DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201805016

# 基于部分硝化的不同曝停频率下脱氮性能的比较

李 冬[1],郭跃洲[1],劳会妹[1],曹美忠[1],张 杰[1,2]

(1.水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室(北京工业大学),北京 100124;
2.城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学),哈尔滨 150090)

**摘 要:** 为研究相同曝停比且不同曝停频率下系统脱氮性能及氮素的变化,在室温下(18~20 ℃),接种实验室培养成熟的亚硝化絮状污泥于序批式反应器(SBR)中,用时控开关控制周期内曝气/停曝时间为:2 min∶2 min,4 min∶4 min,10 min∶10 min,30 min∶30 min,120 min∶120 min,对反应器的情况进行研究.结果表明,不同曝停频率下的污泥系统均可以保持良好的亚硝化性能,系统的平均亚硝化率、平均氨氧化率分别为89.7%,87.1%.在曝气∶停曝时间为2 min∶2 min时,总氮去除率稳定至88.4%.随着周期内曝气/停曝时间的增加(曝停频率的减少),总氮去除率出现下降的趋势,在曝气/停曝时间为120 min∶120 min时,总氮去除率下降至56.2%.由于较大曝停频率(曝气/停曝时间为2 min∶2 min)可以使曝气阶段生成的亚硝酸盐在下一个停曝阶段及时被反硝化细菌利用,提高了系统总氮去除率,故曝停频率和总氮去除率呈正相关.烧杯实验表明,在曝气/停曝时间为2 min∶2 min时,单位VSS氨利用速率为10.387 mg/(g·h),故曝停频率较大的运行方式可以筛选出氨利用速率较快的氨氮氧化菌(AOB),并且单位VSS硝酸盐生成速率最大仅为0.42 mg/(g·h),故可以减少污泥系统中相对亚硝酸盐氧化菌(NOB)数量.

**关键词:** 曝停比;曝停频率;总氮去除率;氨氧化速率;硝酸盐生成速率
**中图分类号:** X703.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)08-0008-06

# Comparison of nitrogen removal performances based on partial nitrification at different frequencies of alternating aerobic/anoxic

LI Dong[1], GUO Yuezhou[1], LAO Huimei[1], CAO Meizhong[1], ZHANG Jie[1,2]

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering (Beijing University of Technology), Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment (Harbin Institute of Technology), Harbin 150090, China)

**Abstract:** In order to assess the variations of nitrogen removal performance and nitrogen concentrations at different frequencies of alternating aerobic/anoxic (FAA) and same ratio of aeration time to anoxic time (2 min∶2 min, 4 min∶4 min, 10 min∶10 min, 30 min∶30 min, and 120 min∶120 min), mature partial nitrification sludge from laboratory was inoculated to sequencing batch reactor (SBR) at room temperature (18-20 ℃). Results showed that good partial nitrification was maintained at different FAA. The average nitritation rate and ammonia oxidation rate were 89.7% and 87.1%, respectively. When the aeration time∶anoxic time was 2 min∶2 min, total nitrogen removal efficiency (TNE) increased to 88.4% and remained stable. With the increase of the aeration time∶anoxic time (decline of FAA), the TNE tended to decrease, and it reduced to 56.2% when the aeration time∶anoxic time was 120 min∶120 min. Owing that with high FAA (2 min∶2 min), the nitrite generated during the aeration period could be used by the denitrifying bacteria timely in the next anoxic phase, TNE was increased, and FAA was positively correlated with it. Results of beaker experiment showed that the maximum ammonia utilization rate ($R_{AU}$) and maximum nitrate production rate ($R_{NP}$) were 10.387 and 0.42 mg/(g·h) with the aeration time∶anoxic time of 2 min∶2 min. It indicated that the ammonia oxidation rate was faster with higher FAA, which can reduce the relative amount of nitrite oxidizing bacteria (NOB).

**Keywords:** ratio of aeration time to anoxic time; frequency of alternating aerobic/anoxic; total nitrogen removal efficiency; ammonia utilization rate; nitrate production rate

常规的脱氮工艺(硝化-反硝化)是将氨氮氧化成亚硝酸盐氮,然后再将其氧化成硝酸盐氮,最后通过缺氧反硝化将硝酸盐氮还原成亚硝酸盐氮,然后生成氮气,实现脱氮[1].对于该工艺,亚硝酸盐仅是一种中间介质.基于亚硝酸盐的部分硝化-反硝化新型脱氮工艺因其节约曝气、节省外加碳源、减少污

**收稿日期:** 2018-05-08
**基金项目:** 北京市青年拔尖团队项目(2014000026833TD02)
**作者简介:** 李 冬(1976—),女,教授,博士生导师;
张 杰(1938—),男,博士生导师,中国工程院院士
**通信作者:** 李 冬,lidong2006@bjut.edu.cn

泥产量等优点，已成为生物脱氮研究的热点[1-2]，且该工艺在经济上和技术上均具有较高的可行性，特别是处理高质量浓度氨氮和低碳氮比污水[3-4].

实现部分硝化的实质是抑制亚硝酸盐氧化菌(NOB)和富集氨氧化菌(AOB). 由于在缺氧段 NOB 的生长速率下降得较多[5-6]，从缺氧到好氧阶段，故 AOB 较 NOB 能较快地恢复活性[7]. 间歇曝气是实现亚硝化工艺稳定的一种重要手段，众多研究以周期内循环曝气/无曝气的运行方式实现了亚硝化的启动和稳定运行[8-10]. 苏东霞等[8]在 SBR 反应器中，研究了不同曝停比(3∶1，3∶2，3∶3)对 SBR 系统中氮素影响，实验表明停曝时间比越小越有利于亚硝酸盐氮的积累；高春娣等[11]在 SBR 反应器中，研究了不同缺氧/好氧时间比(1∶1，1∶2)对于污染物去除效果的影响，结果表明，在交替缺氧/好氧的方式运行下可以提高污染物去除效率，总氮去除率在 70% 左右，COD 去除率 80% 左右.

不同的曝停时间比会在周期内形成不同时间长度的好氧时间，即曝气总量是不一样的，因此，对于脱氮性能的研究可比性不强. 同一曝停时间比(好氧时间相同)、不同曝停频率的运行模式会使硝化细菌和异养菌活性由于交替缺氧、好氧环境频率的不同而不同，进而使脱氮效果及氮素变化产生差异. 然而，在该运行模式下，系统脱氮性能以及氮素变化的研究甚少.

基于此，本实验接种具有良好亚硝化性能的活性污泥于 SBR 反应器中，通过时控开关控制周期内曝气和停曝时间(2 min∶2 min，4 min∶4 min，10 min∶10 min，30 min∶30 min，120 min∶120 min)来保证系统相同的曝停时间比以及不同的曝停频率，以期明晰相同曝停时间比、不同曝停频率下系统的脱氮性能以及氮素变化规律.

## 1　实　验

### 1.1　实验装置与运行参数

实验采用由有机玻璃制成的 SBR 反应器，高 70 cm，内径 15 cm，有效容积 10.5 L，换水比为 2/3，底部设有曝气装置，采用鼓风曝气，转子流量计控制曝气量. SBR 反应器均在室温(18 ~ 20 ℃)下运行培养，每天运行 3 个周期，每个周期 8 h，其中包括 11 min进水、搅拌和曝气、7 min 沉降，3 min 排水和 3 min 闲置，SBR 反应器运行参数见表 1.

**表 1　不同阶段反应器运行参数**

Tab. 1　Operation parameters at different phases

| 参数 | 第Ⅰ阶段(第 0 ~ 30 天) | 第Ⅱ阶段(第 31 ~ 60 天) | 第Ⅲ阶段(第 61 ~ 90 天) | 第Ⅳ阶段(第 91 ~ 120 天) | 第Ⅴ阶段(第 121 ~ 150 天) |
|---|---|---|---|---|---|
| 曝气∶停曝 | 2 min∶2 min | 4 min∶4 min | 10 min∶10 min | 30 min∶30 min | 120 min∶120 min |
| 曝停比 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

### 1.2　接种污泥和实验用水

SBR 反应器接种实验室培养的亚硝化絮状污泥作为种泥. 接种相同质量的活性污泥后 MLSS 为 3 046 mg/L，SVI 为 82 mL/g. 采用人工配水模拟生活污水启动反应器，以丙酸钠为有机碳源(COD 为 300 mg/L)，硫酸铵提供氨氮($NH_4^+$-N 为 80 mg/L)，碳酸氢钠提供进水碱度，维持 pH 在 7.12 ~ 7.46，每升水中含有 0.136 g $KH_2PO_4$、0.02 g $MgSO_4 \cdot 7H_2O$、0.136 g $CaCl_2$，同时还有微生物生长必需的微量元素[12].

### 1.3　分析方法

定期检测反应器内混合液 $NH_4^+$-N、$NO_2^-$-N、$NO_3^-$-N、MLSS、VSS、SVI 等参数，通过 WTW(pH/Oxi 340i)便携式多参数测定仪监控 pH、DO 及温度. 水样分析中 $NH_4^+$-N 测定采用纳氏试剂分光光度法，$NO_2^-$-N 采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法，$NO_3^-$-N 采用紫外分光光度法，COD 采用快速测定仪，且 COD 值是扣除了亚硝酸盐的干扰，MLSS、VSS、SVI 等参数采用国家规定的标准方法测定[13]. 本实验中氨氧化率(ammonia oxidation rate，$R_{AO}$)和亚硝化率(partial nitrosation rate，$R_{PN}$)分别按照下式计算：

$$R_{AO} = \frac{\rho(NH_4^+ - N)}{\rho_{in}(NH_4^+ - N)}, \tag{1}$$

$$R_{PN} = \frac{\rho(NO_2^- - N)}{\rho(NO_2^- - N) + \rho(NO_3^- - N)}. \tag{2}$$

式中：$\rho(NH_4^+ - N)$、$\rho(NO_2^- - N)$、$\rho(NO_3^- - N)$为进出水中 $NH_4^+ - N$、$NO_2^- - N$、$NO_3^- - N$ 的质量浓度差，mg/L；$\rho_{in}(NH_4^+ - N)$为进水 $NH_4^+ - N$ 质量浓度，mg/L.

### 1.4　烧杯实验

氨利用速率($R_{AU}$). 为比较不同曝停频率下活性污泥中 AOB 利用氨氮的速率，通过测定混合液中起始的 $NH_4^+ - N$ 质量浓度及间隔一定时间的变化曲线，利用曲线的斜率 $r$ 和测定的混合液 MLVSS 值，由公式 $R_{AU} = r/\rho_{MLVSS}$ 求得单位 VSS 氨利用速率(mg/(g · h)). 其中，采用人工配制混合液，以硫酸

铵为氮源,碳酸氢钠为碱度,并且保证氮源及碱度过量(设定 $NH_4^+$ – N 质量浓度为 80 mg/L),将污泥清洗后与混合液混合,连续曝气 2 h,温度为(19 ± 0.5)℃,其间,每隔 20 min 取样测定 $NH_4^+$ – N 质量浓度. 为减小误差,进行 3 组平行实验[11].

硝酸盐氮生成速率($R_{NP}$). 为比较不同曝停频率下活性污泥中 NOB 的被抑制程度,在氧充足的条件下测量不同阶段反应器污泥中 NOB 相对数量的大小. 具体操作方法为:于反应结束后的不同阶段反应器中分别取 1 L 泥水混合液置于烧杯内,进行连续曝气,并且配制相同质量浓度的亚硝酸盐溶液在相同条件下曝气进行空白对照. 每隔一段时间取样测定硝酸盐氮质量浓度,计算硝酸盐氮生成速率($R_{NP}$),即单位时间单位污泥质量浓度的硝酸盐氮生成量,通过对比硝酸盐氮生成速率定性比较不同阶段活性污泥中 NOB 的相对数量,从而反映不同曝停频率下亚硝化的稳定性[8].

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同曝气频率下溶解氧及亚硝化性能的比较

在运行过程中,不同阶段的典型周期内溶解氧(DO)变化如图 1 所示. 可以看出,在反应周期的缺氧段 DO 接近零,而在好氧段 DO 在 0 ~ 1 mg/L 变化. 如图 1(a)所示,曝停频率大的运行方式,在周期内反应器中 DO 质量浓度变化频繁. 随着曝停频率的减小,周期内反应器中 DO 质量浓度变化减少.

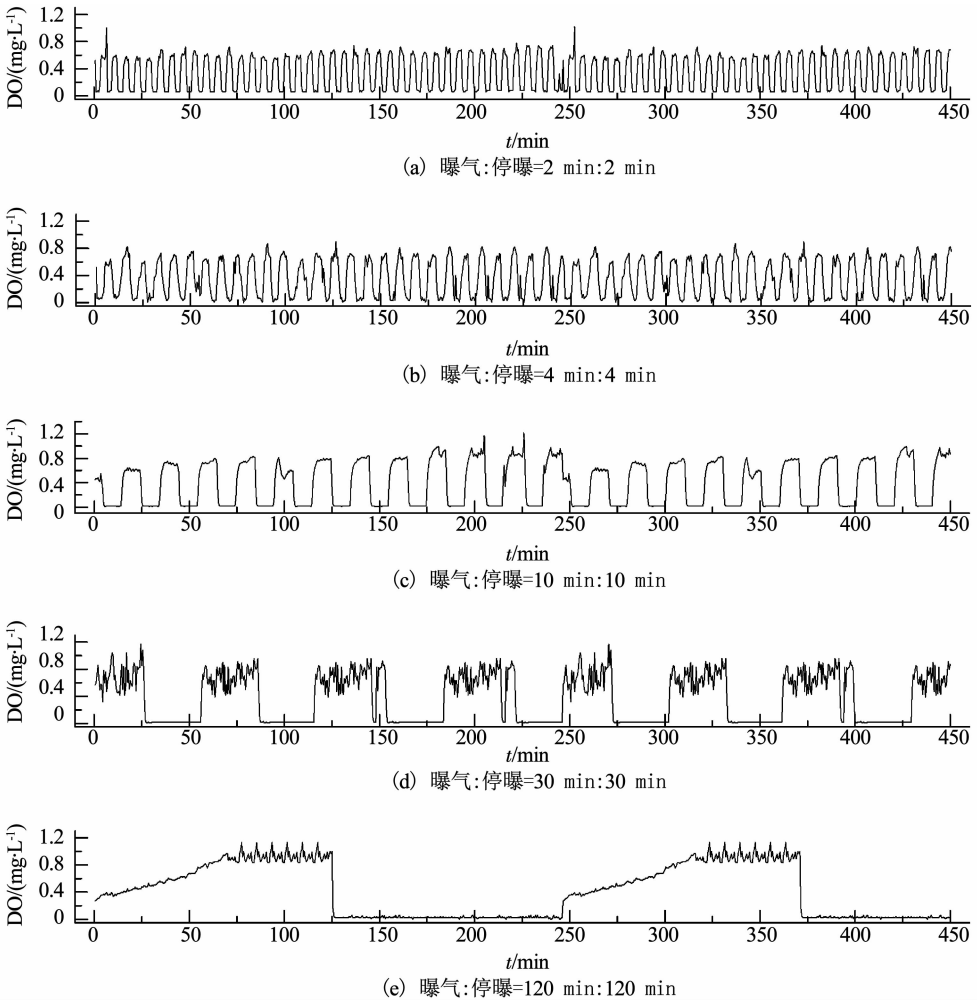



**图 1 不同阶段典型周期内溶解氧的变化**

Fig. 1 Variations of DO in typical cycles during operation

运行期间进出水氮素的变化如图 2 所示. 由于 AOB 和 NOB 二者对“缺氧环境”的动力学反应不同[7]以及在缺氧阶段 NOB 的生长速率下降较大[5-6],AOB 从缺氧环境过渡到好氧环境时能较快恢复活性. 接种后的活性污泥是在 2 min:2 min 的曝气、停曝方式下运行,AOB 从缺氧段到好氧段刚要恢复活性后,系统又迅速进入缺氧阶段,故刚接种后的活性污泥中 AOB 不能及时氧化进水中的氨氮,因此,在刚接种后氨氧化率较低,仅为 65%. 在较高曝停频率下运行会筛选出氨氧化速率较快的 AOB[11],氨氧化率逐渐升高,且较快的曝停频率能较好地抑制 NOB,因此,系统的亚硝化率同样呈现上升的趋

势. 在第Ⅰ阶段末(第 30 天),氨氮去除率、亚硝化率分别达 90%,81%,且出水的氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮分别为 5.1,2.2,0.5 mg/L. 在Ⅱ ~ Ⅴ阶段,由于不同曝停频率下的间歇曝气系统均能抑制 NOB,可以保持系统中良好的亚硝化性能. 然而,在运行中的第Ⅱ阶段,系统的亚硝化率波动较大,这主要是因为此阶段出水的亚硝酸酸盐氮和硝酸盐氮质量浓度均比较低,出水中二者很小的质量浓度变化就会引起系统亚硝化率的较大波动. 第Ⅱ阶段,出水中的平均亚硝酸盐氮、硝酸盐氮质量浓度分别为 4.7,0.9 mg/L. 在Ⅱ ~ Ⅴ阶段,系统的平均亚硝化率为 89.7%,且平均氨氧化率为 87.1%.

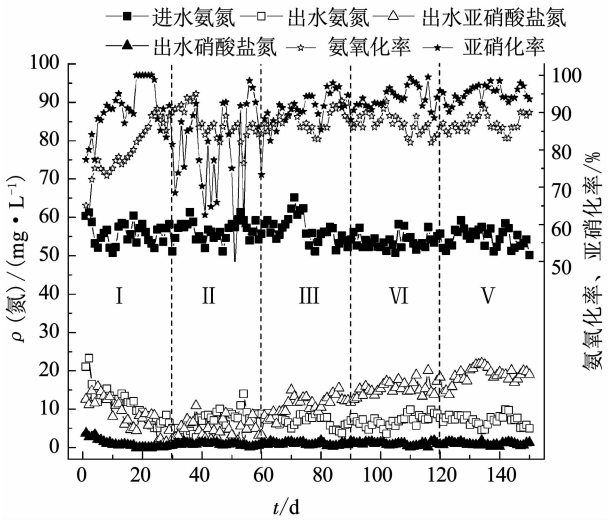



**图 2　运行期间氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、氨氧化率及亚硝化率变化**

Fig. 2　Variations of ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, nitrate nitrogen, ammonia oxidation rate, and nitritation rate

## 2.2　不同曝气频率下脱氮性能的比较

研究表明,曝停频率是 SBR 运行部分硝化-反硝化工艺的重要参数[14]. 反应器运行期间进出水总氮的变化如图 3 所示. 本实验是人工配水模拟生活污水,总氮等于氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮之和. 分析图 3 可知,在第Ⅰ阶段,接种后的活性污泥,氨氧化率较低,出水氮大部分均是氨氮,因此,运行期间缺氧段反硝化反应受到反应基质质量浓度(亚硝酸盐、硝酸盐)的限制,总氮去除率比较低. 随着反应器的运行,氨氧化率逐渐升高,系统中的亚硝酸盐和硝酸盐质量浓度增加,总氮去除率呈现上升趋势. 由初始的总氮去除率为 41.5% 上升到第 25 天的 88.4%,出水总氮为 6.8 mg/L,并在第Ⅰ阶段的后期保持稳定.

阶段Ⅰ ~ Ⅴ,间歇曝气的停曝时间比相等,即在运行周期内总的曝气段和缺氧段相等. 但是,随着曝停频率的减小,出水总氮出现上升的趋势,总氮去除率减少,这可能是由于曝停频率越大,可相应地增加反应过程中曝气/停曝交替循环的次数,曝气阶段生成的亚硝酸盐可以及时在下一个缺氧段被反硝化细菌利用,提高了系统总氮去除率;另一方面,曝停频率越大,越有利于减少碳源的快速消耗以及微生物体内聚-β-羟丁酸(PHB)的积累,而微生物体内 PHB 的增多强化了部分硝化-反硝化反应,使总氮去除率增加[15-16]. 在运行的末期(第 150 天),出水总氮为 25.3 mg/L,其中氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮分别为 5,19,1.3 mg/L,出水中总氮主要是亚硝酸盐氮,且总氮去除率下降至 56.2%. 说明曝停频率的减少仍然可以很好地抑制 NOB 的活性,但是会降低系统的总氮去除率.

在运行中,配水桶中 COD 约为 300 mg/L,进水后反应器中混合液的 COD 为 200 ~ 230 mg/L. 分析图 4 可知,在第Ⅰ阶段,由于总氮去除率的升高,反硝化反应消耗大量的进水 COD,故出水 COD 逐渐降低,由初始的 122.4 mg/L 下降到第Ⅰ阶段末期(第

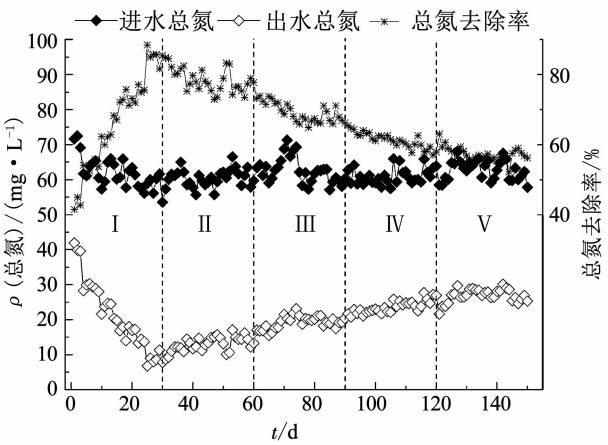



**图 3　运行期间进出水总氮以及总氮去除率的变化**

Fig. 3　Variations of total nitrogen concentration and total nitrogen removal efficiency during operation

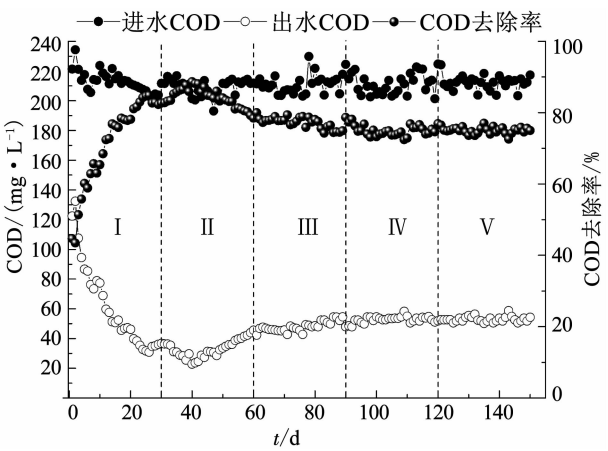



**图 4　运行期间进出水 COD 以及 COD 去除率的变化**

Fig. 4　Variations of COD concentration and COD removal efficiency during operation

30 天)的 36.7 mg/L,COD 去除率上升至 82.6%. 在第Ⅱ阶段,由于 COD 的去除率和总氮去除率有非常密切的联系,出水 COD 和总氮的变化趋势相似,出水的 COD 呈现上升的趋势. 在第Ⅱ阶段末(第 60 天)上升至 42.3 mg/L,COD 去除率下降至 79.9%. 在阶段Ⅲ ~ Ⅴ,COD 去除率基本稳定在 70% ~ 79%,故系统保持很好的去除 COD 能力.

### 2.3　烧杯实验

在运行不同阶段的稳定时期,分别从 SBR 反应器中取适量的污泥进行烧杯实验. 通过定时测定烧杯中氨氮质量浓度,拟合氨氮质量浓度下降直线,利用该直线斜率计算 $R_{AU}$,不同阶段稳定时期的 $R_{AU}$ 如图 5 所示. 可以看出,较大的曝停频率下(第Ⅰ阶段),反应器中氨利用速率为 10.387 mg/(g·h). 随着曝停频率的减小,氨利用速率逐渐减少,在阶段Ⅱ ~ Ⅴ,氨利用速率分别为 9.715,7.828,7.264,5.498 mg/(g·h). 经分析可得,较大的曝停频率使周期内缺氧/好氧交替的次数增加,而在每个交替的周期内缺氧或好氧维持的时间较短,故可以筛选出能较快氧化进水氨氮的 AOB. 随着曝停频率的减少,周期内交替缺氧/好氧的次数减少,每个交替周期内缺氧或好氧维持时间变长,系统中氧化进水氨氮较慢的 AOB 又逐渐增多,故氨利用速率逐渐下降.

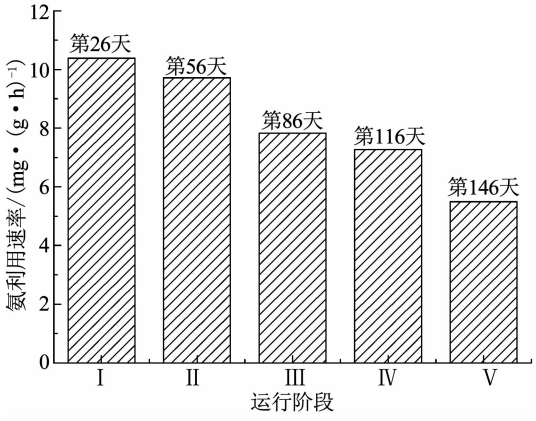



**图 5　运行期间氨利用速率的变化**

Fig. 5　Variations of $R_{AU}$ during operation

在运行中,为比较不同曝停频率下系统中 NOB 的抑制效果和相对数量,利用烧杯实验研究了不同阶段的 $R_{NP}$[17],如图 6 所示. 在每个阶段的稳定时期,于反应结束后取适量的泥水混合液进行测量实验,并配置相同质量浓度的亚硝酸钠在相同的条件下进行空白对照. 空白实验结束后仅有 4 mg/L 的亚硝酸盐氮转化为硝酸盐氮,故烧杯实验产生的硝酸盐绝大部分是 NOB 氧化亚硝酸盐所得.

分析图 6 可知,不同阶段的烧杯实验在前 10 h,$R_{NP}$均小于 0.05 mg/(g·h),主要是因为间歇曝气的运行方式可以充分抑制 NOB,这也侧面说明了本实验是基于亚硝酸盐的生物脱氮工艺. 比较图 6 中的各个阶段发现,阶段Ⅴ的 $R_{NP}$在第 13 小时有较大的上升,为 0.15 mg/(g·h),说明在连续曝气的情况下,NOB 的活性被激活,开始氧化亚硝酸盐生成硝酸盐. 阶段Ⅰ ~ Ⅳ在第 13 小时分别为 0.03,0.02,0.03,0.02 mg/(g·h),均小于阶段Ⅴ的 $R_{NP}$,故曝停频率较大的运行方式更能抑制 NOB 活性. 随着烧杯实验的进行,不同阶段的 $R_{NP}$均出现了上升,NOB 均被激活.

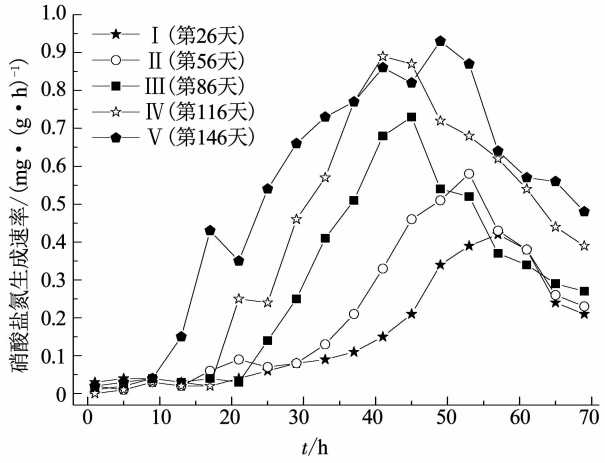



**图 6　运行期间硝酸盐氮生成速率的变化**

Fig. 6　Variations of $R_{NP}$ during operation

在第 49 小时,阶段Ⅴ烧杯实验的 $R_{NP}$达到最大值,为 0.93 mg/(g·h). 根据微生物生长动力学中米氏方程分析可知,烧杯实验中 NOB 被充分激活后,此时活性污泥中 NOB 的相对数量是硝酸盐生成速率增加的唯一限制因素. 此后,由于大量的亚硝酸盐被氧化,NOB 的底物亚硝酸盐成为限制因素,NOB 活性受到抑制,硝酸盐生成速率下降. 阶段Ⅰ烧杯实验在第 57 小时,$R_{NP}$达到最大值为 0.42 mg/(g·h),阶段Ⅱ ~ Ⅳ的烧杯实验分别在第 53,45,41 小时取得 $R_{NP}$最大值 0.58,0.73,0.89 mg/(g·h),均小于阶段Ⅴ的 $R_{NP}$最大值,故较高曝停频率下的 SBR 运行方式可以在一定程度降低活性污泥系统中 NOB 的相对数量. 其原因可能是较高的曝停频率会导致 NOB 的比增长速率进一步下降,NOB 相对数量减少[18]. 虽然较小曝停频率下污泥系统的相对 NOB 数量较多,在交替缺氧/好氧的运行方式下,NOB 可以被充分抑制,系统保持良好的亚硝化性能.

## 3　结　论

1)曝停频率越大,活性污泥系统中交替缺氧、

好氧环境的次数越多. 不同的曝停频率(2 min∶2 min,4 min∶4 min,10 min∶10 min,30 min∶30 min,120 min∶120 min)均会使系统保持良好的亚硝化性能,污泥系统的平均亚硝化率和平均氨氧化率分别为 89.7%,87.1%.

2)同一曝停比的不同曝停频率对于亚硝化系统的脱氮性能影响不同,曝停频率越大,系统生成的亚硝酸盐可以被及时去除,并且有利于微生物体内 PHB 的积累,因此,总氮去除率较高.

3)曝停频率大的运行方式可以筛选出氨氧化速率较快的 AOB,氨利用速率为 10.387 mg/(g·h),且该系统中最大硝酸盐生成速率较低,仅为 0.42 mg/(g·h),因此,该污泥系统中相对 NOB 数量较少.

## 参考文献


[1]ZHU G, PENG Y, LI B, et al. Biological removal of nitrogen from wastewater[J]. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 2008, 192: 159

[2]FUX C, VELTEN S, CAROZZI V, et al. Efficient and stable nitritation and denitritation of ammonium-rich sludge dewatering liquor using an SBR with continuous loading[J]. Water Research, 2006, 40(14): 2765. DOI:10.1016/j.watres.2006.05.003

[3]TURK O, MAVINIC D S. Benefits of using selective inhibition to remove nitrogen from highly nitrogenous wastes[J]. Environmental Technology Letters, 1987, 8(1-12): 419. DOI: 10.1080/09593338709384500

[4]ZENG W, WANG X, LI B, et al. Nitritation and denitrifying phosphorus removal via nitrite pathway from domestic wastewater in a continuous MUCT process[J]. Bioresource Technology, 2013, 143(9): 187. DOI:10.1016/j.biortech.2013.06.002

[5]KORNAROS M, DOKIANAKIS S N, LYBERATOS G. Partial nitrification/denitrification can be attributed to the slow response of nitrite oxidizing bacteria to periodic anoxic disturbances[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(19): 7245. DOI: 10.1021/es100564j

[6]BOURNAZOU M N C, HOOSHIAR K, ARELLANO-GARCIA H, et al. Model based optimization of the intermittent aeration profile for SBRs under partial nitrification[J]. Water Research, 2013, 47(10): 3399. DOI:10.1016/j.watres.2013.03.044

[7]YU R, CHANDRAN K. Strategies of Nitrosomonas europaea 19718 to counter low dissolved oxygen and high nitrite concentrations[J]. BMC Microbiology, 2010, 10(1): 1. DOI: 10.1186/1471-2180-10-70.

[8]苏东霞, 李冬, 张肖静, 等. 曝停时间比对间歇曝气 SBR 短程硝化的影响[J]. 中国环境科学, 2014, 34(5): 1152
SU Dongxia, LI Dong, ZHANG Xiaojing, et al. Effects of different ratios of aeration time and anaerobic time on shortcut nitrification in the intermittent aeration SBR[J]. China Environmental Science, 2014, 34(5): 1152

[9]KATSOGIANNIS A N, KORNAROS M, LYBERATOS G. Enhanced nitrogen removal in SBRs bypassing nitrate generation accomplished by multiple aerobic/anoxic phase pairs[J]. Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2003, 47(11): 53

[10]YANG S, YANG F. Nitrogen removal via short-cut simultaneous nitrification and denitrification in an intermittently aerated moving bed membrane bioreactor[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 195(1): 318. DOI:10.1016/j.jhazmat.2011.08.045

[11]高春娣, 王惟肖, 李浩, 等. SBR 法交替缺氧好氧模式下短程硝化效率的优化[J]. 中国环境科学, 2015, 35(2): 403
GAO Chundi, WANG Weixiao, LI Hao, et al. Optimization of efficiency on partial nitrification under the mode of alternating anoxic/oxic in sequencing batch reactor[J]. China Environmental Science, 2015, 35(2): 403

[12]张艳辉, 李冬, 梁瑜海, 等. 缺氧/好氧比对连续流半亚硝化稳定性的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(6): 1724
ZHANG Yanhui, LI Dong, LIANG Yuhai, et al. Influence of anoxic/aerobic ratio on stability of partial nitritation in a continuous flow process[J]. China Environmental Science, 2016, 36(6): 1724

[13]国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 100
The State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring and analysis method[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 100

[14]方茜, 张朝升, 杜馨. 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, 2009, 29(7): 1411. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2009.07.014
FANG Qian, ZHANG Chaosheng, DU Xin. Influence of intermittent aeration on the stability of simultaneous nitrification and denitrification[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(7): 1411. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2009.07.014

[15]THIRD K A, GIBBS B, NEWLAND M, et al. Long-term aeration management for improved N-removal via SND in a sequencing batch reactor[J]. Water Research, 2005, 39(15): 3523. DOI:10.1016/j.watres.2005.06.014

[16]吴光学, 管运涛. SRT 及碳源质量浓度对厌氧/好氧交替运行 SBR 工艺中 PHB 的影响[J]. 环境科学, 2005, 26(2): 126
WU Guangxue, GUAN Yuntao. Effects of SRT and carbon concentration on the PHB in the anaerobic/aerobic alternative operating SBR process[J]. Environmental Science, 2005, 26(2): 126. DOI:10.13227/j.hjkx.2005.02.026

[17]LI J, ELLIOTT D, NIELSEN M. Long-term partial nitrification in an intermittently aerated sequencing batch reactor (SBR) treating ammonium-rich wastewater under controlled oxygen-limited conditions[J]. Biochemical Engineering Journal, 2011, 55(3): 215. DOI:10.1016/j.bej.2011.05.002

[18]蒋轶锋, 陈浚, 王宝贞, 等. 间歇曝气对硝化菌生长动力学影响及 $NO_2^-$ 积累机制[J]. 环境科学, 2009, 30(1): 85
JIANG Yifeng, CHEN Jun, WANG Baozhen, et al. Effect of intermittent aeration on growth kinetics of nitrifiers and mechanism for $NO_2^-$ accumulation[J]. Environmental Science, 2009, 30(1): 85


(编辑　刘　彤)