

不同深度人工复合生态床处理农村生活污水的比较

刘超翔, 胡洪营*, 张建, 黄霞, 施汉昌, 钱易 (清华大学环境科学与工程系环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084, E-mail: liucx99g@mails.tsinghua.edu.cn)

摘要: 采用了2种填充深度(60cm和40cm)的人工复合生态床对滇池地区低浓度农村生活污水进行了处理试验研究。结果表明, 在30cm/d高水力负荷的条件下, 对COD、总氮、氨氮和总磷的去除率, 深度为60cm的床体分别为66.4%、57.7%、78.7%和63.2%, 40cm深的床体分别为63.8%、59.1%、82.1%和61.3%。深度为60cm床体对COD和总磷的去除率高于深度为40cm的床体, 但后者对氮的去除效果略优于前者。对氮、磷去除途径的分析表明: 微生物的硝化/反硝化作用以及填料对磷的吸附沉淀作用是人工复合生态床去除氮、磷的主要途径; 水生植物对氮、磷的吸收量分别占投加总量的10%和9%以上, 也是一个重要途径。

关键词: 人工湿地; 面源污染; 农村生活污水; 氮; 磷

中图分类号: X799.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)05-05-0092

Rural Sewage Treatment Performance of Constructed Wetlands with Different Depths

Liu Chaoxiang, Hu Hongying, Zhang Jian, Huang Xia, Shi Hanchang, Qian Yi (ESPC State Key Joint Laboratory, Depart. of Environ. Sci. and Eng., Tsinghua University, Beijing 100084, China E-mail: liucx99g@mails.tsinghua.edu.cn)

Abstract: The treatment performance, for low concentration rural sewage, through constructed wetlands of different depths (60cm and 40cm), was comparatively investigated by using pilot-scale apparatus in Lake Dianchi area, Yunnan province, China. The experiment results showed, under a high hydraulic loading rate of 30cm/d, that the removal efficiencies of COD, total nitrogen, ammonia nitrogen and total phosphorus in the constructed wetland of 60cm depth were 66.4%, 57.7%, 78.7% and 63.2%, respectively, and were 63.8%, 59.1%, 82.1% and 61.3% in the 40cm depth, respectively. The removal efficiencies of COD and total phosphorus in the constructed wetland of 60cm depths were higher than those in the 40cm depth, but the nitrogen removal efficiency in the latter was higher than that in the former. Nitrogen and phosphorus removal mechanisms were studied. The results showed that nitrogen removal through nitrification/denitrification and the phosphorus removal through absorb and sedimentation were their main removal mechanisms. The nitrogen and phosphorus removed by plant harvesting were amounting to 10% and 9% of input TN and TP, respectively, which was also an important removal pathway for nitrogen and phosphorus.

Keywords: constructed wetland; nonpoint source pollution; rural sewage; nitrogen; phosphorus

面源污染是造成滇池流域水体污染的主要原因之一, 根据对某示范控制区的调查, 暴雨径流、台地水土流失、村镇生活污水和农业废水是构成面源污染的主要来源, 河道和沟渠是污染物的最终入湖途径。因此, 有效地控制村镇农业生产和生活所带来的氮磷等污染物对于控制水体富营养化具有重要的意义。

所谓人工复合生态床就是在人工湿地形式的基础上, 选择最佳的植物栽种方式, 并在床体内部填充多孔的、有较大比表面积的介质, 以改善湿地的水力学性能, 为微生物提供更大的附

着面积, 同时增强系统对污染物, 尤其是氮、磷的去除能力^[1]。人工湿地污水处理技术被认为是控制面源污染的一种低费用、实用有效的方法^[2,3]。对于潜流式湿地, 按常规的水力负荷(一般为2~15cm/d)设计要占很大的面积^[2]。另外填料的种类、填充方式及深度也将影响处理单元的处理效果和建设费用。因此研究如何提高

基金项目: 国家科技部重大专项(2000-03)

作者简介: 刘超翔(1974~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水污染控制。

收稿日期: 2002-08-25; 修订日期: 2002-09-18

* 通讯联系人

系统负荷,减少占地面积以及填料费用成为人工复合生态床研究的重点.本研究针对滇池地区农村生活污水与流域内村庄农田排灌水相混合,污染物浓度低但流量大的特点,对超高水力负荷下不同深度的人工复合生态床处理农村污水的运行性能进行了现场实验研究,并分析了水生植物在氮、磷去除中的作用.

1 试验部分

1.1 试验装置

试验系统设在滇池流域某一示范控制区,采用的人工复合生态床水流方式为潜流式,一共有 3 个单元床体(编号为 1 号、2 号和 3 号床).首先,污水经过自流流入调节池,然后通过 PVC 管送入到各个床体单元.每个床体宽 1m,长 6m,床深 0.7m,坡度 1%.其中 1 号床和 2 号床体底部铺设 10cm 的碎石(直径 2~4cm)层,中部为 40cm 的炉渣层,上部为 10cm 的土壤,填充深度为 60cm;3 号床填充方式同前,但中部炉渣层为 20cm,填充深度为 40cm.各床体设有布水区和集水区,分别填充直径 2~5cm 的卵石,宽度为 40cm.集水区底部安装一多孔集水管并与外部一出水高度可调的竖管相联接.

1.2 植物的选用与栽培

不同的生长环境,适宜的湿地水生植物是不同的.因此应当选择在本地适应性好的水生植物,最好是本地的原有植物^[2].在此基础上再挑选那些对污染物去除效果较好的水生植物.滇池流域常见的水生植物有芦苇、茭白、菖蒲、慈菇和莲等.根据调研结果,本次实验选用的水生植物为芦苇和菖蒲.芦苇是湿地中研究较多的植物,去除氮、磷能力较强,此外其发达的根系有很强的输氧作用.菖蒲的一个突出特点是生长期长,在 1 月份便开始返青生长,它对污染物的去除效果也较好^[4].

早春在滇池附近的天然湿地选择壮实的植物芽尖,取 20cm×20cm×40cm(长×宽×高)的带土芽尖移植到各单元床体.根据在天然湿地中植物生长的多样性,本次实验采用植物混种的方式,即除 1 号床为对照床,不种植物外,其它床体前 1/3 段种植芦苇(16 株/m²),后 2/3

段种植菖蒲(20 株/m²).栽完后立即充水,保持根部浸泡在水中,半个月后开始进污水^[5].

1.3 试验条件

试验系统在 30cm/d 的水力负荷下稳定运行了 5 个月.试验所用污水来自滇池流域某示范控制区某沟渠下游段,该沟渠经过农田和村镇,最后进入滇池.污水以生活污水为主,混有一部分农田排灌水以及雨水.其特点是污染物浓度一般低于生活污水,但水量很大.试验系统运行期间的进水水质情况见表 1.试验运行条件如表 2 所示.试验过程中分析 COD_{Cr}、TN、NH₄⁺-N 和 TP 等水质指标,分析频度为每周 1~2 次,分析方法参照国家环保局推荐方法.

表 1 污水水质/mg L⁻¹

Table 1 Water quality of the sewage/mg L⁻¹

COD	TN	NH ₄ ⁺ -N	TP	DO	pH
50~80	2~8	2~4	0.5~1.0	0.5~1.0	7.0~8.0

表 2 试验运行条件

Table 2 Experiment operation condition

水力负荷/cm d ⁻¹	30	TN 负荷/g·(m ² d) ⁻¹	1.97
COD 负荷/g·(m ² d) ⁻¹	21.6	TP 负荷/g·(m ² d) ⁻¹	0.21

2 试验结果与讨论

2.1 污染物去除效果

各床体对污染物的去除效果及比较见表 3 和图 1.在 30cm/d 的高水力负荷条件下,各单元床处理出水清澈,污染物浓度均较低,满足国家污水综合排放标准二级标准(GB8978-1996),对 COD、TN、NH₄⁺-N 和 TP 的去除率分别为 59.6%~66.4%、50.4%~59.1%、70.8%~82.1%和 55.0%~63.2%.从图 1 可以看出,植物床体污染物去除效果优于无植物床.植物对湿地处理效果的增强主要原因归纳为 3 点:植物生长对湿地流态的改变.植物根系的生长有利于均匀布水,延长系统实际水力停留时间^[6].植物根系巨大表面积和植物的水下部分和残枝败叶起着非常重要的作用,它们为微生物生长提供了寄栖场所,根际会创造有利于各种微生物生长的微环境,植物根茎下穿使原来的厌氧环境在植物根系附近形成有利硝化作

用的好氧微区,同时远离根系周围的厌氧区里富含的枯枝碎屑及底质层,其中含有大量可利用的碳源,这又提供了反硝化条件^[7]. 植物生长对各种营养物尤其是硝态氮的吸收作用.

表3 人工复合生态床对污染物的去除效果/ mg L^{-1}

Table 3 The removal efficiency of contaminants in each constructed wetland/ mg L^{-1}

污染物		床号		
		1	2	3
COD	进水	61~72	61~72	61~72
	出水	23~30	19~26	21~30
	去除率/%	55.6~62.6	62.9~69.1	57~69.0
TN	进水	4.9~7.8	4.9~7.8	4.9~7.8
	出水	3.0~4.8	1.9~3.5	1.8~3.4
	去除率/%	38.5~60.0	54.4~61.3	59.4~65.3
NH_4^+-N	进水	1.9~2.8	1.9~2.8	1.9~2.8
	出水	0.4~1.1	0.4~0.9	0.3~0.7
	去除率/%	62.7~82.8	70.8~81.3	80.1~95.2
TP	进水	0.58~0.97	0.58~0.97	0.58~0.97
	出水	0.24~0.32	0.21~0.29	0.23~0.29
	去除率/%	54.0~58.7	60.8~65.1	59.7~64.2

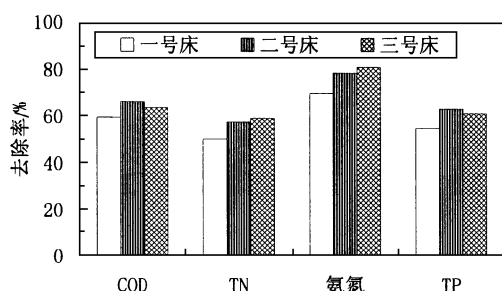


图1 各床体对污染物的平均去除率

Fig. 1 The mean removal efficiency of contaminants in each unit

2.2 床体填充深度的比较

潜流式人工复合生态床中,填料的选择及填充是影响床体对污染物去除效果的一个重要因素^[8]. 填料的种类及填充量也直接影响着人工复合生态床的基建费用^[2]. 另外,水生植物生长时,其根系需要依附基质并且要有一定的生长深度,一些文献推荐的最佳深度为不少于50~60cm^[2,5]. 为此,本次研究中,分别设置了60cm和40cm 2种不同的填充深度的人工复合生态床,即2号床和3号床.

2.2.1 对污染物的去除效果

从图1可以看出,2号床体的COD去除率为66.4%,略高于3号床体的去除率63.8%.这是因为在潜流式构筑湿地系统中,可沉降的那部分有机物可由沉积和过滤作用快速去除掉.对于溶解性的有机物的去除主要是依靠填料和根系表面所附着生长的微生物的作用^[2].由于2号床填料多,使污水与填料接触得更充分,时间更长,再加上更大的微生物反应区面积,导致它对有机物的去除效果高于3号床.

湿地系统中磷的去除主要是介质吸附和形成不溶性的钙、铁、铝等化合物的沉淀,此外磷也是湿地植物必需的养分.2号床由于填料层厚,与污水接触的表面面积大,故它对磷的去除效果要好于3号床.从图1可知,2号床体对磷的去除率为63.2%,高于3号床体的去除率61.3%.

湿地系统去除氮的机理主要包括微生物的硝化/反硝化脱氮、水生植物的吸收.在潜流式湿地系统中,植物根茎下穿使原来的厌氧环境形成有利硝化作用的好氧微区,同时远离根系周围的厌氧区以及其内富含的碳源又提供了反硝化条件.此处,水生植物也能吸收污水中的一部分氮作为营养源,强化收割后的水生植物可吸收的总氮量占投配总氮量的50%^[9].从图1可以看出,与COD和总磷的去除规律相反,3号床体对总氮的去除效率略高于2号床,特别是氨氮去除效率好于2号床体,可达到82.1%.分析原因主要为:本次试验中,3号床体中所种植的水生植物菖蒲长势好,平均高度为1.4m,而2号床体中菖蒲的平均高度为1.2m,故3号床体的植物生长量大于2号床体(见表6).水生植物生长的发达,会使根系有更强的输氧作用^[6];3号床体的内部供氧能力或氧化还原电位高于2号床体(见表4).以上条件都将有利于系统对氮的去除.

通过2号和3号床体的比较,可知在达到国家污水综合排放标准的前提下,种植菖蒲为主的人工复合生态床采用40cm的填料深度是可行的,它在30cm的水力负荷条件下,可以去除更多的氮.此外,与60cm填充深度的床体比

较,它可以减少 1/3 的填料体积,缩减处理设施基建费用。

2.2.2 微生物脱氮环境分析

硝化菌是一种专性好氧菌,它利用无机碳源,从 NH_4^+ 或 NO_2^- 的氧化反应中获得能量;而反硝化细菌是一种兼性异养菌,在缺氧条件下,利用有机物质将 NO_x^- 还原成气态氮或 N_2O 、 $\text{NO}^{[10]}$ 。因此,床体中填充介质的氧化还原性质是影响生物脱氮进行的重要因素。通常用 ORP 来表征土壤等介质的氧化还原性质^[11]。在植物生长稳定期间,通过预埋铂电极测定了床体内部的 ORP,结果列于表 4。

表 4 各床体氧化还原电位(ORP)/mV

Table 4 ORP in each unit/mV

深度/cm	床号		
	1	2	3
0~20	-105	-59	-41
20~60	-200	-120	-94

由表 4 可见,各床体的 ORP 均呈现负值,床体内部处于还原状态,其中 1 号床体的 ORP 最低,在床体底部 20cm~60cm 处的 ORP 可以达到 -200mV,这说明微生物活动要消耗大量的氧,而 1 号床由于缺少水生植物根系的输氧作用,导致了它呈现较强烈的厌氧状态。床体的内部处于还原状态,这一方面说明了床体环境不利于硝化反应的进行,植物根系附近好氧微区将成为硝化等好氧反应的主要场所,另一方面也说明了系统处于厌氧状态,有利于反硝化作用的进行。对比 2 号床和 3 号床可知,3 号床的 ORP 要高于 2 号床,因此 3 号床的硝化效果好于 2 号床。随着床体深度的增加,ORP 呈下降的趋势,这是因为地表的复氧作用以及植物根系的输氧作用,床体上部强于床体底部。在植物生长成熟阶段,对它们的根系进行了测定,结果显示:菖蒲的根茎粗壮,直径可达到 2cm,其深度一般为 10~20cm,匍匐生长,纵向则多为根须。可见菖蒲的输氧作用主要发生在表层 10~20cm 处。Kadlect 和 Knight 把人工湿地根据断面分为 3 个区,即表层的弱还原区、中层的中等还原区和底层的强还原区^[12]。由于相对较高的

ORP 及 DO(溶解氧),湿地表层成为氮去除最活跃的区域^[9]。

2.3 植物在氮、磷去除中的作用

生活污水中的氮通常以有机氮和氨(也可以是铵离子)的形式存在。在土壤-植物系统中,有机氮首先被截留或沉淀,然后在微生物的作用下转化为铵态氮,由于土壤颗粒带有负电荷,铵离子很容易被吸附,土壤微生物通过硝化作用将铵离子转化为 NO_3^- ,土壤又可恢复对铵离子的吸附功能。土壤对负电荷的 NO_3^- 没有吸附截留能力, NO_3^- 可以被植物根系吸收而成为植物营养成分或通过反硝化过程最终转化为 N_2 或者 N_2O 而挥发掉。另外本次试验进出水 pH 值均在中性左右,因此氨态氮的挥发是可以忽略的。污水中磷主要以无机磷酸盐和有机结合的磷酸盐形式存在。磷是植物生长的必需元素。

试验进行的第 120 天,对系统中的植物进行了测定,结果列于表 5 和表 6。由表 5 和表 6 可以计算出试验系统运行期间通过植物吸收所去除的总氮量 N_{plant} 和总磷量 P_{plant} 。由进、出水总氮和总磷浓度和进、出水流量可以得到 120d 污水投配期间的总氮投配总量 N_{in} 和排放总量 N_{out} ,总磷的投配总量 P_{in} 和排放总量 P_{out} 。由此,通过下式可得到系统运行期间通过生物脱氮而去除的氮量 N_b (式 1)以及通过介质吸附和沉淀去除的磷量 P_a (式 2)。计算结果如图 2 和图 3 所示。

$$N_b = N_{\text{in}} - N_{\text{plant}} - N_{\text{out}} \quad (1)$$

$$P_a = P_{\text{in}} - P_{\text{plant}} - P_{\text{out}} \quad (2)$$

从图 2 可以看出,通过反硝化去除的总氮量占投配总氮量的 47%~48%左右,可见硝化/反硝化是脱氮的主要途径;植物吸收的总氮量占投配总氮量的 10%左右,也是去除氮的重要途径。从图 3 可知,由吸附和沉淀去除的磷量占投配量的 51%~54%左右,是磷去除的主要途径,植物吸收则占 9%左右。

通过比较可知,3 号床体中水生植物对氮、磷的吸收高于 2 号床体,因为 3 号床体中的菖蒲生长量高于 2 号床体的菖蒲生长量。这说明

40cm 的床体填充深度是适合菖蒲生长繁殖的. 通过植物氮、磷含量和生长量计算, 依靠植物吸收去除的氮、磷量, 2 号床体为 $885\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 $84\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 3 号床体为 $927\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 $92\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$. 鉴于水生植物对污水中的氮、磷具有一定吸收能力, 定期收割湿地系统中的植物, 也能促进系统对氮、磷的去除.

表 5 各植物的氮、磷含量和含水率/%

Table 5 The nitrogen, phosphorus and water composition in different macrophytes/%

植物	芦苇	菖蒲
全氮(干物质)	2.90	2.04
全磷(干物质)	0.30	0.32
含水率	61.25	61.47

表 6 各床体植物的收割量(湿重)/kg

Table 6 The fresh weight of macrophyte harvested in each unit/kg

床号	芦苇	菖蒲
2	9.6	5.0
3	8.8	7.0

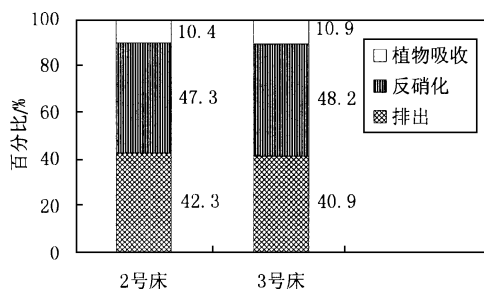


图 2 总氮去除途径分析

Fig. 2 The removal pathway of total nitrogen

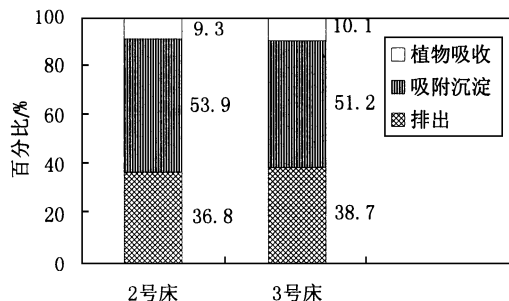


图 3 总磷去除途径分析

Fig. 3 The removal pathway of total phosphorus

3 结论

(1) 在 $30\text{cm}/\text{d}$ 高水力负荷的条件下, 系统出水水质较好, 达到国家污水综合排放标准二级标准. 对 COD、TN、 NH_4^+-N 和 TP 的平均去除率, 2 号床体为 66.4%、57.7%、78.7% 和 63.2%, 3 号床体分别为 63.8%、59.1%、82.1% 和 61.3%.

(2) 由于污水与填料接触的面积更大, 2 号床体对 COD 和 TP 的去除率要高于 3 号床体, 但 3 号床体内部相对较高的 ORP, 使得它对总氮, 特别是氨氮的去除率要高于 2 号床体. 在达到污水排放标准的前提下, 人工复合生态床采用 40cm 的填料深度是适宜的.

(3) 微生物的硝化/反硝化作用以及填料对磷的吸附/沉淀作用是人工复合生态床系统去除氮、磷的主要途径. 水生植物吸收的氮、磷量分别占投加总量的 10% 和 9% 以上, 也是去除氮、磷的重要途径.

参考文献:

- 刘超翔, 胡洪营等. 人工复合生态床处理低浓度农村污水. 中国给水排水, 2002, 18(7): 1~4.
- 高拯民, 李宪法. 城市污水土地处理利用设计手册. 北京: 中国标准出版社, 1991. 8~28, 225~248.
- KAO M, WU M J. Control of Non-point Source Pollution by a Nature Wetland. Wat. Res., 1999, 20(3): 47~54.
- U. S Enviromental Protection Agency. Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. 1998, 47~64.
- 丁庭华等. 污水芦苇湿地处理系统示范工程的研究. 环境科学, 1991, 13(2): 8~13.
- Brix H. Function of macrophytes in constructed wetlands. Wat. Sci. & Tech., 1994, 29(12): 71~78.
- Reed S C. Natural System for Waste Management and Treatment. McGraw-Hillbook Company, 1988. 42~72.
- Drizo A, Frost C A et al. Physico-chemical screening of phosphate remaining substrate for use in constructed wetland system. Wat. Res., 1999, 33(17): 3595~3602.
- Thammarat koottatep and Chongrak polprasert. Role of plant uptake on nitrogen removal in constructed wetland located in the tropics. Wat. Sci. & Tech., 1997, 36(12): 1~8.
- 郑兴灿, 李亚新. 污水除磷脱氮技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. 38~58.
- 吴永峰, 汪民, 钟佐焱. 有机废水快速渗滤处理系统氧化还原环境特征. 环境保护科学, 1995, 21(4): 32~35.
- Knight R L. Design constructed wetland for nitrogen removal. Wat. Sci. & Tech., 1994, 29(4): 15~27.