

广西木薯茎秆资源的能源利用

陶光灿¹, 谢光辉¹, Hakan Örberg², 熊韶峻^{1,2}

(1. 中国农业大学生物质中心, 北京 100193; 2. 瑞典农业大学生物质技术与化学研究所, Umeå SE - 90183)

[摘要] 文章分析了广西木薯茎秆资源可获得性及燃料性状,进而讨论了开发木薯茎秆资源的可行性及商业价值,证明木薯茎秆是优秀的生物质原材料,具有开发固体成型燃料及热电联产的价值。

[关键词] 木薯茎秆;燃料;颗粒;热电联产

[中图分类号] TK6 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)02-0107-06

1 前言

人们对能源和环境的日益关注促进了全球生物质能的发展。将当地生产的生物质原料用作能源将减小对化石燃料的依赖,减少碳排放,改善环境和促进社会的发展。增加生物质的使用已经成为中国国家和地方政府能源策略中的一个主要目标。各地生物质资源以及将生物质转化成能源的方法各不相同。广西壮族自治区用木薯秆作为原料产热、发电及生产生物质颗粒/块,直接燃烧是能源转化的主要方法。

在广西壮族自治区,大约 22 万 hm^2 的边际土地和农田已经被用来种植木薯,占当前全国木薯总产量的 60%^[1],因此木薯秆资源丰富。木薯块根产量较大,被用于生产淀粉和乙醇。武鸣县的初步预测表明,茎秆生物质的产量可以高达约 $7.5 \text{ t}/\text{hm}^2$ (干重)。现在,只有 10%~15% 的茎秆被保存下来用于下一季的繁殖,少量的茎秆被农户粉碎后还田^[2],一部分木薯渣被开发成饲料^[3]、作为食用菌栽培基质^[4]或作为刨花板加工原料^[5],而绝大多数可被用于直接燃烧的原料则被丢弃。

传统的供热电联产模式已经被全世界使用。然而,只有当热负荷大的时候,它才能达到高能效。高能效不仅能促进高效益,还能促进可持续发展的能

源应用以及保护环境。由于广西壮族自治区的亚热带气候和非常短的寒冷季节,其用于取暖的热负荷是非常有限的。

将生物质升级为颗粒燃料并作为固体燃料生产热电被工业化国家证明是一条应用生物质能源的最适宜的技术。中国政府制定了在 2020 年以前每年生产 5 000 万 t 颗粒燃料的目标。与原始生物质不同,颗粒燃料是一种高致密的燃料,单位体积内含有较高的能量,不仅能够在普通锅炉和炉灶中使用,也适用于具有非常优良燃烧性能的自动化燃烧装置(家用或企业规模的设备)。颗粒或块型燃料是具有高密度的干燥产品,这使得其在经济上能够实现远距离运输和交易。本研究的主要目标为考察以木薯秆为原料的热电及颗粒燃料联产的可行性。该概念包含从木薯秆原料的可获得性到建立经典的热电联产工厂并整合颗粒燃料生产的模式,涉及了全部产业链。

2 木薯秆资源状况

2.1 木薯秆收获指数

对广西木薯块根产量(湿重)进行的调查表明,地上部分茎秆/块根变异较大,为 0.34~0.75(见表 1),均值为 0.49。在木薯秆资源评估中可以 0.49 作为收获指数。

[收稿日期] 2010-07-30

[基金项目] 中欧能源和环境项目(EEP-PMU/CN/126077/RE006)

[作者简介] 熊韶峻(1957-),男,内蒙古呼和浩特市人,瑞典农业大学副教授,中国农业大学兼职教授,从事生物质能源研究;
E-mail: Shaojun.Xiong@slu.se

表1 木薯生物质的组成部分和地上茎秆与块根质量比

Table 1 Biomass components and ratio of aboveground stem to tuber mass of cassava

县	地点	块根/kg	地上部	地下部	叶片质量/kg	地上部
			分茎秆/kg	分茎秆/kg		分茎秆/块根质量比
武鸣	灵马	15.1	8.45	1.3	0.35	0.56
	锣圩	11.4	7.20	1.59	0.26	0.63
	太平	8.4	6.30	1.36	0.31	0.75
隆安	那桐	13.6	6.15	2.16	0.89	0.45
	乔建	12.5	5.64	1.98	0.52	0.45
	那桐	14.5	6.00	2.16	0.81	0.41
桂平	石排	16.7	5.70	1.95	0.53	0.34
	社步	18.0	7.60	1.74	0.81	0.42
	马皮	19.4	6.90	1.8	0.7	0.36
平均值		14.4	6.66	1.78	0.58	0.49

2.2 木薯秆资源估计

对三个县的样本的分析表明,在收获期,地上茎秆的含水量平均为 75.3 %。

根据广西统计年鉴^[6] 2009 年的统计数据,木薯种植面积大约为 221 200 hm²。木薯块根的总产量约为 471 万 t(鲜重),相应地,木薯茎秆地上部干重总计 570 051 t(见表 2)。

表2 广西木薯秆资源总量

Table 2 Data about total cassava stem resource in Guangxi today

种植面积/hm ²	块根鲜重/t	地上部	收获时	茎秆地上部干重/t
		分茎秆/块根质量比	茎秆含水量/%	
221 200	4 710 000	0.49	75.3	570 051

农民需要保留 1/3 的地上茎秆用于木薯下一季的繁殖。因此,用于生物质燃料的地上茎秆资源可获得量为:570 051 × 2/3 = 380 034 t 干重,或约等于广西每年产出 1 793 GW·h 的电量。

2.3 木薯渣资源

目前,大部分木薯块根被用于生产淀粉或酒精。提取淀粉或酒精后剩下的富含纤维的残渣经处理后也可用作生物质燃料。这种残渣是一种非常好的可用于造粒或生产粉末的材料。平均算来,块根中纤维的含量为 12 %,水分的含量为 60 %。因而,广西壮族自治区的块根残渣总量(干重)约为 226 080 t(见表 3),或相当于每年 1 128 GW·h 电量。

表3 木薯块根生产淀粉或乙醇后所剩余残渣的数量估计

Table 3 An estimation of cassava tuber residues after starch production

块根鲜重/t	含水量/%	残渣/块根质量比	残渣总量干重/t
4 710 000	60	0.12	226 080

木薯秆和木薯渣资源可用作能源开发的数量是 606 114t;未来 5 年,如果该资源的产业化开发能进一步带动木薯种植面积增长 10 %,不考虑木薯育种及主推品种对收获指数的影响,可用作能源开发的资源将是 666 725t;如果种植面积能增加 20 %,则资源总量将为 727 337t。

3 木薯茎秆能源利用

3.1 木薯秆燃料性状

总的来说,木薯秆是一种很有前景的直燃燃料。尽管它的平均热值略微低于软木燃料(见表 4),但与瑞典的能源作物藜草(RCG)相当。灰熔点与在春季收获的 RCG 相当,但高于作物残余物(如中国吉林省的玉米秸秆)。高灰熔点意味着燃烧结渣风险低。木薯秆灰分的平均含量低于 RCG 和玉米秸秆,这一点对进一步利用也是有利的。

表4 与其他生物质燃料原料相比木薯秆的燃烧性状

Table 4 Fuel characteristics of cassava stem in comparison to other bio-fuels

参数	木薯茎秆	软木燃料 ^[7]	藜草(RCG) ^[8]	玉米秸秆
净热值/(MJ·kg ⁻¹)	17.2	19.2	17.6	16.95
干生物质灰分/%	4.3	2	5.6	5.2
初始变形温度,IT/℃*	1 340	1 160	1 404	1 207
氯(Cl)含量/%	0.16	0.01	0.09	0.42
氮(N)含量/%	1.13	0.3	0.88	0.63
硫(S)含量/%	0.15	0.04	0.09	0.087
钾(K)含量/(mg·kg ⁻¹)	8 199	2 000	2 700	7 633
钙(Ca)含量/(mg·kg ⁻¹)	5 575	5 000	2 000	5 133
硅(Si)含量/(mg·kg ⁻¹)	205	2 000	18 500	8 100
钠(Na)含量/(mg·kg ⁻¹)	51.5	100	200	287
磷(P)含量/(mg·kg ⁻¹)	1 680	400	1 100	627

* ASTM 标准 D-1857-68.

总的来说,木薯秆的燃烧特性与其他已知的燃料有很大区别,尤其是 P、K、Ca 等元素含量高以及 Si 含量低。这些特性会使它成为优质燃料,但其燃烧机制不同于其他的生物质燃料。由于 N 的含量

非常高,在燃烧体系中可能需要有降低氮氧化合物的工艺。Cl 的平均含量不是非常高,但是在少数地区,却达 0.2~0.3,这需要进一步的处理。

3.2 原料堆放

木薯秆堆放一年后,其燃料特性发生变化(见表 5)。其中,热值提高,改善了燃料的热能性状,硫和氯含量的减少,有利于降低锅炉结渣结垢的风险;而灰分略微增加,初始变形温度降低,会增加结渣结垢的风险,含氮量的增加则会增加尾气中 NO_x 的排放。总体上说,排除木薯秆受土壤污染的可能后,木薯秆燃料性状有所改良。木薯秆整株堆垛和扎捆的堆积密度为 56~77 kg/m³,而茎秆条(5~20 mm)和粉末(1.25 mm)的堆积密度却增加到了 115 kg/m³和 135 kg/m³(见表 6)。这些性状对设计合理的工业链和管理生产实践有参考价值。

表 5 堆放一年的木薯秆的燃料特性(基于干重)

Table 5 Fuel characteristics of one year old cassava stems (based on DM)

分析项目	值	分析项目	值
灰分/%	4.6	氧(O)含量/%	38.4
高位热值/(MJ·kg ⁻¹)	19.94	氯(Cl)含量/%	0.02
净热值/(MJ·kg ⁻¹)	18.7	挥发物/%	75.1
硫(S)含量/%	0.11	灰分初始变形温度,IT/°C	1 260
碳(C)含量/%	49.8	灰分软化温度,ST/°C	1 280
氢(H)含量/%	5.7	灰分结球温度,HT/°C	1 310
氮(N)含量/%	1.4	灰分流体温度,FT/°C	1 340

表 6 不同处理后木薯秆的平均堆积密度

Table 6 Average bulk - density of cassava stems with different forms

堆垛方法和尺寸	堆积密度(干生物质)/ (kg·m ⁻³)
整株秸秆,自然堆放(农户堆放方式)	56
整株秸秆打捆,人工堆放	77
碎片(15 mm)	115
粉末(1.25 mm)	135

3.3 木薯秆粉末燃烧特性

就木薯秆用于蒸汽发电和蒸汽干燥制颗粒原料的工业用途而言,木薯秆粉末燃烧被认为是最经济和最合适的。粉末燃烧工艺的高效性和良好的功率调节可以证明上述观点。将 40 kg 的木薯秸秆用粉碎机粉碎木薯至粒径小于 1 mm,并使用瑞典北部能源技术中心 100 kW 的实验装置对木薯秆粉末燃烧进行了实验。表面木薯秆可以作为粉末燃料,废气

中 CO 含量很少,表明燃料接近完全燃烧(见表 7),相对木材粉末来讲,高浓度的 NO 表明木薯秆氮元素含量很高。底灰的物理性质显示,在锅炉中其不会导致机械故障,灰分不是凝结的而是十分松软,很容易将其移出锅炉;飞灰所占比例比其他生物质燃料高。粉尘排放高,因此将来要考虑为其加装清洁装置(如过滤器)。烟灰是干燥的,可利用现有过滤技术进行解决。燃烧实验发现,在模拟的蒸汽锅炉内冷却部位产生了大量的粉尘沉淀堆积(比木材多 4 倍),这与木薯秆粉末的化学组成有关,这些堆积物很软,所以很容易去除。

表 7 木薯秆粉末燃烧的气体排放

Table 7 Gaseous emission during powder combustion of cassava stems

	O ₂ 含量 (平均值) /%	CO 含量 (10% O ₂ 干气)/Nm ³	NO 含量 (10% O ₂ 干气)/Nm ³ ·L ⁻¹	HCl/ (μg SO ₂
木薯秸秆	6.47	4.7	197	0.89 0.0
软木	4.0	5.0	60	0.0 0.0

注:Nm³ 指在 0 °C、一个标准大气压下的气体体积

3.4 木薯秆压制颗粒性状及燃烧特性

用生产能力为 300 kg/h 的小型环模压辊式颗粒造粒机压制木薯秆颗粒,采用 6 mm 筛的锤式粉碎机粉碎样品,通过蒸汽发生器在磨碎的木薯秆中加入少量(2 kg/h)的蒸汽,用 8 mm×55 mm 的模具压制,没有对压程长度进行优化。木薯秆含水量是颗粒化过程中一个非常重要的参数,将木薯秆含水量调节为 10%、12% 和 14% 三个水平。生产出的所有颗粒的耐久性和密度测试都符合欧洲标准,颗粒质量很高(见图 1)。同时也发现,木薯秆的含水量比原产区对颗粒的品质影响更大,表明在颗粒化之前控制木薯秆的含水量是很重要的。

木薯颗粒化消耗的能量比制造其他生物质能颗粒(如木质和藁草)要低,而这是在没有改变设备的基本设置条件下取得的,如对造粒设备进行优化,将会节省更多的能量。

为了用于住宅或其他小型或中型规模的燃烧设备,用两种不同的燃烧炉评估了颗粒燃料。第一种燃烧炉是适用于低灰颗粒燃料的 Eco Tec 30kW。木薯秆颗粒在其中只能短时间燃烧,不久燃烧器中就装满灰分,空气被隔绝。第二种为生物质技术与化学研究所的专门用于高灰分颗粒燃料的燃烧器。采用两种户用颗粒燃烧炉燃烧木薯秆颗粒,达到燃

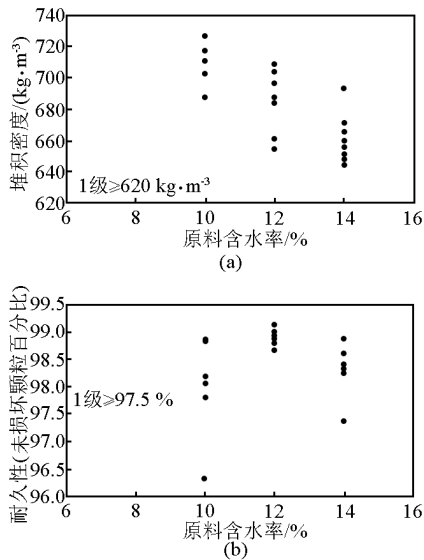


图1 木薯秆颗粒的堆积密度和耐久性(机械强度)

Fig.1 Bulk density and durability of cassava stem pellets (mechanical strength)

提升到90%。在发电与固体颗粒联产中,锅炉所用的干原料含水量大约为10%。这种生产模式的效率可以通过增加一个蒸汽干燥/供热装置来得到提高。在此基础上,还可以外加热负荷(热量用户),其可以是一个淀粉工厂、一个锯木厂或其他需要中低温供热的工厂。每年工厂内电力消耗不超过30 GW·h。对三种模式的年产出进行比较,生物质能联产模式产出最大(见表8)。

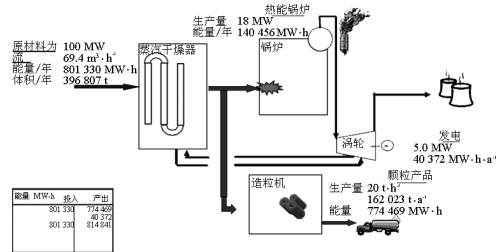


图2 用100 MW 燃料实施热电和颗粒联产(CPP)二位一体的生物质能联产模式

Fig.2 Bioenergy combined (Power + Pellet) with a steam dryer 100 MW fuel

烧炉的最高温度(1 017 ~ 1 256 ℃)时没有明显结渣出现。在两种燃烧炉中只出现了少量的小颗粒结渣,但是它们易碎,也很容易去除。在试验中CO和粉尘排放很多。这与木薯秆颗粒太长、压缩过于密实有关。长且坚硬的颗粒在离开燃烧炉前很难完全燃烧。没有燃烧的颗粒被推出燃烧炉,在锅炉底部继续燃烧,而底部的空气量不足。提高木薯秆颗粒的燃烧要从木薯秆颗粒的物理性能和燃烧炉方面优化。相对木材燃料讲,在废气中NO_x浓度高是因为木薯秆氮元素含量高。另外,粉尘排放量高可能与木薯秆中K高、P低有关,但是这有待进一步研究论证。

3.5 生物质能联产:电力和颗粒联产

为了比较传统的发电方式和生物质能联产方式,以木薯为原料,设计了年消耗含水量50%的木薯秆40万t、满负荷工作时间8 000 h的单一发电、热电联产、发电与固体颗粒联产(见图2)三种生产模式。

在单一发电模式中,燃料中32%的能量转化为电能。能量主要损失在冷却塔冷却和锅炉产生的烟气中(由于原料含水导致热潜能损失)。而热电联产中,用低温供暖装置取代了冷却塔,该装置使每年发电量减少了16 GW·h,但是每年用于取暖的热能增加了480 GW·h,年热能利用效率因此由32%

表8 三种生产模式的年产出比较

Table 8 Comparison of annual output between three cases

	燃料供给/ (t·a ⁻¹)	电/ (GW·h)	区域供暖/ (GW·h)	木薯颗粒/ (GW·h)
单一发电	397.000	256		
热电联产	397.000	240	480	
生物质能联产	397.000	10		774

4 经济效益分析

炎热的季节使得对热能的需求降低因而产生“能量过剩”,生物质能联产的一个关键优势是可以将其加以利用。这些“过剩能源”可以被大量地用于颗粒燃料或压块燃料的生产,燃料产品可以散装或包装的方式进行销售,甚至可储藏后在热负荷高峰季节使用或用于做饭。以此方式,优化的热电联产运营方式和能源生产能够在全年所有季节进行,达到具有高能量效率和低成本的颗粒燃料生产、发电和集中供热^[9]。经济效益和投资风险分析以生物质能联产为例。

经济效益估算参照瑞典同等工厂数据,电价和颗粒价格的计算参照中国的政策和市场情况。生物质能联产工艺中的关键部分投资预算参考2009年瑞典的价格和消费情况。此外,基于对其他生物质原料价格的分析以及当前木薯秆是废弃物、实际成

本为零而估算,木薯秆的市场价格为 250 元/t(干物质);广西的生物质能源电价 = 生产价格 + 政府补贴 = $0.4357 + 0.25 \approx 0.69$ 元/(kW·h),当地的商品电价格是 0.52 元/(kW·h)。发电过程中辅助能总消耗量是输出电量的 10%(在瑞典仅有 5%);基于目前中国颗粒燃料的市场情况和煤炭被颗粒取代的效果,颗粒市场价格设定为 800 元/t,另加政府补贴,总计 900 元/t;广西木薯秆颗粒和当地煤炭的热值相当,而热效率高 50%~80%,此外还有多种生态效益;每年的维修费用估计占总设备投资的 9%(瑞典仅为 7%)。建立一个热电和颗粒联产(CPP)工厂总投资大概是 3.8 亿人民币,工厂每年运行 8 000 h,发电 4 000 万 kW·h、生产 16.2 万 t 固体颗粒。总能效超过 96%。

对于颗粒燃料的生产,当生产量达到年生产能力的 20.9%时就可以盈亏平衡;对于热电联产厂,当其产出达到年产量的 42.6%时盈亏平衡。工程平均的投资回收期是 5~6 年。同煤炭一样,颗粒燃料可以直接用于工业和民用。虽然颗粒市场价格高,但使用颗粒仍有利可图。在中国工业上用颗粒燃料代替煤炭比较少,每年仅有几千吨,今后颗粒燃料潜力很大。中国政府也做出规划,并采取了一些措施,以促进颗粒燃料的发展和利用。其中一个目标就是到 2020 年时颗粒燃料的年产要达到 5 000 万 t^[10, 11]。随着一系列的以促进可再生能源发展的积极税收政策和相关措施的实施,颗粒燃料销售价格应该会有更多改善。

5 结语

在我国广西壮族自治区等热带、亚热带地区种植了大量的木薯以生产淀粉,木薯秆及木薯渣则作为农业的副产物未能很好开发利用。木薯秆及木薯渣用作固体生物质燃料,具有资源丰富、燃烧性好、成型颗粒质量高的特点,是很好的生物能源材料。采用生物能联产的生产模式,可以获得较好的

经济效益,随着我国可再生能源产业政策的实施及产业的进一步发展,木薯秆及木薯渣的开发应用将进一步推动广西壮族自治区等地区能源结构的改善和生活水平的提高。

致谢

感谢中国农业大学、瑞典皇家工程院、中国工程院发起或支持本项目。瑞典 Lars Atterhem, Per Lyssedal and Jan Burvall, Skelleftea Kraft AB, 为项目提供热电联产技术咨询,一并致谢。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 郑永清, 鲍苗青, 叶剑秋. 木薯茎秆粉碎还田对木薯产量影响初探[J]. 广西农业科学, 2009, 40(12): 1546 - 1548.
- [3] 刘平. 木薯渣饲料资源化开发研究[J]. 养殖与饲料, 2009(1): 55 - 59.
- [4] 苏启苞, 刘传森. 利用木薯秆、木薯渣栽培真姬菇试验[J]. 中国食用菌, 2008, 27(4): 59 - 61.
- [5] 应向东. 木薯渣刨花板的研制[J]. 建筑人造板, 1999(2): 24 - 25.
- [6] 广西壮族自治区统计局. 广西统计年鉴 2009 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
- [7] Burvall J. Influence of harvest time and soil type on fuel quality in reed canary grass (*Phalaris arundinacea* L.) [J]. Biomass and Bioenergy, 1997, 12(3): 149 - 154.
- [8] Xiong S, et al. Slagging characteristics during combustion of corn stovers with and without kaolin and calcite[J]. Energy & Fuels, 2008, 22: 3465 - 3470.
- [9] Gustavsson L, Tullin C, Wrande I. Small - scale biomass combustion in Sweden - research towards a sustainable society[R]. First World Conf. and Exhib. Biomass for Energy and Industry. Sevilla. June 2000.
- [10] 国家发展和改革委员会. 可再生能源中长期发展规划[J]. 可再生能源, 2007, 25(5-6): 1-5.
- [11] 财政部, 国家发展和改革委员会, 农业部, 等. 关于发展生物能源和生物化工财税扶持政策的实施意见[J]. 可再生能源, 2006(6): 1-2.

A feasibility study on using cassava stems for the production of bioenergy in Guangxi Zhuang Autonomous Region, China

Tao Guangcan¹, Xie Guanghui¹, Håkan Örberg², Xiong Shaojun^{1,2}

(1. Center of Biomass Engineering, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Unit of Biomass Technology and Chemistry, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå SE -90183, Sweden)

[**Abstract**] Based on the evaluate of the resource availability and combustion characteristic of cassava stems in Guangxi Zhuang Autonomous Region, this paper focused on the feasibility of pelletizing and commercial value of cassava stems as a biomass feedstock. Cassava stems were proved a promising biofuel, and can be produced as pellets/briquettes, then production of electricity, heat and pellets/briquettes.

[**Key words**] cassava stems; biofuel; pellet; production of electricity, heat and pellets/briquettes

(上接 100 页)

Current status and trend of international development of bioenergy

Zhu Wanbin, Li Jie, Yuan Xufeng, Cheng Xu, Wang Xiaofen

(Center of Biomass Engineering, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

[**Abstract**] This paper reviewed the research priorities, advances of tapping the second and the third generation biofuel as well as the backgrounds of fast growing of two bioenergy industries, that is pellet biomass fuel and biomethane. An overall picture of exploration efforts on bioenergy by international community was given.

[**Key words**] bioenergy; research and development; international situation