

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.15.005

基于数学模拟的污水厂运行分析——建模与体检

郝二成¹, 郭毅¹, 刘伟岩¹, 马文瑾¹, 胡志荣², 陈洁³, 张达成⁴,
吴建琴⁴, 吴宏周⁴

(1. 北控水务<中国>投资有限公司, 北京 100102; 2. 加拿大 GL 环境科技有限公司, 加拿大; 3. 广州中业污水处理有限公司, 广东 广州 510800; 4. 东莞市大岭山永溢水务有限公司, 广东 东莞 523000)

摘要: 在北美、欧洲、南非等国家和地区, 污水处理工艺模拟已经广泛应用于污水处理的开发、设计、提标改造和优化运行管理等方面, 成为污水处理行业的标准实践。在国内, 污水处理工艺模拟应用起步较晚, 正处于发展阶段。应用工艺模拟技术对污水处理厂进行管理, 一方面可以大大提高运营管理水平; 另一方面也可为实现智慧化水厂奠定基础。以东莞大岭山连马污水处理厂作为示范, 建立并校正了该污水处理厂的工艺模型, 应用模型对污水处理厂运行现状进行体检, 寻找边界运行条件。结果表明, 在设计流量条件下的运行过程中, 当 MLSS 低于 3 000 mg/L、进水 TN 高于 20 mg/L 时, 出水氨氮有超标风险; 当进水 TN 达到 36 mg/L 时, 若要保证出水水质稳定达标, COD 必须大于 200 mg/L, 当 MLSS 为 6 000 mg/L 时, 最大处理水量为 $8.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

关键词: 污水处理厂; 工艺模拟; 历史监测数据; 模型校准; 数字化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)15-0023-06

Operation Analysis of Wastewater Treatment Plant Based on Mathematical Simulation: Modeling and Examination

HAO Er-cheng¹, GUO Yi¹, LIU Wei-yan¹, MA Wen-jin¹, HU Zhi-rong²,
CHEN Jie³, ZHANG Da-cheng⁴, WU Jian-qin⁴, WU Hong-zhou⁴

(1. Beijing Enterprises Water Group <China> Investment Limited, Beijing 100102, China; 2. GL Environment Inc., Canada; 3. Guangzhou Zhongye Sewage Treatment Co. Ltd., Guangzhou 510800, China; 4. Dongguan Dalingshan Yongyi Water Co. Ltd., Dongguan 523000, China)

Abstract: In North America, Europe, South Africa and other regions, wastewater treatment process simulation has been widely used in the development, design, upgrading and optimization of wastewater treatment plants (WWTPs) management, and has become a standard practice in the wastewater treatment industry. In China, the simulation of wastewater treatment process started late and is in the development stage. On the one hand, the application of process simulation technology to the management of WWTPs can greatly improve the level of operational management. On the other hand, it can also lay a foundation for intelligent WWTPs. A process model of Dalingshan Lianma WWTP in Dongguan City, Guangdong was set up and calibrated. The calibrated model was then used to analyze the operation of the process and find boundary operational conditions. When MLSS was lower than 3 000

mg/L and total nitrogen of influent was higher than 20 mg/L under the design flow rate, ammonia nitrogen in the effluent had the risk of exceeding the standard. When the total nitrogen of influent reached 36 mg/L, COD must be greater than 200 mg/L so as to meet the effluent standards, when MLSS was 6 000 mg/L, the maximum treatment capacity was $8.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$.

Key words: wastewater treatment plant; process simulation; historical monitoring data; model calibration; digitalization

40 多年的开发和应用实践表明,污水处理工艺模拟可以非常有效地预测各种动态条件下工艺运行的状态。从污水处理厂各种工艺模型到全污水处理厂模型的开发、广泛使用的商业模拟软件,以及各种工艺模拟指南:北美的 WERF 指南、荷兰的 STOWA 指南、国际水协的化学污泥模型指南和大量的实际工程应用案例,都为其推广应用奠定了良好基础^[1]。在国内,污水处理工艺模拟的应用起步较晚,正处于发展阶段。

在目前智慧水务的大背景下,应用工艺模拟技术对污水处理厂进行管理,既可以提高运营管理水平,又能够实现智慧化水厂奠定基础。在应用过程中,同时可以培养一批精细化运行管理的技术人才为卓越运营服务。污水处理工艺模拟应用于实际工程的关键是建立一个经过校准和验证的数学模型,而模型校准和验证的关键是具有可靠和完整的数据集。经过校准和验证的模型可以应用于很多方面,这取决于模型使用者的工作目标。常见的应用包括:①污水处理厂的提标改造,数学模拟广泛应用于北美污水处理厂的升级和提标改造工程,近几年来国内已经开始探索这方面的实际应用^[2-3];②污水处理厂的优化运行分析和运行管理^[4-5]。

笔者以东莞大岭山连马污水处理厂作为案例,收集了该污水厂3年的历史监测数据及部分补充检测数据,利用模拟软件 GPS-X 建立并校正了工艺模型,同时应用该模型对该污水厂运行现状进行体检,即评价污水厂运行参数对其出水水质的影响。

1 污水处理厂模型的建立

1.1 污水处理厂工艺概述

污水处理厂的设计处理能力为 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 预处理单元包括粗格栅、旋流沉砂池、细格栅,污水经预处理后,进入二级 UCT 处理工艺(污水依次流经厌氧、缺氧和好氧生物反应池),最后进入二沉池和紫外消毒渠。污水处理厂二级主体工艺由平行的两个系列组成,每个系列工艺流程和处理能力相同。

为了简化模拟工作,模型建立一组池子进行全厂模拟,该污水厂的工艺流程如图1所示。好氧池末端的混合液回流至缺氧2池,设计回流比为200%;缺氧1池回流至厌氧池前端,设计回流比为100%;外回流为两点回流,分别回流至缺氧1池和厌氧池,通过闸阀开度控制回流量,设计外回流比为150%。

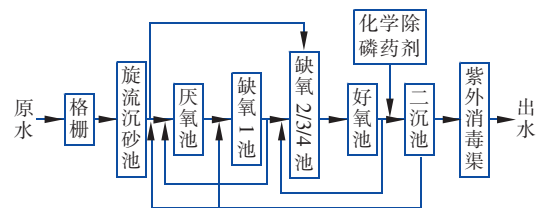


图1 大岭山连马污水处理厂工艺流程

Fig. 1 Process flow of Dalingshan Lianma WWTW

1.2 工艺模型的建立

收集污水处理厂的工艺设计参数包括各构筑物尺寸和数量,以及回流连接等;应用污水处理动态模拟软件 GPS-X 建立该污水处理厂的模型结构,如图2所示。

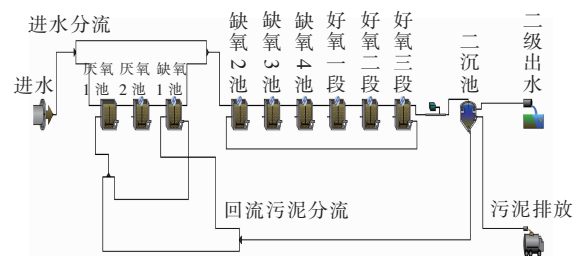


图2 GPS-X 软件平台建立的模型结构

Fig. 2 Model layout set up by GPS-X modeling platform

1.3 数据收集与分析

1.3.1 历史监测数据

为了校准和验证工艺模型,收集2015年—2017年共计1 096 d的日变化运行数据,包括进出水水质、水温、流量、污泥浓度等。

1.3.2 补充监测数据

污水处理厂历史监测数据通常难以满足模拟所需要的进水特征参数要求,例如进水悬浮物,日常检

测只有 SS,模拟时需要知道 VSS/SS,因此补测了部分进水 VSS 数据。为此进行了污水特征参数的补充检测,根据污水厂的检测能力,补测了部分进水水质,具体见表 1。

表 1 2017 年 10 月—11 月补测的进水水质

Tab. 1 Influent parameters obtained from a supplementary test from October to November in 2017

样品	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SCOD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SCOD/ COD	SS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	VSS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	VSS/ SS	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}/$ TP
1	125	43.0	0.34	108	—	—	4.57	0.89	0.19
2	173	51.0	0.29	240	166	0.69	7.93	0.96	0.12
3	122	35.2	0.29	68	50	0.74	2.16	0.55	0.25
4	120	36.9	0.31	100	70	0.70	3.87	0.38	0.10
5	142	22.5	0.16	66	32	0.48	4.82	0.72	0.15
6	137	37.6	0.27	96	72	0.75	4.43	1.08	0.24
7	140	20.4	0.15	174	132	0.76	4.31	1.02	0.24
8	188	24.3	0.13	194	134	0.69	6.83	0.33	0.05
9	133	39.1	0.29	244	126	0.52	8.53	0.57	0.07
10	207	43.0	0.21	118	80	0.68	5.65	0.45	0.08
11	253	38.9	0.15	148	106	0.72	6.88	0.57	0.08
12	300	50.6	0.17	182	116	0.64	13.30	0.29	0.02
13	438	66.5	0.15	274	110	0.40	13.66	0.49	0.04
14	200	33.4	0.17	168	98	0.58	7.55	0.37	0.05
平均值	191	38.7	0.22	156	99	0.64	6.75	0.62	0.12

根据 COD 组分分析方法^[6],将 UCT 工艺出水 COD 的 70% ~ 80% 直接看作可溶不可生物降解的 COD。根据日常检测数据可知, $\text{BOD}_5/\text{COD} = 0.38$,结合经验数据 $\text{BOD}_5/\text{BCOD} = 0.5 \sim 0.7$,得出 COD 组分的百分比大致为易生物降解有机物 S_s 占 15%、可溶不可生物降解有机物 S_1 占 5%、颗粒可生物降解有机物 X_s 占 39% ~ 61%、颗粒不可生物降解有机物 X_1 占 19% ~ 41%,为数学建模提供基础数据。后期利用建立的模型通过拟合工艺的实际运行情况最终确定 X_s 和 X_1 。

1.4 模型校准

利用 3 年的历史监测数据进行模型的校准,污水进水特征参数里总 COD 中易生物降解物质所占比例(f_{rss})的默认值和校准值分别为 0.2 和 0.13,总 COD 中溶解性惰性物质所占比例(f_{rsi})的默认值和校准值分别为 0.05、0.07,总 COD 中颗粒性惰性物质所占比例(f_{rxi})的默认值和校准值分别为 0.13 和 0.20,VSS/SS 的默认值和校准值分别为 0.75 和 0.6,硝化菌最大比生长速率(μ_{nh})的默认值和校准值分别为 0.9 和 0.5 d^{-1} ,其他进水模型中的参数均采用默认值。

为了校准模型,进行了大量各种工况(不同水温、进水水质、运行条件等)的动态模拟,通过不同

工况下模拟与实测结果的对比拟合进行模型参数的校准。大量模拟结果表明,在上述进水组分参数条件下,通过适当修正污水处理厂的剩余污泥排泥量,调整自养菌最大比生长速率,模型模拟得到的好氧反应池中 MLSS 和出水指标的模拟值可以合理地与实测值进行拟合。

模型校正得到的好氧池 MLSS 和 MLVSS 浓度,以及二沉池出水中氨氮、TN 和 TP 的模拟结果和实测结果如图 3 所示。可以看出,建立的模型可以合理地模拟实际污水处理厂的工艺。在模拟过程中需要重点关注以下几个问题:①MLSS 主要受进水特征(VSS/SS 值、 f_{rxi})和排泥量的影响。3 年的总体模拟结果与实测值拟合趋势很好。在某些时间段内,MLSS 的模拟值与实测值有较大误差,由于缺少调整依据,所以没有调整。②氨氮硝化,通过校准硝化菌最大比生长速率,氨氮的模拟值总体与实测值拟合较好。但在某些时间点存在一些误差,这可能与 DO 浓度不同和有工业废水进入有关。由于缺少实际的 DO 记录数据,模拟时三段 DO 浓度分别为 1、1.5、2 mg/L 。③除磷,出水 TP 的模拟值与实测值拟合的总体趋势很好。某些时间点的模拟值与实测值的拟合误差较大,可能是因为工业废水冲击或加药量计量误差造成的。

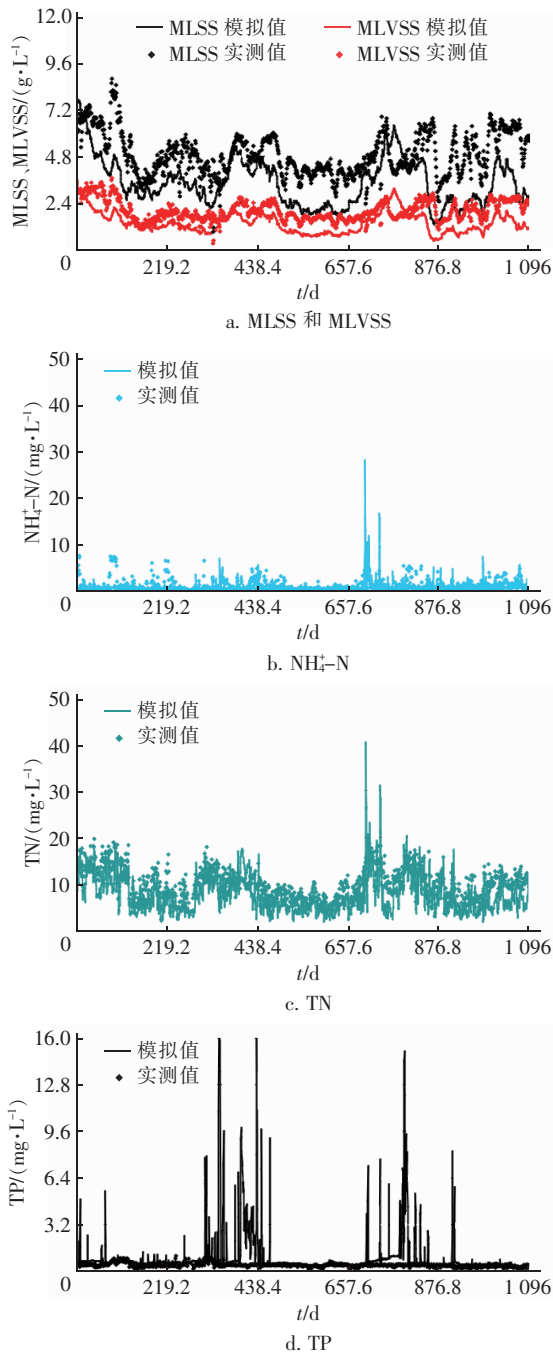


图3 2015年—2017年MLSS、MLVSS、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP的模拟值和实测值

Fig. 3 Comparison of simulated and measured results of MLSS, MLVSS, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, TN and TP from 2015 to 2017

2 污水处理厂的模型应用

利用低温时某段时间的平均进水水质及运行条件,通过敏感性分析研究可调参数对出水水质的影响,由于采用生化结合方法除磷,因此模拟过程中未考虑磷超标问题。另外,模拟了不同进水水质对出

水水质及系统处理能力的影响。

2.1 进水流量的影响

进水流量由非满负荷的 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 到设计负荷的 1.3 倍即 $10.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 之间变化,所有模型参数保持不变,模拟结果如图4所示。可以看出,在保证一定 MLSS 的前提下,进水流量对硝化的影响不大,出水氨氮会缓慢上升,但能保证达标;随进水流量的增加,出水总氮缓慢上升,在进水水质不变的情况下,也能稳定达标;进水流量的变化影响了出水 TP,一方面随进水流量增大,排泥量不变,泥龄逐渐增加,生物除磷效果下降,另一方面化学除磷加药量不变,进水 TP 量增加导致出水总磷增加。

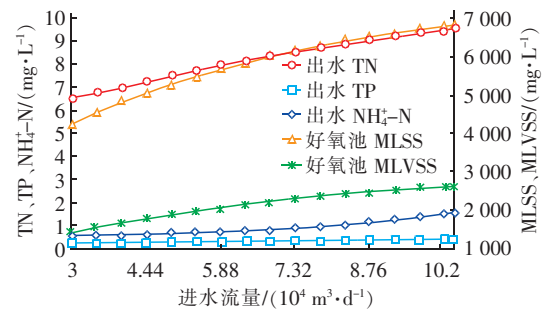


图4 进水流量对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP、MLSS、MLVSS 的影响

Fig. 4 Influence of influent flow on $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, TN, TP, MLSS and MLVSS

2.2 多点进水的流量分配

保持模型参数不变,改变进水流量在厌氧1池和缺氧2池之间的分配比例,模拟结果见表2。在其他条件不变的情况下,进水分配比对出水 TN 和 TP 影响不大,可维持厌氧1池进水比例为 60%。

表2 进水流量在厌氧1池与缺氧2池之间的分配比例对出水水质的影响

Tab. 2 Influence of influent flow distribution ratio between anaerobic and anoxic tanks on effluent quality

项 目	厌氧1池进水比例/%	缺氧2池进水比例/%	出水 TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	出水 TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
工况1	100	0	8.29	0.417
工况2	80	20	8.28	0.417
工况3	60	40	8.27	0.414
工况4	40	60	8.28	0.415
工况5	20	80	8.32	0.414

2.3 缺氧池到厌氧池的回流量

缺氧1池到厌氧1池的回流量为 $0 \sim 8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,模拟结果表明,该回流量对出水水质基本

无影响,唯一影响的是厌氧池的污泥浓度,当回流量为0时,MLSS和MLVSS分别为5 147、1 994 mg/L;当回流量为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,MLSS和MLVSS分别为6 217、2 405 mg/L。鉴于此,可以进行回流。

2.4 好氧池到缺氧池的回流量

使好氧池到缺氧池的回流量为 $0 \sim 16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (设计流量的200%),模拟结果表明,该回流量变化对出水总氮有影响,随内回流量的增加,出水TN下降,当内回流量为 $0 \sim 4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,出水TN下降较多;当内回流量为 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,出水TN不再变化。根据目前的出水水质,建议保持每池有1台内回流泵(设计流量的100%)即可。

2.5 外回流量及其分配

外回流量在 $3.54 \times 10^4 \sim 12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (3台泵)之间变化,模拟结果表明,随着外回流量的增加,好氧池中MLSS逐渐增加,出水TN略有下降,出水TP有上升的趋势,好氧池MLSS从5 482 mg/L增加到9 480 mg/L。根据目前的进水水质情况分析,MLSS维持在5 000 mg/L左右就能满足处理要求,继续增加MLSS,可能会导致泥龄过长,污泥老化。

外回流污泥可以分流进入厌氧1池和缺氧1池,模拟结果表明,外回流分配比例变化对出水水质及好氧池MLSS基本没有影响,仅会影响厌氧池及缺氧1池的污泥浓度。

2.6 排泥量

图5为排泥量对污泥浓度和出水水质的影响。

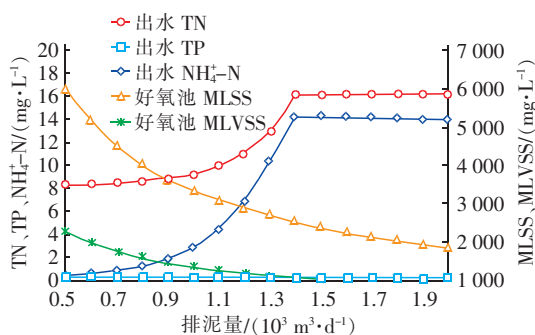


图5 排泥量对 NH_4^+-N 、TN、TP、MLSS、MLVSS的影响

Fig. 5 Influence of sludge discharge on NH_4^+-N , TN, TP, MLSS and MLVSS

由图5可以看出,排泥量的变化直接影响MLSS,随排泥量的增加,MLSS逐渐降低。出水TP随排泥量增加也逐渐降低,这跟除磷是通过排泥去除有关;出水氨氮和TN随排泥量的增加逐渐上升,

从数据上看,出水氨氮先超标,当排泥量增加到 $1 200 \text{ m}^3/\text{d}$ 时(注意与实际计量排泥量有出入),MLSS下降到2 850 mg/L,氨氮面临超标风险。

3 结论

① 以东莞大岭山连马污水处理厂为示范,利用GPS-X模拟软件建立和校准了二级处理UCT工艺的动态模拟模型,并进行相关应用分析。应用2015年—2017年3年的历史监测数据及补测数据建立并校准的UCT工艺模型能够模拟该污水处理厂的污泥产量和出水水质关键指标,可以利用该模型进行模拟应用。

② 利用经过校准的动态模型对工艺进行了“体检”,即模拟了多种运行工况,结果表明:进水分比对出水TN和TP的影响不大;缺氧池到厌氧池的回流量对出水水质基本无影响,唯一影响的是厌氧池的MLSS;缺氧池到厌氧池不进行回流时,外回流一定要回流到厌氧池,外回流量可保持在 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (设计进水流量的50%)左右;好氧池到缺氧池的回流量每池开1台内回流泵(等于设计流量)即可。在一定MLSS(5 000 mg/L左右)且保证DO为1 mg/L的前提下,进水TN低于20 mg/L,进水流量增加(最大为 $10.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)对氨氮硝化影响不大,出水氨氮随流量的升高缓慢上升,但能达标;当MLSS < 3 000 mg/L时,进水TN > 20 mg/L,出水氨氮有超标风险。影响处理能力的主要因素是进水TN和COD,当进水TN为36 mg/L、COD > 200 mg/L时,MLSS为6 000 mg/L,出水TN能够达标,最大处理量为 $8.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;当进水TN增至42 mg/L(2017年最大值)时,COD必须大于300 mg/L,TN才能达标,且最大处理量为 $8.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

参考文献:

- [1] 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.
 - [2] 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, Shangguan 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).

- [3] 丁晓倩,赵剑强. GPS-X 模拟的三种 A²/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 A²/O processes for nitrogen and phosphorus removal based on GPS-X simulation[J]. China Water & Wastewater,2016,32(19):26-30(in Chinese).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] 郝二成,周军,赵颖,等. 活性污泥 2 号模型中进水 COD 组分确定方法研究[J]. 给水排水,2008,34(4):

32-36.

Hao Ercheng, Zhou Jun, Zhao Ying, et al. Researching on analysis method of COD fractions in ASM2d model[J]. Water & Wastewater Engineering,2008,34(4):32-36(in Chinese).



作者简介:郝二成(1975-),男,河北辛集人,硕士,高级工程师,从事污水处理工艺优化及模拟研究。

E-mail:haoercheng@bewg.net.cn

收稿日期:2019-08-08

(上接第22页)

- monitor water quality in the Paris distribution system[J]. Water Res,2019,149:375-385.
- [8] Cao D, Huang H, Hu M, et al. Comprehensive characterization of natural organic matter by MALDI- and ESI-Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry[J]. Anal Chim Acta,2015,866:48-58.
- [9] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, et al. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter[J]. Environ Sci Technol,2003,37(24):5701-5710.
- [10] Smith M R. The biodegradation of aromatic hydrocarbons by bacteria[J]. Biodegradation,1990,1(2/3):191-206.
- [11] Kasuga I, Nakajima F, Furumai H. Diversity of catechol 2, 3-dioxygenase genes of bacteria responding to dissolved organic matter derived from different sources in a eutrophic lake[J]. FEMS Microbiol Ecol,2007,61

(3):449-458.



作者简介:韩梅(1985-),女,黑龙江绥化人,博士,高级工程师,研究方向为水污染控制技术。

E-mail:hithanmei@163.com

收稿日期:2019-06-28