

# 地下渗滤污水处理系统的氮磷去除机理

张 建,黄 霞,魏 杰,胡洪营,施汉昌 (清华大学环境科学与工程系,环境模拟与污染控制国家联合重点实验室,北京 100084)

**摘要:** 对地下渗滤系统处理生活污水的氮磷去除机理进行了研究.结果表明,在 2cm/d 的水力负荷下,系统对氨氮、COD、总磷的去除率可达到 90%以上;出水中氨氮、COD、总磷分别低于 0.2、30、0.025mg/L;系统对总氮亦有良好的去除效果,达 63.5%.强化布水措施可以有效地提高系统对污染物质的去除率.地下渗滤系统中通过硝化、反硝化作用可以去除约 50%的进水总氮,是地下渗滤系统去除氮的主要途径.改善条件以促进反硝化反应是提高地下渗滤系统总氮去除率的关键.土壤吸附与沉淀作用是地下渗滤系统去除磷的主要途径.

**关键词:** 地下渗滤系统;生活污水;硝化;反硝化;脱氮除磷

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-6932(2002)05-0438-04

**Nitrogen and phosphorus removal mechanism in subsurface wastewater infiltration system.** ZHANG Jian, HUANG Xia, WEI Jie, HU Hong-ying, SHI Han-chang (Environment Simulation and Pollution Control State Key Joint Laboratory, Department of Environmental Sciences and Engineering, Tsinghua University, Beijing 10084, China). *China Environmental Science*. 2002,22(5): 438~441

**Abstract:** Nitrogen and phosphorus removal mechanism in subsurface wastewater infiltration system treating domestic wastewater was studied. The hydraulic loading was 2 cm/d. The experimental results showed that the removal rates of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , COD and total phosphorus were all over 90%. The effluent concentrations of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , COD and total phosphorus below 0.2, 30 and 0.025 mg/L respectively. The total nitrogen removal rate was achieved as 63.5%. The removal efficiency of contaminants could be improved through strengthening equalization of flow distribution. Biological nitrogen removal through nitrification and denitrification was the main removal mechanism of nitrogen, which could remove about 50% of influent total nitrogen. How to improve denitrification process was the key to enhance nitrogen removal rate. Phosphorus in sewage was mainly removed by fixation processed in the soil, such as adsorption and chemical precipitation.

**Key words:** subsurface wastewater infiltration system; domestic wastewater; nitrification; denitrification; nitrogen and phosphorus removal

地下渗滤系统是一种人工强化的污水生态工程处理技术,它充分利用在地表下的土壤中栖息的土壤动物、土壤微生物、植物根系以及土壤所具有的物理、化学特性将污水加以净化.该系统具有不影响地面景观、基建及运行管理费用低、出水水质好、受外界影响小等特点,特别适合分散居住地区和城镇地区污水的处理<sup>[1]</sup>.

近年来,随着水资源短缺形势的日益严重和污水回用研究的广泛开展,地下渗滤系统的研究和应用在国内外日益受到重视<sup>[1-10]</sup>.目前,国内外虽然已有一些地下渗滤系统的实验室研究和工程应用,但这些研究和应用多是对运行结果的简

单分析.在净化机理、污染物迁移转化模型及运行模式优化等方面的研究还少有报道.作者对地下渗滤系统的氮磷去除机理进行了研究,并对强化均匀布水方式优化地下渗滤系统的处理性能进行了探讨.

## 1 试验装置与方法

### 1.1 试验装置

渗滤系统剖面如图 1.预沉池出水由泵提升

收稿日期: 2001-12-17

基金项目: 国家科技部重大专项资助项目(2000-03)

\* 通讯联系人

至渗滤装置中的布水管.该布水管放置在一个底部不透水的布水槽中,布水槽上的渗滤沟内填充有经人工配置的特殊土壤渗滤层.污水通过沟内土壤的毛管浸润作用,缓慢地扩散入周围土壤,在土壤、土壤微生物和植物的联合作用下得到净化.渗滤出水由系统底部的集水管收集并排出.试验用水取自清华大学生活污水泵站.

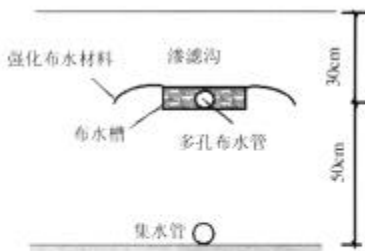


图 1 地下渗滤系统示意  
Fig.1 Schematic diagram of subsurface wastewater infiltration system

试验装置共 2 套,尺寸均为 70×75×80cm,水力负荷均为 2cm/d,地表种植早熟禾,其中系统 1 为常规布水方式,系统 2 采用了强化布水系统,即在布水槽侧翼设置毛管浸润性能良好的材料,以增强布水的均匀性.

1.2 检测项目与方法

常规性的水质检测项目有 COD、氨氮、总氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮和总磷,分别采用重铬酸钾法、纳式试剂光度法、过硫酸钾氧化-紫外分光光度法、酚二磺酸光度法、N-(1-萘基)-乙二胺光度法和氯化亚锡还原光度法;植物成分检测项目有全氮和全磷,分别采用半微量蒸馏滴定法、钼锑抗分光光度比色法.

2 结果与讨论

2.1 植物生长和水量平衡分析

草坪植物的生长与水量的变化是一个相互作用的关系.在气候和土壤条件相同的情况下,水量的供给状况直接决定了草坪植物的生长状况.另外,草坪植物的生长,改良了土壤的性质,有效地提高了根区土壤的通气透水性,同时草坪植物

的吸收作用和蒸腾作用是导致出水水量变化的根本原因.

系统 2 由于采用了强化布水系统,系统中污水分布更为均匀,植物生长良好.而系统 1 的植物生长则略差.前者的蒸发量为污水投加量的 35.6%,而后者则仅为 19.0%.

2.2 污染物去除效果

2.2.1 COD 去除效果 COD 进出水变化见图 2.系统的进水 COD 在 93~264mg/L 之间变化,波动较大,而出水中 COD 则比较稳定,均小于 30mg/L,系统对 COD 的去除率约 90%.这表明地下渗滤系统对有机污染物有很好的去除能力,并具有很高的稳定性及抗冲击负荷能力.

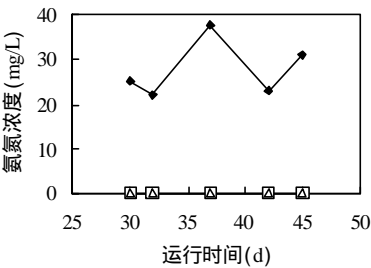


图 2 进出水中 COD 的变化  
Fig.2 Changes of influent and effluent COD  
— — 进水 — — 系统 1 出水 — — 系统 2 出水

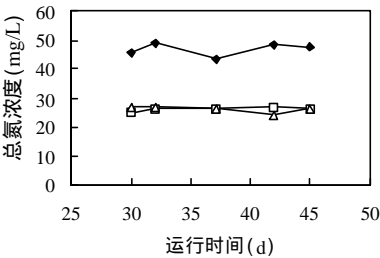


图 3 进出水中氨氮浓度的变化  
Fig.3 Changes of influent and effluent NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N concentration  
注同图 2

2.2.2 氮的去除效果 氨氮进出水的浓度变化如图 3 所示.从图 3 可以看出,系统进水中氨氮浓度在 22.2~50.0mg/L 之间波动,而出水中氨氮浓

度则非常稳定,均低于 0.2mg/L,系统对氨氮去除率达 99%以上,可见地下渗滤系统对氨氮有着非常好的去除效果.

进出水中总氮的浓度变化如图 4 所示.从图 4 可看出,系统进水中总氮浓度在 43.41~49.28mg/L 之间,出水中总氮浓度在 25mg/L 左右波动,系统对总氮的去除效果没有氨氮那么明显.

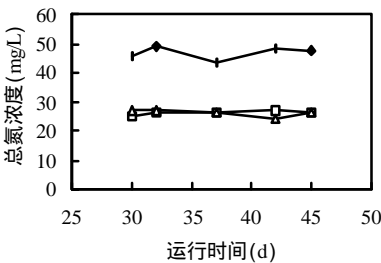


图 4 进出水中总氮浓度的变化

Fig.4 Changes of influent and effluent total nitrogen concentration  
注同图 2

2.2.3 磷的去除效果 磷是造成湖泊富营养化的关键物质,因此必须采取措施严格限制进入封闭性水体中的磷含量.土壤对磷的吸附能力极强,可以认为磷在土壤中几乎是不移动的<sup>[8,9]</sup>,由此地下渗滤系统对磷的去除能力可以达到很高的水平<sup>[3,4,8,9]</sup>.

两套地下渗滤系统进水中的总磷浓度约为 4mg/L,而出水中总磷浓度极低,在氯化亚锡还原光度法的检测下限(0.025mg/L)以下,总磷去除率基本达到 100%.

2.2.4 两套系统的去除效果比较 表 1 比较了系统 1 和系统 2 对各种污染物质的去除率,其计算如式(1)所示:

$$y = \frac{Q_0C_0 - Q_eC_e}{Q_0C_0} \times 100 \tag{1}$$

式中:  $y$  为污染物质去除率(%); $Q_0$  为进水流量(L/d); $C_0$  为进水污染物浓度(mg/L); $Q_e$  为出水流量(L/d); $C_e$  为出水污染物浓度(mg/L).

由表 1 可看出,系统 2 对污染物质的去除效

果明显好于系统 1.可见,在地下渗滤系统中设置强化布水措施不仅有利于地表植物的生长,而且可以有效地提高系统的处理效果.

表 1 系统 1 和系统 2 的去除率比较(% ,运行 45d)

Table 1 Comparison between removal rates of system 1 and that of system 2 (% , 45 days)

系统	布水方式	COD 去除率	总磷去除率	总氮去除率	氨氮去除率
1	普通	90.2	100	53.2	99.8
2	强化	92.3	100	63.5	99.9

2.3 氮磷去除机理分析

2.3.1 进出水中氮的组成分析 对系统 2 进出水中的总氮组成进行了分析.结果表明,系统进水中的总氮以氨氮为主,占总氮的百分比大于 70%,而出水中的总氮则基本上全部为硝态氮,占总氮的百分比达 98%以上.这说明内部的硝化反应进行得很好,而反硝化反应差则是系统总氮去除率不高的重要原因.

Mikael Pell<sup>[4]</sup>等的研究表明,表层土壤的通气传氧性好,利于好氧细菌和硝化细菌的生长,在 6.7cm/d 的水力负荷下,表层 1.5cm 的土壤即可去除 80%以上的 BOD<sub>5</sub>和氨氮.可见地下渗滤系统中,有机质的迅速降解使得反硝化菌可资利用的碳源不足,而好氧环境亦不利于反硝化菌的生长繁殖,由此导致较低的总氮去除率.

2.3.2 总氮去除途径分析 地下渗滤系统中,氮的去除机理主要包括作物吸收、生物脱氮以及氨氮挥发.生活污水中的氮通常以有机氮和氨(也可以是铵离子)的形式存在.在土壤-植物系统中,有机氮在微生物的作用下转化为氨态氮,由于土壤颗粒带有负电荷,铵离子很容易被吸附,土壤微生物通过硝化作用将氨态氮转化为硝态氮,土壤又可恢复对铵离子的吸附功能.土壤对负电荷的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>没有吸附截留能力,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>随水运动迁移.在迁移过程中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>可以被植物根系吸收而成为植物营养成分,也可能发生反硝化过程,最终转化为 N<sub>2</sub>或者 N<sub>2</sub>O 而挥发掉<sup>[8]</sup>.

在试验进行的第 42d,对系统 2 中的牧草进

行了收割,通过牧草的重量、含水率及全氮含量的测定,得到试验系统运行期间通过作物吸收所去除的总氮量  $M_1$ .由进出水中总氮浓度和进出水流量可以得到 42d 污水投配期间的氮投配总量  $M_2$  和排放总量  $M_3$ .试验系统采用的填充土壤 pH 值为中性,所以可以忽略氨氮的挥发损失.由式(2)可得到系统运行期间通过生物脱氮而去除的氮量  $M_4$ .

$$M_4=M_2-M_1-M_3 \quad (2)$$

计算结果表明,通过反硝化过程去除污水中的氮是地下渗滤系统脱氮的主要途径,其去除的总氮含量为 9.43g,占投配总氮量的 49.11%;植物吸收的总氮量为 2.76g,占投配总氮量的 14.36%,也是去除氮的重要途径;随处理出水排放的氮量为 7.01g.

地下渗滤系统地表种植的早熟禾对氮的吸收速率为  $35\sim 55\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ <sup>[8]</sup>,即便按照最大值  $55\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$  计算,42d 内植物吸收的总氮量为 3.32g,仅为投配总氮量的 17%,可见靠提高植物吸收的总氮量以提高系统的除氮能力其上升空间不大,而由反硝化去除的总氮量尚不到投配总氮量的 50%,仍具有较大的上升空间.因此为系统提供良好的反硝化条件是提高地下渗滤系统总氮去除率的根本出路.

**2.3.3 磷去除途径分析** 地下渗滤系统中磷的去除途径主要有两个方面<sup>[3,4]</sup>.土壤的吸附与沉淀作用、生物同化作用(主要为植物的吸收作用).利用上述总氮去除途径的分析方法对磷的去除途径进行了分析.结果表明,土壤吸附与沉淀作用去除的总磷量高达系统投配总磷量的 90%以上,是地下渗滤系统去除磷的主要途径,而通过植物吸收去除的磷总量仅占投配总磷量的 10%以下.

### 3 结论

**3.1** 在  $2\text{cm}/\text{d}$  的水力负荷下,地下渗滤系统对氨氮、COD、总磷的去除率可以达到 90%以上,对总氮亦有良好的去除效果达 63.5%,强化布水措施可以提高系统对污染物质的去除率,亦有利于

栽种植物的生长.

**3.2** 通过硝化、反硝化作用实现生物脱氮是地下渗滤系统去除氮的主要途径,改善条件以促进反硝化反应是提高地下渗滤系统总氮去除率的关键.土壤的吸附与沉淀作用是地下渗滤系统去除磷的主要途径.

#### 参考文献:

- [1] USEPA. Wastewater treatment/disposal for small communities [M]. 1992.75-79.
- [2] Robert L Siegrist. Soil clogging during subsurface wastewater infiltration as affected by effluent composition and loading rate [J]. J. Environ. Qual., 1987,16(2):181-187.
- [3] Donald B Aulenbach, Nie Meisheng. Studies on the mechanism of phosphorus removal from treated wastewater by sand [J]. J. WPCF, 1988,60(12):2089-2094.
- [4] Mikael Pell, Fred Nyberg. Infiltration of wastewater in a newly started pilot sand-filter system: .Reduction reduction of organic matter and phosphorus [J]. J. Environ. Qual., 1989,8:451-475.
- [5] Mikael Pell, Fred Nyberg. Infiltration of wastewater in a newly started pilot sand-filter system: .Development and distribution of the bacterial populations [J]. J. Environ. Qual., 1989,8:457-462.
- [6] Mikael Pell, Fred Nyberg. Infiltration of wastewater in a newly started pilot sand-filter system: .Transformation of nitrogen [J]. J. Environ. Qual., 1989,8:457-462.
- [7] Baveye P, Vandevivere P. Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials [J]. Critical Rev. Environ. Sci. Tech., 1998,28:123-191.
- [8] 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.
- [9] 杨丽萍,田宁宁,褚富春.土壤毛管渗滤污水净化绿地利用研究 [J]. 城市环境与城市生态, 1999, 12(3):4-7.
- [10] 陈绍军,宋 万,刘 月.地下渗滤中水回用技术的工艺设计 [J]. 给水排水,1998,24(12):32-34.

作者简介:张 建(1976-),男,山东临沂人,清华大学环境科学与工程系在读博士生,主要从事水污染控制的研究工作.发表论文 5 篇.