

# 基于工艺模拟的污水处理厂数字化实例研究

张辉<sup>1,2</sup>, 胡志荣<sup>3,4,5</sup>, 续蕾<sup>1</sup>, 袁星<sup>1,2</sup>, 樊鹏超<sup>1,2</sup>, 常江<sup>1,2</sup>,  
王佳伟<sup>1,2</sup>, Spencer Snowling<sup>6</sup>, Goel Rajeev<sup>6</sup>, 焦二龙<sup>1,2</sup>, 高金华<sup>1</sup>

(1. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100124; 2. 北京市污水资源化工程技术研究中心, 北京 100124; 3. 浙江工商大学 环境科学与工程学院, 浙江 杭州 310012; 4. 浙江工商大学 管理工程与电子商务学院, 浙江 杭州 310012; 5. 加拿大 GL 环境科技有限公司, 加拿大;  
6. 加拿大 Hydromantis 环境软件科技公司, 加拿大)

**摘要:** 在对污水处理厂历史监测数据收集、整理和分析的基础上, 利用 GPS-X 软件, 建立并校正了污水处理厂工艺模型, 同时探索了校正方法。研究表明, 自养菌最大比生长速率作为污水特征参数, 需通过拟合出水的  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度变化进行校准。污泥浓度的拟合是一个非常重要的步骤, 影响污泥浓度拟合的参数包括进水特征参数 (VSS/TSS 值、总 COD 中颗粒惰性组分的占比)、剩余污泥排放量、初沉污泥排放量。

**关键词:** 污水处理厂; 工艺模拟; 数字化; 自养菌最大比生长速率; 污泥浓度

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)01-0087-07

## Digitization of Wastewater Treatment Plant Based on Process Simulation: A Case Study

ZHANG Hui<sup>1,2</sup>, HU Zhi-rong<sup>3,4,5</sup>, XU Lei<sup>1</sup>, YUAN Xing<sup>1,2</sup>, FAN Peng-chao<sup>1,2</sup>,  
CHANG Jiang<sup>1,2</sup>, WANG Jia-wei<sup>1,2</sup>, Spencer Snowling<sup>6</sup>, Goel Rajeev<sup>6</sup>, JIAO Er-long<sup>1,2</sup>,  
GAO Jin-hua<sup>1</sup>

(1. Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100124, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Wastewater Reuse, Beijing 100124, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310012, China; 4. School of Management Engineering and E-Business, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310012, China; 5. GL Environment Inc., Canada; 6. Hydromantis Environmental Modeling Solutions Inc., Canada)

**Abstract:** Historical monitoring data of a wastewater treatment plant was collected, collated and analyzed. Then, the process model of a wastewater treatment plant was established and corrected by using GPS-X software, and the correction method was explored. The maximum specific growth rate of autotrophic bacteria could be regarded as the characteristic parameter of sewage, which needed to be calibrated by fitting the change of effluent  $\text{NH}_3\text{-N}$  concentration. The fitting of MLSS was a very important step. Parameters affecting the MLSS included: influent characteristic parameters (VSS/TSS ratio, proportion of particle inert materials in total COD), excess sludge discharge flow and primary sludge discharge flow.

**Key words:** wastewater treatment plant; process simulation; digitization; maximum specific growth rate of autotrophic bacteria; MLSS

随着我国污水处理标准的不断提高,污水处理工艺流程变得越来越复杂,运行管理的费用也十分昂贵。为了实现复杂工艺动态条件下稳定达标并减少能源和化学药品投加,达到可持续性运行管理的目标,污水处理厂数字化和智慧化管理的研究和探索成为了水务行业的重要关注点。数字化和智慧化的一个关键技术点是如何预测污水处理厂在各种条件下的运行效能。40多年的开发和应用实践表明,污水处理工艺模型是非常有效的工艺模拟和预测工具<sup>[1-4]</sup>,而真实可靠的数据是建立一个可应用于实际工程的污水处理厂数字化模型的关键。

笔者以国际水协会 GMP 工作组的活性污泥模型指南、美国水环境联盟的 WERF 指南和荷兰 Stowa 指南为基础<sup>[5-6]</sup>,以某大型污水处理厂为示范实例,进行了基于数据收集、整理和分析的 GPS-X 工艺模型校准和验证,并利用经过校准和验证的模型对污水处理厂的运行管理提出了优化建议。

## 1 工艺模型开发

### 1.1 污水处理厂工艺概述

北京某大型污水处理厂的进水主要为生活污水,二级处理工艺为 A<sup>2</sup>/O 工艺。污水进入厂区经常规预处理后进入初沉池,初沉池出水进入生物反应池。二级生物处理分为 4 个平行系列,每个系列又由 4 组平行生物反应器组成,一共 16 组。每组有 3 个廊道,包含厌氧段、缺氧段、好氧段。二级出水经三级深度处理后进行再生利用,如农业灌溉、河湖环境、绿化、市政杂用、工业低质用水等。该污水厂的工艺流程如图 1 所示。

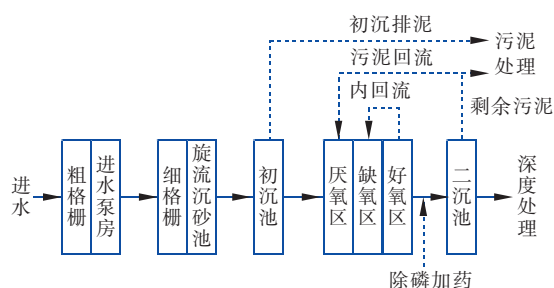


图 1 工艺流程

Fig. 1 Flow chart of wastewater treatment process

### 1.2 数据收集与分析

污水处理厂物理特征参数:污水处理厂工艺流程图;反应池尺寸和数量。

污水进水特征参数:进水各参数的浓度,如 TSS、VSS、BOD<sub>5</sub>、COD、TKN、NH<sub>3</sub>-N、TP 等;进水中各种组分比例;污水处理量。

污水处理厂的运行数据:水温、初沉污泥排放量、剩余污泥排放量、内回流量、外回流量、化学药剂投加量和浓度等。

污水处理厂的性能数据:二沉池出水流量;性能参数浓度,如 TSS、BOD<sub>5</sub>、COD、TN、NH<sub>3</sub>-N、TP;反应器中的 MLSS、DO 等。

通过对收集的数据进行异常值分析,舍弃了异常的数据点,同时结合质量平衡方法,分析了所收集数据的可靠性。这些数据经过整理、分析后作为模型校准和验证数据集。该研究收集了 2015 年全年数据作为模型校准数据集,2016 年全年数据作为模型验证数据集。2015 年和 2016 年进水常规指标如表 1 所示。

表 1 2015 年和 2016 年进水常规指标

Tab. 1 Normal indexes of influent in 2015 and 2016

项 目		流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	TSS/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	COD/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	BOD <sub>5</sub> / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TKN/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	NH <sub>3</sub> - N/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TP/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> - P/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	pH 值
2015 年	平均值	629 944	241	468	224.4	70.7	52.1	5.52	3.557	7.6
	最大值	739 572	880	1 260	818	165.0	154.0	11.40	5.670	8.2
	最小值	461 863	68	222	107	42.4	20.5	2.30	1.890	7.1
2016 年	平均值	632 885	230	510	224	67.7	51.0	4.31	2.800	7.6
	最大值	782 786	1 080	1 370	670	108.0	78.3	6.31	4.100	7.93
	最小值	431 265	70	202	66.6	13.4	1.2	2.49	1.620	7.04

2015 年和 2016 年运行参数的年均值如下:剩余污泥量分别为 1 780、2 670 m<sup>3</sup>/d;初沉污泥量分别为 822、1 043 m<sup>3</sup>/d;外回流量分别为 91 248、124 874 m<sup>3</sup>/d;内回流量分别为 380 137、336 424 m<sup>3</sup>/d;水温分别为 20.9、21 ℃。

### 1.3 工艺模型的概化与建立

利用 Hydromantis 的 GPS-X 模拟软件作为建模平台,考虑到进水数据采用的是总进水数据,同时综合考虑污水厂运行工况的复杂性,为了更贴近实际工程,并便于后续应用的灵活性,模型共分为 4 个

系列,涉及初沉池、化学除磷和碳源投加单元。其中,单一系列工艺的物理参数及使用的模型见表 2。

表 2 工艺物理参数和使用的模型

Tab. 2 Physical parameters and model of process

项 目	有效体积/ $\text{m}^3$	有效面积/ $\text{m}^2$	有效水深/ $\text{m}$	模型
初沉池		4 750	4.0	Empirical
厌氧池	6 248	—	6.5	Mantis2
缺氧池 1 <sup>#</sup>	9 360	—	6.5	Mantis2
缺氧池 2 <sup>#</sup>	9 360	—	6.5	Mantis2
好氧池 1 <sup>#</sup>	10 431	—	6.5	Mantis2
好氧池 2 <sup>#</sup>	10 431	—	6.5	Mantis2
好氧池 3 <sup>#</sup>	10 431	—	6.5	Mantis2
好氧池 4 <sup>#</sup>	10 431	—	6.5	Mantis2
二沉池	—	9 500	4.5	1D

初沉池使用经验模型,相关生物反应池使用 Mantis2 模型,二沉池采用 Takacs 一维沉淀模型。Mantis2 模型由 Hydromantis 公司开发,是基于国际水协 ASM2d 和 ADM1 模型开发的综合全污水厂模型<sup>[4]</sup>。该模型可以描述污水处理厂生物、化学及污泥处理的全部过程,包括液体(活性污泥)和固体(厌氧消化)过程的状态变量。可以描述脱氮除磷过程、外部碳源强化脱氮、厌氧氨氧化(ANAMMOX)过程、金属盐沉淀及沉降、厌氧消化等,允许用户分析碳氮磷去除、资源回收(沼气和鸟粪石)、侧流脱氮等工艺结构和性能,以及各种控制方案的模拟、各种运行情景下的运行费用和能源消耗的模拟计算。工艺模型结构如图 2 所示。

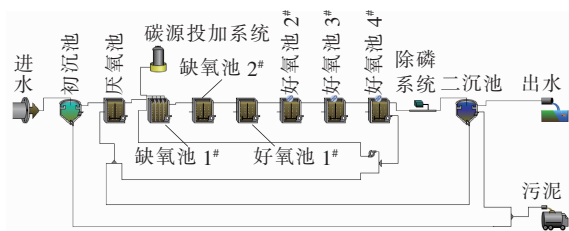


图 2 GPS-X 软件平台建立的模型结构

Fig. 2 Model structure based on GPS-X software platform

#### 1.4 模型校准

反应器污泥浓度的校准:在输入污水进水流量、各种浓度参数和运行参数后,对生物反应器中模拟的污泥浓度与测定的污泥浓度进行拟合。

出水参数的校准:调整模型参数,如进水特征组分比例、工艺运行参数和模型参数,对出水的各种特征指标参数的模拟值与实测值进行拟合。

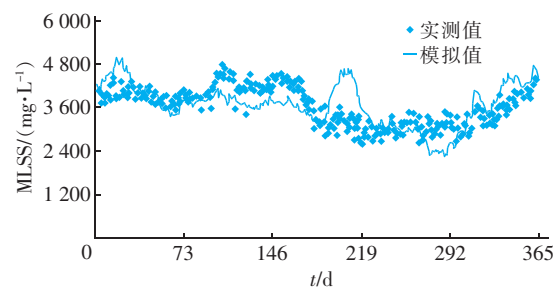
使用 2015 年的进水流量、浓度(COD、BOD<sub>5</sub>、

TKN、NH<sub>3</sub>-N、TP)和运行参数(初沉污泥排放量、剩余污泥排放量、内外回流量、化学加药量等)的平均值进行稳态模拟;采用 365 d 日变化数据进行动态模拟。污水进水特征模型采用 COD 状态变量模型,校准后总 COD 中易生物降解物质所占比例、慢速生物降解 COD 中胶体物质所占比例、溶解性惰性物质所占比例和颗粒性惰性物质所占比例分别为 0.38、0.25、0.04 和 0.15,颗粒性惰性物质中磷的含量、溶解性惰性物质中氮的含量和颗粒性惰性物质中氮的含量分别为 0.011、0.09 和 0.035,其他进水模型中的参数值均采用默认值。

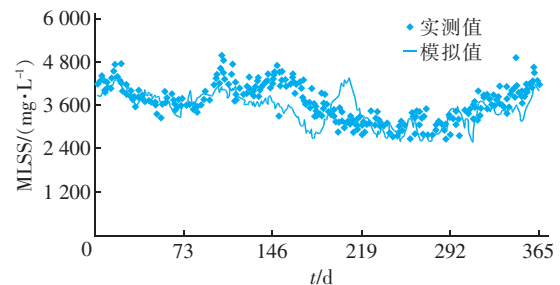
为了进行模型的校准,进行了大量不同情景的动态模拟,通过模拟结果与实测结果的对比,来进一步进行模型输入数据的清洗,同时进行模型动力学和化学计量参数的校准。

大量模拟结果表明,通过适当修正污水处理厂剩余污泥的排放量,舍弃某些进水输入参数的异常点,在模型动力学和化学计量参数方面,只调整自养菌最大比生长速率,模型模拟得到的反应器污泥浓度和出水参数的模拟值可以合理地与实测值拟合。自养菌最大比生长速率是一个受进水特征影响很大的动力学参数,所以常被作为污水特征参数,需通过拟合 NH<sub>3</sub>-N 出水浓度的变化进行校准,氨氧化菌最大比生长速率的校准结果为 0.65 d<sup>-1</sup>。

好氧池中 MLSS 浓度以及二沉池出水中 COD、TN、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的模拟结果和实测结果如图 3 和图 4 所示。



a. 好氧池 1<sup>#</sup>



b. 好氧池 2<sup>#</sup>

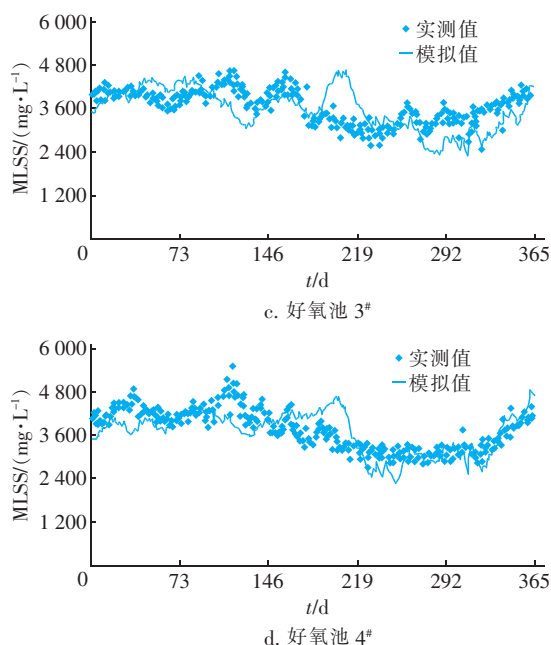


图3 好氧池污泥浓度的模拟结果与实测结果

Fig. 3 Simulated and measured results of MLSS in aerobic tank

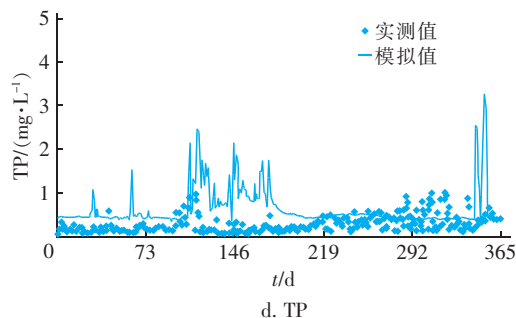
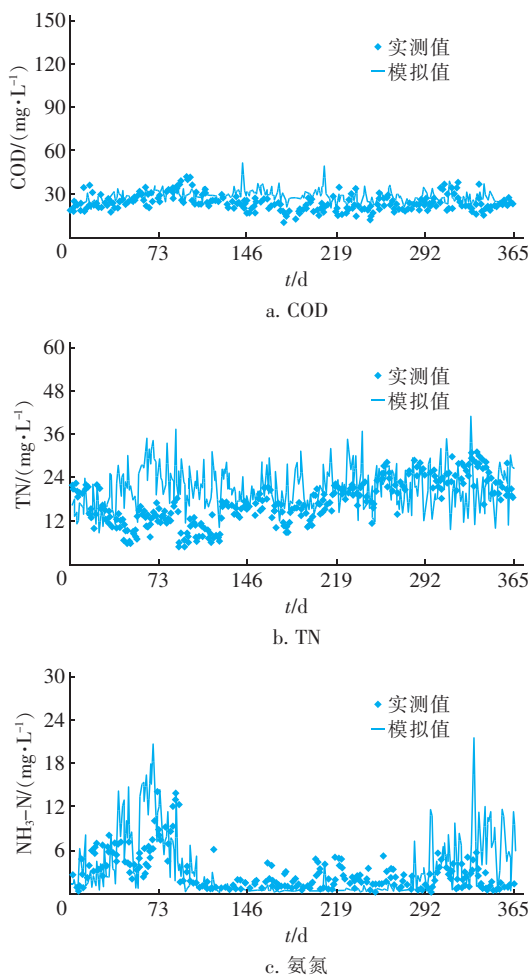


图4 二级出水参数模拟结果与实测结果

Fig. 4 Simulated and measured results of secondary effluent parameters

由图3和图4可以看出,模拟结果与实测结果的总体趋势一致,其中出水COD和氨氮的拟合较好,MLSS、TN和TP在部分时间段未能很好拟合,原因如下:

① 污泥浓度:该参数主要受进水水质特征(VSS/TSS值、总COD中颗粒惰性组分的占比)和排泥量(初沉污泥和剩余污泥)的影响。通过敏感性分析可以发现,本案例中MLSS主要受剩余污泥排放量控制。目前该污水处理厂的剩余污泥排放量数据通过在线流量计获得,仪表的准确性会影响到数据的准确性。但是,由于缺少调整的依据,同时考虑到MLSS总体拟合较好,所以本案例没有对未拟合部分进行调整。

② TN:由于氨氮拟合很好,TN拟合不好的原因主要是硝态氮拟合不够好,即反硝化过程拟合不佳。反硝化过程主要受碳源和内回流的影响,2015年上半年的某些时间拟合误差较大,可能的原因是初沉污泥排放量误差造成了碳源变化。

③ TP:2015年上半年的某些时间段内,模拟的TP与实测数据拟合误差较大,这可能是由于加药量误差引起的。查看运行数据发现,这些时间点的加药量显著低于其他模拟合理时间段的加药量。

### 1.5 模型验证

模拟结果表明,在污水进水组分比例不变,只对运行参数(主要是剩余污泥排放量)进行合理的调整,而生物池模型动力学参数和化学计量参数不变的条件下,模拟得到的污泥产量和出水参数值可以合理地与实测值拟合。其中只需调整一个动力学参数,即自养菌最大比生长速率,通过拟合氨氮出水浓度,将自养菌最大比生长速率调整为 $0.75 \text{ d}^{-1}$ 。

对模型的验证结果如图5和图6所示。



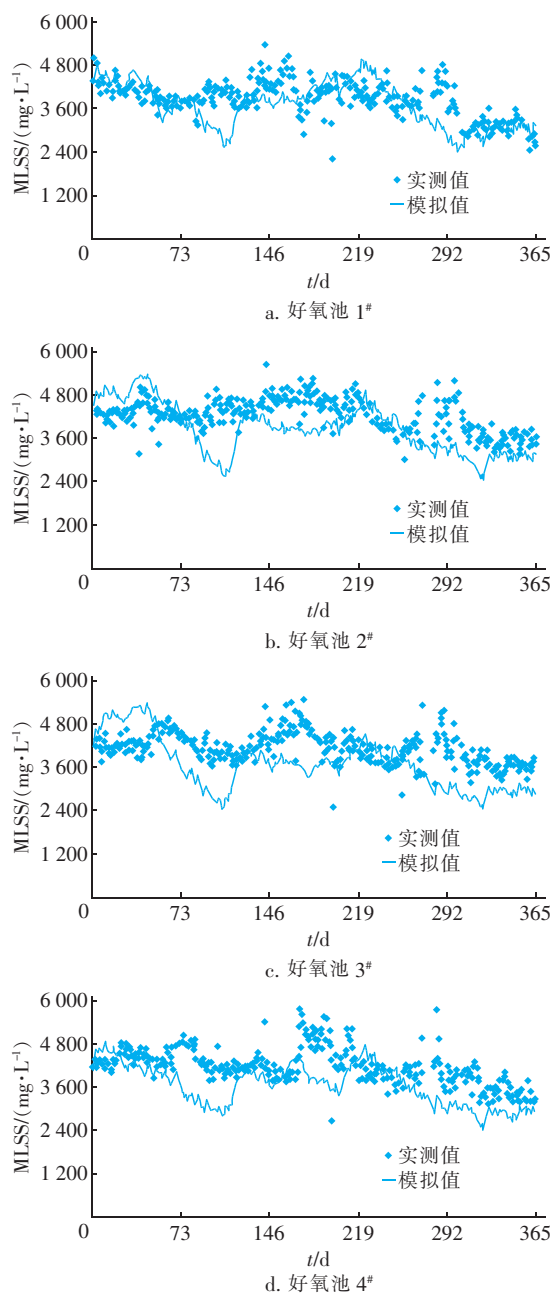


图 5 好氧池污泥浓度模拟结果与实测结果

Fig. 5 Simulated and measured results of MLSS in aerobic

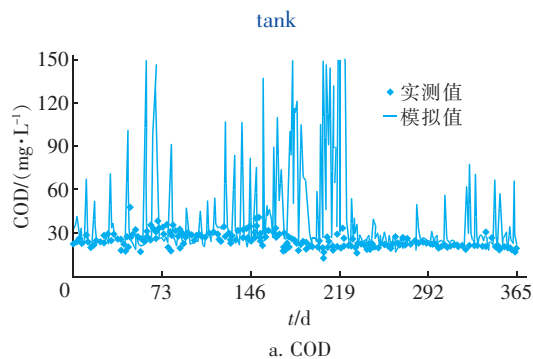


图 6 二级出水参数模拟结果与实测结果

Fig. 6 Simulated and measured results of secondary effluent parameters

由图 5 和图 6 可以看出,好氧池中 MLSS 浓度以及二沉池出水中 COD、TN、 $\text{NH}_3 - \text{N}$  和 TP 的模拟结果和实测结果拟合总趋势一致,其中出水 TP 拟合度很好,MLSS、COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$  和 TN 在部分时间段内拟合不佳,其污泥浓度和 TN 出现上述现象可能的原因与 1.4 节相同。而 COD 拟合误差主要表现在突然的数值升高,出现这种变化可能是由于含有高浓度 COD 的污水排放导致的,需要考虑是否有偷排漏排现象。氨氮在某些时段内存在一些误差,在排除了硝化菌最大比生长速率的影响后,该误差可能是由于溶解氧浓度误差造成的。DO 浓度通过在线溶解氧仪获得,污水处理厂每天只记录 1 个监测点的数据,而本案例中将曝气池分成了 4 段,每段曝气池的 DO 是一个稳态值,因此可能会影响动态模拟的拟合度。

## 1.6 建模小结

从2015年和2016年两年的模型校准和验证的动态模拟结果可以看出,建立的模型可以代表实际污水处理厂,可用来评估污水厂的处理能力和预测污水处理厂的运行性能。在建模过程中,需要重点关注以下几个问题:

① 污泥浓度:这个参数主要受进水水质特征和排泥量的影响,建议加强污泥排放量的监测。当污水特征参数确定后,MLSS主要受剩余污泥排放量控制。2015年和2016年的总体模拟结果与实测数据拟合趋势很好。在某些时间段内MLSS模拟结果与实测数据有较大误差,若调整剩余污泥排放量则很容易拟合。但是,由于缺少调整的依据,没有进行调整。另外,若模型输入的进水水质参数不包含泥区回流液,回流液中污染物浓度也需要加以考虑。当泥区运行异常时,回流液中的污染物浓度过高,该部分污染物对污水处理段的影响不可忽略。

② COD:2016年,出水COD的模拟结果变化非常大,主要原因是进水COD实测数据波动较大。

③ 硝化:2015年和2016年的出水氨氮在调整了硝化菌最大比生长速率以后,模拟结果总体与实测数据拟合较好。但在某些时间段内存在一些误差,这可能是由于溶解氧浓度不同造成的。污水处理厂每天只记录1个监测点的DO值,而本案例中将曝气池分成了4段,每段曝气池的DO是一个稳

态值。因此,可能会影响动态模拟的拟合度。在有溶解氧测定数据时,结合合理的排泥量数据,可以进一步改善出水氨氮的模拟结果。

④ 反硝化:2015年和2016年的出流TN模拟结果在硝化模拟合理校正以后,主要受碳源和内回流的影响。在2015年和2016年上半年的某些时间段内,反硝化模拟结果与实测数据拟合误差较大,这可能是由于初沉污泥排放量误差造成了碳源变化。

⑤ 除磷:2015年和2016年的出水TP模拟结果与实测数据拟合的总体趋势很好。在2015年上半年的某些时段内,TP模拟值与实测值拟合误差较大,这可能是由于加药量误差造成的,因为这些时间点的加药量显著低于其他模拟合理时段的加药量。

## 2 模型应用

利用经过校正的模型评估该污水厂二级处理在不同进水流量下污泥浓度和主要出水参数的影响。这个情景是模拟污水处理厂在雨季时是否可以处理超过设计能力的进水流量。在该模拟情景中,污水进水的特征参数/组分比例不变,运行参数和进水浓度参数使用2015年的数据,模型的化学计量和动力学参数不变。仅仅通过GPS-X软件中的敏感性分析功能,使污水进水流量从 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提高到 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,按照 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的梯度增加,模拟不同进水流量情形下出水参数的变化,结果如图7所示。

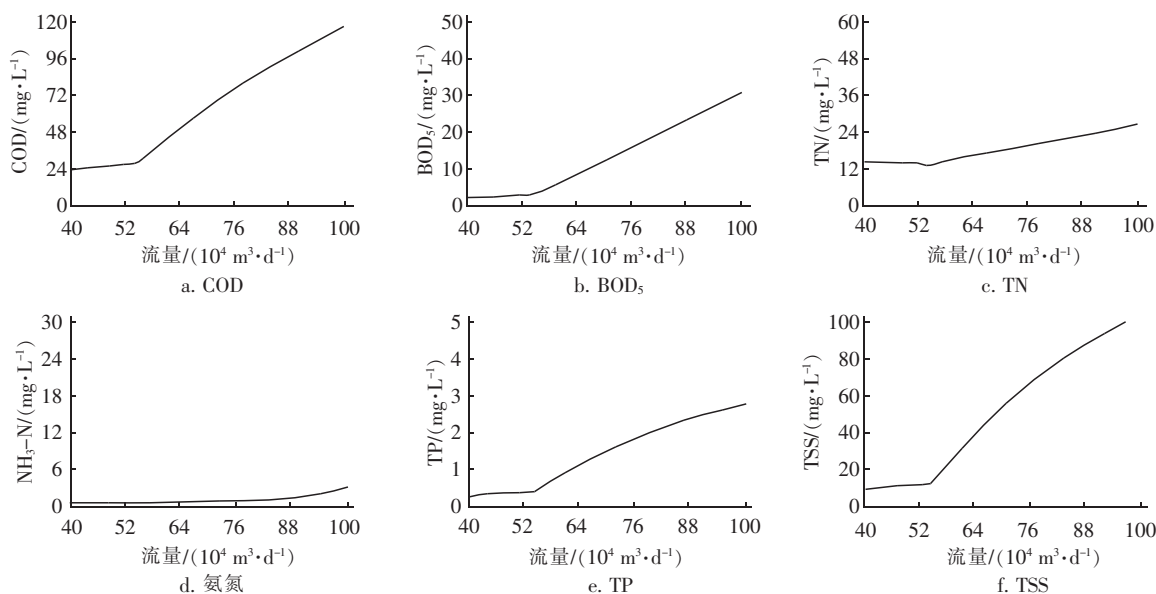


图7 基于校正和验证模型不同进水流量情形下的出水参数模拟结果

Fig. 7 Simulated results of effluent parameters under different influent flow based on verified and calibrated model

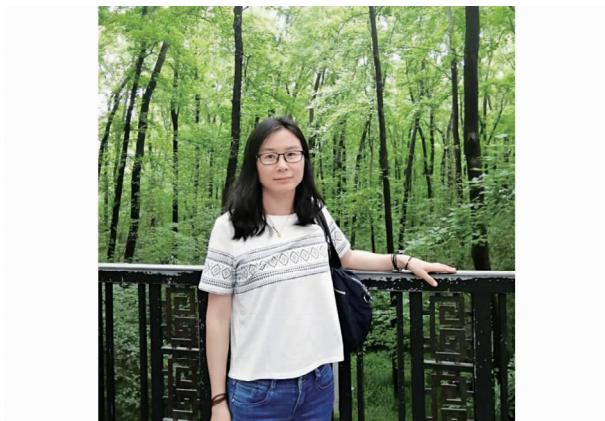
从图 7 可以看出,流量增加对出水氨氮的影响不大,对出水 SS 以及与 SS 相关出水指标的影响较大,因此对二沉池的影响最大;当流量控制在  $52 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  以内时,系统出水污染物浓度基本保持不变,当超过该流量时,除氨氮外的其他污染物浓度增加很快。通过模型的敏感性分析,可以很容易识别出污水处理厂的处理能力及整个污水处理厂可能遇到的瓶颈。

### 3 结论

污水处理厂历史监测数据集的总体质量可以合理反映实际运行状况,能够用来评估污水处理厂的运行性能。自养菌最大比生长速率可看作是污水的特征参数,需通过拟合  $\text{NH}_3\text{-N}$  出水浓度的变化进行校准。在模型校正过程中,污泥浓度的拟合是非常重要的步骤,影响污泥浓度拟合的参数包括进水特征参数(VSS/TSS 值、总 COD 中颗粒惰性组分的占比)、剩余污泥排放量、初沉污泥排放量。通过敏感性分析发现,流量增加对二沉池的影响最大,且存在一个相对安全的处理流量,当超过该流量时,出水污染物指标的增幅加大,需要更加精细的调控运行。

### 参考文献:

- [1] 魏忠庆,上官海东,叶均磊,等. 基于 GPS-X 模拟的污水处理厂提标工艺优化[J]. 中国给水排水,2018,34(19):81-84.  
Wei Zhongqing, Shanguan Haidong, Ye Junlei, et al. Optimization of upgrading design of a wastewater treatment plant based on GPS-X simulation[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(19): 81-84 (in Chinese).
- [2] 丁晓倩,赵剑强. GPS-X 模拟的三种  $\text{A}^2/\text{O}$  工艺脱氮除磷效果比较[J]. 中国给水排水,2016,32(19):26-30.  
Ding Xiaoqian, Zhao Jianqiang. Comparison of three kinds of  $\text{A}^2/\text{O}$  processes for nitrogen and phosphorus removal based on GPS-X simulation[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(19): 26-30 (in Chinese).
- [3] 汪林,张代钧,艾海男,等. 应用 GPS-X 软件模拟 CAST 污水处理厂及优化化学除磷[J]. 环境工程学报,2010,4(7):1493-1497.  
Wang Lin, Zhang Daijun, Ai Hainan, et al. Simulation and optimizing chemical removal of phosphorus of CAST WWTP using GPS-X [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(7): 1493-1497 (in Chinese).
- [4] 郝二成,王如意,胡志荣,等. 大型污水处理厂工艺模拟应用实例[J]. 中国给水排水,2018,34(5):82-87.  
Hao Ercheng, Wang Ruyi, Hu Zhirong, et al. A case study of process modelling of a large-scale wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(5): 82-87 (in Chinese).
- [5] 施汉昌,胡志荣,杨殿海,等. 活性污泥工艺模型使用指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.  
Shi Hanchang, Hu Zhirong, Yang Dianhai, et al. Activated Sludge Process Model Guide [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015 (in Chinese).
- [6] Hulsbeek J J, Kruit J, Roeleveld P J, et al. A practical protocol for dynamic modelling of activated sludge systems [J]. Water Sci Technol, 2002, 45(6): 127-136.



作者简介:张辉(1979-),女,山东青岛人,硕士,高级工程师,主要从事污水处理工艺开发、模拟与优化方面的研究工作。

E-mail: zhanghui@bdc.cn

收稿日期:2019-05-10