

严锐, 韩延超, 吴伟杰, 等. 真空预冷对鲜食莲子采后贮藏品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(13): 331–337. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020100210

YAN Rui, HAN Yanchao, WU Weijie, et al. Effect of Vacuum Pre-cooling on Postharvest Storage Quality of Fresh Lotus Seeds [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(13): 331–337. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020100210

· 贮运保鲜 ·

真空预冷对鲜食莲子采后贮藏品质的影响

严锐^{1,2}, 韩延超², 吴伟杰², 陈杭君^{2,*}, 郜海燕^{2,*}

(1. 浙江农林大学农业与食品科学学院, 浙江杭州 311200;

2. 浙江省农业科学院食品科学研究所, 农业农村部果品产后处理重点实验室, 浙江省果蔬保鲜与加工技术研究重点实验室, 中国轻工业果蔬保鲜与加工重点实验室, 浙江杭州 310021)

摘要: 为探究真空预冷对鲜食莲子采后品质的影响, 分别设置不同的预冷终压 (500、750、1000 Pa) 及补水率 (0%、2%、4%、6%), 以未预冷处理作为对照, 研究不同真空预冷条件对鲜食莲子降温速率和贮藏品质的影响。结果表明: 与对照相比, 真空预冷可在极短时间内降低鲜食莲子采后田间热和呼吸速率, 终压 750 Pa 处理所需预冷时间和预冷过程中的失重分别为 780 s 和 4.51%; 鲜食莲子在真空预冷前进行补水处理, 不仅延长了贮藏期, 而且保持了较好的贮藏品质。其中 750 Pa、补水率 4% 处理的效果较好, 维持了鲜食莲子较好的外观品质, 显著降低失重和呼吸速率, 抑制其褐变并保持较高的总叶绿素、叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量。因此, 终压 750 Pa、补水率 4% 的真空预冷条件可有效延缓鲜食莲子的黄化与衰老, 保持较好的品质并延长贮藏期。

关键词: 鲜食莲子, 真空预冷, 预冷终压, 补水率, 贮藏品质

中图分类号: TS205.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)13-0331-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020100210

Effect of Vacuum Pre-cooling on Postharvest Storage Quality of Fresh Lotus Seeds

YAN Rui^{1,2}, HAN Yanchao², WU Weijie², CHEN Hangjun^{2,*}, GAO Haiyan^{2,*}

(1. College of Agriculture and Food Science, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311200, China;

2. Food Science Institute, Zhejiang Academy of Agricultural Science, Key Laboratory of Post-Harvest Handling of Fruits, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Fruits and Vegetables Postharvest and Processing Technology Research of Zhejiang Province, Key Laboratory of Postharvest Preservation and Processing of Fruits and Vegetables, China National Light Industry, Hangzhou 310021, China)

Abstract: In order to investigate the effect of vacuum precooling on postharvest quality of fresh lotus seeds, different final pre-cooling pressures (500, 750, 1000 Pa) and water replenishment rates (0%, 2%, 4%, 6%) were set respectively, and no pre-cooling was used as control. Then, the effects of different vacuum pre-cooling conditions on the cooling rate and storage quality of fresh lotus seeds were studied. The results showed that compared with the control, vacuum pre-cooling reduced the heat and respiration rate of fresh lotus seeds in a short time. The pre-cooling time and weight loss in the pre-cooling process for the final pressure of 750 Pa were 780 s and 4.51%, respectively. Water replenishment treatment before vacuum pre-cooling not only prolonged the storage period, but also maintained better storage quality. Among of them, the treatment group (750 Pa, 4%) was the best, which could maintain the good appearance quality of fresh lotus seeds during storage, significantly reduce weight loss and respiration rate, and inhibit lotus seeds browning, maintain higher content of total chlorophyll, chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoids. Therefore, vacuum pre-cooling conditions with a final

收稿日期: 2020-09-30

基金项目: 现代农业产业技术体系专项资金 (CARS-24-E-01); 浙江省万人计划人才培养项目 (2018R52020); 浙江省重点研发计划项目 (2019C02079); 杭州市农业和社会发展科研项目 (2019KYRK0340); 余杭区农业与社会发展科技创新项目 (2020KJX015)。

作者简介: 严锐 (1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 949975862@qq.com。

* 通信作者: 陈杭君 (1976-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食品物流与品质控制, E-mail: spshangjun@sina.com。

郜海燕 (1958-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 食品物流保鲜与品质控制, E-mail: spsghy@163.com。

pressure of 750 Pa and water replenishment rate of 4% could effectively delay the yellowing and senescence of fresh lotus seeds, maintain better storage quality, and extend the storage period.

Key words: fresh lotus seeds; vacuum pre-cooling; precooling final pressure; water replenishment rates; preservative quality

莲(*Nelumbo nucifera* Gaertn.), 睡莲科, 多年生水生草本植物^[1], 主要分布在我国湖南、湖北、浙江、江苏等区域。莲子中含有丰富的碳水化合物、蛋白质、维生素、氨基酸等营养物质, 还含有多糖、黄酮类及生物碱等功能活性物质, 具有抗氧化、防辐射、保护心血管、调节血脂、清热降火、滋阴补脾等功效^[2]。鲜食莲子因口感脆嫩, 风味独特, 具有多种保健功效而受到广大消费者喜爱。

鲜食莲子生长季节性很强, 多采摘于高温高湿的7~9月, 采后田间热高, 生理代谢旺盛, 呼吸作用强, 水分蒸发快, 因而极易发生褐变腐败。预冷是果蔬采后前处理的重要环节, 可迅速降低果蔬采后田间热, 快速抑制呼吸作用, 避免因其导致的品质下降^[3]。真空预冷主要通过降低水的沸点, 使果蔬表面或内部的水分迅速蒸发, 从而带走田间热, 实现降温的目的, 它具有冷却速率快、冷却均匀、高效、清洁等优点^[4-5]。陈颖等^[6]研究表明当真空预冷终压为660~700 Pa, 预冷终温为5℃和补水率为5%时, 可较好保持荷兰豆的感官品质和营养品质, 并延长贮藏期。Santana等^[7]优化鲜切西兰花采后真空冷却工艺, 当预冷压力200 Pa, 补水率3%, 预冷时间40 min时, 其贮藏品质较好。张晓娟等^[8]研究表明真空预冷终温5℃, 补水率3%, 处理量2.5 kg时, 可有效抑制毛豆失水和丙二醛含量增加, 从而延长毛豆贮藏期。此外, 真空预冷技术还应用于蘑菇^[9]、生菜^[10]、卷心菜^[11]等。研究表明, 真空预冷技术不仅适用于比表面积较大的叶菜类, 也适用于非叶类果蔬, 如胡萝卜^[12]、洋葱^[13]、芒果^[14]等。综上所述, 真空预冷处理可有效延缓果蔬采后品质变化, 但是真空预冷处理在鲜食莲子采后贮藏方面的研究尚未见报道。

本研究以鲜食莲子为试验材料, 探讨了不同真空预冷压力和补水率处理对鲜食莲子贮藏品质的影响, 以期真空预冷在鲜食莲子贮藏技术中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

鲜食莲子 杭州莲谊农业开发有限公司; 磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、丙酮、95%乙醇 分析纯, 上海凌峰化学试剂有限公司。

JXM/YZ 真空预冷机 山东杰西玛机械科技有限公司; TA.XT.plus 物性测定质构仪 英国 Stable Micro Systems 公司; CR-400 手持色差仪 日本柯尼卡美能达公司; Bifugo stratos 高速冷冻离心机 美国 Thermo 公司; Cintra 404 紫外分光光度计 澳大利亚 GBC 公司; UV-9000 紫外-可见分光光度计 上海元析仪器有限公司; LB20T 手持糖度计 广

州市速为电子科技有限公司; MRC-250B 智能人工气候箱 上海百典仪器设备有限公司; OXYBABY O₂/CO₂ 手持式气体分析仪 德国 WITT 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 莲蓬采摘后于半小时内运至厂房, 及时去除莲房, 挑选七至八成熟、无病虫害、无机械损伤的莲子, 并在厂房内进行真空预冷实验。预冷结束后将莲子分装于 PE 盒内, 并用保鲜袋挽口包装贮藏于4℃恒温箱。分别以降至终温6℃的鲜食莲子作为初始值, 之后每3 d 取样, 每处理取120.0 g 鲜食莲子进行色泽、硬度、呼吸速率测定后, 去除莲子底部和顶端各约1 mm 及莲子心, 将莲子和莲皮分别用液氮冷冻, 并存放在-80℃冰箱中, 用于后续指标测定。

1.2.2 鲜食莲子真空预冷处理工艺 参考陶菲^[15]的方法略有改动。将挑选好的鲜食莲子放入样品框内, 样品框放入真空预冷机内部, 将温度探头插入鲜食莲子内部并记录预冷过程中的温度变化, 每分钟记录一次温度数值。

1.2.2.1 不同预冷终压对鲜食莲子预冷效果的影响 预冷终温设置为6℃, 补水率为0%, 预冷终压分别为500、750、1000 Pa, 通过测定莲子降温曲线及预冷前后失重确定预冷终压。

1.2.2.2 不同补水率对鲜食莲子真空预冷效果的影响 预冷终温设置为6℃, 预冷终压为750 Pa, 补水率分别为0%、2%、4%、6%, 以未预冷作为对照。通过测定莲子降温曲线、失重率、呼吸速率、褐变度、色泽、硬度、叶绿素和类胡萝卜素含量变化筛选出较好的补水率。

1.3 指标测定

1.3.1 失重率的测定 参考 Santana 等^[7]方法。采用差量法, 按如下公式计算:

$$\text{失重率}(\%) = \frac{\text{初始质量} - \text{终质量}}{\text{终质量}} \times 100$$

1.3.2 呼吸速率的测定 参考程园等^[16]方法略有改动。分别取各处理组莲子90.0 g, 各自放入3个自封袋中保存2 h, 然后用O₂/CO₂手持式气体分析仪测定探针刺入密封袋中, 测定CO₂浓度, 呼吸速率以每千克果实每小时释放的CO₂体积表示, 单位为mg/(kg·h)。

1.3.3 褐变度的测定 参考 Sun^[17]的方法略有改动。称取1.0 g 莲子样品, 液氮研磨, 加入5 mL 0.1 mol/L 磷酸缓冲液(pH6.8)混匀, 4℃、10000 r/min 离心20 min。取上清液于410 nm处测定吸光值, 计算褐变度。

褐变度 = $10 \times A_{410\text{nm}}$

1.3.4 色泽的测定 参考 Zhu 等^[5] 方法。用全自动色差仪测定鲜食莲子 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 仪器采用标准白板校正。每个处理测定 20 颗莲子, 每颗莲子测定 3 次, 取平均值。

1.3.5 硬度的测定 参考于胜爽^[18] 的方法略有改动。随机选取 20 颗莲子, 采用 TA.XT.plus 物性测定质构仪进行测定, 选取 P6 探头(直径为 6 mm), 测前速度为 1 mm/s, 测中速度为 1 mm/s, 测后速度为 1 mm/s, 测定深度为 5 mm。

1.3.6 叶绿素、类胡萝卜素含量测定 参考郑州元等^[19] 方法略有改动。称取 0.5 g 样品, 液氮研磨, 加入 10 mL 丙酮: 乙醇(1:1, v/v) 溶液, 室温下避光浸提 3 h, 过滤, 滤液于 663、645 和 470 nm 处测定吸光度。

$$\text{叶绿素 a 含量(mg/g)} = \frac{(12.72 \times A_{663\text{nm}} - 2.59 \times A_{645\text{nm}}) \times V}{1000 \times m}$$

$$\text{叶绿素 b 含量(mg/g)} = \frac{(22.88 \times A_{645\text{nm}} - 4.67 \times A_{663\text{nm}}) \times V}{1000 \times m}$$

$$\text{总叶绿素含量(mg/g)} = \frac{(8.05 \times A_{663\text{nm}} + 20.29 \times A_{645\text{nm}}) \times V}{1000 \times m}$$

$$\text{类胡萝卜素含量(mg/g)} = \frac{(1000 \times A_{470\text{nm}} - 3.27 \times C_a - 104 \times C_b) \times V}{1000 \times m}$$

式中: V-样品提取液总体积, mL; m-样品质量, g; C_a -叶绿素 a 浓度, mg/L; C_b -叶绿素 b 浓度, mg/L。

1.4 数据处理

所有数据平均测定 3 次, 采用 Excel 2010 软件进行数据统计, Origin Pro 2017 软件进行数据图表制作, SPSS 24.0 软件的 Duncan's 法进行数据显著性差异分析($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同预冷终压对鲜食莲子降温速率的影响

由图 1 可知, 在预冷前 180 s 内, 真空泵不断将真空室内空气排出, 压力下降缓慢, 空气与鲜食莲子热量交换微弱, 因此, 莲子温度几乎没有下降。500、750 和 1000 Pa 处理组分别在 240~660、180~600、280~600 s 内降温速度较快, 这是因为真空室内压力迅速下降至设定终压, 莲子表面水分开始蒸发, 从而导致温度大幅度下降。当真空室内温湿度与鲜食莲子温湿度趋于平衡时, 莲子温度下降缓慢。预冷终压为 500、750 和 1000 Pa 处理组所需的预冷时间分别为 720、780 和 1320 s, 表明真空预冷终压越大, 预冷时间越长。相同地, 在草莓和土豆上也有相似的结

论, 如吴冬夏等^[20] 研究发现真空预冷压力越低, 草莓的冷却速率越高, 失水越小; 丁伟华等^[21] 研究也发现土豆在真空预冷终压 1000 Pa 时的预冷时间比 500 Pa 时长。

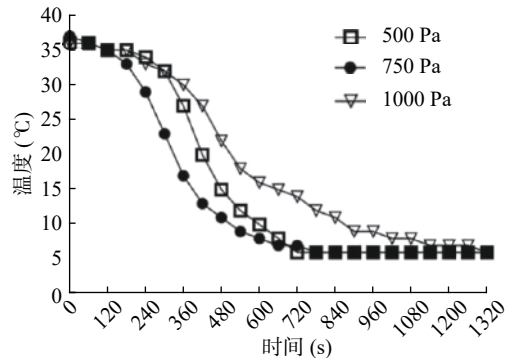


图 1 不同预冷终压的降温曲线
Fig.1 Cooling curve of different pre-cooling final pressure

2.2 不同终压预冷前后鲜食莲子失重率变化

真空预冷主要依靠产品内部水分蒸发带走自身热量, 在降温过程中会引起产品失水问题, 鲜食莲子在预冷过程中的失重主要由水分蒸发造成。由图 2 可知, 在不进行补水的情况下, 预冷终压越大失重越小, 终压为 500 Pa 的处理失重率为 7.18%, 与 750 和 1000 Pa 处理差异显著($P < 0.05$), 但 750 和 1000 Pa 处理之间差异不显著; 终压为 750 Pa 的处理失重率为 4.51%。综合考虑预冷过程中降温速率和失重率的结果, 选择 750 Pa 的预冷终压较为合适。

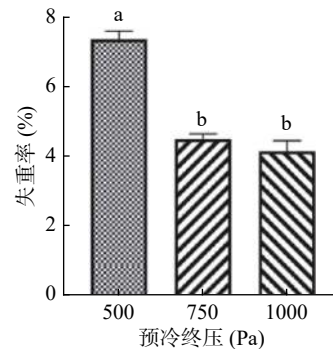


图 2 不同终压预冷前后失重率变化
Fig.2 Change of weight loss rate before and after pre-cooling with different final pressures
注: 不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$); 图 4~图 10 同。

2.3 不同补水率对鲜食莲子降温速率的影响

真空预冷前对果蔬进行补水, 可增加果蔬内部或表面水分从而减少失重, 提高冷却速率。在预冷终压 750 Pa 条件下, 鲜食莲子预冷前进行补水的降温曲线如图 3 所示, 补水率为 0%、2%、4% 和 6% 的处理从初始温度降至 6 °C 终温所需时间分别为 840、780、540 和 1080 s; 补水率 4% 处理的预冷时间最短, 而补水率 6% 处理时间最长。王勤等^[22] 研究发现进行适量补水的杨梅真空预冷效果好于不进行补水的。宣朝辉等^[23] 发现芒果补水率为 16% 时

所需预冷时间比 8% 的长。这可能是果实表面附着水分过多造成的,因此补水率并不是越高降温越快,适宜补水可缩短预冷时间。

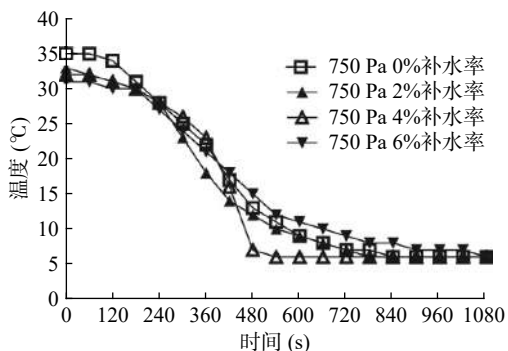


图3 不同补水率的降温曲线

Fig.3 Cooling curve of different water replenishment rates

2.4 不同补水率预冷前后鲜食莲子失重率变化

由图4可知,在预冷终压为750 Pa的情况下,随补水率的增加预冷过程中莲子的失重逐渐减小,补水率为0%的处理失重率达到4.62%,补水率6%处理的失重最小,仅为2.3%。预冷前对莲子进行补水有助于防止失水,补水率越高,预冷后失重越小;若莲子表面附着水分较多,在后续贮藏可能会促进微生物的生长和品质劣变。宣朝辉等^[23]发现在一定补水范围内,补水率越大,芒果在预冷过程中的失重越小。经后期贮藏可知,鲜食莲子补水率在4%左右较为适宜。

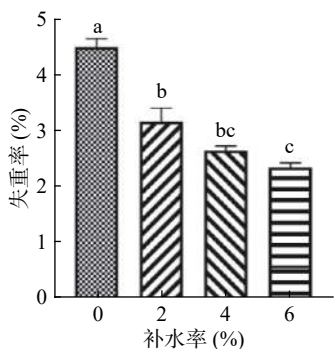


图4 不同补水率预冷前后失重率变化

Fig.4 Change of weight loss rate before and after pre-cooling with different water replenishment rates

2.5 不同补水率对鲜食莲子贮藏期失重率的影响

由图5可知,在贮藏期间,鲜食莲子的失重率呈上升趋势,真空预冷处理失重始终低于对照组(未预冷处理);在贮藏末期,补水率0%、2%、4%、6%处理和对照组的失重率分别为10.09%、8.28%、4.26%、6.96%和11.38%,且补水率4%处理显著($P<0.05$)低于补水率0%、2%和6%处理。吴德慧等^[24]研究发现在1~4℃温度下未预冷杭白菜的失水快于真空预冷的杭白菜。未经预冷的鲜食莲子降温速率慢,长时间内维持较高的呼吸速率,降低了细胞的持水能力,而预冷前补水则加强了细胞的持水能力,因此,补水率4%处理降低了莲子贮藏期间的失重。

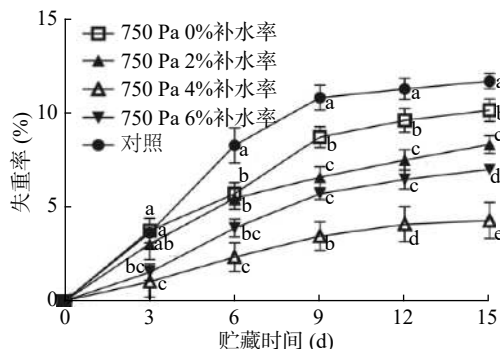


图5 不同补水率对鲜食莲子贮藏期失重率的影响

Fig.5 Effect of different water replenishment rates on weight loss of louts seeds during storage

2.6 不同补水率对鲜食莲子贮藏期呼吸速率的影响

呼吸速率是反映果蔬贮藏效果的重要指标,呼吸强度越大,营养物质消耗越快,从而加速果蔬衰老。由图6可看出,在贮藏期间对照组鲜食莲子的呼吸速率呈降低的趋势,其他处理鲜食莲子的呼吸速率整体呈先升后降的趋势。预冷结束后,莲子呼吸速率从82.79 mg/kg·h迅速降至26.65 mg/kg·h(0%补水率)、17.54 mg/kg·h(2%补水率)、24.7 mg/kg·h(4%补水率)和29.45 mg/kg·h(6%补水率)。在贮藏期间,真空预冷处理的呼吸速率显著低于对照组($P<0.05$),在贮藏9~15 d,补水率4%处理呼吸速率显著低于0%补水率处理($P<0.05$)。陈杭君等^[25]研究发现与冰水和冷库预冷相比,真空预冷可在2.5 h内将芦笋呼吸强度从305 mg CO₂/(kg·h)降至60 mg CO₂/(kg·h)。本研究结果与庄严等^[26]研究结果类似,水芹经冰水预冷后呼吸速率显著低于未预冷水芹。真空预冷的低温抑制了鲜食莲子呼吸作用和生理代谢,延缓了衰老。

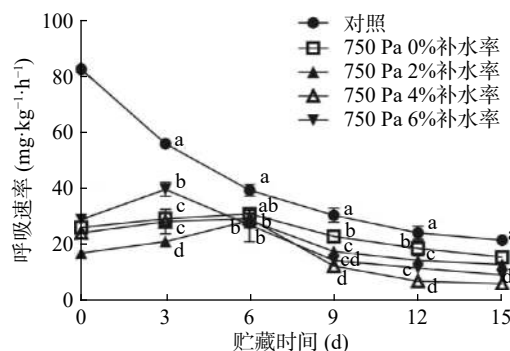


图6 不同补水率对鲜食莲子贮藏期呼吸速率的影响

Fig.6 Effect of different water replenishment rates on respiration rate of louts seeds during storage

2.7 不同补水率对鲜食莲子贮藏期褐变度的影响

褐变度能够反映果蔬的褐变程度,是酚类物质被酚酶氧化形成褐色聚合物的表现。由图7可知,在贮藏期间,鲜食莲子褐变度呈上升趋势。补水率4%处理褐变程度变化相对较缓,始终低于其他补水处理组,且与补水率0%处理差异显著($P<0.05$)。因此,补水率4%处理可以较好抑制贮藏期间莲子褐

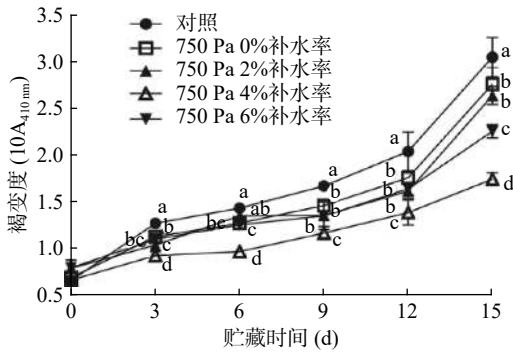


图 7 不同补水率对鲜食莲子贮藏期褐变度的影响
Fig.7 Effect of different water replenishment rates on browning degree of louts seeds during storage

变。Johnson 等^[27]研究也表明,经真空预冷的鲜切芹菜可以维持较好的营养品质,减缓切面褐变程度。

2.8 不同补水率对鲜食莲子贮藏期色泽的影响

色泽是衡量果蔬感官品质及货架期的重要指标。真空预冷对鲜食莲子色泽的影响见表 1, L^* 、 a^* 、 b^* 值分别代表莲子的表面明亮、红绿和黄蓝程度,其中 a^* 、 b^* 值的绝对值越大则颜色越深。在贮藏过程中莲子 L^* 值呈下降趋势,这是由于莲子失水导致颜色变暗,真空预冷处理 L^* 值始终高于对照组,且补水率 4% 处理 L^* 值显著高于对照组($P<0.05$)。在贮藏期间莲子 a^* 值逐渐上升,这可能是叶绿素脱镁形成叶绿酸导致的黄化,真空预冷处理 a^* 值显著低于对照组($P<0.05$),在贮藏前期,补水处理之间差异不显著,在 9~15 d,补水率 4% 处理显著低于其他补水处理($P<0.05$)。 b^* 值在贮藏期间整体呈先降后升的趋势,真空预冷处理低于对照组,且补水率 4% 处理 b^* 值显著低于其它补水处理($P<0.05$)。Zhu 等^[5]研

究发现与未预冷相比,经真空预冷的白菜、青菜和卷心菜均维持了较好的色泽,延缓了叶片黄化。Alibas 等^[28]研究发现与不预冷相比,真空预冷能更好的保持花椰菜的原有色泽,延缓硬度下降。Isik 等^[29]研究发现真空预冷可以维持洋葱等的外观品质。补水率 4% 的真空预冷可维持鲜食莲子较好的外观色泽,这可能是真空预冷降低了莲子呼吸速率,且预冷前补水有利于延缓叶绿素降解,从而延缓莲子黄化。

2.9 不同补水率对鲜食莲子贮藏期硬度的影响

硬度是衡量果蔬品质和商品性的重要因素之一,果蔬贮藏期间的硬度与其呼吸作用、酶活性、细胞持水能力等密切相关。由图 8 可知,鲜食莲子硬度整体呈先升后降的趋势,在贮藏前期呈上升趋势,可能是莲子还处于成熟阶段,营养物质积累;贮藏 3 d 后呈下降趋势,可能是呼吸作用减弱,生理活性下降所导致。在贮藏 0~9 d 各处理之间硬度变化不明显,在贮藏后期 9~15 d 真空预冷处理组显著高于对照组

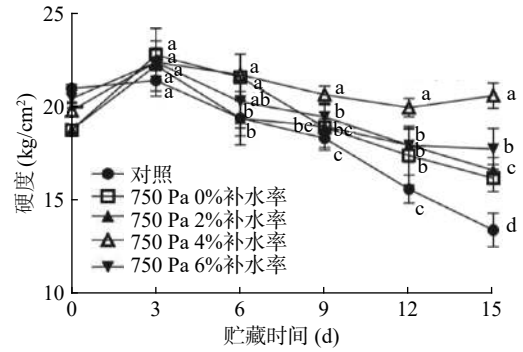


图 8 不同补水率对鲜食莲子贮藏期硬度的影响
Fig.8 Effect of different water replenishment rates on hardness of louts seeds during storage

表 1 不同补水率对鲜食莲子贮藏期色泽的影响

Table 1 Effect of different water replenishment rates on color difference of fresh lotus seeds during storage

色泽	贮藏时间(d)	处理组				
		CK	750 Pa 0%补水率	750 Pa 2%补水率	750 Pa 4%补水率	750 Pa 6%补水率
L^*	0	60.97±2.17 ^c	62.87±0.39 ^b	63.75±0.94 ^b	64.71±2.29 ^a	63.04±1.44 ^b
	3	60.13±2.9 ^b	62.24±0.95 ^{ab}	61.29±0.77 ^b	63.18±1.95 ^a	62.37±2.08 ^{ab}
	6	55.76±0.93 ^c	58.70±1.46 ^b	59.47±2.04 ^b	61.99±2.19 ^a	60.27±1.59 ^b
	9	55.78±1.74 ^d	57.26±0.75 ^c	58.94±0.98 ^b	62.70±1.51 ^a	59.78±0.83 ^b
	12	57.46±1.81 ^c	57.08±0.75 ^c	59.78±2.32 ^b	61.17±0.84 ^a	60.54±2.09 ^b
	15	53.20±1.30 ^d	53.97±0.87 ^{bd}	55.65±2.23 ^{bc}	58.22±1.59 ^a	56.88±1.57 ^{ab}
a^*	0	-15.37±0.39 ^{abc}	-15.13±0.82 ^{ab}	-16.37±1.04 ^c	-15.98±0.6 ^{bc}	-14.79±1.23 ^a
	3	-12.75±1.56 ^a	-14.01±1.30 ^{ab}	-15.66±1.80 ^b	-14.87±1.55 ^b	-14.66±1.69 ^b
	6	-9.98±0.72 ^a	-12.86±1.28 ^b	-13.45±1.75 ^b	-14.18±1.55 ^b	-14.26±0.74 ^b
	9	-9.01±0.87 ^a	-12.12±0.8 ^{bc}	-12.3±2.48 ^c	-13.99±1.08 ^d	-10.65±0.57 ^b
	12	-7.24±1.06 ^a	-9.07±1.08 ^b	-10.53±1.41 ^c	-12.30±1.07 ^d	-9.40±1.06 ^{bc}
	15	-4.81±0.97 ^a	-7.70±0.96 ^{bc}	-8.39±0.70 ^c	-10.29±0.68 ^d	-6.61±2.10 ^b
b^*	0	31.12±2.14 ^a	28.33±0.63 ^{bc}	27.77±0.50 ^{bc}	27.60±1.11 ^c	29.02±1.08 ^b
	3	29.14±1.84 ^a	26.64±0.99 ^{bc}	27.64±1.04 ^{abc}	26.07±2.14 ^c	27.82±0.96 ^{ab}
	6	29.09±1.15 ^a	27.07±0.90 ^b	27.24±0.99 ^b	23.60±1.90 ^c	26.35±1.60 ^b
	9	27.63±1.88 ^a	25.10±0.81 ^b	26.24±1.15 ^{ab}	22.71±1.51 ^c	27.47±1.27 ^a
	12	27.76±1.40 ^a	22.73±0.52 ^c	24.31±1.61 ^b	22.78±1.31 ^c	24.19±1.29 ^{bc}
	15	43.04±2.89 ^a	33.78±0.76 ^c	36.78±1.84 ^b	32.62±2.60 ^d	34.58±1.45 ^c

注:表中数据为各组样品“平均值±标准差”,同行不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

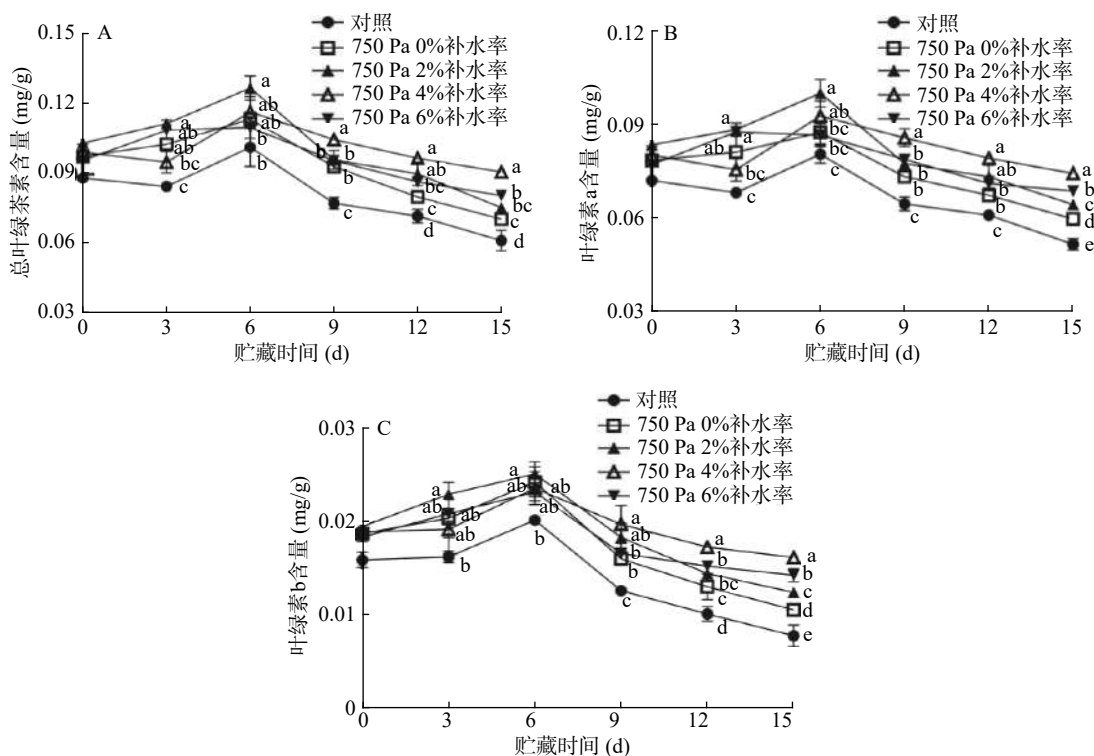


图9 不同补水率对莲皮贮藏期叶绿素含量的影响

Fig.9 Effect of different water replenishment rates on chlorophyll content of louts peel during storage

($P < 0.05$), 补水率 4% 处理显著高于补水率 0% 处理 ($P < 0.05$)。这与张晓娟等^[8]的研究结果相似, 真空预冷较未预冷和冷库预冷延缓了毛豆硬度下降, 维持了较好的保鲜效果。Ilknur 等^[30]研究发现, 相对于风冷和水冷, 真空预冷能更好地延缓朝鲜蓟硬度下降及质量损失。由此说明, 真空预冷可以有效抑制莲子硬度变化, 且预冷前 4% 的补水可以增强细胞持水能力, 延缓莲子软化。

2.10 不同补水率对贮藏期莲皮叶绿素含量的影响

叶绿素是植物体内含量最为丰富的色素, 是衡量叶菜类蔬菜品质的关键指标, 它易受外界因素的影响而降解导致叶片黄化, 是植物衰老的外在标志^[31]。在贮藏期间, 莲皮总叶绿素含量变化如图 9A, 整体呈先上升后下降的趋势, 这可能是由于鲜食莲子采后生理活性较强, 具有后熟能力。各真空预冷处理组含量始终高于对照组, 补水率 4% 处理在贮藏 9~15 d 显著高于 0% 处理 ($P < 0.05$)。由图 9B 可知, 莲皮叶绿素 a 含量呈先升后降的趋势, 真空预冷处理组叶绿素 a 含量在贮藏期间显著高于对照组 ($P < 0.05$); 补水率 4% 处理在第 9~15 d 显著高于其他补水处理组。由图 9C 可知, 叶绿素 b 含量变化与总叶绿素含量变化相似, 在贮藏 6~15 d 补水率 4% 处理组含量显著高于对照组 ($P < 0.05$), 在贮藏末期, 各处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。林永艳等^[32]研究表明真空预冷可延缓青菜叶绿素含量下降。杨国华等^[33]研究表明真空预冷可以有效延缓宁夏菜心叶绿素含量下降。Pratsanee 等^[34]研究也表明真空预冷可以延缓叶绿素降解, 且适宜的预冷压力可以抑制叶绿体的溃解。综上所述, 补水率 4% 的真空预冷可以有效延缓莲皮叶

绿素的降解。

2.11 不同补水率对贮藏期莲皮类胡萝卜素含量的影响

类胡萝卜素是一类天然色素, 具有抗氧化和抗衰老的作用。由图 10 可知, 在贮藏期间, 莲皮类胡萝卜素含量变化趋势与叶绿素变化趋势相似, 在第 6 d 达到峰值, 较贮藏初期分别上升了 9.59% (对照)、6.11% (0%)、8.06% (2%)、12.72% (4%)、3.62% (6%); 在贮藏末期, 各处理组含量较初期分别降低了 27.24% (对照)、17.71% (0%)、13.75% (2%)、0.23% (4%) 和 8.08% (6%), 补水率 4% 处理显著高于对照组和补水率 0% 处理 ($P < 0.05$)。本研究结果与安容慧等^[35]研究结果类似, 真空预冷结合低温可有效保持上海青叶绿素、类胡萝卜素、可溶性蛋白等含量, 提高货架品质, 延长保鲜期。因此, 在真空预冷前进行 4% 补水可有效延缓莲皮类胡萝卜素含量的下降。

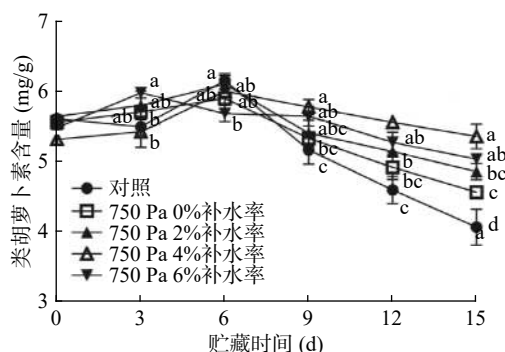


图10 不同补水率对莲皮类贮藏期胡萝卜素含量的影响

Fig.10 Effect of different water replenishment rates on carotenoid content of louts peel during storage

3 结论

真空预冷可在极短时间内降低鲜食莲子的田间热和呼吸速率,不同预冷终压和补水率对鲜食莲子降温速率和失重有明显的差异,在预冷终压为 750 Pa、补水率为 4% 的真空预冷条件下降温速率快,预冷效果较理想。与对照相比,终压 750 Pa、补水率 4% 处理,可在贮藏过程中保持莲子较好的外观品质,明显降低失重和呼吸速率,抑制莲子褐变,维持较高的总叶绿素、叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量。综上所述,适宜的真空预冷终压和补水可以有效延缓鲜食莲子采后黄化和衰老,并延长鲜食莲子的保鲜期。

参考文献

- [1] 孙凤杰. CPPU 处理对鲜食莲子采后品质及莲皮叶绿素代谢的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [2] 黄秀琼, 卿志星, 曾建国. 莲不同部位化学成分及药理作用研究进展[J]. 中草药, 2019, 50(24): 6162-6180.
- [3] T J Rennie, G S V Raghavan, C Vigneault, et al. Vacuum cooling of lettuce with various rates of pressure reduction[J]. *Transactions of the ASAE*, 2001, 44(1): 89-93.
- [4] Ranjbaran M, Datta A K. Pressure-driven infiltration of water and bacteria into plant leaves during vacuum cooling: A mechanistic model[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 246: 209-223.
- [5] Zhu Z, Wu X, Geng Y, et al. Effects of modified atmosphere vacuum cooling (MAVC) on the quality of three different leafy cabbages[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 94: 190-197.
- [6] 陈颖, 刘宝林, 宋晓燕. 荷兰豆真空预冷及其对贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(6): 276-279.
- [7] Santana, José Carlos C, Araújo, et al. Optimization of vacuum cooling treatment of postharvest broccoli using response surface methodology combined with genetic algorithm technique[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 144: 209-215.
- [8] 张晓娟, 刘贵珊, 余江泳, 等. 真空预冷毛豆参数优化及其对贮藏特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(23): 156-161.
- [9] 陶菲, 郝海燕, 葛林梅, 等. 真空预冷减缓双孢菇细胞壁物质的降解[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 264-268.
- [10] He S Y, Li Y F. Experimental study and process parameters analysis on the vacuum cooling of iceberg lettuce[J]. *Energy Conversion & Management*, 2008, 49(10): 2720-2726.
- [11] Cheng H P, Hsueh C F. Multi-stage vacuum cooling process of cabbage[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 79(1): 37-46.
- [12] Kusumaningsih T, Martini T, Rini K S, et al. Effect of air cooling and vacuum cooling storage on the β -carotene content and proximate analysis (water content, pH, total protein and content of sugar) in carrot[J]. *Iop Conference*, 2017, 193: 1-11.
- [13] 宋小勇, 李云飞. 真空预冷处理对洋葱表皮微观结构及性能的影响[J]. 上海交通大学学报(自然版), 2012, 46(05): 819-824.
- [14] 段宙位, 谢辉, 王世萍, 等. 真空预冷澳芒及其对贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(3): 326-330.
- [15] 陶菲. 真空预冷处理延长白蘑菇贮藏期的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2006.
- [16] 程园, 李灿婴, 侯佳宝, 等. 采后硝酸钠处理对南果梨果实贮藏品质和细胞壁降解酶的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(1): 252-257.
- [17] Sun Y, Zhang W, Zeng T, et al. Hydrogen sulfide inhibits enzymatic browning of fresh-cut lotus root slices by regulating phenolic metabolism[J]. *Food Chemistry*, 2015, 177: 376-381.
- [18] 于胜爽. 莲蓬保鲜与鲜食莲子真空油炸工艺的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2014.
- [19] 郑州元, 林海荣, 崔辉梅. 外源硫化氢对盐胁迫下加工番茄幼苗光合参数及叶绿素荧光特性的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(7): 1426-1435.
- [20] 吴冬夏, 申江, 张川, 等. 草莓真空预冷理论分析及实验研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(6): 270-274, 280.
- [21] 丁伟华, 陈威. 蔬菜真空预冷实验分析[J]. *食品工业科技*, 2007, 28(4): 81-83.
- [22] 王勤, 陶乐仁, 崔振科. 不同终压与补水量对杨梅真空预冷的影响[J]. 真空与低温, 2015, 21(6): 365-368.
- [23] 宣朝辉, 杨永安, 李勤国. 不同包装材料下芒果真空预冷的实验研究[J]. 冷藏技术, 2019, 42(3): 24-27, 51.
- [24] 吴德慧, 江洪, 杨爽, 等. 真空预冷和贮藏温度对有机杭白菜品质的影响[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(4): 120-123.
- [25] 陈抗君, 郝海燕, 毛金林, 等. 预冷方式及 MAP 贮藏对芦笋采后生理变化的影响[J]. 中国食品学报, 2007, 7(4): 85-90.
- [26] 庄言, 张婷, 韩永斌, 等. 冰水预冷及贮藏温度对水芹贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(24): 279-284.
- [27] Johnson C E, Elbe J H V, Lindsay R C. Extension of post-harvest storage life of sliced celery[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 39(4): 678-680.
- [28] Alibas I, Koksal N. Forced-air, vacuum, and hydro precooling of cauliflower (*Brassica oleracea* L.var. botrytis cv. Fremont): Part I. determination of precooling parameters[J]. *Food Science & Technology*, 2014, 34(4): 730-737.
- [29] Isik E, Akbudak B, Izli N. Determination of some operation and physiological parameters on the precooling of fresh onion, parsley and peppergrass[J]. *American Naturalist*, 2009, 125(3): 412-420.
- [30] İlknur Alibaş, Okursoy R. Determination of quality parameters during air blast, vacuum and hydro pre-cooling of artichoke under the storage conditions[J]. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 2016, 22(4): 480-491.
- [31] Lim P O, Kim H J, Nam H G. Leaf senescence[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2007, 58: 115-136.
- [32] 林永艳, 谢晶, 朱军伟, 等. 真空预冷对青菜贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(21): 314-317.
- [33] 杨国华, 刘贵珊, 何建国, 等. 预冷后宁夏菜心贮藏期内品质分析及货架期的预测[J]. 食品工业科技, 2020, 41(18): 263-271.
- [34] Kongwong P, Boonyakiat D, Poonlarp P. Extending the shelf life and qualities of baby cos lettuce using commercial precooling systems[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 150: 60-70.
- [35] 安容慧, 周宏胜, 罗淑芬, 等. 真空预冷及不同流通方式对上海青货架品质的影响[J/OL]. 食品科学: 1-11[2020-09-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200925.1342.010.html>.