

生物液体燃料可持续发展评价系统

孟海波¹, 赵立欣^{1*}, 高新星¹, 田宜水¹, Rocco De Miglio²,
Evasio Lavagno²

(1. 农业部规划设计研究院, 北京 100125; 2. 意大利都灵理工大学, 都灵)

摘要: 该文分析了国内外生物液体燃料能量平衡研究现状。在综合考虑能量平衡、污染物排放、土地、水资源成本等各种因素的基础上, 基于线性规划法和电子数据表工具 (SPREADSHEET), 利用生命周期理论研究开发了生物液体燃料可持续评价系统 (BSAS), 该系统主要有基础数据库、分析模块和优化模块 3 部分组成, 以中国内蒙古和黑龙江两地发展甜高粱茎秆燃料乙醇为案例, 利用该系统进行了可持续性评价。研究表明, 利用该系统可实现国家、省以及特定地区等多个层面对发展生物液体燃料的可持续性进行优化分析和综合评价, 得出选定地区在满足设定情景条件下优化的生物液体燃料产业发展规划, 为政府部门科学决策提供技术支撑。

关键词: 生物燃料, 可持续发展, 生物质, 评价系统

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.12.038

中图分类号: TK6

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-12-0218-06

孟海波, 赵立欣, 高新星, 等. 生物液体燃料可持续发展评价系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 218—223.

Meng Haibo, Zhao Lixin, Gao Xinxing, et al. Bio-liquid fuel sustainable assessment system in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 218—223. (in Chinese with English abstract)

0 引言

以生物液体燃料为代表的生物质能可减少化石燃料需求、减排温室气体和提高空气质量, 还能促进农村经济发展, 最关键的是具有可再生的特性, 因此, 生物燃料在可再生能源产业中独唱主角, 并已成为发达国家的重要能源战略。伴随着生物液体燃料在全球范围内的快速发展, 对生物液体燃料产业的可持续性问题也日益引起高度重视, 生物液体燃料能否实现能量的净增长, 能否或者说在多大程度上减少温室气体排放, 经济上是否可行等问题, 正受到世界各国乃至全人类社会的广泛关注。从替代化石能源这一角度讲, 生物液体燃料的可持续性评价以及与现有化石能源相比较是一个非常复杂的问题, 不仅包括能量平衡、碳平衡, 环境排放, 经济成本, 还涉及许多生态及其他社会问题, 需要考虑从原料种植、工业转化、推广应用, 一直到对环境的直接或间接影响的整个生命周期的多种必要因素。笔者基于生命周期评价原理 (LCA)^[1], 在综合考虑能量平衡、污染物排放、土地、水资源成本等各种因素基础上, 利用线性规划法和电子数据表工具 (SPREADSHEET), 研发了生物液体燃料可持续评价系统 (BSAS), 并利用系统以中

国内蒙古、黑龙江等地种植甜高粱发展燃料乙醇为案例, 进行了可持续性评价, 为政府及相关机构发展生物液体燃料决策提供科学依据。

1 生物液体燃料能量平衡研究现状

最早关于生物液体燃料能量平衡研究起源于 20 世纪 70 年代中期, 美国首次对玉米燃料乙醇的能量平衡问题开展研究^[2-3], 当时玉米燃料乙醇替代汽油的能量效益的研究结果表明, 净能量盈余为负值。20 世纪 80 年代末, 美国为减少空气污染, 玉米燃料乙醇的能量平衡问题研究又不断出现^[4]。由于美国以玉米为原料发展车用乙醇汽油引发了广泛争议, 其争议的重要内容是关于车用乙醇汽油能否真正实现“能源经济性”。持反对意见的学者认为, 以粮食作物为原料生产乙醇, 在生命周期的最初环节, 即种植阶段需要消耗大量化石燃料产品以及电能, 如化肥、农药、杀虫剂和农机具柴油等; 在乙醇转化阶段, 又要消耗电能和热能, 乙醇燃烧产生的能量不足以弥补生产乙醇过程中消耗的化石能量, 实际上是负能量收益。支持者则认为, 乙醇产品的确能在较为合理的能源结构方面得到正的净能量值。由于不同的研究者的研究工作存在较大的差别, 如考虑了不同的玉米产量、乙醇转换技术、化肥生产效率、副产品评价以及计算中使用的投入能量值的假设等, 所得结果迥然不同。美国阿贡国家实验室开发了 GREET (greenhouse gases, regulated emissions, and energy use in transportation: 交通运输温室气体排放控制与能量平衡) 模型, 对玉米乙醇进行能量平衡和污染物排放分析评价, 成为目前应用较为普遍的分析工具。表 1 列出了近 20 a 来不同研究者对玉米乙醇研究的假设以及能量平衡结果^[5]。

收稿日期: 2008-12-02 修订日期: 2009-10-13

基金项目: 农业部 948 项目“农业生物质能先进技术引进与产业化”(G2); 农业科技成果转化资金项目 (2008GB23260384); 国家自然科学基金项目 (70741031)

作者简介: 孟海波 (1972—), 男, 山东青州人, 副研究员, 博士, 主要从事生物质资源开发与利用工作。北京市朝阳区麦子店街 41 号 农业部规划设计研究院, 100125。Email: newmh7209@163.com

*通信作者: 赵立欣 (1967—), 女, 研究员, 博士, 主要从事可再生能源及生态环境保护领域的政策、技术与研究工作。北京市朝阳区麦子店街 41 号 农业部规划设计研究院, 100125。Email: zhaolixin5092@gmail.com

表 1 不同研究者对玉米乙醇能量平衡研究结果

Table 1 Results for research on corn-based ethanol energy balance from different researchers

| 研究者 (年份) | 玉米产量/ (kg·hm ⁻²) | 氮肥使用量/ (kg·hm ⁻²) | 氮肥生产能/ (MJ·kg ⁻¹) | 乙醇转化率/ (L·kg ⁻¹) | 乙醇转化能耗/ (MJ·L ⁻¹) | 总能量利用/ (MJ·L ⁻¹) | 副产品能量值/ (MJ·L ⁻¹) | 净能量/ (MJ·L ⁻¹) |
|---------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Pimentel(1991) | 6 907 | 152.51 | 87.34 | 0.37 | 20.54 | 36.51 | 5.99 | -9.34 |
| Pimentel(2001) | 7 975 | 144.66 | 78.02 | 0.37 | 20.94 | 36.53 | 5.99 | -9.35 |
| Keeney-Deluca(1992) | 7 472 | 151.39 | 88.28 | 0.38 | 13.51 | 25.42 | 2.25 | -2.35 |
| Marland(1990) | 7 472 | 142.42 | 72.41 | 0.37 | 13.96 | 20.61 | 2.27 | 5.06 |
| Lorenz(1995) | 7 535 | 137.93 | 64.20 | 0.38 | 15.04 | 22.60 | 7.69 | 8.53 |
| Ho(1989) | 5 651 | - | - | - | 15.89 | 25.08 | 2.93 | -1.11 |
| Wang(1999) | 7 849 | 146.90 | 49.06 | 0.38 | 11.38 | 19.08 | 4.17 | 6.27 |
| Canada(1999) | 7 284 | 140.17 | - | 0.40 | 14.05 | 19.08 | 3.92 | 8.31 |
| Shapouri(1995) | 7 661 | 140.17 | 51.54 | 0.38 | 14.85 | 23.08 | 4.20 | 4.51 |
| Hosein(2002) | 7 849 | 144.66 | 42.78 | 0.40 | 14.43 | 21.52 | 4.01 | 5.88 |

国内利用生命周期理论研究能量平衡和污染物排放问题始于 21 世纪。张治山^[6]基于生命周期分析原理,从热力学的角度定量分析我国玉米燃料乙醇的可持续性及其影响因素。张纪鹏^[7]等就农作物乙醇作为燃料的综合效益进行了全面分析,得出了除甜高粱外多数农作物作为燃料乙醇原料具有较低的能效转换率之结论。戴杜^[8]等研究结果显示,玉米、木薯燃料乙醇的净能量分别为 1.472 和 2.417 MJ/L,净可再生能量分别为 1.474 和 2.459 MJ/L。方芳^[9]等基于 Excel 建立了东北地区玉米燃料乙醇项目基础案例,同时用蒙特卡洛 (Monte Carlo) 模拟法模拟项目运营,最终得出结论,中国玉米燃料乙醇项目若无外部补贴则不可接受;同时依据敏感性分析结果论述了玉米燃料乙醇项目的经济性在将来得到改善的条件及可能性。胡志远^[10]等建立了大豆、油菜籽光皮树和麻疯树 4 种原料制生物柴油生命周期能源消耗和排放评价模型,并对其进行了生命周期能源消耗和排放评价。王明新^[11]等以华北平原高产粮区—山东省桓台县的冬小麦生产体系为例,应用生命周期评价方法,对冬小麦两种不同管理措施进行生命周期资源消耗与污染物排放清单分析,在此基础上进行了生命周期环境影响评价。董丹丹^[12]等引入生命周期理论,对木薯燃料乙醇系统的 3 个阶段进行了能耗分析,重点讨论了燃料生产阶段采用新旧工艺对周期能耗的影响。能耗计算发现,采用新工艺可以较大地增加系统周期的净能量产出,提高系统的能效;加强副产品的开发,使用农家肥替代化肥也可产生同样的效果。胡志远等^[13-15]利用生命周期评价理论建立了木薯燃料乙醇生命周期能源效率评价模型,以总体能源消耗、化石燃料消耗、石油消耗、净能源产出和能源综合利用率为评价指标,对木薯燃料乙醇进行了生命周期能源效率评价。结果表明:与汽油相比,木薯燃料乙醇生命周期整体能源消耗增加 22%,化石燃料消耗降低 54%,石油消耗降低 96%,净能源产出偏低 45%,能源综合利用率偏低 8%。戴杜^[16]等研究结果表明,使用木薯生产燃料乙醇在能量生产和再生能量生产上是可行的,木薯乙醇的净能量为 2.417 MJ,净可再生能量是 2.458 MJ。张治山^[17-18]等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,以中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影响因素进行了分析。

综合分析,传统的生命周期评价方法主要集中在对生物液体燃料整个生命周期过程中能量消耗量或者污染物排放量的简单比较,未见综合考虑经济性、土地资源、水资源等限制条件下对整个生物燃料产业发展的可持续性进行评价分析。另外,现有生物液体燃料能量和环境排放评价分析工具往往过于繁琐且复杂,应用起来缺乏灵活性,而且对既定模型用户无法根据具体情况增加新的功能。

2 生物液体燃料可持续评价系统 (BSAS)

本研究针对现有评价方法存在的局限性,充分考虑土地资源、水资源等因素,以化石能源消耗、污染物和温室气体排放为约束条件,利用线性规划法和电子数据表工具 (SPREADSHEET) 进行数学优化,研究开发了生物液体燃料可持续评价系统。据此,可在国家、省以及选定地区等多个层面对发展生物液体燃料的可持续性进行优化分析和综合评价,得出选定地区在满足某种情景条件下优化的生物液体燃料产业发展方案。本文以发展甜高粱燃料乙醇为例,在几个省区,给定生物乙醇产量和温室气体限定条件下,利用该系统优化分析得到相应的投资规模、产业布局、化石能源消耗量等。该可持续评价系统包括基础数据库、分析模块和优化模块。

2.1 系统算法与框图

该系统利用两种不同的方法、不同的工具和不同的详细水平模拟能量系统,但是使用同一运算规则来求解,即线性规划法。线性规划法包括一个线性目标函数、线性等式或非等式约束;系统通过计算寻求最佳的资源配置方案 (包括能量、物质、自然和人类社会等),得到优化解,为科学决策和项目投资提供依据和支撑。其基本算法如下

$$x_1 + x_2 + \cdots + x_n \leq m \quad x_i = 0,1 \quad \text{二进制} \quad (1)$$

$$x_p \leq \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} \quad x_i = 0,1 \quad \text{二进制} \quad (2)$$

$$x_i + x_j \leq 1 \quad x_i = 0,1 \quad \text{二进制} \quad (3)$$

式中: x_n ——单项变量值; x_p ——单项变量均值极值;
 x_i, x_j ——成对变量。

本评价系统框图如图 1 所示。

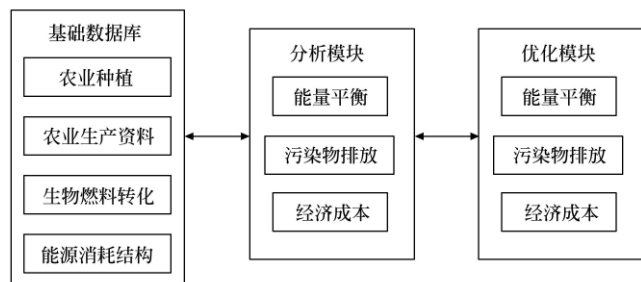


图 1 生物燃料可持续评价系统框图

Fig.1 Chart for biofuels sustainable assessment system

2.2 基础数据库

本系统的基础数据库包括农业种植数据库、生产资料生产数据库和污染物排放数据库;生物燃料转化生产数据库。数据来源:国家、地方各级政府统计部门数据、专项调研及具体案例数据等。

1) 农业种植数据库

农业种植数据库是在收集、存储各地区(省、市、县)甘薯、木薯、甜高粱、棉籽、小桐子、甘蔗等各种能源作物的种植资料基础上建立的,包括各种作物单位面积种子需要量、化肥施用量、农药使用量、机械作业能耗、运输能耗、人工作业能耗等等。

2) 农业生产资料数据库

农业生产资料数据库收集、存储了中国及各省(市、区)氮、磷、钾等各种化肥,以及杀虫剂、除草剂等生产过程中的能源消耗量及其比例构成(如电能、煤、石油、天然气等)。

3) 生物燃料工业转化数据库

生物燃料转化生产数据库收集、存储了中国及各省(市、区)现有燃料乙醇、生物柴油等不同技术工艺条件下的工业转化中的能耗及其能源种类。

4) 能源消耗与结构数据库

能源消耗与结构数据库收集、存储了近年来国家及各省(市、区)的煤炭、石油、天然气、水能、风能、太阳能、生物质能等的平均消耗量、结构组成、各种能源所占比例等。

2.3 分析模块

1) 能量平衡分析模块

根据各种生物液体燃料的原料种植农艺方案和工业生产技术方案,计算各生产环节的能量投入量、产出量以及产投比,分析国家及各省(市、区、县)各个层面各种生物液体燃料生产过程的能量平衡,提出节能与提高能效措施。

2) 污染物排放模块

根据各种生物液体燃料原料种植农艺方案和工业生产技术方案,计算各生产环节的污染物(包括温室气体、颗粒物、废水等)排放量,分析国家及省(市、区、县)

各个层面各种生物液体燃料生产过程的污染物排放情况,提出应对措施。

3) 经济成本分析模块

根据各种生物液体燃料原料种植农艺方案(适当考虑当地农产品价格)和工业生产技术方案,计算各生产环节的经济投入,分析国家及省(市、区、县)各个层面各种生物液体燃料生产成本情况,提出投资估算和经济可行性研究结论。

2.4 优化模块

本系统在能量平衡、污染物排放和经济成本分析的基础上,考虑可利用的土地资源量以及各地区的土地使用成本,结合水资源可利用量以及各地区的水资源利用成本,通过定量计算,进行优化组合规划设计,提出在确定的生物液体燃料产量的情景下,在不同层面的生物液体燃料的发展规模、区域布局和投资估算,并具体分析在这一情景下,化石能源的消耗量、污染物排放量和颗粒污染物排放量等等。

2.5 系统功能与特性

1) 功能

利用 BSAS 系统可以全面评价生物液体燃料在整个生命周期过程中的能耗量、污染物排放量、土地资源利用量、水资源利用量、经济成本等指标;比较不同能源作物在同一地区种植、同一种能源作物在不同地区种植的各种消耗指标情况;在给定地区生物液体燃料需求量的情况下,考虑化石能源消耗、污染物排放以及经济成本等条件,进行优化设计,确定建设规模和区域布局方案。包括土地使用量、水资源利用量及各区域布局,化石能源能耗、污染物排放和总成本等。

2) 特性

生物燃料可持续评价系统(BSAS)是在线性规划方法框架下对评价模型的二次开发,与 GREET 模型比较,该系统具有显著优点。首先,使用者自己能够定义可调整的单元格,并输入求解后的结果,选择优化变量,优化趋势和约束类型,灵活性很高;其次,采用数学优化方法,其目标函数能够依据研究目的的不同而选择,优化标准没有被源代码固定,即可以在不同情景下分析同样的问题,包括不同的目标函数;使用者可直接管理系统结构,采用电子数据表开发系统能够确保数据以及测算法则全部透明,而且能够很容易地修改程序,这些程序链接决策变量、参数或者约束方向,每个过程都能够被系统所计算处理,包括属性和特点。

3 案例分析

本文利用 BSAS 系统对发展甜高粱燃料乙醇进行了研究评价。分别选取内蒙古和黑龙江为发展甜高粱乙醇试点地区,由内蒙五原县和黑龙江桦川县集中种植甜高粱,并跟踪记录田间数据,包括种子需要量、化肥施用量、农药用量、机械能耗、人工以及单位面积甜高粱茎秆产量等,建立甜高粱农业种植数据库,具体见表 2。

表 2 甜高粱农业种植阶段数据库
Table 2 Database for sweet sorghum cultivation

| 能量分析清单 | 描述 | 地区：内蒙古 | 单位能耗 (或消耗量) |
|--------------------------------------|----|-------------|----------------|
| 氮肥/(MJ·kg ⁻¹) | 1 | 统计部门数据，详见批注 | 179.66 |
| 氮肥使用量/(kg·hm ⁻²) | 2 | 五原县农业局提供数据 | 600 |
| 杀虫剂/(MJ·kg ⁻¹) | 11 | 五原县农业局提供来源 | 328.4 |
| 杀虫剂使用量/(kg·hm ⁻²) | 12 | 五原县农业局提供数据 | 0.75 |
| 种子/(MJ·kg ⁻¹) | 13 | 肖明松提供数据 | 0.027 |
| 种子使用量/(kg·hm ⁻²) | 14 | 五原县农业局提供数据 | 15 |
| 运输能量投入/(MJ·hm ⁻²) | 15 | 五原县农业局提供数据 | 259.2 |
| 单位物质运输能量/ (MJ·kg ⁻¹) | 16 | 五原县农业局提供数据 | 0.41 |
| 汽油/(MJ·hm ⁻²) | 17 | 五原县农业局提供数据 | 0 |
| 柴油/(MJ·hm ⁻²) | | 五原县农业局提供数据 | 2 993.76 |
| 灌溉用能/(MJ·hm ⁻²) | 18 | | 0 |
| 劳动力/(MJ·hm ⁻²) | 21 | | 0 |
| 畜力/(MJ·hm ⁻²) | 22 | | 0 |
| 人力/(MJ·hm ⁻²) | 23 | 五原县农业局提供数据 | 583.29 |
| 劳力运输/(MJ·hm ⁻²) | 24 | | 0 |
| 农场机械/(MJ·hm ⁻²) | 25 | - | 0 |
| 农业阶段总能量消耗/ (MJ·hm ⁻²) | | | 114 814.24 |

采用两种生产工艺，包括传统的窖式固态发酵工艺（SSF）和转鼓式固态发酵工艺（ASSF），进行分析评价，并跟踪记录乙醇转化过程的生产数据，建立甜高粱茎秆转化乙醇数据库。具体见表 3。

表 3 甜高粱茎秆转化乙醇数据库
Table 3 Database for sweet sorghum transferring into ethanol

| 能量分析清单 | 描述 | 数据来源 | 单位能耗 (或消耗量) |
|------------------------------|----|----------------|----------------|
| 原料运输能耗/(MJ·L ⁻¹) | 27 | 五原县农业局提供数据 | 0.56 |
| 菌种/(MJ·kg ⁻¹) | 28 | 清华大学提供数据 | 0 |
| 菌种使用量/(kg·L ⁻¹) | 29 | 清华大学提供数据 | 0 |
| 预处理能耗 | 30 | | 0 |
| 粉碎/(MJ·L ⁻¹) | 31 | 清华大学提供数据 | 0.057 |
| 灭菌/(MJ·L ⁻¹) | 32 | | 0 |
| 榨汁/(MJ·L ⁻¹) | 33 | | 0 |
| 液态发酵/(MJ·L ⁻¹) | 34 | | 0 |
| 固态发酵/(MJ·L ⁻¹) | 35 | 清华大学提供数据 | 0.88 |
| 蒸馏/(MJ·L ⁻¹) | 36 | 清华大学提供数据 | 5.19 |
| 基本能量/(MJ·L ⁻¹) | 37 | | 0 |
| 电力/(MJ·L ⁻¹) | 38 | 清华大学提供数据 | 0.43 |
| 煤炭/(MJ·L ⁻¹) | | 清华大学 SSF 法工艺参数 | 0 |
| 天然气/(MJ·L ⁻¹) | | 清华大学 SSF 法工艺参数 | 0 |
| 生物质/(MJ·L ⁻¹) | | 清华大学提供数据 | 15.72 |
| 废水处理/(MJ·L ⁻¹) | 39 | 清华大学 SSF 法工艺参数 | 0 |
| 化学品运输/(MJ·L ⁻¹) | 40 | 五原县农业局提供数据 | 1.74 |
| 总计 | | | |
| 输入能量 | | | 49.09 |
| 输出能量/(MJ·L ⁻¹) | 44 | 清华大学 SSF 法工艺参数 | 21.2 |
| 副产品/(MJ·L ⁻¹) | 45 | | 95.44 |
| 输出能量/(MJ·L ⁻¹) | | | 116.64 |
| 净能量值/(MJ·L ⁻¹) | | 系统计算结果 | 67.55 |

利用 BSAS 系统对两个地区发展燃料乙醇进行优化分析，见表 4。

表 4 两个地区发展甜高粱燃料乙醇优化分析
Table 4 Optimization analysis on development of sweet sorghum stalk-based ethanol in two regions

| 地区 | 地区具体条件 | 消耗的物质或能量 | 价格/元 | 单位能耗/(MJ·hm ⁻²) | 输入相对质量密度/% | 结果/MJ 或 hm ² | 每公顷总能耗的倒数 |
|-----|--|-----------------|-------|-----------------------------|------------|-------------------------|-------------|
| 内蒙古 | 土地消耗 20.000 hm ² 产出 64 500 kg/hm ² 产品总量 1 290 000 kg | CO ₂ | / | 21 | 0.019 | 420 | 8.81568E-06 |
| | | 煤炭 | 450 | 78 623.79 | 69 | 948 963 | |
| | | 天然气 | 1.8 | 29 469.57 | 26 | 359 131 | |
| | | 石油产品 | 1 200 | 4 630.24 | 4 | 92 605 | |
| | | 电力 | 0.55 | 688.59 | 1 | 13 772 | |
| 黑龙江 | 土地消耗 20.000 hm ² 产出 90 000 kg/hm ² 产品总量 1 800 000 kg | CO ₂ | / | 21 | 0 | 420 | 5.08102E-05 |
| | | 煤炭 | 400 | 7 877.16 | 40 | 157 543 | |
| | | 天然气 | 1.9 | 3 572.33 | 18 | 71 447 | |
| | | 石油产品 | 1 300 | 7 062.89 | 36 | 141 258 | |
| | | 电力 | 0.6 | 1 146.72 | 6 | 22 934 | |

研究结果表明：

1) 内蒙古案例：采用转鼓式固态发酵工艺（ASSF），能量投入 26.73 MJ/L，其中农业阶段为 12.46 MJ/L；乙醇转化阶段为 14.27 MJ/L；能量产出：乙醇 23.12 MJ/L，副产品能量 23.74 MJ/L（包括谷物等），生产的副产品固体成型燃料（折合能量 16.77 MJ/L）又作为生产蒸汽的能源进行内部循环利用，蒸汽用来蒸馏乙醇。因此，净能量产出为 20.13 MJ/L，能量产出投入比为 1.75。

2) 黑龙江案例：采用传统固态发酵工艺（SSF），能量投入 29.43 MJ/L，其中农业阶段为 22.85 MJ/L；乙醇转化阶段为 6.58 MJ/L（乙醇体积分数为 60%）；能量产出：乙醇 13.94 MJ/L，副产品能量 5.5 MJ/L（包括谷物等）。

净能量产出为-9.99 MJ/L，能量产出投入比为 0.66。

利用 BSAS 系统对上述案例进行评价分析结果可见，采用先进的种植工艺、合理施肥和科学管理，在转化阶段采用先进的固体发酵工艺，特别是充分开发利用转化后的副产品，以甜高粱茎秆为原料生产燃料乙醇可以实现能量的净增长。

由于中国在甜高粱乙醇生产过程中污染物和温室气体排放方面的研究起步较晚，数据缺乏，本文仅以美国阿贡实验室提供的玉米乙醇生产过程中 CO₂ 排放数据为例对评价系统进行了验证分析，结果表明，该系统可方便地完成计算、分析与评价，获得相对可靠结论。目前，本研究正在建立和完善国内甜高粱茎秆乙醇生产过程中

污染物和温室气体排放数据库, 支持该评价系统。

4 结论与讨论

1) 利用线性规划法和电子数据表工具研究开发了生物燃料可持续评价系统, 该系统包括基础数据库和分析模块, 综合考虑了土地资源、水资源以及经济成本, 可实现在国家、省、市、县等各个层面对发展 1 种或几种能源作物生物燃料进行优化分析评价, 在特定情景下提出产业投资规模和布局方案等, 为政府决策提供科学依据。

2) 利用 BSAS 系统对发展甜高粱燃料乙醇进行了案例分析。结果表明, 该系统具有强大的计算分析功能, 以甜高粱种植为案例在具体情景下对发展燃料乙醇的能量平衡等进行了可持续性研究, 采用先进发酵工艺其能量产出为正。

3) 本研所得生物燃料可持续评价系统是基于生命周期理论, 利用电子数据表 Spreadsheet 的强大数据处理能力开发的, 具备开展包括能量平衡、污染物排放以及经济分析等在内的可持续性评价的多项功能, 操作便捷, 可靠性强, 可为政府决策提供技术支撑和参考。值得讨论的是, 利用本系统进行评价需要依托数量庞大的数据库, 包括农业种植、生物燃料技术转化(如乙醇转化、生物柴油生产、固体成型燃料生产及大中型沼气生产等)、国内能源生产消耗以及污染物排放数据库等等, 限于时间关系, 截至此文发表前, 在液体燃料生产评价中尚未完全建立除能量生产消耗以外的数据库, 本项目课题组正在做这方面的工作。

志谢: 在此文发表之际, 特别感谢对此项目的数据收集、模型建立等工作提供过大量帮助的单位如内蒙古五原农业局、以及清华大学的李十中教授、农业部规划设计研究院的王飞、李想、张艳丽、肖明松、孙丽英等同志。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [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] 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.
- [5] 史济春, 曹湘洪. 生物燃料与可持续发展[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007: 194—207.
- [6] 张治山. 玉米燃料乙醇生命周期系统的热力学分析[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [7] 张纪鹏, 姜慧, 霍炜, 等. 农作物乙醇燃料的综合效益分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 299—303.
Zhang Jipeng, Jiang Hui, Huo Wei, et al. Analysis of the comprehensive benefits of grain alcohol fuel[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(2): 299—303. (in Chinese with English abstract)
- [8] 戴杜, 刘荣厚, 浦耿强, 等. 中国生物质燃料乙醇项目能量生产效率评估[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 121—123.
Dai Du, Liu Ronghou, Pu Gengqiang, et al. Evaluation of energy production efficiency of biomass based fuel ethanol program[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(11): 121—123. (in Chinese with English abstract).
- [9] 方芳, 于随然, 王成焄. 中国玉米燃料乙醇项目经济性评估[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 239—242.
Fang Fang, Yu Suiran, Wang Chengtao. Economic assessment on corn-based fuel ethanol projects in China[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(3): 239—242. (in Chinese with English abstract).
- [10] 胡志远, 谭不强, 楼狄明, 等. 不同原料制备生物柴油生命周期能耗和排放评价[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 141—146.
Hu Zhiyuan, Tan Piyan, Lou Diming, et al. Assessment of life cycle energy consumption and emissions for several kinds of feedstock based biodiesel[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 141—146. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王明新, 包永红, 吴文良, 等. 华北平原冬小麦生命周期环境影响评价[J]. 农业环境科学学报 2006, 25(5): 1127—1132.
Wang Mingxin, Bao Yonghong, Wu Wenliang, et al. Life cycle environmental impact assessment of winter wheat in north china plain[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(5): 1127—1132. (in Chinese with English abstract).
- [12] 董丹丹, 赵黛青, 廖翠萍, 等. 木薯燃料乙醇生产的技术提升及全生命周期能耗分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 160—164.
Dong Dandan, Zhao Daiqing, Liao Cuiping, et al. Energy consumption analysis in life cycle of cassava fuel ethanol production and the advantages of the new technology in energy consumption[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7): 160—164. (in Chinese with English abstract)
- [13] 胡志远, 戴杜, 浦耿强, 等. 木薯燃料乙醇生命周期能源效率评价[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(10): 1715—1718.
Hu Zhiyuan, Dai Du, Pu Gengqiang, et al. Life cycle energy efficiency assessment of cassava based fuel ethanol[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(10): 1715—1718. (in Chinese with English abstract).
- [14] 胡志远, 张成, 浦耿强, 等. 木薯乙醇汽油生命周期能源、环境及经济性评价[J]. 内燃机工程, 2004, 25(1): 13—16.
Hu Zhiyuan, Zhang Cheng, Pu Gengqiang, et al. Life cycle energy, environment, and economy assessment of cassava-based ethanol gasoline[J]. Neiranji Gongcheng, 2004, 25(1): 13—16. (in Chinese with English abstract).

- [15] 胡志远, 楼狄明, 浦耿强. 燃料乙醇生命周期影响评价[J]. 内燃机学报, 2005, (3): 69—74.
Hu Zhiyuan, Lou Diming, Pu Gengqiang. Life cycle impact assessment of fuel ethanol[J]. Transactions of CSICE, 2005, (3): 69—74. (in Chinese with English abstract).
- [16] 戴杜, 理河, 浦耿强. 广西木薯燃料乙醇项目能效评估[J]. 广西农业生物科学, 2005, 24(2): 167—171.
Dai Du, Li He, Pu Gengqiang, et al. Evaluation on energy and renewable energy production efficiency of cassava in Guangxi[J]. Journal of Guangxi Agriculture. and Biological. Science, 2005, 24(2): 167—171. (in Chinese with English abstract).
- [17] 张治山, 袁希钢. 玉米燃料乙醇生命周期净能量分析[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 437—441.
Zhang Zhishan, Yuan Xigang. Net energy analysis of corn fuel ethanol life cycle[J]. Environmental Science, 2006, 27(3): 437—441. (in Chinese with English abstract).
- [18] 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, 27(4): 616—619.
Zhang Zhishan, Yuan Xigang. Carbon balance analysis of corn fuel ethanol lifecycle[J]. Environmental Science, 2006, 27(4): 616—619. (in Chinese with English abstract).

Bio-liquid fuel sustainable assessment system in China

Meng Haibo¹, Zhao Lixin^{1*}, Gao Xinxing¹, Tian Yishui¹, Rocco De Miglio², Evasio Lavagno²

(1. Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China;

2. Dipartimento Di Energetica, Politecnico Di Torino, Italia)

Abstract: The research status of energy balance for bio-liquid fuel in China and the rest of the world have been analysed in this paper. Based on energy balance, emissions of pollutants, land and water resources etc, a bio-liquid fuel sustainable assessment system (BSAS) has been developed by LCA (life cycle assessment), which includes three sections as foundation database, analysis module, optimization module. Two case study have been conducted by the system, which sweetsorghum stalks have been used to produce ethanol in Inner Mongolia and Heilongjiang Province, respectively. The results showed that the system could be used to analysis and assess the sustainability to develop bio-liquid fuels at state, province and specific district levels in China, and bio-liquid fuels planing in the specific area could also be obtained under the certain scenario, which suppyls technology support for decision-makers.

Key words: biofuels, sustainable development, biomass, assessment system