

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.14.017

## 北排清河第二再生水厂低碳运行实践

时玉龙, 鲍海鹏, 李伟, 张荣兵, 李广路, 白煜, 李杰,  
王之敏, 葛勇涛, 刘利群, 刘屹坤, 宋垚, 王宇, 吴雪松,  
段长江

(北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044)

**摘要:** “双碳”目标的达成,对再生水厂低碳运行提出新的更高的要求。2021年清河第二再生水厂聚焦水区节能降耗与泥区消化产能提升重点工作,包括:发挥流域化运营优势,通过流域水量联调,稳定进水负荷;对鼓风机、进水泵等重点耗能设备开展节能优化,保障设备工况与工艺需求及时匹配,实现药耗、电耗双降,水区日均电耗 $0.353\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,较2020年降低20.7%,节电对应 $\text{CO}_2$ 减排比例26.1%;针对泥质与消化池氨氮负荷变化,通过保证初沉泥比例、稳定消化负荷、调控进泥含水率等措施,消化系统沼气产量稳步提升,9月—11月沼气产量均值 $298\text{ m}^3/\text{tDS}$ ,较1月—8月增幅为21.6%,沼气发电、光伏发电、水源热泵等三项可再生能源利用项目 $\text{CO}_2$ 减排比例近22%。清河第二再生水厂将继续以节能降耗与可再生能源利用为抓手引领行业绿色低碳转型。

**关键词:** 污水再生; 污泥处理; 节能降耗; 碳减排; 厌氧消化; 可再生能源

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)14-0099-07

## Low-carbon Operation Practice of Qinghe II Wastewater Reclamation Plant under Beijing Drainage Group

SHI Yu-long, BAO Hai-peng, LI Wei, ZHANG Rong-bing, LI Guang-lu, BAI Yu,  
LI Jie, WANG Zhi-min, GE Yong-tao, LIU Li-qun, LIU Yi-kun, SONG Yao,  
WANG Yu, WU Xue-song, DUAN Chang-jiang  
(Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100044, China)

**Abstract:** To achieve the “double carbon” targets, carbon emissions reduction is becoming increasingly important for wastewater reclamation plant. In 2021, Qinghe II wastewater reclamation plant (QH II) focused on energy conservation in wastewater treatment process and biogas production enhancement in sludge treatment process. It took advantages of watershed operation and stabilized inlet load through joint adjustment of watershed water quantity. Energy efficiency of major energy consuming equipment, such as blowers and inlet pumps, was optimized to ensure the timely matching of equipment working conditions and treatment process requirements. The average daily electricity use in wastewater area was  $0.353\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ , 20.7% lower than that of 2020, and  $\text{CO}_2$  emission was reduced by 26.1% corresponding to power saving. In response to changes in sludge characteristics and ammonia nitrogen load of digestion tank, the biogas production was steadily increased by ensuring the proportion of primary sludge, stabilizing the organic loading rate of digester, and regulating the water content of its feed sludge. The average biogas production from September to November was  $298\text{ m}^3/\text{tDS}$ , an increase of 21.6% compared with January to August. The  $\text{CO}_2$  emission reduction rate of three renewable energy projects,

including biogas power generation, photovoltaic power generation and water source heat pump system, was nearly 22%. QH II will continue to take the lead in the wastewater industry's green and low-carbon transformation with energy conservation and renewable energy utilization.

**Key words:** wastewater reclamation; sludge treatment; energy conservation; carbon emissions reduction; anaerobic digestion; renewable energy

在碳减排的驱动下,污水处理厂运营方在保障工艺运行效率的前提下,更加注重能源利用效率的提升。吨水能耗是衡量污水处理厂运营管理水平的主要指标之一,但由于区位、设计规模、处理工艺、运行负荷及进、出水水质等诸多客观因素的不同,导致污水处理厂的能耗呈现一定差异,且某些差异难以通过工艺优化调控来弥补,因此,能耗水平的评估需结合污水厂的实际工况。能耗高低虽不能完全体现污水厂的运营水平,但决定着污水厂能源中和的实现路径。根据美国能源部统计,美国污水处理厂按照有无强化脱氮工艺划分,2010年污水处理厂耗电量主要集中在 $0.4\sim 0.5\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,均值为 $0.43\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ <sup>[1]</sup>。欧洲污水处理厂平均耗电量约为 $33.4\text{ kW}\cdot\text{h}/(\text{人口当量}\cdot\text{a})$ ,若1人口当量以 $0.2\text{ m}^3/\text{d}$ 计,则折算耗电为 $0.46\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ <sup>[2]</sup>。根据唐建国介绍,德国2019年的污水处理厂耗电量为 $0.42\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 。He等<sup>[3]</sup>对我国千余座污水处理厂的能耗统计分析结果显示,截至2013年,全国执行一级A出水标准的污水处理厂平均耗电为 $0.35\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,包括北京在内的北方污水处理厂平均耗电为 $0.439\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 。

北排集团结合首都水资源特点,建成基于地表Ⅳ类水标准的再生水生产利用系统以及配套的污泥资源化处置中心,水质与泥质标准均处于行业领先水平。2021年,北排在全国污水处理行业内率先发布碳中和规划与实施方案<sup>[4]</sup>。北排清河第二再生水厂(以下简称“清河二厂”)作为生态环境部“首批十佳城镇污水处理低碳运行典型案例”,秉持水、泥全要素资源化利用理念,统筹水、泥两个生产板块,聚焦水区节能降耗与泥区生物质能开发利用等重点任务,全力推进碳减排工作。结合清河二厂碳减排工作具体实践,重点介绍水区节能降耗与泥区沼气产量提升工作以及取得的初步成效。

## 1 清河二厂能源使用情况

清河二厂包括再生水生产与污泥处理两大业

务板块。其中水区设计处理规模为 $50\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,主体工艺为“改良 $\text{A}^2\text{O}\rightarrow$ 二沉池 $\rightarrow$ 砂滤池 $\rightarrow$ 臭氧氧化 $\rightarrow$ 紫外消毒”。再生水出水水质执行北京市《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012)的B标准。高品质再生水主要用作清河河道生态补水。泥区处理能力为 $814\text{ t}/\text{d}$ (以80%含水率计),主体工艺为浓缩/预脱水+热水解+厌氧消化+板框脱水。水区排泥经过无害化、减量化、稳定化处理后,进入园林绿化等领域,实现资源化利用。

清河二厂各工艺系统电能消耗情况见图1。

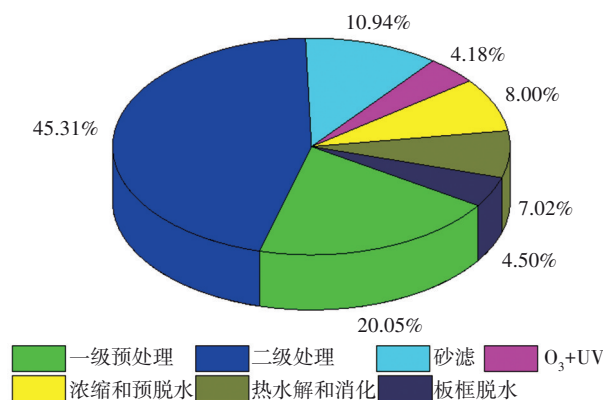


图1 清河二厂各工艺系统电能消耗情况

Fig.1 Energy consumption for Qinghe II wastewater reclamation plant

2021年1月—11月,清河二厂平均耗电为 $0.439\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,其中水区耗电为 $0.353\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,占全厂电单耗的80.48%。如图1所示,水区一级预处理与二级生物处理单元能耗占比较高,对应主要耗能设备分别为进水泵与鼓风机,两者电单耗合计 $0.188\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,约占水区电单耗的53%。泥区耗电量折算吨水单耗为 $0.086\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,占全厂电单耗的19.52%。其中,前端浓缩、预脱水与后端板框脱水单元能耗合计占泥区的64%。除臭系统对电能消耗的贡献不容小觑,约占比框脱水单元电单耗的50%。

## 2 水区节能降耗工作进展

清河二厂作为管网末端污水厂,与上游3座污水厂共同服务近150 km<sup>2</sup>流域面积。受管网来水与上游污水厂抽升的叠加影响,其进水流量呈现显著变化。进水负荷波动成为水区工艺调控与节能降耗需要解决的首要问题。

### 2.1 发挥流域水量联调优势

为充分发挥北排厂网一体化运营优势,强化了流域内污水厂联动联调。2021年初,清河流域启动管网上游清河污水厂与管网末端清河二厂水量联调工作。根据流域内水量变化情况,结合两厂栅前液位变化规律,制定相应的抽升策略。在清河污水厂稳定抽升的前提下,夜间低水量或水量骤增时段,有针对性地向下游清河二厂调水或者加大抽升,以降低后者的水力冲击负荷。流域水量联调前、后水区处理水量的时变化如图2所示。

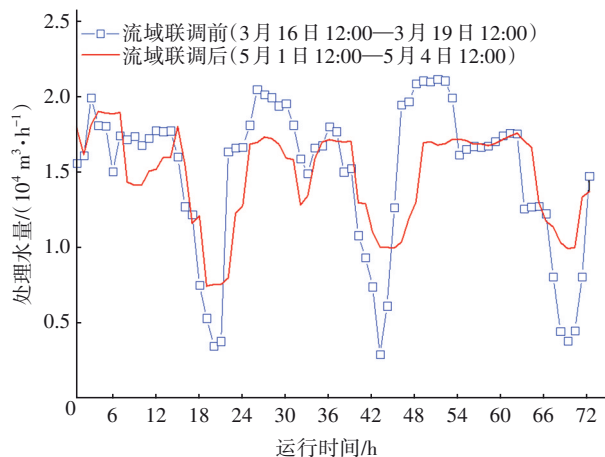


图2 流域水量联调前、后水区处理水量的时变化

Fig.2 Variation of water quantity before and after watershed joint regulation

由图2可以看出,3月16日—19日(72 h)流域水量联调前,清河二厂处理水量每天存在明显的峰谷波动,处理水量为 $(0.35\sim2.1)\times10^4\text{ m}^3/\text{h}$ 。以24 h为一个计算周期,则3个周期标准偏差均值为5 054 m<sup>3</sup>/h。每个周期时平均处理水量与最低水量比值的平均值为4.5。流域水量联调后,5月1日—4日(72 h)清河二厂每天的处理水量波动范围缩小到 $(0.8\sim1.9)\times10^4\text{ m}^3/\text{h}$ 。3个24 h周期标准偏差均值为3 140 m<sup>3</sup>/h,较流域联调前降低近37.9%。每个周期时平均处理水量与最低水量比值的平均值为1.6,较流域联调前降幅达64.4%,为水区工艺设备

的运行提供了更为平稳的水力负荷。

### 2.2 鼓风机、进水泵优化调控

鼓风机能耗占全厂电耗的27%,鼓风机调控优化是水区节能降耗的重点工作。坚持风量与水量及时匹配原则,结合鼓风机导叶开度与风量、单耗相关性分析,明确导叶优选开度区间为35%~55%,投运鼓风机2~3台,聚焦每天增水、减水两个密集调控时段,开展鼓风机精细化调控。

鼓风机调控前,由于风量调节难以适应水量变化,导致低水量期气量与能源浪费,而高水量期则气量供应不足。生物池处理水量、曝气量与DO变化情况见图3。

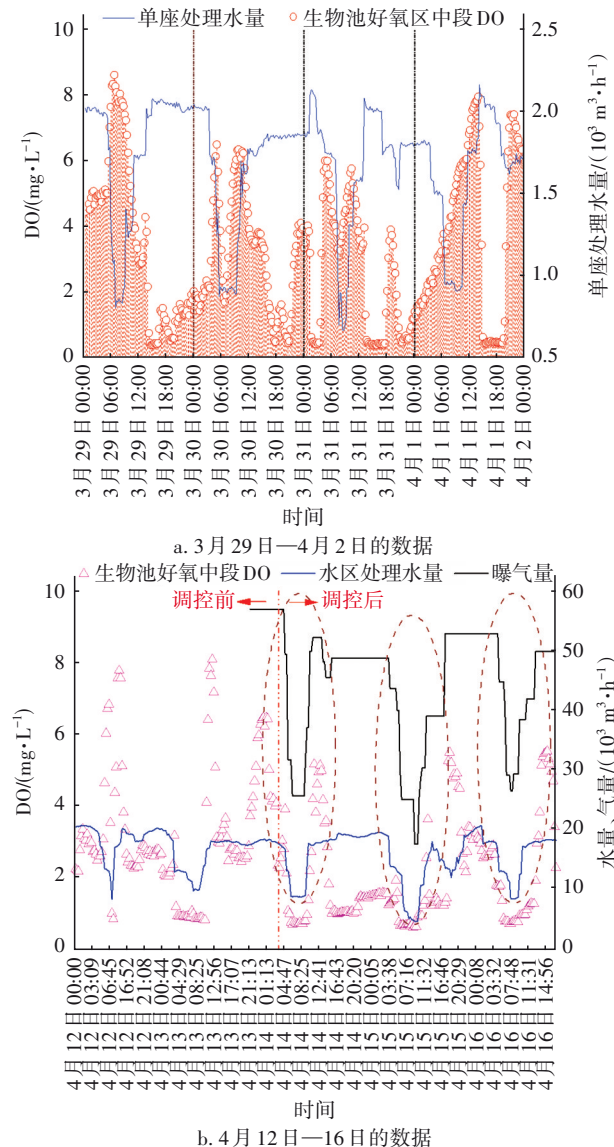


图3 生物池处理水量、曝气量与DO变化情况

Fig.3 Variation of wastewater flow rate, air supply and DO for biological reactor



由图3(a)可以看出,伴随每天水量的变化,生物池好氧区中段DO呈现显著波动。每天凌晨至第二天上午低水量期,DO出现峰值,最高可达6~8 mg/L。而每天下午至夜间高水量期,DO又出现低值,低于0.5 mg/L。鼓风机调控后,气量、水量分时段匹配,DO峰值明显降低,主要集中在0.5~3.5 mg/L,见图3(b)。鼓风机调控优化后气量降幅近 $7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,鼓风机电单耗日均降幅7.8%。1月—11月鼓风机日均电单耗 $0.12 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

参照进水泵性能曲线,结合流域水量联调,确保低水量时段泵井液位 $>8 \text{ m}$ 、栅前水位 $>3 \text{ m}$ ,水泵理论效率 $>80\%$ 。调整进水泵抽升策略,工频泵与变频泵编组运行,利用后者降频实现梯度减水,且频率维持在45 Hz以上。水力条件与抽升策略的优化为进水泵节电创造了条件。2021年进水泵吨水电单耗与吨水提升电单耗分别维持在 $0.068 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 、 $0.0045 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m} \cdot \text{m}^3)$ 。

若要进一步压缩进水泵单耗,需合理应对以下两点设备与工艺的挑战:

① 由于水泵叶轮口环磨损,叶轮与泵体间隙增加,水泵内部泄漏损失升高,导致水泵运行效率下降。例如,11月更换5#工频泵口环后,抽升水量提升近15%;

② 汛期为有效管控合流制溢流污染,降雨前进水泵执行低液位抽升,为上游管网腾容,栅前液位长时段维持低位( $\leq 1.5 \text{ m}$ ),导致进水泵能耗增加。

### 2.3 水区节能降耗初步成效

2019年—2021年水区月度电单耗见图4。

受汛期集中降雨的影响,夏、秋季节管网进厂水量较大,污染物浓度偏低,月度电单耗水平低于冬春季节。2020年初突发新冠疫情,春节期间北排各厂长期处于低负荷运行,其间为了保障工艺稳定运行,以及再生水和污泥产品的安全性,采取了大量调控措施<sup>[5-7]</sup>。受此影响,2020年清河二厂水力负荷率仅为64.8%,水区电单耗值较2019年有所上升。2021年日均水力负荷恢复到84.6%,随着节能降耗专项工作的开展,水区电单耗值明显降低。2019年、2020年、2021年1月—11月,水区日均电单耗分别为 $0.397$ 、 $0.445$ 、 $0.353 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,2021年电单耗较前两年同期分别下降了11.1%和20.7%。

与此同时,充分利用改良 $\text{A}^2\text{O}$ 工艺前置预缺氧

段对后续生物脱氮除磷的促进作用,将鼓风机精细化控制与内回流比调节相结合,提高内碳源反硝化效率。2021年5月基本实现零碳源投加,前三季度甲醇投配率 $15.9 \text{ mg/L}$ ,较2020年降低38.6%。以生物池沿程数据为依据分析,借助生化耦合除磷系统聚合氯化铝理论投配率计算,构建了汛期与非汛期双模式下除磷药剂的动态投加策略,前三季度聚合氯化铝投配率 $9.7 \text{ mg/L}$ ,较2020年降低19.2%。提高紫外消毒系统设备保障度,形成了以紫外消毒为主体、兼顾臭氧氧化衍生消毒效果、维持低剂量补氯的联合消毒新方案,前三季度 $\text{NaClO}$ 投配率基本维持在 $2 \text{ mg/L}$ ,较2020年降低23.1%。

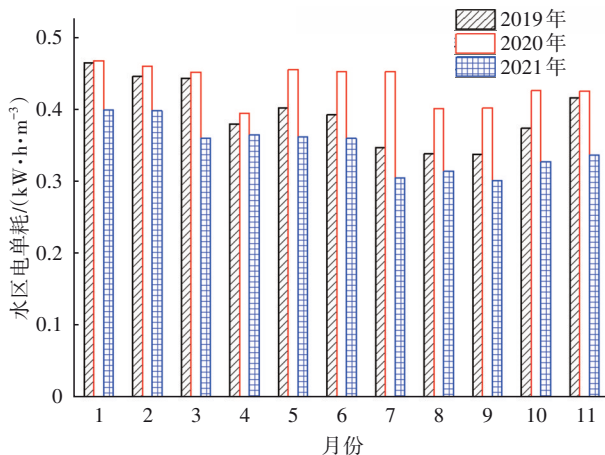


图4 2019年—2021年水区月度电单耗

Fig.4 Monthly electricity consumption of wastewater treatment process from 2019 to 2021

### 3 泥区沼气产量提升工作进展

2021年泥区完成沼气发电机组及余热利用系统建设。泥区沼气产量是制约沼气发电量的关键因素。泥区沼气产量主要受泥质、热水解和消化系统运行效率的影响。其中,泥质主要指标为污泥有机物含量、初沉污泥与剩余污泥比例。热水解单元投运以来严格按照康碧公司提供的技术参数稳定运行。与之相比,消化系统的运行效率受进泥负荷、温度、酸碱比等因素的影响较为明显。

#### 3.1 泥质对沼气产量的影响

脂肪较碳水化合物和蛋白质,具有更高的沼气生成潜力。通常情况下,初沉污泥脂肪含量高,而剩余污泥蛋白质含量高<sup>[8]</sup>。清河二厂污泥样品元素分析结果显示,初沉污泥N/C为0.10,剩余污泥N/C为0.15,与上述规律一致。由于目前泥区执行优先

接收剩余污泥的策略,导致初沉泥量与占比均波动较大。

2021年前三季度泥质与沼气产量如图5所示。

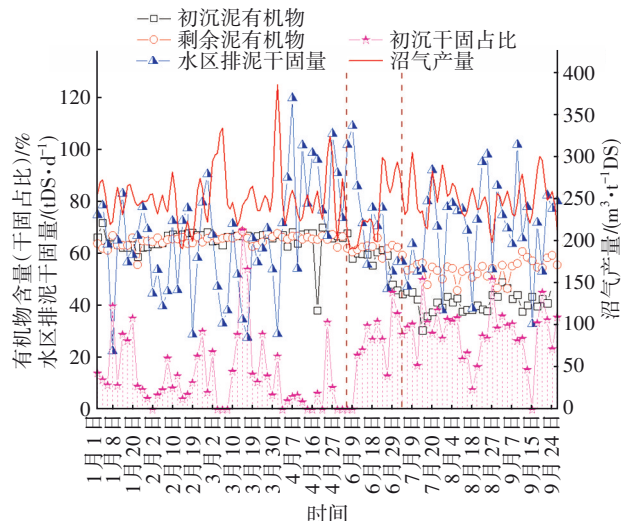


图5 2021年前三季度泥质与沼气产量

Fig.5 Sludge characteristics and biogas production in the first three quarters of 2021

6月1日—7月4日,随着初沉污泥干固占比由不足10%跃升到30%左右,沼气产量明显提升。两

者的泊松系数为0.614,呈中度正相关,可以推断水区初沉排泥量增加是促进沼气产量升高的主要原因。而随着主汛期的到来,大水量冲击导致水区排泥有机物含量显著降低,近两个月(7月初—8月底)剩余污泥与初沉污泥有机物含量长期处于低值,均值分别为52.7%、41.7%。初沉污泥有机物含量的降低,导致即使其干固占比维持在30.4%的较高水平,产气量仍未见明显提升。

### 3.2 消化池运行状态对沼气产量的影响

2021年前三季度消化池进泥量在543~905 m³/d范围波动,日均进泥量为713 m³/d,对应停留时间近30 d。进泥含水率为90.3%~92.3%,有机负荷为0.89~1.86 kgVSS/(m³·d),挥发性脂肪酸含量为1472~3264 mg/L。消化温度维持在42℃,消化池内氨氮均值为2032 mg/L,酸碱比维持在0.1左右。泥质与沼气产量变化如图6所示,入汛前(4月—6月)水区剩余泥排放量长期维持在高值,而初沉污泥占比较低。由于剩余污泥蛋白质含量较高,导致消化池进泥氨氮负荷与消化池内游离氨浓度明显上升,短期内游离氨浓度>600 mg/L。对应时段内游离氨抑制导致沼气产量呈现下降趋势<sup>[9]</sup>。

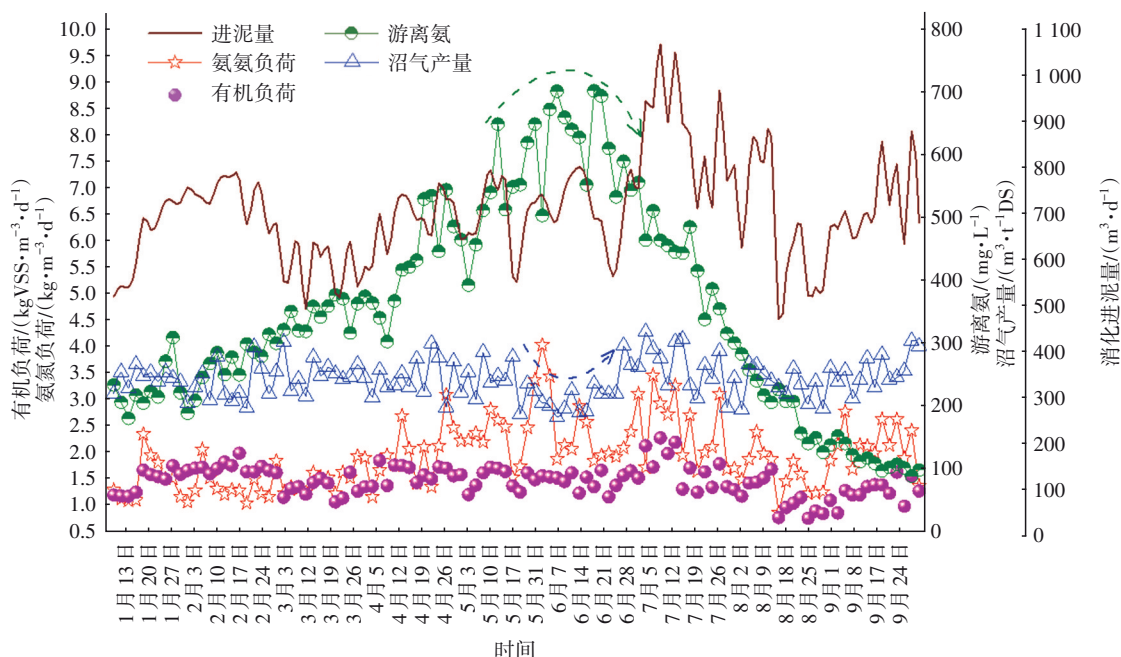


图6 2021年前三季度消化池运行参数

Fig.6 Process parameters of anaerobic digester in the first three quarters of 2021

### 3.3 泥区沼气产量提升初步成效

针对上述泥质变化与消化系统运行参数波动导致的产气量下降问题,将泥区与水区强化联动,

在对剩余污泥负荷合理管控的基础上,提出“稳消化负荷、控进泥含水率、保初沉比例”的工艺优化调控总体方针,以及3条具体措施:①优先适当增加稀

释水用量(6月底—8月中),提高消化池进泥含水率,降低消化系统的游离氨浓度至300 mg/L以下;②对消化池负荷开展精细化调控,9月消化池进泥量标准差较4月—8月进泥量标准差月均值降低近19%,为半年来最低值,消化进泥负荷日趋平稳;③结合泥质有机物含量变化,保证初沉污泥接收比例。工况Ⅰ,有机物含量60%左右,初沉污泥干基投加比需高于10%;工况Ⅱ,有机物含量50%左右,初沉污泥干基投加比需达到30%。随着该方针、措施的执行,以及水区排泥有机物含量的回升,沼气产量稳步提升。

2021年1月—11月的沼气产量如图7所示。9月沼气产量为266 m<sup>3</sup>/tDS,10月沼气产量提升为293 m<sup>3</sup>/tDS,11月沼气产量进一步提升为309 m<sup>3</sup>/tDS。尽管11月中旬由于水区剩余排泥量波动,引发消化池产气量短暂下降,待消化池进泥负荷稳定后,11月下旬沼气产量恢复到319 m<sup>3</sup>/tDS的较高水平。9月—11月沼气产量达298 m<sup>3</sup>/tDS,较1月—8月均值(245 m<sup>3</sup>/tDS)增幅达21.6%。1月—11月沼气产量均值为261 m<sup>3</sup>/tDS。

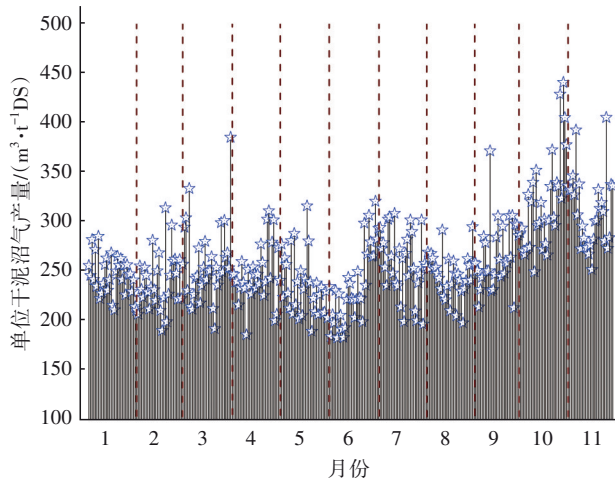


图7 2021年消化池月度沼气产量(1月—11月)

Fig.7 Monthly biogas production of anaerobic digester in 2021(January to November)

#### 4 清河二厂碳减排潜力分析

2021年清河二厂通过提质增效与节能降耗工作的开展,碳减排潜力得到进一步释放。以实际处理水量 $42 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d核算,水区全年节电对应CO<sub>2</sub>减排量为8 519 t,约占2020年全厂能源消耗对应CO<sub>2</sub>排放量的26.1%。

结合泥区现况261 m<sup>3</sup>/tDS的沼气产量,扣除热

水解自用蒸汽与冬季供暖蒸汽消耗沼气量,可发电沼气量以5 500 m<sup>3</sup>/d测算,发电量约 $1.0 \times 10^4$  kW·h/d,约占全厂用电量的5.6%。预估年度节电对应CO<sub>2</sub>减排量为2 205 t。即将建设的光伏发电项目,若按高压并网方式核算,装机容量为6.9 MW,理论可发电量约 $2.3 \times 10^4$  kW·h/d,自用率取83.8%,则对应实际使用电量为 $1.9 \times 10^4$  kW·h/d,约占全厂用电量的10.6%。预估年度节电对应CO<sub>2</sub>减排量为4 189 t。水源热泵系统运行稳定,厂区3台单螺杆水源热泵机组总装机容量为2 800 kW,为厂区综合办公楼、车间等(总建筑面积近22 000 m<sup>2</sup>)提供冬季供暖、夏季制冷服务,每年可节约天然气消耗 $36 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,对应CO<sub>2</sub>减排量约783 t。以2020年全厂能源消耗对应CO<sub>2</sub>排放量为基数,上述3项可再生能源利用项目预估CO<sub>2</sub>减排量分别为6.8%、12.8%和2.4%,合计减排量约22%。

根据目前的数据推断,随着水区节能降耗与泥区沼气产能提升工作的持续推进,以及沼气发电、光伏发电顺利并网投运,清河二厂CO<sub>2</sub>减排量有望达到其2020年能源消耗对应CO<sub>2</sub>排放量的40%~50%。

#### 5 结论

① 通过流域水量联调有效减缓了清河二厂水力负荷波动幅度,时处理水量离散程度与峰谷水量比值较联调前分别降低37.9%、64.4%。鼓风机、进水泵等主要耗能设备节能优化效果显现。2021年1月—11月,水区电单耗为0.353 kW·h/m<sup>3</sup>,较2020年同期降幅为20.7%。水区节电CO<sub>2</sub>减排量约占2020年全厂能源消耗对应CO<sub>2</sub>排放量的26.1%。此外,前三季度碳源与化学除磷药剂投配率降幅分别为38.6%、19.2%。

② 结合泥质、消化系统运行参数与产气量相关性分析,明确了泥质有机物含量、初沉污泥占比、剩余污泥负荷等产气量主要影响因素。提出提升沼气产量3项具体举措,自8月下旬措施实施以来,9月—11月沼气产量达298 m<sup>3</sup>/tDS,较1月—8月的增幅为21.6%。

③ 核算沼气发电、光伏发电、水源热泵等三项可再生能源利用项目CO<sub>2</sub>减排量,约占全厂2020年能源消耗对应CO<sub>2</sub>排放量的22%。节能降耗与可再生能源利用对应的CO<sub>2</sub>减排总量占比有望达到



40%~50%。清河二厂将持续引领行业绿色低碳转型。

#### 参考文献:

- [1] PLAPPALLY A K, LIENHARD V J H. Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16: 4818-4848.
- [2] NECZAJ E, GROSSER A. Circular economy in wastewater treatment plant—challenges and barriers [J]. *Proceedings*, 2018, 2: 614.
- [3] HE Y, ZHU Y S, CHEN J H, *et al.* Assessment of energy consumption of municipal wastewater treatment plants in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 228: 399-404.
- [4] Beijing Drainage Group. Making China's water industry carbon neutral [EB/OL]. [2021-11-04]. <https://iwa-network.org/making-chinas-water-industry-carbon-neutral>.
- [5] 郑江, 李群, 刘垚, 等. 新冠肺炎疫情期间城镇再生水厂低负荷运行实践[J]. *给水排水*, 2020, 46(5): 35-40.
- ZHENG Jiang, LI Qun, LIU Yao, *et al.* Low influent loading operation practice of urban reclaimed water plants during the period of COVID-19 epidemic [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(5): 35-40 (in Chinese).
- [6] 李魁晓, 时玉龙, 于丽昕, 等. 新冠肺炎疫情期间城

镇再生水厂协同消毒工艺运行实践[J]. *给水排水*, 2020, 46(4): 48-53.

LI Kuixiao, SHI Yulong, YU Lixin, *et al.* Practice of synergistic disinfection process in water reclamation plants during COVID-19 epidemic [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(4): 48-53 (in Chinese).

- [7] 李伟, 常菁, 王佳伟, 等. 热水解高级厌氧消化系统的污泥消毒、减量与能量回收[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(16): 19-26.

LI Wei, CHANG Jing, WANG Jiawei, *et al.* Sludge disinfection, reduction and energy recovery by anaerobic digestion with thermal hydrolysis pretreatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(16): 19-26 (in Chinese).

- [8] BARBER W P F. Influence of wastewater treatment on sludge production and processing [J]. *Water Practice and Technology*, 2015, 10(1): 178-186.

- [9] LAUTERBÖCK B, ORTNER M, HAIDER R, *et al.* Counteracting ammonia inhibition in anaerobic digestion by removal with a hollow fiber membrane contactor [J]. *Water Research*, 2012, 46(15): 4861-4869.

作者简介:时玉龙(1986-),男,山东德州人,博士,高级工程师,主要研究方向为污水再生处理与污泥资源化处置。

E-mail:yuchengshihit@163.com

收稿日期:2021-12-28

修回日期:2021-12-29

(编辑:衣春敏)

环境就是民生,青山就是美丽,蓝天也是幸福