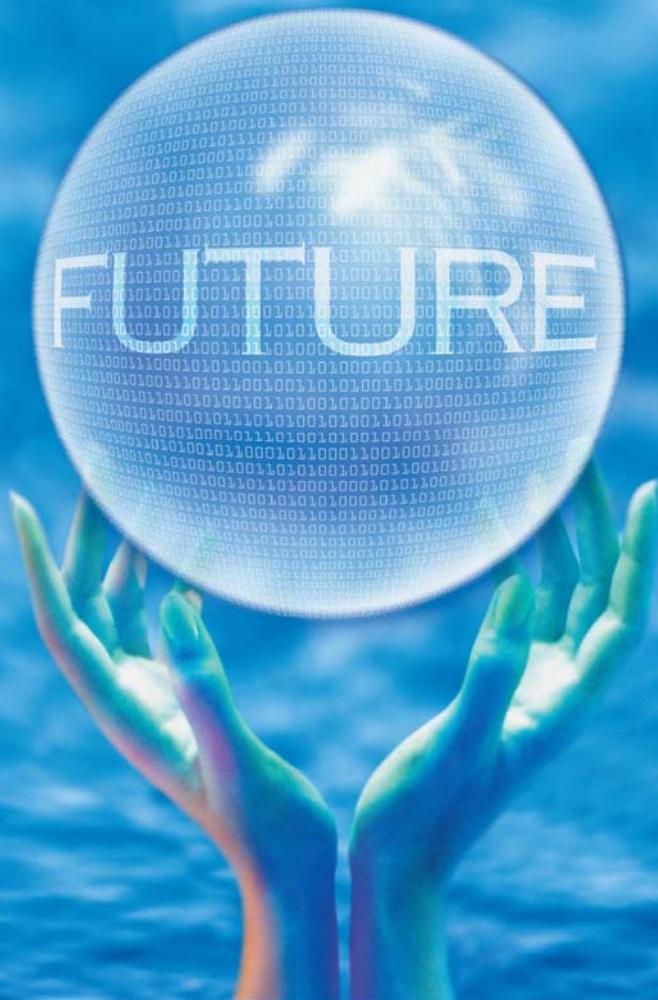




全国中文核心期刊  
中国科技核心期刊

# 环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering



第9卷 第9期

Vol.9 No.9

中国科学院 主办  
生态环境研究中心  
科学出版社 出版

9  
2015

## 目 次

### 水 污 染 防 治

紫外线消毒对3种大肠杆菌的灭活效果和耐药性影响 .....	张崇森	庄凯	巨欣	王晓昌(4097)
强化除磷型 A/O-MBR 工艺运行稳定性 .....	任金柱	李军	王朝朝	刘彬 高金华 常江(4102)
超声波紫外线一体化推流式反应器中试装置用于污水消毒 .....				
.....	郭浩	周瑛	周晓琴	李子富 闫圆圆 靳昕(4107)
Ca <sup>2+</sup> 强化短程硝化颗粒污泥培养 .....	吕永涛	贾燕妮	鞠恺	赵洁 苗瑞 王磊(4112)
猪场废水厌氧自电解处理过程中关键参数优化 .....	王云	朱能武	沈伟航	李小虎 吴平霄(4117)
碳纳米管稳定纳米 Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 的制备及降解染料橙 II .....		邓景衡	李佳喜	余侃萍 谢建国(4125)
湿式过氧化氢氧化活性艳蓝 KN-R .....	贺玲	刘红玉	杨春平	彭艳蓉 曾光明 王鹏 刘芬(4131)
草皮缓冲带对洱海流域面源污染的削减效果 .....			胡威	王毅力 储昭升(4138)
共培养条件下黄菖蒲和狭叶香蒲对铜绿微囊藻光合系统的影响 .....	陈国元	李青松	谢莆尧	陈燕虹(4145)
Fenton 试剂协同 TiO <sub>2</sub> 光催化降解三氯乙酸及协同机理 .....	王芬	赵宝秀	李想	李伟江 杨龙(4153)
城市大型缓流景观水体流场模拟及人工循环水动力优化 .....		贾泽宇	郑剑锋	孙力平 于静洁(4159)
短程硝化反硝化工艺处理低 C/N 餐厨废水 .....	张周	赵明星	阮文权	缪恒锋 任洪艳 黄振兴(4165)
改性天然菱铁矿去除水中六价铬 .....			周晓倩	郭华明 赵凯(4171)
2种载体对厌氧同步消化、反硝化的影响 .....	冉春秋	邹学军	范立明	崔玉波 周集体(4178)
基于有效去除铅(II)的中孔炭乙二胺改性及影响因素分析 .....				
.....	杨美蓉	李坤权	徐恩兵	乔小朵 潘根兴 郑正(4185)
城市污水处理过程中不同形态氮类营养物的转化特性 .....			金鹏康	宋利 任武昂(4193)
曝气对潜流人工湿地中木本植物的影响 .....	陈永华	吴晓芙	纪智慧	马群 陈明利(4199)
变权组合模型在景观水体水质模拟中的应用 .....			赵加斌	赵新华 彭森(4206)
鱼菜共生系统氮素迁移转化的研究与优化 .....	邹艺娜	胡振	张建	谢慧君 梁爽(4211)
基于虚拟治理成本法的生态环境损害量化评估 .....	蔡锋	陈刚才	彭枫	杨清玲 赵士波 鲜思淑 吴飞(4217)
漂浮型可见光催化剂 Fe-N-TiO <sub>2</sub> /FP-CTS 的制备及其对溶解性柴油的降解 .....				
.....	黄嘉瑜	王学江	卜云洁	张晶 马荣荣 赵建夫(4223)
非晶态 Co <sub>0.5</sub> Ni <sub>0.5</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 的制备及对水中五氯苯酚的吸附 .....		孙梦圆	崔春月	吴娟 宋姿蓉(4228)
pH 对同步硝化反硝化生物膜内溶解氧分布的影响 .....			黄胜娟	荣宏伟 林孟霞(4233)
稻壳制备介孔状二氧化硅的光催化性 .....			穆浩荣	张玲玲 白淑琴(4239)
玉米秆碳源去除地下水硝酸盐 .....	李同燕	李文奇	胡伟武	冯传平(4245)
提高低 C/N 值农村生活污水中 TN 的去除效果 .....	匡武	王翔宇	周其胤	杨远盛(4252)
油田聚驱采出液乳化特性及其破乳-絮凝 .....	翁艺斌	阎光绪	李敏	翟星月 郭绍辉 张佩佩(4259)
西安某人工湖水质时空分布特征及其荧光特性 .....		于佳真	王晓昌	薛涛 陈荣(4265)
改性钙基蒙脱土酸性条件下吸附油酸钠 .....	任瑞晨	张乾伟	石倩倩	李彩霞 王秀兰 孟媛媛(4273)
天然沸石对海水中氨氮的吸附特性 .....	王文华	赵瑾	张晓青	成玉 王静 张雨山 李陆杨(4281)
微孔曝气器脉冲式充氧效果 .....		徐鹏	单继宏	金晓航 于江忠 孙毅 张建中(4287)
厌氧、好氧、厌氧/好氧交替状态对活性污泥性质的影响 .....		杨波	单晓明	田晴 李方 马春燕(4293)
城市人工湖的生态治理 .....		徐后涛	赵凤斌	张玮 王丽卿 郑小燕(4300)
载钴催化剂的制备及对染料降解 .....	李洁冰	李玉龙	Asif Hussain	王瑾 李登新(4309)
低温季大型表流湿地对微污染水体脱氮效果及优化运行 .....				
.....	左倬	仓基俊	朱雪诞	成必新 胡伟 商志清 卿杰(4314)
沸石负载高锰酸钾去除低浓度氨氮 .....	郭华	王军林	张小燕	王娜 刘俊良(4321)
2-乙基蒽醌修饰石墨毡催化电极电化学降解土霉素废水二级出水 .....				
.....	李贵霞	岳琳	潘贵芳	刘艳芳 李伟 李再兴(4326)
抗菌剂三氯卡班在水溶液中的光降解 .....		冯振涛	刘海津	汪应灵 冯家豪(4333)
磁性水滑石快速吸附水体中 Cu(II) 离子 .....	张琪	罗琳	张嘉超	刘武嫦 胡伟斌(4339)
零价铁对水中六价铬还原性能及沉淀污泥中铬的固定化 .....	陈忠林	李金春子	沈吉敏	王斌远 樊磊涛(4345)
椰壳活性炭对水中 N-DBP 前体物的吸附 .....			张一凡	金腊华 周元(4353)

混凝和活性炭吸附深度处理制药废水中有机物去除特征 .....	崔凤国	杨 鹏	张伟军	王东升(4359)
Fenton 试剂氧化处理火炸药污染土壤淋洗液 .....	薛江鹏	王建中	赵泉林	王中友 叶正芳(4365)
微波法对吸附扑热息痛废水活性炭的再生 .....	吴 坚	夏洪应	彭金辉	张利波 郑照强 张声洲(4371)
ES 稳定重金属污染底泥效果 .....	蒋玉广	袁珊珊	杨 伟	梁静波 巢军委(4376)
<i>Halothiobacillus neapolitanus</i> 脱硫性能及限制性因素影响 .....			冯守帅	陈金才 杨海麟(4385)
曝气速率对附加微通道湍流促进器 SMBR 流体动力学性能的影响 .....			解 芳	王建敏 刘进荣(4391)
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /Fe <sup>0</sup> 、H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /Fe <sup>2+</sup> 、H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /Fe <sup>3+</sup> 3种体系处理印染废水 .....			姚 兴	颜幼平 冯 霞(4398)
以游泳馆污水为处理对象的 SBR 中不同污泥负荷下氨氧化菌群落的演变 .....				
.....	薛士琼	孙宝盛	于凤庆	王明圆 李 恺 薛圆圆(4403)
环糊精改性蛭石对水中 Cr(VI) 的吸附 .....			张太亮	吴 凤 阳 萍 欧阳斌(4409)
滤材的表面改性对淤泥脱水过程中渗透性能的影响 .....			浩 婷	王 曦 周 颜 吴 燕(4415)
不同混凝剂处理低温低浊水 .....				洪 云 徐 慧(4421)
SMBBR 工艺不同填料处理生活污水 .....	李卫平	李 杰	朱浩君	杨文焕 敬双怡 殷震育 刘 燕(4427)

## 大气污染防治

煤矿井下高压喷雾雾化特性研究 .....	王鹏飞	刘荣华	汤 梦	张 文 桂 哲(4433)
露天堆场防风抑尘网遮蔽效果的数值模拟 .....			潘武轩	宋翀芳 何鸿展(4440)
TEPA/TETA 改性 SBA-15 对 CO <sub>2</sub> 吸附性能的影响 .....			魏建文	和凯凯 孟令硕 廖 雷(4447)
改性粉煤灰基吸附剂烟气脱汞 .....			郑慧敏	刘清才 王 铸 孟 飞 牛德良(4453)
改性 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 脱硫剂脱除 H <sub>2</sub> S 反应特性 .....	沈洪波	张 辉	刘应书	李皓琰 张 贺 郝智天(4458)
一株鱼粉加工硫化氢恶臭气体脱除菌株的分离与鉴定 .....			孙佩璇	娄永江 庄荣玉 严小军(4465)
北京市近 12 年空气污染变化特征及其与气象要素的相关性分析 .....	谢志英	刘 浩	唐新明	李腾腾 张文君(4471)
循环灰加湿量对密相塔半干法脱硫效率的影响 .....			韩剑宏	黄永海 卢熙宁 童震松(4479)
折流式反应器空气净化效果 .....			刘 鹏	郑 洁 宋雪瑞 王小艳(4483)

## 固体废物处置

市政污泥干化动力学研究 .....	范海宏	武亚磊	李斌斌	马 增(4488)
响应曲面法优化 CO <sub>2</sub> 活化制备夏威夷坚果壳基活性炭 .....	程 松	张利波	夏洪应	彭金辉 张声洲 周朝金(4495)
胞外聚合物对生物浸出线路板金属粉末中铜的作用 .....			杨 崇	朱能武 崔佳莹 吴平霄(4503)
微波超声协同处理废弃印刷线路板中非金属 .....			蔡丽楠	殷 进 张 桐 孔晓露(4509)
水淬钢渣碳化固定 CO <sub>2</sub> .....	涂茂霞	雷 泽	吕晓芳	赵宏欣 王丽娜 张军玲 陈德胜 宋文婉 齐 涛(4514)
O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> 气氛下市政污泥混煤燃烧及动力学特性 .....			邵志伟	黄亚继 严玉朋 刘长奇(4519)
提高硅钙渣胶凝活性的热活化实验 .....			杨志杰	孙俊民 张战军 苗瑞平(4526)
医疗废物处理中生物指示剂湿热灭菌动力学方程 .....			靳登超	李 阳 鲍振博 刘 娜(4531)
三七渣固态发酵生产康宁木霉生防菌 .....	谭显东	王君君	王 浪	羊依金 郭俊元 彭 兰 覃璐琳(4535)
3 种畜禽粪便产气特性差异分析 .....			陈 芬	李 伟 刘奋武 张吴平 李筱梅 卜玉山(4540)
黑曲霉固态发酵三七渣产纤维素酶 .....			黄 凡	谭显东 胡 伟 羊依金 林巧玉 任晓霞(4547)
常温下好氧颗粒污泥的形成过程及除污性能 .....			姚 力	信 欣 郭 毅 宋 幻 李 姣(4553)
垃圾填埋场 HDPE 膜漏洞密度及其影响因素的统计分析 .....			徐 亚	能昌信 刘玉强 刘景财 董 路(4558)
富集同型产乙酸菌污泥厌氧产酸 .....			王 晋	李习伟 符 波 杨 彦 刘 和(4565)

## 土壤污染防治

海泡石及其复配原位修复镉污染稻田 .....	梁学峰	韩 君	徐应明	谭适娟 雷 勇 罗文军(4571)
水泥固封镉污染土离子释放规律与微观结构 .....				董祯琴 陆海军 李继祥(4578)

## 环境生物技术

嗜酸氧化亚铁硫杆菌脱煤矸石中硫影响因素的筛选及条件优化 .....				
.....	赵尚明	何 环	于忠琦	黄冠华 冷云伟 陶秀祥(4585)
高岭土固定 GY2B 优化其降解性能 .....			李跃武	吴平霄 李丽萍 党 志(4591)

## 环境 监 测

成都市道路细颗粒物污染特征 .....	袁小燕	叶芝祥	杨怀金	张 菊(4598)
基于远程图像色度的点源水质监测方法 .....			李 文	杨守波 罗学科(4603)
海洋石油工程新型溢油监测系统研究 .....			隋迎光	彭吉友 刘志明 任 华(4609)

# 曝气对潜流人工湿地中木本植物的影响

陈永华 吴晓芙\* 纪智慧 马群 陈明利  
(中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004)

**摘要** 为了增加人工湿地植物的多样性,本文将花叶冬青(*Ilex aquifolium*)、月季(*Rosa chinensis*)和八角金盘(*Fatsia japonica*)3种木本植物引入潜流人工湿地,比较曝气前后系统对污水处理效果,植物的生物量与对TN、TP负荷减少的贡献率,根系形态与内部结构、根际微生物与基质酶活性的比较研究。结果表明,木本植物潜流人工湿地系统曝气后可以提高COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、TP的去除率,分别为6.99%、4.91%、10.25%、8.09%。湿地曝气有利于3种木本植物的生长,在曝气后比曝气前生物量增加了381.75、606.25和896.88 g/m<sup>2</sup>。曝气会促使木本植物长出大量须根,且曝气后的根系具有大量由薄壁细胞组成的通气组织的水生根特征。同时,曝气后增加了硝化菌数量,各处理单元中硝化菌增量分别为A:0.28 MPN × 10<sup>4</sup>/g, B:4.23 MPN × 10<sup>4</sup>/g, C:7.7 MPN × 10<sup>4</sup>/g。另外,曝气后植物根际基质中磷酸酶和尿酶的含量增加量大约在50%以上,这与系统中N和P的去除率提高的规律一致。

**关键词** 木本植物 曝气 微生物 基质酶

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2015)09-4199-07

## Influence of woody plants on a subsurface-flow constructed wetland system under aerated condition

Chen Yonghua Wu Xiaofu Ji Zhihui Ma Qun Chen Mingli

(College of Environment Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract** In order to increase diversity of the plant in constructed wetland, we applied three woody species (*Ilex aquifolium*, *Rosa chinensis*, and *Fatsia japonica*) to a subsurface-flow constructed wetland for sewage treatment, and compared the sewage treatment effects of the system, the plant biomass and the contribution of the plants to the rate of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) load reduction, the root morphology and interior structure, and the activity of the root microbes and the matrix enzyme before and after aeration of the system. The results show that after aeration of the system, the removal rates of COD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TN, and TP increased by 6.99%, 4.91%, 10.25%, and 8.09%, respectively, the biomasses of *I. aquifolium*, *R. chinensis*, and *F. japonica* increased by 381.75, 606.25, and 896.88 g/m<sup>2</sup>, respectively. The woody plants grew lots of fibrous roots and there were many characteristics of water roots consisting of parenchyma cells after aeration. After aeration of the system, the amounts of nitrifying bacteria in the processing units containing *I. aquifolium*, *R. chinensis*, and *F. japonica*, increased by 0.28 MPN × 10<sup>4</sup>/g, 4.23 MPN × 10<sup>4</sup>/g and 7.7 MPN × 10<sup>4</sup>/g, respectively. The increases of phosphatase and urease content in the plant rhizosphere matrix were more than 50%, which was consistent with the N and P removal rate law.

**Key words** woody plants; aeration; microbial; matrix enzyme

潜流型人工湿地作为人工湿地的一种类型,因其污水处理效率高,占地面积相对较少,因而在污水处理中得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>,植物是潜流人工湿地的重要组成部分<sup>[2]</sup>,目前湿地植物的研究主要集中在去污植物的筛选与组合配置、湿地植物的去污机理等方面,湿地植物品种主要包括为芦苇(*Phragmites australis*)、美人蕉(*Canna indica*)、风车草(*Cyperus alternifolius*)、香蒲(*Typha angustifolia*)、水葱(*Scirpus validus*)、梭鱼草(*Pontederia cordata*)等

草本湿地植物类型<sup>[3,4]</sup>,为了增加湿地植物的多样

**基金项目:**国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07206-001-07);湖南省自然科学基金(2015JJ2202);国家级林业科学技术推广项目(2014-56);湖南省环境科学与工程重点学科建设项目

**收稿日期:**2015-01-05; **修订日期:**2015-01-26

**作者简介:**陈永华(1977—),男,博士后,副教授,硕士生导师,主要研究方向:环境生态修复。E-mail:chenyonghua3333@163.com

\* 通讯联系人, E-mail:wuxiaofu530911@vip.163.com

性与冬季抗寒性,我们考虑扩大湿地植物的筛选范围,增加木本植物,我们还发现,木本植物部分品种更具有抗寒性,而且可以提高地上部分生物量、生物多样性与景观效果、增加立体空间<sup>[5,6]</sup>。

为此,我们利用潜流人工湿地运行水位在表层基质的20 cm以下的特点,将木本植物引入潜流人工湿地中,前期研究发现,少数木本植物经过根系驯化诱导后可以适应潜流人工湿地环境<sup>[6,7]</sup>,但是,大部分木本植物很难适应人工湿地水生缺氧的环境,生长受阻甚至导致死亡,因此,本研究拟在人工曝气的条件下,将3种木本植物引入潜流人工湿地系统,比较曝气前后木本植物的潜流人工湿地系统对污水处理效果,植物的生物量与对TN、TP负荷减少的贡献率、丙二醛和根系活力、根系类型、根际微生物与基质酶活性的变化,旨在为木本植物在潜流人工湿地的应用提供基础数据与技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验系统

系统由三级串联的潜流人工湿地单元构成(编号为A、B和C)。每级池体内宽0.8 m,长2 m,深0.6 m,底部填大粒径石灰石,厚度20 cm,中间填充15 cm的蛭石,最上层填20 cm厚的河砂。在床体表层下20 cm处添加了微曝气装置(ACQ-007型,最大供气量100 L/min)(图1),每天08:30—18:30曝气10 h,其余时间不曝气。系统进水水质为:COD 64.58 ~ 207.09 mg/L、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  33.31 ~ 49.91 mg/L、TN 37.5 ~ 55.64 mg/L、TP 2.93 ~ 3.17 mg/L。A、B和C植物分布为花叶冬青(*Ilex aquifolium*)、月季(*Rosa chinensis*)和八角金盘(*Fatsia japonica*),每种植物种植10行,每行10株。平均每天进水量为1 m<sup>3</sup>,未供氧前湿地系统连续运行60 d,60 d后启动曝气装置,同样运行60 d。每6 d取一次水样测定,取水时间为每天曝气停止的时间18:30。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 水质测定

方法参照文献[8]。

#### 1.2.2 植物生长量的测定

每种植物在种前称重,经过12个月的生长以后再称重,将待测样品在80℃烘箱中烘至恒重后称重,计算单株平均生长量。植物氮磷积累量的测定:将植物样品用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮制备成溶液,总氮含量用过硫酸钾氧化吸光光度法测定<sup>[9]</sup>;总磷用钒

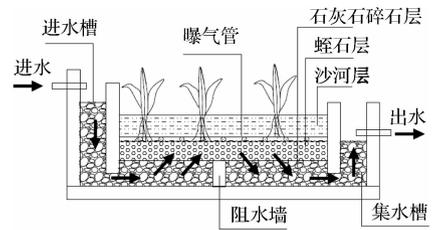


图1 潜流人工湿地单元构造图

Fig. 1 Structure of subsurface-flow wetland cells

钼蓝法测定<sup>[10]</sup>。

#### 1.2.3 植物吸收贡献率测定

单元氮磷去除量 = (进水氮磷浓度 - 出水氮磷浓度) × 均进水量。

单位面积氮磷去除量 = 单元氮磷去除量 / 单元面积。

植物氮磷吸收量 = (整株植物全氮含量 × 总生物量增量) / 种植面积。

植物吸收贡献率 = (植物氮磷吸收量 / 单位面积氮磷去除量) × 100%。

植物单元生物量 = 湿地单元中植物茎叶生物量 + 湿地单元中根生物量。

植物单元生物增量 = 曝气后单元植物生长量 - 种植前单元植物生长量。

#### 1.2.4 根际微生物数量测定

选取5点取样法,在植物根系附近取基质,用MPN法分别测定其中硝化菌及反硝化菌的数量<sup>[11]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 曝气前后系统对污水处理效果的比较

#### 2.1.1 曝气前后 COD 去除率比较

从曝气前后系统对COD去除率(图2)比较可以看出:在前期1个月内曝气前后的COD去除率差异不明显,但去除率的最高值曝气后晚于曝气前1周左右,运行1个月,曝气后的COD去除率明显高于曝气前。数据显示曝气前系统对COD去除率在48%~73%之间,曝气后系统对COD的去除率在56%~80%之间,平均较曝气前增加了6.99%,出现这种现象的原因可能是有机物的去除以兼性细菌和厌氧细菌的分解为主,而增加湿地含氧量,增大了湿地的有氧环境,有利于有机物的去除,曝气后,改善了湿地环境中的含氧量保证了硝化作用的顺利进行<sup>[12,13]</sup>。

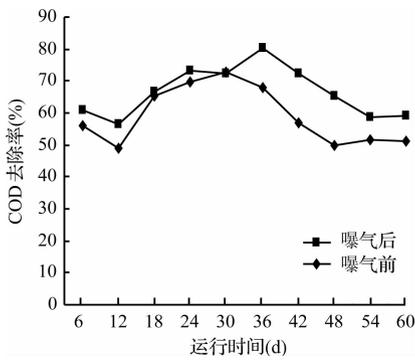


图 2 系统曝气前后的 COD 去除效果比较

Fig. 2 COD removal of the system before and after aeration

### 2.1.2 曝气前后 TN 去除率比较

从曝气前后系统对 TN 去除率(图 3)可以看出:去除率均在 45% 以上,整个实验期间,曝气后的去除率都高于曝气前,总体上,TN 的去除率曝气后 > 曝气前平均增加了 10.25%。有研究证明,人工潜流湿地去除 TN 主要通过硝化-反硝化、水生植物和湿地微生物吸收<sup>[14]</sup>,曝气增强湿地植物及其根际微生物吸收<sup>[15]</sup>可能是系统提高 TN 去除的重要原因。

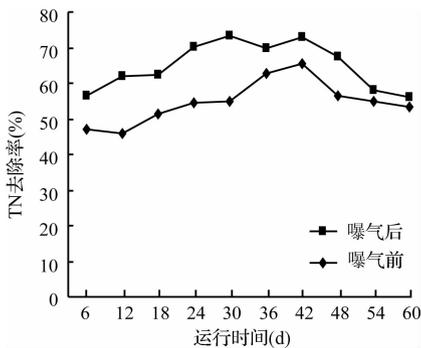


图 3 系统曝气前后的 TN 去除效果比较

Fig. 3 Comparison of TN removal of the system before and after aeration

### 2.1.3 曝气前后 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率比较

从曝气前后系统对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率(图 4)可以看出:在前期阶段曝气前后的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率差异不明显,但去除率的最高值曝气后晚于曝气前 1 周左右,运行 36 d 后,曝气后的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率明显高于曝气前,这一变化规律与 COD<sub>cr</sub> 去除率规律趋势基本一致。总体上,曝气后系统对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除率平均增加了 4.91%,原因为曝气增加了潜流湿地溶解氧浓度,有利于氨氮硝化过程顺利进行,进而提高垂直潜流湿地 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除效率。此外,微生物

的活性增强可强化 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的生物吸收<sup>[14]</sup>。

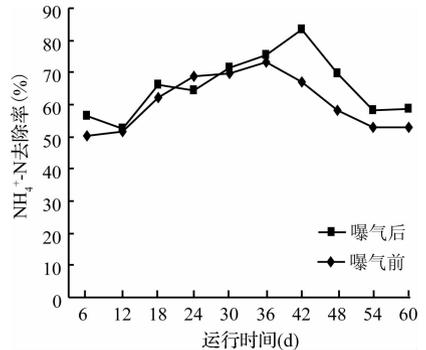


图 4 系统曝气前后的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除效果比较

Fig. 4 Comparison of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N removal of the system before and after aeration

### 2.1.4 曝气前后 TP 去除率比较

从曝气前后系统对 TP 去除率(图 5)可以看出:整个试验期间,曝气后的去除率都高于曝气前,去除率的最高值曝气后晚于曝气前 1 周左右,总体上,曝气后湿地单元对 TP 的去除率增加了 9.43%。有研究表明,人工潜流湿地内,磷主要通过吸附沉降、水生植物和微生物吸收等过程被去除<sup>[5,14]</sup>,磷在潜流湿地内直接与填料接触,吸附滞留成为湿地除磷的主要途径<sup>[16]</sup>,湿地内部曝气的方式强化了磷与湿地填料的接触,有利于增强填料磷吸附去除效果,进而提高潜流湿地磷去除效率<sup>[17,18]</sup>,同时,较高的溶解氧可利用性有利于生物除磷顺利进行。

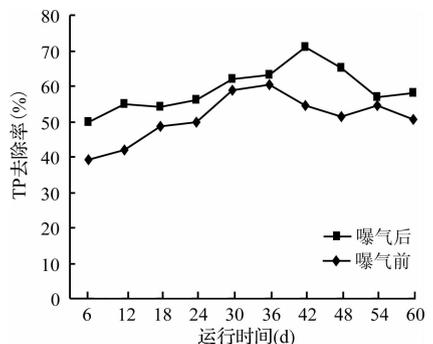


图 5 系统曝气前后的 TP 去除效果比较

Fig. 5 Comparison of TP removal of the system before and after aeration

## 2.2 曝气前后木本植物生长状况比较

### 2.2.1 对植物生物量的影响

从 3 种植物生物量(表 1)来看:在曝气后 A、B、C 单元植物生长量较种植前分别增加了 625.5、781.25 和 1 370.38 g/m<sup>2</sup>,较湿地曝气前分别增加了

381.75、606.25 和 896.88 g/m<sup>2</sup>。同时,在曝气湿地环境生长 60 d 里也有部分植株死亡现象,说明木本植物处于缺氧的条件下可能导致缺氧死亡,有研究表明,植物根区氧含量的变化会影响植物的生长,长期缺氧会造成无氧呼吸,引起植物酒精中毒死亡<sup>[19-21]</sup>,曝气后生长 60 d,增长量明显高于曝气前,说明曝气有利用植物的生长。

### 2.2.2 对植物对氮、磷富集含量的影响

从系统中植物氮、磷吸收量及贡献率(表 2)可

知,曝气前的湿地系统中花叶冬青、月季和八角金盘对 TN、TP 负荷分别减少的贡献率为 0.91%、8.99%。曝气后的系统中植物的吸收量相对增加,且对 TN 去除的贡献率为 2.91%,较曝气前增加了 2%,对 TP 的吸收贡献率为 6.65%,较曝气前增加了 2.34%。分析发现曝气后对 TN、TP 的贡献率都比较低,这也与前人研究一致,植物对 TN、TP 的直接吸收去除率一般不到 5%<sup>[2]</sup>,曝气后对 TN、TP 的去除主要是依靠微生物去污功能的增强<sup>[22]</sup>。

表 1 植物生物量比较

Table 1 Comparison of plant biomass

生长条件	处理单元	植物	茎叶生物量(g/株)	根生物量(g/株)	单元生物量(g/m <sup>2</sup> )	单元生物量增量(g/m <sup>2</sup> )
供氧前生长 60 d	A	花叶冬青	17.7	5.2	1 493.75	243.75
	B	月季	19.8	5.5	1 581.25	175
	C	八角金盘	200	20	4 812.5	437.5
供氧后生长 60 d	A	花叶冬青	21.5	7.5	1 812.5	625.5
	B	月季	25.5	9.5	2 187.5	781.25
	C	八角金盘	235.7	25.3	5 709.38	1 370.38

表 2 植物氮、磷吸收量及贡献率

Table 2 Plant nitrogen and phosphorus uptake of the system and contribution rate

类型	生长条件	进水浓度 (mg/L)	出水浓度 (mg/L)	单元去除量 (g)	单位面积去除量 (g/m <sup>2</sup> )	植物吸收量 (g/m <sup>2</sup> )	植物吸收贡献率 (%)
氮	未曝气	35.01	15.74	1156.2	214.11	1.40	0.91
	曝气	25.90	9.11	1007.4	186.56	5.42	2.91
磷	未曝气	3.04	1.51	91.8	17	1.13	6.65
	曝气	2.68	1.10	94.8	17.56	1.58	8.99

## 2.3 曝气前后根系形态与结构、根际微生物、基质酶的影响

### 2.3.1 对根系形态与结构的影响

3种植物在湿地曝气后,植物的根系形态发生了变化(图 6),长出了白色的水生根,且多为须根。陈章和等<sup>[23]</sup>在研究中也发现,须根型植物对缺氧环境的忍受能力比根茎型植物差,但其对污水的净化能力较根茎型植物强。由此可见,曝气会增加水中氧气,氧气充足时植物长出大量须根,同时增强植物的净化能力,一般说来,植物长期水淹,茎基变粗并在地表形成不定根<sup>[24]</sup>。

从曝气前后木本植物根系内部结构(图 7)可以看出有较大差异,曝气前植物根系细胞排列紧凑,从外皮层、皮层薄壁组织细胞、韧皮部、木质部等结构能明显区分开来且根系的组织非常致密。但是在曝气后,根系具有大量由薄壁细胞组成的通气组织的水生根特征,说明该木本植物在引入潜流湿地种植后,原因推测为在缺氧信号的传递下,长出的不定根



图 6 曝气后 3 种木本植物的根系形态变化

Fig. 6 Variation in the root morphology of the three woody plant after aeration

分泌大量的纤维素酶溶解根系中的木质纤维素,产生薄壁组织,薄壁组织内一些气室或空腔的集合形成通气组织,使根系获得能适于低氧水环境下进行有氧代谢能力,从而为植物长期适于水生环境创造了最佳的条件<sup>[25,26]</sup>。

### 2.3.2 对根际微生物的影响

从曝气前后系统中根际硝化菌和反硝化菌数量

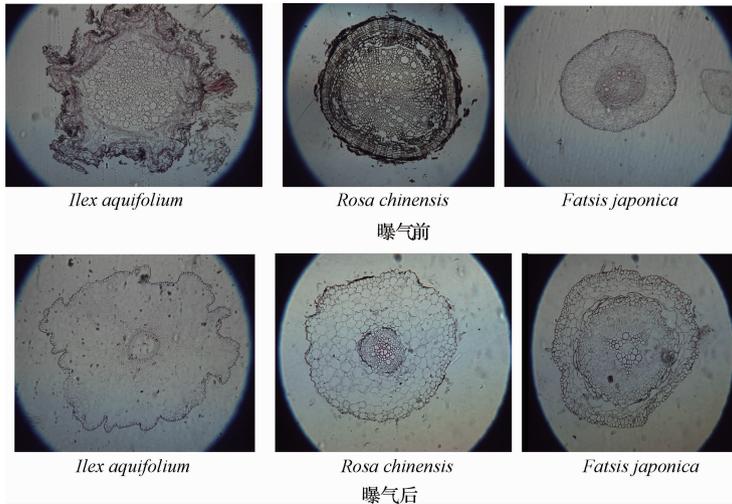


图 7 曝气前后木本植物根系内部结构(4 倍)

Fig. 7 Internal structure of the woody plants before and after aeration (4 times)

的变化(表 3)可以看出:对系统曝气后,硝化菌数量明显增加。与曝气前比较,各处理单元中硝化菌增量分别为:A 池  $0.28 \text{ MPN} \times 10^4/\text{g}$ , B 池  $4.23 \text{ MPN} \times 10^4/\text{g}$ , C 池  $7.7 \text{ MPN} \times 10^4/\text{g}$ ;反硝化菌数量除 A 池增加了  $0.09 \text{ MPN} \times 10^4/\text{g}$  外, B、C 池分别减少了  $2.798 \text{ MPN} \times 10^4/\text{g}$ ,  $0.029 \text{ MPN} \times 10^4/\text{g}$ 。这与系统中的 TN 和  $\text{NH}_4\text{-N}$  去除增加趋势并不一致,分析原因可能为曝气改善了湿地缺氧的环境,有利于硝化菌发挥作用,因此,硝化菌增加明显,由于反硝化菌为兼性菌,曝气对其影响差异不大。有研究发现,溶解氧利用率较低是导致垂直潜流湿地氮去除效果较差的主要因素<sup>[27]</sup>,充足的溶解氧供给是保证氨氮硝化过程顺利进行的关键<sup>[28]</sup>。较高的溶解氧利用率也可促进人工湿地生物除磷, Behrends 等<sup>[29]</sup>研究发现,采用“潮汐流”操作提高溶解氧供给后,湿地

磷去除效率提高 10% ~ 12%。

### 2.3.3 对根际基质酶活性的影响

从曝气前后根际基质酶的含量变化来看(表 4):曝气后植物根系附近基质中磷酸酶和尿酶的含量都相应增加,增加量大约在 50% 以上,这与系统中 P 和 N 的去除率提高的规律一致。这说明曝气过程促进植物根系与根系附近微生物的互动,根系分泌更多的磷酸酶和尿酶,也进一步提升单元中对 P 和 N 的去除率。

## 3 结 论

(1)曝气后可以提高木本植物潜流人工湿地系统对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 的去除率,较曝气前分别增加了 6.99%、4.91%、10.25%、8.09%,曝气后的 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 的去除率比曝气前晚 1 周达到最高值。

表 3 曝气前后根际硝化菌和反硝化菌数量

Table 3 Number of rhizosphere nitrifying bacteria and denitrifying bacteria before and after aeration

( $\text{MPN} \times 10^4/\text{g}$ )

处理单元	未曝气		曝气	
	硝化菌	反硝化菌	硝化菌	反硝化菌
A	0.4	0.21	0.68	0.3
B	1.1	2.8	5.33	0.002
C	17.3	0.03	25	0.001

表 4 曝气前后根际基质酶的含量

Table 4 Matrix enzyme content near plant root systems before and after aeration (mg/100 g)

类型	花叶冬青		月季		八角金盘	
	曝气前	曝气后	曝气前	曝气后	曝气前	曝气后
磷酸酶	52.4	78.67	55.66	80.23	44.31	68.45
尿酶	24.71	41.75	12.36	23.35	9.88	15.89

(2)曝气有利于木本植物的生长,在相同生长时间(60 d)内,3种植物花叶冬青、月季、八角金盘,在曝气条件下比未曝气时单元生物量增加了381.75、606.25和896.88 g/m<sup>2</sup>。

(3)3种木本植物在潜流人工湿地曝气后,根系形态发生了变化,长出了白色的水生根,且多为须根。内部结构也具有大量由薄壁细胞组成的通气组织特征。曝气增加了硝化菌数量,对反硝化菌数量影响差异不大。曝气过程促进植物根系与根系附近微生物的互作,根系可以分泌更多的磷酸酶和尿素,也进一步提升单元中对P和N的去除率。

## 参考文献

- [1] 吴振斌, 谢小龙, 徐栋, 等. 复合垂直流人工湿地在奥林匹克森林公园龙型水系的应用. 中国给水排水, **2009**, 25(24): 28-35  
Wu Zhenbin, Xie Xiaolong, Xu Dong, et al. Application of integrated vertical flow constructed wetland for improvement of water quality of dragon-shaped water system in Beijing Olympic Forest Park. China Water & Wastewater, **2009**, 25(24): 28-35(in Chinese)
- [2] 陈永华, 吴晓芙, 何刚, 等. 人工湿地污水处理系统中的植物效应与基质酶活性. 生态学报, **2009**, 29(11): 6051-6058  
Chen Yonghua, Wu Xiaofu, He Gang, et al. Analysis of plant effect and rhizosphere enzyme activity in a constructed vertical-flow wetland established for sewage treatment. Acta Ecologica Sinica, **2009**, 29(11): 6051-6058(in Chinese)
- [3] 陈永华, 吴晓芙. 人工湿地植物配置与管理. 北京: 中国林业出版社, **2012**
- [4] 邓辅唐. 湿地植物及其工程应用. 昆明: 云南科技出版社, **2007**
- [5] 赵珊, 张军, 陈沉, 等. 木本植物作为人工湿地植物的可行性试验. 净水技术, **2012**, 31(1): 73-79  
Zhao Shan, Zhang Jun, Chen Chen, et al. Feasibility experiments in application of woody plants as constructed wetland plants. Water Purification Technology, **2012**, 31(1): 73-79(in Chinese)
- [6] 陈永华, 吴晓芙, 郝君, 等. 亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价. 环境科学, **2014**, 35(2): 585-591  
Chen Yonghua, Wu Xiaofu, Hao Jun, et al. Selection and purification potential evaluation of woody plant in vertical flow constructed wetlands in the subtropical Area. Environment Science, **2014**, 35(2): 585-591(in Chinese)
- [7] 郝君, 陈永华, 吴晓芙, 等. 4种木本植物在潜流人工湿地环境下的根系诱导. 中南林业科技大学学报, **2012**, 32(12): 46-50  
Hao Jun, Chen Yonghua, Wu Xiaofu, et al. Study on induced root of 4 woody plants with subsurface flow constructed wetlands. Journal of Central South University of Forestry and Technology, **2012**, 32(12): 46-50(in Chinese)
- [8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第4版). 北京: 中国环境科学出版社, **2002**
- [9] 吴建之, 葛滢, 王晓月. 过硫酸钾氧化吸光光度法测定植物总氮. 理化检验: 化学分册, **2000**, 36(4): 166-167  
Wu Jianzhi, Ge Ying, Wang Xiaoyue. UV absorptiohpotometric determination of total nitrogen in plant after K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> oxidation. PTCA (Part B: Chemical Analysis), **2000**, 36(4): 166-167(in Chinese)
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版). 北京: 中国农业出版社, **2000**: 207-237
- [11] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析手册. 北京: 中国农业出版社, **1986**: 91-109
- [12] Maltais-Landry G., Chazarenc F., Comeau Y., et al. Effects of artificial aeration, macrophyte species, and loading rate on removal efficiency in constructed wetland mesocosms treating fish farm wastewater. Journal of Environmental Engineering and Science, **2007**, 6(4): 409-414
- [13] 郭焯焯, 杨淑英, 黄莹, 等. 间歇曝气潜流人工湿地的污水脱氮效果. 环境工程学报, **2014**, 8(4): 1405-1409  
Guo Yeye, Yang Shuying, Huang Ying, et al. Effect of intermittent aeration on performance of nitrogen removal in domestic wastewater treatment by subsurface constructed wetlands. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2014**, 8(4): 1405-1409(in Chinese)
- [14] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?. Water Science and Technology, **1997**, 35(5): 11-17
- [15] Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse. New Delhi: McGraw-Hill Companies. Inc, **2003**: 940-982
- [16] Scholz M. Wetland Systems to Control Urban Runoff. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, **2006**
- [17] De-Bashan L. E., Bashan Y. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997-2003). Water Research, **2004**, 38(19): 4222-4246
- [18] 白少元, 丁彦礼, 游少鸿, 等. 曝气对潜流人工湿地污染物沿程降解规律的影响. 环境工程学报, **2014**, 8(6): 2359-2364  
Bai Shaoyuan, Ding Yanli, You Shaohong, et al. Effect of

- aeration on hydraulic characteristics of horizontal subsurface flow constructed wetlands. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2014**, 8(6): 2359-2364(in Chinese)
- [19] Fan Liwei, Hai Reti, Wang Wenxing, et al. Application of computational fluid dynamic to model the hydraulic performance of subsurface flow wetland. Journal of Environmental Sciences, **2008**, 20(12): 1415-1422
- [20] Jackson M. B. Ethylene-promoted elongation: An adaptation to submergence stress. Annals of Botany, **2008**, 101(2): 229-248
- [21] Rzewuski G., Sauter M. Ethylene biosynthesis and signaling in rice. Plant Science, **2008**, 175(1-2): 32-42
- [22] 汤显强, 李金中, 李学菊, 等. 间歇曝气对生物填料人工湿地氮磷去除性能的影响. 农业环境科学学报, **2008**, 27(1): 318-322
- Tang Xianqiang, Li Jinzhong, Li Xueju, et al. Effect of intermittent aeration on nitrogen and phosphorus removal in constructed wetlands with bilofilm carrier as substrate. Journal of Agro-Environment Science, **2008**, 27(1): 318-322(in Chinese)
- [23] 陈章和, 陈芳, 刘譔诚, 等. 测定潜流人工湿地根系生物量的新方法. 生态学报, **2007**, 27(2): 668-673
- Chen Zhanghe, Chen Fang, Liu Xucheng, et al. Root growth of wetland plants with different root types. Acta Ecologica Sinica, **2007**, 27(2): 668-673(in Chinese)
- [24] Colmer T. D., Cox M. C. H., Voesenek. L. A. C. J. Root aeration in rice (*Oryza sativa*): Evaluation of oxygen, carbon dioxide, and ethylene as possible regulators of root acclimatizations. New Phytologist, **2006**, 170(4): 767-778
- [25] 陈永华, 吴晓芙, 郝君, 等. 4种木本植物在潜流人工湿地环境下的适应性与去污效果. 生态学报, **2014**, 34(4): 916-924
- Chen Yonghua, Wu Xiaofu, Hao Jun, et al. The adaptability and decontamination effect of four kinds of woody plants in constructed wetland environment. Acta Ecologica Sinica, **2014**, 34(4): 916-924(in Chinese)
- [26] 周建昌, 周丽燕, 邢海, 等. 陆生植物对富营养化水体净化及美化效果研究. 河北农业科学, **2008**, 12(1): 42-43
- Zhou Jianchang, Zhou Liyan, Xing Hai, et al. Study of purification and beautification effect of terrestrial plant on eutrophic water. Journal of Hebei Agricultural Sciences, **2008**, 12(1): 42-43(in Chinese)
- [27] Vymazal J. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. Ecological Engineering, **2002**, 18(5): 633-646
- [28] Kusch P., Winbner A., Kappelmeyer U., et al. Annual cycle of nitrogen removal by a pilot-scale subsurface horizontal flow in a constructed wetland under moderate climate. Water Research, **2003**, 37(17): 4236-4242
- [29] Behrends L. L., Houke L., Bailey E., et al. Reciprocating constructed wetlands for treating industrial, municipal and agricultural wastewater. Water Science and Technology, **2001**, 44(11-12): 399-405