

## 技术进展

### “生物质能源”专题报道导读

生物质能源开发已成为全球关注的热点,我国近几年也已陆续建设了一批燃料乙醇、生物柴油示范生产厂,在可再生替代燃料的开发和环保方面做出了有益的尝试,取得了显著成效。但是,生物燃料产业化发展正面临着原料供给、经济效益和技术进步等一系列问题的挑战,尤其以粮食为原料生产燃料乙醇,大规模发展必将引发严重的粮食问题。美国目前已停止对以玉米等粮食原料生产燃料乙醇项目的支持,我国也叫停了此类新生产项目的上马。所以,必须寻求新的原料来源,推动技术进步,降低成本,才能实现生物燃料产业的可持续发展。本栏目将在本期刊出3篇相关文章,探讨生物质能源产业化中存在问题的可能解决途径。“甜高粱生产燃料乙醇的研究进展”一文,将介绍以甜高粱茎秆及其纤维素成分生产燃料乙醇的新技术进展,该法较之玉米生产乙醇更具经济竞争力,并可解决与人争粮的问题;“生物质高压液化生物油的研究进展”,则介绍了生物质直接液化技术的关键技术方面的国内外进展情况,探讨了一种生物质液体燃料生产的新技术;“第二代生物柴油及其制备技术的研究进展”,介绍了基于炼油厂加氢过程的第二代生物柴油合成路线。欢迎广大读者关注本专题报告。

——本刊编委:袁振宏

# 甜高粱生产燃料乙醇的研究进展

许晓菁<sup>1,2</sup>,王祥河<sup>2</sup>,晋明芬<sup>2</sup>,武晓炜<sup>2</sup>

(1.天津大学化工学院,天津 300072; 2.天津工业微生物所,天津 300462)

**摘要:**以甜高粱为原料生产燃料乙醇具有广泛的应用前景。主要介绍了国内外利用甜高粱生产燃料乙醇的研究现状、工艺路线及存在的主要问题,并指出今后由甜高粱生产燃料乙醇的发展方向是利用其纤维素成分进行乙醇发酵。

**关键词:**甜高粱;燃料乙醇;发酵

中图分类号:TQ033

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2008)03-0017-05

## Research advance in ethanol production using sweet sorghum

XU Xiao-jing<sup>1,2</sup>, WANG Xiang-he<sup>2</sup>, JIN Ming-fen<sup>2</sup>, WU Xiao-wei<sup>2</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Industrial Microbe Research Institute of Tianjin, Tianjin 300462, China)

**Abstract:** Ethanol production by fermentation of sweet sorghum is a promising pathway. In this paper, the research advance, processes, issues to be solved are introduced. Finally, the ethanol production by the fermentation of cellulose ingredient of sweet sorghum is proposed as the development direction for ethanol production by the fermentation of sweet sorghum.

**Key words:** sweet sorghum; fuel ethanol; fermentation

目前,我国已成为世界能源生产和消费大国,但人均能源消费水平还很低。随着经济和社会的不断发展,我国能源需求的持续增长与化石能源的日益短缺之间的矛盾将越来越突出。为了增加能源供应、保障能源安全、保护生态环境,大力发展生物质能等可再生能源已经成为促进我国经济和社会协调发展的一项重大战略任务。目前,国家发展与改革委员会、财政部等相关部门已将生物质能源列为重点扶持对象。在生物质的开发利用中,燃料乙醇的

生产是最主要的途径之一。甜高粱作为新兴的能源作物,其综合开发利用引起科研人员的广泛关注。本文将对利用甜高粱进行乙醇生产的优势、国内外研究现状、工艺路线、存在的问题以及今后的发展方向进行综述。

### 1 利用甜高粱进行乙醇生产的优势

甜高粱为粒用高粱的变种,是光合作用效率最高的作物之一,其光合效率为大豆、小麦、甜菜等作

收稿日期:2007-12-04

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2007BAD42B00)

作者简介:许晓菁(1978-),女,博士,主要从事生物质燃料乙醇方面的研究,022-59832008-8311, xuxiaojing@tju.edu.cn。

物的 2~3 倍,被称为“高能作物”。甜高粱具有很强的适应性,抗旱、耐涝、耐盐碱,pH 从 5.0~8.5 都能很好生长,适合在山地、坡地、盐碱地(6‰以下)种植,分布的地理范围广泛,并且对土壤、肥料要求不高,需水量少,生产和收获的总能耗小于其他糖类作物<sup>[1-2]</sup>。与甘蔗和甜菜比较,其生长期短,生物学产量高,糖分积累快。而较之于淀粉质原料,甜高粱只需要简单处理就可以用于乙醇生产,省去了液化和糊化操作,工艺简单。Worley 等<sup>[3]</sup>比较了利用甜高粱和玉米作为原料生产乙醇的能量比(能量产出与能量消耗的比值)情况,发现甜高粱发酵生产乙醇较之于玉米生产乙醇具有能量方面的优越性。而刘杰等<sup>[4]</sup>的研究结果表明,单位面积甜高粱茎秆乙醇提取量明显高于单位面积玉米籽实的乙醇提取量,甜高粱茎秆是制取乙醇极佳的生物质能源。

我国自 2001 年开始利用陈化粮进行燃料乙醇的生产,并取得了一定的成果,但是由于陈化粮消耗完后,燃料乙醇行业的发展必然会出现与人争粮的局面,存在造成粮食危机的隐患,影响国家的粮食安全。2006 年 12 月 18 日,国家发展与改革委员会、财政部联合下发《关于加强生物燃料乙醇项目建设管理》的通知,要求各地暂停核准和备案玉米加工乙醇项目,并对在建和拟建的项目进行全面清理。2007 年国家发展与改革委员会颁布的《可再生能源中长期发展规划》中明确指出,近期重点发展以木薯、甘薯、甜高粱等为原料的燃料乙醇技术。受粮食总量制约,我国近期不会再扩大以粮食为原料的燃料乙醇生产,而我国有盐碱地数千万公顷,种植普通作物产量很低,改造起来难度大、成本高,而如果能将其加以合理利用来种植甜高粱,则可以满足几十年内制乙醇的原料需求。这无疑符合我国的国情,为利用生物质进行燃料乙醇的生产开辟了一条新的途径。对于广大盐碱地的农民,大量种植甜高粱则是一项提高收入、改善经济结构的途径,有利于解决“三农”问题。

用甜高粱秸秆生产燃料乙醇不仅具有显著的经济效益、社会效益,而且具有明显的环境效益。甜高粱秸秆经发酵制取的乙醇作为能源使用,可以减少有害气体的排放,同时可以减少秸秆燃烧时造成的大气污染。

## 2 国内利用甜高粱进行乙醇生产的现状

作为能源作物,甜高粱已经引起许多国家的重视,被作为一种良好的乙醇发酵生产原料进行研究

和推广。巴西自 1975 年开始实施甜高粱生产乙醇计划,现已拥有 12 万 L/d 的商业乙醇工厂,美国自 1978 年便开始应用甜高粱生产燃料乙醇,到 2000 年甜高粱的种植面积已达到 8 400 万亩(1 亩 = 667 m<sup>2</sup>),生产燃料乙醇约 50 亿 L/a<sup>[5]</sup>。印度、加拿大、日本、澳大利亚等国都已种植甜高粱,并相继开展了以甜高粱秸秆为主要原料来生产燃料乙醇的研究与开发。

我国在甜高粱育种方面具有很强的自主创新能力,近些年来取得了很大的成果,有些品种达到了国际领先水平。这为甜高粱发酵生产乙醇提供了可靠的支撑,但是在大面积的生产应用上还处于研究试验阶段。黑龙江、山东、新疆、内蒙古和辽宁等省区进行了甜高粱试点种植,目前形成了 3 万 t/a 甜高粱茎秆乙醇的生产能力。

当前,我国已经广泛开展利用甜高粱进行乙醇生产的研究,并取得了一定的成果。中国科学院近代物理研究所对适宜在甘肃种植的甜高粱品种和种植技术做了试验研究及推广工作。2006 年在甘肃省的川地、旱地、山坡地和盐碱地筛选出 4 个优良的甜高粱品种,亩产量达 8 t 以上,汁液含糖质量分数 20%左右。与此同时,研究人员利用重离子辐照培育出了新菌种,通过甜高粱榨汁直接发酵工艺得到了 9%以上的酒分,并将发酵时间缩短为 16 h,仅为粮食(如玉米)生产燃料乙醇发酵时间的 1/4。2006 年 9 月,山东省滨州市政府与中国粮油食品(集团)有限公司正式签约甜高粱秸秆制乙醇合作项目。根据规划,滨州市将在北部沿海发展 30 万亩甜高粱,同时发展汽油醇加工产业。2007 年 5 月清华大学与天津工业微生物所联合在内蒙古五原县进行了甜高粱秸秆固体发酵生产乙醇的中试实验。发酵时间为 44 h,糖醇转化率为 94.4%,乙醇收率达到理论值的 87%以上。

## 3 甜高粱茎秆乙醇生产的工艺路线

在发酵生产中,工艺路线在很大程度上影响到产品的产量和发酵时间,因此,选择适宜的工艺路线对于甜高粱茎秆的乙醇生产非常重要。甜高粱茎秆制乙醇的工艺路线主要有液体发酵和固体发酵 2 种。

### 3.1 液体发酵

在液体发酵工艺中,首先用压榨的方法提取茎秆汁液,然后进行预处理,添加适量的营养盐,接种,发酵,得到一定乙醇浓度的醪液,最后进行醪液精馏,得到质量分数为 99.5%的乙醇。该工艺适宜大

规模生产,需要集中压榨大量茎秆,并对糖汁进行及时处理,以免变质。

液体发酵工艺的关键问题在于糖汁的处理和保存。Daeschel等<sup>[6]</sup>的研究表明,对于新压榨的甜高粱汁常温下需要在5 h内进行加工,否则会变酸或变色。如果压榨后及时放于4℃保藏,则可以放置14天。Worley等<sup>[3]</sup>对甜高粱发酵应用2种方案:一种是榨汁、浓缩后储存,用于整年的发酵生产,副产物作为饲料;另一种方案是所榨汁液仅用于收获期的乙醇生产,并不进行浓缩和储存。而榨汁后的副产品中的纤维素则在收获期以外的时间被转化为糖并发酵成乙醇。由于汁液的浓缩储存成本较高,因此方案二的能量产出比要高于方案一。费立发等<sup>[7]</sup>对以甜高粱秸秆榨汁的乙醇发酵中原汁的保存期进行了研究。结果表明,调整原汁的酸度,能够防止杂菌污染,在29℃恒温条件下,可延长甜高粱榨汁的保存期至2~3天。

由于液体发酵工艺比较成熟,对发酵方式以及发酵参数的选择和优化有助于乙醇产量的提高。Lakkana等<sup>[8]</sup>将甜高粱汁作为发酵底物,利用酿酒酵母进行了间歇发酵和半连续发酵研究。在间歇发酵中,最佳细胞浓度和糖质量分数分别为 $1 \times 10^8$ /mL和24%,此时的乙醇质量浓度、产量以及生产能力分别为100 g/L、0.42 g/g和1.67 g/h。在半连续发酵过程中,在初始糖质量分数为24%时的最佳底物流加方式为一次性添加底物,此时的乙醇质量浓度、产量和生产能力分别为120 g/L、0.48 g/g、1.11 g/h。半连续发酵乙醇的最终浓度和产量分别提高了18%和14%,但是生产能力有所下降。刘荣厚等<sup>[9]</sup>以甜高粱茎秆汁液作为原料,分别在摇床和流化床反应器上进行了固定化酵母酒精发酵的研究,考察了营养盐对乙醇得率的影响,得出不同营养盐对提高乙醇得率影响的主次顺序,并确定了最佳的营养盐配方为:0.125%  $K_2HPO_4$ 、0.200%  $(NH_4)_2SO_4$ 和0.010%  $MgSO_4$ 。

### 3.2 固体发酵

固体发酵工艺则是不经过压榨,将茎秆粉碎后直接接种进行固体发酵,发酵结束后,用蒸汽吹蒸,冷凝,得到粗乙醇,然后进一步精馏脱水,得到成品乙醇。固体发酵对水的需求量小,发酵体积较小,能耗小,资金投入少,发酵工艺设备简单,易于操作,建厂期短,收效快,便于推广,另外由于用水少,因此废水处理问题小<sup>[2]</sup>。但是固体发酵占据生产场地较大,劳动强度较大,难于产业化或者机械化,这是其

自身的缺点。将若干个生产粗乙醇的小厂分散到甜高粱种植基地,然后将粗乙醇集中到精馏总厂进行集中处理,则可以在一定程度上解决大量茎秆的运输与储存问题,这种生产模式目前得到了广泛认同。

在固体发酵中,发酵能力依赖于颗粒大小、湿度、接种量、底物特性、温度等因素。Kargi等<sup>[10-11]</sup>对酿酒酵母在静置瓶和转鼓中利用甜高粱茎秆固体发酵生产乙醇的影响因素进行了研究。研究表明,发酵前的榨汁处理对提高糖浓度和乙醇产量没有明显作用,向发酵底物中添加还原剂( $Na_2S$ 、半胱氨酸盐酸)可以提供厌氧环境并降低酵母细胞在发酵结束阶段对乙醇的消耗;乙醇的生成速率随着转鼓的转动速度增加而降低,当转速为1 r/min时,转鼓中的发酵速率与静止瓶相近。在甜高粱的固体发酵中,乙醇得率大约为理论产量的80%。研究还表明,底物湿度的最佳水平为70%,最佳发酵温度为35℃,最佳的细胞初浓度为 $7 \times 10^8$ /mL。他们还发现,向发酵底物中添加无机盐对发酵没有明显影响,这说明在甜高粱茎秆中的营养物质可以满足酵母菌的需要。Gibbons等<sup>[12]</sup>提出一种半连续的固体发酵工艺,将其用于甜高粱的乙醇生产过程。该工艺为中试规模,发酵体系为管状。在此工艺中,甜高粱茎秆首先被烘干,切碎,在发酵前重新水化,然后调节pH至2.0~3.0,分别选用灭菌和不灭菌的工艺进行发酵。底物在半连续发酵体系中停留时间为72 h,乙醇质量分数约6%。1 t干物质的乙醇产量为176~179 L,达到理论产量的85%。通过计算发现,在灭菌和不灭菌情况下能量产出与能量消耗的比值分别为1.05和1.31。在他们的研究中,较之于传统的液体发酵,固体发酵的能量产出比更大。刘杰等<sup>[4]</sup>以甜高粱品种九甜梁1号和九甜杂1号为材料,采用简易固态发酵法对其茎秆制取乙醇进行了实验,结果表明,不同的甜高粱品种茎秆乙醇产量有明显的差异:九甜梁1号茎秆可提取50%粗乙醇9.26 t/hm<sup>2</sup>,折99.6%的无水乙醇3.96 t/hm<sup>2</sup>;九甜杂1号茎秆可提取50%粗乙醇8.76 t/hm<sup>2</sup>,折99.6%的无水乙醇3.75 t/hm<sup>2</sup>。Coble等<sup>[13]</sup>对几种发酵工艺进行比较后发现,不进行榨汁处理而将整个甜高粱进行发酵,其乙醇产量要比榨汁后发酵要高。

## 4 当前存在的主要问题

目前,国内的甜高粱制乙醇项目多处于摸索阶段,尚有许多问题有待于解决,主要有以下几个

方面。

#### 4.1 优良甜高粱品种的选育与推广

不同的甜高粱品种,在出汁量、总糖含量、发酵能力以及乙醇产量等方面的遗传差异非常明显<sup>[1]</sup>。甜高粱品种的生物物质产量和含糖量对温度和光照等条件很敏感,因此不可盲目进行引进和推广,而应该着力培育适宜本地条件的优良品种。由于遗传学上的非加性基因效应对提高生物物质产量、植株高度、可溶性固体含量以及出汁量等方面具有显著效果,因此可以采用遗传杂交方法以获得性能优良的甜高粱品种<sup>[14]</sup>。近十几年来,我国自行研发生产的甜高粱杂交种子已经达到较高的性能指标,但仍有很多工作要做。由于甜高粱制乙醇生产中存在收获期集中、加工分散的问题,所以有必要进一步开发适于在不同时期成熟的品种,以延长加工期。另外,培育耐盐碱、耐干旱的品种对于扩大甜高粱的种植面积、降低生产成本具有重要意义。

#### 4.2 原料储存与加工期的延长

在甜高粱发酵生产中一个较大的制约因素是原料的储存和加工期的延长问题。甜高粱茎秆中的糖类极易转化,茎秆变质快,不易贮藏,其汁液也极易酸败。因此,原料贮藏困难是导致甜高粱制取乙醇难以形成规模化工业生产的主要原因之一。虽然很多研究人员对此开展工作,取得了不同程度的成果,但是还没有找到生产中切实可行的解决方法,目前仍有待于开发出更加有效的方法。

由于甜高粱的集中成熟收获以及存储困难,使得其加工期仅为 2~3 个月。虽然通过培育优良品种、交错收割以及分散发酵、集中蒸馏等方法,可以延长甜高粱的加工期,但是仍然无法满足长年生产的需要。而且超过合理运输半径,将大大增加原料成本,降低工业化生产的可操作性。Nguyen 等<sup>[15]</sup>通过平衡原料运输成本和生产成本之间的矛盾,建立了一个简单模型,可以用来优化工厂的生产能力。他们指出,在最优条件下,生产单位体积乙醇时,原料的运输成本与生产成本的比例是可以预测的,一般为 0.4~0.6。另外,他们在研究中指出,通过混合谷物发酵,可以延长加工期,从而降低生产成本。笔者所在课题组的研究也表明,如果在茎秆发酵过程中添加一定量的甜高粱籽粒进行混合发酵,一方面可以提高设备利用率和乙醇的生产能力,另一方面可以达到延长加工期的目的<sup>[16]</sup>。

Bvochora 等<sup>[17]</sup>研究了在普通条件和浓醪条件下利用甜高粱汁和高粱籽粒的混合物进行乙醇发酵生

产的情况。结果表明,甜高粱汁和高粱籽的混合发酵可以有效促进浓醪条件下发酵的进行。Gibbons 等<sup>[18]</sup>为了降低利用玉米和小麦的浆液进行乙醇发酵生产的成本,在发酵过程中添加还原糖质量分数为 6.5%~7.6%的甜高粱汁部分代替或者全部代替自来水,结果显示,甜高粱汁的添加可以明显降低生产成本并提高乙醇产量;当得到的乙醇体积分数高于 10%时,添加甜高粱汁比直接用谷物进行发酵能显著提高能量产出比(能量产生与能量消耗的比值)。以上研究表明,将甜高粱茎秆与其他谷物进行混合发酵,可以在一定程度上延长加工期,从而降低生产成本,但是加工期问题的根本解决还有赖于成本低、效果好的原料存储方法的发展。

#### 4.3 工艺路线的选择和优化

当前,不管是液体发酵工艺还是固体发酵工艺,均存在若干问题。如前所述,对于液体发酵工艺而言,其主要的问题是榨出汁的储存问题。而对于固体发酵工艺,原料的储存相对要简单一些,但是,目前生产中所用的固体发酵工艺大多借鉴传统制白酒的窖池发酵工艺,发酵过程的监测无法在线进行,后期的蒸馏也主要依靠间歇性小型设备进行,劳动强度大,处理量小,设备难以实现机械化和自动化。开发出自动化程度高的发酵装置和连续蒸馏装置,将极大地促进固体发酵工艺的应用。

## 5 发展方向

利用纤维素原料进行乙醇生产,是当前国内外最具有挑战性的研究方向之一。甜高粱茎秆中纤维含量较高,有研究表明,甜高粱茎秆中可溶性的糖与不可溶的碳水化合物(主要是纤维素和半纤维素)含量大致相等<sup>[19]</sup>。如果能将这部分糖资源加以充分利用,将极大地提高甜高粱生产乙醇的效率,这也是甜高粱乙醇发酵的一个重要发展方向。

甜高粱茎秆中的纤维主要是由纤维素、半纤维素和木素 3 种成分所组成,以苯丙烷为单元的三维木素结构将它们相互之间交织在一起,一起构成植物细胞壁物质。传统方法中通过利用酸水解将纤维素或者半纤维素降解成为低聚糖,进而发酵生成乙醇,此法糖转化率不高,对设备的腐蚀性大,设备投资和运行成本很高。Piskorz 等<sup>[20]</sup>尝试利用沃特卢快速高温分解法(WFPP)从甜高粱和甜高粱渣中获得可用于乙醇发酵的成分,效果较明显。随着酶工程技术的发展,纤维素的酶水解研究取得了很大成就。而利用基因工程手段,可构建出能同时利用五

碳糖和六碳糖的菌株<sup>[21]</sup>,该菌株可用于纤维素原料的乙醇生产。另外,Lezinou等<sup>[22]</sup>将可以产生纤维素酶和半纤维素酶的霉菌 *F. oxysporum* 和酿酒酵母混合培养,以新鲜的甜高粱茎秆作为原料发酵生产乙醇。结果表明,混合培养时,乙醇的浓度、产量都有明显的提高,发酵周期明显缩短,甜高粱秸秆中的可溶性糖和不溶性糖得到较好的利用。

发酵结束后的秸秆残渣大约占秸秆总质量的50%,对其进行合理有效的利用,不仅可以降低生产成本,还可以带动其他关联产业的发展,增加其附加值。残渣的主要成分是纤维素,经处理后可以制得高质量的纤维板,也可用于制造质量较好的纸张。另外,发酵残渣还可以作为营养丰富的牛羊饲料、热源燃料以及有机肥原料等。

## 6 结语

甜高粱制乙醇是一种符合国情的、安全的能源供应产业,为生物燃料乙醇的生产开辟了一条具有广泛应用前景的途径。当前的甜高粱制乙醇的研究多处于实验室或者中试规模水平,要实现其工业化生产,尚有许多具体的工作需要做。固体发酵工艺是适合甜高粱自身特性的一种发酵工艺,若能进一步解决设备的自动化操作及控制问题,将有望在甜高粱茎秆制乙醇过程中发挥巨大作用。将甜高粱与其他谷物混合发酵可以有效延长加工期。甜高粱茎秆中纤维素的开发利用是今后利用甜高粱制乙醇的一个发展方向。

## 参考文献

- [1] Reddy B V S, Ramesh S, Reddy P S, *et al.* Sweet sorghum: A potential alternate raw material for bio-ethanol and bioenergy[EB/OL]. <http://www.icrisat.org/journal/mpii/v1i1/v1i1sweet.pdf>. 2007.
- [2] Sree N K, Sridhar M, Rao L V, *et al.* Ethanol production in solid substrate fermentation using thermotolerant yeast[J]. *Process Biochemistry*, 1999, 34: 115 - 119.
- [3] Worley J W, Vaughan D H, Cundiff J S. Energy analysis of ethanol production from sweet sorghum[J]. *Bioresour Technol*, 1992, 40(3): 263 - 273.
- [4] 刘杰, 郑士梅, 李原有, 等. 利用甜高粱茎秆提取乙醇的实验报告(第1报): 不同品种乙醇提取量的实验[J]. *酿酒科技*, 2007(5): 51 - 53.
- [5] 王艳秋, 朱翠云, 卢峰, 等. 甜高粱的用途及发展前景[J]. *杂粮作物*, 2004, 24(1): 55 - 56.
- [6] Daeschel M A, Mundt J O, McCarty I E. Microbial changes in sweet sorghum (*sorghum bicolor*) juices[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1981, 42(2): 381 - 382.
- [7] 费立发, 赵福升, 张鹏, 等. 甜高粱秸秆榨汁发酵实验研究[J]. *酿酒科技*, 2007(5): 77 - 78.
- [8] Laopaiboon L, Thanonkeo P, Jaisi P, *et al.* Ethanol production from sweet sorghum juice in batch and fed-batch fermentations by *Saccharomyces cerevisiae*[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2007, 23(10): 1497 - 1501.
- [9] 刘荣厚, 李金霞, 沈飞, 等. 甜高粱茎秆汁液固定化酵母酒精发酵的研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(9): 137 - 140.
- [10] Kargi F, Curme J A, Sheehan J J. Solid-state fermentation of sweet sorghum to ethanol[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1985, 27(1): 34 - 40.
- [11] Kargi F, Curme J A. Solid-state fermentation of sweet sorghum to ethanol in a rotary-drum fermentor[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1985, 27(8): 1122 - 1125.
- [12] Gibbons W R, Westby C A, Dobbs T L. Intermediate-scale, semicontinuous solid-phase fermentation process for production of fuel ethanol from sweet sorghum[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1986, 51(1): 115 - 122.
- [13] Coble C G, Egg R P, Shmulevich I. Processing techniques for ethanol production from sweet sorghum[J]. *Biomass*, 1984, 6(1/2): 111 - 117.
- [14] Sankarapandian R, Ramalingam J, Pillai M A, *et al.* Heterosis and combining ability studies for juice yield related characteristics in sweet sorghum[J]. *Ann Agric Res*, 1994, 15(2): 199 - 204.
- [15] Nguyen M H, Prince R G H. A simple rule for bioenergy conversion plant size optimization: Bioethanol from sugar cane and sweet sorghum[J]. *Biomass and Bioenergy*, 1996, 10(5/6): 361 - 365.
- [16] 王祥河, 管于平, 赵琼, 等. 甜高粱茎秆及其籽粒固态发酵酒精的研究[J]. *酿酒科技*, 2007(11): 48 - 50.
- [17] Bvochora J M, Read J S, Zvauya R. Application of very high gravity technology to the cofermentation of sweet stem sorghum juice and sorghum grain[J]. *Industrial Crops and Products*, 2000, 11: 11 - 17.
- [18] Gibbons W R, Westby C A. Cofermentation of sweet sorghum juice and grain for production of fuel ethanol and distillers' wet grain[J]. *Biomass*, 1989, 18: 43 - 57.
- [19] Mamma D, Christakopoulos P, Koullas D, *et al.* An alternative approach to the bioconversion of sweet sorghum carbohydrates to ethanol[J]. *Biomass and Bioenergy*, 1995, 8(2): 99 - 103.
- [20] Piskorz J, Majerski P, Radlein D, *et al.* Fast pyrolysis of sweet sorghum and sweet sorghum bagasse[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1998, 46(1): 15 - 29.
- [21] Govindaswamy S, Vane L M. Kinetics of growth and ethanol production on different carbon substrates using genetically engineered xylose-fermenting yeast[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98: 677 - 685.
- [22] Lezinou V, Christakopoulos P, Li L W, *et al.* Study of a single and mixed culture for the direct bio-conversion of sorghum carbohydrates to ethanol[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1995, 43: 412 - 415. ■