

技术总结

# 微型复合垂直流人工湿地处理农村灰水试验研究

王凯军, 陈世朋, 董娜, 阎中  
(北京市环境保护科学研究院, 北京 100037)

**摘要:** 针对北方农村家庭生活污水以灰水为主的状况, 采用微型复合垂直流人工湿地处理模拟农村灰水。试验结果表明, 稳定运行的微型复合垂直流湿地对灰水中 COD 的去除率为 70%, 对总氮的去除率为 99%。通过从微型湿地不同高度处取样分析, 研究了湿地内各形态氮间的降解规律。由于受到灰水中碳源不足和垂直流湿地供氧条件的限制, 湿地内的硝化、反硝化作用不充分。通过增加曝气设备和补充天然碳源物质, 可明显增强湿地内的硝化和反硝化作用。

**关键词:** 复合垂直流人工湿地; 灰水; 脱氮; 碳源; 硝化作用; 反硝化作用

**中图分类号:** X703.1 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2008)17-0040-04

## Experimental Study on Treatment of Grey Water by Mini-integrated Vertical-flow Constructed Wetland

WANG Kai-jun, CHEN Shi-peng, DONG Na, YAN Zhong

(Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China)

**Abstract** Aimed at the fact that the rural domestic sewage is mainly composed of grey water in northern China, a mini-integrated vertical-flow constructed wetland (MVCW) was used to treat simulated rural grey water. The results indicate that the removal rates of COD and TN are 70% and 99% respectively. The degradation characteristics of various types of nitrogen were investigated by analyzing the samples from different depths. Also, because of limitations in carbon source shortage in the grey water and in oxygen supply, the effect of the nitrification and denitrification is insufficient. The effect of the two processes can be significantly improved through installation of aeration equipment and supply of a natural carbon source.

**Key words** integrated vertical-flow constructed wetland (MVCW); grey water; nitrogen removal; carbon source; nitrification; denitrification

灰水是指除粪便水以外的生活污水, 包括洗浴水、厨房水等洗涤水。与黑水(包含粪便水的生活污水)相比, 灰水中的污染物浓度较低, COD、BOD<sub>5</sub>、TSS 一般分别为 (80~400)、(30~200)、(20~200) mg/L<sup>[1-3]</sup>。对于灰水的处理, 各国学者采用的方法

不尽相同, 如 UASB、SBR、人工湿地等<sup>[4-6]</sup>。我国大部分村镇地区的生活污水主要为灰水, 由于村镇地区存在经济不发达、人口居住分散、污水水量小且污染物浓度低等特点, 所以灰水的处理需根据村镇特有的条件选择合适的方法。笔者利用微型复合垂直

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目 (8072011)

流人工湿地处理模拟村镇灰水, 考察了对 COD 和总氮的去除效果, 以为农村灰水的处理提供依据。

### 1 试验装置及检测方法

#### 1.1 试验装置及进水水质

选用两个上口直径为 50 cm, 下口直径为 40 cm、高为 65 cm 的塑料桶, 采用两级串联的连接方式, 试验布水和集水采用工字型穿孔管, 水力负荷保持在  $0.1 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 种植植物为滴水观音。沿水流方向共设置 9 个取样口, 其中 1<sup>#</sup> 为进水; 5<sup>#</sup> 和 9<sup>#</sup> 分别为下行出水和上行出水; 2<sup>#</sup> ~ 4<sup>#</sup> 和 8<sup>#</sup> ~ 6<sup>#</sup> 分别为下行床和上行床内表层土下 10、30、50 cm 处的取样口。

试验工艺流程见图 1, 填料的装配结构见表 1。

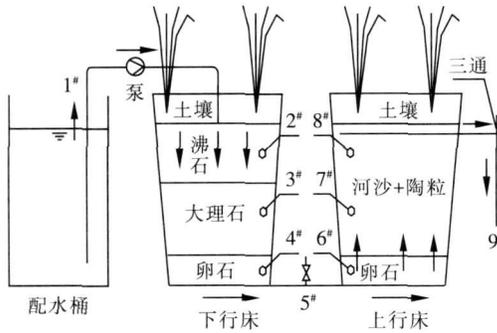


图 1 试验工艺流程

Fig 1 Flow chart of treatment process

表 1 填料的装配结构

Tab 1 Structure of filling

项目	空间分布 / mm	填料种类	规格 / mm
下行床	0~ 100	卵石	20~ 50
	100~ 350	大理石	3~ 5
	350~ 550	沸石	1~ 2
上行床	0~ 100	卵石	20~ 50
	100~ 550	河沙、陶粒	(1~ 2)、(3~ 5)

注: 河沙与陶粒的配比为 1: 1(体积比)。

进水为环科院小区生活污水稀释配制而成, 进水 COD 为 50~ 100 mg/L(平均为 78 mg/L)、TN 为 10~ 40 mg/L(平均为 32 mg/L)、 $\text{NH}_3 - \text{N}$  为 5~ 35 mg/L(平均为 15 mg/L)、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  为 0.5~ 5 mg/L(平均为 1.9 mg/L)。

#### 1.2 检测方法

COD: 重铬酸钾法, TN: 碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法;  $\text{NH}_3 - \text{N}$ : 次氯酸钠—水杨酸分光光度法;  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ : 紫外分光光度法。

## 2 结果与分析

### 2.1 对有机物的去除

反应器的进水 COD 平均为 78 mg/L, 出水为 23 mg/L, 对其去除率为 70%, 其中第一级下行床对其去除率达 65%, 是去除有机物的主要场所。通过分别测定未处理进水和滤后水的 COD, 得出过滤水的 COD 为未处理进水的 41%, 由此可知颗粒状物质占进水 COD 总量的 59%, 而溶解性物质占 41%。颗粒状有机物在下行床表层通过填料的截留作用而被去除, 而溶解性物质主要通过下行床内微生物的降解作用而被去除。

### 2.2 对氮的去除

在复合垂直流人工湿地中, 填料、溶解氧浓度、微生物种类等条件沿水流方向均存在显著差异, 造成不同位置处氮浓度差别较大。进水 TN 为 31.53 mg/L, 出水为 0.32 mg/L, 对其去除率达 99%。湿地对 TN 的去除效果与氮的存在形式及环境条件等有很大关系, 生活污水中的总氮主要以  $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和有机氮的形式存在, 所以对 TN 的去除机理与它们的浓度变化有关。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_3 - \text{N}$  的沿程浓度变化及去除率如图 2 所示。

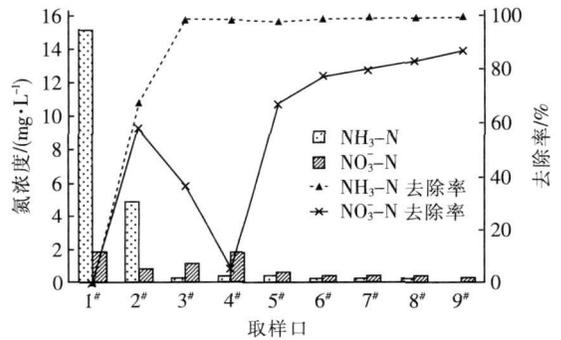


图 2  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_3 - \text{N}$  的沿程浓度变化及去除率

Fig 2 Variation of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  and  $\text{NH}_3 - \text{N}$  concentration and removal rate along reactor

由图 2 可知, 在 2<sup>#</sup> 取样点处下行床对  $\text{NH}_3 - \text{N}$  的去除率为 68%, 这主要是因为具有多孔结构的土壤和填料对污水中  $\text{NH}_3 - \text{N}$  的吸附和截留作用所致<sup>[7]</sup>。此外, 硝化菌利用进水中的溶解氧和有机物也可以将部分氨氮转化为硝酸盐氮, 但从硝酸盐氮的浓度变化过程看, 该过程显然不占主导地位。从进水到 2<sup>#</sup> 取样口, 氨氮浓度下降了 10 mg/L, 而硝酸盐氮的浓度并未增加反而有所降低, 直到 3<sup>#</sup> 取样口时硝酸盐浓度才相对有所增大, 在 4<sup>#</sup> 取样口出现峰

值 (1.75 mg/L)。第一级湿地从表层到底部随着水力停留时间的延长,硝化作用逐渐增强,  $\text{NH}_3 - \text{N}$  经硝化作用转变为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ , 在 4# 取样口出现对氨氮的去除率下降, 至此  $\text{NH}_3 - \text{N}$  基本被去除完全。

由于下行床中溶解氧逐步被有机物氧化和硝化反应所消耗, 所以在上行床中形成了厌氧环境, 促使反硝化作用增强, 成为湿地内的主要反应。然而第一级湿地出水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度基本上已稳定, 第二级湿地对其只有微弱的去除作用, 最终对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率为 87%, 反硝化过程进行得不完全, 这主要是由于在反应器前端微生物可利用的有机物已基本被消耗完毕, 剩余的主要是难以生物转化的物质。

在 3# 取样口处, 对有机氮的去除率为 86% (见表 2), 这是因为生活污水中的大量颗粒态有机氮被填料层截留所致。而 3# ~ 4# 出口之间有 14% 的去除率, 除了截留部分以外, 可能是由于该区域内厌氧水解菌(氨化细菌)的大量繁殖, 使污水中溶解性有机氮被水解为氨氮等小分子物质所致, 这可以由图 2 中 4# 出口氨氮浓度由 0.22 mg/L 升至 0.32 mg/L 的现象证明。

表 2 有机氮的浓度变化及其去除率

Tab 2 Variation of organic nitrogen concentration and its removal rate

取样口	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
有机氮浓度 / (mg·L <sup>-1</sup> )	8.27	3.53	1.19	0.03	0.43	0.18	0.12	0.01	0.04
有机氮去除率 / %	0	57	86	100	95	98	99	99	99

综上所述, 湿地内对氮的去除受多种因素的共同影响, 包括吸附、截留、硝化、反硝化作用等。其中对有机氮的去除主要受截留及水解作用的影响, 对氨氮的去除则主要受吸附及硝化作用的影响(主要发生在下向流湿地内)。对于硝酸盐, 在下向流过程中受湿地内溶解氧含量低的影响, 硝化程度较低; 在上向流过程中反硝化作用逐渐加强, 而此时湿地内可被微生物利用的有机物含量非常少, 抑制了反硝化反应的充分进行。所以总体来说湿地内增加溶解氧和有机物含量是脱氮需要解决的问题。

### 2.3 改进型湿地的试验结果

根据上述结果可知, 虽然两级湿地对 TN 的去除效果较好, 但去除机理主要是土壤填料等对氨氮(所占比例为 48%)的吸附、截留作用, 当进水中氨氮浓度较高时, 单纯的吸附截留作用不足以保证出

水水质, 还需通过微生物的硝化、反硝化作用来去除。而湿地内的硝化和反硝化作用都很微弱, 本试验中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的最大浓度只有 1.75 mg/L, 这是由湿地系统内溶解氧不足造成的。

通过第一级下行床后, 剩余的 COD 只有 27.6 mg/L, 可供反应的电子不充足, 从而使反硝化反应不能完全进行, 因此有必要在湿地内增加碳源, 促进反硝化反应。McCarty 等也提到在绝大多数情况下, 电子供体是限速底物<sup>[8]</sup>。为此, 重新组装一套复合垂直流湿地反应器, 在新反应器的下行床底部模仿城市污水处理厂的曝气池, 铺设穿孔管进行曝气, 在上行床底部添加天然碳源物质——碎树枝, 添加量为 300 g, 新反应器的结构及取样点设置如图 3 所示。

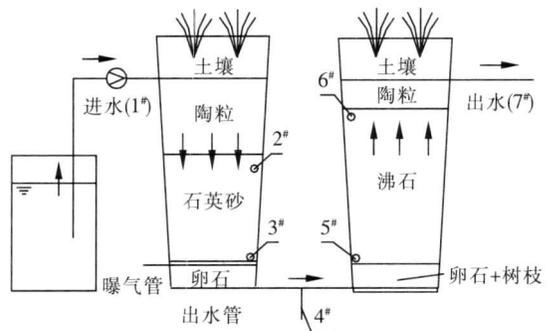


图 3 改进后的复合垂直流人工湿地

Fig 3 Schematic diagram of integrated vertical flow constructed wetland after being improved

改进后湿地的运行条件与第一组的相同, 只是连续曝气, 气水比为 7:1。在连续曝气一个月后, 检测结果显示下行床内水中的硝酸盐含量迅速增加, 到达上行床时又明显降低, 说明微生物的硝化、反硝化作用得到明显改善(见图 4)。

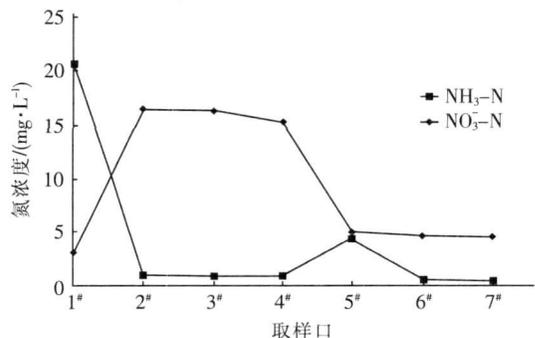


图 4 湿地改进后  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_3 - \text{N}$  浓度的变化

Fig 4 Variation of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  and  $\text{NH}_3 - \text{N}$  concentration after system improvement

由图 4 可知, 湿地系统经改进后, 水流在到达下行床中部 (2<sup>#</sup>取样口) 时  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度由  $20.7\text{ mg/L}$  迅速降至  $0.85\text{ mg/L}$ , 同时  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  由  $3.1\text{ mg/L}$  升至  $16.5\text{ mg/L}$ , 说明采取的曝气措施可以明显强化  $\text{NH}_3\text{-N}$  经硝化作用转化为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的速度和数量。而在由下行床底进入上行床底后 (4<sup>#</sup> ~ 5<sup>#</sup> 取样点),  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度迅速由  $15.3\text{ mg/L}$  迅速降至  $5.1\text{ mg/L}$ , 与原反应器相比,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的反硝化速率和数量显著增大, 证明反硝化作用得到增强。

上述试验结果表明, 改进后的复合垂直流人工湿地在硝化和反硝化作用方面明显得到增强, 采用的技术措施可以为解决传统湿地内氮素去除不彻底提供一条技术途径。由于对该技术还缺乏深入研究, 所以出水硝酸盐氮的含量偏高, 这可能是碳源物质的投量偏低所致。对于碳源物质投量的确定及如何控制有机物释放方面还需作进一步研究。

### 3 结论

① 复合垂直流微型人工湿地对模拟灰水中有机物和 TN 具有较好的去除效果, 出水水质不仅可满足生活污水排放标准, 并且相关指标 (COD 和氮元素) 还达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV 类水质要求。这说明采用分散自然处理工艺, 不仅可以降低处理农村生活污水的投资和运行成本, 同时结合农村改水、改厕, 微型湿地可以获得良好的出水水质, 处理后的出水可以直接排入当地的水环境和具有水质功能要求的河流。

② 虽然建造的复合垂直流人工湿地已经取得了很好的试验结果, 但在氮的去除方面, 由于受溶解氧浓度和碳源的限制, 湿地内的硝化和反硝化作用微弱。通过在湿地下行床和上行床之间分别增加曝气设备和补充碳源物质, 可明显改善湿地内的硝化

和反硝化作用, 但在碳源物质的投加量及如何控制有机物释放等方面还需作进一步研究。

### 参考文献:

- [1] Jefferson B, Palmer A, Jeffrey P, *et al*. Grey water characterisation and its impact on the selection and operation of technologies for urban reuse [J]. *Water Sci Technol* 2004 50 (2): 157-164
- [2] Winward G P, Avery L M, Stephenson T, *et al*. Chlorine disinfection of grey water for reuse: effect of organics and particles [J]. *Water Res* 2008, 42(1-2): 483-491.
- [3] 郝晓地. 可持续污水—废物处理技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006
- [4] Halalshah M, Dalahmeh S, Sayed M, *et al*. Grey water characteristics and treatment options for rural areas in Jordan [J]. *Bioresour Technol* 2008 99(14): 6635-6641
- [5] Lanine M, Boussehri L, Ghnabi A. Biological treatment of grey water using sequencing batch reactor [J]. *Desalination*, 2007, 215(1-3): 127-132
- [6] Winward G P, Avery L M, Frazer-Willian sa Ronnie *et al*. A study of the microbial quality of grey water and an evaluation of treatment technologies for reuse [J]. *Ecol Eng* 2008, 32: 187-197.
- [7] 薛玉, 张旭, 李旭东, 等. 复合沸石吸氮系统控制暴雨径流污染 [J]. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2003, 43(6): 854-857.
- [8] Bruce E Ritman, Perry L M cCarty. 环境生物技术原理与应用 [M]. 文湘华等译. 北京: 清华大学出版社, 2004.

电话: 13146601040

E-mail 13146601040@m165.com

收稿日期: 2008-05-09

**加强农村水利工作, 建设社会主义新农村**