

高浓度 CO₂ 气调对浆果生理及超微结构影响的研究进展

姜爱丽^{1,2}, 高红豆^{1,2}, 胡文忠^{1,2}, 顾思彤^{1,2}, 蒋海峰^{1,2}

(1.大连民族大学, 大连 116600; 2.生物技术与资源利用教育部重点实验室, 大连 116600)

摘要: **目的** 介绍高浓度 CO₂ 对浆果采后超微结构和生理代谢影响的研究进展, 为浆果保鲜提供新的思路 and 依据。**方法** 从高浓度 CO₂ 气调贮藏浆果保鲜中的应用和高浓度 CO₂ 气调贮藏处理对浆果生理生化变化的影响入手, 总结国内外高浓度 CO₂ 贮藏浆果、类浆果及其他水果的相关文献。**结果** 通过总结高浓度 CO₂ 对浆果采后超微结构和生理代谢影响的内在机制和共性科学问题, 解析了浆果类果实可以忍耐高浓度 CO₂ 的内在原因, 归纳出了高浓度 CO₂ 处理延缓浆果生理代谢和衰老进程的生理机制。**结论** 作为一种通过物理手段可有效保持浆果品质的贮藏方法, 高浓度 CO₂ 气调贮藏保鲜技术具有能延迟浆果后熟衰老, 避免低温冷害和其他生理性病害的发生, 有效延长浆果货架期等特点。高浓度 CO₂ 气调贮藏及包装的综合运用将会为浆果贮运及其物流配送带来新的生机和希望。

关键词: 浆果; 高浓度 CO₂; 超微结构; 生理代谢; 贮藏保鲜

中图分类号: TB485.2; TS255.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)09-0096-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.09.017

Research Progress of Effects of High-concentration CO₂ Modified Atmosphere on the Physiological Metabolism and Ultrastructure of Berry

JIANG Ai-li^{1,2}, GAO Hong-dou^{1,2}, HU Wen-zhong^{1,2}, GU Si-tong^{1,2}, JIANG Hai-feng^{1,2}

(1.Dalian Minzu University, Dalian 116600, China; 2.Key Laboratory of Biotechnology and Bioresource Utilization, Ministry of Education, Dalian 116600, China)

ABSTRACT: The work aims to introduce the research progress of effects of high-concentration CO₂ on the postharvest ultrastructure and physiological metabolism of berry and provide new idea and basis for its preservation. Starting from the application of modified atmosphere storage of high-concentration CO₂ in the preservation of berry and the effects of treatment by modified atmosphere storage of high-concentration CO₂ on the physiological and biochemical change of berry, the relevant literature on the berry, berry-like fruit and other fruit stored in high-concentration CO₂ at home and abroad was summarized. By summarizing the internal mechanism and generic scientific problems of the effects of high-concentration CO₂ on the postharvest ultrastructure and physiological metabolism of the berry, the underlying cause for the resistance of berry-like fruit against the high-concentration CO₂ was analyzed, and the physiological mechanism of high-concentration CO₂ treatment used to delay the physiological metabolism and aging process of the berry was concluded. As a kind of storage method that could effectively maintain the quality of berries through the physical means, the preservation technology of high CO₂ modified atmosphere storage is characterized by the abilities to inhibit after-ripening and senescence, avoid chilling damage and other physiological disorders, and effectively prolong the shelf life of berries, etc. The comprehensive application of high concentration CO₂ modified atmosphere storage and package will bring new vitality and hope for the storage and transportation of berry and its logistics distribution.

KEY WORDS: berry fruits; high-concentration CO₂; ultrastructure; physiological metabolism; storage and preservation

浆果是由子房或联合其他花器发育成的柔软多汁的肉质单果^[1]。与其他水果相比, 浆果的鲜食品质

收稿日期: 2017-12-24

基金项目: “十三五”国家重点研发计划重点专项 (2016YFD0400903); 国家国际科技合作项目 (2013DFA31450)

作者简介: 姜爱丽 (1971—), 女, 博士, 大连民族大学副教授, 主要研究方向为采后生物学与技术。

通信作者: 胡文忠 (1959—), 男, 博士, 大连民族大学教授, 主要研究方向为食品科学。

更胜一筹。浆果内部含有大量的多酚、花色苷、纤维素以及人体生长发育所需的微量元素等物质,有提高机体免疫功能等功效,对人体健康有益^[2]。

浆果采后仍是一个有鲜活生命的有机体,继续进行着新陈代谢和呼吸代谢,能够对自身和环境的刺激产生相应的反馈^[3]。与采前相比,采后浆果不再从母体中得到养分、水分等物质的供给,只能靠分解代谢自身积累的有机物质,以获得生存所需能量来维持生命活动,致使果实内部特有的结构、成分产生某种程度的改变。由于浆果自身含水量高、组织结构不致密,因此在贮运过程中极易腐败变质、失水萎蔫。目前自发气调包装(MAP)结合低温冷藏是我国果蔬产业化保鲜的主要方法之一,具有良好的科研基础及广阔的应用前景^[4],该技术为浆果的保鲜及物流提供了有力的保障。外源CO₂处理可以提高植物细胞间隙CO₂的浓度,抑制脱羧过程的速度,减缓呼吸进程,从而减少甚至抑制果实软化及霉烂的发生,提高果实的耐藏性和鲜食品质,延长贮运期^[5]。对浆果进行适当的高浓度CO₂气调处理,可保证浆果在贮藏销售过程中有较好的品质。

1 高浓度CO₂气调贮藏在水果保鲜中的应用

气调贮藏与其他贮藏方法相比具有操作简单、安全可靠、效果显著等优点。许多研究均已就果蔬气调贮藏方法中的高浓度CO₂对水果保鲜作用进行了分析,高浓度CO₂阈值的高低主要取决于CO₂气调处理时间的长短。如果用CO₂进行短时的冲击处理或动态气调贮藏,那么CO₂体积分数不少于20%时才称之为高浓度CO₂^[6-7];如果用CO₂进行静态气调贮藏,则CO₂体积分数达到5%以上就称为高浓度CO₂^[8]。

1.1 浆果保鲜

世界范围内,位居产量前3位的浆果依次为葡萄、草莓、蓝莓^[9]。这三大浆果中,蓝莓虽开发利用最晚,但因其极强的抗氧化能力和保健功效,已跻身于世界五大健康水果之列^[10]。孟宪军等以伯克利品种蓝莓为实验材料,研究了在1℃的O₂(5%)+CO₂(10%),O₂(5%)+CO₂(20%)和O₂(5%)+CO₂(30%)(均为体积分数)这3种不同的箱式气调贮藏条件下蓝莓的保鲜效果,发现O₂(5%)+CO₂(20%)更有利于延缓蓝莓的衰老进程^[11]。同时,该实验采用直接充入体积分数为99.9%的CO₂气体对蓝莓进行48,96和144h的处理,来探索高浓度CO₂对采后蓝莓生理代谢及品质的影响,研究发现,短时高浓度CO₂冲击处理能有效降低蓝莓果实内部酶的活性,增强其抗氧化能力^[6]。可见,无论是对蓝莓施以动态还是静态的适宜高浓度CO₂气调贮藏,均可在一定程度上改善蓝莓品质并延长货架期。高浓度CO₂气调贮藏

在葡萄上的应用更为广泛,有研究表明,高浓度CO₂可减缓果蔬呼吸速率和乙烯生成,影响果蔬后熟和病原菌生长,从而达到延缓衰老的作用。用冰温结合外源体积分数为10%或15%的CO₂对“巨峰”葡萄进行气调贮藏,能抵抗葡萄果实腐烂和脱粒的发生,对果梗褐变也有一定的抑制效果^[12]。还有研究利用低温(0℃)条件下高浓度CO₂(体积分数为20%)处理红地球葡萄3d,发现该方法可有效增加果实的花色苷含量,增强抗氧化作用,减慢果实的衰老进程^[13]。用O₂(20%)+CO₂(20%)对葡萄进行3d的短时前处理,能明显降低葡萄贮藏期间的质量损失率和果实萎蔫的发生,可有效地延长货架期^[7]。与蓝莓和葡萄相比,草莓的外表皮更软,因此更易腐烂。CO₂可抑制采后草莓产生乙烯和脱落酸,对纤维素酶活性也有抑制作用,并且可以延缓花青素分解^[14]。肖功年等^[15]在对草莓进行气调贮藏时发现O₂(2.5%)+CO₂(16%)为最佳气调贮藏条件,该条件下的草莓贮藏期能延长4~6d。对草莓进行CO₂(10%)和CO₂(20%)气调贮藏时,在温度为(5±1)℃的环境下,CO₂(20%)贮藏7d时草莓腐烂率仍可维持在10%以下,该气调包装对草莓有很好的贮藏效果^[14]。此外,Yong等^[16]研究发现高浓度CO₂可引起草莓硬度的上升,主要是能引起果胶聚合物生成、水溶性果胶含量降低以及螯合溶解果胶含量上升。

1.2 类浆果保鲜

类浆果是指果实自身分类虽不属于浆果,但却具有柔软多汁等特点,如水蜜桃、甜樱桃、荔枝、龙眼等。

甜樱桃是经济价值很高的水果,本身质软多汁,采收又多在高温高湿季节,因此不耐贮藏^[17-18]。甜樱桃果实对高浓度CO₂具有很强的忍耐力,这一特征为甜樱桃的贮运保鲜带来了生机和希望^[19]。笔者所在的课题组通过对“8-102”甜樱桃进行高浓度CO₂短时(48,96,144h)前处理,发现不同时间的高浓度CO₂处理对甜樱桃果实多酚氧化酶的活性均有抑制作用,其中效果最好的是48和96h这2个处理组,不仅延缓了果皮褐变进程,抑制了果实的呼吸强度和过氧化物酶活性的上升速度及膜脂过氧化物的发生,还降低了丙二醛含量^[20]。对“红灯”品种的甜樱桃分别进行O₂(5%)+CO₂(5%),O₂(5%)+CO₂(10%)的静态气调贮藏和装入聚乙烯薄膜中进行自发气调贮藏,得出静态气调贮藏的保鲜效果明显优于自发气调贮藏,且O₂(5%)+CO₂(10%)的贮藏效果好于O₂(5%)+CO₂(5%)^[21]。杜小琴等^[22]用O₂(5%)+CO₂(5%),O₂(5%)+CO₂(8%),O₂(5%)+CO₂(10%)这3个气调条件贮藏甜樱桃,通过分析贮藏过程中呼吸强度、硬度、丙二醛含量等指标的变化情况来寻找最佳贮藏条件,发现O₂(5%)+CO₂(8%)

气调条件下甜樱桃的贮藏效果最好。

高浓度 CO_2 气调贮藏对龙眼的贮藏保鲜中也有所应用, Tian 等^[8]用 O_2 (4%) + CO_2 (5%), O_2 (4%) + CO_2 (15%) 和 O_2 (70%) + CO_2 (0%) 对龙眼果实进行贮藏, 发现 O_2 (4%) + CO_2 (15%) 最有利于龙眼品质的保持和货架期的延长。

用 O_2 (20%) + CO_2 (20%) 对番荔枝进行 3 d 前处理, 能够影响番荔枝酸性几丁质酶和 β -1, 3-葡聚糖酶的基因表达, 从而提高果实品质。同时, 高浓度 CO_2 能够促进低温防护蛋白的合成, 降低果实冷害的发生, 有效地延长果实的贮藏期^[23]。

此外, 高浓度 CO_2 处理果实的保鲜效果与果实成熟度有很大关系, 对不同成熟度的桃子 (果肉硬度分别为 60 和 45 N) 用体积分数小于 1% 的 O_2 和体积分数为 30% 的 CO_2 分别进行 24 或 48 h 短时冲击前处理, 后于 20 °C 贮藏 8 d, 发现低浓度 O_2 和高浓度 CO_2 冲击处理均能延缓桃子的硬度下降, 且抑制成熟度低的样品乙烯的生物合成及成熟度高样品 β -1, 4-葡聚糖内切酶活性。贮藏过程中对照组乙醛含量逐渐积累, 乙醇含量变化较小, 乙醇脱氢酶在后熟阶段才有明显增加。低浓度 O_2 和高浓度 CO_2 短时冲击前处理可诱导乙醛、乙醇大量积累, 但冲击结束后成熟度高的桃子其乙醛含量明显降低, 2 种成熟度的桃子其乙醇含量均迅速下降。24 h 低浓度 O_2 和高浓度 CO_2 冲击前处理中成熟度低的桃子乙醇脱氢酶活性较高, 而其他组乙醇脱氢酶的变化相似。可见, 高浓度 CO_2 刺激乙醇脱氢酶的基因表达^[24]。

2 高浓度 CO_2 气调贮藏处理对浆果生理生化变化的影响

高浓度 CO_2 通过抑制果蔬中乙烯合成和呼吸作用, 推迟呼吸跃变, 改变相关代谢酶活性 (糖酵解、呼吸代谢、三羧酸循环和苹果酸代谢等)^[25], 引起氨基丁酸的积累, 细胞质 pH 值下降, 杀死或抑制果蔬表面致病微生物, 从而起到延缓衰老和延长贮藏期的作用^[26-27]。

2.1 超微结构

随着电镜技术的发展, 人们开始通过电镜观察果实成熟衰老过程中其组织结构变化。由于浆果质地较软, 超微结构切片较为困难, 因此对浆果超微结构的研究较少^[28]。

与其他浆果相比, 草莓的结构相对致密, 采后贮藏期细胞超微结构变化较为明显, 草莓在衰老过程中细胞按照一定的顺序发生解体, 首先是细胞壁和叶绿体, 其次是高尔基体、内质网液泡和囊泡, 最后是原生质膜和线粒体^[29]。体积分数为 20% 和 40% 的 CO_2

均能有效减缓草莓果实失水和组织降解, 这种变化是由果实软化期间细胞壁酶活性迅速升高所致^[29-30]。Harker 等^[31]的研究则表明, 尽管体积分数为 20% 的 CO_2 气调贮藏能使草莓的果实硬度和拉伸力显著增加, 但由于超微结构研究过程中要经历切割等, 导致电镜结果看不出高浓度 CO_2 气调贮藏的果实与对照组间的差异。猕猴桃果实衰老过程中细胞器的变化与草莓相似, 其叶绿体也由椭圆向圆形转变, 内部类囊体分解, 叶绿体被膜断裂, 嗜银颗粒数量增加, 体积变大, 最终叶绿体逐渐解体^[32]。Blanch 等^[29]在葡萄贮藏 (0 °C) 过程中, 用体积分数为 20% 的 CO_2 对其进行 3 d 短时冲击处理, 贮藏 22 d 后对其超微结构进行观察发现, 对照组结合水含量下降, 细胞组织散乱, 完整性较差, 而在 CO_2 体积分数为 20% 的条件下, 果实结合水含量高, 细胞组织完整性好。通过对采后草莓、猕猴桃和葡萄超微结构进行研究发现, 浆果超微结构变化比较类似, 均从质壁分离开始到最后原生质层和线粒体裂解^[31-33]。整个过程通过控制酶的作用可以达到更好的保鲜效果, 高浓度 CO_2 可通过抑制或降低果胶酶和纤维素酶等酶活性, 避免果实细胞壁和细胞器过早降解, 延长浆果的贮藏寿命^[34]。

有些浆果类果实表面的角质层便是天然的“单果包装材料”, 可在果实表面和内部形成高浓度 CO_2 和低浓度 O_2 的微气调环境。蓝莓角质层是肉眼可见的, 其他浆果如蔓越橘, 尽管有薄的表皮蜡质存在, 但肉眼不可见^[35], 而浆果类果实中产量最大的草莓未见有表皮角质层的研究报道。具有浆果类果实特性的核果类果实甜樱桃, 也有肉眼不可见的角质层存在, 在对不同品种甜樱桃进行耐贮藏性实验中, 姜爱丽等^[36]发现不同品种甜樱桃的耐贮藏性与其表层细胞壁及蜡质结构密切相关, 耐藏性强的品种表皮细胞壁和外层蜡脂均较厚, 而不耐藏的品种表皮细胞壁均很薄, 较厚的蜡质层也会阻止微生物的侵染。对于每个蓝莓果实而言, 较厚的角质层相当于在果实表面有效地附着上一层生物膜并形成微气调环境, 在蓝莓果实内外部气体交换中起到很好的选择性通透作用, 使得外部的高浓度 CO_2 气体只在表皮起到杀菌抑菌作用, 不会过多地进入果实内部引起伤害, 同时, 外部的氧气也不会充足地进入果实内部而催化氧化反应的发生。由此, 为了解蓝莓的果实特性和衰老机理, 研究蓝莓果实表面角质层的化学组成、超微结构及其针对 O_2 和 CO_2 气体的选择通透性具有重要的生物学意义。

2.2 生理代谢

呼吸是生命的基本特征, 呼吸作用在果蔬生长发育的过程中起着至关重要的作用, 不仅能够为果蔬生长发育提供能量, 同时也加速果蔬的成熟和改善果蔬外观, 通常采用呼吸速率来衡量果蔬的耐藏性^[37]。枸

杞是一种为数不多的药食同源浆果, Kafkaletou 等^[38]研究了枸杞鲜果在CO₂体积分数为10%、15%和20%条件下的呼吸代谢水平,发现与空气对照组相比,3种高浓度CO₂贮藏均可有效降低枸杞的呼吸速率,并可降低果肉pH值,从而有效地保持枸杞的感官品质和甜度。高浓度CO₂(20%)改变了番荔枝果实对低温的反应,诱导了抗冷蛋白如病程相关蛋白酶的合成,从而降低果实对冷害的敏感性,并可通过降低呼吸代谢速率提高果实的耐贮性^[23]。用体积分数为20%的CO₂对葡萄进行3d的预处理,可有效提高葡萄果实的萜合成酶基因表达量以及反式白藜芦醇的含量,并可有效提高果实的相对含水量和可滴定酸含量,抑制褐变、萎蔫、质量损失等现象的发生^[7]。可见,体积分数高达20%的CO₂对上述3种浆果均不会造成气体伤害。

贮藏前期高浓度CO₂短时动态气调贮藏作为一种高效、安全的贮藏方法,已在蓝莓^[6]、葡萄^[38-40]、草莓^[41]等浆果中得到广泛应用。Romero 等^[39]的研究认为,经体积分数为20%的CO₂动态气调条件贮藏3d能有效提高葡萄果实品质和抗氧化能力,并可控制腐烂的发生,这是因为高浓度CO₂处理能有效抑制活性氧的产生,但高浓度CO₂处理并不能提高苯丙氨酸解氨酶、查尔酮合成酶及抗坏血酸过氧化物酶等抗氧化相关酶活性及基因表达。动态气调贮藏的作用效果与作用时间的长短有关,6d的CO₂(20%)气调条件能使晚熟葡萄总酚含量、花色苷含量及抗坏血酸过氧化物酶mRNA显著增加,而3d的CO₂(20%)气调条件却没有带来类似的效果^[40]。草莓的研究中发现CO₂(20%)处理3d的草莓,其非原生质体中的H⁺和HCO₃⁻的含量均有所增加,可使可溶性果胶沉淀及细胞间粘接力增强,最终表现为果实硬度的增加和耐贮性的增加^[41]。综上,尽管浆果类果实对高浓度CO₂有较强的忍耐力,但这种忍耐也是有范围限制的^[6]。

2.3 表面致病致腐微生物

高浓度CO₂可抑制果蔬表面微生物的生长,降低果蔬采后病害发生率,延长果蔬的采后贮藏时间^[42-44]。研究结果显示,采用自发气调贮藏甜樱桃,贮藏时间超过30d以后,CO₂体积分数维持在11%~12%,此时气调贮藏甜樱桃病害发生率明显低于对照组,贮藏80d时,气调贮藏样品病害发生率仅为对照组的28.46%^[43-45]。

3 结语

气调贮藏作为一种行之有效的保鲜技术,有着诸多优势,如安全性高、环保、不产生任何污染等,加之浆果类果实对高浓度CO₂气调条件有较强的忍耐力,因此,高浓度CO₂气调贮藏已成为浆果类果实采

后品质精准控制的主要保鲜手段。随着气调贮藏技术的不断发展,涂膜、辐照、紫外杀菌等多项物理保鲜技术与高浓度CO₂气调贮藏及包装的综合运用和有机结合将成为未来发展的方向,这种复合型气调保鲜手段将为浆果贮运及其物流配送带来新的生机和希望。

参考文献:

- [1] BASU A, RHONE M, LYONS T J. Berries: Emerging Impact on Cardiovascular Health[J]. *Nutrition Reviews*, 2010, 68(3): 168—177.
- [2] 刘文旭, 黄午阳, 曾晓雄, 等. 草莓、黑莓、蓝莓中酚类物质及其抗氧化活性研究[J]. *食品科学*, 2011, 32(23): 130—133.
LIU Wen-xu, HUANG Wu-yang, ZENG Xiao-xiong, et al. Phenolic Content and Antioxidant Capacity of Strawberry, Blackberry and Blueberry[J]. *Food Science*, 2011, 32(23): 130—133.
- [3] RIZZINI F M, BONGHIC, TONUTTI P. Postharvest Water Loss Induces Marked Changes in Transcript Profiling in Skins of Wine Grape Berries[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2009, 52(3): 247—253.
- [4] 朱麟, 凌建刚, 康孟利, 等. 不同包装方式对兔眼蓝莓保鲜效果的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2012, 38(3): 190—193.
ZHU Lin, LING Jian-gang, KANG Meng-li, et al. Effect of Different Package Methods on Quality of Blueberries During Cold Storage[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2012, 38(3): 190—193.
- [5] 张平, 李志文, 王莉, 等. 短时高浓度二氧化碳处理对冰温贮藏期间葡萄果实软化生理的影响[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(4): 368—373.
ZHANG Ping, LI Zhi-wen, WANG Li, et al. Effect of Short-term High-CO₂ Treatments on Soften Physiology of Table Grape under Controlled Freezing Point Storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(4): 368—373.
- [6] 姜爱丽, 孟宪军, 胡文忠, 等. 高CO₂冲击处理对采后蓝莓生理代谢及品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 362—368.
JIANG Ai-li, MENG Xian-jun, HU Wen-zhong, et al. Effects of High CO₂ Shock Treatments on Physiological Metabolism and Quality of Postharvest Blueberry Fruits[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(3): 362—368.
- [7] SANCHEZ-BALLETS M A, JIMENEZ J B, ROMERO I, et al. Effect of High CO₂, Pretreatment on Quality, Fungal Decay and Molecular Regulation of Stilbene Phytoalexin Biosynthesis in Stored Table Grapes[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2006, 42(3): 209—216.
- [8] TIAN S P, XU Y, JIANG L, et al. Physiological and Quality Responses of Longan Fruit to High O₂ or High CO₂ Atmospheres in Storage[J]. *Postharvest Biology*

- and Technology, 2002, 24: 335—340.
- [9] BRAZELTOND, STRIK B C. Perspective on the U.S. and Global Blueberry Industry[J]. Journal-American Pomological Society, 2007, 61(3): 144—147.
- [10] 杨夫臣, 涂俊凡, 秦仲麒, 等. 湖北省蓝莓产业现状及发展趋势[J]. 亚热带植物科学, 2011, 40(1): 75—78.
YANG Fu-chen, TU Jun-fan, QIN Zhong-qi, et al. Industry Status and Development Trend of Blueberry in Hubei Province[J]. Subtropical Plant Science, 2011, 40(1): 75—78.
- [11] 孟宪军, 姜爱丽, 胡文忠, 等. 箱式气调贮藏对采后蓝莓生理生化变化的影响[J]. 食品工业科技, 2011, 32(9): 379—383.
MENG Xian-jun, JIANG Ai-li, HU Wen-zhong, et al. Effects of Plastic Box Modified Atmosphere Storage on the Physiological and Biochemical Changes of Postharvest Blueberry Fruits[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(9): 379—383.
- [12] 李志文, 张平, 王罡, 等. 冰温贮藏条件下短时高浓度 CO_2 处理对巨峰葡萄的保鲜效果[J]. 食品科技, 2011, 36(12): 20—26.
LI Zhi-wen, ZHANG Ping, WANG Gang, et al. Effect of Controlled Freezing-point Temperature Storage Combined with Exogenous CO_2 on Fresh-keeping of Kyoho Grape[J]. Food Science and Technology, 2011, 36(12): 20—26.
- [13] ROMERO I, SANCHEZ-BALLESTA M A, ESCRIBANO M I, et al. Individual Anthocyanins and Their Contribution to Total Antioxidant Capacity in Response to Low-temperature Storage and High CO_2 in Cardinal Table Grapes[J]. Postharvest Biology & Technology, 2008, 49(1): 1—9.
- [14] 顾采琴, 朱冬雪. 高 CO_2 对草莓果实采后生理变化的影响[J]. 西南农业学报, 2000(3): 73—76.
GU Cai-qin, ZHU Dong-xue. The Effect of High CO_2 Concentration on Postharvest Physiological Changes of Strawberry[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2000(3): 73—76.
- [15] 肖功年, 张懋, 彭建, 等. 气调包装(MAP)对草莓保鲜的影响[J]. 食品工业科技, 2003, 24(6): 68—71.
XIAO Gong-nian, ZHANG Min, PENG Jian, et al. Effects of Modified Atmosphere Packaging(MAP) on Preservation of Strawberries[J]. Science and Technology of Food Industry, 2003, 24(6): 68—71.
- [16] YONG S H, MIN J H, KIM D Y, et al. Potential Mechanisms Associated with Strawberry Fruit Firmness Increases Mediated by Elevated pCO_2 [J]. Horticulture Environment & Biotechnology, 2012, 53(1): 41—48.
- [17] 杨艳芬. 大樱桃采后生理与贮藏保鲜技术研究进展[J]. 北方园艺, 2009(11): 122—124.
YANG Yan-fen. Research Advances in Postharvest Physiology and Storage Technology of Cherry[J]. Northern Horticulture, 2009(11): 122—124.
- [18] 施俊凤, 薛梦林, 王春生, 等. 甜樱桃采后生理特性与保鲜技术的研究现状与进展[J]. 保鲜与加工, 2009(6): 7—10.
SHI Jun-feng, XUE Meng-lin, WANG Chun-sheng, et al. Research Status and Development of Post-harvest Physiology Characteristics and Storage Techniques of Sweet Cherry[J]. Storage and Process, 2009(6): 7—10.
- [19] 田世平. 冷藏条件下超低氧处理对樱桃果实中乙醇、乙醛和甲醇含量的影响[J]. 植物生理学通讯, 2000(3): 201—204.
TIAN Shi-ping. Effects of Ultra Low- O_2 Treatment on Ethanol, Acetaldehyde and Methanol Contents in Sweet Cherries in Low Temperature Storage[J]. Plant Physiology Communications, 2000(3): 201—204.
- [20] 王艳颖, 姜爱丽, 何煜波, 等. 高浓度 CO_2 处理对采后甜樱桃果实生理代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2011, 32(7): 368—370.
WANG Yan-ying, JIANG Ai-li, HE Yu-bo, et al. Effect of High Concentration CO_2 Treatment on Postharvest Physiology Metabolism of Sweet Cherry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(7): 368—370.
- [21] 姜爱丽, 田世平, 徐勇, 等. 不同气体成分对甜樱桃果实采后生理及品质的影响[J]. 中国农业科学, 2002(1): 79—84.
JIANG Ai-li, TIAN Shi-ping, XU Yong, et al. Effects of Different Atmospheres on Postharvest Physiology and Quality of Sweet Cherry[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002(1): 79—84.
- [22] 杜小琴, 李玉, 秦文, 等. 气调贮藏对甜樱桃果实采后生理生化变化的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(12): 314—318.
DU Xiao-qin, LI Yu, QIN Wen, et al. Effect of Controlled Atmosphere Storage on Postharvest Physiological and Biochemical Change of Sweet Cherry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(12): 314—318.
- [23] GONI O, SANCHEZBALLESTA M T, MERODIO C, et al. Regulation of Defense and Cryoprotective Proteins by High Levels of CO_2 in Annona Fruit Stored at Chilling Temperature[J]. Journal of Plant Physiology, 2009, 166(3): 246—258.
- [24] BONGHI C, RAMINA A, RUPERTI B, et al. Peach Fruit Ripening and Quality in Relation to Picking Time, and Hypoxic and High CO_2 , Short-term Postharvest Treatments[J]. Postharvest Biology & Technology, 1999, 16(3): 213—222.
- [25] GUNES G, WATKINS C B, HOTCHKISS J H. Physiological Responses of Fresh-cut Apple Slices under High CO_2 , and Low O_2 , Partial Pressures[J]. Postharvest Biology & Technology, 2001, 22(3): 197—204.
- [26] DONG Tian-tian, SHI Jing-ying, JIANG Cai-zhong, et al. A Short-term Carbon Dioxide Treatment Inhibits the Browning of Fresh-cut Burdock[J]. Postharvest Biology & Technology, 2015, 110: 96—102.
- [27] 钱敏, 白卫东, 于新, 等. CO_2 对果蔬采后生理的作

- 用[J]. 食品工业科技, 2009(10): 350—355.
- QIAN Min, BAI Wei-dong, YU Xin, et al. Effects of CO₂ on Post-harvest Physiology in Fruits and Vegetables[J]. Science and Technology of Food Industry, 2009(10): 350—355.
- [28] 张晋元, 张宏平, 吴国良, 等. 果树果实细胞超微结构研究进展[J]. 山西林业科技, 2009, 38(1): 31—34.
- ZHANG Jin-yuan, ZHANG Hong-ping, WU Guo-liang, et al. The Research Progress of Cell Ultrastructure of Fruits[J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2009, 38(1): 31—34.
- [29] BLANCH M, SANCHEZ-BALLESTA M T, ESCRIBANO M I, et al. Water Distribution and Ionic Balance in Response to High CO₂, Treatments in Strawberries (*Fragaria vesca*, L. cv. Mara de Bois)[J]. Postharvest Biology & Technology, 2012, 73(3): 63—71.
- [30] 张进献. 草莓果实软化过程中细胞壁酶、果胶及细胞超微结构变化规律研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2000.
- ZHANG Jin-xian. Changes in Cell Wall Hydrolytic Enzymes Activities, Pectin Contents and Cell Ultrastructure during Strawberry Fruit Softening[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei Province, 2000.
- [31] HARKER F R, ELGAR H J, WATKINS C B, et al. Physical and Mechanical Changes in Strawberry Fruit after High Carbon Dioxide Treatments[J]. Postharvest Biology & Technology, 2000, 19(2): 139—146.
- [32] 任亚梅, 刘兴华, 徐春雅, 等. 不同处理对猕猴桃采后生理和细胞超微结构的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 217—221.
- REN Ya-mei, LIU Xing-hua, XU Chun-ya, et al. Effects of Different Treatments on the Post-harvest Physiology and Cell Ultrastructure of Kiwifruit[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7): 217—221.
- [33] GONI O, FERNANDEZ-CABALLERO C, SANCHEZ-BALLESTA M T, et al. Water Status and Quality Improvement in High-CO₂ Treated Table Grapes[J]. Food Chemistry, 2011, 128(1): 34.
- [34] 张群, 周文化, 谭欢, 等. 葡萄果肉组织的能量水平和细胞壁代谢对其自溶软化的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(1): 264—272.
- ZHANG Qun, ZHOU Wen-hua, TAN Huan, et al. Effects of Energy Levels and Cell Wall Metabolism on Aril Breakdown in Grape Fruits[J]. Food Science, 2018, 39(1): 264—272.
- [35] OZGEN M, PALTA J P, SMITH J D. Ripeness Stage at Harvest Influences Postharvest Life of Cranberry Fruit: Physiological and Anatomical Explanations[J]. Postharvest Biology and Technology, 2002, 24: 291—299.
- [36] 姜爱丽. 甜樱桃果实采后生理、耐藏性及褐变机理的研究[D]. 北京: 中国科学院植物研究所, 2002.
- JIANG Ai-li. Studies on Postharvest Physiological Properties, Storability and Mechanism of Browning of Sweet Cherry Fruit[D]. Beijing: Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, 2002.
- [37] YANG Z F, CAOS F, SU X G, et al. Respiratory Activity and Mitochondrial Membrane Associated with Fruit Senescence in Postharvest Peaches in Response to UV-C Treatment[J]. Food Chemistry, 2014, 161: 16—21.
- [38] KAFKALETOU M, CHRISTOPOULOS M V, TSANTILI E. Short-term Treatments with High CO₂ and Low O₂ Concentrations on Quality of Fresh Goji Berries (*Lycium Barbarum* L.) during Cold Storage[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2017, 97(15): 55—58.
- [39] ROMERO I, SANCHEZ-BALLESTA M T, MALDONADO R, et al. Anthocyanin, Antioxidant Activity and Stress-induced Gene Expression in High CO₂-treated Table Grapes Stored at Low Temperature[J]. Journal of Plant Physiology, 2008, 165(5): 522—30.
- [40] ROMERO I, CABALLERO C F, SANCHEZ-BALLESTA M T, et al. Influence of the Stage of Ripeness on Phenolic Metabolism and Antioxidant Activity in Table Grapes Exposed to Different CO₂ Treatments[J]. Postharvest Biology & Technology, 2009, 54(2): 118—121.
- [41] BODELON O G, BLANCH M, SANCHEZ-BALLESTA M T, et al. The Effects of High CO₂ Levels on Anthocyanin Composition, Antioxidant Activity and Soluble Sugar Content of Strawberries Stored at Low Non-freezing Temperature[J]. Food Chemistry, 2010, 122(3): 673—678.
- [42] AMANATIDOU A, SMID E J, GORRIS L G. Effect of Elevated Oxygen and Carbon Dioxide on the Surface Growth of Vegetable-associated Micro-organisms[J]. Journal of Applied Microbiology, 1999, 86(3): 429—438.
- [43] 王宝刚, 李文生, 冯晓元, 等. 气调箱贮藏甜樱桃品质变化研究[J]. 中国农学通报, 2011(30): 253—257.
- WANG Bao-gang, LI Wen-sheng, FENG Xiao-yuan, et al. Changes of Qualities in Sweet Cherry Stored with CA Box[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011(30): 253—257.
- [44] 李春媛, 李志文, 朱志强, 等. 箱式气调保鲜技术在果蔬贮藏中的应用研究进展[J]. 天津农业科学, 2013, 19(9): 48—52.
- LI Chun-yuan, LI Zhi-wen, ZHU Zhi-qiang, et al. Application of Plastic Modified Atmosphere Box in the Storage of Fruits and Vegetables[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2013, 19(9): 48—52.
- [45] 王宝刚, 侯玉茹, 李文生, 等. 自动自发气调箱贮藏对甜樱桃品质及抗氧化酶的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 137—141.
- WANG Bao-gang, HOU Yu-ru, LI Wen-sheng, et al. Effects of Auto-MA Box on Qualities and Antioxidative Enzymes in Sweet Cherry Fruit during Storage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 137—141.