

# 酶处理促进龙眼果汁中蔗糖的转化和低聚果糖的生成

程永霞, 魏新雨, 蓝海波, 王凯, 赵雷, 胡卓炎

(华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)

**摘要:** 为了降低龙眼果汁中的蔗糖含量和制备一种富含低聚果糖的龙眼果汁, 本研究以龙眼果汁为原料, 探讨底物浓度、底物 pH、果糖基转移酶添加量、酶处理温度和时间等单因素对果汁中蔗糖的转化和生成低聚果糖的影响。采用液相色谱法 (HPLC) 分析酶转化前后果汁中蔗糖、果糖、葡萄糖、低聚果糖含量的变化。结果表明, 底物浓度、pH、酶用量、温度和处理时间等因素对龙眼果汁蔗糖转化和低聚果糖的生成有显著影响 ( $p < 0.05$ )。在底物浓度 30 °Brix、pH 6.0、酶用量 9 U/g、55 °C 下转化 7 h 的龙眼果汁, 蔗糖含量从 164.36 mg/mL 减少至 22.34 mg/mL, 生成的低聚果糖含量为 97.88 mg/mL, 占果汁中总糖的 38.21%。利用果糖基转移酶处理龙眼果汁, 能有效降低果汁中的蔗糖含量, 获得一种低热量且富含低聚果糖的功能性果汁。

**关键词:** 龙眼果汁; 蔗糖; 低聚果糖; 酶处理条件

文章篇号: 1673-9078(2018)10-103-110

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.10.015

## Sucrose Conversion and Fructo-oligosaccharide Synthesis in Longan Juice Promoted by Enzymatic Treatment

CHENG Yong-xia, WEI Xin-yu, LAN Hai-bo, WANG Kai, ZHAO Lei, HU Zhuo-yan

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

**Abstract:** This study aimed to reduce the sucrose content in Longan (*Dimocarpus longan* Lour.) juice and to prepare a Longan juice rich in Fructo-oligosaccharides. Longan juice was used as the main raw material for the investigations on the effect of a single factor, including substrate concentration (as total soluble solids, TSS), substrate pH, fructosyltransferase addition, enzyme treatment temperature and time, on the conversion of sucrose and oligo-fructose formation in fruit juice. The changes in the contents of sucrose, fructose, glucose and fructo-oligosaccharides in the juice before and after enzymatic conversion were tracked and analyzed by liquid chromatography. The obtained results showed that parameters like substrate concentration, pH, amount of enzyme, treatment temperature and treatment time had significant effects ( $p < 0.05$ ) on the conversion of sucrose to fructo-oligosaccharides in Longan juice. Under the enzymatic conditions of TSS 30 °Brix, pH 6.0, enzyme dosage 9 U/g sucrose, 55 °C for 7 h, the sucrose decreased from 164.36 to 22.34 mg/mL, leading to the fructo-oligosaccharide content of 97.88 mg/mL which accounted for 38.21% of the total sugar in the juice. The treatment with fructosyltransferase can effectively reduce the sucrose content in the Longan juice, and facilitate a low-calorie functional juice rich in fructo-oligosaccharide.

**Key words:** Longan juice; sucrose; fructo-oligosaccharides; enzyme treatment

龙眼(*Dimocarpus longan* Lour.)在中国有着悠久的种植和食用历史, 原产于中国南方<sup>[1]</sup>, 在广东、福建、广西、海南等省份及台湾地区均有着广泛种植<sup>[2]</sup>。龙眼凭借其美好的风味和丰富的营养价值, 自古以来就被视为药食两用的滋补佳品<sup>[3]</sup>。龙眼果肉含糖量高,

收稿日期: 2018-04-29

基金项目: 国家荔枝龙眼产业技术体系项目(CARS-33); 广东省扬帆计划创新团队项目(2014YT02H013); 广州市科技计划项目(201807010113)

作者简介: 程永霞(1987-), 女, 博士, 研究方向: 食品加工与贮藏

通讯作者: 胡卓炎(1961-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工与贮藏

主要包括蔗糖、葡萄糖和果糖, 其中蔗糖含量最高, 占总糖的60%~70%。同时龙眼果肉富含多糖<sup>[4,5]</sup>、多酚<sup>[6]</sup>、 $\gamma$ -氨基丁酸<sup>[7]</sup>及人体需要的矿物质和微量元素<sup>[8,9]</sup>, 现代药理研究表明龙眼果肉的这些营养成分具有抗氧化<sup>[10]</sup>、抗癌<sup>[11]</sup>、增强免疫力<sup>[12]</sup>和保护关节<sup>[13]</sup>的功效。传统龙眼加工产品主要有龙眼干(桂圆肉)、龙眼浓缩汁(龙眼膏)等产品。龙眼膏一般采用龙眼果汁加热浓缩加工而成。龙眼果汁浓缩后蔗糖含量进一步提高。随着人们饮食观念的改变, 高糖食品因易引发肥胖, II型糖尿病和心血管疾病<sup>[14]</sup>, 而不能满足现代消费者追求低糖(低热量)的健康饮食需求。利用果糖基转

酶将蔗糖转换成低聚果糖已有不少报道。低聚果糖是一种优质的益生元,其性质稳定,不被胃肠道内源酶消化<sup>[15]</sup>,具备调节肠道菌群平衡<sup>[16]</sup>、预防结肠癌<sup>[15]</sup>、改善脂质代谢<sup>[17]</sup>、促进矿物质吸收<sup>[18]</sup>、增强免疫力<sup>[19]</sup>等生理功能。低聚果糖(FOS)可以由蔗糖经果糖基转移酶处理后制得,是由1~3个果糖基通过 $\beta$ -(2-1)糖苷键与蔗糖中的果糖基结合生成的蔗果三糖(GF<sub>2</sub>)、蔗果四糖(GF<sub>3</sub>)和蔗果五糖(GF<sub>4</sub>)的混合物<sup>[20]</sup>。目前已有研究探讨用低聚果糖代替蔗糖制备功能性饮料的报道<sup>[21-23]</sup>,也有通过发酵或发酵产酶的方法除去果汁中的蔗糖制备低热量原果汁的研究<sup>[14,24,25]</sup>。在果汁加工中采用酶处理一般是以提高出汁率或制备澄清果汁为目的,但利用酶法转化果汁中蔗糖同时生成低聚果糖的研究尚鲜见报道。基于龙眼果汁蔗糖含量高的特点,利用果糖基转移酶的作用,探讨不同酶处理时间、酶用量、温度、底物浓度和pH等工艺参数对蔗糖的转化和低聚果糖含量变化的影响,旨在为开发低热量和富含低聚果糖的龙眼果汁的研究及实际生产提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

龙眼(*Dimocarpus longan* Lour.)为“储良”品种,产于广东茂名高州,于2016年8月成熟采摘;果糖基转移酶(1824 U/mL),诺维信公司;柠檬酸(化学纯),国药集团化学试剂有限公司;柠檬酸钠(化学纯),国药集团化学试剂有限公司;乙醇(分析纯),天津市富宇精细化工有限公司;糖标准物:果糖、葡萄糖、蔗糖、蔗果三糖(GF<sub>2</sub>)、蔗果四糖(GF<sub>3</sub>)、果五糖(GF<sub>4</sub>),Sigma试剂公司;乙腈(色谱纯),默克试剂公司。

### 1.2 仪器与设备

WZ103糖度计,上海天呈科技有限公司;FE320 pH计,上海梅特勒—托利多有限公司;JYL-C16D九阳打浆机,九阳股份有限公司;TD5-II低速离心机,长沙平凡仪器仪表有限公司;RE-52A旋转蒸发器,上海亚荣生化仪器厂;AUW120电子分析天平,日本岛津公司;SHA-CA晶波水浴恒温振荡器,常州普天仪器制造有限公司;HWS24型电热恒温水浴锅,上海一恒科学仪器有限公司;KQ5200DE数控超声波清洗器,昆山超声仪器有限公司;5430-eppendorf高速离心机,德国eppendorf公司;移液器,德国eppendorf公司;海尔BCD-256KF型冰箱,青岛海尔股份有限公司;

LC-20AT高效液相色谱仪(配示差检测器RID),日本岛津公司;NH<sub>2</sub>P-50 4E色谱柱,日本昭和电工公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 果糖基转移酶酶活的测定

参照Vega-Paulino等人<sup>[26]</sup>的方法,用0.1 mol/L pH 5.5柠檬酸-柠檬酸钠缓冲液将10 g蔗糖溶解并定容至100 mL,取20 mL蔗糖溶液,加入适量的酶,置于三角瓶中,于55 °C,转速150 r/min的恒温回旋式摇床中反应60 min,取出于95 °C,30 s灭酶处理,冷却至室温,于10000 r/min台式离心机离心20 min,取上清液过0.45  $\mu$ m微孔滤膜过滤,用高效液相色谱仪法(HPLC)分析GF<sub>2</sub>含量,并计算酶活。酶活力单位定义:在上述酶反应条件下,将蔗糖转化成低聚果糖,每分钟产生1  $\mu$ mol蔗果三糖所需酶量为一个酶活力单位(U)<sup>[27]</sup>。

#### 1.3.2 制备低聚果糖龙眼果汁工艺流程

龙眼→去皮、去核→打浆榨汁→过滤→浓缩→酶转化处理→加热钝化酶活性→冷却→样品

选择无病虫害和机械损伤的龙眼,人工去皮去核后榨汁,过滤(过100目滤布),得龙眼原果汁,测定原汁总可溶性固形物含量(TSS)为20 °Brix, pH 6.8;根据试验设计,加蒸馏水将原汁稀释至TSS 10 °Brix,或在60 °C下真空浓缩至TSS 30、40、50和60 °Brix,用柠檬酸调pH,随后加入果糖基转移酶进行酶转化,酶转化结束后立即进行95 °C,30 s杀菌钝化酶活性处理,冷却,包装,冷藏待分析。

#### 1.3.3 酶转化工艺参数的影响试验

分别以底物浓度(TSS)、pH、酶添加量(U/g蔗糖)、温度和转化作用时间对龙眼果汁中蔗糖含量、蔗糖转化率、低聚果糖生成量和低聚果糖占果汁中总糖的比例的影响进行单因素试验。

底物TSS的影响: TSS分别取10、20、30、40、50和60 °Brix,其他因素取值:酶添加量9 U/g、底物pH 6.0、温度55 °C下反应时间5 h。

pH的影响:用柠檬酸调不同的pH值,分别为4.0、5.0、6.0、7.0、8.0,其他因素取值:酶添加量9 U/g、底物TSS 30 °Brix、55 °C下转化反应5 h。

酶添加量的影响:根据底物中蔗糖的质量设置不同的酶添加量(即每克蔗糖对应的酶活力单位U:0.6、1.2、2.4、6.0、9.0和12.0 U/g),其他因素取值:pH 6.0、温度55 °C、底物TSS 30 °Brix、反应时间5 h。

温度的影响:设置不同的作用温度35、45、55、65和75 °C,其他因素取值:酶添加量9 U/g、底物TSS

30 °Brix、底物pH 6.0、反应时间5 h。

时间的影响：设置不同的转化作用时间0、1、3、5、7、9 h，其他因素取值：酶添加量9 U/g、底物TSS 30 °Brix，pH 6.0、温度55 °C。

#### 1.4 果汁中的糖分的分析方法

参照胡志群等<sup>[28]</sup>人的测定方法，采用高效液相色谱仪测定果汁中蔗糖、葡萄糖、果糖、低聚果糖等糖分组成及各组分含量，具体参数条件如下：

高效液相色谱分析条件：选用岛津LC-20AT高效液相色谱仪，配有RID示差检测器，色谱柱为NH2P-50 4E氨基柱（4.6 mm×250 mm），流动相为乙腈（V）：水（V）=70:30，流速为1 mL/min，柱温30 °C，进样量10 μL。标准曲线：配制系列浓度的蔗糖、葡萄糖、果糖、GF<sub>2</sub>、GF<sub>3</sub>、GF<sub>4</sub>标准溶液，通过液相色谱分析测定，制定标准物浓度与峰面积关系的标准曲线。

样品处理：准确移取龙眼果汁样品6 mL于100 mL容量瓶中，加入80%（体积比）的乙醇80 mL，在超声波振荡器中处理30 min，3500 r/min离心40 min，收集上清液，沉淀重复用同量的乙醇及超声波处理1~2次，离心收集上清液。合并上清液，真空旋转蒸发至乙醇和水分将近全干，然后用蒸馏水定容至25 mL的容量瓶中，4 °C冰箱中放置过夜，离心取上清液，用0.45 μm微孔滤膜过滤，滤液供分析用。

蔗糖转化率（%）=（酶处理前果汁蔗糖含量-酶处理后果汁蔗糖含量）/酶处理前果汁蔗糖含量×100%。

低聚果糖（FOS）含量=蔗果三糖（GF<sub>2</sub>）+蔗果四糖（GF<sub>3</sub>）+蔗果五糖（GF<sub>4</sub>），单位为mg/mL。

低聚果糖（FOS）比例（%）=低聚果糖含量/总糖含量×100%。

总糖含量=蔗糖含量+葡萄糖含量+果糖含量+低聚果糖含量，单位：mg/mL。

#### 1.5 数据处理

采用SPSS16.0和Excel 2010软件进行数据分析和作图，组间均值比较用单因素方差分析（One-Way ANOVA）和Tukey's两两比较分析，结果用平均值±标准差表示，平均显著水平为 $p < 0.05$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 底物TSS对酶转化龙眼果汁中产物的影响

在酶添加量9 U/g、pH 6.0、温度55 °C下反应时间5 h，设置不同的底物TSS（10、20、30、40、50和60

°Brix），探讨底物TSS不同对龙眼果汁中蔗糖的转化和生成低聚果糖产量的影响，结果如图1。由图可知，随着底物浓度的提高，经过酶的作用转化了部分蔗糖，生成低聚果糖的量会显著增加（ $p < 0.05$ ）。底物浓度从40 °Brix提高到60 °Brix，虽然低聚果糖含量也明显增加，但果汁中的蔗糖含量因浓缩的原因随浓缩倍数的增加而增加，同时蔗糖的转化率显著降低（ $p < 0.05$ ），低聚果糖占果汁中的总糖比例并没有提高。因此，考虑到实际操作，龙眼果汁的底物TSS选择在30~40 °Brix为较适合。

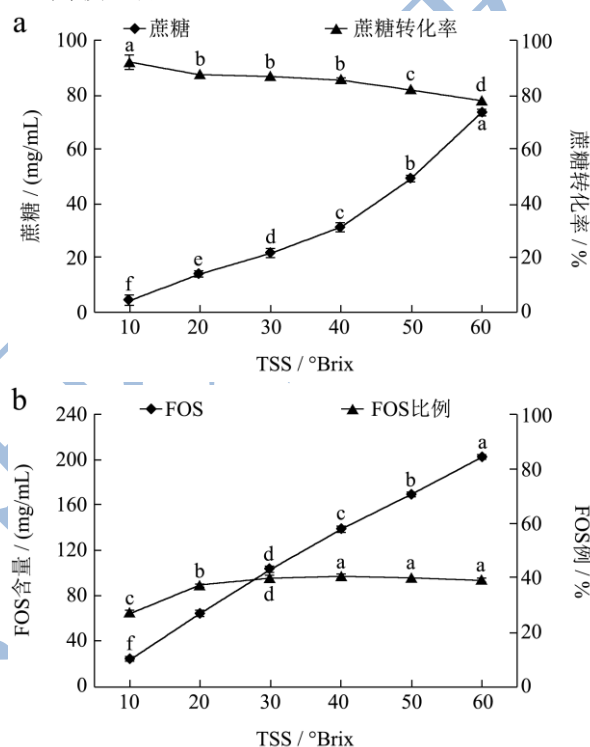


图1 底物TSS对龙眼果汁中蔗糖转化(a)和FOS产量(b)的影响

Fig.1 Influence of TSS on sucrose conversion and FOS production in longan juice

注：同一系列数据上带不同小写字母表示处理间差异显著， $p < 0.05$ 。

### 2.2 pH对酶转化龙眼果汁中产物的影响

在酶添加量9 U/g、底物TSS 30 °Brix、55 °C下转化反应5 h，设置pH 4.0、5.0、6.0、7.0、8.0，探讨不同pH值对龙眼果汁中蔗糖的转化和低聚果糖产量的影响。结果如图2所示。在pH 5.0~6.0范围，蔗糖含量明显减少，转化率达最大值，在pH 5.0~7.0范围内，低聚果糖的产量及其占总糖比例达最大值，呈现先上升后下降的趋势，在pH < 5.0和pH > 7.0的范围，蔗糖转化率、低聚果糖含量及其占总糖的比例显著降低（ $p < 0.05$ ）。据参考文献<sup>[29]</sup>报道果糖的转移酶的最适pH是5.5~6.5，当pH > 7.0之后果糖基转移酶的活性受到

抑制,蔗糖转化率明显降低,底物中蔗糖含量较高。考虑龙眼果汁自身的pH和果糖基转移酶的酶学特性,选择pH 6.0较适合。

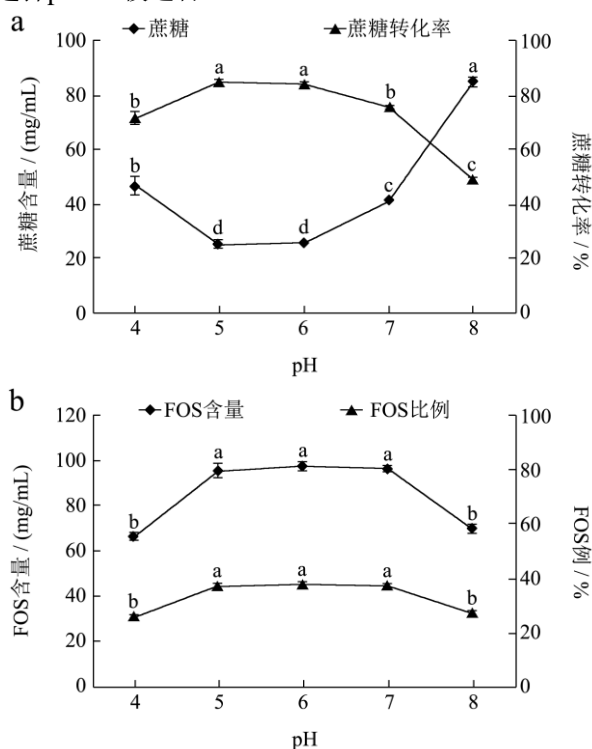


图2 不同pH对龙眼果汁中蔗糖的转化(a)和FOS产量(b)的影响

Fig.2 Influence of pH on sucrose conversion and FOS production in longan juice

注:同一系列数据上带不同小写字母表示处理间差异显著,  $p < 0.05$ 。

### 2.3 酶添加量对酶转化果汁中产物的影响

以果汁中蔗糖的含量为基准,根据果汁中蔗糖的质量设置不同的酶添加量(即每克蔗糖对应的酶活力单位U: 0.6、1.2、2.4、6.0、9.0和12.0 U/g),在pH 6.0、温度55 °C、底物TSS 30 °Brix、反应时间5 h下,研究酶添加量对龙眼果汁中蔗糖的转化和低聚果糖产量的影响,结果见图3。

如图3中所示随着酶添加量的增加,果汁中蔗糖含量显著降低 ( $p < 0.05$ ),同时低聚果糖的产量会迅速增加,在添加量为9~12 U/g时,蔗糖转化率、低聚果糖含量及其占总糖的比例达到最大值。根据酶促反应作用,当底物浓度大大超过酶浓度时,酶的反应速度与酶浓度成正比,但当底物与酶的活力中心结合饱和后,反应速度就不再增加<sup>[30]</sup>。因此在酶添加量较少时随着酶添加量的增加,低聚果糖生成量会迅速增加,但酶添加量在9 U/g以上时,蔗糖转化率和低聚果糖生成量已没有显著增加。因此,酶的添加量范围在9~12 U/g为佳。

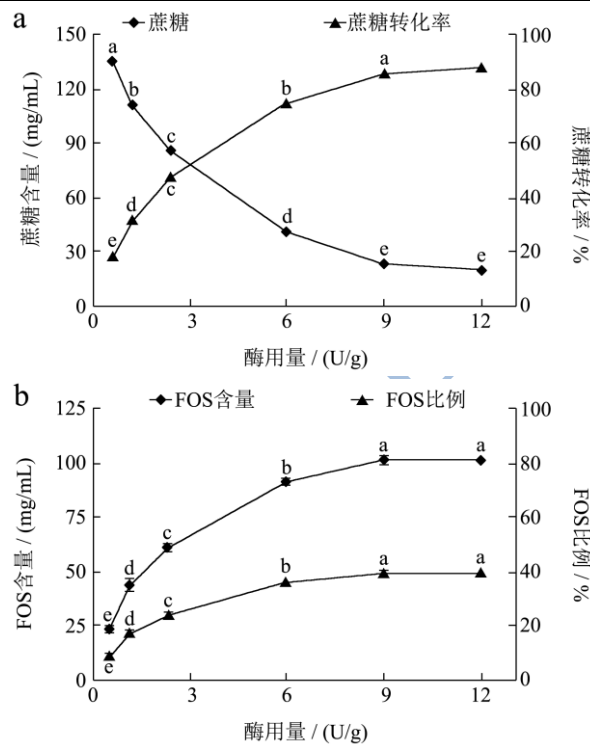


图3 酶添加量对龙眼果汁中蔗糖转化(a)和FOS产量(b)的影响

Fig.3 Influence of enzyme concentration on sucrose conversion and FOS production in longan juice

注:同一系列数据上带不同小写字母表示处理间差异显著,  $p < 0.05$ 。

### 2.4 温度对酶转化果汁中产物的影响

在酶添加量9 U/g、底物TSS 30 °Brix、pH 6.0、反应时间5 h下,设置不同的温度(35、45、55、65和75 °C),探讨不同的温度对龙眼果汁中蔗糖的转化和低聚果糖产量的影响,结果见图4。由图4可知,随着反应温度从35 °C升高至55 °C,果汁中蔗糖显著减少,转化率显著提高,低聚果糖的含量及其比例显著增加达到最大值。当温度从65 °C提高至75 °C时,蔗糖的转化明显受到抑制,低聚果糖的含量及其比例也显著下降。这说明果糖基转移酶在45~65 °C的温度范围内热稳定性良好,但在75 °C的条件下活性明显受到抑制。不同来源的果糖基转移酶热稳定性及最适温度会有所不同。

余轩等<sup>[31]</sup>研究米曲霉来源的果糖基转移酶发现其最适温度范围是20~50 °C,当温度高于70 °C时酶活基本全部丧失,李慧娟等<sup>[32]</sup>研究了耶氏酵母细胞来源的果糖基转移酶发现其热稳定温度范围是45~55 °C,且最适温度是45 °C。王一恬等<sup>[33]</sup>将黑曲霉YZ59果糖基转移酶的基因表达达到酿酒酵母细胞上,生产出的果糖基转移酶最适反应温度为55 °C。本研究所用果糖基转移酶来源于棘孢曲霉菌株发酵,与上述研究相比其具

有更广泛的热稳定范围。综上所述，酶转化温度选择为55℃较合适。

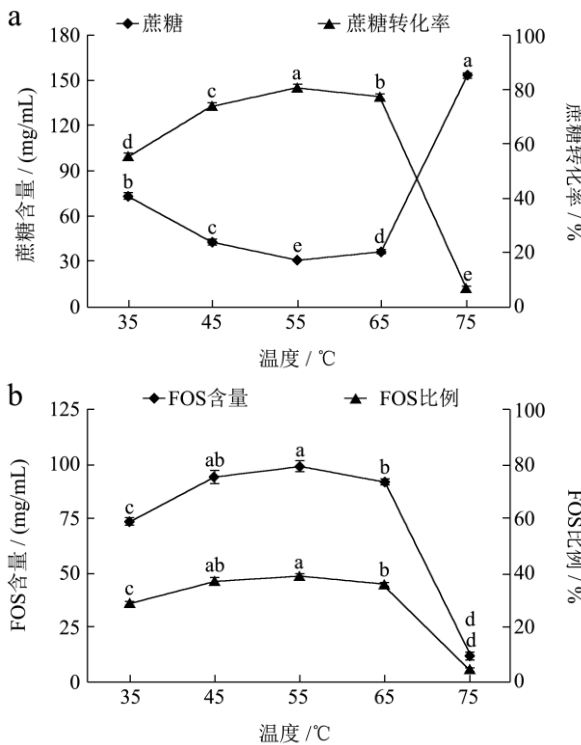


图4 不同温度对龙眼果汁中蔗糖转化(a)和FOS产量(b)的影响  
Fig.4 Influence of temperature on sucrose conversion and FOS production in longan juice

注:同一系列数据上带不同小写字母表示处理间差异显著,  $p < 0.05$ 。

### 2.5 反应时间对酶转化果汁中产物的影响

在酶添加量9 U/g、底物TSS 30°Brix, pH 6.0、温度55℃下,设置不同的转化反应时间下(0、1、3、5、7、9 h),探讨反应时间对龙眼果汁中蔗糖的转化和生成低聚果糖产量的影响,结果见图5。在反应初期至5 h,随着反应时间的延长果汁中的蔗糖含量显著降低,蔗糖转化率迅速提高,显著生成低聚果糖 ( $p < 0.05$ )。反应至7 h后,随时间的增加,蔗糖含量和蔗糖转化率变化不显著,低聚果糖含量及其比例趋于稳定。酶处理时间选择5~9 h较合适。

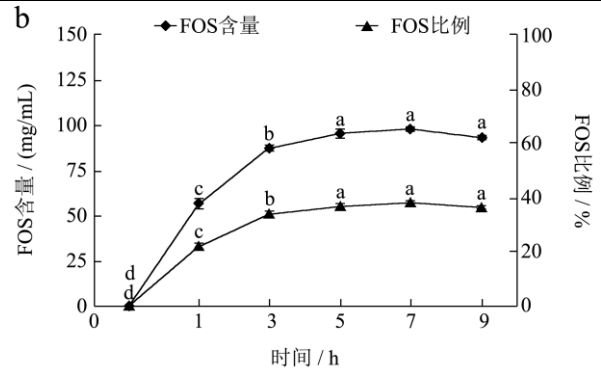
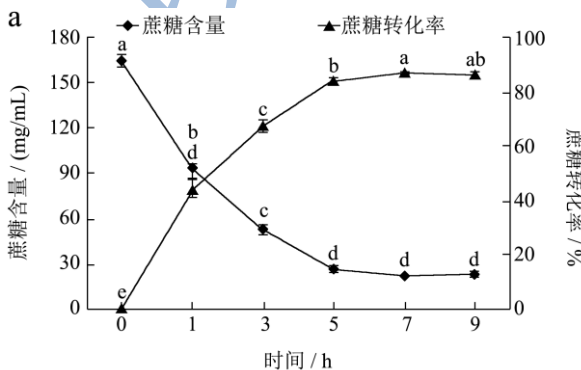


图5 酶处理时间对龙眼果汁中蔗糖转化(a)和FOS产量(b)的影响

Fig.5 Influence of reaction time on sucrose conversion and FOS production in longan juice

注:同一系列数据上带不同小写字母表示处理间差异显著,  $p < 0.05$ 。

### 2.6 酶处理对果汁中糖组分的影响

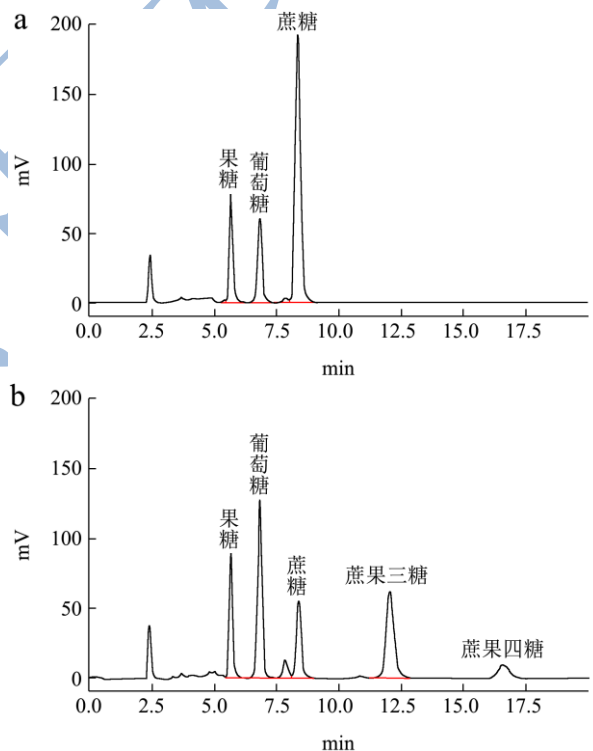


图6 酶转化前后龙眼果汁中单糖、蔗糖及低聚糖组成的液相色谱图

Fig.6 The liquid chromatogram of monosaccharides, sucrose and oligosaccharides in longan juice before and after enzymatic treatment

注:(a)为酶转化之前的龙眼果汁,(b)为酶转化之后的龙眼果汁。

基于单因素实验结果,选取底物总可溶性固形物为30°Brix龙眼果汁,酶添加量9 U/g, pH 6.0,在55℃下处理7 h的样品,采用高效液相色谱法对酶处理前后

的龙眼果汁中单糖、蔗糖和低聚果糖等组分进行分析,结果见表1和图6。

结果表明,酶转化前底物TSS为30 °Brix的龙眼浓缩果汁中以蔗糖为主,含量为164.36 mg/mL,果糖的含量为42.52 mg/mL、葡萄糖的含量为49.27 mg/mL,没有检测到低聚果糖。酶转化7 h所得龙眼果汁中蔗糖的含量显著减少至22.34 mg/mL,果糖的含量为37.73 mg/mL,葡萄糖的含量为98.22 mg/mL,检测到蔗果三糖和蔗果四糖,含量分别为70.50 mg/mL和27.38 mg/mL,低聚果糖含量为97.88 mg/mL。结果表明,经酶转化之后龙眼果汁中蔗糖的含量显著减少了

86.41%,新生成的低聚果糖占果汁中总糖的比例为38.21%。同时值得注意的是果汁中葡萄糖含量也会增加。Roberto等<sup>[34]</sup>人用一种商业酶转化蔗糖制备低聚果糖,也得到了类似结果,随着反应的进行葡萄糖会积累,且葡萄糖积累到一定量之后会抑制低聚果糖的生成。因此,后续的研究工作需要考虑降低果汁中葡萄糖的含量,使果汁中的低聚果糖含量和比例得到进一步的提高。当然,龙眼果汁在55 °C处理7 h,除了糖组分产生变化外,因美拉德反应,颜色和风味等感官指标会发生变化,如颜色加深,显现出干制龙眼的香味物质,有待进一步研究。

表1 酶处理前后的龙眼果汁中糖组分的变化和含量

Table 1 The sugars composition in longan juice before and after enzymatic treatment

| 酶处理时间/h | 含量/(mg/mL)               |                         |                         |            |            |            |
|---------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|------------|------------|------------|
|         | 蔗糖                       | 果糖                      | 葡萄糖                     | 蔗果三糖(GF2)  | 蔗果四糖(GF2)  | 低聚果糖       |
| 0       | 164.36±4.35 <sup>a</sup> | 42.52±1.37 <sup>a</sup> | 49.27±2.09 <sup>b</sup> | ND         | ND         | ND         |
| 7       | 22.34±0.84 <sup>b</sup>  | 37.73±1.60 <sup>b</sup> | 98.22±1.46 <sup>a</sup> | 70.50±0.27 | 27.38±0.99 | 97.88±1.20 |

注: ND: 未检出; 同一系列数据上带不同小写字母表示处理间差异显著,  $p < 0.05$ 。

### 3 结论

底物浓度(TSS)、pH、酶添加量、温度和酶处理时间等单因素对龙眼果汁中蔗糖和低聚果糖含量有显著影响,其中较适合的酶转化条件为:龙眼果汁的底物TSS为30~40 °Brix, pH 6.0,酶的添加量范围在9~12 U/g,酶转化温度55 °C,酶处理时间5~9 h。在此条件范围之内,果糖基转移酶能够有效将龙眼果汁中的蔗糖转化生成低聚果糖,且使蔗糖的转化率和低聚果糖比例分别能够保持在80%以上和38%以上;HPLC分析结果表明30 °Brix的龙眼浓缩果汁,酶转化前蔗糖含量为164.36 mg/mL、果糖的含量为42.52 mg/mL、葡萄糖的含量为49.27 mg/mL,没有检测到低聚果糖,在酶添加量9 U/g、pH 6.0、55 °C下转化7 h的龙眼果汁,蔗糖显著降低,其含量为22.34 mg/mL,果糖的含量为37.73 mg/mL,葡萄糖含量为98.22 mg/mL,蔗果三糖含量为70.50 mg/mL,蔗果四糖含量为27.38 mg/mL,低聚果糖的总含量为97.88 mg/mL,占果汁中总糖的38.21%。利用果糖基转移酶处理果汁制备一种低蔗糖(低热量)且富含低聚果糖的具有潜在益生元作用的功能性龙眼果汁。

### 参考文献

[1] 黄美香, 林河通, 李辉, 等. 龙眼果实加工技术研究进展[J]. 包装与食品机械, 2012, 2: 48-52  
HUANG Mei-xiang, LIN He-tong, LI Hui, et al. Advances in the researches of processing technologies of *Longan* fruits [J].

Packaging and Food Machinery, 2012, 2: 48-52

- [2] 陈水渐, 姚兆奇, 万忠, 等. 2015年广东龙眼产业发展形势与对策建议[J]. 广东农业科学, 2016, 4: 25-28  
CHEN Shui-jian, YAO Zhao-qi, WAN Zhong, et al. Development situation and countermeasures of Guangdong *Longan* industry in 2015 [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2016, 4: 25-28
- [3] 黄建蓉, 李琳, 李冰. 龙眼肉生理功效和活性成分的研究进展[J]. 食品工业科技, 2007, 3: 221-224  
HUANG Jianrong, LI Lin, LI Bing. Research progress on physiological functions and active components of *Longan* meat [J]. Science and Technology of Food Industry, 2007, 3: 221-224
- [4] 蓝海波, 温亚州, 杨光美, 等. 龙眼多糖树脂脱色除蛋白工艺优化[J]. 热带作物学报, 2016, 8: 1558-1566  
LAN Haibo, WEN Yazhou, YANG Guangmei, et al. Optimization of decoloration and deproteinization technology for polysaccharides from *Longan* [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 8: 1558-1566
- [5] Liu X, Luo Y, Zha C, et al. Rheological properties of polysaccharides from *Longan* (*Dimocarpus longan* Lour.) fruit [J]. International Journal of Polymer Science, 2015, 2015: 1-5
- [6] Rangkadilok N, Worasuttayangkum L, Bennett R. Identification and quantification of polyphenolic compounds in *Longan* (*Euphoria longana* Lam.) fruit [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(5): 1387-1392

- [7] Zhou M, Ndeurumio K H, Zhao L. Impact of precooling and controlled-atmosphere storage on gamma-aminobutyric acid (GABA) accumulation in *Longan* (*Dimocarpus longan* Lour.) fruit [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(33): 6443-6450
- [8] 李升锋,刘学铭,吴继军,等.龙眼果肉的研究与开发[J].福建果树,2004,2:12-15  
LI Shengfeng, LIU Xueming, WU Jijun, et al. Research and development of *Longan* pulp [J]. Fujian Fruits, 2004, 2: 12-15
- [9] Yang B, Jiang Y, Shi J, et al. Extraction and pharmacological properties of bioactive compounds from *Longan* (*Dimocarpus longan* Lour.) fruit-A review [J]. Food Research International, 2011, 44(7): 1837-1842
- [10] Rangkadilok N, Sithimonchai S, Worasuttayangkum L, et al. Evaluation of free radical scavenging and antityrosinase activities of standardized *Longan* fruit extract [J]. Food and Chemical Toxicology, 2007, 45(2): 328-336
- [11] Meng F, Ning Y, Qi J, et al. Structure and antitumor and immunomodulatory activities of a water-soluble polysaccharide from *Dimocarpus Longan* Pulp [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2014, 15(3): 5140-5162
- [12] Yi Y, Zhang M, Liao S, et al. Structural features and immunomodulatory activities of polysaccharides of *Longan* pulp [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(1): 636-643
- [13] Zhu S, Zhou B, Liu Q, et al. Effect of *Longan* polysaccharides on proliferation and phenotype maintenance in rabbit articular chondrocytes in vitro [J]. Medical & Biological Engineering & Computing, 2016, 54(4): 607-617
- [14] Johansson S, Diehl B, Christakopoulos P, et al. Oligosaccharide synthesis in fruit juice concentrates using a glucansucrase from *Lactobacillus reuteri* 180 [J]. Food and Bioproducts Processing, 2016, 98: 201-209
- [15] Dominguez A L, Rodrigues L R, Lima N M, et al. An overview of the recent developments on fructooligosaccharide production and applications [J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(2): 324-337
- [16] 龙晓蕾,李梓民,周月婵,等.低聚果糖口服液对人体肠道菌群的影响[J].应用预防医学,2016,3:227-229  
LONG Xiaolei, LI Zimin, ZHOU Yuechan, et al. Effect of oligofructose oral liquid on human intestinal flora [J]. Journal of Applied Preventive Medicine, 2016, 3:227-229
- [17] Costa G T, de Abreu G C, Bastos Guimaraes A B. Fructo-oligosaccharide effects on serum cholesterol levels. An overview [J]. Acta Cirurgica Brasileira, 2015, 30(5): 366-370
- [18] Bryk G, Coronel M Z, Lugones C, et al. Effect of a mixture of GOS/FOS® on calcium absorption and retention during recovery from protein malnutrition: experimental model in growing rats [J]. European Journal of Nutrition, 2016, 55(8): 2445-2458
- [19] Kumar V P, Prashanth K V H, Venkatesh Y P. Structural analyses and immunomodulatory properties of fructo-oligosaccharides from onion (*Allium cepa*) [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 117: 115-122
- [20] Khanvilkar S S, Arya S S. Fructooligosaccharides: applications and health benefits A review [J]. AGRO FOOD INDUSTRY HI-TECH, 2015, 26(6): 8-12
- [21] 陈晓强.印度研究表明:果汁饮料中可添加低聚果糖取代蔗糖[N].中国食品报,2010-06-01(005)  
CHEN Xiaoqing. Indian research shows that fructo-oligosaccharides can be added in juice drinks instead of sucrose[N]. China Food News,2010-06-01(005)
- [22] Ribeiro Da Silva L M, Lima A D S, Maia G A. Development of mixed beverages made of caja (*Spondias mombin* L.) and cashew apple (*Anacardium occidentale*) added of Fructooligosaccharides and Inulin [J]. Archivos Latinoamericanos de Nutricion, 2011, 61(2): 209-215
- [23] Butt A Y M S, Qaisrani M Y T B. Compositional analysis of developed whey based fructooligosaccharides supplemented low-calorie drink [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(3): 1849-1856
- [24] Fontes C P M L, Da Silva J L A, Rabelo M C, et al. Development of low caloric prebiotic fruit juices by dexransucrase acceptor reaction [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(11): 7272-7280
- [25] [25] Nguyen T T H, Seo Y, Cho J, et al. Synthesis of oligosaccharide-containing orange juice using glucansucrase [J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2015, 20(3): 447-452
- [26] Vega-Paulino R J, Zúñiga-Hansen M E. Potential application of commercial enzyme preparations for industrial production of short-chain fructooligosaccharides [J]. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic, 2012, 76: 44-51
- [27] GB/T 23528-2009,低聚果糖[S]  
GB/T 23528-2009, Fructooligosaccharide [S]
- [28] 胡志群,王惠聪,胡桂兵.高效液相色谱测定荔枝果肉中的糖、酸和维生素C[J].果树学报,2005,5:582-585  
HU Zhiqun, WANG Huicong, HU Guibing. Measurement of

- sugars, organic acids and vitamin C in *Litchi* fruit by high performance liquid chromatography [J]. *Journal of Fruit Science*, 2005, 5: 582-585
- [29] 唐江涛,覃益民,杨梅,等.米曲霉GX0015 $\beta$ -果糖基转移酶分离纯化及酶学性质研究[J].*广西轻工业*,2007,10:7-8  
TANG Jiangtao, TAN Yimin, YANG Mei, et al. Separation, purification and enzymatic properties of  $\beta$ -fructosyltransferase from *Aspergillus oryzae* GX0015 [J]. *Guangxi Journal of Light Industry*, 2007, 10: 7-8
- [30] 阚健全.食品化学[M].北京:中国农业大学出版社,2008  
KAN Jianquan. *Food Chemistry* [M].Beijing: China Agricultural University Press, 2008
- [31] 余轩.米曲霉果糖基转移酶的分离纯化与催化活性研究[D].郑州:郑州轻工业学院,2015  
YU Xuan. Study on the purification of fructosyltransferase from *Aspergillus oryzae* and analysis of its catalytic activity [D]. Zhengzhou:Zhengzhou Institute of Light Industry, 2015
- [32] 李慧娟,邵先祥,孙云鹏,等.蔗糖:蔗糖-1-果糖基转移酶的表面展示及酶学性质分析(英文)[J].*微生物学通报*,2014,11: 2190-2197  
LI Huijuan, SHAO Xianxiang, SUN Yunpeng, et al. Expression and characterization of surface-displayed sucrose:sucrose 1-fructosyltransferase on *Yarrowia lipolytica* cells [J]. *Microbiology China*, 2014, 11: 2190-2197
- [33] 王一恬,张玲,沈微,等.果糖基转移酶在酿酒酵母中异源表达及酶学性质分析[J].*食品与发酵工业*,2015,41(6):24-28  
WANG Yitian, ZHANG Ling, SHEN Wei,et al. The heterologous expression and enzymatic properties of fructosyltransferase in *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2015, 41(6): 24-28
- [34] Vega R, Zuniga-Hansen M E. A new mechanism and kinetic model for the enzymatic synthesis of short-chain fructooligosaccharides from sucrose [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2014, 82: 158-165