

运输振动对水果贮藏品质影响的研究进展

吴琼,周然*

(上海海洋大学食品学院,上海 201306)

摘要:为探寻长途运输过程对采后水果贮藏品质造成影响的机理,本文主要对目前各类水果经模拟运输振动处理后品质变化的研究成果进行了综述。水果在人们日常膳食中的重要组成部分,本文通过分别阐述国内外水果贮运的发展现状,比较总结出国内目前农产品长途运输方式存在的欠缺。概述了水果振动损伤特性研究现状,并总结了模拟运输振动的方法及其影响因素。另外本文分别从果实的外观、营养、风味品质变化以及果实的后熟软化、呼吸乙烯速率变化以及抗氧化四个方面着重分析了运输振动对水果采后贮藏品质特性影响的研究进展,总结得出长途运输过程会导致果实发生形变、营养成分比例降低以及风味口感改变,还会加速果实的后熟软化以及呼吸乙烯释放速率,最后在此基础上提出了目前水果运输振动研究存在的不足和未来的研究方向。

关键词:水果 运输 振动 品质

Advances in research of effects of transportation vibration on storage quality of fruits

WU Qiong, ZHOU Ran*

(College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In this paper to seek the principle about effects on fruit quality on storage caused by long-distance transport, the research findings of quality change of various fruits at present which were proceeded by simulative transportation vibrations were reviewed. Fruits play an increasingly important role in daily life. By comparing the development situation of transport and store in China and other developed countries, the paper stated the current inadequacy of long-distance transport at home. It also stated research status of fruits vibration damage characteristics, and summarized the methods and influencing factors of simulative transportation vibrations. In addition, this paper analyzed the research progress of which transportation vibration affects postharvest storage quality characteristics of fruits respectively in these aspects: the change of appearance, nutrition, quality ripen-softening, ethylene respiratory rate of fruits and antioxidant metabolism. Thus, it concluded that long-distance transport can lead to deformation, flavor taste and lower percentage of nutrition of fruits, and accelerate ripen-softening and ethylene respiratory rate. Finally, as mentioned, the paper put forward the deficiency existing in current research and the future research direction about transportation vibration of fruits.

Key words: fruits; transport; vibration; quality

中图分类号:TS255.1

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2017)11-0356-08

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2017.11.061

我国是农业大国,水果资源十分丰富,生产总量常年位居世界第一,是全球最大的水果生产、消费、输出国^[1]。我国地域辽阔,人居分布不均,水果从种植采摘到市场销售大多需要经过长途公路运输的过程^[2]。由于采摘、分级、包装、贮藏、运输等环节的技术因素,造成水果采收后大量损耗。运输方式还包括铁运、空运和航运,但由于研究表明,在运输过程

中机械振动是造成水果品质下降的最主要的因素^[3-4],所以长途公路运输对水果造成的损耗最大,也是广大学者重点研究的方面。调查显示,在我国,振动胁迫对水果采后运输过程中造成的机械损伤使水果损失达25%~45%,每年水果蔬菜的经济损失高达700亿元^[5]。水果从采摘到销售过程中造成的损伤是一个全世界普遍关注的问题。

收稿日期:2016-10-24

作者简介:吴琼(1992-),女,在读硕士,主要从事冷链物流方向的研究,E-mail:544269515@qq.com。

* 通讯作者:周然(1977-),男,博士,副教授,主要从事冷链物流方向的研究,E-mail:rzhou@shou.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金(31201439);上海高校一流学科建设项目资助(B-5005-13-0002-4);上海市科委工程中心建设项目(11DZ2280300);上海海洋大学优秀青年学科骨干培养计划(海鸥计划)资助项目。

长期以来,广大学者致力于研究振动对水果品质的损害机理及如何降低这种损伤程度。目前,对于水果振动损伤的研究方法是基于模拟运输的技术,本文也详细介绍了模拟运输振动的实验方法并列举出实验影响因素。通过振动实验台模拟车辆长途运输过程对水果进行振动处理,并检测果实相应品质指标的变化情况,发现了振动逆境会加速果实的成熟衰老,主要表现在影响果实的外观,果实的水分散失和组织腐烂等方面。另外评价振动后的水果品质指标还有硬度、呼吸乙烯释放速率、细胞膜透性、抗坏血酸含量、活性氧成分、抗氧化活性等。通过观察和检测这些品质指标可以了解水果经机械损伤后的品质变化机理。

1 水果的特性

水果在农产品中占有重要地位,也是人们日常膳食结构中的重要组成部分。与其他农作物相比,水果具有鲜明的生物属性和地理集聚性,应该对其专门研究。其特殊性主要表现在种植条件的地域性和季节性,并且目标销售地十分分散,从而导致水果的流通种类多、难度高、数量大,流通附加值也非常高,因此国内外研究学者针对如何提高水果产品的流通附加值做了很多的研究和努力。目前我国农产品业在发展道路上面临的主要问题已经从生产转向了流通,减少水果在流通运输过程中产生的机械损伤已然成为当务之急,在流通过程中对水果产品质量的把控显得十分重要。

水果种类繁多,有些果实从发育、成熟直至衰老的过程中,其呼吸强度的变化模式是在果实发育定型之前,呼吸强度不断下降,而在成熟后,呼吸强度会骤然升高,当到达一个高峰值后又快速下降,这一现象称为呼吸跃变,这类果实称为跃变型果实,例如杏、梨、香蕉、猕猴桃、榴莲、番茄等。呼吸强度的最高值叫做呼吸高峰,在呼吸跃变期间,果实体内的生理代谢发生了根本性的转变,是果实由成熟向衰老转化的转折点,所以,跃变型果实贮运时,一定要在呼吸跃变出现以前进行采收。这也就导致当这些水果被运送到市场上进行销售时很可能还未完全成熟,可能需要进行催熟处理。与跃变型果实不同,另一类果实在其发育过程中没有呼吸高峰的出现,呼吸强度在其成熟过程中缓慢下降或基本保持不变,此类果实称为非跃变型果实,例如杨桃、樱桃、葡萄、草莓等,贮运这类果实时,可适当晚收^[6]。

一般来说,跃变型果实对乙烯很敏感,成熟期间自身能产生乙烯,只要有微量的乙烯,就足以促使果实成熟,随后内源乙烯迅速增加,达到释放高峰,此期间乙烯累计在组织中的浓度可高达10~100 mg/kg。虽然乙烯高峰和呼吸高峰出现的时间有所不同,但就多数跃变型果实来说,乙烯高峰常出现在呼吸高峰之前,或与之同步。研究表明采后运输会加速果实乙烯的释放^[7],研究学者通过研究振动后果实的后熟机理,采取相应措施以延长产品贮藏期。非跃变型果实成熟期间自身不产生乙烯或产量极低,因此后熟过程不明显。国内外研究学者大都把研究重心放

在呼吸跃变型水果上。

2 国内外水果贮运的发展现状

怎样能够降低运输流通过程中水果损耗的比率,这是世界上所有农产品流通业参与者都在研究的主要问题之一。水果从采收、分级、包装、运输和贮藏到发货交易,物流环节较多,同时损伤和损耗原因也非常复杂,有物理、化学、生物等各方面原因。我国虽是水果大国,但并非水果强国,相比较一些发达国家,我国无论是产地管理还是采后流通的基础设施都并不完善,所以目前在水果采后流通过程中的保鲜和贮藏等问题还需进一步解决。而发达国家在水果采后流通过程中的品质控制体系远领先于我国,水果流通损耗率普遍低于5%,美国更低,仅只有1%~2%^[8]。

长途运输过程中容易发生的问题包括两个方面:一是温度过低或过高,造成冻伤或促进衰老,实践中更易出现后者情况;二是包装不当,由于振动磕碰,造成机械损伤。流通过程中的机械振动是造成水果采后损耗的最主要原因,机械振动不可避免的会对新鲜水果造成外观损伤,引起果实商品性下降,并可导致水果有关代谢物质的改变。本节还对目前水果振动特性相关研究成果进行了综述。

2.1 国外水果贮运的研究现状

近年来,许多生产和科研人员不断致力于改善水果保鲜和耐贮藏工作,并对此进行了大量的设施栽培、保鲜储藏和储运损伤控制等方面的研究,目前国外许多科研和生产人员正在通过不断改进设施、改善保鲜贮藏条件和控制贮运损伤等多方面不断地改善水果农产品的采后保鲜和耐贮藏情况。国外的相关研究多集中在水果可见的机械损伤方面以及与有关水果保鲜等方面^[9]。

国外研究学者 Samir.K.^[10] 基于鲜果农产品损耗提出在适当压缩物流成本的情况下,减少对环境的负担,建立环境友好型的鲜果农产品供应链。Kakeo Shina^[11] 研究水果等变质率较高的生鲜农产品,探究此类农产品新鲜度控制的供应链运作方法,并发现 TET(Time Environment Tolerance, 时间环境容忍度)可以很好地实现对水果等农产品新鲜度控制的效果,认为 TET 控制可以有效的优化农产品供应链运作流程。Cakmak^[12] 指出果实处于运输振动过程中,随着运输时间延长果实的损伤速度会因为车体的晃动而加剧,加之纸板包装的方式增加了果实的温度,从而加速了果实的硬度降低。Shahbazi 等^[13] 模拟实际运输工况,在对西瓜进行振动实验研究后发现,在振动频率为 7.49 Hz 和 13.03 Hz 时损伤率出现了峰值,这结果说明在实际运输中因尽量规避这两个振动频率。Van Zeebroeck 等^[14] 研究苹果运输振动发现在加速度逐渐达到峰值时,不同的位置和方向,挤压分别不断加强,堆放位置越高的苹果受损面积越大。

2.2 国内水果贮运的研究现状

总体上来讲,现阶段中国水果物流的发展,正逐步得到政府的重视和政策的支持,但是,在理论和实践上都处于初级阶段。调查表明,导致我国水果采

后流通损耗严重的原因主要有以下几个方面。

对水果物流重视程度不够且理论研究滞后。中国农村自古以来普遍存在“重生产、轻流通”的传统思想,水果产品增值的目标难以实现。此外,现阶段的大多物流政策都是直接借用国外的,这就难免造成物流系统的各个要素被肢解,而无法全面、系统的进行优化。因此,造成当前的果蔬物流处于无序的发展状态和混乱的局面。

“冷链”流通意识不足,体系不完善。发达国家的水果采后流通冷链系统已经建立,标准化的贮运体系也已形成。冷链物流投资巨大,目前冷链运输带来的物流成本增加还不能被大多数经销商和消费者所接受。调查显示,我国人均冷库面积及人均冷藏车数量都很少,2014年人均冷库面积是 $0.058\text{ m}^3/\text{人}$,同期美国是 $0.357\text{ m}^3/\text{人}$ 。2014年我国公路冷藏车保有量为7.6万辆,日本是15万辆,美国是25万辆。我国果蔬及肉类等食品冷链流通率在5%~25%之间,生鲜农产品大部分在常温下流通,而欧美发达国家已经形成了完整的农产品冷链物流体系,农产品及易腐坏食品的冷链流通率达到95%以上^[15]。

长途运输过程中车辆的机械振动无法避免。水果在采后流通过程中的机械损伤主要来自搬运碰撞和机械振动两方面,搬运碰撞发生在水果采收装运的过程中,是人为可控的,相对容易解决,所以学者们一般着重研究机械振动带来的损伤。机械振动导致的水果果实损伤是最直接明显的,为了减少这种流通损耗,我们需要对目前的水果运输方式进行大量的研究并作出改进。研究表明,车体小,自重轻的车辆,振动强度高;车轮内压力高时,振动强度高;在同一车厢中,后部的振动强度高于前部,上方的振动强度高于下方^[16]。

2.3 水果振动特性研究现状

官悍^[17]从呼吸强度及细胞膜渗透率两个方面研究了运输过程中不同振动方式和频率对蜜瓜的影响,结果表明,振动会促进蜜瓜的呼吸作用,并且通过检测果实的相对电导率变化得知振动会使得果实细胞膜渗透率增高。周然等^[18]分析了水果实际运输振动过程中的状况及损伤,采用了钢片弹簧悬架系统的卡车运输黄花梨,并检测了不同路况下车厢不同位置的不同方向振动,比较了车厢内前后放置的梨损伤情况,得出放置在车尾的黄花梨机械损伤程度要比放置在车头的严重。康维民等^[19-20]发现梨在运输振动过程中加速度越大越易产生损伤,在加速度相同的条件下,振动频率越小越易产生损伤,同时指出果实的振动损伤程度与其吸收的能量有一定比例关系。刘迎雪^[21]研究得出运输过程中振动会加速小番茄呼吸速率,增加小番茄的乙烯释放量。

美国的Hinsch R T等人通过对样本梨的功率谱密度(PSD)检测研究发现,在约3.5 Hz频率处PSD达到峰值,其余衰减峰分别出现在9、18、25 Hz处,类似的结果在番茄测试中也出现。该结果表明,水果运输车辆需要对上述频率加以规避。另外,作者还指出,运输过程中梨果实的水平加速度要远小于垂

直加速度,此结论有助于改进运输车辆的储物空间的机械结构,减少运输过程中水果的质量损失^[22]。

3 振动特性研究方法——模拟运输

由于公路运输是水果在采后流通过程中最主要的运输方式,所以模拟公路运输成为研究水果运输振动特性的主要方法。由于公路道路凹凸不平造成的车辆振动会引起位移干扰,水果产生受迫振动^[23],从而造成了水果的机械损伤。

康维民^[19]等基于疲劳损伤理论定量地分析了水果的损伤能量,认为水果振动吸收能量应遵循如下表达式。

$$W_c = N\pi c\omega A^2 \quad \text{式(1)}$$

式(1)中: W_c —水果失去商品性时的临界损伤能量; N —水果失去商品性时的振动次数; c —水果粘弹性系数; ω 、 A —振动频率和振幅。

目前模拟公路运输的方式以实验振动装置为主。这类装置是由振动台、控制计算机、测定解析装置、加速度传感器及振动控制系统构成^[22]。

3.1 振动频率

车辆行驶过程的功率谱密度能显示高功率处的频率值,反映了车辆具有较高振动能量的频率区间。每个物体都有其固定振动频率,即固定频率,每个物体的固定频率都不相同。当由外力作用于一个物体上且这个外力的振动频率与这个物体的固有频率相同或相近时,便会发生共振,这个共振的频率就称为共振频率。当一个外力对某一物体造成了损伤,这个外力的振动频率就称为这一物体的损伤频率。有研究表明,振动频率在2~5 Hz时,车辆功率谱密度值较大^[24-25]。另据现有研究显示:Jamal^[26]等测定部分水果的固有频率,结果表明,一般水果的固有频率在50 Hz以上。祝青园^[27]等基于虚拟仪器技术测出西瓜的固有频率在139.4~173 Hz。Shahbazi^[13]等研究发现,在7.49、13.03 Hz出现西瓜振动损伤率峰值。黄祥飞^[28]等利用扫频实验得到梨果实的共振频率在45~85 Hz。张连文^[29]等通过振动实验得到圣女果的固有频率为53.1 Hz。Slaughter^[30]等研究发现梨振动损伤频率低于40 Hz。Barchi^[31]等研究发现,枇杷振动损伤频率范围为13~25 Hz。以上研究结果说明,造成水果机械振动损伤的是低频率,而并不是车辆的振动达到水果的固有频率。康维民^[19]等指出在较小的振动频率下易造成梨的损伤。综上所述,水果果实的损伤频率要远低于其固有频率和与外力的共振频率,所以模拟公路运输振动的频率参数应在15 Hz以下的低频区选取。

3.2 振动加速度

振动加速度是影响果品振动损伤的重要因素之一^[32]。由于水果的种类、性质、运输包装方式不同,振动加速度的响应受到水果堆积层数、包装方式及水果力学传递特性的影响。模拟运输振动加速度的选定要考虑以下三个方面。

第一,参照实际的车辆运输工况。运输振动加速度最大值为0.3~1.5 g(g 为重力加速度,下同)^[33-34];但也有研究发现,当振动加速度大于1 g

时, 损伤类型转变为冲击损伤^[35]。卢广新等^[32]模拟运输实验时采取公路运输随机振动功率谱密度数据, 并进行加强 $\sqrt{5}$ 倍以符合实际运输工况。

第二, 提高实验效率。在模拟运输振动实验中可适当增大振动加速度以提高实验效率。

第三, 遵循水果加速度响应特征。在对非单体水果进行运输模拟时, 由于堆积层数、包装方式的影响, 水果的加速度响应是不同的。康维民^[20]等通过模拟水果运输振动实验发现, 在一定振动频率范围内, 振动加速度传递率随包装层数的递增而变大。

3.3 振动时间

制定模拟运输实验的振动时间需考虑振动后损伤测定的有效性和高效性两个方面。一般地, 振动时间取 10~40 min 时, 相当于公路运输 1 h 或 1500 km, 火车运输 3 h 或 4500 km^[36]。

3.4 其他实验因素

为了更加准确地模拟水果在实际流通运输过程中的振动, 振动实验需考虑更多的影响因素。例如, 为准确探究不同振动方式对水果造成的损伤是否不同, 需考虑振动外力的方向, 是垂直振动、水平振动还是两者同时。为改善运输过程中水果的受损伤状况, 可以对水果的包装进行改进, 这里的实验因素就是不同的包装层数和包装材料等。

4 运输振动对采后水果的影响研究现状

运输振动引起的机械损伤不仅会影响水果的外观, 还会加速水果果实内部的变质。振动损伤会造成果实局部形变, 还会造成受损部位发生褐变、失水加快, 继而发生组织萎蔫、整个果实底色变黄等现象。振动胁迫造成的损伤还会加快果实呼吸代谢和愈伤代谢活动从而加速果实贮藏过程中营养物质的转化和消耗, 果实中营养成分向次生代谢产物转化会降低营养成分的比例果实品质, 这是一种应激机械伤害带来的逆境伤害的反应。振动损伤会改变果实的风味, 主要表现为促进果实质地变软、甜度增大、纤维素含量增多等, 这些不利影响是伴随着一系列其他生理变化而逐渐发生的。振动损伤使得微生物入侵进而水果腐败, 降低了水果在储藏销售过程中的商品价值^[37]。

4.1 运输振动对果实品质的影响

4.1.1 运输振动对果实外观品质的影响 评价水果外观品质的优劣主要是看果实的形态、光泽度、平滑度、萎蔫度等。观察发现机械损伤会导致果实形变, 包括软塌、凹陷、开裂等; 机械损伤还会使得果实产生失水、萎蔫、发黄等。主要的评价指标有: 硬度、腐烂率、失重率等。其中硬度会随着果实损伤程度的增加和贮藏时间的增长而降低, 失重率也是影响水果贮藏品质的主要因素之一, 主要表现为果实发生皱缩, 并且失去光泽。研究表明, 果实的失重主要由蒸腾作用失水造成^[38]。随着贮藏时间的延长, 果实失重率逐渐升高。腐烂率也遵循同样的变化趋势。

郑永华^[39]等对杨梅的研究发现, 模拟运输振动处理后的杨梅失水率和腐烂率都明显比不作处理的对照组要高, 而可溶性固形物含量较对照组明显

要低。

4.1.2 运输振动对果实营养品质的影响 水果的营养丰富, 含有丰富的维生素等对人体有益的物质。评价水果营养品质优劣的指标主要有: 维生素 C、可溶性固形物、抗坏血酸、可滴定酸等。可溶性固形物是指液体或流体食品中所有果汁中能溶于水的糖、酸、维生素、矿物质等, 以百分率表示。测定可溶性固形物可以衡量水果成熟情况, 以便确定采摘时间。我们喝的果汁一般糖都在 100 g/L 以上, 主要是蔗糖、葡萄糖和果糖, 可溶性固形物含量可以达到 9% 左右。研究表明运输振动胁迫会加速水果的呼吸代谢, 并且使得果实的愈伤代谢活动旺盛, 这就会加速果实贮藏过程中营养物质的转化和消耗。果实中营养成分向次生代谢产物转化会降低营养成分的比例从而降低果实营养品质, 这是一种应激机械伤害带来的逆境伤害的反应。

郑永华^[39]等对杨梅的研究发现, 模拟运输振动处理后的杨梅可溶性固形物含量较对照组明显要低。陈蔚辉^[40]研究橄榄发现, 振动损伤在短时间内会促进果实碳水化合物、有机酸含量和 V_C 含量的降解, 同时还会致使可溶性固形物含量呈先上升后经过分解又迅速下降的趋势。

4.1.3 运输振动对果实风味品质的影响 新鲜果实香气宜人、质地脆嫩、酸甜可口, 深受消费者喜爱。长途运输的机械振动损伤会改变果实原有的风味, 主要表现为果实迅速变甜变软、纤维素含量增多等, 这些不利影响是伴随着一系列其他生理变化而逐渐发生的。评价水果风味品质的指标主要有: 电子鼻、电子舌以及通过主观品尝观察果实的风味变化。电子鼻是一种新颖的分析、识别和检测复杂气味和挥发性成分的人工嗅觉系统, 相比较传统的气相色谱法 (GC) 和气相色谱-质谱联用技术 GC-MS 等, 电子鼻检测费用低、检测周期短, 特别是样品无须前处理, 所得气味成分不再是样品经分离后的产物, 不用有机溶剂, 是一种“绿色”的仿生检测仪器, 且便于携带, 可进行实时检测^[41]。实现化学传感器系统功能的装置, 若用在气体分析中, 称为电子鼻; 若用在液体分析中, 称为电子舌^[42]。在贮藏过程中, 水果的香气成分的种类与含量会发生一系列变化, 这是由于后熟、呼吸作用、发酵作用和酚类物质氧化造成的, 并且病原微生物对果实的侵染也会导致香气成分的变化^[43]。基于水果香气成分在贮藏期间发生的变化, 可利用电子鼻系统采集水果的芳香成分, 监测贮藏期间香气成分的变化情况, 并对水果货架期进行判断和对水果质量进行监控。

张晓华^[44]等使用 GC-Flash 型电子鼻预测红星苹果货架期质量, 运用主成分分析 (PCA) 后发现, 电子鼻能够很好的将不同贮藏期内的苹果区分开来, 并通过传统的理化检测方法证明了电子鼻预测货架期的准确性。高利萍^[45]等使用电子舌很好地反映出了不同贮藏时间草莓汁的品质的变化趋势, 其效果要好于电子鼻。草莓贮藏期间的品质总体呈下降趋势, 贮藏前期下降迅速, 贮藏中期下降缓慢。陈守

江^[46]对草莓研究发现,振动损伤会加速草莓贮藏过程中变色和变软的速度。Victor^[47]研究表明振动损伤会明显改变香蕉的风味。

4.2 运输振动对果实后熟软化的影响

研究表明在水果采后运输过程中,皮薄脆嫩的果实受振动胁迫影响更大,机械损伤会加速果胶类物质的水解,破坏细胞壁的组织结构,细胞膜透性增强,细胞组成成分在各类酶的催化作用下发生降解而使果实迅速变软。评价果实后熟软化的指标主要有:硬度、相对电导率、果胶含量、纤维素含量等。果实硬度可以用来表示果实细胞壁的变化,经过运输振动后的水果硬度快速降低,说明其细胞壁结构遭到了破坏。相对电导率是用来描述物质中电荷流动难易程度的参数,它的变化可以反映出果实细胞膜透性的变化,果实成熟度越高其相对电导率越大。果胶和纤维素含量对应表征果实细胞壁结构成分的变化,经运输振动后的果实内原果胶含量越来越少,纤维素含量则明显增加。

王艳颖^[48]等在红富士苹果上的研究发现,机械损伤导致果实迅速软化的原因是原果胶含量明显减少,可溶性果胶和纤维素含量明显升高。解静^[49]研究发现,机械损伤会破坏果实结构,促进底物与酶的接触,造成细胞壁网状结构解体,使果实原果胶含量和硬度降低。李正国^[50]研究发现振动胁迫会破坏果实组织细胞膜系统和细胞壁结构的完整性,从而加快果实采后贮藏期间的成熟衰老和软化进程。刘俊围^[51]对香蕉的采后贮藏品质研究发现,随着贮藏时间的增加香蕉的电导率一直在增加,在一定程度上说明随着贮藏时间的延长,香蕉的细胞膜完整性受到的破坏程度在增大。

4.3 运输振动对果实呼吸速率和乙烯释放速率的影响

对于呼吸跃变型水果,乙烯的释放会明显加速果实的成熟衰老。研究表明运输振动胁迫会影响果实的呼吸作用,甚至改变某些水果组织的呼吸途径,从而影响水果采后流通过程中的贮藏品质。一般情况下果实的呼吸强度是随振动强度的增加而增加,但在振动强度高于临界强度时呼吸强度则会下降^[52]。乙烯是果实在采后后熟过程中重要的生理物质,同时也可抵御外界逆境。

官晖^[17]的研究表明蜜瓜果实的呼吸速率随着振动强度的增大而增大,而且垂直振动对蜜瓜果实呼吸速率增强作用要大于水平振动。在苹果^[53]和水蜜桃^[54]的研究上也表明呼吸速率随振动强度增大而增大。在研究振动胁迫对无花果、草莓等多种果实的影响时也发现了类似的结果^[55-56]。以上实验研究表明振动胁迫作用使果实为了抵抗外界逆境条件而发生增强自身呼吸强度的应激反应。马海军等^[57]研究发现富士苹果受振动损伤后48 h内,其乙烯释放量随损伤程度增大而明显增大。受振动处理后的杨梅果实内源乙烯生成量呈先下降后上升的趋势并明显高于对照果实^[39]。研究学者表示这是一种应激反应,表现为果实为抵御振动胁迫的促软化衰老作用

而先减少乙烯合成量,后又受振动胁迫影响逐渐减弱抵御作用而使乙烯生成量增加。Mao等^[58]发现振动胁迫会加速无花果果实呼吸和乙烯产生,甚至破坏果实细胞完整性。

4.4 振动胁迫对果实抗氧化代谢的影响

果实采后仍然进行着氧化自由基的产生与清除以保证果实代谢的稳定。振动胁迫在植物贮藏期间的衰老过程中,细胞自由基会大量产生对植物组织的毒害作用,从而因其果实活性氧代谢平衡被破坏。主要涉及指标有:过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)3种抗氧化酶活性以及丙二醛(MDA)、超氧阴离子(O_2^-)、过氧化氢(H_2O_2)的含量^[59]。在水果贮藏过程中,抗氧化酶系统的活性是评价其采后贮藏品质的重要指标^[60]。而SOD、POD和CAT是活性氧防御系统的主要酶系统^[61],其酶活性高低可以作为判断果蔬贮藏性高低的指标和品质衰老的标志。超氧化物歧化酶(SOD)是植物自身适应性调节的活性氧自由基清除系统和维持活性氧代谢平衡的重要保护酶^[62]。MDA是膜脂过氧化最重要的产物之一,它的产生还能加剧膜的损伤,因此可通过MDA了解膜脂过氧化的程度,以间接测定膜系统受损程度以及果实的抗逆性。

郑永华等^[39]研究发现振动胁迫可以加速杨梅果实SOD活性从而促进果实的后熟衰老。应铁进等^[56]对草莓的研究发现,受振动胁迫的果实SOD活性在整个贮藏期间都明显高于没有受振的草莓果实。Victor Martins Maia等^[47]研究表明,碰伤和擦伤明显提高了香蕉果实的POD活性。振动胁迫启动了某些衰老和相应的保护机制而促进SOD的活性升高,使果实机体的抗逆性增强并且破坏了活性氧代谢的产生与清除的平衡。

5 总结与展望

5.1 目前采取的措施

目前针对减少长途运输中车辆运输振动对水果造成的机械损伤,国内农产品流通市场采取的主要应对措施有:采用冷链物流运输水果,选择运输时长最短的方式和路线,改进水果运输的包装方式,包括化学涂膜包装。

由于冷链物流在保证产品质量和品质、降低损耗等方面的优越性,冷链物流受到人们前所未有的关注和重视。近年来我国冷链物流需求增幅加快,冷链物流企业逐步发展,冷链物流信息技术水平不断提高。冷链物流的使用对象绝大部分都是农产品。农产品冷链物流是指使生鲜农产品从产地采收后,在产品加工、贮藏、运输、分销、零售等环节始终处于适宜的低温控制环境下,最大程度地保证产品品质和质量安全、减少损耗、防止污染的特殊供应链系统^[63]。另外还有在水果运输前对其进行提前预冷,预冷在产地进行,以尽量延长水果的保鲜期。如果运输过程中不能做到冷藏车运输,也可以对水果进行加冰冷藏。在中国,荔枝运输大多采用加冰块运输,这样既能保证荔枝的口感,也能延长荔枝的销售期。长途运输进行选择交通工具较快

的运输方式,避免运输途中时间过长造成水果霉烂变质。长途运输的果品应选择品质优良的,避免劣质品质的水果运输,防止运输过程中尽心霉烂传播。

目前水果运输包装的主要形式有:衬板、泡沫塑料、气垫薄膜、现场发泡等。另一种涂膜包装的方式是在果实表面涂上一层高分子的液态膜,干燥后成为一层很均匀的膜,可以隔离果实与空气进行气体交换,从而改善了果实的硬度和新鲜饱满程度,并减少病原菌的侵染而造成的腐烂。

5.2 存在的不足

目前我国综合冷链流通率仅为19%,其中果蔬、肉类、水产品冷链流通率分别为5%、15%、23%。而美、日等发达国家的冷链流通率达到85%,其中欧、美、加、日等发达国家肉禽冷链流通率已经达到100%,蔬菜、水果冷链流通率也达95%以上^[15]。与发达国家相比,我国冷链流通率明显较低。这主要是由于冷链物流需投入的成本较高,而广大消费者尚不完全能接受水果价格的上涨,对冷链运输认知不足,并且我国冷链基础设施尚处在逐步完善的过程中。

综上所述,已经表明长途运输的机械振动会影响水果在采后流通过程中的贮藏品质。以前的研究还指出运输过程中的振动胁迫会使得果实外部和内部反复承受着挤压、冲击、摩擦等外载作用,不同的振动强度对果实造成的可见损伤的程度不同,振动强度越大,则果实损耗越严重^[64]。一般来说,随着运输包装的发展,目前已经能够大大的降低运输导致的水果可见的机械损伤^[65],而一些肉眼看不见的机械损伤仍然难以避免,这些肉眼不可见的损耗是否可以加以利用,变害为利,这一点值得深思探寻。

5.3 未来研究方向

以往的研究集中在如何能够尽量减少运输中振动胁迫造成成熟水果品质下降方面。事实上,为了抢占市场,大多数后熟水果并不是在完全成熟时采摘,而我们已知运输振动会促进果实的成熟软化,这就使得利用振动催熟具有可行性。然而,尚未见到振动催熟水果的相关研究报道。所以未来的研究方向可以尝试利用振动可催使未成熟水果成熟软化来实现振动物理催熟的方式,从而取代传统意义上的化学试剂催熟水果。

可以对需要进行催熟处理的水果进行实验,即后熟型水果。通过研究,一方面先分析振动胁迫对运输贮藏过程中水果组织状态的影响机理,总结规律,为进一步揭示振动催熟水果的原理奠定基础;另一方面,对振动胁迫处理后水果的品质变化进行分析,获取较合适的振动催熟条件,并建立基于振动胁迫条件水果品质的预测模型,为未来出现振动催熟水果的机械装置提供理论支持。

通过对振动催熟机理的研究,我们可以了解水果后熟的产生过程和原理,为进一步阐明振动胁迫影响采后水果生命活动的规律奠定基础,因此对水果果实的储运保鲜具有重大意义。同时,还可为水

果农产品储运保鲜领域的其它复杂问题的揭示和解决提供新的模式和思路,减少目前水果催熟过程中化学药剂的使用,有效地消除消费者对食品安全隐患的顾虑,因此也具有非常重要的现实意义。

参考文献

- [1]单杨.中国果蔬加工产业现状及发展战略思考[J].中国食品学报,2010,10(1):1-9.
- [2]朱君,蔡延光,汤雅连.水果运输调度问题的优化[J].北京联合大学学报,2014,28(2):79-84.
- [3]Griffiths K, Shires D, White W, et al. Correlation study using scuffing damage to investigate improved simulation techniques for packaging vibration testing [J]. Packaging Technology and Science, 2013, 26(7):373-383.
- [4]李培庆,何杰,黄永升,等.基于改进遗传算法的带软时间窗果蔬运输路径选择问题[J].交通信息与安全,2015,33(5):29-35.
- [5]李萍,王若伊,林顿,等.果蔬运输振动损伤及其减振包装设计[J].食品工业科技,2013,34(5):353-357.
- [6]郑永华.食品贮藏保鲜[M].北京:中国计量出版社,2006.
- [7]袁洪超,赵正栋,郑丽英,等.果实损伤与乙烯释放关系研究[J].陕西理工学院学报(自然科学版),2014,30(5):56-58,63.
- [8]陈勇.现代物流发展与我国农村物流体系的重构[J].农业经济问题,2006(4):74-76.
- [9]张慙.我国果蔬汁饮料加工现状及发展对策[J].食品与机械,2000,76(2):4-6.
- [10]Samir K, Srivastava. Green Supply - chain Management: A state-of-the-art literature review [J]. Management Reviews, 2007, 13(9):53-80.
- [11]Takeo Shina. Logistics of Fruit and Vegetables [J]. Farming Japan, 2003, 37(5):26-36.
- [12]Cakmak B, Alayunt F N, Akdeniz R C, et al. Assessment of the quality losses offresh fig fruits during transportation [J]. Journal of Agricultural Sciences, 2010, 16(3):180-193.
- [13]Shahbazi F, Rajabipour A, Mohtasebi S, et al. Simulated in-transit vibration damage to watermelons [J]. Journal of Agriculture Science and Technology, 2010, 12(1):23-34.
- [14]Van Zeebroeck M, Tijskens E, Dintwa E, et al. The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling: case study of vibration damage during apple bulk transport [J]. Postharvest Biology and Technology, 2006, 41(1):92-100.
- [15]袁学国,邹平,朱军,等.我国冷链物流业发展态势、问题与对策[J].中国农业科技导报,2015,17(1):7-14.
- [16]周然,李云飞.不同强度的运输振动对黄花梨的机械损伤及贮藏品质的影响[J].农业工程学报,2007,23(11):255-259.
- [17]官晖,杨晓清,宋晓宇,等.振动对河套蜜麻采后生理特性影响的研究[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2009(1):142-145.
- [18]周然,谢晶.运输过程中哈密瓜品质的影响因素及其解决方案研究[A].上海市制冷学会:上海市制冷学会2013年学

术年会论文集[C].上海市制冷学会,2013.

- [19]康维民,肖念新,蔡金星,等.稳定振动条件下梨的振动损伤研究[J].农业机械学报,2004(3):105-108.
- [20]康维民,肖念新,蔡金星,等.模拟3自由度振动条件下水果运输振动加速度传递率及损伤研究[J].农业工程学报,2003(6):219-222.
- [21]刘迎雪,卢立新.振动对小番茄生理特性的影响[J].包装工程,2007,28(6):20-21.
- [22]Hinsch R T, Slaughter D C, Craig W L, et al. Vibration of Fresh Fruits and Vegetable during Refrigerated Truck Transport [J]. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1993, 36(4): 1039-1042.
- [23]智秀娟,周林森.浅谈振动理论在缓冲防振包装中的应用[J].水利电力机械,2005,27(4):41-43.
- [24]周然,李云飞.不同强度的运输振动对黄花梨的机械损伤及贮藏品质的影响[J].农业工程学报,2007,23(11):255-259.
- [25]Jarimopas B, Singh S P, Saengnil W. Measurement and analysis of truck transport vibration levels and damage to packaged tangerines during transit [J]. Packaging Technology and Science, 2005, 18: 179-188.
- [26]Jamal N, Yi-bin Y, Jian-ping W, et al. Firmness Evaluation of Melon Using its Vibration Characteristic and Finite Element Analysis [J]. Journal of Zhejiang University Science, 2005(6): 483-490.
- [27]祝青园,陈度,滕海,等.基于虚拟仪器的水果运输损伤诊断系统研究[C].中国仪器仪表学会、北京自动化学会《仪器仪表学报》杂志社、《国外电子测量技术》杂志社、《电子测量技术》杂志社、第三届全国虚拟仪器大会论文集、中国仪器仪表学会、北京自动化学会、《仪器仪表学报》杂志社、《国外电子测量技术》杂志社、《电子测量技术》杂志社,2008.
- [28]黄祥飞,卢立新.梨果实共振特性及振动损伤的实验研究[J].包装工程,2008(7):1-3.
- [29]张连文,杨传民,孟宪文,等.圣女果运输包装件振动冲击性能实验研究[J].振动工程学报,2011,24(1):73-77.
- [30]Slaughter D C, Hinsch R T, Thompson J F. Assessment of Vibration Injury to Bartlett Pears [J]. Transactions of the ASAE, 1993, 36(4): 1043-1047.
- [31]Barchi G L, Berardinelli A, Guarneri A, et al. Damage to loquats by vibratiosimulating intrastate transport [J]. Biosystems Engineering, 2002, 82(3): 305-312.
- [32]卢立新,黄祥飞,华岩.基于模拟运输条件的梨果实包装振动损伤研究[J].农业工程学报,2009,25(6):110-114.
- [33]陈元生,潘见,高良润,等.草莓疲劳损伤实验研究[J].农业机械学报,1990(1):75-82.
- [34]李小昱,王为.苹果运输振动损伤初探[J].西北农业大学学报,1998,26(4):25-29.
- [35]孙一源,余登苑.农业生物力学及农业生物电磁学[M].北京:中国农业出版社,1996:238-243.
- [36]刘劲,赵延伟.包装测试技术[M].长沙:湖南大学出版社,1989.
- [37]Singh J, Singh S P, Joneson E. Measurement and analysis of US truck vibration for leaf spring and air ride suspensions, and

- development of tests to simulate these conditions [J]. Packaging Technology and Science, 2006(19):30-33.
- [38]Valentina C, Giovanna G. Shelf-life extension of highbush blueberry using 1-methylcyclopropene stored under air and controlled atmosphere [J]. Food Chemistry, 2011, 126(4): 1812-1816.
- [39]郑永华,应铁进,席均芳,等.振动胁迫对杨梅果实采后衰老生理的影响[J].园艺学报,1996(3):25-28.
- [40]陈蔚辉,彭惠琼.机械损伤对橄榄采后品质及其生理的影响[J].食品科学,2008(1):329-333.
- [41]圣光,夏欣.纸浆模塑工艺与技术[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [42]马福昌,吕迎春,李怀恩.电子舌及其应用研究[J].传感器技术,2004,23(9):1-3.
- [43]Laothawornkitkul J, Jansen RMC, Smid HM, et al. Volatile organic compounds as a diagnostic marker of late blight infected potato plants: A pilot study [M]. Crop Protection, 2010: 1-7.
- [44]张晓华,张东星,刘远方,等.电子鼻对苹果货架期质量的评价[J].食品与发酵工业,2007,33(6):20-23.
- [45]高利萍.基于电子鼻和电子舌的草莓鲜榨汁的检测[D].杭州:浙江大学,2012.
- [46]陈守江,张德静.机械伤对草莓贮藏期间生理变化的影响[J].保鲜与加工,2006(1):16-17.
- [47]Victor Martins Maia, Luiz Carlos Chamhum Salomão, Dalmo Lopes Siqueira, et al. Physical and metabolic alterations in "Prata Anã" banana induced by mechanical damage at room temperature [J]. Sci Agric (Piracicaba, Braz), 2011, 68(1):31-36.
- [48]王艳颖,胡文忠,庞坤,等.机械损伤对富士苹果采后软化生理的影响[J].食品研究开发,2008,29(5):132-135.
- [49]解静.1-MCP对番茄冷害及机械损伤的影响[D].杭州:浙江大学,2010.
- [50]李正国,苏彩萍,王贵禧.振动胁迫对猕猴桃果实成熟衰老生理的影响[J].农业工程学报,2000,16(4):142-143.
- [51]刘俊围.香蕉冷冻和贮藏过程中品质变化规律及控制研究[D].广东:广东海洋大学,2015.
- [52]俞雅琼.机械损伤对采后砀山酥梨生理生化变化的影响[D].合肥:安徽农业大学,2011.
- [53]王艳颖,胡文忠,庞坤,等.机械损伤对富士苹果生理生化变化的影响[J].食品与发酵工业,2007,33(7):58-62.
- [54]肖丽娟,曾凯芳,曾凡坤.振动胁迫对水蜜桃采后生理的影响[J].保鲜与加工,2006,6(1):21-22.
- [55]茅林春,叶立扬.无花果果实对非外伤性振动的生理反应[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,2000,25(4):423-426.
- [56]应铁进,茅林春,郑永华,等.草莓果实对机械振动胁迫的生理反应与抗性机制研究[J].科技通报,1998(1):2-6.
- [57]马海军,郑彩霞,李猛,等.碰伤富士苹果果实内源茉莉酸和主要保护酶活性的变化[J].西北植物学报,2010,30(10):2002-2009.
- [58]Mao LC, Ying T J, Xi Y F, et al. Respiration rate, ethylene production, and cellular leakage of Fig fruit following vibration stress [J]. Hort Science, 1995, 30(1):145.

(下转第368页)

Interface Science 2010 ,15(4) : 271–282.

[29] Kotsmar C , Pradines V , Alahverdijeva V S , et al. Thermodynamics , adsorption kinetics and rheology of mixed protein–surfactant interfacial layers [J]. Advances in Colloid and Interface Science 2009 ,150(1) : 41–54.

[30] Wan Z L , Wang L Y , Wang J M , et al. Synergistic interfacial properties of soy protein – stevioside mixtures: relationship to emulsion stability [J]. Food Hydrocolloids 2014 ,39: 127–135.

[31] Böttcher S , Scampicchio M , Drusch S. Mixtures of saponins and beta–lactoglobulin differ from classical protein/surfactant – systems at the air–water interface [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 2016 ,506: 765–773.

[32] Dan A , Gochev G , Miller R. Tensiometry and dilational rheology of mixed β –lactoglobulin/ionic surfactant adsorption layers at water/air and water/hexane interfaces [J]. Journal of Colloid and Interface Science 2015 ,449: 383–391.

[33] Noskov B A. Dilational surface rheology of polymer and polymer/surfactant solutions [J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science 2010 ,15(4) : 229–236.

[34] Sun C , Gunasekaran S , Richards M P. Effect of xanthan gum on physicochemical properties of whey protein isolate stabilized oil – in – water emulsions [J]. Food Hydrocolloids ,2007 ,21(4) : 555–564.

[35] Gu Y S , Decker E A , McClements D J. Influence of pH and κ -carrageenan concentration on physicochemical properties and stability of β –lactoglobulin–stabilized oil–in–water emulsions [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry 2004 ,52(11) : 3626–3632.

[36] Bouyer E , Mekhloufi G , Le Potier I , et al. Stabilization mechanism of oil–in–water emulsions by β –lactoglobulin and gum arabic [J]. Journal of Colloid and Interface Science 2011 ,354(2) : 467–477.

[37] Tamm F , Drusch S. Impact of enzymatic hydrolysis on the interfacial rheology of whey protein/pectin interfacial layers at the oil/water–interface [J]. Food Hydrocolloids 2017 ,63: 8–18.

[38] Liu L , Zhao Q , Liu T , et al. Dynamic surface pressure and

dilatational viscoelasticity of sodium caseinate/xanthan gum mixtures at the oil–water interface [J]. Food Hydrocolloids 2011 ,25(5) : 921–927.

[39] Liu L , Zhao Q , Zhou S , et al. Modulating interfacial dilatational properties by electrostatic sodium caseinate and carboxymethylcellulose interactions [J]. Food Hydrocolloids 2016 ,56: 303–310.

[40] Garofalakis G , Murray B S. Dilatational rheology and foaming properties of sucrose monoesters in the presence of β –lactoglobulin [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 2001 ,21(1) : 3–17.

[41] Seta L , Baldino N , Gabriele D , et al. Rheology and adsorption behaviour of β –casein and β –lactoglobulin mixed layers at the sunflower oil/water interface [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 2014 ,441: 669–677.

[42] Wojciechowski K , Orczyk M , Gutberlet T , et al. Complexation of phospholipids and cholesterol by triterpenic saponins in bulk and in monolayers [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes 2016 ,1858(2) : 363–373.

[43] Rossetti D , Ravera F , Liggieri L. Effect of tea polyphenols on the dilational rheology of human whole saliva (HWS) : Part 2 , polyphenols – HWS interaction [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 2013 ,110: 474–479.

[44] Zou Y , Wan Z , Guo J , et al. Tunable assembly of hydrophobic protein nanoparticle at fluid interfaces with tannic acid [J]. Food Hydrocolloids ,2017 ,63: 364–371. Zou Y , Wan Z , Guo J , et al. Tunable assembly of hydrophobic protein nanoparticle at fluid interfaces with tannic acid [J]. Food Hydrocolloids ,2017 ,63: 364–371.

[45] Burke J , Cox A , Petkov J , et al. Interfacial rheology and stability of air bubbles stabilized by mixtures of hydrophobin and β –casein [J]. Food Hydrocolloids 2014 ,34: 119–127.

[46] Pagureva N , Tcholakova S , Golemanov K , et al. Surface properties of adsorption layers formed from triterpenoid and steroid saponins [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 2016 ,491: 18–28.

(上接第362页)

[59] 田平平. 采后处理对杏鲍菇贮藏品质及抗氧化酶系统的影响 [J]. 中国农业科学 2015 ,48(5) : 941–951.

[60] Ayala–zavala J F , Wang S Y , Wang C Y , et al. Effect of storage temperatures on antioxidant capacity and aroma compounds in strawberry fruit [J]. Lebensmittel–Wissenschaft und Technologie 2004 ,37(7) : 687–695.

[61] 刘洪竹 , 赵习姮 , 陈双颖 , 等. 热激处理对鲜切甜椒活性氧代谢及贮藏品质的影响 [J]. 食品工业科技 2014 ,35(1) : 310–314.

[62] 吴彩娥 , 王文生 , 寇晓红. 果实成熟衰老与保护酶系统的关系 [J]. 保鲜与加工 2000 ,1(1) : 5–7.

[63] 国家发改委. 农产品冷链物流发展规划 [EB/OL]. (2010–07–28) [2012–08–30]. <http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/2010tz/W020100730635829888837.pdf>.

[64] Zhou R , Su S , Yan L , et al. Effect of transport vibration levels on mechanical damage and physiological responses of Huanghua pears (Pyrus pyrifolia Nakai , cv. Huanghua) [J]. Postharvest Biology and Technology 2007(46) : 20–28.

[65] Zhou R , Su S , Li Y. Effects of inner packages on the firmness of Huanghua pears (Pyrus Pyrifolia Nakai , Huanghua) during distribution and storage [J]. Packaging Technology and Science , 2008(21) : 1–11.