

中国西南地区木薯燃料乙醇发展潜力及对温室气体减排的影响

尹芳¹ 刘磊¹ 江东² 刘睿^{3*}

- (1. 长安大学 地球科学与资源学院, 西安 710054;
2. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 重庆师范大学 地理科学学院, 重庆 400047)

摘要 利用多因子综合分析和生命周期分析的研究方法,对中国西南5省区(重庆、四川、云南、贵州、广西)适宜木薯种植的宜能边际土地资源潜力、适宜性等等级等进行研究,并对该区发展木薯燃料乙醇的能量生产及温室气体减排潜力进行了分析,结果表明:1)西南5省区适宜与较适宜木薯发展的土地资源分别为88.49万和456.62万 hm^2 ,主要集中于广西、云南,其中,广西适宜与较适宜的土地资源分别为83.30万和253.64万 hm^2 ,云南适宜与较适宜的土地资源分别为5.19万和162.36万 hm^2 ;2)若这些土地资源全部被利用,则该区木薯燃料乙醇的净能量最大总生产潜力为6254.590万 GJ/a ;3)同时,该区规模化生产木薯燃料乙醇的总温室气体减排潜力为139.016万 t/a 。本研究结果可为国家及地方政府环境保护、温室气体减排目标和相关产业政策的制定提供参考。

关键词 木薯; 燃料乙醇; 边际土地; 温室气体减排

中图分类号 P 967 文章编号 1007-4333(2013)06-0018-09 文献标志码 A

Potential of cultivation capacity of cassava fuel ethanol in Southwest China and its effect on greenhouse gas emission reduction

YIN Fang¹, LIU Lei¹, JIANG Dong², LIU Rui^{3*}

- (1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China;
2. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
3. College of Geographical Science, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

Abstract Firstly, spatial distribution, suitability degree and the total amount of marginal land resources suitable for cultivating cassava in Southwest China were identified using multi-factor comprehensive analysis method. Then, the life cycle net energy and greenhouse gas emission reduction capacity of cassava on marginal land with different suitability degrees were calculated, based on the expanded life cycle model for cassava fuel ethanol. The results showed that the areas of suitable and moderate suitable land resources for cultivating cassava were 884 900 and 4 566 200 hm^2 , respectively. The suitable and moderate suitable land resources are mainly concentrated in Guangxi and Yunnan. The areas of suitable and moderate suitable land resources for Guangxi were 833 000 and 2 536 400 hm^2 , respectively. These for Yunnan were 51 900 and 1 623 600 hm^2 , respectively. Using these land resources, the maximum net production potential of fuel ethanol produced from cassava and the total greenhouse gas emission reduction capacity in each year would be 62 545 900 GJ and 1 390 160 t , respectively. The results has the potential to deliver technical methods for assessment of the development and environmental benefits of biofuels derived from energy plants.

Key words cassava; fuel ethanol; marginal land; greenhouse gas emission reduction

收稿日期: 2013-03-20

基金项目: 中国科学院知识创新项目(KSCX2-YW-N-039); 国防科工局高分辨率对地观测重大专项(30-Y30A07-9001-12/13); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2013G1271103)

第一作者: 尹芳, 博士, 主要从事 GIS 与遥感技术应用方面的研究, E-mail: yinf@lreis. ac. cn

通讯作者: 刘睿, 副教授, 博士, 主要从事地理信息系统应用及资源环境遥感研究, E-mail: liur@lreis. ac. cn

近年来,能源需求的巨大缺口已成为中国经济社会可持续发展的“瓶颈”,石油供给压力空前增大。如2012年中国共消费石油4.837亿t,占世界石油总消耗的11.7%,其中进口量达到石油加工总量的57.1%。能源过高的进口依赖度已经威胁到国家能源战略安全^[1]。因此,作为石油替代性产品的生物质能,特别是燃料乙醇,受到越来越多的关注,中国政府早在20世纪90年代便启动了一系列生物燃料乙醇技术研发项目。2005年颁布的《可再生能源法》,明确大力发展包括燃料乙醇在内的可再生能源。2007年颁布的《可再生能源中长期发展规划》制定了非粮燃料乙醇发展目标:到2010年,增加“非粮”原料燃料乙醇年利用量200万t;到2020年,计划生物燃料乙醇年利用量达到1000万t。

考虑到国情、粮食安全等多方面因素,作为非粮生物质能原料,木薯被普遍认为是中国发展“非粮”燃料乙醇的最合适原料^[2-5]。在现有技术条件下,利用木薯生产燃料乙醇的经济性显著高于红薯、甘蔗、玉米、小麦、马铃薯等作物^[2,4,6]。近年来,国内外学者分别从木薯生长习性、燃料乙醇转化效率、能源效率、环境影响和经济效益等方面研究发展木薯燃料乙醇的可行性,为木薯燃料乙醇产业化提供了基础^[4-15]。同时,中国农业部在2007年制定的《木薯优势区域布局规划(2007—2015)》中明确提出:到2015年,全国木薯收获面积达100万hm²,平均单产达30.0t/hm²,鲜薯总产量达3000万t。

然而,木薯燃料乙醇发展面临着诸多不确定性,主要表现在原料供给能力、净能量生产与温室气体减排潜力的准确评估等方面。目前,虽然已有研究针对木薯燃料乙醇原料供给潜力,即评价适宜规模化种植木薯的土地资源数量及质量,但缺少可靠的

土地利用、气象等空间数据作为基础,导致评估精度不高;虽然已有较多利用生命周期分析(Life Cycle Assessment, LCA)等方法研究木薯燃料乙醇生命周期的净能量和温室气体减排^[9-14],但大多是基于单位体积或质量(如1L乙醇)燃料乙醇开展的,无法对大规模发展木薯燃料乙醇的净能量和温室气体减排潜力进行估算。

针对上述问题,本研究选取中国西南5省区(重庆、四川、贵州、云南、广西)为研究区,综合采用GIS(Geographic Information System,地理信息系统)与LCA等技术方法,开展以下两方面的研究:1)确定该区适宜木薯种植的边际土地资源数量、等级及其空间分布;2)构建相应分析模型,对该区木薯燃料乙醇的最大净能量、温室气体减排潜力进行准确评估。

1 研究区及木薯生长习性分析

1.1 研究区简介

本研究选取中国西南5省区为研究区,行政区划上包括四川、云南、贵州3省和重庆直辖市、广西壮族自治区,总面积236.58万km²,占全国国土面积的24.6%。该区以湿润北亚热带季风气候和低纬高原中南亚热带季风气候为主,具有良好的光、温、水条件,是中国农、林、牧业集中发展区域,适宜木薯等多种能源植物生长。

1.2 木薯生长习性

木薯对土壤条件要求不高,甚至在比较贫瘠、有砾石的土壤均可种植,特别适合在山区种植^[15]。通过查阅相关文献并进行实地调查,本研究确定了木薯生长对温度、水分、坡度、地形及土壤的约束条件(表1)。

表1 木薯生长对温度、水分、坡度及土壤条件的要求^[15-16]

Table 1 Temperature, soil moisture, and land slope under three categories of land suitability for cassava plantation

指标 Indicators	适宜 Suitable	较适宜 Moderate suitable	不适宜 Unsuitable
温度条件 Temperature condition	年均气温/°C Annual mean temperature	≥21	18~21 ≤18
水分条件 Water condition	降水/mm Precipitation	1 000~2 000	600~1 000 或 2 000~6 000 >6 000 或 <600
	Thornthwaite 指数 Thornthwaite index	-33.3~100.0	-66.7~-33.3 >100.0 或 <-66.7

续表

指标 Indicators		适宜 Suitable	较适宜 Moderate suitable	不适宜 Unsuitable
坡度条件 Slope		$\leq 15^\circ$	$15^\circ \sim 25^\circ$	$\geq 25^\circ$
高程条件 Terrain condition	海拔/m Elevation	$\leq 1\ 500$	1 500~2 000	$\geq 2\ 000$
土壤条件 Soil quality	土层厚度/cm Soil depth	≥ 75	30~75	≤ 30
	土壤有机质含量/% Organic contents	≥ 3.5	1.5~3.5	≤ 1.5
	土壤质地(壤土体积比/%) Soil texture	≥ 30	10~30	≤ 10

2 数据来源

木薯适宜种植的边际土地资源潜力评价需要利用气象数据、高程数据、土壤数据及土地利用数据等进行综合分析。而木薯燃料乙醇的最大净能量、温室气体减排潜力研究需要利用不同等级土地木薯产量、生命周期内各项投入的能耗参数数据等。

2.1 自然条件数据

1) 气象数据。气象数据来源于中国气象局发布的1950—2010年气象台站观测数据。基于气候数据插值算法制备成年均气温、Thorntwaite指数等栅格数据。

2) 地形数据。本研究采用地形数据为全国1:25万地图数据库,由国家测绘局提供。利用GIS软件进行相应处理,获得全国平均坡度信息、高程分级信息,作为评价土地适宜性的基础信息。

3) 土壤数据。根据全国第二次土壤普查的记录,利用Kriging插值算法制作了包括土壤类型及其理化性状信息的空间数据,包括土层厚度、土壤有机质含量、土壤质地等。

2.2 土地利用数据

本研究采用的土地利用数据来自中国科学院1:10万土地利用数据集,由中国科学院资源环境科学数据中心提供。该数据集基于Landsat TM/ETM和中巴资源卫星影像解译而来,数据总体精度在92%以上^[17]。该数据集包括了6个一级地类和25个二级地类。西南地区适宜木薯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)^[16]。

2.3 生命周期能量、排放数据

木薯燃料乙醇生命周期整个过程消耗化肥、农

药、石油产品、煤、天然气、水电、火电、己烷、甲醇等,产出燃料乙醇和副产品。该研究中,采用的木薯产量等部分数据通过实地调查并综合相关文献获得^[13-14],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及燃煤生产等)主要参考国内外公开出版的相关文献资料,以及美国阿冈(Argonne)国家实验室的GREET模型数据库^[11-12,18-23]。国外数据都根据中国西南5省区的具体情况进行了修正。

经实地调查并结合已有文献^[13-14,22],确定适宜与较适宜等级土地种植木薯平均单产分别为20.000和13.333 t/hm²。本研究根据已有文献^[14]并结合实地调查,确定利用适宜与较适宜的土地种植木薯每年可分别吸收CO₂约1.95和1.30 t/hm²。

木薯燃料乙醇生命周期过程基本参数和主要投入的排放参数列于表2和表3。其中,根据调查及参考相关文献,中国西南5省区电力组成中,水电占40%,火电占60%^[13-14]。

表2 木薯种植阶段主要参数特征

Table 2 Main parameters for cassava plantation

生命周期过程 LCA pathways	用量 Amount
种植阶段 Plantation	
N肥/(kg/hm ²) N fertilizer	100 ^[14]
P肥/(kg/hm ²) P fertilizer	100 ^[14]
K肥/(kg/hm ²) K fertilizer	200 ^[14]
除草剂/(kg/hm ²) Herbicide	5 ^[13]
电/(kWh/hm ²) Electricity	90
柴油/(L/hm ²) Diesel	44

续表

生命周期过程 LCA pathways	用量 Amount
木薯干片运输距离/km Cassava dry chip transportation distance	250 ^[14]
燃料乙醇生产阶段 Ethanol production	
木薯干片转化效率 Cassava dry chip conversion rate	3 ^[13-14]
乙醇转化效率 Ethanol conversion rate	2.6 ^[13-14]
总能耗(MJ/L; bioethanol) Total energy consumption	11.109 ^[13-14, 21-22]
燃料乙醇运输距离/km Ethanol transportation distance	300 ^[14]
燃料乙醇配送/(kWh/L) Ethanol distribution	0.0007 ^[13]
副产品分配/% Sharing ratio of the by-product	18.06 ^[13-14]

注：表中未标出处数据均为实地调查数据。

Note: The unlabeled data are acquired through field investigation.

表 3 燃料乙醇生命周期主要物质排放参数

Table 3 Main emission parameters of cassava fuel ethanol life cycle g/t

投入 Inputs	CH ₄	N ₂ O	CO ₂
N 肥 N fertilizer	1 634.4	69.1	1 519 548.1
P 肥 P fertilizer	121.9	1.0	432 112.7
K 肥 K fertilizer	896.0	7.0	655 492.0
除草剂 Herbicide	31 954.0	234.5	23 496 370.0
柴油(L) Diesel	0.020	0.075	3 199.460
电(度) Electricity	0.004	0.005	413.452
煤 Coal	31.110	21.110	2 695 731.510

注：引用参考文献[1, 14, 22-23]。

Note: Adapted from reference [1, 14, 22-23].

3 研究方法

3.1 木薯适种的边际土地资源识别与评价

根据木薯生长习性,利用 GIS 软件对研究区的气象数据、地形数据、土壤数据和土地利用数据等进行处理。

1)将上述所有数据重采样为 1 000 m 空间分辨率并统一坐标系统;

2)根据木薯对温度、水分、坡度、海拔、土壤等自然条件的要求(表 1),利用 GIS 工具对各种自然条件相应数据进行处理,在空间分布上将其划分为适宜、较适宜和不适宜三级^[15];

3)以上述单因子分析结果为基础,对土地资源适宜性进行多因子综合评价;

4)结合土地利用数据,对各种类型土地资源的适宜性及等级进行分析。

3.2 木薯燃料乙醇净能量、温室气体减排能力

木薯燃料乙醇生命周期主要包括木薯种植(原料生产)、干片运输、乙醇生产、乙醇运输配送和燃烧 5 个大部分^[13]。其中原料生产阶段包括土地准备、茎干修剪、扦插、施肥、收获鲜薯、切片、烘干等过程^[14]。

3.2.1 木薯燃料乙醇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)是评价木薯燃料乙醇生命周期能源效率的关键参数^[18]。净能量是燃料乙醇提供的能量减去燃料乙醇生命周期的能量消耗;能量比是指燃料乙醇提供的能量与燃料乙醇生命周期的能量消耗之比。

单位质量燃料乙醇的净能量分析数学模型如下^[19]:

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

式中,NEV 为燃料乙醇年净能量, MJ/hm²; BE 为燃料乙醇所含能量, MJ/hm²; FE₁、FE₂、FE₃、FE₄、FE₅ 分别为原料生产、干片运输、燃料乙醇生产转化、乙醇输配、副产品能量, MJ/hm²。FE₁~FE₅ 计算公式参见文献[19-20]。

能量比分析数学模型如下^[17]:

$$ER = \frac{BE}{FE_1 + FE_2 + FE_3 + FE_4 - FE_5} \quad (2)$$

3.2.2 木薯燃料乙醇生命周期温室气体减排能力分析

温室气体排放主要包括 CO₂、CH₄、N₂O, 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 CO₂ 当量,按下式计算温室气体排放总量^[18]。

$$GHG_{LCA} = 23CH_{4,LCA} + 296N_{2O,LCA} + CO_{2,LCA} \quad (3)$$

式中:GHG_{LCA}为生命周期温室气体总排放量, g/hm²;

$CH_{4,LCA}$ 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, 单位 g/hm^2) 是与燃料乙醇等能量值的传统汽油温室气体排放减去燃料乙醇生命周期总排放所得的差值^[18]。利用下式计算

$$NGRV = GHG_{LCA,CG} - GHG_{LCA,biofuel} \quad (4)$$

式中, $GHG_{LCA,CG}$ 、 $GHG_{LCA,biofuel}$ 分别为传统汽油和燃料乙醇生命周期温室气体总排放, 单位 g/hm^2 。 $GHG_{LCA,biofuel}$ 按下式计算

$$GHG_{LCA,biofuel} = C_1 + C_2 + C_3 - C_{avoided} + C_4 + C_5 \quad (5)$$

式中, C_1 是原料生产过程的温室气体排放量, g/hm^2 ; C_2 是木薯干片运输过程的温室气体排放量, g/hm^2 ; C_3 是燃料乙醇生产、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 是燃料乙醇运输过程的温室气体排放量, g/hm^2 ; C_5 为燃料乙醇燃烧阶段排放量, g/hm^2 。 C_1 、 C_2 、 C_3 、 $C_{avoided}$ 、 C_4 计算公式参见文献^[17], C_5 利用 GREET 模型获取。

3.3 西南5省区木薯规模化种植净能量生产、温室气体减排潜力估算

3.3.1 西南5省区木薯总净能量生产潜力分析模型

通过对单位(体积或质量)燃料乙醇生命周期净能量平衡模型进行改进, 将 LCA 与 GIS 结合, 构建大区域发展木薯燃料乙醇总净能量生产潜力模型^[20,24-27]; 该模型根据不同适宜性等级的边际土地资源总量及其相应的 LCA 净能量生产潜力, 估算西南地区发展木薯燃料乙醇的总净能量潜力。

$$SumNEV = \sum_i (NEV_i \times X_i) \quad (6)$$

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 类土地生产木薯燃料乙醇的净能量, MJ/hm^2 ; X_i 为第 i 类土地上种植木薯的土地面积, hm^2 。

3.3.2 木薯燃料乙醇总温室气体减排潜力分析模型

通过对单位(体积或质量)木薯燃料乙醇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, 估算西南5省区发展木薯燃料乙醇的总净温室气体减排潜力^[24-27]。

$$SumGHG = \sum_i (NGRV_i \times X_i) \quad (7)$$

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 类土地生产木薯燃料乙醇的净温室气体减排量, g/hm^2 ; X_i 为第 i 类土地上种植木薯的土地面积, hm^2 。

4 结果分析及讨论

4.1 木薯土地资源适宜性评价

以气象、高程、土地利用等多种空间数据为数据源, 以 GIS 为工具, 利用多因子综合评价法, 计算得出研究区具备木薯规模化开发潜力的土地资源数量。具体结果如图 1、2 和表 4, 可以得到如下结论:

1) 总体来看, 木薯对温度条件的要求较高, 在西南5省区适宜木薯种植的土地资源相对较少。具体来看, 适宜与较适宜木薯发展的土地资源分别为 88.49 万和 456.62 万 hm^2 。其中, 适宜的土地资源

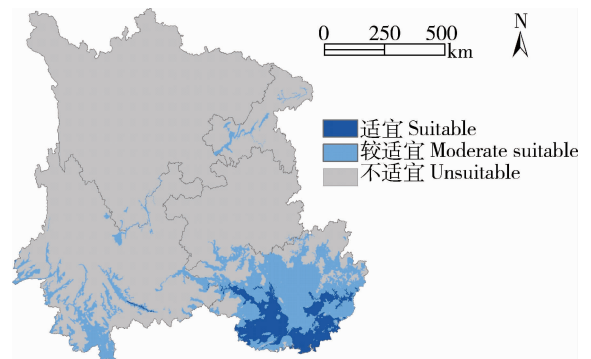


图 1 基于多因子综合分析的木薯土地适宜性空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of suitability of land for cassava plantation based on multi-factor analysis

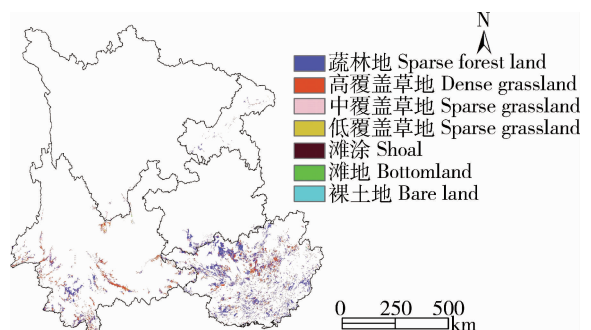


图 2 适宜与较适宜木薯种植的土地类型空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the suitable and moderate suitable land use types for cassava plantation

类型以疏林地、高覆盖度草地和中覆盖度草地 3 种类型为主。

2) 适宜的土地资源主要集中在温度较高的广西

自治区, 约占 5 省区适宜土地总面积的 94.1%, 主要为疏林地和高覆盖度草地 2 种类型。云南也有少量适宜的土地资源, 仅 5.19 万 hm^2 。

表 4 西南 5 省区木薯多因子土地资源适宜性评价结果

Table 4 Land areas suitable and moderate suitable for cassava plantation based on multi-factor analysis in Southwest China

万 hm^2

土地类型 Land type	广西自治区 Guangxi		云南省 Yunnan		贵州省 Guizhou		四川省 Sichuan		重庆市 Chongqing		5 省区合计 Total	
	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 Sparse forest land	61.85	157.09	0.78	53.93	0	13.42	0	1.49	0	3.57	63.01	231.51
高覆盖草地 Dense grassland	18.31	81.13	3.54	78.71	0	0.08	0	1.10	0	0.60	24.08	176.83
中覆盖草地 Moderate dense grassland	2.42	13.87	0.70	27.69	0	11.52	0	4.83	0	2.63	3.71	61.70
低覆盖草地 Sparse grassland	0.02	0.62	0.18	1.55	0	1.07	0	0.17	0	0.08	0.20	3.52
滩涂 Shoal	0.04	0.09	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0.00	0.04	0.09
滩地 Bottomland	0.58	0.85	0	0.41	0	0	0	0.04	0	0.03	0.58	1.32
裸土地 Bare land	0.09	0.00	0	0.07	0	0	0	0.00	0	0.00	0.09	0.07
合计 Total	83.30	253.64	5.19	162.36	0	26.09	0	7.63	0	6.90	88.49	456.62

4.2 木薯燃料乙醇生命周期净能量、温室气体减排能力分析结果

4.2.1 木薯燃料乙醇生命周期净能量平衡分析

通过对木薯燃料乙醇生命周期各阶段能耗的分析, 可以得到以木薯为原料生产燃料乙醇的能量投

入, 利用适宜、较适宜 2 种等级土地发展燃料乙醇生命周期能耗分别为 48 871.692 和 36 046.599 MJ/hm^2 (表 5)。为便于对比、分析, 将单位土地面积木薯燃料乙醇能耗转换为单位体积燃料乙醇生命周期能耗。由表 5 可知, 虽然利用适宜与较适宜 2 种不

表 5 1 hm^2 木薯燃料乙醇生命周期总能耗

Table 5 Energy consumption for cassava fuel ethanol system in the whole life cycle per hm^2

过程 Stages	适宜土地 Suitable			较适宜土地 Moderate suitable		
	单位土地面积 能耗/ (MJ/hm^2) Average energy consumption	百分比/ $\%$ Percent	单位体积生物 柴油能耗/ (MJ/L) Energy consumptions per liter	单位土地面积 能耗/ (MJ/hm^2) Average energy consumption	百分比/ $\%$ Percent	单位体积生物 柴油能耗/ (MJ/L) Energy consumptions per liter
原料生产 Plantation	10 398.335	21.277	3.201	10 398.335	28.847	4.801
干片运输 Dry chips transportation	1 497.379	3.064	0.461	998.228	2.769	0.461
转化变性 Ethanol production	36 089.669	73.846	11.109	24 059.178	66.745	11.109
乙醇运输 Ethanol transportation	863.873	1.768	0.266	575.901	1.598	0.266
配送 Distribution	22.436	0.046	0.007	14.957	0.041	0.007
合计 Total	48 871.692	100.000	15.044	36 046.599	100.000	16.645

同等级土地栽植木薯对原料种植阶段能耗影响较大,但从整个生命周期来看,乙醇转化变性阶段能耗总量最大,折合 11.109 MJ/L,分别占总能耗的 73.846%和 66.745%;其次为原料种植、生产阶段,主要是由于种植阶段投入了大量化肥、农药,利用两种不同等级的土地栽植木薯消耗的能量分别为 3.201 和 4.801 MJ/L,分别占总能耗的 21.277%和 28.847%;其次为干片运输和乙醇运输阶段消耗的能量为 0.727 MJ/L,约占总能耗的 4.3%~4.8%;配送阶段消耗能量最少,占总量的 0.1%以下。综上,计算得利用适宜与较适宜两种不同级别土地发

展木薯燃料乙醇生命周期能耗分别为 15.044 和 16.645 MJ/L。

由表 6 可知:当未考虑副产品分配时,利用适宜土地发展木薯燃料乙醇生命周期净能量为 6.140 MJ/L,能量比为 1.408;而利用较适宜土地发展木薯燃料乙醇的生命周期净能量仅为 4.540 MJ/L,能量比为 1.273。当考虑副产品能量分配后,两种等级土地发展燃料乙醇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 8.857 MJ/L,能量比达到 1.719;而较适宜土地的净能量和能量比分别达到 7.546 MJ/L 和 1.553。

表 6 木薯燃料乙醇主副产品能量分配结果

Table 6 Allocation results of energy consumption for cassava-based fuel ethanol

土地等级 Suitable degrees	分配前 Before allocation		分配后 After allocation	
	净能量/(MJ/L)	能量比	净能量/(MJ/L)	能量比
	Net energy	Energy ratio	Net energy	Energy ratio
适宜土地 Suitable land	6.140	1.408	8.857	1.719
较适宜土地 Moderate suitable land	4.540	1.273	7.546	1.553

4.2.2 木薯燃料乙醇生命周期温室气体减排能力分析

通过对木薯燃料乙醇生命周期各阶段温室气体排放进行累加,可以得到以木薯为原料生产燃料乙

醇未经副产品分配的总排放(表 7)。

CH₄ 主要由原料生产和运输阶段排放引起,两者共占总排放的 90%以上,其余各阶段所占比例较少。对于 N₂O 排放,燃烧和转化阶段所占比重

表 7 木薯燃料乙醇生命周期总排放

Table 7 Total emission of cassava fuel ethanol in whole life cycle

g/hm²

阶段 Stages	适宜种植土地 Suitable land				较适宜种植土地 Moderate suitable land			
	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	GHG _{LCA, biofuel}	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	GHG _{LCA, biofuel}
原料生产阶段 Plantation	691.1	13.4	-1 313 188.2	-1 293 316.1	691.1	13.4	-663 187.8	-643 315.8
干片运输阶段 Dry chips transportation	320.3	6.2	283 372.4	292 569.2	213.5	4.1	188 910.2	195 041.4
燃料乙醇生产 Ethanol production	52.1	32.4	4 112 201.9	4 122 980.1	34.7	21.6	2 746 284.0	2 753 470.0
乙醇运输 Ethanol transportation	184.8	3.6	163 484.1	168 790.0	123.2	2.4	108 986.7	112 523.7
乙醇配送 Distribution	0.1	0.1	9 276.2	9 311.4	0.1	0.1	6 184.1	6 207.7
燃烧阶段 Combustion	50.4	41.4	4 287 474.5	4 300 892.3	33.6	27.6	2 858 247.8	2 867 193.0
合计 Total	1 298.8	97.1	7 542 621.0	7 601 227.0	1 096.2	69.2	5 245 425.0	5 291 120.0
温室气体排放量/(g/t) GHG	506.5	37.9	2 941 625.1	2 964 481.5	641.3	40.5	3 068 576.7	3 095 308.3
NGRV	3 734.1	94.1	132 919.6	254 310.5	3 576.4	91.0	-12 357.9	104 177.3

最大,其次为原料生产阶段和运输阶段。木薯乙醇生命周期各阶段 CO₂ 排放以转化阶段和燃烧阶段为主,两者之和占总量的 95%以上。经种植阶段 CO₂ 排放消减后,利用适宜、较适宜土地生产木薯燃料乙醇生命周期温室气体排放分别为 2 964 481.5 和 3 095 308.3 g/t(表 7);对应的 NGRV 分别为 254 310.5 和 104 177.3 g/t(表 7)。

本研究将获得的燃料乙醇生命周期排放数据与汽油进行对比,在不考虑副产品分配的情况下,木薯燃料乙醇生命周期仅 CH₄ 和 N₂O 排放较汽油低,

CO₂ 排放与汽油接近,温室气体排放略低于汽油排放。

4.3 木薯规模化种植总净能量生产、温室气体减排潜力估算

利用公式(6)、(7)计算西南地区木薯规模化种植净能量生产、温室气体减排潜力。

4.3.1 总净能量生产潜力

结果表明(表 8),西南 5 省区木薯燃料乙醇净能量最大总生产潜力为 6 254.590 万 GJ;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 1 765.172 万 GJ。

表 8 木薯燃料乙醇总净能量生产潜力

Table 8 Total net energy production potential of cassava fuel ethanol

省份 Province	适宜土地面积/(10 ⁴ hm ²) Suitable land	净能量/(10 ⁴ GJ) Net energy	较适宜土地面积/(10 ⁴ hm ²) Moderate suitable land	净能量/(10 ⁴ GJ) Net energy
广西 Guangxi	83.30	1 661.643	253.64	2 493.750
云南 Yunnan	5.19	103.529	162.36	1 596.299
贵州 Guizhou	0.00	0.000	26.09	256.513
四川 Sichuan	0.00	0.000	7.63	75.017
重庆 Chongqing	0.00	0.000	6.90	67.840
合计 Total	88.49	1 765.172	456.62	4 489.418

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,共 4 155.393 万 GJ;其次为云南省,总净能量约为 1 699.827 万 GJ,其他 3 省区由于适宜种植木薯的土地资源有限,总净能量生产潜力较小。

4.3.2 总温室气体减排潜力

对于中国西南 5 省区,利用总净温室气体减排模型,计算当不考虑副产品分配时,西南 5 省区木薯

燃料乙醇总净温室气体减排潜力(表 9)。结果表明,西南地区木薯燃料乙醇总温室气体减排潜力为 139.016 万 t。

分省统计表明,研究区各省中以广西壮族自治区总减排潜力最大,共 99.485 万 t;其次为云南省,总减排量约为 32.297 万 t,其他省份温室气体总减排量相对较小。

表 9 西南 5 省区木薯燃料乙醇总净温室气体减排潜力

Table 9 Total GHG emission reduction potential of cassava fuel ethanol in Southwest China

省份 Province	适宜土地面积/(10 ⁴ hm ²) Suitable land	总减排/(万 t) Net energy	较适宜土地面积/(10 ⁴ hm ²) Moderate suitable land	总减排/(万 t) Net energy
广西 Guangxi	83.30	54.318	253.64	45.167
云南 Yunnan	5.19	3.384	162.36	28.912
贵州 Guizhou	0	0	26.09	4.646
四川 Sichuan	0	0	7.63	1.359
重庆 Chongqing	0	0	6.90	1.229
合计 Total	88.49	57.702	456.62	81.313

5 结论

本研究以中国西南 5 省区为研究区,采用 GIS 和 LCA 等方法,并对西南地区木薯燃料乙醇的发

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)西南地区适宜与较适宜木薯发展的土地资源分别为 88.49 万和 456.62 万 hm²,适宜的土地资源

类型以疏林地、高覆盖度草地和中覆盖度草地 3 种类型为主。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 94.1%。云南也有部分适宜的土地资源,但仅 5.19 万 hm^2 ,而其他 3 省适宜的土地资源面积较小。

2) 利用适宜与较适宜两种不同级别土地发展木薯燃料乙醇生命周期能耗分别为 17.246 和 19.550 MJ/L。其中以燃料乙醇转化变性阶段能耗总量最大,折合 11.109 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、较适宜土地生产燃料乙醇生命周期温室气体排放分别为 2 964 481.5 和 3 095 308.3 g/t;对应的 NGRV (净温室气体减排)分别为 254 310.5 和 104 177.3 g/t。结果表明木薯燃料乙醇可以获得净能量效益并有效降低温室气体排放。

3) 西南 5 省区木薯燃料乙醇净能量最大总生产潜力为 6 254.590 万 GJ,其中,广西壮族自治区总净能量潜力最大,共 4 155.393 万 GJ。

4) 对于中国西南地区,当不考虑副产品分配时,西南 5 省区木薯燃料乙醇总净温室气体减排潜力为 139.016 万 t。以广西自治区总减排潜力最大,共 99.485 万 t。

参 考 文 献

[1] BP. BP Statistical Review of World Energy[R]. UK, London: British Petroleum, 2013

[2] Yu S, Tao J. Life cycle simulation-based economic and risk assessment of biomass-based fuel ethanol (BFE) projects in different feedstock planting areas[J]. *Energy*, 2008, 33: 375-384

[3] 谢光辉. 非粮生物质原料体系研发进展及方向[J]. *中国农业大学学报*, 2012, 17(6): 1-19

[4] 韦昌联, 卢柳忠, 黎贞崇. 我国木薯生物质能源产业发展现状与科技需求[J]. *酿酒科技*, 2012 (7): 108-111

[5] Yang H, Chen L, Yan Z C, et al. Emergy analysis of cassava-based fuel ethanol in China[J]. *Biomass Bioenergy*, 2011, 35 (1): 581-589

[6] 秦建文, 王耀钰, 叶洪强. 广西木薯燃料酒精产业发展研究[J]. *广西大学学报: 哲学社会科学版*, 2008, 30(5): 15-18

[7] Nguyen T L T, Gheewala S H, Garivait S. Full chain energy analysis of fuel ethanol from cassava in Thailand [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41: 4135-4142

[8] Nguyen T L T, Gheewala S H, Garivait S. Energy balance and GHG abatement cost of cassava utilization for fuel ethanol in Thailand[J]. *Energy Policy*, 2007, 35: 4585-4596

[9] Seksan Pamong, Pomthong Malakul. Life-cycle energy and environmental analysis of bioethanol production from cassava in Thailand[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(1): 112-118

[10] Sorapipatana C, Yoosin S. Life cycle cost of ethanol production from cassava in Thailand [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(2): 1343-1349

[11] Hu Z, Fang F, Ben D, et al. Net energy, CO₂ emission, and life cycle cost assessment of cassava-based ethanol as an alternative automotive fuel in China[J]. *Applied Energy*, 2004, 78: 247-256

[12] Yu S, Tao Jing. Energy efficiency assessment by life cycle simulation of cassava-based fuel ethanol for automotive use in Chinese Guangxi context[J]. *Energy*, 2009, 34: 22-31

[13] 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: 1686-1699

[14] 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): 374-384

[15] 黎贞崇, 梁秀明. 木薯作为我国燃料乙醇原料的潜力分析[J]. *酿酒科技*, 2010(4): 31-33

[16] 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

[17] Liu Jiyuan, Liu Mingliang, Zhuang Dafang, et al. Study on spatial pattern of landuse change in China during 1995—2000 [J]. *Science in China : Series D*, 2003, 46(4): 373-384

[18] Wang M Q. Development and uses of GREET 1. 6. Center for Transportation Research[R]. USA, Illinois: Argonne National Laboratory, 2001

[19] Ou Xunmin, Zhang Xiliang, Chang Shiyuan, 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: 197-208

[20] 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, 14(28): 201-208

[21] 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

[22] 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, 2010

[23] 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

[24] Fiorese G, Guariso G. A GIS-based approach to evaluate biomass potential from energy crops at regional scale [J]. *Environ Model & Softw*, 2010(25): 702-711

[25] Wang X L. The estimation on crop absorbing CO₂ under current and double CO₂ conditions in the world [J]. *ACTA Meteorologica Sinica*, 1996, 54: 466-472

[26] Liu Lei, Zhuang Dafang, Jiang Dong, et al. Assessing the potential of the cultivation area and greenhouse gas (GHG) emission reduction of cassava based fuel ethanol on marginal land in Southwest China [J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2012, 7(41): 5594-5603

[27] Zhang C, Zhang X D, Yang J Y, et al. Evaluation of cassava planting potential with remote sensing and GIS [J]. *New Zeal J Agr Res*, 2007, 50(5): 1135-1140