

DOI:10.13205/j.hjgc.202303026

张纪文,徐遵主,张宇威,等. 某药企厌氧池废气减污降碳协同治理生命周期评价[J]. 环境工程,2023,41(3):192-201.

某药企厌氧池废气减污降碳协同治理生命周期评价

张纪文¹ 徐遵主¹ 张宇威¹ 陈宇祺² 金小贤¹ 刘东¹ 陆朝阳^{1,3*}

(1. 南大恩洁优环境技术(江苏)股份公司, 南京 210093; 2. 金陵中学, 南京 210029;
3. 南京大学环境规划设计研究院集团股份有限公司, 南京 210093)

摘要: 针对制药企业污水站厌氧池中的温室气体甲烷和恶臭气体,在原有水吸收-光催化-化学吸收治理工艺的基础上,改造形成水吸收-碱吸收-蓄热式焚烧(RTO)-急冷-碱吸收为主的温室气体削减协同恶臭处理新工艺。利用生命周期评价法,对废气治理工艺的环境影响进行特征化、标准化分析。结果表明,改造前、后废气治理工艺的主要环境影响均为全球变暖。通过温室气体削减核算和经济性评估可知,工艺改造后,总温室效应潜值年削减量可达到 7.53×10^6 kg CO_{2-eq},运行成本节约 1.21×10^6 元。新工艺在实现减污降碳的同时,具有显著的经济和社会效益。

关键词: 厌氧池废气;减污降碳;生命周期评价;温室效应

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF COORDINATED TREATMENT OF WASTE GAS POLLUTION AND CARBON REDUCTION IN ANAEROBIC POND IN A PHARMACEUTICAL FACTORY

ZHANG Jiwen¹, XU Zunzhu¹, ZHANG Yuwei¹, CHEN Yuqi², JIN Xiaoxian¹, LIU Dong¹, LU Zhaoyang^{1,3*}

(1. NJU Environmental Technologies of Nanjing University Jiangsu Co., Ltd, Nanjing 210093, China;
2. Jinling High School, Nanjing 210029, China; 3. The Group of Nanjing University Academy of Environmental Planning & Design, Nanjing 210093, China)

Abstract: In response to the environmental protection goal of “reducing pollution and carbon, collaborative governance, improving”, a new process of equivalent greenhouse gas and malodorous gas treatment based on the original “water absorption-photocatalysis-chemical absorption” treatment process had been transformed into a “water absorption-alkali absorption-regenerative incineration (RTO)-quench-alkali absorption,” which aimed at greenhouse gas methane and malodorous gas of the anaerobic tank in the sewage station of the pharmaceutical industry. Life cycle assessment (LCA) was used to implement characteristic and standardized analysis of the environmental impact of the waste gas treatment process. The results showed that the significant environmental impact of the original and new waste gas treatment process was global warming. Through the greenhouse gas reduction calculation and economic evaluation, compared with the original process, the new process could reach the annual greenhouse effect reduction value of 7.53×10^6 kg CO_{2-eq} and an economic benefit of RMB 1.21×10^6 . The new process provided a theoretical basis for comprehensively developing the pharmaceutical industry’s environmental, technological, economic, and social benefits while achieving efficient waste gas treatment.

Keywords: gas of the anaerobic tank; coordinated treatment of waste gas pollution and carbon reduction; life cycle assessment; greenhouse effect

0 引言

随着工业化发展,全球变暖问题对人类生存环境

造成了严重挑战。因此,“十四五”发展规划提出了“碳减排、碳中和”的环保战略^[1]。我国大气污染物

收稿日期:2022-06-27

基金项目:国家环境保护生态工业重点实验室开放基金(2022KFF-05)

第一作者:张纪文(1990-),男,硕士,主要研究方向为大气污染防治。jwzhang@njuae.cn

*通信作者:陆朝阳(1980-),男,博士,教授,主要研究方向为污染控制技术。zlu@njuae.cn

与温室气体具有同根、同源、同过程特点,减污降碳应协同进行。“减污降碳,协同治理”既是打好污染防治攻坚战的目标要求,也是实现经济、社会绿色低碳转型的重要抓手。

制药行业是国民经济发展的重点产业,具有有机溶剂使用量大、利用率低等特点,制药厂污水站废气成分复杂^[2,3],含有挥发性恶臭有机物以及 NH_3 、 H_2S 等无机恶臭气体,异味扰民情况凸显^[4,5]。常规治理工艺在处理污水站废气时,由于能源消耗以及有机碳转变为 CO_2 ,会新增温室气体排放。污水站厌氧池除了上述废气外,在降解水体有机物的过程还会产生高浓度 CH_4 ,其增温潜势是 CO_2 的28倍^[6]。因此,以某药厂污水站厌氧池废气为研究对象,充分利用高增温潜势 CH_4 的燃烧热值,将原有水吸收-光催化-化学吸收工艺改造为水吸收-碱吸收-蓄热式焚烧(RTO)-急冷-碱吸收工艺,以期实现“减污降碳,协同治理”的目标。

生命周期评价法(life cycle assessment, LCA)可对被研究对象在评价范围内所涉及的资源、能源消耗以及造成的环境影响进行彻底、全面的评价,广泛应用于环保治理领域。如刘宇彤^[7]通过对工业园区VOCs集中处理设施进行LCA及技术经济研究,并明确了VOCs治理过程中对环境造成主要影响的类型。沈兰^[8]以工艺设施为主线,运用LCA法分析造纸行业废水处理工艺的环境影响,核算该工艺各阶段污染物的排放量,为废水工艺改进提供理论依据。Hsien等^[9]运用LCA法核算了NEWater与常见海水淡化工艺相比,再生每吨淡水能减少26%的碳排放。Singh等^[10]从LCA的角度,提出了污水处理过程中产生的

污泥的热消化和厌氧消化处理过程中实现回收能量、降低能耗的途径。目前,国内外利用LCA开展研究主要关注特定治理工艺在生命周期内各个阶段的环境影响类型,而对工艺提标改造前后环境影响负荷的变化研究较少。同时,该评价范围仅局限于工艺本身,治理过程对整体环境的影响研究较少。

为评估厌氧池废气治理工艺改造前、后的净化效果和整体环境负荷变化,优化了LCA法评价框架,对改造前后环境影响进行特征化、标准化分析,识别废气治理生命周期的关键阶段,对比研究其环境负荷,分析主要环境影响。最后,以“双碳”目标为出发点,分析改造前后废气治理过程对整体环境的温室气体削减当量值,并进行经济性分析,为探索工业废气减污降碳协同治理的新路径提供参考。

1 制药厂污水站厌氧池废气处理工艺概况

某制药厂污水站采用厌氧-好氧-沉淀-絮凝组合工艺净化生产废水。本研究主要针对该药厂污水站厌氧池废气的处理过程^[11,12]进行研究。

厌氧池废气治理原工艺为水吸收-光催化-化学吸收,工艺流程见图1。废气分别通过气液逆流吸收、光催化氧化、三级化学氧化进行净化。

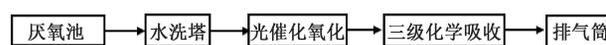


图1 厌氧池废气治理原工艺流程

Figure 1 Original process for waste gas treatment for the sewage station

厌氧池废气治理原工艺存在净化效率低和高增温潜势 CH_4 排放量大等问题。为解决上述问题,并实现减污降碳协同治理,拟对原工艺进行升级改造,改造后工艺流程和主要设备见图2。

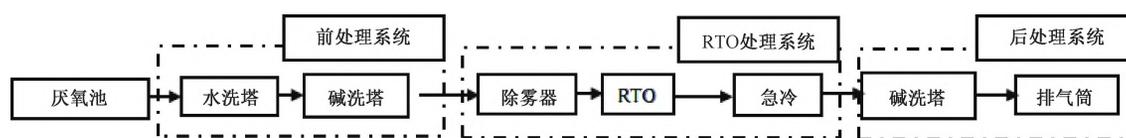


图2 厌氧池废气处理新工艺流程

Figure 2 New process for waste gas treatment of the sewage station

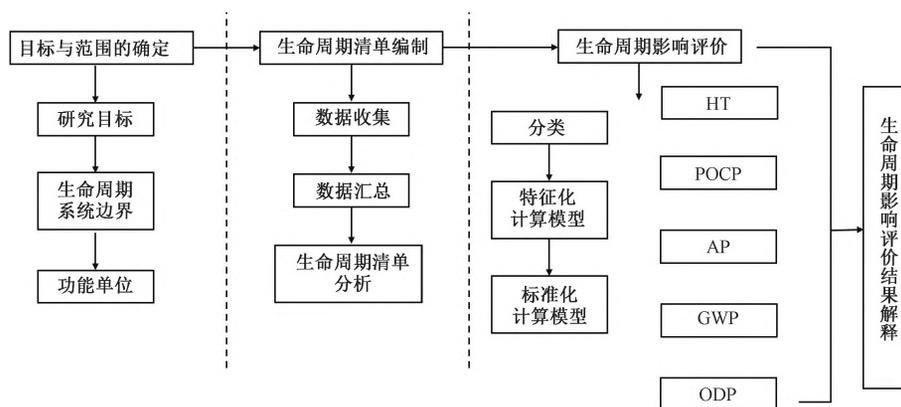
首先,将废气接入前处理系统,去除 NH_3 、 H_2S 等无机恶臭气体,同时降低对后续设备的腐蚀。前处理系统对无机恶臭气体的去除率可达到95%。经过前处理后的气体除雾后进入RTO,通过高温燃烧实现废气净化。RTO对挥发性恶臭有机物(malidor volatile organic compounds, MVOC,以NMHC计)和 CH_4 去除率为99%,无机恶臭气体的累计去除率可达

到99%。经急冷塔降温后的尾气进入碱洗塔,去除RTO焚烧后产生的少量副产物。

工艺改造前、后厌氧池废气净化情况详见表1。工艺升级改造后,新工艺的净化效率显著提升,同时可满足DB12/524—2020《天津市工业企业挥发性有机物排放控制标准》限值要求,可实现“减污降碳”的环保目标。

表 1 厌氧池废气处理工艺废气排放情况

污染物	进气浓度/ (mg/m ³)	原工艺出口 浓度/(mg/m ³)	新工艺出口 浓度/(mg/m ³)	总风量/ (m ³ /h)
CH ₄	8000(夏) 4000(冬)	8000(夏) 4000(冬)	80(夏) 40(冬)	5000
H ₂ S	76.89	3.54	0.77	
NH ₃	31.9	1.47	0.32	
NMHC	375.73	17.29	3.76	



注:HT 为人体健康危害潜值 (human toxicity);POCP 为光化学污染潜值 (photochemical oxidation potential);AP 为酸化效应潜值 (acidification potential);GWP 为温室效应潜值 (global warming potential);ODP 为大气臭氧损耗潜值 (ozone depletion potential)。

图 3 LCA 技术路线

Figure 3 Technology roadmap of life cycle assessment

2.1 目的和范围的确定

目标和范围的确定是开展 LCA 评价的出发点,通过对研究目标和系统进行精确、清晰的定义能有效提升评价结果的可靠性。

2.1.1 研究目标

本研究中 LCA 模型以天津某药厂污水站厌氧池废气治理工艺作为研究对象,收集、编制废气治理工艺改造前后的生命周期清单,分析各工序的环境负荷及特征化指标,识别生命周期关键阶段并分析主要环境影响。基于此,提出污水站废气治理工艺改造措施,并进行减排效果核算,为后续环保治理的工艺改造和工艺选取提供理论依据^[13,14]。

2.1.2 功能单位

功能单位是对治理工艺生命周期的量化描述,是数据收集、评价和方案对比的基础。本研究的功能单元定义为工作周期为 1 a 的制药厂污水站厌氧池废气治理过程。其中,废气总处理量为 $4.38 \times 10^7 \text{ m}^3$,废气主要成分为制药原料挥发而产生的以丙酮、二氯甲烷、乙酸乙酯、三氯甲烷为主的 VOCs,和废水中有机物经厌氧发酵后产生的 CH₄、H₂S 和 NH₃ 等气态污染

2 生命周期研究目标与方法

LCA 是一种评价产品、工艺或行动相关的环境负荷客观过程的数据模型,通过识别和量化能源与材料使用,评价这些能源与材料使用和污染物排放造成的环境负荷,从而提出工艺改造和环境保护的方案。

LCA 步骤主要由目标与范围的确定、生命周期清单编制、生命周期影响评价和结果解释 4 个环节组成,其技术路线见图 3。

物。本研究所涉及的资源消耗、能源使用、污染物排放等均基于该功能单位进行转换。

2.1.3 系统边界

系统边界用于限定研究对象的评估范围。根据研究目标和范围,为保证工艺过程和数据的完整性以及后续的生命周期分析和结果评价的准确性,系统边界分类和划分规则如下:1)系统边界暂不考虑废气处理设备配套建筑等固定资产、人员管理投入和设备部件的维护更新等。2)生命周期内污染物排放包括直接和间接排放,直接排放包括处理尾气中存在的污染物;间接排放主要来自所需药耗、燃耗、能耗在生产运输过程中产生的污染物排放。3)LCA 过程涵盖了制药厂厌氧池废气治理工艺改造前后的各污染治理工序,主要由收集系统、废气治理系统以及排气系统组成。生命周期清单输入部分主要关注电耗、化石能源供给等环节。

系统边界及研究范围的具体界定如图 4 所示。

2.2 生命周期清单编制

生命周期清单编制是量化和评价在整个废气治理工艺的生命周期过程中资源和能源的使用过程,是

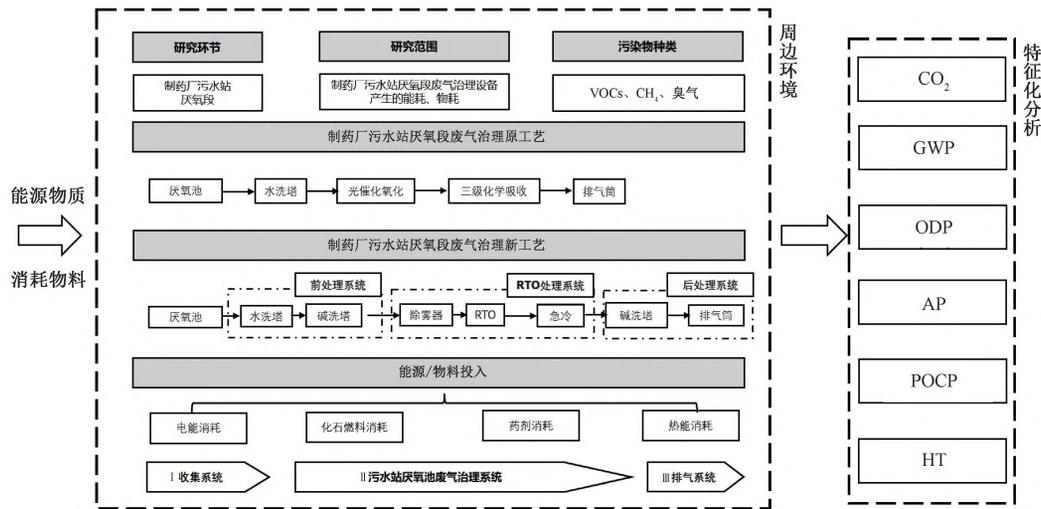


图 4 LCA 系统边界及研究范围

Figure 4 System boundary and research scope of LCA

LCA 研究工作的基础。本研究主要数据来自实地调研所获得的数据,包括设备电耗、设备运行情况、能源消耗量、药剂消耗量等。

表 2 汇总了在上述功能单位内废气治理工艺在治理过程中的输入输出清单,以及各工艺单元所需的能耗和治理药剂。

表 2 污水站厌氧池废气治理工艺生命周期清单

Table 2 Life cycle inventory of waste gas treatment process in anaerobic tank of the sewage station

工艺	类别	节点	输入量	设备清单
厌氧池当量温室气削减协同恶臭处理新工艺	能耗	收集系统	4.63×10 ⁴ kW·h	轴流风机 1 台、治理风机 1 台
		前处理系统	6.13×10 ⁵ kW·h	加药泵 1 台、循环水泵 1 台、除雾器 1 台
		RTO 系统	9.49×10 ⁴ kW·h	主风机 1 台、助燃风机 1 台、吹扫风机 1 台、急冷塔加药泵 1 台、急冷塔循环水泵 1 台
		后处理系统	5.24×10 ⁴ kW·h	加药泵 1 台、循环水泵 1 台、搅拌电机 1 台
	药耗	排污系统	1.61×10 ³ kW·h	排污泵 1 台
		RTO 后碱洗塔 32%液碱	1.08×10 ⁰ t	—
		RTO 前碱洗塔 32%液碱	2.73×10 ² t	—
厌氧池废气处理原工艺	燃耗	RTO 天然气冷启动	6.00×10 ² m ³	—
		能耗	收集系统	4.77×10 ⁴ kW·h
厌氧池废气处理原工艺	能耗	水洗系统	1.61×10 ⁵ kW·h	循环水泵 1 台
		光催化系统	1.23×10 ⁵ kW·h	光催化设备 1 台
		化学吸收系统	1.17×10 ³ kW·h	加药泵 1 台、搅拌电机 1 台
		排污系统	1.41×10 ³ kW·h	排污泵 1 台、治理风机 1 台
		药耗	次氯酸钠	3.97×10 ¹ t
	硫酸		2.50×10 ⁰ t	—

2.3 生命周期影响评价计算模型

生命周期影响评价就是对生命周期清单分析得到的资源消耗数据以及排放数据进行定性或定量排序,并通过特征化指标将污染物排放量转化环境负荷,从而分析评价对象所造成的各类环境影响。

本研究利用 Sima Pro 软件,评价污水站厌氧池废气处理工艺对环境污染影响的贡献。基于生命周期清单、Ecoinvent 数据库、欧盟生命周期参考数据库 (Europe life cycle database, ELCD)、中国生命周期参考数据库 (Chinese life cycle database, CLCD) 等生命

周期数据库资料,再利用 CML-IA baseline v3.05/EU25 的分析方法,建立了 LCA 模型。

2.3.1 特征化模型

特征化模型能反映环境影响绝对量的大小,各特征化指标通过相关清单物质的量值与其特征化当量因子的乘积求和,得出系统中所有同类环境排放影响的总和。特征化分析是通过将每一个影响类型中的不同物质转化和汇总成为统一的单元,从而反映该生命周期系统对环境的影响的大小。

本研究采用当量因子法作为特征化过程的计算

方法,每种污染物都有与之相对应的特征化指标的当量因子。因此,通过汇总污染物的环境影响类型的特征值,从而得出相对应特征化指标,即可分析其对环境的影响。该计算过程由软件处理,其计算见式(1)、(2)。最终,通过运行 Sima Pro 软件得到本生命周期模型各中间因子指标的特征化结果。

$$EF_{ji} = EF_{ji\text{污染物燃烧热值}} + EF_{ji\text{药剂}} + EF_{ji\text{化石燃料}} + EF_{ji\text{电力消耗}} \cdots \quad (1)$$

$$EP_j = \sum EP_{ji} = \sum Q_{ji} \times EF_{ji} \quad (2)$$

式中: EF_{ji} 为生命周期的第 j 种环境影响类型的第 i 种污染物的消耗量; EP_j 为生命周期的第 j 种环境影响类型的环境影响特征值; EP_{ji} 为生命周期的第 i 种污染物的第 j 种环境影响类型的环境影响特征值; Q_{ji} 为生命周期的第 j 种环境影响类型的第 i 种污染物的当量因子。

基于污水厂厌氧池废气增温潜势高、含有大量恶臭气体和 VOCs 等污染物,能源消耗量大、温室气体排放量多、药剂投入大等特点,本研究从大气污染角度,在 CML-IA baseline 中选取 GWP、ODP、AP、POCP、HT 5 种特征化指标进行评价。

1) GWP 是指温室气体对温室效应的贡献值,选取 CO_2 的环境影响大小为基准值。2) ODP 是指会导致臭氧层消耗物质产生臭氧层破坏的潜能值,选取一氟三氯甲烷(CFC-11)的环境影响大小为基准值。3) AP 是污染物扩散导致的酸性环境损害,选取 SO_2 的环境影响大小为基准值。4) POCP 是指大气中光化学污染物的环境影响,选取乙烯(C_2H_4)的环境影响大小为基准值。5) HT 是指环境中有毒物质对人体造成的健康损害的潜值,选取 1,4-二氯苯的影响大小为基准值。

2.3.2 标准化模型

标准化模型是通过将制药企业污水站厌氧池废气处理原工艺和当量温室气体削减协同恶臭处理新工艺的生命周期内各环境影响类型特征值通过标准化因子后转换为统一值,使本研究所关注的各环境影响类型特征值具有可比性。标准化因子均来自 CML-IA baseline V3.05/EU25-Normalization/Weighting Set (<http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>)。标准化模型可以识别该废气治理工艺生命周期内的关键环境影响类型,并能够进一步分析造成这些环境影响的关键环节。计算方法详见式(3)。

$$SD_j = \sum SD_{ji} = c \sum (Q_{ji} \times EF_{ji}) \quad (3)$$

式中: SD_j 为生命周期的第 j 种环境影响类型的标准化值; SD_{ji} 为生命周期的第 j 种环境影响类型的第 i 种污染物的标准化值; c 为标准化因子。

本研究环境影响类型均选取国际上推荐采用的世界范围各类环境负荷总量作为归一化基准值,见表3。

表3 特征值的标准化因子汇总

Table 3 Summary of standardized factors for eigenvalues

特征值	GWP/(kg $\text{CO}_2\text{-eq}$)	ODP/(kg CFC-11 _{eq})	AP/(kg $\text{SO}_2\text{-eq}$)	POCP/(kg $\text{C}_2\text{H}_4\text{-eq}$)	HT/(kg 1,4-DB _{eq})
标准化因子	1.99×10^{-13}	1.12×10^{-8}	3.35×10^{-11}	1.18×10^{-10}	1.29×10^{-13}

注:当量系数均为 1.0。

3 结果和讨论

3.1 LCA 特征化模型

本研究特征化模型通过当量因子法,并运行 Sima Pro 软件,将污染物转换为参照物的环境影响潜值^[15,16]。

3.1.1 GWP

本生命周期内 GWP 值主要来源于天然气燃烧、电力生产和 CH_4 排放及燃烧。废气治理工艺改造前、后各工序的 GWP 值详见图 5。可知:新工艺的收集系统、前处理系统、RTO 系统、后处理系统和排污系统的 GWP 值分别为 4.93×10^4 , 6.57×10^4 , 8.39×10^5 , 1.35×10^5 , 7.53×10^4 kg $\text{CO}_2\text{-eq}$ 。其中,RTO 系统的 GWP 值最大,其组成部分包括燃烧处理后的废气治理和冷启动时天然气的供给。这些过程均会产生大量 CO_2 等温室气体,导致 RTO 系统的 GWP 值偏高。而原工艺的收集系统、水洗系统、光催化系统、化学吸收系统和排污系统的 GWP 值分别为 4.93×10^4 , 1.72×10^5 , 1.38×10^5 , 1.91×10^4 , 7.45×10^6 kg $\text{CO}_2\text{-eq}$ 。其中排污系统的 GWP 值最大。因原工艺无法处理 CH_4 ,其温室效应是 CO_2 的 28 倍,这会导致其 GWP 值远大于改造后。

综上,改造后工艺能够有效减少运行电耗和温室气体排放,削减废气治理过程所产生的温室效应。

3.1.2 AP

新工艺的收集系统、前处理系统、RTO 系统、后处理系统和排污系统的 AP 值分别为 2.20×10^2 , 2.94×10^2 , 4.66×10^2 , 8.18×10^2 , 3.00×10^1 kg $\text{SO}_2\text{-eq}$ (图 6)。后处理系统的 AP 贡献值最大,其主要原因是在运行过程中需要消耗大量液碱。液碱的生产以氯碱电解法为主,需要消耗大量电能。一方面,在火

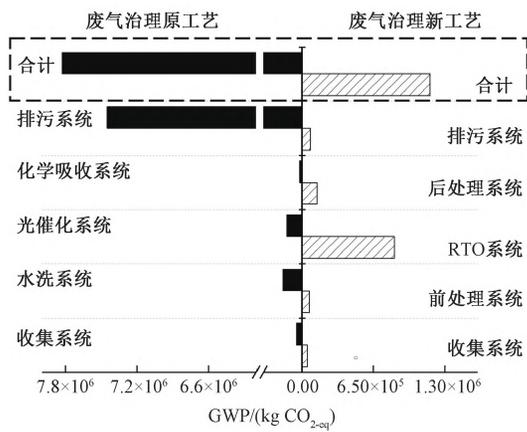


图 5 GWP 特征值计算结果

Figure 5 Characteristic value of global warming potential (GWP)

电为主的供电体系中,化石燃料的燃烧会生成大量 SO₂、NO_x 等酸性气体;另一方面,生产过程中副产品 Cl₂ 作为酸性气体,会造成一定的环境酸化效应。而原工艺的收集系统、水洗系统、光催化系统、化学吸收系统和排污系统的 AP 值分别为 2.2 × 10², 7.66 × 10², 5.87 × 10², 6.06 × 10¹, 7.92 × 10² kg SO_{2-eq}。排污系统的 AP 值最大,是由于原工艺的净化效率较低,治理尾气中仍存有少量酸性气体,对环境造成酸化影响。

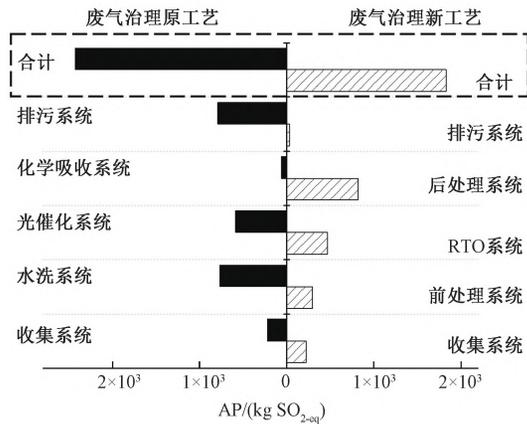


图 6 AP 特征值计算结果

Figure 6 Characteristic value of acidification (AP)

3.1.3 POCP

新工艺的收集系统、前处理系统、RTO 系统、后处理系统和排污系统的 POCP 值分别为 8.23 × 10⁰, 1.10 × 10¹, 1.75 × 10¹, 3.65 × 10¹, 3.03 × 10¹ kg C₂H_{4-eq} (图 7)。后处理系统的 POCP 值最大,主要原因是其运行需投入液碱,其生产过程中,火电供给会产生大量的 NO_x、CO 与碳氢化合物^[17]。同时,生产过程会产生 Cl₂。这些物质具有光化学反应性,会导致 POCP 值的增加。原工艺的收集系统、水洗系统、光

催化系统、化学吸收系统和排污系统的 POCP 值分别为 8.23 × 10⁰, 2.86 × 10¹, 2.20 × 10¹, 2.49 × 10⁰, 1.59 × 10³ kg C₂H_{4-eq}。排污系统的 POCP 值最大,因为原工艺净化效率较低,治理尾气中仍含有少量 VOCs,会与大气中的 NO_x 等活性组分发生光化学反应,造成光化学污染。

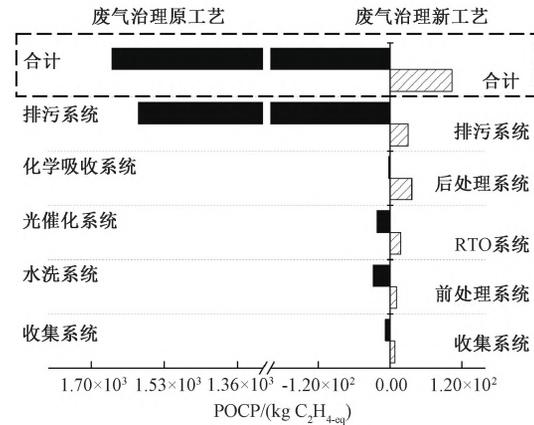


图 7 POCP 特征值计算结果

Figure 7 Characteristic value of photochemical oxidation (POCP)

综上,工艺改造前后相比,POCP 削减量最大的环节是排污系统,削减值约为 1.55 × 10³ kg C₂H_{4-eq}。新工艺可有效提升 VOCs 去除率,减少治理工艺对环境的光化学污染。

3.1.4 ODP

新工艺的收集系统、前处理系统、RTO 系统、后处理系统和排污系统的 ODP 值分别为 4.02 × 10⁻⁴, 5.96 × 10⁻⁴, 8.24 × 10⁻⁴, 1.64 × 10⁻², 1.39 × 10⁻⁵ kg CFC-11_{eq} (图 8)。原工艺的收集系统、水洗系统、光催化系统、化学吸收系统和排污系统的 ODP 值分别为 4.02 × 10⁻⁴, 1.40 × 10⁻³, 1.07 × 10⁻³, 5.71 × 10⁻³, 7.31 × 10⁻⁴ kg CFC-11_{eq}。

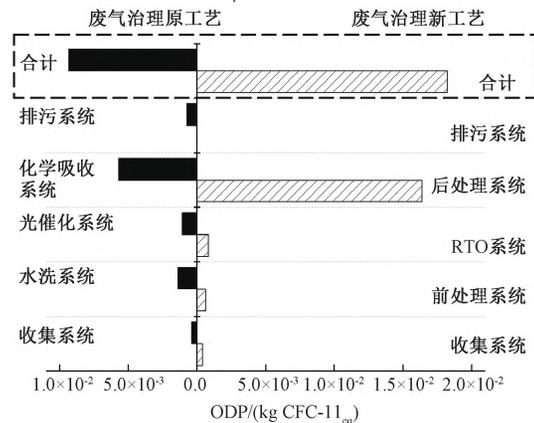


图 8 ODP 特征值计算结果

Figure 8 Characteristic value of ozone layer depletion (ODP)

综合来看,新工艺后处理系统环节的 ODP 值最大,这是因为其中碱洗塔运行需要投入大量液碱。一方面其生产过程需要投入大量电力。由于现有供电体系以火电为主,化石燃料的供电燃烧过程会产生 NO_x 等污染物, NO_x 可与臭氧层中的 O_3 可以发生反应,消耗大量的 O_3 。 NO_x 还可与平流层内的臭氧发生反应生成 NO 与 O_2 , NO 与 O_3 进一步反应生成 NO_2 和 O_2 ,从而打破 O_3 平衡,使 O_3 浓度降低,导致臭氧层的耗损。另一方面,生产过程产生的 Cl_2 排放到大气中会对 O_3 有持续的破坏作用,会将 O_3 转化为 O_2 ,从而导致臭氧层破坏^[18]。

因此,新工艺的 ODP 值比原工艺有小幅增高,约 $8.92 \times 10^{-3} \text{ kg CFC-11}_{\text{eq}}$ 。

3.1.5 HT

新工艺的收集系统、前处理系统、RTO 系统、后处理系统和排污系统的 HT 值分别为 1.74×10^4 , 2.31×10^4 , 3.62×10^4 , 2.36×10^4 , $6.15 \times 10^2 \text{ kg 1,4-DB}_{\text{eq}}$ (图 9),其中 RTO 系统的 HT 值最大。原工艺的收集系统、水洗系统、光催化系统、化学吸收系统和排污系统的 HT 值分别为 1.74×10^4 , 6.07×10^4 , 4.66×10^4 , 7.40×10^3 , $3.19 \times 10^4 \text{ kg 1,4-DB}_{\text{eq}}$ 。其中,水洗系统和光催化系统的 HT 值较大。

HT 值主要来自电力消耗和化石燃料燃烧环节。在新工艺的 RTO 系统,原工艺的光催化系统和水洗系统的运行需要大量电耗。在火电为主的供电系统中,火力发电是通过化石燃料燃烧,使化石燃料中化

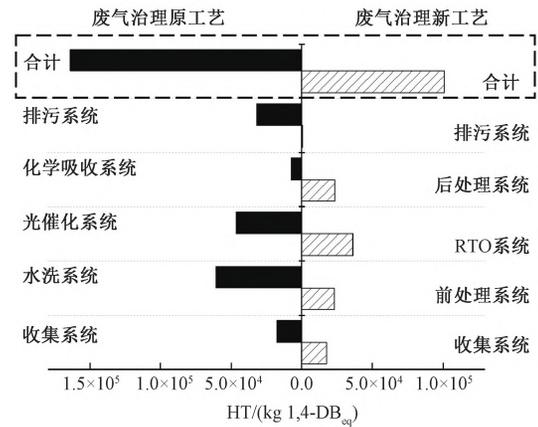


图 9 HT 特征值计算结果

Figure 9 Characteristic value of human toxicity (HT)

学能转化为电能。在这一过程中,首先会产生硫硝污染物,形成酸雨,对人体的皮肤会产生伤害,燃烧产生的粉尘和 CO 、 SO_2 等有毒气体会引发呼吸道疾病,从而危害人体健康。新工艺的改造能够有效减少耗电量,进而削减工艺系统的 HT 值。

3.2 LCA 标准化模型

标准化模型是将本生命周期内各特征值通过标准化因子转换,使得本研究所关注的各特征值具有可比性,识别关键环境影响类型。基于 2.3.2 节标准化计算模型,各特征值的标准化计算结果见表 4。标准化模型中废气治理新工艺生命周期的环境影响标准值顺序为 $\text{GWP} > \text{AP} > \text{HT} > \text{POCP} > \text{ODP}$ 。原工艺的标准值顺序为 $\text{GWP} > \text{POCP} > \text{AP} > \text{HT} > \text{ODP}$ 。

表 4 标准化模型计算结果

Table 4 Calculation results of standardized model

工艺	模型参数	GWP/(kg $\text{CO}_2\text{-eq}$)	ODP/(kg CFC-11 _{eq})	AP/(kg $\text{SO}_2\text{-eq}$)	POCP/(kg $\text{C}_2\text{H}_4\text{-eq}$)	HT/(kg 1,4-DB _{eq})
新工艺	特征化值	1.17×10^6	1.82×10^{-2}	1.83×10^3	1.04×10^2	1.01×10^5
	标准化因子	1.19×10^{-13}	1.12×10^{-8}	3.35×10^{-11}	1.18×10^{-10}	1.29×10^{-13}
	标准化值	2.33×10^{-7}	2.04×10^{-10}	6.13×10^{-8}	1.23×10^{-8}	1.30×10^{-8}
	标准化值占比	72.84%	0.06%	19.18%	3.84%	4.08%
原工艺	特征化值	7.83×10^6	9.31×10^{-3}	2.43×10^3	1.65×10^3	1.64×10^5
	标准化因子	1.19×10^{-13}	1.12×10^{-8}	3.35×10^{-11}	1.18×10^{-10}	1.29×10^{-13}
	标准化值	1.56×10^{-6}	1.04×10^{-10}	8.14×10^{-8}	1.95×10^{-7}	2.12×10^{-8}
	标准化值占比	83.97%	0.01%	4.39%	10.49%	1.14%

改造前、后废气治理工艺的 GWP 标准化值均远大于其他指标,温室效应是其最主要的环境影响类型。由 3.1.1 节可知,新工艺的 GWP 的主要产生环节发生在 RTO 系统。由于废气中含有大量 CH_4 ,其 GWP 值为 $28 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$,本工艺中通过 RTO 系统将 CH_4 转化成 CO_2 ,很大程度上削减污水站厌氧池废气

的温室效应。但降解产物 CO_2 排放到大气中仍会对环境造成一定影响。而在原工艺中,工艺无法净化 CH_4 ,因此在排污系统中会产生大量的 GWP 值。

由于新工艺运行过程中需要投入大量电能,在化石燃料的供电过程会生成大量 SO_2 、 NO_x 等污染物。同时,该系统运行所需投入的液碱在生产、使

用过程中会排放 Cl_2 等污染物。这些酸性气体会对环境造成一定的酸性效应,因此新工艺中的 AP 值占比仅次于 GWP 值,约为 19.18%。原工艺中,由于废气净化效率不够高,会排放一部分 VOCs 进入环境。上述具有光化学反应性的气体在紫外线的照射下产生光化学烟雾会对人体造成一定伤害。因此原工艺中的 POCP 值占比仅次于 GWP 值,约为 10.49%。而污水厂厌氧池废气中的主要污染物以 CH_4 为主,同时还有少量的恶臭污染物和由制药原料挥发而产生的以丙酮、二氯甲烷、乙酸乙酯、三氯甲烷为主的 VOCs,这些污染物基本不具有臭氧层破坏的特性。因此,ODP 标准化值均较小,仅占总环境影响的 0.1% 左右。

3.3 敏感性分析

由 3.2 节可知:本生命周期模型主要受供电量、药剂投入量和天然气供给量 3 个参数的影响。通过以 $\pm 10\%$ 的变化量改变各工艺的输入参数,判断各参数对模型输出值的影响敏感度,计算见式(4),敏感性分析计算结果如表 5 所示:

$$M = \frac{\Delta y/y_0}{2\Delta x/x_0} \quad (4)$$

式中: M 为敏感性系数; x_0 、 y_0 分别为生命周期的初始输入值和输出值; Δx 为输入的变化量; Δy 为输出值的变化量。当 $|M| \geq 1$ 时,表示非常敏感,记为 IV;当 $1 > |M| \geq 0.2$ 时,表示敏感,记为 III; $0.2 > |M| \geq 0.05$ 时,表示低敏感,记为 II;当 $0.05 > |M| \geq 0$ 时,表示不敏感,记为 I。

表 6 不确定性分析计算结果

Table 6 Result of uncertainty analysis

项目	废气治理原工艺					废气治理新工艺				
	GWP/(kg $\text{CO}_2\text{-eq}$)	ODP/(kg $\text{CFC-11}_{\text{eq}}$)	HT/(kg $1,4\text{-DB}_{\text{eq}}$)	POCP/(kg $\text{C}_2\text{H}_4\text{-eq}$)	AP/(kg $\text{SO}_2\text{-eq}$)	GWP/(kg $\text{CO}_2\text{-eq}$)	ODP/(kg $\text{CFC-11}_{\text{eq}}$)	HT/(kg $1,4\text{-DB}_{\text{eq}}$)	POCP/(kg $\text{C}_2\text{H}_4\text{-eq}$)	AP/(kg $\text{SO}_2\text{-eq}$)
平均值	7809289	0.009369	165697	1649.491	2430.315	1160476	0.018326	102941.6	103.2423	1825.75
中位数	7797564	0.009182	154626.3	1646.871	2406.832	1158049	0.018225	95197.44	103.0929	1813.237
SD	384412.4	0.001062	20891.4	81.70055	278.6021	61371.08	0.002318	12729.55	7.771122	186.3205
CV	4.922502	11.33878	12.60819	4.953077	11.46362	5.288438	12.65063	12.36579	7.527069	10.20515

结合不确定性分析结果中各特征化指标的平均值和标准差(SD)可知,本研究中的各环境影响类型特征值计算结果变异系数(CV)均 <15 。生命周期模型中 HT 和 ODP 计算的不确定度略高于 GWP、AP、POCP 等特征化指标,但计算结果整体的不确定性低。因此,本生命周期计算结果稳定可信,能准确反映该废气处理工艺对环境的影响。

表 5 敏感性分析计算结果

Table 5 Calculation results by sensitivity analysis

工艺系统	工艺参数	GWP	AP	HT	POCP	ODP
废气治理	供电量	III	III	IV	III	II
新工艺	药剂投入量	I	III	I	III	III
	天然气供给量	I	I	I	I	I
废气治理	供电量	II	III	III	I	III
原工艺	药剂投入量	I	I	I	I	III

根据污水站厌氧池废气治理工艺改造前后的标准化模型和敏感性分析结果,对制药行业废气治理工艺后续提标改造和减污降碳提出相应建议:1)虽然 RTO 工艺可通过燃烧高增温潜势 CH_4 ,降低废气对环境温室效应的影响,但是尾气中仍含有大量的温室气体(如 CO_2)。因此,后续可强化治理尾气的末端治理,发展“碳捕集”技术,降低温室效应的环境影响负荷。2)供电量是影响 LCA 计算结果最为敏感的因素,因此考虑达标排放的同时,还需降低设备运行能耗,从而有效降低治理过程的环境负荷。3)建立废气治理工艺全生命周期模型,分析各工序的污染负荷,掌握废气治理工艺的关键环节,以指导实现达到能耗、药耗、燃耗与烟气达标的最优方案。

3.4 不确定性分析

本生命周期清单数据基于经过校验的现场测量值,且数据来源于天津某制药厂中一整套厌氧池废气处理工艺流程实际运行数据。基于上述数据特征,对污水站厌氧池当量温室气体削减协同恶臭处理工艺生命周期模型特征值计算结果进行蒙特卡洛不确定性分析,计算结果见表 6。

4 温室气体削减效果及经济性评估

由第 3 节可知:温室效应既是厌氧池废气最主要的污染特性,也是废气治理工艺最为显著的环境影响。厌氧池废气处理工艺的排放来源主要有治理尾气的直接排放,以及能耗、药耗形成的间接排放。因此基于各产污环节的 GWP 和 2.3.1 节特征化模型计算方法,以 $\text{kg CO}_2\text{-eq}$ 计,分析废气治理过程中的碳足

迹路线,详见表7。

表7 厌氧池废气治理工艺各阶段的碳足迹

Table 7 Carbon footprint of each stage of the exhaust gas treatment process of anaerobic tank

系统	环节	工序	碳足迹/ (kg CO _{2-eq})	占比/%	
新工艺	电耗	收集系统	4.93×10 ⁴	23.52	
		前处理系统	6.54×10 ⁴		
		RTO系统	1.02×10 ⁵		
		后处理系统	5.55×10 ⁴		
		排污系统	1.71×10 ³		
	药耗	前处理系统	3.13×10 ²	6.81	
		后处理系统	7.90×10 ⁴		
	能耗	RTO天然气供给	1.46×10 ³	0.10	
		治理尾气	RTO燃烧废气		7.36×10 ⁵
	原工艺	电耗	收集系统	4.93×10 ⁴	3.55
光催化系统			1.32×10 ⁵		
化学吸收			1.25×10 ³		
排污系统			8.97×10 ⁴		
药耗			化学吸收药剂	1.06×10 ⁴	
治理尾气		光催化氧化 VOCs 碳排放	6.23×10 ³	96.30	
		化学吸收氧化 VOCs 碳排放	7.27×10 ³		
		甲烷排放量	7.36×10 ⁶		

治理尾气中所含有的温室气体是废气治理过程造成温室效应的最主要因素,而电耗是影响温室效应的次要因素。新工艺中治理尾气碳排放占总碳足迹的69.53%,电耗占23.52%。原工艺中治理尾气碳排放占总碳足迹的96.30%,电耗占3.55%。由3.1.1节的GWP计算结果可知:新工艺在整体GWP值下降的同时,治理尾气的碳足迹占比也有所下降。由此可见,新工艺相比原工艺能够显著减少运行过程中碳排放、降低厌氧池废气的温室潜值。因此,通过分析废气治理工艺对整体环境的当量温室气体削减量,可以用以评价新工艺对缓解“温室效应”综合效果^[19-21]。

由新工艺的技术原理可知,温室气体减排策略主要是:1)削减CH₄等具有强温室效应的温室气体;2)回收RTO烟气余热,减少热能燃料供给。

RTO系统年回收热值量见表8。燃烧废气的年平均浓度以 ρ (甲烷)=6000 mg/m³和 ρ (VOCs)=375.728 mg/m³计,RTO系统年运行所需热量1.24×10⁶ kJ/h。输送热效率以80%计,余热锅炉热效率以90%计。

4.1 温室气体削减效果核算

由2.2节可知:废气治理工艺产生GWP值的环

表8 RTO系统回收热值计算

Table 8 Calculation of heat recovery value of RTO system

污染物	进气浓度/ (mg/m ³)	甲烷产生 热值/ (kJ/h)	RTO自供热 所需热值/ (kJ/h)	富裕热量/ (kJ/h)	输送过程 热量/ (kJ/h)	余热锅炉 热量/ (kJ/h)
CH ₄	4000	3.00×10 ⁶	1.24×10 ⁶	3.26×10 ⁶	2.61×10 ⁶	2.35×10 ⁶
	8000	5.98×10 ⁶				
VOCs	375.728	4.73×10 ¹				

节主要集中在电耗、药耗、天然气消耗和排污废气等环节中。因此,为评估废气处理工艺改造前后对整体环境中当量温室气体的削减效果,本文选取GWP为代表,基于本工艺减排策略和2.3.1节特征化模型计算方法,改变模型输入参数,获得各工序的GWP值。通过比对各工序的GWP值的变化,从而得出工艺改造前后对厌氧池废气中温室气体削减当量值,为实现制药行业污水治理过程的“双碳目标”提供理论依据。

各个治理环节当量温室气体排放量/削减量汇总表9。综上,相比改造前,新工艺GWP削减量可达到7.53×10⁶ kg CO_{2-eq}。可以在高效治理厌氧池废气的同时,实现温室气体的“负排放”,有效推进“减污降碳,协同治理”的目标。

表9 温室气体削减效果核算

Table 9 Greenhouse gas reduction effect accounting

系统	工序	GWP值变化量/(kg CO _{2-eq})
新工艺	电耗	2.74×10 ⁵
	药耗	7.93×10 ⁴
	能耗	1.46×10 ³
	排放尾气	8.10×10 ³
	甲烷排放量	-7.28×10 ⁶
	回收余热	-1.41×10 ⁶
	当量温室气体总排放量	-7.53×10 ⁶
旧工艺	电耗	2.72×10 ⁵
	药耗	1.06×10 ⁴
	直接排放	7.37×10 ⁶
	甲烷排放量	7.36×10 ⁶
	当量温室气体总排放量	7.66×10 ⁶

4.2 经济性评估

本节以“双碳”目标为出发点,针对温室气体削减当量,从运行能耗、燃耗、碳交易额、耗材药剂投入、余热锅炉供热等方面,进行废气治理的经济效益核算(表10),为当量温室气体削减协同恶臭处理工艺改造方案的经济可行性提供理论支持。

由此可见,新工艺在高效净化当量温室气体及恶臭气体的同时,可每年节约运行成本1.21×10⁶元,具有良好的经济推广性。

表10 经济性评估结果

Table 10 Economic evaluation results

项目	新工艺	原工艺	单价	经济效益/ (元/a)
电/(kW·h/a)	3.00×10^5	1.85×10^5	0.722 元/(kW·h)	1.15×10^5
耗材药剂/ (元/a)	5.21×10^4	4.41×10^5	—	-3.89×10^5
自来水/(t/a)	2.03×10^3	3.15×10^3	7.222 元/t	-1.12×10^3
回收余热/ (m ³ 天然气/a)	—	5.78×10^5	2.5 元/m ³ 天然气	1.45×10^6
CO ₂ 排放量/ (t/a)	—	7.22×10^2	60 元/t CO ₂ (碳交易额)*	4.33×10^4
合计				1.21×10^6

注:* 碳交易额单价来源于全国碳市场碳排放配额(CEA)挂牌协议2022年1—8月收盘价。

5 结论

1) 制药行业污水站厌氧池废气治理工艺改造前、后对环境的主要影响均为温室效应。GWP的产生环节主要发生在电耗和治理尾气过程中。改造后的废气治理新工艺可有效降低运行期间所产生的GWP值及GWP标准化值的占比。

2) 从厌氧池废气中当量温室气体整体削减量角度分析,通过分解温室气体CH₄和回收余热等方式,废气治理新工艺相较而言GWP削减量可达到 7.53×10^6 kg CO_{2-eq},可推动实现制药行业污水站废气治理过程的“双碳目标”。

3) 通过对某药厂污水站厌氧池废气处理系统新工艺进行经济效益评估可知,相较而言可节约运行成本 1.21×10^6 元/a,在当量温室气体削减协同恶臭处理的同时,具备良好的经济可行性。

在环境标准日趋严格和“减污降碳,协同治理”的政策背景下,采用水吸收-碱吸收-蓄热式焚烧(RTO)-急冷-碱吸收工艺处理制药行业厌氧池废气,可以高效协同削减CH₄和恶臭气体,实现温室气体的“负排放”,有效推进“双碳”目标的实现。

参考文献

- [1] CHEN H, QI S Z, TAN X J. Decomposition and prediction of China's carbon emission intensity towards carbon neutrality: from perspectives of national, regional and sectoral level[J]. Science of the Total Environment, 2022,825: 153839.
- [2] 郭斌,宋玉,律国黎,等. 制药企业密集区空气中VOCs污染特性及健康风险评价[J]. 环境化学, 2014,33(8): 1354-1360.
- [3] GUI C W, LI G X, ZHU R S, et al. Capturing VOCs in the pharmaceutical industry with ionic liquids [J]. Chemical Engineering Science, 2022,252: 117504.
- [4] 窦红,姜建彪,刘翠棉,等. 发酵类制药企业污水处理厂废气中VOCs及厂界恶臭物质特征分析[J]. 河北工业科技, 2019,36(3): 215-220.
- [5] 赵秀梅. 化学原料药行业挥发性有机废气污染特征与治理中的主要问题及建议[J]. 环境工程学报, 2020,14(9): 2277-2283.
- [6] JACKSON R B, SOLOMON E I, CANADELL J G, et al. Methane removal and atmospheric restoration [J]. Nature Sustainability, 2019,2(6): 436-438.
- [7] 刘宇彤. 我国工业VOCs集中处理生命周期评价及技术经济研究[D]. 长春:吉林大学, 2020.
- [8] 沈兰. 造纸废水治理工艺的生命周期分析[D]. 苏州:苏州科技学院, 2010.
- [9] HSIEN C, LOW J, FUCHEN S C, et al. Life cycle assessment of water supply in Singapore: a water-scarce urban city with multiple water sources[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019,151: 104476.
- [10] 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.
- [11] 王婷,朱晓禹,董斌,等. 制药行业废水改造工程实例[J]. 给水排水, 2022,48(1): 83-85.
- [12] 韩进光,郑承军,王毅. 西安市北石桥污水处理工程生命周期评价研究[J]. 给水排水, 2009,35(增刊1): 214-217.
- [13] 钱大益,张梦然,苏伟. 脱硫灰处理生命周期环境影响评价[J]. 环境工程学报, 2021,15(5): 1716-1723.
- [14] 张杉雪,张文龙,熊维,等. 典型海水淡化工艺的生命周期评价[J]. 环境工程, 2019,37(3): 168-173.
- [15] 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.
- [16] 李文杰. 化学制药企业废水处理工程实例[J]. 环境工程学报, 2020,10(4): 606-612.
- [17] ZHOU J K, YIN T, TIAN J. Research on the impact of Beijing-Tianjin-Hebei electric power and thermal power industry on haze pollution[J]. Energy Reports, 2022,8: 1698-1710.
- [18] SOLOMON, SUSAN. Progress towards a quantitative understanding of Antarctic ozone depletion[J]. Nature, 1990,347(6291): 347-354.
- [19] 吉倩倩. 生命周期评价在城市污水处理的环境效益分析中的应用[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2010.
- [20] XU M M, TAN R P. How to reduce CO₂ emissions in pharmaceutical industry of China: evidence from total-factor carbon emissions performance[J]. Journal of Cleaner Production, 2022,337: 130505.
- [21] DONG Z Y Z, XIA C Y, FANG K, et al. Effect of the carbon emissions trading policy on the co-benefits of carbon emissions reduction and air pollution control[J]. Energy Policy, 2022,165: 112998.