

分段进水比对两级A/O-海绵填料工艺处理DMF废水的影响

夏云康¹, 马睿莉¹, 吴鹏^{1,2,3}, 徐乐中^{1,2,3}, 汪宇光¹, 茅思楠¹, 钱昊冬¹

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 江苏苏州 215009;

2. 城市生活污水资源化利用技术国家地方联合工程实验室, 江苏苏州 215009;

3. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 江苏苏州 215009)

[摘要] 采用两级A/O-海绵填料工艺处理DMF废水, 探究一级A/O缺氧池(A1)和二级A/O缺氧池(A2)分段进水比(8:2、7:3、6:4、5:5)对系统脱氮除碳效能影响。结果表明, 两级A/O-海绵填料工艺在不同分段进水比条件下均能实现对COD的高效去除, COD平均去除率均达到95%以上, 而系统对TN、NO₃⁻-N和NH₄⁺-N的去除受分段进水比影响较大。在较高(8:2和7:3)分段进水比条件下, 系统TN去除率为81.39%~89.03%, 此时TN主要以NH₄⁺-N和NO₃⁻-N形式存在; 当分段进水比减小为6:4时, 系统TN去除率达到最优值91.33%, 出水NH₄⁺-N和NO₃⁻-N均明显低于其余进水比工况, 分别降至8.04 mg/L和7.06 mg/L。因此通过优化两级A/O-海绵填料工艺分段进水比, 可提升高浓度有机氮废水中难降解碳源的利用率与控制氨化反应进程, 实现DMF废水有机氮的高效去除。

[关键词] 两级A/O-海绵填料工艺; 分段进水比; 脱氮; DMF废水

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)01-0085-07

Effect of step-feed ratios on DMF wastewater treatment via two stage A/O-sponge packing process

XIA Yunkang¹, MA Ruili¹, WU Peng^{1,2,3}, XU Lezhong^{1,2,3},
WANG Yuguang¹, MAO Sinan¹, QIAN Haodong¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. National Regional Engineering Laboratory of Urban Domestic Wastewater Resources Utilization Technology, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu High Education Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology and Material, Suzhou 215009, China)

Abstract: A two-stage A/O-sponge packing process was developed to treat DMF wastewater, with the first-stage A/O anoxic tank(A1) and second-stage A/O anoxic tank(A2)(8:2, 7:3, 6:4, 5:5) to explore the effects of step-feed strategy on nitrogen and carbon removal performance. Results indicated that the efficient removal of COD was achieved in two-stage A/O-sponge packing process despite the different step-feed ratios, and its average removal efficiency reached over 95%. While the removal of TN, NO₃⁻-N and NH₄⁺-N in the system was greatly affected by the ratios of step-feed. Under the high ratios of step-feed(8:2 and 7:3) conditions, the TN removal efficiency of the system was 81.39%~89.03%, which mainly existed in the form of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N. When the ratio of step-feed was dropped to 6:4, the TN removal efficiency of the system reached the optimal value of 91.33%, and the effluent concentrations of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N were significantly lower than those of other ratios, which were decreased to 8.04 mg/L and 7.06 mg/L, respectively. Therefore, the utilization rate of refractory carbon sources in high organic nitrogen wastewater and control the process of ammonia oxidation reaction to achieve the efficient removal of organic nitrogen in DMF wastewater can be improved by optimizing the ratios of step-feed of two-stage A/O-sponge packing process.

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51578353, 51808367)

Key words: two-stage A/O-sponge packing process; ratios of step-feed; denitrification; DMF wastewater

DMF(*N,N*-二甲基甲酰胺)是一种高极性有机溶剂,能够与水及大部分种类的有机溶剂混溶,故称为“通用溶剂”,用于化工生产、农药合成啉虫脒,医药吸收剂等^[1]。DMF废水成分复杂,具有毒性高、难降解、有机物浓度高等特点。目前国内外常见处理方法有化学法(Fenton、光催化氧化、湿式氧化、超临界水氧化、碱性水解)^[2-4]、物化法(精馏、吸附、萃取)^[5]、物化预处理及组合工艺,其中以微生物代谢为基础的生物法(A/O、A/A/O、氧化沟、生物滤池)被认为是处理DMF废水最经济的方法^[6]。

传统A/O工艺处理低C/N难降解高有机氮废水时,由于碳源不足会导致反硝化效果差,外加碳源则会导致运行成本增加。而两级A/O-海绵填料工艺通过传统单级A/O工艺基础上增加A/O级数使有机物分级利用,控制一级A/O碳源的利用,为二级A/O提供剩余碳源,从而提高原水碳源的利用率;通过在好氧区投加海绵填料,为微生物提供附着生长环境,从而形成溶解氧梯度,使得生物膜由内而外分别形成厌氧、缺氧、好氧区,为同步硝化反硝化提供反应微环境,进一步强化反硝化脱氮性能。

而对于低C/N的难降解高有机氮废水,高效利用有限的原水碳源是关键。因此通过分段进水将原水按比例分别通入各缺氧区(图1),有机氮废水在一级A/O缺氧池(A1)进行水解酸化、氨化将大分子有机物降解为小分子生物碳源进行反硝化,并在好氧池(O1)进行同步硝化反硝化,而二级A/O中进入缺氧池(A2)的原水有机物与上一级好氧池出水的硝态氮进行反硝化,好氧池(O2)则再次进行同步硝化反硝化,从而达到高效脱氮除碳的目的。通过分段进水比合理分配碳源,可以有效减少低C/N带来的不利影响,降低硝化过程有机负荷,避免有机物无效氧化^[7]。Yijun SHEN等^[8]研究发现当分段进水比为75:25时低C/N污水处理效果最佳,最终出水COD、氨氮、TN分别为20.8、0.64、14.2 mg/L。王帆等^[9]在处理低温城市污水时研究发现分段进水比为3:2:1时,系统出水COD、氨氮去除率超90%,TN去除率超80%。

当一级进水占比较高时,增加了原水发生同步硝化反硝化的可能性,同时也会造成二级A/O由于

碳源缺乏而效果不佳的现象。而二级进水占比较高,会使得难降解有机物在较短的水力停留时间下无法完全降解。因此,本试验基于两级A/O-海绵填料工艺处理DMF废水,探究不同分段进水比下污染物的去除效果,确定最优分段进水比,旨在为两级A/O-海绵填料工艺处理DMF等高有机氮废水提供高效经济的方案。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

两级A/O-生物膜工艺装置见图1。

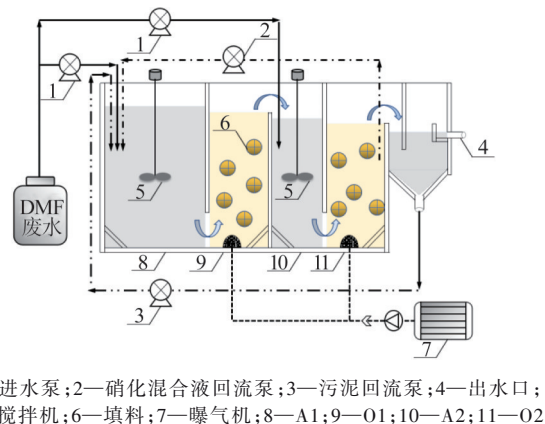


图1 试验装置

Fig. 1 Schematic diagram of the reactor

装置由有机玻璃制成,尺寸为565 mm×100 mm×240 mm,总进水体积为10.8 L。配套设备有:气体转子流量计、曝气机、搅拌机、进水泵、硝化混合液回流泵、污泥回流泵、海绵填料等。其中一级反应器设缺氧池(A1)、好氧池(O1),有效容积分别为4.2、2.4 L;二级反应器设缺氧池(A2)、好氧池(O2),有效容积分别为1.8、4 L;二沉池为竖流沉淀池,有效容积为1.5 L,采用上部溢流堰排水,污泥从底部排空管由污泥回流泵回流至一级缺氧池(A1),沉淀池每10 d进行一次排泥。硝化混合液从二级好氧池(O2)回流至一级缺氧池(A1)。其中好氧池中投加聚氨酯海绵填料。

1.2 填料结构特性

试验选用的填料为宽度20 mm,孔隙率达97%以上的聚氨酯海绵填料。其是一种高分子合成亲水生物填料,具有反应性功能基,其表面活性基团可与

微生物肽链氨基酸残基作用,形成离子键结合或共价键结合,将微生物和酶固定在载体上。多孔隙结构能使不同需氧程度的微生物种群繁殖生长,为实现同步硝化反硝化提供有利微环境,同时其表面积大具有增强气液接触表面积,提高传质效率等特点^[10-11],聚氨酯海绵填料见图2。



图2 聚氨酯海绵填料

Fig. 2 Polyurethane sponge packing picture

1.3 试验水质

本试验所接种的污泥取自苏州某污水厂二沉池剩余污泥。试验用水为苏州某腈纶废水处理厂经预处理后的出水,水质见表1。

表1 DMF废水水质

Table 1 DMF wastewater quality

项目	COD/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TN/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+-\text{N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NO}_3^--\text{N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NO}_2^--\text{N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	pH
水质指标	1 200~1 400	250~280	0~0.5	0~0.08	0~0.05	7.2~7.8

1.4 反应运行条件

本试验温度为25~28℃,设计总进水流量为0.3 L/h,总水力停留时间(HRT)为36 h,设计污泥回流比 $R_1=150\%$,硝化混合液回流比 $R_2=100\%$ 。好氧池(O1、O2)聚氨酯海绵填料投加率为50%,由气泵进行曝气,通过气体转子流量计控制曝气量,好氧池溶解氧(DO)质量浓度控制在2~4 mg/L,缺氧池(A1、A2)使用机械搅拌机进行搅拌, $\text{DO}\leq 0.2\text{ mg/L}$,MLSS为2 400~2 800 mg/L,通过研究一级缺氧池(A1)和二级缺氧池(A2)的4种进水比例,考察系统对污染物的去除效果,运行工况见表2。

1.5 水样检测与方法

试验中: NH_4^+-N 采用纳氏试剂分光光度法测定; NO_3^--N 采用麝香草酚分光光度法测定;TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定;COD采

表2 实验运行工况及运行参数

Table 2 Experimental operation conditions and operation parameters

工况	A1、A2进水比	运行天数/d
I	8:2	20
II	7:3	22
III	6:4	20
IV	5:5	16

用重铬酸钾快速消解紫外分光光度计法测定,pH采用上海雷磁PHSJ-4型pH计直接测定,温度和溶解氧采用哈希便携式溶解氧仪测定,MLSS含量采用重量法测量。

2 结果与讨论

2.1 进水分配比对COD去除效果的影响

两级A/O-海绵填料工艺在不同进水分配比条件下对DMF废水中COD去除效果见图3。

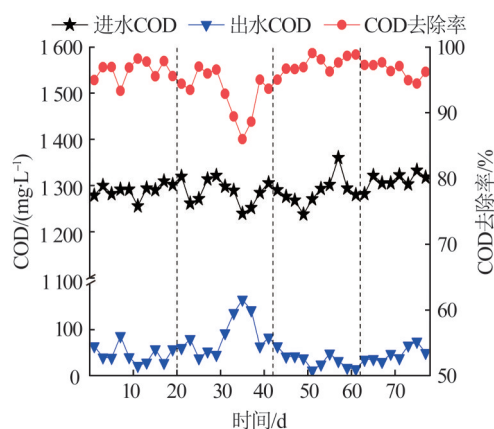


图3 两级A/O-海绵填料工艺对COD去除效果

Fig. 3 Effect of two-stage A/O-sponge packing process on COD removal

由图3可知,在进水平均COD为1 290.83 mg/L时,4个工况出水平均COD为46.20、87.06、33.37、47.02 mg/L,平均去除率分别为96.41%、93.02%、97.41%、96.42%。因此系统在不同分段进水比条件下均能实现对COD的高效去除,这与南彦斌等^[12]探究分段进水比对生活污水处理系统COD去除情况结果一致。

两级A/O-海绵填料工艺COD沿程变化情况见图4。

由图4可知,进水COD主要在缺氧段(A1、A2)去除,首先大分子难降解有机物水解酸化为小分子有机物,接着小分子有机物氨化为有机碳源和

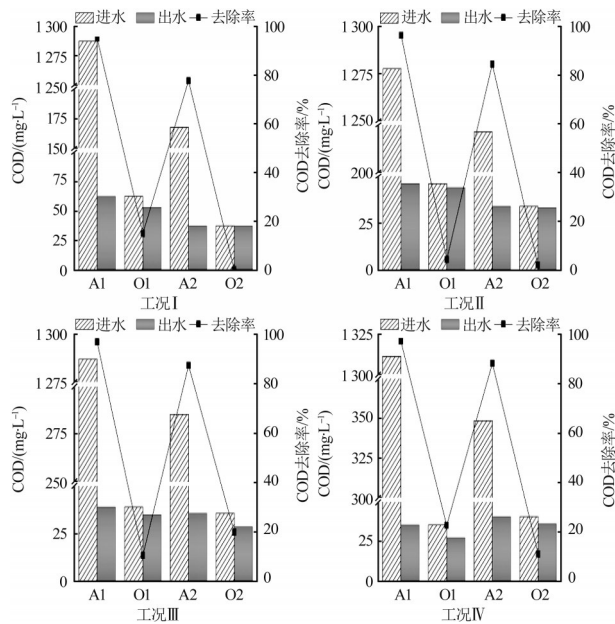


图4 两级A/O-海绵填料工艺COD沿程变化情况

Fig. 4 Two-stage A/O-sponge packing process COD changes along the process

NH_4^+-N , 其中大部分有机碳源被反硝化菌直接用于反硝化脱氮, 少部分则进入好氧池(O1、O2)。通过在好氧池(O1、O2)投加聚氨酯海绵填料, 构成同步硝化反硝化环境, 消耗部分流入好氧池(O1、O2)的有机物。而最终系统出水COD浓度略微上升可能是由于部分细胞发生老化, 细胞外多聚物溶解在水中^[13], 同时二沉池的不可生物降解有机物较多, 导致最终出水COD升高。

在4个工况中, 一级缺氧池(A1)中COD去除率缓慢升高, 由96.30%升至97.29%, 李学飞等^[14]处理含高氮废水时发现在较高一级A/O进水占比(1:0、3:1)条件下, 由于有机物含量较高而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度较低, 反硝化反应不完全, 使其在好氧区无效消耗。因此随着A1进水占比的减少, 有机负荷也相应降低, 进水有机物能够被微生物充分利用; 其次延长一级A/O的HRT, 也利于有机物的消耗去除。而二级缺氧池(A2)中COD的去除率较A1有明显降低, 主要是由于A2进水占比小于A1, 使得进入A2的有机物含量相对较少, 且二级A/O的一部分进水来源是一级A/O的出水, 原水中的部分缓慢降解有机物经过一级A/O较长的水力停留接触后, 剩余多为难降解有机物。

通过分段进水, 将原水中有限的有机物在缺氧

池合理分配, 缓解有机负荷以及HRT对系统影响, 使得碳源最大限度地被利用, 避免了好氧区的无效碳氧化。因此COD在好氧池(O1、O2)去除率普遍较低。而工况II(7:3)时O1、O2的COD去除率几乎为0, 推测是此时受分段进水比影响, 两级A/O工艺同步硝化反硝化效果较差^[15]。

2.2 进水分配比对TN去除效果的影响

进水分配比对DMF废水中TN的去除效果的影响见图5。

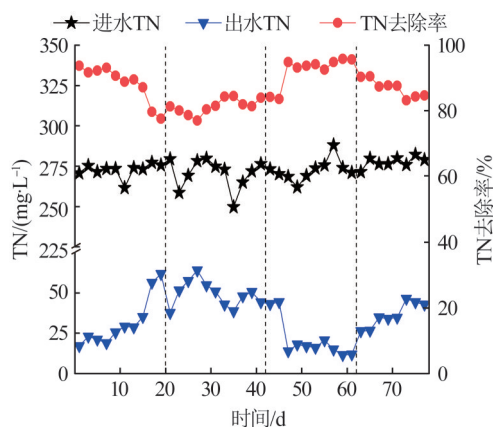


图5 两级A/O-海绵填料工艺对TN去除效果

Fig. 5 Effect of two-stage A/O-sponge packing process on TN removal

由图5可知, 原水平均TN为275 mg/L, 4个工况下系统出水平均TN分别为30.63、49.09、21.10、36.20 mg/L, 随着进水分配比的增大, TN去除率呈现波动趋势, 先由89.03%(工况I)降为81.39%(工况II), 又升至91.33%(工况III), 最后降为86.97%(工况IV)。表明进水分配比对系统TN的去除影响较大。

两级A/O-海绵填料工艺TN沿程变化情况见图6。

由图6可知, TN去除主要发生在一级A/O缺氧池(A1), 有机氮在该格室通过氨化反应转化为 NH_4^+-N , 4个工况一级A/O出水TN平均去除率均高于80%。二级A/O中, 二级进水导致有机氮进一步氨化, 因此A2出水的TN浓度高于O1出水。当进水分配比为5:5时, A2出水TN浓度较其他3个工况有明显升高, 原因是此时A2进水TN浓度最高, 增加了氨化产生的 NH_4^+-N 浓度和出水TN浓度。因此虽然分段进水可以减少一级A/O的有机氮负荷冲击, 但如果二级A/O进水占比较大, 会在一定程度上增加

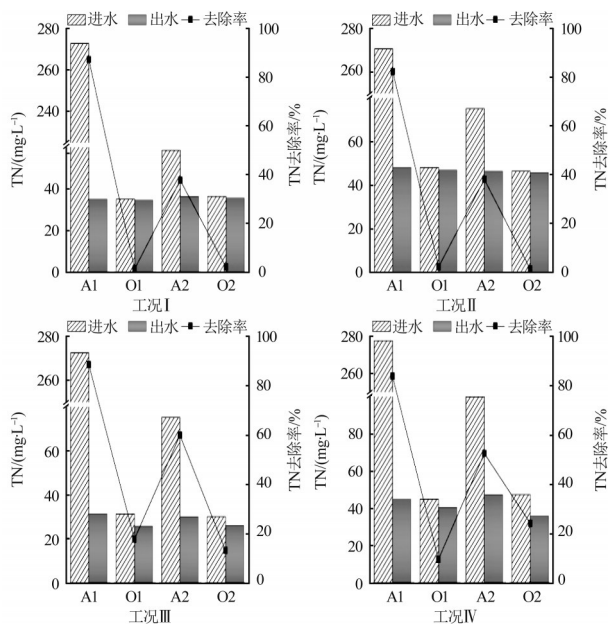


图6 两级A/O-海绵填料工艺TN沿程变化情况

Fig. 6 Two-stage A/O-sponge packing process
TN changes along the process

二级A/O出水TN的浓度。

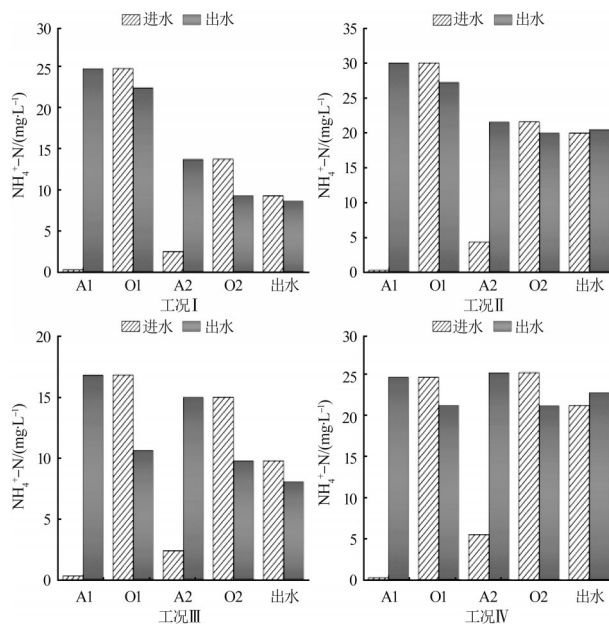
进水分配比为7:3时的系统TN去除效果最差,出水TN达到48.15 mg/L, TN去除率仅为82.19%,此时TN主要以 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N的形式存在。通过减小进水分配比,调整为6:4时, TN去除效果最佳,去除率提升至91.33%。王伟等^[16]调控分段进水比为6:3:1处理生活污水时,处理效果最佳,出水TN为17.47 mg/L,因此推测控制一级A/O进水占比60%左右,对系统TN去除效果好。原因是此时一级A/O可降解有机物含量降低,减少了异养微生物大量繁殖而对硝化细菌代谢活动产生的抑制,提高了对 NH_4^+ -N的去除效果;同时高有机氮废水进入二级A/O的比例增大,使得该段水解氨化产生的小分子有机物含量高于上一段反应器出水,从而促进反硝化反应和降低出水TN浓度。

缺氧池(A1、A2)对TN的去除起着重要的作用,因为缺氧池更容易对有机氮进行降解,同时 NO_3^- -N还原为 N_2 主要发生在缺氧池^[8],因此控制缺氧段进水比对整个系统的脱氮效果影响较大。

2.3 进水分配比对 NH_4^+ -N去除效果的影响

两级A/O-海绵填料工艺 NH_4^+ -N沿程变化情况见图7。

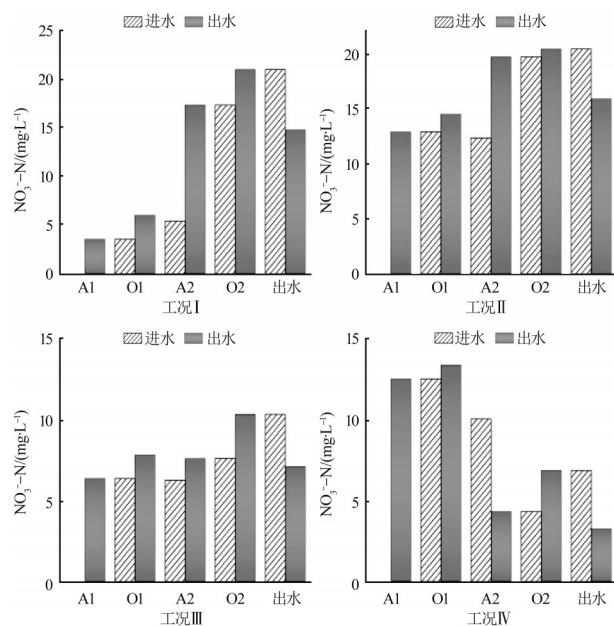
由图7可知,4个工况出水的平均 NH_4^+ -N分别

图7 两级A/O-海绵填料工艺 NH_4^+ -N沿程变化情况Fig. 7 Two-stage A/O-sponge packing process
 NH_4^+ -N changes along the process

为8.65、20.47、8.04、23.01 mg/L。其中工况Ⅲ(6:4)时, NH_4^+ -N去除效果最佳。4个工况下的 NH_4^+ -N在缺氧池(A1、A2)均升高,同时 NH_4^+ -N的生成量随着分段进水占比的增大而升高。而 NH_4^+ -N的去除主要是发生在好氧池(O1、O2),由硝化菌将 NH_4^+ -N转化为 NO_3^- -N。工况Ⅱ(7:3)时O1段出水 NH_4^+ -N浓度较高,分析原因是此时一级A/O的有机物浓度较高,未能营造出适合硝化作用的低浓度有机条件,使得异养菌成为了优势菌种,从而抑制硝化细菌^[17]。工况Ⅲ(6:4)通过增大二级A/O的进水比例,使得二级A/O的有机物和 NH_4^+ -N负荷升高,硝化效果逐渐提高。而工况Ⅳ(5:5)继续增大二级A/O进水,却未能提高硝化效果,原因可能是二级进水较大,有机负荷较高,未能在水力停留时间较短的缺氧池发生充分氨化,使其在好氧条件下也进行了氨化反应,最终 NH_4^+ -N浓度升高^[18]。荣懿等^[19]研究发现预缺氧池、厌氧池、缺氧池进水比为1:2:3时系统氨氮去除效果最佳,而继续增大缺氧池进水比,并未提高去除效果,与本研究结果相一致,表明最后一段缺氧池进水占比不宜过大。

2.4 进水分配比对 NO_3^- -N去除效果的影响

两级A/O-海绵填料工艺 NO_3^- -N沿程变化情况见图8。

图8 两级A/O-海绵填料工艺 NO_3^- -N沿程变化情况Fig. 8 Two-stage A/O-sponge packing process NO_3^- -N changes along the process

由图8可知,4种进水分配比条件下,系统出水平均 NO_3^- -N分别为14.78、16.18、7.10、3.24 mg/L。4个工况 NO_3^- -N的去除效果差异较大,其中工况IV(5:5)时出水浓度最低,反硝化性能最好,工况III(6:4)时各级出水变化差异最小,而工况I(8:2)、II(7:3)相差不大。分析原因是随着二级A/O进水占比的增大,流入二级A/O的有机物升高,缺氧池(A2)中的 NO_3^- -N与有机物充分发生反硝化反应,反硝化效果提高。好氧池(O1、O2)中 NO_3^- -N浓度较缺氧池(A1、A2)有所提高,原因是A1的 NO_3^- -N主要来源是二沉池的污泥回流和O2的硝化液回流,所以A1段的 NO_3^- -N浓度较低,且随着A1进水占比的降低,一级A/O中能被反硝化菌利用的COD较少,所以4个工况A1出水的 NO_3^- -N浓度逐渐升高。而O1中残留大量 NO_3^- -N是由于好氧硝化反应,系统DO浓度高于亚硝化细菌活性范围,所以硝化最终产物为 NO_3^- -N,导致 NO_3^- -N浓度沿程升高。而工况III(6:4)时浓度较低且变化不明显,原因可能是此时好氧池同步硝化反硝化效果较好,填料外层好氧环境产生的 NO_3^- -N,给予中间层和内层的缺氧环境电子受体,发生反硝化反应。而在二级A/O中由于工况I(8:2)、工况II(7:3)碳源含量较低,系统沿程碳源得不到补充,反硝化作用较弱,而硝化作用相对较强,

使得二级反应器中 NO_3^- -N浓度较工况III(6:4)、工况IV(5:5)高^[20]。

3 结论

(1)在4种不同进水分配比工况下,两级A/O-海绵填料工艺COD平均去除率均高于95%,因此分段进水策略能够实现两级A/O工艺碳源的合理利用。

(2)相比工况I(89.03%)、工况II(81.39%)和工况IV(86.97%),在工况III下,系统获得最优TN去除率(91.33%),表明该系统TN的去除受进水分配比影响较大。

(3)系统在工况III(6:4)下出水 NH_4^+ -N最低(8.04 mg/L),继续增加二级A/O进水配比将会造成出水 NH_4^+ -N显著升高。

(4)两级A/O-海绵填料工艺受原水中碳源分配的影响,在4个工况下出水 NO_3^- -N浓度差异较大。

参考文献

- [1] 张鹤,李泽兵,安凯,等. DMF废水生物处理研究进展[J]. 工业水处理, 2019, 39(6): 13-17.
ZHANG He, LI Zebing, AN Kai, et al. Research progress in the biological treatment of DMF wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(6): 13-17.
- [2] 符继乐. 催化湿式氧化处理含氮废水催化剂的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
FU Jile. Catalytic wet air oxidation of N-containing waste water[D]. Xiamen: Xiamen University, 2018.
- [3] TANIA F, AMELIA F, ISABEL S, et al. Scale-up and cost analysis of a photo-Fenton system for sanitary landfill leachate treatment[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 283: 76-88.
- [4] 孙怡,于利亮,黄浩斌,等. 高级氧化技术处理难降解有机废水的研发趋势及实用化进展[J]. 化工学报, 2017, 68(5): 1743-1756.
SUN Yi, YU Liliang, HUANG Haobing, et al. Research trend and practical development of advanced oxidation process on degradation of recalcitrant organic wastewater[J]. CIESC Journal, 2017, 68(5): 1743-1756.
- [5] DOU Pengjia, SONG Jianfeng, ZHAO Shuwei, et al. Novel low cost hybrid extraction-distillation-reverse osmosis process for complete removal of N,N-dimethylformamide from industrial wastewater[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 130: 317-325.
- [6] 崔兵,周正胜,韦丽敏. 含N,N-二甲基甲酰胺废水的处理方法研究[J]. 广东化工, 2017, 44(17): 120-121.
CUI Bing, ZHOU Zhengsheng, WEI Liming. Research for containing N,N-dimethyl formamide wastewater[J]. Guangdong Chemical

- Industry, 2017, 44(17): 120-121.
- [7] 马睿莉, 徐乐中, 陈茂林. 高有机氮废水AO工艺脱氮研究进展[J]. 工业水处理, 2020, 40(10): 8-13.
MA Ruili, XU Lezhong, CHEN Maolin. Research progress on treatment of high organic nitrogen wastewater with AO process[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(10): 8-13.
- [8] SHEN Yijun, YANG Dianhai, WU Yang, et al. Operation mode of a step-feed anoxic/oxic process with distribution of carbon source from anaerobic zone on nutrient removal and microbial properties[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1153.
- [9] 王帆, 李军, 艾胜书, 等. 三级AO耦合工艺低温污水处理脱氮机理[J]. 中国环境科学, 2020, 40(3): 1059-1067.
WANG Fan, LI Jun, AI Shengshu, et al. Analysis on denitrification mechanism of low temperature wastewater treatment by three-stage AO coupling process[J]. China Environmental Science, 2020, 40(3): 1059-1067.
- [10] SHI Jingxin, XU Chunyan, HAN Yuxing, et al. Enhanced anaerobic biodegradation efficiency and mechanism of quinoline, pyridine, and indole in coal gasification wastewater[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 361: 1019-1029.
- [11] LIM Junwei, LIM Poheng, SENG Chyeeng, et al. Simultaneous 4-chlorophenol and nitrogen removal in moving bed sequencing batch reactors packed with polyurethane foam cubes of various sizes[J]. Bioresour. Technol., 2013, 129(2): 485-494.
- [12] 南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 等. 分段进水对改良A²/O-BAF双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(4): 1704-1712.
NAN Yanbin, PENG Yongzhen, ZENG Liyun, et al. Effect of step feed on denitrifying phosphorus and nitrate removal in a modification of the two sludge A²/O-BAF system[J]. Environmental Science, 2018, 39(4): 1704-1712.
- [13] 周晓黎, 孙迎雪, 石娜, 等. 反硝化生物滤池生物膜胞外聚合物空间分布特征[J]. 环境工程学报, 2017, 11(5): 2836-2844.
ZHOU Xiaoli, SUN Yingxue, SHI Na, et al. Spatial distribution characteristics of extracellular polymeric substances in a denitrification biological filter[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(5): 2836-2844.
- [14] 李学飞, 陆健刚. 高氮废水分段进水A/O工艺脱氮效果研究[J]. 江西科学, 2016, 34(6): 852-857.
LI Xuefei, LU Jiangang. Research on multi-stage anoxic/oxic process treating high-nitrogen wastewater[J]. Jiangxi Science, 2016, 34(6): 852-857.
- [15] 徐宇峰, 王让, 唐锋兵, 等. 分配比对分段进水A²/O工艺脱氮除磷的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(4): 761-768.
XU Yufeng, WANG Rang, TANG Fengbing, et al. Affection of distribution ration of influent on nitrogen and phosphorus removal of step feed A²/O process[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(4): 761-768.
- [16] 王伟, 陈强, 汪传新, 等. 改良分段进水工艺处理低C/N城市污水流量优化控制[J]. 化工学报, 2015, 66(7): 2686-2693.
WANG Wei, CHEN Qiang, WANG Chuanxin, et al. Optimization of flow for modified step feed process treating low COD/TN municipal sewage[J]. CIESC Journal, 2015, 66(7): 2686-2693.
- [17] 王宏伟, 张国珍, 武福平, 等. 改良多级A/O对低C/N生活污水强化除磷效果研究[J]. 化工进展, 2020, 39(S2): 379-384.
WANG Hongwei, ZHANG Guozhen, WU Fuping, et al. Study on enhanced phosphorus removal effect of improved multi-stage A/O on low C/N domestic sewage[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(S2): 379-384.
- [18] 林炜. 有机氮在厌氧及好氧化条件下氨化效果的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.
LIN Wei. Ammonification efficiency of organic nitrogen under anaerobic and aerobic conditions[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017.
- [19] 荣懿, 刘小钗, 何音旋, 等. A²/O流量分配处理低C/N污水性能与微生物结构优化[J]. 环境科学, 2019, 40(9): 4113-4120.
RONG Yi, LIU Xiaochai, HE Yinxuan, et al. Enhanced nutrient removal and microbial community structure in a step-feed A²/O process treating low-C/N municipal wastewater[J]. Environmental Science, 2019, 40(9): 4113-4120.
- [20] 闵芮, 张国珍, 武福平, 等. 流量分配比对改良多级A/O污染物的去除影响[J]. 化工进展, 2020, 39(S2): 421-426.
MIN Rui, ZHANG Guozhen, WU Fuping, et al. Influence of flow distribution ratio on the removal of improved multi-stage A/O pollutants[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(S2): 421-426.
- [作者简介] 夏云康(1996—), 硕士研究生。电话: 18862316761, E-mail: 408628731@qq.com。通讯作者: 徐乐中。E-mail: kgre505@163.com。
- [收稿日期] 2021-11-18(修改稿)