

秸秆沼气化发电技术生命周期评估及经济分析

马国杰¹, 朱琳影¹, 张苗苗², 赵肖玲^{2,3,4*}, 常春^{2,3,4}

(1. 郑州大学管理学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学化工学院, 郑州 450001; 3. 车用生物燃料技术国家重点实验室, 安阳 473000; 4. 河南省杰出外籍科学家工作室, 郑州 450001)

摘要: 该研究基于生命周期评价方法和时间价值动态分析方法对沼气直燃发电技术、沼气燃料电池发电技术作可行性分析, 并与燃煤发电技术相比, 旨在综合评估三种发电技术在环境和经济上的特点, 为发电方式选择提供参考依据。结果表明: 沼气燃料电池发电技术环境效益最佳, 总环境影响负荷为 8.55×10^{-4} , 沼气直燃发电技术总环境影响负荷为 2.15×10^{-2} , 两者相较于燃煤发电 (2.97×10^{-1}) 的减排量分别为 99.71% 和 92.76%。在经济上, 沼气直燃发电技术的投资回收期最短 (12.03 a), 运营期净现值可达 1 361 246 Yuan/MW; 其次是燃煤发电技术 (14.5 a), 净现值为 423 933 Yuan/MW; 沼气燃料电池发电技术动态回收期 > 20 a 且未实现盈余。说明沼气直燃发电技术在近期内将仍是替代燃煤发电的最佳发电技术之一。

关键词: 秸秆; 沼气发电; 经济分析; 生命周期评估; 环境负荷

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.24.018

中图分类号: X71; F4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-24-0162-07

马国杰, 朱琳影, 张苗苗, 等. 秸秆沼气化发电技术生命周期评估及经济分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(24): 162-168.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.24.018 <http://www.tcsae.org>

Ma Guojie, Zhu Linying, Zhang Miaomiao, et al. Life cycle assessment and economic analysis of straw biogasification power generation technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(24): 162-168. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.24.018 <http://www.tcsae.org>

0 引言

目前不可再生能源造成的能源枯竭、环境污染等问题严重阻碍了中国社会可持续发展道路的发展^[1], 激烈的国际能源竞争也使能源问题晋升为影响国家战略的问题之一^[2], 向可再生能源转型对中国发展至关重要。生物质能源作为低碳替代能源, 具有很高的应用潜力^[3-4]。中国作为农业大国, 每年秸秆燃烧引起的农村面源污染^[5], 已使农业部门成为温室气体碳排放的重要来源^[6]。而农业废弃物资源的资源量大, 可作为生物质能源的主要来源^[7]。目前国内外对生物质资源利用研究重点依然是生物质燃料化, 根据利用方式不同可分为生物质直接燃烧、气化、液化、热解、固化等^[8-12]。国外近年对生物质的研究重点包括热解、气化、液化和沼气燃料电池发电技术研究^[13-15]。中国作为发展中国家, 研究重点是通过直接燃烧、液化和沼气化等方式制备燃料, 以满足中国发电需求^[16-18]。

沼气发电作为高效、环保的发电技术, 合理运用能大幅度减少碳排放^[19], 符合中国能源循环利用的理念, 同时能带来极大的经济效益和社会效益。本文选择技术

成熟度较高的沼气直燃发电技术和目前热度较高的沼气燃料电池发电技术, 分析两者的可行性。秸秆含有大量纤维素、半纤维素, 适合作厌氧发酵原料^[20]。沼气直燃发电技术和沼气燃料电池发电技术均是以秸秆为原料进行厌氧消化, 将产生的沼气直接转化为电能, 因此统称为秸秆沼气化发电技术。其中沼气燃料电池发电技术能量转换效率更高^[21-22]。沼气直燃发电技术是传统的沼气发电技术, 通过利用有机废弃物厌氧发酵, 产生的沼气进行简单提纯后直接燃烧驱动发电机组发电^[23]。沼气燃料电池发电技术是在燃料电池的基础上以高度提纯的沼气 (甲烷浓度 > 90%) 作燃料, 利用电化学反应过程产生电流的高效发电装置^[24]。其发电的方式有两种, 既可通过高温燃料电池直接发电, 也可经过重整后转换为氢气作为燃料电池的传统燃料^[25], 本文研究的沼气燃料电池发电方式为第二种。

目前对生物质能源转化项目的可行性分析方法包括全生命周期评价法 (Life Cycle Assessment, LCA)、模型模拟分析以及工艺流程分析等, 用于评估生物质转化技术的经济、环境、工艺可行性^[26-29]。中国对生物质可行性研究主要是评估单种生物质转化项目的可行性, 鲜少有人对比分析多种生物质转化技术的可行性, 并分析特点。

本文基于 LCA 和时间价值的动态分析方法, 旨在综合评估秸秆沼气化发电技术、并于燃煤发电技术进行对比, 为项目选择合适的生物质能源转化技术提供参考意见。同时为综合对比其他生物质能源转化技术的可行性提供参考依据, 需要注意的是, 经济分析部分评价指标

收稿日期: 2022-09-22 修订日期: 2022-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (22178328); 生物质资源加工与高效利用杰出外籍科学家工作室项目 (GZS2022007); 南阳市协同创新重大专项 (郑州大学南阳研究院) (21XTCX12002); 车用生物燃料技术国家重点实验室开放课题 (KFKT2020009)

作者简介: 马国杰, 副教授, 研究方向为资源利用与实验室管理。

Email: magj@zzu.edu.cn

*通信作者: 赵肖玲, 讲师, 研究方向为生物质资源化利用。

Email: zhaoxiaoling@zzu.edu.cn

需要结合具体技术背景选择。文章通过三种环境类别的影响潜值：全球变暖潜值（Global Warming Potential, GWP）、环境酸化潜值（Acidification Potential, AP）和人类毒性潜值（Human Toxicity Potential, HTP），分析不同发电技术的环境效益，并通过动态投资回收期、内部收益率和净现值三个指标，根据时间价值的动态分析方法综合评估不同发电技术的可行性。

1 材料与研究方法

1.1 污染气体排放量清单

发电厂运行阶段的环境影响主要由气体污染物的排放引起，表 1 显示了沼气直燃发电、沼气燃料电池发电和燃煤发电 1 kW·h 生命周期的主要污染物排放数据。其中沼气燃料电池技术的研究有限难以准确获得其污染物排放数据，因此本文根据沼气燃料电池发电周期内需要消耗的天然气的量以及燃煤和燃气电厂污染物排放对环境评价的比较^[30-32]，选用部分燃煤发电排放量清单来替代沼气燃料电池发电的排放清单用于相关数据的计算。

表 1 不同发电技术的排放清单^[3,30-37]

Table 1 Emission inventories of different power generation technologies / (kg·a⁻¹)

发电技术 Power generation technology	CO ₂	CO	CH ₄	NO _x	PM	SO ₂
沼气直燃发电 Biogas direct fired power generation	5.11×10 ⁻¹	1.03×10 ⁻³	5.37×10 ⁻⁵	8.72×10 ⁻⁴	1.69×10 ⁻⁴	3.18×10 ⁻³
沼气燃料电池发电 Biogas fuel cells generate	4.98×10 ⁻¹	0	1.07×10 ⁻³	1.23×10 ⁻²	1.01×10 ⁻³	0
燃煤发电 Coal-fired power generation	1.07	1.55×10 ⁻²	2.60×10 ⁻³	6.46×10 ⁻²	2.02×10 ⁻²	9.93×10 ⁻³

1.2 评价方法

1.2.1 生命周期评价方法

生命周期评价法（LCA）是一种评价产品或过程在其生命周期中对环境影响的环境工具，也被应用于生物质发电技术环境影响评价。LAC 分为目标和范围确定、生命周期清单分析、环境效益评估、结果分析四个阶段。考虑到沼气发电技术的多样性以及燃煤发电技术的复杂性，本文在建立评估模型时简化了环境评估的范围。范围包括原材料生产、原材料加工、原材料运输和运营阶段的发电，忽略了设备制造、设备回收、设备折旧以及工厂建设等阶段。机组容量的选择以近年来的相关项目规模综合分析确定，以沼气直燃发电机组容量选择为例，截止到 2020 年，沼气直燃发电技术装机容量达到 50 万千瓦^[38]，中位数为 2 MW。最终沼气直燃发电、燃煤发电的机组容量分别选择为 2、1 320 MW。沼气燃料电池发电技术现在以 200 kW 机和 11 MW 两种规模形成了系列化，11 MW 机是世界上最大的燃料电池发电设备，目前中国沼气燃烧电池技术发展未完全成熟，因此沼气燃烧

电池发电的机组容量选择 200 kW。

清单分析数据只表示每个特定环境交换对确定的环境影响类型的贡献强度。需要计算各个环境种类的环境影响潜值，在进行标准化和加权后分析总环境影响负荷以判断不同发电技术的环境效益。本文考虑了发电过程中对环境和人体健康造成的影响，选择全球变暖、环境酸化、人类毒性 3 种环境种类计算影响潜值。

环境影响潜值根据公式（1）计算

$$EP(j) = \sum EP_i(j) = \sum [Q_i \times EF_i(j)] \quad (1)$$

式中 $EP(j)$ ：第 j 种环境影响潜值，kg/a； $EP_i(j)$ ：第 i 种污染物对第 j 种环境影响的贡献； Q_i ：第 i 种污染物的排放量； $EF_i(j)$ ：第 i 种污染物对第 j 种环境影响类别的当量因子。

在比较不同环境影响类别对总环境影响的潜在危害程度之前，应先对公式（1）的计算结果进行标准化和加权赋值，通过比较各种环境影响潜力的相对值，判断不同的环境影响类别对总环境的影响潜力。本文主要以 1990 年为标准化基准年，将其环境影响负荷作为计算的基准值，并采用全球 2000 年的环境影响基准对国内缺失的数据进行补充。不同环境影响类别的环境影响标准化潜值根据（2）计算：

$$NEP(j) = EP(j) / ER(j) \quad \text{标准化与评估} \quad (2)$$

式中 $NEP(j)$ ：第 j 种标准化后环境影响潜值； $EP(j)$ ：第 j 种环境影响潜值； $ER(j)$ ：第 j 种环境影响潜值加权计算的基准值^[39]。

1.2.2 基于时间价值的动态分析方法

发电技术经济效益就没采用基于时间价值的动态分析方法进行研究，根据沼气发电厂项目在建设期以及运营期的相关经济参数建立发电厂经济效益计算模型进行经济评价和效益评估。在发电厂项目的建设期，初始投资主要包括土建施工、设备采购安装以及设备调试交付等，本文将建设期花费作为资本流出阶段。经营期是项目的寿命期，即从正式投产到项目报废的全过程时长。运营期既有资金流入也有资金流出，资本流出阶段主要包括原材料、燃料采购和运输、劳动力管理成本、设备折旧和其他运营成本，资本流入阶段主要包括电力和其他副产品收入。

动态投资回收期反映投资返本期，但其计算在投资回收年限的基础上考虑了资金的时间价值；净现值是将项目在运营期内各年的净现金流量以行业投资的平均报酬率作为贴现率折算所得出的价值之和，反映了资金的现有价值；内部收益率可以直接说明其与行业投资平均收益水平的差别，内部收益率越高，说明投资项目承受行业投资平均收益水平或市场利率上升的能力就越强。这三种指标可以全面的评估整个项目周期的经济。此外，项目在投资之初需要设定最低期望值一折现率 I_c ，只有当最低期望可以满足时才能考虑进一步投资。在中国评估界，采用的折现率一般在 10%~15%，本文中选取 10% 的折现率进行计算。其中评价指标包括：折现回收期（10%）、净现值（NPV）、内部收益率（IRR），其计算公式如下：

动态回收期 (10%) : $\sum_{t=0}^{P'} (CI - CO)_t (1 + i_c)^{-t} = 0 \quad (3)$

净现值: $NPV = \sum_{t=0}^n (CI - CO)_t (1 + i_c)^{-t} \quad (4)$

内部收益率: (5)

式中 P'_t : 动态回收期 (10%); CI : 现金流入, $Yuan$; CO : 现金流出, $Yuan$; $(CI - CO)$: 第 t 年净现金流量, $Yuan$; n : 年, a ; i_c : 基准折现率, %; NPV : 净现值;

i_1 : 低贴现率; i_2 : 高贴现率 $IRR = i_1 + (i_2 - i_1) \frac{NPV_{i_1}}{NPV_{i_1} + |NPV_{i_2}|}$ 。

2 结果与分析

2.1 环境效益分析

2.1.1 环境影响潜力分析

表 2 中表述了三种环境影响种类中包含的主要污染物以及当量因子, 目的是将每种环境影响种类中存在的不同污染气体以同一参数转化为统一单位, 用于对比影响潜值和后续的标准化计算。以全球变暖类别影响潜值为例, 全球变暖以 CO_2 为参照, CO 、 CH_4 和 NO_x 的当量因子分别是 2、25 和 320, 以此得出其他环境影响种类的当量因子。

表 2 不同环境影响种类的当量因子
Table 2 Equivalent factors for different environmental impact categories

环境类别 Environment category	当量因子 Equivalent factor	参考文献 References
全球变暖 Global warming	$CO_2 = 1, CO = 2, CH_4 = 25, NO_x = 320$	[40]
环境酸化 Acidification	$SO_2 = 1, NO_x = 0.7$	[41]
人类毒性 Human toxicity	$SO_2 = 100, NO_x = 65, CO = 1$	[35, 42]

结合表 1 中不同类型污染物排放清单和表 2 中环境影响种类的当量因子, 根据公式 (1) 计算得出不同环境影响类型的影响潜力值, 计算结果见表 3。

根据三种发电技术对不同类别环境影响潜力的计算结果发现: 燃煤发电对环境影响最大, 三种环境类别的影响潜值分别为 21.84、 7.15×10^{-2} 和 5.21。沼气直燃发电全球变暖和环境酸化两种环境类别的影响潜值最低, 相较于燃煤发电技术, 三种环境减排量分别为 96.37%、

94.7%、92.78%。沼气燃料电池发电技术人体毒性环境类别影响潜值最低, 三种环境减排量分别为 79.58%、82.8%、99.76%。沼气燃料电池发在全球变暖和环境酸化两种环境类别中表现不佳的原因可能是因为其工艺技术不够成熟, 使用的天然气在发电过程中会产生较多的 CH_4 和 NO_x 气体, 导致温室效应和环境酸化潜力值上升。可以通过提升沼气燃料电池的利用效率、改善发电技术工艺控制废气产生。整体比较三种发电技术对不同环境影响类别的潜值发现, 沼气直燃发电技术相较于沼气燃料电池发电技术代替传统燃煤发电对环境的影响更小。说明从环境排放角度来看, 沼气直燃发电更适合在以燃煤发电为主的地区实行和推广。沼气燃料电池在发电过程中会产生较高的 NO_x 废气排放量, 增加环境负担, 需要改善工艺控制 NO_x 的产生。

表 3 不同发电技术对环境的影响潜力
Table 3 Potential of different power generation technologies for environmental impacts ($kg \cdot a^{-1}$)

影响类别 Impact category	GWP	AP	HTP
沼气直燃发电 Biogas direct fired power generation	7.93×10^{-1}	3.79×10^{-3}	3.76×10^{-1}
沼气燃料电池发电 Biogas fuel cells generate	4.46	1.23×10^{-2}	1.23×10^{-2}
燃煤发电 Coal-fired power generation	21.84	7.15×10^{-2}	5.21

2.1.2 总环境影响负荷分析

表 3 的数据只能显示不同发电技术对各个环境影响类别的影响程度, 不能直接对比分析不同发电技术对总环境影响的潜在危害程度。需要通过标准化和加权赋值计算总环境影响潜值, 不同环境影响类别的环境影响标准化潜值可通过公式 (2) 计算。在相同的环境影响类型下, 专家学者针对不同的研究范围和研究对象给出的权重不同, 文中主要研究的是秸秆沼气化, 考虑到秸秆沼气与燃料乙醇工程类型较为接近, 均属于生物质资源能源化利用^[33]。因此, 最终选择采用王伟等^[34]给出的权重因子作为参照。不同发电技术标准化后环境影响潜值、加权后环境影响潜值以及总环境影响负荷的结果见表 4。

表 4 不同发电技术标准化后各环境影响潜值
Table 4 Potential value of environmental impact after standardization of different power generation technologies

环境负荷种类 Types of environmental loads	发电技术 Power generation technology	环境影响潜值 Environmental impact potential ($kg \cdot a^{-1}$)	1990 年全球 基准值 1990 global benchmark value/($kg \cdot a^{-1}$)	权重因子 Weight factor	标准化后环境影响潜 值 Environmental impact potential after standardization	加权后环境影 响潜值 Weighted environmental impact	总环境影响负荷 Total environmental impact load
GWP	沼气直燃发电 Biogas direct fired power generation	7.93×10^{-1}	8.7×10^3	0.208	9.11×10^{-5}	1.89×10^{-5}	2.15×10^{-2}
	沼气燃料电池发电 Biogas fuel cells generate	4.46			5.13×10^{-4}	1.07×10^{-4}	8.55×10^{-4}
	燃煤发电 Coal-fired power generation	21.84			2.51×10^{-3}	5.22×10^{-4}	2.97×10^{-1}
AP	沼气直燃发电 Biogas direct fired power generation	3.79×10^{-3}	36	0.138	1.05×10^{-4}	1.45×10^{-5}	/
	沼气燃料电池发电 Biogas fuel cells generate	1.23×10^{-3}			3.24×10^{-4}	4.72×10^{-5}	/
	燃煤发电 Coal-fired power generation	7.15×10^{-2}			1.99×10^{-3}	2.74×10^{-4}	/
HTP	沼气直燃发电 Biogas direct fired power generation	3.76×10^{-1}	6.11	0.348	6.15×10^{-2}	2.14×10^{-2}	/
	沼气燃料电池发电 Biogas fuel cells generate	1.23×10^{-2}			2.01×10^{-3}	7.01×10^{-4}	/
	燃煤发电 Coal-fired power generation	5.21			8.53×10^{-1}	2.97×10^{-1}	/

对比三种发电技术总环境影响负荷的结果发现：总环境影响负荷从高到低依次为燃煤发电、沼气直燃发电、沼气燃料电池发电。两种沼气发电技术运行 1a 造成的环境影响远远小于燃煤发电技术，与煤炭使用相比，沼气直燃发电技术可以减少 92.76% 的环境影响负荷，沼气燃料电池发电技术可以减少 99.71% 的环境影响负荷。霍丽丽等^[43]对农业生物质减排的潜力计算结果也证实了沼气发电对环境的友好性。说明从能源替代角度而言，沼气直燃发电技术和沼气燃料电池发电技术均具有良好的代替性。此外，沼气燃料电池发电技术在人类毒性环境类别中代替燃煤发电的降低总环境影响负荷的效果是沼气直燃发电技术的 30.57 倍，因此在代替燃煤发电降低总环境影响负荷的对比中，沼气燃料电池对环境的影响最小。沼气燃料电池发电技术在环境效益方面具有巨大的潜力，需要合理开发利用，可以通过改善工艺条件控制 CH₄ 和 NO_x 气体排放量较高的问题。

2.2 经济效益分析

2.2.1 资本流入-流出清单分析

通过文献查阅，获得了目前常用的、有代表性的传统沼气发电厂、沼气电池燃料发电厂和燃煤发电厂的有关资本投入产出的数据并进行计算，秸秆价格和上网电价等部分包含在运营成本和运用利润中，不再单独讨论。根据 2021 年，发改委、财政部、能源局联合发布《2021 年生物质发电项目建设工作方案》，将补贴项目分为竞争性配置和非竞争性配置项目两类，农林生物质发电上网电价的规定分别是低于 0.75 元/度和 0.75 元/度。在数据处理过程中，为方便计算做了以下假设：发电站为非竞争性配置、年基准收益率设定为 10%、运行期为 20 a、年发电周期为 5 500 h、上网电价为 0.75 元/kW 时等，计算结果在表 5 中表示。

表 5 不同发电技术资本流入-流出清单^[28,33,44-46]

Table 5 List of capital inflows and outflows of different power generation technologies (Yuan·MW ⁻¹)						
技术 Technology	规模 Scale	初始投资 Initial investment	运营投资 Operational investments	运营利润 Operating profit	年度利润 Annual profit	
沼气直燃发电 Biogas direct fired power generation	2 MW	41 820 205	1 410 938	7 540 921	6 129 983	
沼气燃料电池发电 Biogas fuel cells generate electricity	800 kW	46 620 000	4 045 580	1 605 695	740 740	
燃煤发电 Coal-fired power generation	1 320 MW	3 555 566	1 816 338	2 288 748	472 410	

根据表 5 中的数据发现，项目规模和相关技术成熟度有关。沼气燃料电池发电技术在中国发展时间尚短，技术为完全成熟度，相应发电站规模较小。与此相对，燃煤发电技术发展至今百余年，技术足够成熟，因此火电厂规模更大。在初始阶段，沼气燃料电池发电项目投资最大，燃煤发电项目投资最小，说明工艺发展成熟度与投资成本有关。沼气燃料电池技术因为工艺成熟度低、产品生产流程复杂，在发电过程中需要昂贵的化学催化剂并且需要高度纯化 H₂ 和 CH₄ 等原因导致投资成本增加^[47]。

沼气直燃发电项目与沼气燃料电池发电项目相比初始投资费用较低，除了因为对沼气直燃发电技术工艺技术的研究更全面之外，还与沼气燃料电池发电技术使用天然气作原料导致制备成本更高有关。在运营期间，沼气直燃发电和燃煤发电的投资相差无几，说明沼气直燃发电技术在初始投资期和运营期的经济性均足以和燃煤发电技术竞争。截止到目前为止，中国对沼气直燃发电技术做了大量研究，使其技术工艺更完善，且原材料价格低廉。从年度利润结果来看，沼气直燃发电项目利润最高，沼气燃料电池发电项目和燃煤发电项目的年度利润相差无几。说明沼气直燃发电项目在多方面都具有显著的能源替代作用，适合大规模推广和使用。沼气燃料电池发电项目由于技术、原料等原因导致经济效益表现欠佳，可以通过开售副产品收入和减少秸秆收集成本等提高收益^[48]。

2.2.2 经济分析

基于表 5 中的数据，根据公式（3）~公式（5）对不同沼气直燃发电技术和燃煤发电技术进行计算，动态投资回收期、净现值以及内部收益率的结果在表 6 中显示。

表 6 不同发电技术的经济评价结果
Table 6 Economic evaluation results of different power generation technologies

技术 Technology	规模 Scale	动态投资回收期/年 Dynamic pay-back period/a	净现值 NPV/ (Yuan·MW ⁻¹)	内部收益率 IRR/%
沼气直燃发电 Biogas direct fired power generation	2 MW	12.03	1 361 246	13.49
沼气燃料电池发电 Biogas fuel cells generate electricity	800 kW	>20	/	-9.08
燃煤发电 Coal-fired power generation	1 320 MW	14.50	423 933	11.88

根据表 6 中三种发电技术的整体经济评价结果发现，沼气直燃发电项目的经济性最佳，沼气燃料电池发电项目没有经济性。单独以动态回收期为评价指标时，沼气直燃发电技术有最佳回收期（12.03 a），其次是燃煤发电技术（14.50 a），沼气燃料电池发电技术在运行期内无法成功回收初始投入资本（>20 a）。当以净现值为评价指标时，传统发电技术的净现值最高（1 361 246 Yuan/MW），随之是燃煤发电技术（423 933 Yuan/MW），沼气燃料电池发电在运营期间无法实现盈利。以内部收益率为评价指标时，沼气直燃发电技术内部收益率最高（13.49%），随之是燃煤发电的内部收益率（11.88%），沼气燃料电池技术内部收益率最低（-9.08%）。内部收益率越高，说明新增投资项目的获利空间越大。综合来看，沼气直燃发电项目和燃煤发电项目在运行期间二者均可回收资本、实现盈利并达到投资的最低收益要求，项目具有可行性。沼气燃料电池发电项目在运行期间无法实现盈余，项目不具备可行性。而与燃煤发电技术相比，沼气直燃发电技术具有更大的获利空间，因此，尽管沼气燃料电池发电技术对环

境影响最低,但与沼气直燃发电技术相比依旧没有竞争力。在沼气燃料电池技术发展成熟之前,代替传统化石能源发电的重心依然要放在沼气直燃发电技术上。

3 结 论

1) 对比三种发电技术对总环境影响负荷的结果来看,沼气直燃发电、沼气燃料电池发电均具有较好的环境效益。其中沼气燃料电池的环境效益最佳,总环境负荷为 8.55×10^{-4} ,相较于传统燃煤发电产生的环境负荷 (2.97×10^{-1}),可以减少 99.71% 的环境影响负荷。沼气直燃发电技术总环境负荷 2.15×10^{-2} ,相较于燃煤发电可减少 92.8% 的环境影响负荷。这表明生物质发电技术符合中国可持续发展的要求,具有较强的发展空间。

2) 本文对比讨论了沼气直燃发电、沼气燃料电池发电以及燃煤发电三种技术的环境效益和经济效益。从整体情况看,沼气直燃发电技术在三种发电技术中可行性评估结果最佳;沼气燃料电池技术在环境效益方面表现最好,但是经济可行性评估最差,目前无法凭借项目收益吸引投资,可行性不高;燃煤发电技术经济效益较佳,但运行过程中对环境影响负荷过大,不符合中国“碳中和”的目标且不利于环境可持续发展。因此,在近期内沼气直燃发电技术将仍然是替代传统燃煤发电的最佳选择之一。

3) 沼气燃料电池发电技术虽然在环境效益方面具有巨大的潜力,但由于其技术成熟度和投入成本等原因无法实现经济效益。因此在中国相关技术和工艺能力成熟之前,无法进行大面积推广和使用。对此建议:加强对沼气燃料电池技术的研究方向,提高技术成熟度和生产效率;降低设备、原料、管理和人员产生的成本费用;对副产品进行加工,增加其价值并进行售卖;政府部门制定相关政策弥补沼气燃料电池发电前期投入过大的缺点,促进行业发展。

[参 考 文 献]

- [1] 向治华, 古庭赞, 黄友金. 能源转型发展的需求与创新模式分析[J]. 新型工业化, 2019, 9(7): 15-22.
Xiang Zhihua, Gu Tingyun, Huang Youjin. Analysis on the demand and innovation mode of energy transformation and development[J]. New Industrialization, 2019, 9(7): 15-22. (in Chinese with English abstract)
- [2] Mohr S H, Wang J, Ellem G, et al. Projection of world fossil fuels by country[J]. Fuel, 2015, 141(12): 0-35.
- [3] Shuang Y C, He F, Jun Z, et al. Life cycle assessment and economic analysis of biomass energy technology in China: a brief review[J]. Processes, 2020, 8(9): 1112.
- [4] 毛健雄, 郭慧娜, 吴玉新. 中国煤电低碳转型之路: 国外生物质发电政策/技术综述及启示[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 1-11.
Mao Jianxiong, Guo Huina, Wu Yuxin. Road to low-carbon transformation of coal power in China: A review of biomass co-firing policies and technologies for coal power abroad and its inspiration on biomass utilization[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李傲群, 李学婷. 基于计划行为理论的农户农业废弃物循环利用意愿与行为研究: 以农作物秸秆循环利用为例[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(12): 33-40.
Li Aoqun, Li Xueting. Study on farmer's willingness and behavior about agricultural waste recycling based on the theory of planned behavior[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(12): 33-40. (in Chinese with English abstract)
- [6] 邹晓霞, 李玉娥, 高清竹, 等. 中国农业领域温室气体主要减排措施研究分析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(Z2): 1348-1358.
Zou Xiaoxia, Li Yu'e, Gao Qingzhu, et al. How to reduce greenhouse gas(GHG) emissions in agriculture: An analysis of measures and actions taken in China[J]. Journal of Ecological Environment, 2011, 20(Z2): 1348-1358. (in Chinese with English abstract)
- [7] 席静, 王静, 梁斌. 生物质能源的研究综述[J]. 山东化工, 2019, 48(2): 52-53.
- [8] Shahbeig H, Shafizadeh A, Rosen M A, et al. Exergy sustainability analysis of biomass gasification: A critical review[J]. Biofuel Research Journal-Brj, 2022, 9(1): 1592-1607.
- [9] Dahmen N, Sauer J. Evaluation of techno-economic studies on the bioliq® process for synthetic fuels production from biomass[J]. Processes, 2021, 9(4): 684.
- [10] Kumar G, Shobana S, Chen W H, et al. A review of thermochemical conversion of microalgal biomass for biofuels: chemistry and processes[J]. Green Chemistry, 2017, 19(1): 44-67.
- [11] 冯雪, 吴国春, 曹玉昆. 基于 Citespace 的中国生物质能源研究知识图谱分析[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(1): 35-42.
Feng Xue, Wu Guochun, Cao Yukun. Analysis on knowledge mapping in China's biomass energy research based on CiteSpace[J]. Resources and Environment in Arid Areas, 2018, 32(1): 35-42. (in Chinese with English abstract)
- [12] 孙振杰, 黄思思, 时号, 等. 生物质炭负载镍钙催化剂催化裂解/重整生物质热解气研究[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 211-217.
Sun Zhenjie, Huang Sisi, Shi Hao, et al. Investigation into the catalytic cracking/reforming of biomass pyrolysis gas by biochar supported Ni-Ca catalyst[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(17): 211-217. (in Chinese with English abstract)
- [13] Nuhma M J, Alias H, Tahir M, et al. Microalgae biomass conversion into biofuel using modified HZSM-5 zeolite catalyst: a review[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 42: 2308-2313.
- [14] Al-Rabiah A A, Al-Dawsari J N, Ajbar A M, et al. Development of a Biomass Gasification Process for the Coproduction of Methanol and Power from Red Sea Microalgae[J]. Energies, 2022, 15(21): 7890.
- [15] Naqvi S R, Khoja A H, Ali I, et al. Recent progress in catalytic deoxygenation of biomass pyrolysis oil using microporous zeolites for green fuels production[J]. Fuel, 2023, 333: 126268.
- [16] 王芳, 刘晓凤, 陈伦刚, 等. 生物质资源能源化与高值利用研究现状及发展前景[J]. 农业工程学报, 2021, 37(18): 219-231.
Wang Fang, Liu Xiaofeng, Chen Lungang, et al. Research status and development prospect of energy and high value utilization of biomass resources[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(18): 219-231. (in Chinese with English abstract)
- [17] 岳国君, 林海龙, 彭元亭, 等. 以生物质为原料的未来绿

- 色氢能[J]. 化工进展, 2021, 40(8): 4678-4684.
- Yue Guojun, Lin Hailong, Peng Yuanling, et al. Future green hydrogen energy from biomass[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(8): 4678-4684. (in Chinese with English abstract)
- [18] 丁文冉, 李欢, 赵保峰, 等. 农林废弃物生物质水热液化研究探讨[J]. 现代化工, 2021, 41(10): 23-27.
- Ding Wenran, Li Huan, Zhao Baofeng, et al. Review on hydrothermal liquefaction of agricultural and forestry waste biomass[J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(10): 23-27. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王艺鹏, 杨晓琳, 谢光辉, 等. 1995—2014 年中国农作物秸秆沼气化碳足迹分析[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(5): 1-14.
- Wang Yipeng, Yang Xiaolin, Xie Guanghui, et al. Temporal variation in carbon footprint of crop residue for biogas utilization in China from 1995 to 2014[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(5): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- [20] 高鑫. 秸秆类原料厌氧发酵产沼气试验研究[D]. 华中农业大学, 2013.
- Gao Xin. Research On Bogas Anaerobic Fermentation By Using Stalk Materials[D]. Huazhong Agricultural University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [21] 戴晓虎, 陈淑娴, 蔡辰, 等. 秸秆主流能源化技术研究与经济性分析[J]. 环境工程, 2021, 39(1): 1-17.
- Dai Xiaohu, Chen Shuxian, Cai Chen, et al. Reserch and economic analysis of mainstream energy technologies for straw[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(1): 1-17. (in Chinese with English abstract)
- [22] Shafie S M, Othman Z, Hami N, et al. Biogas fed-fuel cell based electricity generation a life cycle assessment approach[J]. International Journal of Energy Economics and Policy, 2020, 10(5): 670216917.
- [23] 焦文玲, 刘珊珊, 唐胜楠. 借鉴国外先进经验推动中国沼气应用[J]. 太阳能, 2015(5): 15-19.
- [24] 陆浩. 基于熔融碳酸盐燃料电池的沼气高效发电系统研究[J]. 中国沼气, 2021, 39(3): 73-79.
- Lu Hao. Study on high efficiency biogas power generation system based on molten carbonate fuel cell[J]. China Biogas, 2021, 39(3): 73-79. (in Chinese with English abstract)
- [25] 曾国揆, 谢建, 尹芳. 沼气发电技术及沼气燃料电池在中国的应用状况与前景[J]. 可再生能源, 2005(1): 38-40.
- Zeng Guokui, Xie Jian, Yin Fang. The application and prospect of methane power generation technology and methane fuel cell[J]. Renewable Energy, 2005(1): 38-40. (in Chinese with English abstract)
- [26] Shraddha M, Vijay S. A consolidated bioprocess design to produce multiple high-value platform chemicals from lignocellulosic biomass and its technoeconomic feasibility[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 377: 134383.
- [27] Ravi R, Kalib N S, Muchtar A, et al. Potential of integrating Solid Oxide Fuel Cell based on biomass in power generation in Malaysia: A feasibility study[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2022, 1257(1): 012018.
- [28] Kuo P C, Yu J. Process simulation and techno-economic analysis for production of industrial sugars from lignocellulosic biomass[J]. Industrial Crops & Products, 2020, 155: 112783.
- [29] Samson-Br ę k I, Owczuk M, Matuszewska A, et al. Environmental Assessment of the Life Cycle of Electricity Generation from Biogas in Polish Conditions[J]. Energies, 2022, 15(15): 5601.
- [30] 刘龙海, 钟史明. 中国天然气发电近况与前景[J]. 燃气轮机技术, 2016, 29(3): 1-6, 32.
- Liu Longhai, Zhong Shiming. Nature gas power recent developments problems and prospect in China[J]. Gas Turbine Technology, 2016, 29(3): 1-6, 32. (in Chinese with English abstract)
- [31] 赵艳. 天然气发电的经济性研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016.
- Zhao Yan. The Economy Research Of Natural Gas Power Generation[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2016. (in Chinese with English abstract)
- [32] 周浩, 魏学好. 天然气发电的环境价值[J]. 热力发电, 2003(5): 2-5+0.
- Zhou Hao, Wei Xuehao. The environmental value of electricity from natural-gas-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2003(5): 2-5+0. (in Chinese with English abstract)
- [33] 狄向华, 聂祚仁, 左铁镛. 中国火力发电燃料消耗的生命周期排放清单[J]. 中国环境科学, 2005, 28(5): 632-635.
- Di Xianghua, Nie Zuoren, Zuo Tiejong. Life cycle emission inventories for the fuels consumed by thermal power in China[J]. China Environmental Science, 2005, 28(5): 632-635. (in Chinese with English abstract)
- [34] 王伟, 赵黛青, 杨浩林, 等. 生物质气化发电系统的生命周期分析和评价方法探讨[J]. 太阳能学报, 2005, 29(6): 752-759.
- Wang Wei, Zhao Daiqing, Yang Haolin, et al. Lifecycle analysis on biomass gasification & power generation system and inquiry to assessment method[J]. Journal of Solar Energy, 2005, 29(6): 752-759. (in Chinese with English abstract)
- [35] 刘俊伟. 生物质能资源化利用系统的初始条件及生物周期评价的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
- Liu Junwei. Study On The Initial Conditions And Lifecycle Assessment Of Biogas Energy Utilization System[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [36] 龚运. 沼气发电工程技术经济及环境效益分析[D]. 保定: 华北电力大学, 2018.
- Gong Yun. Technical Economy and Environmental Benefit Analysis of Biogas Power Generation Project[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [37] 黄智贤, 吴燕翔. 天然气发电的环境效益分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2009, 37(1): 147-150.
- Huang Zhixian, Wu Yanxiang. Environmental benefit of electricity generated by natural gas[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2009, 37(1): 147-150. (in Chinese with English abstract)
- [38] 三胜咨询. 2019~2024 年沼气发电行业前景及趋势预测[J]. 电器工业, 2019(4): 32-37.
- [39] 建新, 如松. 产品生命周期评价方法及应用[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- [40] Change C. IPCC fourth assessment report[J]. The Physical Science Basis, 2007, 2: 580-595.
- [41] 夏训峰, 张军, 席北斗. 基于生命周期的燃料乙醇评价及政策研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [42] 杨建新, 王如松, 刘晶茹. 中国产品生命周期影响评价方法研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(2): 234-237.
- Yang Jianxin, Wang Rusong, Liu Jingru. Methodology of life cycle impact assessment for Chinese products[J]. Journal of Environmental Science, 2001, 21(2): 234-237. (in Chinese with English abstract)
- [43] 霍丽丽, 赵立欣, 姚宗路, 等. 农业生物质能温室气体减排潜力[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 179-187.

- Huo Lili, Zhao Lixin, Yao Zonglu, et al. Potentiality of agricultural biomass energy for greenhouse gas emission reduction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(22): 179-187. (in Chinese with English abstract)
- [44] Zang G, Jia J, Tejasvi S, et al. Techno-economic comparative analysis of Biomass Integrated Gasification Combined Cycles with and without CO₂ capture[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2018, 78: 73-84.
- [45] 潘发存. 餐厨垃圾资源化利用产沼气发电的生命周期评价[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- Pan Facun. Liff Cycle Assessment Of The Utilization Ofkitchen Waste To Produce Biogas For Power Generation[D]. Nanning: Guangxi University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [46] 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(1): 59-65.
- Wu Yuanyuan, Chang Xuning, Zhang Jiawei. Environmental Emission Evaluation for Straw Biogas Power Generation and Bio-natural Gas Preparation Based on LCA Method[J]. China Biogas, 2020, 38(1): 59-65. (in Chinese with English abstract)
- [47] 刘杨, 杨平. 从废水中回收沼气和氢能及电能[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(10): 133-139.
- Liu Yang, Yang Ping. Recovery of biogas energy, hydrogen ene recovery of energy sources from wastewater[J]. Environmental Science and Technology, 2010, 33(10): 133-139. (in Chinese with English abstract)
- [48] Fukuda T, Fukushima Y, Chen I C, et al. Techno-economic assessment of solid oxide fuel cell-based biogas power plant projects in northern Japan[J]. Journal of chemical engineering of Japan, 2021, 54(11): 593-602.

Life cycle assessment and economic analysis of straw biogasification power generation technology

Ma Guojie¹, Zhu Linying¹, Zhang Miaomiao², Zhao Xiaoling^{2,3,4*}, Chang Chun^{2,3,4}

(1. School of Management, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. State Key Laboratory of Motor Vehicle Biofuel Technology, Anyang 473000, China; 4. Henan Center for Outstanding Overseas Scientists, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: At present, the problems of energy depletion and environmental pollution caused by non renewable energy such as oil and coal have seriously hindered the sustainable development of our society. Biomass energy is a reliable low-carbon alternative energy with renewable, clean and other characteristics. Therefore, the energy transformation to renewable energy is crucial to China's development. Research shows that China has rich biomass resources. For example, agricultural wastes can be used to produce biogas by anaerobic fermentation of agricultural wastes straw, which can reduce a lot of carbon emissions. Therefore, it is of great significance for China's development to make full and reasonable use of this resource. This paper discusses two types of biogas power generation technologies using straw as raw material, namely, traditional biogas direct combustion power generation technology and biogas fuel cell power generation technology. Based on life cycle assessment (LCA) and time value dynamic analysis method, the feasibility of two types of biogas power generation technologies is comprehensively evaluated from both environmental and economic aspects. The feasibility of this technology is compared with that of coal-fired power generation technology, and the feasibility of straw biogas power generation technology in both economic and environmental aspects is discussed. In the feasibility analysis of environmental benefits, three potential values of environmental impact categories are considered: global warming (GWP), environmental acidification (AP) and human toxicity (HTP). The environmental impact potential of the three power generation technologies is calculated according to the equivalence factor of each environmental category. After the environmental impact potentials are standardized, the total environmental impact loads of different environmental categories are obtained. The analysis of the total environmental impact is consistent with the judgment of the environmental benefits of the three power generation technologies. The economic feasibility analysis adopts the dynamic analysis method of time value, and selects the dynamic investment payback period, internal rate of return and net present value as the analysis indicators. According to literature review, find representative power plants, and calculate dynamic payback period, net present value and internal rate of return by referring to capital input and output data of power plants. According to the calculation results, the economic feasibility of different power generation technologies is comprehensively analyzed. The results show that the biogas fuel cell power generation technology is the best in terms of total environmental impact, and the total environmental impact load is 8.55×10^{-4} , followed by biogas direct combustion power generation technology, with a total environmental impact load of 2.15×10^{-2} . Compared with coal-fired power generation technology (2.97×10^{-1}), the emission reduction rate reached 99.71% and 92.76% respectively. In terms of economic benefits, when the dynamic payback period and NPV are taken as indicators, the payback period of the straw biogas direct fired power generation project is the shortest (12.03 years), the NPV in the operation period can reach 1 361 246 Yuan/MW, and the economic benefits are the best; The second is coal-fired power generation project (14.5 years), with a net present value of 423 933 Yuan/MW; The dynamic payback period of biogas fuel cell power generation project is more than 20 years, and there is no surplus during operation. Therefore, compared with biogas fuel cell power generation technology, biogas direct combustion power generation technology has more significant economic benefits. This shows that biogas direct fired power generation technology will remain one of the best power generation technologies to replace coal-fired power generation in the future.

Keywords: straw; biogas power generation; economic analysis; life cycle assessment; environmental load