

# 静脉产业园沼气利用方式的碳减排分析

刘殊嘉

(上海康恒环境股份有限公司, 上海 201703)

**摘要:** 可再生能源的发展是减少温室气体排放的重要措施之一。以青岛市某静脉产业园为研究对象, 基于国家核证自愿减排量 (CCER) 方法学 CM-072-V01 对 5 种沼气利用方式即火炬燃烧、入炉焚烧发电、内燃机发电、锅炉供热、提纯制天然气的碳排放进行评估和比较, 以确定最低碳的利用方式。结果表明, 5 种沼气利用方式的碳减排量由高到低依次为: 内燃机发电 (9505.18 tCO<sub>2</sub>e)、锅炉供热 (9048.36 tCO<sub>2</sub>e)、入炉焚烧发电 (5963.83 tCO<sub>2</sub>e)、提纯制天然气 (4658.73 tCO<sub>2</sub>e)、火炬燃烧 (-7695.04 tCO<sub>2</sub>e)。选取沼气作为替代能源利用时, 应考虑项目所在地、替代能源类型以及设备能耗等因素。在华北地区, 采用内燃机发电是最为低碳的沼气利用方式, 具有较高的碳减排效益。

**关键词:** 静脉产业园; 沼气利用; 碳排放; CCER

中图分类号: S216.4; X703 文献标志码: A 文章编号: 1000-1166(2023)02-0017-06

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023020017

**Carbon Emission Reduction Analysis of Biogas Utilization Method in Vein Industrial Park / LIU Shujia / (Shanghai SUS Environment Co Ltd, Shanghai 201703, China)**

**Abstract:** Renewable energy development is one of the essential measures to reduce greenhouse gas emissions. This study was conducted to assess and compare the carbon emissions of five biogas utilization methods, and taking a vein industrial park in Qingdao as an example. The Chinese Certified Emission Reduction methodology CM-072-V01 was used to compare flare combustion, incineration for power generation, internal combustion engine for power generation, boiler for heating, and purification for natural gas to determine the most low-carbon utilization method. The results showed that the carbon emission reductions of the five biogas utilization methods were in descending order: internal combustion engine for power generation (9505.18 tCO<sub>2</sub>e), boiler for heating (9048.36 tCO<sub>2</sub>e), incineration for power generation (5963.83 tCO<sub>2</sub>e), purification for natural gas (4658.73 tCO<sub>2</sub>e), and flare combustion (-7695.04 tCO<sub>2</sub>e). When selecting biogas as an alternative energy source, factors such as project location, the type of alternative energy, and equipment energy consumption should be considered. In North China, using an internal combustion engine for power generation is the most low-carbon way to biogas utilization method, which has higher carbon emission reduction benefits.

**Key words:** vein industrial park; biogas utilization; carbon emission; CCER

在“双碳”目标和绿色发展的双重时代背景下, 固体废弃物的治理问题事关社会的可持续发展和人民的健康安全。据国家统计局数据显示, 自 2010 年以来, 我国生活垃圾清运量逐年增长, 2020 年城市生活垃圾清运量已达 23511.7 万吨<sup>[1]</sup>。近年来随着循环经济的发展, 各地规划并建设了以生活垃圾焚烧发电为核心的静脉产业园<sup>[2]</sup>。静脉产业园通过建立循环产业链, 将城市生产和消费过程中产生的固体废物进行资源化处理, 实现物质和能量的双重循环, 有助于减污降碳协同增效<sup>[3]</sup>。

静脉产业园渗滤液处理系统主要采用厌氧+好氧组合的生化工艺来处理高浓度有机废水<sup>[4-5]</sup>。厌氧消化技术不仅能降解废水中的有机物, 还能产生沼气<sup>[6]</sup>。沼气作为一种清洁可再生能源, 可以缓解能源短缺问题, 并且有助于温室气体的减排。目前较为普遍的沼气利用方式主要为 5 种: 应急火炬燃烧、沼气入炉焚烧、沼气内燃机发电、沼气锅炉供热以及提纯制天然气<sup>[7-9]</sup>。然而, 不同沼气利用方式能耗不同, 所产生的碳排放也会有所差别。且国内外学者大多研究不同沼气利用方式的环境影响差

收稿日期: 2022-10-27 修回日期: 2022-12-12

作者简介: 刘殊嘉(1996-)女, 汉族, 上海人, 硕士, 主要研究方向为固废资源化利用, E-mail: 364351088@qq.com

异<sup>[10-11]</sup>和经济效益<sup>[12]</sup>,缺乏对不同沼气利用方式的碳减排分析。因此,本文将以青岛市某静脉产业园为研究对象,基于渗滤液处理站实际运行数据,采用CCER方法学,对上述5种常见的沼气利用方式进行碳排放计算并比较分析,为静脉产业园沼气利用方式的选择提供科学依据。

## 1 研究对象和方法

### 1.1 研究对象

本研究以青岛市某静脉产业园为研究对象。该静脉产业园处理生活垃圾 2250 t·d<sup>-1</sup>、餐厨垃圾 100 t·d<sup>-1</sup> 配套建设 1300 t·d<sup>-1</sup> 渗滤液处理站。园区内餐厨垃圾预处理后的有机浆液送至渗滤液处理站进行协同处理。渗滤液处理工艺为“预处理 + UASB 厌氧反应器 + MBR 膜生物反应器(A/O + 超滤) + 纳滤 + 反渗透”。渗滤液在厌氧处理过程中会产生大量沼气,沼气分别采用5种工艺进行利用(见图1)。碳排放计算采用园区渗滤液处理站2020年8月~2021年7月期间的运行数据,沼气组分、设备功率等参数均由厂家提供。

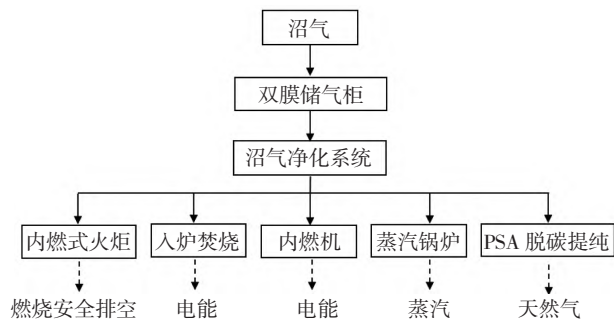


图1 沼气不同处理工艺流程

### 1.2 研究方法

碳排放核算方法采用国家发改委颁布的温室气体自愿减排方法学《CM-072-V01: 多选垃圾处理方式(第一版)》,该方法学参考了CDM项目方法学ACM0022适用于拟在固体垃圾处理点处理新鲜垃圾的项目活动,涉及一种或多种组合的垃圾处理工艺,包括堆制肥料或联合堆肥、厌氧消化<sup>[13]</sup>、热处理、机械处理、气化和焚烧<sup>[14]</sup>。同时引用CDM工具和指南包括《基准线情景识别与额外性论证组合工具(第07.0版)》《电力系统排放因子计算工具(第07.0版)》《电力消耗导致的基准线、项目和/或泄漏排放计算工具(第03.0版)》《厌氧消化池项目和泄漏排放的计算工具(第02.0版)》《确定含甲烷

气体燃烧项目排放量的工具》《2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子》《IPCC 2006年国家温室气体清单指南2019修订版》等。

采用CM-072-V01方法学计算碳排放主要包括基准线情景识别、项目边界确定、泄露估算、减排量计算等过程。本研究探讨静脉产业园中沼气不同利用方式的碳减排效果,故边界条件设置为沼气利用的活动范围,不考虑静脉产业园中垃圾处理活动带来的碳排放,不存在项目泄露。

沼气利用活动的项目减排量:

$$ER_y = BE_y - PE_y \quad (1)$$

式中:  $ER_y$  为第  $y$  年的减排量, tCO<sub>2</sub>e;  $BE_y$  为第  $y$  年的基准线排放, tCO<sub>2</sub>e;  $PE_y$  为第  $y$  年的项目排放, tCO<sub>2</sub>e。

#### 1.2.1 基准线排放

沼气利用活动的基准线排放:

$$BE_y = BE_{EN_y} + BE_{NG_y} \quad (2)$$

$$BE_{EN_y} = BE_{EC_y} + BE_{HG_y} \quad (3)$$

式中:  $BE_{EN_y}$  为第  $y$  年与能源生产相关的基准线排放, tCO<sub>2</sub>e;  $BE_{NG_y}$  为第  $y$  年与天然气利用相关的基准线排放, tCO<sub>2</sub>e;  $BE_{EC_y}$  为第  $y$  年与发电相关的基准线排放, tCO<sub>2</sub>;  $BE_{HG_y}$  为第  $y$  年产热相关的基准线排放, tCO<sub>2</sub>。

与沼气发电相关的基准线排放:

$$BE_{EC_y} = \sum EC_{BL_k_y} \times EF_{EF_k_y} \times (1 + TDL_{k_y}) \quad (4)$$

式中:  $EC_{BL_y}$  为项目活动生产的电量, MWh;  $EF_{EF_k_y}$  为第  $y$  年电源  $k$  电量产生的排放因子, tCO<sub>2</sub>·MWh<sup>-1</sup>, 取值为项目所在地华北区域电网基准线排放因子;  $TDL_{k_y}$  为第  $y$  年电源  $k$  供电平均输电和配电损耗率。

与沼气产热相关的基准线排放:

$$BE_{HG_y} = \frac{HG_{PJ_y} \times EF_{CO_2BL_HG}}{\eta_{HG_{BL}}} \quad (5)$$

式中:  $HG_{PJ_y}$  为第  $y$  年替代化石燃料锅炉所产生的基准线热量的项目活动的供热量, TJ;  $EF_{CO_2BL_HG}$  为基准线锅炉产热所使用的化石燃料类型的CO<sub>2</sub>排放因子, tCO<sub>2</sub>·TJ<sup>-1</sup>, 化石燃料类型这里指柴油;  $\eta_{HG_{BL}}$  为基准线用于产热的锅炉的效率。

与沼气提纯制天然气相关的基准线排放:

$$BE_{NG_y} = BIOGAS_{NG_y} \times NCV_{BIOGAS_{NG_y}} \times EF_{CO_2_{NG_y}} \quad (6)$$

式中:  $BIOGAS_{NG_y}$  为第  $y$  年因项目活动而输送至天然气管网的提纯沼气体积, Nm<sup>3</sup>;  $NCV_{BIOGAS_{NG_y}}$  为第  $y$  年因项目活动而输送至天然气管网的提纯沼气

的净热值,  $\text{TJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$ ;  $EF_{\text{CO}_2, \text{NG}_y}$  为第  $y$  年天然气管网中天然气的平均  $\text{CO}_2$  排放因子,  $\text{tCO}_2\cdot\text{TJ}^{-1}$ 。

1.2.2 项目排放

沼气利用活动的项目排放:

$$PE_y = PE_{EC_y} + PE_{AD_y} \quad (7)$$

式中:  $PE_{EC_y}$  为第  $y$  年沼气利用活动中电力消耗排放  $\text{tCO}_2\text{e}$ ;  $PE_{AD_y}$  为第  $y$  年厌氧消化和沼气燃烧产生的项目排放量  $\text{tCO}_2\text{e}$ 。

电力消耗产生的项目排放:

$$PE_{EC_y} = \sum EC_{Pj_y} \times EF_{EFj_y} \times (1 + TDL_{j_y}) \quad (8)$$

式中:  $EC_{Pj_y}$  为项目活动消耗的电量,  $\text{MWh}$ ;  $EF_{EFj_y}$  为第  $y$  年电源  $j$  电量产生的排放因子,  $\text{tCO}_2\cdot\text{MWh}^{-1}$ ;  $TDL_{j_y}$  为第  $y$  年电源  $j$  供电平均输电和配电损耗率。

沼气燃烧产生的项目排放:

$$PE_{AD_y} = PE_{flare_y} = \sum_{h=1}^{8760} TM_{RC_h} \times (1 - \eta_{HG_{BL}}) \times \frac{GWP_{CH_4}}{1000} \quad (9)$$

式中:  $PE_{flare_y}$  为第  $y$  年沼气燃烧产生的项目排放量  $\text{tCO}_2\text{e}$ ;  $TM_{RC_h}$  为甲烷在  $h$  小时内残余气体的质量流量,  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ;  $\eta_{HG_{BL}}$  为在  $h$  小时内火炬燃烧效率;  $GWP_{CH_4}$  为甲烷全球变暖潜能值,  $\text{tCO}_2\text{e}\cdot\text{t}^{-1}\text{CH}_4$ 。

计算过程中所涉及的相关参数取值如表 1 所示。

表 1 碳排放计算过程中相关参数

项目	数值
$EF_{EFj_y} / \text{tCO}_2\cdot\text{MWh}^{-1}$	0.7119
$TDL_{k_y} / \%$	3
$EF_{\text{CO}_2, \text{BL}_{HG}} / \text{tCO}_2\cdot\text{TJ}^{-1}$	74.1
$NCV_{\text{BIOGAS}_{\text{NG}_y}} / \text{MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$	33.66
$\eta_{HG_{BL}} / \%$	90
$EF_{\text{CO}_2, \text{NG}_y} / \text{tCO}_2\cdot\text{TJ}^{-1}$	56.1
$EF_{EFj_y} / \text{tCO}_2\cdot\text{MWh}^{-1}$	0.7199
$TDL_{j_y} / \%$	20
$\rho_{\text{CH}_4, T} / \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	0.716
$\eta_{HG_{BL}} / \%$	90
$GWP_{\text{CH}_4} / \text{tCO}_2\text{e}\cdot\text{t}^{-1}\text{CH}_4$	25

2 结果与分析

2.1 青岛市某静脉产业园沼气产量变化

2020 年 8 月~2021 年 7 月青岛市某静脉产业园沼气产量变化如图 2 所示, 沼气年产量约 548.6

万  $\text{m}^3$ , 日均产量约 15000  $\text{m}^3$ 。静脉产业园渗滤液站厌氧反应器产气量受温度影响较大<sup>[15]</sup>, 在 2021 年 1 月沼气产量最低, 为 27.7 万  $\text{m}^3$ , 在 2021 年 5 月沼气产量最高, 达到 59.3 万  $\text{m}^3$ , 呈现“夏高冬低”的变化趋势。沼气成分组成如表 2 所示, 主要由 70% 甲烷、30% 二氧化碳和微量硫化氢气体组成。硫化氢气体易对设备造成腐蚀性破坏, 从而影响设备性能, 因此在沼气利用之前, 需对其进行过滤、脱水、脱硫、增压等预处理, 以满足后端设备的进气要求。

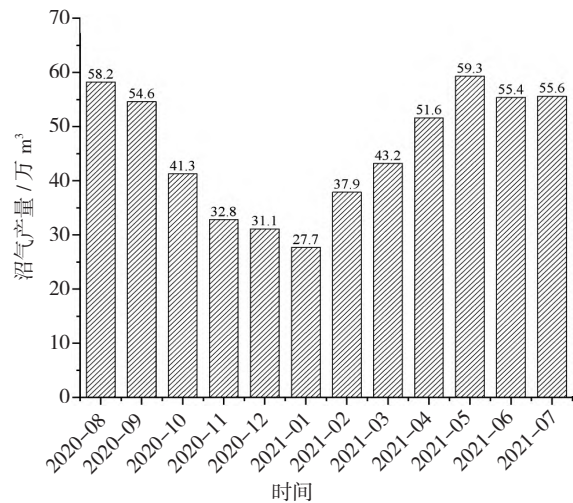


图 2 青岛市某静脉产业园沼气产量变化

表 2 沼气成分组成表

$\text{CH}_4$	$\text{CO}_2$	$\text{O}_2$	$\text{N}_2$	$\text{H}_2\text{S}$	热值
%	%	%	%	ppm	( $\text{MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$ )
70	30	0	0	$\leq 7000$	25.13

2.2 沼气不同利用方式的碳排放分析

2.2.1 火炬燃烧

沼气火炬是静脉产业园渗滤液处理站的必要设施, 一般作为沼气的应急处理装置, 在产气过大、设备检修等情况时启用。渗滤液处理站厌氧反应器产生的沼气先收集储存至双膜气柜中, 经静置稳压后加压送入预处理系统脱水、脱硫, 随后通入内燃式火炬直接安全燃烧排放。沼气以火炬燃烧的方式直接燃烧生成  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ , 此过程无资源化利用, 因此基准线排放( $BE_{y1}$ ) 为 0  $\text{tCO}_2\text{e}$ 。项目排放包括设备运行的电耗排放和沼气燃烧产生的排放, 火炬燃烧主要耗能设备如表 3 所示, 由增压风机、沼气脱硫脱水装置和沼气燃烧装置组成。

由公式 (8) 可得, 电力消耗产生的项目排放 ( $PE_{EC_y}$ ) 为:

$$108.5 \times 24 \times 365 / 1000 \times 0.7199 \times (1 + 20\%) = 821.08 \text{ tCO}_2\text{e}$$

由公式(9)可得,沼气燃烧产生的项目排放( $PE_{flare,y}$ )为:

$$5486000 \times 70\% \times 0.716 \times (1 - 90\%) \times 25 / 1000 = 6873.96 \text{ tCO}_2\text{e}$$

因此,由公式(1)可得,沼气火炬燃烧的碳减排量( $ER_{y1}$ )为:

$$0 - 821.08 - 6873.96 = -7695.04 \text{ tCO}_2\text{e}$$

表3 火炬燃烧主要耗能设备

设备	数量	总功率/kW
增压风机	1	30
沼气脱硫脱水装置 (含泵、再生风机、冷干机等装置)	若干	60
沼气燃烧装置	1	18.5

### 2.2.2 入炉焚烧发电

沼气入炉焚烧发电是目前垃圾焚烧发电项目常用的一种处理手段,用以节能并改善焚烧炉炉膛的燃烧情况。预处理后的沼气经增压风机增压至系统所需要的压力(5~20 kPa),随后通过燃烧器送入炉膛进行燃烧。每台焚烧炉左右各配置一个燃烧器,并设置两台助燃风机,用于补充沼气燃烧的需氧量,避免达到爆炸极限。沼气燃烧产生的热量随同生活垃圾焚烧发电上网,即替代传统燃煤火力发电。

沼气入炉焚烧发电效率按25%计算,由公式(4)可得,沼气入炉焚烧发电的基准线排放( $BE_{y2}$ )为:

$$5486000 \times 25.13 \times 25\% / 3.6 / 1000 \times 0.7199 \times (1 + 3\%) = 7098.97 \text{ tCO}_2\text{e}$$

沼气入炉焚烧发电主要耗能设备如表4所示,则电力消耗产生的项目排放( $PE_{EC2,y}$ )为:

$$150 \times 24 \times 365 / 1000 \times 0.7199 \times (1 + 20\%) = 1135.14 \text{ tCO}_2\text{e}$$

因此,沼气入炉焚烧发电的碳减排量( $ER_{y2}$ )为:

$$7098.97 - 1135.14 = 5963.83 \text{ tCO}_2\text{e}$$

表4 入炉焚烧发电主要耗能设备

设备	数量	总功率/kW
沼气脱硫脱水装置 (含泵、再生风机、冷干机等装置)	若干	60
增压风机	2	60
助燃风机	2	30

### 2.2.3 沼气内燃机发电

沼气通过内燃机转化为机械能,从而使发电机

旋转发电。根据本项目的产气量变化和内燃机特性,选择2台GE颜巴赫J329GS燃气发电机组,单台发电功率为1063 kW,能够满足全年沼气发电需求。沼气通过内燃机发电上网,替代了传统燃煤火力发电,颜巴赫发电机组电转换效率按38%计算,则每立方米沼气可产电量约为:

$$25.13 \times 38\% / 3.6 = 2.65 \text{ kW}\cdot\text{h}$$

由公式(4)可得,沼气内燃机发电的基准线排放( $BE_{y3}$ )为:

$$5486000 \times 25.13 \times 38\% / 3.6 / 1000 \times 0.7199 \times (1 + 3\%) = 10790.43 \text{ tCO}_2\text{e}$$

沼气内燃机发电主要耗能设备如表5所示,发电机组耗电量约占总发电量的3%,则电力消耗产生的项目排放( $PE_{EC3,y}$ )为:

$$(120 \times 24 \times 365 / 1000 + 5486000 \times 25.13 \times 38\% / 3.6 / 1000 \times 3\%) \times 0.7199 \times (1 + 20\%) = 1285.25 \text{ tCO}_2\text{e}$$

因此,沼气内燃机发电的碳减排量( $ER_{y3}$ )为:

$$10790.43 - 1285.25 = 9505.18 \text{ tCO}_2\text{e}$$

表5 沼气内燃机发电主要耗能设备

设备	数量	总功率/kW
沼气脱硫脱水装置 (含泵、再生风机、冷干机等装置)	若干	60
增压风机	2	60
颜巴赫J329GS燃气发电机组	2	2126

### 2.2.4 锅炉供热

锅炉供热是指沼气作为燃料在锅炉炉膛内燃烧,其化学能转化为热能,产生的蒸汽向外供热。根据本项目“夏高冬低”的产气特性,配置额定蒸发量 $2 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $4 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ 的蒸汽锅炉各1台,每吨蒸汽消耗沼气约 $140 \sim 170 \text{ m}^3$ ,春夏季产气量高时两台锅炉并联运行,秋冬季产气量低时仅运行一台 $4 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ 蒸汽锅炉。蒸汽锅炉在低压(1.25 MPa)下运行,以水为介质,给水温度 $20^\circ\text{C}$ ,出口蒸汽温度为 $194^\circ\text{C}$ ,热效率约为90%,则每立方米沼气供热量为:

$$25.13 \times 90\% = 22.617 \text{ MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$$

由公式(5)可得,锅炉供热的基准线排放( $BE_{y4}$ )为:

$$5486000 \times 22.617 \times 74.1 / 10^6 / 90\% = 10215.66 \text{ tCO}_2\text{e}$$

锅炉供热主要设备参数如表6所示,则电力消耗产生的项目排放( $PE_{EC4,y}$ )为:

$$154.25 \times 24 \times 365 / 1000 \times 0.7199 \times (1 + 20\%)$$



$$= 1167.30 \text{ tCO}_2\text{e}$$

因此, 锅炉供热的碳减排量( $ER_{34}$ )为:

$$10215.66 - 1167.30 = 9048.36 \text{ tCO}_2\text{e}$$

表6 锅炉供热主要耗能设备

设备	数量	总功率(kW)
沼气脱硫脱水装置 (含泵、再生风机、冷干机等装置)	若干	60
增压风机	2	60
2 t·h <sup>-1</sup> 蒸汽锅炉	1	18.5
4 t·h <sup>-1</sup> 蒸汽锅炉	1	25

### 2.2.5 提纯制天然气

沼气提纯制天然气是指沼气经脱硫净化、脱碳提纯等工艺制取的高品质生物天然气,可直接输送至天然气管网作为民用燃气<sup>[16]</sup>。根据本项目的产气特性,选择采用变压吸附法(PSA)提纯沼气脱除CO<sub>2</sub>,甲烷回收率96%,最终产品气气质达到《天然气》(GB17820—2018)标准中的二类天然气标准,每立方米沼气可制得约0.72 Nm<sup>3</sup>天然气,由公式(6)可得,沼气提纯制天然气的基准线排放( $BE_{35}$ )为:

$$5486000 \times 0.72 \times 33.66 \times 56.1 / 10^6 = 7458.74 \text{ tCO}_2\text{e}$$

沼气提纯制天然气主要耗能设备如表7所示,则电力消耗产生的项目排放( $PE_{EC5}$ )为:

$$370 \times 24 \times 365 / 1000 \times 0.7199 \times (1 + 20\%) = 2800.01 \text{ tCO}_2\text{e}$$

因此,沼气提纯制天然气的碳减排量( $ER_{35}$ )为:

$$7458.74 - 2800.01 = 4658.73 \text{ tCO}_2\text{e}$$

表7 沼气提纯制天然气主要耗能设备

设备	数量	总功率/kW
沼气脱硫脱水装置 (含泵、再生风机、冷干机等装置)	若干	60
增压风机	2	60
PSA 脱碳提纯装置	若干	250

### 2.2.6 分析与对比

不同沼气利用方式的碳减排量如图3所示。5种沼气利用方式的碳减排量由高到低依次为:内燃机发电(9505.18 tCO<sub>2</sub>e) > 锅炉供热(9048.36 tCO<sub>2</sub>e) > 入炉焚烧发电(5963.83 tCO<sub>2</sub>e) > 提纯制天然气(4658.73 tCO<sub>2</sub>e) > 火炬燃烧(-7695.04 tCO<sub>2</sub>e)。当沼气用于应急火炬燃烧时,其碳减排量为负值,这是由于沼气在燃烧过程中不存在资源化

利用,并且产生了CO<sub>2</sub>,消耗了电能,相当于直接排放7695.04 tCO<sub>2</sub>e。目前,某些餐厨垃圾<sup>[17]</sup>、污泥<sup>[18]</sup>、废水<sup>[19]</sup>处理工程在实际运行过程中产生的富余沼气依然通过火炬燃烧排空,在双碳的背景下应进一步加强沼气的资源化利用。

在沼气作为替代能源利用时,沼气内燃机发电碳减排效果明显优于其他3种利用方式(入炉焚烧发电、锅炉供热、提纯制天然气),主要原因是内燃机发电效率较高,其作为替代能源产生的基准线排放也高于其他3种利用方式,为10790.43 tCO<sub>2</sub>e,相当于每立方米沼气内燃机发电产生的基准线排放为 $1.97 \times 10^{-3} \text{ tCO}_2\text{e} \cdot \text{m}^{-3}$ ,其次是锅炉供热(10215.66 tCO<sub>2</sub>e,  $1.86 \times 10^{-3} \text{ tCO}_2\text{e} \cdot \text{m}^{-3}$ )、提纯制天然气(7458.74 tCO<sub>2</sub>e,  $1.36 \times 10^{-3} \text{ tCO}_2\text{e} \cdot \text{m}^{-3}$ )、入炉焚烧发电(7098.97 tCO<sub>2</sub>e,  $1.29 \times 10^{-3} \text{ tCO}_2\text{e} \cdot \text{m}^{-3}$ )。赵恩泽<sup>[20]</sup>等人采用CDM方法学计算了西北地区某污泥厌氧消化系统的碳减排量,该厂每立方米沼气拖动鼓风机节电的基准线排放为 $1.70 \times 10^{-3} \text{ tCO}_2\text{e} \cdot \text{m}^{-3}$ ,低于本研究中每立方米沼气内燃机发电的基准线排放,高于本研究中每立方米沼气入炉焚烧发电的基准线排放,这可能是由于本文研究对象所在区域为华北区域,不同区域的电网基准线排放因子不一,说明碳减排效果与能源利用效率以及项目所在区域的电网基准线排放因子有关。除此之外,碳减排效果还与替代化石燃料类型及其排放因子有关。张志渊<sup>[21]</sup>等人对华北地区某污水处理厂进行了碳减排分析,该厂沼气替代了天然气(排放因子为 $56.1 \text{ tCO}_2 \cdot \text{TJ}^{-1}$ )用于锅炉产热,每立方米沼气锅炉产热产生的基准线排放为 $1.48 \times 10^{-3} \text{ tCO}_2\text{e} \cdot \text{m}^{-3}$ ,低于本研究每立方米沼气替代柴油(排放因子为74.1

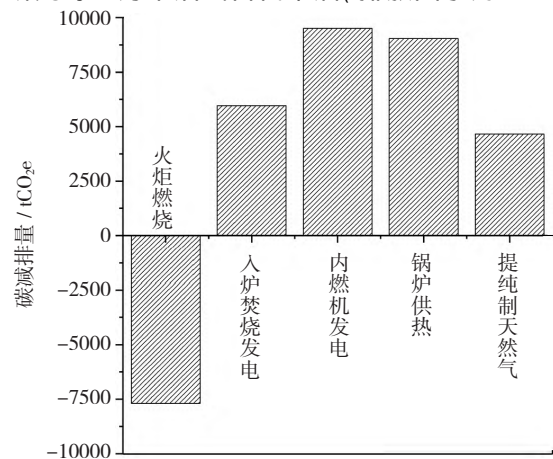


图3 不同沼气利用方式的碳减排量对比

tCO<sub>2</sub>·TJ<sup>-1</sup>) 锅炉供热的结果。

综上所述,选取具体的沼气利用方式,应考虑项目所在地、替代能源类型及设备能耗等因素,在华北地区,采用内燃机发电是最为低碳的沼气利用方式,具有较高的碳减排效益。

### 3 结论

(1) 根据 CCER 方法学进行碳排放计算,结果表明沼气采用不同的利用方式,其碳减排效果也有所差异。沼气利用活动中的碳减排量主要得益于作为替代能源产生的基准线排放和较低的项目排放水平。

(2) 当产气量过大或设备检修时,沼气用于应急火炬燃烧,属于应急处置,其主要目的是达标排放,不存在资源化利用,碳减排量为负值(-7695.04 tCO<sub>2</sub>e)。

(3) 选取沼气作为替代能源利用时,应考虑项目所在地、替代能源类型及设备能耗等因素,在华北地区,采用内燃机发电是最为低碳的沼气利用方式,具有较高的碳减排效益,可达到 9505.18 tCO<sub>2</sub>e。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [2] 杜欢政, 张芳. 中国资源循环利用产业发展模式研究[J]. 生态经济, 2013(07): 33-37+84.
- [3] 龙吉生, 杜海亮, 邹昕, 等. 关于城市生活垃圾处理碳减排的系统研究[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(08): 1143-1153.
- [4] 官桐乐, 刘永红, 贺超, 等. 垃圾焚烧渗滤液处理工艺研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(04): 1119-1123.
- [5] 陈燕, 任洪艳, 阮文权. 厌氧-好氧工艺处理垃圾焚烧厂渗滤液工程运行效果[J]. 环境工程学报, 2015, 9(12): 5750-5756.
- [6] 许国芹, 尹芳, 张无敌, 等. 城市垃圾渗滤液厌氧消化试验研究[J]. 中国沼气, 2017, 35(05): 20-24.
- [7] 田焯, 唐侠, 李游, 等. 有机物与有机废水的沼气资源

化利用研究[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(04): 37-41.

- [8] 张桂仙. 静脉产业园沼气利用方式比较分析[J]. 中国新技术新产品, 2020(11): 123-125.
- [9] 董顶, 田兴, 李宽峰, 等. 造纸废水处理与沼气利用工程调试及运行[J]. 中国给水排水, 2018, 34(02): 86-90.
- [10] 吴媛媛, 常旭宁, 张佳维. 基于 LCA 方法的秸秆沼气发电和制备生物天然气的环境排放评价[J]. 中国沼气, 2020, 38(01): 59-65.
- [11] Alengebawy A, Mohamed B A, Ghimire N, et al. Understanding the environmental impacts of biogas utilization for energy production through life cycle assessment: An action towards reducing emissions [J]. Environmental Research, 2022, 213: 113632.
- [12] 刘青荣, 阮应君, 吴家正. 养殖场沼气综合利用系统的热经济学分析[J]. 中国沼气, 2016, 34(02): 62-65.
- [13] 易志刚, 祖柱, 王瑞洋. 基于 CCER 方法学的餐厨垃圾处理项目碳减排量十年预测研究[J]. 广东化工, 2021, 48(11): 111-114+100.
- [14] 黄静颖, 张浩, 谭钦怀, 等. 小型垃圾热解气化焚烧厂碳排放计算[J]. 环境卫生工程, 2021, 29(04): 1-6.
- [15] 刘青荣, 李深, 晁亮亮, 等. 不同环境温度下沼气工程厌氧罐内料温研究[J]. 中国沼气, 2016, 34(05): 67-72.
- [16] 甄峰, 李东, 孙永明, 等. 沼气高值化利用与净化提纯技术[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(11): 103-108.
- [17] 周曼. 浅析武汉市某餐厨废弃物厌氧发酵产沼气工程[J]. 广东化工, 2021, 48(24): 135-136+115.
- [18] 宋晓雅. 小红门污泥热水解厌氧消化项目运行两周年之回顾[J]. 中国给水排水, 2018, 34(22): 116-122.
- [19] 付永猛, 夏亚龙, 雷成军, 等. 乳业废水沼气利用与碳减排的工程探索[J]. 低碳世界, 2022, 12(01): 46-48+76.
- [20] 赵恩泽, 张云. 污泥厌氧消化系统的碳减排效果分析[J]. 绿色环保建材, 2019(04): 22-23.
- [21] 张志渊, 孙冀垆. 小红门污水处理厂污泥厌氧消化系统碳减排量计算分析[J]. 山东工业技术, 2016(07): 37-39.