

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.09.003

厌氧氨氧化滤池的深度脱氮性能与菌群结构分析

委 燕¹, 马 斌², 许鑫鑫³, 彭 轶⁴

(1. 海南大学 南海海洋资源利用国家重点实验室, 海南 海口 570228; 2. 海南大学 海南省农林环境过程与生态调控重点实验室, 海南 海口 570228; 3. 北京工业大学 城镇污水深度处理与资源化利用国家工程实验室, 北京 100124; 4. 国投信开水环境投资有限公司, 北京 101101)

摘 要: 为了降低城市污水处理厂深度脱氮过程中有机碳源的消耗量,提出了短程反硝化/厌氧氨氧化双滤池系统,并通过试验考察了厌氧氨氧化滤池的脱氮性能及菌群结构。结果表明,厌氧氨氧化滤池在进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 平均浓度分别为 9.9、9.1 mg/L 条件下,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 平均浓度分别为 2.5、9.5 mg/L,达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准,对应的滤池 HRT 为 15 min,容积氮去除速率为 $1.0 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。滤池中的厌氧氨氧化菌属为 *Candidatus Kuenenia* 和 *Candidatus Brocadia*,相对丰度分别为 4.33% 和 2.70%。与传统反硝化滤池相比,短程反硝化/厌氧氨氧化双滤池系统可节省有机碳源 62%,同时可降低污泥产量,减少滤池反冲洗次数。

关键词: 厌氧氨氧化; 短程反硝化; 滤池; 深度脱氮; 有机碳源

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)09-0015-06

Advanced Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Composition of Anammox Biofilter

WEI Yan¹, MA Bin², XU Xin-xin³, PENG Yi⁴

(1. State Key Laboratory of Marine Resource Utilization in South China Sea, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. Key Laboratory of Agro-Forestry Environmental Processes and Ecological Regulation of Hainan Province, Hainan University, Haikou 570228, China; 3. National Engineering Laboratory for Advanced Municipal Wastewater Treatment and Reuse Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 4. SDIC Xinkai Water Environment Investment Co. Ltd., Beijing 101101, China)

Abstract: In order to reduce organic carbon source consumption in advanced denitrification processes, a partial denitrification and anaerobic ammonium oxidation (Anammox) double biofilter system was proposed, and the nitrogen removal performance and microbial community composition of the Anammox biofilter were investigated. When the average concentrations of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_2^- - \text{N}$ in influent of the Anammox biofilter were 9.9 mg/L and 9.1 mg/L, the concentrations of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN in the effluent were 2.5 mg/L and 9.5 mg/L, respectively, which met the first level A criteria specified in Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant (GB 18918-2002). HRT

基金项目: 海南省重点研发计划项目(ZDYF2018241); 国家自然科学基金资助项目(51868015); 海南省基础与应用基础研究计划(自然科学领域)高层次人才项目(2019RC017)

通信作者: 马斌 E-mail: mady7802@163.com

of the biofilter was 15 min, and the volumetric nitrogen removal rate was $1.0 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$. The Anammox bacteria in the biofilter belonged to *Candidatus Kuenenia* and *Candidatus Brocadia* with relative abundances of 4.33% and 2.70%, respectively. Compared with traditional denitrification biofilter, the partial denitrification and Anammox double biofilter system could save 62% of organic carbon source and reduce sludge production and backwash time.

Key words: Anammox; partial denitrification; biofilter; advanced nitrogen removal; organic carbon source

随着我国经济的发展,国家对水环境质量要求越来越高,因此普遍要求新建或改造城镇污水处理厂的出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准^[1-2]。针对原有污水处理厂二级出水 TN 不能满足一级 A 标准的情况,对其进行升级改造一般采用反硝化滤池,外加有机碳源实现反硝化脱氮^[1,3]。反冲洗和投加有机碳源是反硝化滤池运行的两个重要步骤,反冲洗周期一般为 9~48 h^[1,4-5];而有机碳源投加量直接影响反硝化滤池的出水水质,若有机碳源投加量少,如 $\text{COD}/\text{NO}_3^- - \text{N} < 3.65$ 时就会出现 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累, TN 去除率降低^[6]。有机碳源投加产生的药剂费可占反硝化滤池运行费用的 60%^[1],因此降低脱氮过程中有机碳源的消耗量对于降低污水处理厂运行成本具有重要意义。

Cui 等^[7]研究发现,通过改变反硝化滤池的滤速可实现短程反硝化,即将水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 还原为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$,而不继续还原为氮气,从而实现出水中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累;而且该研究得出短程反硝化滤池可降低微生物生长速率、减少反冲洗周期,反冲洗周期为 4~7 d,显著高于传统反硝化滤池的 9~48 h^[1,4-5],且水力停留时间(HRT)低于 20 min,氮去除效率较高^[7]。若使上述短程反硝化出水进入厌氧氨氧化(Anammox)滤池,积累的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 与原水中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 发生厌氧氨氧化反应生成氮气,则可实现氮的脱除。Du 等^[8]研究发现短程反硝化过程由于以 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 代替 N_2 作为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的终产物,一方面可提高氮去除率和节约反应器容积,另一方面可降低有机碳源消耗量,进而降低剩余污泥产量,而且短程反硝化可在较大的温度范围内(14.8~28.2℃)保持稳定运行^[9]。此外, Li 等^[10]研究发现西安第四污水处理厂缺氧区发生了短程反硝化厌氧氨氧化,且至少持续了两年多时间,该污水厂缺氧区有生物填料,形成了生物膜,反硝化有利于 pH 值的

升高,高 pH 值有利于 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累,进水 C/N 值为 1.2~7.9,大部分时间 C/N 值处于相对较低的水平,出水总无机氮(TIN)低至 7.6 mg/L ^[10-11]。短程反硝化过程中,较短的 HRT 可以避免 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 过度还原为 N_2 ,当 HRT 由 5 h 降为 1 h 时, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率可由 18% 上升到 87%^[12]。

综上,短程反硝化滤池+厌氧氨氧化滤池的双滤池系统,有望实现二级出水深度脱氮,使出水 TN 浓度达到一级 A 标准。与传统反硝化滤池相比,短程反硝化/厌氧氨氧化双滤池系统可节省有机碳源,降低污泥产量,减少反冲洗频率^[13],减少曝气量和温室气体氧化亚氮(N_2O)的产生^[14-15]。为此,在 Cui 等^[7]证明短程反硝化生物滤池可行的基础上,笔者研究了厌氧氨氧化生物滤池的脱氮性能及微生物菌群特性,以期短程反硝化/厌氧氨氧化双滤池系统应用于城市污水深度脱氮提供技术支撑。

1 试验材料与方法

1.1 厌氧氨氧化滤池及运行方法

厌氧氨氧化滤池采用有机玻璃制作,内径为 5 cm,有效容积为 2 L。滤池底部为承托层(高 5 cm),中间为 50 cm 陶粒滤料层,体积为 1 L。整个厌氧氨氧化滤池外壁用锡箔纸包裹,避免光照造成滤池内壁生长藻类,因为藻类产氧会抑制厌氧氨氧化菌生长。厌氧氨氧化滤池底部进水管位置装有压力表,当压力超过 0.02 MPa 时,采用反冲洗水泵进行反冲洗。研究分为 3 个阶段,第 1 阶段为滤池的启动阶段(1~30 d);第 2 阶段为滤池的进水负荷增长阶段(30~65 d);第 3 阶段为滤池的稳定运行阶段(65~106 d)。整个研究过程在室温条件下进行,未设置温度调控装置。

1.2 接种污泥及进水水质

厌氧氨氧化滤池的接种污泥为实验室培养的厌氧氨氧化生物膜经挤压揉搓后产生的厌氧氨氧化污泥。接种污泥的 MLSS 为 1.68 g/L 、体积为 1 L。采

用人工配水模拟城市污水厂二沉池出水经短程反硝化滤池处理后的出水,其水质指标如表1所示。

表1 模拟污水水质

Tab.1 Quality of synthetic wastewater

项 目	$\text{NH}_4^+ - \text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{NO}_2^- - \text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{TN}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{DO}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	温度/ $^{\circ}\text{C}$
阶段1	8.6 ± 1.5	9.7 ± 0.6	19.0 ± 1.8	5.5 ± 0.9	29.8 ± 0.8
阶段2	10.4 ± 0.9	9.3 ± 0.8	20.7 ± 1.8	5.4 ± 1.0	30.1 ± 1.0
阶段3	9.9 ± 2.0	9.1 ± 0.6	19.8 ± 2.0	5.1 ± 1.0	29.2 ± 0.8

1.3 分析项目与方法

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 分别采用纳氏试剂分光光度法、 $\text{N} - (1 - \text{萘基}) - \text{乙二胺}$ 比色法、麝香草酚分光光度法测定; DO 、 pH 值和温度采用德国 WTW pH/oxi340i 多参数水质分析仪测定; MLSS 采用滤纸称重法测定。在第 106 天从厌氧氨氧化滤池的上、中、下位置各取 50 mL 带生物膜的滤料,然后将上述滤料混合,再剧烈振荡使生物膜脱落,用脱落的生物膜提取 DNA,采用引物 338F (5' - ACTCCTACGGGAGGCAGCAG - 3') 和 806R (5' - GGACTACHVGGGTWCTAAT - 3'),对细菌 16S rRNA 的 V3 - V4 区域进行扩增,采用高通量测序分析生物膜的菌群结构^[13]。

2 结果与讨论

2.1 厌氧氨氧化滤池的脱氮效果

厌氧氨氧化滤池进出水的氮浓度变化如图1所示。滤池启动之前接种厌氧氨氧化污泥,开始运行的第1天滤池出水氮浓度较高。随着滤池的运行,厌氧氨氧化菌逐渐适应了滤池的运行环境条件,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度逐渐降低。运行至启动阶段后期的第30天,在进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度分别为 10.3、9.4 和 1.8 mg/L 的条件下,厌氧氨氧化滤池出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度分别降至 0.1、1.2 mg/L,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度升至 6.4 mg/L,出水 TN 浓度为 7.7 mg/L,达到了一级 A 排放标准。在第2阶段,为了在滤池中富集更多的厌氧氨氧化菌,通过提高进水流量来提高滤池的氮负荷,在此过程中,出水 TN 浓度最高为 12.7 mg/L、平均为 9.7 mg/L,滤池保持了较好的脱氮效果。在第3阶段,进水流量保持不变,进水平均温度由第2阶段的 30.1 $^{\circ}\text{C}$ 降至 29.2 $^{\circ}\text{C}$,出水 TN 浓度最高为 12.7 mg/L、平均为 9.5 mg/L,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度最高为 5.2 mg/L、平均为 2.5 mg/L,仍满足一级 A 排放标准。综上所述,厌氧氨氧化滤池用于处理 TN 平均浓度为 20 mg/L 的进水时,出水 TN 浓度能

稳定达到一级 A 排放标准,其平均值低于 10 mg/L。如果想要达到某些水环境敏感区域(如太湖流域一、二级保护区)更严格的 TN 排放标准(TN < 10 mg/L)^[16],可通过延长厌氧氨氧化滤池的水力停留时间来实现,因为本研究中滤池出水一般同时存在 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$,为继续厌氧氨氧化脱氮提供了基础。

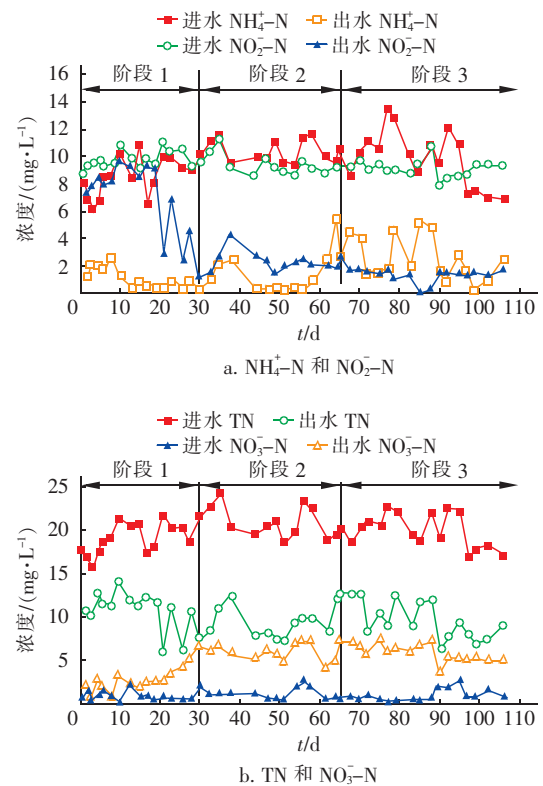


图1 厌氧氨氧化滤池的进出水氮浓度

Fig.1 Nitrogen concentrations in influent and effluent of Anammox biofilter

2.2 厌氧氨氧化滤池的容积氮去除速率

容积氮去除速率(NRR)可表征滤池脱氮效率,NRR越大,说明滤池脱氮效率越高。厌氧氨氧化滤池的进水氮负荷和容积氮去除速率见图2,HRT与进水流量见图3。厌氧氨氧化滤池启动阶段,NRR由 0.11 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 提高到 0.33 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。第

2 阶段进水流量由 1.0 L/h 提高到 4.3 L/h, 对应的 HRT 由 60 min 降低至 14 min, NRR 最大值增加到 1.1 kg/(m³ · d), 滤池脱氮效率提高了 3 倍。第 3 阶段, 进水流量保持不变, NRR 相对稳定, 平均值为 1.0 kg/(m³ · d), 对应的 HRT 为 15 min。方月英等^[16]研究表明中试反硝化生物滤池在 HRT 为 15 min 时, NRR 约为 0.8 kg/(m³ · d); 而商佳吉等^[1]对反硝化滤池实际工程启动阶段的研究表明, 在 HRT 约为 60 min 时, NRR 约为 0.05 kg/(m³ · d)。可以看出, 与传统反硝化滤池相比, 厌氧氨氧化滤池的 NRR 相对较高^[1,16]。在处理效率相当的情况下, 厌氧氨氧化滤池更大的优势在于无需投加有机碳源, 从而可有效降低脱氮过程的药剂投加费用^[17]。

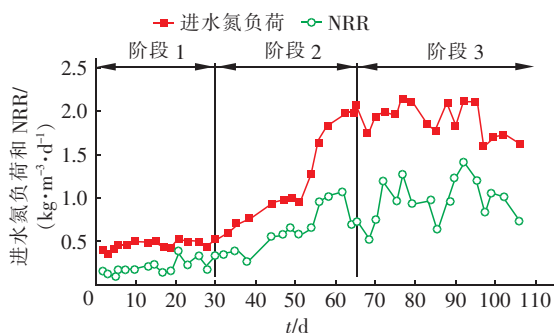


图2 厌氧氨氧化滤池的进水氮负荷和容积氮去除速率

Fig. 2 Influent nitrogen load rate and volumetric nitrogen removal rate of Anammox biofilter

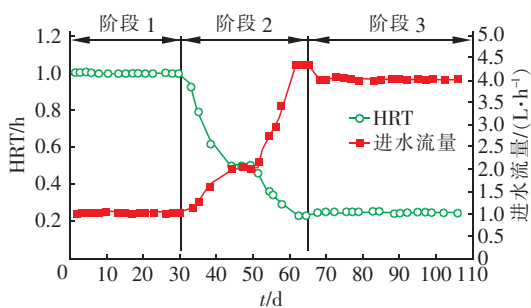


图3 厌氧氨氧化滤池的 HRT 与进水流量

Fig. 3 HRT and influent flow rate of Anammox biofilter

2.3 厌氧氨氧化滤池的生物膜菌群结构

厌氧氨氧化滤池接种污泥中的厌氧氨氧化菌属为 *Candidatus Kuenenia*, 其相对丰度为 25.04%; 未检测到 *Candidatus Brocadia*。 *Candidatus Kuenenia* 为典型的厌氧氨氧化菌, 普遍存在于污水处理系统中, 尤其是进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度较高的系统^[18-19]。本研究中厌氧氨氧化滤池进水为低浓度污水, 形成的生物膜中厌氧氨氧化菌属主要有

Candidatus Kuenenia 和 *Candidatus Brocadia*, 相对丰度分别为 4.33% 和 2.70% (如图 4 所示)。与接种污泥相比, 滤池生物膜中的厌氧氨氧化菌总体相对含量降低, 而 *Candidatus Brocadia* 含量增加, 主要原因可能是接种污泥来自于处理高浓度污水的生物膜反应器, 而本滤池进水底物浓度较低, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 平均浓度分别为 9.6、9.3 mg/L。低浓度污水处理系统中的优势厌氧氨氧化菌属一般为 *Candidatus Brocadia*^[13,20]。Ma 等^[13]研究发现, 在进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 20 mg/L 的短程反硝化厌氧氨氧化生物滤池中, 填料生物膜的优势厌氧氨氧化菌为 *Candidatus Brocadia*, 其相对丰度为 2.97%; Du 等^[21]研究表明, 在进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 57.8 mg/L 的短程反硝化厌氧氨氧化 SBR 污泥中, 优势厌氧氨氧化菌也是 *Candidatus Brocadia*, 但其相对丰度较低 (0.33% ~ 0.46%)。SBR 中的厌氧氨氧化菌丰度较低, 这主要是因为该反应器中微生物以絮体污泥的形式存在, 不利于生长较慢的厌氧氨氧化菌富集^[22]。同时研究也发现, 形成颗粒污泥或生物膜有利于厌氧氨氧化菌的生长富集^[15,23], 这与本研究中厌氧氨氧化菌丰度相对较高的结果一致。Gaul 等^[24]认为 *Candidatus Brocadia* 更容易受到高浓度 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的抑制, 因此在高底物浓度的厌氧氨氧化系统中不容易被富集, 这样就解释了为什么在低浓度污水处理系统中 *Candidatus Brocadia* 会被慢慢富集。根据此结果, 建议在污水厂二级出水厌氧氨氧化脱氮滤池启动时, 尽可能接种富含 *Candidatus Brocadia* 的厌氧氨氧化污泥, 从而能更快地适应低底物浓度环境, 缩短启动时间。

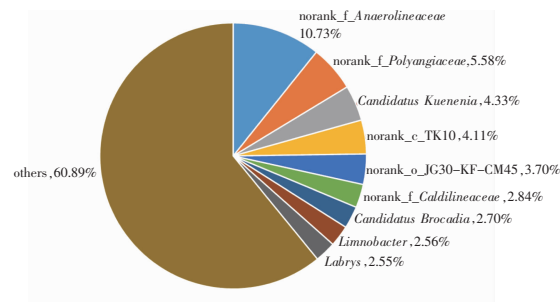


图4 厌氧氨氧化生物滤池的生物膜菌属构成

Fig. 4 Microbial composition of Anammox biofilter at genus level

2.4 厌氧氨氧化滤池用于污水深度脱氮的潜力

本研究证明厌氧氨氧化滤池用于处理 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 平均浓度分别为 9.6、9.3 mg/L 的低浓度污水,脱氮效果较好,可以稳定达到一级 A 排放标准,同时保持较高的脱氮效率,因此具有良好的实际应用潜力。在需要升级改造的城市污水厂中,可将二沉池出水和部分初沉池出水混合进入短程反硝化滤池,利用初沉池出水中的有机物作为碳源,将二沉池出水中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 还原为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$;短程反硝化滤池出水再进入到厌氧氨氧化滤池,利用积累的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 在厌氧氨氧化菌的作用下与初沉池出水中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 反应生成氮气,实现深度脱氮的目的(见图5)。与传统反硝化滤池相比,短程反硝化/厌氧氨氧化双滤池系统可节省有机碳源 62%,所消耗的有机碳源来自于初沉池出水,因此无需外加有机碳源;降低污泥产量 62%,从而可以降低滤池的反冲洗次数;同时还可节省好氧硝化曝气量,因为部分初沉池出水进入短程反硝化/厌氧氨氧化双滤池系统,而无需进入好氧硝化池。目前上述研究大都是基于人工配水或理论计算完成,因此还需要继续深入开展中试和生产性试验,为污水的低碳低能耗脱氮提供技术支撑。

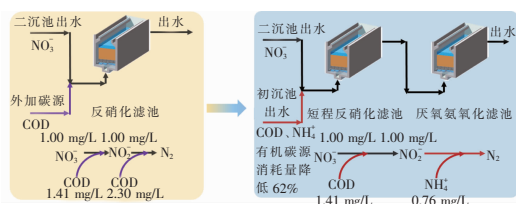


图5 传统反硝化滤池和短程反硝化/厌氧氨氧化双滤池的脱氮对比

Fig.5 Comparison of traditional denitrification biofilter and partial denitrification/Anammox double biofilter

3 结论

① 当进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 平均浓度分别为 9.9、9.1 mg/L 时,经厌氧氨氧化滤池处理后,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 平均浓度降为 2.5、9.5 mg/L,可达到国家一级 A 排放标准。

② 在 HRT 为 15 min 的条件下,厌氧氨氧化滤池的容积氮去除速率为 $1.0 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。

③ 厌氧氨氧化滤池中的厌氧氨氧化菌属主要为 *Candidatus Kuenenia* 和 *Candidatus Brocadia*,相对丰度分别为 4.33% 和 2.70%。

④ 与传统反硝化滤池相比,短程反硝化/厌氧氨氧化双滤池系统可节省有机碳源 62%,同时可降

低污泥产量,减少滤池反冲洗次数。

参考文献:

- [1] 商佳吉,洪超,吕劲衡,等. 反硝化滤池用于城镇污水处理厂提标改造[J]. 中国给水排水,2019,35(6): 93-98.
SHANG Jiaji, HONG Chao, LÜ Jinheng, et al. Application of denitrification filter in upgrading and reconstruction of an urban wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(6): 93-98 (in Chinese).
- [2] 刘向荣,简德武,简爽. 高排放标准下城镇污水处理厂的提标改造探讨[J]. 中国给水排水,2019,35(20):19-25.
LIU Xiangrong, JIAN Dewu, JIAN Shuang. Discussion on the upgrading of municipal wastewater treatment plant under high emission standard [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(20): 19-25 (in Chinese).
- [3] 高飞亚,郭庆英,余浩,等. 反硝化深床滤池在一级 A 提标项目中的应用及运行效果[J]. 中国给水排水,2019,35(6):63-66.
GAO Feiya, GUO Qingying, YU Hao, et al. Application and operation performance of denitrification deep-bed filter in upgrading project for first class A level criteria [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(6): 63-66 (in Chinese).
- [4] LIU X, WANG H, YANG Q, et al. Online control of biofilm and reducing carbon dosage in denitrifying biofilter: pilot and full-scale application[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 2017, 11(1): 59-66.
- [5] 张朋锋,马乐宁,赵金,等. 深床反硝化生物滤池碳源优选研究[J]. 中国给水排水,2020,36(3): 92-96.
ZHANG Pengfeng, MA Lening, ZHAO Jin, et al. Carbon source optimization for deep bed denitrification biological filter[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(3): 92-96 (in Chinese).
- [6] 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).
- [7] CUI B, LIU X, YANG Q, et al. Achieving partial denitrification through control of biofilm structure during

- biofilm growth in denitrifying biofilter[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 238: 223–231.
- [8] DU R, CAO S, PENG Y, *et al.* Combined partial denitrification (PD) – Anammox: a method for high nitrate wastewater treatment [J]. *Environment International*, 2019, 126: 707–716.
- [9] DU R, PENG Y, JI J, *et al.* Partial denitrification providing nitrite: opportunities of extending application for anammox[J]. *Environment International*, 2019, 131: 105001.
- [10] LI J W, PENG Y Z, ZHANG L, *et al.* Quantify the contribution of anammox for enhanced nitrogen removal through metagenomic analysis and mass balance in an anoxic moving bed biofilm reactor[J]. *Water Research*, 2019, 160: 178–187.
- [11] QIAN W, MA B, LI X, *et al.* Long-term effect of pH on denitrification: high pH benefits achieving partial-denitrification[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 278: 444–449.
- [12] SHI L, DU R, PENG Y. Achieving partial denitrification using carbon sources in domestic wastewater with waste-activated sludge as inoculum [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 283: 18–27.
- [13] MA B, XU X, GE S, *et al.* Reducing carbon source consumption through a novel denitrification/anammox biofilter to remove nitrate from synthetic secondary effluent [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 309: 123377.
- [14] DU R, PENG Y, CAO S, *et al.* Characteristic of nitrous oxide production in partial denitrification process with high nitrite accumulation[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 203: 341–347.
- [15] MA B, PENG Y Z, ZHANG S J, *et al.* Performance of anammox UASB reactor treating low strength wastewater under moderate and low temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 129: 606–611.
- [16] 方月英, 徐锡梅, 恽云波, 等. 反硝化生物滤池在污水深度处理中的应用[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(11): 97–102.
- FANG Yueying, XU Ximei, YUN Yunbo, *et al.* Application of denitrifying biological filter in advanced wastewater treatment[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(11): 97–102 (in Chinese).
- [17] MA B, XU X, WEI Y, *et al.* Recent advances in controlling denitrification for achieving denitrification/anammox in mainstream wastewater treatment plants [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 299: 122697.
- [18] ZHANG Z, CHENG Y, LIU Y, *et al.* Deciphering the evolution characteristics of extracellular microbial products from autotrophic and mixotrophic anammox consortia in response to nitrogen loading variations[J]. *Environment International*, 2019, 124: 501–510.
- [19] VAN DER STAR W R L, MICLEA A I, VAN DONGEN U G J M, *et al.* The membrane bioreactor: a novel tool to grow anammox bacteria as free cells[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008, 101(2): 286–294.
- [20] XU X, MA B, LU W, *et al.* Effective nitrogen removal in a granule-based partial-denitrification/anammox reactor treating low C/N sewage[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297: 122467.
- [21] DU R, CAO S, ZHANG H, *et al.* Flexible nitrite supply alternative for mainstream anammox: advances in enhancing process stability[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(10): 6353–6364.
- [22] STROUS M, HEIJNEN J J, KUENEN J G, *et al.* The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1998, 50(5): 589–596.
- [23] MA B, QIAN W T, YUAN C S, *et al.* Achieving mainstream nitrogen removal through coupling anammox with denitrification [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(15): 8405–8413.
- [24] GAUL T, MARKER S, KUNST S. Start-up of moving bed biofilm reactors for deammonification: the role of hydraulic retention time, alkalinity and oxygen supply [J]. *Water Science & Technology*, 2005, 52(7): 127–133.
-
- 作者简介: 委燕(1989–), 女, 甘肃民勤人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为污水脱氮除磷技术。
E-mail: 598802451@qq.com
收稿日期: 2020–06–10
修回日期: 2020–07–19

(编辑: 刘贵春)