

梯田式人工湿地处理生活污水的初步研究

詹 鹏¹ ,王湘英¹ ,朱建林^{1,2} ,高华生² ,李小明¹

(1. 湖南大学环境科学与工程学院 ,湖南 长沙 410082 ; 2. 宁波大学建筑工程与环境学院 ,浙江 宁波 315211)

摘要 :针对山丘坡地的自然环境特点 ,提出构建梯田式人工湿地处理生活污水的方法 ,并通过实验装置对梯田式人工湿地处理生活污水的效果进行了初步研究。结果表明 :当 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 的进水质量浓度变化范围在 182.3 ~ 286.7 mg/L、32.91 ~ 59.28 mg/L、1.23 ~ 3.05 mg/L 时 ,其平均去除率分别为 86.52%、80.5%、96.16% ,出水质量浓度分别低于 30 mg/L、10 mg/L、0.1 mg/L ,湿地基质中硝化菌、反硝化菌数量变化范围分别为 1.5 万 ~ 420 万 MPN/g、30 万 ~ 1 860 万 MPN/g。与常规人工湿地相比 ,梯田式人工湿地具有较强的污染物去除能力 ,特别是具有高效的脱氮除磷效果。

关键词 :生活污水 ;人工湿地 ;脱氮 ;除磷

中图分类号 :X703 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-693X(2008)01-0027-04

Primary research on domestic sewage treatment with terrace-type constructed wetland

ZHAN Peng¹ , WANG Xiang-ying¹ , ZHU Jian-lin^{1,2} , GAO Hua-sheng² , LI Xiao-ming¹

(1. College of Environmental Science & Engineering , Hunan University , Changsha 410082 , China ; 2. Faculty of Architectural Engineering , Civil Engineering and Environment , Ningbo University , Ningbo 315211 , China)

Abstract :Based on the natural environmental characteristics of sloping field , a method for the treatment of domestic sewage with terrace-type constructed wetland was developed. Preliminary study on the removal efficiency of domestic sewage was carried out by experiments , which indicated that when the influent concentration of COD_{Cr} , $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, TP varied in the range of 182.3—286.7 mg/L , 32.91—59.28 mg/L and 1.23—3.05 mg/L respectively , the corresponding effluent concentration were less than 30 mg/L , 10 mg/L and 0.1 mg/L with average removal efficiency 86.52% , 80.5% and 96.16% respectively. The numbers of nitrifying and denitrifying bacteria in the strata of the system were $1.5 \times 10^4 \text{MPN/g}$ — $4.2 \times 10^6 \text{MPN/g}$ and $3.0 \times 10^5 \text{MPN/g}$ — $1.86 \times 10^7 \text{MPN/g}$, respectively. The results indicate that the terrace-type system has higher removal efficiency than the normal constructed wetlands , especially for nitrogen and phosphorous removal.

Key words :domestic sewage ; constructed wetland ; denitrification ; phosphorous removal

浙东沿海地区的饮用水源保护区多处在山丘农村地区 ,由于受经济、技术等条件的制约 ,保护区内居民生活污水大多未经任何处理而直接排放 ,造成饮用水源受污染。受生活污水的影响 ,浙东沿海地区的重要饮用水源水库都出现了污染指数超标的问题 ,特别是氮、磷元素超标较严重 ,严重影响饮水安全 ,已成为浙江省重大环境与公共安全问题之一。因此 ,发展经济有效、简单适合于水源库区的生活污

水污染控制方法与技术 ,对于饮用水源地保护具有重要现实意义。

与表面流及潜流人工湿地相比 ,垂直流人工湿地具有较强的有机物及氮的去除能力^[1-2]。自 1990 年后采用垂直流形式构建的人工湿地迅速发展起来 ,并已得到广泛应用^[1-6]。然而 ,由于溶解氧、碳氮比、温度与季节等因素的影响 ,垂直流人工湿地生物硝化、反硝化脱氮效果不强 ,对生活污水的氨氮去除

基金项目 :浙江省自然科学基金资助项目(Y505335) ;宁波市科技攻关项目(2006C100109)

作者简介 :詹鹏(1982—) ,男(土家族) ,湖南保靖人 ,硕士研究生 ,研究方向水污染控制。E-mail :jpzhan1982163.com

率一般为 60% ~ 70% ;且系统除磷效果不是很好 ,难以满足较高的出水水质要求。

为解决饮用水源保护区生活污水污染问题 ,提高人工湿地脱氮除磷效果 ,本文根据饮用水源保护区自然环境特点 ,提出一种基于山丘坡地的梯田式人工湿地。这种湿地由两个或多个沿山坡排列的复合垂直流湿地及连接复合垂直流湿地之间的表面流湿地构建而成 ,其特点是综合复合垂直流湿地较高的污染物去除率及表面流湿地能实现水体自动复氧的优点 ,完成系统的自动充氧 ,使整个系统形成交替的好氧厌氧环境 ;整个湿地系统相当于多级串联的 O/A/O/A 池 ,从而实现对生活污水的梯级净化。初步试验结果表明 ,与常规人工湿地相比 ,梯田式人工湿地具有较强的污染物去除能力 ,尤其是具有高效的脱氮除磷效果。

1 试验装置与方法

1.1 湿地结构

梯田式人工湿地由两个复合垂直流人工湿地加一个相当于表面流人工湿地的坡地组成。整个系统采用 PVC 板材制成 ,周边密封 ,其中复合垂直流湿地各单池长×宽×高为 30 cm×60 cm×60 cm ,池底均为 15 cm 的粒径为 20 ~ 50 mm 的鹅卵石连通层 ,其上为 15 cm 的粒径为 10 ~ 20 mm 的砾石层 ,最上层为 0 ~ 0.5 mm 的砂层。上行流池比下行流池低 5 cm ,污水依靠两池间的水面高差由下行池重力自流进入上行池。系统平均空隙率约为 45% ,总有效容积为 235.8 L ,各单池均匀种植长势良好的芦苇 ,密度为 30 株/m² ,坡地长×宽×高为 60 cm×60 cm×30 cm ,内填 20 cm 厚的细砂 ,其上栽种人工草皮并加铺少许杨树枯落物 ,模拟野外山丘坡地情况 ,其结构如图 1 所示。

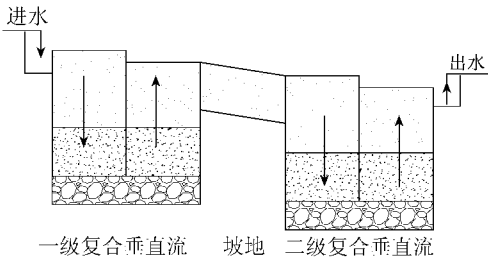


图 1 梯田式人工湿地结构示意图

1.2 运行条件

实验在室外条件下进行 ,实验用水为宁波大学生活区化粪池出水。系统于 2006 年 4 月 5 日开始运行并测试各项指标 ,测试时间为 80 d ,采样频率为 10 d/次。采用自控器控制进水泵 ,全天间歇性进水 4 次 ,连续出水 ,进水量为 60 L/d ,理论水力负荷为 33.3 cm/d ,理论水力停留时间为 5 d。系统运行 1 个

月达到成熟稳定状态 ,此后测定基质中硝化菌、反硝化菌数量。进水参数如表 1 所示。

表 1 进水参数

pH	$\rho(\text{DO})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
7.84 ~ 8.57	0.91 ~ 2.43	182.3 ~ 286.7	32.91 ~ 59.28	1.23 ~ 3.05

1.3 测试项目与方法

本实验主要测试进出水 COD_{Cr} 、 NH_4^+-N 、TP、基质中硝化菌和反硝化菌数量。水质指标分析采用国家环保局标准分析方法^[7] : COD_{Cr} 为重铬酸钾法 , NH_4^+-N 为纳氏试剂光度法 ,TP 为钼锑抗光度法 ;硝化菌、反硝化菌数量测定采用 MPN 法^[8]。

2 结果与分析

2.1 COD_{Cr} 的去除

垂直流人工湿地具有较强的有机物去除能力 ,其中不溶性有机物通过沉淀、过滤作用被填料或植物根系截留下来 ,然后被湿地中的微生物、原生动动物及后生动物加以利用 ;可溶性有机物则先被吸附在基质中的生物膜上 ,然后通过生物膜内好氧、厌氧微生物的代谢过程得以去除^[9]。

由图 2 可见 ,系统运行初期 COD_{Cr} 去除率不高 ,不到 60% ,这一时期主要是不溶性 COD_{Cr} 通过填料的沉淀、过滤作用而截留在湿地内。随着系统运行时间的延长 ,基质中微生物大量繁殖 ,填料间生物膜形成 ,系统逐渐趋于稳定。整个湿地系统成为固定的生物反应器 , COD_{Cr} 通过浓度扩散、吸附作用被附着在生物膜上的微生物进行好氧厌氧代谢得以去除。系统运行 40 d 后 ,其 COD_{Cr} 的平均去除率为 86.52% ,高于一般处理生活污水的人工湿地 70% ~ 80% 的去除率 ,系统出水 COD_{Cr} 质量浓度在 50 mg/L 以下 ,且波动较小 ,处理效果稳定。

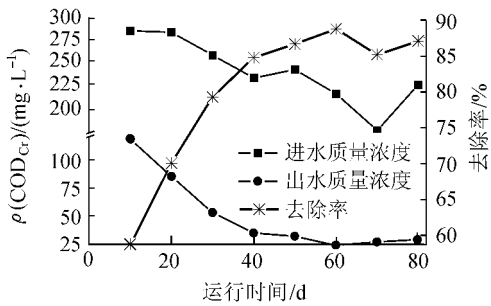


图 2 梯田式人工湿地内 COD_{Cr} 变化情况

2.2 NH_4^+-N 的去除

人工湿地中 NH_4^+-N 去除途径包括填料的吸附、离子交换、气体挥发、植物的吸收及微生物的作用等 ,其中湿地中硝化菌、反硝化菌的硝化和反硝化作用是实现 NH_4^+-N 去除的主要途径 ;另外植物根系具

有向基质输氧的能力 ,形成有利于实现硝化作用的好氧微区 ,同时在远离根系周围的厌氧区又为反硝化作用提供了条件^[10-11] ,使人工湿地存在同步硝化反硝化现象^[12]。

由图 3 可见 ,尽管系统进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量浓度波动较大 ,变化范围在 32.91 ~ 59.28 mg/L 间 ,但运行 40 d 后 ,系统出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量浓度较稳定 ,均低于 10 mg/L。 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率从运行前 10 d 的 53.0% 上升到 40 d 后的 81.7% ,最终平均去除率为 80.5% ,高于一般人工湿地处理生活污水 60% ~ 70% 的去除率。

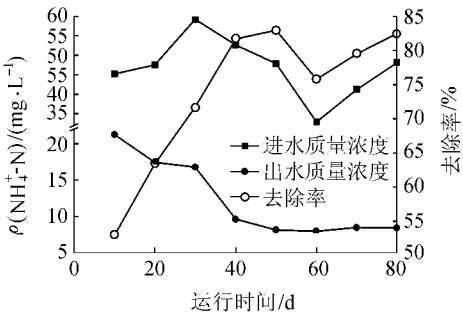


图 3 梯田式人工湿地内 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 变化情况

研究表明 ,人工湿地中硝化菌和反硝化菌等微生物对系统的除氮能力有很大影响^[13-14]。梯田式人工湿地基质不同层次硝化与反硝化细菌数目见图 4。由图 4 可见 ,沿水流方向硝化菌数量明显降低 ,反硝化细菌数量明显升高 ,与沿水流方向因微生物代谢消耗溶解氧 ,使其浓度不断降低的规律吻合^[15]。但如表 2 所示 ,梯田式人工湿地二级复合垂直流湿地中硝化菌数量明显多于单一复合垂直流人工湿地中硝化菌数量 ,而反硝化菌数量明显少于后者^[16]。

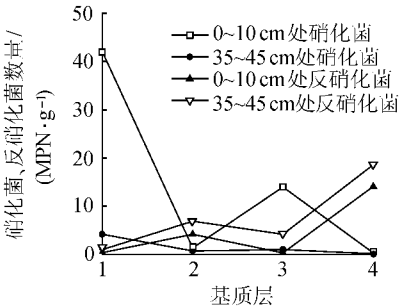


图 4 梯田式人工湿地基质不同层次硝化与反硝化细菌数目 (1 2 3 4 分别代表沿水流方向的四个单一垂直流池)

表 2 两种人工湿地中硝化菌、反硝化菌数量比较

人工湿地	硝化菌数量 ($\text{MPN} \cdot \text{g}^{-1}$)	反硝化数量 ($\text{MPN} \cdot \text{g}^{-1}$)
梯田式人工湿地	$1.0 \times 10^5 \sim 1.4 \times 10^6$	$3.0 \times 10^5 \sim 4.2 \times 10^6$
单一复合垂直流人工湿地 ^[17]	$7.5 \times 10^3 \sim 1.1 \times 10^5$	$7.5 \times 10^6 \sim 1.1 \times 10^7$

产生这一现象的原因是梯田式人工湿地在二级复合垂直流湿地前增加了一个表面流湿地的坡地 ,污水以表面流的形式流经坡地时实现了自动复氧 ,使得后续系统的溶解氧浓度增加 ,整个系统实现了好氧/厌氧的交替运行 ,水体经过坡地后溶解氧质量浓度增加 0.5 ~ 1.2 mg/L。该系统具有高效的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的去除能力 ,与其可能达到适合的溶解氧质量浓度范围有密切的关系。

2.3 磷的去除

污水中磷的存在形态取决于磷的类型 ,生活污水中磷主要以正磷酸盐和有机磷的形式存在 ,人工湿地对磷也有较好的去除效果 ,其主要去除机理是通过填料吸附、微生物和植物的吸收以及有机质的吸附等来实现的。

由图 5 可见 ,运行初期 ,TP 的去除率为 70% 左右 ,去除途径主要为填料的吸附和植物的吸收。随着系统运行时间的延长 ,依据根区法理论^[17] ,各种微生物尤其是聚磷微生物的作用成为 TP 去除的主要途径之一。因此 ,虽然系统进水 TP 的质量浓度波动范围较大 ,但系统内维持高的微生物数量 ,能够持续吸收磷 ,使出水 $\rho(\text{TP})$ 维持在 0.05 mg/L 以下 ,TP 的去除率高达 95%。表明梯田式人工湿地具有很高的除磷效果及抗冲击负荷的能力。

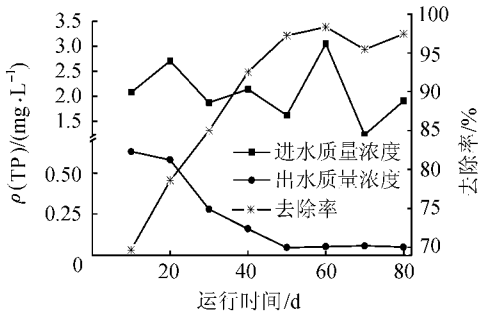


图 5 梯田式人工湿地内 TP 的变化情况

3 结 论

a. 与常规人工湿地相比 ,梯田式人工湿地可以达到较高的生活污水处理效率 ,其中 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TP 平均去除率分别达到 86.52%、80.5%、96.16% ,出水质量浓度分别低于 30 mg/L、10 mg/L、0.1 mg/L ,出水水质满足城镇污水处理厂污染物排放标准一级 B 标准。

b. 梯田式人工湿地具有高效的脱氮除磷效果 ,湿地中的坡地能够实现水体的自动复氧 ,提高了后续系统的硝化能力及去除其他污染物的能力 ,为解决人工湿地因溶解氧不足而限制脱氮效率提供了一种新的思路。

c. 如何确定坡地水体的溶解氧含量及溶解氧

对后续系统处理效率的影响,把人工湿地与多种土地利用类型相结合,实现经济、高效的生活污水处理能力尚需进一步研究。

参考文献：

[1] WEEDON C M. Compact vertical flow constructed wetland systems-first two years 'performance[J]. Water Sci Technol , 2003 48(5):15-23.

[2] LABER J ,PERFLER R ,HABERL R. Two strategies for advanced nitrogen elimination in vertical flow constructed wetlands[J]. Water Sci Technol ,1997 35(5) :71-77.

[3] HANS B ,CARLOS A A. The use of vertical flow constructed wetlandsfor on-site treatment of domestic wastewater :New Danish guidelines[J]. Ecological Engineering ,2005 ,25(5) : 419-500.

[4] ARTHUR F M M ,RICHARD VAN L ,GERARD B J ,et al. Water and mass budgets of a vertical-flow constructed wetland used for wastewater treatment [J]. Ecological Engineering , 2003 20(1) 31-44.

[5] MONIKA S ,FERDINAND K ,NHARD P ,et al. Tertiary treatment in a vertical flow reed bed system-a full scale pilot plant for 200-600 P E[J]. Water Sci Technol ,1997 35(5) : 223-230.

[6] 刘家宝 ,莫凤鸾 ,雷志洪 ,等.垂直流人工湿地系统保护饮用水源的实例[J]. 给水排水 2005 31(4) :10-13.

[7] 国家环保局编委会.水和废水检测分析方法[M].4 版. 北京 :中国环境科学出版社 2002.

[8] 陈文新.土壤与环境微生物学[M].北京 北京农业大学

出版社 ,1984.

[9] 吴晓磊.人工湿地废水处理机理[J].环境科学 ,1995 ,16 (3) 83-86.

[10] 张兵之 ,吴振斌 ,徐光来.人工湿地的发展概况和面临的问题[J].环境科学与技术 2003 26(5) 87-90.

[11] GREEN M ,FRIEDLER E ,SAFRAL I. Enhancing nitrification in vertical flow constructed wetland tilizing a passive air pump [J]. Water Research ,1998 32(12) 3513-3520.

[12] 吴建强 ,黄沈发 ,丁玲 ,等.人工湿地中的 SND 机理以及 DO、pH 对其的影响[J]. 环境污染与防治 ,2005 ,27(6) : 476-478.

[13] CHRIS C T ,ROBERT H K. Nitrogen processing gradients in subsurface flow treatment wetlands-influence of wastewater characteristic[J]. Ecological Engineering ,2002 ,18(4) :499-520.

[14] SOMDA Z C ,PNATAK S C ,MILLS H A. Nitrapy in terrazole , atrazine and simazine influence on denitrification and corn growth[J]. Plant Nutrition ,1990 ,13(9) :1195-1208.

[15] BERGERON V ,KENT R A ,BERGERON V ,et a1. Toxicity of tributylhin chloride to anaerobic nitrogen transformation in sedi-ment and porewater[J]. J Environ Qual ,1993(22) 528-536.

[16] 贺锋 ,吴振斌 ,陶菁 ,等.复合垂直流人工湿地污水处理系统硝化与反硝化作用[J].环境科学 2005 26(1) 47-50.

[17] 尹军 ,崔玉波.人工湿地污水处理技术[M].北京 :化学工业出版社 2006.

(收稿日期 2007-04-04 编辑 徐 娟)

(上接第 19 页)

[3] 姚长宏 ,杨桂芳 ,蒋忠诚 ,等.贵州水城盆地人类活动及其地质环境效应[J]. 城市环境与城市生态 ,2002 ,15 (5) :1-3.

[4] 贾亚男 ,袁道先.土地利用变化对水城盆地岩溶水水质的影响[J].地理学报 2003 58(6) 831-838.

[5] 贾亚男 ,刁承泰 ,袁道先.土地利用对埋藏型岩溶区岩溶水质的影响——以涪陵丛林岩溶槽谷区为例[J]. 自然资源学报 2004 ,19(4) 455-461.

[6] 章程 ,袁道先.典型岩溶地下河流域水质变化与土地利用的关系——以贵州普定后寨地下河为例[J].水土保持学报 2004 ,18(5) :134-137.

[7] 蒋勇军 ,袁道先 ,张贵 ,等.岩溶流域土地利用变化对地下水水质的影响——以云南小江流域为例[J]. 自然资

源学报 2004 ,19(6) :707-715.

[8] GÜLBAHAR N ,ELHATIP H. Estimation of environmental impacts on the water quality of the Tahtalidam watershed in Izmir ,Turkey[J]. Environ Geol 2005 47(5) :725-728.

[9] MAILA Y A ,EI-NAHAL I ,AL-AGHA M R. Seasonal variations and mechanisms of groundwater nitrate pollution in the gaza strip[J]. Environ Geol 2004 47(1) 84-90.

[10] KATZ B G. Sources of nitrate contamination and age of water in large karstic springs of Florida[J]. Environ Geol 2004 46 (6-7) 689-706.

[11] 郭芳 ,姜光辉 ,裴建国 ,等.广西主要地下河水质评价及其变化趋势[J].中国岩溶 2002 ,12(3) :195-201.

[12] 沈照理 ,朱苑华 ,钟佐 .水文地球化学基础[M]. 北京 地质出版社 ,1993 :77-78.

(收稿日期 2006-12-27 编辑 徐 娟)