



热带亚热带水果采后贮藏及保鲜技术研究进展

吴娱, 孔令熙, 罗炜林, 黄凯鹏, 蔡雪晴, 董丽梅

引用本文:

吴娱, 孔令熙, 罗炜林, 等. 热带亚热带水果采后贮藏及保鲜技术研究进展[J]. 热带亚热带植物学报, 2026, 34(4): 479–488.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.5034>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

我国果蔬采后生理学进展

Advances in Postharvest Physiology of Fruits and Vegetables in China

热带亚热带植物学报. 2019, 27(5): 558–564 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4090>

全球变化背景下陆地植物N/P生态化学计量学研究进展

Research Progress of Terrestrial Plants N/P Ecological Stoichiometry under Global Change

热带亚热带植物学报. 2019, 27(5): 534–540 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4112>

华南地区亚热带树木叶面积指数的高光谱反演研究

Hyperspectral Inversion of Leaf Area Index of Subtropical Vegetation in South China

热带亚热带植物学报. 2018, 26(4): 323–334 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3840>

夏季南亚热带森林演替中后期优势种幼叶花色素苷的光保护作用

Photoprotection of Anthocyanins in Young Leaves of Dominant Tree Species at Mid–and Late–successional Stages of Low Subtropical Forest in Summer

热带亚热带植物学报. 2018, 26(4): 363–374 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3838>

基于植物功能性状的生态学研究进展:从个体水平到全球尺度

Plant Functional Traits: From Individual Plant to Global Scale

热带亚热带植物学报. 2019, 27(5): 523–533 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4108>

向下翻页, 浏览PDF全文

热带亚热带水果采后贮藏及保鲜技术研究进展

吴娱, 孔令熙, 罗炜林, 黄凯鹏, 蔡雪晴, 董丽梅*

(广东生态工程职业学院, 广州 510520)

摘要: 热带亚热带水果因水分含量高、代谢旺盛且易受病原菌侵染, 采后极易发生品质劣变。本文系统梳理了广东省主要种植的香蕉、荔枝、无花果在贮藏过程中的生理特性, 包括呼吸作用、乙烯释放、抗氧化系统及微生物侵染等方面的规律, 详细阐述了物理、化学、生物等保鲜技术的研究进展, 并探讨了纳米技术、基因工程等新兴技术在该领域的应用前景, 以期对相关领域新技术的研发提供理论参考。

关键词: 香蕉; 荔枝; 无花果; 采后贮藏; 保鲜技术

doi: 10.11926/jtsb.5034 CSTR:32235.14.jtsb.5034

Research Advances on Postharvest Storage and Preservation Technology of Tropical and Subtropical Fruits

WU Yu, KONG Lingxi, LUO Weilin, HUANG Kaipeng, CAI Xueqing, DONG Limei*

(School of Horticulture and Food, Guangdong Eco-Engineering Polytechnic, Guangzhou 510520, China)

Abstract: Tropical and subtropical fruits, due to their high water content, vigorous metabolism and susceptibility to pathogen infection, are prone to quality deterioration after harvest. This paper systematically reviews the physiological characteristics of bananas, lychees and figs, which are mainly cultivated in Guangdong Province, during storage, including the patterns of respiration, ethylene release, antioxidant systems and microbial infection. It elaborates in detail on the research progress of various preservation technologies such as physical, chemical and biological methods, and explores the application prospects of emerging technologies such as nanotechnology and genetic engineering in this field, with the aim of providing theoretical references for the development of new technologies in related areas.

Key words: Banana; Litchi; Fig; Post-harvest storage; Preservation technology

热带亚热带水果凭借独特风味、丰富营养及鲜艳色泽深受消费者喜爱。广东作为我国主产区, 香蕉(*Musa nana*)、荔枝(*Litchi chinensis*)、无花果(*Ficus carica*)等水果产量占全国前列: 2023 年广东省香蕉产量达 4.78×10^6 t, 占全国总产量的 40.87%, 稳居

首位; 2023 年广东荔枝产量达 1.63×10^6 t, 约占全国总产量的 60%; 无花果产业近年来在粤发展迅猛, 虽缺乏精确统计数据, 但据估算其年产量占全国比重超 30%^[1-2]。从营养价值分析, 香蕉富含碳水化合物、蛋白质、膳食纤维及钾、镁等微量元素, 可有

收稿日期: 2025-05-28 接受日期: 2025-08-20

基金项目: 广东省普通高校青年创新人才类项目(2024KQNCX277); 广东省普通高校特色创新项目(2022KTSCX283); 广东省科技创新战略专项(pdjh2025bc359); 广东省普通高校重点领域专项(2023ZDZX4104); 广州市科技计划项目(2023A04J1110); 广东省林学会科技计划项目(2021-GDFS-KJ-03); 广东省普通高校创新团队项目(2023KCXTD069)资助

This work was supported by the Project for Youth Innovation Talent of General Universities in Guangdong (Grant No. 2024KQNCX277), the Characteristic Innovation Project of General Higher Education Institutions in Guangdong (Grant No. 2022KTSCX283), the Special Project for Science and Technology Innovation Strategy in Guangdong (Grant No. pdjh2025bc359), the Special Project in Key Field of General Higher Education Institutions in Guangdong (Grant No. 2023ZDZX4104), the Project for Science and Technology Planning in Guangzhou (Grant No. 2023A04J1110), the Project for Science and Technology Planning of Guangdong Forestry Society (Grant No. 2021-GDFS-KJ-03), and the Project for Innovation Team of General Higher Education Institutions in Guangdong (Grant No. 2023KCXTD069).

作者简介: 吴娱(1991 年生), 女, 博士, 从事果蔬采后保鲜研究。E-mail: wuyu163eemail@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dlm0728@163.com

效补充能量、缓解疲劳^[3]；荔枝糖分含量高，维生素 C 与蛋白质协同作用，有助于提升机体免疫力^[4]；无花果含有 18 种氨基酸，其中天门冬氨酸含量显著，且多种酶类物质具备促进消化功能，兼具食用与药用价值^[5]。然而，这类水果采后极易发生品质劣变，造成严重经济损失^[6]。为此，系统研究热带亚热带水果采后生理特性，并开发高效保鲜技术，对降低产业损耗、推动可持续发展具有重要的理论与实践意义。

本文聚焦广东主产的香蕉、荔枝、无花果，系统梳理热带亚热带水果采后生理变化规律及保鲜技术研究进展，深入剖析当前保鲜难题与解决方案。通过全面分析现有技术的优势与局限，进一步探讨保鲜技术的未来发展方向，旨在为热带亚热带水果采后保鲜技术研发提供理论支撑与实践参考。

1 热带亚热带水果采后生理特性

1.1 呼吸作用

果蔬采收后，虽然同化作用基本停止，但其仍为活体，呼吸作用仍在进行^[7]。呼吸作用的强弱直接决定果蔬贮藏寿命的长短。一般来说，呼吸作用越旺盛，果蔬内各种营养物质的流失就越严重，其货架期也就越短^[8]。

香蕉属于典型的呼吸跃变型水果。采后随着时间推移，呼吸速率会逐渐上升，出现明显的呼吸高峰。在呼吸跃变期间，果实内部的淀粉会迅速转化为糖分，使果实甜度增加，同时果实硬度下降，逐渐成熟变软^[9]。荔枝虽归为非呼吸跃变型水果，但采后呼吸速率相对较高。在常温下，荔枝果实会持续进行较强的呼吸作用，消耗大量的氧气并产生二氧化碳，导致果实内部的营养物质快速消耗，从而影响果实的品质和贮藏寿命^[10]。无花果虽被归类为呼吸跃变型果实，但在 20℃ 下，其乙烯生成量为 1.0~10.0 $\mu\text{L}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ ，呼吸速率维持在 10~20 $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ ，乙烯生成量和呼吸速率一直较为平稳，并未出现明显的呼吸跃变峰^[11]。因此，无花果不具备典型呼吸跃变型水果的特点，即没有明显的后熟现象，应当在达到成熟阶段时进行采摘，且采摘之后，随着呼吸作用的增强，果实会迅速软化并腐烂^[12]。

1.2 乙烯释放

乙烯作为关键植物激素，在果实成熟与衰老过程中发挥重要调控作用，但不同水果对乙烯的响应

存在差异。香蕉属于典型呼吸跃变型水果，对乙烯极为敏感，采后自身会大量合成乙烯，促使香蕉加快成熟^[13]。荔枝属于非呼吸跃变型水果，采后乙烯生成量较低，乙烯对其成熟衰老的影响不如呼吸跃变型水果显著。然而，在贮藏过程中，若荔枝受到机械损伤、病虫害或不良环境条件影响，也会产生一定量乙烯，加速果实变质^[14]。对于无花果而言，乙烯通常无法直接诱导其成熟进程^[15]。在常温下，无花果采摘后 2 d 内，乙烯释放量下降，随后维持相对稳定状态，而经冷藏处理、气调贮藏的果实，乙烯释放量降幅则更为明显^[16]。

1.3 抗氧化系统

果实的衰老，从本质上来说是一种氧化反应，活性氧(ROS)的不断生成和累积成为引发植物遭受氧化损伤的主要因素。ROS 的过量积累会引发氧化应激反应，导致采后果蔬出现呼吸代谢紊乱、能量供应不足以及生物膜功能衰退等一系列问题，进而加速果实的衰老进程，并且还有可能引发冷害、褐化、质地软化等多种品质下降的现象^[17]。植物体内存在一套由超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)等抗氧化酶构成的 ROS 清除防御系统。这些酶能够协同作用，维持细胞内的 ROS 代谢平衡，减轻细胞氧化损伤，从而保护果蔬的品质^[18]。

香蕉作为呼吸跃变型水果，采后呼吸作用和乙烯合成增强，会促使 ROS 大量产生。在成熟衰老进程中，香蕉果实内 SOD、POD 和 CAT 等抗氧化酶活性起初会因 ROS 刺激而升高以应对氧化压力，但随着衰老加剧，这些抗氧化酶活性逐渐下降，无法及时清除过量 ROS，导致细胞膜脂过氧化加剧，加速果实软化、褐变和腐烂^[19-20]。

荔枝采后呼吸速率较高，在旺盛的呼吸代谢过程中会产生较多 ROS，且荔枝皮薄易失水，水分散失会破坏细胞结构，促使 ROS 积累。其抗氧化酶系统在采后初期能够维持 ROS 代谢平衡，但随着贮藏时间延长，POD 活性逐渐降低，ROS 积累加速，导致果皮褐变、果肉劣变衰老^[21]。

无花果常温贮藏时，其体内 SOD、POD 和 CAT 活性均随时间逐渐减弱，与之相对应的无花果果肉中超氧阴离子(O_2^-)生成率及过氧化氢(H_2O_2)含量则呈上升趋势。相比之下，在低温储存条件下，低温能够有效减缓无花果中 SOD、POD 和 CAT 活性的降低速度，并显著抑制果肉中超氧阴离子(O_2^-)生成

率以及 H_2O_2 含量^[22]。

抗坏血酸-谷胱甘肽循环(AsA-GSH 循环)作为植物体内重要的抗氧化系统之一,在维持细胞内 ROS 稳态方面同样发挥着关键作用。当抗氧化酶系统无法充分清除 ROS 时,AsA-GSH 循环便作为一种补充机制,继续发挥功效,以确保细胞内 ROS 水平维持在较低状态。抗坏血酸(AsA)和谷胱甘肽(GSH)作为抗氧化物质,不仅是 AsA-GSH 循环的关键组成部分,还可以直接参与自由基的清除反应并且在果实的成熟衰老过程中其含量也会发生变化^[23]。研究表明,纤维蛋白处理香蕉可降低贮藏期果皮褐变指数与活性氧水平,提高谷胱甘肽含量^[24];微酸性电解水处理荔枝能保持还原型抗坏血酸与谷胱甘肽水平,抑制超氧阴离子自由基产生及过氧化氢^[25];1-甲基环丙烯和气调包装处理无花果可维持抗坏血酸、谷胱甘肽等物质含量,提升活性氧清除酶活性,有效维持其营养和品质^[26]。

1.4 微生物侵染

微生物侵染是水果采后品质下降的关键因素。其病害发生受果实自身状态、病原菌特性及贮藏条件三大核心因素调控,当前学界对水果病害的研究,也主要围绕这3个方面进行。Delaunoy 等^[27]深入剖析植物对病原菌侵染的响应过程,并系统阐释其机制(图1)。当真菌等病原菌侵染植物时,植物首先通过细胞膜上的模式识别受体识别病原菌表面的微生物相关分子模式,同时,植物细胞受损释放的损伤相关分子模式(DAMP)也会被识别,启动感知与信号转导过程。随后,植物细胞迅速产生活性

氧、草酸氧化酶、超氧化物歧化酶、过氧化物酶等参与其中,ROS 既能直接氧化损伤病原菌生物大分子,又可作为信号激活下游防御。接着,多聚半乳糖醛酸酶、 α -半乳糖苷酶等作用于细胞壁,重塑其结构,增强物理屏障,阻碍病原菌扩散。最后,植物大量合成防御相关蛋白,如具抗菌活性的 PR1,能分解真菌细胞壁成分的几丁质酶、葡聚糖酶,以及脂肪酶、蛋白酶、凝集素等,从多层面协同抵御病原菌侵染,构建复杂防御体系。

香蕉、荔枝、无花果这3种水果在结构和生理特性上的差异,使得它们易受不同微生物侵害,引发腐烂变质。香蕉皮薄,在采收、运输过程中极易产生机械损伤,这些损伤为炭疽菌(*Bacillus anthracis*)、镰刀菌(*Fusarium*)等病原菌的入侵提供了途径。炭疽菌会在香蕉果实成熟前潜伏,成熟时大量繁殖,导致果实出现黑色凹陷病斑^[28]。荔枝果皮薄且带有龟裂片结构,表面存在大量微小缝隙,果实采后呼吸旺盛,果皮气孔持续开合,为荔枝霜霉菌(*Pero-nophthora litchii*)提供了附着和入侵的通道。荔枝霜霉菌侵染荔枝后,会在果皮表面形成白色霜状霉层,加速果皮褐变^[29]。此外,荔枝采后在常温下极易失水,果皮皱缩破损后,更易遭受微生物的进一步侵染^[30]。无花果的表面亦有许多气孔,同样为微生物的入侵提供了通道^[31]。无花果采后,细菌、霉菌和酵母菌等微生物容易附着在果实表面,并在适宜的条件下生长繁殖,最终导致果实霉变、腐烂,如常见的灰霉病会在无花果表面形成灰色的霉层,使果实失去食用价值^[32]。

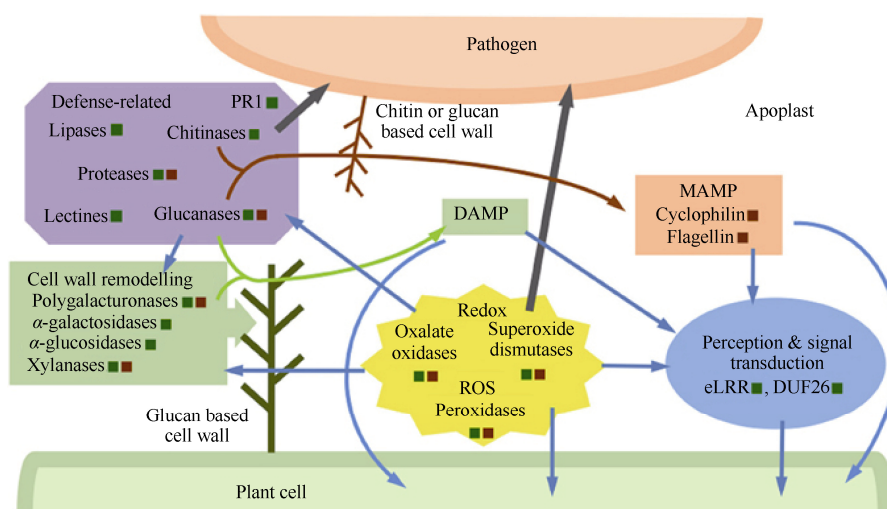


图1 植物响应真菌侵染时的生理变化^[27]

Fig. 1 Physiological changes of plants in response to fungal infection^[27]

2 热带亚热带水果采后贮藏及保鲜技术

2.1 物理保鲜技术

2.1.1 低温贮藏

贮藏温度对热带亚热带水果保鲜品质有着关键影响,低温贮藏技术通过降低温度,抑制果实呼吸及其他代谢过程,从而减少果实水分蒸发、降低呼吸作用强度和乙烯产生量^[33]。然而,不同水果对低温的耐受能力和适宜贮藏温度存在明显差异。

香蕉作为典型的热带呼吸跃变型水果,对低温较为敏感,其最适贮藏温度为 12℃~14℃。若贮藏温度低于该范围,香蕉易发生冷害,表现为果皮出现灰褐色斑块、果肉褐变、无法正常后熟等症状,而温度过高则会加速果实呼吸跃变进程,导致成熟过快、腐烂加剧。在 12℃~14℃下,香蕉的呼吸速率和乙烯释放量显著降低,果实的软化和糖分转化速度得到有效控制,从而延长货架期^[9]。

荔枝的适宜贮藏温度为 1℃~5℃。低温能够显著抑制荔枝的呼吸作用,延缓果实衰老和褐变。但荔枝对低温的适应性相对有限,当贮藏温度低于 1℃时,容易发生冷害,表现为果皮褐变加剧、果肉风味变差。在 1℃~5℃环境下,荔枝果实内的多酚氧化酶(PPO)活性受到抑制,减缓了果皮褐变速度,同时,低温还能降低微生物的生长繁殖速度,减少果实腐烂^[34]。

无花果的抗低温能力较强,其冰点温度为 -2.4℃,相较于香蕉和荔枝更不易受到冷害,适合采用低温贮藏^[35]。以新疆早黄无花果为研究对象,通过监测呼吸速率、乙烯释放量、抗氧化酶活性和丙二醛(MDA)含量等指标发现,0℃~2℃的低温环境可显著延长果实贮藏期。在此温度下,无花果的呼吸速率和乙烯释放量明显降低,果实内 SOD、POD 等抗氧化酶活性下降速度减缓,有效缓解了 MDA 的累积,维持细胞膜的完整性,从而延缓果实衰老和腐烂^[36]。

2.1.2 气调贮藏

气调贮藏是通过调节贮藏环境气体成分来延长果实贮藏寿命的技术^[37]。其核心原理是降低氧气浓度、提高二氧化碳浓度,从而抑制果实呼吸作用与乙烯生成^[38]。荔枝气调贮藏研究表明,1% O₂ 和 5% CO₂ 的环境可显著减少重量损失和果皮褐变,保持可溶性固形物等营养成分,延缓褐变并维持抗氧化活性^[39]。无花果采用不同微孔膜的改良气调包

装,能延长冷藏时间,减少重量损失,延缓内腐病等病理性失调,冷藏 21 d 内仍可保持良好理化品质^[40]。

2.1.3 辐照保鲜

辐照保鲜是利用放射性同位素产生的射线或电子加速器产生的高能电子束对无花果进行照射,杀死果实表面的微生物,延缓果实的成熟和衰老^[41]。研究表明适量的辐照处理(0.5~1.0 kGy 的 γ 射线)可有效抑制香蕉炭疽菌、青霉菌等病原菌的生长,延缓果实腐烂^[42]。同时,辐照能降低香蕉乙烯合成关键酶 1-氨基环丙烷-1-羧酸合成酶(ACS)和 1-氨基环丙烷-1-羧酸氧化酶(ACO)的活性,减缓果实成熟速度^[43]。采用 0.3~0.6 kGy 的 ⁶⁰Co- γ 射线辐照荔枝,能有效杀灭果皮和果肉表面的霉菌、酵母菌等微生物,降低果实腐烂率并抑制荔枝果皮中多酚氧化酶和过氧化物酶的活性,减缓褐变进程^[44]。此外,辐照处理对荔枝的香气成分和营养物质影响较小,有助于保持果实的食用品质^[45]。蔚江涛等^[46]研究表明,⁶⁰Co- γ 辐照可减轻无花果腐烂程度,并且辐照处理对无花果的可溶性固形物含量无显著影响,可延缓无花果感官品质的劣变进程。

2.2 化学保鲜技术

2.2.1 乙烯抑制剂

1-甲基环丙烯(1-MCP)是一种低毒性的乙烯抑制剂,可与果实细胞中的乙烯受体结合,从而阻止受体与乙烯的结合,以此延缓果实衰老^[47]。研究表明,0.3~0.45 μ L/L 浓度的 1-MCP 能显著延迟香蕉成熟,减缓果皮上糖斑的形成,保持果实硬度^[48]。荔枝对 1-MCP 的敏感性相对较低,1.0~1.5 μ L/L 的 1-MCP 处理能有效抑制果皮褐变和果肉劣变,降低乙烯生成量,延长保鲜期^[49]。无花果经 0.5~1.0 μ L/L 1-MCP 处理后,可延迟呼吸跃变的启动,减缓果实硬度下降和糖分转化速度,保持较好的商品性状^[50]。

2.2.2 杀菌剂

杀菌剂能够有效抑制水果采后病原菌的生长繁殖,降低腐烂率。常见的杀菌剂分为咪唑类和甲氧基丙烯酸酯类。抑霉唑作为咪唑类杀菌剂,通过抑制真菌细胞中细胞色素 P450 依赖性甾醇 14 α -脱甲基酶(CYP51)活性,阻断麦角甾醇合成,从而破坏细胞膜结构、增加通透性,抑制病原菌生长繁殖。啞菌酯属于甲氧基丙烯酸酯类杀菌剂,作用于真菌线粒体的细胞色素 bc1 复合体(呼吸链复合体 III),抑制电子传递,阻断 ATP 合成,导致真菌细胞能量代谢受阻,香蕉采后易受炭疽菌、青霉菌侵染,经

0.05%~0.1%的抑霉唑溶液浸果处理, 可使炭疽病、青霉病的发病率降低 60%~80%, 果实腐烂率减少 70%以上^[51]。荔枝采后易感染霜霉菌、酸腐菌, 使用 25%啞菌酯悬浮剂 1 000~1 500 倍液浸泡处理, 对荔枝霜霉菌的防治效果达 75%~85%, 腐烂率降低 65%~75%, 延长保鲜期^[52]。针对无花果采后高发的

灰霉病, 0.02%的啞菌酯溶液处理可有效抑制灰葡萄孢菌生长, 保障果实品质^[53]。

2.2.3 其他

除上述提及的化学处理之外, 近年来已报道其他一些化学处理对热带亚热带水果也具有较好的保鲜效果, 显示出一定的发展前程(表 1)。

表 1 化学处理对热带、亚热带水果的保鲜效果

Table 1 Effects of chemical treatments on tropical and subtropical fruits

处理 Treatment	水果 Fruit	效果 Effect	参考文献 Reference
二氧化氯(80 mg/L)	无花果	显著减少总微生物数量、不影响感官品质	[54]
二氧化氯(0.2 μL/L)	香蕉	抑制内源乙烯产生与呼吸作用	[55]
二氧化氯(80、120 mg/L)	荔枝	抑制病害发生、减缓褐变程度	[56]
抗坏血酸	香蕉	抑制多酚氧化酶(PPO)活性、防止香蕉颜色退化	[57]
抗坏血酸(3g/L)+PE 保鲜袋	荔枝	延缓褐变	[58]
抗坏血酸(0.3%)	无花果	抑制多酚氧化酶活性、延缓褐变	[59]
二氧化硫	无花果	减少果实表面病原菌数量, 控制采后腐烂	[60]
二氧化硫	荔枝	二氧化硫能保护荔枝果皮颜色, 且不增加可食假种皮亚硫酸盐残留量	[61]
连二亚硫酸钠	荔枝	抑制果实腐烂	[62]
氯化钙(5g/L)	荔枝	强化果实细胞壁结构、延缓褐变	[63]
氯化钙	香蕉	抑制腐烂, 减缓硬度下降, 增强抗氧化能力	[64]
氯化钙+草酸	香蕉	抑制丙二醛、细胞渗透率和过氧化氢含量上升, 提升香蕉抗冷性	[65]
氯化钙(4%)+茉莉酸甲酯(1 mmol/L)	香蕉	降低冷害发生率	[66]
氯化钙(4%)	无花果	保持果实色泽、质地, 促进抗坏血酸积累, 抑制嗜温需氧菌、酵母菌及霉菌生长, 延缓无花果成熟衰老	[67]
二氯异氰尿酸钠	香蕉	降低乙烯生成速率, 影响糖类、有机酸等代谢产物积累, 减少羟自由基产生, 提升抗氧化活性, 延缓采后香蕉成熟衰老	[68]
硫氢化钠(1.5 mmol/L)	无花果	延缓无花果果实细胞壁结构破坏, 维持高含量原果胶、纤维素、半纤维素与低含量水溶性果胶	[69]

2.3 生物保鲜技术

2.3.1 拮抗菌应用

从自然界筛选分离的拮抗菌, 能够与水果采后病原菌竞争营养和生存空间, 产生抗生素、溶菌酶等物质抑制病原菌生长, 在水果保鲜领域发挥着重要作用^[70]。哈茨木霉菌(*Trichoderma harzianum*)作为水果常用拮抗菌, 其代谢产生的木霉素、胶霉素等抗生素可有效抑制炭疽菌、镰刀菌等病原菌的菌丝生长和孢子萌发^[71]。通过体外实验测试哈茨木霉菌和芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)对草莓炭疽菌的体外拮抗活性, 结果表明哈茨木霉菌具有抑制炭疽菌等病原菌的能力^[72]。此外, 哈茨木霉菌与球囊霉属(*Glomus*)在香蕉枯萎病防治领域具有重要作用, 能够有效降低香蕉受枯萎病感染的风险^[73]。在荔枝保鲜中, 枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)能够在荔枝果实表面迅速定殖, 分泌的抗菌肽和脂肽类物质对荔枝炭疽菌有较强抑制作

用^[74]。对于无花果, 贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)可通过直接抑菌作用和诱导果实抗病性来有效控制无花果采后炭疽病的发生, 降低无花果采后腐烂率^[75]。

2.3.2 天然提取物利用

许多植物、微生物的天然提取物具有抑菌、抗氧化特性, 可用于水果保鲜^[76]。在香蕉保鲜方面, Shinga 等^[77]研究了仙人掌黏液可食用涂层在零售条件下对香蕉软化的抑制效果, 结果表明该涂层能有效延缓细胞壁和叶绿素的降解, 通过抑制软化酶来保持香蕉的品质并延长其保质期。Ahmed 等^[78]研究表明磷脂溶液浸泡可延缓香蕉变质, 使果肉更坚实, 减缓淀粉分解与果皮色斑形成速度, 延长 1~2 d 保鲜期。荔枝保鲜中, 壳聚糖作为一种天然多糖, 具有成膜性和抑菌性。1%~2%的壳聚糖涂膜处理荔枝, 能在果实表面形成半透性膜, 抑制水分散失和气体交换, 同时抑制病原菌生长, 延缓果皮褐变, 将

荔枝保鲜期延长 3~5 d^[79]。在无花果保鲜领域,有研究采用多糖的可食用涂层对无花果保鲜,可食用涂层能在一定程度上保持无花果的品质^[80]。此外,壳聚糖涂层能显著减少无花果果实失重和品质变化,提高总多酚、花青素和类黄酮含量和抗氧化活性,还能增强抗氧化酶的活性,减少氧化应激,防止褐变反应^[81]。

3 新兴技术在热带亚热带水果保鲜中的应用前景

3.1 纳米技术

纳米技术凭借材料的特殊性能,在水果保鲜领域极具潜力。针对香蕉保鲜,有研究表明,以松针废料和埃洛石纳米管为原料制备的乙烯气体清除纸用于香蕉包装时,这种纳米材料包装体系能显著延缓香蕉成熟衰老,有效稳定果实色泽、总可溶性固形物含量和 pH 值^[82]。对于荔枝,400 $\mu\text{g/mL}$ 的纳米银复合粒子(Ag-NP)溶液处理并将其置于 4 $^{\circ}\text{C}$ 下储存,荔枝的健康果实比例达到最高,褐变指数降至最低。同时,该处理对荔枝的花色苷含量、总可溶性固形物含量和可滴定酸含量均产生积极影响^[83]。在无花果保鲜方面,纳米雾加湿器能使贮藏的无花果果实比在超声雾中储存的果实更硬实,腐烂发生率显著降低,整体品质指数得到提高,并且能更好地维持果实的颜色、总可溶性固形物以及可滴定酸度等品质属性^[84]。

3.2 基因工程技术

基因工程技术从分子层面为改善水果耐贮性提供了创新思路。在香蕉保鲜研究中,Hu 等^[85]通过构建基于 CRISPR/Cas9 的香蕉 *MaACO1* 基因编辑载体,对香蕉进行遗传转化,获得 *MaACO1* 基因定点突变的香蕉阳性植株。结果表明,在常温(22 $^{\circ}\text{C}$)不催熟条件下,突变株系果实相比野生型成熟明显减缓,野生型果实在 20 d 左右已完全成熟且开始腐烂,而 *MaACO1* 突变果实约 80 d 开始成熟,大大延长了香蕉采后的常温保存期。在荔枝保鲜领域,基因工程技术同样展现出显著成效。研究表明通过增强病程相关蛋白基因等抗病基因的表达,能显著提高果实对荔枝霜霉菌的抗病能力;抑制多酚氧化酶(PPO)基因表达,能阻断酚类物质的氧化路径,延缓果皮褐变,保持果实外观品质^[86]。

4 总结和展望

热带亚热带水果采后极易发生品质劣变,造成经济损失。本文系统梳理了热带亚热带水果(香蕉、荔枝、无花果)采后生理特性及保鲜技术研究现状。研究表明,呼吸作用、乙烯释放、抗氧化酶活性变化与微生物侵染协同作用,共同导致果实品质劣变。保鲜技术方面,物理、化学、生物等传统技术各有优缺点,如低温贮藏易引发冷害损伤,化学处理存在残留风险,生物抑菌技术作用时效有限。相比之下,纳米技术与基因工程等新兴技术凭借分子层面精准调控优势,在延缓果实衰老、提升抗病性等方面展现出广阔的应用前景。

未来,热带亚热带水果保鲜技术开发应以安全无毒、环保高效为重点,强调物理、化学、生物等方式的有效结合,特别是纳米技术、基因工程等一些新技术的应用,并结合低温精准控制和自发气调包装,形成综合保鲜技术体系,实现对水果采后品质的全方位保护,有效延长货架期。

参考文献

- [1] Statistics Bureau of Guangdong Province. Guangdong Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2024. [广东省统计局. 广东统计年鉴 2024 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.]
- [2] Statistics Bureau of Guangdong Province. Statistical Yearbook Guangdong Rural [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2024. [广东省统计局. 广东农村统计年鉴 2024 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.]
- [3] LI Y Z, DUAN H Y, ZHU S H. The new technology in banana processing [J]. Mod Bus Trade Ind, 2002(1): 49–51. [李远志, 段翰英, 祝曙华. 香蕉深加工的新技术 [J]. 中国商办工业, 2002(1): 49–51. doi: 10.3969/j.issn.1672-3198.2002.01.018.]
- [4] XU C, LUO S L, ZHANG Y, et al. Advances in research on nutrient components, biological activity and comprehensive utilization of litchi fruits [J]. J Fruit Sci, 2021, 38(11): 1995–2005. [徐晨, 罗思玲, 张琰, 等. 荔枝果实的营养成分、生物活性及其综合利用研究进展 [J]. 果树学报, 2021, 38(11): 1995–2005. doi: 10.13925/j.cnki.gsxb.20210170.]
- [5] LIU P L, CHEN Y X, YU Y P, et al. A review of nutritional components and biological activity of *Ficus carica* [J]. Sci Technol Food Ind, 2023, 44(6): 424–431. [刘鹏莉, 陈英乡, 遇艳萍, 等. 无花果营养成分及生物活性研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(6): 424–431. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050002.]

- [6] CHEN B X. Storage and preservation of tropical and subtropical fruits [J]. Refrigeration, 2000(4): 29–31. [陈炳旭. 热带、亚热带水果的贮藏保鲜 [J]. 制冷, 2000(4): 29–31.]
- [7] JIANG Y M, DUAN X W. Advances in postharvest physiology of fruits and vegetables in China [J]. J Trop Subtrop Bot, 2019, 27(5): 558–564. [蒋跃明, 段学武. 我国果蔬采后生理学进展 [J]. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(5): 558–564. doi: 10.11926/jtsb.4090.]
- [8] CHEN Y L. Comparative experiment on preservation methods of figs [J]. S China Fruits, 2013, 42(2): 88–89. [陈益臻. 无花果保鲜方法比较试验 [J]. 中国南方果树, 2013, 42(2): 88–89. doi: 10.13938/j.issn.1007-1431.2013.02.029.]
- [9] CHEN Z D, ZHENG T, LIN X X. Summary on physiology, biochemistry and storage for postharvest banana fruit [J]. Chin Agric Sci Bull, 2013, 29(7): 61–64. [陈振东, 郑涛, 林秀香. 香蕉采后生理及贮藏保鲜研究综述 [J]. 中国农学通报, 2013, 29(7): 61–64. doi: 10.3969/j.issn.1000-6850.2013.07.012.]
- [10] ZHAO K, GAO Z, NIZAMANI M M, et al. Mechanisms of litchi response to postharvest energy deficiency via energy and sugar metabolisms [J]. Foods, 2024, 13(14): 2288. doi: 10.3390/foods13142288.
- [11] TANG J X, WANG J L, YING L M, et al. Advances in physiological metabolism changes and regulation mechanism of harvested fruits and vegetables [J]. Packag Eng, 2022, 43(5): 91–99. [唐建新, 王佳莉, 英丽美, 等. 果蔬采后生理代谢变化及调控机制研究进展 [J]. 包装工程, 2022, 43(5): 91–99. doi: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.05.013.]
- [12] YAN D M, YIN J J, TANG J W, et al. Research advances on storage and fresh-keeping technology of fresh *Ficus carica* [J]. Food Saf Qual, 2019, 10(9): 2462–2467. [颜道民, 尹金晶, 唐晋文, 等. 鲜食无花果贮藏保鲜技术研究进展 [J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(9): 2462–2467. doi: 10.3969/j.issn.2095-0381.2019.09.004.]
- [13] KESARI R, TRIVEDI P K, NATH P. Ethylene-induced ripening in banana evokes expression of defense and stress related genes in fruit tissue [J]. Postharv Biol Technol, 2007, 46(2): 136–143. doi: 10.1016/j.postharvbio.2007.04.010.
- [14] WANG W, ZHANG S, FU H, et al. Evaluation of litchi impact damage degree and damage susceptibility [J]. Comput Electr Agric, 2020, 173(3): 105409. doi: 10.1016/j.compag.2020.105409.
- [15] MU S Y, HU W Z, JIANG A L. Research progress in the role of ethylene as signal molecule and regulation of physiological metabolism in postharvest fruits and vegetables [J]. Sci Technol Food Ind, 2015, 36(3): 375–378. [穆师洋, 胡文忠, 姜爱丽, 等. 乙烯的信号分子作用及其在采后果蔬生理代谢调控的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2015, 36(3): 375–378. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2015.03.073.]
- [16] ZHANG M. Study on the change of postharvest physiology and storage quality of different *Ficus carica* L. varieties [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2013. [张明. 不同品种无花果采后生理及贮藏品质变化的研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2013.]
- [17] DUAN X W. Physiological mechanisms of pure oxygen on browning inhibition of fruit pericarp of harvested litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) [D]. Guangzhou: South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, 2004. [段学武. 纯氧处理抑制采后荔枝(*Litchi chinensis* Sonn.)果皮褐变生理机 [D]. 广州: 中国科学院华南植物园, 2004.]
- [18] EREIRA C, LÓPEZ-CORRALES M, SERRADILLA M J, et al. Influence of ripening stage on bioactive compounds and antioxidant activity in nine fig (*Ficus carica* L.) varieties grown in Extremadura, Spain [J]. J Food Compos Anal, 2017, 64: 203–212. doi: 10.1016/j.jfca.2017.09.006.
- [19] YIN Z B, DONG T, HUANG W J, et al. Spatially resolved metabolomics reveals variety-specific metabolic changes in banana pulp during postharvest senescence [J]. Food Chem X, 2022, 15: 100371. doi: 10.1016/j.fochx.2022.100371.
- [20] XIAO Y Y, CHEN J Y, KUANG J F, et al. Banana ethylene response factors are involved in fruit ripening through their interactions with ethylene biosynthesis genes [J]. J Exp Bot, 2013, 64(8): 2499–2510. doi: 10.1093/jxb/ert108.
- [21] LIU B, XUE W W, GUO Z L, et al. Water loss and pericarp browning of litchi (*Litchi chinensis*) and longan (*Dimocarpus longan*) fruit maintain seed vigor [J]. Sci Hort, 2021, 290: 110519. doi: 10.1016/j.scienta.2021.110519.
- [22] WANG L. Study on the change of postharvest physiology and influence factor of *Ficus carica* L. [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2012. [王磊. 无花果采后生理变化及其影响因素研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2012.]
- [23] LI Y L, LIU Y F, ZHANG J G. Advances in the research on the AsA-GSH cycle in horticultural crops [J]. Front Agric China, 2010, 4(1): 84–90. doi: 10.1007/s11703-009-0089-8.
- [24] LIU J, LI F J, LIANG L, et al. Fibroin delays chilling injury of postharvest banana fruit via enhanced antioxidant capability during cold storage [J]. Metabolites, 2019, 9(7): 152. doi: 10.3390/metabo9070152.
- [25] ZHANG J, CHEN X Z, LIU Q Q, et al. Slightly acidic electrolyzed water treatment enhances the quality attributes and the storability of postharvest litchis through regulating the metabolism of reactive oxygen species [J]. Food Chem X, 2024, 23: 101644. doi: 10.1016/j.fochx.2024.101644.
- [26] WANG C L, DU J M, HOU D H, et al. Quality retention and delay postharvest senescence of figs (*Ficus carica* L.) using 1-methylcyclo-

- propene and modified atmosphere packaging during cold storage [J]. Food Biosci, 2023, 53: 102748. doi: 10.1016/j.fbio.2023.102748.
- [27] DELAUNOIS B, JEANDET P, CLÉMENT C, et al. Uncovering plant-pathogen crosstalk through apoplastic proteomic studies [J]. Front Plant Sci, 2014, 5: 249. doi: 10.3389/fpls.2014.00249.
- [28] ZAKARIA L, SAHAK S, ZAKARIA M, et al. Characterisation of colletotrichum species associated with anthracnose of banana [J]. Trop Life Sci Res, 2009, 20(2): 119. doi: 10.1016/S1246-7391(99)80028-1.
- [29] SUN J H, CAO L L, LI H L, et al. Early responses given distinct tactics to infection of *Peronophythora litchii* in susceptible and resistant litchi cultivar [J]. Sci Rep, 2019, 9(1): 2810. doi: 10.1038/s41598-019-39100-w.
- [30] KUMAR V, ANAL A K D. Postharvest diseases of litchi and their management [M]// SINGH D, SHARMA R R, DEVAPPA V, et al. Postharvest Handling and Diseases of Horticultural Produce. Boca Raton: CRC Press, 2021.
- [31] XIA Q P, JIANG H Y, LV P, et al. Postharvest physiology affecting fruit and vegetable storage and transportation [J]. China Fruit Veget, 2016, 36(2): 1–6. [夏巧萍, 蒋海燕, 吕平, 等. 影响果蔬贮运的生理问题综述 [J]. 中国果菜, 2016, 36(2): 1–6. doi: 10.3969/j.issn.1008-1038.2016.02.001.]
- [32] TSAI L S, HUXSOLL C C, ROBERTSON G. Prevention of potato spoilage during storage by chlorine dioxide [J]. J Food Sci, 2001, 66(3): 472–477. doi: 10.1111/j.1365-2621.2001.tb16133.x.
- [33] ZHEN Z K, FU Z, YAN M M. Briefly talk about the low-temperature freshness preservation technology of fruits and vegetables [J]. China S Agri Mach, 2019, 50(13): 74. [甄泽康, 付铮, 闫铭铭. 浅谈果蔬的低温保鲜技术 [J]. 南方农机, 2019, 50(13): 74.]
- [34] JIANG G X, XIAO L, YAN H L, et al. Redox regulation of methionine in calmodulin affects the activity levels of senescence-related transcription factors in litchi [J]. Biochim Biophys Acta Gen Subj, 2017, 1861(5): 1140–1151. doi: 10.1016/j.bbagen.2017.02.004.
- [35] WANG D, SUN L, ZHANG Q, et al. Analysis on fruit and fruit juice freezing characteristics of *Ficus carica* L. and influencing factors [J]. Shandong Agri Sci, 2013, 45(8): 51–57. [王丹, 孙蕾, 张倩, 等. 无花果果实果汁的冻结特点及影响因素分析 [J]. 山东农业科学, 2013, 45(8): 51–57. doi: 10.3969/j.issn.1001-4942.2013.08.013.]
- [36] LIAO L, LI J Y, MA H Y, et al. Effects of storage temperature and maturation on postharvest physiology of Xinjiang Zaohuang fig fruits [J]. J Nucl Agri Sci, 2016, 30(2): 282–287. [廖亮, 李瑾瑜, 马红艳, 等. 贮藏温度和成熟度对新疆早黄无花果采后生理的影响 [J]. 核农学报, 2016, 30(2): 282–287. doi: 10.11869/j.issn.100-8551.2016.02.0282.]
- [37] ZHANG X W, ZHANG Q G, MENG X Y, et al. Research progress of modified atmosphere preservation technology [J]. Food Ind, 2024, 45(5): 208–213. [张晓雯, 张庆钢, 孟欣宇, 等. 气调保鲜技术研究进展 [J]. 食品工业, 2024, 45(5): 208–213.]
- [38] YUAN Y, WANG Y Y, MA Y X, et al. Review of research status of storage and fresh preservation technology of fruits and vegetables [J]. Agric Sci Tech Equip, 2023(5): 56–59. [袁越, 王一钰, 马杨欣, 等. 果蔬贮藏保鲜技术研究现状综述 [J]. 农业科技与装备, 2023(5): 56–59. doi: 10.16313/j.cnki.nykjybz.2023.05.027.]
- [39] ALI S, KHAN A S, MALIK A U, et al. Effect of controlled atmosphere storage on pericarp browning, bioactive compounds and antioxidant enzymes of litchi fruits [J]. Food Chem, 2016, 206: 18–29. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.03.021.
- [40] DEL CARMEN VILLALOBOS M, SERRADILLA M J, MARTÍN A, et al. Preservation of different fig cultivars (*Ficus carica* L.) under modified atmosphere packaging during cold storage [J]. J Sci Food Agric, 2016, 96(6): 2103–2115. doi: 10.1002/jsfa.7326.
- [41] LIU Z S, SHI J Y, WANG Q, et al. Research advance on application of irradiation technology in storage and preservation of fruits and vegetables [J]. Stor Proc, 2020, 20(4): 236–242. [刘泽松, 史君彦, 王清, 等. 辐照技术在果蔬贮藏保鲜中的应用研究进展 [J]. 保鲜与加工, 2020, 20(4): 236–242. doi: 10.3969/j.issn.1009-6221.2020.04.038.]
- [42] ZAMAN W, PAUL D, ALAM K, et al. Shelf life extension of banana (*Musa sapientum*) by gamma radiation [J]. J Bio-Science, 2007, 15: 47–53. doi: 10.3329/jbs.v15i0.2202.
- [43] SUNYOTO M, DJALI M, IBRAHIM S F. Study of gamma irradiation and its possibility to extend the banana ‘Mas’ (*Musa acuminata* Colla) shelf life [J]. IOP Conf Ser Earth Environ Sci, 2019, 309: 012041. doi: 10.1088/1755-1315/309/1/012041.
- [44] XIE Y H, XU F M, DUAN Z H, et al. Effects of irradiation dose on postharvest browning of litchi [J]. Food Sci Technol, 2021, 46(2): 39–43. [谢玉花, 许凤梅, 段振华, 等. 辐照剂量对荔枝采后褐变的影响 [J]. 食品科技, 2021, 46(2): 39–43. doi: 10.13684/j.cnki.spkj.2021.02.007.]
- [45] MATHABA N, SCHOEMAN M H, BOTHA A F, et al. Effect of gamma irradiation and insect proof bagging on postharvest quality of sulfur dioxide fumigated litchi fruit (‘Mauritius’) [J]. Acta Hort, 2015 (1105): 335–340. doi: 10.17660/ActaHortic.2015.1105.48.
- [46] WEI J T, WANG C L, LI K, et al. Preliminary study on preservation effect of ^{60}Co - γ irradiation on commercially packaged fig [J]. Food Ind, 2022, 43(11): 135–139. [蔚江涛, 王彩莲, 李奎, 等. ^{60}Co - γ 辐照对商业化包装无花果保鲜效果初探 [J]. 食品工业, 2022, 43(11): 135–139.]

- [47] JIANG Y, RAO Z Z, LIU J, et al. Effect of 1-MCP treatment on postharvest storage quality of fig fruit [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(15): 276–282. [姜毅, 饶泽洲, 刘佳, 等. 1-MCP 对无花果采后贮藏品质的影响 [J]. *食品工业科技*, 2021, 42(15): 276–282. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020090284.]
- [48] CHU T D, GRUEN I, FERNANDO L. Effect of 1-methylcyclopropane (1-MCP) on banana ripening [J]. *Acta Hort*, 2010, 875: 57–64. doi: 10.17660/ActaHortic.2010.875.5.
- [49] AKTER M S, SARKAR M R, CHOUDHURY S, et al. Effect of post-harvest treatments on shelf life and quality of litchi stored at ambient temperature [J]. *Int J Postharv Technol Innov*, 2020, 7(4): 319–334. doi: 10.1504/IJPTI.2020.110883.
- [50] HAN L, YUAN S Q, ZHANG X N, et al. Effect of 1-MCP treatment on storage quality and postharvest physiology of fig fruits [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2013, 34(3): 339–341. [韩璐, 苑社强, 张晓娜, 等. 1-MCP 处理对无花果贮藏品质及采后生理的影响 [J]. *食品工业科技*, 2013, 34(3): 339–341. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2013.03.052.]
- [51] YOU W J. Screening of broad-spectrum biocontrol bacteria for post-harvest diseases of tropical fruits and study on their antagonistic mechanisms [D]. Haikou: Hainan University, 2021. [尤文静. 热带水果采后病害广谱生防菌的筛选与拮抗机理研究 [D]. 海口: 海南大学, 2021. doi: 10.27073/d.cnki.ghadu.2021.000597.]
- [52] JIANG Y M, WANG Y, SONG L, et al. Postharvest characteristics and handling of litchi fruit: An overview [J]. *Aust J Exp Agric*, 2006, 46(12): 1541–1556. doi: 10.1071/EA05108.
- [53] CHU F G. Occurrence and control of three major diseases of fig [J]. *Yantai Fruits*, 2011(4): 53–54. [褚方钢. 无花果三大病害的发生与防治 [J]. *烟台果树*, 2011(4): 53–54. doi: 10.3969/j.issn.1005-9938.2011.04.033]
- [54] KARABULUT O A, ILHAN K, ARSLAN U, et al. Evaluation of the use of chlorine dioxide by fogging for decreasing postharvest decay of fig [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2009, 52(3): 313–315. doi: 10.1016/j.postharvbio.2009.01.006.
- [55] ZHANG S S, WANG W S, ZHANG Z D, et al. Effects of low-concentration chlorine dioxide treatment on postharvest physiology and storage quality of banana [J]. *Preserv Process*, 2008(2): 27–30. [张珊珊, 王文生, 张子德, 等. 低浓度二氧化氯处理对香蕉采后生理及贮藏品质的影响 [J]. *保鲜与加工*, 2008(2): 27–30. doi: 10.3969/j.issn.1009-6221.2008.02.009.]
- [56] GUO Q, ZHANG Y L, WANG J D, et al. Effects of chlorine dioxide treatment on postharvest storage quality of litchi [J]. *Food Sci Technol*, 2013, 38(6): 46–50. [郭芹, 张玉丽, 王吉德, 等. 二氧化氯处理对荔枝采后贮藏品质的影响 [J]. *食品科技*, 2013, 38(6): 46–50. doi: 10.13684/j.cnki.spkj.2013.06.002.]
- [57] YILDIZ G. The effect of different chemical agents on the prevention of enzymatic browning in banana [J]. *J Food Sci Eng*, 2018, 7: 91–96. doi: 10.17265/2159-5828/2018.02.005.
- [58] SHI S Y, DONG C H, ZHANG J N, et al. Effects of five soaking treatments combined with two kinds of packaging on “Feizixiao” litchi browning during cold storage [J]. *Food Ferment Ind*, 2020, 46(22): 125–128. [石淑源, 董成虎, 张佳楠, 等. 五种浸泡处理结合两种包装对“妃子笑”荔枝冷藏期间褐变程度的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(22): 125–128. doi: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.024976.]
- [59] HSSAINI L, OUAABOU R, CHARAFI J, et al. Effects of pre-storage ascorbic and salicylic acids treatments on the enzymatic browning and nutritional quality of dried fig: Combined use of biochemical and ATR-FTIR analyses [J]. *Vib Spectrosc*, 2021, 115: 103269. doi: 10.1016/j.vibspec.2021.103269.
- [60] CANTÍN C M, PALOU L, BREMER V, et al. Evaluation of the use of sulfur dioxide to reduce postharvest losses on dark and green figs [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2011, 59(2): 150–158. doi: 10.1016/j.postharvbio.2010.09.016.
- [61] PAULL R E, REYES M E Q, REYES M U. Sulfite residues on litchi fruit treated with sulfur dioxide [J]. *Postharv Biol Technol*, 1998, 14(2): 229–233. doi: 10.1016/S0925-5214(98)00036-2.
- [62] SU Y L. Application of sodium dithionite in litchi preservation research [J]. *J Dongguan Univ Technol*, 2000, 7(2): 42–44. [苏亚玲. 连二亚硫酸钠在荔枝保鲜研究中的应用 [J]. *东莞理工学院学报*, 2000, 7(2): 42–44. doi: 10.16002/j.cnki.10090312.2000.02.009.]
- [63] GUO X M, LI Q, LUO T, et al. Postharvest calcium chloride treatment strengthens cell wall structure to maintain litchi fruit quality [J]. *Foods*, 2023, 12(13): 2478. doi: 10.3390/foods12132478.
- [64] MINH N P. Effectiveness of CaCl₂ treatment on quality attributes of banana fruit during storage [J]. *Plant Sci Today*, 2022, 9(1): 206–214. doi: 10.14719/pst.1458.
- [65] YANG W H, HUANG Y M, XU C, et al. Calcium chloride and oxalic acid treatments alleviate chilling injury of banana fruits during storage [J]. *S China Fruits*, 2020, 49(5): 78–82. [杨文慧, 黄玉咪, 徐超, 等. 氯化钙和草酸处理减轻香蕉果实贮藏冷害 [J]. *中国南方果树*, 2020, 49(5): 78–82. doi: 10.13938/j.issn.1007-1431.20200065.]
- [66] ELBAGOURY M M, TUROOP L, RUNO S, et al. Regulatory influences of methyl jasmonate and calcium chloride on chilling injury of banana fruit during cold storage and ripening [J]. *Food Sci Nutr*, 2021, 9(2): 929–942. doi: 10.1002/fsn3.2058.
- [67] IRFAN P K, VANJAKSHI V, PRAKASH M N K, et al. Calcium chloride extends the keeping quality of fig fruit (*Ficus carica* L.)

- during storage and shelf-life [J]. *Postharv Biol Technol*, 2013, 82: 70–75. doi: 10.1016/j.postharvbio.2013.02.008.
- [68] WU Q X, LI T T, CHEN X, et al. Sodium dichloroisocyanurate delays ripening and senescence of banana fruit during storage [J]. *Chem Cent J*, 2018, 12(1): 131. doi: 10.1186/s13065-018-0503-5.
- [69] REN Y Y, HUANG D D, LIU S W, et al. Sodium hydrosulfide delays the softening of fig fruit during cold storage [J]. *Sci Hort*, 2022, 299: 111037. doi: 10.1016/j.scienta.2022.111037.
- [70] VERMA S, AZEVEDO L C B, PANDEY J, et al. Microbial intervention: An approach to combat the postharvest pathogens of fruits [J]. *Plants (Basel)*, 2022, 11(24): 3452. doi: 10.3390/plants11243452.
- [71] ANEJA M, GIANFAGNA T J, HEBBAR P K. *Trichoderma harzianum* produces nonanoic acid, an inhibitor of spore germination and mycelial growth of two cacao pathogens [J]. *Physiol Mol Plant Pathol*, 2005, 67(6): 304–307. doi: 10.1016/j.pmp.2006.05.002.
- [72] ES-SOUFI R, TAHIRI H, AZAROUAL L, et al. *In vitro* antagonistic activity of *Trichoderma harzianum* and *Bacillus amyloliquefaciens* against *Colletotrichum acutatum* [J]. *Adv Microbiol*, 2020, 10(3): 82–94. doi: 10.4236/aim.2020.103008.
- [73] CASTILLO A G, PUIG C G, CUMAGUN C J R. Non-synergistic effect of *Trichoderma harzianum* and *Glomus* spp. in reducing infection of fusarium wilt in banana [J]. *Pathogens*, 2019, 8(2): 43. doi: 10.3390/pathogens8020043.
- [74] ZHAO P Y, LI P Z, WU S Y, et al. Volatile organic compounds (VOCs) from *Bacillus subtilis* CF-3 reduce anthracnose and elicit active defense responses in harvested litchi fruits [J]. *AMB Express*, 2019, 9(1): 119. doi: 10.1186/s13568-019-0841-2.
- [75] YANG W Y, JIANG Y, TANG J, et al. Identification of *Colletotrichum horii* isolated from postharvest fig anthracnose and its control by *Bacillus velezensis* [J]. *Food Sci*, 2023, 44(15): 204–211. [杨婉艺, 姜毅, 汤静, 等. 无花果采后炭疽病原菌鉴定及贝莱斯芽孢杆菌防治效果 [J]. *食品科学*, 2023, 44(15): 204–211. doi: 10.7506/spkx1002-6630-20220718-205.]
- [76] SHAHBAZ M U, ARSHAD M, MUKHTAR K, et al. Natural plant extracts: An update about novel spraying as an alternative of chemical pesticides to extend the postharvest shelf life of fruits and vegetables [J]. *Molecules*, 2022, 27(16): 5152. doi: 10.3390/molecules27165152.
- [77] SHINGA M H, FAWOLE O A. *Opuntia ficus-indica* mucilage coatings regulate cell wall softening enzymes and delay the ripening of banana fruit stored at retail conditions [J]. *Int J Biol Macromol*, 2023, 245: 125550. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.125550.
- [78] AHMED Z F R, PALTA J P. Postharvest dip treatment with a natural lysophospholipid plus soy lecithin extended the shelf life of banana fruit [J]. *Postharv Biol Technol*, 2016, 113: 58–65. doi: 10.1016/j.postharvbio.2015.10.016.
- [79] KUMARI P, BARMAN K, PATEL V B, et al. Reducing postharvest pericarp browning and preserving health promoting compounds of litchi fruit by combination treatment of salicylic acid and chitosan [J]. *Sci Hort*, 2015, 197: 555–563. doi: 10.1016/j.scienta.2015.10.017.
- [80] PAOLUCCI M, DI STASIO M, SORRENTINO A, et al. Active edible polysaccharide-based coating for preservation of fresh figs (*Ficus carica* L.) [J]. *Foods*, 2020, 9(12): 1793. doi: 10.3390/foods9121793.
- [81] ADILETTA G, ZAMPELLA L, COLETTA C, et al. Chitosan coating to preserve the qualitative traits and improve antioxidant system in fresh figs (*Ficus carica* L.) [J]. *Agriculture*, 2019, 9(4): 84. doi: 10.3390/agriculture9040084.
- [82] KUMAR A, DESHMUKH R K, GAIKWAD K K. Quality preservation in banana fruits packed in pine needle and halloysite nanotube-based ethylene gas scavenging paper during storage [J]. *Biomass Conv Biorefin*, 2024, 14(5): 6311–6320. doi: 10.1007/s13399-022-02708-6.
- [83] LIN X J, LIN Y S, LIAO Z P, et al. Preservation of litchi fruit with nanosilver composite particles (Ag-NP) and resistance against *Peronophythora litchi* [J]. *Foods*, 2022, 11(19): 2934. doi: 10.3390/foods11192934.
- [84] VAN H D, TANAKA F, UCHINO T, et al. Using nanomist humidifier to maintain postharvest quality of fig (*Ficus carica* L.) fruit in high humidity storage environment [J]. *J Fac Agric Kyushu Univ*, 2011(2): 56. doi: 10.5109/20332.
- [85] HU C H, SHENG O, DENG G M, et al. CRISPR/Cas9-mediated genome editing of *MaACO1* (aminocyclopropane-1-carboxylate oxidase 1) promotes the shelf life of banana fruit [J]. *Plant Biotechnol J*, 2021, 19(4): 654–656. doi: 10.1111/pbi.13534.
- [86] LI W, LI P, DENG Y Z, et al. Litchi aspartic protease LcAP1 enhances plant resistance via suppressing cell death triggered by the pectate lyase PIPeL8 from *Peronophythora litchii* [J]. *New Phytol*, 2024, 242(6): 2682–2701. doi: 10.1111/nph.19755.