

玉米燃料乙醇生命周期净能量分析

张治山¹, 袁希钢^{1, 2*}

(1. 天津大学化工学院, 天津 300072; 2. 天津大学化学工程联合国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:玉米燃料乙醇作为化石燃料的替代品, 能量效率(净能量或能量比)是评价其可持续性的一个重要标准。基于生命周期清单分析原理, 建立了玉米燃料乙醇的净能量分析方法。以我国夏玉米燃料乙醇的生产条件为例, 计算了玉米燃料乙醇整个生命周期的能量效率并对其进行影响因素进行了分析, 讨论了乙醇汽油混合燃料的节能效果。研究表明: 玉米燃料乙醇具有一定的能量效益, 干法和湿法工艺的能量效率(能量比)分别为 1.25 和 1.04。通过玉米燃料乙醇生命周期内的能量输入比较可知, 玉米生产和乙醇转化过程的化石能输入占有最大的比例, 因而玉米种植过程中的氮肥、电力、柴油消耗和乙醇生产过程中蒸馏和脱水过程的能耗是影响玉米燃料乙醇能量效益的主要因素。

关键词:玉米; 燃料乙醇; 生命周期分析; 净能量分析

中图分类号:X382.1 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3301(2006)03-0437-05

Net Energy Analysis of Corn Fuel Ethanol Life Cycle

ZHANG Zhi-shan¹, YUAN Xi-gang^{1, 2}

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. State Key Laboratory of Chemical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract:Energy efficiency (net energy gain or energy ratio) of corn-based ethanol as a substitute for fossil fuel is an important criteria for assessing its sustainability. The method of net energy analysis for fuel ethanol from corn was developed based on principles of life cycle inventory (LCI) analysis. For the production state of fuel ethanol from summer corn in China, energy efficiency of the corn fuel ethanol life cycle system was estimated and its main influence factors were identified, and energy saving effect of some ethanol blended gasoline fuels was discussed. Corn fuel ethanol has certain energy benefits. The energy ratios for dry and wet milling process were 1.25 and 1.04 respectively. Through comparison of energy inputs in corn fuel ethanol life cycle, fossil energy inputs of corn production and ethanol conversion processes were identified as the most important, and therefore nitrogen fertilizer, electricity and diesel used in corn farming and energy consumption of distillation and dehydration process in ethanol production could be known as the most influential factors for the energy benefit of corn fuel ethanol.

Key words:corn; fuel ethanol; life cycle analysis; net energy analysis

燃料乙醇作为一种可再生能源其研究受到了很大的关注。近年来,我国已经开始推动以玉米为主要原料的燃料乙醇的研究、生产和应用^[1]。但是玉米燃料乙醇从原料的生产、乙醇的转化,一直到被消耗的整个生命周期中的多个阶段需要直接或间接地消耗矿物能源,因而,虽然玉米燃料乙醇是可再生能源,然而是否具有可持续性及其可持续性的大小则取决于其燃烧中所产生的能量(热值)与燃料乙醇整个生命周期中所消耗的能量相比是否有盈余及盈余的大小。20世纪70年代中期,玉米燃料乙醇的能量平衡问题研究首次在美国出现^[2,3],当时乙醇替代汽油的能量效益的有关研究指出玉米燃料乙醇的净能量盈余略显负值。20世纪80年代末期,美国为了减少空气污染,玉米燃料乙醇再次引起人们的关注,其能量平衡问题的研究又不断出现^[4,5],但由于划定的系统边界、考虑的影响因素等多种条件的不同,其研究结果存在很大差异,这也是在其可持续性评价

方面一直存在争议的主要原因之一。一些政府机构和酒精工业认为玉米燃料乙醇的净能量盈余为正值^[6~8],而以 Pimentel 为代表的一些学者则与之相反^[9~13]。国内有关玉米燃料乙醇能量平衡问题的深入研究尚未广泛开展。

本文基于生命周期清单分析(Life Cycle Inventory, LCI)原理^[14],建立了玉米燃料乙醇的净能量分析模型和方法,考虑我国玉米农业生产水平、乙醇转化技术和能源利用状况等实际条件,定量评价了玉米燃料乙醇的能量效率并对其进行影响因素进行了分析,进而提出了改进方向,从而为正确评价和提高我国玉米燃料乙醇的能量可持续性提供量化依据。

收稿日期:2005-04-04; 修订日期:2005-06-30

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2001CB711203)

作者简介:张治山(1975~),男,博士研究生,主要研究方向为化工过程系统工程。

* 通讯联系人, E-mail: yuanxg@tju.edu.cn

1 玉米燃料乙醇的生命周期系统

玉米燃料乙醇生命周期系统是由化石能和太阳能共同驱动的生物能源系统,其能量的输入、输出及内部流动如图 1 所示。

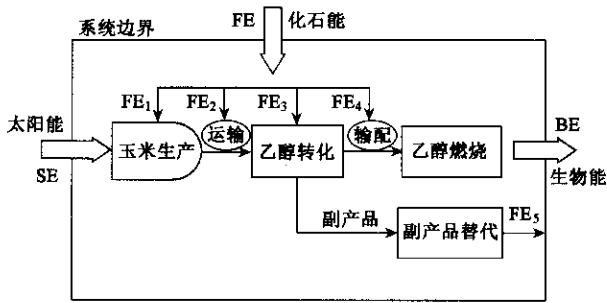


图 1 玉米燃料乙醇生命周期系统的能量流动

Fig.1 Energy flows in corn fuel ethanol life cycle system

在图 1 中,能量输入包括太阳能(Solar Energy, SE)和从玉米种植到乙醇燃烧整个生命周期直接或间接消耗的化石能(Fossil Energy, FE)。其中,FE 包括玉米生产过程的能耗 FE_1 (由种子、化肥、农药、电力和燃料等间接载入的化石能)、乙醇转化过程消耗的能量 FE_3 (主要来自于玉米粉碎、蒸煮,酒糟的干燥,乙醇的蒸馏及脱水,以及副产品生产等操作)以及运输玉米以及燃料乙醇消耗的能量 FE_2 和 FE_4 (与运输方式和运输半径有关)。乙醇转化过程生产的副产品包括干法工艺的全价干酒糟饲料(Distiller's Dried Grains with Solubles, DDGS)和湿法工艺的玉米面筋粉(Corn Gluten Meal, CGM)、玉米面筋饲料(Corn Gluten Feed, CGF)以及玉米油。为了考虑 FE_3 中生产副产品所占份额,本文采用能量替代法^[15],即在图 1 中用生产与副产品功能相当的替代产品所需能量 FE_5 加以表示。例如,有关饲料生产所需能量可以用生产具有相同营养量的大豆粉或玉米粉所需的能量表示。同理,玉米油可以用大豆油替代。这种方法通过扩展系统边界,将与副产品功能相当的替代产品生产过程包括进来,避免了对副产品生产所需能量的直接计算。能量输出包括乙醇的燃烧热能(Biomass Energy, BE)和副产品的替代能量 FE_5 。

2 净能量分析模型

玉米燃料乙醇的净能量分析就是基于热力学第一定律,研究其生命周期系统的化石能输入 FE 与生物能输出 BE 之间的关系,这一关系可以表示为

净能量(Net Energy, NE)或能量比(Energy Ratio, ER)。净能量是燃料乙醇提供的能量减去玉米燃料乙醇生命周期的化石能量输入之后的剩余能量与副产品替代能量之和;能量比是指燃料乙醇提供的能量与除去副产品替代能量之后的玉米燃料乙醇生命周期的化石能量输入之比。

单位质量玉米燃料乙醇的净能量分析数学模型如(1)式。

净能量:

$$NE = BE - (FE_1 + FE_2 + FE_3 + FE_4 - FE_5) \quad (1)$$

式中, FE_1 、 FE_2 、 FE_3 、 FE_4 、 FE_5 分别由(2)~(7)计算

$$BE = HHV_{乙醇} \quad (2)$$

式中, $HHV_{乙醇}$ 是乙醇的高热值,即乙醇完全燃烧且燃烧产物中的水蒸气凝结为液态水时的反应热,其值为 29.66 MJ/kg。

$$FE_1 = \frac{\sum (XEI_i \times X_i)}{Y \times x} \quad (3)$$

式中, X_i 是玉米生产过程中消耗物质或能量的数量, XEI_i 是它们的能量强度,即生产单位产品(能量或物质)直接消耗的能量(如燃料、动力、耗能工质)以及能源或物质在开采、生产、运输直到最终使用等各个阶段的间接能量消耗的总和; Y 是玉米产量; x 是乙醇转化率。

$$FE_2 = \frac{D_1 \times TE_1 \times H_2}{x} \quad (4)$$

式中, D_1 是原料供应的平均运输距离; TE_1 是运输燃料的消耗强度; H_1 是运输燃料的能量强度。

$$FE_3 = \sum_i E_i \times EEI_i \quad (5)$$

式中, E_i 是乙醇转化过程中各种能量的消耗量; EEI_i 是各种能量形式的能量强度。

$$FE_4 = D_2 \times TE_2 \times H_2 \quad (6)$$

式中, D_2 是乙醇输配过程的平均运输距离; TE_2 是运输燃料的消耗强度; H_2 是运输燃料的能量强度。

$$FE_5 = \sum_i (EW_i \times M_i) \quad (7)$$

式中, EW_i 是乙醇转化过程中共生副产品的能量替代系数; M_i 是副产品产率。

能量比:

$$ER = \frac{BE}{FE_1 + FE_2 + FE_3 + FE_4 - FE_5} \quad (8)$$

上述模型是在对玉米燃料乙醇整个生命周期中

的能量流动进行分析和热力学第一定律的基础上建立的,可以定量评价其在不同生产条件下(玉米农业生产水平、乙醇生产技术和能源利用状况等)的能量可持续性,对整个生命周期中的影响因素进行分析。

3 数据来源

本文玉米生产过程考虑的能量输入包括种子、机械、化肥(N、P₂O₅和K₂O)、燃料(柴油和汽油)、灌溉用电、杀虫剂和除草剂,其输入数量为我国夏玉米主产区平均产量为7 500kg/hm²时的估算值^[16],柴油、汽油和和电力的能量强度来自我国公开出版的文献资料^[17],其他输入项的能量强度来自国外文献数据^[18];模型中有关乙醇转化过程(干法和湿法)的转化率、能耗、副产品收率及替代系数的数据采用文献数据^[7,15,19];根据我国玉米燃料乙醇的生产状况,玉米和乙醇的运输方式采用柴油货车运输,假设玉米和燃料乙醇的平均运输距离分别为300km和500km,我国1998年交通运输企业主要经济技术指标显示,柴油货车的柴油消耗强度为0.05 L·(t·km)⁻¹。

4 结果与讨论

4.1 净能量和能量比

根据上述玉米燃料乙醇净能量分析模型和数据来源,对我国玉米燃料乙醇生命周期净能量分析的计算结果(干法和湿法)如表1所示。

表1 玉米燃料乙醇净能量分析结果/MJ·kg⁻¹
Table 1 Results of net energy analysis for corn fuel ethanol/MJ·kg⁻¹

类别	能量	数值(干法)	数值(湿法)
能量输入	玉米生产 FE ₁	8.63	9.22
	玉米运输 FE ₂	2.09	2.23
	乙醇转化 FE ₃	17.23	19.16
	乙醇分配 FE ₄	1.08	1.08
	总计	29.03	31.69
能量输出	副产品替代 FE ₅	5.32	3.14
	生物能 BE	29.66	29.66
评价指标	净能量盈余 NE	5.95	1.11
	能量比 ER	1.25	1.04

由表1可知,干法工艺和湿法工艺均可获得实际的能量效益,但后者并不明显,故干法工艺更适于燃料乙醇生产。玉米燃料乙醇生产系统的能量输出与化石能输入相比具有能量盈余,这部分能量来自植物光合作用固定的太阳能。以干法为例,玉米燃料乙醇生命周期系统的能量平衡如图2所示,其中,A表示玉米生产和运输过程的化石能量输入

(10.72MJ),B表示乙醇生产和分配过程的化石能输入(18.32MJ),C表示玉米中由植物光合作用固定的太阳能(48.71MJ),由玉米的热值(15.10 MJ·kg⁻¹)^[20]和乙醇转化率(0.31kg·kg⁻¹)^[19]计算得到,则总能量输入为77.74MJ;E表示乙醇燃烧释放的热能(29.66MJ);F表示副产品的化石能量替代值(5.32MJ),N表示考虑副产品能量分配时的净能量(5.95MJ),等于E-(A+B)+F;L表示整个玉米燃料乙醇转化系统的太阳能损失(43.14MJ),等于(C+A+B)-(E+F)。

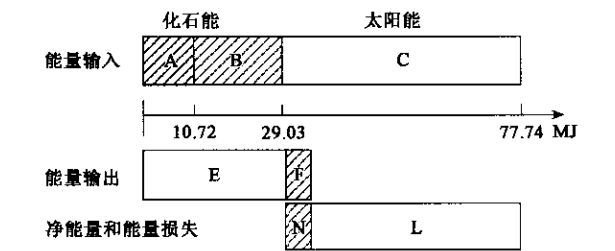


图2 玉米燃料乙醇生命周期系统的能量平衡
Fig. 2 Energy balance in corn fuel ethanol life cycle system

4.2 生命周期阶段的能量输入比较

玉米燃料乙醇生命周期各阶段的能量输入和副产品替代能量如图3所示。由图3可知,乙醇转化是玉米燃料乙醇生命周期中化石能输入最多的过程,大约占60%;其次是玉米生产过程,大约占30%;玉米运输和乙醇分配过程的能量输入相对较少,分别大约占7%和3%。

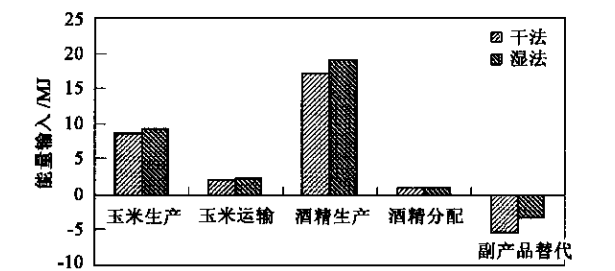


图3 玉米燃料乙醇生命周期的能量输入
Fig. 3 Energy inputs in corn fuel ethanol life cycle

乙醇转化过程的能耗大部分用于乙醇的蒸馏和脱水,因此,燃料乙醇蒸馏和脱水工艺的节能措施非常重要。另外,通过玉米发酵技术的研究改进,提高乙醇转化率也是降低能耗的有效方法。

玉米生产过程的各种能量输入份额如图4所示。由图4可知,氮肥是最重要的能量输入项,其次是耕作和农资运输耗用的柴油和灌溉用电。

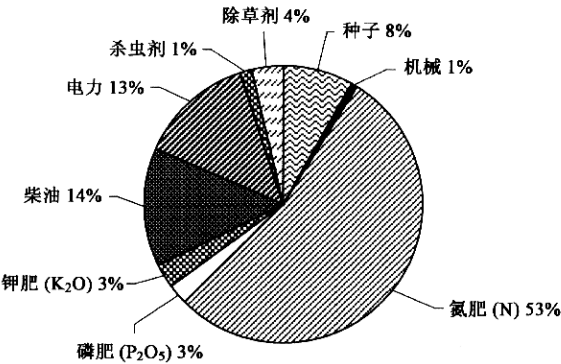


图 4 玉米生产过程能量的输入
Fig. 4 Energy inputs for corn production

虽然增加氮肥的投入是提高玉米产量的重要手段,但是两者并不呈简单的比例关系,随着耕种时间的延长,化肥投入呈现报酬递减趋势,而氮肥的过量投入会大大增加化石能的载量.因此,从能量效益的角度来说,氮肥施用量存在最优化问题.为了降低图 4 中其他部分的能耗,采用中耕或免耕技术、节水灌溉技术,使用基因技术提高玉米产量和控制病虫害均是有效的措施.

4.3 乙醇汽油混合燃料

燃料乙醇通常按不同比例(体积比)与汽油混配使用,如 E10、E22、E85. 根据汽油、乙醇(干法)的热值和能量强度,可以得出各种混合燃料的热值和能量强度.以 1L 汽油提供的能量为基准,各种燃料的体积和化石能源能量消耗比较如表 2 所示.

表 2 乙醇-汽油混合燃料的能量消耗比较

Table 2 Comparison of fossil energy use for ethanol blended gasoline fuels

燃料类型	体积/L	热值 /MJ·L ⁻¹	能量强度 /MJ·L ⁻¹	能量消耗 /MJ	节能/%
汽油	1	34.74	39.19	39.19	基准
乙醇	1.485	23.40	18.71	27.78	24.7
E10	1.034	33.61	37.14	38.40	2.02
E22	1.078	32.25	34.68	37.39	4.59
E85	1.384	25.10	21.78	30.14	23.09

由表 2 可知,与汽油相比,混合燃料中乙醇比例越大,节约化石能源的效果越明显,但燃料热值越小,需要更大体积的发动机.对于目前我国通常使用 E10 作为汽油替代燃料,行驶同样距离,可以比普通汽油节约 2.02% 的化石能源.

应该指出,上述计算采用的数据部分来自国外文献,如乙醇转化过程的能耗,种子、氮肥等能量强度等,因此计算结果与我国玉米燃料乙醇的实际情

况相比会有一定偏差,但对于初步定量评价我国玉米燃料乙醇的能量效益仍有一定的参考价值,特别是对分析玉米燃料乙醇能量效益的主要影响因素(如主要能量输入)有重要意义.若要获得反映我国玉米燃料乙醇实际的分析结果,需进一步收集和评价有关我国的实际数据.

5 结论

(1) 基于生命周期清单分析原理,建立了玉米燃料乙醇的净能量分析方法.该模型考虑了玉米农业生产水平、乙醇生产技术、运输过程及其能源利用状况等实际因素,可以定量评价不同生产条件下的能量可持续性和分析其影响因素.由于玉米产量和耕种管理方式、乙醇转化率和能耗等条件因地区和时间不同而有所变化,从而会影响评价结果的准确性,故在进行模型计算时应尽量使用反映玉米燃料乙醇实际生产情况的有关数据.

(2) 以我国夏玉米主产区的玉米燃料乙醇生产条件为例,对其能量效益的研究表明:玉米燃料乙醇具有一定的能量效益,干法和湿法的净能量盈余分别为 5.95MJ·kg⁻¹ 和 1.11MJ·kg⁻¹,能量比分别为 1.25 和 1.04;生命周期能量输入的比较分析显示,玉米生产过程中氮肥、灌溉电力、机械用柴油和乙醇转化过程中蒸馏和脱水工艺的能耗是影响玉米燃料乙醇能量效益的主要因素;与汽油相比,E10、E22、E85 和 E100 分别可以节约 2.02%、4.59%、23.09% 和 24.7% 的化石能源.

参考文献:

[1] 曹湘洪. 我国发展燃料乙醇和乙醇汽油应注意的若干问题[J]. 石油炼制与化工, 2001, 32(6): 7~10.

[2] Chambers R S, Herendeen R A, Joyce J J, et al. Gasohol: Does It or Doesn't It Produce Positive Net Energy? [J]. Science, 1979, 206: 790~795.

[3] Ethanol Study Committee. Ethanol Production From Biomass With Emphasis on Corn [R]. Madison: University of Wisconsin, 1979.

[4] Ho S P. Global warming impact of ethanol versus gasoline [A]. In: National Conference on Clean Air Issues and America's Motor Fuel Business[C]. Washington DC, 1989.

[5] Marland G, Turhollow A F. CO₂ emissions from the production and combustion of fuel ethanol from corn[R]. Tennessee. Oak Ridge National Laboratory, Atmospheric and Climate Research Division, 1991.

[6] Shapouri H, Duffield J A, Graboski M S. Estimating the net energy balance of corn ethanol [R]. Washington DC. US Department of Agriculture, Economic Research Service, Office of Energy and New Uses, 1995.

- [7] Shapouri H, Duffield J A, Wang, M. The energy balance of corn ethanol: An update[R]. Washington DC. US Department of Agriculture, Office of the Chief Economist, Office of Energy Policy and New Uses, 2002.
- [8] Wang M, Saricks C, Santini D. Effects of Fuel Ethanol Use on Fuel-Cycle Energy and Greenhouse Gas Emissions [R]. Argonne IL. US Department of Energy, Argonne National Laboratory, Center for Transportation Research, 1999.
- [9] Pimentel D. Ethanol fuels: Energy security, economics, and the environment [J]. Journal of Agricultural and Environmental Ethics, 1991, 4(1):1~13.
- [10] Pimentel, D. Ethanol fuels: Energy balance, economics, and environmental impacts are negative [J]. Natural Resources and Research, 2003, 12(2): 127~134.
- [11] Keeney D R, Deluca T H. Biomass as an energy source for the Midwestern US [J]. American Journal of Alternative Agriculture, 1992, 7(1):137~143.
- [12] Giampietro M, Ulgiati S, Pimentel D. Feasibility of large-scale biofuel production [J]. Bioscience, 1997, 47(9): 587~600.
- [13] Patzek T W. Thermodynamics of corn ethanol biofuel cycle [J]. Critical Reviews in Plant Science, 2004, 23(6): 1~50.
- [14] Vigon B W, Tolle D A, Cornaby B W, *et al.* Life cycle assessment: inventory guidelines and principles [M]. Cincinnati: EPA Press, 1993. 87~93.
- [15] Kim S, Dale B E. Allocation procedure in ethanol production system from corn grain [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2002, 7(4): 237~243.
- [16] 卢树昌, 臧凤艳, 刘惠芬, 等. 北方潮土区肥料定位试验下最佳配方研究[J]. 天津农学院学报, 2003, 10(1): 1~5.
- [17] 张管生. 科学用能原理及方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986. 132~167.
- [18] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States [J]. Agricultural Ecosystems and Environment, 2002, 91(1): 217~232.
- [19] 陈璈. 淀粉与酒精工业[J]. 淀粉与淀粉糖, 1990, 1(1): 12~19.
- [20] Pimentel D, Dazhong W. Agroecology [M]. New York: McGraw Hill Press, 1990. 147~164.