

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.11.003

DN/CN 强化脱氮技术在污水厂提标改造中的应用

王晓磊^{1,2,3}, 押玉荣^{1,2,3}, 吴江渤^{1,2,3}, 李曙光^{1,2,3}, 韩墨菲^{1,2,3}, 朱涛^{1,2,3},
安少锋^{1,2,3}

(1. 嘉诚环保工程有限公司, 河北 石家庄 050031; 2. 河北省污水治理与资源化技术创新中心, 河北 石家庄 050031; 3. 污水治理与水体修复工程研究中心, 河北 石家庄 050031)

摘要: 以某市城镇污水处理厂 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度较高的生化出水为研究对象, 采用反硝化生物滤池 + 曝气生物滤池 (DN/CN) 工艺, 研究了碳氮比 (C/N 值)、进水负荷、温度等对 TN 去除效果的影响。结果表明, 当增加的 C/N 值为 3.6、水力负荷 $\leq 9.44 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ [$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 最大负荷为 $4.8 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$] 时, 出水 TN 满足国标要求 ($\leq 10 \text{ mg/L}$); 去除单位质量 TN 需 3.7 倍 COD, 碳源不足会导致 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累和碳源单耗升高; $14 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的 TN 去除率较 $19 \text{ }^\circ\text{C}$ 时下降了约 15%; 反硝化过程中 pH 值增量和 TN 去除量存在一个对应关系, 可用于反硝化滤池处理效果的辅助判断。

关键词: 生物滤池; 强化脱氮; 碳氮比; 硝态氮

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)11-0015-06

Application of DN/CN Enhanced Nitrogen Removal Technology in Upgrading and Reconstruction of Wastewater Treatment Plant

WANG Xiao-lei^{1,2,3}, YA Yu-rong^{1,2,3}, WU Jiang-bo^{1,2,3}, LI Shu-guang^{1,2,3},
HAN Mo-fei^{1,2,3}, ZHU Tao^{1,2,3}, AN Shao-feng^{1,2,3}

(1. Jiacheng Environmental Protection Engineering Co. Ltd., Shijiazhuang 050031, China; 2. Wastewater Treatment and Resource Reusing Technology Innovation Center of Hebei Province, Shijiazhuang 050031, China; 3. Wastewater Treatment and Waterbody Remediation Engineering Research Center, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: The effluent contained high nitrate concentration of a bioreactor in a municipal wastewater treatment plant was treated by a process of denitrification and nitrification biofilters (DN/CN), the effects of carbon to nitrogen (C/N) ratio, influent load and temperature on total nitrogen removal were investigated. When C/N ratio increased by 3.6 and hydraulic load was no more than $9.44 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ [the maximum nitrate load was $4.8 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$], the effluent TN met the national standard requirements ($\leq 10 \text{ mg/L}$). Removing per unit mass TN required 3.7 times COD, and insufficient carbon source would lead to accumulation of nitrite and increase of carbon source per unit consumption. TN removal efficiency at $14 \text{ }^\circ\text{C}$ decreased by about 15% compared with that at $19 \text{ }^\circ\text{C}$. A corresponding relationship between pH increment and TN removal amount was developed, which could be used to assist in estimating the treatment efficiency of the denitrification filter.

Key words: biofilter; enhanced nitrogen removal; carbon to nitrogen ratio; nitrate

随着国家对水质排放要求的提高,北京、天津、河北、浙江等陆续出台地方城镇污水处理厂排放标准,上述标准中,部分水污染物排放指标严于国家一级A排放标准,如河北地标中核心控制区(雄安新区)要求TN排放限值为10 mg/L。基于各地政府对于水质改善的迫切需求,以及地方标准的出台,城镇污水处理厂的提标改造也提上了日程。

对于污水厂的主要污染指标,氮的去除仍以生物法为最佳^[1]。目前生物法主要有活性污泥法、深床滤池和反硝化生物滤池(DN)等。其中,深床滤池为下流式,对SS的去除效果好,但也存在N₂易积聚在滤料层内部、床层阻力增长快等问题^[2];普通活性污泥法在深度脱氮方面应用较少,主要原因是,其与DN池相比,需配备沉淀池,容积负荷和水力负荷小,水力停留时间长,所需基建投资大,运行费用高等^[3];而DN池克服了上述两种技术存在的部分不足,在深度脱氮方面逐渐受到重视。我国已经有多个污水处理厂采用DN/CN(曝气生物滤池)组合工艺作为一级生化处理技术,取得了较好的效果,出水

指标达到一级A或B标准^[1,3-4]。由于准IV类水质标准提出时间较短,所以研究实例较少,尤其是缺乏针对较高硝态氮负荷水质条件的研究。马秋莹等^[5]研究了硝化液回流比、水力负荷对DN池深度脱氮的影响,出水总氮浓度达到了5.02 mg/L,但是该研究的水力负荷范围偏小,而且未涉及C/N值和温度对TN去除的影响。王先涛等^[6]在C/N值为6.0的条件下,研究了水力负荷对DN池去除TN的影响,低负荷时出水总氮浓度达到了1.82 mg/L,但是未涉及C/N值和温度等关键指标,缺乏较完整的技术参数。基于此,笔者考察了C/N值、进水负荷、温度等因素对DN/CN组合工艺脱氮的影响,旨在为工程实践提供技术参数。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置及流程

河北某城镇污水处理厂,处理水量为 2×10^4 m³/d,其进水中生活污水和养殖废水占90%。DN/CN中试装置以该污水厂稳定池出水为原水,处理水量为0.25 m³/h,工艺流程见图1。

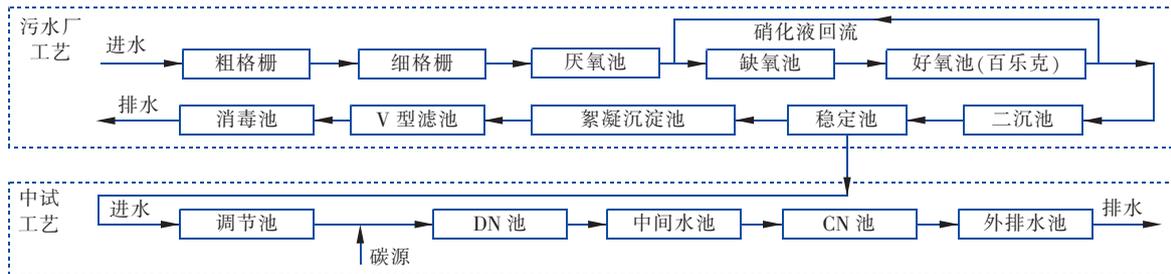


图1 污水厂及中试工艺流程

Fig. 1 Process flow chart of wastewater treatment plant and pilot test

试验装置材质均为不锈钢, DN池尺寸为300 mm×300 mm×2 250 mm,底部承托层填充鹅卵石,粒径为8~16 mm,高度为200 mm;填料层填充火山岩,粒径为3~6 mm,高度为1 050 mm。CN池尺寸为500 mm×500 mm×2 200 mm,底部为承托层(同DN池);填料层填充火山岩,粒径为3~6 mm,高度为680 mm。试验过程中, DN池水力停留时间为27.3 min,后期通过提高进水量缩短水力停留时间,从而提高水力负荷。

1.2 进水水质及分析方法

中试装置设计进水COD、NH₄⁺-N、TN分别为20~70、0.5~4、20~40 mg/L, pH值为6.5~7.5;设计出水COD、NH₄⁺-N、TN分别为30、1.5、10 mg/L,

pH值为6~9。

TN采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定, COD采用重铬酸钾快速消解法测定, NH₄⁺-N采用纳氏试剂分光光度法测定, NO₃⁻-N采用紫外分光光度法测定, NO₂⁻-N采用氨基苯磺酸和N-(1-萘基)-乙二胺二盐酸盐显色-紫外分光光度法测定, pH值采用梅特勒EL20K pH计测定。

1.3 试验方法

试验时间为2018年5月—12月,水温为14~21℃,经污水厂生化处理后,稳定池出水NO₃⁻-N占比一般在80%以上,故深度脱氮以去除NO₃⁻-N为主。DN池后配置CN池的目的是保证进水COD波动或碳源投加过量时,不会造成出水COD超标。

本试验考察了进水 C/N 值、水力负荷、水温等对污染物去除效果的影响。因水中存在少量难降解 COD,易降解组分已经在一、二级生化工段中基本降解去除,所以对于尾水深度处理考虑 TN 去除时需额外投加碳源,以增加 C/N 值($\Delta C/N$ 值)代表总 C/N 值更符合实际状况。反硝化碳源采用工业级乙酸钠,无硝化液回流。反洗方式为气洗→气水混合洗→水洗,反洗周期为 12~72 h,并根据水头损失实时调整。

2 结果与讨论

2.1 C/N 值对去除 TN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的影响

在 DN 池 HRT 为 27.3 min、DO < 0.2 mg/L 时,通过进口连续投加不同浓度的乙酸钠溶液,考察了 $\Delta C/N$ 值和 TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除率的关系,结果如图 2 所示。

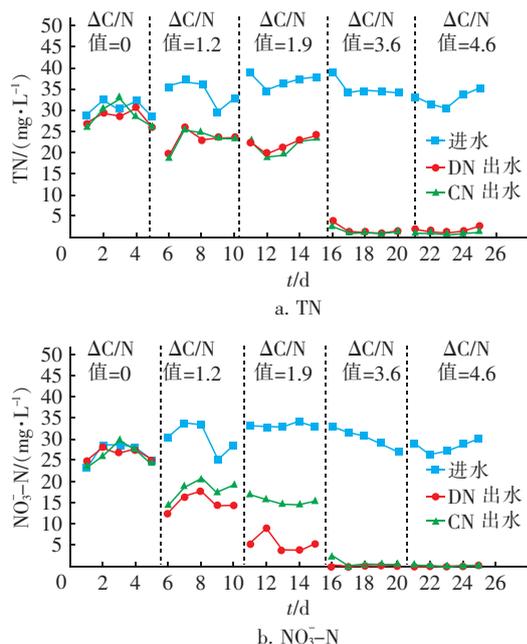


图 2 $\Delta C/N$ 值对 TN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除效果的影响

Fig. 2 Influence of $\Delta C/N$ ratio on TN and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ removal efficiency

从图 2 可以看出,在不额外投加碳源的情况下, TN 去除率约为零,说明单纯依靠污水厂尾水中现有的 COD 难以降解 TN,也进一步说明以 $\Delta C/N$ 值代表总 C/N 值更符合污水深度处理情况。随着 $\Delta C/N$ 值的升高, TN 去除率逐渐增大,当 $\Delta C/N$ 值 ≤ 1.9 时,出水 TN 在 18~33 mg/L 之间,不达标;当 $\Delta C/N$ 值 ≥ 3.6 时, CN 池出水 TN 在 0.6~3 mg/L 之间, DN 池对 TN 的去除率 > 90%,满足排放标准。因

此,在此负荷条件 [$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 负荷为 $2 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$] 下,若要满足出水 TN 浓度低于 5 mg/L, $\Delta C/N$ 值应不低于 3.6。

$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 进、出水曲线与 TN 相似。在碳源不足的情况下,存在 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累,在 $\Delta C/N$ 值为 1.9 时最为明显,经过 DN 池处理后 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 下降明显,再经 CN 池曝气反应后, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量又大幅升高,这是因为在缺氧条件下,异养反硝化是以有机碳源为电子供体及营养源,碳源不足会造成缺乏电子供体,最终影响反硝化程度,此外 1 g 的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 还原为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 只需消耗 1.15 g 的 COD,而完全还原为 N_2 则需 2.86 g 的 COD^[1],所以碳源不足对前者影响较小,易造成 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累,同时 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的质子化产物——游离亚硝酸(FNA)对反硝化细菌等微生物的增殖与产能具有抑制作用^[7],积累的 FNA 又反过来抑制反硝化进程。

2.2 COD 去除效果及 COD 单耗

投加碳源是为了满足反硝化进水所需的 C/N 值,但是也要保证装置出水 COD 浓度不超过排放标准,所以试验分析了不同 $\Delta C/N$ 值阶段 COD 浓度及碳源消耗,结果如图 3 所示。

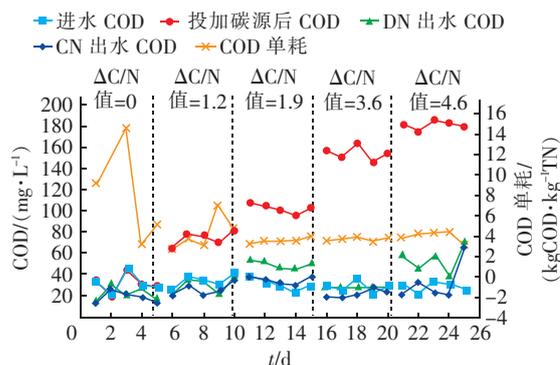


图 3 不同 $\Delta C/N$ 值条件下 COD 去除效果及 COD 单耗

Fig. 3 COD removal efficiency and consumption under different $\Delta C/N$ ratio

从图 3 可以看出,随着 $\Delta C/N$ 值的提高, DN 池出水 COD 浓度出现较多大于 30 mg/L 的情况,但是 CN 池出水 COD 浓度基本都能够满足准 IV 类水质标准 ($\leq 30 \text{ mg/L}$)。所以对于反硝化滤池,其后应该配置 CN 池,以保证碳源投加过量或进水 COD 浓度波动时,总出水 COD 浓度达标;后置 CN 池也可以在进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度升高时,适时开启硝化液回流,提高系统的稳定性。

计算去除单位质量 TN 消耗的 COD 量(简称

COD 单耗), 可以为反硝化碳源的投加量计算提供参考。因 BOD₅ 检测比 COD 检测繁琐且耗时长, 所以工程中多采用 COD/N 值代表 BOD₅/N 值。当 ΔC/N 值 ≤ 1.2 时, COD 单耗有一定的波动且平均值 > 4 kgCOD/kgTN, 明显高于碳源较充足时, 这可能是因为碳源不足的情况下, 部分 NO₃⁻-N 转化为 NO₂⁻-N 后未进一步转化为 N₂, 导致 NO₂⁻-N 积累, 造成碳源消耗升高; 碳源充足时, 本试验 COD/N 值在 3.7 左右, 略低于《生物滤池法污水处理工程技术规范》(HJ 2014—2012) 中“反硝化滤池进水 BOD₅/N 值不小于 4.0”的指标。

2.3 反硝化 pH 值的变化

反硝化效果的判断通常需要检测出水 TN 指标, 而 TN 检测需要高温消解等预处理, 总检测时长为 2~3 h, 此外也需要专用检测仪器和药剂。本试验也在积极探索能否找到一种辅助判断 TN 去除效果的方法, 试验中发现 TN 去除率和 pH 值增加量存在一定关系, 如图 4 所示。

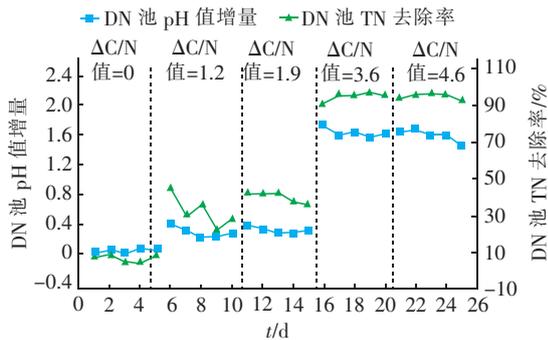


图 4 TN 去除率与 pH 值的关系

Fig. 4 Relationship between TN removal rate and pH in DN reactor

DN 池进水 pH 值约为 7.1, DN 池出水 pH 值增量会随着 TN 去除率的升高而逐渐增大, 碳源充足时, DN 池的 pH 值增量约为 1.6 左右。pH 值升高的原因可能是: 反硝化细菌每利用 1 g 的 NO₃⁻-N, 会产生 3.57 g 碱度, 升高的碱度提高了 pH 值^[8-9]。

本试验条件下, 碳源较充足时 pH 值增量和 TN 去除量也存在一个对应关系:

$$\Delta Q_{TN} = 20.1 \times \Delta[-\lg c(H^+)] = 20.1 \times \Delta pH \quad (1)$$

式中: ΔQ_{TN} 为 TN 去除量, mg/L; ΔpH 值为 DN 池 pH 值增量; c(H⁺) 为污水中 H⁺ 浓度, mol/L; Δ[-lgc(H⁺)] 约等于 ΔpH 值; 20.1 为倍数, 可能

因水质不同倍数关系也会有所不同。

因 pH 值检测简单、快捷、成本低, 污水厂实际运行中, 可用 DN 池 pH 值增量作为反硝化滤池去除效果的辅助判断。

2.4 水力负荷对 TN 去除效果的影响

为了提高滤池的利用率和确定滤池最大运行负荷, 分别考察了水力负荷为 2.78、5.00、7.22、9.44 m³/(m²·h) 时对 TN、COD 去除率的影响。根据上一阶段试验, 选择 ΔC/N 值为 3.6 进行不同水力负荷试验, 结果见图 5。

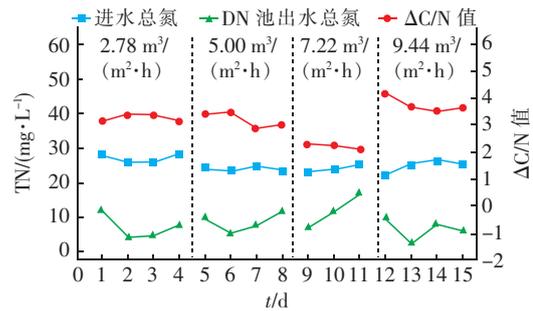


图 5 水力负荷对 TN 去除效果的影响

Fig. 5 Influence of hydraulic load on TN removal

本阶段因装置进水 TN 浓度的波动, ΔC/N 值也存在一定的波动。当水力负荷 ≤ 7.22 m³/(m²·h) 时, ΔC/N 值较长时间低于 3.5, 甚至低于 3, 污水中碳源浓度稍显不足, 所以 DN 池出水 TN 浓度也稍高。当水力负荷为 9.44 m³/(m²·h) 时上调了碳源投加量, ΔC/N 值多处于 3.5~4 之间, 出水 TN 浓度在 2.5~9.7 mg/L 之间, 满足准 IV 类水质标准, 此时 NO₃⁻-N 最大负荷为 4.8 kg/(m³·d), 高于《生物滤池法污水处理工程技术规范》(HJ 2014—2012) 的 1.5~3 kg/(m³·d); 停留时间为 12.07 min, 低于上述设计规范的 20~30 min。

随着进水负荷的增加, TN 去除率保持在 70% 左右, 无太大变化, 但是进水负荷增大后, 填料层阻力增长迅速, 反洗周期从最初的 24~48 h 下降到 12 h, 成为进水负荷进一步增大的制约因素。

2.5 水力负荷对 COD 去除效果的影响

进水量提高后, 因填料负荷增大、停留时间变短, 可能存在 COD 未完全反应就被排出装置的情况。所以本试验也关注了不同负荷阶段中试装置对 COD 的去除效果, 如图 6 所示。可以看出, 不同进水负荷阶段, 进水 COD 浓度多处于 20~30 mg/L, 偶有超过 30 mg/L 的现象。随着水力负荷的增大,

DN 出水 COD > 30 mg/L 的情况逐渐增多。经过 CN 池处理后,出水 COD 浓度基本达到准IV类水质要求 (≤ 30 mg/L),凸显了 CN 池的保障作用。

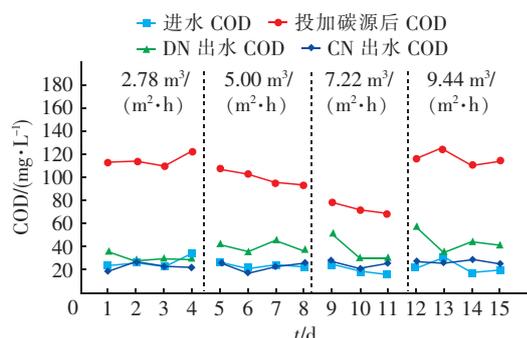


图6 水力负荷对 COD 去除效果的影响

Fig. 6 Influence of hydraulic load on COD removal

就负荷考察阶段而言,出水 COD、TN 值基本都能满足准IV类水质排放标准,考虑反洗周期不能低于 12 h,所以就本试验的反硝化滤池,进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 负荷应不超过 $4.8 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 、水力负荷应不超过 $9.44 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

2.6 水温对 TN 去除效果的影响

周敬东等^[10]的研究表明,冬季反硝化深床滤池运行时,TN 去除率偏低,为 15% ~ 40%,反硝化功能较弱。为了验证冬季运行效果,在进水量为 $0.25 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $\Delta\text{C}/\text{N}$ 值为 3.6 的条件下,对中试装置的秋季和冬季低温运行效果进行了对比。结果表明,14 °C 时,总氮由 25 mg/L 下降至 5 mg/L,总氮去除率约为 80%,与蒋柱武等^[11]的研究结果相近;19 °C 时 DN 池对 TN 的去除率约为 95%。14 °C 时 DN 池出水 TN 在 4.4 ~ 7.5 mg/L,虽满足 $\text{TN} \leq 10 \text{ mg/L}$ 的排放标准,但在工程设计中,冬季低温条件要考虑 TN 安全系数应有 15% 左右,以保证 TN 达标。

3 经济分析

电耗计算:按照最大进水量为 $0.85 \text{ m}^3/\text{h}$ 、反洗周期为 24 h、电费为 $0.75 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 计算,考虑反洗水泵和风机、CN 池曝气风机,单位电耗约为 $0.15 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,电费为 $0.11 \text{ 元}/\text{m}^3$,因为中试耗电设备选型偏大,且不具备变频功能,可能会造成电耗略高于实际工程应用。

碳源计算:碳源采用工程中常用的工业级三水合乙酸钠(约 4 000 元/t),纯度约为 99%,经检测,其 COD 当量为 0.45。本试验中,总氮从 35 mg/L 降至 5 mg/L,按照去除单位质量 TN 消耗约 3.7 倍

COD 计算,碳源成本为 $0.96 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。针对该污水厂提标改造,如出水总氮要求低于 10 mg/L,则可采取水量分流或分池体投加。若按照总氮从一级 A 的 15 mg/L 再降到准IV类水的 10 mg/L,则碳源成本仅增加 $0.16 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

本试验中总运行费用为 $1.07 \text{ 元}/\text{m}^3$,如总氮再从一级 A 降到准IV类水总运行费用仅增加 $0.27 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

4 结论与建议

① DN/CN 组合工艺是实现污水强化脱氮的有效手段,通过补充碳源,出水 TN 可以满足准IV类水质标准 ($\leq 10 \text{ mg/L}$)。考虑到反洗周期,反硝化滤池的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 负荷应不超过 $4.8 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,水力负荷应不超过 $9.44 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

② 去除单位质量的 TN,需要消耗约 3.7 倍左右的 COD。为节省碳源,对于只需去除部分 TN 即可达标的情况,建议采取水量分流或分池体投加。

③ 14 °C 较 19 °C 时 TN 去除率下降了约 15%,工程设计中,冬季低温条件下应考虑 TN 安全系数。

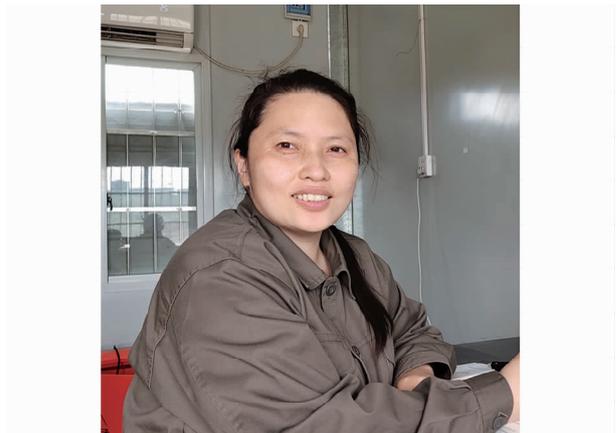
④ DN 池中 TN 去除量和 pH 值增加量存在一个对应关系,pH 值可用于 DN 池反硝化效果的辅助判断。

⑤ 考虑反洗水泵和风机、曝气风机电耗及碳源消耗,总氮从一级 A 标准降到准IV类水质标准,运行费用仅增加 $0.27 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

参考文献:

- [1] 刘金瀚,白宇,林海,等. 反硝化生物滤池用于污水深度脱氮研究[J]. 中国给水排水,2008,24(21):26-29.
Liu Jinhan, Bai Yu, Lin Hai, et al. Study on denitrifying biofilter for advanced wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24 (21): 26 - 29 (in Chinese)
- [2] 葛玫,许新灵. 污水处理厂反硝化深床滤池的比较与应用[J]. 浙江化工,2017,48(6):36-38.
Ge Mei, Xu Xinling. Comparison and application of denitrification deep-bed filter in sewage treatment plant [J]. Zhejiang Chemical Industry, 2017, 48 (6): 36 - 38 (in Chinese).
- [3] 周永刚. 反硝化生物滤池在污水厂升级改造中的应用[J]. 中国给水排水,2014,30(24):49-52.

- Zhou Yonggang. Application of denitrification biofilter in upgrading of sewage treatment plants[J]. *China Water & Wastewater*,2014,30(24):49-52(in Chinese).
- [4] 徐姮,陆少鸣,李嘉树,等. 前置+后置反硝化滤池强化脱氮效果研究[J]. *水处理技术*,2018,44(5):84-87,102.
- Xu Heng, Lu Shaoming, Li Jiashu, *et al.* Study on nitrogen removal effect of pre and post denitrification filter[J]. *Technology of Water Treatment*,2018,44(5):84-87,102(in Chinese).
- [5] 马秋莹,李东,封莉,等. 前置反硝化生物滤池深度脱氮效能与影响因素[J]. *环境工程学报*,2017,17(9):4932-4936.
- Ma Qiuying, Li Dong, Feng Li, *et al.* Nitrogen removal efficiency and influencing factors in a pre-denitrification biofilter system [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*,2017,17(9):4932-4936(in Chinese).
- [6] 王先涛,李易,黄韬,等. 水力负荷对反硝化滤池深度脱氮效能的影响[J]. *中国给水排水*,2016,32(21):12-16.
- Wang Xiantao, Li Yi, Huang Tao, *et al.* Effect of hydraulic loading on advanced nitrogen removal in denitrification biofilter[J]. *China Water & Wastewater*,2016,32(21):12-16(in Chinese).
- [7] 李璐,马娟,宋相蕊. FNA在污水生物脱氮除磷中的抑制效应[J]. *工业水处理*,2014,34(6):5-9.
- Li Lu, Ma Juan, Song Xiangrui. Inhibitory effect of free nitrous acid (FNA) on wastewater biological denitrification and dephosphorization [J]. *Industrial Water Treatment*,2014,34(6):5-9(in Chinese).
- [8] 朱海兴. 短程硝化反硝化微生物技术处理催化剂含氮废水的研究[D]. 上海:华东理工大学,2011.
- Zhu Haixing. Study on the Treatment of Ammonia-containing Wastewater with Short-term Nitrification/Denitrification Microbial Technology [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2011 (in Chinese).
- [9] Park N B, Lee H Y, Kim S M, *et al.* Nitrification and denitrification of land-based fish farm wastewater using an anaerobic-aerobic upflow biological aerated filter[J]. *Original Article*,2014,47(5):622-629.
- [10] 周敬东,李新凯,张晓燕,等. 反硝化深床滤池冬季脱氮运行的应用探讨[J]. *中国给水排水*,2017,33(6):106-108.
- Zhou Jingdong, Li Xinkai, Zhang Xiaoyan, *et al.* Winter performance of deep-bed denitrification filter for nitrogen removal[J]. *China Water & Wastewater*,2017,33(6):106-108(in Chinese).
- [11] 蒋柱武,张仲航,陈礼洪,等. 反硝化生物膜滤池脱氮影响因素分析[J]. *中国给水排水*,2019,35(7):101-106.
- Jiang Zhuwu, Zhang Zhonghang, Chen Lihong, *et al.* Analysis of influencing factors of nitrogen removal in a denitrification biological filter [J]. *China Water & Wastewater*,2019,35(7):101-106(in Chinese).



作者简介:王晓磊(1984-),女,河北邢台人,硕士,高级工程师,主要从事水污染治理与防治技术研发工作。

E-mail:jchbyf@126.com

收稿日期:2019-12-14