

不同贮藏温度对甘薯块根内色泽和糖类成分含量变化的影响

龙凌云^{1,2}, 谢朝敏^{1,2}, 毛立彦^{1,3}, 黄秋岚^{1,2}, 黄欣欣^{1,2}, 艾静汶^{1,2}, 檀小辉^{1,3},
刘功德^{1,2}, 邓小红^{1,2}, 石秋香⁴, 詹美燕⁵, 黄秋伟^{1,2*}

1. 广西壮族自治区亚热带作物研究所, 广西南宁 530001; 2. 农业农村部亚热带水果贮藏保鲜加工技术科研试验基地, 广西南宁 530001; 3. 广西亚热带特色水果质量安全控制重点实验室, 广西南宁 530001; 4. 广西柳州市秋野家生态农业综合发展有限公司, 广西融水 545300; 5. 广西南珠妹农业科技有限公司, 广西钦州 535000

摘要: 本研究旨在探究不同贮藏温度下甘薯块根内色泽和糖类成分的变化特点, 为甘薯块根的贮藏和品质质量控制措施的制定提供参考。以普薯 32 号甘薯块根为材料, 将其分别贮藏于 25 °C (对照)、14 °C (低温处理) 和 -4 °C (近冰温处理) 环境, 采用色差仪测量块根的色泽指标, 测定块根内可溶性总糖、蔗糖、果糖、葡萄糖和淀粉含量, 同时测定参与块根糖代谢的淀粉酶、中性转化酶和酸性转化酶活性, 并对色泽指标和糖类含量进行相关性分析。结果表明: 在贮藏期间 (0~60 d), 25 °C 对照和 14 °C 处理下各取样时间点的甘薯块根 L^* 值与取样起始点 (0 d) 相比无显著变化, -4 °C 处理下块根 L^* 值始终显著低于取样起始点的样品, 3 个温度下甘薯块根的 a^* 和 b^* 值随贮藏时间的延长呈波动变化; 14 °C 温度处理下块根可溶性糖含量随贮藏时间的延长逐渐升高, 同时期的 14 °C 处理块根的蔗糖含量始终高于 25 °C 对照和 -4 °C 处理; 3 个温度下甘薯块根淀粉均表现为随贮藏时间的延长显著降低; 在贮藏初期 (0~20 d), -4 °C 处理的甘薯块根内淀粉酶、中性转化酶和酸性转化酶均高于 25 °C 对照和 14 °C 处理。相关性分析显示, 甘薯块根的淀粉含量与中性转化酶、酸性转化酶均呈极显著负相关; 块根 L^* 值、 b^* 值和 H^* 值均与蔗糖呈极显著正相关, 可作为评价甘薯块根中蔗糖含量的指标。由此可见, 3 个贮藏温度中以 14 °C 诱导甘薯块根糖化效果最好, 可有效促进块根内可溶性糖积累, 可作为该品种的较适宜贮藏温度; 近冰温 -4 °C 对甘薯块根色泽变化的影响较大, 块根贮藏过程中色泽变化与糖代谢存在密切关系, 转化酶可能是调控该品种贮藏过程中可溶性糖代谢的关键酶, 研究结果将为甘薯加工制品的品质提升和工艺优化提供参考依据。

关键词: 甘薯; 贮藏温度; 色泽; 糖类

中图分类号: S531 文献标志码: A

Effect of Different Storage Temperature on the Color and Sugar Content of Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.) Tuberous Root

LONG Lingyun^{1,2}, XIE Chaomin^{1,2}, MAO Liyan^{1,3}, HUANG Qiulan^{1,2}, HUANG Xinxin^{1,2}, AI Jingwen^{1,2},
TAN Xiaohui^{1,3}, LIU Gongde^{1,2}, DENG Xiaohong^{1,2}, SHI Qiuxiang⁴, ZHAN Meiyun⁵, HUANG Qiuwei^{1,2*}

1. Guangxi Subtropical Crops Research Institute, Nanning, Guangxi 530001, China; 2. Scientific Research and Experimental Base of Subtropical Fruit Storage and Processing Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanning, Guangxi 530001, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Quality and Safety Control for Subtropical Fruits, Nanning, Guangxi 530001, China; 4. Guangxi Liuzhou Qiu Ye Jia Ecological Agriculture Comprehensive Development Co., Ltd., Rongshui, Guangxi 545300, China; 5. Guangxi Nanzhumei Agricultural Science and Technology Co., Ltd., Qinzhou, Guangxi 535000, China

Abstract: It was aimed to investigate the characteristics of variations in color and sugar components within sweet potato tuberous root under diverse storage temperatures and to offer references for the formulation of storage and quality con-

收稿日期 2025-01-13; 接受日期 2025-02-26

基金项目 广西科技计划项目 (桂科 AD20297126); 广西农业科学院基本科研业务专项 (桂农科 2024YP126, 桂科 2021YP1143)。

作者简介 龙凌云 (1985—), 男, 硕士, 高级农艺师, 研究方向: 果蔬加工和品质调控。*通信作者 (Corresponding author): 黄秋伟 (HUANG Qiuwei), Email: 841749797@qq.com。

trol measures for sweet potato tuberous root. The sweet potato tuberous root of Pushu 32 was respectively stored in environments of 25 °C (normal temperature control), 14 °C (low-temperature treatment), and -4 °C (near-freezing temperature treatment). The color of the tuberous root was measured using a colorimeter, and the contents of total soluble sugar, sucrose, fructose, glucose, and starch within the tuberous root were determined. Meanwhile, the activity of amylase, neutral invertase, and acid invertase involved in sugar metabolism of the tuberous root was measured, and the correlation analysis was conducted on color and sugar contents. During the storage period (0–60 days), the L^* value of the tuberous root at 25 °C control and 14 °C did not exhibit significant changes compared with the initial sampling point (0 days), while the L^* value of the tuberous root at -4 °C was consistently significantly lower than that of the initial sampling point. The a^* and b^* values of the tuberous root at the three temperatures fluctuated with the prolongation of the storage time. Under the 14 °C, the content of soluble sugar in the tuberous root gradually increased with the extension of the storage time, and the sucrose content of the tuberous root under the 14 °C was always higher than that of the 25 °C control and -4 °C treatment during the same period. The starch content of the tuberous root at the three temperatures significantly decreased with the prolongation of the storage time. In the early stage of storage (0–20 days), the activity of amylase, neutral invertase, and acid invertase within the sweet potato tuberous root at -4 °C was higher than those at 25 °C and 14 °C. The correlation analysis indicated that the starch content of the tuberous root was extremely significantly negatively correlated with neutral invertase and acid invertase; the L^* value, b^* value, and H^p value of the tuberous root were extremely significantly positively correlated with sucrose, which could be utilized as indicators for evaluating the sucrose content in the tuberous root. Thus, among the three storage temperatures, 14 °C induced the best saccharification effect on sweet potato tuberous root, effectively facilitating the accumulation of soluble sugar substances within the tuberous root, and could be regarded as a more suitable storage temperature for this variety; -4 °C exerted a considerable influence on the color change of sweet potato tuberous root. The color change during the storage process of the tuberous root was closely related to sugar metabolism, and invertase might be the key enzyme regulating the metabolism of soluble sugar during the storage process of this variety. The research findings would offer a reference for enhancing the quality characteristics and optimizing the processing techniques of sweet potato processed products.

Keywords: sweet potato; storage temperature; color; sugar

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.06.018

甘薯 (*Ipomoea batatas* L.) 是重要的块根类经济作物, 广泛种植于热带和亚热带地区^[1]。甘薯的环境适应性强、产量高, 块根富含淀粉、可溶性糖等碳水化合物和类胡萝卜素、花青素、维生素、蛋白等营养物质, 在农副食品市场有较高需求, 是农户易于接受和种植的经济作物^[2]。甘薯采收后因贮藏温度、湿度等环境因子的作用, 块根组织内呼吸代谢强度及内源酶活性会随环境因子波动和时间变化而改变, 从而造成营养成分和色泽变化, 影响后期的运输、销售及二次加工等环节^[3-4]。探究不同贮藏条件甘薯块根的品质变化规律, 对于保障食品加工行业生产甘薯果汁、果脯等产品的原料品质稳定供应, 避免原料过度损耗带来的经济损失至关重要。

温度是影响甘薯块根采后贮藏中淀粉、可溶性糖、色泽等品质指标变化的重要因素^[5]。研究表明, 甘薯块根的淀粉和可溶性糖含量与贮藏温度存在显著相关性, 低温可显著促进甘薯块根内糖类成分代谢和相互间转化^[6]。史光辉等^[7]通过比较 3 种甘薯在 4 °C 和 10 °C 贮藏过程中的品质变

化, 发现甘薯块根淀粉含量随贮藏时间的延长总体呈下降趋势, 温度对甘薯淀粉、还原糖含量等指标的影响显著。MASUDA 等^[8]将甘薯品种 Kokei 14 分别置于 3、5、10、13 °C 环境中, 贮藏 20 d 后发现 5 °C 促进块根内蔗糖和甜度显著增加的效果最明显。LI 等^[9]采用低温调节和冷藏相结合的方式, 观察到 10 °C 低温可促进甘薯块根内可溶性糖积累。这些研究主要集中在探究 0 °C 以上温度贮藏过程中甘薯块根的糖类成分变化规律, 关于贮藏过程中块根色泽变化及色泽与糖类相关性研究较少。

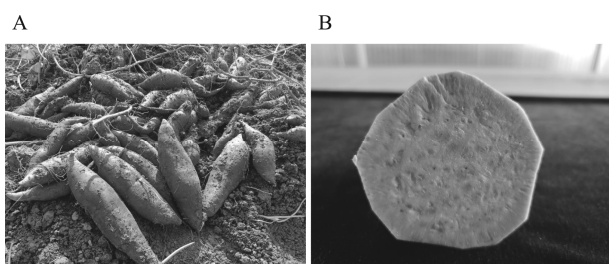
甘薯块根的色泽是评价其新鲜度的重要指标, 也影响着消费者对其选购的喜好程度^[10]。SANCHEZ 等^[11]和 ZACCARI 等^[12]的研究表明, 贮藏温度和时间会影响甘薯块根色泽变化, L^* 、 a^* 和 b^* 值的变化可反映出块根的新鲜度和耐储运性。但前人未对 0 °C 和甘薯冰点之间的近冰温贮藏过程中块根的色泽变化规律进行探究。故本研究以甘薯品种普薯 32 号作为材料, 研究不同贮藏温度对甘薯块根色泽指标和糖类成分含量变化的

影响,同时探究近冰温贮藏甘薯的可行性,以期
为甘薯加工制品品质特性的提升提供理论依据和
技术指导。

1 材料与方法

1.1 材料

供试甘薯品种为普薯 32 号(图 1),种植于广
西壮族自治区融水县永乐镇毛潭村(109°4'12"E,
24°57'0"N),正常水肥管理。于 2023 年 9 月 13
日采收甘薯,挑选形状、大小一致且无损伤的块
根,当天运输到农业农村部亚热带水果贮藏保鲜
加工技术科研试验基地实验室。



A: 种植基地采收的甘薯块根; B: 甘薯块根的横切面。
A: The sweet potato tuberous roots harvested at the planting base;
B: The cross-sectional view of the sweet potato tuberous roots.

图 1 甘薯采收和块根横切面形态

Fig. 1 Sweet potato harvest and cross-sectional
morphology of tuberous roots

1.2 方法

1.2.1 甘薯块根冰点测定 甘薯块根在实验室内
用清水清洗晾干,随机挑选 8 个质量相近、无损
伤和病虫害的块根并编号。参照 ZHAO 等^[13]的方
法并加以改进,将温度记录仪(L93-8,杭州路格
科技有限公司)的探头插入块根,再将块根放入
-20℃冰箱,每 10 s 自动记录 1 次温度,待块根
完全结冰后,从温度记录仪中导出数据,以测定
时间为横坐标,块根检测温度为纵坐标,绘制甘
薯块根冰点曲线,确定其冰点温度。如图 2 所示,
块根中心温度快速下降到-5.500℃(过冰点),
为适应极低温环境块根组织通过代谢活动释放热
量,使中心温度回升到-5.025℃,出现短暂的温
度跃升现象,而后继续缓慢冻结。块根的冰点温
度为-5.025℃,为避免样品完全冻结,故本研究
中近冰温设置为-4℃。

1.2.2 块根样品处理 甘薯块根在实验室内用清
水清洗晾干,随机分为 3 组,每组 20 个甘薯块根,
分别置于 25℃(常温)、14℃(低温)和-4℃
(近冰温)的恒温恒湿培养箱中贮藏,取样时间

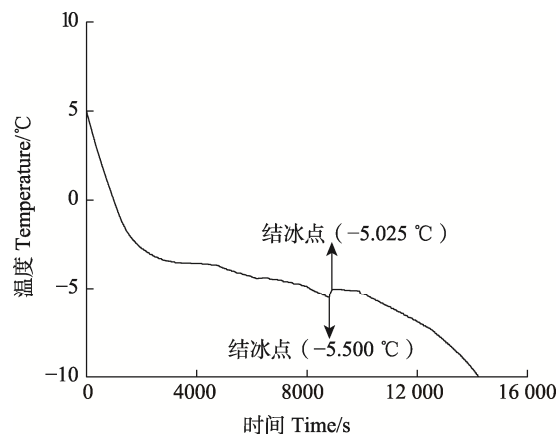


图 2 甘薯块根冰点曲线

Fig. 2 Freezing point curve of sweet potato tuberous root

分别为 0、20、40、60 d,每次取样均随机抽取 5
个块根测定品质指标。以 25℃(常温)为对照
组,14℃(低温)和-4℃(近冰温)为处理组。
1.2.3 块根色泽测定 参照 ONWUDE 等^[14]的方
法并加以改进。用不锈钢刀将所有待测的甘薯块
根样品沿纵向切成两半,选取每个块根样品剖面
中轴线附近 5 个点,使用分光色差仪(DS-220,
杭州彩谱科技有限公司)测定甘薯块根剖面的 L^*
值、 a^* 值、 b^* 值和 H^* 值,每个温度处理每次取样
时间点均测定 5 个块根样品。

1.2.4 块根的可溶性糖类含量测定 称取 1.0 g 甘
薯样品,加入 5 mL 80%乙醇,研磨后再加入 15 mL
80%乙醇,80℃水浴提取 30 min,待提取液冷却后,
8500 r/min 离心 10 min,收集上清液,用 80%乙醇
定容至 50 mL,即为糖提取液,用于测定可溶性糖
总糖、蔗糖、果糖和葡萄糖含量。参照周振祥等^[15]
的方法采用改良的蒽酮比色法测定可溶性糖总糖、
蔗糖、果糖和葡萄糖含量,单位为 mg/g。

1.2.5 块根的淀粉含量测定 参照田维娜等^[16]
的方法并加以改进。称取制备甘薯块根样品的糖
提取液后剩余的沉淀物 0.2 g,加入 1.0 mL 95%乙
醇,用 ddH₂O 定容至 15 mL,100℃水浴 10 min,
糊化,待糊化液冷却后,用 ddH₂O 定容至 100 mL,
即为淀粉提取液,采用碘-淀粉比色法测定淀粉含
量,单位为 mg/g。

1.2.6 块根中糖代谢相关酶活性测定 酶提取液
制备:称取 1.0 g 甘薯样品,冰浴研磨,加入 5 mL
预冷的 50 mmol/L Hepes-NaOH 缓冲液(pH 7.5)
(5.0 mmol/L MgCl₂, 1.0 mmol/L EDTA,
2.5 mmol/L DTT, 0.05% TritonX-100, 0.05% BSA,
2.0%甘油),混匀,4℃,11 000 r/min 离心 15 min,
上清液即为酶提取液,用于测定中性转化酶

(NI)、酸性转化酶(AI)活性。

NI 活性测定参照 TOMLINSON 等^[17]的方法。吸取 0.2 mL 酶提取液,加入 0.3 mL 酶反应液(10 g/L 蔗糖,5 mmol/L MgCl_2 ,1 mmol/L EDTA、0.1 mmol/L 磷酸缓冲液,pH 7.5),34 °C 水浴加热 10 min,然后沸水浴 5 min,反应液冷却后加入 0.5 mL 2 mol/L NaOH 终止反应。采用 3,5-二硝基水杨酸法测定还原糖含量;另取 0.2 mL 酶提取液沸水浴 5 min 作为对照。用二者的差值计算还原糖产生速率来表示转化酶活性,单位为 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 。

AI 活性测定参照 TOMLINSON 等^[17]的方法并加以改进,吸取 0.2 mL 酶提取液,加入 0.3 mL 酶反应液(100 mmol/L 醋酸-醋酸钠缓冲液,pH 5.5,10 g/L 蔗糖),34 °C 水浴加热 10 min,然后沸水浴 5 min,反应液冷却后加入 0.5 mL 2 mol/L NaOH 终止反应。酶活力换算方法与 NI 活性测定相同。

1.2.7 块根中淀粉酶活性测定 酶提取液制备:称取 1.0 g 甘薯块根样品,置于预冷研钵,加入 5 mL ddH₂O 冰浴研磨,转移至离心管中,用 ddH₂O 洗涤研钵 3 次,每次加入 5 mL ddH₂O,将洗涤液与研磨液合并,静置 20 min,4 °C,6000 r/min 离心 10 min,吸取上清液,用 ddH₂O 定容至 50 mL,即为淀粉酶提取液。

参照田维娜等^[16]的方法并加以改进,吸取 0.25 mL 淀粉酶提取液,加入 0.25 mL 淀粉提取液,混匀后 40 °C 水浴 5 min,再加入 0.5 mL DNS 溶液,沸水浴 5 min,待反应液冷却后用 ddH₂O 定容至 5 mL。在 540 nm 处测定反应液吸光值。采用麦芽糖标准品绘制标准曲线,计算淀粉酶催化形成的麦芽糖含量,以每克甘薯块根鲜样每分钟产生的麦芽糖质量表示淀粉酶活性,单位为 $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{min})$ 。

1.3 数据处理

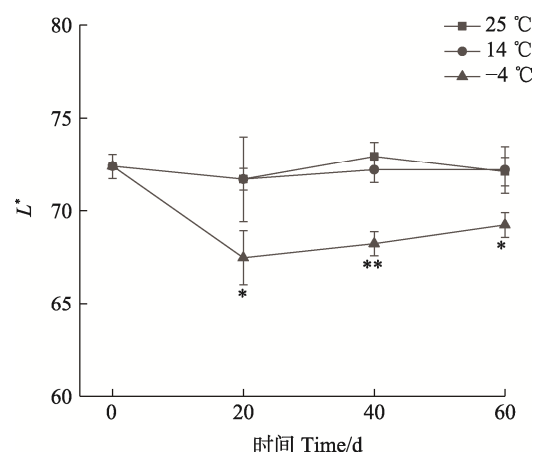
采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件进行数据统计分析,采用 Duncan 多重比较法进行方差分析(ANOVA)及显著性检验,采用 Pearson 法进行相关性分析;采用 Origin Pro 2021 软件绘制图像。所有试验最少重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 不同贮藏温度下块根色泽的变化

2.1.1 块根 L^* 值的变化 L^* 值通常用来反映物体颜色的明亮程度, L^* 值越大,亮度越高。不同贮藏

温度条件下甘薯块根 L^* 值的变化如图 3 所示。随贮藏时间的延长,25 °C (对照)和 14 °C (处理)的甘薯块根 L^* 值与取样起始点(0 d)相比无明显变化,但-4 °C (处理)的甘薯块根 L^* 值在贮藏初期(0~20 d)与取样起始点(0 d)相比显著降低。贮藏 20~60 d,-4 °C (处理)的甘薯块根的 L^* 值低于 25 °C (对照)和 14 °C (处理),说明近冰温贮藏对甘薯块根 L^* 值的影响较大,贮藏后的块根颜色相对偏暗。



*表示同一时间处理组与对照组差异显著 ($P<0.05$); **表示同一时间处理组与对照组差异极显著 ($P<0.01$)。

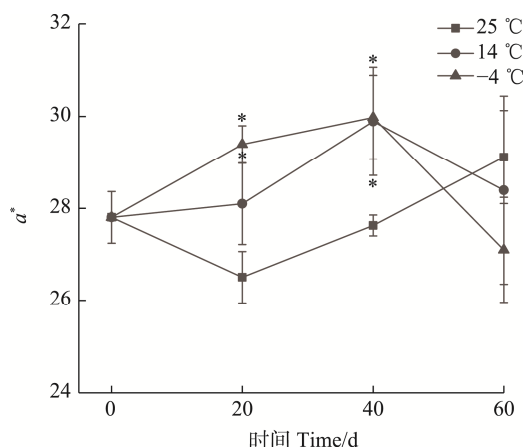
* indicates significant difference between the treatment and the control group at the same time ($P<0.05$); ** indicates extremely significant difference between the treatment and the control group at the same time ($P<0.01$).

图 3 不同贮藏温度条件下甘薯块根 L^* 值的变化

Fig. 3 Variations in L^* values of sweet potato tuberous root under different storage temperature conditions

2.1.2 块根 a^* 值的变化 a^* 值可反映物体中红色或绿色物质的积累浓度,正值为红色,负值为绿色。不同贮藏温度条件下甘薯块根 a^* 值的变化如图 4 所示。整个贮藏期内(0~60 d),3 个温度(25 °C、14 °C 和-4 °C)处理的甘薯块根 a^* 值均为正值,说明甘薯块根中呈色物质表现为红色。其中 25 °C 对照的甘薯块根 a^* 值呈先降后升的变化趋势,14 °C 处理和-4 °C 处理的块根 a^* 值均表现为先升后降的变化趋势,表明甘薯中呈色的红色物质受贮藏温度和时间变化的影响。

2.1.3 块根 b^* 值的变化 b^* 值可反映物体中黄色或蓝色物质的积累浓度,正值为黄色,负值为蓝色。不同贮藏温度条件下甘薯块根 b^* 值的变化如图 5 所示。3 个温度(25 °C、14 °C 和-4 °C)条件下的甘薯块根 b^* 值均为正值,说明块根内呈色物质表现为黄色。整个贮藏期间(0~60 d),25 °C

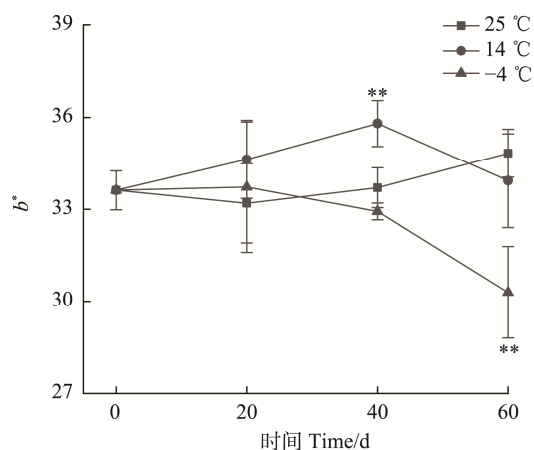


*表示同一时间处理组与对照组差异显著 ($P<0.05$)。

* indicates significant difference between the treatment and the control group at the same time ($P<0.05$).

图 4 不同贮藏温度条件下甘薯块根 a^* 值的变化

Fig. 4 Variations in a^* values of sweet potato tuberous root under different storage temperature conditions



**表示同一时间处理组与对照组差异极显著 ($P<0.01$)。

** indicates extremely significant difference between the treatment and the control group at the same time ($P<0.01$).

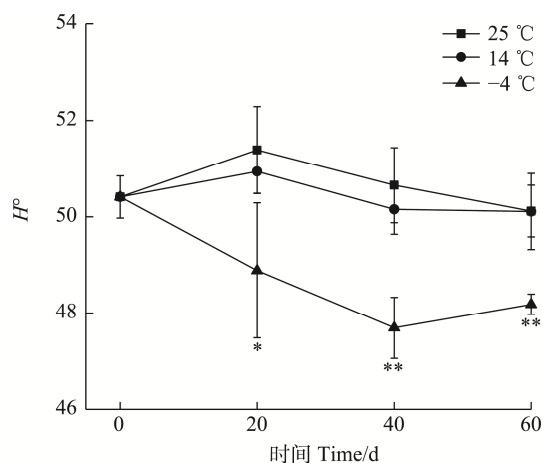
图 5 不同贮藏温度条件下甘薯块根 b^* 值的变化

Fig. 5 Variations in b^* values of sweet potato tuberous root under different storage temperature conditions

对照组温度下的甘薯块根 b^* 值呈先降后升的变化趋势; 14 °C 处理组的甘薯块根的 b^* 值呈先升后降的变化趋势, 表明 0~40 d 该温度条件下块根中黄色呈色物质随贮藏时间的延长逐渐积累, 且在第 40 天时块根 b^* 值极显著高于同时期 25 °C 对照样品; -4 °C 处理组中甘薯块根 b^* 值表现为逐渐降低的趋势, 第 60 天的块根 b^* 值极显著低于同时期对照样品, 说明 -4 °C 处理不利于甘薯块根内黄色呈色物质的积累。

2.1.4 块根 H° 值的变化 H° 值可反映物体的色调, 0° 表示红色, 180° 表示绿色, 360° 表示蓝色。不同贮藏温度条件下甘薯块根 H° 值的变化如图 6

所示。3 个温度 (25 °C、14 °C 和 -4 °C) 条件下的甘薯块根 H° 均小于 60°, 说明块根的颜色偏红。整个贮藏期 (0~60 d), 25 °C 对照组和 14 °C 处理组的甘薯块根 H° 值均呈先升后降的变化趋势, 但各时间段 (除 0 d 外) 的样品 H° 值相对于起始取样点 (0 d) 波动不明显。-4 °C 处理组块根各时间段 (除 0 d 外) 的 H° 值均显著低于同时期的对照组样品, 且也明显低于起始取样点。说明 25 °C 对照和 14 °C 处理对甘薯块根的 H° 值影响不大, -4 °C 近冰温环境对块根 H° 值影响较大。



*表示同一时间处理组与对照组差异显著 ($P<0.05$); **表示同一时间处理组与对照组差异极显著 ($P<0.01$)。

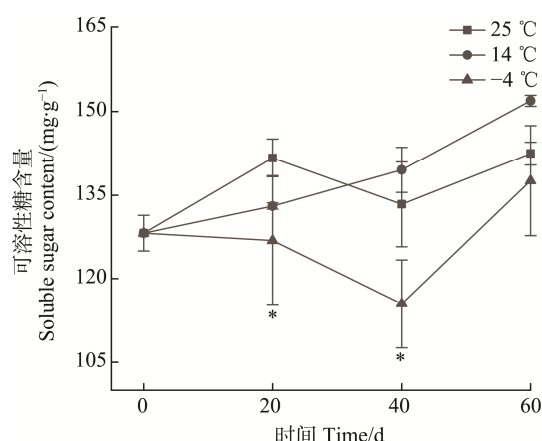
* indicates significant difference between the treatment and the control group at the same time ($P<0.05$); ** indicates extremely significant difference between the treatment and the control group at the same time ($P<0.01$).

图 6 不同贮藏温度条件下甘薯块根 H° 值的变化

Fig. 6 Variations in H° values of sweet potato tuberous root under different storage temperature conditions

2.2 不同贮藏温度下块根中糖类成分的变化

2.2.1 可溶性糖含量变化 不同贮藏温度条件下甘薯块根可溶性糖含量变化如图 7 所示。整个贮藏期内 (0~60 d), 25 °C 温度条件下甘薯块根的可溶性糖含量随贮藏时间的延长呈现先升后降再升的波动变化, 14 °C 温度条件下块根的可溶性糖含量随时间延长持续升高, -4 °C 温度条件下块根的可溶性糖含量表现为先降后升的变化趋势。3 个温度 (25 °C、14 °C 和 -4 °C) 条件下甘薯块根均在第 60 天时, 可溶性糖含量达到最高值, 且 14 °C 温度条件下的甘薯块根中可溶性糖含量 [(151.90±0.98)mg/g] 高于同时期的 25 °C 对照 [(142.47±2.03)mg/g] 和 -4 °C 处理 [(137.59±9.87)mg/g]。说明 14 °C 的贮藏温度相较于 25 °C 和 -4 °C, 更有利于甘薯块根的可溶性糖积累。



*表示同一时间处理组与对照组差异显著 ($P<0.05$)。

* indicates significant difference between the treatment and the control group at the same time ($P<0.05$).

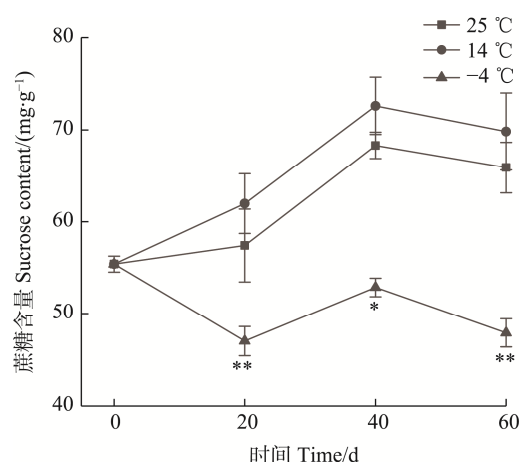
图 7 不同贮藏温度条件下甘薯块根的可溶性糖含量变化

Fig. 7 Variations in soluble sugar content of sweet potato tuberous root under different storage temperature conditions

2.2.2 蔗糖含量变化 不同贮藏温度条件下甘薯块根蔗糖含量变化如图 8 所示。整个贮藏期内 (0~60 d), 25 °C 对照组和 14 °C 处理组的甘薯块根蔗糖含量均呈先升后降的趋势, 且各时间段 (除 0 d 外) 取样点的块根蔗糖含量均高于起始取样点 (0 d); -4 °C 处理组的块根蔗糖含量呈先降后升再降的变化趋势, 各时间段 (除 0 d 外) 取样点的块根蔗糖含量均低于起始取样点 (0 d), 且显著低于同时期的 25 °C 对照。由此可知, 25 °C 和 14 °C 贮藏温度有利于甘薯块根内蔗糖积累, 而贮藏时间也对块根蔗糖积累有较大影响, -4 °C 处理不利于甘薯块根中蔗糖积累。

2.2.3 果糖含量变化 不同贮藏温度条件下甘薯块根果糖含量变化如图 9 所示。整个贮藏期 (0~60 d), 25 °C 对照组的甘薯块根果糖含量表现为先升后降变化; 14 °C 处理组的块根果糖含量呈先降低、后升高、再降低的变化趋势; -4 °C 处理组的块根果糖含量呈先快速降低, 到基本稳定不变, 再快速降低的变化趋势。从第 40 天开始, 3 个温度 (25 °C、14 °C 和 -4 °C) 条件下的块根果糖含量均出现大幅度的降低, 表明块根中果糖不断被消耗, 有可能被用于其他代谢物的合成。此外, -4 °C 处理的块根在第 40 天和第 60 天的果糖含量分别极显著和显著低于同时期的 25 °C 对照, 说明 -4 °C 近冰温环境促进了果糖的消耗。

2.2.4 葡萄糖含量变化 不同贮藏温度条件下甘薯块根葡萄糖含量变化如图 10 所示。整个贮藏期

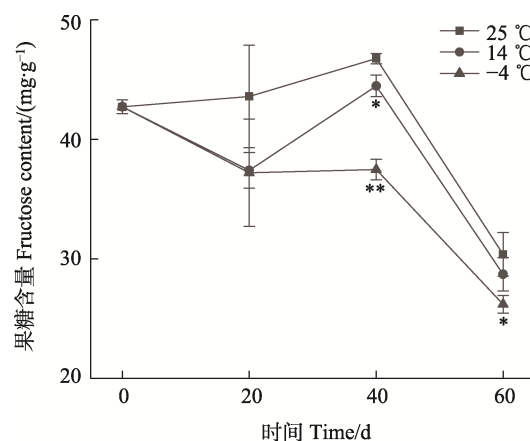


*表示同一时间处理组与对照组差异显著 ($P<0.05$); **表示同一时间处理组与对照组差异极显著 ($P<0.01$)。

* indicates significant difference between the treatment and the control group at the same time ($P<0.05$); ** indicates extremely significant difference between the treatment and the control group at the same time ($P<0.01$).

图 8 不同贮藏温度条件下甘薯块根的蔗糖含量变化

Fig. 8 Variations in sucrose content of sweet potato tuberous root under different storage temperature conditions



*表示同一时间处理组与对照组差异显著 ($P<0.05$); **表示同一时间处理组与对照组差异极显著 ($P<0.01$)。

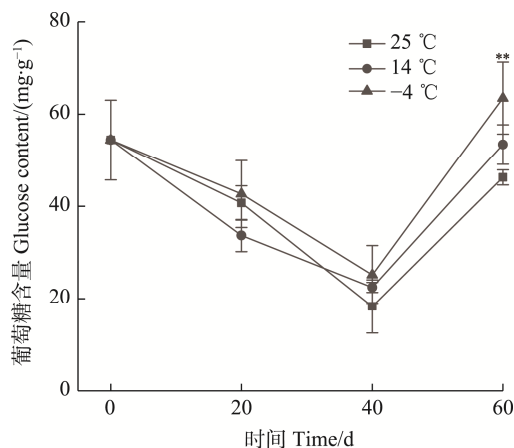
* indicates significant difference between the treatment and the control group at the same time ($P<0.05$); ** indicates extremely significant difference between the treatment and the control group at the same time ($P<0.01$).

图 9 不同贮藏温度条件下甘薯块根的果糖含量变化

Fig. 9 Variations in fructose content of sweet potato tuberous root under different storage temperature conditions

(0~60 d), 3 个温度 (25 °C、14 °C 和 -4 °C) 条件下甘薯块根的葡萄糖含量均表现为先降低后升高的变化趋势。第 40 天达到最低值, 随后出现大幅度的升高, 结合图 9 中果糖含量的变化, 推测 40~60 d 的贮藏期内, 甘薯块根中消耗的果糖可能被大量转化为葡萄糖。

2.2.5 淀粉含量变化 不同贮藏温度条件下甘薯块根淀粉含量变化如图 11 所示。整个贮藏期间

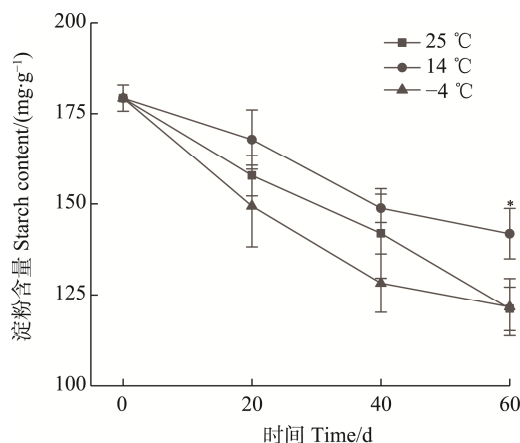


**表示同一时间处理组与对照组差异极显著 ($P<0.01$)。

** indicates extremely significant difference between the treatment and the control group at the same time ($P<0.01$).

图 10 不同贮藏温度条件下甘薯块根的葡萄糖含量变化

Fig. 10 Variations in glucose content of sweet potato tuberous root under different storage temperature conditions



*表示同一时间处理组与对照组差异极显著 ($P<0.05$)。

* indicates extremely significant difference between the treatment and the control group at the same time ($P<0.05$).

图 11 不同贮藏温度条件下甘薯块根的淀粉含量变化

Fig. 11 Variations in starch content of sweet potato tuberous root under different storage temperature conditions

(0~60 d) 内, 3 个温度 (25 °C、14 °C 和 -4 °C) 条件下的甘薯块根内淀粉含量均呈显著降低变化 ($P<0.05$), 表明 3 个温度条件下贮藏的甘薯块根随贮藏时间延长, 淀粉不断被降解。

2.3 不同贮藏温度下甘薯块根糖代谢相关酶活力变化

2.3.1 中性转化酶活力变化 不同贮藏温度条件下甘薯块根的中性转化酶 (NI) 活力如图 12 所示。整个贮藏期 (0~60 d), 3 个温度 (25 °C、14 °C 和 -4 °C) 条件下的甘薯块根内 NI 活力均随着时间的延长表现为先升高后降低的变化趋势, 在第 40 天时 NI 活力达到最高值, 随后大幅度降低。表明不

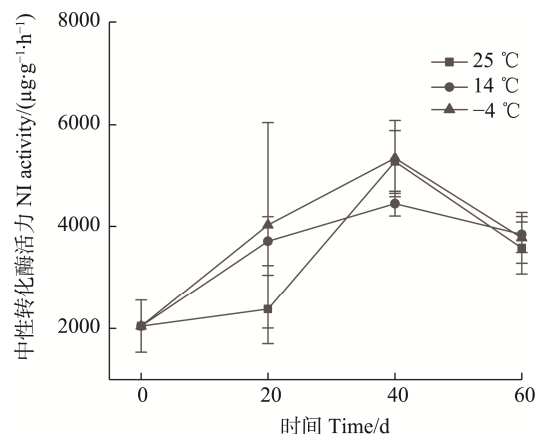
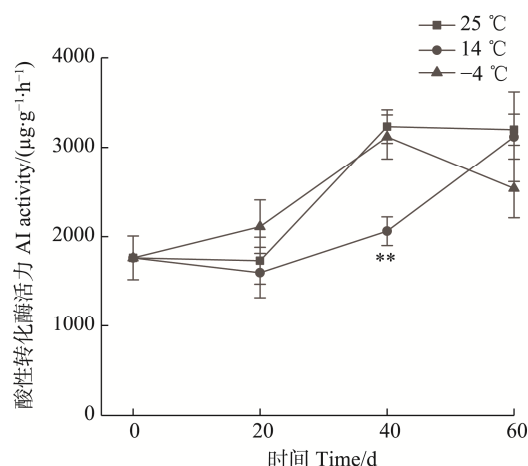


图 12 不同贮藏温度条件下甘薯块根的中性转化酶活力变化

Fig. 12 Variations in neutral invertase activity of sweet potato tuberous root under different storage temperature conditions

同温度对甘薯块根 NI 活力变化趋势的影响相同。

2.3.2 酸性转化酶活力变化 不同贮藏温度条件下甘薯块根的酸性转化酶 (AI) 活力如图 13 所示。整个贮藏期 (0~60 d), 25 °C 对照组的甘薯块根 AI 活力表现在贮藏初期 (0~20 d) 与起始取样点比较无明显变化, 随后快速升高, 达到最高值后酶活力趋于平稳; 14 °C 处理组块根 AI 活力表现为在贮藏初期略微下降, 随后快速升高的变化; -4 °C 处理组中块根 AI 活力随贮藏时间延长呈先升后降变化。表明随着贮藏时间延长, 14 °C 处理的甘薯块根内 AI 仍具有较高活力。



**表示同一时间处理组与对照组差异极显著 ($P<0.01$)。

** indicates extremely significant difference between the treatment and the control group at the same time ($P<0.01$).

图 13 不同贮藏温度条件下甘薯块根的酸性转化酶活力变化

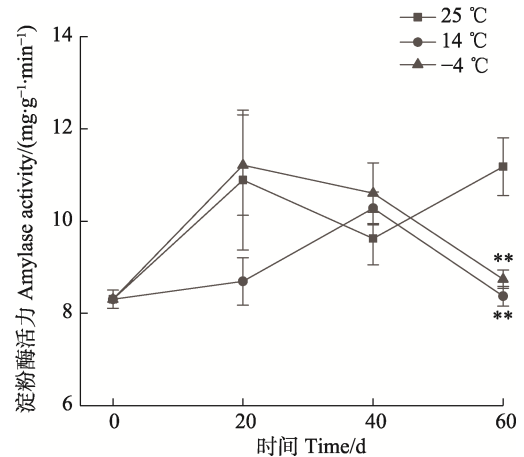
Fig. 13 Variations in acid invertase activity of sweet potato tuberous root under different storage temperature conditions

2.3.3 淀粉酶活力变化 不同贮藏温度条件下甘薯块根的淀粉酶活力如图 14 所示。整个贮藏期 (0~60 d), 25 °C 对照组的甘薯块根淀粉酶活力呈先升后降再升的波浪式变化; 14 °C 处理组和 -4 °C 处理组的块根淀粉酶活力呈先升后降变化。贮藏 60 d 后, 14 °C 和 -4 °C 的块根中淀粉酶活力均极显著低于 25 °C 对照, 说明在贮藏后期随着时间延长, 较高温度贮藏可显著提高块根内淀粉酶活力。

2.4 甘薯块根内在品质与色差的相关性分析

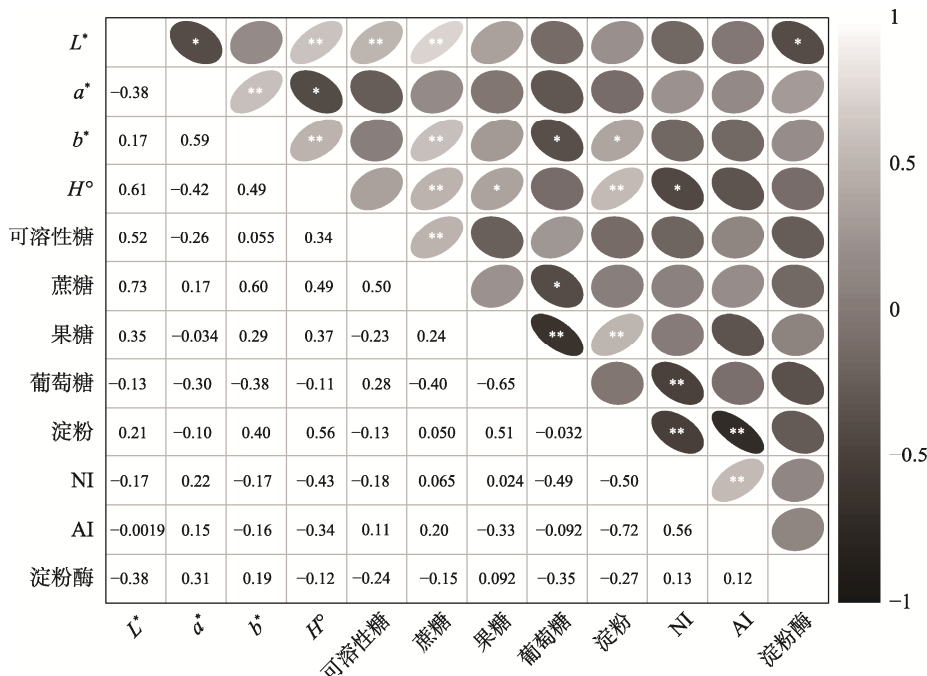
贮藏期内甘薯块根色泽指标与糖类含量、糖代谢酶活力之间的相关性如图 15 所示。甘薯块根色泽的 L^* 值与可溶性糖、蔗糖含量均呈极显著正相关, 与淀粉酶活力呈显著负相关; a^* 值与已检测的糖类含量、糖代谢酶活力均无显著相关性; b^* 值与蔗糖呈极显著正相关, 与淀粉含量呈显著正相关, 而与葡萄糖含量呈显著负相关。 H° 值与蔗糖和淀粉呈极显著正相关, 与果糖呈显著正相关, 而与 NI 活力呈显著负相关。蔗糖与可溶性糖呈极显著正相关, 与葡萄糖呈显著负相关, 表明在甘薯块根中蔗糖是主要的可溶性糖类成分之一。果糖与葡萄糖呈极显著负相关, 与淀粉呈极显著正

相关。此外, 葡萄糖与 NI 活力呈极显著负相关, 淀粉与 NI 和 AI 的活力均呈极显著负相关。相关性分析结果说明, 色泽变化与糖类成分的代谢活动密切相关, 3 个色差指标 L^* 值、 b^* 值和 H° 值均与蔗糖呈极显著正相关, 表明甘薯在贮藏过程中蔗糖可能是决定色泽变化的重要因素之一。



**表示同一时间处理组与对照组差异极显著 ($P<0.01$)。
** indicates extremely significant difference between the treatment and the control group at the same time ($P<0.01$).

图 14 不同贮藏温度条件下甘薯块根的淀粉酶活力变化
Fig. 14 Variations in amylase activity of sweet potato tuberous root under different storage temperature conditions



*表示显著相关 ($P<0.05$); **表示极显著相关 ($P<0.01$)。

* indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

图 15 贮藏期间甘薯块根色泽及糖代谢生理指标的相关性热图

Fig. 15 Correlation heatmap of color and sugar metabolism physiological indices in sweet potato tuberous roots during storage

3 讨论

温度是影响采收后甘薯贮藏过程中甜味品质变化的重要因子^[18]。甘薯不同品种对温度的适应性不同,故不同品种的适宜贮藏温度存在差异。有文献报道 12~15 °C 是甘薯块根的最适宜贮藏温度^[19],亦有研究表明甘薯的适宜贮藏温度范围应为 10~14 °C^[20]。本研究中,整个贮藏期内(0~60 d),14 °C 温度下甘薯块根的可溶性糖含量表现为随时间延长持续升高,且各贮藏时间点的蔗糖含量均高于同时期 25 °C 和-4 °C 温度下的甘薯块根,表明 14 °C 是甘薯品种普薯 32 号的适宜贮藏温度,与前人关于甘薯贮藏适宜温度范围相印证。从甘薯糖化增甜效果上看,近冰温-4 °C 处理甘薯块根的增甜效果低于 25 °C 和 14 °C。

植物块根、块茎等贮藏器官中转化酶活性会影响其组织细胞中的淀粉含量^[21-23]。AMJAD 等^[24]发现,马铃薯块茎在低温环境中的酸性转化酶活性大幅度升高,随之可溶性糖种类和含量比例发生明显变化,参与淀粉分解的关键酶是酸性转化酶而不是淀粉酶。ZHANG 等^[25]采用比较转录组分析发现,甘薯块根内编码液泡酸性转化酶的 *lbβfruct2* 表达量与淀粉含量存在负相关性,编码的转化酶可调节块根淀粉含量,液泡酸性转化酶活性越高,胞内淀粉颗粒积累越少。这也解释了本研究中甘薯块根的淀粉含量与中性转化酶、酸性转化酶活性呈显著负相关的现象。

色泽是甘薯外观品质的核心指标之一,对鲜食及加工产品的商品价值有着重要影响。甘薯块根颜色的变化归因于组织细胞中花青素、类胡萝卜素等天然色素成分,它们的含量变化与块根色泽强度直接相关^[26-27],而贮藏温度和时间也会极大的影响块根内代谢活性,从而导致色泽变化^[28-29]。本研究中同时期的近冰温-4 °C 处理甘薯块根 L^* 值显著低于 25 °C 对照和 14 °C 处理,3 个温度条件下甘薯块根的 a^* 和 b^* 值亦随贮藏时间延长而发生波动变化,这与 SANCHEZ 等^[11]的研究结果相似,可能是温度影响了块根内花青素、类胡萝卜素等成分的代谢,从而改变块根色泽,这有待后续深入探究温度对甘薯块根色素组成和含量的影响。

糖类可参与调节植物花青素生物合成途经,进而影响器官色泽变化^[30-31]。甘薯块根中花青素含量通常与色泽指标 L^* 、 a^* 、 b^* 值呈正相关,花青素含量对块根色泽变化有显著影响,而淀粉含量与色泽指标呈负相关^[32],淀粉的降解可能为合

成花青素前体物质提供重要中间体,从而促进块根中花青素积累^[33]。因为本研究未对甘薯块根色素成分进行检测,糖类成分如何参与调节呈色物质的代谢机理,后续还需进一步细化分析。

参考文献

- [1] SHEIKHA A F E, RAY R C. Potential impacts of bio-processing of sweet potato: review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 57(3): 455-471.
- [2] ALBUQUERQUE D R M T, SAMPAIO B K, SOUZA D L E. Sweet potato roots: unrevealing an old food as a source of health promoting bioactive compounds-a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 85: 277-286.
- [3] SUGRI I, MAALEKUU K B, GAVEH E, KUSI F. Compositional and shelf-life indices of sweet potato are significantly improved by pre-harvest dehauling[J]. Annals of Agricultural Sciences, 2019, 64 (1): 113-120.
- [4] JI Y C, CHUNG W, KIM S H, JUNG W Y, KANG L, JEONG J C, KWAK S S. Transcriptome profiling of sweetpotato tuberous roots during low temperature storage[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2017, 112: 97-108.
- [5] PADDA M, PICHA D. Effect of low temperature storage on phenolic composition and antioxidant activity of sweetpotatoes[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 47(2): 176-180.
- [6] NAUBUYA A, NAMUTEBI A, BYARUHANGA Y, NARVHUS J, WICKLUND T. Influence of development, postharvest handling, and storage conditions on the carbohydrate components of sweetpotato (*Ipomea batatas* Lam.) roots[J]. Food Science & Nutrition, 2017, 5(6): 1088-1097.
- [7] 史光辉, 胡志和, 吴子健, 孙振刚, 武文起, 冯永强, 何瑞燕, 柳澜昱, 刘雪君. 贮藏温度对 3 种甘薯品质的影响[J]. 核农学报, 2015, 29(3): 493-498.
SHI G H, HU Z H, WU Z J, SUN Z G, WU W Q, FENG Y Q, HE R Y, LIU L Y, LIU X J. Effect of storage temperature on the quality of three breeds sweet potato[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(3): 493-498. (in Chinese)
- [8] MASUDA D, FUKUOKA N, GOTO H, KANO Y. Effect of cold treatment after harvest on sugar contents and storability in sweet potato (*Ipomoea batatas* L.)[J]. Horticultural Research, 2007, 6(6):597-601.
- [9] LI X, YANG H, LU G. Low-temperature conditioning combined with cold storage inducing rapid sweetening of sweetpotato tuberous roots (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) while inhibiting chilling injury[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 142: 1-9.

- [10] SANCHEZ C D P, HASHIM N, SHAMSUDIN R, NOR M Z M. Applications of imaging and spectroscopy techniques for non-destructive quality evaluation of potatoes and sweet potatoes: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 96: 208-221.
- [11] SANCHEZ C D P, HASHIM N, SHAMSUDIN R, NOR M Z M. Effects of different storage temperatures on the quality and shelf life of Malaysian sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) varieties[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2021, 28: 100642.
- [12] ZACCARI F, CABRERA M, SAADOUN A. Sweet potato and squash storage[J]. Encyclopedia of Food Security and Sustainability, 2019, 2: 464-472.
- [13] ZHAO H D, JIAO W X, CUI K B, FAN X G, SHU C, ZHANG W L, CAO J K, JIANG W B. Near-freezing temperature storage enhances chilling tolerance in nectarine fruit through its regulation of soluble sugars and energy metabolism[J]. Food Chemistry, 2019, 289: 426-435.
- [14] ONWUDE D I, HASHIM N, ABDAN K, JANIUS R, CHEN G N. Combination of computer vision and backscattering imaging for predicting the moisture content and colour changes of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) during drying [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150: 178-187.
- [15] 周振祥, 赵博, 王唯先, 仝晓鹏, 郑剑波, 李艳红, 高建明, 罗峰, 孙守钧, 裴忠有. 不同前处理对测定甜高粱茎秆汁液 3 种糖含量的影响[J]. 草业科学, 2022, 39(5): 940-948.
- ZHOU Z X, ZHAO B, WANG W X, TONG X P, ZHENG J B, LI Y H, GAO J M, LUO F, SUN S J, PEI Z Y. Determination of three soluble sugars in stem juice of sweet sorghum by anthrone colorimetry[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(5): 940-948. (in Chinese)
- [16] 田维娜, 文一, 缪颖, 李雯妮, 姜微波, 曹建康. 外源亚精胺脉冲负压渗透对采后菜豆粒衰老生理的影响[J]. 中国食品学报, 2014, 14(10): 75-82.
- TIAN W N, WEN Y, MIAO Y, LI W N, JIANG W B, CAO J K. Effects of vacuum pulse infiltration of exogenous spermidine on senescence physiology of postharvest common bean-seed[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(10): 75-82. (in Chinese)
- [17] TOMLINSON K L, MCHUGH S, LABBE H, GRAINGER J L, JAMES L E, POMEROY K M, MULLIN J W, MILLER S S, DENNIS D T, MIKI B L A. Evidence that the hexose-to-sucrose ratio does not control the switch to storage product accumulation in oilseeds: analysis of tobacco seed development and effects of overexpressing apoplastic invertase[J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(406): 2291-2303.
- [18] WANG S Q, TANG J, HU K D, HUANG Z Q, YANG F, ZHANG H Y, HU L Y, LI Y H, YAO G F, ZHANG H. Antioxidative system in sweet potato root is activated by low-temperature storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(8): 3824-3833.
- [19] 解则义, 李洪民, 马代夫, 陈天娇, 韩永华, 李宗芸. 低温胁迫影响甘薯贮藏的研究进展[J]. 植物生理学报, 2017, 53(5): 758-767.
- XIE Z Y, LI H M, MA D F, CHEN T J, HAN Y H, LI Z Y. Research progress of the effects of low temperature stress on the sweetpotato during storage[J]. Plant Physiology Journal, 2017, 53(5): 758-767. (in Chinese)
- [20] 吕尊富, 潘超, 崔鹏, 陈国林, 庞林江, 陆国权. 短期储藏对不同大小甘薯理化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(6): 30-36.
- LYU Z F, PAN C, CUI P, CHEN G L, PANG L J, LU G Q. Effects of short-term storage on physical and chemical characteristics of sweet potato in different sizes[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 34(6): 30-36. (in Chinese)
- [21] DRAFFEHN A M, MELLER S, LI L, GEBHARDT C. Natural diversity of potato (*Solanum tuberosum*) invertases[J]. BMC Plant Biology, 2010, 10(1): 271.
- [22] ARAÚJO N O D, VÉRAS M L M, SANTOS M N D S, ARAÚJO F F D, TELLO J P D J, FINGER F L. Sucrose degradation pathways in cold-induced sweetening and its impact on the non-enzymatic darkening in sweet potato root[J]. Food Chemistry, 2020, 312: 125904.
- [23] 占雷雷, 朱国鹏, 刘永华. 4 种蔗糖分解酶在甘薯块根品质形成中的作用[J]. 热带作物学报, 2019, 40(9): 1723-1728.
- ZHAN L L, ZHU G P, LIU Y H. Differential roles of four sucrose-degrading enzymes in the formation of qualities of the storage roots of sweet potato[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(9): 1723-1728. (in Chinese)
- [24] AMJAD A, JAVED M S, HAMEED A, HUSSAIN M, ISMAIL A. Changes in sugar contents and invertase activity during low temperature storage of various chipping potato cultivars[J]. Food Science and Technology, 2020, 40(2): 340-345.
- [25] ZHANG K, WU Z D, TANG D B, LUO K, LU H X, LIU Y Y, DONG J, WANG X, LV C W, WANG J H, LU K. Comparative transcriptome analysis reveals critical function of sucrose metabolism related-enzymes in starch accumulation in the storage root of sweet potato[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 914.
- [26] ROSE I M, VASANTHAKAALAM H. Comparison of the nutrient composition of four sweet potato varieties cultivated in Rwanda[J]. American Journal of Food and Nutrition, 2011,

- 1(1): 34-38.
- [27] AMOANIMAA-DEDE H, SU C T, YEBOAH A, CHEN C H, YANG S X, ZHU H B, CHEN M. Flesh color diversity of sweet potato: an overview of the composition, functions, biosynthesis, and gene regulation of the major pigments[J]. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 2020, 89(4): 805-833.
- [28] MAESHIMA M, ASAH I, URITANI I. Effect of temperature on the activity and stability of plant cytochrome c oxidase[J]. *Agricultural and Biological Chemistry*, 2014, 44(10): 2351-2356.
- [29] KONCZAK-ISLAM I, NAKATANI M, YOSHINAGA M, YAMAKAWA O. Effect of ammonium ion and temperature on anthocyanin composition in sweet potato cell suspension culture[J]. *Plant Biotechnology*, 2001, 18(2): 109-117.
- [30] OHTO M, ONAI K, FURUKAWA Y, AOKI E, ARAKI T, NAKAMURA K. Effects of sugar on vegetative development and floral transition in *Arabidopsis*[J]. *Plant Physiology*, 2001, 127(1): 252-261.
- [31] HARA M, OKI K, HOSHINO K, KUBOI T. Enhancement of anthocyanin biosynthesis by sugar in radish (*Raphanus sativus*) hypocotyl[J]. *Plant Science*, 2003, 164(2): 259-265.
- [32] XU M, LI J, YIN J, WU M C, ZHOU W T, YANG X S, ZHANG R, HE J R. Color and nutritional analysis of ten different purple sweet potato varieties cultivated in China via principal component analysis and cluster analysis[J]. *Foods*, 2024, 13(6): 1-16.
- [33] WANG S Q, PAN D Z, LYU X J, SONG X M, QIU Z M, HUANG C M, HUANG R H, CHENG W. Proteomic approach reveals that starch degradation contributes to anthocyanin accumulation in tuberous root of purple sweet potato[J]. *Journal of Proteomics*, 2016, 143: 298-305.