

DOI:10.13205/j.hjgc.202206017

吴百苗,张一梅,栗帅,等. 基于 LCA 的污水处理方案碳中和综合影响评价[J]. 环境工程,2022,40(6):130-137.

基于 LCA 的污水处理方案碳中和综合影响评价

吴百苗¹ 张一梅^{1,2*} 栗 帅¹ 郭文瑾¹ 郭晓倩¹ 王森尧³ 梁 希² 耿学文^{4*}

(1. 华北电力大学 环境科学与工程学院,北京 102206; 2. 华北电力大学苏州研究院,江苏 苏州 215213;

3. 上海电力大学 电力工程学院,上海 201306; 4. 中国电力国际发展有限公司,北京 102206)

摘要:在“碳达峰,碳中和”双碳目标背景下,污水处理行业碳中和规划中尚缺乏对工艺设计方案的定量化综合影响评价。为此,基于全生命周期(LCA)框架,建立全生命周期碳足迹、环境、经济综合影响评价模型(LCA-CEE),并利用该模型对 2 种不同污泥处理工艺下污水处理厂(A 方案:污泥填埋;B 方案:污泥-厨余垃圾共消化)以 30 年为限的建设阶段、运行阶段、拆除阶段中能耗、物耗、污染排放等方面进行综合影响评价与对比分析。结果表明:B 方案利用共消化热电联产系统发电量高达 38.9 MW·h,碳中和率达到 133%,实现能源自给自足,经济效益较 A 方案提高 1.6 倍且环境影响显著减小。该 LCA-CEE 模型从全流程评价节能减排路径,为污水处理行业碳中和规划提供理论支撑。

关键词:污水处理;碳中和;碳足迹;共消化;综合评价模型

COMPREHENSIVE IMPACT ASSESSMENT ON CARBON NEUTRALIZATION OF WASTEWATER TREATMENT PLANTS BASED ON HYBRID LCA

WU Baimiao¹, ZHANG Yimei^{1,2*}, LI Shuai¹, GUO Wenjin¹, GUO Xiaoqian¹, WANG Senyao³, LIANG Xi², GENG Xuewen^{4*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Suzhou Research Institute of North China Electric Power University, Suzhou 215213, China; 3. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 201306, China; 4. China Power International Development Ltd, Beijing 102206, China)

Abstract: Under the background of China's carbon peak and carbon neutralization goals, there is a lack of quantitative comprehensive impact assessment on process design in carbon-neutral planning of the wastewater treatment industry. Therefore, based on the LCA framework, a comprehensive impact assessment model of carbon footprint, environment, and economy of the whole life cycle (LCA-CEE) was established. And the model was used to analyse the effects of two different sludge treatment processes in sewage treatment plants (A plant: sludge landfill; B plant: sludge-kitchen waste co-digestion). The comprehensive impact assessment and comparative analysis were conducted on energy consumption, material consumption and pollution discharge in the construction, operation and demolition stages within 30 years. The results showed that the power generation of cogeneration system in plant B reached 38.9 MW · h, realizing energy self-sufficiency and with a carbon neutralization rate up to 133%. Compared with plant A, the economic benefit was 1.6 times higher and the environmental impact was significantly reduced. The LCA-CEE model developed in this study evaluated the energy-saving and emission reduction path from the whole process, providing theoretical support for carbon neutrality planning of the sewage treatment industry.

Keywords: wastewater treatment; carbon neutralization; carbon footprint; co-digestion; comprehensive evaluation mode

收稿日期:2021-11-24

基金项目:国家自然科学基金(51878272)

第一作者:吴百苗(1998-),女,硕士研究生,主要研究方向为生命周期评价及碳中和技术研发与应用。2019527505@qq.com

* 通信作者:张一梅(1982-),女,教授,主要研究方向为环境风险评价和环境修复技术。zhangym@ncepu.edu.cn

耿学文(1982-),男,高级工程师。gengxuewen@126.com

0 引言

面对全球气温升高引发的一系列环境危机,中国提出了“2030碳达峰,2060碳中和”(30.60)目标,通过一定途径使活动中产生的温室气体相对净“零排放”,实现高质量可持续性发展^[1]。作为碳排放大国,“30.60”双碳目标从热议进入各行业实践阶段。污水处理是高耗能行业,开发利用污水中本身蕴含的能量(有机物、热能等)显得尤为重要^[2],并可为实现污水处理过程能源自给及碳中和运行提供基础参考。

污水处理厂碳中和的实质是污水处理所消耗能量和回收能量呈等式关系。为了减少温室气体排放与实现污水处理碳中和,已有研究提出技术方案:美国希博伊根污水处理厂^[3]利用高浓度食品废物与污泥共同厌氧消化技术产生的甲烷进行热电联产,同时采取节能措施,产电量与耗电量比值达到90%~115%,基本实现碳中和。荷兰实现碳中和的策略是将污水处理厂改造或新建成能量工厂,使污水处理厂与居民生活、工厂、资源回收、农业及大自然联结成一个整体,达到一种区域循环共生的状态^[4]。Vipin Singh等^[5]研究了印度通过热消化和厌氧消化从污水污泥中回收能量,解决降低能耗和减少污泥等问题。我国由于受行业技术水平低等因素限制,目前尚未建成真正意义上的“碳中和”污水厂,提出适合我国污水行业实现碳中和技术刻不容缓。

污水行业实现碳中和是一项系统且长期持续的工程,要从多个层面综合考量。污水处理厂影响评价大多数采用全生命周期分析(life cycle assessment, LCA)框架。LCA是对1个系统在其整个生命周期中使用的所有原材料与能源输入、输出的量化评估的有用工具,其目的广泛,如帮助识别产品生命周期中的关键部件,寻找改进系统环境策略的机会,或使来自不同领域的决策者能够进行战略规划和过程设计^[6]。污水处理厂大多数都集中在对运行与建设阶段进行环境影响评估。潘艺蓉等^[7]基于9座污水处理厂实际运行数据,运用LCA法模拟分析城镇污水处理厂经济与环境效益。郝晓地等^[8]通过LCA环境影响评价、LCA成本评价及LCA生态效益评价分别对地上、地下式污水处理厂进行综合影响评价。已有研究从不同角度对污水处理厂进行LCA评价,尚存在一些不足:大多数研究采用投入产出LCA法仅对污水处理厂运行阶段进行环境影响评价,或仅对某一污水处理厂碳足迹进行全方位综合影响评价^[9],未

把经济效益评价加入污水处理影响评价中,目前缺乏污水处理厂实现碳中和的全方位综合影响评价。

在此背景与先前的研究基础上,本研究基于LCA框架,建立了涵盖污水处理厂的碳足迹评价(carbon footprint assessment)、环境影响评价(environmental impact assessment)、经济评价(economic assessment)的全生命周期综合影响评价模型——碳足迹-环境-经济综合影响评价模型(life cycle carbon footprint-environmental-economic assessment),简称LCA-CEE模型,对污水处理厂的建设、运行、拆除阶段的碳足迹、环境效益、经济效益的各项指标进行综合影响评价,并应用LCA-CEE模型对比分析了2种污水处理工艺的综合影响,为工艺改进、能源资源合理利用、减少环境污染等提供理论支撑,并为污水处理厂实现碳中和提供理论依据。

1 研究方法

1.1 污水处理碳中和技术

污水处理行业实现碳中和主要技术途径为能源替代、节能减排及能量回收^[10]。能源替代包括光伏、生物质发电等。节能减排包括节能降耗与优化工艺,其技术转化率较低、成本较高。能量回收是指水源热泵与污泥回收利用,水源热泵是利用水中储存的太阳能资源作为冷、热源进行能量转换的技术,即将污水中低品位热能提升为高品位热能并加以利用;污泥回收利用是通过剩余污泥厌氧产能(CH_4)与热电联产等方式结合产电,即在去除过程中将污水所含有机能源“主动”转化为能源物质(CH_4)后加以利用,减少厂区对外部能源需求。郝晓地等^[11]研究表明,利用污水源热泵、剩余污泥和光伏发电技术的碳中和率分别为50%、53%和10.4%。但光伏发电技术发电不稳定,污水源热泵产生的冷、热源地域限制较大,不易实现。而剩余污泥中含有大量氮、磷、钾等营养元素,为厌氧微生物提供良好的反应环境,研究表明厌氧消化是减少环境负荷和经济负担的最适当处理方法^[12]。因此,剩余污泥厌氧消化技术在我国更具发展潜力。

由于进水COD负荷较低,仅对剩余污泥厌氧消化产生的能量(CH_4)进行回收利用难以实现碳中和。青岛污水处理厂^[13]利用污泥厌氧消化产沼气进入热电联产系统发电,仅可满足65%的厂区用电需求。郝晓地等^[14]提出了充分利用难以常规处理的巨量厨余垃圾、秸秆等有机碳源与剩余污泥高效共消化产生更多能量,进而最大程度地回收外部资源(污水、污

泥)蕴含的能量,不再依赖厂外发电厂供电,扮演自给自足的能源工厂角色。目前我国厨余垃圾处理量远低于其产生量,对环境自我修复能力造成了沉重负担,探讨适合我国国情的处置方法极具现实意义和经济社会价值。因此,可采用污泥与外加碳源(厨余垃圾)进入热电联产系统产电技术,实现污水处理行业碳中和。

城市污水污泥与厨余垃圾的特性决定了处理处置的困难性与资源化利用的光明前景。污水污泥含水率高,N、P含量高,C/N低,厨余垃圾有机质含量高,N、P含量低,两者具有协同效应。田雨晴^[15]的实验得出在热水解反应温度为170℃时,污泥与餐厨垃圾配比(以挥发性有机物VS计)为1:1的反应器累计产气量最多,比热水解污泥单基质厌氧消化(0.26 m³/kg VS)^[16]提高了14.46倍,其投料基质参数见表1,1 m³沼气可发电1.7 kW·h,产热2 kW·h^[17]。

表1 共发酵的投料基质参数^[18]

Table 1 Feeding substrate's parameters for co-fermentation

垃圾类型	投加量/t	含水率/%	TS/%	VS/%	碳水化合物/%	脂肪/%	蛋白质/%
餐厨垃圾	6.7	81.7	17.20	93.03	42.05	16.38	19.52
剩余污泥	8.8	99.0	0.84	69.10	—	—	—

1.2 LCA 方法

本研究基于LCA法对污水处理厂各个阶段进行分析,全面评估与污水处理厂相关的能源消耗、资源利用、碳足迹、环境负担和经济成本。生命周期评估方法遵循ISO14040的基本原理,被分为4个相互关联的阶段:目标与范围、清单分析、评价方法、结果分析。

1.2.1 目标与范围

本文物理边界范围以进水为起点,出水为终点,包括污泥处置过程。时间边界范围包括建设、运行、拆除3个阶段。建设阶段包括原材料(钢筋、钢材、混凝土)的开采、加工、运输,以及建设时期的能耗和施工废水、废料等。运行阶段包括污水/污泥处理与能源回收过程中的能源和药剂消耗,输出主要包括气体排放(CO₂、CH₄、N₂O)、固体废物与污泥的处理和运输以及能源回收产生的资源(电、热)^[19]。拆除阶段考虑到钢材回收、能源消耗与运输。系统由原材料和能源的输入与气体排放、固体废物和回收资源的输出组成,如图1所示。其中,CO₂和CH₄是导致全球变暖的主要气体,本文把污泥处理过程作为详细分析的主要阶段。

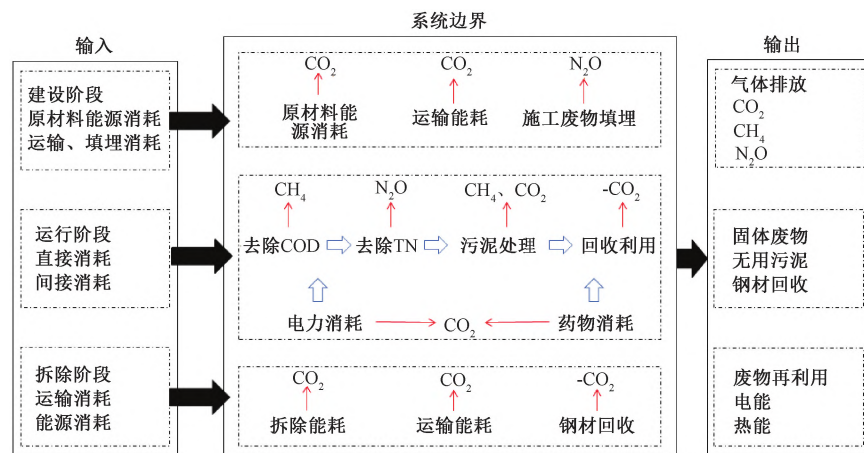


图1 LCA 评价系统边界

Figure 1 System framework for LCA

1.2.2 清单分析

清单中数据主要包括整个系统中物料和能量的输入与输出^[20]。清单分析的核心部分是数据收集。数据包括污水处理厂建设、运行和拆除过程中资源、能源的消耗情况,排放的废气废水及固体废物。建设阶段包括原材料采购至整个污水处理厂建成为止的所有活动,本阶段污染物排放来源于原材料运输与能

源利用。运行阶段的污水处理与污泥处理过程中均有直接与间接排放,直接排放是指去除COD、TN等工艺排放的温室气体,间接排放是指设备耗电量与化学品消耗量所产生的温室气体。拆除工作的材料和能源消耗粗略估算为处理设施建设阶段能耗的90%^[19]。

本研究选择我国江西省某典型污水处理厂(污

水处理方案A)作为研究案例,该厂区占地面积为 $1.7 \times 10^4 \text{ m}^2$,处理规模为 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用 A^2/O 处理工艺产出污泥 8.8 t/d ,出水水质达到国家排放标准;基于污水处理方案A,提出低碳污水处理工艺——方

案B,主要工艺流程如图2所示,服务年限均为30年,A方案的污泥处置方式是填埋,B方案的污泥处置方式是污泥与厨余垃圾厌氧共发酵进入热电联产系统发电。评价功能单位为 $3 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 废水。

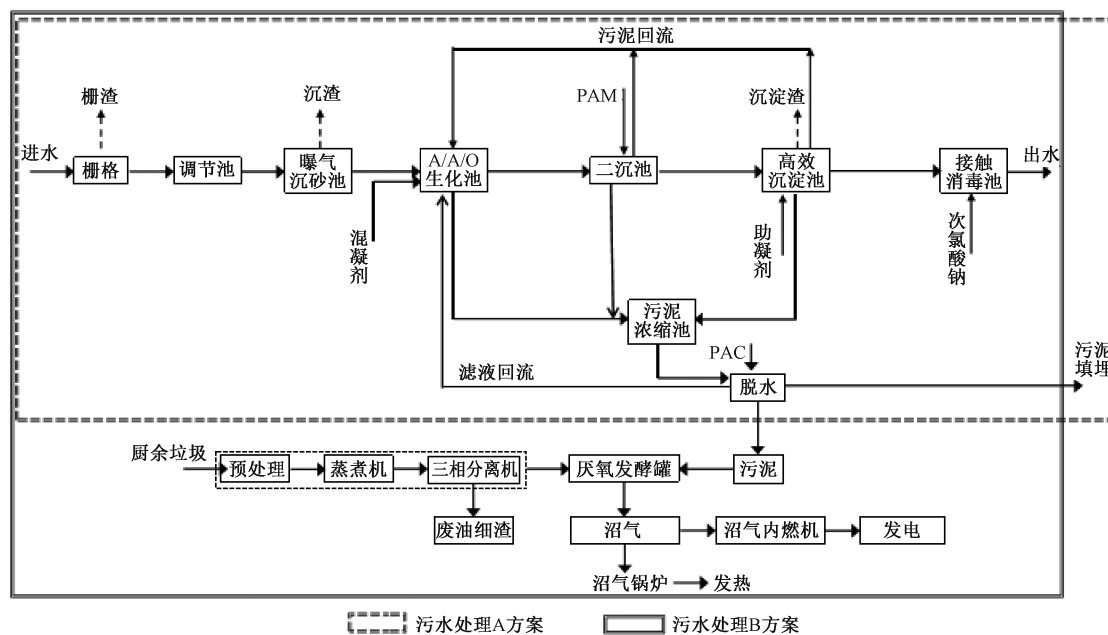


图2 污水处理方案A/B工艺流程

Figure 2 Process flow chart of scheme A and B of the sewage treatment plant

本文通过现场调研和查阅项目报告书,编制LCA清单(见附表1)。依据市场价取 1.5 元/t 的排污费收益,发酵罐单位体积投资 4175.1 元/m^3 ,储罐运行成本为 0.082 元/m^3 ^[18],餐厨垃圾单位收运成本为 50 元/t 。若设备使用年限为10年,则生命周期中需更新2次设备。设污水处理厂外购电的电价为 $0.7 \text{ 元/kW} \cdot \text{h}$,油耗为 5.85 元/kg ,餐厨垃圾处理政府补贴 150 元/t ,每吨餐厨垃圾中可提取 0.05 t 油脂,每吨油脂平均收入 3.24 万元/t ^[21]。

1.2.3 LCA-CEE综合影响评价模型

本研究根据清单分析的结果^[22],建立了LCA-CEE模型,如图3所示。从LCA角度确定碳足迹、环境、经济3大评价指标体系,对污水处理厂的建设、运行、拆除3阶段进行全生命周期评价。

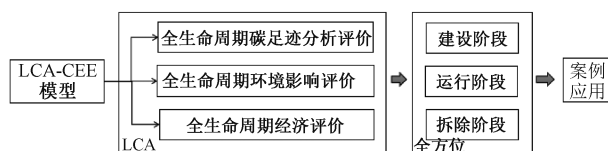


图3 污水处理LCA-CEE模型开发流程

Figure 3 Flow chart of LCA-CEE model of sewage treatment

1) 全生命周期碳足迹评价模型。

碳足迹是指在整个工作流程中产生的温室气体都有着不同的全球变暖潜值(GWP),统一转化为以 CO_2 当量表示^[23]。碳足迹分析是评估污水处理厂实现碳中和的新兴策略,从全球变暖对环境影响的程度来判断该工艺的合理性。污水处理厂全流程碳足迹分为2个方面:直接与间接碳排放。能源和材料供应链的背景来源于广泛使用的Ecoinvent 3.1数据库,利用IPCC排放因子法^[23]来计算。根据文献查阅,不同排放源的温室气体排放因子见表2,碳足迹核算模型见式(1)^[9]。

$$\text{LCA-C} = \sum_{j=1}^n A_j \times \text{EF}_j \times \text{GWP}_j \quad (1)$$

式中:LCA-C为全生命周期碳足迹(以 CO_2 当量计), $\text{kg CO}_2\text{-eq}$; A_j 为温室气体源 j 活动排放量, kg ; EF_j 为温室气体 j 排放因子; GWP_j 为温室气体 j 全球变暖潜值, j 为选定的温室气体, CH_4 、 N_2O 的全球变暖潜值分别为21、310^[24]; n 为所讨论温室气体种类数。

2) 全生命周期环境影响评价模型。

本文根据环境影响评价指标分类,计算出特征化

表 2 LCA 温室气体排放因子^[24]

Table 2 Emission factors of greenhouse gas in LCA ^[24]		
种类	温室气体来源 _j	排放因子 EF _j
污水处理	进水到排放产生的 CH ₄	0.25 kg/kg COD
	进水到排放产生的 N ₂ O	0.005 kg/kg N
药剂消耗	PAM	1.5 kg CO ₂ eq/kg
	PAC	1.6 kg CO ₂ eq/kg
	次氯酸钠	1.4 kg CO ₂ eq/kg
污泥处理	填埋产生的 N ₂ O	8.2 g/kg 干污泥
	填埋产生的 CH ₄	13.4 g/kg 干污泥
	厌氧发酵产生的 CH ₄	0.51 g/m ³
	厌氧发酵产生的 N ₂ O	0.0071 g/m ³
	沼气燃烧产生的 N ₂ O	0.004 g/kg
能源消耗	电能	0.81 kg CO ₂ -eq/(kW·h)

与标准化数值,根据其标准化结果得到环境综合影响^[25]。特征化将产品污染物的输出乘以特征化因子得到特征化结果,进而评估 LCA 中各阶段产生的污染物对环境造成的影响。标准化是依据基准信息对中间环境影响类别参数大小进行比较的过程,对各项环境指标的大小进行标准化评价^[26]。

本研究利用 Simapro 软件对污水处理厂运行 30 年产生的环境影响进行特征化与标准化分析,得到各个环境影响类别不同处理单元的贡献大小及其主要影响因素。在全生命周期环境影响评估中,清单分析的结果分配给评价指标,并根据特征因素对其潜在影响进行量化。利用 CML 2 baseline 2000 分析法进行标准化分析,对海洋生态毒性(MAETP)、大气酸化(AP)、非生物资源耗竭潜能(ADP)、淡水生态毒性(FAETP)、光化学毒性(PCO)、陆地生态系统(TETP)、全球变暖潜值(GWP)、人体毒性(HTP) 8 个子环境影响评价指标进行量化,见表 3。

表 3 LCA 环境影响评价指标

Table 3 Categories of environmental impact assessment indicator in LCA		
评价指标	环境影响主要物质	排放来源
ADP	煤、石油	消耗电能生产过程、物料运输过程
AP	SO ₂ 、NO _x	消耗电能生产过程
FAETR	淡水资源	污水处理过程
MAETP	苯、COD	消耗电能与药剂生产
TETP	苯、二氯苯	污水处理过程
PCO	碳氢化合物	污水处理过程
HTP	Cu、Hg、Cd、Zn 等	出水排放
GWP	甲烷、CO ₂	污水处理过程

3) 全生命周期经济评价模型。

经济活动超出环境资源的承受范围将会产生恶性循环,因此经济性评价非常必要,并可依照评价结果改善生产工艺。以往有研究针对污水处理厂经济

信息,利用几个参数来评估其经济性。本文在以往研究^[27]的基础上增加了参数,包括初始投资、设备更新、运行成本以及利益收入,见表 4。

表 4 LCA 经济指标

Table 4 Economic indicators in LCA	
经济指标	具体分析
初始投资	建设费、基本预备费、设备采购与安装费用
设备更新	针对设备的运行周期更换
运行成本	药剂费、维修费、人员费和其他费用
利益收入	来自产电与热以及政府补贴

本研究采用全生命周期经济影响评价法分析厂区的经济信息,全生命周期总利润=利益收入+净残值-(建设成本+运行成本),其模型公式见式(2)、(3)^[27]:

$$\text{LCA-E} = \left(\sum_{i=0}^T \frac{B+H}{(1+r)^i} + S \right) - \left[\sum_{k=1}^m C_k + \sum_{h=1}^n C_h \sum_{t_0=1}^{T_0} \left(\frac{1+f}{1+r} \right)^{t_0} + \sum_{i=0}^T \sum_{i=1}^p \frac{C_i}{(1+r)^i} \right] \quad (2)$$

$$r = (1+j) \times (1+f) - 1 \quad (3)$$

式中:LCA-E 为全生命周期经济效益,万元; C_k 为初始投资费用(包括安装费,取设备投资的 15%),万元; C_h 为设备更新费用,万元; C_i 为运行成本,万元; S 为净残值(取固定资产的 4%),万元; H 为回收能源利用所产生的经济效益,万元; B 为政府补贴,万元; f 为通货膨胀率(取 2.8%); r 为折现率; j 为利率(取 4.9%); T 为全生命周期,a; t 为运行年份,a; t_0 为设备更新时间,a; m 为设备总数,种; n 为最大更新设备数,种; k 为设备序号; p 为可运行设备总数,种。

2 评价结果与讨论

2.1 碳足迹评价

污水处理厂排放来源主要有处理过程中形成的直接排放以及能耗、药耗形成的间接排放。由表 5 可知:A 方案总排放量为 28300 kg CO₂-eq/d,其中,水处理阶段碳排放量占总碳排的 56%,污泥处理碳排放占 30%,电耗与药剂属于直接排放,占比分别为 8% 和 3%。运行阶段的污水处理过程在碳足迹中占比最大,这是由于进水到排放处理过程中产生的 CH₄ 与 N₂O 较多。污泥处理阶段碳排放占比大是因为采用传统污泥填埋工艺产生大量 CH₄ 与 N₂O。Liu 等^[28]研究中国太湖流域污泥处理方案的温室气体排放时,也发现填埋处置方案存在一定的甲烷泄漏风险。

表 5 污水处理各阶段的碳足迹

Table 5 Carbon footprint of sewage treatment stages

		kg CO ₂ -eq/d			
项目		A 方案		B 方案	
		碳足迹	占比	碳足迹	占比
建设阶段	原材料与资源消耗	7.63E2	3%	7.77E2	1%
	能源与运输	2.51E2	1%	2.53E2	—
	固废处理	6.95E-3	—	7.17E-3	—
运行阶段	污水处理	1.59E4	56%	1.59E4	30%
	污泥处理	8.40E3	30%	-3.14E4	-59%
	电量消耗	2.22E3	8%	4.44E3	8%
	药剂消耗	8.45E2	3%	8.45E2	2%
	固体废物	5.11	—	5.06	—
拆除阶段	拆除阶段	-2.12E1	—	-2.14E1	—
总碳排放量		2.83E4	1	-9.22E3	1

注:正值表示消极环境影响;负值表示积极环境影响;“—”表示数据小至可忽略;“占比”表示阶段碳排放占总碳排放的值

郝晓地^[29]研究表明,通过剩余污泥厌氧消化仅可回收污水厂 50% 能量,未能实现碳中和;而对剩余污泥与厨余垃圾稳定化和资源化的研究发现,两者共消化的产气潜力巨大。本文中 B 方案当剩余污泥 VS 与厨余垃圾 VS 比为 1:1 时反应器累计产气量最

多,应用到热电联产系统中替代化石燃料发电,总排放量为-9220 kg CO₂-eq/d,污水处理阶段碳排放量占总碳排放量的 30%,污泥处理碳排放占-59%,电耗与药剂分别占比 8% 和 2%,较 A 方案碳减排量为 37520 kg CO₂-eq/d,碳排放量低于碳减排量,碳中和率达到 133%^[30],并产生 9220 kg CO₂-eq/d 可交易碳汇。

2.2 环境影响评价

表 6 为对 2 个污水处理方案进行全生命周期特征化分析的结果。不同环境各污染物产生的影响程度不同,均有自身固有的特性,使得不同环境类别间无法比较,所以需要将特征化数值进行数字标准化,结果如图 4 所示。可看出:B 方案在 8 种类型的环境污染上均小于 A 方案;MAETP、AP、GWP 是 2 个污水处理方案的主要环境影响类型,TETP、ADP、HTP 与 FAETP 次之,PCO 结果最小,与其他影响类型相比可忽略,并且 B 方案的 HTP 指标对环境产生了积极影响。由此说明,能源回收利用对污水厂综合环境影响起到显著改善作用。

表 6 2 种污水处理方案 LCA 特征化分析

Table 6 LCA characteristic analysis of the two sewage treatment plants

环境评价 指标	单位	A 方案				B 方案			
		总计	建设阶段	运行阶段	拆除阶段	总计	建设阶段	运行阶段	拆除阶段
ADP	kg Sb eq	4.01 E5	5.78 E4	3.41 E5	2.18 E3	1.94 E5	5.93 E4	-4.25 E4	2.18 E3
AP	kg SO ₂ eq	2.91 E5	3.81 E4	2.52 E5	861	2.02 E4	3.91 E4	-1.97 E4	861
FAETP	kg 1,4-DB eq	5.2 E5	1.39 E5	3.92 E5	-9.72 E3	2.19 E5	1.42 E5	8.74 E4	-9.72 E3
MAETP	kg 1,4-DB eq	2.61 E9	3.61 E8	2.25 E9	7.19 E6	5.28 E8	3.71 E8	1.51 E8	7.16 E6
TETP	kg 1,4-DB eq	2.73 E5	7.02 E4	2.08 E5	-5.19 E3	8.88 E3	7.18 E4	-5.77 E4	-5.19 E3
PCO	kg C ₂ H ₄ eq	1.09 E4	2.77 E3	8.54 E3	-453	771	2.84 E3	-1.61 E3	-453
HTP	kg 1,4-DB eq	3.81 E7	8.55 E6	3.08 E7	-1.28 E6	-4.25 E6	8.76 E6	-1.17 E7	-1.28 E6
GWP	kg CO ₂ eq	9.62E7	1.14E7	8.5E7	-2.27E5	3.56E7	1.17E7	2.41E7	-2.27E5

注:正值表示消极环境影响,产生负面影响;负值则代表积极环境影响,产生正向影响

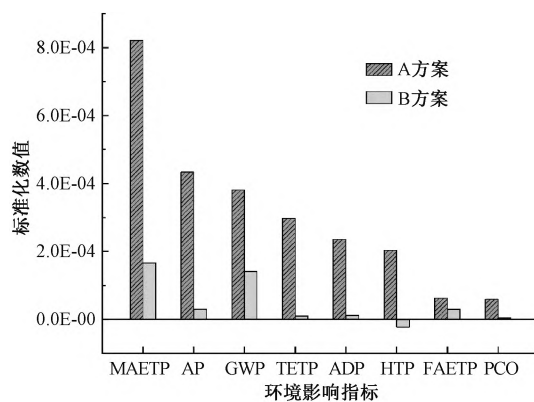


图 4 2 类污水处理方案 LCA 标准化对比分析

Figure 4 Normalized LCA comparative analysis of the two sewage treatment plants

图 5 为对 2 个污水处理方案的 3 个阶段进行 8

个影响指标的具体表示,本研究选取最大的 MAETP、AP 与 HTP 进行具体分析。

MAETP 影响值源于生产能源的相关过程中排放重金属及其他污染物。由图 5 可知:A 方案的 MAETP 影响值主要产生在运行阶段,其次是建设阶段。而 B 方案主要产生在建设阶段,其次是运行阶段,A/B 方案拆除阶段均无 MAETP 影响值。由 2 种工艺对系统的输入/输出量可知:B 方案在运行阶段耗药量与耗电量比 A 方案大,但由于 B 方案污泥回收利用,使得其运行阶段环境影响潜值减少。

AP 环境影响值主要来源于 SO₂ 和 NO_x 等酸性气体。由图 5 可知:A 方案运行阶段消耗贡献值最大,B 方案运行阶段贡献消耗值为负。A 方案贡献值大,是因为电量与药剂的消耗,追溯其生产过程也伴

随较大的环境负荷。B 方案贡献值为负,是因为污泥与厨余垃圾厌氧消化工艺进入热电联产系统产电,中和了其他阶段对环境的消极影响,最终使运行阶段对环境产生积极影响。

HTP 是 LCA 中需要考虑的长期环境影响,与耗电量有密切关系。由图 5 可看出:最大的影响因素来自运行阶段。由清单分析可知,运行阶段供电过程产生的 Ni^{2+} 、 As^{5+} 等毒性物质、污水处理后污染物排入河流湖泊、电能和药剂生产都会对 HTP 产生影响。A 方案运行阶段中的污泥填埋工艺由于重金属污染物排入土壤中也会带来明显的贡献值(消极影响),B 方案运行阶段由于污泥回收利用产电和拆除阶段回收废弃材料,对环境带来积极影响。

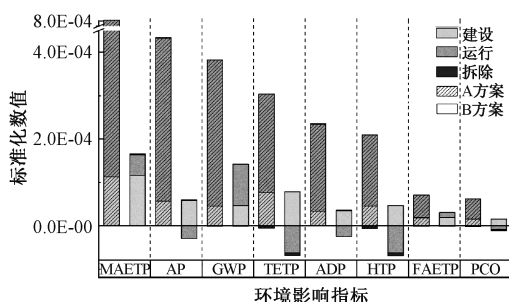


图 5 2 类污水处理方案建设-运行-拆除阶段标准值对比分析

Figure 5 Comparative analysis of normalized values in stages of construction-operation-demolition for the two sewage treatment plants

综上,8 种环境影响类别经污泥回收利用后,环境影响潜值均有所减低,其中降低值最大为 MAETP,其次是 AP。孙雪菲^[31]提出添加水源热泵和厌氧消化的能源回收方案,并对这 8 类环境影响类别进行研究,发现降低值最大的是 GWP 与 HTP。Chen 等^[32]也提出城市固体废物与污泥厌氧共消化是最好的选择。因此,在保证出水水质质量的同时,需提高能源回收利用效率来减低污水处理方案造成的环境影响,但这两者间的平衡需要决策者来把握。

2.3 经济评价

总利润由建设费用、运行费用、能源回收经济效益组成。建设费用包括基建设备投入及建设阶段人员费用;运行费用包括药剂使用、设备运行成本以及餐余垃圾运输成本等;能源回收经济效益包括厌氧消化热电联产生电所带来的费用。各方案的成本费用是基于环境影响报告书及国内外类似研究获取,计算与整理后见表 7。

对污水处理厂 30 年的运行经济性展开研究,从初始投资看,A 方案初始投资为 7346 万元,B 方案总

表 7 污水处理 LCA 经济效益比较

Table 7 LCA economic benefit comparison for the two

sewage treatment plants		万元	
项目		方案 A	方案 B
成本	建设阶段		
	初始投资成本	7346	12790
	第 10 年设备更新折现成本	980	5391
	第 20 年设备更新折现成本	1016	3889
	运行阶段		
	药剂费(0.04 元/ m^3)	21	21
	维修费(固定资产的 1%)	93.42	220
	管理费(其他运行费用的 15%)	694	1074
	能耗费[电价 0.70 元/($\text{kW}\cdot\text{h}$)]	2099	4199
	员工工资(2000 元/d)	2190	2190
收入	拆除阶段		
	其他费用(固定资产的 2.4%)	224	529
	运行阶段折现成本	2189	3388
	总成本	11531	25458
	净残值(固定资产的 4%)	373	882
	经济收入		
	经济效益	49275	49275
	能源回收效益	—	29788
	政府补贴	—	1149
	油渣变卖	—	15330
利润	经济收入折现成本	20308	39380
	总收入	20681	40262
		9150	14804

注:工作时间为 262800 h

投资为 12790 万元,由于热电联产机组费用以及其他维修费用,B 方案比 A 方案高 5444 万元。但从经济回收利益来看,B 方案效益更高,产电利益、厨余垃圾油渣变卖、政府补贴,使得经济总收入折现成本达到 39380 万元。B 方案总收益是 A 方案的 1.6 倍。

3 结论与展望

本研究基于 LCA 理论,引入碳足迹、环境、经济 3 大指标,建立全生命周期碳足迹、环境、经济综合影响模型(LCA-CEE),并运用该模型对典型污水处理厂进行碳排放量分析、特征化与标准化分析以及经济分析。首先在碳足迹方面,利用活动排放与排放因子的乘积得到温室气体潜能;其次在环境方面,计算了 8 种环境类型的标准化数值,在此结果中选取 3 项有价值的环境指标作为重点分析目标;最后在经济方面,利用投入产出的方式得出总收益。得出以下结论:

1) 目标污水处理厂方案 A 总碳排放量为 27500 $\text{kg CO}_2\text{-eq/d}$,方案 B 总碳排放量为 -9223 $\text{kg CO}_2\text{-eq/d}$,B 方案碳中和率达到 133%,利用污泥与厨余垃圾共消化技术理论上可实现污水处理厂碳中和,达成污水处理厂可持续性发展目标。

2) 方案 B 具有良好的节能降耗特性。当 $m(\text{污泥 VS})$ 与 $m(\text{厨余垃圾 VS})=1:1$ 厌氧共消化,产 CH_4 为 22861 m^3/d ,热电联产系统产电量为 38863 $\text{kW}\cdot\text{h}$,实现能源自给自足。

3) 方案B 8种类型的环境污染潜值均小于方案A,海洋生态毒性、大气酸化是污水处理的主要环境影响类型,对环境的影响主要来自能源消耗。方案B由于能源回收利用使其在人体毒性环境影响方面产生积极影响。

4) 从30年的运行经济来看,方案B总收益是A方案的1.6倍,经济效益更好。

本研究为废物处理、学者、废物管理研究人员和政策决策者提供了全新研究思路。面向未来,污水处理与其他行业的紧密融合构成的新工艺流程,可能带来行业低碳发展新契机,同时带来来自环境、经济方面的挑战。对新工艺流程开展多维度分析,是碳中和目标步入实践的有力保障。

参考文献

- [1] 苏健,梁英波,丁麟,等.碳中和目标下我国能源发展战略探讨[J].中国科学院院刊,2021,36(9):1001-1009.
- [2] WANG K, NAKAKUBO T. Strategy for introducing sewage sludge energy utilization systems at sewage treatment plants in large cities in Japan: a comparative assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2021,316(659):128282.
- [3] 郝晓地,魏静,曹亚莉.美国碳中和运行成功案例:Sheboygan 污水处理厂[J].中国给水排水,2014,30(24):1-6.
- [4] 郝晓地,金铭,胡沅胜.荷兰未来污水处理新框架:NEWs 及其实践[J].中国给水排水,2014,30(20):7-15.
- [5] SINGH V, PHULERIA H C, CHANDEL M K. Estimation of energy recovery potential of sewage sludge in india: waste to watt approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276(2/3):122538.
- [6] 郑秀君,胡彬.我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展[J].科技进步与对策,2013,30(6):155-160.
- [7] 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):11188-1198.
- [8] 郝晓地,于文波,王向阳,等.地下式污水处理厂全生命周期综合效益评价[J].中国给水排水,2021,37(7):1-10.
- [9] ZHUANG H, GUAN J, LEU S Y, et al. Carbon footprint analysis of chemical enhanced primary treatment and sludge incineration for sewage treatment in Hong Kong[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 272:122630.
- [10] HAO X D, LIU R B, HUANG X. Evaluation of the potential for operating carbon neutral WWTPs in China[J]. Water Research, 2015, 87:424-431.
- [11] 郝晓地,黄鑫,刘高杰,等.污水处理“碳中和”运行能耗赤字来源及潜能测算[J].中国给水排水,2014,30(20):1-6.
- [12] XU C Q, CHEN W, HONG J L. Life-cycle environmental and economic assessment of sewage sludge treatment in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 67:79-87.
- [13] 范秀磊,袁博,李学强,等.青岛麦岛污水处理厂污泥消化及热电联产运行管理经验[J].中国给水排水,2020,36(2):22-25.
- [14] 郝晓地,詹兴,曹达启.剩余污泥厌氧共消化技术研究现状及应用趋势[J].环境工程学报,2016,10(12):6809-6818.
- [15] 田雨晴.餐厨垃圾与污泥混合厌氧消化及流变研究[D].北京:北京建筑大学,2021.
- [16] 孙飞,徐兴.热水解工艺强化低有机质污泥厌氧消化产气率的中试研究[J].生物化工,2021,7(3):105-107.
- [17] 龚运.沼气发电工程技术经济及环境效益分析[D].北京:华北电力大学.
- [18] 刘铁望,黄涛,黄晶晶,等.剩余污泥与餐厨垃圾协同厌氧发酵实现电能需求导向的沼气供应情景分析与仿真研究[J].环境科学学报,2020,40(5):1911-1920.
- [19] ZHANG Q H, WANG X C, XIONG J Q, et al. Application of life cycle assessment for an evaluation of wastewater treatment and reuse project-Case study of Xi'an, China[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(5):1421-1425.
- [20] 张倩芸.基于LCA的污水处理系统的环境影响评价研究[D].大连:大连理工大学,2016.
- [21] 陈福仲,刘杰,陈晶晶.餐厨垃圾沼气热电联产经济分析[J].能源研究与利用,2020(2):30-33.
- [22] 罗小勇,黄希望,王大伟,等.生命周期评价理论及其在污水处理领域的应用综述[J].环境工程,2013,31(4):118-122.
- [23] MMA B, AA B, EM C, et al. Comprehensive evaluation of the carbon footprint components of wastewater treatment plants located in the Baltic Sea region[J]. Science of the Total Environment, 2022, 806:150436.
- [24] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventory[M]. IGES, Japall, 2006.
- [25] 郝晓地,王向阳,江瀚,等.污水处理环境综合效益评价方法及案例应用[J].中国给水排水,2019,35(6):6-15.
- [26] 梁凯铭.基于LCA的清洁生产审核方法研究[D].大连:大连理工大学,2016.
- [27] 黄辉,张勤,傅斌.基于全生命周期成本理论的污水厂投资方案比较[J].中国给水排水,2013,29(1):101-104.
- [28] LIU B B, QI W, BING Z, et al. Life cycle GHG emissions of sewage sludge treatment and disposal options in Tai Lake Watershed, China[J]. Science of the Total Environment, 2013, 447:361-369.
- [29] 郝晓地.污水处理碳中和运行技术[M].北京:科学出版社,2014.
- [30] 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.
- [31] 孙雪菲.基于LCA的污水处理厂环境影响评价及能源回收优化研究[D].延边:延边大学,2021.
- [32] CHEN G Y, WANG X T, LI J, et al. Environmental, energy, and economic analysis of integrated treatment of municipal solid waste and sewage sludge: a case study in China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 647:1433-1443.