

不同生物载体模拟河道反应器的微污染水源水修复研究

丁炜¹, 朱亮¹, 徐京¹, 冯丽娟¹, 徐向阳^{1,2,3*}

(1. 浙江大学环境工程系, 杭州 310029; 2. 浙江大学-西澳大学水环境综合管理与保护联合研究中心, 杭州 310029; 3. 农业部面源污染控制重点开放实验室, 杭州 310029)

摘要: 分别以弹性填料和 AquaMats[®] 生态基为载体, 比较了 2 组模拟河道生物反应器启动过程及其修复微污染水源水性能。结果表明, 在间歇曝气与逐步增强曝气强度的挂膜启动方式下, 悬挂弹性填料的模拟河道反应器运行 50 d 即启动完成, 其高锰酸盐指数、氨氮去除率分别高达 78.2%、93.5%; AquaMats[®] 生态基反应器的高锰酸盐指数、氨氮去除率则在 2 周后分别达到 70%、80% 以上。不同曝气方式的影响研究发现, 曝气/停曝时间比 3 h: 3 h、曝气量 250 L·h⁻¹ 工况下, 弹性填料生物膜反应器的高锰酸盐指数、氨氮、TN、TP 的去除率均优于 AquaMats[®] 反应器; 随着曝气强度减至 120 L·h⁻¹ 及曝气/停曝时间比缩短, AquaMats[®] 反应器的污染物去除性能逐步提高, 表明其在确保一定的污染物去除率的前提下具有低气水比潜力与节能降耗的应用优势。镜检分析发现, 弹性填料表面以颗粒物质截留、丝状菌包裹为主, 而 AquaMats[®] 生态基上附着的生物膜微生物群落相对较丰富。研究认为, 呈辐射状结构的弹性填料对颗粒态污染物具有较强的截留能力, 可实现微污染源水修复系统快速挂膜与稳定运行; 而 AquaMats[®] 生态基内部微孔结构有利于不同功能的微生物富集, 可在低气水比条件下强化多种低浓度污染物的协同去除。

关键词: 微污染水源水; 模拟河道反应器; 生物膜; 弹性填料; AquaMats[®] 生态基

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)11-2639-06

Bioremediation of Micro-polluted Source Water by Simulated River Bioreactor with Different Carriers

DING Wei¹, ZHU Liang¹, XU Jing¹, FENG Li-juan¹, XU Xiang-yang^{1,2,3}

(1. Department of Environmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; 2. ZJU-UWA Joint Centre in Integrated Water Management and Protection, Hangzhou 310029, China; 3. Key Laboratory of Non-point Source Pollution Control, Ministry of Agriculture, Hangzhou 310029, China)

Abstract: Two simulated river bioreactors with elastic filler and AquaMats[®] were applied to remediate micro-polluted source water. Under intermittent aeration and gradual increase of aeration intensity, the biofilm reactor with elastic filler was successful start-up within 50 days, and average removal efficiencies of permanganate index, NH₄⁺-N were 78.2% and 93.5%, respectively, but the removal efficiencies of the reactor with AquaMats[®] were more than 70% and 80% after two weeks. On the condition of aerobic to anoxic ratio of 3 h: 3 h and aeration intensity of 250 L·h⁻¹, elastic filler was more efficient for the removal of permanganate index, NH₄⁺-N, TN and TP. The pollutant removal of AquaMats[®] was strongly enhanced when the aerobic to anoxic ratio and aeration intensity changed to 2 h: 4 h and 120 L·h⁻¹, which suggested its potential of energy saving. Microscopic observation revealed that the surface of elastic filler was fully surrounded with filamentous bacteria and more inorganic particulate matter after successful start-up of the reactor, and the biofilm attaching to AquaMats[®] was of higher microbial population diversity. The results indicated that elastic filler with homogeneous biofilm had a strong retention capacity for its radial structure, and the AquaMats[®] with microporous structure was more suitable for the enrichment of different functional microorganisms and enhanced the collaborative removal of multiple pollutants.

Key words: micro-polluted source water; simulated river bioreactor; biofilm; elastic filler; AquaMats[®]

近年来,随着我国社会经济迅猛发展和小城镇规模不断扩大,城镇工业废水、农村生活污水、生活垃圾、畜禽养殖废物超标排放或直排以及农药化肥面源污染等问题突出,已造成我国城镇地表水和地下水源严重污染,且有加剧趋势,保障饮用水安全已成为我国亟待解决的重大社会问题^[1~3]。已有生态修复研究与实践表明,微生物修复受污染水体的生物膜法具有低成本、水生生态友好、运行性能稳定等特点,具有广阔的应用前景^[4~8]。

生物膜填料作为微生物载体直接影响系统处理效率与运行稳定性,一直受到国内外学者关注^[9~11]。由于现有生物膜载体多数针对生活污水与高浓度工业废水处理系统而设计,虽已在我国部分城市重污染河道有应用,但针对微污染水体原位净

收稿日期: 2009-11-25; 修订日期: 2010-04-21

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAJ08B01); 浙江省教育厅科研项目(Y200909172)

作者简介: 丁炜(1986~), 女, 硕士, 主要研究方向为流域水污染控制技术, E-mail: dingding-316@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xuxy@zju.edu.cn

化的研究较少^[7,8,12,13]. 众所周知,弹性立体填料因其具有较大的附着表面积和优异的充氧性能,已广泛应用于国内外废水生物处理领域,而美国 Meridian 公司专利产品 AquaMats® 生态基则在污染水体净化方面业已大量选用^[14~16]. 为此,本研究在调查分析杭嘉湖平原的 10 个城镇饮用水源地水质的基础上,选用弹性立体填料和 AquaMats® 生态基 2 种生物载体,比较分析了模拟河道生物反应器启动过程及其修复微污染水源水性能,以期为我国城镇受污染水源水原位生物修复工艺优化提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置采用自行设计的模拟河道生物反应器,该反应器由有机玻璃制成,有效容积 50 L,有效长度 75 cm,高度 30 cm,根据杭嘉湖地区河道的一般规律设置了 0.5% 的坡降和 75° 的边坡斜度,以期在构型上尽量符合实际的河道特征,用以微污染水体中同步去除有机物和氮磷. 反应器设进水区、反应

区、出水堰,其中进水区与反应区之间用布水板隔开,反应区内布设生物填料,底部设曝气砂盘,具体反应器构型参见文献[13]. 为模拟天然河道光照特性,反应器四周用不透明的防水布包裹,常温运行.

1.2 填料类型与布设

试验采用的弹性填料为杭州天宇环保工程有限公司的 TA-II 型立体材料,填料片直径为 200 mm,比表面积 200 ~ 300 m²·m⁻³. AquaMats® 生态基购于美瑞达安(广州)环保产品有限公司,比表面积 160 ~ 180 m²·m⁻³.

2 种填料经比表面折算后,以相同总表面积悬挂布设. 弹性填料由直径 4 mm 耐腐中心绳串接,14 片/串,共布设 3 串,相邻填料片的间距为 20 mm. AquaMats® 布设 3 排,每排 3 串,长度分别为 11.5、20 和 11.5 cm,填料串自然下垂.

1.3 试验用水和接种底泥

试验用水根据所调查杭嘉湖平原的 10 个典型小城镇的饮用水源地平均水质,模拟配[✓]成,具体水质见表 1.

表 1 试验用水水质

Table 1 Water quality for the experiment

水温 /℃	DO /mg·L ⁻¹	高锰酸盐指数 /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	DP /mg·L ⁻¹	TOC /mg·L ⁻¹
9.0 ~ 19.5	5.22 ~ 10.0	10.27 ± 2.53	6.26 ± 0.53	4.10 ± 0.65	2.42 ± 0.53	0.07 ± 0.04	0.40 ± 0.08	0.28 ± 0.11	15.12 ± 7.87

模拟河道反应器底泥取自杭嘉湖地区洛舍、钟管及瓶窑饮用水源地取水口附近. 为尽可能减少其他因素对生物膜去除污染物特性的干扰,将接种底泥经蒸馏水洗涤、0.45 mm 不锈钢筛过滤后,按一定比例混合铺设在反应器底部.

1.4 反应器运行参数

试验期间两反应器运行工况基本保持一致,共分为 3 个阶段,分别考察挂膜阶段及 2 种曝气工况下反应器性能,具体操作参数见表 2.

根据试验要求,定期监测进出水相关水质指标以及生物膜特征指标(如生物膜量、胞外多聚物含量、膜表面结构等).

表 2 反应器运行方案

Table 2 Operational condition of the reactors

参数	运行阶段		
	挂膜阶段	工况 1	工况 2
曝气方式(曝气/停曝时间比)	3 h:3 h	3 h:3 h	2 h:4 h
曝气量/L·h ⁻¹	120 L·h ⁻¹ (1 ~ 15 d), 250 L·h ⁻¹ (15 d 以后)	250 L·h ⁻¹	120 L·h ⁻¹
进水方式	连续进水, HRT 1 d		

1.5 分析方法

高锰酸盐指数、氨氮(NH₄⁺-N)、总氮(TN)、总磷(TP)等常规指标测定参见文献[17],每个指标平行测定 3 次后取均值;DO、温度用 YSI 550A 溶解氧仪测定;生物膜量采用碱液溶解与超声处理填料表面生物膜后抽滤,用质量法分析^[18];生物膜胞外多聚物(EPS)热提取后 4℃、20 000 r/min 离心 20 min,取上清液进行测定^[19],多聚糖采用苯酚-硫酸比色法^[20],总蛋白以牛血清白蛋白为标准物采用改良 Lowry 法测定^[21]. 生物膜表面结构采用 Leica DMLB 显微镜和 Philip XL-30-ESEM 环境扫描电镜观察. 分批实验动力学分析参照文献[22].

2 结果与讨论

2.1 反应器启动

为实现模拟河道反应器快速挂膜启动,试验采用逐步提升曝气强度的挂膜方式^[23~25],启动分别以弹性填料(R₁)和 AquaMats® 生态基(R₂)为生物载体的 2 组模拟河道反应器. 为判别反应器挂膜和启动完成与否,本研究结合相关报道与实验室前期研

究成果,以高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别达到 70% 和 85% 作为反应器启动完成的指标^[13].

试验期间 2 组模拟河道生物反应器的高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除情况见图 1 和图 2. 挂膜启动 5 d 后,两反应器的高锰酸盐指数去除率均达到 70% 左右;随着曝气强度的增加,反应器启动 40 d 后,高锰酸盐指数去除率分别稳定在 80% 和 75% 以上. 在挂膜启动初期(0~23 d),反应器 R_2 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的净化效果要优于 R_1 , 平均去除率分别为 18.0% 和 14.0%. 随着曝气强度增大, R_1 的有机污染物去除性能稳步提升,其 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 净化效果迅速上升并逐渐优于 R_2 , 启动 50 d 后反应器 R_1 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率达到 85.7% 并最终稳定在 90% 以上,结合高锰酸盐指数去除率,表明该反应器已完成启动;相比而言, R_2

启动 65 d 左右 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率方稳定在 85%, 启动时间相对较长.

分析认为, R_2 因其良好的亲水吸附性能,在系统启动初期迅速吸附大量营养物质进而富集功能微生物,其内部多孔结构亦有利于微生物滞留;但随着反应器的连续运行与生物膜生长,液相主体的污染物及溶解氧向生物膜内传递逐步受限,致使系统的污染物净化效果增幅缓慢. 相比较而言,呈辐射状结构的弹性填料在相同的启动条件下挂膜更为迅速,大量生物膜附着在弹性填料表面并黏连为网状结构,赋予系统较高的有机污染物和氨氮去除效果. 此外,挂膜期间提升曝气强度的启动方式有效强化了系统的氨氮去除性能,缩短了反应器的启动时间.

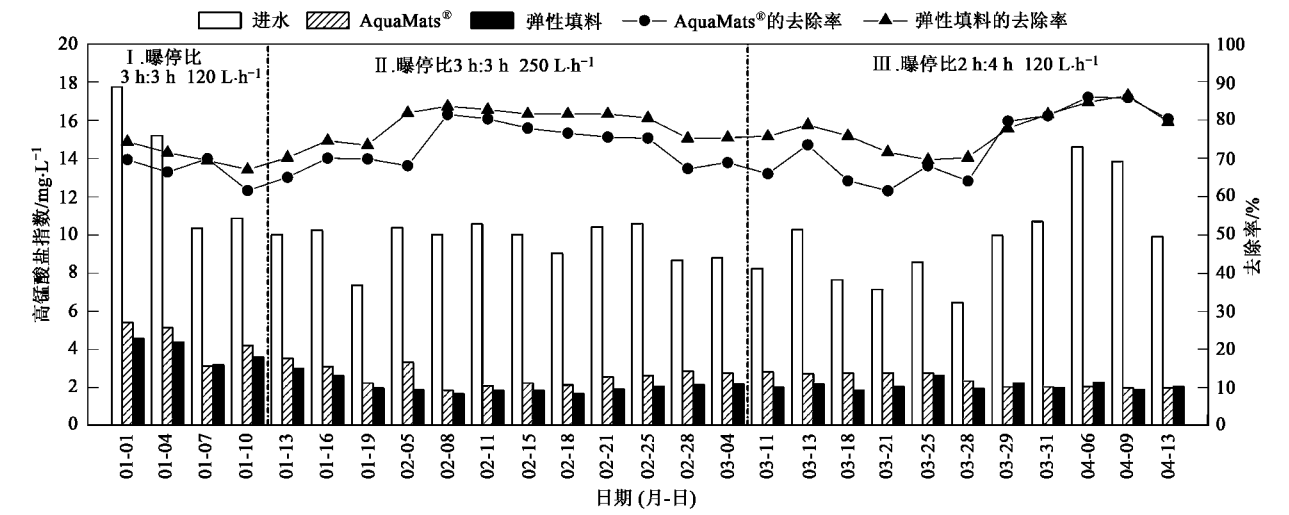


图 1 2 组模拟河道生物反应器的高锰酸盐指数变化情况
Fig.1 Variation of permanganate index in two simulated river bioreactors

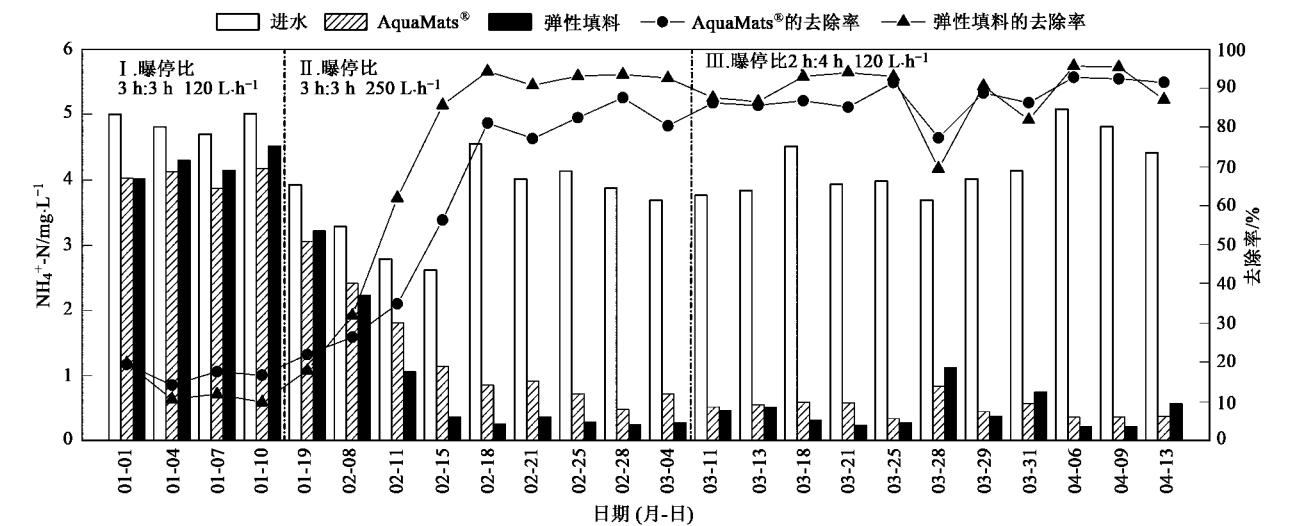


图 2 2 组模拟河道生物反应器的氨氮去除情况
Fig.2 Performances of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal of two simulated river bioreactors

2.2 曝气方式对系统去污性能的影响

2.2.1 NH₄⁺-N、TN 净化规律

反应器启动完成后,试验设置不同曝气方式,即曝气/停曝时间比 3h:3h(曝气量 250 L·h⁻¹,工况 1)与曝气/停曝时间比 2 h:4 h(曝气量 120 L·h⁻¹,工况 2),研究其对 2 组模拟河道反应器脱氮性能的影响。结果表明,工况 1 时 R₁ 对 NH₄⁺-N 去除率始终保持在 90% 以上,明显高于 R₂。随着曝气方式的改变,工况 2 时反应器 R₁ 的 NH₄⁺-N 去除率略有下降,而反应器 R₂ 的 NH₄⁺-N 去除率逐渐增至 90% 以上。以单位质量生物膜的 NH₄⁺-N 负荷变化作动力学分析发现,其 NH₄⁺-N 去除符合一级反应动力学方程(见表 3),弹性填料反应器的 NH₄⁺-N 去除速率常数达 0.142 h⁻¹,为 R₂ 的 4.83 倍,表明其具有较高的硝化性能。

2 组反应器在工况 1 条件下运行时,体系溶解氧始终维持在 3.0 mg·L⁻¹ 以上,TN 去除率均不高。其中 R₂ 修复后水体检测到较高的亚硝态氮浓度,为

弹性填料反应器 2~10 倍,而其硝氮浓度较低。为进一步提高修复系统脱氮能力,延长反应器停曝时间后体系溶解氧最低降至 1.7 mg·L⁻¹,反应器 R₂ 的 TN 去除率显著增加,而 R₁ 出水 TN 变化不明显(见表 4)。通过分批动力学实验发现,随着反应器的运行 R₁ 体系亚硝态氮和硝态氮的浓度持续上升,最终分别保持在 0.17 mg·L⁻¹、6.4 mg·L⁻¹,系统 TN 去除率不高;而 R₂ 反应器的硝态氮变化相对平稳,由初始的 2.5 mg·L⁻¹ 增至 24 h 后的 3.0 mg·L⁻¹,体系亚硝态氮浓度则在 5 h 左右达到峰值 0.31 mg·L⁻¹,随后逐渐降至检测限以下,表明 R₂ 反应器具有较高的脱氮性能。分析认为,寡营养条件下载体上附着的生物膜厚度较小,通常在几十至几百 μm^[24,25],其在高曝气强度下生物膜呈现“全透”状态,反硝化作用受到抑制;随着曝气强度的减小和停曝时间的延长,R₂ 内部微孔结构有利于形成兼氧微环境,系统脱氮性能得以增强。

2.2.2 高锰酸盐指数的净化规律

表 3 分批条件下反应器氨氮及有机物转化动态¹⁾

Table 3 Degradation dynamics of NH₄⁺-N and permanganate index during 24 hours

填料	氨氮转化		有机物降解		
	<i>K</i> /h ⁻¹	<i>R</i> ²	指数衰减方程 ²⁾	<i>R</i> ²	反应级数
AquaMats®	0.029 4	0.977 2	$c_t = 15.096\ 9e^{-t/1.877\ 3} + 5.571\ 9$	0.948 4	1
弹性填料	0.142 0	0.983 2	$c_t = 0.848\ 4e^{-t/1.934\ 7} + 0.278\ 2$	0.990 2	1

1) *R* 表示相关系数;*K* 为反应速率常数; 2) *c_t* 表示 *t* 时刻反应器中污染物浓度

表 4 不同运行阶段总氮的去除情况

Table 4 Performances of TN removal under different operating conditions

项目	挂膜阶段	工况 1	工况 2
进水/mg·L ⁻¹	6.18 ± 0.64	6.70 ± 0.01	6.22 ± 0.43
R ₂ 反应器出水/mg·L ⁻¹	5.81 ± 0.39	6.56 ± 0.51	5.89 ± 0.54
R ₂ 反应器去除率/%	5.99	2.09	5.31
R ₁ 反应器出水/mg·L ⁻¹	5.87 ± 0.32	6.46 ± 0.19	5.98 ± 0.41
R ₁ 反应器去除率/%	5.02	3.58	3.86

工况 1 时弹性填料反应器的高锰酸盐指数平均去除率达 80.3%,高出 R₂ 反应器 6% 以上(图 1)。曝气方式调整初期,两反应器的高锰酸盐指数去除率出现一定程度的下降;随着生物膜内微生物对生境改变的逐步适应,R₂ 反应器的高锰酸盐指数去除率显著提高,最终 2 组反应器的高锰酸盐指数平均去除率分别达 82.6%、82.0%。

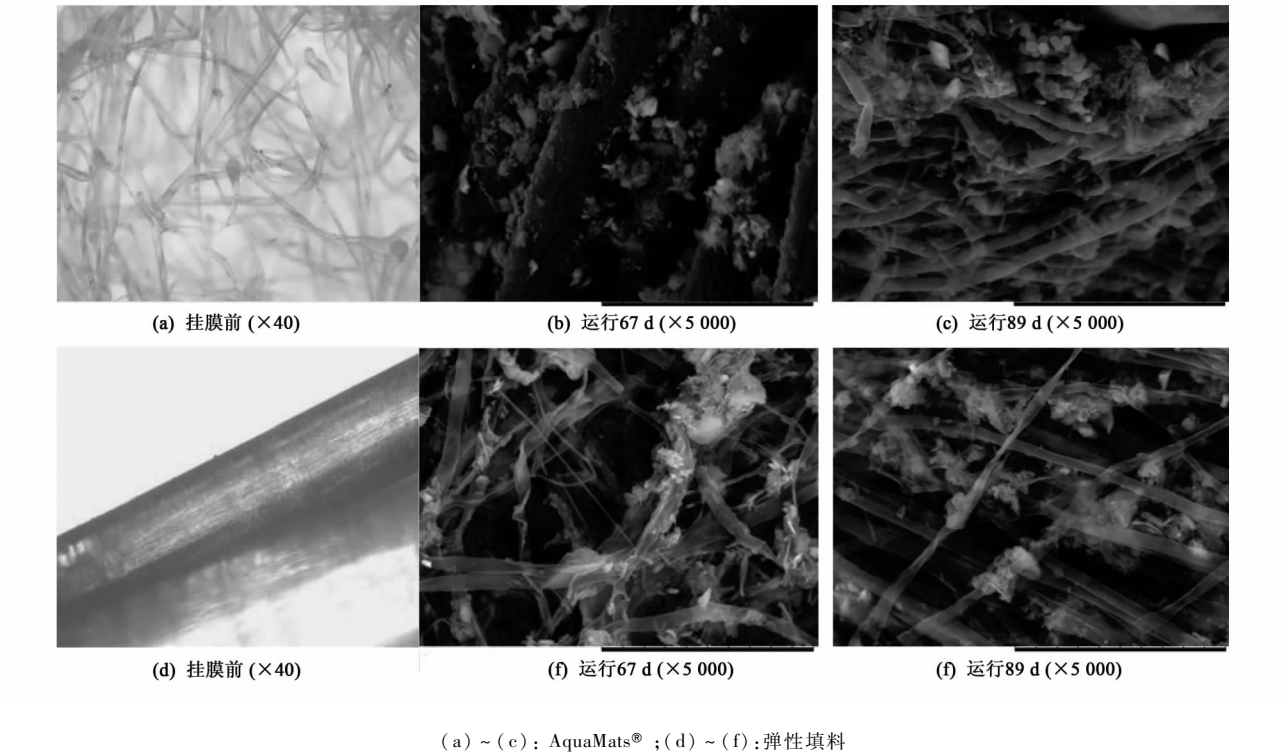
在分批实验条件下,以单位质量生物膜的有机物负荷对时间作图并进行拟合发现,反应体系的高锰酸盐指数变化较好地符合指数衰减方程(见表 3),反应 2 h 后高锰酸盐指数去除率即达 55% 以上。

相比而言,R₂ 反应器初始高锰酸盐指数去除率较高,推测 R₂ 生态基内部丰富的孔洞结构有效增强了溶解性有机物的吸附性能,在低气水比条件下有利于有限碳源的合理利用,单位生物膜具有相对较高的功能微生物持留能力和污染物去除活性。

2.2.3 TP 的净化规律与机制

2 组反应器在工况 1 条件下运行时,弹性填料反应器的总磷(TP)平均去除率达 14.3%(表 5),高于 R₂ 反应器;研究还发现,R₂ 反应器的出水 TP 浓度波动较大,若以总磷与溶解性正磷酸盐的差值反映出水悬浮颗粒物的吸附态磷,则 R₂ 反应器出水中吸附态磷含量更大(约为 R₁ 反应器 3.3 倍),一定意义上说明弹性填料较高的悬浮颗粒物截留能力强化了其 TP 去除率^[12]。与挂膜启动期相比,2 组反应器在工况 1 时的 TP 平均去除率均有所下降,分析认为本实验条件下的 TP 去除以底泥吸附与填料截留悬浮颗粒为主,随着反应器的连续运行磷素吸附饱和,部分磷素在厌氧条件下发生二次释放导致系统 TP 去除率下降^[9,26]。

与工况 1 相比,2 组反应器的 TP 去除率在工况 2 时分别减少了 4.9% 和 12.0%,推测悬浮颗粒吸附饱和后磷素在兼氧环境下释放增强等因素有关.其中,工况 2 时 R₂ 反应器的 TP 去除率高于 R₁ 反应器,同时其溶解性正磷酸盐的去除率在整个运行期间均优于 R₁ 反应器,揭示 R₂ 生态基除吸附悬浮颗粒除磷外,还可能存在其它除磷途径.研究还发现,调整曝气方式后 R₂ 内生物膜的 VS/TS 比与胞外多聚物(EPS)含量均较 R₁ 反应器明显增加,这些黏性分泌物有利于微生物聚集、絮凝形成生物膜或细小颗粒^[26],有关研究有待从分子生物角度进一步开展.



(a) ~ (c): AquaMats® ; (d) ~ (f): 弹性填料

图 3 试验期间填料表面镜检图

Fig. 3 Microscopic graphs observed by microscope and ESEM

动态变化最终趋于稳定(图 3).对比发现,不同工况下弹性填料表面的生物膜结构变化不明显,生物膜内以截留的悬浮颗粒物为主,单位填料生物膜量约为 AquaMats® 的 4~6 倍(见表 6),其表面缠绕大量的丝状菌,网状结构较为密实,膜内可见一定量的短杆菌与球菌;而 AquaMats® 生态基在工况 2 时附着

的生物膜量明显增加,膜表面凹凸明显,菌相较为丰富,可观察到丝状菌、杆菌及球菌以及少量藻类共存,推测 AquaMats® 独特的微孔结构赋予不同功能的微生物一个合适的生境,在低气水比条件下有望通过填料组合赋予微污染源水修复系统稳定高效的污染物去除性能.

表 6 填料附着生物膜量、VS/TS 及 EPS 含量的变化

填料	67 d			89 d		
	生物膜干重/g·m ⁻³	VS/TS	EPS/mg·g ⁻¹	生物膜干重/g·m ⁻³	VS/TS	EPS/mg·g ⁻¹
AquaMats®	71.79	0.16	116.84	139.51	0.46	118.79
弹性填料	316.54	0.22	89.10	864.20	0.23	66.16

3 结论

(1) 采用间歇曝气、逐步增强曝气强度的挂膜方式,可实现处理微污染源水模拟河道生物反应器的快速启动,2 组反应器的高锰酸盐指数、氨氮去除率均可稳定在 70%、85% 以上。

(2) 在本试验条件下,弹性填料反应器的挂膜时间比 AquaMats® 反应器(R₂)缩短近 2 周,并具有较高的有机物与氨氮去除性能;不同曝气方式的影响研究发现,曝气/停曝时间比 3 h:3 h、曝气量 250 L·h⁻¹ 工况下,弹性填料反应器的高锰酸盐指数、氨氮、TN、TP 的去除率均优于 AquaMats® 反应器;随着曝气强度的减小和曝气方式的改变,AquaMats® 反应器的污染物去除性能逐步提高,表明其在确保一定的污染物去除率的前提下具有低气水比潜力以及节能降耗的应用优势。

(3) 呈辐射状结构的弹性填料对颗粒态污染物具有较强的截留能力,可实现微污染源水修复系统快速挂膜与稳定运行;而 AquaMats® 生态基上附着的生物膜微生物群落相对较丰富,在低气水比条件下通过填料组合可强化微污染源水修复系统的氮磷污染物协同去除性能。

参考文献:

- [1] 肖羽堂,张晶晶,吴鸣,等.我国水资源污染与饮用水安全性研究[J].长江流域资源与环境,2001,10(1):51-59.
- [2] Shao M, Tang X Y, Zhang Y H, et al. City clusters in China: air and surface water pollution[J]. Front Ecol Environ, 2006, 4(7): 353-361.
- [3] Qin B Q, Xu P Z, Wu Q L, et al. Environmental issues of Lake Taihu, China[J]. Hydrobiologia, 2007, 581: 3-14.
- [4] 吴为中,王占生.不同生物接触氧化法的净化效果及其生物膜特性的比较[J].环境科学学报,2000,20(增刊):44-50.
- [5] 肖羽堂,吴鸣,刘辉,等.弹性填料微孔曝气生物膜法修复污染源除NH₄⁺-N[J].环境科学,2001,22(3):40-43.
- [6] 徐斌,夏四清,高廷耀,等.悬浮生物填料床处理微污染原水硝化试验研究[J].环境科学学报,2003,23(6):742-747.
- [7] Pu P M, Hu W P, Yan J S, et al. A physico-ecological engineering experiment for water treatment in a hypertrophic lake in China[J]. Ecol Eng, 1998, 10(2): 179-190.
- [8] 王淑梅,王宝贞,金文标,等.污染水体就地综合净化方法在福田河综合治理中的应用[J].给水排水,2007,33(6):12-15.
- [9] Leenen E J T M, Dos Santos V A P, Grolle K C F, et al. Characteristics of and selection criteria for support materials for cell immobilization in wastewater treatment[J]. Water Res, 1996, 30(12): 2985-2996.
- [10] 方芳,龙腾锐,郭劲松,等.多孔填料表面物理特性对生物膜附着的影响[J].工业用水与废水,2004,35(6):1-4.
- [11] Khatoon H, Yusoff F, Banerjee S, et al. Formation of periphyton biofilm and subsequent biofouling on different substrates in nutrient enriched brackishwater shrimp ponds[J]. Aquaculture, 2007, 273(4): 470-477.
- [12] 田伟君,郝芳华,翟金波.弹性填料净化受污染入湖河流的现场试验研究[J].环境科学,2008,29(5):1308-1312.
- [13] 黄可谈,朱亮,李国平,等.模拟河道生物反应器原位修复受污染源水研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2009,45(3):295-300.
- [14] Bratvold D, Browdy C L. Effects of sand sediment and vertical surfaces (AquaMats™) on production, water quality, and microbial ecology in an intensive *Litopenaeus vannamei* culture system[J]. Aquaculture, 2001, 195(1-2): 81-94.
- [15] Stewart N T, Boardman G D, Helfrich L A. Treatment of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) raceway effluent using baffled sedimentation and artificial substrates[J]. Aquacult Eng, 2006, 35(2): 166-178.
- [16] Arnold S J, Coman F E, Jackson C J, et al. High-intensity, zero water-exchange production of juvenile tiger shrimp, *Penaeus monodon*: An evaluation of artificial substrates and stocking density[J]. Aquaculture, 2009, 293(1-2): 42-48.
- [17] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002.200-281.
- [18] Liu Y. Estimating minimum fixed biomass concentration and active thickness of nitrifying biofilm[J]. J Environ Eng, 1997, 123(2): 198-202.
- [19] 方亮,张丽丽,蔡伟民.活性污泥胞外多聚物提取方法的比较[J].环境科学与技术,2006,29(3):46-53.
- [20] Dubois M, Gilles K A, Hamilton J K, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances [J]. Anal Chem, 1956, 28(3): 350-356.
- [21] Lowry O H, Rosebrough N J, Farr A L, et al. Protein measurement with the Folin phenol reagent [J]. J Biol Chem, 1951, 193(1): 265-275.
- [22] 郑平,冯孝善.废物生物处理[M].北京:高等教育出版社,2006.92-98.
- [23] 傅金祥,陈正清,赵玉华,等.挂膜方式对曝气生物滤池的影响[J].水处理技术,2006,32(8):42-45.
- [24] Liu Y, Tay J H. Metabolic response of biofilm to shear stress in fixed-film culture[J]. J Appl Microbiol, 2001, 90(3): 337-342.
- [25] Celmer D, Oleszkiewicz J A, Cicek N. Impact of shear force on the biofilm structure and performance of a membrane biofilm reactor for tertiary hydrogen-driven denitrification of municipal wastewater[J]. Water Res, 2008, 42(12): 3057-3065.
- [26] 刘文君,贺北平,张锡辉.生物预处理对受有机污染源水中胶体 Zeta 电位的影响研究[J].中国给水排水,1996,12(4):27-29.