

# 微冻对蚕豆籽粒保鲜效果及成熟衰老的影响

李 蝶<sup>1</sup>, 李海燕<sup>1</sup>, 钟士宏<sup>2</sup>, 付院生<sup>2</sup>, 李梅青<sup>1</sup>, 张海伟<sup>1,\*</sup>

(1.安徽农业大学茶与食品科技学院, 农业农村部江淮农产品精深加工与资源利用重点实验室, 安徽省特色农产品高值化利用工程研究中心, 安徽 合肥 230036; 2.安徽迈涛食品有限公司, 安徽 芜湖 241000)

**摘 要:** 探究微冻技术对新鲜蚕豆籽粒的保鲜效果。通过测定蚕豆籽粒的冰点, 确定3个微冻温度, 以冷藏(4℃)为对照组, 分析不同微冻温度(-2、-3、-4℃)贮藏对蚕豆籽粒感官品质、叶绿素含量、色差值等品质指标的影响, 再通过多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)、过氧化物酶(peroxidase, POD)、苯丙氨酸解氨酶(phenylalanine ammonia lyase, PAL)活性、总酚含量、可溶性蛋白含量及细胞组织结构等研究微冻贮藏对蚕豆籽粒成熟衰老的影响。结果表明, 4℃冷藏条件下蚕豆籽粒保鲜期为7 d, 3个微冻温度贮藏均能显著提高样品的感官品质, 其中-3℃使蚕豆籽粒保鲜期达35 d, 能显著减缓叶绿素含量的降低和质量损失率、色差值的升高, 能较好地维持蚕豆籽粒的硬度, 采用主成分分析也得-3℃为最佳微冻温度。-3℃微冻贮藏能减缓PPO、PAL活性升高, 维持较高的POD活性, 延缓蚕豆籽粒中淀粉和可溶性蛋白的生成、总酚的积累及变化速率, 还能维持细胞组织结构、形态的相对稳定, 减缓蚕豆籽粒的成熟衰老。

**关键词:** 蚕豆籽粒; 微冻保鲜; 贮藏期; 品质变化; 成熟衰老

## Effect of Superchilling on Preservation, Ripening and Senescence of Broad Bean Seeds

LI Die<sup>1</sup>, LI Haiyan<sup>1</sup>, ZHONG Shihong<sup>2</sup>, FU Yuansheng<sup>2</sup>, LI Meiqing<sup>1</sup>, ZHANG Haiwei<sup>1,\*</sup>

(1. Anhui Engineering Research Center for High Value Utilization of Characteristic Agricultural Products, Key Laboratory of Jianghuai Agricultural Product Fine Processing and Resource Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, School of Tea and Food Science & Technology, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Anhui Maitao Food Co. Ltd., Wuhu 241000, China)

**Abstract:** This study sought to investigate the effect of superchilling on the preservation of fresh broad bean seeds. Three superchilling temperatures (-2, -3 and -4 °C) were determined based on the freezing point of broad bean seeds. The effects of superchilling storage at each temperature on the sensory quality, chlorophyll content, color difference values and other quality indexes of broad bean seeds were analyzed using chilled storage (4 °C) as a control, and then the effects of superchilling storage on the ripening and senescence of broad bean seeds were studied by determining the activities of polyphenol oxidase (PPO), peroxidase (POD) and phenylalanine ammonia lyase (PAL), total phenol content, soluble protein content and the cell structure. The results showed that the shelf life of broad bean seeds stored at 4 °C was 7 d, and all three superchilling temperatures significantly improved the sensory quality of the samples. Superchilling at -3 °C kept broad bean seeds fresh for up to 35 d, significantly slowing down the decrease in chlorophyll content and the increase in mass loss rate and color difference values during storage and maintaining the hardness well. Principal component analysis (PCA) showed that the optimal superchilling temperature was -3 °C. Superchilling storage at -3 °C slowed down the elevation of PPO and PAL activities, maintained a higher POD activity, and delayed the generation of starch and soluble protein as well as the accumulation and the rate of change of total phenol content in broad bean seeds. Moreover, it maintained the relative stability of the cell structure and morphology and delayed the ripening and senescence of broad bean seeds.

**Keywords:** broad bean seeds; superchilling; storage period; quality changes; ripening and senescence

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240115-143

中图分类号: TS255.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2025)01-0149-09

收稿日期: 2024-01-15

基金项目: 安徽省高校协同创新项目(GXXT-2019-011); 安徽省重点研究与开发计划项目(202104f06020038);

安徽省研究生教育质量工程项目(2023cxcysj046)

第一作者简介: 李蝶(1999—)(ORCID: 0009-0007-6420-0860), 女, 硕士, 研究方向为农产品加工与贮藏。

E-mail: 1400494257@qq.com

\*通信作者简介: 张海伟(1979—)(ORCID: 0000-0001-7069-9038), 女, 副教授, 博士, 研究方向为农产品加工、贮藏与品质分析。E-mail: zhanghaiwei@ahau.edu.cn

引文格式:

李蝶, 李海燕, 钟士宏, 等. 微冻对蚕豆籽粒保鲜效果及成熟衰老的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(1): 149-157.  
DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240115-143. <http://www.spkx.net.cn>

LI Die, LI Haiyan, ZHONG Shihong, et al. Effect of superchilling on preservation, ripening and senescence of broad bean seeds[J]. Food Science, 2025, 46(1): 149-157. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240115-143.  
<http://www.spkx.net.cn>

蚕豆 (*Vicia faba* L.) 又称为佛豆、寒豆、南汉豆、胡豆, 属于豆科植物, 是人类最早种植的豆类植物之一<sup>[1]</sup>。蚕豆中含有丰富的蛋白质、维生素、矿物质等<sup>[2]</sup>, 对土壤的生长适应性强, 在我国产量高<sup>[3]</sup>。蚕豆通常以鲜豆荚形式贮藏、售卖, 但如今快节奏的社会生活使去皮蚕豆籽粒(蚕豆米)更受消费者、饭店和食品加工厂等的欢迎。新鲜蚕豆籽粒蛋白质含量高, 相对一般果蔬耐贮藏性差, 去皮后易发生黄化、褐变, 导致品质变差, 并且蚕豆籽粒在剥皮的过程中还易遭受机械损伤。目前蚕豆的保鲜研究主要是针对鲜豆荚, 已有研究表明, 热处理、酸处理、抗氧化剂处理<sup>[4]</sup>、壳聚糖涂膜处理<sup>[5]</sup>、1-甲基环丙烯处理<sup>[6]</sup>、低温贮藏(0℃)<sup>[7]</sup>及二氧化氯处理<sup>[8]</sup>能够延缓鲜豆荚褐变、衰老, 对维持鲜豆荚品质具有良好的效果。然而这些处理方法应用于蚕豆籽粒保鲜存在弊端, 蚕豆籽粒失去豆荚的保护, 其组织脆嫩, 热处理、化学保鲜剂等处理会使其品质受损, 加快劣变, 使保鲜期缩短。速冻技术虽可延长蚕豆籽粒的贮藏期, 防止腐烂变质<sup>[9]</sup>, 但速冻后的蚕豆籽粒组织结构发生变化, 也会使其品质受损。因此, 应选择一种直接、简便的方法保鲜蚕豆籽粒。

微冻技术是指在生物冻结点以下1~2℃的温度下进行贮藏的轻微冷冻保鲜方法<sup>[10]</sup>, 能够较大幅度地抑制生物体的生理活性, 以达到延缓果蔬成熟衰老和维持品质的效果。如今微冻技术已在蔬菜保鲜中广泛应用, 已有研究表明, 微冻技术应用于紫甘蓝<sup>[11]</sup>、蕹菜、薇菜<sup>[12]</sup>等蔬菜保鲜, 能较好地维持蔬菜品质。杨光等<sup>[13]</sup>研究发现, 雷竹笋在-3℃微冻条件下, 贮藏期达30 d, 同时还能保持其原有风味。果蔬贮藏期间成熟衰老主要涉及新陈代谢、呼吸作用、酶促反应及非酶抗氧化成分变化<sup>[14]</sup>, 通过调节此类反应能够延缓果蔬衰老, 维持果蔬品质。在低温环境下贮藏, 果蔬可通过降低呼吸速率和激活活性氧(reactive oxygen species, ROS)清除保护机制, 达到延缓变质的目的<sup>[15-16]</sup>, 并且能更好地维持外观和营养品质。因此, 本研究依据蚕豆籽粒的冰点, 采用不同的微冻温度对蚕豆籽粒进行贮藏, 探究不同微冻温度对蚕豆籽粒的保鲜效果及成熟衰老的影响, 以期蚕豆籽粒保鲜提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

蚕豆籽粒, 品种为‘青海3号’, 购于安徽省合肥市蜀山区超市。

30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、氢氧化钠(均为分析纯) 西陇科学股份有限公司; 硼酸(分析纯) 无锡市展望化工试剂有限公司; 硼砂(分析纯) 上海中试化工总公司;  $\beta$ -巯基乙醇(纯度 $\geq 98.0\%$ ) 上海麦克林生化科技有限公司; L-苯丙氨酸(纯度98.0%) 上海皓鸿生物医药科技有限公司; 可溶性淀粉(分析纯) 广东汕头西陇化工厂; 牛血清白蛋白(bovine serum albumin, BSA)(纯度98.8%) 上海毕得医药科技股份有限公司; 其他试剂(均为分析纯) 国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

TA-Xt Plus型食品物性测试仪 英国SMS公司; CR-400型色差计 日本柯尼卡美能达公司; BC/BD-200HER型卧式冷藏冷冻转换柜(电子控温, 精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ) 青岛海尔特特种电冰柜有限公司; TU-1950型紫外-可见分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司; B302型生物显微镜 重庆奥特光学仪器有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 原料处理

选取大小均匀、无病害、无机械损伤的蚕豆籽粒原料。首先, 测定蚕豆籽粒的冰点, 确定微冻温度。其次, 每组分别选取5.0 kg蚕豆籽粒, 用PE自封袋(8 cm $\times$ 12 cm)进行装袋密封, 每袋(100 $\pm$ 5) g, 每组分为50袋, 分别置于(4 $\pm$ 0.5)、(-2 $\pm$ 0.5)、(-3 $\pm$ 0.5)℃和(-4 $\pm$ 0.5)℃条件下贮藏, 每隔7 d取样一次, 测定指标, 得出最佳微冻温度。最后, 将蚕豆籽粒置于(-3 $\pm$ 0.5)℃条件下贮藏42 d, 与(4 $\pm$ 0.5)℃贮藏作对比, 每隔7 d取样一次, 测定蚕豆籽粒的多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)、过氧化物酶(peroxidase, POD)、苯丙氨酸解氨酶(phenylalanine ammonia lyase, PAL)活性、淀粉含量、可溶性蛋白含量, 观察细胞组织结构, 以探究微冻贮藏对蚕豆籽粒成熟衰老的影响。

#### 1.3.2 蚕豆籽粒冰点测定

参考陈惠等<sup>[7]</sup>的方法, 称取100 g新鲜蚕豆籽粒打成匀浆, 倒入烧杯中, 将温湿度记录仪插入样品中心位

置, 置于-18℃冰箱中, 根据中心温度随时间变化的参数, 绘制冻结曲线, 确定冰点温度。

### 1.3.3 感官评定

感官评定在安徽农业大学茶与食品科技学院食品感官分析实验室进行, 参与感官评价的成员由经过专业培训、身体健康、对蚕豆无厌恶感的10名评价人员组成, 男女比例为1:1。样品置于白色餐盘中, 均采用随机3位数编码呈送, 评价员按照蚕豆籽粒感官评分标准(表1)进行感官评分。采用加权评分法, 对色泽、质地、气味和组织形态4个方面进行评价, 满分10分, 分别赋予4个指标不同的权重, 得到最终的感官评分。当感官评分等级为差时, 可判定样品失去商品价值和食用价值。

表1 蚕豆籽粒感官评分标准

Table 1 Criteria for sensory evaluation of broad bean seeds

指标	评分标准	评分等级 (评分)	评价方法
色泽 (30%)	色泽新鲜, 呈青绿色, 无褐色斑点	优 (8.00~10.00)	直接观察样品 表面颜色
	色泽较新鲜, 呈较淡的青绿色, 无褐色斑点	良 (6.00~7.99)	
	部分绿色褪去, 稍微发黄, 有较少褐色斑点	中 (4.00~5.99)	
	颜色变黄, 褐色斑点较多	差 (2.00~3.99)	
组织形态 (25%)	颜色完全变黄, 完全褐变	极差 (0.00~1.99)	直接观察样品 表面形态
	蚕豆粒表面完整、光滑、饱满	优 (8.00~10.00)	
	蚕豆粒表面较完整、光滑、饱满	良 (6.00~7.99)	
	蚕豆粒表面少量凹陷、略微萎蔫	中 (4.00~5.99)	
	蚕豆粒表面凹陷明显、萎蔫明显	差 (2.00~3.99)	
气味 (15%)	蚕豆粒表面凹陷很多, 萎蔫严重	极差 (0.00~1.99)	将样品端至鼻前 嗅闻样品的气味
	蚕豆特殊香味浓厚, 无异味	优 (8.00~10.00)	
	蚕豆香味较浓厚, 无异味	良 (6.00~7.99)	
	蚕豆特殊香味适中, 无明显异味	中 (4.00~5.99)	
	蚕豆香味较淡, 有异味	差 (2.00~3.99)	
质地 (30%)	无明显蚕豆香味且有豆腥味或腐臭味	极差 (0.00~1.99)	用手捏和掐断蚕 豆瓣, 感受样品 的软硬程度
	质地较硬, 清脆易折	优 (8.00~10.00)	
	质地硬, 较易折断	良 (6.00~7.99)	
	质地较软, 不易折断	中 (4.00~5.99)	
	质地软, 较难折断	差 (2.00~3.99)	
	质地很软, 很难折断	极差 (0.00~1.99)	

### 1.3.4 叶绿素含量测定

参考展宗冰等<sup>[17]</sup>的分光光度法测定蚕豆籽粒中的叶绿素含量, 按式(1)~(3)计算:

$$\rho_a = 13.95A_{665\text{ nm}} - 6.88A_{649\text{ nm}} \quad (1)$$

$$\rho_b = 24.96A_{649\text{ nm}} - 7.32A_{665\text{ nm}} \quad (2)$$

$$\text{叶绿素含量}/(\text{mg/g}) = \frac{(\rho_a + \rho_b) \times V}{m \times 1000} \quad (3)$$

式中:  $\rho_a$ 和 $\rho_b$ 分别为叶绿素a和叶绿素b质量浓度/(mg/L);  $V$ 为样品提取液总体积/mL;  $m$ 为样品质量/g。

### 1.3.5 色差值测定

采用手持式色差计测定样品表面亮度值( $L^*$ )、红度值( $a^*$ )和黄度值( $b^*$ ), 并计算 $\Delta E$ 。随机选取一袋

样品铺平, 排列整齐、无缝隙后进行测定, 每组样品平行测定6次, 结果取平均值。 $L_0^*$ 、 $a_0^*$ 、 $b_0^*$ 表示每个样品贮藏0 d时的色差值;  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 表示每个样品测定时的色差值,  $\Delta E$ 按式(4)计算:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (4)$$

### 1.3.6 质量损失率测定

参考冯海红等<sup>[18]</sup>的方法, 蚕豆籽粒初始质量为 $m_1$ , 贮藏后质量为 $m_2$ , 进行3次重复实验, 质量损失率按式(5)计算:

$$\text{质量损失率}/\% = \frac{m_1/\text{g} - m_2/\text{g}}{m_1/\text{g}} \times 100 \quad (5)$$

### 1.3.7 水分含量测定

参考GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》<sup>[19]</sup>中的直接干燥法测定水分质量分数。

### 1.3.8 硬度测定

参考冯海红等<sup>[18]</sup>方法并稍作修改, 将完整蚕豆籽粒平放在食品物性测试仪台面中心位置, 选用P/2探头进行穿刺, 测前速率2 mm/s, 测试速率1 mm/s, 测后速率2 mm/s, 接触力10×g, 穿刺深度5 mm, 重复测定9次, 结果取平均值, 单位为g。

### 1.3.9 PPO、POD、PAL活性、总酚含量和淀粉含量测定

参考曹建康<sup>[20]</sup>的方法进行测定, 以每克样品(鲜质量)每分钟吸光度增加1为一个酶活性单位(U); 以每克样品(鲜质量)在波长280 nm处吸光度表示总酚含量; 淀粉含量采用碘-淀粉比色法进行测定, 单位以mg/g表示。

### 1.3.10 可溶性蛋白含量测定

参考梁钻好等<sup>[21]</sup>的双缩脲法测定可溶性蛋白含量, 单位以mg/g表示。

### 1.3.11 细胞组织结构观察

参考张仁凤<sup>[22]</sup>的方法并作修改, 切取蚕豆籽粒表面的横切组织切片, 厚度约为0.5 mm, 用镊子将切片放在载玻片上, 用滴管滴1~2滴清水后盖上盖玻片, 在显微镜下观察细胞结构并截屏保存图像。

## 1.4 数据处理与分析

使用Excel 2019软件进行数据初步处理, 采用GraphPad Prism软件进行数据多重比较分析, 采用SPSS Statistics 19软件进行独立样本 $t$ 检验,  $P < 0.05$ 表示差异显著。采用Origin 2021软件绘图。结果均以平均值±标准差表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 蚕豆籽粒冰点及其冻结规律

由图1可知, 蚕豆籽粒冻结过程符合一般果蔬冻结的3个阶段。根据其冻结规律得出, 蚕豆籽粒的冰点为



-0.5℃, 高于已报道的鲜豆荚的冰点(-0.8℃)<sup>[7]</sup>, 这可能是因为本研究采用的是剥皮后的蚕豆籽粒, 而且冰点高低还受蚕豆品种、嫩度、水分含量等因素的影响。综上所述, 选择-2、-3、-4℃作为微冻实验温度。

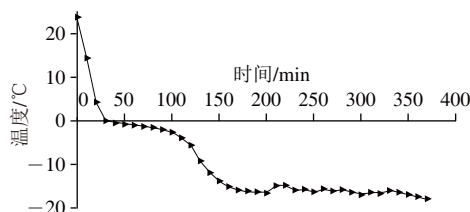


图1 -18℃下蚕豆籽粒冻结曲线

Fig. 1 Freezing curve of broad bean seeds at -18℃

## 2.2 不同微冻温度贮藏对蚕豆籽粒保鲜效果的影响

### 2.2.1 不同微冻温度贮藏对蚕豆籽粒感官评分的影响

随着贮藏时间的延长, 蚕豆籽粒感官品质不断下降, 如叶绿素含量减少导致的表面黄化、褐变; 又由于蚕豆籽粒中含有多不饱和脂肪酸, 脂氧合酶催化作用易引发油酸和亚油酸的氧化, 产生挥发性化合物<sup>[23]</sup>, 以及蛋白质、糖和类胡萝卜素的降解反应产生某些挥发性物质<sup>[24]</sup>, 使蚕豆籽粒随着贮藏时间延长产生异味。由图2、3可知, 蚕豆籽粒感官评分在贮藏期间呈下降趋势, 外观逐渐变差。但是微冻处理均能有效延缓蚕豆籽粒感官评分的下降, 尤其是一3℃微冻处理。4℃冷藏组样品保鲜期为7 d, 贮藏至14 d后, 感官评分降为2.7, 评分等级为差, 结合外观图(图3)可知, 蚕豆籽粒表面褐变严重, 失去食用价值。14~28 d贮藏期间, -3℃组和-4℃组感官评分差异不显著( $P>0.05$ ), 但显著高于-2℃组。28 d以后2组感官评分迅速下降, 主要是因为贮藏后期蚕豆籽粒产生的豆腥味较重及明显开始黄化。贮藏至35 d时, -2℃组感官评分为 $3.54\pm0.36$ , 评分等级为差, 褐变较明显; -3℃组感官评分显著高于-4℃( $P<0.05$ )。因此, -3℃微冻贮藏能够更好地维持蚕豆籽粒的感官品质, 保鲜期为35 d左右。

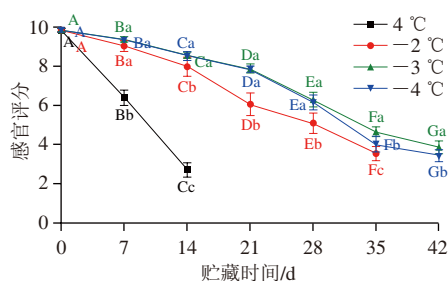


图2 不同微冻温度贮藏对蚕豆籽粒感官评分的影响

Fig. 2 Effects of different superchilling temperatures on the sensory score of broad bean seeds during storage

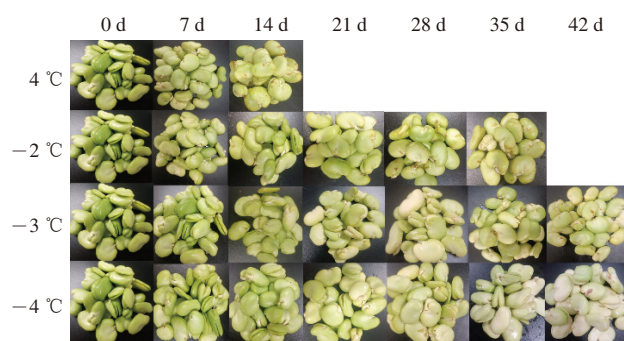


图3 不同微冻温度贮藏对蚕豆籽粒外观变化的影响

Fig. 3 Effects of different superchilling temperatures on the appearance change of broad bean seeds during storage

### 2.2.2 不同微冻温度贮藏对蚕豆籽粒叶绿素含量的影响

叶绿素是评价蚕豆籽粒贮藏过程中品质变化的一个重要指标。由于在贮藏过程中蚕豆籽粒的光合作用和叶绿素合成酶活性受到抑制, 并且叶绿素在贮藏期间也处于不断转化中<sup>[25]</sup>, 导致贮藏期间各组蚕豆籽粒的叶绿素含量整体呈下降的趋势(图4)。与4℃冷藏组相比, 微冻处理均显著延缓了叶绿素含量下降( $P<0.05$ )。贮藏至14 d时, 4℃组叶绿素含量比初始值下降66.67%, 而-3、-4℃组分别下降16.67%、18.18%, 且2组之间差异不显著( $P>0.05$ )。贮藏至35 d时, 3个微冻温度组叶绿素含量差异不显著( $P>0.05$ ), 但依然高于4℃冷藏至14 d时蚕豆籽粒的叶绿素含量。

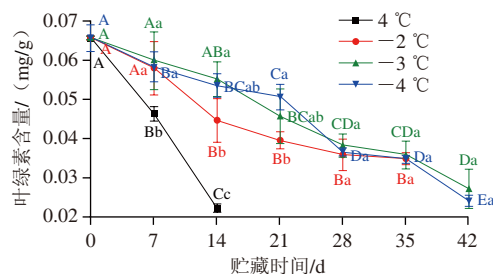


图4 不同微冻温度贮藏对蚕豆籽粒叶绿素含量的影响

Fig. 4 Effects of different superchilling temperatures on the chlorophyll content of broad bean seeds during storage

### 2.2.3 不同微冻温度贮藏对蚕豆籽粒色差值的影响

新鲜蔬菜的表皮颜色直接影响消费者的可接受程度, 颜色的变化也是影响蔬菜品质的重要因素<sup>[26]</sup>。如图5所示, 随着贮藏时间的延长, 蚕豆籽粒表面逐渐黄化, 各组蚕豆籽粒 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 逐渐增大,  $\Delta E$ 相应逐渐增大。微冻处理均显著降低蚕豆籽粒 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 的增大程度, 可知微冻贮藏比冷藏更能维持蚕豆籽粒贮藏期间的色泽。贮藏21 d后, 3个微冻处理组 $\Delta E$ 具有显著差异( $P<0.05$ ), 其中-3℃组 $\Delta E$ 最小。因此, -3℃微冻贮藏更能维持蚕豆籽粒色泽, 减缓蚕豆籽粒表面黄化。

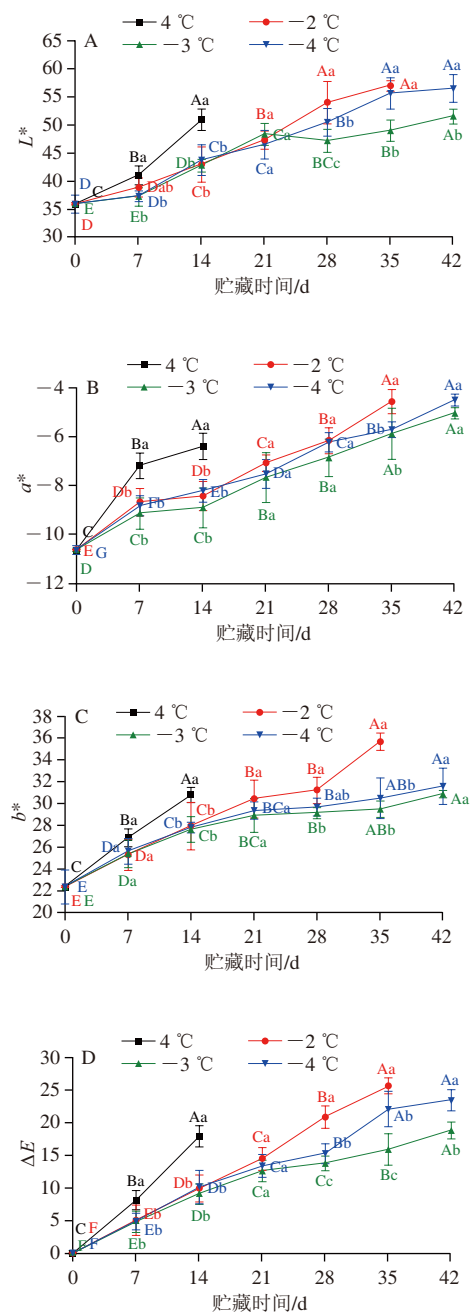


图5 不同微冻温度贮藏对蚕豆籽粒 $L^*$  (A)、 $a^*$  (B)、 $b^*$  (C)、 $\Delta E$  (D) 的影响

Fig. 5 Effects of different superchilling temperatures on the  $L^*$  (A),  $a^*$  (B),  $b^*$  (C), and  $\Delta E$  (D) values of broad bean seeds during storage

#### 2.2.4 不同微冻温度贮藏对蚕豆籽粒质量损失率和水分含量的影响

在贮藏过程中,呼吸和蒸腾作用可导致果蔬失水萎蔫,质量损失率增加,易造成品质劣变<sup>[27-28]</sup>。微冻处理显著延缓了贮藏期间蚕豆籽粒质量损失率的增大和水分含量的降低,而且微冻温度越低,延缓效果越好(图6)。但贮藏至35 d后,-4 °C组质量损失率迅速增加,并显著高于-3 °C组( $P<0.05$ ),这可能是由于-4 °C温度较

低,使蚕豆籽粒内部组织冻结程度相对较大,对细胞结构破坏较大,导致汁液流失增多。因此,-3 °C微冻贮藏减缓质量损失率上升方面具有较好的效果,而-4 °C微冻贮藏在维持蚕豆籽粒水分含量方面具有较大的优势。

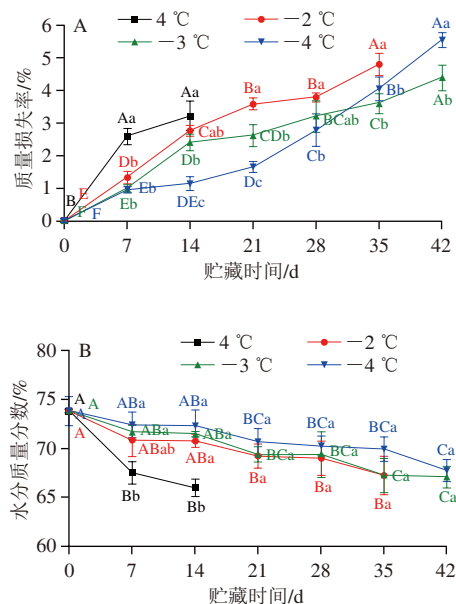


图6 不同微冻温度贮藏对蚕豆籽粒质量损失率(A)和水分含量(B)的影响

Fig. 6 Effects of different superchilling temperatures on the mass loss rate (A) and water content (B) of broad bean seeds during storage

#### 2.2.5 不同微冻温度贮藏对蚕豆籽粒硬度的影响

如图7所示,由于在贮藏前14 d组织老化,蚕豆籽粒在微冻贮藏期间硬度逐渐增加,贮藏至21 d后,蚕豆籽粒细胞壁成熟,出现轻微萎蔫软化现象,硬度降低<sup>[29]</sup>。4 °C冷藏组老化程度较大、硬度提高最快,始终显著高于3个微冻贮藏组( $P<0.05$ ),从0 d至14 d,4 °C组硬度与初始值相比增加40.52%,而-3 °C组仅增加11.07%。贮藏至14 d后,蚕豆硬度开始逐渐降低,贮藏21 d后,-3 °C与-4 °C组硬度差异不显著( $P>0.05$ ),但是在硬度降低期间,-3 °C组蚕豆籽粒的硬度均高于-4 °C组。因此,-3 °C微冻贮藏能够较好地维持蚕豆籽粒的硬度。

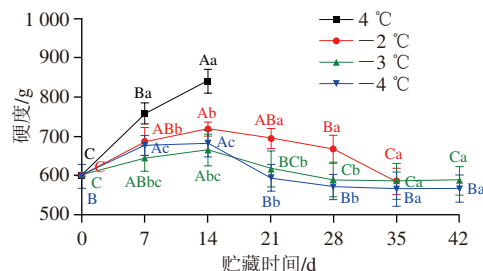


图7 不同微冻温度贮藏对蚕豆籽粒硬度的影响

Fig. 7 Effects of different superchilling temperatures on the hardness of broad bean seeds during storage

2.2.6 主成分分析 (principal component analysis, PCA)

为进一步探究不同微冻温度对蚕豆籽粒贮藏品质的影响,采用PCA将不同指标对贮藏品质的贡献进行量化和可视化<sup>[30]</sup>,得出PCA图(图8)和PC载荷矩阵(表1)。如图8所示,前2个PC累计贡献率为95.5%,表明2个PC可以解释原始数据的大部分信息。从9个指标中提取出2个PC,  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $\Delta E$ 和质量损失率在PC1正坐标轴处具有较高载荷,说明PC1反映了这5个指标信息;硬度在PC2正坐标轴处有较高载荷,说明PC2反映了该指标信息(表1)。PCA图能够反映不同微冻温度对蚕豆籽粒品质稳定性的影响,3个微冻温度中,以 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏组的置信圈最窄小<sup>[21]</sup>,可得出 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏的蚕豆籽粒各保鲜指标在贮藏期间变化最小。因此,3个微冻处理对蚕豆籽粒的保鲜效果依次为 $-3\text{ }^{\circ}\text{C} > -4\text{ }^{\circ}\text{C} > -2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,即 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 微冻贮藏的蚕豆籽粒保鲜效果最佳。

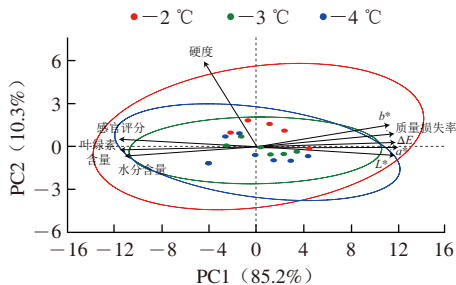


图8 不同微冻温度贮藏对蚕豆籽粒保鲜品质影响的PCA图

Fig. 8 PCA plot showing the changes in the preservation quality of broad bean seeds during storage at different superchilling temperatures

表1 PC载荷矩阵

Table 1 Principal component loading matrix

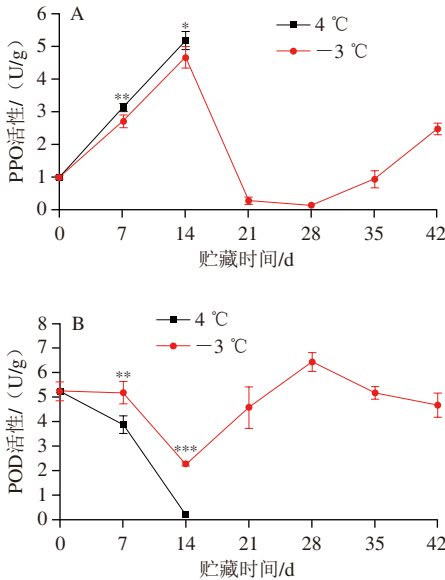
指标	PC1	PC2
感官评分	-0.354	0.086
叶绿素含量	-0.351	-0.035
$L^*$	0.352	-0.036
$a^*$	0.357	0.002
$b^*$	0.342	0.188
$\Delta E$	0.355	0.049
质量损失率	0.351	0.117
水分含量	-0.339	-0.106
硬度	-0.134	0.963

2.3 微冻贮藏对蚕豆籽粒成熟衰老的影响

2.3.1 微冻贮藏对蚕豆籽粒PPO、POD活性的影响

如图9A所示,在微冻贮藏期间,蚕豆PPO活性整体变化趋势为先升高后降低再升高,贮藏至14 d,酶活性达到峰值,21~28 d酶活性平稳变化后又缓慢上升。这是因为蚕豆籽粒贮藏前14 d呼吸作用及生理活性处于活跃状态,细胞膜氧化程度增强,因而酶活性持续升高,加速蚕豆籽粒成熟;当贮藏至21 d时,蚕豆籽粒出现休眠状态,并且底物浓度降低、细胞膜氧化程度改变,从而

导致酶活性降低且变化平缓;但是当贮藏至28 d以后,蚕豆籽粒衰老进程加快,PPO与酚类底物的区域化被打破<sup>[31]</sup>,蚕豆籽粒表面也逐渐出现褐变。在贮藏前14 d内, $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 组蚕豆籽粒PPO活性显著低于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 组( $P < 0.05$ ),表明微冻贮藏对PPO活性有一定的抑制效果,能抑制蚕豆籽粒微冻贮藏前期的褐变,延缓品质劣变。



\*.组间差异显著 ( $P < 0.05$ ); \*\*.组间差异极显著 ( $P < 0.01$ ); \*\*\*.组间差异高度显著 ( $P < 0.001$ )。图10、11同。

图9 不同微冻温度贮藏对蚕豆籽粒PPO (A)、POD (B) 活性的影响  
Fig. 9 Effects of superchilling temperatures on the PPO (A) and POD (B) activities of broad bean seeds during storage

POD具有抗氧化活性,与其他抗氧化酶组成的复杂抗氧化系统可通过清除果蔬中过多的 $\text{H}_2\text{O}_2$ ,保护果蔬免受ROS影响<sup>[32]</sup>,以此减缓果蔬成熟衰老过程中的氧化褐变。如图9B所示,蚕豆籽粒的POD活性在微冻贮藏期间整体变化为先降低后升高再降低,与闫安<sup>[12]</sup>的研究结果一致。贮藏前14 d内, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 组POD活性极显著低于 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 组( $P < 0.01$ ), $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 组贮藏结束时,POD活性达到最低,因而 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 组蚕豆籽粒褐变严重。由此可知,微冻贮藏能够有效维持POD活性,减缓蚕豆籽粒衰老褐变。贮藏14 d后, $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 组POD活性开始升高,可能是由于低温激活了蚕豆籽粒组织内部的抗氧化系统,使POD活性升高,以应对氧化应激,抵御氧化褐变发生,减缓蚕豆籽粒变质。

2.3.2 微冻贮藏对蚕豆籽粒PAL活性和总酚含量的影响

PAL是果蔬次生物质黄酮类、酚类物质、木质素等生物合成途径中参与苯丙烷代谢的关键酶<sup>[33]</sup>。酚类物质是果蔬组织内酶促褐变的关键底物,酚类物质被氧化后会在果蔬内形成褐色物质<sup>[34]</sup>,两者与果蔬成熟衰老有密



切联系。如图10所示,蚕豆籽粒在贮藏期间PAL活性和总酚含量均呈现先上升后下降的趋势,4℃冷藏组蚕豆籽粒贮藏至7 d时出现PAL活性高峰,而-3℃组贮藏至35 d才出现酶活性高峰和总酚含量峰值,并且4℃组贮藏结束时,PAL活性和总酚含量高于-3℃组。表明微冻贮藏能够显著抑制PAL活性和总酚的合成积累,延迟PAL活性高峰的出现。PAL活性上升期间,蚕豆籽粒组织内部苯丙烷代谢随着贮藏时间延长而加快,酚类物质积累较多,总酚含量上升。贮藏至21 d后,酶活性升高速率减小,说明此时苯丙烷代谢变缓,当达到酶活性高峰后,酶活性降低,总酚含量也随之降低。且随着果蔬成熟衰老,总酚含量降低,果蔬新鲜度也降低<sup>[35]</sup>,在42 d时蚕豆籽粒品质开始劣变,逐渐失去食用价值。

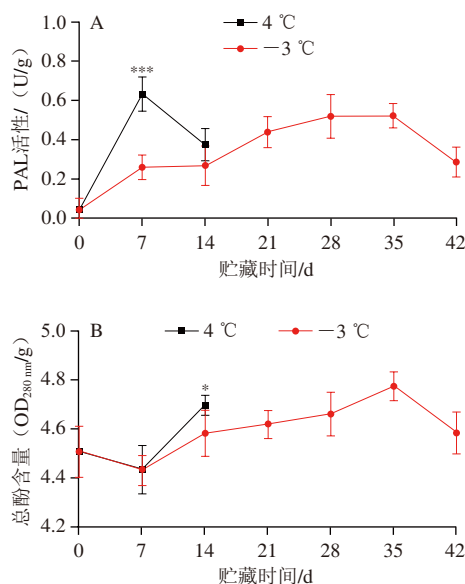


图10 微冻贮藏对蚕豆籽粒PAL活性(A)和总酚含量(B)的影响

Fig. 10 Effect of superchilling on the PAL activity (A) and total phenolic content (B) of broad bean seeds during storage

### 2.3.3 微冻贮藏对蚕豆籽粒淀粉、可溶性蛋白含量的影响

果蔬中淀粉代谢与果蔬的品质和耐贮性有较大相关性,在成熟衰老进程中,淀粉不断合成、分解,处于变化状态<sup>[36-37]</sup>。如图11A所示,在-3℃微冻贮藏期间,蚕豆籽粒淀粉含量先上升后下降,主要是因为蚕豆籽粒贮藏前期淀粉的合成大于降解,到贮藏末期蚕豆成熟度较高,同时受到低温诱导,淀粉开始水解<sup>[38]</sup>,导致淀粉含量下降。贮藏至14 d时,4℃组和-3℃组淀粉含量比初始值分别升高60.45%与12.87%,说明微冻贮藏能减缓淀粉的合成,从而减缓蚕豆籽粒的成熟。贮藏至21 d,-3℃组淀粉含量达到峰值,贮藏结束时,淀粉含量与初始值相比升高1.05倍,说明蚕豆籽粒贮藏期间淀粉的合成大于水解。

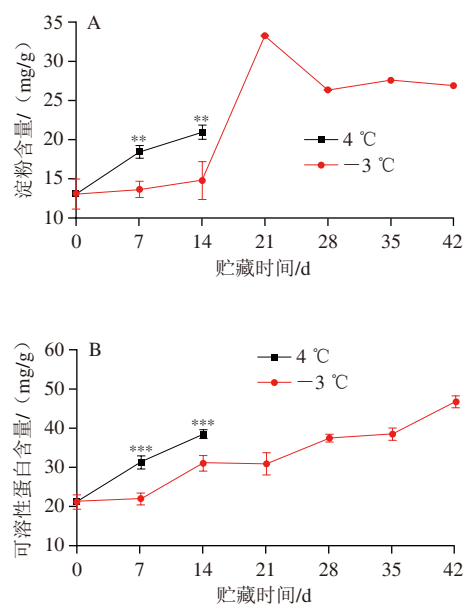


图11 微冻贮藏对蚕豆籽粒淀粉含量(A)和可溶性蛋白含量(B)的影响

Fig. 11 Effect of superchilling on the starch content (A) and soluble protein content (B) of broad bean seeds during storage

果蔬中的蛋白质可分为可溶性蛋白和不溶性蛋白,在成熟衰老进程中,不溶性蛋白会向可溶性蛋白转化,可溶性蛋白是参与调控果蔬组织多种生理生化反应的渗透调节物质和营养物质,与果蔬成熟衰老有密切联系<sup>[21]</sup>。如图11B所示,蚕豆籽粒中可溶性蛋白含量在贮藏期间不断增加,贮藏至14 d,4℃组和-3℃组可溶性蛋白含量差异高度显著( $P<0.001$ ),比初始值分别增加82.31%和47.04%, -3℃贮藏35 d时,可溶性蛋白含量增加82.40%。结果表明,微冻贮藏能够减缓可溶性蛋白的生成。

### 2.3.4 微冻贮藏对蚕豆籽粒组织细胞结构的影响

在贮藏过程中,果蔬组织形态会随其成熟衰老而发生变化,导致组织内部细胞结构发生变化。如图12所示,蚕豆籽粒在-3℃微冻贮藏过程中,组织细胞结构的变化主要是排列方式的变化。贮藏初始,蚕豆籽粒细胞组织结构排列紧密,随着贮藏时间延长,细胞排列逐渐分散,失去原有的紧密性,而细胞形变程度较小。可能是因为蚕豆籽粒微冻贮藏期间组织内部淀粉含量增加,淀粉粒对组织细胞有一定的支撑作用,而使蚕豆籽粒细胞组织细胞形变较小。但是从蚕豆籽粒细胞结构放大图中能明显观察到,4℃贮藏至14 d,细胞结构发生形变,主要是因为4℃贮藏结束时,水分含量比初始值降低10.6%,显著低于微冻组( $P<0.05$ ),蚕豆籽粒失水导致细胞结构发生形变。

表 2 -3 ℃微冻贮藏蚕豆籽粒各指标间的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between various indicators of broad bean seeds during superchilling storage at -3 ℃

指标	贮藏时间	感官评分	叶绿素含量	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	$\Delta E$	水分含量	质量损失率	硬度	PPO活性	POD活性	PAL活性	总酚含量	可溶性蛋白含量	淀粉含量
贮藏时间	1.000															
感官评分	-0.983**	1.000														
叶绿素含量	-0.994**	0.973**	1.000													
<i>L</i> *	0.950**	-0.890**	-0.952**	1.000												
<i>a</i> *	0.994**	-0.975**	-0.990**	0.935**	1.000											
<i>b</i> *	0.936**	-0.858*	-0.931**	0.961**	0.934**	1.000										
$\Delta E$	0.981**	-0.929**	-0.975**	0.978**	0.976**	0.986**	1.000									
水分含量	-0.976**	0.948**	0.965**	-0.940**	-0.987**	-0.936**	-0.972**	1.000								
质量损失率	0.975**	-0.928**	-0.964**	0.962**	0.962**	0.981**	0.993**	-0.948**	1.000							
硬度	-0.557	0.642	0.597	-0.473	-0.549	-0.290	-0.428	0.509	-0.386	1.000						
PPO活性	-0.171	0.184	0.238	-0.235	-0.187	-0.059	-0.129	0.208	-0.044	0.746	1.000					
POD活性	0.150	-0.208	-0.219	0.047	0.195	-0.029	0.054	-0.159	-0.011	-0.730	-0.812*	1.000				
PAL活性	0.677	-0.597	-0.682	0.730	0.697	0.772*	0.744	-0.746	0.709	-0.288	-0.403	0.280	1.000			
总酚含量	0.704	-0.700	-0.682	0.745	0.668	0.661	0.703	-0.709	0.699	-0.510	-0.393	0.121	0.773*	1.000		
可溶性蛋白含量	0.975**	-0.960**	-0.970**	0.926**	0.950**	0.911**	0.952**	-0.907**	0.969**	-0.515	-0.062	0.050	0.566	0.654	1.000	
淀粉含量	0.762*	-0.686	-0.791*	0.886**	0.767*	0.792*	0.807*	-0.809*	0.743	-0.546	-0.585	0.278	0.769*	0.699	0.676	1.000

注：\*在0.05水平（双尾）显著相关，\*\*在0.01水平（双尾）极显著相关。

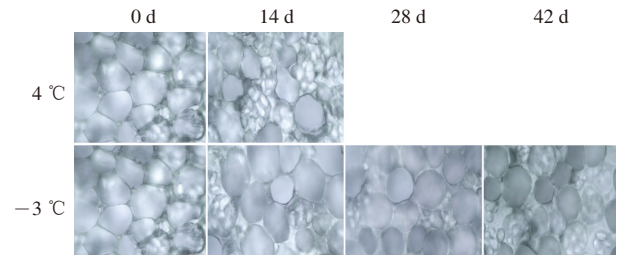


图 12 微冻贮藏对蚕豆籽粒细胞组织结构的影响（×400）

Fig. 12 Effect of superchilling on the cell structure of broad bean seeds during storage (× 400)

2.4 -3 ℃微冻贮藏过程中蚕豆籽粒各指标相关性分析结果

由表2可知，贮藏时间与*L*\*、*a*\*、*b*\*、 $\Delta E$ 、质量损失率、可溶性蛋白含量之间呈极显著正相关（ $P<0.01$ 、 $r>0.9$ ），与POD活性（ $r=0.150$ ）、PAL活性（ $r=0.677$ ）、总酚含量（ $r=0.704$ ）呈正相关但是不显著（ $P>0.05$ ），与感官评分、叶绿素含量、水分含量呈极显著负相关（ $P<0.01$ ， $r<-0.9$ ），与硬度（ $r=-0.557$ ）和PPO活性（ $r=-0.171$ ）呈负相关但不显著（ $P>0.05$ ）。极显著影响蚕豆籽粒感官品质的因素主要是叶绿素含量、*L*\*、*a*\*、*b*\*、 $\Delta E$ 、水分含量、质量损失率和可溶性蛋白含量（ $P<0.01$ ），主要是由于叶绿素含量降低，蚕豆表面黄化褐变使色差值发生变化，进而导致感官评价中色泽评分降低，水分含量和质量损失率主要影响蚕豆籽粒的质地及组织形态，但水分含量与干物质（可溶性蛋白（ $r=-0.907$ ）和淀粉（ $r=-0.809$ ）含量呈显著负相关（ $P<0.05$ 、 $P<0.01$ ），说明水分散失可能会造成干物质含量的增加。总酚含量与PPO活性呈负相关（ $r=-0.393$ ），与POD活性（ $r=0.121$ ）和PAL活性（ $r=0.773$ ）呈正相

关，说明PPO会造成酚类物质的分解，而总酚含量的升高可激活POD抗氧化活性，并且PAL活性的升高会造成酚类物质的积累。

3 讨论与结论

果蔬保鲜方法多种多样，但是相比之下，微冻贮藏能在延长贮藏期的前提下保持果蔬原本的组织形态，对果蔬本身不会造成较大的机械损伤，是一种潜力较大的果蔬保鲜方法。邹琼<sup>[11]</sup>研究表明，微冻贮藏能够有效抑制紫甘蓝的失水和感官品质下降，效果明显优于冷藏。杨光等<sup>[13]</sup>研究微冻（-3 ℃）与冷藏（4 ℃）、冻藏（-18 ℃）对雷竹笋品质影响的结果表明，微冻可克服速冻过程中冻结产生的冰晶造成的组织结构损伤和汁液流失等现象，与冷藏相比，其贮藏期得到显著延长，感官品质也得到提高。本研究结果表明，微冻比冷藏更能够显著延长蚕豆籽粒的保鲜期，较好地保持其品质，延缓成熟衰老。冰温保鲜与微冻保鲜既有相似之处又有差异，两者均能使果蔬组织细胞保持一定的活性，抑制或减缓其生理活性，但相比之下，微冻保鲜效果更佳。冰温保鲜的温度主要是0 ℃至冰点温度之间，在最低非冷冻温度范围内，不使食品组织内部发生冻结<sup>[39]</sup>。而微冻保鲜是在冰点以下1~2 ℃贮藏，会使生物体处于部分冻结或过冷却状态，且内部会产生细小、均匀的冰晶，以维持果蔬在贮藏和运输时的温度稳定<sup>[11]</sup>。

本研究将微冻技术应用于蚕豆籽粒保鲜，结果显示，微冻能够延长蚕豆的保鲜期至35 d左右，减缓蚕豆黄化褐变发生。实验首先探究了蚕豆籽粒在不同微冻温度贮藏期间的品质变化，结果表明，蚕豆籽粒在4 ℃下贮藏



至14 d时已经失去商品价值,而-3℃贮藏至42 d时才失去食用价值。蚕豆籽粒在微冻贮藏期间感官评分、叶绿素含量、水分含量均呈下降趋势,色差值 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $\Delta E$ 和质量损失率均呈上升趋势,硬度呈先上升后下降趋势,至贮藏结束时,-3℃贮藏能维持较低的 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $\Delta E$ 、质量损失率和较好的硬度,但-4℃贮藏能维持较高的水分含量,根据PCA结果,综合比对后,将-3℃作为蚕豆籽粒的最佳微冻温度。在微冻贮藏对蚕豆籽粒成熟衰老的研究中得出,与4℃冷藏对比,微冻贮藏可达到抑制蚕豆籽粒贮藏前期PPO、PAL活性,延迟PAL活性高峰出现,保持较高POD活性和延缓总酚积累及变化速率的效果,进而减缓蚕豆成熟衰老及黄化褐变的发生。与此同时,微冻贮藏能够减缓蚕豆籽粒中淀粉和可溶性蛋白的生成;并且微冻贮藏能维持蚕豆籽粒中的水分,使蚕豆组织细胞不易发生形变,但细胞排列逐渐分散。

### 参考文献:

- [1] 刘玉玲. 蚕豆籽粒淀粉含量的遗传分析及相关QTL定位[D]. 西宁: 青海大学, 2022. DOI:10.27740/d.cnki.gqhdx.2022.000622.
- [2] AKKAD R, KHARRAZ E, HAN J, et al. Characterisation of the volatile flavour compounds in low and high tannin faba beans (*Vicia faba* var. *minor*) grown in Alberta, Canada[J]. Food Research International, 2019, 120: 285-294. DOI:10.1016/j.foodres.2019.02.044.
- [3] TANG Q X, HAILE T, LIU H B, et al. Nitrogen uptake and transfer in broad bean and garlic strip intercropping systems[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(1): 220-230. DOI:10.1016/s2095-3119(17)61772-6.
- [4] 张兰. 蚕豆采后生理及保鲜技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2003. DOI:10.7666/d.Y559264.
- [5] 陈惠, 王学军, 宋居易, 等. 壳聚糖涂膜对蚕豆鲜荚采后生理及贮藏品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(24): 220-223. DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.24.061.
- [6] 柳晓晨. 热水和1-MCP处理对鲜食蚕豆常温保鲜效果的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2021. DOI:10.27244/d.cnki.gnjnu.2021.002080.
- [7] 陈惠, 王学军, 宋居易, 等. 低温贮藏对蚕豆鲜荚品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(6): 250-254. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.06.046.
- [8] 努尔开西·肉扎洪, 侯媛媛, 赵雅芹, 等. 二氧化氯熏蒸处理对蚕豆品质及褐变的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(1): 222-230. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220218-136.
- [9] 杨洋, 陈琪琪, 郭丽红, 等. 低温维持果蔬采后活性氧代谢平衡的抗氧化转录调控机制研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(5): 451-458. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2022040290.
- [10] KAAL L D, EIKEVIK T M, RUSTAD T, et al. Superchilling of food: a review[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 107(2): 141-146. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2011.06.004.
- [11] 邹琼. 紫甘蓝微冻贮藏特性及工艺的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2019. DOI:10.27136/d.cnki.ghnu.2019.000412.
- [12] 闫安. 不同条件对薇菜和蕨菜贮藏期间品质变化的影响[D]. 沈阳: 东北农业大学, 2019. DOI:10.7666/d.Y3588412.
- [13] 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. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201705038.
- [14] PETZOLD G, CARO M, MORENO J. Influence of blanching, freezing and frozen storage on physicochemical properties of broad beans (*Vicia faba* L.)[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 40: 429-434. DOI:10.1016/j.jrefrig.2013.05.007.
- [15] 李智荣. 硫化氢和乙烯调节果蔬成熟衰老的信号机制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016. DOI:10.7666/d.Y3028484.
- [16] KARLIA M, YONADITA P, SONY S. Reactive oxygen species and antioxidants in postharvest vegetables and fruits[J]. International Journal of Food Science, 2020, 2020: 8817778. DOI:10.1155/2020/8817778.
- [17] 展宗冰, 康三江, 张海燕, 等. 野生苣荬菜护绿工艺及护绿保脆剂复配优化[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(18): 102-107. DOI:10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2019.18.025.
- [18] 冯海红, 易建勇, 毕金峰, 等. 高静压处理对绿芦笋生理特性及贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(22): 224-229. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201622034.
- [19] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [20] 曹建康. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
- [21] 梁钻好, 林华兴, 陈海强, 等. 贮藏温度对鲜毛豆贮藏期品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(19): 382-389. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2022120225.
- [22] 张仁凤. 半纤维素基果蔬保鲜膜制备及绿芦笋保鲜性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020. DOI:10.27200/d.cnki.gkmlu.2020.001751.
- [23] ABRAHAM B, ROBERT B, CAROLINE M, et al. Faba bean flavor effects from processing to consumer acceptability[J]. Foods, 2023, 12(11): 2237-2259. DOI:10.3390/FOODS12112237.
- [24] SIDDHARTH S, GABRIELA Z, AURÉLIA P, et al. Flavor of fava bean (*Vicia faba* L.) ingredients: effect of processing and application conditions on odor-perception and headspace volatile chemistry[J]. Food Research International, 2022, 159: 111582. DOI:10.1016/J.FOODRES.2022.111582.
- [25] 王晓艳, 韩延超, 吴伟杰, 等. 气调贮藏对毛豆采后叶绿素降解的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(11): 191-201. DOI:10.16429/j.1009-7848.2023.11.019.
- [26] 王震, 彭勇, 刘静润, 等. ‘鲁丽’苹果低温贮藏和货架期间品质和生理变化[J]. 食品科学, 2023, 44(17): 136-143. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220815-170.
- [27] 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.
- [28] 陈琳, 胡兴成, 罗紫玮, 等. L-抗坏血酸联合超声处理对鲜切芋艿贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(11): 267-277. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20231017-135.
- [29] XU Y J, CHEN H, ZHANG L, et al. Clove essential oil loaded chitosan nanocapsules on quality and shelf-life of blueberries[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 249: 126091. DOI:10.1016/J.IJBIOMAC.2023.126091.
- [30] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210421-301.
- [31] 王晓, 乔勇进, 张国强, 等. 臭氧处理对绿芦笋贮藏品质的影响[J]. 上海农业学报, 2020, 36(3): 102-106. DOI:10.15955/j.issn1000-3924.2020.03.19.
- [32] ELHAM K T, ZAHRA P, AZAM A. Effect of thiamin treatment on antioxidant enzyme activity and chilling injury of Elberta peach (*Prunus persica* L.) fruit during postharvest storage[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(6): 6191-6199. DOI:10.1007/S11694-023-02114-0.
- [33] DONG B Y, DA F F, CHEN Y L, et al. Melatonin treatment maintains the quality of fresh-cut *Gastrodia elata* under low-temperature conditions by regulating reactive oxygen species metabolism and phenylpropanoid pathway[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(18): 14284. DOI:10.3390/ijms241814284.
- [34] 韩丽春, 何雪莲, 郑娜燕, 等. 外源一氧化氮对扁豆采后贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 175-182. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221010-078.
- [35] LI Y, LI L, ZHANG X P, et al. Differences in total phenolics, antioxidant activity and metabolic characteristics in peach fruits at different stages of ripening[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 178(6): 114586. DOI:10.1016/j.lwt.2023.114586.
- [36] YONGGU C, KWONKYOO K. Functional analysis of starch metabolism in plants[J]. Plants, 2020, 9(9): 1152. DOI:10.3390/plants9091152.
- [37] PFISTER B, ZEEMAN S C. Formation of starch in plant cells[J]. Cellular and Molecular Life Sciences, 2016, 73(14): 2781-2807. DOI:10.1007/s00018-016-2250-x.
- [38] TENGFEI L, ABU M K, SHAHNEWAZ B, et al. Potato tonoplast sugar transporter 1 controls tuber sugar accumulation during postharvest cold storage[J]. Horticulture Research, 2023, 10(4): 200-210. DOI:10.1093/HR/UHAD035.
- [39] 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. DOI:10.1016/j.scienta.2017.10.032.