

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.19.009

太湖流域某污水处理厂能耗波动的响应规律

余炼^{1,2}, 朱浴宇³, 周瑜³, 刘佳^{1,2}, 倪晓静¹, 郭茹^{1,2},
蔡辰^{1,2}, 黄翔峰^{1,2}, 彭开铭^{1,2}

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学碳中和研究院, 上海 200092; 3. 无锡市水务集团有限公司, 江苏 无锡 214031)

摘要: 采用数学分析法解析了太湖流域某污水处理厂近十年的能耗数据, 分别研究了水量、污染物、水温对能耗波动的影响规律及影响程度。研究发现, 该厂近十年吨水能耗的变化范围为0.15~0.45 kW·h/m³, 波动幅度大; 影响因素分析发现, 吨水能耗与水量呈幂函数负相关, 水量每增加10%, 吨水能耗减少约12%, 呈现规模效应; 各类污染物中, 含氮污染物对能耗波动影响最显著; 在温度变化幅度较大的时段, 吨水能耗与水温基本呈负相关。综合比较发现, 水量对能耗波动的影响程度最大, 可为污水处理厂稳定运行的评估提供借鉴。

关键词: 污水处理厂; 能耗波动; 水量; 含氮污染物; 水温

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)19-0061-08

Response of Energy Consumption Fluctuations in a Wastewater Treatment Plant in Taihu Lake Basin

YU Lian^{1,2}, ZHU Yu-yu³, ZHOU Yu³, LIU Jia^{1,2}, NI Xiao-jing¹, GUO Ru^{1,2},
CAI Chen^{1,2}, HUANG Xiang-feng^{1,2}, PENG Kai-ming^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Institute of Carbon Neutrality, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Wuxi Water Group Co. Ltd., Wuxi 214031, China)

Abstract: This paper analyzed the energy consumption data of a wastewater treatment plant in Taihu Lake basin in recent ten years by mathematical analysis method, and investigated the effects and influence degree of water quantity, pollutants and water temperature on energy consumption fluctuation, respectively. In the past ten years, the energy consumption per volume of wastewater in the plant fluctuated significantly in the range of 0.15–0.45 kW·h/m³. The analysis of influencing factors indicated that the energy consumption per volume of wastewater was negatively correlated with the water quantity as a power function. For every 10% increase in water quantity, the energy consumption per volume of wastewater was reduced by approximately 12%, showing that there was a scale effect. Among various pollutants, nitrogen-containing pollutants had the most significant influence on energy consumption fluctuation. The energy consumption per volume of wastewater was negatively correlated with water

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978490); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2022-4-YB-01); 污水处理厂碳排放核算体系开发及关键低碳技术研究项目(KH0040020212378)

通信作者: 彭开铭 E-mail: pengkaiming@tongji.edu.cn

temperature in the period of large temperature variation. A comprehensive comparison showed that water quantity had the greatest influence on fluctuation of energy consumption, which could provide a reference for evaluating the stable operation of wastewater treatment plants.

Key words: wastewater treatment plant; energy consumption fluctuation; water quantity; nitrogen-containing pollutants; water temperature

截至 2020 年,全国设市城市、县(不含建制镇及以下)的污水处理厂共计 4 326 座,处理能力达 $2.30 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$,污水年排放总量为 $6.75 \times 10^{10} \text{ m}^3$,年处理总量为 $6.56 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。污水处理厂属于能源消耗密集型行业,为了达到日益严格的污水排放标准,大多数污水厂通过“以高能耗换取高水质”的方式处理污水^[1],使电力约占整个污水处理能耗的 60%~90%^[2],可见能耗控制对污水厂尤为重要。

污水处理厂能耗受多种因素影响,张羽就等^[3]认为影响能耗的因素包括水量、进水 COD 浓度、排放标准、工艺等;Khalkhali 等^[4]认为气候因素如水温、气温、降水量等也会影响能耗。杨凌波等^[5]研究了国内 559 座污水处理厂的吨水能耗与处理水量之间的关系,结果表明污水处理量翻倍,吨水能耗将降低 11%;Yu 等^[6]采用贝叶斯半参分位数回归法分析发现污水水温过高或过低都会增加能耗。受各因素影响,污水厂能耗具有一定的波动性,对污水厂的设备、电网等稳定运行造成一定冲击,因此对能耗波动及其响应规律的探究很有必要。笔者以太湖流域某污水处理厂为例,探究了水量、污染物、水温对能耗波动的影响规律及影响程度,以期为污水厂能耗波动因素分析与控制提供建议。

1 污水处理厂概况及数据分析方法

该污水处理厂地处太湖流域,分两期建设,一期规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用倒置 A²O+V 型滤池为主体工艺;二期规模为 $1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$,工艺为倒置 A²O+滤布滤池,具体工艺流程见图 1。2020 年该厂对深度处理单元进行改造,将 V 型滤池、滤布滤池均改造为反硝化深床滤池。自 2021 年 1 月 1 日起,出水水质执行《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》(DB 32/1072—2018)(以下简称 DB 32),设计及平均进、出水水质见表 1。

本研究将单位体积污水消耗电能作为该厂的吨水能耗,单位污染物去除量所耗电能作为单位污染物去除能耗,污染物包括 COD、BOD₅、SS、TP、TN、

NH₃-N、耗氧污染物,其中耗氧污染物指 BOD₅+3.5NH₃-N。以 Origin Pro 9.1、SPSS 20 为分析软件,运用幂函数拟合、单因素方差分析、Spearman 相关性分析等方法进行数据处理。

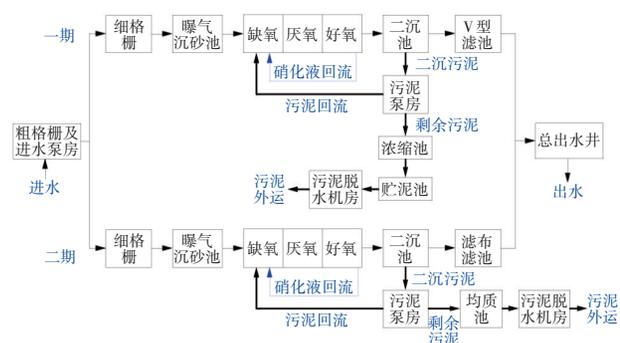


图 1 太湖流域某污水处理厂工艺流程

Fig.1 Flow chart of a wastewater treatment plant in Taihu Lake basin

表 1 进、出水水质

Tab.1 Influent and effluent quality mg·L⁻¹

项 目	COD	BOD ₅	SS	TP	TN	NH ₃ -N
设计进水	500	220	150	6	50	40
设计出水	≤40	≤10	≤10	≤0.3	≤10(12)	≤3(5)
平均进水	238±121	108±55	100±65	4±2	32±9	24±7
平均出水	18.28±4.54	3.34±0.93	4.79±0.78	0.15±0.08	8.10±1.98	0.44±0.40

注: 括号外数值为水温>12℃时的控制指标,括号内数值为水温≤12℃时的控制指标。

2 结果与讨论

2.1 污水处理厂能耗波动特征

该污水处理厂 2010 年—2021 年吨水能耗 E_w 、单位 COD 去除能耗 E_1 、单位耗氧污染物去除能耗 E_o 的平均值分别为 $0.28 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 、 $1.33 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$ 、 $1.54 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$ 。其中 E_w 比太湖流域污水厂^[7]的平均能耗低 39%(见表 2),同时也低于国内平均水平^[3],但与同规模污水厂的能耗基本相当^[3],这可能是由于国内中小型城镇污水厂($<1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$)数量占 88%^[8],而 E_w 一般随规模的减小而升高^[9]。该厂的

E_w 较华北地区污水厂也更低^[10],这可能是由于该厂的冬季水温(10~15 °C)比华北地区(北京市某污水厂冬季水温为5~10 °C^[11],内蒙古中部某污水厂冬季水温为5.3~8 °C^[12])更高,污染物去除效能更优。同时,与该厂同规模($1 \times 10^5 \sim 4 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$)、同工艺污水厂的平均 E_1 、 E_0 分别为1.10和1.22 kW·h/kg^[13],分别比该厂低17%和21%。可见该厂能耗在国内整体处于较低水平,但仍有一定降耗空间。

表 2 污水处理厂吨水能耗的文献值

Tab.2 Literature values of E_w for wastewater treatment plants

项 目	E_w
太湖流域 204 座污水处理厂平均能耗 ^[7]	0.46
国内 1 291 座污水处理厂平均能耗 ^[3]	0.32
同规模污水处理厂(规模 $>1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$)平均能耗 ^[3]	0.27
华北地区污水处理厂平均能耗 ^[10]	0.40~0.50

为进一步研究能耗的历史变化趋势,将该厂十余年(2010年—2021年)的能耗数据以箱线图表示

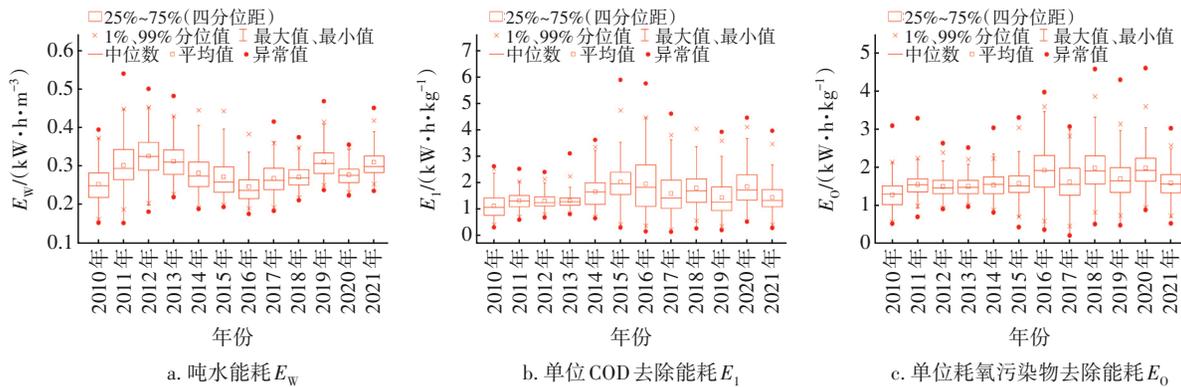


图 2 能耗逐年变化

Fig.2 Energy consumption change by year

通过单因素方差分析可知,提标至 DB 32 后 2021 年与提标前 2019 年的吨水能耗无显著性差异($P > 0.05$)。比较发现两年的污染物进水浓度相差不大,但 2021 年出水浓度比 2019 年更低,尤其是氨氮降低了 60%。当只考虑标准提高时,需增加能耗投入,如义乌市 9 座污水厂提标后能耗增加了 7%^[14],西安市某污水厂^[15]出水达标后能耗增加了 18%;而该厂提标后同时降低了好氧池后端的溶解氧浓度,2019 年、2021 年的好氧池后端溶解氧平均浓度分别为 3.40 和 1.93 mg/L。由此可见,当污染物进水浓度基本不变时,虽然排放标准提高,但由于控制溶解氧使得提标后的吨水能耗无显著增加。

(见图 2)。 E_w 、 E_1 、 E_0 一直呈波动状态,能耗波动幅度大。其中 E_w 的最小值、最大值分别为 0.15 和 0.45 kW·h/m³,两者相差 200%,变异系数达 18%,25%~75% 的 E_w 分布在 0.21~0.36 kW·h/m³。 E_1 的波动范围是 0.14~4.47 kW·h/kg,两者相差 32 倍。 E_0 主要分布在 0.23~3.46 kW·h/kg,变异系数达 29%。同时可发现 E_w 、 E_1 主要呈右偏态分布,中位数小于平均值,能耗更加集中地分布在 25%~50%。

E_w 逐年波动可能是由污染物浓度和水量波动引起的,如 2012 年—2016 年进水 COD 浓度逐年下降,同时进水量增加,使得此阶段的吨水能耗逐年下降。由于进水污染物浓度的波动幅度增大,2014 年—2021 年 E_1 的离散度比前 4 年更大,2016 年—2021 年 E_0 的离散度也大于前 6 年。如 2016 年 E_1 的四分位距高达 1.50 kW·h/kg,最大值与最小值相差 4.33 kW·h/kg。同时对比发现, E_w 的四分位距相比 E_1 、 E_0 更稳定,波动程度较小,可见 E_1 、 E_0 受外界因素影响的敏感度较 E_w 更为显著。

2.2 污水处理厂能耗波动响应规律

该厂近十年的能耗波动范围较大,研究表明排放标准、污染物去除量、工艺、水量、水温等因素的变化均会影响能耗^[3,16-17],本研究选择进水量、污染物及水温对能耗波动的影响规律进行分析。由于 2021 年 1 月该厂排放标准提高,同时考虑数据的时效性,因此选择近 5 年(2017 年—2021 年)的数据进行能耗波动响应规律的研究。

2.2.1 水量对能耗波动的影响规律

将该厂进水量和吨水能耗的日均数据进行幂函数曲线拟合(P 均小于 0.05),得到幂函数方程见图 3。吨水能耗与水量呈幂函数负相关,其随水量增加而降低,符合污水处理厂的规模效应规律^[5,16]。

以 2021 年为例,当水量增加 10% 时,吨水能耗减少约 12%,可见适当提高污水处理量,有助于降低吨水能耗水平。根据拟合效果(R^2)可知,2020 年处于改造施工阶段,受进水调度、设备停用、施工用电、运行调试等因素影响,吨水能耗与水量的拟合效果较其他 4 年差。

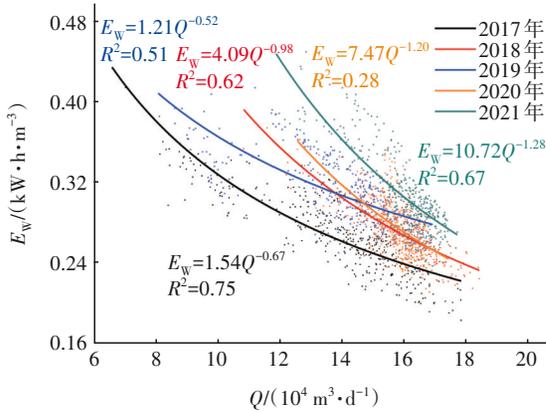


图 3 进水量对吨水能耗的影响

Fig.3 Influence of water quantity on E_w

目前研究表明了吨水能耗与水量存在一定的幂函数关系^[18],但对幂指数的大小规律讨论较少。本研究发现幂指数越小,当水量增加相同比例时,吨水能耗的下降幅度越大,规模效应越显著。意大利 146 个污水厂^[19]能耗与水量的拟合方程为 $E_w = 38.26Q^{0.27}$,由幂指数可知,该厂较意大利污水厂的规模效应更显著,且水量相同时对应能耗更小,这是由于意大利污水厂具有污泥处理单元,且进水 COD 比该厂近 5 年高 3.4 倍。同时发现回流比对幂指数有一定影响,根据各年的幂函数方程可知该厂

2021 年的规模效应较 2017 年—2019 年更显著,推测是提标后增加了内外回流比,回流泵能耗受水量波动的敏感度增加,使提标后规模效应更加显著。

2.2.2 污染物对能耗波动的影响规律

吨水能耗与各污染物进水浓度的相关性分析见表 3。吨水能耗与各污染物浓度基本呈正相关,污染物浓度增大,处理单位体积的污水则需要消耗更多能源,从而实现污染物去除。由表 3 可知,含氮污染物的相关系数最大。污水厂为了去除 COD 和含氮污染物,需要对生物池进行曝气,这是污水厂总能耗的重要来源,同时该厂在实际运营过程中,主要依据进出水氨氮浓度调节生物池曝气量;从进水特点来看,该厂进水碳氮比较低,因此脱氮成为出水达标的控制关键。由此可知在各污染物中,含氮污染物浓度对吨水能耗的影响最为显著。

表 3 吨水能耗与进水污染物浓度的相关性分析

Tab.3 Correlation analysis of E_w and influent pollutant concentration

年 份	Spearman 相关系数					
	COD	BOD ₅	SS	TP	TN	NH ₃ -N
2017 年	0.57***	0.42***	0.15**	0.57***	0.71***	0.76***
2018 年	0.41***	0.08	0.38***	0.30***	0.29***	0.40***
2019 年	0.17**	0.11*	0.20***	0.21***	0.37***	0.38***
2020 年	0.12*	0.06	0.11*	0.45***	0.36***	0.49***
2021 年	0.36***	0.23***	0.30***	0.59***	0.65***	0.60***

注: *代表 $P < 0.05$, **代表 $P < 0.01$, ***代表 $P < 0.001$ 。

同时,将污染物每日进出水浓度差和进水量转化为每日污染物去除量,探究能耗与污染物去除量的幂函数关系,见表 4。

表 4 单位污染物去除能耗与污染物去除量的关系

Tab.4 Relationship between energy consumption of unit pollutant reduction and pollutant removal

污染物	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
COD	$E_1 = 33\ 616X_1^{-0.99}$ ($R^2 = 0.97$)	$E_1 = 35\ 299X_1^{-0.98}$ ($R^2 = 0.98$)	$E_1 = 11\ 308X_1^{-0.87}$ ($R^2 = 0.94$)	$E_1 = 37\ 934X_1^{-0.99}$ ($R^2 = 0.95$)	$E_1 = 29\ 160X_1^{-0.95}$ ($R^2 = 0.96$)
BOD ₅	$E_2 = 34\ 547X_2^{-0.99}$ ($R^2 = 0.97$)	$E_2 = 45\ 102X_2^{-1.00}$ ($R^2 = 0.98$)	$E_2 = 18\ 775X_2^{-0.91}$ ($R^2 = 0.93$)	$E_2 = 40\ 242X_2^{-0.99}$ ($R^2 = 0.95$)	$E_2 = 37\ 905X_2^{-0.97}$ ($R^2 = 0.97$)
SS	$E_3 = 15\ 483X_3^{-0.91}$ ($R^2 = 0.95$)	$E_3 = 28\ 691X_3^{-0.96}$ ($R^2 = 0.98$)	$E_3 = 36\ 968X_3^{-0.99}$ ($R^2 = 0.94$)	$E_3 = 52\ 093X_3^{-1.02}$ ($R^2 = 0.98$)	$E_3 = 29\ 110X_3^{-0.94}$ ($R^2 = 0.97$)
TP	$E_4 = 21\ 206X_4^{-0.91}$ ($R^2 = 0.92$)	$E_4 = 33\ 447X_4^{-0.96}$ ($R^2 = 0.96$)	$E_4 = 26\ 689X_4^{-0.93}$ ($R^2 = 0.92$)	$E_4 = 23\ 031X_4^{-0.90}$ ($R^2 = 0.91$)	$E_4 = 19\ 860X_4^{-0.86}$ ($R^2 = 0.96$)
TN	$E_5 = 20\ 372X_5^{-0.93}$ ($R^2 = 0.94$)	$E_5 = 30\ 541X_5^{-0.96}$ ($R^2 = 0.94$)	$E_5 = 32\ 238X_5^{-0.97}$ ($R^2 = 0.95$)	$E_5 = 29\ 715X_5^{-0.95}$ ($R^2 = 0.96$)	$E_5 = 15\ 495X_5^{-0.86}$ ($R^2 = 0.94$)
NH ₃ -N	$E_6 = 24\ 087X_6^{-0.95}$ ($R^2 = 0.92$)	$E_6 = 41\ 967X_6^{-1.00}$ ($R^2 = 0.95$)	$E_6 = 16\ 603X_6^{-0.88}$ ($R^2 = 0.88$)	$E_6 = 35\ 078X_6^{-0.98}$ ($R^2 = 0.98$)	$E_6 = 14\ 517X_6^{-0.85}$ ($R^2 = 0.91$)

在表 4 的回归方程中, E_i 为单位污染物去除能耗, $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$, $i=1, \dots, 6$, 分别代表 6 种污染物; X_i 为污染物去除量, kg/d 。 R^2 均在 0.90 左右, 拟合效果较好, 与王佳伟等^[20]采用 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 拟合的效果一致。 E_i 与 X_i 呈幂函数负相关, 污染物去除量增大, 单位污染物去除能耗随之减小, 这与杨凌波等^[5]研究的所有污染物去除均存在“规模效应”的结果相吻合。以 2021 年 COD 为例进行分析(见图 4), 当 COD 去除量增加 20% 时, 单位 COD 去除能耗减少约 16%。本研究将斜率绝对值 $\leq 1.25 \times 10^{-5}$ 作为能耗下降速度趋于平缓的条件, 当斜率为 -1.25×10^{-5} 时, 此时对应的 COD 去除量为 61 715 kg/d 。当 COD 去除量 $> 61 715 \text{ kg}/\text{d}$ 时, 单位 COD 去除能耗稳定保持在较低水平, 能效较高。可见适当提高污染物去除量, 能够减少水质冲击对能耗波动的影响, 有利于实现高效低耗的稳定运行。

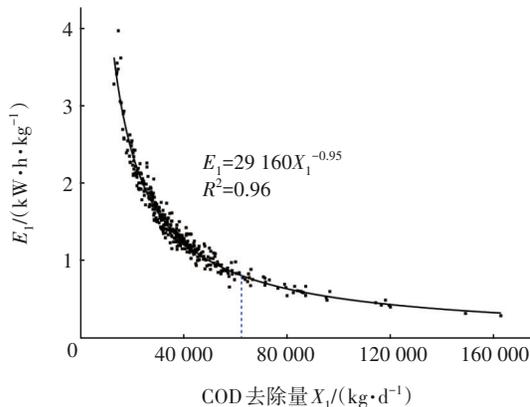


图 4 单位 COD 去除能耗与 COD 去除量的关系

Fig.4 Relation between E_1 and COD removal

2.2.3 水温对能耗波动的影响规律

该厂吨水能耗与水温季度均值的关系见图 5。

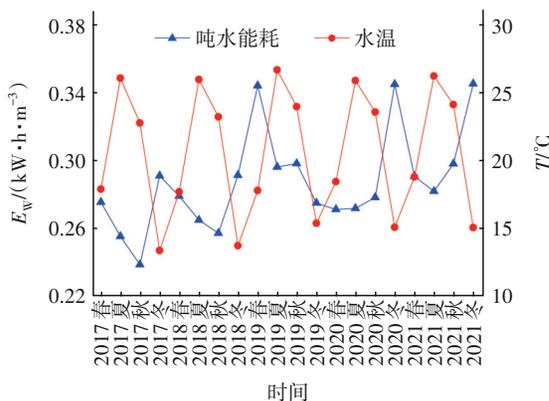


图 5 水温对吨水能耗的影响

Fig.5 Influence of water temperature on E_w

由图 5 可知, 2017 年—2021 年(2019 年除外)吨水能耗呈现夏低冬高的季节性特征, 如 2021 年夏季(6 月—8 月)、冬季(12 月—2 月)的吨水能耗分别为 0.28、0.35 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$, 冬季能耗比夏季高 25%。进一步对水温变化幅度较大的季节进行分析(见表 5), 10 月—12 月、4 月—6 月分别作为降温、升温季, 温度均在 15~25 $^{\circ}\text{C}$, Spearman 相关性分析表明, 除 2017 年、2018 年、2020 年的升温季外, 其他阶段的吨水能耗与水温均呈负相关, 相关系数绝对值最高可达 0.89。这主要是由于硝化菌和反硝化菌对温度变化比较敏感, 当水温 $< 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 反应速率逐步下降^[21], 为获得相同的硝化速率, 冬季水温每降低 1 $^{\circ}\text{C}$, DO 浓度应提高 10%^[22], 该厂在冬季通过增大曝气量或提高内回流比, 增加能耗投入确保出水水质达标。张家口市某城镇污水厂^[23]为使出水达到一级 A 标准, 当水温 $< 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 延长搅拌时间; 当水温 $< 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 额外增加曝气时间, 从而使得冬季能耗增加。

表 5 吨水能耗与水温的 Spearman 相关性分析

Tab.5 Spearman correlation analysis of E_w and water temperature

年份	降温季		升温季	
	相关系数	P 值	相关系数	P 值
2021 年	-0.80	<0.05	-0.32	<0.05
2020 年	-0.62	<0.05	0.002	>0.05
2019 年	-0.34	<0.05	-0.69	<0.05
2018 年	-0.28	<0.05	0.11	>0.05
2017 年	-0.89	<0.05	0.26	<0.05

特别的是, 该厂 2019 年夏季吨水能耗比冬季更高, 这与美国鹿岛污水厂夏季能耗在一年中占比最高的情况相似^[4]。水温对厂内运行有两方面影响, 一方面, 微生物活性随水温的升高而增强, 污染物去除速率显著提高; 另一方面, 氧溶解度随水温升高而下降, 导致曝气需求增加, 可见该厂在 2019 年夏季可能是氧溶解度下降对能耗影响占主导作用。

2.3 能耗波动因素的影响程度

为了探究水量、污染物进水浓度(选用耗氧污染物)、水温对能耗波动的贡献值, 通过控制两个变量在一定范围(原范围 20%)以内, 探究第三个变量对能耗波动的影响程度。经过两次筛选后取第三因素的 0.25、0.75 分位值, 计算分位值对应的吨水能耗、自变量波动百分比、能耗波动百分比及影响

程度(见表 6),其中能耗波动百分比和影响程度均用绝对值表示。

表 6 变量对能耗波动的影响程度

Tab.6 Influence degree of energy consumption fluctuation by factors

影响因素	年份	0.25分位值/0.75分位值	对应吨水能耗/(kW·h·m ⁻³)	影响因素波动百分比/%	吨水能耗波动百分比/%	影响程度
水量 Q / (m ³ ·d ⁻¹)	2021年	160 945/167 721	0.291 7/0.287 8	4.210	1.337	0.318
	2020年	153 248/160 188	0.283 0/0.262 8	4.529	7.138	1.576
	2019年	144 354/155 520	0.288 6/0.274 8	7.735	4.782	0.618
	2018年	153 110/164 976	0.286 3/0.259 8	7.750	9.256	1.194
	2017年	147 445/162 488	0.263 4/0.220 9	10.202	16.135	1.582
耗氧污染物进水浓度 C /(mg·L ⁻¹)	2021年	139.95/182.50	0.276 0/0.289 6	30.404	4.928	0.162
	2020年	131.88/174.95	0.272 6/0.270 9	32.664	0.624	0.019
	2019年	162.40/227.10	0.273 8/0.274 5	39.840	0.256	0.006
	2018年	108.58/149.40	0.275 9/0.275 4	37.601	0.181	0.005
	2017年	124.05/183.10	0.250 1/0.245 4	47.602	1.879	0.039
水温 T /°C	2021年	21.6/26.9	0.295 9/0.299 7	24.537	1.284	0.052
	2020年	16.0/24.7	0.277 3/0.267 2	54.375	3.642	0.067
	2019年	15.2/26.2	0.314 2/0.281 3	72.368	10.471	0.145
	2018年	15.6/23.6	0.264 3/0.265 0	51.282	0.265	0.005
	2017年	20.2/25.8	0.256 9/0.264 4	27.723	2.919	0.105

注：影响程度=吨水能耗波动百分比/影响因素波动百分比。

由表 6 可知, Q 对能耗波动的影响程度最大,且 Q 比 C 、 T 的波动百分比更小,可见能耗对水量的敏感度最高,建议该厂通过加强管理运行或调整工艺参数等方法提高抗冲击负荷能力,从而减小能耗波动幅度,提高能耗控制水平。

随着该厂服务地区的人口和发展愈加稳定, Q 的波动逐年减小,同时污水厂管理水平日益提高,逐渐削弱了 Q 对能耗波动的影响程度。 C 的波动整体上随时间减小,且其在 2021 年的影响程度显著高于前 4 年,可见排放标准提高对污染物削减程度的需求增加,使能耗波动在提标后对 C 更加敏感。此外,近 5 年水温波动、能耗波动的百分比整体呈先增后减趋势,其中 2019 年当地极端水温天数 ($T < 14$ °C 与 $T > 26$ °C) 的占比最高即 47%,因此相较于其他年份,该年水温和能耗波动的幅度最大,影响程度也最大。

3 结论

① 2010 年—2021 年吨水能耗的波动范围为 0.15~0.45 kW·h/m³,极值相差 200%,变异系数达 18%,能耗波动幅度大,因此对能耗波动的控制有利于其稳定运行。

② 吨水能耗与水量呈幂函数负相关,具有一

定规模效应,水量每增加 10%,吨水能耗减少约 12%,适当提高进水量,有助于降低吨水能耗水平;含氮污染物浓度对吨水能耗的影响最为显著;适当提高污染物去除量,有利于实现高效低耗的稳定运行;在温变幅度最大的降温季(10 月—12 月)和升温季(4 月—6 月),吨水能耗与水温基本呈负相关。

③ 水量对能耗波动的影响程度最大,其次是耗氧污染物进水浓度和水温。随着污水厂进水量的稳定与动态管理水平的提高,水量对能耗波动的影响程度逐年减小;提高排放标准对污染物削减程度的需求增加,使能耗波动对耗氧污染物进水浓度的敏感度在提标后显著增加;相较于其他年份,某一年极端水温天数的占比越高,其对能耗波动的影响程度越大。

参考文献:

[1] 宋新新,刘杰,林甲,等. 碳中和时代下我国能量自给型污水处理厂发展方向及工程实践[J]. 环境科学学报, 2022, 42(4): 53-63.
SONG Xinxin, LIU Jie, LIN Jia, et al. The development direction and practice of energy self-sufficiency sewage treatment plants in China under Carbon Neutral Era [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,

- 2022, 42(4): 53–63 (in Chinese).
- [2] SINGH P, KANSAL A. Energy and GHG accounting for wastewater infrastructure [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 128: 499–507.
- [3] 张羽就, 席佳锐, 陈玲, 等. 中国城镇污水处理厂能耗统计与基准分析 [J]. *中国给水排水*, 2021, 37(8): 8–17.
ZHANG Yujiu, XI Jiarui, CHEN Ling, *et al.* Energy consumption statistics and benchmarking analysis of urban wastewater treatment plants (WWTPs) in China [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(8): 8–17 (in Chinese).
- [4] KHALKHALI M, MO W W. The energy implication of climate change on urban wastewater systems [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 267: 121905.
- [5] 杨凌波, 曾思育, 鞠宇平, 等. 我国城市污水处理厂能耗规律的统计分析 with 定量识别 [J]. *给水排水*, 2008, 34(10): 42–45.
YANG Lingbo, ZENG Siyu, JU Yuping, *et al.* Statistical analysis and quantitative recognition of energy consumption of municipal wastewater treatment plants in China [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2008, 34(10): 42–45 (in Chinese).
- [6] YU Y, ZOU Z H, WANG S S. Statistical regression modeling for energy consumption in wastewater treatment [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 75(1): 201–208.
- [7] 邹吕熙, 李怀波, 王燕, 等. 太湖流域城镇污水处理厂能耗评价与分析 [J]. *环境工程学报*, 2019, 13(12): 2890–2897.
ZOU Lüxi, LI Huaibo, WANG Yan, *et al.* Energy consumption evaluation and analysis of wastewater treatment plants in Taihu basin, China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(12): 2890–2897 (in Chinese).
- [8] ZHANG Q H, YANG W N, NGO H H, *et al.* Current status of urban wastewater treatment plants in China [J]. *Environment International*, 2016, 92: 11–22.
- [9] GU Y F, LI Y, LI X Y, *et al.* The feasibility and challenges of energy self-sufficient wastewater treatment plants [J]. *Applied Energy*, 2017, 204: 1463–1475.
- [10] 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.
- [11] 郝晓地, 孙思辈, 李季, 等. 污水处理过程水温变化模型构建与验证 [J]. *环境科学学报*, 2022, 42(12): 1–11.
HAO Xiaodi, SUN Sibe, LI Ji, *et al.* Establishing and verifying a temperature model for the process of wastewater treatment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(12): 1–11 (in Chinese).
- [12] 杨红, 白文龙, 梅小乐, 等. 寒冷地区冬季脱氮除磷工艺调控及效果分析 [J]. *中国给水排水*, 2021, 37(6): 107–111.
YANG Hong, BAI Wenlong, MEI Xiaole, *et al.* Adjustment and analysis of nitrogen and phosphorus removal process to resist winter in cold regions [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(6): 107–111 (in Chinese).
- [13] 蒋勇, 卓葳, 毛联华, 等. 城市污水处理厂运行能耗影响因素分析 [J]. *北京交通大学学报*, 2014, 38(1): 33–37.
JIANG Yong, FU Wei, MAO Lianhua, *et al.* Influence factors analysis of urban sewage treatment plant on energy consumption [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2014, 38(1): 33–37 (in Chinese).
- [14] 潘艺蓉, 罗雨莉, 刘俊新, 等. 义乌市城镇污水提标处理的环境与经济效益分析 [J]. *环境工程学报*, 2021, 15(4): 1188–1198.
PAN Yirong, LUO Yuli, LIU Junxin, *et al.* Environmental and economic impacts of implementing tighter effluent standards at municipal wastewater treatment plants in Yiwu City, China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(4): 1188–1198 (in Chinese).
- [15] 王先宝, 赵敏, 金虎, 等. 西安市某氧化沟污水处理厂升级改造能耗分析 [J]. *中国给水排水*, 2016, 32(3): 93–96.
WANG Xianbao, ZHAO Min, JIN Hu, *et al.* Analysis on energy consumption in upgrading and reconstruction of a wastewater treatment plant with Orbal oxidation ditch in Xi'an [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(3): 93–96 (in Chinese).
- [16] CARDOSO B J, RODRIGUES E, GASPARI A R, *et al.* Energy performance factors in wastewater treatment plants: a review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 322: 129107.
- [17] 楚想想, 罗丽, 王晓昌, 等. 我国城镇污水处理厂的能耗现状分析 [J]. *中国给水排水*, 2018, 34(7): 70–74.
CHU Xiangxiang, LUO Li, WANG Xiaochang, *et al.*

- Analysis on current energy consumption of wastewater treatment plants in China [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(7): 70-74 (in Chinese).
- [18] YANG X Z, WEI J Y, YE G J, *et al.* The correlations among wastewater internal energy, energy consumption and energy recovery/production potentials in wastewater treatment plant: an assessment of the energy balance [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136655.
- [19] RANIERI E, GIULIANO S, RANIERI A C. Energy consumption in anaerobic and aerobic based wastewater treatment plants in Italy [J]. *Water Practice and Technology*, 2021, 16(3): 851-863.
- [20] 王佳伟, 张天柱, 陈吉宁. 污水处理厂COD和氨氮总量削减的成本模型 [J]. *中国环境科学*, 2009, 29(4): 443-448.
- WANG Jiawei, ZHANG Tianzhu, CHEN Jining. Cost model for reducing total COD and ammonia nitrogen loads in wastewater treatment plants [J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(4): 443-448 (in Chinese).
- [21] PARK J J, BYUN I G, PARK S R, *et al.* Nitrifying bacterial communities and its activities in aerobic biofilm reactors under different temperature conditions [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2008, 25(6): 1448-1455.
- [22] 杨小丽, 叶峰, 宋海亮, 等. 基于污水厂运行数据的低温生物脱氮强化研究 [J]. *中国给水排水*, 2009, 25(1): 82-85, 88.
- YANG Xiaoli, YE Feng, SONG Hailiang, *et al.* Enhanced biological nitrogen removal at low-temperature based on operation data of wastewater treatment plants [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(1): 82-85, 88 (in Chinese).
- [23] 柳蒙蒙, 陈梅雪, 齐嵘, 等. 面向寒冷地区城镇污水处理厂提标改造的ASM模拟优化及其应用 [J]. *环境工程学报*, 2020, 14(4): 1119-1128.
- LIU Mengmeng, CHEN Meixue, QI Rong, *et al.* ASM simulation optimization and practical application on upgrading of urban sewage treatment plant in cold region [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(4): 1119-1128 (in Chinese).

作者简介:余炼(1998-),女,江西萍乡人,硕士研究生,主要研究方向为污水处理厂低碳运行。

E-mail:yulian@tongji.edu.cn

收稿日期:2022-08-05

修回日期:2022-09-07

(编辑:沈靖怡)

加强湖泊管理保护

改善湖泊生态环境

维护湖泊健康生命