

# 三种改性方法对青香蕉淀粉物化性质的影响

白永亮, 陈庆发, 张全凯, 叶琼娟, 杨公明

(华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)

**摘要:** 为了探求一种既尽可能保留青香蕉淀粉的天然特性, 又能改善其加工特性的改性方法, 对比了复合酶法、乳酸发酵法和挤压膨化法对青香蕉淀粉特性的影响。结果表明: 三种改性方法中, 复合酶法能够显著提高抗性淀粉的质量分数; 通过比较三种改性淀粉的理化特性, 复合酶法和乳酸发酵法使结晶度由 18.13% 分别增加到 20.19% 和 22.06%, 而挤压膨化法使结晶度大幅下降至 2.16%。复合酶法淀粉的分子解聚程度低, 能较好保持原淀粉的颗粒形态, 且有助于提高淀粉糊的热稳定性、冷稳定性和凝沉性。而乳酸发酵法和挤压膨化法使热稳定性降低, 凝沉性减弱, 但能够提高冷稳定性; 加工特性研究表明, 复合酶法对香蕉原淀粉的色泽影响较小, 有助于改善淀粉糊的透明度, 提高香蕉淀粉的感官品质。挤压膨化改性淀粉在透明度、溶解度和吸水性方面均有所改善。而乳酸发酵改性对冻融稳定性的影响较小。综上所述, 复合酶法是比较理想的改性方法。

**关键词:** 香蕉淀粉; 改性; 特性

文章编号: 1673-9078(2013)10-2453-2460

## Effects of Three Modification Methods on the Physicochemical Properties of Native Banana Starch

BAI Yong-liang, CHEN Qing-fa, ZHANG Quan-kai, YE Qiong-juan, YANG Gong-ming

(College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** The effects of three modification methods including compound enzymolysis, lactic acid fermentation and extrusion on physicochemical and processing characteristics were analyzed, in order to find a method that can retain the natural advantages of banana starch and improve the processing performance. The results showed that compound enzymatic modification could increase the content of resistant starch (RS) significantly. Compound enzymolysis and lactic acid fermentation increased the crystallinity of banana starch from 18.13% to 20.19% and 22.06% respectively, but the crystallinity of the starch modified by extrusion decreased to 2.16%. The effect of compound enzymatic modification could preserve the particle morphology of native banana starch which was helpful to improve the thermal stability, cold stability and the retrogradation. Besides, the compound enzymolysis had less effect on color that improved the transparency of starch paste. Lactic acid fermentation and extrusion reduced the thermal stability and retrogradation, but helped to improve the cold stability. Extrusion could also improve the transparency, solubility and hygroscopicity. The three kinds of modification methods decreased freezing and thawing stability, but the lactic acid fermentation had less effect on it. In a word, the compound enzymolysis was an ideal modification method.

**Key words:** banana starch; modification; characteristic

大多数的天然淀粉有着许多性质上的不足, 使得其各领域的应用受到了限制。因此对淀粉进行改性处理, 使其性质发生一系列变化, 可拓宽淀粉的应用范围。目前, 国内外淀粉的改性方法主要有物理、化学和生物技术等方法<sup>[1-2]</sup>, 其中化学改性法应用最为广泛。但物理改性和生物改性方法以其在安全性上的优势,

收稿日期: 2013-03-27

项目基金: 东莞市科技计划资助项目(200910810100600), 广州市科技计划项目(12G12101661)

作者简介: 白永亮(1986-), 男, 博士, 研究方向: 食品科学

通讯作者: 杨公明(1950-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 农产品加工新工艺与装备

广泛应用于食品工业的变性淀粉制备中。以青香蕉为原料制备的天然香蕉淀粉, 富含抗性淀粉, 有极好的生理功能<sup>[3-6]</sup>, 是一种新型的功能性食品辅料。但是青香蕉淀粉结构致密, 糊化温度在68~76℃之间<sup>[7]</sup>, 颗粒呈不规则三角形, 且菱角分明, 口感较差, 在产品开发过程中表现出较低的持水性和保水性, 因此, 采用物理或生物的方法对香蕉淀粉进行改性处理, 改善其理化特性和加工特性, 对香蕉淀粉的应用范围、产品形态的选择乃至香蕉资源的充分利用均有基础性作用和影响。

复合酶法能较好的保持淀粉的颗粒形态, 其宏观效果是在淀粉颗粒表面形成一个个很小孔, 然后沿着

径向逐步向颗粒中心推进,同时小孔孔径逐渐扩大,在中心附近相互融合形成一个中空结构,仍保持颗粒基本形状<sup>[8]</sup>。聂丽红<sup>[9]</sup>等采用 $\alpha$ -淀粉酶和糖化酶双酶协同制备多孔玉米淀粉,产品的吸油率达到了98.48%。微生物的发酵作用可以用来改善膳食纤维的持水力、溶胀性和阳离子交换能力等功能特性、风味口感和生理活性。袁美兰<sup>[10]</sup>等发现玉米淀粉经发酵后制作的粉条口感爽滑、弹性好、耐咀嚼,品质得到显著提高。挤压膨化加工技术是集混合、搅拌、破碎、加热、杀菌、膨化及成型为一体的技术,由于其具有显著的优点(效率高、处理量大、易于产业化),而在食品工业中广泛用于粮油加工、食品制作、纤维和淀粉降解、谷物和大豆蛋白组织化、谷物破壁等方面<sup>[11]</sup>。Gonzalez-Soto等<sup>[12]</sup>利用双螺杆挤压膨化对香蕉粉进行预糊化,再冷藏来增加抗性淀粉含量,以提高香蕉粉的保健功能。

本文为了拓宽香蕉淀粉的应用范围,分别采用复合酶法、乳酸发酵法和挤压膨化法进行改性处理,研究比较香蕉淀粉的抗性淀粉质量分数、理化特性和加工特性的变化,旨在找到既能保留天然香蕉淀粉优势又能改善其加工性能的改性方法。

表1 青香蕉原淀粉成分分析

Table 1 The composition analysis of native banana starch

成分	蛋白质	脂肪	水分	灰分	总膳食纤维	总淀粉
质量分数/%	2.96±0.31	0.50±0.11	7.72±1.58	2.07±0.21	10.23±1.06	78.43±3.29

注:  $\bar{x} \pm s$  表示平均值±标准偏差。

青香蕉原淀粉:将鲜香蕉洗净去皮后加相同质量的护色液,离心分离,沉淀反复清洗离心分离3次后于45℃烘箱中烘干,最后过100目筛,即得试验用的香蕉淀粉,其主要成分及质量分数如表1所示。

复合酶法改性香蕉淀粉:参考黄守耀等<sup>[13]</sup>的方法,将香蕉淀粉用磷酸缓冲液调节淀粉乳质量分数为10%,然后加入10%的复合酶(中温 $\alpha$ -淀粉酶与糖化复合酶的质量比为2:5),50℃下水浴振荡酶解24 h后,3000 r/min离心10 min,沉淀物在50℃下烘干,粉碎,过100目筛即得复合酶法改性香蕉淀粉。

生物发酵改性香蕉淀粉:参考闵伟红等<sup>[14]</sup>的方法,将香蕉天然淀粉用6~8%的盐水调节淀粉乳质量分数为10%,然后接入质量分数为10%的自然发酵乳酸菌悬液。室温(25±5℃)下密封发酵7 d后,3000 r/min离心10 min,沉淀物在50℃下低温烘干,粉碎,过100目筛即得生物发酵改性香蕉淀粉。

挤压膨化改性香蕉淀粉:参考夏雨等的方法<sup>[15]</sup>,将香蕉淀粉用水调节使原料含水率为18%左右,然后在供料速度116 r/min、螺杆转速313 r/min、挤压温度

## 1 材料与方法

### 1.1 主要材料与试剂

青香蕉:购于番禺农场;柠檬酸:东莞市华宏化工有限公司;中温 $\alpha$ -淀粉酶(M0003)(≥3700U/g):北京奥博星;糖化复合酶(糖化酶+普鲁兰酶)(300×10<sup>4</sup>U/g):广州裕立宝生物科技有限公司。

### 1.2 主要仪器与设备

HR2860型飞利浦打浆机,飞利浦有限公司;SPJ-40实验型双螺杆挤压膨化机,由陕西得爱食品科技有限公司、华南农业大学食品学院联合研制;Brabender Viskograph-E型黏度计,德国Brabender公司;Q10型差示扫描量热仪(DSC),美国TA公司;S-3700N型扫描电镜,日立中国有限公司;XD-2型X-射线衍射仪,北京普析通用仪器有限责任公司。TC-PIIG型全自动测色色差计,北京光学仪器厂。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 试验原料制备

130℃条件下进行挤压膨化处理。将膨化香蕉粉粉碎,过100目筛即得膨化改性香蕉淀粉。

#### 1.3.2 试验内容

抗性淀粉质量分数测定:采用AOAC 2002.02推荐的McCleary法进行测定。称取100 mg样品至10 mL具塞试管中,先加入4 mL酶液(含 $\alpha$ -淀粉酶1200 U和糖化复合酶12 U),于37℃水浴水平震荡16 h。取出试管加入等量乙醇沉淀未消化的淀粉,离心后弃上清液,沉淀再用50%乙醇洗涤3次,加2 mL 2 mol/L的KOH溶液至沉淀中,边冰浴边磁力搅拌20 min,然后加入1.2 mol/L乙酸钠缓冲液(pH 3.8),混匀后加入糖化复合酶溶液于50℃水浴振荡30 min,冷却至室温后定容,测定葡萄糖质量分数。

抗性淀粉质量分数=葡萄糖含量×0.9

扫描电镜观察:电子枪加速电压20 kV,在1600倍下观察淀粉的颗粒形态。

X-射线衍射分析:采用Cu靶,石墨单色器、30 kV、30 mA,在2 $\theta$ =4~60°范围扫描,扫描速度为6°/min。

结晶度的计算:采用峰拟合法计算淀粉的结晶度,

利用MDI Jade5.0对图谱进行平滑后,拟合出非结晶峰的强度。然后选择衍射峰,进行手动拟合,直至全部拟合完成。

$$\text{结晶度} = \frac{\text{晶相衍射强度}}{\text{总强度}}$$

碘吸收曲线:将50 mg样品用10 mL 90% DMSO(二甲基亚砜)于60 °C水浴中分散10 min,迅速冷却,用水定容至50 mL。取该溶液2 mL于50 mL容量瓶中,加入25 mL水及1 mL碘试剂,定容,立即混匀,显色10 min,同时做空白。用紫外分光光度计扫描,波长500~700 nm。

平均聚合度及分子量的测定:采用还原末端法。

布拉班德黏度曲线的测定:将500 g质量分数为6%的淀粉乳置于测量杯中,从30 °C开始升温,升温速率为1.5 °C/min,转子转速75 r/min,升温到95 °C后保温30min,再以1.5°C/min的速率冷却到50 °C,保温30 min得到一条黏度随时间和温度而连续变化的布拉班德黏度曲线。

色差分析:按照仪器自动提示进行调零操作,然后校对标准(调白)。取一定量的样品平铺放好,按下测试键,再按下显示键,即可显示测定结果。计算3种改性淀粉与香蕉原淀粉之间的明度差与色度差。 $L^*$ 值表亮度, $L^*$ 值越大,亮度越大; $a^*$ 值表示有色物质的红绿偏向,正值越大,偏向红色的程度越大,负值绝对值越大,偏向绿色的程度越大; $b^*$ 值表示有色物质的黄蓝偏向,正值越大,偏向黄色的程度越大,负值绝对值越大,偏向蓝色的程度越大。

保水率与溶解度的测定:取5.0 g样于100 mL水的离心管中,分别在50 °C、60 °C、70 °C、80 °C和90 °C下水浴加热15 min。水浴后以3000 r/min的转速离心15 min,将上清液和沉淀物分开,沉淀物倾斜45°,

静置10 min除去水分,称其质量 $M_2$ ,计算保水率。收集上清液,烘干后称其质量 $M_3$ ,计算溶解度。

$$\text{保水率} = \frac{M_2 - M_1 - M_0}{M_0} \times 100\%$$

$$\text{溶解度} = \frac{M_3}{M_0} \times 100\%$$

注: $M_0$ -称取淀粉质量, g;  $M_1$ -离心管质量, g;  $M_2$ -去除水分后淀粉和管的质量, g;  $M_3$ -上清液烘干后质量, g。

透明度的测定:将样品配成质量分数为1%的淀粉乳,置于沸水浴中加热搅拌15 min,然后冷却至25 °C,用1 cm的比色杯在620 nm波长下测定淀粉糊的透光率。以蒸馏水为空白,设蒸馏水的透光率为100%。

冻融稳定性的测定:将样品配成质量分数为6%的淀粉乳,加热至95 °C后冷却至室温。然后将淀粉糊于-20 °C的冰箱中冷冻存放24 h,取出自然解冻后,在3000 r/min下离心20 min,称取沉淀物的质量,并计算析水率,从而表示冻融的稳定性。

$$\text{析水率}(\%) = \frac{\text{糊质量}(\text{g}) - \text{离心管中沉淀物质量}(\text{g})}{\text{糊质量}(\text{g})} \times 100\%$$

## 1.4 数据处理方法

各组试验数据均重复三次,取平均值,并用Excel软件分析作图。数据统计分析采用SPSS1.7.3软件的进行单因素方差分析,以平均值±标准差表示,样品之间的显著性差异检验用LSD法( $p < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 香蕉原淀粉及其改性淀粉中抗性淀粉的质量分数

表2 香蕉原淀粉及其改性淀粉中抗性淀粉的质量分数( $\bar{x} \pm s$ )

Table 2 The resistant starch content of native banana starch and the modified starches

淀粉种类	香蕉原淀粉	复合酶法改性淀粉	乳酸发酵改性淀粉	挤压膨化改性淀粉
抗性淀粉的质量分数/%	64.2±2.69	70.2±2.82*	66.5±2.76	12.6±0.76*

注: $\bar{x} \pm s$ 表示平均值±标准偏差;\*表示该改性淀粉中抗性淀粉的质量分数与香蕉原淀粉中抗性淀粉的质量分数存在显著性差异, $P \leq 0.05$ 。

香蕉原淀粉及其改性淀粉中抗性淀粉的质量分数测定结果见表2。由表2可以看出,香蕉原淀粉中抗性淀粉质量分数为64.2%,说明香蕉原淀粉中的主要成分是抗性淀粉。复合酶法改性和乳酸发酵改性之后产品中抗性淀粉质量分数有所增加,其中复合酶法改性使抗性淀粉质量分数显著提高。主要是因为这两种改性方式使得香蕉淀粉中的部分可消化成分被降解去除,从而导致产品中抗性淀粉的相对质量分数增加。

而挤压膨化改性则由于改性条件过于激烈,从而导致抗性损失严重。

### 2.2 香蕉原淀粉及其改性淀粉理化特性

#### 2.2.1 香蕉原淀粉及其改性淀粉在扫描电镜下的颗粒形貌

香蕉原淀粉和改性淀粉的扫描电镜结果,如图1所示。从图1a可以看出,香蕉原淀粉呈不规则、大小不一

的三角形或椭圆形；从图1b可以看出，复合酶解后香蕉淀粉颗粒表面被降解，颗粒形态变得圆滑，并伴有少许裂纹出现；从图1c可以看出，乳酸菌发酵后香蕉淀粉颗粒形态更加圆滑，且颗粒表面出现大量裂纹；从图1d可以看出，挤压膨化后香蕉淀粉颗粒被降解，并出现更小的颗粒形态，表面变得凹凸不平。

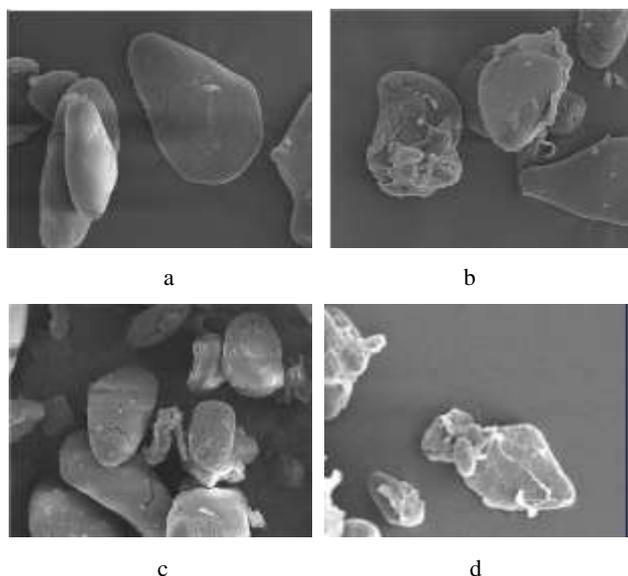


图1 蕉原淀粉及其改性淀粉的扫描电镜图 (×1600)

Fig.1 The SEM charts of native banana starch and the modified starches

注：a：香蕉原淀粉，b：复合酶法改性淀粉，c：乳酸发酵改性淀粉，d：挤压膨化改性淀粉

### 2.2.2 香蕉原淀粉及其改性淀粉的晶体类型与结晶度

表3 香蕉原淀粉及其改性淀粉的 X-射线衍射数据分析

Table 3 XRD data analysis of native banana starch and the modified starches

淀粉	特征峰强度/ $s^{-1}$	结晶度/%
香蕉原淀粉	20	15.00
	峰强度	17.02 18.19 22.13 23.44
复合酶法改性淀粉	20	15.12
	峰强度	17.10 18.05 22.70 23.90
乳酸发酵改性淀粉	20	15.11
	峰强度	16.90 19.80 21.94 23.30
挤压膨化改性淀粉	20	15.56
	峰强度	- 18.26 22.68 -
		2.89

结果显示，香蕉原淀粉、乳酸发酵改性淀粉和复合酶法改性淀粉的晶型为C型。可见，乳酸发酵改性和复合酶法改性不会改变香蕉原淀粉的晶体类型。淀粉结晶度是表征淀粉材料类产品性质的重要参数，淀粉材料的一些物理性能和机械性能与其结晶度有着密切的关系。结晶度愈大，晶区范围愈大，其强度、硬度、刚度愈高，密度愈大，尺寸稳定性愈好；同时耐热性

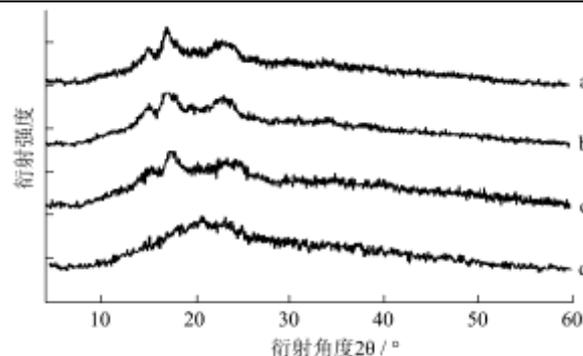


图2 香蕉原淀粉及其改性淀粉的 X-射线衍射曲线

Fig.2 The XRD curves of native banana starch and the modified starches

注：a-香蕉原淀粉；b-酶法改性淀粉；c-乳酸发酵改性淀粉；d-挤压膨化改性淀粉。

淀粉晶体结构可以划分为非晶、亚微晶和微晶三种结构，它们具有不同的X-射线衍射特征及性质。淀粉及其衍生物的结晶结构和结晶度大小直接影响着淀粉产品的应用性能。采用X-衍射分析，结晶区是呈现峰特征的，而非晶区呈现弥散特征。淀粉颗粒的不同晶型都具有明显的特征峰，A型分别在15°、17°、18°和23°处有4个强峰；B型其衍射图在5.6°、17°、22°和24°有较强的衍射峰出现；C型显示了A型和B型的综合，但它和A型相比在5.6°处有一个中强峰，而且该峰在干燥或部分干燥的样品中可能消失，与B型相比它在23°显示的是一个单峰。香蕉原淀粉及其改性淀粉的X-衍射相关数据见表3。

和耐化学性也愈好。复合酶法改性和乳酸发酵改性后香蕉淀粉的结晶度有所提高。而挤压膨化改性后香蕉淀粉的结晶度下降。这可能是由于复合酶和乳酸菌的作用降解了部分无定型区，使得淀粉链结晶区相对增加的缘故。经挤压膨化改性后，衍射曲线上各特征峰明显减少，且相比香蕉原淀粉，在17°最强的特征峰完全消失。在高温高压作用下，挤压膨化改性淀粉结晶

结构明显被破坏,晶体的有序化程度降低,结晶度也明显降低。

### 2.2.3 香蕉原淀粉及其改性淀粉的碘吸收曲线

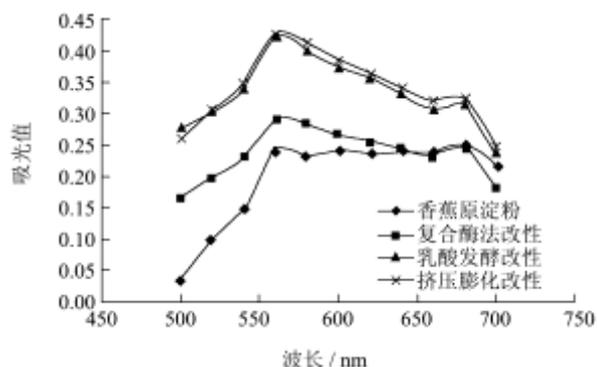


图3 香蕉原淀粉及其改性淀粉的碘吸收曲线

Fig.3 The iodine absorption curve of native banana starch and the modified starches

淀粉粒由直链淀粉和支链淀粉组成,淀粉的性质与直链淀粉和支链淀粉的含量及结构有很大关系。支链淀粉的支链长度强烈影响淀粉的糊化性能、凝胶强度。长支链淀粉和中等大小的直链淀粉还是淀粉黏度的主要影响因素。香蕉原淀粉及其改性淀粉碘吸收曲线,结果如图3。淀粉-碘复合物吸光度法是利用淀粉与碘形成各种有色复合物来研究淀粉中直支链淀粉比例、链长或分子大小,也是直链淀粉质量分数的一种定性方法。直链淀粉-碘络合物在600~640 nm间呈现最大的光吸收,而支链淀粉-碘络合物的则为520~560 nm。这种复合物的最大吸收波长 $\lambda_{max}$ 、吸收峰的范围和吸光度的变化都与直链淀粉的比例、直链淀粉的质量分数和分子量大小等有密切关系<sup>[24]</sup>。从图3可见,经过3种方法改性的淀粉分子发生解聚,淀粉与碘络合物的最大吸收峰由直链淀粉处明显向支链淀粉处偏移,挤压膨化改性淀粉和乳酸发酵改性淀粉的吸光值最高,断链作用比较强烈。挤压过程中高温、高压和剪切力使淀粉发生一定糖苷键断裂,分子发生解聚,分子量也变小,且最大吸收峰较尖锐,淀粉分子聚合度的分布较集中。利用乳酸菌发酵改性的主要是在发酵过程中,微生物产酸和酶作用于淀粉颗粒对淀粉进行改性,且酸的断链作用强于酶的断链作用。相对来讲,复合酶法改性作用较温和,通过酶解能够达到微孔化的目的,能较好的保持淀粉的颗粒形态。

### 2.2.4 香蕉原淀粉及其改性淀粉的分子量与平均聚合度

淀粉的平均聚合度的变化会影响淀粉凝胶的弹性、淀粉的柔韧品质和蒸煮性能,且在抗性淀粉制备中与抗性淀粉的得率有关。香蕉原淀粉及其改性淀粉的分子量与平均聚合度,如图4所示。从图4可以看出:

3种方法改性后比原淀粉均有所降低,平均聚合度和平均分子量的大小顺序为:复合酶法改性淀粉>乳酸发酵改性淀粉>挤压膨化改性淀粉。香蕉原淀粉的平均聚合度DP=91,平均分子量Mn=14000 Da,而挤压膨化改性后香蕉淀粉变化最大,平均聚合度DP=52,平均分子量Mn=7800 Da。淀粉的降解削弱了其再结晶的能力,但抗老化性增强,有利于保持较多的水分。另一方面,分支化程度降低,削弱了空间的阻碍作用,加速了直链淀粉的回生及直链淀粉与支链淀粉的相互作用,有助于形成稳定的凝胶结构。

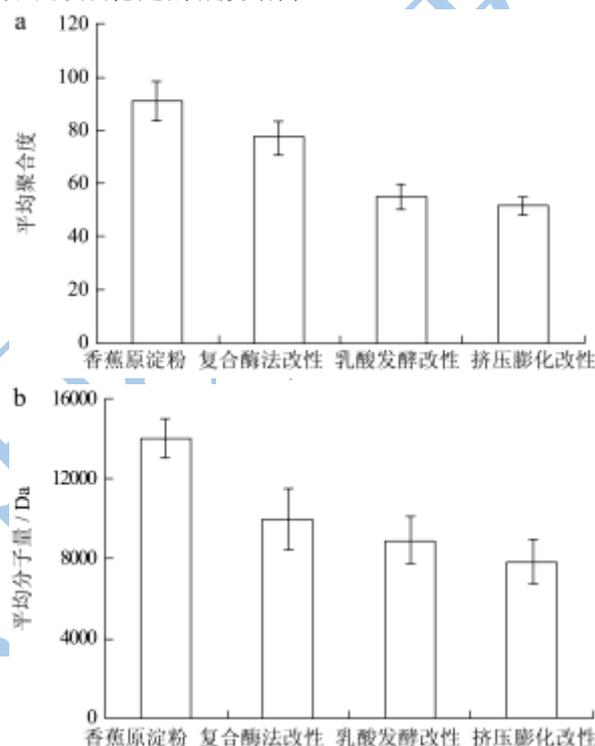


图4 香蕉原淀粉及其改性淀粉的平均聚合度和平均分子量

Fig.4 The average molecular weight and average degree of polymerization of native banana starch and the modified starches

### 2.2.5 香蕉原淀粉及其改性淀粉的布拉班德黏度曲线

黏度是淀粉的一项重要物理指标,也是一项实用指标,特别是在食品加工过程中有着极其重要的作用。黏度崩解值表示淀粉糊的热稳定性,崩解值越小,淀粉的热稳定越好。崩解值与淀粉颗粒的晶体结构、淀粉分子结构及淀粉中其它微量成分的含量等关系较为密切。回升值是表示淀粉糊的冷稳定性,变化越小则表示冷稳定性越好。BF表示淀粉糊的凝沉性,变化为正值时,越大则表示凝沉性越强,变化为负值时,表示凝沉性弱,负值的绝对值越小则表示凝沉性越弱。由表4可得香蕉原淀粉及其改性淀粉的起糊温度大小依次为:复合酶法改性淀粉>香蕉原淀粉>乳酸发酵改性

淀粉>挤压膨化改性淀粉,复合酶法改性有效提高了淀粉的起糊温度;3种改性淀粉的峰值黏度和冷却淀粉糊均有大幅度下降。崩解值BD大小依次为:挤压膨化改性淀粉>乳酸发酵改性淀粉>香蕉原淀粉>复合酶法改性淀粉,说明复合酶法改性有助于提高淀粉糊的热稳定性,而乳酸发酵改性和挤压膨化改性均使香蕉淀粉

糊的热稳定性降低。从回升值ED来看,3种改性方法均有助于提高香蕉淀粉糊的冷稳定性,而挤压膨化改性能使香蕉淀粉糊具有较强的冷稳定性。从BF值来看,复合酶法改性会导致香蕉淀粉糊淀粉糊的凝沉性增强,而乳酸发酵改性和挤压膨化改性则会使香蕉淀粉的凝沉性减弱。

表4 香蕉原淀粉及其改性淀粉的黏度曲线特征参数

Table 4 The characteristic parameters of native banana starch and the modified starches

淀粉种类	A/℃	B/BU	C/BU	D/BU	E/BU	F/BU	BD/BU	ED/BU	BF=F-B
香蕉原淀粉	78.6	251.0	243.0	216.0	273.0	255.0	35.0	57.0	22.0
复合酶法改性淀粉	84.7	80.0	73.0	78.0	98.0	95.0	2.0	20	18.0
乳酸发酵改性淀粉	76.0	145.0	144.0	107.0	133.0	130.0	38.0	26.0	-12.0
挤压膨化改性淀粉	30.4	93.0	50.0	49.0	52.0	52.0	44.0	3.0	-41.0

注:A点-起糊温度(℃);B点-峰值黏度(BU);C点-升温达到95℃时的黏度值(BU);D点-95℃保温30min后的黏度值(BU);E点-冷却至50℃时的黏度值(BU);F点-50℃保温30min后的黏度值(BU);BD-崩解值,D值与B值差的绝对值(BU);ED-回升值,D值与E值差的绝对值(BU)。FB-冷却至50℃时的黏度F值减最高黏度B值的差。

### 2.3 香蕉原淀粉及其改性淀粉加工特性

#### 2.3.1 香蕉原淀粉及其改性淀粉的色泽

香蕉原淀粉及其改性淀粉的色差测定结果如表5。

表5 香蕉原淀粉及其改性淀粉的色差分析

Table 5 The chromatic aberration analysis of native banana starch and the modified starches

淀粉种类	L*	a*	b*
香蕉原淀粉	74.61±2.02	4.87±0.06	15.66±1.86
复合酶法改性淀粉	67.64±0.74*	6.05±0.91*	13.60±0.97*
乳酸发酵改性淀粉	65.91±1.06*	8.73±0.43*	14.54±1.18*
挤压膨化改性淀粉	63.58±0.63*	6.11±0.36*	15.61±0.86*

注:  $\bar{x} \pm s$  表示平均值±标准偏差;\*表示该改性淀粉中与香蕉原淀粉中色差值之间存在显著性变化,  $P < 0.05$ 。

由表5可以看出,改性后香蕉淀粉的L\*值、a\*值和b\*值与香蕉原淀粉相比均存在显著性差异。改性后淀粉的L值即明度L\*值下降,a值有所增加,b值均有所下降,即三种3种方法改性后香蕉淀粉的色泽加深,出现偏有变暗、红色加深和黄色变淡的趋势黄和偏红色。综合来看,复合酶法改性对香蕉原淀粉的色泽影响较小。改性后淀粉色差变小,其中挤压膨化后色差最小,而复合酶法改性后色差最大。复合酶法改性淀粉色泽明显加深,乳酸发酵改性淀粉出现明显红色,挤压膨化改性则出现明显偏黄色。

#### 2.3.2 香蕉原淀粉及其改性淀粉吸水率和溶解度

香蕉原淀粉及其改性淀粉不同温度下的吸水率测定结果见图5,溶解度曲线见图6。

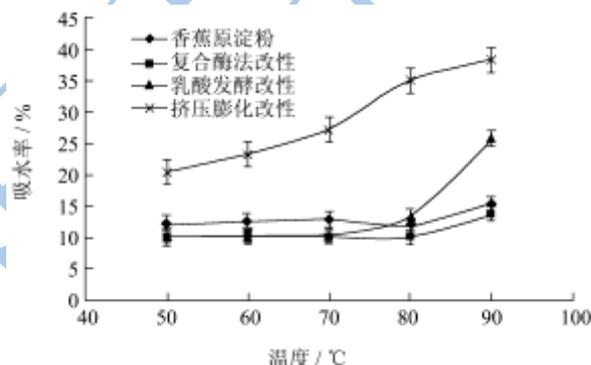


图5 不同温度下香蕉原淀粉及其改性淀粉的吸水性

Fig.5 The hygroscopicity of native banana starch and the modified starches at different temperatures

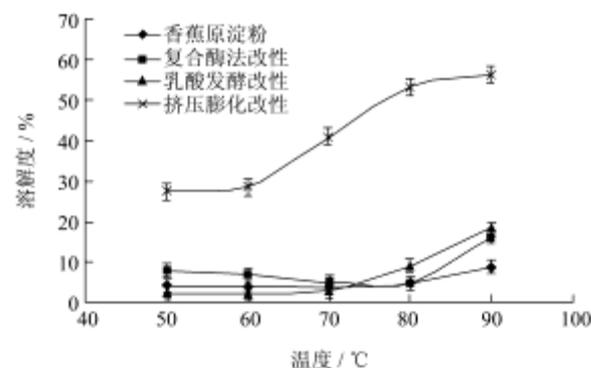


图6 香蕉原淀粉及其改性淀粉的溶解度

Fig.6 The solubility of native banana starch and the modified starches at different temperature

从图5可见,在80℃以下,除挤压膨化改性淀粉外,其他淀粉的吸水率随温度的上升变化不大。当高于80℃时,淀粉的开始吸水膨胀,其中乳酸发酵改性淀粉的吸水率增长速度较快,显著高于其他几种淀粉。挤压膨化改性淀粉在60~80℃之间的吸水率增长速度

较快, 80 °C后趋于平缓, 这是由于淀粉在挤压膨化后, 导致淀粉糊化和颗粒的降解, 使得膨化改性的香蕉淀粉的吸水率远远高于原淀粉和其他改性淀粉。由图6可见, 当80 °C以下时, 膨化改性淀粉的溶解度变化较大。当高于80 °C时, 复合酶法改性淀粉与乳酸发酵改性淀粉的溶解度增长较快, 而挤压膨化改性淀粉的溶解度增幅最小。

### 2.3.3 香蕉原淀粉及其改性淀粉的透明度

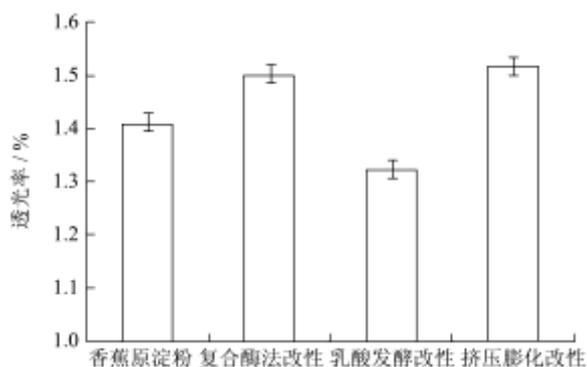


图7 香蕉原淀粉及其改性淀粉的透光率

Fig.7 The transmittance of native banana starch and the modified starches

香蕉原淀粉及其改性淀粉糊的透明度的测定结果, 见图7。从图7可以看出: 与香蕉原淀粉相比, 复合酶法改性和挤压膨化改性后香蕉淀粉的透光率有所提高, 而乳酸发酵改性的香蕉淀粉的透光率有所减小。因此, 复合酶法改性和挤压膨化改性后有助于改善淀粉糊的透明度, 提高香蕉淀粉的感官品质; 而乳酸发酵改性后会降低淀粉糊的透明度, 影响香蕉淀粉糊制品的感官品质。

### 2.3.4 香蕉原淀粉及其改性淀粉的冻融稳定性

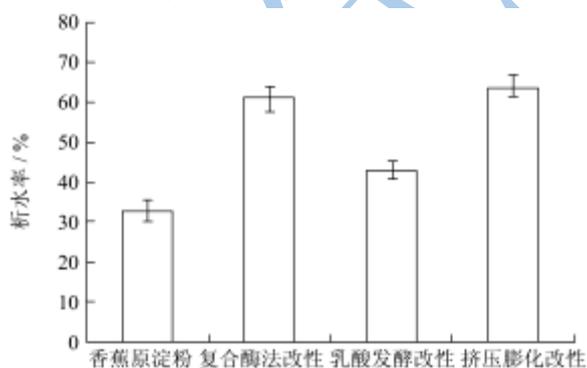


图8 香蕉原淀粉及其改性淀粉的冻融稳定性

Fig.8 The freezing and thawing stability of native banana starch and the modified starches

冻融稳定性是指乳液经受冻结和融化交替变化时的稳定性。香蕉原淀粉及其改性淀粉糊的冻融稳定性测定由析水率表示, 如图8。从图8可以看出, 3种改性对香蕉淀粉的冻融稳定性均有所影响, 其中挤压膨化

改性和复合酶法改性影响较大, 而乳酸发酵改性对冻融稳定性的影响较小。因此, 3种改性淀粉中乳酸发酵改性淀粉更适合于低温冷冻食品中。

## 3 结论

3.1 复合酶法改性和乳酸发酵改性均能使产品中抗性淀粉质量分数增加, 其中复合酶法改性淀粉的抗性淀粉质量分数最高。挤压膨化改性之后产品中抗性淀粉质量分数显著下降。

3.2 通过对香蕉原淀粉及其改性淀粉理化特性的研究可以看出, 相对于其他两种改性方法, 复合酶法改性作用较温和, 通过酶解能够达到微孔化的目的, 淀粉分子解聚程度低, 且能较好的保持淀粉的颗粒形态; 复合酶法改性和乳酸发酵改性使香蕉原淀粉淀粉结晶度由 18.13% 分别增加到 20.19% 和 22.06%, 而挤压膨化改性不能保持淀粉的颗粒形态, 结晶度大幅下降至 2.16%; 3 种改性方法中, 只有复合酶法改性能够提高起糊温度, 且有助于提高淀粉糊的热稳定性和冷稳定性, 使淀粉糊的凝沉性增强。而乳酸发酵改性和挤压膨化改性使香蕉淀粉糊的热稳定性降低, 凝沉性减弱, 但有助于提高香蕉淀粉糊的冷稳定性。

3.3 通过对香蕉原淀粉及其改性淀粉加工特性的研究可以看出, 3 种方法改性对香蕉淀粉的  $L^*$  值和  $a^*$  值和  $b^*$  值均产生显著性影响。其中, 复合酶法改性对香蕉原淀粉的色泽影响相对较小。经挤压膨化预糊化的香蕉淀粉在溶解度和吸水性方面均有大大改善; 复合酶法改性和挤压膨化改性有助于改善淀粉糊的透明度, 提高香蕉淀粉的感官品质; 3 种改性对香蕉淀粉的冻融稳定性均有所影响, 其中乳酸发酵改性对冻融稳定性的影响较小。

3.4 综合而言, 在 3 种改性方法中, 复合酶法改性从提高产品中抗性淀粉质量分数、保持香蕉淀粉的颗粒形态、提高结晶度、减少对淀粉颗粒的破坏以及提高香蕉淀粉产品的加工特性等方面优于其他两种改性方式。同时该方法具有操作简单, 设备要求不高, 成本低等特点, 适合于产业化生产。

## 参考文献

- [1] 李学红, 陆勇, 王冰, 等. 栖热菌 4- $\alpha$ -糖基转移酶对马铃薯淀粉的改性作用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 363-368  
Li Xuehong, Lu Yong, Wang Bing, et al. Effects of thermus scotoductus 4- $\alpha$ -glucanotransferase on modified property of potato starch [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(1): 363-368

- [2] 滕建文,马倩,夏宁.乳酸菌发酵对玉米的改性作用[J].食品科技,2008,5:126-129  
TENG Jian-wen, MA Qian, XIA Ning. Modified role of lactobacillus fermentation in corn [J]. Food science and technology, 2008, 5: 126-129
- [3] Pingyi Zhang, Whistler R L, BeMiller J N, et al. Banana starch: production, physicochemical properties and digestibility -a review [J]. Carbohydrate Polymers, 2005, 59: 443-458
- [4] Ble-Castillo, Jorge L Aparicio-Trapala, Maria A Francisco-Luria, et al. Banana Resistant Starch Flour Supplementation Reduces Body Weight and Insulin Resistance in Obese Type 2 Diabetics [J]. OBESITY, 2008, 16: S152-S153
- [5] Ble-Castillo J L, Aparicio-Trapala M A, Olvera- Hemandez V, et al. BENEFICIAL EFFECT OF BANANA RESISTANT STARCH TO REDUCE GLYCEMIA AND LIPIDS IN TWO ANIMAL MODELS WITH DISMETABOLIC DISORDERS. ATHEROSCL EROSIS SUPPLEMENTS [J]. 2011, 12(1): 144-144
- [6] Saguila'n A A, yago-Ayerdi S S, Vargas-Tomes A, et al. Slowly digestible cookies prepared from resistant starch-rich lintnerized banana starch [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2007, 20:175-181
- [7] Da MOTA R V, LAJOLO F M, CORDENUNSI B R, et al. Composition and functional properties of banana flour from different varieties [J]. Starch/Starke, 2000, 52(2/3): 63-68
- [8] SREENATH H K. Studies on starch grallules digestion by  $\alpha$ -amylase [J]. Starch, 1992, 44(2): 61-63
- [9] 聂丽红,罗志刚,王颖,等.酶法制备多孔玉米淀粉及其显微结构的研究[J].现代食品科技,2009,25(12):1426-1430  
NIE Li-hong, LUO Zhi-gang, WANG Ying, et al. Study on Preparation and Microstructure of Porous Maize Starch Prepared By Enzyme Hydrolysis [J]. Modern Food Science and Technology, 2009, 25(12): 1426-1430
- [10] 袁美兰,鲁战会,李里特.自然发酵对玉米淀粉物理性质和玉米粉条拉伸性质的影响[J].食品科学,2008,29(12): 40-44  
YUAN Mei-lan, LU Zhan-hui, LI Li-te. Effect of Spontaneous Fermentation on Physical Properties of Corn Starch and Tensile Properties of Corn Starch Noodle [J]. Food Science, 2008, 29(12): 40-44
- [11] Ding Qing -Bo, Ainsworth P, Tucker G, et al. The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 66: 283-289
- [12] Gonzalez-soto R A, Mora-escobedo R, Hernandezsanchez H, et al. Extrusion of banana starch: characterization of the extrudates [J]. J Sci. Food Agri, 2007, 87(2): 348-356
- [13] 黄守耀,夏雨,杜冰,等.大蕉淀粉的复合酶法改性工艺优化 [J].食品科学,2012,33(6):69-73  
HUANG Shou-yao, XIA Yu, DU Bing, et al. Optimization of Double-Enzymatic Modification of Plantain Starch [J]. Food Science, 2012, 33(6): 69-73
- [14] 闵伟红,李里特,王朝辉.乳酸菌发酵对大米淀粉物理化学性质的影响[J].食品科学,2004,25(10):73-76  
MIN Wei-hong, LI Li-te, WANG Zhao-hui. Effects of Lactic Acid Bacteria Fermentation of Rice Starch on Physical Properties [J]. Food Science, 2004, 25(10):73-76
- [15] 夏雨,张延杰,龚启宙,等.香蕉粉的双螺杆挤压膨化改性研究[J].广东农业科学,2012,10:124-127  
XIA Yu, ZHANG Yan-jie, GONG Qi-zhou, et al. Study on modified banana powder by twin-screw extrusion [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012, 10: 124-127