

亚硝酸盐对聚磷菌好氧摄磷的影响研究

李玲玲, 郑西来*, 吴俊文, 李梅, 赵淑梅

(中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266003)

摘要: 利用批量试验研究了不同浓度的亚硝酸盐对聚磷菌好氧摄磷过程的影响, 以及在含盐废水硝化过程中亚硝酸盐的累积对聚磷菌好氧摄磷的影响. 试验结果表明: 亚硝态氮浓度为 4 mg/L 时, 对聚磷菌摄磷有抑制作用, 其对摄磷速率的抑制系数为 0.08; 亚硝态氮浓度为 15 mg/L 时, 对聚磷菌摄磷产生明显的抑制, 抑制系数增加到 0.61. 亚硝酸盐对聚磷菌的抑制作用主要与亚硝酸有关. 本研究中亚硝酸浓度在 0.000 2 mg/L 以上时即对聚磷菌产生较强的抑制作用. 亚硝酸盐对聚磷菌的抑制作用只是在亚硝酸盐存在的条件下才发生, 一旦亚硝酸盐消失, 对聚磷菌的抑制作用即可解除. 含盐废水硝化过程中, 在好氧反应开始 1~2 h 内, 由于亚硝态氮浓度低, 其对聚磷菌摄磷抑制作用小. 随着亚硝态氮的逐步累积, 亚硝态氮浓度达到 8~9 mg/L 以上时, 其对聚磷菌摄磷的抑制作用逐渐增强. 进水氨氮浓度高时, 好氧反应过程中 pH 值较低, 会导致亚硝酸浓度增高, 致使磷酸根的吸收量减少.

关键词: 硝化; 亚硝酸盐; 好氧摄磷; 抑制; 亚硝酸; 含盐废水

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)08-1574-06

Effect of Nitrite on Aerobic Phosphate Uptake by Phosphate Accumulating Organisms

LI Ling-ling, ZHENG Xi-lai, WU Jun-wen, LI Mei, ZHAO Shu-mei

(Key Laboratory of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: Effect of nitrite at various concentration levels on aerobic phosphate uptake was investigated through a series of batch experiments. Furthermore, the effect of nitrite accumulated in the process of nitrification on aerobic phosphate uptake was studied in saline wastewater treatment. The results show that NO_2^- -N concentration of 4 mg/L inhibits aerobic phosphate uptake by phosphate accumulating organisms (PAO) and phosphate uptake rate decreases 8%. Exposure to higher nitrite concentration levels inhibits aerobic phosphate uptake severely. At NO_2^- -N concentration of 15 mg/L, phosphate uptake rate decreases 61%. The toxic effect of nitrite is presumed to be linked with free nitrous acid (FNA). Significant inhibition on aerobic phosphate uptake appeared at 0.000 2 mg/L of FNA concentration. The inhibiting effect of nitrite is found to occur only when nitrite is present. The ability of accumulating phosphate resumes after nitrite is no longer present. During the process of nitrification of saline wastewater, the inhibition of nitrite on aerobic phosphate uptake is slight at the initial 1~2 h due to low nitrite accumulation. With the build-up of NO_2^- -N (up to about 8 to 9 mg/L), the inhibiting effect of nitrite increases gradually. It is found that higher ammonium concentration causes lower pH value and higher FNA concentration, which could decrease the amount of phosphate uptake.

Key words: nitrification; nitrite; aerobic phosphate uptake; inhibition; free nitrous acid; saline wastewater

亚硝酸盐累积到一定程度时, 对微生物会产生抑制作用. 据研究, 在 pH 值为 6 的条件下, NO_2^- -N 达到 30 mg/L 时可对反硝化过程产生抑制; 亚硝酸达到 0.2 mg/L 时可对硝化菌产生抑制作用^[1]. 最近一些研究表明, 亚硝酸盐会影响生物除磷过程. Meinhold 等人研究了在反硝化聚磷过程中亚硝酸盐对磷去除的影响, 研究结果表明, 亚硝态氮达到 8 mg/L 时即对缺氧条件下的聚磷产生明显的抑制^[2]. Saito 等人在研究中发现亚硝态氮超过 3 mg/L 后反硝化聚磷速率开始降低^[3]. 目前在此方面的研究主要集中于反硝化过程中亚硝酸盐的累积对聚磷过程的影响.

在硝化过程中, 由于温度、pH 值、溶解氧、泥龄、

游离氨及有毒物质的影响也会导致亚硝酸盐的大量累积. 而目前就硝化过程中亚硝酸盐的累积对好氧摄磷过程影响的研究尚未见报道. 笔者在含盐废水脱氮除磷研究过程中, 观察到硝化反应过程中的现象, 在此基础上进一步研究了好氧反应过程中亚硝酸盐的累积对聚磷菌摄磷的影响.

1 材料与方法

1.1 试验用污泥

收稿日期: 2005-08-21; 修订日期: 2005-11-24

作者简介: 李玲玲(1974~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为污水生物处理技术.

* 通讯联系人

试验所用污泥取自实验室 SBR 反应器,在该反应器中已对污泥在含盐量为 10 g/L 的条件下进行一定时间的驯化.该污泥中硝化菌因受到盐度的抑制将氨氮氧化到亚硝酸盐阶段.

1.2 试验用水

试验用水采用人工配制污水,以葡萄糖作为碳源,(NH₄)₂SO₄ 和 KH₂PO₄ 作为氮源和磷源,并加入氯化钠、碳酸氢钠、硫酸镁、氯化钙、氯化铁及一些微量元素配制而成;含盐量为 10 g/L. 试验水温为 25℃左右.

1.3 试验方法

1.3.1 亚硝酸盐对聚磷菌好氧摄磷过程的影响

为确定亚硝酸盐对聚磷菌好氧摄磷的抑制程度,首先利用批量试验研究了不同浓度的亚硝态氮对聚磷菌摄磷过程的影响.在 SBR 反应器中投加试验用水后进行 1 h 的厌氧反应,此阶段为厌氧释磷阶段;厌氧阶段结束后,将 SBR 反应器中污泥均分为若干份并置于有效容积为 1 L 的反应器中,同时加入不同量的亚硝酸钠以形成不同的亚硝态氮浓度,进行曝气,定时取样分析 PO₄³⁻-P 浓度.试验分 2 批进行,一批亚硝态氮浓度分别为 0 mg/L(作为对照)、4 mg/L、8 mg/L 及 12 mg/L (MLSS 为 2 880 mg/L);另一批亚硝态氮浓度分别为 0 mg/L(作为对照)、15 mg/L、30 mg/L、50 mg/L 及 80 mg/L (MLSS 为 2 900 mg/L).为减少好氧反应过程中亚硝态氮的生成量,试验用水中仅投加少量硫酸铵.

1.3.2 含盐废水硝化过程试验

从 SBR 反应器中取适量污泥与人工配制污水混合后置于 2 个有效容积为 1 L 的反应器中(MLSS 为 2 750 mg/L),并向 2 个反应器中加入不同量的硫酸铵(该试验未加有机碳源),同时进行曝气,定时取样分析 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 浓度.

1.3.3 含盐废水硝化过程中亚硝酸盐的累积对聚磷菌好氧摄磷过程的影响

先在 SBR 反应器中投加试验用水后进行 1 h 的厌氧反应,厌氧阶段结束后,将 SBR 反应器中污泥均分为 3 份置于有效容积为 1 L 的反应器中(MLSS 为 2 580 mg/L).试验分 3 组进行:第 1 组为对照组;在第 2 组与第 3 组反应器中,分别加入不同量的硫酸铵,以确定在不同氨氮浓度下所生成的亚硝态氮对聚磷菌摄磷的影响.3 组反应器同时曝气,并定时取样分析 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、PO₄³⁻-P 浓度以及 pH 值.3 组试验中所加其他营养物质均相同,好氧反应开始时 3 组试验氨氮浓度分别为 10 mg/L、

48 mg/L 及 100 mg/L.

1.4 分析项目与方法

NH₄⁺-N: 纳氏试剂分光光度法;NO₂⁻-N: N-1-萘基乙二胺光度法;NO₃⁻-N: 紫外分光光度法;PO₄³⁻-P: 钼锑抗分光光度法.

2 结果与讨论

2.1 亚硝酸盐对聚磷菌好氧摄磷过程的影响

在不同亚硝态氮浓度下通过聚磷菌好氧摄磷,磷酸根浓度随时间变化曲线见图 1 与图 2.

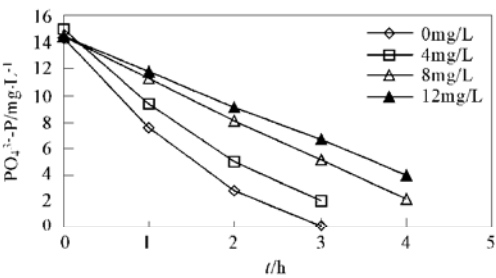


图 1 不同亚硝态氮浓度下好氧摄磷过程中磷酸根浓度随时间的变化

Fig. 1 Profile of aerobic phosphate uptake in the presence of nitrite

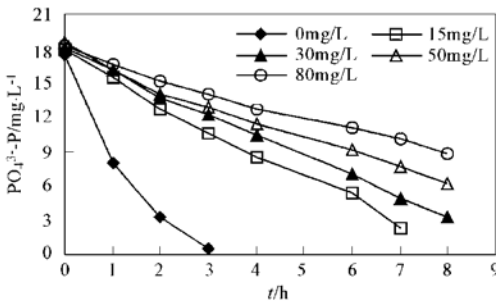


图 2 不同亚硝态氮浓度下好氧摄磷过程中磷酸根浓度随时间的变化

Fig. 2 Profile of aerobic phosphate uptake in the presence of nitrite

根据图 1 与图 2 中曲线变化趋势,得到在不同亚硝态氮浓度下单位污泥摄磷速率,见表 1.

表 1 不同亚硝态氮浓度下单位污泥摄磷速率(U)/ mg·(g·h)⁻¹

Table 1 Phosphate uptake rate at different nitrite concentration(U)/ mg·(g·h) ⁻¹								
第 1 组 NO ₂ ⁻ -N/ mg·L ⁻¹				第 2 组 NO ₂ ⁻ -N/ mg·L ⁻¹				
0	4	8	12	0	15	30	50	80
1.63	1.50	1.06	0.91	1.93	0.75	0.63	0.51	0.39

由表 1 可看出,当亚硝态氮浓度在 0~ 15 mg/L 范围内时,单位污泥摄磷速率随亚硝态氮浓度的增

加而迅速降低;亚硝态氮浓度超过 15 mg/L 以后,摄磷速率随亚硝态氮浓度的增加仍在降低,但降低的速度有所减缓.试验结果表明,亚硝态氮对聚磷菌好氧摄磷有抑制作用,抑制程度的大小可用抑制系数反映.抑制系数计算公式如式(1)所示:

$$Y = \frac{U_0 - U_i}{U_0} \quad (1)$$

式中, Y 为抑制系数; U_i 为某一亚硝态氮浓度下单位污泥摄磷速率[$\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$]; U_0 为亚硝态氮浓度 0 mg/L 时单位污泥摄磷速率[$\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$].

不同亚硝态氮浓度对聚磷菌好氧摄磷抑制程度的大小如图 3 所示.从图 3 中抑制系数随亚硝态氮浓度变化趋势看,整个曲线基本被分成 2 段,其中一段在亚硝态氮浓度为 0~15 mg/L 范围内,此段内抑制系数随亚硝态氮浓度增加而迅速上升,至亚硝态氮浓度为 15 mg/L 时,抑制系数已达到 0.61;而亚硝态氮浓度在 15~80 mg/L 范围内时,抑制系数增加速度较慢,至亚硝态氮浓度为 80 mg/L 时,抑制系数为 0.8.抑制系数(Y)与亚硝态氮浓度(c)之间的关系可由式(2)与式(3)来表示:

$$Y = 0.04c - 0.0213 \quad (2)$$

(NO_2^- -N 为 0 ~ 15 mg/L)

$$Y = 0.0028c + 0.5808 \quad (3)$$

(NO_2^- -N 为 15 ~ 80 mg/L)

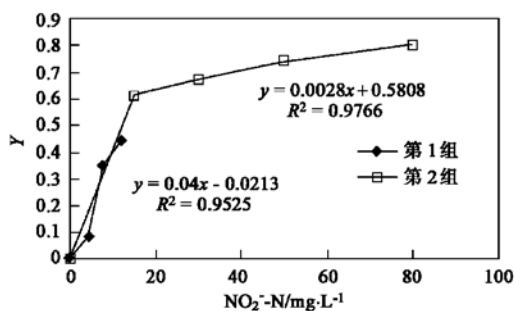


图 3 不同亚硝态氮浓度对摄磷速率的抑制系数

Fig. 3 Inhibition coefficient for phosphate uptake rate at different nitrite concentration

亚硝酸盐对聚磷菌的抑制机理目前还不是很清楚.一些研究认为抑制作用主要与亚硝酸有关^[4].因为亚硝酸能通过细胞膜,降低细胞内的 pH 值,导致 pH 梯度降低,从而使质子推动力降低.质子推动力一方面用来运输磷酸盐,另一个作用是在三磷酸腺苷酶的位置形成 ATP.质子推动力的降低导致了 ATP 合成量的减少,使得 ATP/ADP 比率比较低,也就降低了聚磷酸盐的生成量,致使磷酸根的吸收

量减少.亚硝酸浓度(FNA)与溶液中 pH 值等条件有关,其可根据公式(4)计算^[4]:

$$\text{FNA} = \left[\frac{46}{14} \right] \times \left[\frac{\text{NO}_2^- \cdot \text{N}}{K_a \times 10^{\text{pH}}} \right] \quad (4)$$

式中, K_a 为离子平衡常数; $K_a = e^{-2300/(273 + ^\circ\text{C})}$.

本试验中 pH 值为 8.4 左右,根据公式(4)以及以上试验结果分析可得:当亚硝酸浓度为 0.000 2 mg/L 时即对聚磷菌产生较强的抑制作用,此时抑制系数为 0.35;当亚硝酸浓度为 0.000 4 mg/L 时,抑制系数达到 0.61.

为确定受亚硝酸盐抑制的污泥在无亚硝酸盐存在的条件下好氧摄磷情况,本研究进行了以下试验:污泥经过 80 mg/L 亚硝态氮抑制 24 h 后,用含盐率为 1% 的水将污泥清洗 3 次以去除亚硝态氮.加入人工配制污水,厌氧 1 h、好氧 4 h,定时取样分析 PO_4^{3-} -P 的浓度.试验结果如图 4 所示.

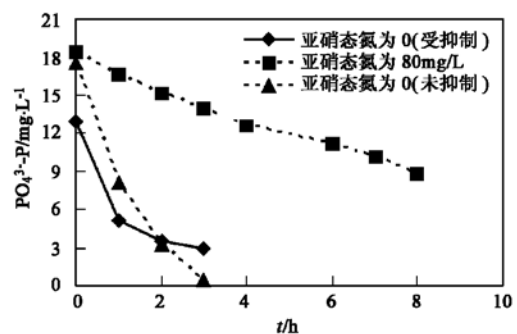


图 4 受亚硝酸盐抑制的污泥在无亚硝酸盐时好氧摄磷曲线

Fig. 4 Phosphate uptake after exposure to nitrite

由图 4 可见,受亚硝酸盐抑制的污泥在无亚硝酸盐的环境下,好氧摄磷能力基本没有受到抑制.在好氧摄磷的第 1 h 内,受抑制的污泥在没有亚硝酸盐存在时,摄磷量为 7.8 mg/L;未受亚硝酸盐抑制的污泥摄磷量为 9.4 mg/L;而在亚硝态氮为 80 mg/L 的环境中,聚磷菌摄磷量仅为 1.7 mg/L. Meinhold 等人研究发现受亚硝酸盐抑制的污泥缺氧摄磷能力在没有亚硝酸盐存在时也可得到恢复^[2].由此说明亚硝酸盐对聚磷菌的抑制作用只是在亚硝酸盐存在的条件下才发生,一旦亚硝酸盐消失,对聚磷菌的抑制作用即可解除或持续几小时后摄磷能力可恢复正常.

2.2 含盐废水硝化过程

笔者在驯化耐盐活性污泥的过程中,将含盐量由 8 g/L 提高到 10 g/L 时观察到亚硝酸盐累积的现象.于德爽等人在研究含海水生活污水的处理过程

中,当海水占生活污水比例为 30% 时(此时含盐量为 10.5 g/L 左右)也观察到亚硝酸盐的累积^[5]. 分析其原因,可能是硝化菌对盐度比亚硝化菌更敏感,含盐量为 10 g/L 时就对硝化菌产生明显的抑制,此时硝化反应主要由亚硝化菌完成,从而出现了亚硝酸盐的积累.

在含盐量为 10 g/L 的条件下,进水氨氮浓度分别为 30 mg/L 和 56 mg/L 时,氨氮、亚硝态氮、硝态氮浓度随反应时间变化过程见图 5.

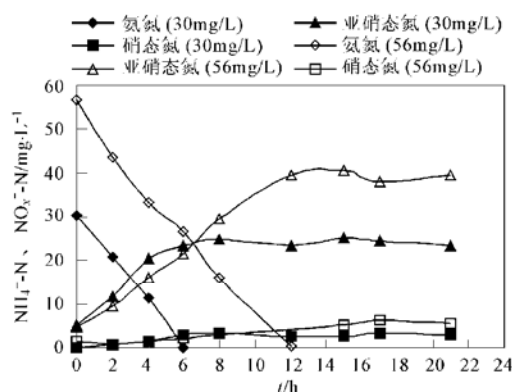


图 5 不同进水氨氮浓度下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度随反应时间的变化

Fig. 5 Profile of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ concentration at different influent ammonium concentration

从图 5 可看出,不同进水氨氮浓度下氨氮随反应时间变化均呈直线趋势,且两者基本平行. 进水氨氮浓度为 30 mg/L 和 56 mg/L 的情况下,比硝化速率分别为 1.85 mg/(g·h) 和 1.69 mg/(g·h),说明比硝化速率与进水氨氮浓度无关,呈零级反应关系,这主要是因为硝化反应的半饱和系数非常小,对于氨的半饱和系数通常为 (N) 0.06~5.6 mg/L^[6],导致硝化动力学在比较宽的氨浓度范围内(氨氮在 10 mg/L 以上^[7])都是以零级反应方式进行. 在整个硝化反应过程中,硝态氮的浓度都远小于亚硝态氮的浓度,反应至 21 h 时,硝态氮的浓度分别为 2.7 mg/L 和 5.5 mg/L,亚硝化率 $[\text{NO}_2^-\text{-N}/(\text{NO}_2^-\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N})]$ 达到 88% 以上,试验结果表明该硝化过程属于短程硝化.

2.3 含盐废水硝化过程中亚硝酸盐的累积对聚磷菌好氧摄磷的影响

3 组试验在好氧反应过程中亚硝态氮浓度与磷酸根浓度随反应时间变化情况见图 6.

如图 6 所示,对照组亚硝态氮在整个反应过程中保持了较低的浓度,大约在 1 mg/L 左右. 第 2 组

与第 3 组亚硝态氮浓度随反应时间增加而呈线性增加,其中第 2 组反应至 330 min 时,氨氮已消耗完,此后亚硝态氮浓度不再增加,保持在 17.8 mg/L 左右. 从好氧反应开始至 105 min 这一时段内,第 2 组与第 3 组亚硝态氮浓度保持一致,说明反应开始时段内由于氨氮浓度较高,氨氮以零级反应方式被转化成亚硝态氮,即亚硝态氮生成速率与进水氨氮浓度无关. 从 105 min 至 330 min 这一时段内,第 3 组亚硝态氮浓度比第 2 组亚硝态氮浓度略高 1~2 mg/L.

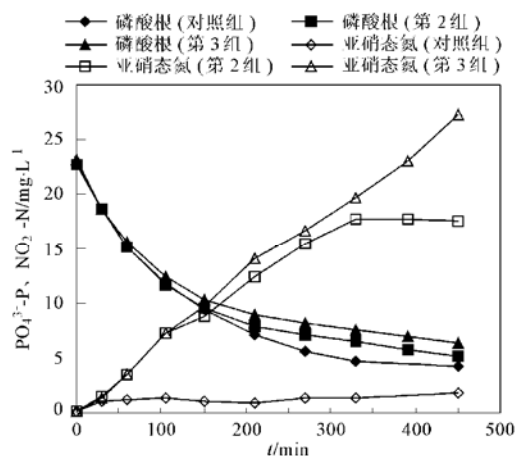


图 6 好氧反应过程中亚硝态氮、磷酸根浓度随时间的变化

Fig. 6 Profile of nitrite and phosphate concentration under aerobic conditions

从图 6 中磷酸根浓度随时间变化趋势来看,自好氧反应开始至 60 min 这一时段内,由于亚硝态氮浓度较低,其对聚磷菌摄磷没有影响,3 组试验中磷酸根被吸收的量基本相同. 而从 60 min 以后,随着亚硝态氮浓度的不断增高,在第 2 组与第 3 组讨论中,聚磷菌摄磷已受到抑制,其在反应过程中不同时段受抑制的程度见表 2. 表 2 中抑制系数根据文中公式(1)计算,其中 U_i 为第 2 组或第 3 组在某一时段内摄磷量, U_0 为第 1 组(对照组)在某一时段内摄磷量. 根据生物除磷动力学,好氧阶段摄磷速率与磷酸根浓度有关,因此计算抑制系数时 U_i 和 U_0 所选择的时段可能不同,所选择 U_0 时段的起始磷酸根浓度与 U_i 在某一时段内的起始磷酸根浓度相近. 如第 3 组试验中 210~270 min 的摄磷量为 0.8 mg/L, 210 min 时混合液中磷酸根的浓度为 9.0 mg/L; 对照组在 150 min 时磷酸根的浓度为 9.5 mg/L, 因此计算抑制系数时对照组所选择的时段为 150~210 min.

从表 2 中结果可看出, 在好氧反应过程中, 随着亚硝态氮的逐步累积, 其对聚磷菌摄磷的抑制作用逐渐增强. 在好氧反应开始时段内(大约前 150 min 内), 由于亚硝态氮浓度低, 其对聚磷菌摄磷抑制作用小. 150 min 后, 亚硝态氮浓度达到 8~ 9 mg/L 以上, 其对聚磷菌摄磷抑制作用明显增强. 第 2 组试验中亚硝态氮浓度由 8.8 mg/L 增加到 17.8 mg/L 时,

抑制系数由 0.25 增加到 0.47, 并进一步增加到 0.60 左右, 此结果与本文 2.1 节中分析结果接近; 第 3 组试验中在 150~ 330 min 这一时段内, 亚硝态氮浓度略高于第 2 组亚硝态氮浓度, 但抑制系数要明显高于第 2 组试验, 分析其原因, 可能与反应过程中的 pH 值有关. 本研究中 3 组试验在好氧反应过程中 pH 值的变化见图 7.

表 2 不同时段聚磷菌摄磷量及摄磷受抑制系数
Table 2 Phosphate removal by PAO and inhibition coefficient at different intervals

时段/min	第 1 组摄磷量 /mg·L ⁻¹	第 2 组			第 3 组		
		NO ₂ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	摄磷量/mg·L ⁻¹	抑制系数	NO ₂ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	摄磷量/mg·L ⁻¹	抑制系数
0~ 60	7.6	0~ 3.5	7.7	—	0~ 3.5	7.6	—
60~ 105	3.4	3.5~ 7.3	3.4	0.01	3.5~ 7.3	3.2	0.05
105~ 150	2.3	7.3~ 8.8	2.1	0.09	7.3~ 9.6	2.1	0.11
150~ 210	2.3	8.8~ 12.4	1.7	0.25	9.6~ 14.1	1.4	0.41
210~ 270	1.5	12.4~ 15.4	0.8	0.47	14.1~ 16.6	0.8	0.65
270~ 330	1	15.4~ 17.8	0.6	0.6	16.6~ 19.7	0.7	0.71
330~ 390	—	17.8	0.7	0.54	19.7~ 23.1	0.5	0.69
390~ 450	—	17.8~ 17.6	0.5	0.49	23.1~ 27.3	0.7	0.55

如图 7 所示, 第 3 组试验中由于氨氮浓度高, 在硝化过程中消耗了更多的碱度, 导致其 pH 值比第 2 组 pH 值低, 致使第 3 组亚硝酸的浓度比第 2 组高 (见图 8). 根据文中提及的亚硝酸盐对聚磷菌摄磷

的抑制机理, 亚硝酸浓度越高, 磷酸根的吸收量越小, 因此在 60 min 后第 3 组反应器中磷酸根浓度高于第 2 组. 试验结果也反映出在处理氨氮浓度较高的废水时, 如果出现亚硝酸盐的大量累积, 在亚硝酸盐和低 pH 值的双重作用下, 将会导致磷酸根的去除率明显降低.

3 结论

(1) 亚硝酸盐对聚磷菌好氧摄磷具有抑制作用. 亚硝态氮浓度为 4 mg/L 时, 其对摄磷速率的抑制系数为 0.08; 浓度为 15 mg/L 时, 抑制系数已达到 0.61; 亚硝态氮浓度为 80 mg/L 时, 抑制系数为 0.8. 亚硝酸盐对聚磷菌的抑制作用主要与亚硝酸有关. 本研究中亚硝酸浓度在 0.000 2 mg/L 以上时即对聚磷菌产生较强的抑制作用. 亚硝酸盐对聚磷菌的抑制作用只是在亚硝酸盐存在的条件下才发生, 一旦亚硝酸盐消失, 对聚磷菌的抑制作用即可解除或持续几小时后摄磷能力恢复正常.

(2) 含盐废水硝化过程中, 在好氧反应开始 1~ 2 h 内, 由于亚硝态氮浓度低, 其对聚磷菌摄磷抑制作用小. 随着亚硝态氮的逐步累积, 亚硝态氮浓度达到 8~ 9 mg/L 以上时, 其对聚磷菌摄磷的抑制作用逐渐增强. 本研究中进水氨氮浓度不同时, 在反应前 330min 内所生成的亚硝态氮浓度基本相同, 但对聚

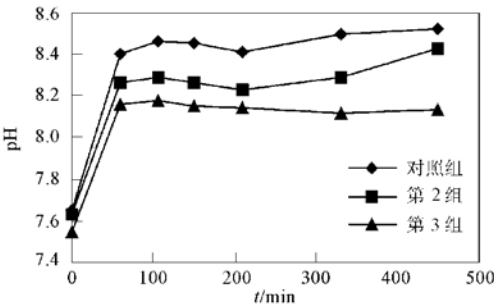


图 7 反应过程中 pH 值的变化
Fig. 7 Variation of pH during the experiment

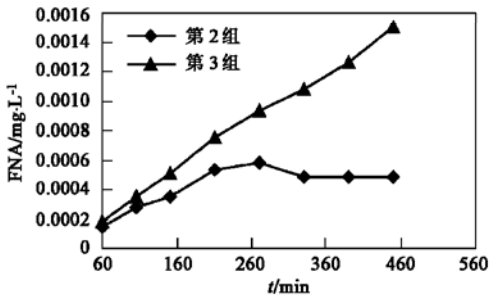


图 8 反应过程中 FNA 的变化
Fig. 8 Variation of FNA during the experiment

磷菌摄磷的抑制程度有差异,分析其原因可能是进水氨氮浓度高时,水中 pH 值较低,导致亚硝酸浓度增高,致使磷酸根的吸收量减少.

参考文献:

- [1] Glass C, Silverstein J, Oh J. Inhibition of Denitrification in activated sludge by nitrite [J]. Water Environ. Res., 1997, **69**(6): 1086~ 1093.
- [2] Meinhold J, Arnold E, Issaacs S. Effect of nitrite on anoxic phosphate uptake in biological phosphorus removal activated sludge [J]. Wat. Res., 1999, **33**(8): 1871~ 83.
- [3] Satio T, Brdjanovic D, Van Loosdrecht M C M. Effect of nitrite on phosphate uptake by phosphate accumulating organisms [J]. Wat. Res., 2004, **38**(17): 3760~ 3768.
- [4] Weon S Y, Lee C W, Lee S I, *et al.* Nitrite inhibition of aerobic growth of *Acinetobacter* sp. [J]. Wat. Res., 2002, **36**(18): 4471~ 4476.
- [5] 于德爽,彭永臻,宋学起,等. 含海水污水的短程硝化反硝化 [J]. 环境科学, 2003, **24**(3): 50~ 56.
- [6] Leslie Grady C P, Daigger G T, Henry C L, 著,张锡辉,刘勇弟,译. 废水生物处理[M]. (第二版). 北京: 化学工业出版社, 2003. 59~ 60.
- [7] Hall E R, Murphy K L. Sludge age and substrate effects on nitrification kinetics [J]. J WPCF, 1985, **57**: 413~ 418.

欢迎订阅《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊.

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想,理论和实用技术等.

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国的《EI》,《BA》,《CA》,日本的《科学技术文献速报》,俄罗斯的《文摘杂志》等;国内的检索系统有《环境科学文摘》,《中国生物学文摘》,《中国地理科学文摘》,《中国地质文摘》,《中国科学引文数据库》和《中国科学论文统计与分析数据库》等.

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续.

《环境科学》为 16 开本,208 页,38 元/册,全年 12 期.

国内统一刊号: CN11-1895/X 国际标准刊号: ISSN 0250-3301

国外发行代号: M 0205 国内邮发代号: 2-821

编辑部地址: 北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编: 100085

电话: 010-62941102; 传真: 010-62849343; E-mail: hjkx@rcees.ac.cn; 网址: www.hjkx.ac.cn