

# Analysis of carbon reduction contribution of photovoltaic power generation in sewage treatment plants —— Take a sewage treatment plant in Shanghai as an example

Yifeng Zhang

Shanghai Chengtong Sewage Treatment Co., Ltd. Shidongkou Sewage Treatment Plant, Shanghai, 200942, China

## Abstract

Under the backdrop of the “dual carbon” goals, the high energy consumption and significant carbon emissions from wastewater treatment plants have become increasingly prominent, posing substantial pressure to reduce carbon emissions. To study the potential for reducing carbon emissions through photovoltaic power generation in wastewater treatment plants, a typical wastewater treatment plant in Shanghai was selected as the research subject. The study analyzed the power usage and photovoltaic installation at this wastewater treatment plant. It was found that by adopting a 12.02 MWp photovoltaic system, the plant can reduce its annual carbon emissions by 4,645.16 tons of CO<sub>2</sub>eq, accounting for about 5% of total carbon emissions, and cover 29.17% of the electricity demand during the wastewater treatment process. This validates the feasibility and effectiveness of the “photovoltaic + wastewater treatment plant” model in reducing the carbon footprint of wastewater treatment plants and supporting the national “dual carbon” goals. The study provides specific technical pathways for the low-carbon transformation of the wastewater treatment industry.

## Keywords

sewage treatment plant; power consumption; photovoltaic + sewage treatment plant; carbon reduction

# 光伏发电在污水处理厂的减碳贡献分析——以上海某污水处理厂为例

张亦锋

上海城投污水处理有限公司石洞口污水处理厂, 中国·上海 200942

## 摘要

在“双碳”目标的大背景下, 污水处理厂能耗高、碳排放量大的问题愈发突出, 面临着巨大的减碳压力。为研究光伏发电应用于污水处理厂的减碳潜力, 以上海某典型污水处理厂为研究对象, 对该污水处理厂的用电情况及光伏安装情况进行分析。研究发现, 通过采用12.02 MWp的光伏系统, 该污水处理厂每年可减少碳排放4645.16吨CO<sub>2</sub>eq, 占总碳排放量的约5%, 并且能够覆盖污水处理过程中29.17%的用电需求。验证了“光伏+污水厂”模式在降低污水处理厂碳足迹、助力实现国家“双碳”目标方面的可行性与有效性。为污水处理行业的低碳转型提供了具体的技术路径参考。

## 关键词

污水处理厂; 能耗; 光伏+污水厂; 降碳

## 1 引言

作为城市重要的基础设施, 污水处理厂对保护生态环境和公众健康起着至关重要的作用。然而, 污水处理厂在去除废水中污染物的过程中, 也消耗了大量的能源<sup>[1]</sup>。研究表明, 污水处理行业能耗占全社会总用电量的1%-3%, 电能产生的间接碳排放占污水处理厂碳排放总量的40%-60%<sup>[4]</sup>。随着我国“双碳”目标的推进, 传统依赖电网供电的污水处理厂面临巨大的减碳压力。

上海市作为中国城市化进程最快的地区之一, 其污水处理厂普遍面临两大矛盾: 一方面随着污水处理标准的不断提高, 污水处理厂的电耗也日益增加, 2014年上海吨水处理平均耗电量为0.211 kWh/m<sup>3</sup><sup>[2]</sup>, 到2019年已上升至0.29 kWh/m<sup>3</sup><sup>[3]</sup>; 另一方面, 受限于土地资源紧张, 常规节能改造难以满足深度减碳需求。在此背景下, “光伏+污水厂”模式通过利用污水处理厂占地面积大, 空间利用率高的特点, 将光伏发电系统架设在污水处理厂闲置空间上<sup>[5]</sup>, 实现能源自给与绿电替代, 成为污水处理厂低碳转型的重要路径之一<sup>[6]</sup>。本研究以上海某典型污水处理厂(以下简称S污水处理厂)为对象, 通过系统解析其光伏发电对污水处理全流程的减碳贡献, 为污水处理厂低碳转型提供参考。

【作者简介】张亦锋(1978-), 男, 中国上海人, 本科, 助理工程师, 从事污水、污泥运营研究。

## 2 S 污水处理厂电耗情况分析

### 2.1 S 污水处理厂概况

S 污水处理厂规划的污水处理规模达 40 万 m<sup>3</sup>/d，其干基污泥的日产量为 72 吨。在污水处理环节，采用了三级处理工艺，具体流程为“粗、细格栅对污水进行初步拦截，而后通过沉砂池去除砂粒，接着利用一体化活性污泥法工艺进行生物处理，再经过高效沉淀池沉淀杂质，最后由反硝化深床滤池进一步净化”。处理后的尾水水质符合 GB18918-2002 一级 A 标准后排放。该污水处理厂耦合了“脱水 - 干化 - 焚烧”的污泥处理工艺。焚烧产生的烟气经过一系列处理，达到上海市《生活垃圾焚烧大气污染物排放标准》(DB31/768-2013) 后排放。作为污泥集中处理中心，该污水处理厂设计的污泥处理规模为 200 tDs/d，除了处理本厂产生的污泥外，还接收来自其他污水处理厂约 128 tDs 的污泥。为了减少废气排放对环境的影响，全厂采用全覆盖式设计来收集废气，将收集到的废气集中输送至除臭系统进行处理，达标后排放。该污水处理厂的整体工艺流程详见图 1。

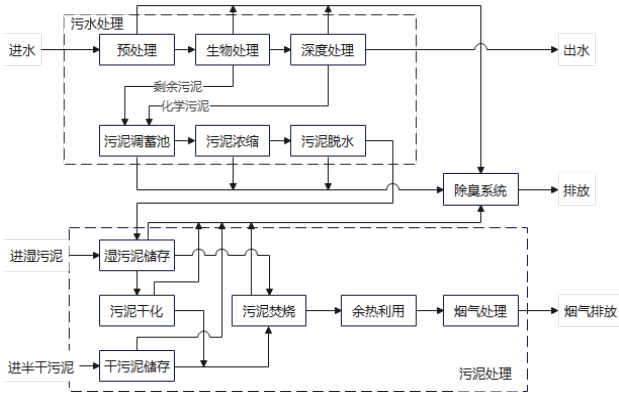


图 1 S 污水处理厂工艺流程图

### 2.2 S 污水处理厂电耗现状分析

S 污水处理厂正常运行过程中主要有能耗和物耗两类消耗，其中主要能耗为电能。图 2 展示了 2021 年至 2024 年的月用电负荷情况。如图所示，S 污水处理厂月用电负荷总体比较稳定，保持在 5258MWh 与 7128MWh 之间，小时均值约为 8467.85kWh。全厂月用电负荷呈季节性波动，每年 7 到 9 月用电量较多，11 月到 3 月用电量较少，与上海市的汛期及早期时间相符。结合进水情况分析，该厂用电负荷与进水量的波动趋势基本保持一致。这是因为该污水处理厂污水处理过程月用电负荷占总用电负荷的 61.10% - 77.70%，占用电负荷的主导地位，且污水处理工艺中使用的进水泵、曝气风机、提升泵等主要用电设备的负荷都是根据水量进行调节的。

对 S 污水处理厂月用电单耗数据进行分析，厂内月单耗特性如图 3 所示。其中，月最大电负荷发生在 2024 年 12 月，为 0.518 kWh/m<sup>3</sup>，月最小电负荷发生在 2021 年 8 月，为 0.360 kWh/m<sup>3</sup>，月电单耗与月用电量的变化趋势相反，这是由于

规模效应引起的，夏季进水量大虽然会导致用电量的增加，但是在计算用电单耗时也分摊了工频设备，办公用电等固定电力消耗，从而降低了电单耗。

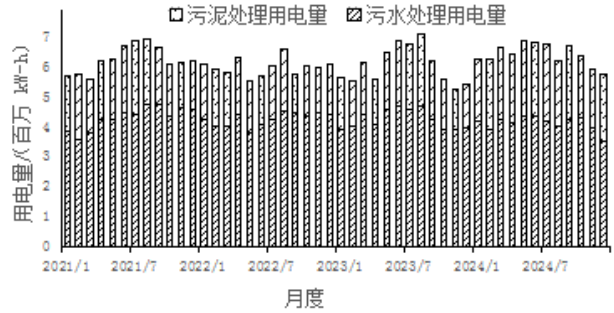


图 2 S 污水处理厂月电能消耗情况

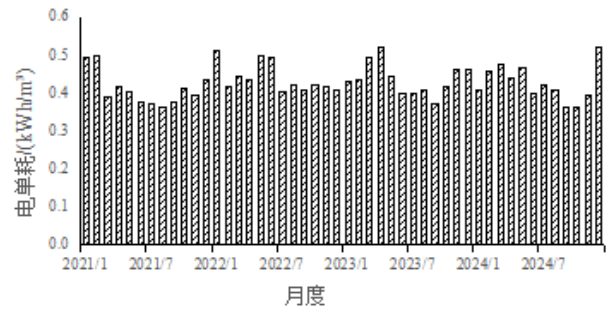


图 3 S 污水处理厂月电单耗情况

## 3 S 污水处理厂光伏安装情况

### 3.1 S 污水处理厂光伏安装规模

S 污水处理厂工程用地面积为 28.20ha，总平面布置包括两个个区域，分别为(1)40 万 m<sup>3</sup>/d 预处理区、生物处理区、提标改造工程新建 40 万 m<sup>3</sup>/d 深度处理区、出水区以及设计处理量 72tDs 的污泥处理一期工程（以下简称区域一）；(3)设计处理量 128tDs/d 污泥处理二期工程（以下简称区域二）。区域一的一体化生反池、调蓄池、高效沉淀池、反硝化深床滤池、加氯接触池占地面积大，周边遮挡物少，可安装光伏设施的面积约 9000 m<sup>2</sup>；区域二可以在污泥焚烧车间及污泥脱水机房等车间设置屋顶光伏装置，安装总面积约为 1500 m<sup>2</sup>。最终安装光伏板安装规模，详见表 1：

表 1 S 污水处理厂光伏安装容量

序号	安装位置	面积 (m <sup>2</sup> )	安装容量 (KWp)
1	一体化生反池	54460	9230
2	高效沉淀池	4500	820
3	反硝化深床滤池	5700	693
4	加氯接触池	5700	790
5	二期污泥焚烧车间	11800	390
6	二期机修车间	460	49
7	二期脱水机房	800	49
8	总计	83420	12021

### 3.2 光伏发电量估算

光伏发电系统的发电量计算与当地的太阳辐射量、光伏发电系统的总效率、光伏方阵的安装倾角等因素有关。上海位于北亚热带东亚季风盛行地区，四季分明，冬夏长、春秋短，雨量充沛，年平均日照时间 1800h 左右，属于四类资源区。其中，夏季日照时数达 600-700 小时，冬季约 360-465 小时。年平均太阳总辐射量 4200-5000MJ/m<sup>2</sup>，日辐射量 3.2-3.8kWh/m<sup>2</sup>。根据气象观测站所提供的 2010 年 -2020 年的太阳辐射资料数据分析，S 污水处理厂附近的太阳能月资源在 200MJ/m<sup>2</sup>-530MJ/m<sup>2</sup> 之间变化，其中月总辐射从 4 月开始急剧增加，7 月为一年峰值，9 月迅速下降，冬季 12 月达最小值，4 ~ 9 月实测总辐射日均能够超过 400MJ/m<sup>2</sup>，7 月峰值在 530MJ/m<sup>2</sup> 左右。近 10 年间太阳辐射分布年际变化比较稳定，其数值在区间在 4000 ~ 4500MJ/m<sup>2</sup> 之间。月日照时数在冬季 11 月 -2 月达最小值。5 ~ 9 月月日照时数均在 150h 以上，8 月为 241h，是全年月日照时数最长的月份。

根据光伏发电系统的构成以及光伏组件的光电转换特性，电站的发电量取决于太阳总辐射量及逆变器的转换效率，同时又受到多种因素影响，故：光伏发电上网电量可按公式 1-2 计算：

$$E_p = H_A \times \frac{PAZ}{E_s} \times K \quad 1$$

式中： $H_A$ ：水平面太阳能总辐照量（kWh/m<sup>2</sup>，峰值小时数）； $E_p$ ：上网发电量（kWh）； $E_s$ ：标准状态下的日照强度，等于 1kW/m<sup>2</sup>； $PAZ$ ：光伏系统的安装容量（kWp）； $K$ ：为综合效率系数。

$$K = K1 \times K2 \times K3 \times K4 \times K5 \times K6 \times K7 \times K8 \times K9 \quad 2$$

式中： $K1$ ：组件类型修正系数，取值为 1； $K2$ ：光伏方阵的倾角和方位角修正系数，取值为 0.999； $K3$ ：光伏发电系统可用率，取值为 0.99； $K4$ ：光照利用率，取值为 0.99； $K5$ ：逆变器效率，取值为 0.99； $K6$ ：集电线路和升压变压器损耗修正系数，取值为 0.97； $K7$ ：光伏组件表面污染修正系数，取值为 0.98； $K8$ ：光伏组件转换效率修正系数，取值为 0.88； $K9$ ：双面双玻组件的转换效率修正系数，取值为 1.03。

综合以上数据，S 污水处理厂设计光伏安装容量 12.02MWp，综合效率系数为 0.82，年平均发电量约为 1226.32 万 kWh，年平均利用小时数为 1020.07 h。其中区域一的光伏年发电量为 1176.45 万 kWh，区域二的光伏年发电量为 49.87 万 kWh。

## 4 绿电替代情况分析

### 4.1 光伏在 S 污水处理厂的应用分析

由于区域一和区域二分别独立接入市电，区域一和区域二各自拥有独立的市电接入点和配电系统，分布式光伏发电系统采用“自发自用”方式，其发出的电仅限定在同一计量点范围内消纳，无法跨计量点传输，因而需要对两个区域

的绿电替代情况分别进行分析。

根据 S 污水处理厂的用电量数据，区域一的小时用电量均值约为 5867.32 kWh，区域二的小时用电量均值约为 2600.53 kWh。根据上海年均日照小时数估算区域一和区域二实际的小时发电量，区域一的光伏发电量日均值为 32231.51 kWh，小时发电量约为 6536 kWh；区域二的光伏发电量日均值为 1366.3014 kWh，小时发电量约为 277kWh。由此可见，光伏发电系统在有光照的有效时段内的发电量可以覆盖区域一的用电负荷，甚至还存在 10.23% 的弃光现象。对于区域二，光伏发电量很小，仅能在有光照的有效时段覆盖 10.65% 的用电需求。主要是因为污水处理区的可安装光伏设施面积是污泥处理区的 6 倍，且池顶障碍物小，光伏组件可铺满整个池顶。而污泥处理区的仅能在车间建筑物顶部设置屋顶光伏，屋顶有大量面积被排气管道等设施占据，有效利用面积远远小于污水处理区。

### 4.2 绿电替代效益

光伏发电系统的年均碳排放减少量和碳排放强度减少量可根据《上海城镇污水处理厂温室气体排放核算指南》并结合《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》中推荐的排放因子法进行核算。计算方法如式 3 所示：

$$M_{CO_2-电} = M_{电} \times EF_{电} \quad 3$$

式中： $M_{CO_2-电}$ 为污水污泥处理过程中单位时间段或单位计量基准使用的电能的产生，kgCO<sub>2</sub>； $M_{电}$ 为污水污泥处理过程中单位时间段或单位计量基准使用的电能 kWh； $EF_{电}$ 为污水污泥处理过程中使用的电的排放因子，上海地区电网平均碳排放因子为 0.42 kgCO<sub>2eq</sub>/kWh。

根据 S 污水处理厂光伏设计年均发电量 1226.32 万 kWh，实际可用于替代的绿电量为 1105.99 万 kWh，占污水处理过程用电量的 29.17%，总用电量的 15%。年均碳排放减少量为 4645.16 tCO<sub>2eq</sub>/年，可实现 5% 的总碳排放量的减少。在 25 年的运行周期内，按照相同的碳排放因子计算，25 年的总碳排放减少量为 116128.95 tCO<sub>2eq</sub>/年。

光伏发电系统运营期内 S 污水处理厂按日均处理水量 29 万 m<sup>3</sup> 计算，则光伏发电系统的引入将实现 0.104 kWh/m<sup>3</sup> 的绿电替代，碳排放强度的可减少 0.044 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>3</sup>。

## 5 讨论

本研究以上海某污水处理厂为例，探讨了光伏发电系统在污水处理过程中的减碳效益。研究表明，在 12.02 MWp 光伏系统的支持下，该污水处理厂的年碳排放量可以减少 4645.16 吨 CO<sub>2eq</sub>，覆盖了污水处理过程中 29.17% 的用电量。这表明，“光伏+污水厂”模式能够有效降低污水处理厂的碳足迹，并有助于实现国家“双碳”目标。然而，光伏发电系统的应用也面临一些挑战。首先，尽管区域一的光伏系统能够在有光照的有效时段内完全覆盖其用电负荷，甚至存在 10.23% 的弃光现象，但区域二由于安装面积受限，

只能满足 10.65% 的用电需求。这说明，在单独污泥处理系统中难以通过光伏发电实现碳中和的目标。此外，在污水处理系统中光伏发电可以满足有效光照时段内的用电需求，甚至还有富裕，但上海按电价区属于 II 类资源区，对应的光伏标杆电价为 0.95 元 / kWh，该价格远高于平电 0.6555 元 / kWh 和谷电 0.3675 元 / kWh 的电价，因而加装储能装置实现光伏发电的全量利用在经济上并不可行，所以在设计和实施光伏发电系统时，需要在充分考虑场地条件和空间布局，以最大化利用可安装面积的同时，综合考量现场的实际用电情况，合理预估发电量、容量分配和节能减排效果。

本研究采用的碳排放因子为 0.42 kgCO<sub>2eq</sub>/kWh，基于此计算得出的碳减排量为 4645.16 tCO<sub>2eq</sub>/年。这一结果为污水处理行业提供了具体的参考数据，但不同地区的电网结构、能源构成等因素可能导致碳排放因子有所差异，从而影响最终的减碳评估结果。因此，未来的研究应进一步细化各地的碳排放因子，以便更准确地评估减碳效益。

## 6 结论

本研究通过分析上海某污水处理厂的电耗情况及光伏发电系统的实际应用效果，揭示了光伏发电在污水处理领域的显著减碳潜力。结果显示，采用 12.02 MWp 的光伏系统后，该污水处理厂每年可减少碳排放 4645.16 吨 CO<sub>2eq</sub>，占总碳排放量的约 5%，且能覆盖污水处理过程中近三成的用电需求。这一发现不仅验证了“光伏+污水厂”模式的可行性，也为其他污水处理厂提供了低碳转型的技术路径参考。

值得注意的是，尽管该污水处理厂在引入光伏发电系统后取得了显著的减碳成效，但仍存在一定的局限性。例如，受场地限制，部分区域无法充分利用太阳能资源，导致绿电替代比例较低。针对这些问题，建议未来可通过优化空

间布局，结合其他可再生能源技术（如风能或生物质能），构建多能互补的能源供应体系，以确保全年稳定的清洁能源供给。

综上所述，随着全球对气候变化问题的关注度不断提高，污水处理行业作为能耗大户，亟需采取有效的节能减排措施。“光伏+污水厂”模式作为一种可行的解决方案，不仅能有效减少温室气体排放，还有助于提升污水处理厂的自给率和环境友好性。未来，随着技术进步和政策支持的不断加强，预计会有更多的污水处理厂采用此类绿色能源方案，共同推动行业的可持续发展。

## 参考文献

- [1] Vivas M A U, Segui-Amortegui L, Guerrero-Garcia-Rojas H. Analysis of greenhouse gas production at the El Prat del Llobregat wastewater treatment plant, Spain: the decarbonization challenge[J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2025:18.
- [2] 中国城镇供水排水协会. 城镇排水统计年鉴-二〇一五年[M]. [中国城镇供水排水协会], 2015.
- [3] 肖蓝. 上海市各污水处理厂运营能耗研究[J]. 给水排水, 2020,56(S1):558-561.
- [4] 吴娇. 上海某污水处理厂碳排放分析及减碳路径探索[J]. 净水技术, 2023,42(S1):135-140.
- [5] 孙波, 郭大力, 刘运北. 北京良乡卫星城污水处理厂光电建筑示范[J]. 建设科技, 2012(5):66-68.
- [6] Nakkasunchi S, Hewitt N J, Zoppi C, et al. A review of energy optimization modelling tools for the decarbonisation of wastewater treatment plants[J]. JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2021,279:20.