

进水流量分配比对 SMAOBAF 工艺处理效能的影响

孙海龙^{1,2}, 周鑫^{1,2}, 张琦^{1,2}, 张鑫爱^{1,2}

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 山西省市政工程研究生教育创新中心, 山西 太原 030024)

摘要: 开发了一种基于分段进水的多级缺氧/好氧曝气生物滤池(SMAOBAF)新工艺,并将其用于处理模拟生活污水,考察了进水流量分配比对系统除碳脱氮效能的影响。结果表明,不同进水流量分配比对 COD 和氨氮的去除影响较小,但对缺氧反硝化及好氧同步硝化反硝化(SND)影响显著。当进水流量分配比为 2:5:3 时,对 TN 的去除率最高(70.8%),其中第2段的SND和缺氧反硝化对 TN 的去除贡献最大。合理分配各段进水量有助于碳源和溶解氧的有效利用,充分发挥硝化/反硝化的最佳效能。

关键词: 多级缺氧/好氧曝气生物滤池工艺; 分段进水; 进水流量分配比; 生物脱氮; 同步硝化反硝化

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)03-0121-05

Effect of Influent Flow Distribution Ratio on Performance of SMAOBAF Process

SUN Hai-long^{1,2}, ZHOU Xin^{1,2}, ZHANG Qi^{1,2}, ZHANG Xin-ai^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Innovation Center for Postgraduate Education in Municipal Engineering of Shanxi Province, Taiyuan 030024, China)

Abstract: A novel process of step-feed multistage anoxic/aerobic biological aerated filter (SMAOBAF) was developed and applied to treat synthetic domestic wastewater, and the effect of influent flow distribution ratio on carbon and nitrogen removal efficiency was investigated. The results indicated that different influent flow distribution ratios had less influence on the removal efficiency of COD and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, but they significantly affected the anoxic denitrification and aerobic simultaneous nitrification and denitrification (SND) efficiency. When the influent flow distribution ratio was 2:5:3, the maximum TN removal efficiency of 70.8% was achieved, and most TN was removed by SND and anoxic denitrification in the second stage. Proper distribution of influent flow was beneficial for effective utilization of carbon resource and dissolved oxygen (DO), making full use of nitrification and denitrification capacities of the process.

Key words: multistage anoxic/aerobic biological aerated filter process; step-feed; influent flow distribution ratio; biological nitrogen removal; simultaneous nitrification and denitrification

目前,缺氧/好氧(A/O)法和厌氧/缺氧/好氧(A/A/O)法两种传统污水处理工艺已被广泛应用,但是一段式A/O和单点进水方式使得溶解氧(DO)、碳源的供给量与微生物实际需求量之间存在不平衡,碳源和DO量无法在整个工艺流程进行合理分配与有效利用,导致脱氮效率难以提高。分段进水多级A/O活性污泥工艺将进水方式由单点进水单级A/O改良为分段进水多级A/O,有助于提高碳源和溶解氧的利用率,在工艺可行性、脱氮效率、运行成本以及稳定性等方面都要优于传统A/O工艺^[1-3]。但活性污泥法存在生物量低、好氧区出水中的高DO量对下一级缺氧区存在干扰、流程复杂(需要二沉池和污泥回流)且占地面积大等问题。基于此,笔者以深度脱氮为目标,开发了一种分段进水多级缺氧/好氧曝气生物滤池(SMAOBAF)工艺(专利号:CN104071897A)。该工艺对传统曝气生物滤池进行改进,通过在滤池中间曝气,将滤池自然分隔成缺氧区和好氧区。进水分别进入各级滤池的缺氧区,具有一定高度的滤料层可以快速消耗上一级好氧区出水携带的高溶解氧,以保证下一级的缺氧环境;而且该工艺结构紧凑,占地面积小(不设置硝化液回流、污泥回流装置和二沉池)。之前的研究表明^[4-5]:影响分段进水多级A/O工艺脱氮效率的因素主要有分段数、好氧区与缺氧区的容积比、进水流量分配比、原水C/N值、DO浓度、温度和水力停留时间(HRT)等。其中,进水流量分配比是影响脱氮效率的最重要的因素之一。鉴于此,笔者重点考察了不同的进水流量分配比对SMAOBAF工艺除碳脱氮效果的影响,旨在为该工艺的设计和运行优化提供理论基础。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

SMAOBAF工艺的小试装置如图1所示,主体由3段反应滤柱组成,直径均为80 mm。反应柱内填充粒径为4~6 mm的陶粒滤料,其比表面积为 $2.13 \text{ m}^2/\text{g}$ 、表观密度为 $1.71 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、堆积空隙率为42.69%、筒压强度为5.3 MPa、堆积密度为 $0.98 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。选择粒径均匀的鹅卵石作为承托层,高度为300 mm,起承托滤料以及均匀布水的作用。反应柱中部设曝气装置,将每一反应柱平分为上部的好氧区(O区)和下部的缺氧区(A区),高度均为300 mm。为了保证水量平衡和水质均一,在相邻两个反

应柱间设置调节池,前一段的出水与后一段的进水在调节池中充分混合后再泵入后一段反应柱中。各段进水量分别由独立的蠕动泵调节;曝气量由转子流量计控制。

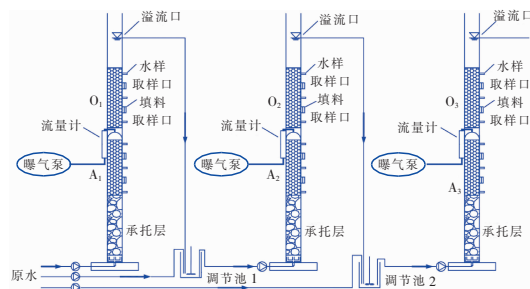


图1 SMAOBAF工艺示意

Fig.1 Schematic diagram of SMAOBAF process

1.2 反应器的启动

试验进水采用模拟生活污水,以葡萄糖和 NH_4Cl 分别作为COD和 NH_4^+-N 的来源,并投加一定量的 KH_2PO_4 和 NaHCO_3 分别提供微生物生长必需的磷源与碱度。进水水质如下:COD为 $400 \text{ mg}/\text{L}$ 、 NH_4^+-N 为 $50 \text{ mg}/\text{L}$ 、碱度(CaCO_3 计)为 $250 \text{ mg}/\text{L}$ 、pH值为7.5,水温维持在 20°C 左右。

接种污泥取自山西某污水处理厂曝气池中的活性污泥,经沉淀浓缩后加入到反应柱中,同时进水。反应器采用快速排泥法挂膜,闷曝24 h后将反应柱内的污水排空,重复上一步维持闷曝3 d。闷曝期间保持曝气强度为 $100 \text{ mL}/\text{min}$ 。闷曝结束后,反应器连续进水运行,运行10 d后COD去除率达到90%以上,氨氮去除率达到70%以上,肉眼可观察到滤料表面附着黄褐色的生物污泥,通过扫描电子显微镜(SEM)进一步观察发现挂膜后填料表面被大量相互缠绕的丝状菌覆盖,形成了复杂的空间结构,为较小尺寸的球菌、杆菌等提供了生长场所。由此判断微生物挂膜良好,反应器短时间即可完成启动。

1.3 试验方法

系统的HRT约为12 h,3段好氧区的曝气量均为 $200 \text{ mL}/\text{min}$ 。前期初步试验结果表明:过高的第1段进水流量比例将造成碳源的浪费,不利于后续脱氮,因此将第1段的进水流量比例固定在20%,重点考察后两段的进水流量占比对系统去除污染物的影响。设置5种流量分配方案依次进行试验,进水流量分配比分别为2:2:6、2:3:5、2:4:4、2:5:3、2:6:2,每种工况均稳定运行12~15 d。

1.4 检测项目与方法

COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度采用 HACH 快速测定仪进行测定; DO 浓度采用 YSI 550A 溶解氧仪测定; pH 值采用 pH 计测定。

2 结果与分析

2.1 进水流量分配比对有机物去除的影响

5 种进水方案下,系统出水 COD 浓度分别为 18、27、22、25、23 mg/L,去除率分别为 95.5%、93.3%、94.5%、93.8%、94.3%,均达到了国家一级 A 排放标准,表明 SMAOBAF 工艺对有机物有较高的去除效果。另外可以看出,进水流量分配比对系统的有机物降解效率无显著影响,这与一些学者的研究结果一致^[6-7]。原水分流进入 3 段反应器的缺氧段,既有利于异养反硝化菌对原水中碳源的充分利用,同时又能减弱碳源进入好氧区对好氧硝化菌生长产生的抑制作用。出水残留的 COD 多为微生物代谢产生的难降解性有机质^[8]。

2.2 进水流量分配比对硝化作用的影响

通过对沿程水质的监测发现,各反应段均没有 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 检出,由于氨氮浓度较低,反应器中的硝化细菌以亚硝酸盐氧化菌(NOB)为优势菌,可以将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 快速氧化成 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。5 种工况下反应器出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度分别为 2.3、2.1、0.0 mg/L,去除率分别为 95.4%、96%、98%、100%、100%,均达到了国家一级 A 排放标准,表明 SMAOBAF 工艺有利于实现 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的高效去除。

方案 1 至方案 5,逐步提高第 2 段进水比例同时降低第 3 段进水比例,即降低第 3 段的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 负荷,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度呈下降趋势。由于本工艺不设污泥及硝化液回流,故进入最后一段的原水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 只经过 O_3 段好氧作用即排放,所以若 O_3 段的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 负荷过高,超过其本身硝化容量,则 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 无法彻底去除,导致出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度升高。由此推断:当第 3 段进水比例超过 40% 时,第 3 段的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 负荷即超过其最大硝化能力。为保障出水水质,第 3 段进水比例不宜超过 40%。

2.3 进水流量分配比对反硝化作用的影响

各进水方案下,系统出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度分别为 19、15.7、15.2、14.6、17.2 mg/L,可知,不同进水流量分配比对系统的反硝化作用影响显著,随着第 2 段进水比例的提高、第 3 段进水比例的降低,出水

$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度呈先降低、后升高的变化趋势。方案 1 至方案 3,进水水量较集中于第 3 段,前两段负荷较低、硝化能力充足,第 3 段较大的进水量中充足的碳源使得前两段产生的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在 A_3 段中得到了充分反硝化去除,出水中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 主要由第 3 段进水中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在 O_3 段中硝化产生。故方案 4 继续降低第 3 段进水比例,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度进一步降低。而在方案 5 中,第 2 段进水量过高,氨氮负荷超过其硝化能力,导致 O_2 段出水氨氮浓度较高,进入第 3 段后,导致其出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度上升。

2.4 进水流量分配比对 TN 去除的影响

各进水方案下,系统出水 TN 浓度分别为 21.3、17.7、16.2、14.6、17.2 mg/L,去除率分别为 57.4%、64.6%、67.6%、70.8%、65.6%。方案 1 至方案 5 出水 TN 浓度的变化趋势与出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的变化趋势基本一致。在第 1 段进水比例为 20% 固定不变的条件下,逐渐提高第 2 段进水比例,同时降低第 3 段进水比例,出水 TN 浓度先降低后升高,各段进水比例对系统的脱氮效率影响显著。当进水流量分配比为 2:5:3 时,SMAOBAF 工艺的脱氮效果最好,出水 TN 浓度可以达到国家一级 A 排放标准。为获得较高的脱氮效果,宜将进水更多地分配给第 2 段,但水量比例也不宜超过 50%;若水量过高,则第 3 段的进水量过少,不能提供足够的反硝化碳源,不利于脱氮。

通过对各段沿程取样,进一步考察了不同进水流量分配比下各区段对去除 TN 的贡献,结果见图 2。本系统中 TN 的去除既包括各级 A 区的反硝化作用,也包括 O 区的同步硝化反硝化作用。方案 1 至方案 5,系统的反硝化脱氮贡献率分别为 39.4%、36.6%、44.8%、46.1%、54.7%,SND 脱氮贡献率分别为 18.0%、28.0%、22.8%、24.7%、10.9%。可见,不同进水流量比对反硝化及 SND 作用影响显著。各方案中由于第 1 段缺氧区无 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 回流,故对 TN 的去除贡献较低。前两种方案中,第 2 段的进水量较少、第 3 段进水量较多,使得第 3 段对 TN 的去除贡献最高,而在后 3 种方案中,随着第 2 段进水比例的增加,第 2 段对 TN 的去除贡献最高;由于碳源提供量逐渐充足, A_2 段的反硝化效果不断加强,同时水量负荷的增大使 O_2 段中的 DO 浓度不断降低,SND 作用逐渐增强。因此,通过调节进水流量分配比控制各反应段的碳源分配以及处理负

荷,可以强化系统的缺氧反硝化和好氧 SND 联合脱氮效能。

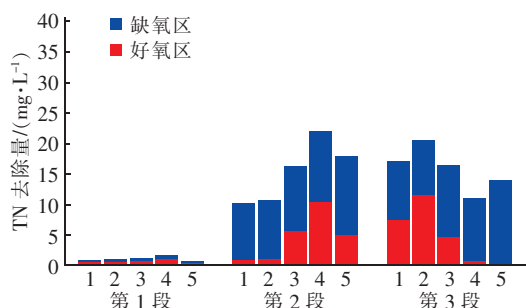


图2 不同进水分配方案下各区段的脱氮贡献

Fig.2 Nitrogen removal in each stage at different flow distribution schemes

2.5 最佳进水流量分配比下水质沿程变化

在2:5:3的最佳进水流量分配比条件下,沿程水质参数变化见图3。由于分段进水的特点,沿程的COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度均呈锯齿形下降趋势。COD在各级好氧区和缺氧区中分别被好氧菌和反硝化菌降解,浓度不断降低。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在缺氧区中小幅上升,这可能是由于氨化作用下生成了 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,而在好氧区中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 被完全硝化转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,导致 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度在好氧区快速下降; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在缺氧区中通过反硝化作用生成 N_2 ,故 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度在缺氧区快速降低。而沿程的TN浓度则一直呈降低趋势,表明各段对TN的去除都有贡献,而且在第2段下降最明显。

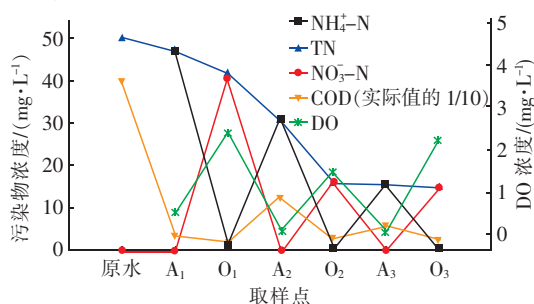


图3 最佳进水流量分配比下水质沿程变化

Fig.3 Variation of water quality parameters along the process under the optimal influent flow distribution ratio

由于分段进水和工艺特性,DO在系统沿程的缺氧和好氧区呈现明显的交替式下降和上升态势,由于生物滤池的特性,前一段好氧区出水携带的DO可以被下一段缺氧区的异养菌迅速消耗,从而

保持良好的缺氧环境,以保证良好的反硝化效果。然而当进水流量分配比为2:5:3时,TN仍未达到满意的去除效果,下一步可适当降低第3段的进水比例而提高第1段的进水比例,以充分发挥第1段的SND脱氮效能;另外由于发生明显SND作用的第2段DO浓度仅为1.5 mg/L左右,故下一步考虑根据水力负荷进一步优化各段的曝气量以获得最大的SND效率,从而获得更高的脱氮效率。

3 结论

① SMAOBAF工艺系统采用快速排泥法启动,启动期较短,10 d后对COD和氨氮的去除率可分别达到90%和70%以上,微生物挂膜良好。

② 进水流量分配比对SMAOBAF工艺的有机物降解和硝化作用无显著影响,但对反硝化和同步硝化反硝化作用影响显著。当进水比为2:5:3时,系统的脱氮效果最好,TN去除率为70.8%,出水TN浓度可达到国家一级A排放标准。

③ 第1段和第3段的进水流量分配比不宜过高,应重点发挥第2段的缺氧反硝化和好氧SND效能联合强化脱氮。

参考文献:

- [1] Peng Y Z, Ge S J. Enhanced nutrient removal in three types of step feeding process from municipal wastewater [J]. Bioresour Technol, 2011, 102(11): 6405-6413.
 - [2] Nasab A R M, Soleymani S M, Nosrati M, et al. Performance evaluation of a modified step-feed anaerobic/anoxic/oxic process for organic and nutrient removal [J]. Chinese J Chem Eng, 2016, 24(3): 394-403.
 - [3] Zhu G B, Peng Y Z, Wang S Y, et al. Comparative study of two biological nitrogen removal processes: A/O process and step-feeding process [J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2008, 24(4): 528-531.
 - [4] 孙亚男, 彭永臻, 王伟. 不同流量分配比下分段进水脱氮工艺的性能研究 [J]. 中国给水排水, 2008, 24(5): 18-21, 26.
 - [5] Sun Yanan, Peng Yongzhen, Wang Wei. Research on performance of step-feed biological nitrogen removal process under different influent flow rate distribution ratios [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(5): 18-21, 26 (in Chinese).
- [5] 王伟, 彭永臻, 孙亚男, 等. 分段进水A/O工艺流量分

(下转第129页)