

王娟紫, 王春芳, 乔勇进, 等. 近冰温贮藏对鲜糯玉米采后品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(14): 336–345. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080308

WANG Juanzi, WANG Chunfang, QIAO Yongjin, et al. Effect of Near-freezing Temperature Storage on the Quality of Postharvest Fresh Waxy Corn[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(14): 336–345. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080308

· 贮运保鲜 ·

近冰温贮藏对鲜糯玉米采后品质的影响

王娟紫^{1,2}, 王春芳^{2,3}, 乔勇进^{2,3}, 柳洪入^{2,3}, 刘晨霞^{2,3}, 钟耀广^{1,*}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306;

2. 上海市农业科学院作物育种栽培研究所, 上海 201403;

3. 上海农产品保鲜加工工程技术研究中心, 上海 201403)

摘要: 为研究近冰温处理对鲜糯玉米贮藏品质的影响, 本实验以‘沪红糯 1 号’糯玉米为实验试材, 分别将其贮藏于 4 ℃ 和近冰温 (−1 ℃) 条件下 40 d, 测定鲜糯玉米贮藏期间品质及抗氧化活性的变化, 并进行相关性分析与主成分分析。结果表明, 与 4 ℃ 冷藏相比, 近冰温处理能够有效降低鲜糯玉米失重率并延缓玉米籽粒果皮硬度的增加, 维持水分、可溶性固形物 (soluble solids, TSS)、可溶性糖、可溶性蛋白及次生代谢物质含量。同时, 近冰温处理通过维持较高的总酚、类黄酮、花青素含量和过氧化氢酶 (catalase, CAT)、超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 和抗坏血酸过氧化物酶 (ascorbate peroxidase, APX) 活性, 减少 H₂O₂ 含量的积累, 维持鲜糯玉米的营养品质, 延缓果实衰老。相关性分析表明, 鲜糯玉米贮藏时间和失重率、果皮硬度、H₂O₂ 含量呈极显著 ($P<0.01$) 正相关, 与水分含量、TSS 含量、可溶性糖含量、总酚含量、类黄酮含量、花青素含量和 APX 活性呈极显著负相关。主成分分析和综合得分进一步表明, 影响鲜糯玉米贮藏品质的关键指标是类黄酮含量、花青素含量、APX 活性、果皮硬度、失重率、H₂O₂ 含量、CAT 活性和 SOD 活性, 近冰温处理具有较好的保鲜效果, 有利于维持鲜糯玉米贮藏品质。

关键词: 鲜糯玉米, 近冰温贮藏, 营养品质, 次生代谢产物, 抗氧化酶

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)14-0336-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080308

本文网刊:



Effect of Near-freezing Temperature Storage on the Quality of Postharvest Fresh Waxy Corn

WANG Juanzi^{1,2}, WANG Chunfang^{2,3}, QIAO Yongjin^{2,3}, LIU Hongru^{2,3}, LIU Chenxia^{2,3}, ZHONG Yaoguang^{1,*}

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Research Institute of Crop Breeding and Cultivation, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China;

3. Agri-food Storage and Processing Research Center, Shanghai Academy of Agriculture Sciences, Shanghai 201403, China)

Abstract: To investigate the effects of near-freezing temperature treatment on the storage quality of fresh waxy corn, the 'Huhongnuo 1' waxy corn was used as experimental material in this experiment. The waxy corn was stored at 4 ℃ and near-freezing temperature (−1 ℃) for 40 days, respectively. The changes in quality and the activities of antioxidant enzymes of fresh waxy corn during storage were determined, and correlation analysis and principal component analysis were performed. The results showed that compared with refrigerated storage at 4 ℃, near-freezing temperature treatment could effectively reduce the weight loss, inhibit the rise of fruit skin hardness, and maintain the content of moisture, soluble solids (TSS), soluble sugar, soluble protein and secondary metabolites. In addition, near-freezing temperature treatment could maintain a high level of total phenols, flavonoids and anthocyanins, and increase the activity of catalase (CAT), superoxide

收稿日期: 2022-08-31

基金项目: 上海市科技兴农项目 (沪农科推字 (2021) 第 4-1 号); 上海市农产品保鲜加工专业技术服务平台 (21DZ2292200)。

作者简介: 王娟紫 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品贮藏保鲜, E-mail: WJZ15306572601@163.com。

* 通信作者: 钟耀广 (1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农畜产品加工、功能食品及食品安全, E-mail: ygzhang@shou.edu.cn。

dismutase (SOD) and ascorbate peroxidase (APX), which reduced the accumulation of H_2O_2 , maintained the nutritional quality of fresh waxy corn, and delayed fruit senescence. Correlation analysis showed that the storage time of fresh waxy corn was significantly positively correlated with the weight loss rate, fruit skin hardness and H_2O_2 content and was significantly ($P<0.01$) positively correlated with water content, TSS content, soluble sugar content, total phenols content, flavonoids content, anthocyanins content and APX activity. Principal component analysis and comprehensive score further showed that the key indicators affecting the storage quality of fresh waxy corn were flavonoids content, anthocyanins content, APX activity, fruit skin hardness, weight loss rate, H_2O_2 content, CAT activity and SOD activity. The near-freezing temperature treatment had better fresh-keeping effect, which was conducive to maintaining the storage quality of fresh waxy corn.

Key words: fresh waxy corn; near-freezing temperature storage; nutritional quality; secondary metabolites; antioxidant enzymes

随着人们经济水平的不断提高,消费者对高品质农产品的需求也在日益增加^[1]。糯玉米(*Zea mays* L. var. *certain* Kulesh)俗称黏玉米,它是受玉米第 9 染色体上的隐性糯质基因 *wx* 所控制的一种特殊玉米类型^[2]。鲜糯玉米中含有蛋白质、氨基酸等多种人体必需的营养元素^[3]。因其具有营养物质丰富、风味独特、适口性好等特点,市场需求与日俱增,种植面积逐年增加^[4]。玉米鲜食作为人们喜爱的一种食用方式受到人们的重视,但鲜糯玉米采后受呼吸作用,蒸腾作用,微生物滋生等因素影响,会造成食用性下降,风味口感变差,因此,采后鲜糯玉米的贮藏保鲜技术研究显得尤为重要^[5]。

目前,应用于鲜糯玉米采后保鲜的贮藏技术包括低温贮藏、气调贮藏、真空包装及生物保鲜等,不同的保鲜技术均在一定程度上维持了鲜糯玉米的贮藏品质。研究表明,温度在果蔬贮藏中对其品质有显著影响^[6]。近冰温贮藏作为一种新型果蔬保鲜方式,将贮藏温度控制在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和果蔬冰点之上,在此温度之间的果蔬组织细胞仍保持活性,但生理代谢受到抑制,从而达到保鲜的目的^[7]。近冰温贮藏不仅有利于减缓蓝莓、冬枣、油桃和杏果实采后贮藏期间的营养损失,还能有效维持干杏、西兰花、黄花梨等果蔬的抗氧化能力^[8]。

采后果蔬在维持正常生命活动、抵抗逆境胁迫时均会产生活性氧, H_2O_2 是主要且稳定的活性氧之一,过量的 H_2O_2 积累会破坏细胞正常的生命活动,最终导致果实衰老^[9]。面对极端的环境变化,植物进化出一种称为应激适应的保护机制,在氧化应激下清除过度生成的活性氧的酶促和非酶促保护机制对植物的抗逆性至关重要^[10]。果蔬中存在非酶抗氧化系统,包括总酚、类黄酮和花青素等次生代谢产物^[11]。CAT、SOD 和 APX 是果蔬体内活性氧酶促清除系统中的重要抗氧化酶。林学亮^[12] 研究表明,近冰温贮藏有效抑制黄化梨失重率和果实中 H_2O_2 含量的上升,并使果实内 APX、SOD 在贮藏过程中保持较高活性。布丽根·加冷别克等^[13] 研究表明,与冷藏($4\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$)相比,近冰温($-1.5\sim -1\text{ }^{\circ}\text{C}$)贮藏的吊干杏 H_2O_2 含量处于较低水平,更能保持较高的 SOD、CAT 和 APX 活性,从而有助于降低吊干杏品质劣变并提

高其耐贮性。

目前,近冰温贮藏鲜食玉米的研究仅限于甜玉米,且研究内容局限于甜玉米的外观与营养品质变化^[14]。然而,近冰温贮藏对采后鲜食玉米活性氧代谢(酶促保护机制、非酶抗氧化系统)的影响及其与贮藏品质的关系还未见报道。本研究以‘沪红糯 1 号’糯玉米为实验材料,研究近冰温贮藏技术对采后鲜糯玉米营养品质与活性氧代谢的影响,以期为延长鲜糯玉米采后保质期和扩大鲜食玉米的市场流通提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

‘沪红糯 1 号’糯玉米 购自上海惠和南瓜种植专业合作社,样品在乳熟期及时采收,采收后 2 h 内运至中心实验室,挑选玉米穗型大小一致、无病虫害和机械损伤的玉米鲜穗备用;浓硫酸、浓盐酸、甲醇、丙酮、没食子酸、芦丁等 国药集团化学试剂有限公司(分析纯);聚乙烯吡咯烷酮、抗坏血酸 上海泰坦科技股份有限公司;芍药素 上海源叶生物科技有限公司。

RC-4HC 型温度湿度测定记录仪 江苏精创电气股份有限公司;BP301S 型电子天平 德国塞多利斯公司;TA.XT plus 型物性测试仪(质构仪) 英国 Stable Micro Systems 公司;WYA-ZT 型阿贝折射仪 上海仪电物理光学仪器有限公司;Osterode 型高速冷冻离心机 德国 Biofuge 公司;DKS-16 型恒温水浴锅 艾万拓威达优尔国际贸易(上海)有限公司; μ Quant 型酶标仪 德国 BIO-TEK 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 鲜糯玉米冰点的测定 取带苞衣的鲜糯玉米,挑选大小一致的糯玉米进行冰点的测定。将温度湿度测定记录仪的探针从外苞衣开始插入到玉米籽粒的中心位置,把鲜糯玉米放置于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰箱中,记录其中心温度数值随时间的变化情况^[15]。以时间为横坐标、温度为纵坐标,绘制鲜糯玉米的冻结曲线,从而测定其冰点温度。

1.2.2 样品处理 将挑选好的鲜糯玉米果穗放置于 $(4\pm 0.5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷库中,充分预冷 10 h 后,随机分为 2 组,

分别为CK组、近冰温处理组,每组100个。将玉米果穗随机单层平铺于已消毒的塑料框内,CK组:置于 $(4\pm 0.5)^{\circ}\text{C}$ 冷库中;近冰温处理组:置于 $(-1\pm 0.5)^{\circ}\text{C}$ 的温控冰箱中,贮藏期间相对湿度均保持为 $90\%\pm 5\%$ 。预冷结束后选取6个果穗测定果穗中部籽粒的果皮硬度、水分含量和可溶性固形物含量,将部分籽粒经液氮速冻粉碎后贮存在 -80°C 备用。每个处理每隔8d随机取6个玉米果穗,挑选去除苞衣后成熟度一致的鲜糯玉米,测定果穗中部籽粒的理化性质,共贮藏40d。每次试验进行三次重复。

1.2.3 失重率的测定 采用称重法测定鲜糯玉米失重率,失重率按下列公式进行计算,结果以%表示。

$$\text{失重率}(\%) = \frac{\text{初始重量} - \text{贮藏固定时间后的重量}}{\text{初始重量}} \times 100$$

1.2.4 水分含量的测定 将玉米籽粒使用组织粉碎机粉碎后,使用水分干燥仪测定鲜糯玉米的水分含量,结果以%表示。

1.2.5 果皮硬度的测定 参照Yang等^[16]的方法使用TA.XT质构仪测定鲜糯玉米果皮硬度,选用直径2mm的圆柱形探头(P2),对其中的玉米粒进行试验测定,结果以N表示。

1.2.6 可溶性固形物(total soluble solids, TSS)含量 将玉米籽粒使用组织粉碎机粉碎后,使用阿贝折射仪测定TSS含量,结果以%表示。

1.2.7 可溶性蛋白含量的测定 可溶性蛋白含量参照曹建康等^[17]方法采用考马斯亮蓝染色法测定。以蛋白质质量(μg)为横坐标,吸光度为纵坐标,得线性回归方程 $y=0.0035x+0.6811(R^2=0.9939)$,按下列公式进行计算,结果以 mg/g 表示。

$$\text{可溶性蛋白质含量} = \frac{m' \times V}{V_s \times m \times 1000} (\text{mg/g})$$

式中: m' 表示从标准曲线查得的蛋白质的质量, μg ; V 表示样品提取液总体积, mL ; V_s 表示测定时所取样品提取液体积, mL ; m 表示样品质量, g 。

1.2.8 抗化血酸过氧化物酶(APX)活性的测定 参照曹建康等^[17]的方法并稍作改动。称取1.0g样品,加入5.0mL经 4°C 预冷的提取缓冲液,冰浴匀浆后,于 4°C 、 $12000 \times g$ 离心30min,收集上清液进行测定。以每克样品APX酶促反应体系在波长290nm处吸光度降低0.01为一个酶活性单位(U),按下列公式进行计算,结果以U/g表示。

$$\Delta\text{OD}_{290} = \frac{\text{OD}_{290\text{F}} - \text{OD}_{290\text{I}}}{t_f - t_i}$$

$$\text{APX活性} = \frac{\Delta\text{OD}_{290} \times V}{0.01 \times V_s \times m}$$

式中: ΔOD_{290} 表示每分钟反应混合液在290nm处吸光度的变化值; $\text{OD}_{290\text{F}}$ 表示反应混合液吸光度终止值; $\text{OD}_{290\text{I}}$ 表示反应混合液吸光度初始值; t_f 表示反

应终止时间, min ; t_i 表示反应初始时间, min ; V 表示样品提取液总体积, mL ; V_s 表示测定时所取样品提取液体积, mL ; m 表示样品质量, g 。

1.2.9 次生代谢产物(总酚、类黄酮和花青素)含量的测定 参照曹建康等^[17]的方法稍作改动。称取1.0g样品,加入6.0mL经预冷的1% HCl-甲醇溶液,混匀,于 4°C 避光提取20min,期间摇动数次,然后 $12000 \times g$, 4°C ,离心10min,收集上清液待用。以1% HCl-甲醇溶液作空白参比调零,取上清液分别于280、325、600和530nm处测定吸光值,重复3次。以波长280nm处吸光度值表示总酚含量,波长325nm处吸光度值表示类黄酮物质含量,在波长530和600nm处吸光度值之差表示花青素含量。以没食子酸含量(μg)为横坐标,吸光度为纵坐标制作标准曲线,为 $y=0.0256x+0.0657(R^2=1)$ 计算总酚物质含量;以芦丁含量(μg)为横坐标,吸光度为纵坐标制作标准曲线,为 $y=0.0079x+0.0402(R^2=0.9989)$ 计算类黄酮含量;以芍药素含量(μg)为横坐标,吸光度为纵坐标制作标准曲线,为 $y=0.0522x+0.009(R^2=0.9994)$ 计算花青素含量,按下列公式进行计算。结果以 mg/g 表示。

$$\text{次生代谢物质含量} = \frac{m' \times V}{V_s \times m \times 1000} (\text{mg/g})$$

式中: m' 表示从标准曲线查得的总酚或类黄酮或花青素的质量, μg ; V 表示样品提取液总体积, mL ; V_s 表示测定时所取样品提取液体积, mL ; m 表示样品质量, g 。

1.2.10 可溶性糖含量、过氧化氢(H_2O_2)含量、过氧化氢酶(CAT)和超氧化物歧化酶(SOD)活性测定 使用北京盒子生工科技有限公司提供的 H_2O_2 含量检测试剂盒;苏州梦犀生物医药科技有限公司提供的可溶性糖含量试剂盒、CAT活性测定试剂盒;南京建成生物工程研究所提供的SOD活性测定试剂盒。

1.3 数据处理

每个指标测定均重复3次,结果采用平均值。采用统计软件SPSS 17.0进行方差分析、独立样本T检验和相关性分析, $P<0.05$ 表示差异显著, $P<0.01$ 表示差异极显著,并用Origin 2018绘图软件对数据进行主成分分析和图像处理。

2 结果与分析

2.1 鲜糯玉米冰点的测定

以测定时间为横坐标,鲜糯玉米中心温度为纵坐标,根据温度记录值绘制出鲜糯玉米冻结曲线,如图1所示。由图1可知,鲜糯玉米温度先随时间的延长快速下降,之后温度回升至 -1.6°C ,然后温度继续下降缓慢冻结,从而判断鲜糯玉米的冰点为 -1.6°C 。为了避免温度不稳定发生果实冻结现象,将鲜糯玉米的近冰温贮藏温度设定为 -1°C 。

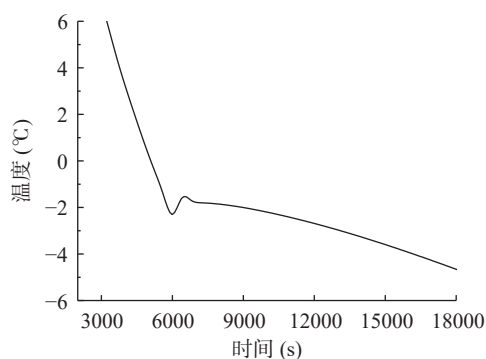


图 1 鲜糯玉米冰点曲线

Fig.1 Freezing curve of fresh waxy corn

2.2 近冰温贮藏对鲜糯玉米失重率、水分含量和果皮硬度的影响

失重率是鲜糯玉米贮藏期间品质变化的重要指

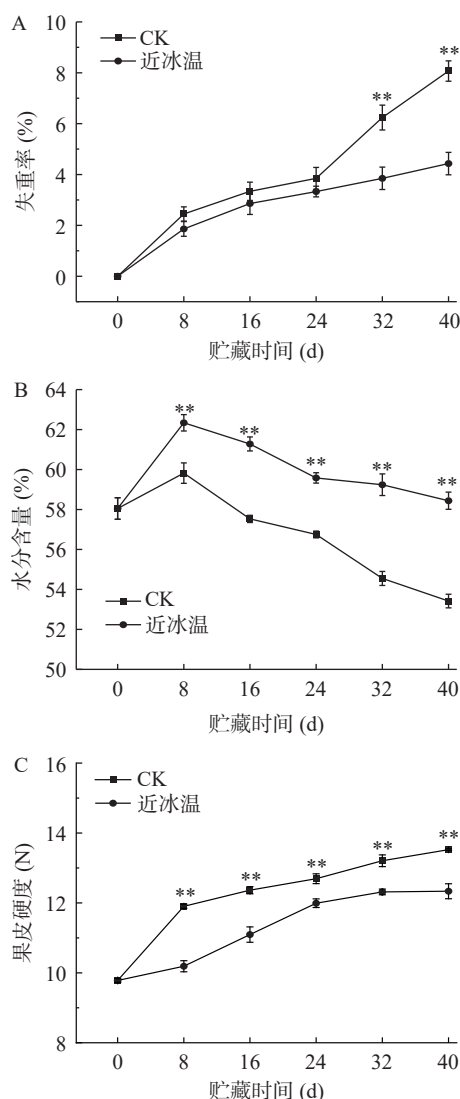


图 2 近冰温贮藏对鲜糯玉米失重率(A)、水分含量(B)和果皮硬度(C)的影响

Fig.2 Effects of near-freezing temperature on weight loss rate (A), moisture content (B) and fruit skin hardness (C) of fresh waxy corn

注: **表示同一天两组之间差异极显著($P<0.01$), *表示差异显著($P<0.05$); 图 3~图 7 同。

标。由图 2A 可知,鲜糯玉米失重率随贮藏时间的延长而不断增加。近冰温处理组在整个贮藏期的失重率始终低于 CK 组,且分别在贮藏 32 和 40 d 时差异极显著($P<0.01$)。贮藏 40 d 时,CK 组的失重率为 8.07%,而近冰温处理组的失重率为 4.43%,比 CK 组低 45.11%,这可能是因为近冰温处理温度较低,能够抑制鲜糯玉米的呼吸消耗和水分散失,从而抑制失重率的上升^[18]。

鲜糯玉米的水分含量对玉米的食用品质有很大影响。由图 2B 可知,CK 组和近冰温处理组鲜糯玉米的水分含量均在第 8 d 达到峰值后降低,变化趋势一致。但近冰温处理组在整个贮藏期间的水分含量始终极显著高于 CK 组($P<0.01$)。贮藏至 40 d 时,CK 组的水分含量为 53.42%,与初始水分含量(58.05%)相比显著下降,而近冰温处理组的水分含量为 58.44%,与初始值无显著差异($P>0.05$)。说明近冰温处理可有效保持鲜糯玉米籽粒在贮藏期间的水分。

果皮硬度与鲜糯玉米的食用口感关系密切。由图 2C 所示,鲜糯玉米的果皮硬度均随贮藏时间的延长而增加。在 40 d 贮藏期间,CK 组的果皮硬度均极显著高于近冰温处理组($P<0.01$),可能是因为 CK 组玉米在贮藏期间,水分含量的降低和营养成分的变化导致玉米籽粒果皮硬度增加迅速^[19]。贮藏 40 d 时,CK 组的果皮硬度为 13.523 N,比初始值(9.781 N)增加了 38.28%,而近冰温处理组的果皮硬度(12.334 N)比初始值增加了 26.15%,说明近冰温处理能有效抑制鲜糯玉米果皮硬度的增加,从而更好的保持鲜糯玉米的柔嫩口感。

2.3 近冰温贮藏对鲜糯玉米可溶性固形物(TSS)与可溶性糖含量的影响

可溶性固形物(TSS)是果实中溶于水的糖、酸和维生素等化合物的总称,反映了果实采后贮藏品质^[20]。由图 3A 可知,CK 和近冰温处理组的 TSS 含量均随贮藏时间的延长呈下降趋势,近冰温处理组的 TSS 含量始终极显著高于 CK 组($P<0.01$),这可能是由于低温能够有效抑制鲜糯玉米的生理代谢进程,从而减少糖类营养物质的消耗,延缓 TSS 含量的下降。当贮藏 40 d 时,近冰温处理组的 TSS 含量为 11.85%,比 CK 组(10.81%)高 9.62%,表明近冰温处理有利于维持鲜糯玉米的 TSS 含量。

可溶性糖是评价鲜糯玉米食味品质的重要指标。由图 3B 所示,随着贮藏时间的延长,玉米籽粒中可溶性糖含量呈下降趋势。近冰温处理组的可溶性糖含量始终高于 CK 组,并在 8~16 d 时差异显著($P<0.05$),24~40 d 时差异极显著($P<0.01$)。在 0~8 d,可溶性糖含量的下降速率较明显,这可能是由于采后初期,鲜糯玉米无法获取由其它器官转运的蔗糖等淀粉合成前体物质,采收前所形成的可溶性糖向淀粉转化的代谢活动仍在进行^[21],因此,采后可溶性糖含量显著下降。贮藏 32~40 d,CK 组可溶性糖含量快速

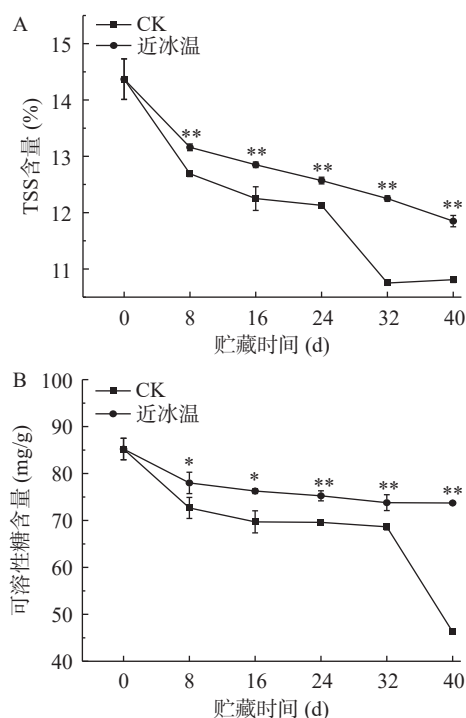


图3 近冰温贮藏对鲜糯玉米 TSS(A)与可溶性糖(B)含量的影响

Fig.3 Effects of near-freezing temperature on TSS (A) and soluble sugar (B) content of fresh waxy corn

降低,这可能是因为后期可溶性糖含量受呼吸作用、微生物侵染等因素的综合影响而大量分解^[19]。贮藏40 d时,CK组和近冰温处理组的可溶性糖含量分别是初始可溶性糖含量的54.28%和86.51%,这表明近冰温处理能够更好的抑制可溶性糖的降解,维持鲜糯玉米的风味品质。

2.4 近冰温贮藏对鲜糯玉米可溶性蛋白的影响

可溶性蛋白是果蔬组织中重要的渗透调节物质和营养物质,能够调控多种生理生化反应,与果蔬组织的成熟衰老关系密切^[22]。由图4可知,贮藏至第8 d,CK组的可溶性蛋白含量下降至1.32 mg/g,而近冰温处理组的蛋白含量增加为4.78 mg/g,这可能是由于近冰温处理的玉米籽粒为应对低温胁迫,刺激体内细胞合成蛋白来修复伤害^[23],同时,低温环境抑制了细胞组织的生理代谢进程,蛋白的合成量高于蛋白

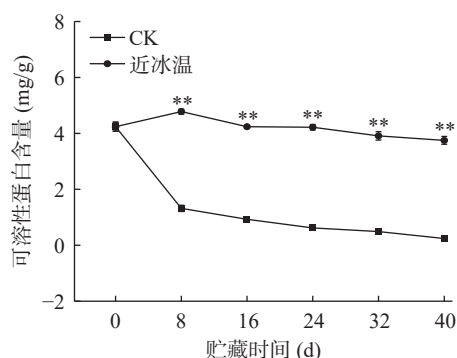


图4 近冰温贮藏对鲜糯玉米可溶性蛋白含量的影响

Fig.4 Effect of near-freezing temperature on the soluble protein content of fresh waxy corn

的分解量,使贮藏初期的蛋白含量有所增加。随着贮藏时间的延长,CK组和近冰温处理组的可溶性蛋白含量均呈下降趋势,近冰温处理组的可溶性蛋白含量始终极显著高于CK组($P<0.01$)。贮藏至40 d时,CK组和近冰温处理组的可溶性蛋白含量分别是0.24和3.75 mg/g,分别是初始可溶性蛋白含量(4.24 mg/g)的5.66%、88.44%,差异极显著($P<0.01$)。综上所述,近冰温处理有利于维持玉米籽粒的可溶性蛋白含量。

2.5 近冰温贮藏对鲜糯玉米次生代谢产物的影响

总酚、类黄酮、花青素是果蔬组织中重要的次生代谢产物^[24]。总酚具有超强的活性氧清除能力,参与抵抗植物逆境应激反应,类黄酮可以抑制脂类过氧化、清除自由基^[25],花青素是一种天然色素,具有很强的抗氧化、抗炎和抗癌活性^[26]。由图5可知,近冰温处理组的总酚、类黄酮、花青素含量均呈先上升后下降的趋势,并均在第8 d达到峰值,说明近冰温处

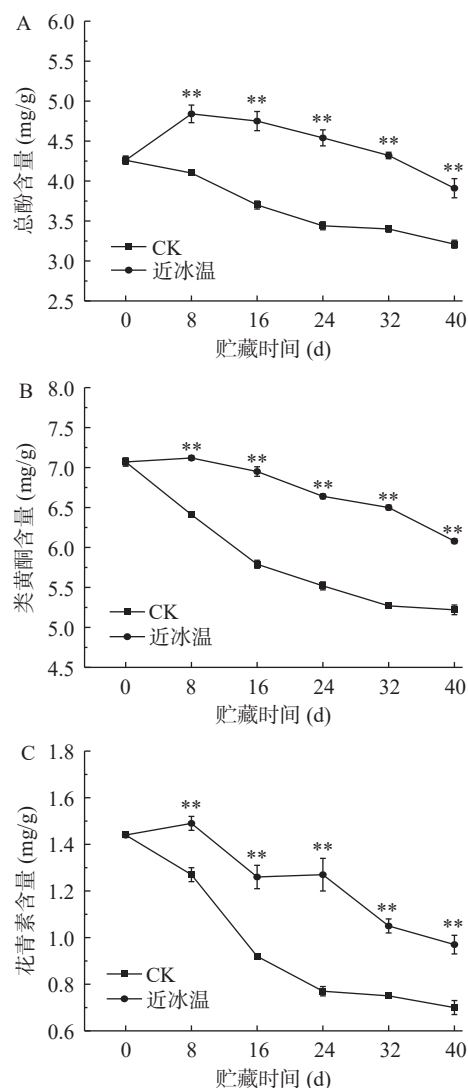


图5 近冰温贮藏对鲜糯玉米总酚(A)、类黄酮(B)和花青素(C)含量的影响

Fig.5 Effects of near-freezing temperature on total phenols (A), flavonoids (B) and anthocyanins (C) content in fresh waxy corn

理有效激活了鲜糯玉米面对逆境胁迫的应激反应,刺激酚类、类黄酮类和花青素等次生代谢物质的产生与积累。在 40 d 贮藏期间,近冰温处理组的次生代谢产物含量始终显著高于 CK 组 ($P<0.01$)。由图 5A 可知,贮藏 40 d 时,近冰温处理组的总酚含量为 3.91 mg/g,比 CK 组 (3.21 mg/g) 高 21.81%。由图 5B 可知,CK 组和近冰温处理组贮藏 40 d 的类黄酮含量分别为 5.22、6.08 mg/g,分别是初始值 (7.07 mg/g) 的 73.83%、86.00%。由图 5C 可知,贮藏至 40 d 时,CK 组和近冰温处理组的花青素含量分别下降到了 0.7 和 0.97 mg/g。上述结果表明,近冰温处理不仅可有效促进贮藏初期玉米籽粒总酚、类黄酮和花青素含量的积累,还能有效减缓次生代谢产物在贮藏期间的损耗,从而维持玉米籽粒的抗氧化活性,延缓果实衰老。

2.6 近冰温贮藏对鲜糯玉米 H_2O_2 含量的影响

H_2O_2 是采后果蔬在进行新陈代谢等生命活动中产生的活性氧,当 H_2O_2 含量过度积累时,会损伤果蔬机体中生物膜脂成分,加速果实的衰老进程^[27]。由图 6 可知,不同处理组的 H_2O_2 含量随贮藏时间的增加呈上升趋势,CK 组 H_2O_2 含量始终高于近冰温处理组,并在第 8 d 时差异显著 ($P<0.05$),第 32 和 40 d 时差异极显著 ($P<0.01$)。贮藏 40 d 时,CK 组的 H_2O_2 含量为 2.51 $\mu\text{mol/g}$,比近冰温处理组 (2.2 $\mu\text{mol/g}$) 高 14.09%,说明近冰温处理能有效降低 H_2O_2 含量的积累,从而更好的保持玉米贮藏品质。

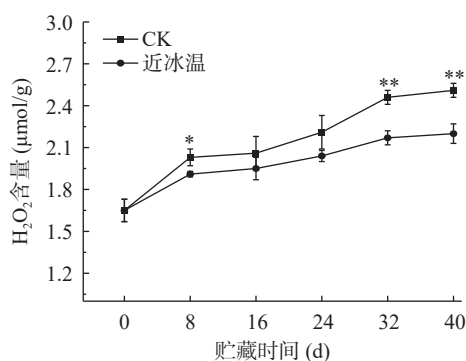


图 6 近冰温贮藏对鲜糯玉米 H_2O_2 含量的影响

Fig.6 Effect of near-freezing temperature on H_2O_2 content of fresh waxy corn

2.7 近冰温贮藏对鲜糯玉米 CAT、SOD、APX 活性的影响

CAT、SOD 和 APX 是果实体内抗氧化酶的重要组成部分, CAT 能特异性地将 H_2O_2 转化为 H_2O 和 O_2 , APX 也可有效分解 H_2O_2 , SOD 则可通过清除组织中产生的超氧阴离子,从而减少活性氧对果实造成损伤,延缓果实衰老^[28]。近冰温贮藏对鲜糯玉米抗氧化酶活性的影响如图 7 所示。由图 7A 可知,在整个贮藏期间,CK 组 CAT 活性始终低于近冰温处理组,且均呈先上升后下降趋势,在贮藏 16 d 时达到峰值,16 至 40 d 期间差异显著 ($P<0.05$)。贮藏 40 d

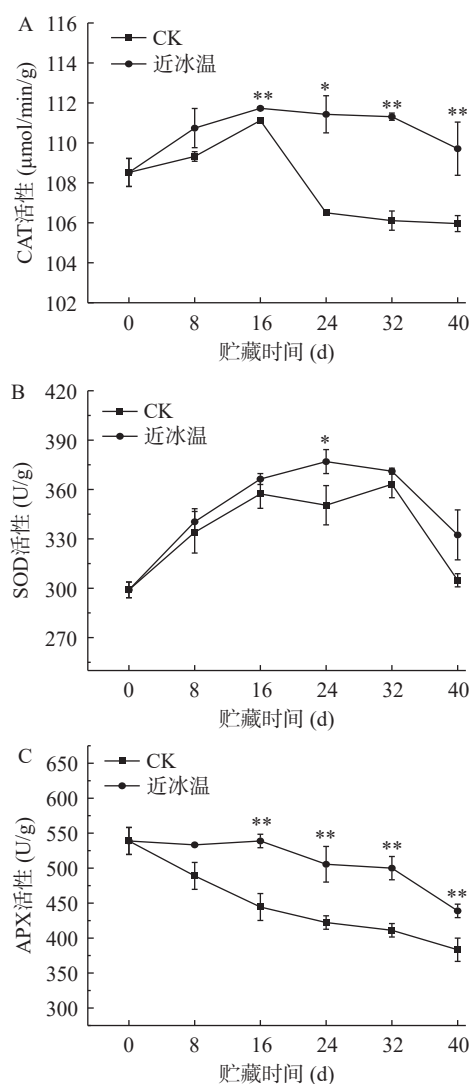


图 7 近冰温贮藏对鲜糯玉米 CAT(A)、SOD(B)和 APX(C)活性的影响

Fig.7 Effects of near-freezing temperature on CAT (A), SOD (B) and APX (C) activity in fresh waxy corn

时,近冰温处理组的 CAT 活性为 109.71 $\mu\text{mol/min/g}$,比 CK 组 (105.96 $\mu\text{mol/min/g}$) 高 3.54%。上述结果说明近冰温处理可诱导抗氧化酶活力,这与李亚玲等^[8]在研究近冰温贮藏对杏果实 CAT 活性的影响研究一致。近冰温贮藏在贮藏初期更有利于激发 CAT 活性,并在长期的贮藏过程中能够通过延缓 CAT 活性的降低,从而更好的清除玉米籽粒内过量的 H_2O_2 ,维持玉米贮藏品质。

由图 7B 可知,CK 组和近冰温处理组的 SOD 活性总体呈先上升后下降趋势,在 40 d 贮藏期间,近冰温处理组的 SOD 活性始终高于 CK 组,在 24 d 时差异显著 ($P<0.05$)。贮藏 40 d 时,近冰温处理组 SOD 活性 (332.42 U/g) 比 CK 组 (304.85 U/g) 高 9.39%,说明近冰温处理在一定程度上有利于维持 SOD 活性,从而提高鲜糯玉米籽粒的抗氧化性。

如图 7C 所示,CK 组和近冰温处理组的 APX 活性均随贮藏时间的延长呈下降趋势。在 40 d 贮藏期间,CK 组的 APX 活性始终低于近冰温处理组,

贮藏 16 d 后差异极显著 ($P<0.01$)。贮藏 40 d 时, CK 组 APX 活性 (383.33 U/g) 和近冰温处理组的 APX 活性 (438.89 U/g), 分别下降到初始 APX 酶活 (538.89 U/g) 的 71.13% 和 81.44%, 说明近冰温处理能有效延缓鲜糯玉米贮藏期间 APX 活性的下降。

2.8 相关性分析

对鲜糯玉米保鲜的各生理指标进行相关性分析, 结果如表 1 所示。鲜糯玉米贮藏时间和失重率、果皮硬度、 H_2O_2 含量呈极显著正相关 ($r=0.889$, $r=0.856$, $r=0.871$, $P<0.01$), 与水分含量、TSS 含量、可溶性糖含量、总酚含量、类黄酮含量、花青素含量和 APX 活性呈极显著负相关 ($r=0.485$, $r=0.896$, $r=0.703$, $r=0.526$, $r=0.716$, $r=0.796$, $r=0.734$, $P<0.01$), 说明在贮藏期间, 失重率、果皮硬度、 H_2O_2 含量、水分含量、TSS 含量、可溶性糖含量、总酚含量、类黄酮含量、花青素含量和 APX 活性均能反应贮藏期间鲜糯玉米的品质, 且总酚含量、类黄酮含量、花青素含量、CAT 活性和 APX 活性与 H_2O_2 含量呈极显著负相关 ($r=0.673$, $r=0.859$, $r=0.863$, $r=0.426$, $r=0.825$, $P<0.01$), 表明总酚等次生代谢产物含量及 CAT 等抗氧化酶活性越高, H_2O_2 含量的积累越少, 更有利于清除玉米籽粒组织内的活性氧自由基, 降低细胞膜脂过氧化程度, 鲜糯玉米各生理指标间关联密切。

2.9 主成分分析

对鲜糯玉米生理指标进行主成分分析, 将鲜糯玉米贮藏期间的 13 项指标转化为 2 个主成分 (表 2 和图 8)。结果表明, 前两个主成分的累计贡献率达到 88.315%, 且特征值均大于 1, 说明前两个主成分可以代表各成分大部分的信息^[29], 符合分析要求。

主成分载荷矩阵可以由表 3 可知, 水分含量、TSS 含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、总酚含量、类黄酮含量、花青素含量和 APX 活性与第 1 主

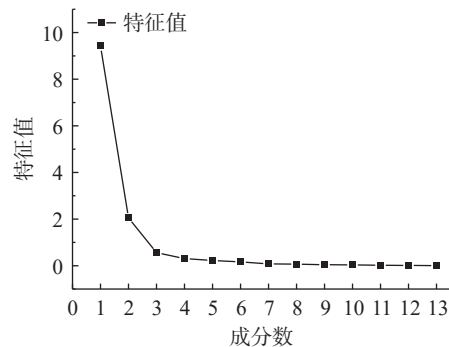


图 8 碎石图

Fig.8 Scree plot

成分呈正相关; 失重率、果皮硬度和 H_2O_2 含量与第 1 主成分呈负相关; 第 2 主成分主要代表 CAT 和 SOD 这 2 个成分, 且呈正相关。综合二者可以得出影响鲜糯玉米贮藏品质的关键指标是类黄酮含量、花青素含量、APX 活性、果皮硬度、失重率、 H_2O_2 含量、CAT 活性和 SOD 活性。

2.10 鲜糯玉米品质综合评价

由表 4 可知, 可用 2 个主成分变量 PCA1、PCA2 代替原来的 13 个指标, 得出各主成分特征向量为:

$$PCA1 = -0.298X_1 + 0.264X_2 - 0.303X_3 + 0.280X_4 + 0.283X_5 + 0.282X_6 + 0.292X_7 + 0.320X_8 + 0.311X_9 - 0.296X_{10} + 0.202X_{11} - 0.038X_{12} + 0.310X_{13};$$

$$PCA2 = 0.185X_1 + 0.326X_2 + 0.218X_3 - 0.295X_4 - 0.041X_5 + 0.136X_6 + 0.259X_7 + 0.022X_8 - 0.045X_9 + 0.201X_{10} + 0.460X_{11} + 0.618X_{12} + 0.039X_{13}.$$

以选取的第 1、第 2 主成分的方差贡献率 α_1 (72.528%)、 α_2 (15.786%) 作为权数构建综合评价模型: $F = \alpha_1 Y_1 + \alpha_2 Y_2$, 即 $F = 0.72528Y_1 + 0.15786Y_2$ 。F 值代表鲜糯玉米贮藏品质的综合得分。鲜糯玉米综

表 1 各生理指标间的相关性分析

Table 1 Correlation analysis between various physiological indicators

	贮藏时间	失重率	水分含量	果皮硬度	TSS 含量	可溶性糖含量	可溶性蛋白含量	总酚含量	类黄酮含量	花青素含量	H_2O_2 含量	CAT 活性	SOD 活性	APX 活性
贮藏时间	1.000													
失重率	0.889**	1.000												
水分含量	-0.485**	-0.630**	1.000											
果皮硬度	0.856**	0.910**	-0.616**	1.000										
TSS 含量	-0.896**	-0.945**	0.488**	-0.915**	1.000									
可溶性糖含量	-0.703**	-0.897**	0.645**	-0.813**	0.780**	1.000								
可溶性蛋白含量	-0.388*	-0.650**	0.740**	-0.758**	0.600**	0.722**	1.000							
总酚含量	-0.526**	-0.670**	0.914**	-0.735**	0.576**	0.690**	0.887**	1.000						
类黄酮含量	-0.716**	-0.846**	0.812**	-0.908**	0.817**	0.803**	0.900**	0.924**	1.000					
花青素含量	-0.796**	-0.851**	0.762**	-0.915**	0.823**	0.771**	0.805**	0.869**	0.961**	1.000				
H_2O_2 含量	0.871**	0.949**	-0.586**	0.922**	-0.930**	-0.830**	-0.677**	-0.673**	-0.859**	-0.863**	1.000			
CAT 活性	-0.227	-0.412*	0.780**	-0.347*	0.281	0.443**	0.642**	0.766**	0.615**	0.538**	-0.426**	1.000		
SOD 活性	0.334*	0.259	0.278	0.387*	-0.405*	-0.015	-0.019	0.165	-0.128	-0.209	0.312	0.436**	1.000	
APX 活性	-0.734**	-0.836**	0.770**	-0.861**	0.809**	0.789**	0.837**	0.885**	0.954**	0.912**	-0.825**	0.609**	-0.057	1.000

注: *代表差异显著, $P<0.05$; **代表差异极显著, $P<0.01$ 。

表 2 主成分特征值及方差贡献率
Table 2 Principal component eigenvalue and variance contribution rate

主成分	特征值	方差贡献率(%)	累计贡献率(%)
1	9.429	72.528	72.528
2	2.052	15.786	88.315
3	0.564	4.338	92.652
4	0.304	2.341	94.993
5	0.228	1.751	96.744
6	0.161	1.237	97.981
7	0.080	0.618	98.599
8	0.068	0.523	99.122
9	0.043	0.327	99.449
10	0.035	0.268	99.717
11	0.020	0.157	99.874
12	0.013	0.098	99.972
13	0.004	0.028	100.000

表 3 主成分载荷矩阵
Table 3 Principal component load matrix table

特征向量	成分1	成分2
失重率	-0.914	0.264
水分含量	0.811	0.467
果皮硬度	-0.929	0.312
TSS含量	0.861	-0.423
可溶性糖含量	0.869	-0.059
可溶性蛋白含量	0.867	0.195
总酚含量	0.896	0.370
类黄酮含量	0.984	0.032
花青素含量	0.956	-0.064
H ₂ O ₂ 含量	-0.91	0.288
CAT活性	0.622	0.659
SOD活性	-0.118	0.886
APX活性	0.953	0.055

表 4 主成分得分系数矩阵
Table 4 Principal component score table

指标名称	成分1	成分2
失重率	-0.298	0.185
水分含量	0.264	0.326
果皮硬度	-0.303	0.218
TSS含量	0.280	-0.295
可溶性糖含量	0.283	-0.041
可溶性蛋白含量	0.282	0.136
总酚	0.292	0.259
类黄酮	0.320	0.022
花青素	0.311	-0.045
H ₂ O ₂ 含量	-0.296	0.201
CAT活性	0.202	0.460
SOD活性	-0.038	0.618
APX活性	0.310	0.039

合得分如图 9 所示, 鲜糯玉米 CK 和近冰温处理组的综合得分均呈下降趋势, 且不同贮藏时间的近冰温处理组的综合得分均极显著高于对照组($P<0.01$), 上述结果表明近冰温处理对鲜糯玉米的保鲜具有明显的效果。

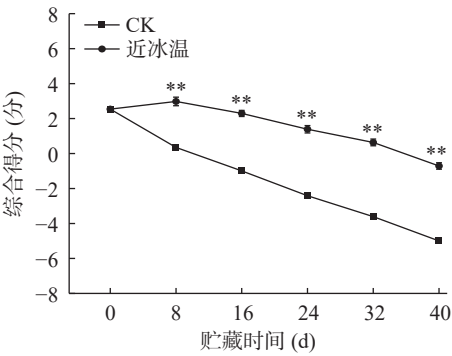


图 9 鲜糯玉米的综合得分
Fig.9 Comprehensive score of fresh waxy corn

3 结论

果蔬是具有呼吸作用和蒸腾作用的生物体, 呼吸作用会消耗果蔬中的大量有机物质, 降低其营养品质和贮藏品质, 必须通过减缓呼吸作用和蒸腾作用来减少采后损失^[30]。温度是影响鲜糯玉米保鲜效果的重要因素之一, 适宜的低温贮藏可以有效延长鲜糯玉米贮藏期。研究表明, 近冰温处理能够有效延缓鲜糯玉米的水分流失, 抑制鲜糯玉米果皮硬度和失重率增加, 维持其 TSS、可溶性糖、可溶性蛋白等营养物质含量, 并通过保持较高的抗氧化酶(CAT、SOD、APX)活性和次生代谢物质(总酚、类黄酮、花青素)含量, 增强玉米籽粒抗氧化特性, 减缓 H₂O₂ 含量的积累, 从而一定程度上维持鲜糯玉米贮藏品质。

相关性分析结果表明总酚等次生代谢产物含量及 CAT 等抗氧化酶活性越高, 越有利于减缓 H₂O₂ 含量的积累。主成分分析得出影响鲜糯玉米贮藏品质的关键指标是类黄酮含量、花青素含量、APX 活性、果皮硬度、失重率、H₂O₂ 含量、CAT 活性和 SOD 活性。根据构建的鲜糯玉米品质评价模型可知, 近冰温处理的鲜糯玉米在贮藏期间的综合得分更高, 具有更佳的保鲜效果。

综上所述, 近冰温处理能够有效抑制采后鲜糯玉米的品质劣变, 维持玉米果穗良好的贮藏品质, 保鲜效果较好, 为鲜糯玉米采后贮藏保鲜技术的发展及应用提供了理论参考, 但鲜糯玉米贮藏期间的品质劣变机理仍需进一步深入研究, 后续可深入探究贮藏期间鲜糯玉米生理生化指标的变化与代谢组和转录组之间的内在关联, 进一步阐明鲜食糯玉米的采后衰老机理, 从而开发更具针对性的贮藏保鲜技术, 以促进鲜糯玉米的市场流通, 满足鲜糯玉米的市场需求。

参考文献

[1] 张沛敏, 邵林生, 闫建宾, 等. 不同鲜食糯玉米品种比较试验[J]. 山西农业科学, 2022, 50(2): 135–141. [ZHANG P M, SHAO L S, YAN J B, et al. Comparative experiment of different fresh-eating waxy corn varieties[J]. Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50 (2): 135–141.]
[2] 徐瑞. 鲜糯玉米冻藏期间品质变化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019. [XU R. Study on quality changes of fresh waxy corn during freezing storage[D]. Chongqing: Southwest University, 2019.]

- [3] KETTHAISONG D, SURIHARN B, TANGWONGCHAI R, et al. Changes in physicochemical properties of waxy corn starches after harvest, and in mechanical properties of fresh cooked kernels during storage[J]. *Food Chemistry*, 2014, 151: 561–567.
- [4] 宋旭东, 薛林, 张振良, 等. 鲜食糯玉米自交系果穗秃尖性状评价及其配合力分析[J]. *玉米科学*, 2022, 30(1): 8–14, 22. [SONG X D, XUE L, ZHANG Z L, et al. Identification of ear tip-barrenness length among waxy maize inbred lines and analysis on combining ability[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2022, 30(1): 8–14, 22.]
- [5] 罗永华. 即食糯玉米的保鲜加工与贮藏关键技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010. [LUO Y H. Study on key technologies for preservation processing and storage of instant waxy corn [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.]
- [6] IKEGAYA A, OHBA S, NAKAJIMA T, et al. Practical long-term storage of strawberries in refrigerated containers at ice temperature[J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(9): 5138–5148.
- [7] 张鹏, 袁兴铃, 薛友林, 等. 精准温度控制对枸杞鲜果贮藏品质和香气成分的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(18): 322–330. [ZHANG P, YUAN X L, XUE Y L, et al. Effect of precise temperature control on the storage quality and aroma components of fresh goji fruit[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(18): 322–330.]
- [8] 李亚玲, 崔宽波, 石玲, 等. 近冰温贮藏对杏果实冷害及活性氧代谢的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(7): 177–183. [LI Y L, CUI K B, SHI L, et al. Effect of near freezing temperature storage on chilling injury and active oxygen metabolism of apricot fruit[J]. *Food Science*, 2020, 41(7): 177–183.]
- [9] LI J, YAN J Q, RITENOUR M A, et al. Effects of 1-methylcyclopropene on the physiological response of Yali pears to bruise damage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 200: 137–142.
- [10] XIANG N, HU J G, WEN T X, et al. Effects of temperature stress on the accumulation of ascorbic acid and folates in sweet corn (*Zea mays* L.) seedlings[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(4): 1694–1701.
- [11] LI J A, YAN J Q, WANG J F, et al. Effects of chitosan coating on oxidative stress in bruised Yali pears (*Pyrus bretschneideri* Rehd.)[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2010, 45(10): 2149–2154.
- [12] 林学亮. 冰温贮藏黄花梨品质变化及其生命代谢研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2018. [LIN X L. Study on quality and physiological metabolism of Huanghua pear during ice-temperature storage[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2018.]
- [13] 布丽根·加冷别克, 任建业, 胡梓睿, 等. 水杨酸处理结合冰温贮藏对吊干杏采后品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(13): 336–344. [BULIGEN J L B K, REN J Y, HU Z R, et al. Effects of salicylic acid treatment combined with freezing point storage on postharvest quality of apricot (*Prunus armeniaca* L. cv. Diaogan)[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(13): 336–344.]
- [14] SHAO X L, LI Y F. Quality control of fresh sweet corn in controlled freezing-point storage[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2011, 10(65): 14534–14542.
- [15] ZHAO H D, SHU C, FAN X G, et al. Near-freezing temperature storage prolongs storage period and improves quality and antioxidant capacity of nectarines[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 228: 196–203.
- [16] YANG C, DUAN W Y, XIE K L, et al. Effect of salicylic acid treatment on sensory quality, flavor-related chemicals and gene expression in peach fruit after cold storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 161: 111089.
- [17] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2011: 44–46, 68–70, 131–132. [CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Postharvest physiological and biochemical guidance of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2011: 44–46, 68–70, 131–132.]
- [18] 方志军. 鲜食玉米穗采收后保鲜技术研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008. [FANG Z J. Study of fresh-maintaining technique of fresh-eating maize in post-harvesting[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2008.]
- [19] 司婉芳. 鲜食玉米保鲜包装技术及包装材料研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019. [SI W F. Study on fresh maize preservation packaging technology and packaging materials[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.]
- [20] 李燕, 刘贵珊, 何建国, 等. 预冷方式对长枣保鲜效果的影响[J/OL]. *食品科学*: 1–11[2022-06-07]. <https://kns-cnki-net.webvpn.zafu.edu.cn/kcms/detail/11.2206.TS.20220224.2155.046.html>. [LI Y, LIU G S, HE J G, et al. Preservation effect of precooling treatments on long jujube[J/OL]. *Food Science*: 1–11[2022-06-07]. <https://kns-cnki-net.webvpn.zafu.edu.cn/kcms/detail/11.2206.TS.20220224.2155.046.html>.]
- [21] 陈利容. 鲜食糯玉米采后生理结构变化及相关酶代谢研究[D]. 济南: 山东大学, 2014. [CHEN L R. Study on postharvest physiological structure changes and related enzyme metabolism of fresh-eating waxy maize[D]. Jinan: Shandong University, 2014.]
- [22] 杨光, 王丹丹, 李琴, 等. 不同贮藏温度对雷竹笋品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(5): 233–239. [YANG G, WANG D D, LI Q, et al. Different storage temperature on the quality of phyllostachys praecox[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2017, 43(5): 233–239.]
- [23] 魏丽娟, 冯毓琴, 李翠红, 等. 基于温度条件的西兰花硅窗自发气调硅窗面积的筛选及验证[J/OL]. *食品科学*: 1–15[2022-06-07]. <https://kns-cnki-net.webvpn.zafu.edu.cn/kcms/detail/11.2206.ts.20210927.2313.044.html>. [WEI L J, FENG Y Q, LI C H, et al. Screening and verification of silicon window area for silicon window packaging of broccolibased on temperature conditions[J/OL]. *Food Science*: 1–15[2022-06-07]. <https://kns-cnki-net.webvpn.zafu.edu.cn/kcms/detail/11.2206.ts.20210927.2313.044.html>.]
- [24] HU Q P, XU J G. Profiles of carotenoids, anthocyanins, phenolics, and antioxidant activity of selected color waxy corn grains during maturation[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(5): 2026–2033.
- [25] 高名月, 赵政阳, 王燕, 等. 气调贮藏对瑞雪苹果的保鲜效果与果皮褐变机制的初探[J/OL]. *食品与发酵工业*: 1–9[2022-06-07]. doi:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.030225. [GAO M Y, ZHAO Z Y, WANG Y, et al. Effects of controlled atmosphere on preservation of Ruixue apples and preliminary study on pericarp browning mechanism[J/OL]. *Food and Fermentation Industries*: 1–9[2022-06-07]. doi:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.030225.]
- [26] SAIKAEW K, LERTRAT K, MEENUNE M, et al. Effect of high-pressure processing on colour, phytochemical contents and an-

tioxidant activities of purple waxy corn (*Zea mays* L. var. *ceratina*) kernels[J]. *Food Chemistry*, 2018, 243: 328–337.

[27] ZHAO H D, WANG B G, CUI K B, et al. Improving postharvest quality and antioxidant capacity of sweet cherry fruit by storage at near-freezing temperature[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 246: 68–78.

[28] MISHRA B, CHAND S, SANGWAN N S. ROS management is mediated by ascorbate-glutathione- α -tocopherol triad in co-ordination with secondary metabolic pathway under cadmium stress in *Withania somnifera*[J]. *Plant Physiology and Biochem-*

istry, 2019, 139: 620–629.

[29] 谢晶, 覃子倚, 潘家丽, 等. 基于主成分分析的确普钠处理对采后荔枝活性氧代谢的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(9): 192–198.

[XIE J, QIN Z Y, PAN J L, et al. Effect of sodium nitroprusside treatment on reactive oxygen species metabolism of postharvest litchi as investigated by principal component analysis[J]. *Food Science*, 2022, 43(9): 192–198.]

[30] YAN J Q, SONG Y, LI J, et al. Forced-air precooling treatment enhanced antioxidant capacities of apricots[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, 42(1): e13320.