



全国中文核心期刊
中国科技核心期刊

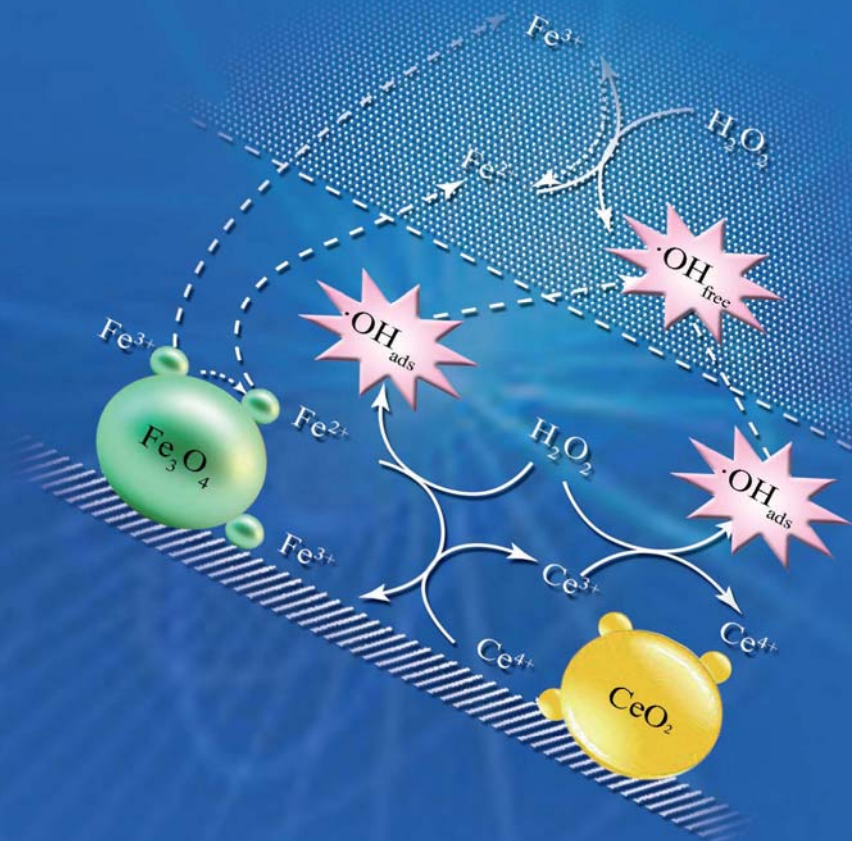
环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering

封面文章

磁性 Fe_3O_4 纳米颗粒的制备及在水处理中的应用

展思辉, 张宇, 朱丹丹, 等, 2016, 10(1): 1-11



中国科学院
生态环境研究中心

主办



科学出版社

出版

Vol. 10 No. 1

2016.1

目 次

综 述

磁性 Fe₃O₄ 纳米颗粒的制备及在水处理中的应用 展思辉 张 宇 朱丹丹 邱明英 于雯超 史 强(1)

水 污 染 防 治

人工湿地对水产养殖废水典型污染物的去除 黄翔峰 王 坤 陈国鑫 陆丽君 刘 佳(12)

选矿废水中黄药的生化处理 夏丽娟 胡学伟 张雅琳 靳松望 王亚冰(21)

增强型中空纤维膜生物反应器处理污水 赵 微 肖长发 权 全 胡晓宇 环国兰(27)

TEMPO 氧化微晶纤维素和马来酸酐接枝微晶纤维素的制备及对 Cu²⁺ 的吸附 ... 杨 阳 王一宁 潘远凤 肖惠宁(33)

利用活性氧分子消除污水中的 COD 白敏茹 毛首蕾 李超群 周建纲(38)

污水颗粒尺寸分布对深度过滤中雌激素去除的影响 胡碧波 阳 春 刘 达(43)

于桥水库溶解性有机碳分布特征及三卤甲烷的生成势 牛志广 魏晓婷 张 颖(48)

不同 pH 下纳米级天然黄铁矿对水中 ReO₄⁻ 的去除规律 丁 峰 钱天伟 丁庆伟 赵东叶 崔晋艳 王莉霄(55)

聚酰胺小球负载 *Comamonas* sp. (bdq06) 生物降解水中的喹啉 蔺 尧 陈 瑜 郭树君 邵德武 耿 直 霍明昕 刘志强 朱遂一(60)

草酸改性柚子皮对废水中镉离子的吸附性能 毛艳丽 康海彦 吴俊峰(65)

合肥城郊典型排水沟渠沉积物磷形态及其释放风险 唐文坤 李如忠 钱 靖 金菊良 常 笑(73)

新型缓释碳源的制备及其性能 王润众 郝瑞霞 赵文莉(81)

乳液电纺纤维膜固定化漆酶及其对水中酚类污染物的降解 袁 钰 代云容 宋永会 于彩虹(88)

螺蚌和沉水植物搭配对微污染水体的净化作用 李雪娟 和树庄 常学秀 谭福广 申 意 陆福田 侯文通(95)

HRT 和 SRT 对 AO 工艺去除四环素及耐药菌的影响 郑 宇 黄满红 陈 亮 徐 奇(103)

对乙酰氨基磺酰氯生产废水的 UASB 处理及硫酸盐的影响 李伟成 张 红 戚伟康 牛启桂 刘予宇 李玉友 高迎新(110)

炼化污水的厌氧生物预处理技术 王 宇 许双双 阎光绪 王庆宏 李 敏 马文峰 马静园 郭绍辉(115)

多胺改性 PGMA-DAAM 树脂的合成及对 Pb²⁺ 的吸附性能 杨迎霞 宋明超 陶子元 刘春萍(121)

光催化剂磷酸钾的制备及结构表征 刘天成 黄家卫 王天丽 唐光阳 贾丽娟 王博涛 王红斌(127)

重庆市加油站周边浅层地下水中石油烃污染调查与特征分析 赵 丽 张 韵 郭劲松 张 丹 邓春光(131)

太湖地区典型降雨水稻田径流污染物输出特点及相关性分析 陈育超 李 阳 于海明 乔 斌 孙井梅(137)

铁屑耦合生物麦饭石的 PRB 系统修复含铬酸根与硝酸根地下水 狄军贞 朱志涛 戴男男 江 富(145)

山核桃加工废水的成分测定与分析 张贝贝 刘文洪 李俊峰 叶志青(150)

煤基活性炭的改性及其对含铜废水的吸附性能 吕 游 刘树根 谢容生 宁 平 谷俊杰(157)

以养殖固体废弃物发酵产物为碳源的 SND 系统的脱氮除磷效果 成小婷 罗国芝 李 丽 谭洪新(163)

石墨烯/TiO₂ 复合物的制备及其光催化性能 张宏忠 秦小青 王明花(169)

剩余污泥对活性黑和酸性大红混合染料的吸附 王春英 黄平清 黄晓霞 刘 茹(175)

狭叶香蒲活性炭对 Cd²⁺ 与 Pb²⁺ 的吸附及机理分析 舒 艳 李科林 宋金凤 李 冰 汤春芳(181)

催化湿式氧化法处理垃圾渗滤液 蔡先明 秦 侠 张 丽 崔红蕊(189)

印染废水中氮硫形态转化和去除效率 王兴华 李 蕾 刁新星 王 浩(194)

反硝化生物滤池用于再生水脱氮效能及动力学研究 高建锋 杨碧印 赵建树 张金松(199)

TiO₂ 光催化耦合 SO₄²⁻ 体系对硝基苯酚的降解性能及动力学 唐 海 沙俊鹏 颜酉斌 蔡昌凤 王军刚(205)

铁碳微电解/H₂O₂ 耦合类 Fenton 法预处理高浓度焦化废水 殷旭东 李德豪 毛玉凤 朱越平 刘正辉(212)

生化-Fenton 氧化联合工艺处理石化净化水的回用 王泳超 李玉平 陈 娟(217)

模拟优化模型在地下水监测布井中的应用 熊 锋 苏 婧 翟秋敏 孙源媛 吴 超 姜永海 席北斗(223)

活性炭负载 CuO 催化过硫酸盐去除活性艳红 X-3B 染料 王宇轩 王应军 方明珠(230)

生物接触氧化法应急处理原水突发性藻类污染 许 骆 罗建中 邓俊强 刘敏强(237)

次氯酸钠降解水中萘普生的效果 纪夏玲 吕文英 李富华 陈 平 李若白 范斯娜 姚 琨 张祥丹 刘国光(243)

大 气 污 染 防 治

活性炭纤维负载功能化离子液体的脱硫性能 王建英 张丽喆 穆惠英 陈 莹 胡永琪(248)

滤袋式膜生物反应器净化二甲苯 徐孟孟 陈 效 蒋轶锋 吴成强(257)

电极配置对多针-板脉冲等离子体反应器放电特性的影响 董冰岩 周海金 施志勇 黄尝伟 丁奇岨 王 晖(262)

油茶果壳炭对油烟的吸附性能	刘 超	廖 雷	覃爱苗	周江喜	彭 娟(267)
防止中小型锅炉脱硫除尘一体化系统中引风机积灰振动的研究	吕 太	贺培叶(272)			
程序升温脱附法测定活性炭上酯类有机物的脱附活化能	任爱玲	孟少左	田森	张丁超	韩梦非(277)
大流量低浓度 VOCs 气体二次吸附浓缩净化技术开发					

..... 苟志萌	李照海	何 娇	羌 宁	覃兰雪	徐素玮	曹 熠(283)
挥发性有机物生物增溶性能及效果	王国惠	许亚楠	李慧敏(289)			
制备条件对锰氧化物 SCR 脱硝性能的影响	刘育松	高凤雨	唐晓龙	易红宏	赵顺征	曹雨萌(295)

固 体 废 物 处 置

水泥回转窑共处置含砷污泥	熊正为	朱 雷	杨博豪	戴清伟	陆 森(301)	
进出料频率对牛粪两相厌氧发酵特性的影响	王光远	李文哲	李 雷	蔡康妮	王忠江(306)	
城市污泥过热蒸汽薄层干燥初始段凝结特性	张绪坤	孙瑞晨	王学成	温祥东	吴 起	邢 普(311)
家电报废量预测模型与安徽省实例分析	刘志峰	张雅堃	黄海鸿	薛亚琼	王 玲(317)	
药渣与煤共热解动力学模型及逸出气红外特性分析	刘宝宣	蒋旭光	吕国钧	王 飞	池 涌	严建华(323)
温度对热水解预处理高含固污泥特性的影响	程 瑶	韩 芸	卓 杨	代 璐	彭党聪(330)	
疏浚底泥固化改性与资源化利用技术				武博然	柴晓利(335)	
利用旋转炉热解城市污泥的产物特性	王学涛	张兴宇	徐 斌	兰维娟(343)		
次氯酸钠氧化废轮胎胶粉对改性沥青性能的影响						

..... 于 凯	张 琛	王 欢	张 楠	陆宇鹏	李彤彤	李沁宇	刘双喜(350)
聚乙烯醇/超细羽绒粒子共混膜的制备及其染料吸附动力学							

..... 陈凤翔	谢文雅	董兵海	王世敏	赵 丽	许祖勋	万 丽(355)
以粉煤灰为原料制备高纯度 NaP 型分子筛	周慧云	徐婷婷	陈彦广	解聪浩	宋 华(360)	
核桃壳骨架构建剂对污泥脱水性能的影响	董凌霄	丁绍兰	谢林花	蔡 丽	杨慧佳(365)	
巢湖蓝藻酸提取液提高玉米秸秆的酶解效率	吴玉杰	王 进	崔康平	洪天求	岳正波(370)	
稻壳基高比表面积介孔活性炭的制备与表征	薛广钊	侯贵华	乔仁静	董鹏玉	张勤芳(375)	
改性油菜秸秆对 Co(II) 的吸附				汪 洋	吴 纓(379)	
化工污泥基轻质填料的制备及其应用	俞敏洁	胡 俊	孙 婧	李 溪	徐炎华(385)	
不同碱剂对污泥与餐厨垃圾联合厌氧发酵产氢余物产甲烷的影响	郑育毅	林 鸿	林志龙	罗鸿信	刘常青(393)	
废弃 LCD 面板金属铜的超声协同浸出	庄绪宁	李英顺	杨义晨	胡冰倩	赵颖璠(399)	
脉冲电场在污泥处理中的应用	姜俊杰	梁美生	李 伟		裴旭倩(405)	

土 壤 污 染 防 治

外源铅在不同类型土壤的形态转化						宋 波	曾炜铨(410)
荧光假单胞菌产铁载体对油麦菜吸收砂基和水基中镉的影响	晋银佳	刘 文	朱 跃	王丰吉(415)			
再生水灌溉区土壤对头孢噻肟的吸附特征	虞敏达	张 媛	张 慧	檀文炳	高如泰	席北斗	杨津津(421)
化学氧化法治理焦化厂 PAHs 污染土壤	杨 勇	张蒋维	陈 恺	李忠博	李洪旺	牛 静	王瑜瑜(427)
循环流化床燃煤固硫灰改良云南红粘土	李勇辉	王群英	邓庆德	景文斌	张石华(432)		

生 态 修 复 工 程

不同沉水植物组配对北大港水库水体净化效果的影响	常素云	吴 涛	赵静静(439)			
生态修复工程对城市内河水体细菌多样性的影响	唐方园	张秋芳	周阳靖	陈力行	徐继荣	程军蕊(445)
组合型生态浮床处理农家乐污水	王 郑	崔康平	许为义	孟 蓉	孙 鹏	陈鸿汉(455)
微宇宙法研究环境因子对南方典型梯级水库群藻类生长的影响	周 利	朱嘉成	朱 佳	高静思(461)		

环 境 生 物 技 术

水葫芦多环芳烃含量及其与脂肪含量的关系	杨海燕	郭金鹏	卢少勇	曲洁婷	贾九敏(467)		
金鱼藻对不同扰动方式下悬浮物的生理响应		张翠英	王丽萍	万 蕾	张后虎(473)		
以不同底物和苯胺为燃料的微生物燃料电池的产电特性	佟海龙	黄力群	何 燕	刘解答	刘承鸿	于 荆(480)	
含固率和电极间距对牛粪发酵产电性能的影响	王成显	张艺臻	吴淑娜	张小梅	沈建国	丁仕林	辛言君(485)

工 程 实 例

城镇污水处理厂的综合绩效评价	魏 亮	陈 滢	刘 敏	翟宇超(490)	
膜工艺在电镀废水处理工程中的应用	夏仙兵	蔡邦肖	缪 佳	林建平	倪 政(495)

环 境 监 测 与 评 价

SPE-HPLC 法检测环境水样中的痕量三氯卡班	朱开抗	曾庆玲	沈春花	周真明	李 飞(503)
--------------------------------	-----	-----	-----	-----	----------

组合型生态浮床处理农家乐污水

王 郑¹ 崔康平¹ 许为义¹ 孟 蓉¹ 孙 鹏² 陈鸿汉²

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009; 2. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083)

摘 要 为了研究由水生植物与人工填料构建的组合型生态浮床对某农家乐污水的净化效果, 通过将美人蕉和球形塑料填料组合在一起构建成组合型生态浮床, 研究了该组合型生态浮床对农家乐污水的净化效果。结果表明, 该组合型生态浮床对化学需氧量(COD)、总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)和总磷(TP)都有较好的去除效果, 去除率分别达到79.71%、73.88%、88.67%和85.61%, 均明显高于基质对照组和植物对照组。可见在组合型生态浮床中, 由植物根系吸收、填料吸附及微生物的协同作用对污染物的去除效果要优于单一系统, 合理的植物-微生物组合对提高处理该农家乐污水效果具有较好的促进作用。该研究结果为构建适宜当地农家乐废水处理的组合型生态浮床提供了重要的参考和借鉴。

关键词 组合型生态浮床 球形塑料填料 美人蕉 农家乐污水

中图分类号 X522 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2016)01-0455-06

Combined ecological floating bed for farmhouse wastewater treatment

Wang Zheng¹ Cui Kangping¹ Xu Weiyi¹ Meng Rong¹ Sun Peng² Cheng Honghan²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of water resources & Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract In order to study the purifying effect of combined ecological floating bed constructed by aquatic plants and artificial packing on the farmhouse wastewater, a combined ecological floating bed in the farmhouse wastewater was established by combining with the canna and spherical plastic packing. Results showed that the combined ecological floating bed had a good removal efficiency of COD, TN, NH_4^+-N and TP. The removal rates of COD, TN, NH_4^+-N and TP were 79.71%, 73.88%, 88.67% and 85.61%, respectively, which were significantly higher than the removal rates by single matrix control and single plant control. The results also showed that visible synergism of plant absorbing, matrix adsorption and microorganism in combined ecological floating bed was better than a single system to eliminate the pollutants and reasonable plant-microbial combination played a positive role in promoting purification effect on the farmhouse wastewater. And this study provided important experiences and reference for building combined ecological floating bed proper for local farmhouse wastewater treatment.

Key words combined ecological floating bed; spherical plastic packing; canna; farmhouse wastewater

百二河水库是湖北省十堰市一个重要的居民生活饮用水水源地, 其上游百二河河段位于该市旅游景区, 且当地农家乐餐饮行业不断发展^[1-3]。但是由于山区经济发展相对落后、污水处理基础设施缺乏且居民环境保护意识不强, 导致大量农家乐生活污水未经治理直接排入河道, 使得下游百二河水库的水质安全问题日趋严峻, 因此, 采取有效措施集中治理分散的农家乐生活污水是当前的一项迫切任务^[4-7]。组合生态浮床技术作为污水净化的有效方法之一, 在国内外各种污水处理中得到了广泛的应用^[8-11]。其主要是利用水生植物和微生物两类生物之间的协同作用净化污水。目前, 研究较多的是在湖泊、水库和池塘等水体治理方面, 而作为主体工艺处理生活污水方面研究报道较少。美人蕉的根系

长, 泌氧能力好, 能为好氧微生物提供较适宜的环境, 是理想的水生植物^[12, 13]。本研究通过在单一的美人蕉浮床的基础上增加球形塑料填料单元构建成组合型生态浮床, 考察了其对于某农家乐生活污水的改善效果, 以期为百二河地区分散点源污水的有效处理提供技术支撑。

基金项目: 国家“水体污染控制与治理”科技重大专项(2012ZX07205-002); 国家自然科学基金资助项目(41072194)

收稿日期: 2015-09-26; **修订日期:** 2015-10-14

作者简介: 王郑(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事水污染控制研究。E-mail: wangzheng171717@163.com

* 通讯联系人, E-mail: cuikangping@163.com

1 材料与方法

1.1 实验装置

组合型生态浮床装置由浮床植物、浮板和球形塑料填料3部分组成,如图1所示。选用美人蕉为浮床植物,将其固定安放在中间镂空的空心塑料浮板上,利用浮板的浮力使其漂浮在水面。美人蕉根部和球形塑料填料用尼龙网围住,尼龙网的孔径略小于球形塑料填料的直径。各实验组在60 cm(长)×54 cm(宽)×45 cm(高)的塑料水箱中进行,实际水深40 cm。

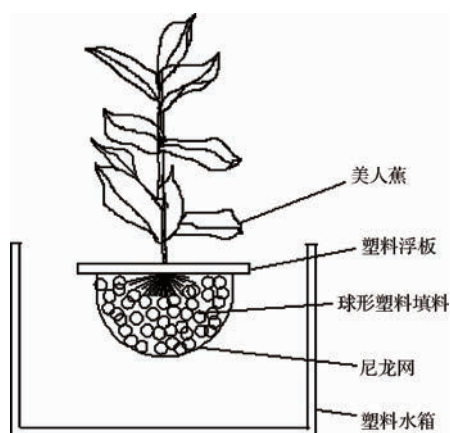


图1 组合型生态浮床装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of combined ecological floating bed

1.2 实验材料

污水取自百二河水库上游河段沿途某农家乐化粪池的出水(经过简单的稀释),其主要水质指标COD、TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和TP的含量分别为119.7~123.5、19.14~19.61、15.41~15.72、1.16~1.21和1.42~1.48 mg/L。美人蕉幼苗取自湖北汉库汇水流域水质安全保障人工示范基地;基质选取挂膜效率较高的球形塑料填料,购自江苏省宜兴市清溪环保填料有限公司,粒径为1.2 cm,孔隙率为51.28%。

1.3 实验方案

实验开始前,先将取来的美人蕉幼苗置于实验水体中进行10 d的适应性培养,然后选取株高基本一致的美人蕉为实验所用,并对其根部进行适当的修剪以保持长度基本一致。同时浮床所用的球形塑料填料在挂膜前先进行灭菌处理,再用实验用水进行人工挂膜,挂膜期间昼夜平均水温24.5℃,每隔5 h通过漩涡式气泵向水中曝气1 h,每两天换水1

次,DO维持在2.0 mg/L左右,直到生物膜生成为止(大约14 d)。实验开始时,将美人蕉和球形塑料填料进行组合。实验系统有组合生态浮床、植物对照组、基质对照组和空白对照组:组合生态浮床由美人蕉和适量的球形塑料填料基质构成;植物对照组只有同等量的美人蕉而不加入球形塑料填料;基质对照组只加入同等量的球形塑料填料而不放入美人蕉;空白对照组只加入等量的实验污水。每组设置2个平行实验,上层覆盖小石子用以固定美人蕉根系和填料,各组均放置在有阳光的河道边,并做好防雨措施。实验于2015年7月8日开始(即0 d),期间正值夏季,各组水温较为稳定(23~28℃),每3天取一次水样进行测定,至2015年7月31日结束。实验结束时,测量各组美人蕉的株高和根长,并对各组水中细菌总量进行测定。

1.4 监测项目

基质挂膜期间测定水体中的溶解氧。每隔3 d在水面以下20 cm处取300 mL水样,分别测定水样中COD、TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和TP的浓度。实验结束后,测定各组水体中细菌总量。分别在各组实验开始时和结束时测量每组美人蕉的株高和根长。

1.5 测试方法

COD、TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和TP按第四版国家环境保护局水和废水监测分析方法测定^[14]。COD的测定:重铬酸钾法,TN的测定:碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法, NH_4^+-N 的测定:纳氏试剂分光光度法, NO_3^--N 的测定:氨基磺酸紫外分光光度法,TP的测定:过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法,DO的测定:哈希HQ30 d便携式溶解氧测定仪,水中细菌总量的测定:平板涂布法,美人蕉的株高和根长的测定:标准卷尺。

2 实验结果与讨论

2.1 水体COD浓度的变化

污水中的污染物可通过微生物降解、植物根系截留、填料吸附等形式去除,其中以微生物降解为主^[15,16]。各组对COD的去除效果如图1所示。经过24 d的运行,组合型生态浮床、植物对照组、基质对照组和空白对照组对COD的去除率分别为79.71%、48.61%、35.56%和14.36%。可见该组合型浮床对COD的去除效果最好,而且比单一系统实验中COD的去除率要高得多。较高的去除率可能有两方面原因:一方面,组合型生态浮床底部的球

形塑料填料具有丰富的内表面,可为微生物的生长繁殖提供良好的生存环境,且该填料已提前进行过挂膜处理,生物膜较厚,微生物数量多,处理效率高;另一方面,美人蕉通过人工筛选,株体强壮,根系发达,其泌氧作用促进了好氧微生物生长繁殖,需要消耗大量有机物。基质对照组对 COD 的去除率高于植物对照组,说明在 COD 的去除过程中球形塑料填料起着重要作用,而填料正是微生物最主要的栖息场所,进一步验证了微生物在 COD 去除过程中所起的关键作用。

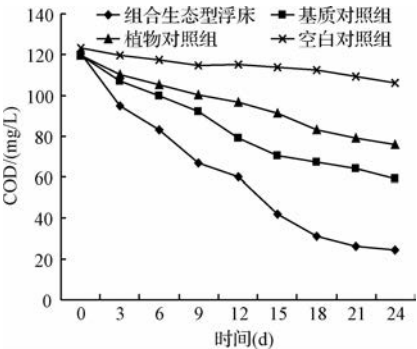


图 1 化学需氧量的变化
Fig. 1 Change of COD

2.2 水体 TN 浓度的变化

污水中总氮主要以有机氮、氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮的形式存在。图 2 为各组实验对 TN 的去除效果,组合型生态浮床、植物对照组、基质对照组和空白对照组对 TN 的去除率分别为 73.88%、41.15%、32.78% 和 11.98%。可见组合型生态浮床中植物和球形塑料填料的组合对 TN 的去除效果最明显。从组合型生态浮床装置示意图可以看出,美人蕉的根系经过一段时间的生长后扎入球形塑料填料之中类似如根系扎入土壤的结构,可以更好地

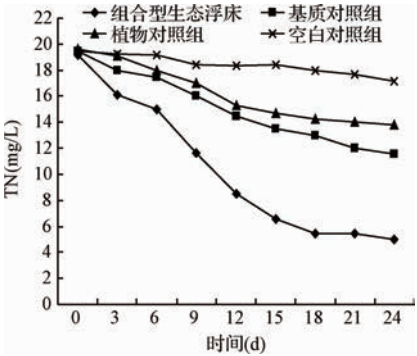


图 2 总氮的变化
Fig. 2 Change of TN

保护植物的根系,有利于根系对氮元素的吸收。球形塑料填料内部复杂的结构可以较容易地制造出好氧和厌氧区域,有助于微生物的硝化和反硝化作用脱氮。植物对照组依靠植物根系的吸收和水中分散的微生物的脱氮作用除氮,而从空白对照组可以看出,其水中分散的微生物脱氮效果不佳。基质对照组主要通过填料基质中微生物的脱氮作用除氮。基质对照组中 TN 去除率高于植物对照组,说明了组合型生态浮岛基质中富集的微生物是 TN 去除的主要机制。

2.3 水体 NH₄⁺-N 浓度的变化

氨氮以游离 NH₃ 和 NH₄⁺ 形式存在,是有机氮化物氧化分解的第一步产物,是水体受污染的一个重要标志,NH₄⁺-N 的去除主要通过生物硝化、植物吸收及 NH₃ 的挥发^[17]。

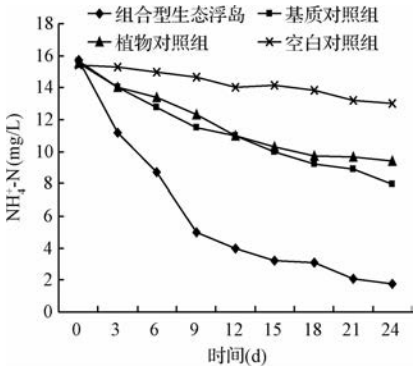


图 3 氨氮的变化
Fig. 3 Change of NH₄⁺-N

从图 3 可以看出,各组 NH₄⁺-N 的去除效果,组合型生态浮床、植物对照组、基质对照组和空白对照组对 NH₄⁺-N 的去除率分别为 88.67%、49.11%、39.39% 和 15.64%。可见通过组合型生态浮床的处理,水体中 NH₄⁺-N 也得到了较好的去除,其中植物自身对 NH₄⁺-N 的吸收量少,根部球形塑料填料中丰富的微生物对 NH₄⁺-N 的去除作用大,基质对照组对 NH₄⁺-N 去除率高于植物对照组恰好说明这一点。由于植物根部的释氧作用,填料周围附着的好氧硝化菌的数量和活性都有所增加,在溶氧含量充足的条件下,通过好氧硝化菌的作用将污水中的 NH₄⁺-N 氧化为亚硝酸盐或硝酸盐^[18],从而达到 NH₄⁺-N 的去除效果。

2.4 水体 NO₃⁻-N 浓度的变化

硝态氮主要是由污染水体中本身含有的 NO₃⁻-N 和硝化菌硝化作用生成的 NO₃⁻-N 组成,其可通过

微生物反硝化作用和植物吸收等形式去除^[19]。

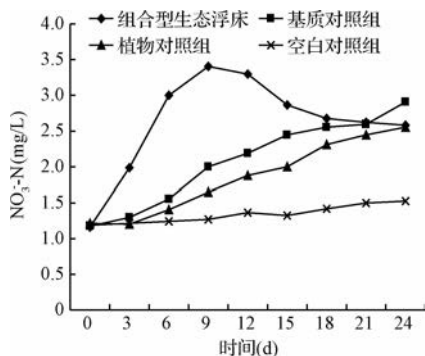


图 4 硝氮的变化

Fig. 4 Change of $\text{NO}_3^- \text{-N}$

从图 4 可以看出,经过 24 d 的运行,各组水体中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度均有不同程度的上升。组合型生态浮床的水体中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度在前 9 天时是呈上升趋势,可能是因为微生物硝化作用生成 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的速度大于微生物反硝化作用加上植物吸收对 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的去除速度。在 9 ~ 18 d 范围之间, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的浓度开始呈缓慢下降趋势,从 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的去除效果上看, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的浓度有所降低,可以推测出是因为反硝化作用加上植物吸收对 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的去除速度开始大于微生物硝化作用生成 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的速度。在 18 ~ 24 d 范围之间, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的浓度趋于平稳,结合 COD 的去除效果,可能是由于水体中碳源不足而导致 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的去除率无法在短时间内再继续升高。开始阶段基质对照组和植物对照组水体中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度上升速度均小于组合型生态浮床,是由于硝化作用需要消耗大量氧气^[20],组合型生态浮床中植物根系的泌氧保证了水体中一定的溶解氧含量,而基质对照组中缺少植物的释氧作用,水体中溶氧量不足,植物对照组中虽有植物根部的释氧,但是植物根部没有填料富集的微生物,仅靠水中分散的微生物,硝化作用有限。

2.5 水体 TP 浓度的变化

污水中总磷的存在形态主要有元素磷、有机团结合的磷酸盐、聚磷酸盐、正磷酸盐、焦磷酸盐及偏磷酸盐,可将其分类为颗粒型磷和溶解型磷。对 TP 的去除主要通过植物的吸收、填料的吸附作用以及微生物的固定等^[21]。各组对 TP 的去除效果如图 5 所示。组合型生态浮床、植物对照组、基质对照组和空白对照组对 TP 的去除率分别为 85.61%、56.0%、35.91% 和 13.79%。可见组合型生态浮床

对 TP 去除率较高,分析认为,可能有多重原因,其一通过植物根部对 TP 的吸收,并同化为自身的营养物质;其二填料中的聚磷菌在好氧条件下自身增殖的过程中吸收并同化一定量的 TP;其三球形塑料填料复杂的内部结构对悬浮颗粒型磷的吸附。基质对照组对 TP 的去除率高于植物对照组,说明填料吸附 TP 及填料中微生物聚磷的共同作用要强于仅植物对 TP 的吸收。至于该农家乐污水,组合型生态浮床中植物对磷的吸收、微生物的聚磷以及填料对颗粒型磷的吸附哪种作用对 TP 的去除贡献最大还需要进一步研究。

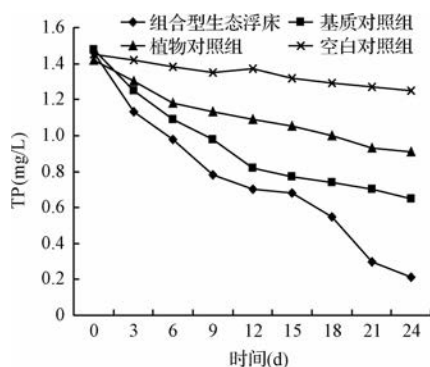


图 5 总磷的变化

Fig. 5 Change of TP

2.6 水体中微生物的状况

实验结束时测得组合型生态浮床、基质对照组、植物对照组和空白对照组的细菌总数分别为 2.4×10^6 、 1.8×10^6 、 7.4×10^5 和 4.2×10^5 CFU/mL。由此可以看出,组合生态浮床中的水体细菌繁殖速度明显优于没有填料基质的植物对照组,说明球形塑料填料丰富的内部结构可以为微生物更好的生长繁殖提供所需的环境,同时植物根系分泌物可以促进某些氮、磷菌的生长^[22],其泌氧作用又可以增加水中溶解氧的含量,为好氧菌提供了良好的溶氧环境。基质对照组中的水体细菌数量多于植物对照组,则进一步说明球形塑料填料的存在有利于微生物的生长,其水体中 COD、TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 TP 的去除率高于植物对照组,则验证了组合型生态浮床填料中的微生物在污染物的去除中起着核心作用。

2.7 植物生长状况

实验开始时以及实验结束时各组美人蕉的生长状况见表 1。由表 1 可知,实验阶段挺水植物美人蕉生长状况均良好,其中生态组合浮床中美人蕉的生长状况要优于植物对照组,说明球形塑料填料富

集的微生物在促进植物生长方面有积极的作用,而且植物的氮磷固定量与植物的生物量呈显著相关关系^[23,24],植物的生物量越大,对氮磷的固定能力越强,污水净化效果越好。

表 1 美人蕉生长状况
Table 1 Growth of canna

		组合型生态浮床	植物对照组
开始	株高 (cm)	23.7	23
	根长 (cm)	3.2	3.4
结束	株高 (cm)	41.5	30.3
	根长 (cm)	24.1	13.6

综上所述,美人蕉和球形塑料填料的组合对农家乐水体中污染物的去除效果好,填料中富集的微生物对提高浮床治理农家乐水体的效能具有积极的促进效应。针对美人蕉是季节性植物,实际工程应用中建议将美人蕉和一些耐寒的植物如菖蒲等混合种植,同时冬季搭建温室大棚对其进行保温,以维持植物正常的生长和填料中微生物较高的活性。此外,可通过前置沉淀池、砂滤池将污水中的悬浮颗粒物截留,达到初步净化污水的目的,也降低了后续的组合型生态浮床系统的污染物负荷。工程投资建设时,建议有目的性的加大处理设施有效体积的建设,以使组合型生态浮床中污水的平均停留时间能达到 10 d 以上,同时增设微曝气装置,增加水体中溶解氧的含量,提高污水的处理效率。

3 结 论

(1)组合型生态浮床对农家乐生活污水有较好的处理效果,且处理效率明显高于基质对照组和植物对照组,经过 24 d 的运行,COD、TN、NH₄⁺-N 和 TP 去除率分别达到了 79.71%、73.88%、88.67% 和 85.61%,球形塑料填料及其富集的微生物在污染物的去除中起主导作用。

(2)组合型生态浮床中的细菌数量和植物生物量分别高于基质对照组和植物对照组,植物和微生物之间有相互积极的促进作用,有效地提高了水体生态修复效率。

(3)将水生植物和微生物有效的结合起来,充分发挥各自优势,可实现污染物的快速降解,提高污染物的降解效率,且投资低、运行成本低、环境效益好,还兼具一定的景观效果,具有很好的应用价值。

参 考 文 献

[1] 孙兴旺,马友华,王桂苓,等. 中国重点流域农村生活污水处理现状及其技术研究. 中国农学通报, **2010**, 26 (18):384-388
Sun Xingwang, Ma Youhua, Wang Guiling, et al. Research on current treatment status and technologies of rural domestic wastewater in China major basins. Chinese Agricultural Science Bulletin, **2010**, 26 (18):384-388 (in Chinese)

[2] 周爱萍. 我国农村水污染现状及防治措施. 安徽农业科学, **2009**, 37 (9):4345-4346, 4348
Zhou Aiping. The status quo and countermeasures of China's rural water pollution. Journal of Anhui Agricultural Sciences, **2009**, 37 (9):4345-4346, 4348 (in Chinese)

[3] 凌霄,杨细平,陈满,等. 广东省农村生活污水治理现状调查. 中国给水排水, **2009**, 25 (8):8-10, 15
Ling Xiao, Yang Xiping, Chen Man, et al. Investigation on present situation of rural domestic sewage treatment in Guangdong Province. China Water & Wastewater, **2009**, 25 (8):8-10, 15 (in Chinese)

[4] 铁柏清,李希,李杰峰,等. 3 种植物人工浮床对生活污水水质动态净化特性的比较. 环境工程学报, **2010**, 4 (7):1566-1570
Tie Baiqing, Li Xi, Li Jiefeng, et al. Comparison of removal effect of three plants artificial floating islands for water purification under dynamic conditions. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2010**, 4 (7):1566-1570 (in Chinese)

[5] 李先宁,宋海亮,朱光灿,等. 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. 湖泊科学, **2007**, 19 (4):367-372
Li Xianning, Song Hailiang, Zhu Guangcan, et al. Effect of combined floating bed ecosystem on water quality improvement in lake water source area. Journal of Lake Sciences, **2007**, 19 (4):367-372 (in Chinese)

[6] Sun Lianpeng, Liu Yang, Jin Hui. Nitrogen removal from polluted river by enhanced floating bed grown canna. Ecological Engineering, **2009**, 35 (1):135-140

[7] 李希,铁柏清,彭陵文,等. 混合型植物人工浮岛处理生活污水的试验研究. 安全与环境工程, **2009**, 16 (2):48-51
Li Xi, Tie Boqing, Peng Linwen, et al. Improving sewage water quality by hybrid-plant artificial floating island. Safety and Environmental Engineering, **2009**, 16 (2):48-51 (in Chinese)

[8] 许国晶,段登选,杜兴华,等. 组合生态浮床净化养殖水体效果研究. 上海海洋大学学报, **2015**, 24 (1):94-101
Xu Guojing, Duan Dengxuan, Du Xinghua, et al. Purification effect of combined ecological floating bed on aquaculture

- wastewater. Journal of Shanghai Ocean University, **2015**, 24 (1): 94-101 (in Chinese)
- [9] Nahlik A. M., Mitsch W. J. Tropical treatment wetlands dominated by free-floating macrophytes for water quality improvement in Costa Rica. Ecological Engineering, **2006**, 28 (3): 246-257
- [10] 范洁群, 邹国燕, 宋祥甫, 等. 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. 环境科学研究, **2001**, 24(8): 850-856
Fan Jiequn, Zou Guoyan, Song Xiangfu, et al. Effects of FCEFB and TFB on the nitrogen removal and nitrogen cycling microbial community in a eutrophic river. Research of Environmental Sciences, **2001**, 24(8): 850-856 (in Chinese)
- [11] 刘海洪, 汪详静, 吴磊, 等. 生物组合对浮床污染物净化效能的影响. 东南大学学报(自然科学版), **2011**, 41 (4): 784-787
Liu Haihong, Wang Xiangjing, Wu Lei, et al. Effect of biological combination on pollutants purification performance of floating bed. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), **2011**, 41(4): 784-787 (in Chinese)
- [12] 徐德福, 李映雪, 方华, 等. 4种湿地植物的生理性状对人工湿地床设计的影响. 农业环境科学学报, **2009**, 28 (3): 587-591
Xu Defu, Li Yingxue, Fang Hua, et al. Effects of physiological character of four wetland plants on design of the constructed wetland bed. Journal of Agro-Environment Science, **2009**, 28(3): 587-591 (in Chinese)
- [13] 卜发平, 罗固源, 许晓毅, 等. 美人蕉和菖蒲生态浮床净化微污染源水的比较. 中国给水排水, **2010**, 26(3): 14-17
Bu Faping, Luo Guyuan, Xu Xiaoyi, et al. *Canna indica* and *Acorus calamus* ecological floating beds for Purification of micro-polluted source water. China Water & Wastewater, **2010**, 26(3): 14-17 (in Chinese)
- [14] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法(第4版). 北京: 中国环境科学出版社, **2003**
- [15] Hoppe H. G., Kim S. J., Gocke K., et al. Microbial decomposition in aquatic environments: Combined process of extracellular enzyme activity and substrate uptake. Applied and Environmental Microbiology, **1988**, 54(3): 784-790
- [16] 王国芳, 汪详静, 吴磊, 等. 组合型生态浮床中各生物单元对污染物去除的贡献及净化机理. 土木建筑与环境工程, **2012**, 34(4): 136-141
Wang Guofang, Wang Xiangjing, Wu Lei, et al. Contribution and purification mechanism of bio-components to pollutants removal in an integrated ecological floating bed. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, **2012**, 34(4): 136-141 (in Chinese)
- [17] Hu Guangji, Zhou min, Hou Haobo, et al. An ecological floating-bed made from dredged lake sludge for purification of eutrophic water. Ecological Engineering, **2010**, 36 (10): 1448-1458
- [18] 孙连鹏, 冯晨, 刘阳, 等. 强化生态浮床对珠江水中氮污染物去除研究. 中山大学学报(自然科学版), **2009**, 48 (1): 93-97
Sun Lianpeng, Feng Chen, Liu Yang, et al. Nitrogen removal from pearl river by enhanced ecological floating bed system. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, **2009**, 48(1): 93-97 (in Chinese)
- [19] 徐秀玲, 陆欣欣, 雷先德, 等. 不同水生植物对富营养化水体中氮磷去除效果的比较. 上海交通大学学报(农业科学版), **2012**, 30(1): 8-14
Xu Xiuling, Lu Xinxin, Lei Xiande, et al. Effects of hydrophytes on removal of nitrogen and phosphorus in eutrophic water. Journal of Shanghai Jiao Tong University (Agricultural Science), **2012**, 30(1): 8-14 (in Chinese)
- [20] 郑立国, 杨仁斌, 王海萍, 等. 组合型生态浮床对水体修复及植物氮磷吸收能力研究. 环境工程学报, **2013**, 7 (6): 2153-2159
Zheng Liguang, Yang Renbin, Wang Haiping, et al. Study on water remediation and uptake ability of nitrogen and phosphorus by plants using combined ecological floating bed. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2013**, 7 (6): 2153-2159 (in Chinese)
- [21] 段金程, 张毅敏, 高月香, 等. 复合强化净化生态浮床对污水中 N、P 的去除效果. 生态与农村环境学报, **2013**, 29(4): 422-427
Duan Jincheng, Zhang Yimin, Gao Yuexiang, et al. Effect of composite enhanced water-purifying ecological floating bed removing nitrogen and phosphorus in polluted water. Journal of Ecology and Rural Environment, **2013**, 29(4): 422-427 (in Chinese)
- [22] 陈秋夏, 郑坚, 金川, 等. 水生植物对 N、P 的富集作用研究. 江西农业大学学报, **2008**, 30(3): 437-442
Chen Qiuxia, Zheng Jian, Jin Chuan, et al. Nitrogen and phosphorus uptake of 18 aquatic plant species in sanyang wetland. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, **2008**, 30(3): 437-442 (in Chinese)
- [23] 成水平, 夏宜琤. 香蒲、灯心草人工湿地的研究-III. 净化污水的机理. 湖泊科学, **1998**, 10(2): 66-71
Cheng Shuiping, Xia Yicheng. Studies on artificial wetland with cattail (*Typha angustifolia*), rush (*Juncus efusus*), III: Mechanisms of purifying wastewater. Journal of Lake Sciences, **1998**, 10(2): 66-71 (in Chinese)
- [24] Zhu B., Fitzgerald D. G., Mayer C. M., et al. Alteration of ecosystem function by zebra mussels in Oneida Lake: Impacts on submerged macrophytes. Ecosystems, **2006**, 9 (6): 1017-1028