

DO 和曝停比对单级自养脱氮工艺影响试验研究

方芳, 杨国红, 郭劲松, 秦宇

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 为提高 SBBR 单级自养脱氮系统脱氮性能并考察 DO 和曝/停比对 SBBR 单级自养脱氮系统的影响, 采用 4 组对比试验进行研究. 结果表明, 连续和间歇 2 种曝气方式均可实现单级自养脱氮, 在进水氨氮浓度为 160 mg/L 左右, 温度 $30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, pH 值 7.8 ~ 8.2, HRT 为 2 d, DO 为 0.8 ~ 1.0 mg/L 的条件下, 连续曝气系统的氨氮转化率和总氮去除率分别达到 80% 和 70%. DO 为 (曝气) $2.0 \sim 2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ / (停曝) $0.2 \sim 0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 曝/停比为 2 h: 2 h 的系统则达到 90% 和 80% 以上. SBBR 单级自养脱氮系统的 DO 应随其曝/停比进行调节, 同时还可能与反应器内生物量及微生物在活性污泥和生物膜中的分布情况有关. 本研究还探讨了 SBBR 单级自养脱氮的机理.

关键词: SBBR; 单级自养脱氮; DO; 曝/停比

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)09-1975-06

Influence of DO and Aeration/Non-aeration Ratio on One-step SBBR Completely Autotrophic Nitrogen Removal Process

FANG Fang, YANG Guo-hong, GUO Jin-song, QIN Yu

(Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: To improve the performance of single SBBR completely autotrophic nitrogen removal system and study the influence of aeration/non-aeration ratio on it, four reactors were applied in the experiment. The results showed that both continuous and intermittent aeration system could implement completely autotrophic nitrogen removal. On the conditions of ammonium concentration round 160 mg/L, temperature $30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, pH value 7.8 ~ 8.2, HRT 2 days and DO 0.8 ~ 1.0 mg/L, ammonium and total nitrogen removal efficiency reached 80% and 70% respectively in the continuous aeration system, and in the system of DO $2.0 \sim 2.5$ (aeration) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ / $0.2 \sim 0.4$ (non-aeration) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, aeration/non-aeration ratio 2 h: 2 h, ammonium and total nitrogen removal efficiency reached above 90% and 80% respectively. DO should be adjusted in accordance with aerobic/anaerobic ratio, and may be related to the biomass and its distribution between activated sludge and biofilm. The mechanism of nitrogen removal was also discussed.

Key words: SBBR; one-step autotrophic nitrogen removal; DO; aeration/non-aeration ratio

单级自养脱氮工艺是指 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 至 N_2 的全部转化过程由一个反应器内的自养微生物完成, 不需有机碳源物质的一类工艺, 其最重要的实现条件就是限制性供氧, 因此, DO 作为单级自养脱氮工艺最重要控制因素受到了国内外研究者的关注并对其进行探讨了研究^[1~3], 其研究一般是采用低氧连续曝气的方式进行.

本试验是在 SBBR 单级自养脱氮系统启动成功后进行的. 前期试验中, 反应器采用连续曝气的方式, 控制 DO 为 0.8 mg/L 左右, pH 值 8.0 ± 0.2 , 水温 $30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. 反应器运行 200 余天, 氨氮转化率最高达到了 85%, 亚硝态氮积累率达到 80%, 而总氮的去除率最高只有 40% 左右, 在有剩余 NH_4^+ 存在的情况下 NO_2^- 严重积累. 有研究认为^[4~6], 在氧受限的条件下, 单级自养脱氮系统中的氮是由亚硝化反应和厌氧氨氧化反应联合去除的. 亚硝化反应主

要发生在活性污泥絮体或生物膜的外部空间, 而厌氧氨氧化则在絮体中心区域或生物膜内部发生. 因此, 前期试验中系统脱氮效果不佳可能是由于反应器中的活性污泥絮体或生物膜中的厌氧区太小或厌氧环境尚未完全形成, 而影响了厌氧氨氧化菌的生长活性. 本试验同时采用了连续和间歇 2 种曝气方式以继续提高系统的脱氮性能, 重点考察此过程中曝/停比和 DO 对系统脱氮性能的影响.

1 材料与方法

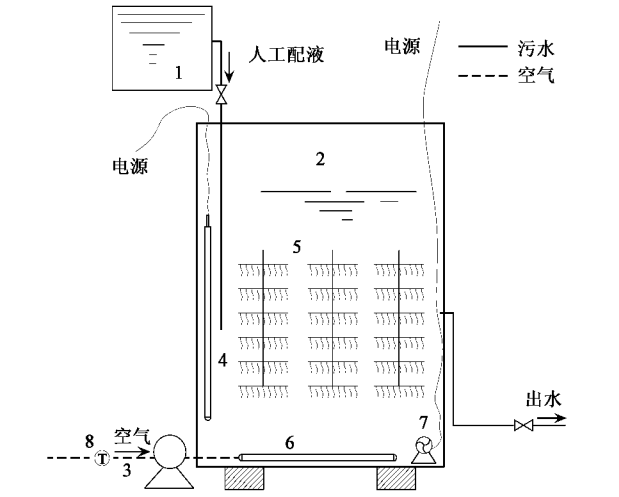
1.1 试验装置

收稿日期: 2006-10-12; 修订日期: 2006-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(50608071); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20050611010); 重庆市自然科学基金项目(CSTC2005887266)

作者简介: 方芳(1973 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为污染控制的理论与技术, E-mail: xiduo@tom.com

本试验采用由有机玻璃制成的 SBBR (sequencing batch biofilm reactor) 反应器, 如图 1 所示, 反应器呈方形, 有效容积 30 L; 反应器内置填料供微生物附着, 配备恒温加热棒以保持系统温度稳定; 内设低功率潜水搅拌泵以避免污泥沉积在反应器底部。



1. 人工配液箱; 2. SBR 反应器; 3. 空气泵; 4. 恒温棒; 5. 填料; 6. 曝气砂条; 7. 潜水搅拌泵; 8. 时间控制器

图 1 试验装置示意

Fig.1 Schematic representation of the reactor

1.2 试验用水

本试验采用人工合成的氨氮废水, 即在自来水中加入适量的 NH_4HCO_3 , 使进水氨氮浓度为 160 mg/L 左右; 同时加入适量的 KH_2PO_4 以供给微生物

足够的磷源; 配制微量元素贮备液 (EDTA 5.0 g/L, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 1.6 g/L, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 2.2 g/L, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 5.1 g/L, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 1.6 g/L, $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 1.1 g/L, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 5.5 g/L, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 5.0 g/L), 按 2 mL 微量元素贮存液配 1 L 溶液加入反应器. 人工配水水质如表 1 所示.

表 1 人工配水水质					
Table 1 Components of synthetic wastewater					
COD /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	pH	微量 元素
< 25	150 ~ 170	0	20	7.8 ~ 8.2	适量

1.3 分析测试项目与方法

pH: Sension2 型便携式 pH/ISE 测量仪; 悬浮固体 (SS) 和挥发性悬浮固体 (VSS): 标准重量法^[7]; 亚硝酸盐: *N*-1-奈基-乙二胺比色法^[7]; 总氮: 过硫酸钾氧化-紫外分光光度法^[7]; COD: 重铬酸钾-硫酸银氧化法; 溶解氧: LDO™ HQ10 便携式溶解氧测量仪.

1.4 试验安排

本试验采用 4 组 SBBR 反应器 (编号分别为 1 ~ 4 号). 各组反应器进水水质相同, 均采用间歇进水的运行方式, 每周周期换水 2 次, 每次换掉一半水. 试验后期另加工一组为空白反应器 (编号为 0 号), 反应器内既无微生物也无填料, 以考察试验过程中的氨氮吹脱等物理化学作用对试验结果的影响. 控制反应器的 pH 值为 7.8 ~ 8.2, 水温 $30^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, HRT 均为 2 d, 其它控制条件如表 2 所示.

表 2 各反应器控制条件 ¹⁾				
Table 2 Control parameters of the reactor				
反应器编号	曝/停比(h:h)	DO/mg·L ⁻¹		填料
		1 ~ 70 d	91 ~ 155 d	
0	—	—	2.0 ~ 2.5	无
1	—	0.8 ~ 1.0	0.8 ~ 1.0	软性填料
2	2.5:1.5	0.8 ~ 1.0/0.2 ~ 0.4	2.0 ~ 2.5/0.2 ~ 0.4	空心球 + 弹性填料
3	2:2	0.8 ~ 1.0/0.2 ~ 0.4	2.0 ~ 2.5/0.2 ~ 0.4	空心球 + 弹性填料
4	1.5:2.5	0.8 ~ 1.0/0.2 ~ 0.4	2.0 ~ 2.5/0.2 ~ 0.4	软性填料

1) 间歇曝气系统 DO 的“/”前后分别代表曝气时的最高 DO 和停曝气时的最低 DO; 第 70 ~ 90 d 由于溶氧仪出现故障, 无 DO 监测数据

2 结果与分析

本试验是在单级自养脱氮系统启动成功后进行的, 共运行 155 d 左右. 第 1 ~ 70 d, 各反应器曝气时的 DO 均控制在 0.8 ~ 1.0 mg/L, 氨氮和总氮的去除率较低, 基本维持前期试验水平. 第 70 ~ 90 d, 由于溶氧仪出现故障无法监测系统的 DO, 期间主要通过

对系统氨氮转化率、亚硝态氮和硝态氮积累率及总氮去除率的分析结果来调控系统曝气量: NH_4^+ -N 转化率和 TN 去除率均较低, 而 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 无积累时, 加大曝气量; NH_4^+ -N 转化率较高, 并且 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 积累时, 则减小曝气量. 这一时期 1 号和 3 号反应器的出水水质明显提高, 1 号反应器的氨氮转化率和总氮去除率分别达到了 80% 和 70%, 3 号

反应器则高达 90% 和 80% .90 d 后溶氧仪修复,测得 3 号反应器的 DO 在 2.0 ~ 2.5/0.2 ~ 0.4 mg/L. 因此,在随后的运行时段,把 2 号和 4 号反应器的 DO 也调至 2.0 ~ 2.5/0.2 ~ 0.4 mg/L,1 号反应器的 DO 则仍保持在 0.8 ~ 1.0 mg/L. 根据反应器 DO 的变化情况,把运行时段划分为 3 个阶段:低 DO 阶段(1 ~ 70 d)、DO 波动阶段(70 ~ 90 d)和高 DO 阶段(90 ~ 155 d). 反应器运行结果如表 3 所示.

试验运行中期,测得 1 ~ 4 号反应器内微生物活性污泥和生物膜浓度分别为:671 mg/L 和 747 mg/L; 1 052 mg/L 和 617 mg/L; 728 mg/L 和 844 mg/L; 757 mg/L 和 433 mg/L. 试验过程中系统进出水 COD 基本没有变化且均小于 25 mg/L. 另由空白试验结果证实,pH 值为 7.8 ~ 8.2,水温 30℃ ± 2℃,DO 为 2.0 ~ 2.5 mg/L条件下,由于吹脱等物化作用去除的总氮仅为 10 mg/L左右,去除率为 6%. 据此推断,系统中总氮的去除大部分是由自养菌完成的.

表 3 各反应器运行结果/%

Table 3 Experiment results of each reactor/%

编号	项目	低 DO 期 (I 阶段 1 ~ 70 d)	DO 波动期 (II 阶段 71 ~ 90 d)	高 DO 期 (III 阶段 91 ~ 155 d)
1	氨氮转化率	30 ~ 50	65 ~ 90	60 ~ 80
	总氮去除率	20 ~ 40	50 ~ 70	50 ~ 70
2	氨氮转化率	25 ~ 50	30 ~ 60	30 ~ 90
	总氮去除率	20 ~ 40	25 ~ 50	25 ~ 75
3	氨氮转化率	25 ~ 60	50 ~ 100	90 ~ 100
	总氮去除率	20 ~ 40	35 ~ 84	80 ~ 86
4	氨氮转化率	20 ~ 30	25 ~ 40	30 ~ 50
	总氮去除率	20 ~ 30	20 ~ 30	25 ~ 60

2.1 1 号反应器

1 号反应器进出水 NH₄⁺ -N、NO₂⁻ -N、NO₃⁻ -N 和 TN 如图 2 所示.

第 1 ~ 70 d, 随着时间的推移,出水氨氮由 125 mg/L 逐渐降至 85 mg/L 左右,总氮也由 126 mg/L 逐渐

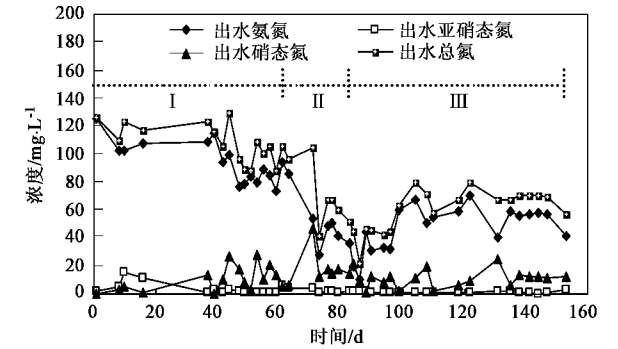


图 2 第 1 号反应器氮转化关系

Fig.2 Nitrogen conversion in No.1 reactor

降至 95 mg/L,亚硝态氮极少积累,一般在 5 mg/L 以下,硝态氮也只有 15 mg/L 左右.即由氨氮转化来的亚硝态氮基本被转化成了氮气.但在第 49 d 和第 55 d 时,可能是由于搅拌泵清洗后增强了反应器中泥水气的混合,改善了氧气的传输效率,硝态氮的浓度有所升高,达到 27 ~ 28 mg/L.

第 71 ~ 90 d,出水氨氮和总氮浓度分别为 50 ~ 25 mg/L 和 70 ~ 40 mg/L,氨氮转化率和总氮去除率均较第 I 阶段有大幅度上升,亚硝态氮和硝态氮浓度仍较低,分别为 4 mg/L 和 20 mg/L 以下.尽管这一阶段的 DO 不明确,但试验结果表明,根据氮的转化情况对单级自养脱氮系统实施实时控制具有重要意义.

第 91 ~ 155 d,重新恢复对 DO 的监测,并仍维持在 0.8 ~ 1.0 mg/L.出水亚硝态氮和硝态氮仍基本无积累,而氨氮和总氮浓度在第 II 阶段的基础稍有上升,分别在 30 ~ 60 mg/L 和 40 ~ 80 mg/L 之间.

2.2 2 号反应器

2 号反应器进出水 NH₄⁺ -N、NO₂⁻ -N、NO₃⁻ -N 和 TN 如图 3 所示.

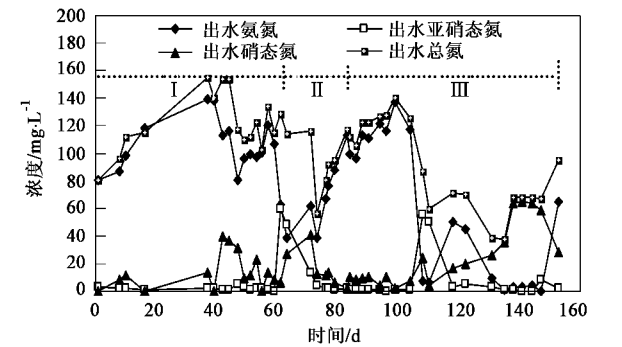


图 3 第 2 号反应器氮转化关系

Fig.3 Nitrogen conversion in No.2 reactor

第 1 ~ 70 d, 反应器出水水质波动较大,氨氮浓度在 80 ~ 110 mg/L 之间,总氮在 100 ~ 130 mg/L 之间. 但第 37 d 左右时,由于试验过程中不慎将反应器内部分污泥流失,出水总氮迅速升高至 150 mg/L 左右,1 周之后基本恢复正常.亚硝态氮和硝态氮的浓度分别低于 5 mg/L 和 15 mg/L,在第 42 d 和 71 d 清洗搅拌泵后,出水硝态氮浓度达到 40 mg/L 和 27 mg/L.

第 71 ~ 90 d,系统出水水质变化不大.在第 91 ~ 155 d 的高 DO 阶段,控制 DO 在 2.0 ~ 2.5/0.2 ~ 0.4 mg/L,可明显看出氨氮浓度在 104 d 后急速下降,转化率达到 90% 以上;总氮浓度也由 130 mg/L 下降到 70 mg/L 左右,去除率达到 75% 左右.

2.3 3号反应器

3号反应器进出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 如图 4 所示.

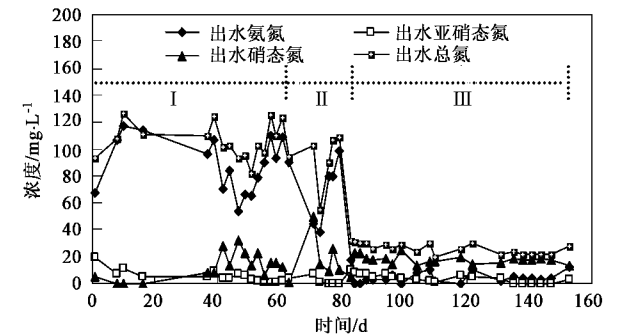


图 4 第 3 号反应器氮转化关系
Fig.4 Nitrogen conversion in No.3 reactor

第 1 ~ 70 d, 出水氨氮在 55 ~ 110 mg/L 之间波动, 总氮浓度最低为 80 mg/L, 最高则达到 125 mg/L. 第 71 ~ 90 d 为 DO 变化阶段, 开始时系统出水氨氮和总氮浓度波动较大, 分别在 98 ~ 38 mg/L 和 110 ~ 50 mg/L 之间. 但在第 79 d 之后, 系统出水渐趋于稳定, 氨氮浓度最高仅为 17 mg/L, 最低的几天则低于检测限(可认为氨氮全部发生转化), 出水总氮浓度则稳定在 25 mg/L. 至 90d 左右溶氧仪修复后, 测得该反应器内的 DO 已达到了 2.0 ~ 2.5/0.2 ~ 0.4 mg/L.

第 91 ~ 155 d, 控制系统 DO 在 2.0 ~ 2.5/0.2 ~ 0.4 mg/L 之间, 氨氮转化率稳定在 90% 以上, 总氮去除率则在 81% ~ 87% 之间, 这一结果表明 DO 可以在短时间内对单级自养脱氮系统产生较大的影响, 同时也说明曝/停比为 2 h:2 h 时, DO 为 2.0 ~ 2.5/0.2 ~ 0.4 mg/L 较 0.8 ~ 1.0/0.2 ~ 0.4 mg/L 更有利于系统中氮的去除.

2.4 4号反应器

4号反应器进出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 如图 5 所示.

由图 5 可以看出, 对于 4 号反应器而言, 3 个阶段氨氮和总氮去除率变化不明显, 无论是在 DO 为 0.8 ~ 1.0/0.2 ~ 0.4 mg/L 的第 1 ~ 70 d, 还是 DO 变化的第 71 ~ 90 d, 出水氨氮基本在 110 ~ 120 mg/L 之间, 总氮为 120 ~ 130 mg/L. 在 DO 为 2.0 ~ 2.5/0.2 ~ 0.4 mg/L 的第 91 ~ 155 d, 氨氮在原来的基础上有所下降, 至第 108 d 时基本稳定在 100 mg/L 左右, 总氮在第 110 d 后也稳定在 100 ~ 110 mg/L. 与 1、2 和 3 号反应器相比, 4 号反应器的出水亚硝态氮和硝态

氮浓度更低, 亚硝态氮基本上低于 2 mg/L, 硝态氮浓度除了个别天数达到 20 mg/L 左右外, 其余基本低于 10 mg/L.

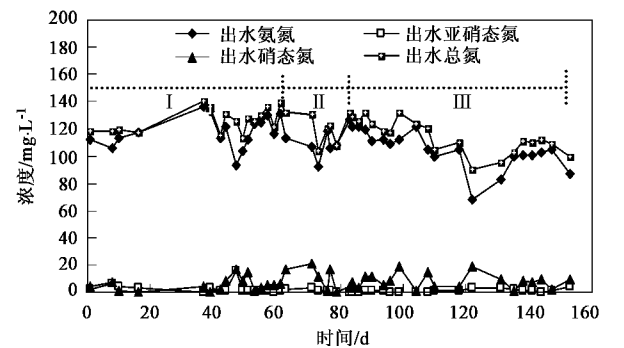


图 5 第 4 号反应器氮转化关系
Fig.5 Nitrogen conversion in No.4 reactor

3 讨论

目前, 关于单级自养脱氮机理的研究尚无定论. 主流观点认为单级自养脱氮是由 2 步反应完成的^[4,8]: 首先, 亚硝化菌把部分 NH_4^+ 氧化为 NO_2^- ; 然后, 厌氧氨氧化菌以生成的 NO_2^- 为电子受体, 把剩余 NH_4^+ 转化为 N_2 . 第 1 步反应为好氧过程, 第 2 步则是厌氧过程. 系统中一般存在着亚硝化菌、硝化菌和厌氧氨氧化菌^[9], 三者相互竞争基质, 如图 6 所示: ①在 NH_4^+ 被氧化为 NO_2^- 和 NO_2^- 被氧化为 NO_3^- 的过程中, 亚硝化菌和硝化菌相互竞争 O_2 , 但亚硝化菌对氧的亲合性比硝化菌强, 因此, 较低的 DO 有利于淘汰硝化菌而抑制 NO_2^- 向 NO_3^- 的转化, 但过低的 DO 将影响 NH_4^+ 向 NO_2^- 的转化; ②厌氧氨氧化菌把 NH_4^+ 和 NO_2^- 转化为 N_2 的过程和硝化菌把 NO_2^- 氧化为 NO_3^- 的过程需要共同的基质 NO_2^- , 但前者为厌氧菌而后者为好氧菌, 因此, 较低的 DO 有利于厌氧氨氧化反应进行而抑制 NO_2^- 向 NO_3^- 的转化; ③亚硝化菌以 NH_4^+ 为基质, 而厌氧氨氧化菌以生成的 NO_2^- 和剩余的 NH_4^+ 为基质, 如果过多的 NH_4^+ 被氧化为 NO_2^- , 将导致只有部分 NO_2^- 被转化为 N_2 而出现 NO_2^- 积累; 如果剩余 NH_4^+ 较多, 将导致出水 NH_4^+ 浓度过高而影响系统脱氮性能. 因此, DO 的高低将直接影响系统中亚硝化菌、硝化菌和厌氧氨氧化菌的数量和活性, 并制约着氨氮、亚硝态氮、硝态氮和总氮之间的转化关系, 是单级自养脱氮系统中最关键的控制因素. Helmer 等^[6]的研究中, 以氨氮为唯一氮源, 不向反应器提供 O_2 时, 氨氮几乎

不会发生转化; DO 为 0.7 mg/L 时,硝化反应和厌氧氨氧化达到平衡; DO 为 5 mg/L 时,氨氮全部转化为亚硝态氮和硝态氮.廖德祥等^[3]的研究中,DO 控制在 0.5~0.7 mg/L 时,氨氮转化率达 90% 以上,出水亚硝态氮和硝态氮浓度很低;DO 为 0.2~0.3 mg/L 时,氨氮转化率只有 54.6%. 本试验采用连续和间歇 2 种曝气方式及 1.5 h:2.5 h、2 h:2 h 和 2.5 h:1.5 h 这 3 种曝/停比,并通过控制不同的 DO 水平考察曝/停比和 DO 对 SBBR 单级自养脱氮系统的影响.

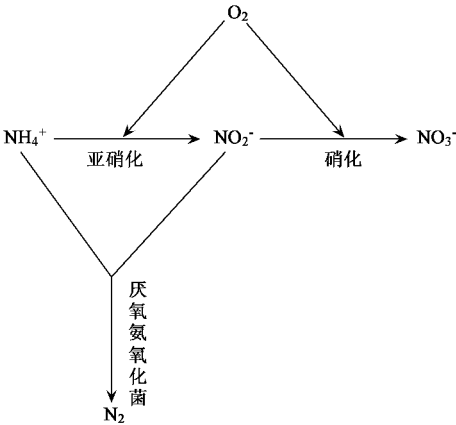


图 6 单级自养脱氮系统中微生物竞争关系
Fig.6 Competition of the microorganisms in CANON

由 1 号反应器的试验结果可知,反应器运行 80 d 左右后,其氨氮转化率和总氮去除率可分别达到 80% 和 70%,亚硝态氮和硝态氮则很少积累.说明在连续曝气条件下,DO 为 0.8~1.0 mg/L 有利于 SBBR 单级自养脱氮系统生物膜外层好氧空间和内部厌氧区的形成,亚硝化菌和硝化菌在外层的好氧空间竞争 O₂,但由于硝化菌对 O₂ 的亲性和比亚硝化菌小,因此,如此较低的 DO 有利于亚硝化菌的生长繁殖而淘汰硝化菌从而抑制了亚硝态氮向硝态氮的转化并为厌氧氨氧化反应提供了底物——亚硝态氮.在生物膜的厌氧区,厌氧氨氧化菌则把剩余的氨氮和亚硝态氮转化为氮气.

2、3 和 4 号反应器均采用间歇的曝气方式,DO 为 0.8~1.0/0.2~0.4 mg/L 情况下,3 个反应器的氨氮转化率和总氮去除率均较低;DO 为 2.0~2.5/0.2~0.4 mg/L 时,3 号反应器脱氮效果最佳,2 号反应器次之,4 号反应器则变化不大.

DO 为 2.0~2.5/0.2~0.4 mg/L 时,3 号反应器的氨氮转化率和总氮去除率分别由 DO 为 0.8~1.0/0.2~0.4 mg/L 时的 25%~60% 和 20%~40% 升至

90% 和 80% 以上.说明在曝/停比为 2 h:2 h 的单级自养脱氮系统中 DO 为 2.0~2.5/0.2~0.4 mg/L 较 0.8~1.0/0.2~0.4 mg/L 更有利于总氮的去除,同时也表明间歇曝气系统中短时间高达 2.5 mg/L 的 DO 并没有破坏 SBBR 单级自养脱氮系统的动态平衡. Slikers 等^[8]的研究结果表明 *B. anammoxians* 在氧存在的条件下仍有较好的活性.郑平等^[10]在研究过程中则发现,取自厌氧氨氧化反应器的厌氧氨氧化混培物中有相当数量的好氧氨氧化菌,其活性达到了常规硝化菌混培物的水平.因此,厌氧氨氧化菌的厌氧特性还有待进一步的研究探索.

曝/停比为 2.5 h:1.5 h 的 2 号反应器在 DO 为 2.0~2.5/0.2~0.4 mg/L 的情况下,其氨氮转化率和总氮去除率达到了 90% 和 60%,而其硝态氮平均达到 27 mg/L.说明有一定数量的硝化菌存活于生物膜外层好氧空间把亚硝态氮氧化为硝态氮,并使厌氧氨氧化反应由于缺乏足够的亚硝态氮而难以进行.而生成的硝态氮难以从系统中去除,因此其总氮去除率比 3 号反应器低.另外,2 个反应器内生物量及微生物在活性污泥和生物膜中分布的不同也可能是导致其脱氮性能存在差异的原因之一.

无论 DO 为 0.8~1.0/0.2~0.4 mg/L 还是 2.0~2.5/0.2~0.4 mg/L,4 号反应器的氨氮转化率和总氮去除率均较低,只有 50% 和 40% 左右,亚硝态氮和硝态氮的浓度也分别低于 2 mg/L 和 10 mg/L.在间歇曝气的条件下,DO 在 1 h 后才能升至较高水平,曝/停比为 1.5 h:2.5 h 的系统中,DO 维持在 2.0~2.5 mg/L 只有 0.5 h,可能较短的曝气时间导致生物膜外层的好氧空间太小,不但抑制了亚硝态氮被氧化为硝态氮,同时也限制了氨氮向亚硝态氮的转化,尽管内部的厌氧区形成得比较完善,但由于厌氧氨氧化菌缺少足够的亚硝态氮作为基质,厌氧氨氧化反应难以进行而导致系统的总氮去除率太低.当然,4 号反应器内生物量(尤其是附着生物量)较低也可能是导致其脱氮性能较差的原因之一.

以上分析表明,DO 对 SBBR 单级自养脱氮系统的脱氮性能和运行稳定性有重要影响.如果把连续曝气看作曝/停比为无限大的一种极限情况,则在其它条件不变的情况下,为要达到相同的氮去除效果,曝/停比越高,所需的 DO 水平相对越低.因此 SBBR 单级自养脱氮系统的 DO 应随其曝/停比进行调节.同时,反应器内生物量及微生物在活性污泥和生物膜中分布的不同对系统 DO 的调控也应该存在一定影响.另外,根据 Hao 等^[4,11]对 CANON 工艺的模拟

结果,DO 还应随氨氮表面负荷的升高而升高,而且还与生物膜厚度有关:生物膜厚度为 0.2 ~ 0.7 mm 时,DO 应随生物膜厚度的增加而升高.

4 结论

(1)通过 4 组对比试验得出,在进水氨氮浓度为 160 mg/L 左右,温度 30℃ ± 2℃,pH 值 7.8 ~ 8.2,HRT 为 2 d,DO 为 0.8 ~ 1.0 mg/L,连续曝气的 SBBR 单级自养脱氮系统的氨氮转化率和总氮去除率分别可达到 80% 和 70%;DO 为 2.0 ~ 2.5/0.2 ~ 0.4 mg/L,曝/停比为 2 h:2 h 的单级 SBBR 生物膜自养脱氮系统中的氨氮转化率和总氮去除率也分别达到 90% 和 80% 以上.

(2)单级自养脱氮系统的 DO 应根据其曝/停比进行调节,在其它条件不变的情况下,为要达到相同的氮去除效果,曝/停比越高,所需的 DO 水平相对越低,同时还可能与反应器内生物量及微生物分布情况有关.

(3)不加有机碳源的 SBBR 单级自养脱氮系统中氨氮的去除大部分是由通过微生物的作用完成的,只有极少量是由氨氮吹脱等物理化学作用去除的.但由于其中脱氮途径和功能微生物尚不明确,氮去除机理还有待进一步的研究.

参考文献:

[1] Hippen A, Rosenwinkel K H, Baumgarten G, *et al.* Aerobic deammonification: a new experience in the treatment of wastewater [J]. Water Science Technology, 1997, **35**: 111 ~ 120.

[2] Sliekers A O, Third K A, Abma W, *et al.* CANON and Anammox in a gas-lift reactor [J]. FEMS Microbiology Letters, 2005, **218** (2): 339 ~ 344.

[3] 廖德祥,李小明,曾光明,等.单级 SBBR 生物膜中全程自养脱氮的研究[J].中国环境科学,2005, **25**(2): 222 ~ 225.

[4] Hao X D, Heijnen J J, Van Loosdrecht M C M. Sensitivity analysis of a biofilm model describing a one-stage completely autotrophic nitrogen removal (CANON) process [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2002, **77**(3): 266 ~ 277.

[5] Nielsen M, Bollmann A, Sliekers O, *et al.* Kinetics, Diffusional limitation and microscale distribution of chemistry and organisms in a CANON reactor[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2005, **51**(2): 247 ~ 256.

[6] Helmer C, Tromm C, Hippen A, *et al.* Single stage biological nitrogen removal by nitrification and anaerobic ammonium oxidation in biofilm systems[J]. Water Science Technology, 2001, **43**(1): 311 ~ 320.

[7] 国家环保局编.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002.

[8] Sliekers A O, Derworth N, Gomez J L C, *et al.* Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor [J]. Water Research, 2002, **36**: 2475 ~ 2482.

[9] Third K A, Sliekers A O, Kuenen J G, *et al.* The CANON (completely autotrophic nitrogen-removal over nitrite) under ammonium limitation: interaction and competition between three groups of bacteria [J]. Systematic and Applied Microbiology, 2001, **24**: 588 ~ 596.

[10] 郑平,胡宝兰,徐向阳.厌氧氨氧化好氧代谢特性研究[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2000, **26**(5): 521 ~ 526.

[11] Hao X D, Heijnen J J, Van Loosdrecht. Model-based evaluation of temperature and inflow variations on a partial nitrification-ANAMMOX biofilm process [J]. Water Research, 2002, **36**: 4839 ~ 4849.