

# 多级 A/O 耦合生物膜反硝化处理低 C/N 值生活污水

阚睿哲, 李 军, 卞 伟, 王 盟, 王文啸, 赵昕燕, 赵 青  
(北京工业大学建筑工程学院 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室,  
北京 100124)

**摘 要:** 首先采用分段进水多级 A/O 工艺处理低 C/N 值生活污水,通过投加乙酸钠强化反硝化性能,并针对试验过程中出现的污泥膨胀、碳源利用率低等问题,提出了多级 A/O 耦合生物膜反硝化强化脱氮工艺。探究 C/N 值对多级 A/O 工艺以及耦合系统性能的影响,并对比两者的异同;同时通过批式试验考察了碳源类型对污泥沉降性能的影响。当进水 C/N 值为 2~5 时,两种工艺对 COD 的去除效果差异不大,出水 COD 均低于 50 mg/L。两者去除  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的差异较大,当 C/N 值=5 时多级 A/O 工艺对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率为 88.8%,出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  高于 5 mg/L,而耦合工艺受 C/N 值的影响不大,对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率保持在 96.8%~99.6%,平均去除率为 98.7%。两者对 TN 的去除率都随 C/N 值的增大而升高,但在 C/N 值=3~5 时,耦合工艺较多级 A/O 工艺分别高出 5.4%、5.4%、9.7%,且耦合工艺对 TN 的去除率呈线性增长。另外当底物充足时,乙酸钠、葡萄糖、淀粉均不会对污泥膨胀造成进一步恶化。

**关键词:** 多级 A/O; 生活污水; 低碳氮比; 生物膜; 外加碳源; 后置反硝化

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2017)01-0027-06

## Treatment of Domestic Sewage with Low C/N Ratio by Coupling Process Multistage A/O and Denitrifying Biofilm

KAN Rui-zhe, LI Jun, BIAN Wei, WANG Meng, WANG Wen-xiao, ZHAO Xin-yan,  
ZHAO Qing

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering,  
College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Step-feed multistage A/O process was used to treat domestic sewage with low C/N, and denitrification performance was enhanced by adding sodium acetate. To address the problems of sludge bulking and low carbon utilization rate during the test, the coupling process of multistage A/O and denitrifying biofilm was proposed. The effects of C/N ratio on the performance of the multistage A/O process and the coupling process were studied, the similarities and differences between the both were compared, and the influence of carbon type on sludge settleability was investigated in batch experiments. The results showed that when the influent C/N was 2 to 5, there was no difference in the removal of COD of the two processes, and the effluent COD was less than 50 mg/L. But there was difference in removal of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ . When C/N ratio was 5, the removal rate of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  of the multistage A/O process was 88.8% and the

effluent  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  was higher than 5 mg/L. However, the C/N ratio had little effect on the coupling process, the removal rate of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  remained at around 96.8% to 99.6%, with the average removal rate of 98.7%. The removal rate of TN of the two processes increased with the increase of C/N ratio, but when C/N ratio was 3 to 5, the removal rates of TN of the coupling process were 5.4%, 5.4% and 9.7% higher than that of the multistage A/O process, and the TN removal rate of the coupling process showed a linear growth trend. In addition, when the substrate was sufficient, sodium acetate, glucose and starch would not cause further deterioration of sludge bulking.

**Key words:** multistage A/O; domestic sewage; low carbon to nitrogen ratio; biofilm; external carbon source; post denitrification

相比于传统的活性污泥工艺,分段进水多级 A/O 工艺具有脱氮效率高、充分利用原水碳源、负荷均衡、能耗低、抗冲击负荷能力强<sup>[1-3]</sup>等优点。在我国大部分城市生活污水的 C/N 值较低,因此需要考虑投加碳源以满足反硝化脱氮的要求。侯红娟等<sup>[4]</sup>提出当进水 C/N 值 < 3.4 时,需投加碳源来保证生物脱氮效果。而碳源投加过量有可能对污泥沉降性能产生影响,祝贵兵等<sup>[5]</sup>研究发现随着外加碳源的增多,第一段的高负荷和溶解氧的不足可能导致污泥膨胀。

也有研究认为进水中碳源的种类对污泥沉降性能以及丝状菌的繁殖有选择性的影响<sup>[6,7]</sup>。因而碳源类型及其投加方式成为关键问题,既要保证对外加碳源的充分利用,又要避免碳源增多导致污泥膨胀现象的发生。因此,笔者在考察投加碳源后分段进水多级 A/O 工艺处理低 C/N 值生活污水效果的基础上,针对产生的碳源利用率低、污泥膨胀等问题,采用批式试验考察了碳源类型对污泥沉降性能的影响,并提出多级 A/O 与后置反硝化生物膜装置的耦合工艺,以期为强化脱氮提供指导和依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验装置

试验采用分段进水多级 A/O 活性污泥法耦合反硝化生物膜反应器(见图1),该装置的曝气区与非曝气区的体积比约为 2:1,每个区均设折流板,从而使每区均为顶部进水、底部出水,避免曝气区对非曝气区的影响。反应器由有机玻璃粘制而成,反应区长为 90 cm、宽为 60 cm、高为 60 cm,其中有效高度为 50 cm,总容积为 324 L,有效容积为 270 L。二沉池采用竖流式,体积为 90 L,定期从底部排空管排泥。反硝化生物膜装置的有效容积为 45 L。采用 5 台蠕动泵分别控制进水、污泥回流、外加碳

源,采用鼓风机为系统好氧格室供气,通过空气流量计控制曝气量以保证  $\text{DO} > 2 \text{ mg/L}$ 。采用 3 台电动搅拌机对缺氧区进行搅拌。反应器各格室温度控制在 22 ~ 25 °C。

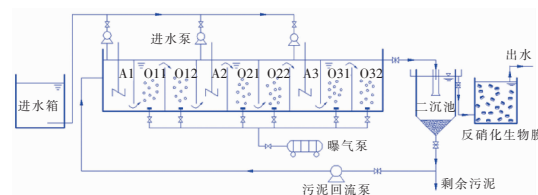


图1 三段进水 A/O 法耦合反硝化生物膜反应器示意  
Fig. 1 Schematic diagram of three-stage A/O coupled denitrifying biofilm reactor

取多级 A/O 好氧区的污泥置于 3 个序批式反应器(SBR)进行批式试验。反应器由有机玻璃制得,长为 20 cm、宽为 20 cm、高为 25 cm,有效容积为 10 L;由人工控制进水、曝气、沉淀、排水和闲置全过程;采用微孔曝气砂头曝气,曝气量由转子流量计调节。采用 DO 和 pH 探头在线监测反应器中 DO、pH 值的变化。

### 1.2 试验水质

多级 A/O 试验用水取自北京工业大学生活小区,属于典型的低碳氮值城市污水(水质见表1)。试验过程中不考虑除磷。

表1 原水水质

Tab. 1 Raw wastewater quality  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_2^- - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	TN
范围	112.9 ~ 214.0	65.81 ~ 100.15	0 ~ 0.84	0 ~ 4.38	85.10 ~ 122.33

注: 表中 COD 值为溶解性 COD 值。

批式试验采用人工配水,三个 SBR 反应器分别以乙酸钠、葡萄糖、淀粉作为碳源,进水 COD 为 300 mg/L,相应的投量分别为 384.38、300、282.2 mg/

L);分别以氯化铵和磷酸二氢钾为氮源和磷源,投量分别为 114.64、43.87 mg/L,使 C:N:P=300:30:10。

### 1.3 分析方法

氨氮:纳氏试剂分光光度法;亚硝酸盐氮:N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法;硝酸盐氮:麝香草酚分光光度法;TN:TOC 分析仪;COD:COD 快速测定仪;MLSS:重量法;SV:沉降法;DO:德国 WTW oxi330 溶解氧仪;pH 值:德国 WTW pH3310 仪。

### 1.4 试验方法

分段进水多级 A/O 工艺采用三段进水方式,主要控制参数:主反应区内 MLSS 平均值维持在 3 000~3 500 mg/L,初定流量分配比为 1:1:1,污泥回流比为 50%,污泥龄为 12 d 左右,系统 HRT 为 12 h。原水 C/N 值在 1~2 之间,无法保证对 TN 的全部去除。为此,通过投加不同浓度的乙酸钠来调整进水的 COD 浓度,控制 C/N 值分别为 2、3、4、5,每个反应阶段均在运行稳定的条件下进行沿程取样分析。

为研究碳源类型对污泥性能的影响,在序批式反应器(SBR)中对微膨胀的污泥(SVI=362.2 mL/g)进行批式试验,分别采用乙酸钠、葡萄糖、淀粉作为碳源,温度控制在 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,采用鼓风曝气,控制 $\text{DO} < 2 \text{ mg/L}$ ,每个周期曝气 6 h,每天运行 3 个周期,每个周期进水 5 L,排水比为 50%。考察其对 COD 的去除效果和 SVI 的变化。

反硝化生物膜填料来自运行良好的全程多级 A/O 脱氮反应器的缺氧池。填充比为 30%,温度控制在 22~25 $^\circ\text{C}$ ,通过投加碳源改变进水 C/N 值同样为 2、3、4、5,考察耦合工艺在不同 C/N 值下的性能。

## 2 结果与讨论

### 2.1 外加碳源对多级 A/O 工艺性能的影响

#### 2.1.1 对 COD 去除效果的影响

不同 C/N 值下对污染物的去除效果见图 2。在硝化反硝化工艺中,污水中有机物的去除主要是通过各级缺氧区微生物的同化、反硝化作用来完成,剩余部分在好氧区被异养菌氧化分解,使得有机物得到进一步去除。测定显示,对 COD 的去除率随着 C/N 值的增大而提高,当 C/N 值为 2~5 时进水 COD 为 108.3~431.9 mg/L,各阶段对 COD 的去除率分别为 64.3%、75.6%、84.2%、86.6%,出水

COD 均低于 50 mg/L。说明系统对有机物有较好的去除效果,且抗冲击负荷能力较强。

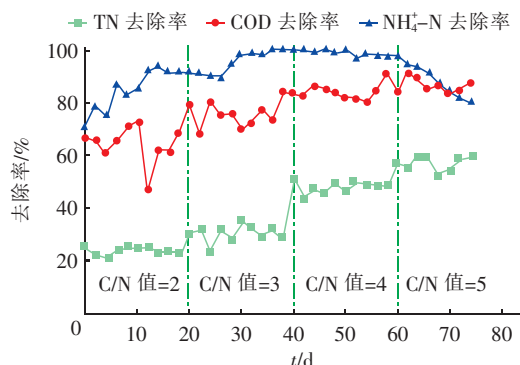


图 2 不同 C/N 值下对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、COD、TN 的去除效果

Fig. 2 Removal of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , COD and TN under different C/N ratios

在不同 C/N 值下沿程 COD 浓度的变化如图 3 所示,可以看出 C/N 值对 COD 的降解过程影响不大,主要是由于高氨氮的污水水质使得好氧池产生了较多的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  积累,即使 C/N 值=4 碳源也不足,所以在各级缺氧区有机物首先得到降解,使得出水 COD 浓度稳定。

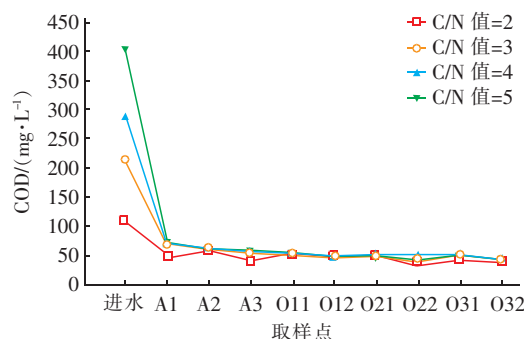


图 3 不同 C/N 值下 COD 的沿程降解

Fig. 3 Profile of COD concentration along process

#### 2.1.2 对硝化性能的影响

在低 C/N 值条件下,硝化菌所占比例相对较大,此时系统的硝化速率较高(见图 4)。当 C/N 值增大时,系统去除氨氮的能力逐渐减弱,系统的硝化速率降低,这主要是由于随着进水有机物浓度的升高,异养菌在缺氧区利用存在的少量溶解氧和易降解的有机物大量繁殖,导致在好氧区异养菌与硝化菌对于底物和溶解氧的竞争更加激烈,并且在此过程中污泥的沉降性能也逐渐变差,在 C/N 值=5 时对氨氮的去除率仅为 88.8%,出水氨氮浓度高于 5 mg/L,SVI 达到了 247 mL/g。而在各 C/N 值下氨氮

浓度的沿程变化相似,在反应过程中  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度基本为零,即为全程硝化反应。

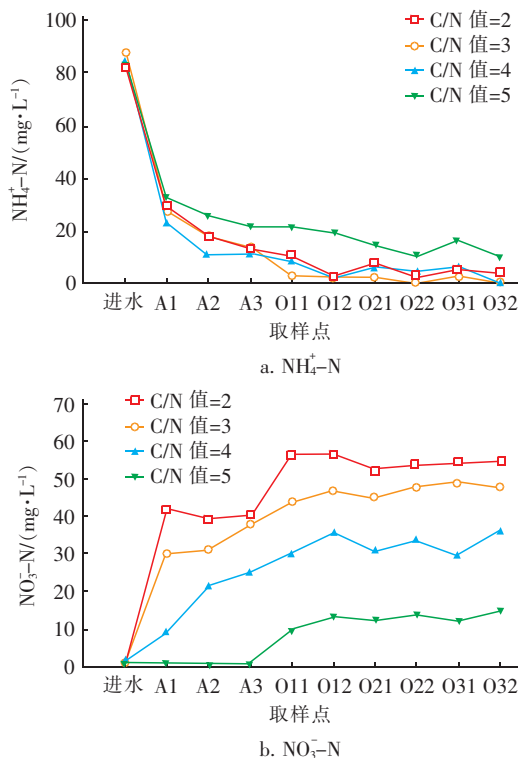


图4 不同 C/N 值下  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度的沿程变化

Fig. 4 Profile of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  concentration along process

### 2.1.3 对 TN 的去除性能

由图2可知,随着 C/N 值的升高, TN 去除率逐渐增加,各阶段的平均值分别为 23.7%、30.3%、47.9%、57.1%。结合图4(b)可知,硝酸盐氮在各缺氧区、好氧区基本呈逐渐升高的趋势,当 C/N 值为 2~4 时,由于进水碳源不足及高氨氮,各缺氧区会出现硝酸盐氮的剩余,硝酸盐氮的累积造成较高的出水 TN 浓度。但当进水 C/N 值 = 5 时, TN 去除率上升缓慢,这是由于此时硝化速率减弱,各段进水碳源可满足反硝化要求,硝酸盐氮无累积,出水 TN 浓度由最末段分配水量来决定。由于采用等比例进水方式,因此,最后一段进入的 1/3 水量将只进行硝化反应,而不经历反硝化反应,出水 TN 即为硝化反应出水的硝酸盐氮, TN 去除率必然受到一定限制。

### 2.1.4 污泥沉降性能的变化

随着 C/N 值的增加, SVI 值增高,各 C/N 值下的 SVI 分别为 83、124、131、247  $\text{mL/g}$ ,且有继续上升的趋势。当 C/N 值达到 5 时,肉眼可观察到粘稠

丝状污泥,镜检发现存在大量的丝状菌。其原因可能是在高有机物负荷冲击及等比例进水条件下,由于多级 A/O 的污泥浓度在反应器内呈梯形分布,使得第一级的污泥负荷较后两级的小,导致第一级的好氧池处于低溶解氧状态,而在低溶解氧状态下丝状菌比菌胶团细菌有更高的溶解氧亲和力,对低溶解氧的忍耐力更强,因而容易导致丝状菌污泥膨胀的发生<sup>[8]</sup>。

## 2.2 碳源类型对污泥沉降性能的影响

批次试验中接种污泥的 SVI 为 362.2  $\text{mL/g}$ ,其沉降性能较差,为膨胀污泥。在采用不同碳源培养期间,对 COD 的去除情况和各反应器内 SVI 的变化如图5所示。

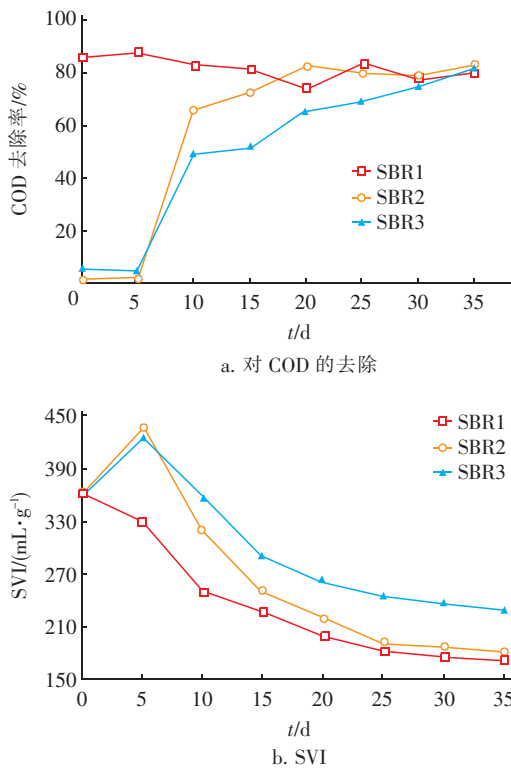


图5 碳源类型对去除 COD 及 SVI 的影响

Fig. 5 Influence of carbon source type on COD removal and SVI

在 SBR2 和 SBR3 运行过程中 SVI 值出现了短暂的波动,在第 5 天左右达到两者的最大值,分别为 436、426  $\text{mL/g}$ ,直到 35 d 左右才恢复到了 182、228  $\text{mL/g}$ 。而 SBR1 的 SVI 值一直处于降低趋势。分析认为:环境突变后,微生物对其不适应,导致了污泥沉降性能的暂时恶化,并且对有机物的去除效果也证实了这一点:SBR1 在运行 40 d 内对 COD 的去除



率一直较高,平均为 81.6%;而 SBR2 与 SBR3 在开始通过吸附作用去除了少部分 COD 后对有机物的去除率开始大幅提高,最终三个反应器对有机物的去除率均达到了 80% 以上。在持续运行一段时间后,三个反应器的 SVI 值均呈现降低的趋势。究其原因,虽然丝状菌在低溶解氧的条件下能进行新陈代谢<sup>[9]</sup>,但在底物浓度较高的系统中,菌胶团细菌的比生长速率高于丝状菌,因而赢得了对底物的竞争,本批式试验采用短时进水模式,这有利于菌胶团细菌对底物的吸收与贮存,逐渐抑制了膨胀恶化的趋势。从 SVI 值的变化趋势可以看出 SBR1 与 SBR2 内 SVI 的下降速率基本相同,而 SBR3 的下降速率较缓慢,这主要是由于乙酸钠与葡萄糖均属于小分子碳源,易被微生物分解利用,而溶解性淀粉在被利用之前,要先经过分子键断裂形成中小分子的碳源<sup>[10]</sup>,这与 SBR3 对 COD 降解缓慢的现象相符。

### 2.3 耦合工艺的除污性能

耦合工艺在不同 C/N 值下对 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 的去除情况见图 6。当进水 C/N 值在 3~5 之间时,出水 COD 平均浓度分别为 38.67、44.84、38.76 mg/L,均低于 50 mg/L。去除率随 C/N 值的增大而升高,对 COD 的去除效果与多级 A/O 工艺基本相同,表明两种工艺对 COD 的去除效果相差甚微。

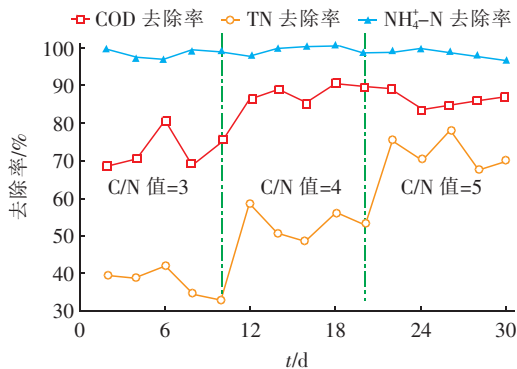


图 6 耦合工艺在不同 C/N 值下对 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 的去除

Fig. 6 Removal of COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and TN by combined process under different C/N ratios

耦合工艺对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率的变化与在前端集中投加碳源的多级 A/O 工艺不同,在 C/N 值 = 3~5 时,平均去除率分别为 98.4%、99.4%、98.3%,硝化性能波动不大。主要是由于碳源集中在后部投加,使得主体反应器中好氧区进入的有机物较少,抑制了异养菌的生长,减少了与硝化菌对 DO 的竞争,

表现出稳定良好的硝化效果。表明在低碳源条件下两种工艺的硝化效果相差不大;而当 C/N 值高时,多级 A/O 工艺的硝化效果出现波动,而耦合工艺可以保持良好的硝化效果。

耦合工艺对 TN 的去除率同样随碳源投量的增加而提高,但其提高程度要高于多级 A/O 工艺,当 C/N 值为 3、4、5 时 TN 去除率分别高出 5.4%、5.4%、9.7%。分析其主要原因为:在多级 A/O 工艺中投加的易降解碳源首先在缺氧区进行反硝化而得到大量降解,但还有少量碳源进入好氧区被异养菌去除,导致了碳源的浪费;而在耦合工艺中大部分被反硝化生物膜直接利用进行反硝化,使 TN 去除率得到提高。如 2.1.3 节所述,当多级 A/O 工艺中外加碳源过多时, TN 去除率提高的效果明显降低,而耦合工艺对 TN 的去除率则基本呈线性提高,因而 C/N 值为 5 时 TN 去除率的提高量明显多于多级 A/O 工艺(见表 2)。TN 的去除较大幅度受 COD 的限制,要使出水 TN 浓度 < 5 mg/L,则需再提高耦合工艺外加碳源投量或调整流量分配比。在耦合工艺运行一个月过程中,污泥的沉降性能得到好转,SVI 从最高的 470.5 mL/g 降低到 154.2 mL/g。对于多级 A/O 耦合生物膜反硝化工艺,既保证了对 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除,又提高了对 TN 的去除效果。

表 2 两种工艺对 TN 的去除率比较

Tab. 2 TN removal rate of two processes %

C/N 值	多级 A/O 工艺			耦合工艺		
	最大	最小	平均	最大	最小	平均
3	34.5	28.5	30.3	41.3	32.9	35.7
4	51.1	44.1	47.9	58.6	48.6	53.3
5	59.7	52.9	57.1	75.2	63.3	66.8

### 3 结论

① C/N 值对多级 A/O 工艺去除 COD 的影响不大,而对去除  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 的效果影响显著,但并非 C/N 值越高越好。当 C/N 值 = 5 时,对氨氮的去除率为 88.8%,出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  高于 5 mg/L,对 TN 的去除率仅从 47.9% 升高到 57.1%,SVI 也达到 247 mL/g 且有继续上升的趋势。

② 在短时进水、全程低氧曝气的条件下,以乙酸钠、葡萄糖、淀粉为碳源时均未引发污泥膨胀的恶化,SVI 值呈逐渐下降的趋势,但采用小分子碳源时污泥的性能恢复更快。

③ 在不同 C/N 值下耦合工艺出水 COD 平均

浓度能够达标,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率保持在 96.8% ~ 99.6%, 且 TN 去除率基本随 C/N 值呈线性增长, 污泥沉降性能也逐渐好转。在 C/N 值 = 3 ~ 5 时, TN 去除率较在前端投加碳源的多级 A/O 工艺分别高出 5.4%、5.4%、9.7%。

#### 参考文献:

- [1] 王冰. 四级三相式生物流化床分段进水工艺脱氮效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [2] Ge S, Peng Y, Qiu S, *et al.* Complete nitrogen removal from municipal wastewater via partial nitrification by appropriately alternating anoxic/aerobic conditions in a continuous plug-flow step feed process[J]. *Water Res*, 2014, 55(3): 95-105.
- [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] 侯红娟, 王洪洋, 周琪. 进水 COD 浓度及 C/N 值对脱氮效果的影响[J]. *中国给水排水*, 2005, 21(12): 19-23.
- [5] 祝贵兵, 彭永臻. 碳氮比对分段进水生物脱氮的影响[J]. *中国环境科学*, 2005, 25(6): 641-645.
- [6] 杨雄, 霍明昕, 王淑莹, 等. 碳源类型对污泥沉降性能及丝状菌生长的影响[J]. *化工学报*, 2011, 62(12): 3471-3477.
- [7] Ciggin A S, Orhon D, Rossetti S, *et al.* Short-term and

long-term effects on carbon storage of pulse feeding on acclimated or unacclimated activated sludge[J]. *Water Res*, 2011, 45(10): 3119-3128.

- [8] 武联菊. SBR 工艺中低溶解氧污泥微膨胀启动与维持的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
- [9] Eikelboom D H. Process control of activated sludge plants by microscopic investigation[M]. London: IWA Publishing, 2000.
- [10] 杨雄, 彭永臻, 宋姬晨, 等. 进水中碳水化合物分子大小对污泥沉降性能的影响[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(2): 448-456.



作者简介: 阚睿哲(1992-), 男, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 研究方向为水污染控制。

E-mail: 294468103@qq.com

收稿日期: 2016-02-15

(上接第 26 页)

- [9] Von Gunten U. Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation[J]. *Water Res*, 2003, 37(7): 1443-1467.
- [10] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter[J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37(24): 5701-5710.
- [11] Gao S, Zhao Z, Xu Y, *et al.* Oxidation of sulfamethoxazole (SMX) by chlorine, ozone and permanganate—a comparative study[J]. *J Hazard Mater*, 2014, 274: 258-269.
- [12] Cheng X, Liang H, Ding A, *et al.* Effects of pre-ozonation on the ultrafiltration of different natural organic matter (NOM) fractions: Membrane fouling mitigation, prediction and mechanism[J]. *J Membr Sci*, 2016, 505: 15-25.



作者简介: 成小翔(1989-), 男, 山东菏泽人, 博士研究生, 研究方向为膜法饮用水处理技术。

E-mail: cxx19890823@163.com

收稿日期: 2016-09-23