

推流式 A²O 工艺强化脱氮数值模拟研究

樊佳¹, 武延坤^{2,3,4}, 许仕荣^{1*}, 张金松³, 李秀⁴

(1.湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2.深圳职业技术学院建筑与环境工程学院, 广东 深圳 518052;
3.深圳市水务(集团)有限公司, 广东 深圳 518030; 4.清华大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要: 为了改善城市污水混进垃圾渗滤液后经常出现的 TN 含量超标问题, 运用数值模拟方法, 基于活性污泥模型 ASM2d 构建推流式 A²O 工艺数学模型。经过灵敏度分析和参数校正后, 模型出水中 COD、TN 含量、NH₄⁺-N 含量模拟值与实测值的相对误差分别为 2.1%、2.6%和 1.6%。采用单因素试验和多因素正交试验优化混合液回流比、污泥回流比、好氧段溶解氧对出水 TN 含量的影响, 结果表明, 当混合液回流比为 400%, 污泥回流比为 100%, 好氧段溶解氧控制在 3 mg/L 时可达达到较佳脱氮效果。

关键词: 城市污水; 强化脱氮; 推流式 A²O 工艺; 数值模拟; 活性污泥数学模型 ASM2d

中图分类号: X131.2; X703.1; X832 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2015)05-0544-05

Numerical simulation for enhanced nitrogen removal in plug-flow A²O process

Fan Jia¹, Wu Yankun^{2,3,4}, Xu Shirong^{1*}, Zhang Jinsong³, Li Xiu⁴

(1.College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2.School of Construction and Environmental Engineering, Shenzhen Polytechnic, Guangdong, Shenzhen 518052, China; 3.Shenzhen Water(Group) Co. Ltd., Guangdong, Shenzhen 518030, China; 4.Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Guangdong, Shenzhen 518055, China)

Abstract: To solve the issue of nitrogen out of limits in co-treatment of domestic wastewater and landfill leachate, numerical simulation was employed to build the mathematic model in A²O process based on activated sludge model ASM2d. On the analysis of sensitivity parameters and calibration parameters, the relative error between the simulated value and the measured value of COD, TN and NH₄⁺-N in the effluent were 2.1%, 2.6% and 1.6%, respectively. The effects of different internal return ratio, sludge return ratio and the concentration of dissolved oxygen in the aerobic tank on nitrogen removal were also conducted by using single factor experiment and multi-factor orthogonal experiment. The results showed that the optimum removal efficiency could achieved in the 400% of internal return ratio, 100% of sludge return ratio and 3 mg/L concentration of dissolved oxygen in aerobic tank.

Keywords: urban sewage; enhanced nitrogen removal; plug-flow A²O process; numerical simulation; activated sludge model ASM2d

城市污水处理厂处理污水时, 垃圾渗滤液的混入会导致进水中 NH₄⁺-N 含量和 TN 含量升高, 出水面临 TN 含量超标的风险^[1]。部分污水处理厂在运行管理过程中对混合液回流比、污泥回流比和溶解氧浓度等因素在脱氮过程中所起的作用认识不深, TN 含量去除难以达到预期目标^[2]。目前, 国内

针对 A²O 工艺的强化脱氮措施大都采用中试或生产性试验的方式, 选取 A²O 工艺中一个或几个运行参数, 考察其对脱氮的影响^[3-4], 而对污水处理厂的运行进行数学模拟, 并在此基础上系统分析和调整工艺参数的研究鲜见报道。活性污泥数学模型已被证实是研究、发展、优化污水处理过程的有效手

段之一^[5]。笔者基于活性污泥数学模型 ASM2d,以 GPS-X 软件为平台,结合污水处理厂的运行数据对污水处理厂污水处理流程进行模拟,通过模拟试验得出较佳运行工况,旨在为污水处理厂强化脱氮提供参考。

1 污水处理厂概况

试验污水处理厂为某城市污水处理厂,共有 4 座 A²O 生物处理池。单池的设计处理量为 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。厌氧区、缺氧区和好氧区的容积分别为 3 110、7 358、14 500 m^3 ,总水力停留时间为 13.3 h,混合液回流比为 100%~300%,设计污泥龄为 16.9 d,污

泥回流比为 33%~100%。单池对应 6 个长方形平流式二沉池,长、宽、高分别为 50、8、3.7 m。为满足排放要求,污水处理厂采取辅助化学除磷,处理后水质要求达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》GB18918—2002 一级 A 标准。

该污水处理厂主要处理城市污水(水中掺杂部分垃圾渗滤液)。垃圾渗滤液具有成分复杂、水质水量变化大、污染物浓度高等特点^[6-7],渗滤液中主要污染物为溶解性有机物和 NH_4^+-N 。由于垃圾渗滤液的引入,该厂进水中 TN 含量和 NH_4^+-N 含量浓度较高(表 1),超出了该厂的设计处理能力。

表 1 污水处理厂 2013 年 8—9 月进水水质指标

Table 1 Influent characteristics from sewage treatment plant during August to September, 2013						mg/L
项目	COD	BOD	SS 质量浓度	TN 质量浓度	NH_4^+-N 质量浓度	TP 质量浓度
设计进水	464	203	206	43.3	34.4	4.37
实际进水	217~626	101~296	104~478	38.6~63.5	29.4~50.0	2.03~6.68

2 试验方法

2.1 模型的构建与校验

2.1.1 模型的构建

反应器构建是对污水处理工艺进行数学模拟的首要环节,决定了模拟结果的可靠性和真实性,其构建应遵循“简化而不简单”的原则^[8]。根据污水处理厂的设计进水流量和各池的尺寸,计算出厌氧池、缺氧池和好氧池的佩克拉准数 Pe (分别为 18.7、12.3 和 10.5 时可认为是理想推流反应器^[9])。结合污水处理厂实际情况,分别利用 1 段、2 段和 4 段推流式反应器来模拟该污水处理厂厌氧池、缺氧池和好氧池,以上反应器生化反应机理模型均采用 ASM2d 模型。污水处理厂的二沉池为矩形平流沉淀池,故采用矩形平流沉淀池模块对其进行模拟,其沉淀机理模型采用 Takacs 简单的一维模型。利用加拿大 Hydromantis 公司的 GPS-X 仿真模拟软件构建上述推流式 A²O 工艺的活性污泥模拟程序。采用龙格-库塔-费尔伯格法对模型的微分方程进行求解。

2.1.2 模型的校验

由于 ASM2d 模型中包含了大量的动力学参数和化学计量学参数,模型使用中的一项关键工作就是取得适合于特定污水处理厂的活性污泥数学模型

参数值。本研究中首先应用静态模拟法对模型进行校正,再使用动态模拟法对校正后的模型进行验证。

在静态模拟基础上利用式(1)^[10]进行灵敏度分析:

$$S = \frac{dy/y}{da/a} = \frac{(y_2 - y_1)/y_1}{(a_2 - a_1)/a_1} \quad (1)$$

式中, a_1 、 a_2 分别表示参数的典型值和变化后的值, y_1 、 y_2 表示水质考察指标在 a_1 和 a_2 下的对应结果。根据上式对 ASM2d 中的所有化学计量学参数和动力学参数进行灵敏度分析。

2.2 数值模拟试验

针对出水 TN 含量超标问题,选取 A²O 工艺中对出水 TN 含量影响较大且污水处理厂易于调控的混合液回流比、污泥回流比和好氧段溶解氧(DO)3 个工艺参数进行分析。在已建立的数学模型的基础上,分别通过单因素试验和多因素正交试验模拟 3 个因素对污水处理厂污水处理效果的影响,以确定较佳工艺参数组合。初始试验条件:水质与水量采用污水处理厂 2013 年 8—9 月每日监测值,运行参数(混合液回流比、污泥回流比和好氧段溶解氧)均采用污水处理厂实际运行数据。

2.2.1 单因素试验

1) 混合液回流比的选取。A²O 工艺中混合液回流的作用是为缺氧段的反硝化反应提供硝酸盐。混

合液回流比的大小直接影响反硝化脱氮的效果^[11]。本次模拟考察混合液回流比为100%、200%、300%和400%时系统对污染物的去除效果。

2) 污泥回流比的选取。污泥回流比也是A²O工艺中重要的运行参数之一,污泥回流的主要作用是向系统提供活性污泥微生物,影响系统内污染物,特别是氮、磷的去除。本次模拟中考察污泥回流比为60%、80%、100%和120%时系统对污染物的去除效果。

3) 好氧段溶解氧浓度的选取。在A²O工艺中,好氧池中的溶解氧浓度对NH₄⁺-N含量去除起关键作用,而过低、过高的溶解氧浓度对TN含量的去除都不利^[12]。本次模拟考察好氧段溶解氧分别为1、

2、3、4 mg/L时系统对污染物的去除效果。

2.2.2 正交试验

采取正交试验法来确定推流式A²O工艺的较佳运行工况。以出水TN含量作为评价指标,采用L₉(3⁴)正交试验确定混合液回流比(A)、污泥回流比(B)和好氧段溶解氧浓度(C)的较优水平。

3 结果与分析

3.1 模型的构建与校验结果

GPS-X仿真界面如图1所示。仿真界面中构筑物的形状、尺寸、有效水深等物理参数与实际运行参数一致。

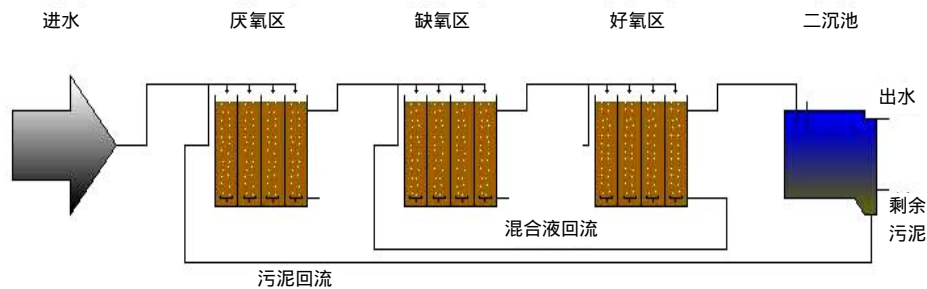


图1 某污水处理厂推流式A²O工艺流程模拟图

Fig. 1 A simulated chart of simulated process for plug-flow A²O

静态模拟试验数据为该厂2012年8—9月的进水水量与水质指标实测数据平均值,即 Q 为 $3.66 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,COD为470 mg/L,TN质量浓度为59 mg/L,NH₄⁺-N质量浓度为45 mg/L,TP质量浓度为4.0 mg/L,SS质量浓度为230 mg/L。进水COD组分采用文献[13]中的研究成果进行调整校正。将系统稳定运行后得到的模拟结果平均值与实测结果平均值进行比较,发现除NH₄⁺-N含量外,其他指标模拟值与实测值的相对误差均小于10%。

根据(1)式对ASM2d中所有化学计量学参数和动力学参数进行灵敏度分析的结果表明,对出水NH₄⁺-N含量和TN含量影响最大的参数依次为自养菌最大比增长率 μ_{AUT} 、自养菌衰减速率 b_{AUT} 和PHA贮存的速率常数 q_{PHA} 。另有研究表明,硝化菌的最大比增长速率 μ_{AUT} 是对模拟结果影响最大的因素之一^[14-15],因此,考虑到进厂水中含有部分垃圾渗滤液,NH₄⁺-N含量超过设计标准,本研究中着重对 μ_{AUT} 进行校核。运用GPS-X软件中自带

的参数优化求解器,确定校核后, μ_{AUT} 由典型值 1 d^{-1} 调整为 0.8 d^{-1} 。参数调整后所有指标模拟值与实测值的相对误差均小于10%。

动态模拟试验数据为污水处理厂2013年8—9月(60 d)进水水量与水质每日监测值,运用灵敏度分析结果调整参数 μ_{AUT} 为 0.8 d^{-1} ,系统稳定运行后,出水中COD、TN含量以及NH₄⁺-N含量模拟结果与实测结果的相对误差分别为2.1%、2.6%和1.6%。模拟结果表明,调整后的模型能很好地模拟污水处理厂的运行,可在此模型基础上进行下一步模拟试验研究。

3.2 模拟试验结果

3.2.1 单因素试验结果

适宜混合液回流比的选取。由图2可知,当混合液回流比由100%上升至300%时,出水TN含量平均浓度有明显降低,TN含量去除率平均值由54.4%上升至70.5%,而混合液回流比再由300%上

升至 400% 时,出水 TN 含量去除率稍有下降,但下降并不明显。可见,系统的脱氮效率随混合液回流比的增加而升高,且混合液回流比的提升能强化系统的硝化和反硝化能力。结合上述试验结果与能耗分析,选取较佳混合液回流比为 300%~400%。

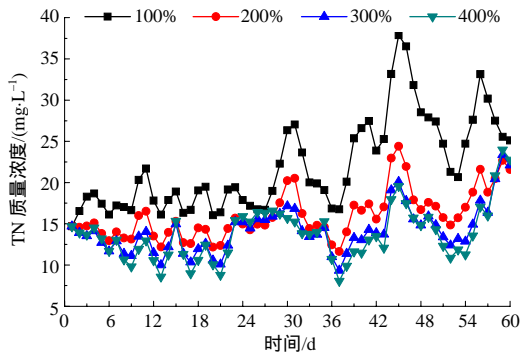


图 2 不同混合液回流比条件下 60 d 内出水的 TN 含量
Fig. 2 Different internal return ratios on contents of TN in 60 d

适宜污泥回流比的选取。由于污泥回流含有硝化反应结束的硝酸盐,回流比越大,被反硝化去除的硝酸盐的量也越多,厌氧区和缺氧区的反硝化过程被强化。由图 3 可知,当污泥回流比由 60% 提升至 120% 时,出水 TN 含量平均值由 14.83 mg/L 降低至 12.93 mg/L。磷是通过排放剩余污泥来去除的,生物除磷时需要较短的污泥龄,并且污泥回流比过高会增大曝气费用和二沉池的负荷,污泥回流比不宜取得过大,因此,选取较佳污泥回流比为 100%。

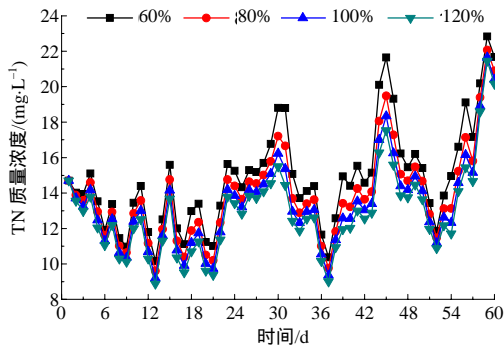


图 3 不同污泥回流比条件下 60 d 内出水的 TN 含量
Fig.3 Different sludge return ratios on contents of TN in 60 d

好氧段溶解氧浓度的选取。溶解氧是 A²O 工艺中脱氮的重要影响因素。由图 4 可知,DO 质量浓度由 1 mg/L 上升到 3 mg/L 时,出水 TN 质量浓度平均值由 17.00 mg/L 下降到 14.38 mg/L,再将 DO 升至 4 mg/L, TN 质量浓度反而上升,且出水中 NO₃⁻-N 含量上升。其原因是当好氧段 DO 质量浓

度上升时,混合液回流中 DO 被携带至缺氧段,破坏了缺氧段的反应环境,影响了反硝化效果。在保证脱氮效果的前提下,考虑到运行能耗,将好氧段溶解氧质量浓度控制在 3 mg/L 为宜。

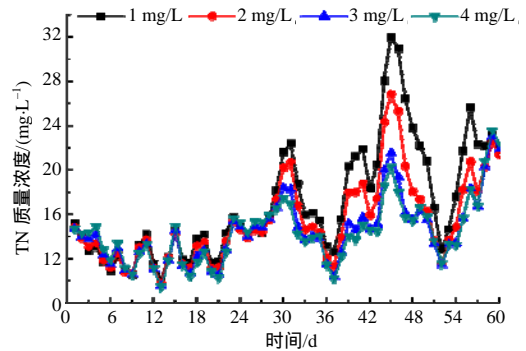


图 4 不同好氧段溶解氧条件下 60 d 内出水的 TN 含量
Fig.4 Different concentration of dissolved oxygen in aerobic tank

3.4 多因素正交模拟试验结果

由表 2 可知,试验 9 条件下平均出水 TN 质量浓度模拟值最低为 10.75 mg/L。由试验极差可知,3 个因子对出水 TN 含量的影响从大到小依次为 B(污泥回流比(%))、A(混合液回流比(%))、C(好氧段溶解氧质量分数(mg/L)),A²O 工艺强化脱氮较佳工况为 B₃A₃C₂(混合液回流比 400%,污泥回流比 100%,好氧段溶解氧质量浓度为 3 mg/L)。

表 2 多因素正交模拟试验结果

Table 2 Result of orthogonal experiment with multi-factor				
试验号	A	B	C	TN 质量浓度/(mg·L ⁻¹)
1	200	60	2	17.92
2	200	80	4	15.08
3	200	100	3	11.08
4	300	60	3	14.43
5	300	80	2	13.78
6	300	100	4	11.74
7	400	60	4	14.26
8	400	80	3	13.41
9	400	100	2	10.75
K _{1j}	44.08	46.61	42.45	
K _{2j}	39.95	42.27	38.92	
K _{3j}	38.42	33.57	41.08	
极差 R	5.66	13.04	3.53	

4 结论与讨论

本试验结果表明,基于 ASM2d 搭建的推流式 A²O 工艺数学模型能准确模拟污水处理厂的实际运

行。基于所建立的模型进行模拟试验,得出的优化运行方案对污水处理厂的实际运行具有较好的指导作用。

混入垃圾渗滤液后 TN 含量超标时,污水处理厂提高混合液回流比和污泥回流比能有效降低出水 TN 含量。

多因素正交试验优化结果表明,当维持混合液回流比为 400%,污泥回流比为 100%,好氧段溶解氧为 3 mg/L 时,该污水处理厂可达到较佳脱氮效果。

参考文献:

- [1] 石明岩,冯兆继,余建恒,等.城市污水混合垃圾渗滤液脱氮试验研究[J].环境工程,2010,28(5):39-46.
- [2] 熊建新,王佳伟,周军,等.内外回流比对 A²O 工艺生物脱氮的影响[J].给水排水,2008,34(12):38-41.
- [3] 马艳娜,王素兰,李瑞,等.A²O 工艺强化脱氮效果中试研究[J].水处理技术,2012,38(8):80-87.
- [4] 陈东宇,周少奇,赵蓉,等.A-A²O 工艺脱氮实践运行效果及优化[J].环境工程学报,2012,6(4):1149-1153.
- [5] Penya-Roja J M, Seco A, Ferrer J. Calibration and validation of activated sludge model No.2 d for spanish municipal wastewater[J]. Environmental Technology, 2002, 23(8): 849-862.
- [6] 乔勇,赵国志.垃圾渗滤液接入城市污水处理厂存在的问题探讨[J].给水排水,2006,32(2):13-16.
- [7] Ferhan Çeçen, Didem Çakıroğlu. Impact of landfill leachate on the co-treatment of domestic wastewater[J]. Biotechnology Letters, 2001, 23: 821-826.
- [8] 杨跃,张金松,刘礼祥.三沟式氧化沟工艺数学模拟的反应器构建方法[J].中国给水排水,2010,26(7):46-49.
- [9] 孙培德,宋英奇,王如意.活性污泥动力学模型及数值模拟导论[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [10] 董姗姗,姚重华.单级活性污泥过程数学模型 ASM2D 参数的灵敏度分析[J].环境化学,2005,24(2):129-133.
- [11] 王洪臣,周军,王佳伟.5F-A²O—脱氮除磷工艺的实践与探索[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [12] 李培,潘杨.A²O 工艺内回流中溶解氧对反硝化的影响[J].环境科学与技术,2011,35(1):103-106.
- [13] 邓仁健.MSBR 工艺脱氮除磷及其优化控制的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [14] 施汉昌,邱勇.污水生物处理的数学模型与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [15] Gernaey K V, Van Loosdrecht M C M, Henze M, et al. Activated sludge wastewater treatment plant modeling and simulation: State of art[J]. Environmental Modelling and Software, 2004, 19(9): 763-783.

责任编辑:王赛群
英文编辑:王 库