

振动胁迫对果蔬采后生理品质影响的研究进展

熊思国, 蒋旭, 彭丽, 姜爱丽, 胡文忠

(大连民族大学 a.生命科学学院 b.生物技术与资源利用教育部重点实验室, 辽宁 大连 116600)

摘要: **目的** 讨论振动胁迫对果蔬采后生理品质的影响, 为降低振动胁迫造成的巨大损耗提供科学见解和研究思路。**方法** 综述国内外果蔬振动胁迫的相关文献, 总结振动胁迫的成因、影响因素、研究方法、对果蔬品质的影响, 以及应对措施。**结果** 振动胁迫程度受到多种因素的影响, 国内外的主要研究方法为实际运输实验和模拟运输实验。振动胁迫会造成果蔬采后生理品质的下降, 包括外观、质地、风味和相关生理代谢。使用物理技术、化学技术和生物技术来减小直接作用于果蔬的振动, 对于提高果蔬抗性、降低果蔬对振动的敏感度都是行之有效的应对措施。**结论** 振动胁迫会导致果蔬采后生理品质的劣变, 应积极研究应对措施, 特别是提高果蔬自身抗振动胁迫的能力, 以减轻振动胁迫对果蔬采后品质的影响, 从而降低果蔬在运输过程中的损耗。

关键词: 振动胁迫; 果蔬; 生理品质; 机械损伤

中图分类号: TS255.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)07-0128-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.07.015

Advances in Research on Effects of Vibration Stress on Postharvest Physiological Quality of Fruits and Vegetables

XIONG Si-guo, JIANG Xu, PENG Li, JIANG Ai-li, HU Wen-zhong

(a. College of Life Science b. Key Laboratory of Biotechnology and Resource Utilization,
Ministry of Education, Dalian Minzu University, Liaoning Dalian 116600, China)

ABSTRACT: The work aims to discuss the effects of vibration stress on postharvest physiological quality of fruits and vegetables and provide scientific insights and research ideas to reduce the significant losses caused by vibration stress. A literature review on vibration stress in fruits and vegetables at home and abroad was presented to summarize the causes, influencing factors, research methods, effects on fruit and vegetable quality and countermeasures of vibration stress. The degree of vibration stress was affected by a combination of factors, and the main research methods used at home and abroad were actual and simulated transport. Vibration stress could cause postharvest physiological degradation of fruits and vegetables, including changes in appearance, texture, flavor and associated physiological and metabolic changes. The use of physical, chemical and biological techniques to reduce the direct effects of vibration on fruit and vegetables, to improve their resistance or to reduce their sensitivity to vibration were all effective countermeasures. Vibration stress can lead to postharvest physiological quality deterioration of fruits and vegetables. Countermeasures should be actively researched, especially in improving the resistance of fruits and vegetables to vibration stress, to mitigate the effects of vibration stress on the postharvest quality of fruits and vegetables and thus reduce the loss of fruits and vegetables during transportation.

KEY WORDS: vibration stress; fruits and vegetables; physiological quality; mechanical damage

收稿日期: 2022-08-10

基金项目: 甘肃省科技计划重大项目 (21ZD4NA016-02)

作者简介: 熊思国 (1999—), 男, 硕士生, 主攻采后生物学与技术。

通信作者: 姜爱丽 (1971—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为采后生物学与技术。

果蔬是人们日常生活必需的食物, 它为人提供日常所需的营养物质^[1]。据统计, 2020 年我国蔬菜和水果的产量分别为 74 912.90 万 t 和 28 692.36 万 t, 出口占比分别为 27.56%和 11.58%^[2]。我国采用的果蔬运输方式多为公路运输, 由振动、挤压、碰撞等带来的机械损伤会对果蔬造成巨大的损耗^[3]。据估计, 在运输过程中, 我国果蔬的损耗率高达 25%~45%, 而发达国家的损耗率仅为 2%~23%^[4-5]。如何降低果蔬在运输过程中的损耗, 保持其商品性, 是亟待解决的问题。目前, 国内外学者普遍认为振动是造成果蔬损耗的主要原因^[6-11], 因此了解振动胁迫的成因、机制及其影响, 并系统地制定控制措施显得非常重要^[12]。文中在收集相关文献的基础上, 讨论振动胁迫的成因、影响因素、研究方法, 以及对果蔬品质劣变的影响, 并提出缓解果蔬品质劣变的技术措施。

1 振动胁迫

1.1 成因和影响机制

在运输过程中, 道路与车辆悬架系统的相互作用会引发振动胁迫。具体而言, 果蔬受到由动态力、静态力和振荡力所组成的周期性力的作用^[10], 会发生撞击、磨损、挤压和振动损伤, 导致其组织变形或破裂^[13-15]。当果蔬所受的周期性力超过生物屈服点, 即达到使果蔬表面发生应变所需应力的阈值时, 会在短时间内破坏果蔬的细胞结构, 形成直观的机械损伤(外伤、表面伤)^[16]。即使该周期性力小于生物屈服点, 但随着运输时间的延长, 周期性力的反复作用会使果蔬组织发生疲劳损伤(内伤、延迟损伤)^[4], 如图 1 所示。近年来, 我国物流体系和道路建设发展迅速, 在运输过程中造成的机械损伤明显减少, 但由振动胁迫引起的一系列果蔬生理品质劣变和延迟损伤是当前造成果蔬损耗的重要原因。

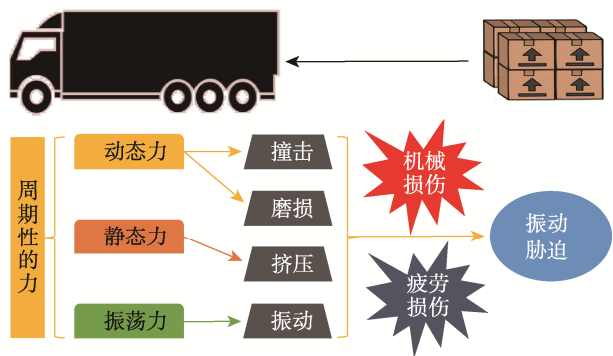


图 1 果蔬振动胁迫的成因和影响机制
Fig.1 Causes and effect mechanisms of vibrational stress in fruits and vegetables

1.2 影响振动胁迫的主要因素

果蔬的振动胁迫程度与诸多因素有关, 按照实际

运输流程, 主要分为 3 类: 第 1 类为振动前因素, 包括但不限于果蔬类型、品种、成熟度和包装材料等; 第 2 类为振动过程因素, 主要与路程(振动时间)、振动水平(振动频率、加速度、振幅)、行驶速度、车辆类型(悬挂及车轴数量等)、摆放位置、堆叠条件、贮藏温湿度等诸多因素有关; 第 3 类为振动后因素, 主要包括采后处理技术, 可影响果蔬的振动敏感性和相关抗性。在果蔬实际运输及之后的贮藏过程中, 以上 3 类因素共同作用, 直接或间接地影响果蔬的振动胁迫程度, 其中引起振动胁迫变化的关键性因素是运输过程中的振动水平。

2 研究方法

目前, 国内外学者主要通过实际运输实验和模拟运输实验来研究振动对果蔬采后生理品质的影响。列举了部分果蔬受到振动胁迫的相关研究, 所用的方法和变量因素见表 1。

表 1 研究果蔬受到振动胁迫的方法和变量因素
Tab.1 Research methods and variable factors of vibration stress in fruits and vegetables

对象	方法	变量因素	参考文献
柑橘	模拟运输	振动时间、包装材料	[1]
	实际运输	路程、摆放位置	
哈密瓜	模拟运输	路况	[3]
猕猴桃	模拟运输	果实成熟度、振动频率、振动时间	[4]
草莓	模拟运输	果实品种、堆叠条件	[5]
香蕉	实际运输	摆放位置、堆叠高度、包装材料	[6, 8]
柿子	模拟运输	振动频率	[10]
梨	模拟运输	包装材料	[11]
枸杞	模拟运输	振动时间	[17]
尖椒	模拟运输	采后处理技术	[18]
西兰花	模拟运输	采后处理技术	[19]
圆椒	模拟运输	采后处理技术	[20]
双孢菇	模拟运输	包装材料	[21]

2.1 实际运输

实际运输实验旨在研究运输过程中振动水平的不同因素之间的关系, 并将这些因素与果蔬产品质量的变化和损害联系起来^[15]。实际运输实验在现场环境中进行, 农产品在卡车或类似的运输工具中装载, 并以运输实验前后互为对照, 研究运输过程对果蔬品质的影响。这种方法可在振动参数与农产品质量变化之间建立直接的因果关系, 但主要限于在单次运输过程中收集数据。

2.2 模拟运输

基于实际运输往往不能满足重复性实验的需求,出于对实验变量的单一化控制,模拟运输实验是在实验室开展研究,需要利用标准振动曲线或有限频率的已知振动强度来驱动振动台^[15]。与实际运输过程中,各因素的相互作用有所不同,模拟运输是在实际运输研究的基础上,选择一些关键影响因素作为变量,通过人为控制这些变量因素来细化研究振动胁迫。通过设置定频或非定频参数(如振动频率、振动加速度、振动时间等)来模拟实验,使果蔬受到与实际振动相仿的振动信号,从而对果蔬造成类似实际运输的效果,这些实验有助于确定已知振动影响因素对新鲜果蔬生理变化的影响^[17-21]。实际运输和模拟运输的示意图,以及2种实验方法的优缺点如图2所示^[6, 12]。

3 振动胁迫会降低果蔬采后品质

外观、质地和风味是果蔬重要的品质属性,影响着消费者对商品的接受度和感官评价。振动胁迫会刺激果蔬发生应激反应,加快其品质劣变。高强度的振动胁迫会对果蔬造成机械伤害,甚至引起微生物感染,导致果蔬腐败变质。列举了振动胁迫对部分果蔬

的研究内容,包括主要测定指标和品质劣变表现,见表2。

3.1 果蔬外观品质

新鲜果蔬的外观是消费者与商品建立的第一道联系,良好的外观品质能吸引消费者,使消费者更愿意消费。然而,振动胁迫会降低新鲜果蔬的外观品质,甚至发生一些消费者所厌恶的颜色变化,影响果蔬的适销性。褐变是果蔬常见的一种外观品质劣变现象,当果蔬受到振动胁迫后,会造成细胞损伤,引发不同程度的褐变^[31]。Tao等^[22]模拟了振动对香菇品质的影响,研究发现,经过4 h的振动,香菇在长达12 d的贮藏期间其褐变指数(browning index, BI)和丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量显著高于未振动组样品。陈代良等^[21]和Yan等^[23]通过双孢菇的模拟振动实验发现,振动胁迫会加剧双孢菇的褐变程度,其亮度 L^* 下降。主要原因是振动后香菇细胞膜的完整性降低,发生了膜脂过氧化作用,并具有较高的多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)和过氧化物酶(peroxidase, POD)活性,酶促褐变加快。Dantas等^[32]研究发现,模拟振动的振动时间会影响桃果肉的褐变程度,并影响其PPO活性。以上报道说明,振动胁迫对果蔬细胞组织造成的损伤会加快果蔬的褐变,缩短其货架期。

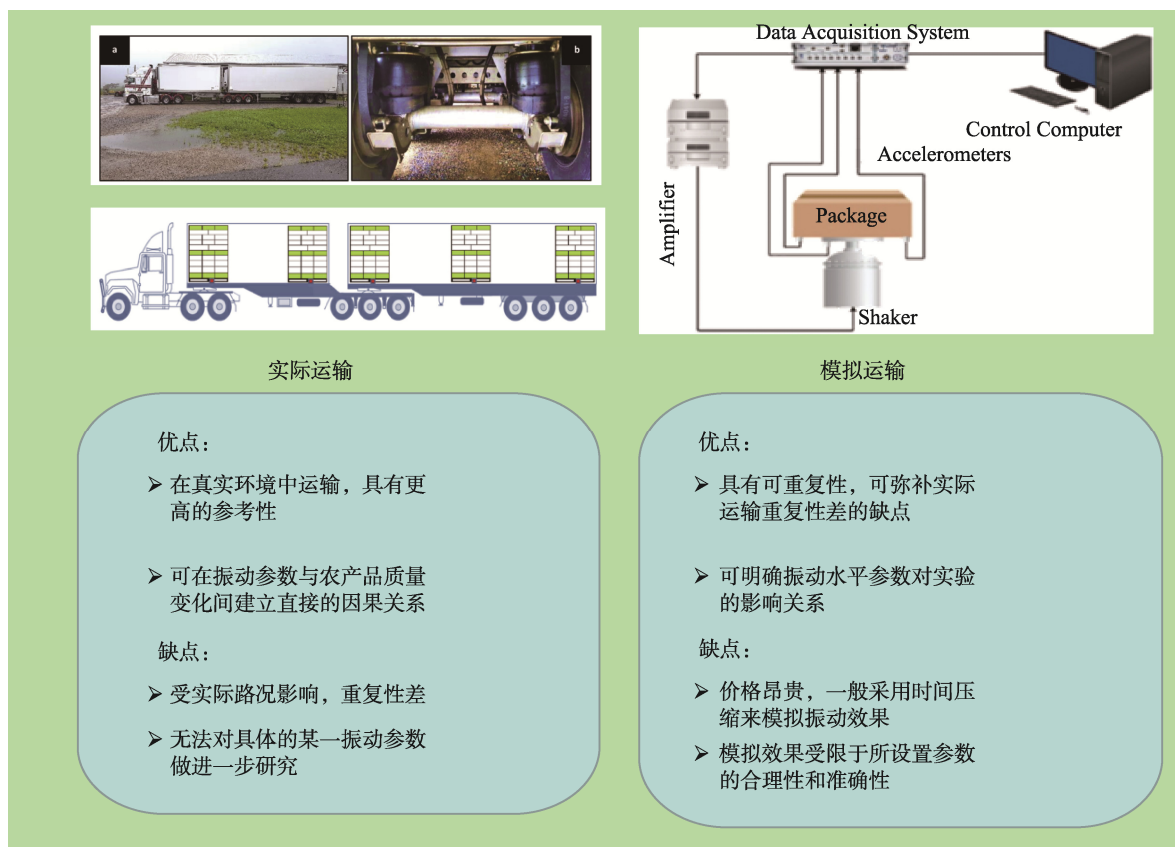


图2 实际运输与模拟运输实验的示意图及优缺点^[6, 12]
Fig.2 Schematic diagram and advantages and disadvantages of actual and simulated transport experiments^[6, 12]

表 2 振动胁迫降低果蔬采后品质的相关研究
Tab.2 Different studies on reduction of postharvest quality of fruits and vegetables by vibration stress

对象	主要测定指标	振动胁迫造成的品质劣变	参考文献
桃子	损伤指数、腐烂率、质量损失率、硬度	瘀伤、腐烂、失水、硬度下降	[9]
香菇	呼吸速率、质量损失率、BI、硬度、MDA	呼吸速率增强、失水、褐变、硬度下降、膜脂损伤	[22]
双孢菇	相对电导率、MDA、H ₂ O ₂ 、CAT、SOD、超微结构	细胞膜完整性降低、褐变、膜脂过氧化、细胞自溶	[23]
西兰花	感官评价、色差、叶绿素代谢酶及基因表达	黄化、膜脂损伤、衰老	[24]
芒果	转黄率、病斑指数、水分含量、果胶含量	黄化、黑斑、失水、软化	[25]
猕猴桃	失重率、超微结构、水分含量、电解质泄露测定	失水、细胞损伤、质壁分离、电解质泄露	[26]
青椒	色泽、硬度、营养物质含量、电解质泄露测定	失绿、硬度下降、膜脂损伤、营养物质流失	[27]
杏	损伤指数	瘀伤	[28]
蓝莓	腐烂率、呼吸强度、营养物质含量、挥发性风味物质含量	腐烂、呼吸强度增加、营养物质流失、风味改变, 醇类增加, 酯类减少	[29]
苹果	挥发性风味物质含量、LOX 代谢通路和转录因子	膜脂损伤、产生己醛和乙酸乙酯等异味	[30]

注: CAT 为过氧化氢酶 (catalase), SOD 为超氧化物歧化酶 (super oxide dismutase), LOX 为脂氧合酶 (lipoxygenase)。

果蔬在受到振动胁迫后, 其颜色也会加速变化。绿色果蔬经振动胁迫后会加快褪绿、黄化等颜色变化进程, 其主要原因是果蔬中的叶绿素降解加快。由于果蔬受到振动胁迫, 其细胞受损, 导致叶绿素的稳态环境遭到破坏, 叶绿素更易发生降解, 并且诱导细胞内活性氧(reactive oxygen species, ROS)过度产生^[33]。此外, 振动胁迫会加速果蔬的生理代谢, 加强果蔬的呼吸代谢, 还会加快其能量消耗, 造成不可逆的能量水平降低, 这会打破果蔬的能量代谢平衡, 加剧果蔬的衰老和颜色的改变^[34]。Xu 等^[24]对西兰花的模拟振动研究表明, 振动后西兰花受到了 ROS 损伤, 发生膜脂过氧化现象, 并且因其叶绿素快速降解, 使得西兰花的小花发生褪绿、黄化等外观品质劣变现象。芒果在受到振动胁迫后, 其转黄率和黑斑病情指数显著提高, 这可能与叶绿素的含量及水分含量有关^[25]。菜心^[35]、尖椒^[18]、圆椒^[20]等一些绿色蔬菜在受到振动胁迫后, 其呼吸代谢增强, 叶绿素含量降低, 出现了褪绿、黄化等现象, 导致其外观品质降低。

3.2 果蔬质地

果蔬在受到振动胁迫后会软化现象。相关研究表明, 振动产生的力会直接作用于果蔬表面, 并对其内部细胞造成损伤^[16]。细胞壁包围着充满液体的植物细胞, 其中分布着细胞质、胞质溶胶和细胞器, 在

宏观上, 细胞在振动胁迫下发生了相对偏移。同时, 在微观水平下细胞质反复发生黏性流动, 并作用于细胞膜, 破坏其完整性, 从而产生物理损伤和不良生理反应^[35]。此外, 振动胁迫还会加速果胶的溶解, 破坏细胞壁结构的稳定性。受到振动胁迫后, 果蔬的硬度会发生显著变化。特别是在呼吸跃变型果实中, 由于生成了大量的乙烯, 并出现了呼吸高峰, 使得果实快速衰老、品质劣变, 这会严重缩短果实的货架期, 造成经济损失^[4]。谢丹丹等^[36]采用不同的振动频率探究了模拟振动对‘徐香’猕猴桃软化的影响, 结果表明, 振动胁迫导致猕猴桃细胞壁发生了不同程度的变形或降解, 发生了质壁分离现象, 部分细胞器破损。卫赛超等^[37]研究了不同模拟振动时间对芒果软化的影响, 结果表明, 振动胁迫显著提高了芒果的呼吸峰值、质量损失率、果胶甲酯酶活性和多聚半乳糖醛酸酶活性, 导致芒果快速软化, 从而丧失商品价值。

瘀伤也是新鲜果蔬组织中常见的机械损伤之一, 由于过度冲击或振动诱导的动态载荷会导致细胞膜破裂、细胞壁完整性丧失, 从而降低对机械损伤的抗性^[38-39]。果蔬中由瘀伤引起的伤口会引发新陈代谢速率加快和水分的流失, 从而导致果蔬的质量损失率增大、皱缩加剧, 这会严重降低其商品性^[40-41]。作为果蔬重要的质量属性之一, 质量损失不仅影响消费者的偏好, 而且影响新鲜果蔬的营销。通过研究李子^[42]、

柠檬^[43]、猕猴桃^[26]、青椒^[27]和番茄^[44]等果蔬的瘀伤发现,随着瘀伤强度的增加,其质量损失率显著增大。此外,通过对桃和梨的研究表明,果实的呼吸速率随着瘀伤程度的增加而显著增加^[45]。瘀伤的产生甚至可使柑橘类(橘、酸橙和甜橙)果实的呼吸速率增加66%^[46]。果蔬在形成瘀伤后,即使是很小范围的组织损伤也会为细菌、真菌或其他病原体的攻击开辟道路,污染并导致水果其余部分的腐烂^[14]。瘀伤必然会导致果蔬产品的低品质和短货架期^[28, 47]。

3.3 果蔬风味和营养品质

新鲜果蔬含有大量的挥发性化合物,这些化合物构成了它们的独特气味。在运输过程中,果蔬受到振动胁迫,其细胞受损、化合物结构被破坏,或参与反应形成其他化合物,从而加速果蔬风味的变化,甚至产生不良风味^[13]。同时,振动胁迫会加剧果蔬的呼吸强度。由于三羧酸循环等代谢途径对糖、酸等底物的利用,导致果蔬的风味和营养品质快速下降^[12]。振动胁迫引起的ROS积累,会导致果蔬体内的抗坏血酸、总酚、类黄酮等抗氧化物质的消耗^[28]。在消耗到一定程度后,果蔬的衰老进程加快,引发果蔬营养物质的流失、风味的丧失。Scalia等^[5]研究了模拟振动对2种草莓品质的影响,结果表明,振动胁迫会使草莓果实的可溶性固形物含量增加、可滴定酸含量下降,导致草莓风味下降、货架期缩短。尖椒、圆椒和西兰花的模拟振动实验结果表明,振动胁迫会导致氮氧化合物和硫化物等腐败特征气味的产生^[19]。振动胁迫提高了蓝莓果实中醇类的相对含量,并降低了脂类的相对含量。这可能是因为振动胁迫改变了蓝莓的生理代谢,导致酒精的积累,严重降低了蓝莓的贮藏寿命和商品价值^[29]。Lin等^[30]分析了机械损伤对苹果中挥发性化合物的变化,研究发现,机械损伤会催生大量的己醛和乙酸乙酯等气体,从而改变苹果的风味。

4 减少振动胁迫对果蔬生理品质劣变的技术

在影响振动胁迫的3类主要因素中,第2类主要与振动过程相关,很难预防,因此具有可行性的减少果蔬振动胁迫的方法应该针对第1类和第3类影响因素制定。文中根据已报道的方法(主要通过减少直接作用于果蔬表面的力及提高果蔬的抗振动胁迫能力),按照技术性质进行分类,可分为物理、化学和生物技术。

4.1 物理技术

在实际运输中,外部减振包装能有效减少直接作用于果蔬表面的振动力。瓦楞纸箱具有易于回收、抗压性高等特点,被广泛用于新鲜果蔬的运输和贮藏,

可减轻因跌落、冲击、振动和压缩负载而造成的机械损伤^[48-49]。Fadiji等^[50]研究了在苹果运输中2种常用通风瓦楞纸板包装(MK4和MK6)的减振能力,结果表明,结构强度更高的MK4包装瓦楞纸箱对苹果的保护效果较好,苹果的瘀伤发生率和程度都明显低于MK6包装。在实际使用中,以可发性聚苯乙烯为代表的泡沫塑料表现出良好的减振和保温能力,对易损伤的生鲜产品具有很好的保护能力。值得注意的是,泡沫包装是潜在的环境负担,越来越多的国家开始限制此类包装的使用。总之,在未来的发展中,需要权衡果蔬供应链中包装保护性能与经济、环境之间的关系^[51]。

随着物流行业和材料包装行业的兴起,除了外部减振包装,市场上已经形成针对不同果蔬专属定制的缓冲内衬包装,包括(但不限于)珍珠棉、葫芦膜、气柱袋等。针对一些高价格果蔬,往往采用多种缓冲材料复合包装,以最大程度地保护其免受振动胁迫。夏铭等^[52]研究了不同减振衬垫材料对猕猴桃的减振效果,发现珍珠棉衬垫的减振效果优于聚苯乙烯泡沫衬垫和聚氯乙烯塑料衬垫,更能保护果实。卫赛超等^[25]通过模拟运输实验发现,相较于保鲜纸、塑料袋和葫芦膜,充气袋对芒果品质的保持效果最佳。对比了3种缓冲材料(聚氨酯+瓦楞纸箱、可膨胀聚乙烯+瓦楞纸箱、瓦楞纸箱)及其包装形式对桃子的保护性能,结果表明,聚氨酯+瓦楞纸箱包装的保护效果最好,桃子的瘀伤面积和腐烂率都显著低于其他组合^[9]。以上内容充分说明,优良的减振包装可以吸收振动过程中的载荷能量,并减少能量的传递,从而减轻作用于果蔬表面的振动胁迫。

低温不仅能保持果蔬原有的生理品质,还能降低果蔬对机械损伤的敏感性。原因是低温能抑制果蔬的生理代谢水平,延缓果蔬瘀伤的形成及相关生理变化进程。在10℃下模拟振动的桃子比在20、30℃下振动的桃子受到的损伤更小,果肉温度会影响水果的瘀伤敏感性^[9]。Ferreira等^[53]研究发现,当草莓的果肉温度降至1℃时,瘀伤体积减小了60%,表明低温抑制了草莓果实中乙烯的产生,并减少了瘀伤症状的发生。此外,低温会降低果蔬对机械损伤的敏感性可能还与其具有较少的微生物数量有关。一方面,低温延缓了果蔬组织的软化,使其汁液不易外流,减少了微生物的能量来源。另一方面,低温可以抑制果蔬的腐败病原菌(主要是真菌和细菌)的生长繁殖速率。机械损伤程度相同的草莓在5℃下贮藏期时,其微生物丰度远低于贮藏在15℃下的草莓^[54]。由此可见,在条件允许的情况下应尽可能采用冷链物流,以更好地保持果蔬在运输过程中的品质。

4.2 化学技术

1-甲基环丙烯(1-Methylcyclopropene, 1-MCP)是一种竞争性乙烯抑制剂,能不可逆地与乙烯受体结

合,从而阻断乙烯与受体的结合。1-MCP 被广泛应用于各种园艺作物的采后保鲜,特别是在呼吸跃变型果蔬中,通过抑制果蔬内源性乙烯的生成,从而延缓果蔬的成熟和衰老进程^[55]。乙烯吸收剂可以通过物理吸附或化学反应去除环境或果蔬中释放出的乙烯气体,延缓果蔬的衰老^[56]。目前,市场上在售的有缓释片剂、粉剂、微胶囊、保鲜标签纸等,使用方便,可满足长途物流运输的需求。

在植物的生长和发育过程中,植物激素作为与防御反应和保护有关的信号分子,会参与植物的抗逆胁迫调节。外源施用茉莉酸甲酯(Methyl jasmonate, MeJA)、水杨酸(Salicylic acid, SA)可以增强果蔬对振动胁迫的抗性,主要是因这些植物激素能激活次生代谢物的合成。Xu等^[24]研究发现,采用MeJA处理西兰花可有效减小振动胁迫的影响,保持其外观质量,并延缓模拟运输胁迫后西兰花的黄化和衰老进程。MeJA的作用可能与其抑制ROS积累、提高维生素C含量、诱导抗氧化酶活性和基因表达,以及抑制叶绿素降解酶活性和基因表达有关。Gu等^[57]研究发现,采用MeJA和SA处理减少了甜樱桃的机械损伤,抑制了其质量损失率的增大、硬度的降低、ROS的积累和膜脂降解相关酶的活性。以上结果表明MeJA和SA具有维持果蔬品质和减少机械损伤的能力。

4.3 生物技术

可食用涂层、薄膜也称环保包装材料,可食用涂层可直接应用于果蔬表面,可食用薄膜可用作包裹、包装材料。用于可食用涂层的材料可生物降解,且无毒,主要来源于多糖、蛋白质、脂类、复合材料等各类生物聚合物基质^[58]。研究表明,使用植物精油和酚类化合物作为可食用涂层、薄膜材料,可以保护果蔬在运输过程中免受各种微生物污染物的侵害,减少脂质氧化,防止水分流失,从而延长果蔬的保质期,减轻品质劣变^[59]。在以壳聚糖、海藻酸钠、羟丙基甲基纤维素等为主要原材料的保鲜涂层、薄膜中添加柠檬烯、姜黄素、茶树精油等天然抑菌保鲜成分,所制备的混合涂层、薄膜的抗菌活性和抗氧化能力会增强^[60]。

使用从农产品废弃物中提取的各种酚类化合物对新鲜果蔬进行保鲜处理,不仅可有效利用资源,还具有绿色、安全等特点。绿原酸(Chlorogenic acid, CGA)是果蔬中的一种重要酚酸,可作为抵御非生物胁迫的重要防御化合物。据报道,外源施用CGA可以减轻振动胁迫对苹果造成的品质劣变,主要得益于CGA对苹果能量代谢的调控。经CGA处理,在振动后可以保持更高水平的ATP和能量电荷,维持振动胁迫后果实的正常新陈代谢^[61],确保有充足的能量供应,减轻果蔬采后非生物胁迫,延缓果蔬的衰老^[27]。除了调控果蔬的能量代谢,CGA处理还

可调节衰老相关酶活性^[62],提高抗氧化活性^[63],增强果实的抗性^[64]。

4.4 复合处理

由于各种处理技术的作用原理和位点不同,在实际中往往采用多种技术联合处理,以实现保鲜效果的叠加或弥补。近年来,消费者愈发重视食品安全,无论使用何种处理技术,都要在保障食品安全的前提下进行。在运输过程中,提供更具保护性和功能性的包装技术将有助于增加新鲜果蔬对振动胁迫的抵抗力,在此基础上开发和研究具有复合处理效果的活性包装技术是目前的研究热点。李江阔等研发了微环境气调保鲜箱,它可调节微环境内气体的成分及浓度,并在保鲜箱内添加1-MCP、生物保鲜剂等,结合冷链运输,可以更好地维持果蔬的采后品质,减少果蔬在贮运过程中的损耗,已对蓝莓^[65]、兰州百合^[66]、葡萄^[67]、柿子^[68]等多种果蔬开展了相关试验,取得了一定进展。Rudra等^[69]探究了复合抗菌剂和乙烯吸收剂的活性包装纸对水果的作用,发现该活性包装对呼吸跃变型水果的保鲜更有效。

5 结语

如何科学地减少新鲜果蔬在运输过程中受到的振动胁迫,维持其较高的商品价值,需进行系统研究。近20年来,国内外学者分析了振动胁迫对果蔬品质的影响,但相关报道仍有限,且存在以下不足:部分研究重点关注振动情况,对评估某些地区或路线的振动水平很有用,但并未将其与果蔬的生理品质变化及病理损伤结合;研究集中在苹果、梨、草莓、番茄等果蔬,对其他易损伤果蔬的相关报道较少,需要对更多种类的果蔬进行具体分析;部分模拟运输实验所设计或使用的实验参数不一定与实际相符,所能提供的参考价值较为有限;处理技术或包装材料的经济性、有效性与食品安全和环境影响存在冲突。

目前,越来越多的学者或者供应链从业人员关注到振动胁迫对果蔬的影响,以及损伤发生的机理和测量方法,并提出了有效的处理方法。未来将更多关注以下几方面:多学科知识交叉,利用力学统计和数理分析进行更精确的仿真模拟设计,以实现模拟实验设计的科学性、合理性、有效性;深入探究损伤机制,从生理学、病理学、分子生物学等多角度分析果蔬在振动胁迫过程中的品质变化,以及在细胞和分子水平的机制,研究相应的保护措施;新兴处理技术的开发,如可生物降解聚合物的研发,天然植物活性成分的提取,纳米技术和新型包装技术的应用;物联网技术的发展,开发智能供应链数据采集技术,通过集成的实时信息数据监测系统及智能传感器,实现对新鲜果蔬的远程质量监测及调控。

参考文献:

- [1] 陈佳慧. ‘红美人’柑橘果实采后振动损伤特性研究及减振包装开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 1-2.
CHEN Jia-hui. Study on Postharvest Vibration Damage Characteristics of 'Hongmeiren' Citrus Fruit and Development of Anti-Vibration Packaging[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 1-2.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴—2021(总第 40 期)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
National Statistical Office. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [3] 曾媛媛. 不同等级道路运输振动损伤哈密瓜组织细胞膜、细胞壁机制的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017: 2-4.
ZENG Yuan-yuan. Research on Effect of Different Levels of Road Transport Vibration on Cellular Membrane and Cell Wall of Hami Melon[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017: 2-4.
- [4] 谢丹丹. 模拟运输振动对猕猴桃果实生理及品质的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 2-6.
XIE Dan-dan. Effects of Simulated Transport Vibration on the Physiology and Quality of Kiwifruit[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 2-6.
- [5] SCALIA G, AIELLO G, MICELI A, et al. Effect of Vibration on the Quality of Strawberry Fruits Caused by Simulated Transport[J]. Journal of Food Process Engineering, 2016, 39(2): 140-156.
- [6] FERNANDO I, FEI Jian-gang, STANLEY R. Measurement and Analysis of Vibration and Mechanical Damage to Bananas during Long-Distance Interstate port by Multi-Trailer Road Trains[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 158: 110977.
- [7] RÍOS-MESA A F, ZULUAGA GALLEGO R, OSORIO M, et al. Effect of Vehicle Vibration on the Mechanical and Sensory Properties of Avocado (*Persea Americana* Mill Cv Hass) during Road Transportation[J]. International Journal of Fruit Science, 2020, 20(3): S1904-S1919.
- [8] FERNANDO I, FEI J, STANLEY R, et al. Evaluating Packaging Performance for Bananas under Simulated Vibration[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 23: 100428.
- [9] LIN Meng-hua, CHEN Jia-hui, CHEN Feng, et al. Effects of Cushioning Materials and Temperature on Quality Damage of Ripe Peaches According to the Vibration Test[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 25: 100518.
- [10] MIR H, SHAHBAZI F. Simulated Transit Vibration Effects on the Postharvest Quality of Persimmon during Storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 189: 111918.
- [11] WANG Li-jun, ZHANG Qi, SONG Hai-yan, et al. Mechanical Damage of 'Huangguan' Pear Using Different Packaging under Random Vibration[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 187: 111847.
- [12] AL-DAIRI M, PATHARE P B, AL-YAHYAI R, et al. Mechanical Damage of Fresh Produce in Postharvest Transportation: Current Status and Future Prospects[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 124: 195-207.
- [13] LIPÍŃSKA M, TOMASZEWSKA M, KOŁOŻYŃ-KRAJEWSKA D. Identifying Factors Associated with Food Losses during Transportation: Potentials for Social Purposes[J]. Sustainability, 2019, 11(7): 2046.
- [14] VAN ZEEBROECK M, VAN LINDEN V, RAMON H, et al. Impact Damage of Apples during Transport and Handling[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 45(2): 157-167.
- [15] LI Zhi-guo, THOMAS C. Quantitative Evaluation of Mechanical Damage to Fresh Fruits[J]. Trends in Food Science & Technology, 2014, 35(2): 138-150.
- [16] FERNANDO I, FEI Jian-gang, STANLEY R, et al. Measurement and Evaluation of the Effect of Vibration on Fruits in Transit-Review[J]. Packaging Technology and Science, 2018, 31(11): 723-738.
- [17] 刘梦琪, 董福佳, 刘贵珊. 模拟运输振动对枸杞果实贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(21): 368-374.
LIU Meng-qi, DONG Fu-jia, LIU Gui-shan. Effect of Simulate Transportation Vibration on the Storage Quality of Lycium Barbarum Fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(21): 368-374.
- [18] 徐冬颖, 刘婧, 左进华, 等. 茉莉酸甲酯处理对运输振动后尖椒贮藏品质的影响[J]. 现代食品科技, 2018, 34(9): 70-76.
XU Dong-ying, LIU Jing, ZUO Jin-hua, et al. Effect of Methyl Jasmonate Treatment on Quality of Postharvest Pepper Subjected Vibration during Transportation[J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(9): 70-76.
- [19] 刘瑶, 徐冬颖, 刘婧, 等. 基于电子鼻的运输振动蔬菜气味品质检测[J]. 北方园艺, 2019(18): 100-109.
LIU Yao, XU Dong-ying, LIU Jing, et al. Detection of Vegetable Smell Quality after Transport Vibration Based on Electronic Nose Technology[J]. Northern Horticulture, 2019(18): 100-109.

- [20] 徐冬颖, 闫志成, 刘婧, 等. 茉莉酸甲酯处理对模拟运输振动圆椒贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(4): 271-275.
- XU Dong-ying, YAN Zhi-cheng, LIU Jing, et al. Effect of Methyl Jasmonate Treatment on Storage Quality of Green Bell Pepper after Transportation Vibration Simulation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(4): 271-275.
- [21] 陈代良, 韩延超, 吴伟杰, 等. 减振包装对双孢菇采后贮运品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(4): 801-807.
- CHEN Dai-liang, HAN Yan-chao, WU Wei-jie, et al. Effect of Special Cushioning Packaging on Storage Quality of *Agaricus Bisporus*[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2022, 34(4): 801-807.
- [22] TAO Fei, CHEN Wen-wei, JIA Zhen-bao. Effect of Simulated Transport Vibration on the Quality of Shiitake Mushroom (*Lentinus Edodes*) during Storage[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 9(2): 1152-1159.
- [23] YAN Jia-wei, BAN Zhao-jun, LUO Zi-sheng, et al. Variation in Cell Membrane Integrity and Enzyme Activity of the Button Mushroom (*Agaricus Bisporus*) during Storage and Transportation[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(5): 1655-1662.
- [24] XU Dong-ying, ZUO Jin-hua, LI Pei-yun, et al. Effect of Methyl Jasmonate on the Quality of Harvested Broccoli after Simulated Transport[J]. Food Chemistry, 2020, 319: 126561.
- [25] 卫赛超, 谢晶. 不同包装方式对芒果低温模拟运输贮藏中品质及代谢的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(5): 227-234.
- WEI Sai-chao, XIE Jing. Effects of Different Packaging Methods on the Quality and Metabolism of Mango Fruit during Simulated Low-temperature Transportation and Storage[J]. Food Science, 2022, 43(5): 227-234.
- [26] WEI Xiao-peng, XIE Dan-dan, MAO Lin-chun, et al. Excess Water Loss Induced by Simulated Transport Vibration in Postharvest Kiwifruit[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 250: 113-120.
- [27] WANG Yun-xiang, ZHOU Fu-hui, ZUO Jin-hua, et al. Pre-Storage Treatment of Mechanically-Injured Green Pepper (*Capsicum Annuum* L) Fruit with Putrescine Reduces Adverse Physiological Responses[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 145: 239-246.
- [28] KHODAEI M, SEIHEDLOU S, SADEGHI M. The Evaluation of Vibration Damage in Fresh Apricots during Simulated Transport[J]. Research in Agricultural Engineering, 2019, 65(4): 112-122.
- [29] XU Fang-xu, LIU Shi-yang, LIU Ye-fei, et al. Effect of Mechanical Vibration on Postharvest Quality and Volatile Compounds of Blueberry Fruit[J]. Food Chemistry, 2021, 349: 129216.
- [30] LIN Meng-hua, CHEN Jia-hui, WU Di, et al. Volatile Profile and Biosynthesis of Post-Harvest Apples are Affected by the Mechanical Damage[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(33): 9716-9724.
- [31] DEVAUX M F, BARAKAT A, ROBERT P, et al. Mechanical Breakdown and Cell Wall Structure of Mealy Tomato Pericarp Tissue[J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 37(3): 209-221.
- [32] DANTAS T B H, DE O FERRAZ A C, HONÓRIO S L, et al. Polyphenoloxidase Activity in Peaches after Vibration[J]. Engenharia Agrícola, 2013, 33(2): 312-318.
- [33] AGHDAM M S, FLORES F B. Employing Phytosulfo-kine α (PSKA) for Delaying Broccoli Florets Yellowing during Cold Storage[J]. Food Chemistry, 2021, 355: 129626.
- [34] SHU Chang, CAO Jian-kang, JIANG Wei-bo. Postharvest Vibration-Induced Apple Quality Deterioration is Associated with the Energy Dissipation System[J]. Food Chemistry, 2022, 386: 132767.
- [35] 杨松夏, 吕恩利, 朱立学, 等. 模拟运输条件下保鲜模式对菜心品质的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(3): 127-131.
- YANG Song-xia, LYU En-li, ZHU Li-xue, et al. Effects of the Fresh-Keeping Modes on Quality of Flowering Chinese Cabbage under Simulated Transportation[J]. Food & Machinery, 2018, 34(3): 127-131.
- [36] 谢丹丹, 茅林春, 卢文静, 等. 猕猴桃果实对模拟运输振动的生理和品质响应[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(11): 168-174.
- XIE Dan-dan, MAO Lin-chun, LU Wen-jing, et al. Physiological and Qualitative Responses to Simulated Transport Vibration in Kiwifruit[J]. Food Research and Development, 2018, 39(11): 168-174.
- [37] 卫赛超, 谢晶. 模拟运输时间对芒果低温贮藏过程中生理与品质的影响[J]. 食品科学技术学报, 2020, 38(3): 43-50.
- WEI Sai-chao, XIE Jing. Effect of Simulated Transport Time on Physiology and Quality of Mango during Low-Temperature Storage[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 38(3): 43-50.
- [38] HUSSEIN Z, FAWOLE O A, OPARA U L. Determination of Physical, Biochemical and Microstructural Changes in Impact-Bruise Damaged Pomegranate Fruit[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13(3): 2177-2189.

- [39] HUSSEIN Z, FAWOLE O A, OPARA U L. Harvest and Postharvest Factors Affecting Bruise Damage of Fresh Fruits[J]. Horticultural Plant Journal, 2020, 6(1): 1-13.
- [40] AKTAS T, POLAT R, ATAY Ü. Mechanical Properties and Bruise Susceptibility of Tomatoes Related to Impact Direction and Drop-Height[J]. Philippine Agriculturist, 2009, 91(2): 180-186.
- [41] CRISOSTO C H, VALERO D. Harvesting and Post-harvest Handling of Peaches for the Fresh Market[M]// The peach: botany, production and uses. Wallingford: CAB, 2008: 575-596.
- [42] MARTÍNEZ-ROMERO D, CASTILLO S, VALERO D. Forced-Air Cooling Applied before Fruit Handling to Prevent Mechanical Damage of Plums (*Prunus Salicina* Lindl)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, 28(1): 135-142.
- [43] MARTNEZ-ROMERO D, VALERO D, SERRANO M, et al. Effects of Post-Harvest Putrescine and Calcium Treatments on Reducing Mechanical Damage and Polyamines and Absciscic Acid Levels during Lemon Storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1999, 79(12): 1589-1595.
- [44] LI Zhi-guo, LI Ping-ping, LIU Ji-zhan. Effect of Tomato Internal Structure on Its Mechanical Properties and Degree of Mechanical Damage[J]. African Journal of Biotechnology, 2010, 9(12): 1816-1826.
- [45] 赵梅霞. 几种水果不同部位呼吸量及机械损伤后呼吸反应的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005: 34-36.
ZHAO Mei-xia. Study on Respiration Intensity of Different Parts of Several Fruits and Wound Respiration[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005: 34-36.
- [46] SCHERRER-MONTERO C R, DOS SANTOS L C, ANDREAZZA C S, et al. Mechanical Damages Increase Respiratory Rates of Citrus Fruit[J]. International Journal of Fruit Science, 2011, 11(3): 256-263.
- [47] WU Gui-fang, WANG Chun-guang. 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.
- [48] PATHARE P B, OPARA U L. Structural Design of Corrugated Boxes for Horticultural Produce: A Review[J]. Biosystems Engineering, 2014, 125: 128-140.
- [49] FADIJI T, BERRY T M, COETZEE C J, et al. Mechanical Design and Performance Testing of Corrugated Paperboard Packaging for the Postharvest Handling of Horticultural Produce[J]. Biosystems Engineering, 2018, 171: 220-244.
- [50] FADIJI T, COETZEE C, CHEN Lan, 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.
- [51] LIN Meng-hua, FAWOLE O A, SAEYS W, et al. Mechanical Damages and Packaging Methods along the Fresh Fruit Supply Chain: A Review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022: 1-20.
- [52] 夏铭, 赵晓晓, 徐昌杰, 等. 不同减振衬垫对模拟运输猕猴桃生理和品质影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(4): 276-279.
XIA Ming, ZHAO Xiao-xiao, XU Chang-jie, et al. Physiological and Qualitative Influences of Anti-Vibration Pad on Kiwifruit in Simulated Transportation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(4): 276-279.
- [53] FERREIRA M D, SARGENT S A, BRECHT J K, et al. Strawberry Bruising Sensitivity Depends on the Type of Force Applied, Cooling Method, and Pulp Temperature[J]. HortScience, 2009, 44(7): 1953-1956.
- [54] SATITMUNNAITHUM J, KITAZAWA H, AROFATULLAH N A, et al. Microbial Population Size and Strawberry Fruit Firmness after Drop Shock-Induced Mechanical Damage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 192: 112008.
- [55] XU Dong-ying, ZHOU Fu-hui, GU Si-tong, et al. 1-Methylcyclopropene Maintains the Postharvest Quality of Hardy Kiwifruit (*Actinidia Aruguta*)[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021, 15(4): 3036-3044.
- [56] WANG Si-yao, ZHOU Qian, ZHOU Xin, et al. The Effect of Ethylene Absorbent Treatment on the Softening of Blueberry Fruit[J]. Food Chemistry, 2018, 246: 286-294.
- [57] GU Si-tong, XU Dong-ying, ZHOU Fu-hui, et al. Repairing Ability and Mechanism of Methyl Jasmonate and Salicylic Acid on Mechanically Damaged Sweet Cherries[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 292: 110567.
- [58] SUHAG R, KUMAR N, PETKOSKA A T, et al. Film Formation and Deposition Methods of Edible Coating on Food Products: A Review[J]. Food Research International, 2020, 136: 109582.
- [59] DUAN Jing-yun, WU Ru-yi, STRIK B C, et al. Effect of Edible Coatings on the Quality of Fresh Blueberries (Duke and Elliott) under Commercial Storage Conditions[J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 59(1): 71-79.
- [60] DHITAL R, JOSHI P, BECERRA-MORA N, et al. Inte-

- grity of Edible Nano-Coatings and Its Effects on Quality of Strawberries Subjected to Simulated In-Transit Vibrations[J]. LWT, 2017, 80: 257-264.
- [61] SHU Chang, ZHANG Wan-li, ZHAO Han-dong, et al. Chlorogenic Acid Treatment Alleviates the Adverse Physiological Responses of Vibration Injury in Apple Fruit through the Regulation of Energy Metabolism[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 159: 110997.
- [62] XI Yu, CHENG Dai, ZENG Xiang-quan, et al. Evidences for Chlorogenic Acid—a Major Endogenous Polyphenol Involved in Regulation of Ripening and Senescence of Apple Fruit[J]. PLoS One, 2016, 11(1): e0146940.
- [63] XI Yu, FAN Xin-guang, ZHAO Han-dong, et al. Postharvest Fruit Quality and Antioxidants of Nectarine Fruit as Influenced by Chlorogenic Acid[J]. LWT, 2017, 75: 537-544.
- [64] JIAO Wen-xiao, LI Xiang-xin, WANG Xiao-mei, et al. Chlorogenic Acid Induces Resistance Against *Penicillium Expansum* in Peach Fruit by Activating the Salicylic Acid Signaling Pathway[J]. Food Chemistry, 2018, 260: 274-282.
- [65] 张鹏, 朱文月, 薛友林, 等. 微环境气调对冰温贮藏蓝莓货架期果实软化的影响[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(3): 157-166.
- ZHANG Peng, ZHU Wen-yue, XUE You-lin, et al. Effects of Micro-Environment Gas Regulation on Fruit Softening of Blueberry during Shelf Life after Controlled Freezing-Point Storage[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(3): 157-166.
- [66] 魏宝东, 康丹丹, 张鹏, 等. 微环境气调结合相温贮藏对兰州百合采后品质的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(9): 241-249.
- WEI Bao-dong, KANG Dan-dan, ZHANG Peng, et al. Effects of Micro-Environment Modified Atmosphere Package Combined with Phase Temperature Storage on Postharvest Quality of Lanzhou Lily[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(9): 241-249.
- [67] 张鹏, 刘振通, 李江阔, 等. 气调结合生物保鲜剂对葡萄冷藏品质及电子鼻判别的影响[J]. 食品科技, 2017, 42(12): 40-47.
- ZHANG Peng, LIU Zhen-tong, LI Jiang-kuo, et al. Effects of Modified Atmosphere Combined with Biological Preservatives on Storage Quality of Grape during Cold Storage[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(12): 40-47.
- [68] 马琴, 冯娟, 田建文, 等. 采后 1-甲基环丙烯与自发气调处理对冰温贮藏火柿软化及相关生理变化的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(17): 231-239.
- MA Qin, FENG Juan, TIAN Jian-wen, et al. Effects of 1-Methylcyclopropene and Modified Atmosphere Packaging on the Softening and Related Physiological Changes in 'Huo' Persimmon during Postharvest Controlled Freezing Point Storage[J]. Food Science, 2022, 43(17): 231-239.
- [69] RUDRA S G, SINGH V, JYOTI S D, et al. Mechanical Properties and Antimicrobial Efficacy of Active Wrapping Paper for Primary Packaging of Fruits[J]. Food Bioscience, 2013, 3: 49-58.

责任编辑: 彭颀