

文章编号: 1000-5013(2011)04-0409-05

# 应用 ASM2D 模型对曝气生物滤池 工艺的模拟和优化

李伟博<sup>1</sup>, 洪俊明<sup>1</sup>, 尹娟<sup>1</sup>, 董文艺<sup>2</sup>

(1. 华侨大学 化工学院, 福建 泉州 362021;

2. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 利用活性污泥模型 2D 号(ASM2D)建立曝气生物滤池处理工艺的计算模型,并通过灵敏度分析,对模型的动力学参数进行校正.校正后的模型对出水化学需氧量、氨氮、总氮、硝氮和总磷的模拟值与测量值基本一致.在所建模型的基础上分析甲醇投加量和回流比对出水总氮和硝氮的影响,结果发现表明,当甲醇的投加质量浓度为  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,可以满足反硝化需求,回流比最佳可控制在 110%.

**关键词:** 曝气生物滤池; 活性污泥模型 2D 号; 污水处理; 数学模拟; 优化

**中图分类号:** X 703

**文献标志码:** A

曝气生物滤池(BAF)是 20 世纪 80 年代末在欧美发展起来,在国际上较为流行的一种新型污水处理技术,是集生物吸附、物理截留过滤和生物氧化为一体的污水处理工艺.与传统的生物处理技术相比,生物滤池具有处理效果好,占用土地少,对环境影响小,造价和运行费用较低等优点<sup>[1-3]</sup>.自 1986 年国际水协(IWA)推出活性污泥模型(Activated Sludge Model,简称 ASM)系列以来,活性污泥数学模型对污水处理厂进行优化设计、系统模拟的应用已经十分普遍.活性污泥模型 2D 号(ASM2D)数学模型是 ASM2 号模型的发展,增加了两个过程来描述聚磷菌(PAO)利用胞内有机贮存物进行反硝化<sup>[4]</sup>.它包含 19 个组分,21 个反应过程,45 个动力学参数,用于描述活性污泥系统的碳氧化、硝化、反硝化、生物除磷和化学除磷等生化反应过程.在模拟硝酸盐和聚磷酸盐动力学方面,ASM2D 比 ASM2 更精确、完整,被看作是进一步研究和发生活性污泥系统脱氮除磷过程动力学的平台.目前污水处理工艺的动力学模拟主要是以活性污泥法为主,针对曝气生物滤池(BAF)工艺的动力学模拟还鲜有报道.本文以 ASM2D 模型为基础,对某污水处理厂曝气生物滤池二级处理工艺进行了动力学模拟和参数修正.

## 1 曝气生物滤池工艺

某城市污水处理厂二级处理曝气生物滤池工艺设计日处理污水 30 万 t,采用法国 Degremont 公司的前置反硝化-硝化(DN+CN)BIOFOR 曝气生物滤池工艺,出水水质达到 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》中的一级 B 排放标准.

污水厂曝气生物滤池分两线,每条线各有 7 座反硝化(DN)滤池,14 座硝化(CN)滤池.污水经高效沉淀池一级混凝沉淀处理后,由提升泵提升,与回流水和甲醇混合后,通过配水渠进入 DN 滤池进行反硝化处理;DN 滤池出水进入 CN 滤池,并在 CN 滤池进行曝气好氧处理,以及硝化反应和碳氧化反应.一部分 CN 滤池出水回流至 DN 滤池进行脱氮,回流比约为 100%,剩余部分排放.

曝气生物滤池处理单元基本参数如表 1 所示.表 1 中: $V$  为体积; $A$  为面积; $h$  水深; $d$  为滤料粒径;

**收稿日期:** 2010-11-06

**通信作者:** 洪俊明(1974-),男,副教授,主要从事水污染控制工程及清洁生产的研究. E-mail:jmhong@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家“十一五”水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07317-02);福建省厦门市科技计划项目(3502Z20093028)

$\varphi$  为滤料体积分数; $S_A$  为滤料比表面积.

表 1 曝气生物滤池处理单元基本参数  
Tab. 1 Fundamental parameters of processing units of the BAF

项目	$V/\text{m}^3$	$A/\text{m}^2$	$h/\text{m}$	$d/\text{mm}$	$\varphi/\%$	$S_A/\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$
DN 滤池	406	80	4.3	3.5	65	1 000
CN 滤池	501	80	4.6	2.7	65	1 000

## 2 模型的建立与参数确定

模拟过程首先进行 4 点假设:(1) 由于模拟过程在冬季条件下进行,忽略溶解氧(DO)和温度动态变化;(2) 进水水质组分为测定的平均值,在模拟过程中视为恒定;(3) 由于模型中的生物膜反应器不具备滤池的过滤功能,增加设置理想沉淀池进行固液分离;(4) 生物滤池视为全混流反应器.图 1 为污水处理厂工艺模拟流程.

根据 ASM2D 模型,建立反应器的物料平衡计算式为

$$\frac{d\rho_i}{dt}V = Q(\rho_{i,\text{in}} - \rho_i) + Vv_i.$$

(1)

式(1)中: $V$  为反应器体积; $Q$  为污水进入反应器的流量; $\rho_{i,\text{in}}$  为进水组分  $i$  的质量浓度; $\rho_i$  为反应器中组分  $i$  的平均质量浓度; $v_i$  是组分  $i$  由 ASM2D 模型计算的总过程速率.

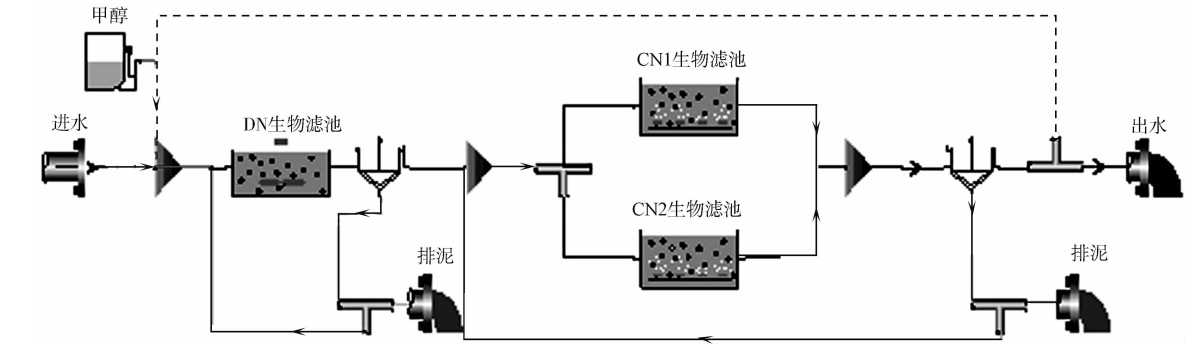


图 1 污水处理厂工艺模拟流程

Fig. 1 Simulation process of wastewater treatment plant

在模型应用时,除了对有机物作必要的试验区分外<sup>[5]</sup>,在 2009 年 11—12 月和 2010 年 1 月(冬季),测定进水的水质参数,作为 ASM2D 模型的进水水质参数.根据国际水协(IWA)1995 年发展的 ASM2 模型划分,COD 组分包括溶解性 COD 组分(SCOD)与颗粒性 COD 组分(XCOD),而溶解性 COD 组分包括快速生物降解 COD 组分( $S_A + S_F$ )和溶解性惰性 COD 组分( $S_I$ ),颗粒性 COD 组分包括慢速生物降解 COD 组分( $X_s$ )和颗粒性惰性 COD 组分( $X_I$ ).其中: $S$  表示溶解性组分; $X$  表示颗粒性组分;下标  $S, I, A, F$  分别表示溶解性、惰性、发酵产物和可发酵的易生物降解有机物.

污水厂反硝化-硝化(DN+CN)工艺进水水质情况,如表 2 所示.表 2 中: $\rho_{\text{exp}}$  为组分质量浓度实测值, $\epsilon$  为单组分占总组分的比例.

表 2 反硝化-硝化工艺进水的的水质参数

Tab. 2 Influent quality of the process of DN+CN

组分	$\rho_{\text{exp}}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\epsilon/\%$
溶解性 COD	67~102	60
颗粒性 COD	41~76	40
快速生物降解 COD	24~38	25
溶解性惰性 COD	17~34	18
慢速生物降解 COD	55~74	41
颗粒性惰性 COD	16~35	17
总凯氏氮	33~45	—
氨氮	32~43	93
总磷	1.81~3.52	—
$\text{PO}_4^{3-}$	0.49~1.68	45

## 3 模型的校准和验证

### 3.1 灵敏度分析

虽然 IWA 给出了 ASM2D 参数的默认值,但是在实际污水处理工艺应用中仍有许多参数需要重新校核<sup>[6]</sup>.在动力学模型的应用过程中,需要调整模型的各种参数,使预测结果和实际测量数据相符.采用

对模型参数灵敏度分析的方法对所建立的模型进行校正.

在对污水厂实际流程进行模拟的基础上,进行灵敏度分析<sup>[7]</sup>. 对出水总氮、硝氮、氨氮的影响较大的动力学参数有硝化菌的最大生长速率 $\mu_{\text{AUT}}$ ,硝化菌的衰减速率 $b_{\text{AUT}}$ ,氨氮饱和系数 $K_{\text{NH}_3\text{-N}}$ ,颗粒基质 $X_s$ 的水解速率常数 $K_h$ ,缺氧水解速率降低修正因子 $\eta_{\text{NO}_3}$ ,溶菌和衰减的速率常数 $b_H$ . 对灵敏度分析影响较大的动力学参数,如表 3 所示.

表 3 灵敏度较高的动力学参数  
Tab. 3 High-sensitive dynamic parameters

参数	$\mu_{\text{AUT}}$	$b_{\text{AUT}}$	$K_{\text{NH}_3\text{-N}}$	$K_h$	$\eta_{\text{NO}_3}$	$b_H$
总氮	—	—	—	-0.21	-0.20	0.21
硝氮	0.03	—	0.02	-0.25	-0.24	0.25
氨氮	-0.60	0.38	0.48	—	—	—

3.2 参数校正与模拟分析比较

曝气生物滤池工艺的进、出水水质中,COD 组分、氨氮组分、硝氮组分、总氮组分和总磷组分质量浓度( $\rho$ )的实测值与模拟值对比,如图 2 所示. 图 2 中:左、右纵坐标分别为出水、进水质量浓度.

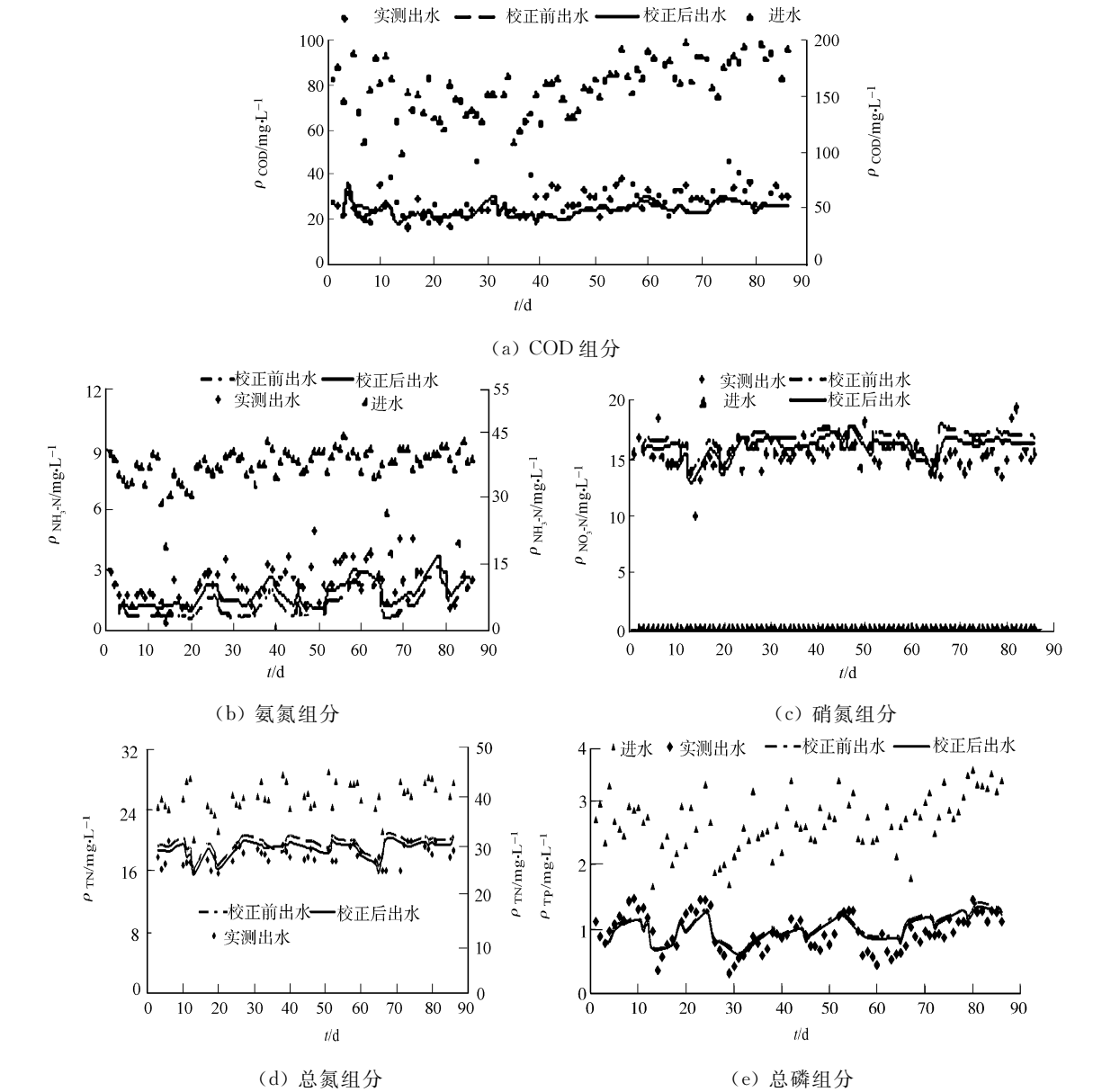


图 2 曝气生物滤池工艺的各组分质量浓度实测值与模拟值

Fig. 2 Analog and experiment value of all constituents in the BAF

从图 2(a)可以看出,采用 ASM2D 动力学模型能够较好地模拟曝气生物滤池工艺的 COD 降解,模拟出水的 COD 能够反映曝气生物滤池工艺的出水,与实测 COD 值较为接近. 因此,采用 ASM2D 模型对 COD 组分模拟不需要进行动力学参数和组分的调整. 校正其他水质指标的动力学参数后,模拟出水 COD 浓度与实际检测值也吻合较好.

从图 2(b)可以看出,曝气生物滤池对氨氮有很好的去除效果,模拟出水氨氮质量浓度和实测质量浓度都在  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下. ASM2D 模型对氨氮的模拟也能基本反映氨氮的降解趋势,但是模拟结果整体比实测值要偏低  $1.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

究其原因,可能是在曝气生物滤池工艺中,滤料表面的生物膜需要经过一定的传质过程才能与氨氮进行硝化反应,总体反应速率低于活性污泥法. 因此,降低硝化菌的最大生长速率常数,从初始值为 1 减小到 0.7,以降低硝化菌的生长速率,增加出水氨氮质量浓度. 动力学参数校正后,模拟出水氨氮质量浓度比未校正模拟出水氨氮质量浓度增加  $0.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,氨氮模拟结果的变化趋势与实测吻合较好.

从图 2(c),(d)可以看出,在未进行参数校正前,采用 ASM2D 模型模拟的结果总体趋势与实测结果基本相符,但是模拟的出水总氮质量浓度比实测浓度略高,平均偏高  $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;而模拟的硝氮质量浓度比实测结果偏高了  $1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 对模型的动力学参数校正后,模拟出水总氮质量浓度比校正前降低  $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,模拟出水硝氮质量浓度比校正前降低  $0.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 因此参数校正后,模拟总氮和硝酸盐氮的质量浓度变化趋势与实际吻合,校正后的模型能够很好的模拟曝气生物滤池对总氮和硝酸盐氮的质量浓度变化情况.

这是由于经混凝沉淀的一级处理后,再进入曝气生物滤池系统,污水水质组分中颗粒性易生物降解 COD 比活性污泥法进水要低,故增大颗粒基质  $X_s$  的水解速率常数  $K_h$ ,初始值由 3 增大到 4,使得颗粒性 COD 水解过程有更多易生物降解 COD 支持反硝化过程;曝气生物滤池中的微生物停留时间长,减小溶菌和衰减的速率常数  $b_H$ ,初始值为 0.4,减小到 0.3,提高微生物在滤池中的停留时间,减小出水总氮硝氮浓度.

从图 2(e)可以看出,ASM2D 模型模拟出水总磷能够较好地反应出实测总磷的变化趋势,与实际出水总磷吻合较好. 因此,不需要校正总磷的相关参数. 校正其他水质指标的动力学参数后,模型总磷模拟值与实际检测值也吻合较好.

校正动力学参数后的模型模拟值与实际检测值的吻合较好,所建模型对污水厂生物滤池实际运行预测有一定指导意义.

## 4 数学模型的工艺优化

基于 ASM2D 动力学模型,在不同的甲醇投加量和回流比的运行条件下,模拟流程的处理效果.

### 4.1 投加甲醇的影响

甲醇属于快速易生物降解 COD<sup>[4]</sup>,作为 DN 反硝化滤池的微生物可快速利用的碳源. 以污水厂月平均数据为入流数据,在原有甲醇投加量为  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的基础上改变甲醇投加量  $\rho$ (甲醇),考察甲醇投加量对脱氮效果的影响,如图 3 所示. 从图 3 可以看出,减少甲醇投加量对总氮的去除有一定影响,出水总氮质量浓度增大  $0.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右;而增大甲醇投加量对出水水质几乎没有影响. 由此可见,目前的甲醇投加量是足够的,投加的甲醇量满足 DN 滤池反硝化对碳的需求. 如果该曝气生物滤池工艺需要进一步脱氮,需要采取增加回流等其他措施.

### 4.2 回流比的影响

CN 池出水回流使好氧硝化产生的硝氮回流至 DN 池进行反硝脱氮. 改变回流比并模拟污水厂的运行,考察回流比( $\gamma$ )对污水脱氮效果的影响,结果如图 4 所示. 从图 4 可以看出,减小回流比,出水总氮和硝氮浓度增大;而增大回流比,曝气生物滤池工艺的出水总氮、硝氮变小.

这说明由于 DN 滤池中有足够的碳源支持异养菌在缺氧条件下的反硝化过程,影响脱氮的主要因素为回流比. 加大 CN 滤池出水回流(即增大 DN 滤池中硝氮总量),可以提高曝气生物滤池系统对总氮的去除. 在运行过程中,可以适当增大 CN 池的回流比,使 DN 滤池中有足够的硝氮被反硝化,提高脱

氮的效果. 建议回流比在此原回流比基础上上增大 10%, 则出水总氮可减少  $1.2\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

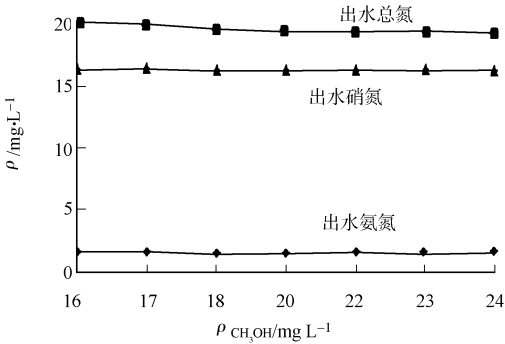


图 3 甲醇投加量对出水氮的影响  
Fig. 3 Effect of methanol dosage on the effluent nitrogen

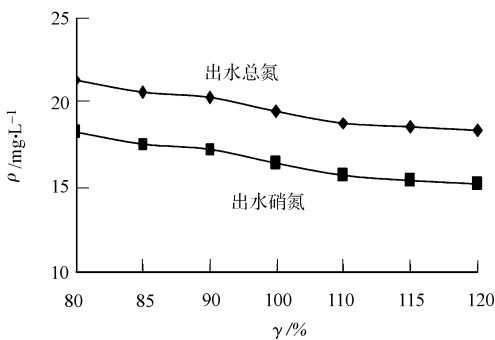


图 4 回流比对出水硝氮和总氮的影响  
Fig. 4 Effect of reflux ratio on the effluent nitrate and total nitrogen

5 结束语

以 ASM2D 模型为基础对曝气生物滤池工艺进行了模拟. 通过灵敏度分析, 校正了模型的动力学参数, 使得出水 COD、氨氮、总氮、硝氮和总磷的模拟值和测量值基本一致. 在污水处理方面, 数学模型作为一项新兴而强有力的工具, 将对工艺的设计和 optimization 控制运行发挥更大的作用, 这将成为一种趋势.

参考文献:

[1] 张文艺, 翟建平, 郑俊, 等. 曝气生物滤池污水处理工艺与设计[J]. 环境工程, 2006, 24(1): 9-10.  
[2] 王舜和, 郭淑琴. 不同功能曝气生物滤池的设计要[J]. 给水排水, 2008, 34(11): 47-49.  
[3] 桑军强, 王占生. BAF 在微污染源水生物预处理中的应用[J]. 中国给水排水, 2003, 19(2): 21-22.  
[4] 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.  
[5] 郝晓地, 宋虹苇, 胡胜胜, 等. 数学模拟技术应用中的污水水质(COD)特征化方法[J]. 中国给水排水, 2007, 23(13): 7-10.  
[6] 朱向东, 郝二成, 甘一萍, 等. ASM2D 模型在北京高碑店污水处理厂的应用[J]. 给水排水, 2007, 33(4): 101-104.  
[7] 张代钧, 陈丹琴, 浏颖. 传统活性污泥对 COD 去除及脱氮改造的模拟[J]. 环境科学学报, 2002, 2(4): 44-45.

Mathematical Modeling and Optimization of Biological Aerated Filter Based on ASM2D

LI Wei-bo<sup>1</sup>, HONG Jun-ming<sup>1</sup>, YIN Juan<sup>1</sup>, DONG Wen-yi<sup>2</sup>

(1. College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;  
2. Shenzhen Graduate School, Haerbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** Biological aerated filter (BAF) was one of the mainstream processes of the municipal wastewater treatment. In this paper, the mathematical model of BAF based on activated sludge model 2D (ASM2D) was built, and the dynamic parameters of the model were calibrated by the sensitivity analysis. The simulation results showed that the model values of chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen, total nitrogen and total phosphorus were approximately to the experiment values. The effect of methanol dosage and reflux ratio on the nitrate and total nitrogen in effluent were discussed based on the mathematical model. The denitrification process was optimized when the dosing quantity of methanol was  $20\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , the reflux ratio was 110%.

**Keywords:** biological aerated filter; activated sludge model 2D; wastewater treatment; mathematical modeling; optimization