

不同生物质原料的气化合成制航煤的环境影响评价

潘小天^{1,2}, 仲兆平^{1,2}, 汪 维^{1,2}, 郑 翔^{1,2}, 沈钊丞^{1,2}, 邓 玥^{1,2}

(1. 东南大学能源热转化与过程测控教育部重点实验室, 南京 210096; 2. 东南大学能源与环境学院, 南京 210096)

摘 要: 采用生命周期评价方法对玉米秸秆、稻壳和杨木3种生物质的气化合成航空煤油工艺路线进行环境影响评价。选取全球变暖、酸化、富营养化、光化学污染、人体毒性和固体废弃物6种环境影响类型,对3种工艺路线的全生命周期进行环境影响潜值计算。计算结果表明:系统全生命周期中生产阶段排放最多的是CO₂,占比为69.13%~74.36%;运输阶段环境影响最小,在各环境影响潜值中占比不足7%;玉米秸秆是3种生物质中环境影响最小的原料,减少费托合成反应器的耗电量可降低玉米秸秆工艺的环境影响。

关键词: 生物质能; 生命周期; 环境影响; 航空煤油; 气化合成; 清单分析

中图分类号: TK6

文献标志码: A

0 引 言

生物质气化合成制备液体燃料是一种较成熟的生物质转化工艺,可通过该工艺制备甲醇、汽油、航空煤油等高值产品。近年来,众多中外学者采用生命周期评价法对生物质制备液体燃料工艺进行系统的环境影响评价。De等^[1]对生物航空燃料的不同生产工艺进行生命周期评价,将温室气体排放量作为评价环境影响的指标,结果显示化石燃料排放量最高,其次为醇制航煤工艺、糖制航煤工艺、加氢液化工艺,费托合成工艺排放量最低。陶炜等^[2]针对费托合成副产物水蒸气的不同利用途径进行模拟研究,提出发电途径的环境影响比供热途径低,且航煤的环境影响显著低于化石燃料。Fortier等^[3]选取废水中培养的微藻作为制备航空煤油的生物质原料,研究发现微藻运输阶段排放的温室气体最多,但工艺的总温室气体排放量比传统工艺低76%。

由于目前大多数研究都重点对比不同生物质转化工艺的环境影响,而较少地关注选取的生物质原料对环境造成的影响。本文采取生命周期评价方法对生物质费托合成制备航空煤油工艺进行环境影响评价,旨在探究采用不同生物质原料(玉米秸秆、稻壳和杨木)进行费托合成所造成的环境影响差异。

1 评价对象与评价方法

1.1 评价对象

生物质气化合成航空煤油工艺主要由生物质气化、净化

调变、费托合成、烯烃齐聚、分离提质等单元组成。如图1所示,生物质气化单元初步得到的合成气进入净化调变单元,经净化调整后其H₂/CO体积比约为2。调变后的合成气经冷却进入费托合成单元生成烯烃,产物通入烯烃齐聚单元生成高碳烯烃产物。其中高碳组分进入分离提质单元通过闪蒸器将气相、油相和蜡相分离,部分气相经叠合齐聚反应生成油相,油相经加氢异构反应生成烷烃,蜡相组分通过加氢裂化生成气相和油相。最后,将分离提质单元中的三相产物分离得到航煤与少部分汽油^[4]。

1.2 评价方法

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)是研究产品从生产原材料到产品报废处置的全生命周期中对生态环境、人体健康和自然资源的影响^[5]。生命周期评价体系包括目标与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释。

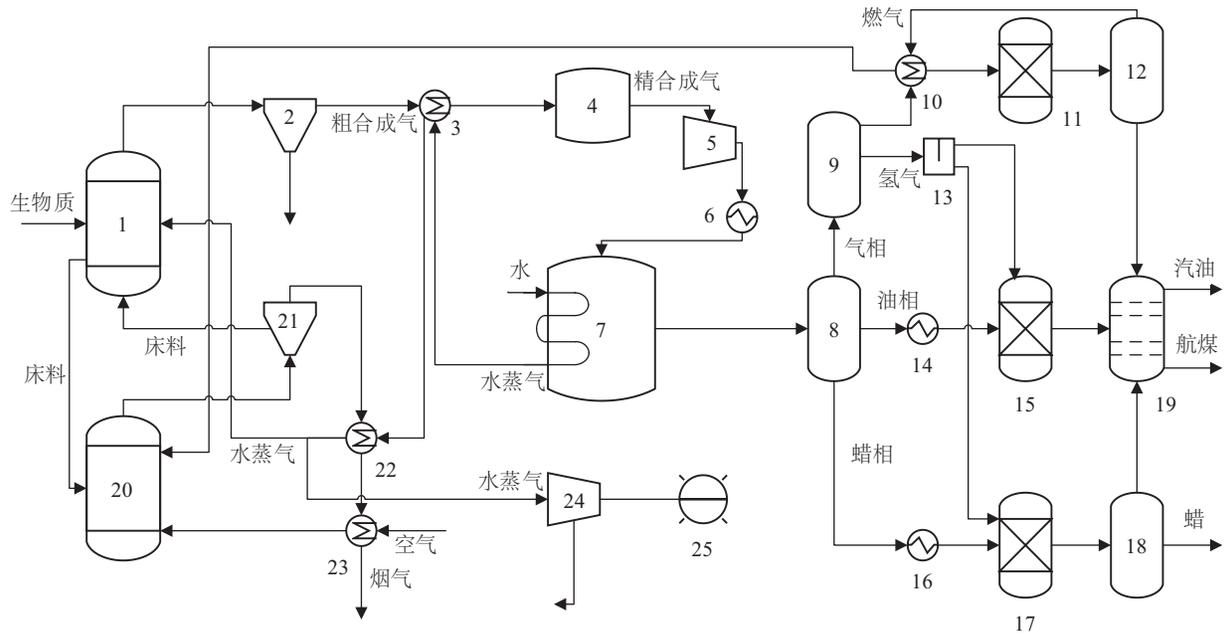
1.2.1 生命周期评价范围

图2为生物质制备航煤工艺生命周期系统边界,包括农业过程、生产过程和分配使用过程。农作物的种植、生物质的收集与运输是农业过程的主要组成部分,农业过程的输入为农药、化肥、电力和柴油等。生产过程涉及生物质原料的预处理、气化合成和产物的分离提质,该过程产生电能输出给电网。分配使用过程由航煤的运输和消费使用组成,该过程主要消耗柴油。生物质制备航空煤油工艺的全生命周期主要考虑CO₂、CH₄、SO₂、碳氢化合物(HC)等污染物的排放。工艺系统的生命周期包括生物质种植阶段、生物质收集阶段、生物质运输阶段、航煤生产阶段、航煤配送阶段、航煤消

收稿日期: 2021-12-29

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1501400)

通信作者: 仲兆平(1965—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事可再生能源技术方面的研究。zzhong@seu.edu.cn



1. 气化反应器; 2、21. 旋风分离器; 3、10、22、23. 换热器; 4. 净化器; 5、24. 压缩机; 6、14、16. 冷却器; 7. 费托合成反应器; 8、9、12、18. 闪蒸器; 11. 叠合齐聚反应器; 13. 分割器; 15. 加氢异构反应器; 17. 加氢裂解反应器; 19. 蒸馏塔; 20. 燃烧器; 25. 发电机。

图1 生物质气化合成制航煤工艺流程

Fig. 1 Process of biomass gasification synthesis to aviation jet coal

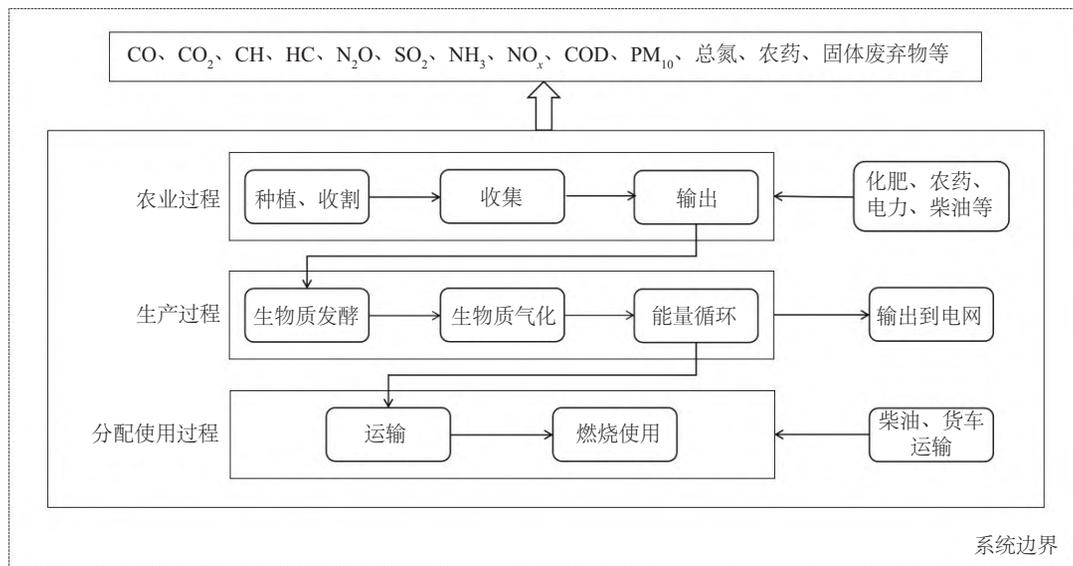


图2 生命周期系统边界

Fig. 2 Life cycle system boundaries

费阶段,本文规定生物质收集阶段与航煤配送阶段统一为运输阶段。

1.2.2 特征化与标准化

环境影响评价采用 CML2001 方法作为评价指标,选取的环境影响类型包括全球变暖潜值(global warming potential, GWP)、酸化潜值(acidification potential, AP)、富营养化潜值

(eutrophication potential, EP)、光化学污染潜值(photochemical ozone formation potential, POFP)、人体毒性潜值(human toxicity potential, HTP)、固体废弃物潜值(solid waste potential, SWP)。环境影响潜值的计算是将生命周期清单输入与输出数据分类为各种环境影响类型,把每一类别数据以典型污染物为单位统一表示,如式(1)^[6]所示。

$$E_j = \sum Q_i F_{ij} \quad (1)$$

式中: E_j ——第 j 种环境影响特征化指标值; Q_i ——第 i 种物质的排放量; F_{ij} ——第 i 种排放物的第 j 种环境影响的当量系数。

因为不同的特征化环境影响潜值的单位不同,为了对各环境影响类型进行比较,需对数据进行标准化处理,计算公式^[7]为:

$$P_j = \frac{E_j}{R_j} \quad (2)$$

式中: P_j ——第 j 种环境影响类型指数的标准化结果; E_j ——第 j 种环境影响类型指数; R_j ——第 j 种环境影响类型的标准化基准。

2 环境影响评价

2.1 清单分析

2.1.1 种植阶段

不同生物质种类在种植阶段的环境影响存在差异性。表 1 根据《全国农产品成本收益资料汇编》^[8]近 5 年的统计数据,考虑的资源消耗有氮肥、磷肥、钾肥、复合肥以及农药。

表 1 生物质种植阶段资源消耗

kg/hm ²			
输入	玉米秸秆	稻壳	杨木 ^[10]
氮肥	121.14	118.14	86.50
磷肥	4.74	8.19	12.30
钾肥	3.18	19.89	9.80
复合肥	240.18	189.78	—
农药	3.70 ^[2]	3.70 ^[9]	10.00

由于玉米秸秆与稻壳是经济作物的副产物,所以采用经济分配法来计算副产物的资源消耗系数^[11]:

$$K_b = \frac{P_b}{M_{ba} \times P_b + P_a + M_{ca} \times P_c} \quad (3)$$

式中: P_a ——主产物的市场价格,元; P_b ——副产物 1 的市场价格,元; P_c ——副产物 2 的市场价格,元; M_{ba} ——副产物 1 与主产物的质量比; M_{ca} ——副产物 2 与主产物质量比。

2.1.2 收集阶段

在收集阶段主要考虑生物质破碎打包过程中的资源消耗,其中玉米在该过程的耗油量(柴油)为 24.09 kg/hm²,耗电量为 139.61 kWh/hm²^[12];水稻在破碎打包、粮食加工时耗油量(柴油)为 26.43 kg/hm²,耗电量为 201.64 kWh/hm²^[13];杨木在收集阶段耗油量(柴油)为 267 kg/hm²,耗电量为 400 kWh/hm²^[14]。

2.1.3 运输阶段

运输阶段主要考虑柴油车运输生物质原料和配送航煤

产品时的污染排放。假设采用荷载为 8 t 的柴油车运输生物质与航煤产品,将生物质原料运输到生产工厂的距离与航煤运输到机场的距离之和设定为 100 km,柴油车运输过程污染排放参考 CLCD 中国生命周期核心数据库。

2.1.4 生产阶段

生产阶段采用生物质处理量为 1 t/h 的航煤生产设备,污染物排放主要考虑生物质生产航煤时的电力消耗和生产过程产生的污染物,生产阶段数据来源于 Aspen Plus 模拟。

2.1.5 消费阶段

消费阶段数据来源于 eBalance 环境影响评价数据库,每千克航煤产生 0.336 g CH₄、0.168 g N₂O、5.04 g NO_x、11.13 g CO、10.416 g HC、0.588 g PM₁₀。表 2 为 3 条路径全生命周期的环境影响清单。

表 2 生命周期环境影响汇总

Table 2 Life cycle environmental impact summary

类别	污染排放与资源消耗		
	玉米秸秆	稻壳	杨木
CO ₂	2848.940	4118.150	3977.523
CH ₄	6.405	18.275	7.035
N ₂ O	0.219	3.003	0.220
NO _x	12.980	18.352	16.144
SO ₂	6.726	12.118	5.765
CO	13.169	14.595	14.285
HC	11.148	11.396	11.485
PM ₁₀	1.951	1.014	1.573
固体废弃物	64.900	157.401	182.904
COD	0.876	1.030	0.913
总氮	0.261	0.120	0.098
标煤	3.221	3.870	2.484
原油	60.495	75.015	47.466
天然气	0.002	0.001	0.001

2.2 环境影响分析

2.2.1 污染物足迹分析

图 3 为 3 种生物质转化为航空煤油工艺的全生命周期环境排放。色域越接近白色排放量越大,越接近黑色排放量则越小。纵向来看,生命周期中 CO₂ 的排放量最大。由于生物质在种植阶段对 CO₂ 的固定作用,所以不考虑生产过程和消费过程中 CO₂ 的直接排放,但在航煤制备生命周期中,每个阶段都会使用电能、消耗柴油,这是排放大量 CO₂ 的主要原因。

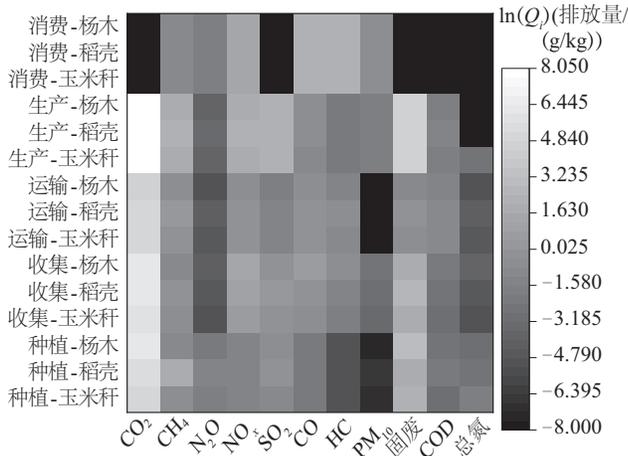


图3 环境排放热图

Fig. 3 Environmental emissions heat map

在基于不同生物质原料的航煤生产工艺中,污染物排放足迹存在相似性。在3条路线(玉米秸秆、稻壳、杨木)中,生产阶段的CO₂和固体废弃物排放量远大于其他阶段。这是因为生产阶段使用高温高压反应器,消耗大量电能;生物质在反应过程中,C元素大多转化为CO、CO₂和CH₄进入下一步反应,而剩余的C元素和未参加反应的灰分作为固体废弃物从系统中分离。

N₂O和总氮的排放大多由种植阶段产生。一方面,N₂O和总氮的排放是由于氮肥的施用引起的,排放量与氮肥施用量正相关;另一方面,土壤中存在硝化和反硝化微生物,生物质在农业生长过程中会产生大量N₂O。此外,由于水稻是水田种植,土壤中的产甲烷菌在极端厌氧环境中释放大量的CH₄,因此稻壳路线中CH₄在种植阶段排放较多,占比达到45.77%。

消费阶段也排放较多的污染物,尤其表现在CO、HC上,其中消费阶段排放CO占比区间为76.26%~84.52%,排放HC占比区间为90.69%~93.44%。在消费阶段,航空煤油的未完全燃烧是排放CO和HC的主要原因。

2.2.2 不同阶段下环境影响类型分析

图4为3条路径的环境影响分布情况。在全球变暖潜值(GWP)影响分布中,3条路径(玉米秸秆、稻壳、杨木)生产阶段的环境影响占比分别为60.90%、59.43%、62.64%,表明

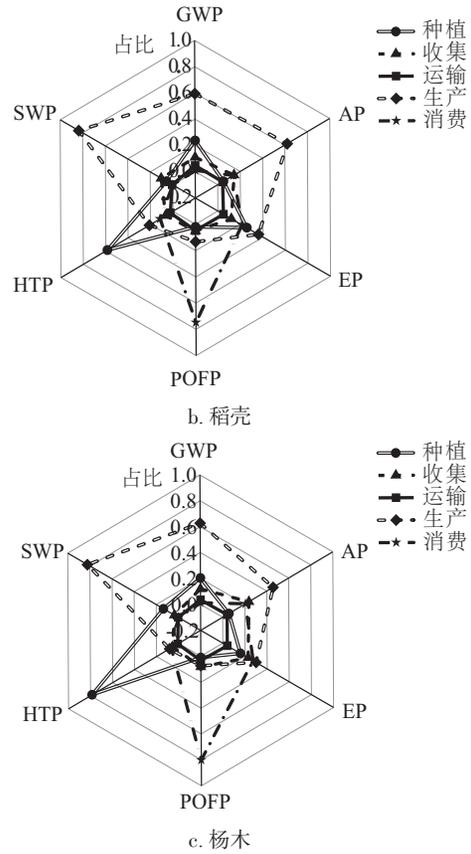


图4 不同阶段下环境影响潜值分析

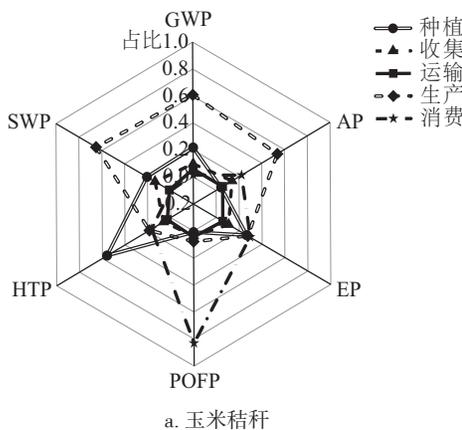
Fig. 4 Analysis of environmental impact potentials under different phases

全球变暖潜值主要受生产阶段的影响,因为生产阶段CO₂排放量占全生命周期CO₂排放总量的69.13%~74.36%。此外种植阶段是温室气体CH₄与N₂O的主要排放源,因此种植阶段对全球变暖潜值产生较大影响。生产阶段是SO₂的主要来源,而NO_x大多来自于收集过程和消费过程的燃料燃烧,因此这三个阶段是造成酸化环境影响的主要原因。种植、生产和消费这三个阶段释放较多的N₂O、NO_x和总氮,从而对富营养化潜值(EP)的影响较大。但杨木的收集过程涉及采伐作业,消耗大量柴油和电力产生NO_x排放,从而导致富营养化潜值较高。

全生命周期中,消费阶段对光化学污染潜值(POFP)影响最大,原因是消费阶段CO、HC的排放量超过全生命周期的76%。种植阶段,农药的使用与流失导致该阶段是影响人体毒性潜值(HTP)的主要原因。固体废弃物主要来自于生产阶段的灰分和生物质残渣,因此固体废弃物潜值(SWP)主要受生产阶段的影响。

2.2.3 不同生物质原料的环境影响比较

图5是3条航煤制备路线与化石航煤的全生命周期环境影响标准化结果。在GWP、AP和POFP方面,生物航煤环境影响较化石航煤降低;而生物航煤的EP、HTP和SWP整体比化石航煤高。生物航煤的主要优势在于温室气体排放减



a. 玉米秸秆

少,因此全球变暖潜值较生物航煤降低 40.04%~60.26%。

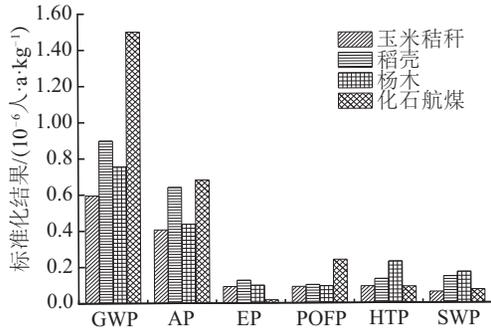


图5 不同生物质原料的环境影响比较

Fig. 5 Comparison of environmental impact of different biomass

比较 3 种生物质的全球变暖潜值、酸化潜值和富营养化潜值,其环境影响为稻壳>杨木>玉米秸秆;以稻壳为生物质原料时,产生的 CO_2 、 CH_4 、 SO_2 、 NO_x 高于玉米秸秆和杨木,其中稻壳的 CH_4 排放量比玉米秸秆和杨木分别高 185.32%、159.78%, SO_2 排放量分别高 80.170%、110.18%,从而导致稻壳路线的 GWP、AP 和 EP 较高。虽然稻壳路线的 SO_2 与 CH_4

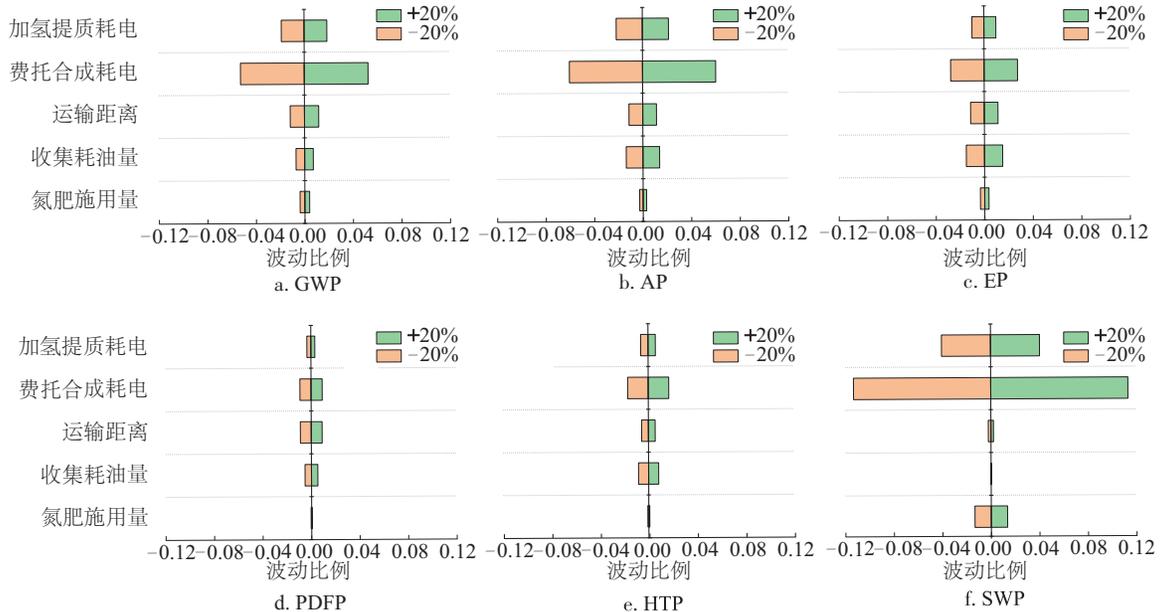


图6 玉米秸秆环境影响敏感性分析

Fig. 6 Sensitivity analysis of environmental impact of maize stover

分析表明,费托合成耗电量对全球变暖潜值、酸化潜值和固体废弃物潜值影响较大,导致这 3 类环境影响分别上下波动 5.26%、6.03%、11.31%;氮肥施用量相较于其他因素,对 6 种环境影响潜值影响较小,波动范围为 0.05%~1.35%。光化学污染潜值主要受到航煤燃烧的影响,所以受几种因素影响较小;种植阶段的农药施用与流失是影响人体毒性潜值的关键因素,因此其他因素也对其影响很小。生产阶段的电力消耗是玉米秸秆路径全生命周期中敏感性最大的因素,通过副产物燃烧提高费托合成模块的供热效率从而减少电能消耗,可有效降低玉米秸秆路径的环境影响。

排放量远大于其他两条路线,但三者 CO 和 HC 的排放量并无明显差异,所以在光化学污染方面,3 条路线所造成的环境影响相当。

在人体毒性潜值与固体废弃物潜值方面,则是杨木>稻壳>玉米秸秆。生物质原料在种植阶段的污染排放比例通过经济分配系数、草谷比与航煤产量等计算得到,玉米秸秆原料每生产 1 kg 航油排放的农药量最少,为 1.19 g 农药/kg 航煤。由于杨木含有更多难气化的木质素,导致杨木工艺的固体废弃物潜值较高。

综合比较 6 种环境影响潜值,以玉米秸秆为原料的航煤生产工艺对环境的影响最小。

2.2.4 玉米秸秆路径的敏感性分析

对环境友好的玉米秸秆生命周期的环境影响类型进行敏感性分析,如图 6 所示。敏感性分析选取的主要影响因素有:1)种植阶段氮肥施用量;2)收集阶段的耗油量;3)运输阶段卡车行驶的距离;4)生产阶段费托合成模块的耗电量;5)生产阶段加氢提质模块的耗电量。以系统正常运行条件的 $\pm 20\%$ 为变化范围。

3 结 论

通过对生物质费托合成制备航空煤油工艺进行全生命周期的环境影响评价,分别计算玉米秸秆、稻壳和杨木工艺路线的环境影响潜值,研究发现:

- 1)生产阶段和种植阶段是全生命周期中排放温室气体最多的环节,其中生产阶段 CO_2 的排放占比为 69.13%~74.36%,全生命周期中 N_2O 的排放主要来自种植阶段。
- 2)从环境影响评价结果来看,生产阶段造成的环境影响最大,而运输阶段对环境的影响最小,全球变暖潜值、酸化潜

值、固体废弃物潜值主要受生产阶段的影响。

3)3种生物质原料中,玉米秸秆造成的环境影响最小,通过减少生产阶段中费托合成反应的耗电量可提高玉米秸秆工艺的环境友好性。

[参考文献]

- [1] DE JONG S, ANTONISSEN K, HOEFNAGELS R, et al. Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable jet fuel production [J]. *Biotechnology for biofuels*, 2017, 10(1): 64-75.
- [2] 陶炜, 肖军, 杨凯. 生物质气化费托合成制航煤生命周期评价[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(1): 383-391.
TAO W, XIAO J, YANG K. Life cycle assessment of jet fuel from biomass gasification and Fischer-Tropsch synthesis [J]. *China environmental science*, 2018, 38(1): 383-391.
- [3] FORTIER M O P, ROBERTS G W, STAGG-WILLIAMS S M, et al. Life cycle assessment of bio-jet fuel from hydrothermal liquefaction of microalgae [J]. *Applied energy*, 2014, 122(5): 73-82.
- [4] 杨凯, 陶炜, 肖军. 生物质气化费托合成航空煤油的生命周期焓分析[J]. *发电设备*, 2018, 32(4): 246-252.
YANG K, TAO W, XIAO J. Exergetic life cycle assessment of jet fuel from biomass gasification and Fischer-Tropsch synthesis [J]. *Power equipment*, 2018, 32(4): 246-252.
- [5] FINNVEDEN G, HAUSCHILD M Z, EKVALL T, et al. Recent developments in life cycle assessment [J]. *Journal of environmental management*, 2009, 91(1): 1-21.
- [6] KIM J K, PARK J Y, YIM E S, et al. Bio-jet fuel production technologies for GHG reduction in aviation sector [J]. *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, 2015, 26(6): 609-628.
- [7] FAN J Q, SHONNARD D R, KALNES T N, et al. A life cycle assessment of pennycress (*Thlaspi arvense* L.)-derived jet fuel and diesel [J]. *Biomass & bioenergy*, 2013, 55: 87-100.
- [8] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编-2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
Price Department of National Development and Reform Commission. National compilation of cost and benefit information on agricultural products-2021 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [9] 于点. 生物质基航空燃料制备工艺系统仿真、焓分析及全生命周期评价 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
YU D. System simulation exergy analysis and life cycle assessment of biological fuel preparation process [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [10] GUO M, LITTLEWOOD J, JOYCE J, et al. The environmental profile of bioethanol produced from current and potential future poplar feedstocks in the EU [J]. *Green chemistry*, 2014, 16(11): 4680-4695.
- [11] 瞿婷婷, 肖军, 沈来宏. 生物质制取高品位液体燃料的生命周期评价 [J]. *太阳能学报*, 2014, 35(9): 1700-1707.
QU T T, XIAO J, SHEN L H. Life cycle assessment of high-quality liquid fuels from biomass [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2014, 35(9): 1700-1707.
- [12] 曹溢, 沈辉. 秸秆发电过程中原料收集的成本分析 [J]. *电力与能源*, 2012, 33(5): 463-466.
CAO Y, SHEN H. A research on collection cost in the process of stover power generation [J]. *Power & energy*, 2012, 33(5): 463-466.
- [13] ZANG G Y, TEJASVI S, RATNER A, et al. A comparative study of biomass integrated gasification combined cycle power systems: performance analysis [J]. *Bioresource technology*, 2018, 255: 246-256.
- [14] SCHWEIER J, MOLINA-HERRERA S, GHIRARDO A, et al. Environmental impacts of bioenergy wood production from poplar short-rotation coppice grown at a marginal agricultural site in Germany [J]. *Global change biology bioenergy*, 2017, 9(7): 1207-1221.

ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF GASIFICATION SYNTHESIS OF DIFFERENT BIOMASS FOR PRODUCTION OF JET FUEL

Pan Xiaotian^{1,2}, Zhong Zhaoping^{1,2}, Wang Wei^{1,2}, Zheng Xiang^{1,2}, Shen Zhaocheng^{1,2}, Deng Yue^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Process Measurement and Control, Ministry of Education,*

Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The life cycle assessment method was used to evaluate the environmental impact of the gasification synthesis for the production of jet fuel from three types of biomass: maize stover, rice husk and poplar wood. Six types of environmental impacts, including global warming, acidification, eutrophication, photochemical ozone formation, human toxicity and solid waste, were selected to calculate the potential environmental impact of the three processes over their entire life cycles. The calculation results show that highest CO₂ emissions in the production phase throughout the life cycle, with emission accounting for 69.13%-74.36%; minimal environmental impact during the transport phase, with each environmental impact potential accounting for less than 7%; maize stover is with the lowest environmental impact among the three biomass, and reducing the power consumption of the Fischer-Tropsch reactor can reduce the environmental impact of the maize stover process.

Keywords: biomassenergy; life cycle; environmental impact; jet coal; gasification synthesis; inventory analysis