

基于冷链物流的青脆李保鲜技术研究进展

王春霞^{1,2}, 包沅鑫³, 应 婧^{1,2*}, 郭 鹏¹, 蒋昭琼^{1,2}, 吝祥根¹, 何清燕^{1,2}

(1. 四川省农业机械科学研究院, 成都 610066; 2. 农业农村部丘陵山地农业装备技术重点实验室, 成都 610066; 3. 四川农业大学食品学院, 雅安 625014)

摘 要: 青脆李因其质地清脆、风味酸甜可口、营养含量丰富而受到消费者追捧。但是采后运输过程中的青脆李生理活动、微生物污染或结构损伤均易导致果实软化、转黄、腐烂等, 严重缩短了青脆李的货架期, 损害了商品价值, 因此青脆李采后保鲜尤为重要。冷链物流是一种能够减少损耗防止污染的低温运输系统, 也是最常用的运输保藏方法, 具有较大的应用前景。本文概述了低温下青脆李腐败变质因素, 总结青脆李冷链运输相关保鲜技术, 包括果实采后处理技术如冷热处理、紫外辐照、气调保鲜等物理保鲜技术, 化学或天然试剂修饰、可食膜、涂层等化学保鲜技术, 以及冷链物流系统监控技术等, 为青脆李冷链物流保鲜技术研究提供参考。

关键词: 青脆李; 腐败变质; 冷链物流; 保鲜技术; 冷链监控技术

Research progress of preservation technology for *Prunus salicina* Lindl. Cv. Qingcui based on the cold chain logistics

WANG Chun-Xia^{1,2}, BAO Yuan-Xin³, YING Jing^{1,2*}, GUO Peng¹,
JIANG Zhao-Qiong^{1,2}, LIN Xiang-Gen¹, HE Qing-Yan^{1,2}

(1. Sichuan Academy of Agricultural Machinery Sciences, Chengdu 610066, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology for Hilly and Mountainous Areas Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu 610066, China; 3. College of Food Science, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

ABSTRACT: *Prunus salicina* Lindl. Cv. Qingcui is sought after by consumers because of its crisp texture, sweet and sour flavor and rich nutrition content. However, the physiological activities, microbial contamination or structural damage of *Prunus salicina* Lindl. Cv. Qingcui during postharvest transportation can easily lead to fruit softening, yellowing, rotten, etc., which seriously shorten the shelf life of *Prunus salicina* Lindl. Cv. Qingcui and damage the value of the product. Therefore, it is particularly important to keep fresh after picking. Cold chain logistics is a kind of low-temperature transportation system that can reduce losses and prevent pollution. It is also the most commonly used transportation preservation method which has a large application prospect. The article outlined the factors of *Prunus salicina* Lindl. Cv. Qingcui's corruption at low temperature, and summarized the relevant fresh-keeping techniques for the transportation related to the *Prunus salicina* Lindl. Cv. Qingcui cold chain, including the perspectives of physics, such as cold and heat treatment, ultraviolet radiation, gas preservation technologies, and the perspectives of chemistry, such as chemical or natural reagent modification, edible film, edible coating, as well as cold chain logistics system monitoring technology, etc., which is excepted to provide reference for the research on cold chain logistics preservation technology of *Prunus salicina* Lindl. Cv. Qingcui.

基金项目: 四川省科技计划项目科技创新创业苗子工程项目(2022JDRC0119)

Fund: Supported by the Science and Technology Innovation and Entrepreneurship Seedling Project of Sichuan Province (2022JDRC0119)

***通信作者:** 应婧, 硕士, 正高级农艺师, 主要研究方向为农产品加工及贮藏。E-mail: 77012455@qq.com

***Corresponding author:** YING Jing, Master, Senior Agronomist, Sichuan Academy of Agricultural Machinery Sciences, No.5, Niusha Road, Jinjiang District, Chengdu 610066, China. E-mail: 77012455@qq.com

KEY WORDS: *Prunus salicina* Lindl. Cv. Qingcui; corruption deterioration; cold chain logistics; preservation technology; cold chain monitoring technology

0 引言

青脆李(*Prunus salicina* Lindl. Cv. Qingcui)作为南方李品种,在西南高山地区如四川、重庆等种植广泛^[1]。其果味酸甜、果实清香爽口、质地脆嫩^[2]、香味芬芳^[3]而受到消费者的喜爱。青脆李果实中含有丰富的营养物质,如多酚、黄酮等,果皮中还含有花青素等抗氧化活性物质,具有预防消化系统疾病、心血管疾病、增强免疫等多种生理功能^[4]。青脆李属于呼吸跃变型水果,对乙烯敏感,采摘后继续成熟^[5],呼吸速率高、代谢旺盛,加之作为应季鲜果,采集中主要在夏季,环境温度高,采后 3~5 d 即失去原有质地和风味甚至发生劣变,主要表现为细胞壁结构或成分改变造成果实软化、果皮中花青素氧化转黄、微生物导致果实腐败等,给青脆李果实的贮藏和流通都带来了一定挑战^[6],而从产地到餐桌中流通环节保鲜处理不当将直接影响产品贮藏。

经过证明低温冷链运输能够有效防止果蔬在流通过程中变质^[7]。经冷链前处理的果蔬,从运输至销售过程中始终保持在较低的温度条件下,可以最大程度保证品质,保障经济效益。然而在冷链过程中,由于影响因子的多样性,如李果生理活动、微生物侵染、运输过程温湿度变化、震动胁迫甚至冷链中断^[8]等会对冷链物流过程中的保鲜效果造成影响。本文在收集相关文献的基础上,探讨冷链运输过程中青脆李品质变化影响因素,总结冷链物流保鲜技术的特点,以期对青脆李冷链物流过程中的技术应用与研究提供参考。

1 冷链物流在水果保鲜方面的研究现状

低温贮藏是呼吸跃变型水果最常见的贮藏保鲜方式。 -2°C 贮藏能明显降低阿克苏苹果的呼吸高峰,维持可溶性固

形物以及可滴定酸含量,减缓硬度下降,同时多酚氧化酶活性被抑制,有利于维持较高的糖心果率,保持苹果品质^[9]。采用 $-0.5\sim-1.5^{\circ}\text{C}$ 贮藏“红香酥”梨果实被证明可将 20°C 条件下 7 d 的货架期延长至 120~240 d^[10]。芙蓉李在常温条件下果实迅速软化,品质劣变快,不耐贮藏,而在 4°C 低温贮藏可延缓其硬度、可滴定酸含量的降低以及丙二醛含量的积累,从而延缓衰老,保障品质,延长贮藏货架期^[11]。此外,有研究表明,低温可以明显抑制猕猴桃软腐病致病菌 *Phomopsis fukushii* 的生长,减少猕猴桃软腐病的发生^[12]。综上,低温环境能够有效保证水果贮藏品质,抑制水果致病微生物生长,延长货架期。

冷链物流是利用温控、保鲜等技术工艺,以及冷库、冷藏车等设备设施,确保冷链产品在初加工、储存、运输、流通加工、销售等全过程始终处于规定的温度环境下的专业物流,近年来发展迅速并应用广泛。由于全程低温,冷链物流保鲜可以抑制腐败微生物生长、控制果实后熟反应,降低呼吸速率,减少果实酶促反应等。与常温流通相比,黄桃在全程冷链流通过程中(4°C),生理代谢活动减缓,营养成分保持更高的含量^[13]。张潇方^[14]的研究表明,采用全程冷链保鲜技术可将甜樱桃的货架期延长 58 d,腐损率降至 5%以下。XU^[15]对比了冷链和常温物流对李果品质的影响,结果表明相较于常温物流,冷链物流有利于李果保持其品质质量。上述研究表明,与常温物流相比,冷链物流具有显著的优势,有利于减少水果质量损失,延长保质期。

2 青脆李变质因素

青脆李品质变化成因主要为果实自身生理生化反应、微生物活动以及在运输过程中由于环境或者外界条件变化等而造成的品质劣变等(图 1),劣变的主要表现形式见图 2。

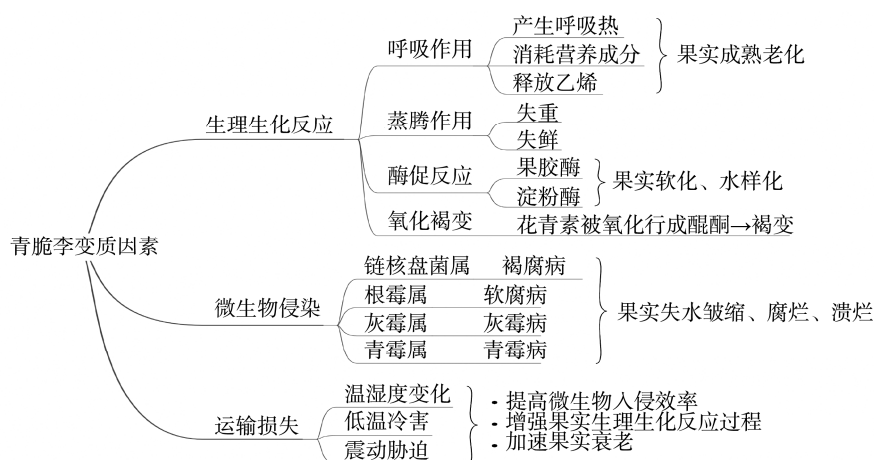


图1 青脆李的变质因素

Fig.1 Spoilage factors of *Prunus salicina* Lindl. Cv. Qingcui

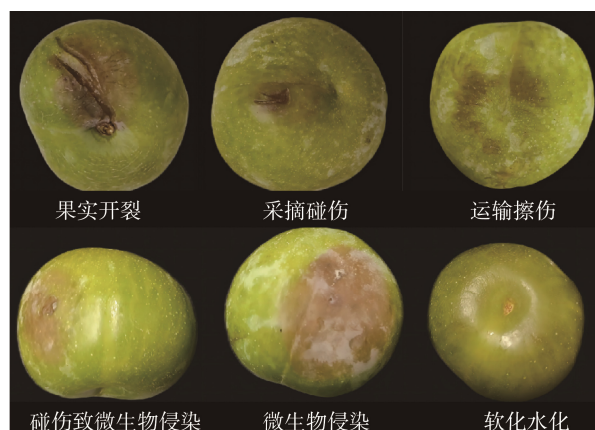


图2 青脆李劣变表现形式

Fig.2 Expressions of *Prunus salicina* Lindl. Cv. Qingcui deterioration

2.1 生理生化反应

青脆李是呼吸跃变型水果, 采后会发生不可逆的生理变化, 呼吸作用、蒸腾作用仍然较为旺盛, 果实易发生氧化变色和在酶促反应下软化。青脆李进入呼吸跃变期后, 呼吸作用急剧增强, 生成大量呼吸热, 营养物质消耗加快, 同时释放大乙烯, 促进李果中生长素的合成^[16], 果实迅速成熟老化。蒸腾作用则会造成青脆李表面水分流失, 果实干瘪^[17]。青脆李果皮含有花青素, 当李果被切割或瘀伤时, 花青素暴露在空气中遇氧气降解形成醌、酮醛等小分子, 导致青脆李产生异味, 营养物质发生损失并变质。青脆李中常见果胶甲酯酶和淀粉酶, 参与果实后熟过程, 随着果胶酶分解果胶, 细胞壁变弱, 果实变得更软更嫩, 同时淀粉酶将青脆李中的淀粉分解成单糖, 果实硬度降低, 失去脆感, 随着时间推移, 青脆李过分成熟和软化, 果实变色并形成糊状, 发生变质^[18]。研究表明, 相较于常温条件, 0℃、-1℃均能延缓青脆李硬度下降, 避免冷害, 可延长青脆李贮藏期至 70 d 以上^[19]。而当青脆李贮藏于(5±1)℃条件下 15 d 时即出现呼吸高峰, 强度为 150.88 mg CO₂·kg⁻¹·h⁻¹, 硬度由贮藏初期约 1100 g 下降至 472 g^[17]。表明低温环境能够有效地延缓青脆李品质的下降, 然而, 不同的低温条件对品质的影响存在较大的差异。

2.2 微生物活动

微生物活动是青脆李腐败变质的主要因素之一。病原微生物侵染主要是从水果表面的气孔或者表面的机械损伤部位侵入^[20], 青脆李成熟期为高温高湿夏季, 青脆李中含有的多种营养物质, 如碳水化合物、矿物质、维生素和蛋白质, 使其成为各种微生物生长和生存的理想平台, 且成熟后果皮易变软破裂, 加大了受到微生物侵染的风险。李果内部较低的 pH 和丰富的营养环境的特点决定了霉菌在李果腐败中起到主导作用。除开定植于李果表面微生物, 青脆李生产的采前和收获后阶段环境中微

生物的附着, 例如存在于土壤颗粒、灰尘或空气中的孢子等^[5], 也是李果常见的微生物污染源之一^[21]。青脆李作为核果类水果, 许多采后病原体均会导致其腐烂, 主要为链核盘菌属引发的褐腐病: 褐腐病致病菌的分生孢子通过雨水或风传播侵染未成熟幼果, 并处于潜伏状态^[22], 李果成熟后组织软化或者通过伤口进行侵染果实, 会形成圆形黑色病斑并逐渐蔓延至整个果面形成褐色软腐状, 伴随出现失水皱缩, 同时散发难闻气味, 使李果失去商品性^[23]; 根霉属引发的软腐病: 根霉属生存力强, 分生孢子很容易附着在李果表面及运输工具上, 感染李果后在果面上形成褐色小点, 迅速向外扩散, 果肉变软, 最后烂果失水皱缩; 灰霉属引发的灰霉病: 灰霉属分生孢子可以在果实收获、搬运和贮存期间通过伤口侵染, 引起果实腐烂^[24], 也可从患病的果实迅速扩散到相邻的健康果实, 导致灰霉病的大范围侵害; 青霉属引发的青霉病: 青霉普遍存在于果实采后环境中并能存活较久, 当水果抗性下降时, 孢子会通过伤口进入果实并快速蔓延和表达致病因子, 加速诱发肉眼可见的浸渍, 引起水果的溃烂, 同时次级代谢产物大量积累, 改变细胞膜的通透性, 大分子物质合成受到抑制, 细胞活性丧失^[25]。

2.3 运输过程中的品质劣变

在低温运输过程中存在的冷害、机械损失和温度波动等会对水果造成水分和营养物质流失^[26]。低温可以延缓果蔬类的后熟, 然而李果长期放置在不适宜的低温条件下易发生冷害^[27], 细胞膜完整性的丧失, 还会引起氧化应激。这是由于李果在组织冰点以上的不适低温所造成的一种逆境伤害, 包括生物膜系统被破坏, 电解质外渗, 氨基酸、糖和无机盐等从细胞中渗透流出^[28], 正常代谢受阻和有毒物质在组织内积累, 影响组织内酶活性以及增强呼吸作用, 刺激乙烯合成等^[29]。由于冷链技术的不完善、制冷设备不先进、果蔬冷链过程堆放不当等, 导致了空间温度的不稳定性, 温度的波动又导致空气中的水分形成水珠, 为微生物生长提供条件。也有研究发现温度波动会导致李果类呼吸跃变型水果呼吸强度增大, 氧化加剧, 发生褐变、硬度下降, 破坏细胞壁形态结构造成生理损伤及表面结露等^[30]现象, 造成李果失水、衰老、腐败加速, 从而影响青脆李的品质。目前冷链运输以公路运输为主, 长距离的运输及震动胁迫会促使李果擦伤、组织结构损伤, 品质降低, 加速果实衰老、腐烂, 商品价值降低。陈豫等^[31]通过实验模拟运输中震动, 研究其对李果的影响, 发现李果在受到震动胁迫后造成机械损伤, 不仅外观品质受到影响, 同时引发“伤呼吸”, 呼吸强度升高, 氧化酶活性提高, 而可溶性固形物、可滴定酸和维生素 C 等含量明显下降。因运输过程中震动胁迫引起的一系列生理品质劣变和延迟损伤也是当前造成果蔬损耗的重要原因之一^[32]。

3 冷链物流过程中青脆李保鲜技术

冷链物流能够有效抑制环境微生物活动、控制青脆李生理生化反应并维持其品质活性。然而在采后冷链过程中存在一些加速果实损失的关键因素,主要包括温湿度稳定性差、缺乏创新的包装材料、机械震动以及监测技术不足等。针对冷链物流过程中果蔬品质变化的影响因素,青脆李冷链物流运输的保鲜技术参照常见果蔬保鲜方法分为 3 类: (1)物理保鲜技术,主要包括对果实冷链前处理的保鲜技术例如冷热处理、紫外辐照等,以及通过调节冷链环境中的气体成分的气调保鲜技术; (2)化学保鲜技术,采用化学或天然试剂修饰、可食膜等包装保鲜技术; (3)冷链物流系统监控技术,通过对冷链监控系统的优化,减少冷链物流过程中的质量损失。

3.1 物理保鲜技术

3.1.1 冷热处理

预冷处理可除去采后储运前李果的田间热,使李果达到相对较低的温度,延缓后熟衰老,抑制微生物的生长,防止腐败,同时能够减少冷链设备负荷,常见的方式有空气预冷、冷水预冷和真空预冷。相较于没有进行预冷处理的农产品,预冷后再进行后续处理的农产品的损失率更低,王华瑞等^[33]采用冷水处理李果果实,发现褐变和冷害程度下降,经过冷处理后的李果品质得到提高。

热处理技术是将采后水果置于特定的热环境中,控制温度在 30~50℃之间,处理数分钟至数天不等^[34]。经过热处理后的果实无化学残留,能够有效避免微生物和病虫害的侵染及果实腐败变质,研究发现经过热处理后的水果能够减缓受损伤口扩张,抑制果皮氧化,防止形成褐色烫伤,提高抗低温性,使水果在低温条件下维持氧气活动,促进代谢平衡,维持细胞壁的正常生理活动^[35]。CHANG 等^[36]利用热空气结合壳聚糖涂层处理李果,并在低温下运输贮藏,研究结果表明在低温贮藏过程中李果的表皮损失明显缓解,其中的总酚类、黄酮等明显增加,同时降低了果实运输过程中的冷害现象。

3.1.2 紫外辐照

波长 250~270 nm 的短波紫外线被证明是最有效的杀菌波长^[37],紫外辐照杀菌技术具有环保、简便、无化学残留等优点,在食品工业中应用广泛。有研究表明经过紫外辐照的果实在冷链过程中腐烂率显著低于空白组^[38]。通过紫外线辐射,李果表皮的微生物能得到有效抑制^[39],同时紫外辐射可诱导果实防御机制,激活相关的酶及活性物质,减少乙烯的合成^[40],有助于提高李果的抗氧化能力和延缓后熟^[41],延长保鲜期。然而紫外辐照技术具有局限性,由于紫外线穿透性较差,不能完全杀死微生物,且在较高剂量下处理果实,易导致果实灼伤。此外,长时间暴露在紫外照射的果蔬中的营养物质易发生氧化和降解^[42]。故将低

温与紫外辐照杀菌技术协同使用可以增强果蔬保鲜效果,但需要精确控制紫外线剂量。

3.1.3 气调保鲜技术

根据果蔬的最佳贮藏条件,通过有效调节环境或包装中的气体成分可以控制植物细胞的新陈代谢^[43],降低水果的呼吸活动,延缓成熟软化,减少各种生理失调和病原菌侵染的发生^[44],从而起到保鲜的效果。气调保鲜技术通常是通过调节 O₂、CO₂、N₂ 等气体比例,改变果蔬贮藏环境,其中,CO₂ 可抑制细菌生长繁殖,对大多数需氧菌有较好的抑菌效果,维持果蔬品质^[45]。N₂ 是一种惰性气体,可作为填充气体。目前,常用的气调保鲜技术是将环境中的 CO₂ 提高, O₂ 浓度降低,同时添加一定量的 N₂ 作为填充和缓冲。但是目前气调保鲜还存在一些问题,如包装薄膜透气率难以与果蔬新陈代谢速度平衡,导致包装环境中 O₂ 浓度过低,使果蔬无氧呼吸,消耗自身的有机物质或造成生理损害。高氧气调保鲜(一般 O₂ 浓度大于 70%)能够避免气体交换速率和果蔬代谢平衡问题,降低果蔬的新陈代谢速率,减少腐烂^[46]。王华瑞等^[47]研究指出,李果在 O₂、CO₂ 比例优化后可冷藏 3 个月以上,腐烂率下降显著,果肉色泽、风味良好。高氧气调保鲜技术具有较大的发展潜力,但是冷链运输中气调保藏成本较高,且不能根据果实自身生理状况及时调整包装环境中气体比例和温度,因此后续研究应朝着节能环保、便利智能的方向发展。

3.2 化学保鲜技术

采用化学保鲜剂,通过涂膜、浸泡等方法包覆果蔬以延长其采后寿命,具有成本较低、易获得、操作简单的特点,是现阶段水果保鲜中不可缺少的保鲜技术,已广泛应用于果蔬保鲜中。

过氧化氢、臭氧等作为抗菌剂应用于食品中,被公认为是安全的化学试剂,由于低毒和安全的分解产物,作为水果涂膜保鲜剂,附着于水果表面,可破坏细菌蛋白质、DNA 和微生物细胞的细胞膜,造成蛋白质释放、脂质过氧化和细胞通透性改变,对多种细菌、酵母、霉菌、病毒和孢子具有生物杀灭作用,同时臭氧能抑制乙烯生成,降低水果蒸腾作用^[44]。通常情况下,采后青脆李果实中果胶甲酯酶(pectin methylesterase, PME)及多聚半乳糖醛酸酶(polygalacturonase, PG)活性的升高,会加速果胶分解,使果实硬度下降。而陈鸥等^[48]使用 5 μL/L 1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)熏蒸处理对 0℃条件下李果实相关指标进行分析,结果显示,与对照组相比,1-MCP 处理后能够明显抑制青脆李贮藏期间硬度的下降,且原果胶含量显著高于对照组,这说明 1-MCP 可能通过降低 PG 和 PME 活力,延缓细胞壁物质分解,从而保持果实硬度,同时还能够延缓李果实颜色转变及品质下降。LI 等^[49]采用不同包装材料结合 1-MCP 熏蒸处理探讨低温贮藏过程中

青脆李品质变化,结果表明使用纳米改性包装可以延缓果实腐烂、颜色发黄,更好地保持果实质地和有机酸含量。彭梦云等^[50]则在脆李电商速递过程中放置 1-MCP 保鲜卡,研究其对后续货架期的影响,结果表明,相较于对照组,1-MCP 处理能有效减缓脆李衰老进程,延长货架期。

利用从植物、动物、微生物中提取的多糖、蛋白质或脂质等形成复合物,覆盖于果蔬表面的可食用包装,具有可生物降解性、无毒性^[51]、能阻隔空气、防止水分损失、还能提高果蔬抗机械损伤、抑制微生物生长繁殖等,从而提高在冷藏运输过程中果蔬的贮藏保鲜性能。阿拉伯半乳糖(arabino galactan, AG)浸泡处理能够延缓青脆李果实采后颜色由绿变黄的过程,延缓贮藏过程中硬度和重量的降低、延缓青脆李果实衰老进程、降低采后呼吸速率和抑制乙烯生成,将青脆李果实货架期延长至 3 d 以上^[52]。将海藻酸盐添加到可食涂层中处理李果能有效延缓与采后成熟相关参数的演变,如可溶性固形物含量、硬度和呼吸速率的变化,对保持较高浓度的总酚类物质、总花青素含量和抗氧化活性表现出积极作用^[53]。由此可见,植物中许多抗微生物组分和活性物质,作为天然添加剂,有着良好的抗菌、抗真菌活性和生物聚合物相容性,可以通过喷淋、浸泡等直接应用或添加到可食用涂层中,在冷链物流中具有较好应用前景。

3.3 冷链物流系统监控技术

冷链物流系统监控技术对于冷链物流发展和农产品市场规模扩大有着重要作用。减少冷链运输过程中果蔬损伤,除开果蔬保鲜技术的运用,近些年来已经逐步利用现代科学技术来进行无损、无接触式的监测、控制和预测采后供应链中果蔬的质量演变,以减少损失,这些技术包括成像技术、传感器技术和数学建模等。

常见的成像技术包括计算机成像、光谱成像等,通过收集和分析捕获的图像可以获得产品的空间信息,主要包括水果颜色、几何尺寸和表面结构等表面属性。计算机成像技术可以有效反映果蔬的色彩、饱满度等外观品质属性^[54],评估和量化运输期间果蔬发生的品质变化,以确定变质、冻伤及保质期等情况^[55-56]。光谱成像是结合成像技术和震动光谱,探测果蔬在紫外线、可见光和红外光谱区域的特征,获取果蔬的空间信息和光谱信息,在检测外部品质的同时对内部品质进行分析,已被开发应用于监测和优化多种水果的冷藏过程,包括检测水果是否发生物理损伤和褐变^[57],判断果蔬成熟度、感官质量等复杂特性^[58]。该技术具有可重复光谱数据的优点,并提供高分辨率的光谱。然而光谱数据通常包含冗余信息,分析复杂,且光谱穿透深度有限,使用成本较高。

传感器技术通过放置在冷链运输设备中不同位置的众多传感器来捕获重要的质量属性指标,可以在运输过程

中实时检测并记录包括产品颜色、硬度、质量,环境温度,运输时间等参数^[59-60]以有效控制运输水果的安全和质量变化。此外,射频识别^[61]、电子鼻^[62]和声脉冲响应^[63]也被证明可以用于评估冷藏期间果蔬的质量。

数学建模是通过构建适当的数学模型,对可能导致损失的不良因素进行预测,从而达到提前优化冷链物流控制参数的目的。多年来,研究人员针对水果收获后供应链开发了多种数学模型,涵盖了新鲜农产品内部与周围传热和传质、流体流动、质量变化、气体交换、水分迁移等多个方面,用来预测并深入了解农产品采后质量变化。然而,针对水果运输过程的建模研究,需要考虑运输时间、多样化的环境条件(例如温度、湿度和气流)、包装以及车辆移动等多个环节,操作复杂^[64]。为了更深入地了解果蔬质量属性在多大程度上得到了保存,并量化新鲜农产品供应链中腐烂过程的其他驱动因素(例如相对湿度、光照)的影响,需要更多研究人员的共同努力。

4 结束语

青脆李采后常携带田间病原微生物,且果实成熟后容易开裂或软化发生变质。低温条件会减缓青脆李病原体的生长,延缓果实的成熟过程和生理化学反应。一般来说,建议将李果贮藏于不伤害宿主的最低温度下,理想的最低温度刚好高于冰点。因此,李果品种一般可以在 0~2℃之间储存并通过冷链运输。然而,在冷链物流过程中温湿度变化、气压不均等会对青脆李品质造成影响,现有保鲜技术还受到多方面因素的制约:(1)冷链运输技术及设施不完备,监控及优化成本过高;(2)民众对某些化学、天然试剂及可食或涂膜包装保鲜接受度不高;(3)冷链运输过程中不可避免的机械损伤和冷害易对李果品质造成影响。尽管近些年来国家已经加快了对冷链物流技术的研发,但是由于技术创新基础比较薄弱和应用设施类型落后等原因,冷链物流的研究多以理论叙述为主,缺少实例和数据的支撑,行业规范化、标准化程度低,使得我国农产品的损耗率一直居高不下。此外,在查阅文献过程中发现,有关水果冷链物流保鲜参数的研究较少,现有研究多数从低温贮藏、包装保鲜、化学试剂处理等某一方面阐述对水果品质的影响,缺乏多方面的综合研究。随着《“十四五”冷链物流发展规划》的发布,明确了推动冷链物流发展是健全“从农田到餐桌、从枝头到舌尖”的生鲜农产品质量安全体系的重要保障。因此在了解青脆李腐败机制的基础上,为了高质量完成青脆李从枝头到舌尖链条,最大限度地保持李果固有品质及感官特性,降低青脆李冷链物流中的腐损率,提高青脆李冷链物流标准化程度,延长青脆李货架期,从农艺上降低田间腐损率的研究,低温冷链运输过程中保鲜参数的研究,不同保鲜技术之间的协同效用,以及结合冷链物流

优化及监控技术的青脆李冷链物流保鲜技术, 将是未来青脆李保鲜发展的趋势。

参考文献

- [1] DU LN, KOU LL, LIU DD, *et al.* Integrated analysis of nutritional quality changes and molecular regulation in 'Qingcui' plum fruit treated with 1-MCP during storage [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2024, 1: 207.
- [2] 马晓丽, 袁项成, 向苹苇, 等. 稻草和地膜覆盖对青脆李裂果和果实品质的影响[J]. *天津农业科学*, 2022, 28(6): 43–46, 55.
- MA XL, YUAN XC, XIANG PW, *et al.* Effects of straw and plastic film mulching on cracking fruit and fruit quality of *Prunussalicina* Lindl. [J]. *Tianjin Agric Sci*, 2022, 28(6): 43–46, 55.
- [3] 李冀舒, 刘军, 马廷伟. 草莓冷链运输中的状态监测方法研究[J]. *中国储运*, 2019, 227(8): 133–136.
- LI JS, LIU J, MA TW. Research on condition monitoring methods in strawberry cold chain transportation [J]. *Chin Storage Trans*, 2019, 227(8): 133–136.
- [4] 曾小峰, 高伦江, 曾顺德, 等. 青脆李采后贮藏过程糖含量及相关酶的变化规律[J]. *南方农业*, 2021, 15(28): 28–32.
- ZENG XF, GAO LJ, ZENG SD, *et al.* Change regulation of the sugar content and related enzymes of crisp plum during storage after picked [J]. *South China Agric*, 2021, 15(28): 28–32.
- [5] CHOI WS, SINGH S, LEE YS. Characterization of edible film containing essential oils in hydroxypropyl methylcellulose and its effect on quality attributes of 'Formosa' plum (*Prunus salicina* L.) [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2016, 70: 213–222.
- [6] 曾昌平, 汪于波, 李佳艳, 等. 阿拉伯半乳糖处理对采后青脆李果实贮藏特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(17): 383–391.
- ZENG CP, WANG YB, LI JY, *et al.* Effects of arabinogalactan treatment on storage characteristic of postharvest Qingcui plum [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2023, 44(17): 383–391.
- [7] RAUT RD, GARDAS BB, NARWANE VS, *et al.* Improvement in the food losses in fruits and vegetable supply chain-A perspective of cold third-party logistics approach [J]. *Per Resh Pers*, 2019, 6: 100117.
- [8] 乌雪岩. 冷链中断对新鲜干酪品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(21): 4.
- WU XY. Effect of cold chain interrupt on fresh cheese quality [J]. *Food Res Dev*, 2016, 37(21): 4.
- [9] 李孟洁, 董成虎, 纪海鹏, 等. 精准控温对阿克苏苹果采后生理品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(3): 284–289.
- LI MJ, DONG CH, JI HP, *et al.* Effect of precise temperature control on postharvest physiological quality of Aksu apples [J]. *Food Ferment Ind*, 2023, 49(3): 284–289.
- [10] 王志高, 高剑利, 王文辉, 等. 不同贮藏温度对'红香酥'梨果实品质和生理指标的影响[J]. *中国果树*, 2020, (5): 13–19, 143.
- WANG ZH, GAO JL, WANG WH, *et al.* Effects of different storage temperature on fruit quality and related physiological indexes of 'Hongxiangsu' pear [J]. *Chin Fruit*, 2020, (5): 13–19, 143.
- [11] 林炎娟, 叶新福, 梁华伟, 等. 贮藏温度对芙蓉李采后保鲜效果的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(5): 1520–1523.
- LIN YJ, YE XF, LIANG HD, *et al.* The effects of storage temperature on the postharvest preservation of Furong plum [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(5): 1520–1523.
- [12] 李青芝, 蒋亚涛, 张莉娟, 等. 河南周口水果市场上猕猴桃软腐病主要病原真菌鉴定及防治研究[J]. *中国果树*, 2020, (2): 63–68.
- LI QZ, JIANG YT, ZHANG LJ, *et al.* Identification and control of the primary pathogens causing post-harvest rot in kiwifruit on the fruit market in Zhoukou, Henan Province [J]. *Chin Fruit*, 2020, (2): 63–68.
- [13] 尚夔砾. 全程冷链流通技术对黄桃、菠菜、茄子营养品质变化的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
- SHANG KL. Research on the influence of whole-process cold chain circulation technology on changes in nutritional quality of yellow peach, spinach and eggplant [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.
- [14] 张潇方. 甜樱桃采后全程冷链保鲜技术研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
- ZHANG XF. Study on whole cold-chain and preservation technology of postharvest sweet cherry [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.
- [15] XU X. Quality control and management of plum in cold chain logistics [J]. *Contemp Logist*, 2011, 3: 28.
- [16] TRAINOTTI L, TADIELLO A, CASADORO G. The involvement of auxin in the ripening of climacteric fruits comes of age: The hormone plays a role of its own and has an intense interplay with ethylene in ripening peaches [J]. *J Exp Bot*, 2007, 58(12): 3299–3308.
- [17] 高伦江, 方波, 曾顺德, 等. 青脆李采后贮藏中生理及感官品质变化研究初报[J]. *南方农业*, 2019, 13(19): 51–54.
- GAO LJ, FANG B, ZENG SD, *et al.* Preliminary report on physiological and sensory quality changes in harvest storage of green crisp plum [J]. *South China Agric*, 2019, 13(19): 51–54.
- [18] 黄展文, 李明娟, 游向荣, 等. 李果采后生理及贮藏保鲜技术研究进展[J]. *食品科技*, 2021, 46(1): 27–32.
- HUANG ZW, LI MJ, YOU XR, *et al.* Research progress on postharvest physiology, storage and fresh-keeping technologies of plum fruits [J]. *Food Sci Technol*, 2021, 46(1): 27–32.
- [19] 张立新, 陈嘉, 冯志宏. 不同温度对青脆李贮藏性的影响[J]. *北方园艺*, 2016, (3): 129–131.
- ZHANG LX, CHEN J, FENG ZH. Effect of different temperatures on storability of *Prunus americana* [J]. *North Hortic*, 2016, (3): 129–131.
- [20] 周秋阳. 水蜜桃褐腐病拮抗酵母菌的筛选、初步应用及生防机理的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- ZHOU QY. Screening, preliminary application and biocontrol mechanism of antagonistic yeasts against peach brown rot [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [21] MK A, SVA B, IS A. Microbes associated with fresh produce: Sources, types and methods to reduce spoilage and contamination-science direct [J]. *Adv Appl Microbiol*, 2019, 107: 29–82.
- [22] MUSTAFA MH, BASSI D, LINO LO, *et al.* Phenotyping brown rot susceptibility in stone fruit: A literature review with emphasis on peach [J]. *Horticulturae*, 2021, 7(5): 115.

- [23] 李思颖, 代松, 任非宏, 等. 沿河沙子空心李褐腐病的发生及综合防治[J]. 农村实用技术, 2023, 2: 107–108.
- LI SY, DAI S, REN FH, *et al.* Occurrence and comprehensive prevention and control of sand hollow plum brown rot along the river [J]. Pract Technol Rural Areas, 2023, 2: 107–108.
- [24] 田一鸣, 张旭, 陆祥柳, 等. 桃、李采后主要侵染性病害及其防控方法[J]. 中国果菜, 2022, 42(6): 13–19.
- TIAN YM, ZHANG X, LU XL, *et al.* Main infectious diseases of peach and plum after harvest and their control methods [J]. Chin Fruit Veg, 2022, 42(6): 13–19.
- [25] 胡倩珏, 乔楠桢, 于雷雷, 等. 扩展青霉和展青霉素的生物防治研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(21): 292–298.
- HU QJ, QIAO NZ, YU LL, *et al.* Recent progress on the biological control of *Penicillium expansum* and patulin [J]. Food Ferment Ind, 2020, 46(21): 292–298.
- [26] 李家琪, 张东红, 韩爱云. 鲜切苹果保鲜技术研究进展[J]. 保鲜与加工, 2023, 23(3): 75–80.
- LI JQ, ZHANG DH, HAN AIY. Research progress on preservation of fresh-cut apples [J]. Storage Process, 2023, 23(3): 75–80.
- [27] SINGH S, SINGH Z, SWINNY E. Postharvest nitric oxide fumigation delays fruit ripening and alleviates chilling injury during cold storage of Japanese plums (*Prunus salicina* Lindl.) [J]. Postharvest Biol Technol, 2009, 53(3): 101–108.
- [28] JOOSTE M, ROHWER EA, KIDD M, *et al.* Comparison of antioxidant levels and cell membrane composition during fruit development in two plum cultivars (*Prunus salicina* Lindl.) differing in chilling resistance [J]. Sci Hortic Amsterd, 2014, 180: 176–189.
- [29] 张丹丹, 屈红霞, 段学武, 等. 热带果蔬采后冷害研究进展[J]. 热带作物学报, 2020, 41(10): 2062–2079.
- ZHANG DD, QU HX, DUAN XW, *et al.* Advances in postharvest chilling injury of tropical fruit and vegetable [J]. J Chin Trop Crop, 2020, 41(10): 2062–2079.
- [30] 张翼钊. 猕猴桃采后品质评价及温度适应性研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.
- ZHANG JZ. Postharvest quality evaluation and temperature adaptability of kiwifruit [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2022.
- [31] 陈豫, 胡伟, 王宇, 等. 模拟运输震动胁迫对宜宾茵红李生理生化变化的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(11): 309–313.
- CHEN Y, HU W, WANG Y, *et al.* Effect of simulating transportation vibration stress on changes of physiology and biochemistry of “Yinhong” plum [J]. Sci Technol Food Ind, 2017, 38(11): 309–313.
- [32] 熊思国, 蒋旭, 彭丽, 等. 震动胁迫对果蔬采后生理品质影响的研究进展[J]. 包装工程, 2023, 44(7): 128–137.
- XIONG SG, JIANG X, PENG L, *et al.* Advances in research on effects of vibration stress on postharvest physiological quality of fruits and vegetables [J]. Pack Eng, 2023, 44(7): 128–137.
- [33] 王华瑞, 李建华, 赵迎丽, 等. 不同冷冲击处理时间对黑宝石李果实贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2012, 12(5): 18–22.
- WANG HR, LI JH, ZHAO YL, *et al.* Effects of cold shock treatment with different durations on the quality of friar plum fruits during cold storage [J]. Storage Process, 2012, 12(5): 18–22.
- [34] 汤乐金, 杨钦沾, 屈杰光. 水果贮藏保鲜技术研究现状及前景展望[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(9): 2474–2480.
- TANG LJ, YANG QZ, QU JG. Research status and prospects of fruit storage and preservation technology [J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(9): 2474–2480.
- [35] 周颖军. 热处理技术在果蔬贮藏中的应用研讨[J]. 黑龙江科学, 2017, 8(19): 24–25.
- ZHOU YJ. Application of heat treatment technology in fruit and vegetable storage [J]. Heilongjiang Sci, 2017, 8(19): 24–25.
- [36] CHANG X, LU YS, LI Q, *et al.* The combination of hot air and chitosan treatments on phytochemical changes during postharvest storage of ‘Sanhua’ plum fruits [J]. Foods, 2019, 8(8): 338.
- [37] 郑巧, 张婧, 杨苗, 等. 非热杀菌技术在冷链生鲜食品中杀菌消毒的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(11): 197–204.
- ZHENG Q, ZHANG J, YANG M, *et al.* Research progress on non-thermal sterilization technology for sterilization and disinfection in cold chain fresh food [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(11): 197–204.
- [38] YAMAGA I, IKEGAYA A, NAKAMURA S, *et al.* Alleviation of fruit decay during the export and domestic storage of satsuma mandarin fruit through temperature treatment and ultraviolet-C irradiation via phytoalexin production [J]. Hortic J, 2021, 90(3): 286–295.
- [39] KIM HG, SONG KB. Combined treatment with chlorine dioxide gas, fumaric acid, and ultraviolet-C light for inactivating *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* inoculated on plums [J]. Food Control, 2017, 71: 371–375.
- [40] 刘泽松, 史君彦, 王清, 等. 辐照技术在果蔬贮藏保鲜中的应用研究进展[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(4): 236–242.
- LIU ZS, SHI JY, WANG Q, *et al.* Research advance on application of Irradiation technology in storage and preservation of fruits and vegetables [J]. Storage Process, 2020, 20(4): 236–242.
- [41] 罗冬兰, 曹森, 马超, 等. 1-甲基环丙烯结合 ^{60}Co - γ 辐照处理在李子保鲜中的应用[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 143–147.
- LUO DL, CAO S, MA C, *et al.* Effect of the treatment of 1-MCP combined with ^{60}Co - γ irradiation on the storage of plum fruit [J]. Food Mach, 2021, 37(7): 143–147.
- [42] GUERRERO-BELTRAN JA, WELTI-CHANGES J, BARBOSA-CANOVAS GV. Ultraviolet-C light processing of grape, cranberry and grapefruit juices to inactivate *saccharomyces cerevisiae* [J]. J Food Process Eng, 2009, 32(6): 916–932.
- [43] 马玉婷, 王瑞环. 水果保鲜技术研究进展[J]. 山东化工, 2020, 49(20): 48–49.
- MA YT, WANG RH. Research progress of fruit preservation technology [J]. Shandong Chem Ind, 2020, 49(20): 48–49.
- [44] CALEB OJ, MAHAJAN PV, AL-SAID AJ, *et al.* Modified atmosphere packaging technology of fresh and fresh-cut produce and the microbial consequences-a review [J]. Food Bioproc Technol, 2013, 6(2): 303–329.
- [45] 王泽彬, 张玲, 李春媛, 等. 基于气调小包装的生菜采后保鲜技术研究

- 进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(7): 218–224.
- WANG ZB, ZHANG L, LI CY, *et al.* Postharvest preservation technology of lettuce based on modified atmosphere packaging [J]. Food Res Dev, 2023, 44(7): 218–224.
- [46] 刘欢, 赵焱羽, 叶露露, 等. 高氧气调包装对鲜切刺嫩芽保鲜效果的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(7): 153–158.
- LIU H, ZHAO HY, YE LL, *et al.* Effects of high-oxygen modified atmosphere packaging of the quality of fresh-cut *Aralia elata* [J]. Food Mach, 2022, 38(7): 153–158.
- [47] 王华瑞, 赵迎丽, 王春生, 等. 不同气体成分对“黑宝石”李果实贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(6): 297–300.
- WANG HR, ZHAO YL, WANG CS, *et al.* Effect of gas composition on fruit quality of friar plum during modified atmosphere cold storage [J]. Food Sci, 2011, 32(6): 297–300.
- [48] 陈鸥, 吴雪莹, 邓丽莉, 等. 1-甲基环丙烯处理对采后李果实硬度变化的影响机制[J]. 食品科学, 2020, 41(3): 185–191.
- CHEN OU, WU XY, DENG LL, *et al.* Effect of 1-methylcyclopropene treatment on firmness change of postharvest plum fruit and underlying mechanism [J]. Food Sci, 2020, 41(3): 185–191.
- [49] LI B, LI S, YUAN H, *et al.* Effects of different packaging materials on storage quality of crisp plum [C]. E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2021.
- [50] 彭梦云, 黄明, 周敏, 等. 电商速递中 1-MCP 处理对巫山脆李货架品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(14): 52–58.
- PENG MY, HUANG M, ZHOU M, *et al.* Effect of 1-MCP treatment in E-commerce logistics on the quality of Wushan crisp plums during shelf life [J]. Food Res Dev, 2023, 44(14): 52–58.
- [51] KUMAR L, RAMAKANTH D, AKHILA K, *et al.* Edible films and coatings for food packaging applications: A review [J]. Environ Chem Lett, 2022, 20(1): 875–900.
- [52] 曾昌平, 汪于波, 李佳艳, 等. 阿拉伯半乳糖处理对采后青脆李果实贮藏特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(17): 383–391.
- ZENG CP, WANG YB, LI JY, *et al.* Effects of arabinogalactan treatment on storage characteristic of postharvest Qingcui plum [J]. Sci Technol Food Ind, 2023, 44(17): 383–391.
- [53] BALL E. Effects of alginate edible coating enriched with salicylic and oxalic acid on preserving plum fruit (*Prunus salicina* L. cv. ‘Black amber’) quality during postharvest storage [J]. Acta Sci Polon Hort Cult, 2019, 18(4): 35–46.
- [54] AGUDELO-LAVERDE LM, SCHEBOR C, BUERA MDP. Water content effect on the chromatic attributes of dehydrated strawberries during storage, as evaluated by image analysis [J]. Lebensm Wissen Technol, 2013, 52(2): 157–162.
- [55] CAVALLO DP, CEFOLA M, PACE B, *et al.* Non-destructive and contactless quality evaluation of table grapes by a computer vision system [J]. Comput Electron Agric, 2019, 156: 558–564.
- [56] CUBERO S, ALEIXOS N, MOLTÓ E, *et al.* Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality evaluation of fruits and vegetables [J]. Food Bioproc Technol, 2010, 4: 487–504.
- [57] LU R. Detection of bruises on apples using near-infrared hyperspectral imaging [J]. Trans Asae, 2003, 46(2): 523–530.
- [58] WIEME J, MOLLAZADE K, MALOUNAS I, *et al.* Application of hyperspectral imaging systems and artificial intelligence for quality assessment of fruit, vegetables and mushrooms: A review [J]. Biosyst Eng, 2022, 222: 156–176.
- [59] LIU Z, JIA X, XU X. Study of shrimp recognition methods using smart networks [J]. Comput Electron Agric, 2019, 165: 104926.
- [60] LIU J, ZHANG X, LI Z, *et al.* Quality monitoring and analysis of Xinjiang ‘Korla’ fragrant pear in cold chain logistics and home storage with multi-sensor technology [J]. Appl Sci, 2019, 9(18): 3895.
- [61] ZOU Z, CHEN Q, UYSAL I, *et al.* Radio frequency identification enabled wireless sensing for intelligent food logistics [J]. IEEE Tran Comp Pack Manuf Technol, 2015, 5(9): 1244–1252.
- [62] 万赐晖, 贾文玮, 王纪华, 等. 基于人工神经网络算法的电子鼻系统在食品无损检测中的应用[J]. 食品与机械, 2016, 32(10): 221–225.
- WAN CH, JIA WK, WANG JH, *et al.* ANN-based electronic nose system in the application of food nondestructive testing. [J]. Food Mach, 2016, 32(10): 221–225.
- [63] LASHGARI M, MALEKI A, AMIRIPARIAN J. Application of acoustic impulse response in discrimination of apple storage time using neural network [J]. Int Food Res J, 2017, 24(3): 1075–1780.
- [64] 杨浩军. 食品冷链物流的安全性研究及其优化措施[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(24): 187–190.
- YANG HJ. Research and optimization measures of the food cold chain logistics safety [J]. Food Res Dev, 2016, 37(24): 187–190.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

作者简介



王春霞, 硕士, 工程师, 主要研究方向为农产品加工及贮藏。
E-mail: wangchxgo@163.com



应 婧, 硕士, 正高级农艺师, 主要研究方向为农产品加工及贮藏。
E-mail: 77012455@qq.com