

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.04.008

熊婧, 魏嘉怡, 杜雅欣, 等. 不同糖醇对黄心甘薯浓浆品质的影响[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(4): 55-62.

XIONG J, WEI J Y, DU Y X, et al. Effect of different sugar alcohols on quality of orange sweet potato puree[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(4): 55-62.

不同糖醇对黄心甘薯浓浆品质的影响

熊婧¹, 魏嘉怡¹, 杜雅欣¹, 李尚蔚¹, 肖建辉^{1,2}✉

(1. 江西农业大学 食品科学与工程学院, 江西 南昌 330045;

2. 江西省薯芋生物学重点实验室, 江西 南昌 330045)

摘要: 分别添加不同糖醇(麦芽糖醇、赤藓糖醇、木糖醇、山梨糖醇)制作低糖黄心甘薯浓浆, 研究其对黄心甘薯浓浆流变特性、贮藏期色泽、 β -胡萝卜素含量及消化特性的影响。结果表明, 所有样品均为假塑性流体, 经 Power-law 模型拟合, 麦芽糖醇与赤藓糖醇显著降低了薯浆粘度 ($P < 0.05$), 与空白组相比体系更均匀。经过杀菌与贮藏, 糖醇能够有效减少 β -胡萝卜素的损失, 起到稳定色泽的作用 (色差值 $\Delta E < 4$)。21 d 贮藏后, 麦芽糖醇组中 β -胡萝卜素含量为 504.66 mg/kg, 相比空白组, 显著提高了 35.54%, 使抗氧化活性 (DPPH· 和 ABTS⁺· 清除率) 也有所提高。经体外消化后, 麦芽糖醇与山梨糖醇组中 β -胡萝卜素的释放均高于 85%。综合考虑, 麦芽糖醇为开发低糖黄心甘薯浓浆的最佳选择。

关键词: 甘薯浓浆; 功能性糖醇; 流变特性; β -胡萝卜素; 贮藏品质

中图分类号: TS215; S-3 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)04-0055-08

Effect of Different Sugar Alcohols on Quality of Orange Sweet Potato Puree

XIONG Jing¹, WEI Jia-yi¹, DU Ya-xin¹, LI Shang-wei¹, XIAO Jian-hui^{1,2}✉

(1. College of Food Science and Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Potato Biology, Nanchang, Jiangxi 330045, China)

Abstract: In this study, different sugar alcohols (maltitol, erythritol, xylitol, sorbitol) were added to make low sugar orange sweet potato puree. The effects of different sugar alcohols on rheological properties, storage color, β -carotene content and digestive properties of orange sweet potato puree were investigated. The results showed that all samples were pseudoplastic fluid. After Power-law model fitting, maltitol and erythritol significantly reduced the viscosity of sweet potato puree ($P < 0.05$), and the system was more uniform than that of the blank group. During sterilization and storage, sugar alcohols can effectively reduce the loss of β -carotene and thus stabilize the color (color difference $\Delta E < 4$). After 21 days of storage, β -carotene content of maltitol group was 504.66 mg/kg, which was 35.5% higher than that of blank group, and corresponding antioxidant activity (clearance rate of DPPH· and ABTS⁺·) was also increased. After

收稿日期: 2023-04-11

基金项目: 江西农业大学 2022 年大学生创新创业训练计划项目 (202210410030)

Supported by: 2022 Innovation and Entrepreneurship Training Program for College Students of Jiangxi Agricultural University (No. 202210410030)

作者简介: 熊婧, 女, 2002 年出生, 在读本科生, 研究方向为食品科学与工程。E-mail: xjqyr1220@163.com

通讯作者: 肖建辉, 男, 1983 年出生, 博士, 教授, 研究方向为农产品加工及贮藏工程。E-mail: xiaojh666666@jxau.edu.cn

digestion in vitro, the release of β -carotene in sweet potato puree with maltitol and sorbitol were higher than 85%. In conclusion, maltitol is the optimal choice for developing low-sugar sweet potato puree.

Key words: sweet potato puree; functional sugar alcohol; rheological properties; β -carotene; storage quality

黄心甘薯是 β -胡萝卜素的良好来源。 β -胡萝卜素作为膳食中重要的维生素 A 原, 具备较强的抗氧化活性, 在抗肿瘤、提高免疫力及维持视力等方面具有显著作用^[1]。目前市场上常见的甘薯加工食品品种较少, 主要以干制为主, 附加值不高。

浆制作为一种加工方式, 广泛运用于谷物等的加工。谷物浓浆指的是总固形物和总膳食纤维较多的谷物类饮料。目前甘薯浆制品主要是打浆后制成甘薯汁饮料, 有甘薯原汁饮料, 以及甘薯果肉悬浮饮料^[2]。不仅可以大批处理甘薯鲜果, 还可以很好地保留营养成分。具有营养更易吸收、口感醇厚的特点, 但多存在高脂高糖的特性。近年来, 长期高糖的摄入所带来的各种健康问题如龋齿等已引起广泛关注。糖醇作为一种天然甜味剂, 正因其良好的感官特性及无血糖负担等优势, 已成为主流的糖类替代品。目前, 开发低糖产品备受国内外关注, 如郭楠楠等^[3]以柠檬、百合花、木糖醇研制低糖饮料, Nistor 等^[4]以天然甜味剂开发无糖沙棘果酱, 但尚未见对低糖黄心甘薯浓浆的相关研究报道。

因此, 本研究选用黄心甘薯作为原料, 添加麦芽糖醇、赤藓糖醇、木糖醇与山梨糖醇四种功能性糖醇于黄心甘薯的制浆工艺中, 制备低糖黄心甘薯浓浆, 并分析不同糖醇对黄心甘薯浓浆持水性、持油性、流变特性及贮藏期色泽、 β -胡萝卜素含量及其抗氧化活性与消化特性的影响, 以为低糖黄心甘薯浓浆的开发提供理论基础, 从而进一步推动甘薯产业的发展。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜黄心甘薯(普薯 32 号): 产自福建, 市售; 麦芽糖醇、赤藓糖醇、木糖醇、山梨糖醇: 山东省德州国家高新技术产业开发区; 胃蛋白酶(3 200 U/mg)、猪胰酶(0.35 U/mg): 阿拉丁试剂(上海)有限公司; 糖化酶(100 U/g)、1, 1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、2, 2-联氨基双(3-

乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐(ABTS)、 β -胡萝卜素标准品(纯度 $\geq 98\%$): 北京索莱宝科技有限公司; 正己烷、无水乙醇均为分析纯: 西陇科技股份有限公司。

2100 型&UV2100 型可见分光光度计: 上海龙尼柯仪器有限公司; Multiskan MK3 酶标仪: 美国 Thermo Labsystem 公司; SHA-C 水浴恒温振荡器: 常州国宇仪器制造有限公司; ColorQuest XE 色差分析仪: 美国 HunterLab 公司; DD5 台式大容量离心机: 湖南赫西仪器装备有限公司; LC-10N-50D 型冷冻干燥机: 北京博医康实验仪器有限公司; DHR-2 流变仪: 美国 TA 公司。

1.2 黄心甘薯浓浆的制备

挑选→去皮切块→蒸煮→打浆→装袋→杀菌→冷却

操作要点: (1) 挑选: 挑选新鲜无病虫害的黄心甘薯; (2) 去皮切块: 切为 $1 \times 1 \times 1$ cm 薯块; (3) 蒸煮: 沸水蒸煮 30 min; (4) 打浆: 加入鲜薯质量 65% 的纯净水与 10% 的不同糖醇(麦芽糖醇、赤藓糖醇、木糖醇、山梨糖醇)所混合的糖液; (5) 杀菌: 高压蒸汽灭菌锅中 121°C 下灭菌 7 min; (6) 贮藏: 37°C 下分别贮藏 7、14 和 21 d。

其中空白对照组: 用纯净水等量代替打浆中加入的糖醇, 其他同上述工艺。

1.3 物化特性测定

1.3.1 持水性

取质量为 M_0 的冻干粉末样品加入离心管中, 称量离心管和样品的总质量记作 M_1 , 按料液比 $1:20$ (g/g) 加入蒸馏水, 混匀, 振荡 30 min, 3 000 r/min 离心 25 min, 倒置沥干水分后离心管和样品的总质量记作 M_2 。按下式计算持水性:

$$\text{持水性}(g/g) = \frac{M_2 - M_1}{M_0}$$

1.3.2 持油性

取质量为 M_0 的冻干粉末样品加入离心管中, 称量离心管和样品的总质量记作 M_1 , 按料

液比 1 : 10 (g/g) 加入大豆油, 混匀, 振荡 30 min, 3 000 r/min 离心 15 min, 倒置沥干油分后离心管和样品的总质量记作 M_2 。按下式计算持油性:

$$\text{持油性}(g/g) = \frac{M_2 - M_1}{M_0}$$

1.3.3 流变特性

取适量贮藏 7 d 的各组甘薯浓浆样品置于 PP-40 平板上, 设置测量间隙为 1 mm, 去除边缘多余样品。

动态粘弹性测定^[5]: 应变扫描: 频率设置为 1 Hz, 在应变范围 0.1%~10% 内探究甘薯浓浆的线性粘弹区 (LVER)。在本实验中, 固定应变为 0.5%。频率扫描: 温度设置为 25 °C, 在频率 0.1~100 rad/s 内测定甘薯浓浆的储能模量 G' 与损耗模量 G'' 的变化。

剪切粘度的测定: 对样品进行剪切扫描, 温度设置为 25 °C, 剪切速率控制在 0.1~10 s^{-1} 范围内变化, 测定甘薯浓浆的表观粘度随剪切速率的变化。采用 Power-law 模型按下式对流变曲线进行拟合:

$$\sigma = k \cdot \varepsilon^n$$

式中: σ -表观粘度 (Pa), ε -剪切速率 (s^{-1}), k -粘度系数, n -流动特性指数

1.4 色泽测定

分别取杀菌前后及贮藏期间黄心甘薯浓浆样品, 用色差仪测定色泽参数 L^* 、 a^* 、 b^* 值。设定杀菌前为基准组, 其色泽参数为 L_0 、 a_0 、 b_0 , 按下式计算色差值 (ΔE):

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2}$$

1.5 贮藏期甘薯浓浆中 β -胡萝卜素总含量的测定

1.5.1 β -胡萝卜素标准曲线的测定

精确称取 2.5 mg β -胡萝卜素标准样品, 置于 100 mL 棕色瓶中, 用正己烷-无水乙醇 (1 : 1) 定容, 摇匀, 此溶液浓度为 25 $\mu\text{g/mL}$, 分别取适量溶液于 5 mL 棕色瓶中, 用正己烷-无水乙醇 (1 : 1) 定容, 使其浓度分别为 0、2、4、6、8、10、12、14 $\mu\text{g/mL}$, 在 450 nm 处测定吸光度, 绘制标准曲线。

1.5.2 β -胡萝卜素含量的测定

利用有机溶剂提取法与超声辅助法提取 β -

胡萝卜素。称取贮藏期间 1 g 甘薯浓浆样品, 加入正己烷-无水乙醇 (1 : 1) 30 mL, 密封后匀浆, 50 °C 下超声 25 min, 后于 3 000 r/s 离心 15 min, 收集上清液在 450 nm 下测定吸光度, 每个样品重复 3 组实验, 整个过程尽量避光, 按下式计算 β -胡萝卜素含量:

$$\beta\text{-胡萝卜素含量} = \frac{C \cdot V \cdot N}{m \cdot DM}$$

式中: C -将吸光度值代入 β -胡萝卜素标准曲线得到质量浓度 ($\mu\text{g/mL}$); V -有机提取液体积 (mL); N -稀释倍数; m -甘薯浓浆质量 (g); DM -样品中甘薯干基率。

1.6 抗氧化活性的测定

1.6.1 DPPH·清除率测定

取贮藏期间样品的 β -胡萝卜素提取液, 进行 DPPH·清除率测定。精确称取 39.4 mg DPPH, 无水乙醇溶解, 定容为 100 mL 作储备液, 将 DPPH 储备液配制成 7×10^{-5} mol/L 的工作液。取 1 mL 待测样液与 3 mL DPPH 工作液, 混匀, 于室温反应 30 min 后, 在 517 nm 下测定吸光度。DPPH 清除率计算公式如下^[6]:

$$\text{DPPH} \cdot \text{清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_2 - A_1}{A_0}\right) \times 100\%$$

式中: A_0 -未加入提取液时的吸光度; A_1 -提取液在测定波长的吸光度; A_2 -加入提取液时的吸光度。

1.6.2 ABTS⁺·清除率测定

取贮藏期间样品的 β -胡萝卜素提取液, 进行 ABTS⁺·清除率测定。精确称取 38.4 mg 的 ABTS⁺, 溶解于 10 mL 蒸馏水中; 取 6.7 mg 的 $K_2S_2O_8$ 溶解于 10 mL 蒸馏水中; 1 : 1 混匀于室温避光处放置 16~24 h, 得 ABTS⁺·母液; 用无水乙醇稀释, 使其吸光度在 734 nm 下为 0.7 ± 0.02 , 得 ABTS⁺·工作液。取 0.3 mL 待测样液与 1 mL ABTS⁺·工作液, 混匀, 避光静置 30 min 后在 734 nm 下测定吸光度。ABTS⁺·清除率计算公式如下:

$$\text{ABTS}^+ \cdot \text{清除率}(\%) = \frac{A_0 - A_1 - A_2}{A_0} \times 100\%$$

式中: A_0 -未加入提取液时的吸光度; A_1 -提取液在测定波长的吸光度; A_2 -加入提取液时的吸光度。

1.7 体外消化过程中 β -胡萝卜素的释放

取贮藏 7 d 的 1 g 样品冻干粉末, 加入 50 mL PB 缓冲液, 用 1 mol/L HCl 调节 pH 至 2 左右, 加入适量胃蛋白酶液在 37 °C 下模拟胃消化 60 min; 胃消化阶段完成后, 用 1 mol/L NaOH 调节 pH 至 6.5 左右, 加入适量混合酶液 (猪胰酶: 糖化酶=20:1) 在 37 °C 下模拟肠消化 2 h; 分别在第 20、60、90、120、180 min 取消化液, 加入乙醇灭酶。提取并测定消化液中 β -胡萝卜素含量, 操作同 1.5.2。 β -胡萝卜素的释放率计算公式为:

$$\beta\text{-胡萝卜素释放率}(\%) = \frac{\text{溶液中释放的}\beta\text{-胡萝卜素浓度} \times \text{溶液的体积}}{\text{样品中}\beta\text{-胡萝卜素总量}} \times 100\%$$

1.8 数据处理

所有实验均重复 3 次, 数据为 3 次实验结果的平均值。采用 Excel 2019 进行数据的汇总整理, 使用 SPSS 26 软件进行显著性分析, 显著性差异水平为 $P < 0.05$, 运用 Origin Pro 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同糖醇对甘薯浓浆物化特性的影响

2.1.1 不同糖醇对甘薯浓浆持水性的影响

持水性是衡量甘薯浓浆品质的重要指标之一, 感官上反映出甘薯浓浆口感的细腻度、多汁性、柔软性。如图 1 所示, 与空白组相比, 山梨糖醇组的持水性显著增加, 达 4.24 g/g, 赤藓糖醇组持水性显著降低 ($P < 0.05$), 麦芽糖醇组与木

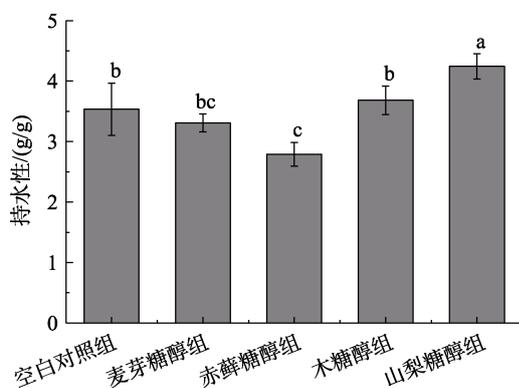


图1 不同糖醇对甘薯浓浆持水性的影响

Fig.1 Effects of different sugar alcohols on water retention of sweet potato puree

糖醇组未见显著性差异。这可能是因为不同糖醇分子中具有羟基数量与活性不同, 进而与水、淀粉和其他分子发生不同程度的相互作用, 其中山梨糖醇、木糖醇羟基数量多, 表现出高的持水性^[7], 而赤藓糖醇为四羟基醇, 结晶度高, 吸湿性偏低, 故持水性较低^[8]。

2.1.2 不同糖醇对甘薯浓浆的持油性影响

持油性主要取决于甘薯浓浆中的蛋白质、加工方式和热处理条件。如图 2 所示, 与空白组相比, 木糖醇和山梨糖醇组的持油性显著提高 ($P < 0.05$)。这可能是因为木糖醇与山梨糖醇羟基数量更多, 易与水分子通过氢键相连, 从而对甘薯浓浆中蛋白质-水的氢键产生了更大的破坏, 使得疏水基暴露出来, 提高甘薯浓浆的持油性, 而麦芽糖醇组的持油性显著降低 ($P < 0.05$), 这与杨恒等^[9]关于不同糖醇对辣条坯体持油性的研究结果一致。

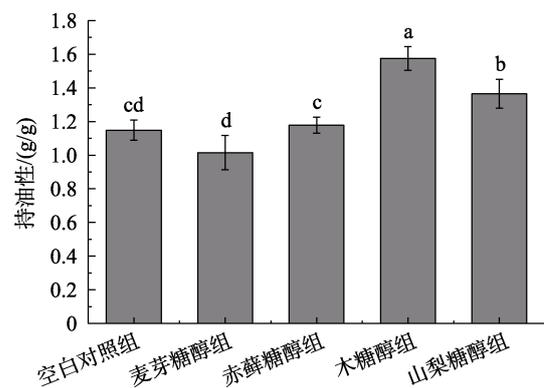


图2 不同糖醇对甘薯浓浆持油性的影响

Fig.2 Effect of different sugar alcohols on oil retention of sweet potato puree

2.2 不同糖醇对甘薯浓浆流变学特性的影响

2.2.1 储能模量 G' 与损耗模量 G''

取贮藏 7 d 的甘薯浓浆样品进行频率扫描。由图 3(A)可知, 在 0.1~100 rad/s 的扫描频率中, 所有样品的 G' 和 G'' 随振荡频率的增加而增加, G' 值始终高于对应的 G'' 值, 说明样品均以弹性性能为主, 具有弱凝胶性质。不同糖醇处理组间的动态流变行为存在差异, 赤藓糖醇和麦芽糖醇组的 G' 和 G'' 均大于空白组, 山梨糖醇和木糖醇组的 G' 和 G'' 基本小于空白组, 这可能主要与杀菌过程中糖醇影响甘薯蛋白变性温度有关。杀菌过程中, 样品温度逐渐升高至稳定为 121 °C, 而甘薯蛋白

的变性温度在 90~100 °C 左右, 在杀菌过程中绝大部分甘薯蛋白已发生变性。蛋白质变性温度受体系中自由水含量及蛋白质分子运动状态的影响^[10], 山梨糖醇和木糖醇组样品的持水力强, 自由水含量较高, 蛋白质分子运动以及分子展开不易受限, 故变性温度较低, 蛋白质分子受热后会发生过快聚集, 导致分子链未完全展开时即发生无规则交联, 形成结构不均匀致密凝胶, 使弹性降低^[11]。

2.2.2 表观粘度

取贮藏 7 d 的甘薯浓浆样品进行剪切扫描。图 3 (B) 和表 1 显示剪切速率在 0.1~10 s⁻¹ 时, 各样品组薯浆的表观粘度。从中可以看出, 各组表观粘度随剪切速率的增大而减小, 表现出假塑

性流体特有的剪切稀化现象。采用 Power-law 模型对样品组流变曲线进行拟合, k 值表征流体的粘度指数, 数值越大越粘稠; n 值表征流体的流动指数, 数值越大流动性越强; R² 表征拟合程度, 越接近 1, 甘薯浓浆体系越稳定, 体系中水分更不易游离出来。结果表明 (如表 1), 麦芽糖醇和赤藓糖醇组的 k 值显著低于空白组 ($P < 0.05$), 表现更为明显的剪切稀化现象; n 值显著高于空白组 ($P < 0.05$), 流动性更强; R² 更接近 1, 体系更稳定。这可能与糖醇影响薯浆中水分的结合能力有关^[12], 麦芽糖醇与赤藓糖醇组持水力较低, 故自由水含量较低, 致其粘度系数小, 水分更不易游离。这与郝月慧^[13]等发现赤藓糖醇处理会显著降低淀粉食品的黏度的研究结果一致。

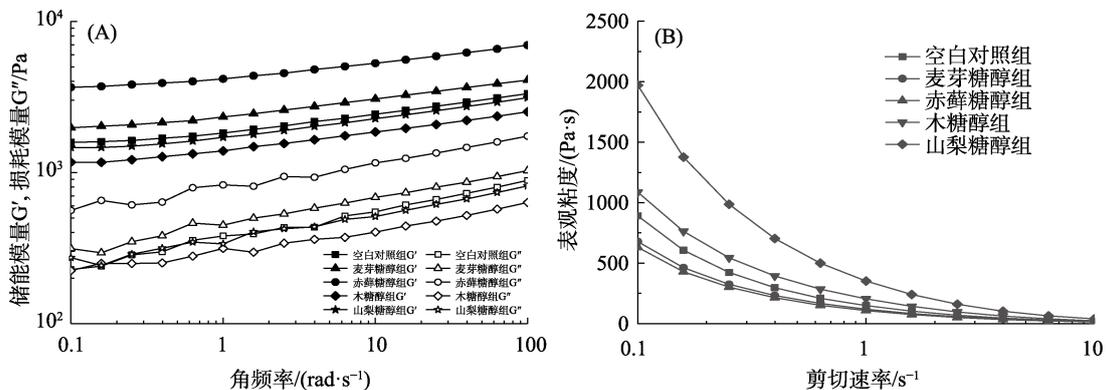


图 3 不同糖醇对甘薯浓浆流变学特性的影响

Fig.3 Effects of different sugar alcohols on the rheological properties of sweet potato puree

表 1 添加不同糖醇的甘薯浓浆流变曲线拟合方程 ($\sigma = k \cdot \dot{\epsilon}^n$) 参数

Table 1 Rheological curve fitting equation ($\sigma = k \cdot \dot{\epsilon}^n$) parameters of sweet potato puree with different sugar alcohols

样品	粘度系数 k	流动特性指数 n	R ²
空白对照组	143.258±2.929 ^c	0.169±0.003 ^c	0.938
麦芽糖醇组	108.102±7.530 ^d	0.191±0.002 ^a	0.941
赤藓糖醇组	103.710±1.533 ^d	0.179±0.002 ^b	0.966
木糖醇组	175.586±16.710 ^b	0.164±0.001 ^c	0.868
山梨糖醇组	326.108±6.259 ^a	0.139±0.007 ^d	0.859

注: 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$).

2.3 不同糖醇对甘薯浓浆贮藏前后色泽的影响

黄心甘薯浓浆色泽会影响消费者的接受程度, 甘薯浓浆色泽越鲜亮纯正, 消费者的接受度越高。低糖黄心甘薯浓浆外观色泽鲜亮, 质地均一较粘稠, 固形物含量高, 入口甘甜有浓郁的黄

心甘薯风味, 口感细腻醇厚, 无颗粒感。如图 4 所示, 与空白对照组相比, 糖醇的添加并不会对甘薯浓浆色泽造成较大影响, 且糖醇组甘薯浓浆的颜色更纯正、浓厚, 呈现出更加饱满的色泽。杀菌与贮藏是食品加工过程中易对食品色泽产生较大影响的关键过程。表 2 中色差值 ΔE 表示杀菌和贮藏对甘薯浓浆色泽变化的影响。从中可以看出, 杀菌对空白对照组 ΔE 值的影响显著高于糖醇组 ($P < 0.05$)。贮藏期间糖醇组与空白组间也存在显著性差异 ($P < 0.05$), 经糖醇处理的甘薯浓浆色泽变化波动更小, 其中麦芽糖醇组 ΔE 值最小, 色泽最为稳定。这主要是因为糖醇结构性质稳定, 不易发生美拉德反应使食物褐变; 另一方面可能是由于糖醇的多羟基结构及形成的氢键对甘薯浓浆中的类胡萝卜素的热稳定性起着重要的作用, 与任顺成等研究结果一致^[14]。综上所述

述, 糖醇处理可以提高黄心甘薯浓浆的色泽稳定性, 对于保护其色泽和营养成分具有积极意义。



图 4 黄心甘薯浓浆样品图

Fig.4 Sample of Orange sweet potato puree

表 2 贮藏期间甘薯浓浆色差值表

Table 2 Color difference (ΔE) table of sweet potato puree during storage period.

样品	色差值 ΔE			
	杀菌后	7 d	14 d	21 d
空白对照组	4.38±0.02 ^a	2.65±0.84 ^a	2.44±0.15 ^b	1.53±0.25 ^a
麦芽糖醇组	2.32±0.32 ^c	1.78±0.23 ^c	0.98±0.08 ^d	0.53±0.05 ^c
赤藓糖醇组	2.23±0.14 ^c	1.43±0.01 ^d	1.81±0.22 ^c	0.79±0.10 ^c
木糖醇组	3.61±0.13 ^b	2.39±0.15 ^{ab}	3.01±0.16 ^a	1.37±0.16 ^a
山梨糖醇组	3.49±0.38 ^b	2.33±0.11 ^b	1.88±0.45 ^c	0.95±0.13 ^b

注: 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$).

2.4 不同糖醇对贮藏期甘薯浓浆中 β -胡萝卜素的

2.4.1 不同糖醇对贮藏期甘薯浓浆中 β -胡萝卜素含量的影响

β -胡萝卜素在黄心甘薯中含量较高, 是天然的抗氧化物质, 分子中存在共轭双键结构, 在光照、酸、氧及高温条件下不稳定, 易于异构化。由表 3 可知, 各样品组中 β -胡萝卜素含量在杀菌后至贮藏 7 d 期间整体出现上升现象, 而后呈下降趋势, 这与刘顺枝^[15]等研究贮藏期间火龙果红

色素含量变化趋势类似, 可能是杀菌导致了甘薯浓浆成分出现波动。其次, 糖醇组中 β -胡萝卜素含量显著高于空白对照组 ($P < 0.05$), 其中麦芽糖醇组含量最高, 可能原因是在蒸制与打浆的过程中, 甘薯细胞壁被破坏, β -胡萝卜素释放出来, 一方面糖醇配制的糖液使细胞外液渗透压更大, β -胡萝卜素被有效截留, 出现 β -胡萝卜素含量高于空白组的现象, 另一方面, 不同糖醇结构不同, 其中麦芽糖醇因分子质量大、多羟基, 易通过氢键与甘薯淀粉分子相连^[16], 形成更为致密的结构利于截留 β -胡萝卜素, 而其他糖醇主要是由于羟基活性不同而与 β -胡萝卜素产生不同程度的相互作用, 而出现产生截留差异。

表 3 贮藏期间甘薯浓浆样品中 β -胡萝卜素含量变化

Table 3 Changes of β -carotene content in sweet potato puree samples during storage mg/kg

样品	β -胡萝卜素含量			
	杀菌后	7 d	14 d	21 d
空白对照组	325.25±5.15 ^d	421.36±5.98 ^c	395.81±0.92 ^c	372.34±7.31 ^c
麦芽糖醇组	472.22±2.23 ^a	578.72±4.78 ^a	552.67±4.79 ^a	504.66±4.46 ^a
赤藓糖醇组	418.75±8.62 ^b	505.46±1.87 ^b	473.65±5.11 ^b	465.66±3.85 ^b
木糖醇组	409.08±3.19 ^{bc}	461.56±4.50 ^b	428.63±7.01 ^d	413.20±5.34 ^d
山梨糖醇组	403.91±3.34 ^c	471.38±5.44 ^c	447.12±4.91 ^c	429.39±6.16 ^c

注: 同行不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$).

2.4.2 不同糖醇对贮藏期甘薯浓浆中 β -胡萝卜素抗氧化活性的影响

DPPH·和 ABTS⁺的清除程度可以反映出样品的抗氧化活性, 即清除率越高, 抗氧化活性越强^[17]。由图 5 (A) 可见, 与空白组相比, 糖醇组在杀菌后及贮藏期间对 DPPH·清除能力更强。由

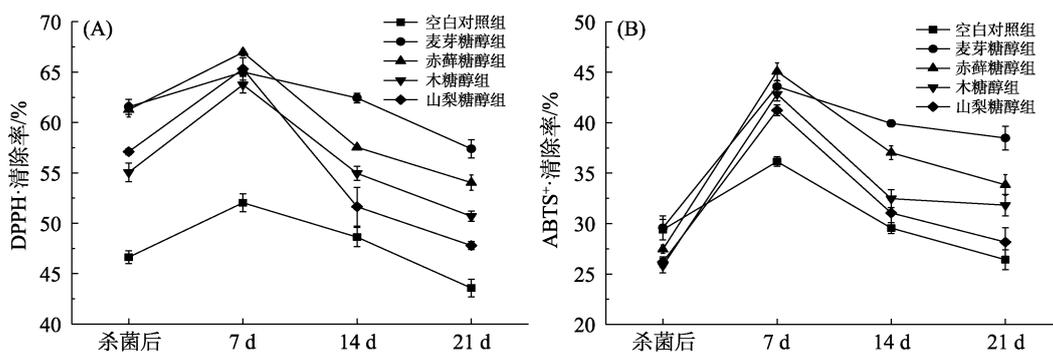


图 5 添加不同糖醇的甘薯浓浆样品中 β -胡萝卜素的抗氧化活性

Fig.5 Antioxidant activity of β -carotene in sweet potato puree samples with different sugar alcohols

表 3 知, 经 21 d 贮藏后, 甘薯浓浆中 β -胡萝卜素含量依次为麦芽糖醇组 > 赤藓糖醇组 > 山梨糖醇组 > 木糖醇组 > 空白组, 甘薯浓浆样品抗氧化活性与 β -胡萝卜素含量大致呈正相关。

如图 5 (B) 所示, 各组对 $ABTS^{\cdot+}$ 的清除能力在杀菌后偏低, 至贮藏 7 d 逐渐上升而后下降, 与空白组相比, 糖醇组清除能力更强, 经 21 d 贮藏后, 麦芽糖醇组呈现最强的抗氧化活性。总体上对 $ABTS^{\cdot+}$ 清除能力的变化趋势也与贮藏期 β -胡萝卜素含量变化趋势基本一致。

2.4.3 不同糖醇对甘薯浓浆中 β -胡萝卜素体外消化特性的影响

β -胡萝卜素在人体内的消化吸收过程是先经胃肠消化酶消化, 使其从甘薯浓浆中释放出来, 在此过程中与脂类物质相结合, 乳化成小脂滴, 随后再从脂滴中转移出来, 被小肠上皮细胞吸收。 β -胡萝卜素消化率取决于多种因素, β -胡萝卜素的释放量可以较直观表示 β -胡萝卜素消化的快慢^[18]。图 6 为 β -胡萝卜素模拟体外消化的释放情况, 从中可以看出, 各样品组消化释放趋势基本一致, 释放率均较高。这是因为经打浆处理, β -胡萝卜素更易被释放, Kolawole 等也发现在不同加工方式中, 浆状黄心甘薯显示出 β -胡萝卜素的高生物利用率^[19]。

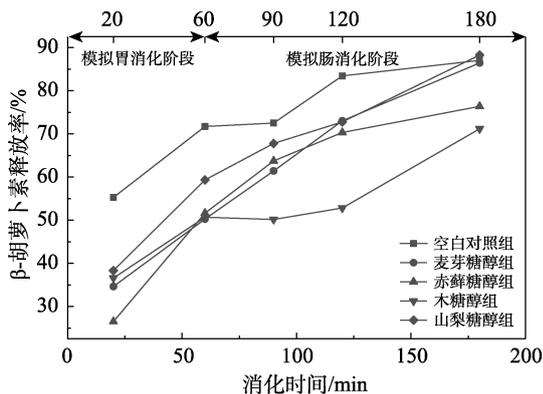


图 6 添加不同糖醇的甘薯浓浆样品中 β -胡萝卜素体外模拟消化释放情况

Fig.6 In vitro simulated digestion and release of β -carotene in sweet potato puree samples with different sugar alcohols

在模拟胃消化阶段中, β -胡萝卜素的释放速率较高, 其中空白组释放最快。在肠消化末, 山梨糖醇组的释放率为 88.25%, 麦芽糖醇组的释放率为 86.44%, 与空白组相比均未见显著性差异,

而赤藓糖醇与木糖醇组的释放率与空白组相比则显著降低 ($P < 0.05$)。这可能是由于不同糖醇结构不同影响薯浆截留 β -胡萝卜素的程度不同, 麦芽糖醇分子量大, 更易与甘薯淀粉等分子连接形成致密结构而截留 β -胡萝卜素, 故消化过程中淀粉水解造成释放率更高^[7], 木糖醇与赤藓糖醇的分子量小、羟基数量少, 结合作用更弱, 故消化释放率不高, 这也印证了贮藏期中糖醇组中 β -胡萝卜素含量较高的研究现象。

3 结论

糖醇作为良好的糖替代品, 加入制浆工艺中可以制备出的低糖黄心甘薯浓浆, 既能保持黄心甘薯浓浆原有的良好风味及营养价值, 又能满足消费者的低糖饮食需求。本研究结果表明, 与空白组相比, 木糖醇与山梨糖醇显著提高了薯浆的持水性, 麦芽糖醇和赤藓糖醇处理使甘薯浓浆粘度显著下降, 流动性增强, 形成更稳定体系。糖醇能维持甘薯浓浆杀菌与贮藏期间的良好色泽, 对 β -胡萝卜素更是具有一定的保护作用, 其中, 麦芽糖醇处理的薯浆抗氧化能力最强。经体外模拟消化后, 麦芽糖醇与山梨糖醇组中 β -胡萝卜素释放与空白组差异不大, 均高于 85%。综上所述, 选择麦芽糖醇开发低糖黄心甘薯浓浆较适宜。本研究结果可为开发低糖黄心甘薯浓浆及低糖、无糖甘薯类食品提供理论基础, 促进甘薯深加工产业的发展。

参考文献:

- [1] 赵凌霄, 邓逸桐, 衡曦彤, 等. 106 份特色甘薯品种资源品质性状评价与分析[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(4): 839-847.
ZHAO L X, DENG Y T, HENG X T, et al. Evaluation and analysis of quality characters of 106 special sweet potato variety resources[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2021, 37(4): 839-847.
- [2] 张碧莹. 甘薯鲜榨汁工艺及品质特性研究[D]西南大学, 2018.
ZHANG B Y. Research on the fresh juice technology and quality characteristics of sweet potato[D] Southwest University, 2018.
- [3] 郭楠楠, 张如意, 琚媛媛. 功能性低糖饮料的研制[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(7): 88-93.
GUO N N, ZHANG R Y, JU Y Y. Study on the functional low sugar beverage[J]. Food Research and Development, 2017, 38(7): 88-93.

- [4] NISTOR O, BOLEA C A, ANDRONOIU D, et al. Attempts for developing novel sugar-based and sugar-free sea buckthorn marmalades[J]. *Molecules*, 2021, 26(11): 3073.
- [5] 吴思宇, 徐阳, 熊思慧, 等. 超高压和热处理对低糖柑橘酱品质及流变特性的影响[J]. *食品科学*, 2022: 1-11.
WU S Y, XU Y, XIONG S H, et al. Effects of high hydrostatic and heat treatment on the quality and rheological properties of low-sugar citrus jam[J]. *Food Science*, 2022:1-11.
- [6] 羌宇, 张耀宗, 余勃, 等. ABTS 法和 DPPH 法测定类胡萝卜素清除自由基能力的适用性[J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2019, 43(6): 543-549.
QIANG Y, ZHANG Y Z, YU B, et al. Applicability of ABTS and DPPH methods for determination of free radical scavenging ability of carotenoids[J]. *Journal of Nanchang University*, 2019, 43(6): 543-549.
- [7] 南冲, 熊柳, 孙庆杰, 等. 糖醇对甘薯淀粉理化性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(2): 22-26.
NAN C, XIONG L, SUN Q J, et al. Effects of sugar alcohol on physicochemical characteristics of sweet potato starch[J]. *Journal of Grain and Oils of China*, 2013, 28(2): 22-26.
- [8] SANDRA M, ESTHER H, TERESA S, et al. Effect of using erythritol as a sucrose replacer in making Spanish muffins incorporating xanthan gum[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 5(8): 3203-3216.
- [9] 杨恒, 王学东, 丁贝贝, 等. 不同糖醇对辣条坯体品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(13): 190-197.
YANG H, WANG X D, DING B B, et al. Effects of different polyols on the quality of Chinese spicy snack food[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2021, 47(13): 190-197.
- [10] NICORESCU I, VIAL C, TALANSIER et al. Comparative effect of thermal treatment on the physicochemical properties of whey and egg white protein foams[J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(4): 797-808.
- [11] SALVADOR P, TOLDRÀ M, SAGUER E, et al. Microstructure-function relationships of heat-induced gels of porcine Haemoglobin[J]. *Food hydrocolloids*, 2009, 23(7): 1654-1659.
- [12] MARTÍNEZ-CERVERA S, DE LA HERA E, SANZ T, et al. Effect of using erythritol as a sucrose replacer in making Spanish muffins incorporating xanthan gum[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 5(8): 3203-3216.
- [13] 郝月慧, 贾春利, 王凤, 等. 三种糖醇对海绵蛋糕面糊流变学、热力学及烘焙学特性影响的比较研究[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(6): 298-302.
HAO Y H, JIA C L, WANG F, et al. A comparative research of the influences of maltitol, xylitol and three erythritol on the rheological, thermal and baking properties of sponge-cake batter[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(6): 298-302.
- [14] 任顺成, 曹悦, 李林政, 等. 糖和多元醇对藻蓝色素热稳定性的影响[J]. *食品科技*, 2020, 45(12): 215-223.
REN S C, CAO Y, LI L Z, et al. Effects of sugar and polyols on thermal stability of phycocyanin[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(12): 215-223.
- [15] 刘顺枝, 孙茹, 江月玲, 等. 贮藏温度对火龙果品质和衰老变化的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(12): 336-340.
LIU S Z, SUN R, JIANG Y L, et al. Effects of storage temperature on quality and senescence of pitaya[J]. *Food Science*, 2013, 34(12): 336-340.
- [16] 房子蔚, 王雨生, 于真, 等. 油酸和麦芽糖醇混合物对玉米淀粉老化特性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(20): 109-116.
FANG Z W, WANG Y S, YU Z, et al. Effects of oleic acid and maltitol mixtures on the retrogradation properties of corn starch[J]. *Food Science*, 2022, 43(20): 109-116.
- [17] 熊双丽, 卢飞, 史敏娟, 等. DPPH 自由基清除活性评价方法在抗氧化剂筛选中的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(8): 380-383.
XIONG S L, LU F, SHI M J, et al. Advancement of evaluation method about DPPH radical scavenging activity in Screening Antioxidant[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(8): 380-383.
- [18] 范会平, 侯冰洁, 索标, 等. 基于模拟体系研究甘薯/马铃薯淀粉体外消化特性及结构变化[J]. *中国食品学报*, 2022: 22(8)61-68.
FAN H P, HOU B J, SUO B, et al. Studies on in vitro digestion characteristics and structural changes of sweet potato/potato starch based on simulation system[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2022: 22(8)61-68.
- [19] KOLAWOLE F L, BALOGUN M A, OYEYINKA S A, et al. Effect of processing methods on the chemical composition and bio-accessibility of β -carotene in orange-fleshed sweet potato[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(7): 1-9. 
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。