

# SRT对 A<sup>2</sup>/O 工艺脱氮除磷的影响

徐伟锋<sup>1</sup>, 顾国维<sup>2</sup>, 陈银广<sup>2</sup>

(1.上海电力学院环境工程系,上海 200090; 2.同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室,上海 200092)

**摘 要:** 以小试规模 A<sup>2</sup>/O 工艺结合活性污泥数学模型(ASM2D),考察了实际污水中污泥龄为 8、10、12、15 d 时对脱氮除磷的影响,并建立了 A<sup>2</sup>/O 数学模型进行模拟与优化。结果表明,除碳和脱氮率基本不受污泥龄的影响,去除率分别为 80%~88%和 57%~65%;聚磷菌释磷和吸磷受污泥龄的影响较大,以 12 d 时脱氮除磷效率为最高,出水基本能达到城镇污水处理厂污染物排放一级标准;COD、NH<sub>3</sub>-N 和 P 在各反应器内的模拟值与实测值较为接近,在短污泥龄时受模型结构限制,NO<sub>3</sub>-N 模拟值与实测值相差较大,在长污泥龄时 NO<sub>3</sub>-N 的模拟精度达 93%,所建立的模型可较好地模拟工艺运行;通过分析模拟优化结果,得出最佳污泥龄约为 13 d,与试验结果基本相吻合。

**关键词:** 生物脱氮除磷;污泥龄;数学模型;实际污水

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3770(2007)09-068-04

A<sup>2</sup>/O 工艺污泥龄的确定十分重要,要使硝化菌存活就需要较长的污泥龄(SRT),但除磷主要是通过排放含高磷剩余污泥而实现的,如 SRT 过长则排出的剩余污泥量太少,就达不到较高的除磷效率。许多研究报道<sup>[1-3]</sup>,当控制 SRT 在 8~15 d 时,一般可同时取得一定的脱氮除磷效果。目前,国内外研究大多数采用合成污水作为碳源来驯化污泥并进行研究<sup>[4-6]</sup>,而实际污水成份相当复杂,试验结果并不能完全反映实际情况。同时,近年来国际水协组织(IWA)推出了活性污泥数学模型(ASM),整合了当今污水处理技术的大部分研究成果。因而,本文以实际污水培养驯化活性污泥的 A<sup>2</sup>/O 工艺为研究对象,结合活性污泥数学模型,建立 A<sup>2</sup>/O 工艺数学模型,对 SRT 影响生物脱氮除磷的效果进行了研究及模拟优化。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验装置

A<sup>2</sup>/O 工艺 3 个反应器均由圆筒形的有机玻璃制成,在各反应区内均设有搅拌器以防止污泥沉淀。接种污泥取自上海某污水处理厂,采用上海某小区的 actual 生活污水为进水碳源。试验期间厌氧、缺氧和好氧区水力停留时间分别为 1.6、1.6、4.8 h,DO 2.0~3.0 mg/L,污泥回流比 75%,混合液回流比 200%,水温

20℃。在运行过程中,通过改变系统排泥量来考察 SRT 分别为 8、10、12、15 d 时对脱氮除磷的影响。

### 1.2 测定项目及方法

试验中常规指标分析均按国家标准方法<sup>[7]</sup>;PHAs 测定方法见文献<sup>[8]</sup>,糖原采用蒽酮法<sup>[9]</sup>。

### 1.3 数学模型的建立

考虑到试验过程中存在碳氧化、硝化/反硝化、生物除磷及反硝化除磷等过程,因而以 IWA 推出的 ASM2D 为平台,根据模型求解原理和参照积分路线<sup>[10]</sup>,并借助 Matlab 优秀的计算功能,依次建立和求解 3 个反应器出水的模型组分浓度方程组与流量关系式,即实现对工艺出水的模拟。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SRT 对生物脱氮除磷的影响

表 1 是 COD、氮、磷在不同 SRT 工况下的试验结果。由表 1 可见,COD 去除几乎不受 SRT 长短的影响,去除率达 80%~88%,COD 出水浓度基本达到我国城镇污水处理厂排放标准规定的一级标准<sup>[9]</sup>。同时,通过物料平衡的方法计算各反应器内 COD 去除的所占比例,如表 2 所示。厌氧区内 COD 去除量最大,且随 SRT 延长呈上升趋势,而缺氧区内去除量随 SRT 延长而降低,这可能与 MLSS 浓度有

收稿日期 2006-10-30

基金项目 国家自然科学基金重点资助项目(50138010);上海市重点学科建设项目(P1304)

作者简介 徐伟锋(1978-),男,博士,讲师,研究方向为水污染控制,联系电话:13764566357, E-mail: steve78107@163.com。

表 1 不同 SRT 下污染物的去除效果  
Table 1 Removal of various pollutants under four different SRT

污染物	8 d			10d			12 d			15 d		
	进水 (mg/L)	出水 (mg/L)	去除率 (%)	进水 (mg/L)	出水 (mg/L)	去除率 (%)	进水 (mg/L)	出水 (mg/L)	去除率 (%)	进水 (mg/L)	出水 (mg/L)	去除率(%)
COD	380.6	48.6	87.2	384.6	62.8	83.7	368.4	61.9	83.2	382.1	60.7	84.1
NH <sub>3</sub> -N	56.3	0.0	100	53.4	0.8	98.5	54.8	0.0	100	55.6	0.4	99.3
NO <sub>2</sub> -N	0.0	4.1	-	0.0	3.1	-	0.0	1.4	-	0.0	1.0	-
TN	64.0	27.3	57.3	64.8	23.6	63.6	62.0	22.1	65.4	64.3	23.8	63.0
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	6.6	0.2	97.0	6.9	0.1	98.6	6.7	0.1	98.5	6.5	1.8	72.3
TP	7.0	0.8	88.6	7.4	0.9	87.8	7.0	0.6	91.4	6.8	2.2	67.6
MLSS	2590	2590		2800	2800		3160	3160		3460	3460	

关,在 SRT 较短时 MLSS 浓度较低,则厌氧区内有机负荷较高,使部分未经被利用的有机物直接进入缺氧区而得到去除。好氧反应器对 COD 去除的贡献也较小,这会抑制普通异养菌的生长繁殖。可见,SRT 对系统总 COD 的去除几乎没有影响,但对有机物在各反应器内的迁移转化有一定的影响。

由表 1 还可知,NH<sub>3</sub>-N 去除率几乎达到 100%,达到一级排放标准中的 A 级标准,TN 去除率随着 SRT 的延长呈上升趋势,当 SRT 为 8d 和 10d 时,出水中出现了 NO<sub>2</sub>-N 的积累,表明硝化反应的第二步受到抑制。且在 SRT 分别为 8、10、12d 时,出水 TP 浓度均低于 1.0mg/L,达到一级排放标准中 B 级标准;但当 SRT 为 15d 时出水磷浓度较高,只符合二级排放标准。

表 2 不同 SRT 下各反应器 COD 去除量的所占比例(%)  
Table2 COD removal percent under of each reactor under four SRT

反应器	8 d	10d	12d	15 d
厌氧池反应器	73.9	81.9	89.8	90.0
缺氧池反应器	21.5	9.8	1.9	1.5
好氧池反应器	4.6	8.3	8.3	8.5

PHAs 是生物除磷系统中聚磷菌最主要的能量来源,与厌氧释磷和好氧吸磷有着密切的联系,将释放/吸收磷与 PHAs 结合起来则更能从本质上反映出聚磷菌的厌氧释磷能力和好氧吸磷能力。通过物料平衡的方法对各反应器内 PHAs 浓度、释放/吸收磷量进行计算,结果如表 3 所示。PAOs 合成单位 PHAs 的释磷量随着 SRT 的延长而增加,而利用单位 PHAs 的吸磷量出现先升高后下降趋势。这是因为 SRT 越长,MLSS 浓度就越高,微生物的有机负荷就越低,厌氧区内去除的有机物量就越大(见表 2),则 PAOs 在厌氧段内吸收更多碳源并将其合成为 PHAs,释放出更多的磷,使厌氧末 PHAs 浓度就越高,进而会吸收更多的磷。这从表 3 可看出,PAOs 利用单位 PHAs 的吸磷量随着 SRT 的延长而增加。但当 SRT 为 15d 时反而略呈下降趋势,原因是当

SRT 延长到 15d 时,PHAs 浓度只是略有升高,而释磷量持续增加,即厌氧区发生了无效释磷,这些磷并没有伴随着 PHAs 的利用而吸收,从而降低了除磷效果。

表 3 SRT 与合成 PHAs 的释磷量和利用 PHAs 的吸磷量关系  
Table3 Relationship between SRTs and P release/ PHAs accumulation & P uptake/ PHAs utilization

项目	8 d	10d	12 d	15 d
合成单位 PHAs 释磷量 (mg/mg)	0.370	0.407	0.508	0.574
利用单位 PHAs 吸磷量 (mg/mg)	0.466	0.484	0.593	0.584
比值	1.26	1.19	1.17	1.02

从表 3 还可以看出,随着 SRT 的延长,PAOs 利用单位 PHAs 吸磷量与合成单位 PHAs 释磷量比值呈下降趋势,当 SRT 为 8d 时,PAOs 具有较高的吸磷/释磷活性,但由于 SRT 过短,系统并不能取得较高的脱氮效果,当 SRT 为 15d 时,比值迅速下降,除磷效果较差。可见,污泥龄对 PAOs 释磷、吸磷有较大的影响。

综合考虑,SRT 为 12 d 时系统可取得较高的脱氮除磷效果,各指标基本能达到国家排放一级标准。

2.2 试验数据模拟与优化计算

利用建立的 A<sup>2</sup>/O 工艺数学模型对试验结果进行了模拟,模型计算工况与实际工况在 3 个反应器中基质浓度的对比情况如图 1~4 图所示。可以看出,当 SRT 分别为 8、10 d 时,COD、NH<sub>3</sub>-N、P 的模拟值与实测值较为接近,COD 模拟精度达 95%以上,NH<sub>3</sub>-N 在厌氧、缺氧区内的模拟精度达 90%以上,在好氧区内由于绝对值较小,导致相对误差达 26%,但绝对误差仅为 1.0、0.2 mg/L,NO<sub>3</sub>-N 的模拟值与实测值相差较大,绝对误差为 2.0~4.4 mg/L。原因是试验发现这两种工况下出水出现了 NO<sub>2</sub>-N 积累,IWA 专家组认为虽然 NO<sub>2</sub>-N 是硝化反应的中间产物,为简化便于应用模型,在 ASM 中假定 NO<sub>3</sub>-N 是氮的唯一氧化形式<sup>[10]</sup>。可见,现有模型在模拟硝化反应过程仍需进一步完善。当 SRT 分别为 12、15 d 时,COD、N、P 的模拟均能达到令人满意的结果,COD 模拟精度达 95%,NH<sub>3</sub>-N 在厌氧、缺氧区

内的模拟精度达 92%以上, 在好氧区内由于绝对值较小, 导致相对误差达 67%, 但绝对误差仅为 1.1 mg/L。P 的模拟精度达 88%以上,  $\text{NO}_3\text{-N}$  的模拟精度达 93%。

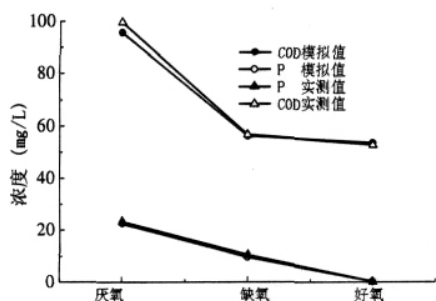


图 1(a) COD、P 模拟值与实测值比较

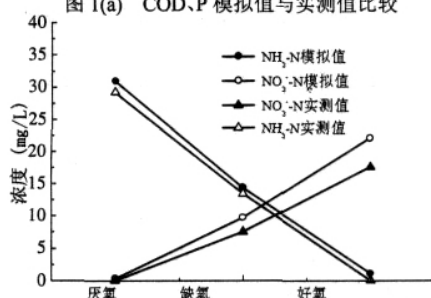


图 1(b)  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  模拟值与实测值比较

图 1 各基质的模拟值与实测值比较 (污泥龄 8d)  
Fig.1 Comparison of measured values and simulated values (SRT 8d)

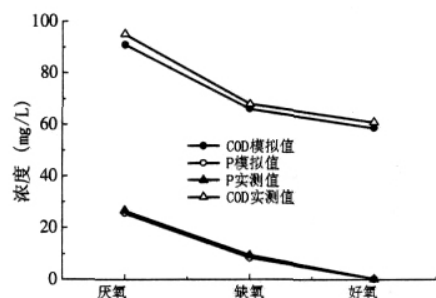


图 2(a) COD、P 模拟值与实测值比较

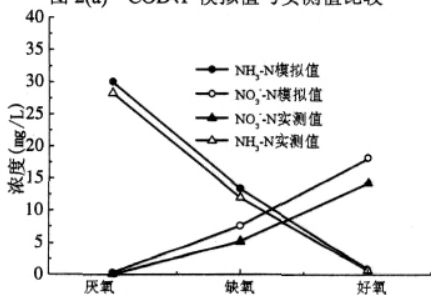


图 2(b)  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  模拟值与实测值比较

图 2 各基质的模拟值与实测值比较 (污泥龄 10d)  
Fig.2 Comparison of measured values and simulated values (SRT 10d)

由以上分析可以看出, COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、P 模拟均可取得令人满意的结果。但在污泥龄较短时, 因受模型结构的限制,  $\text{NO}_3\text{-N}$  模拟值与实测值相差较多;

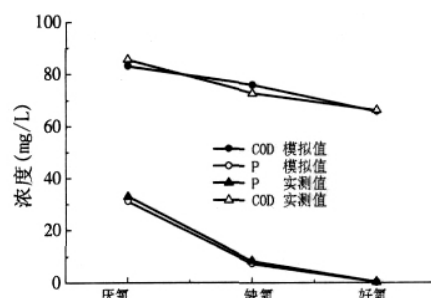


图 3(a) COD、P 模拟值与实测值比较

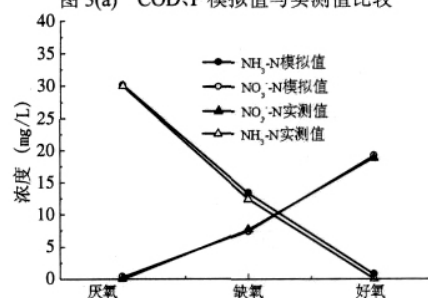


图 3(b)  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  模拟值与实测值比较

图 3 各基质的模拟值与实测值比较 (污泥龄 12d)  
Fig.3 Comparison of measured values and simulated values (SRT 12d)

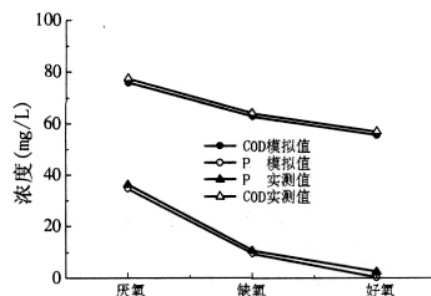


图 4(a) COD、P 模拟值与实测值比较

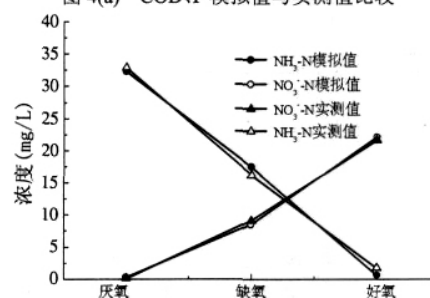


图 4(b)  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  模拟值与实测值比较

图 4 各基质的模拟值与实测值比较 (污泥龄 15d)  
Fig.4 Comparison of measured values and simulated values (SRT 15d)

而在污泥龄较长时,  $\text{NO}_3\text{-N}$  模拟精度可达 93%。可见, 在试验条件下, 所建立的模型基本可以较好地模拟工艺的运行, 但仍需要进一步完善硝化反应过程。同时, 由于受试验条件的限制, 只能考察有限个 SRT 对脱氮除磷的影响。本研究借助数学模型, 可方便地计算任意多组工况, 进而较精确地确定最佳 SRT 的范围, 便于指导实验和优化污水处理厂的运



行。图 5 所示为经模型计算的不同 SRT 工况下 A<sup>2</sup>/O 厌氧区内磷浓度、系统除磷率和脱氮率的变化情况。可以看出 随着 SRT 的延长 厌氧区内磷浓度呈线性上升 除磷率呈抛物线型下降 脱氮率经历了一个先上升后趋于平缓的过程。如果只考虑除磷效果, 系统 SRT 越短 则除磷效果越好。对于同步脱氮除磷工艺而言, 在考虑系统除磷效果的同时还需考虑脱氮效果, 以得出系统的最佳 SRT。试验结果还表明, 在 SRT 4~15d 时, 脱氮率随着 SRT 延长而逐渐提高, 这与试验结果相吻合; 而当 SRT 进一步延长至 25d 时, 脱氮率基本没有变化。通过分析模型计算结果, 可得出过长的 SRT 尽管可以提高系统脱氮率, 但除磷效果较差; 反之, 过短的 SRT 可实现较高的除磷率, 但会降低脱氮率。因而, 本研究认为将 SRT 设置在 13d 左右时可获得较好的脱氮除磷效果, 与试验结果基本相吻合。

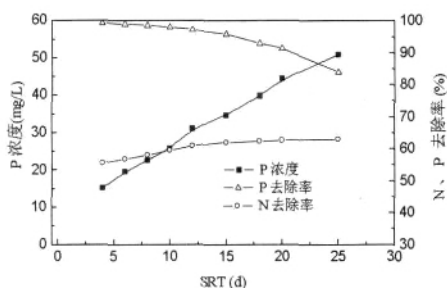


图 5 最优污泥龄计算  
Fig.5 Calculation of optimum SRT

### 3 结 论

SRT 对 COD 去除和脱氮率的影响并不大, 但对有机物在各反应器内的迁移转化有一定的影响; SRT 长短对聚磷菌释磷能力和吸磷能力的影响较大, 以 12 d 时脱氮除磷效率为最高。

所建立的 A<sup>2</sup>/O 工艺数学模型可达到较高的模

拟精度, 能较好地模拟工艺运行, 但仍需要进一步完善硝化反应过程; 并且模拟优化得出最佳 SRT 约为 13d, 可取得较高的脱氮除磷效果, 与试验结果基本相吻合。该模型可以用于辅助实验研究和污水处理厂工艺运行控制领域。

### 参考文献:

- [1] 娄金生, 谢水波. 提高 A<sup>2</sup>/O 工艺总体处理效果的措施 [J]. 中国给水排水, 1998, 14(3): 27-30.
- [2] Chuang S H, Ouyang C F, Yuang H C, et al. Evaluation of phosphorus removal in anaerobic-anoxic-aerobic system via polyhydroxyalkanoates measurements [J]. Water Sci Tech., 1998, 38(1): 107-114.
- [3] Rensink J H, Donker H J, Simons S J. Phosphorus removal at low sludge loadings [J]. Water Sci Tech., 1985, 17(1-2): 177-186.
- [4] Meinhold J, Pedersen H, Arnold E, et al. Effect of continuous addition of an organic substrate to the anoxic phase on biological phosphorus removal [J]. Water Sci Technol., 1998, 38(1): 97-105.
- [5] Sudiana I M, Mino T, Satoh H. Metabolism of enhanced biological phosphorus removal and non-enhanced biological phosphorus removal sludge with acetate and glucose as carbon source [J]. Water Sci Technol., 1999, 39(6): 29-35.
- [6] Jeon C O, Park J M. Enhanced biological phosphorus removal in a sequencing batch reactor supplied with glucose as a sole carbon source [J]. Water Res., 2000, 34(7): 2160-2170.
- [7] 国家环境保护总局. 水与废水监测分析方法 (第四版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [8] 徐伟锋, 陈银广, 顾国维, 等. A<sup>2</sup>/O 污水处理工艺中基质转化机理研究 [J]. 环境科学, 2006, 27(11): 80-84.
- [9] Jenkins D, Richard M G, Daigger G T. Manual on the causes and control of activated sludge bulking and foaming-2nd edition [M]. Florida: Lewis Publishers, 1993.
- [10] 张亚雷, 李咏梅. 活性污泥数学模型 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [11] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 城镇污水处理厂污染物排放标准 (GB18918-2002) [S]. 北京: 中国环境出版社, 2003.

## RESEARCH ON EFFECT OF SRT ON A/A/O BIOLOGICAL NUTRIENT REMOVAL AND SIMULATION

XU Wei-feng<sup>1</sup>, GU Guo-wei<sup>2</sup>, CHEN Yin-guang<sup>2</sup>

(1. Department of Environmental Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on a laboratory-scale A<sup>2</sup>/O process acclimated with real wastewater, and combining with activated sludge model, research on effect of SRT of 8, 10, 12 and 15 d on biological nutrient removal was done, and simulation and optimization with the established A<sup>2</sup>/O model were made. The results indicated that COD and nitrogen removals were rarely influenced by SRT, with the removal efficiency of 80-88% and 57-65% respectively, while P release and uptake of PAOs were largely affected by sludge age. Removal efficiency was the best at the SRT 12 d and the effluent concentrations could comply with the first class discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant. The simulated values for COD, NH<sub>3</sub>-N and P in three reactors were close to the measured values. Due to practically being limited by model structure, the difference between the simulated and measured values for NO<sub>3</sub>-N was great at the short SRT, while at the long SRT the simulating precision was above 93%, indicating that the established model could satisfactorily simulate the process operation. After analysing the optimizing result the optimal SRT was 13 d, which approached to the experimental results.

key words: biological nutrient removal; sludge retention time; mathematic model; real wastewater