

## 复合填料地下渗滤系统的强化脱氮研究

严群<sup>1,2</sup>, 吴一繁<sup>1</sup>, 杨健<sup>1</sup>, 董卫华<sup>3</sup>

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 江西理工大学建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000;  
3. 杭州市市政设施监管中心, 浙江 杭州 310003)

**摘要:** 为有效提高地下渗滤系统的运行水力负荷并强化其脱氮效果, 建立了由55%煤渣、25%土壤与20%草炭全混合装填的地下渗滤装置, 运行水力负荷为 $10 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 每天进水4次, 通过改变不同运行条件来促进TN的去除。研究表明该装置对COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , TN的平均去除率, 在正常出水水位条件下运行, 分别为73.4%, 98.2%和20.1%; 在提高出水水位条件下运行, 分别为75.4%, 79.1%和26.9%; 在添加碳源条件下运行, 分别为88.9%, 88.5%和55.7%。说明草炭的添加并不能明显提高TN的去除率, 而出水水位的提高, 可促进系统内厌氧环境的形成从而有利于TN的去除, 但同时也会降低氨氮的去除效果; 添加碳源可明显提高TN的去除效果, 使系统出水TN质量浓度由正常出水水位条件下的 $22.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降到 $14.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 且对COD和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果的影响不大。因此, 影响该系统去除TN的关键因素是碳源的缺乏。

**关键词:** 地下渗滤系统; 煤渣; 草炭; 生活污水

**中图分类号:** X 703

**文献标识码:** A

### Intensified Denitrification of Compound Mixed Subsurface Wastewater Infiltration System

YAN Qun<sup>1,2</sup>, WU Yifan<sup>1</sup>, YANG Jian<sup>1</sup>, DONG Weihua<sup>3</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Institute of Architectural and Survey Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 3. Monitoring Centre for Public Facilities of Hangzhou City, Hangzhou 310003, China)

**Abstract:** In order to improve the hydraulic permeability and intensify denitrification of subsurface wastewater infiltration system, one apparatus was established in a pilot laboratory with the mediums of 55% cinder, 25% soil and 20% grass carbon mixed completely. The apparatus was dosed 4 times

daily with domestic wastewater at  $10 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ . Operating conditions were changed in order to improve the removal efficiency of TN. The average removal efficiency of COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and TN were 73.4%, 98.2% and 20.1%, respectively, when outlet location was at normal position. The average removal efficiency of COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and TN were 75.4%, 79.1% and 26.9%, respectively, when outlet location was heightened 30 cm, the bottom of apparatus was submerged so that anaerobic environment was formed. The average removal efficiency of COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and TN were 88.9%, 88.5% and 55.7%, respectively, when the apparatus was conducted in glucose added in domestic wastewater. The results show that the removal of TN is not improved by adding grass carbon in apparatus; outlet location raising can increase TN removal efficiency from 20.1% to 26.9%, but the action is limited; the glucose added can increase TN removal efficiency from 20.1% to 55.7%, and TN concentration of effluent decreases from  $22.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  to  $14.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; at the same time, the removal of COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  is not affected. So the critical factor of the TN removal blocked is carbon absent.

**Key words:** subsurface wastewater infiltration system; cinder; grass carbon; municipal wastewater

地下渗滤系统是以土壤为填料, 利用土壤-植物-微生物系统的物理、化学和生化作用对污水进行综合净化治理<sup>[1]</sup>的技术, 对治理农村分散式排放的污水非常有效。目前对地下渗滤系统技术主要集中在以纯土壤或砂为填料进行研究, 由于土壤或砂的水力渗透性能较小, 存在着运行水力负荷过低, 占地面积较大, 易堵塞, 且脱氮效果差的问题。S.

收稿日期: 2009-02-19

基金项目: 国家重大水专项资助项目(2008ZX07421-002, 2008ZX07407-007-1, 2008ZX07421-001); 上海市科委资助项目(09dz1204107, 09QA1406100)

作者简介: 严群(1973-), 女, 博士生, 主要研究方向为水污染控制技术. E-mail: yanqun8219893@163.com

杨健(1953-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为城市污水和污泥的生物生态处理技术, 难降解工业废水处理技术, 城市水资源可持续高效利用技术. E-mail: yishu@online.sh.cn

Vancuyk<sup>[2]</sup>等人进行了为期一年的砂渗滤系统处理生活污水的研究,最高水力负荷为  $8.4 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,出水的 COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 的平均质量浓度分别为  $14.0, 54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均去除率分别为 96.4%, 100% 和 4.8%, TN 的去除效果不理想. 张健<sup>[3]</sup>等研究认为在土壤中添加 10% 的草炭可以改善地下渗滤系统的水力渗透性,水力负荷为  $4 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$  时,对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 的平均去除率可由未掺加草炭时的 83% 和 69% 分别提高到 95% 和 80%. 由于受到土壤渗透系数的影响,采用纯土壤为填料的地下渗滤系统的水力负荷无法进一步提高,USEPA<sup>[4]</sup> 建议水力负荷不宜超过土壤饱和渗透系数的 10%,一般在  $0.8 \sim 6.6 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$  之间,若超过则易发生堵塞现象. 本试验研究考虑在保证出水水质的情况下通过内部填料的选配来提高水力负荷,并考察该系统脱氮的能力.

因此,在试验中对土壤与煤渣的水力渗透性能及硝化与反硝化强度进行了研究,采用了对污染物吸附能力较强且粒度较粗、孔隙率较大的煤渣与少部分土壤及草炭混合作为地下渗滤系统的填料进行污水处理,提高系统的水力渗透性能并采用不同的运行措施来探讨该技术脱氮问题的解决办法.

## 1 试验概况

### 1.1 进水水质

小试进水取自上海市曲阳水质净化厂的曝气沉砂池出水,测得主要的水质指标 COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 的平均质量浓度分别为 124.1, 22.8 和  $31.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

### 1.2 主要装置

实验室研究采用小型试验装置,装置的尺寸  $1.00$ (长)  $\times$   $0.15$ (宽)  $\times$   $1.00$ (高) m, 填料厚度为  $0.90 \text{ m}$ , 装置内填料为 25% 土壤, 20% 草炭与 55% 煤渣全混合后装填. 试验运行过程为污水在调节池内进行一定时间的沉淀后由恒流泵输送到地下渗滤装置内进行处理,然后将经处理后的水排出.

### 1.3 主要测试方法

水质分析项目包括 COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN, 分别采用重铬酸钾法、纳氏试剂分光光度法和碱性过硫酸钾紫外分光光度法<sup>[5]</sup> 进行分析. 饱和水力渗透系统的测定是根据文献<sup>[1]</sup> 及达西定律自制测试装置进行测试.

### 1.4 运行工况

装置运行采用间歇配水方式,由定时器控制恒流泵定时进水. 具体运行工况为 2006 年 1 月 25 日至 3 月 11 日,水力负荷  $10 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 进水  $8 \text{ 次} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $45 \text{ min} \cdot \text{次}^{-1}$ , 正常出水水位条件下运行 60 d; 3 月 12 日至 4 月 10 日,水力负荷  $10 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 进水  $8 \text{ 次} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $45 \text{ min} \cdot \text{次}^{-1}$ , 提高出水水位条件下运行 30 d; 7 月 20 日至 8 月 31 日,水力负荷  $10 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 进水  $8 \text{ 次} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $90 \text{ min} \cdot \text{次}^{-1}$ , 进水添加葡萄糖且在正常出水水位条件下运行 43 d.

## 2 试验结果及分析

### 2.1 填料性能分析

#### 2.1.1 水力渗透性

地下渗滤系统采用的水力负荷不应超过土壤饱和和渗透系数的 4%~10%, 测得的纯土壤及纯煤渣的饱和水力渗透系数分别为  $3.53 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$  及  $11232.00 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 根据要求可算得纯土壤及纯煤渣的渗滤系统所能承受的最高水力负荷分别为  $0.35 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$  及  $1123.20 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 在实际应用中采用纯土壤的地下渗滤系统处理污水时,由于孔隙率过小容易堵塞,且日处理水量很小而使得占地面积较大;若地下渗滤系统采用纯煤渣则将使污水较快地通过而影响污水处理效果不能达标排放. 因此,期望通过两者混合后改善地下渗滤系统的水力渗透性能,并通过添加草炭考察能否促进 TN 的去除.

#### 2.1.2 填料含水率和挥发性有机物固体(VSS)量

取  $200 \text{ g}$  经风干后土壤和煤渣,各用的确良布包裹,平摊后埋入绿化草皮下  $10 \text{ cm}$  土壤中,经过自然接种驯化 2 个月后取出. 接种后的不同填料各称取适量进行含水率、VSS 量及硝化与反硝化强度的测试. 含水率的测试依据文献<sup>[6]</sup>, VSS 量依据文献<sup>[7]</sup> 的方法测试. 填料含水率可确定不同填料的持水度,即污水在填料中的含量,并且可直接影响填料的固、液、气三相比,从而影响对污水的处理效果. 如果含水率过高则可能影响填料的复氧能力而降低对污水的处理效果,如果含水率过低则会降低填料处理污水的量,因此保持适当的固、液、气三相比有利于提高污水处理效果. VSS 量在一定程度上可表征微生物量的多少,因此,对培养前的土壤、煤渣的 VSS 量也进行了测试以减去其所含的挥发性有机物的本底值,测试结果见图 1.

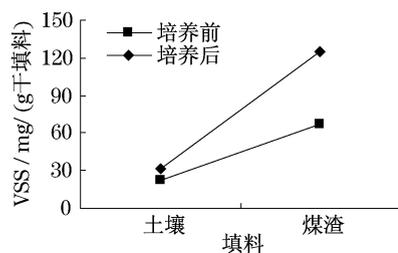


图1 土壤与煤渣 VSS 含量  
Fig.1 VSS of soil and cinder

培养后土壤、煤渣的含水率分别为 31.0%, 24.1%, 煤渣的含水率仅比土壤稍低一些, 由于煤渣具有多孔结构, 孔隙率达 50%~60%, 比表面积较大, 且其孔隙是不规则的, 污水进入其中能滞留<sup>[8]</sup>, 因此煤渣具有良好的持水性能. 由图 1 可知, 培养前, 两种填料均含有一定的挥发性有机物的量, 但经培养后, 两种填料的 VSS 量均升高, 且煤渣的 VSS 量增加了  $78.06 \text{ mg} \cdot (\text{g 干填料})^{-1}$ , 而土壤的 VSS 量仅增加了  $9.04 \text{ mg} \cdot (\text{g 干填料})^{-1}$ , 由于煤渣具有较好的持水性能, 且其内部不规则孔隙较多, 煤渣中的残炭具有较强的吸附性能, 污水流经煤渣后可使填料内保持比较适当的固、液、气三相比, 从而有利于微生物的生长; 而尽管土壤的含水率也不低, 但土壤粒度很细且偏粘性, 其所带有的负电荷与其邻近的土壤水中的阳离子形成双电层, 巨大的表面积和表面电荷使土壤有极强的吸附水分子能力, 形成与其粒径相比相对厚的水层或水膜. 土壤间的孔隙极细, 其吸附的水膜就有可能充满或堵塞这些极细的孔隙, 致使微生物生长的空间受到限制且空气含量也较低<sup>[6]</sup>, 所以 VSS 量比煤渣低很多. 因此, 两种填料进行比较, 一定粒度的煤渣持水性能及其相对的多孔性能很适合于微生物的生长, 通过与土壤混合后作为地下渗滤系统的填料不但可提高水力负荷还可保证出水水质.

### 2.1.3 硝化与反硝化强度

硝化与反硝化作用是地下渗滤系统脱氮的主要途径. 系统中的填料经一段时间的培养后会产生进行硝化和反硝化反应的微生物, 土壤与煤渣的硝化与反硝化强度的差异可通过在室温条件下测定填料的硝化作用与反硝化作用的强度来进行比较. 硝化与反硝化强度依据文献<sup>[6,9]</sup>的方法测试, 硝化作用的强度以单位质量(1 kg)烘干填料单位时间(1 h)内产生的  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的量(mg)表示; 反硝化作用的强度以单位质量(1kg)烘干填料单位时间(1 h)内消耗的  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的量(mg)表示, 测试结果见图 2.

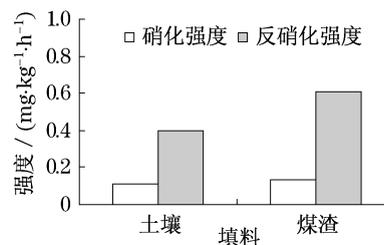


图2 土壤与煤渣的硝化与反硝化强度  
Fig.2 Nitrification and denitrification intensity in soil and cinder

由图 2 可知, 硝化强度是煤渣高于土壤. 硝化反应是将水中氨氮和亚硝酸转化为硝氮的过程, 因此, 硝化强度的高低直接反映了填料对氨氮和亚硝酸去除能力大小的差别. 由于煤渣吸附污染物的性能较强且煤渣的孔隙较多, 氧气也能在煤渣孔隙中存留, 且硝化反应需要消耗碱度, 煤渣浸泡试验显示其浸泡液 pH 值在 7.9~8.2 之间, 呈碱性, 这些因素都有利于硝化细菌在煤渣孔隙内的聚集生长繁殖; 而土壤的吸附性能次之, 但土壤内含有较多的营养元素, 也较适宜硝化细菌的生长. 反硝化强度是煤渣远高于土壤, 由于填料对  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的去除依赖于异养厌氧菌的反硝化作用, 填料中渗滤污水的  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  在质量浓度差推动下进入填料表面或内部的生物膜, 反硝化细菌在生物膜内局部厌氧环境下, 以  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  取代氧作为电子受体,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  经过一系列过程还原为  $\text{N}_2$  或  $\text{N}_2\text{O}$ , 并利用反硝化过程中产生的能量与污水中的碳源合成细胞, 从而使反硝化菌群不断生长<sup>[10-11]</sup>. 煤渣中的孔隙率较高, 内部容易形成局部的厌氧环境有利于反硝化细菌的生长, 填料经培养后, 以煤渣的 VSS 量增高明显, 说明其微生物生长繁殖较快, 煤渣的多孔性有利于有机污染物的聚集, 也有利于局部的厌氧环境形成并给微生物的生长提供了足够的空间, 物理化学性能都有利于反硝化菌群的生长. 由此可知, 煤渣较适宜作为地下渗滤系统的填料进行污水处理.

### 2.2 TN 去除效果分析

试验中运行了三种工况, 有研究认为阻碍地下渗滤系统脱氮效果的原因有两方面: 一是缺乏碳源; 二是缺乏厌氧环境. 因此工况 1 在正常运行条件下运行考察草炭的添加是否会提高系统的除氮效果; 工况 2 为提高出水水位 30 cm, 使下部的填料处于渍水缺氧状态以考察是否有利于 TN 的去除; 工况 3 为添加葡萄糖增加碳源, 提高 COD 和 TN 的质量浓度比值来考察 TN 的去除效果.

### 2.2.1 添加草炭对 TN 去除效果的影响

正常运行条件下,添加草炭系统对 COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 的去除效果比较,见图 3~5,对进出水 TN 的组成进行了分析比较,见图 6.

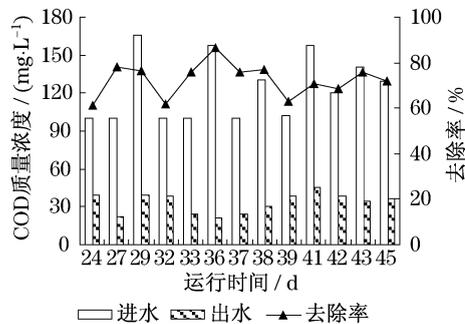


图 3 COD 去除效果

Fig.3 Removal effect of COD

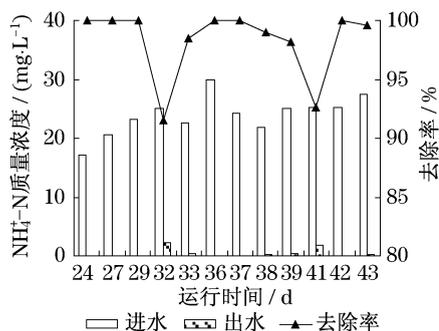


图 4  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除效果

Fig.4 Removal effect of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

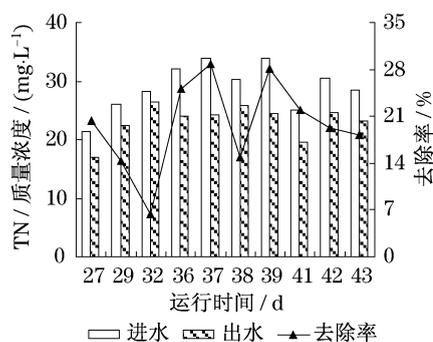


图 5 TN 去除效果

Fig.5 Removal effect of TN

由图 3~5 可知,正常运行条件下,系统对 COD 的去除效果良好,去除率稳定在 61.0%~78.0%之间,平均去除率为 73.4%,出水平均质量浓度为 32.8  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率均在 91.0%以上,出水平均质量浓度为 0.4  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;对 TN 的去除效果较差,平均去除率在 6.4%~28.8%之间,平均去

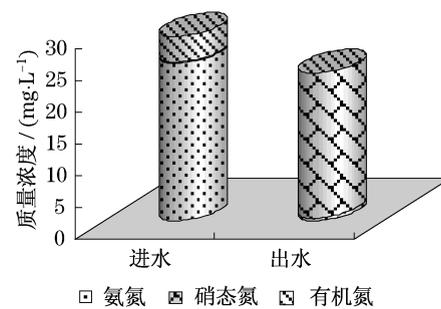


图 6 进出水 TN 组成分析图

Fig.6 Component analysis of TN in influent and effluent

除率为 20.1%,出水平均质量浓度为 20.1  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;由于系统是刚装填运行,内部填料松散孔隙率高,复氧能力强,好氧环境形成较好,因此,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果很好.反之,复氧能力强则不利于厌氧环境的形成,对 TN 去除效果则较差.由图 6 可知,系统出水以硝态氮为主,占出水 TN 的 97.9%.由此可知,添加草炭并没有明显提高 TN 的去除率,在实验中又进行了草炭的厌氧发酵试验,以一锥形瓶装入一定量的草炭并加入蒸馏水密封住瓶口,初测蒸馏水的 COD 为 0  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,经发酵 1 个月后,取瓶内的液体测 COD 值为 2  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,且液体清澈;发酵 5 个月,再测瓶内液体 COD 为 372  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,且液体呈棕褐色;由此可知,草炭在缺氧条件下需经历如此长时间才能释放出碳源,而刚装填的系统内部处于较好的好氧环境,此时草炭的添加并不能明显提高 TN 的去除.因此 TN 去除效率不高,可能原因是填料中厌氧环境形成不足,不利于反硝化反应的进行,使硝酸盐氮无法进一步转变为  $\text{N}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$ ,从而产生积累.由图 6 可知,系统出水的 TN 成分中硝酸盐含量高达 22.7  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,作为反硝化反应的基质,硝酸盐氮的积累说明装置内的反硝化作用没有有效发挥.解决方法是使系统内能形成厌氧环境强化系统的反硝化作用,使硝酸盐氮不再积累,从而降低出水 TN 的质量浓度,提高 TN 去除率.因此,对系统采取提高出水水位的方式来促进厌氧环境的形成以考察 TN 的去除情况.

### 2.2.2 提高出水水位对 TN 去除效果的影响

提高出水水位就是将系统的出水位置提高到高于集水管 30 cm 位置处,使装置内的填料保持 30 cm 的淹水深度.在此运行条件下,系统对 COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 的去除效果比较见图 7~9,对进出水 TN 的组成分析结果见图 10.

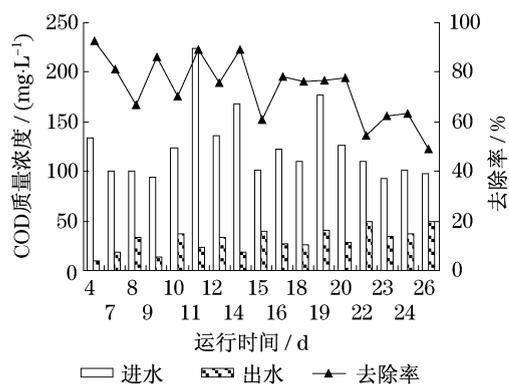


图7 COD去除效果

Fig.7 Removal effect of COD

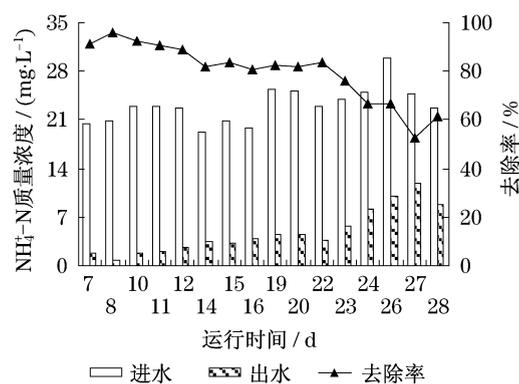
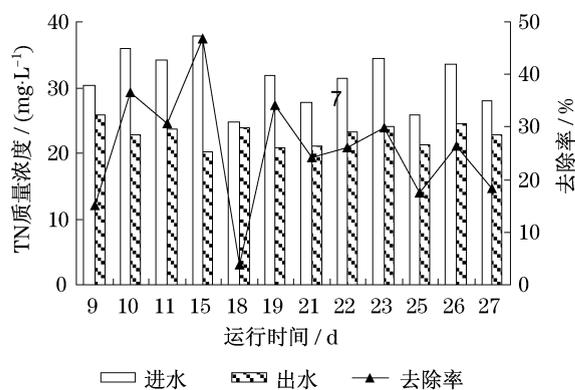
图8 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除效果Fig.8 Removal effect of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N

图9 TN去除效果

Fig.9 Removal effect of TN

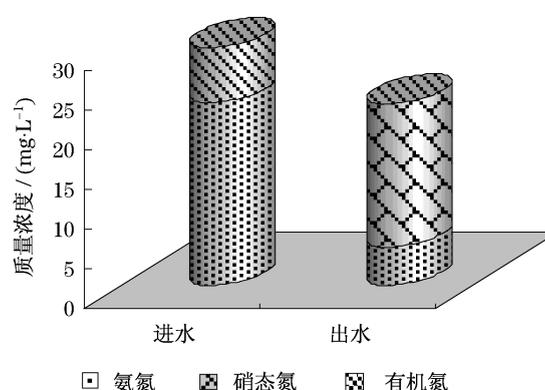


图10 进出水TN组成

Fig.10 Component analysis of TN in influent and effluent

由图7~10可知,系统对COD的去除效果变化不大,平均去除率为75.4%,出水平均质量浓度为 $30.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;而对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率则下降到79.1%,出水平均质量浓度上升到 $4.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,且随运行时间的延长,出水氨氮质量浓度表现出逐步升高的趋势;对TN的去除效果则略有升高,平均去除率为26.9%,出水平均质量浓度为 $18.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;系统出水仍以硝态氮为主,但占出水TN的比例下降为78.8%,氨氮所占比例为21.8%。由此可知,提高出水水位,促进了装置内部厌氧环境的形成,提高了TN去除率,并使得出水硝氮质量浓度下降且占出水TN比例也下降,而出水氨氮质量浓度则上升,占出水TN比例升高,说明厌氧环境的形成虽然促进了TN去除率的升高,但也影响了氨氮的去除。总体而言,虽然厌氧环境促进了TN的去除,但TN去除率上升的幅度不大,这是因为虽然有厌氧环境的存在,但进水中有机污染物质量浓度不高,

大多为好氧微生物降解,反硝化反应因缺乏可利用的无机碳碳源而使得TN去除率无法进一步提高。因此,对系统进水添加葡萄糖以提高进水有机物质量浓度,并考察对TN去除的影响。

### 2.2.3 增加碳源对TN去除效果的影响

增加碳源是向原进水污水中添加 $0.5 \sim 1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的葡萄糖,提高进水COD质量浓度,在此运行条件下,系统对COD, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN的去除效果比较见图11~13,进出水TN的组成见图14,TN去除率随COD/TN比值增加的变化规律见图15。

由图11~14可知,系统进水COD质量浓度在 $158.0 \sim 166.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间波动,进水平均质量浓度为 $426.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,COD的平均去除率为88.9%,出水平均质量浓度为 $47.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,在进水COD高质量浓度下系统仍保持了良好的COD去除效果;对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均去除率为88.5%,出水平均质量浓度为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;对TN的去除效果升

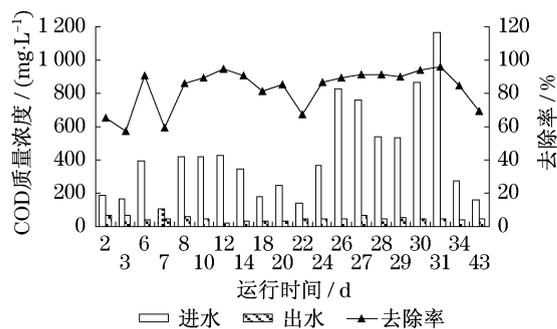


图 11 COD 去除效果

Fig. 11 Removal effect of COD

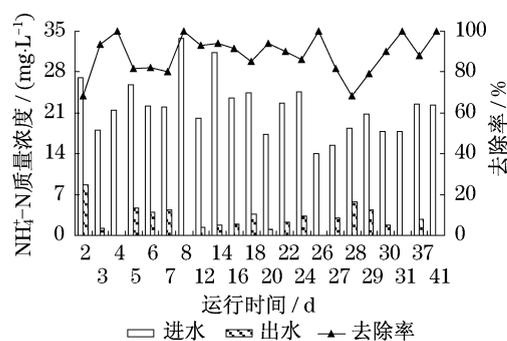


图 12 NH₄⁺-N 去除效果

Fig. 12 Removal effect of NH₄⁺-N

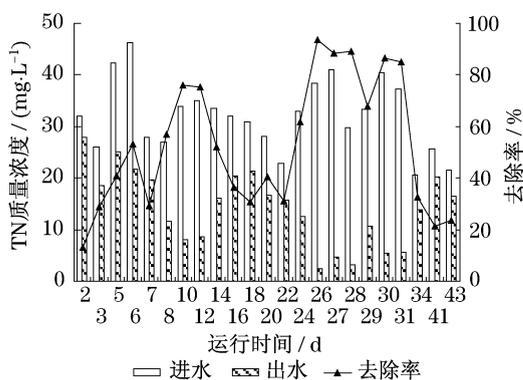


图 13 TN 去除效果

Fig. 13 Removal effect of TN

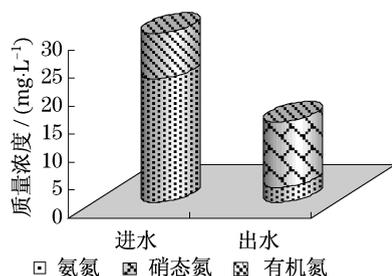


图 14 进出水 TN 组成分析

Fig. 14 Component analysis of TN in influent and effluent

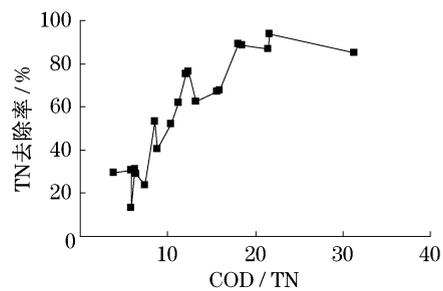


图 15 随 COD/TN 比值的增加 TN 去除率的变化规律

Fig. 15 Change of TN removal efficiency following COD/TN rate

高较快,平均去除率由高出水水位时的 26.9% 提高到 55.7%,出水平均质量浓度为  $14.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 系统出水仍以硝态氮为主,占出水 TN 的比例为 82.9%,氨氮所占比例为 17.8%;且由图 15 可知, TN 去除率随着 COD 与 TN 质量浓度的比值的升高而升高.由此可知,在系统处于良好的复氧环境下,影响该系统 TN 去除的关键因素是碳源的缺乏.

此运行条件下,进水时间比前两个工况延长了 45 min,亦即进水时间为 90 min,进水速度更慢则更有利于系统内的复氧,且 COD 及氨氮的去除效果均较高,说明系统内处于较好的好氧环境,但却没有影响到在厌氧环境下才能去除的 TN 去除效果.由填料的 VSS 量、硝化与反硝化强度的试验结果分析已表明经培养后的煤渣的 VSS 量、硝化与反硝化强度均高于土壤的,说明由于煤渣的孔隙率高,微生物更易于聚集生长,并形成局部微小的好氧与厌氧环境,在有机物浓度低,氧量充足的情况下,好氧微生物分解有机物的反应速度快,因而有机物很快被降解,使得发生反硝化反应的厌氧微生物无法获得更多的有机物;在有机物浓度较高,氧量充足的情况下,尽管好氧微生物分解有机物的反应速度快,但因为有机物浓度高,厌氧微生物还是能够获得更多的碳源来进行反硝化反应,从而可提高 TN 的去除率.

### 3 结论

通过土壤、草炭与煤渣进行填料配比,并采用全混合装填方式,有效地提高了地下渗滤系统的运行水力负荷,试验通过改变不同运行条件来促进 TN 的去除,试验结果表明,  $10 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$  运行时,影响系统 TN 去除的关键因素是碳源的缺乏.经分析得出如下结论:

(1) 填料性质研究表明,煤渣的水力渗透性能、

VSS量及硝化与反硝化强度均高于土壤,以煤渣及少量草炭作为地下渗滤系统的填料配合土壤进行污水处理不但可以提高系统的水力渗透性能,减少系统的占地面积,而且也有利于微生物在系统中的生长并保证良好的污染物去除效果;

(2) 在正常出水水位条件下,  $10 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$  运行时,系统对 COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 的平均去除率分别为 73.3%, 98.2% 和 20.1%, 草炭的添加并不能明显提高 TN 的去除率;

(3) 提高系统出水水位条件下,  $10 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$  运行时,此条件运行虽然可促进系统内厌氧环境的形成并有利于 TN 的去除,使 TN 的去除率由正常出水水位时的 20.1% 提高到 26.9%, 上升幅度有限;但同时还会降低氨氮的去除效果,使氨氮的去除率由正常出水水位时的 98.2% 下降到 79.1%. 因此厌氧环境对 TN 的去除有一定的促进作用,但不是关键因素;

(4) 添加碳源的试验研究表明, TN 的去除率由提高出水水位时的 26.9% 上升到 55.7%, 出水质量浓度由  $22.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  下降到  $14.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 且 COD 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  平均去除率分别为 88.9% 和 88.5%, 均保持了良好的去除效果. 因此, 影响系统去除 TN 的关键因素是碳源的缺乏.

#### 参考文献:

- [1] 高拯民, 李宪法. 城市污水土地处理利用设计手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 1991.  
GAO Zhengmin, LI Xianfa. Design manual of land and municipal wastewater treatment [M]. Beijing: China Standard Press, 1991.
- [2] Vancuyk S, Siegrist R, Logan A, et al. Hydraulic and purification behaviors and their interactions during wastewater treatment in soil infiltration systems[J]. Wat Res, 2001, 35: 953.
- [3] 张健, 黄霞, 施汉昌, 等. 掺加草炭的地下渗滤系统处理生活污水[J]. 中国给水排水, 2004, 20(6): 41  
ZHANG Jian, HUANG Xia, SHI Hanchang, et al. Municipal wastewater treated by subsurface wastewater infiltration system added grass carbon[J]. China Water & Wastewater, 2004, 20(6): 41.
- [4] USEPA. Onsite wastewater treatment systems manual [M]. Washington: USEPA, 2002.
- [5] 国家环境保护总局, 《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第4版. 北京: 环境科学出版社, 2002.  
State Environmental Protection Administration, Water and Exhausted Water Monitoring Analysis Method Editing Committee. Water and exhausted water monitoring analysis method [M]. 4th ed. Beijing: Environmental Science Press, 2002.
- [6] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.  
LU Rukun. Analysis method of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [7] 张自杰. 废水处理理论与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.  
ZHANG Zijie. The theory and design of wastewater treatment [M]. Beijing: China Architecture and Building Industry Press, 2003.
- [8] 刘精今, 李小明, 杨麒. 炉渣的吸附性能及在废水处理中的应用[J]. 工业用水与废水, 2003, 34(1): 12.  
LIU Jingjin, LI Xiaoming, YANG Qi. Adsorbability and application of Cinder in wastewater treatment [J]. Industrial Water & Wastewater, 2003, 34(1): 12.
- [9] 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.  
WANG Xiaojuan, ZHANG Rongshe. Study on intensity of microorganism nitrification and denitrification in constructed wetlands[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(2): 225.
- [10] Cooper P F, Findlater B C. Constructed wetlands in water pollution control[M]. New York: Pergamon Press, 1990.
- [11] Mayo A W, Bigambo T. Nitrogen transformation in horizontal subsurface flow constructed wetlands I: model development [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2005, 30: 65.