

Research on the Technology of Enhanced Denitrification for Sewage Subsurface System

Danni Dou, Liping Jia, Chunyue Li, Ping Fang, Binhui Jiang*

Department of Environmental Engineering, School of Resource & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning
Email: *jiangbinhui@mail.neu.edu.cn, 1025915808@qq.com

Received: May 27th, 2017; accepted: Jun. 16th, 2017; published: Jun. 19th, 2017

Abstract

With the higher removal rate of pollutants, subsurface system has attracted worldwide attention and has been widely used in sewage treatment technology in recent years. This article shows a detailed review on the definition, classification, mechanism, problem and application prospects of the sewage subsurface system.

Keywords

Sewage Subsurface System, Enhanced Denitrification, Microorganism

污水地下渗滤系统强化脱氮技术研究现状

窦丹妮, 贾丽萍, 李春月, 方萍, 姜彬慧*

东北大学资源与土木工程学院 环境工程系, 辽宁 沈阳
Email: *jiangbinhui@mail.neu.edu.cn, 1025915808@qq.com

收稿日期: 2017年5月27日; 录用日期: 2017年6月16日; 发布日期: 2017年6月19日

摘要

地下渗滤系统是近几年来应用较为广泛的污水处理技术, 凭借其对污染物较高的去除率已受到各国的关注和重视。本文主要针对地下渗滤系统的定义、分类、对污染物的去除原理以及存在问题和发展前景做了详细的介绍。

*通讯作者。

关键词

地下渗滤系统, 强化脱氮, 微生物

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 污水地下渗滤系统

地下渗滤系统属于土地污水处理系统的一种类型[1], 是利用植物 - 土壤 - 微生物组成的稳定的生态系统处理污水的一种工艺[2]。地下渗滤系统是将污水有控制的投放距离地面一定距离、有一定的构造、易扩散的土壤中, 污水在土壤的毛管力和渗透作用下向周围扩散, 再通过植物 - 土壤 - 微生物等一系列的物理截留、化学吸附及生物作用使污水达到净化的效果[3]。由于地下渗滤系统具有基建费用及运行成本低, 维修管理方便, 对于有机污染物和磷的去除效果较好等特点, 近几年成为了国内外研究的热点[4]。

目前, 世界各国都在寻找成本较低且对于污水处理效果较好的技术。在我国应用比较广泛的污水处理技术以高效藻类塘、人工湿地、蚯蚓生态滤池处理技术、移动床生物膜反应器和地下渗滤系统为主。世界银行环境事务署规定: “当有土地可用和毒物含量足够低时, 土地处理是最简单、最经济的技术, 在任何工业项目中, 土地处理都应当作为第一选择来考虑” [5]。

1.1. 地下渗滤系统的分类

地下渗滤系统种类较多, 主要有地下渗井, 渗滤沟式地下渗滤系统, 渗滤管式地下渗滤系统和尼米槽式地下渗滤系统[6]。

1) 地下渗井

地下渗井又称为地下渗滤坑, 是指在地下一定距离构造渗滤坑并利用其底部和周围的土壤作用对污水进行预处理的污水处理装置, 地下渗井是由预处理装置和砾石堆组成, 预处理装置是由水泥、石头和塑料等构成, 池壁上开有所需大小的孔, 预处理池内部和周围均由砾石填充, 整个渗滤井都埋入具有良好渗透性的土壤中。污水经过化粪池处理之后直接进入预处理池, 随后由预处理池池壁上的孔眼分配到周围的砾石堆中, 透过砾石堆进入周围渗透性良好的土壤中, 整个过程中污水得到了净化。渗滤井是一种比较原始的地下渗滤系统, 适用于流量比较小的污水源。

2) 渗滤沟式地下渗滤系统

渗滤沟式地下渗滤系统又称为土壤净化槽, 是最常见的地下渗滤系统装置。该工艺是由化粪池, 布水管, 砾石堆和处理场地构成, 该工艺的结构是将布水管放置在若干个相互平行的渗滤沟中, 并且在布水管周围布满砾石。污水经过化粪池处理后通过布水管缓缓地向周围渗透扩散, 以此达到净化污水的目的。该类系统提高了污水处理的能力, 并且布水面积较大, 出水的水质有了较大提高。

3) 渗滤管式地下渗滤系统

渗滤管式地下渗滤系统不再应用砾石堆, 取而代之的是在处理场地中放置褶皱织物包裹的渗滤管。污水通过渗滤管流入周围的土壤中, 通常在上述工艺装置中, 布水管的上部都会设有检查孔来确定运行一段时间后渗滤管是否存有污泥。这种无砾石的系统相对于传统的地下渗滤系统具有基建费用低, 便于维修, 易于安装, 能够减弱砾石在渗滤过程中风化带来的不良效果。

4) 尼米槽式地下渗滤系统

尼米槽(Nimi System)相对于传统的地下渗滤系统不同之处在于,其在布水管的下方设有一个不透水厌氧槽(又称为尼米槽),在槽中填充的是沙子或其他填料,布水管周围则是由纤维包裹的砾石,在砾石的上方则是表层覆土。污水通过布水管进入尼米槽,在尼米槽内积累一段时间,随后通过沙子和土壤的毛细力扩散到尼米槽周围的土壤中,污水中的悬浮物大多被截留在尼米槽中,同时在槽中液化酸化,可以降低土壤被堵塞的可能性,使出水水质有了很大的提高。

1.2. 地下渗滤系统对污染物的去除作用及机理

1.2.1. 固体悬浮物

对于地下渗滤系统来说,固体悬浮物对于系统中的土壤结构会有很大的影响,可能会引起系统渗滤层及土壤间隙内的土壤堵塞,直接影响系统的复氧效果,引起系统内微生物的变化,从而影响系统主要污染物的去除性能。所以固体悬浮物的去除是决定地下渗滤系统总体性能的关键因素之一[7]。

生活污水进入化粪池后,大部分固体悬浮物被截留液化,得到预处理,减少了后继系统中的负荷。对于无机型 SS,截留、吸附或者反映之后,在外部环境相对稳定的情况下不在发生变化;有机型 SS 则在物理截留、吸附之后发生变化,在厌氧环境中可以被厌氧微生物液化、酸化以及甲烷化后降解,在好氧情况下则被好氧菌分解成 CO₂ 从系统内放出[5]。

1.2.2. N 的去除

污水中的氮以多种形式存在,主要有有机态氮、氨态氮、硝酸态氮和亚硝酸态氮等[8]。地下渗滤系统中氮的脱除途径包括反硝化、植物吸收、土壤固定和氨氮挥发等[9],其中生物硝化、反硝化过程是最主要的途径[10]。N 在土壤中迁移转化的过程可分为三个阶段[11]:

- 1) 有机氮转变成成为氨态氮,氨态氮被土壤颗粒吸附, $\text{CHNH}_2\text{COOH} + \text{O}_2 \rightarrow \text{RCOOH} + \text{CO}_2 + \text{NH}_3$ (氨化);
- 2) 土壤吸附的氨态氮在硝化细菌的作用下转化为硝态氮, $\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$ (硝化作用);
- 3) 硝态氮通过反硝化作用以 N₂ 或 N₂O 的形式扩散到大气中, $\text{NO}_3^- + 5\text{H}_2 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ (反硝化作用)。

可见氮的脱除受基质中的脱氮菌群数量、性能以及基质的孔隙度等影响。研究表明,碳源是影响地下渗滤系统中生物反硝化过程中的主要因素,若投配污水的 C/N < 3,则碳源不足,反硝化菌的活性将受到抑制而不利于氮的去除[12]。由于对地下渗滤系统的内部环境调控不灵活,氧化还原环境不能得以改善;同时,二次补水等外加碳源的调控技术还不成熟。因此,氮的脱除仍是地下渗滤系统的薄弱环节。

1.2.3. P 的去除

磷是水体富营养化的主要限制性因素[13],生活污水中的磷来自于人类排泄物,洗涤剂。一般生活污水中以固体形式或液体形式、有机或者无机形式存在的总磷含量为 12~20 mg/L。污水中的磷以无机磷为主,含少量有机磷。地下渗滤系统中,磷的主要去除方式是土壤的吸附于沉淀作用及植物和微生物的同化作用[14]。

对于不溶性的磷酸盐通过物理吸附截留得以去除,被吸附沉淀的磷在污水中磷浓度较低的情况下,会有一部分被释放到水中[15]。李斌等[14]认为土壤对磷的吸收存在饱和度的问题,当土壤对磷的吸附达到饱和后会发生磷穿透,使磷重新回到水中,使出水中的总磷浓度升高。

2. 地下渗滤系统强化脱氮的技术与方法

2.1. 地下渗滤系统脱氮的强化方式

2.1.1. 微生物强化基质脱氮

基质是地下渗滤系统中至关重要的一部分，其不仅可以为污水渗滤提供良好的水利条件，为植物的生长提供必需的载体和营养物质，更为重要的是为微生物的生长提供附着的载体和生长环境[16]。王梦芸[17]通过研究证明了装填微生物菌剂能够促进系统对 COD、NH₃-N 的去除，加速硝化反应。邹轶[18]通过添加微生物菌剂，明显增强了地下渗滤系统去除氨氮和总氮的效率，并且大幅度缩短了地下渗滤系统启动的运行时间。李英华等[19]采用富含脱氮细菌的干化污泥和孔隙度较大的煤渣等填料替代系统中部分原有的草甸土，使系统启动周期缩短并提高了抗冲击负荷能力，并且使氨氮和总氮的去除率分别达到了 92.4% 和 82%。

2.1.2. 改善系统氧化还原条件

氧化还原电位(Oxidation-Reduction Potrntial, 简称 ORP)作为介质(包括土壤、天然水、培养基等)环境条件的一个综合性指标，已沿用已久，它表征介质氧化性或还原性的相对程度[20]。地下渗滤系统中 ORP 是影响微生物硝化、反硝化作用的主要因素之一。一般来说，通常提高系统渗透性来增加土壤中溶解氧含量，改善土壤中氧化还原条件，从而提高地下渗滤系统的脱氮效果[21]。目前国内外采用以下三种方法提高系统内的 ORP:

1) 干湿交替运行

干湿交替是指进水 - 落干 - 进水 - 落干交互进行；若较长时间持续进水将会导致系统一直处于厌氧和缺氧的环境，会减弱微生物的硝化作用。干湿交替方式会避免上述现象的发生，补充期间消耗的溶解氧，保证系统处于一定程度的好氧环境，有效的调节系统中的 ORP [22]。Zhang Jian [23]等人通过实施干湿交替运行，提高了系统内氨氮和总氮的去除率，均达到 80% 以上。VanCuy [24]等人在试验中证明了干湿交替运行可以改变系统 ORP，从而影响氨氮和总氮的去除效率。

2) 植物输氧

植物的根系可以使系统种缺氧或者厌氧区存在局部的好氧环境。植物从周围吸收 CO₂，通过自身将 O₂ 输送到发达的根系中，使与根系四周的基质均处于好氧状态，而远处的区域会出现厌氧或缺氧的环境，这种情况分别有利于硝化和反硝化细菌的生长和繁殖，提高整个系统的脱氮效率[25]。但是植物根系所处范围是一定的，而且受到季节变化的影响，因此植物向土壤内输送的氧气有限，一般将植物输氧作为一种辅助手段，不能从根本上提高系统内的 ORP。石云[26]等人通过研究证明空气通过植物茎秆被运送到根部，在根部周围形成好氧区域，原理根部的区域处于缺氧或厌氧状态，有利于总氮的去除。

3) 强制通风

强制通风是一种可以有效增加系统内部含氧量的方法，是指利用布水管与干湿交替结合，在落干期间通过自然通风或机械鼓风的方式向系统内部输送空气，可以明显改善系统内的氧化还原环境，提高总氮的去除率。Luanmanee [26]等通过控制通风的大小，发现随着风量的增加，系统对总氮的去除率随之增加。Pan [27]等人通过间歇式透风改善了系统的 ORP，促进了系统内硝化菌和反硝化菌的生长，提高了总氮的去除效率。

2.1.3. 添加碳源

增加碳源是有效提高系统脱氮效率的方法之一。目前主要有 2 种添加碳源的方式:

1) 直接添加有机物作为碳源，例如稻壳、木屑等。Chen [28]等在地下渗滤系统中添加泥炭，显著提

高了 TN 的去除效率。Wanielista [29]发现在系统中添加木屑有助于硝态氮的去除。

2) 通过中间分流的方式,利用污水中的有机物作为碳源。张建[30]等人通过中间分流的方式强化了反硝化过程,将总氮的去除效率由 56%提高至 65%。王振[12]等人通过实验证明了分流比能够增加系统中反硝化细菌的数量,并且会影响系统中的 ORP 变化。

2.2. 污水地下渗滤系统运行时存在的问题

1) 黑箱性问题

地下渗滤系统处理主体位于地面以下,并且微生物对系统的处理效果发挥关键作用,目前的研究对于其内部的变化过程不能完全揭示,尤其系统处于动态变化是,系统的微生物结构特征及群落特征尚未得到全面认识,因此存在黑箱问题[5]。

2) 堵塞问题

系统堵塞不仅影响地下渗滤系统的进水负荷,妨碍通气,降低地下渗滤系统的净化效果,而且有时严重到缩短系统的使用寿命。地下渗滤系统的堵塞成因很复杂,一般认为物理堵塞和生物堵塞是造成系统崩溃的主要原因,具体堵塞机理则涉及流体力学、结构力学、渗流力学等多方面,此外,气泡堵塞在一些情况下也容易发生。

3) 总氮去除率较低

地下渗滤系统中,有机质的迅速降解使得反硝化菌可利用的碳源不足,而好氧环境亦不利于反硝化菌的生长繁殖,导致总氮的去除率较低[31]。

3. 研究前景及展望

影响地下渗滤系统总氮去除效率的因素众多,着眼于地下渗滤系统的发展趋势而言,仅单因素强化已不能满足要求,强化系统的脱氮效率应对其不同的影响因素进行主次排序,选取运行一种有主有辅的运行条件,并且优化各种工艺参数。加强对脱氮微生物的利用,培养高效脱氮微生物种群;将多种脱氮工艺相结合,构建高效的地下渗滤系统。与此同时可以将强化后的地下渗滤应用到其他含氮污水的处理中,拓展其应用的范围与空间[32]。

基金项目

国家自然科学基金项目(51278090)和国家水体污染与控制治理科技重大专项课题(2013ZX07202-010-05)。

参考文献 (References)

- [1] 宋斐. 改良式地下渗滤系统处理农村生活污水工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [2] 李屹, 沈剑, 林燕, 等. 土壤渗滤系统中污染物去除效果分析[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(6): 738-742.
- [3] Li, H., Li, Y., Sun, T., *et al.* (2012) The Use of a Subsurface Infiltration System in Treating Campus Sewage under Variable Loading Rates. *Ecological Engineering*, **38**, 105-109.
- [4] Li, H., Li, Y., Sun, T., *et al.* (2011) Effects of Hydraulic Loading Rate on Pollutants Removal by a Deep Subsurface Wastewater Infiltration System. *Ecological Engineering*, **37**, 1425-1429.
- [5] 潘晶. 地下渗滤系统微生物特征及强化脱氮工艺研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- [6] 张思. 地下渗滤系统处理农村生活污水的净化效果研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 河北农业大学, 2014.
- [7] 秦伟. 地下渗滤系统处理农村分散生活污水去除效果研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 河北农业大学, 2013.
- [8] 郭振苗. 农村生活污水土壤渗滤过程中氮素运移试验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2012.
- [9] Rammon, D.A. and Peirce, J.J. (1999) Biogenic Nitric Oxide from Wastewater Land Application. *Atmospheric Envi-*

ronment, **33**, 2115-2121.

- [10] 李英华. 污水地下渗滤系统脱氮关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [11] 王莹. 人工渗滤系统强化去除水体中总氮的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 中国石油大学(华东), 2012.
- [12] 王振, 刘超翔, 董健, 等. 分流比对土壤渗滤系统脱氮效果的影响研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(7): 1926-1931.
- [13] 郑鹏. 地下渗滤系统处理污水的效果及工程应用研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [14] 李斌, 杨继富, 樊国中. 农村分散生活污水地下渗滤系统处理技术研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(4): 20-23.
- [15] 张雨瑶, 李世友. 土壤磷与植物关系研究进展[J]. 世界林业研究, 2013, 26(5): 19-24.
- [16] 王鑫, 李海波, 孙铁珩. 地下渗滤污水处理系统中基质的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(12): 86-89.
- [17] 王梦芸. 强化型土壤渗滤系统脱氮性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2016.
- [18] 邹轶. 添加微生物菌剂的地下渗滤系统处理生活污水模拟实验研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳药科大学, 2007.
- [19] 李英华, 李海波, 王鑫, 等. 生物填料地下渗滤系统对生活污水的脱氮[J]. 环境工程学报, 2013, 7(9): 3369-3374.
- [20] 向交, 徐丽萍, 李和平, 等. 氧化还原电位的研究及应用[J]. 地球与环境, 2014, 42(3): 430-436.
- [21] 王士满. 高负荷地下渗滤系统强化脱氮研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳大学, 2016.
- [22] 张晓辉, 崔建宇, 曹奇光, 等. 高羊茅和结缕草对地下渗滤系统中氮磷的去除研究[J]. 环境工程, 2012, 30(6): 52-54+59.
- [23] Zhang, J., Huang, X., Liu, C., *et al.* (2005) Nitrogen Removal Enhanced by Intermittent Operation in a Subsurface Wastewater Infiltration System. *Ecological Engineering*, **25**, 419-428. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.06.011>
- [24] Van, C.S., Siegrist, R., Logan, A., *et al.* (2001) Hydraulic and Purification Behaviors and Their Interactions during Wastewater Treatment in Soil Infiltration Systems. *Water Research*, **35**, 953-964. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00349-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00349-3)
- [25] Zhang, T.C. and Huang, Y.H. (2006) Effects of Surface-Bound Fe²⁺ on Nitrate Reduction and Transformation of Iron Oxide(s) in Zero-Valent Iron Systems at Near-Neutral pH. *Journal of Environmental Engineering*, **132**, 527-536. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2006\)132:5\(527\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2006)132:5(527))
- [26] Luanmanee, S., Boonsook, P., Attanandana, T., *et al.* (2002) Effect of Organic Components and Aeration Regimes on the Efficiency of a Multi-Soil-Layering System for Domestic Wastewater Treatment. *Soil Science and Plant Nutrition*, **48**, 125-134. <https://doi.org/10.1080/00380768.2002.10409182>
- [27] Pan, J., Fei, H., Song, S., *et al.* (2015) Effects of Intermittent Aeration on Pollutants Removal in Subsurface Wastewater Infiltration System. *Bioresource Technology*, **191**, 327-331. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.023>
- [28] Xin, W., Sun, T.H., Li, H.B., *et al.* (2010) Nitrogen Removal Enhanced by Shunt Distributing Wastewater in a Subsurface Wastewater Infiltration System. *Ecological Engineering*, **36**, 1433-1438. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.06.023>
- [29] Wanielista, M., Chang, N.B., *et al.* (2011) Nitrogen Transport and Transformation Beneath Stormwater Retention Basins in Karst Areas and Effectiveness of Stormwater Best Management Practices for Reducing Nitrate Leaching to Ground Water Marion County, Florida. <http://stormwater.ucf.edu/wp-content/uploads/2015/10/FinalReport.pdf>
- [30] 张建, 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): 41-43.
- [31] 聂俊英. 改良的地下渗滤系统处理污水及相关机理研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [32] 王鑫, 王士满, 王洪, 等. 多介质地下渗滤系统脱氮影响因素及强化措施[J]. 中国农学通报, 2015, 31(29): 136-140.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：aep@hanspub.org