

# 凤眼莲融合活性污泥对生活污水的净化效能研究

杨顺清<sup>1</sup>, 韩雪<sup>1</sup>, 周健珍<sup>1</sup>, 杜明霞<sup>1</sup>, 张显球<sup>1,2</sup>, 戴科伟<sup>1</sup>

(1.南京师范大学环境学院,江苏南京 210023)

(2.南京师范大学江苏省物质循环与污染控制重点实验室,江苏南京 210023)

**[摘要]** 以水生植物为核心的生态修复技术日益向污水处理领域拓展,但因其占地面积大导致应用受到一定的限制。为提高水生植物系统的净化效能,设计了一种凤眼莲融合活性污泥好氧净化系统,实验研究了该系统对低碳氮比生活污水的净化效能并分析了其净化机理。结果表明,单独凤眼莲对污水中的氮磷去除效能较微生物低,但构建凤眼莲融合活性污泥好氧净化系统可同时发挥植物吸收和生物降解的作用,显著提高 N、P、COD 等污染物的去除效果,为污水植物净化系统的工程应用提供有益的依据。

**[关键词]** 凤眼莲,活性污泥,污水,氮,磷

**[中图分类号]** X703.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2019)02-0082-05

## Study on Purification Effect of *Eichhornia crassipes* and Activated Sludge on Domestic Sewage

Yang Shunqing<sup>1</sup>, Han Xue<sup>1</sup>, Zhou Jianzhen<sup>1</sup>, Du Mingxia<sup>1</sup>, Zhang Xianqiu<sup>1,2</sup>, Dai Kewei<sup>1</sup>

(1.School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2.Jiangsu Key Laboratory of Material Circulation and Pollution Control, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** The ecological restoration technology based on aquatic plants is increasingly expanding into the field of sewage treatment, but the application is limited due to its occupied large area. To improve the efficiency of the aquatic plant purification system, a purification system of *Eichhornia crassipes* combined with activated sludge is designed. The purification efficiency of domestic wastewater with low carbon and nitrogen ratio is studied and its purification mechanism is analyzed. The results show that the removal efficiency of nitrogen and phosphorus in the single system of *Eichhornia crassipes* is lower than those of microorganisms. However, the aerobic purification system of *Eichhornia crassipes* combined with activated sludge can exert plant uptake and biodegradation at the same time, which can significantly improve the removal efficiency of N, P, COD and other pollutants. It provides a useful basis for the engineering application of sewage plant purification system.

**Key words:** *Eichhornia crassipes*, activated sludge, sewage, nitrogen, phosphorus

近年来,以水生植物为核心的生态修复技术,因具有同时净化氮素和磷素的能力,且环境友好、易管理、成本低廉等特点,受到国内外环保工作者的青睐并不断向污水处理领域扩展<sup>[1]</sup>。应用水生植物处理污水被视为一种非常有潜力的“绿色”处理技术。

在水生植物净化系统中,凤眼莲(*Eichhornia crassipes*, 俗名水葫芦)根系发达,繁殖速度快,吸收氮(N)、磷(P)能力强,不需要反复播种或移栽,易打捞,可利用途径较多,不易产生二次污染<sup>[2]</sup>,已成为实际应用首选的漂浮植物。凤眼莲已被应用于太湖<sup>[3]</sup>、滇池<sup>[4]</sup>及草海<sup>[5]</sup>的水体修复工程并取得了显著的效果;在生活污水<sup>[6]</sup>、家禽废水<sup>[7]</sup>和垃圾渗滤液<sup>[8]</sup>等污水处理方面的净化研究也证实其具有良好的效果。

凤眼莲净化系统除植物本身对某些污染物的吸收作用外,其根际微生物的作用不可忽略。凤眼莲发达的根系能够为微生物提供良好的附着和繁殖场所,根系分泌的糖类、有机酸、氨基酸和醇类物质能够为

收稿日期:2018-11-09.

基金项目:污染控制与资源化研究国家重点实验室开放课题(PCRRF16012)、水体污染控制与治理科技重大专项课题(2017ZX07203003)。

通讯联系人:张显球,副教授,研究方向:水污染控制. E-mail: zhangxianqiu@njnu.edu.cn

附着的微生物提供碳源和营养物质<sup>[9]</sup>,形成了特殊的凤眼莲-根际微生物非特异性结合的根际微生态系统. 研究证实,凤眼莲根系微生物对某些污染物的净化贡献大于植物吸收作用<sup>[10]</sup>,其脱氮能力也大于植物吸收<sup>[11]</sup>.

由于自然条件下水生植物根际微生物数量较少,导致水生植物系统净化效率有限,净化周期长达数天甚至几十天<sup>[12]</sup>,使得系统占地面积大,限制了其在污水处理中的应用. 为提高凤眼莲系统的净化效能,本文设计了一种凤眼莲融合活性污泥净化系统,实验研究了该系统对低碳氮比(C/N)生活污水的净化效能并分析了其净化机理,为污水植物净化系统的工程应用提供有益的参考依据.

## 1 材料及方法

### 1.1 实验材料

实验挑选生长状态良好、无黄叶、大小根系基本一致的凤眼莲植株供实验所用. 活性污泥采自南京某城市污水处理厂曝气池,为有效去除水中的磷,实验前处于厌氧状态. 实验污水取自南京师范大学仙林校区北区污水处理站出水口,该处理站对校园生活污水和食堂餐饮污水进行简单的好氧处理以满足城镇污水接管要求(GB/T 31962-2015). 经测定,其水质情况如表1所示. 从表1可知,实验污水COD浓度不高,但氨氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )和总氮(TN)浓度较高,属于低C/N污水.

表1 实验水质  
Table 1 Quality of the experimental water mg/L

TP	TN	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	$\text{NO}_3^--\text{N}$	COD
3.37	50.31	42.45	4.98	41.1

### 1.2 实验方法

实验在南京师范大学仙林校区北区玻璃房内进行. 实验装置由塑料桶、曝气装置和定时器组成. 实验桶中污水量均为9L. 曝气装置的运行时间由定时器控制,实验过程中溶解氧浓度DO保持在2 mg/L以上.

实验分为A、B、C、D 4组. 组A中仅含有污水,以考察原水中本已存在的少量微生物对污染物去除的效果. 组B考察单独水生植物凤眼莲的净化效果,实验时在污水中投放70 g鲜重的凤眼莲植株. 组C考察单独活性污泥的净化效果,实验开始时向污水中投放活性污泥,使混合液悬浮固体(MLSS)为1 000 mg/L. 组D考察水生植物凤眼莲融合活性污泥的净化效果,实验开始时在污水中投放70 g鲜重的凤眼莲植株和与组C同量的活性污泥. 为减少误差,设置平行实验组. 实验周期为23 h,实验中定时添加去离子水来补充蒸发的水分,采集的水样经快速滤纸过滤后,取滤液测定水样的TP、TN、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、COD等水质指标.

### 1.3 测定项目和方法

TP采用钼酸铵分光光度法测定;TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定; $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 采用水杨酸-次氯酸盐光度法测定; $\text{NO}_3^--\text{N}$ 采用紫外分光光度法测定;COD采用重铬酸钾法测定<sup>[13]</sup>.

## 2 实验结果分析

### 2.1 COD的去除

COD的去除效果如图1所示. 仅有污水的组A和仅有凤眼莲的组B中的COD呈现缓慢下降,说明实验污水中存在的少量微生物也能够对污水中的COD起到一定的降解作用. C、D组的净化效果明显高于组A和组B,这主要是由于C、D组中含有MLSS为1 000 mg/L的活性污泥,微生物量显著高于组A和组B,说明微生物降解是去除污水中COD的最有效的途径.

实验末期,C组的COD浓度出现一定程度的上升趋势,可能是由于水中的营养物质缺乏(即没有可利用的底物维持

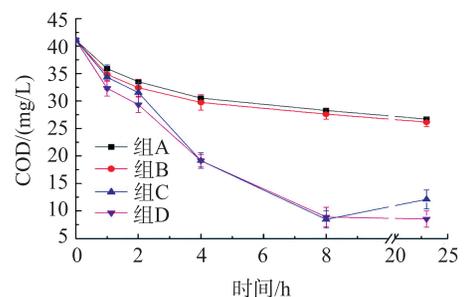


图1 COD浓度的变化

Fig. 1 Change of COD concentrations

现有细胞生存),微生物进入内源代谢状态,细胞死亡分解释放一定量难以被降解的代谢产物(soluble microbial products, SMP),导致水中的 COD 浓度有所回升<sup>[14]</sup>. D 组中的 COD 浓度没有回升,可能是因为凤眼莲根系能够分泌一定的有机碳<sup>[9]</sup>,在微生物无可利用的底物时为其提供了一定的营养来源,为微生物创造了一个稳定的适合其生存繁殖的环境.

### 2.2 TP 的去除

由图 2 可知,组 A 中 TP 浓度几乎不变,组 B 的 TP 浓度呈现缓慢下降,组 C 和组 D 中的 TP 浓度呈现显著下降,处理效果表现为组 A<组 B<组 C<组 D,说明生物除磷的贡献一般大于植物吸收,凤眼莲与活性污泥的融合对除磷效果具有增强作用.实验初期,组 C、D 中的 TP 浓度出现快速下降,其原因是实验投加的活性污泥已处于厌氧状态,其中的聚磷菌进行了释磷,故投加后在曝气好氧条件下,能快速从水中吸收磷.

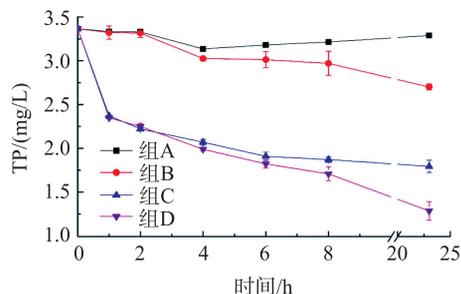


图 2 TP 浓度的变化

Fig. 2 Change of TP concentrations

### 2.3 N 的转化与去除

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 浓度变化如图 3 所示.由图 3 可知,组 A 和组 B 中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 浓度变化缓慢,组 C 和组 D 中变化更显著.

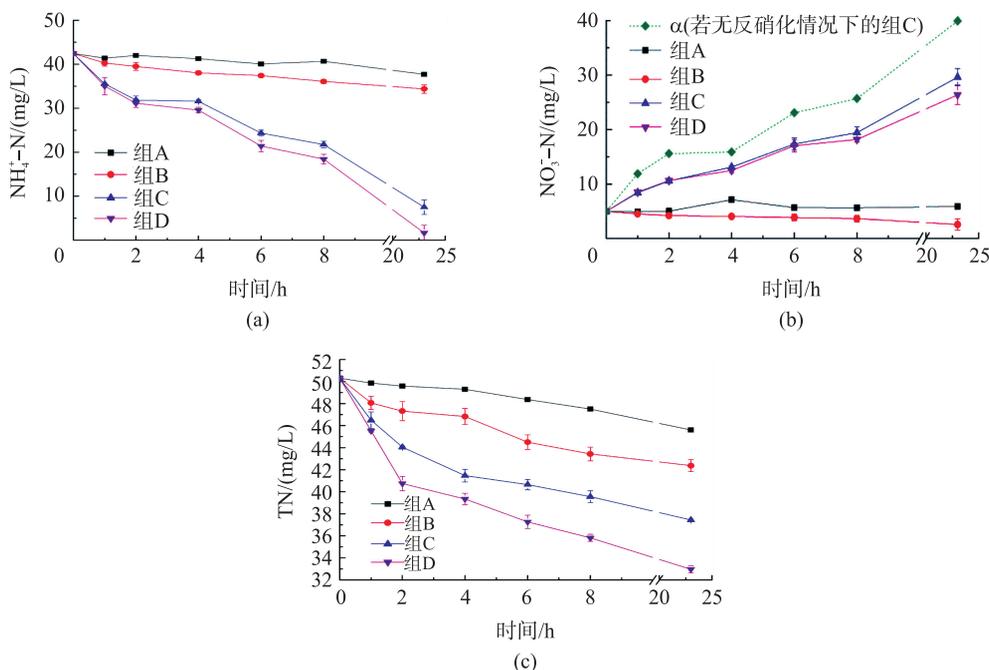


图 3  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 浓度的变化

Fig. 3 Change of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  and TN concentrations

在本实验系统中,主要通过两种途径去除氮,一种是被凤眼莲直接吸收,二是活性污泥微生物的作用.组 A 仅依靠污水中存在的少量微生物作用,对氮素的转化和去除效能很弱.组 B 中由于种养的凤眼莲可直接吸收水中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ <sup>[16]</sup>,故对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和 TN 的去除效果优于组 A,但由于实验时间较短,不足 24 h,凤眼莲的吸收效果有限.

组 C 中活性污泥较多,MLSS 达到 1 000 mg/L.因实验过程中污水处于好氧状态,有机碳源不高,适合硝化菌生长繁殖,硝化作用较强,故  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度快速下降, $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度持续上升.此外,经过计算可发现,组 C 中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  下降量并未与其转化为的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的增加量一致,而是  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的增加量比计算结果(图 3(b)中的 α 线)偏低,说明系统中存在反硝化,即发生了好氧反硝化,部分  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  转化为  $\text{N}_2$ <sup>[15]</sup>.但由于碳源不足,在一定程度上抑制了反硝化,综合结果仍维持  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度呈升高的态势.

组 D 中的活性污泥浓度与组 C 一样,故  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度与组 C 的变化相似, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度呈快速下

降,  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度呈显著上升。同时,组 D 种养的凤眼莲可直接吸收  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N,故  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 及 TN 浓度均低于组 C。此外,因凤眼莲根系附着的活性污泥与曝气的气泡不易接触而更易存在缺氧的微环境<sup>[17]</sup>,缺氧反硝化强于组 C,使得 TN 的去除效果相对于组 C 有较明显提升。

### 3 结语

单独凤眼莲对污水中的氮磷去除效能较微生物低,但构建凤眼莲融合活性污泥好氧净化系统可同时发挥植物吸收和生物降解的共同作用,显著提高 N、P、COD 等污染物的去除效果,为污水植物净化系统的工程应用提供有益的参考。

#### [参考文献] (References)

- [1] SUN L P, YANG L, HUI J. Nitrogen removal from polluted river by enhanced floating bed grown canna[J]. Ecological engineering, 2009, 35(1): 135-140.
- [2] 蒋伟军, 颜幼平, 李萍. 水葫芦资源化利用综述[J]. 水资源保护, 2010, 26(6): 79-83.  
JIANG W J, YAN Y P, LI P. Progress in resources utilization of *Eichhornia crassipes* [J]. Water resources protection, 2010, 26(6): 79-83. (in Chinese)
- [3] 刘国锋, 张志勇, 严少华, 等. 大水面放养水葫芦对太湖竺山湖水环境净化效果的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1299-1305.  
LIU G F, ZHANG Z Y, YAN S H, et al. Purification effects of large-area planting water hyacinth on water environment of Zhushan Bay, Lake Taihu [J]. Environmental science, 2011, 32(5): 1299-1305. (in Chinese)
- [4] 王智, 张志勇, 韩亚平, 等. 滇池湖湾大水域种养水葫芦对水质的影响分析[J]. 环境工程学报, 2012, 6(11): 3827-3832.  
WANG Z, ZHANG Z Y, HAN Y P, et al. Effects of large-area planting water hyacinth (*eichhornia crassipes*) on water quality in the bay of Lake Dianchi [J]. Chinese journal of environmental engineering, 2012, 6(11): 3827-3832. (in Chinese)
- [5] WANG Z, ZHANG Z, ZHANG Y, et al. Nijjintrogen removal from Lake Caohai, a typical ultra-eutrophic lake in China with large scale confined growth of *Eichhornia crassipes* [J]. Chemosphere, 2013, 92(2): 177-183.
- [6] VAILLANT N, MONNET F, SALLANON H, et al. Treatment of domestic wastewater by an hydroponic NFT system [J]. Chemosphere, 2003, 50(1): 121-129.
- [7] SOOKNAH R D, WILKIE A C. Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater [J]. Ecological engineering, 2004, 22(1): 27-42.
- [8] 刘鸣达, 赵玉婷, 何娜, 等. 凤眼莲去除垃圾渗滤液中的 COD、 $\text{NH}_3$ -N 和 TP [J]. 环境工程学报, 2012, 6(6): 1875-1879.  
LIU M D, ZHAO Y T, HE N, et al. Removal of COD,  $\text{NH}_3$ -N and TP in landfill leachate by *Eichhornia crassipes* [J]. Chinese journal of environmental engineering, 2012, 6(6): 1875-1879. (in Chinese)
- [9] 马涛, 易能, 张振华, 等. 凤眼莲根系分泌氧和有机碳规律及其对水体氮转化影响的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10): 2003-2013.  
MA T, YI N, ZHANG Z H, et al. Oxygen and organic carbon releases from roots of *Eichhornia crassipes* and their influence on transformation of nitrogen in water [J]. Journal of agro-environment science, 2014, 33(10): 2003-2013. (in Chinese)
- [10] 袁蓉, 刘建武, 成旦红, 等. 凤眼莲对多环芳烃(萘)有机废水的净化 [J]. 上海大学学报(自然科学版), 2004, 10(3): 272-276.  
YUAN R, LIU J W, CHENG D H, et al. Removal of naphthalene by *Eichhornia crassipes* solms and study on the mechanism [J]. Journal of Shanghai university (natural science edition), 2004, 10(3): 272-276. (in Chinese)
- [11] GAO Y, YI N, WANG Y, et al. Effect of *Eichhornia crassipes*, on production of  $\text{N}_2$ , by denitrification in eutrophic water [J]. Ecological engineering, 2014, 68: 14-24.
- [12] 张芳, 易能, 邸攀攀, 等. 不同水生植物的除氮效率及对生物脱氮过程的调节作用 [J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(2): 174-180.  
ZHANG F, YI N, DI P P, et al. Nitrogen removal efficiency and control of bio-denitrification process of aquatic plants [J]. Journal of ecology and rural environment, 2017, 33(2): 174-180. (in Chinese)

- [13] 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]. 4 版. 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 methods[M]. 4th ed. Beijing:China Environmental Science Press,2002.(in Chinese)
- [14] 张强. 低浓度底物好氧降解趋势及 SMP 产出[D]. 北京:清华大学,2002.  
ZHANG Q. Aerobic degradation trend of low concentration substrates and SMP output[D]. Beijing:Tsinghua University, 2002.(in Chinese)
- [15] 王弘宇,马放,苏俊峰,等. 好氧反硝化菌株的鉴定及其反硝化特性研究[J]. 环境科学,2007,28(7):1548-1552.  
WANG H Y,MA F,SU J F,et al. Identification and characterization of a bacterial strain C3 capable of aerobic denitrification[J]. Environmental science,2007,28(7):1548-1552.(in Chinese)
- [16] 金春华,陆开宏,胡智勇,等. 粉绿狐尾藻和凤眼莲对不同形态氮吸收动力学研究[J]. 水生生物学报,2011,35(1):75-79.  
JIN C H,LU K H,HU Z Y,et al. Kinetics of ammonium and nitrate uptake by *Myriophyllum aquaticum* and *Eichhornia Crassipes*[J]. Acta hydrobiologica sinica,2011,35(1):75-79.(in Chinese)
- [17] 张迎颖,张志勇,刘海琴,等. 滇池凤眼莲种养水域水体理化指标 24 小时变化规律[J]. 环境工程学报,2015,9(1):137-144.  
ZHANG Y Y,ZHANG Z Y,LIU H Q,et al. 24 hour change rule of physical and chemical indexes in water area of Lake Dianchi with water hyacinth(*Eichhornia crassipes*) cultivated[J]. Chinese journal of environmental engineering,2015,9(1):137-144.(in Chinese).

[责任编辑:严海琳]

(上接第 67 页)

- [18] 戴璐平,刘海英,郑宽磊. 结合局部二元图特征的运动目标阴影抑制方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016,44(10):119-122.  
DAI L P,LIU H Y,ZHENG K L. Shadow suppression method for moving object based on the characteristics of binary pattern[J]. Journal of Huazhong university of science and technology(nature science edition),2016,44(10):119-122.(in Chinese)
- [19] XU M,ZHU J,LÜ P,et al. Learning-based shadow recognition and removal from monochromatic natural images[J]. IEEE transactions on image processing,2017,26(12):5811-5824.
- [20] 袁博,阮秋琦,安高云. 改进的自适应灰度视频序列阴影检测方法[J]. 信号处理,2014(11):1370-1374.  
YUAN B,RUAN Q Q,AN G Y. Improved adaptive shadow detection approach in grayscale video sequences[J]. Journal of signal processing,2014(11):1370-1374.(in Chinese)
- [21] 韩延祥,张志胜,郝飞,等. 灰度序列图像中基于纹理特征的移动阴影检测[J]. 光学精密工程,2013,21(11):2931-2942.  
HAN Y X,ZHANG Z S,HAO F,et al. Shadow detection based on texture features in gray sequence images[J]. Optics and precision engineering,2013,21(11):2931-2942.(in Chinese)
- [22] 邢藏菊,温兰兰,何苏勤. TLD 视频目标跟踪器快速匹配的研究[J]. 小型微型计算机系统,2015,36(5):1113-1116.  
XING C J,WEN L L,HE S Q. Research on fast matching based TLD video target tracking[J]. Journal of Chinese computer systems,2015,36(5):1113-1116.(in Chinese)
- [23] 武明虎,宋冉冉,刘敏. 结合 HSV 与纹理特征的视频阴影消除算法[J]. 中国图象图形学报,2017,22(10):1373-1380.  
WU M H,SONG R R,LIU M. Video shadow elimination algorithm by combining HSV with texture features[J]. Journal of image and graphics,2017,22(10):1373-1380.(in Chinese).

[责任编辑:严海琳]