

## HRT对多级A/O+悬浮填料组合工艺脱氮除磷的影响

陈杰云<sup>1</sup>, 余薇薇<sup>2,3</sup>, 杜邦昊<sup>2,3</sup>, 杨伦<sup>2,3</sup>, 朱家悦<sup>2,3</sup>, 魏迅<sup>4</sup>

(1. 重庆市渝北区建设工程质量监督站, 重庆 401120; 2. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 3. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 4. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381)

**摘要:** 采用多级A/O+悬浮填料组合工艺处理低碳源生活污水,考察了水力停留时间(HRT)对COD、NH<sub>3</sub>-N、TN和TP去除效果的影响。结果表明,当HRT大于8 h时,出水COD、NH<sub>3</sub>-N和TN浓度能够稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,但对TP的去除效果一般,去除率不足75%。悬浮填料生物膜形成的缺氧微环境条件有利于同步硝化反硝化(SND)过程的发生,脱氮效果好于传统活性污泥系统。这为低碳源生活污水处理选择适宜的HRT提供了理论依据。

**关键词:** 多级A/O; 悬浮填料; 低碳源; 水力停留时间; 同步硝化反硝化

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2017)09-0031-04

## Effect of Hydraulic Retention Time on Nitrogen and Phosphorus Removal in Multistage A/O + Suspended Carrier Combined Process

CHEN Jie-yun<sup>1</sup>, YU Wei-wei<sup>2,3</sup>, DU Bang-hao<sup>2,3</sup>, YANG Lun<sup>2,3</sup>, ZHU Jia-yue<sup>2,3</sup>, WEI Xun<sup>4</sup>

(1. Chongqing Yubei District Municipal Construction Engineering Quality Supervision Station, Chongqing 401120, China; 2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 4. North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China)

**Abstract:** The multistage A/O + suspended carrier combined process was applied to treat low carbon source domestic sewage, and the effect of hydraulic retention time (HRT) on chemistry oxygen demand (COD), ammonia nitrogen (NH<sub>3</sub>-N), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) removal efficiency was investigated. The experimental results showed that the effluent concentrations of COD, NH<sub>3</sub>-N and TN could steadily achieve the first class A criteria specified in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002). However, the removal efficiency of TP was relatively poor with removal rate of less than 75%. Anoxic microenvironment condition formed by biofilm on suspended carrier was in favor of simultaneous nitrification and denitrification (SND), so the nitrogen removal efficiency was better than traditional activated sludge system. This provides a theoretical

basis for selecting suitable HRT for low-carbon source sewage treatment.

**Key words:** multistage A/O; suspended carrier; low carbon source; hydraulic retention time; simultaneous nitrification and denitrification

我国许多城市污水厂的进水以低碳源生活污水为主,可通过外加碳源满足反硝化脱氮需求<sup>[1,2]</sup>,但也存在占地面积增大、处理成本提高等问题,故充分利用污水中的碳源是处理该类污水的关键所在。

国内外的试验和工程应用结果表明,分段进水 A/O 工艺具有脱氮效率高、节省内回流、污泥浓度高、池体容积小、基建投资和运行费用省、运行方式灵活等特点<sup>[3-5]</sup>。悬浮填料是一种生物载体,其巨大的比表面积可增加污泥浓度,而且可以为微生物提供附着生长环境,有利于世代周期长、增殖速度慢的硝化细菌生长<sup>[6]</sup>。投加悬浮填料后,填料上附着生长的生物膜增加了活性生物量,在与悬浮生长的活性污泥的共同作用下,可有效改善对污水的处理效果,提高了出水水质,且对溶解氧的变化有较强的耐冲击能力<sup>[7]</sup>。悬浮填料生物膜上的微生物呈附着态,产生的溶解氧梯度有利于形成缺氧微环境,从而易于发生同步硝化反硝化(SND)现象<sup>[8]</sup>。硝化过程消耗的碱度与反硝化过程产生的碱度相互抵消,可以有效地保持系统的 pH 值稳定,而且可以减少缺氧池容积,缩短反应时间<sup>[9]</sup>。同时,悬浮填料生物膜生长变厚可以形成厌氧条件,有利于培养驯化聚磷菌,起到除磷作用<sup>[10]</sup>。笔者采用多级 A/O + 悬浮填料组合工艺处理低碳源生活污水,探讨了 HRT 对 COD、NH<sub>3</sub>-N、TN 和 TP 去除效果的影响,以期选择适宜的 HRT 提供理论依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验水质与装置

试验原水为某大学宿舍生活污水,由排污管收集后流入实验室外的蓄水池,污水中漂浮物及大粒径悬浮物经筛网过滤去除,通过水泵提升到高位水箱后进入反应器。试验期间原水水质较稳定,进水 COD 为 215 ~ 240 mg/L, NH<sub>3</sub>-N 为 35 ~ 42 mg/L, TN 为 40 ~ 47 mg/L, TP 为 3.8 ~ 4.2 mg/L, pH 值为 6.8 ~ 7.9。试验过程中根据水质情况投加适量的葡萄糖、无水乙酸钠等试剂,使其接近低碳源城市生活污水水质。

试验装置由高位水箱、多级 A/O + 悬浮填料反应器和二沉池组成,工艺流程见图 1。高位水箱尺

寸为 750 mm × 750 mm × 1 000 mm,有效容积为 393 L;反应器尺寸为 720 mm × 660 mm × 1 000 mm,有效容积为 332 L,其中有效水深为 70 cm。反应器横向等分为三段矩形槽,每级缺氧区(A 段)和好氧区(O 段)的容积可以通过调整隔板位置进行控制,好氧区采用黏砂曝气头曝气并投加一定量的悬浮生物填料,缺氧区采用潜水泵搅拌。试验设计规模为 1 m<sup>3</sup>/d,采用竖流式二沉池,上部沉淀区呈圆柱形,直径为 500 mm,污泥斗为截头倒锥体,倾角为 60°,总高度为 850 mm,采用中心管进水、周边三角堰出水方式。回流污泥采用蠕动泵抽升至缺氧一区。

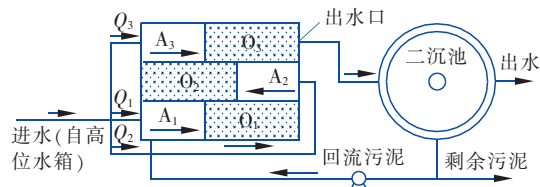


图1 多级 A/O + 悬浮填料组合工艺流程

Fig. 1 Flow chart of multistage A/O + suspended carrier combined process

### 1.2 悬浮生物填料

采用 Kaldnes K<sub>3</sub> 型高密度聚乙烯填料,其呈圆柱状,直径和高度分别为 25、12 mm,比表面积为 500 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>,表面较粗糙,密度为 950 kg/m<sup>3</sup>,生物膜固着性能良好,特殊的结构使其在运行过程中不易堵塞和结团,空隙率较大,通气、过水性能良好<sup>[11]</sup>。

### 1.3 分析项目及方法

COD 采用重铬酸钾法测定, MLSS 采用重量法测定, NH<sub>3</sub>-N 采用纳氏试剂分光光度法测定, TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定, TP 采用钼酸铵分光光度法测定。

### 1.4 试验方案

试验采用三段连续进水运行方式,进水流量分配比为 5 : 3 : 2,缺氧区和好氧区的容积比为 2 : 3,好氧区采用梯级曝气方式, DO 依次为 0.5、1.0 和 1.5 mg/L,悬浮生物填料填充率为 40%。回流比采用 100%,水温为 20 ~ 25 ℃,污泥龄控制在 15 d 左右。试验在 HRT 为 4、6、8、10 和 12 h 五个工况下进

行,每个工况都有一段时间的污泥适应期,待组合工艺运行稳定后对混合液水质指标进行检测。考虑到组合工艺运行状态发生改变时悬浮填料生物膜上的微生物演替不如活性污泥快,且悬浮填料上的生物膜是一个逐渐变厚的过程,为尽量避免试验间的相互干扰,加快试验进度,采用有机负荷从低到高的顺序进行试验,即先进行HRT为12 h的试验,最后进行HRT为4 h的试验。

## 2 结果与讨论

### 2.1 HRT对COD去除效果的影响

随着HRT的增大,COD去除率先增加后趋于稳定(见图2)。HRT为10 h和12 h时,出水COD均在20 mg/L左右,剩余的COD基本为不可生物降解的或微生物内源呼吸的残留物,此时水流速度较低,悬浮填料生物膜上的微生物对COD的去除起主要作用;HRT为6 h和8 h时,出水COD在40 mg/L以下,去除率接近85%;HRT为4 h时,相比于HRT为8 h时2 000 mg/L的MLSS,系统MLSS浓度降低了35%,仅约为1 300 mg/L,但对COD的去除率接近80%,去除效果仍较好,这是因为系统在较高有机负荷下运行时,附着在填料上的微生物对有机物的去除起主要作用<sup>[12,13]</sup>。反应器中有机负荷增加时,悬浮相污泥减少,而附着相生物量和总生物量增加,且附着相生物量在总生物量中所占的比例随有机负荷的增加而增加,因此组合工艺有一定的耐冲击负荷能力。当有机负荷较高时,可以通过增大回流比来增加组合工艺的活性污泥浓度,从而提高对COD的去除效果。

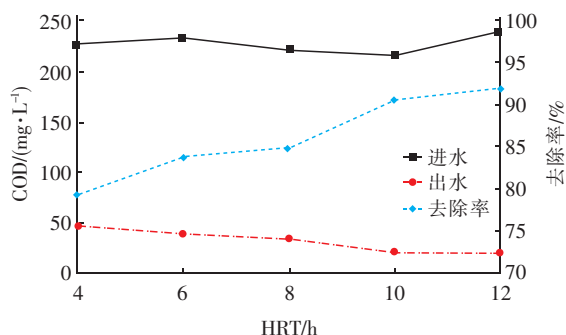


图2 HRT对去除COD的影响

Fig. 2 Effect of HRT on COD removal

### 2.2 HRT对脱氮的影响

对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN的去除率随着HRT的增加而不断提高,在HRT>8 h的条件下,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和

TN浓度可稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准(见图3)。

HRT为10 h和12 h时,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度小于1.2 mg/L,去除率在97%以上;HRT为8 h时,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为2.94 mg/L,去除率为91.67%;HRT为6 h时,对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率接近70%,此时与活性污泥系统相比,悬浮填料生物膜上微生物基本呈固着状态,污泥龄较长,有利于世代周期长、增殖速度慢的硝化细菌生长并成为优势菌群<sup>[14]</sup>,组合工艺的硝化能力得以提升,因此,组合工艺的硝化效率依然维持在较高水平;HRT为4 h时,由于生物膜上的硝化细菌没有充分的接触时间,同时进水流量偏大会使悬浮相污泥中的硝化细菌流失,从而导致出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度偏高,不过此时的去除率仍接近60%,比传统活性污泥系统提高了很多。

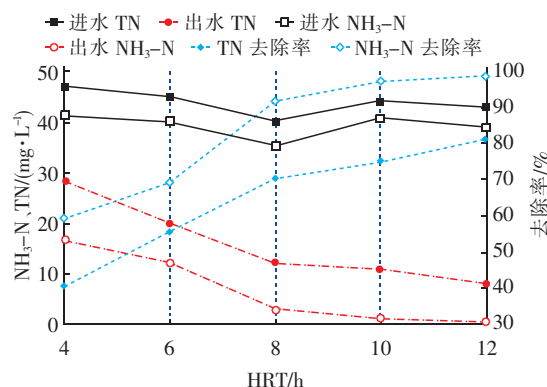


图3 HRT对去除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN的影响

Fig. 3 Effect of HRT on  $\text{NH}_3\text{-N}$  and TN removal

HRT为4 h时,出水TN为28 mg/L,去除率只有40%,此时HRT过短,进水流量偏大,导致携带的溶解氧增加,硝化细菌利用碳源进行代谢,从而影响反硝化细菌的脱氮过程;同时,进水流速偏快,水流对悬浮填料的冲刷作用加速了生物膜更新,生物膜厚度不足以形成反硝化过程所需的缺氧环境,故对TN的去除效果不佳。HRT为6 h和8 h时,出水TN分别为20和11.93 mg/L,此时系统中 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度下降, $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度升高,水力停留时间的延长有利于硝化细菌的生长,同时悬浮填料生物膜上的微生物处于更好的缺氧微环境条件,使得同步硝化反硝化反应明显,脱氮效果较好。水力停留时间为10 h和12 h时,TN去除率分别为75%和81.4%,水力停留时间的进一步增大对出水TN浓度的影响不大。



## 2.3 HRT对TP去除效果的影响

随着HRT的延长,对TP的去除率增大,但均不足75%,出水TP浓度偏高。HRT为4h时,出水TP为2.3 mg/L,去除率为45.24%,此时水力停留时间过短,从而影响聚磷菌好氧吸磷,对TP的去除效果较差;HRT为6h时,出水TP为1.8 mg/L,去除率升至53.16%;HRT为8、10和12h时,TP去除率分别为63.92%、69.54%和72.77%。由于进水COD浓度不高,有限的碳源在脱氮过程中被消耗,故系统的整体除磷效果一般,建议后期考虑化学除磷方式。

## 3 结论

① 多级A/O+悬浮填料组合工艺对主要污染物的去除率随着HRT的增大而提高。当HRT>8h时,出水COD、NH<sub>3</sub>-N和TN浓度能够稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,由于未设置厌氧区,对TP的去除效果一般,可考虑采取化学除磷方式。

② 悬浮填料生物膜中形成的缺氧微环境有利于同步硝化反硝化过程的发生,对TN的去除效果好于传统活性污泥系统。同时,悬浮填料的投加使组合工艺具有较强的耐冲击负荷能力。

③ HRT过长不利于系统高效运行和控制建设成本,在保证出水水质的前提下,多级A/O+悬浮填料组合工艺的HRT控制在8h左右为宜。为提高系统对HRT的适应性,在低HRT工况下,可采取增加曝气和减少排泥的措施以提高脱氮效果。

## 参考文献:

- [1] 杨敏,孙永利,郑兴灿,等. 不同外加碳源的反硝化效能与技术经济性分析[J]. 给水排水,2010,36(11): 125-128.
- [2] 操家顺,侯梁浩,方芳,等. 温度及外加碳源对生物脱氮除磷过程的影响[J]. 环境工程学报,2013,7(6): 2013-2018.
- [3] 葛士建,彭永臻. 连续流分段进水工艺生物脱氮除磷技术分析及优化控制[J]. 环境科学学报,2009,29(12): 2465-2470.
- [4] 胡博,赵剑强,陈莹,等. 多段进水A/O生物膜工艺运行性能的研究[J]. 中国环境科学,2011,31(10): 1644-1650.
- [5] Cao G, Wang S, Peng Y, et al. Biological nutrient removal by applying modified four step-feed technology to treat weak wastewater[J]. Bioresour Technol, 2013, 128(1):

604-611.

- [6] 李倩,曹国凭,郑兴灿,等. 悬浮填料强化硝化功能及温度影响试验研究[J]. 中国给水排水,2013,29(5): 50-54.
- [7] 宋旭升,毕学军,吴涛. 悬浮填料强化活性污泥系统硝化功能的试验研究[J]. 工业水处理,2011,31(4): 19-22.
- [8] Gonzalez B C, Spinola A L, Lamon A W, et al. The use of microsensors to study the role of the loading rate and surface velocity on the growth and the composition of nitrifying biofilms[J]. Water Sci Technol, 2011, 64(8): 1607-1613.
- [9] 曹文娟,徐祖信,王晟. 生物膜中同步硝化反硝化的研究进展[J]. 水处理技术,2012,38(1): 1-5.
- [10] Wu G, Nielsen M, Sorensen K, et al. Distributions and activities of ammonia oxidizing bacteria and polyphosphate accumulating organisms in a pumped-flow biofilm reactor[J]. Water Res, 2009, 43(18): 4599-4609.
- [11] 刘景明,刘慧,乔淑媛,等. 废水处理有机填料的合成材料现状和展望[J]. 环境科学与技术,2010,33(S1): 321-326.
- [12] 刘春,年永嘉,张静,等. 微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究[J]. 环境科学,2014,35(6): 2230-2235.
- [13] 赵一宁,汤兵,张忠华,等. 利用悬浮填料附着生物膜同步去除碳氮磷[J]. 环境工程学报,2012,6(12): 4553-4558.
- [14] 张文燕,马金星,王志伟,等. 有机负荷对膜-生物反应器硝化性能的影响[J]. 环境污染与防治,2012,34(2): 39-44.



作者简介:陈杰云(1984—),男,湖北武穴人,博士,高级工程师,研究方向为水污染控制理论及技术和工程质量管理。

E-mail: chenjieyun1004@163.com

收稿日期:2017-01-13