

污水处理工艺模型的验证及优化

李 岚, 刘世德, 徐瑞捷, 周 丹, 张晓凤
(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381)

摘 要: 以浙江省某污水处理厂一期工程的实际进水水质、水量以及各构筑物设计参数等为基础,进行污水厂工艺模拟。结合已有的进水组分确定原则,并参考周边地区的组分数据,找出符合我国污水厂实际情况的进水组分确定方法,根据该方法调整模拟软件的进水组分参数,模拟结果与实际出水水质一致性较好,表明该方法具有可行性和实用性。同时以调整后的模型参数为基础,对该污水厂新建的二期工程进行工艺流程和设计参数的验证及优化。最终通过模型模拟,提升污水厂设计计算的可靠性,确定最佳设计参数,节省项目工程投资。

关键词: 污水处理厂; 进水组分; 模拟; 验证及优化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)09-0071-06

Verification and Optimization of Wastewater Treatment Process Model

LI Lan, LIU Shi-de, XU Rui-jie, ZHOU Dan, ZHANG Xiao-feng
(North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China)

Abstract: The process of first-phase project of a wastewater treatment plant in Zhejiang Province was simulated based on actual influent quality, quantity and design parameters. Then, the determination method of the influent component in line with the actual situation of Chinese wastewater treatment plants was founded through combining with the existing principle of determining the influent component and referring to the component data of surrounding areas. According to the method, the parameters of influent component in the simulation software were adjusted. The simulation results were in good agreement with the actual effluent quality, indicating that the method was feasible and practical. Meanwhile, the process and design parameters of the newly-constructed second-phase project of the wastewater treatment plant were verified and optimized based on the adjusted model parameters. Through the model simulation, the reliability of the design and calculation of the wastewater treatment plant was eventually improved, the optimal design parameters were determined, and the project investment was saved.

Key words: wastewater treatment plant; influent component; simulation; verification and optimization

目前,污水处理工艺过程仿真模拟软件的应用并未完全开发出模拟软件的计算潜力,也缺乏详尽、全面的模拟流程及设计模板。由于模拟软件均采用复杂的活性污泥计算模型进行后台计算,故对进 waters 水质的组分要求较高,而目前国内污水厂很难满足该要求。此外,仿真模拟软件大都为国外设计制作,其后台的默认设计参数均按照国外污水厂的情况进

行设置,对于国内污水厂存在一定的偏差。

笔者以浙江省某污水处理厂一期工程的进水水质、水量以及各构筑物设计参数等为基础,通过比较模拟出水水质与实际出水水质调整模拟软件的后台参数,使之更加适合该污水处理厂的实际情况,从而使模拟结果更加准确。并在此基础上对该污水厂新建的二期工程进行了优化设计,可为新建工程的设

计提供参考。

1 进水组分的确定及模拟分析

1.1 污水厂一期工程简介

该污水处理厂一期工程设计规模为 $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 采用生物脱氮除磷改良 AAO 工艺, 后加辅助化学除磷工艺, 设计进出水水质见表 1。

表 1 一期工程设计进出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality of the first-phase project $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	BOD ₅	COD	SS	TN	NH ₃ -N	TP
进水	220	550	330	55	40	11
出水	20	60	20	20	15	1

初沉池采用矩形平流沉淀池, 共 3 座, 每座 6 格, 设计表面负荷: $q_{\max} = 3.86 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 单格尺寸为 $55 \text{ m} \times 8.5 \text{ m} \times 5.26 \text{ m}$; 生物池共 3 座, 总有效容积为 $122\,140 \text{ m}^3$, 有效水深为 8.0 m , 设计流量下总水力停留时间为 12.84 h , 悬浮固体浓度为 $3\,500 \text{ mg/L}$, 泥龄为 17.39 d 。二沉池采用周进周出辐流式沉淀池, 直径为 48 m , 池深为 5.1 m , 设计表面负荷为 $1.50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 具体工艺流程见图 1。

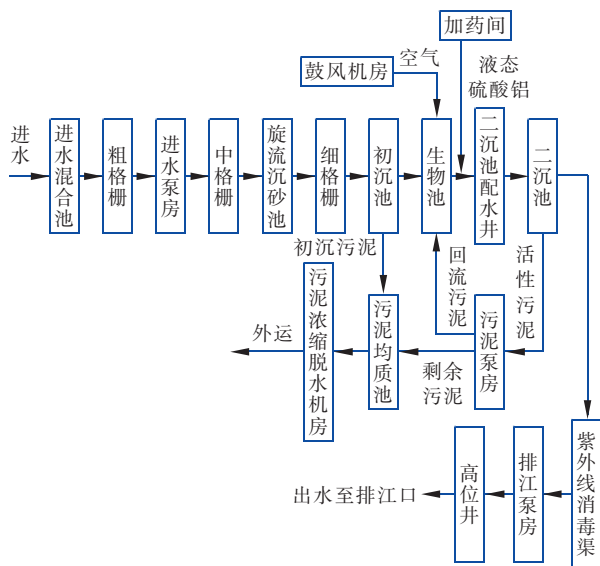


图 1 工艺流程

Fig. 1 Flow chart of process

目前, 该污水处理厂一期工程已经稳定运行, 且各项出水指标基本达到设计要求。为节省碳源, 初沉池超越运行, 好氧池溶解氧基本控制在 2 mg/L 左右, 内回流比控制为 180% , 外回流比控制在 100% 左右。实际运行过程中, 前置反硝化段并未按照设计流程运行, 可将其视作厌氧段。运行中对进出水

水质、温度、污泥浓度等均进行了长期的测定。

1.2 工艺流程模拟及初步结果

模拟采用加拿大 EnviroSim 联合公司研制的 BioWin 模拟软件, 该软件的核心是 ASDM 综合模型, 并在 ASDM 模型的基础上建立了进水、反应器、沉淀池、污泥处理等共计 30 个工艺单元模块, 可为污水处理厂多种常规处理工艺建立模型^[1]。

取 2013 年 6 月 20 日—2014 年 6 月 19 日期间的数据作为原始数据, 并按照 BioWin 模型提供的默认组分输入进水水质。按照污水处理厂实际工艺参数建立的模拟流程如图 2 所示。

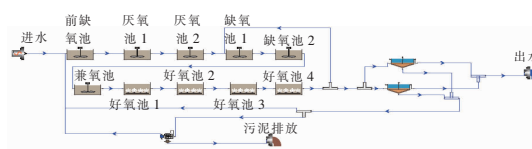


图 2 一期工程模拟流程示意

Fig. 2 Schematic diagram of process model of the first-phase project

考虑到软件模拟的效率, 该模拟流程仅取现状污水处理厂 6 组工艺流程中的 1 组作为模拟对象。相应的水量及池容等取现有数据的 $1/6$ 。此外, 为创造生物反应池的推流效果, 分段计算现有各段生物反应池的相应数据。

按季节将模拟过程分为 4 部分: 12 月—2 月温度取 14°C ; 3 月—5 月温度取 18°C ; 6 月—8 月温度取 22°C ; 9 月—11 月温度取 18°C 。模拟结果显示, 采用软件默认进水组分时, 出水模拟数值与实测出水数值相比, 部分指标如总氮变化趋势差别不大, 但氨氮、SS 等指标存在较大差别, 且出水 BOD₅、COD 等数值也有较大差别, 故采用软件默认组分进行模拟可在一定程度上反映出出水水质的变化趋势, 但难以作为设计和研究的依据。

1.3 进水污染物组分的确定

由于采用 BioWin 模拟软件中的默认进水组分得出的模拟结果与实测结果有一定差距, 默认数值难以作为设计的依据, 又因为这些组分的测定非常复杂, 按照国内污水厂的实际情况难以实现完全测定。故采用软件模拟时需获得一套更简单有效的进水组分确定方法。

荷兰水利用研究基金会 (STOWA) 结合 5 年模型软件的使用经验, 并通过对大约 100 个污水处理厂的工艺进行模拟, 制定了相关的指南作为污水特

性参数测定的标准方法。该测定方法可以很好地为污水处理厂服务。鉴于该指南采用的物化方法的可行性和使用经验,本研究采用该指南对进水组分进行分析,具体过程如下^[2]:

- ① 基于污水处理厂出水的惰性可溶性 COD 确定 S_I ;
- ② 用进水可溶性 COD 减去 S_I 得到 S_S ;
- ③ 用 BCOD 减去 S_S 得到 X_S ;
- ④ 用式(1)确定 X_I , 其中 $COD_{inf,tot}$ 为进水总 COD。

$$X_I = COD_{inf,tot} - S_I - S_S - X_S \quad (1)$$

目前,国内现有污水厂基本都能做到对进出水主要指标的长期监测。根据多项研究结果,可认为惰性溶解性有机物约为出水 COD(滤后)的 90%;进水中的 BOD_5 约为 $TBOD_5$ 的 70%,而 $TBOD_5$ 约为 BCOD 的 88%^[3]。故根据上述数据和 STOWA 指南中的相关界定,可完全通过污水厂现有的进出水监测数据大致确定进水中的 COD 组分,从而为模拟提供第一手可靠的数据。

采用 BioWin 模拟软件计算,除需要确定 COD 的各组分外,还需要确定无机 SS 的比例。目前污水处理厂仅对 TSS 有常年检测数据。活性污泥 3 号模型(ASM3)中对 COD 和挥发性 SS 的比例给出了参考数值^[4]。而 BioWin 模拟软件在确定了 COD 的数值及各组分含量后也可以通过模拟试算计算出挥发性 SS 的含量,从而获得无机 SS 的数值。按照上述进水组分的确定原则并综合参考周边地区的组分数值,确定了该工程 COD 和 SS 的各组分参数(如图 3 所示)。

Parameters		
Name	Default	Value
Fbs - Readily biodegradable (including Acetate) [gCOD/g of total COD]	0.160 00	0.160 00
Fac - Acetate [gCOD/g of readily biodegradable COD]	0.150 00	0.160 00
Fexp - Non-colloidal slowly biodegradable [gCOD/g of slowly degradable COD]	0.750 00	0.330 00
Fuis - Unbiodegradable soluble [gCOD/g of total COD]	0.050 00	0.080 00
Fup - Unbiodegradable particulate [gCOD/g of total COD]	0.130 00	0.150 00
Fna - Ammonia [gNH3-N/gTKN]	0.660 00	0.760 00
Fnox - Particulate organic nitrogen [gN/g Organic N]	0.500 00	0.500 00
Frus - Soluble unbiodegradable TKN [gN/gTKN]	0.020 00	0.020 00
FupN - N:COD ratio for unbiodegradable part. COD [gN/gCOD]	0.035 00	0.035 00
Fp04 - Phosphate [gP04-P/gTP]	0.500 00	0.500 00
FupP - P:COD ratio for unbiodegradable part. COD [gP/gCOD]	0.011 00	0.011 00
F2bh - Non-poly-P heterotrophs [gCOD/g of total COD]	1.000 0E-4	1.000 0E-4
F2bm - Anaerobic methanol utilizers [gCOD/g of total COD]	1.000 0E-4	1.000 0E-4
F2ab - Ammonia oxidizers [gCOD/g of total COD]	1.000 0E-4	1.000 0E-4
F2nob - Nitrite oxidizers [gCOD/g of total COD]	1.000 0E-4	1.000 0E-4
F2anob - Anaerobic ammonia oxidizers [gCOD/g of total COD]	1.000 0E-4	1.000 0E-4

图 3 一期工程模型进水组分输入值

Fig. 3 Input values for influent component of the first-phase project

除上述参数外,氨氧化菌(AOB)的比增长速率、异养菌的半饱和系数以及好氧反硝化菌的半饱

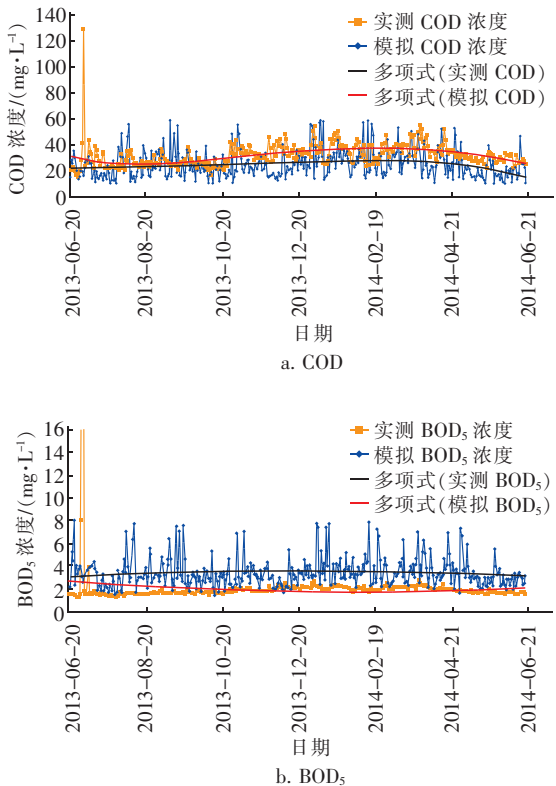
和系数等参数对模拟结果也有较大影响^[5]。

佛山高明污水处理厂和北京某污水处理厂分别对氨氧化菌的最大比增长速率进行了长期研究,结果表明佛山高明污水处理厂的氨氧化菌最大比增长速率为 0.65 d^{-1} ,非软件默认的 0.9 d^{-1} ,而北京某污水处理厂的数值则为 1.1 d^{-1} ^[6]。

笔者以该污水处理厂一期工程的数据为依据,分别调整 AOB 的最大比增长速率为 $0.6\sim 1.1\text{ d}^{-1}$ 。每隔 0.1 d^{-1} 分别进行模拟验证,模拟结果几乎没有任何差别,表明在该污水厂的水质和运行条件下,AOB 的比增长速率对系统的影响可以忽略不计。但模拟结果仅限于在该污水处理厂一期工程的特定运行工况条件下。

1.4 模拟验证

按照上述进水组分确定原则模拟污水处理厂一期工程出水水质,其中模拟流程中的污泥排放量、溶解氧等基础数据均按照污水厂 2013 年 6 月 20 日—2014 年 6 月 19 日的实测数据输入,其中污泥量平均约为 $6.5\text{ t}/10^4\text{ m}^3$ 污水(80% 含水率),溶解氧浓度约为 2.0 mg/L 。通过对比该水质数据与实测数据,其变化趋势及数值范围基本在同一水平。尤其是对于 COD 和 TN,模拟结果与实际出水的测定结果一致性较好(见图 4)。



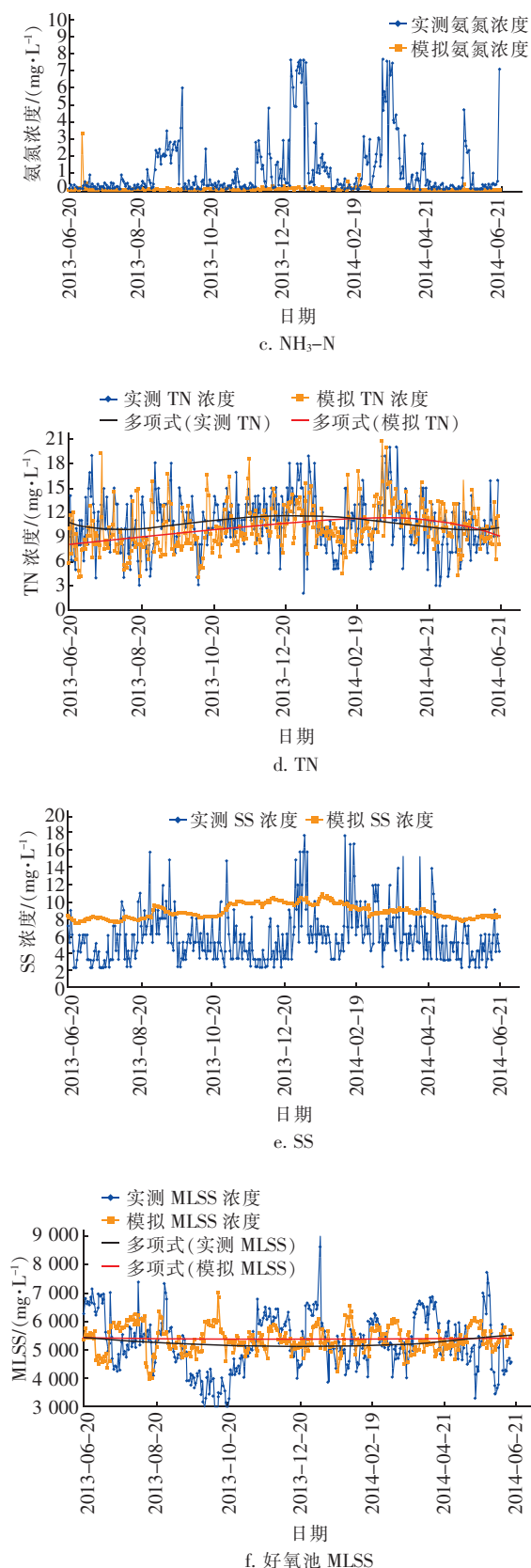


图4 模拟水质与实测水质的对比

Fig. 4 Comparison of simulated and actual effluent quality

出水氨氮和 BOD_5 的模拟结果相对于实测结果较好,可能是由于运行中污泥浓度较高,故实际泥龄要远远高于设计泥龄。而实际运行中由于受各种不可预知因素的影响,这两项出水指标存在一定的波动,因此模拟值和实测值的变化趋势存在不一致性。但上述实测和模拟结果均控制在一个非常小的范围内,这也说明对该两项指标的模拟是正确的。

此外,模拟混合液污泥浓度,并将模拟结果与实测结果进行对比。好氧池污泥浓度拟合计算结果表明,模拟混合液浓度与实测值差距较小,说明对该污水厂基础参数的拟合基本符合实际特征。但模拟的污泥浓度每日变化幅度小于实测污泥浓度的变化,这也与实际生产各种不确定性(如排泥的及时性和进水无机组分的比例)等有关。

故从上述曲线来看,采用荷兰废水特性指南并按照经验参数和污水处理厂出水指标的测试,可较好处地进行软件的模拟,为现有条件下的软件模拟提供了可能。

2 设计优化

2.1 污水处理厂二期工程简介

该污水处理厂二期工程设计规模为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,与一期工程采用同一个进水分配井。其进水水质与一期工程完全相同。出水水质需达到一级 A 排放标准。进水按照 90% ~ 95% 保证率计算,其设计进出水水质见表 2。

表2 二期工程设计进出水水质

Tab. 2 Design influent and effluent quality of the second-phase project

项 目	COD	BOD_5	SS	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	TP
进水	400	150	160	40	50	5
出水	≤ 50	≤ 10	≤ 10	≤ 5	≤ 15	≤ 0.5

二期工程主要采用 AAO + 深床滤池工艺处理污水,其中 AAO 采用多模式 AO 的方式。按照常规计算方法,主处理构筑物的主要设计参数如下:初沉池采用平流沉淀池,共 12 组,单池尺寸为 $42 \text{ m} \times 7.5 \text{ m} \times 4.8 \text{ m}$,表面负荷为 $4.2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;生物池数量为 2 座,每座 2 池,总有效池容为 $175\,250 \text{ m}^3$,有效水深为 7.3 m ;停留时间为 14.02 h ,混合液悬浮固体浓度为 $4\,000 \text{ mg/L}$,总泥龄为 16 d ;二沉池采用矩形周进周出沉淀池,共 24 组,单池尺寸为 $60 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 6.6 \text{ m}$,有效水深为 4.5 m ,最大流量表面负荷为 $1.41 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

2.2 污水处理厂二期工程模拟流程

按照上述进出水水质及设计参数,建立污水处理厂二期工程的工艺模型,如图 5 所示。

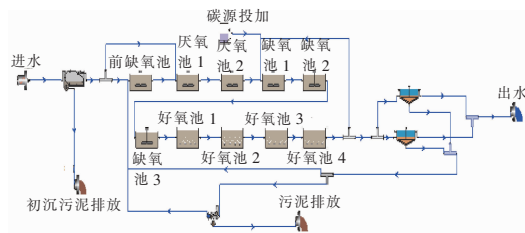


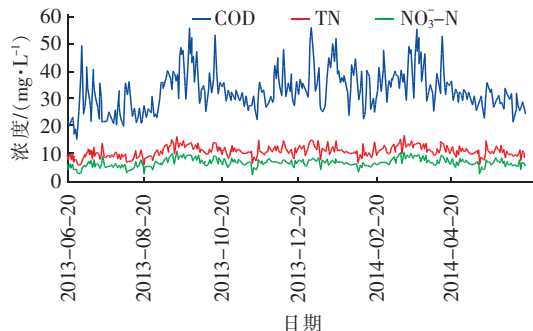
图 5 二期工程模拟流程示意

Fig. 5 Schematic diagram of process model of the second-phase project

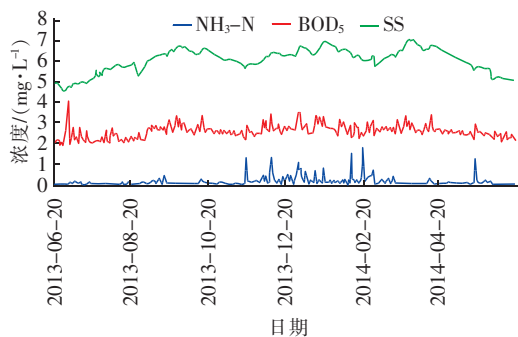
二期工程模拟的进水水质与一期工程进水水质相同。目前,污水处理厂的设计进水水质一般按照满足一定保证率选取,二期工程的保证率为 90% ~ 95%。该确定方法具备一定的科学性,但也有一定的局限性,具体表现在:首先进水水质的保证率与出水水质达标的保证率没有根本联系,进水水质保证率确定后,出水水质难以保证完全或在一定保证率基础上达标。其次,将各指标按照一定保证率取较大值作为进水水质未考虑污水厂进水数值的复杂性,未考虑污水厂各进水水质指标的相互联系,且污水厂最不利的进水条件并不一定是各进水指标均维持在较高水平的条件。

采用模拟软件进行设计优化可以有效克服上述问题,尤其对于改扩建工程可采用动态模拟的手段,输入 1 年或一段时间的进水水质数据,采用动态模拟该段时间的出水数据,出水数据的达标保证率便为实际的设计达标保证率。

故对二期工程采用动态模拟,进水水质仍取一期工程 2013 年 6 月 20 日—2014 年 6 月 19 日的进水数据。按照 4 个季节温度不同分别进行动态模拟,对原设计结果进行验证,模拟结果如图 6 所示。



a. COD、TN 和 $\text{NO}_3\text{-N}$



b. BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 SS

图 6 二期工程模拟出水水质

Fig. 6 Simulated effluent quality of the second-phase project

从图 6 可以看出,在原设计条件下,二期工程全年有 12 d 的 COD 超出设计标准,其余时间均达标, COD 的达标率为 97%;有 2 d 的 TN 超出设计标准, TN 的达标率为 99%;其他常规指标全年均达标,达标率为 100%。这说明原设计工艺流程及设备参数的选取可满足设计出水水质要求。

2.3 污水处理厂二期工程设计优化

根据模拟结果发现,出水水质虽基本满足设计要求,但出水总氮基本维持在 10 ~ 14 mg/L 之间。但从出水指标衡量,设计池容等几乎无进一步压缩的空间。出水指标除受池容影响外还受回流比、进水分比、各段池容比例等因素的影响。模型可以对工艺流程的任何一个点进行求证并获得该点的水质参数,从而为设计优化提供了巨大空间。可根据硝酸盐氮 + 亚硝酸盐氮在工艺流程各段的水质模拟结果进行设计优化。前缺氧池出水硝酸盐氮 + 亚硝酸盐氮浓度大部分在 0.5 mg/L 以下,只有个别数据突破 1.0 mg/L,故前缺氧池的容积可适当减小。缺氧池 1 ~ 3 出水硝酸盐氮 + 亚硝酸盐氮浓度逐渐减小,且缺氧池 2 出水亚硝酸盐氮几乎全部小于 0.5 mg/L,故缺氧池面积过大。出水总氮较高的因素可确定为好氧池设计容积过小或内回流比较低。而好氧池 1 ~ 4 的硝酸盐氮 + 亚硝酸盐氮浓度不断升高,好氧池 3 与好氧池 4 的差距明显较小,表明好氧池的容积不是制约总氮浓度的因素。故从硝酸盐氮 + 亚硝酸盐氮浓度的角度考虑,好氧池的容积可适当减小。出水总氮浓度除受池容影响外,还受内回流比的制约,根据模拟结果目前 200% 的回流比完全满足设计要求,故可不进行调整。但前缺氧池、缺氧池和好氧池的池容均可适当降低,对出水水质应无

明显影响。按照该原则进行多次试算分析,确定前缺氧池容积降低30%左右,缺氧池和好氧池容积均降低20%左右,出水水质与上述水质几乎无大的变化。故通过本次模拟可在保证设计质量前提下对生物池容积进行优化,以节省项目投资。

3 结论

仿真模拟软件的运用可通过模拟多个运行工况及设计参数,以确定最佳设计和方案,提升设计计算的可靠性。本研究将BioWin软件计算模型与浙江省某污水处理厂一期工程的实际运行相结合,通过不断运行模拟及调整,获得符合污水厂实际情况的污染物组分数据,调整进水组分后的模拟结果与实测数据相比,其变化趋势及数值范围基本一致,为现有条件下的软件模拟提供了可能。将修正后的模拟系统应用于该污水处理厂新建二期工程的设计中,对其设计参数进行验证和优化,模拟结果表明按照常规计算方法确定的设计参数可满足设计要求。并通过多次模拟试算发现,在常规计算基础上,前缺氧池容积降低30%左右,缺氧池和好氧池容积均降低20%左右,出水水质亦能达标,可在保证设计质量的前提下适当缩减生物池容积,以节省项目投资。

参考文献:

- [1] 胡志荣,Chapman K,Dold P,等. 全污水处理厂数学模拟的BioWin模型[J]. 给水排水,2008,34(Z2):159-166.
- Hu Zhirong,Chapman K,Dold P,*et al.* BioWin model for whole wastewater treatment plant process modeling[J]. Water & Wastewater Engineering,2008,34(Z2):159-166(in Chinese).
- [2] 艾冰,郝二成,顾剑,等. 基于BioWin的MBR工艺模型[J]. 给水排水,2011,37(3):100-103.
- Ai Bing,Hao Ercheng,Gu Jian,*et al.* BioWin-based MBR process modeling[J]. Water & Wastewater Engineering,2011,37(3):100-103(in Chinese).
- [3] 陈莉荣,肖作义,彭党聪. 活性污泥1号模型含碳组分

测定方法探讨[J]. 环境工程,2004,22(1):67-69.

Chen Lirong,Xiao Zuoyi,Peng Dangcong. Exploration of carbonaceous organic matter determination in the activated sludge model No. 1[J]. Environmental Engineering,2004,22(1):67-69(in Chinese).

- [4] Gujer W,Henze M,Mino T,*et al.* Activated sludge model No.3[J]. Water Sci Technol,1999,39(1):183-193.

- [5] 卢欢亮,胡志荣,叶向东,等. 硝化菌最大比增长速率常数的实测与应用[J]. 给水排水,2015,41(2):44-47.

Lu Huanliang,Hu Zhirong,Ye Xiangdong,*et al.* Measure and application of maximum specific growth rate constant of nitrifier[J]. Water & Wastewater Engineering,2015,41(2):44-47(in Chinese).

- [6] 胡志荣,卢欢亮,杜惟玮,等. 应用工艺模拟改善佛山市高明区第一污水处理厂的运行管理[J]. 给水排水,2013,39(11):105-109.

Hu Zhirong,Lu Huanliang,Du Weiwei,*et al.* Operation and management improvement by process simulation in No. 1 wastewater treatment plant in Gaoming District, Foshan City[J]. Water & Wastewater Engineering,2013,39(11):105-109(in Chinese).



作者简介:李岚(1986-),女,天津人,硕士,工程师,主要从事市政水厂、污水厂、污泥处理工程设计工作。

E-mail:lilan12@cemi.com.cn

收稿日期:2018-12-13