

# 厌氧池-潜流人工湿地处理低浓度农村生活污水的研究<sup>①</sup>

杨文婷<sup>1,3</sup>, 王德建<sup>1\*</sup>, 纪荣平<sup>2</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏扬州 225009;

3 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 研究了厌氧池-潜流人工湿地系统 (anaerobic tank-subsurface flow constructed wetland system, AT-SFCW) 对江苏省常熟市农村生活污水的处理, 探讨了该系统对生活污水中主要污染物的去除效果, 并将厌氧池部分与湿地部分的处理效果进行了比较。结果表明, 该系统对化学需氧量(COD<sub>Cr</sub>)、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、硝氮(NO<sub>3</sub>-N)的总平均去除率分别达到 44.3%、42.7%、73.9%、45.6%、37.5%, 出水平均浓度分别为 16.9、5.2、0.1、3.3、1.4 mg/L, 达到国家城镇污水处理厂污染物排放一级A类标准 (GB18918-2002)。系统中厌氧池部分对COD<sub>Cr</sub>、TN、NO<sub>3</sub>-N的去除率分别达到 17.4%、6.7%、57.7%。TP经厌氧池后有较明显的上升, 升高率达到 15.3%。系统中湿地部分对TP、NH<sub>3</sub>-N、TN、COD<sub>Cr</sub>的去除起主要作用, 去除率分别达到 89.2%、44.5%、36.0%、26.9%。该系统对农村生活污水的处理效果较好, 建设运行成本低廉, 维护管理方便, 适合农村地区生活污水处理的运用与推广。

**关键词:** 农村生活污水; 人工湿地; 厌氧池; 处理效果

**中图分类号:** X131.2

随着农村经济的发展、人民生活水平的提高以及环保意识的逐渐增强, 农村生活污水的排放及处理问题越来越受到政府和人民群众的重视。尤其在太湖地区, 农村居民的生活水平较高, 人口居住比较密集, 农村生活污水排放所引起的面源污染已经导致了严重的环境问题, 引起了国家的高度重视。根据估计, 到 2010 年, 我国村镇污水的排放量可达 270 亿m<sup>3</sup><sup>[1]</sup>。然而现阶段, 我国小城镇污水处理率还不到 10%<sup>[2]</sup>, 农村地区生活污水的处理率更低, 绝大部分生活污水未经处理直接排放。因此, 找到一种适合农村地区生活污水处理的方法迫在眉睫。

我国农村地区几乎没有管网收集系统, 居民点比较分散, 经济水平较低, 因此, 开发出设备简单、易于管理、投资运行费用低的新型农村生活污水处理技术已经势在必行<sup>[3]</sup>。人工湿地相比SBR、A<sup>2</sup>/O等机械化工艺具有投资少、运行费用低、处理效果好、耐冲击负荷较强等优点, 在农村生活污水的处理中有非常强劲的竞争优势。然而, 根据目前国内外对人工湿地处理污水的试验研究以及实践, 也发现了一系列的问题, 如占地面积大、出现恶臭吸引蚊蝇、易堵塞等<sup>[4-6]</sup>。另有研究表明, 只要有较好的预处理系统或有足够大

面积的湿地, 湿地系统对有机物的去除效率可达 90% 以上, 并且可以去除所有的N、P<sup>[7]</sup>。太湖地区经济比较发达, 人口密集, 农村耕地资源紧张, 为尽量缩减占地面积, 本研究设计的人工湿地污水处理系统采用厌氧池作为预处理设施, 与潜流型人工湿地相结合形成组合工艺, 对农村生活污水进行深度处理。

目前对于人工湿地系统去除污染物的研究多采用黑箱理论, 去除机理尚不明确, 而将人工湿地系统各个部分处理机理及效果分别讨论并进行比较研究的报道较少。分步讨论及定量研究将有助于加深对人工湿地系统处理效果及机理的了解。本文将分别讨论组合工艺中厌氧池预处理部分与潜流人工湿地部分对有机物及 N、P 的去除效率及处理机制, 旨在为人工湿地污水处理系统的设计与应用提供依据。

## 1 工艺及方法

### 1.1 运行系统基本情况

该人工湿地系统位于江苏省常熟市辛庄镇学甸村 (属于亚热带季风气候), 集中处理村内一村民集中居住区中约 30 户农户每日排放的生活污水。工艺流程如图 1 所示。

①基金项目: 国家科技支撑计划课题项目 (2006BAJ10B06) 和中国科学院知识创新工程项目 (KSCX2-YW-N-038) 资助。

\* 通讯作者 (djwang@issas.ac.cn)

作者简介: 杨文婷 (1985—), 女, 湖南常德人, 硕士研究生, 主要从事人工湿地方面的研究。E-mail: wtyang@issas.ac.cn

农户每日排放的生活污水经管道收集后过隔栅进入集水池, 然后经过带液位自动控制系统的水泵将污水抽到厌氧池中进行预处理, 再通过自流进入湿地进行深度处理。其中厌氧池部分分为 4 级(图 2), 第一、四级采用生物挂膜(悬浮填料), 利用生物挂膜及污水的上、下流动进行预处理, 以减少悬浮物, 防止湿地填料堵塞, 确保人工湿地系统的稳定运行, 增加湿地的处理寿命<sup>[8]</sup>, 提高其处理效果。污水通过厌氧池后

进入人工湿地。该人工湿地为水平潜流型, 占地面积  $16\text{ m} \times 12\text{ m}$ , 通过水泥沟道布水。湿地深  $70\text{ cm}$ , 填充基质从下往上依次为  $10\text{ cm}$  砾石、 $30\text{ cm}$  细砂、 $20\text{ cm}$  煤渣、 $10\text{ cm}$  土。湿地表面种植易于生长且对污水有较好处理效果的乡土植物美人蕉。

## 1.2 污水来源及性质

本湿地系统处理的污水来自学甸村学甸小区, 污水基本化学性质如表 1 所示。

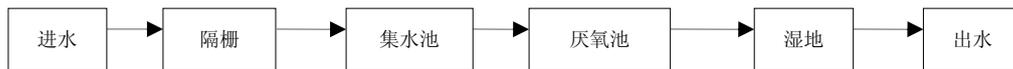


图 1 厌氧-潜流湿地系统工艺流程

Fig. 1 Flow chart of AT-SFCW System

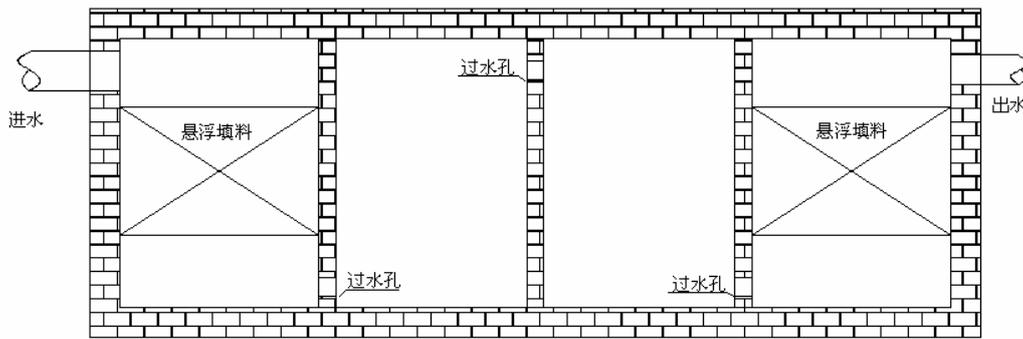


图 2 厌氧池示意图

Fig. 2 Schematic diagram of anaerobic tank

表 1 进水主要性质 (mg/L)

Table 1 Influent properties

COD	NH <sub>3</sub> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	TN	TP
20.0 ~ 108.0	4.0 ~ 22.7	1.0 ~ 5.0	10.0 ~ 40.0	0.2 ~ 2.2

## 1.3 湿地运行情况及采样分析

该湿地于 2008 年 4 月份建成并投入试运行, 采样及分析从 2008 年 7 月 6 日开始, 于 2008 年 8 月 16 日结束。确定每隔一天采样, 早晚各采一次, 采样时间定为早上 7 点和傍晚 6 点。此外, 常熟市环境监测站还在 2008 年 12 月 18 日对该系统的处理效果进行了抽查监测。测定进出水以及 4 个厌氧池中化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、硝氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)。监测分析方法 COD<sub>Cr</sub> 采用重铬酸钾法, TN 为过硫酸钾氧化紫外分光光度法 (GB11894-

89); TP 为钼锑抗分光光度法 (GB11893-89)<sup>[9]</sup>, NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 用流动分析仪测定 (AutoAnalyzer 3 BRAN+LUEBBE)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 湿地系统对 COD<sub>Cr</sub> 的去除效率

根据对污水进出水及厌氧池近 40 天的监测, 结果显示进水的 COD<sub>Cr</sub> 浓度一般为  $20 \sim 50\text{ mg/L}$ , 出水浓度一般在  $0 \sim 40\text{ mg/L}$ , 水质达到中华人民共和国城镇污水处理厂污染物排放一级 A 类标准 (GB18918-2002, 以下简称国家一级 A 类标准)。COD<sub>Cr</sub> 的去除率一般在  $20\% \sim 80\%$  之间波动, 平均去除率达到  $44.3\%$ 。其中, 厌氧池部分平均去除率达到  $17.4\%$ , 湿地部分平均去除率达到  $26.9\%$  (图 3)。可见, 两部分对 COD<sub>Cr</sub> 的去除都起到重要作用, 其中湿地部分起主要作用。由图 3

可知, COD<sub>Cr</sub>的进水及出水浓度均较低, 普遍在 50 mg/L 以下, 且波动较大, 处理效率的波动也比较大。COD<sub>Cr</sub>

的进水浓度比较低, 可能跟该地农民习惯收集自家粪尿浇灌菜园与夏季雨水稀释效应有关。

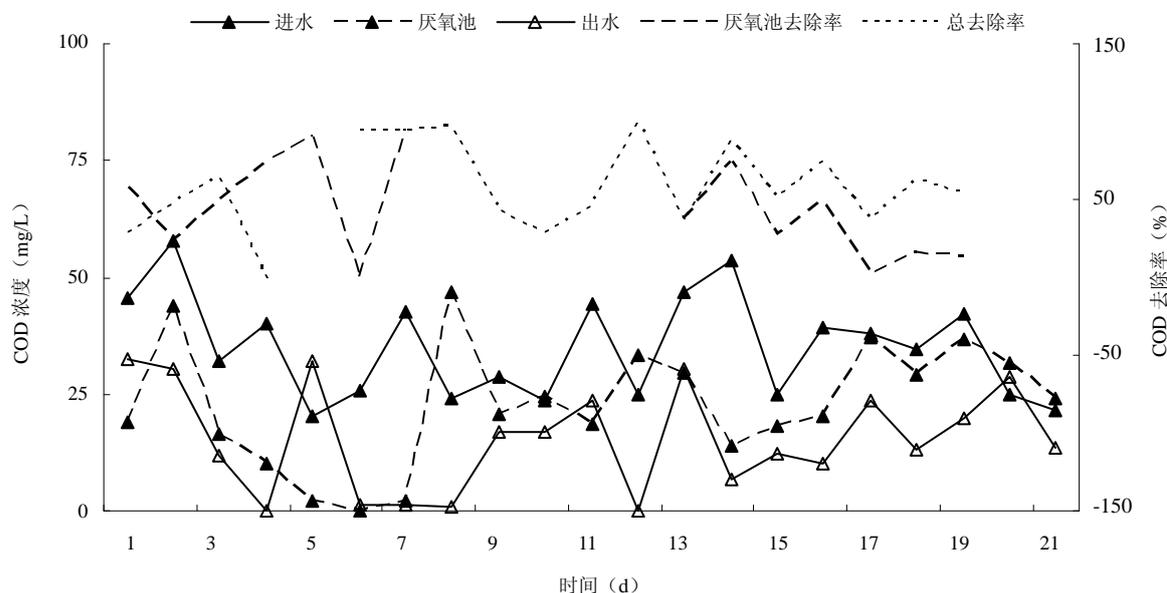


图3 COD<sub>Cr</sub>浓度及去除率变化

Fig. 3 Dynamics of COD<sub>Cr</sub> concentration and removal efficiency of AT-SFCW System

## 2.2 湿地系统对 TN 的去除效率

连续监测结果表明, TN的进水浓度一般在 8 ~ 15 mg/L, 出水浓度在 5 ~ 7 mg/L 的浓度范围内波动, 水质达到国家一级A类排放标准。湿地系统总去除率一般在 50% ~ 60%, 平均去除率达到 42.7%。其中, 厌氧池部分平均去除率为 6.7%, 湿地部分平均去除率可达到 36.0%, 可见湿地部分对TN的去除起主要作用(图4)。在厌氧池部分, TN的去除主要依靠悬浮填料中微生物的作用, 微生物数量有限, 而且受生长状况限制, 故去除率比较低; 而当污水到达湿地部分后, 可通过湿地中的基质吸附、微生物和植物的作用等去除, 其中植物在湿地脱N过程中起重要作用。有研究表明, 植物直接吸收和存储占湿地脱N的 30% 左右, 而微生物的硝化/反硝化作用是人工湿地脱N的最主要形式<sup>[10]</sup>。另外, 由图4可知, 监测的前15天进水中TN的浓度波动较大, 此后浓度比较稳定, 而出水中TN的浓度一直比较稳定, 去除效率也保持在一个相对稳定的水平, 说明该系统有较强的应对冲击负荷的能力。

## 2.3 湿地系统对 TP 的去除效率

由连续监测结果可知, TP的进水浓度一般在 0.5

~ 1.0 mg/L, 出水浓度 0.05 ~ 0.3 mg/L, 水质达到国家一级A类排放标准。湿地系统对TP的去除率保持在 70% ~ 95% 的水平, 平均达到 73.9% (图5)。12月18日的抽样监测表明, 进水与出水的TP浓度分别为 2.23、0.24 mg/L, 去除率为 89.2%。连续监测的前15天, 进水中的TP浓度波动较大, 此后慢慢趋向稳定, 而出水中的TP浓度除两个特殊点(图中点a、b)外, 一直保持比较稳定的水平, 说明该系统有比较强的应对冲击负荷的能力。厌氧池进出水的监测数据显示, 污水经过厌氧池后其TP浓度反而上升, 平均上升率为 15.3%。研究表明, 在该阶段某些聚磷菌在受到压抑的厌氧环境中, 能够分解其细胞内的聚磷酸盐同时产生三磷酸腺苷以及磷酸盐。这部分磷酸盐被排出细胞体外, 从而使厌氧池污水中的TP含量升高<sup>[11]</sup>。而湿地部分去除率一般在 50% ~ 95%, 平均去除率达到 89.2%, 可见这部分对TP的去除起主要作用。针对湿地填料、植物的相关研究表明, 该部分通过基质的物理吸附、沉淀作用, 植物的吸收作用以及微生物等一系列作用相结合, 可有效减少污水中的TP含量<sup>[12-13]</sup>。

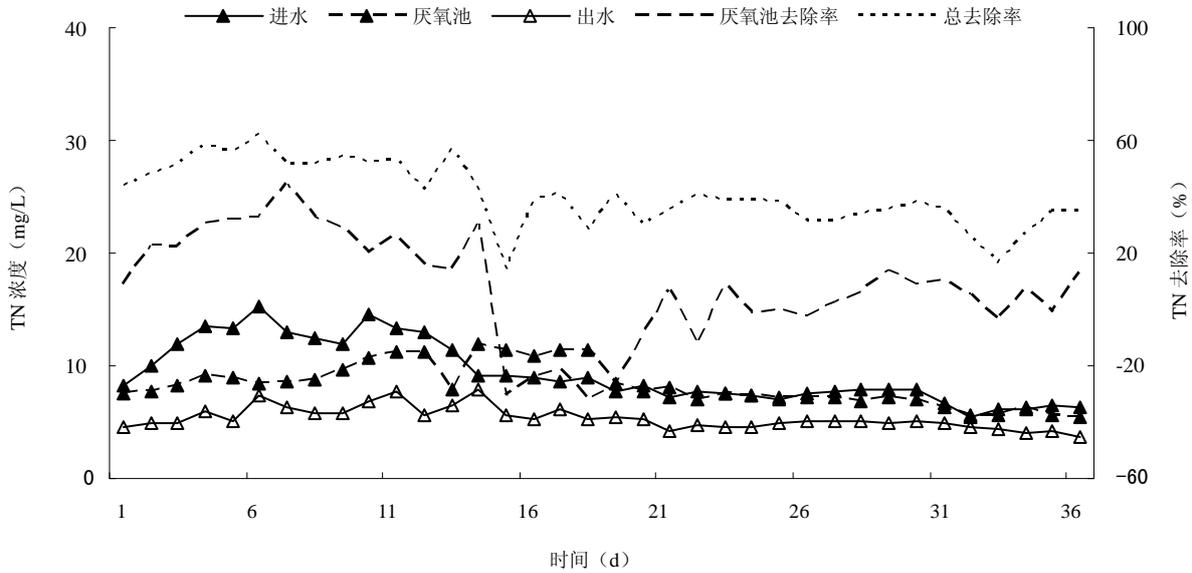


图 4 系统 TN 浓度及去除率变化

Fig. 4 Dynamics of TN concentration and removal efficiency of AT-SFCW System

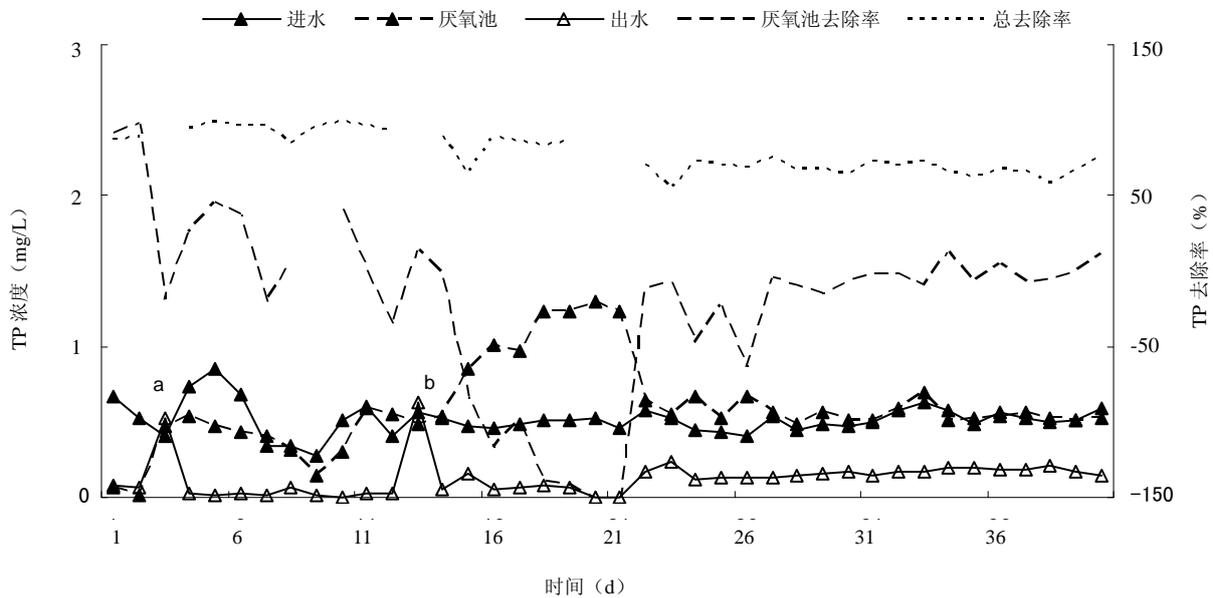


图 5 系统 TP 浓度及去除率变化

Fig. 5 Dynamics of TP concentration and removal efficiency of AT-SFCW System

#### 2.4 湿地系统对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效率

由连续的监测结果可知,湿地系统进水的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度一般在 $4\sim 10\text{ mg/L}$ ,出水浓度一般在 $2\sim 5\text{ mg/L}$ ,水质达到国家一级A类排放标准。总去除率达 $20\%\sim 60\%$ ,平均达到 $45.6\%$ ,其中,厌氧池部分的平均去除

率为 $1.1\%$ ,人工湿地部分的平均去除率达到 $44.5\%$ (图6)。12月18日的抽样监测结果表明,进出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度分别为 $22.7、8.13\text{ mg/L}$ ,去除率为 $63.4\%$ 。如图6所示,进水与厌氧池中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度曲线呈现一个交叉的现象,前15天,进水浓度高于厌氧池中浓度,而

15天后,厌氧池中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度反而高于进水中浓度。这可能是因为前段时间系统运行未稳定,厌氧池中的厌氧环境未完全形成,进水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 由于挥发或厌氧池填料中微生物的作用部分减少;当厌氧池中厌氧条件稳定后,污水中的有机N、 $\text{N}_2$ 等在厌氧环境下通过微生物作用转化生成 $\text{NH}_3\text{-N}$ ,使其反而升高。而到

达湿地部分后,主要通过人工湿地中微生物的硝化作用,以及植物直接吸收和存储减少污水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量<sup>[10]</sup>。另外,监测的前15天,进水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度波动较大,随后比较稳定,而出水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量一直保持比较稳定的状态,也说明该系统应对冲击负荷的能力较强。

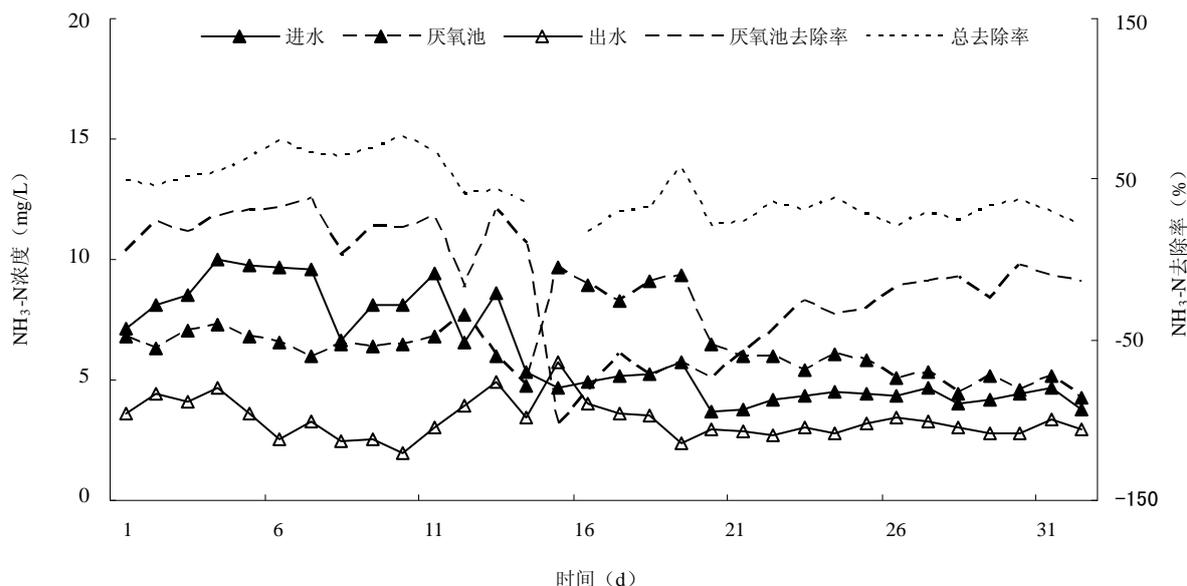


图6 系统 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度及去除率变化

Fig. 6 Dynamics of  $\text{NH}_3\text{-N}$  concentration and removal efficiency of AT-SFCW System

## 2.5 湿地系统对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除效率

由连续的监测结果可知,该湿地系统进水的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度一般在 $1.0 \sim 5.0 \text{ mg/L}$ ,出水浓度一般在 $0.5 \sim 2.0 \text{ mg/L}$ ,水质达到国家一级A类排放标准。总去除率一般为 $20\% \sim 70\%$ ,平均达到 $37.5\%$ ,其中,厌氧池部分的平均去除率为 $57.7\%$ ,而经过湿地部分后,出水中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量反而升高(图7)。可见,厌氧池部分对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除起主要作用。这主要是因为,在厌氧池中,污水中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 在厌氧环境下通过微生物的作用生成 $\text{N}_2$ ,进入湿地部分后作为气体排出。而在湿地部分, $\text{O}_2$ 相对比较充分,在好氧环境下,污水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、有机N等,在好氧微生物的作用下生成 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ ,使得出水中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量升高。另外,由图7中的进出水曲线可知,进水中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度的波动比较大,而出水则一直保持在相对稳定的水平,说明该系统对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 有比较强的冲击负荷。

## 2.6 高负荷进水条件下湿地处理效果

在高负荷污染物的进水条件下,厌氧池-潜流人工湿地系统的进出水及处理效率如表2所示。

由表2可知,厌氧池-潜流人工湿地系统在高负荷的进水条件下,对 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、SS的去除率分别达到 $78.8\%$ 、 $89.6\%$ 、 $63.4\%$ 、 $89.2\%$ 、 $36.4\%$ ,出水中 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{BOD}_5$ 、TP、SS浓度均达到国家一级A类排放标准, $\text{NH}_3\text{-N}$ 出水浓度达到国家一级B类排放标准。

## 3 结论

(1) 监测结果表明,该湿地系统对 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 均有较好的处理效果,去除率分别达到 $44.3\%$ (进水浓度高时达 $78.7\%$ )、 $42.7\%$ 、 $73.9\%$ ( $89.2\%$ )、 $45.6\%$ ( $63.4\%$ )、 $37.5\%$ ,出水浓度平均分别为 $16.9$ 、 $5.2$ 、 $0.13$ 、 $3.3$ 、 $1.4 \text{ mg/L}$ ,达到了国家城镇污水处理厂污染物一级A类排放标准

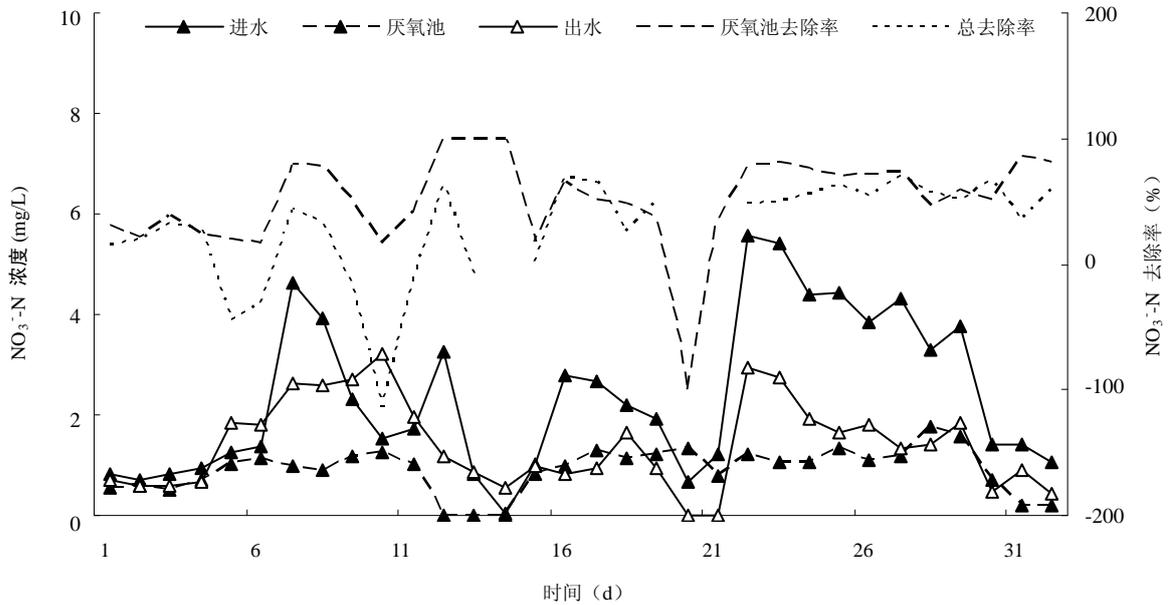


图 7 系统NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度及去除率变化

Fig. 7 Dynamics of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N concentration and removal efficiency of AT-SFCW System

表 2 系统对高浓度进水的处理效果

Table 2 Removal efficiency of AT-SFCW System to high concentration influent

水质指标	CODcr	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> -N	TP	SS
进水浓度(mg/L)	108	36.5	22.7	2.23	11
出水浓度(mg/L)	23	3.8	8.31	0.24	7
去除率 (%)	78.7	89.6	63.4	89.2	36.4
国家一级 A 类标准	≤50	≤10	≤8 (5)	≤0.5	≤10

(GB18918-2002)。因进水浓度较低，且湿地的处理效果较好，该系统完全达到设计目标。

(2) 在湿地系统的两部分中，厌氧池对CODcr、TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的去除率分别达到 17.4%、6.7%、57.7%，但TP经厌氧池后有较明显的上升，升高率达到 15.3%，故湿地部分对TP、NH<sub>3</sub>-N、TN、CODcr的去除起主要作用。

(3) 人工湿地正式运行至今，系统运行状况良好，出水水质稳定。该系统维护管理方便，基建运行费用低，卫生状况良好，且起到美化景观的作用。适合农村地区生活污水处理的应用与推广。

参考文献:

[1] 沈东升, 贺永华, 冯华军, 周旭辉. 农村生活污水埋地式无动力

厌氧处理技术研究. 农业工程学报, 2005, 21(7): 111-115

[2] 张凯松, 周启星, 孙铁珩. 城镇生活污水处理技术研究进展. 世界科技研究与发展, 2003, 25(5): 5-10

[3] 戴世明, 白永刚, 吴浩汀, 吕锡武. 滴滤池/人工湿地组合工艺处理农村生活污水. 中国给水排水, 2008, 24(7): 21-24

[4] 王久贤. 白泥坑人工湿地水力学计算研究. 广东水利水电, 1997(6): 50-52

[5] 苏东辉, 郑正, 王勇, 罗兴章, 吴文继. 农村生活污水处理技术探讨. 环境科学与技术, 2005, 28(1): 79-81

[6] 梁祝, 倪晋仁. 农村生活污水处理技术与政策选择. 中国地质大学学报(社会科学版), 2007, 7(3): 18-22

[7] Luederitz V, Eckert E, Martina LW, Lange A, Richard MG. Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands. Ecological

- Engineering, 2001, 18: 157-171
- [8] 应俊辉. 利用人工湿地处理农村生活污水的研究. 安徽农业科学, 2007(4): 1 104-1 105
- [9] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 210-257
- [10] 张政, 付融冰, 顾国维, 杨海真. 人工湿地脱氮途径及其影响因素分析. 生态环境, 2006, 15(6): 1 385-1 390
- [11] 李军, 杨秀山, 彭永臻. 微生物与水处理工程. 北京: 化学工业出版社, 2002
- [12] 秦怡, 李勇, 金龙, 黄勇. 人工湿地中常用填料和植物对污染物去除效果的比较. 江苏环境科技, 2006, 19(5): 46-48
- [13] 张雨葵, 杨扬, 刘涛. 人工湿地植物的选择及湿地植物对污染河水的净化能力. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1 318-1 323

## Anaerobic Tank-Subsurface Flow Constructed Wetland System for Rural Domestic Wastewater Treatment

YANG Wen-ting<sup>1,3</sup>, WANG De-jian<sup>1</sup>, JI Rong-ping<sup>2</sup>

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;* 2 *School of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;* 3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** An Anaerobic Tank-Subsurface Flow Constructed Wetland (AT-SFCW) System for treating rural domestic wastewater was studied in removal efficiency and mechanism for Chemical Oxygen Demand (COD), nitrogen and phosphorus in Xuedian Village, Xinzhuang Town of Changshu City. The AT part, which compared with SFCW, was also studied for explaining the functions of AT-SFCW System. The results showed that this system could remove 44.3%, 42.7%, 73.9%, 45.6% and 37.5% of COD, TN, TP, NH<sub>3</sub>-N and NO<sub>3</sub>-N respectively, and the effluent concentration were 16.9, 5.2, 0.1, 3.3 and 1.4 mg/L for COD, TN, TP, NH<sub>3</sub>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N respectively, which were below the national discharge standard of pollutants for municipal wastewater of Class A level (GB18918-2002). The AT part could remove 17.4%, 6.7% and 57.7% of COD, TN and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N respectively, but the concentrations of TP was increased by about 15.3%. The removal efficiency of SFCW part for TP, NH<sub>3</sub>-N, TN and COD<sub>Cr</sub> were 89.2%, 44.5%, 36.0% and 26.9% respectively, so this part played a more important role in removing pollutants. Hence, AT-SFCW system is very effective in treating rural domestic wastewater, it is also material/energy-saving compared with central technical systems, thus, worth popularization and application.

**Key words:** Rural domestic wastewater, Constructed wetland, Anaerobic tank, Treatment efficiency