

蓝莓采后品质劣变与保鲜技术研究进展

Research progress on postharvest quality deterioration and preservation technology of blueberry

余杰海^{1,2,3} 周文化^{1,2,3} 马妍^{1,2,3}

SHE Jiehai^{1,2,3} ZHOU Wenhua^{1,2,3} MA Yan^{1,2,3}

曾瑶英^{1,2,3} 余焯均^{1,2,3} 郭航宇⁴

ZENG Yaoying^{1,2,3} YU Zhuojun^{1,2,3} GUO Hangyu⁴

(1. 中南林业科技大学食品科学与工程学院, 湖南长沙 410004; 2. 特医食品加工湖南省重点实验室, 湖南长沙 410004; 3. 国家稻谷深加工及副产物实验室, 湖南长沙 410004; 4. 湖南口味王食品有限公司, 湖南益阳 415300)

(1. College of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China; 2. Hunan Key Laboratory of Special Medical Food Processing, Changsha, Hunan 410004, China; 3. National Laboratory of Rice Deep Processing and By-products, Changsha, Hunan 410004, China; 4. Hunan Kouweiwang Foods Co., Ltd., Yiyang, Hunan 415300, China)

摘要: 蓝莓因水分含量高易受病虫害而腐败变质, 严重影响了蓝莓果实的货架期。文章总结了蓝莓果实采后品质劣变的原因机制及国内外蓝莓保鲜技术的研究现状, 主要包括物理、化学、生物 3 种保鲜方法, 重点强调了生物方法在蓝莓采后保鲜中的应用。

关键词: 蓝莓; 品质; 采后; 保鲜; 生物方法

Abstract: Because of high moisture content, blueberries are susceptible to disease and insect infestation leading to corruption and deterioration, which has serious influence on the shelf life of blueberry fruits. This article summarizes the cause mechanism of postharvest quality deterioration of blueberry fruits and the research progress of blueberry preservation technology at home and abroad, mainly including physical, chemical and biological preservation methods; and emphasizes the application of biological methods in the postharvest preservation of blueberries.

Keywords: blueberry; quality; post-harvest; keep fresh; biological method

蓝莓(*Vaccinium* spp.)为杜鹃花科越橘属蓝果类型

植物的俗称,属于杜鹃花科(*Ericaceae*)越橘属越橘亚属植物。蓝莓鲜果是一类富含多酚、多种维生素、花青素、鞣花酸和黄酮类等生理活性物质的浆果^[1]。

根据国际蓝莓组织发布的《2022 年全球蓝莓产业状况报告》,截至 2022 年,全球高丛蓝莓种植面积达 4 082 021 hm²,总产量为 1 789 590 t,每年因采收方式不合理、贮藏保鲜不当而损失的蓝莓占总产量的 30%^[2-3],剩下的 70%蓝莓有效保质期也低于 4 周^[4]。随着生产规模逐渐扩大,新鲜蓝莓呼吸速率高、表皮蜡质结构脆弱、采后病原真菌高度易感等因素导致的经济损失也越来越严重,如何延长蓝莓果实采后货架期已成为整个蓝莓产业的焦点。张鹏等^[5]采用微环境气调(mMAP+1-MCP)处理蓝莓,通过延缓纤维素酶(Cx)和 β -半乳糖苷酶(β -Gal)基因表达量出峰时间,抑制贮藏后期 Cx 和 β -Gal 活性,保持果实的纤维素和原果胶含量,进而减缓果实软化;王瀚博^[6]探究了茉莉酸甲酯(MeJA)对蓝莓采后果实抗氧化体系、能量代谢的影响,利用 MeJA 处理能够促进酚类物质、黄酮类物质、花青素、抗坏血酸和还原型谷胱甘肽的积累,增强了蓝莓苯丙烷代谢,促进产生了多种苯丙烷代谢产物;不饱和脂肪酸代谢、氨基酸代谢、糖酵解途径和 TCA 循环代谢物也发生明显变化,维持了蓝莓采后品质。齐昭京等^[7]以 1.5%壳聚糖、0.6%甘油、0.5%石榴皮提取物(PPE)和 0.02% γ -氨基丁酸(GABA)为配方,制备了壳聚糖复合涂膜,该膜能够有效保持蓝莓类黄酮、

基金项目: 湖南省重点研发计划项目(编号:2023NK2033); 湖南省自然科学基金项目(编号:2022JJ50260)

作者简介: 余杰海,男,中南林业科技大学在读硕士研究生。

通信作者: 周文化(1969—),男,中南林业科技大学教授,博士生导师,博士。E-mail:zhowenhua@126.com

收稿日期: 2023-12-27 **改回日期:** 2024-03-23

抗坏血酸、花青素和还原型谷胱甘肽等抗氧化物质含量;随着蓝莓花青素含量的增加,ABTS 自由基清除能力、DPPH 自由基清除能力、羟自由基清除能力和铁离子螯合能力均增加^[8]。目前,有关蓝莓采后保鲜技术研究大多集中于气调贮藏、低温贮藏、植物生长素、1-MCP 等物理方法和化学方法,且系统性保鲜方法研究较少。

文章拟综述蓝莓采后品质劣变机制的原因和国内外蓝莓保鲜技术的研究现状,着重论述生物方法中的天然香料和中药中的植物精油处理及基因工程技术对果蔬保鲜的应用机制,以期为蓝莓采后品质保障及延长货架期提供依据。

1 蓝莓采后品质劣变原因

1.1 物理原因

1.1.1 机械损伤 蓝莓果实具有浅蓝色的外观,表皮覆盖一层由三萜类和 β -二酮组成的白色针状蜡质^[9],是生物和非生物胁迫的第一个防护屏障,在控制非气孔水分损失和阻止致病性微生物孢子萌发等方面具有重要作用。研究^[10]表明,针状蜡与水果收获后质量密切相关。Chu 等^[11]研究发现,去除水果上的天然蜡会加速采后水分流失和衰减,降低感官和营养品质并缩短货架期。

1.1.2 物流与低温 不同运输方式和低温冷害对蓝莓采后品质、机械损伤、病原菌侵害、货架期寿命有直接影响。贾晓昱等^[12]分析了公路运输—人工挑选、公路运输—过筛挑选、航空运输—人工挑选、航空运输—过筛挑选对蓝莓采后品质的影响,发现公路运输—人工挑选可延缓果实硬度、可滴定酸含量下降,抑制果实呼吸速率,于 4℃ 货架贮藏 20 d 后,其维生素 C 含量为 50.26 mg/100 g,保持了较好的蓝莓品质。

低温贮藏是蓝莓采后普遍应用的贮藏方法之一。在不影响果蔬正常生理代谢的前提下,贮藏温度越低,贮藏期越长^[13]。然而,长时间的低温贮藏易导致蓝莓组织发生冷害,降低其贮藏期和品质。Cao 等^[14]研究了不同冻结条件(-20,-40,-80℃)和浸入液氮对冻融蓝莓品质变化的影响。与新鲜样品相比,-20℃ 处理后蓝莓果实的细胞壁水、细胞质水、细胞外空间和液泡水的弛豫时间显著缩短。浸入液氮后,蓝莓果实的冻结速度快,导致水果霜裂,汁液损失率更高,品质恶化严重。

1.2 生理原因

1.2.1 果实软化 新鲜蓝莓采后的品质取决于水分损失、自溶作用和微生物感染,采后果实软化和失水是影响蓝莓鲜果贮藏货架期的主要原因,同时对蓝莓的口感与营养价值和生物活性成分造成巨大损失。影响蓝莓果实软化的因素包括果实成熟的生理生化代谢变化、成熟阶段、采收的具体时间、表皮硬度和软化酶活性等^[15]。细胞壁降解是蓝莓果实软化的重要原因,在细胞壁降解酶果

胶甲基酯酶(PE)、纤维素酶(Cx)、 β -半乳糖苷酶(β -Gal)等酶的作用下,将细胞壁转化为水溶性果胶、半纤维素和纤维素,降解和剥离细胞间层溶解,主壁和次生壁被破坏,果实细胞壁网状结构和果实软化的坍塌,蓝莓细胞壁组织结构的完整性受到损伤^[16]。蓝莓果实软化与失水会导致风味香气和适口性、贮藏性和抗病性变低,维生素 C、总糖和花青素等生理活性物质含量下降,贮藏品质也会越来越低。Liu 等^[17]采用 0.05 mmol/L 褪黑素(MT)对蓝莓进行处理,可在 42 d 的贮藏过程中保持针状蜡棒状结构,延缓了蜡的降解;贮藏 21 d 后,经 MT 处理的果实中细胞壁降解酶的活性大大下降,减缓了果胶和纤维素的降解达到了防止蓝莓软化和衰老的目的。失水软化对蓝莓保鲜的影响尚未进行系统研究,需深入探讨其对蓝莓保鲜效果的机制。

1.2.2 生理代谢 果实发育阶段中相关的生理代谢变化会直接影响水果的品质^[18]。Montecchiarini 等^[19]研究发现,蓝莓硬度与有机酸、碳水化合物、细胞壁、细胞膜和蛋白质代谢相关的一些代谢物或酶之间有强烈的正负相关性,但代谢物与蓝莓硬度降低的机制关系尚不清楚。蓝莓果实的采后呼吸模式尚存在一定争议,但越来越多证据^[20]表明蓝莓属于呼吸跃变型果实,鲜果采摘后主要进行呼吸作用并产生热量以保持果实生命状态,同时自身贮存的有机物会被消耗,加速蓝莓衰老发焉。乙烯是一种植物激素,其生产量在蓝莓采摘后会出现上升期及峰值,影响水果成长进程和品质改变,如促进成长速率与养分转化、加速叶绿素的降解和细胞壁裂解,从而使果实软化^[21]。Wang 等^[22]研究发现,乙烯吸收剂影响采后蓝莓果实品质,通过阻碍 1-氨基环丙烷-1-羧酸合成酶(ACS)和 1-氨基 cy-氯丙烷-1-羧酸氧化酶(ACO)来抑制乙烯的产生,降低蓝莓果实软化和品质恶化,减少总酚含量的损失。

1.3 病理原因

蓝莓采后病理主要由微生物多样性决定,而真菌和细菌类病原体是其中影响最大的原因,蓝莓采后病理机制如图 1 所示。

1.3.1 真菌侵害 真菌病原体引起的收获后果实腐烂是蓝莓果实贮藏和销售的一个重要限制因素,发展中国家每年因此造成的产量损失高达 50% 以上^[23]。真菌污染会在灌溉、手工挑选、包装、销售等任何环节中发生,采后侵染性病害的发生会加快生理性病变的进程和果实腐烂,也会导致自身抗性减弱、机械伤口,最终大大缩短货架期,造成重大的社会经济损失^[24]。蓝莓采后的主要真菌病害以灰霉病(*Botrytis cinerea.*)、链格孢菌(*Alternaria sp.*)、炭疽病菌(*Colletotrichum sp.*)和青霉菌(*Penicillium sp.*)为主^[25],主要致病真菌对蓝莓采后果实的致病性见表 1。

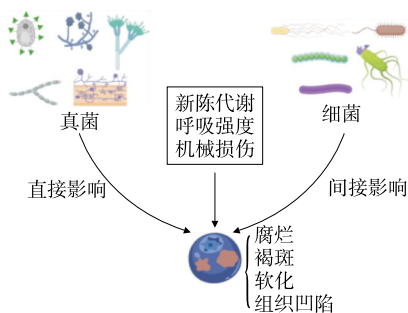


图 1 蓝莓采后病理机制图

Figure 1 Postharvest pathological mechanism of blueberry

表 1 致病真菌对蓝莓采后果实的致病性

Table 1 Pathogenicity of pathogenic fungi on postharvest fruit of blueberry

致病菌	带菌率/%	对果实致病性	参考文献
灰霉病菌	82	淡褐色,水浸状,组织凹陷腐烂,表面密生灰色或灰白色霉层	[26]
链格孢菌	77	0 °C 的贮藏温度下引起果实腐烂衰减病变	[27]
炭疽病菌	70	果实上形成凹陷斑,病斑上着生橘黄色、胶质状的孢子体	[28]
青霉菌	62	防止水果硬度的丧失,抑制可溶性固体的减少,并保持较低的 PPO 活性和更高的 POD 和 CAT 活性	[29]

1.3.2 细菌侵害 真菌病原体是感染蓝莓的主要原因,但同样也会受到细菌病原体的侵害,不仅影响果实的贮藏保鲜,还会降低果实品质,有些细菌更会产生内毒素。如鼠伤寒沙门氏菌(*Salmonella typhimurium*)、单核细胞增生李斯特氏菌(*Listeria monocytogenes*)和大肠杆菌(*Escherichia coli*)^[30],土壤和水为其传播媒介。因此,控制和预防这些病原体的侵袭极其重要。

2 蓝莓采后保鲜技术

2.1 物理方法

2.1.1 气调贮藏处理 气调贮藏是指利用调节和限制食物贮存条件的空气成分、比重及周围环境的温湿度以延长食品的贮存寿命和货架时间的一类技术。其中,改变 O₂ 和 CO₂ 条件下的受控大气(例如提高 CO₂ 或降低 O₂) 是用于新鲜水果运输保鲜的重要手段,目的是需要适当的 O₂ 水平来避免氧化和提高水果发酵的耐受阈值,以保持水果的品质。Smrke 等^[31] 研究发现,5% CO₂、5% O₂ 和 90% N₂ 为蓝莓长期贮藏下的最佳控制大气,虽然 5% CO₂ 贮藏 62 d 后,蓝莓的黄酮-3-醇和羟基肉桂酸含量略

有下降,但类黄酮和花青素含量不变,水果质量、总糖、有机酸含量、糖与有机酸比和酚类物质含量均得到了很好的保留。气调贮藏尤其是微环境气调是一种较为先进的贮藏方法,该方法能更好地保持蓝莓的硬度和口感,对品质提升和延长货架期具有重要意义,然而管理和相关技术配套等是一个较为复杂的工程,其运行成本和维护费用高昂,因此,需对该技术进行进一步研究。

2.1.2 低温贮藏处理 低温可有效抑制蓝莓果实呼吸强度并降低其乙烯释放速率和水分流失,抑制维生素 C 和花色苷含量的减少、保护蓝莓果霜,通过抑制细胞壁水解酶活性来延缓果胶和半纤维素的降解。另一方面也不利于微生物的生长繁殖,可降低病害,延缓衰老进程。Zhou 等^[32] 发现蓝莓在 0 °C 贮藏 30 d 后,蓝莓中点蚀的水果细胞结构和生理参数被改变,同时二磷酸腺苷(ADP)、三磷酸腺苷(ATP)和多酚氧化酶(EC)酶活性降低,有助于延缓蓝莓果实衰老。Cheng 等^[33] 研究表明,与新鲜蓝莓相比,采用 NF-80 °C 冷冻蓝莓,解冻后的蓝莓多酚和其他营养化合物(包括果胶、可溶性糖和维生素)可以保留 95% 以上。周宇益等^[34] 将蓝莓于 4 °C、10 mT 恒稳磁场环境下贮藏 7 d,蓝莓果实的失重率和腐烂率分别下降了 55.63% 和 62.14%,果实的超氧化物歧化酶活性得到增强,并减少了膜透性。

值得注意的是,贮藏温度过低易导致果蔬温度损失,在贮藏不当冰晶形成量过大,使细胞遭受机械破坏而造成解冻时的汁液外流。

2.1.3 非热力杀菌处理 涂膜保鲜、冷等离子体、紫外线辐照、高压静电场技术等物理保鲜技术因低温、无残留、环保、操作简便且安全性较高,可避免高温对食品营养、风味、质地和色泽等的影响,被广泛应用于蓝莓的采后保鲜。Sun 等^[16] 利用壳聚糖和胸腺油涂层与短波紫外线照射(UV-C)处理相结合的方法,抑制了蓝莓细胞壁多糖(PG、PME、β-Gal、Cx)的降解,延缓了收获后蓝莓的软化和衰老。Sami 等^[35] 研究发现,经新型壳聚糖、二氧化硅纳米颗粒结合乳酸链球菌素制作的复合薄膜处理后,蓝莓果实的酵母菌数为 3.58 log(CFU/g),低于未处理组[4.62 log(CFU/g)]。潘雅雯^[36] 利用冷离子体活性水处理蓝莓,可以抑制可溶性果胶含量的减少和蓝莓软化相关酶活性,且能够维持蓝莓细胞壁的完整结构。应用非热杀菌技术时还需考虑大批量处理过程中杀菌时长或处理剂量对蓝莓果实的负面影响。

2.2 化学方法

2.2.1 化学保鲜剂处理 利用茉莉酸甲酯、1-甲基环丙烯(1-MCP)、β-羟基-β-甲基丁酸钙等化学保鲜剂对蓝莓进行浸泡、熏蒸、涂膜处理,可显著抑制微生物生长繁殖,降低果实细胞降解酶活性,调控果实呼吸代谢和生理生

化指标,且具有易操作、低机械性损伤的优点。罗冬兰等^[37]采用 300 $\mu\text{mol/L}$ 茉莉酸甲酯浸泡蓝莓果实 5 min,可有效降低蓝莓果实的腐烂率和呼吸强度,保持果实硬度、花色苷含量及总酚含量。Ba 等^[38]采用 1.0 $\mu\text{L/L}$ 的 1-MCP 结合控制大气(CA)贮藏对蓝莓进行处理,于 0 $^{\circ}\text{C}$ 、90%相对湿度下贮藏 80 d 后,有效延缓了果实软化和氧化酶活性的降低,抑制了相对电解质泄漏和丙二醇(MDA)含量的增加。Tang 等^[39]采用 β -羟基- β -甲基丁酸钙(HMBCa)和纳米纤维素(CNCs)作为交联剂和增强剂,制备了 0.4 g/mL AVP-0.5 mg/mL HMBCa-CNCs 薄膜,降低了蓝莓的呼吸频率,延缓了果实质量损失,更好地维持了可溶性固体和有机酸含量。

2.2.2 化学消毒剂熏蒸处理 常见的果蔬消毒剂有 SO_2 、 ClO_2 、 O_3 等,其能够有效地杀死害虫,降低蓝莓患病发生率。魏佳等^[40]采用气态熏蒸方式抑制了蓝莓果实表面微生物的生长繁殖,调节了果实生理代谢。加入适宜浓度的气体消毒剂 SO_2 、 ClO_2 、 O_3 、NO、CO 气体也能提高采后水果质量,主要表现为延缓衰老、抑制褐变、控制疾病和减轻轻害^[41]。但化学熏蒸和药剂处理会对蓝莓自身的安全性造成影响且污染环境,因此,熏蒸操作需在密闭空间进行,而化学消毒剂的批次浓度难以控制,有些气体易燃操作风险系数高,一般多作为辅助。

2.3 生物方法

2.3.1 植物精油处理 自然界中许多天然香辛料和中草药的提取物具有抑菌作用,但只有部分植物能被应用于采后果蔬贮藏保鲜。这些植物提取物因含丰富的酚类、醛类、挥发油类化合物而具有较好的抑菌效果^[42]。植物精油是从植物的花、芽、种子、叶、枝、果实和根中通过发酵和提取而获得的芳香含油液体,具有低相对分子质量和亲脂性特点,能够穿过微生物细胞膜,使微生物细胞产生毒性作用从而抑制细胞的通透性和生理代谢。各种植物精油作为保鲜剂的抑菌效果见表 2。因安全、环保以及优良的抑菌活性,植物精油被广泛应用于果蔬保鲜中,除直接用于果蔬保鲜外,还可与其他保鲜剂复配使用,例如制成精油纳米乳液保鲜剂、联合物理化学方法等用于果蔬保鲜。但精油具有挥发性,采用保鲜剂涂膜对果蔬的保护时间较短,且其抗菌活性不稳定,因此,植物精油应用于蓝莓保鲜具有很好的开发前景。

2.3.2 生物拮抗处理 目前,常见的微生物拮抗剂有酵母菌、枯草芽孢杆菌及木霉菌等。其控制水果和蔬菜采收后疾病有两种方式:① 使用已经存在于生产本身上的微生物,可以促进生长和管理;② 某些可以人为引入收获后病原体的微生物。生物拮抗主要的作用模式为利用微生物群的多样性来抑制病原体的一些毒性、压力耐受性

表 2 各种植物精油作为保鲜剂的抑菌效果

Table 2 The antibacterial effect of various plant essential oils as preservatives

精油	壁材	剂型类别	抑菌类别	抑菌效果	文献
艾草精油	明胶和壳聚糖	微胶囊	金黄色葡萄球菌、大肠杆菌	抑制率:对 <i>S. aureus</i> 为 97.14%;对 <i>E. coli</i> 为 98.86%	[43]
松针精油	Tween-80	纳米乳液	金黄色葡萄球菌	抑菌圈直径为(7.23+0.20) mm	[44]
芥末精油	Tween	纳米乳液	白地霉	经 64 μL /柑橘果胶/吐温/芥末精油纳米乳液处理 6 h 后,白地霉孢子萌发率为 6.67%,芽管长度为 8.57 mm	[45]
肉桂精油	Tween-80	薄膜	金黄色葡萄球菌、大肠杆菌	当精油薄膜含量为 10%时, <i>S. Aureus</i> 抑菌带为 4 cm^2 , <i>E. coli</i> 为 2 cm^2	[46]
蓝桉精油	二氧化硅纳米颗粒	薄膜	金黄色葡萄球菌	平均抑制范围为 12.2~26.2 mm	[47]
丁香精油	蛋白质类	酰基载体	金黄色葡萄球菌和大肠杆菌	<i>S. aureus</i> (180 μL , 1×10^6 CFU/mL)最终质量浓度为 0.013,0.26,0.52,1.04,2.08 mg/mL, <i>E. coli</i> 质量浓度分别为 0.016,0.32,0.64,1.28,2.56 mg/mL	[48]
混合孜然花 椒精油	混合番红和白蛋白	薄膜	金黄色葡萄球菌、大肠杆菌	<i>S. aureus</i> :从 1.6 mg/mL 降至 0.4 mg/mL; <i>E. coli</i> :从 0.8 mg/mL 降至 0.4 mg/mL	[49]
美国薄荷 精油	Tween-80	纳米乳液	链格孢菌、炭疽病菌	当纳米乳化精油(MEO)体积分数为 0.8 $\mu\text{L/mL}$ 时, <i>Alternaria</i> sp.的抑制率 90.32%,当 MNE 体积分数为 0.6 $\mu\text{L/mL}$ 时, <i>Colletrichum</i> sp.的抑制率为 100.0%	[50]
茶树精油			鼠伤寒沙门氏菌、李斯特菌	生物膜细胞分别降低了 3.0,3.3 $\log(\text{CFU}/\text{cm}^2)$	[51]

和调控新陈代谢。杨蕾等^[52]从健康蓝莓叶片、果实、根部土壤中发现并得到 17 株拮抗菌,其中从根部土壤中分离得到的芽孢杆菌对青霉和枝孢菌两种致病菌有良好的抑制效果。秦士维^[53]采用葡萄有孢汉逊酵母(*Hanseniaspora uvarum*, 10^8 CFU/mL)结合 SA 制备抑菌剂,于果实采收前喷淋,采后 20 °C 贮藏 6 d 后, *H. uvarum* + SA 组果实腐烂率为 5.1%,对照组腐烂率为 37.50%,喷淋生物防菌剂的果实腐烂率大大降低。

与杀菌处理相比,这种生物拮抗保鲜方法仍处于起步阶段,将其用于水果和蔬菜收获后疾病的控制具有巨大的潜力。

2.3.3 基因工程处理 基因工程保鲜技术是通过有关基因工程技术找到果蔬成熟内源性基因,并去除或将果蔬的基因进行替换并表达,来调控乙烯生物合成并抑制细胞壁降解酶的活性,延缓果实失水与软化进度,从而达到果蔬保鲜的目的。Zhao 等^[54]研究发现, *LcERF10* 可以作为荔枝脱落的正调控因子,抑制代谢基因延缓荔枝根部脱落,其在表达中促进了器官的胞质碱化,结合启动子抑制了 *LcNHx7* 的表达,调节了脱落区(AZ)细胞的胞质 pH。Cappai 等^[55]认为,可以在蓝莓中应用 CRISPR (clustered regularly interspaced short palindromic repeats)技术,编辑蓝莓基因组以提高果实硬度,但其关键在于:① 找到果实硬度关键待编辑候选区域;② 优化蓝莓的组织培养方案以获得高编辑效率。对于蓝莓采后而言,作为呼吸跃变型水果也可以利用乙烯信号传导途径 EIN2、EIN3 和 EILs 的转录因子结合顺式原件来调控乙烯响应基因从而实现保鲜目的。

3 结论与展望

蓝莓是货架期极短且易受微生物污染的水果,采用气调、低温、辐照和高压静电场技术等物理方法保鲜时,需严格控制参数浓度配比防止蓝莓受到冷害、气体毒性的负面影响。在气调贮藏中添加一些消毒剂如 SO_2 等气体能够提高保鲜效果,但化学保鲜剂、消毒剂等化学方法会对蓝莓自身的安全性造成污染,还会危害环境和人体健康。生物方法能够有效抑制病原菌的污染和相关酶的活性,但其成本较高和部分生物保鲜剂会导致果蔬颜色风味变化,一定程度上限制了其应用。

目前,蓝莓保鲜技术仍处在应用于表面效果研究层面,许多保鲜方法对蓝莓果实衰老进程的调控机理尚不清楚,特别是在乙烯和基因调控方面。植物精油作用时间较短,将其与纳米技术结合可以有效延长植物精油作用时间,但纳米材料的选择、植物精油与纳米材料相互作用机制不明确。植物激素之间的相互作用机制也未能得到明确阐述,需深入研究。后续研究可集中于利用物理和化学两种方法的优势开发出低成本、安全性好、环保绿

色的保鲜方法。结合蓝莓的生理病理特性,精准寻找其“靶器官”组织基因,对症下药,方可对蓝莓采后果实做出安全、长效、经济、便捷的保鲜技术措施。

参考文献

- [1] VENDRAME S, DEL BO C, CIAPPELLANO S, et al. Berry fruit consumption and metabolic syndrome [J]. *Antioxidants*, 2016, 5 (4): 34.
- [2] 丁丹燕, 于诗颖, 韩叶平. 蓝莓营养价值及生产发展现状分析 [J]. *美洲农业研究前沿*, 2023, 13(1): 1-11.
DING D Y, YU S Y, HAN Y P. Analysis on the nutritional value and production development status of blueberries [J]. *Front in American Agriculture*, 2023, 13(1): 1-11.
- [3] 李亚东, 裴嘉博, 陈丽, 等. 2020 中国蓝莓产业年度报告 [J]. *吉林农业大学学报*, 2021, 43(1): 1-8.
LI Y D, PEI J B, CHEN L, et al. 2020 China blueberry industry annual report [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2021, 43 (1): 1-8.
- [4] JACKSON E D, SANFORD K A, LAWRENCE R A, et al. Lowbush blueberry quality changes in response to prepacking delays and holding temperatures [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 1999, 15(2): 117-126.
- [5] 张鹏, 朱文月, 薛友林, 等. 微环境气调对蓝莓贮藏期软化的调控作用 [J]. *中国食品学报*, 2022, 22(5): 249-258.
ZHANG P, ZHU W Y, XUE Y L, et al. Regulatory effect of microenvironmental climate control on the softening of blueberry during storage [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(5): 249-258.
- [6] 王瀚博. 茉莉酸甲酯对蓝莓果实采后品质及抗病性调控机制研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2022: 30-35.
WANG H B. Study on the regulation mechanism of methyljasmonate on postharvest quality and disease resistance of blueberry fruits [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2022: 30-35.
- [7] 齐昭京, 夏秀英. 壳聚糖复合涂膜对蓝莓贮藏品质及抗氧化系统的影响 [J]. *北方园艺*, 2020(24): 97-106.
QI Z J, XIA X Y. Effects of chitosan composite coating on storage quality and antioxidant system of blueberries [J]. *North Gardening*, 2020(24): 97-106.
- [8] 石晓岩. 蓝莓中花青素的抗氧化活性研究 [J]. *中国食品添加剂*, 2023, 34(12): 162-168.
SHI X Y. Study on antioxidant activity of anthocyanins in blueberries [J]. *China Food Additives*, 2023, 34(12): 162-168.
- [9] 丁捷, 刘春燕, 黄彭, 等. 蓝莓保鲜技术研究进展 [J]. *园艺学报*, 2023, 50(9): 1 944-1 958.
DING J, LIU C Y, HUANG P, et al. Research progress on blueberry preservation technology [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2023, 50(9): 1 944-1 958.
- [10] MARTIN L B B, ROSE J K C. There's more than one way to skin

- a fruit: Formation and functions of fruit cuticles[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65(16): 4 639-4 651.
- [11] CHU W, GAO H, CHEN H, et al. Effects of cuticular wax on the postharvest quality of blueberry fruit[J]. *Food Chemistry*, 2018, 239: 68-74.
- [12] 贾晓昱, 董立超, 李金金, 等. 不同运输和选果方式对蓝莓采后品质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(9): 2 778-2 786.
- JIA X Y, DONG L C, LI J J, et al. Effects of different transportation and fruit selection methods on postharvest quality of blueberry[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2022, 13(9): 2 778-2 786.
- [13] 房祥军, 吴伟杰, 穆宏磊, 等. 外源脱落酸处理对蓝莓采后低温胁迫下生理响应的影响[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(2): 232-242.
- FANG X J, WU W J, MU H L, et al. Effects of exogenous abscisic acid treatment on physiological response of postharvest blueberry under low temperature stress[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(2): 232-242.
- [14] CAO X, ZHANG F, ZHAO D, et al. Effects of freezing conditions on quality changes in blueberries[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(12): 4 673-4 679.
- [15] SHI J, XIAO Y, JIA C, et al. Physiological and biochemical changes during fruit maturation and ripening in highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.)[J]. *Food Chemistry*, 2023, 410: 135299.
- [16] SUN H Y, HAO D Q, TIAN Y, et al. Effect of chitosan/thyme oil coating and UV-C on the softening and ripening of postharvest blueberry fruits[J]. *Foods*, 2022, 11(18): 2 795.
- [17] LIU R, SHANG F, NIU B, et al. Melatonin treatment delays the softening of blueberry fruit by modulating cuticular wax metabolism and reducing cell wall degradation[J]. *Food Research International*, 2023, 173: 113357.
- [18] NG J K T, SCHRÖDER R, BRUMMELL D A, et al. Lower cell wall pectin solubilisation and galactose loss during early fruit development in apple (*Malus x domestica*) cultivar 'Scifresh' are associated with slower softening rate [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2015, 176: 129-137.
- [19] MONTECCHIARINI M L, BELLO F, RIVADENEIRA M F, et al. Metabolic and physiologic profile during the fruit ripening of three blueberries highbush (*Vaccinium corymbosum*) cultivars [J]. *Journal of Berry Research*, 2018, 8(3): 177-192.
- [20] 姬亚茹, 胡文忠, 廖嘉, 等. 蓝莓采后生理病理与保鲜技术的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(18): 263-269.
- JI Y R, HU W Z, LIAO J, et al. Research progress on postharvest physiology, pathology and preservation technology of blueberry[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2019, 45(18): 263-269.
- [21] 严涵, 郝全洋, 艾祥, 等. 乙烯对果蔬成熟作用研究进展[J]. *中国果菜*, 2020, 40(10): 1-8.
- YAN H, HAO Q Y, AI X, et al. Research progress on the effect of ethylene on fruit and vegetable ripening[J]. *Chinese Fruit and Vegetable*, 2020, 40(10): 1-8.
- [22] WANG S Y, ZHOU Q, ZHOU X, et al. The effect of ethylene absorbent treatment on the softening of blueberry fruit[J]. *Food Chemistry*, 2018, 246: 286-294.
- [23] DIAZ M A, PEREYRA M M, PICON-MONTENEGRO E, et al. Killer yeasts for the biological control of postharvest fungal crop diseases[J]. *Microorganisms*, 2020, 8(11): 1 680.
- [24] 戴启东, 李广旭, 杨华, 等. 蓝莓采后病害的病原鉴定及发生规律研究[J]. *果树学报*, 2016, 33(10): 1 299-1 306.
- DAI Q D, LI G X, YANG H, et al. Pathogen identification and occurrence law of blueberry postharvest diseases[J]. *Journal of Fruit Science*, 2016, 33(10): 1 299-1 306.
- [25] 孙莎, 邵海燕, 熊涛, 等. 五倍子提取液对蓝莓采后病害和品质的影响[J]. *林业科学*, 2018, 54(6): 53-62.
- SUN S, HAO H Y, XIONG T, et al. Effect of gallnut extract on postharvest disease and quality of blueberry[J]. *Forestry Science*, 2018, 54(6): 53-62.
- [26] WANG H, KOU X, WU C, et al. Nitric oxide and hydrogen peroxide are involved in methyl jasmonate-regulated response against *Botrytis cinerea* in postharvest blueberries[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(47): 13 632-13 640.
- [27] ZHU X Q, XIAO C L. Phylogenetic, morphological, and pathogenic characterization of *Alternaria* species associated with fruit rot of blueberry in California[J]. *Phytopathology*, 2015, 105(12): 1 555-1 567.
- [28] XU C N, WANG Y N, HU T L, et al. Identification and pathogenicity of pathogen causing anthracnose on *vaccinium*[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(20): 3 992-3 998.
- [29] WU W, CAO S, CHEN H, et al. Effects of ozone fumigation on the main postharvest pathogenic fungi *Penicillium* sp. and the storage quality of blueberry in Majiang County, China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 898994.
- [30] ZHANG H, TSAI S, TIKEKAR R V. Inactivation of *Listeria innocua* on blueberries by novel ultrasound washing processes and their impact on quality during storage[J]. *Food Control*, 2021, 121: 107580.
- [31] SMRKE T, CVELBAR W N, VEBERIC R, et al. Modified atmospheric CO₂ levels for maintenance of fruit weight and nutritional quality upon long-term storage in blueberry [J]. *Horticulturae*, 2021, 7(11): 478.
- [32] ZHOU Q, ZHANG C, CHENG S, et al. Changes in energy metabolism accompanying pitting in blueberries stored at low temperature[J]. *Food Chemistry*, 2014, 164: 493-501.
- [33] CHENG L, WU W, AN K, et al. Advantages of liquid nitrogen quick freezing combine gradient slow thawing for quality preserving of blueberry[J]. *Crystals*, 2020, 10(5): 368.
- [34] 周宇益, 杨哪, 孟嫚, 等. 恒稳磁场辅助冷藏保鲜对蓝莓品质

- 的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(11): 161-165, 172.
- ZHOU Y Y, YANG N, MENG M, et al. Effect of constant magnetic field assisted cold storage on blueberry quality [J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(11): 161-165, 172.
- [35] SAMI R, SOLTANE S, HELAL M. Microscopic image segmentation and morphological characterization of novel chitosan/silica nanoparticle/nisin films using antimicrobial technique for blueberry preservation[J]. *Membranes*, 2021, 11(5): 303.
- [36] 潘雅雯. 冷等离子体延缓蓝莓软化及保鲜研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021: 18-33.
- PAN Y W. Cold plasma retarded blueberry softening and preservation [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021: 18-33.
- [37] 罗冬兰, 瞿光凡, 孙雁征, 等. 茉莉酸甲酯处理对蓝莓贮藏品质的影响[J]. 中国南方果树, 2022, 51(4): 161-166, 170.
- LUO D L, QU G F, SUN Y Z, et al. Effect of methyljasmonate treatment on storage quality of blueberry[J]. *South China Fruits*, 2022, 51(4): 161-166, 170.
- [38] BA L, LUO D, JI N, et al. Effects of 1-methylcyclopene and controlled-atmosphere treatment on the quality and antioxidant capacity of blueberries during storage [J]. *Food Science and Technology*, 2021, 42: e60220.
- [39] TANG H, HAN Z L, ZHAO C L, et al. Preparation and characterization of aloe vera polysaccharide-based packaging film and its application in blueberry preservation [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2023, 177: 107445.
- [40] 魏佳, 张政, 赵芳芳, 等. 鲜食葡萄 SO₂ 气体精准熏蒸保鲜控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 260-268.
- WEI J, ZHANG Z, ZHAO F F, et al. Design of control system for fresh-keeping of grape by precise fumigation with SO₂ gas [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(1): 260-268.
- [41] ZHANG W L, PAN Y G, JIANG Y M, et al. Advances in gas fumigation technologies for postharvest fruit preservation [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 19: 1-20.
- [42] KISIRIKO M, ANASTASIADI M, TERRY L A, et al. Phenolics from medicinal and aromatic plants: Characterisation and potential as biostimulants and bioprotectants[J]. *Molecules*, 2021, 26(21): 6 343.
- [43] 翟媛媛, 刘艳君, 王进, 等. 艾草精油抗菌微胶囊的制备与应用[J]. 纺织科学与工程学报, 2021, 38(4): 50-56.
- ZHAI Y Y, LIU Y J, WANG J, et al. Preparation and application of antibacterial microcapsules of wormwood essential oil[J]. *Journal of Textile Science and Engineering*, 2021, 38(4): 50-56.
- [44] 王雪薇. 黑皮油松松针精油纳米乳液的制备及其抑菌活性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021: 38-39.
- WANG X W. Preparation of essential oil nanoemulsion of pine needle and its antibacterial activity[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021: 38-39.
- [45] 袁楚珊, 孙畅, 程小梅, 等. 柑橘果胶/吐温/芥末精油纳米乳的稳定性、抑菌活性及其在砂糖橘保鲜中的应用[C]// 中国食品科学技术学会第二十届年会论文摘要集. 长沙: 中国食品科学技术学会, 2023: 579-580.
- YUAN C S, SUN C, CHENG X M, et al. Stability and antibacterial activity of citrus pectin/Tween/mustard essential oil nanoemulsion and its application in the preservation of sugar oranges [C]// Abstract Collection of Papers of the 20th Annual Meeting of the Chinese Society of Food Science and Technology. Changsha: Chinese Society of Food Science and Technology, 2023: 579-580.
- [46] WANG L N, LIU F, JIANG Y F, et al. Synergistic antimicrobial activities of natural essential oils with chitosan films[J]. *J Agric Food Chemistry*, 2011, 59(23): 12 411-12 419.
- [47] ELANGOVA S, MUDGIL P. Antibacterial properties of eucalyptus globulus essential oil against mrsa: A systematic review [J]. *Antibiotics*, 2023, 12(3): 474.
- [48] BAI J W, LI J Q, CHEN Z Y, et al. Antibacterial activity and mechanism of clove essential oil against foodborne pathogens[J]. *LWT*, 2023, 173: 114249.
- [49] LI H B, ZHAO L L, DAI Q Y, et al. Blended cumin/zanthoxylum essential oil improve the antibacterial, fresh-keeping performance and flavor of chilled fresh mutton [J]. *Meat Science*, 2023, 200: 109173.
- [50] ZHANG Y X, DAI J L, MA X Y, et al. Nano-emulsification essential oil of monarda didyma l. to improve its preservation effect on postharvest blueberry [J]. *Food Chemistry*, 2023, 417: 135880.
- [51] MEENU M, PADHAN B, PATEL M, et al. Antibacterial activity of essential oils from different parts of plants against salmonella and listeria spp[J]. *Food Chemistry*, 2023, 404: 134723.
- [52] 杨蕾, 伍建榕, 邓佳, 等. 蓝莓采后病害病原菌分离鉴定及其拮抗菌筛选[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2019, 48(2): 143-147.
- YANG L, WU J R, DENG J, et al. Isolation and identification of postharvest pathogens of blueberry and screening of antagonistic bacteria[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University*, 2019, 48(2): 143-147.
- [53] 秦士维. 蓝莓果实潜伏感染病原真菌分离鉴定及生物防治研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017: 33-34.
- QIN S W. Isolation, identification and biological control of pathogenic fungi latent infection in blueberry fruits[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017: 33-34.
- [54] ZHAO M L, LI C Q, MA X S, et al. Knox protein kant1 regulates fruitlet abscission in litchi by repressing ethylene biosynthetic genes[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2020, 71(14): 4 069-4 082.
- [55] CAPPAL F, BENEVENUTO J, FERRAO L F V, et al. Molecular and genetic bases of fruit firmness variation in blueberry: A review[J]. *Agronomy*, 2018, 8(9): 174.