

国内外活性污泥模型研究进展

杨双春, 王晓珍, 潘一, 邓丹, 刘国斌, 张贵安

辽宁石油化工大学环境与生物工程学院, 辽宁抚顺 113001

摘要 活性污泥模型(ASM)是表述废水中各种污染物质与废水处理系统中微生物之间的复杂生物化学反应过程的数学模型。本文主要介绍了国内外活性污泥数学模型的研究现状及进展,包括活性污泥1号模型(ASM1)、BSM1模型、ASM-SST模型、ASM-ASS模型、活性污泥2号模型(ASM2)、活性污泥2d模型(ASM2d)、活性污泥3号模型(ASM3)、FCASM3模型等。对这些模型做了评价和比较,并对今后的研究方向提出了建议:需要在活性污泥法机理、模型参数的确定和相关软件方面开发上多做研究,在水处理工艺设计以及水质监测方面多进行应用。

关键词 污水处理;好氧活性污泥;生物数学模型;活性污泥模型

中图分类号 X703

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.26.012

Progress in the Studies of Activated Sludge Model

YANG Shuangchun, WANG Xiaozhen, PAN Yi, DENG Dan, LIU Guobin, ZHANG Gui'an

Department of Environmental and Biological Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, Liaoning Province, China

Abstract An activated sludge model is a mathematical model to describe the complex biochemical reaction of micron germs and pollutants. This paper reviews the biomathematical models of activated sludge in our country and abroad, including the Activated Sludge Model No.1(ASM1), the Benchmark Simulation Model No.1 (BSM1), the Activated Sludge Model-Secondary Sedimentation Tank (ASM-SST), the Activated Sludge Model-Aeration System Simplified (ASM-ASS), the Activated Sludge Model No.2 (ASM2), the Activated Sludge Model No.2d (ASM2d), the Activated Sludge Model No.3 (ASM3) and the Fully Coupled Activated Sludge Model No.3 (FCASM3). The existing problems of these activated sludge models are discussed. Some suggestions about activated sludge models are made. It is pointed out that the reaction mechanism of the activated sludge model should be studied in order to simplify the model; experiments should be conducted to determine parameters in the activated sludge model; and the activated sludge model software development should be encouraged, with applications in the industrial waste water engineer design and the water quality monitoring.

Keywords wastewater treatment; aerobic activated sludge; biomathematical model; activated sludge model

0 引言

据统计,“十二五”期间,中国87%的城市有建设污水处理厂的计划,这意味着将有约1500座规模在2万m³/d以下的污水处理厂建成。目前国内已建成的污水处理设施中超过90%的核心工艺采用活性污泥法,在进行工程设计时都是根据工程设计人员的经验进行设计,存在较大的弊端。数学模

型法是现代科学研究的重要手段,利用数学模型描述活性污泥系统的反应过程,有助于给工程设计提供理论指导;模拟活性污泥系统的动态变化和对各项水质指标的影响,可知实际生产运行情况;将模型和控制理论及方法结合起来,就可按处理水质的要求,达到优化运行的目的。从1987年第一个活性污泥模型的提出,目前活性污泥模型(ASM)已经从静态

收稿日期:2012-04-21;修回日期:2012-07-04

基金项目:辽宁石油化工大学博士启动基金项目(80040118)

作者简介:杨双春,讲师,研究方向为三废治理与资源化,电子信箱:yangchun_bj@126.com;潘一(通信作者),讲师,研究方向为油藏模拟,电子信箱:panyi_bj@126.com

发展到动态,国内外学者建立了 ASM 系列的十余种模型,并开发出相应的计算机应用程序和软件^[1-2]如 SSSP, DSP, GPS-X 等。中国在活性污泥数学模型的研究方面起步较晚、研究较少。本文对活性污泥模型进行了综述,并对这些模型做了评价和比较,为国内活性污泥的研究方向提供建议。

1 模型的研究现状及进展

上世纪 80 年代至今,国内外学者建立了十余种活性污泥模型/复合模型以及相应的多种应用程序和软件。

1.1 ASM1 模型

活性污泥 1 号模型(ASM1)包含动力学参数 14 个,化学计量系数 5 个,组分 13 种^[3],模型以矩阵的形式描述反应过程:有机物降解、衰减、水解、微生物生长等,采用“死亡-再溶解”机理(如图 1),体现了对代谢残余物的再利用,模型未包含磷的去除。

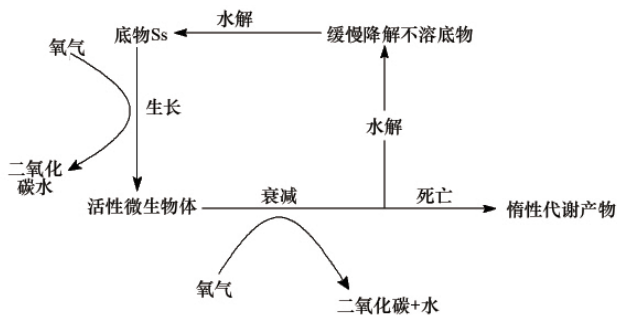


图 1 “死亡-再溶解”机理

Fig. 1 "Death-dissolute" mechanism

ASM1 建模时,速率方程不能完全描述系统内部发生的活动,而且有机物浓度表示方法混乱,学者^[4]因此引入了开关函数,确定 COD 为计量单位,并对溶解性惰性有机物、易生物降解有机物、颗粒惰性有机物的测定方法进行了研究,如 Marais 等^[5]提出用沉淀物理化学法来测定易生物降解有机物以及溶解性惰性有机物,该方法简便快捷,对设备要求低,但它并不是根据生物降解速度的不同来区分有机物降解的难易性,所以对易生物降解有机物只是一个粗略的估计值。Nowak 等^[6]提出用物料平衡物理化学法,利用活性污泥系统内部 COD 平衡和氮平衡得出含碳组分和含氮组分的值,但该方法在测定过程中会产生误差,只能估算模型组分。

国内外许多学者对 ASM1 进行了研究,如 Lim 等^[7]基于 ASM1 建立了一个多元参数误差最小化的系统模型。国内学者丁永伟等^[8]将活性污泥的 Lawrence-McCarty 模式、ASM1、数学模型和底物在生物膜内的 Fickian 扩散理论相结合,提出了三种复合工艺的数学模型,对底物的去除和微生物的增长做了更详细的描述。国外 ASM1 模型研究已经进入商业化开发阶段,美国 Clemson 大学将 ASM1 模型编成计算机应用程序 SSSP(simulation of single sludge process)^[9-10],软件源于序贯模块法的编程思想。SSSP 软件可以显示模型中所包含的变

化速率之间的关系曲线,包括泥龄、回流比、耗氧速率等,可以对污水处理厂进行稳态模拟和动态模拟。

1.2 BSM1 模型

国际水协会(IWA)和欧盟科学技术合作组织(COST)合作开发了活性污泥污水处理基准仿真模型 BSM1^[11],为活性污泥处理过程自动控制方案的开发建立了一个平台,但在建立此模型的时候仿真时间太短,扰动数据不完善,所以 Rosen 等^[12]提出了一个“长期型 1 号基准仿真模型”(Long-Term Benchmark Simulation Model No.1, BSM1_LT),其主要目的是促进长期性的控制方案和过程监控的评估。此模型在建立的时候只考虑了局部处理单元,对于一个仿真模拟真实污水处理厂的系统来说是完全不够的,所以在 BSM1_LT 的基础上,Jeppsson 等^[13]提出了“2 号基准仿真模型”(Benchmark Simulation Model No.2, BSM2),其主要目的是实现在全厂范围内对控制性能进行长期评估。随后,Benhalla 等^[14]基于 ASM1 建立了 BSM1 线性模型,这个线性模型最主要的特征是其线性时间恒定不变,而且保留了生物学参数和 ASM1 模型的原始尺寸,因此,部分研究者认为其将来还可能取代 ASM1 模型。

1.3 活性污泥推流式模型(ASP-CR 模型)

国内外已经有学者在从事实用软件方面的研究。Science Trav2eller International 公司目前已经开发出针对好氧系统推出的活性污泥稳态模拟软件 SASSPro,还有用于市政污水处理厂优化的软件 STOAT 以及 Biowin Process Advisor 软件。中国大多的仿真软件都是以 MATLAB 为开发工具,编写复杂,并且软件的可视性和易用性较差,不利于推广。有学者^[15]结合推流式活性污泥的具体工艺,利用 LabVIEW 软件和其自带的基本函数库,开发出推流式活性污泥法仿真系统,并探讨了其在水处理仿真中的实际应用。2007 年,于广平等^[16]在此研究基础上,针对 ASM1 应用进行合理的简化,得到了适合描述活性污泥碳去除过程推流式工艺的 ASP-CR 模型,并对溶解氧组分进行了特殊处理——用现场的测量值代替预测值,而且对反应组分、反应过程和参数进行了适当的削减,ASP-CR 模型只包含 7 种组分、3 个反应过程和 8 个参数,并在该模型的基础上建立了污水处理仿真系统,解决了数据转换和参数校正的问题。

1.4 活性污泥-二沉池模型(ASM-SST 模型)

活性污泥数学模型包括反应池模型和二沉池模型。对于二沉池,基于固体通量理论的一维通量模型使用较多,而将两种模型耦合并应用于整个活性污泥过程仿真和预测的研究不多。Cote^[17]将神经网络建模技术与数学模型结合,实时估计出水悬浮固体(SS)浓度、出水化学耗氧量(COD)浓度、出水氨氮浓度以及混合液溶解氧浓度(DO),虽然此研究方法计算量大,而且实时控制效果不是很好,但为后来学者建立二沉池简化模型奠定了基础。还有学者^[18]将质量守恒的二沉池一维通量模型与反应池活性污泥二号模型耦合,对活性污泥过程进行模拟与优化研究。乔俊飞等^[19]在 ASM1 的基础上,建立

了能够反映二沉池出水水质关键参数的简化模型,该模型解决了控制系统不易于控制器设计的问题,而且解决了计算量较大、实时控制效果不是很好的问题。

1.5 活性污泥-曝气系统简化模型(ASM-ASS模型)

在污水处理系统中,主要节能措施有对曝气量、内外回流量等的优化控制。Samuelsson 等^[20]研究了活性污泥处理污水系统中操作费用最小化的控制策略,而且进行了仿真研究,说明了其可行性。Fikar 等^[21]以某一小型废水处理厂为研究对象,考虑了出口处约束条件,以能量消耗最小为前提,确定了最优的曝气/非曝气时间,对污水处理的动力学进行了优化。目前国外已经有用于生化除氮(BNR)废水处理预曝气装置分析设计和操作优化的商业化预曝气工艺软件 DSP(dynamic simulator for prefermenters)。在国外学者研究的基础上,舒海涛^[22]等用 AMPL 建模语言进行建模,建立了基于 ASM1 模型的曝气系统简化数学模型,该模型采用 IPOPT 求解器进行求解,解决了以曝气能量消耗最小为目标函数的曝气系统优化控制问题,优化控制节约了 40% 的能耗,而且此曝气的过程经验证是有效的。

1.6 ASM2 模型

活性污泥 2 号模型是国际水质协会(IAW)于 1995 年推出的,仍然包含复杂的反应过程 19 种,42 个动力学参数和 22 个化学计量系数,该模型增加了 PAO(phosphorus accumulating organisms)有关的反应过程,而且包含磷的吸收和释放、醇解、厌氧水解。ASM2 模型提出,该模型过程中的 PAOs(聚磷微生物)由两部分组成,其中一部分可以反硝化,但在 ASM2^[23]中,这一部分没有得到详细的描述。而且由于 ASM1 和 ASM2 推出的时候,计算的能力有限,模型的发展还是受到了抑制。为了简化,模型规定了很多的假设:如假定异氧菌生物量和聚磷菌生物量是均匀的,并且不随时间变化;有机物质、有机氮和有机磷酸盐的水解是相耦合的,而且是同时发生的。在 ASM2 基础上,丹麦 DHI 水动力研究所基于 ASM1 和 ASM2 开发了 EFOR 软件^[24],由 EFOR ApS 公司与以 Mogens Henze 教授为首的 IAWQ 活性污泥模型国际专家组联合开发,该软件能够获得稳态与动态的出水效果。

1.7 ASM2d 模型

活性污泥 2d 模型是由 IAW 于 1999 年推出的,国内外在 ASM2d 模型方面的研究不是很多,该模型是对去除活性污泥系统中的化学需氧量(COD)、氮、磷等综合生物处理过程进行动态模拟的数学模型,在 ASM2 的基础上增加了两个过程来说明聚磷菌可利用胞内有机贮存产物来进行反硝化^[25]。ASM2d 模型虽然在引入聚磷菌的同时考虑了磷沉降的问题,但该模型未考虑 NO₃⁻、K⁺、Mg²⁺ 和亚硝酸盐对生物除磷的抑制。Smolders 代谢模型也是对含磷有机物去除的一个模型^[26],该模型将对生物除磷过程具有实质性意义的糖原作为重要的组分进行利用研究,但该模型是否可应用到连续性活性污泥模型中尚且未知,所以董珊燕等^[27]提出应该将这两个模型的

优点结合起来,建立结构完整、参数较少、辨识简单的模型。

1.8 活性污泥碳氧化硝化简化模型(ASM-CN 模型)

慢速生物降解有机物的水解一般都受其自身浓度的控制,随着温度的降低,慢速生物降解有机物以及不可生物降解有机物的浓度会发生变化,这些都会影响活性污泥处理水的效果。Sollfrank 等^[28]就针对温度对废水特征的影响进行了研究,而且对慢性生物降解有机物的去除做了相应的研究;Roeleveld 等^[29]对进水常规监测数据进行了研究,而且提供了模型组分的转换方法。这些研究都为后来活性污泥碳氧化硝化模型的建立奠定了理论基础。在国外学者研究的基础上,刘芳等^[30]以活性污泥 1 号模型为开发平台,建立了活性污泥碳氧化硝化简化模型(ASM-CN 模型),模拟误差控制在 11% 以内,模型还可以通过模拟来反映模型参数和运行方式的改变对废水处理系统性能的影响,从而对水质以及各装置运行情况具体分析后得出可行的运行参数,提高了此模型的实用性。因为在 ASM-CN 模型中,异氧菌衰减系数(bH)、异氧菌最大比增长速率(μ_{mH})和自养菌最大比增长速率(μ_{mA})对活性污泥系统的性能有显著的影响^[31],所以刘芳等同年着重研究了这 3 个参数,并对这 3 个参数的测定过程的影响因素进行了分析。

1.9 ASM3 模型

ASM3 模型被认为是未来新模型的研究标准,它不以水解作为重点,而是引入有机物在微生物体内的贮存及内源呼吸过程,只强调细胞内部的活动过程^[32]。因为 ASM1 和 ASM2 推出的时候,计算能力有限,为了简化计算,只用“死亡-再生”理论来描述衰减过程(图 2),而 ASM3 用内源呼吸(图 3)^[33]真实地反映了衰减过程,而且 ASM3 对胞内过程进行了详细的描述,并且使得衰减过程更适应环境条件,降低了水解的重要性。在 ASM1 中,异氧菌衰减和硝化菌衰减的相互作用影响严重,容易混淆,而在 ASM3 中,对这两组生物体的所有转换过程都进行了清晰的区分,并以相同的模式进行描述;ASM3 假

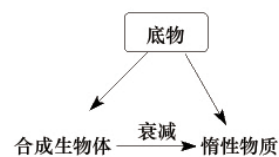


图 2 死亡-再生理论

Fig. 2 Deaths-regeneration theory

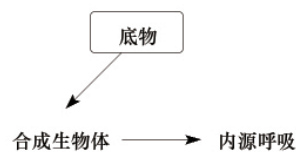


图 3 内源呼吸

Fig. 3 Endogenous breathing theory

定水解过程是独立于电子供体而进行的,与 ASM1 相比,减弱了水解对耗氧速率和反硝化速率的控制作用,减弱了水解的重要性;ASM3 更注重胞内贮存物的描述,并且允许衰减过程更适应环境条件的改变。ASM3 包含 13 个组分,12 个生化过程。在 ASM3 中,虽然 ASM2 中的生物除磷过程不包含在内,但很容易就可以添加进去。

Xie 等^[34]基于 ASM3 建立了反硝化模型,结果表明新的模型能在反硝化的过程中反映可溶性微生物的形成与基质消耗之间的关系。Liwarska-Bizukojc 等^[35]将 ASM3 对复杂活性污泥模型的模拟结果,和现有的一些大型污水处理厂所应用的 BioWin 软件中的应用结果进行比较,实测值和模拟值已经基本吻合。Trutnau 等^[36]提出了基于 ASM3 的耦合模型,用 TOC 含量来描述各模块组分中的除磷过程。目前 Hydromantis 公司已经开发了基于 ASM3 的面向对象、模型独立的交互式商业化软件 GPS2X(the general purpose simulator)。

1.10 FCASM3 模型

FCASM3 模型^[37]是在充分分析活性污泥系统生物反应的机理上建立的,是活性污泥系统生物去除营养物质的细观机理模型,该系统将微生物划分为 8 类菌群,包含 31 种组分、72 个子过程。其主要特点就是充分考虑微生物间的相互作用,将微生物进行了细分。有学者在 FCASM3 模型的基础上进行了相关研究。如王如意等^[38]对全耦合模型(FCASM3)进行了校核,动态模拟结果与实测结果一致,为此模型的优化改进提供了理论依据和科学的数据基础。但由于 FCASM3 模型在建立的时候,没有充分考虑场与场(生物场、水力场和温度场)之间的相互关系,所以孙培德等^[39]在全耦合活性污泥模型(FCASM3)的基础上建立了活性污泥系统生物场-水力场-温度场耦合模型(FCASM3-Hydro-Temp),该模型既能准确反映活性污泥系统污染物去除过程,又充分考虑水力以及温度的多场耦合。

1.11 ASM3C 模型

ASM3C 模型^[40]是 ASM3 模型的一个调整版本,有机物变量是以有机碳而不是以 COD 来表达。此模型是对 ASM3 模型的一个补充,二者结合对 ASM1 的缺陷进行了补充。ASM3C 可以算是比较先进的模型,但缺乏大量实验数据的检验,尤其对贮存现象的描述不够完善,所以研究人员应致力于这方面的研究,使 ASM3C 模型和 ASM3 模型可联合使用,从而取代 ASM1 模型作为今后活性污泥数学模型发展的基础模型。

2 结论和展望

国外的数学模型发展已经非常先进,并非处于对试验数据的简单拟合的研究。如比利时开发的 WEST 仿真软件,用户提供相应的水质信息,就可以实现对污水厂的模拟构建。中国在这方面的研究工作还相当落后,表现在了解模型研究的技术人员很少、模型参数的测定数据极端缺乏。中国活性

污泥数学模型要得到更大的发展,应该把研究方向集中于以下 3 方面。第一,应致力于活性污泥机理的深入研究。机理是模型重构和简化的基础,是忽略某些因素的根据。第二,在推广应用活性污泥数学模型过程中对污水水质组分的研究不够,而且有关水质组分的参数值与国际水协会的推荐值存在差异^[41]。如国家城市给水排水工程技术研究中心的研究人员,采用中国某典型污水处理厂的报表数据,用 ASM1 进行了模拟,结果不令人满意,原因就是实际的化学计量参数、动力学参数、温度系数等与软件提供的默认值不符。第三,ASM 的建立是为了模拟好氧活性污泥系统中水处理,并不适用于工业废水主导污水特性的情形,今后有必要加强该模型在实际工业废水应用方面的研究。

参考文献 (References)

- [1] 宋健健. 污水处理活性污泥模型及 GPS-X 软件应用[J]. 石油化工安全环保技术, 2011, 27(1): 43-60.
Song Jianjian. *Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology*, 2011, 27(1): 43-60.
- [2] 张志群, 王梓先. 活性污泥模型研究及其工艺软件的发展 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2001, 2(6): 38-44.
Zhang Zhiqun, Wang Zixian. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2001, 2(6): 38-44.
- [3] 李茹莹, 季民, 任智勇. 活性污泥数学模型的研究应用进展与问题讨论[J]. 工业用水与废水, 2002, 33(4): 4-6.
Li Ruying, Ji Min, Ren Zhiyong. *Industrial Water and Wastewater*, 2002, 33(4): 4-6.
- [4] Smets I Y, Haeghebaert J V, Carrette R, et al. Linearization of the activated sludge model ASM1 for fast and reliable predictions [J]. *Water Research*, 2003, 37(8): 1831-1851.
- [5] Mamais D, Jenkins D, Prrr P. A rapid physical chemical method for the determination of readily biodegradable soluble COD in municipal wastewater [J]. *Water Research*, 1993, 27(1): 195-197.
- [6] Nowak O, Franz A, Svardal K, et al. Parameter estimation for activated sludge models with the help of mass balances [J]. *Water Science and Technology*, 1999, 39(4): 113-120.
- [7] Lim J J, Kim M H, Kim M J. A systematic model calibration methodology based on multiple errors minimization method for the optimal parameter estimation of ASM1 [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2011, 29(3):291-303.
- [8] 丁永伟, 王宝贞, 王琳. 活性污泥和生物膜复合工艺模型研究进展[J]. 给水排水, 2008, 34(S1): 368-372.
Ding Yongwei, Wang Baozhen, Wang Lin. *Water Supply and Drainage*, 2008, 34(S1): 368-372.
- [9] 于广平, 苑明哲, 王宏. 活性污泥法污水处理数学模型的发展和应用 [J]. 信息与控制, 2006, 35(5): 614-623.
Yu Guangping, Yuan Mingzhe, Wang Hong. *Information and Control*, 2006, 35(5): 614-623.
- [10] Yang S, Pan Y. Research situation of activated sludge process software [C]//2010 3rd International Conference on Environmental and Computer Science (ICECS 2010), Kunming, China, October 18-19, 2010: 235-237.
- [11] Cristea V M, Pop C, Agachi P S. Model predictive control of the waste water treatment plant based on the Benchmark Simulation Model No.1-

- BSM1[J]. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2008, 25: 441-446.
- [12] Rosen C, Jeppsson U, Vanrolleghem P A. Towards a common benchmark for long-term process control and monitoring performance evaluation[J]. *Water Science and Technology*, 2004, 50(11): 41-49.
- [13] Jeppsson U, Rosen C, Alex J, et al. Towards a bench-mark simulation model for plant-wide control strategy performance evaluation of WWTPs [J]. *Water Science and Technology*, 2006, 53(1): 287-295.
- [14] Benhalla A, Houssou M, Charif M. Linearization of the full activated sludge model No 1 for interaction analysis[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2010, 33(6): 759-771.
- [15] 方芳, 郭劲松, 朱建军. 基于 LabVIEW 的推流式活性污泥法动态仿真研究[J]. 给水排水, 2005, 31(5): 106-109.
Fang Fang, Guo Jinsong, Zhu Jianjun. *Water Supply and Drainage*, 2005, 31(5): 106-109.
- [16] 于广平, 苑明哲, 王宏. 基于简化活性污泥数学模型的污水处理仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(23): 5366-5369.
Yu Guangping, Yuan Mingzhe, Wang Hong. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(23): 5366-5369.
- [17] Cote M, Grandjean B P A, Lessard P, et al. Dynamic modeling of the activated sludge process: improving prediction using neural networks[J]. *Water Research*, 1995, 29(4): 995-1004.
- [18] 张代钧, 李振亮, 卢培利, 等. 活性污泥过程反应池与二沉池耦合模型与模拟[J]. 中国环境科学, 2007, 27(2): 155-159.
Zhang Daijun, Li Zhenliang, Lu Peili, et al. *China Environmental Science*, 2007, 27(2): 155-159.
- [19] 乔俊飞, 韩红桂, 张颖. 基于 LabView 的污水处理过程动态仿真研究 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 40(4): 879-882.
Qiao Junfei, Han Honggui, Zhang Ying. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 40(4): 879-882.
- [20] Par S, Bjorn H, Bengt C. Cost-efficient operation of denitrifying activated sludge process—an initial study [J]. *Water Research*, 2007, 41(11): 2325-2332.
- [21] Fikar M, Chachuat B, Latifi M A. Optimal operation of alternating activated sludge processes[J]. *Control Engineering Practice*, 2005, 6(13): 853-861.
- [22] 舒海涛, 罗建旭. 基于简化 ASM1 模型的污水处理厂曝气系统优化控制[J]. 计算机与应用化学, 2012, 29(1): 67-70.
Shu Haitao, Luo Jianxu. *Computers and Applied Chemistry*, 2012, 29(1): 67-70.
- [23] Hong Zhao, Hao O J, Thomas J, et al. Approaches of modeling nutrient dynamics: ASM2, simplified model and neural nets [J]. *Water Science and Technology*, 1999, 39(1): 227-234.
- [24] 于广平, 苑明哲, 王宏. 活性污泥法污水处理数学模型的发展和应用 [J]. 信息与控制, 2006, 35(5): 614-623.
Yu Guangping, Yuan Mingzhe, Wang Hong. *Information and Control*, 2006, 35(5): 614-623.
- [25] Henze M, Gujer W, Mino T, et al. Activated sludge model No.2D, ASM2D[J]. *Water Science and Technology*, 1999, 39(1): 165-182.
- [26] Smolders G J F, Van LM CM, Heijnen J J. Sto-ichiometric model of the aerobic metabolism of the biological-phosphorus removal process [J]. *Biotech Bioeng*, 1994, 44(7): 837-848.
- [27] 董珊燕, 姚重华. 活性污泥生物除磷数学模型研究进展[J]. 化工环保, 2005, 25(4): 281-284.
Dong Shanyan, Yao Chonghua. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2005, 25(4): 281-284.
- [28] Sollfrank U, Kappeler J, Gujer W. Temperature effects on wastewater characterization and the release of soluble inert organic material [J]. *Water Science and Technology*, 1992, 25(6): 33.
- [29] Roeleveld P J, van Loosdrecht M C M. Experience with guidelines for wastewater characterisation in The Netherlands [J]. *Water Science and Technology*, 2002, 45(6): 77-87.
- [30] 刘芳, 陈秀华. 简化活性污泥数学模型在城市污水厂中的应用[J]. 环境工程, 2005, 23(2): 33-36.
Liu Fang, Chen Xiuhua. *Environmental Engineering*, 2005, 23(2): 33-36.
- [31] 刘芳, 陈秀华, 顾国维. ASM-CN 模型中主要动力学参数的测定研究 [J]. 东华大学学报, 2005, 31(3): 20-25.
Liu Fang, Chen Xiuhua, Gu Guowei. *Journal of DongHua University*, 2005, 31(3): 20-25.
- [32] Janus T, Ulanicki B. Modelling SMP and EPS formation and degradation kinetics with an extended ASM3 model [J]. *Desalination*, 2010, 261(1-2): 117-125.
- [33] 彭永臻, 高景峰, 隋铭皓. 活性污泥法动力学模型的研究与发展[J]. 给水排水, 2000, 26(8): 15-19.
Peng Yongzhen, Gao Jingfeng, Sui Minghao. *Water Supply and Drainage*, 2000, 26(8): 15-19.
- [34] Xie W M, Ni B J, Raymond J, et al. Formation of soluble microbial products by activated sludge under anoxic conditions [J]. *Apply Microbiological Biotechnology*, 2010, 87(1): 373-382.
- [35] Liwarska-Bizukojc E, Olejnik D, Biernacki R. Calibration of a complex activated sludge model for the full-scale wastewater treatment plant [J]. *Bioprocess Biosyst Eng*, 2011, 34(6): 659-670.
- [36] Trutnau M, Petzold M, Mehlig L. Using a carbon-based ASM3 EAWAG Bio-P for modeling the enhanced biological phosphorus removal in anaerobic/aerobic activated sludge systems [J]. *Bioprocess Biosyst Eng*, 2011, 34(3): 287-295.
- [37] Kaelin D, Manser R, Rieger L, et al. Extension of ASM3 for two-step nitrification and denitrification and its calibration and validation with batch tests and pilot scale data[J]. *Water Research*, 2009, 43(6): 1680-1692.
- [38] 王如意, 孙培德, 宋英琦. 全耦合活性污泥模型(FCASM3)模型校验[J]. 环境科学报, 2008, 28(12): 2420-2429.
Wang Ruyi, Sun Peide, Song Yingqi. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 28(12): 2420-2429.
- [39] 孙培德, 王如意. 活性污泥系统生物场-水力场-温度场耦合模型(FCASM3-Hydro-Tmep)iv: 模型建立[J]. 环境科学学报, 2008, 28(12): 2438-2441.
Sun Peide, Wang Ruyi. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 28(12): 2438-2441.
- [40] 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.
Zhang Yalei, Li Yongmei. *Activated sludge mathematical modeling*[M]. Shanghai: Tongji University Pressing House, 2002.
- [41] 李卫忠, 靳晓瑜, 牛录波. 活性污泥模型基本参数及其校核 [J]. 华北水利水电学报, 2010, 31(2): 87-90.
Li Weizhong, Jin Xiaoyu, Niu Lubo. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2010, 31(2): 87-90.

(责任编辑 马骁骁)