

论述与研究

人工复合生态床处理低浓度农村污水

刘超翔, 胡洪营, 张健, 盛建武, 黄霞, 施汉昌, 钱易
(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 采用人工复合生态床处理滇池地区低浓度农村污水的试验结果表明, 在 30 cm/d 的高水力负荷条件下, 4 个不同的单元床体对 COD、TN、氨氮和 TP 的去除率分别为 59.6%~70.6%、50.4%~60.6%、70.8%~83.0% 和 55.0%~66.0%。因芦苇具有较强的输氧能力, 而茭白对氮、磷的吸收能力强, 因此芦苇和茭白混种是一种较好的植物栽种方式。

关键词: 人工湿地; 农村污水; 氮; 磷; 水生植物

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2002)07-0001-04

Use of New Type Constructed Wetland for Treatment of Low Strength Rural Sewage

LIU Chao-xiang, HU Hong-ying, ZHANG Jian, SHENG Jian-wu,
HUANG Xia, SHI Han-chang, QIAN Yi

(Dept of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Experiment was made on the use of artificial wetland to treat low strength rural sewage in the Lake Dianchi area, Yunnan. The experimental results showed that the removal rate of COD, TN, ammonia nitrogen and TP is 59.6%~70.6%, 50.4%~60.6%, 70.8%~83.0%, and 55.0%~66.0% respectively under high hydraulic loading rate (30 cm/d). Because the reed has higher capability in oxygen transfer and the indian rice is good at absorbing nitrogen and phosphorus, pollutants removal efficiency can be greatly improved when the reed and Indian rice grow together in wetland.

Keywords: artificial wetland; rural sewage; nitrogen; phosphorus; hydrophytes

近年随着流域点源污染控制工程的实施, 面源氮、磷入湖量占流入滇池总量的比例已超过 50%, 因此控制面源污染已成为解决滇池富营养化的关键。根据对滇池某示范控制区的调查, 其地表径流、水土流失、固体废物和村镇生活污水是主要面污染源, 而河道和沟渠是污染物的最终入湖途径, 为此研究、开发了一种适合于该地区的新型人工湿地系统即人工复合生态床系统。

该系统是在人工湿地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。人工复合生态床作为湿地系统的一种, 具有工艺简单、运行管理方便、生态环境效益显著、投资少等优点, 适合于村镇生活污水的处理。根据调查, 在滇池地区农村生活污水与排灌水

基金项目: 国家科技部重大专题项目 (2000-03)

相混合的现象十分普遍,因此农村生活污水汇集出口处因受农田排灌水的影响,污水浓度低、流量大。对于潜流式湿地,若按常规的水力负荷(一般为2~15 cm/d)设计要占很大的面积^[1],因此如何提高系统负荷、减少占地面积成为人工复合生态床研究的重点。

1 试验装置及方法

1.1 试验装置

试验系统设在滇池流域某一示范控制区,共有4个单元床体,结构如图1所示。

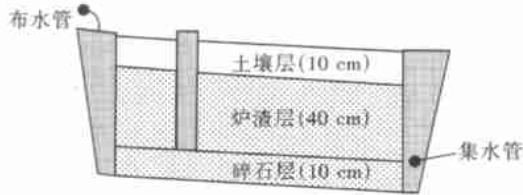


图1 潜流式人工复合生态床结构

首先,污水自流进入调节池,然后通过PVC管送入各个单元床体。人工复合生态床水流为潜流式,每个床体宽为1 m、长为6 m、床深为0.7 m、坡度为1%。床体底部铺设10 cm厚的碎石(直径为2~4 cm)层,中部为40 cm厚的炉渣层,上部为10 cm厚的土壤层,污水在床体内部水平流动。布水区和集水区的宽度均为40 cm,内部分别填充直径为2~5 cm的卵石,集水区底部安装一根多孔集水管,且与外部一根出水高度可调的竖管相联接。

经测定床体平均孔隙率为50%,填充炉渣的水力传导系数为 3.47×10^{-3} mm/s。为了比较不同水生植物的处理效果,在各单元床体种植了不同的植物(具体布置见表1),其中1号床为空白对照。

表1 各单元床体的植物布置方式

项目	1号	2号	3号	4号
植物种类	无	芦苇	前1/3段为芦苇,后2/3段为茭白	前1/3段为芦苇,后2/3段为菖蒲
种植密度(株/m ²)		16	芦苇:16,茭白:12	芦苇:16,菖蒲:20

1.2 植物栽培

试验选用滇池流域常见的水生植物:芦苇、茭白和菖蒲。2001年2月底在滇池附近的沼泽地选择20 cm×20 cm×40 cm(长×宽×高)的带土芽尖并将其移植到各单元床体(种植密度见表1),栽完后立即充水并使根部浸泡在水中,半个月后开始进污水^[2]。

1.3 试验条件

试验所用污水来自该示范控制区某沟渠的下游段(该沟渠的水流经农田和村镇,最后进入滇池),以生活污水为主,混有一部分农田排灌水和雨水,其特点是污染物浓度低于生活污水,但水量很大。系统运行期间的进水水质见表2,运行条件见表3。试验过程中参照国家环保局的推荐方法分析COD、TN、氨氮和TP等水质指标(每周1~2次)。

表2 污水水质

COD (mg/L)	TN (mg/L)	氨氮 (mg/L)	TP (mg/L)	DO (mg/L)	pH
50~80	2~8	2~4	0.5~1.0	0.5~1.0	7.0~8.0

表3 运行条件

水力负荷 (cm/d)	COD 负荷 [g/(m ² ·d)]	TN 负荷 [g/(m ² ·d)]	TP 负荷 [g/(m ² ·d)]	停留时间 (d)
30	21.6	1.97	0.21	1

2 结果与讨论

2.1 对污染物的去除效果

在湿地系统中具有沉降性的有机物通过沉积和过滤可很快被去除,可溶性有机物主要通过微生物的降解而去除,氮则是通过硝化与反硝化反应及水生植物的吸收而被去除,而磷的去除主要靠沉淀、吸附及水生植物的吸收^[1]。值得指出的是复合生态床中的植物长势非常良好,在4个月内芦苇、茭白和菖蒲分别由0.4 m长高到2.0、2.5和1.2 m,而且枝叶繁密,生长速度明显高于自然环境中的植株。

人工复合生态床对污染物的去除效果见表4。

表4 人工复合生态床对污染物的去除效果

床号	COD			TN			氨氮			TP		
	进水 (mg/L)	出水 (mg/L)	去除率(%)	进水 (mg/L)	出水 (mg/L)	去除率(%)	进水 (mg/L)	出水 (mg/L)	去除率(%)	进水 (mg/L)	出水 (mg/L)	去除率(%)
1		23~30	55.6~62.6(59.6)		3.0~4.8	38.5~60.0(50.4)		0.4~1.1	62.7~82.8(70.8)		0.24~0.32	54.0~58.7(55.0)
2	61~72	16~26	62.9~73.8(68.6)	4.9~7.8	1.9~3.4	55.5~62.7(59.0)	1.9~2.8	0.2~0.7	76.4~87.5(83.0)	0.58~0.97	0.20~0.29	61.8~66.0(65.0)
3		15~23	67.1~75.4(70.6)		1.8~3.2	57.0~64.0(60.6)		0.3~0.8	72.5~86.4(80.9)		0.19~0.28	62.2~67.2(66.0)
4		19~26	62.9~69.1(66.4)		1.9~3.5	54.4~61.3(57.7)		0.4~0.8	70.8~81.3(78.7)		0.21~0.29	60.8~65.1(63.2)

注:“去除率”一栏中括号内为平均值。

从表 4 可以看出,2、3 号床对污染物的去除效果较好,1 号空白床的去除效率最低。这是因为水生植物都有通过水面上的枝叶从大气中吸收和输送氧气的能力,它们把氧气送到根部的气体导管,所以与根或茎直接接触的土壤会呈好氧状态,其他部位的土壤则呈厌氧状态,这为土壤中各种不同微生物提供了适宜的环境,从而促进污染物的降解;而空白湿地上无植物生长且长期被淹没,土壤几乎都呈厌氧状态,不利于多种微生物的生长。另外污水处理系统中的植物被认为是一个营养贮存库,植物吸收营养维持生长和繁殖(这些营养物基本来自污水中的有机物、氮和磷),植物生长得越快则污染物减少得越多。

2.2 植物栽种方式的比较

复合生态床中除 2 号床全部种植芦苇以外,其他均采用混种方式。从表 4 可知,3 号床除污效果最好、2 号床次之、4 号床则低于上述两床。

以上结果说明,多种植物组合能发挥不同植物的优势,符合湿地植物的多样性规律,有利于床体对污染物的去除。4 号床的除污效果低于 2、3 号床是由于菖蒲与芦苇、茭白相比个体矮小(平均高度为 1.2 m)且分蘖很少,另外菖蒲的匍匐根虽然很粗大,但其只在土壤浅层蔓延、扎根不深,因此传氧能力较低。芦苇和茭白的根系发达并且深浅交错、输氧能力强,特别是在芦苇湿地系统中传输氧的能力更强,因为芦苇的根茎是垂直向下地延伸生长,具有非常强的穿透性。系统运行 120 d 后对植物根系的生长状况进行了测定,结果显示芦苇的根茎深度为 30~50 cm,根系发达且四处穿插;茭白的根茎深度为 40~50 cm,根茎粗大,其上长有许多根须;菖蒲的根茎深度为 10~15 cm,纵向多为根须。

2.3 氧化还原电位(ORP)比较

在植物稳定生长期间测定了出水 DO 和床体的 ORP,结果见表 5。

表 5 各床体 ORP 及出水 DO				
项 目	1 号	2 号	3 号	4 号
出水 DO(mg/L)	0.7	1.5	1.3	1.1
床体 ORP(mV)	- 200	- 48	- 84	- 120

由表 5 可知,除空白床外的各床体出水 DO 浓度略高于进水(0.5~1.0 mg/L),表明植物对床体有一定的输氧作用,其中 2 号床 DO 最高,3、4 号床次之。床体内部的 ORP 均为负值,可见床体总体

上处于还原态,内部供氧不足,这种条件有利于反硝化而不利于硝化及好氧反应。比较各单元床体的 ORP 发现 2 号床最高,3、4 号床次之,1 号床最低,说明植物床中芦苇的输氧能力最强,而空白床中因为无植物输氧作用则处于严重的缺氧状态。

从以上分析可知,2、3 号床体是较为适宜的人工复合生态床形式,3 号床对各污染物的去除综合效果最好,而且种植的茭白具有一定的经济价值。

2.4 植物对脱氮、除磷的作用

湿地系统中氮的脱除主要包括作物吸收、生物脱氮以及氮的挥发。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 NO₃⁻,土壤又可恢复对铵离子的吸附功能。土壤对带负电荷的 NO₃⁻ 没有吸附截留能力,NO₃⁻ 可以被植物根系吸收而成为植物营养成分或通过反硝化最终转化为 N₂ 或者 N₂O 而挥发掉。湿地系统中磷的去除主要包括形成不溶性的钙、铁、铝等化合物的沉淀以及植物的吸收。采用潜流式系统时选用适宜的土壤和介质可使除磷效果更好,含有一定量粘土或介质中有铁、铝离子存在时可进一步提高除磷效果^[1]。

在试验进行的第 120 天对系统中植物的各项参数进行了测定,结果见表 6、7。

表 6 各植物的氮、磷含量和含水率 %			
项 目	芦苇	茭白	菖蒲
全氮 *	2.90	2.34	2.04
全磷 *	0.30	0.25	0.32
含水率	61.25	53.81	61.47
注: * 干物质含量。			

表 7 各床体植物的收割量(湿重) kg			
床号	芦苇	茭白	菖蒲
1 号			
2 号	20.8		
3 号	7.9	16.7	
4 号	9.6		5

由表 6、7 可计算出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、出水流量可以得到在此期间的

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})。试验系统采用的填充土壤的 pH 值为中性, 所以可以忽略氮的挥发损失, 由此可得到系统运行期间通过生物脱氮而去除的氮量 $N_b = N_{in} - N_{plant} - N_{out}$ 以及通过沉淀和介质吸附去除的磷量 $P_a = P_{in} - P_{plant} - P_{out}$, 计算结果如图 2、3 所示。

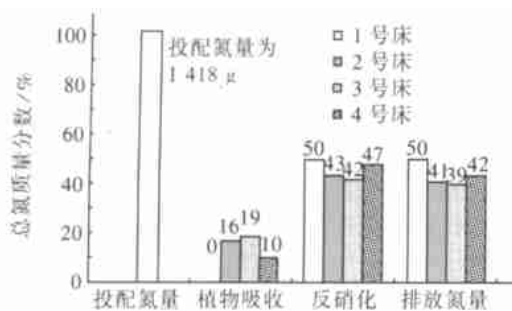


图2 总氮去除途径

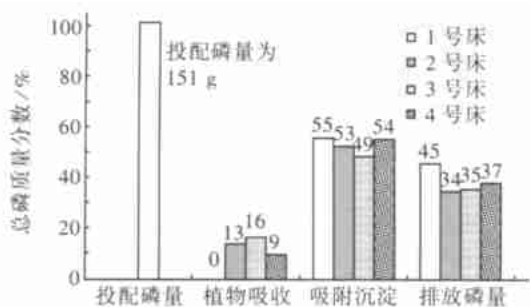


图3 总磷去除途径

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 40 % 左右, 可见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 % ~ 19 %, 也是脱氮的重要途径。从图 3 可知, 由沉淀和吸附去除的磷量占投配量的 50 % 左右 (是除磷的主要途径), 植物吸收则占 9 % ~ 16 % 左右。

通过比较可知, 3 号床中植物对氮、磷的吸收最大, 4 号床最小。因为 3 号床中的植物特别是茭白的生长量最大, 而 4 号床中的菖蒲由于植株矮小, 生长量最小, 这也从另一个角度说明了为什么 3 号床对污染物的去除效果较好。由此可见, 茭白对氮、磷

的吸收能力强, 芦苇则介于二者之间, 但芦苇的根系输氧作用强。鉴于水生植物对污水中的氮、磷具有一定吸收能力, 定期收割人工复合生态床中的植物也能促进系统对氮、磷的去除。

2.5 对污染物削减量的计算

以试验所用排污沟渠为例, 对人工复合生态床的污染物削减量进行了计算。污水流量为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 即 ($240 \text{ m}^3/\text{d}$), 按 3 号床的处理效果计算, 水力负荷为 $30 \text{ cm}/\text{d}$ 时的处理系统所需占地面积为 800 m^2 , 对 COD 、 TN 和 TP 的平均去除量分别为 15.25 、 1.193 和 $0.134 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 可削减 COD 、 TN 和 TP 量分别为 4.45 、 0.35 和 0.039 t/a , 与一般湿地系统相比, 该工艺水力负荷高、占地面积小。

3 结论

在高水力负荷 ($30 \text{ cm}/\text{d}$) 条件下各单元床体出水水质较好, 对 COD 、 TN 、氨氮和 TP 的去除率分别为 $59.6\% \sim 70.6\%$ 、 $50.4\% \sim 60.6\%$ 、 $70.8\% \sim 83.0\%$ 和 $55.0\% \sim 66.0\%$ 。人工复合生态床对 COD 、 TN 和 TP 去除量分别为 15.25 、 1.193 和 $0.134 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

芦苇具有较强的输氧能力, 茭白具有较强的吸收氮、磷的能力, 因此芦苇与茭白混种是一种较好的植物种植方式。

参考文献:

- [1] 高振民, 李宪法. 城市污水土地处理利用设计手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
- [2] 丁庭华. 污水芦苇湿地处理系统示范工程的研究 [J]. 环境科学, 1991, 13(2): 8 - 13.

作者简介: 刘超翔 (1974 -), 男, 湖北鄂州人, 清华大学在读博士研究生, 研究方向为水污染控制。

电话: (010) 62778943 (O) 13683031036
13501062244 (胡洪营)

E-mail: liucx99g@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2002 - 02 - 25