

# 木薯发酵乙醇工艺的研究进展

徐大鹏<sup>1,2,3</sup>, 冯英<sup>1,2,3</sup>, 王俊增<sup>1,2,3</sup>, 武光传<sup>1,2,3</sup>, 赵彦平<sup>1,2,3</sup>, 师立亮<sup>1,2,3</sup>

(1.山东泓达生物科技有限公司,山东 临沂 276400; 2.山东昆达生物科技有限公司,山东 临沂 276400;  
3.山东沂蒙山酒业有限公司,山东 临沂 276400)

**摘要:** 木薯是一种重要的全球性作物,其块根富含大量的淀粉。在我国南部,木薯作为非粮作物有着重要的经济价值。简述了国内外木薯发酵乙醇工艺的研究进展,提出了木薯发酵工艺的发展对策。

**关键词:** 木薯; 发酵; 乙醇; 工艺

中图分类号: TS262.2; TQ920; TS261.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-9286(2012)01-0093-05

## Research Progress in Cassava Fermentation to Produce Ethanol

XU Dapeng<sup>1,2,3</sup>, FENG Ying<sup>1,2,3</sup>, WANG Junzeng<sup>1,2,3</sup>, WU Guangchuan<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Yanping<sup>1,2,3</sup> and SHI Liliang<sup>1,2,3</sup>,

(1. Shandong Hongda Biotechnology Co.Ltd., Linyi, Shandong 276400; 2. Shandong Kunda Biotechnology Co. Ltd., Linyi, Shandong 276400; 3. Shandong Yimengshan Wine Co. Ltd. Linyi, Shandong 276400, China)

**Abstract:** Cassava is an important worldwide starch-containing root crop. In south China, cassava, not a staple food, is of significant economic values. In this paper, research progress in cassava fermentation to produce ethanol at home and abroad was reviewed and the development measures were proposed.

**Key words:** cassava; fermentation; ethanol; technology

由于石油短缺和环境恶化等问题的日益突出,生物质燃料乙醇越来越受到关注。我国考虑到能源安全和环境友好等因素,大力发展燃料乙醇作为车用燃料<sup>[1-2]</sup>。

木薯 (*Manihot esculenta* Crantz) 属大戟科 (*Euphorbiaceae*) 木薯属 (*Manihot* Miller) 植物,起源于热带美洲亚马逊盆地南沿,全球种植面积大于 1700 万 ha,是全球三大薯类作物之一,在南北纬 30° 间分布。木薯在我国是作为非粮作物,约有 44 万 ha 的种植面积,每年产鲜木薯 911 万 t。我国两广、海南和云南的大部分地区,湖南、江西、福建等省南部,贵州和四川南端的河谷地带盛产木薯<sup>[3-4]</sup>。与其他作物相比,以木薯为原料生产乙醇有着不可比拟的优势:木薯对土质的要求低,耐旱、耐瘠薄,是非粮作物,符合目前国家生物能源发展战略,有利于保障国家能源安全和粮食安全;以木薯为原料生产乙醇比玉米、小麦、甘蔗等更经济。木薯的经济效益、社会效益和扶贫效果较为突出<sup>[5]</sup>。

### 1 木薯发酵乙醇工艺

乙醇生产工艺,按发酵过程物料存在的状态、发酵法可分为液体发酵、半固体发酵和固体发酵;根据发酵料注

入发酵罐的方式,可分为间歇式、半连续式、连续式<sup>[6]</sup>。乙醇生产工艺分类及关系见图 1。

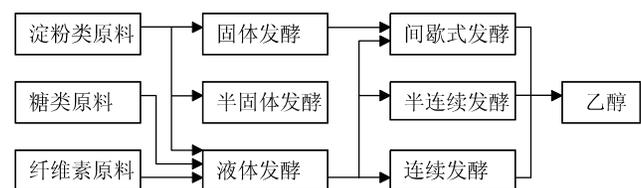


图1 乙醇生产工艺分类及关系

现阶段,木薯发酵乙醇工艺主要有生料发酵工艺、固定化发酵工艺、先水解后发酵工艺和同步糖化发酵工艺等。

### 2 木薯发酵乙醇主要工艺

#### 2.1 木薯生料发酵乙醇工艺

生料发酵 (Fermentation of raw material) 是指微生物将未经蒸煮的生淀粉直接利用进行生长代谢的过程。生料发酵可分两种:一种是利用添加的酶将生淀粉水解成可发酵性的糖来生产乙醇;另一种是微生物直接将生淀粉转化成乙醇<sup>[7-8]</sup>。实践证明,生料发酵乙醇随着底物浓度加大,发酵醪中的乙醇浓度也会增大,但同时残余总糖

收稿日期: 2011-09-21; 修回日期: 2011-11-22

作者简介: 徐大鹏,男,研究方向:生物化工。

优先数字出版时间: 2011-11-27; 地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/52.1051.TS.20111227.1518.001.html>。

及还原糖也会越多,造成淀粉利用率降低<sup>[9]</sup>。

现阶段,国内外有很多关于木薯生料发酵乙醇工艺的研究报道,如 Fujio Yusaku<sup>[10]</sup>等利用根霉菌在气升式反应器中进行生料发酵木薯生产乙醇,发酵4 d,结果所得乙醇浓度为13%vol~14%vol,发酵强度2.3 g/L·h,相当于酵母发酵葡萄糖效率的50%,木薯淀粉利用率为72.3%~83.5%;Ukrit Rattanachomsri<sup>[11]</sup>等利用黑曲霉 BCC17849 中的酶系水解木薯发酵乙醇,在40℃、pH 5.0条件下作用48 h,从木薯浆中得到716 mg葡萄糖和67 mg木糖,同时利用热带假丝酵母 BCC7755 进行乙醇发酵30 h,其结果表明,4%(w/v)木薯浆可得到14.3 g/L的乙醇,比传统蒸煮工艺节能;Nitayavardhana Saoharit<sup>[12]</sup>等利用超声波处理木薯后发酵乙醇,结果显示乙醇产量与超声时间有直接关系,与超声功率没有直接关系,超声波处理木薯后发酵比传统工艺多产乙醇近29%;刘汉灵<sup>[13]</sup>等利用微波预处理木薯进行生料发酵乙醇,料水比1:2.8,添加糖化酶量180 U/g、活性干酵母量0.3%、氮源量0.3%、30℃静止发酵72 h,其乙醇浓度达12.7%vol,比传统蒸煮工艺节省能耗至少30.8%;伍彦华<sup>[14]</sup>等采用粉碎木薯后过1.5 mm筛,料水比1:2.5~2.7,pH 4.0~4.2,添加糖化酶量250 U/g,纤维素酶量10 U/g,克菌灵10 mg/L,接种量8%,32~34℃发酵84 h,所得乙醇浓度为12.7%vol,残余总糖1.93%,残还原糖0.15%;陈洪章<sup>[15]</sup>等利用蒸汽爆破预处理木薯进行固态发酵生产乙醇,此法不但解除了木薯产品中氰化物的毒害,还降低木薯粉碎、淀粉液化、蒸馏的能耗、发酵醪水分含量和废水的处理,且能提高发酵乙醇浓度;段钢<sup>[16]</sup>等利用降粘酶和真菌 $\alpha$ -淀粉酶处理新鲜木薯醪液后,再加入淀粉水解酶 STARGEN™ 发酵,能显著降低黏度和提高发酵率;王怀能<sup>[17]</sup>等用SO<sub>2</sub>水溶液浸泡新鲜木薯或干木薯,粉碎后过80~120筛,料水比1:1.8~4,调整酸度及营养成分,添加生料发酵剂0.2%~0.7%,机械搅拌22~45 r/min,32~36℃发酵96~128 h,结果表明此法能有效降低能耗;李志平<sup>[18]</sup>等用木薯进行生料发酵生产乙醇,料水比1:4.5,接种量为5%,添加根霉所制生淀粉酶量30 U/g,30℃下发酵4 d,所得乙醇浓度为7.04%vol,发酵率达78.38%;马光庭<sup>[19]</sup>等用木薯进行生料发酵生产乙醇,料水比1:4,初始pH 6.0,添加磷酸氢二钾0.2%、尿素0.4%、生料发酵剂0.7%,在35℃下发酵5~6 d,结果原料淀粉利用率和乙醇产率分别达到85.3%和48.4%。

## 2.2 木薯固定化发酵乙醇工艺

固定化技术(Fermentation of immobilization)是利用酶或活细胞的高度集中,与普通游离状态的酶或细胞相比,能加快反应速率,并使反应周期缩短和生产效率

提高<sup>[20]</sup>。

现阶段,国内外也有一些专家学者们对木薯固定化发酵乙醇工艺进行了研究,取得了一定的研究成果。如 Amutha Ramasamy<sup>[21]</sup>等利用共固定化酵母和运动单胞菌进行同步糖化发酵液化后的木薯粉,结果表明:以流速为15 mL/h,停留4 h,发酵强度为8.9 g/L·h,可从50 g/L的液化醪中得到46.7 g/L的乙醇;Giordano Raquel L C<sup>[22-23]</sup>等利用多孔二氧化硅共固定化糖化酶和酵母菌进行连续的木薯同步糖化发酵乙醇,反应器中酶的浓度为3.77 U/mL,结果表明,初始还原糖浓度为166.0 g/L时,乙醇发酵强度为8.3 g/L·h,达到理论产值的91%;初始还原糖浓度为163.0 g/L时,乙醇发酵强度为5.9 g/L·h,底物转化率为97%,乙醇产率为81%,固定化流化床能稳定运行275 h。Swain M R<sup>[24]</sup>等利用游离和固定化酿酒酵母分别发酵新鲜木薯和储存12个月的木薯来生产乙醇,结果表明,游离酵母发酵新鲜木薯和储存12个月的木薯后,乙醇得率分别为193 g/kg、148 g/kg;固定化酵母发酵新鲜木薯和储存12个月的木薯后,乙醇得率分别为205 g/kg、152 g/kg;伍彦华<sup>[25]</sup>等利用固定化反应器,浓醪连续发酵约90 d,选育出自絮凝酵母 FJY 后同步糖化发酵,最终乙醇浓度为15.7%vol,残余总糖为1.35%;董昭<sup>[26]</sup>等利用海藻酸铝将糖化酶固定化,并与游离酶的特性相比,结果为固定化酶米氏常数K<sub>m</sub>是13.72 g/L,最适温度为65℃,半衰期为100.7 d,固定化糖化酶的活力回收率达61.8%;周志明<sup>[27]</sup>等利用海藻酸铝共固定化糖化酶和酵母,料液比1:2.0,填充率50%,pH值4.0~4.5,添加糖化酶300 U/g,湿酵母2.5 g,硫酸铵0.50 g/L,硫酸镁0.20 g/L,磷酸二氢钾0.10 g/L,37℃发酵,此法所得乙醇浓度为13.4%vol,淀粉利用率达到90.2%。

## 2.3 木薯先水解后发酵生产乙醇工艺

先水解后发酵工艺(Separate hydrolysis and fermentation, SHF)中的水解和发酵分别在不同反应器里进行。发酵初期高糖浓度会抑制酵母的生长和糖化酶活性,延长发酵时间<sup>[28]</sup>。

现阶段,也有一些关于木薯先水解后发酵乙醇工艺的研究报道,如 Divya Nair M P<sup>[29]</sup>等利用纤维素酶、半纤维素酶和木聚糖酶作用于木薯淀粉而得到木薯渣(60%的淀粉和15%的纤维素)生产乙醇,此法具有很大的潜在用途;Yuwa-Amornpitak<sup>[30]</sup>等利用根霉菌 #3Su 水解木薯培养基(木薯淀粉6%)24 h后,再利用酿酒酵母 5088 发酵乙醇,结果表明,乙醇浓度达到14.36 g/L;Nellaiah H<sup>[31]</sup>等利用运动单胞菌 NRRL B-4286 发酵木薯水解后初始浓度为171 g/L的葡萄糖,其乙醇浓度达到80 g/L;张树河<sup>[32]</sup>等按料水比1:5,98℃液化30 min,液化率

99.15%,糖化醪中添加0.5%硫酸铵,发酵3d,结果表明,乙醇浓度为10.81%vol,淀粉出酒率达51.88%,pH值与时间对木薯液化和还原糖的影响显著,料水比对试验影响不显著;梁玮<sup>[33]</sup>等按料水比1:2.8,添加复合酶量0.4%,35℃±1℃下发酵70h,乙醇浓度为22.0%vol,乙醇产率为48.32%、总产量为30.58mL;曹喜焕<sup>[34]</sup>等按料水比1:4,添加淀粉酶量20U/g,100℃蒸煮2h,冷至60℃,添加糖化酶量85U/g,糖化30min,冷至32℃,接种量10%,35~36℃下发酵67h,结果表明,利用木薯、大麦、大米和玉米发酵,乙醇浓度分别为11%vol、8.9%vol、11.3%vol和9.5%vol;申乃坤<sup>[35]</sup>等按淀粉浓度的33.64%添加淀粉酶,85~90℃液化30min,冷至60℃,添加糖化酶量0.27AGU/g,糖化60min,肌醇量0.065%,37℃发酵48h,结果表明:乙醇浓度达15.02%vol,优化条件与初始条件相比,乙醇浓度提高25%;陆雁<sup>[36]</sup>等选育耐高温酵母,料水比1:2,液化糖化后,调pH为4.0,37℃温度下,添加接种量5%,尿素0.10%,发酵64h,结果表明:乙醇浓度为15.54%vol,残总糖为2.73%;梁于朝<sup>[37-38]</sup>等利用挤压膨化技术预处理木薯,料水比1:2,添加淀粉酶量5U/g,80~88℃液化1h,冷至60℃,糖化酶量100U/g,糖化45min,30℃接入酵母量0.1%,发酵72h,结果表明:乙醇浓度达16.61%vol,与传统工艺相比,乙醇浓度提高22.76%,添加硫酸铵含氮量0.1%对发酵有促进作用,添加硫酸镁对发酵没有明显影响;张成明<sup>[39]</sup>等利用厌氧消化液作为配料水,自来水作为对照组,平衡期时,前者的酵母数量达到 $1.24 \times 10^8$  cell/mL,比对照样 $1.01 \times 10^8$  cell/mL多22.8%,结果表明:厌氧消化液回用可促进乙醇发酵,相同发酵条件,前者的残余总糖及还原糖比后者分别降低50.8%和84.5%;易弋<sup>[40-41]</sup>等以60℃水润料,料水比1:2.3,添加淀粉酶10U/g,105℃液化2h,碘检显酱红,冷至60℃,调节pH为4.5,添加糖化酶150U/g,糖化30min,冷至33℃发酵,静态发酵,结果表明:乙醇浓度为16.4%vol,淀粉利用率为90.68%。

#### 2.4 木薯同步糖化发酵乙醇工艺

同步糖化发酵工艺(Simultaneous saccharification and fermentation, SSF)是糖化和发酵在一个反应器中同时进行。葡萄糖一经生成,就被酵母代谢,此法能解除底物和产物抑制,并保持糖化酶的活性,避免染菌<sup>[28]</sup>。SSF工艺与SHF工艺相比,能避免底物抑制,提高乙醇产率,降低能耗,缩短总体发酵时间<sup>[42]</sup>。

现阶段,也有很多关于木薯同步糖化发酵乙醇工艺的报道,如Apiwatanapiwat Waraporn<sup>[43]</sup>等构建新型酵母,其表面含有 $\alpha$ -淀粉酶、糖化酶、葡聚糖酶、纤维二糖水解

酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶,并进行木薯同步糖化发酵乙醇,结果表明,新型酵母在木薯培养基中无需添加其他水解酶就可以发酵乙醇;Choi Gi-Wook<sup>[44]</sup>等利用2株酵母CHY1011和CHF0901进行木薯同步糖化发酵乙醇,发酵66h,乙醇浓度分别为89.1g/L±0.87g/L和83.8g/L±1.11g/L,乙醇发酵强度分别为2.10g/L·h±0.02g/L·h和1.88g/L±0.01g/L·h,其理论产率分别为93.5%±1.4%和91.3%±1.1%,表明这2株菌可应用于乙醇工业生产;Choi Gi-Wook<sup>[45]</sup>等利用原生质体融合技术将非絮凝高产乙醇酿酒酵母CHY1011和絮凝低产乙醇贝酵母KCCM12633融合,得到1株絮凝高产乙醇酵母CHF0321,并进行木薯同步糖化发酵乙醇,木薯浆浓度19.5%(w/v),32℃发酵65h,结果表明,乙醇浓度为89.8g/L±0.13g/L,乙醇发酵强度为1.38g/L·h±0.13g/L·h,理论产率为94.2%±1.584%;Kosugi Akihiko<sup>[46]</sup>等将木薯浆在140℃下热处理1h,加入纤维素酶水解木薯原料中的纤维素,利用基因工程菌直接同步发酵,结果表明:乙醇浓度为5%和10%木薯粉转化成乙醇理论产值的91%和80%;Ogbonna Christiana N<sup>[47]</sup>等利用木薯粉进行连续固态发酵乙醇,先加入曲霉水解木薯粉后,再加入酵母进行同步糖化发酵,并加入适量的米糠,理论上,1g木薯淀粉可转化成0.440g乙醇,而实验结果则为:1g木薯粉可转化为0.309g乙醇,乙醇浓度为120g/L;Shanavas S<sup>[48]</sup>等利用新型淀粉酶Spezyme Xtra和糖化酶Stargen<sup>TM</sup>001优化木薯乙醇发酵,木薯浆浓度为10%(w/v),添加淀粉酶Spezyme Xtra 20.0mg(280U),pH5.5,90℃液化30min,糖化酶100mg(45.6U),30℃±1℃进行同步糖化发酵48h,其发酵效率达94.0%;唐艳艳<sup>[49]</sup>等认为,木薯同步糖化发酵乙醇工艺的效果优于先水解后发酵工艺,发酵48h,乙醇浓度为15.9%vol,残总糖为1.58%(w/v),残还原糖为1.56%(w/v),发酵效率为90.3%;容元平<sup>[50]</sup>等利用硫酸水解糖蜜作为配料水,糖蜜锤度30°Bx,pH值2.4,水解温度125℃,保温时间40min,结果表明:糖蜜中蔗糖转化率可达95.0%,酒精度为15.5%vol;谢玉峰<sup>[51]</sup>等按料水比1:2.3,60℃预热30min,105℃液化2h,60℃加糖化酶150U/g,纤维酶添加量20U/g,调pH值为4.5,冷至33℃,加入尿素0.25%,此法将纤维素酶添加入木薯粉中,提高原料出酒率2%,乙醇浓度为14.9%vol,残总糖为0.97%,出酒率为39.9%;周玲玲<sup>[52]</sup>等利用运动发酵单胞菌232B,按料水比1:3,添加糖化酶量4AGU/g,酵母粉4.0g/kg,硫酸铵0.8g/kg,30℃同步糖化发酵21h,乙醇浓度达103.22g/kg,乙醇发酵强度为4.915g/kg·h;易弋<sup>[53-54]</sup>等按氮源和无机盐的最适添加量尿素0.25%(w/w),MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.45g/L, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>

1.50 g/L, CaCl<sub>2</sub> 0.20 g/L, 最适发酵温度 33 °C, 初始 pH4.5, 酵母接种量 10 % (v/v), 发酵 48 h, 乙醇浓度达 17.2 % vol, 淀粉利用率 91 %, 糖化影响因素的主次为: 糖化酶量 > 糖化时间 > 糖化 pH 值 > 糖化温度; 刘振<sup>[55]</sup>等将木薯粉碎后过 0.45 mm 筛, 按料水比 1:2.8, 添加 α-淀粉酶量 10 U/g, 100 °C 下蒸煮 30 min, 糖化酶量 180 U/g, 30 °C 发酵 48 h, SSF 与 SHF 工艺相比, 其工艺简单、能耗低、发酵快、醪液乙醇度高; 李志军<sup>[56]</sup>等采用安琪超级酿酒干酵母, 木薯浓醪发酵乙醇, 60~70 °C 润料 30 min, 添加淀粉酶 10~20 U/g, 90~95 °C 液化 90 min, 调 pH4.0~4.5, 糖化酶 100~200 U/g, 30~35 °C 发酵, 结果表明, 酵母接种量应为: 小试接种量 0.2 %, 中试接种量 0.05 %~0.1 %, 大生产接种量 0.02 %~0.05 %。

### 3 结束语

木薯生料发酵乙醇工艺, 虽然在节能方面具有优异效果, 但容易染菌, 造成发酵不彻底。木薯固定化发酵乙醇工艺, 因木薯属于淀粉类原料, 要先水解后才能发酵, 否则易造成传输困难; 木薯先水解后发酵乙醇工艺, 会造成发酵初期糖浓度过高, 影响酵母的发酵效率; 木薯同步糖化发酵, 能提高设备的利用率, 避免高糖浓度抑制酵母发酵, 缩短总体发酵时间。现阶段, 大多数乙醇企业多采用半连续同步糖化发酵工艺进行生产。

木薯生产乙醇一般需要经过液化、糖化、发酵、蒸馏4个工段, 其中蒸馏工段的耗能占总耗能的比例较大。若采用同步糖化浓醪发酵工艺, 能提高发酵醪中乙醇浓度, 有效降低能耗, 并且提高了发酵罐的生产效率, 但浓醪发酵会造成高浓度底物醪液的黏度较大, 输送较困难。因此, 木薯发酵乙醇工艺中需要构建新型酵母, 避免高浓度底物对它的胁迫, 还需要进一步发展新型的酶制剂, 降低醪液的黏度, 并将木薯中除淀粉外的其他碳水化合物水解而为酵母利用, 提高木薯原料的出酒率。

### 参考文献:

- [1] Yu Suiran, Tao Jing. Simulation-based life cycle assessment of energy efficiency of biomass-based ethanol fuel from different feedstocks in China[J]. Energy, 2009, 34(4):476-484.
- [2] 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(3):374-384.
- [3] 柳树海, 刘晓峰. 木薯非粮燃料乙醇生产技术紧张[J]. 酿酒, 2010, 37(2):9-11.
- [4] Jansson Christer, Westerbergh Anna, Zhang Jiaming, et al. Cassava, a potential biofuel crop in the People's Republic of China [J]. Applied Energy, 2009, 86(1):95-99.
- [5] 陈立胜, 潘瑞坚. 木薯酒精产业的社会效益和经济效益分析[J]. 广西轻工业, 2007(1):24-25.
- [6] 袁振宏, 吴创之, 马隆龙. 生物质能利用原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005:211-288.
- [7] 王晨霞, 杜风光, 李根德. 淀粉原料生料发酵法生产酒精概述[J]. 粮食与油脂, 2008(6):11-13.
- [8] 杨辉, 徐可为. 生料发酵法生产白酒工艺条件的优化[J]. 酿酒科技, 2004(4):33-34.
- [9] 池振明, 刘自镛. 生淀粉高浓度酒精发酵的研究[J]. 生物工程学报, 1994, 10(2):130-134.
- [10] Fujio Yusaku, Ogata Masafumi, Ueda Seinosuke. Ethanol fermentation of raw cassava starch with Rhizopus koji in a gas circulation type fermentor[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2010, 27(8):1270-1273.
- [11] Ukrit Rattanachomsri, Sutipa Tanapongpipat, Lily Eurwilaichitr, et al. Simultaneous non-thermal saccharification of cassava pulp by multi-enzyme activity and ethanol fermentation by *Candida tropicalis*[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2009, 107(5):488-493.
- [12] Nitayavardhana Saoharit, Shrestha Prachand, Rasmussen Mary L, et al. Ultrasound improved ethanol fermentation from cassava chips in cassava-based ethanol plants[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(8):2741-2747.
- [13] 刘汉灵, 杨勇, 王孝英, 等. 微波预处理木薯发酵酒精的研究[J]. 食品科学, 2011 (3):161-164.
- [14] 伍彦华, 覃红梅, 张家伟. 木薯生料发酵工业化生产酒精的工艺研究[J]. 酿酒科技, 2010(6):39-43.
- [15] 陈洪章, 付小果. 汽爆木薯固态发酵乙醇及其综合利用的方法[P]. 中国专利, CN2010101137164.2010.
- [16] 段钢, 许宏贤, 阮振华, 等. 新鲜木薯直接转化生产乙醇[J]. 食品与生物技术学报, 2009, 28(3):413-417.
- [17] 王怀能, 王辉, 文科. 一种木薯生淀粉批量发酵酒精的生物方法[P]. 中国专利, CN2008101084672. 2008-11-12.
- [18] 李志平, 庞宗文. 生木薯淀粉直接发酵生产酒精的发酵条件研究[J]. 酿酒科技, 2005 (12):57-59.
- [19] 马光庭, 许金丽, 兰钊, 等. 木薯淀粉原料生料酒精发酵的研究[J]. 生物产业技术, 2009(16):131-133.
- [20] 王健, 袁永俊, 张驰松. 固定化酵母摇床与培养箱静止酒精发酵效果对比研究[J]. 酿酒, 2007, 34(2):61-63.
- [21] Amutha Ramasamy, Gunasekaran Paramasamy. Production of ethanol from liquefied cassava starch using co-immobilized cells of *Zymomonas mobilis* and *Saccharomyces diastaticus*[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2001, 92(6):560-564.
- [22] Raquel L C Giordano, Joubert Trovati, Willibaldo Schmidell, et al. Continuous production of ethanol from starch using glucoamylase and yeast co-immobilized in pectin gel[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2008, 147(1):47-61.
- [23] Joubert Trovati, Roberto C Giordano, Raquel L C Giordano.

- Improving the performance of a continuous process for the production of ethanol from starch [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2009, 156(1): 76–90.
- [24] Swain M R, Kar S, Sahoo A K, et al. Ethanol fermentation of mahula (*Madhuca latifolia* L.) flowers using free and immobilized yeast *Saccharomyces cerevisiae*[J]. *Microbiological Research*, 2007, 162(2): 93–98.
- [25] 伍彦华,覃红梅,崔师泰,等.固定化酵母的选育及在木薯浓醪发酵生产燃料乙醇中的性能对比[J].*酿酒科技*, 2010(7): 31–38.
- [26] 董昭,周志明.海藻酸铝固定化糖化酶特性研究[J].*应用化学*, 2010, 39(6): 886–887.
- [27] 周志明,尹成志,王梦琴,等.浓醪体系中共固定糖化酶与酵母木薯酒精的制取[J].*重庆大学学报:自然科学版*, 2009, 32(6): 727–730.
- [28] 梁于朝,李开绵.木薯酒精发酵研究进展[J].*广西轻工业*, 2007(1): 16–17.
- [29] Divya Nair M P, Padmaja G, Moorthy S N. Biodegradation of cassava starch factory residue using a combination of cellulases, xylanases and hemicellulases[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(3): 1211–1218.
- [30] Yuwa-Amornpitak, Thalisa, Ethanol production from cassava starch by selected fungi from tan-koji and *Saccaromyces cerevisiae*[J]. *Biotechnology*, 2010, 9(1): 84–88.
- [31] Nellaiah H, Karunakaran T, Gunasekaran P. Ethanol fermentation of cassava starch by *Zymomonas mobilis* NRRL B-4286[J]. *Biomass*, 1988, 15(3): 201–207.
- [32] 张树河,李海明,吴松海,等.木薯淀粉制燃料酒精的技术研究[J].*福建农业学报*, 2010, 25(2): 163–166.
- [33] 梁玮,施翔星.木薯干发酵生产燃料乙醇潜力研究[J].*中外能源*, 2010, 15(5): 31–34.
- [34] 曹喜焕,奚菊芬,陈霞,等.不同原料对酵母生长及发酵酒精结果的影响[J].*食品与发酵科技*, 2009, 45(5): 6–8.
- [35] 申乃坤,王青艳,陆雁,等.木薯淀粉高温高浓度生产酒精的工艺研究[J].*酿酒*, 2009(5): 47–51.
- [36] 陆雁,秦艳,李明松,等.木薯淀粉高温浓醪发酵酒精工艺的研究[J].*酿酒科技*, 2009(9): 23–28.
- [37] 梁于朝,朱德明,李开绵,等.挤压膨化木薯粉生产酒精的研究[J].*安徽农业科学*, 2008, 36(21): 9242–9243.
- [38] 梁于朝,朱德,匡钰,等.挤压膨化技术应用于木薯生产燃料酒精的初步研究[J].*食品研究与开发*, 2009(7): 10–13.
- [39] 张成明,翟芳芳,张建华,等.木薯酒精生产中厌氧消化液的回用工艺研究[J].*安徽农业科学*, 2008, 36(17): 7417–7420.
- [40] 易弋,蒋常德,伍时华,等.木薯酒精浓醪发酵糖化条件的研究[J].*广西工学院学报*, 2008, 19(1): 58–62.
- [41] 伍时华,蒋常德,易弋,等.木薯酒精浓醪发酵中液化条件的优化[J].*食品科学*, 2007, 28(10): 381–383.
- [42] Nikolic Svetlana, Mojovic Ljiljana, Rakin Marica, et al. Bioethanol production from corn meal by simultaneous enzymatic saccharification and fermentation with immobilized cells of *Saccharomyces cerevisiae* var. *ellipsoideus*[J]. *Fuel*, 2009, 88(9): 1602–1607.
- [43] Apiwatanapiwat Waraporn, Murata Yoshinori, Kosugi Akihiko, et al. Direct ethanol production from cassava pulp using a surface-engineered yeast strain co-displaying two amylases, two cellulases, and  $\beta$ -glucosidase[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, Article in Press, 2011: 1–8.
- [44] Choi Gi-Wook, Um Hyun-Ju, Kim Yule, et al. Isolation and characterization of two soil derived yeasts for bioethanol production on Cassava starch[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2010, 34(8): 1223–1231.
- [45] Choi Gi-Wook, Um Hyun-Ju, Kang Hyun-Woo, et al. Bioethanol production by a flocculent hybrid, CHFY0321 obtained by protoplast fusion between *Saccharomyces cerevisiae* and *Saccharomyces bayanus*[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2010, 34(8): 1232–1242.
- [46] Kosugi Akihiko, Kondo Akihiko, Ueda Mitsuyoshi, et al. Production of ethanol from cassava pulp via fermentation with a surface-engineered yeast strain displaying glucoamylase[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(5): 1354–1358.
- [47] Ogbonna Christiana N, Okoli Eric C. Conversion of cassava flour to fuel ethanol by sequential solid state and submerged cultures[J]. *Process Biochemistry*, 2010, 45(7): 1196–1200.
- [48] Shanavas S, Padmaja G, Moorthy S N, et al. Process optimization for bioethanol production from cassava starch using novel eco-friendly enzymes[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(2): 901–909.
- [49] 唐艳艳,易弋,伍时华,等.木薯粉浓醪酒精同步糖化发酵工艺研究[J].*安徽农业科学*, 2010, 38(23): 12690–12692.
- [50] 容元平,廖兰,伍时华,等.用糖蜜水解液对木薯粉调浆进行浓醪酒精发酵工艺研究[J].*安徽农业科学*, 2010, 38(16): 8643–8644.
- [51] 谢玉峰,伍时华,易弋,等.应用纤维素酶提高木薯酒精发酵出酒率的试验研究[J].*酿酒科技*, 2009(1): 30–32.
- [52] 周玲玲,赵海,甘明哲,等.运动发酵单胞菌 232B 木薯快速乙醇发酵[J].*太阳能学报*, 2009, 30(9): 1228–1232.
- [53] 易弋,黎娅,伍时华,等.木薯粉酒精浓醪发酵条件的优化[J].*中国酿造*, 2008(23): 61–69.
- [54] 易弋,蒋常德,伍时华,等.木薯酒精浓醪发酵液化糖化工艺的研究[J].*安徽农业科学*, 2008, 36(25): 11091–11101.
- [55] 刘振,王金鹏,张立峰,等.木薯干原料同步糖化发酵生产乙醇[J].*过程工程学报*, 2005, 5(3): 353–356.
- [56] 李志军,刘小民,刘代武,等.安琪超级酿酒干酵母在酒精浓醪发酵中的应用[J].*酿酒科技*, 2005(9): 101–106.