

· 控制技术 ·

doi: 10.3969/j.issn.1674-6732.2012.01.012

## 生物生态耦合技术处理农村生活污水的应用研究

刘文涛, 吴磊, 吕锡武, 李先宁, 盛翼

(东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 在对“厌氧池+跌水充氧接触氧化池+水耕蔬菜型人工湿地”生物生态耦合技术应用于农村生活污水处理进行实证研究的基础上,进一步探讨了生物与生态处理单元各自的主要去除对象和效率,为生物生态技术的合理耦合提供了依据。结果表明:在进水COD、TN、TP质量浓度波动范围为51.20~211.12, 28.29~122.12, 1.26~5.97 mg/L时,出水平均质量浓度为15.80, 5.51, 0.34 mg/L,出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。污水中COD、TN、TP的78%, 85%, 50%的去除是在生物处理单元完成的,而TP的达标排放还需要生态处理单元的参与。整个处理技术效果良好,运行费用低,适合在条件允许的农村地区推广使用。

**关键词:** 跌水充氧接触氧化池; 水耕蔬菜型人工湿地; 农村生活污水

中图分类号: X52

文献标识码: A

文章编号: 1674-6732(2012)-01-0046-04

### Study on the Process Combined with Bio-ecological Technology for Rural Sewage Treatment

LIU Wen-tao, WU Lei, LU Xi-wu, LI Xian-ning, SHENG Yi

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**ABSTRACT:** The effects of the removal of the combined process device with anaerobic process, water-dropping aerating bio-contact oxidation process and aquatic-planted constructed wetlands on some kinds of contaminations were experimentally studied. The device was continuously monitored and the effects of the removal of the combined process on COD, TN and TP were analyzed according to the results. The average effluent concentrations of COD, TN and TP were 15.80 mg/L, 5.51 mg/L and 0.34 mg/L, respectively, meanwhile the influent concentrations were in the range of 51.20~211.12 mg/L, 28.29~122.12 mg/L and 1.26~5.97 mg/L, respectively. All these indexes were in accord with the pollutant discharging standard. The biological process presented the average removal ratios of COD, TN and TP while the operation period were 78%, 85% and 50%, respectively, however the ecological process was necessary for the removal of TP. Finally, experiments demonstrated that the process could be applied to treat rural wastewater, and reduced the operation cost.

**KEY WORDS:** water-dropping aerating bio-contact oxidation process; aquatic-planted constructed wetlands; rural sewage

中国农村人口多达8亿,每年产生生活污水达80多亿t,据2005年建设部对全国部分农村的调查显示,96%的农村没有污水处理及收集系统,80%的村庄垃圾堆放在路边甚至水池、泄洪槽及水塘边,这严重危害饮用水源安全和影响居民身体健康<sup>[1,2]</sup>。有研究表明,中国农村生活污水处理率不足25%,其他75%以上的污水不经任何处理就近排入河道,使河道、湖泊等受到严重污染,农村污水排放已严重破坏了农村的生态平衡,导致目前农村河流普遍遭到污染,还严重威胁到地下水质量<sup>[3]</sup>。

受经济条件限制,农村污水处理技术应具备低建设运行成本、低土地占用、低维护性、高稳定与高

处理效率的要求。为此,东南大学提出了一系列生物生态耦合技术,如“厌氧池+跌水充氧接触氧化池+水耕蔬菜型人工湿地”、“水解/脉冲滴滤池/人工湿地工艺”等<sup>[4,5]</sup>。本试验在对“厌氧池+跌水充氧接触氧化池+水耕蔬菜型人工湿地”应用于农村生活污水处理和跌水充氧效果进行实证研究的基础上,进一步探讨了生物与生态处理单元各自的主要去除对象和效率,为生物生态技术的合理

收稿日期: 2011-11-28; 修订日期: 2012-01-08

基金项目: 国家水体污染控制与治理重大专项项目(2009ZX07101-009-04)。

作者简介: 刘文涛(1987—),男,硕士,从事环境科学研究。

耦合提供了依据。

1 试验部分

1.1 工艺流程

“厌氧池 + 跌水充氧接触氧化池 + 水耕蔬菜型人工湿地”生物生态耦合农村污水处理工艺流程如图 1 所示。

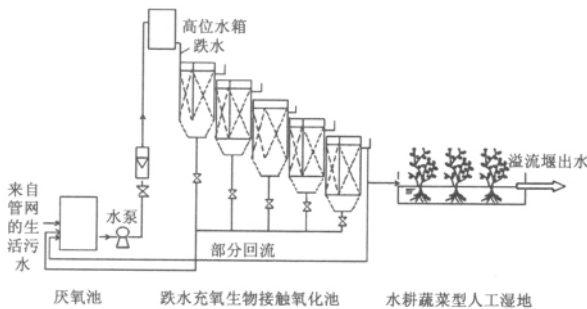


图 1 “厌氧池 + 跌水充氧接触氧化池 + 水耕蔬菜型人工湿地”工艺流程

生活污水由管网收集，进入厌氧池，然后由一台小型潜污泵提升到高位布水区，经三角堰布水装置进入跌水充氧生物接触氧化池，经五级跌水单池反应后，由出水槽进入到后续水耕蔬菜湿地净化系统进行深度处理。

1.2 试验装置概况

该装置位于宜兴市周铁镇葛渎自然村，根据实地考察，取设计流量为 10 m<sup>3</sup>/d，厌氧池设计停留时间为 30 h，设计容积为 12.5 m<sup>3</sup>。有效水深取 1.5 m，厌氧池平面有效尺寸取 3.46 m × 2.4 m，沿水流方向分 2 格，第 3 格为水泵吸水坑。

接触氧化池采取五级跌水，设 5 个单池，总填料体积为 0.42 m<sup>3</sup>，池内装填填料，池中设隔板，水流从隔板一侧流入，穿过隔板底部，从另一侧流出。停留时间 1 h，每个单池填料体积均为 0.084 m<sup>3</sup>，填料高度 0.5 m。截面积 0.168 m<sup>2</sup>，净截面尺寸 0.53 m × 0.32 m。池底设泥斗，泥斗高 0.15 m。第五号池出水部分进入生态净化系统，部分回流到厌氧池。前两级跌水高度为 0.7 m，第三级为 0.6 m，后两级为 0.5 m。前三级单池设两层跌水挡板；后两级设一层跌水挡板，采用一阶跌水挡板样式。

接触氧化池中填料材料为毛毡，间隔 15 cm 垂直悬挂，池中隔板和跌水挡板均为 PVC 板材。单池两侧的防水挡板使用 PVC 板材，用螺栓分别固

定于垂直的两面水泥壁上。

水耕蔬菜型人工湿地面积 3 m × 10 m = 30 m<sup>2</sup>，水力负荷为 0.2 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> · d)，采用推流式反应器，分两级，中间用隔墙隔开，东西方向坡度 3‰。夏季种植空心菜，冬季种植水芹，既能对曝气装置的出水进行深度处理，又具有一定的经济收益。

1.3 试验原水

试验以宜兴市周铁镇葛渎自然村生活污水为原水，污水水量及浓度随着每日早晚以及冬夏季节的不同而产生波动。具体数据见表 1。

表 1 原水水质

| $\rho(\text{TN}) /$<br>(mg · L <sup>-1</sup> ) | $\rho(\text{TP}) /$<br>(mg · L <sup>-1</sup> ) | $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N}) /$<br>(mg · L <sup>-1</sup> ) | $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N}) /$<br>(mg · L <sup>-1</sup> ) | $\rho(\text{COD}) /$<br>(mg · L <sup>-1</sup> ) |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 28.29 ~ 122.12                                 | 1.26 ~ 5.97                                    | 10.48 ~ 80.25                                                 | 0 ~ 2.98                                                      | 51.20 ~ 211.12                                  |

1.4 分析项目及测定方法

该装置自 2011 年 5 月建设完工并进入调试运行，从 7 月份开始定期对进出水水质进行监测，具体监测项目及方法见表 2。

表 2 水质指标分析方法

| 分析项目                             | 测试方法                             |
|----------------------------------|----------------------------------|
| COD                              | 重铬酸盐法(GB/T 11914—1989)           |
| TP                               | 钼酸铵分光光度法(GB/T 11893—1989)        |
| TN                               | 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB/T 11894—1989) |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N | 纳式试剂比色法(GB/T 7479—1987)          |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N | 氨基磺酸分光光度法(GB 7480—87)            |
| DO                               | YSI 550A 野外便携式溶解氧仪               |

2 结果与分析

2.1 COD 的去除效果

由图 2 可以看出，进水的 COD 浓度有较大的波动，因为取样时间是从 6 月中旬开始，一直持续到 9 月份，时间跨度比较大，再加上农村污水特有的排放规律，排放的污水中有机物的浓度变化比较大，进水 COD 的质量浓度平均为 112.45 mg/L，水耕蔬菜型人工湿地的出水质量浓度在 8 ~ 18 mg/L 之间，平均质量浓度为 15.80 mg/L，平均去除率为 86.43%，出水水质达到城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918—2002)的一级 A 标准要求。

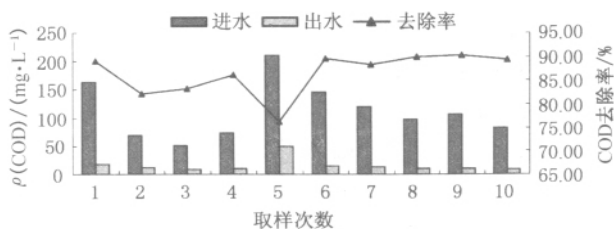


图2 生物生态耦合工艺对 COD 的去除效果

图3是水耕蔬菜型人工湿地前面的生物处理单元的去除效果,主要包括厌氧池和跌水充氧接触氧化池,在厌氧池中异养微生物通过厌氧发酵将污水中不溶性有机物和大分子溶解性有机物分解为 $\text{CH}_4$ 和 $\text{CO}_2$ ,在跌水充氧接触氧化池中组合填料上的好氧微生物将部分可生物降解的小分子有机物降解为 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ ,从图3可以看出,出水COD质量浓度在20~86 mg/L之间,平均为37.36 mg/L,平均去除率为66.6%。此外,可以从图3中明显看到去除率呈上升趋势,主要原因是在装置运行的初期,跌水充氧接触氧化池中填料的挂膜效果还不是很好,随着时间的推移,可以明显看到填料表面生物膜厚度的增加,去除率也随之升高。

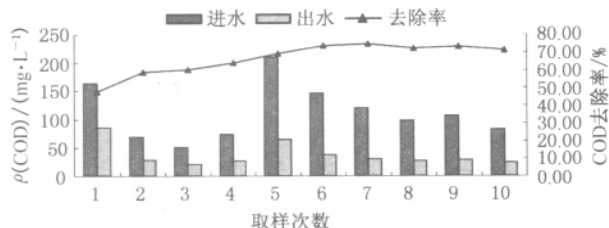


图3 “厌氧池+跌水充氧接触氧化池”对 COD 的去除效果

## 2.2 对 TN 的去除效果

由图4可以看出,组合工艺对TN的去除率保持在一个较高的水平,到后期TN的去除率趋于平缓,说明装置运行稳定,对TN保持较好的去除效果。去除率在78%~98%之间,平均为92%,出水TN质量浓度在2~10 mg/L之间,平均为5.51 mg/L,出水水质达到城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918—2002)的一级A标准要求。

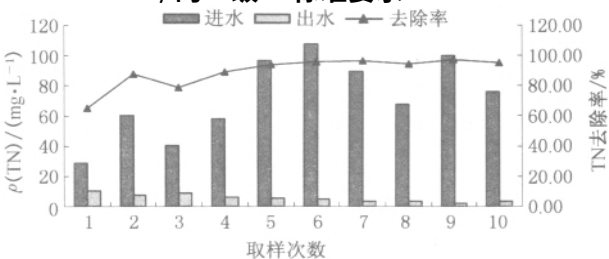


图4 生物生态耦合工艺对 TN 的去除效果

厌氧池和跌水充氧接触氧化池组成的生物处理单元,实际上是一个A/O系统,因此对TN的去除效果也是随着时间的推移变得越来越好,由图5可以看出,“厌氧池+跌水充氧接触氧化池”对TN的去除率在43%~90%之间波动,跨度比较大,但平均去除率为78%,维持在一个较高的水平。可以看出,在前期TN的去除率维持在一个较低的水平,后来慢慢增加并趋于稳定,主要原因是装置刚开始运行时,填料刚开始进行挂膜,接触氧化池内的硝化细菌数量还不多,随着装置的运行,硝化细菌的数量增多并趋于一个稳定的状态<sup>[3]</sup>。

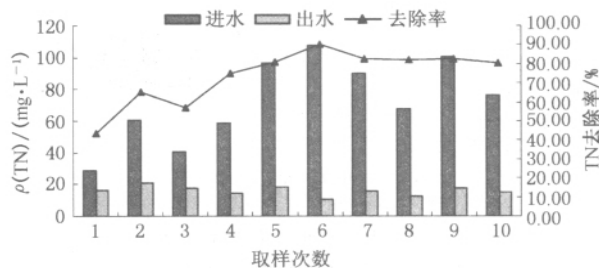


图5 “厌氧池+跌水充氧接触氧化池”对 TN 的去除效果

## 2.3 对 TP 的去除效果

由图6和图7可以看出,整个装置出水TP质量浓度在0.21~0.45 mg/L之间,平均出水质量浓度为0.34 mg/L,对TP保持较高的去除率,去除率在70%~94%之间,平均去除率为87%。可以由图7看出,“厌氧池+跌水充氧接触氧化池”对TP的去除率在后期维持在一个相对稳定的阶段,去除率都在50%以上,但出水TP浓度还是不能达标,必须依靠后续的湿地处理才能达标。这是因为生活污水中的磷分为溶解性磷和不溶性磷两种,其中溶解性磷分为有机磷和无机磷,有机磷可以通过微生物的分解作用被去除,一部分被自身利用,一部分转化为无机磷,而后通过植物根系的吸收以及聚磷菌的过量摄磷释磷作用被去除,不溶性磷则是通过湿地中植物根系的吸附截流作用被去除<sup>[6,10]</sup>。整个生物生态耦合工艺是一脉相承的,只有它们共同作用才能达到期望的除磷效果。

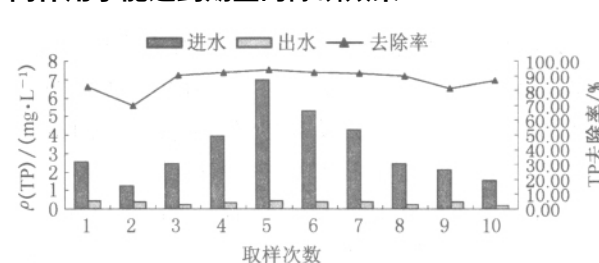


图6 生物生态耦合工艺对 TP 的去除效果

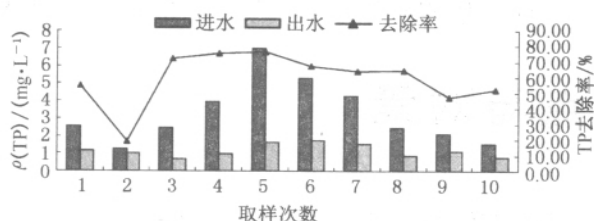


图7 “厌氧池+跌水充氧接触氧化池”对TP的去除效果

#### 2.4 生物和生态处理单元对COD、TN和TP的去除贡献率

由图8可以看出,生态单元即水耕蔬菜型人工湿地对COD去除的贡献率仅为22%,造成这种结果可能是由于进水的COD浓度本身就不高,污水中的有机物在经过厌氧池和跌水充氧接触氧化池降解后,其中易被生物利用的成分基本消耗,进入湿地中的COD都是一些难降解的有机物,以及接触氧化池出水中携带的少量生物残体,在人工湿地中通过异养微生物的降解作用及基质截留作用进一步去除有机物。可以看出厌氧池和接触氧化池可以大幅度地减少污水中的有机物,这有效减少了湿地的负担。

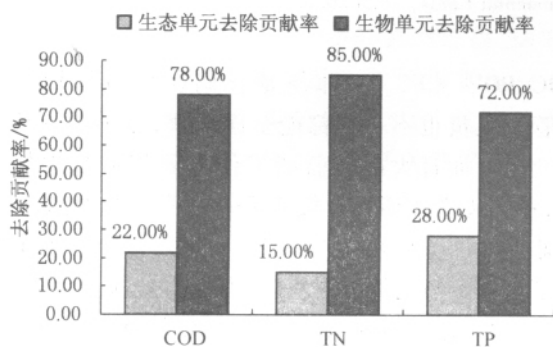


图8 生物与生态处理单元对COD、TN和TP去除的贡献率

由图8可以看出,生物单元即“厌氧池+跌水充氧接触氧化池”对TN的贡献率保持在85%,具有较高的贡献率,这主要因为跌水充氧接触氧化池对 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 保持较高的去除率,平均去除率可达到95%,因为在跌水曝气充氧的条件下,填料上的硝化细菌很容易进行硝化作用,再加上一定的回流进入厌氧池进行反硝化除氮<sup>[6]</sup>,所以“厌氧池+跌水充氧接触氧化池”可以去除大多数氮源,进入湿地的污水含有少量的 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,利于湿地中微生物的反硝化脱氮作用的进行,所以整个组合工艺能够对TN保持较高的去除率。

由图6和图7可知,仅仅依靠生物单元的处理,出水TP是不能达标的,还必须加上后续的生态单元,所以说生态单元在整个工艺中的作用是无法代替的,从图8可以看出,生态单元的贡献率达到28%,它对TP的出水水质起到把关的作用<sup>[7,8]</sup>。

### 3 结果与讨论

(1) “厌氧池+跌水充氧接触氧化池+水耕蔬菜型人工湿地”生物生态耦合技术对COD、TN和TP的去除率分别达到86.43%,92%和87%。出水水质达到城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918—2002)的一级A标准要求。

(2) “厌氧池+跌水充氧接触氧化池+水耕蔬菜型人工湿地”生物生态耦合技术中,生物处理单元的贡献要大于生态处理单元,污水中COD、TN、TP的78%,85%,50%的去除是靠生物处理单元完成的。但是缺少了生态处理单元,TP就不能达到一级A的标准排放,磷的深度去除,还必须依靠湿地植物的自身代谢和根系的吸附作用,进一步去除不溶性磷和无机磷。

#### 参考文献

- [1] 彭举威,汪诚文,付宏祥,等. 我国农村水污染现状及治理措施[J]. 中国资源综合利用,2010(28):44-45.
- [2] 彭举威,汪诚文,付宏祥,等. 分散农村污水处理模式分析[J]. 环境与可持续发展,2010(1):28-30.
- [3] 郑彦强,卢会霞,许伟,等. 地下渗滤系统处理农村生活污水的研究[J]. 环境工程学报,2010(10):2632-2636.
- [4] 吴磊,吕锡武,李先宁,等. 厌氧/跌水充氧接触氧化/人工湿地处理农村污水[J]. 中国给水排水,2007,23(3):57-59.
- [5] 吴磊,吕锡武,吴浩汀,等. 水解/脉冲滴滤池/人工湿地工艺处理农村生活污水[J]. 东南大学学报:自然科学版,2007,37(5):878-882.
- [6] 王永才,陈卫,郑晓英,等. 生物接触氧化法的同步硝化反硝化影响因素研究[J]. 中国给水排水,2011(27):22-25.
- [7] SPAQNI A, MARSILI L S. Nitrogen removal via nitrite in a sequencing batch reactor treating sanitary landfill leachate[J]. Bioresour Technol, 2009,100(2):609-614.
- [8] 王晓娟,张荣社. 人工湿地微生物硝化和反硝化强度对比研究[J]. 环境科学学报,2006,26(2):225-229.
- [9] NATHALIE V, FABIEN M. Treatment of domestic wastewater by an hydroponic NFT system[J]. Chemosphere,2003(50):121-129.
- [10] 熊飞,李文朝,潘继征,等. 人工湿地脱氮除磷的效果与机理研究进展[J]. 湿地科学,2005,3(3):228-233.

(本栏目编辑 周立平)