雒怀庆, 胡勇有. 2006 影响亚硝化过程和硝化过程因素的动力学模型分析 [J]. 环境科学学报, 26(4): 561- 566
Luo H Q, Hu Y Y. 2006. Mathematical kinetics model evaluation of factors effect on nitritification and nitrafication process[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 26(4): 561- 566
[免审稿件]责任编辑提示: 本刊欢迎广大读者针对免审稿件提出各种意见

影响亚硝化过程和硝化过程因素的动力学模型分析

雒怀庆[1,2], 胡勇有[1,*]

1. 华南理工大学环境科学与工程学院, 广州 510640
2. 广州市环境保护工程设计院有限公司, 广州 510115

收稿日期: 2005-11-22 修回日期: 2005-02-02 录用日期: 2005-02-05

摘要: 用数学模型模拟了 1L初始氨氮浓度 60 mg·L^{-1}且无其它氮源的污水完全混合批式硝化过程, 并分别计算了溶解氧、温度、微生物群落对硝化过程的影响. 模拟结果表明, DO浓度降低时各物质转化速度也降低, DO= 0.5 mg·L^{-1}和氨氧化细菌占优势时 NO_2^--N的转化率可高于50%, 因而低浓度溶解氧有利于 NO_2^--N积累; 不同温度的氨氧化细菌和亚硝酸氧化细菌代谢速度不同, 温度升高对氨氧化细菌的促进作用更大, 亚硝酸盐氮浓度最大值随温度升高而增大, 温度高于 30℃有利于 NO_2^--N的积累; 此外硝化动力学方程对底物最大比氧化速率的灵敏度要高于亲和常数的灵敏度, 但二者均低于微生物构成对模拟结果的影响, 溶解氧和温度对硝化过程的影响也均不如微生物构成显著, 因此要确保亚硝化过程的实现, 必须保持系统中氨氧化细菌占优势.

关键词: 亚硝化; 硝化; 动力学方程; 灵敏度分析

文章编号: 0253-2468(2006)04-0561-06 中图分类号: X703.1 文献标识码: A

Mathematical kinetics model evaluation of factors effect on nitritification and nitrafication process

LUO Huaiqing[1,2], HU Yongyou[1,*]

1. School of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640
2. Guangzhou EP Environmental Engineering Ltd., Guangzhou 510115

Received 22 Novembery 2005; **received** in revised form 2 February 2006; **accepted** 5 February 2006

Abstract: The effects of dissolved oxygen (DO), temperature, microbial community on nitritification process were evaluated by mathematical models in a 1 liter well mixed batch nitrification system with the initial ammonia nitrogen of 60 mg·L^{-1} and no any other nitrogen source. Based on the evaluation results, the transformation rates of the involved substance decrease with decrease of DO concentration. When ammonia oxidizing bacteria are dominant in the microorganism community, the conversion rate of ammonia to nitrite can excess 50% at DO = 0.5 mg·L^{-1}, which implies that lower DO concentration is favorable for the nitritfication process. Temperature influences the metabolism rate of ammonia- oxidizing bacteria and nitrite- oxidizing bacteria to different degree. The maximum concentration of nitrite increases with higher temperature due to the more improvement of temperature to nitritefication than to nitratification. Temperature above 30℃ will be suitable for nitrite accumulation. The affinity constant is less sensitive impact than the maximum specific substrate oxidation rate on the nitrification kinetic model analysis, whereas evaluation results is more likely affected by the composition of microbial community than model parameters. Similarly, comparing dissolved oxygen and temperature with microbial community, the same conclusion can be drawn. This means that ammonia- oxidizing bacteria should be kept dominant to assure nitritification process.

Keywords: nitritification; nitrafication; kinetics model; model sensitivity analysis

在硝化过程中, 自养的氨氧化细菌 (ammonia-oxidizing bacteria) 和亚硝酸氧化细菌 (nitrite-oxidizing bacteria) 是整个过程的控制者并且互相协作, 尽管该过程发生的生化反应 (Bailey *et al.*,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50378039)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50378039)

作者简介: 雒怀庆 (1971—), 男, 博士; * 通讯作者 (责任作者), Tel: (020) 87114706, E-mail: ppyyhu@scut.edu.cn
Biography: LUO Huaiqing (1971—), male, PhD; * **Corresponding author**: Tel: (020) 87114706, E-mail: ppyyhu@scut.edu.cn

1986)以及生物学过程(Barnes *et al*., 1983; Loosdrecht *et al*., 1998; Ye *et al*., 2001)已广为人知,但是,这两大类菌的生长特性具有很大的差异(Prosser, 1989),因此为确保良好运行的生物脱氮(硝化)过程必须考虑其差异.此外,厌氧氨氧化为基础的亚硝化脱氮过程是将硝化过程控制在亚硝化阶段从而比传统硝化-反硝化工艺节约 25%的氧和 40%的碳源,其低能耗与低物耗使其成为很有前景的生物脱氮技术之一(Hellinga *et al*., 1998),但是到目前为止该技术在应用上仍有许多障碍,而对硝化两个阶段的控制方法方面的不足尤为突出,两类细菌比较相近的生长特性和在代谢过程中的关联增加了对硝化过程控制的难度.

因此从理论上研究两类细菌的差异及与溶解氧、温度等因素的关系对深入了解硝化过程有很大的帮助,同时也能为低耗亚硝化脱氮过程与工艺的应用提供理论指导.

1 模拟方法(Analytic approach)

1.1 硝化过程动力学方程

由于氨氧化细菌和亚硝酸氧化细菌都是利用单一基质生长的微生物,所以硝化作用更接近于 Monod 关系的基本条件.由此可以写出氨氧化过程和亚硝酸氧化过程的速率方程式:

$$r_{NH} = v_{NH,max}\left[\frac{C_{NH}}{K^{NH}_{NH_4} + C_{NH}}\right]\left[\frac{DO}{K^{NH}_{O_2} + DO}\right]X_{AOB} \quad (1)$$

$$r_{NO} = v_{NO,max}\left[\frac{C_{NO}}{K^{NO}_{NO_2} + C_{NO}}\right]\left[\frac{DO}{K^{NO}_{O_2} + DO}\right]X_{NOB} \quad (2)$$

式中,r_{NH}、r_{NO}为氨氮氧化和亚硝酸氮氧化的速率,mg·L^{-1}·h^{-1};$K^{NH}_{NH_4}$,$K^{NH}_{O_2}$为氨氧化细菌对氨氮及氧的亲和常数,mg·L^{-1};$K^{NO}_{NO_2}$,$K^{NO}_{O_2}$为亚硝酸氧化细菌对亚硝酸氮和氧的亲和常数,mg·L^{-1};C_{NH},C_{NO}为系统内氨氮和亚硝酸氮的浓度,mg·L^{-1};DO 为溶解氧浓度,mg·L^{-1};$v_{NH,max}$、$v_{NO,max}$为氨氧化和亚硝酸氧化的最大比氧化速率,mg·mg^{-1}·h^{-1};X_{AOB},X_{NOB}为氨氧化细菌和亚硝酸氧化细菌的浓度,mg·L^{-1}.

式(1)~(2)中的参数见表 1.

表 1 亚硝化过程和硝化过程的动力学参数

Table 1 Kinetic parameters for ammonium, nitrite oxidizers(30℃, pH 7~8)

参数	定 义	数值	单位	文献
K^{NH}_{NH4}	氨氧化细菌对氨氮的亲和常数	2.4	mg·L^{-1}	Hao *et al*., 2002a
K^{NH}_{O2}	氨氧化细菌对氧的亲和常数	0.6	mg·L^{-1}	Hao *et al*., 2002a
K^{NO}_{NO2}	亚硝酸氧化细菌对亚硝酸氮的亲和常数	5.5	mg·L^{-1}	Hao *et al*., 2002a
K^{NO}_{O2}	亚硝酸氧化细菌对氧的亲和常数	2.2	mg·L^{-1}	Hao *et al*., 2002a
$v^{*}_{NH,max}$	氨氮氧化的最大比氧化速率	0.57	mg·mg^{-1}·h^{-1}	Hao *et al*., 2002a
$v^{*}_{NO,max}$	亚硝酸氮氧化的最大比氧化速率	1.47	mg·mg^{-1}·h^{-1}	Hao *et al*., 2002a

* 由文献数据计算得到.

1.2 溶解氧对硝化过程影响的分析条件

溶解氧是硝化过程重要的控制参数,硝化过程中两大类细菌对溶解氧的利用情况并不相同.本模拟实验的溶液体积为 1L,在批式完全混合反应器中进行.NH_4^+-N 初始浓度为 60 mg·L^{-1},不含亚硝酸盐氮和硝酸盐氮,分析以下两种情况(系统温度 30℃)下氮的各种形态的转化以考察溶解氧对硝化过程的影响:①溶液中 X_{AOB}、X_{NOB}分别为 20 mg·L^{-1}和 30 mg·L^{-1}(常见的硝化体系中亚硝酸氧化细菌占优势或与氨氧化细菌相近),溶解氧的浓度为 2.0 mg·L^{-1}(正常曝气)和 0.5 mg·L^{-1}(微氧);②溶液中 X_{AOB}、X_{NOB}分别为 30 mg·L^{-1}和 10 mg·L^{-1}(特殊情况,氨氧化细菌占优势),溶解氧的浓度分别为 2.0 mg·L^{-1}和 0.5 mg·L^{-1}.

1.3 温度对硝化过程影响的分析条件

通常硝化过程适宜的温度为 20~40℃,但是不同的环境、气候条件会使微生物生存环境的温度发生较大的变化,从而显著影响到这些微生物在污水中的代谢过程.氨氧化细菌和亚硝酸氧化细菌在相同的温度下具有不同的代谢活性,因此当温度发生变化时硝化过程的结果将不同.从动力学角度上看,温度对各类硝化细菌的底物利用速率有非常明显的影响(Hao *et al*., 2002b),这种影响可用下式表示:

$$v_{max}(T) = v_{max}(293)\exp[-\theta(293-T)] \quad (3)$$

式中,$v_{max}(T)$、$v_{max}(293)$为温度 T 及 293K 时的最大比氧化速率,mg·mg^{-1}·h^{-1};θ为温度修正系数,

K^{-1}; T为温度, K.

293K时氨氧化细菌和亚硝酸氧化细菌的最大比氧化速率 $\upsilon_{max}(293)$分别为 0.80d^{-1}和 0.79 d^{-1}, 温度修正系数分别为 0.094 K^{-1}及 0.061 K^{-1} (Hao *et al.*, 2002b), 将这些数据代入式(3), 即可求得不同温度下两类细菌的底物最大比氧化速率.

为研究温度对硝化过程的影响, 假定各亲和常数在研究的温度范围内不变, 模拟实验同上, 考察两种情况下的硝化过程: ①溶液中 X_{AOB}、X_{NOB}分别为 20 mg·L^{-1}和 30 mg·L^{-1}, DO为 2 mg·L^{-1}, 温度为 15、35℃; ②溶液中 X_{AOB}、X_{NOB}分别为 30 mg·L^{-1}和 10 mg·L^{-1}, DO为 2 mg·L^{-1}, 温度为 20℃、35℃. 15℃或 20℃代表通常的环境温度, 35℃则代表有利的环境温度.

1.4 动力学方程中参数的灵敏度分析

式(1)、式(2)动力学方程中的氨氧化细菌对氧的亲和常数、亚硝酸氧化细菌对氧的亲和常数等参数基本靠实验手段得到. 由于实验条件、实验的误差及实验者的不同使得这些参数的差别较大, 这样在用不同的参数进行拟合时便可能会带来比较大的差异, 为了能对一定范围的参数变化引起的结果变化的程度有一定的认识, 必须对方程中的参数进行灵敏度分析.

在上述模拟实验条件下进行参数的灵敏度分析, 当溶液中 X_{AOB}、X_{NOB}分别为 20 mg·L^{-1}和 30 mg·L^{-1}、DO为 2.0 mg·L^{-1}时, ①$K_{O_2}^{NH}$ = 0.6~1.6 mg·L^{-1}, 标准差 0.2 mg·L^{-1}, $K_{O_2}^{NO}$ = 0.1~2.4 mg·L^{-1}, 标准差 0.36 mg·L^{-1}; ②$K_{O_2}^{NH}$、$K_{O_2}^{NO}$的条件同①, $\upsilon_{NH,max}$ = 0.27~0.57 mg·mg^{-1}·h^{-1}, 标准差 0.3 mg·mg^{-1}·h^{-1}, $\upsilon_{NO,max}$ = 0.49~1.47 mg·mg^{-1}·h^{-1}, 标准差 0.3 mg·mg^{-1}·h^{-1}.

以上 $\upsilon_{NH,max}$和 $\upsilon_{NO,max}$的下限数据由郑兴灿等人的研究结果(郑兴灿等, 1998)计算而来.

1.5 分析手段

对以上各种条件下硝化过程的计算分析采用由 EAWAG (Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology)开发的 AQUASIM2.0软件, 该软件已被多位研究者 (Hao *et al.*, 2002b; Koch *et al.*, 2000)应用于水系统生物过程的模拟研究.

2 结果 (Results)

2.1 溶解氧对硝化过程影响的分析结果

在前述设定的两种情况下, 对溶解氧为 2.0 mg·L^{-1}及 0.5 mg·L^{-1}时的批式硝化过程由 AQUASIM2.0软件模拟计算的结果见图 1.

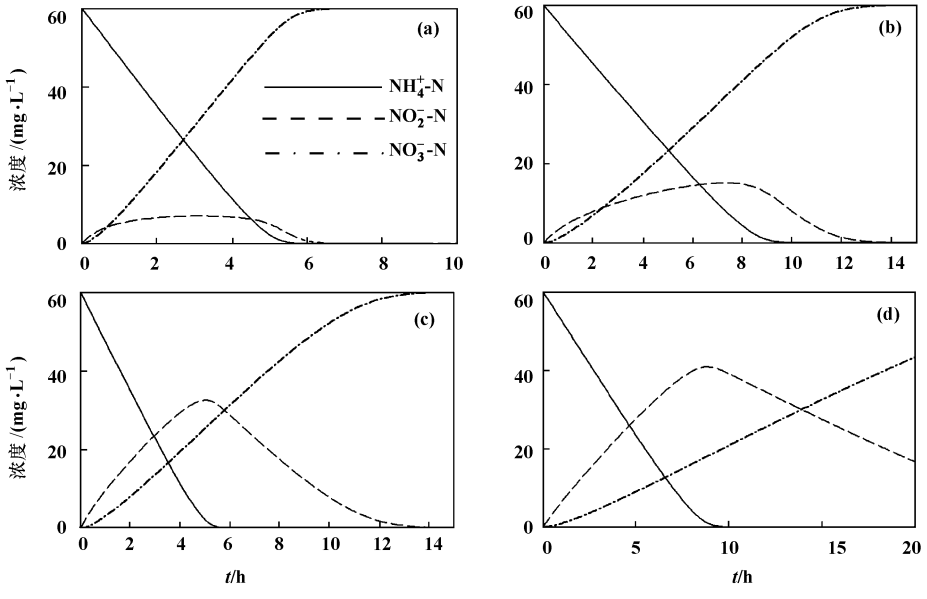


图 1　溶解氧对硝化过程的影响

(X_{AOB} = 20 mg·L^{-1}, X_{NOB} = 30 mg·L^{-1}: a DO = 2.0 mg·L^{-1}, b DO = 0.5 mg·L^{-1}; X_{AOB} = 30 mg·L^{-1}, X_{NOB} = 10 mg·L^{-1}: c DO = 2.0 mg·L^{-1}, d DO = 0.5 mg·L^{-1})

Fig. 1　Effects of DO on nitrification process

图 1(a)和 1(b)为 X_{AOB} = 20 mg·L^{-1}、X_{NOB} = 30 mg·L^{-1}时的结果,这种情况与大多数实际情况一致,即亚硝酸氧化细菌在系统内占优势或略占优势;图 1(c)和 1(d)为 X_{AOB} = 30 mg·L^{-1}、X_{NOB} = 10 mg·L^{-1}时的结果,模拟的是氨氧化细菌占优势时的情况.

从模拟结果看,在亚硝酸氧化细菌在系统内占优势或略占优势的情况下(图 1(a)和 1(b)),硝化过程开始时氨氮充足,NO_2^--N产生速度大于消耗的速度,NO_2^--N逐渐积累,但 NO_2^--N 的量增加后,提供给亚硝酸氧化细菌的底物浓度增加了,这导致亚硝酸盐氮消耗速度的加快,当 NO_2^--N产生速度和消耗速度相等时必然出现其浓度最大值,此后随着氨氮浓度的减少,NO_2^--N产生速度下降,而消耗速度的增加,氨氮、亚硝酸氮浓度同时下降,一定时间后氨氮完全转化为亚硝酸氮,而后者在亚硝酸氧化细菌的作用下继续转化,最后完全转化为硝酸盐氮.另外 DO值不同时硝化过程的物质消耗与产生的速度是不同的.在 DO为 2.0 mg·L^{-1}、0.5 mg·L^{-1}时,60 mg·L^{-1}的氨氮被完全氧化的时间分别为 5.5h和 12.8h,亚硝酸盐氮浓度最高分别为 6.8 mg·L^{-1}和 15.2 mg·L^{-1},氨氮完全转化为硝酸盐氮所需要的时间也随着溶解氧的减少而增加.

当氨氧化细菌占优势的情况下(图 1(c)和 1(d)),在 DO为 2.0 mg·L^{-1}、0.5 mg·L^{-1}时,60 mg·L^{-1}的氨氮被完全氧化的时间分别为 5.7h和 9.6h,亚硝酸盐氮浓度最高分别为 33.6 mg·L^{-1}和 42.7 mg·L^{-1}.这表明系统中氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮的变化情况与亚硝酸氧化细菌在系统内占优势或略占优势时的情况相似,但是系统中的亚硝酸盐最高浓度却大大增加,且转化率最高时均超过了 50%,这说明系统中微生物群落的构成对硝化过程的结果具有显著影响.

从图 1的 4个图还可以看出,尽管不同条件下系统中都会出现亚硝酸盐的积累,但只要存在亚硝酸氧化细菌,则生成的 NO_2^--N 最终将完全转化为 NO_3^--N.

2.2 温度对硝化过程的影响

对不同条件不同温度下的硝化过程模拟结果见图 2(a)~2(d).

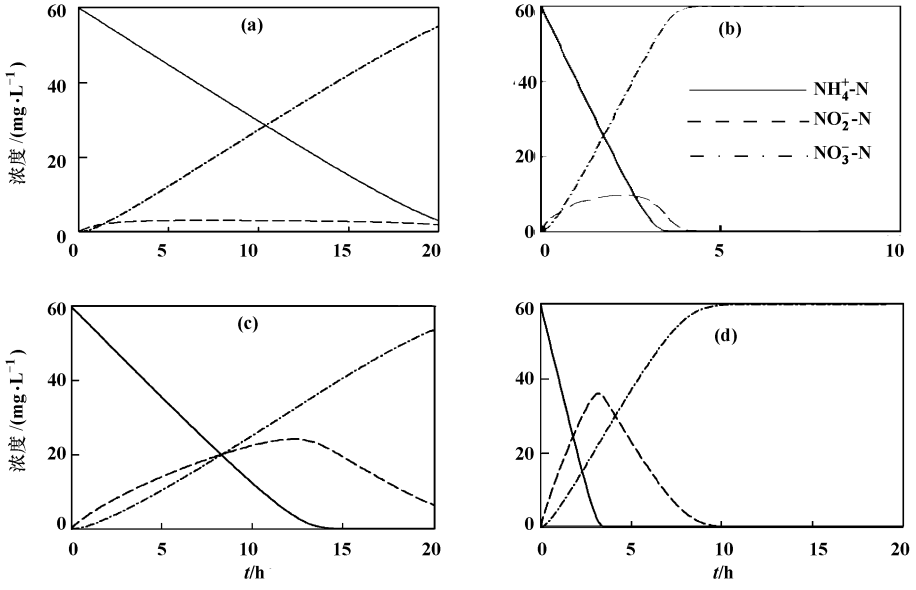


图 2 温度对硝化过程的影响

(X_{AOB} = 20 mg·L^{-1} X_{NOB} = 30mg·L^{-1}: a T = 15℃, b T = 35℃;

X_{AOB} = 30 mg·L^{-1}, X_{NOB} = 10mg·L^{-1}: c T = 20℃, d. T = 35℃)

Fig. 2 Effects of temperature on nitrification process

从图 2看出,当亚硝酸氧化细菌在系统内占优势或略占优势时(图 2(a)和 2(b)),温度对硝化过程的影响十分明显.在温度为 15℃的情况下,氨氮在 20h后仍未被完全氧化,NO_2^--N的最高浓度仅 3.2 mg·L^{-1},而当温度升高至 30℃(图 1(a))、35℃时(图 2(b)),氨氮迅速被氧化,所需要的时间分别为 5.5 h和 3.6 h,

NO_2^--N的最高浓度分别为 6.8 mg·L^{-1}及 7.9 mg·L^{-1}, 同时氨氮、亚硝酸盐氮完全转化为硝酸盐氮的时间也随温度的升高而减少. 对此, 温度升高将较大程度地促进了微生物的新陈代谢是主要原因.

在氨氧化细菌占优势的情况下 (图 2(c)和 2(d)), 当温度为 35℃时, 氨氮被氧化所需要的时间为 3.4h, 仅为 30℃(图 1(c))和 20℃所需时间 (5.7 h和 30.9 h)的 11%和 59.6%, 在此温度下, 亚硝酸盐氮出现的最大浓度为 37.2 mg·L^{-1}, 而 30℃和 20℃的最大浓度 (33.6 mg·L^{-1}和 23.7 mg·L^{-1})分别为其 90.3%和 63.7%.

可以看出, 虽然微生物的组成不同, 但温度对硝化过程的影响规律相似, 即在低温时硝化过程进行的比较缓慢, 温度升高后, 硝化的各步骤都不同程度的加快, 而氨氧化加快的程度大于亚硝酸盐氧化的速度, 因而随温度升高, 亚硝酸盐氮浓度的最大值也越大. 显然升高温度 (30℃以上)对亚硝酸盐氮的产生是有利的. 模拟结果还可以看出, 在氨氧化细菌占优势的情况下, 亚硝酸盐氮最大浓度要远远高于同条件亚硝酸氧化细菌在系统内占优势或略占优势的情况 (图 1(c)和图 1(a)、图 2(d)和图 2(b)), 这同样表明了系统微生物构成对硝化过程的产物影响也是显著的.

2.3　动力学方程中参数的灵敏度分析

在上述模拟条件下对动力学方程中参数的灵敏度的分析结果见图 3.

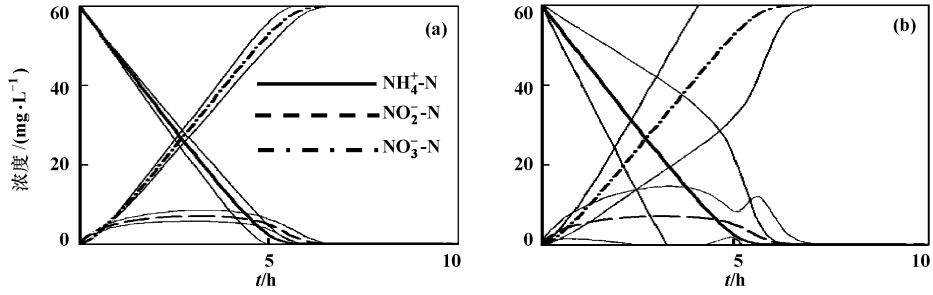


图 3　硝化动力学方程中参数的灵敏度分析

(a $K_{O_2}^{NH}$ = 0.6~1.6 mg·L^{-1}, 标准差 0.2 mg·L^{-1}, $K_{O_2}^{NO}$ = 0.1~2.4 mg·L^{-1}, 标准差 0.36 mg·L^{-1}; b $K_{O_2}^{NH}$ = 0.6~1.6 mg·L^{-1}, 标准差 0.2 mg·L^{-1}, $K_{O_2}^{NO}$ = 0.1~2.4 mg·L^{-1}, 标准差 0.36 mg·L^{-1}; $v_{NH,max}$ = 0.27~0.57 mg·mg^{-1}·h^{-1}, 标准差 0.3 mg·mg^{-1}·h^{-1}, $v_{NO,max}$ = 0.49~1.47 mg·mg^{-1}·h^{-1}, 标准差 0.3 mg·mg^{-1}·h^{-1})

Fig. 3　Sensitivity analysis of the nitrification model parameters

3(a)、3(b)图中的粗线由 1.2节中的①条件计算得到 (DO= 2.0 mg·L^{-1}), 细线表示参数在给定范围内变化时, 各物质浓度变化的界限, 因此粗线两边的细线就给出了模拟结果的阈值. 可以看出, 当动力学方程中仅氨氧化细菌和亚硝酸氧化细菌对氧的亲和常数变化时, 硝化过程中各种物质浓度的变化范围很小, 曲线形状没有发生变化 (图 3(a)), 说明这些亲和常数对模型结果的影响可以忽略.

当动力学方程中有多个参数同时变化时, 这些变化对模拟结果具有明显的影响 (图 3(b)). 其中, 氨转化曲线和硝酸盐生成曲线形状在边界处有一定的变化, 亚硝酸盐氮转化曲线的变化最明显, 其上边界出现了两次最大值, 分别为 14.2 mg·L^{-1}和 11.4 mg·L^{-1}, 其下边界则出现浓度为 0的情况, 最大浓度也很低, 仅 2.2 mg·L^{-1}.

图 3(a)表明亲和常数对模拟结果的影响小; 而在亲和常数变化的情况下, 底物最大比氧化速率的改变却导致模拟结果的很大不同 (图 3(b)), 这说明本文中的动力学方程对底物最大比氧化速率的灵敏度要高于对亲和常数的灵敏度. 此外, 从图 1~图 3看, 尽管参数变化使硝化过程的产物浓度有一定的变化, 但这种变化的程度较低, 而当系统的微生物构成发生明显变化时, 硝化过程的产物分布则发生了质的变化, 因此要对硝化过程进行控制以实现亚硝化, 应尽可能保持系统中氨氧化细菌占优势.

3　讨论 (Discussion)

多种外界因素可以对硝化过程产生影响, 如 pH、溶解氧、温度、游离氨、毒性物质等. 通常条件下, 废水基本不含抑制硝化过程的有毒物质, 游离氨在 pH < 9的情况下浓度较低, 不足以对亚硝酸氧化细菌产生显著不利的影响 (雒怀庆, 2003a), 因此在保证碱度充足的条件下, 溶解氧和温度成为硝化过程的重要控制参数.

氨氧化细菌和亚硝酸氧化细菌均是绝对好氧菌,但溶解氧的浓度对两类细菌的影响是不同的,Laanbroek 等人(1993)研究认为氨氧化细菌对氧的亲和力要比亚硝酸氧化细菌对氧的亲和力大,因而在低氧浓度下会出现亚硝酸. Hanaki等人(1990)对低溶解氧下两种亚硝酸氧化细菌的活性进行了研究,结果表明 DO 低于 0.5 mg·L^{-1}时亚硝酸氧化细菌活性受到严重抑制,而氨氧化细菌活性没有受到明显的影响,这些都表明在低溶解氧情况下有利于亚硝酸盐氮的积累,这与模拟的结果相一致.

温度对微生物的影响是多方面的,氨氧化细菌和亚硝酸氧化细菌在不同的温度下具有不同的生长速率(Mulder *et al*, 1997; Verstraete *et al*, 1998; 雒怀庆等, 2003b),这对于一个连续运行的系统会有非常明显的影响,同时,温度还影响代谢速度,显然,当温度升高时,氨氧化细菌的代谢速度增加的要比亚硝酸氧化细菌代谢速度增加的多,这就会产生亚硝酸盐最大浓度随温度升高而增加的现象,因此在一定范围内升高温度是控制硝化过程的有效手段.

对于批式硝化过程,本文虽只进行了有限条件的模拟,但基本包含了一般的情况,如果反应器的容积、系统内微生物构成发生变化,则模拟结果仍将与本文的模拟结果相一致.

4 结论(Conclusions)

1) 硝化过程中各物质的转化速度与溶解氧浓度密切相关,当溶解氧从 2.0 mg·L^{-1}降低到 0.5 mg·L^{-1},氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮的转化速度也降低,但是亚硝酸盐氮最大浓度值却变大,低氧有利于 NO_2^--N 的形成与积累,宜将 DO 控制在 0.5 mg·L^{-1}以获得最理想的亚硝化效果.

2) 升高至相同温度时氨氧化细菌和亚硝酸氧化细菌代谢速度不同,温度升高对氨氧化细菌的促进作用更大,亚硝酸盐最大浓度值随温度升高而变大,在一定范围内升高温度是促进硝化过程的有效手段.

3) 亲和常数对模拟结果的影响很小,而在亲和常数变化的情况下,底物最大比氧化速率的改变会导致模拟结果的很大差异,硝化过程动力学方程对底物最大比氧化速率的灵敏度要高于对亲和常数的灵敏度,但其影响程度低于微生物构成对模拟结果的影响.

4) 在各种条件下,氨氧化细菌占优势时系统获得的亚硝酸盐都要远远高于同条件下亚硝酸氧化细菌占优势或略占优势的情况,对结果的影响程度也远远大于溶解氧、温度和参数的变化,因此要确保亚硝化过程的实现,必须保持系统中氨氧化细菌占优势.

References:

Bailey J E, Ollis D F. 1986. Biochemical Engineering Fundamentals [M]. New York: McGraw-Hill, 105—136

Barnes D, Bliss P J. 1983. Biological Control of Nitrogen in Wastewater Treatment[M]. E & F N Spon, 53—87

Hanaki K, Wantswin C, Ohgaki S. 1990. Nitrification at low levels of dissolved oxygen without organic loading in a suspended-growth reactor[J]. Wat Res, 24: 297—302

Hao X D, Heijnen J J, van Loosdrecht M C M. 2002a. Sensitivity analysis of a biofilm model describing a one stage completely autotrophic nitrogen removal (CANON) process[J]. Biotech Bioeng, 77(3): 265—277

Hao X D, Heijnena J J, van Loosdrechta M C M. 2002b. Model-based evaluation of temperature and inflow variations on a partial nitrification ANAMMOX biofilm process [J]. Wat Res, 36: 4839—4849

Hellinga C, Schellen A A J C, Mulder J W, *et al*. 1998. The SHARON process: An innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste water[J]. Wat Sci Tech, 37(9): 135—142

Koch G, Egli K, van der Meer J R, *et al*. 2000. Mathematical modeling of autotrophic denitrification in a nitrifying biofilm of a rotating biological contactor[J]. Wat Sci Tech, 41: 191—198

Laanbroek H J, Gerards S. 1993. Competition for limiting amounts of oxygen between Nitrosomonas europaea and Nitrobactor winogradski grown in mixed continuous cultures [J]. Arch Microbiol, 159: 453—459

LUO Huaiqing. 2003a. Application basic of anaerobic ammonium oxidation process to nitrogen removal and assessment of the bacteria communities[D]. Guangzhou: South China University of Technology

LUO Huaiqing, HU Yongyou, CHEN Zhu. Batch study on the nitrification process characteristics using biological porcelain granule [J]. Journal of outh China University of Technology (Science). 31(5): 47—50

Mulder J W, van Kempen R. 1997. N-removal by SHARON [J]. Water Quality International, 2: 30—31

Prosser J I. 1989. Autotrophic nitrification in bacteria[J]. In Advance in Microbiol Physiology, 30: 125—181

van Loosdrecht M C M, Jetten M S M. 1998. Microbiological conversions in nitrogen removal[J]. Wat Sci Tech, 38(1): 1—7

Verstraete W, Philips S. 1998. Nitrification-denitrification processes and technologies in new contexts[J]. Environmental Pollution (sl), 102: 717—726

Ye R W, Thomas S M. 2001. Microbial nitrogen cycles: physiology, genomics and applications[J]. Current Opinion in Microbiology, 4(3): 307—312

ZHENG Xingcan, LI Yaxin. 1998. N and P removal technology in wastewater treatment process[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 50—51

中文参考文献:

雒怀庆. 2003a. 厌氧氨氧化生物脱氮技术基础及其细菌群落的研究[D]. 广州: 华南理工大学

雒怀庆, 胡勇有, 陈 柱. 2003b. 生物陶粒批式硝化过程特性研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 31(5): 47—50

郑兴灿, 李亚新. 1998. 污水除磷脱氮技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 50—51