

文章编号:1004-8227(2011)01-0061-07

麻疯树种子油生命周期的经济、环境与能量效率

王赞信, 卢 英

(云南大学发展研究院, 云南 昆明 650091)

摘要:要成为化石能源的有效替代品,生物燃料必须能提供净能量收益,能产生环境效益,具有经济效率,且在大量生产的情况下不引起粮食危机。麻疯树作为第二代生物柴油的重要原料作物,在国内得到大力推广,但实际效率尚不清楚。基于将麻疯树种子油与化石柴油直接混合使用的技术选择,利用生命周期评估法分析了麻疯树种子油生命周期的经济、环境和能量效率。结果表明:(1)在当前产量和生产技术水平下,生产和使用麻疯树种子油的财务净现值为负,要促进麻疯树种子油的生产,需要每年为种子生产者提供 881.7 元/hm² 以上的补贴,为榨油厂商提供 2.68 元/L 的补贴;(2)生产和使用每升麻疯树种子油可减少约 13 kgCO₂ 当量的温室气体排放,固碳价值为补贴生产提供了部分经济依据,但是仅考虑种子油和固碳的价值时,生产和使用麻疯树种子油尚不具有经济可行性;(3)当仅考虑种子油的能量产出时,只有当种子产量达到 795 kg/hm² 以上才具有能量效率;当把树枝和果壳等所包含的生物质能计算在内时,在较低种子产量的情况下,也具有显著的能量效率。敏感性分析表明,随着麻疯树种子产量的增加,财务净现值趋于下降,但是种子油的成本下降,减排温室气体的贡献和能量效率都增加。最后,基于麻疯树种子油的生命周期分析,提出了提高经济、环境和能量效率的途径。

关键词:麻疯树种子油;生命周期分析;激励政策;第二代生物柴油;碳平衡;能量效率
文献标识码:A

生物质能源由于其可再生、可降解、无毒和环境友好的特性被看作是化石能源的理想替代品,开发生物质能源有利于降低对石油的依赖、改善环境和减少温室气体(GHG)排放量,并被当作促进农村发展和增加就业的途径^[1,2]。在中国,发展生物燃料被看作缓解石油稀缺性压力和实现可持续发展的一个重要手段。2006年,国家发改委制定了到2020年15%的交通能源使用生物燃料的目标^[3]。

由于大量生产以农作物为原料的第一代生物燃料会影响到粮食安全^[4,5],而以非农作物为原料的第二代生物燃料不会危及粮食安全且比第一代生物燃料更利于改善环境。为了实现生物燃料的可持续发展,从以粮食作物为原料的第一代生物燃料转向“不与人争粮,不与粮争地”的第二代生物燃料已是大势所趋^[1,6]。在我国,《可再生能源发展“十一五”规划》明确表示:要控制第一代生物燃料的生产规模,鼓励生产以非粮生物质为原料的第二代生物燃料。

在热带与亚热带地区,麻疯树(*Jatropha curcas* L.)因含油量高且不影响到粮食安全而成为发展第

二代生物柴油的重点原料作物^[7]。麻疯树属于大戟科(Euphorbiaceae)的灌木或小乔木,广泛分布于热带及亚热带地区,包括中美、南美、东南亚、印度和非洲等地,其原产地可能是中美洲和墨西哥^[8]。麻疯树被引种到我国已有300多a的历史,分布于云南、四川、贵州、广东、广西、海南、福建和台湾等地,在云南、贵州和四川3省数量尤其多^[9]。麻疯树的种子产量因产地不同而相差很大。国外,Achten等^[10]对印度、马里、尼加拉瓜、巴拉圭、泰国和佛得角等地的产量进行了文献调查,结果表明麻疯树年种子产量为0.3~5 t/hm²,其中在马里有高达8 t/hm²的报道。但是,2007年3月在荷兰瓦格宁根召开的麻疯树会议上,专家认为5 t/hm²是种子产量的上限值,目前该产量还未经麻疯树种植者证实。特别是,当在荒山上种植且靠雨水浇灌的情况下,每棵麻疯树仅能生产1.00~1.25 kg种子^[11]。国内,在当前的生产技术水平下,麻疯树的种子产量为0.6~4.5 t/hm²^[12~14],麻疯树种子含油率一般为38%~41%^[15],种仁含油为49%~62%^[16]。目前西

收稿日期:2010-01-08;修回日期:2010-03-17

基金项目:加拿大国际发展研究中心(IDRC)东南亚经济与环境计划(EEPSEA)项目(003591-180);国家自然科学基金项目(71063024)

作者简介:王赞信(1973~),男,江西省大余人,副教授,博士,主要研究方向为自然资源与环境经济学。E-mail:wzxkm@hotmail.com

南 3 省和广西等地都在大力发展麻疯树生物燃料。

然而,要成为化石燃料的替代品,生物燃料必须能提供净能量、带来环境和经济效益,且大量生产时不减少粮食供应^[17]。生物燃料的生产与消费可能带来积极的环境影响,也可能带来消极的环境影响,结果取决于生产技术、地点和市场等特定的因素。例如, Farrell 等^[18]认为生产燃料酒精能为实现能源与环境目标做出贡献,但是 Crutzen 等^[19]认为,由于使用氮肥,使用生物柴油反而增加了 GHG 的排放; Pimental 与 Patzek^[20]发现用玉米生产燃料酒精的“净能量”为负值。

在大力发展生物柴油产业之前,有必要对生物柴油的经济、环境和能量效率进行系统的研究,从而避免不必要的风险,并为制定产业发展政策提供依据。本研究以目前国内大力发展的麻疯树生物柴油为研究对象,运用生命周期评估方法分析了开发麻疯树种子油的经济、环境与能量效率。

由于麻疯树种子油的粘度很高,易导致积碳、燃烧不充分和降低引擎使用寿命,不能直接用于引擎。但是,可将它与化石柴油混合使用,也可以加工成生物柴油后使用。通过化石柴油稀释,麻疯树种子油的粘度可被大大降低,含 30% (体积比) 种子油的混合油的粘度与化石柴油的粘度相近^[21]。特别是,含 2.6% 种子油的混合油能产生最大的制动力和制动热效率,耗油量最小,且能用做化石柴油着火加速剂的添加剂^[22]。本文以将麻疯树种子油与化石柴油混合使用的技术为基础进行分析。

1 研究方法与数据来源

采用的方法是生命周期评价法 (LCA), 利用能量守恒原理和物质不灭定律, 对产品生产和使用过程中的物质、能量的使用和消耗进行平衡计算^[23]。麻疯树种子油生命周期各阶段的投入和产出数据通过在云南实地调研、收集获得, 并经过误差分析及检验。化石柴油、燃煤、化学品等的生产能耗与排放数据来源于 GREET 模型^[24]及相关文献。

麻疯树种子油的生命周期包括生产种子、榨油、分销和使用 4 个阶段 (图 1), 根据对各个阶段的物质、能量的投入与产出的清单核算, 可评估出种子油生命周期的经济、环境和能量效率, 并确定提高这 3 种效率的途径。

研究的基础假设为: (1) 项目期为 30 a (麻疯树的寿命为 30~50a), 基本贴现率为 8%, 麻疯树种植

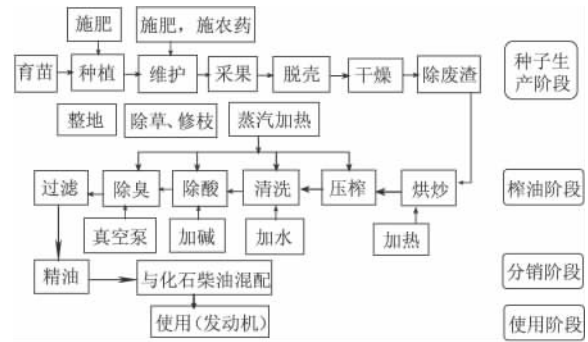


图 1 麻疯树种子油的生产链

Fig. 1 Production Chain of *Jatropha curcas* Oil

1 a 后能结果, 但产量低, 产出从第三年开始计算; (2) 麻疯树林的株间距为 $2\text{ m} \times 3\text{ m}$, 按 $1\ 650\text{ 株}/\text{hm}^2$ 计算; (3) 根据化石柴油与麻疯树种子油的平均热值和密度, 算得每升化石柴油的热值与 0.994 升麻疯树种子油的热值相当, 因而麻疯树种子油的价格被看作与化石柴油的市场价格相同, 即 $5.22\text{ 元}/\text{L}$; (4) 麻疯树林与榨油厂及化肥销售点之间的距离设为平均 20 km , 榨油厂与种子油分销点的距离设为平均 10 km , 车辆是运载能力为 3 t 的小卡车, 油罐车运载能力为 5 t ; (5) 麻疯树的果壳占全果重量的 $30\% \sim 40\%$, 种子占 $60\% \sim 70\%$, 分析中按果壳占果重的 40% , 种子占果重的 60% 计算。

1.1 财务分析

由两部分构成: 一是麻疯树种子油的整个生产过程由同一生产者完成情况下的全生产链财务分析; 二是在种子生产和榨油由不同生产者完成情况下的分阶段财务可行性。财务可行性的计算公式为:

$$FNPV = \sum_{n=0}^N \frac{P_n Q_n + \sum_{i=1}^4 \sum_{m=0}^M q_{im} p_{im} - \sum_{i=1}^4 C_{in}}{(1+r)^n} \quad (1)$$

式中: $FNPV$ 是生产和使用麻疯树种子油的财务净现值; P_n 为第 n 年的种子油价格; Q_n 为第 n 年的种子油产量; q_{im} 为第 n 年第 i 阶段第 m 种副产品的产量; p_{im} 是第 m 种副产品的价格; M 是在第 i 阶段副产品种类数; r 为贴现率。其中 C_{in} 是第 i 阶段第 n 年单位产品的生产成本, 其表达式为:

$$C_{in} = \sum_{j=1}^J Q_{ijn} P_{jn} + D_{in} + E_{in} \quad (2)$$

式中: Q_{ijn} 是第 n 年第 i 阶段生产单位产品的第 j 种投入; P_{jn} 是第 j 种投入的价格; J 是第 i 阶段总投入的种类数; D_{in} 为第 n 年第 i 阶段单位数量种子油所分摊的固定资产折旧; E_{in} 是第 n 年第 i 阶段的销售成本。

在公式(1)中,当只考虑某一个阶段时,可分析单一阶段的财务可行性并根据产品或其市场替代品的价格计算所需要的补贴率。

1.2 环境效率分析

在生物燃料生产链中,存在着诸多可能的环境影响,包括水土流失、固碳或 GHG 的排放、有毒气体和液体的排放等。尽管生物燃料被认为是解决环境问题(特别是气候变暖问题)的重要手段,生产和使用生物燃料的环境影响可能是积极的,也可能是消极的,结果取决于生产与使用方式^[18]。由于时间与经费的限制,本研究只考虑麻疯树生物柴油整个生产链的 GHG 排放和减排。生产和使用生物柴油对减少 GHG 排放的贡献用产品生命周期的二氧化碳当量(Carbon Dioxide Equivalent, CO_{2e})平衡来表示,即麻疯树种子油生产与使用过程中 CO_{2e}的总减排量与总排放量之差。显然,若生产过程中的 CO_{2e}排放量小于减排量,则使用和生产生物燃料对减缓全球变暖具有贡献。

麻疯树种子油的 CO_{2e}清单分析考虑了所有的投入和生产过程的 GHG 净排放量或净固碳量。GHG 的减排源于麻疯树人工林的固碳效应、用果壳替代煤和用种子油替代柴油的 GHG 减排效应。GHG 的排放源于运输种子、化肥与种子油,榨油及精炼,麻疯树人工林的维护(施肥、农药与除草剂)。所考虑的 GHG 包括 CH₄、N₂O 和 CO₂,根据各自的全球变暖效应,CH₄ 和 N₂O 被转化成为 CO_{2e}。当时间跨度为 100 a 时,CH₄ 和 N₂O 的全球变暖效应分别为 CO₂ 的 25 和 298 倍^[24]。

由于国家鼓励发展“不与人争粮,不与粮争地”的生物燃料,本研究考虑在植被稀少的荒山上种植麻疯树,因而忽略了因土地利用方式变化所造成的 GHG 排放。

另外,根据碳平衡和国内清洁生产机制(CDM)市场上的碳交易许可证(CER)价格,可估算出固碳效应的经济价值,并将结果纳入经济分析。

1.3 能量效率分析

只有当所生产的能量大于所投入的能量时,生产和使用生物燃料才具有能量效率。麻疯树种子油生命周期涉及到直接能量投入和间接能量投入。直接能量投入主要包括运输化肥、种子和种子油等所消耗的柴油,榨油及精炼过程消耗的煤与电。间接的能量投入源自生产过程中的各种非能源投入,例如化肥、杀虫剂、劳动力和生产设备等。由于缺乏相关的统计数据,没有考虑建设生产厂房和制造运输

车辆的耗能。能量产出包括目标产品(种子油)和副产品(除种子油的生物质)所包含的能量。

在分别考虑目标能源和全部生物质能时,能量效率分别根据公式(3)和(4)计算。

$$EE_1 = \frac{HV_{seed\ oil}}{HV_{energy\ input}} \quad (3)$$

$$EE_2 = \frac{HV_{seed\ oil} + HV_{by-products}}{HV_{energy\ input}} \quad (4)$$

式中:EE₁ 为单位数量种子油的热量值与总能量投入的热量值之比;HV_{seed oil} 是单位数量麻疯树种子油的热量值;HV_{energy input} 是生产单位数量种子油所消耗能量的总热量值,包括直接能量投入和间接能量投入;EE₂ 为包括种子油及副产品能量在内的总能量产出与总能量投入之比;HV_{by-products} 为与每升种子油相对应全部副产品的热量值。

2 结果

2.1 财务分析

2.1.1 全生产链财务分析

当麻疯树种子的生产与榨油由同一生产者完成时,财务可行性如表 1 所示。结果表明:在当前的生产技术与市场条件下,生产和使用麻疯树种子油不具有财务可行性。由于单位成本高于单位收入,随着种子产量的增加,总收入与总成本都增加,但是财务净现值逐渐下降。随着种子产量的增加,种子生产阶段的成本占总成本的比例逐渐下降。提高种子产量有利于降低麻疯树种子油的单位成本。另外,柴油价格的上升有利于缩小与种子油成本价之间的差距,从而增加财务净现值。可见,种子产量和柴油

表 1 生产麻疯树种子油的财务分析结果

Tab. 1 Results of Financial Analysis of *Jatropha curcas* Oil Production

年种子产量 (kg/hm ²)	297	891	1 485	2 079	2 673	3 267	3 861	4 455
总成本 (10 ⁴ 元/hm ²)	2.0	3.2	4.5	5.7	7.0	8.2	9.55	10.7
生产种子阶段 的成本(%)	94.3	89.5	87.4	86.2	85.4	84.9	84.5	84.2
榨油阶段的 成本(%)	5.7	10.5	12.6	13.8	14.6	15.1	15.5	15.8
种子油产量 (L/hm ²)	59.8	179.4	299.0	418.6	538.2	657.8	777.4	897.0
总收入 (10 ⁴ 元/hm ²)	0.5	1.6	2.6	3.7	4.7	5.8	6.8	7.9
净现值 (10 ⁴ 元/hm ²)	-1.5	-1.7	-1.9	-2.1	-2.3	-2.5	-2.7	-2.9
种子油成 本价(元/L)	19.8	10.7	8.9	8.1	7.7	7.4	7.3	7.1

注:年种子产量从 297 ~ 4 455 kg/hm² 分别对应年平均年产量数从 100 ~ 1 500 颗/树,按 200 颗/树递增,以下各表相同

的市场价格是决定生产和使用麻疯树种子油的财务可行性的主要因素。

若按每树每年结果 500 颗计算,只有当柴油价格水平涨到 8.9 元/L 时,才可能实现盈亏平衡;若要促进麻疯树种子油的生产,需要为生产者提供 3~5 元/L 的补贴。随着产量的提高,所需要的补贴逐渐下降,但是当产量达到每树每年结果 900 颗以上时,提高产量对降低单位成本的影响不大,可通过优化生产投入降低成本。

敏感性分析表明,净现值对贴现率和最终产品的价格敏感。净现值随贴现率的下降或最终产品价格的上升而增加。可见,低贴现率或化石柴油价格

上涨有利于生物柴油投资项目。

2.1.2 分阶段财务分析

在种子生产阶段,主要成本源于施肥、采果与干燥、剥果壳。按种子价 2 元/kg 计算,当种子产量从 297 增加到 4 455 kg/hm²,财务净现值依然小于或等于零。提高种子价格能增加财务净现值,但这势必增加加工阶段的成本。

财务净现值随着种子产量的增加而增加,提高种子产量有利于降低成本价。但是,在现阶段,要促进麻疯树生物柴油产业的发展,必须为生产者提供补贴。假定生产者的利润为 10%,不同产量与所需补贴之间的关系如表 2 所示。

表 2 麻疯种子生产阶段所需补贴

Tab. 2 Subsidies Required for the Production of *Jatropha curcas* Seeds

年种子产量(kg/hm ²)	297	891	1 485	2 079	2 673	3 267	3 861	4 455
种子成本价(元/kg)	6.2	3.2	2.6	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0
所需补贴(元/kg)	4.8	1.5	0.9	0.6	0.4	0.3	0.3	0.2
种植麻疯树每年所需补贴(元/hm ²)	1 438.1	1 358.6	1 279.1	1 199.6	1 120.1	1 040.7	961.2	881.7

当其它条件不变时,财务净现值随着贴现率的增加而下降,种子的成本价也随贴现率的增加而增加,这是因为当产量一定时,为了弥补因贴现率增加所带来的机会成本,需要提高种子的价格。

在榨油阶段,加工 1 t 种子的总成本为 2 361.81 元,主要成本源于购买种子,占总成本的 84.68%。若所生产种子油的价格为当前化石柴油价格,即 5.22 元/L,这个阶段的财务净现值为 -774.91 元/t。

实验表明,使用机械压榨法时,所得粗油占种子重量的 32.2%~40.2%,精炼后占 30.4%。根据加工的总成本及种子油的密度算得,麻疯树种子油的成本价格应为 7.11 元/L。若生产者的利润为 10%,麻疯树种子油的补贴应为 2.68 元/L。

2.2 环境效益分析

生产和使用麻疯树种子油对减少 GHG 的排放

具有积极的作用,即生产和使用麻疯树种子油的过程中,GHG 的减排量大于排放量,且这种作用随着麻疯树种子产量的增加而显著增强。表 3 表明,在年种子产量很低时(例如 297 kg/hm²),CO_{2e}平衡依然为正。

麻疯树种子油生命周期的 CO_{2e}平衡主要源于麻疯树人工林的固碳效应和用种子油替代化石柴油的减碳效应。比较而言,生产和使用麻疯树种子油过程中 GHG 的排放量很小,主要的 GHG 排放源自生产种子阶段所使用的化肥、杀虫剂和除草剂等化学品,其中包括生产这些化学品的间接 GHG 排放。其它生产活动所导致的 GHG 排放量较少,这主要原因是生产过程中的机械化程度很低,所消耗的化石燃料量较少。另外,本研究考虑在荒山种植麻疯树人工林的情况,由于荒山的植被稀疏,因土地利用方式改变所导致的 GHG 排放被忽略不计。

表 3 麻疯树种子油生命周期的环境效率

Tab. 3 Environmental Efficiency of Production of *Jatropha curcas* Oil

不同种子产量(kg/hm ²)下的 GHG 减排量与 CO _{2e} 平衡	297	891	1 485	2 079	2 673	3 267	3 861	4 455
人工林(10 ⁴ kg/hm ²)	2.5	7.4	12.4	17.3	22.3	27.3	32.2	37.2
以果壳代替煤(kg/hm ²)	66.8	200.3	333.9	467.4	601.0	734.7	868.1	1 001.7
用种子油替代柴油(10 ⁴ kg/hm ²)	0.9	2.6	4.3	6.0	7.7	9.4	11.1	12.8
榨油及精炼(kg/hm ²)	-14.9	-44.4	-73.9	-103.5	-133.1	-162.6	-192.2	-221.8
运输种子和化肥(kg/hm ²)	-89.8	-231.0	-372.3	-513.5	-654.8	-796.1	-937.3	-1 078.6
化肥、杀虫剂和除草剂(kg/hm ²)	-6 719.7							
CO _{2e} 平衡(10 ⁴ kg/hm ²)	2.7	9.3	16.0	22.6	29.3	35.9	42.6	49.2
单位种子油的 CO _{2e} 平衡(kg/L)	10.7	12.3	12.7	12.8	12.9	12.9	13.0	13.0
总固碳价值(10 ⁴ 元/hm ²)	0.09	0.31	0.54	0.76	0.99	1.21	1.44	1.66

表 3 表明,随着种子产量增加,生产每升种子油的 CO_{2e} 增加,但增长率趋于下降并逐渐稳定。当年种子产量达到 1 485 kg/hm² 时,生产和使用每升种子油的 CO_{2e} 趋于稳定,大约为 13 kgCO_{2e}/L 左右。

当前国内 CDM 市场的核证减排额(Certified Emission Reduction, CER)价格为 10 欧元/t 或 91.8 元/t 左右(2009 年 4 月)。按此价格算得与种子产量 297~4 455 kg/hm² 相对应的总固碳价值(30 a)为 0.09~1.66 万元/hm²。可见,生产和使用麻疯树种子油具有显著的环境经济价值。然而,结合表 1 的财务分析结果可看出,将固碳价值计算在内可大大提高经济净现值,但还不足以使经济净现值为正。因此,仅考虑种子油和固碳的价值时,生产和使用麻疯树种子油还不具有经济可行性。

2.3 能量效率分析

生产麻疯树种子油主要能耗源于除草剂与杀虫剂、化肥、榨油与精炼。其中,源于使用化学品的能耗主要是间接能量投入,例如,所使用的除草剂和杀虫剂分别为草甘膦与多菌灵,它们的生产能耗分别为 454 和 397MJ/kg^[25,26]。采果与干燥、剥壳、育苗、造林和抚育的能量投入主要为劳动力的能量投入,每个劳动力的平均能量消耗为 2.28 MJ/h^[27]。直接能量投入主要源于榨油和精炼阶段,为 6.60 MJ/L,其中煤和电分别占 94.7%和 2.9%。能量产出为麻疯树种子油和树枝与果壳等所包含的生物质能,其中麻疯果油热值为 37.83~39.20 MJ/kg^[28~30],即平均 35.25 MJ/L。以每树结果 500 颗(1 485 kg/hm²)的产量为例,能量投入组成如图 2 所示。

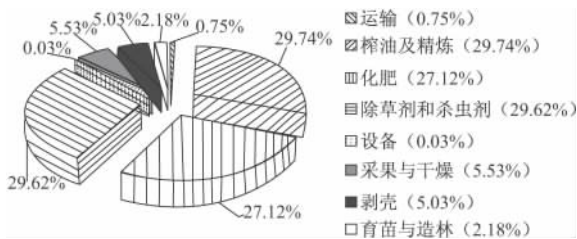


图 2 麻疯树种子油生命周期的能量投入组成

Fig. 2 Lifecycle Energy Input of Production of *Jatropha curcas* Oil

根据公式(3)和(4)算得不同种子产量水平下的 EE₁ 和 EE₂(表 4)。结果表明:麻疯树种子油的能量效率随着种子产量的增加而提高。当只考虑目标产品种子油的能量产出时,只有当种子产量达到 795 kg/hm² 以上,才具有能量效率,即能量产出大于能量投入。当包括树枝和果壳等其它能量产出

时,在较低的种子产量水平下(例如 297 kg/hm²),生产和使用麻疯树种子油也具有显著的能量效率。显然,在当前的生产技术水平下,若能保证种子产量达到 795 kg/hm² 以上,则无论是只考虑种子油的能量,还是将树枝和果壳等所包含能量计算在内,能量效率都很显著。

表 4 生产麻疯树种子油的能量效率

Tab. 4 Energy Efficiency of Production of *Jatropha curcas* Oil

年种子产量 (kg/hm ²)	297	891	1 485	2 079	2 673	3 267	3 861	4 455
种子油生产的总能耗(MJ/L)	72.9	30.2	21.7	18.1	16.0	14.7	13.8	13.2
种子油能量(MJ/L)	35.3							
与每升种子油相应的其它能量产出(MJ/L)	95.8							
总能量产出(MJ/L)	131.0							
EE ₁	0.5	1.2	1.6	2.0	2.2	2.4	2.6	2.7
EE ₂	1.8	4.3	6.0	7.3	8.2	8.9	9.5	10.0

3 结论与讨论

研究以特定的技术选择为基础,即使用普通的生产工艺和机械加工方法生产麻疯树种子油,并将它与化石柴油混配后直接使用,利用生命周期评估法分析了生产和使用麻疯树种子油的经济、环境和能量效率。结果表明,在现有的技术和管理水平下,麻疯树种子油的生产在财务上和经济学上都不具有可行性,但是环境和总能量效率显著。

假定麻疯树种子生产者和加工者的利润率 10%,在当前的种子产量水平下,麻疯树生物燃料的工业化发展离不开政府的激励政策,需要为麻疯树种子生产者提供每年至少 881.7 元/hm² 以上的补贴,为种子油生产者提供 2.68 元/L 的补贴。

不论是种子生产阶段还是种子油加工阶段,成本都大于收益。在种子生产阶段,主要的成本来自化肥、采果、干燥、剥壳和除草。在种子油加工阶段,主要成本来自于购买麻疯树种子。

生产和使用麻疯树种子油的固碳效应显著,每生产 1 L 麻疯树种子油约能减少相当于 13 kgCO_{2e} 排放,具有显著固碳价值。固碳价值可为补贴生产提供部分经济依据,但仅考虑种子油和固碳价值时,生产和使用麻疯树种子油还不具有经济可行性。

当只考虑目标能源时,只有当种子产量达到 795 kg/hm² 时才能具有能量效率;当把树枝和果壳等所包含的生物质能计算在内时,在较低的种子产量水平下,也具有能量效率。然而,从产业化角度

看,应保证目标能源的生产具有能量效率,即要求种子产量达到 $795 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。在当前的生产技术水平下,麻疯树的种子产量为 $0.6 \sim 4.5 \text{ t}/\text{hm}^2$,达到这一产量要求完全有可能。另外,本文假设在植被稀少的荒山上种植麻疯树,忽略了因土地利用方式变化所造成的 GHG 排放。为了保证环境效益,在营造油料林时应慎重选择造林地,并采取环境友好型造林方式,避免因土地利用方式的改变导致大量土壤碳排放或破坏生物多样性。

根据对麻疯树种子油的生命周期分析,可从以下方面提高生产麻疯树种子油的经济、环境和能量效率:(1)由于在目前的榨油技术水平下,种子的出油率不高,通过优化榨油的生产工艺条件(预处理、加热和进料等),可提高出油率;(2)选育和通过遗传改良培育高产量的品种;(3)选择适宜种植地,提高麻疯树种子的单产;(4)开发剥壳机和辅助采果的机械有利于降低种子生产成本;(5)培育矮化高产的品种有利减少采果的劳动成本;(6)利用副产品开发高附加值的商品,提升财务与经济可行性,例如树枝可以作为药材或用来制作杀虫剂,油粕可开发成饲料;(7)由于能量消耗主要源于使用杀虫剂与除草剂、化肥、榨油和精炼,加强生态系统管理和使用绿肥可以减少杀虫剂、除草剂及化肥相关的能量投入,用果壳替代煤炭有利于减少种子油精炼过程的能量投入。特别是,生产除草剂草甘膦的能量投入过大,且用量也大,使用低能量消耗的除草剂(例如,莠去津和氟草津)或通过人工除草将降低能量投入,从而提高生产麻疯树种子油的能量效率。

当选择其它技术方案时,特别是当考虑到副产品的附加值时,例如,酯化反应的副产品甘油是生产一些高附加值商品的原材料,生产麻疯树生物燃料的经济、环境和能量效率可能大不相同,值得进一步研究。另外,由于生产和使用麻疯树种子油具有显著的固碳效应,若能将麻疯树生物燃料的工业化发展与清洁发展机制(CDM)项目相结合,生产麻疯树生物柴油的财务和经济可行性将被大幅度提升。通过将两者优化结合并建立相应的运行机制将有望促进麻疯树生物燃料的发展,值得深入探索。

参考文献:

- [1] FAO. Bioenergy, food security and sustainability-towards an international framework[M]. HLC/08/INF/3. Rome, 2008.
- [2] WIESENTHAL T, LEDUC G, CHRISTIDIS P, et al. Biofuel support policies in Europe: Lessons learnt for the long way ahead[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(4): 789~800.
- [3] GTZ (German Technical Cooperation). Liquid bio-fuel for transportation: Chinese potential and implications for sustainable agriculture and energy in the 21st Century[M]. Beijing: GTZ, 2006.
- [4] RUNGE C, SENAUER B. How biofuels could starve the Poor [J/OL]. Foreign Affairs, 2007. <http://www.foreignaffairs.com/articles/62609/c-ford-runge-and-benjamin-senauer/how-biofuels-could-starve-the-poor> 2009/6/15.
- [5] 黄季焜, 仇焕广, MICHEL KEYZER, 等. 发展生物燃料乙醇对我国区域农业发展的影响分析[J]. 经济学, 2009, 8(2): 727~742.
- [6] CHRISTOPHER F. Time to move to a second generation of biofuels [J]. Washington D C: Worldwatch Institute, 13 February 2008.
- [7] OPENSHAW K. A review of *Jatropha curcas*: An oil plant of unfulfilled promise[J]. Biomass and Bioenergy, 2000, 19: 1~15.
- [8] HELLER J, NUT P, JATROPHA C L. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. I[M]. Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben/ International Plant Genetic Resources Institute, Rome, 1996.
- [9] 武志杰, 宗文君. 麻疯树开辟物质能源的新前景[J]. 科学新闻, 2007(14): 15.
- [10] ACHTEN W M J, VERCHOT L, FRANKEN Y J, et al. *Jatropha* bio-diesel production and use[J]. Biomass and Bioenergy, 2008, 32: 1 063~1 084.
- [11] KUMAR S, GUPTA A K, NAIK S N. Conversion of non-edible oil into bio-diesel[J]. J Sci Ind Res 2003, 62: 124~132.
- [12] 和丽萍, 郎南军, 马惠芬, 等. 云南省红河州部分地区麻疯树种子的化学成分分析比较[J]. 西部林业科学, 2007, 36(4): 69~74.
- [13] 陈波涛, 邓伯龙, 郁建平, 等. 贵州省麻疯树资源调查研究[J]. 中国林副特产, 2006(6): 55~57.
- [14] 徐嘉, 费世民, 何亚平, 等. 四川麻疯树种群数量特征和更新研究[J]. 四川林业科技, 2008, 29(1): 1~6.
- [15] 钟志权. 小桐子——一种大有希望的能源植物[J]. 热带植物研究, 1984(2): 62~65.
- [16] 张无敌, 宋洪川, 韦小岩, 等. 小桐子开发与元谋县生态环境保护[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2001, 21(5): 37~42.
- [17] SRINIVASAN S. The food v. fuel debate: A nuanced view of incentive structures[J]. Renewable Energy, 2009, 34: 950~954.
- [18] FARRELL A E, PLEVIN R J, Turner B T, et al. Ethanol can contribute to energy and environmental goals[J]. Science, 2006, 311: 506~508.
- [19] CRUTZEN P J, MOSIER A R, SMITH K A, et al. N_2O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2007, 7: 11 191~11 205.
- [20] PIMENTEL D, PATZEK T W. Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; Biodiesel production using soy-

- bean and sunflower [J]. *Natural Resources Research*, 2005, 14 (1): 65~76.
- [21] PRAMANIK K. Properties and use of *Jatropha curcas* oil and diesel fuel blends in compression ignition engine [J]. *Renewable Energy*, 2003, 28: 239~248.
- [22] FORSON F K, ODURO E K, HAMMOND-DONKOH E. Performance of *Jatropha* oil blends in a diesel engine [J]. *Renewable Energy*, 2004, 29(7): 1135~1145.
- [23] 邓南圣, 王小兵. 生命周期评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [24] WANG M Q, GREET 1 1. 8b[DB]. Argonne, Illinois: Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, 1999.
- [25] TZILIVAKIS J, WARNER D J, MAY M, et al. An assessment of the energy inputs and greenhouse gas emissions in sugar beet production in the UK [J]. *Agricultural Systems*, 2005, 85: 101~119.
- [26] GREEN M. Energy in pesticide manufacture, distribution and use [C]//HELSEL Z R (Ed.). *Energy in plant nutrition and Pest Control*, vol. 7. Elsevier, Amsterdam, ISBN, 1987.
- [27] KALLIVROUSSIS L, NATSIS A, PAPADAKIS G. The energy balance of sunflower production for biodiesel in Greece [J]. *Biosystems Engineering*, 2002, 81 (3): 347~354.
- [28] AUGUSTUS G D P S, JAYABALAN M, SEILER G J. Evaluation and bioinduction of energy components of *Jatropha curcas* [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2002, 23: 161~164.
- [29] SAHOO P K, DAS L M. Process optimization for biodiesel production from *Jatropha*, *Karanja* and *Polanga* oils [J]. *Fuel*, 2009, 88: 1588~1594.
- [30] BAITIANG T, SUWANNAKIT K, DUANGMUKPANAOT, et al. Effects of biodiesel and *Jatropha* oil on performance, black smoke and durability of single-cylinder diesel engine [J]. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 2008, 18(2): 181~185.

LIFECYCLE ECONOMIC, ENVIRONMENTAL AND ENERGY PERFORMANCE OF *JATROPHA CURCAS* L. OIL

WANG Zan-xin, LU Ying

(School of Development Studies, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: To be a viable alternative to fossil fuel, biofuel should yield a positive energy balance, have contribution to environmental improvement, be economically feasible, and be producible in large quantities without impacting food security. As a major feedstock of the second-generation biodiesel, *Jatropha curcas* L. (JCL) has been widely developed in China, but its viability for substituting fossil biodiesel has not been systematically assessed. This paper analyzed the economic, environmental and energy performance of the production and use of JCL oil through life cycle analysis. The results show that: (1) at the current levels of seed yield, technologies and management, the production and use JCL oil is financially infeasible, and for the industrialization of JCL oil, producers should be subsidized with an amount of 881.7~1438.1 Yuan/hm² for seed production and 2.68 Yuan/L for oil extraction and refining; (2) about 13 kg CO₂ equivalent can be reduced as per liter JCL oil is produced; (3) the energy efficiency depends on the seed yields. If JCL oil is considered the only energy output, there is energy efficiency when the seed yield is higher than 795 kg/hm². If the biomass other than seeds is considered the energy output, there is also significant energy efficiency when the seed yield is as low as 297 kg/hm². The results of sensitivity analysis show that increasing the seed yield can reduce the unit cost of JCL oil but result in a decreased financial net present value, because the unit cost of JCL is higher than the unit price of diesel in the market. However, the environmental benefits and energy efficiency tend to increase as the JCL seed yield is increased. Finally, based on the results of the study, some measures were suggested to improve the lifecycle economic, environmental and energy performance.

Key words: *Jatropha curcas* oil; life cycle analysis; incentive policy; second-generation biodiesel; carbon balance; energy efficiency