

A Review on the Effects of Different Gas Components on the Preservation of Chinese Bayberry

Jun Zhou Ting Yang Fangfang Zhang

Taizhou Food and Drug Inspection and Research Institute, Taizhou Key Laboratory for Quality Safety and Quality Improvement of Special Agricultural Products, Taizhou, Zhejiang, 318000, China

Abstract

As a high-value berry with Chinese characteristics, waxberry has a very short post-harvest life and is difficult to preserve, which severely restricts its industrial development. Modified Atmosphere Preservation (MAP) technology, which regulates the gas composition in the storage environment, can effectively delay fruit senescence, inhibit microbial reproduction, and maintain nutrition and flavor. It is a promising green preservation strategy. This paper systematically reviews the research progress on the application of different gas components, such as oxygen, carbon dioxide, carbon monoxide, and ozone, in waxberry preservation, and deeply explores their mechanisms of action, including their effects on respiratory metabolism, ethylene action, enzyme activity, microbial community, and quality metabolism. The article analyzes the advantages and disadvantages of various modes such as conventional MAP and dynamic MAP, and points out the challenges existing in current research and application. Finally, it looks forward to future research directions such as precision MAP, technology integration, and safety assessment, with the aim of providing theoretical references for the in-depth research and industrial application of waxberry preservation technology.

Keywords

waxberry; controlled atmosphere preservation; gas composition; post-harvest physiology; quality regulation; mechanism of action

不同气体组分对杨梅保鲜效果影响的研究综述

周俊 杨挺 张芳芳

台州市食品药品检验研究院, 台州市特色农产品质量安全与品质提升重点实验室, 中国·浙江 台州 318000

摘要

杨梅作为我国特色的高价值浆果, 采后寿命极短, 保鲜难度大, 严重制约了其产业发展。气调保鲜技术通过调控贮藏环境中的气体成分, 能够有效延缓果实衰老、抑制微生物繁殖、保持营养与风味, 是一种前景广阔的绿色保鲜策略。本文系统综述了氧气、二氧化碳、一氧化碳、臭氧等不同气体组分在杨梅保鲜中的应用研究进展, 深入探讨了其作用机制, 包括对呼吸代谢、乙烯作用、酶活性、微生物群落及品质代谢的影响。文章分析了常规气调、动态气调等多种模式的优劣, 并指出了当前研究与应用中存在的挑战, 最后对未来研究方向, 如精准气调、技术融合及安全性评估等进行了展望, 以期为杨梅保鲜技术的深化研究与产业化应用提供理论参考。

关键词

杨梅; 气调保鲜; 气体组分; 采后生理; 品质调控; 作用机制

1 引言

杨梅, 这一起源于中国的亚热带珍果, 以其独特的紫红色泽、酸甜多汁的风味以及丰富的花色苷、维生素C和多酚类物质^[1]而备受推崇。然而, 其果实采后生物学特性决定了其极高的腐败敏感性。杨梅属于非呼吸跃变型果实但呼吸强度异常旺盛, 加之果肉柔软、无外果皮保护, 使其在

采后极易遭受物理损伤、水分流失、营养成分快速消耗以及霉菌感染^[2]。在常温条件下, 杨梅的商品货架期^[3]通常不足两天, 这造成了巨大的采后损失, 成为产业发展的核心瓶颈。

为应对这一挑战, 多种保鲜技术^[4]被开发和应用, 包括物理方法、化学方法和生物方法。其中, 低温贮藏是基础, 但单独使用难以完全抑制其腐败进程; 化学保鲜剂^[5]则面临农药残留和消费者接受度的压力。气调贮藏技术^[6]通过主动或被动地改变贮藏环境中的气体组成, 从源头上干预果实的生理代谢和病原微生物的活动, 具有环境友好、效能显著、安全性高等突出优点, 被视为解决杨梅保鲜难题的关键技术之一。

【基金项目】台州市科技计划项目(项目编号: 22nyb10)。

【作者简介】周俊(1987-), 男, 本科, 工程师, 从事食品安全检测与分析研究。

尽管气调保鲜原理在果蔬领域已普遍适用,但对于杨梅这种生理特性特殊的浆果,其最适气体配方^[7]、作用机理以及与其他技术的协同效应仍需深入探索。不同气体组分通过不同的路径影响杨梅的保鲜结局,系统梳理这些影响及其内在逻辑,对于推动该技术的精准化和标准化^[8]至关重要。本综述旨在整合国内外相关研究,全面阐述不同气体组分对杨梅保鲜效果的影响与机制,评述现有技术的得失,并展望未来发展趋势。

2 杨梅采后腐败的生理与病理学基础

深入理解杨梅采后腐败的内在原因,是解析气体保鲜作用机制的前提。其劣变主要源于以下几个相互关联的生理与病理过程:

2.1 旺盛的呼吸代谢与能量耗竭

采后杨梅仍是一个独立的生命体,进行着强烈的呼吸作用^[9],以消耗自身积累的糖、酸等呼吸底物来维持生命活动。这种高速率的代谢过程不仅导致营养物质快速流失、风味下降,还释放大量的呼吸热,加速了整个衰老进程^[10]。

2.2 乙烯与衰老信号的协同

虽然杨梅不属于典型的呼吸跃变型果实,但其自身仍会产生微量乙烯^[11]。在采后逆境下,乙烯的合成与信号传导^[12]可能发生变化,并与脱落酸等其他植物激素协同作用,共同推动果实的软化、转色和衰老。

2.3 细胞壁降解与质地软化

果实成熟与衰老过程中,果胶酶、纤维素酶等细胞壁降解酶^[13]的活性显著上升,导致细胞壁结构解体、中胶层溶解,从而使果实硬度急剧下降,承受机械外力的能力减弱,更易受损。

2.4 水分蒸腾与色泽变化

杨梅缺乏坚韧的外皮,表皮角质层薄,采后蒸腾作用^[14]强烈,极易失水皱缩,导致新鲜度与商品外观迅速下降。同时,色素物质在酶和氧的作用下会发生降解或转化,造成色泽变暗或褪色^[15]。

2.5 微生物侵染与腐烂

高糖分、高水分和较低的pH值为微生物的生长^[16]提供了理想条件。灰葡萄孢菌和根霉等腐生真菌^[17]是杨梅采后的主要致病菌,它们通过伤口或直接侵染引发软腐、流汁,并产生霉味,是导致果实彻底丧失商品价值的直接原因。马焱娜等研究发现,微生物初始数量^[18]是影响杨梅采后腐烂速率的关键因素之一。

3 主要气体组分的作用机制与保鲜效果

3.1 氧气:生命活动的调控开关

氧气是需氧呼吸的最终电子受体,其浓度高低直接决定了杨梅的代谢速率^[19]。作用机制:适当降低环境中的O₂浓度(通常低于空气水平),能够有效抑制线粒体的有氧呼吸强度^[20],减少底物消耗,延缓能量耗竭和衰老。低氧环

境还能抑制乙烯的生物合成及其生理效应的发挥,并降低多酚氧化酶^[21]等导致褐变的酶活性。此外,对于许多好氧性腐败微生物,低氧条件^[22]也能在一定程度上抑制其生长繁殖。

保鲜效果与应用:研究表明,将O₂浓度控制在较低水平能显著延长杨梅的贮藏期^[23],更好地保持果实的硬度、维生素C含量和原始色泽。然而,O₂浓度存在一个临界阈值。过低的O₂会迫使果实进行无氧呼吸,大量积累乙醇、乙醛等异味代谢物,引发组织坏死和风味劣变,造成低氧伤害^[24]。因此,寻找并维持略高于无氧呼吸临界点的O₂浓度是技术关键。

3.2 二氧化碳:有效的代谢抑制剂与杀菌剂

高浓度CO₂是气调保鲜中另一个核心要素,其对杨梅的抑菌效果尤为突出。作用机制:CO₂能够竞争性地抑制琥珀酸脱氢酶^[25]在三羧酸循环中的活性,从而直接干扰呼吸链,降低呼吸速率。它还能降低细胞内的pH值,影响多种酶的活性^[26]。在乙烯代谢方面,高CO₂可以抑制乙烯合成关键酶的活性并拮抗其作用^[27]。最重要的是,高CO₂对引起杨梅腐烂的多种真菌具有显著的抑制甚至杀灭作用,它能穿透微生物细胞膜^[28],影响其内部酸碱平衡和酶系统功能。保鲜效果与应用:采用中等至高浓度的CO₂处理,能大幅降低杨梅的腐烂率^[29]。短期高CO₂冲击处理^[30]或长期维持在一定浓度的CO₂环境中,被证明能有效控制灰霉病和根霉病的发生与发展。但同样,CO₂浓度也存在一个安全上限。过高的CO₂会引发生理毒害,破坏细胞膜结构,加剧无氧呼吸,导致果实出现凹陷斑、组织软化、产生异味等CO₂中毒症状^[31]。

3.3 O₂与CO₂的协同:常规气调贮藏

在实际应用中,O₂和CO₂的浓度需要协同调控,即创造一种低O₂和高CO₂的稳定气体环境。最适配比探索:大量研究致力于寻找适合杨梅的O₂和CO₂最佳组合^[32]。尽管因品种、成熟度和贮藏温度而异,但普遍认为一个较低范围的O₂浓度配合一个中等范围的CO₂浓度能取得最佳效果^[33]。在此条件下,杨梅的好果率、色泽、硬度和营养成分能得到最大程度的保留,贮藏期得以显著延长^[34]。这种协同作用体现在:低O₂抑制了呼吸和衰老,而高CO₂则强化了抑菌和代谢抑制效果,二者相辅相成,共同构建了一个高效的保鲜微环境。

3.4 其他功能性气体的辅助保鲜作用

3.4.1 一氧化碳

CO作为一种信号分子^[35],在果蔬保鲜中的研究日益深入。作用机制:低浓度的CO能够模拟一氧化氮的某些功能,作为信号分子激活植物体内的防御网络。它可以抑制乙烯的生物合成,减轻乙烯介导的衰老进程。同时,CO能上调超氧化物歧化酶、过氧化氢酶等抗氧化酶的活性,增强果实清除活性氧的能力,减轻氧化损伤,维持膜系统的完整性。

此外,它还可能激发与抗病相关的苯丙烷代谢途径。在杨梅保鲜中的潜力:初步研究表明,低剂量 CO 熏蒸处理对保持杨梅红色色泽、减缓营养损耗和降低腐烂指数表现出积极效果。其作为一种新型的气体保鲜剂,具有用量低、效应广的潜力,但其作用机制细节、安全性及残留问题仍需系统评估。

3.4.2 臭氧

O_3 是一种强氧化性气体,以其广谱、高效的杀菌能力而闻名^[36]。作用机制: O_3 能迅速氧化微生物的细胞膜、酶系统和遗传物质,导致其死亡。它能有效分解果实自身释放的乙烯,延缓衰老。同时, O_3 还能氧化降解环境中已有的异味物质,起到除臭作用。低浓度的 O_3 处理还能诱导果实产生植保素等抗病物质,提升其系统抗性。在杨梅保鲜中的应用与注意事项:间歇性或持续低浓度的 O_3 处理能显著降低杨梅表面的微生物负载量,有效控制交叉感染,延长货架期。然而, O_3 的强氧化性是一把双刃剑,若浓度控制不当或处理时间过长,可能对果实表皮造成氧化损伤,导致褪色或灼伤斑,并可能加速某些营养素的氧化。因此,精确控制 O_3 的浓度、处理频率和持续时间至关重要^[37]。

3.4.3 氮气

N_2 是惰性气体,在气调包装中主要作为填充气体使用^[38],其本身不直接参与生理调控。它的作用是置换包装内的空气,帮助快速建立并稳定维持所设定的低 O_2 和高 CO_2 环境,同时防止包装因内部气体被消耗而塌陷。

3.5 动态气调贮藏:迈向精准保鲜

传统的静态气调在整个贮藏期维持固定的气体配比,可能无法完美适应果实动态变化的生理状态。动态气调则应运而生。概念与优势:动态气调是指根据果实的实时生理状态或环境反馈,智能、动态地调整气体成分。例如,在贮藏初期采用更苛刻的气体条件以快速抑制病原菌和强烈的呼吸,在后期则调整为更温和的条件以避免生理伤害。这种动态调控能够实现全周期的最优化管理,保鲜效果更佳。发展前景:随着传感器技术、物联网和人工智能的发展,动态气调在杨梅保鲜中展现出巨大的应用潜力,尽管目前相关研究和应用尚处于初级阶段。

4 气体组分对杨梅综合品质的影响

4.1 感官品质的维持

色泽:适宜的低 O_2 和高 CO_2 环境能抑制叶绿素分解和花色苷的降解与氧化,有助于杨梅保持其鲜艳的紫红色。 O_3 处理不当则可能因氧化作用使色泽变暗。质地:气调贮藏通过抑制果胶降解酶的活性,能有效减缓细胞壁物质的分解,从而更好地维持果实的硬度和饱满度,减少软化变形。风味:合理的气体环境能延缓糖类和有机酸的消耗,保持杨梅固有的甜酸比。反之,不当的低 O_2 或高 CO_2 会诱发无氧呼吸,产生不正常的发酵异味,严重损害风味。

4.2 营养成分的保留

维生素 C:作为易氧化的营养素,维生素 C 在低 O_2 环

境下的保存率显著高于普通空气环境。酚类物质与抗氧化活性:气调贮藏,特别是结合低温,能够抑制多酚氧化酶的活性,减少总酚和花色苷等抗氧化物质的降解,从而更好地维持杨梅的整体抗氧化能力。

4.3 采后生理与酶活的调控

所有有效的气体处理均以显著降低杨梅的呼吸强度和乙烯释放量为共同特征。在酶水平上,气调环境能够抑制与衰老和褐变相关的酶(如 PPO、POD)的活性,同时维持或适度提升与抗逆性相关的抗氧化酶(如 SOD、CAT)的活性,从而延缓细胞衰老进程。

4.4 微生物群落的抑制

高 CO_2 和 O_3 在直接控制微生物方面扮演着关键角色。它们能显著降低果实表面和贮藏环境中的霉菌、酵母菌和细菌数量,从源头上减少腐烂的发生。

5 结论与展望

综上所述,气调贮藏通过科学调控 O_2 、 CO_2 等核心气体组分,并辅以 CO 、 O_3 等功能性气体,能够从抑制呼吸代谢、调控乙烯作用、维持细胞结构、激发抗逆反应和直接抑制微生物等多个层面,有效延缓杨梅采后衰老,保持其感官、营养和商品价值。其中,低 O_2 与高 CO_2 的协同应用是当前技术的主流和基石。

展望未来,杨梅气调保鲜的研究与应用将呈现以下发展趋势:走向精准化与个性化:未来研究需更深入地揭示不同杨梅品种的采后气体应答机制,建立基于基因组学、蛋白组学和代谢组学的精准气调模型,实现“因品施策”。拥抱智能化与动态化:开发集成实时监测、数据分析和自动反馈控制的智能气调系统,实现气体环境的动态、精准调控,是技术升级的必然方向。深化技术集成与创新:积极探索“气调+”多元复合保鲜技术,通过多靶点、多层次的协同干预,追求保鲜效果的极致化。

参考文献

- [1] 张慙,李娟.杨梅采后生理及保鲜技术研究进展[J].食品与发酵工业,2015,41(8):246-252.
- [2] 林河通,席珣芳,陈绍军.杨梅果实采后生理与保鲜技术研究进展[J].农业工程学报,2005,21(3):184-189.
- [3] 李丽娟,王强,陈守江.杨梅采后腐烂机理及保鲜技术研究现状[J].保鲜与加工,2016,16(3):112-117.
- [4] 陈健初,李勇,叶兴乾.果蔬保鲜技术研究进展[J].农业工程学报,2014,30(S1):329-338.
- [5] 王友升,王贵禧.化学保鲜剂在果蔬保鲜中的应用及安全性研究[J].食品科学,2013,34(11):345-350.
- [6] 李艳,张平,李江阔.气调贮藏技术在浆果保鲜中的应用研究进展[J].食品工业科技,2017,38(12):339-344.
- [7] 黄雪梅,吴锦铸,李洪军.杨梅气调保鲜关键技术及机理研究[J].食品科技,2018,43(7):234-239.
- [8] 刘春泉,宋江峰,李大婧.浆果类果实气调保鲜标准化研究进

- 展[J]. 江苏农业学报, 2019, 35 (2): 478-484.
- [9] 王鸿飞, 李和生, 谢果凰. 杨梅采后呼吸代谢及能量变化规律研究[J]. 中国食品学报, 2008, 8 (2): 98-103.
- [10] Li H, Wang Y, Chen J. Regulation of respiratory metabolism in waxberry by controlled atmosphere storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 95: 89-96.
- [11] 陈金印, 陈明, 甘霖. 非呼吸跃变型果实乙烯合成及信号转导研究进展[J]. 园艺学报, 2012, 39 (S1): 2001-2008.
- [12] 李娟, 张懋, 张卫明. 杨梅采后乙烯代谢与果实软化的关系[J]. 食品科学, 2015, 36 (14): 234-238.
- [13] 吴慧峰, 李丽萍, 王强. 细胞壁降解酶与果实软化关系研究进展[J]. 保鲜与加工, 2014, 14 (4): 1-6.
- [14] 林河通, 洪启征, 林娇芬. 杨梅果实采后水分损失机理及控制技术[J]. 福建农林大学学报 (自然科学版), 2006, 35 (2): 190-194.
- [15] 王艳颖, 胡文忠, 庞坤. 花色苷降解机制及影响因素研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39 (8): 171-176.
- [16] 李艳, 李江阔, 张平. 杨梅采后微生物区系及致病微生物研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37 (19): 345-349.
- [17] 陈守江, 李丽娟, 王强. 杨梅采后主要致病菌鉴定及抑菌技术研究[J]. 食品科技, 2017, 42 (5): 256-260.
- [18] 马焱娜, 李娇, 徐沁, 等. 弱酸性电位水在杨梅防腐保鲜中的应用[J]. 食品科学, 2016, 37 (14): 253-257.
- [19] Zhang Y, Li J, Zhang M. Effect of oxygen concentration on postharvest physiology of waxberry fruit[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52 (8): 5012-5020.
- [20] 王友升, 张平, 李江阔. 低氧环境对杨梅采后乙烯合成及酶活性的影响[J]. 食品科学, 2015, 36 (20): 223-227.
- [21] Chen L, Lin H, Lin J. Inhibition of aerobic microorganisms on waxberry by low oxygen storage[J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 67: 456-462.
- [22] 李丽萍, 吴慧峰, 王强. 不同氧气浓度对杨梅贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2015, 15 (3): 23-27.
- [23] Wang H, Li H, Xie G. Anaerobic injury of waxberry fruit under low oxygen storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93 (11): 2789-2796.
- [24] Lin H, Xi Y, Chen S. Effect of carbon dioxide on respiratory chain enzymes of waxberry fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 36 (2): 157-163.
- [25] 张平, 李艳, 李江阔. 高CO₂对杨梅果实细胞内pH及酶活性的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32 (12): 273-278.
- [26] Li J, Zhang M, Zhang W. Regulation of ethylene metabolism in waxberry by high carbon dioxide storage[J]. Food Chemistry, 2015, 174: 567-573.
- [27] 陈健初, 李勇, 叶兴乾. 高CO₂对杨梅致病真菌的抑制作用及机制[J]. 食品科学, 2014, 35 (19): 189-193.
- [28] Huang X, Wu J, Li H. Effect of high CO₂ shock treatment on decay of waxberry fruit[J]. LWT - Food Science and Technology, 2018, 92: 345-351.
- [29] 刘春泉, 宋江峰, 李大婧. 高CO₂胁迫对杨梅果实生理损伤的影响[J]. 江苏农业学报, 2017, 33 (4): 892-897.
- [30] 李江阔, 张平, 李艳. 杨梅气调贮藏中O₂与CO₂适宜配比研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36 (10): 321-325.
- [31] Zhang M, Li J, Zhang Y. Optimization of controlled atmosphere parameters for waxberry storage[J]. Journal of Food Preservation, 2016, 40 (3): 456-463.
- [32] 林河通, 林娇芬, 洪启征. 不同气调参数对杨梅果实贮藏品质的影响[J]. 福建农林大学学报 (自然科学版), 2007, 36 (3): 298-302.
- [33] Li H, Wang Y, Chen J. Synergistic effect of low O₂ and high CO₂ on waxberry preservation[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 100: 123-130.
- [34] Guo Y, Li J, Zhang M. Carbon monoxide as a signal molecule in fruit preservation[J]. Trends in Food Science & Technology, 2014, 39 (2): 102-110.
- [35] 王艳颖, 胡文忠, 庞坤. 臭氧在果蔬保鲜中的应用机制及研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40 (7): 178-183.
- [36] Li Y, Zhang P, Li J. Bactericidal mechanism of ozone on waxberry surface microorganisms[J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 68: 567-573.
- [37] Zhang Y, Li J, Zhang M. Role of nitrogen in modified atmosphere packaging of waxberry[J]. Journal of Food Preservation, 2015, 39 (4): 215-222.
- [38] 李丽萍, 吴慧峰, 王强. 氮气填充对杨梅气调包装稳定性的影响[J]. 食品科技, 2016, 41 (6): 231-235.