

麻疯树生物柴油发展适宜性、能量生产潜力与环境影响评估

尹芳¹, 刘磊¹, 江东^{2,3}, 任红艳^{2,3}

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054; 2. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 为对西南 5 省麻疯树生物柴油产业的发展提供依据, 该文对西南 5 省适宜麻疯树种植的宜能边际土地资源潜力、适宜性等级等进行研究, 并对该区发展麻疯树生物柴油的能量生产、温室气体减排潜力进行分析。利用多因子综合分析法对麻疯树适宜种植的边际土地资源进行识别及适宜性评价, 获得麻疯树适宜种植的边际土地资源空间分布、适宜性等级和总量; 利用生命周期分析法, 对不同适宜性等级的边际土地资源生产麻疯树生物柴油的生命周期净能量、温室气体减排能力进行研究; 利用上述研究结果, 对生命周期模型进行扩展, 获得西南 5 省规模化种植麻疯树的总净能量生产能力、温室气体减排潜力。研究表明, 西南 5 省适宜与较适宜麻疯树发展的土地资源分别为 199.45 和 557.28 万 hm^2 ; 如果这些土地资源全部被利用, 则该区麻疯树生物柴油净能量年最大总生产潜力为 15 099.194 万 GJ, 总温室气体年减排潜力为 1 591.655 万 t。该文研究结果可为制定生物能源产业政策提供参考。

关键词: 柴油, 生物质, 环境影响评估, 麻疯树, 边际土地, 生命周期分析, 净能量, 温室气体减排

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.14.031

中图分类号: P967

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-14-0201-08

尹芳, 刘磊, 江东, 等. 麻疯树生物柴油发展适宜性、能量生产潜力与环境影响评估[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 201-208.

Yin Fang, Liu Lei, Jiang Dong, et al. Assessments of suitability, energy capacity and environment impact on biodiesel from *Jatropha curcas* L.[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(14): 201-208. (in Chinese with English abstract)

0 引言

林业生物柴油因具有“不与人争粮, 不与粮争地”的优点, 开始受到包括中国在内的许多发展中国家的重视^[1]。麻疯树 (*Jatropha curcas* L.) 被认为是最具潜力的生物柴油原料树种^[1-2]。中国西南 5 省由于适宜能源植物发展的边际土地资源最为丰富, 且成片分布, 加上光、温、水条件都较好, 是中国麻疯树的主要发展区域^[3]。中国西南地区地方政府已经制定麻疯树发展规划, 如云南、四川和贵州 3 省从 2006 年开始相继制定了麻疯树生物柴油发展规划, 计划在未来 15 a 内利用边际性土地资源种植麻疯树 166.7 万 hm^2 。

虽然中国麻疯树生物柴油产业已呈现出快速发展的态势, 但是其发展仍面临着诸多不确定性, 原料供给潜力、净能量生产潜力与温室气体减排潜力是目前面临的 3 大重要问题, 因为这些因素直接影响到国家能源政策以及政府对环境保护、温室气体减排目标和相关产业政策的建立。

生命周期分析 (life cycle assessment, LCA) 是一

种用于评价产品或系统在其整个生命周期中, 即从原材料获取、产品生产、产品使用及使用后处理整个过程中, 对环境影响和能量消耗进行分析的方法^[4]。生命周期分析已被广泛应用于生物能源影响评价研究中^[5-8]。但目前还没有针对不同适宜性等级的边际土地资源, 种植能源植物的生命周期净能量、温室气体减排能力的相关研究, 也缺少将宜能 (适宜能源植物种植) 边际土地资源与生命周期分析法结合, 估算区域总净能量生产潜力和温室气体减排潜力的研究。

面对上述问题, 该研究以中国西南 5 省 (重庆、四川、贵州、云南、广西) 为研究区, 对该区适宜麻疯树种植的宜能边际土地资源潜力、适宜性等级划分及空间分布进行研究, 并对西南 5 省发展麻疯树生物柴油的最大净能量、温室气体减排潜力进行分析, 为政府制定相应产业政策提供依据。

1 研究方法

1.1 麻疯树适种的边际土地识别与评价

参照庄大方等^[3]的研究确定宜能边际土地的界定标准, 利用多因子综合分析法, 进行麻疯树适宜种植的边际土地资源潜力及适宜性研究。

具体步骤如下: 1) 基于已有文献并咨询相关专家, 设定麻疯树对温度、水分、坡度、土壤等自然条件的要求, 将各种自然条件划分为适宜、较适宜和不适宜 3 级^[1,9]; 2) 在对温度、水分、土壤、坡度等因子进行适宜性分级的基础上, 对土地资源适宜性进行多因子综合评价; 3) 在多因

收稿日期: 2012-01-03 修订日期: 2012-05-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (70741034); 地理信息科学教育部重点实验室开放研究基金资助项目 (KLGIS2011A13); 中国科学院知识创新项目 (KSCX2-YW-N-039)

作者简介: 尹芳 (1983-), 女, 河北河间人, 博士, 主要从事 GIS 与遥感技术应用方面的研究。西安 长安大学地球科学与资源学院, 710054。

Email: yinf@lreis.ac.cn

子综合评价结果的基础上, 基于宜能边际土地的界定标准, 对各种类型土地资源的适宜性进行分析; 4) 基于经济、社会及环境等约束条件, 对多因子综合评价结果进行修正。

1.1.1 麻疯树生长习性

学者对于麻疯树的生长习性 & 环境适应性等已进行过较多的研究, 并进行了相应的区划^[1,10]。在本研究过程中, 麻疯树生长的温度、水分、坡度及土壤的约束条件参照吴伟光等^[1]的指标, 具体见表 1。

表 1 麻疯树生长对温度、水分、坡度及土壤条件的要求
Table 1 Temperature, soil moisture, land slope and soil condition for *Jatropha curcas* L. plantation

| 指标 | 项目 | 适宜 | 较适宜 | 不适宜 |
|-------|--------------------------|-----------|-------------|---------------|
| 温度 | 年均气温/°C | ≥20 | 17~20 | ≤17 |
| | 年均极端最低气温/°C | ≥2 | 0~2 | ≤0 |
| 水分 | Thornthwaite (桑斯维特湿润) 指数 | -33.3~100 | -66.7~-33.3 | >100 或 <-66.7 |
| 坡度(°) | | ≤15 | 15~25 | ≥25 |
| | 土层厚度/cm | ≥75 | 30~75 | ≤30 |
| 土壤 | 土壤有机质质量分数/% | ≥3.5 | 1.5~3.5 | ≤1.5 |
| | 土壤质地(壤土体积分数 %) | ≥30 | 10~30 | ≤10 |

注: 引用参考文献^[1]。

1.1.2 相关数据

根据上述工作流程及麻疯树生长习性, 该研究所需的数据包括气象数据、地形数据、土壤数据及土地利用数据等。

1) 气象数据

气象数据由中国气象局提供, 主要包含年均气温、年均极端最低气温、Thornthwaite (桑斯维特湿润) 指数等对麻疯树生长较为关键的参数。

2) 地形数据

地形数据由国家测绘局提供, 比例尺为 1:250 000。并基于该数据利用地理信息系统软件进行相应处理, 获得全国平均坡度信息。

3) 土壤数据

1: 100 000 土壤数据集由中国科学院资源环境科学数据中心提供。主要包括有效土层厚度、土壤有机质含量、土壤质地等参数。

4) 土地利用数据

西南 5 省区适宜麻疯树种植的边际土地资源包括疏林地、草地和裸土地 (含滩涂和滩地、盐碱地和裸地)^[3]。同时, 各类保护区如自然保护区、水土保持区等土地应被排除。

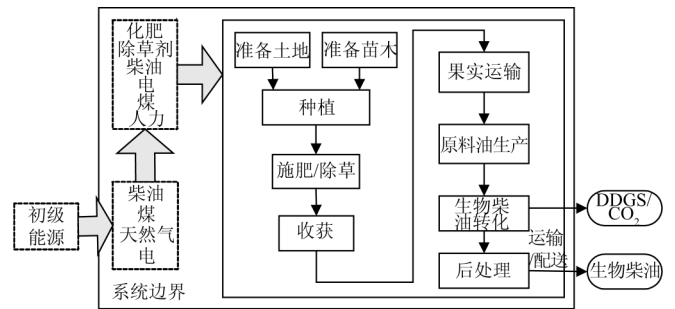
该研究采用的土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中心 1:100 000 土地利用/覆被数据集, 该数据集采用 Landsat TM (美国陆地资源卫星) 和中巴资源卫星数据, 利用全数字化、人机交互遥感信息提取与精度分析技术构建, 数据总体精度在 92% 以上^[11]。该数据集包括了 6 个一级地类和 25 个二级地类。

在处理前, 上述所有数据被重采样为 1 000 m 空间分辨率并统一坐标系统。

1.2 麻疯树生物柴油生命周期净能量、温室气体减排能力

1.2.1 麻疯树生命周期计算相关系数的确定

麻疯树生物柴油生命周期是指从麻疯树种植到生物柴油在发动机气缸内燃烧的整个过程, 主要包括麻疯树种植、果实运输、麻疯树生物柴油生产转化、生物柴油运输、生物柴油配送和生物柴油在引擎内燃烧 6 个阶段, 见图 1。整个过程消耗化肥、农药、石油产品、煤、天然气、水电、火电、己烷、甲醇等, 产出生物柴油和副产品。该研究中, 人力成本未予考虑。最终获得的结果为单位面积麻疯树生产生物柴油年净能量、年温室气体减排量。



注: DDGS/CO₂ 表示麻疯树生物柴油生产中的副产品 (滤清液干燥浓缩后并与滤渣混合干燥而获得的饲料)/生物柴油生产转化过程中产生的 CO₂ 排放。

图 1 麻疯树生物柴油生命周期框架

Fig.1 Life cycle of *Jatropha curcas* L. based biodiesel

麻疯树作为 1 种多年生落叶灌木或小乔木, 生命周期一般为 20~30 a^[12]。目前麻疯树栽植多采用穴状整地、苗木 (枝条) 扦插方法栽植, 第 1 年至第 5 年为麻疯树生长期, 果实产量逐年增长, 从第 6 年开始~第 25 年为盛果期, 随后进入衰退期, 必须进行更新, 故该研究设定麻疯树生命周期为 25 a。仅第 1 年需进行整地、扦插工作, 在苗木运输和整地过程中耗用部分柴油和人力, 由于此数值在 25 a 中所占比重非常小, 予以忽略; 从第 1~25 年, 每年进行施肥、除草、修剪、收获等工作, 耗用大量化肥、除草剂、电、柴油等。因此, 对于麻疯树种植阶段, 化肥、除草剂、电、柴油等能耗及果实产量均以 25 a 平均值参与模型计算。

该研究采用的麻疯树果实产量等部分数据通过实地调查获得, 其他数据如能耗参数、汽油生产数据、化肥等化学品生产数据、燃煤生产等部分数据, 参考中国和国外公开出版的相关文献资料及美国阿冈 (Argonne) 国家实验室的 GREET (greenhouse gases, regulated emissions, and energy use in transportation) 模型数据库获得^[5-6,9,13-15]。所有来自国外的数据都根据中国西南 5 省的具体情况进行了修正。

1.2.2 麻疯树生物柴油生命周期净能量平衡分析

净能量 (net energy value, NEV) 与能量比 (energy ratio, ER) 是评价麻疯树生物柴油生命周期能源效率的关键参数^[8]。净能量是生物柴油提供的能量减去生物柴油生命周期的能量消耗; 能量比是指生物柴油提供的能量与生物柴油生命周期的能量消耗之比。

单位质量生物柴油的净能量分析数学模型如下

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

式中, NEV 为生物柴油年净能量, 单位为 MJ/hm^2 ; BE 为生物柴油所含能量, MJ/hm^2 ; FE_1 、 FE_2 、 FE_3 、 FE_4 、 FE_5 分别为生物柴油原料种植、果实运输、生物柴油生产转化、柴油输配、副产品能量, MJ/hm^2 。由公式 (2) ~ (6) 计算。

$$FE_1 = \sum_i (X_i \times XEI_i) \quad (2)$$

式中, X_i 是麻疯树种植过程中消耗物质或能量的数量, 其中, i 分别为 N 肥、P 肥、K 肥、除草剂、电力、柴油等物质, 单位分别为 kg/hm^2 、 kg/hm^2 、 kg/hm^2 、 kg/hm^2 、 kWh/hm^2 、 L/hm^2 ; XEI_i 是其能量强度, 即生产单位产品 (能量或物质) 直接消耗的能量 (如燃料、动力等) 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, MJ/kg 或 MJ/kWh 或 MJ/L 。

$$FE_2 = d_1 \times TE \times EN \times Y \quad (3)$$

式中, d_1 是原料供应的平均运输距离, km ; TE 是运输燃料的消耗强度, $\text{L}/(\text{t}\cdot\text{km})$; EN 是运输燃料的能量密度, MJ/L ; Y 是单位面积土地种植麻疯树的果实产量, t/hm^2 。

$$FE_3 = \sum_i (E_i \times EEI_i) \quad (4)$$

式中, E_i 是生物柴油转化过程中各种物质的消耗量, kg/hm^2 、 kWh/hm^2 等; EEI_i 是各种物质的能量强度, MJ/kg 或 MJ/kWh 等。

$$FE_4 = \frac{d_2 \times TE \times EN \times Y}{x} \quad (5)$$

式中, d_2 是生物柴油输配过程的平均运输距离, km ; x 是生物柴油转化率, 即麻疯树果实质量与生产出的生物柴油质量之比。

$$FE_5 = \sum_i (EW_i \times M_i) \quad (6)$$

式中, EW_i 是生物柴油转化过程中共生副产品的能量密度, MJ/kg ; M_i 是副产品产量, kg/hm^2 。

$$ER = \frac{BE}{FE_1 + FE_2 + FE_3 + FE_4 - FE_5} \quad (7)$$

1.2.3 麻疯树生物柴油生命周期温室气体减排能力分析

温室气体排放主要包括 CO_2 、 CH_4 、 N_2O , 分别由直接排放和间接排放构成。根据 3 种温室气体的全球增温潜力系数 (global warming potential value, GWP) 将其转换为 CO_2 当量, 按下式计算温室气体排放总量^[16]

$$GHG_{LCA} = 23CH_{4,LCA} + 296N_{2O,LCA} + CO_{2,LCA} \quad (8)$$

式中, GHG_{LCA} 为生命周期温室气体总排放量, g/hm^2 ; $CH_{4,LCA}$ 为 CH_4 生命周期总排放量, g/hm^2 ; $N_{2O,LCA}$ 为 N_2O 生命周期总排放量, g/hm^2 ; $CO_{2,LCA}$ 为 CO_2 生命周期总排放量, g/hm^2 。

净温室气体减排 (net GHG reduction value, NGRV, g/hm^2) 是评价麻疯树生物柴油生命周期温室气体减排的关键参数^[8]。净温室气体减排是与生物柴油等能量值的传统柴油温室气体排放减去生物柴油生命周期总排放所得的差值。利用如下公式计算

$$NGRV = GHG_{LCA,CD} - GHG_{LCA,biofuel} \quad (9)$$

式中, $GHG_{LCA,CD}$ 、 $GHG_{LCA,biofuel}$ 分别为传统柴油和生物柴油生命周期温室气体总排放, g/hm^2 。 $GHG_{LCA,biofuel}$ 按如下公式计算

$$GHG_{LCA,biofuel} = C_1 + C_2 + C_3 - C_{\text{avoided}} + C_4 + C_5 \quad (10)$$

式中, C_1 是麻疯树种植过程的温室气体排放量, g/hm^2 ; C_2 是果实运输过程的温室气体排放量, g/hm^2 ; C_3 是生物柴油生产、转化过程的温室气体排放量, g/hm^2 ; C_{avoided} 是副产品替代能量的等效温室气体减排量, g/hm^2 ; C_4 是生物柴油运输过程的温室气体排放量, g/hm^2 ; C_5 为生物柴油燃烧阶段排放量, g/hm^2 。 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_{avoided} 、 C_4 分别由 (10) ~ (14) 计算, C_5 利用 GREET 模型获取。

$$C_1 = \sum_i (X_i \times EF_i) - GHG_{\text{plant}} \quad (11)$$

式中, X_i 是麻疯树种植过程中消耗第 i 种物质 (依次为种子、机械、氮肥、磷肥、钾肥、和除草剂等) 的数量, kg/hm^2 ; EF_i 是第 i 种物质的温室气体排放系数, g/kg ; GHG_{plant} 为麻疯树生长阶段吸收的温室气体, g/hm^2 。

$$C_2 = d_1 \times TE \times TEF \times Y \quad (12)$$

式中, d_1 是果实运输平均距离, km ; TE 是运输燃料的消耗强度, $\text{L}/(\text{t}\cdot\text{km})$; TEF 是运输燃料的温室气体排放系数, g/L ; Y 是单位面积土地种植麻疯树的果实产量, t/hm^2 。

$$C_3 = \sum_i E_i \times EF_i \quad (13)$$

式中, E_i 是生物柴油转化过程中各种物质的消耗量, kg/hm^2 ; EF_i 是第 i 种能源的温室气体排放系数, g/kg 。

$$C_{\text{avoided}} = \sum_i (EW_i \times M_i \times EF_{\text{coal}} / EW_{\text{coal}}) \quad (14)$$

式中, EW_i 是生物柴油转化过程中共生副产品的能量密度, MJ/kg ; M_i 是副产品产率, kg/hm^2 ; EF_{coal} 是燃煤的温室气体排放系数, g/kg ; EW_{coal} 是燃煤的能量密度, MJ/kg 。

$$C_4 = \frac{d_2 \times TE \times TEF \times Y}{x} \quad (15)$$

1.2.4 模型所需基础数据

经调查并结合已有文献, 确定较适宜土地种植麻疯树果实多年平均单产为 $2.7 \text{ t}/\text{hm}^2$, 适宜土地种植麻疯树果实多年平均单产为 $5 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。研究表明, 麻疯树生长每年可吸收 CO_2 约 $5.5 \text{ t}/\text{hm}^2$ ^[17], 本研究根据实地调查, 确定适宜与较适宜土地种植麻疯树每年分别吸收 CO_2 约 3.733 、 $2.016 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。

麻疯树生物柴油生命周期过程基本参数见表 2, 主要投入的排放参数见表 3。其中, 生物柴油生产转化阶段包括麻疯树原料油生产与生物柴油转化 2 个阶段, 该数据根据文献中相关数据计算获得。根据调查及参考相关文献, 西南 5 省电力组成中, 水电占 40%, 火电占 60%^[6]。

表 2 麻疯树种植主要参数特征

Table 2 Main parameters for *Jatropha curcas* L. plantation

| 生命周期过程 | 主要参数 | 参数值 |
|--------|--|-------------------|
| 种植阶段 | N 肥 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) | 97 ^[8] |

续表

| 生命周期过程 | 主要参数 | 参数值 |
|------------|-------------------------------|-----------------------|
| 生物柴油生产转化阶段 | P 肥/(kg·hm ⁻²) | 27 ^[8] |
| | K 肥/(kg·hm ⁻²) | 18 ^[8] |
| | 除草剂/(kg·hm ⁻²) | 5 |
| | 电/(kWh·hm ⁻²) | 11 ^[14,7] |
| | 柴油/(L·hm ⁻²) | 18 ^[14,7] |
| | 果实运输距离/km | 250 ^[8] |
| | 转化效率 | 3.3 ^[8] |
| | 总能耗/(MJ·L ⁻¹) | 9.946 ^[18] |
| | 生物柴油运输距离/km | 300 ^[8] |
| | 生物柴油配送/(kWh·L ⁻¹) | 0.0007 |
| 副产品分配比例/% | 40 ^[8] | |

注：其他数据均为实地调整数据。

表 3 生物柴油生命周期主要物质排放参数

Table 3 Main emission parameters of *Jatropha curcas* L. biodiesel life cycle

| 排放参数 | CH ₄ /(g·t ⁻¹ ·a ⁻¹) | N ₂ O/(g·t ⁻¹ ·a ⁻¹) | CO ₂ /(g·t ⁻¹ ·a ⁻¹) |
|------|--|--|--|
| N 肥 | 1634.4 | 69.1 | 1519548.1 |
| P 肥 | 121.9 | 1.0 | 432112.7 |
| K 肥 | 896.0 | 7.0 | 655492.0 |
| 除草剂 | 31954.0 | 234.5 | 23496370.0 |
| 柴油 | 0.02 | 0.075 | 3199.46 |
| 电 | 0.004 | 0.005 | 413.452 |
| 煤 | 31.110 | 21.110 | 2695731.51 |

注：引用参考文献[1,6-7]。

1.3 麻疯树规模化种植净能量生产、温室气体减排潜力估算

1.3.1 麻疯树总净能量生产潜力分析模型

通过对单位（体积或质量）生物柴油生命周期净能量平衡模型进行改进，将该模型中的单位扩展为按适宜种植的土地总面积计算的净能量生产潜力数量，得到西南 5 省麻疯树生物柴油总净能量生产潜力模型^[19-20]

$$SumNEV = \sum_i (NEV_i \times X_i) \quad (16)$$

式中，*SumNEV* 为最大净能量生产潜力，MJ；*i* 为土地类型（适宜、较适宜等）；*NEV_i* 为单位面积第 *i* 类土地生产麻疯树生物柴油的净能量，MJ/hm²；*X_i* 为第 *i* 类土地上种植麻疯树的土地面积，hm²。

1.3.2 麻疯树生物柴油总净温室气体减排潜力分析模型

通过对单位（体积或质量）麻疯树生物柴油生命周期温室气体减排能力模型进行改进，将该模型中的单位扩展为按适宜种植的土地总面积计算的温室气体排放数量，生成西南 5 省麻疯树生物柴油总净温室气体减排潜力分析模型^[19-20]。

$$SumGHG = \sum_i (NGRV_i \times X_i) \quad (17)$$

式中，*SumGHG* 为最大净温室气体减排量，g；*i* 为土地类型（适宜、较适宜等）；*NGRV_i* 为单位面积第 *i* 类土地生产麻疯树生物柴油的净温室气体减排量，g/hm²；*X_i* 为第 *i* 类土地上种植麻疯树的土地面积，hm²。

2 结果与分析

2.1 麻疯树土地资源适宜性评价

利用多因子综合评价法（2.1 节），计算得出具备规模化开发潜力的适宜生物能源作物生长的土地资源数量。具体结果如图 2、3 和表 4，可以得到如下结论：

1) 总体来看，适宜与较适宜麻疯树发展的土地资源分别为 199.45 和 557.28 万 hm²，其中，适宜的土地资源类型以疏林地和草地为主。

2) 适宜的土地资源主要集中在广西壮族自治区，约占五省适宜土地总面积的 87.9%，以疏林地和高覆盖度草地 2 种类型为主。云南也有部分适宜的土地资源，共 21.83 万 hm²，而其他 3 省适宜的土地资源面积较小。这主要是由于麻疯树对温度条件要求较高，温度是限制其发展的最大的因素。

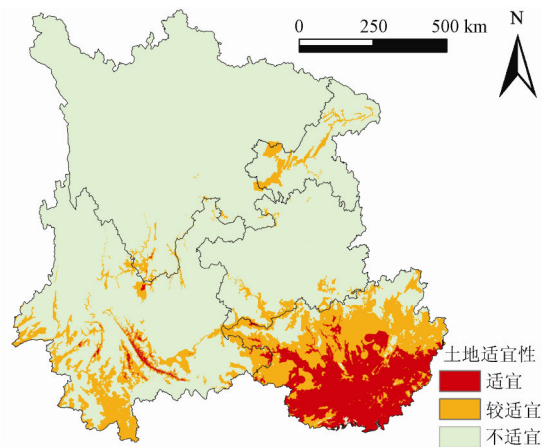


图 2 基于多因子综合分析的西南 5 省麻疯树土地适宜性空间分布
Fig.2 Spatial distribution of land suitability for *Jatropha curcas* L. plantation based on multi-factor analysis in five provinces of southwest of China

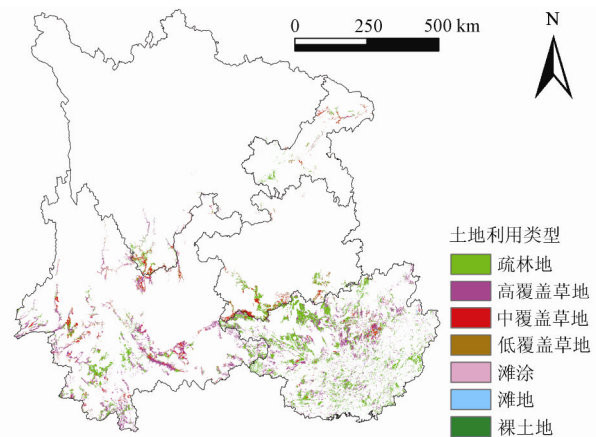


图 3 西南 5 省适宜与较适宜麻疯树种植的土地类型空间分布
Fig.3 Spatial distribution of suitable and moderate suitable land use types for *Jatropha curcas* L. plantation in five provinces of southwest of China

2.2 麻疯树生物柴油生命周期净能量、温室气体减排能力分析

2.2.1 麻疯树生物柴油生命周期净能量平衡分析

通过对麻疯树生物柴油生命周期各阶段能耗的分

析，可以得到以麻疯树为原料生产生物柴油的能量投入，利用适宜、较适宜 2 种等级土地发展生物柴油生命周期能耗分别为 26 852.08 和 17 713.28 MJ/hm²（表 5）。为便于对比、分析，将单位土地面积麻疯树生物柴油能耗转换为单位体积生物柴油生命周期能耗。由表 5 可知，虽然利用适宜与较适宜 2 种不同等级土地种植麻疯树对原料种植阶段能耗影响较大，但从整个生命周期来看，原料油生产及生物柴油转化阶段能耗总量最大，折合 9.95 MJ/L；其次为原料种植阶段，主要是由于种植阶段投入了大量化肥、农药，利用 2 种不同等级的土地种植生物柴油消耗的能量分别为 3.87 和

7.17 MJ/L。利用适宜与较适宜 2 种不同等级土地种植生物柴油生命周期能耗分别为 14.89 和 18.19 MJ/L。

由表 6 可知：当未考虑副产品分配时，利用适宜土地发展麻疯树生物柴油生命周期净能量为 18.71 MJ/L，能量比为 2.26；而利用较适宜土地发展麻疯树生物柴油的生命周期净能量为 15.41 MJ/L，能量比为 1.85，可见发展麻疯树生物柴油的净能量盈余较多，能源效率较高。当考虑副产品能量分配后，2 种等级土地发展生物柴油的净能量和能量比均有较大幅度的提高。其中利用适宜土地在副产品分配后净能量达到 24.67 MJ/L，能量比达到 3.77；而较适宜土地的净能量和能量比分别达到 22.69 MJ/L 和 3.08。

表 4 麻疯树多因子土地资源适宜性评价结果

Table 4 Land areas suitable and moderate suitable for *Jatropha curcas* L. plantation based on multi-factor analysis

| | 广西壮族自治区 | | 云南省 | | 贵州省 | | 四川省 | | 重庆市 | | 合计 | |
|-------|---------|--------|-------|--------|------|-------|------|-------|-----|-------|--------|--------|
| | 适宜 | 较适宜 | 适宜 | 较适宜 | 适宜 | 较适宜 | 适宜 | 较适宜 | 适宜 | 较适宜 | 适宜 | 较适宜 |
| 疏林地 | 115.30 | 137.80 | 5.30 | 81.42 | 0.02 | 29.03 | 0.17 | 11.76 | 0 | 8.12 | 120.80 | 268.13 |
| 高覆盖草地 | 50.31 | 70.30 | 12.62 | 108.51 | 0 | 0.17 | 0.11 | 3.41 | 0 | 1.12 | 63.03 | 183.51 |
| 中覆盖草地 | 8.16 | 9.79 | 3.22 | 44.39 | 0.93 | 24.40 | 1.00 | 12.01 | 0 | 6.92 | 13.31 | 97.51 |
| 低覆盖草地 | 0.25 | 0.59 | 0.57 | 2.77 | 0.05 | 2.91 | 0.07 | 0.29 | 0 | 0.19 | 0.93 | 6.73 |
| 滩涂 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.15 | 0 |
| 滩地 | 1 | 0.54 | 0.12 | 0.45 | 0 | 0 | 0 | 0.23 | 0 | 0.03 | 1.14 | 1.25 |
| 裸土地 | 0.09 | 0 | 0 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.09 | 0.15 |
| 合计 | 175.26 | 219.02 | 21.83 | 237.69 | 1.00 | 56.51 | 1.35 | 27.70 | 0 | 16.38 | 199.45 | 557.28 |

表 5 麻疯树生物柴油生命周期总能耗

Table 5 Energy consumption for *Jatropha curcas* L. biodiesel system in whole life cycle

| 过程 | 适宜土地 | | 较适宜土地 | | | |
|--------|---------------------------------|-------|----------------------------------|---------------------------------|-------|----------------------------------|
| | 单位土地面积能耗/(MJ·hm ⁻²) | 百分比/% | 单位体积生物柴油能耗/(MJ·L ⁻¹) | 单位土地面积能耗/(MJ·hm ⁻²) | 百分比/% | 单位体积生物柴油能耗/(MJ·L ⁻¹) |
| 原料种植 | 6985.11 | 26.01 | 3.87 | 6985.11 | 39.43 | 7.17 |
| 原料运输 | 1403.79 | 5.23 | 0.78 | 758.05 | 4.28 | 0.78 |
| 原料油生产 | 7162.70 | 26.68 | 3.97 | 3867.86 | 21.84 | 3.97 |
| 生物柴油生产 | 10776.75 | 40.13 | 5.98 | 5819.44 | 32.85 | 5.98 |
| 生物柴油运输 | 510.47 | 1.90 | 0.28 | 275.65 | 1.56 | 0.28 |
| 配送 | 13.26 | 0.05 | 0.01 | 7.16 | 0.04 | 0.01 |
| 合计 | 26852.08 | 100 | 14.89 | 17713.28 | 100 | 18.19 |

表 6 麻疯树生物柴油主副产品能量分配结果

Table 6 Allocation results of energy consumption for *Jatropha curcas* L. biodiesel

| 土地等级 | 分配前 | | 分配后 | |
|-------|---------------------------|------|---------------------------|------|
| | 净能量/(MJ·L ⁻¹) | 能量比 | 净能量/(MJ·L ⁻¹) | 能量比 |
| 适宜土地 | 18.71 | 2.26 | 24.67 | 3.76 |
| 较适宜土地 | 15.41 | 1.85 | 22.69 | 3.08 |

2.2.2 麻疯树生物柴油生命周期温室气体减排能力分析

将麻疯树生物柴油生命周期各阶段排放进行累加，得到以麻疯树为原料生产生物柴油（未经副产品分配）的总排放量（表 7）。

生物柴油生产阶段比值 CH₄ 排放最大，种植阶段和果实运输阶段所占比例接近，燃料混合、燃烧阶段排放较少。N₂O 排放则以燃烧阶段为主，其余阶段排放较少。种植阶段由于植物光合作用吸收 CO₂，因此 CO₂ 排放排放值为负^[14]；其余各阶段中燃烧阶段排放量最大。为便于与传统柴油进行对比、分析，将单位土地面积麻疯树生物柴油温室气体排放（g/hm²）转换为单位质量生物柴油生命周期能耗（g/t）。经消减后，利用适宜、较适宜土地生产生物柴油生命周期温室气体排放量分别为 1 309 488.58、1 512 870.77 g/t（表 7）；对应的 NGRV 分别为 2 258 018.73、2 054 636.54 g/t（表 8）。

根据副产品分配系数 (0.4) 计算了利用 2 种适宜性 (表 9)。结果表明, 副产品分配对于降低生物柴油生命周期总温室气体排放具有重要作用。

表 7 麻疯树生物柴油生命周期总排放
Table 7 Total emission of *Jatropha curcas* L. biodiesel in whole life cycle

| | 适宜种植土地 | | | | 较适宜种植土地 | | | |
|---------------------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------------------|
| | CH ₄ | N ₂ O | CO ₂ | GHG _{LCA, biofuel} | CH ₄ | N ₂ O | CO ₂ | GHG _{LCA, biofuel} |
| 种植阶段 | 338.13 | 9.43 | -3382851.17 | -3371586.88 | 338.13 | 9.43 | -1665517.83 | -1654253.55 |
| 果实运输阶段 | 300.26 | 5.80 | 265661.63 | 274895.90 | 162.14 | 3.13 | 143457.28 | 148443.82 |
| 原料油生产 | 291.55 | 2.21 | 292187.00 | 300134.85 | 157.44 | 1.19 | 157781.00 | 162072.84 |
| 生物柴油生产 | 787.68 | 1.63 | 256873.50 | 277051.59 | 425.35 | 0.88 | 138711.70 | 149607.87 |
| 柴油运输阶段 | 90.99 | 1.76 | 80503.52 | 83301.81 | 49.13 | 0.95 | 43471.90 | 44983.03 |
| 混合阶段 | 0.05 | 0.07 | 5481.37 | 5502.36 | 0.03 | 0.04 | 2959.94 | 2971.39 |
| 燃烧 | 34.70 | 160.15 | 4366182.39 | 4414773.97 | 18.74 | 86.48 | 2357738.49 | 2383977.96 |
| 合计 | 1843.36 | 181.05 | 1884038.24 | 1984073.60 | 1150.95 | 102.10 | 1178602.48 | 1237803.35 |
| 温室气体排放量 (g·t ⁻¹) | 1216.61 | 119.49 | 1243465.24 | 1309488.58 | 1406.72 | 124.80 | 1440514.14 | 1512870.77 |

注: GHG_{LCA, biofuel} 分别为传统柴油和生物柴油生命周期温室气体总排放; 均转换为 CO₂ 当量。

表 8 麻疯树生物柴油生命周期排放量与净温室气体减排
Table 8 Total emission of *Jatropha curcas* L. biodiesel in whole life cycle and NGRV

| | 适宜种植土地 | | | | 较适宜种植土地 | | | |
|---------|-----------------|------------------|-----------------|--------------------|-----------------|------------------|-----------------|--------------------|
| | CH ₄ | N ₂ O | CO ₂ | GHG _{LCA} | CH ₄ | N ₂ O | CO ₂ | GHG _{LCA} |
| 温室气体排放量 | 1216.61 | 119.49 | 1243465.24 | 1309488.58 | 1406.72 | 124.80 | 1440514.14 | 1512870.77 |
| NGRV | 2672.32 | -5.20 | 2192760.76 | 2258018.73 | 2482.22 | -10.51 | 1995711.87 | 2054636.54 |

注: GHG_{LCA} 为温室气体生命周期总排放量, 下同。

表 9 麻疯树生物柴油副产品分配前后生命周期总排放量与柴油对比

Table 9 Emissions for *Jatropha curcas* L. biodiesel and diesel in whole life cycle

| 总排放量 | g·t ⁻¹ | | | |
|----------------|-------------------|------------------|-----------------|--------------------|
| | CH ₄ | N ₂ O | CO ₂ | GHG _{LCA} |
| 柴油 | 3888.94 | 114.29 | 3436226.00 | 3567507.31 |
| 副产品分配后 (适宜土地) | 729.97 | 71.69 | 746079.14 | 785693.15 |
| 副产品分配后 (较适宜土地) | 844.03 | 74.88 | 864308.48 | 907722.46 |

注: 均转换为 CO₂ 当量。

2.2.3 敏感性分析

通过将生命周期影响因素增加或减小 10% 分析结果的敏感性, 结果表明该研究获得的麻疯树生命周期净能量、净温室气体减排数据对各影响因素的变化不敏感, 与文献[8]的结论类似, 因此在此未列出敏感性分析结果。同时, 原料种植阶段由于投入了大量化肥、农药, 利用适宜、较适宜的土地发展生物柴油消耗的能量分别占总能耗的 26.01%、39.43% (表 5), 与国内外学者研究结果如 35%^[8]、38%^[21] 接近。此外, 研究结果也表明利用适宜土地种植麻疯树由于产量较高, 能够明显降低原料种植阶段的能耗比重。

2.3 麻疯树规模化种植总净能量生产、温室气体减排潜力估算

基于 2.1、2.2 节成果, 利用公式 (15)、(16) 计

算西南 5 省麻疯树规模化种植净能量生产、温室气体减排潜力。由于目前副产品利用率较低, 因此本部分未计算副产品分配部分的能量与排放影响。

2.3.1 总净能量生产潜力

由表 10 所见: 麻疯树生物柴油净能量最大总生产潜力为 15 099.20 万 GJ, 若按照此区划进行生物液体燃料生产, 单位传统柴油所含能量为 46 643.77 MJ/t^[5], 则每年生产的生物柴油的净能量相当于 323.71 万 t 柴油; 而若仅利用等级为适宜的土地资源, 净能量最大总生产潜力为 6 731.89 万 GJ, 每年仅能替代 144.33 万 t 柴油。

分省统计表明, 研究区各省中以广西壮族自治区总净能量潜力最大 (表 10), 共 9 204.09 万 GJ, 其次为云南省, 总净能量约为 4 305.53 万 GJ, 其他 3 省由于适宜种植麻疯树的土地资源有限, 因此总净能量生产潜力较小。

表 10 麻疯树生物柴油总净能量生产潜力
Table 10 Total net energy production potential of *Jatropha curcas* L. biodiesel

| 省份 | 适宜土地面积/万 hm ² | 净能量/万 GJ | 较适宜土地面积/万 hm ² | 净能量/万 GJ |
|----|--------------------------|----------|---------------------------|----------|
| 广西 | 175.26 | 5915.72 | 219.02 | 3288.37 |
| 云南 | 21.83 | 736.85 | 237.69 | 3568.68 |
| 贵州 | 1.00 | 33.75 | 56.51 | 848.44 |
| 四川 | 1.35 | 45.57 | 27.70 | 415.89 |
| 重庆 | 0 | 0 | 16.38 | 245.93 |
| 合计 | 199.44 | 6731.89 | 557.30 | 8367.30 |

2.3.2 总温室气体减排潜力

对于西南 5 省，利用总净温室气体减排模型，计算当不考虑副产品分配时，麻疯树生物柴油总净温室气体减排潜力（表 11）。结果表明，西南 5 省麻疯树生物液体燃料能源作物总温室气体减排潜力为 1 591.66 万 t。

分省统计表明（表 11），研究区各省中以广西壮族自治区总减排潜力最大，共 967.79 万 t，其次为云南省，总减排量约为 474.26 万 t，其他省份温室气体总减排量相对较小。

表 11 西南 5 省区麻疯树生物柴油总净温室气体减排潜力
Table 11 Total GHG emission reduction potential of *Jatropha curcas* L. biodiesel

| 省份 | 适宜土地面积/万 hm ² | 总减排/万 t | 较适宜土地面积/万 hm ² | 总减排/万 t |
|----|--------------------------|---------|---------------------------|---------|
| 广西 | 175.26 | 599.61 | 219.02 | 368.19 |
| 云南 | 21.83 | 74.69 | 237.69 | 399.57 |
| 贵州 | 1.00 | 3.42 | 56.51 | 95.00 |
| 四川 | 1.35 | 4.62 | 27.70 | 46.57 |
| 重庆 | 0 | 0 | 16.38 | 27.54 |
| 合计 | 199.44 | 682.33 | 540.92 | 909.32 |

3 讨论

由于基于生命周期分析法研究中国境内发展麻疯树的净能量、温室气体排放的研究较少，因此该研究仅将结果与 Ou 等（2009）^[8]的研究结果进行对比。

在不考虑副产品分配的情况下，无论利用适宜种植或较适宜种植的土地发展麻疯树生物柴油的能量效率的计算结果均大于 1，说明了发展麻疯树具有较好的能量生产潜力。本研究中计算的麻疯树生物柴油的能量比为 2.26（适宜土地）和 1.85（较适宜土地），与 Ou 等（2009）^[8]计算获得的 2.004 较接近。对于麻疯树生物柴油生命周期温室气体排放，在不考虑副产品分配的情况下，CH₄ 和 CO₂ 都较柴油生命周期排放低，仅 N₂O 较柴油排放高，而温室气体排放则较柴油大幅降低，温室气体排放结果与文献[8]的研究结果接近。

同时，副产品分配对于提高净能量和温室气体减排具有重要作用，但目前副产品回收利用环节还存在很多问题，因此应加强副产品的利用效率。

通过对比利用 2 种不同等级土地发展生物柴油生命周期能源效率和环境效应可知，提高作物单产可以有效提高能源效率和环境效益。因此，研发高产能源作物从而提高作物单产，有利于提高生物液体燃料产业的可行性。

4 结论

该研究以中国西南 5 省为研究区，采用多因子综合评价和生命周期分析法等方法，对麻疯树生物柴油的发展潜力、最大净能量、温室气体减排潜力进行了分析，得到如下结论：

1) 西南 5 省适宜与较适宜麻疯树发展的土地资源分别为 199.45 和 557.28 万 hm²，适宜的土地资源类型以疏林地和高覆盖度草地为主，主要集中在广西壮族自治区，约

占 5 省区适宜土地总面积的 87.9%。云南也有部分适宜的土地资源，共 21.83 万 hm²，而其他 3 省适宜的土地资源面积较小。

2) 利用适宜与较适宜 2 种不同级别土地，发展生物柴油生命周期能耗分别为 14.89 和 18.19 MJ/L。其中：以生物柴油生产及转化阶段能耗总量最大，折合 9.95 MJ/L；其次为原料种植阶段，主要是由于种植阶段投入了大量化肥、农药。利用适宜、较适宜土地，生产生物柴油生命周期温室气体排放分别为 1 309 488.58、1 512 870.77 g/t，对应的 NGRV（净温室气体减排）分别为 2 258 018.73、2 054 636.54 g/t。结果表明：麻疯树生物柴油可以获得净能量效益并有效降低温室气体排放。

3) 麻疯树生物柴油净能量最大总生产潜力为 15 099.19 万 GJ，若按照此区划进行生物柴油生产，则每年生产的生物柴油的净能量相当于 323.71 万 t 柴油。广西壮族自治区和云南省总净能量潜力最大，分别为 9 204.09、4 305.53 万 GJ。

4) 生物液体燃料能源作物总温室气体减排潜力为 1 591.66 万 t。以广西壮族自治区总减排潜力最大，共 967.79 万 t，其次为云南省，总减排量约为 474.26 万 t，其他省份温室气体总减排量相对较小。

[参 考 文 献]

- [1] Wu W G, Huang J K, Deng X Z. Potential land for plantation of *Jatropha curcas* as feedstocks for biodiesel in China[J]. Science China Earth Sciences, 2009, 53(1): 120—127.
- [2] 王涛. 中国主要生物质燃料木本能源植物资源概况与展望[J]. 科技导报, 2005, 5(23): 12—14.
Wang Tao. A Survey of the woody plant resources for biomass fuel oil in China[J]. Science and Technology Review, 2005, 5(23): 12—14. (in Chinese with English abstract)
- [3] Zhuang Dafang, Jiang Dong, Liu Lei, et al. Assessment of bioenergy potential on marginal land in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(2): 1050—1056.
- [4] Rebitzera G, Ekvallb T, Frischknecht R, et al. Life cycle assessment, Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications[J]. Environment International, 2004, 30(5): 701—720.
- [5] Dai Du, Hu Zhiyuan, Pu Gengqiang, et al. Energy efficiency and potentials of cassava fuel ethanol in Guangxi region of China[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(13/14): 1686—1699.
- [6] Leng Rubo, Wang Chengtao, Zhang Cheng, et al. Life cycle inventory and energy analysis of cassava-based fuel ethanol in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2008, 16(3): 374—384.
- [7] 张彩霞. 我国生物乙醇的资源潜力及影响评价[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
Zhang Caixia. Potential and Impact Assessment of Bio-ethanol in China[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [8] Ou Xunmin, Zhang Xiliang, Chang Shiyan, et al. Energy consumption and GHG emissions of six biofuel pathways by

- LCA in (the) People's Republic of China[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(Suppl.): 197—208.
- [9] Food and Agriculture Organization (FAO). *Agro-ecological Zoning Guidelines*[R]. 1996.
- [10] 袁理春, 赵琪, 康平德, 等. 云南麻疯树(*Jatropha curcas*) 资源生态地理分布及评价[J]. *西南农业学报*, 2007, 20(6): 1283—1287.
Yuan Lichun, Zhao Qi, Kang Pingde, et al. Investigation of geographical distribution and evaluation of *Jatropha curcas* in Yunnan province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2007, 20(6): 1283—1287. (in Chinese with English abstract)
- [11] Liu J, Liu M, Zhuang D, et al. Study on spatial pattern of landuse change in China during 1995-2000[J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 46(4): 373—84.
- [12] Henning R K. *The Jatropha System—Economy and dissemination Strategy*. 2004. [EB/OL]. <http://www.jatropha.de/>. [2009-3-15].
- [13] Wang M Q. Development and uses of GREET 1.6. Center for Transportation Research[R]. Argonne National Laboratory, 2001.
- [14] 朱琪. 生物柴油的生命周期能源消耗、环境排放与经济性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
Zhu Qi. Study of Life Cycle Energy Consumption, Environmental Emission and Economics of Biodiesel[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [15] 中国交通出版社. 2010 中国交通运输统计年鉴[R]. 北京: 中国交通出版社, 2011.
China Transportation and Communication Publication House. 2010 year book of China transportation and communication[R]. Beijing: China Transportation and Communication Publication House, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [17] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *IPCC third assessment report: climate change 2001*[R]. 2001.
- [18] Bengt M. Assessment of the potential of *Jatropha curcas* (biodiesel tree) for energy production and other uses in developing countries [EB/OL]. ECHO website: http://www.echotech.org/mambo/index.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=179&Itemid=68S, 2006.
- [19] Whitaker M, Heath G. Life cycle assessment of the use of *Jatropha* biodiesel in Indian Locomotives[R]. National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- [20] 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)
- [21] Fiorese G, Guariso G. A GIS-based approach to evaluate biomass potential from energy crops at regional scale[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2010, 25(6): 702—711.
- [22] Prueksakorn K, Gheewala S H, Malakul P, et al. Energy analysis of *Jatropha* plantation systems for biodiesel production in Thailand[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2010, 14(1), 1—5.

Assessments of suitability, energy capacity and environment impact on biodiesel from *Jatropha curcas* L.

Yin Fang¹, Liu Lei¹, Jiang Dong^{2,3}, Ren Hongyan^{2,3}

(1. College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xian 710054, China; 2. Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai, 200062, China; 3. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: To provide the basis for the development of biodiesel from *Jatropha curcas* L. (JCL), marginal land suitable for JCL planting and their spatial distribution, suitability degrees were investigated, then total net energy production potential and GHG emission reduction potential derived from large-scale planting of JCL in southwest of China were estimated. Multi-factor comprehensive analysis method was used to identify marginal land resources suitable for JCL cultivation, make suitability assessment, and obtain their spatial distribution, suitability degree and total amount. Then, using life cycle analysis (LCA) method, the life cycle net energy and greenhouse gas emission reduction capacity of marginal land resources with different suitability degrees for biodiesel production was calculated. The life cycle model was expanded to obtain the potentiality of total net energy production and greenhouse gas emission reduction of JCL plantation. The results showed that the areas of suitable and moderate suitable land resources for cultivating JCL were 1 994 500 and 5 572 800 hm², respectively. Using these land resources, the maximum net production potential of biodiesel produced from JCL and the total greenhouse gas emission reduction capacity in each year would be 150 991 940 GJ and 15 916 550 t, respectively. The results can provide reference for biodiesel industry.

Key words: diesel fuel, biomass, environmental impact assessments, *Jatropha curcas* L., marginal land, life cycle analysis, net energy, greenhouse gas emission reduction