

生鲜果蔬物流及包装技术与展望

邵海燕^{1,2,3,4}, 杨海龙⁵, 陈杭君^{1,2,3,4}, 吴伟杰^{1,2,3,4}

(1. 浙江省农业科学院 食品科学研究所, 浙江 杭州 310021; 2. 浙江省农业科学院 农业农村部果品产后处理重点实验室, 浙江 杭州 310021; 3. 浙江省农业科学院 中国轻工业果蔬保鲜与加工重点实验室, 浙江 杭州 310021; 4. 浙江省农业科学院 浙江省果蔬保鲜与加工技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310021; 5. 温州大学 生命与环境科学学院, 浙江 温州 325035)

摘要: 生鲜果蔬是人们膳食结构的基本组成,在国民经济发展中占有重要的战略地位。然而,生鲜果蔬在物流过程中存在保质期短、营养流失严重等难题,难以满足产业快速发展及人们对高品质生活的需求。作者从生鲜果蔬动态物流保鲜的视角,从采后预冷技术、物流包装材料与技术、蓄冷与保温技术、物流过程品质监测技术等方面,全面综述了国内外生鲜果蔬物流及包装技术的研究现状和科技前沿,并对未来的研究趋势进行了展望,旨为生鲜果蔬物流与包装技术的科技创新和产业发展提供参考。

关键词: 生鲜果蔬;冷链物流;包装材料;研究展望

中图分类号:TS 255 文章编号:1673-1689(2020)08-0001-09 DOI:10.3969/j.issn. 1673-1689.2020.08.001

Progress and Prospect of Logistics and Preservation Technology on Fresh Fruit and Vegetables

GAO Haiyan^{1,2,3,4}, YANG Hailong⁵, CHEN Hangjun^{1,2,3,4}, WU Weijie^{1,2,3,4}

(1. Institute of Food Science, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 2. Key Laboratory of Post-Harvest Handling of Fruits, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhejiang Academy of Agricultural Science, Hangzhou 310021, China; 3. Key Laboratory of Postharvest Preservation and Processing of Fruits and Vegetables, China National Light Industry, Zhejiang Academy of Agricultural Science, Hangzhou 310021, China; 4. Key Laboratory of Fruits and Vegetables Postharvest and Processing Technology Research of Zhejiang Province, Zhejiang Academy of Agricultural Science, Hangzhou 310021, China; 5. School of Life & Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

Abstract: Fresh fruit and vegetables are the basic components in people's daily diet, and play an important strategic role in the development of national economy. However, fresh fruit and vegetables are perishable, causing many problems during the logistics process, such as limited shelf life, high loss rate and serious quality deterioration, which are difficult to meet the rapid development of the industry and people's demand for high-quality life. Based on the perspective of dynamic logistics preservation of fresh fruit and vegetables, the research progress and frontier development of domestic and foreign fresh fruit and vegetable logistics and packaging technology are comprehensively

收稿日期: 2020-05-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0401304);国家自然科学基金面上项目(31772042)。

作者简介: 邵海燕(1958—),女,博士,研究员,博士研究生导师,主要从事食品物流保鲜加工与品质控制方面的研究。

E-mail: spsghy@163.com

reviewed including post-harvest pre-cooling technology, logistics packaging materials and technology, cold storage and thermal insulation technology, quality monitoring technology during logistics process, and so on. The future prospect of research trend is also summarized, aiming to provide reference for scientific and technological innovation and industrial development of logistics packaging technology on fresh fruits and vegetables.

Keywords: fresh fruit and vegetables, cold-chain logistics, packaging materials, progress and prospect

生鲜果蔬在膳食结构中占有重要地位,是人们日常消费的主要组成部分,采后损失(Postharvest losses)是实现新鲜农产品可持续供应的一个主要障碍,并影响着食品安全,特别是在转型期国家,大约40%的果蔬采收后却最终无法食用。我国是果蔬生产大国,据农业农村部统计,2016年全国蔬菜总产量达70 780万t,水果28 351万t^[2]。然而,果蔬类农产品生产具有地域性和季节性,一般生产周期较长而采摘期较短,表现为短期内集中上市,除少量在产地被消费外,绝大多数要进入流通环节,满足其他地区人们的需求。由于生鲜果蔬本身的生物学特性,极易出现失水萎蔫、营养流失、色泽和质构劣变、腐败微生物繁殖等现象,保质期短,容易腐烂,在物流过程中营养品质和商品价值极易受损。据统计,我国生鲜果蔬采后损失超过20%。生鲜果蔬类农产品的物流保鲜技术是实现其保质减损和农业可持续发展的重要路径和必然趋势,也是实现供应链安全的基本保障。同时,随着经济的迅速发展和生活水平的提高,人们对生鲜食品的消费已由传统的数量化、贫乏型向现代的质量化、多元化转变,对食品的新鲜度和安全性等要求越来越高^[2-3]。通过科技创新驱动生鲜果蔬物流技术的提升,是实现其产后减损增效、提升产品物流商品性、满足食品高质量消费、延伸农业产业链、提高国内外市场竞争力的重要举措。作者系统综述了国内外生鲜果蔬采后物流及包装相关技术的最新研究成果,并对未来研究趋势进行了展望。

1 预冷技术

温度是影响生鲜果蔬采后品质和货架期的关键因子,适宜的贮藏温度是延缓果蔬采后品质劣变最重要的方法。生鲜果蔬新陈代谢旺盛,采后自身的呼吸作用、蒸腾作用会造成水分损失和营养物质消耗,加速果蔬的成熟衰老,最终导致果蔬品质和鲜度下降,甚至变质、萎蔫、腐烂。采后迅速进行预

冷,随后保持最佳温度,可显著减少生鲜果蔬在物流过程中的质量损失,延长保质期^[4]。例如将蓝莓的预冷时间从16 h减少到2 h,可显著降低后续贮藏过程中的失重和软化^[5];杨梅在充分预冷后(果心温度达0℃),物流配送过程中能维持果实较好的感官品质及硬度,膜脂过氧化程度较低^[6];荔枝经预冷(10~13℃)处理后,在低温运输(8 h)和贮藏(15 d)过程中果皮相对电导率上升幅度小,细胞膜完整性得以保持,总可溶性固形物和总酸含量降低程度小,维生素C含量一直保持较高水平^[7];经预冷处理(13℃,22 h)的小黄瓜,在随后的物流储藏过程中果肉硬度、外观品质、VC含量均显著优于未经预冷处理的对照样品^[8]。同时,预冷还可以减少冷藏运输设备的制冷负荷。王宝刚等研究表明,甜樱桃经5℃预冷处理20 h后,采用常温物流运输12 h果箱内中部温度仍可维持在5~10℃^[9]。

目前我国普遍采用冷库自然预冷,预冷时间长(一般需要10 h以上);采用先进的预冷设备进行批量预冷,如冷水(冰水)预冷、压差预冷、强制通风预冷和真空预冷等,可以缩短预冷时间在1 h以内,在保持生鲜果蔬品质和降低预冷成本方面更加有效^[10]。颜丽萍等比较了预冷方式对塑料箱包装青花菜预冷速度的影响,结果表明,冷库预冷速度为0.094℃/min,而压差预冷可以达到0.232℃/min,冷却效率明显提高^[11]。另外,冷水预冷能增加湿度,Manganaris等研究表明,采用冷水预冷处理樱桃,可明显延迟樱桃的衰老与劣变,降低樱桃褐变率,减少表面皱缩和延长货架期^[12]。当然,通过优化果蔬包装箱子的设计及其堆垛方式可以提高预冷的效率。Defraeye等采用计算流体力学(CFD)研究了包装箱内的橘子之间以及不同堆垛高度的包装箱之间冷却速度和冷却均匀性的差异,结果表明,与强制通风冷气相比,低气流速度不仅会导致水果冷却变慢,而且各个水果之间和不同高度的箱子之间的冷却不均匀性也更大;同时,包装箱堆垛之间的间隙

会使气流回转,导致水果冷却速度大大降低,提出了提升垂直气流和减少堆垛之间的气流回路操作方式,可以替代柑橘类水果运输前的强制通风预冷^[13]。

2 物流包装材料与技术

2.1 新型包装材料

包装可以保护果蔬在物流、贮藏过程中不受外部生物、化学和物理因素的影响,目前与果蔬直接接触的包装主要由聚乙烯(polyethylene, PE)、聚氯乙烯(Polyvinyl chloride, PVC)、聚丙烯(polypropylene, PP)等石油基高分子材料制成。近年来,为了减少环境污染,提高包装对果蔬的保护作用,具有抗菌功能和生物来源的新型包装材料越来越受到人们的重视^[14]。

抗菌包装材料分两类:一类是本身具有抗菌活性的高分子化合物,如生物相容性良好的壳聚糖和 ϵ -赖氨酸。壳聚糖通过与金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)和白色念珠菌(*Candida albicans*)等菌的细胞结合,使其发生钾离子和三磷酸腺苷 ATP 的渗漏,达到抑菌的效果^[15],经改性的壳聚糖用于果蔬包装不仅抗细菌,而且可显著抑制灰葡萄孢(*Botrytis cinerea*)等真菌,有效延长货架期^[16]; ϵ -赖氨酸抗菌谱广,作用机制主要是破坏细菌的结构,对沙门氏菌(*Salmonella typhimurium*)、李斯特菌(*Listeria monocytogenes*)、大肠杆菌(*Escherichia coli* O157:H7)、铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)、金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)等病原菌均有良好的效果,对 *E. coli* 和 *S. aureus* 的最小抑菌浓度为 12.5 $\mu\text{g/mL}$ ^[17],对 *L. monocytogenes* 的最小抑菌浓度为 0.1 mg/mL ^[18];另一类抗菌包装材料是将金属类、植物精油类、酚类、溶菌酶、抗菌肽等抑菌剂通过物理包埋或化学键连接的方式与传统包装材料相结合,通过其接触果蔬或缓慢挥发释放等方式抑制微生物的生长。Azlin-Hasim 等以商用低密度聚乙烯(low-density polyethylene, LDPE)膜为基材,采用逐层沉积乙烯亚胺(PEI)和聚丙烯酸(PAA)聚合物涂层并交联纳米银(Ag)离子制备抗菌膜,对革兰氏阳性菌和阴性菌均有很强的抑制作用^[19];Li 等采用钛酸酯交联剂修饰纳米 TiO_2 粒子,然后与 LDPE 混合,挤出成膜法制备含 1% TiO_2 的 TiO_2 -LDPE 膜包装草莓,与普通 LDPE 膜包装袋相比,在 14 d 贮藏(4 $^{\circ}\text{C}$)过程中草莓的腐烂率显著降低^[20];Muriel-

Galet 等在聚丙烯膜表面涂布一层含有牛至精油(oregano essential oil)的乙烯-乙醇共聚物,用于包装果蔬沙拉,4 $^{\circ}\text{C}$ 贮藏 1 d 后,与对照相比,大肠杆菌、总需氧细菌、乳酸菌、真菌的数量分别减少了 1.38、1.08、1.77、0.67 lg (CFU/g),有效地提高食品安全^[21];Manukumar 等采用光交联技术,制备了肉桂醛-LDPE 包装膜用于包装葡萄果实,贮藏 10 d 后,金黄色葡萄球菌 MRSA 090 的数量从 (7.89 ± 0.18) lg (CFU/g)减少至 (2.97 ± 0.31) lg (CFU/g),具有显著的抑菌活性^[22];Orsuwan 等将核黄素(riboflavin)与 LDPE 树脂混合制备 Riboflavin-LDPE 光敏膜,核黄素的添加量为 5%时,复合膜的抗菌活性最好,对大肠杆菌(*E. coli*)和金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)的抑制率分别达 99%和 94%^[23]。

生物源包装材料根据其来源可以分为 3 类:1)利用可再生的单体化合物经聚合反应而成,如聚乳酸;2)采用特定微生物发酵生物合成,如聚赖氨酸、聚苹果酸、聚羟基脂肪酸;3)从动植物材料中分离制备,如纤维素、壳聚糖、海藻多糖、淀粉、果胶、明胶、大豆蛋白。这些生物聚合物(Biopolymer)来源广、可生物降解、绿色环保,很多种类还具有可食性,但是在可塑性、力学性和阻隔性能等方面较差,限制了其在食品包装中的应用,通过热处理、射线辐照、化学改性、添加增塑剂等物理化学方法可有效提升其包装性能^[24-25]。 γ 射线(剂量 24 kGy)处理含 1.5%的槐豆胶的玉米淀粉,可显著促进聚合物间的交联,制成的膜抗拉强度从 9.41 MPa 提升至 13.59 MPa,抗水解性和水汽渗透性均显著下降^[26];采用 0.15%的戊二醛蒸汽交联改性大豆蛋白-明胶复合膜,抗拉强度超过 3 400 MPa^[27];Saurabh 等通过响应面优化确定在瓜尔胶中添加 0.88%的 Tween-80、1.21%经辐照的蜂胶、13.91%的甘油、3.07%的纳米粘土 nanofil-116,制成的膜抗拉强度可达 122 MPa,水汽透过率降低至 69 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,有效地提升了膜的性能^[28]。

生物基材料中结合抗菌活性成分制备抗菌包装能有效抑制微生物的生长,可显著提升物流贮藏过程生鲜果蔬的品质。Marrez 等采用酚还原法制备银纳米粒子,按质量分数 0.05%的比例加入醋酸纤维素制备的薄膜对常见的食源性致病菌(蜡样芽孢杆菌 *Bacillus cereus*、金黄色葡萄球菌 *S. aureus*、大肠杆菌 *E. coli* O157、铜绿假单胞菌 *P. aeruginosa*、荧

光假单胞菌 *P. fluorescens*、肺炎克雷伯菌 *Klebsiella pneumoniae* 等)有显著的抑菌作用^[29];以甘油为增塑剂制备嵌合辣椒素(capsaicin)的结冷胶-壳聚糖薄膜,经 5 h 的接触后 7 lg (CFU/g)的大肠杆菌被全部杀灭^[30];Salmieri 等将牛至精油作为抗菌剂加入聚乳酸-纳米纤维素复合薄膜用于蔬菜包装,接种 3 lg (CFU/g)李斯特菌(*L. monocytogenes*)研究该膜的抑菌活性,在 4 ℃下贮存 14 d 后,细菌数量低于检测限^[31]。

2.2 减振包装技术

物流运输过程不可避免地会产生振动,不仅会造成新鲜果蔬机械损伤,还会影响其生理代谢。许时星等的研究表明,振动胁迫加速蓝莓果实贮藏期内好果率、硬度及维生素 C 含量的下降,使花色苷、总酚含量达到峰值时间缩短,加剧细胞膜结构的破坏,促进超氧化物歧化酶(SOD)活性增大,明显加速了果实商品性的丧失^[32];振动会显著影响草莓色泽、硬度、可溶性固形物和总酸的含量^[33],也会加速苹果品质的劣变,导致失重率、可溶性固形物含量、CO₂和乙烯产生量的上升,降低硬度^[34]。一般来说,振动时间越长对果蔬的品质影响越大,但不同品种间差异较大,在振动时间相同的条件下,豆芽、茄子外观严重受损,质地变软,汁液流失严重,对碰撞及摩擦耐力较弱,而莲藕仅色泽上有褐变^[35]。果蔬在运输卡车中的装载位置与其所受机械损伤的风险密切相关,装载在卡车上部的梨受损程度要大于车厢下部^[32];Fernando 等通过研究香蕉长途运输(3 300 km)发现,在同一堆垛中,顶层香蕉受损程度最高,底层居中,中层损伤程度最低^[36];Acican 等模拟运输过程中振动的机械作用力及其对苹果损伤的影响,结果表明,运输中产生的力会导致水果受损,从而缩短保质期,同一包装内作用于底部苹果上的机械力比上层大,而水平冲击力对下层、中层和上层苹果的总影响相似,在包装的所有表面添加吸力材料,可以减小苹果损伤^[37]。在香蕉长距离运输过程中,垫衬聚苯乙烯泡沫塑料板可将机械损伤从 26.3%降至 12.9%,同时可有效地减少失重、维持硬度和色泽^[38];Ertan 等比较了在公路运输过程中,不同包装(薄聚丙乙烯盒、厚聚丙乙烯盒和纸板箱)的无花果所受到的机械损伤情况,结果表明薄聚丙乙烯盒包装的无花果所受损伤最小,适宜作为运输包装^[39]。通过优化包装箱的设计也可以减小运输过程中振动所导

致的损伤,Fadiji 等采用两种规格的瓦楞纸板箱 MK4(495 mm×326 mm×266 mm)和 MK6(395 mm×293 mm×272 mm)包装苹果,结果表明,MK4 具有较好的长/高比,在振动频率相同的情况下,包装的苹果所受振动损伤要远小于 MK6^[40]。

3 蓄冷与保温技术

3.1 蓄冷技术

物流贮藏过程中维持生鲜果蔬在相应的低温环境是保证其品质与安全的关键,冷链物流是冷链体系的重点。蓄冷技术可有效地提高能源利用效率,与冷链物流相结合不但节能,而且在外界温度突然升高或周期性波动时可以维持果蔬冷藏环境的稳定^[41]。其中研究和应用最广泛的蓄冷技术是利用物质相态变化进行吸-放热,重点在于高性能相变材料的开发。许多有机、无机、生物基相变材料的相变温度在食品冷链物流所需的温度范围内,最常用的相变材料包括脂肪酸、石蜡、水合盐、共晶体等^[42]。将不同的相变材料复合能极大地提高蓄冷和使用性能,在 KCl 溶液加入 1% SiO₂ 和 0.1% CuS 能较好地减少溶液的过冷现象^[43];戚晓丽等以有机物甘露醇(C₆H₁₄O₆)水溶液作为主储能剂、无机物氯化钾(KCl)水溶液为相变温度调节剂,确定当 C₆H₁₄O₆ 与 KCl 溶液的浓度比为 0.6:0.2,且水溶液体积按 1:1 混合时,该复合物的相变潜热可达 290 J/g^[44];贾蒲悦等研发了一种由三羟甲基丙烷(TMP)、氯化铵(NH₄Cl)和水组成的新型有机-无机复合相变蓄冷材料,确定最佳配比为 1.0:2.0:7.0,相变潜热可达 251.4 kJ/kg^[45]。在蓄冷剂中加入导电物质可有效地提升其传热性能,在 1%的丙烯酸钠水溶液中加入 0.1%的多壁碳纳米管,热导率提升了 19.17%^[46];贾蒲悦等在三羟甲基丙烷/氯化铵/水组成的复合相变蓄冷剂中添加 0.4%的纳米 TiO₂,热导率增大至 0.81 W/(m·K)^[45];Song 等采用真空渗透法将相变材料十二烷均匀地填充在膨胀石墨(Expanded graphite,EG)的孔隙结构中,EG 的最佳添加量为 16%,热导率较对照提高了 15 倍^[47]。大多数相变材料在室温条件下是液态的,很难将它们直接融入到包装结构和冷藏设备中,微胶囊技术可以用成膜材料把固体或液体包覆形成微小的粒子,微胶囊化可以防止相变物质与周围环境反应、控制相转变时的体积变化、防止泄漏、增加传热、使用方便^[42]。Singh

等人以玉米醇溶蛋白为壁材,采用超声辅助技术成功地将相变材料十四烷和氯化钾微胶囊化,平均直径为13 950 nm,热稳定性良好,相变潜热为107 J/g^[48]; Han等以正十四烷(n-tetradecane)为芯材、脲醛树脂为壁材制备微胶囊相变材料,确定最佳芯/壁材的比率为5.5:1,相变潜热达194.1 J/g,可用于冷链运输^[49]。

3.2 隔热技术

保温在果蔬冷链物流过程中不可或缺,可以降低制冷能耗、保持果蔬物流微环境温度的稳定。张博等研究表明,20 cm厚度的保温棉配套1:6蓄冷剂可满足樱桃番茄3~4 d低温冷链物流运输的要求,果品品质优良^[50]。目前运用于果蔬冷链物流外包装和冷藏运输车的保温材料主要是聚苯乙烯、聚氨酯等泡沫材料,采用泡沫箱加冰袋可显著降低荔枝果实的呼吸强度和相对电导率、减缓荔枝可溶性固形物、可滴定酸及VC含量的下降,保持较好的果实感官品质^[51]。为了提高泡沫材料的隔热性能,可以填充碳氟化合物等具有低导热系数的绝缘气体(约为0.012 W/(m·K)),但这些气体会污染环境,而且容易从材料中逸出。使用含碳材料作为添加剂可以制备结构独特的纳米复合泡沫材料,实现低导电性。Gong等掺入1%的多层碳纳米管,制备的聚苯乙烯发泡材料导热系数低至0.030 W/(m·K)^[52]。

石油基的发泡材料降解困难,容易造成环境污染,研发生物基材料是当今保温材料的发展趋势。研究人员成功地以植物油、木质素、甘蔗渣、玉米淀粉等为原料合成了聚氨酯^[53];淀粉是最常见的可再生资源,淀粉基泡沫材料具有良好的隔热性能^[54],但脆性大、吸水性强,添加增塑剂(甘油等)、甘蔗纤维、芦笋皮、玉米醇溶蛋白、棉纤维、花生衣等可有效地改善其性能^[55]。聚乳酸是生物高分子化合物,但发泡性能较差。Wang等将硅烷改性玻璃纤维(GF)与聚乳酸复合显著提高了其发泡性能,在膨胀率为20倍情况下,加入10% GF后,泡沫材料的抗压强度和模量分别提高了44.8%和92.0%,导热系数为0.031 4 W/(m·K)^[56];还可利用鸡羽毛生产羽毛纤维,然后将鸡毛纤维加工成衬垫,制成负载空气的无纺布-鸡毛纤维复合垫,该复合垫的保温效果与发泡聚氨酯相当^[57]。

真空绝热板是理想的保温材料^[46],但其优良的隔热性能是建立在保证真空度的基础上,使用受

限。气凝胶(Aeroge)具有纳米多孔结构,粒径在1~20 nm,孔径在2~50 nm,孔隙率可达90%,导热系数极低^[58]。Li等制备的强化二氧化硅气凝胶,在芳纶纤维添加量为1.5%~6.6%时,导热系数为 $(0.022\ 7 \pm 0.000\ 7)\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[59]。SiO₂气凝胶应用于在冷藏车保温厢体能够提高厢板的隔热性能,减少冷藏车制冷机组的工作时间,实现节能降耗^[60]。利用生物基材料制备气凝胶更加环境友好,Wang等以魔芋葡甘露聚糖、马铃薯淀粉、结冷胶和小麦秸秆为原料,通过溶胶-凝胶-冷冻干燥法制备的生物基气凝胶,正交优化确定各组分最佳添加量为1%、2%、0.5%和1.5%,所得气凝胶导热系数为0.046 4 W/(m·K)^[61]。

4 物流过程品质监测技术

在长距离的冷链运输过程中温度变化很大,而且冷藏车不同部位温度亦存在差异^[61],势必影响生鲜果蔬的感官品质、理化成分和微生物指标。Cao等模拟商业运输条件,分析不同运输温度对椪柑腐烂率和品质的影响。结果表明,随运输温度的升高,椪柑的腐烂率上升、总酸下降^[62];Zeng等研究了美国不同州之间,袋装沙拉在冷链物流过程中温度变化以及大肠杆菌O157:H7和李斯特杆菌的增殖情况,确定温度的波动会增加这些病原微生物繁殖的几率^[63]。目前,温湿度传感器已被广泛应用于监测生鲜果蔬物流过程的温湿度,基于相关模型可以推断部分果蔬的潜在货架期^[64]。为了掌握物流过程中生鲜果蔬品质的动态变化,开发实时监测技术是果蔬物流保鲜研究的重要内容。

4.1 挥发性代谢产物的分析

物流过程很难通过取样进行离线分析,开发气体传感器监测生鲜果蔬代谢导致的气体含量变化是掌握果蔬品质的重要手段。生鲜果蔬的代谢会消耗O₂、产生CO₂,利用近红外二氧化碳传感器可以实时了解果蔬的代谢情况^[65]。乙烯是一种与水果成熟相关的气体植物激素,不仅水果成熟会释放出乙烯,而且机械损伤或昆虫攻击等胁迫也会促使成熟的果实释放乙烯,而香蕉这类跃变型水果,其未成熟状态可以保持很长时间,但一旦开始成熟,其过程就很难被终止直至腐烂^[66]。Wills等的研究表明,香蕉物流过程中品质的变化与乙烯体积分数密切相关。3 000 km的公路运输过程中,14℃条件下,乙烯体积分数在0.90 μL/L范围内可以保持青香蕉的

品质^[67];电催化传感器、非色散红外光谱等是监测物流过程乙烯体积分数变化最有前景的方法^[66]。苹果物流过程中会代谢产生乙醛、乙烯、乙醇等气体物质,Vergara 等采用集成的金属氧化物(MOX)传感器微阵列监测苹果物流中相关气体,传感器基板由采用微系统技术制造的集成 4 个元件的微热板组成,每个气体传感器阵列包括 4 个不同的厚膜金属氧化物层(由铂、钨掺杂的锡、钨氧化物制备而成),微阵列内的各个传感器的结构都包括气敏层、叉指电极、绝缘层和多晶硅加热器,它们都堆叠在 0.2 μm 厚的 Si_3N_4 膜上,用于监测苹果物流过程中乙醛、乙烯、乙醇和氨的浓度准确率达 100%,定性测定时间只需 9.5 s,定量测定需 39 s^[68]。

生物传感技术在食品运输中的应用刚刚起步,但有局限性,只有与之接触的水果被微生物感染时才能触发警报,探针取样存在障碍;更可行的方法是检测腐败微生物的气体代谢产物,La Scalia 等基于草莓储运过程中的质量与其主要腐败微生物产生的挥发性有机化合物间的关系,提出了采用挥发性有机成分传感器在线监测生鲜果蔬冷链物流过程中质量变化^[69];并将挥发性有机成分传感器 MiCS-5524、温度传感器 MCP9700A、湿度传感器 808H5V5、二氧化碳传感器 TGS4161 集成,开发了智能物流单元(Smart logistic unit),以草莓为研究对象,建立了挥发性有机物与细菌生长之间的关系模型以及通过分析挥发性成分浓度预测产品剩余货架期的可靠数学模型^[70]。

4.2 果蔬品质的无损检测

基于分子泛频峰和组合振动的可见光/近红外光谱(Vis/NIR spectroscopy)可以呈现 CH、OH 和 NH 等官能团性质和数量的重要生化信息,通过 Vis/NIR 光谱可以获得目标物的典型光谱特征或光谱指纹^[71],可用于综合分析农产品采后加工过程中颜色、化学成分、微生物含量等主要特征的变化^[72]。近红外光谱分析技术具有快速、非破坏性和无污染等特点,十分适合于流通领域果蔬的品质监测。Wu 等将采收的番茄置于模拟运输的振动装置,测定番茄样品可见光/近红外光谱的变化,采用扩展的倍增散射校正(extended multiplicative scatter correction)、

一阶导数(the first derivative)和标准正态变异结合去趋势(standard normal variant combined with detrending)等方法减少潜在变量数和降低残差,确定 600~1 600 nm 的波长区域最适于预测振动对番茄组织的影响,可见光/近红外光谱结合化学计量学的方法可用于监测模拟运输振动水平对番茄组织的损伤情况^[73];陈晓宇等研究了鲜食葡萄物流过程中质构与 NIR 间的关系,基于 NIR 的鲜食葡萄质构检测模型验证准确度达到 0.81,可用于鲜食葡萄货架期预测和物流过程安全管理。

5 展 望

随着我国人民的消费模式逐渐向多元化方向发展,特别是电商物流等新业态的出现,人们对生鲜食品的供应和品质也提出了更高要求。近年来,我国在生鲜果蔬物流及包装技术研究方面取得了较大进展,然而其物流过程的损耗仍然严重,难以满足产业快速发展及人们日益增长对高品质生活的需求。随着学科交叉、产业科技融合的不断扩展和深入,生鲜果蔬物流及包装技术与开发正呈现出新的时代趋势和需求。

1) 加强生鲜果蔬物流保鲜生物学基础理论研究。生鲜食品种类繁多,表现为生物表征多样化、品质劣变个性化、技术措施差异化,需综合应用植物生理学、分子生物学、生物化学、组学技术明确生鲜食品的品质劣变机理,解析外源环境条件和内源因子的调控机制,为果蔬采后减损降耗和品质维持核心技术的革新奠定基础。

2) 开发环境友好、智能、高效的生鲜果蔬物流保鲜新材料。将纳米材料技术、生物技术与智能技术结合,研发绿色防腐保鲜、环境友好的活性智能新包装;开发新型高效相变储冷材料以及减振、隔热新材料,有效降低生鲜果蔬冷链物流的能耗。

3) 构建安全高效的生鲜果蔬全程冷链物流保鲜新技术。针对生鲜果蔬易腐劣变的特性,研发基于微生物生态群落的采后精准防腐技术以及基于关键靶基因的颠覆性保鲜技术,创新物流过程品质监测技术,减少物流损失,保持生鲜果蔬的营养和高品质。

参考文献:

- [1] MACHEKA L, SPELT E, VAN DER VORST J G I J, et al. Exploration of logistics and quality control activities in view of context characteristics and postharvest losses in fresh produce chains; a case study for tomatoes[J]. **Food Control**, 2017, 77: 221-234.
- [2] 陈晓宇, 张小栓, 朱志强, 等. 基于 NIR 的鲜食葡萄物流过程安全系统[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(10): 3154-3158.
- [3] 张松涛, 张盼盼, 张敏. 基于冷链物流的荔枝质量安全控制研究[J]. 保鲜与加工, 2018, 18(2): 114-119, 124.
- [4] DO NASCIMENTO NUNES M C, NICOMETO M, EMOND J P, et al. Improvement in fresh fruit and vegetable logistics quality: berry logistics field studies[J]. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, 2014, 372: 20130307.
- [5] TETTEH M K, PRUSSIA S E, NESMITH D S, et al. 2004 Modelling blueberry firmness and mass loss during cooling delays and storage[J]. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 2004, 47: 1121-1127.
- [6] 朱麟, 凌建刚, 尚海涛. 不同包装方式对模拟物流配送杨梅品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2016, 16(1): 87-90.
- [7] 李秋月, 龙桂英, 巴良杰, 等. 不同物流条件对荔枝采后贮藏期间果实品质的影响[J]. 广东农业科学, 2014(16): 96-99, 111.
- [8] 郭晓萌, 唐妮萍, 丁晓春, 等. 预冷及包装对水果小黄瓜物流的保鲜效果[J]. 广东农业科学, 2016(2): 111-115.
- [9] 王宝刚, 李文生, 侯玉茹, 等. 甜樱桃物流及气调箱贮藏期间的品质变化[J]. 果树学报, 2014, 31(5): 953-958.
- [10] 方净, 吴建毅, 杨富华. 果蔬预冷及冷链物流中外对比研究[J]. 冷藏技术, 2016(1): 16-18.
- [11] 颜丽萍, 刘升, 饶先军. 预冷、冷藏运输和销售方法对青花菜品质的影响[J]. 食品与机械, 2012, 28(2): 174-176, 218.
- [12] MANGANARIS G A, ILIAS I F, VASILAKAKIS M, et al. The effect of hydrocooling on ripening related quality attributes and cell wall physicochemical properties of sweet cherry fruit (*Prunus avium* L.) [J]. **International Journal of Refrigeration**, 2007, 30(8): 1386-1392.
- [13] DEFRAEYE T, CRONJÉ P, VERBOVEN P, et al. Exploring ambient loading of citrus fruit into reefer containers for cooling during marine transport using computational fluid dynamics[J]. **Postharvest Biology and Technology**, 2015, 108: 91-101.
- [14] 邰海燕, 陈杭君, 穆宏磊, 等. 生鲜食品包装材料研究进展[J]. 中国食品学报, 2015, 15(10): 1-10.
- [15] 陈威, 吴清平, 张菊梅, 等. 壳聚糖抑菌机制的初步研究[J]. 微生物学报, 2008, 48(2): 164-168.
- [16] MIN T, ZHU Z, SUN X, et al. Highly efficient antifogging and antibacterial food packaging film fabricated by novel quaternary ammonium chitosan composite[J]. **Food Chemistry**, 2020, 308: 125682.
- [17] LI Y Q, HAN Q, FENG J L, et al. Antibacterial characteristics and mechanisms of ϵ -poly-lysine against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* [J]. **Food Control**, 2014, 43: 22-27.
- [18] LIN L, GU Y, LI C, et al. Antibacterial mechanism of ϵ -poly-lysine against *Listeria monocytogenes* and its application on cheese [J]. **Food Control**, 2018, 91: 76-84.
- [19] AZLIN-HASIM S, CRUZ-ROMERO M C, CUMMINS E, et al. The potential use of a layer-by-layer strategy to develop LDPE antimicrobial films coated with silver nanoparticles for packaging applications[J]. **Journal of Colloid and Interface Science**, 2016, 461: 239-248.
- [20] LI D, YE Q, JIANG L, et al. Effects of nano-TiO₂-LDPE packaging on postharvest quality and antioxidant capacity of strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.) stored at refrigeration temperature[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 2017, 97: 1116-1123.
- [21] MURIEL-GALET V, CERISUELO J P, LÓPEZ-CARBALLO G, et al. Evaluation of EVOH-coated PP films with oregano essential oil and citral to improve the shelf-life of packaged salad[J]. **Food Control**, 2013, 30: 137-143.
- [22] MANUKUMAR H M, UMESHA S. Photocrosslinker technology: an antimicrobial efficacy of cinnamaldehyde cross-linked low-density polyethylene (Cin-C-LDPE) as a novel food wrapper[J]. **Food Research International**, 2017, 102: 144-155.
- [23] ORSUWAN A, KWON S, BUMBUDSANPHAROKE N, et al. Novel LDPE-riboflavin composite film with dual function of broad-spectrum light barrier and antimicrobial activity[J]. **Food Control**, 2019, 100: 176-182.
- [24] SAURABH C K, GUPTA S, BAHADUR J, et al. Mechanical and barrier properties of guar gum based nano-composite films[J]. **Carbohydrate Polymers**, 2015, 124: 77-84.
- [25] KHALIL H P S A, BANERJEE A, SAURABH C K, et al. Biodegradable films for fruits and vegetables packaging application: Preparation and properties[J]. **Food Engineering Reviews**, 2018, 10: 139-153.
- [26] KIM J K, JO C, PARK H J, et al. Effect of gamma irradiation on the physicochemical properties of a starch-based film[J]. **Food Hydrocolloids**, 2008, 22(2): 248-254.

- [27] 石云娇,张华江,吕雪鹏,等. 交联方式对大豆蛋白复合膜机械性能及微观结构的影响[J]. 中国食品学报,2017,17(11):138-144.
- [28] SAURABH C K, GUPTA S, VARIYAR PS, et al. Effect of addition of nanoclay, beeswax, tween-80 and glycerol on physicochemical properties of guar gum films[J]. **Industrial Crops and Products**, 2016, 89: 109-118.
- [29] MARREZ D A, ABDELHAMID A E, DARWESH OM. Eco-friendly cellulose acetate green synthesized silver nano-composite as antibacterial packaging system for food safety[J]. **Food Packaging and Shelf Life**, 2019, 20: 100302.
- [30] ZHAO J, WEI F, XU W, et al. Enhanced antibacterial performance of gelatin/chitosan film containing capsaicin loaded MOFs for food packaging[J]. **Applied Surface Science**, 2020, 30: 145418.
- [31] SALMIERI S, ISLAM F, KHAN RA, et al. Antimicrobial nanocomposite films made of poly (lactic acid)-cellulose nanocrystals (PLA-CNC) in food applications-part B: effect of oregano essential oil release on the inactivation of *Listeria monocytogenes* in mixed vegetables[J]. **Cellulose**, 2014, 21: 4271-4285.
- [32] 许时星, 邵海燕, 陈杭君, 等. 振动胁迫对蓝莓果实品质和抗氧化酶活性的影响[J]. 林业科学, 2017, 53(9): 26-34.
- [33] LA SCALIA G, AIELLO G, MICELI A, et al. Effect of vibration on the quality of strawberry fruit caused by simulated transport [J]. **Journal of Food Process Engineering**, 2016, 39: 140-156.
- [34] JUNG H M, PARK J G. Effects of vibration stress on the quality of packaged apples during simulated transport[J]. **Journal of Biosystems Engineering**, 2012, 37(1): 44-50.
- [35] 赵芸, 马少博, 胡云峰, 等. 运输过程中振动对蔬菜品质的影响[J]. 天津农业科学, 2018, 24(5): 75-79.
- [36] FERNANDO I, FEI J, STANLEYR. Measurement and analysis of vibration and mechanical damage to bananas during long-distance interstate transport by multi-trailer road trains[J]. **Postharvest Biology and Technology**, 2019, 158: 110977.
- [37] ACICAN T, ALIBAS K, ÖZELKÖ K I S. Mechanical damage to apples during transport in wooden crates[J]. **Biosystems Engineering**, 2007, 96(2): 239-248.
- [38] WASALA W M C B, DHARMASENA D A N, DISSANAYAKE C A K, et al. Feasibility study on styrofoam layer cushioning for banana bulk transport in a local distribution system[J]. **Journal of Biosystems Engineering**, 2015, 40(4): 409-416.
- [39] ERTAN B, SENKAYAS H, TUNCAY Ö. Postharvest logistics performance of fresh fig varieties in Turkey [J]. **Scientia Horticulturae**, 2019, 257: 108769.
- [40] FADIJI T, COETZEE C, CHEN L, et al. Susceptibility of apples to bruising inside ventilated corrugated paperboard packages during simulated transport damage[J]. **Postharvest Biology and Technology**, 2016, 118: 111-119.
- [41] BOUCIGUEZ A, LARA M A. On the behavior of phase change materials with sudden change or periodic oscillation in the external temperature conditions[J]. **Journal of Food Processing and Preservation**, 2010, 34: 807-819.
- [42] SINGH S, GAIKWAD K K, LEE Y S. Phase change materials for advanced cooling packaging[J]. **Environmental Chemistry Letters**, 2018, 16: 845-859.
- [43] 李婷, 潘欣, 应铁进. 食品相变蓄冷剂的配方优化及应用[J]. 中国食品学报, 2011, 11(4): 115-122.
- [44] 戚晓丽, 朱冰清, 牟望舒, 等. 用于冷链运输的复合相变蓄冷剂主储能剂研制[J]. 中国食品学报, 2015, 15(10): 86-90.
- [45] 贾蒲悦, 武卫东, 王益聪, 等. 新型复合低温相变蓄冷材料的研制及热物性优化[J]. 化工学报, 2019, 70(7): 2758-2765.
- [46] XU X, ZHANG X, LIU S. Experimental study on cold storage box with nanocomposite phase change material and vacuum insulation panel[J]. **International Journal of Energy Research**, 2018, 42: 4429-4438.
- [47] SONG Y, ZHANG N, JING Y, et al. Experimental and numerical investigation on dodecane/expanded graphite shape-stabilized phase change material for cold energy storage[J]. **Energy**, 2019, 189: 116175.
- [48] SINGH S, GAIKWAD K K, LEE M, et al. Microwave-assisted micro-encapsulation of phase change material using zein for smart food packaging applications[J]. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 2018, 131: 2187-2195.
- [49] HAN P, LU L, QIU X, et al. Preparation and characterization of macrocapsules containing microencapsulated PCMs (phase change materials) for thermal energy storage[J]. **Energy**, 2015, 91: 531-539.
- [50] 张博, 李喜宏, 张新, 等. 樱桃番茄简约冷链物流蓄冷保温参数研究[J]. 食品工业, 2018, 39(3): 193-197.
- [51] 蒋依辉, 黄泽鹏, 刘伟, 等. 电商物流包装贮运对‘翡翠’荔枝贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(18): 249-254.
- [52] GONG P, WANG G, TRAN M P, et al. Advanced bimodal polystyrene/multi-walled carbon nanotube nanocomposite foams for thermal insulation[J]. **Carbon**, 2017, 120: 1-10.

- [53] AGRAWAL A,KAUR R,WALIA R S. PU foam derived from renewable sources:perspective on properties enhancement:An overview[J]. **European Polymer Journal**,2017,95:255-274.
- [54] ARIF S,BURGESS G,NARAYAN R,et al. Evaluation of a biodegradable foam for protective packaging applications [J]. **Packaging Technology and Science**,2007,20:413-419.
- [55] MACHADO C M,BENELLI P,TESSARO I C. Study of interactions between cassava starch and peanut skin on biodegradable foams[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,2020,147:1343-1353.
- [56] WANG J,CHAI J,WANG G,et al. Strong and thermally insulating polylactic acid/glass fiber composite foam fabricated by supercritical carbon dioxide foaming[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,2019,138:144-155.
- [57] DIECKMANN E,NAGY B,YIAKOUMETTI K,et al. Thermal insulation packaging for cold-chain deliveries made from feathers [J]. **Food Packaging and Shelf Life**,2019,21:100360.
- [58] HE Y L,XIE T. Advances of thermal conductivity models of nanoscale silica aerogel insulation material [J]. **Applied Thermal Engineering**,2015,81:28-50.
- [59] LI Z,CHENG X,HE S,et al. Aramid fibers reinforced silica aerogel composites with low thermal conductivity and improved mechanical performance[J]. **Composites;Part A**,2016,84:316-325.
- [60] 任俊生,任鹏远,文润双,等. 气凝胶绝热材料在冷藏车保温厢体中的应用探究[J]. 专用汽车,2019(3):66-69.
- [61] WANG Y,WU K,MIAO M,et al. Thermal conductivity,structure and mechanical properties of konjac glucomannan/starch based aerogel strengthened by wheat straw[J]. **Carbohydrate Polymers**,2018,197:284-291.
- [62] CAO J,WANG C,XU S,et al. The effects of transportation temperature on the decay rate and quality of postharvest Ponkan (*Citrus reticulata* Blanco) fruit in different storage periods[J]. **Scientia Horticulturae**,2019,247:42-48.
- [63] ZENG W,VORST K,BROWN W,et al. Growth of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* in packaged fresh-cut romaine mix at fluctuating temperatures during commercial transport,retail storage,and display[J]. **Journal of Food Protection**,2014,77:197-206.
- [64] JEDERMANN R,GEYER M,PRAEGER U,et al. Sea transport of bananas in containers - parameter identification for a temperature model[J]. **Journal of Food Engineering**,2013,115(3):330-338.
- [65] LANG W,JEDERMANN R. What can MEMS do for logistics of food? intelligent container technologies:a review[J]. **IEEE Sensors Journal**,2016,16(18):6810-6818.
- [66] JANSSEN S,SCHMITT K,BLANKE M,et al. Ethylene detection in fruit supply chains[J]. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**,2014,372:20130311.
- [67] WILLS R B H,HARRIS D R,SPOHR L J,et al. Reduction of energy usage during storage and transport of bananas by management of exogenous ethylene levels[J]. **Postharvest Biology and Technology**,2014,89:7-10.
- [68] VERGARA A,RAMIREZ JL,LLOBET E. Reducing power consumption via a discontinuous operation of temperature-modulated micro-hotplate gas sensors:application to the logistics chain of fruit[J]. **Sensors and Actuators B**,2008,129:311-318.
- [69] LA SCALIA G,AIELLO G,MICELIA,et al. Effect of vibration on the quality of strawberry fruit caused by simulated transport [J]. **Journal of Food Process Engineering**,2016,39:140-156.
- [70] LA SCALIA G,NASCA A,CORONAO,et al. An innovative shelf life model based on smart logistic unit for an efficient management of the perishable food supply chain[J]. **Journal of Food Process Engineering**,2017,40:e12311.
- [71] ALBRECHT R,JOFFRE R,GROS R,et al. Efficiency of near-infrared reflectance spectroscopy to assess and predict the stage of trans-formation of organic matter in the composting process[J]. **Bioresource Technology**,2008,99:448-455.
- [72] GIOVANELLI G,SINELLI N,BEGHI R,et al. NIR spectroscopy for the optimization of postharvest apple management [J]. **Postharvest Biology and Technology**,2014,87:13-20.
- [73] WU G,WANG C. Investigating the effects of simulated transport vibration on tomato tissue damage based on vis/NIR spectroscopy[J]. **Postharvest Biology and Technology**,2014,98:41-47.
- [74] 姚军,耿新丽,郑贺云,等. 新疆哈密瓜冷链物流体系温湿度监控及保鲜调控[J]. 江苏农业科学,2018,46(15):158-161.