

# 冰温贮藏延缓莲藕的品质劣变

陈锦辉<sup>1</sup>, 漆欣<sup>1</sup>, 易阳<sup>1,2</sup>, 侯温甫<sup>1,2</sup>, 艾有伟<sup>1,2</sup>, 王宏勋<sup>1,2</sup>, 闵婷<sup>1,2\*</sup>

(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北武汉 430023)

(2. 湖北省生鲜食品工程技术研究中心, 湖北武汉 430023)

**摘要:** 为延长莲藕的贮藏时间, 以“鄂莲5号”莲藕为实验材料, 在冰温-1℃贮藏条件下, 研究了莲藕外观品质、质构、淀粉微观结构、总酚、酚类物质的变化规律, 4℃贮藏作为对照组。研究结果显示-1℃贮藏延缓了外观品质的劣变、L\*值和总酚含量的下降。-1℃贮藏的莲藕硬度和弹性比4℃贮藏分别高出了16.88%和21.43%, 但咀嚼度差异不显著( $p>0.05$ )。同时-1℃贮藏延缓了莲藕中淀粉粒断裂, 维持了淀粉粒的光泽和细胞壁排列状态。运用高效液相色谱法测定了莲藕中酚类物质的变化, 研究结果表明-1℃贮藏抑制了莲藕中没食子酸和绿原酸含量的升高, 从而抑制了褐变底物的生成; 延缓了黄酮类物质含量的降低, 维持了非黄酮类物质的含量。因此, 冰温贮藏能延缓莲藕品质的劣变并有效维持酚类物质的含量, 该研究为莲藕的长期贮藏提供了理论参考依据。

**关键词:** 冰温贮藏; 品质; 贮藏时间; 酚类物质

文章编号: 1673-9078(2022)06-136-144

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.6.1021

## Delaying the Quality Deterioration of Lotus Roots by Freezing Storage

CHEN Jinhui<sup>1</sup>, QI Xin<sup>1</sup>, YI Yang<sup>1,2</sup>, HOU Wenfu<sup>1,2</sup>, AI Youwei<sup>1,2</sup>, WANG Hongxun<sup>1,2</sup>, MIN Ting<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

(2. Hubei Fresh Food Engineering Technology Research Center, Wuhan 430023, China)

**Abstract:** To extend the storage period of lotus roots, changes in the appearance, texture, starch microstructure, and total phenol and phenolic acid contents of “Elian 5” lotus roots stored at -1℃ were compared with those stored at 4℃. The results demonstrated that storage at -1℃ could delay changes in the appearance of the lotus roots as well as the decreases in their L\* value and total phenol content. The hardness and elasticity of the lotus roots stored at -1℃ were respectively 16.88% and 21.43% higher than those of roots stored at 4℃. However, the lotus roots stored at the two temperatures exhibited no significant differences in their chewiness ( $p>0.05$ ). Moreover, storage at -1℃ alleviated breakage of the starch granules, thereby preserving their luster and cell wall arrangement. High-performance liquid chromatography analysis of the variations in phenolic acid contents revealed that storage at -1℃ could inhibit the increase in gallic acid and chlorogenic acid contents, thus suppressing the formation of browning substrates. Furthermore, the flavonoid content of the freezer-stored lotus roots decreased more slowly, while the content of non-flavonoids remained more or less unchanged. In summary, freezing storage can delay the quality deterioration of lotus roots and effectively maintain their phenolic acid content. These findings provide a theoretical reference for the prolonged storage of lotus roots.

**Key words:** freezing storage; quality; storage time; phenolics

引文格式:

陈锦辉, 漆欣, 易阳, 等. 冰温贮藏延缓莲藕的品质劣变[J]. 现代食品科技, 2022, 38(6): 136-144

CHEN Jinhui, QI Xin, YI Yang, et al. Delaying the quality deterioration of lotus roots by freezing storage [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(6): 136-144

莲藕是一种富含多种营养物质的水生蔬菜, 其中淀粉、多糖、酚类等为其主要成分<sup>[1,2]</sup>。然而莲藕在采

收稿日期: 2021-09-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(32001764); 武汉轻工大学校级项目(2021Y08)

作者简介: 陈锦辉(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬贮藏与保鲜, E-mail: 1055717997@qq.com

通讯作者: 闵婷(1987-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 果蔬贮藏与保鲜, E-mail: minting1323@163.com

后贮藏和加工过程中品质容易发生变化, 极大的缩短了贮藏时间<sup>[3]</sup>, 主要表现在褐变、硬度、失重、可溶性固形物、可滴定酸、抗坏血酸含量以及腐烂率等品质的变化<sup>[4]</sup>。

温度是影响果蔬贮藏品质的重要因素之一, 低温贮藏能有效地调节果蔬的生理活动, 降低各种生理生化反应速度, 延缓果蔬品质劣变<sup>[5,6]</sup>, 同时还可抑制微生物的生长繁殖, 延长货架期<sup>[7]</sup>, 周白雪<sup>[8]</sup>研究发现4℃低温贮藏能有效延缓莲藕的褐变, 提高了莲藕贮

藏品质,且4℃低温贮藏莲藕中酚类合成相关基因 *PAL1/2*、*4CL1*、*CHI1*、*CHS4/5*,其中 *CHI1* 的表达下调可能与褐变延缓有关。 $3\pm 0.5$ ℃贮藏有效地维持龙眼果实的色素和营养品质,提高其贮藏性<sup>[9]</sup>。巴良杰等<sup>[10]</sup>研究发现8℃低温贮藏可以较好地维持西番莲的色泽和营养品质,并延缓果实的衰老。然而,低温贮藏只能短时的延长果蔬等农产品的货架期,并不能满足产品长时间贮藏的需求,而且低温贮藏还易导致果蔬发生冷害胁迫等问题<sup>[11]</sup>。近年来冰温贮藏果蔬、肉类制品、水产品等农产品中研究较多,在农产品保鲜和长时间贮藏等方面具有很大的潜力<sup>[12]</sup>。鲜切山药在冰温贮藏条件下维持较好的品质,延长了货架期<sup>[13]</sup>。梁桢婕等<sup>[14]</sup>研究发现冰温-1.5℃贮藏延缓了罗非鱼中微生物的腐败,同时也维持了罗非鱼的鲜度。近冰温贮藏还提高了樱桃的抗氧化性,同时维持了细胞膜的完整性,贮藏时间可长达100 d<sup>[15]</sup>。

黄利刚等<sup>[16]</sup>研究表明莲藕的冰点为-1.7℃,与4℃低温贮藏相比,冰温贮藏抑制了多酚氧化酶的活性,延缓了总酚含量和水分含量的下降,明显延长了莲藕的贮藏时间。虽然前人研究了在冰温贮藏条件下莲藕的理化特性和生理变化<sup>[16]</sup>,但对莲藕质构、微观结构的变化和营养品质等并未研究,尤其是多酚类化合物。多酚是莲藕主要的营养物质之一,且种类丰富,谢君等<sup>[17]</sup>报道了莲藕中的酚类物质以表儿茶素、没食子儿茶素和儿茶酚为主,所以开展冰温贮藏过程中酚物质的变化来评价莲藕的品质具有重要的意义。因此,本论文研究了冰温贮藏条件下,莲藕贮藏过程中外观品质、质构、淀粉微观结构、总酚、酚酸类物质、黄酮类物质和非黄酮类物质的变化,为莲藕长时间的贮藏和品质的维持提供了科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

“鄂莲5号”莲藕从武汉市江夏区棋良公司生产基地现场采收,选取的莲藕外形相近(直径在8~10 cm范围内,长度在15~18 cm范围内)、颜色无明显差异、表面无机械损伤,迅速装袋运回实验室,于4℃预冷24 h<sup>[18]</sup>。

乙醇、福林酚、无水碳酸钠、没食子酸,国药集团化学试剂有限公司(用于总酚含量没食子酸标准曲线);标准品没食子酸、儿茶素、没食子儿茶素、芦丁(用于高效液相色谱)等, Sigma 公司;甲醇、冰乙酸,色谱纯, Fisher 公司。

### 1.2 仪器与设备

Canon DS12627 数码相机,佳能;JZ-300 通用色差计,深圳市金准仪器设备有限公司;Agilent-1260LC 高效液相色谱系统,安捷伦科技有限公司;RE-2000A 旋转蒸发仪,上海亚荣生化仪器厂;MSTA.XTplus 型质构仪,英国 Stable Micro System 公司;MIR-154 型低温贮藏箱,日本三洋;XHF-D 高速分散器,宁波新芝生物科技股份有限公司;GL-20G-II 离心机,上海安亭科学仪器公司;A360 型紫外可见分光光度计,翱艺仪器(上海)有限公司;HH-6 恒温水浴锅,常州天瑞仪器有限公司;Thermo Scientific Apreo 2 扫描电子显微镜, OPTON 有限公司。

## 1.3 实验方法

### 1.3.1 实验材料处理

用自来水洗净莲藕表面的淤泥,并用洁净锋利、已消毒的刀具对莲藕进行断节切分,藕节切口完整且内部组织未接触空气。将莲藕随机分为2组,每组24节完整的莲藕,分别放置于-1±0.5℃和4±0.5℃冰箱中贮藏,每2周进行一次取样测定指标,并进行3次生物学重复。

### 1.3.2 拍照

用数码相机拍摄莲藕整藕和切开后的图片。

### 1.3.3 色差的测定

用手持式色差仪测定莲藕可食用段表皮,选取3个不同的测定点,记录  $L^*$  值。

### 1.3.4 质构的测定

质构的检测方法参考 Min 等<sup>[19]</sup>进行。取莲藕肉切成1 cm×1 cm×1 cm(长×宽×厚)左右的厚块作为检测样品待用。质构仪测定采用 TPA 模式, P/45 探头, 100 g 触发力, 初始速度 10.0 mm/s, 下压速度 0.5 mm/s, 结束上行速度 10.0 mm/s, 两次压缩中间停留时间 5 s, 形变 35%。

### 1.3.5 扫描电子显微镜

参考 Chen 等<sup>[20]</sup>的方法,将莲藕切成片状,用0.1 mol/L pH 7.0 的磷酸缓冲溶液清洗藕样3次,每次15 min,4%戊二醛于4℃固定。0.1 mol/L pH 7.0 的磷酸缓冲溶液清洗藕样3次,每次15 min。然后采用30%、50%、70%、90%、100%的乙醇梯度洗脱,每次5 min。乙酸异戊酯:丙酮体积比1:1和纯乙酸异戊酯各置换两次,每次5 min,完成后用滤纸擦干样品表面乙酸异戊酯,用临界干燥仪进行干燥。将干燥好的样品固定在样品台上,使用离子溅射镀膜仪(E-1010)将样品喷碳镀金,5 min后将样品台取出,然后用扫描电子显微镜观察其表面结构,将电子枪加速电压设定为15 kV,放大倍数为500倍。

### 1.3.6 总酚含量的测定

总酚含量参考 Min 等<sup>[21]</sup>的方法进行。将 3.0 g 冻样藕肉组织样品用 30 mL 60%乙醇冰浴匀浆 6 min, 10000 r/min 离心 10 min 后取上清液。样品组取 0.125 mL 上清液与 0.5 mL 蒸馏水混合, 对照组取 0.625 mL 蒸馏水, 加入 0.125 mL Folin 酚试剂。充分混合后室温下静置 6 min, 加 1.25 mL 7% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和 1.0 mL 蒸馏水, 25 °C 水浴避光静置 90 min, 在 760 nm 波长处测定吸光度。用没食子酸绘制标准曲线, 结果表示为没食子酸当量/质量 (mgGAE/kg)。

### 1.3.7 莲藕中单体酚含量的测定

莲藕酚类物质提取参考许金蓉<sup>[22]</sup>方法略作修改: 称取 32 g 莲藕样品, 加入 160 mL 预冷的 pH 3.0 40% 乙醇匀浆, 超声 72 min; 4500 r/min 离心 10 min, 过滤分离上清液; 滤渣加入 200 mL 预冷的 pH 3.0 40% 乙醇, 超声 10 min, 重复浸提 1 次, 合并上清液。真空旋蒸浓缩, 并用甲醇定容至 15 mL。

### 1.3.8 高效液相测定条件

表 1 甲醇流动相线性洗脱程序

时间/min	流动相 A(甲醇, %)	流动相 B/%
0	5	95
40	25	75
50	50	50
65	70	30
66	100	0
72	100	0
73	5	95
80	5	95

表 2 流动相乙腈线性洗脱程序

时间/min	流动性 A(乙腈, %)	流动相 B/%
0	5	95
10	25	75
20	35	65
21	100	0
25	100	0
26	5	95
30	5	95

色谱柱: XDB-C18 (4.6 mm×250 mm, 5μm); 色谱条件: 检测焦性没食子酸、天麻素、香豆酸、没食子儿茶素、邻苯二酚、儿茶素、绿原酸、咖啡酸、表儿茶素、槲皮素、芹菜素的程序为: 流动相 A 为甲醇, B 为 0.4%冰醋酸, 流速为 1.0 mL/min, 色谱柱温度 30 °C, 紫外检测器波长为 280 nm, 进样体积为 20 μL,

线性洗脱程序见表 1。检测没食子酸、芦丁、金丝桃苷、白藜芦醇的程序为: 流动相 A 为乙腈, B 为 0.4%冰醋酸, 流速为 1.0 mL/min, 色谱柱温度 30 °C, 紫外检测器波长为 280 nm, 进样体积为 20 μL, 线性洗脱程序见表 2。混合酚类物质的标准曲线如图 1 所示。

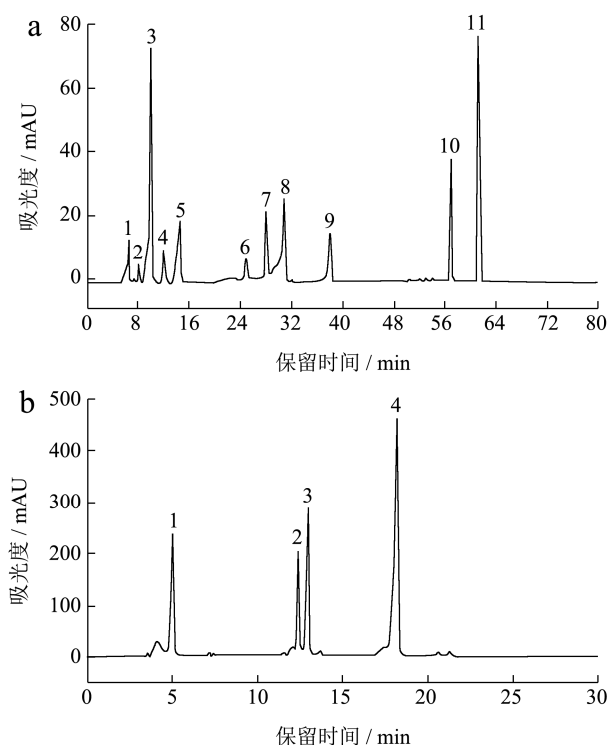


图 1 两种程序下酚类物质混合标准品 HPLC 色谱图

Fig.1 HPLC chromatograms of mixed standards of phenolic substances under two procedures

注: a 中 1 为焦性没食子酸, 2 为天麻素, 3 为香豆酸, 4 为没食子儿茶素, 5 为邻苯二酚, 6 为儿茶素, 7 为绿原酸, 8 为咖啡酸, 9 为表儿茶素, 10 为槲皮素, 11 为芹菜素; b 中 1 为没食子酸, 2 为芦丁, 3 为金丝桃苷, 4 为白藜芦醇。

### 1.3.9 数据处理

每次测定做 3 个平行, 实验数据均采用 SPSS 和 Origin 2018 软件进行分析与作图, 采用单因素方差分析 (ANOVA) 和邓肯氏 (Duncan's) 差异分析, \*代表具有显著性差异 ( $p < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 莲藕的外观品质、色差和褐变度

-1 °C 冰温贮藏对莲藕外观的影响如图 2a 所示, 在第 8 w 时, 4 °C 莲藕表面出现黑色的斑点, 切开后莲藕组织已经发生严重的褐变, 而 -1 °C 贮藏莲藕表皮略微泛黄, 切开的莲藕组织无明显的褐变。莲藕表皮的  $L^*$  值 (图 2b) 在整个贮藏期间呈现下降趋势, -1 °C 贮藏下降了 9.56%, 4 °C 贮藏下降了 12.61%, 在贮藏第 6 w

后, -1 °C 贮藏的莲藕的白度显著高于 4 °C 贮藏 ( $p<0.05$ )。结果表明-1 °C 低温贮藏有利于延缓莲藕的外观品质劣变, 且在 10 w 的贮藏期内, -1 °C 贮藏可显著延缓莲藕肉质部分的褐变。Zhao 等<sup>[23]</sup>的研究也证实

了近冰温贮藏 (-1.4 °C) 延缓了油桃外观品质的劣变, 抑制了果肉的冷害作用。Liu 等<sup>[24]</sup>冰温贮藏 (-2.5 °C) 桃果实能有效延长贮藏期至 60 d。

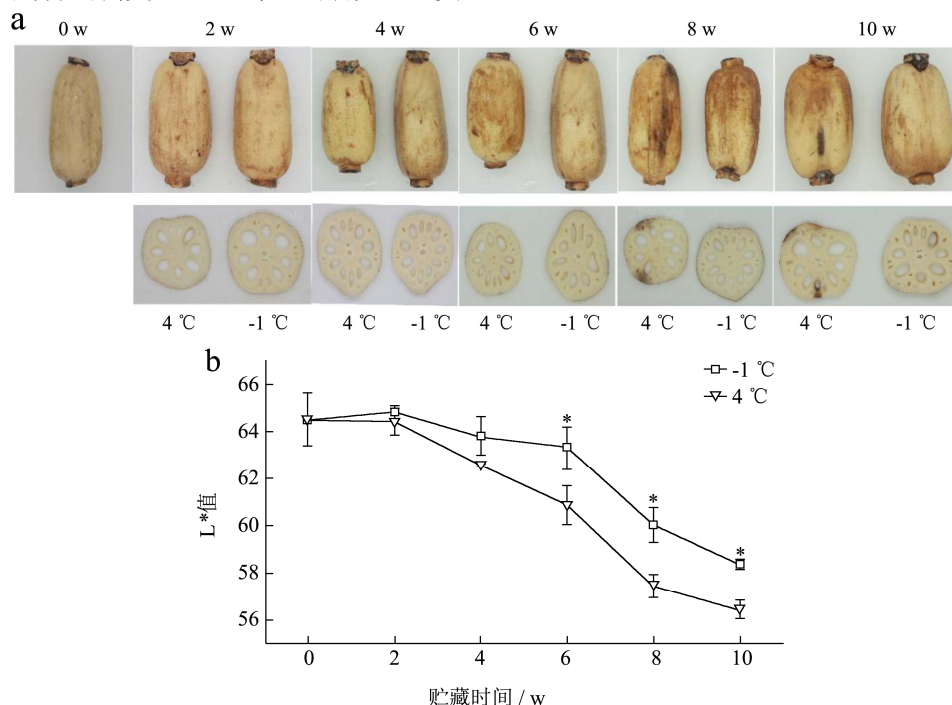


图2 冰温贮藏对莲藕外观品质的影响

Fig.2 The effect of freezing temperature storage on the appearance quality of lotus root

## 2.2 莲藕的质构

由图 3a~3c 可知, 在贮藏期间莲藕硬度、弹性、咀嚼度均呈现下降趋势, -1 °C 贮藏条件下的硬度下降了 33.34%, 4 °C 贮藏下降了 50.22%, 在第 4 w 后, -1 °C 贮藏的莲藕硬度显著高于 4 °C 贮藏 ( $p<0.05$ ); 咀嚼度在整个贮藏期间仅在第 10 w 有显著差异 ( $p<0.05$ ); 在整个贮藏期间, -1 °C 贮藏的弹性从 0.14 N 下降至 0.12 N, 而 4 °C 贮藏下降至 0.09 N, 在第 4 w 后高于 4 °C, 且在第 6 w 和第 10 w 时有显著差异 ( $p<0.05$ )。结果表明-1 °C 贮藏能有效延缓莲藕质构的下降, 提高莲藕的贮藏性能。冰温贮藏延缓果实硬度的下降在杏<sup>[25]</sup>、苹果<sup>[26]</sup>、蓝莓<sup>[27]</sup>、猕猴桃<sup>[28]</sup>等果蔬中也得以证实。

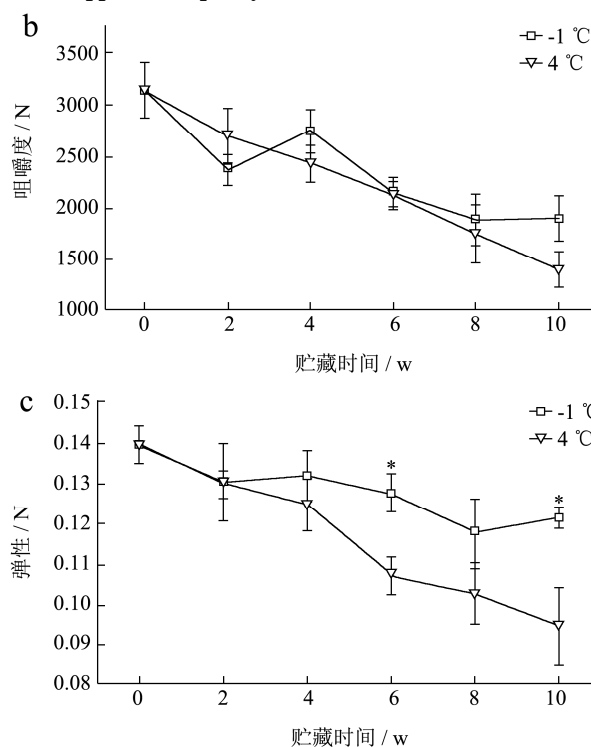
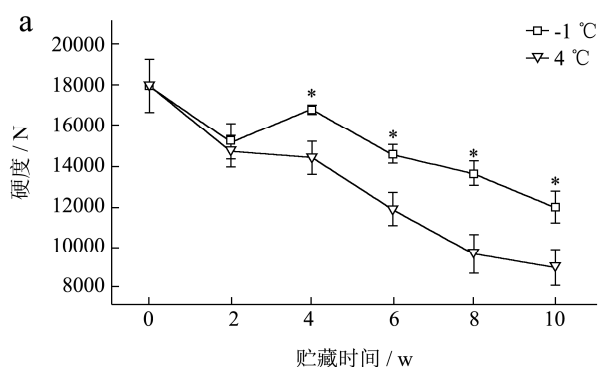


图3 冰温贮藏对莲藕质构的影响

Fig.3 The effect of freezing temperature storage on the texture of lotus root

### 2.3 莲藕淀粉粒的微观状态

在电子显微镜下观察到莲藕中淀粉粒的状态如图4所示,在前4w内,两贮藏温度下淀粉粒状态饱满光滑具有光泽,细胞壁排列紧密整齐;在第6w后,4℃贮藏莲藕淀粉粒开始断裂,表面凹凸不平且发暗,细胞壁排列较松散,而-1℃贮藏的淀粉粒依旧光滑饱满具有光泽,没有断裂的迹象,细胞壁排列整齐。在第10w时,4℃贮藏观察到的淀粉颗粒干瘪,且大部分断裂成细小的状态,-1℃贮藏的莲藕淀粉粒暗淡无光泽,淀粉粒断裂只有少部分。结果表明,冰温贮藏能维持淀粉粒的形态和光泽,且对细胞壁没有破坏作用,延缓莲藕的品质劣变。Fan等<sup>[29]</sup>也通过电子显微镜观察到近冰温贮藏(-2.1℃~-1.7℃)杏果实的细胞壁坚实且排列整齐,与本研究结果相似。

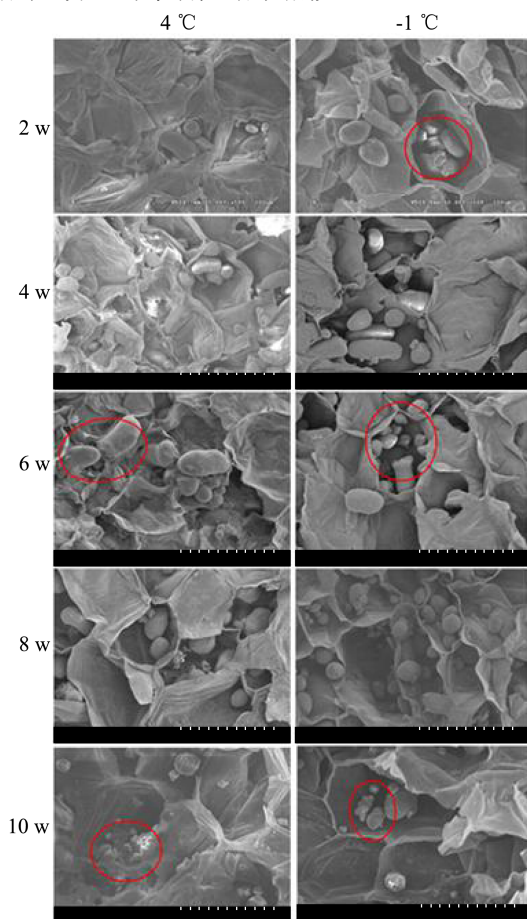


图4 冰温贮藏对莲藕淀粉微观结构的影响

Fig.4 Effect of freezing temperature storage on the microstructure of lotus root starch

注:红色圆圈标记为淀粉,仅标出部分。

### 2.4 莲藕贮藏过程中总酚的变化

总酚含量的变化趋势如图5,在贮藏前2w内,总

酚含量呈上升趋势,之后呈下降趋势。在第4w后-1℃贮藏的莲藕中总酚含量显著( $p<0.05$ )高于4℃。在贮藏结束时,与初始值相比,-1℃贮藏含量升高了12.63%,而4℃贮藏降低了24.82%。这表明冰温贮藏比低温贮藏能更好的维持莲藕总酚含量,提高莲藕的抗氧化性。在贮藏后期,果蔬会成熟衰老,小分子物质间会发生转化<sup>[30]</sup>,莲藕总酚含量略有上升可能是贮藏过程其它物质次生代谢所引起的。Zhao等<sup>[31]</sup>研究发现在70d的长期贮藏时间内,冰温贮藏能保持油桃贮藏后期较高的总酚含量,与我们的研究结果一致。

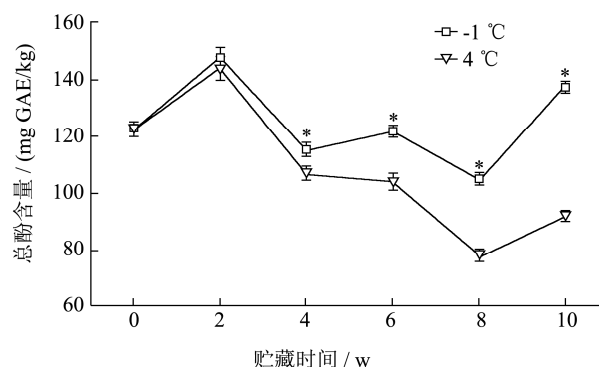


图5 冰温贮藏对莲藕总酚含量的影响

Fig.5 Effect of freezing temperature storage on the content of total phenols in lotus root

### 2.5 莲藕贮藏过程中酚酸类物质的变化

莲藕贮藏过程中酚酸类物质的含量变化如图6所示,莲藕中酚酸类的单酚含量较低,香豆酸(图6a)含量在前4w内呈下降趋势,之后有略微的上升,两贮藏温度间无显著差异,总体来看香豆酸含量无明显变化。没食子酸含量的变化如图6b,-1℃贮藏呈先下降后上升趋势,4℃贮藏有略微上升的趋势,在第4w后,4℃贮藏的含量高于-1℃。绿原酸的变化如图6c所示,在整个贮藏期间,-1℃贮藏的含量呈下降趋势,在第2周含量最高为6.14 μg/g,而4℃贮藏呈先上升后下降趋势,在第8w时出现峰值为9.45 μg/g,且在第4w后均显著高于-1℃贮藏( $p<0.05$ )。绿原酸是植物在有氧呼吸过程中产生的一种苯丙素类化合物<sup>[32]</sup>,4℃贮藏的莲藕绿原酸含量升高,可能是进行了有氧呼吸,而冰温贮藏抑制了莲藕呼吸或呼吸相关酶活,从而导致绿原酸含量呈下降趋势。酚酸类是引起莲藕褐变的主要物质,王清章等<sup>[33]</sup>研究了莲藕中多酚氧化酶的最适底物是没食子酸,本研究中-1℃贮藏没食子酸含量低于4℃,这表明冰温贮藏能抑制莲藕贮藏期间没食子酸的合成,从而延缓莲藕的褐变。

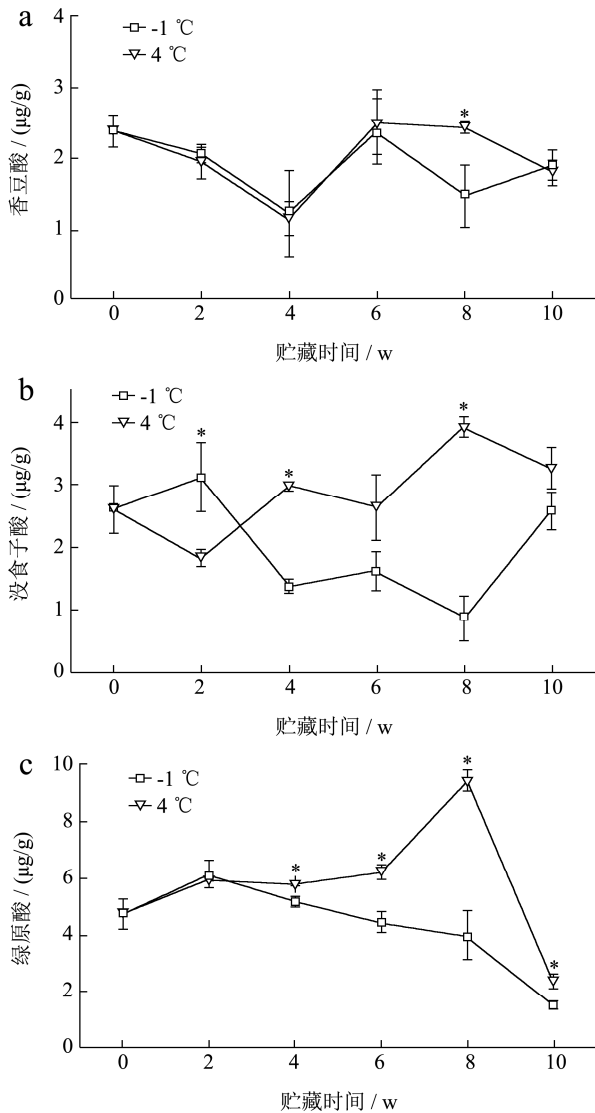


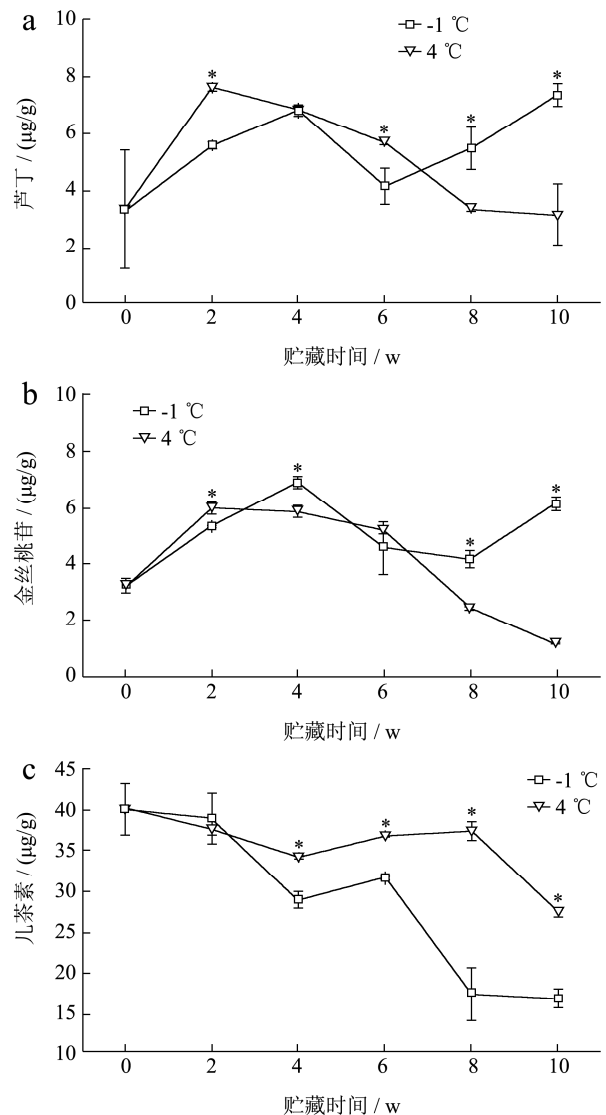
图6 冰温贮藏对莲藕中酚酸类物质的影响

Fig.6 Effect of freezing temperature storage on phenolic acids in lotus root

### 2.6 莲藕贮藏过程中黄酮类物质的变化

冰温贮藏对莲藕黄酮类物质的影响如图7所示，黄酮类物质是莲藕酚类的主要成分，含量较高。在贮藏期间，芦丁(图7a)的含量呈先上升后下降趋势，初始含量为3.30 μg/g，在贮藏结束时-1 °C贮藏的含量为7.32 μg/g，而4 °C贮藏的含量为3.12 μg/g，-1 °C贮藏的含量显著高于4 °C ( $p < 0.05$ )。芦丁是一种抗氧化物质，在贮藏前期芦丁含量上升，可能是莲藕采后诱导了防御机制，促进了芦丁的合成，抗氧化性有所提高<sup>[34]</sup>。金丝桃苷(图7b)的含量变化与芦丁相似，在贮藏结束时-1 °C贮藏的含量为6.10 μg/g，4 °C贮藏的含量为1.18 μg/g，-1 °C贮藏的含量显著高于4 °C ( $p < 0.05$ )。儿茶素(图7c)的含量呈下降趋势，-1 °C

贮藏下降了57.90%，4 °C贮藏下降了31.78%，在第4 w后，-1 °C贮藏的含量均显著低于4 °C ( $p < 0.05$ )，这表明冰温贮藏能有效降低莲藕褐变底物儿茶素的含量，这与漆欣等<sup>[35]</sup>的研究结果一致。没食子儿茶素(图7d)含量呈下降趋势，在整个贮藏期间，-1 °C贮藏的含量均显著高于4 °C。在贮藏前期，由于温度急剧下降至冰温，诱导了莲藕的防御机制<sup>[36]</sup>，促进了没食子儿茶素前体物质的合成，从而导致没食子儿茶素含量有所升高。黄酮类物质生物合成起始于苯丙氨酸解氨酶解氨酶(phenylalanine ammonia lyase, PAL)催化的苯丙氨酸代谢，之后进入4-香豆酸辅酶A连接酶(4-coumarate: CoA lig- ase, 4CL)催化的类黄酮代谢途径，黄烷酮经一系列酶催化形成二氢黄酮，二氢黄酮经黄酮醇合成酶(flavonol synthase, FLS)催化合成黄酮醇<sup>[37]</sup>，黄酮类呈下降趋势，这可能是莲藕中黄烷醇向黄酮醇转化的结果。因此，-1 °C贮藏能有效延缓莲藕黄酮类物质的减少。



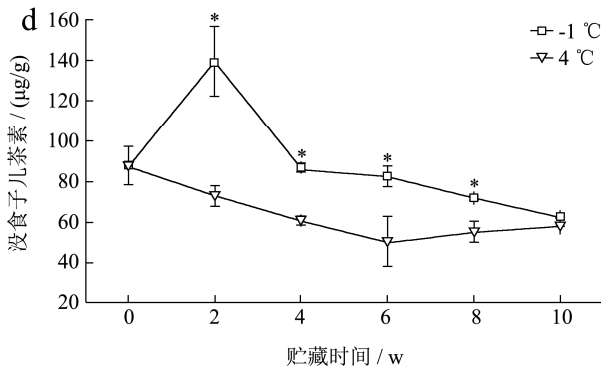


图7 冰温贮藏对莲藕中黄酮类物质的影响

Fig.7 Effect of freezing temperature storage on flavonoids in lotus root

2.7 莲藕贮藏过程中非黄酮类物质的变化

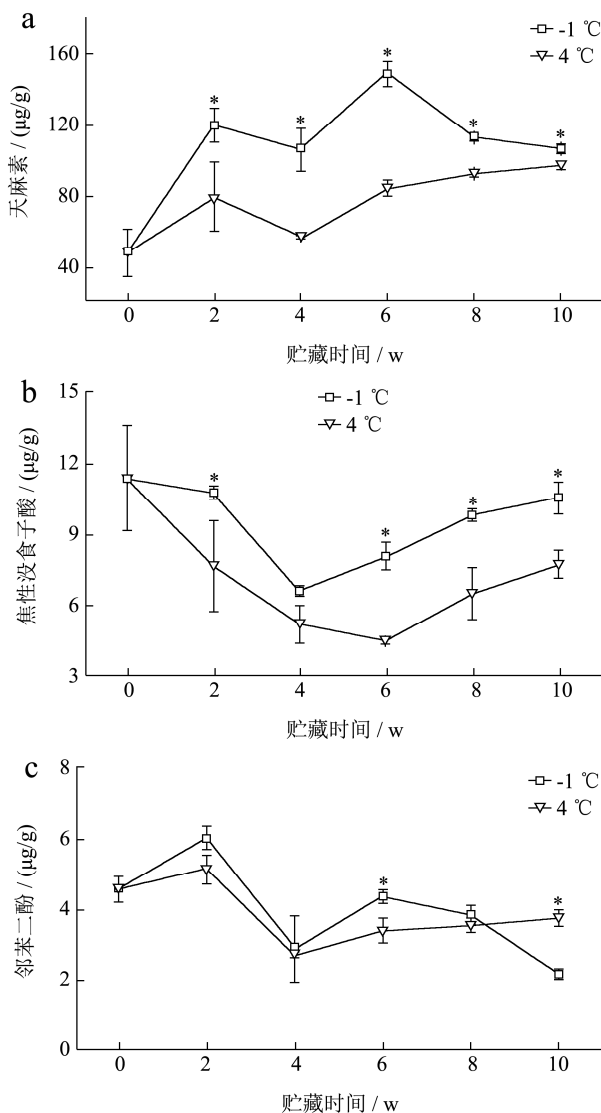


图8 冰温贮藏对莲藕中非黄酮类物质的影响

Fig.8 Effect of freezing temperature storage on non-flavonoids in lotus root

冰温贮藏对莲藕非黄酮类物质的影响如图8所示,

天麻素(图8a)在莲藕中含量较高初始值为48.12 μg/g,且呈上升趋势,-1 °C贮藏的最高含量为148.51 μg/g,4 °C贮藏的最高含量为96.65 μg/g,在整个贮藏期间-1 °C均显著高于4 °C ( $p < 0.05$ )。焦性没食子酸(图8b)的含量呈先下降后上升趋势,-1 °C贮藏的最低含量为6.60 μg/g,4 °C贮藏的最低含量为4.46 μg/g,除第4 w外,-1 °C贮藏的焦性没食子酸含量均显著高于4 °C ( $p < 0.05$ )。邻苯二酚(图8c)的含量呈下降趋势,-1 °C贮藏的最低含量为2.13 μg/g,4 °C贮藏的最低含量为2.70 μg/g,两贮藏温度下邻苯二酚的含量差异并不显著 ( $p > 0.05$ )。结果表明,冰温贮藏能维持莲藕中天麻素和焦性没食子酸的含量,延缓了非黄酮类物质的减少。

3 结论

在10 w的贮藏时间内,-1 °C贮藏能较好的维持莲藕外观品质和较高的果肉硬度,并且细胞壁完整性没有遭到明显破坏,从而延长了莲藕的贮藏时间。同时,-1 °C贮藏延缓了总酚含量的降低,提高了抗氧化性;降低了酚酸类物质的含量,减少了褐变底物的生成;延缓了黄酮类物质的减少,维持了非黄酮类物质的含量。因此,冰温贮藏对延长莲藕贮藏时间和延缓品质劣变具有重要意义。

参考文献

[1] Yi Y, Sun J, Xie J, et al. Phenolic profiles and antioxidant activity of lotus root varieties [J]. *Molecules*, 2016, 21(7): 863

[2] Yi Y, Huang X, Zhong Z, et al. Structural and biological properties of polysaccharides from lotus [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019

[3] 张有林,朱芬.莲藕贮期褐变机理与防褐变技术研究[J].食品工业科技,2003,1:87-89  
ZHANG Youlin, ZHU Fen. Browning mechanism of lotus root during storage and prevention of browning [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2003, 1: 87-89

[4] Wen B, Li D, Tang D, et al. Effects of simultaneous ultrasonic and cysteine treatment on antibrowning and physicochemical quality of fresh-cut lotus roots during cold storage [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 168: 111294

[5] 甄泽康,付铮,闫铭铭.浅谈果蔬的低温保鲜技术[J].南方农机, 2019,50(13):74  
ZENG Zekang, FU Zheng, YAN Mingming. A review: the low-temperature preservation technology of fruits and vegetables [J]. *China Southern Agricultural Machinery*, 2019, 50(13): 74

[6] Ali S, Sattar Khan A, Ullah Malik A, et al. Modified atmosphere

- packaging delays enzymatic browning and maintains quality of harvested litchi fruit during low temperature storage [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 254: 14-20
- [7] 王红林,马玉华,解璞,等.低温贮藏对百香果紫香1号果实品质的影响[J].*贵州农业科学*,2021,49(2):97-104  
WANG Honglin, MA Yuhua, XIE Pu, et al. Effect of low temperature storage on fruit quality of passion fruit Zixiang 1 [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2021, 49(2): 97-104
- [8] 周白雪.莲藕酚类物质累积规律及儿茶素生物合成关联酶基因的差异表达[D].武汉:武汉轻工大学,2019  
ZHOU Baixue. Accumulation of phenolics and differential expression of genes related to catechin biosynthesis in lotus root [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2019
- [9] 陈锦,林毅雄,林育钊,等.低温贮藏对‘松风本’龙眼果实品质和耐贮性的影响[J].*热带作物学报*,2020,41(11):2314-2321  
CHEN Jin, LIN Yixiong, LIN Yuzhao, et al. Effects of low temperature storage on quality and storability of ‘Songfengben’ longan fruit [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(11): 2314-2321
- [10] 巴良杰,张丽敏,蔡国俊,等.低温对西番莲采后贮藏品质的影响[J].*包装工程*,2021,42(15):49-55  
BA Liangjie, ZHANG Liminn, CAI Guojun, et al. Effects of low temperature on storage quality of passion fruit [J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(15): 49-55
- [11] Lado J, Gurra A, Zacaría L, et al. Influence of the storage temperature on volatile emission, carotenoid content and chilling injury development in Star Ruby red grapefruit [J]. *Food Chemistry*, 2019, 295: 72-81
- [12] 张浩彦,陈爱强,刘斌.冰温贮藏技术在食品贮藏中的应用现状与展望[J].*冷藏技术*,2021,44(1):52-55  
ZHANG Haoyan, CHEN Aiqing, LIU Bing. Application status and prospect of ice temperature storage technology in food storage [J]. *Cold Storage Technic*, 2021, 44(1): 52-55
- [13] 马卓云,于潇潇,杨舒乔,等.冰温贮藏对鲜切山药品质的影响及货架期的预测[J].*农产品加工*,2021,1:4-9  
MA Zhuoyun, YU Xiaoxiao, YANG Shuqiao, et al. Effect of ice temperature storage technology on quality of fresh-cut yam and shelf life prediction [J]. *AEM Roducts Rocessing*, 2021, 1: 4-9
- [14] 梁桢婕,缪小兰,段杉.冰温及4℃贮藏罗非鱼的腐败特征差异[J].*广东海洋大学学报*,2021,41(3):99-104  
LIANG Anjie, LIAO Xiaolan, DUAN Shan. Difference between corruption characteristics of tilapia under controlled freezing-point storage and 4℃ cold storage [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2021, 41(3): 99-104
- [15] Zhao H, Liu B, Zhang W, et al. Enhancement of quality and antioxidant metabolism of sweet cherry fruit by near-freezing temperature storage [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 147: 113-122
- [16] 黄利刚,李慧娜,张亮,等.冰温贮藏对莲藕品质的影响[J].*华中农业大学学报*,2008,2:317-320  
HUANG Ligang, LI Huina, ZHANG Liang, et al. Influence of ice-temperature storage on lotus root [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2008, 2: 317-320
- [17] 谢君,周白雪,闵婷,等.莲藕不同极性酚类物质组成分析及抗氧化活性评价[J].*江苏农业科学*,2017,45(17):189-192  
XIE Jun, ZHOU Baixue, MIN Ting, et al. Composition analysis of different polar phenolic substances and evaluation of antioxidant activity in lotus root [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(17): 189-192
- [18] 肖越,邓云,刘永军,等.不同预冷方式对采后莲藕贮藏品质的影响[J].*中国食物与营养*,2021,27(7):21-24  
XIAO Yue, DENG Yun, LIU Yongjun, et al. Effects of different pre-cooling methods on storage quality of postharvest lotus root [J]. *Food and Nutrition in China*, 2021, 27(7): 21-24
- [19] Min T, Niu L, Feng X, et al. The effects of different temperatures on the storage characteristics of lotus (*Nelumbo nucifera* G.) root [J]. *Food Chemistry*, 2021, 348: 129109
- [20] Chen X, Du X, Chen P, et al. Morphologies and gelatinization behaviours of high-amylose maize starches during heat treatment [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 157: 637-642
- [21] Min T, Xie J, Zheng M, et al. The effect of different temperatures on browning incidence and phenol compound metabolism in fresh-cut lotus (*Nelumb onucifera* G.) root [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2017, 123: 69-76
- [22] 许金蓉.莲藕采前及采后的生理生化研究[D].武汉:华中农业大学,2004  
XU Jinrong. Study on physiology and biochemistry of lotus root before and after harvest [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2004
- [23] Zhao H, Jiao W, Cui K, et al. 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
- [24] Liu B, Jiao W, Wang B, et al. Near freezing point storage compared with conventional low temperature storage on apricot fruit flavor quality (volatile, sugar, organic acid) promotion during storage and related shelf life [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 249: 100-109
- [25] Cui K, Zhao H, Sun L, et al. Impact of near freezing temperature storage on postharvest quality and antioxidant



- capacity of two apricot (*Prunus armeniaca* L.) cultivars [J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(7): e12857
- [26] 赵迎丽,王亮,张微,等.长短枝红富士苹果冰温贮藏期质构特性及品质变化[J].北方园艺,2021,7:104-109  
ZHAO Yingli, WANG Liang, ZHANG Wei, et al. Texture characteristics and quality changes of long-short branch red Fuji apple during ice temperature storage [J]. Northern Horticulture, 2021, 7: 104-109
- [27] 魏文平,华璐云,王金庆,等.蓝莓冰温贮藏的实验研究[J].食品工业科技,2012,33(13):346-348  
WEI Wenping, HUA Luyun, WANG Jinqing, et al. Study on ice-temperature preservation of blueberry [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(13): 346-348
- [28] 尚海涛,郇海燕,朱麟,等.动态冰温对红阳猕猴桃冷害与贮藏品质的影响[J].保鲜与加工,2016,16(1):7-11  
SHANG Haitao, GAO Haiyan, ZHU Lin, et al. Effects of dynamic ice-temperature storage on chilling injury and storage quality of Hongyang kiwifruit [J]. Storage and Process, 2016, 16(1): 7-11
- [29] Fan X, Jiang W, Gong H, et al. Cell wall polysaccharides degradation and ultrastructure modification of apricot during storage at a near freezing temperature [J]. Food Chemistry, 2019, 300: 125194
- [30] Serna-Escolano V, Giménez M J, Castillo S, et al. Preharvest treatment with oxalic acid improves postharvest storage of lemon fruit by stimulation of the antioxidant system and phenolic content [J]. Antioxidants, 2021, 10: 963
- [31] Zhao H, Shu C, Fan X, et al. Near-freezing temperature storage prolongs storage period and improves quality and antioxidant capacity of nectarines [J]. Scientia Horticulturae, 2018, 228: 196-203
- [32] Yin Z C, Qie X J, Zeng M M, et al. Effect of thermal treatment on the molecular-level interactions and antioxidant activities in  $\beta$ -casein and chlorogenic acid complexes [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 123: 107177
- [33] 王清章,彭光华,金悠,等.莲藕中酚类物质的提取分析及酶促褐变底物的研究[J].分析科学学报,2004,1:38-40  
WANG Qingzhang, PENG Guanghua, JIN You, et al. Extraction of polyphenol from lotus roots and its enzymatic browning substrate [J]. Journal of Analytical Science, 2004, 1: 38-40
- [34] Galani J H Y, Patel J S, Patel N J, et al. Storage of fruits and vegetables in refrigerator increases their phenolic acids but decreases the total phenolics, anthocyanins and vitamin c with subsequent loss of their antioxidant capacity [J]. Antioxidants, 2017, 6(3): 59
- [35] 漆欣,周白雪,易阳,等.莲藕酚类物质的变化及采后贮藏对鲜切莲藕酚类物质的影响[J].食品科技,2021,46(2):25-32  
QI Xin, ZHOU Baixue, YI Yang, et al. Changes of phenols in lotus root and effects of postharvest storage on phenols in fresh-cut lotus root [J]. Food Science and Technology, 2021, 46(2): 25-32
- [36] Valmor Ziegler, Iasmim de Almeida Veeck, Mariane Lobo Ugalde, et al. Effects of storage period and temperature on the technological properties, starch digestibility, and phenolic compounds of mung beans (*Vigna radiata* L.) [J]. Journal of Stored Products Research, 2020, 89: 101694
- [37] 方芳,王凤忠.葡萄果实黄酮醇生物合成影响因素研究进展[J].核农学报,2016,30(9):1798-1804  
FANG Fang, WANG Fengzhong. Research progress on factors affecting the biosynthesis of flavonols in grape fruit [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(9): 1798-1804

---

(上接第 104 页)

- [35] 袁佐云,朱运平,任晨刚,等.粟谷及全麦酚类物质含量及其抗氧化活性对比研究[J].中国食品学报,2016,16(10):183-189  
YUAN Zuoyun, ZHU Yunping, REN Chengang, et al. Phenolic contents and antioxidant activity of five varieties of foxtail millet and one kind of wheat [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(10): 183-189
- [36] Hur S. J, Lee S Y, Kim Y C, et al. Effect of fermentation on the antioxidant activity in plant-based foods [J]. Food Chemistry, 2014, 160: 346-356
- [37] 刘红艳.双孢蘑菇固态发酵对谷物营养成分及抗氧化性的影响[D].太原:山西大学,2018  
LIU Hongyan. Effects of solid-state fermentation with *Agaricus bisporus* on nutritional components and antioxidant properties of cereals [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2018
- [38] 汤晓,方伟,沈秀丽,等.多黄酮混合物抗氧化活性的协同与拮抗作用[J].食品科学,2014,35(5):111-115  
TANG Xiao, FANG Wei, SHEN Xiuli, et al. Synergism and antagonism of flavonoid mixtures on antioxidant capacities [J]. Food Science, 2014, 35(5): 111-115