

# 地下渗滤处理村镇生活污水的中试

张建,黄霞,刘超翔,施汉昌,胡洪营,钱易(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, E-mail: zhangjian00@mails.tsinghua.edu.cn)

摘要:以红壤土作为填充土壤,在 2 cm/d 的水力负荷下,进行了地下渗滤系统处理村镇生活污水的现场中试。结果表明,地下渗滤系统对 COD、氨氮、总磷和总氮有着良好的去除效果,去除率分别达到 84.7%、70.0%、98.0% 和 77.7%,出水 COD、氨氮、总磷和总氮的平均浓度分别为 11.7 mg/L、4.0 mg/L、0.04 mg/L、4.7 mg/L,达到建设部颁发的生活杂用水水质标准。对总氮去除机理的分析表明,由硝化/反硝化实现生物脱氮是地下渗滤系统去除总氮的主要途径。在本中试系统中,反硝化效果良好但硝化效果不够理想,改善土壤环境以促进硝化作用是提高总氮去除率的关键。对土壤中氧化还原电位的测定结果表明,土壤内部的还原性质是阻碍硝化反应进行的主要原因。

关键词:地下渗滤系统;村镇生活污水;硝化;反硝化;脱氮除磷

中图分类号:X799.3 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2002)06-05-0057

## Pilot Study on Subsurface Wastewater Infiltration System Applied in Rural Sewage Treatment

Zhang Jian, Huang Xia, Liu Chaoxiang, Shi Hanchang, Hu Hongying, Qian Yi(ESPC State Key Joint Laboratory, Dept. of Environmental Sciences and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China E-mail: zhangjian00@mails.tsinghua.edu.cn)

**Abstract:** A pilot plant of subsurface wastewater infiltration system (SWIS) filled with red clay was tested to treat rural sewage with hydraulic loading of 2 cm/d. The experiment results showed that average removal rates of COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , total phosphorus, and total nitrogen were 84.7%, 70.0%, 98.0% and 77.7%, with average effluent concentrations of COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , total phosphorus, and total nitrogen being 11.7 mg/L, 4.0 mg/L, 0.04 mg/L and 4.7 mg/L respectively, which met the standard for water reuse issued by the Ministry of Construction of China. Nitrogen removal mechanism analysis revealed that nitrogen in the influent was mainly eliminated through biological removal via nitrification/denitrification processes. In the pilot system, denitrification was well proceeded but nitrification was not satisfactory. How to improve nitrification performance through change of soil environment was the key to enhance nitrogen removal rate. The measurement results of redox potential in the filled soil showed that reductive property of soil was main hindrance to nitrification process.

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

地下渗滤系统是一种人工强化的污水处理技术,由于具有不影响地面景观、基建及运行管理费用低、氮磷去除能力强、处理出水水质好、可用于回用等特点,在日本、美国、新西兰和西欧等国家,地下渗滤系统的研究和应用日益受到重视<sup>[1-3]</sup>。

在我国,随着经济的发展和环境问题的日益突出,污水处理不仅在城市而且在乡镇也要越来越高。鉴于地下渗滤系统的上述优点,自

90年代初,其在污水处理特别是在乡镇污水处理与回用领域中的应用研究受到越来越多的关注<sup>[4-7]</sup>。虽然国内外目前已有一些地下渗滤系统的实验室研究和工程应用,但在污染物净化机理及系统运行模式的优化等方面,研究尚不

基金项目:国家科技部重大专项(2000-03)

作者简介:张建(1976~),男,博士研究生,主要研究方向为水污染控制。

收稿日期:2001-12-13;修订日期:2002-04-03

十分完善.本试验通过中试系统探讨了地下渗滤系统对生活污水中各类污染物质的去除效果及回用处理出水的可行性,并对总氮去除机理进行了详细的研究.

## 1 试验装置与方法

### 1.1 试验装置

地下渗滤系统试验装置的断面图如图 1 所示.生活污水经预沉池处理后由多孔布水管流入布水槽.布水槽不透水,起着承托渗滤沟土壤并使污水均匀分布的作用.污水通过沟内土壤的毛管浸润作用,呈非饱和流状态缓慢地扩散入周围土壤.渗滤沟内的土壤由人工配置的特殊土壤组成,具有良好的毛管浸润性能、通气透水性和一定的有机质含量.在布水槽的侧翼设置毛管浸润性能良好的材料,以加强布水的均匀性.渗滤出水通过系统底部的集水管排出.

地下渗滤系统的进水为昆明市某村镇的生活污水,水力负荷为  $2\text{cm/d}$ ,地表种植黑麦草.在渗滤沟内埋深  $10\text{cm}$ 、 $15\text{cm}$ 、 $20\text{cm}$  处和渗滤沟间埋深  $10\text{cm}$ 、 $30\text{cm}$ 、 $50\text{cm}$ 、 $70\text{cm}$  处预埋铂电极,以监测系统内部氧化还原性质的变化.系统运行稳定以后,在垂直于布水管的剖面上测试各取样点(A~G)不同深度的含水率,取样点的布置如图 1 所示.

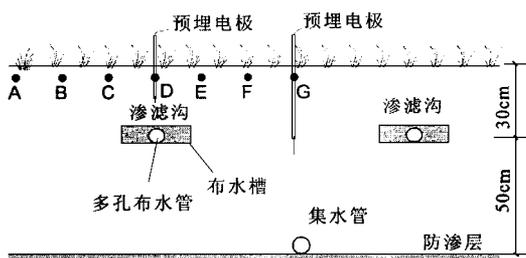


图 1 土壤渗滤系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of pilot system

### 1.2 检测项目与方法

常规性的水质检测项目、植物成分检测项目及分析方法如表 1 所示.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 水流特征分析

土壤中水的能量称为土水势,水总是由势

值大的位置流向势值小的位置,土水势包括压力势、基质势和重力势.在非饱水条件下,土水势主要取决于基质势和重力势.基质势是由毛管吸力引起的,随含水率的提高而增大<sup>[8]</sup>.通过测定系统内部的含水率分布,可以定性地得到地下渗滤系统内部的水流特征.含水率测定结果如图 2 所示.

表 1 检测项目与分析方法

Table 1 Analysis methods of testing items

检测项目	分析方法
COD	重铬酸钾法
氨氮	纳式试剂光度法
硝酸盐氮	紫外分光光度法
亚硝酸盐氮	N-(1-萘基)-乙二胺光度法
总氮	过硫酸钾氧化-紫外分光光度法
总磷	钼锑抗分光光度法
植物全氮	半微量蒸馏滴定法
植物全磷	钼锑抗分光光度比色法

由图 2 可见,系统内部均为非饱和流动.渗滤沟内土壤的含水率随深度逐渐增加,由此底部土壤和顶部土壤存在基质势差,在这个基质势差的作用下污水由布水系统附近(即渗滤沟底部)向上运动.然后,由于毛管浸润作用,渗滤沟内的土壤含水率提高,土水势增加,这样沟内土壤和沟间土壤间存在能量差,在这种能量差的作用下水由地下渗滤沟向沟间土壤水平浸润扩散.另外,在这种水平浸润过程中,污水还受到重力势的作用并向下运动.所以污水由地下

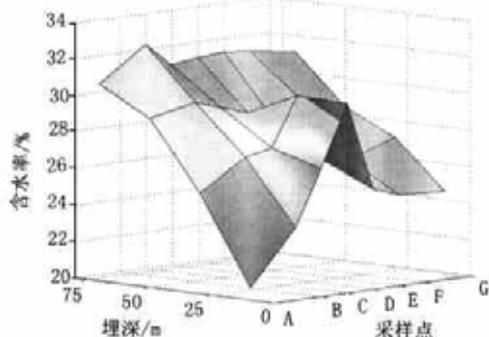


图 2 含水率监测结果

Fig.2 Results of soil water content

渗滤沟向沟间土壤浸润扩散的过程是二维渗流运动.在这个运动过程中,设置在布水槽侧翼的毛管浸润性能良好的材料一方面防止污水由布水槽的侧翼直接下渗造成短路流,另一方面增大了污水与土壤的直接接触面积,即毛管浸润面积,加强了布水的均匀性.最后,污水在重力势作用下由土壤渗漏沟间的土壤流向系统底部的集水层.

### 2.2 污染物去除效果分析

(1) COD 去除效果 COD 进出水变化情况如图 3 所示.从图 3 可以看出,系统的进水 COD 为 30 ~ 200 mg/L,波动较大,而出水 COD 则非常稳定,全部小于 50 mg/L,系统对 COD 的平均去除率为 84.7%.这充分表明地下渗滤系统对有机污染物有良好的去除能力,抗冲击负荷能力强.

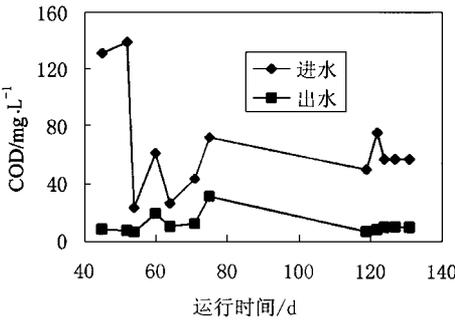


图 3 进出水 COD 的变化

Fig.3 Changes of influent and effluent COD

(2) 氮去除效果 氨氮进出水的浓度变化情况如图 4 所示.从图 4 可以看出,系统进水氨氮浓度在 5.2 ~ 28.5 mg/L 之间波动,出水氨氮浓度随进水浓度的波动而变化,系统对氨氮去除率为 70%左右.

总氮进出水的浓度变化情况如图 5 所示.从图 5 可以看出,系统进水总氮浓度为 10 ~ 40 mg/L,系统出水总氮浓度在 5 mg/L 左右波动,系统对总氮有着较好的去除效果,去除率接近 80%.

(3) 磷去除效果 污水土地处理中,磷的去除主要由磷的化学沉淀反应过程控制.污水或土壤溶液中的磷多以  $H_2PO_4^-$  (酸性环境下) 和

$HPO_4^{2-}$  (碱性环境下) 形式存在.磷酸根离子很容易与土壤中大量存在的  $Ca^{2+}$ 、 $Al^{3+}$ 、 $Fe^{3+}$  等离子发生化学反应,生成各种难溶性磷酸盐,因此地下渗滤系统对磷通常有很高的去除率<sup>[1,2,4,6,9]</sup>.

本研究的 2 套地下渗滤系统进水总磷浓度波动很大(0.5 ~ 4.0 mg/L),而各系统出水总磷浓度极低,均在 0.1 mg/L 以下,系统对总磷的去除率达到 95%以上.

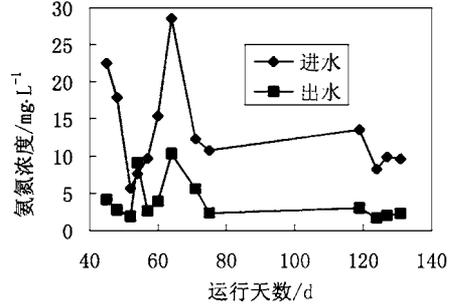


图 4 进出水氨氮浓度的变化

Fig.4 Changes of influent and effluent ammonia nitrogen concentration

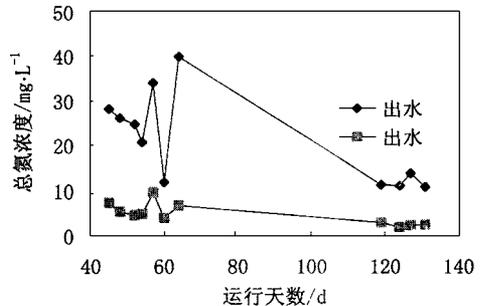


图 5 进出水总氮浓度的变化

Fig.5 Changes of influent and effluent total nitrogen concentration

表 2 列出了系统运行 3 个多月的污染物平均浓度和去除率.由表 2 可以看出,系统对 COD、总磷、总氮、氨氮等污染物质均有良好的去除效果,处理出水达到建设部颁发的《生活杂用水水质标准》(CJ25·1-89).

### 2.3 总氮去除机理分析

(1) 氮去除途径 地下渗滤系统中,氮的脱除机理主要包括作物吸收、生物脱氮以及氨氮

表 2 系统对污染物质的去除效果汇总

Table 2 Pollutants removal performance of pilot system

项目	COD	总磷	总氮	氨氮
进水平均浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	76.0	1.94	21.1	13.2
出水平均浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	11.7	0.04	4.7	4.0
去除率/%	82.7	98.0	77.7	70.0

挥发.通过测定牧草一个收割周期(2周)的生长重量,含水率及全氮含量可以得到试验系统运行期间通过作物吸收所去除的总氮量  $M_4$ .由进出水总氮浓度和进出水流量可以得到污水投配期间的总氮投配总量  $M_2$  和排放总量  $M_3$ .试验系统采用的填充土壤 pH 值为酸性,所以可以忽略氨氮的挥发损失,由此,通过下式可近似得到系统运行期间通过生物脱氮而去除的氮量  $M_4$  (如式(1)所示).计算结果如图 6 所示.

$$M_4 = M_2 - M_1 - M_3 \quad (1)$$

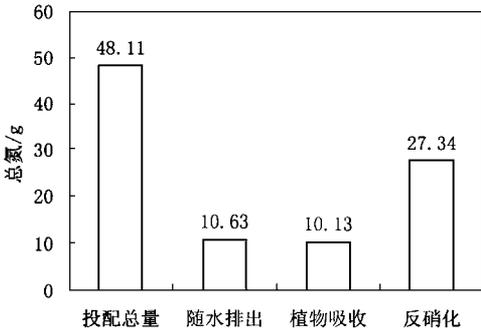


图 6 总氮去除途径分析

Fig. 6 Analysis of nitrogen removal path

从图 6 中可以看出,通过硝化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,2周内其去除的总氮含量为 27.34g,占投配总氮量的 57%;植物吸收的总氮量占投配总氮量的 21%,也是去除氮的重要途径.

土地处理系统中,通过植物吸收而得到的总氮去除率通常为 20%左右<sup>[4]</sup>.可见,靠提高植物吸收的氮总量以提高系统的除氮能力其上升空间不大.因此,创造良好的硝化/反硝化环境以进一步促进生物脱氮过程是提高地下渗滤系统总氮去除率的重要措施.

(2) 进出水总氮组成 为进一步了解系统

对各种形态氮的去除机理,对系统进出水的总氮组成进行了分析,结果如图 7 所示.由图 7 可见,系统进水中的总氮以氨氮为主,而出水中的总氮大部分也为氨氮,在总氮中占 83.8%,这说明系统内部的硝化反应进行比较差.

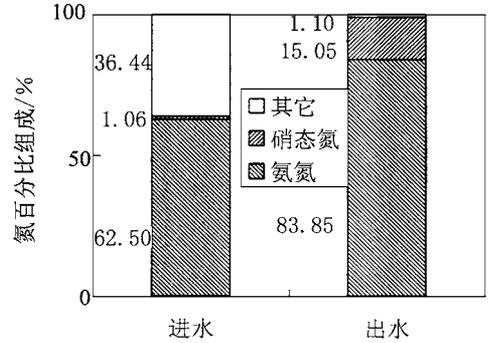


图 7 进出水总氮组成分析

Fig. 7 Analysis of influent and effluent total nitrogen composition

(3) 生物脱氮环境 土壤中硝化/反硝化反应的发生与土壤的氧化还原环境有关.通常,硝化细菌的硝化反应需要在好氧条件下进行,而反硝化细菌是一种兼性异养菌,在有机物质存在时,仅当厌氧条件下才能发生反硝化反应(氧化还原电位  $\text{ORP} = 350 \sim 100 \text{ mV}$ ).因此,土壤的氧化还原性质是影响硝化/反硝化进行的重要因素,通常可用 ORP 来表征<sup>[10,11]</sup>.通过土壤中预埋铂电极测定了不同位置、不同土壤深度的 ORP,结果如表 3 所示.

表 3 ORP 测定结果

Table 3 Results of ORP measurement

电极预埋位置	埋深/cm	氧化还原电位/mV
渗滤沟内	10	224
	15	155
	20	-169
渗滤沟间	10	180
	30	137
	50	145
	70	52

由表 3 可见,中试系统渗滤沟内的 ORP 很低,靠近布水管处的 ORP 最低可以达到

-169 mV,这说明此处的微生物活动强烈,大量地耗氧,导致土壤呈现较强烈的厌氧状态.而即使是表层 10cm 处的 ORP 也低于 300 mV 的氧化还原界限,呈现还原状态.在地表附近 ORP 有上升的趋势,这和地表及植物根系的传氧作用有关.渗滤沟间的 ORP 相对比较平均,但也很低,处于还原状态,而且随深度的增加,ORP 有变小的趋势.

上述测定结果表明中试系统的土壤处于还原状态.这种状态一方面不利于硝化反应的进行,导致系统氨氮去除率不高,仅为 70.0%,但另一方面又有利于反硝化作用的进行.

本中试系统的土壤处于还原状态的测定结果与相关报道有较大的差异<sup>[3,5]</sup>,这可能与装置中填充的土壤类型有关.本中试装置中采用了质地细密的云南红壤土作为填充介质,红壤土通气透水性能差,保水性能强,不利于土壤进行通气传氧.要使土壤恢复好气条件,其含水率不应大于 18%<sup>[10]</sup>,而本系统内部土壤的含水率均在 20%以上(见图 2),这进一步阻碍了土壤的通气传氧作用.

### 3 结论

(1)在 2cm/d 的水力负荷下,进行了地下渗滤系统处理村镇生活污水的现场中试.结果表明系统对 COD、氨氮、总磷、总氮等污染物均有良好的去除效果,处理出水中 COD、氨氮、总磷、总氮的浓度分别为 11.7 mg/L、4.0 mg/L、0.04 mg/L、4.8 mg/L,达到建设部颁发的《生活杂用水水质标准》(CJ25·1-89).

(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.系统中反硝

化作用进行得很好,但硝化反应不够充分,改善土壤环境以促进硝化反应是提高地下渗滤系统总氮去除率的关键.

(3)地下渗滤中试系统中土壤的还原性质是阻碍硝化反应进行的主要原因.

### 参考文献:

- 1 Donald B Aulenbach, Nie Meisheng. Studies on the mechanism of phosphorus removal from treated wastewater by sand. J. WPCF, 1988, 60(12):2089~2094.
- 2 Mikael Pell, Fred Nyberg. Infiltration of waste water in a newly started pilot sand-filter system: I. Reduction of organic matter and phosphorus. J. Environ. Qual., 1989, 8:451~475.
- 3 Mikael Pell, Fred Nyberg. Infiltration of waste water in a newly started pilot sand-filter system: II. Development and distribution of the bacterial populations. J. Environ. Qual., 1989, 8:457~462.
- 4 高拯民,李宪法.城市污水土地处理利用设计手册.北京:中国标准出版社,1991.46~50.
- 5 Tieheng Sun, Yaowu He et al. Treatment of domestic waste water by underground capillary seepage system. Ecological Engineering, 1998, 11:111~119.
- 6 杨丽萍,田宁宁等.土壤毛管渗滤污水净化绿地利用研究.城市环境与城市生态,1999, 12(3):4~7.
- 7 陈绍军,宋万等.地下渗滤中水回用技术的工艺设计.给水排水,1998, 24(12):32~34.
- 8 刘兆昌,张兰生等.地下水系统的污染与控制.北京:中国环境科学出版社,1991.59~74.
- 9 严健汉,詹重慈.环境土壤学.上海:华中师范大学出版社,1989.90~95.
- 10 吴永峰,汪民,钟佐焱.有机废水快速渗滤处理系统氧化还原环境特征.环境保护科学,1995, 21(4):32~35.
- 11 Meek B D, Grass L B. Redox potential in irrigated desert soils as an indicator of aeration status. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 1975, 39:870~875.