

# 乡镇污水处理厂仿真模拟及优化运行研究

邵 袁<sup>1</sup>, 王华成<sup>2</sup>, 覃榴滨<sup>1</sup>, 侯婉宁<sup>2</sup>, 朱光灿<sup>1</sup>

(1. 东南大学能源与环境学院, 210096;

2. 江苏省城镇供水安全保障中心, 210036; 江苏 南京)

**摘 要:** 基于WEST软件建立了太湖流域某乡镇生活污水处理厂A<sup>2</sup>/O工艺过程的数学模型,并优化了工艺的运行参数。结果表明,出水COD和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP含量模型计算与实测结果偏差分别为2.5%、1.0%、1.0%,模型可较好地模拟该污水处理厂的运行。利用建立的模型模拟研究内回流比、外回流比和曝气池的DO含量等因素对出水水质的影响,当将内、外回流量比均由现状的100%降为50%、好氧池DO的质量浓度控制在1~3 mg/L时,可确保出水水质达到GB 18918-2002要求。将模拟确定的优化运行参数应用于该污水处理厂,出水达标率达到100%,TP的月均削减量由16.20 kg增加至23.72 kg,全厂用电量由7.1 GW·h/月降至5.5 GW·h/月,除磷药剂聚合氯化铝月均使用量较优化前下降56%。

**关键词:** 活性污泥数学模型;数学模拟;优化;乡镇污水处理厂;节能



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3770(2020)09-0090-008

截至2016年末,全国共有1.81万个建制镇和1.09万个乡,建制镇和乡的污水处理率分别为52.64%和11.38%<sup>[1]</sup>。研究表明,乡镇污水处理厂运行管理中存在诸多问题,如运行负荷率低、污水收集率不高、超规模设计及建设、污水处理工艺运行有缺陷和运行成本高等问题<sup>[2-3]</sup>。其中太湖流域乡镇污水处理厂的运行成本达到0.8~1.5元/m<sup>3</sup>,远高于城市污水处理厂的运行成本<sup>[3]</sup>。因此迫切需要优化乡镇污水处理厂的运行管理,提高污水处理效果、降低能耗。

针对污水处理厂中复杂的系统,利用活性污泥数学模型,通过计算机软件仿真,可以在很短的时间里完成成千上百次的模拟实验。ELAWWAD等利用活性污泥3号模型(Activated Sludge Model No.3, ASM3)模拟干旱城市工业混合进水污水处理厂的工艺,加入Arrhenius方程很好的预测所研究污水处理厂的处理性能<sup>[4]</sup>;UBAY-COKGOR等运用加拿大

Envirosim基于生物处理过程模型编制的BioWin软件模拟对污水厂的运行,提出有效的提标改造方案<sup>[5-6]</sup>;GABARRÓN等基于ASM2d模型对某MBR系统进行优化,大幅减少了曝气量,降低了成本<sup>[7]</sup>。国内的应用起步较晚,应用丹麦水动力学研究所(DHI)开发的WEST软件污水厂的运行进行模拟,优化参数后确定推荐方案,实现了工艺设计与运行控制策略的优化<sup>[8-10]</sup>。利用数学模型模拟污水厂优化运行,大量减少实验研究的工作量,节省人力物力,为水处理的智能化控制提供科学依据和理论基础。

本研究针对太湖流域乡镇污水厂出水水质不稳定、运行能耗高的问题,采用WEST软件模拟太湖流域具有代表性的某乡镇生活污水处理厂的污水处理过程,分析其脱氮除磷的途径,建立适用该污水厂的仿真模型并通过模拟实验确定适宜运行参数,并将优化方案应用于污水厂的实际运行,以实现该乡镇

收稿日期:2019-03-20

基金项目:第九期太湖水污染治理专项资金(TH2015304)

作者简介:邵 袁(1993—),女,硕士研究生,研究方向为水处理技术;联系电话:15252630588;电子邮件:513447605@qq.com

通讯作者:朱光灿,博士,教授;电子邮件:gc-zhu@seu.edu.cn

污水处理厂的稳定达标与节能降耗。

## 1 研究方法

### 1.1 研究对象

基于太湖流域乡镇污水厂运行现状的现场调研结果,选择具有代表性的某乡镇生活污水处理厂为研究对象。该厂设计处理规模为 $1\,000\text{ m}^3/\text{d}$ ,采用厌氧-缺氧-好氧( $A^2/O$ )工艺,并在缺氧池和好氧池悬挂组合填料,二沉池出水经生态塘后排入河道。集水池、厌氧池、缺氧池和好氧池(分为3个廊道)的设计水力停留时间(HRT)分别为0.5、2、4和8 h,二沉池表面负荷 $0.8\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,污泥回流至厌氧池前端,回流体积比100%,硝化液回流至缺氧池前端,回流体积比100%~200%,在好氧池出水端添加除磷药剂,磷主要通过化学法得到去除,间歇排泥,剩余污泥经脱水后外运处置。

采用等比例混合法采集水样,在6:00-20:00时间段内,每隔2 h采集200 mL水样,混合后按照标准方法检测COD和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 含量<sup>[11]</sup>。溶解氧(DO)含量采用溶氧仪测定(HQ30 d),pH采用pH计测定(PH100),传感器均置于水面以下0.3 m。

### 1.2 WEST 模拟步骤

WEST软件模拟污水处理厂运行的步骤如图1所示<sup>[8]</sup>。

首先根据需要确定机理模型(ASM1、ASM2、ASM2d或ASM3),选取各污水处理单元、传感器、控制器等组件构建所需要的工艺流程;然后根据实际情况输入各节点的设计参数以及进水水质参数;其次,通过敏感性参数模拟得出对模拟结果影响较大的参数,反复调整敏感性参数并验证。最后,进行工艺模拟与结果输出,分析模拟结果。

## 2 结果与讨论

### 2.1 污水处理厂概况

跟踪分析6月15日-7月15日的进水水量和进出水水质,出水从二沉池出水口采集。实际进水量为445~590  $\text{m}^3/\text{d}$ ,平均500  $\text{m}^3/\text{d}$ ,运行负荷率仅为50%。

进出水水质如图2~图4所示。

由图2~图4可知,进水COD为30~160 mg/L,平均为87.9 mg/L,受降雨的影响,变化范围较大,而出水COD均稳定达到GB 18918-2002要求<sup>[12]</sup>。进

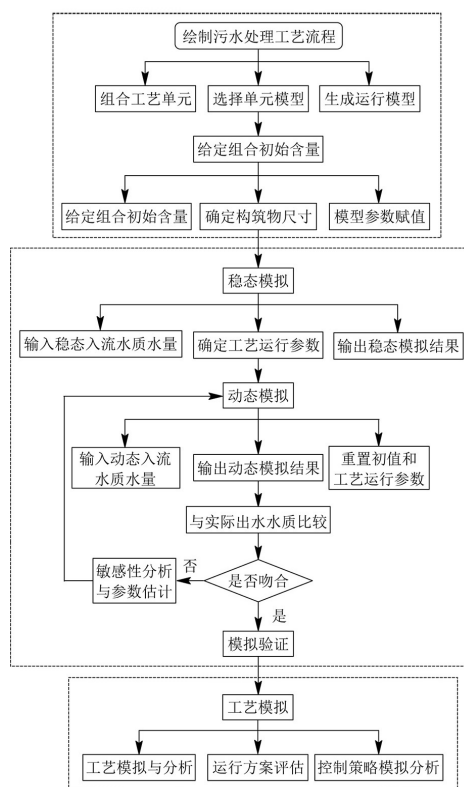


图1 WEST软件模拟步骤

Fig.1 Simulating steps of WEST software

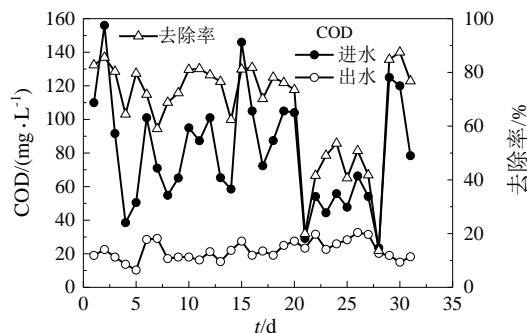


图2 实际进出水COD及其去除率

Fig.2 COD in actual influent and effluent and its removal rate

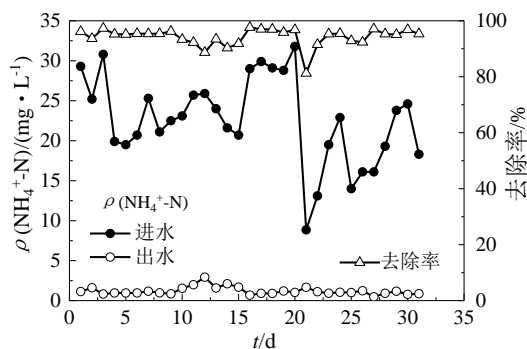


图3 实际进出水 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 含量及其去除率

Fig.3  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  content in actual influent and effluent and its removal rate

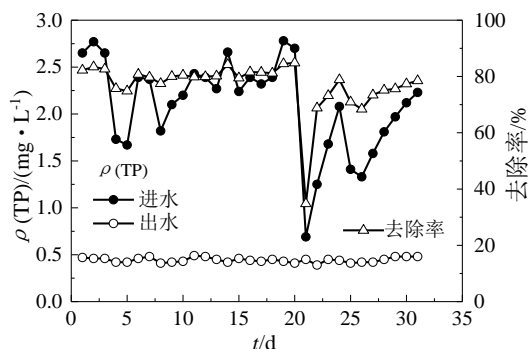


图4 实际进出水TP含量及其去除率

Fig.4 TP content in actual influent and effluent and its removal rate

水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  及 TP 含量有一定波动,出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量稳定满足排放要求,而出水 TP 的质量浓度在 0.5 mg/L 上下波动。该厂进水平均  $\text{COD}/\rho(\text{TN}) \approx 2.4$ ,属于低碳源污水。

进一步监测了反应池沿程的 DO 含量。 $\text{A}^2/\text{O}$  反应池的厌氧池、缺氧池、好氧池第 1~3 廊道和二沉池的 DO 的质量浓度分别为  $(0.63 \pm 0.14)$ 、 $(0.61 \pm 0.10)$ 、 $(1.26 \pm 0.34)$ 、 $(2.01 \pm 0.48)$ 、 $(4.17 \pm 0.46)$  和  $(2.53 \pm 0.44)$  mg/L。由于二沉池污泥回流比较大,使厌氧池处于缺氧甚至低氧状态,因此导致聚磷菌释磷效率较差,削弱了生物除磷效能。好氧池第 3 廊道 DO 含量超过了系统需求,增加了不必要的能耗。

沿程采集水样,分析污染物在处理工艺中沿程变化规律,结果如图 5 和图 6。水样采样点 1~点 7 分别位于集水池、厌氧池末端、缺氧池末端、好氧池第 1 廊道、好氧池第 3 廊道末端、二沉池出水口和生态塘出水口。

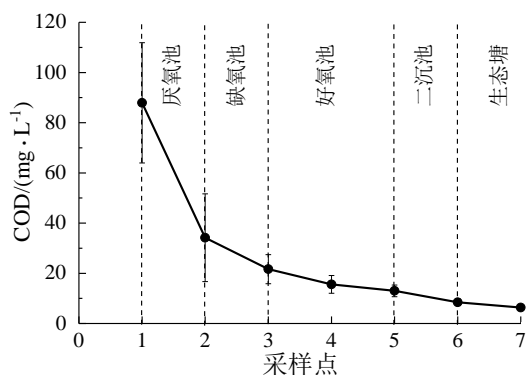


图5 沿程COD的变化

Fig.5 Change of COD along the path

由图 5 可知,进入好氧池时 COD 已经很低, COD 主要因厌氧池、缺氧池中内外回流的稀释作用、生物除磷、反硝化脱氮过程以及微生物生长代谢而降低。

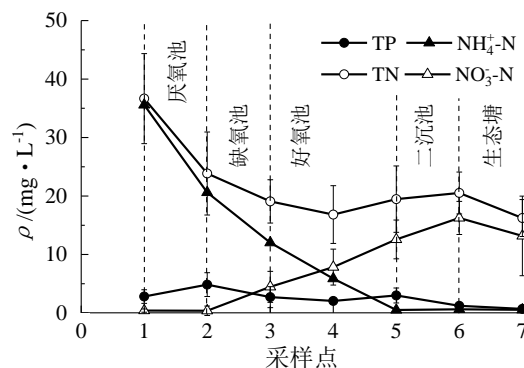


图6 沿程N和TP含量的变化

Fig.6 Change of N and TP content along the path

由图 6 可知,进水 TP 的质量浓度平均为 2.81 mg/L,厌氧池中 TP 含量因聚磷菌厌氧释磷而增高,缺氧池中除了内回流的稀释作用,还存在反硝化除磷的作用使得 TP 含量下降<sup>[13]</sup>。好氧池中 TP 含量没有得到降低,表明好氧池中聚磷菌吸磷量少,生物除磷效果差<sup>[14]</sup>。好氧池出水端 TP 的质量浓度为 3.01 mg/L,在好氧池出水端添加除磷药剂,出水 TP 的质量浓度平均为 0.70 mg/L,未达标排放。该厂污泥为间歇排泥,排泥量较少,磷主要通过化学法得到去除,增加了污水处理的成本。

由图 6 还可知,进水 TN 的含量较高,质量浓度平均约为 36.66 mg/L,其中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的质量浓度平均约 35.02 mg/L,而  $\text{NO}_3^+\text{-N}$  含量较低,出水 TN 的质量浓度平均为 16.24 mg/L,去除率不高,为 55.7%,而  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率达 98.5%,说明是反硝化效果不佳限制了 TN 的去除。污水进入厌氧池后由于外回流的稀释, TN 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量迅速降低。好氧池中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量大幅下降,而  $\text{NO}_3^+\text{-N}$  含量大幅上升,表明好氧池内进行了明显的硝化反应<sup>[15]</sup>。含有大量  $\text{NO}_3^+\text{-N}$  的混合液回流到缺氧区,理应在缺氧区因为内回流的稀释以及发生反硝化,使 TN 含量大幅度下降,而实际上 TN 含量没有明显降低,分析原因为,好氧池 3 中 DO 的质量浓度平均为 4.17 mg/L,供氧过量,富含 DO 的内回流液回流至缺氧池,使缺氧池中 DO 的质量浓度平均为 0.61 mg/L,破坏了缺氧池的还原环境,又因为处理的污水属于低碳源水,经过厌氧池聚磷菌的利用在缺氧池中微生物进行反硝化所能利用的碳源更少,从而使得反硝化效果差,出水 TN 未能稳定达标排放<sup>[16]</sup>。

## 2.2 模型的建立

根据污水厂的工艺流程,选用 ASM2D 模型模拟从格栅池到二沉池出水之间的工艺过程,建立仿



真模型。首先对模型所需的污水处理厂进水组分进行更细致的短期测定, 得到进水组分参数详见表1<sup>[17-18]</sup>。进水组分测定有利于模型的进水数据与污水处理厂实际进水水质更加接近, 提高模型模拟预测的准确程度。

表1 WEST软件中进水组分参数

Tab.1 The parameters of influent components in the WEST software			
参数	含义	模型	实测
F_S_PO	TP与磷酸盐的质量浓度的比	0.6	0.43
F_TSS_COD	TSS对COD的转换因子	0.75	0.85
f_S_A	溶解性COD与发酵产物SA的比	0.25	0.35
f_S_F	溶解性COD与易生物降解有机物SF的比	0.375	0.45
f_S_NH	TN与NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N质量浓度的比	1.00	0.85
f_X_H	颗粒态COD与异养菌质量浓度(XH)的比	0.17	0.10
f_X_S	颗粒态COD与慢速降解颗粒态有机物质 量浓度(XS)的比	0.69	0.55

模型参数校正是仿真模拟过程中的关键步骤<sup>[19]</sup>。采用国际水协推荐的动力学参数和化学计量学系数的典型值进行模拟<sup>[20]</sup>。初次模拟结果如表2所示。

表2 初始模拟与实测结果的对比

Tab.2 Comparison between the initial simulation and the measured results			
项目	COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	$\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
初始模拟	25.6	0.33	0.58
实测	22.0	1.20	0.44
绝对误差	3.6	0.87	0.14

由表2可知, 模拟出水COD的实测结果略高, 相对误差16.4%; 模拟出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量结果与实测结果相差较大, 相对误差72.5%; 模拟出水TP含量的相对误差为31.8%, 模拟的出水与实际测量结果存在一定的差异, 因此需要进行参数的调整。

以参数灵敏度分析为基础, 得到动力学参数与化学计量参数对出水COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP的灵敏度<sup>[21-23]</sup>。找到对出水影响较大的关键参数, 有异养菌衰减系数Y(H)、溶菌和衰减的速率常数b(H)、基于基质的最大生长速率 $\mu(\text{H})$ 、自养菌的最大生长率 $\mu(\text{AUT})$ 、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的自养菌饱和系数K(NH-AUT)和基于易生物降解基质的生长饱和/抑制系数K(F)。

通过调整重要动力学及化学计量学参数, 降低模拟与实测结果之间的误差, 相关参数调整如表3。

利用污水处理厂6月15日-7月15日实际进出水水质进行模型的验证, 调整参数后的结果如图7和图8所示。

由图7和图8可知, 模拟出水COD和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP的质量浓度平均分别为22.56 mg/L和1.21、0.44

表3 活性污泥相关参数调整

Tab.3 Adjustment of activated sludge relevant parameters

项目	Y(H)/ d <sup>-1</sup>	b(H)/ d <sup>-1</sup>	$\mu(\text{H})/$ d <sup>-1</sup>	$\mu(\text{AUT})/$ d <sup>-1</sup>	K(NH-AUT)/ (mg·L <sup>-1</sup> )	K(F)/ (mg·L <sup>-1</sup> )
典型	0.625	0.4	6.0	1.0	1.0	4.0
调整后	0.685	0.2	6.6	1.1	1.2	6.5

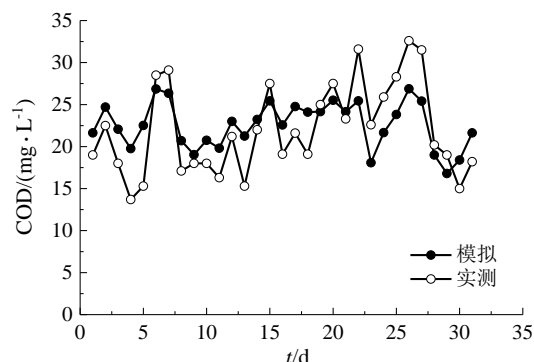
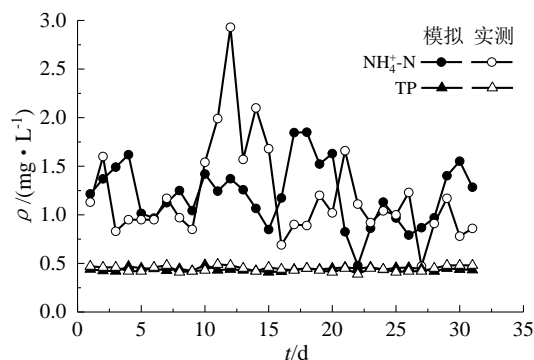


图7 模型校正后模拟与实测出水COD对比

Fig.7 Comparison of COD between the corrected simulation and the measurement of the effluent quality

图8 模型校正后模拟与实测出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和TP含量Fig.8 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and TP content between the corrected simulation and the measurement of the effluent quality

mg/L, 与实测结果之间的总体误差分别为2.5%和1%、1%, 最大误差分别为7.22 mg/L和1.56、0.06 mg/L, 模拟与实测结果趋势基本一致, 误差在可接受范围内。经过参数修正后的模拟, 模拟精度显著提高, 认为利用WEST模拟该乡镇污水处理厂的运行结果是有效的, 可通过模拟获得污水处理厂工艺优化运行参数。

### 2.3 模拟优化运行

利用上述仿真模型优化乡镇污水处理厂运行参数, 考察内回流比、外回流比、溶解氧(DO)含量对出水水质的影响。

#### 2.3.1 内回流比对出水水质的影响

模拟内回流比 $R_{\text{内}}$ 对出水COD和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP含量的影响见图9~图11。

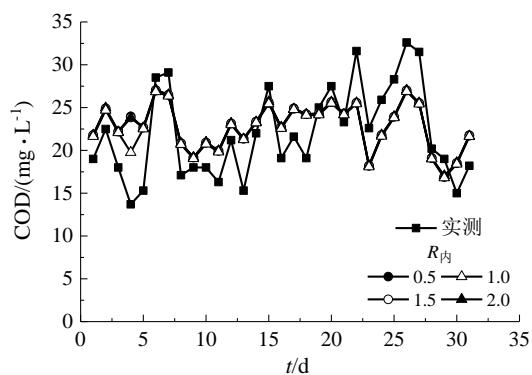


图9 模拟内回流比对出水COD的影响

Fig.9 Effect of simulated internal reflux ratio on COD in effluent

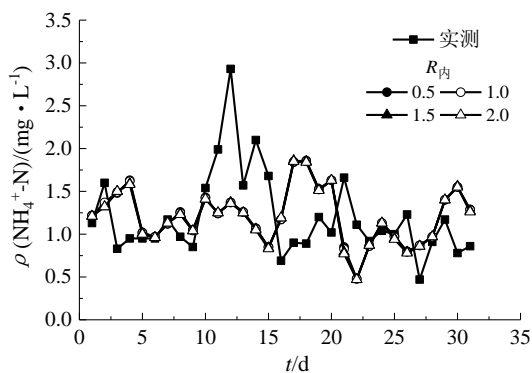
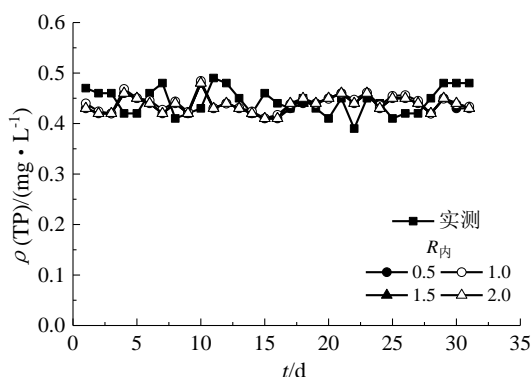
图10 模拟内回流比对出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量的影响Fig.10 Effect of simulated internal reflux ratio on NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N content in effluent

图11 模拟内回流比对出水TP含量的影响

Fig.11 Effect of simulated internal reflux ratio on TP content in effluent

由图9~图11可知,当改变内回流比时,出水COD和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP含量均未发生大幅变化,模拟内回流体积比分别为0.5、1.5、2.0时,出水COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP含量均与实际内回流体积比( $R_{内}=1$ )时模拟结果相近,出水各指标均满足达标排放要求。模拟结果表明降低内回流比对出水效果未造成明显影响。因此,在实际优化运行中,可通过降低内回流比以降低污水处理能耗。

### 2.3.2 外回流比对出水水质的影响

模拟外回流比 $R_{外}$ 对出水COD和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP含量的影响见图12~图14。

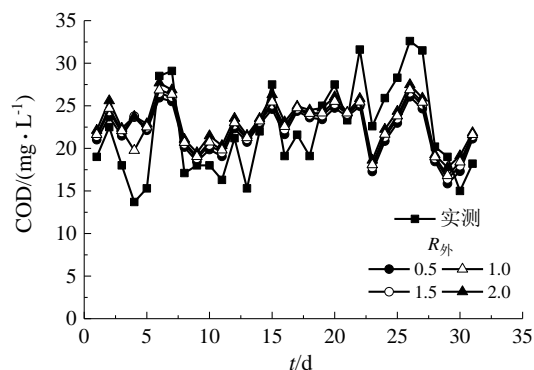


图12 模拟外回流比对出水COD的影响

Fig.12 Effect of simulated external reflux ratio on COD in effluent

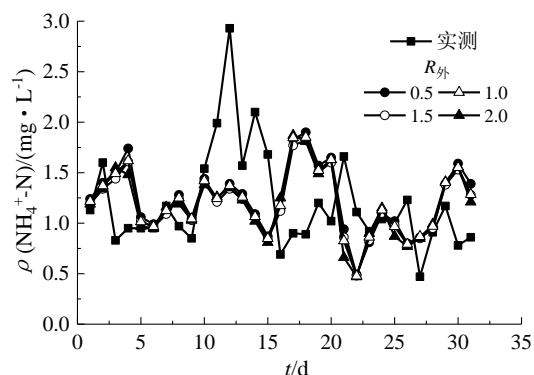
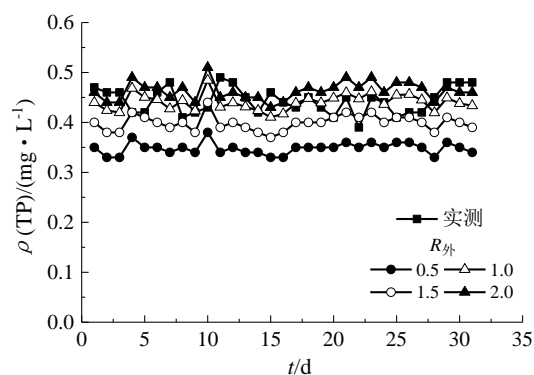
图13 模拟外回流比对出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量的影响Fig.13 Effect of simulated external reflux ratio on NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N content in effluent

图14 模拟外回流比对出水TP含量的影响

Fig.14 Effect of simulated external reflux ratio on TP content in effluent

由图12~图14可知,改变外回流比 $R_{外}$ 对TP出水效果影响较大,当外回流体积比由2降低为0.5时,出水COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量模拟结果未产生大幅度变化,均达到GB 18918-2002一级A排放标准,而出水TP含量模拟结果随着外回流比降低而降低,原因为剩余污泥量排放量增加,污泥活性得到提高,TP

去除量增加<sup>[24]</sup>。因此,在优化运行中,可通过降低外回流比、增加剩余污泥排泥量,降低出水TP含量的同时也可减少除磷药剂的消耗。

### 2.3.3 DO含量对出水水质的影响

模拟DO含量对出水COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP含量的影响见图15~图17。

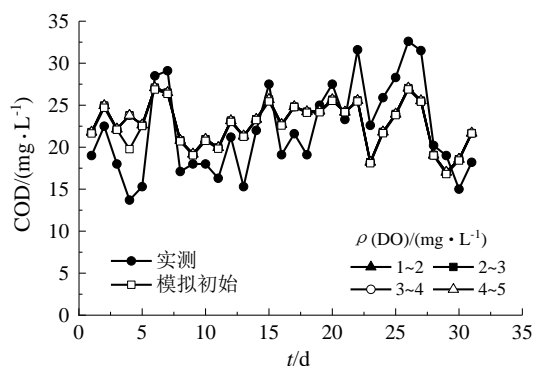


图15 模拟DO含量对出水COD的影响

Fig.15 Effect of simulated DO content on COD in effluent

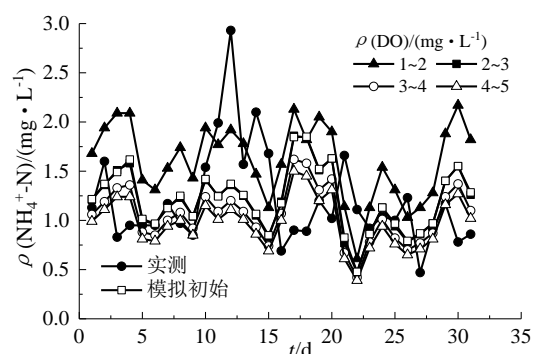


图16 模拟DO含量对出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的影响

Fig.16 Effect of simulated DO content on  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  content in effluent

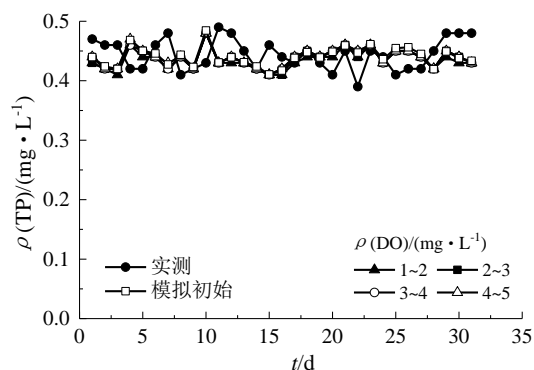


图17 模拟DO含量对出水TP含量的影响

Fig.17 The simulating effects of DO content on TP content in effluent

由图15~图17可知,模拟好氧池DO的质量浓度由初始实际运行状态的5 mg/L降低为1 mg/L时,出水中COD、TP含量未发生大幅度变化,模拟出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量小幅度升高,在DO的质量浓度1~2

mg/L时,模拟出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量比实测高,此时模拟的最高质量浓度低于3 mg/L。原因为降低好氧池DO含量在一定程度上影响好氧池中的硝化反应,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量略微升高。但在保证出水达标的基础上,降低好氧池的DO含量可以有效降低污水处理厂的能耗。

上述仿真模拟结果表明,该乡镇污水处理厂可通过分别降低内回流比、外回流比及减少好氧池的曝气量优化工艺运行,减少污水处理厂不必要的能耗。

## 3 优化运行

### 3.1 运行方案

根据该乡镇污水处理厂运行现状及仿真模拟结果,在现运行的基础上,调整好氧池曝气量,尽量控制好氧池DO的质量浓度在1~3 mg/L内;减少内回流量,将内回流体积比逐步降低至0.8~0.9;降低外回流比,增加二沉池排泥量,将外回流体积比控制在0.6~0.7。

优化运行方案在当年9月实施,从出水达标率、除磷药剂的消耗、污水处理能耗等方面验证优化方案的有效性,同时分析沿程脱氮除磷途径。

### 3.2 水质达标率

通过统计对比实施优化方案前后的同期3个月的出水达标率,结果表明,方案实施前的5月、6月、7月出水达标率分别为68.2%、73.1%、72.4%,而方案实施后即第2年的5月、6月、7月该污水厂出水达标率均可达100%,出水达标率明显提高。

### 3.3 氮磷去除途径

通过对曝气的优化控制,对优化运行阶段各处理单元的DO含量进行监测,厌氧池、缺氧池DO的质量浓度平均为0.5 mg/L,且波动很小,好氧池内部DO的质量浓度控制在1.0~3.5 mg/L。优化后对沿程水质进行监测,结果如表4所示。

表4 优化运行后污水处理厂各单元污染物含量

Tab.4 The pollutants content of each unit in the sewage treatment plant after optimizing operation

采样点	COD/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$			
		$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	TN	TP
进水	67.9±21.0	20.98±3.10	0.09±0.07	34.23±11.84	1.63±0.20
厌氧池出水	35.1±10.7	11.80±2.63	1.87±1.41	22.61±3.19	0.96±0.22
缺氧池出水	32.4±3.2	5.21±2.60	4.61±1.37	14.14±2.51	0.77±0.28
好氧1出水	25.5±3.1	0.59±0.29	8.76±1.12	11.20±2.32	0.73±0.19
好氧3出水	25.6±6.0	0.42±0.07	9.01±1.50	10.40±1.92	0.83±0.17
二沉出水	23.2±7.1	0.44±0.09	8.89±1.72	10.20±1.81	0.46±0.05
出水	25.8±9.2	0.35±0.11	8.63±0.67	10.00±2.03	0.43±0.04

由表4可知,COD的去除与优化前的差异主要在好氧池内,其下降程度较优化前的有所减少,原因是优化后好氧池内DO含量下降,有机物的氧化减少。优化后,厌氧池中TN含量降低, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量大幅度降低,而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量小幅上升,部分原因是外回流的作用。另外,厌氧池内DO的质量浓度平均为0.50 mg/L,且接受进水碳源,满足实现同步硝化反硝化(SND)反应的条件<sup>[25-26]</sup>。

理论上厌氧池中聚磷微生物释磷,厌氧池内TP含量上升;而通过检测发现,厌氧池内TP含量下降,除了外回流的稀释作用还可能原因为厌氧池内发生反硝化除磷。有研究表明,当 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量不是很高(质量浓度4~5 mg/L时),不会破坏缺氧吸磷,相反还可以作为吸磷的电子受体<sup>[27]</sup>;同样,缺氧池中存在内回流的稀释作用以及反硝化吸磷现象,使得TP含量在缺氧池内进一步降低<sup>[28]</sup>。

缺氧池中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量进一步降低, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量进一步上升,原因为好氧池混合液回流至缺氧池内,缺氧池中DO的质量浓度平均控制在0.50 mg/L,优化后很好的保持了缺氧池的缺氧环境,有利于反硝化作用的进行,缺氧池出水TN的质量浓度为14.14 mg/L,较优化前有所降低。

一级好氧池内发生硝化反应, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量进一步降低;同时较优化前发生效果明显的聚磷微生物吸磷作用,TP含量进一步降低,生物除磷效果较优化前有所提高。三级好氧池后,污水中TP主要通过排放剩余污泥、化学药剂去除,二沉池出水TP含量已满足排放要求。

### 3.4 能耗与药耗

通过统计分析,优化方案实施前后该乡镇污水处理厂耗电能 $W$ 、混凝剂聚合氯化铝(PAC)消耗量 $m$ 和TP削减量 $m(\text{TP})$ 与分别见图18。

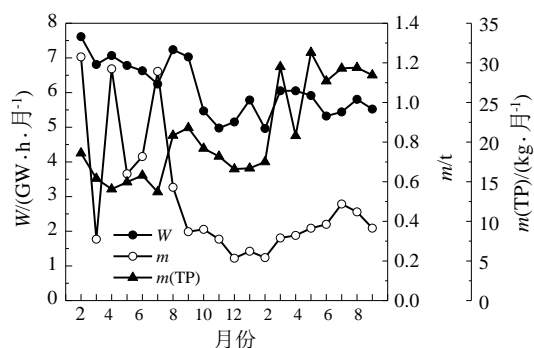


图18 优化方案实施前后能耗及PAC消耗

Fig18 Energy and PAC consumption before and after the implementation of the optimized scheme

由图18可知,优化前每月最高及最低电耗分别为7.6、6.2 GW·h,平均为7.1 GW·h;优化后月电耗最高及最低分别为6.1、5.0 GW·h,平均为5.5 GW·h,降低了23%。

优化前TP月均最大与最小削减量为分别为20.84、13.70 kg,平均为16.20 kg;优化后TP月均最大与最小削减量分别为31.3、16.61 kg,平均为23.72 kg,增加了46%。而除磷药剂PAC添加量随着优化方案的实施逐渐减少,优化前月均PAC用量为0.763 t,优化后月均PAC用量为0.335 t,月均使用量下降56%。

图18也表明随着优化运行的进行,耗电量与药剂投加量逐渐趋向稳定。

结果证明,优化方案的实施使得该乡镇污水处理厂在出水达标率均为100%的情况下,电耗及药耗量明显降低。

## 4 结 论

通过驻地监测考察太湖流域某乡镇污水处理厂的运行情况结果表明,该厂进水水量比较稳定,进水流量约500 m³/d,进水COD平均为87.9 mg/L,水COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均能达到GB 18918-2002一级A排放标准,但出水TP含量较高。该厂缺氧池反硝化效果差,TN去除效果不佳,TP主要依靠化学加药去除,曝气池DO含量较高且波动大,造成不必要的电能浪费,同时排泥量较小,活性污泥含量较低。

根据污水处理厂实际情况构建仿真模型并通过合理调整模型进水组分参数、动力学参数、化学计量学参数等各模型参数,得到出水COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP模拟与实测总体误差分别为2.5%、1.0%、1.0%,在合理范围内,表明WEST仿真模拟软件能够较好地模拟该乡镇污水处理厂的运行。

通过模拟优化污水厂内回流比、外回流比、DO含量运行参数,表明该污水处理厂可在现运行基础上将原内回流体积比由1降低至0.5,将原外回流体积比由1降至0.5;减少好氧池曝气量,将DO的质量浓度控制在1~3 mg/L,可以在稳定达标的基础上,达到降低能耗的效果。

优化运行方案实施后,增强了该工艺生物脱氮除磷的效果,该厂出水达标率提高至100%,TP的月均削减量较优化运行前增长46%,电耗减少了23%。除磷药剂PAC消耗量下降56%,且电耗、药耗都逐渐稳定。



## 参考文献:

- [1] 住房和城乡建设部. 2016年城乡建设统计公报[R/OL]. (2017-08-24) [2019-02-15]. [http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tjzljxsxytjgb/tjxxtjgb/201708/t20170818\\_232983.html](http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tjzljxsxytjgb/tjxxtjgb/201708/t20170818_232983.html).
- [2] 王星, 贺建. 乡镇污水处理厂运行管理相关问题探讨[J]. 安徽农业科学, 2014(2): 522-522.
- [3] 郑超海. 乡镇污水处理厂建设、运营中存在问题及对策[J]. 能源与环境, 2013(4): 66-67.
- [4] ELAWWAD A, ZAGHLOUL M, ABDEL-HALIM H. Simulation of municipal-industrial full scale WWTP in an arid climate by application of ASM3[J]. Journal of Water Reuse and Desalination, 2017, 7(1): 37-44.
- [5] UBAY-COKGOR E, RANDALL C W, ORHON D. Evaluation of the performance of the Tyson Foods wastewater treatment plant for nitrogen removal[J]. Water Science & Technology, 2005, 51(11): 159-166.
- [6] HAMAWAND I, BAILLIE C. Anaerobic digestion and biogas potential: simulation of lab and industrial-scale processes[J]. Energies, 2015, 8(1): 454-474.
- [7] GABARRÓN S, DALMAU M, PORRO J, et al. Optimization of full-scale membrane bioreactors for wastewater treatment through a model-based approach[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 267: 34-42.
- [8] 揭大林, 操家顺, 花月, 等. WEST 仿真软件在污水处理中的应用研究[J]. 环境工程学报, 2007, 1(3): 138-141.
- [9] SOLLFRANK U, GUJER W. Characterisation of domestic wastewater for mathematical modelling of the activated sludge process[J]. Water Science and Technology, 1991, 23(4/6): 1057-1066.
- [10] 张舒, 马小杰. 活性污泥模型在准IV类水城镇污水处理厂设计中的应用研究[J]. 中国市政工程, 2017(2): 55-57.
- [11] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [12] 城镇污水处理厂污染物排放标准: GB 18918-2002[S].
- [13] LIU H B, YAO Y Y, XU S Y. Removal and transformation of pollutants in a two-line denitrifying phosphorus removal process treating low C/N municipal wastewater: influence of hydraulic retention time[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2018, 229(3): 90.
- [14] 张为堂, 侯锋, 刘青松, 等. HRT 和曝气量对 AAO-BAF 系统反硝化除磷性能的影响[J]. 化工学报, 2014, 65(4): 1436-1442.
- [15] 匡武, 王翔宇, 周其胤, 等. 提高低 C/N 值农村生活污水中 TN 的去除效果[J]. 环境工程学报, 2015, 9(9): 4252-4258.
- [16] 樊杰. 改良型 A<sup>2</sup>/O 工艺处理低浓度城市污水的特征及控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [17] ROELEVELD P J, VAN L M C M. Experience with guidelines for wastewater characterisation in The Netherlands[J]. Water Science and Technology, 2002, 45(6): 77-87.
- [18] 张蓉. 仿真软件在 AAO、CAST 和 MBR 污水厂的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [19] 王磊, 于广平, 苑明哲. 污水处理过程模型参数校正方法研究及应用[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(21): 6354-6359.
- [20] 张亚雷, 李咏梅. 活性污泥数学模型[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [21] 陈晓龙, 杨海真, 顾国维. 活性污泥 2 号模型的应用与校正[J]. 工业用水与废水, 2003, 34(1): 1-4.
- [22] ZHOU X, CHEN J, TANG Y Q, et al. Improved monitoring protocol for evaluating the performance of a sewage treatment works based on sensitivity analysis of mathematical modelling[J]. Engineering, 2018, 10: 464-476.
- [23] HU X, XIE L, MI C, et al. Calibration and validation of an activated sludge model for a pilot-scale anoxic/anaerobic/aerobic/post-anoxic process[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2014, 15(9): 743-752.
- [24] 吴昌永. A<sup>2</sup>/O 工艺脱氮除磷及其优化控制的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [25] ELENA G, IGOR G. Simultaneous denitrification and nitrification in the lab-scale oxidation ditch with low C/N ratio[J]. Procedia Engineering, 2015, 117: 107-113.
- [26] POCHANA K, KELLER J. Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification (SND) [J]. Water Science and Technology, 1999, 39(6): 61-68.
- [27] OEHMEN A, LEMOS P C, CARVALHO G, et al. Advances in enhanced biological phosphorus removal: from micro to macro scale[J]. Water Research, 2007, 41(11): 2271-2300.
- [28] 吴昌永, 彭永臻, 彭铁. A<sup>2</sup>O 工艺处理低 C/N 比生活污水的试验研究[J]. 化工学报, 2008, 59(12): 3126-3131.

## Study on Analogue Simulation and Optimized Operation for Township Sewage Treatment Plant

SHAO Yuan<sup>1</sup>, WANG Chenghua<sup>2</sup>, QIN Liubin<sup>1</sup>, HOU Wanning<sup>2</sup>, ZHU Guangcan<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Environment, Southeast University, 210096;

2. Security Support Center for Urban Water Supply of Jiangsu Province, 210036: Nanjing, China)

**Abstract:** The mathematical model was constructed for an A<sup>2</sup>/O (Anaerobic-Anoxic-Oxic) process in a township sewage treatment plant which located in Taihu Lake Basin based on the simulation tool WEST software, and the operation parameters of the process were also optimized. The results showed that, the error of model calculation value and measured value of COD and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TP content was 2.5%, 1.0%, 1.0%, respectively. Therefore, the established model could simulate the operation of the sewage treatment plant well. The effect of internal reflux ratio, external reflux ratio and DO content of aeration tank on effluent quality was studied by model construction. The effluent quality could meet the requirement of GB 18918-2002 when internal and external reflux volume ratio decreased from 100% to 50% and DO mass concentration of aerobic tank controlled at 1~3 mg/L. After applying the optimized operation parameters to the plant, the effluent attainment rate reached 100%. The monthly reduction amount of TP was increased from 16.20 to 23.72, and the monthly energy consumption was decreased from 7.1 GW·h to 5.5 GW·h. The average monthly use of poly aluminum chloride (PAC) was 56% lower than that before the optimization.

**Keywords:** activated sludge mathematical model; mathematical modeling; optimization; sewage treatment plants in town; energy saving