

DOI:10.13746/j.njkj.2021302

木薯燃料乙醇项目全生命周期评价 及碳中和策略研究

耿中峰, 杨淑媛, 张 佳, 吕惠生, 张敏华

(天津大学石油化工技术开发中心, 天津大学绿色合成与转化教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 对现有木薯燃料乙醇项目开展了全生命周期评价, 得到项目全生命周期碳排放量为 2298 kg CO₂ eq, 不能满足碳中和要求, 与等量燃烧值汽油的碳排放量 1837 kg CO₂ eq 比较, 不具备碳减排竞争力。基于项目生命周期各阶段碳排放潜力数据及分析, 提出了厌氧污泥沼渣还田、热电联产、沼气代煤、蒸汽降耗及秸秆代煤五项碳中和策略, 实施后项目生命周期碳排放量由 2298 kg CO₂ eq 降至 -1372 kg CO₂ eq, 为负碳排放, 满足碳中和要求。木薯燃料乙醇及下游产品显示出较强的碳中和及市场融碳潜力, 为国家及行业制定产业发展政策提供了方向性的指导。

关键词: 木薯; 燃料乙醇; 生命周期评价; 碳达峰; 碳中和策略

中图分类号: TS262.2; TS261.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-9286(2023)02-0065-06

Life Cycle Assessment and Carbon Neutrality Strategy of Cassava Bioethanol Project

GENG Zhongfeng, YANG Shuyuan, ZHANG Jia, LÜ Huisheng and ZHANG Minhua

(R&D Center for Petrochemical Technology, Key Laboratory for Green Chemical Technology
of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Life cycle assessment of the existing cassava bioethanol project was conducted. The life-cycle carbon emission of the project was 2298 kg CO₂ eq, failing to meet the requirement of carbon neutrality for biomass products, and lacking carbon reduction competitiveness compared with gasoline, whose life-cycle carbon emission was 1837 kg CO₂ eq. Based on the carbon emission potential data of the project, we proposed 5 carbon neutrality strategies: returning anaerobic sludge residue to field, combined production of heat and power, biogas replacing coal, steam consumption reduction, and straw replacing coal. The optimized life-cycle carbon emission was remarkably reduced to -1372 kg CO₂ eq, achieving the carbon neutrality target. Cassava fuel ethanol and its downstream products show strong competitiveness in carbon neutrality and market carbon melting. This study has provided guidance for the government and the industry to formulate relevant industrial development policies.

Key words: cassava; bioethanol; life cycle assessment; peak carbon dioxide emissions; carbon neutrality strategy

2020年,我国政府提出了“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”等目标。目前,我国的能源结构仍以煤为主,使得碳排放总量和强度“双高”,且减排实施时间紧,制约因素多,实现“双碳”目标面临着艰巨挑战^[1]。

发展燃料乙醇等生物质能源及基础化学品成

为我国实现“双碳”目标的重要举措之一^[2]。生物质能是自然界中有生命的植物提供的能量,并以生物质作为媒介储存太阳能。依据“碳中性”原则,部分生物质生命周期自然状态基准线情景与项目设计情景均会转化为二氧化碳等温室气体释放入大气,具有排放可再生的零碳排放或负碳排放的能源特

作者简介:耿中峰(1981-),男,河北石家庄人,副研究员,主要从事生物质能源的研究工作。

通讯作者:杨淑媛(1996-),女,山东泰安人,硕士研究生,主要从事生物乙醇的研究工作。

征。因此,生物燃料乙醇现有或在建项目的生命周期评价应满足碳中和或负碳排放为环境影响的基本要求,如果碳排放不达标,需尽早制定并实施科学、具体的碳减排策略。

木薯是大宗生物乙醇生产原料之一,中国作为较早大规模生产木薯乙醇的国家,拥有成熟的木薯乙醇成套生产技术^[3]。2007年,采用天津大学石化中心技术,在广西建成了20万吨/年木薯燃料乙醇示范生产装置,混配的车用乙醇汽油已在广西等地推广使用。目前对于燃料乙醇项目的评价多关注于项目情景的投资及经济效益,对于二氧化碳等温室气体排放的评价,只是定性简单说明,缺乏对项目的原料种植、运输、生产、产品运输及燃烧全生命周期各阶段碳排放详细数据的评价及分析^[4-5],与国家绿色低碳发展生物质能源产业要求不适应,急需一份全面、科学及公正的燃料乙醇项目生命周期各阶段碳排放等环境影响数据的评价,使科学制定项目低碳排放方案及策略成为可能。

生命周期评价是一种产品或项目基于“从摇篮到坟墓”全过程或全阶段的一种评价方法,有助于在项目流程设计、产业发展的前期或过程中识别不同阶段的环境影响潜力,为国家或相关行业健康持续发展提供政策方向性引导^[6-7]。

1996年,德国PE-INTERNATIONAL公司开发了一种全生命周期评价专业软件GaBi,用于评估传统产品或项目的排放及环境影响。经过多年的项目实践及完善,目前GaBi已成为生物质能源等行业广泛接受的计算传统产品或项目环境影响的评价工具。

本研究拟以目前现有的木薯燃料乙醇项目为评价载体,采用GaBi生命周期评价模型,对项目碳排放等环境影响潜力定量评估,找到进一步降低项目生命周期各阶段碳排放的突破口,制定策略,落实木薯燃料乙醇具体项目的清洁低碳目标^[8]。

Aspen Plus是目前广泛应用的化工过程模拟工程软件,拥有严格且多样的机理模型、丰富的数据库和多种单元操作模块,可实现燃料乙醇等化工过程流程模拟优化,获得开展项目全生命周期评价所需的生产过程基础数据。

本研究以广西木薯为原料,采用天津大学石化

中心开发的木薯燃料乙醇成套生产技术,确定项目情景,采用Aspen Plus生产工艺模型,收集相关数据,获得项目物料投入、能量消耗等基础数据,即项目生命周期评价所需的物料衡算和能量衡算等基础数据^[9-10]。以此为基础,采用GaBi评价模型,完成现有木薯燃料乙醇项目生命周期碳排放等的环境影响评价^[11-12]。根据评价数据,提出项目碳中和、碳减排的环境影响策略,并对实施效果进行生命周期评价,以满足木薯燃料乙醇项目碳中和或负碳排放的产业发展要求。

1 木薯燃料乙醇项目生命周期评价

1.1 建立生命周期评价系统边界

项目生命周期评价流程主要包括:建立生命周期评价系统边界、确定木薯燃料乙醇项目生产工艺模型、物耗能耗及环境排放参数、建立生命周期物质清单、构建项目生命周期评价模型、完成生命周期评价、评价结果说明解释。

建立木薯燃料乙醇项目情景生命周期评价系统边界,主要参考国际标准ISO 14040/44^[13],具体参见图1。

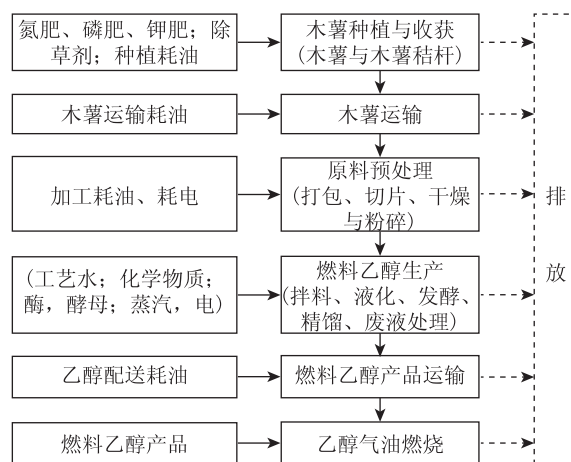


图1 项目生命周期评价系统边界图

从图1可以看出,木薯燃料乙醇项目全生命周期评价系统边界主要包括木薯种植、运输、预处理、燃料乙醇生产、产品运输及燃烧等阶段。

1.2 确定木薯燃料乙醇生产工艺

建立项目生命周期评价系统边界后,需确定木薯燃料乙醇生产工艺并建立模型,获得项目生命周期物质清单所需的木薯燃料乙醇项目生产过程物

料平衡及能量平衡的基础数据。

现有项目情景主要包括原料预处理、液化、发酵、精馏脱水与废水处理等生产单元,生产工艺流程:木薯原料经粉碎、拌料及预热后,在 90 ℃ 条件下进行液化操作,得到的液化醪冷却到 30~35 ℃ 进行同步糖化发酵操作,发酵时间为 48~65 h,乙醇转化率为 90 %;发酵得到的乙醇发酵醪送入精馏脱水单元,发酵醪经精馏及分子筛吸附脱水操作后,获得燃料乙醇产品;精馏单元排放的废醪液送入废水处理单元得到副产品沼气及木薯沼渣活性污泥。

项目采用 Aspen Plus 完成项目生产过程的模拟与优化,得到较为可靠的物料衡算和能量衡算基础数据,获得现有项目生产 1000 L 木薯燃料乙醇产品的总蒸汽(6 MPa 饱和蒸汽)消耗 1.71 t 等数据。

1.3 建立生命周期评价物质清单

项目进一步收集木薯种植、运输和处理等阶段的数据,获得完整的木薯燃料乙醇项目全生命周期评价所需的物质清单,为生命周期评价提供必要的基础数据。表 1 为木薯燃料乙醇项目生命周期物质清单(基准:1000 L 燃料乙醇产品)。

表 1 木薯燃料乙醇项目生命周期物质清单
(基准:1000 L 燃料乙醇产品)

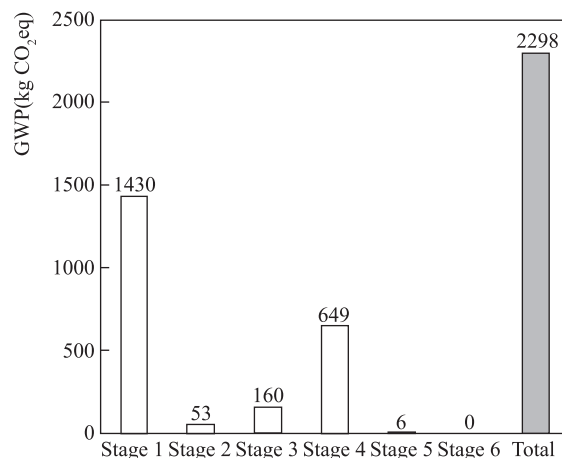
资源	使用量
木薯(kg)	8103
土地使用量(m ²)	3681.3
氮肥(kg)	74.7
磷肥(kg)	58.1
钾肥(kg)	62.1
除草剂(kg)	8.7
种植阶段柴油(L)	15.9
运输油耗(L)	12.2
预处理加工耗电(kW·h)	183.0
淀粉酶(kg)	0.8
糖化酶(kg)	2.3
酵母(kg)	0.16
原煤(kg)	231.0

由表 1 可知,生产 1000 L 木薯燃料乙醇所需的部分物质或资源量,即木薯原料 8103 kg,氮肥、磷肥、钾肥和除草剂分别为 74.7 kg、58.1 kg、62.1 kg 和 8.7 kg 等。

1.4 项目生命周期评价

采用全生命周期评价专业软件 GaBi 构建木薯燃料乙醇项目生命周期评价模型,开展项目多种情景的生命周期评价。根据碳中和原则,生命周期评价过程涉及的木薯、秸秆、沼气及燃料乙醇燃烧过程的碳排放为零^[14]。

采用全球变暖潜力(GWP)指标作为项目生命周期评价碳排放的主要指标,单位为“kg CO₂eq”。现有的木薯燃料乙醇项目生命周期评价结果:生产 1000 L 燃料乙醇,碳排放为 2298 kg CO₂eq,作为生物燃料与国家对于生物质能源产品的碳中和要求差距较大,木薯原料种植阶段碳排放占比最高,碳排放 1430 kg CO₂eq,占比 62 %,燃料乙醇生产阶段碳排放 649 kg CO₂eq,占比 28 %。通过对现有木薯燃料乙醇项目生命周期的评价,获得了木薯燃料乙醇项目各阶段碳排放评价的定量评估数据。具体参见图 2。



注: Stage 1—木薯种植阶段; Stage 2—木薯运输阶段; Stage 3—木薯预处理阶段; Stage 4—乙醇生产阶段; Stage 5—乙醇运输阶段; Stage 6—乙醇燃烧阶段; Total—全生命周期

图 2 现有项目生命周期各阶段碳排放图

现有木薯燃料乙醇项目评价结果表明,木薯种植阶段的碳排放明显高于燃料乙醇生产阶段,制定碳减排策略不仅要关注生产阶段的节能减排,更应关注木薯原料种植技术的进步及相关化肥生产技术的提升。现有项目生命周期内 1000 L 木薯燃料乙醇产品的碳排放量与等量燃烧值化石燃料汽油的碳排放量 1837 kg CO₂eq 比较^[15],燃料乙醇产品碳排放高于汽油产品,缺乏碳减排竞争力,易形成生

物乙醇产品碳减排能力负面评价,项目碳中和碳减排潜力较大,亟待制定科学可行的碳中和、碳减排策略,满足项目碳中和要求。

2 木薯燃料乙醇碳中和策略

通过现有木薯燃料乙醇项目生命周期评价,获得了各阶段碳排放数据,并对数据进行分析比较,找到了现有项目碳排放等环境影响指标的改善潜力,使项目进一步降低碳排放成为可能。

依据现有木薯燃料乙醇项目的现状及特点,本文系统地提出了厌氧污泥沼渣还田、热电联产、沼气代煤、蒸汽降耗及秸秆代煤五项碳中和、碳减排策略,并分别对五项碳中和策略的实施效果进行了生命周期评价分析。

2.1 厌氧污泥沼渣还田

木薯燃料乙醇生产过程中产生的废醪液经厌氧生化处理得到副产沼气,废水液固分离后得到富含腐蚀质等的厌氧污泥沼渣,收集后通常填埋,但已有个别企业开展了其作为生产有机肥料还田替代部分化肥的推广试验工作。

目前,农业生产大量使用氮肥等无机肥,出现农田土壤酸化板结等问题,影响农业生产持续发展,有机肥料的投入能够有效改善农田土壤结构,促进作物对土壤养分的吸收和利用,降低化肥使用量,提高生产效率及作物产量。推广实践证明,木薯厌氧污泥制备的有机肥料还田方案,可以替代木薯种植阶段的大部分化肥,起到降低种植阶段碳排放的效果。

木薯燃料乙醇生产过程中,生产1000 L燃料乙醇,通常得到厌氧沼渣有机肥原料约700 kg,如果按照减少木薯种植阶段50%化肥替代量估算,采用木薯厌氧沼渣有机肥还田策略,能够降低燃料乙醇项目木薯种植阶段碳排放量715.0 kg CO₂eq。

目前,厌氧污泥沼渣还田措施主要面临市场推广困难,作为有机肥生产原料需要复配成有机肥产品再还田使用;需要进一步开拓有机肥产品的销售渠道或利用现有有机肥产品的销售渠道,得到农户认可需要时间,建立新的生产、营销及服务模式。

2.2 热电联产

热电联产(CHP)是一种高效、清洁及低碳的能

源生产技术,装置将发电后的蒸汽乏汽用于工业制造,能够达到能量最大化利用。项目将热电联产技术引入木薯燃料乙醇生产过程,采用以汽定电方案,产生的发电蒸汽乏汽用于燃料乙醇生产过程单元设备加热,即木薯燃料乙醇项目生产阶段所需蒸汽全部采用热电联产锅炉的乏汽,省掉现有木薯燃料乙醇项目生产阶段制备加热蒸汽消耗煤燃料所产生的碳排放量,电力主要用于燃料乙醇生产。

现有木薯燃料乙醇项目如果以煤为燃料,采用热电联产以汽定电方案,生产1000 L燃料乙醇,需要消耗原煤208 kg(原煤平均低位发热量20.9 MJ/kg计)。本策略生产所需蒸汽将全部采用锅炉发电后的乏汽替代,不需要额外消耗其他燃料,多余的生物电可出售,项目热电联产策略资源增效实现碳减排218 kg CO₂eq,碳减排效果显著。

2.3 沼气代煤

沼气代煤策略是将现有项目的废醪液处理单元厌氧生化处理装置产生的沼气送至锅炉,替代锅炉的煤燃料。项目按照生产1000 L木薯燃料乙醇计算,废醪液厌氧生化处理过程副产的沼气的量约249 m³,沼气的平均低位发热量18.7 MJ/m³,现有木薯燃料乙醇项目生产过程的蒸汽消耗量,副产沼气可以全部替代热电联产锅炉所需的煤燃料,沼气代煤策略使能源结构变化,实现碳减排462 kg CO₂eq。沼气代煤方案已在一些现有项目推广尝试,但锅炉需要改造。

2.4 蒸汽降耗

近年来,天津大学石化中心燃料乙醇生产技术不断优化创新,开发并工程化了超糊化点液化、同步糖化浓醪发酵、复杂热耦合精馏、新型隔壁塔等技术及设备,使现有木薯燃料乙醇项目生产1000 L燃料乙醇的蒸汽消耗量由1.71 t降至1.09 t,通过蒸汽降耗策略项目实现碳减排152 kg CO₂eq,节能降耗效果显著。

2.5 秸秆代煤

在木薯原料种植与收获过程中,每收获1 t木薯,约副产0.667 t木薯秸秆,目前,副产木薯秸秆原料除10%~20%作为种子留用外^[6],大量的木薯秸秆被直接废弃或焚烧,经济效益低,影响环境及农民木薯种植的积极性。秸秆代煤策略是将木薯秸

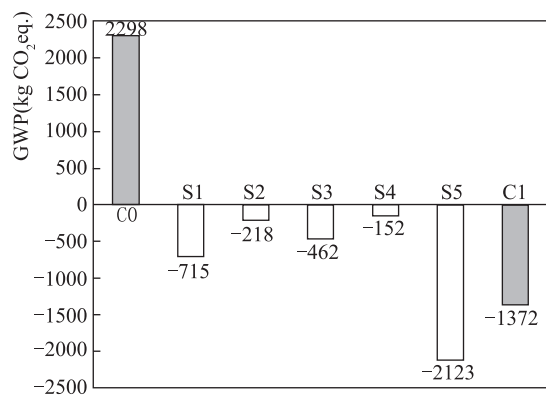
秆收集后作为锅炉燃料代替煤发电,项目获得的生物电可以不等或全部作为项目生物能源产品出售。

秸秆代煤策略实施应考虑木薯秸秆收集运输过程碳排放增加的影响。木薯秸秆收集运输距离不宜过长,参考木薯原料的收购运输距离,木薯秸秆原料收集运输半径定为150 km。

项目生产1000 L木薯燃料乙醇,需要新鲜木薯8103 kg,副产含水量70%的木薯秸秆量5402 kg^[17]。按照木薯秸秆中约20%留种或损耗计算,可被回收利用木薯秸秆量为4322 kg。原煤与干基木薯秸秆的平均低位发热量分别为20.908 MJ/kg、18.15 MJ/kg^[18],发电装置生产1 kw/h电需消耗9 MJ,木薯秸秆燃料可代替1126 kg原煤,总发电量为289 kw/h,能源替代变化实现碳减排2339 kg CO₂eq,考虑木薯秸秆收集运输过程额外增加了216 kg CO₂eq的碳排放,木薯秸秆代煤发电策略可减少碳排放2123 kg CO₂eq,碳中和碳减排效果最为显著。

2.6 项目碳中和策略实施效果及前景

现有木薯燃料乙醇项目五项碳中和碳减排策略的实施效果如图3所示,燃料乙醇产品基准为1000 L乙醇,碳排放单位为“kg CO₂eq”。



注: C0-项目初始碳排放; C1-实施五项策略后项目碳排放; S1-厌氧污泥沼渣还田策略碳减排量; S2-热电联产策略碳减排量; S3-沼气代煤策略碳减排量; S4-蒸汽降耗策略碳减排量; S5-秸秆代煤策略碳减排量

图3 现有项目及实施碳中和策略减排效果图

从图3现有项目及实施碳中和策略减排效果图可以看出,现有木薯燃料乙醇项目的厌氧污泥沼渣还田、热电联产、沼气代煤及蒸汽降耗四项碳中

和策略较易实施,可分别实现碳减排715 kg CO₂eq、218 kg CO₂eq、462 kg CO₂eq、152 kg CO₂eq,改进后的项目生命周期碳排放由2298 kg CO₂eq降至751 kg CO₂eq,还不能完全实现现有木薯燃料乙醇项目的碳中和,但明显低于现有的汽油产品全生命周期碳排放1837 kg CO₂eq,碳排放量仅为汽油产品的41%,在一定程度上显示出木薯燃料乙醇产品所具有的碳减排竞争力。

由图3还可看出,为了完全实现木薯燃料乙醇项目碳中和,甚至负碳排放的生物能源产品目标,项目在实施厌氧污泥沼渣还田、热电联产、沼气代煤及蒸汽降耗四项碳中和策略并取得减排效果后,可考虑进一步实施木薯秸秆代煤发电碳减排策略,再实现碳减排2123 kg CO₂eq,策略碳中和潜力显著,减排量与现有木薯燃料乙醇项目的碳排放量基本持平。

通过采用以上五项碳中和策略,项目总碳排放量可进一步降至-1372 kg CO₂eq,实现负碳排放目标,木薯秸秆代煤策略实现碳减排量占五项碳中和策略减排量58%,碳减排潜力显著,木薯副产秸秆的资源化利用是最终实现木薯燃料乙醇项目碳中和的关键措施,满足了生物质能源产业发展碳中和要求。

通过项目碳中和减排策略碳排放影响的生命周期评价效果分析,在项目全生命周期过程减少化肥、煤等资源的投入,以及热电联产等能量制备方式的变化,是现有木薯燃料乙醇生产项目实现碳中和的可行途径。

项目碳中和策略实施前景分析。木薯燃料乙醇项目涉及的厌氧污泥沼渣还田、热电联产、沼气代煤、蒸汽降耗四项碳中和策略,对于现有项目不需要较大的工艺变化,较易于实施,且部分策略已在一些项目推广应用,取得了良好的经济效益及碳减排潜力;对于进一步实施秸秆代煤碳中和策略,首先需要建立秸秆原料庞大的收储系统,锅炉需要投资改造,投资较大,公用工程工艺变化较大,需要对生产的生物电使用或出售统筹安排,争取国家政策支持,具体实施推广难度较大,可以考虑分步实施,逐步推广,适用于新建项目参考。

3 结论

现有的木薯燃料乙醇生产项目生产 1000 L 燃料乙醇,生命周期碳排放为 2298 kg CO₂eq,不能满足生物燃料的基本要求,与汽油产品碳排放量相比,缺乏碳减排竞争力,易造成生物乙醇及下游产品碳减排能力的负面评价。

现有项目实施厌氧沼渣还田、热电联产、沼气代煤、蒸汽降耗四项碳中和策略后,项目碳排放量可降至 751 kg CO₂eq,虽然还达不到碳中和目标,但明显低于现有汽油产品碳排放量,在一定程度上具备碳减排竞争力。

现有项目再进一步实施第五项木薯秸秆代煤碳中和策略后,木薯燃料乙醇项目碳排放量可降低至-1372 kg CO₂eq,满足生物燃料负碳排放要求,木薯秸秆能源替代策略碳减排潜力显著。现有项目实施五项碳中和策略后,木薯燃料乙醇及下游产品显示出较强的碳中和及市场融碳竞争力,实现了碳达峰及碳中和目标,为国家及行业制定燃料乙醇产业低碳发展政策提供了方向性指导。

参考文献:

- [1] 胡鞍钢.中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J].北京工业大学学报(社会科学版),2021,21(3): 1-15.
- [2] 张迪茜.生物质能源研究进展及应用前景[D].北京:北京理工大学,2015.
- [3] ZHANG T, XIE X, HUANG Z. The policy recommendations on cassava ethanol in China: analyzed from the perspective of life cycle “2E&W”[J].Resources, conservation and recycling,2017,126: 12-24.
- [4] AYODELE B V, ALSAFFAR M A, MUSTAPA S I. An overview of integration opportunities for sustainable bioethanol production from first- and second-generation sugar-based feedstocks[J].Journal of cleaner production, 2020,245: 118857.
- [5] MORALES M, QUINTERO J, CONEJEROS R, et al. Life cycle assessment of lignocellulosic bioethanol: environmental impacts and energy balance[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2015, 42: 1349-1361.
- [6] LYU H, ZHANG J, ZHAI Z, et al. Life cycle assessment for bioethanol production from whole plant cassava by integrated process[J]. Journal of cleaner production, 2020, 269: 121902.
- [7] LYU H, YANG S, ZHANG J, et al. Impacts of utilization patterns of cellulosic C5 sugar from cassava straw on bioethanol production through life cycle assessment[J]. Bioresource technology, 2021, 323: 124586.
- [8] QUINTERO J A, MONTOYA M I, SÁNCHEZ O J, et al. Fuel ethanol production from sugarcane and corn: comparative analysis for a Colombian case[J]. Energy, 2008, 33(3): 385-399.
- [9] RATHNAYAKE M, CHAIREONGSIRIKUL T, SVANGARIYASKUL A, et al. Process simulation based life cycle assessment for bioethanol production from cassava, cane molasses, and rice straw[J].Journal of cleaner production,2018,190: 24-35.
- [10] 胡鹏飞.燃料乙醇生产过程中半连续同步糖化发酵模拟与优化[D].天津:天津大学,2015.
- [11] 时锋,张佳,王智,等.多种原料路线的乙醇生产工艺[J].酿酒科技,2019(4): 48-54.
- [12] 张敏华,吕惠生.我国非粮燃料乙醇生产技术进展[J].酿酒科技,2008(9): 91-95.
- [13] GUINEE J B. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards[J].The international journal of life cycle assessment,2002,7(5): 311.
- [14] NEAMHOM T, POLPRASERT C, ENGLANDE A J. Ways that sugarcane industry can help reduce carbon emissions in Thailand[J].Journal of cleaner production, 2016,131: 561-571.
- [15] VENKATESH A, JARAMILLO P, GRIFFIN W M, et al. Uncertainty in life cycle greenhouse gas emissions from United States natural gas end-uses and its effects on policy[J].Environmental science & technology,2011, 45(19): 8182-8189.
- [16] MORIIZUMI Y, SUKSRI P, HONDO H, et al. Effect of biogas utilization and plant co-location on life-cycle greenhouse gas emissions of cassava ethanol production [J]. Journal of cleaner production, 2012, 37: 326-334.
- [17] VEIGA J P S, VALLE T L, FELTRAN J C, et al. Characterization and productivity of cassava waste and its use as an energy source[J]. Renewable energy, 2016, 93: 691-699.
- [18] 韦茂贵.木薯茎秆作为生物质能原料的化学特性研究[D].北京:中国农业大学,2014.