

生态环境

某城镇污水处理厂碳排放核算及碳减排策略分析

许生辉, 高国文, 吴 奥, 刘凯汪, 黎昌昊

(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

[摘要] 以西北地区某县城生活污水处理厂为研究对象,采用排放因子法进行碳排放量核算,并分析污水处理厂的主要耗电设备,模拟分布式光伏的碳减排效果。研究表明,该污水厂碳排放主要包括 CH_4 、 N_2O 和电力消耗产生的 CO_2 ;2021年,该污水厂直接碳排放中 N_2O 排放占比为49.3%,主要来源于氮素硝化和反硝化反应, CH_4 排放占比为50.7%,主要来源于A2O污水处理工艺生化池,各季度直接碳排放当量具有差异性;设备电力消耗产生的碳排放为1 697.38 t,占厂区间接碳排放量的99%。厂区可用于布设分布式光伏发电设备的面积共计9 479.96 m^2 。经计算,日均发电量可达到6 788.88 $\text{kW}\cdot\text{h}$,占厂区总日均用电的85.5%,可减少的碳排放量占总碳排放量的46.31%。根据投资成本计算,分布式光伏仅需4.83年即可完成成本回收,说明污水处理厂布设分布式光伏在有效减少碳排放的同时,从长远看还具有一定的经济效益。

[关键词] 污水处理厂;碳排放核算;碳减排;分布式光伏发电

[中图分类号] X703; X322

[文献标志码] A

[文章编号] 2097-2423(2025)04-0106-07

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.04.017

0 引言

温室气体排放导致全球气候变暖,改变传统发展模式,并采取缓解措施减少温室气体排放^[1]越来越重要。当前,中国已成为世界最大的碳排放国之一,控制碳排放速度和降低碳排放强度已成为我国需要解决的重大课题,各行业都在节能减排和碳减排方面进行积极探索^[2-4]。污水处理作为城市环境卫生的重要组成部分,贡献全球1%~2%的温室气体排放量^[5],因此,进行污水处理减碳方法的研究显得尤为重要。

目前,国内关于城市污水输送及处理的碳排放源及核算已有较多研究。刘润雨等^[6]通过对医院污水碳排放源分析及碳排放当量计算,提出以安全达标排放为最终处理目标,优化处理工艺可减少碳排放;蔡博峰等^[7]分析研究了全国各地污水厂甲烷排放因子;CHEN等^[8]使用基于投入和产出的混合生命周期分析(IOLCA)量化了2006—2015年中国所有城市污水处理厂的生命周期温室气体排放,研究了中国300多个城市扩大污水基础设施建设导致的城市水资源压力和温室气体排放之间的关系,概述了减少与污水相关的温室气体排放的可行途径。

目前,碳排放核算主要基于《2006年IPCC国家温室气体清单指南》,主要方法包括利用排放因子法、实测法、模型法和质量平衡法等^[9],各种方法的优缺点见表1。

表1 碳排放核算方法对比分析^[10-11]

类别	排放因子法	实测法	模型法	质量平衡法
优点	计算简易,结果较准确	结果精准	方便计算,结果较准确	结果较准确
缺点	排放因子影响因素多,不易选择	需要大量人力、物力实地监测	需要大量基础数据支撑模型,具有区域性	计算过程复杂,数据获取困难

[收稿日期] 2024-09-23

[作者简介] 许生辉(1984—),男,甘肃高台人,博士,高级工程师,主要研究方向:水处理、重金属污染防治。

[引用格式] 许生辉,高国文,吴奥,等.某城镇污水处理厂碳排放核算及碳减排策略分析[J].绿色矿冶,2025,41(4):106-112.

XU Shenghui, GAO Guowen, WU Ao, et al. Carbon emission accounting and carbon reduction strategy analysis of a municipal wastewater treatment plant[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(4): 106-112.

排放因子法通过确定排放源,构造其活动水平数据与排放因子(EF)乘积计算,简便易操作,是应用最广泛的定量评估的方法,但不同学者研究成果中的排放因子与IPCC指南及国内相关标准有所差异,需要根据研究对象的具体工艺及相关研究进行甄别选择。本文以西北地区某生活污水处理厂为研究对象,选用《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》中的排放因子,利用排放因子法核算了污水厂各季度碳排放,分析碳减排路径,并重点模拟布设分布式光伏对该厂产生的环境效益和经济效益,以期为同类型污水厂的减污降碳措施提供参考。

1 案例概况

西北地区某生活污水处理厂位于甘肃省平凉市西南方向,地处东经 $105^{\circ}46'15'' \sim 106^{\circ}23'45''$,北纬 $35^{\circ}03'23'' \sim 35^{\circ}28'26''$,温带季风气候,夏季长达130 d,日照充足,光能资源丰富,年平均日照时长达 $2\,418\text{ h}^{[12]}$ 。污水厂占地面积为 $29\,142.84\text{ m}^2$,设计规模为 $1.5\text{ 万 m}^3/\text{d}$,污水来源主要为城区内9.58万城市居民的生活排水。污水处理采用A2O活性污泥法底部曝气工艺,处理流程为“粗/细格栅+沉砂+初沉池+A2O(厌氧+缺氧+好氧)+二沉池+次氯酸钠消毒”,利用A2O工艺去除污水中的COD、BOD、氮和磷等污染物,之后在二沉池经过絮凝沉淀完成二级污水处理,二沉池出水的上清液经过次氯酸钠消毒等工序完成进一步处理后,达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,污泥浓缩后外运综合处理。

本文以生活污水处理厂2020.4—2021.3月季度运行数据(表2)为基础,研究污水厂碳当量排放。

表2 生活污水处理厂运行数据

季度	进水量/ 万 m^3	出水量/ 万 m^3	COD减 排量/t	氨氮减 排量/t	用电量/ kW·h	絮凝剂 用量/kg
一	130.32	119.22	1409.23	75.91	106.49	1091.70
二	75.81	69.36	776.02	43.90	60.14	259.31
三	102.41	93.69	689.19	53.24	45.52	350.30
四	122.56	112.53	1812.24	50.99	77.66	407.90

2 碳排放核算方法及核算结果

2.1 碳排放核算方法

污水处理排放的温室气体包括过程中直接排放

的 CH_4 和 N_2O ,以及电力和药剂消耗、化石燃料消耗过程间接产生的 CO_2 。其中, CH_4 在管网、厌氧/好氧池及污泥消化过程产生, N_2O 主要在生物脱氮过程中产生。

2.1.1 污水厂直接碳排放核算方法

本文采用《工业其他行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》中的方法对污水厂碳排放直接排放量进行核算。

1) CH_4 碳排放量核算公式见式(1)。

$$M_{\text{CH}_4} = (\text{COD}_{\text{in}} - \text{COD}_{\text{out}}) \times V \times \text{EF}_{\text{CH}_4} \times 10^{-6} \times \text{GWP}_{\text{CH}_4} \quad (1)$$

式中, M_{CH_4} 为 CH_4 直接排放量, kgCO_2 ; COD_{in} 为污水厂进水COD浓度, mg/L ; COD_{out} 为污水厂出水COD浓度, mg/L ; V 为污水处理量, L ; EF_{CH_4} 为 CH_4 排放因子,取 $0.0062^{[6]}$, $\text{kg}_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{COD}}$; GWP_{CH_4} 为全球变暖潜势值, CH_4 的GWP为25.0。

2) N_2O 碳排放量核算公式见式(2)。

$$M_{\text{N}_2\text{O}} = (\text{TN}_{\text{in}} - \text{TN}_{\text{out}}) \times V \times \text{EF}_{\text{N}_2\text{O}} \times 10^{-6} \times \text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}} \quad (2)$$

式中, $M_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 直接排放量, kgCO_2 ; TN_{in} 为污水厂进水TN浓度, mg/L ; TN_{out} 为污水厂出水TN浓度, mg/L ; V 为污水处理量, L ; $\text{EF}_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 排放因子,取 0.0106 , $\text{kg}_{\text{N}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{COD}}$; $\text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}}$ 为全球变暖潜势值, N_2O 的GWP为298.0。

2.1.2 污水厂间接碳排放核算方法

污水处理厂间接碳排放主要为运行过程中电力和药剂消耗以及化石燃料使用带来的碳排放,采用活动水平数据乘以对应碳排放因子进行核算。

$$M_{\text{物CO}_2} = X \times \text{EF}_{\text{物}} \quad (3)$$

式中, $M_{\text{物CO}_2}$ 为生活污水处理过程中物质消耗产生的温室气体 CO_2 的排放量, kg/d ; X 为生活污水处理过程投加的化学药剂的消耗量, kg/d ; $\text{EF}_{\text{物}}$ 为污水处理消耗的某种化学药剂的 CO_2 排放因子, kgCO_2/kg 。

电力和药剂消耗及化石燃料的碳排放核算排放因子采用《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》的成果,电耗排放因子取 $0.5857\text{ kgCO}_2\text{e}/\text{kW}\cdot\text{h}^{[9]}$,絮凝剂PAC排放因子取 $0.53\text{ kgCO}_2\text{e}/\text{kg}$,消毒剂 NaClO 排放因子取 $0.99\text{ kgCO}_2\text{e}/\text{kg}$ 。

2.2 碳排放核算结果

2.2.1 污水厂直接碳排放特征

表3列出了2020.4—2021.3月季度的直接碳排放量。经计算,在2020.4—2021.3期间内,该

厂 N₂O 排放 707.71 t, 占直接碳排放的 49.3%, CH₄ 排放 726.44 t, 占比为 50.7%。从时间纬度看, 各季度直接碳排放当量具有差异性, 第一季度与第四季度碳排放量较高, 主要因为此阶段为春季和冬季, 当地居民务工返乡致使污水处理厂服务人数增多, 污水产量及其 COD 和 TN 浓度较高, 污水处理释放的温室气体量随之增加; 第二季度与第三季度为夏季和秋季, 可能受当地居民务工外出及降雨增多等因素影响, 污水量及 COD 和 TN 浓度偏低, 温室气体释放量较其他两季度少。

该污水处理厂服务人口约为 9.58 万人, CH₄ 和 N₂O 人均年排放强度分别为 0.007 5 t/a 和 0.007 4 t/a; CH₄ 产生主要集中在厌氧区域的氮素硝化和反硝化反应, N₂O 产生主要集中缺氧区域^[12-13]。根据该污水处理厂厌氧区和缺氧区面积分别为 850 m² 和 1 850 m² 核算, CH₄ 和 N₂O 单位面积排放强度分别为 0.85 t/a 和 0.38 t/a。春季的直接碳排放量最高, 为 458.22 t, 夏季直接碳排放量最低, 为 258.97 t, 降低了 43.48%。综上所述, 碳排放受污水处理厂处理规模和水体有机物浓度的影响较大, 具有较为显著的季节性特征。

表 3 2020.4—2021.3 月污水厂直接碳排放量 t

碳排放种类	第一季度	第二季度	第三季度	第四季度	总计
CH ₄	218.43	120.28	106.82	280.90	726.44
N ₂ O	239.78	138.69	168.18	161.07	707.71
合计	458.22	258.97	275.00	441.96	1 434.15

2.2.2 污水厂间接碳排放特征

污水厂内间接碳排放主要来源于厂内设备电力消耗、药剂投加及车辆运输等^[14]。根据污水厂的电力消耗和药剂消耗等数据, 可以计算出相应的间接碳排放量。

该厂区月平均耗电量为 24.15 万 kW·h, 日均耗电量为 7 939.73 kW·h。污水处理厂间接碳排放量核算统计如图 1 所示。从图 1 可知, 2020.4—2021.3 期间, 电力消耗产生的 CO₂ 量为 1 697.38 t, 药剂投加产生的 CO₂ 量为 2.09 t。此外, 由于该污水处理厂车辆运输方面的管理不甚明晰, 统计较为困难, 车辆的间接碳排放暂不列入讨论。可以看出本污水处理厂的间接碳排放中电力消耗占据主导地位。对污水处理厂间接碳排放来说, 电力消耗产生的碳排放最高, 占据厂区间接总碳排放量的 99%。

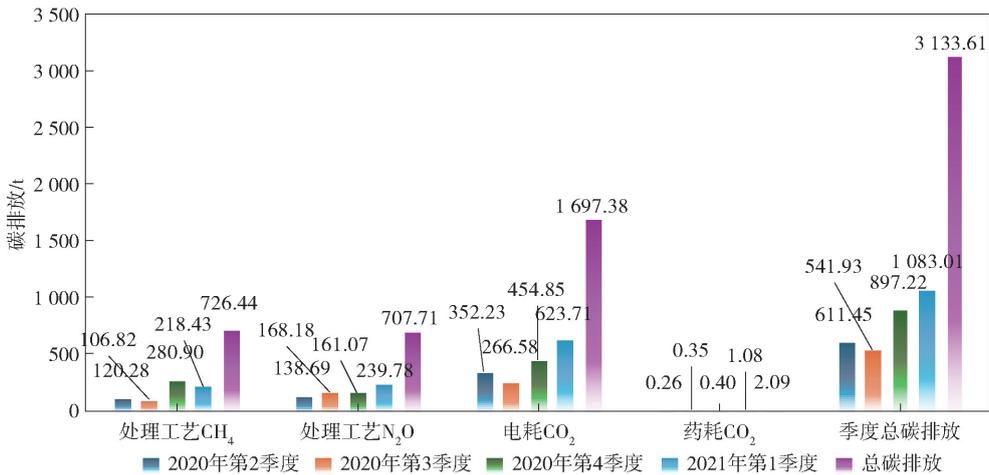


图 1 污水处理厂碳排量核算统计

3 分布式光伏发电碳减排分析

从当前分析可以看出, 污水厂间接碳排放占总碳排放量的较大比重, 特别是电力消耗引发的 CO₂ 排放。污水处理厂内的核心设备(如鼓风机、提升泵等)的高能耗进一步加剧了间接碳排放的规模。为实现可持续发展并减少碳排放, 迫切需要引入更加环保的能源方案, 如分布式光伏发电。光伏发电不仅能够为污水处理厂提供清洁能源, 还能够缓解

对化石燃料的依赖, 降低总体碳排放。此外, 光伏系统还可以通过特殊的布局(如在二沉池等区域上方架设光伏板), 优化污水厂的整体运作, 从而降低设备维护和运行成本。因此, 本文尝试分析污水厂的主要单元耗电特点以及分布式光伏发电的可行性。

3.1 污水处理厂主要单元耗电分析

水处理厂主要耗电单元运行时间与耗电量如图 2 所示。由图 2 可知, 主要耗能设备为提升泵、鼓风机、污泥压缩机等; 当鼓风机和提升泵运行时间增加

时,月耗电量显著增加。由于鼓风机的运行时间长,设备功率高,因此鼓风机的电耗占比最大。在1月,可以观察到提升泵和鼓风机房的运行时间有显著增长,直接导致了耗电量的大幅升高。因此,应该重点关注对这些高能耗设备的减排研究。

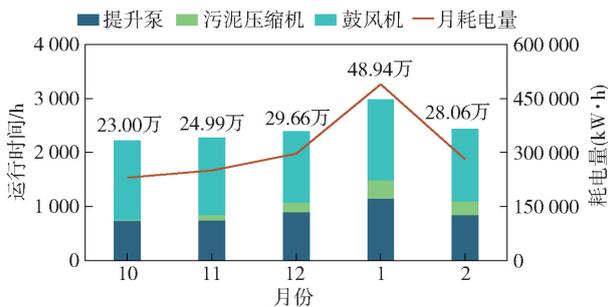


图2 2020—2021年污水处理厂主要耗电单元运行时间与耗电量

3.2 分布式光伏模拟分析

由于该地区年平均日照时长达到2418 h,年总辐射量为4700~5400 MJ/m²,发电效率也较高。因此,分布式光伏发电存在巨大的经济利用价值^[15]。由于厂区建筑主要采用混凝土平面,上空开阔,采用传统的固定式支架即可满足建设要求。铺设分布式光伏设备对污水厂设备的运行维护也有所帮助,如在二沉池上分布架设的光伏板能够有效减少阳光对水体的直射以及雨水对设备的腐蚀,从而减少藻类的滋生和延长设备寿命;光伏板对A2O池的密封也有助于冬季的保温和臭气的收集,从而保障系统更为稳定的运行。

由于二沉池、A2O池等位于厂区的关键位置,搭建光伏系统时首先要确保不会影响正常污水处理运行。支架通常采用耐腐蚀材料,如不锈钢或铝合金,结构需能承受光伏组件的重量和外部环境的影响(如风荷载)。设计时要避免破坏现有池体结构,并保持维护通道。此外,考虑到污水处理厂环境较为特殊,大部分区域湿度较高,对设备存在较大的腐蚀风险,采用单晶多晶硅光伏板较好,并采用防腐材料保护组件的接线盒以及电缆,在条件允许情况下对材料进行涂层,以减少污垢堆积和水分渗透等情况的发生。架设时,为了使光伏板能够最大程度的保持光照状态,存在计算公式:最佳倾角≈纬度±15°。

污水处理厂所在县的经纬度为35°12′10″N、106°02′10″E。以此为基础计算最佳架设倾角,并在条件允许时采用双轴追踪系统,方便矫正光伏板方向。该污水厂的碳排放量在冬季和春季较高,这可

能是由于冬季气温较低,厂区供暖要求更大的电力消耗;此外,春季降雨量增加,导致污水流量上升,需要处理更多的污水,直接增加了设备的运行能耗。因此,在设置光伏板倾角时应当充分考虑该污水厂能源消耗的季节性因素,倾角应当为纬度+15°,即倾角约为50°为最佳。

该污水厂总占地面积29142.84 m²,分为绿地面积、建筑面积和道路广场面积。其中,绿地面积占45.2%,为13172 m²;建筑面积占27.24%,为7937 m²;其余为道路广场面积。在可铺设分布式光伏设备的建筑面积中,A2O池占据最大的面积,为3635 m²,其余可用面积包括沉砂池、二沉池、沉淀池、部分办公楼屋顶等。该污水厂的大量绿地面积存在于各个污水处理建筑之间,不能有效利用,仅有两处面积共为3110.56 m²的绿地处于开阔地段,四周无建筑物遮挡,可用于光伏发电。综上所述,厂区可用于布设分布式光伏发电设备的面积共计9479.96 m²。当地每日平均日照时长为6.62 h,结合他人研究,取可利用系数为0.8^[16],则日均发电量=W×6.62×0.8,其中W为装机容量,其计算方法见式(4)。

$$W = A_g \cdot 1 \text{ kW} \cdot \text{m}^2 \cdot \eta \quad (4)$$

式中, A_g 为安装面积, η 为光伏组件的光电转换效率,物理量单位是%,取决于选用的光伏组件。目前市面上较为常见的晶硅光伏组件的光电转换效率 η 值为15%~19%,本文取 η 为15%,则装机容量为1421.99 kW。可得刚建成第一年的日发电量为7530.88 kW·h。此外,由于光伏组件实际功率会随着时间而衰减,取第一年衰减2.5%,随后每年衰减0.73%^[17],则可得实际发电量见表4。

表4 光伏发电量预测

使用年	日发电量/kW·h	使用年	日发电量/kW·h
第1年	7530.880	第15年	6675.513
第2年	7342.608	第16年	6626.782
第3年	7289.007	第17年	6578.406
第4年	7235.797	第18年	6530.384
第5年	7182.976	第19年	6482.712
第6年	7130.540	第20年	6435.388
第7年	7078.487	第21年	6388.410
第8年	7026.814	第22年	6341.774
第9年	6975.519	第23年	6295.480
第10年	6924.597	第24年	6249.523
第11年	6874.048	第25年	6203.901
第12年	6823.867	25年总发电量	61948.556
第13年	6774.053	平均年发电量	2477.942
第14年	6724.603	平均日发电量	6788.88

由表 4 可知,以运营 25 年计算,这项光伏工程的日均发电量可以达到 6 788.88 kW·h,占厂区总日均用电的 85.5%。

当今市场中,光伏设备的成本随时间延长而增长。针对 2021 年的光伏设备市场进行调查,发现市面上的光伏发电设备的平均成本为 4.5 元/W,运维成本为 0.047 元/(W·a);此外,由于当地每日光照时长为 6.62 h,则 25 年内平均每小时发电量为 1 025.38 kW·h,而厂区的平均小时耗电量为 379.33 kW·h,小于发电量,所以在保证厂区供电的同时,还需对额外发电量进行存储,因此需要额外采购储能设施。根据当前市场 0.57 元/W 的价格,则储能设施价格为 81.05 万。根据该项工程的装机容量可得初始成本约为 639.90 万元,运维成本为

6.68 万元/a。因此,该项工程的设备总成本为 720.95 万元,每年运维成本为 6.68 万元。

由于系统发电功率为 1 421.99 kW,日均发电量 6 788.88 kW·h,按照平均电价 0.64 元/kW·h 计算,则日均电费利润为 4 344.88 元。投资回收周期计算方法见式(5)。

$$\sum_{t=0}^{P'_t} (CI - CO)_t (1 + i_c)^{-t} = 0 \quad (5)$$

式中, P'_t 为动态投资回收周期; $(CI - CO)_t$ 为第 t 年的净现金流出量; i_c 为基准利率。

取当地贷款利率为 3.85%,根据式(5)得到该项目的基准投资回收期为 4.83 年,具体信息见表 5。

表 5 污水厂分布式光伏发电经济效益计算

参数	安装面积/ m ²	安装功率/ kW	日发电量/ kW·h	初始投资/ 万元	运维成本/ (万元/a)	财务利率/ %	投资回收期/ 年	每日电费/ 元
数值	9 479.96	1 421.99	6 788.88	720.95	6.68	3.85	4.83	4 344.88

3.3 分布式光伏碳减排分析

根据前文所述,电耗排放因子取 0.585 7 kg CO₂e/kW·h^[16],则该污水处理厂每年产生 3 133.61 t 碳排放,其中因工艺产生的直接碳排放为 1 434.15 t,电耗产生的间接碳排放为 1 697.38 t,而光伏系统每日发电量为 6 788.88 kW·h,每年可节约电量 247.79 万 kW·h,即减少约 1 451.31 t 的碳排放,占总碳排放的 46.31%。

从经济角度来说,尽管初期建设成本较高,但光伏系统寿命长,通常为 20~30 年,且维护成本较低,光伏系统能够实现良好的投资回报率。采用光伏技术,还可能获得政府的补贴或碳减排激励政策。从社会层面来说,引入清洁能源符合绿色环保理念,有助于提升污水厂的社会形象,展示其履行社会责任的承诺,并推动社会对可再生能源的关注和接受度。光伏系统有助于厂区在电力供应紧张时期缓解用电压力,保证关键设备的正常运行,尤其在应急情况下提供备用电源,减少因电力中断导致的污水处理停滞。从环境层面来说,光伏发电能够显著减少化石燃料的消耗,降低污水厂的间接碳排放,有助于实现碳中和目标。每减少一度电的传统能源消耗,就可避免相应的 CO₂、CH₄ 和 NO_x 等污染物排放。实施光伏发电,可为地方和国家的可再生能源比例贡献力量,促进绿色低碳循环发展,减少对传统能源的依

赖,推动环境保护事业。因此,从经济、社会、环境的角度来说,将分布式光伏发电技术布设于该污水站都是一项卓有收益的工程。

针对分布式光伏发电技术在污水站的应用,未来研究还可关注光伏系统对污水厂环境的正面效应,如光伏板对水体的遮蔽减少藻类滋生和阳光直射产生的设备腐蚀问题,从而延长设备使用寿命、减少污水处理的维护费用;进一步探讨光伏发电对污水厂整体碳排放的长期影响,包括对间接碳排放的削减效果;研究不同光伏发电规模对污水处理厂的碳足迹影响,评估各类污水处理工艺(如 A2O、MBR 等)结合光伏发电的减排潜力;同时,可以考虑将光伏与其他清洁能源技术(如风能、生物质能)结合,形成多能源互补的协同系统,从而提高能源利用率并进一步减少碳排放。通过结合这些建议和研究方向,可以进一步提升污水处理厂的整体能源利用效率和碳减排效果,同时推动可持续发展目标的实现。

4 结论

1) 污水厂碳排放主要包括 CH₄、N₂O 和电力消耗产生的碳排放;在 2020.4—2021.3 月内,该污水厂直接碳排放中 N₂O 排放占比约为 49%,主要来源于氮素硝化和反硝化反应,CH₄ 占比约为 51%,主要

来源于 A2O 污水处理工艺生化池,各季度直接碳排放当量具有差异性;厂内设备电力消耗排放 CO₂ 量较多,是间接碳排放的主要贡献者。

2) 厂区日均耗电量为 7 939.73 kW·h,其中鼓风机房耗电量占主导地位。从控制间接碳排放的角度考虑,控制电耗,尤其控制是以鼓风机房为主的高功率用电设施电耗,是一种较好的减排措施。

3) 经结合厂区实际情况进行初步估算,厂区可用于布设分布式光伏发电设备的面积共计 9 479.96 m²,日均发电量为 6 788.88 kW·h,占厂区总日均用电的 85.5%,可以较好地满足厂区每日的用电需求;从经济角度来说,仅需 4.83 年可完成成本回收并开始盈利;从环保角度来说,该项目不仅有助于减少对化石燃料的依赖,还能降低大气污染物,尤其是温室气体的排放,对碳减排有着显著的帮助。

[参考文献]

[1] 张玲玲,郭兴芳,申世峰,等.污水处理厂温室气体的产生、核算和减量研究进展[J].给水排水,2023,59(4):129-138.

[2] 赵娜,赵丽.低碳经济时代的营销模式创新探索[J].环境工程,2023,41(8):20.

[3] 王晗,周健.低碳经济模式下新疆“人口-产业-资源”格局的时空特征分析[J].山东师范大学学报(自然科学版),2023,38(2):136-145.

[4] 舟丹.中国是世界上最大的碳排放国之一[J].中外能源,2015,20(1):56.

[5] 王兴斌.城镇污水处理厂碳减排技术研究和应用[J].绿色矿冶,2024,40(3):88-93,98.

[6] 刘润雨,牛住元,张恒仓.某医院污水处理碳排放量化及核减措施研究[J].给水排水,2023,59(6):63-68,74.

[7] 蔡博峰,高庆先,李中华,等.中国污水处理厂甲烷排放研究[J].中国环境科学,2015,35(12):3810-3816.

[8] CHEN S, ZHANG L, LIU B, et al. Decoupling wastewater-related greenhouse gas emissions and water stress alleviation across 300 cities in China is challenging yet plausible by 2030 [J]. Nature Water, 2023: 1-13.

[9] 刘然彬,于文波,张梦博,等.城镇水务系统碳核算与减碳/降碳规划方法[J].中国给水排水,2023,39(8):1-10.

[10] 张星.城镇生活污水处理系统碳排放研究[D].南京:南京信息工程大学,2018.

[11] 张海亚,李思琦,黎明月,等.城镇污水处理厂碳排放现状及减污降碳协同增效路径探讨[J].环境工程技术学报,2023,13(6):2053-2062.

[12] WANG J H, ZHANG J, XIE H J, et al. Methane emissions from a full-scale A/A/O wastewater treatment plant [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(9): 5479-5485.

[13] 孙慧,王佳伟,吕竹明,等.北京某大型城市污水处理厂节能降耗途径和效果分析[J].中国给水排水,2019,35(16):31-34.

[14] DU W J, LU J Y, HU Y R, et al. Spatiotemporal pattern of greenhouse gas emissions in China's wastewater sector and pathways towards carbon neutrality [J]. Nature Water, 2023. 1(2): 166-175.

[15] 李东梅.污水处理厂温室气体排放核算及碳中和策略[D].昆明:昆明理工大学,2022.

[16] 李小明,赵瑜强,章文杰,等.中国农村地区建筑屋顶太阳能光伏发电资源评估和效益分析研究[J].建设科技,2023,(8):31-35.

[17] 王彦琦.基于CEMS监测数据的火电厂大气污染物达标判定方法研究[D].北京:中国环境科学研究院,2021.

Carbon Emission Accounting and Carbon Reduction Strategy Analysis of a Municipal Wastewater Treatment Plant

XU Shenghui, GAO Guowen, WU Ao, LIU Kaiwang, LI Changhao

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 7300505, China)

Abstract: Taking a domestic sewage treatment plant in a county in Northwest China as the research object, the emission factor method was used to calculate the carbon emissions, and the main power consumption equipment of the sewage treatment plant was analyzed, and the carbon emission reduction effect of distributed photovoltaic was simulated. The results show that the carbon emissions of the sewage plant mainly include CH₄, N₂O and CO₂ produced by power consumption. In 2021, the proportion of N₂O emissions in the direct carbon emissions of the sewage plant was 49.3%, mainly from nitrogen nitrifica-

tion and denitrification reactions, and the proportion of CH_4 emissions was 50.7%, mainly from the A2O sewage treatment process. The biochemical pool, the direct carbon emission equivalent of each quarter is different; the carbon emission generated by the power consumption of the equipment is 1 697.38 t, accounting for 99% of the total indirect carbon emission in the plant area. The total area of the plant that can be used to deploy distributed photovoltaic power generation equipment is 9 479.96 m^2 . It is calculated that the average daily power generation can reach 6 788.88 $\text{kW}\cdot\text{h}$, accounting for 85.5% of the total daily power consumption in the plant, and the carbon emissions that can be reduced account for 46.31% of the total carbon emissions. According to the calculation of investment cost, distributed photovoltaic can complete cost recovery in only 4.83 years, indicating that the distributed photovoltaic in sewage treatment plants can effectively reduce carbon emissions and has certain economic benefits in the long run.

Key words: sewage treatment plant; carbon emission accounting; carbon emission reduction; distributed photovoltaic power generation

(上接第 79 页)

coal gangue, desulfurization gypsum and sludge, in the field of building materials in Panzhihua City, and focused on the analysis of their innovative technical paths and application effects in the fields of concrete, brick and composite cementitious materials. On this basis, this paper further reviewed the main problems existing in the current solid waste recycling process, including technical bottlenecks such as insufficient activity of some materials, high cost of large-scale application, and high risk of heavy metal leaching. In view of the above problems, it is proposed that the research on efficient excitation and stabilization technology should be strengthened, the application scenarios and market scale of solid waste should be expanded, the ways of resource utilization should be innovated, and the policy support system should be improved, so as to promote the efficient recycling of industrial solid waste in Panzhihua and provide strong support for the realization of the goal of “dual carbon”.

Key words: utilization of solid waste; tailings; smelting waste; coal gangue; desulfurization gypsum; sludge; building materials