

方茜, 张朝升, 杜馨. 2009 间歇曝气模式对同步硝化反硝化稳定性的影响 [J]. 环境科学学报, 29(7): 1411-1418

Fang Q, Zhang C S, Du X. 2009 Influence of intermittent aeration on the stability of simultaneous nitrification and denitrification [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(7): 1411-1418

间歇曝气模式对同步硝化反硝化稳定性的影响

方茜*, 张朝升, 杜馨

广州大学土木工程学院, 广州 510006

收稿日期: 2008-10-31 修回日期: 2009-01-21 录用日期: 2009-05-26

摘要: 在不同间歇曝气 (IA) 模式下, 采用序批式活性污泥法 (SBR) 处理模拟低碳城市污水, 并考察了 ORP 和 pH 值的变化规律与同步硝化反硝化 (SND) 持续稳定性之间的关系. 结果表明, 在曝气百分数 (AF) 为 0.5 和高曝气频率 (f_{IA}) 的间歇曝气模式下, TN 去除率为 92%, ORP 均值均化程度最好, ORP 和 pH 值的稳定性最强. 因此, 低曝气百分数和高曝气频率的间歇曝气模式有利于 SND 过程的持续稳定, 且 ORP 均值的均化程度与 ORP 和 pH 值的稳定性可控制 SND 过程的稳定性. 另外, 低曝气频率的间歇曝气模式有利于顺序式硝化反硝化 (SQND) 的发生.

关键词: 城市污水; 同步硝化反硝化 (SND); 间歇曝气; ORP 和 pH

文章编号: 0253-2468(2009)07-1411-08 中图分类号: X703 文献标识码: A

Influence of intermittent aeration on the stability of simultaneous nitrification and denitrification

FANG Qian*, ZHANG Chaosheng DU Xin

College of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006

Received 31 October 2008 received in revised form 21 January 2009; accepted 26 May 2009

Abstract The present paper reports the results of the application of a sequencing batch reactor (SBR) to treat low carbon municipal wastewater under different intermittent aeration (IA) modes. The ORP and pH profiles and the stability of simultaneous nitrification and denitrification (SND) were correlated. The results showed that 92% of TN was removed in IA with aeration fraction of 0.5 and high air-on frequency. Under these conditions, the best average level of ORP and stability of ORP and pH values were achieved. These results suggest that IA with small aeration fraction and high air-on frequency should promote stable SND. The fluctuation range of the average level of ORP and the stability of the ORP and pH values may control the stability of SND process. In other experiments, a lower air-on frequency, that is, a longer air-on or air-off period, appeared to favor sequential nitrification and denitrification (SQND).

Keywords municipal wastewater; simultaneous nitrification and denitrification (SND); intermittent aeration; ORP and pH

1 引言 (Introduction)

同步硝化反硝化现象 (Simultaneous Nitrification and Denitrification, 简称 SND), 即硝化和反硝化可在同一空间内同时发生. 通过对影响 SND 发生的控制因素及机理研究可知, SND 工艺实现的关键在于系统内维持合理的低氧条件, 为硝化和反硝化的实现创造良好的微环境条件, 同时控制合理的 C/N 比和污泥龄及 pH 值来保证系统内硝化菌群和反硝化菌

群的正常生理功能的发挥. 低 C/N 比会使 SND 脱氮效率降低, 如何在碳源偏低情况下, 提高 SND 脱氮效率是低碳污水 SND 实现的难题. 低氧条件的实现对好氧曝气系统来说无疑是节能的良好途径, 而该条件的控制却与曝气模式密切相关. 连续曝气 (Continuous Aeration, CA) 操作简单, 但能耗较高 (曾薇等, 2002); 间歇曝气 (Intermittent Aeration, IA) 较连续曝气 (CA) 节省能耗, 还有利于好氧反硝化菌和异氧硝化菌的脱氮及 PHB 的积累和贮存

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50578044); 广东省自然科学基金 (No. 7301484)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50578044) and the Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 7301484)

作者简介: 方茜 (1973-), 女, 副教授 (博士), E-mail: gz_fq@126.com; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: FANG Qian (1973-), female, associated professor (Ph. D.), E-mail: gz_fq@126.com; * Corresponding author

(Robertson *et al*, 1988; Hong *et al*, 1999),这对低碳污水实现稳定的同步硝化反硝化非常重要. 另外, ORP和 pH的变化规律能不同程度地反映脱氮除磷生化反应的进程,可作为过程控制参数 (Akmh *et al*, 2005; Ju-Hyun K in 2004; Chen *et al*, 2002). 其中, ORP值能很好地反应 DO的变化情况,尤其是在 DO浓度非常低且难以直接用探头测定的条件下. 因此, ORP值的测定已被用于低氧曝气过程的控制 (Lo *et al*, 1994).

目前,关于 SND的研究大都集中在各种影响因素及机理方面,而对如何实现低碳污水的稳定 SND控制模式及其参数的研究却相对较少. 因此,本研究重点考察不同 IA运行模式下 SND过程的稳定程度与 ORP和 pH值变化规律之间的关系,并确定稳定 SND过程的参数条件,以期为低碳污水脱氮及后续SND与除磷过程耦合协同研究提供技术基础.

2 材料与方 法 (Materials and methods)

2.1 试验装置

试验装置如图 1所示. SBR反应器直径 20cm,圆柱体高 44cm,反应器底部为圆台型,高 10cm,总容积 13L,有效容积 12L;自控装置控制进水、曝气/非曝气和沉淀等操作过程,在非曝气段采用电动搅拌器进行搅拌;采用气泵曝气,转子流量计调节气量,粘砂块作为微孔曝气器;反应器内设置温度控制仪用于调控水温;在反应器中装有 DO、ORP和 pH传感器,在线监测反应过程中 DO、ORP和 pH值的变化情况. 高位水箱用于贮存水量和控制进水,有效容积 40L.

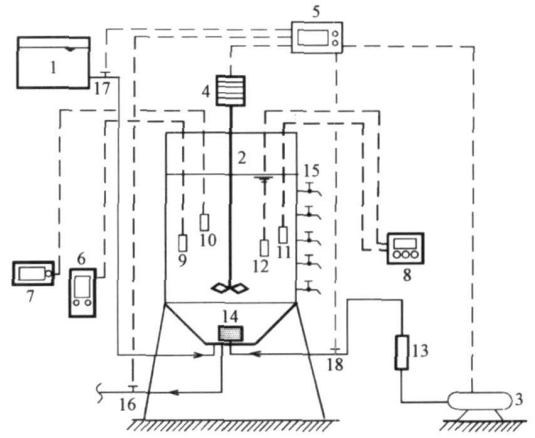


图 1 SBR试验装置 (1 水箱; 2 SBR反应器; 3 气泵; 4 电动搅拌器; 5 自控装置; 6 温度控制仪; 7 DO在线检测仪; 8 ORP和 pH在线检测仪; 9 加热探头; 10 DO传感器; 11 ORP传感器; 12 pH传感器; 13 转子气体流量计; 14 曝气头; 15 取样口; 16 排水阀; 17 进水阀; 18 进气阀)

Fig. 1 Schematic diagram of the SBR system (1 wastewater tank 2 SBR reactor 3 air pump 4 stirrer 5 timer 6 temperature meter 7 DO meter 8 ORP and pH meter 9 temperature sensor 10 DO sensor 11 ORP sensor 12 pH sensor 13 air float meter 14 air stone 15 sampling point 16 discharge sludge and wastewater valve 17 influent valve 18 air valve)

2.2 接种污泥

试验所用污泥取自广州市猎德污水处理厂 A/B工艺中 B段曝气池中的回流污泥,该污泥具有良好的脱氮除磷功能.

2.3 试验用水

试验用水为人工配制的模拟污水,主要以淀粉加啤酒作为碳源, NH_4Cl 为氮源, KH_2PO_4 为磷源,以 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 NaCl 等作为微量元素的来源,以 NaHCO_3 作为 pH调节剂. 水质见表 1.

表 1 模拟城市污水水质

Table 1 The characteristics of the synthetic wastewater

COD / (mg L^{-1})	BOD ₅ / (mg L^{-1})	TN / (mg L^{-1})	TP / (mg L^{-1})	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ / (mg L^{-1})	$\text{NO}_3^- \text{-N}$ / (mg L^{-1})	$\text{NO}_2^- \text{-N}$ / (mg L^{-1})	SS / (mg L^{-1})	pH
89.80~ 250.00	46.80~ 127.60	17.20~ 29.10	1.90~ 7.02	16.23~ 28.39	0.20~ 1.65	ND	-	6.80~ 7.70

注: ND表示未检出.

2.4 试验设计

试验设计的不同间歇曝气运行方式如表 2所示. 在整个反应过程中,根据间歇曝气时间的长短(间歇曝气频率 f_n),分为 A1、A2、A3、B1、B2和 B3

等 6种不同的运行工况. 其中, A1、A2和 A3工况的曝气百分数(1个反应周期内曝气时间占总反应时间的百分数, Aeration Fraction, 简称 AF)为 0.5; B1和 B2工况的 AF值为 0.83; B3工况的 AF值为

0.67. 每种工况的污泥龄控制在 22d 左右, 污泥浓度约为 5500 mg L^{-1} , 曝气量恒定为 $50 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$. 在相同曝气量下, 由于 AF 和 f_{IA} 的不同, 各工况所控制的 DO 浓度也不同. A1 和 A2 工况的 DO 浓度在 0.7 mg L^{-1} 以内; A3 工况的 DO 浓度在 0.6 mg L^{-1} 以内; B1 工况的 DO 浓度在反应前 4h 内为 1.0 mg L^{-1} 以内, 之后跃升至 5.0 mg L^{-1} ; B2 和 B3 工况的 DO 浓度在 0.8 mg L^{-1} 以内. 除 B1 工况外, 其余工况均维持了稳定的低氧条件. 为了更好反映间歇曝气时间短情况下 ORP 和 pH 值的变化规律, ORP 和 pH 值每隔 1min 记录 1 次, 然后计算 5min 之内的平均值, 这 2 个参数的一阶导数通过相邻 2 个均值来计算.

表 2 间歇曝气的运行工序

Table 2 Operating strategies of intermittent aeration (IA)

运行工况	运行工序			
	进水方式	间歇曝气工况时间 ($t_{\text{R}} = 300 \text{ min}$)	沉淀时间 /min	排水 闲置时间 /min
A1 ($f_{\text{R}} = 5$)	曝气	30min / 非曝气 30min		
A2 ($f_{\text{R}} = 10$)	曝气	15min / 非曝气 15min		
A3 ($f_{\text{R}} = 15$)	瞬时	曝气 10min / 非曝气 10min	50	10
B1 ($f_{\text{IA}} = 5$)	进水	曝气 50min / 非曝气 10min		
B2 ($f_{\text{IA}} = 10$)	曝气	25min / 非曝气 5min		
B3 ($f_{\text{IA}} = 20$)	曝气	10min / 非曝气 5min		

2.5 分析方法

试验中主要的分析指标包括: COD、TN、

$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、DO、pH 和 ORP 等. 其中, 除 DO、pH 和 ORP 采用 WTW 的系列仪器进行在线检测外, 其余均采用国家环境保护局发布的标准方法.

3 结果 (Results)

3.1 恒定 AF 值下不同间歇曝气模式的运行状况

在恒定 AF 值的 3 种运行工况 (A1、A2 和 A3) 下, 氮的转化规律及 ORP、pH 的变化规律如图 2 图 3 和图 4 所示.

由图 2 可看出, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 TN 浓度在 3 种工况下均呈持续下降的趋势, 且两者的去除率相等; $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度在 3 种工况下均无积累, 基本保持在 0.13 mg L^{-1} 以下; $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度在工况 A1 中, 随曝气和非曝气状态的更替呈现出顺序式的升高和降低, 在其余 2 种工况下也均无积累, 始终保持在 0.2 mg L^{-1} 以下. A2 和 A3 工况下, 在 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 降解的同时, 无 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的积累, TN 呈现出和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 相同的降解规律, 即在硝化的同时发生了反硝化 (即 SND 过程). 而 A1 工况下, 在 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 降解的同时, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 呈现顺序式的积累和降低, TN 虽呈现出与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 相同的降解规律, 但其脱氮主要是由顺序式的硝化和反硝化 (SQND) 所造成. 比较 3 种工况发现, TN 的去除率随 f_{R} 的增加而增加, 分别为 71%、91% 和 92%.

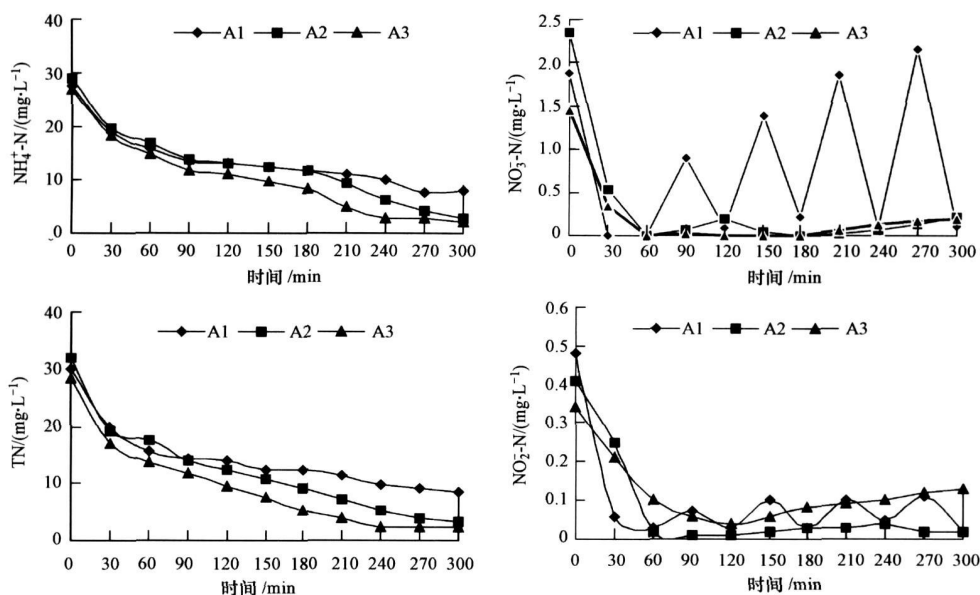


图 2 恒定 AF 值条件下的氮转化规律

Fig. 2 Nitrogen levels at fixed aeration fraction (AF) in a cycle

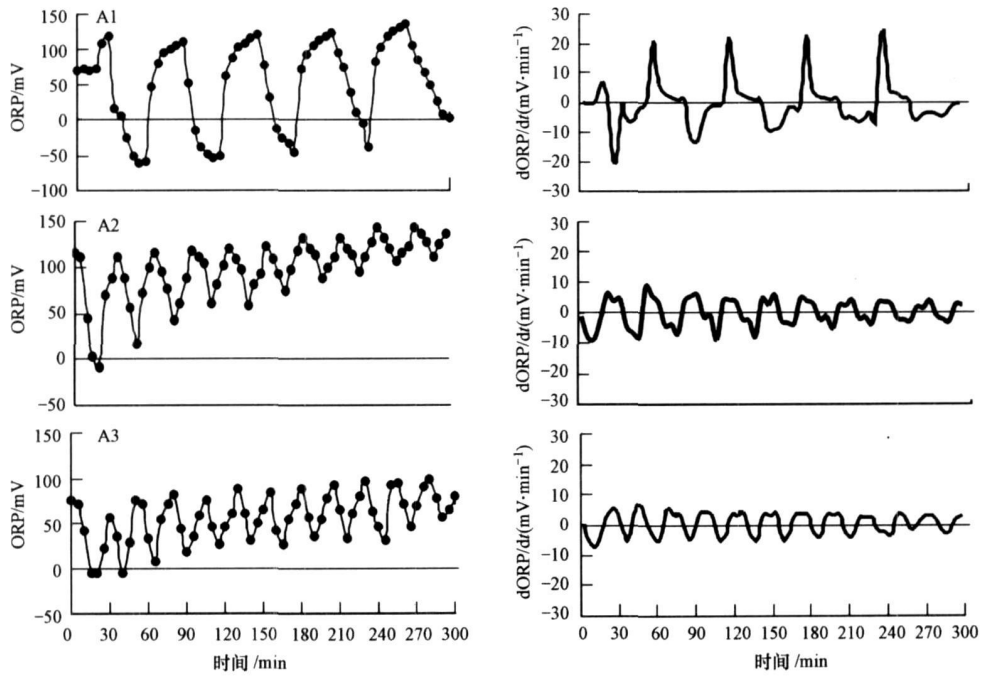


图 3 恒定 AF 值条件下的 ORP 变化规律

Fig. 3 ORP profiles at fixed AF in a cycle

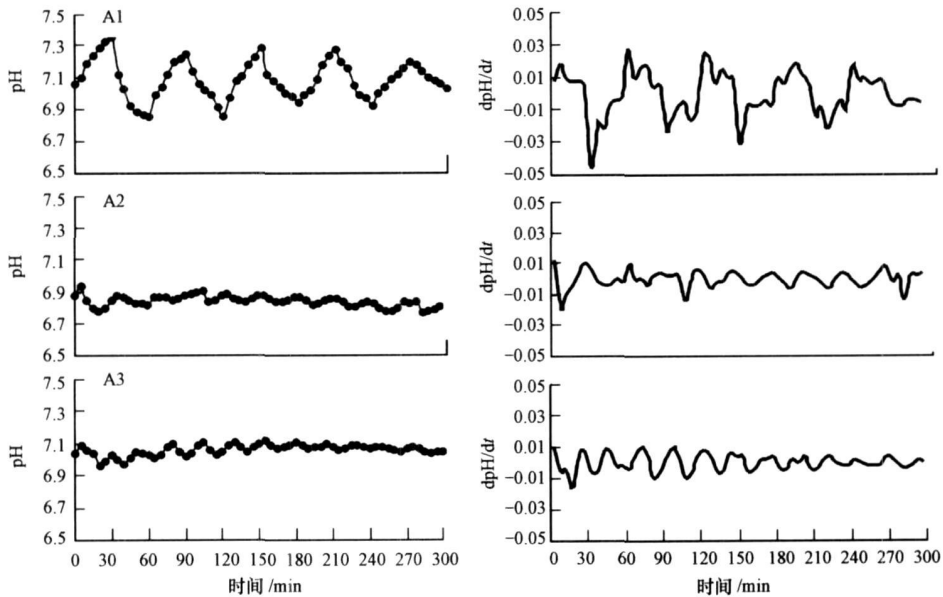


图 4 恒定 AF 值条件下 pH 的变化规律

Fig. 4 pH profiles at fixed AF in a cycle

由图 3 可知, ORP 曲线的波幅及其宽度随 f_{in} 的增加而变小, 并逐步趋于平缓. 这点可从 ORP 值对时间的一阶导数曲线上得到进一步的证实. 通常, ORP 值的一阶导数不仅能反映该值随时间的变化规律, 而且还作为传统活性污泥法硝化反硝化脱氮实时控制的控制点 (Ju-Hyun Kim 2004). 比较 3 种

工况下的 $dORP/dt$ 曲线变化规律发现, A1 工况下的 $dORP/dt$ 曲线上有明显的正、负“峰值”, 表示 ORP 值的急速升高和降低. 这些“峰值”点的出现时间与曝气/非曝气开始的时间点相吻合, 并随反应时间的延长, 负“峰值”越来越不明显. 由于正“峰值”表示 ORP 的增加, 氧化能力增强; 负“峰值”表

明 ORP 降低, 还原功能的增强. 表明随间歇曝气的进行, 反硝化反应有逐渐变弱的趋势. 同时, 各正“峰值”点与 A1 工况下 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 曲线的各“峰值”相对应, 负“峰值”对应于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 曲线上的“谷点”. 因此, A1 工况下的 $d\text{ORP}/dt$ 曲线不仅表明 ORP 值的大幅度波动, 而且还预示着硝化和反硝化反应的顺序发生. A2 和 A3 工况下的 $d\text{ORP}/dt$ 曲线上不仅没有正、负“峰值”的出现, 而且变化幅度随 f_{IA} 增加而明显减小, 尤其是 A3 工况下, $d\text{ORP}/dt$ 曲线围绕零值小幅度波动. 这表明在高 f_{IA} 的情况下, $d\text{ORP}/dt$ 值有趋零趋势, 即 ORP 值趋向于一个固定的常数. 此常数就是该工况下整个反应周期内 ORP 的均值.

从图 4 可以看出, pH 值在 3 种工况下的变化规律类似于 ORP. A1 工况中 pH 曲线上的“谷点”预示着顺序硝化的结束和反硝化的开始, 而且在高 f_{IA} 的情况下, pH 值的变化较 ORP 值更趋于稳定, 且始终保持在中性范围内. $d\text{pH}/dt$ 曲线的变化规律也类似于 $d\text{ORP}/dt$ 曲线, 随 f_{IA} 的增加而趋于零值.

因此, 在恒定曝气量和 AF 值的间歇曝气模式下, 随 f_{IA} 的增加, ORP 及 pH 值的变化趋于平和, 硝化和反硝化趋于平衡, TN 去除率依次升高, 这更有利于 SND 发生过程的稳定和完全. 而低 f_{IA} 则利于 SQND 的发生.

3.2 非恒定 AF 值下不同间歇曝气模式的运行状况

试验考察了曝气百分数分别为 0.83 和 0.67 时的氮转化规律及 ORP、pH 的变化规律. 试验结果如图 5 图 6 和图 7 所示.

由图 5 可看出, B1 工况下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 去除率分别为 99% 和 68%; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在反应前 3h 内有少量的顺序积累和降解, 3h 后持续积累至反应结束; $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 在整个反应过程中的顺序积累和降解均小于 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; TN 在整个反应过程中是持续降低的. 这表明反应前 3h 内发生了一定程度的 SQND 现象, 而在 3h 后则出现了一定程度的 SND 现象. B3 工况下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 去除率分别为 91% 和 90%, 在 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 持续降解的整个反应过程中均无 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累, 两者浓度均保持在 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 表明整个过程中发生了稳定而持久的 SND. B2 工况下 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 出现持续积累, 但积累量要明显低于 B1 工况; $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 在整个反应过程中也未出现积累现象. 因此, B2 工况下已无 SQND 的发生, TN 的去除主要是由于 SND 的发生. 从 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 降解曲线的变化趋势来看, B1 和 B2 工况下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 降解速率基本相当, B2 工况下的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率为 96%, 较 B1 工况略有下降; 相反, B2 工况下 TN 去除率为 81%, 较 B1 工况显著提高.

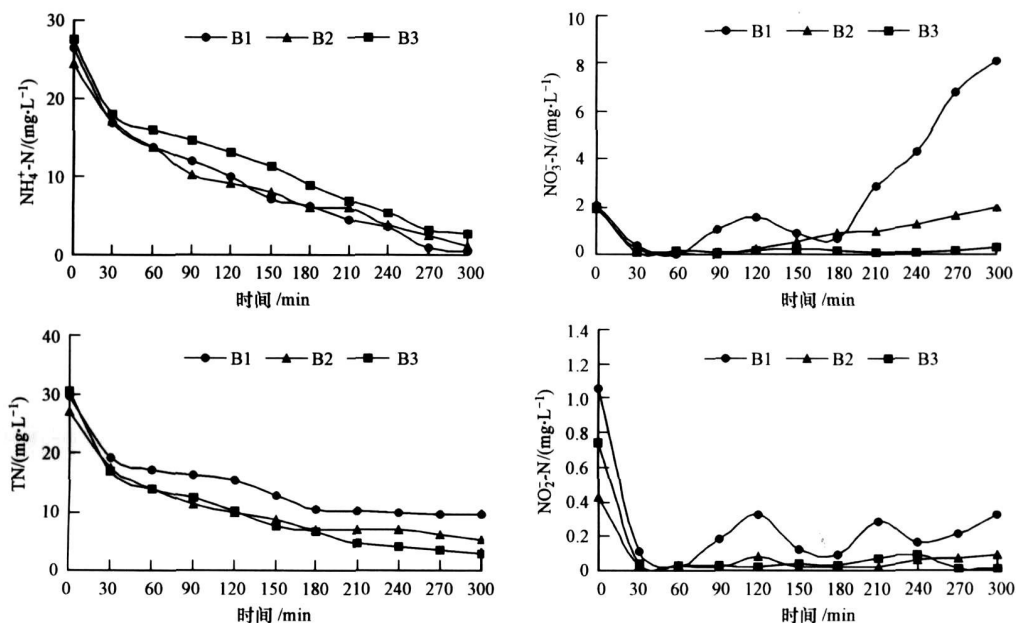


图 5 不同 AF 和 f_{IA} 值下的氮转化规律

Fig. 5 Nitrogen levels at different AF and f_{IA} in a cycle

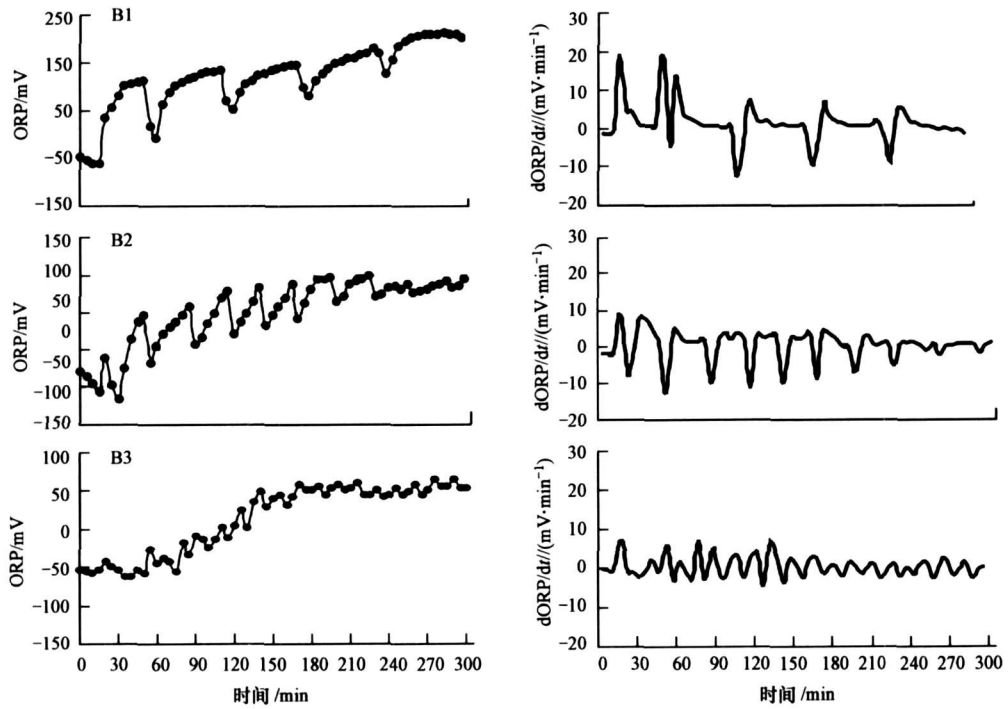


图 6 不同 AF 和 f_{IA} 值下的 ORP 变化规律

Fig. 6 ORP profiles at different AF and f_{IA} in a cycle

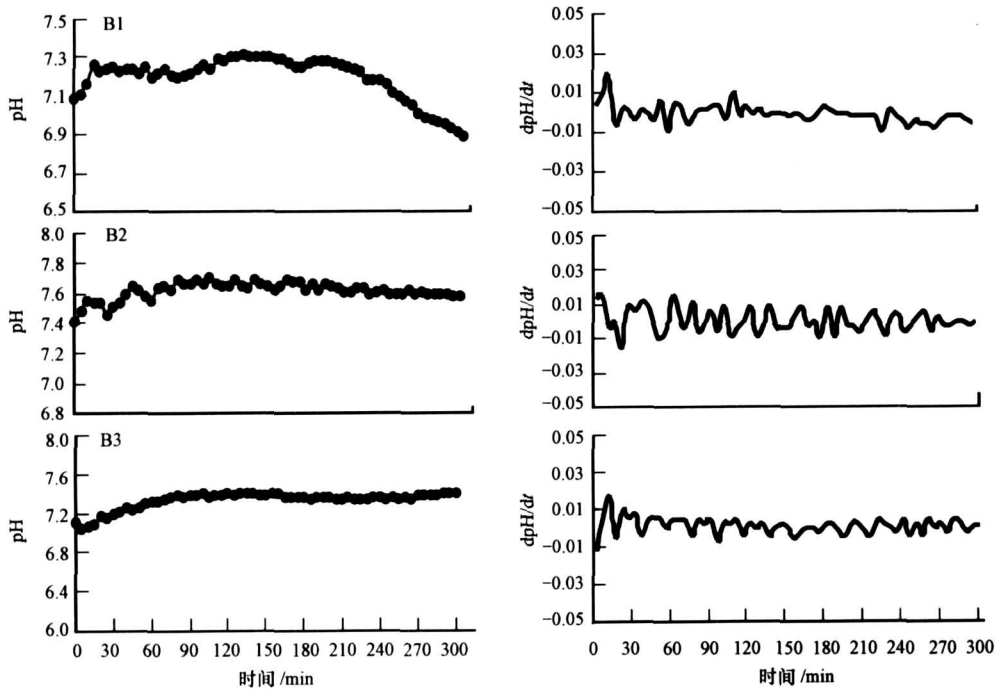


图 7 不同 AF 和 f_{IA} 值下 pH 的变化规律

Fig. 7 pH profiles at different AF and f_{IA} in a cycle

图 6 给出在不同 AF 和 f_{IA} 值下 ORP 值的变化规律. 从图 6 可以看出, 在 AF 值大于 0.5 的情况下, ORP 曲线均呈现出逐渐攀升的趋势, 且 AF 值越

大, 攀升趋势越强. 随着 AF 值的减小和 f_{IA} 的增加, ORP 均值逐渐减小, 且 ORP 值的波动也越小. 这一点可从 $dORP/dt$ 曲线的变化上得到进一步证实, B1

工况的 $dORP/dt$ 曲线上有尖锐的“正峰”和“负峰”, 且两者交替出现. 在反应前期, “正峰”值大于“负峰”值, 系统内主要体现为硝化反应. 随着反应的进行, “正峰”逐渐减弱, 而“负峰”值逐渐变大, 系统内主要表现为反硝化反应. 在反应后期, “正峰”和“负峰”值逐渐趋向于零, 即 ORP 值趋于稳定值. 这种变化不仅表明 B1 工况下硝化反应与反硝化反应的不均衡, 而且还证明了在 B1 工况下有一定程度的 SQND 发生. 由 B2 工况下的 ORP 变化曲线可发现, 在相同 AF 下, f_{IA} 的增加可减小 ORP 值的波幅并均衡硝化与反硝化反应, 更利于 SND 的发生. 因此, 该工况下的 $dORP/dt$ 曲线的波动也远小于 B1 工况. B3 工况下的 ORP 和 $dORP/dt$ 曲线变化说明, 当 AF 值进一步减小而 f_{IA} 继续增加时, $dORP/dt$ 曲线波动更小, 基本处于零值附近; ORP 值趋向于稳定的均值, 硝化与反硝化反应趋于平衡, 即更有利于 SND 的发生. 由图 7 的 pH 值变化曲线可以看出, B1 工况下的 pH 曲线在反应后期有缓慢下降的趋势, 但由于 pH 的下降较为平缓, 所以 dpH/dt 曲线上并没有出现明显的峰值点. B2 和 B3 工况下, pH 曲线的变化波动非常小, 基本为平滑曲线, 由 dpH/dt 曲线的变化趋势可知 B3 工况下的 pH 值更稳定.

在恒定曝气量和不同曝气百分数的间歇曝气模式下, 减小 AF 值和增加 f_{IA} 可明显降低 ORP 的波幅及均值, 使 pH 趋于稳定, 从而有利于 SND 的发生.

4 讨论 (Discussion)

4.1 ORP 和 pH 值的稳定性

试验过程中发现, 当 ORP 值趋向于该反应过程的均值, 且 pH 值稳定在中性范围 (图 3 图 4 图 6 和图 7) 时, SND 过程较为稳定和持续, TN 去除率也会明显提高 (A3 和 B3 工况), 这表明 ORP 和 pH 值的稳定性是 SND 过程持续稳定的重要因素.

在顺序式的硝化反硝化 (SQND) 过程中, pH 曲线上会出现指示硝化反应结束的“谷点”, 而 ORP 曲线上会出现指示反硝化反应结束的“膝点” (Akmh *et al.*, 2005). 理论上发生完全的 SND 过程需要硝化和反硝化速率相等 (Mnch *et al.*, 1996), 即硝化和反硝化过程的平衡, 此时的 ORP 值是一个稳定的常数, 也就是发生完全 SND 过程所需的最优 ORP 值. 但在实际运行过程中, 由于各种动态因素的影响和 ORP 对反应条件的敏感性, 在整个 SND 反应

过程内始终保持最优 ORP 值较为困难. 如果能控制 ORP 波动范围逐渐缩小并趋于无穷小时, 系统内的 ORP 值就无穷地接近 ORP 均值, 而 ORP 均值就越接近完全 SND 理论上所需的最优 ORP 值, 这一点可从工况 A3 中得到验证. A3 工况下 $dORP/dt$ 的均值趋于零, 表示 ORP 值趋于一个稳定的常数, 而此常数恰好是 ORP 波动范围内的 ORP 均值, 通过计算为 55mV. 同时, $dORP/dt$ 曲线的变化均匀且幅度较小, 这说明 ORP 值波动幅度小且与均值吻合性好. 因此, ORP 均值可近似认为该工况下的最优 ORP 值, 此工况下的 SND 过程最为稳定, TN 去除率也最高. 另外, 由于硝化过程消耗碱度造成 pH 值降低, 而反硝化过程产生碱度使 pH 值增加. 因此, 在无外加碱度的条件下, SQND 过程使 pH 值产生明显的升、降交替现象. 而对于完全的 SND 过程, 由于硝化和反硝化过程的平衡, 使碱度得到了部分补偿, pH 值保持在中性而稳定的范围内 (Hyungseok *et al.*, 1999). 在工况 A2 A3 B2 和 B3 中 pH 值的变化规律可明显看出.

4.2 间歇曝气频率 f_{IA}

比较不同间歇曝气模式下的各种运行工况可发现, f_{IA} 是一个与 SND 过程是否持续稳定密切相关的参数. 工况 A1 A2 A3 B1 B2 的结果表明, 在 AF 值相同的情况下, f_{IA} 的增加有利于持续稳定 SND 的实现和 TN 去除率的增加, 而低 f_{IA} 则有利于 SQND 的发生.

f_{IA} 实质反映了间歇曝气过程中曝气/非曝气段周期时间的长短. 当 1 个反应周期的总时间和 AF 值固定时, f_{IA} 增大, 可相应地增加反应过程中曝气/非曝气交替循环的次数, 这有利于减少碳源有机物的快速消耗并均化有机物的浓度, 提高 SND 的 TN 去除率. 究其原因是这种方式有利于微生物体内 PHB 的积累, 而微生物体内 PHB 的增加促使了 SND 过程的完全和 TN 去除率的提高 (Thirida *et al.*, 2005; 吴光学等, 2005). 因此, f_{IA} 增高的间歇曝气模式可为 PHB 的积累创造了良好环境, 解决低碳污水发生 SND 时所存在的碳源不足而导致 TN 去除率降低的问题.

试验中还发现, 具有低 f_{IA} 的间歇曝气运行工况过程更有利于 SQND 的发生, 而不利于 SND 的脱氮 (A1 和 B1 工况). 这一结果与 Zhao (1999) 等的间歇曝气试验结果相吻合. 同时, 在 AF 值相同的情况下, f_{IA} 的提高可减小 ORP 和 pH 的波动范围, 提高

ORP值的均化程度,有利于 ORP和 pH值的稳定性,更有利于稳定持续 SND过程的实现.

4.3 曝气百分数 AF

在相同曝气量和反应时间内,AF值的大小可表明反应过程内总气量的大小.如恒定曝气量运行5h的条件下,AF值分别为0.83、0.67和0.50时,整个反应过程的总气量分别为207.5、167.5和125.0L亦即随AF的减小,总供气量明显降低.这不仅能够节约能源消耗,而且有利于维持系统内的低氧微环境条件(Holman *et al.*, 2005),而低氧条件是SND过程发生的必要条件,这一点在本实验中也得到了证实.SND过程的持续稳定性和TN去除率随AF值的减小而增加,最佳效果出现于AF为0.50的A3工况.由此可知,AF值影响着SND过程所需的外因条件,即低氧微环境的形成.因此,在恒定曝气量的条件下,AF也是控制SND过程持续稳定的重要参数.

5 结论 (Conclusions)

1) 间歇曝气模式下,ORP和pH值的稳定程度控制着SND过程的稳定和完全程度.ORP和pH值的波幅越小,ORP均值的均化程度就越高、稳定性愈强,pH值亦愈趋于中性而稳定,相应的SND过程就越趋于完全和稳定.

2) 间歇曝气模式下,提高 f_A 值可使PHB的积累增加,有利于ORP及pH值的稳定,可更好地促进低碳污水处理中持续稳定SND过程的实现.

3) 间歇曝气模式下,AF值控制着SND过程所需的低氧条件,SND的持续稳定性和TN去除率随AF值的减小而增加.

参考文献 (References):

Akinci B S, Ugruk A. 2005. Monitoring and control of biological nutrient removal in a Sequencing Batch Reactor [J]. *Process Biochemistry*, 40: 2873—2878

Chen K C, Chen C Y, Peng J W, *et al.* 2002. Real-time control of an immobilized-cell reactor for wastewater treatment using ORP [J]. *Water Res* 36: 230—238

国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 2002. 水和废水监测

分析方法(第4版)[M]. 北京:中国环境科学出版社

State Environmental Protection Administration of China. 2002. Monitoring and analysis methods of water and wastewater (4th edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press (in Chinese)

Holman J B, Wareham D G. 2005. COD, Ammonia and Dissolved Oxygen Time Profiles in the Simultaneous Nitrification/Denitrification Process [J]. *Biochemical Engineering Journal* 22: 125—133

Ju-Hyun K in, Chen M X, Naohiro Kishida, *et al.* 2004. Integrated real-time control strategy for nitrogen removal in swine wastewater treatment using sequencing batch reactors [J]. *Water Res* 38: 3340—3348

Lo C K, Yu C W, Tam N F Y, *et al.* 1994. Enhanced nutrient removal by oxidation-reduction potential (ORP) controlled aeration in a laboratory scale extended aeration treatment system [J]. *Water Res* 28: 2087—2094

Mench E V, Lant P, Keller J. 1996. Simultaneous nitrification and denitrification in benchscale sequencing batch reactors [J]. *Water Res* 30: 277—284

Robertson L A, Van Niel E W J, Torrmans R A M, *et al.* 1988. Simultaneous nitrification and denitrification in aerobic chemostat cultures of *Thiosphaera pantotropha* [J]. *Appl Environ Microbiol* 54: 2812—2818

Thida K A, Gibbs B, Newland b M, *et al.* 2005. Long-term Aeration Management for Improved N-removal via SND in a Sequencing Batch Reactor [J]. *Water Res* 39: 3523—3530

吴光学,管涛涛. 2005. SRT及碳源浓度对厌氧/好氧交替运行SBR工艺中PHB的影响[J]. *环境科学*, 26(2): 126—130

Wu G X, Guan Y T. 2005. Effects of SRT and carbon concentration on the PHB in the anaerobic/aerobic alternative operating SBR process [J]. *Environmental Science*, 26(2): 126—130 (in Chinese)

Yoo Hyungseok, Ahn Kyu-Hong, Lee Hyung-Jik, *et al.* 1999. Nitrogen removal from synthetic wastewater by simultaneous nitrification and denitrification (SND) via nitrite in an intermittently-aerated reactor [J]. *Water Res* 33: 145—154

曾薇,王淑莹,彭永臻,等. 2002. 供氧方式对SBR法硝化过程控制的影响[J]. *环境化学*, 21(6): 571—575

Zeng W, Wang S Y, Peng Y Z, *et al.* 2002. Effect of Oxygen supply on nitrification control in SBR process [J]. *Environmental Chemistry*, 21(6): 571—575 (in Chinese)

Zhao H W, Mavinic D S, Ollhan W K, *et al.* 1999. Controlling factors for simultaneous nitrification and denitrification in a two-stage intermittent aeration process treating domestic sewage [J]. *Water Res* 33(4): 961—967