

文章编号: 0254-0096(2018)03-0864-09

4种能源植物在中国的适应性及 液体燃料生产潜力评估

张蓓蓓^{1,2}, 马颖³, 耿维^{1,2}, 崔建宇³, 慕康国³, 胡林^{2,3}

(1. 中国农业大学农学院, 北京 100193; 2. 国家能源非粮生物质原料研发中心, 北京 100193;

3. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 利用气象数据评价边际性土地种植能源植物甜高粱、木薯、柳枝稷和麻疯树的气候适宜性, 估算液体生物燃料的生产潜力, 并比较这4种能源植物的经济效益。结果表明, 在集中连片宜耕边际性土地中, 甜高粱、木薯、柳枝稷和麻疯树的适宜种植面积分别为218.65、18.82、208.67和46.19万 hm^2 。甜高粱、木薯、柳枝稷燃料乙醇的生产潜力分别为648.82、23.85、633.63万t, 麻疯树生物柴油的生产潜力为40.42万t。与柳枝稷和麻疯树相比, 甜高粱和木薯的经济效益更高, 更适宜边际性土地液体生物燃料生产, 其利润分别为2940和1322 $\text{¥}/\text{hm}^2$ 。

关键词: 燃料乙醇; 生物柴油; 土地利用; 边际性土地; 气候适宜性; 生产潜力; 经济分析

中图分类号: S216.2

文献标识码: A

0 引言

在生物质能源产业中, 方便运输的液体生物燃料是“化石燃料替代的主战场”^[1], 而能源植物是生产液体生物燃料的重要基础。我国能源植物资源丰富^[2], 可分为糖类、淀粉类、油脂类、木质纤维素类和能源藻类。其中, 甜高粱、木薯、柳枝稷和麻疯树分别是糖类、淀粉类、木质纤维素类和油脂类能源植物的典型代表^[3], 其能源利用潜力备受关注。

研究能源植物对气候条件的要求和适宜种植的边际性土地资源分布状况, 对我国液体生物燃料的产业布局至关重要。张彩霞等^[4]估算中国适宜种植甜高粱的未利用地面积为410.5万 hm^2 ; 刘磊等^[5]评估了西南5省适宜与较适宜种植麻疯树的土地资源分别为199万和557万 hm^2 ; 王露等^[6]研究了广西满足木薯种植条件的荒草地和未利用地总面积为115.5万 hm^2 ; 庄大方等^[7]估算中国可开发种植菊芋、木薯、黄连木和麻疯树的大规模边际性土地面积为4375万 hm^2 。

然而, 当前对甜高粱、木薯、柳枝稷和麻疯树的种植适应性及液体生物燃料生产潜力的综合研究较少, 限制了能源植物的生产利用。因此, 本研究选择上述4种能源植物作为研究对象, 结合气象数据评价边际性土地种植能源植物的气候适宜性, 估算液体生物燃料的生产潜力, 以及利用生产成本、利润等因素分析能源植物的经济效益, 并讨论能源植物发展对中国生物质能源产业、三农的贡献和意义。

1 数据与方法

1.1 能源植物的气候适宜性评价

结合气象数据和能源植物生长发育对环境条件的要求, 评价能源植物的气候适宜性。气象因素中, 年均气温、积温和降水量等均是影响能源植物生长发育的关键。通过查阅文献资料分析能源植物生长发育对温度、降水量等的要求, 确定最适宜、次适宜和不适宜的环境条件分级评价标准。在气候适宜性评价的基础上, 估算3种适宜性级别的边际性土地资源量。文中1981~2013年间的温度、降水等气象数据来源于中国气象数据网。

收稿日期: 2017-03-29

基金项目: 中国工程院咨询项目(2012-ZD-16)

通信作者: 胡林(1965—), 男, 博士、教授, 主要从事生物质资源评估方面的研究。hulin@cau.edu.cn

1.2 液体生物燃料的生产潜力计算公式

利用适宜种植能源植物的边际性土地面积、能源植物单产和液体生物燃料产率,估算中国能源植物生产液体生物燃料的潜力,计算公式为:

$$M = \sum_{i=1}^n (P_{ia} Y_{ia} E + P_{ib} Y_{ib} E) \quad (1)$$

式中, M ——液体生物燃料产量; n ——中国的地级市; i ——第 i 市; P_{ia} ——第 i 市最适宜边际性土地面积; P_{ib} ——第 i 市次适宜边际性土地面积; Y_{ia} ——最适宜边际性土地能源植物的单产; Y_{ib} ——次适宜边际性土地能源植物的单产; E ——液体生物燃料产率。

1.3 能源植物的经济效益分析

基于能源植物种植成本,液体生物燃料生产成本、销售利润等,分析能源植物种植及生产液体生物燃料的经济效益。能源植物的种植成本、液体生物燃料生产成本和利润等数据均为通过查阅文献获得典型地区的实证研究数据。

1.4 能源植物的特征数据

能源植物的生物量、生物质组分、热值、液体燃料(燃料乙醇或生物柴油)产率等能源特征参数均为通过整理和分析已发表文献资料^[8-12],并采用加权平均法获得的各参数的全国平均值,见表 1。

表 1 4种能源植物的能源特征比较

Table 1 Characteristics of 4 species of energy plants

种类	拉丁名	科属	单产*/ t·hm ⁻²	生物质 组分/%	液体燃料产率/ t·hm ⁻²	适种区域
甜高粱	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	禾本科 高粱属	70.0	糖含量 12~18	4.55	适种范围广,从蒙新区、东北区到西南区、华南区
木薯	<i>Manihot esculenta</i> Crantz	大戟科 木薯属	16.3	淀粉含量 24~28	2.36	热带地区,主要包括广东、广西、福建、云南、贵州等地
麻疯树	<i>Jatropha carcas</i> (L.)	大戟科 麻疯树属	5.0	油含量 30~60	1.63	热带和亚热带地区,主要包括广西、广东、云南、四川等地
柳枝稷	<i>Panicum virgatum</i> (L.)	禾本科 黍属	20.0	纤维素 39.80,半纤维素 24.12,木质素 5.84	4.44	适种范围广,热带、亚热带和温带地区

注:*甜高粱单产为茎秆产量,不包含籽粒产量;柳枝稷单产为干重,其他 3 种均为鲜重。

1.5 宜耕边际性土地数据

宜耕边际性土地资源中,集中连片宜耕边际性土地资源具有规模化发展液体生物燃料产业的潜力和优势。本研究中,中国边际性土地数据采用 2000~2003 年间国土资源部对集中连片耕地后备资源的调查数据^[13]。集中连片耕地后备资源类型包括可开垦耕地后备资源(荒草地、盐碱地、沼泽地、苇地、滩涂和其他未利用地)和可复垦耕地后备资源(废弃压占破坏地、塌陷地和自然损毁地)。其中,沼泽地、苇地和滩涂属于湿地^[14],因具有重要的生态价值而不宜开发利用,其他类型土地均具有种植能源植物的潜力,见表 2。

2 结果与分析

2.1 4种能源植物的生长习性和气候适宜性分级

甜高粱和木薯均为一年生能源植物,木薯的生育期比甜高粱长 3~4 个月。柳枝稷和麻疯树是多年生能源植物,生育期均可达到 10 a 以上。木薯和麻疯树对年均气温和降水量的要求相近,最适宜的年均气温为 20 ℃ 以上,最适宜的年降水量分别为 1000~2000 mm 和 600~2000 mm,主要在温暖湿润的热带和亚热带种植。与木薯和麻疯树相比,适宜甜高粱和柳枝稷种植的范围较广,温带、亚热带和热带地区均可生长。依据已有研究成果^[4,6,15-24],本文确定的甜高粱、木薯、柳枝稷和麻疯树的生育期和气候条件适宜性分级,如表 3 所示。

表 2 中国各区域集中连片宜耕边际性土地资源

Table 2 Cultivable centralization marginal land resources in each region in China

区域	可开垦土地/万 hm ²			可复垦土地/万 hm ²			合计	
	荒草地	盐碱地	其他未利用地	废弃压占破坏地	塌陷地	自然灾害毁损地	面积/万 hm ²	比例/%
东北区	21.46	14.20	0.97	1.63	0.31	0.53	39.10	6.06
华北区	19.02	14.12	4.75	4.85	1.71	0.19	44.64	6.92
黄土高原区	47.91	12.03	17.63	1.67	0.57	5.14	84.96	13.16
蒙新区	193.37	34.11	136.08	0.16	0.15	2.96	366.83	56.84
长江中下游区	33.64	0.54	6.22	3.99	1.86	0.70	46.94	7.27
华南区	6.21	0.04	0.64	0.27	0	0.09	7.25	1.12
西南区	23.71	0.02	3.52	0.85	0.10	1.66	29.85	4.63
青藏区	16.26	4.99	1.25	3.15	0	0.20	25.85	4.01
全国	361.58	80.05	171.07	16.56	4.70	11.46	645.43	100.00

注:①可开垦其他未利用地包括裸土地、沙地等;②宜耕标准:可开垦土地自然坡度小于 25°,土层厚度大于 50 cm,土壤石砾含量小于 15%等;可复垦土地坡度小于 25°,挖掘塌陷深度大于 10 m,砂石堆积厚度小于 50 cm,地下水位大于 1 m 等;③中国大陆 31 个省(区、直辖市)划分为 8 大生态区域:东北区(黑龙江、吉林、辽宁),华北区(北京、天津、河北、河南、山东),黄土高原区(山西、陕西、甘肃),蒙新区(内蒙古、宁夏、新疆),长江中下游区(上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南),华南区(福建、广东、广西、海南),西南区(重庆、四川、贵州、云南)和青藏区(青海、西藏)。

表 3 4 种能源植物的生育期和气候条件适宜性分级

Table 3 Growth period and climate suitability classification of 4 species of energy plants

植物种类	生育期	气候条件适宜性分级		
		最适宜	次适宜	不适宜
甜高粱	一年生 100~170 d	日均温 10℃以上期间 降水量 400~1000 mm	日均温 10℃以上期间降水量 200~400 mm 或 >1000 mm	日均温 10℃以上期间降水量 <200 mm
木薯	一年生 180~300 d	年均气温 >21℃, 年降水量 1000~2000 mm	年均气温 18~21℃,年降水量 500~1000 mm 或 2000~6000 mm	年均气温 <18℃,年降水量 <500 mm 或 >6000 mm
柳枝稷	多年生 10~15 a	日均温 ≥10℃ 的活动积温 > 3500℃,年降水量 >500 mm	日均温 ≥10℃ 的活动积温 1500~ 3500℃,年降水量 300~500 mm	日均温 ≥10℃ 的活动积温 < 1500℃,年降水量 <300 mm
麻疯树	多年生 20~30 a	年均气温 >20℃,年极端最低 气温 >2℃,年降水量 600~ 2000 mm	年均气温 17~20℃,年极端最低 气温 0~2℃,年降水量 300~600 mm 或 2000~3000 mm	年均气温 <17℃,年极端最低 气温 <0℃,年降水量 <300 mm 或 >3000 mm

2.2 边际性土地种植 4 种能源植物的适宜性评价

中国集中连片宜耕边际性土地资源量为 645.43 万 hm²,适宜种植 4 种能源植物的边际性土地面积存在差异(表 4)。最适宜和次适宜种植甜高粱的边际性土地面积分别为 110.91 万和 107.74 万 hm²,合计 218.65 万 hm²,占总面积的比例为 33.88%。满足甜高粱种植条件的边际性土地资源主要分

布在中东部地区,其中最适宜边际性土地面积超过 10 万 hm²的省份有山东、黑龙江和江苏,分别为 31.40 万、15.98 万和 10.91 万 hm²;江西、吉林和内蒙古的次适宜边际性土地面积在 10 万~25 万 hm²之间;西北部的新疆、甘肃、宁夏、青海等省区边际性土地资源丰富,然而部分市由于降水量偏少,雨养条件下甜高粱无法正常生长发育,水土资源不匹配问题较突出。

木薯生长发育需要较高的温度和适宜的降水条件,适宜种植区域集中分布在华南区、西南区和长江中下游区,其中广东、广西、福建、云南及海南的种

植适宜性最高。全国最适宜和次适宜种植木薯的边际性土地面积分别为 2.34 万和 16.48 万 hm^2 , 合计 18.82 万 hm^2 , 占总面积的比例低于 5%。

表4 适宜种植4种能源植物的集中连片宜耕边际性土地资源量(万 hm^2)

Table 4 Areas of cultivatable centralization marginal land suitable for 4 species of energy plants (10^4hm^2)

植物种类	适宜性 分级	生态区								合计
		东北区	华北区	黄土高原区	蒙新区	长江中下游区	华南区	西南区	青藏区	
甜高粱	最适宜	23.69	42.95	4.42	5.47	15.64	0	18.17	0.57	110.91
	次适宜	15.42	1.69	14.45	15.81	31.3	7.25	11.68	10.14	107.74
	不适宜	0	0	66.09	345.55	0	0	0	15.14	426.78
木薯	最适宜	0	0	0	0	0	2.09	0.25	0	2.34
	次适宜	0	0	0	0	7.67	4.49	4.31	0	16.48
	不适宜	39.10	44.64	84.96	366.83	39.27	0.66	25.29	25.85	626.61
柳枝稷	最适宜	2.40	41.04	3.07	0	46.94	7.25	27.20	0	127.91
	次适宜	36.70	3.60	13.10	16.86	0	0	2.65	7.87	80.76
	不适宜	0	0	68.79	349.98	0	0	0	17.99	436.75
麻疯树	最适宜	0	0	0	0	0	3.59	2.33	0	5.92
	次适宜	0	0	0	0	21.10	3.66	15.52	0	40.27
	不适宜	39.10	44.64	84.96	366.83	25.84	0	12.01	25.85	599.24

麻疯树喜温、耐旱、怕涝,最适宜和次适宜的边际性土地面积分别为 5.92 万和 40.27 万 hm^2 , 合计为 46.19 万 hm^2 , 占总面积的比例为 7.16%。主要适宜种植区域包括华南区、西南区和长江中下游区, 其中江西、云南、重庆、广东、湖南、广西和福建的适宜种植面积均在 1 万 hm^2 以上。

柳枝稷具有较强的抗逆能力,在 4 种能源植物中种植柳枝稷的最适宜边际性土地面积最高,为 127.91 万 hm^2 , 主要分布在华北区的山东,长江中下游区的江西、江苏、湖北,以及西南区的云南、四川、重庆;次适宜边际性土地面积为 80.76 万 hm^2 , 主要分布在东北区、蒙新区和黄土高原区,由于耐旱能力强,在青海、甘肃、内蒙古等省区年均降水量高于 300 mm 的地区也适宜种植。

2.3 能源植物的液体生物燃料生产潜力估算

2.3.1 边际性土地能源植物的生产能力

再吐尼古丽·库尔班等^[25]研究显示,盐分含量 1.2 g/kg 与 3.2~5.4 g/kg 试验区的甜高粱茎秆平均单

产分别为 52.55 和 26.34 t/hm^2 , 土壤盐分含量的增加引起甜高粱茎秆减产约 50%。在挖沙废弃地和公路两侧废弃地种植柳枝稷,可获得生物量 3.55~4.00 t/hm^2 和 15.3 t/hm^2 ^[8], 与农田柳枝稷多年平均单产 20 t/hm^2 相比,分别减产约 80%和 20%。

相比粮食作物,非粮能源植物具有较强的抗逆能力,边际性土地种植能源植物能获得一定产出,生态和经济价值也非常可观。根据现有边际性土地种植能源植物的实证研究数据,能源植物在边际性土地上的产出会比正常耕地上减少 20%~50%,甚至达到 80%。因此,本研究将最适宜和次适宜边际性土地能源植物单产分别取值为正常耕地上单产水平的 80%和 50%。

2.3.2 液体生物燃料的生产潜力估算

利用最适宜和次适宜的集中连片宜耕边际性土地种植能源植物,本研究分别估算甜高粱、木薯、柳枝稷或麻疯树的液体生物燃料生产潜力,结果如图 1 所示。

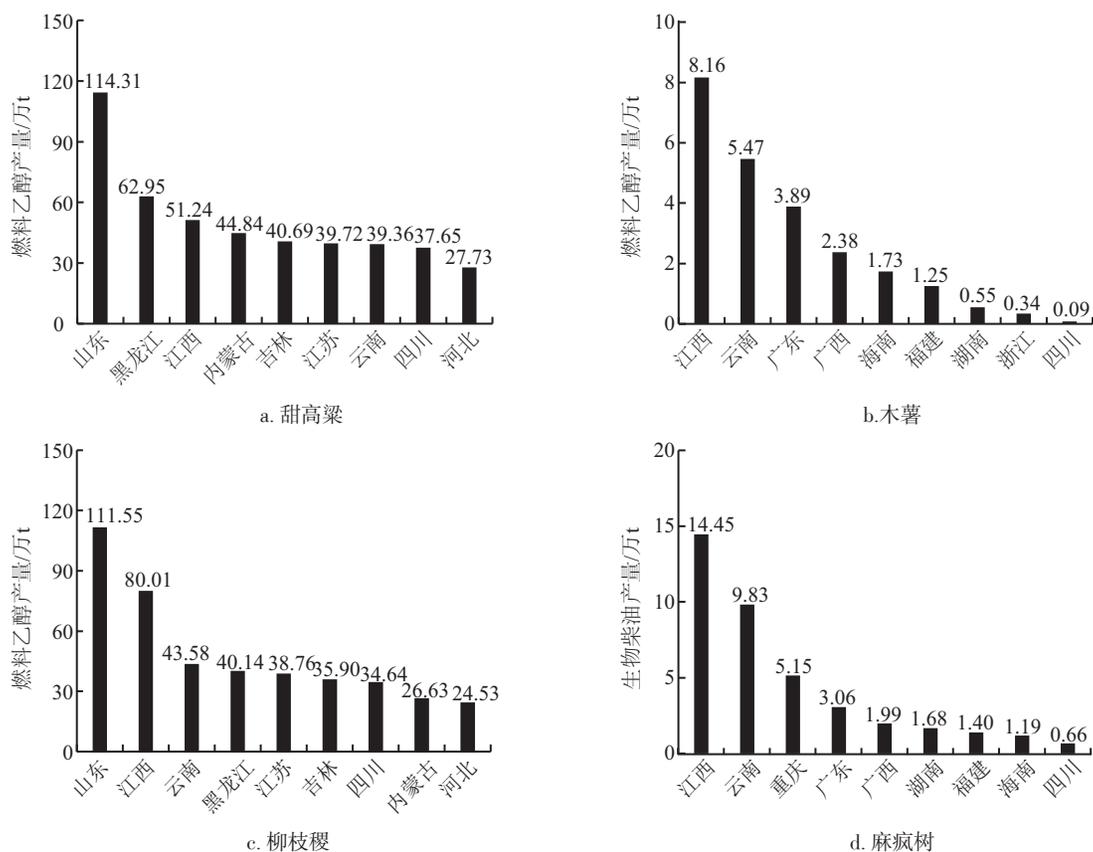


图1 中国主要省(市)4种能源植物的液体生物燃料生产潜力

Fig. 1 Production potential of liquid biofuels of 4 species of energy plants in main provinces in China

全国甜高粱燃料乙醇生产潜力为 648.82 万 t, 可折合标准煤 778.58 万 t, 其中山东和黑龙江的生产量分别为 114.31 万和 62.95 万 t。与甜高粱相比, 适宜种植木薯的边际性土地面积较少, 燃料乙醇生产潜力为 23.85 万 t (28.63 万 t 标准煤), 其中江西、云南和广东的生产量分别为 8.16 万、5.47 万和 3.89 万 t。柳枝稷燃料乙醇生产潜力达到 633.63 万 t (760.36 万 t 标准煤), 其中山东和江西的生产量分别为 111.55 和 80.01 万 t。利用边际性土地种植麻疯树, 生物柴油生产潜力为 40.42 万 t, 折合标准煤 59.01 万 t, 其中江西、云南和重庆的生产量分别为 14.45 万、9.83 万和 5.15 万 t。

2.4 能源植物的经济效益分析

能源植物种植成本及利润方面, 最适宜和次适宜边际性土地种植甜高粱的经济效益最高, 分别可获得利润 4822 和 3014 $\text{¥}/\text{hm}^2$, 其次是柳枝稷, 分别可获得利润 2528 和 728 $\text{¥}/\text{hm}^2$ 。在最适宜边际性土地上种植木薯和麻疯树能获得一定利润, 在次适宜

边际性土地利润为负值, 详见表 5。

液体生物燃料生产成本及利润方面, 1 hm^2 边际性土地柳枝稷燃料乙醇产量为 2.22~3.55 t, 加工成本高达 10675 $\text{¥}/\text{t}$, 生产成本最高、利润最低。甜高粱和木薯燃料乙醇具有较好的经济效益, 最适宜边际性土地的生产利润分别为 2940 和 1322 $\text{¥}/\text{hm}^2$ 。 1 hm^2 土地麻疯树生物柴油的产量为 0.81~1.30 t, 与甜高粱和木薯相比, 液体生物燃料产率偏低, 在最适宜和次适宜边际性土地的生产利润分别为 794 和 496 $\text{¥}/\text{hm}^2$ 。

通过比较 4 种典型能源植物的种植及液体生物燃料生产的成本和利润可看出, 甜高粱在种植和生物燃料生产阶段均具有较高的经济效益。以柳枝稷为代表的二代能源植物, 种植成本低、液体生物燃料加工成本过高, 现阶段以柳枝稷为原料生产燃料乙醇无法获得利润和经济效益。

文献[30]多次提到生物质能源是解困“三农”的一剂良药, 是发展现代农业的必经路径。以最适宜边际性土地种植木薯为例, 1 t 木薯的种植成本和

表5 4种能源植物的经济效益分析

Table 5 Economic benefit analysis of 4 species of energy plants

植物种类	能源植物种植成本及利润				液体生物燃料生产成本及利润				
	种植成本/ ¥·hm ⁻²	单产/ t·hm ⁻²	销售价格/ ¥·t ⁻¹	利润/ ¥·hm ⁻²	燃料产量/ t·hm ⁻²	加工成本/ ¥·t ⁻¹	总成本/ ¥·hm ⁻²	利润/ ¥·hm ⁻²	
最适宜 边际性 土地	甜高粱	6378	56	200	4822	3.64	1615	17080	2940
	木薯	3900	13	450	1957	1.89	1696	9058	1322
	柳枝稷	2272	16	300	2528	3.55	10675	42718	-23182
	麻疯树	3060	4	1200	1740	1.30	1197	6356	794
次适宜 边际性 土地	甜高粱	3986	35	200	3014	2.28	1615	10675	1837
	木薯	3900	8	450	-239	1.18	1696	5661	826
	柳枝稷	2272	10	300	728	2.22	10675	26699	-14489
	麻疯树	3092	2.5	1200	-92	0.81	1197	3973	496

注:①种植成本主要包括种苗费、化肥费、农药费、人工或机械费等;②甜高粱和木薯燃料乙醇的加工成本占总成本的比例取值为35%,燃料乙醇和生物柴油市场价为5500¥/t;③参考文献来源为文献[9~11,26~29]。

销售价格分别约为300和450¥,1hm²土地木薯的收益达到1957¥。利用最适宜和次适宜边际性土地种植甜高粱,农民的收入分别为4822和3014¥/hm²,每年总收入可达86亿¥。边际性土地种植能源植物既能缓解能源消费压力,又能为农民增收、促进农村经济发展提供新途径。

结合2.3节计算的液体生物燃料生产潜力,全国甜高粱和木薯燃料乙醇的生产利润分别可达52.40和1.67亿¥,麻疯树生物柴油的生产利润为2.47亿¥,柳枝稷燃料乙醇的经济效益为负值。此外,液体生物燃料生产过程中的副产品也有一定的经济收益,充分利用副产品对提高能源植物的经济效益具有重要作用。侯新村等^[9]指出1t柳枝稷燃料乙醇的副产品收益为1.28万¥,黎贞崇^[27]估计1t木薯燃料乙醇的副产品产值是110¥。考虑到副产品收益,1t柳枝稷燃料乙醇的生产利润增加至4848¥/t,全国柳枝稷燃料乙醇的总利润将达到307亿¥,经济效益十分可观。

3 讨论

本研究所用的土地资源数据是集中连片(最小面积20hm²)的宜耕边际性土地,估算适宜甜高粱种植的土地面积为218.65万hm²,高于张彩霞等^[4]估算的适宜甜高粱种植的集中连片(最小面积100hm²)土地面积78.6万hm²;适宜木薯种植的边际性土地面积为18.82万hm²,与庄大方等^[7]估算的

17万hm²接近,低于王露等^[6]的研究结果。甜高粱燃料乙醇的生产潜力达到648.82万t,开发利用50%的潜力即可实现《生物质能发展“十三五”规划》对2020年液体生物燃料产量的目标(600万t),还能促进我国生物质能源利用规模(3500万t标准煤)增加约9%。当前,我国缺乏边际性土地能源植物的实证产量数据,只有少量种植甜高粱、柳枝稷的试验数据,会对能源潜力评估和生物质产业推进产生影响。应开展各省、各类边际性土地能源植物的种植试验,以获取更详细的实证产量数据作为潜力评估的基础。

柳枝稷是第2代生物质能源原料,具有适宜种植范围广、生物量高的优势,本研究估算的柳枝稷燃料乙醇生产潜力在4种能源植物仅次于甜高粱。柳枝稷木质素含量平均值为5.84%,低于小麦、玉米等农作物秸秆的木质素含量^[31],与作物秸秆相比更有利于水解发酵,是比较适宜生产燃料乙醇的原料。然而,我国柳枝稷作为能源植物的研究尚处于起步阶段^[8],种质资源、生长发育条件、产量潜力、生态适应性等方面的研究还需进一步加强。此外,纤维素原料预处理技术、酶制剂与酶解工艺和成本、纤维素利用率、工艺设备等方面还存在问题,制约着纤维素燃料乙醇的产业化、商业化发展^[32,33]。根据国际能源署的调查,截至2012年底,全世界以木质纤维素为原料的生物燃料项目共有55个,年产能13.7万t,仅占世界生物燃料总产能的0.15%^[34]。国

家发改委批准的万吨级纤维素乙醇项目山东龙力、河南天冠和山东圣泉,总设计生产能力为 10 万 t,但尚无长期连续稳定运转的考核报道^[33]。总体上,木质纤维素燃料乙醇产业化进程面临着久攻不克的局面,现阶段燃料乙醇的主要原料仍是碳水化合物类能源植物。

利用甜高粱、木薯和麻疯树生产液体生物燃料,原料成本占总成本的比例高达 65%~80%。本研究能源植物种植成本主要包括生产资料、人工或机械成本,其中人工成本达到 40%甚至更高,尤其是麻疯果主要依靠人工采摘。此外,考虑到土地成本以及农药、化肥等生产资料的价格上涨,种植能源植物的经济效益和比较优势会下降。因此,选育高产高抗品种、提高农业生产效率和机械化水平等措施是种植能源植物发展液体生物燃料产业的关键环节。

4 结 论

本文在评估甜高粱、木薯、柳枝稷和麻疯树气候适宜性的基础上,估算适宜种植的边际性土地面积和液体生物燃料生产潜力,并对经济效益进行分析,得到以下主要结论:

1) 中国集中连片宜耕边际性土地资源量为 645.43 万 hm^2 ,气候条件上最适宜种植甜高粱、木薯、柳枝稷和麻疯树的土地面积分别为 110.91 万、2.34 万、127.91 万和 5.92 万 hm^2 ,次适宜的土地面积分别为 107.74 万、16.48 万、80.76 万和 40.27 万 hm^2 。利用最适宜和次适宜的集中连片宜耕边际性土地种植能源植物,甜高粱燃料乙醇、木薯燃料乙醇、柳枝稷燃料乙醇或麻疯树生物柴油的生产潜力分别为 648.82 万、23.85 万、633.63 万或 40.42 万 t。

2) 能源植物甜高粱和木薯在液体生物燃料生产方面均能获得较好的经济效益,最适宜边际性土地的液体生物燃料的利润分别为 2940 和 1322 $\text{¥}/\text{hm}^2$ 。柳枝稷的种植成本最低但燃料乙醇生产成本较高,在现阶段的生产工艺水平下无比较优势和经济效益。

3) 结合气候、经济因素,因地制宜地选择能源植物,优先利用集中连片宜耕边际性土地,一方面能实现我国液体生物燃料发展目标,另一方面有助于推动农村经济发展。

[参考文献]

- [1] 石元春. 生物质能源四十年[J]. 生命科学, 2014, 26(5): 432—439.
- [1] Shi Yuanchun. Four decades of bioenergy [J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2014, 26(5): 432—439.
- [2] Shao Hongbo, Chu Liye. Resource evaluation of typical energy plants and possible functional zone planning in China[J]. Biomass and Bioenergy, 2008, 32(4): 283—288.
- [3] Chen Wei, Wu Fangwei, Zhang Jinhua. Potential production of non-food biofuels in China [J]. Renewable Energy, 2016, 85: 939—944.
- [4] Zhang Caixia, Xie Gaodi, Li Shimei, et al. The productive potentials of sweet sorghum ethanol in China [J]. Applied Energy, 2010, 87(7): 2360—2368.
- [5] Liu Lei, Zhuang Dafang, Jiang Dong, et al. Assessment of the biomass energy potentials and environmental benefits of *Jatropha curcas* L. in southwest China [J]. Biomass and Bioenergy, 2013, (56): 342—350.
- [6] 王 露, 杨海龙, 封志明, 等. 广西能源作物木薯种植的可能规模: 自然适宜性与社会限制性评价[J]. 资源科学, 2012, 34(1): 150—158.
- [6] Wang Lu, Yang Hailong, Feng Zhiming, et al. Potential capacity of cassava planting in Guangxi: Assessment of natural suitability and socio-economic restrictions [J]. Resources Science, 2012, 34(1): 150—158.
- [7] 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.
- [8] 范希峰, 侯新村, 武菊英, 等. 我国北方能源草研究进展及发展潜力[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 150—158.
- [8] Fan Xifeng, Hou Xincun, Wu Juying, et al. Research progress and development potential analysis of bioenergy grass in the north of China [J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(6): 150—158.
- [9] 侯新村, 范希峰, 武菊英, 等. 纤维素类能源草在京郊地区的经济效益与生态价值评价[J]. 草业学报, 2011, 20(6): 12—17.
- [9] Hou Xincun, Fan Xifeng, Wu Juying, et al. Evaluation of economic benefits and ecological values of cellulosic bioenergy grasses in Beijing suburban areas [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(6): 12—17.
- [10] Chang Shiyan, Zhao Lili, Timilsina G R, et al. Biofuels development in China: Technology options and policies

- needed to meet the 2020 target[J]. *Energy Policy*, 2012, 51(4): 64—79.
- [11] Qiu Huangang, Sun Laixiang, Huang Jikun, et al. Liquid biofuels in China: Current status, government policies, and future opportunities and challenges[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(5): 3095—3104.
- [12] Food and Agriculture Organization. Faostat: production, crops [DB/OL]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>, 2017-01-10.
- [13] 温明炬, 唐程杰. 中国耕地后备资源[M]. 北京: 中国大地出版社, 2005.
- [13] Wen Mingju, Tang Chengjie. Reserve of aiable land resources in the PRC [M]. Beijing: China Land Press, 2005.
- [14] 谢光辉, 刘奇颀, 段增强, 等. 中国宜能非粮土地资源评价研究进展[J]. *中国农业大学学报*, 2015, 20(2): 1—10.
- [14] Xie Guanghui, Liu Qiqi, Duan Zengqiang, et al. Review on resource of non-food land suitable for energy plant production in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(2): 1—10.
- [15] 张彩霞, 谢高地, 李士美, 等. 中国能源作物甜高粱的空间适宜分布及乙醇生产潜力[J]. *生态学报*, 2010, 30(17): 4765—4770.
- [15] Zhang Caixia, Xie Gaodi, Li Shimei, et al. Spatial suitability and its bio-ethanol potential of sweet sorghum in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(17): 4765—4770.
- [16] 王芳, 卓莉, 覃新导, 等. 广东边际性土地能源植物种植潜力适宜性评价[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(19): 276—284.
- [16] Wang Fang, Zhuo Li, Qin Xindao, et al. Evaluation on suitability of planting potential of energy plants on marginal land of Guangdong Province [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(19): 276—284.
- [17] 刘吉利, 朱万斌, 谢光辉, 等. 能源作物柳枝稷研究进展[J]. *草业学报*, 2009, 18(3): 232—240.
- [17] Liu Jili, Zhu Wanbin, Xie Guanghui, et al. The development of *Panicum virgatum* as an energy crop[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(3): 232—240.
- [18] 程序, 朱万斌. 北方农牧交错带以开发能源作物促生态重建的前景[J]. *草业学报*, 2012, 21(6): 1—7.
- [18] Cheng Xu, Zhu Wanbin. Prospect of ecological restoration through tapping energy crops in Northern China interlaced zone of arable lands and grasslands[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(6): 1—7.
- [19] 吴伟光, 黄季焜, 邓祥征. 中国生物柴油原料树种麻疯树种植土地潜力分析[J]. *中国科学D辑: 地球科学*, 2009, 39(12): 1672—1680.
- [19] Wu Weiguang, Huang Jikun, Deng Xiangzheng. Potential land for plantation of *Jatropha curcas* as feedstocks for biodiesel in China[J]. *Science China Serial D: Earth Science*, 2009, 39(12): 1672—1680.
- [20] Achten W M J, Verchot L, Franken Y J, et al. *Jatropha* bio-diesel production and use[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2008, 32(12): 1063—1084.
- [21] 吴全忠, 常欣, 程序. 黄土丘陵区柳枝稷生物量与土壤水分的动力学研究[J]. *扬州大学学报: 农业与生命科学版*, 2005, 26(4): 70—73.
- [21] Wu Quanzhong, Chang Xin, Cheng Xu. Dynamic research on relationship between switchgrass (*Panicum virgatum*) biomass and oil water in hilly region on loess plateau[J]. *Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition*, 2005, 26(4): 70—73.
- [22] 王春旭. 吉林省西部不同柳枝稷品种比较及生物学特性的初步探究[D]. 长春: 东北师范大学, 2016.
- [22] Wang Chunxu. Genotypes comparison and biological traits research for switchgrass in the western region of Jilin Province [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2016.
- [23] 张朝平. 美国引进柳枝稷耐盐碱性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- [23] Zhang Chaoping. Study on saline-alkali tolerance of *Panicum virgatum* introduced from the United States of America[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [24] Ma Yongqing, An Yu, Shui Junfeng, et al. Adaptability evaluation of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) cultivars on the Loess Plateau of China[J]. *Plant Science*, 2011, 181(6): 638—643.
- [25] 再吐尼古丽·库尔班, 吐尔逊·吐尔洪, 阿扎提·阿布都古力. 盐碱地对甜高粱秸秆产量与含糖锤度的影响[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(9): 109—114.
- [25] Zaituniguli · Kuerban, Tuerxun · Tuerhong, Azati · Abuduguli. Effect of saline soil on the stalk yield and sugar contents of sweet sorghum [J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2012, 40(9): 109—114.

- [26] 吴伟光, 黄季焜. 林业生物柴油原料麻风树种植的经济可行性分析[J]. 中国农村经济, 2010, (7): 56—63.
- [26] Wu Weiguang, Huang Jikun. Economic feasibility analysis of forestry energy plant *Jatropha curcas* L. as biodiesel feedstock [J]. Chinese Rural Economy, 2010, (7): 56—63.
- [27] 黎贞崇. 能源作物——甘蔗和木薯的效益比较[J]. 能源研究与利用, 2008, (5): 22—25.
- [27] Li Zhenchong. Benefit comparison of sugarcane and cassava as energy plants [J]. Energy Research & Utilization, 2008, (5): 22—25.
- [28] 邢爱华, 马捷, 张英皓, 等. 生物柴油全生命周期经济性评价[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(6): 923—927.
- [28] Xing Aihua, Ma Jie, Zhang Yinghao, et al. Life cycle assessment of economy for biodiesel [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 50 (6): 923—927.
- [29] 韩立朴, 马凤娇, 谢光辉, 等. 甜高粱生产要素特征、成本及能源效率分析[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 56—69.
- [29] Han Lipu, Ma Fengjiao, Xie Guanghui, et al. Analysis of sweet sorghum's characteristic of production factor, cost and energy efficiency [J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(6): 56—69.
- [30] 石元春. 中国需要新的国家能源战略[J]. 能源与节能, 2011, (12): 1—4.
- [30] Shi Yuanchun. China needs a new national energy strategy [J]. Energy and Energy Conservation, 2011, (12): 1—4.
- [31] Niu Wenjuan, Han Lujia, Liu Xian, et al. Twenty-two compositional characterizations and theoretical energy potentials of extensively diversified China's crop residues [J]. Energy, 2016, 100: 238—250.
- [32] Fang Xu, Shen Yu, Zhao Jian, et al. Status and prospect of lignocellulosic bioethanol production in China [J]. Bioresource Technology, 2010, 101 (13): 4814—4819.
- [33] 岳国君, 武国庆, 林鑫. 纤维素乙醇工程化探讨 [J]. 生物工程学报, 2014, 30(6): 816—827.
- [33] Yue Guojun, Wu Guoqing, Lin Xin. Insights into engineering of cellulosic ethanol [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2014, 30(6): 816—827.
- [34] Bacovsky D, Ludwiczek N, Ognissanto M, et al. Status of advanced biofuels demonstration facilities in 2012: A report to IEA Bioenergy Task 39 [EB/OL]. http://task39.org/files/2013/05/Demoplants_Report_Final.pdf, 2017-01-07.

ASSESSING SUITABILITY AND LIQUID BIOFUELS PRODUCTION POTENTIAL OF FOUR ENERGY SPECIES IN CHINA

Zhang Beibei^{1,2}, Ma Ying³, Geng Wei^{1,2}, Cui Jianyu³, Mu Kangguo³, Hu Lin^{2,3}

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. National Energy R & D Center for Non-food Biomass, Beijing 100193, China;

3. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Climate suitability of 4 major energy species, i.e. sweet sorghum, cassava, switchgrass and *Jatropha curcas*, in marginal land in China was assessed according to the regional meteorological resources. Production potential of liquid biofuels and economic benefits of these 4 energy species were quantitatively compared in this study. The results showed that the suitable land for sweet sorghum, cassava, switchgrass and *Jatropha curcas* is 218.65×10^4 , 18.82×10^4 , 208.67×10^4 , and 46.19×10^4 hm² respectively in cultivatable marginal land in China. The ethanol fuel production potential of sweet sorghum, cassava or switchgrass in suitable marginal land is 648.82×10^4 , 23.85×10^4 or 633.63×10^4 tonnes respectively. And biodiesel production potential of *Jatropha curcas* is 40.42×10^4 tonnes. Comparing with *Jatropha curcas* and switchgrass, sweet sorghum and cassava have higher economic benefits for producing liquid biofuels, which can reach 2940 and 1322 ¥/hm² in the most suitable marginal land.

Keywords: bioethanol; biodiesel; land use; marginal land; climate suitability; production potential; economic analysis