

不同充水比下 SBR 光生物反应器的脱氮除磷效能

翟俊, 赵宇婷, 黎小廷, 魏昊轩

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 利用螺旋藻系统处理生活污水,旨在为污水的资源化利用提供一条可行的途径。采用人工配水对螺旋藻进行预培养,培养至系统稳定后开始投加经厌氧处理后的生活污水,比较不同充水比条件下对氮、磷的去除效果以及螺旋藻的生长情况。从3组试验对比情况来看,螺旋藻系统对氮、磷均有一定的去除效果。在充水比为10%时,系统的稳定性最好,对氮、磷的去除率也最高,其中对TN的去除率为75.67%,对TP的去除率为75.70%。因此,螺旋藻系统光生物反应器能够用于生活污水的处理及资源化利用,在实现污水处理的同时,也可产生螺旋藻生物质,可用于制作牲畜饲料或生物质柴油。

关键词: 螺旋藻; 生活污水; 充水比; 营养物去除

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2018)09-0006-05

Nitrogen and Phosphorus Removal Efficiency of Domestic Wastewater by SBR Photobioreactor under Different Water Filling Ratios

ZHAI Jun, ZHAO Yu-ting, LI Xiao-ting, WEI Hao-xuan

(Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: In order to find a feasible way for domestic wastewater utilization, *Spirulina platensis* system was developed for domestic wastewater treatment. *Spirulina platensis* was pre-cultured in synthetic wastewater, and purification effect and *Spirulina platensis* growth were investigated by replacing different amount of anaerobic domestic wastewater when the system reached stable. It showed that the microalgal system could effectively remove nitrogen and phosphorus in anaerobic domestic wastewater. The microalgal system could maintain stability under the water filling ratio of 10%, and the removal rates of TN and TP reached 75.67% and 75.70% respectively. The results showed that the photobioreactor could be used for treatment of domestic wastewater. At the same time, it could also produce *Spirulina platensis* biomass, which could be used for livestock feed or biomass diesel production.

Key words: *Spirulina platensis*; domestic wastewater; water filling ratio; nutrients removal

社会经济在快速发展的同时也引发了能源危机和水污染等问题,将微藻作为一种生物质能源,与废水资源化利用相结合,有利于缓解当前水环境污染和能源危机造成的压力。适于微藻培养的污水需要

具备以下两个特点:①包含适宜微藻生长所需的营养元素;②影响微藻生长的有毒有害物质浓度低。

微藻对污水中氮、磷的去除包括直接作用和间接作用。微藻细胞以光能为动力,直接以污水中的

无机氮和有机氮化合物作为氮源,以磷酸盐作为磷源,以二氧化碳、碳酸盐和一些小分子有机物作为碳源,进行光能自养生长^[1,2]。同时,微藻的光合作用使水体 pH 值升高,导致磷酸盐形成沉淀和 NH_3 吹脱,从而间接去除氮、磷。Chaudhary 等^[3]研究了小球藻和栅藻在市政污水中的生长情况,在只曝空气条件下两种微藻的生物量仅约为 100 mg/L,而提高生物量需要向反应器中通入浓度为 5% 的 CO_2 。Yang 等^[4]利用人工尿液和实际尿液分别对螺旋藻进行批次培养和连续培养,虽然螺旋藻对尿液中的 N、P 均有较好的去除效果,但需要向反应器中通入浓度为 1% 的 CO_2 和补充 NaHCO_3 。Markou 等^[5]利用稀释不同倍数的畜禽垃圾渗滤液来培养螺旋藻,结果发现,螺旋藻不能在稀释 10 和 15 倍的渗滤液中生长,在稀释 20 和 25 倍的渗滤液中的生物产量仅是 Zarrouk 培养基的一半。

由于微藻难以直接利用大分子有机物,而目前对于微藻处理有机污废水的耐受浓度及系统稳定性方面的研究较少,污水中原始微生物等因素对微藻去除氮、磷的影响还不明确。为此,鉴于螺旋藻具有高蛋白、便于资源化利用的特性,比较分析了不同充水比条件下螺旋藻系统对经厌氧处理后的生活污水中 N、P 的利用效果及其生长情况,探讨了螺旋藻在 SBR 光生物反应器中对污水的耐受性和连续运行的可行性,旨在确定其对污水的耐受程度,并为污水处理与微藻培养耦合提供一种能够稳定运行的技术,从而为利用污水规模化培养微藻提供借鉴和指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验藻种选用钝顶螺旋藻 (FACHB-431),购于中国科学院武汉水生生物所。

试验用生活污水取自重庆大学学生宿舍生活污水。污水经厌氧处理及砂滤柱过滤后用于微藻培养及净化试验。待出水水质稳定后,多次取过滤后出水根据国家标准方法进行水质分析,测得水质如下: pH 值为 7.8 ~ 8.4,浊度为 6.5 ~ 18.0 NTU, COD、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、TP 分别为 65 ~ 125、50 ~ 75、33 ~ 65、0.05 ~ 0.40、0.30 ~ 1.70、3.1 ~ 5.1 mg/L。

1.2 试验方法

1.2.1 工艺流程

工艺流程如图 1 所示。



图 1 工艺流程

Fig.1 Flow chart of SBR photobioreactor

1.2.2 钝顶螺旋藻的保育与培养

将钝顶螺旋藻接种至若干装有 500 mL Zarrouk 培养基的 1 L 锥形瓶中,于 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、光照强度为 4 000 lx、光暗比为 12 h : 12 h 的生化培养箱中培养至对数生长期。

1.2.3 人工污水对钝顶螺旋藻的预培养

试验在 200 L 的方形反应池 $(1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 0.15\text{ m})$ 中进行,有效体积为 150 L。试验初始采用人工污水对钝顶螺旋藻进行预培养,将培养至对数生长期的藻液按 10% 接种至装有 150 L 人工污水的反应池中,初始生物量接近 0.1 g/L。池正上方悬挂 12 支并排均匀分布的日光灯,光照强度为 4 000 lx,光暗比为 12 h : 12 h,为增加扰动使藻液均匀混合,池子一侧设有一台推流泵。池底均匀布置有曝气条,曝气强度为 0.5 L/min,温度为室温。

1.2.4 螺旋藻系统处理生活污水

待人工污水培养的螺旋藻系统达到稳定期后开始投加经厌氧处理后的生活污水,试验采用 SBR 模式,通过蠕动泵进水,微孔纤维膜过滤后收集出水,每天进出水。设置 3 个不同的试验组,充水比分别为 5%、10%、20%,分别用 $m_{0.05}$ 、 $m_{0.1}$ 、 $m_{0.2}$ 表示。3 组试验利用同一系统分开进行,一组完成后对该反应池系统进行调节维护,使其状态与初始试验时接近并稳定几天后再进行下一组试验。对每个试验组的进出水进行取样,其中 $m_{0.05}$ 每 3 d 取样, $m_{0.1}$ 每 2 d 取样, $m_{0.2}$ 每天取样,测定水质和生物量,分析螺旋藻系统在不同充水比条件下对生活污水的处理效果和反应池内螺旋藻的生长状况。

1.2.5 参数测定

采用重量法测定干质量 (DW);微藻在一段时间的总体生长情况用比生长速率来表示,具体计算公式参照文献[6];螺旋藻叶绿素 a 的测定参照文献[7]。

收集经 0.45 μm 滤膜过滤后的滤液用于水质分析,采用国家标准方法测定 TN、TP。TN、TP 去除负荷的计算公式参照文献[8]。

试验分析了最佳充水比条件下细菌的群落结构。参照课题组的方法^[9]对样品进行总 DNA 提取、

PCR 扩增、纯化、克隆后送至上海美吉生物公司分析微藻反应池系统的细菌多样性和群落结构。

1.2.6 数据分析

采用 EXCEL 的方差分析对试验结果进行差异性显著分析($p = 0.05$),分析不同充水比条件对污水中 N、P 去除效率的影响。

2 结果与讨论

2.1 充水比对系统 pH 值及螺旋藻生物量的影响

螺旋藻能够很好地适应人工污水,第 9 天以后反应池系统达到稳定,螺旋藻生物量达到 0.72 g/L ,平均比生长速率为 0.20 d^{-1} 。同时螺旋藻能够很好地去除人工污水中的 N、P,对 TN 和 TP 的去除率分别达到 80.32%、80.55%。待培养稳定后,开始投加经厌氧处理后的生活污水,发现充水比对系统螺旋藻生物量有较大的影响(见表 1~3)。

表 1 充水比为 5% 时系统 pH 值及生物量的变化

Tab.1 pH and biomass under water filling ratio of 5%

项 目		时间/d						
		0	3	6	9	12	15	18
pH 值	起始	9.8	9.7	9.7	9.8	9.6	9.5	9.6
	终点	9.7	10	9.8	9.7	9.8	9.6	9.5
DW/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	起始	899	742	681	806	899	864	799
	终点	774	687	728	789	918	811	863

表 2 充水比为 10% 时系统 pH 值及生物量的变化

Tab.2 pH and biomass under water filling ratio of 10%

项 目		时间/d				
		0	2	4	7	9
pH 值	起始	9.25	9.09	8.96	8.86	8.89
	终点	9.2	9.05	8.97	8.92	9.02
DW/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	起始	568.5	501	503	523	519
	终点	501.5	522	516	547	534

表 3 充水比为 20% 时系统 pH 值及生物量的变化

Tab.3 pH and biomass under water filling ratio of 20%

项 目		时间/d				
		0	1	2	3	4
pH 值	起始	9.72	9.55	9.61	9.51	9.48
	终点	9.57	9.6	9.54	9.5	9.44
DW/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	起始	594	467.5	510	386	306
	终点	436	478.5	454	287	277

$m_{0.1}$ 组的螺旋藻生物量维持在 523 mg/L 左右,而 $m_{0.05}$ 和 $m_{0.2}$ 组的螺旋藻生物量均有较大波动,在 $m_{0.2}$ 组的培养后期,螺旋藻生物量有明显的降低,这可能是因为系统中螺旋藻的增殖速率小于衰亡速率,而且污水负荷过高对系统稳定性造成冲击,使螺

旋藻从稳定期过渡为衰亡期。在整个试验过程中,3 组的 pH 值在培养后期均呈现降低趋势,但均处于螺旋藻的最适生长范围,说明充水比对系统 pH 值的影响不大。

2.2 不同充水比条件下对 TN 的去除

在不同充水比条件下,螺旋藻系统对 TN 均有一定的去除效果,TN 浓度总体均呈现下降趋势(见图 2),但 3 组试验中螺旋藻系统对 TN 的去除速率有明显差异。随着充水比的提高,系统对 TN 的去除速率表现出先增后减的规律, $m_{0.1}$ 组的 TN 去除速率高于其他两组。 $m_{0.1}$ 组螺旋藻系统的平均 TN 去除负荷为 $(7.13 \pm 1.98)\text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 。可能是因为当充水比提高到一定程度后,进入系统的有害物质增多,对螺旋藻产生抑制或毒害作用,并且在高充水比条件下其他微生物与螺旋藻的生长形成竞争,影响螺旋藻的生长进而影响其对氮的利用。

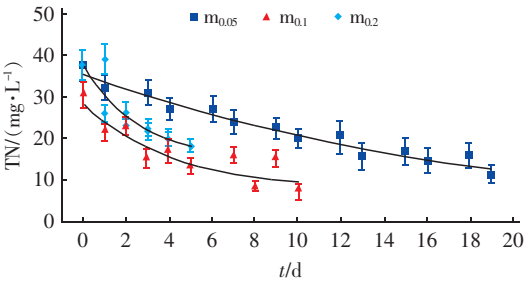


图 2 不同充水比条件下去除 TN 的比较

Fig.2 TN removal under different water filling ratios

2.3 不同充水比条件下对 TP 的去除

在不同充水比条件下,螺旋藻系统对 TP 均有一定的去除效果,TP 浓度总体均呈现下降趋势(见图 3),但是随着充水比的提高,系统对 TP 的去除速率先增加后降低。

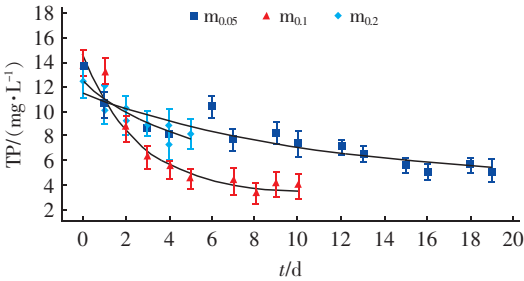


图 3 不同充水比条件下去除 TP 的比较

Fig.3 TP removal under different water filling ratios

当充水比从 5% 增加到 10% 时,螺旋藻系统对 TP 的去除负荷发生了少量的增加,从 (0.94 ± 0.47)

*piraceae*等均为厌氧菌^[10],相对丰度分别为9.35%、8.4%、4.99%、4.31%,经过反应后相对丰度分别降至5.1%、1.62%、0.09%、0.29%,说明该光生物反应器能够抑制厌氧菌的生长。而在螺旋藻生长的同时伴随着某些细菌的生长,如 *Porphyrobacter* 的相对丰度由反应前的0.01%增至3.41%,*norank_f_NS11-12_marine_group* 的相对丰度由反应前的0.02%增加至3.02%,*Methylophilus* 的相对丰度由反应前的零增加至2.76%。上述这些细菌属于变形菌门(*Proteobacteria*)和拟杆菌门(*Bacteroidetes*),大多数均能参与生物脱氮除磷过程。这说明藻菌均能参与系统中N、P的降解过程。

3 结论

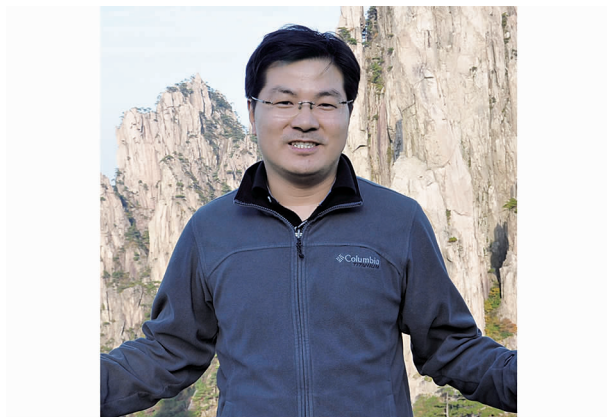
① 充水比对螺旋藻系统的生物量影响较大,充水比为10%时,系统的生物量维持在523 mg/L。

② 螺旋藻系统对生活污水中的N、P均有良好的去除效果,且N、P的去除负荷与藻细胞叶绿素a增长量呈正相关关系。

③ 充水比为10%时,螺旋藻系统对生活污水中TN、TP的去除效果最好,去除率分别为75.67%和75.70%。

参考文献:

- [1] 李晨旭,彭伟,方振东,等. 微藻用于城市污水深度处理的研究进展[J]. 化学与生物工程,2017,34(11):5-10.
Li Chenxu, Peng Wei, Fang Zhendong, et al. Research progress in advanced municipal sewage treatment by microalgae [J]. Chemistry & Bioengineering, 2017, 34(11):5-10(in Chinese).
- [2] Cheah W Y, Ling T C, Show P L, et al. Cultivation in wastewaters for energy: A microalgae platform [J]. Applied Energy, 2016, 179:609-625.
- [3] Chaudhary R, Dikshit A K, Tong Y W. Carbon-dioxide biofixation and phycoremediation of municipal wastewater using *Chlorella vulgaris*, and *Scenedesmus obliquus* [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2017, (3):1-8.
- [4] Yang C, Liu H, Li M, et al. Treating urine by *Spirulina platensis* [J]. Acta Astronautica, 2008, 63(7):1049-1054.
- [5] Markou G, Ionomou D, Muylaert K. Applying raw poultry litter leachate for the cultivation of *Arthrospira platensis* and *Chlorella vulgaris* [J]. Algal Res, 2016, 13:79-84.
- [6] Reyimu Z, Özcimen D. Batch cultivation of marine microalgae *Nannochloropsis oculata* and *Tetraselmis suecica* in treated municipal wastewater toward bioethanol production [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 150:40-46.
- [7] 徐长健. 柱状光生物反应器螺旋藻系统对污水中N、P的深度处理研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
Xu Changjian. Study on the Advanced Treatment of N and P by Artificial Algae System of Column Photobioreactor [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016 (in Chinese).
- [8] Chang H X, Fu Q, Huang Y, et al. An annular photobioreactor with ion-exchange-membrane for non-touch microalgae cultivation with wastewater [J]. Bioresource Technol, 2016, 219:668-676.
- [9] Zhai J, Rahaman M H, Chen X, et al. New nitrogen removal pathways in a full-scale hybrid constructed wetland proposed from high-throughput sequencing and isotopic tracing results [J]. Ecol Eng, 2016, 97:434-443.
- [10] 高晨晨,郑兴灿,游佳,等. 城市污水脱氮除磷系统的活性污泥菌群结构特征[J]. 中国给水排水,2015,31(23):37-42.
Gao Chenchen, Zheng Xingcan, You Jia, et al. Structure characteristics of activated sludge microbial communities in nitrogen and phosphorus removal system of municipal wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(23):37-42(in Chinese).



作者简介:翟俊(1977-),男,江苏溧阳人,博士,教授,从事废水处理理论与技术研究。

E-mail:zhaijun99@126.com

收稿日期:2018-01-28