

基于数学模拟的污水处理厂设计:方法与案例

魏忠庆^{1,2}, 胡志荣^{3,4}, 上官海东², 叶均磊², 邱 勇⁵

(1. 同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 2. 福州城建设计研究院有限公司, 福建 福州 350001; 3. 浙江工商大学 环境科学与工程学院, 浙江 杭州 310018; 4. 加拿大 GL 环境科技有限公司, 加拿大; 5. 清华大学 环境学院, 北京 100084)

摘 要: 随着我国城镇污水处理厂出水水质标准的逐步提高, 基于经验的传统(定性或半定量)设计方法已经难以满足稳定达标和高标准水质排放的要求。提出了基于数学模拟的污水处理工艺设计中的工艺评估和优化方法, 并列举了两个应用案例(一个为新建污水处理厂, 另一个为污水处理厂提标改造), 包括工艺方案的比较选择、工艺方案评估优化等内容。案例模拟结果表明, 数学模拟技术的应用有助于污水处理厂的设计或提标改造的定量化分析, 可使污水处理工艺的优化更加合理、全面。

关键词: 数学模拟; GPS-X; 污水处理厂

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)10-0021-06

Model-based Design of Sewage Treatment Plants: Methodology and Case Studies

WEI Zhong-qing^{1,2}, HU Zhi-rong^{3,4}, SHANGGUAN Hai-dong², YE Jun-lei², QIU Yong⁵

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Fuzhou City Construction Design & Research Institute Co. Ltd., Fuzhou 350001, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China; 4. GL Environmental Inc., Canada; 5. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: With a large number of municipal sewage treatment plants put into operation and more stringent effluent standards applied in China, the traditional (qualitative or semi-quantitative) design methods based on experience are difficult to meet the requirement of stable operation and high standard effluent quality. The model-based design procedure was presented, and two practical cases (one for new sewage treatment plant and the other for upgrading sewage treatment plant) were introduced to demonstrate the application of the model-based design method, including process comparison/selection, and process evaluation/optimization. The simulation results showed that the application of mathematical simulation technology was helpful to the quantitative analysis of the design and renovation for sewage treatment plants, and could make the optimization of sewage treatment process more reasonable and comprehensive.

Key words: mathematical modeling; GPS-X; sewage treatment plant

随着城镇污水处理厂出水排放标准的日趋严格,基于经验的传统污水处理设计方法已不能满足新的污水处理厂设计和现有污水处理厂提标改造的工程要求^[1]。在方案比选或评估中,传统设计方法往往只能理论推断和定性分析,无法对各种工艺方案的效果进行定量预测,难以定量识别所设计工艺中存在的问题。

为了更好地进行污水处理工艺的优化设计和运行,在过去的近50年中,污水处理的活性污泥工艺模型已从简单的COD去除和硝化发展为同步生物脱氮除磷模型;从稳态模型发展到动态模型;从单一的二级处理生物反应模型发展到能同时模拟污水和污泥处理工艺的全污水处理厂模型。这些污水处理工艺模型包括了许多描述不同处理工艺单元的状态变量以及这些变量在多种生物化学反应过程中的化学计量关系和动力学特征。借助于实施这些数学模型的商用模拟软件,数学模拟技术已从一种研究工具发展成为一种成熟的工程工具,并在北美、欧洲、南非和澳大利亚等地得到了广泛的工程应用,成为污水处理工艺设计、提标改造和优化运行中的标准实践^[2-6]。

为了推动数学模拟技术在我国污水处理厂设计和提标改造工程实践中的应用,笔者在对比基于经验的传统污水处理设计方法与基于数学模拟的污水处理设计方法的基础上,详细介绍了基于数学模拟的污水处理工艺设计和提标改造中的工艺比较和评估方法,给出了几个典型的实际应用案例说明并示范了这种方法在实际工程中的应用,以期对数学模拟技术在我国污水处理工艺设计和提标改造中的实践提供参考。

1 方法

基于数学模拟的工艺设计方法包括新污水处理厂或已有污水处理厂提标改造中的工艺方案的比较和选择,设计工艺的评估和优化等。需要强调的是污水处理厂基于数学模拟的设计方法和基于经验的传统设计方法二者虽然不同,但是它们之间不是替代关系,而是相互补充的关系。传统的设计方法通常提供一个污水处理厂的初步的设计,而数学模拟则提供了定量评估和优化传统方法所设计的污水处理工艺的工具和方法^[2-4]。

1.1 传统与数学模拟设计方法对比

传统的工艺设计方法通常是根据预估的进水特性,参考设计手册提供的方法、公式和参数,确定工艺总体方案,然后对污水处理工艺单元的构筑物尺寸、结构进行选择 and 计算。考虑到不同时期数据的可获取性,手册提供的设计计算过程相对比较简单,要求的数据少,一般的电子表格就可以完成,而且设计参数的选择很大程度上取决于设计人员的经验。虽然传统设计方案基于长期设计运行经验的积累和总结,但是难以获取设计参数与出水水质之间的定量关系,对设计是否达标的判断只能停留在直觉和经验判断上。这种特点难以适应水质标准越来越严格的污水处理工艺稳定达标和优化的精细化设计。数学模拟方法提供了一种有效且强有力的辅助设计技术,可以帮助设计人员量化设计参数与出水水质的关系,从而能够选取比较准确的设计参数。两种方法的总结对比见图1。

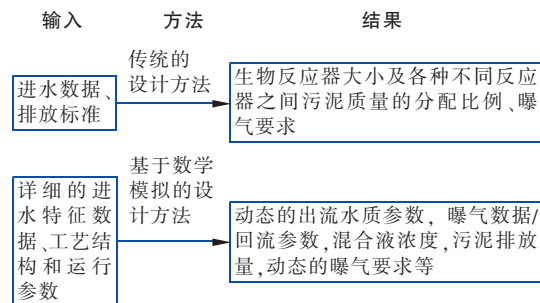


图1 传统设计方法与数学模拟设计方法

Fig. 1 Traditional design and mathematical simulation method

1.2 基于数学模拟的污水处理工艺比选

在新建污水处理厂设计或已有污水处理厂提标改造工作中,污水处理工艺或方案的比较和选择是一项重要工作。根据实际项目目标的不同,这种比较和选择可以仅仅是污水处理厂某部分工艺(通常是二级处理工艺),也可以是包括三级处理工艺、污泥处理工艺,直至全污水处理厂的工艺比较和选择。对于基于经验的传统设计方法要进行这种比较和选择已经非常困难,实际上也不可能,而基于数学模拟的设计方法则可以方便、快速地进行各种各样的工艺或方案的比较,然后按照给定的标准(如是否达标,工艺的占地面积,能耗和总的费用等)选择一个优化的工艺或方案。为此,以某新建污水厂为案例

介绍这种方法。

在这个案例中,对于给定的污水处理厂进水水质特征(见表 1),根据排放标准(一级 B)对三个候选的典型二级处理工艺(传统活性污泥 CAS,填料活性污泥 IFAS,膜生物反应器 MBR)进行建模和模拟(利用北美广泛使用的 GPS-X 模拟软件平台建立的三种工艺比较模型见图 2),然后根据工艺达标、占地面积、费用等进行比较评估,并选择合适的或优化的工艺。

表 1 某新建污水处理厂进水水质特征
Tab. 1 Characteristics of influent quality for a new sewage treatment plant

项目	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TSS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TKN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_3 - \text{N}$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	碱度/ ($\text{mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$)
数值	15 000	430	239	40	25	350

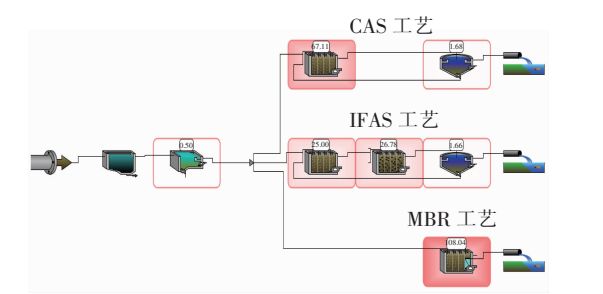


图 2 某新建污水处理厂三种工艺的 GPS-X 比较模型
Fig. 2 GPS-X comparison model of three processes for a new sewage treatment plant

根据传统方法设计得到的三种工艺的设计参数如表 2 所示。这些参数作为模型模拟输入参数,污水的特征参数使用 GPS-X 模拟软件的默认值。

表 2 三种工艺的设计参数
Tab. 2 Design parameters of three processes

项 目	CAS	IFAS	MBR
厌氧区/ m^3	1 000	1 000	1 000
缺氧区/ m^3	1 500	1 500	1 500
好氧区/ m^3	4 000	2 400	1 500
总容积/ m^3	6 500	4 900	4 000
二沉池/ m^2	804	804	—
污泥回流比/%	80	80	—
内回流/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	—	—	1 200
排泥量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	205	180	110

利用在 GPS-X 软件平台建好的三个工艺的比较模型,在相同进水特征和表 2 的设计运行参数下进行模拟。若某工艺的模拟出流结果不能达标排

放,则根据经验调整设计参数直到三个工艺都达标排放。在三个工艺都达标排放时,利用 GPS-X 软件中快速计算和统计的一键点击功能分别得到三个工艺的能耗和运行费用。利用这个工艺比较模型得到的三个工艺的容积、能耗和运行费用见表 3。

表 3 某新建污水处理厂三种工艺模拟结果
Tab. 3 Simulation results of three processes for a new sewage treatment plant

项 目	CAS	IFAS	MBR
能耗/($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{d}^{-1}$)	3 645	3 667	11 304
运行成本/(美元· d^{-1})	363	368	1 131
总容积/ m^3	6 500	4 900	4 000

由表 3 可知,在三种工艺都能满足排放标准的前提下,CAS 和 IFAS 工艺的能耗和费用相似,但 IFAS 工艺占地小。MBR 能耗最高,是 IFAS 和 CAS 工艺的 3 倍左右。但是 MBR 工艺占地最小,IFAS 次之。综合来看,IFAS 工艺占地小、运行成本不高,可以作为推荐的工艺。

1.3 基于数学模拟的污水处理工艺评估和优化

在新污水处理厂设计或现有污水处理厂提标改造中选定了工艺或工艺方案后,需对利用传统方法设计得到的工艺或方案使用数学模型进行工艺设计方案的评估(或方案的复算)和优化。这种方法已经在北美、澳大利亚、南非等国家和地区得到广泛的应用,并在大量应用的基础上开发出了实际的应用指南,如北美的 WERF 指南(活性污泥模拟中污水特征化的方法)^[4]、欧洲荷兰的 STOWA 指南(荷兰污水特征化指南)^[5]、国际水协会的统一指南(活性污泥模型使用指南)^[6]。总结这些指南和作者经验,基于数学模拟的污水处理工艺或方案的评估及优化方法可以总结为如图 3 所示的四个步骤:①建立污水处理工艺模拟模型;②设计工艺评估和优化的模拟方案(模拟情景);③利用污水处理工艺模拟模型对各种模拟情景进行模拟从而获得各种模拟情景的模拟结果;④分析各种模拟情景的模拟结果是否满足给定的设计标准。如果不能,则调整模拟方案,重新进行模拟直到模拟结果满足设计要求。

模拟情景和方案的设计要求设计者具有丰富的工艺知识和经验以及处理解决各种工艺问题的能力,常见的影响污水处理工艺超标的问题可能是水量峰值、低温硝化、低碳氮比等。这些可以描述成如下的模拟情景:①峰值流量情况下,有可能导致污水

处理超标,如夏季进水量较大或暴雨事件;②水温较低情况下,可能导致硝化不足,出水氨氮超标,进而导致总氮超标,如冬季水温可能低于 15℃;③低碳氮比的情况在南方较为常见,与设计条件偏差较大时,容易导致反硝化不充分,致使总氮超标。

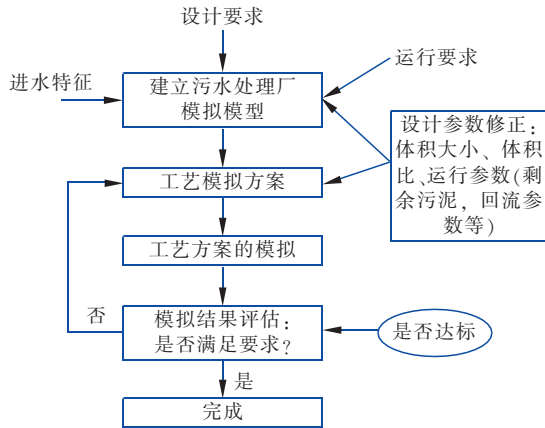


图 3 基于数学模拟的污水处理工艺评估和优化

Fig. 3 Evaluation and optimization of sewage treatment process based on mathematical simulation

2 实际案例

① 西班牙某污水厂设计方案评估与优化^[7]

西班牙某新建 SBR 工艺污水处理厂,其处理平均流量、峰值流量、污水特征及出流设计标准见表 4。该污水厂 4 个 SBR 并联运行,后接一座储水池(见图 4)。设计参数:每单体 SBR 容积为 5 687.5 m³。反应器水位在平均流量时为 5.13 m,峰值流量下为

6.5 m。反应器底部水位维持在 3 m。反应器中混合液的 MLSS 浓度在曝气阶段维持在 3 000 mg/L 以下。所设计的循环如表 5 所示。

表 4 污水的流量、特征和污水处理厂排放标准

Tab. 4 Sewage flow, characteristics and discharge standards of sewage treatment plant

项 目	污水特征	污水处理厂排放标准
BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	147	15
SS/(mg·L ⁻¹)	98	20
TKN/(mg·L ⁻¹)	34	—
NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	—	3
NO ₃ ⁻ -N/(mg·L ⁻¹)	0	15、10、5 ¹
平均流量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	3	—
峰值流量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	5	—

注: ¹指冬季为 10℃、平均为 13℃、夏季为 20℃三个不同温度下的硝酸盐氮排放标准。

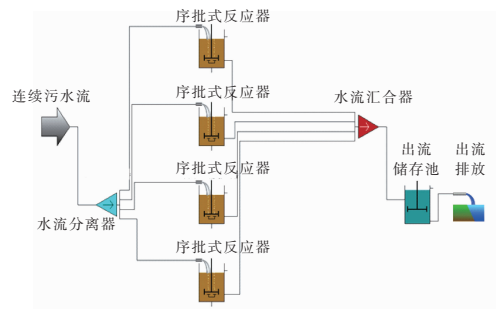


图 4 SBR 工艺污水处理厂工艺流程

Fig. 4 Process flow chart of SBR treatment plant

表 5 设计的 SBR 工艺循环和模拟优化后的 SBR 工艺循环

Tab. 5 Designed SBR process cycle and simulated optimized SBR process cycle

项 目			各阶时间						
			设计循环	优化循环					
				方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六
1	注水	注入和混合	45	30	30	30	30	30	0
		注入和曝气	45	60	60	50	60	60	70
2	曝气		135	40	20	0	60	50	0
3	混合(无氧段)		0	30	50	110	0	20	90
4	沉淀		55	120	120	90	160	150	150
5	滗水		60	120	120	90	160	150	150
6	排泥		20	20	20	20	20	20	20
总的循环长度			360	420	420	390	490	480	480

模拟分析的目标是利用数学模拟分析评价所设计的污水处理厂是否满足设计的要求,即:a. SBR 工艺及循环在各种运行条件下是否满足出流的要求;b. 确定在各种运行条件下,MLSS 是否小于 3 000 mg/L;c. 如果设计的循环不能满足出流要求,利用

模拟技术优化能满足出流要求的优化循环。

按照模拟分析的目标,确定了如下模拟方案即 SBR 污水厂典型的运行条件:二个不同的污水流量(平均流量和峰值流量),三个不同温度(冬季为 10℃,平均为 13℃,夏季为 20℃)。二个流量和三个

温度的不同组合构成了六种模拟方案,方案一、方案三和方案五:平均流量为 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,温度分别为 10、13、20 $^{\circ}\text{C}$;方案二、方案四和方案六:峰值流量为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,温度分别为 10、13、20 $^{\circ}\text{C}$ 。

在所有方案的模拟中,除了上述流量和温度外,其他如污水特征参数、模型动力学和化学计量参数

都保持不变。在设计的循环下,六种方案的模拟结果如表 6 所示。模拟结果分析表明:利用传统方法设计的 SBR 工艺的循环设置并不能满足所有运行条件下的出流水质要求。根据模拟分析及工艺经验对六种方案的 SBR 工艺循环进行了优化(优化后的循环见表 5),模拟结果如表 7 所示。

表 6 在设计的 SBR 工艺循环下出流模拟结果

Tab. 6 Simulated effluent results under designed SBR process cycle mg · L⁻¹

项 目	目标值	温度 (10 $^{\circ}\text{C}$)		温度 (13 $^{\circ}\text{C}$)		温度 (20 $^{\circ}\text{C}$)		温度 (20 $^{\circ}\text{C}$)		温度 (20 $^{\circ}\text{C}$)		温度 (20 $^{\circ}\text{C}$)	
		方案一		方案二		方案三		方案四		方案五		方案六	
		预测值	是否满足目标	预测值	是否满足目标	预测值	是否满足目标	预测值	是否满足目标	预测值	是否满足目标	预测值	是否满足目标
BOD ₅	15	4.1	√	7.6	√	3.8	√	7.2	√	3.4	√	6.3	√
SS	20	24.6	×	34.1	×	23.9	×	33.6	×	23.7	×	32.9	×
NH ₃ - N	3	0.04	√	0.06	√	0.04	√	0.05	√	0.04	√	0.05	√
NO ₃ ⁻ - N	15,10,5	12.6	√	12.4	√	12.7	×	12.4	×	12.5	×	12.6	×
最大 MLSS	3 000	2 400	√	1 800	√	2 300	√	1 700	√	2 100	√	1 600	√
注: √指满足目标要求;×指没有满足目标要求。													

表 7 在优化后的 SBR 工艺循环下出流模拟结果

Tab. 7 Simulated effluent results under optimized SBR process cycle mg · L⁻¹

项 目	目标值	温度 (10 $^{\circ}\text{C}$)		温度 (13 $^{\circ}\text{C}$)		温度 (20 $^{\circ}\text{C}$)		温度 (20 $^{\circ}\text{C}$)		温度 (20 $^{\circ}\text{C}$)		温度 (20 $^{\circ}\text{C}$)	
		方案一		方案二		方案三		方案四		方案五		方案六	
		预测值	是否满足目标	预测值	是否满足目标	预测值	是否满足目标	预测值	是否满足目标	预测值	是否满足目标	预测值	是否满足目标
BOD ₅	15	3	√	4.9	√	3.2	√	5.3	√	3.4	√	5.1	√
SS	20	15.1	√	17.7	√	14	√	18.4	√	17	√	18.1	√
NH ₃ - N	3	0.7	√	1.7	√	1.0	√	2.2	√	2.8	√	3.0	√
NO ₃ ⁻ - N	15, 10, 5	7.2	√	10.9	√	7.1	√	10	√	3.8	√	5.9	×
最大 MLSS	3 000	2 400	√	1 800	√	2 300	√	1 700	√	2 100	√	1 600	√
注: √指满足目标要求;×指没有满足目标要求。													

如表 7 所示的模拟结果分析表明:当传统方法所设计的 SBR 工艺循环设置并不能满足所有运行条件下的出流水质要求时,可以通过数学模拟分析技术优化 SBR 工艺循环设置,使得排放水质满足设计要求。

② 福建平潭污水处理厂工艺评估与分析

福建平潭某污水处理厂设计规模为 $5.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,分为两组。单组 A²/O 工艺总水力停留时间(HRT)为 15.9 h,总体积为 16 532 m³。由于区划功能调整 and 环境影响评价要求,该污水厂的出水排放标准由《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准提高至地表水准Ⅳ类标准(见表 8)。为此,提出两种提标工艺方案:a. 改良 Bardenpho 工艺,即在现状 A²/O 生化池后增加

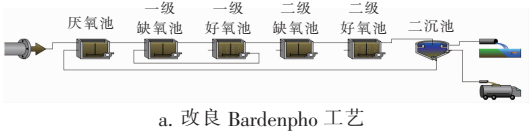
“A/O 工艺”;b. 现状工艺二沉池后增加“反硝化深床滤池工艺”。

表 8 设计进水水质及排放标准

Tab. 8 Design influent quality and discharge standards

项 目	BOD ₅	COD	NH ₃ - N	TN	TP	SS
进水水质	225	380	35	50	4.0	250
一级 A 标准	10	50	5(8)	15	0.5	10
地表水准Ⅳ类标准	6	30	3	10	0.3	5

利用 GPS - X 软件平台建立了上述两种工艺方案的模型,其数学模型的流程见图 5。



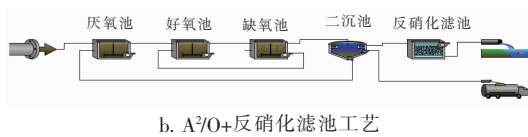


图 5 处理工艺数学模型的流程

Fig. 5 Mathematical model flow of the treatment process

运用 GPS-X 模拟不同进水温度的处理效果,发现改良 Bardenpho 工艺脱氮效果更好。为了保证改良 Bardenpho 工艺具有良好的脱氮性能下,尽可能改善其除磷性能,并且优化工艺,对该工艺进行进一步优化模拟。优化策略包括调整排泥量、回流比和 HRT 参数。优化后工艺选择排泥量为 $1\ 050\ \text{m}^3/\text{d}$,混合液回流和污泥回流分别由原来的 200%、100% 降低至 160%、80%,同时工艺生化池总容积减少了 $906\ \text{m}^3$ 。优化后工艺出水水质控制指标 COD、 BOD_5 、 NH_3-N 、TN、TP 均达到地表水准 IV 类水质标准(见表 9)。

表 9 优化前、后出水水质对比

Tab. 9 Comparison of effluent quality before and after optimization

项 目	COD	BOD_5	NH_3-N	TN	TP
优化前	17.53	4.20	0.30	7.87	0.44
排泥量优化	16.04	3.99	0.42	7.91	0.33
回流比优化	16.14	4.11	0.48	8.88	0.31
HRT 优化	16.72	4.55	0.86	6.61	0.29
控制指标	30	6	3	10	0.3

3 结论

西班牙 SBR 工艺的模拟使所有循环运行条件都达到出水标准,福建平潭改良 Bardenpho 工艺的模拟节约了建设占地面积及运行成本,数学模拟技术的应用使污水处理工艺的评估优化更加全面、合理。文中提出的数学模型应用过程和方法有助于新污水处理厂的设计或提标改造的定量化分析,在传统污水设计实践基础上引入污水处理工艺数学模拟技术,是解决日益提高的污水厂设计标准及实现稳定达标排放的有效途径。

参考文献:

- [1] 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.
Shi Hanchang, Qiu Yong. Modeling and Application for Biological Wastewater Treatment [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014 (in Chinese).

- [2] Henze M, van Loosdrecht M C M, Ekama G A, et al. 污水生物处理:原理、设计与模拟[M]. 施汉昌,胡志荣,周军,等译. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
Henze M, van Loosdrecht M C M, Ekama G A, et al. Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design [M]. Shi Hanchang, Hu Zhirong, Zhou Jun, et al., translated. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011 (in Chinese).
- [3] Daigger G T, Nolasco D. Evaluation and design of full scale wastewater treatment plants using biological process models [J]. Water Sci Technol, 1995, 31 (2): 245 - 255.
- [4] Melcer H, Dold P L, Jones R M, et al. Methods for Wastewater Characterization in Activated Sludge Modeling [M]. Alexandria, VA: Water Environment Research Foundation, 2003.
- [5] Roeleveld P J, van Loosdrecht M C M. Experiences with guidelines for wastewater characterization in the Netherlands [J]. Water Sci Technol, 2001, 45 (6): 77 - 87.
- [6] Reiger L, Gillot S, Langergraber G, et al. Guidelines for Using Activated Sludge Models [M]. US: IWA Publishing, 2012.
- [7] 胡志荣, Snowling S, Andres H. 工艺模拟技术用于 SBR 优化设计 [J]. 中国给水排水, 2005, 21 (9): 60 - 62.
Hu Zhirong, Snowling S, Andres H. Application of simulation technology in the optimization design of SBR process [J]. China Water & Wastewater, 2005, 21 (9): 60 - 62 (in Chinese).



作者简介:魏忠庆(1980 -),男,福建福清人,博士研究生,高级工程师,注册公用设备工程师,注册咨询工程师,主要从事给排水及环境工程设计和科研工作。

E-mail: 654606536@qq.com

收稿日期:2018 - 10 - 29