

基于全生命周期的生物质热解液化技术经济评价

靳梦雨¹, 宋远博¹, 顾敏燕², 司慧萍¹, 沈 峰^{1,*}, 张亚雷^{1,3}

(1. 同济大学 新农村发展研究院, 上海 201804; 2. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092; 3. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要:在“双碳目标”背景下,通过对生物质能源化利用和热解液化制备生物油生产链条的生命周期技术经济评价,开拓生物汽柴油生产方式,为缓解我国原油进口“卡脖子”问题寻求新出路。从生物油厂建设到运营寿命期终止整个过程中,静态投资回收期为5.46年,动态投资回收期为7.45年,内部收益率为17%,累计净现值为2 021.491万元。若项目生产成本、生产能力和销售能力与预期值相同,产品销售价格(生物柴油)不低于6 105.81元·t⁻¹时,才能避免发生亏损。相对于电耗价格,该项目对原料价格敏感性更低,且需要生产规模大于1 700 t才能实现项目的有效盈利。生物油厂进一步降低能耗和原料价格对其生存和发展至关重要,同时稳定廉价的原料供给也是企业竞争的关键所在。

关键词:生物质;全生命周期评价;生物油;技术经济评价;敏感性分析

中图分类号:X705

文献标识码:A

Economic evaluation of biomass pyrolysis liquefaction technology based on life cycle assessment

JIN Mengyu¹, SONG Yuanbo¹, GU Minyan², SI Huiping¹, SHEN Zheng^{1,*}, ZHANG Yalei^{1,3}

(1. *Institute of New Rural Development, Tongji University, Shanghai 201804, China*; 2. *Shanghai Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200092, China*; 3. *College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

Abstract: Based on the life-cycle assessment, the project of biomass pyrolysis-liquefaction to yield bio-oil was analyzed by using technical and economic analysis methods. From the construction of the bio-oil plant to the end of the operational life, the static and dynamic investment payback period are 5.46 years and 7.45 years respectively, the internal rate of return is 17%, and the cumulative net present value is 2 021.491 ten thousand yuan (RMB). If the production cost, production capacity and sales capacity of the project are the same as the expected value, the losses can be avoided when the sales price of the product (biodiesel) is not less than 6 105.81 yuan/t. Compared to power consumption, the project is less sensitive to the price of raw material and requires a production scale greater than 1 700 t to realize the effective profitability of the project. Further reducing energy consumption and raw material price is crucial for the survival and development of enterprise, while the stable and cheap supply of raw materials is also the key to the competition of the enterprise.

Keywords: Biomass; Life cycle assessment; Bio-oil; Technical and economic evaluation; Sensitivity analysis

收稿日期:2023-09-13

DOI:10.20078/j.eep.20231103

基金项目:国家重点研发计划“固废资源化”重点专项(2019YFC1906700)

作者简介:靳梦雨(1996—),女,河南郑州人,硕士研究生,主要研究方向为生物质高值化转化。E-mail: Jmy123@tongji.edu.cn

通讯作者:沈 峰(1978—),男,浙江宁波人,研究员,主要研究方向为废弃物资源化利用。E-mail: shenzheng@tongji.edu.cn

0 引言

生物质作为一种广泛且廉价的资源可以通过各种利用方式实现其资源化和能源化^[1-2]。据统计,我国农业废弃物,以秸秆为代表,理论资源量约为8.3亿吨/年,我国林业废弃物理论资源量3.5亿吨/年,二者共计11.8亿吨,资源庞大^[3]。“双碳”目标下,我国农林生物质资源化、能源化开发利用前景广阔,秸秆还田、青贮饲料、厩/耗堆肥、热解碳化制备生物炭、热解气化制备生物气、热解液化制备生物油、生物质发电等产业蓬勃发展。据统计,2022年我国生产原油20467万吨,进口原油5.08亿吨,对外依存度高达71.2%^[4]。此背景下,生物质能源化利用暨热解液化制备生物油(bio-oil)以弥补石油能源不足,成为当前产业热点。

生物质热解加氢精制生物油为生物质制烃类燃料工艺的一种^[5]。该工艺可以分为两个阶段:热解液化制备生物原油和生物原油加氢制备高品位烃类燃料。阶段一常使用的技术手段包括苯酚液化、多元醇液、生物质快速热解、高压催化热解等^[6-7]。其中,生物质快速热解液化制取生物原油技术,在现阶段生物质可再生工艺中属于最具发展潜力的工艺之一^[8]。但由于其成分复杂,很难被直接利用,故而需要将其提炼加工或者分质转化后,才可以实际使用。阶段二是对生物原油进行加氢精制,生物油加氢精制的主要工艺有加氢脱氧和加氢裂化,最终得到高品位烃类燃料^[9]。生物质热解液化技术能够将废弃秸秆等生物质分质转化为生物汽油和生物柴油,实现资源化利用,

具有良好的应用前景。客观评价农业废弃物资源化利用产生的经济价值,对农业发展及企业投资有重要的参考价值^[10-11]。然而,目前学者尚未对生物质热解液化加氢精制汽柴油技术的经济性开展科学的定量评估,且产品及副产品的利用价值也尚不明确,阻碍了生物质油技术的发展和应[12]。全生命周期评估(Life Cycle Assessment, LCA)是一种系统评估方法^[13],用于评估产品、工艺或活动在其整个生命周期阶段中所涉及的各种影响因素。技术经济性评价是一种评估特定技术或项目可行性和效益的方法^[14-16]。它结合了技术、经济和商业等方面的考虑,通过综合分析成本、收益、风险和影响等因素,来评估技术或项目是否值得实施。

本文以秸秆生物质为基材,耦合生物质热解碳化、气化和液化等基础工艺,突出液化产油功能和生物油加氢裂解精制成成品油工艺,并对此生产链条进行生命周期技术经济评价,开拓生物汽柴油生产方式,为缓解我国原油进口“卡脖子”问题寻求新出路^[17]。

1 技术经济评价

1.1 目标和范围界定

(1)本次经济评价属于研究性评价,仅仅是以主要设备的粗糙尺寸以及工艺流程图为基础。评价范围包括秸秆的收集和运输、干燥和粉碎、生物质热解、热解残渣回用、余热利用、加氢脱氧和加氢裂化几个部分,不考虑农作物种植等过程。工艺流程如图1所示。

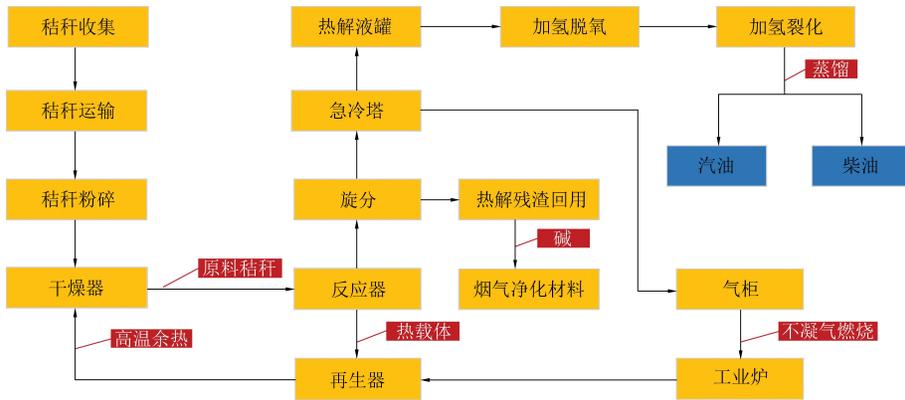


图1 生物质热解液化技术

Fig. 1 Biomass pyrolysis-liquefaction technology

(2)不考虑生产过程中全部化学品及物资运输、纯化生物汽柴油等厂家建设以及日常运营方面的资源、能力投入。最终产物主要有三种:烟气净

化材料载体、柴油和汽油(汽油 $Q=43\ 120\ \text{MJ/t}$,柴油 $Q=46\ 050\ \text{MJ/t}$),烟气净化材料按市场价 $4\ 332\ \text{元}\cdot\text{t}^{-1}$,柴油 $7\ 941\ \text{元}\cdot\text{t}^{-1}$,汽油 $8\ 845\ \text{元}\cdot\text{t}^{-1}$ 。

(3)数据来源于河南百优福生物能源有限公司(合作企业),初始一次性投资2 500万元,设计单套装置每年处理秸秆1万t,秸秆含水率10%,设备折旧费分摊到每年的成本计算中,第11年投入1 000万元维修或更新装置,投资期20年,第一年建设期不盈利,不考虑每年的实际利润变化,不考虑税金(即假定政府补贴项目是免税的),基准收益率8%。为了方便统计实际收益,后续成本计算均以1.00 t秸秆为单位。

1.2 清单分析

表1为物质和能量清单,根据项目的各个环节,对输入和输出物质进行统计,其中碱用于处理生物质热解过程中产生的热解残渣;表2为成本表,其中氢气成本包括两部分,一部分是热解尾气中的氢气分离出来循环利用,余下的是外购氢气,成本只计外购氢气;输出物质中烟气净化材料、汽油和柴油按照市场价平均价格进行计算。

表1 物质和能量清单
Table 1 Material and energy inventory

项目名称	输入	输出
秸秆收集 与运输	秸秆 1 t	秸秆 1 t
	汽油 1 kg	
秸秆干燥	秸秆 1 t	干燥秸秆 0.72 t 水汽 0.28 t
	热能能耗 726.51 MJ	
秸秆粉碎	干燥秸秆 0.72 t	秸秆颗粒 0.72 t
	电能能耗 43.37 MJ	
生物质热解	秸秆颗粒 0.72 t	热解液 0.43 t 不凝气 0.14 t 热解残渣 0.14 t
	热能能耗 1 254.10 MJ	
	电能能耗 180.72 MJ	
	不凝气 144.58 MJ	
热解残渣加工	空气 924.10 kg	尾气 1 068.68 kg 热能 1 980.72 MJ 烟气净化材料 0.09 t 废水碱液 0.79 t
	热解残渣 0.14 t	
	电能 53.98 MJ	
	碱 0.07 t、水 0.72 t	
	热解液 0.43 t	
加氢脱氧	氢气 0.009 t	脱氧液 0.189 9 t 气相 0.045 3 t 水相 0.203 6 t
	电能能耗 407.9 MJ	
	脱氧液 0.189 9 t	
加氢裂化	氢气 0.003 t	汽油 0.084 8 t 柴油 0.084 7 t 水相 0.009 7 t 气相 0.013 t
	电能能耗 255.015 MJ	

1.3 影响评价

1.3.1 评价指标

生物质热解分质转化系统的全生命周期成本(LCC)为生物质热解分质转化总成本。静态评价法是一种不考虑投资时间价值的技术方案评价方法^[18]。动态评价法是以资本的时间价值为依据,来分析一个方案在整个研究期间的现金流量^[19]。

(1)全生命周期成本

$$LCC = \sum C_j - S_f$$

式中:LCC为生物质热解分质转化总成本,万元; C_j 为第j项目的成本,万元; S_f 为各种产品的销售收入,万元。

(2)静态投资回收期法(P_t):

$$\sum_{t=0}^{P_t} (CI - CO)_t = 0$$

$$P_t = \left[\frac{\text{累计净现金流量开}}{\text{始出现正值的年份}} \right] - 1 + \frac{|\text{上年累计净现金流量}|}{\text{当年净现金流量}}$$

式中:CI——现金流入量,万元;CO——现金流出量,万元; $(CI - CO)_t$ ——第t年净现金流量,万元。

(3)动态投资回收期法(P_t):

$$\sum_{t=0}^n (CI - CO)_t (1 + i_0)^{-t} = 0$$

$$P_t = \left[\frac{\text{累计净现金流量开}}{\text{始出现正值的年份}} \right] - 1 + \frac{|\text{上年累计净现金流量}|}{\text{当年净现金流量的折现值}}$$

式中： i_0 ——基准收益率

(4) 财务净现值(NPV)：

表 2 成本表
Table 2 Cost table

项目名称	成本/元
秸秆收集	250.000
秸秆运输	50.000
电耗成本	182.970
循环水	0.396
净化风	0.319
氢气	120.000
燃料气	350.000
催化剂	35.000
设备维修费	9.625
人工费用	47.718
设备折旧费	20.042
碱	124.740
水	6.380
成本总计	1 197.190
烟气净化材料	389.880
汽油	750.056
柴油	672.603
利润总计	615.350

$$NPV = \sum_{t=0}^n (CI - CO)_t (1 + i_0)^{-t}$$

式中： $(1+i_0)^{-t}$ ——折现系数； i_0 ——基准折现率。

(5) 内部收益率法(IRR)：

$$\sum_{t=0}^n (CI - CO)_t (1 + IRR)^{-t} = 0$$

式中： $(1+IRR)^{-t}$ 为折现系数

1.3.2 经济性评价

本工艺涉及到的能耗分为三种,分别为汽油能耗、电能能耗和热能能耗,每处理 1 t 湿秸秆的能耗总量为 2 964.72 MJ/t。其中热能能耗约占 66.8%,通过循环余热供能的方式,整个生物质热解液化工艺运行还需外加能耗 984.11 MJ。工艺成本主要集中在燃料气、秸秆收集、电耗成本等,所占总成本的比例分别为 29.2%、20.9%和 15.3%,如图 2 所示,说明降低燃料气成本是提高该项目经济性的重点。根据全生命周期成本公式计算,工艺处理 1 t 湿秸秆的总成本约为 1 197.19 元,而收入 1 812.54 元,纯利润约为 615.35 元,销售利润率达 51.40%。

$$LCC = \sum C_j - S_f$$

$$= \frac{1\ 812.54 - 1\ 197.19}{1\ 197.19} \times 100\% = 51.40\%$$

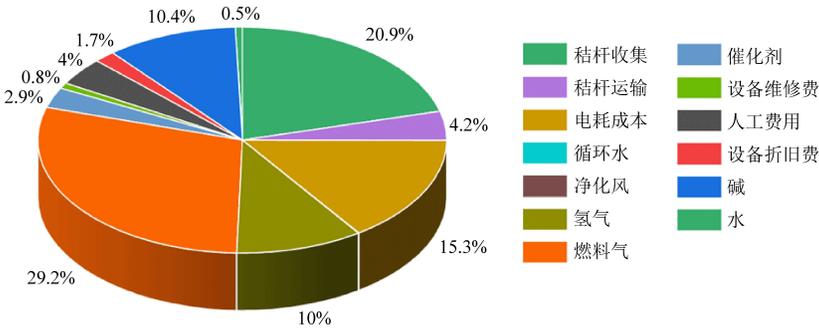


图 2 工艺成本分布图

Fig. 2 Process cost distribution pie chart

静态回收期:累计净现金开始出现正值的年份为第 6 年(包括建设期),上年累计净现金流量为-38.6 万元,当年净现金流量为 576.75 万元,由以上数据可计算出该项目静态回收期为 5.07 年,其中包括 1 年的建设期。从这一点来看,该项目投资见效时间快,盈利性较好。

$$P_t = \left[\frac{\text{累计净现金流量开}}{\text{始出现正值的年份}} \right] - 1 + \frac{|\text{上年累计净现金流量}|}{\text{当年净现金流量}}$$

$$= 6 - 1 + \frac{|-38.6|}{576.75} = 5.07 \text{ 年}$$

动态回收期:累计净现金开始出现正值的年份

为第 7 年(含建设期 1 年),根据模型数据结果可知,上年累计净现金流量为-225.08 万元,当年净现金流量的折现值为 133.98 万元,可以计算得生物柴油厂动态回收期为 7.68 年(含建设期 1 年)。由此可以看出,该项目投资见效时间相对较快,同时项目投资风险适中,能够稳定的长期盈利,有利于废油资源化利用,缓解现阶段的能源危机。

$$P_t = \left[\frac{\text{累计净现金流量开}}{\text{始出现正值的年份}} \right] - 1 + \frac{|\text{上年累计净现金流量}|}{\text{当年净现金流量的折现值}}$$

$$= 7 - 1 + \frac{|-225.08|}{133.98} = 7.68 \text{ 年}$$

生物柴油厂的投资建设期1年,20年为一个运营周期,在纳入资金时间价值变量的前提下,计算得出20年内的累计净现金流量为2 542.96万元。故而,项目从建厂开始,直到运营寿命终止,可以获得利润共计2 542.96万元,由此可见该项目的盈利性较好。

$$NPV = \sum_{i=0}^n (CI - CO)_i (1 + i_0)^{-i}$$

$$= 2\,542.96 \text{ 万元}$$

在生物柴油厂运营过程中,将其基准收益率设为银行利率的8%,由此可以计算出在项目整个生命周期(含建设期)的内部收益率为18.8%,因项目内部收益率18.8% > 8%,所以从内部收益率角度来看,该项目的投资是可行的,未来存在可观的盈利空间。

$$\sum_{i=0}^n (CI - CO)_i (1 + IRR)^{-i} = 0$$

计算得:IRR = 18.8%

生物柴油厂的建设期以及运营寿命分别为1年、20年,以其年收入及支出为基础,能够预测得出项目20年时间内的现金流量表。图3为运营期内系统的累计净现值流量,可以看出考虑资金时间价值时盈利将有2 542.96万元,盈利可观。

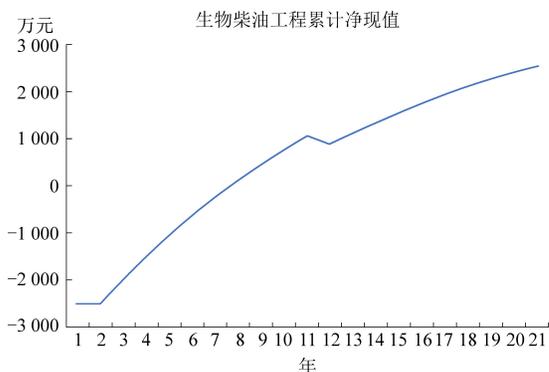


图3 系统累计净现值流量

Fig. 3 Accumulated net present value flow of the system

2 不确定性分析

在实际生产中,燃料气,电耗成本、原料价格和化学品用量等元素都是变化的,元素的变化将会对项目经济效益产生影响,需将不确定因素纳入所有参加经济评价的数据^[20]。因此在完成生物质热解液化技术的经济评价之后,还需要对其进行不确定性分析,依据分析结果来确定优化的变量。

2.1 盈亏平衡分析

盈亏平衡分析的主要目的就是找出盈亏平衡点(BEP)^[21],盈亏平衡点越低,意味亏损的可能性越小,项目具备更大的投资潜力^[22]。

假设将项目生产的多种产品及副产品换算为单一产品计算,此时将烟气净化材料和汽油都换算为柴油进行计算,即该项目年设计生产能力为生产柴油0.205万t,单位柴油售价8 845元·t⁻¹。根据以上假设,产品市场供求状况不会因项目的销售行为发生明显变动,不考虑其他市场条件,产品价格视为恒定值。此时产品销售收入与销售数量之间呈线性关系,即:

$$B = PQ$$

式中: B ——销售收入,元; P ——单位产品价格,元·t⁻¹; Q ——产品销售量,t。

项目总成本为固定成本和变动成本的总和,其与产品产量的关系可近似视为线性关系,即:

$$C = C_f + C_v Q$$

式中: C ——总生产成本,元; C_f ——固定成本,元; C_v ——单位产品变动成本,元·t⁻¹。

当销售收入 B 与总成本 C 相等时,为项目的盈亏平衡点,设此时的产量为 Q^* ,则有:

$$PQ^* = C_f + C_v Q^*$$

$$\text{盈亏平衡产量: } Q^* = \frac{C_f}{P - C_v}$$

如果设 Q_c 为项目设计生产能力,则利用率 E^* 可由下式计算得出,即:

$$E^* = \frac{Q^*}{Q_c} \times 100\% = \frac{C_f}{(P - C_v) Q_c} \times 100\%$$

当严格按照项目设计能力进行生产和销售时,可计算得出盈亏平衡销售价格 P^* ,即:

$$P^* = \frac{B}{Q_c} = \frac{C}{Q_c} = C_v + \frac{C_f}{Q_c}$$

保持销售价格恒定不变,仍按设计能力生产和销售,则可计算出盈亏平衡单位产品变动成本 C_v^* ,即:

$$C_v^* = P - \frac{C_f}{Q_c}$$

假设产品销售价格及生产成本不变,通过计算盈亏平衡点,若该项目满足生物柴油的售价不低于6 105.81元·t⁻¹,单位产品的变动成本不高于7 719.51元·t⁻¹,年销售量不低于0.06万t,且生产能力利用率不低于29%,可以初步判断该投资

表3 项目盈亏平衡分析计算结果

Table 3 Project break-even analysis calculation results

项目	结果
单位产品变动成本 C_v / (元 · t ⁻¹)	4 980.32
盈亏平衡产量 Q^* / (万 t)	0.06
盈亏平衡生产能力利用率 E^* / (%)	29
盈亏平衡销售价格 P^* / (元 · t ⁻¹)	6 105.81
盈亏平衡单位产品变动成本 C_v^* / (元 · t ⁻¹)	7 719.51

表4 敏感性分析

Table 4 Sensitivity analysis

	因素变化率/%	变化因素数值	盈亏平衡价格/元	盈亏平衡价格变化率/%	投资利润率/%	投资利润率变化率/%
电耗价格/元	+20	219.564	6 809.22	+11.52	+29.85	-33.39
	+10	201.267	6 457.51	+5.76	+36.92	-17.60
	0	182.97	6 105.80	0.00	+44.81	0.00
	-10	164.673	5 754.10	-5.76	+53.66	+19.75
	-20	146.376	5 402.39	-11.52	+63.66	+42.08
原料价格/元	+20	300	6 349.71	+3.99	+39.25	-12.41
	+10	275	6 227.76	+2.00	+41.97	-6.33
	0	250	6 105.80	0.00	+44.81	0.00
	-10	225	5 983.85	-2.00	+47.76	+6.59
	-20	200	5 861.90	-3.99	+50.83	+13.45
生产规模/年	+20	2 460	5 088.17	-16.67	+73.83	+64.58
	+10	2 255	5 550.73	-9.09	+59.35	+32.29
	0	2 050	6 105.80	0.00	+44.86	0.00
	-10	1 845	6 784.23	+11.11	+30.38	-32.29
	-20	1 640	7 632.26	+25.00	+15.89	-64.58

考虑到市场价格的变化,首先考察了电耗价格在 146.38 元 · t⁻¹ 到 219.56 元 · t⁻¹ 之间变化时对生物油项目经济性的影响,结果如图 4 所示。可以看出,随着电耗价格的上涨,盈亏平衡价格上升,投资利润率下降。当电耗价格上涨 20% 时,投资利润率显著下降,只有 29.85%,此时项目风险较大。其次考察了原料价格在 200 元 · t⁻¹ 到 300 元 · t⁻¹ 之间变化时对项目经济性的影响,如图 5 所示。此时投资率在 39.25% 到 50.83% 之间变化,可以看出,相对于电耗价格,项目对原料价格敏感性更低一些,说明相对于传统生物汽柴油项目对原料价格最为敏感的情况^[24-25],生物质热解液化制备生物汽柴油项目略微降低了对原料价格的依赖,这主要是因为传统生物汽柴油项目中,限制生物油产业发展的关键因素就是原料成本^[26-27]。因此,该项目采用废弃秸秆作为主要原料,降低了原料成本。最后根据图 6 所示,项目的盈亏平衡

方案在当前市场条件下不会产生亏损。

2.2 敏感性分析

本文对因素变化时各经济指标进行敏感性分析,以此为基础,确定可以优化的变量^[23]。根据全生命周期成本分析,选择对电耗费用、原料费用、生产规模因素降低 10%、20%、提高 10%、20% 等情况进行单因素敏感性分析,分析结果见表 4。

价格与生产规模呈现反比态势,随着规模的扩大,项目投资利润率随之提高,可以有效提升其抗抵御风险能力。若要保证项目的投资利润率大于 20%,则其对应的生产规模下限值为 1 700 t,说明未来只有产量大于 1 700 t 以上才能实现项目的有效盈利。

3 结果解释

本研究针对生物质热解液化技术项目从建厂投资到项目运营寿命终结的全过程,进行了技术经济学评价,得到结论如下:

(1) 工艺处理 1t 湿秸秆的总成本约为 1 197.19 元,收入约为 1 812.54 元,纯利润约为 615.35 元,销售利润率达 51.40%,经济效益较好。

(2) 投资生物柴油项目的静态投资回收期为 5.07 年,动态投资回收期为 7.68 年,表明该项目投资见效时间相对较短,有盈利性。项目在运营

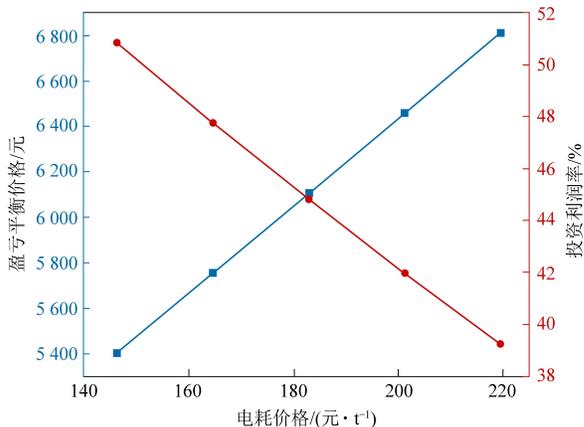


图4 电耗价格的影响

Fig. 4 The impact of electricity consumption price

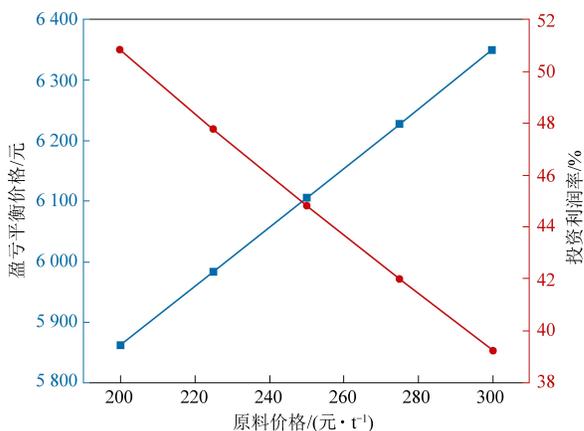


图5 原料价格的影响

Fig. 5 The impact of raw material prices

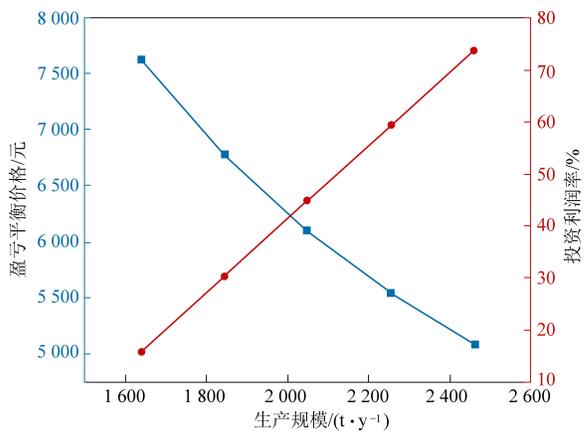


图6 生产规模的影响

Fig. 6 The impact of production scale

期内累积净现值为 2 542.96 万元,内部收益率为 18.8%,大于基准收益率 8%,表明实行生物质热解液化技术项目经济投资是可行的,具有良好的盈利潜力。

(3)通过计算盈亏平衡点并结合市场预测得出,若要达到项目不亏损的预期,生物柴油的售价不得低于 6 105.81 元·t⁻¹,单位产品的变动成本

不得高于 7 719.51 元·t⁻¹,其年销售量不得低于 0.06 万 t,且生产能力利用率不得低于 29%。

(4)通过敏感性分析,相对于电耗价格,项目对原料价格敏感性更低,采用废弃秸秆作为原料,避免了传统生物油炼制油料农作物原料成本过高、与粮食抢地的问题。该项目投资利润率为 20%时所对应的生产规模为 1 700 t,说明未来只有产量大于 1 700 t 以上才能实现项目的有效盈利。

4 结 论

通过建立的秸秆类生物质全生命周期经济评价模型,对生物汽柴油热解液化工工艺运行过程进行定量分析,证实该项目投资见效时间短且投资回报率高,表明生物质热解液化制取生物汽柴油项目具有较好的持续性,投资盈利潜力较高。不确定性分析表明,在生物质热解液化制备生物汽柴油的项目实施中,进一步降低能耗、原料价格对生物汽柴油企业的生存和发展至关重要,未来的研发重点将围绕低能耗的绿色环保项目展开,同时稳定廉价的原料供给也是企业竞争的关键。

生物质热解液化制备生物汽柴油过程中,氢气采购、储备和投加等外部成本占据一定份额。今后,结合分布式光伏、风电等绿电进行电解水制氢,或者原位耦合热解过程中的热解气纯化制氢,可提供热解油进所需氢气,降低生物汽柴油制备成本。同时,可更大程度集成分布式风电光伏、绿电制氢、热解生物质纯化制氢、热解生物质制备生物炭、热解生物质制备生物油等相关产业,做到产业链条最大化协同集成、能源耦合,最大程度提高生物汽柴油技术应用前景和其他产业协同价值。

参考文献 (References):

- [1] 尹凡,曾德望,邱宇,等. 生物质热化学制氢技术研究进展[J]. 能源环境保护, 2023, 37(1): 29-41.
YIN Fan, ZENG Dewang, QIU Yu, et al. Advances in biomass-based thermochemical hydrogen production technology [J]. Energy Environmental Protection, 2023, 37(1): 29-41.
- [2] 赵志月,蒋志伟,曾永健,等. 农林生物质热解制富酚生物油研究进展[J]. 能源环境保护, 2023, 37(2): 134-146.
ZHAO Zhiyue, JIANG Zhiwei, ZENG Yongjian, et al. Advances in the pyrolytic transformation of lignocellulosic biomass to phenol-enriched bio-oil [J]. Energy Environmental Protection, 2023, 37(2): 134-146.
- [3] 苏永东,周育智,刘英,等. 两淮地区农林固废资源量时空特征及利用潜力评价[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(21): 67-73.
SU Yongdong, ZHOU Yuzhi, LIU Ying, et al. Temporal and

- spatial characteristics and utilization potential evaluation of agricultural and forestry solid waste resources in lianghuai area [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, 50(21): 67-73.
- [4] 王成仁, 陈妍, 刘梦. 我国化石能源保供稳价形势研判及对策建议[J]. *价格理论与实践*, 2023(3): 31-37+64.
WANG Chengren, CHEN Yan, LIU Meng. Analysis and suggestions on the situation of ensuring supply and stabilizing price of fossil energy in China [J]. *Price Theory & Practice*, 2023(3): 31-37+64.
- [5] 吴晓颖. 生物质油制备及应用现状分析[J]. *当代化工*, 2023, 52(2): 465-468.
WU Xiaoying. Analysis on the preparation and application of bio-oil [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2023, 52(2): 465-468.
- [6] 严云, 刘洪, 曹芮, 等. 农林废弃生物质的热解特性及动力学研究[J]. *化工新型材料*, 2020, 48(1): 148-151+156.
YAN Yun, LIU Hong, CAO Rui, et al. Study on pyrolysis characteristics and kinetics of waste biomass in agriculture and forestry [J]. *New Chemical Materials*, 2020, 48(1): 148-151+156.
- [7] 刘壮, 田宜水, 马大朝, 等. 生物质热解的典型影响因素及技术研究进展 [J]. *可再生能源*, 2021, 39(10): 1279-1286.
LIU Zhuang, TIAN Yishui, MA Dazhao, et al. Research progress on typical influencing factors and technology of biomass pyrolysis [J]. *Renewable Energy Resources*, 2021, 39(10): 1279-1286.
- [8] 王立宁, 周思彤. 生物质热解影响因素及技术研究进展解析[J]. *资源节约与环保*, 2019(9): 31.
- [9] 李海燕, 肖军, 沈来宏, 等. 生物质热解加氢制汽柴油系统的焓分析[J]. *热科学与技术*, 2015, 14(3): 230-238.
LI Haiyan, XIAO Jun, SHEN Laihong, et al. Exergy analysis of transportation fuel production via biomass fast pyrolysis and hydroprocessing [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2015, 14(3): 230-238.
- [10] 候其东, 鞠美庭. 秸秆类生物质资源化技术研究前沿和发展趋势[J]. *环境保护*, 2020, 48(18): 65-70.
HOU Qidong, JU Meiting. Frontiers and trend of straw biomass utilization technology [J]. *Environmental Protection*, 2020, 48(18): 65-70.
- [11] 王芳, 刘晓风, 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, CEHN 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*, 2021, 37(18): 219-231.
- [12] 潘珂, 王乐乐, 张大勇. 生物质能产业标准体系建构初探[J]. *标准科学*, 2023(5): 76-81.
PAN Ke, WANG Lele, ZHANG Dayong. Preliminary study on the construction of biomass energy industry standards system [J]. *Standard Science*, 2023(5): 76-81.
- [13] 周祖鹏, 刘夫云, 唐兴春. 产品全生命周期评价方法研究前景的探讨[J]. *机械设计与制造*, 2011(10): 261-263.
ZHOU Zupeng, LIU Fuyun, TANG Xingchun. Discussions on outlook of product life cycle assessment research [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2011(10): 261-263.
- [14] 郭焱, 利娜. 菜籽油生物柴油技术经济评价——基于全生命周期评价方法[J]. *技术经济*, 2011, 30(9): 75-79.
GUO Yan, LI Na. Technical and economic evaluation on rapeseed biodiesel: Based on life cycle assessment method [J]. *Journal of Technology Economics*, 2011, 30(9): 75-79.
- [15] 刘凯瑞, 张彩虹. 生物柴油全生命周期的能耗和环境排放评价[J]. *北京林业大学学报(社会科学版)*, 2017, 16(2): 71-75.
LIU Kairui, ZHANG Caihong. An evaluation on energy consumption and environmental emission for biodiesel in life cycle [J]. *Journal of Beijing Forestry University (Social Sciences)*, 2017, 16(2): 71-75.
- [16] 王健, 常青, 田秉晖, 等. 油菜籽制生物柴油生命周期的化学污染物排放风险评价[J]. *生物质化学工程*, 2013, 47(3): 17-22.
WANG Jian, CHANG Qing, TIAN Binghui, et al. Life cycle assessment of chemical pollutant discharge risk for biodiesel made from rapeseed [J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2013, 47(3): 17-22.
- [17] 傅向升. 石化产业高质量发展与转型升级的思考——在2023(第十一届)亚洲炼油和化工科技大会上的报告[J]. *中国石油和化工*, 2023(6): 10-16.
FU Xiangsheng. Reflection on the high quality development and transformation and upgrading of the petrochemical industry - Report at the 11th Asian Refining and Chemical Technology Conference in 2023 [J]. *China Petroleum and Chemical Industry*, 2023(6): 10-16.
- [18] 李忠良, 黎建波, 孙朝晖, 等. 基于静态投资回收期的基站效益评估模型研究及应用分析 [J]. *电信技术*, 2018(2): 11-13.
- [19] 石雪梅, 葛斐, 汪志宏. 跨区域电网送出工程的动态投资回收期测算[J]. *科技和产业*, 2013, 13(5): 60-62+109.
SHI Xuemei, GE Fei, WANG Hongzhi. Analysis and calculate the payback times of dynamic investment on the grid project connecting the different province for transmission power [J]. *Science Technology and Industry*, 2013, 13(5): 60-62+109.
- [20] 李月婕. 石油化工项目财务评价与审计方法与不确定性风险分析——评《化工技术经济》[J]. *化学工程*, 2023, 51(1): 98.
LI Yuejie. Financial evaluation and audit methods and uncertainty risk analysis of petrochemical projects [J]. *Chemical Engineering (China)*, 2023, 51(1): 98.
- [21] 李子峰, 倪渊, 王子焉. 简析盈亏平衡点、成本结构和经营风险的关系[J]. *价值工程*, 2019, 38(2): 6-8.
LI Zifeng, NI Yuan, WANG Ziyang. Brief analysis of the relationship between breakeven point, cost structure and business risk [J]. *Value Engineering*, 2019, 38(2): 6-8.

- [22] 牛晓霞. 盈亏平衡分析在项目决策中的多角度应用[J]. 财务与金融, 2017(1): 61-64.
NIU Xiaoxia. Multiple applications of break-even analysis in project decision[J]. Accounting and Finance, 2017(1): 61-64.
- [23] 刘建敏, 李华兵, 王宪成, 等. 基于敏感性分析的生物柴油简化机理研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2013, 51(3): 45-49.
LIU Jianmin, LI Binghua, WANG Xiancheng, et al. Reduced kinetic model for bio-diesel fuel combustion mechanism based on sensitivity analysis[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2013, 51(3): 45-49.
- [24] 朱锡锋, 朱建萍. 生物质热解液化技术经济分析[J]. 能源工程, 2004(6): 32-34.
ZHU Xifeng, ZHU Jianping. Economical analysis on the technology of biomass pyrolysis[J]. Energy Engineering, 2004(6): 32-34.
- [25] 史宣明, 徐廷丽, 朱先龙, 等. 生物柴油的工业化生产及技术经济分析[J]. 中国油脂, 2005, 30(11): 59-61.
SHI Xuanming, XU Tingli, ZHU Xianlong, et al. Industrialized production of biodiesel and its techno-economic analysis[J]. China Oils and Fats, 2005, 30(11): 59-61.
- [26] 邱娅男. 第二代生物柴油技术的发展[J]. 山西科技, 2015, 30(6): 57-59.
QIU Yanan. Development of second-generation biodiesel technology[J]. Shanxi Science and Technology, 2015, 30(6): 57-59.
- [27] 李春桃, 周圆圆. 第二代生物柴油技术现状及发展趋势[J]. 天然气化工—C1 化学与化工, 2021, 46(6): 17-23+32.
LI Chuntao, ZHOU Yuanyuan. Status and development trend of second generation biodiesel technology [J]. Natural Gas Chemical Industry, 2021, 46(6): 17-23+32.