

# 人工湿地中不同因素处理氮磷效果的试验研究

陈娟, 丁为民, 张迎颖

(南京农业大学工学院, 江苏南京 210031)

**摘要:** 以模拟垂直流人工湿地为研究对象, 采用正交试验法研究了基质比例、进水流量、湿干比三因素对污水中总氮(TN)、总磷(TP)的去除效果, 以寻求优化的因素组合, 并对试验结果进行了验证。结果表明, 基质比例、进水流量、湿干比对污水中 TN、TP 的处理效果均有极显著影响, 其中基质(蜂窝煤渣: 蛭石)比例为 1:2、进水流量为 28.8 L/d、湿干比为 1:5 时, 对 TN、TP 的去除效果最好。

**关键词:** 因素; 人工湿地; 氮去除; 磷去除

**中图分类号:** X171 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2008)05-0290-03

人工湿地是依据土地处理系统及水生植物处理污水的原理, 由人工建立的具有湿地性质的污水处理生态系统<sup>[1]</sup>。由于其投资少、能耗低、对氮磷处理效果好, 从 20 世纪 70 年代以来得到了人们广泛的关注<sup>[2]</sup>。人工湿地主要由基质、植物以及微生物构成, 其中基质作为人工湿地中重要的组成部分, 对污水中氮素和磷素的去除起着举足轻重的作用。大量研究证明, 基质作用是人工湿地重要的氮磷去除途径之一<sup>[3-8]</sup>。然而人工湿地在处理污水中氮磷时受到很多因素的影响, 如基质种类、水力负荷、进水浓度、湿干比等。本试验以模拟垂直流人工湿地为研究对象, 采用正交试验法研究了蜂窝煤渣和蛭石两种基质在组合比例、进水流量、湿干比三因素影响下对生活污水中总氮(TN)、总磷(TP)的处理效果。

## 1 材料与方法

### 1.1 人工湿地结构

1.1.1 人工湿地的构建 垂直流人工湿地以塑料水桶(上部直径 23 cm, 下部直径 19 cm, 桶高 21.5 cm)为主体装置。进水管为一段长为 50 cm 的医用输液管, 布水管采用一段长为 20 cm 带孔乳胶管, 二者以三通管相连, 布水管呈圆形布置在基质表面, 保证布水均匀。沿桶壁垂直插入一直径为 1.5 cm、长度为 22 cm 的 PVC 管; 出水管为一段长为 50 cm 的

医用输液管, 一端沿 PVC 管管壁插入桶底, 另一端通到桶外, 以连接在输液管上的滴水控制开关控制进、出水流量。

1.1.2 基质 所用基质为蜂窝煤渣和蛭石, 粒径为 0.8~1.5 cm, 其中蜂窝煤渣取自南京农业大学附近饭店, 蛭石购自河北省灵寿县汇鑫矿业加工厂。在 1~3 号桶中填充体积比(蜂窝煤渣: 蛭石)为 1:1 的蜂窝煤渣和蛭石, 厚度为 16 cm; 4~6 号桶中填充比例为 1:2 的蜂窝煤渣和蛭石, 厚度为 16 cm; 7~9 号桶中填充比例为 2:1 的蜂窝煤渣和蛭石, 厚度为 16 cm。上层为蛭石, 下层为蜂窝煤渣。

### 1.2 试验设计及人工湿地的运行

本试验采用正交试验的设计方法, 设计为三因素三水平。三因素为基质比例、湿干比和进水流量。三水平为: 基质(蜂窝煤渣: 蛭石)比例分别为 1:1、1:2 和 2:1; 湿干比分别为 1:1(连续配水 12 h)、1:2(连续配水 8 h)和 1:5(连续配水 4 h); 进水流量分别为 28.8 L/d、57.6 L/d 和 86.4 L/d。由于基质比例、湿干比、进水流量之间无交互作用, 所以采用无交互作用的正交表进行试验设计, 正交试验表如表 1 所示。试验每天运行一次, 每次试验均取 3 个样, 分析进水和出水水质。试验自 2007 年 7 月 22 日起至 2007 年 7 月 28 日止。

### 1.3 供试污水特性

供试污水由人工配制而成。投加  $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$  于自来水中配成中等浓度的人工污水, TN 为 25.89~36.31 mg/L, TP 为 3.87~4.13 mg/L。

### 1.4 分析方法及数据统计方法

总氮测定: 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法; 总磷测定: 采用钼酸铵分光光度法。数据统计

收稿日期: 2008-03-14

作者简介: 陈娟(1980—), 女, 江苏泰州人, 硕士研究生, 从事人工湿地污水处理研究。E-mail: chenjuan122615@163.com。

通讯作者: 丁为民(1957—), 男, 安徽合肥人, 教授, 博士生导师, 从事农业生物环境工程研究。

表1 正交试验因子及水平

试验号	因子		
	基质比例	湿干比	进水流量(L/d)
1	(1) 1:1	(1) 1:5	(1) 28.8
2	(1) 1:1	(2) 1:2	(2) 57.6
3	(1) 1:1	(3) 1:1	(3) 86.4
4	(2) 1:2	(1) 1:5	(2) 57.6
5	(2) 1:2	(2) 1:2	(3) 86.4
6	(2) 1:2	(3) 1:1	(1) 28.8
7	(3) 2:1	(1) 1:5	(3) 86.4
8	(3) 2:1	(2) 1:2	(1) 28.8
9	(3) 2:1	(3) 1:1	(2) 57.6

采用 SPSS13.0 进行多因子方差分析及多重比较。

## 2 结果与分析

经 SPSS13.0 多因子方差分析表明:基质比例、湿干比、进水流量三者之间无交互作用,其极差分析、方差分析以及多重比较结果分析如下。

### 2.1 极差分析

对试验数据进行极差分析。通过极差分析能够确定各因子对指标影响程度的大小,并选出最好的试验条件。极差分析结果如表2所示。表2中  $T$  表示各列中同一水平对应的试验指标结果之和,如基质比例这一列中的  $T_1$  表示基质比例取1水平时,氮(或磷)的去除率之和。通过比较  $T$  的平均值大小可看出因子水平的好坏,平均值最大的,则该水平最好<sup>[9-10]</sup>。由表2可知,使 TN、TP 去除率均达到最大的条件是:基质比例为1:2,湿干比为1:5,进水流量为28.8 L/d。表2中  $R$  表示极差,极差指各列水平对应的试验指标平均值的最大值与最小值之差<sup>[9-10]</sup>,  $R$  值较大,则表示改变这一因子的水平会对指标造成较大的变化<sup>[9]</sup>,所以该因子对指标的影响大;反之,影响就小。由表2可知,对于 TN 和 TP 都是进水流量这一因素对其影响最大,其次是湿干比,基质比例影响最小。

### 2.2 数据的方差分析及多重比较

极差分析是通过极差的大小来评价各个因子对指标影响的大小,但极差要小到什么程度才可以认为该因子对指标值没有显著影响了呢?为此,须对数据进行方差分析。将试验数据录入 SPSS13.0 系统,得到方差分析及多重比较结果(表3、表4)。

由表3可知,三因素对 TN、TP 的去除均有极显著意义。由对显著性因素进行多重比较结果(表4)可知,对 TN 的去除,3种比例及3种进水流量之间均存在极显著差异,湿干比1:5和1:2之间及1

表2 氮、磷去除率正交试验结果

试验号	因子			氮/磷去除率
	基质比例	湿干比	进水流量(L/d)	
1	1:1	1:5	28.8	0.61/0.83
2	1:1	1:2	57.6	0.28/0.12
3	1:1	1:1	86.4	0.25/0.09
4	1:2	1:5	57.6	0.56/0.48
5	1:2	1:2	86.4	0.20/0.04
6	1:2	1:1	28.8	0.58/0.80
7	2:1	1:5	86.4	0.23/0.08
8	2:1	1:2	28.8	0.39/0.74
9	2:1	1:1	57.6	0.22/0.09
$k_1$	0.38/0.35	0.47/0.47	0.53/0.79	
$k_2$	0.45/0.44	0.29/0.30	0.36/0.23	
$k_3$	0.28/0.31	0.35/0.33	0.23/0.07	
$R$	0.17/0.14	0.18/0.16	0.30/0.72	

注:表中去除率均为所有样本的平均值。

:5和1:1之间均存在极显著差异,1:1和1:2之间差异显著。对 TP 的去除,基质比例1:2和1:1之间及1:2和2:1之间均存在极显著差异,1:1和2:1之间差异不显著;湿干比1:5和1:2之间及1:5和1:1之间均存在极显著差异,1:1和1:2之间差异不显著;进水流量的各水平之间存在极显著差异。

表3 氮、磷去除率方差分析结果

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
基质比例	0.311/0.195	2/2	0.155/0.097	23.040/7.885	<0.01
湿干比	0.341/0.338	2/2	0.170/0.169	25.294/13.649	
进水流量	0.942/6.046	2/2	0.471/3.023	69.900/244.514	

注:表中数据“/”前为氮的数据,“/”后为磷的数据。

### 2.3 试验结果验证

优化组合是通过统计分析得出的,须进行试验验证,以保证优化方案与实际一致,为此进行试验验证。将优化组合(基质比例1:2,湿干比1:5,进水流量28.8 L/d)和正交表中最好的试验号1(基质比例1:1,湿干比1:5,进水流量28.8 L/d)作对比试验。试验时间为2007年11月4日~2007年11月10日,试验方法同上。若优化组合比试验号1更好则通常就认为优化组合确实是优方案,否则试验号1就是所需的优方案,出现后一种情况可能是没有考虑交互作用或者试验误差较大造成的。

由试验结果(表5)可知,正交试验结果统计出的优化组合的去除氮磷的效果确实比试验号1好,说明它确实是所需的优化方案。

表 4 多重比较结果

因素	水平	磷去除率	氮去除率
基质比例	1:1	0.35A	0.38A
	1:2	0.44B	0.45B
	2:1	0.31AC	0.28C
湿干比	1:5	0.47A	0.47A
	1:2	0.30BC	0.29Bc
	1:1	0.33C	0.35Bd
进水流量(L/d)	28.8	0.79A	0.53A
	57.6	0.23B	0.36B
	86.4	0.07C	0.23C

注:同一列中上标不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )、不同大写字母表示差异极显著( $P < 0.01$ )。

表 5 验证结果

试验对象	氮去除率平均值(%)	磷去除率平均值(%)
试验号 1	59.56	81.74
优化组合	61.59	83.67

### 3 讨论

#### 3.1 人工湿地系统对 TN 的去除

在人工湿地系统中,对氮的去除作用包括基质的吸附和过滤、氨的挥发、植物的吸收和微生物的硝化/反硝化作用<sup>[11]</sup>,而这些作用都受湿地基质的直接影响,基质的理化性质对人工湿地的处理效果十分重要。由本试验数据分析可知,基质比例(蜂窝煤渣:蛭石)为 1:2 时,对氮的去除效果最好,1:1 效果居其次,2:1 效果最差;这说明增加蛭石的比例有利于氮的去除。有研究表明,蛭石的氨氮饱和和吸附量可达 20.83 mg/g<sup>[12]</sup>,前期试验也得出蛭石对氮的吸附明显好于蜂窝煤渣。而通常基质的吸附不能作为氨氮去除的最终途径,大气的复氧作用和植物根系的充氧作用可以促进硝化作用,反硝化作用则要在厌氧条件下进行,通过硝化/反硝化作用才能有效地去除氨氮。本试验中,进水流量取最小值 28.8 L/d 时,对 TN 的去除率最大,随着进水流量的增大,对 TN 的去除率降低,正是由于进水流量过大时,水力停留时间过短,无法达到硝化菌的世代时间,部分硝化菌会随水流出系统<sup>[13]</sup>,从而抑制了硝化作用,使 TN 去除率下降,所以适当减小进水流量有利于 TN 的去除;同时,当湿地基质含水率增加时,反硝化作用将会增强,蜂窝煤渣内部的多孔结构易形成缺氧条件<sup>[2]</sup>,有利于厌氧微生物反硝化作用去除氮素。试验还得出湿干比为 1:5 时,人工湿地系统对 TN 的去除率最大,且随湿干比的增大则去

除效果变差。可能的原因是随着湿干比的增大,干化时间缩短,系统的好氧环境未能恢复或者恢复效果较差,使得在下一运行周期时硝化作用受到抑制<sup>[14]</sup>,从而除氮效果变差。

#### 3.2 人工湿地系统对 TP 的去除

在人工湿地系统中,对总磷的去除主要是基质的固磷作用和植物与微生物的除磷,其中基质对磷的作用被认为是最有效的机制<sup>[15]</sup>。据数据分析可知,基质比例(蜂窝煤渣:蛭石)为 1:2、进水流量取最小值 28.8 L/d、湿干比取最小值 1:5 时对总磷的去除效果最好。一些学者研究了不同类型的人工湿地基质,认为富含钙和铁铝的基质净化污水中磷素能力较强,而硅含量较高的基质净化能力较差<sup>[16-17]</sup>,蜂窝煤渣和蛭石的钙铁铝含量均较高,由试验得出,这两种基质组合对磷的处理效果也很好。随着进水流量的增大,系统对磷的去除效果变差,原因是进水流量过大,对基质的冲击使原先吸附在基质表面的磷冲出系统<sup>[18]</sup>,造成 TP 去除率下降;试验还得出,随湿干比的增大,系统对磷的去除效果变差,原因是湿干比增大,则干化时间缩短,不能充分地复氧,降低了基质表面氧的传送,从而降低基质表面的吸附点位和吸附性能,进而降低磷的去除率。

### 4 结论

基质比例、湿干比、进水流量三因素对 TN、TP 的去除均有极显著影响,进水流量这一因素对其影响最大,其次是湿干比,基质比例影响最小。

由正交试验和验证结果得出,对 TN、TP 去除的最佳组合为:基质(蜂窝煤渣:蛭石)比例 1:2,湿干比 1:5,进水流量 28.8 L/d。增加基质中蛭石的比例能提高污水中氮磷的去除效果;随着进水流量和湿干比的增大,氮磷的去除率降低。

#### 参考文献:

- [1] 吴建强,阮晓红,王 雪. 人工湿地中水生植物的作用和选择[J]. 水资源保护, 2005, 21(1): 1-6.
- [2] 朱夕珍,崔理华,温晓露,等. 不同基质垂直流人工湿地对城市污水的净化效果[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(4): 454-457.
- [3] Korkusuz E A, Meryem Beklioglu, Gökse N D. Use of blast furnace granulated slag as a substrate in vertical flow reed beds: Field application [J]. Bioresource Technology, 2006, 97: 1-13.
- [4] 郭本华,宋志文,李 捷,等. 3 种不同基质潜流湿地对磷的去除效果[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(1): 110-113.

(下转第 293 页)

# 江苏省连云港市生态循环农业种养新模式探析

尚庆伟, 刘淑梅, 黄国兵, 梁 玲, 张来振

(江苏省连云港市农产品质量检验检测中心, 江苏连云港 222001)

**摘要:** 对江苏省连云港市农产品质量建设过程中部分基地实行“猪—沼—菜”、“猪—沼—茶”、“猪—沼—鱼—鸭—草”、“猪—沼—果”等生态循环农业种养模式进行调查, 对其运行方式、经济效益、生态效益和社会效益进行了具体的阐述, 并提出今后发展的对策建议。

**关键词:** 农产品; 质量安全; 生态循环农业

**中图分类号:** S314 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2008)05-0293-03

“猪—沼—菜”、“猪—沼—茶”等种养模式是一种庭院经济与生态农业相结合的新的生产模式。它以生态学、经济学、系统工程学为原理, 以土地资源为基础, 以太阳能为动力, 以沼气为纽带, 将种植业与养殖业相结合, 通过生物质能转换技术, 在农户的土地上和在全封闭的状态下, 将沼气池、猪禽舍、厕所和日光温室等组合在一起的一种生态循环农业种养模式。此种模式适应市场对优质、安全、无公害农产品的需求, 进一步改善农产品品质和提升档次, 增强农产品市场竞争力, 进而创造更多的效益来增加

农民收入。本文对江苏省连云港市农产品质量建设过程中部分基地实行生态循环农业种养新模式进行调查, 并对其运行方式、经济效益、生态效益和社会效益进行具体阐述。

## 1 江苏省连云港市生态循环农业种养新模式情况调查与探析

### 1.1 主要模式

1.1.1 “猪—沼—菜”种养栽培模式 “猪—沼—菜”种养栽培模式主要是依据能量循环利用原理, 在温室内建猪舍和沼气池, 猪舍养猪, 猪粪尿进入沼气池产生沼气, 可增加室内热源, 增加优质有机肥料, 改良土壤和提高蔬菜品质, 逐步达到绿色蔬菜和有机蔬菜的生产标准, 这样既净化了家园、保护了生态环境, 又达到了农业增效、农民增收的效果。江苏

收稿日期: 2008-03-19

作者简介: 尚庆伟(1976—), 男, 江苏赣榆人, 农艺师, 主要从事农产品质量安全管理与检测工作。Tel: (0518) 85587807; E-mail: boyshw@sina.com。

(上接第 292 页)

[5] 袁东海, 景丽洁, 张孟群, 等. 几种人工湿地基质净化磷素的机理[J]. 中国环境科学, 2004, 24(5): 614-617.

[6] 王全金, 李 丽, 刘 江, 等. 潜流人工湿地基质除氮磷效果研究[J]. 华东交通大学学报, 2006, 23(5): 1-3.

[7] Prochaska C A, Zouboulis A I. Removal of phosphates by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate [J]. Ecological Engineering, 2006, 26: 293-303.

[8] Andrea S B, Melissa N R, et al. Phosphorus removal by wollastonite: A constructed wetland substrate [J]. Ecological Engineering, 2000, 15: 121-132.

[9] 张建同, 孙昌言. 以 Excel 和 SPSS 为工具的管理统计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[10] 何 为. 优化设计方法及其在化学中的应用 [M]. 北京: 北京电子科技大学出版社, 2004.

[11] 张 政, 付融冰, 顾国维, 等. 人工湿地脱氮途径及其影响因素分析 [J]. 生态环境, 2006, 15(6): 1385-1390.

[12] 聂发辉, 吴晓美, 胡曰利, 等. 人工湿地中蛭石填料净化污水中

的氨氮能力 [J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(6): 280-282.

[13] 王世和, 王 薇, 俞 燕. 水力条件对人工湿地处理效果的影响 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003, 33(3): 359-362.

[14] 郭劲松, 王春燕, 方 芳, 等. 湿干比对人工快渗系统除污性能的影响 [J]. 中国给水排水, 2003, 22(17): 9-17.

[15] Sakadevank Bavor H J. Phosphate adsorption characteristics of soil, slag and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems [J]. Wat Res, 1998, 32(2): 393-399.

[16] Drizo A, Frost C A, Grace J, et al. Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems [J]. Water Research, 1999b, 33(17): 3595-3602.

[17] Yuan G, Lakulich L M. Phosphate adsorption in relationship to extractable iron and aluminum in spodosols [J]. Soil Sci Soc Am J, 1994, 58: 343-346.

[18] 胡小琴. 人工湿地除磷综述 [J]. 中国水运, 2006, 6(11): 92-93.