

各代生物乙醇生产工艺碳减排潜力研究

门继军^{1,2}, 李洪深^{1,3}, 楚洁璞², 魏利³, 李十中³

(1. 中国天辰工程有限公司, 天津 300499; 2. 新地能源工程技术有限公司, 廊坊 065001;

3. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要: 基于清洁发展机制(CDM)方法学框架,在定义边界、基准线排放量和项目活动排放量的基础上,重点分析玉米蒸煮发酵(第1代)、甜高粱固态发酵(第1.5代)和纤维素水解发酵(第2代)3类典型工艺的碳减排特征。通过引入副产物资源化利用的二次减排核算体系,系统揭示各代生物乙醇工艺的最大碳减排潜力。结果表明:在当前技术水平下,第1.5代甜高粱固态发酵技术具有最高的碳减排能力,单位乙醇产量理论最高可减排5.14 t CO₂e温室气体;第2代纤维素乙醇在技术创新驱动下展现出更优的碳减排前景。

关键词: 生物质能源; 生物乙醇; 固态发酵; 温室气体减排; 生物碳捕集与封存; 碳减排潜力

中图分类号: TK6

文献标志码: A

0 引言

实现“双碳”目标是中国重要的国家战略。与其他新能源仅提供电力不同,生物质能以燃料、材料等形式替代化石燃料,是唯一可大规模取代石油的可再生能源,其规模化应用对优化能源结构、促进农业碳循环具有重要意义^[1-2]。燃料乙醇是全球应用规模最广泛的生物液体燃料,近年来中国燃料乙醇总产量稳定在280万t左右,仅占全球总产量的3%,产业发展亟待突破^[3]。

当前中国已形成1代(粮食基)、1.5代(非粮生物质)和2代(纤维素基)生物乙醇的多元技术格局。出于粮食安全考虑,中国在非粮生物燃料研究方面具有先发优势,以甜高粱、木薯或秸秆为原料的乙醇的示范项目已在多地陆续投产^[4-5]。

对生物乙醇的碳减排效益,部分学者仍有质疑^[6-7]。一方面,能源作物种植引发的土地利用变化而增加的碳排放难以计量;另一方面,原料和产品运输、生产过程能耗及副产物处理等环节的碳排放抵消效应还缺乏定量的计算方法。

中国燃料乙醇定价与汽油出厂价挂钩,其碳减排效益长期以来难以在流通环节中体现。随着中国碳市场逐渐向交通领域扩容,特别是醇基喷气燃料(alcohol-to-jet, AtJ)、乙醇重整制氢(ethanol steam reforming, ESR)等新兴技术的发展,生物航空燃料(sustainable aviation fuel, SAF)、绿氢等乙醇衍生品已显现出显著的碳溢价^[8-9],为中国生物乙醇产业拓展了

发展空间,但也亟需建立科学的碳核算方法学以支撑生物乙醇行业碳资产的开发。

传统生命周期评价(life cycle assessment, LCA)方法因系统边界模糊、数据源异质性强等问题,难以满足具体项目的碳减排核证需求^[10-12]。在工厂实践中,温室气体减排量计算大多参照联合国清洁发展机制(clean development mechanism, CDM)方法学,其中排放因子的确定主要依据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)制定的《国家温室气体清单编制指南》^[13-14]。CDM已批准大型项目方法学中ACM0017《生物燃料生产》主要面向生物柴油生产,但基本框架可为本文提供借鉴^[13]。本文拟通过构建适用于生物乙醇项目的碳计量模型,重点解析副产物资源化利用产生的二次减排效益,支撑生物乙醇工艺技术发展路径优化,实现项目碳减排潜力最大化。

1 碳减排方法学构建

1.1 项目边界

不同作物生产燃料乙醇的工艺有所差别,其项目边界界定与碳核算方法也需差异化处理。表1为项目边界内的排放源和计入的温室气体。在基准线情景下,生物乙醇用于掺混制备乙醇汽油,基准线温室气体排放采用等效热值替代原则计算,即与燃料乙醇燃烧产生同等热值的汽油燃烧时的排放量(包含汽油燃烧不充分产生的CH₄和N₂O)。

收稿日期: 2025-02-08

基金项目: 城市水资源与水环境国家重点实验室自主课题(2024TS27); 广州市南沙区重点领域科技计划(2023ZD015)

通信作者: 李洪深(1983—), 男, 硕士、正高级工程师, 主要从事生物质化工方面的研究。li-hs17@tsinghua.org.cn

表1 项目边界内的排放源和计入的温室气体
Table 1 Emission sources included in or excluded from project boundary

排放源	温室气体	是否计入	解释或说明
基准线	农业有机物废弃	CO ₂	否 生物源碳循环抵消
		CH ₄	是 自然厌氧分解产生
		N ₂ O	是 自然腐解产生
	交通工具燃烧燃料	CO ₂	是 化石燃料燃烧产生
		CH ₄	是 不充分燃烧产生
		N ₂ O	是 燃烧副产物
	发酵副产物排放	CO ₂	是 未捕集利用而释放
		CH ₄	否 为简化而忽略
		N ₂ O	否 为简化而忽略
项目活动	土地耕种的农业投入	CO ₂	是 化肥施用产生
		CH ₄	是 仅考虑水稻种植
		N ₂ O	是 化肥施用产生
	原料及产品的运输	CO ₂	是 化石燃料燃烧产生
		CH ₄	否 为简化而忽略
		N ₂ O	否 为简化而忽略
	项目生产的能源消耗	CO ₂	是 按综合能耗计入
		CH ₄	否 为简化而忽略
		N ₂ O	否 为简化而忽略
	生产废水厌氧处理	CO ₂	否 为简化而忽略
		CH ₄	是 厌氧处理主要产物
		N ₂ O	否 为简化而忽略

淀粉类或糖类原料,即使未用于乙醇生产,其通过农作物生长吸收的 CO₂ 与有机物分解产生的 CO₂ 理论可实现平衡,因此不计入项目边界。如将农作物秸秆作为纤维素乙醇生产原料,需考虑基准情景下的常规处置方式(如还田自然腐解或非受控燃烧),此类非能源用途不完全燃烧或厌氧分解会产生高增温潜势的 N₂O 和 CH₄,需纳入基准线排放核算。

在生物化学转化过程中,单糖厌氧发酵产生等摩尔量的乙醇和 CO₂,将乙醇生产伴生的 CO₂ 进行捕集与利用,可产生额外的碳减排量。捕集的 CO₂ 源自植物光合固碳过程,根据 CDM 方法学的额外性原则,该部分碳汇已存在于项目边界外的自然碳循环中,故应按照基准线排放量进行核算。

项目活动排放系统涵盖以下范畴:1)生物质原料种植阶段的农业投入碳排放;2)原料运输至生产厂区及生物乙醇和副产品分销过程的碳排放;3)生产过程的电力及化石能源消耗产生的碳排放;4)生产过程有机物厌氧处理产生的 CH₄ 排放。

此外,生物乙醇加工后的固态残余物(玉米酒糟、甜高粱酒糟、木质素废渣等)具有显著的资源化潜力。例如,玉米酒糟可生产蛋白饲料(distillers dried grains with soluble, DDGS),甜高粱酒糟或甘蔗渣除用作饲料外,还可继续生产纤维素乙醇、生物天然气、固态成型燃料、生物基材料等,木质纤维素预处理分离出的木质素和水洗废液中的半纤维素也有诸多高值化利用途径。对这些副产品的梯级利用产生的温室气体减排量,可参照已有方法学,确定项目边界后,统一折算成二次排放量,计入工程净减排量。

1.2 基准线排放量

为统一不同燃料乙醇生产工艺的碳排放核算基准,本文以单位产量燃料乙醇作为基本计算单元。基准线排放量为:

$$E_{BL} = E_{LC} + E_{MG} + E_{CU} \quad (1)$$

式中: E_{BL} ——基准线排放量,t CO₂e; E_{LC} ——无项目活动时生物质原料废弃产生的排放量,t CO₂e; E_{MG} ——等热值汽油燃烧产生的排放量,t CO₂e; E_{CU} ——与项目发酵过程捕集等量的边界外 CO₂ 产品使用量,t CO₂e。

对纤维素乙醇项目,木质纤维素原料(如农作物秸秆)常规处置时产生的 N₂O 与 CH₄,其计算式为:

$$E_{LC} = (P_{CH_4} \times F_{CH_4,LC} + P_{N_2O} \times F_{N_2O,LC}) \times C_{LC} \quad (2)$$

式中: P_{CH_4} 、 P_{N_2O} ——CH₄ 和 N₂O 的全球增温潜势,t CO₂e/t; $F_{CH_4,LC}$ 、 $F_{N_2O,LC}$ ——常规处置时 CH₄ 和 N₂O 的排放因子,t/t; C_{LC} ——单位纤维素乙醇原料的消耗量,t。

基准线汽油排放量采用等热值替代法计算,移动源 CH₄ 和 N₂O 排放率取决于车辆的燃烧和排放控制技术,计算式为:

$$E_{MG} = V_{FE} (F_{CO_2,MG} + P_{CH_4} F_{CH_4,MG} + P_{N_2O} F_{N_2O,MG}) \quad (3)$$

式中: V_{FE} ——燃料乙醇的平均净热值,GJ/t; $F_{CO_2,MG}$ 、 $F_{CH_4,MG}$ 、 $F_{N_2O,MG}$ ——基准线情景汽油的 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放因子,t/GJ。

1.3 项目活动排放量

项目活动排放量为:

$$E_{PJ} = E_{AF} + E_{TR} + E_{OP} + E_{AT} \quad (4)$$

式中: E_{PJ} ——项目活动排放量,t; E_{AF} 、 E_{TR} 、 E_{OP} 、 E_{AT} ——农作物种植、原料及产品运输、生产运行能耗、生产废水厌氧处理产生的排放量,t。

农作物种植环节产生的碳排放主要来源于化肥施用过程,特别是氮肥中有效氮成分在施用和排水等过程中,直接和间接排放的 N₂O 气体,当施用尿素或石灰石时,需额外核算尿素水解及石灰石中和反应产生的 CO₂ 排放,忽略农机耕

作过程化石燃料排放贡献^[14],计算式为:

$$E_{AF} = C_F \left[F_{SN} P_{N_2O} (F_{N_2O,F,D} + F_r F_{N_2O,F,I}) \frac{44}{28} + F_C \frac{44}{12} + F_{CO_2,P} \right] \quad (5)$$

式中: C_F ——化肥施用量, t; F_{SN} 、 F_C ——化肥中有效氮和碳元素的质量分数, %; $F_{N_2O,F,D}$ 和 $F_{N_2O,F,I}$ —— N_2O 直接和间接排放因子, t/t; F_r ——氮挥发系数; $F_{CO_2,P}$ ——化肥生产过程相关的温室气体排放因子。

原料和产品在运输过程的碳排放, 根据所用运输工具实际消耗的化石燃料量计算:

$$E_{TR} = \sum_m \left(\frac{M_m}{L_m} D_m F_{TR} \right) \quad (6)$$

式中: M_m ——物质 m 的运输量, t; L_m ——运输工具的平均负载量, t; D_m ——平均运输距离, km; F_{TR} ——运输工具燃料的 CO_2 排放因子, t/km。

不同原料及生产工艺的生物乙醇项目运行时, 工程单位能耗存在一定差异, 为简化模型, 合并各工序的电力、热力以及其他耗能工质, 均按《综合能耗计算通则》折算为标准煤耗量^[15], 计算式为:

$$E_{OP} = P_{SC} F_{CO_2,S} \quad (7)$$

式中: P_{SC} ——单位乙醇生产的标准煤耗量, tce/t; $F_{CO_2,S}$ ——标准煤碳排放因子, t CO_2e /tce。

有机废水厌氧处理产生的 CH_4 量, 计算公式为:

$$E_{AT} = Q_{COD} P_{COD} B_0 M_{CF} P_{CH_4} \quad (8)$$

式中: Q_{COD} ——需要厌氧处理的废水量, m^3 ; P_{COD} ——废水的化学需氧量, t/ m^3 ; B_0 ——单位质量 COD 的甲烷 CH_4 产生量, t/t; M_{CF} ——甲烷转化因子。

1.4 工程净减排量

工程净减排量 E_R 的计算式为:

$$E_R = E_{BL} + E_L - E_{PJ} + E_{RU} \quad (9)$$

式中: E_L ——泄漏排放量, t; E_{RU} ——副产品处置活动二次减排量, t, 其中 E_{RU} 根据应用场景确定正负值。

相较于基准线情景的汽油储运系统挥发性有机物泄漏率, 生物乙醇储运系统泄漏率更低。根据碳核算保守性原则, 当 $E_L < 0$, 按 $E_L = 0$ 计算。

第 1 代和第 1.5 代乙醇生产工艺仅利用了原料中的淀粉或可发酵糖成分, 残余木质纤维素部分可通过饲料化利用、联产生物天然气、制备生物基材料等多种途径实现二次碳减排。第 2 代纤维素乙醇工艺产生的预处理废液中的木质素和半纤维素组分可进一步高值化利用, 实现生物能源碳捕集与封存 (bioenergy with carbon capture and storage, BECCS) 效率的提升。具体核算可参照现有 CDM 方法学, 并依据实际工艺参数确定各环节的排放因子。

2 结果与讨论

2.1 工艺描述

本文选取 3 类典型生物乙醇项目进行对比分析。项目 1 采用第 1 代玉米蒸煮液态发酵工艺, 项目 2 采用第 1.5 代甜高粱固态发酵工艺, 项目 3 采用第 2 代玉米秸秆纤维素水解发酵工艺^[16-18]。

第 1 代玉米乙醇工艺流程如图 1a 所示。原料经干磨粉碎后通过蒸煮系统实现淀粉糊化, 添加 α -淀粉酶形成液化醪。糖化工序采用糖化酶将糊精转化为可发酵糖。冷却的糖化醪与酿酒酵母混合进行同步发酵, 发酵产物再经过精馏和分子筛脱水系统后, 添加变性剂获得燃料级乙醇产品。副产物废乙醇糟经离心分离、浓缩、干燥制成全糟蛋白饲料 (distiller dried grains with solubles, DDGS), 实现废水零排放与资源闭路循环。

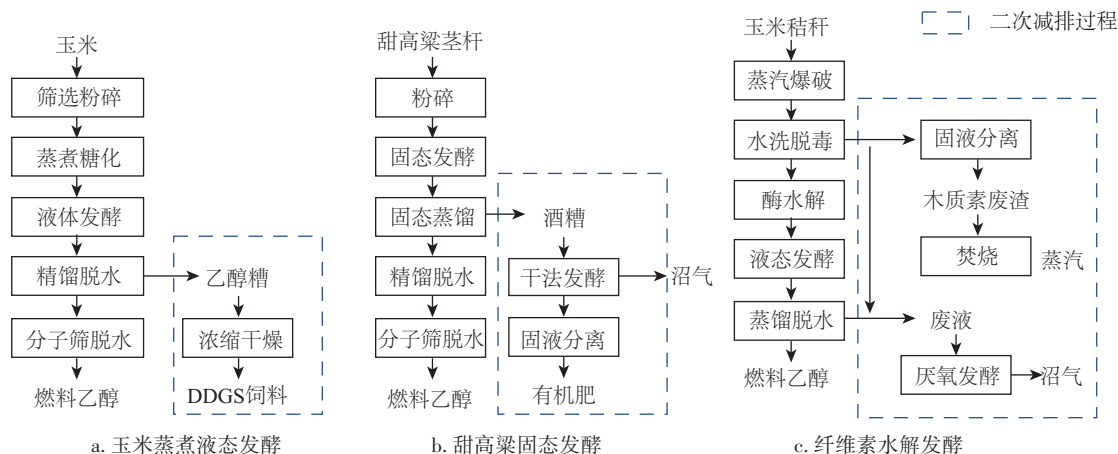


图 1 各代生物乙醇生产工艺流程

Fig. 1 Flow chart of different generation bioethanol production processes

固态发酵是指在无游离水的不溶性固态基质上直接进行微生物发酵, 将可发酵糖直接转化成乙醇的过程。甜高粱

固态发酵工艺流程如图 1b 所示, 甜高粱秸秆粉碎后直接接经二级扩培的酿酒酵母, 在转鼓式发酵罐厌氧发酵 24~30

h, 发酵产物进入固态蒸馏塔, 通入蒸汽提取酒醅中的乙醇, 蒸馏塔顶气体经提纯获得燃料乙醇, 塔底产生酒糟可继续用于生产沼气、造纸或动物饲料等。

第2代纤维素乙醇生产流程如图1c所示。粉碎后的木质纤维素原料采用蒸汽爆破预处理技术破坏其致密结构, 预处理降解产物经水洗脱毒后加入纤维素酶, 将原料中的纤维素和半纤维素水解为单糖, 糖化液经五六碳糖共发酵菌株转

化为乙醇。发酵醪经精馏和脱水至燃料级产品, 预处理废液经固液分离木质素回用于锅炉为生产供能, 发酵废水经厌氧处理后达标排放。

2.2 一次减排量

从原料至生物乙醇产品产出全过程的温室气体排放量, 计为项目活动一次减排量, 计算参数如表2所示。

表2 各类生物乙醇项目活动一次碳减排量计算参数

Table 2 Calculation parameters of GHG abatement for different bioethanol projects

参数	描述	项目1	项目2	项目3
$P_{CH_4}/(t\ CO_2e/t)$	CH ₄ 全球增温潜势	25	25	25
$P_{N_2O}/(t\ CO_2e/t)$	N ₂ O全球增温潜势	298	298	298
$F_{CH_4,OW}/(t/t)$	有机废弃物CH ₄ 排放因子	不适用	不适用	0.1012
$F_{N_2O,OW}/(t/t)$	有机废弃物N ₂ O排放因子	不适用	不适用	0.0356
$C_{LC}/(t/t)$	单位乙醇木质纤维素原料消耗量	0	0	6.46
$V_{FE}/(GJ/t)$	乙醇平均净热值	26.77	26.77	26.77
$F_{CO_2,MG}/(t/GJ)$	汽油燃烧CO ₂ 排放因子	0.0741	0.0741	0.0741
$F_{N_2O,MG}/(t/GJ)$	汽油燃烧N ₂ O排放因子	9.8×10^{-5}	9.8×10^{-5}	9.8×10^{-5}
$F_{CH_4,MG}/(t/GJ)$	汽油燃烧CH ₄ 排放因子	0.00116	0.00116	0.00116
$P_{EE}/(tce/t)$	单位乙醇标准煤耗	0.514	0.378	0.469
$F_{CO_2,S}/(t\ CO_2e/tce)$	标准煤排放因子	2.66	2.66	2.66
$M_{m,F}/t$	所需原料运输量	3.20	16.67	8.13
$M_{m,P}/t$	产品运输量	1.909	1.909	1.909
T_m/t	柴油卡车载重量	8	8	8
$D_{m,F}/km$	原料收集距离(往返)	60	60	60
$D_{m,P}/km$	产品分销距离(往返)	500	500	500
$F_{TR}/(t/km)$	中型柴油卡车排放因子	0.00143	0.00143	0.00143
C_F/t	单位乙醇化肥施用量	0.117	0.067	0.108
$F_{SN}/\%$	所用化肥含氮量	22.0	46.7	22.0
$F_f/\%$	氮挥发系数	0.1	0.1	0.1
$F_{CO_2,D}/(t/t)$	N ₂ O直接排放因子	0.01	0.01	0.01
$F_{CO_2,I}/(t/t)$	N ₂ O间接排放因子	0.01	0.01	0.01
$F_C/\%$	化肥中含碳量	7.5	20	7.5
$F_{CO_2,P}/(t/t)$	化肥生产相关排放因子	1.02	0.87	1.02
Q_{COB}/m^3	生产废水量	0	0	19.3
$P_{COB}/(t/m^3)$	废水的化学需氧量	不适用	不适用	0.012
$B_0/(t/t)$	甲烷最大产生能力	不适用	不适用	0.25
M_{CF}	甲烷转化因子	不适用	不适用	0.8
$E_{CU}/(t/t)$	工程捕集的CO ₂ 减排量	0.909	0.909	0.909

项目生产原辅料消耗、能耗、废水排放量等计算参数源于工程数据,为方便对比,各项目原料运输半径、产品分销距离、运输车辆等均不作区分,发酵过程产生的 CO_2 按 95% 捕集率计,其他环节排放因子默认采用 IPCC 缺省值^[14]。

项目 1 和项目 3 中,玉米种植过程采用复合肥-石灰石配施方案,每 kg 地上干物质施用复合肥 27.4 g(含氮量 22%)与石灰石 43.0 g(碳含量 7.5%)^[19]。基于能量分摊法,玉米籽粒和秸秆的低位热值分别为 18.1 MJ/kg 和 16.9 MJ/kg,对应温室气体分摊比例分别为 52% 和 48%^[20]。项目 2 甜高粱种植环节施用尿素和固态有机肥,茎秆能量分摊率按 70% 计^[20]。针对项目 3 的基准场景,需核算秸秆自然腐解产生的 N_2O 与 CH_4 排放;项目场景则需额外计算秸秆不还田带来的土壤有机碳损失。研究显示,每 kg 秸秆移除将导致平均 16 g 的土壤有机碳损失,等效排放量为 $0.059 \text{ t CO}_2\text{e/t}$ 秸秆(干基)^[21]。

原料收集运输的甜高粱为含糖 14%、含水 65% 的鲜基茎秆,玉米秸秆含水率按 20%。产品分销包含乙醇和液体 CO_2 的运输。为评估最大碳减排潜力,统一选择经济性原料收集半径和产品分销半径,分别设定为 30 km 和 250 km^[22]。

各代生物乙醇工艺均包含以下核心工序:生物质原料预处理(玉米乙醇蒸煮糖化、甜高粱乙醇粉碎、纤维素乙醇预处理和水解)、生物发酵、乙醇蒸馏脱水、 CO_2 捕集和液化及污水处理和循环回用等。基于项目实际运行数据,将各工序能源消耗统一折算为综合能耗指标,用于核算生产阶段的温室气体排放量。发酵副产物资源化利用产生碳减排量纳入二次减排体系,其对应的生产耗能产生的碳排放量同步纳入项目二次活动核算边界。

玉米乙醇采用 DDGS 技术可实现高 COD 浓度生产废水零排放。甜高粱固态发酵工艺将木质纤维素成分截留于酒糟中,也无高浓度废水排放。纤维素乙醇预处理水洗废液经板框压滤后,可分离出大部分木质素,与蒸馏塔釜液混合废水厌氧处理产生的 CH_4 ,在计算一次减排量时按全部放空处理。以上流程中各工序(如蒸煮、水解、糖化、发酵、蒸馏等)冷却水,净化处理后回用。

按已建立的方法学核算,项目一次活动生产单位乙醇的温室气体减排量为:第 1 代玉米蒸煮发酵工艺 $1.06 \text{ t CO}_2\text{e/t}$ 、第 1.5 代甜高粱固态发酵工艺 $1.30 \text{ t CO}_2\text{e/t}$ 、第 2 代纤维素水解工艺 $0.60 \text{ t CO}_2\text{e/t}$ (图 2)。

纤维素乙醇基准情景包含了秸秆还田腐解排放,基准线排放量较其他工艺高 $0.54 \text{ t CO}_2\text{e/t}$,而项目情景因秸秆离田需额外计入 $0.36 \text{ t CO}_2\text{e/t}$ 的土壤有机碳损失,导致其项目耕种阶段碳排放强度最高,而使用秸秆生产乙醇较直接还田仍可实现 $0.18 \text{ t CO}_2\text{e/t}$ 的净减排量;甜高粱不考虑秸秆还田场景,且种植对化肥特别是氮肥的需用量小于玉米,因此其项目耕种阶段的碳排放强度最低。玉米籽粒能量密度高,在项目原料运输过程中所产生的碳排放最低;甜高粱固态发酵需使用

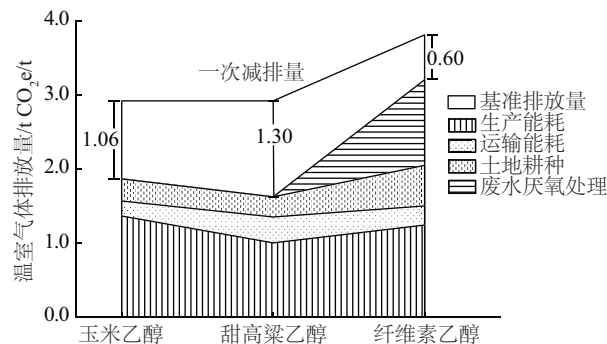


图2 各代生物乙醇项目一次减排量

Fig. 2 Primary carbon abatement of different bio-ethanol projects

高含水量的茎秆,其原料运输碳排放最高。在生产能耗方面,玉米乙醇蒸煮糖化和纤维素乙醇蒸汽爆破工序都额外增加了项目整体能耗,而甜高粱乙醇固态蒸馏虽然需要对固态基质整体加热,但相对而言,其综合能耗最低。仅纤维素乙醇需要厌氧处理高浓度水洗废液和蒸馏塔釜液,如沼气全量放空,将增加 $1.158 \text{ t CO}_2\text{e/t}$ 的碳排放。综上,在计入土壤有机碳损失和不收集废水处理产生的沼气的情况下,纤维素乙醇项目碳减排效益最低,若未捕集发酵过程产生的 CO_2 ,项目净减排量将下降至 $-0.31 \text{ t CO}_2\text{e/t}$,即实际加剧环境的温室效应。

2.3 二次减排量

不同工艺的生物乙醇项目均可通过对副产物的合理利用,实现二次减排,一次减排量和二次减排量共同构成理论最大减排量,如图 3 所示。

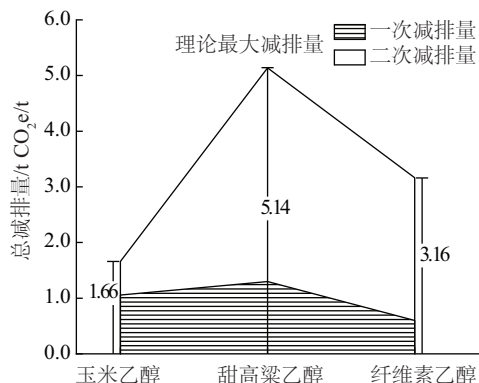


图3 各代生物乙醇项目理论最大减排量

Fig. 3 Carbon abatement potential of different bioethanol projects

DDGS 技术实现了高 COD 废水零排放,同时还具备显著的副产物二次减排优势,按每生产 1 t 乙醇可联产 0.92 t DDGS 副产品,蛋白质含量 30% 计算,以单蛋白饲料生产作为基准线情景时,可产生最高的碳减排效益,二次减排量为 $0.60 \text{ t CO}_2\text{e/t}$,叠加生物乙醇替代化石燃料的一次减排量,项目减排量最高可达 $1.66 \text{ t CO}_2\text{e/t}$ 。

甜高粱固态发酵乙醇生产中,仅茎秆中的可发酵糖被微生物利用,而木质纤维素组分仍保留于酒糟内。按每 16.7 t

含糖量 14% 的甜高粱茎秆生产 1 t 生物乙醇计算, 同步可生产 3.0 t 干基酒糟, 其利用方式多样。本文基于 CDM 方法学 AM0057、AM0036 和文献[23-25]方法定量评估了甜高粱酒糟用于制造纸浆、生产成型燃料供热和生产生物天然气 3 种典型利用路径的减排效果。结果表明, 利用干法厌氧发酵技术, 甜高粱酒糟可产生 696 Nm³ 生物天然气, 并通过主动捕集沼气提纯产生 1.18 t CO₂, 二次净碳减排量可达 1.95 t CO₂e/t。进一步对厌氧消化后的沼渣进行固液分离与堆肥处理, 可再生产 1.77 t 有机肥(含氮量 3.3%、含水量 30%), 部分替代基准情景含氮量 16% 的化肥使用, 可再额外产生 1.89 t CO₂e/t 的碳减排效益。综上, 集成甜高粱固态发酵、干法生物天然气联产有机肥工艺, 可梯级利用生物质资源, 将能源作物甜高粱生长吸收固定的 CO₂“吃干榨净”, 单位乙醇产量理论最大减排潜力达 5.14 t CO₂e, 是极具碳减排效益的 BECCS 路径。

纤维素乙醇生产工艺的碳减排潜力主要受限于生产废弃物处理, 需收集利用水洗废液厌氧处理产生的沼气和固液分离后的废渣, 实现减排效益最大化。提纯项目一次活动情景下产生的沼气可生产 65 Nm³ 生物天然气和 0.11 t CO₂, 扣除沼气脱硫和净化能耗, 可实现 1.43 t CO₂e/t 二次减排量^[26]。生产废渣中木质素占干重比例达 70%~80%, 其资源化利用途径涵盖酚醛树脂合成、活性炭制备、植物生长调节剂开发及土壤改良剂生产等领域, 有待开发。鉴于纤维素乙醇生产的高蒸汽需求, 现有工艺普遍将废渣木质素回送锅炉焚烧供汽, 锅炉效率按 85% 计算^[27], 生产废渣焚烧可额外产生 1.13 t CO₂e/t 二次减排量。因此, 通过沼气利用与废渣焚烧的协同处理, 纤维素乙醇工艺现阶段最高可实现 3.16 t CO₂e/t 的最大减排量。

2.4 碳减排潜力预测

BECCS 工程实现温室气体减排的核心机理, 源于植物光合作用对大气中 CO₂ 的主动捕集与生物封存。若要最大化其碳减排潜力, 首要策略是筛选具有高光合转化效率与碳汇累积速率的能源作物。玉米和甜高粱均为 C4 植物, 光合固碳能力强, 是生物质能源生产的优选原料。相比于淀粉类作物, 甜高粱等糖类作物茎秆中的可发酵糖可直接被酿酒酵母代谢转化, 避免了淀粉蒸煮糖化过程产生的热力碳排放。此外, 甜高粱由于根系发达, 适合盐碱和边际土壤地区种植, 对水、肥要求较低, 从碳减排角度来看, 更适宜作为生产生物乙醇的原料。

实现生物乙醇 BECCS 工程的碳减排效益, 需通过技术驱动, 降低运输和生产环节的能耗, 增加一次减排量。研究表明, 按分布式能源站模式规划生物乙醇项目选址布局, 可将生物质原料平均收集半径压缩至 30 km 以内, 降低运输过程的碳排放强度^[28]。在生产环节, 混合菌种协同固态发酵、蒸汽渗透分离膜替代传统精馏等技术, 能大幅削减原料转化过

程的碳排放强度^[29-30]。随着新兴节能技术的不断涌现, 未来生物乙醇工程的净碳移除量将进一步提升。

提升生物乙醇发酵副产品的二次减排量, 关键在于构建生物质梯级利用体系, 实现淀粉、单糖、纤维素、半纤维素及木质素等不同有机质组分的定向高值转化。目前玉米乙醇酒糟主要用作蛋白饲料, 未来可通过开发高附加值产品进一步挖掘其减排潜力。甜高粱乙醇酒糟的含水量和碳氮比适宜, 且固态蒸馏初步破坏了木质纤维素的顽固结构, 尤其适合干法生物天然气生产; 沼渣制成有机肥可将残余有机质固定于土壤, 部分替代氮肥还可减少 N₂O 的排放, 在现阶段是具有最高净减排量的 BECCS 工艺。纤维素乙醇的减排效益提升依赖于半纤维素与木质素的高效利用, 当前普遍应用的木质素焚烧供热路径, 远未完全开发其减排效益。新的技术路径, 如半纤维素高效催化转化 2,5-呋喃二甲酸(FDCA)、木质素热解生物航空燃料等都逐渐成熟, 结合低能耗预处理技术和高固酶解发酵等节能工艺, 第 2 代纤维素乙醇将释放更大的碳减排潜力。

碳市场机制是释放生物乙醇产业碳减排潜力的有力支撑。随着欧盟对航空、海运领域的免税配额的下降, 生物乙醇的研究热点已开始向醇喷合成(AtJ)、重整制氢等工艺转移。中国也需加快建立生物燃料碳减排核算体系, 尽快将交通运输领域燃料替代纳入 CCER 体系, 促进生物乙醇企业参与碳交易, 通过碳信用收益反哺技术创新, 形成良性循环。

3 结 论

1) 生物乙醇替代化石燃料可降低消费环节的碳排放, 但其碳减排效益常被前端环节碳排放部分抵消。需特别关注种植期间的氮肥施用、原料运输的柴油消耗及废水处理中的甲烷逸散等过程的抵消量, 方能准确评估生物乙醇项目的净碳减排量。

2) 第 1 代玉米乙醇采用全糟干燥工艺可消除糟液污染, 结合发酵过程的 CO₂ 捕集和替代单蛋白饲料生产碳排放, 净减排量可达 1.66 t CO₂e/t。

3) 第 1.5 代甜高粱连续固态发酵工艺, 具有显著减排优势, 固态酒糟联产生物天然气和有机肥, 单位乙醇可实现 5.14 t CO₂e 的理论减排量, 是当前技术水平下碳减排量最高的生物乙醇生产工艺。

4) 第 2 代纤维素乙醇能高效利用农业有机废弃物, 但预处理过程废水产生量大, 若沼气直接排放且未实施发酵 CO₂ 捕集, 系统减排量将被大幅抵消。若全部收集生产过程产生的温室气体并焚烧利用木质素废渣, 最高也可获得 3.16 t CO₂e/t 的温室气体减排量。纤维素乙醇技术进步空间巨大, 未来碳减排效益将不断提高。

5) 在双碳背景下, 中国发展生物乙醇产业需要科技创新驱动和先进产业示范, 同时, 需要碳市场的政策支持, 以推进

生物乙醇向重型交通领域的转型。

[参考文献]

- [1] 李十中. 推动新能源革命促进实现碳中和目标[J]. 人民论坛·学术前沿, 2021(14): 42-51.
LI S Z. Promoting the new energy revolution and achieving the goal of carbon neutrality[J]. Frontiers, 2021(14): 42-51.
- [2] 李十中. 生物经济发展趋向: 构建生物食源产业与生物能源产业体系[J]. 人民论坛·学术前沿, 2022(14): 14-26.
LI S Z. Trends in bioeconomic development: building a biofood industry and bioenergy industry system [J]. Frontiers, 2022(14): 14-26.
- [3] Statista. Fuel ethanol production worldwide [EB₂OL]. <https://www.statista.com/statistics/281606/ethanol-production-in-selected-countries/>, 2025-2-8.
- [4] 宁艳春, 马迎雪, 伊凤, 等. 燃料乙醇技术发展现状及建议[J]. 化学工业, 2024, 42(3): 58-61.
NING Y C, MA Y X, YI F, et al. Technology development situation and suggestions of fuel ethanol [J]. Chemical industry, 2024, 42(3): 58-61.
- [5] 张蓓蓓, 马颖, 耿维, 等. 4种能源植物在中国的适应性及液体燃料生产潜力评估[J]. 太阳能学报, 2018, 39(3): 864-872.
ZHANG B B, MA Y, GENG W, et al. Assessing suitability and liquid biofuels production potential of four energy species in China[J]. Acta energiae solaris sinica, 2018, 39(3): 864-872.
- [6] FARGIONE J, HILL J, TILMAN D, et al. Land clearing and the biofuel carbon debt [J]. Science, 2008, 319(5867): 1235-1238.
- [7] SEARCHINGER T, HEIMLICH R, HOUGHTON R A, et al. Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change [J]. Science, 2008, 319(5867): 1238-1240.
- [8] LIU H R, LI H S, LI S Z. Ni-hydrocalumite derived catalysts for ethanol steam reforming on hydrogen production [J]. International journal of hydrogen energy, 2022, 47(58): 24610-24618.
- [9] TAO L, MARKHAM J N, HAQ Z, et al. Techno-economic analysis for upgrading the biomass-derived ethanol-to-jet blend stocks[J]. Green chemistry, 2017, 19(4): 1082-1101.
- [10] 田宜水, 李十中, 赵立欣, 等. 甜高粱茎秆乙醇全生命周期分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 132-137.
TIAN Y S, LI S Z, ZHAO L X, et al. Life cycle assessment on fuel ethanol producing from sweet sorghum stalks [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 132-137.
- [11] 沈钊丞, 仲兆平, 郑翔, 等. 典型生物质发酵制取燃料乙醇环境影响分析[J]. 太阳能学报, 2024, 45(4): 280-285.
SHEN Z C, ZHONG Z P, ZHENG X, et al. Environmental impact analysis of fuel ethanol from typical biomass fermentation [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(4): 280-285.
- [12] 欧训民, 张希良, 常世彦, 等. 生物燃料乙醇和生物柴油全生命周期分析[J]. 太阳能学报, 2010, 31(10): 1246-1250.
OU X M, ZHANG X L, CHANG S Y, et al. LCA of bio-ethanol and bio-diesel pathways in China [J]. Acta energiae solaris sinica, 2010, 31(10): 1246-1250.
- [13] CDM Executive Board. Production of biofuel, Version 4.0 [EB/OL]. <https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/PNBR5ULFIDLY3TMXUKGBP2ZRXRDTV2>, 2017-05-04.
- [14] IPCC. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [R]. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [15] GB/T 2589—2020, 综合能耗计算通则[S].
GB/T 2589—2020, General rules for calculation of the comprehensive energy consumption[S].
- [16] 姜新春, 区镜深, 李凡, 等. 玉米燃料乙醇低能耗工业生产新工艺[J]. 生物质化学工程, 2021, 55(4): 7-13.
JIANG X C, OU J S, LI F, et al. Low-energy consumption technology for industrial production of corn fuel ethanol [J]. Biomass chemical engineering, 2021, 55(4): 7-13.
- [17] LI H S, LIU H R, LI S Z. Feasibility study on bioethanol production by one phase transition separation based on advanced solid-state fermentation[J]. Energies, 2021, 14(19): 6301.
- [18] 肖明松, 王孟杰. 燃料乙醇生产技术与工程建设[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
XIAO M S, WANG M J. Fuel ethanol production technology and construction engineering [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2010.
- [19] WANG M, HAN J, DUNN J B, et al. Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use [J]. Environmental research letters, 2012, 7(4): 045905.
- [20] RABSKAE S, SOWINSKI J. The effect of nitrogen fertilization on morphology traits of sweet sorghum cultivated on sandy soil [J]. Communications in biometry and crop science, 2014, 9(2): 83-89.
- [21] 陈鲜妮, 岳西杰, 葛玺祖, 等. 长期秸秆还田对壤土耕

- 层土壤有机碳库的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(1): 25-32.
- CHEN X N, YUE X J, GE X Z, et al. Effect of long-term residue return on soil organic carbon storage[J]. Journal of natural resources, 2012, 27(1): 25-32.
- [22] DORNBURG V, VAN VUUREN D, VAN DE VEN G, et al. Bioenergy revisited: key factors in global potentials of bioenergy[J]. Energy & environmental science, 2010, 3(3): 258-267.
- [23] CDM Executive Board. Use of biomass in heat generation equipment-Version 7.0 [EB/OL]. https://cdm.unfccc.int/methodologies/DBNEZL55_M3ISPDD9I4HSLVTVOABX_QZP, 2022-3-11.
- [24] CDM Executive Board. Avoided emissions from biomass wastes through use as feed stock in pulp and paper, cardboard, fibreboard or bio-oil production-Version 3.0 [EB/OL]. <https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/9YGTI34RIUKP67M87C4J500Q4KOGPP>, 2010-8-13.
- [25] 李洪深, 楚洁璞, 徐伟涛, 等. 干法生物天然气 BECCS 工程碳负排效益分析[J]. 太阳能学报, 2024, 45(5): 158-164.
- LI H S, CHU J P, XU W T, et al. Carbon negative benefit evaluation on dry fermentation biomethane BECCS project [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(5): 158-164.
- [26] CDM. Natural gas substitution by biogenic methane produced from the anaerobic digestion of organic waste-Version 1.0[EB/OL]. <https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/GYN18E8XAL36LNBS2TZ9SCTE3RTG9C>, 2020-4-23.
- [27] MARIAN F, ZAHARIOIU A M, BUCURA F, et al. Study on the process of gasification of black liquor[J]. Current trends in natural sciences, 2023, 12(24): 34-44.
- [28] LI H S, JIA Z F, WEI L, et al. Compacted silage fermentation on whole sweet sorghum plant for distributed bioethanol production [J]. ACS sustainable chemistry & engineering, 2023, 11(34): 12739-12746.
- [29] 刘云云, 张宇, 许敬亮, 等. 混合固态发酵降解甘蔗渣产糖产乙醇研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(5): 1302-1307.
- LIU Y Y, ZHANG Y, XU J L, et al. Conversion of sugarcane bagasse to sugars and ethanol by mixed culture solid-state fermentation [J]. Acta energiae solaris sinica, 2016, 37(5): 1302-1307.
- [30] 李洪深, 李十中. 蒸汽渗透技术在燃料乙醇生产中的应用研究进展[J]. 化工进展, 2020, 39(5): 1620-1631.
- LI H S, LI S Z. Advances in research and application of vapor permeation for biofuel ethanol production [J]. Chemical industry and engineering progress, 2020, 39(5): 1620-1631.

RESEARCH ON GHG ABATEMENT POTENTIAL OF DIFFERENT GENERATION BIOETHANOL PROJECTS

Men Jijun^{1,2}, Li Hongshen^{1,3}, Chu Jiepu², Wei Li³, Li Shizhong³

(1. China Tianchen Engineering Corporation, Tianjin 300499, China;

2. Xindi Energy Engineering Technology Co., Ltd., Langfang 065001, China;

3. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The project boundary, baseline emissions and project emissions of fuel ethanol projects were defined. The greenhouse gas (GHG) emission of 3 generations of bioethanol projects, including corn liquid fermentation, sweet sorghum solid fermentation and cellulose hydrolysis fermentation were analyzed. By introducing a secondary emission reduction accounting system for the resource utilization of by-products, the maximum carbon emission reduction potential of each generation of bioethanol processes was systematically revealed. The results show that the sweet sorghum solid-state fermentation has the highest carbon emission reduction potential, with the maximum theoretical 5.14 ton CO₂e GHG abatement per ton of ethanol production. Cellulosic ethanol has greater carbon negative potential under the background of technological progress.

Keywords: biomass energy; bioethanol; solid state fermentation; GHG mitigation; biocarbon capture and storage; carbon emission reduction potential