

# 不同基质和土壤组合渗滤系统 处理生活污水的研究

武轩韵, 孙向阳\*, 栾亚宁, 祁娜  
(北京林业大学林学院, 北京 100083)

**摘要:**通过室内土柱试验模拟土壤渗滤系统,考察了土壤(TR)、无烟煤(WY)、活性炭(HX)、土壤+无烟煤(TR+WY)、土壤+活性炭(TR+HX)、土壤+无烟煤+活性炭(TR+WY+HX)6种基质组合对污水中氨氮和总磷的去除效果以及对pH的影响。结果表明,在水力负荷为 $0.08\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 条件下,6种不同填充基质对污水中氨氮和总磷的去除效果由大到小分别为:TR+WY+HX>TR+HX>TR+WY>TR>HX>WY、WY>TR+WY>TR+WY+HX>HX>TR+HX>TR。其中经TR+WY和TR+WY+HX处理后的污水,出水中氨氮和总磷的平均质量浓度同时达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》中的一级A标准。除处理WY、TR+HX外,经其他基质组合去除后的污水pH与进水pH均无显著差异。因此,无烟煤和活性炭能够全部或部分替代纯土壤,且其中某些处理优于原有土壤处理,对污水中氨氮和总磷的去除率均有显著提高。

**关键词:**渗滤系统;基质;无烟煤;活性炭;去除率

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2014)07-0109-04

## Different substrates and soil combinations used in seepage system for treatment of domestic wastewater

WU Xuan-yun, SUN Xiang-yang\*, LUAN Ya-ning, QI Na  
(School of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** By simulating the soil infiltration system with soil column experiments, the effects of six kinds of matrix combination, including soil (TR), anthracite (WY), activated carbon (HX), soil + anthracite (TR + WY), soil + activated carbon (TR + HX), soil + anthracite + activated carbon (TR + WY + HX), on ammonia nitrogen and total phosphorus removal efficiency and pH changes of wastewater are studied. The results show that the rank orders of six kinds of filler matrix for removal of nitrogen and phosphorous in sewage are TR + WY + HX > TR + HX > TR + WY > TR > HX > WY and WY > TR + WY > TR + WY + HX > HX > TR + HX > TR, respectively, when the hydraulic loading is  $0.08\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ . The average concentration of the ammonia nitrogen and total phosphorus in the polluted water that is treated with the anthracite TR + HX and TR + WY + HX, meets satisfying Level A of the Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant. Except for the WY and TR + HX treatments, the pH of the water after removal by other matrix combinations and the pH of wastewater are not significantly different. It can be seen that anthracite and activated carbon can replace all or part of the soil. Moreover, some of the six treatments are better than the soil. The removal rates of the ammonia nitrogen and total phosphorus are promoted after using some kinds of matrix combination.

**Key words:** seepage system; substrate; anthracite; activated carbon; removal

渗滤系统也叫土壤含水层处理,是一种污水处理生态功能技术。其对污水的净化机制是:污水在包气带及潜水层流动时,借助于发生在土壤和浅部含水层中的物理、化学和生物作用,使污染物通过吸附、沉淀、微生物降解以及其他化学反应去除,最终达到污水净化的目的<sup>[1]</sup>。与传统的污水处理方法相比,具有处理出水水质好,投资少,管理简单等优点<sup>[2]</sup>。基质作为土壤渗滤系统的主要组成部分,在净化中发挥着极其重要的作用。目前在基质的选择方面,人们主要采用纯土壤,但纯土壤的水渗透性能

小、易堵塞等缺点会降低土壤的水力传导性能,严重影响对污水中污染物的去除效果<sup>[3-5]</sup>。因此,笔者通过室内模拟实验,选用比表面积大、吸附能力强、化学性质稳定的无烟煤、活性炭替代部分土壤作为基质,探究不同基质组合对生活污水中的总磷、氨氮的去除效果。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

进水选择:实验污水为北京市清河污水处理厂

收稿日期:2014-02-27

基金项目:国家林业局948项目(2012-4-75);北京市自然科学基金资助项目(2122044)

作者简介:武轩韵(1989-),女,硕士生,主要研究方向为土壤生态,474179987@qq.com;孙向阳(1965-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为土壤生态,通讯联系人,sunxy@bjfu.edu.cn。

的进水,为保证进水水质,每 2 天取水 1 次。进水水质指标如表 1 所示。

表 1 污水进水指标

指标	总磷/ (mg·L <sup>-1</sup> )	氨氮/ (mg·L <sup>-1</sup> )	COD/ (mg·L <sup>-1</sup> )	pH
变化范围	3.48~8.43	54.72~73.11	129.71~320.44	7.19~8.02
均值	4.83	65.58	200.73	7.48

基质的选择:土壤(TR)、无烟煤(WY)、活性炭(HX)、土壤+无烟煤(TR+WY)、土壤+活性炭(TR+HX)、土壤+无烟煤+活性炭(TR+WY+HX),其中土壤为北京林业大学北门建筑工地的开挖土;无烟煤购于河南郑州滤料厂;活性炭为果壳活性炭,与无烟煤购于同一滤料厂。

实验装置选择:试验采用直径 10 cm、高 100 cm、壁厚 0.5 cm 的玻璃管模拟土壤渗滤系统装置。为了防止出水管堵塞,使用前,玻璃柱底部填充粒径 0.5~1 cm 的碎石 10 cm,同时在出水管与碎石接触的管口处用尼龙网包裹,使其达到漏水不漏基质的目的。玻璃管上部留下 10 cm 作为淹水水头空间,基质高 80 cm,如图 1 所示。

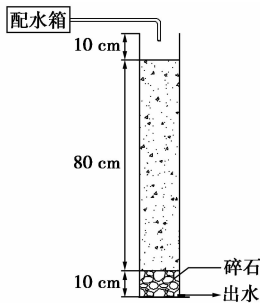


图 1 实验装置示意图

### 1.2 实验设计

实验于 2013 年 11 月在北京林业大学林业楼室内进行,试验期间室内温度为 13~19℃,共设 6 个基质处理,每个处理重复 3 次。处理中不同基质之间采用均匀混合的方式,实验设计方案见表 2。

表 2 模拟土壤渗滤系统基质组成

实验处理	TR	WY	HX	TR+WY	TR+HX	TR+WY+HX
w(土)/%	100			50	50	30
w(无烟煤)/%		100		50		35
w(活性炭)/%			100		50	35

采用间歇式进水,以上进下出的方式,每天进水 2 次,9 点 1 次,21 点 1 次,水力负荷为 0.08 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d),

每隔 24 h 取出水水样 1 次。在试验的开始阶段,首先进行 5 d 的环境适应,然后进入正式运行阶段。正式试验连续运行 25 d 后落干 5 d,再运行,实验共运行 54 d。

### 1.3 指标测定方法

采用国家环保局标准分析方法<sup>[6]</sup>:氨氮采用纳氏试剂光度法测定;pH 采用玻璃电极法测定;总磷采用钼锑抗分光光度法测定。

### 1.4 数据处理

选用 Microsoft Office Excel 2003 和 SPSS 16.0 为数据处理软件进行方差分析和多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 氨氮的去除效果分析

通过 54 d 室内模拟实验,发现 6 个装置对污水中氨氮均有一定的去除效果,如图 2 所示。当进水氨氮平均质量浓度为 65.58 mg/L 时,处理 TR、TR+WY、TR+HX、TR+WY+HX 的出水氨氮平均质量浓度均达到了国家一级 A 标准。而处理 WY、HX 对污水中氨氮的去除效果较差,且随着系统运行时间的加长,去除效果整体呈下降趋势。当系统运行到第 20 d 时,装有纯土壤的处理 TR 所进污水在淹水水头集聚,因此使其落干 3 d 后再继续运行<sup>[7]</sup>。当系统运行一个月后,各装置对氨氮的去除效果均下降。Drizo A 等<sup>[8-9]</sup>发现当土柱对污水中的污染物去除效果减弱时,可采用落干的形式使其出水效果变好。因此对 6 个装置进行 5 d 的落干,除了处理 TR 和处理 HX 对氨氮的去除率没有回升外,其他装置除氨氮效果均有回升,其中装有无烟煤的装置去除率提升最多,达到了 23.4%。

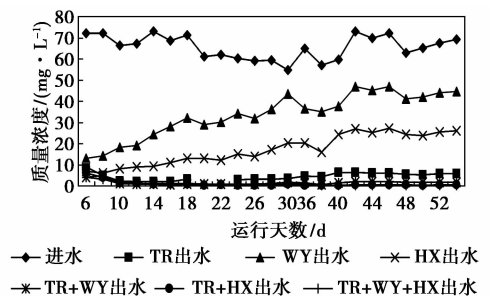


图 2 不同基质处理对污水中氨氮的去除效果

方差分析和多重比较( $P < 0.05$ )如表 3 所示。对污水中氨氮的去除率最大的是处理 TR+WY+HX,与处理 TR+HX、TR+WY 差异不显著,但与处理 TR、WY、HX 呈显著差异;其次为处理 TR;再者是处理 HX。去除率最小的是处理 WY,处理 TR、HX、

WY 分别与除本身以外的其他 5 个处理呈显著差异。

表 3 不同基质处理对污水中氨氮的平均去除率

不同基质处理	TR	WY	HX	TR + WY	TR + HX	TR + WY + HX
				WY	HX	HX
平均去除率/%	93.20 ± 1.50 <sup>b</sup>	48.06 ± 1.17 <sup>d</sup>	73.61 ± 0.60 <sup>c</sup>	97.63 ± 0.33 <sup>a</sup>	98.55 ± 0.79 <sup>a</sup>	98.59 ± 1.02 <sup>a</sup>

注:a、b、c、d 表示各水平  $P < 0.05$  的多重比较,字母相同表示不显著,字母不同表示显著。下同。

## 2.2 总磷的去除效果分析

总体来讲,6 个处理对污水中总磷的去除均较好,如图 3 所示。其中处理 WY、TR + WY、TR + WY + HX 最为明显,出水总磷平均质量浓度均达到国家一级 A 标准。处理 HX、TR + HX 的去除效果相对较差,但出水总磷平均质量浓度为 1.01、1.10 mg/L,部分时间也达到了国家一级 B 标准。装有纯土壤的装置去除效果最弱,出水总磷平均质量浓度为 1.70 mg/L。在系统运行的前一个月内,处理 HX、TR + WY、TR + WY + HX 随着系统运行时间的加长,对污水中总磷的去除效果明显下降,但经过 5 d 的落干后,去除效果均有回升。

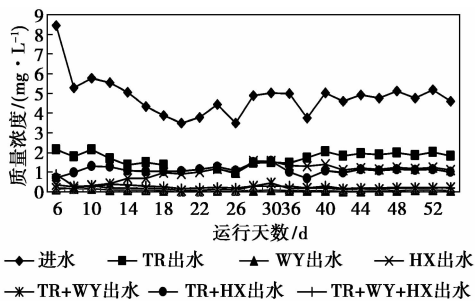


图 3 不同基质处理对污水中总磷的去除效果

方差分析和多重比较 ( $P < 0.05$ ) 如表 4 所示。处理 WY 对污水中总磷的去除率最大,与处理 TR + WY 无显著差异。处理 TR + WY + HX 除了与 TR + WY 差异不明显外,与其他 4 个处理都呈显著差异。处理 HX 和 TR + HX 的去除效果一般,且两者无显著差异。对污水中总磷去除率最小的是 TR,与其他 5 个处理均呈显著差异。

表 4 不同基质处理对污水中总磷的平均去除率

不同基质处理	TR	WY	HX	TR + WY	TR + HX	TR + WY + HX
				WY	HX	HX
平均去除率/%	65.30 ± 2.56 <sup>d</sup>	98.38 ± 0.89 <sup>a</sup>	78.01 ± 0.63 <sup>c</sup>	96.11 ± 1.15 <sup>ab</sup>	76.39 ± 0.97 <sup>c</sup>	94.41 ± 1.40 <sup>b</sup>

## 2.3 进出水 pH 的变化

不同基质处理进出水 pH 的变化如表 5 所示。

表 5 不同基质处理进出水 pH 的变化

不同基质处理	TR	WY	HX	TR + WY	TR + HX	TR + WY + HX
				WY	HX	HX
进水 pH 平均值	7.48 ± 0.17 <sup>b</sup>	7.48 ± 0.17 <sup>b</sup>	7.48 ± 0.17 <sup>b</sup>	7.48 ± 0.17 <sup>b</sup>	7.48 ± 0.17 <sup>b</sup>	7.48 ± 0.17 <sup>b</sup>
出水 pH 平均值	6.90 ± 0.19 <sup>bc</sup>	9.55 ± 0.67 <sup>a</sup>	6.89 ± 0.15 <sup>bc</sup>	7.49 ± 0.58 <sup>b</sup>	6.64 ± 0.38 <sup>c</sup>	6.91 ± 0.24 <sup>bc</sup>

由表 5 可知,除处理 WY 外,其他处理出水 pH 均在中性范围内变化。通过方差分析和多重比较 ( $P < 0.05$ ),当进水 pH 平均值为 7.48 时,处理 WY 出水 pH 平均值显著高于进水,达到了 9.55。处理 TR、HX、TR + WY 以及 TR + WY + HX 与进水 pH 无显著差异。处理 TR + HX 出水 pH 小于进水 pH,且差异显著,但与处理 TR、HX、TR + WY + HX 无显著差异。由实验期间出水 pH 变化可知,在试验运行初期,处理 WY 出水的 pH 偏高,但随着运行时间的增加,pH 逐步下降,而其他处理的 pH 并没有表现出随系统运行而有规律变化,平均 pH 保持在 6.39 ~ 8.08 之间。

## 3 讨论

### 3.1 不同处理对氨氮的净化效果

处理 TR、TR + WY、TR + HX、TR + WY + HX 对污水中氨氮的去除效果均优,平均去除率都在 93% 以上。但处理 TR 在系统运行 20 d 就丧失了渗透性能。出现此现象有两方面原因:一是以纯土壤为基质的土壤渗滤系统中,悬浊物的产生、微生物及其胞外分泌物的积累过程产生的气体导致土壤堵塞;二是由于土壤本身吸附达到了饱和<sup>[10-11]</sup>。落干 3 d 后,处理 TR 又能正常运行,这是由于通过干湿交替的方式有效防止了微生物新陈代谢产生的气体对土壤空隙的堵塞过程。处理 TR + WY、TR + HX、TR + WY + HX 去除效果很好,是由于氨氮的减少与土壤中氧的含量有很大的关系<sup>[12]</sup>。无烟煤和活性炭与土壤均匀混合可使装置内孔隙增大且分布较均匀,复氧能力较强,有利于硝化反应的进行。处理 WY、HX 对氨氮的去除率较差。原因是无烟煤和活性炭主要是通过物理吸附作用去除进水中的氨氮,硝化和反硝化作用较小,对氨氮的处理效果不甚理想。随着运行时间的加长,无烟煤和活性炭逐步达到饱和,去除率也不断下降。

### 3.2 不同处理对总磷的净化效果

无烟煤具有多孔介质结构和其中所含的胶体氧化铝成分,对总磷具有很好的去除效果,因此装有处理 WY 对总磷的去除效果最好,平均去除率高达 98.38%,但他易受到进水水质和运行周期影响,表明无烟煤除磷机理主要是吸附和截留作用。处理 TR 相比 HX、TR + WY、TR + HX 以及 TR + WY + HX 来说,去除效果最差,原因是无烟煤和活性炭替代部分土壤后吸附性能有所增强。另外,通过观察发现,实验运行一个月后,处理 TR + WY、TR + HX、TR + WY + HX 由于生长大量的微生物,玻璃柱壁变成了黑褐色,但除总磷效果因此而变好;处理 TR + WY、TR + HX 反而继续下降。原因是在去除污水中总磷方面,微生物起的作用并不大,而其中基质的吸附却逐渐达到饱和<sup>[13-14]</sup>。

### 3.3 不同基质对 pH 的影响

pH 作为土壤渗滤系统废水处理中监测的常规指标,对系统长期运行效率的评价起着重要作用<sup>[15-17]</sup>。有研究指出,人工湿地运行初期,出水的 pH 会突然上升<sup>[18]</sup>,在此模拟系统中,以无烟煤为填料的玻璃柱表现的最为明显。原因是实验运行刚开始,质子发生阳离子交换或碳酸盐溶出的非生物机理,到后期,质子的阳离子交换过程和溶出过程变缓慢,所以出水的 pH 会逐步下降。其他处理出水 pH 大多数时间在中性范围变化,说明实验模拟系统运行正常。

## 4 结论

在水力负荷为  $0.08 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  条件下,处理 TR、TR + WY、TR + HX、TR + WY + HX 出水氨氮平均质量浓度以及处理 WY、TR + WY、TR + WY + HX 出水总磷平均质量浓度均达到了国家一级 A 标准;处理 WY、TR + HX 出水 pH 平均值分别为 9.55、6.64,均与进水 pH 平均值有显著差异性,其中,经过处理 WY 去除的污水呈碱性,未达到国家排放标准。从模拟土柱实验所得的综合指标考虑,在普通土壤中添加无烟煤或活性炭,不仅可以提高渗透性能,还可有效促进污水中氨氮的去除;无烟煤不适合单独作为土壤渗滤系统的填料基质,必须与其他偏酸性的基质搭配使用;经 TR + WY 和 TR + WY + HX 处理后的污水,出水中氨氮和总磷的平均质量浓度同时达到了国家一级 A 标准,且 pH 在中性范围内变化,因此选用这 2 种基质组合作为土壤渗滤系统的填料,可以使污水的净化效果最佳。

## 参考文献

- [1] 郑艳侠,冯绍元,刘培斌,等.土壤渗滤系统处理微污染水的研究现状与进展[J].水资源与水工程学报,2004,15(2):29-32.
- [2] 刘宝.土壤渗滤系统处理污染河水的试验研究[D].郑州:郑州大学水利与环境学院,2011.
- [3] Baveye P, Vandevivere P, et al. Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soil and aquifer materials[J]. Critical Rev Environ Sci Tech, 1998, 28: 123-191.
- [4] Rober L Siegrist, William C Boyle. Wastewater-include soil clogging development[J]. Environ Eng, 1987, 113(3): 550-566.
- [5] Rober L, Siegrist. Soil clogging during subsurface wastewater infiltration as affected by effluent composition and loading rate [J]. Environ QUAL, 1987, 16(2): 181-187.
- [6] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编写组.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,1989:230-351.
- [7] 王书文,刘庆玉,焦银珠,等.生活污水土壤渗滤就地处理技术研究进展[J].水处理技术,2006,32(3):5-10.
- [8] Drizo A, Comean Y, Forget C, et al. Phosphorus saturation potential: A parameter for estimating the longevity of constructed wetland systems[J]. Environ Sci Technol, 2002, 36(21): 4642-4648.
- [9] 邢乃春,陈雷.粗砂填料基质和土壤渗滤系统在人工湿地应用中的污染物去除机理研究[J].水利规划与设计,2012,(5): 44-47.
- [10] 潘晶,孙铁铮,李海波.地下渗滤系统填充基质改良及污水净化效果研究[J].环境污染与防治,2011,33(4):7-10.
- [11] U. S. Environmental Protection Agency. Onsite wastewater treatment systems manual[M]. Washington, D. C. : Office of Water Office of Research and Developmen U. S. Environmental Protection Agency, 2002.
- [12] 郑艳侠,冯绍元,刘培斌.土壤渗滤系统处理微污染水的研究现状与进展[J].水资源与水工程学报,2004,15(2):29-32.
- [13] 胡艳,胡曰利,吴晓芙,等.基质组合方式对生活污水中磷的去除效果研究[J].环境科学与技术,2008,31(7):112-115.
- [14] Lantze L R, Mitchell D S, Heritage A D, et al. A model of factors controlling orthophosphate removal in planted vertical flow wetlands [J]. Ecological Engineering, 1999, 12: 93-105.
- [15] Carl S K, Charles A Cravotta. Net alkalinity and net acidity 2: Practical consideration [J]. Applied Geochemistry, 2005, 20(10): 1941-1964.
- [16] Carl S Kirby, Charles A Cravotta. Net alkalinity and net acidity 1: Theoretical considerations [J]. Applied Geochemistry, 2005, 20(10): 1920-1940.
- [17] 张欢欢,黄玉明.潜流人工湿地污水处理系统长期运行中 pH 及酸度和碱度的变化[J].西南大学学报:自然科学版,2012, 34(5): 63-67.
- [18] Melanie A Vile, Kelman R. Alkalinity generation by Fe(III) reduction versus sulfate reduction in wetlands constructed for acid mine drainage treatment [J]. Water Air and Soil Pollution, 1993, 69: 425-441. ■