

蒋颂昊, 冯一耐, 王刚. “双碳”目标下某水-泥-气协同处理污水处理厂电耗与节能分析[J]. 净水技术, 2026, 45(9): 122-131.

Jiang S H, Feng Y N, Wang G. Analysis of power consumption and energy-saving for a sewage-sludge-odor co-treatment WWTP under the "dual carbon" target[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(9): 122-131.

“双碳”目标下某水-泥-气协同处理污水处理厂电耗与节能分析

蒋颂昊*, 冯一耐, 王 刚

(上海城投污水处理有限公司石洞口污水处理厂, 上海 200942)

摘 要 【目的】电耗是污水处理厂的主要碳排放源, 随着环保要求提高, 污水处理厂电耗随之增加, 与“节能降碳增效”目标相悖。因此, 正确识别影响污水处理厂电耗的因素, 是实现其绿色低碳运行的基础。【方法】本文以上海某水-泥-气协同处理污水处理厂为研究对象, 采用比能耗分析及非线性回归分析方法, 对该厂 2021 年—2024 年的用电情况进行分析。【结果】水-泥-气协同处理模式下, 全厂单位电耗达 0.617 kWh/m^3 , 较常规污水处理厂增加 106%。曝气系统、污泥焚烧系统及除臭系统是核心耗能环节, 占总电耗的 67.78%, 其中曝气风机、除臭风机和一次风机分别占全厂用电量的 23%、13% 和 5%。处理量对电耗影响显著, 且存在临界阈值: 当污水处理量大于 55% 设计负荷、污泥处理量控制在设计负荷 60%~80% 时, 可以达到总电耗和单位电耗的平衡。【结论】基于电耗特征分析结果, 该厂具有显著的节能运行潜力, 可通过设备改造、运行负荷管理、运行策略优化及智慧管控等手段实现 14.39%~22.58% 的节能效果。本文可为其他污水处理厂的绿色低碳运行提供参考。

关键词 绿色低碳; 污水处理厂; 曝气系统; 污泥焚烧系统; 除臭系统; 电耗分析; 节能低碳运行

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)09-0122-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.09.013

Analysis of Power Consumption and Energy-Saving for a Sewage-Sludge-Odor Co-Treatment WWTP under the "Dual Carbon" Target

Jiang Songhao, Feng Yinai, Wang Gang

(Shanghai Chengtong Wastewater Treatment Co., Ltd., Shidongkou Wastewater Treatment Plant, Shanghai 200942, China)

Abstract [Objective] Power consumption is the primary source of carbon emissions in wastewater treatment plants (WWTPs). With increasingly stringent environmental protection requirements, the power consumption of WWTPs has increased accordingly, conflicting with the "energy conservation, carbon reduction and efficiency improvement" goals. Therefore, accurately identifying factors influencing power consumption of WWTPs is fundamental to achieving green and low-carbon operation targets. [Methods] This paper focuses on a sewage-sludge-odor co-treatment WWTP in Shanghai. Specific energy consumption analysis and non-linear regression analysis method were used to analyze the power consumption data of this plant from 2021 to 2024. [Results] Under the sewage-sludge-odor co-treatment mode, the specific power consumption of the whole plant reached 0.617 kWh/m^3 , representing a 106% increase compared to conventional WWTPs. The aeration system, sludge incineration system, and deodorization system were the core energy-consumption processes, together accounting for 67.78% of the total power consumption. Among them, the aeration blower, deodorization blower and primary air blower contributed 23%, 13%, and 5% of the total plant power consumption, respectively. The treatment capacity significantly influenced electricity consumption, with critical threshold effects observed. When the wastewater treatment capacity is higher than 55% of the designed load and the sludge treatment capacity is in the range of 60%~80% of the designed load, a balance between total power consumption and specific power consumption can be achieved. [Conclusion] Based on the power consumption characteristics analysis, this paper shows that the plant has substantial energy-saving potential. Energy

[收稿日期] 2025-04-30

[通信作者] 蒋颂昊(1985—), 男, 工程师, 主要从事污水处理和污泥处理处置等工作, E-mail: sun_sum@163.com。

savings of 14.39% – 22.58% can be achieved through equipment upgrading and renovation, operational load management, operation strategy optimization, and intelligent management and control. This paper provides a reference for the green and low-carbon operation of other WWTPs.

Keywords green and low-carbon; wastewater treatment plant (WWTP); aeration system; sludge incineration system; deodorization system; power consumption analysis; energy-saving and low-carbon operation

随着环保要求日益提高,上海市政污水处理事业得到快速发展。《2025 年上海统计年鉴》显示,2014 年—2024 年上海市污水处理厂的总处理能力提高了 58.24%^[1]。污泥处置量也显著增加,上海市生态环境局水环境保护情况统计数据表明,上海市污泥处置量从 2019 年的 41.3 万 t 增长至 2024 年的 167.53 万 t^[2-3]。

然而,污水处理标准的提高也伴随着污水处理厂能耗的增加,2014 年上海吨水处理平均耗电量为 0.211 kWh/m³^[4]。至 2019 年,该数值已升至 0.29 kWh/m³^[5]。为满足越来越高的污泥无害化处理处置率的要求^[6],大量新建及改扩建的污泥处理处置设施投入运行,这将进一步提高污水处理的总体能耗^[7]。这与国务院提出的《2030 年前碳达峰行动方案》中关于“节能降碳增效”的目标相悖。

电耗是污水处理厂碳排放的主要来源,其电费支出占经营总成本的 20%~35%^[8]。因此,全面分析污水处理厂生产过程中的电耗情况对降本降碳增效具有重要意义。受污水处理厂的实际控制边界限制,目前污水处理厂的电耗分析往往不包含污泥处理处置或者仅涵盖了污泥处理的部分工艺,无法完整呈现污水处理厂全流程的电耗特征^[9]。上海某污水处理厂(以下简称 S 污水处理厂)耦合了污泥干化焚烧及相应的除臭工艺,能够有效揭示水-泥-气协同处理下的电耗特征。本文以 S 污水处理厂为研究对象,对该厂 2021 年—2024 年的运行数据进行分析,为该厂及同行业其他设施的低碳运行提供思路。

1 污水处理厂基本情况

1.1 S 污水处理厂工艺流程

S 污水处理厂设计污水处理规模为 40 万 m³/d,干基污泥产量为 72 tDs/d。污水采用“粗、细格栅+沉砂池+一体化活性污泥法工艺+高效沉淀池+反硝化深床滤池”三级处理工艺,使尾水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级 A 标准。污泥采用“脱水+干化+焚烧”处理工艺。烟气经处理后达到上海市《生活垃圾焚烧大气

污染物排放标准》(DB 31/768—2025)排放。作为区域污泥集中处理处置中心,设计干基污泥处理规模为 200 tDs/d,除需处理本厂产生的污泥外,还需接收处理外厂污泥约 128 tDs/d。全厂采用全覆盖式设计,废气集中收集并在除臭系统中处理后排放,主要工艺流程如图 1 所示。根据 S 污水处理厂工艺流程,可将全厂按传统边界划定习惯及不同处理介质分为污水处理、污泥处理及除臭 3 个单元。

这 3 个单元又可根据其工艺特点细分为若干个工艺段。污水处理单元可划分为预处理段、生物处理段、深度处理段、污泥浓缩段及污泥脱水段;污泥处理单元可划分为污泥干化段、污泥焚烧段、公辅段和暖通照明段,鉴于公辅段(如压缩空气系统,循环冷却水系统)和暖通照明段(如车间通风及照明)属于辅助系统,服务于整个污泥处理过程,故未在工艺流程图中作为独立工艺环节绘出;除臭单元包括除臭系统(可细分为污水除臭段和污泥除臭段)。由于该污水处理厂在电气系统设计时,未将余热利用系统及烟气处理系统从焚烧线中独立出来,这两个系统的用电量无法单独计量,故统一合并入污泥焚烧段。该污水处理厂为地上污水处理厂,污水处理单元的暖通照明用电量很小,故将污水处理段的暖通照明纳入污泥处理单元中一并考虑^[10]。恶臭气体是污水及污泥处理过程中的副产物,主要由有机物的分解、微生物的代谢活动以及厌氧条件下的发酵产生,对周边环境和人体健康具有较大危害^[11]。实证研究表明,除臭单元的电耗占全厂总能耗的 12%^[12]。因此,作为恶臭气体的治理手段,在进行全厂电耗分析时,将除臭系统列为独立单元进行分析。各工艺段的主要用电设备如表 1 所示。

1.2 电耗分析方法

国内在污水处理厂的电耗特征方面已经有一些研究,这些研究主要分为两类。第一类是通过比能耗法^[5,13]、耗氧总污染物(OCTP)评价法^[14]、描述统计、聚类分析、非参数检验等方法,从地域分布、处理工艺、规模和排放标准等多个维度对污水处理厂的

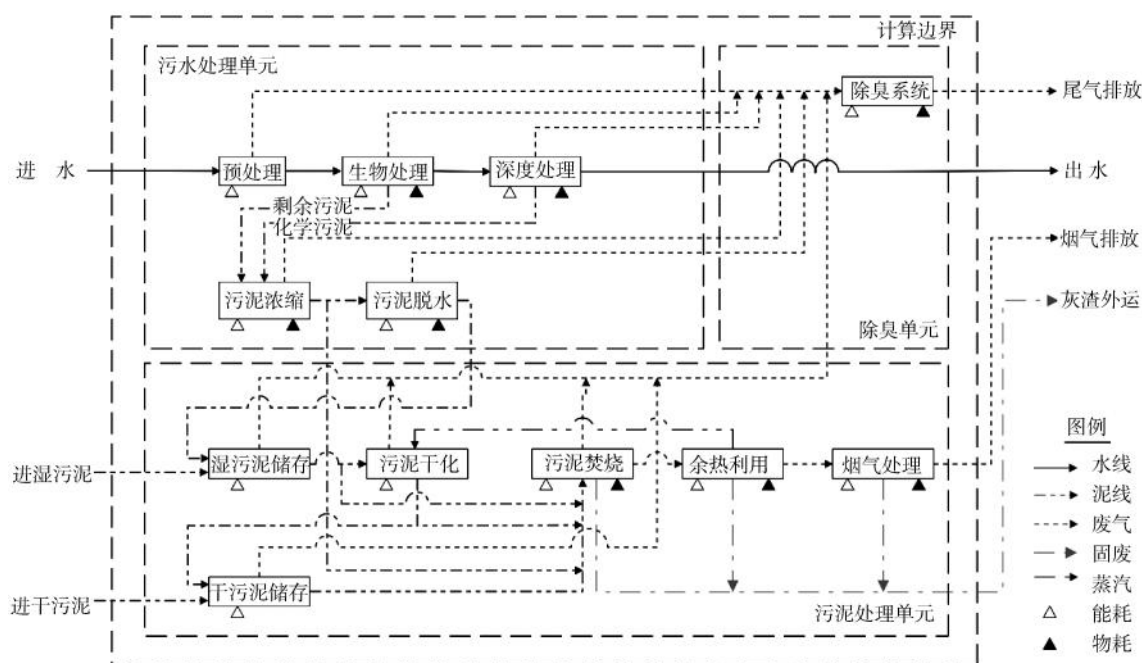


图1 S污水处理厂工艺流程

Fig. 1 Process Flow of S WWTTP

表1 S污水处理厂各工艺段主要用电设备

Tab. 1 Main Electrical Equipment in Each Process Section of S WWTTP

处理单元	工艺段	主要用电设备
污水处理	污水预处理	粗、细格栅,进水泵,潜水泵等
	生物处理	潜水搅拌机,曝气风机,潜水泵,排泥泵,刮泥机
	深度处理	提升泵,加药泵,回流污泥泵,化学污泥泵,反冲洗风机,反冲洗水泵,废水排水泵,刮泥机,出水泵等
	污泥浓缩脱水	螺压浓缩机,重力浓缩池,离心脱水机及配套的污泥切割机,进、排泥泵
污泥处理	污泥干化	进泥螺杆泵、污泥干化机,载气风机以及刮板输送机等
	污泥焚烧	各类泵与风机,如一次风机、引风机、给水泵、冷凝水泵等,污泥输送机械,焚烧炉辅助设备,电除尘器等
	公辅	循环冷却水泵,空压机等
	暖通照明	排风扇,空调,路灯等
除臭	污水除臭	除臭风机,循环水泵等
	污泥除臭	离子风幕机,除臭风机,循环水泵等

电耗状况及其影响因素进行宏观剖析^[15-17]。另一类则对具体污水处理厂各单元的电耗特性进行细致分析并提出节能策略^[10,18-19]。各类研究方法中,比能耗分析法因其计算简单,实用性强等特性,广泛地

用于分析污水处理厂能耗。此外,各影响因素往往与电耗呈非线性关系,其与电耗之间的关系可以通过非线性回归分析进行量化^[17]。因此,本文采用比能耗分析及非线性回归分析,对该污水处理厂的电耗情况进行分析。

目前,污水处理比能耗研究中常采用3种分析指标,即单位处理水量电耗(kWh/m^3)、单位污染物削减量电耗($\text{kWh}/\text{kg COD}$)和年服务人口当量电耗 $[\text{kWh}/(\text{PE} \cdot \text{a})]$ 。对于单一污水处理厂,单位处理水量及单位污染物削减量较服务人口更易获得且准确性更高,其中处理水量与总电耗的相关性最高^[20]。因此,本文在进行污水处理厂总体电耗及污水处理单元电耗分析时,选取单位处理水量电耗作为分析指标。污泥处理比能耗研究常用的分析指标为单位绝干污泥处理电耗(kWh/tDs)^[21]。由于S污水处理厂处理的污泥量远大于其自身所产的污泥量,故在单独分析污泥处理单元的电耗规律时,采用单位绝干污泥处理电耗作为分析指标。除臭单元的能耗主要取决于采集恶臭气体时的换气量,在分析除臭单元的电耗特征时,将除臭系统的单位进口风量电耗(kWh/m^3)作为分析指标^[22]。相关指标可用式(1)进行计算。

$$e_i = \frac{E_i}{F_i} \quad (1)$$

其中: e_i ——不同处理单元的单位电耗, 污水, kWh/m³; 污泥, kWh/tDs; 除臭, kWh/m³;
 E_i ——统计周期内各处理单元的总耗电量 (kWh);
 F_i ——不同功能单元污水处理量, m³; 污泥处理量, tDs; 除臭系统进口标态风量, Nm³。

本文采用非线性回归方法量化处理量与单位电耗之间的关系。基于对数据的观察及相关文献的分析, 选用幂函数模型对数据进行拟合, 如式 (2) 所示^[17,23]。

$$y = ax^b \quad (2)$$

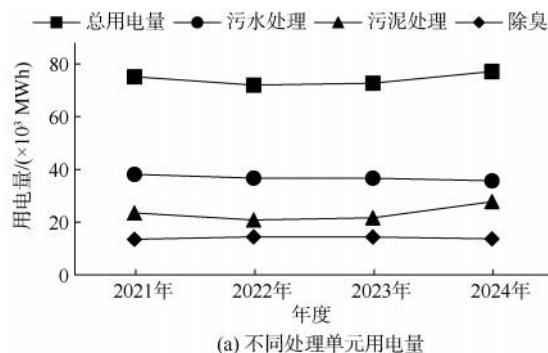
其中: y ——单位电耗 (ECl_i);
 a ——回归系数, 反映系统的基准能耗;
 x ——处理量, 污水月处理总量, m³/月; 污泥月处理总量, tDs/月; 除臭季度换气量, Nm³/季;
 b ——回归系数, 反映规模效应的程度。

2 结果分析

2.1 S 污水处理厂用电量分析

2.1.1 S 污水处理厂总体用电情况

图 2 展示了该污水处理厂 2021 年—2024 年间



各处理单元的用电量情况。图 2(a) 显示, S 污水处理厂各年总用电量比较稳定, 保持在 71 978 MWh 至 77 123 MWh 之间。其中, 污水处理单元及除臭单元各年用电量变化不大, 范围分别在 35 684 MWh 至 38 132 MWh、13 509 MWh 至 14 439 MWh 之间。这是因为污水处理系统各用电设备的启停主要基于处理量控制, 而统计期间污水处理单元各年总处理量变化较小。除臭单元则采用手动变频模式控制, 为保证除臭效果, 运行过程中尽量避免对运行工况进行调整。而污泥处理量则从 4 万 tDs 增加到 8 万 tDs, 故污泥处理单元用电量逐年增长, 从 20 840 MWh 增加到 27 756 MWh。图 2(b) 显示, 该厂污水处理单元用电量占总用电量的 46.27%~50.98%; 其次是污泥处理单元, 占比为 28.95%~35.99%; 除臭单元用电量占比为 17.74%~20.06%。由于 S 污水处理厂相比于常规污水处理厂增加了污泥焚烧工艺, 所以污泥处理用电量占比是常规污水处理厂 (7%~16%) 的 3 倍有余; 由于增加了污泥处理设施, 除臭单元的规模也有所增加, 其用电量占比达文献所述 (4%~10%) 的 2 倍^[10]。

2.1.2 各处理单元用电量与对应处理量的关系

S 污水处理厂 2021 年—2024 年的每月用电量以及结合污水、污泥处理量的对比结果如图 3 所示。

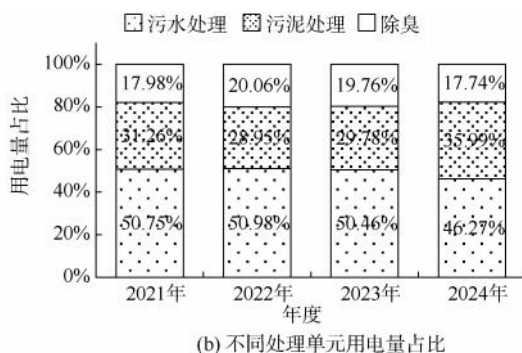


图 2 不同处理单元的 (a) 用电量; (b) 用电量占比情况

Fig. 2 (a) Power Consumption; (b) Proportion of Power Consumption of Different Treatment Units

由图 3(a) 可知, 污水处理厂用电量呈季节性波动, 每年 7 月—9 月用电量较多, 11 月—次年 3 月用电量较少, 与上海市的汛期及早期时间保持一致。最高用电量出现在 2023 年 8 月, 月用电量为 7 128 MWh, 最低月用电量为 2023 年 11 月的 5 258 MWh。

图 3(b) 为污水处理单元用电量与污水处理量的每月变化趋势对比, 从图中可以看出污水处理单

元用电量与污水处理量的变化趋势一致。每年 6 到 10 月, 受梅雨及台风影响, 用电量随降雨量的增加而增加。最高为 2021 年 8 月的 3 593.45 MWh, 最低为 2024 年 12 月的 2 450.82 MWh。

由图 3(c) 可知, 污泥处理单元的用电量与污泥处理量的变化趋势相同, 也呈季节性波动, 且波峰出现在 7 月左右, 波谷出现在 11 月左右, 与污水处理厂污泥产量的季节变化规律基本一致^[24]。

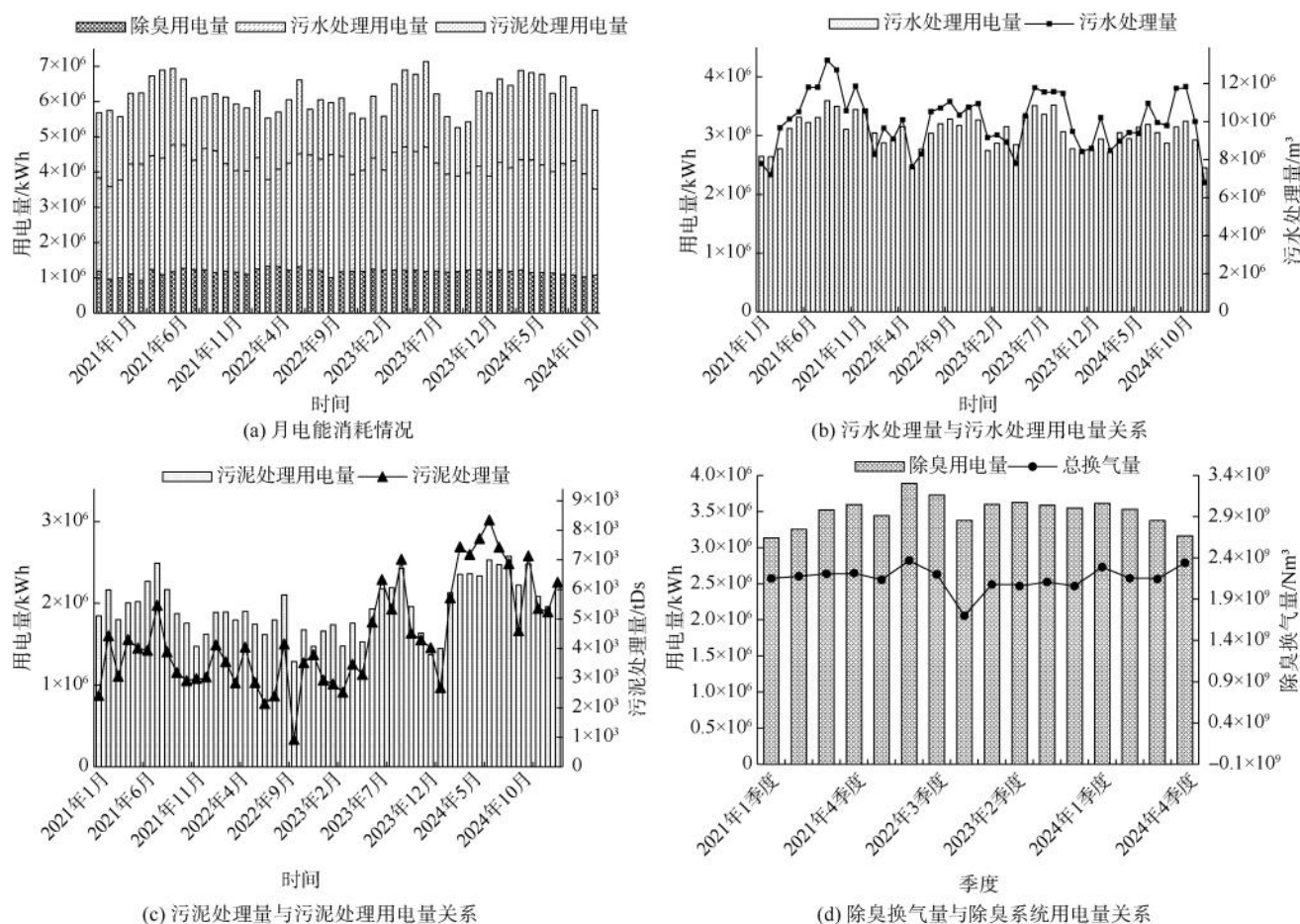


图3 月电能消耗与处理量对比情况

Fig. 3 Comparison of Monthly Power Consumption and Treatment Capacity

由图 3(d)可知,除臭用电量的变化在 2021 年到 2024 年各月间相对平稳,基本保持在 $1\,165\text{ MWh} \sim 1\,333\text{ MWh}$ 。由于除臭系统没有实时换气量监测仪表,换气量数据通过定期对臭气排口进行检测时测量获得,为减少数据不确定性带来的误差,根据检测频次按季度换气量进行分析,除臭用电量与换气量的变化趋势基本一致。

2.2 关键耗电工艺

图 4 显示了 S 污水处理厂各工艺段的电耗占比。根据设计文件,该厂曝气风机设计用电负荷 ($3\,000\text{ kW}$) 占生物处理段总设计用电负荷 ($3\,400\text{ kW}$) 的 88% 。其余生物处理段设备共用同一开关柜,用电量无法分开计量,其中潜水搅拌机、潜水泵以及排泥泵间歇运行,精确曝气系统为曝气

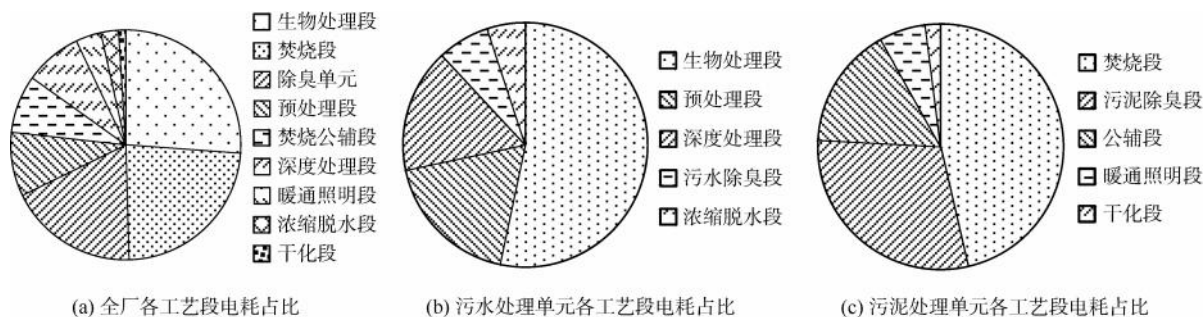


图4 各工艺段电耗占比

Fig. 4 Proportion of Power Consumption of Each Process Section

风机的辅助系统。故将生物处理段的用电量近似看作曝气系统用电量进行分析。由图 4(a)可知,该厂电耗占比最高的是曝气系统,其次是污泥焚烧系统,随后是除臭系统,预处理系统,焚烧公辅系统,深度处理系统,暖通照明系统,浓缩脱水系统及干化系统,分别为 26.17%、23.38%、18.23%、9.00%、8.11%、8.06%、3.56%、2.48%、1.01%。其中曝气系统,污泥焚烧系统及除臭系统 3 项占全厂总用电量的 67.78%。由图 4(b)可知,曝气系统占污水处理单元用电量的 53.32%,预处理、深度处理,污水除臭系统和浓缩脱水系统分别占 18.33%、16.42%、6.88%和 5.04%。如图 4(c)所示,焚烧系统占污泥处理单元用电量的 46.39%,其次是污泥除臭系统、公辅系统、暖通照明系统分别为 29.46%、16.05%和 6.09%,干化系统的用电量占比最少,仅为 2.01%。

从用电设备层面分析,本文选取单机功率大于 100 kW 的大型用电设备作为能耗分析对象。厂内

符合该标准的设备主要包括曝气风机、一次风机、引风机、循环冷却水泵及除臭风机等;而其他通常被视为大型设备的机械,如出水泵(75 kW)、污泥干化机(75 kW)等,因单机功率较小,未纳入本次重点分析范围。受限于厂区电气系统的计量架构,电能计量仪表仅配置至 HP(高压柜)、LP(低压配电柜)及 MCC(电动机控制中心)的进线侧,未覆盖至末端设备回路。由于多台设备共用同一馈电回路,无法获取单台设备的独立分项计量数据。因此,针对上述筛选出的主要设备,本文统一采用设计负荷占比法估算其电耗占比,即依据设备设计功率占所在工艺段总设计负荷的比例,结合工艺段实测总电耗进行折算。具体负荷及折算电耗占比如表 2 所示。计算结果表明,耗电量最高的三大设备分别为:(1)曝气风机占总用电量的 23%;(2)除臭系统中用于向末端除臭装置抽气的除臭风机占总用电量的 13%;(3)焚烧系统中用于为污泥燃烧供氧的一次风机占总用电量的 5%。

表 2 S 污水处理厂主要用电设备电耗折算表

Tab. 2 Power Consumption Conversion of Main Electrical Equipment in S WWTP

工艺段	主要用电设备	单机功率/kW	设计功率/kW	设计功率占所在工艺段总设计负荷比例	折算电耗占比
曝气系统	曝气风机	500	3 000	88%	23%
除臭系统	除臭风机	110~132	2 442	70%	13%
污泥焚烧系统	一次风机	450	900	20%	5%
预处理系统	进水泵	132	528	43%	4%
预处理系统	潜水泵	110~140	500	40%	4%
污泥焚烧系统	引风机	280	560	12%	3%
深度处理系统	中间提升泵	180	360	33%	3%
焚烧公辅系统	循环冷却水泵	110	220	10%	1%

综上所述,S 污水处理厂实施节能降耗工作时,应着重关注曝气系统、污泥焚烧系统和除臭系统这 3 个主要耗电部分,优先对其进行节能优化改造。针对耗电量高的设备如曝气风机、除臭风机和一次风机,可通过采用高效节能设备、优化运行策略等方式,降低其能耗。同时,对于其他电耗占比较小的工艺段也不能忽视,尤其是对各类风机与泵应重点关注,通过全面统筹规划节能措施,可实现 S 污水处理厂整体能耗的有效降低。

2.3 处理量对电耗的影响

2.3.1 S 污水处理厂整体单位电耗分析

S 污水处理厂总体比能耗情况如图 5 所示,整

个统计期间总体单位电耗为 0.617 kWh/m³,总体单位电耗逐年增加,由 0.587 kWh/m³ 增加到 0.656 kWh/m³。其中,污水处理与除臭系统的单位电耗在统计周期内基本保持不变,分别为 0.303 kWh/m³ 和 0.115 kWh/m³,其中污水除臭的单位电耗为 0.021 kWh/m³,水线的总体单位电耗为 0.324 kWh/m³,与相关研究的结果基本吻合^[20]。污泥处理的单位处理量电耗则随着污泥处理量的提高而快速提高,这也是 S 污水处理厂在统计期间单位电耗逐年增加的主要原因。由于发达国家多采用厌氧消化耦合热电联产的污泥处理工艺,可产出大量的电回用于污水处理厂,从而降低单位电

耗^[10]。然而,S 污水处理厂所采用的污泥单独干化焚烧工艺仅对热能进行回收利用,对污泥化学能的利用方式单一,无法降低污水处理厂的电耗。此外,S 污水处理厂的曝气风机、除臭风机等高耗能设备为工频运行,整体能效较低,从而导致其单位电耗远高于美国、日本和德国等发达国家平均单位电耗(0.26~0.32 kWh/m³)的水平^[10],有较大的提升空间。

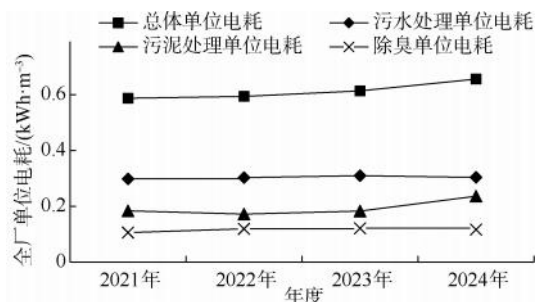


图5 S 污水处理厂总体比能耗

Fig. 5 Overall Specific Power Consumption of S WWTW

2.3.2 污水处理单元的单位电耗特征

对统计期间各月的污水、污泥处理量及单位污水处理电耗、单位污泥处理电耗进行回归分析的结果如图6所示。由图6(a)可知,单位污水处理电耗与污水处理量呈较密切的幂函数相关性,单位污水处理电耗随污水处理量的增加而快速减少,当污水处理量为 12.6×10^6 m³/月(42万 m³/d)时,单位电耗为0.270 kWh/m³,低于全国序批式活性污泥法(SBR)工艺的平均单位电耗值0.282 kWh/m³^[15],但是当污水处理量为设计负荷的55% [6.6×10^6 m³/月(22万 m³/d)]时,污水处理单位电耗提高了25%,高达0.360 kWh/m³。可见污水处理量对单位电耗

影响巨大,当污水处理量低于设计负荷时,单位电耗显著提高。由拟合曲线可知,S 污水处理厂污水处理单元处理量和单位电耗的拟合效果 R^2 为0.676 7与国内同等规模污水处理厂类似^[23]。主要是因为S 污水处理厂的进水泵、中间提升泵及曝气风机均为工频运行,虽然日常运行中会根据处理量调整泵与风机的启停数量,但其调节的幅度和范围远小于变频设备,从而导致处理量与电耗的相关性受到削弱。

2.3.3 污泥处理单元的单位电耗特征

如图6(b)所示,污泥处理单位电耗与污泥处理量存在更为密切的幂函数相关性,决定系数高达0.916 7。当污泥处理量小于设计处理量的40%(2 400 tDs/月)时,单位电耗随污泥处理量的增加急剧下降。当污泥处理量处于设计处理量的40%~60%(2 400~3 600 tDs/月)时,曲线由陡降转为平缓,且此时污泥处理的总电耗并未显著增加。当污泥处理量大于设计处理量的60%后,单位电耗随处理量的变化趋于稳定,但污泥处理的总电耗开始快速增加。可见控制污泥处理量在设计处理量60%~80%,能够获得单位电耗和总电耗的平衡,且系统还保有一定的余量可以应对日常负荷变动及污泥产量的季节性变化。图3(c)也验证了这一结论,当污泥处理量从71.37 tDs/d(35.7%设计负荷)增加到143.17 tDs/d(71.5%设计负荷)时,污泥处理总用电量仅从53 908 kWh上升到54 546 kWh,单位电耗从755.33 kWh/tDs降低到380.99 kWh/tDs,而污泥处理量大于设计负荷后,污泥处理总电耗水平较高,不利于全厂总电耗的控制。

2.3.4 除臭单元的单位电耗特征

图6(c)同样显示出除臭系统单位电耗与换气量

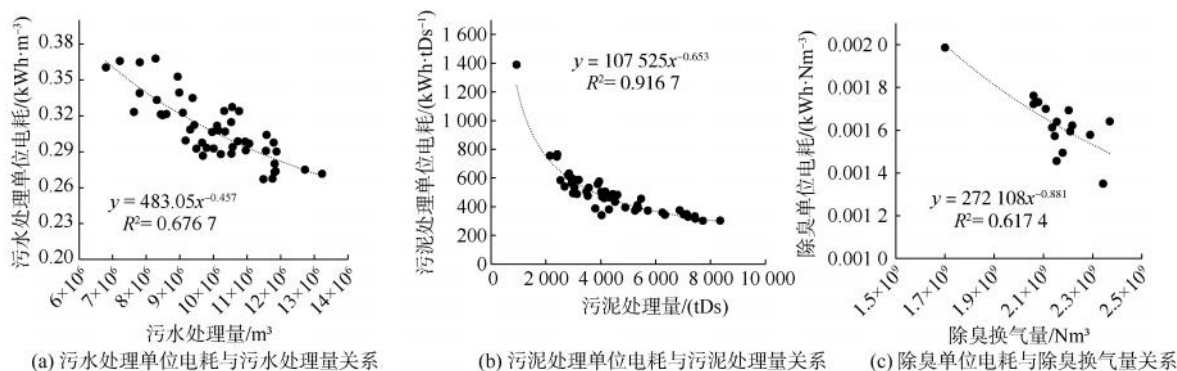


图6 单位电耗与处理量的关系

Fig. 6 Relationship between Unit Power Consumption and Treatment Capacity

之间的幂函数相关性。经计算, S 污水处理厂除臭系统的单位电耗为 0.0016 kWh/Nm^3 。其中, 用于污水处理除臭的单位电耗为 0.0010 kWh/Nm^3 , 而用于污泥处理除臭的单位电耗为 0.0019 kWh/Nm^3 。这是因为污泥处理段的恶臭气体含量(4 500 无量纲)远超污水处理段(1 200 无量纲)^[25], 处理同等气量需要消耗更多的电能。此外, 污泥处理段的设施(如脱水车间, 污泥料仓)及设备(如脱水机、干化机)均需维持密闭负压环境, 设计处理风量达污水处理段的 3 倍, 故而污泥处理段的除臭设备规模较污水处理段更大。因此, 污泥处理段的除臭系统单位能耗达到污水处理段的 4.7 倍。此外, S 污水处理厂的除臭系统设备虽然可变频控制, 但需要手动操作, 无法及时响应负荷变化, 整体能效不高, 进一步提高了除臭系统的电耗水平。由图 6(c)可以看出, 当季度换气量保持在 $2.15 \times 10^9 \text{ Nm}^3$ 时, 除臭风机采用较低的运行频率, 单位电耗降低了 14% (0.0014 kWh/Nm^3)。

3 讨论

3.1 水-泥-气协同处理与传统污水处理厂电耗特征比较

作为国内较早实现泥水全流程处理的污水处理厂, S 污水处理厂总的单位电耗为 0.617 kWh/m^3 , 相比于 2020 年统计的全国设计规模为 20 万 ~ 50 万 m^3/d 的传统污水处理厂平均电耗 (0.300 kWh/m^3), 单位电耗增加了 106%^[26]。主要原因是污泥干化焚烧系统的运行涉及众多高能耗设备, 如各类泵与风机、除臭系统等, 将整体电耗提高了 0.288 kWh/m^3 , 远大于采用常规污泥处理系统的 $0.055 \sim 0.118 \text{ kWh/m}^3$ ^[10]。从耗能设备方面看, 传统污水处理厂的主要耗电设备为曝气风机、提升泵、污泥回流泵等; 而 S 污水处理厂由于污泥焚烧处理系统的存在, 使得曝气风机等设备的电耗占比大幅降低, 而污泥焚烧系统中的一次风机、循环水泵占了污泥处理系统用电量的 20% 以上。除臭系统的用电量也大幅上升。由此可见, 水-泥-气协同处理的电耗结构与传统污水处理厂有巨大差异, 污泥处理是未来建设碳中和污水处理厂时不可忽视的组成部分^[27]。将污泥处理电耗纳入污水处理厂电耗进行整体考虑是实现污水处理厂节能降碳目标、优化整体能耗结构、提升能源利用效率的关键举措。

3.2 处理量对电耗的影响

处理量对污水处理厂电耗有着显著影响。在污水处理单元, 单位污水处理电耗与污水处理量呈幂函数关系, 当处理量低于设计负荷时, 单位电耗显著提高。在污泥处理单元, 单位电耗与处理量同样呈幂函数关系, 且相关性更为密切。当污泥处理量小于设计处理量的 40% 时, 单位电耗随处理量增加急剧下降; 处于设计处理量的 40% ~ 60% 时, 曲线趋于平缓; 大于设计处理量的 60% 后, 单位电耗变化趋于稳定, 此时继续增大处理量会导致边际效益减小, 无法利用规模效应继续降低能耗, 应该通过逐步更换高效风机、水泵, 改变运行控制策略等手段逐步调整相关性曲线, 将整体能耗进一步降低。可见在运行过程中, 要注意水量和泥量的控制, 尽量保持在最佳负荷区域运行, 并根据污水处理厂的处理量及回归曲线综合确定所采用的节能措施, 以达到经济和效益的平衡。

3.3 节能管理与潜力

基于上述分析, S 污水处理厂具有较大的节能潜力。(1) 在曝气系统方面, 该厂曝气风机为工频运行, 无法灵活地根据负荷的变化调整风量, 有巨大的优化空间。如通过设备改造, 将曝气风机改为变频控制的高效风机, 预计可降低曝气系统 30% 电耗^[28]。按曝气系统用电量占全厂的 26.17% 计算, 可节约 7.85%。(2) 除臭系统用电量占全厂的 18.23%, 且运行模式为连续全负荷运转, 尽管这确保了废气达标排放, 但却不利于节能。根据相关文献, 除臭风机在低负荷时段切换为低频运行, 可以降低 51% 电耗^[29]。通过调整除臭风机运行频率即可实现节能 6.54%。(3) 对于污泥处理单元, 鉴于污泥处理单位电耗与处理量的非线性关系, 可通过优化污泥调配, 充分利用污泥储存设施将污泥处理量控制在设计处理量的 60% ~ 80% 范围内, 可实现单位电耗和总电耗的平衡, 并为应对日常负荷变动及污泥产量季节性变化保留一定余量。S 污水处理厂通过设置半干污泥坑实现了污泥处理量的优化调度, 2024 年污泥处理单位电耗较 2020 年降低了 35%, 按污泥焚烧系统用电量占全厂的 23.38% 计算, 可节能 8.18%。

4 结论

本文通过对 S 污水处理厂 4 年的实际运行数据

进行全流程电耗分析,主要得出以下结论:

(1)水-泥-气协同处理模式显著改变了传统污水处理厂电耗结构,S污水处理厂单位电耗为 0.617 kWh/m^3 ,较常规厂增加106%。其中污泥处理单元和除臭单元用电占比分别为28.95%~35.99%和17.74%~20.06%,较传统厂提升3倍及2倍有余。曝气系统(占总电耗的26.17%)、污泥焚烧系统(23.38%)及除臭系统(18.23%)为核心耗能环节,合计占总电耗67.78%。曝气风机,除臭风机和一次风机是耗电量最高的三大用电设备,分别占全厂用电量的23%、13%和5%。这一特征表明,同类协同处理的污水处理厂将曝气、除臭及污泥焚烧系统及其主要用电设备作为重点改造优化对象可以达到更好的节能效果。

(2)污水、污泥及除臭单元的用电量均与相应处理量变化趋势一致。各处理单元的单位电耗均与相应处理量呈显著幂函数关系,且存在临界阈值。污水处理量低于设计负荷的55%时,单位电耗较满负荷提高25%;污泥处理量处于设计负荷的60%~80%时,单位电耗较30%负荷降低50%,总电耗仅增加1.2%。因此,加强处理负荷的管理对污水处理厂的节能降耗尤为重要,使处理负荷维持在设计负荷的60%以上,可以有效降低单位电耗。

(3)S污水处理厂工频设备占比高,导致负荷响应滞后,能效偏低,具备显著节能空间。可通过对曝气风机、除臭风机等大型设备改造、运行策略优化等手段实现14.39%的节能效果。此外,若叠加运行负荷管理,最多可实现22.58%的节能效果。

参考文献

- [1] 上海市统计局. 上海统计年鉴 2025 [EB/OL]. (2026-03-02) [2026-08-03]. <https://tjj.sh.gov.cn/tjnj/nj25.htm?d1=2025tjnj/C0515.htm>.
Shanghai Municipal Bureau of Statistics. Shanghai statistical yearbook 2025 [EB/OL]. (2026-03-02) [2026-08-03]. <https://tjj.sh.gov.cn/tjnj/nj25.htm?d1=2025tjnj/C0515.htm>.
- [2] 上海市生态环境局. 2019年上海市水环境保护情况统计数据 [EB/OL]. (2021-09-06) [2026-08-03]. <https://sthj.sh.gov.cn/hbzywpt1133/hbzywpt1135/20210906/ed50ce2aa59d4070aed2d232d4338a89.html>.
Shanghai Municipal Bureau of Ecology and Environment. Statistical data on water environmental protection in Shanghai 2019 [EB/OL]. (2021-09-06) [2026-08-03]. <https://sthj.sh.gov.cn/hbzywpt1133/hbzywpt1135/20210906/ed50ce2aa59d4070aed2d232d4338a89.html>.
- [3] 上海市生态环境局. 2024年上海市排放源统计年报 [EB/OL]. (2025-12-24) [2026-08-03]. <https://sthj.sh.gov.cn/hbzywpt1133/hbzywpt1135/20251226/08ae8e138f9e47afb100ef4de9d18b05.html>.
Shanghai Municipal Bureau of Ecology and Environment. 2024 Shanghai emission source statistical annual report [EB/OL]. (2025-12-24) [2026-08-03]. <https://sthj.sh.gov.cn/hbzywpt1133/hbzywpt1135/20251226/08ae8e138f9e47afb100ef4de9d18b05.html>.
- [4] 中国城镇供水排水协会. 城镇排水统计年鉴-二〇一五年 [M]. 北京:中国城镇供水排水协会, 2015.
China Urban Water Association. Municipal drainage statistics annual report - 2015 [M]. Beijing: China Urban Water Association, 2015.
- [5] 肖蓝. 上海市各污水处理厂运营能耗研究 [J]. 给水排水, 2020, 56(增刊1): 558-561.
Xiao L. Research on operational energy consumption of wastewater treatment plants in Shanghai [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(S1): 558-561.
- [6] 蒋玲燕, 麦穗海. 上海市中心城区污水处理厂污泥特性及处理处置路线分析 [J]. 给水排水, 2015, 51(12): 30-34.
Jiang L Y, Mai S H. Characterization and disposal of treated sludge from municipal wastewater treatment plants in central city of Shanghai [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 51(12): 30-34.
- [7] Zhang D M, Luo L T, Wei Y Y, et al. Status quo and resource utilization technology of sludge treatment and disposal [J]. Academic Journal of Science and Technology, 2023, 6(1): 146-152.
- [8] 蒋富海, 王琴, 张显忠, 等. 城镇污水治理与温室气体的协同减排双控研究 [J]. 中国市政工程, 2022, (5): 42-47. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4655.2022.05.012.
Jiang F H, Wang Q, Zhang X Z, et al. Study on the dual control of urban sewage treatment & greenhouse gas collaborative emission reduction [J]. China Municipal Engineering, 2022(5): 42-47. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4655.2022.05.012.
- [9] 贺珊珊, 陈红芳, 刘海燕, 等. 城镇污水处理厂碳排放核算标准现状分析与比较 [J]. 给水排水, 2024, 50(7): 169-174.
He S S, Chen H F, Liu H Y, et al. Current status of carbon emission accounting standards for urban sewage treatment plants [J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(7): 169-174.
- [10] 朱洁, 胡维杰. 污水处理厂全流程能耗识别及节能降耗建议 [J]. 给水排水, 2020, 56(增刊1): 584-588.
Zhu J, Hu W J. Identification on plant-wide energy consumption and suggestions on energy saving technologies for wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(S1): 584-588.
- [11] 张剑, 钟颖, 余佳平, 等. 协同除臭技术在罗芳污水处理厂

- 中的工程应用[J]. 净水技术, 2024, 43(增刊2): 209-215.
Zhang J, Zhong Y, Yu J P, et al. Engineering application of odor reduction and collaborative deodorization technology in Luofang WWTP[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(S2): 209-215.
- [12] 陈广, 周振, 蒋路漫, 等. 竹园第二污水处理厂全流程物流分析与运行优化研究[R]. 2020-12-01.
Chen G, Zhou Z, Jiang L M, et al. Research on whole-process material flow analysis and operation optimization of Zhuyuan No. 2 Sewage Treatment Plant[R]. 2020-12-01.
- [13] 宋涛, 兰玲, 贺亚. 城市污水处理厂能耗分析及节能措施研究[J]. 节能与环保, 2023, (3): 90-92. DOI: 10.3969/j.issn.1009-539X.2023.03.031.
Song T, Lan L, He Y. Energy consumption analysis and energy-saving measures of urban sewage treatment plant[J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2023, (3): 90-92. DOI: 10.3969/j.issn.1009-539X.2023.03.031.
- [14] 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 X X, Luo L, Wang X C, et al. Analysis on current energy consumption of wastewater treatment plants in China[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(7): 70-74.
- [15] 蒋勇, 卓薇, 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 Y, Fu W, Mao L H, et al. Influence factors analysis of urban sewage treatment plant on energy consumption[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2014, 38(1): 33-37.
- [16] 任福民, 梁锐, 蒋勇, 等. 不同地区污水处理厂进出水浓度及削减量对能耗的影响[J]. 北京交通大学学报, 2014, 38(1): 29-32.
Ren F M, Liang R, Jiang Y, et al. Inlet and outlet water condition and throughput effect on energy consumption[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2014, 38(1): 29-32.
- [17] 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与定量识别[J]. 给水排水, 2008, 44(10): 42-45.
Yang L B, Zeng S Y, Ju Y P, et al. Statistical analysis and quantitative identification of energy consumption patterns in urban sewage treatment plants in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, 44(10): 42-45.
- [18] 金昌权, 汪诚文, 曾思育, 等. 污水处理厂能耗特征分析方法与节能途径研究[J]. 给水排水, 2009, 35(增刊1): 270-274.
Jin C Q, Wang C W, Zeng S Y, et al. Study on energy consumption characteristic analysis methods and energy saving approaches of sewage treatment plants[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(S1): 270-274.
- [19] 金文杰, 杨丹丹. 污水处理厂能耗分析方法[J]. 环保科技, 2012, 18(2): 18-20.
Jin W J, Yang D D. Methods for analyzing energy consumption in wastewater treatment plants: Review[J]. Environmental Protection and Technology, 2012, 18(2): 18-20.
- [20] 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 Y J, Xi J R, Chen L, 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.
- [21] 郝晓地, 陈奇, 李季, 等. 污泥干化焚烧乃污泥处理/处置终极方式[J]. 中国给水排水, 2019, 35(4): 35-42.
Hao X D, Chen Q, Li J, et al. Ultimate approach to handle excess sludge: Incineration and drying[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(4): 35-42.
- [22] 张伟, 张德政, 王莹莹, 等. 双碳目标下城镇污水处理厂除臭技术发展趋势展望[J]. 市政技术, 2023, 41(11): 183-189.
Zhang W, Zhang D Z, Wang Y Y, et al. Development trend of deodorization technology in urban sewage treatment plants under dual carbon target[J]. Municipal Engineering Technology, 2023, 41(11): 183-189.
- [23] 余炼, 朱浴宇, 周瑜, 等. 太湖流域某污水处理厂能耗波动的响应规律[J]. 中国给水排水, 2023, 39(19): 61-68.
Yu L, Zhu Y Y, Zhou Y, et al. Response of energy consumption fluctuations in a wastewater treatment plant in Taihu Lake Basin[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(19): 61-68.
- [24] 王磊. 城市污水厂污泥产率季节变化与影响因素分析[J]. 净水技术, 2018, 37(6): 36-40.
Wang L. Analysis of seasonal variation and influencing factors of sludge yield in municipal sewage plant[J]. Water Purification Technology, 2018, 37(6): 36-40.
- [25] Hina K. Outline of biological deodorization equipment in sewage treatment facility and its application to desulfurization[J]. Journal of Japan Association on Odor Environment, 2007, 38(4): 256-262.
- [26] 胡洪营. 中国城镇污水处理与再生利用发展报告(1978-2020)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
Hu H Y. Development report on municipal wastewater treatment and reuse in China (1978-2020)[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.
- [27] 郝晓地, 李季, 曹达啟. 污水处理碳中和运行需要污泥增量[J]. 中国给水排水, 2016, 32(12): 1-6.
Hao X D, Li J, Cao D Q. Carbon-neutral operation of wastewater treatment needing sludge increment[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(12): 1-6.
- [28] 杨庆, 王亚鑫, 曹效鑫, 等. 污水处理碳中和运行技术研究进展[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(3): 292-305.
Yang Q, Wang Y X, Cao X X, et al. Research progress of carbon neutrality operation technology in sewage treatment[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48(3): 292-305.
- [29] 林莉峰, 王珑, 蒋路漫. 上海某污水处理厂除臭系统设计和运行策略[J]. 净水技术, 2026, 45(6): 163-170.
Lin L F, Wang L, Jiang L M. Design and operation solutions of deodorization system for a WWTP in Shanghai[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(6): 163-170.