

# 大型污水处理厂工艺模拟应用实例

郝二成<sup>1,2</sup>, 王如意<sup>3</sup>, 胡志荣<sup>3</sup>, 袁星<sup>1,2</sup>, 常江<sup>1,2</sup>, 阜巍<sup>1,2</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)

**摘要:** 污水厂工艺模拟(数学模型)已被广泛接受,并应用于城市污水厂的设计、升级改造和优化运行。但是,模拟中的困难和挑战是缺少可靠、高质量的数据进行污水厂模型的校准和验证,通常需要投入大量的人力和资金收集数据。另一方面,在污水厂运行管理中,为满足监管而投入大量人力和资金所获得的数据(历史监测数据)没有得到很好的利用,价值没有得到很好的挖掘。利用北京某大型污水厂两年的历史监测数据对工艺模型进行校准和验证,并应用校正后的模型为该污水厂的运行管理提供优化方案。这个实例充分发掘了历史监测数据的价值,示范性地探索了如何利用污水处理的历史监测数据进行污水处理模型校准和验证,并为污水处理厂的优化运行、升级改造提供了可靠方案。

**关键词:** 污水处理厂; 工艺模拟; 监测数据; 脱氮

**中图分类号:** TU992.4 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)05-0082-06

## A Case Study of Process Modelling of a Large-scale Wastewater Treatment Plant

HAO Er-cheng<sup>1,2</sup>, WANG Ru-yi<sup>3</sup>, HU Zhi-rong<sup>3</sup>, YUAN Xing<sup>1,2</sup>, CHANG Jiang<sup>1,2</sup>, FU Wei<sup>1,2</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)

**Abstract:** The process modelling (mathematical model) of wastewater treatment plant (WWTP) has been widely accepted and applied for design, retrofit, and optimization of municipal WWTP. One of the challenges in the process modelling is the lack of reliable and high-quality data for the calibration and validation of the model. Collection of the data costs considerable budget. However, the monitoring data from the operation and management of WWTP could be better utilized and the value of the data could be further explored. This study calibrated and validated a process model using two years' monitoring data from a large wastewater treatment plant in Beijing, and provided a calibrated and optimized model for the operation and management of the wastewater treatment plant. This example fully explored the value of the historical monitoring data, demonstrated the calibration and verification of sewage treatment models using historical monitoring data, and provided a reliable plan for the optimization of the operations and the retrofit of wastewater treatment plants.

**Key words:** wastewater treatment plant; process modelling; monitoring data; nitrogen removal

随着污水厂出流排放及节能降耗的要求越来越严格,污水处理工艺越来越复杂,无论是污水厂的设计还是运行都面临着巨大挑战。污水处理工艺模拟作为一个强有力的工具,它能使污水厂最大程度地利用已有设施的处理能力,发挥新建污水处理设施的效益,以及提出合理的污水厂升级改造方案以满足更严格的污水排放标准或满足未来污水量的增长<sup>[1,2]</sup>。在欧美和南非,污水处理厂的工艺模拟已经被广泛接受并应用于城市污水厂的设计、升级改造和优化运行。相比欧美国家,我国利用污水处理厂的工艺模拟指导设计、优化运行管理尚处于起步阶段。而工艺模拟的困难和挑战是缺少可靠的、高质量的数据进行污水厂模型的校准和验证。另一方面,在污水厂的运行管理中,为满足监管和管理的需要,投入大量的人力和资金获得的数据没有得到很好的利用,价值没有得到很好的挖掘。因此,如何利用污水处理的历史监测数据进行污水处理模型的校准和验证,开发污水厂工艺模拟的标准化方法和实践,是解决上述困难的有效途径,也有助于加快我国污水厂数字化的进程。

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>[3~5]</sup>,结合北京市的污水处理实践(监管和排放标准),以某大型污水厂为实例,示范基于收集、整理、分析评估污水厂历史监测数据进行污水厂模型的校正和验证。同时,利用校正后的模型为污水处理的优化运行提供方案。

## 1 工艺模型的建立

### 1.1 污水厂工艺概述

北京某大型污水处理厂主要解决北京市某一区域排放的生活污水。常规工艺分两期建设,分别为一期的倒置 A<sup>2</sup>/O 工艺和二期的正置 A<sup>2</sup>/O 工艺,污水来自同一管网,处理规模均为 20 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,分别于 2002 年 10 月和 2004 年 12 月投入运行。一期倒置 A<sup>2</sup>/O 工艺缺氧段池容较小,未设内回流,脱氮效果不理想;二期采用正置 A<sup>2</sup>/O 工艺,增大了缺氧池池容,内回流设为 300%。一期的曝气池有 3 组,每组 3 个廊道;二期的曝气池有 4 组,每组 5 个廊道。

### 1.2 数据收集与分析方法

首先,收集该污水厂历史数据用于模型校准和验证:①运行参数,如回流污泥量(RAS)、剩余污泥量(WAS)、曝气池的布气情况及 DO 浓度、生化反应

池和回流的混合液悬浮固体浓度(MLSS)以及温度等;②进水流量和一系列水质指标的浓度,如 COD、TSS、TKN、TP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 等;③污水处理厂性能监测指标,如出水 TSS、COD、TN、NH<sub>3</sub>-N、TP 等。然后,对收集的数据进行异常值分析,舍弃异常的数据点,如 NH<sub>3</sub>-N 浓度明显大于对应的 TN 浓度。最后,通过进出水质量衡算,如 TSS 质量衡算以及 N、P 等元素的质量衡算,分析所获得数据的可靠性。

### 1.3 工艺模型的建立

利用 Hydromantis 的 GPS-X<sup>®</sup> 模拟软件作为建模平台。为了研究方便,在建立污水厂的工艺模型时进行了简化,没有考虑曝气沉砂池,只考虑了生物处理单元(见图 1)。该污水厂工艺模型结构由 1 个进水单元、一期和二期分别由 5 个(3 个曝气)和 6 个(4 个曝气)完全混合反应器组成的生化处理单元、1 个沉淀池、1 个污泥处理单元(用于引出剩余污泥流)以及 1 个出流排放单元等组成。各处理单元的物理及运行参数见表 1。

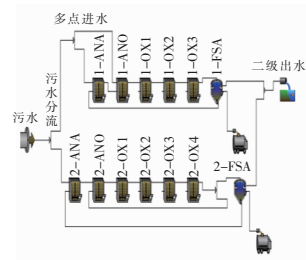


图 1 污水处理厂工艺流程的模拟

Fig. 1 Simulation of treatment process of WWTP

表 1 工艺模型中各处理单元的物理和运行参数

Tab. 1 Physics and operation parameters of each unit

项 目		体积/m <sup>3</sup>	面积/ m <sup>2</sup>	池深/ m	曝气头 数量	DO 均值/ (mg · L <sup>-1</sup> )
一期	缺氧池	12 240	2 040	6.0	不曝气	0
	厌氧池	20 136	3 356	6.0	不曝气	0
	好氧池 1	5 064	844	6.0	2 059	2
	好氧池 2	37 440	6 240	6.0	15 220	2
	好氧池 3	37 440	6 240	6.0	15 220	2
	沉淀池	70 800	14 160	5.0	—	—
二期	厌氧池	12 884	2 147.3	6.0	不曝气	0
	缺氧池	25 764	4 294	6.0	不曝气	0
	好氧池 1	12 884	2 147.3	6.0	5 237	0.8
	好氧池 2	25 764	4 294	6.0	10 473	1.5
	好氧池 3	25 764	4 294	6.0	10 473	2
	好氧池 4	25 764	5 725.3	4.5	13 964	2
	沉淀池	70 800	14 160	5.0	—	—

在 GPS - X 中采用 Mantis2 模型对污水厂一期及二期的生化处理工艺进行模拟,二沉池采用 Takacs 简单的一维沉淀模型。Mantis2 模型是由 Hydromantis 公司基于 ASM2d 和 ADM1 模型推出的,它综合了 ASM2d 模型的生物 C、N、P 去除反应,UCTADM1 模型的厌氧消化过程以及 Musvoto Mode 模型的无机物沉淀过程。Mantis2 模型能较好地模拟实际污水处理过程,应用广泛。

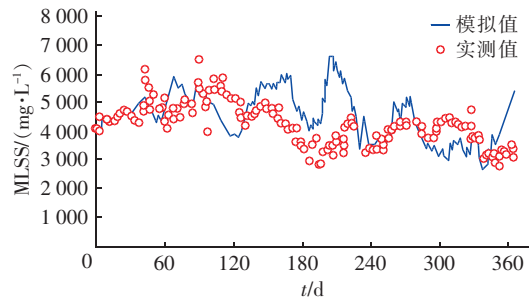
1.4 模型校准

模型的校准,即调整模型的参数使预测结果和测量数据相符,是模拟过程中非常关键的一步,直接关系到模拟结果的准确程度。模型校准可细化为以下步骤:①污水进水特征化,即把常规数据转变成模型所需输入的数据,需输入 COD、TKN、NH<sub>3</sub> - N、TP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> - P 和一组化学计量系数;②污泥产量的校准,即反应器中混合液浓度的校准;③模型参数的校准。

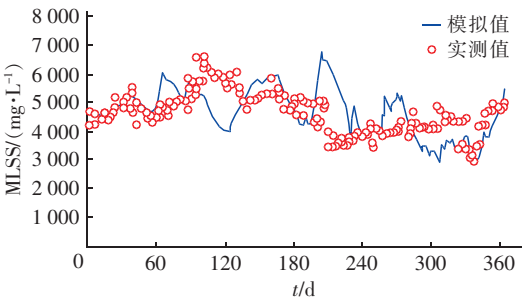
采用污水厂 2015 年 1 月—12 月的历史监测数据进行模型校准。稳态模拟所用进水数据为年平均,如表 2 所示。采用 COD 进水模型,表 3 为根据进出水水质校准后的 2015 年进水水质特征,其他进水模型中的参数均采用默认值。

表 2 2015 年进水常规指标年平均值及出水标准值  
Tab. 2 Conventional index of influent and effluent standard in 2015

项 目	年平均值	进水 最大值	进水 最小值	出水 标准
流量/(m <sup>3</sup> · d <sup>-1</sup> )	411 540	239 166	158 855	—
总 COD/(mg · L <sup>-1</sup> )	485	1 660	96	60
TKN/(mg · L <sup>-1</sup> )	66.4	105.0	32.6	20(TN)
NH <sub>3</sub> - N/(mg · L <sup>-1</sup> )	48.4	86.8	15.3	8
TP/(mg · L <sup>-1</sup> )	6.0	51.4	3.2	1.0
TSS/(mg · L <sup>-1</sup> )	380	2 820	52	20
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> - P/(mg · L <sup>-1</sup> )	3.7	6.0	2.6	—
pH 值	7.47	8.17	7.02	6 ~ 9



a. 一期好氧池中 MLSS 浓度



b. 二期好氧池中 MLSS 浓度

表 3 经模拟校准后的进水特征

Tab. 3 Influent features after calibration

项目	意义	校准值	默认值
frss	总 COD 中易生物降解物质所占比例	0.28	0.2
frsac	总 COD 中乙酸所占的比例	0.12	0
frscol	慢速生物降解 COD 中胶体物质所占的比例	0.25	0.15
frsi	总 COD 中溶解性惰性物质所占比例	0.03	0.05
frxi	总 COD 中颗粒性惰性物质所占比例	0.15	0.13
ipxi	颗粒性惰性物质中磷的含量	0.011	0.01
insi	溶解性惰性物质中氮的含量	0.09	0.05
inxi	颗粒性惰性物质中氮的含量	0.035	0.05

在稳态模拟的基础上,用 2015 年的进水水质、水量日变化数据对模型生化反应动力学及化学计量参数进行校准。进水的 COD 和 NH<sub>3</sub> - N 浓度波动较大,而且水温随季节的变化十分明显(在 14 ~ 27 ℃之间)。

由于水温对硝化速率的影响较为显著,所以结合实测的水温,模拟了水温的动态影响。自养菌(氨氧化菌和亚硝态氮氧化菌)的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,所以经常被看作是污水特征参数,需要通过拟合 NH<sub>3</sub> - N 和亚硝态氮出流浓度的变化进行校准。氨氧化菌的最大比生长速率的校准结果为 0.48 d<sup>-1</sup>,该值在朱向东等人<sup>[6]</sup>的校准结果范围(0.4 ~ 0.55 d<sup>-1</sup>)内。另外,亚硝态氮氧化菌的最大比生长速率也由默认值的 1.0 d<sup>-1</sup>调为 0.53 d<sup>-1</sup>。值得一提的是,反硝化氧抑制系数由默认值的 0.2 mgO<sub>2</sub>/L 上调至 0.6 mgO<sub>2</sub>/L,说明曝气系统中存在同步硝化反硝化现象,即存在氮的非同化损失。

经校准,2015 年污水厂一期和二期好氧池中的 MLSS 浓度以及二沉池出水 COD、TN、NH<sub>3</sub> - N 浓度的模拟结果和实测结果能够较好地吻合,具体如图 2 所示。

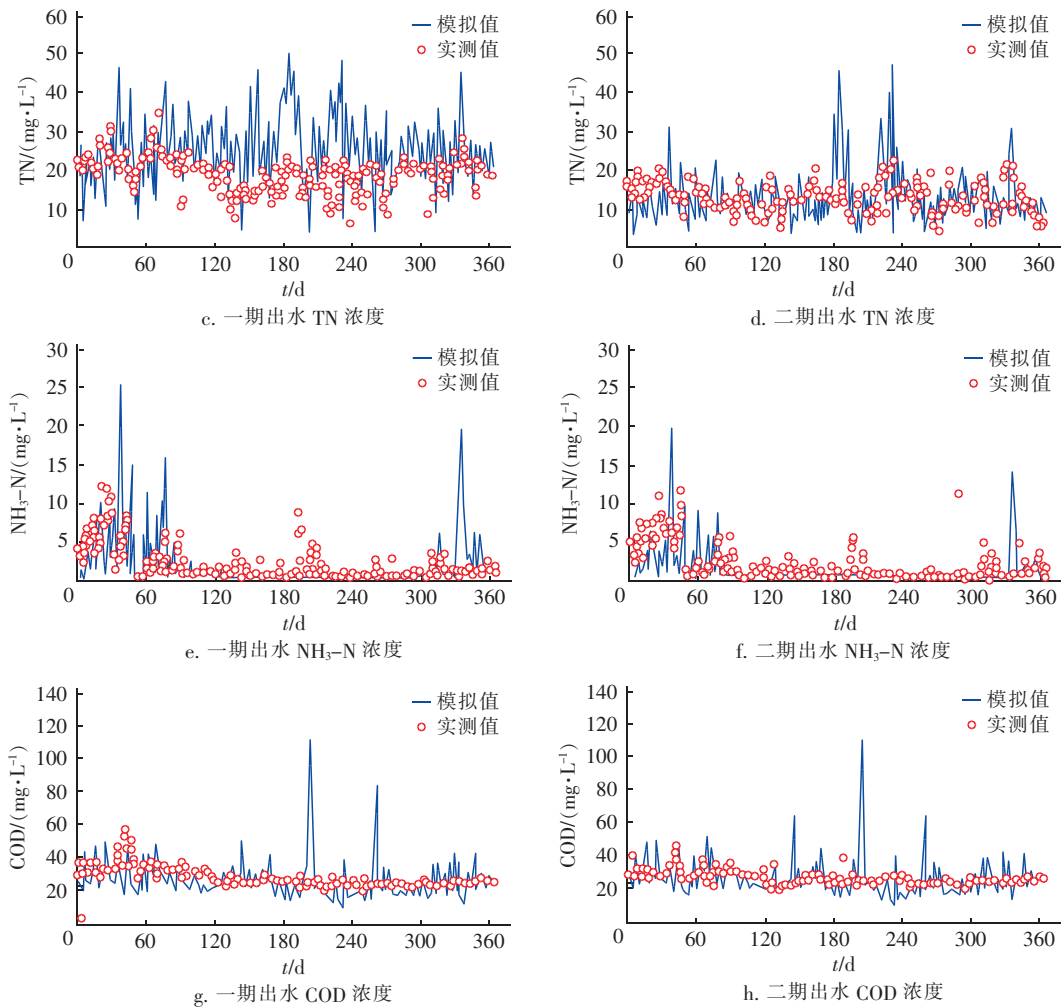


图2 2015年好氧池MLSS以及二沉池出水TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和COD的模拟值与实测值对比

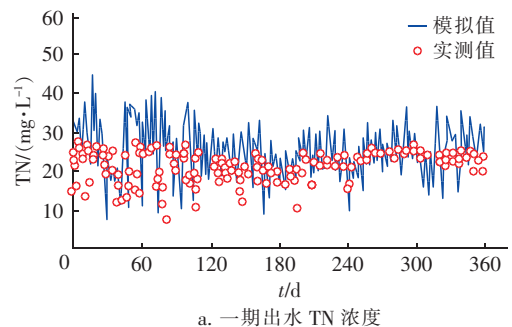
Fig. 2 Comparison of simulation value and measured value of MLSS in aerobic tank and second settling tank effluent quality in 2015

### 1.5 模型验证

为了进一步验证模型校准结果的准确性,采用该污水厂2014年1月—12月的历史监测数据对模型进行验证。由于2014年进水水质、水量变化以及运行情况与2015年存在略微的差别,所以以下参数在校准结果的基础上进行了调整:①2014年的出水氨氮以及亚硝态氮浓度总体上比2015年低,可见2014年自养菌的生长情况比2015年的好,所以氨氧化菌的最大比生长速率以及亚硝态氮氧化菌的最大比生长速率分别调为 $0.65 \text{ d}^{-1}$ 和 $0.73 \text{ d}^{-1}$ ;②2014年的总氮和硝态氮浓度总体上比2015年高,可见2014年生化反应池的反硝化效果不如2015年,这可能是由于2014年好氧池的曝气效果较好,曝气池内的同步硝化反硝化存在的程度较2015年低,因而将反硝化氧抑制系数调整为 $0.2 \text{ mgO}_2/\text{L}$ 。

验证结果见图3。可以看出,2014年,二沉池出水指标的模拟结果和实测结果吻合较好。

综上可以看出,模拟出水水质的波动较实测结果大,这可能是由于取样的密度不够大,每天一个取样点还不能完全反映每天的进水情况。因此,若要实现更好的模拟,需进一步探索水质、水量的变化规律。





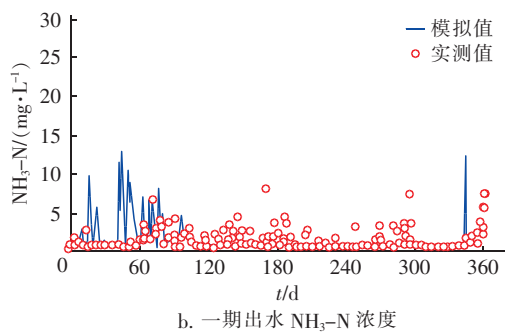


图 3 2014 年一期二沉池出水水质模拟值与实测值对比  
Fig. 3 Comparison of simulation value and measured value of second settling tank effluent in 2014

2 模型应用

2.1 应用目的

由该污水处理厂的历史数据可知,该污水厂出水 TN 达标率并不理想,尤其是在冬季低温条件下,氨氮去除率明显降低,这与氨氧化细菌、硝化细菌在低温下最大比增长速率明显降低有关。虽然王阿华等<sup>[7]</sup>在探索了冬季水温对低温脱氮影响规律的基础上提出了低温生物脱氮总体对策:DO 维持在 4 ~ 6 mg/L、提高混合液回流比、延长污泥龄等措施,但是若要针对污水厂的具体情况定量地实现出水稳定达标,仍需要通过工艺模拟的手段来获得具体的工艺优化方案。

应用经过两年历史监测数据校准验证后的污水处理厂模型,通过工艺模拟提出特许经营和北京新地标条件下污水处理厂一期、二期工艺的最优运行策略,确保污水处理厂的出水水质稳定达标,降低运行成本。为了这个目的,定义如下模拟情景,即采用该污水处理厂 2015 年 1 月进水指标均值作为情景模拟的基础数据,设定水温为 13 ℃,MLSS < 4 500 mg/L。实现的目标:一期、二期的出水总氮浓度稳

定在 15 mg/L 以下;保证冬季出水氨氮浓度稳定降到 2.5 mg/L 以下。

2.2 模拟情景的设计与分析

根据以上目的与要求,设计了如表 4 和表 5 所示的模拟情景。通过分析不同情景的模拟结果可以得到如下结论:

① 水温从 15 ℃降至 13 ℃对自养菌的生长速率影响极大。在构筑物条件、设计水量不变的情况下,13 ℃水温条件下,即使是充分曝气并加大外回流比以及内回流比(二期),污水厂出水达标排放仍然比较困难。

② 总进水量的降低,即适当提高水力停留时间,同时提高污泥停留时间,从而保持反应池中适当的污泥浓度的方法能够在低温条件下降低出水的 NH<sub>3</sub> - N 浓度,但是当 NH<sub>3</sub> - N 浓度降到一定值后,一期出水 TN 难以达标。一期出水 TN 浓度难以降至 15 mg/L 以下主要是由于缺氧段碳源比较少。所以,适当提高二期进水的分配比(占进水流量的 65%),再略微调高好氧池的 DO 浓度即可实现一期、二期出水 TN < 15 mg/L。但进水量仍需要满足小于 27 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d 的条件,即小于设计流量 40 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d 的 68%。

③ 无论如何调整其他运行参数,污水处理厂一期的 TN 去除效果仍然不太理想,这主要是因为缺少内回流。如果一期增加 300% 的内回流,则可以大大提高对 TN 的去除效果。因此,实现一期、二期在低温条件下出水氨氮和总氮浓度分别低于 2.5 mg/L 和 15 mg/L 的措施如下:增加一期的内回流,适当降低进水量( < 318 830 m<sup>3</sup>/d),并维持反应池中一定的污泥浓度,同时曝气维持适当的 DO 浓度(4 mg/L)。

表 4 污水厂一期不同情景的设定值与模拟结果

Tab. 4 Set data and simulation results of different scenarios of the first phase project

情景	水温/ ℃	总流量/ (m <sup>3</sup> · d <sup>-1</sup> )	一期						出水指标			
			流量/ (m <sup>3</sup> · d <sup>-1</sup> )	好氧池 1 DO/ (mg · L <sup>-1</sup> )	好氧池 2 DO/ (mg · L <sup>-1</sup> )	好氧池 3 DO/ (mg · L <sup>-1</sup> )	好氧池 HRT/h	SRT/ d	NH <sub>3</sub> - N/ (mg · L <sup>-1</sup> )	亚硝态氮/ (mg · L <sup>-1</sup> )	硝态氮/ (mg · L <sup>-1</sup> )	TN/ (mg · L <sup>-1</sup> )
1	15	418 830	209 415	2.0	2.0	2.0	9.2	12	7.2	16.2	1.2	27.3
2	13	418 830	209 415	6.0	6.0	6.0	9.2	12	15.1	4.7	5.4	27.9
3	13	278 830	139 415	2.0	2.0	2.0	13.8	21	2.2	2.3	15.1	22.2
4	13	270 000	94 500	2.0	2.0	2.0	20.3	34	1.0	1.0	10.2	14.8
5 <sup>a</sup>	13	318 830	159 415	4.0	4.0	4.0	12.0	18	2.5	1.9	7.4	14.4

注:“a”表示一期增加 300% 的内回流。

表 5 污水厂二期不同情景的设定值与模拟结果

Tab.5 Set data and simulation results of different scenarios of the second phase project

情景	二期							出水指标			
	流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	好氧池 1 DO/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	好氧池 2 DO/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	好氧池 3 DO/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	好氧池 4 DO/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	好氧池 HRT/h	SRT/ d	$\text{NH}_3 - \text{N}/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	亚硝态氮/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	硝态氮/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TN/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
1	209 415	0.8	1.5	2.0	2.0	10.3	15	5.9	2.3	5.1	16.0
2	209 415	6.0	6.0	6.0	6.0	10.3	15	7.1	1.4	5.9	17.1
3	139 415	0.8	1.5	2.0	2.0	15.5	25	3.0	1.4	5.6	12.6
4	175 500	2.0	2.0	3.0	3.0	12.3	19	4.5	1.3	6.2	14.7
5	159 415	4.0	4.0	4.0	4.0	13.6	21	2.2	0.8	8.8	14.4

3 结论

利用北京某大型污水厂两年的历史监测数据对工艺模型进行校准和验证,并应用校正后的模型为该污水厂的运行管理提供优化方案。通过对该污水厂的模拟校验及情景模拟分析,可知该污水厂的曝气池中存在同步硝化反硝化现象,且 2015 年明显大于 2014 年;一期总氮去除效果不理想主要是因为缺少内回流,使缺氧段因缺少硝态氮而不能进行反硝化;氨氧化菌和亚硝态氮氧化菌的最大比生长速率受温度的影响显著,从而影响氨氮的去除。实现一期、二期在水温  $< 13\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下出水氨氮和总氮分别低于  $2.5\text{ mg/L}$  和  $15\text{ mg/L}$  的措施是:增加一期的内回流,适当降低进水量 ( $< 318\ 830\text{ m}^3/\text{d}$ ),并维持反应池中一定的污泥浓度,同时曝气维持适当的 DO 浓度 ( $4\text{ mg/L}$ )。

参考文献:

[1] 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).

[2] 卢欢亮, 胡志荣, 李朝晖, 等. 污水处理厂工艺模型的开发及工程应用[J]. 给水排水, 2014, 40(10): 111 – 117.  
Lu Huanliang, Hu Zhirong, Li Zhaohui, *et al.* Process model development and its engineering application for a wastewater treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(10): 111 – 117 (in Chinese).

[3] Hulsbeek J J W, 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.

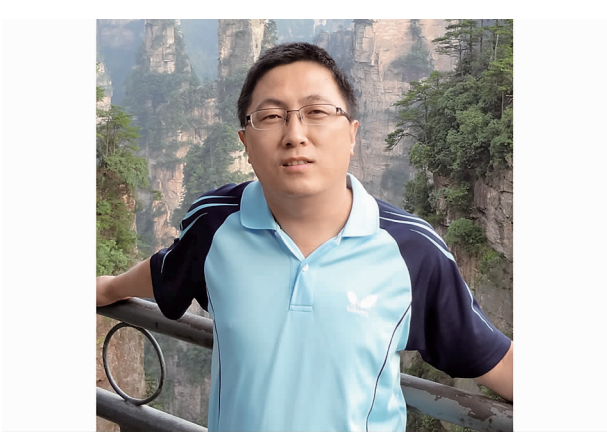
[4] Roeleveld P J, van Loosdrecht M C M. Experience with

guidelines for wastewater characterisation in The Netherlands[J]. Water Sci Technol, 2002, 45(6): 77 – 87.

[5] Henze M. Characterization of wastewater for modelling of activated sludge processes [J]. IWA Publishing, 1992, 25: 1 – 15.

[6] 朱向东, 郝二成, 周军, 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.  
Zhu Xiangdong, Hao Ercheng, Zhou Jun, *et al.* Application of ASM2d model in Gaobeidian Wastewater Treatment Plant in Beijing[J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(4): 101 – 104 (in Chinese).

[7] 王阿华, 杨小丽, 叶峰. 南方地区污水处理厂低温生物脱氮对策研究[J]. 给水排水, 2009, 35(10): 28 – 33.  
Wang Ahua, Yang Xiaoli, Ye Feng. Study on bio-denitrification in wastewater treatment plant under low temperature in South China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(10): 28 – 33 (in Chinese).



作者简介:郝二成(1975 – ), 男, 河北辛集人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为污水处理工艺优化和模拟技术。

E – mail :haoercheng@163. com

收稿日期:2017 – 07 – 12