



基于城市污水 AB 法处理的碳减排量测算分析

师旭军, 马小蕾, 李 建, 王海梅, 雷克刚

(中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730030)

摘要:在“双碳”战略背景下, 污水处理厂的资源高效利用与碳减排以已成为亟待解决的关键问题。文章基于 AB 法工艺, 采用污泥厌氧消化与热电联产相结合的方法, 以西北地区规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的污水处理厂为研究对象, 以《农田灌溉水质标准》为出水再生利用标准, 详细测算其碳排放量和碳减排量。研究表明: 通过污水资源化利用, 可有效减少约 $3.5 \times 10^4 \text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{d}$ 的碳排放, 结合污泥沼气发电、锅炉供热和土地利用, 该厂的碳减排率可达到 42.28%, 此外, 通过热电联产将沼气用于发电和供暖, 可将污水处理厂的能源中和率提升至 37.72%, 最后通过核算结果分析, 提出了污水处理厂碳减排的关键措施。

关键词:碳减排; 吸附-生物降解; 污水资源化; 热电联产; 能源中和

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)04-0074-07

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.04.052

Research on carbon reduction in wastewater treatment plants based on AB method under the background of carbon neutrality

SHI Xujun, MA Xiaolei, LI Jian, WANG Haimei, LEI Kegang

(Cscec aecom consultants Co., Ltd., Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Under the background of the “dual - carbon” strategy, the efficient resource utilization and carbon emission reduction in wastewater treatment plants have become crucial issues that need to be addressed urgently. This study is based on the AB process, adopting a method that combines sludge anaerobic digestion with combined heat and power generation. Taking a wastewater treatment plant with a scale of $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ in the northwest region of China as the research object, and using the *quality standard for farmland irrigation water* as the standard for reclaimed water utilization, the carbon emissions and carbon emission reduction of the plant are calculated in detail. The research shows that through the utilization of wastewater resources, carbon emissions can be effectively reduced by approximately $3.5 \times 10^4 \text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{d}$. Combining sludge biogas power generation, boiler heating, and land use, the carbon emission reduction rate of this plant can reach 42.28%. In addition, by using biogas for power generation and heating through combined heat and power generation, the energy neutralization rate of the wastewater treatment plant can be increased to 37.72%. Finally, based on the analysis of the accounting results, key measures for carbon emission reduction in wastewater treatment plants were proposed.

Key words: carbon reduction; adsorption-biodegradation; sewage resource utilization; cogeneration of heat and power; energy neutralization

污水处理厂进水中的有机物, 在处理过程中, 通过生化反应会产生 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等主要温

收稿日期: 2024-03-12

基金项目: 甘肃省企业技术创新资助项目(GXHRC20240328-3); 甘肃省科技计划资助项目(22CX8JA093); 中国市政工程西北设计研究院有限公司科研课题(XBSZKY2204)。

作者简介: 师旭军(1994—), 男, 工程师, 从事水污染防治与资源化研究。

室气体,污水的提升、输送和曝气风机在水厂运行过程中也会消耗电能,产生间接的碳排放^[1]。截至2020年,全国现有规模型城镇污水处理厂已超过4140座,处理总规模达1.78亿m³/d,耗电量约为184亿kW·h,其能耗在全国总能耗中的占比为0.3%~1.0%^[2],且在社会总能耗中的占比逐年上升^[3]。

根据统计数据,超90%的污水处理厂采用生物处理工艺^[4-5],为满足稳定达标排放目的,外加化学药剂被广泛使用,超6%的污水处理厂采用外加碳源,大约消耗各种化学品约10×10⁴t/a^[6]。某种程度污水处理过程实际是一种以能耗换水质的“灰色”手段^[7],另一方面,进厂水中的有机污染物大约含1.5~1.9kW·h/m³有机化学能没有被有效利用^[8]。

本文基于AB法工艺,基于污水处理行业“碳中和”的目标,结合污泥厌氧消化+热电联产工艺路线,以西北某市污水处理厂为例,详细测算其碳排放量以及碳减排量,分析节能降耗、低碳运行及能源自给等方面的运行效果,旨在为我国污水处理厂低碳处理新模式的发展提供借鉴。

1 工艺流程概述

1.1 污水处理流程

西北某市污水处理厂设计流量为8333m³/h,设计规模为20万m³/d,流程如图1所示。以污水资源农灌为目的,生物处理工艺采用AB法,A段的剩余污泥量占总污泥量的81.7%^[9]。改造的B段包括生物池和二沉池,因需维持生物池缺氧/好氧环境,对B段曝气池实施分区曝气,约占全厂总电

能的44.9%,剩余污泥量占总污泥的18.3%,与A段剩余污泥一起输送至后续污泥处理系统,进行厌氧消化。

1.2 污泥处理流程

如图2,污泥处理前的含水率为98.0%~99.0%,中沉淀池与二沉淀池产生的剩余污泥经浓缩后导入厌氧消化池,通过浓缩后污泥含水率降低为95.0%~96.0%,在35℃中温条件下,污泥经厌氧消化产生生物气体是整个厂区能量回收的核心内容^[10],最后,对满足《农用污泥污染物控制标准》(GB4284—2018)的污泥,最终运至附近农田及林场肥料化处置利用。

2 污水处理碳排放

2.1 碳排放概述

污水生物处理最终产物为CO₂、CH₄和N₂O是该过程的副产物,CO₂分为直接与间接排放,直接碳排放主要由生物处理过程产生,间接碳排放通常包括能耗和物耗产生的碳排放。对于碳排放测算,主要是基于《2006国家温室气体清单指南》(IPCC)和《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》^[10]。有机物被微生物摄取后,部分被氧化为CO₂,部分被同化为细胞物质,还可能发生内源呼吸产生CO₂,均属于生源CO₂不应考虑“碳汇”作用,一般不计入碳排放核算,为增强微生物的活力,人为投加碳源物质产生的碳排放属于化石源CO₂,需要进行详细核算^[11-13]。因此,碳排放主要考虑外加碳源转化和能耗产生的CO₂排放,以及污水处理厂运行过程产生的CH₄、N₂O排放^[14,15]。

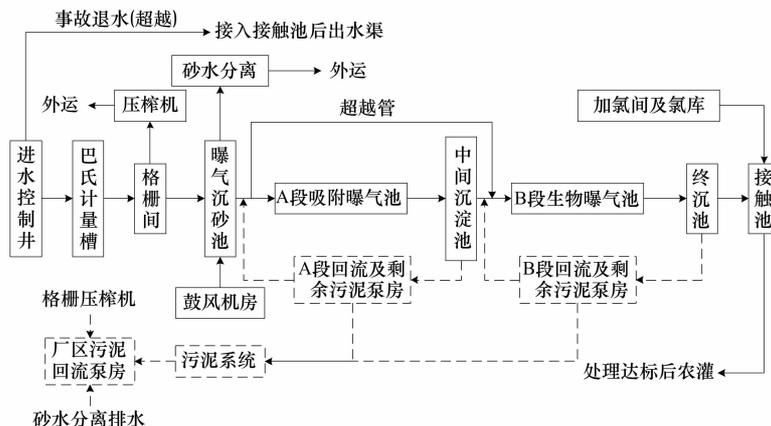


图1 污水处理工艺流程

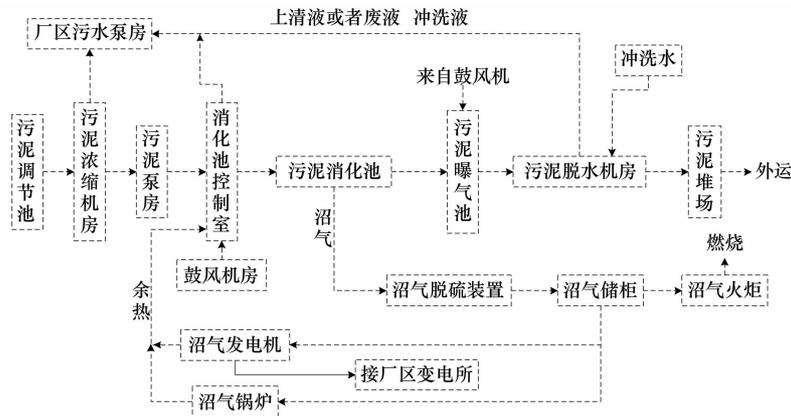


图 2 污泥处理工艺流程

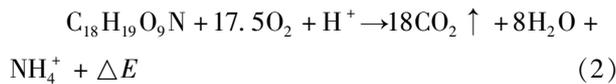
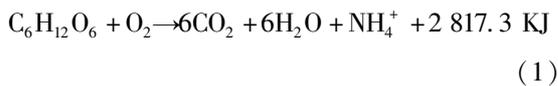
2.2 污水处理碳排放测算

2.2.1 CO₂ 排放

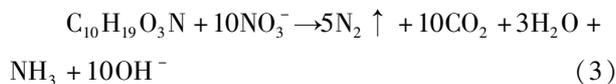
(1) 直接 CO₂ 排放

生活污水中的有机物主要包括碳水化合物 (C₁₀H₁₈O₉)、脂肪 (C₈H₆O₂) 和蛋白质 (C₁₄H₁₂O₇N₂) 三大类, 且三者的占比相当, CO₂ 的产生途径主要有^[16]:

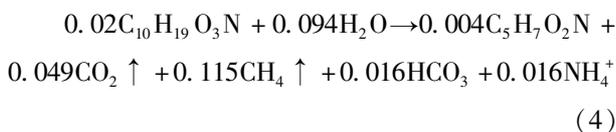
好氧过程反应式如下:



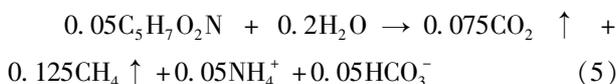
缺氧阶段, 含氮有机物反硝化反应也会释放 CO₂:



厌氧阶段反应式如下:



内源代谢反应:



在存在外加碳源的情况下, 核算化石源 CO₂ 的排放量, 应使用污水中化石碳比例与总 CO₂ 产生量的乘积, 计算公式如下:

$$\text{CES}_{\text{CO}_2-\text{ww}} = \text{MFCF} \cdot \left\{ \left[1.1 (B_{\text{in}} + B_{\text{ex}} - B_{\text{eff}}) \times \left(1.47 - 1.42 \times \frac{0.67}{1 + B_{\text{ex}} \cdot \text{SRT}} \right) + (1.947\text{HRT} \times \text{MLVSS} \cdot \right. \right.$$

$$\left. K_d \right) - 4.49 \times \left[(TKN_{\text{in}} - TKN_{\text{eff}}) \right] - B_{\text{in}} + B_{\text{ex}} - B_{\text{eff}} \times \left. \left(\frac{0.67}{1 + K_d \cdot \text{SRT}} \right) \times 0.124 \right\} \times 10^{-3} \quad (6)$$

$$\text{MFCF} = \left(\frac{\text{FCF} \cdot B_{\text{in}} + B_{\text{ex}}}{B_{\text{in}} + B_{\text{ex}}} \right) \quad (7)$$

$$k_d = 0.05 \times 1.04^{T_b - 20} \quad (8)$$

式中: $\text{CES}_{\text{CO}_2-\text{ww}}$ 为污水处理化石源 CO₂ 排放强度, kgCO_{2-eq}/m³; MFCF 为化石源 CO₂ 排放比例, %; 1.1 为 BOD₅ 矿化产生 CO₂ 产量; B_{in} 为污水处理厂平均进水 BOD₅ 浓度, mgBOD₅/L; B_{ex} 为运行过程中人为投加的额外碳源, mgBOD₅/L; B_{eff} 为污水处理厂平均出水 BOD₅ 浓度, mgBOD₅/L; 1.47 为实际 BOD₅ 浓度与检测 BOD₅ 浓度比; 1.42 为微生物细胞 BOD₅ 当量, kg BOD₅/kg MIVSS; 0.67 为绝对产率系数, kg MLVSS/kgBOD₅; K_d 为衰减系数, d⁻¹; SRT 为生物固体平均停留时间, d; 1.947 为污泥内源呼吸 CO₂ 产率, kgCO_{2-eq}/kg MLVSS; HRT 为生物反应池水力停留时间, d; MLVSS 为生物池混合液挥发性悬浮固体平均浓度, mg MIVSS/L; 4.49 为单位质量氨氮硝化固定的 CO₂ 质量, kgCO_{2-eq}/kgNH₄⁺-N; TKN_{in} 为污水处理厂平均进水总凯氏氮浓度, mg N/L; TKN_{eff} 为污水处理厂平均出水总凯氏氮浓度, mgN/L; 0.124 为微生物 (C₅H₇O₂N) 体内含 N 质量比; FCF 为污水处理厂进水中化石源有机物比例, %; T_b 为水温, °C。

(2) 间接 CO₂ 排放

间接 CO₂ 的排放主要包括化石燃料、电力消耗、材料消耗及运输产生的碳排放^[10]。化石燃料直接碳排放主要包括污水处理厂部分机械设备运

行中消耗汽油、柴油等化石燃料产生的直接碳排放,由于本项目基本不存在此类机械设备,因此不再核算化石燃料直接碳排放。电力消耗碳排放计算公式:

$$CES_d = (E_d \cdot EF_d) / Q \quad (9)$$

式中: CES_d 为运行维护消耗购入电力产生的碳排放强度, $\text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$; E_d 为评价年内运行维护总耗电量, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{a}$; EF_d 为该地区电力排放因子, $\text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{kW} \cdot \text{h}$; Q 为评价年内总处理水量, m^3/a 。

材料消耗碳排放计算公式:

$$CES_{cl} = \sum_{(i=1)}^n (M_{cl,i} \cdot EF_{cl,i} / Q_{in}) \quad (10)$$

式中: CES_{cl} 为水系统运行中所消耗的药剂、材料等产生的间接碳排放强度, $\text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$; $M_{cl,i}$ 为评价年内第 i 种药剂总消耗量, kg/a ; $EF_{cl,i}$ 为第 i 种药剂的排放因子, $\text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{kg}$; n 为药剂总计; Q_{in} 为评价年内总处理水量, m^3/a 。

运输过程碳排放计算公式:

$$CES_{ys} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l (M_{ys,i,j} \cdot L_{ys,i,j} \cdot EF_{ys,i}) / Q_{in} \quad (11)$$

式中: CES_{ys} 为因运输材料使用所产生的碳排放强度, $\text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$; $M_{ys,i,j}$ 为评价年内第 i 次运输中, 使用第 j 种方式的运输材料总量, t/a ; $L_{ys,i,j}$ 为评价年内第 i 次运输中, 使用第 j 种方式的运输距离, km ; $EF_{ys,i}$ 为第 j 种运输方式排放因子, $\text{kgCO}_2\text{-eq}/(\text{t} \cdot \text{km})$; n 为评价年内总运输次数; l 为第 i 次运输中, 总计采用了 1 种运输方式。

2.2.2 N_2O 排放

N_2O 通常是硝化反应的副产物, 主要受处理工艺类型、DO 浓度、C/N 等的影响^[17~19], 另一方面, 低温、高盐度、低泥龄、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 高浓度及有毒化合物也会对间接导致 N_2O 的增加^[20~21]。根据 IPCC 指南及现有文献的研究成果, 结合污水处理厂实际调研分析, 一般可采用系数法进行计算:

$$CES_{\text{N}_2\text{O}-\text{ww}} = (TN_{in} \cdot EF_{\text{N}_2\text{O}-\text{ww}} \times \frac{22}{14} \times 10^{-3} - M_{\text{N}_2\text{O}-\text{T}}) \times 265 \quad (12)$$

式中: $CES_{\text{N}_2\text{O}-\text{ww}}$ 为污水处理 N_2O 排放强度, $\text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$; TN_{in} 为污水处理厂平均进水总氮浓度, mgN/L ; $EF_{\text{N}_2\text{O}-\text{ww}}$ 为生物处理污水过程中 N_2O 排放因子, $\text{kgN}_2\text{O} - \text{N}/\text{kgN}$; $M_{\text{N}_2\text{O}-\text{T}}$ 为回收或处理去除的 N_2O 气体量, $\text{kgN}_2\text{O}/\text{m}^3$ 。

2.2.3 CH_4 排放

CH_4 主要是在厌氧反应中的产甲烷阶段产生, 厌氧环境和高浓度有机物是产甲烷细菌发生作用的必要条件, 从现有设计运行水平来看, 污水处理全流程各单元均存在形成厌氧环境的可能, 但由于生物处理系统处于不断流动循环状态, 处理过程很难出现适合产甲烷菌作用的环境条件。AB 法工艺难以满足产甲烷条件, 故在污水生物处理部分不在核算 CH_4 的排放。

2.3 污泥处理碳排放测算

2.3.1 污泥浓缩和脱水

污泥在处理处置过程中, 浓缩、脱水等的能耗(电耗)会间接产生 CO_2 排放, 不同机械处理的比能耗统计如表 1 所示, 计算公式参见式(9)。污泥脱水絮凝剂为 PAC, 并在消化池投加 $\text{Fe}(\text{OH})_2$, 计算公式参见式(10), 药剂运输过程产生的碳排放量计算参见式(11)。

表 1 不同机械处理的比能耗统计

处理方法	污泥类型	污泥含固率/%	比能耗/ $(\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{tTS}^{-1})$
污泥浓缩	重力浓缩	初沉污泥	8~10
	重力浓缩	二次污泥	2~3
	离心浓缩	二次污泥	5~7
	重力带式浓缩	二次污泥	3~5
	鼓式浓缩机	二次污泥	4~8
污泥脱水	板框压滤机	二次污泥	—
	带式压滤机	二次污泥	—
	离心脱水机	二次污泥	—

2.3.2 污泥厌氧消化

现有针对实际污水处理过程的研究表明, 具有污泥消化工艺的污水处理厂, 其 CH_4 产生量要明显高于不设污泥消化的水厂, 污泥厌氧消化过程主要以产生 CH_4 为主, 此外, 还会产生约 30%~35% 的 CO_2 及少量 H_2S 与 NH_3 。

(1) 厌氧消化碳排放

1) CH_4 产生量计算:

$$CES_{\text{CH}_4-\text{ad}} = P \cdot [Q_{\text{SS}} \cdot (VSS_{\text{o-ad}} - VSS_{\text{e-ad}}) \cdot \frac{16F_{\text{CH}_4}}{44 - 28F_{\text{CH}_4}}] / Q_{in} \times 28 \quad (13)$$

式中: $CES_{\text{CH}_4-\text{ad}}$ 为厌氧消化化石源 CH_4 排放强度, $\text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$; P 为沼气泄露比例, %; Q_{SS} 为评价

年内污水处理厂产出剩余污泥总量, m^3/a ; $VSS_{0-\text{ad}}$ 为厌氧消化池进泥 VSS , kg/m^3 ; $VSS_{e-\text{ad}}$ 为厌氧消化池出泥 VSS , kg/m^3 ; F_{CH_4} 为沼气中 CH_4 所占体积比例, %。

2) CO_2 产生量计算:

$$CES_{\text{CO}_2-\text{ad}} = MFCF \cdot \left[(1 - P) \times \frac{44F_{\text{CH}_4}}{44 - 28F_{\text{CH}_4}} + \frac{44 - 44F_{\text{CH}_4}}{44 - 28F_{\text{CH}_4}} \right] \cdot Q_{\text{SS}} \cdot (VSS_{0-\text{ad}} - VSS_{e-\text{ad}}) / Q_{\text{in}} \quad (14)$$

式中: $CES_{\text{CO}_2-\text{ad}}$ 为厌氧消化化石源 CO_2 排放强度, $\text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$; $MFCF$ 为化石源 CO_2 排放比例, %; P 为沼气泄露比例, %; F_{CH_4} 为沼气中 CH_4 所占体积比例, %; Q_{SS} 为污水处理厂评价年内产出剩余污泥总量, m^3/a ; $VSS_{0-\text{ad}}$ 为厌氧消化池进泥 VSS , kg/m^3 ; $VSS_{e-\text{ad}}$ 为厌氧消化池出泥 VSS , kg/m^3 ; Q_{in} 为评价年内生活污水处理总量, m^3/a 。

(2) 污泥土地利用碳排放

污泥通过土地利用的方式处理, 由于存在厌氧环境, 有机物会产生厌氧反应, 生成 CH_4 , 一般可采用排放系数法核算, 此外, 污泥土地利用不仅是一种污泥处置方式, 也是一种污泥资源化路径, 含有氮磷的污泥可促进农作物的生长, 由此减少化肥的使用, 实现碳减排。污泥土地利用碳排放计算公式为:

$$CES_{\text{CH}_4-\text{la}} = EF_{\text{CH}_4-\text{la}} \cdot M_{\text{SS}} / Q_{\text{in}} \times 28 \quad (15)$$

式中: $CES_{\text{CH}_4-\text{la}}$ 为土地利用 CH_4 排放强度, $\text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$; $EF_{\text{CH}_4-\text{la}}$ 为污泥利用中 CH_4 的排放因子, kgCH_4/kg 干污泥; $EF_{\text{N}_2\text{O}-\text{la}}$ 为污泥利用中 N_2O 的排放因子, $\text{kgN}_2\text{O}/\text{kg}$ 干污泥; M_{SS} 为进行处理的污泥干重(以 SS 计), kg 干污泥/ a 。

3 结果与分析

3.1 碳排放测算结果

3.1.1 污水处理碳排放量测算

(1) 直接 CO_2 排放量

由于该污水处理厂出水以农灌资源化利用为出路, 保留了 N 、 P 等农作物生长所需元素, 因此, 未设置碳源投加设施, 因此直接 CO_2 排放量主要是由污水处理厂进水中化石源有机物产生, 产生量为 $939.20 \text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{d}$ 。

(2) 间接 CO_2 排放量

本项目污水处理过程投加药剂主要为消毒药剂 NaClO 和污泥脱水絮凝剂 PAC , 消毒采用的 NaClO , 加氯量约 $1000 \text{ kg}/\text{d}$ (有效氯含量 $5 \text{ mg}/\text{L}$), NaClO 的 CO_2 排放系数为 $1.06 \text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{kg}^{[23]}$, 絮凝剂 PAC 每天加药量为 267 kg , PAC 的 CO_2 排放系数为 $0.455 \text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{kg}$ 。有效地防止 H_2S 产生, 避免 H_2S 对管路及设备的腐蚀, 在进消化池的污泥中投加 $\text{Fe}(\text{OH})_2$, 投加量按 $5 \text{ kg}/\text{t}(\text{ds})$, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 的 CO_2 排放系数约为 $0.077 \text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{kg}$ 。由此测算各类药剂投加产生的间接 CO_2 排放量为 $1193.04 \text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{d}$, 药剂运输产生的间接 CO_2 排放量为 $532 \text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{d}$ 。

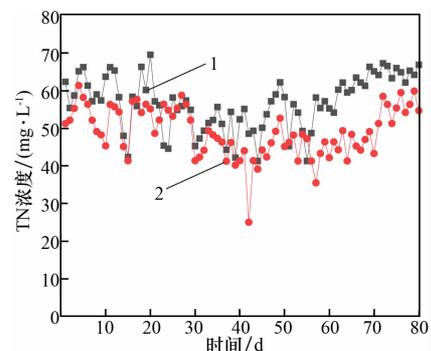
通过统计污水厂提升泵、鼓风机、脱水机等耗电设备(含污泥处理部分)的计算耗电量, 统计得耗电量为 $1738100 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{a}$, 根据式(9)和表2 测算电力消耗产生的间接 CO_2 排放量为 $54264 \text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{d}$ 。

表 2 中国地区电力排放因子

区域	排放因子/ $(\text{kgCO}_2\text{-eq} \cdot \text{kWh}^{-1})$
华北区域电网	0.941 9
东北区域电网	1.082 6
华东区域电网	0.792 1
华中区域电网	0.858 7
西北区域电网	0.892 2
南方区域电网	0.804 2

(3) N_2O 排放量测算

通过实测该污水处理厂 2016 年 11 月 26 日 ~ 2018 年 2 月 19 日的进、出水 TN 浓度, 共测 80 d, 统计出浓度变化, 如图 3 所示。测算得 N_2O 排放量为 $0.0387 \text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$, 根据水厂的设计规模折算后排放量为 $7742.24 \text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{d}$ 。



1—进水 TN ; 2—出水 TN 。

图 3 进出水 TN 浓度变化

3.1.2 污泥处理碳排放量测算

污泥经厌氧消化后,污泥量变为 $754 \text{ m}^3/\text{d}$,其中干固体量是 32.15 t/d (含水率 75%),体积为 $128.6 \text{ m}^3/\text{d}$,有机污泥干固体为 20.668 t/d ,其中挥发性固体减少量为 40%。根据式(13)和式(14)计算得 CO_2 排放量为 $93\,740.0 \text{ kgCO}_2\text{-eq/d}$, CH_4 排放量为 $949.4 \text{ kgCO}_2\text{-eq/d}$ 。根据式(15)计算得污泥土地利用碳排放 $2\,862.64 \text{ kgCO}_2\text{-eq/d}$ 。污泥处理间接碳排放量(电力消耗、药剂投加与运输)计算含在污水处理间接碳排放量计算中。

3.2 碳减排测算结果

污泥消化过程中产生的沼气量为 $516 \text{ m}^3/\text{h}$,低热值为 $5\,500 \sim 6\,000 \text{ kcal/m}^3$,是一种优质燃料,主要用于沼气发电和沼气锅炉,沼气发电采用两台沼气发电机,每台需用沼气量 $204 \text{ m}^3/\text{h}$,传输功率 511 kW ,主要用于夏季发电。冬季用于锅炉供暖,主要是采用两台沼气锅炉,单台需用沼气量 $235 \text{ m}^3/\text{h}$ 。污水厂通过污泥消化产生沼气用于非供暖季节发电,节约 $332.2 \text{ 万 kW}\cdot\text{h}$ 电耗,约半年的碳减排量为 $3\,312\,034 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$ 。通过污泥消化产生沼气用于寒冷季沼气锅炉,节约了天然气的消耗,测算出半年的碳减排量为 $2\,735\,208 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$ 。污泥中含有氮磷等作物生长所需元素,因此可被用于农田林场的肥料,从而减少化肥使用量,有利于碳减排,测算出碳减排量为 $351.5 \text{ kgCO}_2\text{-eq/d}$ 。

该污水厂通过尾水资源化,减少甚至避免了污水向水体中的排放,有利于减少碳排放。根据 IPCC 指南,地表水体 CH_4 、 N_2O 的排放因子是基于排入接纳水体的 BOD_5 、 TN 质量提出的,分别取 $0.06 \text{ kgCH}_4/\text{kgBOD}_5$ 、 $0.008 \text{ kgN}_2\text{O}/\text{kgTN}$,计算公式为 $J_{\text{水质提升}} = 0.012\,6 \times Q_{\text{in}} \times (B_{\text{in}} - B_{\text{eff}}) + 0.023\,8 \times Q_{\text{in}} \times (\text{TN}_{\text{in}} - \text{TN}_{\text{eff}})^{[22]}$,计算得污水资源化提升所产生的碳减排量为 $34\,840 \text{ kgCO}_2\text{-eq/d}$ 。污水处理过程保留的 N、P 可被农作物利用,可替代硝酸铵、过磷酸钙等化肥原料。化肥硝酸铵生产能耗为 1 GJ/t ,过磷酸钙生产能耗为 1.3 GJ/t ,出水 $\text{TP} = 4.5 \text{ mg/L}$, $\text{TN} = 55 \text{ mg/L}$,结合污泥细胞 N 含量为 0.12(其中 61% 可被植物利用),P 含量为 0.02(其中 70% 可被植物利用), NH_4NO_3 与 N 的分子质量比率为 2.8; $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 与 P 的分

子质量比率为 3.8, $EF_{\text{天然气}}$ 消耗的 CO_2 系数为 $51\,600 \text{ kg/TJ}$ 。计算污水农灌替代化肥的碳减排^[22],测算得碳减排量为 $119.56 \text{ kgCO}_2\text{-eq/d}$ 。

3.3 碳减排与能源中和分析

基于 AB 工艺的污水处理厂,其碳排放主要集中在药剂投加、电能消耗、污泥处理等产生的碳排放,通过尾水、污泥资源化利用、污泥消化、热电联产及土地利用,可有效减少碳排放量约为 $68\,596.5 \text{ kgCO}_2\text{-eq/d}$,能够实现 42.28% 的碳减排率。

“能源中和”一般是指污水处理厂利用内外回收或产生一种或多种清洁能源,直接或间接补充水厂能源消耗量,从而达到替代化石能源等以达到能源自给的目的^[23]。根据耗电量和产电量的分析,该污水处理厂电耗为 $0.238 \text{ kW}\cdot\text{h/t}$ 水,半年的电耗为 $8.806 \times 10^6 \text{ kW}\cdot\text{h}$,根据半年发电量,核算出该污水处理厂能源中和率(电能)为 37.72%,若沼气用于全年发电,能源中和率还将增加一倍。

4 结 论

(1) 通过以农田灌溉为主的污水资源化利用,避免了挤占水体环境容量,保留进水中的氮磷元素,有利于农作物的生长,降低化学肥料的使用量,可有效减少约 $3.5 \times 10^4 \text{ kgCO}_2\text{-eq/d}$ 的碳排放。

(2) 利用污泥消化和土地利用,将含有 N、P 元素的污泥用于农田施肥,并引入热电联产,通过将 A 段、B 段的剩余污泥厌氧消化,结合污泥利用、沼气发电与锅炉供热及污水资源化利用,碳减排率可达 42.28%,同时,可将能源中和率(电能)提高至 37.72%。与城市污水处理 A^2/O 、氧化沟、SBR 等工艺相比较,AB 法在处理过程中,能利用污泥厌氧消化产生的甲烷进行热电联产以实现能量的回收,通过回收能量的利用,AB 法能够显著减少外部能源的消耗,从而降低因能源消耗而产生的碳排放。

(3) 污水厂要实现碳中和运行,通常要有较多的有机质来实现在厌氧消化过程中的能量转化,我国污水中有机物浓度较低,难以形成足够剩余污泥量来满足污水处理碳中和运行目标,因此,污水处理工艺选择与研究时,非必要不实施污泥减量技术,同时寻求与厨余垃圾等市政有机固体

废弃物协同消化的机会,以增加沼气“产量”。在利用污水中的化学能发电和供暖之外,引入水源热泵也可实现污水处理的部分碳减排,此外,基于商业化光伏太阳能板的发电效率,可作为污水处理碳中和技术路线的重要补充。

参考文献:

- [1] 宋宝木,秦华鹏,马共强. 污水处理厂运行阶段碳排放动态变化分析:以深圳某污水处理厂为例[J]. 环境科学与技术,2015,38(10):204-209.
- [2] 沈耀良. 城市污水处理技术:走向低碳绿色[J]. 苏州科技大学学报(工程技术版),2021,34(3):1-16.
- [3] 常纪文,井媛媛,耿瑜,等. 推进市政污水处理行业低碳转型. 助力碳达峰、碳中和[J]. 中国环保产业,2021(6):9-17.
- [4] SHEIK A R, MULLER E E, WILMES P. A hundred years of activated sludge: time for a rethink[J]. *frontiers in microbiology*, 2014, 5(47):1-7.
- [5] NIU K, WU J, QI L, et al. Energy intensity of wastewater treatment plants and influencing factors in China[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 670(20):961-970.
- [6] 张维,颜秀勤,张悦,等. 我国城镇污水处理厂运行药耗分析[J]. 中国给水排水,2017,33(4):103-108.
- [7] 程良凤,张婧,颜康康. 污水处理过程中的“碳中和”技术[J]. 江西化工,2017(2):225-227.
- [8] 刘智晓. 未来污水处理能源自给新途径:碳源捕获及碳源改向[J]. 中国给水排水,2017,33(8):43-52.
- [9] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories, intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [10] 中国城镇供水排水协会. 城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2022.
- [11] SHAHABADI M B, YERUSHALMI L, HAGHIGHAT F. Estimation of greenhouse gas generation in wastewater treatment plants-model development and application [J]. *Chemosphere*, 2010, 78(9):1085-1092.
- [12] 谢淘,汪诚文. 污水处理厂温室气体排放评估[J]. 清华大学学报(自然科学版),2012,52(4):473-477.
- [13] 赵晨晨. 污水处理工艺生命周期环境影响分析与比较[D]. 大连:大连理工大学,2015.
- [14] SINGH P, KANSAL A. Energy and GHG accounting for wastewater infrastructure [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 128:499-507.
- [15] ZAWARTKA P, DOROTA B K, AGATA B. Model of carbon footprint assessment for the life cycle of the system of wastewater collection, transport and treatment[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1):1-21.
- [16] 徐志婧,张程,姚宸朕,等. 一种污水处理厂碳排放量化计算方法[P]. 陕西:CN108182344A, 2018-06-19.
- [17] 闫旭,韩云平,李琦路,等. 污水处理过程中温室气体产生研究进展[J]. 环境化学,2015,34(5):853-862.
- [18] GABARRO J, GONZALEZ-CARCAMO P, RUSCALLEDA M, et al. Anoxic phases are the main N₂O contributor in partial nitrification reactors treating high nitrogen loads with alternate aeration [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 163(4):92-99.
- [19] RODRIGUEZ-CABALLERO A, PIJUAN M. N₂O and NO emissions from a partial nitrification sequencing batch reactor: Exploring dynamics, sources and minimization mechanisms[J]. *Water Research*, 2013, 47(9):3131-3140.
- [20] YAN X, LI L, LIU J X. Characteristic of greenhouse gases emission in three full-scale wastewater treatment processes[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(2):256-263.
- [21] 闫旭,韩云平,刘俊新. A²O工艺中N₂O的产生与逸散特征[J]. 环境工程学报,2014,(2):592-598.
- [22] 张岳,葛铜岗,孙永利,等. 基于城镇污水处理全流程环节的碳排放模型研究[J]. 中国给水排水,2021, 37(9):65-74.
- [23] 郝晓地,张益宁,李季,等. 污水处理能源中和与碳中和案例分析[J]. 中国给水排水,2021,37(20):1-8.