

低温贮藏条件下果蔬营养品质及抗氧化能力变化分析

孔思妍

赤峰学院, 内蒙古 赤峰 024000

[摘要] 低温贮藏可通过抑制呼吸和酶促反应延缓果蔬衰老, 但温度过低又可能引起冷害和氧化损伤。本文基于公开研究数据, 分析糖酸、抗坏血酸、酚类、色素及抗氧化酶在低温贮藏中的变化。结果表明, 适宜低温能够降低失水和营养消耗, 维持抗氧化能力; 其效果受品种、温度、时间和组织状态共同影响。果蔬贮藏应由单一低温控制转向品种适温、多指标监测和复合保鲜协同调控。

[关键词] 果蔬贮藏; 营养品质; 抗氧化能力; 低温胁迫

DOI: 10.64635/ja.2026.1567

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

Analysis of Changes in Nutritional Quality and Antioxidant Capacity of Fruits and Vegetables under Low-Temperature Storage

Kong Siyan

Chifeng University, Chifeng, Inner Mongolia 024000, China

Abstract: Low-temperature storage can delay the senescence of fruits and vegetables by suppressing respiration and enzymatic reactions, but excessively low temperatures may also induce chilling injury and oxidative damage. Based on publicly available research data, this study analyzes changes in sugars and organic acids, ascorbic acid, phenolic compounds, pigments, and antioxidant enzymes during low-temperature storage. The results indicate that appropriate low-temperature conditions can reduce water loss and nutrient depletion while maintaining antioxidant capacity. These effects are jointly influenced by cultivar, temperature, storage duration, and tissue condition. The storage of fruits and vegetables should therefore shift from single-factor temperature control toward coordinated regulation integrating cultivar-specific optimal temperatures, multi-indicator monitoring, and combined preservation technologies.

Keywords: fruit and vegetable storage; nutritional quality; antioxidant capacity; low-temperature stress

引言

果蔬采收后仍保持呼吸、蒸腾和酶促代谢活动。糖、有机酸等呼吸底物不断被消耗, 抗坏血酸和酚类物质发生氧化, 叶绿素及花色苷逐渐降解, 最终表现为失水、软化、褐变和风味下降。降低贮藏温度能够抑制上述反应, 是果蔬采后保鲜的基本措施, 但“温度越低, 保鲜效果越好”并不适用于所有品种。

温带果蔬通常可以耐受接近零摄氏度的环境, 而部分热带、亚热带果蔬在较高温度下便可能发生冷害。已有研究显示, 加工与贮藏通常会造成果蔬植物化学物质和抗氧化活性的损失, 但不同品种、组织状态及贮藏时间之间存在明显差异^[1]。因此, 有必要将商品品质、营养组成和抗氧化防御能力结合起来, 分析低温贮藏的作用边界。

1 低温贮藏影响果蔬品质的生理基础

1.1 呼吸代谢与水分迁移

采后果蔬失去植株持续供应的水分和营养, 其生命活动主要依赖自身储藏物质。呼吸作用消耗糖和有

机酸, 同时释放热量和水分。适宜低温能够降低相关酶活性, 推迟呼吸高峰, 从而减少可溶性固形物和可滴定酸的消耗。低温还可以降低果实与环境之间的水汽压差, 但若冷库湿度不足或空气流速过大, 果蔬仍会出现明显失重。

黄晶果在 5、10、15 和 20 摄氏度下贮藏 12 天的对比结果具有代表性。贮藏结束时, 5 摄氏度组质量损失率为百分之 2.41, 15 摄氏度组为百分之 8.14, 20 摄氏度组达到百分之 13.43; 10 摄氏度组的可溶性固形物、可滴定酸和抗坏血酸下降幅度较小^[4]。这说明低温能够显著抑制水分和营养损耗, 但质量损失率低并不等于综合品质最好, 还应同时考察冷害、硬度和细胞膜完整性。

叶菜类单位质量的表面积较大, 水分散失速度通常快于完整果实。生菜经 4 摄氏度预冷 8 小时后, 在接近冰点条件下贮藏 15 天, 呼吸速率、质量损失和叶绿素下降均受到抑制^[2]。由此可见, 预冷能够尽快移除田间热, 接近冰点贮藏则有助于维持低代谢状态, 两者构成叶菜冷链控制的重要环节。

1.2 低温胁迫与细胞膜损伤

当温度低于果蔬的耐受阈值时,细胞膜脂质状态和膜蛋白功能会发生改变,膜选择透过性下降,细胞内电解质外渗。与此同时,活性氧生成与清除之间的平衡被破坏,膜脂过氧化产物积累,继而诱发组织凹陷、表皮褐变、异常软化和风味劣变。

黄晶果在 5 摄氏度下贮藏至第 3 天即出现果面凹陷、水渍和果皮褐变,而 10 摄氏度组在第 9 天仍有多数果实保持完整。10 摄氏度组的适宜保质期比 15 摄氏度组至少延长 3 天,比 20 摄氏度组至少延长 6 天^[4]。这一结果说明,对冷敏型果实而言,5 摄氏度虽然能降低失重和呼吸,却因冷害而失去综合优势,适温应当是代谢抑制与冷害风险之间的平衡点。

冷害还具有一定滞后性。有些果蔬在冷库内外观正常,转入货架温度后才出现褐变、失水和腐烂。因此,低温贮藏研究不应只记录冷藏结束时的指标,还应设置货架恢复期,评价果蔬在流通和销售环境中的品质表现。

2 果蔬营养品质的变化规律

2.1 糖、酸及可溶性固形物变化

糖和有机酸既是主要风味物质,也是采后呼吸的底物。果实在贮藏初期可能因淀粉水解、细胞壁多糖降解或失水浓缩而出现可溶性固形物暂时升高;进入衰老阶段后,呼吸消耗超过物质转化,可溶性糖和有机酸总体下降。因此,单次测定值难以反映完整过程,连续取样更能揭示营养变化规律。

黄晶果在不同温度下贮藏时,20 摄氏度组的可溶性固形物下降最快,15 摄氏度组次之,10 摄氏度组下降最慢。20 摄氏度组总糖在第 3 至第 6 天快速降低,此后又因失水而出现表现回升^[4]。这表明含量增加有时只是水分减少造成的浓缩效应,并不代表营养物质重新合成。评价时应同步测定质量损失率,必要时按照干物质或初始鲜质量校正。

低温对风味的保护也并非无限。温度过低可能抑制正常后熟,使水果香气生成不足,糖酸比例不能形成适宜状态;蔬菜则可能因组织损伤出现苦味、异味或汁液渗出。因此,糖酸指标应与质构、香气和感官评价共同使用。

2.2 抗坏血酸和酚类物质变化

抗坏血酸对氧、光和金属离子较敏感,切分、挤压及组织破损会增加其与氧化酶的接触。低温通常能够减缓抗坏血酸氧化,但不能完全阻止损失。对 19 种果蔬进行 4 摄氏度、15 天贮藏的研究发现,

抗坏血酸含量总体下降;总酚最大降幅达到百分之 29.67^[5]。这说明家用冷藏虽然能够延长可食期,仍可能造成营养价值和抗氧化能力逐步降低。

酚类物质的变化比抗坏血酸更复杂。一方面,低温抑制多酚氧化和组织衰老,可减少酚类消耗;另一方面,适度低温胁迫可能激活防御代谢,促进部分酚酸合成。上述 19 种果蔬在总酚下降的同时,部分单体酚酸却有所增加^[6]。因此,“总酚下降”与“所有酚类均下降”并不等同,应根据研究目的区分总量测定和单体成分分析。

“黑琥珀”李在 2 摄氏度和 20 摄氏度下表现出不同变化速率。2 摄氏度显著延缓果实硬度和多种自由基清除能力的下降,也减缓总酚、总黄酮及总抗氧化能力的变化;酚类、黄酮类与总抗氧化能力呈极显著相关^[3]。这表明低温的主要作用并非使所有指标保持不变,而是降低品质变化速度,延长相对稳定阶段。

2.3 色素及感官品质变化

叶绿素、类胡萝卜素和花色苷既决定果蔬外观,也参与抗氧化反应。叶菜衰老时叶绿素降解,外观由绿色转为黄绿色;浆果和有色果实中的花色苷则可能因氧化、聚合或酸碱环境改变而减少。低温能够延缓色素降解,但严重冷害会破坏液泡和细胞膜,使酚类底物与氧化酶接触,加速褐变。

生菜接近冰点贮藏期间,叶绿素下降速度低于普通冷藏,表明低代谢状态有助于保持绿色外观^[2]。黄晶果则显示另一种情况:5 摄氏度组虽失重较小,却从第 3 天开始出现明显褐变^[4]。由此可知,颜色变化既可能是自然衰老结果,也可能是低温伤害信号,必须结合组织电解质外渗、膜脂氧化产物和感官症状加以判断。

感官品质具有综合性。消费者关注的脆度、汁液、酸甜协调和气味,不能被某一种营养指标完全替代。低温方案即使能够保持较高的抗坏血酸或总酚,若造成严重冷害或异常风味,也不具备商业应用价值。

3 低温贮藏期间抗氧化能力的响应

3.1 非酶抗氧化体系变化

果蔬非酶抗氧化体系主要由抗坏血酸、酚类、类黄酮、花色苷、类胡萝卜素及谷胱甘肽等组成。这些物质能够直接清除自由基、提供还原力或参与抗氧化物质再生。其含量受品种、成熟度、组织部位和贮藏时间影响,因而抗氧化能力并不总与某一成分同步变化。

在 19 种果蔬的冷藏研究中,总酚与三种体外抗氧化评价结果的相关系数分别为 0.808、0.690 和

0.458; 花色苷与总酚的相关系数为 0.661^[5]。这些数据表明, 总酚是抗氧化能力的重要贡献因素, 但检测方法不同, 相关强度也不同。抗氧化能力应采用两种以上原理不同的方法评价, 避免以单一自由基清除试验推断全部功能活性。

果实不同组织之间也存在差异。“黑琥珀”李近果皮与近果核部位的总酚、总黄酮和抗氧化能力存在显著差别, 近果皮组织的抗氧化指标与可溶性固形物关系更紧密, 而近果核组织与酸碱状态的关系更明显^[3]。因此, 取样位置不统一会放大研究误差, 实验中应规定去皮与否、取样深度和组织混合方式。

3.2 抗氧化酶系统及其品质效应

低温贮藏期间, 果蔬通过超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、抗坏血酸过氧化物酶等清除活性氧。适度低温可维持或诱导抗氧化酶活性, 使活性氧保持在信号调节范围内; 温度过低或时间过长时, 酶系统受损, 活性氧大量积累, 最终导致膜脂过氧化和细胞结构破坏。

生菜在接近冰点条件下贮藏时, 过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶活性得到维持, 超氧阴离子生成、膜脂过氧化产物积累和细胞膜损伤受到抑制^[2]。黄晶果在 10 摄氏度下的膜脂过氧化产物、多酚氧化酶和过氧化物酶活性均低于 20 摄氏度组, 褐变与衰老进程相应推迟^[4]。这些结果说明, 抗氧化酶变化应结合活性氧、膜损伤和外观品质解释, 酶活性升高有时代表防御能力增强, 有时也可能说明组织正承受更强的氧化压力。

抗氧化能力的变化还受成熟度制约。采收过早时, 抗氧化物质积累不足, 低温可能阻碍正常后熟; 采收过晚时, 组织防御能力已经下降, 即使迅速冷却也难以逆转衰老。因此, 适宜成熟度、快速预冷和稳定冷链应被视为连续控制过程。

4 低温贮藏品质调控与评价方法

4.1 品种适温与多指标协同控制

低温贮藏首先应建立品种适温, 而不是套用统一温度。耐寒叶菜、苹果和李等可在接近零摄氏度条件下贮藏, 冷敏型热带果实则需采用较高温度。黄晶果的研究显示, 10 摄氏度综合效果优于 5、15 和 20 摄氏度^[4]; 生菜则可在零下 0.5 摄氏度、温度波动 0.2 摄氏度的条件下贮藏 15 天^[2]。两者差异说明, 果蔬的生物学特性决定了低温控制边界。

品质监测应至少覆盖四类指标: 第一类为商品性指标, 包括质量损失、硬度、色泽和腐烂率; 第二类为营养指标, 包括糖、酸、抗坏血酸、总酚和色素;

第三类为氧化状态指标, 包括自由基清除能力、活性氧和膜脂过氧化产物; 第四类为生理指标, 包括呼吸、乙烯和细胞膜透性。只有多指标趋势一致时, 才能较可靠地判断贮藏效果。

在实际冷链中, 温度控制还应与适宜湿度、气调包装、预冷和卫生管理协同。高湿度有助于降低失水, 但冷凝水会增加微生物风险; 低氧能够抑制呼吸, 但氧含量过低又可能导致无氧代谢和异味。后续研究可利用连续温湿度记录和无损品质检测建立动态预警, 使控制目标从“延缓腐烂”进一步转向“保持营养和抗氧化品质”。

5 结语

低温贮藏通过降低呼吸、蒸腾和酶促氧化速率, 能够减缓果蔬糖酸、抗坏血酸、酚类及色素的损耗, 并维持一定的抗氧化防御能力。但低温效应具有明显的品种依赖性和时间边界, 过低温度会造成细胞膜损伤、活性氧积累和冷害。公开研究数据表明, 4 摄氏度冷藏 15 天可使部分果蔬总酚下降近百分之 30; 黄晶果在 5 摄氏度下 3 天即出现冷害, 而 10 摄氏度可使其保质期较 20 摄氏度至少延长 6 天。由此可见, 果蔬贮藏不能以最低温度或单项营养保留率作为唯一依据。建立品种适温, 统一取样和检测方法, 并将营养成分、抗氧化能力、感官品质及货架表现纳入综合评价, 是提高低温贮藏精准性和产业适用性的关键。

【参考文献】

- [1] 王萌蕾, 陈复生, 杨宏顺, 等. 加工和贮藏对果蔬营养成分变化及抗氧化活性影响的研究进展[J]. 现代食品科技, 2013, 29(3): 692-697.
- [2] 唐坚, 马丽, 王凯晨, 等. 冰温贮藏对生菜抗氧化能力及贮藏效果的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(22): 255-259.
- [3] 郭晓敏, 安琳, 王友升, 等. 两种贮藏温度下“黑琥珀”李果实品质及不同部位抗氧化活性的变化规律[J]. 食品科学, 2010, 31(20): 425-429.
- [4] 何炬才, 康仕成, 张冬敏, 等. 不同贮藏温度对黄晶果采后生理和贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(21): 213-219.
- [5] 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.