

NO₂⁻ 作为电子受体对反硝化吸磷影响动力学研究

侯红勋¹, 彭永臻^{1*}, 殷芳芳¹, 刘秀红²

(1. 北京工业大学环境与能源学院北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100022; 2. 北京市城市排水集团公司, 北京 100063)

摘要: 在生物除磷系统中 NO₂⁻ 常被认为是反硝化吸收磷过程的抑制剂, 而 NO₂⁻ 对反硝化吸磷抑制过程的抑制剂量的结果差别很大, 缺乏动力学研究. 本研究应用序批式反应器(SBR)在不同的 NO₂⁻ 浓度和 pH 梯度下进行了反硝化吸磷试验, 其接种活性污泥取自 A²/O 氧化沟中试反应器. SBR 试验步骤为, 取氧化沟好氧区活性污泥, 先投加乙酸钠释放磷, 然后投加 NO₂⁻ 吸磷. 大量试验发现 NO₂⁻ 和 pH 共同作用对反硝化吸磷产生了抑制. 结果表明, ①在恒定 pH 下, 比反硝化速率和比吸磷速率与初始 NO₂⁻ 浓度均符合 Andrews 抑制动力学; ②在 6.5 < pH < 8.0, pH 越低, NO₂⁻ 对反硝化吸磷过程抑制越强, pH 越高, 抑制越弱; ③反硝化吸磷过程动力学参数为: 反硝化过程最大比反硝化速率 $r_{N_{max}}$ 为: 4.55 mg/(g·h), 半饱和常数 K_{SN} : 2.14 mg/L; 吸磷过程最大比吸磷速率 $r_{P_{max}}$ 为: 3.06 mg/(g·h), 半饱和常数 K_{SP} : 2.64 mg/L.

关键词: 污水处理; 生物除磷; 反硝化除磷; NO₂⁻; 动力学

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)07-1874-06

Inhibitory Effect Kinetics of Nitrite Acting as Electron Acceptor on Anoxic Phosphorus Uptake and Denitrification

HOU Hong-xun¹, PENG Yong-zhen¹, YIN Fang-fang¹, LIU Xiu-hong²

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. Beijing City Sewage Group Co., Beijing 100063, China)

Abstract: Nitrite has been found in previous research an inhibitor on anoxic phosphorus uptake in enhanced biological phosphorus removal systems (EBPR). However, the inhibiting nitrite concentration reported varied in a large range and no kinetics study concerned on anoxic phosphorus uptake. This study investigates the nitrite inhibition on anoxic phosphorus uptake with sequencing batch reactor (SBR) in different concentrations of NO₂⁻ and under different pH gradient. The activated sludge was cultured with A²/O Oxidation Ditch pilot-scale reactor performing EBPR. The progress of SBR is as follows: the activated sludge was taken out an aerobic zone of the A²/O Oxidation Ditch to SBR, then phosphorus was released with acetate fed in anaerobic phase, subsequently phosphorus uptake proceeded with NO₂⁻ added in anoxic phase. It is pointed that not only NO₂⁻ but pH inhibited anoxic phosphorus uptake. The result indicated that ① specific denitrification rate and specific phosphorus uptake rate correlated the original nitrite accord with Andrews's inhibition model under the constant pH. ② If pH was in the range of 6.5 to 8.0, nitrite inhibited DPR much stronger when pH was less, vice versa. ③ Kinetics parameter was as follows: the max specific denitrification rate was 4.55 mg/(g·h), the half saturation constant of the denitrification process was 2.14 mg/L; and the max specific phosphorus uptake rate was 3.06 mg/(g·h), the half saturation constant of the phosphorus uptake process was 2.64 mg/L.

Key words: wastewater treatment; biological phosphorus removal; denitrifying phosphorus removal; nitrite; kinetics

生物除磷(EBPR)是一种经济和可持续除磷方法,因其避免了投加化学药剂产生大量难以处理的化学污泥而成为近年来研究的热点^[1]. EBPR 主要通过聚磷菌(PAOs)在厌氧和好氧交替环境中运行, PAOs 在厌氧状态下吸收易降解碳源(主要为挥发性有机酸),合成聚 β-羟基烷酸(PHA),并将其储存于体内,消耗的能量主要来自于分解体内的聚磷酸盐,同时将正磷酸盐释放到微生物体外;在随后的好氧阶段, PAOs 利用储存的 PHA 作为碳源和能源生长繁殖,吸收水中的正磷酸盐,以聚磷酸盐的形式存储,并恢复体内的聚磷酸盐水平^[2]. 生物除磷就是排出好氧阶段富磷活性污泥,达到除磷目的.

PAOs 在缺氧状态下也能进行磷的吸收. 被称作反硝化聚磷菌(DPAOs)的微生物能够以 NO₂⁻ 或 NO₃⁻ 作为最终电子受体氧化体内的 PHA, 提供吸收磷的能量. 原水中的碳源先应用于 PAOs 释放磷, 然后以 PAOs 内碳源的形式进行反硝化, 实现了碳源的二次利用, 这对于碳源不足的污水处理有着显著

收稿日期: 2007-07-16; 修订日期: 2007-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(50628808); 国家“十一五”科技支撑计划重点项目(2006BAC19B03); 北京市科技计划项目(D07050601500000); 北京市教委科技创新平台项目

作者简介: 侯红勋(1977~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为污水脱氮除磷.

* 通讯联系人, E-mail: pyz@bjut.edu.cn

的优势^[3-5].

生物脱氮革新工艺如 (SHARON)^[6,7] 仅将 NH_4^+ 氧化为 NO_2^- , 然后就直接将 NO_2^- 还原为 N_2 , 节省了反硝化阶段的碳源和硝化阶段的氧, 且污泥产量低, 使其成为研究的热点.

NO_2^- 为短程硝化反硝化的主要中间产物, 同样能够作为反硝化除磷的电子受体, 所以 NO_2^- 是联系短程硝化反硝化和反硝化除磷的纽带. 目前, NO_2^- 作为反硝化除磷过程电子受体时有 2 种理论: ① NO_2^- 为反硝化吸磷过程或者好氧吸磷过程的抑制剂; ② 游离亚硝酸 (FNA) 是反硝化除磷过程的抑制剂^[9].

NO_2^- 能够充当反硝化吸磷的电子受体, 但是它对反硝化吸收磷存在抑制作用, 它对反硝化吸磷的抑制性还受 pH 值影响, 造成了 NO_2^- 对反硝化吸磷影响的复杂性^[8]. 一些研究结果表明, pH 对 NO_2^- 作为电子受体的反硝化吸磷产生影响^[8-10]. Zhou 等^[9] 提出了是 FNA 而不是 NO_2^- 为反硝化吸磷的抑制因素, FNA 难以直接计量, 而通过 NO_2^- 和 pH, 用公式 (1) 间接求得:

$$\text{FNA} = \frac{S_{\text{N-NO}_2}}{K_a \times 10^{\text{pH}}} \quad (1)$$

式中, K_a 的值与温度 t 存在式 (2) 关系^[10]:

$$K_a = e^{-2.300/(273+t)} \quad (2)$$

NO_2^- 和 pH 之一改变就会使 FNA 发生改变. 与其用 NO_2^- 和 pH 的推算结果 FNA 间接研究其对反硝化吸磷的影响, 不如直接通过 NO_2^- 和 pH 联合控制来综合研究二者对反硝化吸磷过程的影响.

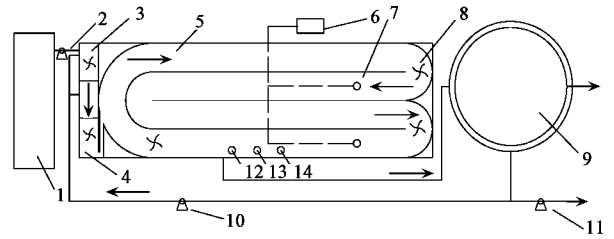
在 A^2/O 氧化沟工艺中试实现稳定的反硝化除磷的基础上, 利用稳定的反硝化除磷污泥进行批次试验, 通过大量小试, 研究了不同 pH 值下 NO_2^- 作为反硝化吸磷的电子受体的反硝化特征和吸磷特征, 得出了 pH 影响下 NO_2^- 作为基质抑制下的反硝化除磷动力学参数.

1 材料与方法

1.1 试验装置

A^2/O 中试试验装置由 3 部分组成, 进水水箱、带前置缺氧、厌氧选择区的氧化沟反应器和二沉池组成, 3 部分有效容积分别为 200、300 和 75 L, 如图 1 所示.

前置厌氧区、缺氧区和氧化沟的水力停留时间



1. 储水箱; 2. 进水泵; 3. 厌氧区; 4. 缺氧区; 5. 氧化沟; 6. 空压机; 7. 曝气头; 8. 搅拌机; 9. 二沉池; 10. 回流污泥泵; 11. 剩余污泥泵; 12. DO 仪; 13. ORP 仪; 14. pH 仪

图 1 氧化沟系统试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of oxidation ditch system

(HRT) 分别为 0.5、1.5 和 18 h, 总污泥回流比为 100%, 回流污泥的 25% 回流至厌氧区, 75% 回流至缺氧区. 进出水取样位置分别为进水水箱和二沉池出水. 进水由水箱经蠕动泵与回流污泥混合进入前置厌氧区, 混合液与 75% 回流污泥混合经缺氧区后流入氧化沟, 厌氧区和缺氧区分别设搅拌机进行搅拌, 氧化沟内设曝气装置和搅拌推流装置使活性污泥在氧化沟内循环流动, 泥水经二沉池分离后上清液排出系统, 全部污泥回流入前置厌氧区和缺氧区, 剩余污泥通过氧化沟曝气池排放. 在氧化沟的出水口处设置 DO、ORP、pH 在线测定仪. 静态试验装置为 SBR 反应器, 厌氧释磷试验有效容积为 12 L, 吸磷过程试验为 1 L, 静态试验装置如图 2 所示.

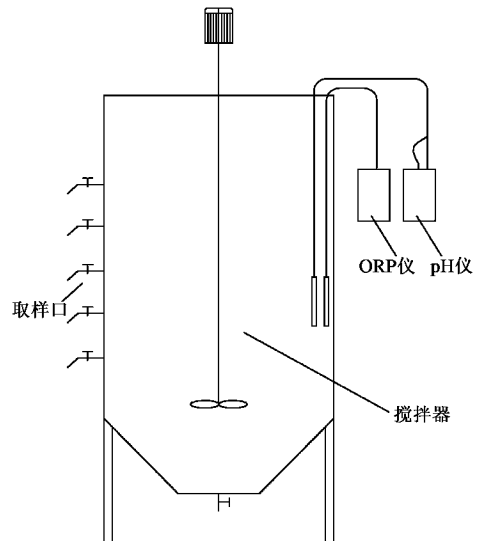


图 2 静态试验装置

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

1.2 活性污泥和试验用水

本研究接种污泥来自北京市某大型氧化沟工艺污水处理厂的回流污泥, 试验用水取自北京工业大

学家属区市政管道生活污水,主要水质指标见表1.

表1 生活污水水质/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Quality of real domestic wastewater/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

指标	平均值	最小值/最大值
COD	296.5	196.2/514.5
NH_4^+	54.2	46.9/63.7
PO_4^{3-}	5.0	3.2/8.4
TP	5.6	3.8/10.4
pH	7.4	7.2/7.7

1.3 检测指标及分析方法

试验中所采用的分析方法均按照国家环境保护局发布的标准方法^[11],并且文中给出的试验结果都是经过多次试验得出重现性很好的试验数据.静态试验中用 WTW level2 在线精密 pH 计实时测定反应器内的 pH,通过滴加 0.05 mol 的 NaOH 或 HCl 使 pH 值控制在精确的范围内.静态试验污泥进行了厌氧预处理,具体为取氧化沟曝气池活性污泥泥水混合液 12 L,静置过夜,投加乙酸钠缓慢搅拌 2h 充分释放磷.然后用该活性污泥进行反硝化吸磷试验.

2 结果与分析

2.1 恒定 pH 下初始 NO_2^- 对反硝化吸磷的影响

为了考察不同 NO_2^- 浓度对反硝化吸磷的影响,通过控制 pH 值,研究恒定 pH 下 NO_2^- 浓度对反硝化吸磷的影响.

首先,在 A^2/O 氧化沟中试工艺实现了稳定的反硝化除磷,取氧化沟曝气池活性污泥投加乙酸钠(折合 COD 150 mg/L)厌氧释磷 2 h 后,控制 pH 在 7.00 ± 0.02 ,调节不同的 NO_2^- 浓度进行反硝化吸磷试验.图 3 为反硝化吸磷过程 PO_4^{3-} 和 NO_2^- 的变化曲线.

在 pH 为 7.00 ± 0.02 ,初始 NO_2^- 浓度为 20 mg/L ,反硝化和吸磷反应同时进行.通过线性关系得出这一过程的比反硝化速率和比吸磷速率分别为 $2.51 \text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 和 $1.68 \text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$.其它状态下比反硝化速率和比吸磷速率可以通过同样方法求得.

2.2 不同 pH 下初始 NO_2^- 浓度对反硝化吸磷的影响

同 2.1 方法得出 pH 在 6.5、7.0、7.5 和 8.0 下的比反硝化速率和比吸磷速率随初始 NO_2^- 浓度的变化关系,如图 4 所示.

由图 4 可见,在 pH 为 8.0 下比反硝化速率近似符合 Monod 方程.在 $\text{pH} < 8.0$ 下比反硝化速率在 NO_2^- 浓度较低的环境下符合 Monod 方程,在浓度较

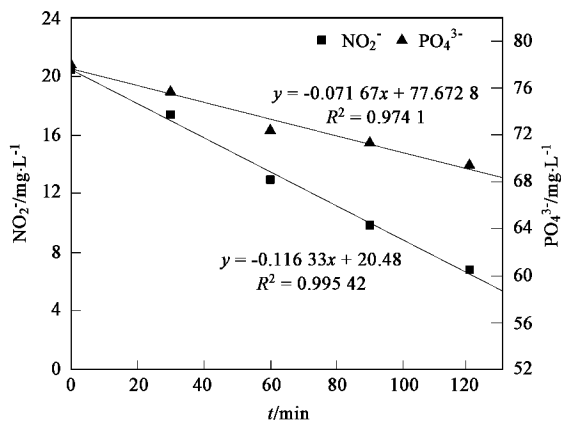


图3 pH 7.0 时 PO_4^{3-} 与 NO_2^- 浓度变化曲线

(初始 NO_2^- 浓度为 20 mg/L)

Fig.3 Variety of phosphorus and nitrite under pH 7.0

(the initial NO_2^- 20 mg/L)

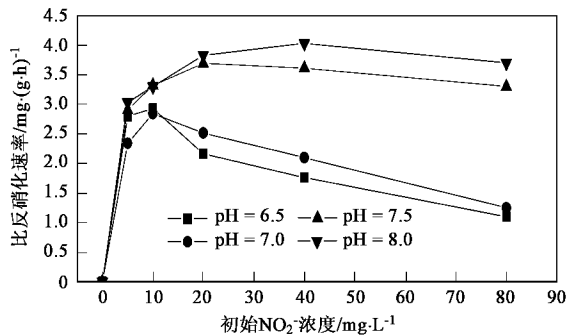


图4 不同 pH 下比反硝化速率与初始 NO_2^- 浓度的关系

Fig.4 Relation between specific denitrification rate and initial nitrite under different pH

高的环境下,比反硝化速率不但不随 NO_2^- 浓度的升高而升高,而是随 NO_2^- 浓度的升高而降低.

按上述方法同样得出 pH 在 6.5、7.0、7.5 和 8.0 下比吸磷速率随初始 NO_2^- 浓度的变化关系,如图 5 所示.

由图 5 可见,在 pH 为 8.0 下比吸磷速率曲线近似符合 Monod 方程.在 $\text{pH} < 8.0$ 下比吸磷速率在 NO_2^- 浓度较低的环境下也符合 Monod 方程,在浓度较高的环境下,比吸磷速率随 NO_2^- 浓度的升高而降低.

3 讨论

3.1 pH 为 8.0 时反硝化吸磷过程反应动力学 Monod 方程^[12]如公式(3)所示:

$$r = r_{\max} \frac{S_s}{K_s + S_s} \quad (3)$$

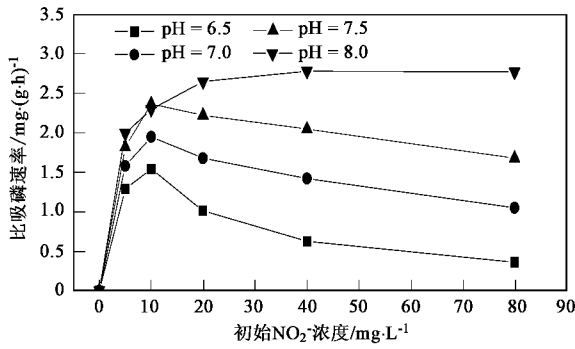


图5 不同 pH 下比吸磷速率与初始 NO_2^- 浓度的关系

Fig.5 Relation between specific phosphorus uptake rate and initial nitrite under different pH

式中, r 为比速率, $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$; r_{max} 为最大比速率, $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$; S_s 为基质浓度, mg/L ; K_s 为半饱和常数, mg/L .

pH 较低 NO_2^- 也较低时, 比反应速率与 NO_2^- 浓度近似符合 Monod 方程; 而在 NO_2^- 较高时, 比反应速率均有所降低, 且 NO_2^- 浓度越高, 比反应速率降低越大. 这一特征说明在较低 pH 下 Monod 方程已经不足以描述这种情形. Andrews^[13] 首先建议使用酶模型为基础函数方程描述抑制型有机基质对细菌生长速率的影响, 因此 Andrews 方程为:

$$r = r_{\text{max}} \frac{S_s}{K_s + S_s + S_s^2/K_1} \quad (4)$$

式中, K_1 为 Andrews 模型抑制系数, mg/L .

方程(4)与 Monod 方程相似, 只是多了一个抑制系数 K_1 . 当 K_1 非常大时, Andrews 方程可以简化为 Monod 方程, 表明这 2 个方程中的 r_{max} 和 K_s 有相同的意义.

根据 Monod 方程, 比反硝化速率与基质 NO_2^- 的关系如式(5)所示:

$$r_N = r_{N\text{max}} \frac{S_N}{K_{SN} + S_N} \quad (5)$$

式中, r_N 为比反硝化速率, $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$; $r_{N\text{max}}$ 为最大比反硝化速率, $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$; S_N 为 NO_2^- 浓度, mg/L ; K_{SN} 为反硝化反应半饱和常数, mg/L .

公式(5)可以转化为式(6):

$$\frac{1}{r_N} = \frac{K_{SN}}{r_{N\text{max}}} \times \frac{1}{S_N} + \frac{1}{r_{N\text{max}}} \quad (6)$$

因为 K_{SN} 和 $r_{N\text{max}}$ 均为常数, 则 $1/r_N$ 和 $1/S_N$ 呈线性关系.

然而与非抑制性基质情况不同的是 r_{max} 不能被

观测到, 而是一个根据试验结果推算出来的最大比增长速率, 只有当基质不是抑制型基质时才能够准确得到. 通常 $r_{N\text{max}}$ 不能被观察到, K_{SN} 也只能根据试验结果推算出来. 本研究观测到在 pH 为 8.0、 NO_2^- 较低时, NO_2^- 对比反应速率抑制较弱. 根据这一特征, 通过曲线拟合近似求出 r_{max} 和 K_s .

根据试验结果发现, pH = 8.0 时比反硝化速率和比吸磷速率与基质 NO_2^- 接近 Monod 方程. 在 pH 为 8.0 时求出 Monod 方程的近似参数.

将 pH = 8.0 状态下的结果用公式(6)进行计算, 得到如下结果.

反硝化过程: 最大比反硝化速率 $r_{N\text{max}}$ 的近似值为 $4.14 \text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$, 半饱和常数 K_{SN} 的近似值为 $1.95 \text{ mg}/\text{L}$.

吸磷过程: 最大比吸磷速率 $r_{P\text{max}}$ 的近似值为 $2.78 \text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$, 半饱和常数 K_{SP} 的近似值为 $2.40 \text{ mg}/\text{L}$.

虽然 pH 为 8.0 时 NO_2^- 对反硝化吸磷过程抑制比较微弱, 但是抑制仍然存在, 所以求出的最大比反硝化速率和最大比吸磷速率低于真实值. 由于抑制过程的动力学常数没有办法求得, 往往采用估计值. 本研究在上述求得的最大速率 $r_{N\text{max}}$ 和半饱和常数 K_s 在近似值的基础上乘以一个修正系数 k , 通过模拟发现 k 值在 1.05 ~ 1.15 范围内. 取 k 为 1.1 时, 模拟结果与试验结果吻合较好. 这样反硝化吸磷过程 Monod 方程中的常数修正后结果为: 反硝化过程最大比反硝化速率 $r_{N\text{max}}$ 为 $4.55 \text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$, 半饱和常数 K_{SN} 为 $2.14 \text{ mg}/\text{L}$. 吸磷过程最大比吸磷速率 $r_{P\text{max}}$ 为 $3.06 \text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$, 半饱和常数 K_{SP} 为 $2.64 \text{ mg}/\text{L}$.

3.2 pH 为 7.5 时反硝化吸磷过程反应动力学

对 pH 为 7.5 时比反硝化速率和比吸磷速率按照 Andrews 模型进行模拟, 试验结果发现在 pH = 7.5 时, 反硝化吸磷过程比反硝化速率和比吸磷速率与初始 NO_2^- 的浓度符合 Andrews 模型, 见公式(4).

公式(4)中 r_{max} 和 K_s 均为常数, 且已经在抑制条件较弱的环境中求得, S_N 为试验控制条件, 为已知量, r 则为试验结果, 这样式(4)中只有 K_1 为未知量, 公式(4)进行数学代换转换为公式(7):

$$K_1 = \frac{S_N^2}{r_{\text{max}}/r - S_N - K_s} \quad (7)$$

由试验结果可以得出 K_1 , 根据 pH 为 7.5 时的试验结果得出反硝化反应抑制系数 K_{IN} 和吸磷反应

抑制系数 K_{IP} 分别为 192 mg/L 和 92 mg/L. 则比反硝化速率与 NO_2^- 浓度的模拟公式如公式(8)所示, 比吸磷速率与 NO_2^- 浓度的模拟公式如公式(9)所示:

$$r_N = 4.45 \times \frac{S_{SN}}{2.14 + S_{SN} + S_{SN}^2/192} \quad (8)$$

式中, r_N 为比反硝化速率, $mg/(g \cdot h)$.

$$r_P = 3.06 \times \frac{S_{SN}}{2.64 + S_{SN} + S_{SN}^2/92} \quad (9)$$

式中, r_P 为比吸磷速率, $mg/(g \cdot h)$.

pH 为 7.5 时比反硝化速率和比吸磷速率与初始 NO_2^- 浓度的关系如图 6 所示.

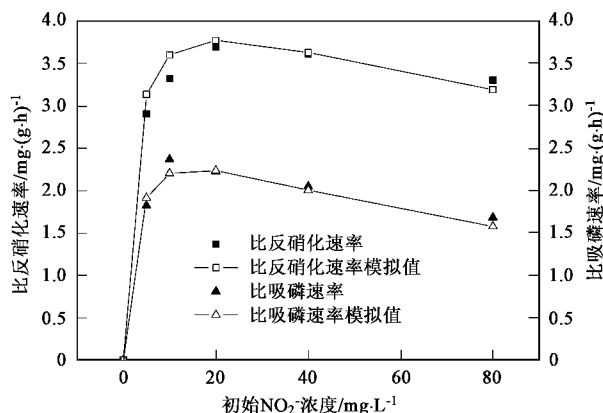


图 6 pH 为 7.5 时比反硝化速率和比吸磷速率与初始 NO_2^- 关系

Fig.6 Relation between specific denitrification rate and specific phosphorus uptake rate and original nitrite under pH 7.5

由图 6 可见, 以 Andrews 模型为基础的公式(8)和(9)能够很好模拟实际的比反硝化速率和比吸磷速率. 这也说明在 pH 为 7.5 时, NO_2^- 对反硝化吸磷过程的抑制符合 Andrews 基质抑制模型.

3.3 不同 pH 值下反硝化吸磷过程反应动力学

同样, 在不同 pH 值下, NO_2^- 对反硝化除磷过程同样具有抑制作用, 不同的是抑制强度随 pH 的变化有较大的差异. 同 3.2 方法得到 pH 分别在 6.5、7.0 和 8.0 下的动力学抑制参数 K_{IN} 和 K_{IP} , 如表 2 所示.

表 2 不同 pH 下抑制系数/ $mg \cdot L^{-1}$

Table 2 Inhibitory constants under different pH/ $mg \cdot L^{-1}$

参数	pH			
	6.5	7.0	7.5	8.0
K_{IN}	25	33	192	534
K_{IP}	11	18	92	421

K_I 反映了不同条件下抑制剂的抑制性的强弱,

K_I 越低抑制性越强. pH 在 6.5 ~ 8.0 时, 随着 pH 值升高, NO_2^- 对反硝化吸磷的抑制减弱.

将表 2 抑制常数 K_I 与 pH 进行指数拟合, 拟合曲线如图 7 所示.

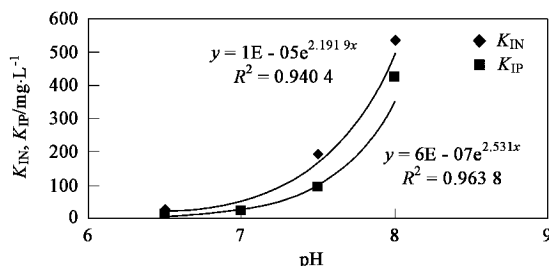


图 7 抑制常数 K_{IN} 和 K_{IP} 随 pH 的变化关系

Fig.7 Relation between inhibitory constant K_{IN} and K_{IP} and pH

得到 K_{IN} 和 K_{IP} 与 pH 变化拟合曲线如公式(10)和(11)所示:

$$K_{IN} = 1 \times 10^{-5} \times \exp^{2.19 \times pH} \quad (10)$$

$$R^2 = 0.94$$

K_{IN} 为 NO_2^- 抑制反硝化反应 Andrews 模型的抑制系数.

$$K_{IP} = 6 \times 10^{-7} \times \exp^{2.53 \times pH} \quad (11)$$

$$R^2 = 0.96$$

K_{IP} 为 NO_2^- 抑制吸磷反应 Andrews 模型的抑制系数.

将公式(10)和(11)代入公式(4), 得到比反硝化速率随 NO_2^- 和 pH 关系数学模型(12)和比吸磷速率随 NO_2^- 和 pH 关系数学模型(13):

$$r_N = r_{Nmax} \frac{S_{SN}}{K_{SN} + S_{SN} + S_{SN}^2 / (1 \times 10^{-5} \times \exp^{2.19 \times pH})} \quad (12)$$

$$r_P = r_{Pmax} \frac{S_{SN}}{K_{SP} + S_{SN} + S_{SN}^2 / (6 \times 10^{-7} \times \exp^{2.53 \times pH})} \quad (13)$$

4 结论

(1) NO_2^- 作为反硝化吸磷的电子受体时, NO_2^- 和 pH 协同作用抑制反硝化吸磷, 恒定 pH 下, 反应速率与初始 NO_2^- 浓度符合 Andrews 抑制动力学.

(2) 在 $6.5 < pH < 8.0$, pH 越低, NO_2^- 对反硝化吸磷过程抑制越强, pH 越高, 抑制越弱.

(3) Andrews 抑制动力学参数为: 反硝化过程最大比反硝化速率 r_{Nmax} 为 4.55 $mg/(g \cdot h)$, 半饱和和常数 K_{SN} 为 2.14 mg/L ; 吸磷过程最大比吸磷速率 r_{Pmax} 为

3.06 mg/(g·h), 半饱和常数 K_{SP} 为 2.64 mg/L.

(4) 在 $6.5 < \text{pH} < 8.0$, 抑制系数 K_i 随 pH 的变化而变化, 反硝化反应抑制系数 K_{IN} 和吸磷反应抑制系数 K_{IP} 与 pH 的关系符合 $K_{\text{IN}} = 1 \times 10^{-5} \times \exp^{2.19 \times \text{pH}}$, $K_{\text{IP}} = 6 \times 10^{-7} \times \exp^{2.53 \times \text{pH}}$.

(5) 在 $6.5 < \text{pH} < 8.0$, NO_2^- 与 pH 协同作用, 比反硝化速率随 NO_2^- 和 pH 关系数学模型:

$$r_{\text{N}} = r_{\text{Nmax}} \frac{S_{\text{SN}}}{K_{\text{SN}} + S_{\text{SN}} + S_{\text{SN}}^2 / (1 \times 10^{-5} \times \exp^{2.19 \times \text{pH}})}$$

比吸磷速率随 NO_2^- 和 pH 关系数学模型:

$$r_{\text{P}} = r_{\text{Pmax}} \frac{S_{\text{SN}}}{K_{\text{SP}} + S_{\text{SN}} + S_{\text{SN}}^2 / (6 \times 10^{-7} \times \exp^{2.53 \times \text{pH}})}$$

参考文献:

- [1] Tchobanoglous G, Burton F L, Stensel H D. Wastewater engineering: Treatment and reuse[M]. (Fourth Edition). New York, USA: Metcalf & Eddy Inc., McGraw-Hill Science Engineering, 2002. 776-778.
- [2] 祝贵兵, 彭永臻. 生物除磷设计与运行手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005. 14-15.
- [3] Kuba T, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J, *et al.* Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system [J]. Water Research, 1996, **30**(7): 1702-1710.
- [4] 徐伟锋, 陈银广, 张芳, 等. 污泥龄对 A/A/O 工艺反硝化除磷的影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(8): 1693-1696.
- [5] 刘建广, 付昆明, 杨义飞, 等. 不同电子受体对反硝化除磷菌缺氧吸磷的影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(7): 1472-1476.
- [6] Hellinga C, Schellen A A J C, Mulder J W, *et al.* The sharon process: An innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste water[J]. Water Science and Technology, 1998, **37**(9): 135-142.
- [7] Khin T, Annachatre A P. Novel microbial nitrogen removal processes[J]. Biotechnology Advances, 2004, **22**(7): 519-532.
- [8] Serralta J, Ferrer J, Borrás L, *et al.* Effect of pH on biological phosphorus uptake[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2006, **95**(5): 875-882.
- [9] Zhou Y, Pijuan M, Yuan Z. Free nitrous acid inhibition on anoxic phosphorus uptake and denitrification by poly-phosphate accumulating organisms[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2007, **98**(4): 903-912.
- [10] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B S, *et al.* Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid[J]. Water Pollution Control Federation, 1976, **48**(5): 835-852.
- [11] 国家环境保护局《水和废水监测分析方法》编委会. 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. 200-281.
- [12] Monod J. The growth of bacteria cultures [J]. Annual Review of Microbiology, 1949, **3**: 371-394
- [13] Andrews J F. A mathematical model for the continuous culture of microorganisms utilizing inhibitory substrates [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1968, **10**(6): 707-723.