

藻类膜工艺系统对南宁市南湖水的处理效果研究

朱宇轩¹, 魏群^{1,2}, 涂晓杰¹, 陈延飞¹, 李晓伟¹

(1. 广西大学 资源环境与材料学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西高校环境保护重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要: 以进(原)水箱、蠕动泵、藻类生物膜反应器、斜板沉淀池、超滤膜装置和出水箱构建新型藻类膜工艺系统,由斜生栅藻在立体弹性聚氯乙烯载体上形成藻类生物膜,并在连续光照度为3 500 lx、室温、水力停留时间为4 d的条件下,研究了系统对南宁市南湖水的处理效果。结果表明:在连续15 d的动态试验中,藻类膜工艺系统对南湖水中COD、TP、NH₃-N和TN的平均去除率分别为52.61%、90.42%、91.47%和77.39%;藻类膜反应器中pH值、DO和温度分别平均为10.38、12.8 mg/L和32.3℃,温度比室温平均高约4℃。藻类膜工艺系统具有较强的抗负荷冲击能力,对低氮、磷营养物的湖泊水具有良好且稳定的去除效果。

关键词: 藻类膜工艺系统; 南湖; 斜生栅藻; 氮; 磷; COD

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)23-0073-05

Treatment Effect of Nanhu Lake Water in Nanning City by Algae Biofilm Process System

ZHU Yu-xuan¹, WEI Qun^{1,2}, TU Xiao-jie¹, CHEN Yan-fei¹, LI Xiao-wei¹

(1. School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China;
2. Guangxi Universities Key Laboratory of Environmental Protection, Nanning 530004, China)

Abstract: An algae biofilm process system consisted of influent tank, peristaltic pumps, algae biofilm reactor, inclined plate sedimentation tank, ultrafiltration device and effluent tank was built. In the algae biofilm reactor, algae biofilm was formed by *Scenedesmus obliquus* on the surface of stereo elasticity PVC filler. The treatment effect of Nanhu Lake water was studied under the condition of continuous illumination intensity of 3 500 lx, room temperature, and HRT of 4 d. The results showed that, after 15 d continuous dynamic experiments, the average removal rates of COD, TP, NH₃-N and TN were 52.61%, 90.42%, 91.47% and 77.39%, respectively. The pH, DO, and temperature in the reactor were 10.38, 12.8 mg/L, and 32.3℃. The average temperature in the reactor was 4℃ higher than the room temperature. The algae biofilm process system demonstrated a strong resistance to the influent load, had good and stable removal effect on lake water with low nitrogen and phosphorus nutrients.

Key words: algae biofilm process system; Nanhu Lake; *Scenedesmus obliquus*; nitrogen; phosphorus; COD

南湖是南宁市的最大城市内湖,位于南宁市东南部,湖面总面积约为 1 km^2 ,总水量为 $2.1 \times 10^6 \text{ m}^3$,湖水的补充主要源于自然降雨和邕江水汇入。由于曾长期作为城市生活污水和工业废水的天然处理设施,随着城市人口快速增长和城市经济不断发展,污水的排入量超过了水体的自净能力,南湖水质不断恶化,水体富营养化问题加剧,南湖原本的用水和景观功能性被极大削弱。自2002年5月以来,南湖综合治理工程、南湖水质改善工程补水子工程项目^[1]启动,经过长期治理,其水质得到改善。根据南宁市2014年的环境公告显示:2014年,南湖总磷浓度偏高,水质评价归为V类,综合营养状态相比2013年有所下降,为中度富营养化。由于富营养化等问题的存在,南湖治理仍需得到持续关注。本研究采用新型藻类生物膜工艺系统处理南湖水,旨在为南湖水富营养化问题的治理提供一种新思路和解决方法。

1 试验材料和方法

1.1 藻种

藻种选用斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*),购自中国科学院武汉水生生物研究所。斜生栅藻属栅藻科栅藻属,细胞具有多种形态,包括椭圆、卵圆、长筒、纺锤或新月形,其藻细胞常常以列状形式聚集,一般由4个细胞构成单列,或由8个细胞构成双列的群体。斜生栅藻繁殖快,广泛分布于各种淡水水体中,藻体富含营养,可供食用或作为饲料。

1.2 试验载体

试验载体选用立体弹性聚氯乙烯填料,直径为150 mm,比表面积为 $310 \text{ m}^2/\text{m}^3$,丝直径为0.35 mm,密度为 $2.0 \text{ kg}/\text{m}^3$,最大成膜密度为 $69 \text{ kg}/\text{m}^3$,该填料具有耐腐蚀、抗老化、亲水性好、孔隙可变大、透光性好、比表面积大以及气、水、生物膜交换充分等优点。

1.3 原水水质

原水取自于南宁市南湖,其水质指标如下:COD为65 mg/L、TP为0.69 mg/L、TN为2.91 mg/L、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为2.21 mg/L、浊度为17 NTU、pH值为6.76。

1.4 工艺系统

藻类膜工艺系统由进(原)水箱、蠕动泵、藻类生物膜反应器(简称藻类膜反应器)、斜板沉淀池、超滤膜装置和出水箱构成,如图1所示。其中藻类

生物膜反应器作为系统的主体,整体为玻璃材质,共有4个廊道,各廊道通过进出水口的连接方式改变,既能单独运行也能串联运行,各廊道的尺寸为 $150 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$,容积为12 L。试验采用单廊道单独运行,廊道两侧以日光灯作为人工光源,日光灯在平行于载体悬挂方向且距离反应器外壁100 mm处安装,通过调节电压控制日光灯的光照度(以光度计测定),光照度设置在3500 lx左右。

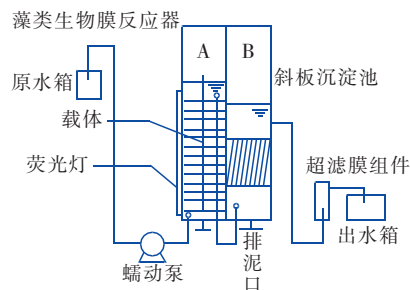


图1 藻类膜工艺系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of algae biofilm process system

1.5 试验过程

1.5.1 藻类培养

斜生栅藻的预培养选用BG11培养基。培养基各原料混合完毕后^[2],将其pH值调至 7.0 ± 2.0 左右,取4个1000 mL锥形瓶,各瓶中分装500 mL的培养基并密封;试验所用玻璃器皿以及分装好的培养基均需在压力蒸汽灭菌器中进行高压蒸汽灭菌,灭菌条件设置为 120°C 、30 min;灭菌完成后置于室温冷却,待冷却至室温后将培养基以及玻璃器皿放入超净工作台进行紫外灭菌30 min^[3],各瓶培养基中均接种50 mL斜生栅藻藻液;接种完成后藻类培养条件设置为光照度3500 lx、室温,每日3次不定时振荡摇瓶。

1.5.2 藻类挂膜及驯化

廊道中先填充一定质量的立体弹性聚氯乙烯载体,并加入2 L处于对数生长期的斜生栅藻藻液和8 L培养基,进行7 d的连续光照静态培养。下一步就是藻类生物膜的驯化培养,每天同一时间将2 L反应器中藻液置换为2 L南湖水,持续置换5 d,最后1 d用南湖水将反应器中藻液全部置换,接着培养5 d,直至成熟的藻类生物膜在载体上稳定生长。

1.5.3 南湖水处理试验

水力停留时间设计为4 d,湖水通过蠕动泵作用由藻类生物膜反应器底部进水、上部出水,之后在重力作用下流经斜板沉淀池和超滤膜装置,最终流入

出水箱。

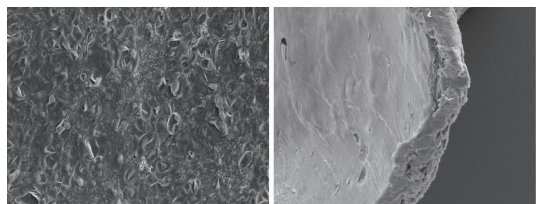
1.5.4 检测指标及方法

待工艺系统运行稳定后,处理装置连续运行 15 d,每 2 d 固定时间对进水、藻类膜反应器出水、沉淀池出水和超滤膜出水取样,测定指标包括 COD、TP、TN 和 $\text{NH}_3\text{-N}$;每 2 d 固定时间对进水和反应器出水取样测定 pH 值,每 4 d 固定时间对沉淀池出水和超滤膜出水取样测定 pH 值;每 2 d 固定时间测定藻类膜反应器中 DO 和温度。其中,pH 值采用 pH S-25 酸度计测定;DO 采用便携式溶解氧分析仪测定;TP 采用钼酸铵分光光度法测定; $\text{NH}_3\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法测定;TN 采用麝香草酚分光光度法测定;COD 采用快速消解分光光度法测定。所有分光光度法均使用 722N 可见分光光度计。

2 结果和讨论

2.1 藻类生物膜微观结构

当藻类生物膜对南湖水的处理效果良好时,截取藻类生物膜进行电镜扫描,结果见图 2。藻类在载体上的生长状况良好,分布较为紧集中,藻间层叠度较高,形成的藻类生物膜的平均厚度可达 125 μm 左右。将藻类生物膜放大 10 000 倍观察,发现藻细胞并不是在载体上裸露生长的,而是被胞外多糖等细胞代谢分泌物包裹后粘附到载体上而形成藻类生物膜。藻类分泌的胞外多糖等基质可以支撑藻类生物膜的空间结构。



a. 藻类生物膜 b. 放大 10 000 倍的藻类生物膜

图 2 藻类生物膜的电镜扫描结果

Fig. 2 Electron microscopic scanning result of algae biofilm

2.2 pH 值随时间的变化

考察了藻类膜工艺系统在运行过程中 pH 值随时间的变化情况,结果见图 3。可以看出,湖水流经藻类膜反应器后,湖水 pH 值迅速升高,而后始终维持在 10 以上直至试验结束,其 pH 均值为 10.38,高于进水的 7.87,并在第 11 天时达到最大值 10.55;经过沉淀池后,湖水 pH 值下降幅度较大,而流经超滤膜后湖水 pH 值下降程度较小,装置最终出水 pH 值平均为 8.18,其中在第 13 天时出现最小值 7.17,

且出水 pH 值均低于或等于 8.5,符合排放要求。

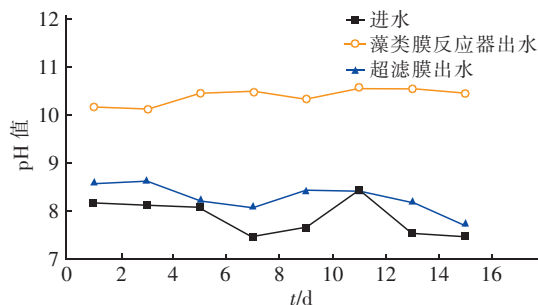
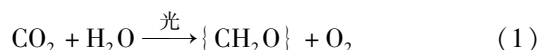


图 3 南湖水处理过程中 pH 值随时间的变化

Fig. 3 Change of pH with time in the process of Nanhu Lake water treatment

光合作用与碳酸盐体系的关系如下:

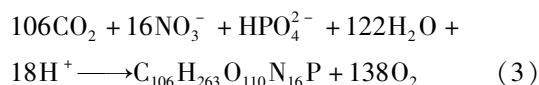


通过式(1)、(2)可解释系统中 pH 值的变化:在藻类光合作用过程中产生大量氧气,破坏了水体原有 CO_2 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 之间的动态平衡体系,促使反应器中 pH 值升高;而在沉淀池中由于藻类光合反应弱化以及外界 CO_2 对水体的补充和沉淀过程中 OH^- 的消耗,使得水体 pH 值降低。

2.3 DO 和温度随时间的变化

南湖水流经藻类膜反应器后,DO 浓度迅速升高。在 15 d 的试验过程中,除第 5 天 DO 浓度略低外,其余几天均高于 12 mg/L,在第 3 天时达到峰值 14.7 mg/L,DO 平均为 12.8 mg/L,表明藻类生物膜的生理状态稳定且良好。在 15 d 的试验过程中,室内平均温度为 28.4 $^{\circ}\text{C}$,此时藻类膜反应器内平均温度达到 32.3 $^{\circ}\text{C}$,比室温平均高 4 $^{\circ}\text{C}$ 左右。与无人工光源装置组对照发现,藻类膜反应器温度高于外界温度主要是由于人工光源的照射所致,但温度升幅有限且稳定。有研究显示,植物体的光呼吸耗散能量随环境温度的升高而增加,耗能的增加意味着更多的氧气消耗^[4]。DO 与温度在经过最初几天的波动后进入相对稳定阶段,表明反应器温度升高并未对藻类的生长活动造成影响。

Stumm 等^[5]的研究发现,藻类分子式可简化为 $\text{C}_{106}\text{H}_{263}\text{O}_{110}\text{N}_{16}\text{P}$,藻细胞光合过程反应式^[6]如下:



由式(3)可知,藻类通过光合作用完成自身生

长繁殖过程时吸收 CO_2 , 并产生大量的 O_2 , 提高了水体中 DO 含量, 从而改善了水体水质。

2.4 对TP 的去除效果

藻类膜工艺系统运行过程中对 TP 的沿程去除效果如图 4 所示。可知, 湖水流经藻类膜反应器后, 对 TP 的去除效果明显, TP 平均浓度由进水时的 0.42 mg/L 降到 0.13 mg/L , 且都保持在 0.15 mg/L 以下; 流经沉淀池和超滤膜装置后, TP 浓度仍有一定程度的降低, 这主要是依靠沉淀池中藻类降解和化学沉淀作用。整个运行过程中, 除第 7 和 11 天时 TP 浓度略高, 达到 0.07 mg/L 之外, 其余时间装置出水总磷浓度均维持在 0.04 mg/L 以下, 平均出水总磷浓度为 0.04 mg/L , 平均去除率高达 90.42% 。

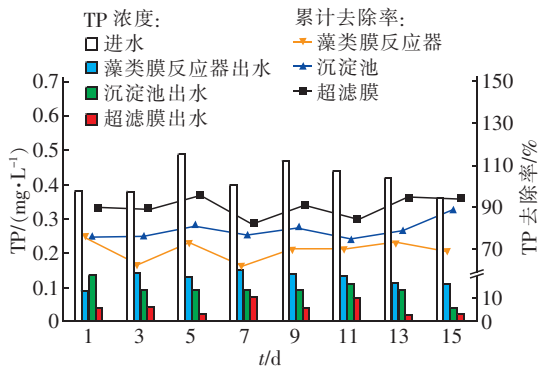


图4 藻类膜工艺系统对 TP 的去除效果

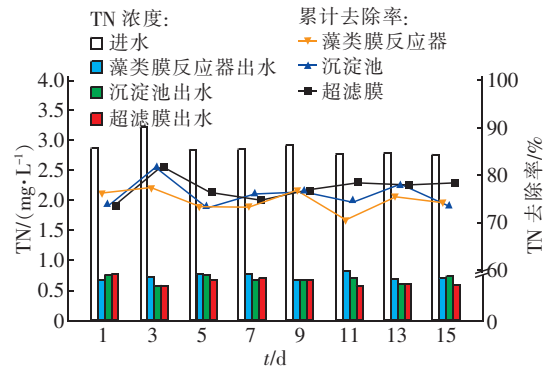
Fig.4 Removal of TP by algae biofilm process system

本工艺中反应器 pH 值维持在 10.38 左右, 有研究发现^[7], 当 pH 值处于 5~9 时, PO_4^{3-} 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Co^{2+} 等离子发生共沉淀现象, 但是这种共沉淀在藻类除磷中贡献度远低于藻类的同化吸收, 所以本工艺除磷仍以藻类对磷的同化吸收为主, 较高的 pH 值对除磷效果影响不大, 这与实际试验结果是相符的。

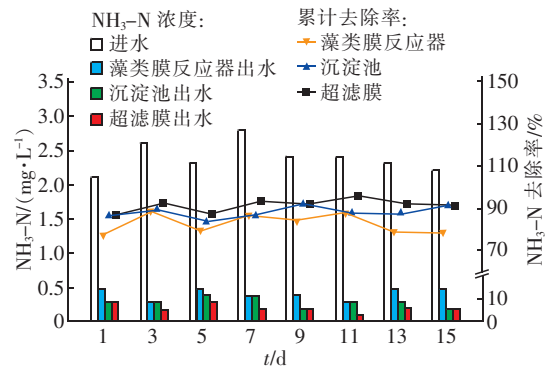
2.5 对TN 和 NH_3-N 的去除效果

藻类膜工艺系统运行过程中对 TN 和 NH_3-N 的去除效果如图 5 所示。由图 5(a) 可知, 湖水经藻类生物膜处理后, TN 平均浓度由初始的 2.89 mg/L 降至 0.73 mg/L , 去除效果十分明显; 流经沉淀池和超滤膜装置后, TN 得到进一步去除。出水 TN 平均浓度为 0.65 mg/L , 平均去除率为 77.39% 。由图 5(b) 可知, 湖水经藻类生物膜处理后, 水中 NH_3-N 浓度由初始的 2.39 mg/L 降至 0.41 mg/L ; 流经沉淀池和超滤膜装置后, NH_3-N 得到进一步去除, 最终出水 NH_3-N 平均为 0.20 mg/L , 平均去除率高

达 91.47% 。



a. 对 TN 的去除效果



b. 对 NH_3-N 的去除效果

图5 藻类膜工艺系统对 TN 和 NH_3-N 的去除效果

Fig.5 Removal of TN and NH_3-N by algae biofilm process system

藻类生长对湖水中氮源的利用, 首先是利用铵态氮, 郭莉娜^[8]的研究结果表明, 藻类生物膜对不同氮源的优先利用情况为铵态氮 > 尿素态氮 > 亚硝态氮 \approx 硝态氮。藻类生物膜对氮的去除途径主要包括氨氮挥发和同化吸收。试验过程中, 藻类生物膜反应器中水体 pH 值始终维持在 10.12 以上, 有助于氨氮挥发。

2.6 对COD 的去除效果

湖水流经藻类膜反应器后, COD 被大量去除, 平均浓度由进水时的 62.89 mg/L 下降到 35.75 mg/L ; 流经沉淀池和超滤膜装置后, COD 得到进一步去除, 这主要是由于沉淀池中存在藻类的降解以及 COD 的部分沉淀, 但去除效果有限。最终出水 COD 浓度降至 29.80 mg/L , 且整个试验阶段装置出水 COD 浓度均低于 32 mg/L , 对 COD 的平均去除率达到 52.61% (见图 6)。相较于利用绿藻、硅藻、裸藻去除水体中 COD^[9], 藻类膜工艺系统中藻类去除 COD 的效率接近平均水平。

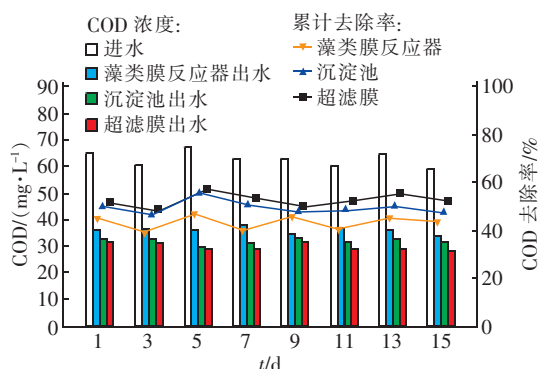


图6 藻类膜工艺系统对COD的去除效果

Fig. 6 Removal of COD by algae biofilm process system

3 结论

① 在连续光照度为3 500 lx、室温、水力停留时间为4 d的条件下,南湖水经过藻类膜工艺系统处理后,出水COD、TP、TN和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 分别平均为29.80、0.04、0.65和0.20 mg/L,平均去除率分别达到52.61%、90.42%、77.39%和91.47%。

② 在15 d的连续试验中,藻类膜反应器中水体的pH值基本保持在10.12以上,平均为10.38;DO平均浓度达到12.8 mg/L,最小值为10.1 mg/L;温度基本维持在32℃左右,比室温平均高约4℃。

③ 藻类膜工艺系统对动态湖水具有较强的抗负荷冲击能力,对低氮、磷营养物质的湖泊水具有良好且稳定的去除效果。

参考文献:

- [1] 李丽和,周小宁,韦丽群,等. 南宁市南湖水质富营养化评价[J]. 广西科学院学报,2012,28(3):219-223.
Li Lihe, Zhou Xiaoning, Wei Liqun, et al. Eutrophication evaluation of water quality in Nanning Nanhu Lake[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2012, 28(3): 219-223 (in Chinese).
- [2] Stanier R Y, Kunisawa R, Mandel M, et al. Purification and properties of unicellular blue-green algae (order Chroococcales)[J]. Bacteriol Rev, 1971, 35(2):171-205.
- [3] 魏群,胡智泉,肖波,等. 利用藻类生物膜技术处理生活污水研究[J]. 中国给水排水,2008,24(5):27-30.
Wei Qun, Hu Zhiquan, Xiao Bo, et al. Study on treatment of domestic sewage by algae biofilm technique[J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(5): 27-30 (in Chinese).
- [4] Wingler A, Quick W P, Leegood R C, et al. Photorespiration: metabolic pathways and their role in stress protection[J]. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 2000, 335(1402):1517-1529.
- [5] Stumm W, Sulzberger B. The cycling of iron in natural environments: Considerations based on laboratory studies of heterogeneous redox processes[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 36(8):3233-3257.
- [6] 邢丽贞,张彦浩,张志杰,等. 藻类膜对城市污水净化能力的研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2004,36(2):186-190.
Xing Lizhen, Zhang Yanhao, Zhang Zhijie, et al. Research on nutrient removal capacity of algal biofilm for municipal wastewater[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2004, 36(2):186-190 (in Chinese).
- [7] Solovchenko A, Verschoor A M, Jablonowski N D, et al. Phosphorus from wastewater to crops: An alternative path involving microalgae[J]. Biotechnology Advances, 2016, 34(5):550-564.
- [8] 郭莉娜. 藻类生物膜优选及脱氮除磷实验研究[D]. 南宁:广西大学,2014.
Guo Lina. Optimum Selection of Algae Biofilm and Experimental Study on Nitrogen and Phosphorus Removal[D]. Nanning:Guangxi University, 2014 (in Chinese).
- [9] 董芳芳,程凯,许敏,等. 藻类对造纸废水中COD的去除效率研究[J]. 环境科学与技术,2010,33(1):166-169.
Dong Fangfang, Cheng Kai, Xu Min, et al. Removal of COD in paper-making wastewater by algae[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(1):166-169 (in Chinese).



作者简介:朱宇轩(1991-),男,江苏扬州人,硕士研究生,研究方向为水污染控制工程。

E-mail:1965768226@qq.com

收稿日期:2019-02-12