

基于纤维素类能源植物的可持续航空燃料全生命周期排放方法分析



杨晓军,袁中楠,丁水汀,侯德铭
中国民航大学,天津 300300

摘要:国际航空业要实现2050年净零碳排放的目标,目前唯一现实的能源解决方案是使用可持续航空燃料(SAF)。为了判断SAF能否真的实现持续的碳减排,有必要对生产的SAF的可持续性进行评估。本文基于国际航空碳抵消和减排计划(CORSIA)定义的生命周期评价(LCA)方法,考虑了燃料生产过程中副产物的固碳效果对总排放的影响,计算了以某种纤维素类能源植物原料制SAF的三种工艺路径的全生命周期排放值,并进行了数据敏感性分析。结果显示,基于该能源植物的SAF各路径均可实现全生命周期碳减排,且考虑生物炭的固碳效果后最大减排量可达152.2%,对实现净零碳甚至负碳排放有关键作用。

关键词:可持续航空燃料;可持续性标准;全生命周期排放;土地利用变化排放;核心生命周期排放

中图分类号:V312+3

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.01.003

目前,航空业的碳排放量约占全球人为CO₂总排放量的2%^[1]。由于航油燃烧产生的CO₂基本排放在大气平流层,其所产生的实际温室效应要比地面排放大4倍左右,危害远远大于其他行业^[2]。尽管受冠状病毒的短期影响,航空运输量显著减少,但由于贸易和旅行的全球化,预计到21世纪中叶,航空排放量将增加3倍以上^[3]。如果航空业能够成功脱碳,将会在很大程度上减少碳排放,从而对全球气候变化产生积极影响^[4]。因此,国际民用航空组织(ICAO)及其成员国正在共同努力制订国家行动计划,以减少国际航空的CO₂排放。

为了遏制航空排放,ICAO及其成员国同意以国际航空碳抵消和减排计划(CORSIA)的形式实施全球碳市场计划,并且制定了全球理想目标,即从2020年起在国际航空领域实现碳中性增长。受制于严格的性能和规格要求,其他替代燃料(如氢气、液化天然气或电池电力)短期内尚不可行。因此,使用基于生物质原料的可持续航空燃料(SAF)可以在实现这一目标方面发挥关键作用^[5]。然而,有研究表明,一些替代燃料与传统喷气燃料相比实际上会使环境问题变得更糟,甚至增加碳排放,所以要想确定SAF是否可以真正实现碳减排,全生命周期评价(LCA)就显得尤

为重要。

LCA是一种用于评估产品在全生命周期中对环境影响程度的方法。与航空燃料的其他评价方法不同,CORSIA LCA方法是将原料、工艺、运输和燃料燃烧各部分评估的影响方法结合起来,对不同的原料提供整个生命周期内选定技术的所有温室气体(GHG)排放评估^[6]。CORSIA LCA方法是国际上第一个用于计算航空燃料生命周期GHG排放的方法。其主要包含三个关键要素:(1)核心生命周期(CLCA)排放。CLCA需要考虑整个燃料供应链中的质量和能量流,对燃料从提取到生产再到最终燃烧过程中产生的GHG排放进行分析评估。(2)土地利用变化(LUC)排放。LUC排放是由土地利用类型改变所导致的,分为土地从其他用途(如非原料农田、森林和草原)转换为SAF原料生产时造成的直接土地利用变化(DLUC)排放和随着SAF原料需求量的加大,用于生物质作物生产的土地增多而导致的作物生产水平变化以及国内外土地用途改变所引起的间接土地利用变化(ILUC)排放^[7]。(3)排放信用(CE)。排放信用是基于固体废弃物管理对城市固体废弃物(MSW)的种类、数量和处理效果进行测算而产生的一种环境信用。这种环境信用可以用于抵消以MSW为原料生产的SAF在生

收稿日期: 2023-07-27; 退修日期: 2023-10-23; 录用日期: 2023-12-07

引用格式: Yang Xiaojun, Yuan Zhongnan, Ding Shuiting, et al. Analysis of whole life cycle emissions method of sustainable aviation fuel based on cellulose energy plants[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(01): 25-35. 杨晓军,袁中楠,丁水汀,等. 基于纤维素类能源植物的可持续航空燃料全生命周期排放方法分析[J]. 航空科学技术, 2024, 35(01): 25-35.

命周期内产生的 GHG 排放,从而实现废弃物管理、经济发展和环境保护的有机结合。对于生物质作物, CORSIA LCA 值由 CLCA 和 LUC 排放值之和给出。因此,只有正确核算 SAF 引起的 CLCA 和 LUC 排放,确定最合适的生物质原料及工艺路径,才能推动航空业净零碳新路径的发展。

目前,国内外对 SAF 均进行了不同程度的研究。E. Crossin^[8]通过评估以澳大利亚南部地区的小桉树为原料制喷气燃料的 LCA 值,发现相比于传统喷气燃料,小桉树制喷气燃料可减少 40% 的温室气体排放。A. Alam 等^[9]研究了适合埃塞俄比亚芥种植的土壤和气候条件,确定了佐治亚州、亚拉巴马州和佛罗里达州三个种植埃塞俄比亚芥的合适地点。S. Michailos^[10]研究了甘蔗渣生产喷气燃料的能源转化效率,并对其进行了 LCA 评估,结果表明甘蔗渣制喷气燃料可实现 26.5% 的能源效率, GHG 减排量约为 47%。Han 等^[11]通过对油料种子的加氢处理工艺(HEFA)、玉米秸秆的费托(FT)工艺以及玉米秸秆的热解工艺进行了研究,并与传统航油对比,得到油料种子 HEFA 工艺 GHG 减排量为 41%~63%、玉米秸秆 FT 工艺 GHG 减排量为 89%,玉米秸秆热解工艺 GHG 减排量为 68%~76%。刘文质^[12]对基于玉米秸秆的 FT 工艺进行了生命周期评估,发现工艺生产阶段用电造成的排放与玉米秆的生长阶段肥料造成的排放对生命周期排放的贡献度最高。于点^[13]以生物质稻壳为原料,对 FT 和生物油催化裂解气费托合成一烯烃齐聚耦合制取航煤(FT-OP)两种工艺路径进行分析,结果表明 FT 工艺的环境性要优于 FT-OP 工艺。由此可见,国内外学者对生物质燃料的研究多集中在核心生命周期排放上,忽视了土地利用变化排放对能源作物可持续性的直接影响,而土地利用变化排放是实现零碳甚至负碳排放的关键因素,同时对于生物质燃料能否作为 SAF 以及能源作物的可持续性缺乏系统的研究。

鉴于此,本文旨在依据 CORSIA SAF 可持续性标准,结合 ICAO CORSIA 定义的生命周期排放模型,提供一套完整的基于生物质的 SAF 全生命周期可持续性评价方法,为我国 SAF 可持续性认证提供理论指导。

1 CORSIA SAF 可持续性标准

SAF 可持续性标准是经 CORSIA 批准的由可持续发展认证计划在独立认证基础上判断 SAF 合规性的依据,旨在为 SAF 的生产商在可持续性投资方面以及航空公司在国际航班中使用 SAF 提供保障。当前已有 124 个国家加入 CORSIA,而 CORSIA SAF 标准也是目前唯一国际性的标准。CORSIA SAF 可持续性标准见表 1^[14]。本文所用单位有: gCO₂e/MJ(克二氧化碳当量/兆焦)、kgC/m²(千克碳/平方米)、kgC/ha(千克碳/公顷)、MJ/t(兆焦/吨)和 t/yr(吨/年)。

航空替代燃料要想作为 SAF,除了需要符合最基本安全性标准,还需要符合 CORSIA 可持续性标准。由表 1 可以看出,如果一种生物质要作为 SAF 的原料,首先,它的种植地不能是高碳土地,因为如果对高碳土地进行耕作,会导致土地碳库损失,从而造成碳排放。其次,在计算 LUC 排放值时,需同时计算 DLUC 和 ILUC 的排放值,并选择其中数值较大的进行最终的全生命周期温室气体排放核算,只有估算了生物质原料所引起的最大的 LUC 排放,才能确保其可以实现真正意义上的碳减排。通过温室气体的评价指标可以看出,只有当航空替代燃料全生命周期排放值相比于传统航空燃料至少要减少 8.9gCO₂e/MJ 时才可被视为 SAF。制定 SAF 可持续性标准对于消除排放到大气中的 GHG 至关重要,它将推动 SAF 的研发与应用,减少对化石燃料的依赖,促进循环经济,同时还可以产生社会和经济效益,创造额外的就业机会和经济活动。为此,需要有一套全生命周期评价方法对其进行评估。

表1 CORSIA SAF 的可持续性标准¹
Table 1 CORSIA SAF sustainability criteria

主题	原则	评价指标
温室气体(GHG)	CORSIA SAF 生命周期内应产生较低的碳排放量	与航空燃料的基线生命周期排放值(89gCO ₂ e/MJ)相比,CORSIA SAF 生命周期内的净温室气体排放量将至少减少 10%
碳储量	CORSIA SAF 不应使用从生物碳储量较高的土地/水生生态系统获取的生物质生产	CORSIA SAF 将不使用从 2008 年 1 月 1 日后转换用途,曾经是有较高的碳储量或会导致碳储量下降的土地/水生生态系统所获取的生物质生产 ²
		如果 2008 年 1 月 1 日之后发生土地用途转换 ³ ,将计算 DLUC 温室气体排放值。如果 DLUC 值超出默认 ILUC 值,将 DLUC 值替代默认 ILUC 值
注:1. 适用于 2024 年 1 月 1 日之前经认证的燃料生产商生产的 CORSIA 合格燃料。2. 较高碳储量的土地/水生系统,包括原始森林、湿地、泥炭地、珊瑚礁、海带林、海草草甸、河口、潮汐盐沼、红树林。3. 土地用途转换是基于政府气候变化专门委员会(IPCC)土地类型所界定的。		

2 全生命周期排放评估模型

SAF全生命周期排放方法是将原料、工艺、运输和燃料燃烧各部分评估的影响方法结合起来,对不同的原料提供整个生命周期内选定技术的GHG排放进行评估。该方法考虑了产品在整个生命周期中对环境的影响程度。其主要包含三个关键要素,即CLCA排放、LUC排放和排放信用。根据原料类型不同,如果原料是生物质作物,需要考虑由土地利用变化引起的LUC排放和由原料生产SAF全过程造成的CLCA排放;对于MSW原料,则无须考虑LUC排放,而是对使用MSW避免的排放信用和CLCA排放进行评估。生命周期排放评估模型示意图如图1所示。

根据上述说明,基于生物质原料的SAF全生命周期温室气体排放值 LS_f 可表示为

$$LS_f = CLCA + (DLUC, ILUC, Maximum) \quad (1)$$

2.1 核心生命周期排放评估模型

通常来讲,归因分析方法是指数以数据为依据,计算每种路径中各个环节对最终结果的影响程度的方法。本文对CLCA GHG排放的计算将使用LCA归因分析方法,即以数据为依据,计算燃料生产供应链中产生温室气体排放的所有过程(原料种植和收集、原料运输、燃料加工、燃料运输和燃料燃烧),如式(2)所示

$$C_E = E_{fe_p} + E_{fe_t} + E_{fe_{fu_p}} + E_{fu_t} + E_{fu_c} \quad (2)$$

式中, C_E 表示CLCA排放强度,是指与提取、生产、运输和消耗单位能源的燃料相关的GHG排放量; E_{fe_p} 代表原料种植阶段,包括原料种植、收获、加工、回收所有活动产生的GHG排放; E_{fe_t} 代表原料运输过程中产生的GHG排放; $E_{fe_{fu_p}}$ 代表将原料转换为SAF过程中产生的GHG排放,目前常见的转换路径有5种,即FT工艺、加氢处理酯和脂肪酸(HEFA)、合成异烷烃(SIP)、乙醇制航空燃料(ETJ)和异丁醇制航空燃料(ATJ); E_{fu_t} 代表燃料运输过程中产生的GHG排放; E_{fu_c} 代表飞机飞行时燃料燃烧产生的GHG排放,由于生物质原料在种植过程中会吸收大气中的GHG,假设飞机燃烧产生的GHG与原料种植吸收的GHG相等,那么, $E_{fu_c} = 0$ 。

2.2 土地利用变化排放评估模型

在全生命周期过程中,SAF原料生产造成的土地利用变化排放是SAF的一个潜在劣势。LUC会引起地上和地下碳储量的变化而导致碳泄漏,如果碳泄漏过大,SAF全生命周期GHG排放可能会高于传统航油,这不仅不会减少碳排放,还会增加环境负担。SAF原料的LUC排放取决于由碳储量损失导致的 CO_2 排放和因土地残存生物质处理、土地径流影响等产生的非 CO_2 排放,为了与CLCA分析保持一致,需要进行LUC的排放强度计算,即

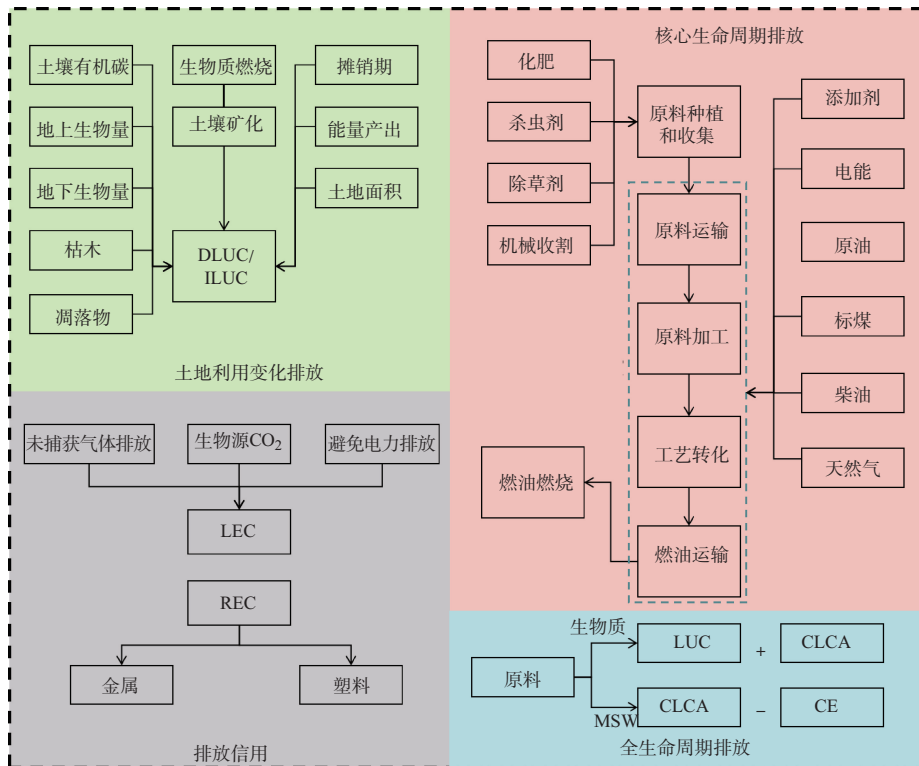


图1 SAF全生命周期排放强度建模流程

Fig.1 SAF whole life cycle emission intensity modeling flow chart

$$LUC_e = \frac{\sum_{i,j,k,r} F_{i,j,k,r} \cdot \Delta L_{i,j,k,r}}{T \cdot E} \quad (3)$$

式中, LUC_e 表示 LUC 排放强度, 是指与土地利用变化相关的 GHG 排放; F 代表土地转化为原料生产的排放系数, 即每单位面积土地发生转换时产生的 GHG 排放; L 代表土地面积; 4 种考虑因素 i, j, k, r 分别代表排放类别、土地类型、农业生态区、国家地区, 对于 DLUC, 只需考虑土地类型这一种因素, 而对于 ILUC, 需考虑由种植 SAF 原料造成的相关土地转换的所有因素, 详细说明见表 2; T 代表排放摊销期, 即土壤碳库变化的时间, 通常是 25 年; E 代表能量输出, 就是燃料燃烧所获得的能量, 等于每单位 SAF 原料中可以转化为燃料的能量与 SAF 原料产量的乘积。

表 2 LUC 排放模型考虑因素

Table 2 Factors of LUC emission model

考虑因素	符号表示	说明
排放类别	i	造成土地排放的相关因素, 如农业生物质、土壤有机碳、泥炭地氧化、自然植被等
土地类型	j	土地按其自然属性的相似性和差异性划归的类别, 如农田、林地、聚居地、湿地、草地、其他土地
农业生态区	k	根据气候、地形等特征将一个地区划分为较小的单元, 如热带雨林、亚热带季风、温带大陆等
国家地区	r	由于当前贸易全球化, 原料种植引起的土地利用变化可能是全球范围的

排放系数 F 是描述特定活动向大气排放温室气体的速率的系数, 是将释放到大气中的污染物的数量与引起该污染物释放的相关活动联系起来的一个代表值^[15], 定义排放系数计算公式如式(4)所示

$$F = F^{CO_2} + F^{nCO_2} \quad (4)$$

其中

$$F^{CO_2} = 44/12 \times \Delta C \quad (5)$$

式中, ΔC 代表土地转化造成的碳储量变化, 具体计算见式(6)~式(8); F^{CO_2} 代表 CO_2 排放系数, 可通过 C 到 CO_2 的化学计量转换计算; F^{nCO_2} 代表非 CO_2 排放系数, 具体计算见式(9)~式(11)。

碳储量即碳的储备量, 通常包括有机碳储量(SOC)和地上与地下碳储量(CVEG)。碳储量变化是指碳库中的碳储量由于碳增加或碳损失而发生的变化。当损失大于增加时, 碳储量变小, 因而该碳库为碳源; 当损失小于增加时, 碳储量变大, 该碳库为碳汇。碳储量(C)计算如式(6)所示

$$C = SOC + CVEG \quad (6)$$

式中, SOC 代表有机碳储量, 是土壤有机质中所含碳的量; CVEG 代表地上和地下碳储量。

SOC 表达式为

$$SOC = SOC_R \times F_{LU} \times F_{MG} \times F_I \quad (7)$$

式中, SOC_R 代表参考有机碳储量; F_{LU} 代表土地利用系数, 反映了与土地利用类型相关的土壤有机碳的差异; F_{MG} 代表管理系数, 反映了与土壤管理相关的土壤有机碳差异; F_I 代表投入系数, 反映了与投入土壤的不同碳水平相关的土壤有机碳的差异。

CVEG 表达式为

$$CVEG = C_{AGB} + C_{BGB} + C_{DW} + C_{LI} \quad (8)$$

式中, C_{AGB} 代表生物质的地上生物量; C_{BGB} 代表生物质的地下生物量; C_{DW} 代表枯木中的碳储量; C_{LI} 代表凋落物中的碳储量。

对于非 CO_2 温室气体, 通常主要考虑甲烷(CH_4)、氧化亚氮(N_2O)、氮氧化物(NO_x)等。在土地非 CO_2 排放的不同来源中, 将土地转换为生物质原料用地需要考虑两种排放来源: (1) 因土地开垦而燃烧的生物质; (2) 土地转化导致的土壤矿化。

定义非 CO_2 排放系数表达式为

$$F^{nCO_2} = FF + FM \quad (9)$$

式中, FF 代表与清理土地相关的生物质燃烧产生的非 CO_2 排放量, FM 代表与土地转换相关的土壤矿化引起的非 CO_2 排放量。定义 FF 表达式为

$$FF = \alpha \times \beta \times$$

$$\frac{CVEG_A \times [G^{CH_4} \times GWP_{CH_4} + G^{N_2O} \times GWP_{N_2O} + G^{NO_x} \times GWP_{NO_x}]}{\theta} \quad (10)$$

式中, α 表示土地因生物质燃烧而清除的面积比例; β 表示土地的燃烧系数; $CVEG_A$ 表示地上生物质碳储量; G^{CH_4} 表示土地转换前生物质燃烧产生的 CH_4 排放系数; G^{N_2O} 表示土地转换前生物质燃烧产生的 N_2O 排放系数; G^{NO_x} 表示土地转换前生物质燃烧产生的 NO_x 排放系数; GWP_{CH_4} 表示与 CH_4 排放相关的 IPCC 全球变暖潜力; GWP_{N_2O} 表示与 N_2O 排放相关的 IPCC 全球变暖潜力; GWP_{NO_x} 表示与 NO_x 排放相关的 IPCC 全球变暖潜力; θ 表示木质生物质含碳率。

定义 FM 表达式为

$$FM = \frac{44}{28} \times \frac{\Delta SOC}{R} \times [EF_1 + \text{Frac}_{\text{LEACH}-(H)} \times EF_5] \quad (11)$$

式中, EF_1 代表土地直接排放的排放系数; ΔSOC 代表土地转换造成的土壤有机碳储量损失; R 代表土壤有机质的碳氮比; EF_5 代表土壤径流引起的间接排放系数; $\text{Frac}_{\text{LEACH}-(H)}$

表3 主要成分参数

Table 3 The main component parameters

元素分析/%					工业分析/%				低位热值
碳/C	氢/H	氧/O	氮/N	硫/S	灰分	挥发分	水分	固定碳	
46.7	5.73	45.1	0.54	0.52	1.4	74.2	2.2	22.2	16747 MJ/t

3.2 土地利用变化排放分析

目前,新疆、内蒙古、安徽、辽宁、湖北等地区都有该种纤维素类能源植物的试点种植基地,本文以湖北地区为例,详细说明种植该种能源植物所造成的 DLUC 排放计算流程。

(1)确定由种植该作物引起的CO₂排放计算参数。首先,需要确定原料种植地转换前后的土地类型,目前土地类型主要分为林地、农田、草地、湿地、聚居地及未利用地六大类。因为种植该能源植物主要开发的是边际土地,所以本文假设作物转换之前的种植地为未利用土地,后面需要对土地进行耕种、收割、管理等农业活动,因此转换后的土地类型定为农田。该种植地位于我国18个农业生态区中的R14^[18],其土壤有机碳储量(0~20cm)参考值为3.95kgC/m²±1.15kgC/m²。

其次,确定与土地利用排放相关的系数,即土地利用系数 F_{LU} 、管理系数 F_{MG} 以及投入系数 F_I 。由于土地转换之前为未利用土地,所以假设转换之前未对该土地进行管理,也基本没有土地投入,那么 $F_{LU}=1, F_{MG}=1, F_I=1$;转换之后由于一系列的农业活动而导致土地投入增加,但该种作物生长过程中的肥料主要来自空气中的氮,不需要额外施肥,因此只需对土地进行较少的管理与耕种,通过查询多年生作物土地利用排放系数表^[19]可得: $F_{LU}=1, F_{MG}=1.08, F_I=1.44$ 。通过国内外对纤维素类能源作物制生物油的研究,假设原料与SAF之间的转化率为50%。

(2)确定由种植该作物引起的非CO₂排放计算参数。土地利用造成的非CO₂排放包括两类:一是清理残留生物质燃烧造成的排放,由于种植作物前该土地是未利用土地,存在的生物质植物较少,因此忽略不计。二是土地矿化造成的排放,主要与土壤氮挥发直接排放系数、土壤径流间接排放系数、土壤有机碳、碳氮比等因素有关。具体参数选择见表4。

由于缺少实测数据,所以计算数据采用已有研究数据以及IPCC默认参数值,具体数据选择见表4^[20]。同时,利用表4数据并依据第2节的LUC计算方法,可计算出该种纤维素类能源植物在湖北地区的DLUC排放强度为-9.94gCO₂e/MJ,说明该土地用于种植该种纤维素类能源植物后并不会造成土地利用变化GHG排放,甚至可以实现负

表4 确定由土地利用变化引起的GHG排放^[20]

Table 4 Determination of GHG emissions caused by land use change^[20]

指标	土地转换之前	之后(实际)	备注/假设条件
	未利用土地	多年生作物	
参考土壤有机碳(SOC _R)/(kgC/m ²)	3.95	3.95	R14
土地利用系数(F_{LU})	1	1	多年生植物
管理系数(F_{MG})	1	1.08	减耕
投入系数(F_I)	1	1.11	高投入(不施肥)
土壤有机碳(SOC)/(kgC/m ²)	3.95	4.74	
土壤有机碳变化(ΔSOC)/(kgC/ha)	-7852.6		
地上和地下碳储量(CVEG)/(kgC/ha)	0	43200	
碳储量的变化(ΔC)/(kgC/ha)	-51052.6		
摊销期(T)/年	25		
面积(L)/ha	200		
产量/t	18000		
能量产出/(MJ/t)	16747		
转化率/%	50		
土壤氮挥发直接排放系数(EF_1)	0.06		湿润地区
土地径流间接排放系数(EF_2)	0.011		
因径流损失的氮分数($Frac_{LEACH-(H)}$)	0.24		
土壤有机质的碳氮比(R)	10		农田

碳排放。

图3所示为计算的该种纤维素类能源植物在其他种植地区的DLUC排放值,通过比较可以看出,所有种植地区均能实现负碳排放,其中四川地区的DLUC排放值最低,说明该种植区土地固碳能力最强,更有利于SAF可持续性发展。

计算出以该种纤维素类能源植物为原料生产的SAF ILUC排放强度为-9.91gCO₂e/MJ,具体确定参数见表5。

依据SAF可持续性标准关于碳储量主题的第二条评价指标,需要同时计算由土地转换导致的DLUC和ILUC的GHG排放值,如果DLUC排放值超出ILUC排放值,将使用DLUC排放值替代ILUC排放值。不同地区的DLUC和ILUC排放强度值如图4所示,可以看出新疆、辽宁、内蒙古、广东地区的DLUC排放强度明显高于ILUC排放强度。因此,将使用4个地区中最高的DLUC排放值作为以该种纤维素类能源植物生产SAF产生的LUC排放值,即 $LUC_e=-8.68gCO_2e/MJ$ 。

3.3 核心生命周期排放分析

SAF原料的核心生命周期排放是使用归因计算方法,对

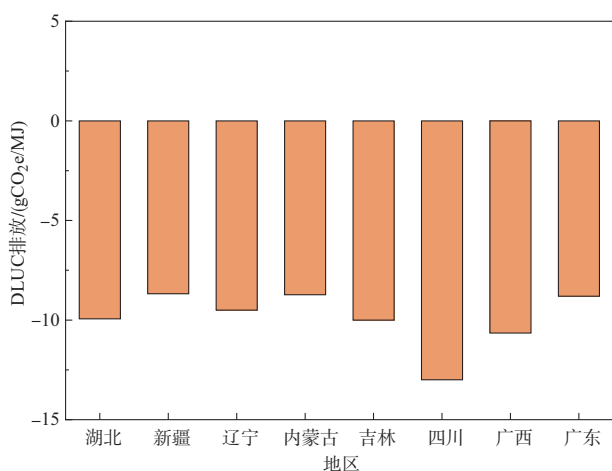


图3 基于纤维素类能源植物的SAF在不同地区的DLUC排放

Fig.3 DLUC emissions in different regions of SAF based on cellulosic energy plants

原料种植、原料收获、原料运输、燃料加工、燃料运输、燃料燃烧各个阶段的资源消耗和能源使用产生的排放进行评估。

由于当前缺乏该种纤维素类能源植物生产SAF过程中各阶段的资源消耗清单与排放值,已知该种纤维素类能源植物中的纤维素含量约为37.74%、半纤维素含量约为

表5 确定由间接土地利用变化引起的GHG排放

Table 5 Determination of GHG emissions caused by indirect land use change

地区	农业生态区	土地排放类别总排放值/(tC/ha)	土地碳储量变化量/(tC/ha)	非CO ₂ 排放/(kgC/ha)	ILUC排放值/(gCO ₂ e/MJ)
湖北	R14	-82.7	-51.05	-10.66	-9.91
新疆	R5	-66.6	-44.62	-1.71	
辽宁	R8	-71.5	-48.83	-7.64	
内蒙古	R4	-70.6	-44.87	-2.00	
吉林	R3	-84.4	-51.39	-11.12	
四川	R16	-89.6	-23.62	-5.30	
广西	R17	-84.9	-25.93	-15.65	
广东	R18	-73.7	-45.19	-14.79	

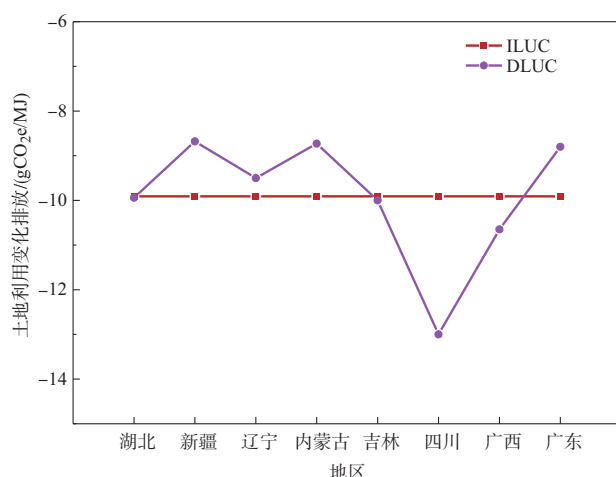


图4 土地利用变化排放强度

Fig.4 Emission intensity of land use change

19.97%、木质素含量约为26.11%,与玉米秸秆相当^[21],所以为了研究的完整性,本文采用玉米秸秆生产SAF的核心生命周期各阶段数据作为替代进行分析^[22]。其工艺转化路径分为三种:(1)采用FT路径,并且产生的余热蒸汽用于工业用汽或城市供暖(FTJ-1);(2)采用FT路径,利用燃烧炉余热将产生的水蒸气加热加压进行循环发电并用于生产耗电及预处理过程耗电(FTJ-2);(3)采用生物油裂解气费托合成一烯烃齐聚耦合制SAF^[23](PYJ)。SAF生产路径流程示意图如图5所示。

由图5可以看出,能源植物通过热解会产生合成气、生物油、生物炭三种产物,其中合成气可直接通过FT路径生产SAF,生物油可通过PYJ路径制取SAF,副产物生物炭将在3.4节进行详细讨论。经计算,各工艺转化路径的CLCA GHG排放强度值见表6,可以看出,各工艺路径生产均会产生GHG排放,其中采用FTJ-2生产路径的总排放值明显低于其他两种路径。

对CLCA不同工艺路径主要资源消耗排放强度进行计算,结果如图6所示。由图6可以看出,电力消耗是CLCA中最大的排放源,而在工艺转化阶段耗电量较多,产生的排放就最高。同时可以看出,采用FTJ-2生产路径,合理利用

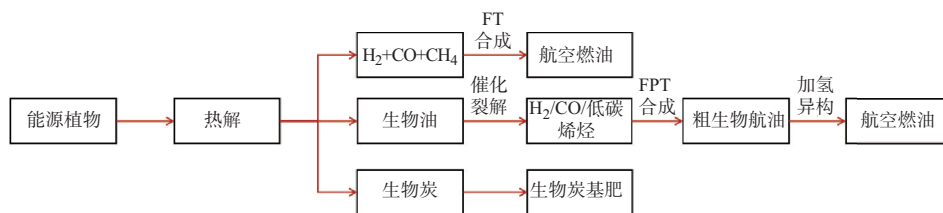


图5 SAF生产路径流程示意图

Fig. 5 SAF production path flow diagram

表6 CLCA GHG 排放清单
Table 6 CLCA GHG emission inventory

路径	FTJ-1	FTJ-2	PYJ
原料种植、收集	1.900	2.690	2.441
原料运输	1.188	1.682	1.506
工艺转化	24.820	0.028	22.063
燃油运输	0.169	0.169	0.169
燃油燃烧	0.316	0.316	0.316
总排放/(gCO ₂ e/MJ)	28.393	4.885	26.495

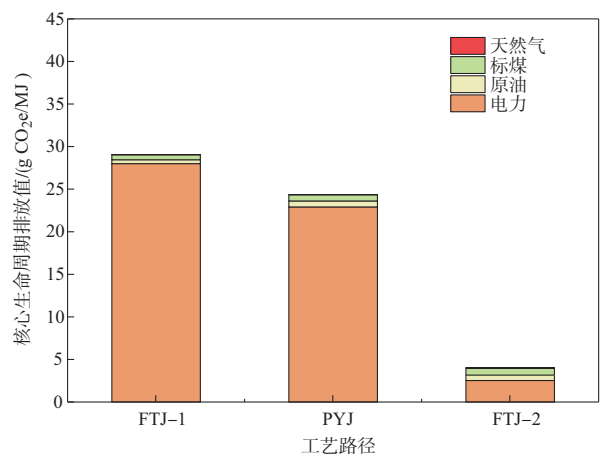


图6 三种工艺路径资源消耗的排放强度

Fig.6 Emission intensity of resource consumption of three process paths

余热蒸汽进行循环发电并将其用于生产中,可以有效减少电力消耗造成的排放,其工艺转化阶段排放显著降低,因此最终的CLCA的总排放值也就最低。

3.4 副产物固碳分析

由图5可以看出,从纤维素类原料到SAF工艺转换过程中,会产生副产物,即生物炭。生物炭作为副产物可以有多种利用途径,最为常见的就是将其作为炭基肥应用到土壤中,改善土壤环境,从而促进能源植物的生长和提高作物的质量和产量^[24],所以本文将考虑生物炭的固碳效果。根据当前公开数据的整理,生物炭的主要成分见表7,该种纤维素类能源植物热解后生物炭的产率约为26.1%。

基于第2节副产物固碳模型,本文假设生物炭利用率为100%,经计算,生物炭的最大固碳强度为-42.688gCO₂e/MJ。

表7 生物炭成分
Table 7 Biochar composition

工业分析/%				元素分析/%				
水分	灰分	挥发分	固定碳	碳	氢	氧	氮	硫
2.73	15.41	6.05	75.81	76.24	0.59	4.42	0.34	0.27

3.5 全生命周期排放分析

根据以上分析,基于第2节全生命周期排放理论模型,以该种纤维素类能源植物为原料生产的SAF全生命周期排放值见表8。依据SAF可持续性标准中关于GHG主题的评价指标,与航空燃料的基线排放值(89gCO₂e/MJ)相比,全生命周期GHG排放至少要减少8.9gCO₂e/MJ才能满足SAF可持续性要求。

表8 基于纤维素类能源植物的SAF全生命周期排放值
Table 8 Whole life cycle emission value of SAF based on cellulosic energy plants

工艺路径	FTJ-1	FTJ-2	PYJ
LS _f /(gCO ₂ e/MJ)	19.713	-3.795	17.815
LS _f (考虑生物炭)/(gCO ₂ e/MJ)	-22.975	-46.483	-24.873

经计算,基于该能源植物的SAF采用FTJ-1工艺路径的LS_f减排值为69.29gCO₂e/MJ,采用FTJ-2工艺路径的LS_f减排值为92.80gCO₂e/MJ,采用PYJ工艺路径的LS_f减排值为71.19gCO₂e/MJ,三种路径的减排值均大于8.9gCO₂e/MJ,满足可持续性标准中GHG减排指标,其中基于该能源植物的FTJ-2工艺路径生产的SAF可实现全生命周期负碳排放。在考虑了生物炭的固碳效果后,三种路径均可以实现全生命周期负碳排放,说明要合理利用燃料加工过程中产生的副产物,将其转化为可利用的资源,避免造成更多的碳排放。

3.6 敏感性分析

目前,我国对于SAF可持续性的研究处于起步阶段,一些相关数据缺失。考虑到各环节数据收集与计算的差异性,本文对基于该能源植物的FTJ-2工艺路径生产的SAF两种情形(考虑和不考虑生物炭固碳效果)的全生命周期GHG排放值进行了敏感性分析。

对于FTJ-2工艺,其全生命周期GHG排放量有95%的可能性介于-14.36~3.04gCO₂e/MJ之间,而分布平均值为-5.5gCO₂e/MJ,如图7(a)所示。基于这一范围,与传统航空燃料相比,相对GHG减排分别为116.1%和96.6%。最大和最小GHG排放量分别为9.5gCO₂e/MJ和-21gCO₂e/MJ,相对GHG减排达到89.3%和123.6%。图7(b)是考虑生物炭固碳效果后的SAF FTJ-2工艺路径GHG排放的不确定性分析,可以看出,其全生命周期GHG排放量有95%的可能性介于-57.05~-39.65gCO₂e/MJ之间,而分布平均值为-48.35gCO₂e/MJ。基于这一范围,与传统航空燃料相比,相对GHG减排分别为164.1%和144.6%。最大和最小GHG排放量分别为-33gCO₂e/MJ和-63.5gCO₂e/MJ,相对GHG

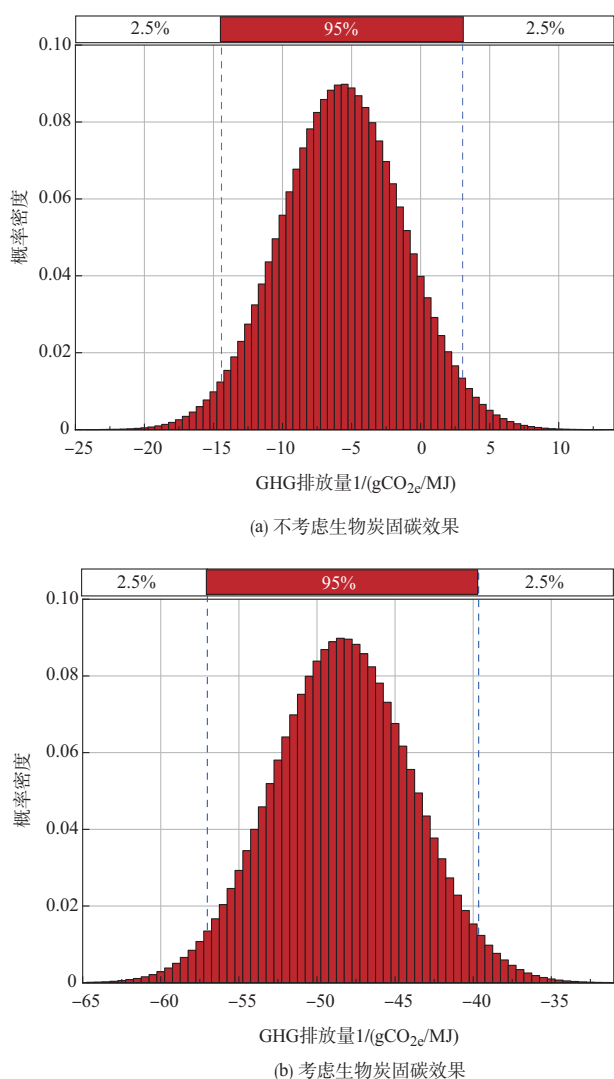


图7 基于纤维素类能源植物的SAF FTJ-2工艺路径全生命周期GHG排放的不确定性分析

Fig.7 Uncertainty analysis on GHG emissions in the whole life cycle of SAF FTJ-2 process path based on cellulosic energy plants

减排达到137.1%和171.3%。

4 结论

通过研究,可以得出以下结论:

(1)以纤维素类能源植物FT工艺路径生产的SAF的全生命周期排放值普遍低于其他原料及工艺路径。基于不同原料及工艺路径生产的SAF在CLCA阶段总会产生排放,而LUC排放可以实现负碳排放,所以对于实现SAF碳减排,除了提高生产技术水平,合理利用土地才是关键。

(2)纤维素类能源植物的DLUC和地区ILUC排放强度

值均为负值,其中最高排放值为 $-8.68\text{gCO}_2\text{e/MJ}$,将其作为LUC排放值,说明将该种原料种植在低LUC风险土地才有可能实现负碳排放。

(3)用纤维素类能源植物作为原料生产SAF的FTJ-1、FTJ-2、PYJ三种工艺路径中,FTJ-2路径的CLCA排放强度值最低,工艺生产主要排放来源为电力消耗,合理利用余热蒸汽可抵消大量生产过程中的电力消耗,减少排放。

(4)SAF原料生产流程分析表明,热解后会产生副产物生物炭,生物炭固化的碳可进一步降低纤维素类原料各工艺全生命周期的排放,具有显著的环境效益。

(5)与传统航空燃料基线相比,基于纤维素类原料的FTJ-1、FTJ-2、PYJ三种工艺全生命周期减排量分别为77.9%、104.3%、80.0%,考虑生物炭固碳效果后,全生命周期减排量分别为125.8%、152.2%、127.9%。

AST

参考文献

- [1] Zhang Libing, Butler T L, Yang Bin. Recent trends, opportunities and challenges of sustainable aviation fuel[J]. Green Energy to Sustainability: Strategies for Global Industries, 2020, 5: 85-110.
- [2] 何皓,邢子恒,李顶杰,等.可持续航空生物燃料的推广应用及行业影响与应对措施[J].化工进展,2019,38(8):3497-3507. He Hao, Xing Ziheng, Li Dingjie, et al. Industry impact and countermeasures for the promotion and application of sustainable aviation biofuel[J]. Progress in Chemical Industry, 2019,38(8):3497-3507. (in Chinese)
- [3] 纪宇晗,孙侠生,俞笑,等.双碳战略下的新能源航空发展展望[J].航空科学技术,2022,33(12):1-11. Ji Yuhan, Sun Xiasheng, Yu Xiao, et al. Development prospect of new energy aviation under the double carbon strategy[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(12): 1-11. (in Chinese)
- [4] 李开省.碳中和目标下航空能源转型研究[J].航空科学技术, 2021,32(9):1-11. Li Kaisheng. Research on aviation energy transition under the goal of carbon neutrality[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021,32(9):1-11. (in Chinese)
- [5] Zhao Xin, Taheripour F, Malina R, et al. Estimating induced land use change emissions for sustainable aviation biofuel pathways[J]. Science of the Total Environment, 2021, 779: 146238.

- [6] Kolosz B W, Luo Yang, Xu Bing, et al. Life cycle environmental analysis of “drop in” alternative aviation fuels: A review[J]. *Sustainable Energy & Fuels*, 2020, 4(7): 3229-3263.
- [7] Dunn J B, Mueller S, Kwon H, et al. Land-use change and greenhouse gas emissions from corn and cellulosic ethanol[J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2013, 6(1): 1-13.
- [8] Crossin E. Life cycle assessment of a mallee eucalypt jet fuel [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2017, 96: 162-171.
- [9] Alam A, Dwivedi P. Modeling site suitability and production potential of carinata-based sustainable jet fuel in the southeastern United States[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239: 117817.
- [10] Michailos S. Process design, economic evaluation and life cycle assessment of jet fuel production from sugar cane residue [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2018, 37 (3): 1227-1235.
- [11] Han J, Elgowainy A, Cai Hao, et al. Life-cycle analysis of bio-based aviation fuels[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 150: 447-456.
- [12] 刘文质. 生物质气化费托合成生产航空煤油的生命周期评价及经济性分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- Liu Wenzhi. Life cycle assessment and economic analysis of aviation kerosene produced by biomass gasification Fischer-Tropsch synthesis[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.(in Chinese)
- [13] 于点. 生物质基航空燃料制备工艺系统仿真、分析及全生命周期评价[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- Yu Dian. System simulation exergy analysis and life cycle assessment of biological fuel preparation process[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.(in Chinese)
- [14] International Civil Aviation Organization. CORSIA sustainability criteria for CORSIA eligible fuels[S]. International Civil Aviation Organization, 2021.
- [15] Bassin J P, Castro F D, Valério R R, et al. The impact of wastewater treatment plants on global climate change[M]. Amsterdam: Elsevier, 2021.
- [16] International Civil Aviation Organization. Clean skies for tomorrow: Sustainable aviation fuel policy toolkit[S]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2021.
- [17] 康利平, 安锋, Earley R, 等. 能源草生物液体燃料利用的关键问题 [R]. 能源与交通创新中心, 2012.
- Kang Liping, An Feng, Earley R, et al. Key issues in the utilization of energy grass bio-liquid fuel[R]. Energy and Transportation Innovation Center, 2012.(in Chinese)
- [18] 徐丽, 于贵瑞, 何念鹏. 1980—2010年中国陆地生态系统土壤碳储量的变化[J]. *地理学报*, 2018, 73(11): 2150-2167.
- Xu Li, Yu Guirui, He Nianpeng. Changes of soil carbon storage in china terrestrial ecosystem from 1980 to 2010 [J]. *Acta Geographica*, 2018, 73(11): 2150-2167.(in Chinese)
- [19] EC-European Commission. Commission decision of 10 June 2010 on guidelines for the calculation of land carbon stocks for the purpose of Annex V to Directive 2009/28/EC [S]. Official Journal of the European Union, 2010.
- [20] Eduardo C B, Sabin G, Bundit L, et al. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. IPCC-XLIX-9, 2019.
- [21] 谭芙蓉, 吴波, 代立春, 等. 纤维素类草本能源植物的研究现状[J]. *应用与环境生物学报*, 2014, 20(1): 162-168.
- Tan Furong, Wu Bo, Dai Lichun, et al. Research status of cellulose herbaceous energy plants[J]. *Journal of Applied and Environmental Biology*, 2014, 20(1): 162-168.(in Chinese)
- [22] 陶炜. 生物质制取航空煤油的生命周期综合评价及数据质量评估[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- Tao Wei. Integrated evaluation of biomass jet-fuel based on lca and its data quality analysis[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.(in Chinese)
- [23] 于点, 仲兆平, 李全新. 生物油裂解气费托合成-烯烃齐聚耦合制取航煤组分的过程模拟及火用分析[J]. *化工进展*, 2018, 37(5): 1767-1773.
- Yu Dian, Zhong Zhaoping, Li Quanxin. Process simulation and exergy analysis of the coupling of Fischer-Tropsch synthesis of bio-oil cracking gas and olefin oligomerization to prepare aviation fuel components[J]. *Progress in Chemical Industry*, 2018, 37(5): 1767-1773. (in Chinese)
- [24] 史登林, 王小利, 段建军, 等. 生物炭对农业土壤及作物生长影响的研究进展[J]. *山地农业生物学报*, 2020, 39(1): 50-57.
- Shi Denglin, Wang Xiaoli, Duan Jianjun, et al. Research progress on the effect of biochar on agricultural soil and crop growth[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2020, 39(1): 50-57.(in Chinese)

Analysis on Whole Life Cycle Emissions Method of Sustainable Aviation Fuel Based on Cellulose Energy Plants

Yang Xiaojun, Yuan Zhongnan, Ding Shuiting, Hou Deming

Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract: The only realistic energy solution for the international aviation industry to achieve its 2050 net-zero carbon emission goal is to use sustainable aviation fuel (SAF). In order to judge whether SAF can really achieve sustainable carbon emission reduction, it is necessary to evaluate the sustainability of the produced SAF. Based on the life cycle assessment (LCA) method defined by the Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA), this paper considers the impact on the carbon sequestration effect of by-products in the fuel production process on the total emissions. The whole life cycle emission values of the three process paths for producing SAF from a cellulose energy plant raw material were calculated, and the data sensitivity analysis was carried out. The results show that all paths of SAF based on this energy plant can achieve carbon emission reduction in the whole life cycle, and the maximum emission reduction can reach 152.2% after considering the carbon fixation effect of Biochar, which plays a key role in achieving net zero carbon or even negative carbon emission.

Key Words: SAF; sustainability criteria; whole life cycle emissions; land use change emissions; core life cycle emissions