

## 纤维素乙醇生命周期碳排放评价

陈栋

(中石化上海工程有限公司, 上海 200120)

**摘要:** 纤维素乙醇是以秸秆等农业废弃物为原料生产生物燃料乙醇, 是生物燃料乙醇产业未来的发展方向, 但目前对纤维素乙醇碳排放的研究较少。依据生命周期的基本理论, 对纤维素乙醇进行碳排放研究, 结果表明: 生产1吨纤维素乙醇的碳排放是458.70 kg, 纤维素乙醇的1 MJ热值的碳排放是0.017 kg。纤维素乙醇与汽油相比, 1 MJ热值的碳排放可以减少28.6%。纤维素乙醇替代汽油能够产生显著碳减排效益, 推广和使用纤维素乙醇有利于推动能源领域的低碳发展, 对实现我国碳达峰和碳中和的目标也有积极意义。

**关键词:** 纤维素乙醇; 碳中和; 绿碳; 碳排放

**中图分类号:** TQ 352

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-817X (2023) 01-009-005

碳排放一般指温室气体排放<sup>[1]</sup>。全球温室气体排放造成温室效应导致人类生存环境逐步恶化。在各种温室气体中, 二氧化碳贡献率占50%以上, 而70%的二氧化碳排放来自化石燃料的使用<sup>[2]</sup>。二氧化碳排放量和碳排放量之间是可以转换的, 即减排1吨碳就相当于减排3.67 t二氧化碳<sup>[3]</sup>。生物燃料乙醇是一种环境友好、可再生的能源, 成为替代化石燃料的理想生物燃料。纤维素乙醇是以秸秆等农业废弃物为原料生产生物燃料乙醇, 是生物燃料乙醇产业未来的发展方向<sup>[4]</sup>, 但目前对纤维素乙醇的碳排放的研究较少。

生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 是目前国际通用的一种可以量化某种产品生命周期碳排放的方法。本文依据生命周期评价<sup>[5]</sup>的基本理论, 以一种典型的纤维素乙醇生产方法为例, 对纤维素乙醇生命周期碳排放进行研究。

## 1 目标和范围定义

纤维素乙醇生命周期包括5个单元。

(1) 原料生产: 玉米秸秆、硫酸、氢氧化钠、酶制剂、发酵培养基等纤维素乙醇生产所需原料的生产过程;

(2) 原料运输: 将上述原料运输至纤维素乙醇的生产车间;

(3) 产品生产: 包括原料粉碎除杂、预处理、酶解、

发酵、乙醇精馏脱水, 得到产品纤维素乙醇; 副产木质素渣和沼气进行热电联产;

(4) 产品运输: 将产品纤维素乙醇运输至调配中心或厂区调配后运输至加油站;

(5) 产品使用 (燃烧): 纤维素乙醇在车辆发动机中燃烧产生驱动车辆行驶的机械能。

纤维素乙醇生命周期碳排放评价的目标和范围如图1所示<sup>[6]</sup>:

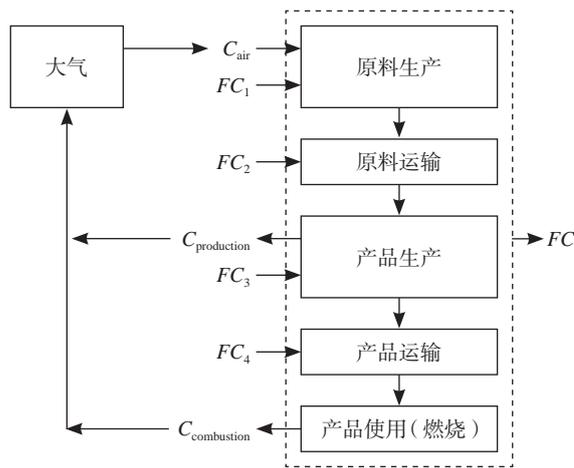


图1 纤维素乙醇生命周期碳排放评价的目标和范围定义  
Fig.1 Definition of objectives and scope of Carbon emission evaluation in the life cycle of cellulosic ethanol

图1中  $FC$ ——纤维素乙醇生命周期碳排放;

$C_{air}$ ——大气中的碳;

$C_{production}$ ——产品生产过程中的碳排放;

$C_{combustion}$ ——产品使用 (燃烧) 过程中的碳

收稿日期: 2022-12-16

作者简介: 陈栋 (1981—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事医药和生物化工工程设计和技术开发工作。

排放；  
 $FC_1$ ——原料生产过程中间接或直接消耗化石能源的碳；  
 $FC_2$ ——原料运输过程中消耗化石燃料的碳；  
 $FC_3$ ——产品生产过程中消耗公用工程等化石能源的碳；

$FC_4$ ——产品运输过程中消耗化石燃料的碳。

## 2 清单分析

### 2.1 原料生产单元清单

本文纤维素乙醇的原料主要是玉米秸秆、硫酸、氢氧化钠、酶制剂、发酵培养基，各种原料生产单元的碳排放见表1。

表1 原料生产单元的碳排放清单

Tab.1 Carbon emission list of raw material production unit

序号	原料名称	原料单耗/t	生产1吨原料的二氧化碳排放/kg	各种原料生产单元的二氧化碳排放/kg	各种原料生产单元的碳排放/kg
1	玉米秸秆	5.482 <sup>[7]</sup>	70.00 <sup>[8]</sup>	383.74	104.56
2	硫酸	0.151 <sup>[7]</sup>	13.63 <sup>[9]</sup>	2.06	0.56
3	氢氧化钠	0.135 <sup>[7]</sup>	1 590.00 <sup>[8]</sup>	214.65	58.49
4	酶制剂	0.083 <sup>[7]</sup>	1 861.52 <sup>[9]</sup>	154.51	42.10
5	发酵培养基	0.028 <sup>[7]</sup>	768.70 <sup>[9]</sup>	21.52	5.86
原料生产单元的碳排放合计/kg					211.57

注：(1)玉米秸秆组成<sup>[7]</sup>：纤维素37.6%（干物），半纤维素21.6%（干物），木质素20%（干物），含水量12%（总重）；  
 (2)发酵培养基组成<sup>[7]</sup>：葡萄糖45.4%，玉米浆45.3%，蛋白胨0.2%，酵母粉0.1%，尿素9.1%；  
 (3)各种原料生产单元的二氧化碳排放=原料单耗×生产1t原料的二氧化碳排放；  
 (4)各种原料生产单元的碳排放=各种原料生产单元的二氧化碳排放÷3.67<sup>[3]</sup>。

由表1可知，生产1吨纤维素乙醇的原料生产单元的碳排放为211.57 kg，即 $FC_1=211.57$  kg 碳/t 纤维素乙醇。

### 2.2 原料运输单元清单

表2为原料运输单元的碳排放清单，我国目前

表2 原料运输单元的碳排放清单

Tab.2 Carbon emission list of raw material transportation unit

序号	项目名称	单位	数据
1	基于生产1吨纤维素乙醇的原料总量	t	5.879
2	原料的平均运输距离	km	200 <sup>[7]</sup>
3	运输1t原料和运输1km的柴油消耗量	L	0.05 <sup>[7]</sup>
4	柴油密度	kg/L	0.85 <sup>[11]</sup>
5	每kg柴油的碳排放系数	kg	1.035
原料运输单元的碳排放合计/kg			51.70

注：(1)基于生产1吨纤维素乙醇的各种原料单耗的总和（各种原料单耗数据见表1）；  
 (2)原料运输单元的碳排放=基于生产1t纤维素乙醇的原料总量×原料的平均运输距离×运输1吨原料和运输1km的柴油消耗量×柴油密度×每kg柴油的碳排放系数；  
 (3)每kg柴油的二氧化碳排放是3.797 kg<sup>[6]</sup>。每kg柴油的碳排放系数=每kg柴油的二氧化碳排放系数÷3.67<sup>[2]</sup>。

货物运输主要是通过柴油车为主的公路运输来完成的<sup>[10]</sup>。

由表2可知，生产1吨纤维素乙醇的原料运输单元的碳排放是51.70 kg，即 $FC_2=51.70$  kg 碳/t 纤维素乙醇。

### 2.3 产品生产单元清单

纤维素乙醇生产过程中，木质素废渣和沼气作为热电联产燃料，抵扣全部蒸汽和部分电的公用工程消耗。因此，纤维素乙醇生产单元所需的公用工程是新鲜水和电，相关二氧化碳排放系数见表3。

表3 各种公用工程的二氧化碳排放系数

Tab.3 Carbon dioxide emission coefficient of various utilities

序号	公用工程名称	单位	各种公用工程的二氧化碳排放系数
1	新鲜水	kg 二氧化碳 / m <sup>3</sup> 新鲜水	12.32 <sup>[8]</sup>
2	电	kg 二氧化碳 / kWh 电	0.928 <sup>[8]</sup>

由表4可知，生产1吨纤维素乙醇的产品生产单元的碳排放是186.64 kg，即 $FC_3=186.64$  kg 碳/t 纤维素乙醇。

表 4 产品生产单元的碳排放清单

Tab.4 Carbon emission list of product production unit

序号	公用工程名称	公用工程单耗	各种公用工程的二氧化碳排放 /kg	各种公用工程的碳排放 /kg
1	新鲜水	19.3 <sup>[7]</sup> m <sup>3</sup>	237.78	64.79
2	电	481.9 <sup>[7]</sup> kWh	447.20	121.85
产品生产单元的碳排放合计 /kg				186.64

注:(1)各种公用工程的二氧化碳排放=公用工程单耗×各种公用工程的二氧化碳排放系数(数据见表3);

(2)表4中的公用工程单耗已是考虑木质素废渣和沼气作为热电联产燃料抵扣全部蒸汽和部分电的公用工程消耗。

(3)各种公用工程的碳排放=各种公用工程的二氧化碳排放÷3.67<sup>[2]</sup>。

## 2.4 产品运输单元清单

由表5可知,生产1吨纤维素乙醇的产品运输单元的碳排放为8.79 kg,即 $FC_4=8.79$  kg碳/t纤维素乙醇。

表 5 产品运输单元的碳排放清单

Tab.5 Carbon emission list of product transportation unit

序号	项目名称	单位	数据
1	基于生产1吨纤维素乙醇的产品总量	t	1
2	产品的平均运输距离	km	200 <sup>[7]</sup>
3	运输1吨产品和运输1km的柴油消耗量	L	0.05 <sup>[7]</sup>
4	柴油密度	kg/L	0.85 <sup>[11]</sup>
5	每kg柴油的碳排放系数	kg	1.035
原料运输单元的碳排放合计 /kg			8.79

注:(1)产品运输单元的碳排放=基于生产1t纤维素乙醇的产品总量×产品的平均运输距离×运输1t产品和运输1km的柴油消耗量×柴油密度×每kg柴油的碳排放系数。

(2)每kg柴油的二氧化碳排放系数是3.797 kg<sup>[4]</sup>。每kg柴油的碳排放系数=每kg柴油的二氧化碳排放系数÷3.67<sup>[2]</sup>。

## 3 碳排放评价和解释

根据纤维素乙醇生命周期碳排放评价的目标和范围定义(见图1),纤维素乙醇生命周期碳排放见式(1):

$$FC = FC_1 + FC_2 + FC_3 + FC_4 + C_{air} - C_{combustion} - C_{production} \quad (1)$$

式中  $FC$ ——纤维素乙醇生命周期碳排放;

$C_{air}$ ——大气中的碳;

$C_{production}$ ——产品生产过程中的碳排放;

$C_{combustion}$ ——产品使用(燃烧)过程中的碳排放;

$FC_1$ ——原料生产过程中间接或直接消耗化石能源的碳;

$FC_2$ ——原料运输过程中消耗化石燃料的碳;

$FC_3$ ——产品生产过程中消耗公用工程等化石能源的碳;

$FC_4$ ——产品运输过程中消耗化石燃料的碳。

本文纤维素乙醇的主要原料是玉米秸秆。玉米秸秆中的碳来自大气中的碳。玉米秸秆中的碳在产品生产过程中转化为纤维素乙醇中的碳以及三废中的碳,纤维素乙醇中的碳经过燃烧后排放至大气中,三废中的碳经过处理后最终释放至大气中。根据文献报道,产品生产过程中的碳排放( $C_{production}$ )和产品使用(燃烧)过程中的碳排放( $C_{combustion}$ )均源自大气中的碳( $C_{air}$ ),因此纤维素乙醇系统与环境系统之间形成了循环关系<sup>[12]</sup>。见式(2):

$$C_{air} = C_{production} + C_{combustion} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),得到纤维素乙醇生命周期中的碳排放,见式(3):

$$FC = FC_1 + FC_2 + FC_3 + FC_4 \quad (3)$$

根据以上各项计算结果,汇总见表6。

表 6 纤维素乙醇生命周期碳排放评价

Tab.6 Assessment of carbon emissions during the life cycle of cellulosic ethanol

序号	名称	数据
1	原料生产单元碳排放( $FC_1$ )/kg碳/t纤维素乙醇	211.57
2	原料运输单元碳排放( $FC_2$ )/kg碳/t纤维素乙醇	51.70
3	产品生产单元碳排放( $FC_3$ )/kg碳/t纤维素乙醇	186.64
4	产品运输单元碳排放( $FC_4$ )/kg碳/t纤维素乙醇	8.79
纤维素乙醇生命周期碳排放( $FC$ )/kg碳/t纤维素乙醇		458.70

由表6可知,纤维素乙醇生命周期碳排放是458.70 kg碳/t纤维素乙醇。

玉米秸秆干物中的碳含量约40%<sup>[13]</sup>。由表1可知,

生产 1 t 纤维素乙醇的玉米秸秆单耗是 5.482 t, 玉米秸秆的含水量是 12%, 因此可以计算得到生产 1 t 纤维素乙醇的玉米秸秆的碳含量 =  $5.482 \times (1 - 12\%) \times 40\% = 2.06941 \text{ t}$ , 即  $C_{\text{air}} = 2.06941 \text{ t} = 2069.41 \text{ kg}$ 。

纤维素乙醇的分子式是  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}^{[14]}$ , 计算纤维素乙醇碳含量 =  $(12 \times 2) \div (12 \times 2 + 1 \times 6 + 16) = 52.174\%$ , 因此可以计算得到 1 吨纤维素乙醇使用(燃烧)的碳排放 =  $1 \times 52.174\% = 0.52174 \text{ t}$ , 即  $C_{\text{combustion}} = 0.52174 \text{ t} = 521.74 \text{ kg}$ 。

根据式(2), 可以得到  $C_{\text{production}} = C_{\text{air}} - C_{\text{combustion}} = 2069.41 - 521.74 = 1547.67 \text{ kg}$ 。

根据以上各项计算结果, 得到基于 1 吨纤维素乙醇的生命周期碳平衡如图 2。

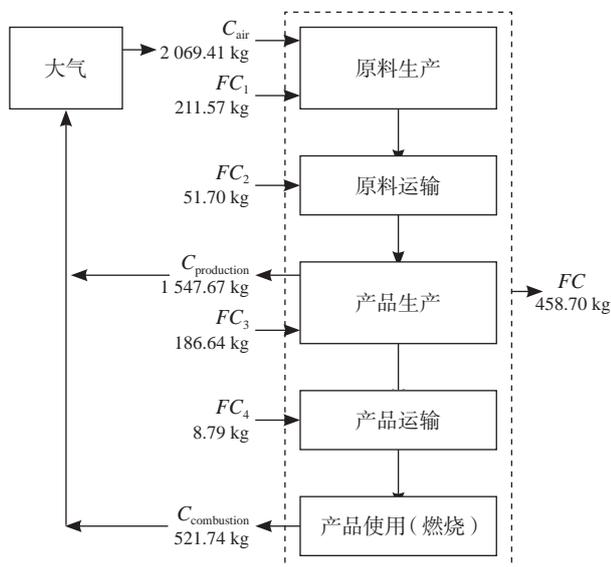


图 2 基于 1 t 纤维素乙醇的生命周期碳平衡

Fig.2 Life cycle carbon balance based on 1 ton of cellulosic ethanol

纤维素乙醇的热值是  $26796 \text{ kJ/kg}^{[15]}$ 。因此可以计算得到, 纤维素乙醇的 1 MJ 热值的碳排放是  $0.017 \text{ kg}$ 。

汽油的二氧化碳排放系数是  $3.85 \text{ kg}$  二氧化碳 /  $\text{kg}$  汽油<sup>[8]</sup>, 折算为汽油的碳排放系数是  $1.049 \text{ kg}$  碳 /  $\text{kg}$  汽油。汽油的热值是  $44000 \text{ kJ/kg}^{[16]}$ 。因此可以计算得到汽油的 1 MJ 热值的碳排放是  $0.024 \text{ kg}$ 。

可见, 纤维素乙醇与汽油相比, 1MJ 热值所排放的二氧化碳可以减少 28.6%。

#### 4 结论

本文依据生命周期的基本理论, 对纤维素乙醇进行生命周期碳排放进行研究, 结果表明:

(1) 纤维素乙醇生命周期碳排放是  $458.70 \text{ kg}$  碳 /  $\text{t}$  纤维素乙醇。

(2) 纤维素乙醇的 1 MJ 热值的碳排放是  $0.017 \text{ kg}$ , 汽油的 1 MJ 热值的碳排放是  $0.024 \text{ kg}$ 。纤维素乙醇与汽油相比, 1 MJ 热值的碳排放可以减少 28.6%。

纤维素乙醇替代汽油能够产生显著碳减排效益, 推广和使用纤维素乙醇有利于推动能源领域的低碳发展, 对实现我国碳达峰和碳中和的目标也有积极意义。

#### 参考文献

- [1] 什么是碳排放 [EB/OL]. (2022-01-11) [2022-12-29]. <https://www.yebaike.com/21/202201/3425130.html>
- [2] 二氧化碳排放量 [EB/OL]. (2013-11-20) [2022-12-29]. <https://www.antpedia.com/news/77/n-358777-p-3.html>
- [3] 碳与二氧化碳的区别 [EB/OL]. (2022-01-11) [2022-12-29]. <https://www.tanzixun.tech/tanpaifang/article16369920002728.shtml>
- [4] 宁艳春, 陈希海, 王硕, 屈海峰. 纤维素乙醇研发现状与研究趋势分析 [J]. 化工科技, 2020, 28 (1): 65-68.
- [5] 耿中峰, 杨淑媛, 张佳, 吕惠生, 张敏华. 木薯燃料乙醇项目全生命周期评价及碳中和策略研究 [J]. 酿酒科技, 2023, 44 (2): 65-70.
- [6] 夏训峰, 张军, 席北斗, 等. 基于生命周期的燃料乙醇评价及政策研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011: 97-98.
- [7] 缪晴. 纤维素乙醇生命周期能量效益评价 [J]. 生物产业技术, 2018, 10 (4): 41-44.
- [8] 中国产品全生命周期温室气体排放系数集 (2022) [EB/OL]. (2022-01-05) [2022-12-29]. <http://lca.cityghg.com/>.
- [9] GREET® 2022. Net software [EB/OL]. (2022-09-08) [2022-12-29]. <https://greet.es.anl.gov/net>.
- [10] 我国目前的货物发送量和周转量 (2018-07-17) [2022-12-29] [EB/OL]. [https://www.chinatruck.org/news/201807/61\\_77350.html](https://www.chinatruck.org/news/201807/61_77350.html)
- [11] 柴油密度 [EB/OL]. (2014-09-08) [2022-12-29]. <https://jingyan.baidu.com/article/fa4125acf4e3c769ad709200.html>.
- [12] 张治山, 袁希钢. 玉米燃料乙醇生命周期碳平衡分析 [J]. 环境科学, 2006, 31 (4): 616-619.
- [13] 玉米秸秆的碳含量 [EB/OL]. (2016-08-23) [2022-12-29]. <https://zhidao.baidu.com/question/1758222391230721588.html>
- [14] 乙醇分子式 [EB/OL]. (2020-04-23) [2022-12-29]. <https://edu.iask.sina.com.cn/bd/jx/CX71YBpirx.html>
- [15] 燃料乙醇热值 [EB/OL]. (2022-06-29) [2022-12-29]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1670797380815149881&wfr=spider&or=pc>.
- [16] 汽油的热值 [EB/OL]. (2021-12-01) [2022-12-29]. <https://www.che9.com/wenda/97989.html>.

# Study on Carbon Emission during the Life Cycle of Cellulosic Ethanol

Chen Dong

(SINOPEC Shanghai Engineering Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

**Abstract:** Cellulosic ethanol is the production of biofuel ethanol from agricultural wastes such as straw, which is the future development direction of the biofuel ethanol industry. However, there is little research on the carbon emissions of cellulosic ethanol at present. Based on the basic theory of Life Cycle Assessment, this paper study on the carbon emission of the cellulosic ethanol. The results show that the carbon emission from the production of 1 ton of cellulosic ethanol is 458.70 kg, and the carbon emission from the 1MJ calorific value of cellulosic ethanol is 0.017 kg. Compared with gasoline, the carbon emitted by cellulose ethanol with 1MJ calorific value can be reduced by 28.6%. Replacing gasoline with cellulosic ethanol can produce significant carbon emission reduction benefits. The promotion and use of cellulosic ethanol is conducive to promoting low-carbon development in the energy field, and is also of positive significance for achieving the goal of carbon peak and carbon neutrality in China.

**Keywords:** cellulose ethanol; carbon neutrality; green caobon; carbon emissions

## 封一介绍

中石化上海工程有限公司（原“中国石化集团上海工程有限公司”，英文简称SSEC），创建于1953年，曾用名“上海医药设计院”、“中国石化集团上海医药工业设计院”等，是国内最早从事石油化工、医药、化工工程设计和总承包的大型综合性工程公司之一。主要业务领域包括：石油炼制领域、石油化工领域、替代能源领域、医药化工领域、生物化工精细化工领域等；中石化上海工程有限公司立足于自主创新，经多年联合攻关形成了一批以乙苯脱氢制苯乙烯成套技术、碳五分离成套技术、HPPO法环氧丙烷成套技术、大型PTA成套技术、淤浆法聚乙烯成套技术、合成气制乙二醇成套技术等为代表的自主专利技术。

中石化上海工程有限公司联合中国石化上海石油化工股份有限公司，中国石化上海石油化工研究院开发了自主专利技术的催化剂和乙烯法醋酸乙烯成套技术，可根据客户需求定制90~300 kt/a醋酸乙烯成套技术工艺包。

**工艺简述：**中国石化乙烯法醋酸乙烯技术采用固定床催化氧化生产醋酸乙烯工艺。中石化上海石油化工研究院授权提供高性能催化剂，以乙烯、醋酸与氧气为原料生产高质量的醋酸乙烯单体，主要副产品是水、醋酸甲酯、醋酸乙酯、乙醛和CO<sub>2</sub>。

**应用领域：**醋酸乙烯下游主要用于聚醋酸乙烯、聚乙烯醇、EVA、VAE等领域，随着下游市场的发展，未来醋酸乙烯产能将持续增加。

**技术特点：**催化剂具有优异的催化剂活性、反应稳定性和较长的催化剂寿命；创新设计的新型合成反应器和氧混合器能耗、物耗低、安全性高、环境友好。所有设备均可国产，投资低。

## 广告索引

封一：中石化上海工程有限公司

拉页：中石化上海工程有限公司

封二：吉林医药设计院有限公司

封三：浙江亚光科技股份有限公司

封四：苏州安特威阀门有限公司

前彩插

1. 重庆润丰工业设备安装工程有限公司

2. 常州奥凯干燥设备有限公司