

麻风果油为原料的生物柴油生产全过程能值分析

鞠丽萍, 陈彬*, 杨志峰, 戴婧, 齐静, 苏美蓉, 刘耕源

(北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 生物柴油作为石油的替代能源之一, 已在我国开始了产业化应用。采用能值分析方法对以麻风果油为原料的生物柴油生产全过程, 包括麻风树的种植、麻风果实的运输、麻风果油的榨取、果油酯化 4 个过程以及废水的处理进行了评价, 从可更新资源、不可更新资源和购买资源入手构建了能值评价指标体系, 并与大豆油为原料的生物柴油、小麦为原料的生物乙醇进行了比较。结果表明麻风果油生物柴油的能值转换率是 1.67×10^{13} sej/kg, 能值产出率是 1.85, 环境负载率是 6.84, 可持续发展指数是 0.271。比较得出, 麻风果油能值转换率是大豆油的 3 倍, 是生物乙醇的 2 倍; 相同经济能值的投入, 麻风果油能值产出率最高, 但对环境的依赖程度也更强; 可持续发展指数三者相差不大。原料的非食用性方面, 与大豆生物柴油、生物乙醇相比, 麻风果油有很大的优势, 具有发展潜力。

关键词: 麻风果油; 生物柴油; 能值

Energy analysis for the whole biodiesel production process with *jatropha curcas* oil as raw materials

JU Liping, CHEN Bin*, YANG Zhifeng, DAI Jing, QI Jing, SU Meirong, LIU Gengyuan

State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: This paper presents an energy-based accounting for the whole production chain of biodiesel made from *Jatropha Curcas* L. (JCL) oil combined with material flow analysis. The total demand and output method which considers renewable resources, nonrenewable resources and purchased resources is employed to establish an energy indicator framework and evaluate the eco-efficiency and sustainability of the process including cropping, transportation, extraction, production and wastewater treatment. The results show that energy yield ratio (EYR) is 1.85, environmental load ratio (ELR) is 6.84, and the energy sustainability index (ESI) is 0.271. The results are also compared with those of the biodiesel made from soy oil and bioethanol made from wheat, indicating that the biodiesel production process with JCL oil as raw materials is associated with higher yield, dependences on the environment, and sustainable level, which may be more suitable to be developed.

Key Words: energy; *Jatropha curcas* L. oil; biodiesel

生物柴油可以作为应对全球石油危机的能源储备。且本身因为其可生物降解、无毒、燃烧排放方面的优势, 是一种较为清洁的可再生能源。目前, 多数国家是以油料作物或废油为原料生产生物柴油来作为矿物柴油的替代品。从进口食用油国情的角度而言, 以大豆等农产品生产生物柴油在我国不经济, 而发展以非食用的木本油料树种为原料的生物柴油更加符合我国的实际情况^[1-2]。

麻风树(*Jatropha curcas* L., JCL)在我国具备大力发展的自然条件, 且有耐干旱瘠薄、病虫害少、丰产性好、雌雄同株、种子含油率达 40% 以上、生物柴油转化率高等优点^[3]。所以, 麻风果油是我国发展生物柴油的

基金项目: 教育部新世纪优秀人才计划基金(NCET-09-0226); 国家自然科学基金资助项目(40701023, 40871056, 40901269); 国家科技部重大基础研究计划资助项目(2005CB724204)

收稿日期: 2009-09-26; 修订日期: 2009-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenb@bnu.edu.cn

优势原料资源^[4]。2008年6月,国家发展改革委员会核准了3个以麻风果油为原料的“油林一体化”生物柴油国家示范项目,标志着我国麻风树生物柴油正式走向了产业化应用。可以看出,一方面,以麻风果油为原料的生物柴油作为一种可再生能源正在迅速发展。另一方面,相应的过程管理和发展规划缺少量化研究和科学依据。因此,对其整个生产过程进行系统评价就显得十分必要。

美国生态学家H. T. Odum在20世纪70年代提出能值理念,为衡量和比较不同类别、不同等级层次上的能量动态提供了理论和方法基础,使传统的能量分析面临的不同能量的可加性和可比性问题得到解决。能值评价这一方法在湿地生态系统^[5]、农业生态系统^[6-7]、工业生产生态系统^[8]和区域生态系统^[9-10]都得到了广泛的应用。在生物能源的评价方面,Sciubba和Ulgati用exergy和能值两种评价方法对玉米生产生物乙醇的整个生命周期过程做了比较研究^[11]。Haas等人也用能值分析方法对以大豆油为原料的生物柴油生产全过程进行了评价^[12]。曹凯和冯霄对以大豆油为原料的生物柴油酯化过程进行了能值研究^[13]。刘圣等人建立能值指标体系对以菜籽油为原料的生物柴油生产体系进行了评价研究^[14]。董孝斌和Ulgati等人对以河南省小麦为原料的生物乙醇的整个生命周期过程进行了能值评价^[15]。目前对生物柴油的生命周期过程进行能值评价的研究仍然较少,需要进一步研究。

本文主要应用能值分析方法对以麻风果油为原料的生物柴油生产全过程包括麻风树的种植、麻风果实的运输、麻风果油的榨取、果油酯化阶段四个过程以及产生的废水进行了评价,并与大豆油为原料的生物柴油、小麦为原料的生物乙醇全过程进行了比较。

1 研究方法

1.1 能值分析方法

能值是一种产品或劳务形成过程中所需要总投入的能量^[16]。在实际应用中,一般用太阳能值作为统一标准来衡量某一能量的能值,其单位为太阳能焦耳(Solar emjoules, 缩写sej)。太阳能值转换率是指形成单位产品或劳务所需要的太阳能值,单位为sej/unit,也是衡量能量质量的尺度,体现了包括人类劳动在内的一切含能物质的能量等级^[17]。

以麻风果油为原料生产生物柴油的整个生产过程中能值输入按来源可以分为两大类:第一类是直接来源于自然界,包括可更新自然资源(R ,主要由太阳能、风能、雨水化学能、地热等构成。由于太阳能、风能、雨水化学能均是源自同一过程的复合产物,在归并中仅计入其中的最大项,以避免重复计算)和不可更新自然资源(N ,如表土层损失)。另一类资源来源于社会经济系统,具体指购入的资源(F),主要包括化学物品、肥料、种子、燃料、劳动力等从外界购入的资源。系统最终输出能值包括主产品生物柴油、副产品甘油的输出,以及系统内部运行时产生的不能再被系统利用的无效能输出。能值总量(U)作为整个生产过程所拥有的“财富”,是系统自身具有的可更新、不可更新自然资源能值和系统购买资源、服务能值之和。

1.2 基于能值的评价指标体系

在已有能值评价指标体系的基础上,选取了评价该系统的部分能值指标,包括能值转换率(Transformity, Tr)、能值产出率(Energy yield ratio, EYR)、环境负载率(Environmental loading ratio, ELR)和可持续发展指数(Environmental sustainability index, ESI)。能值转换率, $EYR = (R + N + F)/O$ (O 指最终输出的产品量),是评价单位产品产出需要投入的能值(包括可更新和不可更新),该指标评价了从最初原材料到最终产品整个产业链过程的转换效率。能值产出率, $EYR = (R + N + F)/F$,是衡量系统运行效率的一种标准,该比值越高,表明系统在相同经济能值投入的情况下,系统的产出能值越大、运行效率越高。环境负载率, $ELR = (N + F)/R$,是对经济系统的一种警示,若系统长期处于较高的环境负载率,将产生不可逆转的功能退化或丧失。可持续发展指数, $ESI = EYR/ELR$,是对能值产出率与环境负载率的相对比较。如果一个国家或地区的经济系统能值产出率高而环境负载率又相对较低,则它是可持续的,反之是不可持续的。

1.3 生物柴油生产过程概述

在研究生物柴油生产全过程时,研究背景、目标、区域范围、生产工艺的选取都是十分关键的因素^[12]。鉴

于中国以麻风果油为原料生产生物柴油这一产业起步较晚,数据不全等原因,本文研究对象的部分原始数据来自 Gour 和 Biswas 的研究结果^[18-19],酯化阶段的部分数据(劳动力和装置折旧)来自于 Haas 关于生物柴油转酯化过程的研究^[12],自然资源的数据则参照适合麻风树生长的四川省的情况(川长江造林局和四川大学等单位于 2006 年 12 月已经在四川攀西地区投资建设麻风果油能源林示范基地和炼油厂)。另外,在种植阶段,鉴于麻风树本生的耐旱性(需水少)和有毒性(病害虫少),且人工灌溉和农药方面的数据难以获取,所以本文不考虑人工灌溉和农药投入。

整个研究过程中,生物柴油作为该部门最终的产品输出,所以产业主要的评价过程包括麻风树的种植、麻风果实的运输、麻风果油的榨取、果油酯化阶段这 4 个主要过程以及污水排放过程,其能值流图如图 1 所示(其中,假设果油的榨取和生物柴油的生产在同一个地方完成)。另外,麻风树一般 3a 试果、4a 挂果、5—6a 盛果^[20],前期产出时间较长,但之后 30a 内都可以产果。因此,本研究以成熟阶段、1hm² 土地、麻风树 1a 产果实为功能研究单位。

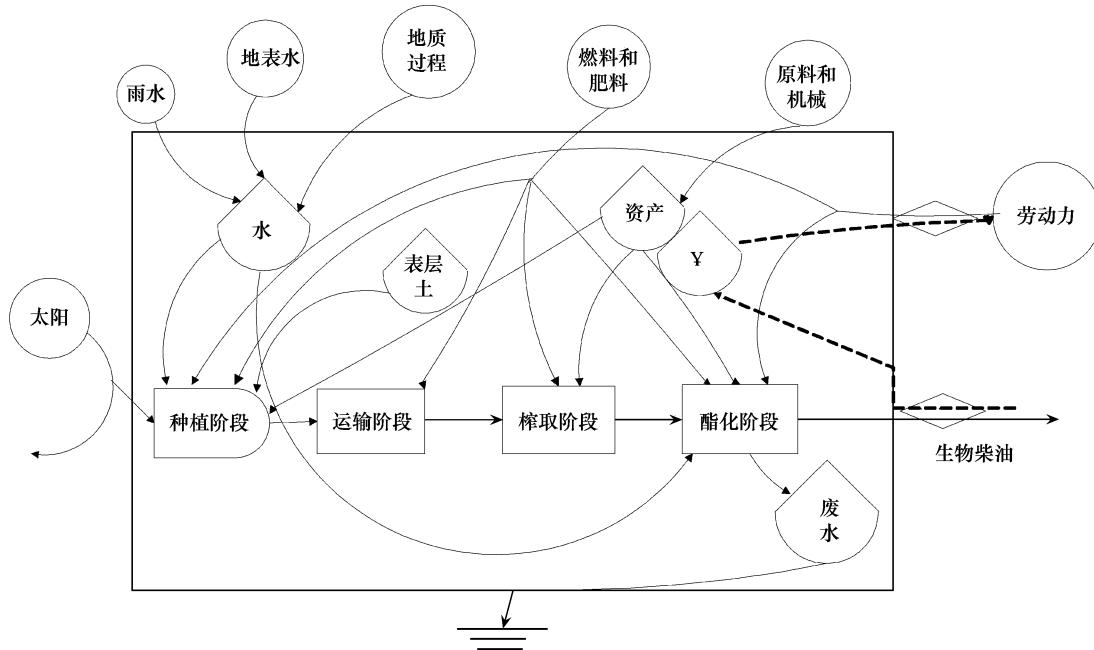


图 1 生物柴油生产过程能值简图
Fig. 1 Bio-diesel system flow diagram

成熟期,麻风树年平均产麻风果实 $5\text{t}/\text{hm}^2$ 。取麻风果实的含油率为 40%,风干的产出率为 75% (收获的种子需要自然风干),压榨阶段出油率 80%,所以 5t 的麻风果实经压榨后可以得到 1t 的麻风果油,3.75t 的油饼。最后经过酯化阶段,这 1t 的麻风果油可以得到主产品生物柴油 950kg、副产品甘油 110kg^[18]。

1.3.1 种植阶段

野生的麻风树在自然条件下就能很好的生长,但是在大规模人工种植环境下,适当的施加化肥可以增加麻风果实的产量。成熟阶段一般每 6 个月按 40:100:40kg/hm² 的比例施用氮肥、磷肥、钾肥来增加产量^[18]。另外,一般采用人工采摘方式收获麻风果实,因此该阶段能值的投入还包括大量的劳动力(表 1)。

1.3.2 运输阶段

假设麻风果实在高速公路上用柴油车运输,平均的运输距离为 300km,柴油的消耗强度平均为 $0.05\text{L}/(\text{t}\cdot\text{km})$ ^[28]。取柴油的密度为 0.83kg/L ,高热值为 $4.45 \times 10^7\text{J/kg}$ (表 2)。

1.3.3 压榨阶段

收获得到的麻风果实需要用压榨机将果实中的油提取出来。压榨机的种类繁多,如人力压榨机,机械压

榨机等。前者在家庭作坊用得较多,此处选取的是适于工业化使用的 Sundhara Press 压榨机^[29]。该装置每小时可压榨 70kg 麻风果实,同时耗费柴油大约 1L(表 3)。

表 1 种植阶段全过程能值评价
Table 1 Emergy evaluation table for the whole process in cropping process

项目 Item	数据 Data	太阳能值转换率 Transformity /(sej/unit)	太阳能值 Emergy/sej	总计 Total/sej
R 太阳辐射 Sunlight ^① /(J/(hm ² ·a))	3.62×10^{13}	1 ^[21]	3.62×10^{13}	
R 雨水 Rain ^② /(J/(hm ² ·a))	4.68×10^{10}	3.06×10^4 ^[21]	1.43×10^{15}	
R 地热 Deep heat ^③ /(J/(hm ² ·a))	5.46×10^{10}	1.02×10^4 ^[21]	5.57×10^{14}	
N 土壤流失 Soil loss ^④ /(J/(hm ² ·a))	4.25×10^{10}	1.24×10^5 ^[22]	5.27×10^{15}	1.43×10^{16}
F 种子 Seeds ^⑤ /(J/(hm ² ·a))	4.15×10^7	7.91×10^4 ^[16]	3.28×10^{12}	(90.06%)
F 氮肥 N ^⑥ /(g/(hm ² ·a))	8.00×10^4	6.83×10^9 ^[21]	5.46×10^{14}	
F 磷肥 P ^⑦ /(g/(hm ² ·a))	2.00×10^5	6.55×10^9 ^[21]	1.31×10^{15}	
F 钾肥 K ^⑧ /(g/(hm ² ·a))	8.00×10^4	1.85×10^9 ^[21]	1.48×10^{14}	
F 劳动力及其他成本 Labor and others ^⑨ /(\$(/ (hm ² ·a))	4.22×10^2	1.18×10^{13} ^[23]	4.98×10^{15}	

① 太阳辐射, 3.62×10^{13} J/(hm²·a)(四川年平均太阳辐射总量)^[24]

② 雨水化学能 = 0.947m(四川年平均降水)^[24] × 10000 m² × 1 × 10⁶ g/m³ × 4.94J/g = 4.68×10^{10} J/(hm²·a)

③ 地热: 5.46×10^{10} J/(hm²·a)(四川盆地平均水平)^[25]

④ 表层土壤有机物流失 = $87.54t/(hm^2 \cdot a)$ ^[26] (土壤流失) × 0.02146^[27] (四川平均有机物含量百分比) × 5.4kcal/g × 4186J/kcal = 4.25×10^{10} J/(hm²·a)

⑤ 一次性投入种子 = $20000g/mu \times 15$ (每公顷土地需要种子量) × 5.53×10^3 J/g^[16] = 1.659×10^9 J/hm²。将其平分到整个生长成熟期 40a, 则每年 4.15×10^7 J/(hm²·a)

⑥ 化肥的使用量^[18]

⑦ 劳动力及其他成本^[18], 主要包括种植阶段的机械、耕种、管理费用: Rs. 20000/hm² × 0.5(中国和印度劳动力成本的差别) × 0.0211(汇率) = 4.22×10^2 \$(/ (hm²·a))

表 2 运输阶段全过程能值评价

Table 2 Emergy evaluation table for the whole process in transport process

项目 Items	数据 Data	单位 Unit	太阳能值转换率 Transformity/(sej/unit)	太阳能值 Emergy/sej	总计 Total/sej
F 燃料 Fuel ^①	2.77×10^9	J/hm ²	1.11×10^5	3.07×10^{14}	3.07×10^{14}

运输阶段耗费的燃油: $300km$ (平均运输距离) × $0.05L/(t \cdot km)$ ^[28] × $0.83kg/L$ (密度) × 4.45×10^7 J/kg = 5.54×10^8 J/t × 5.54×10^8 J/t × $5t/hm^2$ = 2.77×10^9 J/hm²

表 3 压榨阶段全过程能值评价

Table 3 Emergy evaluation table for the whole process in extraction process

项目 Items	数据 Data	单位 Unit	太阳能值转换率 Transformity /(sej/unit)	太阳能值 Emergy/sej	总计 Total/sej
F 装置折旧 Depreciation ^①	27.45	\$/(hm ² ·a)	1.18×10^{13} ^[23]	3.24×10^{14}	6.17×10^{14}
F 燃料 Fuel ^②	2.64×10^9	J/(hm ² ·a)	1.11×10^5 ^[21]	2.93×10^{14}	

① 采用的是压榨机的数据^[29], 一次性投入 8000 \$, 以 10 年寿命折旧。该装置每小时可压榨 70kg 麻风果实, 1a 按 $8 \times 5 \times 52h$ 计算, 1a 可压榨果实 1456t。所以平均折旧为 $5.49 \$/(t \cdot a)$ 。 5.49×5 (每公顷土地平均产 5t 麻风果实) = $27.45 \$/(hm^2 \cdot a)$

② 压榨阶段: $1L/h$ ^[29] × $0.83kg/L$ (密度) × 4.45×10^7 J/kg = 3.69×10^7 J/h, 3.69×10^7 J/h ÷ $70kg/h$ = 5.27×10^5 J/kg, 5.27×10^5 J/kg × $5000kg/hm^2$ = 2.64×10^9 J/hm²

1.3.4 酯化阶段

最常见的生产生物柴油的工艺是转酯化,也就是在催化剂的作用下,植物油脂或游离脂肪酸与醇类生成

脂肪酸烷基酯(生物柴油的主要成分)和甘油。生物柴油是该过程的主产品,甘油是副产品。该反应过程中需要大量的醇类,一般选用甲醇(价格低廉),催化剂为碱性的氢氧化物(此处选氢氧化钠)。酯化过程中,每100g 麻风原油需要消耗12g 甲醇,1g 氢氧化钠^[19]。在劳动力和置折旧方面,该酯化过程和Haas年研究的生物柴油酯化过程类似,所以其数据参考了Haas的研究(表4)。

表4 酯化阶段全过程能值评价
Table 4 Emergy evaluation table for the whole process in industrial process

项目 Items	数据 Data	太阳能值转换率 Transformity /(sej/unit)	太阳能值 Emergy/sej	总计 Total /sej
R 水 Water ^① /(J/(hm ² ·a))	1.63×10^5	6.89×10^4 ^[22]	1.12×10^{10}	
F 甲醇 Methanol ^② /(g/hm ²)	1.2×10^5	1.76×10^9 ^[21]	2.11×10^{14}	
F 氢氧化钠 Sodium hydroxide ^③ /(g/hm ²)	1×10^4	6.38×10^9 ^[21]	6.38×10^{13}	
F 天然气 Natural gas ^④ /(m ³ /hm ²)	5.65×10^{-2}	1.71×10^{12} ^[30]	9.66×10^{10}	6.52×10^{14}
F 电 Electricity ^⑤ /(J/hm ²)	8.30×10^8	3.36×10^5 ^[21]	2.79×10^{14}	
F 装置折旧 Depreciation of capital cost ^⑥ /(\$/hm ²)	6.28	1.18×10^{13} ^[23]	7.41×10^{13}	
F 劳动力 Labor ^⑦ /(\$/hm ²)	0.585	1.18×10^{13} ^[23]	6.90×10^{12}	
F 废水 Wastewater ^⑧ /(\$/hm ²)	1.49	1.18×10^{13} ^[23]	1.76×10^{13}	

① 酯化阶段的耗水量为 $0.033 \text{ g/g}^{[12]}$, $0.033 \text{ g/g} \times 1 \times 10^6 \text{ g/hm}^2$ (每公顷土地平均产麻风果油1t,即 $1 \times 10^6 \text{ g/hm}^2$) = $3.3 \times 10^4 \text{ g/hm}^2$ 。
 $3 \times 10^4 \text{ g/hm}^2 \times 4.94 \text{ J/g} = 1.63 \times 10^5 \text{ J/hm}^2$

② 酯化阶段参加反应的主要物质甲醇的消耗量是 $0.12 \text{ g/g}^{[19]}$, $0.12 \text{ g/g} \times 1 \times 10^6 \text{ g/hm}^2 = 1.2 \times 10^5 \text{ g/hm}^2$

催化剂氢氧化钠的用量是 $0.01 \text{ g/g}^{[19]}$, $0.01 \text{ g/g} \times 1 \times 10^6 \text{ g/hm}^2 = 1 \times 10^4 \text{ g/hm}^2$

③ 酯化阶段的能源消耗^[12]。天然气的用量是 $5.65 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{g}$, $5.65 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{g} \times 1 \times 10^6 \text{ g/hm}^2 = 5.65 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{hm}^2$

电的用量是 $8.30 \times 10^2 \text{ J/g}$, $8.30 \times 10^2 \text{ J/g} \times 1 \times 10^6 \text{ g/hm}^2 = 8.30 \times 10^8 \text{ J/hm}^2$

④ 装置折旧的费用是 $6.28 \times 10^{-6} \text{ $/g}^{[12]}$, $6.28 \times 10^{-6} \text{ $/g} \times 1 \times 10^6 \text{ g/hm}^2 = 6.28 \text{ $/hm}^2$

劳动力的费用是 $1.54 \times 10^{-5} \text{ $/g}^{[12]} \times 3.8\%$ (中国与美国劳动力成本的差别) = 5.85×10^{-7} , $5.85 \times 10^{-7} \text{ $/g} \times 1 \times 10^6 \text{ g/hm}^2 = 0.585 \text{ $/hm}^2$

⑤ 废水处理的费用是 $1.49 \times 10^{-6} \text{ $/g}^{[12]}$, $1.49 \times 10^{-6} \text{ $/g} \times 1 \times 10^6 \text{ g/hm}^2 = 1.49 \text{ $/hm}^2$

2 结果分析

2.1 能值流分析

整个生产过程中能值流所占百分比如图2所示。可以看出,4个阶段中种植阶段所需投入的能值最多(包括可更新资源和不可更新资源)。因为种植阶段收获麻风果实时基本全依赖人工采摘,占种植阶段的34.83%;表土层土壤投入也较大,占种植阶段的36.85%。

2.2 能值指标分析

麻风果油-生物柴油全生产过程的能值指标值见表5。其能值转换率是 $1.67 \times 10^{13} \text{ sej/kg}$,能值产出率是1.85,环境负载率是6.84,可持续发展指数是0.271。

与以大豆油为原料的生物柴油^[31]、小麦为原料生物乙醇^[15]的比较可以看出,麻风果油能值转换率大约是大豆油的3倍、生物乙醇的2倍,说明单位麻风生物柴油的产出需要输入更多的能值。相同经济能值的投入,麻风果油的能值产出率为1.85,略高于大豆油(1.22)和生物乙醇(1.24),但同时麻风果油对当地环境的依赖程度更强。三者的可持续发展指数相差不大。

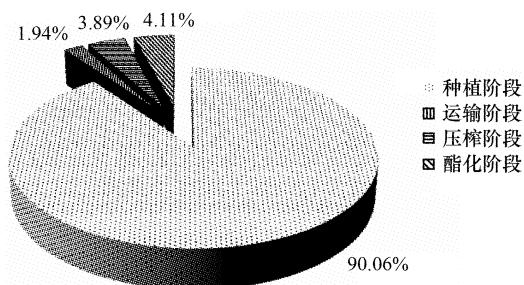


图2 各阶段投入能值百分比
Fig.2 Percentages of energy for each stage in biodiesel process

3 结论

(1) 能值本身属于一种体现能, 记录了过程中各种能量的来源和转换, 所以能值理论方法本身就有适用于过程评价的优势, 可以满足麻风果油生物柴油全过程的分析评价要求。针对生物柴油生产系统的特点, 进行生命周期全过程能值的输入输出评价, 对生物柴油的过程管理和发展规划的量化研究有直接的意义。

表5 生物柴油-麻风果油能值分析指标(与大豆生物柴油、生物乙醇的比较)

Table 5 The indices of the biodiesel made from Jatropha Curcas oil (Compared to soy oil and bioethanol)

能值指标 Emergy indices	能值转换率 $Tr/(sej/kg)$	能值产出率 EYR	环境负载率 ELR	可持续发展指数 ESI
以麻风果油为原料 JCL oil	1.67×10^{13} ^①	1.85 ^②	6.84 ^③	0.271 ^④
以大豆油为原料 Soy oil	5.78×10^{12}	1.22	4.56	0.268
生物乙醇 Bioethanol	8.26×10^{12}	1.24	4.05	0.31

① $EYR = (R + N + F)/O = 1.67 \times 10^{13} sej/kg$; ② $EYR = (R + N + F)/F = 1.85$; ③ $ELR = (N + F)/R = 6.84$; ④ $ESI = EYR/ELR = 0.271$

(2) 与其他评价方法相比, 本文应用能值评价方法, 综合考虑了全过程中太阳、雨水、地热、土壤等自然资源和劳动力的价值, 反映自然、劳务的作用和贡献, 对整个生命周期物质输入的评价更为全面。而且以太阳能值度量各种能量的价值, 建立统一的能值指标体系, 使得评价结果建立在太阳能值为共同标准的基础上, 与其他生产过程具有可比性。

(3) 从全过程的能值流可以看出, 压榨阶段和酯化阶段投入能值占的比例较小。种植阶段最大, 是这两个阶段的10倍左右, 其中土壤流失和人工采摘占的比例较大。表土层土壤的能值转化率是综合考虑土壤整个形成阶段的能值投入, 而不是土壤能提供的服务^[32]。土壤的形成过程复杂, 需要植物、微生物、气候、水等的辅助, 形成时间也很长, 所以土壤的能值转换率相对较高。且土壤本身也是种植阶段的主要投入资源, 所以在麻风树种植过程的能值分析中, 土壤占了较大的比例。人工采摘需要投入大量的劳动力, 中国特别是四川等西部地区的剩余劳动力较多, 所以人工采摘模式比较适合中国当下的国情, 但这也反映出中国传统农业的弱势—机械化水平低, 竞争力不强。另外, 运输阶段投入能值占的比例最小, 但本文中的运输距离采用的是平均距离, 实际因运输距离的不确定性, 这一阶段能值的投入存在较大的变动。

(4) 能值评价方法下, 麻风果油生物柴油、大豆油生物柴油和生物乙醇的能值产出率、环境负载率、可持续发展指数的数值都相差不大, 在一个数量级, 说明三者在投入产出、对环境的影响方面相差不大。但是我国需要进口粮油, 以大豆和小麦为原料不是很经济, 而麻风果油正好弥补大豆和小麦的这一缺陷。所以从原料的非食用性的角度, 麻风生物柴油更具优势, 有一定的发展潜力。

致谢: 感谢北京师范大学环境学院姜昧茗博士对本文写作的帮助。

References:

- [1] Ma Z, Zhu W, Wei Q. Advances in the researches of biodiesel from woody oil-bearing plants. Journal of Northwest Forestry Science, 2007, 22(6): 125-130.
- [2] Xiong J, Song W, Ye J. Research development in reducing production cost of biodiesel. Chemical Industry and Engineering Progress, 2007, 26(6): 774-777.
- [3] Winayanuwattikun P, Kaewpiboon C, Piryakananon K, Tantong S, Thakernarkit W, Chulalaksananukul W, Yongvanich T. Potential plant oil feedstock for lipase-catalyzed biodiesel production in Thailand. Biomass & Bioenergy, 2008, 32(12): 1279-1286.
- [4] Yang G J, Guo W J. A review on the biodiesel made from Jatropha oil in China. China Petroleum and Chemical Industry, 2009(2): 22-25.
- [5] Brown M T, Mcclanahan T R. Energy analysis perspectives of Thailand and Mekong River Dam. Ecological Modeling, 1996, 91(1/3): 105-130.
- [6] Lu H F, Peng S L, Lan S F, Chen F P. Emergy evaluation of dike-pond agro-ecological engineering modes. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(10): 1622-1626.
- [7] Xi Y G, Qin P. Emergy value evaluation on rice-duck organic farming mode. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(2): 237-242.
- [8] Lu H F, Chen F P, Ren H, Peng S L. Emergy synthesis method for multi-scale of industrial ecosystem. Ecology and Environment, 2006, 15(2): 411-415.
- [9] Yan M C. The New Theory of Ecological Economic. Beijing: China Zhigong Press, 2001: 222-258.

- [10] Higgins J B. Energy analysis of the Oak Openings region. *Ecological Engineering*, 2003, 21(1): 75-109.
- [11] Sciubba E, Ulgiati S. Energy and exergy analysis: complementary methods or irreducible ideological options. *Energy*, 2005, 30: 1953-1988.
- [12] Haas M J, Mcalloon A J. A process model to estimate biodiesel production costs. *Bioresource Technology*, 2006, 97(4): 671-678.
- [13] Cao K, Feng X. The energy analysis of multi-product systems. *Institution Chemical Engineers, Part B, Process Safety and Environmental Protection*, 2007, 85(B5): 494-500.
- [14] Liu S, Sun D L, Wan S W, Ding G H, Qin P. Energy evaluation of a kind of biodiesel production system and construction of new energy indices. *Journal of Nanjing University(Natural Science)*, 2007, 43(2): 111-118.
- [15] Dong X B, Ulgiati S, Yan M C, Zhang X S, Gao W S. Energy and exergy evaluation of bioethanol production from wheat in Henan Province, China. *Energy Policy*, 2008, 36(10): 3882-3892.
- [16] Odum H T. Self-organization, transformity, and information. *Science*, 1988, 242: 1132-1139.
- [17] Lan S F, Qin P, Lu H F. *Energy Analysis of Eco-economic System*. Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 3-7.
- [18] Gour V K. Production practices including post harvest management of Jatropha Curcas// Hyderabad. *Biodiesel Conference towards Energy-focus on Jatropha*. New Delhi: Rashtrapati Bhawan, 2006: 223-251.
- [19] Biswas S, Kaushik N, Srikanth G. Biodiesel: technology and business opportunities-an insight // Hyderabad eds. *Biodiesel Conference towards Energy-focus on Jatropha*. New Delhi: Rashtrapati Bhawan, 2006: 303-330.
- [20] Fei S M, Chen X M, He Y P. Prospects of studies on Jatropha Curcas biodiesel in Sichuan. *Biomass Chemical Engineering*, 2006(S1): 193-199.
- [21] Odum H T. *Environmental Accounting: Energy and Environmental Decision Making*. New York: Wiley, 1996: 304.
- [22] Brown M T, Arding J. *Transformities Working Paper*, Center for Wetlands. Gainesville FL: University of Florida, 1991. [2009-9-9] <http://www.emergysystems.org>.
- [23] UFL. University of Florida Database of Energy Analysis of Nations (2007). [2009-9-9]. http://sahel.ees.ufl.edu/database_resources.php?search_type= basic&country= CHN.
- [24] Cheng H. *Hand Book of Natural Resource in China*. Beijing: Science Press, 1990: 545-569.
- [25] Chen M X, Wang J Y, Deng X. *Geothermal Resources in China-Formation Characteristics and Potential Evaluation*. Beijing: Science Press, 1994: 33-36.
- [26] Wang L H. Situation of soil erosion and its type partition in Sichuan Province. *Sichuan Water Conservancy*, 2003, 24(2): 2-6.
- [27] Ye D X, Li K. Analysis of the variation of soil nutrient contents and soil PH in Sichuan Province. *Southwest China Journal of Agriculture Science*, 2003(S1): 101-107.
- [28] Yang Q, Chen B, Ji X, He Y F, Chen G Q. Exergetic evaluation of corn-ethanol production in China. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2009, 14(5): 2450-2461.
- [29] Wiemer H J. An integrated approach of combating desertification by producing fuel oil from Jatropha plants. *Financial and Economic Analysis of the Jatropha System*. [2009-8-25] http://www.jatropha.de/documents/Wiemer-Mali_Jan1996.pdf.
- [30] Wang L, Ni W, Li Z. Energy evaluation of combined heat and power plant eco-industrial park (CHP plant EIP). *Resources, Conservation and Recycling*, 2006, 48: 56-70.
- [31] Carraretto C, Macor A, Mirandola A, Stoppato A, Tonon S. Biodiesel as alternative fuel: experimental analysis and energetic valuations. *Energy*, 2004, 29(12/15): 2195-2211.
- [32] Cohen M J, Brown M T, Shepherd K D. Estimating the environmental costs of soil erosion at multiple scales in Kenya using energy synthesis. *Agriculture Ecosystems&Environment*, 2006, 114: 249-269.

参考文献:

- [1] 马蓁, 朱伟, 尉芹. 木本油料生产生物柴油研究. *西北林学院学报*, 2007, 22(6): 125-130.
- [2] 熊健, 宋炜, 叶君. 降低生物柴油生产成本的研究进展. *化工进展*, 2007, 26(6): 774-777.
- [4] 阳国军, 郭卫军. 我国麻风子油制备生物柴油的进展与思考. *中国石化*, 2009(02): 22-25.
- [6] 陆宏芳, 彭少麟, 蓝盛芳, 陈飞鹏. 基塘农业生态工程模式的能值评估. *应用生态学报*, 2003, 14(10): 1622-1626.
- [7] 席运官, 钦佩. 稻鸭共作有机农业模式的能值评估. *应用生态学报*, 2006, 17(2): 237-242.
- [8] 陆宏芳, 陈飞鹏, 任海, 彭少麟. 产业生态系统多尺度能值整合评价方法. *生态环境*, 2006, 15(2): 411-415.
- [9] 严茂超. 生态经济学新论:理论、方法与应用. 北京: 中国致公出版社, 2001: 222-258.
- [14] 刘圣, 孙东林, 万树文, 丁公辉, 钦佩. 一种生物柴油生产体系的能值分析及新能值指标的构建. *南京大学学报(自然科学)*, 2007, 43(2): 111-118.
- [17] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析. 北京: 化学工业出版社, 2002: 3-7.
- [20] 费世民, 陈秀明, 何亚平. 四川麻疯树生物柴油研究展望. *生物质化学工程*, 2006(S1): 193-199.
- [24] 程鸿. 中国自然资源手册. 北京: 科学出版社, 1990: 545-569.
- [25] 陈墨香, 汪集旸, 邓孝. 中国地热资源——形成特点和潜力评估. 北京: 科学出版社, 1994: 33-36.
- [26] 王丽槐. 四川水土流失状况与类型分区. *四川水利*, 2003, 24(2): 2-6.
- [27] 叶德宪, 李昆. 四川土壤养分及酸碱性变化趋势分析. *西南农业学报*, 2003(S1): 101-107.