

文章编号: 1002-0411(2004)06-0709-05

# 活性污泥法污水处理过程的建模与仿真技术的研究

余 颖, 乔俊飞

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100022)

**摘要:** 综述了活性污泥法污水处理过程的建模及仿真技术的发展. 在分析活性污泥法污水处理过程现状的基础上, 阐述了传统数学模型、智能模型以及混合模型的建模方法, 并介绍了目前活性污泥系统仿真技术的发展现状.\*

**关键词:** 活性污泥法; 建模; 数学模型; 神经网络模型; 混合模型; 仿真软件

中图分类号: TP273

文献标识码: A

## Modeling and Simulation Technology of Activated Sludge Method on Wastewater Treatment Process

YU Ying, QIAO Jun-fei

(School of Electronic Information & Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract:** This paper summarizes the development of modeling and simulation technology of activated sludge method on wastewater treatment process. On the basis of analyzing the actuality of the activated sludge method, this paper describes the modeling methods of traditional mathematic model, intelligent model and hybrid model, and introduces the current development of simulation technology of the activated sludge system.

**Keywords:** activated sludge method; modeling; mathematic model; neural network model; hybrid model; simulation software

### 1 引言 (Introduction)

活性污泥法是利用人工培养的微生物群体去分解氧化污水中可生物降解的有机物, 通过生物化学反应, 改变这些有机物的性质, 将其从污水中分离出来, 使污水得到净化的方法. 所谓活性污泥, 是微生物群体及它们所吸附的有机物质和无机物质的总称. 活性污泥法是目前世界上广泛应用的一种二级污水处理方法. 其工艺流程见图 1. 活性污泥法污水处理要经过曝气池和二沉池. 原生污水经过预处理和一级处理后, 由初沉池出水进入曝气池, 在活性污泥的作用下, 进行好氧和厌氧生物降解, 将污水中的溶解和胶体状态的有机物 ( $BOD_5$ ) 最终分解为二氧化碳 ( $CO_2$ ) 和水 ( $H_2O$ ). 曝气池的混合出水进入二沉池进行固液分离, 上部澄清水排入受纳水体. 活性污泥法将产生大量的污泥, 除回流的活性污泥外, 剩余污泥和初沉池的污泥混合后, 进行消化、脱水等污泥处理过程.

活性污泥法污水处理过程是一个强耦合的多输入多输出动态系统, 具有高度非线性、时变、不确定性和时滞等特点, 过程建模相当困难. 国外学者在 20 世纪 60 年代开始污水处理过程建模的研究, 80 年代后期随着 ASM (Activated Sludge Method, 活性污泥法) 数学模型的出现, 进入污水处理过程建模研究的高峰, 美、英和南非等国的研究走在世界前列. 国内在污水处理模型的研究方面起步晚, 应用相当滞后, 相关的研究报道少. 本文综述了传统数学模型、智能模型以及混合模型建模方法的特点, 并进一步介绍了活性污泥法污水处理过程仿真软件的开发现状.

### 2 活性污泥法建模 (Modeling of activated sludge method)

建模是对所研究的工业过程对象有关属性的模拟, 所建立的模型应当具有被描述过程的主要性质和特征. 建模的目的, 一是离线优化操作规律 (曲

\* 收稿日期: 2004-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60304012); 北京市科技新星计划资助项目 (H020821210120)

线);二是在线优化控制.

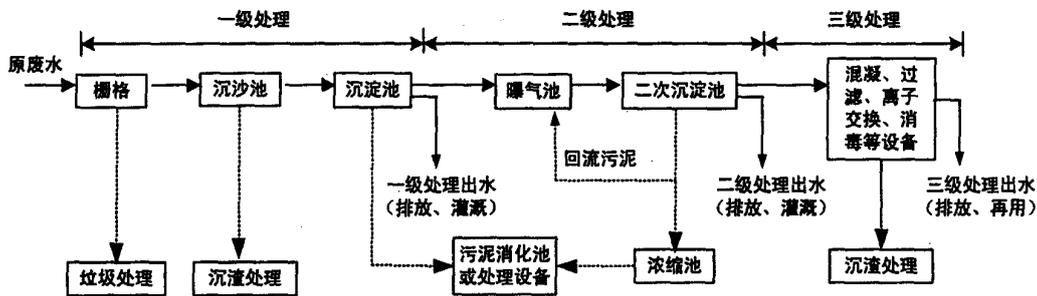


图1 污水处理过程

Fig.1 Wastewater treatment process

污水处理过程建模对控制系统尤其是基于模型的控制系统的的设计具有非常重要的作用.活性污泥法污水处理过程是极其复杂的、动态的过程,其过程建模非常困难.活性污泥系统包括曝气池和二沉池两部分.建立曝气池模型和二沉池模型是活性污泥系统建模的关键.曝气池模型描述其中的各种生物化学过程,如有机物降解、微生物增长等;二沉池模型描述沉淀池中的固液分离过程,两者通过有效的途径结合起来组成完整的活性污泥模型系统.

## 2.1 数学模型

传统的活性污泥法污水处理过程模型是模拟各类微生物、有机养料在处理过程中的主要动态行为和系统工艺特性的数学模型,它有助于新建污水处理过程系统的设计和优化运行,也有助于分析生化处理过程机理或功能.活性污泥法于1913年在英国试验成功至今近百年历史.随着活性污泥处理工艺的深入和完善,人们对活性污泥法及污水处理过程的认识由宏观到微观、由表及里,不断深化.活性污泥系统的数学模型逐渐由简化的半理论半经验模型发展为较完整实用的数学模型.

### 2.1.1 曝气池模型

1942年 Monod<sup>[1]</sup>提出莫诺特(Monod)方程式,指出微生物的生长速率与微生物浓度及某些限制性底物浓度的关系.国外学者开始以 Monod 方程式为基础,提出各种简化的数学模型.其中最具有代表性是 Eckenfelder<sup>[2]</sup>、Mckinney<sup>[3]</sup>以及 Lawrence-McCarty<sup>[4]</sup>在60年代开发的活性污泥法模型. McKinney 较 Eckenfelder 模型缺少微生物浓度因素, Lawrence-McCarty 模型突出泥龄参数,认为系统出水水质与泥龄有关,因此较其它模型更具实用价值.简化模型的计算过程和参数求解相对简单,得出的稳态结果基本满足处理要求,因此曾在污水处理系统中广泛采用.然而伴

随水体富营养化现象的加剧,活性污泥法增加了出水脱氮除磷工艺,简化模型只涉及含碳有机物的去除及仅有静态模拟的缺陷使其应用范围越来越受到限制.

70年代中后期,国外学者开发出活性污泥动态模型,南非的 Marais<sup>[5]</sup>提出除碳、氮、磷的动态活性污泥数学模型,但由于结构非常复杂而使其应用受到限制.在 Marais 等人研究的基础上,国际水质协会(IAWQ)于1987年推出的活性污泥1号模型 ASM1<sup>[6]</sup>(Activated Sludge Model NO.1),是活性污泥模型发展的里程碑,它包括了碳化、硝化和反硝化过程.模型包含了溶解氧、硝态氧、氨氮及异氧生物和自养生物等13种组分;生化反应过程包括了异氧菌、好氧菌的好氧生长及衰减等8个过程;包含异氧菌、自氧菌生长和衰减过程及污泥中化学需氧量(COD)水解过程的14个动力学参数和5个化学计量参数. ASM1 模型最主要的特征是采用矩阵的形式来描述活性污泥系统中各组分的变化规律和相互关系,并在矩阵反应速率中使用“开关函数”的概念,以反映环境因素改变而产生的抑制作用,避免那些具有开关型不连续特征的反应过程表达式在模拟过程中出现数值不稳定现象. ASM1 推出后,在欧美得到广泛使用,成为模拟活性污泥系统的强有力的工具. ASM1 主要缺陷是未包含污水中磷的去除.

IAWQ于1995年推出活性污泥2号模型 ASM2<sup>[7]</sup>,它在 ASM1 的基础上引入生物除磷和化学除磷过程,还增加了厌氧水解、醇解及与聚磷菌有关的4个反应过程.因此 ASM2 更庞大复杂. ASM2 的19个组分中引入发酵过程;包含19个反应过程和22个化学计量系数及42个动力学参数.1999年, IAWQ 又相继推出 ASM2d<sup>[8]</sup>、ASM3<sup>[9]</sup>模型. ASM2d 是对 ASM2 的发展,增加了两个过程模拟聚磷菌利用

细胞内有机产物的反硝化过程。ASM<sub>B</sub> 的侧重点由水解转为有机物在微生物体内的储藏,以强调细胞内部的活动过程。该模型所涉及的主要反应过程与 ASM<sub>1</sub> 相同,没有包括生物除磷。ASM<sub>B</sub> 的准确性和实用性尚需大量的实验进行验证。

ASM 模型虽然存在一定的缺点,如进水水质的分析和测定以及模型中随环境变化的参数的校正是繁琐的过程,但它们仍是活性污泥法数学模型的重大突破,为活性污泥法数学模型的深入研究建立了平台。许多学者在研究和应用 ASM 的基础上推出一些修正模型和简化模型,已经在处理过程的监测和控制中取得成功经验。

近年来,国内学者开始以 ASM 模型为基础,针对污水处理过程的建模做较深入的探讨。季民等<sup>[10]</sup>在总结 ASM 模型的基础上进行适当简化,建立适合普通活性污泥法的碳氧化数学模型。模型包含 8 个组分和 3 个生化过程。杨青等<sup>[11]</sup>以 ASM<sub>1</sub> 模型为基础,通过合理假设,建立动力学模型,对碳化、硝化、反硝化过程进行动态模拟。黄勇等<sup>[12]</sup>建立结构化生物反应动力学模型,文中采用概念模型图示和矩阵表达法表述模型中的定性定量信息。陈晓龙等<sup>[13]</sup>对 ASM<sub>2</sub> 模型进行参数校正,模型预测精度提高。

### 2.1.2 二沉池模型

二沉池的特性模型至今可以根据流量理论建模居多。有关二沉池中净化和加厚的固液分离过程有不少文献介绍<sup>[14]</sup>。二沉池固液分离建模时,通常是先将二沉池分为几层(层数越多越接近于真实值),并假定各层内浓度相同,而各层间的浓度变化根据该层进口的流通量等于出口流通量计算得到。这样的沉淀池的动态模型为一维模型。二沉池中除一维模型以外,还出现了二维模型,即水力学建模。与一维模型相比,二维模型主要是对内部的流场及沉降过程进行分析。Diefel<sup>[15]</sup>等提出的一维二沉池模型可以预测二沉池内和出口的所有可溶性和颗粒性的生物组成的浓度。Olsson<sup>[16]</sup>等将二沉池的进水流量与出水悬浮物(SS)浓度的关系近似为一维模型,并根据实际数据采用系统辨识模型参数,从而得到二沉池模型。Chatellier<sup>[17]</sup>等提出通过每层的对流量和沉淀量保持常量的假设,得出一个新的沉淀速度表达式,模拟数据与实验结果吻合。黄勇等<sup>[18]</sup>以固体通量理论为基础,通过介质连续性偏微分方程离散化建立二次沉淀池浓缩过程模型。模型描述污泥的浓缩和贮存过程,可用于模拟二沉池中的污泥沿池深方向的分布和底流污泥浓度随运行条件的动态变化。

数学模型在活性污泥法污水处理过程的研究中具有重要地位。它是污水处理系统设计和运行控制研究中不可缺少的手段,其应用前景仍很广阔。

### 2.2 智能模型

近年来,对以人工神经网络为代表的智能过程建模及其控制系统的研究成为一大热点。这是因为智能建模方法具有很强的学习能力或者说是自适应能力;其本身是非线性的,可以通过学习达到所要求的非线性形状来模拟对象模型,并且适合多输入多输出系统。智能建模方法与经典数学建模方法相比并不优越,只有当常规方法解决不了或效果不佳时,智能建模方法才能显示出优越性。尤其对问题的机理不甚了解的系统,智能建模往往是最有利的工具。另一方面,智能建模方法对处理大量原始数据而不能用规则或公式描述的问题,表现出极大的灵活性和自适应性。

近年来运用智能建模方法模拟污水处理系统较引人注目。主要的建模方法有:模糊建模、模糊神经网络建模、时间延迟神经网络建模、递归神经网络建模、自适应模糊推理网络建模、神经网络建模(主要采用误差反向传播(BP)网络、径向基函数(RBF)网络,其中以 BP 网络模型应用最广)。主要的建模对象是曝气池或整个活性污泥系统。

采用智能建模方法建立污水处理过程模型方面,国外学者的研究更具有吸引力。Du 等<sup>[19]</sup>采用模糊神经网络模拟活性污泥法污水处理过程并可较准确估计污泥泥龄。Zhu 等<sup>[20]</sup>首先采用多层感知器模型减少数据维度,然后采用时间延迟神经网络改善多层感知器模型性能来在线预测出水生化需氧量(BOD)。Tay 等<sup>[21]</sup>鉴于厌氧污水处理系统的过程复杂性,利用以神经网络为基础的自适应模糊推理系统(ANFIS)作为工具模拟厌氧处理系统,研究表明,ANFIS 对厌氧处理系统的不同运行条件表现出良好的适应性。Wan 等<sup>[22]</sup>将人工神经网络(ANN)与遗传算法(GA)结合,用于污水厂出水水质预报及控制参数优化,建成的模型具有自组织、自学习能力,对出水水质预报准确率达到了 70%。Chang 等<sup>[23]</sup>首先通过主元分析(PCA)减少数据维度,然后采用模糊 C 聚类从数据中抽取系统固有特征,最后采用 TSK 型模糊推理系统预测出水 COD。Chen 等<sup>[24]</sup>采用递归神经网络预测硝化反应的程度。此外,采用 BP 神经网络建模方法建立活性污泥法污水处理系统模型报道最为常见<sup>[25~27]</sup>。

国内学者虽展开一些开创性研究却仍处于起步

阶段,建立的模型大多采用 BP 神经网络的方法.郭劲松等<sup>[28]</sup>建立了间歇曝气活性污泥系统 BP 神经网络水质模型,直接以现场历史数据为学习样本,出水水质指标预测平均误差小于 7.5%.田禹等<sup>[29]</sup>研究了基于 BP 神经网络的臭氧生物活性碳系统建模,并考察了神经网络对水处理系统建模的适应性,探讨了臭氧生物活性碳系统中各影响因素之间的关系.王维斌等<sup>[30]</sup>通过 BP 神经网络和 RBF 神经网络分别建立活性污泥法污水处理系统并进行模型比较.唐光前等<sup>[31]</sup>建立三层递归神经网络模型对焦化废水水质进行了准确预测.

### 2.3 混合建模

将传统数学模型与神经网络模型的优势结合,建立过程混合模型是活性污泥系统建模的新思路. Cote 等<sup>[32]</sup>将神经网络建模技术与数学模型结合建立污水处理过程模型.该模型首先采用 Lessard 等建立的数学模型对过程初步建模,随后利用 BP 神经网络预测数学模型仿真结果与实验测试结果间的误差来改善模型预测输出,两种模型求和作为混合模型的实际输出实时估计 SS 浓度、COD 浓度、出水氨氮浓度以及混合液溶解氧浓度. Zhao 等<sup>[33]</sup>分别采用 ASM2 模型、SPM 简化模型、SPM 简化模型和神经网络结合的混合模型对序批式活性污泥系统(SBR)进行建模和比较,结果表明:①针对 SBR 系统,ASM2 模型比 SPM 简化模型能更准确地进行机理描述,但 ASM2 模型需不断校正;②混合模型耐用性强并通过神经网络改善预测结果;③ASM2 模型的过程模拟性好,而混合模型更适合过程的在线预测和控制.其混合模型结构见图 2.

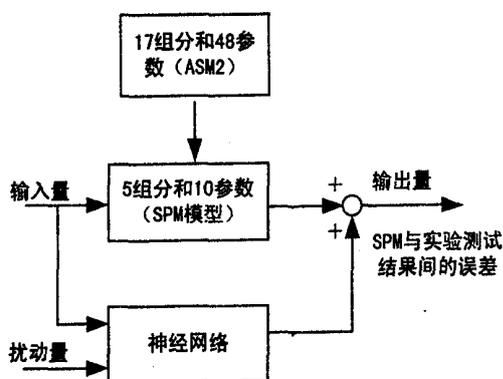


图 2 SPM 和神经网络合成混合模型

Fig. 2 Hybrid model incorporating SPM and neural network

## 3 仿真技术 (Simulation technology)

污水处理过程作为复杂的连续、时变、非线性、

大滞后工业控制过程,微生物在污水环境下的生存规律及所依赖的条件还远没有被完全认识,现场实验不仅时间长而且成本很高.基于模型的计算机仿真软件既可用于开发新工艺、探讨新运行策略的可行性,又能节省人力财力,提高科研效率和过程控制效果,因此仿真软件对污水处理系统格外重要.

污水处理过程的仿真可分为两种类型:一是对某一环节或某一控制策略的实施进行仿真,此类相关的仿真程序在文献中较为常见;二是对污水处理整个过程进行仿真,此类仿真能对不同状态下系统出水的效果进行分析、辨识,还可以添加控制模块对系统控制效果进行模拟.国外学者已提出不少功能强大的污水处理过程仿真软件,并已经成功用于实践.国内在仿真领域的开发仍相当滞后.本文介绍几种较有代表性的仿真软件.

### 3.1 SSSP 程序

SSSP 程序<sup>[34]</sup>由美国 Clemson 大学 1988 年根据 ASM1 模型开发成功,可对污水处理过程进行稳态模拟和动态模拟.SSSP 程序即使对计算机不很熟悉的人也能使用,因此 ASM1 模型的实用价值大为提高.SSSP 程序在国外已得到广泛应用.汪慧贞等<sup>[35]</sup>收集北京高碑店污水厂、北小河污水厂及上海曲阳污水厂的运行数据,用 SSSP 程序对其进行稳态模拟.模拟结果与实际基本吻合.

### 3.2 GPS-X 软件

GPS-X<sup>[36]</sup>是加拿大 Hydromanics 公司 1991 年开发的强大的污水处理仿真软件.它可以通过组态选择不同形式的进水、曝气池和二沉池;此外组态过程中可添加控制环节并选择控制方案.使用者可以输入实际测试数据,仿真软件输出其与仿真结果的比较曲线.

### 3.3 EFOR 软件

EFOR<sup>[37]</sup>是由丹麦 DHI 水动力研究所 1998 年基于 ASM1 模型和 ASM2 模型开发的仿真软件.程序能模拟 ASM1 模型中的碳氧化、硝化与反硝化过程和 ASM2 模型的生化除磷过程.目前最新版是 2002 年推出的 EFOR2002 版本.EFOR 程序本身为相关的水质特性和动力学参数的修正留有余地,因而通过不同具体条件下的适当修正可以适用于不同条件.陈立采用 EFOR 程序对某城市污水处理厂工艺设计进行动态模拟.结果表明,该模型作为开展污水处理新技术开发、设计的通用平台,具有实用价值,适合我国国情.

此外,德国的 SIMBA、英国的 STOAT、比利时的

WEST、瑞士的 ASIM 等仿真软件<sup>[38]</sup>均已商业化,广泛应用于城市污水处理厂的设计、改造和运行管理。目前国内自行开发的仿真软件应用于城市污水处理厂的报道较少,均是在 ASM 模型基础上采用不同的程序语言(例如 Matlab<sup>[39]</sup>, LabVIEW<sup>[40]</sup>等)针对某些过程的仿真,尚无通用仿真软件。

#### 4 结论 (Conclusion)

本文综述了活性污泥法污水处理过程的建模及仿真技术的发展现状。首先系统阐述传统数学模型、智能模型以及混合模型的建模方法的发展。传统数学模型通过数学知识对活性污泥系统的机理进行建模,在活性污泥法污水处理过程的研究中具有重要地位和广阔前景;智能建模研究因其强大的逼近能力和自适应特点成为近年来污水处理过程建模的热点;将传统数学模型与神经网络模型的优势结合的混合模型为活性污泥系统建模研究提供了新思路。随后介绍了目前具有代表性的活性污泥系统仿真软件。

#### 参 考 文 献 (References)

- [1] Monod J. The growth of bacterial cultures [J]. Annual Review of Microbiology, 1949, 3(3): 371 ~ 377.
- [2] Eckenfelder W W, Connor D. Biological Waste Treatment [M]. New York: Pergamon Press, 1961.
- [3] McKinney R E, San J. Mathematics of complete mixing activated sludge [J]. Engineering Division, ASCE, 1962, 88(3): 87 ~ 113.
- [4] Lawrence A W, McCarty P L. A unified basis for biological treatment design and operation [J]. Journal of Sanitary Engineering Division, ASCE, 1970, 96(3): 733 ~ 757.
- [5] Marais G R, Ekama G A. The activated sludge process: part II - dynamic behaviour [J]. Water Science Abstracts, 1977, 1(1): 18 ~ 50.
- [6] Henze M, Grady C P, Gujer W, et al. Activated sludge model No.1 [R]. London, England: International Association on Water Pollution Research and Control (IAWPRC), 1986.
- [7] Henze M, Gujer W, Mino T, et al. Activated Sludge Model No.2 [R]. London, England: International Association on Water Pollution Research and Control (IAWPRC), 1995.
- [8] Henze M, Gujer W, Mino T, et al. Activated sludge model No.2d (ASM2d) [J]. Water Science Technology, 1999, 39(1): 165 ~ 182.
- [9] Henze M, Gujer W, Mino T, et al. Activated sludge model No.3 [J]. Water Science Technology, 1999, 39(1): 183 ~ 193.
- [10] 季 民, 霍金胜, 马文杰, 等. 活性污泥法数学模型的研究与应用 [J]. 中国给水排水, 2001, 17(8): 18 ~ 22.
- [11] 杨 青, 刘遂庆, 甘树应. 城市污水处理厂动态模拟研究 [J]. 上海环境科学, 2001, 21(5): 278 ~ 281.
- [12] 黄 勇, 杨铨大, 王宝贞. 活性污泥生物反应动力学模型研究 [J]. 环境科学研究, 1995, 8(4): 23 ~ 28.
- [13] 陈晓龙, 杨海真, 顾国维. 活性污泥 2 号模型的应用与校正 [J]. 工业用水与废水, 2003, 34(1): 1 ~ 4.
- [14] 杜树新. 污水生化处理过程建模与控制 [J]. 控制理论与应用, 2002, 19(5): 660 ~ 666.
- [15] Diefel S, Ulf J. A model of settler coupled to the biological reactor [J]. Water Research, 1998, 32(2): 331 ~ 342.
- [16] Olsson G, Chapman D. Modeling the dynamic of clarifier behaviour in activated sludge systems [A]. Proceedings of the 4th IAQPRC Workshop on Instrumentation and Control of Water and Wastewater Treatment and Transport Systems [C]. Oxford: Pergamon Press, 1985. 405 ~ 412.
- [17] Chatellier P, Audic J M. A new model for wastewater treatment plant clarifier simulation [J]. Water Research, 2000, 34(2): 690 ~ 693.
- [18] 黄勇. 二次沉淀池的动态数学模型 [J]. 苏州城建环保学院学报, 1998, 11(3): 6 ~ 11.
- [19] Du Y G, Tyagi R D, Bhamidimarri R. Use of fuzzy neural-net model for rule generation of activated sludge process [J]. Process Biochemistry, 1999, 35(1): 77 ~ 83.
- [20] Zhu J B, Zurcher J, Rao M, et al. An on-line wastewater quality prediction system based on a time-delay neural network [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 1998, 11(6): 747 ~ 758.
- [21] Tay J H, Zhang X Y. A fast predicting neural fuzzy model for high-rate anaerobic wastewater treatment systems [J]. Water Research, 2000, 34(11): 2849 ~ 2860.
- [22] Wan T J. An application of artificial neuromolecular system for effluent quality prediction of wastewater treatment plant [J]. Chinese Instrument Environment Engineering, 2000, 10(3): 155 ~ 162.
- [23] Chang K Y, Lee I B. Nonlinear modeling and adaptive monitoring with fuzzy and multivariate statistical methods in biological wastewater treatment plants [J]. Journal of Biotechnology, 2003, 105(2): 35 ~ 163.
- [24] Chen J C, Chang N B. Assessing wastewater reclamation potential by neural network model [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2003, 16(2): 149 ~ 157.
- [25] Andrea G C, Harold V J, Vladimir N, et al. Sludge bulking analysis and forecasting: application of system identification and artificial neural computing technologies [J]. Water Research, 1991, 25(10): 1217 ~ 1224.
- [26] Lee D S, Park J M. Neural network modeling for on-line estimation of nutrient dynamics in a sequentially-operated batch reactor [J]. Journal of Biotechnology, 1999, 75(2): 229 ~ 239.
- [27] Hamoda M F, Ghusain I A, Hassan A H. Integrated wastewater treatment plant performance evaluation using artificial neural networks [J]. Water Science Technology, 1999, 40(7): 55 ~ 65.

(下转第 728 页)