

不同季节浮床美人蕉对水体氮素等污染物的去除*

孙连鹏¹, 刘 阳², 冯 晨¹, 王卓超¹, 金 辉¹

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275;
2. 广东省惠州市环境科学研究所, 广东 惠州 516001)

摘 要: 采用浮床无土栽培的方法, 以人工模拟水槽为实验场所, 在水槽内的富营养化水体表面种植美人蕉, 通过植物的吸收和吸附作用, 以及微生物的协同作用, 去除水体中的氮素。实验结果表明, 春季浮床美人蕉对水中氮素的去除效果较好, 经过五天的处理, TN 去除率约为 58.4%; NH_4^+-N 去除效果显著, 2 天内去除率达 100%。与春季相比, 秋季浮床美人蕉对氮素的去除效果有所下降, 但去除规律大致相同, 经过五天的处理, TN 去除率为 50.4%; 对 NH_4^+-N 的去除效果仍很明显, 4 天内去除率可达 100%。研究结果为浮床植物系统的全年运行提供了科学依据。

关键词: 生态浮床; 脱氮; 富营养化; 美人蕉

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 02-0127-05

生态浮床技术是一门针对富营养化水质, 利用生态工学原理, 降解水中 COD, 降低氮、磷含量的水环境保护技术, 该项技术具有较好的社会效益和环境效益, 具有非常广阔的应用前景。目前该技术已经在闭锁性水域得到了较多的应用^[1-5], 并取得了一定的效果, 但多数研究仅局限于在植物适宜生长的季节条件下浮床对氮、磷等营养盐的净化作用, 而对其在不同季节条件下处理效果以及其内在规律的研究则相对较少。

植物的吸收作用和微生物的分解作用是生态浮床去除水中氮素的主要途径, 而植物和微生物的生长易受环境温度的影响, 因此在不同季节条件下浮床对氮素的净化效率会有一定的差异。本研究以有机玻璃水槽为实验场所, 富营养化的珠江水为净化对象, 分春秋两季进行浮床美人蕉去除水体中氮素

实验。旨在明确浮床美人蕉对富营养化水体中氮素的去除规律及其在不同季节条件下的处理效率, 为浮床系统的全年运行提供科学依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 浮床美人蕉: 选用美人蕉作为浮床植物, 许多陆生植物比水生植物具有更好的氮磷去除能力^[1]。于中山大学园林中心挑选 60 株红花美人蕉, 高度约为 10~20 cm。将处理好的美人蕉分成八列固定在塑料泡沫板上, 列距 10 cm, 每列视植株大小固定 6~8 株植物。

1.1.2 实验用水: 从珠江中大码头段采集。实验用水水质数据如表 1 所示。

表 1 实验用水水质数据

Tab. 1 Experimental water quality

水质项目	TN	NH_4^+-N	NO_3^--N	NO_2^--N	COD_{Cr}	DO	pH
	$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$						
2006 年春季	9.62 ~ 10.1	7.02 ~ 8.41	/	/	44.0 ~ 48.8	4.69 ~ 5.16	6.5 ~ 7.0
2006 年秋季	8.61 ~ 8.86	2.38 ~ 2.96	2.46 ~ 2.79	0.28 ~ 0.76	36.2 ~ 41.6	5.12 ~ 5.61	6.5 ~ 7.0

1.1.3 仪器: 紫外/可见分光光度计, UV 751GD 型, 上海精密科学仪器有限公司; 高压灭菌锅,

CL-32L 型, 日本 Tokyo ALP 公司; 水槽, 有机玻璃制, 体积为 1.2 m × 1.2 m × 0.8 m。

* 收稿日期: 2007-09-06

基金项目: 广东省环境污染控制与修复技术重点实验开放研究基金项目 (2006K001)

作者简介: 孙连鹏 (1973 年生), 男, 副教授, 博士; E-mail: eesslp@mail.sysu.edu.cn

1.2 方法

1.2.1 理化检验法^[6]: 氨氮 (NH_4^+-N), 纳氏试剂分光光度法; 硝态氮 (NO_3^--N), 紫外分光光度法; 亚硝态氮 (NO_2^--N), N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; 总氮 (TN), 过硫酸钾氧化-紫外分光光度法。化学需氧量 (COD_{Cr}), 重铬酸钾法。

1.2.2 模拟实验: 模拟实验在体积为 $1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 的有机玻璃水槽中进行, 实验时注入珠江水约 480 L, 同时在另一相同大小的水槽中注入相同体积的水样, 作为空白对照。模拟实验分为两部分: 春季浮床美人蕉去除水体中氮素实验, 秋季浮床美人蕉去除水体中氮素实验。

经过适应性培养, 植物生长状态稳定后正式开始实验。每天分别于 9:00、15:00 和 21:00, 从浮床美人蕉水槽和空白对照水槽中取水样。每次均在水槽的上部、中部和下部固定位置取样并混合均匀, 以消除取样误差, 取样体积为 100 mL。检测浮床系统对水样的净化效果。

2 结果与讨论

2.1 春季浮床美人蕉去除水体中氮素实验

春季浮床美人蕉对珠江水的净化效果如表 2 和图 1 所示。

表 2 春季浮床美人蕉对珠江水的净化效果

Tab. 2 Removal effect of canna floating bed on the Pearl River water in spring

测量指标 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	浮床美人蕉水槽			空白对照水槽		
	0 d	5 d	去除效率/%	0 d	5 d	去除效率/%
TN	10.1	4.2	58.4	10.1	7.9	21.8
NH_4^+-N	8.41	0.00	100	8.41	5.70	32.2
COD	45.1	26.9	40.4	45.2	30.7	32.1

经过 5 d 的处理, 浮床美人蕉水槽中 TN 由 10.1 下降至 4.2 mg/L, 去除率为 58.4%; 浮床美人蕉对 NH_4^+-N 的去除效果最为明显, 2 d 内去除率达 100%, 而空白对照水槽内的氨氮仅从 8.41 降低至 5.70 mg/L, 这说明浮床美人蕉系统对氨氮的去除起了很大作用; 与对照相比, 系统对 COD 的去除效果一般, 去除率为 40.4%。

2.1.1 春季浮床美人蕉对水中氮素的去除效果

从图 1 中可以看出, 自处理之日开始, 水中 TN 和 NH_4^+-N 呈规律性降低: NH_4^+-N 含量在前 2 天内几乎保持同一速度下降, 最后稳定在零浓度; TN 含量减少速度则是初期较快, 之后减慢。

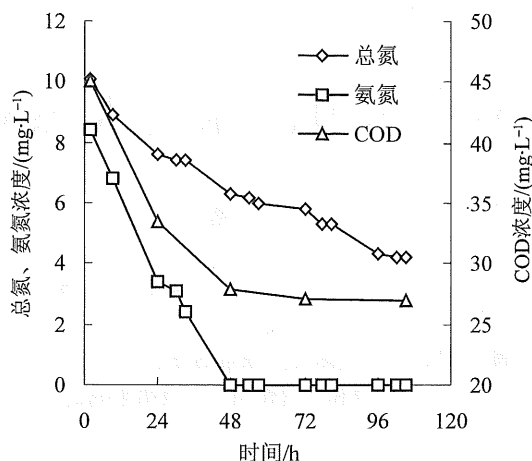


图 1 春季浮床美人蕉对珠江水的净化效果

Fig. 1 Removal effect of canna floating bed on the Pearl River water in spring

处理期间水中各种氮素含量呈现上述动态的变化规律, 主要原因如下:

① TN: 由于本实验是在静态条件下进行, 故水中的某些物质容易发生沉降作用, 实验水体中部分 N (主要是有机氮) 的沉降作用而使 TN 含量在处理初期去除速度较快; 随着时间的推移, 沉降作用已不占优势, 此时在微生物的作用下, 沉淀物中原本以颗粒态存在的有机氮不断以溶解态的形式返还到水体中, 而使 TN 含量动态曲线趋于平缓; 实验后期, 由于水体中溶解氧含量和底物浓度 (NH_4^+-N 浓度) 的降低 (实验前两天, DO 值从最初的 4.96 mg/L 迅速降低至 1.19 mg/L, 随后的几天内稳定在 0.7~0.9 mg/L 之间), 不能满足根际好氧生物的需求, 造成部分微生物死亡, 生物膜脱落, 死亡微生物体内的有机氮又返还到水体中, 使得 TN 下降速度更加缓慢, 在呼吸作用占主导地位的夜晚上甚至有回升的趋势。Warwick 等人用豆瓣菜进行研究中也发现了相似的规律^[7]。

② NH_4^+-N : 去除 NH_4^+-N 的主要途径是硝化和反硝化作用的连续反应, 而不是靠植物的吸收^[8-11]。本系统对 NH_4^+-N 的去除率可达 100%, 这说明系统中含有相当数量活跃的微生物群体。处理初期, 水中溶解氧含量较高, 为硝化微生物提供了良好的好氧环境, 因此硝化反应进行的较为顺利, 硝化作用远远大于氨化作用, NH_4^+-N 含量下降较快; 随着溶解氧的逐渐减少, 以及 NH_4^+-N 浓度的下降, 硝化作用减弱, NH_4^+-N 曲线趋于平缓, 美人蕉作为一种陆生植物具有非常发达的根部, 在实验中很清晰地可以看出美人蕉的根部生长快速, 非常发达, 某些植株的根部甚至接近模型底部, 因

此对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率比许多研究者的效果要好很多^[12-13]。

2.1.2 春季浮床美人蕉对其他水质指标的影响

(1) 春季浮床美人蕉系统对水体透明度的影响

浮床美人蕉系统能快速提高水体透明度。对水槽中的水质观测表明, 原水样发黄、混浊, 植物植入后 2 d 开始变清, 4~5 d 就能使供试水体清澈透明, 而对照水槽内的变化不及浮床美人蕉水槽明显。这说明经过植物净化, 水体水质状况得到了明显的改善。

(2) 春季浮床美人蕉系统对水中 COD 的去除效果及降解规律

经过 5 d 实验, 水体中 COD 的浓度从 45.1 降至 26.9 mg/L, 去除率约为 40.4%, 而空白对照水槽中 COD 降至 30.7 mg/L, 去除率为 32.1%。由实验结果可以看出, 浮床美人蕉系统对水体中的 COD 有一定的去除效果, 但大部分 COD 是靠颗粒物质的自然沉降和自然降解作用去除的。

从图 1 中可以看出, COD 在实验开始的第 1 天里降解速度很快, 第 2 天次之, 第 2 天以后, 曲线趋于平缓, 降解速度明显减慢。产生这种降解规律的原因如下: ① 随着时间的推移, 沉降作用不再占优势, 因此降解速度减慢; ② 随着水体中底物浓度 (有机物浓度) 的下降, 微生物对底物的降解速度减慢, 因此 COD 的降解速率也随之下落。

2.2 秋季浮床美人蕉去除水体中氮素实验

在春季浮床美人蕉实验中, 已经初步测定了浮床美人蕉对富营养化水体的适应性和净化能力。春季温暖湿润、雨量充沛、阳光充足, 是植物生长的最好季节, 因此净化效果比较理想。为了解浮床美人蕉系统在非植物最佳生长季节的净化能力, 为系统的全年运行提供科学依据和技术支持, 进行了秋季浮床美人蕉去除水体中氮素实验。本部分实验增加了对 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^+\text{-N}$ 的监测, 以便更好地分析不同形态氮素的去除和转化情况。

秋季浮床美人蕉对珠江水中 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^+\text{-N}$ 和 COD 的净化效果如表 3 和图 4 所示。

经过 5 d 天的处理, 浮床美人蕉水槽中 TN 由 8.71 下降至 4.32 mg/L, 去除率为 50.4%, 比春季下降了 8%; 浮床美人蕉对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果较为明显, 经过 4 d 的处理后, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率即可达到 100%; $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^+\text{-N}$ 的含量变化幅度不大, 前者从 2.46 降至 1.91 mg/L, $\text{NO}_2^+\text{-N}$ 从 0.76 降至 0.72 mg/L, 而空白对照水槽内的含量均有所

表 3 秋季浮床美人蕉对珠江水的净化效果

Tab. 3 Removal effect of canna floating bed on the Pearl River water in autumn

测量指标 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	浮床美人蕉水槽			空白对照水槽		
	0 d	5 d	去除效率/%	0 d	5 d	去除效率/%
TN	8.71	4.32	50.4	8.71	6.56	24.7
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	2.75	0.00	100	2.80	1.35	51.8
$\text{NO}_3^+\text{-N}$	2.46	1.91	22.4	2.48	3.10	-25.0
$\text{NO}_2^+\text{-N}$	0.76	0.72	5.3	0.72	0.91	-26.4
COD	38.1	22.9	39.9	36.2	26.2	27.6

升高, 说明浮床系统对 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^+\text{-N}$ 的去除起到了一定的作用; 系统对 COD 的去除效果一般, 去除率为 40.0%。

2.2.1 秋季浮床美人蕉对水中氮素的去除效果

由于实验在秋季进行, 温度较低, 植物生长状态和微生物活性都不如春季, 浮床系统对水体的净化效果有一定的下降, 但各种形态氮素的去除规律大致相同。从图 4 中可以看出, 自处理之日开始, 水体中 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^+\text{-N}$ 的含量呈规律性变化: 其中, TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在处理初期的 2 天内下降速度较快, 之后逐渐减慢; $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^+\text{-N}$ 在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度降为 0 之前的四天内呈缓慢上升的趋势, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 完全去除后, 二者出现缓慢下降的趋势, 下降趋势在 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 曲线上表现的更为明显。

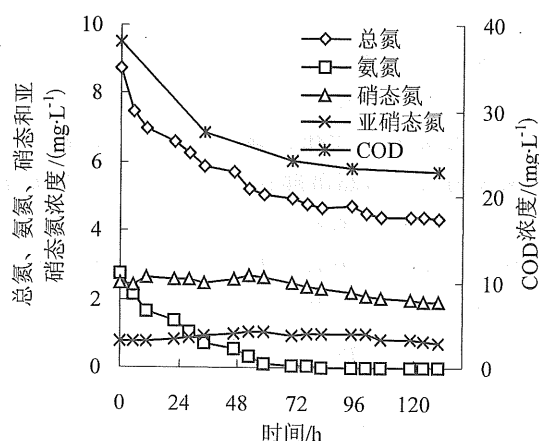


图 2 秋季浮床美人蕉对珠江水的净化效果

Fig. 2 Removal effect of canna floating bed on the Pearl River water in autumn

秋季浮床美人蕉对氮素去除效果的下降可能由以下原因形成: ① 温度的降低。实验期间, 水体气温和水温与春季实验时相比明显降低, 下降了 3~4℃, 因此植物作用和微生物作用都有所减弱, 导致了氮素去除率的降低。② 植物的衰弱。秋季是

植物的衰退期,无论是陆地上的植物还是水中的植物都开始衰退。美人蕉植株和春季相比不够强壮,少数叶片枯黄,可能导致植物对氮素吸收速率的下降。③水体中不同形态氮素比例的变化。2006年夏季,相关部门对珠江水进行了严格的治理,使珠江水水质明显好转。秋季实验所用水质同春季实验有所不同, NH_4^+ -N含量下降, NO_3^- -N和 NO_2^- -N含量升高,氮素构成发生了显著变化。秋季实验中, NH_4^+ -N和 NO_3^- -N浓度分别为2.75、2.46mg/L,由于底物浓度(NH_4^+ -N和 NO_3^- -N)不高,造成了底物向植物根系或微生物附近扩散的速度减慢,因而导致水中氮去除率的下降。

2.2.2 秋季浮床美人蕉对其他水质指标的影响

(1) 秋季浮床美人蕉系统对水体透明度的影响

与春季相比,浮床美人蕉对水体的净化速度有所减慢,但仍能有效地提高水体透明度,改善水体观感效果。对水槽中的水质观测表明,原水样发黄、混浊,植物植入后2-3d开始变清,5d左右就能使供试水体清澈透明。

(2) 秋季浮床美人蕉系统对水中COD的去除效果及降解规律

与春季实验相同,秋季实验中COD的下降也呈现了先快后慢,最后趋于平缓的趋势。经过五天的实验,水体中的COD从38.1降至22.9mg/L,去除率为39.9%;而空白对照水槽COD从36.2降至26.2mg/L,去除率为27.6%。

比较图4和图1中COD动态曲线可知,春秋两季,浮床美人蕉对水体中COD的去除效果变化不大。这主要是由于在浮床系统中,大部分COD是靠颗粒物质的自然沉降作用去除的,而温度等因素的变化对沉降作用的影响很小,因此COD在两个季节的去除效果相似。Warwick等人在利用豆瓣菜进行河流水的处理中也得出了同样的结论^[7]。

实验结果表明秋季浮床美人蕉对水中氮素的去除效果不如春季明显,但总体规律相同;秋季浮床美人蕉对水中COD和透明度等其它指标的效果与春季明显浮床美人蕉系统基本相同。浮床美人蕉系统对水体中氨氮的去除效果非常好,总氮的效果稍差。为提高系统在非植物最佳生长季节(秋冬季)下的处理能力以及对总氮的去除率,可考虑采取其他措施配合,如:加入人工曝气和固定化微生物等,相信会有更好的处理效果。

参考文献:

- [1] ABE K, OZAKI Y. Comparison of useful terrestrial and aquatic plant species for removal of nitrogen and phosphorus from domestic waste water [J]. Solid Science Plant Nutrition, 1998, 44(4): 599-607.
- [2] 屠清瑛,章永泰,杨贤智. 北京什刹海生态修复实验工程[J]. 湖泊科学, 2004, 16(1): 61-67.
TU Qing-ying, ZHANG Yong-tai, YANG Xian-zhi. Approaches to the Ecological Recovery Engineering in Lake Shishahai, Beijing [J]. Journal of Lake Science, 2004, 16(1): 61-67.
- [3] 陈荷生,江溢,宋祥甫,等. 太湖湖内综合治理技术[J]. 水利水电技术, 2002, 33(12): 46-49.
CHEN He-sheng, JIANG Yi, SONG Xiang-pu. The Technique to Comprehensively Harness Water Pollution in Taihu Lake [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002, 33(12): 46-49.
- [4] LI M, WU Y J, YU Z L, et al. Nitrogen removal from eutrophic water by floating-bed-grown water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.) with ion implantation [J]. Water Research, 2007, 41: 3152-3158.
- [5] FOMI C, CHEN J. Evaluation of the fern azolla for growth, nitrogen and phosphorus removal from wastewater [J]. Water Research, 2001, 35(6): 1592-1598.
- [6] 国家环保局编委会主编. 水和废水监测分析方法[M]. 第三版. 北京: 中国环境科学出版社, 1989: 246-356.
- [7] VINCENT W F, DOWNES M T. Variation in nutrient removal from a stream by watercress (*Nasturtium officinale* R. Br.) [J]. Aquatic Botany, 1980, 9: 221-235.
- [8] GERSBERG R M, ELKINS B V, GOLDMAN C R. Nitrogen removal in artificial wetlands [J]. Water Research, 1983, 17(9): 1009-1014.
- [9] HABERL R. Constructed wetlands: A chance to solve wastewater problems in developing countries [J]. Water Science and Technology, 1998, 40(3): 11-17.
- [10] LUEDERITZ V, ECKERT E, LANGE-WEBER M. Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands [J]. Ecological Engineering, 2001, 18(2): 157-171.
- [11] PETERSON S B, TEA J M. The role of plants in ecologically engineered wastewater treatment systems [J]. Ecological Engineering, 1996, 6(1): 137-148.
- [12] ABISSY M, MANDI L. Comparative study of wastewater purification efficiencies of two emergent helophytes: *Typha latifolia* and *Juncus subulatus* under arid climate [J]. Water Science and Technology, 1999, 39(1): 123-126.
- [13] KARNCHANAWONG S, SANJITT J. Comparative study of domestic wastewater treatment efficiencies between facultative pond and water spinach pond [J]. Water Science and Technology, 1995, 32(30): 263-270.

(下转第139页)

Relationship between the Temporal Variations of the River Discharges in the Xijiang River and Beijiang River Basins and the Moisture Sinks

QIN Xiao-hao^{1,2,3}, JIAN Mao-qiu¹, QIAO Yun-ting¹, CHEN Yan⁴

(1. Center for Monsoon and Environment Research//Department of Atmospheric Sciences,
Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Guangzhou General Headquarters of Flood Control, Typhoon and Droughts Defending, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The relationship between the river discharge in the Xijiang River and Beijiang River basins and the atmospheric moisture sinks are analyzed for four seasons. The results show that the interdecadal and interannual variations of two aforementioned variables are well coupled in the Xijiang River basin in summer, but not well coupled in other seasons. In the Beijiang River basin, the river discharge and the moisture sink show a very good correlation on the interdecadal and interannual scales for summer and autumn, but not for some periods in spring and winter.

Key words: Xijiang River; Beijiang River; river discharge; moisture sinks; temporal variation

(上接第 130 页)

Removal of Nitrogen from Water Bodies by Canna Floating Bed in Different Seasons

SUN Lian-peng¹, LIU Yang², FENG Chen¹, WANG Zhuo-chao¹, JIN Hui¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

2. Huizhou Environmental Science Institute, Guangdong Guangzhou 516001, China)

Abstract: Canna was planted in the eutrophication water with the technology of soilless culture in a polymethyl flume, and nitrogen was removed by the effect of plants absorbing and sorption, cooperated with bacteria. The experimental results show that nitrogen can be removed more by the canna floating bed in spring than that in autumn. The removal rate of total nitrogen was about 58.4% within five days, and the removal rate of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was 100% within two days in spring. The removal rate of total nitrogen was about 50.4% within five days, and the removal rate of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was 100% within four days in autumn. The removal rule is the same for different seasons. The experimental result is important to the floating bed operating in the whole year.

Key words: ecological floating bed; removal of nitrogen; eutrophication; canna