

组合生态浮床的水体净化效果与作用机理探讨

李 威^{1,2}, 陈晓国¹, 方 涛²

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430072; 2. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

摘要: 通过在美人蕉 (*Canna glauca*) 底部悬挂生物陶粒基质构建组合生态浮床, 与仅有生物陶粒的基质组和空白组比较了对室内配制富营养化污水的净化效果, 分析了各组水体中的微生物数量和活性, 研究组合浮床中植物、基质和微生物对水体净化的贡献率及其相互间协同作用。结果表明, 经过 48 d 的运行, 组合浮床对总氮、总磷和氨氮的去除率依次为 64.03%、95.82% 和 96.43%, 美人蕉对氮、磷的去除贡献率分别为 36.03%、37.96%。组合浮床组水中的细菌总量、基质上附着的生物膜脱氢酶活性和耗氧速率均高于基质组, 说明植物吸收不是组合浮床去除氮磷的主要机制, 但植物对微生物的数量和活性有积极作用; 组合浮床对水中污染物的去除存在着植物、基质及微生物之间的协同作用。与基质组和空白组相比, 组合浮床可以有效提高对富营养化水体的净化效果。

关键词: 组合浮床; 净化效果; 作用机理; 美人蕉

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2012)06-0076-06

人工浮床运用无土栽培技术, 以高分子材料作为载体, 把高等水生植物或改良的陆生植物种植到富营养化水域上, 通过植物的吸收、吸附和根际微生物作用, 消减水体中的氮、磷及有害物质, 从而实现富营养化水体的修复(白少元和王明玉, 2010)。人工浮床凭借其移动性好、使用寿命长、运行成本低、景观效果好等优势, 在多个国家和地区被成功用于富营养化地表水的污染控制和修复。我国在人工浮床技术理论研究和应用方面发展迅速, 已在地表水体中开展试验研究和工程应用, 并取得一定成效(李英杰等, 2008; 高阳俊等, 2009)。传统人工浮床的净化主体为浮床植物, 其净化效果易受植物生长期和生物量的限制, 与之相比, 由植物、填料和微生物构成的组合型人工浮床, 由于结合了植物的吸收、基质的吸附作用以及微生物的转化过程, 其净化效果更好(范洁群等, 2011)。戴栋超等(2006)研究显示, 生态组合浮床对氨氮、总氮、总磷及 COD 的去除率比传统浮床依次高出 1.19%、9.99%、17.38% 和 2.97%。目前, 关于组合型人工浮床的研究与应用已有一些报导(李先宁等, 2007; 虞中杰等, 2011), 但研究内容主要集中在净化效果方面, 关于组合型人工浮床的净化机理, 特别是植物、基质和微生物三

者间的协同作用机理尚不清楚。本文通过在室内模拟人工浮床的运行, 并与对照组的水质净化效果和微生物活性进行对比, 旨在揭示浮床植物、基质和微生物各自对水体净化的贡献及其相互间协同作用, 为组合型人工浮床的设计及实际应用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置

组合型浮床试验装置由浮床植物、浮板和基质共 3 部分组成(图 1), 选用美人蕉 (*Canna glauca*) 为浮床植物, 用底部开孔的塑料花盆将其固定并安放在泡沫浮板上, 利用浮板的浮力使其悬浮在水中。根部下放置用塑料筐盛放的基质, 基质上表面离花盆底部 3 ~ 5 cm。各试验组在 46 cm × 35 cm × 28 cm(内径)的塑料桶中进行, 实际水深为 20 cm。

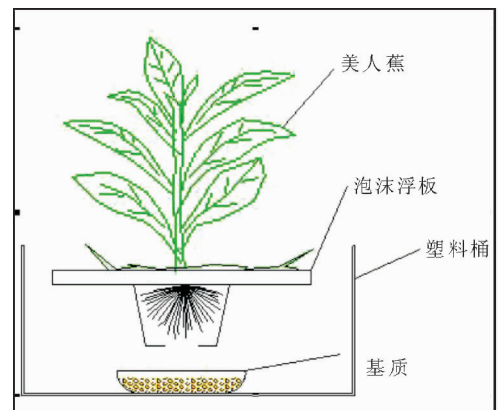


图 1 组合型浮床单元示意

Fig. 1 Schematic diagram of the assembled floating bed

收稿日期: 2012-11-05

基金项目: 广东新高地建设专项工程(Y02601-1-401); 广东省中国科学院全面战略合作项目(2009B091300029)。

通讯作者: 方涛。E-mail: fangt@ihb.ac.cn

作者简介: 李威, 1987 年生, 男, 硕士研究生, 主要从事水污染控制化学及生态工程相关研究。E-mail: liweivaan@gmail.com

1.2 试验材料

供试的原水为实验室内配制的富营养化污水,其主要水质指标见表1。美人蕉取自巢湖双桥河人工湿地;基质选取挂膜效率高的生物陶粒,购自江西省萍乡市某陶瓷有限公司,粒径为4~6 mm,孔隙率为44.58%,含水率为15.34%。

表1 人工合成污水的水质指标

Tab.1 Water quality of synthetic water					mg/L
水质指标	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	
范围	17.33 ± 0.29	2.35 ± 0.24	15.02 ± 0.57	2.18 ± 0.20	

1.3 试验方案

试验系统由组合浮床、基质对照和空白对照组构成:组合浮床组结构如图1所示,由植物单元和生物陶粒基质单元组合构成;基质对照组仅设置生物陶粒基质单元而不添加植物单元;空白对照组为仅放置配制的污水。每组设置2个平行。试验开始前,先将植株大小和重量相近的美人蕉分别放入配置的污水中进行1个月的适应性培养。生物陶粒投放前先经过灭菌处理,烘干后精确称量400 g放置于浮床底部的塑料篓中。于2011年10月20日开始试验,期间各组水温较为稳定,在24~27℃之间。每隔8 d取1次水样做水质分析,取完水样后向各组添加蒸馏水至30 L以补充蒸发的水量。

1.4 监测项目

每隔8 d在水面以下10 cm处取200 mL水样,分别测定其总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)和硝氮(NO₃⁻-N)含量。在组合浮床运行前对美人蕉进行称重,试验完成后收割美人蕉测定其茎叶和根的

湿重、干重及体内的氮磷含量。在试验完成后测定各组水中的细菌总量,并将各组生物陶粒上附着的生物膜洗脱后过滤,测定生物膜的脱氢酶活性和耗氧速率(oxygen uptake rate)。

1.5 测试方法

水质指标TN、TP、NH₄⁺-N的测定采用《水和废水监测方法》(魏复盛,2002)。植物样品采用浓硫酸-过氧化氢消解,植物体内氮、磷的测定分别采用奈氏比色法和钼锑钨分光光度法。水中的细菌总量采用平板涂布法,培养基选用牛肉膏蛋白胨培养基,将不同组的水稀释1 000倍,涂布并放入生化培养箱中30℃恒温培养7 d后测量菌落数。生物膜活性的测定采用TTC-脱氢酶活性测定法(李今等,2005),生物膜的耗氧速率按照Surmacz-Gorska等(1996)的方法测定。

2 结果与讨论

2.1 水质净化效果对比

由图2可见,组合浮床对TN、TP和NH₄⁺-N的净化效果较为明显,经过48 d的运行,TN、TP和NH₄⁺-N的净化效率依次达到了64.03%、95.82%和96.43%,仅有基质的对照组对TN、TP和NH₄⁺-N的净化效率依次为28.86%、45.91%和68.18%,空白组对3项指标的净化效率依次为8.35%、5.31%和53.57%。组合浮床、基质对照和空白对照3组对水中的营养物质去除效率呈现出明显由高到低的趋势。去除效率的差异可能是因为空白组中营养物质的去除主要缘于含氮、磷颗粒物的自然沉降以及水

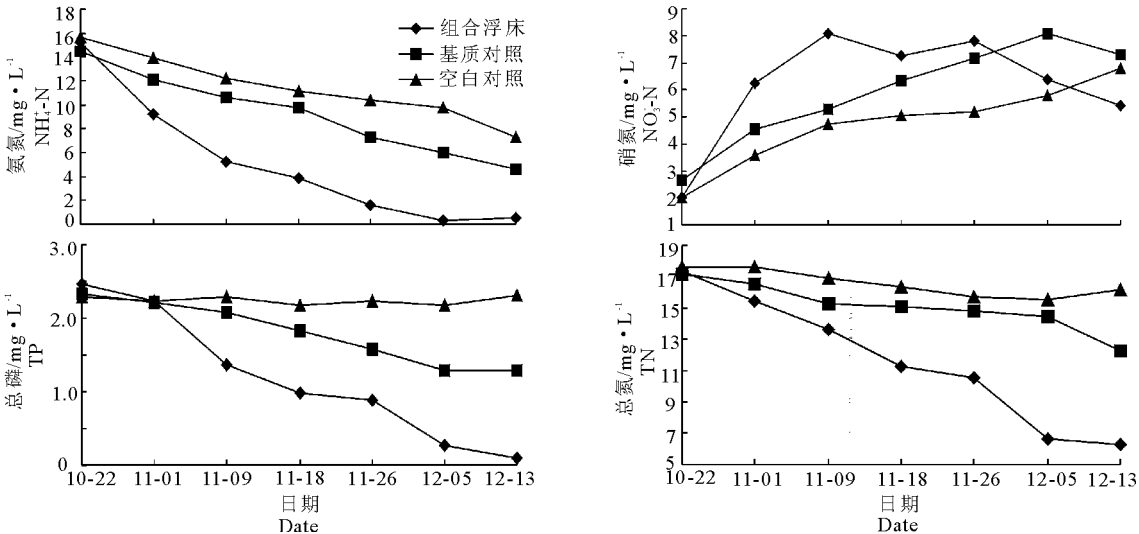


图2 各试验组污染物浓度的动态变化

Fig.2 Dynamic changes of pollutant concentrations in different groups

体微生物的作用,基质组则增加了基质吸附的作用。组合浮床组中的营养物质在植物吸收、基质吸附和微生物的共同作用下得到有效去除,使其去除效率高于其它2组。各试验组水体中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度均有不同程度的升高,组合浮床、基质对照和空白对照组的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度分别提高了166.87%、175.64%和238.76%。

组合浮床对TP去除效率高的原因除了基质吸附和植物吸收2种途径外,可能还因为2种作用之间的相互促进。生物陶粒与可溶性磷接触后,以离子交换的方式对可溶性磷发生吸附反应,吸附过程中同时伴随解吸过程(王世和,2007)。经基质吸附的吸附态磷更容易被植物吸收,且在吸附和解吸过程中产生的吸附态磷和可溶性磷可以很快地产生微沉淀态的 $\text{Ca}_2\text{-P}$,而 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是最容易被植物吸收的磷酸盐种类(沈仁芳和蒋柏藩,1992)。因此,在组合浮床中,基质不仅自身对磷有吸附作用,而且促进了植物对磷的吸收作用。

空白组中氨氮的去除率为53.57%,而硝氮的浓度升高了238.8%,主要是因为水中的微生物通过硝化反应将水体中的氨氮转化为了硝氮。基质组在运行48 d后,氨氮浓度低于空白组,而硝氮浓度高于空白组,则可能是因为生物陶粒的吸附与解吸作用和微生物作用协同造成的。吸附在基质表面的氨氮能在硝化菌的作用下向外部迁移,逐步转化为硝氮,形成微生物作用下的解吸附过程(张曦和吴

为中,2003),且生物陶粒为微生物提供了理想的附着空间,使得基质组中的硝化反应水平高于空白组。

组合浮床组对氨氮的去除率为96.43%,硝氮浓度呈先上升、后下降的趋势,且硝氮浓度的上升速率高于2个对照组,说明组合浮床组中的硝化反应进行得最迅速。因为美人蕉的网状根系通过泌氧作用提高了根系周围水的溶氧量,为好氧的硝化细菌提供了较合适的生长环境(余瑞彰等,2010),随着硝氮浓度的升高,植物对硝氮的吸收速率也会随之加快(常会庆等,2008),由此推断随后硝氮浓度的下降可能是因为植物的吸收作用。植物的吸收使得组合浮床组对总氮、氨氮和硝氮的去除率较对照组均在一个较高的水平。

2.2 美人蕉的生物量及氮磷含量

组合浮床中的美人蕉在试验中全部存活且生长状况良好。在48 d时,美人蕉的植株生长高度为 (22 ± 3) cm,根系生长长度为 (17 ± 5) cm,平均分蘖数为15株/穴,且随着不断的生长,根系延伸穿透花盆底部的孔隙,部分附着缠绕在陶粒基质上。美人蕉具体生物量的增加量和体内氮磷含量见表2。可知美人蕉总计从水体中分别吸收了201.05 mg的总氮和28.73 mg的总磷,对氮磷的去除贡献率分别为36.03%和37.96%,与组合浮床对总氮、总磷的去除率为64.03%、95.82%相比,表明植物吸收作用不是污水中氮磷去除的主要机制,这一结论与李海英(2009)和范洁群(2011)等人的研究结论相似。

表2 美人蕉的净生长量及其体内氮磷含量

Tab.2 Biomass of the Canna and the content of N and P in Canna

茎叶净生长量/g		根净生长量/g		茎叶干重/mg · g ⁻¹		根系干重/mg · g ⁻¹		植物总量/mg	
湿重	干重	湿重	干重	氮	磷	氮	磷	氮	磷
110.0	22.3	305.0	49.4	2.68	0.38	2.86	0.41	201.05	28.73

2.3 基质表面生物膜的生物量与活性

微生物是浮床系统中氮分解去除的主要执行者,微生物数量与净化效果呈显著正相关(虞中杰等,2011)。在本次试验中,生物陶粒丰富的内表面为微生物提供了附着场所和相对稳定的内部空间,是微生物理想的附着对象。将组合浮床组和基质组生物陶粒上生物膜的量及其活性进行对比,能对浮床植物和微生物间的协同关系有进一步的认识。如表3所示,组合浮床组中的水中细菌总数及附着在生物陶粒上生物膜的TTC-脱氢酶活性和耗氧速率都高于基质组。2个试验组水中细菌总数的差别可能是因为以下几个原因:美人蕉的根系所形成的网状结构为微生物提供了有利生长的微环境;美人蕉

通过光合作用产生氧气,部分传输至根系使其周围形成好氧微区,有利于好氧微生物的生长繁殖;美人蕉脱落的叶片掉落在水中腐败后为微生物提供了可利用的碳源;浮床浮板遮挡了直射到水中的阳光,避免了水中微生物的生长受阳光的影响。

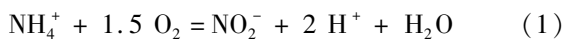
表3 各试验组水中的细菌总数与微生物的脱氢酶活性和耗氧速率

Tab.3 Bacterial counts, activity and OUR of biofilm in each group

测定项目	水中细菌总数/	TTC-脱氢酶活性/	耗氧速率/
	cfu · mL ⁻¹	mg · g ⁻¹ · h ⁻¹	μg · g ⁻¹ · h ⁻¹
组合浮床组	6.2 × 10 ⁵	12.64	14.28
基质组	4.2 × 10 ⁵	10.08	11.45

脱氢酶参与从有机物到分子氧化的电子得失的整个过程,因此脱氢酶活性在很大程度上反应了生物体的活性,而且能反映处理体系中活性微生物量及其对污染物的降解活性,是考察生物膜的重要指标(李今等,2005)。水温、pH、DO 含量和污染负荷会影响脱氢酶的活性(洪梅,2001)。组合浮床组中的 TTC-脱氢酶活性比基质组高,可能是因为组合浮床组中美人蕉的根系分泌物包括碳水化合物、氨基酸和有机酸,为微生物提供了生长所需的能源,从而提高了微生物的脱氢酶活性。脱氢酶活性与生物膜的生物量呈极显著正相关关系(梅琼等,2007),由此推断组合浮床组中的生物膜在数量上和对污染物的降解活性上都高于基质组,可能是因为美人蕉通过化感作用向水环境中释放化学物质,促进了生物膜的生长,其机理还有待于更深入的研究。

在有机物的好氧降解过程中,氧是微生物代谢的最终电子受体,耗氧率直接反映了微生物的代谢速率(Park & Lee,2005)。在硝化反应过程中,硝化需氧量(NOD)(Vymazal,2007)可根据以下反应式推断:



可以看出,氧的消耗量可以直接反应出硝化菌的数量及其硝化活性。在本试验中,组合浮床组内的微生物比基质组的微生物耗氧速率高,说明组合浮床中的微生物通过硝化作用转化了更多的氨氮,从不同试验组的氨氮降解速率中也可以得出相同的结论。氨氮的去除率与水体中的溶解氧呈正相关关系(吴海民等,2010),组合浮床组由于美人蕉的泌氧作用,提高了根系周围水环境的溶解氧,促进了硝化反应的进行,从而使该组微生物的耗氧速率高于其他对照组。

2.4 植物、基质和微生物之间的关系

在组合浮床组中,植物、基质和微生物的作用及其相互间的协同促进作用,使该组对污水的净化效率明显高于其他2个对照组。植物除了对氮磷有吸收作用外,在维持微生物生长和系统稳定性方面具有较大贡献(张荣社等,2005)。植物的根系分泌物可以促进某些氮、磷菌的生长,从而加速其释放与转化(成水平和夏宜珏,1998),通过根系的泌氧作用可以提高水体中的溶氧含量,为硝化菌提供了良好的好氧环境。基质自身对水体中的氮磷有吸附作用,也是微生物理想的附着对象,并通过吸附改变营养元素的形态,使营养元素更容易为植物所吸收。

微生物在污染物的去除起着核心作用(Hoppe et al,1988),包括去除初期的生物物理吸附和去除后期的生物降解,而且在促进植物生长方面也有积极的作用(吴建峰和林先贵,2003)。

3 结论

(1)组合浮床组对污水的净化效率明显高于基质组和空白组,经过48 d的运行,总氮、总磷和氨氮的净化效率分别达到了64.03%、95.82%和96.43%。

(2)组合浮床组中,美人蕉从水体中分别吸收了201.05 mg 氮和28.73 mg 磷,对TN和TP的去除贡献率分别为36.03%和37.96%。植物吸收不是组合浮床对氮磷去除的主要机制,组合浮床对氮磷去除存在着植物、基质和微生物的协同作用。

(3)组合浮床组中的细菌数量、微生物脱氢酶活性和耗氧速率均高于基质对照组,植物对微生物的数量和活性有积极作用。

参考文献

- 白少元,王明玉.2010.复合介质人工浮岛对缓流水体N、P修复研究[J].环境科学与技术,33(7):57-62.
- 常会庆,李娜,徐晓峰.2008.三种水生植物对不同形态氮素吸收动力学研究[J].生态环境,17(2):511-514.
- 成水平,夏宜珏.1998.香蒲、灯心草人工湿地的研究Ⅲ.净化污水的机理[J].湖泊科学,10(2):66-71.
- 戴栋超,黄延林,王震,等.2006.生态组合技术净化景观水体实验研究[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,38(6):786-789.
- 范洁群,邹国燕,宋祥甫,等.2011.不同类型生态浮床对富营养河水脱氮效果及微生物菌群的影响[J].环境科学研究,24(8):850-856.
- 高阳俊,赵振,孙从军.2009.组合生态浮床在滇池入湖河流治理中的应用[J].中国给水排水,25(15):46-48.
- 洪梅.2001.脱氢酶活性检测技术在污水处理厂的应用研究[J].石油化工环境保护,24(4):30-33.
- 李海英,李文朝,冯慕华,等.2009.微曝气生态浮床水芹吸收NP的特性及其对系统去除NP贡献的研究[J].农业环境科学学报,28(9):1908-1913.
- 李今,吴振斌,贺锋.2005.生物膜活性测定中TTC-脱氢酶活性测定法的改进[J].吉首大学学报:自然科学版,26(1):37-39.
- 李先宁,宋海亮,朱光灿,等.2007.组合型浮床生态系统的构建及其改善湖泊水源地水质的效果[J].湖泊科学,19(4):367-372.
- 李英杰,年跃刚,胡社荣,等.2008.生态浮床对河口水质的

- 净化效果研究[J]. 中国给水排水, 24 (11): 60-63.
- 梅琼, 吴永红, 肖邦定, 等. 2007. 武汉东湖秋季水体中光合自养生物膜的生长特性[J]. 生态与农村环境学报, 23 (2): 61-65.
- 沈仁芳, 蒋柏藩. 1992. 石灰性土壤无机磷的形态分布及其有效性[J]. 土壤学报, 29 (1): 80-86.
- 王世和. 2007. 人工湿地污水处理理论与技术[M]. 北京: 科学出版社.
- 魏复盛. 2002. 水和废水监测分析方法(第4版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 吴海明, 张建, 李伟江, 等. 2010. 人工湿地植物泌氧与污染物降解耗氧关系研究[J]. 环境工程学报, 4 (9): 1973-1977.
- 吴建峰, 林先贵. 2003. 土壤微生物在促进植物生长方面的作用[J]. 土壤, 35 (1): 18-21.
- 余瑞彰, 张慧, 蒋俊, 等. 2010. 微生物在生物栅植物根系和填料生物膜上的数量分布差异[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 9(4): 58-66.
- 虞中杰, 王东启, 陈振楼, 等. 2011. 人工浮床加挂填料对富营养化河水的净化效果[J]. 中国给水排水, 27 (17): 31-35.
- 张荣社, 李广贺, 周琪, 等. 2005. 潜流湿地中植物对脱氮除磷效果的影响中试研究[J]. 环境科学, 26 (4): 83-86.
- 张曦, 吴为中. 2003. 氨氮在天然沸石上的吸附及解吸[J]. 环境化学, 22 (2): 166-171.
- Hoppe H G, Kim S J, Goeke K. 1998. Microbial decomposition in aquatic environments: combined process of extracellular enzyme activity and substrate uptake[J]. Applied and Environmental Microbiology, 54 (3): 784-790.
- Park J S, Lee C H. 2005. Removal of soluble COD by a biofilm formed on a membrane in a jet loop type membrane bioreactor[J]. Water Research, 39 (19): 4609-4622.
- Surmacz-Gorska, J K Gernaey, C Demuyne, et al. 1996. Nitritification monitoring in activated sludge by oxygen uptake rate (OUR) measurements[J]. Water Research, 30 (5): 1228-1236.
- Vymazal J. 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. Science of the total environment, 380 (1): 48-65.

(责任编辑 万月华)

Purification Efficiency and Mechanism of the Eutrophic Water
by Combined Ecological Floating Bed

LI Wei^{1,2}, CHEN Xiao-guo², FANG Tao¹

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University
of Technology, Wuhan 430072, P. R. China;
(2. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P. R. China)

Abstract: A combined ecological floating bed(CEFB) was constructed by hanging the bio-ceramic matrix under the roots of canna. By comparing the purifying efficiency of the eutrophic wastewater by the CEFB with the matrix control group and the blank group, and analysing the difference of the counts and activity of bacteria in each group, the removal contribution of the plant, the matrix and the microorganism, and the synergism between those three functions were studied. After 48 days, the removal efficiency of the CEFB on TN, TP and ammonia nitrogen were 64.03%,95.82% and 96.43%, respectively. And the removal contribution of the canna on the nitrogen and the phosphorus were 36.03% and 37.96%, respectively. The microorganism quantity, the TTC dehydrogenase activity and the oxygen uptake rate in the CBFB system were relatively higher than the matrix control group. The results suggested that the plant absorption of nitrogen and phosphorus was not the main function of pollutant removal in the CBFB system. However, the plant have a positive effect on the microorganism, and there is a synergism among plant, bio-ceramic matrix and microorganism in CBFB system. Generally, the nutrient removal efficiency in eutrophic water could be improved by CBFB, compare to the matrix control and blank group.

Key words: combined floating bed; purification efficiency; mechanism; *Canna glauca*