

DOI:10.11918/201908042

不同搅拌方式对厌氧氨氧化污泥复壮及运行影响

李冬¹, 曹正美¹, 张杰^{1,2}, 张诗睿¹, 李帅^{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: 为研究在常温(21 ± 1) °C 条件下不同搅拌方式对于厌氧氨氧化污泥复壮及运行影响, 采用 3 组反应器(R1、R2、R3) 搅拌方式分别为连续搅拌、间歇搅拌、间歇搅拌方式(R2、R3 转速不同), 对系统复壮及运行过程的脱氮性能、颗粒污泥性能等进行分析。结果表明, R1、R2、R3 分别用 10, 2, 2 d 的时间氨氮、亚硝酸盐氮去除率接近 100%, R2、R3 的厌氧氨氧化速率更高, 更适合厌氧氨氧化菌生长; 周期实验结果可知, 间歇搅拌方式形成的水流流化状态较弱, 使反应器呈较低溶解氧的时间较长, 更易抑制 AOB 活性, 从而提高厌氧氨氧化菌活性; R1 系统提供剪切力大, 且持续与基质溶液接触, 产生 EPS 多, 稳定运行时期末, R1、R2、R3 的颗粒污泥平均粒径为 723, 675, 649 μm 。

关键词: 间歇搅拌; 连续搅拌; 厌氧氨氧化活性; 周期试验

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)05-0001-08

Effect of different stirring methods on rejuvenation and operation of anaerobic ammonium oxidation sludge

LI Dong¹, CAO Zhengmei¹, ZHANG Jie^{1,2}, ZHANG Shirui¹, LI Shuai^{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 this experiment, the effects of different stirring methods on the rejuvenation and operation of anaerobic ammonium oxidation sludge under normal temperature (21 ± 1) °C conditions were investigated. Three groups of reactors (R1, R2, and R3) were studied, and the stirring methods were continuous stirring for R1 and intermittent stirring with different rotation speeds for R2 and R3. The denitrification performance and the performance of granular sludge during system rejuvenation and operation process were analyzed. Results show that the removal rates of ammonia nitrogen and nitrite nitrogen of R1, R2, and R3 were close to 100% in 10, 2 and 2 d, respectively. The anaerobic ammonium oxidation rates of R2 and R3 were higher, which were more suitable for the growth of anammox bacteria. According to the results of cycle test, the fluidization state of the water flow formed by the intermittent stirring method was weak, so that the reactor had lower dissolved oxygen for a longer period, and it was easier to inhibit the activity of AOB, thereby increasing the activity of the anammox bacteria. The R1 system provided strong shearing force and had continuous contact with the substrate solution, resulting in more EPS. At the end of the static operation phase, the average particle size of granular sludge in R1, R2, and R3 was 723, 675 and 649 μm , respectively.

Keywords: intermittent stirring; continuous stirring; anaerobic ammonium oxidation activity; cycle test

目前, 厌氧氨氧化工艺逐渐成为污水处理的研究热点, 但厌氧氨氧化菌倍增时间长达 11 ~ 19 d^[1], 细胞产率低并且对温度、溶解氧以及生长基质等周围环境极其敏感^[2]。一般认为, 温度、pH、溶解氧波动过大及底物抑制会导致厌氧氨氧化菌活性

降低, 一旦处于环境不利, 之后的活性将难以恢复^[2-3]。有研究表明, 在厌氧氨氧化污泥复壮期间, 少量的 AOB 菌利用系统中微量的氧将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 氧化为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$, 与厌氧氨氧化菌竞争底物, 进而延长厌氧氨氧化污泥复壮的时间^[4-5], 因此, 探究厌氧氨氧化系统快速复壮的策略引起了广泛关注。

研究表明, 间歇搅拌方式使反应器保持较低的流化状态形成较低的溶解氧环境, 有利于抑制好氧硝化菌活性进而促进厌氧氨氧化菌生长^[6]。同时, 厌氧氨氧化菌具有密度依赖性, 只有当厌氧氨氧化

收稿日期: 2019-08-12

基金项目: 北京高校卓越青年科学家计划项目
(BJJWZYJH01201910005019)

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

细胞浓度达 $10^{10} \sim 10^{11}$ cell/mL, 厌氧氨氧化活性才能表现出来^[7]. 间歇搅拌方式运行时在停止搅拌期间, 颗粒污泥沉降到底部, 反应系统中的厌氧氨氧化菌在较小体积内细胞浓度较高从而提高细菌活性, 此时反应器中水流相对静止, 污泥所接触的溶解氧较低, 促进形成厌氧状态; 在搅拌期间, 颗粒污泥与基质溶液充分接触进行反应, 适当地排出产生的气体, 防止污泥上浮, 并且提供剪切力促进颗粒污泥的形成. 然而, 相对于连续搅拌方式, 间歇搅拌方式可能会使系统中的污泥与基质溶液接触不充分, 其运行的脱氮效果有待进一步研究.

本实验结合上述分析采用 3 个 SBR 反应器, 搅拌方式分别为连续搅拌、间歇搅拌、间歇搅拌方式 (R2、R3 转速不同), 探讨不同搅拌方式对厌氧氨氧化污泥脱氮性能复壮及运行工况, 以期为实际工艺及工况提供理论参考.

1 实 验

1.1 接种污泥和实验用水

将装有厌氧氨氧化菌种的 5 L 厌氧瓶置于装有水浴温度 $(15 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的容器中于避光处储存 15 d (储存基质 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的质量浓度为 100 mg/L). 储存后的厌氧氨氧化污泥底部有些发黑, 将部分发黑的厌氧氨氧化污泥平均分为 3 份于 3 个 SBR 反应器内 (敞口状态运行), 分别编号为 R1、R2、R3. 颗粒平均粒径为 329 μm , MLSS 为 2 443 mg/L.

本实验采用人工配水, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 提供氨氮, NaNO_2 提供亚硝态氮, NaHCO_3 提供进水碱度, 其碱度与氮比为 5, KH_2PO_4 为 2.5 mg/L, CaCl_2 为 12.5 mg/L 以及 1.00 mL/L 的微量元素; 微量元素成分为: EDTA (15 g/L), $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0.25 g/L), $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0.42 g/L), $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (0.24 g/L), $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (0.98 g/L), H_3BO_4 (0.015 g/L), $\text{NiCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0.020 g/L), $\text{NaWO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0.060 g/L).

整个实验过程分为复壮时期、提高负荷时期、稳定运行时期 3 个阶段. 污泥性能稳定后, 增加进水基质浓度来提高进水负荷. 在复壮时期, 氨氮质量浓度约为 50 mg/L, 提高负荷时期和稳定时期, 氨氮质量浓度为 70 mg/L. 配水基质氨氮、亚氮质量浓度按适当比例配制 (由于实验接种污泥中 AOB 菌的活性较高, 提高了配水中的氨氮比例), 实验测得进入反应器后的氨氮与亚氮质量浓度比约为 1:1.

1.2 实验装置及运行参数

采用 3 个 2 L 的 SBR 反应器, 直径为 9 cm, 排水比为 80%, 周期 12 h, 进水 10 min, 反应运行 680 min, 沉淀 10 min, 排水 10 min, 闲置 10 min. 实

验在室温下进行, 温度在 $20 \sim 22^\circ\text{C}$, 温度由温控器控制. pH 在 6.9 ~ 8.6. 反应器进水、搅拌、排水由时控开关自动控制, 内置搅拌机使泥水混合. 反应器装有 pH、DO 及温度在线监测探头.

根据搅拌功率 $P = N_p \rho n^3 D^5$, 其中 P 与 n (转速) 相关, 搅拌耗能 $W = Pt$ ^[8], 转数 = $n \times t$, W 与一定时间内转数值相关. 实验设置 3 组反应器, R1、R2 在一个周期内保持搅拌耗能一致 (转数相同), 对比探讨不同搅拌方式对厌氧氨氧化系统运行影响, R2 与 R3 作对比探讨间歇搅拌方式不同搅拌转速对厌氧氨氧化系统的运行影响. 3 个反应器搅拌方式的参数如表 1 所示.

表 1 3 个反应器的搅拌参数
Tab. 1 Stirring parameters of three reactors

反应 器	搅 拌 方 式	搅 拌 转 速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	搅 拌 时 间: 停 止 搅 拌 时 间	搅 拌 运 行 时 间/ min	搅 拌 转 数
R1	连续搅拌	102	—	680	69 360
R2	间歇搅拌	136	3: 1	510	69 360
R3	间歇搅拌	102	3: 1	510	52 020

1.3 分析方法

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的测定采用纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 采用 $\text{N} - (1 - \text{萘基}) - \text{乙二胺}$ 分光光度法; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 采用紫外分光光度法. 污泥的粒径分布采用激光粒度仪 (Malvern Mastersizer 2000) 进行测定.

EPS 处理及测定方法: 取 30 mL 污泥样品, 配平, 4 000g 离心 (常温) 10 min, 去掉上清液, 加入缓冲液 (常温), 恢复体积到 30 mL, 配平, 4 000g 离心 (常温) 15 min, 去掉上清液, 将剩余样品用缓冲液 (常温) 恢复体积至 30 mL, 涡旋 1 min 使离心管底部污泥完全散开, 60°C 水浴加热 30 min, 同时令离心机空转降温至 4°C ; 样品冷却至接近室温时, 配平, 20 000g 离心 20 min, 4°C , 上清液即为待测样. 采用苯酚硫酸法在 490 nm 波长下测定多糖质量分数, 考马斯亮蓝法在 595 nm 波长下测定蛋白质量分数.

好氧氨氧化速率 (R_{AOB})、厌氧氨氧化速率 (R_{Anammox}) 等参数^[9]按下式计算:

$$R_{\text{AOB}} = [\rho_{\text{in}}(\text{NH}_4^+ - \text{N}) - \rho_{\text{ef}}(\text{NH}_4^+ - \text{N}) - (\rho_{\text{in}}(\text{TN}) - \rho_{\text{ef}}(\text{TN}))/2.04] \times Q/V,$$
$$R_{\text{Anammox}} = (\rho_{\text{in}}(\text{TN}) - \rho_{\text{ef}}(\text{TN})) \times Q/(2.04 \times V).$$

式中: R_{AOB} 、 R_{Anammox} 为反应器好氧、厌氧氨氧化速率, $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$; $\rho_{\text{in}}(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 、 $\rho_{\text{ef}}(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 为进、出水氨氮质量浓度; $\rho_{\text{in}}(\text{TN})$ 、 $\rho_{\text{ef}}(\text{TN})$ 为进、出水总氮质量浓度; Q 为流量; V 为反应器体积.

2 结果与讨论

2.1 反应器脱氮性能及功能菌活性分析

2.1.1 反应器脱氮性能变化

3 个反应器脱氮性能如图 1 所示,实验初期,R1 的厌氧氨氧化反应脱氮恢复效果相比 R2、R3 的恢复效果相差很远. 经过 2 d 的适应,间歇搅拌方式运行系统(R2、R3)表现出良好的厌氧氨氧化活性,氨氮、亚硝酸盐氮去除率接近 100%. 连续搅拌方式运行系统(R1)初期的厌氧氨氧化活性较低,氨氮去除率比亚硝酸盐氮去除率高,R1 反应器中消耗的 $\text{NO}_2^- - \text{N}/\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 较低,可能是由于污泥中存在较高活性的 AOB 菌,连续搅拌方式形成的溶解氧较高, AOB 菌消耗溶解氧将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$,溶液中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的质量浓度降低,进而影响系统中厌氧氨氧化反应的底物消耗情况,提高了氨氮的去除率. 文献[10]也发现 AOB 菌的存在降低了溶解氧质量浓度(溶解氧主要来源于进水),氨氮去除率较高. 随着反应运行,由图 1 可看出脱氮性能逐渐升高,溶解氧逐渐降低, AOB 菌不再适应厌氧环境,其

活性降低,使厌氧氨氧化反应逐渐成为主导反应. 随着厌氧氨氧化活性提高,硝化作用减弱,第 10 天, R1 的氨氮、亚硝酸盐氮去除率接近 100%,此时反应系统进入稳定时期. 由此可得,间歇搅拌方式相对连续搅拌方式使系统更易形成厌氧环境,抑制硝化作用,使厌氧氨氧化污泥快速复壮,而连续搅拌方式需要一定时间才能恢复厌氧氨氧化菌的活性. R1、R2、R3 脱氮性能稳定时期的化学计量比分别为 $1:1.15:0.37$ 、 $1:1.17:0.26$ 、 $1:1.17:0.25$,R2 与 R3 脱氮性能相近,R1 的 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})/\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 较高,可能是连续搅拌方式导致 R1 反应器中存在较高的溶解氧,厌氧氨氧化菌消耗相应的基质后,NOB 菌将剩余的亚硝酸盐氮在溶解氧存在的条件下反应生成硝酸盐氮,从而使反应出水的硝酸盐氮质量浓度升高. 相对连续搅拌方式,间歇搅拌方式近似于给系统中污泥提供一个饱食饥饿的交替状态,NOB 菌饱食饥饿性较差,容易受环境变化影响,间歇搅拌方式有利于逐渐淘汰 NOB 菌. 综上,间歇搅拌方式有利于厌氧氨氧化菌复壮,其不同转速对反应器的脱氮性能影响较小.

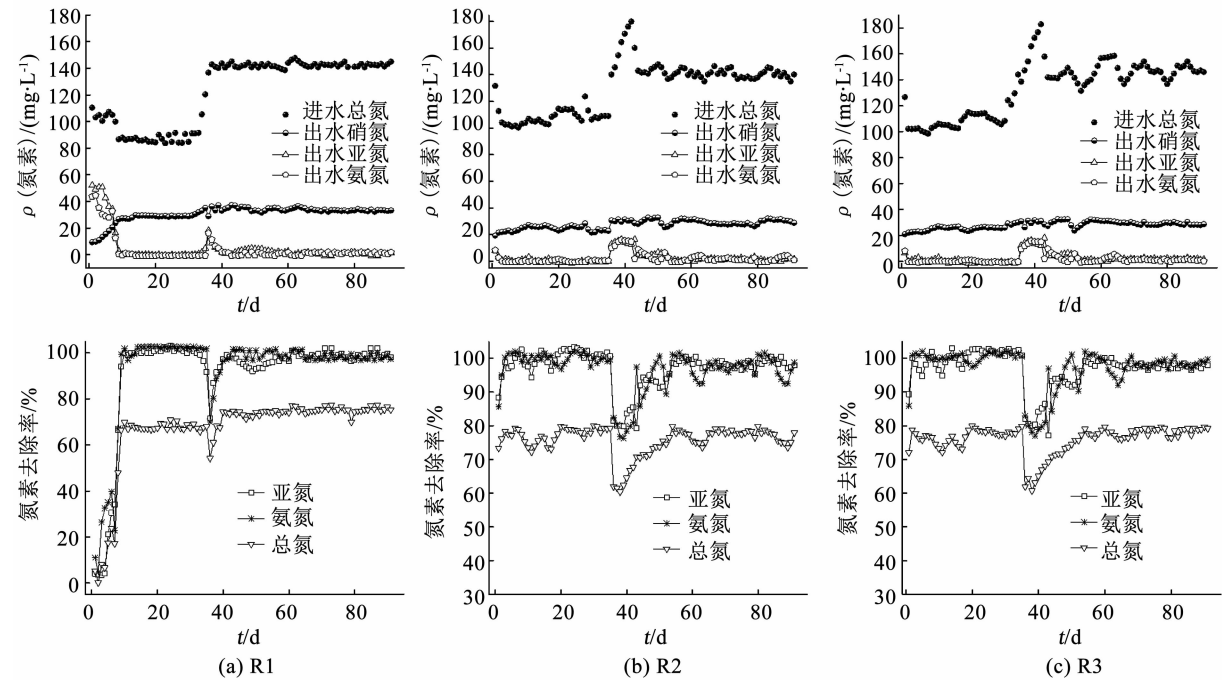


图 1 3 个反应器的氮质量浓度及氮去除率变化

Fig. 1 Changes of nitrogen concentration and nitrogen removal rate of three reactors

厌氧氨氧化脱氮性能稳定后,第 38 天提高基质浓度进而提高反应器脱氮负荷. 提高负荷初期,由于基质浓度变高,系统受到一定冲击,氨氮、亚硝酸盐氮去除率降低. R1、R2、R3 的氨氮去除率降低为 70.13% (降低幅度为 30.87%)、80.31% (降低幅度为 19.32%)、80.13% (降低幅度为 19.87%);亚硝

酸盐氮去除率降低为 71.43% (降低幅度为 26.28%)、79.92% (降低幅度为 20.08%)、80.58% (降低幅度为 19.42%). 间歇搅拌方式运行的系统(R2、R3)相比连续搅拌方式运行的系统(R1),脱氮性能变化幅度较低,更容易抗击基质负荷的波动,保持相对稳定的厌氧环境,在停止搅拌期间使厌氧氨

氧化污泥进一步与基质反应,更有利于厌氧氨氧化污泥保持其活性,从而提高氨氮、亚硝酸盐氮去除率,降低脱氮性能的变化程度. R1 的 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})/\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 由上一阶段 0.37 降低到 0.22,在连续搅拌方式运行的系统中,随着氮负荷的提高,厌氧氨氧化菌代谢较慢,出水的氨氮质量浓度提高(由 0 mg/L 提高到 10 mg/L 以上),游离氨 FA 质量浓度为 0.612 mg/L,在 AOB 菌可承受的阈值之内,NOB 菌的阈值之外,进而对 NOB 菌有抑制作用^[11-12],使 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})/\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 降低幅度较大, $\rho(\text{NO}_2^- - \text{N})/\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 变化较小,稳定在 1.17 左右.

随着厌氧氨氧化菌占主要优势,3 个反应器进入了稳定时期,氨氮、亚硝酸盐氮去除率均接近 100%,化学计量比分别稳定在 1:1.17:0.20、1:1.22:0.25、1:1.21:0.25,总氮去除率分别稳定在 75.7%、78.3%、78.9%. 相比 R2、R3 间歇搅拌方式运行的系统,R1 系统中溶解氧较高,进而 AOB 活性相对 R2、R3 的活性较强,但 R2、R3 的脱氮性能没有明显差距,间歇搅拌方式更有利于厌氧氨氧化菌的稳定运行. 研究^[13]发现搅拌转速在一定范围内反应效果并没明显变化,且转速越快搅拌器消耗功率越大. 本研究中机械搅拌主要使污泥与溶液充分混合获取底物,R2、R3 的转速可能在此范围内对微生物没有明显的影响,从实验结果同样看出,在相同时间内搅拌转速不同(转速在 100~140 r/min)对反应器的脱氮性能影响较小,且转速小消耗功率低有利于高效节能.

2.1.2 反应器主要功能菌活性变化

通过计算单位体积反应器的 R_{Anammox} ,间接说明厌氧氨氧化菌活性的变化情况,结果如图 2 显示.

复壮时期初,R2 和 R3 的 R_{Anammox} 在前 2 d 降低, R_{AOB} 较高,可能是由于阶段初期厌氧氨氧化菌进入新的环境不适应,进水没做去氧处理,AOB 菌在有氧的条件下进行好氧硝化. R1 的 R_{Anammox} 几乎为零, R_{AOB} 变化浮动较大,连续搅拌方式带来较多的溶解氧,在厌氧氨氧化菌复壮初期提供的溶解氧已能够抑制失稳厌氧氨氧化菌的活性,在溶解氧较高的条件下,AOB 菌的活性提高,进而阻止厌氧氨氧化反应的进行. 复壮后期,R2、R3 的 R_{Anammox} 由 60.96 g/(m³·d) 提升到 73.56 g/(m³·d) 左右,厌氧氨氧化菌活性逐渐提高. 在连续搅拌方式运行的 R1 系统中,随着厌氧氨氧化菌活性逐渐提高,硝化作用开始减弱, R_{Anammox} 稳定在 48.95 g/(m³·d),但是由于初期 AOB 菌的活性较高且连续搅拌方式提供的环境中溶解氧较高,AOB 菌的活性不易降低,复壮时期末 R1 的 R_{AOB} 为 10.58 g/(m³·d),比 R2、R3 的活性高,AOB 菌的世代时间比厌氧氨氧化菌的世代时间短,生长速度快,进而使 R_{AOB} 与厌氧氨氧化速率相差 20 g/(m³·d) 左右,R2、R3 间歇搅拌系统的 R_{Anammox} 都在 68.2 g/(m³·d) 左右,间歇搅拌方式运行系统 R2、R3 的搅拌转速不同,可能是在此范围内,搅拌转速的变化对微生物没有较大的影响,R2、R3 的 R_{Anammox} 相差较小.

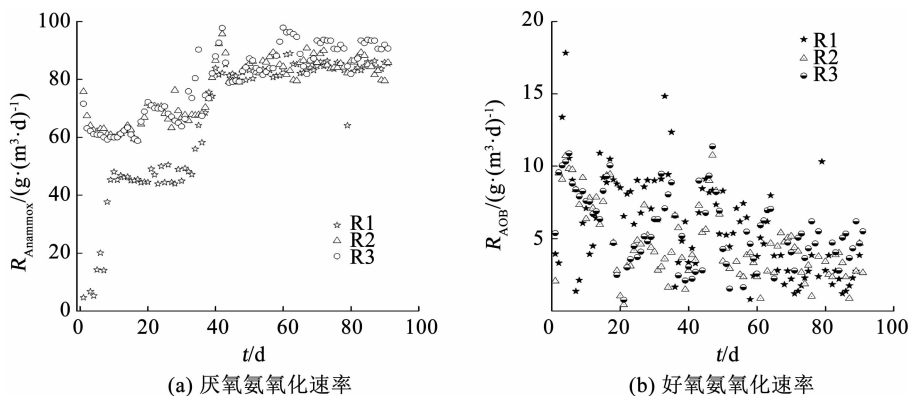


图 2 3 个反应器的主要功能菌活性变化

Fig. 2 Changes of main functional bacteria activity of three reactors

随着氮负荷的提高,反应器内 R_{Anammox} 逐渐提高,初期 R2、R3 的 R_{Anammox} 相比 R1 的高,可知间歇搅拌方式更适合厌氧氨氧化菌生长,从而解释上一节在提高负荷时期,R2、R3 的氨氮、亚氮去除率降低幅度较小的结果. 3 个反应器的 R_{AOB} 在提高负荷初期升高,可能是进水没有去氧处理,基质浓度升高

在短时间内好氧氨氧化去除效率较高. 随着反应运行,由于基质浓度提高,在短时间内脱氮性能不能大幅提高,出水氨氮质量浓度较高,形成较高的游离氨质量浓度,抑制了 NOB 菌的活性,从而促进 R_{Anammox} 升高. 脱氮性能稳定后,稳定时期 R1、R2、R3 3 个反应器的 R_{Anammox} 分别稳定在 88.99、89.80、92.88 g/(m³·d)

左右, R_{AOB} 在 $5\text{ g}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 以内.

2.2 周期实验

反应器中功能菌的活性和系统的脱氮性能与反应器内 DO 和 pH 的变化有着密切联系^[11]. 为明晰间歇搅拌方式与连续搅拌方式中的系统反应工况,

对 3 个反应器中 DO、pH 的变化进行了在线监测,同时也测了周期内的三氮变化,间接反映底物消耗的情况,从而明确菌种活性变化. 3 个反应器在稳定运行时期的一个典型周期内 pH 及 DO 变化和周期内的三氮质量浓度变化如图 3 所示.

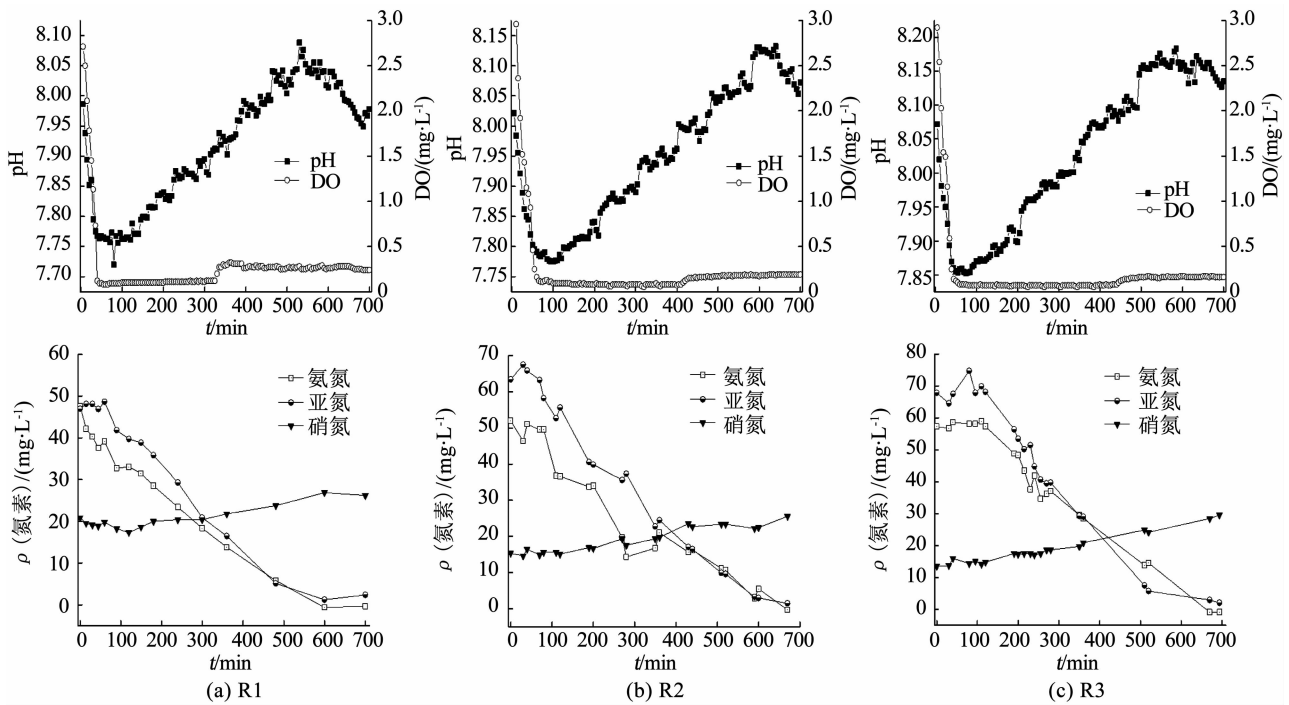


图 3 3 个反应器的典型周期实验 pH、DO 及三氮质量浓度变化
Fig. 3 Changes of pH, DO and trinitrogen concentration of three reactors in a typical cycle

由于进水不做除氧处理,初期进水携带溶解氧,使反应器中的 DO 高达 $2.7\sim3.0\text{ mg/L}$,其 pH 达 $7.99\sim8.12$. 由上节化学计量比可知系统中存在 AOB 菌,随着反应进行,以 AOB 菌为主的其他菌种在周期前 1 h 内消耗溶解氧降低到 0.1 mg/L 左右, pH 随之降低到 7.8 左右,符合适合厌氧氨氧化菌生长的厌氧状态,随后系统以厌氧氨氧化反应为主体反应. 氨氮氧化反应是产酸反应,反应越彻底产生的 H^+ 越多, pH 的变化反映了系统中 AOB 菌活性的变化^[11]. 起初 1 h, R1、R2、R3 反应器内 pH 的降幅分别为 $0.238\text{ (}8.001\rightarrow7.763\text{)}$ 、 $0.228\text{ (}8.003\rightarrow7.775\text{)}$ 、 $0.22\text{ (}8.072\rightarrow7.852\text{)}$,从相应时间内的氮素质量浓度变化同样可看出, R2、R3 反应器内的 AOB 菌活性比 R1 反应器的低. 间歇搅拌方式运行时,在停止搅拌期间污泥接触溶解氧较少,有利于抑制 AOB 菌的活性. 由图 3 中 R2、R3 的氮素质量浓度变化可知,在停止搅拌期间,氮素质量浓度保持不变或升高,可能是颗粒污泥沉降到底部,与基质溶液接触面较小(近似于饥饿状态),污泥消耗之前吸附的基质或自身产生的 EPS 以应对外界环境变化,同时,间歇饥饿状态有利于抑制 NOB 菌的活性,进一

步解释 2.1 节 R2、R3 的 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})/\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 比 R1 的低.

R1、R2、R3 反应器内的 DO 在 0.1 mg/L 内维持了大约 285、385、355 min 后, DO 曲线出现跃升,供 AOB 菌的底物已基本降解完,3 个系统中溶解氧分别跃升到 $0.31, 0.19, 0.17\text{ mg/L}$, R2、R3 间歇搅拌方式形成水流的流化状态较弱,使反应器呈较低溶解氧环境状态时间较长,更适合厌氧氨氧化菌生长. 随着为厌氧氨氧化菌提供的基质底物消耗殆尽(氨氮、亚氮在 5 mg/L 以下), R1、R2、R3 反应器分别在 530、610、585 min 出现 pH 最高值的拐点,标志着厌氧氨氧化反应基本结束^[14],最终出水氨氮都消耗彻底,亚氮在 2 mg/L 以下. 由 DO 曲线、pH 曲线拐点可得, R1 反应器最先出现 DO、pH 拐点,在提高负荷阶段初期,出水氮素质量浓度比复壮时期高, pH 快速提高进而提高 FA 质量浓度(约为 0.61 mg/L),有利于抑制 NOB 菌的活性^[14-15],从而提高 R1 的厌氧氨氧化速率.

2.3 颗粒污泥性能变化

2.3.1 污泥颗粒粒径及沉降性变化

将 3 个反应器的颗粒粒径和 SV_{30} 进行观测对

比,以明晰不同运行方式下厌氧氨氧化颗粒污泥的污泥性能变化.

随着厌氧氨氧化污泥活性恢复,厌氧氨氧化污泥增殖并加快颗粒污泥形成,污泥颜色逐渐趋于红棕色,厌氧氨氧化菌活性提高,颗粒污泥粒径变大,在恢复活性末期,R1、R2、R3 的颗粒粒径由 329 μm 分别增长为 405,406,399 μm ,SV₃₀ 分别降为 5.2%、5.2%、5.4%.

提高氮负荷之后,随着基质浓度升高,提供厌氧氨氧化菌生长的底物增多,污泥生长速度比上一阶段加快,分泌 EPS 物质增多^[16],颗粒污泥粒径快速提高. 间歇搅拌方式使污泥近似于饱食饥饿交替状态,研究^[16]表明在基质匮乏阶段,污泥生长速度减慢,消耗自身的 EPS,不易使颗粒污泥生长. 而连续搅拌方式使污泥与基质长期接触反应(有充足的底物),进一步促进颗粒污泥生长. R2 与 R1 转速相同,但 R1 搅拌时间更长,R1 比 R2 提供的剪切力更大;R3 与 R2 搅拌时间相同,R2 比 R3 的转速更大,转速大形成更强的流场强度^[17],相比 R3,R2 提供更大的剪切力;R1 与 R2 转速不同,但两个转速对微生物的活性差别较小,而 R1 比 R2 搅拌时间更长,其粒径增长速度比 R2 的快,搅拌时间越长,越促进颗粒污泥的形成^[18]. 研究^[16]表明剪切力促进 EPS 中 PN 分泌,同时从上节可知,污泥与基质溶液持续接触,处于饱食状态,粒径增长速率更快. 从图 4 可明显看出,R1 的粒径增长速度比 R2、R3 的

快,R1 的 SV₃₀ 相比间歇搅拌方式运行的 R2、R3 系统低. 在稳定运行时期末,R1、R2、R3 的颗粒污泥平均粒径为 723,675,649 μm ,SV₃₀ 分别降低 2%、2.3%、2.5%.

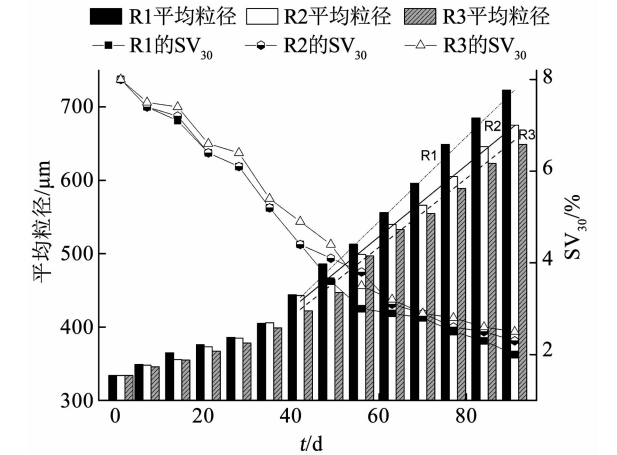
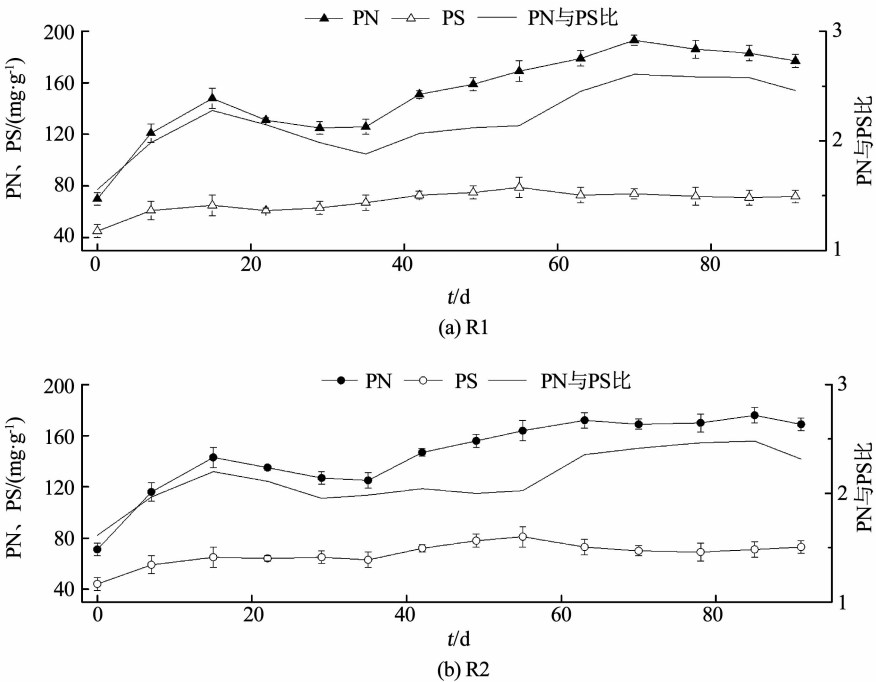


图 4 3 个反应器的颗粒粒径及沉降性变化

Fig. 4 Changes of particle size and sedimentation of three reactors

2.3.2 污泥 EPS 质量分数变化

厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 的质量分数及 PN 与 PS 比的组成变化如图 5 所示. EPS 在污泥颗粒化及维持颗粒污泥的结构稳定中起到重要作用,其受水质条件、反应器运行方式、基质消耗速率以及优势菌种的代谢水平等因素影响. 研究^[16]表明,PN 是影响厌氧氨氧化菌凝聚的关键性物质,厌氧氨氧化污泥 EPS 主要成分为 PN.



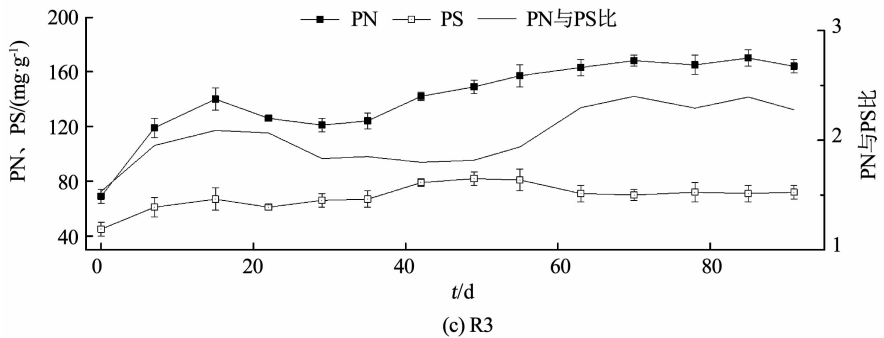


图 5 3 个反应器的污泥 EPS 变化

Fig. 5 Changes of sludge EPS in three reactors

复壮时期初,由于外界条件变化,为维持颗粒污泥的稳定,PN 质量分数升高,PS 质量分数变化浮动不大,PN 与 PS 比快速提高. 反应器提高氮负荷后,研究^[16]表明,充足的基质维持较高的厌氧氨氧化活性,进而污泥产生的 EPS 也不断积累,PN 与 PS 比缓慢升高,颗粒污泥粒径增大. R2、R3 间歇搅拌方式运行的系统,在停止搅拌期间,污泥沉降到反应器底部,底部污泥密度较大,溶液与污泥接触面较小(近似于饥饿状态),在搅拌期间,污泥与基质溶液充分接触,处于饱食状态. 基质充分时,污泥分泌的 EPS 质量分数呈上升趋势,基质匮乏时,污泥中部分 EPS 通过水解等作用释放到溶液中,且部分可降解的 EPS 又被充当能源物质而消耗以维持细菌的正常代谢^[16],进而 R2、R3 在提高负荷初期 PN 质量分数的速度较慢,PN 与 PS 比保持稳定. R1 连续搅拌方式运行的系统,污泥长期接触基质溶液,EPS 质量分数不断升高,PN 与 PS 比呈上升趋势,但由于接触时间较长,产生的 EPS 过多,颗粒形成更快,粒径增长速度更大^[18]. 但过多 EPS 可能使颗粒污泥内部的气体通道更易堵塞,实验过程中观察到少量颗粒污泥上浮于反应器表面,与 Chen 等^[19]研究结果一致. 随着反应运行,3 个反应器的 EPS 质量分数达到稳定,PN 质量分数分别稳定在 177,169,164 mg/g, PS 质量分数分别稳定在 72,73,72 mg/g.

3 结 论

1)在室温条件下,间歇搅拌方式更有利于失稳的厌氧氨氧化菌复壮,恢复原有脱氮性能的时间仅为 2 d. 连续搅拌方式运行的系统中 AOB 菌活性较高,对厌氧氨氧化菌的活性恢复不利,复壮时间为 10 d. 间歇搅拌方式在相同时间内的不同转速对反应器的脱氮性能变化影响较小,且转速低有利于高效节能. R2、R3 的厌氧氨氧化速率更高,更适合厌氧氨氧化菌生长.

2)周期实验结果可看出,间歇搅拌方式形成的

水流流化状态较弱,使反应器呈较低溶解氧的时间较长,更易抑制 AOB 的活性,进而提高厌氧氨氧化菌的活性.

3)间歇搅拌方式使污泥与基质溶液近似处于饱食饥饿交替的状态,产生 EPS 较慢,R1 系统中污泥与基质溶液持续接触,颗粒污泥粒径增长速度较快.

参考文献

[1]高雪健,张杰,李冬,等. 不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5587
GAO Xuejian, ZHANG Jie, LI Dong, et al. Effects of different substrate concentrations on the short-term storage of ANAMMOX bacteria[J]. Environmental Science, 2018, 39(12): 5587. DOI: 10.13227/j. hjkx. 201805107

[2]陈方敏,顾澄伟,胡羽婷,等. 厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5605
CHEN Fangmin, GU Chengwei, HU Yuting, et al. Granular characteristics of anaerobic ammonia oxidation sludge during the recovery process [J]. Environmental Science, 2018, 39 (12): 5605. DOI:10.13227/j. hjkx. 201805217

[3]VAN DONGEN U, JETTEN M, VAN LOOSDRECHT M. The SHARON(R)-Anammox(R) process for treatment of ammonium rich wastewater[J]. Water Science & Technology, 2001, 44(1): 153. DOI:10.2166/wst. 2001. 0037

[4]黄佳路,王小龙,高大文. 常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复[J]. 环境科学, 2017, 38(11): 4687
HUANG Jialu, WANG Xiaolong, GAO Dawen. Storage and reactivation of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) sludge at room temperature [J]. Environmental Science, 2017, 38(11): 4687. DOI:10.13227/j. hjkx. 201704159

[5]李祥,郑宇慧,黄勇,等. 保存温度及时间对厌氧氨氧化污泥活性的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(1): 56
LI Xiang, ZHENG Yuhui, HUANG Yong, et al. Effect of preservation temperature and time on ANAMMOX sludge activity [J]. China Environmental Science, 2011, 31(1): 56

[6]高彦宁. 复合式厌氧氨氧化反应器除氮性能与动力学研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011
GAO Yanning. Study on nitrogen removal performances and kinetics of hybrid ANAMMOX reactor [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011

[7]閻剛,李田,徐乐中,等. 基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化

- 反应器的快速启动特征[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4324
LÜ Gang, LI Tian, XU Lezhong, et al. Quick start-up performance of combined ANAMMOX reactor based on different inoculated sludge types[J]. Environmental Science, 2017, 38(10): 4324. DOI:10.13227/j. hjkx. 201704053
- [8] 杜金海. 污泥厌氧消化系统的水力特性及流态模拟研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2013
DU Jinhai. Research on the hydraulic characteristics and the flow simulation of sludge anaerobic digestion system[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2013
- [9] 梁瑜海. 不同污水处理工艺形式的自养脱氮性能及其微生物特征研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016
LIANG Yuhai. Study on autotrophic nitrogen removal performance and microbial characteristics of different wastewater treatment processes[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016
- [10] 李海玲, 李冬, 张杰, 等. 调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 837
LI Hailing, LI Dong, ZHANG Jie, et al. Adjusting temperature and settling time to achieve ANAMMOX particles rapid start-up and stable operation[J]. Environmental Science, 2019, 40(2): 837. DOI:10.13227/j. hjkx. 201807231
- [11] 李冬, 高雪健, 张杰, 等. 不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 829
LI Dong, GAO Xuejian, ZHANG Jie, et al. Effect of aeration density on start-up of CANON process[J]. Environmental Science, 2019, 40(2): 829. DOI:10.13227/j. hjkx. 201807089
- [12] 张亮, 张树军, 彭永臻. 污水处理中游离氨对硝化作用抑制影响研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(2): 75
ZHANG Liang, ZHANG Shujun, PENG Yongzhen. Review of study on the effects of free ammonia inhibitions on nitrifying bacteria in wastewater treatment[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(2): 75
- [13] 赵东方. 高含固率污泥厌氧消化搅拌技术及水力特性研究[D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2012
ZHAO Dongfang. Research on the stirring technology and hydraulic characteristics of high solids content sludge in anaerobic digestion[D]. Beijing: Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 2012
- [14] 王衫允. 低氨氮浓度厌氧氨氧化工艺强化及颗粒污泥菌群特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016
WANG Shanyun. Study on nitrogen removal enhancement and microbial characteristics of ANAMMOX in low-ammonia sewage treatment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016
- [15] 付昆明, 王会芳, 苏雪莹, 等. 初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N_2O 释放的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(11): 4261
FU Kunming, WANG Huifang, SU Xueying, et al. Effect of initial pH on nitrogen removal performance and N_2O emission of a sequencing batch CANON reactor[J]. Environmental Science, 2016, 37(11): 4261. DOI:10.13227/j. hjkx. 201604221
- [16] 李冬, 田海成, 梁瑜海, 等. 水质条件对厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 含量的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(2): 6
LI Dong, TIAN Haicheng, LIANG Yuhai, et al. Effect of water quality of influent on the content of extracellular polymeric substances in anammox granule sludge[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(2): 6. DOI:10.11918/j. issn. 0367-6234. 2017. 02. 002
- [17] 张建文, 刘禹, 夏建业, 等. 机械搅拌生物反应器的 CFD 模拟及剪切力对红花细胞悬浮培养的影响[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2016, 42(4): 492
ZHANG Jianwen, LIU Yu, XIA Jianye, et al. CFD simulation of a mechanically stirred bioreactor and effect of shear stress on suspension cultures of carthamus tinctorius[J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 42(4): 492. DOI:10.14135/j. cnki. 1006-3080. 2016. 04. 009
- [18] 苏庆岭. 全程自养脱氮污泥快速颗粒化及处理生活污水研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015
SU Qingling. Study on rapid granulation of whole-line autotrophic nitrogen removal sludge and treatment of domestic sewage[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015
- [19] CHEN Jianwei, JI Qixing, ZHENG Ping, et al. Floatation and control of granular sludge in a high-rate anammox reactor[J]. Water Research, 2010, 44(11): 3321. DOI:10.1016/j. watres. 2010. 03. 016

(编辑 刘 彤)