

研究报告

甜高粱填充甘蔗榨期生产燃料乙醇的可行性

李桂英¹, 葛耀相², 梁文育², 覃守贵², 王秀玲¹, 顿宝庆¹

1 中国农业科学院作物科学研究所 农作物基因资源与基因改良国家重大科学工程 生物质能源研究中心, 北京 100081

2 广西柳州市农业科学研究所, 柳州 545003

摘要: 为了探讨在甘蔗产区种植甜高粱填充甘蔗压榨期, 利用现有压榨设备生产燃料乙醇的可行性, 2008年选用15个早、中、晚熟甜高粱品种在广西柳州进行了分期播种试验, 从3月到9月, 共播种7次, 研究不同播期对茎秆产量、籽粒产量、茎秆糖锤度、叶片产量等的影响。研究表明, 3~8月播种, 所有参试品种均能正常生长, 9月底播种, 所有品种均不能正常成熟。茎秆鲜产最高的品种是Sart和PT3-S, 平均单季茎秆产量分别为79.28 t/hm²和78.58 t/hm², 双季茎秆鲜产分别为157.95 t/hm²和155.25 t/hm²。从6月底开始, 早熟品种开始成熟, 之后, 不同品种陆续成熟, 一直到12月底, 均有品种可以收获。年度双季乙醇产量最高产量可达9.14 t/hm²。此外, 还估算了木质纤维素产量, 讨论了甘蔗区发展甜高粱填充甘蔗空榨期生产燃料乙醇的可行性以及甜高粱综合利用的潜力。

关键词: 甜高粱, 甘蔗压榨期, 燃料乙醇

Feasibility of planting sweet sorghum in sugarcane region to prolong milling duration for bioethanol production

Guiying Li¹, Yaoxiang Ge², Wenyu Liang², Shougui Qin², Xiuling Wang¹, and Baoqing Dun¹

1 National Key Facility of Crop Gene Resources and Genetic Improvement, Research Center for Biomass Energy Resources, Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

2 Liuzhou Institute of Agricultural Sciences, Liuzhou 545003, China

Abstract: In order to explore the feasibility of planting sweet sorghum in sugarcane growing area to prolong milling duration for bioethanol production, 15 varieties were sown monthly from March to September in Liuzhou of Central Guangxi Zhuang Autonomous Region. Yields of fresh stem, grain and leaf were documented. The results showed that all varieties grew well when sown from March to August, but could not get mature when sown after late September. The high fresh stem yields were observed for the varieties Sart and PT3-S, 79.28 t/hm² and 78.58 t/hm² for single growing season, and 157.95 t/hm² and 155.25 t/hm² for two growing seasons. Ripening began from the end of June to late December, making the feed stock available for ethanol production from July to the end of December, even January next year.

Keywords: sweet sorghum, sugarcane milling duration, bioethanol

甘蔗是生产燃料乙醇的最佳原料之一。和淀粉类作物相比, 利用甘蔗生产乙醇的过程中, 没有糖

Received: June 30, 2010; **Accepted:** July 6, 2010

Supported by: Key Projects in the National Science and Technology Pollar Program during the Eleventh Five-Year Plan Period (No. 2006BAD07A04), MOA Special Funds for Scientific Research (No. 3-30-1).

Corresponding author: Guiying Li. Tel: +86-10-82108601; Fax: +86-10-82105819; E-mail: liguiying@caas.net.cn

“十一五”国家科技支撑计划 (No. 2006BAD07A04), 公益性行业科研专项经费项目 (No. 3-30-1) 资助。

与淀粉相互转化的2个生化过程,因此,可以节约大量能量和生产成本。但是,由于季节问题,我国甘蔗产区无法全年连续利用甘蔗生产乙醇,使得设备利用率不高。甜高粱是一种新型能源作物,上世纪70-80年代随着第一次石油危机而引起重视,之后随着石油危机减缓,其研究减缓^[1-2],近年来,随着石油价格的攀升,再次引起广泛重视^[3-7]。甜高粱是普通高粱的一个变种或者基因型^[8],与甘蔗具有相似特性,优点是它靠种子繁殖、生长期短、锤度与甘蔗相当,生物量高(0.2~0.7 t/d·hm²)^[9-10]。在甘蔗区种植方便,可以一年多熟,甘蔗压榨空闲期可以利用甜高粱生产乙醇。这样,既可提高蔗糖厂设备资源、人力资源等的利用率,也可以充分利用甘蔗区土地资源的利用率。2000年英国曾在津巴布韦进行了甘蔗与甜高粱综合生产乙醇和发电模式的研究。认为甘蔗与甜高粱配合可以实现利用现有设备全年连续生产乙醇,从而提高现有设备、人力资源、土地资源等的利用效率^[11]。

我国甘蔗产区曾进行过甜高粱引种试验,初步证明甜高粱能够在甘蔗区一年多熟^[12-13]。但当时主要目的是利用甜高粱生产蔗糖。由于甜高粱汁液中,含有阻碍蔗糖结晶的淀粉和乌头酸,因此,限制了甜高粱的发展。然而,利用甜高粱生产乙醇不存在蔗糖结晶问题,蔗糖和其他还原糖一样是发酵生产乙醇的理想成分。

甜高粱原产于热带地区,但其广泛应用却在温带,大部分改良品种也都是针对温带气候环境而培育的。我国现有甜高粱品种大部分引自美国高纬度地区,国内所选育的品种较少,且均为北方温带区选育。为了在甘蔗区充分发挥甜高粱的作用,急需从现有品种中筛选适宜甘蔗区种植的品种,并确定与甘蔗生产相配套的种植制度,同时需要研究甘蔗区适宜甜高粱品种类型,为新品种选育提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验随机选取了在北方地区表现早熟、中熟和晚熟的品种各5个。早熟品种:甜127(Tian127)、甜131(Tian131)、甜35(Tian35)、甜9(Tian9)、甜

128(Tian128);中熟品种:MN-3467、MN-3466、甜116(Tian116)、Babush和甜129(Tian129);晚熟品种:PT3-S(PT3-S),MN3329、Sart、MN-3466和08-KL。

1.2 试验方法

从2008年3~9月份每月播种1次,共7次,主要进行品种筛选试验并对每期试验分别调查播期、出苗期、挑旗期、抽穗期、开花期、乳熟期、蜡熟期、完熟期等,分别在乳熟期、蜡熟期、完熟期、成熟期后第1、2周时测定茎秆糖度,成熟时测定茎秆产量、叶片产量、籽粒产量等。第1~3期在旱地种植,第4~7期在水田种植,试验田土壤肥力中等,质地疏松,壤质土,排灌方便,前茬作物为甘蔗或玉米。结合植前整地施入基肥,亩施生物有机肥1000 kg、三元复合肥60 kg、过磷酸钙60 kg;植后1周淋施少量尿素;植后约1个月进行1次小培土,亩施尿素加硫酸钾25 kg;封行前进行1次大培土,亩施三元复合肥30 kg。结合施肥整个生育期进行2次中耕除草,及时除掉多余分蘖。排灌情况:只在定植前期进行2~3次浇灌保苗,中后期很少灌水,在洪灾过后均能及时排干积水,免受其害。病虫害防治:整个生长过程中根据病虫害发生情况不定期地对蚜虫、螟虫、纹枯病、紫斑病等及时进行防治。

第1期:3月25日播种,3次重复;4行区,小区面积8 m²,行(区)长4 m,行距0.6 m,小区宽2 m,株距0.4 m,每区种植40株。本期试验受5月30日和6月12日两场特大暴雨影响,部分品种出现倒伏现象。第2期:4月29日播种,随机区组排列,MN-3329、MN-3466、Tian131为2次重复,其他只有一个区,四周设置保护行;4行区,小区面积8 m²,行(区)长4 m,行距0.6 m,小区宽2 m,株距0.4 m,每区种植40株。本期试验也受5月30日和6月12日两场特大暴雨影响,部分品种生长受到抑制。第3期:5月30日播种,随机区组排列,均为3次重复,4行区,小区面积8 m²,行(区)长4 m,行距0.6 m,小区宽2 m,株距0.4 m,每区种植40株。第4期:6月30日播种,随机区组排列,3次重复;4行区,小区面积6 m²,行(区)长3 m,行距0.6 m,小区宽2 m,株距0.3 m,每区种植40

株。第5期:7月27日播种。随机区组排列, Babush和MN3466为2次重复,其他均为3次重复,四周设置保护行;4行区,小区面积7 m²,行(区)长3.5 m,行距0.6 m,小区宽2 m,株距0.35 m,每区种植40株。第6期:8月30日播种。随机区组排列,3次重复;4行区,小区面积7 m²,行(区)长3.5 m,行距0.6 m,小区宽2 m,株距0.35 m,每区种植40株。第7期:9月25日播种。

总糖产量(kg/hm²)=茎秆鲜重(kg/hm²)×汁液含糖量(0.75 Bx)×0.7(茎秆含水量)/(1-Bx);

乙醇产量估算公式(t)=0.51×总糖产量(t)+籽粒产量(t)/3。

2 结果与分析

2.1 甜高粱在桂中地区的表现

2.1.1 不同品种对播期的反应差异

通过7期播种试验,发现所有品种在桂中地区均能正常生长。3月25日播种的早熟品种Tian 9和Tian128未能出苗,Tian 127、Tian 131、Tian 35出苗良好,6月底进入蜡熟期,7月初完熟,生育期102~103 d(图1);中熟品种除MN-3466外,均生长良好,7月中旬到8月上旬成熟,生育期109~133 d;晚熟品种PT3-S、MN3329、Sart、MN-3466和08-KL未表现晚熟,甚至早于中熟品种,也是7月中旬到8月初成熟。研究发现,随着播种期的延迟,生育期呈缩短趋势,但不同品种反应差异很大,早熟

品种Tian131在4~7月份播种时,生育期缩短到85~93 d,8月份播种生育期与3月份播种相同。中熟品种MN3467对播期反应最大,3~4月份播种,生育期相近(133~135 d),5月份以后播种生育期大幅度缩短,只有89~99 d;MN-3466则播期反应相对较小,生育期在113~122 d之间波动;晚熟品种PT3-S 3~4月份播种生育期相近(128~133 d),5月底到6月底播种103~107 d,08-KL对播期反应最为稳定,约为110~125 d,Sart从130 d逐步缩短至98 d。由此可见,要合理安排播种期,预先了解品种生育特性十分重要。

2.1.2 15个甜高粱品种在桂中地区的产量表现

通过3月25到9月30日每月一期的播种试验发现,3~8月份播种的品种均能成熟,9月25日播种,所有品种均不能正常成熟。所有品种均能一年两熟,3月25日播种的早熟品种9月底即可完成第2次收获,晚熟品种10月底到11月中旬可完成第2次收获。4月份播种,只有早熟品种能够完成第2季收获。表1总结了15个品种在6个播种期中的单季最高茎秆产量,最高双季产量和茎秆锤度。由表可见,就鲜茎秆单季产量而言,晚熟品种(平均64.53 t/hm²)高于中熟品种(66.64 t/hm²),中熟品种高于早熟品种(31.8 t/hm²),但在中熟品种中,有的品种茎秆产量高于晚熟品种,如Babush平均单季茎秆产量为66.44 t/hm²,而晚熟品种MN3329只有49.9 t/hm²。平均单季茎秆产量最高的是Sart和PT3-S,分别为79.28 t/hm²和78.58 t/hm²。单季茎秆产量较高的有晚熟品种PT3-S、Sart,和中熟品种Tian 129,分别为93.75 t/hm²(4月播种)、93.6 t/hm²(6月份播种)、91.05 t/hm²(6月份播种)。

就籽粒产量而言,单季籽粒产量晚熟品种(平均4.16 t/hm²)高于中熟品种(平均4.06 t/hm²),但差异不显著,两者显著高于早熟品种(3.29 t/hm²),单季籽粒产量最高的品种Babush,播种期是3月25日。单季最高籽粒产量与单季产量变化趋势相同,晚熟品种、中熟品种和早熟品种分别是6.30 t/hm²、5.71 t/hm²和4.67 t/hm²,差异均达到显著水平,单季最高籽粒产量最高的品种是PT3-S,为7.78 t/hm²。

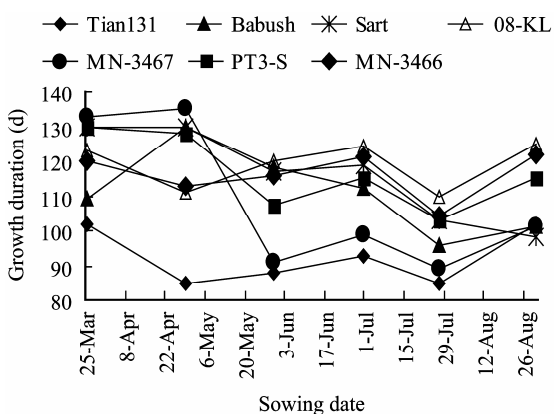


图1 甜高粱部分品种分期播种对生育期的影响

Fig. 1 Growth periods when sown on different dates in partial varieties tested.

茎秆汁液锤度是能源甜高粱最重要的指标之一, 根据每个品种的糖分积累规律, 本文将接近本品种最高锤度时作为可收获期, 表 1 列出了可收获期间的平均锤度和最高锤度。由表可见, 早熟品种的平均锤度明显高于中熟和晚熟品种, 中熟和晚熟品种差异不显著, 平均锤度较高的品种有 Tian 9、

Tian131、Tian127、08-KL、Tian128, 其锤度分别为 15.84%、15.70%、15.47%、14.88%、14.77%、14.56%。单季平均锤度较高的品种有 Tian131、Tian 9、Tian128、Tian127、08-KL、PT3-S, 分别是 18.2%、17.04%、16.96%、16.64%、16.55%、15.8%和 15.1%。

表 1 15 个甜高粱品种在桂中地区的平均单季产量 (t/hm^2)、双季产量 (t/hm^2) 和茎秆汁液锤度 (%)

Varieties	Mean stem yield /crop	Maximum stem yield in one crop	Year stem yield one year	Mean stem yield /crop	Maximum grain yield in one crop	Year grain yield in one year	Mean brix in harvestable period	Maximum brix
Tian127	26.31	36.15	65.10	2.75	4.52	7.38	15.47	16.64
Tian131	27.91	39.15	69.00	3.52	4.98	8.35	15.70	18.20
Tian35	33.11	41.70	69.45	3.26	4.27	7.98	12.82	13.92
Tian9	35.13	48.90	-	3.47	4.58	-	15.84	17.04
Tian128	36.52	46.95	-	3.47	5.01	-	14.56	16.96
Mean of above	31.80	42.57	67.85	3.29	4.67	7.90	14.88	16.55
MN-3467	41.89	43.65	95.10	3.59	5.07	8.57	10.74	11.56
MN-4093	59.10	68.40	-	3.68	4.25	-	9.18	9.70
Tian 116	48.11	66.45	98.70	3.77	5.75	9.29	12.97	13.70
Babush	66.44	88.65	131.70	4.72	7.08	10.04	9.44	12.38
Tian 129	62.68	91.05	121.80	4.55	6.41	10.25	9.92	13.04
Mean of above	55.64	71.64	111.83	4.06	5.71	9.54	10.45	12.08
PT3-S	78.58	93.75	157.95	3.98	7.78	10.32	11.87	15.10
MN3329	49.90	65.85	97.20	4.45	6.64	11.22	8.22	10.78
Sart	79.28	93.60	155.25	4.70	6.24	9.89	9.70	14.60
MN-3466	55.45	73.35	114.90	3.19	4.50	7.81	9.61	14.03
08-KL	59.46	77.55	116.70	4.46	6.36	9.77	14.77	15.80
Mean of above	64.53	80.58	128.40	4.16	6.30	9.80	10.83	14.06

Note: Tian127 didn't established well or didn't emerged when sown on April 29, May 30 and July 27; Tian35 didn't emerged when sown on April 29; Tian 9 and Tian 128 didn't emerged when sown on March 25; MN4093 had only two data when sown on April 29 and June 30; Tian129 hadn't data for May 30 sowing; "-" means on two crops accomplished due to seed shortage.

2.2 播种期对茎秆产量、籽粒产量的影响

如图 2 所示, 不同播种期对甜高粱茎秆产量影响较大, 且各品种的反应趋势相似。总的来看, 3 月 25 日播种和 4 月 29 日播种的茎秆产量略有增减, 7 品种平均分别为 $63.09 t/hm^2$ 和 $64.50 t/hm^2$, 5 月 30 日播种产量显著下降, 平均 $51.86 t/hm^2$, 平均下降 19.6%, 6 月 27 日播种茎秆产量最高, 平均达到 $72.64 t/hm^2$, 7 月 27 日播种茎秆产量 $55.56 t/hm^2$ 与 5 月 30 日播种相近, 8 月 30 日播种产量最低, 为 $42.92 t/hm^2$ 。

由图 3 可见, 3~5 月播种, 籽粒产量变化较平稳, 变化范围在 $3.41\sim 3.56 t/hm^2$ 之间, 其中 5 月份播

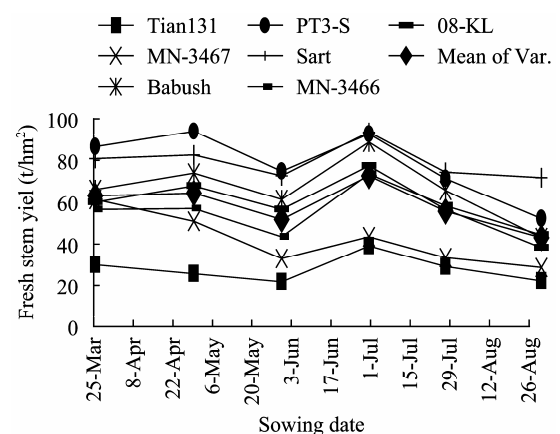


图 2 不同播期对甜高粱茎秆产量的影响

Fig. 2 Fresh stem yield of 7 sweet sorghum varieties when sown on different dates.

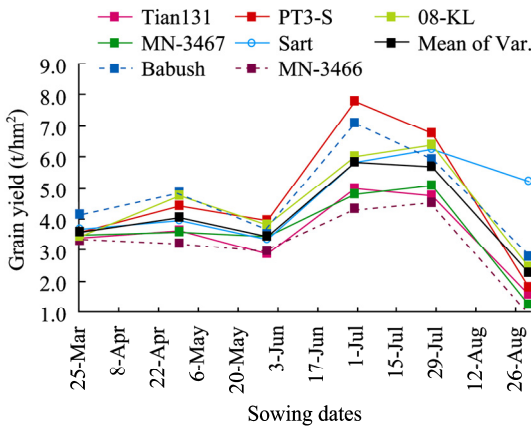


图3 不同播期对甜高粱籽粒产量的影响
Fig. 3 Grain yield respond to different sowing dates in 7 sweet sorghum varieties.

种, 籽粒产量最低, 6月播种, 各品种籽粒产量均显著增加, 7品种平均产量达到 5.83 t/hm², 较前一播种期增加 70.8%, 7月份播种, 籽粒产量略有下降, 达到 5.66 t/hm², 比6月份播种下降 2.9%, 未达到显著水平, 平均为 5.66 t/hm², 但仍然比 3~5月份播种平均产量增加 63.2%。8月份播种产量最

低, 7品种平均只有 2.28 t/hm², 只有6月播种的 39.1%。

对比茎秆产量变化图发现, 不同播期, 籽粒产量与茎秆产量变化动态趋势相近。但7月份播种时, 茎秆产量下降幅度大于籽粒产量, 该时期播种, 正好 10~11月成熟, 有利于籽粒发育。

2.3 不同播种期和可收获期的关系

原料的可持续供应是生物乙醇产业的重要基础, 我国北方甜高粱收获期短, 限制了大规模发展。而在热带地区, 拥有独特的发展甜高粱的自然条件, 本文所指可收获期是指从锤度接近最大值时开始, 一直持续到成熟后 2 周, 图 4 总结了不同播期的甜高粱的可收获期。可见, 从 6 月底, 一直到次年 1 月底, 均有品种可以收获。甘蔗榨期一般为 11 月到次年 4 月, 可见, 只要品种和分期播种搭配合理, 甜高粱至少可以填充 7~10 月份的压榨空闲期。从图中还可发现, 不同品种在不同月份成熟时, 可收获期间长短不同。7~8 月成熟时, 可收获期较短, 之后逐渐延长。

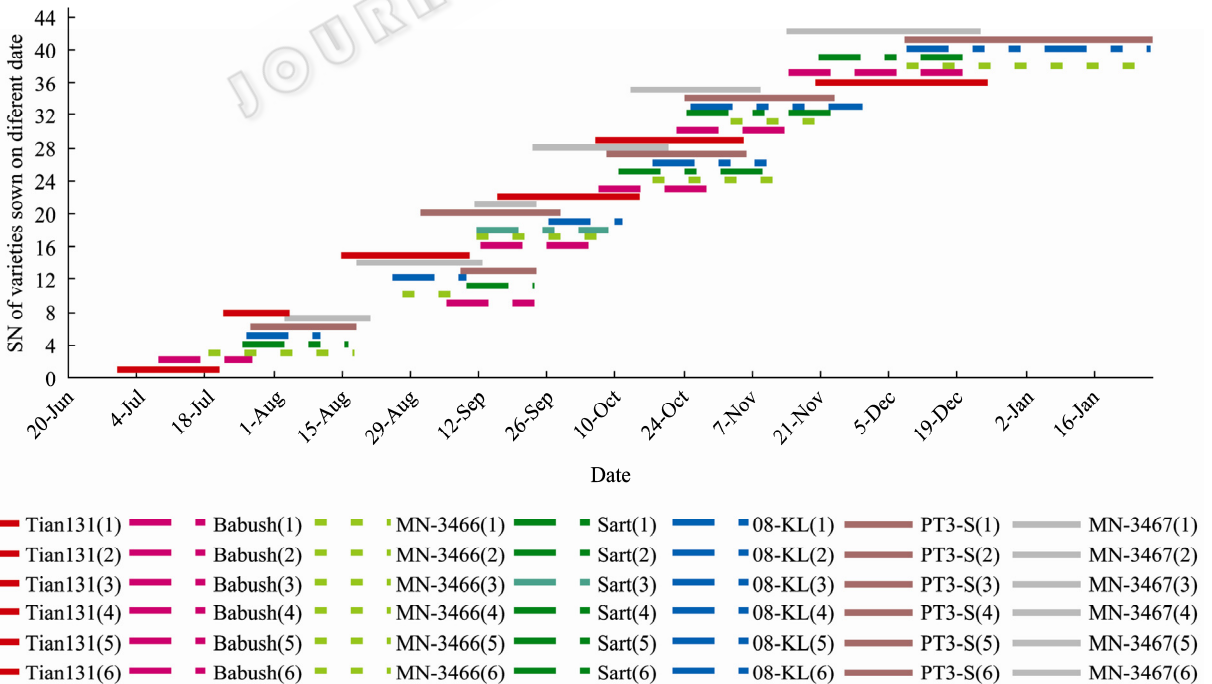


图4 不同播期对甜高粱可收获期的影响
Fig. 4 Harvestable periods of 7 sweet sorghum varieties sown on 6 different dates.

2.4 成熟月份与茎秆汁液含糖量的关系

试验发现, 通过调整播期, 可以做到6~12月均有甜高粱收获, 而且播期对锤度有很大影响(表1)。但分析发现, 播期对锤度的影响主要取决于成熟期, 因此, 进一步分析了甜高粱成熟月份对锤度的影响。图5是8个甜高粱品种在不同月份成熟时完熟期茎秆糖锤度平均值的变化。

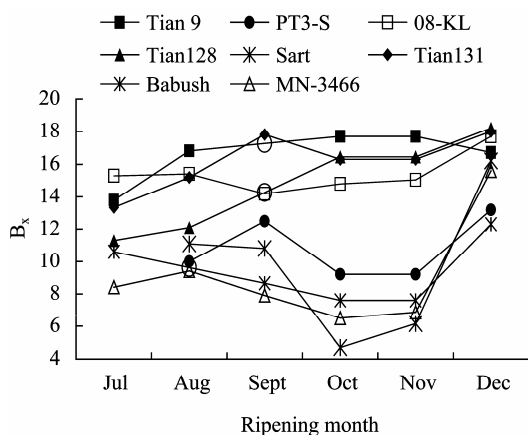


图5 不同品种在不同成熟月份茎秆汁液含糖量(完熟期)(图中“O”点表示数据空缺)

Fig. 5 The brix values (when seed full ripened) of 8 sweet sorghum varieties in different ripening month. “O” means the data was missing.

可见, 不同品种在不同月份成熟, 茎秆糖分积累不同, 但不同品种反映有差异。高糖品种 Tian 9、

08-KL 和 Tian 131 在7~12月份成熟, 其茎秆糖锤度变化较小, 表明其对光温反映较为迟缓。中低含糖量的品种反映较大, Tian 128 从7~12月份茎秆糖锤度逐渐升高, 但10~11月茎秆锤度持续偏低; PT3-S 8月份开始成熟, 9月份茎秆糖锤度有所升高, 之后, 10~11月份持续偏低, 12月份有所升高; Sart、MN-3466 和 Babush 9月份之前, 糖锤度变化较小, 小于2个百分点, 但在10~11月份, 均有明显降低, 表明10~11月份不适宜糖分积累。对比图3中12月份籽粒产量, 可见, 10~11月份有利于籽粒发育, 12月份有利于糖分积累, 但不利于籽粒发育。

2.5 不同甜高粱品种的理论乙醇产量和综合利用潜力

为评价各品种生产燃料乙醇及其综合利用潜力, 估算了各品种平均单季乙醇产量, 单季最高乙醇产量, 双季乙醇总产量, 双季木质纤维素产量和双季叶片产量, 结果见表2。可见, 08-KL 和 PT3-S 平均单季乙醇产量最高分别为 4.25 t/hm² 和 4.16 t/hm², Sart 和 Babush 次之, 分别为 3.85 t/hm² 和 3.43 t/hm²。单季最高乙醇产量以 PT3-S 和 08-KL 两个品种最高, 分别为 5.72 t/hm² 和 5.72 t/hm²。双季乙醇总产量最高的也是 PT3-S 和 08-KL 两个品种, 分别为 9.14 和 8.67 t/hm²。早熟品种 Tian131 生育期虽短, 双季乙醇产量仍可达 5.65 t/hm²。

表2 估算理论乙醇产量、木质纤维素产量和叶片(饲草)产量

Table 2 Estimated theoretical ethanol yield, yield of lignocellulose and leaves

Varieties	Mean stem yield of one crop	Maximum stem yield in one crop	Year stem yield one year	Lignocellulose yield of two crops	Leaf yields of two crops
Tian127	2.21	3.28	5.65	8.35	17.02
Tian131	2.57	3.61	6.22	8.85	19.31
Tian35	2.39	3.07	5.39	8.90	16.13
MN-3467	2.55	3.10	5.92	12.19	24.50
Tian 116	3.18	4.57	7.04	12.65	21.71
Babush	3.43	4.83	7.02	16.88	28.83
Tian 129	3.36	4.82	7.01	15.61	29.95
PT3-S	4.16	5.97	9.14	20.25	26.58
MN3329	2.68	3.79	6.07	12.46	19.53
Sart	3.85	4.77	7.76	19.90	29.21
MN-3466	2.64	3.59	5.87	14.73	28.37
08-KL	4.25	5.72	8.67	14.96	27.88

此外,甜高粱还含有较多纤维素和半纤维素,是二代燃料乙醇的原料,是重要生物质资源。甜高粱叶片是优良饲料,因此,叶片产量是评价甜高粱综合利用潜力具有重要因素。表2可见,PT3-S和Sart木质纤维素产量较高,分别达到20.25、19.9 t/hm²,Babush、Tian 129、08-KL和MN3466次之,分别为16.88 t/hm²、15.61 t/hm²、14.96 t/hm²和214.73 t/hm²。叶片产量分布于16.13~29.95 t/hm²,多数在20 t/hm²以上,平均24.1 t/hm²,可见,品种间叶片产量差异较小,且为副产品,选择品种时可不用考虑。

根据试验地周边地区甘蔗产量推算,甘蔗产量114.5 t/hm²,估计乙醇产量8.2~9.5 t/hm²。考虑到本研究所选品种为随机选取,而非专门针对该地区选育,如果针对该地区选育出专用能源甜高粱品种,其发展潜力将会更大。

综合考虑,乙醇产量,木质素产量以及茎秆糖锤度,在所试品种中,08-KL和PT3-S两个品种适宜作为乙醇原料在该地区种植,但PT3-S糖锤度稳定性较差,需要进一步改良。早熟品种中,Tian 131可作为搭配品种种植。

3 讨论

南方引种甜高粱,已有些试验,杨秀坚等^[12]在广东湛江引种5个品种或杂交种,希望筛选出适合湛江市栽培的籽粒和鲜茎产量蔗糖含量达到甘蔗水平的优良品种进行开发利用,以解决蔗源、粮源不足问题。该试验从1997年上旬至1998年4月下旬共播种5次,结果表明,在湛江市从每年的3月上旬到12月中旬这段时间内,种植甜高粱能够正常生长和结籽能够成熟,且可一年多熟。刘晓辉等^[13]从吉林引进25个甜高粱品种在亚热带地区珠三角腹地的试验表明,引种的品种均能正常生长,而且偏早熟,品种间优势表现不一。本研究中15个北方甜高粱品种在桂中地区均能正常生长,全生育期变化幅度为101~128 d,熟期普遍较北方偏早,Tian35、Tian 212、Babush属极早熟品种;Tian 116、MN-3466属早熟品种;Sart属中熟品种。若以茎秆为主要生

产目的,Sart较适宜在桂中地区推广,品种08-KL茎秆鲜产和糖锤度较高且稳定,可以大面积推广种植。

甜高粱作为“高能”作物,其巨大的生物产量潜力,一直备受关注,但因收获期过短、收获后糖分消耗过快,而使产业化受阻^[14-15],故而产生了在甘蔗产区发展甜高粱填充甘蔗空榨期的思路。通过本文研究,证明在甘蔗产区种植甜高粱生产燃料乙醇是可行的。但在产业化之前需要作好以下几方面的工作:

- 1) 继续选育适宜的品种:标准是适于分期播种且糖锤度相对稳定,平均锤度在16%以上,双季茎秆产量150 t/hm²以上,抗病性较好;
- 2) 建立新的种植制度:早中晚熟品种搭配,不同作物搭配,以达到养地与用地相结合,实现可持续生产的目的;
- 3) 甜高粱综合开发潜力巨大,研究种植业、养殖业和生物能源性结合的生态农业系统十分必要;
- 4) 甘蔗是很好的燃料乙醇原料之一,如何实现甜高粱与甘蔗的有效衔接,还需进一步研究。

高粱作为生物质能源作物在我国推广和应用方面虽已取得可喜的成绩,但在南方地区开展研究课题很少,还没有培育出性状稳定的优良品种,没有引起政府及加工企业的重视,栽培面积不大,为使甜高粱成为甘蔗产区的工业加工原料,更好地促进经济社会又好又快发展,应加大对甜高粱新品种选育力度,尽快选育出一批抗逆性强、综合性状好、适合本地区种植的新品种。与此同时加强与加工企业的交流与合作,为蔗糖企业及乙醇生产等相关企业提供原材料,提高其设备利用率。

此外,本研究对于甜高粱基础研究和新品种选育具有重要的参考意义。首先,如果在腊熟期收获,或者利用广西、海南的自然条件,实现一年3熟是可行的,这样可以大大缩短育种周期。其次,通过分期播种,可以检验不同品种的适应性。适应好的品种往往光温反应迟钝,一年多季节播种,恰好是天然的不同光温反应试验。本研究中表现较好的品种08-KL,在不同播种期表现相对稳定,在北京地区多年的表现相对稳定即是很好的证明。

REFERENCES

- [1] Nguyen MH. Suitability of sweet sorghum for alcohol in the pacific. *Energy Agri*, 1984, **3**: 345–350.
- [2] Smith GA, Buxton DR. Temperate zone sweet sorghum ethanol production potential. *Biores Technol*, 1993, **43**: 71–75.
- [3] Rooney WL, Blumenthal J, Bean B, *et al.* Designing sorghum as a dedicated bioenergy feedstock. *Biofuels Bioprod Bioref*, 2007, **1**: 147–157.
- [4] Tsuchihashi N, Goto Y. Cultivation of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) and determination of its harvest time to make use as the raw material of fermentation, practiced during rainy season in dry land of Indonesia. *Plant Prod Sci*, 2004, **7**(4): 442–448.
- [5] Prashant VB. Economics of on-farm ethanol production using sweet sorghum[D]. Oklahoma State University, 2007.
- [6] Wortmann CS, Liska AJ, Ferguson RB, *et al.* Dryland performance of sweet sorghum and grain crops for biofuel in Nebraska. *Agron J*, 2010, **102**: 319–326.
- [7] Xiao MS, Yang JX. Showcase project: ethanol production through solid fermentation of sweet sorghum stalks. *Transactions of the CSAE*, 2006, **22**(Supp1): 207–210. 肖明松, 杨家象. 甜高粱茎秆固体发酵制取乙醇产业化示范工程. *农业工程学报*, 2006, **22**(Supp1): 207–210.
- [8] Ritter KB, McIntyre CL, Godwin ID, *et al.* An assessment of the genetic relationship between sweet and grain sorghums, within *Sorghum bicolor* ssp. *bicolor* (L.) Moench, using AFLP markers. *Euphytica*, 2007, **157**: 161–176.
- [9] Li DJ, Liao FS. Sweet Sorghum and its Utilization. Beijing: Scientific and Technological Press, 1992. 黎大爵, 廖馥荪. 甜高粱及其利用. 北京: 科学出版社, 1992.
- [10] Li DJ. Studies on sustainable agro-ecology system of sweet sorghum. *Sci Agri Sin*, 2002, **35**(8): 1021–1024. 黎大爵. 甜高粱可持续农业生态系统研究. *中国农业科学*, 2002, **35**(8): 1021–1024.
- [11] Woods J. Integrating sweet sorghum and sugarcane for bioenergy: modeling the potential for electricity and ethanol production in SE Zimbabwe[D]. London: Kings College, 2000.
- [12] Yang XJ, Chen CG, Wei SZ. The initial research of the seed-introducing and experiment of sweet sorghum and comprehensive utilization. *J Zhanjiang Normal College*, 1999, **20**(2): 73–76. 杨秀坚, 陈朝贵, 韦少忠. 甜高粱引种试种及综合利用研究初报. *湛江师范学院学报*, 1999, **20**(2): 73–76.
- [13] Liu XH, Li JH, Gao SJ. Introduction of sweet sorghum into sub-tropical region. *Rain Fed Crop*, 2009, **29**(3): 203–206. 刘晓辉, 李继洪, 高士杰. 亚热带地区甜高粱引种研究. *杂粮作物*, 2009, **29**(3): 203–206.
- [14] James CL, Linda LH, Vincent GM, *et al.* Preservation of potential fermentables in sweet sorghum by ensiling. *Biotechnol Bioeng*, 1987, **30**: 860–867.
- [15] Ross WH, Ferraris R. Post-harvest changes in fermentable sugars in sweet sorghum (*Sorghum bicolor* cv. Wray). *J Sci Food Agri*, 1985, **36**: 557–560.