

不同种植条件莲藕的真空包装品质综合评价

张若妍¹, 钟宇¹, 邓云^{1*}, 万俊², 姚梦丽², 章敏燕³, 赵芳³

(1.上海交通大学 农业与生物学院, 上海 200240; 2.上海佳欣茭白专业合作社, 上海 201715;
3.云南省大理州洱源县检验检测院, 云南 洱源 671208)

摘要: **目的** 研究真空包装及不同种植条件对莲藕贮藏和营养品质的影响, 明确品质指标间的相关性, 建立莲藕采后品质综合评价体系。**方法** 首先对比真空包装对莲藕失水率及色泽的影响。在此基础上以真空包装的莲藕为实验材料, 研究露天和大棚2种植方式及长、短种植周期对莲藕贮藏品质和营养成分的影响, 利用品质指数 (Lotus Quality Index, LQI) 对莲藕营养品质进行评价。**结果** 低温下, 真空包装能有效缓解莲藕水分散失及维持外观色泽, 将货架期从2 d延长至10 d左右。大棚长周期种植的莲藕耐贮性最强, 外观品质保持较好, 而大棚短周期产品营养品质最佳。单位质量莲藕中可溶性固形物 (Total Soluble Solids, TSS)、总糖、淀粉、可溶性蛋白、抗坏血酸 (Vitamin C, Vc) 和总酚经10 d贮藏后均增加。LQI表明真空包装有利于维持莲藕贮藏期间的营养价值。**结论** 大棚种植有效提升了莲藕的营养及贮藏品质, 而种植周期要结合经济效益决定。

关键词: 莲藕; 真空包装; 种植条件; 品质指数; 综合评价

中图分类号: TB487 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)03-0081-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.03.010

Comprehensive Evaluation on the Quality of Lotus Roots Packaged in Vacuum and Harvested from Different Planting Conditions

ZHANG Ruoyan¹, ZHONG Yu¹, DENG Yun^{1*}, WAN Jun², YAO Mengli²,
ZHANG Minyan³, ZHAO Fang³

(1. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;
2. Shanghai Jiaxin Jiaobai Professional Cooperative, Shanghai 201715, China; 3. Inspection and Testing
Institute of Eryuan County in Dali Prefecture of Yunnan Province, Yunnan Eryuan 671208, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the effects of vacuum package and different planting conditions on the storage and nutritional quality of lotus roots, figure out the relationship between indexes and establish a comprehensive evaluation system for the quality of postharvest lotus roots. Firstly, the effects of vacuum package on the water loss rate and color of lotus roots were compared. On this basis, the effects of two planting methods, open-air and greenhouse, and long and short planting periods on the storage quality and nutritional components of lotus root were studied. The lotus quality index (LQI) was used to evaluate the nutritional quality of lotus roots comprehensively. At low temperature, the vacuum package could effectively alleviate the water loss of lotus roots and maintain the appearance color, extending the shelf life from 10 d to 2 d. Lotus roots cultivated in the greenhouse with long planting period were the most resistant to store while those planted for short period had the best nutritional quality. The total soluble solids, total sugar, starch, soluble proteins, Vc, and total phenols in lotus roots increased after 10 days of storage. LQI indicated that the nutritional value of lotus

roots was maintained with vacuum package during storage. The greenhouse planting can effectively improve the nutrition and storage quality of lotus roots, and the planting time should be determined based on economic benefits.

KEY WORDS: lotus roots; vacuum package; planting conditions; quality index; comprehensive evaluation

莲藕 (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) 是一种广泛种植的水生蔬菜, 在亚洲、欧洲等地均有分布^[1]。100 g 新鲜莲藕中约含有 80 g 水分、10~20 g 淀粉、1~2 g 蛋白质以及多种酚类、维生素、氨基酸和矿物质, 如白藜芦醇、B 族维生素、精氨酸、钙、铁、磷等^[2]。莲藕可分为脆质藕和粉质藕, 前者脆嫩适于清炒, 后者口感柔软适合制作藕粉。莲藕兼具较高的营养价值和食用品质, 深受消费者喜爱^[3]。目前我国藕的种植面积可达 20 万 hm^2 , 年产量约为 300 万 t, 主产区为湖北、江苏、安徽和浙江^[4], 主要栽培方式为露天种植。随着设施园艺发展, 大棚栽培逐渐出现, 可比露地栽培提早上市 40~60 d, 较早采收能获得更高的经济效益^[5]。大棚栽培莲藕不仅可以拓宽种植时间, 还可以人为调节温湿度, 精细化管理, 有效防止病虫害, 从而提高产量。

采后莲藕由于生理代谢, 易发生褐变、软化等品质劣变, 感官和食用价值下降。莲藕 25 °C 的货架期仅有 4 d, 限制了销售范围, 不利于扩大地域特色产品的影响力^[6]。因此, 提高莲藕耐贮性、保持营养成分, 对提升经济效益, 产业良性发展至关重要。包装是保鲜莲藕的有效手段, 前人用气体湿度调节袋包装能提高莲藕抗逆性, 4 °C 下与常规包装的 7 d 保鲜期相比延长至 16 d^[7]; 也有研究表明常温下真空包装能够增加莲藕的储存时间^[8]。目前对莲藕贮藏及营养品质的研究集中于鲜切藕的保鲜, 而探究不同种植方式及周期对真空包装泥藕在低温下贮藏及营养品质影响的研究尚未报道。本实验首先探究真空包装对莲藕贮藏期间失水率和色泽的影响。在此基础上, 以同一企业大棚和露天 2 种植方式以及长、短 2 种周期的莲藕为对象, 采用真空包装进行贮藏, 通过测定莲藕硬度、色泽、可溶性固形物 (TSS)、淀粉、总糖、总酚和抗坏血酸等指标的变化, 应用方差分析和计算品质指数的方法, 研究种植方式和周期与莲藕耐贮性及营养品质的关系。旨在为系统分析和综合评价莲藕采后品质和贮藏特性提供理论依据与实践指导。

1 实验

1.1 实验设计

供试莲藕来自上海佳欣茭白专业合作社, 种植于上海市青浦区练塘镇。种植方式为露天和大棚 2 种环境, 分为长、短 2 种周期。长周期种植时间为 2023 年 3~8 月, 短周期种植莲藕种植时间为 2023 年 4~8 月。实验共 4 种植条件, 即露天短周期 (LD)、露天长周期 (LC)、大棚短周期 (DD) 和大棚长周期

(DC)。4 种不同种植条件的莲藕采收后分为 2 组, 一组立即真空密封包装, 另一组无包装 (CK), 均冷链运输回实验室。所有样品置于温度为 (10±1) °C、相对湿度为 (85±5) % 的冷藏柜保存, 于采收和贮藏的第 1、2、4、7、10 天时取样。

1.2 试剂与仪器

主要试剂: 2-硫代巴比妥酸、福林酚、3, 5-二硝基水杨酸试剂, 上海源叶生物科技有限公司; 考马斯亮蓝 G250, 上海麦克林生化科技有限公司; 苯酚、草酸、2, 6-二氯靛酚、三氯乙酸、氢氧化钠、碳酸钠, 国药集团化学试剂有限公司。

主要仪器: TA.XT.PlusC 物性测定仪, 英国 Stable Micro Systems 公司; Multiskan SkyHigh 全波长酶标仪, 美国赛默飞世尔科技公司; LabScan XE 色差仪, 美国 HunterLab 公司; HH-S8 数显恒温恒速磁力搅拌水浴锅, 常州国宇仪器制造有限公司; Z 326 K 冷藏桌面离心机, 德国 Hermle 公司; MASTER-93H 刻度式手持折射仪, 日本 ATAGO 科学仪器有限公司; SC-450G 立式冷藏柜, 山东海尔公司。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 失水率

采收时样品的质量记为 W_0 , 在贮藏第 1、2、4、7、10 天时测定样品质量, 记为 W_1 。样品失水率 (X) 表示为:

$$X = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.2 含水率

采用干燥法测定, 称取 50 g 新鲜样品, 记为 m_1 ; 在 80 °C 下烘干至恒重, 干样质量记为 m_2 。样品含水率 (C) 表示为:

$$C = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

1.3.3 硬度

取莲藕赤道处厚 2 cm 的组织进行测定。将样品置于 TA.XT plusC Texture Analyser SMS P/2N 探头下做穿刺测试。测试参数: 测前速度为 1.5 mm/s, 实验速度为 1.5 mm/s, 测后速度为 10 mm/s, 触发力为 25g, 穿刺深度为 5 mm, 测定参数为硬度^[9]。

1.3.4 色泽

参考向文娟等^[10]的方法, 选择每个莲藕赤道部 3 个不同的点测定颜色, 记录亮度 L^* 值、红绿度 a^* 值、

黄蓝度 b^* 值, 并按式 (3) 计算总色差 ΔE 。

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_0^*)^2 + (a_1^* - a_0^*)^2 + (b_1^* - b_0^*)^2} \quad (3)$$

式中: L_1^* 、 a_1^* 、 b_1^* 分别为贮藏后莲藕亮度、红绿度和黄蓝度; L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* 分别为贮藏第 0 天莲藕的亮度、红绿度和黄蓝度。

1.3.5 TSS

参考 Valverde-Miranda 等^[11]的方法, 使用手持式折光仪对莲藕中 TSS 含量进行测定。取 5 g 新鲜样品研磨匀浆, 4 000 r/min 离心 10 min 后取上清液为待测液。

1.3.6 淀粉

莲藕样品中淀粉含量, 采用北京索莱宝科技有限公司淀粉含量试剂盒进行测定。称取 0.03 g 烘干莲藕样本, 加入 0.6 mL 试剂 1 研磨匀浆。80 °C 水浴提取 30 min, 在 3 000g 条件下离心 5 min, 留沉淀。沉淀中加入 0.3 mL 蒸馏水, 沸水浴糊化 15 min。冷却后加入 0.6 mL 试剂 2, 沸水浴 15 min。冷却后, 在 8 000g 条件下离心 5 min, 上清液为待测液。待测液稀释 8 倍后, 取 0.2 mL 与试剂 3 配制的工作液于 95 °C 反应 10 min, 冷却后测定 620 nm 处吸光度。淀粉含量以样品干质量计算。

1.3.7 总糖

称取干样 2 g 置于锥形瓶中, 加 50 mL H_2O , 再加入 10 mL 浓度为 6 mol/L 的盐酸, 沸水浴 30 min, 冷却至室温后用 NaOH (质量分数为 10%) 调至中性, 补水定容至 100 mL, 混匀后过滤, 收集滤液为测定液。测定管中吸取 0.2 mL 测定液, 1.8 mL 水, 1 mL 质量浓度为 50 g/L 的苯酚溶液, 5 mL 浓硫酸, 混匀, 沸水浴 15 min, 冷却至室温, 测定 490 nm 处的吸光度。从标准曲线上查出葡萄糖含量, 计算样品中总糖。总糖含量以样品干质量计算。

1.3.8 总酚

参考 Li 等^[12]的方法, 稍作修改。称取鲜藕样品 2 g, 加入 5 mL 甲醇溶液 (体积分数为 70%), 匀浆后立即移入 70 °C 水浴中浸提 10 min, 浸提结束后冷却至室温, 3 500 r/min 离心 10 min, 取上清液, 重复一次。合并 2 次上清液, 用水定容至 10 mL, 得到提取液, 提取液稀释 10 倍后为测试液。吸取 1 mL 测试液于比色管中, 加入 5 mL 福林酚试剂, 摇匀。反应 3~8 min 后, 加入 4 mL 碳酸钠溶液 (质量分数为 7.5%), 摇匀。室温下放置 60 min 后在 765 nm 处测定吸光度, 总酚含量以没食子酸表示。总酚含量以样品鲜质量计算。

1.3.9 可溶性蛋白

参考赵倩等^[13]、曹建康等^[14]的方法, 稍作修改。称取干样样品 0.2 g, 用蒸馏水定容至 40 mL, 静置 0.5~1 h 后 4 000 r/min 离心 20 min, 弃沉淀, 上清液

转入 50 mL 容量瓶中并以蒸馏水定容, 即得待测样品提取液。吸取提取液 1 mL, 加入 5 mL 考马斯亮蓝 G-250 溶液, 充分混合, 放置 2 min 后在 595 nm 下比色, 并通过标准曲线查得蛋白质含量。可溶性蛋白含量以样品干质量计算。

1.3.10 抗坏血酸

抗坏血酸 (Vc) 参考国家标准进行测定。吸取 1 mL 质量浓度为 0.1 mg/mL 的抗坏血酸标液加入 10 mL 草酸溶液, 用 2,6-二氯酚靛酚溶液标定。用草酸溶液 (质量分数为 2%) 将 20 g 样品匀浆并定容至 100 mL, 过滤。吸取 10 mL 滤液, 用标定过的 2,6-二氯酚靛酚溶液滴定。抗坏血酸含量 (C_{VC}) 以样品鲜质量计算, 计算式见式 (4)。

$$C_{VC} = \frac{(V - V_0) \times T}{m} \quad (4)$$

式中: V 为滴定试样消耗的 2,6-二氯酚靛酚溶液体积, mL; V_0 为滴定空白消耗的 2,6-二氯酚靛酚溶液体积, mL; T 为 2,6-二氯酚靛酚溶液的滴定度, mg/mL; m 为试样质量, g。

1.4 莲藕品质指数计算

为了综合评价莲藕的品质, 参照宋梦圆等^[15]的方法, 通过整合品质指标计算品质指数 (Lotus Quality Index, LQI, I_{LQI})。首先对莲藕各品质指标进行无量纲化处理, 以消除各指标间单位差异, 无量纲的值均在 0~1 内。对于 TSS、总糖、淀粉、可溶性蛋白、总酚、抗坏血酸指标, 使用式 (5) 进行计算。

$$L = \frac{y - s}{m - s} \quad (5)$$

式中: L 为转化后无量纲值; y 为品质指标的实际测定值; s 和 m 分别为品质指标的最小测定值和最大测定值。每个品质指标转化成无量纲值后, 使用公式 $I_{LQI} = \sum_{i=1}^n L_i$ 计算莲藕品质指数, I_{LQI} 越高, 表明莲藕的综合品质越好。

1.5 数据处理

每个样品重复测定 3 次, 采用 SPSS 26.0 软件进行结果计算与分析, 结果以平均值 \pm 标准偏差表示。采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 对结果进行显著性分析, $P < 0.05$ 表示差异显著。用 Graphpad Prism 8.0 软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 真空包装对莲藕贮藏品质的影响

2.1.1 真空包装对莲藕失水率的影响

图 1 显示相同种植条件的莲藕经真空包装后失

水率显著低于未包装组 (CK)。果蔬失水率达 5% 即失去商品价值^[16], 贮藏第 4 天时所有 CK 组的失水率已超该界限, 第 10 天时接近 20%。而包装组莲藕的失水率在第 10 天时均小于 1%。因此, 真空包装可有效缓解水分散失。

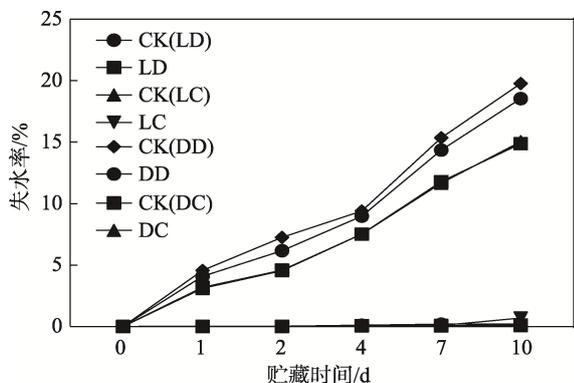


图 1 真空包装与未包装莲藕贮藏期间的失水率

Fig.1 Water loss of vacuum packaged and unpackaged lotus roots during storage

注: CK 为未包装组; LD、LC、DD、DC 分别代表露天短周期、露天长周期、大棚短周期和大棚长周期种植条件, 下同。

2.1.2 真空包装对莲藕色泽的影响

莲藕贮藏期间表型变化如图 2 所示, 第 2 天时未包装组表皮出现明显褐斑, 而真空包装组产品第 10 天时仍具有良好的外观品质。ΔE 是对色度变化定量的指标, 真空包装对莲藕 ΔE 的影响如表 1 所示。第 1 天时, 相同种植条件的莲藕未包装组与包装组间即存在显著差异。第 10 天时, CK 组莲藕的 ΔE 约为包装组的 2~3 倍。由此可见, 真空包装有利于维持莲藕贮藏期间的外观品质。

上述结果表明真空包装是延长莲藕货架期的有效手段。基于此, 后续探究种植条件对莲藕贮藏及营养品质的影响。

2.2 种植条件对莲藕贮藏品质的影响

2.2.1 不同种植条件对莲藕含水率的影响

由图 3a 可知, 莲藕收获时含水率在 76.68%~86.11% 内波动, 且 4 种植植条件间存在显著差异, DC 组莲藕的含水率最高。贮藏第 10 天时, 莲藕含水率均降至 80% 以下, LD 组和 DD 组产品的含水率显著低于其他 2 组。含水率的变化率与采收水分含量呈正相关, DD 组莲藕采收含水率最低, 为 76.68%, 变化率最小。

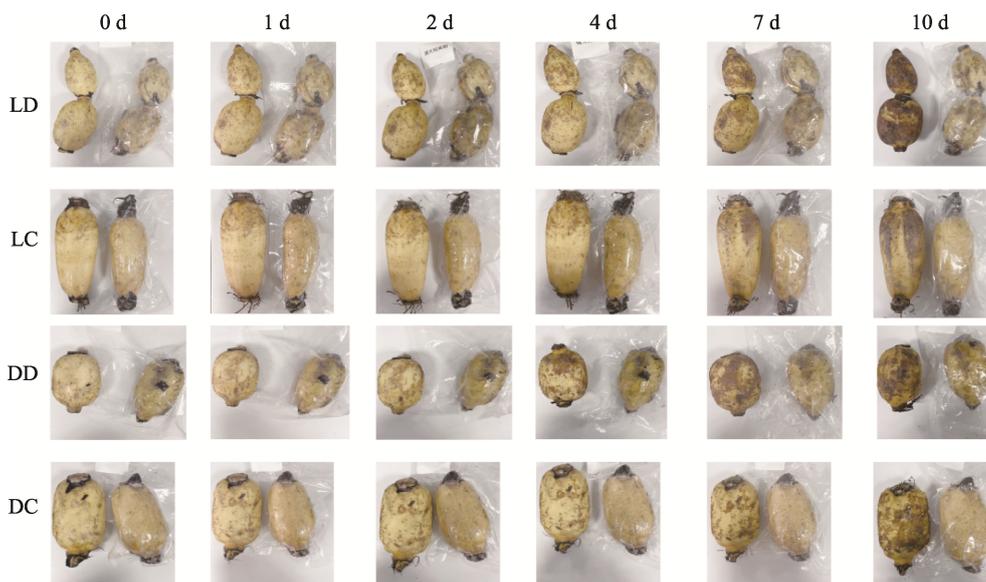


图 2 真空包装与未包装莲藕贮藏期间的表型

Fig.2 Phenotypes of vacuum packaged and unpackaged lotus roots during storage

注: 每张图片中左侧样品为未包装组, 右侧样品为真空包装组。

表 1 真空包装对莲藕色泽变化的影响

Tab.1 Effects of vacuum package on color change of lotus roots

贮藏时间/d	CK (LD)	LD	CK (LC)	LC	CK (DD)	DD	CK (DC)	DC
1	4.13±0.83 ^a	2.95±0.29 ^b	4.12±0.21 ^a	1.79±0.49 ^b	6.88±0.15 ^a	2.75±0.19 ^b	8.99±1.14 ^a	2.11±0.48 ^b
2	4.45±0.36 ^a	3.57±0.54 ^b	4.56±0.13 ^a	2.20±0.04 ^a	7.57±0.78 ^a	3.61±0.44 ^b	9.98±0.64 ^a	2.75±1.01 ^b
4	5.56±0.54 ^a	5.00±0.90 ^b	4.84±0.70 ^a	2.34±0.31 ^a	12.54±0.69 ^a	4.21±0.63 ^b	10.73±1.00 ^a	4.17±0.39 ^b
7	9.81±1.91 ^a	6.31±1.07 ^b	6.69±0.67 ^a	2.85±0.57 ^a	18.94±0.14 ^a	7.00±0.71 ^b	12.61±0.72 ^a	4.92±0.37 ^b
10	25.86±0.65 ^a	7.56±1.22 ^b	15.58±1.58 ^a	6.53±0.66 ^b	21.70±1.64 ^a	9.24±0.82 ^b	15.06±1.10 ^a	5.48±0.54 ^b

注: 不同字母表示相同贮藏时间和相同种植条件下莲藕未包装与包装组的 ΔE 存在显著差异 (P<0.05)。

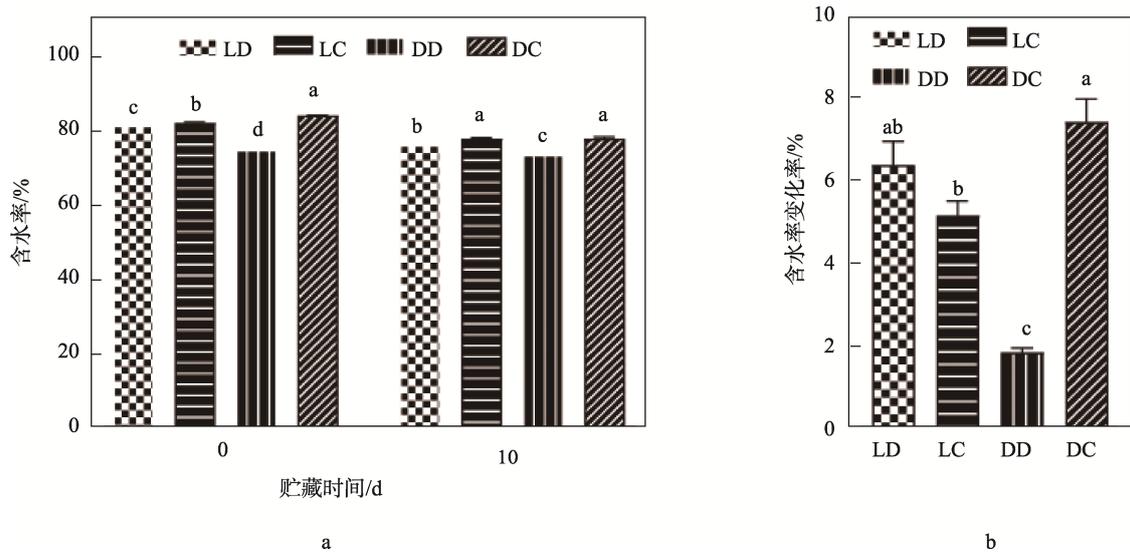


图 3 不同种植条件莲藕含水率 (a) 及变化率 (b)
Fig.3 Water content of lotus roots harvested from different planting conditions (a) and change rate (b)

注: 图 3a 中小写字母表示同一贮藏时间不同种植条件之间的显著差异 ($P < 0.05$),

图 3b 中小写字母表示不同种植条件之间的显著差异 ($P < 0.05$)。

2.2.2 不同种植条件对莲藕硬度的影响

硬度是衡量莲藕新鲜度和品质好坏的重要指标, 由于呼吸和蒸腾发生失水, 细胞结构改变, 从而导致贮藏期间莲藕硬度下降^[17]。采收时, 短周期莲藕硬度大于相同种植方式下长周期产品, 较高的硬度可减少机械损伤, 利于运输。不同种植条件的莲藕硬度下降幅度不同, 贮藏前后 LD 组和 LC 组的莲藕硬度变化达到 45.33%和 18.39%, 而 DD 组和 DC 组仅为 2.31%和 3.91% (图 4)。由此, 大棚种植更有效地保持了莲藕的硬度, 产品耐贮性更强。

本实验发现同一时期莲藕的硬度与含水率呈负

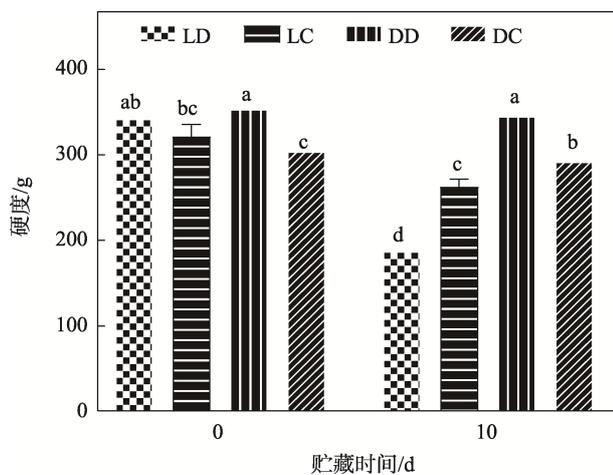


图 4 不同种植条件莲藕贮藏前后硬度的变化

Fig.4 Hardness change of lotus roots harvested from different planting conditions

注: 图中字母表示同一贮藏时间不同种植条件之间的显著差异 ($P < 0.05$)。

相关, 大棚短周期种植莲藕含水率最低, 硬度最高。贮藏期间观测到莲藕水分含量和硬度均下降, 说明果蔬的硬度不仅与水分含量有关, 是多种因素综合作用的结果, 如呼吸作用消耗有机物导致果蔬衰老^[18], 果胶酶、纤维素酶分解细胞壁等^[19]。

2.2.3 不同种植条件对莲藕外观的影响

莲藕贮藏期间色泽变化如表 2 所示。 L^* 是反映褐变的度量, L^* 值越小代表颜色越深。在贮藏期间, 露天长周期和大棚长周期种植的莲藕果皮 L^* 值分别降低了 0.22 和 0.16 个单位, 而 LD 组和 DD 组的莲藕的 L^* 下降约为 8 个单位, 说明长周期种植能更有效地维持莲藕的亮度。 a^* 代表红绿度, a^* 值越大表明样品色泽越接近红色, 贮藏过程中所有组产品 a^* 值均上升, 与图 5 中观测到莲藕果肉逐渐变红一致。 ΔE 由 L^* 、 a^* 和 b^* 值计算而来, 用于反应样品外观色泽的综合变化, ΔE 越接近 0 说明颜色变化越小。本研究发现除 DC 组, 其余组果皮的 ΔE 均大于果肉, 且果皮色泽更易观察, 因此果皮色泽可用于判断莲藕的新鲜度。 ΔE 表明大棚长周期种植的莲藕果皮色泽变化显著低于其他组, 该种植条件更有利于保持莲藕的外观品质。

莲藕褐变主要由多酚氧化酶和过氧化物酶引起, 酚类物质是酶促反应的底物^[20]。本实验中莲藕总酚含量贮藏后上升, 为酶促反应提供底物, 加剧褐变。前人通过草酸、1-MCP、海藻酸钠涂膜等处理来控制莲藕褐变^[21-23]。本实验发现短周期种植的莲藕果皮色差显著大于长周期, 因此也可通过调控种植周期来缓解褐变现象。

表2 不同种植条件莲藕贮藏前后色泽的变化
Tab.2 Color change of lotus roots harvested from different planting conditions

测定部位	贮藏时间/d	种植条件	L^*	a^*	b^*	ΔE
果皮	0	LD	31.52±0.65 ^{Aa}	1.80±0.15 ^{Ac}	9.60±0.47 ^{Ab}	0±0 ^a
		LC	27.85±0.83 ^{Aab}	3.06±0.09 ^{Ba}	13.04±1.11 ^{Aa}	0±0 ^a
		DD	30.52±3.20 ^{Aab}	1.71±0.13 ^{Bc}	9.85±0.49 ^{Ab}	0±0 ^a
		DC	27.27±1.07 ^{Ab}	2.81±0.08 ^{Bb}	10.15±0.74 ^{Ab}	0±0 ^a
	10	LD	23.53±1.83 ^{Bb}	2.50±0.15 ^{Bc}	7.48±0.86 ^{Bb}	8.32±1.85 ^a
		LC	27.63±0.67 ^{Aa}	3.72±0.17 ^{Aa}	10.50±0.69 ^{Ba}	2.71±0.61 ^b
		DD	22.66±1.07 ^{Bb}	2.38±0.1 ^{Ac}	7.57±0.34 ^{Bb}	8.22±1.02 ^a
		DC	27.11±0.08 ^{Aa}	3.36±0.13 ^{Ab}	9.58±0.14 ^{Aa}	0.89±0.12 ^b
果肉	0	LD	41.25±1.86 ^{Aa}	0.36±0.04 ^{Bc}	6.65±0.55 ^{Bc}	0±0 ^a
		LC	39.29±1.35 ^{Aa}	2.31±0.11 ^{Aa}	8.42±0.29 ^{Ab}	0±0 ^a
		DD	41.52±1.51 ^{Aa}	1.41±0.13 ^{Ab}	9.44±0.24 ^{Aa}	0±0 ^a
		DC	39.19±0.56 ^{Bb}	1.49±0.18 ^{Ab}	7.40±0.42 ^{Ac}	0±0 ^a
	10	LD	42.47±0.33 ^{Aa}	0.62±0.07 ^{Ad}	8.15±0.32 ^{Ac}	1.98±0.32 ^a
		LC	39.61±0.33 ^{Ac}	2.36±0.02 ^{Aa}	8.59±0.22 ^{Ab}	0.48±0.09 ^b
		DD	42.96±0.23 ^{Aa}	1.43±0.05 ^{Ac}	9.53±0.46 ^{Aa}	1.50±0.21 ^a
		DC	40.82±0.53 ^{Ab}	1.68±0.17 ^{Ab}	7.44±0.30 ^{Ad}	1.67±0.53 ^a

注：表中小写字母表示同一贮藏时间不同种植条件之间的显著差异 ($P < 0.05$)，大写字母表示不同贮藏时间同一种种植条件间的显著差异 ($P < 0.05$)，下同。

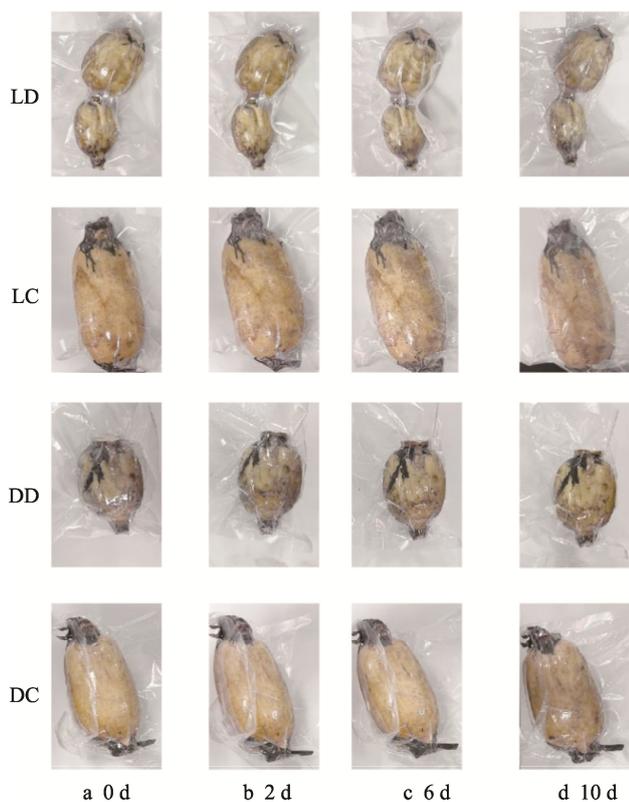


图5 不同种植条件莲藕贮藏前后的表型
Fig.5 Phenotypes of lotus roots harvested from different planting conditions during storage

2.3 种植条件对莲藕贮藏前后营养品质的影响

2.3.1 不同种植条件的莲藕营养品质变化

贮藏期间莲藕的营养品质变化如表3所示。比较相同种植周期的莲藕，采收时露天种植的TSS值高于大棚种植的，说明露天种植有利于初始营养品质的形成。造成此现象的原因可能是在相同的生长周期内，棚膜阻碍了阳光透过，削弱了莲藕地上部光合作用的作用，因而同化物减少^[24]。

淀粉是莲藕中最重要的成分，可占鲜质量的10%~20%^[4]。采收时，DD莲藕的淀粉含量最高，为536.64 mg/g。前人证明粉质藕的淀粉含量高而水分含量低^[4]，与本研究测得DD组莲藕含水率低的结果一致。经10 d贮藏后所有组淀粉含量均显著上升，DD组莲藕仍保持最高，可达721.12 mg/g。而经贮藏后淀粉含量变化率最大的为LD组，采收时莲藕的淀粉含量仅为384.36 mg/g，为4组中最低的，10 d后淀粉含量增加了86.58%，仅次于DD组。除DC组产品的总糖含量贮藏前后无显著变化，其余组均显著增加。贮藏10 d时，总糖含量最高的仍为DD组，达88.81 g/100 g。莲藕在膨大过程中伴随各种同化物的变化，可溶性糖、淀粉、纤维素的含量对贮藏和食用品质至关重要^[25]。本实验发现贮藏过程中淀粉和

表 3 不同种植条件莲藕在贮藏期间的品质指标变化
Tab.3 Nutrition characteristics of lotus roots harvested from different planting conditions

种植条件	时间/d	TSS 含量/%	淀粉含量/ (mg·g ⁻¹)	总糖含量/ [g·(100 g ⁻¹)]	可溶性蛋白含量/ (mg·kg ⁻¹)	总酚含量/ (μg·g ⁻¹)	抗坏血酸含量/ (mg·g ⁻¹)
LD	0	6.5±0 ^{Ab}	384.35±22.18 ^{Bc}	70.39±4.84 ^{Bbc}	3903.73±244.80 ^{Ba}	725.56±25.74 ^{Bb}	0.37±0.0045 ^{Aa}
	10	6±0 ^{Bc}	717.12±57.53 ^{Aa}	83.74±3.71 ^{Aa}	4844.58±53.63 ^{Aa}	967.31±45.87 ^{Ac}	0.27±0.0055 ^{Bb}
LC	0	7.17±0.29 ^{Aa}	454.16±2.87 ^{Bb}	61.96±4.75 ^{Bc}	2238.42±38.55 ^{Bc}	961.70±78.02 ^{Ba}	0.10±0.0012 ^{Bb}
	10	6.33±0.29 ^{Bbc}	480.68±6.56 ^{Ab}	87.83±1.56 ^{Aa}	2889.60±108.80 ^{Ac}	1273.73±18.87 ^{Aa}	0.13±0.0014 ^{Ac}
DD	0	6.17±0.29 ^{Bb}	536.62±20.74 ^{Ba}	78.96±0.69 ^{Bab}	2834.53±126.34 ^{Bb}	890.20±38.98 ^{Ba}	0.37±0.0067 ^{Aa}
	10	7.17±0.29 ^{Aa}	721.12±49.88 ^{Aa}	88.81±0.19 ^{Aa}	4587.56±122.37 ^{Ab}	1031.13±11.12 ^{Abc}	0.37±0.84 ^{Aa}
DC	0	6.17±0.29 ^{Ab}	397.58±16.29 ^{Bc}	82.94±3.36 ^{Aa}	2297.87±118.69 ^{Ac}	997.94±14.27 ^{Ba}	0.09±0.0012 ^{Bb}
	10	6.5±0 ^{Bb}	689.63±19.06 ^{Aa}	81.49±6.62 ^{Aa}	2449.95±72.12 ^{Ad}	1044.57±22.60 ^{Ab}	0.14±0.0037 ^{Ac}

总糖含量总体呈上升趋势。这是因为淀粉水解成小分子糖, 一部分贮藏于根茎中, 另一部分被呼吸消耗。淀粉含量上升是由于在此过程中莲藕内比淀粉更复杂的化合物分解重新合成淀粉^[26]。

可溶性蛋白、总酚和抗坏血酸含量经贮藏后增加。采收时, 短周期莲藕的可溶性蛋白和抗坏血酸含量显著高于长周期种植的, 贮藏 10 d 后有相同的规律。而短周期莲藕的总酚含量在采收及贮藏 10 d 后均低于长周期莲藕的。说明种植周期对莲藕营养品质的不同方面具有不同影响。可溶性蛋白、总酚和抗坏血酸等小分子化合物含量上升, 这些小分子可以成为渗透调节物质, 细胞通过调节渗透压响应低温, 衰老引起的分解代谢加快也会造成这类物质含量的增加^[27]。贮藏过程中, 细胞器释放游离蛋白质, 部分不溶性蛋白在酶的作用下转化为可溶性成分, 造成了可溶性蛋白质含量的上升^[28]。酚类物质具有抗氧化活性, 能够预防人类多种疾病^[29], 被认为是有益成分。然而, 酚类物质是酶促褐变的底物, 易降低果蔬外观品质, 不利于贮藏。

2.3.2 不同种植条件及贮藏时间对莲藕营养品质的方差分析

进行种植方式和种植周期对莲藕采收时以及贮藏 10 d 后营养品质影响的方差分析 (表 4), 发现各因素及交互作用对品质指标的影响不同。采收时, 种植方式对抗坏血酸含量未造成显著影响, 种植周期则显著影响了总糖、可溶性蛋白、抗坏血酸和总酚的含量。贮藏 10 d 后, 莲藕的 TSS 水平与种植周期无关, 淀粉含量不受种植方式和种植周期影响。

2.3.3 莲藕营养品质综合评价

营养品质由多方面构成, 使用单一的指标难以评

价不同种植条件及贮藏期对莲藕营养成分的影响, 因而通过计算 LQI 对莲藕营养品质进行综合分析。图 6a~f 是各指标与 LQI 之间的相关性分析。由回归方程可知, 所有指标与 LQI 呈正相关, 且这些指标均为有益指标, 即值越大表明莲藕营养品质越高, 因此 LQI 可以有效表征莲藕的综合营养价值。

表 4 不同种植方式、周期和贮藏时间对莲藕品质影响的方差分析

Tab.4 Variance analysis of the effects of different planting methods, periods and storage time on the quality of lotus roots

品质指标	种植方式	种植周期	种植方式*种植周期
TSS	**/**	ns/ns	ns/**
总糖	**/**	**/**	**/**
淀粉	**/ns	ns/ns	*/*
可溶性蛋白	**/**	**/**	**/ns
抗坏血酸	ns/**	**/**	ns/**
总酚	**/**	**/**	*/**

注: 表中 ns 表示无显著影响; *, **和***分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平影响显著; XX/XX 中‘/’前的符号表示 0 d 时的显著性, ‘/’后的符号表示 10 d 时的显著性。

图 7 显示了采收时, LD 组和 DD 组莲藕的 I_{LQI} 分别为 2.44 和 2.73, 显著高于长周期种植的莲藕; 贮藏 10 d 时, 上述 2 组短周期产品的 I_{LQI} 仍显著高于长周期的。说明短周期种植条件更有利于形成莲藕的营养品质。相同种植条件, 采收时 I_{LQI} 均显著低于贮藏 10 d 的, 可知 4 种不同种植条件莲藕的营养价值在真空包装下得到了较好的维持。

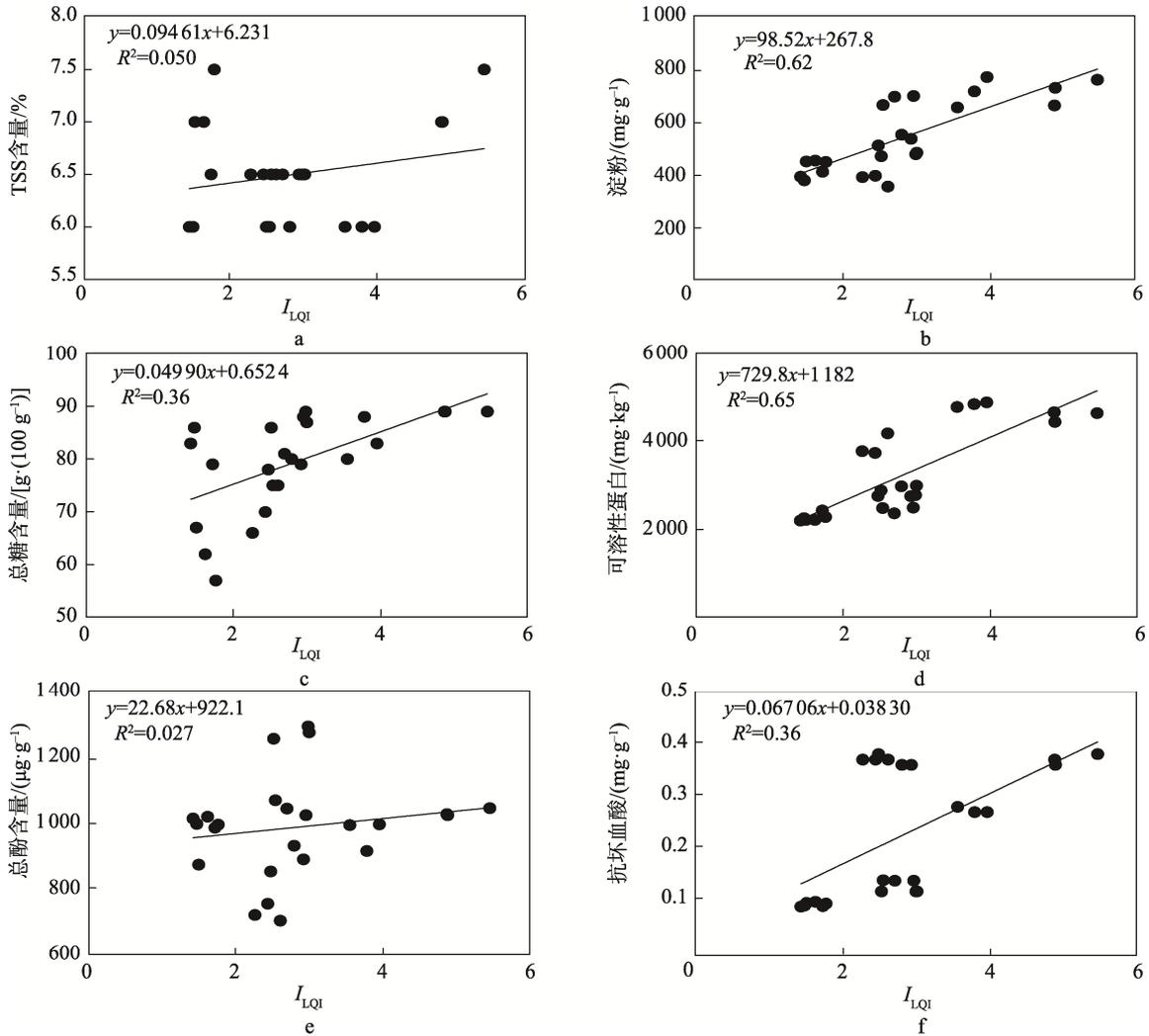


图6 TSS (a)、淀粉 (b)、总糖 (c)、可溶性蛋白 (d)、总酚 (e)、抗坏血酸 (f) 与 LQI 的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis of TSS(a), starch(b), total sugar(c), soluble protein (d), total phenol(e), ascorbic acid(f) and LQI

注：图中 R^2 表示方程的拟合度。

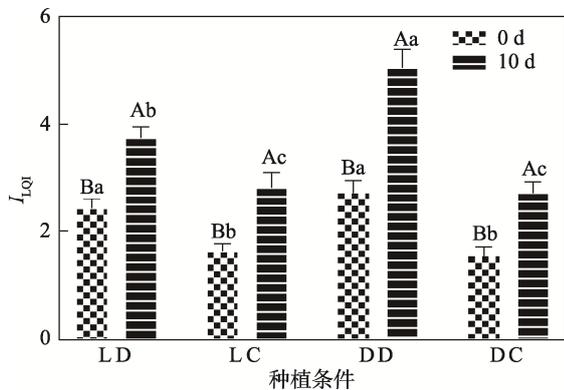


图7 采收及贮藏 10 d 后不同种植条件莲藕的 LQI

Fig.7 LQI value of lotus root under different planting conditions after harvesting and storage for 10 days

注：图中小写字母表示同一贮藏时间不同种植条件之间的显著差异 ($P<0.05$), 大写字母表示不同贮藏时间同一种种植条件间的显著差异 ($P<0.05$)。

3 结语

真空包装显著缓解莲藕采后水分散失和维持外观色泽, 是一种延长产品货架期的有效手段。通过对莲藕含水率、硬度和色泽的测定, 发现长周期种植能更有效地锁住莲藕水分; 根茎的硬度与种植方式有关, 大棚种植莲藕比露天种植硬度下降慢; 大棚长周期条件能抑制果皮色泽变化, 维持较好的外观品质。因此, 在 4 种条件中, 大棚长周期对保持莲藕贮藏品质的效果更好。

整合 TSS、总糖、淀粉、可溶性蛋白、Vc 和总酚计算 LQI, 全面评价莲藕的营养品质。采收和贮藏 10 d 后短周期种植比长周期更有利于提高营养价值, 其中大棚短周期种植的莲藕营养品质最佳。

莲藕的营养品质在真空包装下得到了较好的维持, 考虑到水分含量、质构和外观对商品价值的影响,

应确定合理的贮藏时间。结合莲藕的贮藏品质和营养品质,在种植方式中首选大棚种植。仅考虑贮藏,长周期种植更有利;仅考虑营养,则短周期更佳。然而,短周期种植的另一个弊端是莲藕节间短、产量低,因此种植时间的选择要结合经济效益综合考量。

参考文献:

- [1] MIN T, NIU L F, FENG X Y, et al. The Effects of Different Temperatures on the Storage Characteristics of Lotus (*Nelumbo Nucifera* G.) Root[J]. Food Chemistry, 2021, 348: 129109.
- [2] 齐雨红, 刘功继, 刘延照, 等. 酸碱煮制对莲藕食用品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(17): 8-17.
QI Y H, LIU G J, LIU Y Z, et al. Effects of Acid and Alkali Cooking on Edible Quality of Lotus Rhizome[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(17): 8-17.
- [3] CHIANG F Y, LUO Y Y. Effects of Pressurized Cooking on the Relationship between the Chemical Compositions and Texture Changes of Lotus Root (*Nelumbo Nucifera* Gaertn.)[J]. Food Chemistry, 2007, 105(2): 480-484.
- [4] 姜雅莹. 脆质与粉质莲藕品质与淀粉特性研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023: 2.
JIANG Y Y. Study on Quality and Starch Characteristics of Crisp and Powdery Lotus Roots[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023: 2.
- [5] 赵书平, 吴鹏, 冯凯, 等. 优质轻筒高效生产技术(十三) 莲藕优质轻筒高效栽培技术规程[J]. 中国蔬菜, 2023(1): 116-120.
ZHAO S P, WU P, FENG K, et al. High-quality, Light, Simple, and Efficient Production Technology (13) Technical Regulation for High-quality, Light, Simple, and Efficient Cultivation of Lotus Roots[J]. China Vegetables, 2023(1): 116-120.
- [6] 刘晓燕. 鲜切莲藕保鲜技术及货架期预测模型的建立[D]. 雅安: 四川农业大学, 2018: 39.
LIU X Y. Preservation Technology of Fresh-Cut Lotus Root and Establishment of Shelf Life Prediction Model[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2018: 39.
- [7] 肖越, 祝梓淳, 邓云, 等. 不同包装对采后莲藕保鲜效果的比较[J]. 现代食品科技, 2022, 38(7): 169-176.
XIAO Y, ZHU Z C, DENG Y, et al. Effects of Different Packaging on Preservation of Postharvest Lotus Root[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(7): 169-176.
- [8] 鲁运江. 莲藕真空保鲜的效果及技术[J]. 长江蔬菜, 2017(5): 25-27.
LU Y J. Effect and Technology of Vacuum Preservation of Lotus Root[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2017(5): 25-27.
- [9] 邱靖一. 外源物质对采后番荔枝品质及糖代谢的影响研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2021: 10.
QIU J Y. Effects of Exogenous Substances on Quality and Sugar Metabolism of Postharvest *Annona Squamosa*[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2021: 10.
- [10] 向文娟, 王孝雯, 孙大文. 水杨酸结合气调保鲜对宁夏枸杞贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(9): 215-222.
XIANG W J, WANG X W, SUN D W. Effect of Salicylic Acid Treatment Combined with Modified Atmosphere Packaging on the Quality of Goji Berries(*Lycium Barbarum* L.) during Storage[J]. Food Science, 2022, 43(9): 215-222.
- [11] VALVERDE-MIRANDA D, DIAZ P M, GOMEZ G M, et al. Total Soluble Solids and Dry Matter of Cucumber as Indicators of Shelf Life[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 180: 111603.
- [12] 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, 2023, 178(6): 114586.
- [13] 赵倩, 张鹏, 贾晓昱. 不同采收期对1-MCP处理后蓝靛果贮藏品质的影响[J]. 包装工程, 2023, 44(11): 78-86.
ZHAO Q, ZHANG P, JIA X Y. Effects of Different Harvest Periods on the Storage Quality of *Lonicera caerulea* L. after 1-MCP Treatment[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(11): 78-86.
- [14] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 44-70.
CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Guidance on Postharvest Physiological and Biochemical Experiments of Fruits and Vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 44-70.
- [15] 宋梦圆, 宁国法, 田永强, 等. 不同成熟度番茄果实在贮藏期间的品质变化[J]. 中国蔬菜, 2023(2): 45-50.
SONG M Y, NING G F, TIAN Y Q, et al. Quality Changes of Tomato Fruits with Different Maturity during Storage[J]. China Vegetables, 2023(2): 45-50.
- [16] MCMANAMON O, KAUPPER T, SCOLLARD J, et al. Nisin Application Delays Growth of *Listeria Monocytogenes* on Fresh-Cut Iceberg Lettuce in Modified Atmosphere Packaging, While the Bacterial Community Structure Changes within One Week of Storage[J].

- Postharvest Biology and Technology, 2019, 147: 185-195.
- [17] 罗丽. 鲜切莲藕保鲜预处理及速冻调理食品研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2022: 20.
- LUO L. Research on Preservation Pretreatment and Quick-frozen Food Preparation of Fresh-cut Lotus Root[D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2022: 20.
- [18] 徐海山, 丁胜华, 周辉, 等. 采后果蔬软化机制及调控方法研究进展[J]. 激光生物学报, 2019, 28(6): 504-512.
- XU H S, DING S H, ZHOU H, et al. Advances in Mechanism and Regulation Methods of Postharvest Fruits and Vegetable Softening[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2019, 28(6): 504-51.
- [19] CHEN J, LI Y X, LI F F, et al. Effects of Procyanidin Treatment on the Ripening and Softening of Banana Fruit During Storage[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 292: 110644.
- [20] XU Y H, BAO Y Q, CHEN J H, et al. Mechanisms of Ethanol Treatment on Controlling Browning in Fresh-Cut Lotus Roots[J]. Scientia Horticulturae, 2023, 310: 111708.
- [21] ALI S, KHAN A S, ANJUM M A, et al. Effect of Postharvest Oxalic Acid Application on Enzymatic Browning and Quality of Lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) Root Slices[J]. Food Chemistry, 2020, 312: 126051.
- [22] BATA G M, ZHANG C J, PENG S J, et al. Combination of Sodium Alginate-Based Coating with L-Cysteine and Citric Acid Extends the Shelf-Life of Fresh-Cut Lotus Root Slices by Inhibiting Browning and Microbial Growth[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 175: 111502.
- [23] CHEN J H, XU Y H, YI Y, et al. Regulations and Mechanisms of 1-Methylcyclopropene Treatment on Browning and Quality of Fresh-Cut Lotus (*Nelumbo Nucifera* Gaertn.) Root Slices[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 185: 111782.
- [24] 王克诚, 王丽红, 贾俊芳. 防雾透光增强技术在大棚桃树栽培上的应用效果[J]. 河南农业科学, 2006, 35(8): 103-105.
- WANG K C, WANG L H, JIA J F. Application Effect of Anti-Fog and Light Transmission Enhancement Technology in Peach Tree Cultivation in Greenhouse[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2006, 35(8): 103-105.
- [25] REID J B. Modelling Growth and Dry Matter Partitioning in Root Crops: A Case Study with Carrot (*Daucus carota* L.)[J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 2019, 47(2): 99-124.
- [26] 赵琳, 叶夏芳, 董韦, 等. 贮藏期不同类型甘薯块根营养品质与淀粉特性变化[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(12): 2224-2233.
- ZHAO L, YE X F, DONG W, et al. Changes of Nutritional Quality and Starch Properties of Different Types of Sweet Potato Roots during Storage[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2021, 33(12): 2224-2233.
- [27] 张晓冬. 莲藕根状茎碳水化合物代谢及淀粉特性的初步研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2005: 12.
- ZHANG X D. Preliminary Study on Carbohydrate Metabolism and Starch Characteristics of Rhizome of Lotus Root[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2005: 12.
- [28] 许金蓉, 童志有, 叶开飞. 莲藕化学保鲜剂研究[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(3): 676-679.
- XU J R, TONG Z Y, YE K F. Study on Chemical Preservation Agents of Lotus Root during Storage[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2010, 49(3): 676-679.
- [29] 唐红丽, 孙素玲, 王江琪, 等. 不同贮藏条件下柠檬酸对莲藕营养品质的影响[J]. 浙江农业科学, 2023, 64(7): 1785-1789.
- TANG H L, SUN S L, WANG J Q, et al. Effect of Citric Acid on Nutritional Quality of Lotus Root under Different Storage Conditions[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2023, 64(7): 1785-1789.