

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.02.015

污水处理厂提升雨季处理能力控制溢流污染案例

尹华升^{1,2}, 陈雷², 刘文举³, 宁宇³, 丁帅³, 李晓岩¹

(1. 清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518005; 2. 湖南省建筑科学研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410011; 3. 常德北控碧海水务有限责任公司, 湖南 常德 415000)

摘要: 充分挖掘现有污水处理厂潜能,提高污水处理厂雨季处理能力,是解决城市排水系统溢流污染的重要途径。某污水处理厂采取增加生化池水深、提高生化池污泥浓度、在二沉池投加混凝剂以改善沉淀效果、次氯酸钠+紫外线联合消毒等措施,雨季平均日处理水量达到设计规模的1.54倍,最高日处理水量达到设计规模的1.87倍,出水水质稳定达标,有效削减了合流制排水系统的溢流污染。该项目实现雨季产能提升的改造投资为322.6万元,当处理水量超过设计规模后,新增污水处理量的运行成本仅为0.275元/m³。

关键词: 污水处理厂; 雨季处理能力; 溢流污染; 联合消毒

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)02-0087-07

Case Project of WWTP for Improving the Processing Capacity in Rainy Season to Control Overflow Pollution

YIN Hua-sheng^{1,2}, CHEN Lei², LIU Wen-ju³, NING Yu³, DING Shuai³, LI Xiao-yan¹

(1. Tsinghua University Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518005, China; 2. Hunan Academy of Building Research Co. Ltd., Changsha 410011, China; 3. Changde Beikong Bihai Water Affairs Co. Ltd., Changde 415000, China)

Abstract: Fully exploiting the potential of existing wastewater treatment plant (WWTP) and improving its processing capacity in rainy season are important to solve the overflow pollution of urban drainage system. By taking measures such as increasing the water depth and the sludge concentration of biochemical tank, adding coagulants to the secondary sedimentation tank for improving sedimentation effect and adopting the disinfection of sodium hypochlorite combined with UV irradiation, the average daily processing capacity in rainy season of a WWTP can reach 1.54 times of the design scale, and the highest daily processing capacity can reach 1.87 times. The effluent quality can stably meet the standard, and the methods can effectively reduce the overflow pollution of the combined drainage system. The retrofit investment of this project to improve the productivity in rainy season is 3.226 million yuan. The operation cost of the extra treated wastewater is only 0.275 yuan/m³ when the treated wastewater exceeds the design scale.

Key words: wastewater treatment plant; rainy season treatment capacity; overflow pollution;

基金项目: 深圳市科技创新委员会可持续发展专项(KCXFZ20200201100844824)

通信作者: 李晓岩 E-mail: lixiaoyan@sz.tsinghua.edu.cn

combined disinfection

在雨污分流改造难以短期完成的情况下,一些城市采取扩建污水处理厂来削减雨天合流制溢流污染。虽然扩建污水处理厂能减少溢流污水排放量,但建设和运行成本较高,增加了政府财政负担。因此,充分挖掘现有污水处理厂潜能,提高污水处理厂雨天处理能力,减少排水系统的溢流污染,是一种经济可行的技术路线。日本大阪市研发的“雨天活性污泥工艺”,可使污水处理厂在雨季能处理 2~3 倍旱季设计流量的污水量^[1],是一种典型的雨季超负荷运行技术。国内学者在这方面也做了一些研究探讨,如刘石虎^[2]在某设计规模为 80×10⁴ m³/d 的污水处理厂进行了超负荷运行生产性试验,在出水水质全面达标的情况下,最高日处理污水量达 118×10⁴ m³/d,超设计负荷 47.5%。但是,以提升污水处理厂雨天处理能力来削减溢流污染的工程应用案例在国内还很少,为此,介绍一座设计规模为 10×10⁴ m³/d 的污水处理厂大幅提高雨季处理能力的工程案例,以资借鉴。

1 项目背景

湖南省某污水处理厂设计规模为 10×10⁴ m³/d,尾水排入位于洞庭湖流域生态环境敏感区的 L 湖。该污水处理厂纳污区内有约 8 km² 的老城区属于合流制区域,旱天污水量约 8.9×10⁴ m³/d,雨季时合流污水量为 (15~18)×10⁴ m³/d,由于污水处理厂雨天处理能力不足,导致大量合流污水在厂前溢流排入 L 湖。针对该污水处理厂雨天设计处理能力不足导致严重的溢流污染问题,当地政府要求污水处理厂通过优化运行管理,提升污水处理厂雨季处理能力,最大限度地削减排水系统的溢流污染。

该污水处理厂始建于 1998 年,当年设计出水水质执行《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)的一级标准。格栅间、污水提升泵站、沉砂池及工艺管道设计考虑了 1.0 倍截流倍数,最大处理能力满足 20×10⁴ m³/d 要求。生化系统按照 10×10⁴ m³/d 设计,采用不带厌氧池的转碟表面曝气氧化沟工艺,建成后出水水质可以稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 B 标准。该厂于 2018 年底完成提标改造,提标改造主要包括将原转碟曝气氧化沟改造成微孔曝气 AAO 工艺,增

加高效沉淀池作为深度处理工艺,出水水质执行一级 A 排放标准。污水处理厂工艺流程见图 1。

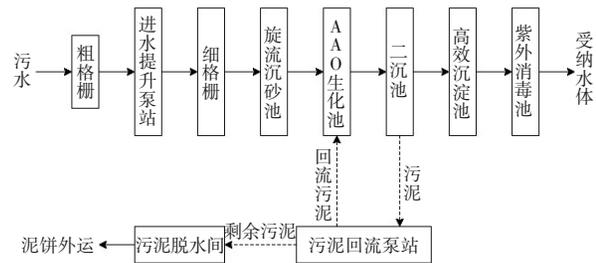


图 1 工艺流程

Fig.1 Flow chart of sewage treatment process

设计进水水质和近 3 年实际进水水质见表 1。

表 1 设计进水水质与实际进水水质

Tab.1 Design and actual influent quality

mg·L⁻¹

水质指标	COD	BOD ₅	NH ₄ ⁺ -N	TN	SS	TP
设计进水	220	100	25	30	200	3.0
实际进水范围	50.0~173.0	21~70.1	10.1~22.1	13.2~26.1	65.3~256.9	0.9~2.2
实际进水均值	97.53	37.03	13.61	17.58	146.89	1.47

2 污水处理厂雨季最大处理能力复核

2.1 按设计规范复核工艺单体

① 粗格栅及进水泵站

粗格栅并设粗格栅 2 台,栅隙 20 mm;进水泵站安装 6 台立式污水泵, Q=1 625 m³/h, H=135 kPa。经复核,粗格栅及进水泵站可以满足最大处理水量 20×10⁴ m³/d 的要求。

② 细格栅及旋流沉砂池

细格栅 2 台,栅隙 15 mm;旋流沉砂池 2 组,直径 5.5 m。经复核,细格栅及旋流沉砂池可以满足最大处理水量 20×10⁴ m³/d 的要求。

③ AAO 池

共 4 座,单座 AAO 池有效水深 4.5 m,总有效容积 8 127 m³,其中厌氧池 940 m³,缺氧池 2 395 m³,好氧池 4 792 m³,总水力停留时间 7.8 h,比《室外排水设计规范》(GB 50014—2021)(以下简称《规范》)规定的下限值高 11%,故可认为最大处理能力满足 1.11 倍设计流量,即 11.1×10⁴ m³/d。

由于 AAO 池有 0.5 m 的超高,可考虑将有效水

深增加0.4 m,达到4.9 m,则单座AAO池有效容积达到8 849 m³,总水力停留时间为8.49 h,比《规范》下限值高12.1%,因此认为最大处理能力可达到12.1×10⁴ m³/d。

④ 二沉池

共4座周进周出辐流式二沉池,单座直径40 m,有效水深4.0 m。按表面水力负荷为1.50 m³/(m²·h)复核,最大处理能力可达到18.1×10⁴ m³/d。

⑤ 污泥回流泵站

污泥回流泵站1座,共配置潜污泵5台,2台小泵:Q=700 m³/h,H=100 kPa;3台大泵:Q=1 400 m³/h,H=70 kPa。按照污泥回流比100%进行复核,最大处理能力可达到13.44×10⁴ m³/d。

⑥ 高效沉淀池

1座,混合池有效容积288 m³,絮凝池有效容积1 400 m³,斜管沉淀池面积566.77 m²。按表面水力负荷为13.0 m³/(m²·h)复核,高效沉淀池最大处理能力可达到17.68×10⁴ m³/d。

⑦ 紫外线消毒渠

两条紫外线消毒渠,单条渠宽1.35 m,渠深2.2 m。安装紫外灯管2套,共256支,每支灯管功率320 W。《规范》规定紫外线有效剂量应为15~22 mJ/cm²。经复核,在处理水量达13×10⁴ m³/d时,紫外线有效剂量为22.8 mJ/cm²,紫外线消毒效果依然可以满足要求。当进水量超过13×10⁴ m³/d时,现有紫外线消毒池难以满足要求。

⑧ 污泥浓缩池

共2座,单座直径18 m,池深4.8 m,有效水深4.35 m。经复核,污泥浓缩池可满足20×10⁴ m³/d处理水量要求。

⑨ 污泥脱水间

污泥脱水间已安装板框压滤机2台,预留1台机位未安装,单台过滤面积200 m²,污泥经脱水后含水率<50%。经复核,已安装的2台污泥脱水机最高可以处理约14×10⁴ m³/d污水产生的污泥量(24 t/d,含水率50%)。

⑩ 鼓风机房

已安装空气悬浮鼓风机3台,Q=121 m³/min,P=60 kPa,由于进水浓度低,实际运行只需开启1台鼓风机。当处理水量达到20×10⁴ m³/d时,开启2台鼓风机可满足要求。

综上所述,AAO池、紫外线消毒池、污泥回流泵

站、污泥脱水间是限制污水处理厂雨天超负荷运行的瓶颈,如果AAO池有效水深加大0.4 m,则污水处理厂最大处理能力可达到12.1×10⁴ m³/d。

2.2 用BioWin复核生化系统最大处理能力

本项目采用AAO+二沉池+高效沉淀池处理工艺,二沉池和高效沉淀池的主要功能是保障出水SS和TP达标,COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TN则主要依靠AAO池生物降解作用去除。因此,生化系统对COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TN的去除效果是污水处理厂出水水质能否达标的关键。通过复核生化系统是否满足设计规范要求,只能大概得出其处理能力,并不能准确反映生化系统在实际进水水量和水质情况下的最大处理能力。

BioWin软件是加拿大EnviroSim环境咨询公司基于国际水协会ASMs系列模型的污水处理仿真软件^[3],该软件可用于对活性污泥工艺污水处理厂进行仿真模拟和参数优化,在污水处理行业有广泛的应用,房婷婷等^[4]利用BioWin软件进行了提高污水处理厂处理能力和应对初期雨水冲击负荷能力的预测和评估。因此,本项目应用BioWin软件对生化系统进行仿真模拟,分析其最大处理能力。

2.2.1 工艺模型的建立

在BioWin软件平台上,构建AAO+二沉池生化系统(见图2),输入进水水质和各构筑物参数,即完成污水处理厂生化系统模型的建立。

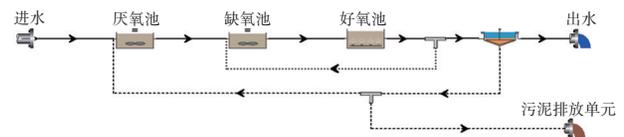


图2 某污水处理厂生化系统模型

Fig.2 Biochemical system model of a wastewater treatment plant

在该模型中,AAO池的有效水深按加高0.4 m考虑,具体参数见表2。

表2 生化单元概化模型中的构筑物参数

Tab.2 Structure parameters in the generalization model of biochemical unit

工艺单元	容积/m ³	有效水深/m	备注
厌氧区	4 096	4.9	4座AAO池的厌氧区有效容积
缺氧区	10 432	4.9	4座AAO池的缺氧区有效容积
好氧区	20 868	4.9	4座AAO池的好氧区有效容积
二沉池	20 096	4.0	4座二沉池有效容积

以设计进水水质作为仿真模拟系统的进水水质,硝化液回流比取200%,污泥回流比为50%,好氧池出口DO浓度为2.5 mg/L。

2.2.2 模拟结果

通过BioWin软件仿真模拟,可以得出不同进水量条件下模型的出水水质情况(见表3)。

表3 进水量对出水水质的影响

Tab.3 Impact of influent inflow on effluent quality

进水量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+-\text{N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	HRT/ h	SRT/ d
15	19.71	10.15	2.22	0.75	11.03	5.66	4.42
16	19.94	10.44	2.68	0.71	11.10	5.31	4.15
17	20.13	10.75	3.27	0.70	11.16	5.00	3.90
18	20.33	11.17	4.10	0.70	11.21	4.72	3.69
18.8	20.49	11.66	5.00	0.71	11.26	4.52	3.53
19	20.53	11.81	5.29	0.71	11.27	4.47	3.49
20	20.68	12.93	7.10	0.73	11.35	4.25	3.32

从表3可知,在处理水量为 $18 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,出水 NH_4^+-N 达到4.10 mg/L,已经接近一级A标准限值(5.0 mg/L);在处理水量为 $19 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,出水 NH_4^+-N 达到5.29 mg/L,已处于超标状态。进一步模拟试算,出水 NH_4^+-N 超标的临界流量为 $18.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

3 超负荷运行的技术措施

根据前述论证,为实现污水处理厂雨天处理能力提升,采取了以下技术措施:

① 加大AAO池水深至4.9 m。在现有AAO池出水堰顶部焊接0.4 m不锈钢板,从而实现有效水深增加0.4 m;增加有效水深后,AAO池的超高只有0.1 m,为防止污水溅出,在AAO池墙顶安装0.5 m高的不锈钢挡水板。

原设计的沉砂池出水井至AAO池的液位差为0.85 m,在AAO池有效水深抬高0.4 m后,沉砂池出水至AAO池的液位差减小至0.45 m。沉砂池至AAO池连接管道的管径为DN1600/DN800,按最大过水能力 $18.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 复核,沉砂池出水井至最远处AAO池管道的水头损失为0.385 m。故AAO池增加0.4 m的水深后,沉砂池出水井至AAO池的液位差依然可以满足要求,不会导致细格栅间和沉砂池溢水。

② 提高污泥回流泵站的污泥回流能力。将

原2台小泵更换为大泵,水泵参数: $Q=1400 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=70 \text{ kPa}$ 。

③ 雨前提高AAO池污泥浓度。根据天气预报,若未来5 d有暴雨或连续降雨天气时,可调整生化系统的排泥量,并向AAO池投加一定量的碳源,将AAO池的污泥浓度提高至旱季正常污泥浓度的1.3~1.5倍。

④ 二沉池增加应急混凝剂投加装置。当雨季超负荷运行、二沉池出水SS超过20 mg/L时,在生化池出水口投加聚合氯化铝(PAC)以改善二沉池沉淀效果,PAC设计投加量为10~20 mg/L。

⑤ 增加次氯酸钠协同消毒设施。当雨季最大进水量超过 $13 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,在二沉池出水口投加次氯酸钠,采用“次氯酸钠+紫外线”联合消毒工艺^[5],净含量为10%的成品次氯酸钠溶液设计投加量为1.0~3.0 mg/L。

⑥ 加大污泥脱水间处理能力。现有污泥脱水设备最大只能满足 $14 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的处理规模要求,故增加一套过滤面积200 m^2 的板框脱水系统。

4 雨季超负荷运行效果

该污水处理厂从2020年4月1日开始在雨季(4月1日—9月30日)按超负荷运行的方式运行。两年多的实际生产运行数据(见表4、图3)表明,该污水处理厂雨季处理水量为 $(8.6 \sim 18.7) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,平均处理水量为 $15.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,最高日处理水量达到 $18.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,平均日处理水量和最高日处理水量对应的AAO池水力停留时间分别只有5.52 h和4.54 h,但出水水质均能稳定达到一级A标准。

表4 雨季进、出水水质

Tab.4 Influent and effluent quality during rainy

season

项目	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{BOD}_5/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	SS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+-\text{N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	大肠菌群/ ($\text{CFU} \cdot \text{g}^{-1}$)
进水范围	48~192	21.9~86.2	69.9~806	9.8~17.6	13.0~21.8	0.9~2.0	
进水均值	94.78	43.75	191.79	13.48	16.66	1.47	
出水范围	4~33	0.3~9.4	1.8~9.4	0.05~4.1	1.94~11.28	0.03~0.33	60~980
出水均值	8.42	3.8	4.72	0.87	6.52	0.132	520

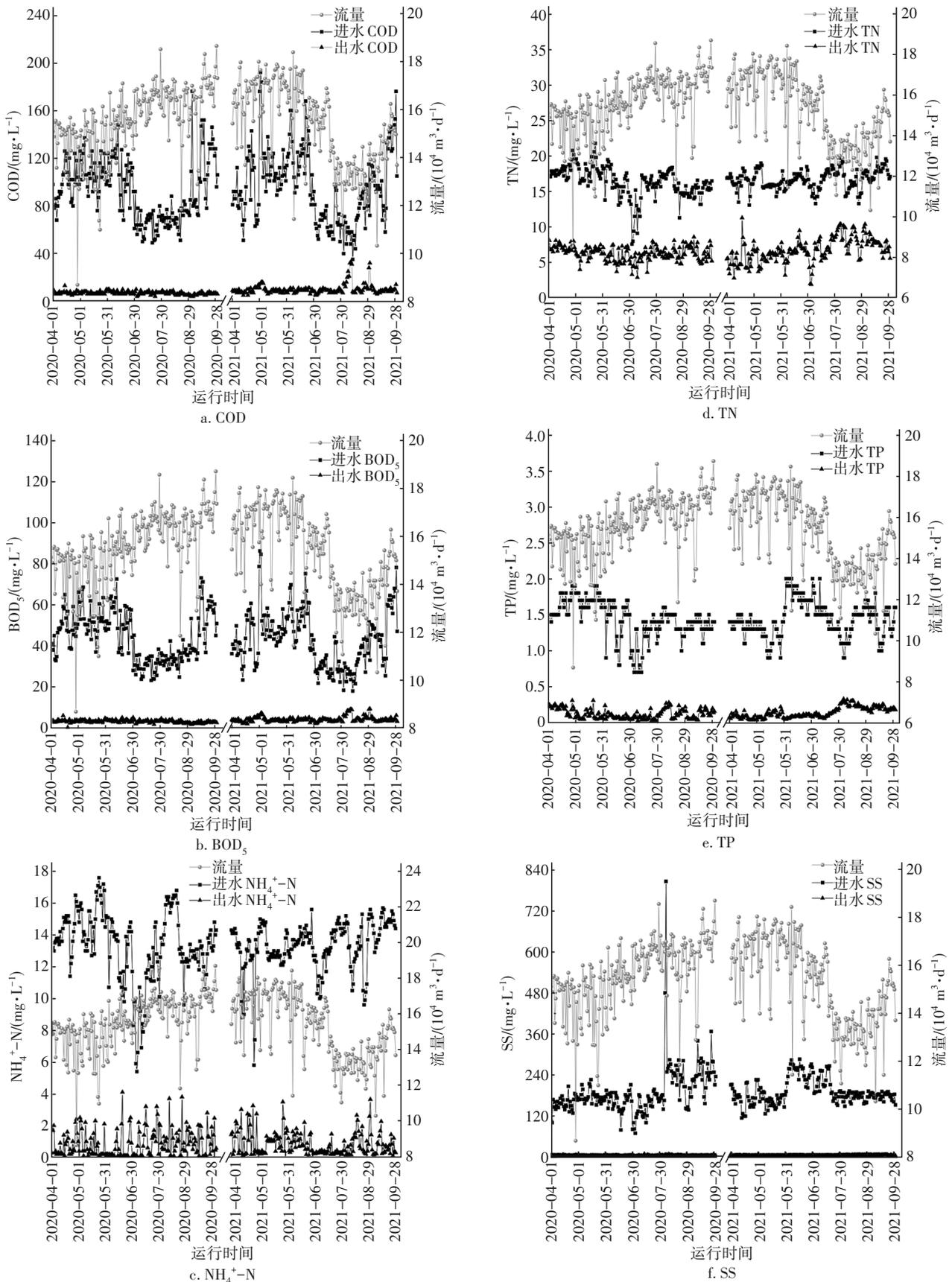


图3 对主要污染物的去除效果
Fig.3 Removal effects of main pollutants

4.1 改造建设成本

该污水处理厂雨季处理能力提升工程改造的总投资为322.6万元,具体见表5。

表5 改造成本

Tab.5 Retrofit costs 万元

项目	改造措施	工程投资
AAO池	AAO池出水堰抬高0.4 m,池墙顶部安装0.5 m不锈钢挡板	60
污泥回流泵站	更换2台潜污泵($Q=1\ 400\ \text{m}^3/\text{h}$, $H=70\ \text{kPa}$)	36
次氯酸钠消毒系统	增加1套次氯酸钠投加系统	32
二沉池应急混凝剂投加系统	增加1套混凝剂投加系统	8.6
污泥脱水间	增加1套过滤面积 $200\ \text{m}^2$ 的板框压滤机系统	186

4.2 运行成本

通过超负荷运行实现污水处理厂雨天处理量的增产,不需要增加工作人员,即人工成本没有增加。受影响的主要是电费、药剂费、污泥处理处置费。假设污水处理厂的人工成本、设备设施维修成本均已摊销到设计规模的 $10\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 水量成本中,超过 $10\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 后的运行成本只需考虑电费、药剂费、污泥处理处置费。由于本项目污泥脱水车间的运行、污泥运输和处置由第三方公司独立承担,本次未能收集到污泥脱水间的用电和药剂使用确切数据,故所计算污水处理厂的电费和药剂费成本未包含污泥脱水间发生的电耗和药剂成本,污泥脱水的电耗和药剂成本计入污泥处理处置成本。

4.2.1 电费

对2020年—2021年的日均处理水量和电耗进行分析,可得出单位水量的电耗随着日处理水量的增大而降低,见表6。

表6 日处理水量与单位水量电耗

Tab.6 Daily treated water quantity and unit water quantity power consumption

处理水量/ ($10^4\ \text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	单位水量电耗范围/ ($\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$)	单位水量的平均电耗/ ($\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$)
8.7~11.99	0.156~0.226	0.190
12.0~14.99	0.116~0.179	0.151
15.0~18.7	0.104~0.165	0.132

污水处理厂超负荷运行具有节能效果,分析如下:①综合办公楼、厂区照明等设施的用电量不随处理水量变化而变化,单位水量电耗随处理水量增加而降低。②超负荷运行时,污水处理设备如水泵和推流器等设备的运行工况可能更接近其额定功率,运行效率更高。③由于污水处理厂雨季进水浓度偏低,处理水量低于设计规模时,经常出现过量曝气,而超负荷运行时可减少过量曝气导致的能耗浪费。2020年—2021年雨季平均处理水量为 $15.4\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$,单位水量电耗为 $0.136\ \text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,电价按 $0.8\ \text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 计算,则雨季超负荷运行时电费为 $0.109\ \text{元}/\text{m}^3$ 。

4.2.2 药剂费

在污水处理厂超负荷运行时,高效沉淀池需要投加PAC和PAM,二沉池出水水质恶化时会投加PAC。统计2020年—2021年雨季的运行数据,单位水量的平均PAC投加量为 $7.68\ \text{mg}/\text{L}$,换算成10%含量的成品PAC溶液为 $76.8\ \text{mg}/\text{L}$;单位水量的平均PAM投加量为 $0.2\ \text{mg}/\text{L}$ 。单位水量的PAC、PAM费用分别为 0.058 、 $0.005\ \text{元}/\text{m}^3$ 。

2020年—2021年雨季超负荷运行期间,单位水量的次氯酸钠平均投加量为 $2.43\ \text{mg}/\text{L}$,换算成10%的成品次氯酸钠为 $24.3\ \text{mg}/\text{L}$ 。单位水量的次氯酸钠费用为 $0.022\ \text{元}/\text{m}^3$ 。

4.2.3 污泥处理处置费

该厂雨季时污泥产量约 $1.8\ \text{t}/10^4\ \text{m}^3$ (50%含水率),根据污泥处理处置协议,污泥的处理处置费用为 $450\ \text{元}/\text{t}$,单位水量污泥处理处置成本为 $0.081\ \text{元}/\text{m}^3$ 。

4.2.4 总运行成本

实行超负荷运行时,在处理水量超过设计规模($10\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$)后,新增处理水量单位运行成本主要由电费、药剂费、污泥处理处置费构成,合计 $0.275\ \text{元}/\text{m}^3$ 。

5 结语

①合流制排水系统中的污水处理厂,由于进水浓度较低,具备超设计负荷运行的潜能。

②提高污水处理厂雨天处理能力的主要技术措施包括:增加生化池水深、提高生化池污泥浓度、在二沉池投加混凝剂以改善污泥沉降性能、采用次氯酸钠与紫外线联合消毒等。

③ 通过局部改造和优化运行,实现了雨季平均日处理水量达到设计规模的1.54倍,最高日处理水量达到设计规模的1.87倍,平均日处理水量和最高日处理水量对应的AAO池水力停留时间分别只有5.52 h和4.54 h,但出水水质均能稳定达到一级A排放标准。

④ 该污水处理厂雨季处理能力提升改造工程的总投资为322.6万元。在超负荷运行时,当处理水量超过设计规模后,新增处理水量的运行成本为0.275元/m³,远低于新建或扩建污水处理厂所需的建设成本和运行成本。

参考文献:

- [1] 山本高弘,中村贵昭.大坂市における既存施設を利用した合流式下水道の改善—雨天時下水活性汚泥処理法の開発と実用化[J].環境システム計測制御学会誌(日本),2005,10(2):8-13.
YAMAMOTO Takahiro, NAKAMURA Takaaki. Improvement of combined sewer system utilizing existing facilities in Osaka city—development and practical application of wet weather activated sludge treatment process [J]. Environmental Instrumentation Control and Automation, 2005, 10(2): 8-13(in Japanese).
- [2] 刘石虎.某大型污水处理厂超负荷能力研究及实施效果[J].给水排水,2019,45(S):14-15.
LIU Shihu. Research on overload capacity of a large sewage treatment plant and its implementation effect[J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(S): 14-15 (in Chinese).
- [3] 马昭,刘玉玲,杨侃.基于BioWin软件对A²/O工艺的模拟与优化[J].环境工程学报,2015,9(10):4803-4810.
MA Zhao, LIU Yuling, YANG Kan. Simulation and optimization of A²/O process based on BioWin software [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(10): 4803-4810(in Chinese).
- [4] 房婷婷,马之光,黄鹄,等.基于BioWin的污水处理厂在不同工况下的工艺模拟及运行优化[J].市政技术,2019,37(3):201-206.
FANG Tingting, MA Zhiguang, HUANG Hu, et al. Process simulation and operation optimization of wastewater treatment plant in different conditions based on BioWin [J]. Municipal Engineering Technology, 2019, 37(3): 201-206(in Chinese).
- [5] 杨纪超.深圳污水处理厂紫外消毒的影响因素及改进对策[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
YANG Jichao. Influencing Factors of Ultraviolet Disinfection and Strategies for the Improvement in Shenzhen Sewage Treatment Plant[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013(in Chinese).

作者简介:尹华升(1979—),男,湖南隆回人,博士生,教授级高级工程师,副总工程师,主要从事市政给水排水设计和水环境治理研究工作。

E-mail:56562230@qq.com

收稿日期:2023-05-24

修回日期:2023-06-08

(编辑:衣春敏)

珍惜资源,保护环境,建设美丽中国