

文章编号: 1007-4929(2006)06-0031-04

# 垂直流人工湿地的设计及净化功能初探

张洪刚, 马安娜, 洪剑明

(首都师范大学生命科学学院, 北京 100037)

**摘要:**阐述了垂直流人工湿地小试系统的设计方法, 并对其净化效果进行了初步的测试。垂直流人工湿地由下行流和上行流方式的 2 池组成, 分别栽种了芦苇, 香蒲, 水葱, 茭白, 慈菇和菖蒲 6 种湿地植物。试验结果表明垂直流人工湿地能较好地改善水质, 对  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN、TP、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的平均去除率都达到了 55% 以上。各系统对污染物的去除作用无明显差异, 出水中  $\text{NO}_3\text{-N}$  的浓度与进水相比降低不明显, 而  $\text{NH}_4\text{-N}$  的去除率却很高, 表明系统中硝化作用较强。本试验说明垂直流人工湿地系统能较好地改善水质, 是一种有效的污水处理技术, 对水体水质改善和水生态系统恢复具有重要意义。

**关键词:** 人工湿地; 垂直流; 湿地植物; 下行—上行流

**中图分类号:** X52      **文献标识码:** A

## Preliminary Research on the Design and Purification Performance of Vertical Flow Constructed Wetland

ZHANG Hong-gang, MA An-na, HONG Jian-ming

(College of Life Science, Capital Normal University, Beijing 100037)

**Abstract:** The design method of small-scale vertical flow constructed wetland was expounded and its purification effect was tested preliminarily in this paper. The system was comprised of two chambers. One chamber induced downward-flow, the other created upward-flow. Six kinds of wetplants, include phragmites communis, typha orientalis, scirpus tabernaemontani, zizania caduciflora, sagittaria sagittifolia and acorus calamus, were transplanted, respectively. The test results showed that the vertical flow constructed wetland could improve water quality and had an average purification efficiency more than of 55% for  $\text{NH}_4\text{-N}$ , TN, TP and  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ . All the treatments had no obvious difference for removing contaminants. Concentrations of nitrate( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) in effluents were not decreased obviously than those in influent, but the removing efficiency for  $\text{NH}_4\text{-N}$  was very high. This indicated that nitrification in the constructed wetland was intensive. The research result proved that the vertical constructed wetland was an effective technology to purify water quality and rehabilitate aquatic ecosystems.

**Key words:** constructed wetland; vertical flow; wetland plants; downward flow-upward flow

## 0 引言

随着人口的增加和城市化进程的加速发展, 造成污水的种类和排放量也随之不断地增加。尽管世界各国都采取了各种

措施, 但是仍然难以遏制水质污染的趋势。

人工湿地污水处理系统是利用自然生态系统中的物理、化学和生物等因素的协同作用得以实现污水净化的。第一个完整的人工湿地试验始于 1974 年德国的 Othfrensen 湿地<sup>[1]</sup>。

**收稿日期:** 2006-03-16

**基金项目:** 北京市教育委员会资助项目。

**作者简介:** 张洪刚(1980-), 男, 硕士研究生, 主要研究人工湿地处理污水技术及湿地生物多样性。

**通讯作者:** 洪剑明(1962-), 男, 副教授, 主要研究方向为湿地植物生理生态与生态修复。

国际上湿地水处理技术发展较快,在欧洲和北美,数以千计的天然湿地和人工湿地被广泛应用于处理多种废水,欧洲芦苇床技术应用较广泛<sup>[2]</sup>。但大多采用水平流、单一的垂直流等方式。本研究发展下行流—上行流人工湿地作为一种水处理技术,改善水质,促使退化水生态系统的恢复和水资源的持续利用。本文针对北京市汉石桥湿地自然保护区严重缺水,出现水生态系统退化的现状,设计了一套人工湿地污水处理系统,并对其净化效果进行了初步的研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 人工湿地的设计

实验场地位于北京市顺义区汉石桥湿地自然保护区东岸,总面积为 257.66 m<sup>2</sup>,人工湿地全长 26.7 m,宽 9.65 m,平均深度为 1.2 m,整体构造全部用石块灌注水泥砌成,底部覆三合土夯实并抹水泥以防渗,见图 1。

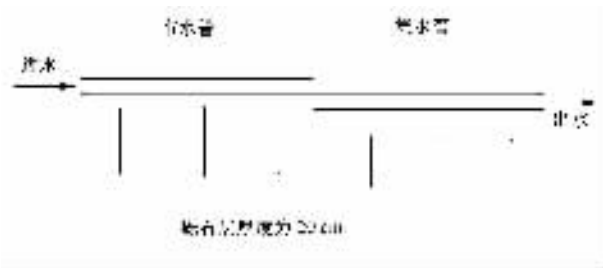


图 1 垂直流人工湿地结构示意图

#### 1.1.1 系统设计

整个系统可分为 4 个部分。

第一部分为曝气沉淀池,由一长 8.7 m、宽 2 m、深 1 m 的长方形池子在中间隔断而成。

第二部分为处理池,前半部并排 3 个池子为长 8 m,宽 2.4 m,深 1.2 m,全部为垂直流;后半部并排 3 个池子长 7.5 m,宽 2.2 m,深 1.1 m,由东到西分别为垂直流、潜流、潜流。

第三部分为集水池,底层以砾石铺垫,预留为漂浮植物处理区。

第四部分为养鱼塘,此部分可以比较直观地显示处理后的出水与进水在透明度上的差别,并可以增加景观效应。

此人工湿地处理系统的污水主要来自汉石桥湿地附近的湿地家苑所排放的生活污水,经处理后排入湿地中供其循环利用。

#### 1.1.2 填料设计

每个处理池最底层铺上 20 cm 厚、直径 10~20 cm 的砾石,砾石上铺 30 cm 的陶粒。为防止陶砾漂浮,在陶砾上铺以 5 cm 的直径为 1~2 cm 的碎石,最上层铺 20 cm 的沙土。

#### 1.1.3 湿地植物

植物作为生态系统中的必不可少的成员之一,不仅是能量的生产者而且对全球生态平衡的维持起着十分重要的作用。湿地植物是水陆交错地带中生态系统的—个重要的组成部分,在人工湿地污水净化过程中湿地植物也起着非常重要的作用。本试验所有植物均选择于汉石桥湿地本土的湿地植物,具有典型的水生、湿生,根系发达,生物量较大等特点,属多年生的植

物,见表 1。

表 1 湿地植物分配

处理池	1-A	1-B	1-C	2-A	2-B	2-C
植物	芦苇	香蒲	水葱	茭白	慈菇	菖蒲

处理池 1-A 与 2-A 用 PVC 管相连(为方便起见以下统称处理单元 A),1-B 与 2-B 用 PVC 管相连(以下统称处理单元 B),1-C 与 2-C 用 PVC 管相连(以下统称处理单元 C),形成 3 组并列的以不同植物组合的处理单元。

### 1.2 系统的运行

系统的管网系统,采用直径为 50 mm 的 PVC 管。下行池中表面中央为 1 根直径 50 mm 一级布水管,横向连接 3 根直径 40 mm 的二级布水管。在管下方钻小孔(直径 6 mm)使进水均匀地分布到湿地表面,充分利用垂直流湿地的界面作用。上行池填料表面为“王”字形收集管,下钻小孔,以均匀收集出水;下行—上行池中间砌一隔断底部留有 20 cm 高相通。水流方式为下行流—上行流。

进水方式采用间歇式,以便于较低水力负荷时的布水均匀,充分地利用湿地表面和体积;另外,间歇式进水方式,利于创造湿地充氧的条件,有利于湿地中的有氧呼吸及硝化作用。根据不同的水力负荷,采用日进水 2~3 次。

在正式开始进入污水前,先向湿地中灌入自来水,目的是洗刷基质填料,以减少由于填料本底值过高而给实验带来的误差。连续洗刷 2 次,每次停留时间 3 d。

洗刷后的湿地系统再经过生活污水浸泡 14 d,培养适宜的微生物群落,污水首先经过化粪池沉淀处理,而后再经短暂的缺氧、厌氧处理最后排入人工湿地系统。

### 1.3 系统进水水源

该试验直接采用湿地家苑的生活污水作为系统的进 waters 源,处理后的出水再排入湿地中以实现水质改善、水资源的循环利用,促使退化水生态系统的恢复和水资源的持续利用。运行期间的进水水质状况见表 2。

表 2 人工湿地进水水质状况(平均值)

指标	数值	指标	数值
水温/℃	27.15	NO <sub>3</sub> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	6.45
pH	8.88	TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	24.0
COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	193.0	TP/(mg·L <sup>-1</sup> )	2.5
NH <sub>4</sub> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	1.34	溶解氧浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	10.14

### 1.4 分析测试

2005 年 7 月至 2005 年 10 月,定期对湿地进出水水质进行分析。本文主要报道几种水质指标的改善状况:①仪器测定进出水的水温、电导、pH 值、氨氮、硝基 N(Hydrolab 多参数水质监测仪)、溶氧(UC-12 型便携式溶氧仪);②化学需氧量(重铬酸钾法);③总 P(钼锑抗比色法)、总氮(过硫酸钾氧化—紫外分光光度法)各种指标的测试方法均按国家环保局编制的《水和废水监测分析方法》进行<sup>[3]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 湿地植物的生长状况

6月16日开始引种植物,这次成功地引种了6种植物,包括:芦苇、香蒲、菖蒲、茭白、水葱、慈菇,引种后将香蒲和芦苇的尖端剪掉,将植物的花絮剪掉以使植株营养生长的时间延长,期望以此提高成活率。引种后向池中持续灌水,使水面保持在土壤之上10cm,并进行日常维护,栽种以后,各种植物均能正常生长。10月底大部分植物出现生长退化,并开始枯萎。水葱、菖蒲和茭白的长势还比较旺盛,一直到11月底才出现枯萎现象。由于栽种的时间较晚,最佳生长季节已过,大部分植物不能充分地占有整个湿地表面,覆盖度不大。

### 2.2 人工湿地处理效果

人工湿地处理污水的机理比较复杂。多年的研究表明,人工湿地系统能够利用基质-微生物-植物这一复合生态系统中物理、化学和生物的三重协同作用,通过过滤、吸附、沉淀、离子交换、植物吸收和微生物分解,实现对废水的高效净化,同时通过营养物质和水分的生物地球化学循环,促进绿色植物生长,实现废水的资源化与无害化。

#### 2.2.1 人工湿地进出水水温、电导、pH和溶解氧浓度的变化

2005年7月至2005年10月,对人工湿地进出水的水温、电导、pH和溶解氧浓度进行了9次测量,其平均值如图2。

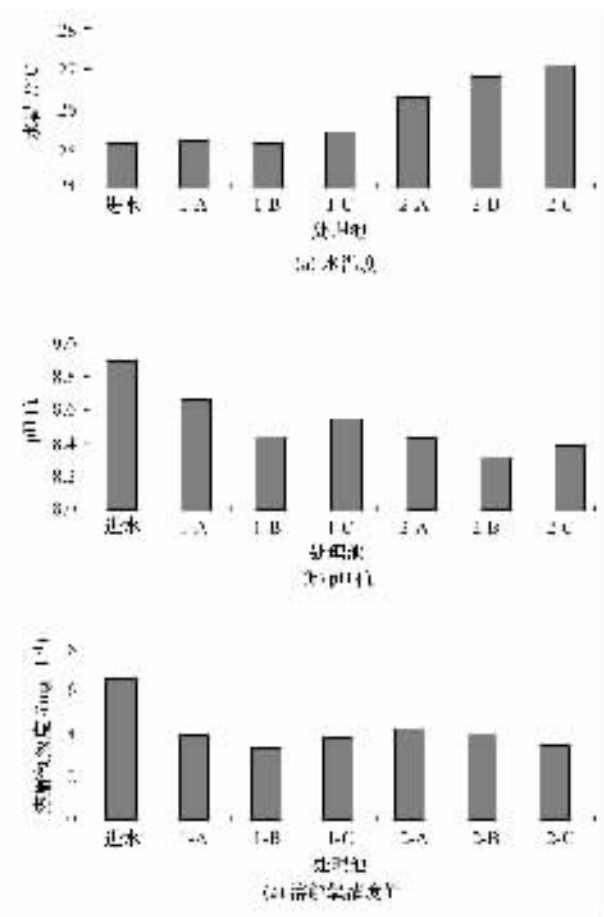


图2 人工湿地进出水理化参数

由图2可以看出:

人工湿地进出水的水温变化不大,但出水的水温要高于进水水温,说明湿地具有保温的功能,而且湿地中的生物特别是微生物的代谢活动如发酵作用也可产生部分热量,可能是导致出水水温略高的原因之一。

进水的pH值为8.88,呈碱性,而出水的pH值略低于进水,说明微生物的降解活动可产生有机酸类,而且基质对离子的吸附和释放作用以及植物的一些生理活动等都可引起出水pH降低。

出水的电导率都低于进水,体现了基质对污水中离子的吸附作用,另外植物根系的吸收和释放作用及植物的生理活动也可改变基质的酸碱等条件促进基质离子的吸收。

出水的溶解氧下降可能是由于污水中的氧化物质被还原、降解,系统出水的溶解氧浓度显著低于进水( $P < 0.05$ )是由于系统在净化污水的过程中还消耗了部分 $O_2$ 。但是处理单元ABC之间的差异并不显著( $P > 0.05$ )。

#### 2.2.2 人工湿地进出水中 $COD_{Cr}$ 和TN、TP的变化

在2005年7月至2005年10月期间,对系统进出水的 $COD_{Cr}$ 和总氮(TN)总磷(TP)进行了测试,其平均值如图3。

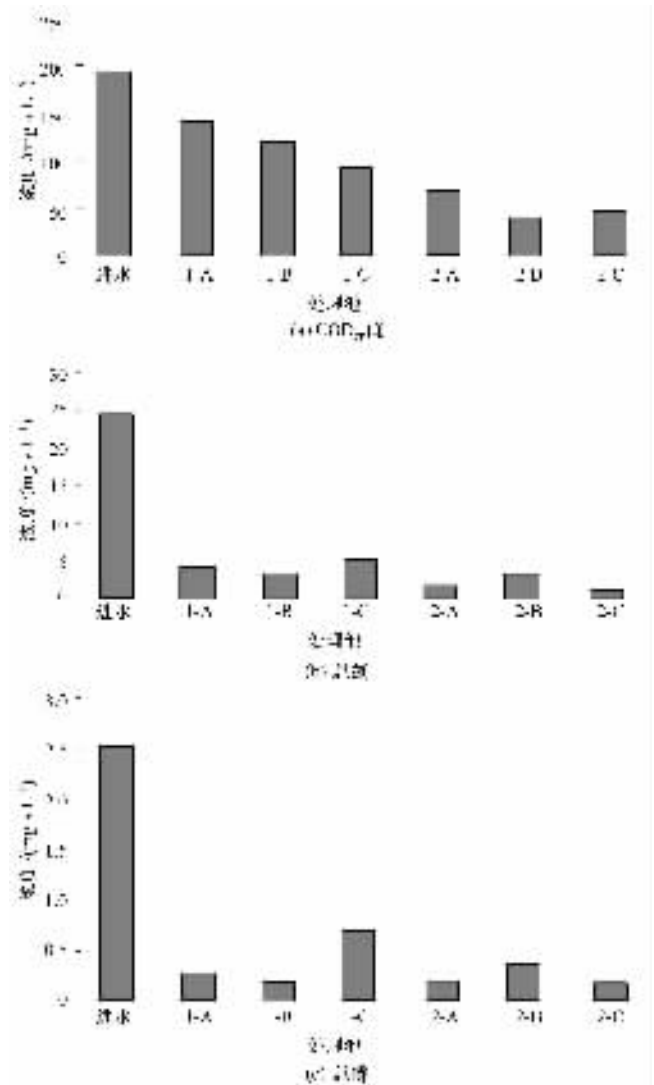


图3 人工湿地进出水 $COD_{Cr}$ 、N、P浓度

由图3可以知道,该系统对污水中的 $COD_{Cr}$ 、TN和TP都

有很好的净化效果,在湿地运行期间,微生物群落已初步形成,系统对  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的去除有不错的效果, $\text{COD}_{\text{Cr}}$  最低去除率为 28%,最高可达 80%。在研究中还发现人工湿地系统对  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的去除效果受温度的影响较大,这是因为水体中  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的去除是在微生物对有机物的分解、矿化和植物吸附、吸收共同作用而得以实现的,温度的降低导致植物、微生物的生理活性下降,从而影响污染物的去除效果<sup>[4]</sup>。

从试验结果可知,人工湿地系统对污水中的 N、P 也有很好的去除效果(见图 3)。湿地中 N 的去除主要是通过微生物的硝化与反硝化作用,植物的吸收和挥发作用,基质的吸附、过滤、沉淀和氨的挥发等。其中硝化、反硝化作用是人工湿地除氮最主要的途径<sup>[5]</sup>。污水进入人工湿地下行流池后先通过硝化作用将氨氮转化为硝态氮,此后在水流行进的路线上硝化作用减弱,反硝化作用占主导地位,最终氮素转化成气态形式释放。有研究表明,复合垂直流人工湿地的下行流池表层具有很强的物理、化学和生物作用,持留了污水中最大部分的氮素<sup>[6]</sup>。人工湿地反硝化作用在各基质层都比较强,也说明反硝化作用是人工湿地主要的除氮途径。有研究表明,湿地中 85% 以上的氮的去除来自反硝化作用<sup>[6,7]</sup>。

本湿地系统 C 处理单元(水葱—菖蒲组合)对 N 的去除率可达 97% 以上, TN 平均浓度为 0.667 3 mg/L, 达到国家地表水环境质量标准(GB 3838-2002) III 类水要求。

人工湿地对 P 的去除是通过微生物的积累、植物的吸收和基质的物理化学作用等几方面协同完成的<sup>[8,9]</sup>。有人认为植物在人工湿地 P 的去除中起的作用很小,主要是通过土壤物理化学作用完成。人工湿地对 P 的去除一直是湿地设计所关心的问题。本试验中,出水中的 TP 浓度明显低于进水,说明除 P 效果明显, TP 最低去除率为 72.3%, 最高可达 93.7%。TP 平均浓度为 0.229 7 mg/L 达到国家地表水环境质量标准(GB 3838-2002) III~IV 类水之间。

可见,该系统能改善水质,去除生活水中部分 N、P 物质,达到地面水质标准。另外,系统对  $\text{NH}_4\text{-N}$  的去除率也比较理想达到了 55.5% 以上,出水平均浓度 0.19 mg/L 可达到 II 类水标准;不过系统的出水中  $\text{NO}_3\text{-N}$  的浓度与进水的  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度相比并没有明显的降低,可能是由于植物的存在,可以为湿地内部输送氧气<sup>[10]</sup>,改善内部有氧条件,促进了硝化作用的发生<sup>[11]</sup>。

根据统计学方法对不同处理单元出水中各指标浓度进行 T 检验,结果证明各处理单元对以上指标的净化能力不存在显著差异( $P > 0.05$ )。可能是由于系统运行时间较短,植物生物量较小,植物及其相关的净化作用尚未充分显现出来。但通过以上试验结果足以能够证明人工湿地系统在污水净化方面的作用,尤其是对污水中氮磷的去除更是不容忽视的。

### 3 结 语

采用下行流—上行流方式的人工湿地系统对污水中有机物和 N、P 具有一定的净化作用,是一种有效的、经济的污水治理技术,而且人工湿地还可因地制宜地应用于地表水和湖泊等水体水质的改善,并具有一定的景观价值。

由于该人工湿地系统植物移栽较晚,运转时间较短,人工湿地中植物生长状况不是很好,造成植物及其相关的净化作用尚未充分显现出来,各系统净化污水的效果暂无明显差异。但是从试验期间各植物的生长状况来看,水葱、芦苇、菖蒲和茭白的生长一直处于较好的状态,净化效果也比较明显,是较为适宜的用于人工湿地的植物种类。

通过本次试验发现人工湿地中植物的生长也存在一些问题,影响其作用的正常发挥,降低了人工湿地的整体净化效果。因此,笔者认为目前在人工湿地系统除污机理的研究中,湿地植物的研究是一个很重要的方面。为了使植物能更好的适应人工湿地的生长环境,达到更好的处理效果,应加强对人工湿地生境条件下植物的生理生态研究、植物种类筛选、功能性植物群落配置研究及适宜的人工生境的研究与创建,为进一步发挥植物在人工湿地中的作用和完善人工湿地污水处理技术提供依据和手段。

### 参考文献:

- [1] 文乐元,谢可军. 人工湿地——新型污水处理技术[J]. 西南林学院学报, 2002, 22(2): 76—79.
- [2] Cooper P F, Green B. Reed bed treatment systems for sewage treatment in the united kingdom— The first 10 years' experience [J]. Water Science Technology, 1995, 32(3): 317—327.
- [3] Chinese EPA(国家环境保护局). 1989 Methods of Water and Wastewater Determination, 4th edit[M]. Beijing :China Environmental Science Press(in Chinese), 2002.
- [4] Liu Jiabao, Tang Xiaobin, Mo Fengluan. Study on wastewater purification efficiency of vertical flow constructed wetland systems [J]. Research of environmental sciences, 2005, 18(6): 68—71.
- [5] Zhang Jun, Zhou Qi, He Rong. Mechanism of nitrogen and phosphorus removal in free—water surface constructed wetland [J]. Ecology and Environment, 2004, 13(1): 98—101.
- [6] He Feng, Wu Zhenbin, Tao jing, et al. Nitrification and denitrification in the integrated vertical flow constructed wetlands [J]. Environmental science, 2005, 26(1): 47—50.
- [7] Albert J O. Nitrogen removal in constructed wetlands treating nitrified meat processing effluent [J]. Water science and technology, 1995, 32(3): 137—147.
- [8] Sakadevank, Bavor H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slag and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems [J]. Water Research, 1998, 32(2): 393—399.
- [9] Dunne E J, Culleton N, Donovan G O, et al. Phosphorus retention and sorption by constructed wetland soil in Southeast Ireland [J]. Water Research, 2005, 39: 4355—4362.
- [10] Whitney D, Rossman A, Haden N. Evaluating an existing sub-surface flow constructed wetland in Akumal, Mexico [J]. Ecological Engineering, 2003, 20: 105—111.
- [11] Achintya N, Bezbaruah, Tian C Zhang. Quantification of oxygen release by bulrush (*Scirpus validus*) roots in a constructed treatment wetland [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2005, 89(3): 308—318.