

改良土壤渗滤系统处理高氨氮废水强化脱氮研究

吕晶晶^{1,2,3}, 窦艳艳¹, 张列宇³, 席北斗³, 于水利², 侯立安^{2,4}

(1. 中原工学院 能源与环境学院, 河南 郑州 450007; 2. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 3. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 4. 火箭军后勤科学技术研究所, 北京 100190)

摘要: 采用曝气预处理+深型土壤渗滤系统处理高氨氮废水,并考察其对脱氮过程的影响。 R_1 、 R_2 反应装置均采用滴滤的进水方式,配水在进入 R_2 之前通过曝气预处理进行强化脱氮。试验结果表明,当进水流量为4 L/d时, R_1 对COD、氨氮和TN的去除率分别为88.1%、99.6%和66.8%, R_2 的相应去除率分别为83.1%、98.0%和76.6%,可见 R_2 在去除TN方面具有明显的优势,这可能与曝气预处理能改善土壤渗滤系统的微生态环境和微生物群落组成有关。两反应器最终出水中硝酸盐氮的含量都较高,因此用土壤渗滤的方法处理高氨氮废水,存在浅层地下水受硝酸盐氮污染的风险。另外,通过化学计量学证明了两反应器脱氮过程中均存在厌氧氨氧化作用,其中 R_2 中厌氧氨氧化的脱氮贡献率达到35.2%以上。

关键词: 土壤渗滤; 生物脱氮; 高氨氮废水; 厌氧氨氧化

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)09-0066-05

Enhanced Nitrogen Removal of High Ammonia Nitrogen Wastewater by Improved Soil Infiltration System

LYU Jing-jing^{1,2,3}, DOU Yan-yan¹, ZHANG Lie-yu³, XI Bei-dou³, YU Shui-li²,
HOU Li-an^{2,4}

(1. School of Energy & Environment, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China; 4. Institute of Logistical Science and Technology of the Rocket Army, Beijing 100190, China)

Abstract: High ammonia nitrogen wastewater was treated by aeration pretreatment and deep soil infiltration system (SIS), and its influence on the nitrogen removal process was investigated. Feeding type of trickling was employed by the two pilot-scale reaction equipments R_1 and R_2 , and nitrogen removal was enhanced by pre-aeration before wastewater was fed into R_2 . The results showed that when the inlet flow was 4 L/d, the COD, ammonia nitrogen and TN removal efficiencies of R_1 could reach 88.1%, 99.6% and 66.8% respectively, and those of R_2 were 83.1%, 98.0% and 76.6% respectively. So, obvious advantage in the removal of TN was achieved by R_2 , which might be related to the improvement of soil infiltration system micro-ecological environment and microbial community composition by aeration

基金项目: 国家青年科学基金资助项目(58208485); 河南省高等学校重点科研项目(16A560026); 河南省高等学校供热空调重点学科开放实验室项目(2017HAC108); 中国纺织工业联合会科技指导性项目(2016039)

pretreatment. High effluent nitrate nitrogen concentrations were monitored in both reactors, which demonstrated that there was a risk of nitrate nitrogen pollution in shallow groundwater when high ammonia nitrogen wastewater was treated by soil infiltration system. Finally, it was proved that anaerobic ammonia oxidation occurred in the two reactors by chemometrics, and the nitrogen removal contribution rate of anaerobic ammonia oxidation reached more than 35.2% in R₂.

Key words: soil infiltration system (SIS); biological nitrogen removal; high ammonia nitrogen wastewater; anaerobic ammonia oxidation (ANAMMOX)

近年来,随着村镇居民生活水平的提高,畜禽养殖业不断向规模化/集约化方向发展,其中农村养猪废水、屠宰废水等都具有高氨氮的特点,因此对于村镇地区高氨氮废水的处理亟待解决^[1]。土壤渗滤是基于生态学原理,利用土壤-微生物-植物生态系统的自净功能和自我调控机制,通过一系列物理、化学、生物过程,使污水中有机物和氮、磷等营养元素得到去除,并集好氧、厌氧处理于一体的一种不影响表层土地使用的污水处理技术^[1~3],该技术是一种比较适合我国国情的分散式污水生态处理技术^[4]。污水土壤渗滤系统的界面环境复杂,其中氮的去除主要包括植物吸收、生物脱氮及氨氮挥发,并且生物脱氮起主要作用^[2,3]。笔者将土壤渗滤系统处理模拟高氨氮废水作为研究重点,深入解析脱氮机理,旨在为系统强化脱氮提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 反应装置

深型土壤渗滤系统处理装置如图 1 所示。

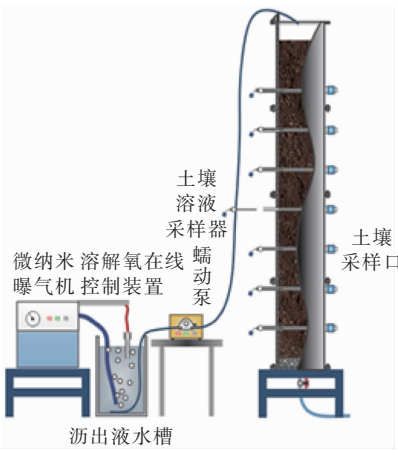


图 1 深型土壤渗滤系统处理装置示意

Fig.1 Schematic diagram of deep soil infiltration system

R₁ 和 R₂ 反应器均是由直径为 30 cm、高为 2.5 m、壁厚为 1 cm 的有机玻璃制作而成的反应柱,其中填充了 2 m 北京顺义地区某村的农田土壤,底部

是约为 15 cm 厚的砾石层,碎石直径为 1~3 cm。反应过程中由蠕动泵将污水从储水池提升至柱子顶部,通过滴滤的方式进入土壤,连续进水,进水流量为 4 L/d。R₁ 与 R₂ 反应器的不同之处在于,R₂ 在前端进水槽中设置了微纳米曝气预处理装置,而 R₁ 前端未设置该装置。

土壤分层装填,0~30、30~60、60~90、90~200 cm 的装填密度分别为 1.32、1.38、1.38 以及 1.46 g/cm³,D₁₀/D₆₀ 分别为 0.016/0.092、0.048/0.178、0.043/0.177、0.013/0.083 mm,有机质分别为 18.13、11.47、1.94、1.28 mg/g。

1.2 试验水质和方法

反应器于 2014 年 6 月 17 日—10 月 18 日进行调试,COD 去除率稳定在 30%~40%,TN 去除率稳定在 80%~85%。在 2014 年 10 月 19 日—12 月 10 日,反应器开始处理污水。本试验取样时间为 2014 年 12 月 31 日—2015 年 4 月 23 日,每 10 d 取样 1 次。通过土壤溶液采样器连接注射器进行负压抽吸采集水样。从上至下依次在 30、60、90、120、150、180 cm 处采集水样和泥样,水样存储于 50 mL 聚氯乙烯塑料小瓶中,在 4℃ 环境下冷藏保存,泥样存储于经过高温消毒的自封袋中,在 -20℃ 环境下冷藏保存。试验原水为人工配制的高氨氮废水,具体水质见表 1。

表 1 原水水质

Tab.1 Raw wastewater quality

项 目	平均值	最大值	最小值
pH 值	7.7	8.0	7.2
NH ₄ ⁺ - N/(mg · L ⁻¹)	131.1	225.5	13.0
NO ₂ ⁻ - N/(mg · L ⁻¹)	2.0	3.1	0
NO ₃ ⁻ - N/(mg · L ⁻¹)	4.4	7.2	0
COD/(mg · L ⁻¹)	202.8	826.4	16.1
COD/TN	1.11	2.36	0.07
温度/℃	17.6	26.0	7.6

COD、TN、TP、NH₄⁺ - N、NO₂⁻ - N 以及 NO₃⁻ - N

均按照《水和废水监测分析方法》(第4版)进行测定。

2 结果与讨论

2.1 COD和TN浓度的沿程变化

图2为COD和TN浓度的沿程变化。

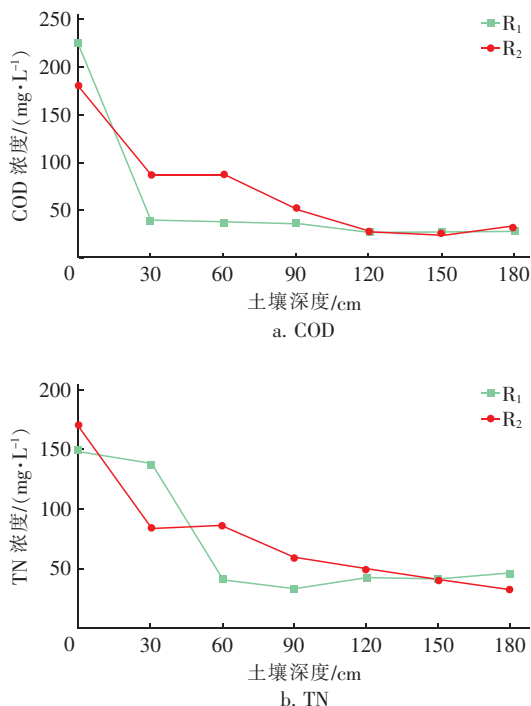


图2 COD和TN浓度的沿程变化

Fig. 2 Change of COD and TN concentrations along depth

由图2(a)可知, R_1 、 R_2 对COD的平均去除率分别为88.1%和83.1%,未曝气预处理的反应器在COD去除方面略占优势。 R_1 及 R_2 的出水COD分别为26.6和32.5 mg/L,达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准的要求。还可以看出, R_2 在30 cm处的COD去除率大于其他深度的。

由图2(b)可知, R_1 和 R_2 对TN的平均去除率分别为66.8%和76.6%,出水TN分别为49.8和29.6 mg/L。可见,在TN去除方面 R_2 具有明显的优势,并且与COD的去除类似, R_2 在30 cm处的TN去除率最大,之后随着深度的增加,TN去除率增加甚微。因此,后续试验在30 cm处取样分析。

图3为 R_2 反应器中COD浓度的变化情况。可见,在进水COD波动较大的情况下,系统始终保持了较高的COD去除率,最低去除率约为40%,表明反应系统对进水负荷具有一定的抗冲击能力。

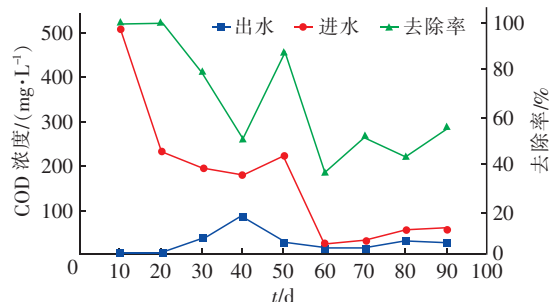


图3 R_2 反应器中COD浓度的变化

Fig. 3 Change of COD concentration in R_2

2.2 氮的沿程变化与分析

图4为 R_2 反应器中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的变化。

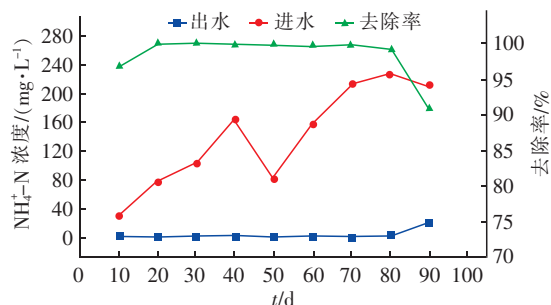


图4 R_2 反应器中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的变化

Fig. 4 Change of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration in R_2

由图4可知,在进水氨氮浓度波动较大的情况下, R_2 反应器出水氨氮始终低于20 mg/L,保持了较高的去除率,始终高于90%,并且大部分时间保持在99%以上。表明系统中存在大量的硝化和亚硝化细菌将氨氮氧化,并且这类细菌具备一定的抗冲击负荷能力,在进水氨氮浓度增加的情况下,仍然保持了较高的活性,使系统始终具有较高的氨氮去除率。

表2为 R_1 、 R_2 反应器中“三氮”的变化情况。

表2 “三氮”的平均浓度及其去除率

Tab. 2 Average concentrations and removal rates of ammonia nitrogen, nitrite nitrogen and nitrate nitrogen

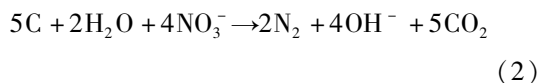
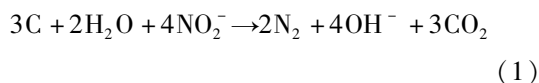
项 目	进水/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		30 cm处出水/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		最终出水/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		总去除 率/%	
	R_1	R_2	R_1	R_2	R_1	R_2	R_1	R_2
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	131.1	131.1	34.7	33.7	0.41	2.79	99.69	98.0
$\text{NO}_2^- - \text{N}$	2.0	2.0	21.3	12.8	0.15	6.55	—	—
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	4.4	4.4	81.8	39.3	52.59	20.26	—	—

由表2可知,两个反应系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率均较高,出水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度显著增加,高氨氮模拟废水对地下水潜在的污染由 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化

为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。并且出水中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的含量较高,说明系统中存在较多的亚硝化细菌。

2.3 脱氮机制分析

土壤渗滤系统中氮的去除主要有氨氮挥发、介质吸附、硝化-反硝化作用、厌氧氨氧化和全程氨氧化作用等^[5~8]。反应过程中进水 pH 值始终处于 7.0~8.5 之间,废水中的氨几乎都以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的形式存在,而且反应温度为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$,通过氨氮挥发途径除氮的可能性不大^[9]。对于土壤渗滤系统,吸附作用在启动初期对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 的去除发挥了重要作用。但随着装置的运行,系统内各类功能菌群的数量不断增加, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 的主要去除机制转变为生物作用^[5]。依据系统进出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度以及 pH 值的变化,推测土壤渗滤系统具有一定的异养反硝化脱氮或自养厌氧氨氧化脱氮作用。根据 R_2 第 40~50 天的运行数据,分析系统的脱氮机制。异养反硝化脱氮作用包括亚硝酸盐氮还原(短程反硝化)过程和硝酸盐氮还原(全程反硝化)过程,见式(1)、(2)^[6]。



通过反硝化作用每去除 1 g $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 需要消耗 2.86 g 易生物降解 COD,每去除 1 g $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 则需 1.71 g 易生物降解 COD。厌氧氨氧化菌在低氧条件下有自养反硝化的能力,此作用以氨氮为电子供体,亚硝酸盐氮为电子受体,最终生成 N_2O 或 N_2 。

在第 40~50 天的稳定运行中,生物量的变化可忽略不计,假设系统中的氮素均是通过异养反硝化和厌氧氨氧化途径去除的。根据系统进出水 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度变化,计算得到 R_2 对 COD 和 TN 的平均去除量分别为 0.811 和 0.731 g/d。全程反硝化要比短程反硝化需要更多的碳源^[8],由于系统在这 10 d 中不存在 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累,假设系统去除的 COD 全部用于短程反硝化,根据式(1)计算,短程反硝化的脱氮量为 0.474 g/d,系统通过厌氧氨氧化途径去除的氮至少为 0.257 g/d,占总去除量的 35.2%。考虑系统也会发生全程反硝化脱氮,因此系统通过异养反硝化作用的脱氮量

小于 0.474 g/d,而通过厌氧氨氧化途径的脱氮量则大于 0.257 g/d。尽管各种途径对系统脱氮的贡献率无法精确定量,但曝气预处理+深型土壤渗滤系统对高氨氮、低 C/N 值模拟废水的生物脱氮机制是明确的,即主要包括硝化-反硝化和厌氧氨氧化。

3 结论

① 曝气预处理+深型土壤渗滤系统处理模拟高氨氮废水比未加预处理的土壤渗滤系统在 TN 去除方面有明显优势。

② 两系统最终出水中较高的硝酸盐氮含量增加了浅层地下水受到污染的风险。

③ 化学计量学显示,脱氮过程中存在厌氧氨氧化作用,其中通过该过程去除的氮至少占氮总去除量的 35.2%。

参考文献:

- [1] 李海波,李英华,孙铁珩,等. 污水地下渗滤系统脱氮效果及动力学过程[J]. 生态学报,2011,31(24):7351-7356.
Li Haibo, Li Yinghua, Sun Tieheng, et al. Efficiency and kinetic process of nitrogen removal in a subsurface wastewater infiltration system (SWIS)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(24): 7351-7356 (in Chinese).
- [2] 李英华,孙铁珩,李海波,等. 地下渗滤系统脱氮的研究进展[J]. 河南师范大学学报:自然科学版,2009,37(4):87-91.
Li Yinghua, Sun Tieheng, Li Haibo, et al. Research progress in nitrogen removal effects of subsurface infiltration system[J]. Journal of Henan Normal University: Natural Science, 2009, 37(4): 87-91 (in Chinese).
- [3] 李英华,李海波,孙铁珩,等. 进水负荷对地下渗滤系统 ORP 及脱氮效果的影响[J]. 中国给水排水,2012,28(17):117-120.
Li Yinghua, Li Haibo, Sun Tieheng, et al. Effects of influent loadings on ORP and nitrogen removal efficiency in subsurface wastewater infiltration system[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(17): 117-120 (in Chinese).
- [4] 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.
Wang Zhen, Liu Chaoxiang, Dong Jian, et al. Effects of diffuent ratio on removal of nitrogen in the constructed s-

(下转第 74 页)