浮床对污染物去除的特征及机理。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验装置

共设置5组生态浮床实验装置(图1)。浮床床体材质为HDPE,长、宽、高分别为 $33 \times 33 \times 6 \text{ cm}$ ,实验所用的浮床植物为粉绿狐尾藻(*Myriophyllum aquaticum*)和西伯利亚鸢尾(*Iris sibirica*),两种植物采取间种的形式,形成生态位互补<sup>[8]</sup>。定植位于床体中央以便于支撑和固定植物根系;所用水体容器为长、宽、高分别为 $70 \times 50 \times 43 \text{ cm}$ 的聚乙烯材质水

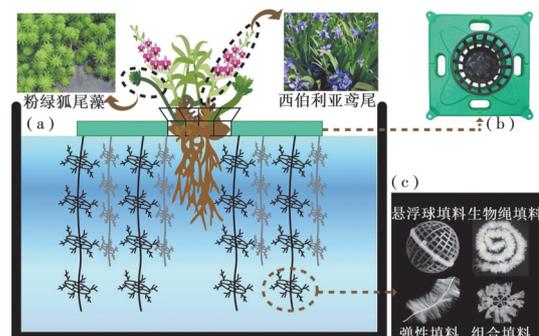


图1 实验装置及材料示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device and materials

箱,有效水深37 cm。实验选用4组填料,分别为悬浮球填料( $\phi 80$  mm)、生物绳填料(BZ-S型)、弹性填料( $\phi 150$  mm)、组合填料( $\phi 150 \times 100$  mm)(江苏鹏锦环保设备有限公司),以及一组填料的空白对照组。实验过程中采用西烁照明公司提供的LED全光谱植物灯对植物进行控时补光。

### 1.2 运行方案

实验用水采用实地取水的方式,实际取样水体为重庆大学校内某人工池塘。进水水质范围COD为67.7~75.0 mg/L、 $\text{NH}_4^+$ -N为9.7~11.6 mg/L、 $\text{NO}_3^-$ -N为4.6~7.0 mg/L、TP为1.4~1.7 mg/L、浊度为12.3~13.9 NTU。浮床装置启动前,对粉绿狐尾藻及西伯利亚鸢尾进行水培驯化,待长势稳定后,选取数量相同、长势相似的植物,经适当修剪后,移栽至对应的实验组浮床中。为消除光照不同对实验产生的影响,阴雨天统一采用6~8 h补光。实验分为两个阶段,首先对增强型生态浮床中填料进行筛选,筛选出对水体修复效果最好的填料(即填料筛选实验);进一步对筛选出的填料投加量对比优化,探究增强型生态浮床的最优工况(即填料工况优化实验)。其中,填料筛选实验阶段进行27 d的连续取样监测,填料工况优化实验进行47 d的连续取样监测。增强型浮床优选填料和工况优化的实验设计如表1、表2所示。

表1 填料筛选实验设计

Table 1 Experimental design of filler selection

编号	实验组	实验材料
1	空白组	仅污水
2	悬浮球填料组	植物+悬浮球填料
3	生物绳填料组	植物+生物绳填料
4	弹性填料组	植物+弹性填料
5	组合填料组	植物+组合填料

表2 生物绳填料工况优化实验设计

Table 2 Optimum experimental design of bio-rope conditions

编号	植物投加量/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )		优选填料投加量/ $\text{m}^3$
	粉绿狐尾藻	西伯利亚鸢尾	
1	无	无	无
2	0.35	0.86	12.5
3	0.33	0.86	25
4	0.34	0.85	50
5	0.34	0.87	75

### 1.3 水质测试

实验周期内对水体的 $\text{COD}_{\text{cr}}$ 、 $\text{NH}_4^+$ -N、TP、溶解氧和pH值等指标进行监测。 $\text{COD}_{\text{cr}}$ 和营养盐的测定参考第四版的《水和废水监测分析方法》<sup>[9]</sup>推荐

的方法, $\text{COD}_{\text{cr}}$ 采用重铬酸钾法测定; $\text{NH}_4^+$ -N采用纳氏分光光度法测定;TP采用钼酸铵分光光度法测定;溶解氧、浊度及pH值均采用HACH便携式多参数水质分析仪进行测定。

### 1.4 微生物群落分析

为进一步探究各填料强化作用微生物机理,研究了填料生物膜中微生物群落结构<sup>[10]</sup>。取相同体积的各填料置于50 mL离心管中,并加入20 mL无菌水,然后使用XH-C型漩涡混合器以最大速率震荡2 min,待生物膜脱离后取出填料,然后使用sigma-2-16P型离心机于8 000 r/min转速下离心5 min。离心后移除上清液,得到沉淀物并存储于 $-20^\circ\text{C}$ 冰箱中直至测序。测序过程中,首先使用E. Z. N. A. @土壤DNA试剂盒(Omega Bio-tek, Norcross, GA, USA)提取样本中的总DNA,然后以通用引物515F(引物序列GTGCCAGCMGCCGCGG)和907R(引物序列CCGTCAATTCMTTTRAGTTT)扩增细菌16S rRNA基因的V4-V5区后建库,然后采用Illumina 2500平台进行高通量测序。测序完成后,采用Qiime 2软件对高通量测序得到的原始数据进行拼接,经过对序列质量进行质控和过滤后,对各样本进行ASV聚类分析和物种分类学分析,并基于ASV统计分析样品Alpha和Beta多样性。

### 1.5 动力学分析

一级动力学模型作为常用的人工湿地、氧化塘、生态浮床污染物去除模型被广泛应用<sup>[11-12]</sup>。一级动力学模型的建立是假定目标污染物的降解规律服从指数关系,将反应器视作活塞流反应器,因此,该模型被广泛应用在湿地设计以及对湿地污染物去除效果的预测<sup>[13]</sup>。

基础一级动力学模型推导经线性化处理计算公式见式(1)。

$$\ln \frac{C_e}{C_i} = -k_v t \quad (1)$$

式中: $C_e$ 为出水浓度,mg/L; $C_i$ 为进水浓度,mg/L; $k_v$ 为速率常数,1/d; $t$ 为水力停留时间,d。

以 $\ln(C_e/C_i)$ 为Y轴,水力停留时间 $t$ 为X轴作图,经线性化拟合后,计算可得反应速率常数,从而对污染物降解过程进行预测。

Monod动力学模型是基于微生物活动起主导作用的分解过程提出的,可以用于判断在污染物代谢过程中微生物作用是否占据主导地位。酶促反应动力学最基本的公式(米-门公式)描述了底物浓度与酶促反应速率之间的关系,假定微生物比增长速率与目标污染物降解速率成比例关系,利用

Monod模型<sup>[14]</sup>的计算公式对污染物的降解过程进行预测,见式(2)。

$$\mu = \frac{\mu_m S}{K_s + S} \quad (2)$$

式中: $\mu$ 为物降解速率; $S$ 为基质浓度; $\mu_m$ 为污染物最大降解速率; $K_s$ 为半饱和系数,决定 $\mu$ 接近 $\mu_m$ 的快慢程度,定义为 $\mu = \mu_m/2$ 时的污染物浓度; $K_s$ 为半饱和系数,决定 $\mu$ 接近 $\mu_m$ 的快慢程度,定义为 $\mu = \mu_m/2$ 时的污染物浓度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 增强型浮床填料筛选

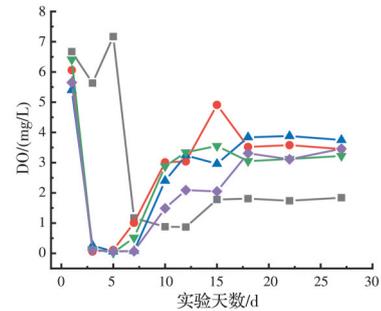
#### 2.1.1 增强型浮床系统污染物去除效果

在实验过程中,各个浮床系统的pH值均在6.8~7.5之间波动,各实验组间无明显的区别,图2为实验过程中4种增强型生态浮床DO、COD去除率、 $\text{NH}_4^+$ -N去除率和TP去除率的变化。

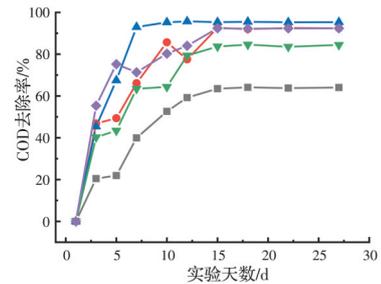
图2(a)表明,实验前7d各实验组中的溶解氧均非常明显地下降,这是由于微生物生长迅速,所需氧气量大,从而造成系统中氧气浓度下降<sup>[6]</sup>;从第7d之后,各浮床系统中溶解氧呈上升趋势,27d时悬浮球填料、生物绳填料、弹性填料、组合填料组的溶解氧浓度分别为3.45、3.75、3.22、3.46 mg/L,而空白组溶解氧仅为1.84 mg/L;结果显示4种浮床系统对水体的复氧能力均明显优于空白组,这是因为植物能够通过根际向水体泌氧,能在一定程度上提高目标水体的溶解氧水平<sup>[15]</sup>。Wang等<sup>[16]</sup>发现通过提高水体的溶解氧水平有助于黑臭水体的自我修复。

COD是水体黑臭的主要诱因之一<sup>[17]</sup>。由图2(b)可见,4种填料强化浮床均能明显提高对原水的COD去除效果,其最终COD去除效果排序分别为生物绳填料组(>99%)>悬浮球填料组(92.6%)>组合填料组(92.4%)>弹性填料组(83.6%),与之相对,空白组COD的去除率仅为63.5%,显示生物绳填料具有最佳的COD去除强化效果。这是由于生物绳填料组具有更大的比表面积,可以负载更多COD降解相关的微生物<sup>[18]</sup>,从而使其能够显著提高水体的COD去除效果。

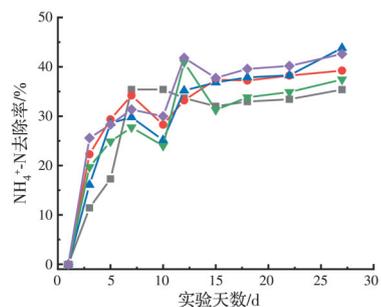
$\text{NH}_4^+$ -N是黑臭水体中氮污染的主要赋存形式,其去除主要通过硝化作用<sup>[19]</sup>。在硝化过程中,DO和微生物发挥关键性作用。图2(a)表明,生态浮床可以通过植物复氧提高水体中DO水平,为 $\text{NH}_4^+$ -N的去除创造条件。由图2(c)可看出,4种填料均能提高对 $\text{NH}_4^+$ -N的去除能力。实验周期结束时(第27d),各实验组的 $\text{NH}_4^+$ -N去除效率分别为



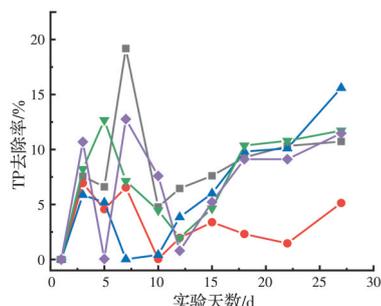
(a) 溶解氧变化



(b) COD去除率



(c)  $\text{NH}_4^+$ -N去除率



(d) TP去除率

注:—■—空白—●—悬浮球填料—▲—生物绳填料—▼—弹性填料—◆—组合填料

图2 4种增强型生态浮床水质参数变化

Fig. 2 Change of water quality parameters of the four enhanced ecological floating beds

生物绳填料组(43.85%)>组合填料组(43.62%)>悬浮球填料组(39.22%)>弹性填料组(37.37%)>空白组(35.41%),显示出生物绳填料更好地富集了硝化作用相关微生物<sup>[20]</sup>。

TP处理能力如图2(d)所示,27d后的TP去除率排序为生物绳填料组(14.03%)>弹性填料组(12.04%)>空白组(11.50%)>组合填料组

(11.22%)>悬浮球填料组(5.43%),磷的去除主要是依靠沉淀作用<sup>[21]</sup>,这导致增强浮床的TP去除效果不理想。相比之下,生物绳填料可以通过对植物生长阶段的控制提升系统整体的去除效率,显示出较好的TP去除效果。

通过浮床填料筛选实验探究发现,相较于其他填料(如悬浮球填料、弹性填料和组合填料),生物绳填料强化浮床对COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP显示出较优的去除能力,其去除率分别为>99%、43.85%、14.03%。

### 2.1.2 增强型生态浮床系统对微生物多样性的影响

上述实验结果表明,生物绳填料具有较优的污染物去除效果。为进一步探究生物绳的强化污染物去除机制,对填料表面的生物膜进行测序分析。Alpha多样性结果如表3所示。Chao指数和Ace指数越大,Simpson指数越小表明物种多样性越丰富。

表3 浮床系统微生物多样性指数分析

Table 3 Analysis of the alpha diversity of microbial structure in the floating bed system

样本	Chao指数	Ace指数	Shannon指数	Simpson指数
水体-空白	229.62	234.26	2.16	0.297
悬浮球填料生物膜	1 049.87	1 076.00	2.60	0.303
生物绳填料生物膜	1 240.56	1 281.03	3.95	0.077
弹性填料生物膜	815.33	867.96	3.24	0.130
组合填料生物膜	857.07	910.84	3.14	0.168

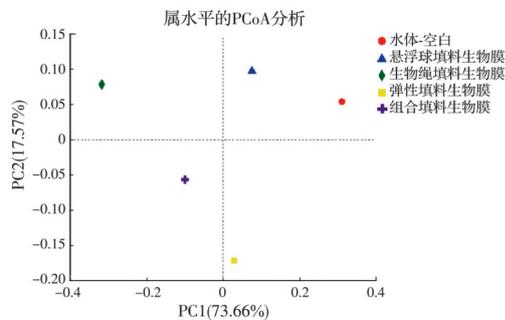


图3 基于属水平微生物群落结构的PCoA分析

Fig. 3 PCoA analysis at the genus-level

为进一步探究生物绳填料对微生物的筛选,比较分析了不同填料表面生物膜中微生物组成(见图4)。结果表明,生物绳填料不仅具有较强的Alpha多样性,而且能定向富集脱氮除磷相关的微生物。如生物绳填料组中*Flavobacterium*的相对丰富度高达14.79%,显著高于其余组。有研究表明,该属与好氧颗粒污泥中部分硝化-反硝化作用相关<sup>[23]</sup>,其在生物绳表面富集可能是导致生物绳填料强化浮床处理效果较好的原因之一。类似地,异养硝化和反硝化菌*Exiguobacterium*<sup>[24]</sup>在生物绳填料生物膜中高达5.82%,远高于弹性填料的0.45%;*Chryseobacterium*属作为异养反硝化功能菌<sup>[25]</sup>,在生物绳填料生物膜中占4.86%,是其他填料和空白对

从群落的丰富度来看,Chao指数和Ace指数反映的结果基本一致<sup>[22]</sup>。水体中微生物群落丰富度总体小于生物膜中微生物群落丰富度,其丰富度依次为水体-空白<弹性填料生物膜<组合填料生物膜<悬浮球填料生物膜<生物绳填料生物膜。从群落的多样性来看,Shannon指数和Simpson指数所反映的结果表明,生物绳填料生物膜和弹性填料生物膜的多样性较高,具有较强的耐冲击性。此外,不同于Alpha多样性,Beta多样性是衡量个体间微生物组成相似性的一个指标,能准确反映样本间多样性。Beta分析利用PCoA分析法,如图3所示,填料表面微生物呈现不同的群落结构。相较于其他填料,生物绳填料表面微生物群落结构与空白对照组相差最大。这可能是由于生物绳填料定向筛选了部分微生物。

照组的12倍以上。此外,生物绳填料也能富集除磷相关的菌群。如图4所示,生物绳填料生物膜中*Microbacterium*相对丰富度达到2.57%,是其他组的2.7~12.8倍;而*Caulobacter*属虽然下降至1.23%,但仍远高于其他组别。有研究表明<sup>[26]</sup>,*Microbacterium*属微生物能促进磷酸盐的矿化生成鸟粪石<sup>[27]</sup>,*Caulobacter*与污水中磷酸盐的去除密切相关。上述脱氮除磷功能菌的富集,很好地解释了生物绳填料强化浮床脱氮除磷效果的原因。

## 2.2 生物绳填料工况优化

### 2.2.1 生物绳填料浮床水质参数变化及最优工况

生物绳填料能够富集脱氮除磷相关的功能菌群,表现出较好的水质净化效果。为促进生物绳强化填料的实际应用,进一步探究了填料的最优工况。图5为实验过程中增强型生态浮床不同工况下DO、COD去除率、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除率和TP去除率的变化。

图5(a)表明,在不同生物绳填料添加下,水体中的溶解氧都处于持续下降的状态,进水溶解氧从6.41~6.67 mg/L降至第17 d的0.05~0.12 mg/L。随后植物根系向水中复氧,水体溶解氧含量增加具体排序为生物绳-25 m<sup>3</sup>(5.74 mg/L)>生物绳-12.5 m<sup>3</sup>(5.45 mg/L)>生物绳-50 m<sup>3</sup>

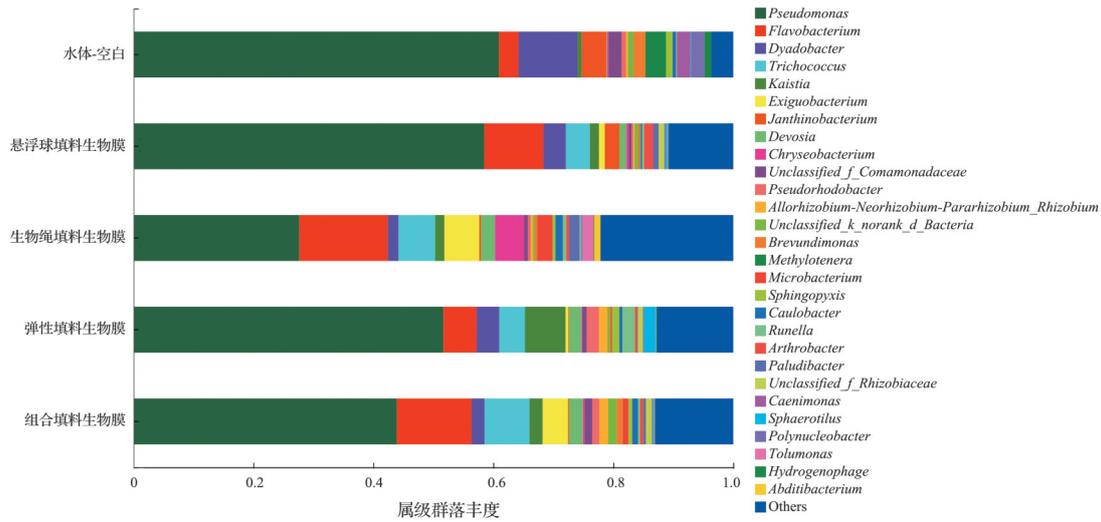


图 4 浮床系统中微生物属分类水平组成

Fig. 4 Taxonomic level composition of microbial genera in floating bed systems

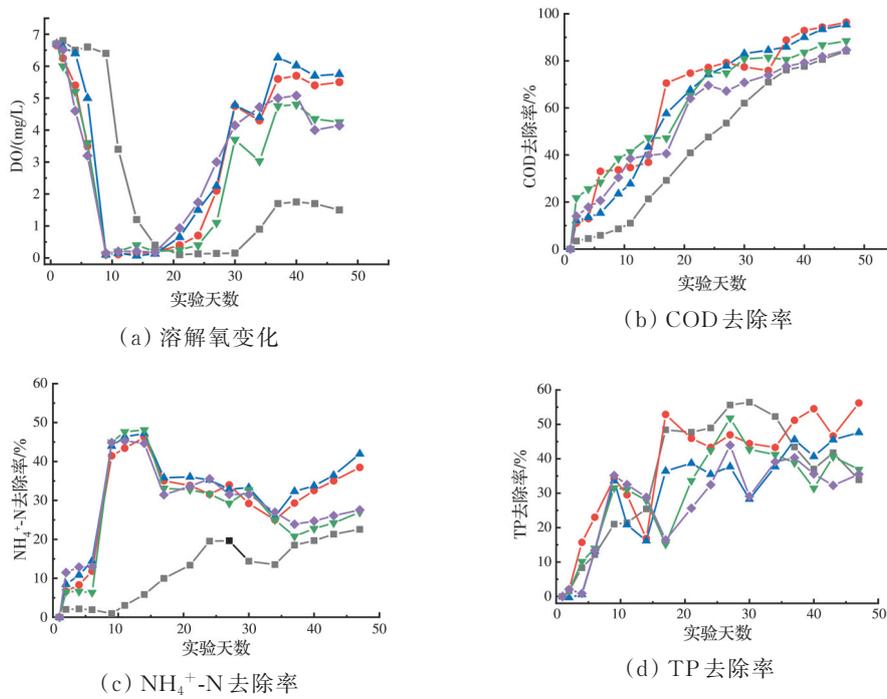


图 5 增强型浮床在不同工况下的水质参数变化

Fig. 5 Water quality parameters change of biological rope filler enhanced floating bed under different working conditions

(4.24 mg/L) > 生物绳 - 75 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (4.15 mg/L) > 空白组 (1.52 mg/L), 表明 12.5 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 和 25 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 的生物绳填料对于水体有较好的复氧效果, 填料过多会导致溶解氧含量低, 其原因是过多的填料限制了植物根系的生长空间以及根系复氧。类似地, 由图 5(b) 可见, 各浮床系统对 COD 的去除皆有较强的效果。直至实验结束, 12.5 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 和 25 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 的生物绳填料对于 COD 的处理能力显著高于其他两种。

如图 5(c) 所示, 在实验的前 6 d, 各浮床对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除率在 15% 左右。6~14 d, 实验组中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 有了较为明显的削减, 去除率达到

44.7%~48.1%。第 14 d, 不同含量生物绳填料的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率大小排序为生物绳 - 50 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (48.1%)、生物绳 - 25 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (47.2%)、生物绳 - 12.5 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (46.2%)、生物绳 - 75 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (44.7%)、空白组 (5.85%)。

浮床对 TP 的去除效果时有反复, 但从长期来看呈下降趋势。如图 5(d) 所示, 各实验组的 47 d TP 去除率排序为生物绳 - 12.5 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (56.6%) > 生物绳 - 25 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (48.5%) > 生物绳 - 50 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (36.9%) > 生物绳 - 75 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (34.7%) > 空白组 (33.4%), 显示 12.5 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 的生物绳填料有效强化生态浮床的 TP 去除能力。

本研究综合水体中各污染物在 47 d 内的去除情况,表明 12.5 m<sup>3</sup>的生物绳为最佳投加量。在 12.5 m<sup>3</sup>的投加量下,水体中 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP 的去除率分别为 96.4%、38.5% 和 56.6%。

2.2.2 生物绳填料浮床动力学模型

为进一步探究生物绳强化浮床的污染物去除特征,选取一级动力学模型以及 Monod 动力学模型分别探究 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除动力学和 COD 降解动力学。利用这两种模型对增强型生态浮床的污染物去除进行预测。

1)NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除动力学模型。

在增强型生态浮床中,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的降解规律与 Monod 动力学不符,但是与一级动力学模型拟合良好,利用一级动力学模型对生物绳填料 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 降解情况进行拟合。12.5 m<sup>3</sup>生物绳填料中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 降解规律与一级动力学的拟合相关性 R<sup>2</sup>=0.884~0.888,具体拟合结果、公式及对应相关性见图 6 和表 4。

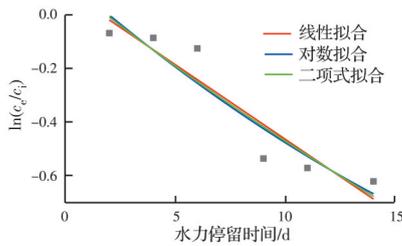


图 6 12.5 m<sup>3</sup>生物绳填料降解 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 一级动力学拟合  
Fig. 6 12.5m<sup>3</sup> bio-rope filler for NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N degradation by primary kinetic fitting

表 4 12.5 m<sup>3</sup>生物绳填料 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 降解一级动力学方程

Table 4 The first-order kinetic equation of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N removal of 12.5 m<sup>3</sup> biological rope filler

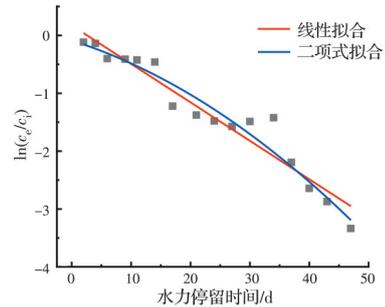
拟合方式	公式	R <sup>2</sup>
线性	y=-0.055 52x+0.090 85	0.884
对数	y=10.534 36-2.781 09×ln(x+42.312 15)	0.886
二项式	y=0.136 55-0.071 23x+0.000 99x <sup>2</sup>	0.888

2)COD 降解动力学研究。

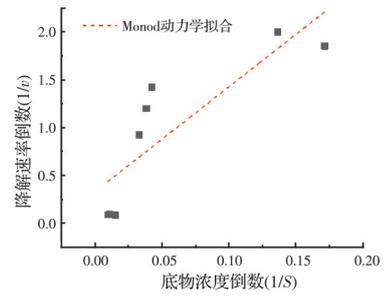
基于生物绳填料在 12.5 m<sup>3</sup>情况下的 COD 的降解规律,分为线性、二项式两种一级动力学模型进行,具体结果如图 7(a)所示,拟合相关性 R<sup>2</sup>分别高达 0.93 和 0.95,显示出较好的拟合结果。与之相对,以 1/S 为 X 轴,1/v 为 Y 轴作图,进行 Monod 动力学拟合,拟合相关性 R<sup>2</sup>仅为 0.72。由于 Monod 动力学所描述的是生物分解占主导的过程,在实验初期,Monod 动力学的拟合程度较高(图 7(b)),因此,可以说明 COD 主要是由吸附和微生物分解去除共同作用。

在增强型生态浮床中,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的降解规律与

一级动力学模型的拟合程度较高。其中,在线性、对数、二项式 3 种一级动力学模型中,对数模型在整体上与各组 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 降解规律拟合度最高。从原理上来说,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 COD 降解是微生物占主导的过程,在理想化状况下,增强型生态浮床中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 COD 的降解规律应与 Monod 动力学拟合程度较高<sup>[28]</sup>。但是在实际拟合过程中,浮床系统整体的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 COD 降解规律与一级动力学的拟合程度更高<sup>[29]</sup>,表明浮床的吸附和微生物降解作用共同参与了污染物的去除。



(a) 一级动力学拟合



(b) Monod 动力学拟合

图 7 12.5 m<sup>3</sup>生物绳填料强化浮床的 COD 降解拟合情况  
Fig. 7 COD degradation fit of 12.5 m<sup>3</sup> biological rope enhanced floating bed

表 5 12.5 m<sup>3</sup>生物绳填料 COD 降解一级动力学方程

Table 5 The first-order kinetic equation of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N removal of 12.5 m<sup>3</sup> biological rope filler

拟合方式	公式	R <sup>2</sup>
线性	y=-0.066 45x+0.173 12	0.932
二项式	y=-0.087 97-0.032 48x-0.000 714x <sup>2</sup>	0.947

3 结论

1)悬浮球填料、生物绳填料、弹性填料和组合填料比较筛选表明,生物绳填料具有最佳的污染物去除效率,其对 COD、氨氮和总磷的去除率分别为大于 99%、43.85% 和 14.03%。

2)高通量测序分析表明,生物绳填料表面生物膜中微生物丰富度最高、物种组成分布最均匀、微生物多样性最高,具有较强的耐冲击能力;生物绳

填料能富集脱氮除磷相关功能菌群,解释了生物绳填料强化浮床脱氮除磷的微生物机理。

3)生物绳填料最佳投放工况研究表明,12.5 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>为最优投加量;在该工况下,经47 d的处理,COD、氨氮和总磷的去除率分别为96.4%、38.5%和56.6%。

4)动力学模型拟合表明,生物绳填料生态浮床中氨氮和COD的降解是吸附和微生物共同作用的结果。

## 参考文献

- [1] 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):26-29,73.  
NING Z J, WANG X. Overview of the black-odorous waters treatment technologies [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(8): 26-29, 73. (in Chinese)
- [2] PAVLINERI N, SKOULIKIDIS N T, TSIHRINTZIS V A. Constructed Floating Wetlands: A review of research, design, operation and management aspects, and data meta-analysis [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 308: 1120-1132.
- [3] CHANG N B, XUAN Z M, MARIMON Z, et al. Exploring hydrobiogeochemical processes of floating treatment wetlands in a subtropical stormwater wet detention pond [J]. Ecological Engineering, 2013, 54: 66-76.
- [4] NING D L, HUANG Y, PAN R S, et al. Effect of eco-remediation using planted floating bed system on nutrients and heavy metals in urban river water and sediment: A field study in China [J]. Science of the Total Environment, 2014, 485/486: 596-603.
- [5] 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.
- [6] SAMAL K, KAR S, TRIVEDI S. Ecological floating bed (EFB) for decontamination of polluted water bodies: Design, mechanism and performance [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 251: 109550.
- [7] LI X N, SONG H L, LI W, et al. An integrated ecological floating-bed employing plant, freshwater clam and biofilm carrier for purification of eutrophic water [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(4): 382-390.
- [8] NSENGA KUMWIMBA M, ZHU B, WANG T, et al. Nutrient dynamics and retention in a vegetated drainage ditch receiving nutrient-rich sewage at low temperatures [J]. Science of the Total Environment, 2020, 741: 140268.
- [9] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,2002.  
Editorial Committee of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods of the State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring and analysis method [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. (in Chinese)
- [10] ZOU L Z, ZHOU M, LUO Z W, et al. Selection and synthesization of multi-carbon source composites to enhance simultaneous nitrification-denitrification in treating low C/N wastewater [J]. Chemosphere, 2022, 288: 132567.
- [11] KAYOMBO S, MBWETTET, KATIMAJ, et al. Waste stabilization ponds and constructed wetlands design manual [R]. UNEP-IETC with the Danish International Development Agency (Danida), 2005: 1-59.
- [12] WANG C Y, SAMPLE D J. Assessing floating treatment wetlands nutrient removal performance through a first order kinetics model and statistical inference [J]. Ecological Engineering, 2013, 61: 292-302.
- [13] 张军,周琪.人工湿地中污染物去除的数学模型[J].环境保护科学,2004,30(2):40-42.  
ZHANG J, ZHOU Q. Mathematic model of pollutant removal in artificial wetland [J]. Environmental Protection Science, 2004, 30(2): 40-42. (in Chinese)
- [14] HEALEY F P. Slope of the Monod equation as an indicator of advantage in nutrient competition [J]. Microbial Ecology, 1980, 5(4): 281-286.
- [15] ARMSTRONG W, COUSINS D, ARMSTRONG J, et al. Oxygen distribution in wetland plant roots and permeability barriers to gas-exchange with the rhizosphere: A microelectrode and modelling study with *Phragmites australis* [J]. Annals of Botany, 2000, 86(3): 687-703.
- [16] WANG W H, WANG Y, SUN L Q, et al. Research and application status of ecological floating bed in eutrophic landscape water restoration [J]. Science of the Total Environment, 2020, 704: 135434.
- [17] HSU A, YEO Z Y, WEINFURTER A. Emerging digital environmental governance in China: The case of black and smelly waters in China [J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2020, 63(1): 14-31.
- [18] CHEN Y H, ZHANG Y, HUANG M S, et al. Ecological restoration by a multistage floating-bed system in a eutrophic urban river, China [C]// International Conference on Mechatronics and Applied Mechanics (ICMAM 2011), Hong Kong, P. R. China, Dec 27-28, 2011.
- [19] HUANGFU S M, ZHOU F L, ZHENG X Y, et al.

- Removal of ammonia nitrogen from black and odorous water by macrophytes based on laboratory microcosm experiments [J]. RSC Advances, 2023, 13(5): 3173-3180.
- [20] 袁兴程, 李丹. 生物绳填料净化河流的效果及微生物群落分析[J]. 环境工程, 2016, 34(4): 48-53.  
YUAN X C, LI D. Purification performance of the bio-cord carrier for river water and microbial community analysis[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(4): 48-53. (in Chinese)
- [21] 陈毛华. 生态浮床原位修复景观水体的效果研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(2): 1075-1083.  
CHEN M H. Study on the in situ restoration effect of ecological floating bed on landscape water bodies [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(2): 1075-1083. (in Chinese)
- [22] WILLIS A D. Rarefaction, alpha diversity, and statistics [J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 2407.
- [23] CHEN J H, HAN Y, WANG Y M, et al. Start-up and microbial communities of a simultaneous nitrogen removal system for high salinity and high nitrogen organic wastewater via heterotrophic nitrification [J]. Bioresource Technology, 2016, 216: 196-202.
- [24] 张莹, 石萍, 马炯. 微小杆菌 *Exiguobacterium* spp. 及其环境应用研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2013, 19(5): 898-904.  
ZHANG Y, SHI P, MA J. *Exiguobacterium* spp. and their applications in environmental remediation [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2013, 19(5): 898-904. (in Chinese)
- [25] CAO Q, LI X C, JIANG H E, et al. Ammonia removal through combined methane oxidation and nitrification-denitrification and the interactions among functional microorganisms [J]. Water Research, 2021, 188: 116555.
- [26] LIU W T, LINNING K D, NAKAMURA K, et al. Microbial community changes in biological phosphate-removal systems on altering sludge phosphorus content [J]. Microbiology, 2000, 146 ( Pt 5): 1099-1107.
- [27] ZHAO T L, LI H, HUANG Y R, et al. Microbial mineralization of struvite: Salinity effect and its implication for phosphorus removal and recovery [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 358: 1324-1331.
- [28] FERNÁNDEZ DEL CASTILLO A, VERDUZCO GARIBAY M, SENÉS-GUERRERO C, et al. Mathematical modeling of a domestic wastewater treatment system combining a septic tank, an up flow anaerobic filter, and a constructed wetland [J]. Water, 2020, 12(11): 3019.
- [29] SAMAL K, TRIVEDI S. A statistical and kinetic approach to develop a floating bed for the treatment of wastewater [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020, 8(5): 104102.

(编辑 胡玲)