

# 地下渗滤系统在污水处理中的应用研究进展<sup>\*</sup>

张 建 黄 霞 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)

**摘 要** 地下渗滤系统是一种基于自然生态原理的污水净化技术,在我国有着良好的可行性和发展前景。本文总结了地下渗滤系统的类型,概括分析了地下渗滤系统中的关键性问题——土壤的选择与配制、水力负荷的选取、氮磷去除问题和土壤堵塞问题。

**关键词** 地下渗滤 土地处理 污水净化 脱氮除磷

## Review of subsurface wastewater infiltration system applied in sewage treatment

Zhang Jian Huang Xia Shi Hanchang Hu Hongying Qian Yi

(ESPC State Key Joint Laboratory, Department of Environmental Sciences and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** Subsurface wastewater infiltration system (SWIS) is a sewage purification technology based on natural ecological principle. The technology has a good feasibility and prospect in China. In the present paper, types of SWIS, were reviewed. And some crucial problems of SWIS, such as selection of filled soil, selection of hydraulic loading rate, nitrogen and phosphorus removal, clogging of soil, were discussed as well.

**Key words** subsurface wastewater infiltration system; land treatment; sewage purification; nitrogen and phosphorus removal

地下渗滤系统是将污水有控制地投配到具有一定构造、距地面一定深度和具有良好扩散性能的土层中,污水在土壤毛细管浸润和渗滤作用下向周围运动,在土壤-微生物-植物系统的综合净化功能作用下,达到处理利用要求的一种土地处理系统<sup>[1,2]</sup>。

地下渗滤系统具有不影响地面景观、基建及运行管理费用低、运行管理简单、氮磷去除能力强、处理出水水质好、可用于污水回用等特点。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,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>[2-20]</sup>。

在我国,随着经济的发展和环境问题的日益突出,我国的污水处理不仅在城市,而且在乡镇也要求越来越高,鉴于地下渗滤系统的上述优点,自20世纪90年代初,其在污水处理,特别是在乡镇污水处理中的应用研究受到越来越多的关注。1992年,北京市环境保护科学研究院建造了一个实际规模的污

水地下毛细管渗滤系统<sup>[21]</sup>;中国科学院沈阳应用生态所在“八五”科技攻关项目中,对地下渗滤系统应用于中水回用进行了探讨。

以下将介绍地下渗滤系统的类型,总结分析地下渗滤系统研究中的关键性问题,如土壤的选择与配制、水力负荷的选取、氮磷的去除和土壤堵塞问题,并对地下渗滤系统的实用范围和应用进行展望。

### 1 地下渗滤系统的类型

污水地下渗滤处理系统种类很多,归结起来可分为3种基本类型:土壤渗滤沟、土壤毛细管渗滤系统、土壤天然净化与人工净化相结合的复合工艺,通常是将浸没生物滤池与土壤毛细管浸润渗滤相结合的复合工艺。

#### 1.1 污水土壤渗滤净化沟

标准构造的土壤渗滤法如图1所示。污水先经化粪池、沉淀池或过滤池等预处理构筑物去除悬浮

<sup>\*</sup> 基金项目:国家科技部资助项目(2000-03)

物后,进入埋在地下的渗滤沟中的布水管,然后缓慢地向周围土壤浸润、渗透和扩散。水力负荷是维持渗滤沟正常工作的重要因素,通常根据地下渗滤系统的运行经验和细致地土壤理化分析来选择水力负荷,水力负荷一般为  $1.0 \sim 4.0 \text{ cm/d}^{[2]}$ 。

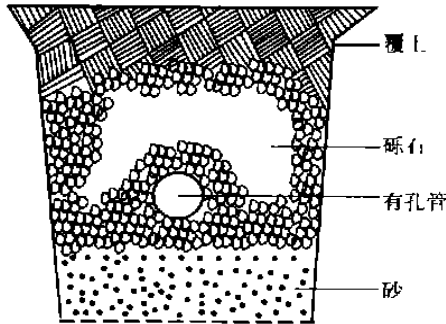


图1 污水土壤渗滤净化沟

## 1.2 土壤毛管渗滤系统

图2为土壤毛管渗滤系统,也称尼米(NüMi)系统,是日本人 NüMi 于 20 世纪 80 年代初期开发成功的<sup>[8]</sup>。系统的下部为不透水层,防止污水直接下渗,避免污染地下水。污水通过沟内土壤的毛管作用,缓慢地向上并向四周浸润、扩散入周围土壤,在地表下 30—50cm 深度的土壤层发生着非饱和渗透。在此层土壤内聚集着大量微生物及微型动物。在需氧微生物和厌氧微生物的作用下,污水中的有机污染物被吸附、降解,土壤中大量的原生动物和后生动物又以微生物为食料;伸入土层中的植物根系则吸收由于污水矿化而产生的氮、磷等无机养分,作为其生长所需的营养。因此,NüMi 系统基本上是一个生态系统,通过植物-土壤-微生物的复杂而又互相联系和制约的作用,最终使污水得到净化。土壤毛管渗滤系统的水力负荷一般取  $30 \sim 40 \text{ L/(m}^2 \cdot \text{d)}$ 。

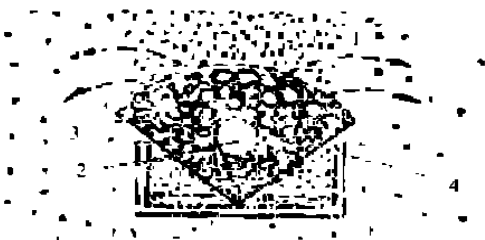


图2 土壤毛管渗滤系统

1. 通气性土壤; 2. 有孔管; 3. 砾石; 4. 膜

## 1.3 复合工艺

地下渗滤系统复合工艺的种类很多,如土壤式沉淀池、厌氧消化-沉淀-土壤渗滤一元化构筑物、接触曝气-土壤净化复合式处理系统、土壤式污泥浓缩池和地下渗滤场等,它们都具有一个共同的特点,即把土壤天然净化工艺和人工净化工艺结合起来<sup>[1]</sup>。复合工艺提高了系统的处理负荷,减少了对环境条件的依赖性,便于人工控制,但是另一方面也会增加基建投资和处理成本。

## 2 地下渗滤系统的关键性问题

### 2.1 土壤的选择与配制

土壤作为土壤-植物-微生物生态系统组成的基质,对污水的净化起着物理截留、化学沉淀、吸附、氧化还原、络合及离子交换等作用,同时为土壤微生物——污染物质的分解者提供了必要的环境条件,这样才能使污水得到很好的净化。土壤的颗粒组成、结构等性质和渗滤土层厚度决定了地下渗滤系统的处理能力和净化效果<sup>[1,2]</sup>,因此,正确的土壤选配措施是地下渗滤系统成功的前提。

在实际应用中,往往是根据应用场地的土质条件进行适当的调整,以得到理想的土壤组成。这种调整主要包括土壤颗粒组成和土壤有机质含量的调整。调整土壤颗粒组成主要是为了得到适当的渗透速率和毛细浸润作用强度;提高土壤有机质可以得到良好的团粒结构,改善土壤的通气透水性,为微生物提供良好的环境。

### 2.2 水力负荷的选取

合适的水力负荷可以维持土壤中污染物质的投配和降解之间良好的平衡,保证系统连续运行状态下的处理效果,防止土壤的堵塞<sup>[2]</sup>。和其他土地处理系统类似,地下渗滤系统一般根据经验数值确定设计水力负荷,而由此确定的水力负荷通常还要应用下述设计依据进行校核<sup>[1,2,20]</sup>。

#### 2.2.1 土壤-植物系统的导水能力

在湿润地区,地下渗滤系统应以处理污水为主要目的,可用下式计算最大允许污水水力负荷率:

$$L_w = ET - P_r + P_w \quad (1)$$

式中:

$L_w$  为最大允许污水水力负荷率  $\text{cm/a}$ ;

$ET$  为土壤水分蒸发损失率  $\text{cm/a}$ ;

$P_w$  为最大允许渗透速率  $\text{cm/a}$ ,一般取土壤限制性渗透速率的 4%—10%;

$P_r$  为降水量  $\text{cm/a}$ 。

### 2.2.2 依据覆盖植被对灌溉的要求

在干旱和半干旱地区,地下渗滤系统应以灌溉为主要目的,可用下式计算最大允许污水水力负荷率:

$$L_w = (ET - P_r) \left( 1 + \frac{LR}{100} \right) \quad (2)$$

式中:

$LR$  为种植作物的年淋溶率,其他参数同式(1)。

### 2.2.3 土壤-植物系统对污染物的同化容量

实践和研究表明,对于城市污水,在保证没有土壤堵塞问题发生的前提下,基于 BOD、P 和 SS 的负荷率都不会成为水力负荷的限制因素<sup>[1,2,20]</sup>,氮的去除率和负荷率通常是地下渗滤系统的限制设计参数,并决定系统所需的土地面积。基于氮负荷的最大允许水力负荷率可用下式较精确地计算:

$$L_{w(N)} = \frac{C_p(P_r - ET) + 10U}{(1-f)C_n - C_p} \quad (3)$$

式中:

$L_{w(N)}$  为基于氮负荷的最大允许污水水力负荷率  $\text{cm/a}$ ;

$C_p$  为渗滤出水中氮的浓度  $\text{mg/L}$ ;

$C_n$  为进水的氮浓度  $\text{mg/L}$ ;

$U$  为植物吸收的氮量  $\text{kg/(hm}^2 \cdot \text{a)}$ ;

$f$  为投配污水中氮素的损失系数,投配污水为一级处理出水时  $f$  约为 0.8,二级处理出水时为 0.1—0.2;

$ET$  和  $P_r$  同式(1)。

### 2.3 氮的去除问题

污水中的氮以有机氮和氨(或铵离子)的形式进入土壤,它是地下渗滤系统中最难以去除的物质,其去除率因污水水质、环境条件和操作条件的不同在 10%—90%之间变化<sup>[1,2,13]</sup>。

氮在土壤中的迁移转化过程可以分为以下几个阶段:有机氮转变成氨态氮,氨态氮被土壤颗粒吸附,土壤吸附的氨态氮在硝化细菌的作用下转化为硝态氮,硝态氮通过反硝化以  $\text{N}_2$  或  $\text{N}_2\text{O}$  的形式扩散到大气中。

进入土壤中的有机氮化合物被微生物分解后,转变为较活泼的无机态氮素的过程称为氨化作用,各种各样的好氧、厌氧微生物都可以是有机氮化合物分解者。由于土壤胶体大都带有负电,因此,土壤

颗粒对氨态氮的吸附作用很强,而一旦转化成了硝态氮或亚硝态氮,其在土壤中的迁移速度将大为增强。

在微生物作用下,氨态氮氧化成亚硝酸氮和硝酸氮的过程称为硝化反应。影响硝化细菌生长繁殖的因素很多。温度、pH 值、还原态无机氮量、充氧条件及湿度条件等都会对硝化过程产生影响。在具有良好通气透水性能的土壤中,硝化反应进行的速度很快,在表层 15cm 的土壤中即可迅速完成<sup>[13]</sup>。

反硝化作用是在缺氧条件下,反硝化细菌以有机质为碳源,把硝酸盐氮转变成气态的  $\text{N}_2$  或  $\text{N}_2\text{O}$  的过程。反硝化是不可逆的过程,在有机物质存在时,仅当缺氧条件下才能发生( $E_h = +350 \sim -100\text{mV}$ )。反硝化菌是兼氧菌,其以氧气为电子受体的好氧呼吸和以氮为电子受体的厌氧呼吸所用的电子转移系统是相同的,溶解氧能够抑制反硝化所需的酶,当有氧存在时,反硝化菌将以氧为电子受体将碳水化合物氧化为二氧化碳和水。

土壤中影响反硝化菌生长繁殖的主要因素为氧化还原条件和碳源。研究表明,地下渗滤系统的氧化还原条件一般不是反硝化作用的限制因素<sup>[6,15,21]</sup>,合适的 C/N 比以保证反硝化菌有充足的碳源才是脱氮高效进行的关键所在<sup>[3,4,7,9,15,19]</sup>。

此外,植物在生长过程中吸收土壤中的氮,通过修剪植株也可以将氮去除。植物同化作用所去除的氮量因不同的植物而变化,但由植物吸收形成的总氮去除率一般不会超过 20%。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,为系统提供良好的硝化、反硝化条件才是提高地下渗滤系统除氮能力的根本出路。

### 2.4 磷的去除问题

地下渗滤系统对磷有着非常好的去除效果,去除率通常达到 90%以上<sup>[1,2,20-22]</sup>。系统中磷的去除主要是通过以下几个过程完成的:土壤颗粒的吸附作用、化学沉淀反应、微生物同化作用和植物吸收作用。

大量的研究和实践表明,地下渗滤系统运行初期,吸附对磷的去除有重要的意义,但是对于磷的进一步去除而言,吸附不是主要作用,土层中对磷的去除过程主要是由化学沉淀反应来控制的,这种磷去除作用的土壤同化容量远比吸附容量大的多<sup>[1,12,20,21]</sup>。土壤的磷吸附饱和问题是土壤渗滤系统有待于进一步研究的课题。

磷在土壤中的迁移转化模型可以用下式表示<sup>[1]</sup>:

$$P_x = P_0 \exp(-K_p T) \quad (4)$$

$$T = \frac{XW}{K_x G} \quad (5)$$

式中:

$P_x$  为土壤水运行距离为  $x$  时的总磷浓度

mg/L;

$P_0$  为污水中总磷的浓度 mg/L;

$K_p$  为瞬时速率常数 ( $pH = 7$ ,  $K_p = 0.002/h$ );

$T$  为停留时间 d;

$X$  为水流迁移距离 m;

$W$  为土壤饱和含水量 (通常取 0.4);

$K_x$  为水流为  $x$  方向的土壤运行渗透速率,即水力负荷 cm/h;

$G$  为水力梯度,  $G = 1$ , 垂直水流动;  $G = \Delta H / \Delta L$ , 侧渗水流动。

## 2.5 土壤的堵塞问题

土壤的堵塞问题会降低土壤的水力传导性能,妨碍土壤的通气传氧作用,严重影响地下渗滤系统的净化效果<sup>[5,10,11,18,19]</sup>。土壤堵塞产生的主要原因有以下几种。

### 2.5.1 悬浮物堵塞土壤孔隙

悬浮物产生的堵塞过程是一个比较迅速的过程,而且这种堵塞通常无法恢复,因此,这种堵塞过程应该在地下渗滤系统中着重避免。另外,悬浮物的组成不同,其对土壤的堵塞问题的影响也会不同<sup>[4]</sup>。

### 2.5.2 微生物作用堵塞土壤孔隙

微生物及其胞外分泌物的积累可能会堵塞土壤的孔隙。研究表明,微生物细胞的积累不是土壤堵塞的直接原因<sup>[14]</sup>,而微生物降解污染物过程中产生的中间产物(胞外多糖)是土壤孔隙堵塞的重要原因,降低进水中的 C/N 比可以有效防止由胞外多糖造成的土壤堵塞<sup>[18,19]</sup>。另外,土壤中腐殖质的积累也会导致地下渗滤系统的堵塞。通过减小系统的水力负荷、降低进水有机质浓度和强化土壤的通气充氧作用等手段可以防止土壤中腐殖质的积累<sup>[10,11]</sup>。

### 2.5.3 土壤中生化反应产生的气体对土壤孔隙的堵塞

土壤中微生物好氧反应过程中会产生  $CO_2$ , 厌氧反应过程中会产生  $CH_4$ 、 $SO_2$ 、 $N_2$ 、 $N_2O$  等气体,这些气体如果不能从土层中及时排出的话,也会造成

土壤孔隙的堵塞。通过干湿交替、间歇投配的操作方式,可以有效地防止微生物新陈代谢产生的气体对土壤孔隙的堵塞过程<sup>[4,10,11]</sup>。

由于土壤孔隙的堵塞问题对地下渗滤系统造成的破坏是很严重的,因此,如何有效地防止系统的堵塞,保证地下渗滤系统的正常运转成为人们的研究重点。

## 3 结 语

目前,国内外已有很多地下渗滤系统的实验室研究和工程应用,但是,这些研究和应用多是对运行结果的简单分析,对实践经验的简单套用,在净化机理、污染物迁移转化模型及运行模式的优化等方面的研究还很少报道。这说明地下渗滤技术虽然历史悠久,但还远未成熟,同时也说明该技术的复杂性。为使该技术能成功地应用于污水回用的实践,还有很多工作要做。

目前,我国面临着严重的水资源危机,水资源匮乏和水质恶化问题日益严重,污水回用的观念也日益深入人心。我国若干已有的污水土地处理工程的实际运行经验表明,土地处理系统在我国广大地区有着良好的适应性和可行性,因此,地下渗滤处理技术在我国将有很好的发展前景。

## 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. 北京:中国标准出版社,1991
- [2] USEPA. Wastewater treatment/ disposal for small communities, EPA 625R92005,1992
- [3] J. C. Lance, F. D. Whisler. Stimulation of denitrification in soil columns by adding organic carbon to wastewater. J. WPCF, 1976, 48(2):346—356
- [4] J. C. Lance, R. G. Gilbert, et al. Renovation of wastewater by soil columns flooded with primary effluent. J. WPCF, 1980, 52(2):381—388
- [5] Kristiansen R. Sand-filter trenches for purification of septic tank effluent: I. The clogging mechanism and soil physical environment. J. Environ. Qual., 1981, 10:353—357
- [6] Kristiansen R. Sand-filter trenches for purification of septic tank effluent: II. The fate of nitrogen. J. Environ. Qual., 1981, 10:353—357
- [7] R. C. Rice, Herman Bouwer. Soil/aquifer treatment using primary effluent. J. WPCF, 1984, 56(1):84—88
- [8] Dillaha, Theo A., Younos, Tamim M., et al. Biological treatment of wastewater in soils by the NiiMi process. Sec-

- ond International Conference on Fixed-film Biological Processes, 1984, 831—845
- [9] J. C. Lance. Effect of sludge additions on nitrogen removal in soil columns flooded with secondary effluent. J. Environ. Qual., 1986, 15(3): 298—301
- [10] Robert L. Siegrist. Soil clogging during subsurface wastewater infiltration as affected by effluent composition and loading rate. J. Environ. Qual., 1987, 16(2): 181—187
- [11] Robert L. Siegrist, William C. Boyle. Wastewater-induced soil clogging development. J. Environ. Eng., 1987, 113(3): 550—566
- [12] Donald B. Aulenbach, Nie Meisheng. Studies on the mechanism of phosphorus removal from treated wastewater by sand. J. WPCF, 1988, 60(12): 2089—2094
- [13] Mikael Pell, Fred Nyberg. Infiltration of wastewater in a newly started pilot sand-filter system: I. Reduction of organic matter and phosphorus. J. Environ. Qual., 1989, 8: 451—475
- [14] Mikael Pell, Fred Nyberg. Infiltration of wastewater in a newly started pilot sand-filter system: II. Development and distribution of the bacterial populations. J. Environ. Qual., 1989, 8: 457—462
- [15] Mikael Pell, Fred Nyberg. Infiltration of wastewater in a newly started pilot sand-filter system: III. Transformation of nitrogen. J. Environ. Qual., 1989, 8: 457—462
- [16] F. J. Cook, F. M. Kelliher, et al. Changes in infiltration during wastewater irrigation of a highly permeable soil. J. Environ. Qual., 1994, 23: 476—482
- [17] Cameron, K. C. Is soil an appropriate dumping ground for our wastes. J. Soil Res., 1997, 6: 109—116
- [18] Baveye, P. Vandevivere, P., et al. Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials. Critical Rev. Environ. Sci. Tech., 1998, 28: 123—191
- [19] G. N. Magesan, J. C. Williamson, et al. Wastewater C:N ratio effects on soil hydraulic conductivity and potential mechanisms for recovery. Bioresource Technology, 2000, 71: 21—27
- [20] USEPA. Process design manual: land treatment of municipal wastewater, EPA625/1-81-013, 1980
- [21] 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

(责任编辑: 刘 颖)

(上接第 77 页)

- [12] Pilon-Smits E A H., de Souza M P, Hong G., et al. Selenium volatilization and accumulation by twenty aquatic plant species. Journal of Environmental Quality, 1999, 28(3): 1011—1018
- [13] 高吉喜, 叶春, 杜娟等. 水生植物对面源污水净化效率研究. 中国环境科学, 1997, 17(3): 247—251
- [14] Shiomi N, Kitoh S. Use of *Azolla* as a decontaminant in sewage treatment. *Azolla* utilization. Manila, Philippines: International Rice Research Institute, 1987, 169—176
- [15] Forni C, Chen J, Tancionil L, et al. Evaluation of the fern *Azolla* for growth, nitrogen and phosphorus removal from wastewater. Water Research, 2001, 35(6): 1592—1598
- [16] Zhao M, Duncan J R. Batch removal of hexavalent chromium by *Azolla filiculoides*. Biotechnol. Appl. Biochem., 1997, 26(3): 179—182
- [17] Zhao M, Duncan J R. Column sorption and desorption of hexavalent chromium from aqueous solution and electroplating effluent using *Azolla filiculoides*. Resource and Environmental Biotechnology, 1997, 2: 51—64
- [18] Zhao M, Duncan J R. Removal and recovery of nickel from aqueous solution and electroplating rinse effluent using *Azolla filiculoides*. Process Biochemistry, 1998, 33(3): 249—255
- [19] <http://departments.agri.huji.ac.il/botany/tel/or/Elisha%20tel-or.htm>

(责任编辑: 刘 颖)