供应链中生鲜果蔬品质劣变机制、共性管控及智能检测技术研究进展

张莉会[1]， 张 慜[*1]， 朱启兵[2]， 陈 健[3]， 胡梁斌[4]， 徐 丹[4]
（1. 江南大学 食品学院，江苏 无锡 214122；2. 江南大学 物联网工程学院，江苏 无锡 214122；3. 江苏省农业科学院农产品质量与营养研究所，江苏 南京 210014；4. 陕西科技大学 食品与生物工程学院，陕西 西安 710016）

摘要：供应链中生鲜果蔬由于呼吸作用、蒸腾作用和乙烯释放等因素，持续消耗有机物质（如糖和淀粉），导致生鲜果蔬品质降低。在整个供应链中，生鲜果蔬的生理、生化变化受内在因素（种类与品种、产地与采收期、成熟度或生长期）和环境因素（如温度、湿度、O_2和CO_2体积分数、乙烯体积分数、挤压、撞击、振动等）的影响。目前，供应链中应用了许多采后技术来提高品质和保留率，以减少生鲜果蔬的品质劣变，提高其市场竞争力。作者简要介绍了供应链中生鲜果蔬品质劣变（如霉变、萎蔫、褐变、软化、黄化等）机制、生鲜果蔬品质劣变影响因素，以及通过采用共性管控技术减缓生鲜果蔬的品质劣变，并综述了智能标签在生鲜果蔬新鲜度检测中的研究进展。

关键词：生鲜果蔬；供应链；品质劣变；共性管控；智能检测
中图分类号：TS 206 **文章编号：**1673-1689(2024)03-0001-13 **DOI：**10.12441/spyswjs.20231207005

Research Progress on Quality Degradation Mechanism, Common Control Strategies, and Intelligent Detection Technologies of Fresh Fruits and Vegetables in Supply Chain

ZHANG Lihui[1], *ZHANG Min*[*1], *ZHU Qibing*[2], *CHEN Jian*[3], *HU Liangbin*[4], *XU Dan*[4]
(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. Institute of Agricultural Product Quality, Safety and Nutrition, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 4. School of Food and Biological Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710016, China)

Abstract: Fresh fruits and vegetables in the supply chain continuously consume organic matter (sugar and starch) due to respiration, transpiration, and ethylene release, leading to their quality deterioration. Throughout the supply chain, the physiological and biochemical changes in fresh fruits and vegetables are influenced by intrinsic factors (species and varieties, origin and harvest period, maturity or developmental age) and environmental factors (temperature, humidity, O_2 and CO_2 concentration, ethylene concentration, extrusion, impact, vibration, and etc.). Currently, numerous

收稿日期：2023-12-07 **修回日期：**2024-01-21
基金项目：国家“十四五”重点研发计划项目（2022YFD2100601）。
作者简介：张莉会（1994—），女，博士研究生，主要从事农产品贮藏与加工研究。E-mail：lihuizhang0205@163.com
*** 通信作者：**张 慜（1962—），男，博士，教授，博士研究生导师，主要从事农产品贮藏与加工研究。E-mail：min@jiangnan.edu.cn

post-harvest technologies are applied in the supply chain to reduce the quality deterioration of fresh fruits and vegetables, thereby enhancing their market competitiveness with the highest quality retention rate. This review briefly introduces the mechanisms of quality deterioration (mold, wilting, browning, softening, yellowing, and etc.) of fresh fruits and vegetables within the supply chain, the factors affecting the quality deterioration of fresh fruits and vegetables, as well as the mitigation of the quality deterioration of fresh fruits and vegetables through the adoption of common control technologies. Furthermore, the latest research progress of intelligent labels in freshness detection of fresh fruits and vegetables are reviewed.

Keywords: fresh fruits and vegetables, supply chain, quality deterioration, common control, intelligent detection

生鲜果蔬是人类饮食中必需营养素和纤维的来源。但由于生鲜果蔬具有生产的季节性、地域性及产品的易腐性等特点,从采收到消费会经历快速和持续变化[1]。生鲜果蔬在包装、运输和贮藏过程中品质(如颜色、质地、营养)的下降是生鲜果蔬劣变损失的最重要原因[2]。此外,生鲜果蔬品质不仅受到诸多产前因素的影响,还易受到采后贮运环境因素(即温度、湿度、O_2 和 CO_2 体积分数、乙烯体积分数、挤压、撞击、振动等)的影响[3]。在全球范围内,生鲜果蔬从产地到消费者的整个供应链中,损耗率高达20%~50%[4]。为了减少生鲜果蔬的损失,需要在采后更好地保持产品的品质,以防止由于物理(如冷害、冻害、水分损失)、生物化学(如褐变反应、营养物质降解)、生理(如成熟、衰老、呼吸)和微生物(如微生物侵染)等因素而导致的品质变化[5]。目前,采后果蔬的保鲜策略主要有冷藏、可食性涂膜、气体调节、物理技术处理等[2]。此外,传统的评估果蔬新鲜度的方法大多是基于人们的主观评判,通过观察果蔬的颜色或硬度等来判断。这种方法需要感官评估人员的高度专业性,并且容易受到人们主观因素的影响,因此难以准确量化果蔬的实际状态[6]。智能标签的应用正逐渐成为人们关注的焦点。在食品产业领域,智能标签是一种视觉标签,根据对周围温度、气体、信号和其他因素变化的敏感性,实时精准监测生鲜食品品质的变化[7]。与传统标签相比,它可以更全面地反映产品的品质状况,包括产品在贮藏和运输过程中的温度、湿度和微生物侵染情况[8]。

作者从供应链视角聚焦提升生鲜果蔬韧性的管控新技术的研究进展,介绍了生鲜果蔬品质劣变机制和影响因素,总结了生鲜果蔬品质劣变共性管控和智能检测技术的研究进展,以降低生鲜果蔬在全球范围内的损耗浪费,提升供应链整体韧性。

1 供应链中生鲜果蔬品质劣变机制

1.1 萎蔫机制

供应链中生鲜果蔬萎蔫是果肉组织尤其是表皮细胞收缩的结果[9],是影响外观的主要物理变化之一。图 1 采用了皮尔逊相关系数网络系统来阐明果实萎蔫与新陈代谢之间的关系[10-11]。细胞的大小和形状取决于细胞的张力压力和细胞壁结构[12]。除细胞壁结构外,细胞内水分对细胞膜和细胞壁施加的张力压力也赋予细胞弹性、刚度和强度[13]。果蔬采后失水是由环境空气和表皮之间的水蒸气压造成的,从而引起果实组织中的水分运动[9]。在对猕猴桃的研究中,果实组织中的水分流失最初发生在外部表皮和外果皮,然后是内果皮[14]。在猕猴桃失水过程中,水分从内部内果皮、外果皮和外部表皮进行空间移动。完整的细胞壁和细胞膜具有半渗透性,是细胞间水分流动的主要障碍。研究表明,运输过程中的振动破坏了果实组织(表皮、外果皮和内果皮)的细胞壁和细胞膜,加速了水分从组织向外表面的无限制流动,造成果实萎蔫[13-14]。虽然失水是造成果蔬萎蔫的必要条件,但它并不是导致萎蔫发生的唯一因素。只有当果皮下果实组织的水合状态无法通过果实内部的水分再分配来维持时,失水才会成为主因。此外,果皮和果皮下的组织必须能够变形,果实才会发生萎蔫。果实细胞壁材料膨胀能力的增加与果胶溶解后水分进入纤维素-半纤维素网络中的空隙有关。溶胀能力的增强以及水与萎蔫过程中释放或暴露出来的细胞壁成分的相互作用,都可能导致水的流动性降低[9]。

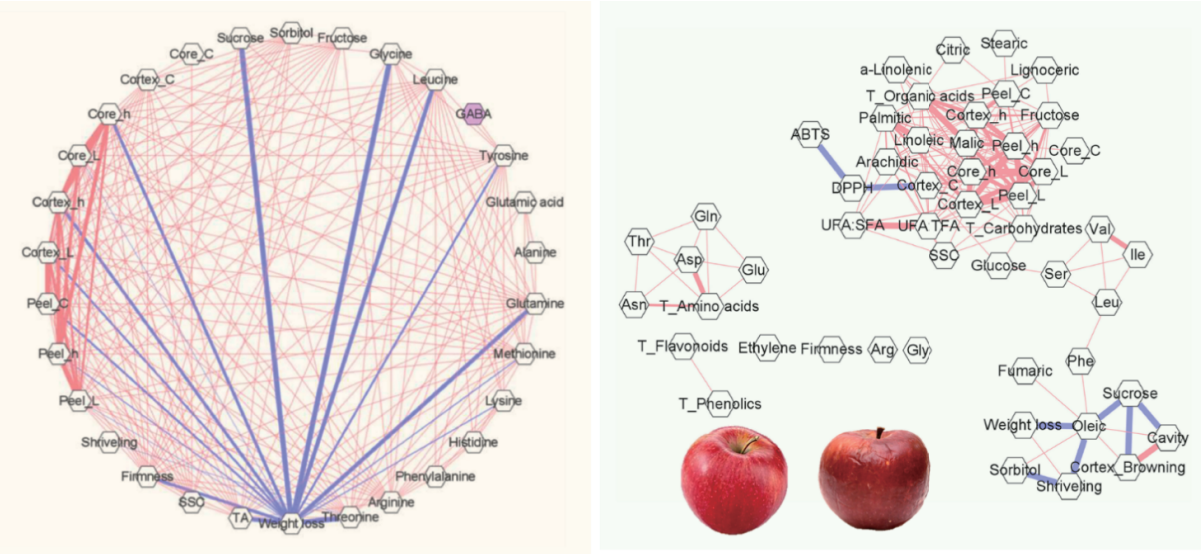


图 1　供应链中生鲜果蔬萎蔫机制

Fig. 1　Mechanism of fresh fruit and vegetable wilting in the supply chain

1.2　霉变机制

许多生鲜果蔬由于表皮薄、柔软多汁、呼吸速率高,难以贮存,因此会导致果蔬快速衰老,容易感染病原菌,造成生鲜果蔬采后腐烂[15]。例如,苹果在收获后容易受到扩展青霉的侵害,造成苹果的腐烂变质[16]。樱桃在供应链中造成的机械损伤易受真菌性病害的侵染,造成果实的腐败[17]。研究发现,果实衰老过程中容易受到 *Botrytis cinerea*、*Penicillium expansum* 和 *Alternaria alternata* 的感染,导致物流过程中的巨大损失[15]。而苯丙烷途径是生鲜果蔬次生代谢产物合成的主要途径,在耐受生物和非生物胁迫方面发挥着关键作用[16]。苯丙氨酸解氨酶、4–香豆酸–CoA 连接酶和肉桂酸–4–羟化酶是植物中参与苯丙烷途径的关键酶,与酚酸的积累密切相关[15]。苯丙氨酸解氨酶是苯丙素途径中的第一个限速酶,苯丙氨酸解氨酶活性与植物抗病能力密切相关。肉桂酸–4–羟化酶催化反式肉桂酸产生羟基肉桂酸是木质素生物合成的前体。4–香豆酸–CoA 连接酶在木质素单体合成路线中的限速方面起着关键作用[18]。另一方面,4–香豆酸–CoA 连接酶的催化产物被用于类黄酮生物合成所需的底物。Yu 等研究表明,苯丙氨酸解氨酶、4–香豆酸–CoA 连接酶和肉桂酸–4–羟化酶的活性与梨果实中由扩展青霉引起的蓝霉菌腐病相关[19-22],见图 2(a)。

1.3　褐变机制

生鲜果蔬采后褐变归因于衰老和胁迫,这与 iATP 短缺有关,较低的抗氧化系统活性和较高的磷脂酶 D 和脂肪氧化酶活性可导致较高的活性氧(reactive oxygen species,ROS)积累,降低了膜的完整性,并通过破坏细胞区室化引起多酚氧化酶与酚类接触导致褐变[23]。另一方面,生鲜果蔬中的组织褐变与细胞膜的结构和功能损伤密切相关[24]。生物膜的维持依赖于细胞能量稳态,一旦能量供应不能满足正常生理代谢的要求,就不能有效清除 ROS,它们会攻击细胞膜,导致酚类物质从液泡中泄漏,最终导致酶促褐变[25]。细胞膜损伤与膜脂质过氧化密切相关,其特征是不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸的比例降低,膜脂质过氧化物积累,膜通透性加剧[23]。

过氧化物酶可催化酚类化合物形成醌类化合物,还可与过氧化氢酶和过氧化物酶协同作用以去除多余的自由基,并保持水果中的氧化还原平衡[24]。多酚氧化酶催化酚类化合物氧化形成抗菌醌,是末端氧化酶的主要组成部分[23]。当果蔬组织受损时,多酚氧化酶可以快速增加活性并促进木质素和醌的形成。在龙眼果皮褐变的研究中,主要表现为色度和色素的降低[25]。其次,龙眼果皮褐变可能与通过上调 *DlPLD2*、*DlNPC3*、*DlPLC2*、*DlLIP2* 和 *DlLOX1* 基因的表达来激活 PLD、PC–PLC、PI–PLC、脂肪酶和脂肪氧化酶有关。被激活的酶加速了磷脂酰胆碱和磷脂酰肌醇的水解加速了磷脂酸和二酯酰甘油的积累,造成了严重的膜损伤,从而加速了多酚氧化酶、过氧化物酶与多酚、类黄酮和花青素的反应,促

进了龙眼果实的果皮褐变。褐变过程中 ROS 清除酶相关基因表达的下调抑制了 ROS 清除酶的活性,并诱导了非酶抗氧化系统的功能失调。这些活动加速了 ROS 的产生和积累,破坏了膜的完整性,促进了龙眼果实的酶促褐变。多酚氧化酶和过氧化物酶对酚类底物的氧化是导致果肉褐变的主要原因,褐变过程中酚类代谢见图 2(b)。桃果肉褐变后苯丙氨酸解氨酶和 4-香豆酸-CoA 连接酶活性降低,同时多酚氧化酶和过氧化物酶活性增加,酚类物质发生氧化,导致醌类物质产生量较高。

1.4 软化机制

供应链中果蔬软化与细胞壁代谢密切相关,果胶和纤维素有助于提高细胞壁的弹性和硬度[26]。大多数果蔬的软化主要是由果胶和纤维素-半纤维素网络降解造成的。生鲜果蔬的软化通常伴随着硬度的丧失,这种反应是中间片层中的果胶和初级细胞壁中的聚合物发生改变的结果。有研究表明,果实软化除了与细胞壁降解酶如多聚半乳糖醛酸酶(polygalacturonase,PG)、果胶裂解酶(pectinlyase,PL)、果胶甲基酯酶(pectin methyl esterase,PME)、纤维素酶(cellulase,Cx)、β-半乳糖苷酶(β-galactosidase,β-Gal)、β-葡萄糖苷酶(β-glucosidase,β-Glu)和木糖苷酶的激活密切相关,还与非酶促细胞壁蛋白质的分解和解聚相关[27],见图 2(c)。基因沉默已被广泛用于研究果实软化,然而,编码果胶分解代谢酶的基因的靶向沉默并没有显著减缓采后果实软化[28]。因此,除了细胞壁结构和成分外,果实软化可能还取决于其他更复杂的因素。植物激素和呼吸跃变型果蔬的发育以及环境因素也可能影响采后软化。*VcPE*、*VcPG*、*VcBG6* 和 *VcGAL1* 是细胞壁降解途径中的关键基因[22]。对梨的软化研究表明,果胶降解基因(*PGs*、*PMEs*、*β-GALs* 和 *ARF1*)都参与了梨果的软化,但 *PG1* 和 *PG2* 是导致果实快速软化的主要基因[26]。

1.5 黄化机制

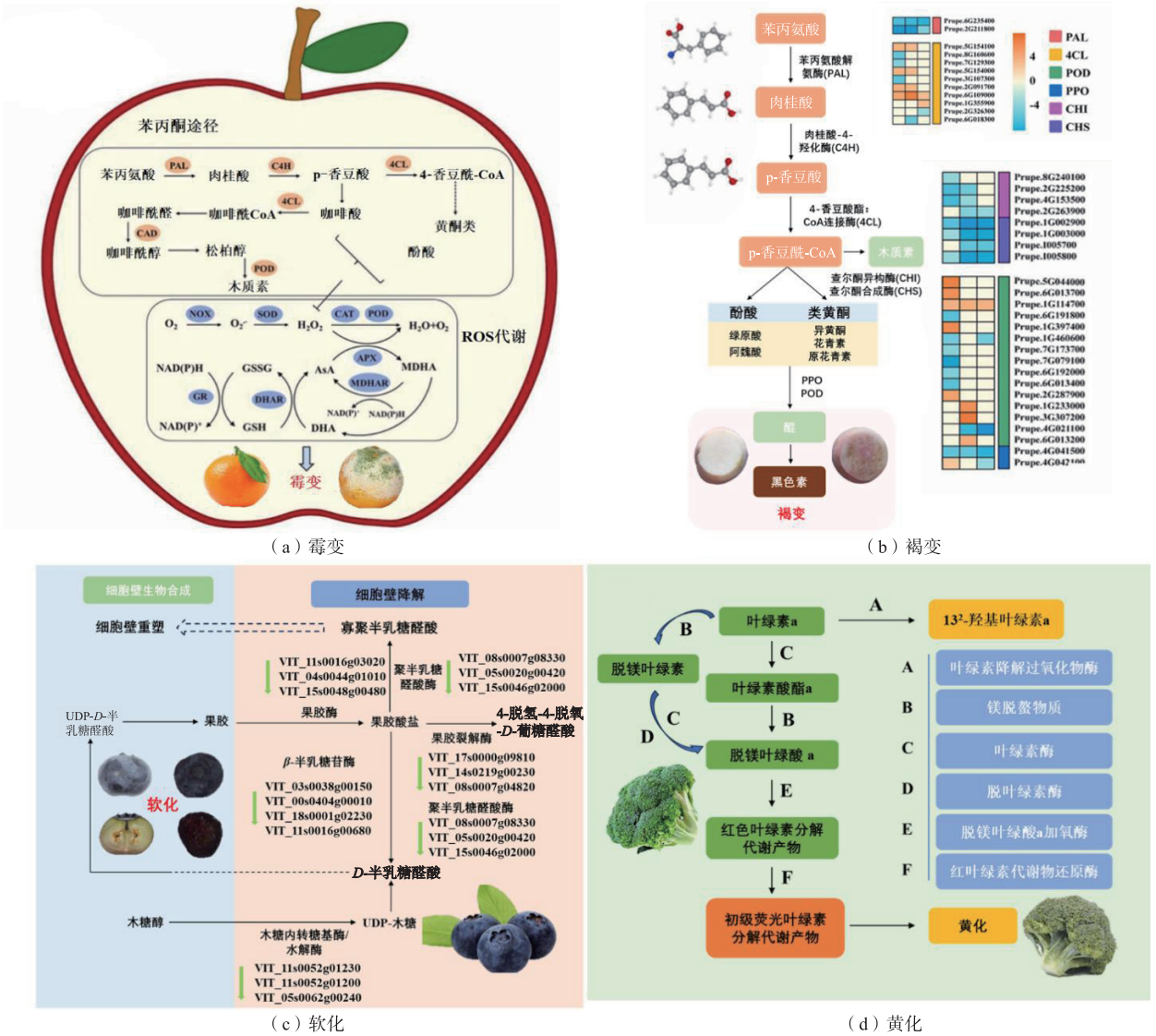
绿叶蔬菜衰老通常表现为叶片颜色的改变,是绿叶蔬菜采后贮存和运输的主要限制因素,这与叶绿素降解有关[29]。如图 2(d)所示,叶绿素降解主要有两种方式:一条途径是叶绿素酶从叶绿素 a 中去除植醇并形成叶绿苷 a,然后镁脱螯物质去除一个镁原子[30]。随后,脱镁叶绿酸 a 降解为具有荧光的、无色的螯合态代谢产物,包括由脱镁叶绿酸 a 加氧酶和红叶绿素代谢物还原酶生成的红色叶绿素分解代谢产物[21]。另一条途径是叶绿素 a 在植物醇基团之前去掉一个镁原子,以脱镁叶绿素 a 为中间体[31]。因此,脱镁叶绿素 a 的脱磷酸是由叶绿素酶催化的,脱叶绿素酶是一种脱镁叶绿素 a 特异性脱叶绿素酶。此外,在一些酚类化合物和过氧化氢存在时,叶绿素 a 也会在体外被叶绿素过氧化物酶降解,形成 13^2-羟基叶绿素 a,这是叶绿素 a 的一种氧化形式[32]。卟啉酶参与了叶绿素降解途径,它将脱镁叶绿酸 a 转化为焦脱镁酸 a[21]。

2 供应链中生鲜果蔬品质劣变的影响因素

影响供应链中生鲜果蔬品质劣变的外部因素主要有温度、湿度、气体、振动、辐射和机械应力等[33]。Pal 等指出,供应链中水果和蔬菜的品质劣变与时间呈线性函数,如果管理不善,它们的时间线性相关性将持续且不可逆转地恶化[34]。图 3 简要说明了供应链中环境条件对果蔬品质的影响[35]。

2.1 温度

温度是影响生鲜果蔬品质的最重要因素之一,它对果蔬周围环境的相对湿度也有影响,温度升高会增加产品与环境之间的水势差[33]。其次,产品温度高会提供更多的能量,促进产品表面水分的蒸发,而大气温度的升高会增加周围空气的持水能力,从而促进水分的流失。果蔬表皮层的渗透性随温度升高而增加,这归因于角质层脂质的重新定向和屏障层亲水开口的形成[36]。与此同时,高温有利于提高呼吸基质的消耗率和产品表皮的水分扩散。在相对湿度 92%的条件下,石榴在 5 ℃和 7.5 ℃分别贮藏 150 d,失水率分别为 27.7%和 45.7%[37]。同样,Fawole 等也观察到,在 10 ℃、相对湿度 92%条件下贮藏的石榴与在 5 ℃或 7 ℃、相对湿度 92%条件下贮藏的石榴相比,贮藏过程中第 84 天失水率明显更高[38],这归因于呼吸速率的差异。根据对黄化指数的评估,西兰花在 5、10、15、20、25 ℃下贮藏时的保质期分别为 24、8、4、3、2 d,这表明温度是控制西兰花采后衰老的重要因素[33]。据报道,贮藏温度的微小变化会导致相对湿度及呼吸温度系数的波动,加快冷藏期间果蔬品质的下降速度。高温和低湿度的结合会导致水果的高呼吸和高蒸腾作用,从而导致更高的水分损失[36]。因此,水果在采摘后必须立即预冷,然后在整个冷链过程中保持适宜的温度和湿度[4]。



（a）霉变　（b）褐变

（c）软化　（d）黄化

图 2　供应链中生鲜果蔬品质劣变机制

Fig. 2　Mechanisms of quality deterioration of fresh fruits and vegetables in the supply chain

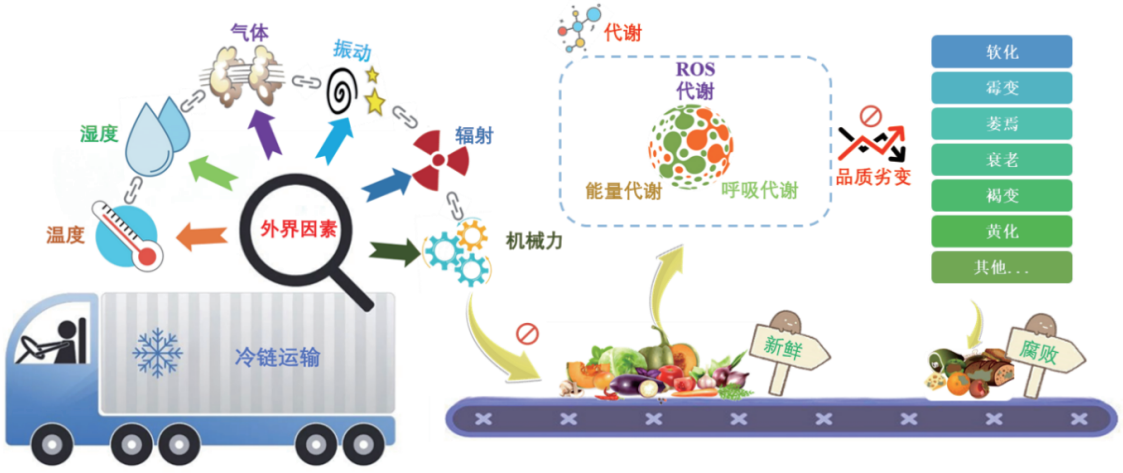


图 3　供应链中环境因素与果蔬品质的变化

Fig. 3　Environmental factors and changes in the quality of fruits and vegetables in the supply chain

2.2 湿度

相对湿度被定义为大气中水汽压与相同温度下饱和水汽压的百分比[39]。这意味着在给定的空气流动率和温度条件下,水果的失水率取决于相对湿度。相对湿度是保持果蔬品质的重要因素之一,它还会严重影响蒸腾作用的速率。在恒温条件下,相对湿度的微小变化会显著影响生鲜果蔬的品质[36]。较低的相对湿度会增加果皮上的水蒸气压力差,加快水分从水果向周围空气扩散[36]。Theron 也观察到,高水蒸气压力差会导致不同品种的李子在环境温度下贮藏 3 d 后水分损失较高[39],在 20 ℃贮藏 30 d 后,在相对湿度 65%下贮藏的石榴果实的失水率为 29.1%,明显高于相对湿度 95%贮藏时的失水率[40]。为了最大限度减少蒸腾失水,环境的相对湿度应尽可能接近产品细胞内环境相对湿度。因此,在冷藏和货架贮藏期间,通过调节相对湿度可以大大减少采后失水。由于大多数新鲜果蔬的水分质量分数为 85%~95%,因此建议将相对湿度保持在 90%~95%[36]。因为生鲜果蔬在贮运过程中失水不可避免,若能控制贮运环境相对湿度在 85%~90%,果蔬失水率在可控范围,不会对感官品质造成明显影响。

2.3 气体

环境气体条件是影响生鲜果蔬货架期的另一个因素[41]。不同果蔬具有独特的采后新陈代谢,会影响成熟和腐烂过程的开始时间和持续时间。呼吸跃变型水果在采收后会产生植物激素乙烯,乙烯不仅影响水果的成熟和衰老过程,还影响周围其他产品的成熟和衰老。此外,产品周围环境中的其他气体成分(如 CO_2 和 O_2)也会影响其呼吸速率和货架期。O_2 和 CO_2 是生鲜果蔬采后呼吸作用过程中必须提供或释放的重要成分,其体积分数的高低或配比合理与否直接影响生鲜果蔬的代谢强度,进而影响果蔬的品质[42]。通常适宜的低 O_2 或高 CO_2 环境能有效抑制生鲜果蔬的呼吸代谢,延缓其成熟衰老进程,并对病原微生物的侵染具有一定的抑制效果;乙烯是一种促衰老激素,适宜的高 CO_2 体积分数不仅能抑制乙烯的生物合成,还能降低乙烯的促衰老作用。但环境中 O_2 体积分数过低,果蔬由于呼吸作用会很快消耗完 O_2,造成缺氧呼吸或发酵,导致 CO_2 伤害,并产生异味物质,同时低 O_2 环境还易诱导微生物侵染。

3 供应链中生鲜果蔬品质劣变典型共性管控技术

3.1 气调及气调包装技术

生鲜果蔬由于质地柔软、生理活性高、对微生物腐败和机械损伤的敏感性高,采后很容易腐烂。因此,有必要在采后处理中寻求延长生鲜果蔬保质期和保持果蔬品质的方法。据报道,气调包装改变生鲜果蔬环境中的气体成分是一种有效的采后保鲜方法,对果蔬品质和安全具有积极作用[43]。生鲜果蔬被包装在塑料聚合物膜中,包装内的气体成分被改变,以加速建立包装内的最佳气体成分,并避免不合适气体[44]。在呼吸过程中,生鲜果蔬消耗 O_2 并产生 CO_2,包装内 O_2 和 CO_2 的体积分数分别降低和增加。因此,重要的是在平衡状态下建立最佳气体成分,该成分由产品品质和生理特性、环境条件和包装材料的特性(膜厚度、渗透性、穿孔密度和表面积)决定[45]。气调包装仅利用大气中的天然成分(O_2、CO_2 和 N_2),由于不使用合成化学品,产品上也不会留下有毒残留物,因此已获得公众认可。气体的初始改性有利于降低呼吸活性,延长生鲜果蔬的保质期[46]。通过用所需的气体成分置换空气来去除或排除 O_2 会降低呼吸速率,延迟果实成熟,并减缓有价值的风味和颜色成分的降解速率[45]。同样,高体积分数 O_2 可以有效防止厌氧呼吸,抑制微生物生长,并有效减少新鲜农产品的腐烂[46]。同时 O_2 体积分数升高会增加活性氧的产生,如超氧化物、过氧化氢和羟基自由基,这些物质会破坏细胞质并抑制各种代谢活性,导致产品品质劣变[47]。

3.2 电磁场技术

3.2.1 电场 电场是一种物理加工技术,该技术具有操作简单、无残留、不发热、能耗低等优点[48]。一些研究表明,电场会影响酶的构型、偶极矩以及酶与反应基质的结合,从而显著降低酶的活性[48]。此外,在采后贮藏过程中,通过调整电场强度可以达到延缓组织崩解和水分流失的效果。静电场是一种非热、低成本的物理保鲜技术,按输出电压可分为高压静电场(>2.5 kV)和低压静电场(≤2.5 kV)[49]。外部静电场会影响果蔬内部固有电场,并使空气电离产生不稳定的臭氧、空气负离子等活性物质,这些物质可以消除乙烯,减少表皮气孔开度,阻碍果蔬正常的糖代谢,并具有优异的抗菌或杀菌效果[50]。近

年来,高压静电场在果蔬保鲜中的应用引起了广泛关注。高压静电场处理还会引起生物体内酶活性的变化,从而影响一系列代谢功能。然而,高压静电场也存在一些明显的局限性,输出电压高、能耗大、安全隐患多,难以在实际生产中大规模应用。研究发现,低压静电场处理可通过空间放电在一定范围内形成负离子环境,并可能影响水分子的迁移[51]。低压静电场可以延缓采后果蔬的衰老,降低活性氧代谢反应水平,诱导抗氧化剂相关酶的活性,并改善细胞膜结构的完整性[49]。脉冲电场技术是一种很有前途的非热保存食品的方法,可以有效解决生物危害问题。脉冲电场是两个电极之间会产生振幅从 100~300 V/cm 到 20~80 kV/cm 的脉冲高强度电场,并在短时间内(从 ms 到 μs)作用于产品,使微生物在热处理温度以下失活[52]。与传统热处理相比,脉冲电场处理对食品材料的颜色、风味、口感和营养成分的影响微乎其微。

3.2.2 *磁场* 磁场是一种新兴的食品保鲜技术,具有杀虫、杀菌和消毒的功能,可以延缓果蔬成熟[53]。但到目前为止,磁场调节的内部保鲜机制还不清楚。磁场可以影响细胞壁的完整性,释放细菌的细胞内物质[54]。此外,磁场可以通过影响生理生化反应来延缓生鲜食品的衰老和腐烂。已有研究表明,磁场对生鲜食品中的水分分布有很大影响,可以影响蛋白质的水合和构象变化,延缓品质劣变[54];磁场还可以通过介导参与植物代谢的酶来影响植物生长和微生物发酵;漆酶、过氧化物酶和乙醇胺氨裂解酶等酶的构象受到磁场的调节,除了改变酶的结构外,外部磁场还能改变参与酶催化活性的未成对电子的动能,从而影响化学和生化反应。

磁场可通过两种方式作用于生物过程:1)磁场作为一种外加剂,不含磁性载体的酶是自由的;2)带有磁性载体的酶被用作固定酶的基质。磁场通过酶内的特定离子(如镁、锰、钙或铁等辅助因子)改变蛋白质的构象[55]。近年来,在对细胞和微生物研究的基础上,从食品的营养特性、功能变化和成分结构特征等方面探讨了磁场对生鲜果蔬的生物学效应。Liu 等报道,4 mT 磁场维持更高的能量和膜的完整性和功能,调节能量代谢酶的水平,并减轻活性氧的积累,延缓草莓衰老和腐烂[53]。Zhao 等发现,磁场可降低黄瓜的呼吸速率和膜渗透性,提高过氧化氢酶和超氧化物歧化酶活性,对黄瓜保鲜具有积极影响[56]。果胶酶对果实中果胶的降解作用可使细胞壁中层溶解,细胞间黏合力下降,从而导致果实软化[57]。

3.3 活性包装膜/涂层技术

活性包装薄膜/涂层是一层薄薄的材料,可以阻挡食品内以及食品与环境之间的传质(水蒸气、O_2、CO_2 和溶质)[58]。与传统的石油基塑料包装相比,活性包装薄膜/涂层具有显著的生物降解性、生物相容性和可再生性优势,并具有一定的光学、机械、阻隔和功能性能,是塑料包装材料的合适替代品[59]。活性包装薄膜/涂层通常采用源自天然植物/动物的可食用生物聚合物制造,例如多种形式(简单或复杂、单层或多层)的多糖、蛋白质和脂质。然而,这些纯生物大分子形成的活性包装薄膜/涂层往往不能满足食品包装和保鲜的真正需求[58]。除了活性包装膜的机械和阻隔性能外,还需要额外的功能性能,如抗菌活性,以确保安全并保持包装食品的品质。尽管一些生物聚合物具有抗菌活性,如壳聚糖和半纤维素,但它们的抗菌性能还不够,需要结合其他具有抗菌性能的物质[60]。为此,对能够赋予活性膜抗菌性能的天然材料进行了研究。Yan 等发现,魔芋葡甘露聚糖/普鲁兰糖膜包装草莓的品质比聚乙烯膜包装的草莓更好,如较低的质量损失和较高的可滴定酸、抗坏血酸和可溶性固形物含量[61]。这主要是由于魔芋葡甘露聚糖/普鲁兰糖包装膜具有选择性气体阻隔特性,限制了外部空气与草莓果实之间的 O_2、CO_2 和水蒸气交换,从而保持了草莓的品质。另外,Pei 等研究表明,与聚乙烯膜相比,咖啡酸接枝壳聚糖/聚乳酸组装薄膜能有效降低双孢蘑菇褐变、呼吸速率和微生物诱导的衰变,激活抗氧化防御系统,降低丙二醛、O_2^- 和 H_2O_2 积累,从而减少氧化损伤,延缓双孢蘑菇衰老[60]。

4 供应链中生鲜果蔬品质劣变智能检测标签

4.1 pH 敏感型智能检测标签

近年来,基于 pH 变化的智能食品包装膜因其低成本、实时监测和便利性受到研究人员的广泛关注。它可以提供实时信号(如颜色变化),用于指示生鲜食品的新鲜度,以便让消费者了解食品状态。这种标签主要由两部分组成:随环境变色的指示剂和支持指示剂的载体。指示剂一般是敏感的合成色

素(甲基红、甲酚红、二甲酚、溴百里酚蓝、氯苯酚、溴甲酚绿/紫等)和从植物中提取的天然色素(花青素、类胡萝卜素、甜菜碱、茜素、姜黄素、萘醌等)[62]。生鲜果蔬受到其自身呼吸、微生物腐烂、快速失水和对冷害敏感性的影响[7],可能导致包装顶部空间气体成分体积分数发生变化,如 CO_2、O_2 和乙烯等。随着贮藏时间的延长,鲜切青椒包装中的 CO_2 体积分数增加,品质逐渐下降。Chen 等开发了一种以甲基红和溴百里酚蓝溶液为 pH 敏感的指示标签,通过标签的颜色变化表征 CO_2 体积分数,用于监测鲜切青椒的新鲜度[7]。Sakare 等将天然蒽醌染料–漆染料固定在滤纸上,开发一种智能型白金针菇实时保鲜指示剂,由于漆染料的固有特性,指示剂的颜色从橙红色(酸性 pH 值)变为紫色(碱性 pH 值)[63]。在新鲜度测试中,指示剂的视觉颜色变化将蘑菇分为 3 个阶段:“新鲜”“次新鲜”和“腐败”。Zong 等通过将紫甘薯多酚提取物负载到淀粉/明胶膜对金针菇新鲜度进行监测,随着金针菇贮藏后的变质,膜颜色由最初的绿色变为紫灰色,最后变为黄色[64],见图4(a)。

4.2 微生物敏感型智能检测标签

食用受病原体污染的食品已导致全球 6 亿人患食源性疾病和 42 万人死亡[65],因此,需要持续的、非破坏性的监测技术来识别和清除供应链中受病原体污染的食品。最近,通过检测微生物释放的挥发性有机化合物来鉴定病原体,重点是检测代谢生物标志物或非靶向代谢组学标志物[66]。通常代谢组学分析需要复杂或高成本的设备,如电子鼻、气质联用或液质联用,这些设备不适用于非破坏性供应链监测。以挥发性有机化合物为生物标记物的低成本比色阵列已被用于非破坏性鉴定单一培养的病原体。金属卟啉和 pH 指示剂可用于鉴定加工猪肉中常见的腐败致病菌[66]。Yang 等研究了一种通过机器学习实现的病原体识别系统[65],见图 4(b)。该系统使用了纸质显色阵列,纸质显色阵列由浸渍有 23 种显色染料和染料组合的纸质基底组成,这些染料在接触相关病原体释放的挥发性有机化合物时会发生颜色变化。这些颜色变化被数字化并用于训练多层神经网络,使其具有高准确度(91%~95%)的菌株特异性病原体识别和定量分析能力。该系统能够区分存活的大肠杆菌、大肠杆菌 O157:H7 和其他存活的病原体,并能同时识别鲜切莴苣和番茄上的大肠杆菌 O157:H7 和单核细胞增生李斯特菌。

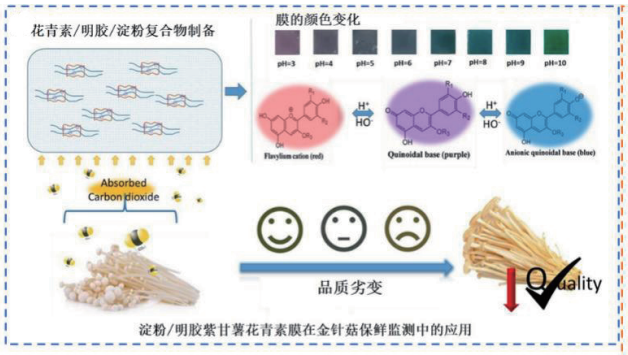
4.3 温度敏感型智能检测标签

生鲜果蔬在运输和贮存过程中容易受到温度的影响而变质,Chen 等研究了温度波动对番茄的影响[67],表明温度波动范围越大,果实的呼吸速率以及品质损失就越大,乙烯释放和颜色转变的速度就越快,从而在短时间内降低新鲜度。温度指示器可以记录温度历史,是附着在产品外包装上的视觉或电子标签,用于跟踪产品在贮存、运输和分销过程中所经历的温度变化,从而反映产品的新鲜度。Wanihsuksombat 等研究了 4 种基于乳酸的温度指示器[68],见图 4(c)。这些标签可以很好表征生鲜食品冷链运输过程中的温度变化。标签使用的材料对温度敏感,随着时间的延长,标签的颜色会发生不可逆的变化,消费者可以通过标签颜色的变化直观地评价产品的品质。根据测量温度范围,时间温度指示器分为:临界温度指示器、部分历史温度指示器和完全历史温度指示器。按照测量原理,温度指示器分为:扩散型指示器、聚合物型指示器、酶反应型指示器、微生物型指示器和光化学型指示器。Giannakourou 等开发了 2 种酶促温度指示器,C 型和 M 型[69],监测冷冻青豌豆和冷冻蘑菇的活化能值分别为 61.10 kJ/mol 和 99.50 kJ/mol,见图 4(d)。研究了冷冻青豌豆在不同贮藏温度下的颜色变化、维生素 C 质量分数和保水能力,活化能值分别为 79.20、136.80、92.50 kJ/mol。研究了冷冻蘑菇的颜色变化,活化能值为 155.10 kJ/mol。根据温度指示器建立的原则,当温度指示器活化能值与食品腐败的活化能值相差 25 kJ/mol 时,该温度指示器才能监测该食品。因此,两个温度指示器都不适合冷冻蘑菇品质监测。而对于青豌豆,只有保水能力才能更准确地与 M 型温度指示器的颜色变化相匹配。

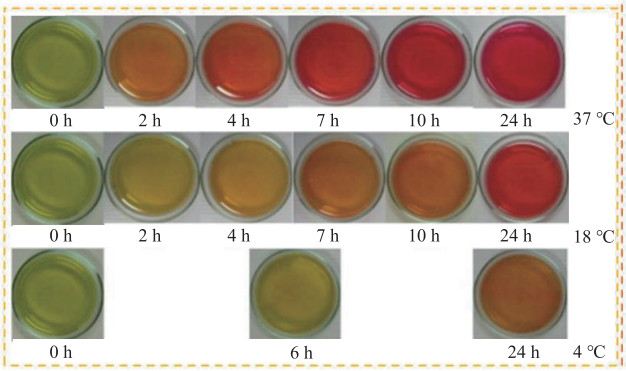
5 展 望

生鲜果蔬具有丰富的营养物质,由于其水分质量分数较高、对包括细菌和真菌病原体在内的微生物的易感以及易被食源性疾病相关的微生物的污染,加上自身代谢旺盛、衰老速度较快、采后损失高[71-72],因此需要有严格的质量保证体系和完善的采后管理措施。

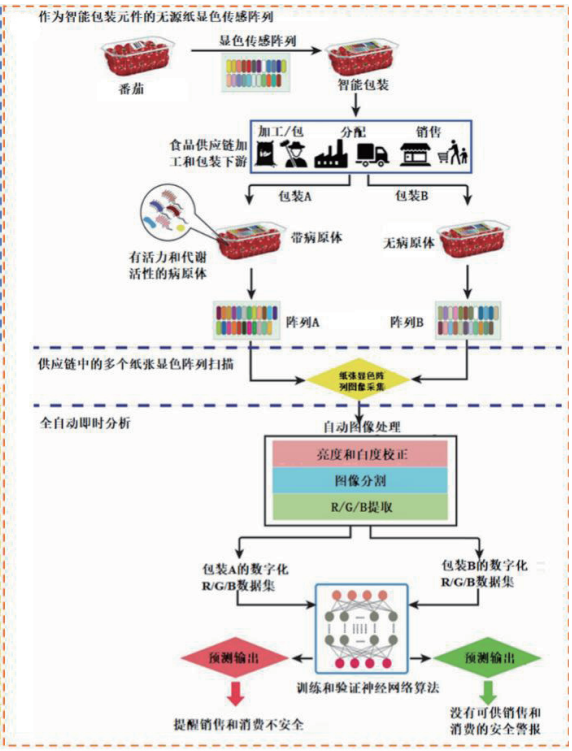
供应链中生鲜果蔬品质的保持必须从采摘开始,直至到达零售商或消费者的餐桌。在此过程中



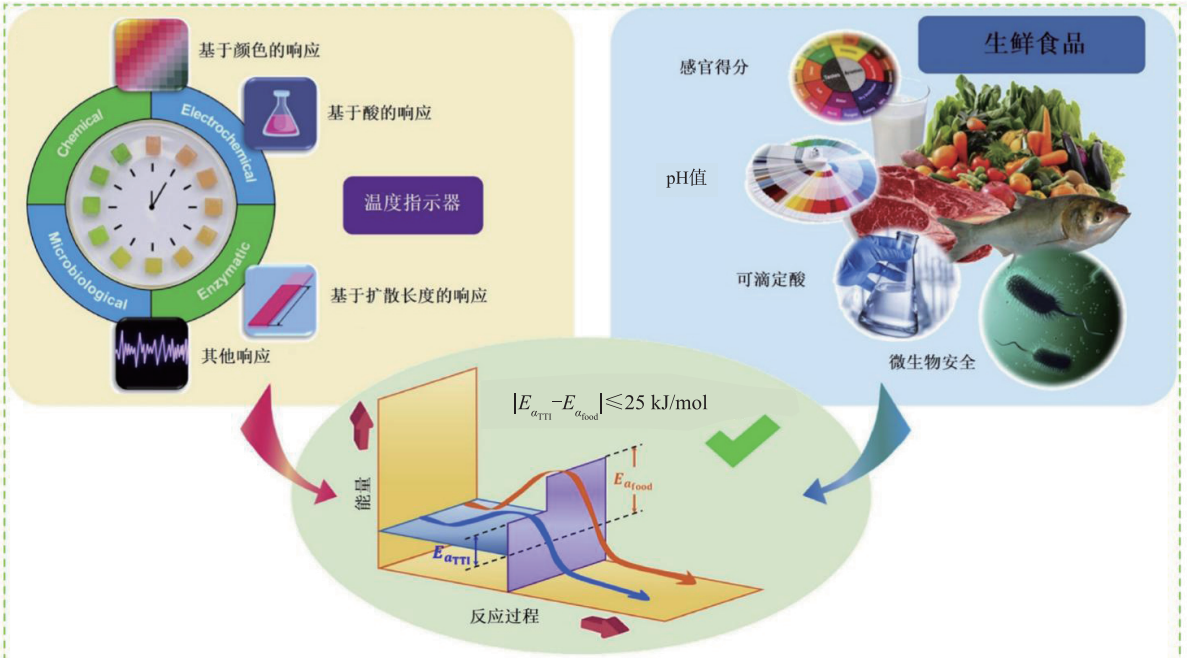
(a)天然色素膜在果蔬保鲜监测中的应用



(b)显色传感阵列在供应链中果蔬智能检测的应用



(c)基于乳酸的温度指示器在供应链中果蔬新鲜度监测的应用



(d)酶促温度指示器在供应链中果蔬新鲜度监测的应用

图 4 供应链中生鲜果蔬品质劣变智能检测[64-65,68,70]

Fig. 4 Intelligent detection of quality deterioration of fresh fruits and vegetables in the supply chain[64-65,68,70]

生鲜果蔬出现的霉变、萎蔫、褐变、软化、黄化等生理生化特性均会导致果蔬品质下降;而贮运环境的温度、湿度及气体成分的管理,则是该过程管理的关键。采用气调、高压静电场、低压静电场、脉冲电场、磁场、活性包装/涂层等多种共性管控策略,能抑制生鲜果蔬品质劣变,延长其货架期[73-74]。尽管文献涵盖了不同的采后共性管控技术,以保持生鲜果蔬在供应链中的新鲜度、生物活性物质的稳定性、抗

微生物和抗真菌特性以及质量安全，但在供应链中要开发强有力的工业导向技术来保持生鲜果蔬的品质，还有很长的路要走。此外，果蔬成熟的机制，包括糖和酸代谢、香气挥发物的产生以及植物生长调节剂在果蔬成熟中的作用，尚需在分子水平上鉴定和证实；收获成熟度阶段的优化、无损成熟度评估方法和各种果蔬生物活性图谱的开发需要从科学角度进行广泛研究。

参考文献：

[1] 陈童，张慜，陈晶晶. 超声波辅助渗透脱水处理及其对西兰花冻结品质的影响[J]. 食品与生物技术学报，2020，39(4)：33-40.
CHEN T，ZHANG M，CHEN J J. Optimization of ultrasonic-assisted osmotic dehydration and the influence on the quality of frozen broccoli[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**，2020，39(4)：33-40.（in Chinese）

[2] DUAN Y，WANG G B，FAWOLE O A，et al. Postharvest precooling of fruit and vegetables：a review[J]. **Trends in Food Science & Technology**，2020，100：278-291.

[3] DEFRAEYE T，SHRIVASTAVA C，BERRY T，et al. Digital twins are coming：will we need them in supply chains of fresh horticultural produce?[J]. **Trends in Food Science & Technology**，2021，109：245-258.

[4] SCHUDEL S，SHOJI K，SHRIVASTAVA C，et al. Solution roadmap to reduce food loss along your postharvest supply chain from farm to retail[J]. **Food Packaging and Shelf Life**，2023，36：101057.

[5] JOSHI K，TIWARI B，CULLEN P J，et al. Predicting quality attributes of strawberry packed under modified atmosphere throughout the cold chain[J]. **Food Packaging and Shelf Life**，2019，21：100354.

[6] 孔玲，张慜. 射频 - 热风联合杀菌对小包装胡萝卜丁品质的影响[J]. 食品与生物技术学报，2015，34(9)：943-948.
KONG L，ZHANG M. Impacts of RF-hot air sterilizing on the quality of carrots in a small package[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**，2015，34(9)：943-948.（in Chinese）

[7] CHEN H Z，ZHANG M，BHANDARI B，et al. Applicability of a colorimetric indicator label for monitoring freshness of fresh-cut green bell pepper[J]. **Postharvest Biology and Technology**，2018，140：85-92.

[8] WANG J Y，ZHANG M，GAO Z X，et al. Smart storage technologies applied to fresh foods：a review[J]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**，2018，58(16)：2689-2699.

[9] JOARDDER M U H，BROWN R J，KUMAR C，et al. Effect of cell wall properties on porosity and shrinkage of dried apple[J]. **International Journal of Food Properties**，2015，18(10)：2327-2337.

[10] LWIN H P，RUDELL D R，LEE J. Metabolism and cold chain performance of ‘Chuhwangbae’ Asian pears as impacted by 1-MCP treatment[J]. **Scientia Horticulturae**，2021，288：110357.

[11] LWIN H P，LEISSO R S，LEE J. Pre-storage temperature conditioning reduces cortex browning and cavity and alters organic，amino，and fatty acid metabolism in cold-stored ‘Chuhwangbae’ pears[J]. **Scientia Horticulturae**，2023，315：111989.

[12] BURDON J，PUNTER M，BILLING D，et al. Shrivel development in kiwifruit[J]. **Postharvest Biology and Technology**，2014，87：1-5.

[13] ZHANG L H，ZHANG M，LAW C L，et al. Effect of vibration and broken cold chain on the evolution of cell wall polysaccharides during fruit cucumber（*Cucumis sativus* L.）shriveling under simulated transportation[J]. **Food Packaging and Shelf Life**，2023，38：101126.

[14] WEI X P，XIE D D，MAO L C，et al. Excess water loss induced by simulated transport vibration in postharvest kiwifruit[J]. **Scientia Horticulturae**，2019，250：113-120.

[15] LI C Y，ZHU J，SUN L，et al. Exogenous γ-aminobutyric acid maintains fruit quality of apples through regulation of ethylene anabolism and polyamine metabolism[J]. **Plant Physiology and Biochemistry**，2021，169：92-101.

[16] VOGT T. Phenylpropanoid biosynthesis[J]. **Molecular Plant**，2010，3(1)：2-20.

[17] 王雷. 不同激发子处理对甜樱桃果实采后青霉病的抑制作用及其机理研究[D]. 南京：南京农业大学，2015.

[18] YU C，ZENG L Z，SHENG K，et al. γ-Aminobutyric acid induces resistance against *Penicillium expansum* by priming of defence responses in pear fruit[J]. **Food Chemistry**，2014，159：29-37.

[19] GUO M，LI C Y，HUANG R，et al. Ferulic acid enhanced resistance against blue mold of *Malus domestica* by regulating reactive

oxygen species and phenylpropanoid metabolism[J]. **Postharvest Biology and Technology**, 2023, 202: 112378.
[20] MHETRE V B, PATEL V B, SINGH S K, et al. Unraveling the pathways influencing the berry color and firmness of grapevine cv. flame seedless treated with bioregulators using biochemical and RNA-Seq analysis under semi-arid subtropics [J]. **Food Chemistry: Molecular Sciences**, 2022, 5: 100116.
[21] AIAMLA-OR S, NAKAJIMA T, SHIGYO M, et al. Pheophytinase activity and gene expression of chlorophyll-degrading enzymes relating to UV-B treatment in postharvest broccoli (*Brassica oleracea* L. *Italica* Group) florets[J]. **Postharvest Biology and Technology**, 2012, 63(1): 60-66.
[22] LIU R L, SHANG F C, NIU B, et al. Melatonin treatment delays the softening of blueberry fruit by modulating cuticular wax metabolism and reducing cell wall degradation[J]. **Food Research International**, 2023, 173: 113357.
[23] LIN Y F, LIN Y X, LIN H T, et al. Application of propyl gallate alleviates pericarp browning in harvested Longan fruit by modulating metabolisms of respiration and energy[J]. **Food Chemistry**, 2018, 240: 863-869.
[24] ZHANG S, LIN H T, LIN M S, et al. *Lasiodiplodia theobromae* (Pat.) Griff. & Maubl. reduced energy status and ATPase activity and its relation to disease development and pericarp browning of harvested Longan fruit[J]. **Food Chemistry**, 2019, 275: 239-245.
[25] CHEN Y Z, LIN H T, ZHANG H L, et al. Dicyclohexylcarbodiimide and disodium succinate regulate the browning development in fresh Longan pericarp by modulating the antioxidant system and the metabolisms of membrane lipids and phenolics [J]. **Postharvest Biology and Technology**, 2023, 203: 112388.
[26] SONG L Y, WANG Z G, WANG Z M, et al. Screening of cell wall-related genes that are expressed differentially during ripening of pears with different softening characteristics[J]. **Postharvest Biology and Technology**, 2016, 115: 1-8.
[27] TUCKER G, YIN X R, ZHANG A D, et al. Ethyleneand fruit softening[J]. **Food Quality and Safety**, 2017, 1(4): 253-267.
[28] POSÉ S, PANIAGUA C, CIFUENTES M, et al. Insights into the effects of polygalacturonase FaPG1 gene silencing on pectin matrix disassembly, enhanced tissue integrity, and firmness in ripe strawberry fruits[J]. **Journal of Experimental Botany**, 2013, 64(12): 3803-3815.
[29] 黄宇斐,乔勇进,刘晨霞,等. 气调对西兰花贮藏效果与品质的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(6):114-118.
HUANG Y F, QIAO Y J, LIU C X, et al. The effect of modified atmosphere on the storage efficiency and quality of broccoli [J]. **Food and Machinery**, 2017, 33(6):114-118.(in Chinese)
[30] HARPAZ-SAAD S, AZOULAY T, ARAZI T, et al. Chlorophyllase is a rate-limiting enzyme in chlorophyll catabolism and is posttranslationally regulated[J]. **The Plant Cell**, 2007, 19(3): 1007-1022.
[31] VAVILIN D V, VERMAAS W F J. Regulation of the tetrapyrrole biosynthetic pathway leading to heme and chlorophyll in plants and cyanobacteria[J]. **Physiologia Plantarum**, 2002, 115(1): 9-24.
[32] YAMAUCHI N, FUNAMOTO Y, SHIGYO M. Peroxidase-mediated chlorophyll degradation in horticultural crops [J]. **Phytochemistry Reviews**, 2004, 3(1): 221-228.
[33] RYBARCZYK-PLONSKA A, HAGEN S F, BORGE G I A, et al. Glucosinolates in broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) as affected by postharvest temperature and radiation treatments[J]. **Postharvest Biology and Technology**, 2016, 116: 16-25.
[34] PAL A, KANT K. Smart sensing, communication, and control in perishable food supply chain[J]. **ACM Transactions on Sensor Networks**, 2020, 16(1): 12-20.
[35] ZHONG X L, ZHANG M, TANG T T, et al. Advances in intelligent detection, monitoring, and control for preserving the quality of fresh fruits and vegetables in the supply chain[J]. **Food Bioscience**, 2023, 56: 103350.
[36] LUFU R, AMBAW A, OPARA U L. Water loss of fresh fruit: influencing pre-harvest, harvest and postharvest factors[J]. **Scientia Horticulturae**, 2020, 272: 109519.
[37] ARENDSE E, FAWOLE O A, OPARA U L. Influence of storage temperature and duration on postharvest physico-chemical and mechanical properties of pomegranate fruit and arils[J]. **CyTA - Journal of Food**, 2014, 12(4): 389-398.
[38] FAWOLE O A, OPARA U L. Effects of storage temperature and duration on physiological responses of pomegranate fruit [J]. **Industrial Crops and Products**, 2013, 47: 300-309.
[39] THERON J A. Moisture loss studies in Japanese plums (*Prunus salicina* Lindl.)[D]. Stellenbosch: Stellenbosch University, 2015.
[40] MUKAMA M, AMBAW A, BERRY T M, et al. Analysing the dynamics of quality loss during precooling and ambient storage of pomegranate fruit[J]. **Journal of Food Engineering**, 2019, 245: 166-173.

[41] 陈守江,王海鸥,张李阳. 果蔬平衡调湿包装设计及试验验证[J]. 农业工程学报,2014,30(19):309-315.
CHEN S J,WANG H O,ZHANG L Y. Design of equilibrium modified humidity package for postharvest fruits and vegetables and validation test[J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**,2014,30(19):309-315. (in Chinese)
[42] CHEN B,ZHANG M,CHEN H Z,et al. Progress in smart labels for rapid quality detection of fruit and vegetables:a review[J]. **Postharvest Biology and Technology**,2023,198:112261.
[43] 章潇天,张慜,过志梅. 超声波-气调联合处理对番茄、丝瓜混合贮藏保鲜效果的影响[J]. 食品与生物技术学报,2020,39(12):62-70.
ZHANG X T,ZHANG M,GUO Z M. Effect of ultrasound combined with modified atmosphere packaging on preservation quality of tomato and loofah mixed storage[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2020,39(12):62-70. (in Chinese)
[44] HUSSEIN Z,CALEB O J,OPARA U L. Perforation-mediated modified atmosphere packaging of fresh and minimally processed produce—a review[J]. **Food Packaging and Shelf Life**,2015,6:7-20.
[45] BELAY Z A,CALEB O J,OPARA U L. Influence of initial gas modification on physicochemical quality attributes and molecular changes in fresh and fresh-cut fruit during modified atmosphere packaging[J]. **Food Packaging and Shelf Life**,2019,21:100359.
[46] BELAY Z A,CALEB O J,OPARA U L. Impacts of low and super-atmospheric oxygen concentrations on quality attributes, phytonutrient content and volatile compounds of minimally processed pomegranate arils[J]. **Postharvest Biology and Technology**,2017,124:119-127.
[47] SALAMAT R,GHASSEMZADEH H R,RANJBAR F,et al. The effect of additional packaging barrier,air moment and cooling rate on quality parameters of button mushroom(*Agaricus bisporus*)[J]. **Food Packaging and Shelf Life**,2020,23:100448.
[48] CHANG C K,HOU C Y,CHENG K C,et al. Exploring the potential of alternative current electric field treatment for preservation and the tissue softening mechanism in *Pleurotus ostreatus*[J]. **Scientia Horticulturae**,2023,321:112284.
[49] XU C,ZHANG X Y,LIANG J,et al. Cell wall and reactive oxygen metabolism responses of strawberry fruit during storage to low voltage electrostatic field treatment[J]. **Postharvest Biology and Technology**,2022,192:112017.
[50] CHANG X J,LIANG Y G,SHI F,et al. Biochemistry behind firmness retention of jujube fruit by combined treatment of acidic electrolyzed water and high-voltage electrostatic field[J]. **Food Chemistry**,2023,19:100812.
[51] HU F F,QIAN S Y,HUANG F,et al. Combined impacts of low voltage electrostatic field and high humidity assisted-thawing on quality of pork steaks[J]. **LWT-Food Science and Technology**,2021,150:111987.
[52] GHOSHAL G. Comprehensive review on pulsed electric field in food preservation:gaps in current studies for potential future research[J]. **Heliyon**,2023,9(6):e17532.
[53] LIU F,YANG N,ZHANG L T,et al. Magnetic field delays the senescence of strawberries by maintaining energy state and regulating respiratory metabolism[J]. **Postharvest Biology and Technology**,2023,199:112282.
[54] ZHU C,ZENG X Y,CHEN L H,et al. Changes in quality characteristics based on protein oxidation and microbial action of ultra-high pressure-treated grass carp(*Ctenopharyngodon idella*) fillets during magnetic field storage[J]. **Food Chemistry**,2024,434:137464.
[55] WASAK A,DROZD R,JANKOWIAK D,et al. The influence of rotating magnetic field on bio-catalytic dye degradation using the horseradish peroxidase[J]. **Biochemical Engineering Journal**,2019,147:81-88.
[56] ZHAO S S,YANG Z,ZHANG L,et al. Effect of combined static magnetic field and cold water shock treatment on the physicochemical properties of cucumbers[J]. **Journal of Food Engineering**,2018,217:24-33.
[57] REN Y Y,SUN P P,WANG X X,et al. Degradation of cell wall polysaccharides and change of related enzyme activities with fruit softening in *Annona squamosa* during storage[J]. **Postharvest Biology and Technology**,2020,166:111203.
[58] ZHANG W L,JIANG H T,RHIM J W,et al. Effective strategies of sustained release and retention enhancement of essential oils in active food packaging films/coatings[J]. **Food Chemistry**,2022,367:130671.
[59] 石浩,张慜. 蛹虫草及其下脚料水提物联合壳聚糖涂膜对西葫芦保鲜效果的影响[J]. 食品与生物技术学报,2020,39(10):48-55.
SHI H,ZHANG M. Effect of water extract from *Cordyceps militaris* and its waste combined with chitosan coating on preservation of zucchini[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2020,39(10):48-55. (in Chinese)
[60] PEI F,HAN P,ZHOU Z C,et al. The characteristics of the film assembled by caffeic acid-grafted-chitosan/polylactic acid and its

effect on the postharvest quality of *Agaricus bisporus*[J]. **Food Packaging and Shelf Life**,2022,32:100828.

[61] YAN Y S,DUAN S Q,ZHANG H L,et al. Preparation and characterization of konjac glucomannan and pullulan composite films for strawberry preservation[J]. **Carbohydrate Polymers**,2020,243:116446.

[62] KANHA N,OSIRIPHUN S,RAKARIYATHAM K,et al. On-package indicator films based on natural pigments and polysaccharides for monitoring food quality:a review[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**,2022,102(15):6804-6823.

[63] SAKARE P,GIRI S K,MOHAPATRA D,et al. Lac dye-based intelligent colorimetric indicator for real-time freshness monitoring of packaged white button mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. **Postharvest Biology and Technology**,2023,206:112552.

[64] ZONG Z H,LIU M,CHEN H J,et al. Preparation and characterization of a novel intelligent starch/gelatin binary film containing purple sweet potato anthocyanins for *Flammulina velutipes* mushroom freshness monitoring[J]. **Food Chemistry**,2023,405:134839.

[65] YANG M Y,LIU X B,LUO Y G,et al. Machine learning-enabled non-destructive paper chromogenic array detection of multiplexed viable pathogens on food[J]. **Nature Food**,2021,2(2):110-117.

[66] HUANG X W,ZOU X B,SHI J Y,et al. Determination of pork spoilage by colorimetric gas sensor array based on natural pigments[J]. **Food Chemistry**,2014,145:549-554.

[67] CHEN L,PAN Y,LI H,et al. Constant temperature during postharvest storage delays fruit ripening and enhances the antioxidant capacity of mature green tomato[J]. **Journal of Food Processing and Preservation**,2020,44(11): e14831.

[68] WANIHSUKSOMBAT C,HONGTRAKUL V,SUPPAKUL P. Development and characterization of a prototype of a lactic acid-based time-temperature indicator for monitoring food product quality[J]. **Journal of Food Engineering**,2010,100(3):427-434.

[69] GIANNAKOUROU AND M C,TAOUKIS P S. Systematic application of time temperature integrators as tools for control of frozen vegetable quality[J]. **Journal of Food Science**,2002,67(6):2221-2228.

[70] GAO T T,TIAN Y,ZHU Z W,et al. Modelling,responses and applications of time-temperature indicators (TTIs) in monitoring fresh food quality[J]. **Trends in Food Science & Technology**,2020,99:311-322.

[71] 张雨宸,谢晶. LED 光照灭菌技术在果蔬保鲜加工中的应用及其研究[J]. 食品与机械, 2019,35(8):155-160.
ZHANG Y C, XIE J. The application and research of LED light sterilization technology in fruit and vegetable preservation processing[J]. **Food and Machinery**, 2019,35(8): 155-160.(in Chinese)

[72] 徐春蕾,王佳,李长洪,等. 气调包装对混合鲜切果蔬保鲜效果的影响[J]. 食品与机械, 2020,36(7):131-135.
XU C L, WANG J, LI C H, et al. The effect of modified atmosphere packaging on the preservation of mixed fresh cut fruits and vegetables[J]. **Food and Machinery**, 2020,36(7):131-135.(in Chinese)

[73] 巫梅婷,陈于陇,戚英伟,等. 室温下不同电商包装对荔枝保鲜效果的比较[J]. 现代食品科技, 2022,38(7):177-183.
WU M T, CHEN Y L, QI Y W, et al. Comparison of the freshness preservation effect of different E-commerce packaging on litchi at room temperature[J]. **Modern Food Technology**, 2022,38(7): 177-183.(in Chinese)

[74] 郑楚瑶,张司南,吴元斌,等. 不同非热加工技术对百香果果浆杀菌效果及品质变化的比较[J]. 现代食品科技, 2023, 39(1): 205-212.
ZHENG C Y, ZHANG S N, WU Y B, et al. Comparison of sterilization effects and quality changes of passion fruit pulp using different non thermal processing techniques[J]. **Modern Food Technology**, 2023, 39(1): 205-212.(in Chinese)