

1-甲基环丙烯和二氧化硫对气调包装杨梅成熟软化及抗氧化性能的影响

施小萌¹ 张静进¹ 林 奇¹ 张慧云² 包媛媛¹

(1. 云南农业大学食品科学技术学院, 云南 昆明 650201;

2. 云南省红河州石屏县坝心镇农业综合服务中心, 云南 红河 662202)

摘要:[目的]探究不同处理对东魁杨梅贮藏期间保鲜效果的影响。[方法]以云南省石屏县东魁杨梅为试验对象,采用不同自发气调保鲜袋贮藏杨梅,分析杨梅采后贮藏期间的成熟软化及抗氧化性能等指标。[结果]与对照组相比,4℃贮藏过程中,1-甲基环丙烯+二氧化硫+PBI物理活化保鲜袋的复合处理可有效维持杨梅果实品质,并维持较高的抗氧化性能。贮藏14 d后,1-MCP+二氧化硫+PBI气调袋复合处理的腐烂率上升幅度较小,抑制了呼吸作用,减少了质量、可溶性糖和可滴定酸损失,减缓了杨梅硬度的下降及相对电导率的上升,较好地保持了东魁杨梅品质;同时多聚半乳糖醛酸酶、纤维素酶和多酚氧化酶活性受到抑制,且杨梅果实的超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶、抗坏血酸过氧化物酶和苯丙氨酸解氨酶活性显著高于对照组($P<0.05$),降低了超氧阴离子的产生速率,更好地维持了杨梅活性氧代谢水平,使新鲜东魁杨梅的贮藏期延长至14 d。[结论]1-MCP+二氧化硫+PBI气调袋复合处理对杨梅的成熟软化和抗氧化性能贮藏效果最佳。

关键词:东魁杨梅;1-MCP;二氧化硫;PBI气调包装;抗氧化性能

Effects of 1-methylcyclopropene and sulfur dioxide on ripening, softening, and antioxidant properties of bayberry in modified atmosphere packaging

SHI Xiaomeng¹ ZHANG Jingjin¹ LIN Qi¹ ZHANG Huiyun² BAO Yuanyuan¹

(1. College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China;

2. Agricultural Comprehensive Service Center of Baxin Town, Shiping County, Honghe, Yunnan 662202, China)

Abstract: [Objective] To explore the effects of different modified atmosphere packaging (MAP) treatments on the preservation of Dongkui bayberry during storage. [Methods] Dongkui bayberry from Shiping County, Yunnan Province is taken as the test object and stored in different MAP bags to determine and analyze the ripening, softening, and antioxidant properties during postharvest storage. [Results] Compared with the control group, during storage at 4℃, the combined treatment of 1-methylcyclopropene (1-MCP) + sulfur dioxide + poly (butylene itaconate) (PBI) physically activated fresh-keeping bags can effectively maintain the quality and high antioxidant properties of bayberry. After 14 days of storage, this combined treatment slightly increases the decay rate, inhibits the respiration, reduces the loss of quality, soluble sugar, and titratable acid, slows down the hardness decrease, and increases the relative conductivity, maintaining the quality of bayberry to an ideal degree. Additionally, the activities of polygalacturonase (PG), cellulase (Cx), and polyphenol oxidase (PPO) are inhibited. In the meantime, the activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase (POD), ascorbate peroxidase (APX), and phenylalanine ammonia-lyase (PAL) in the fruits are significantly higher than those in the control group ($P<0.05$). Consequently, the

基金项目:云南省重点研发项目(编号:202405AF140060)

通信作者:包媛媛(1981—),女,云南农业大学讲师,博士。E-mail: 380984741@qq.com

张慧云(1967—),女,云南省红河州石屏县坝心镇农业综合服务中心高级农艺师,学士。E-mail: Zhanghuiyun1208@163.com

收稿日期:2025-04-02 改回日期:2025-08-22

引用格式:施小萌,张静进,林奇,等. 1-甲基环丙烯和二氧化硫对气调包装杨梅成熟软化及抗氧化性能的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(4): 145-155.

Citation: SHI Xiaomeng, ZHANG Jingjin, LIN Qi, et al. Effects of 1-methylcyclopropene and sulfur dioxide on ripening, softening, and antioxidant properties of bayberry in modified atmosphere packaging[J]. Food & Machinery, 2026, 42(4): 145-155.

production rate of superoxide anion is reduced, and the active oxygen metabolism level of bayberry is better maintained. Therefore, the storage period of fresh Dongkui bayberry is extended to 14 days. **[Conclusion]** The combined treatment of 1-MCP + sulfur dioxide + PBI MAP bag demonstrates the best storage effect on the ripening, softening, and antioxidant properties of bayberry.

Keywords: Dongkui bayberry; 1-methylcyclopropene (1-MCP); sulfur dioxide; poly (butylene itaconate) PBI modified atmosphere packaging; antioxidant property

杨梅(*Myrica rubra* Lour.)是杨梅科杨梅属常绿乔木,是中国特产水果之一,广泛分布于长江以南地区^[1]。新鲜的杨梅果实香气宜人,风味浓郁,富含多种氨基酸、维生素及营养成分,具有多种生物活性作用,对提高机体免疫力有显著效果^[2-4]。东魁杨梅是目前世界上果型最大的品种,可食率和含水量极高,且富含多种氨基酸、维生素及营养成分,具有较高的经济价值和营养价值^[5]。由于东魁杨梅具有很强的季节性、区域性和易变性等特点,在采摘和运输中易受机械损伤,导致东魁杨梅成熟软化及其活性氧代谢平衡被破坏,引起杨梅果实氧化损伤和组织衰老,贮藏期只能维持 1~2 d^[6-7]。

目前,常见的杨梅采收保鲜技术有低温保鲜、气调保鲜、辐射保鲜、药剂保鲜等^[8-14]。郑鹏蕊等^[15]研究发现,自发气调包装袋可以降低杨梅果实呼吸强度,保留维生素 C 和可溶性固形物含量,维持较好的品质。黄天姿等^[16]发现,适宜剂量电子束辐照能抑制猕猴桃的质量损失,延缓可滴定酸质量分数的下降,提高类黄酮含量。微孔膜包装可通过微孔改善传统包装膜的渗透性,有效调节包装中 O₂ 和 CO₂ 的体积比及相对湿度^[17]。蒋璇靛等^[18]研究发现,激光微孔保鲜袋包装能延缓荔枝果皮褐变指数和果实感病指数的上升,保持较高的商品率,维持荔枝果实良好的品质。张皓波等^[19]发现,褪黑素结合 PBI 包装处理可使黄牛肝菌的贮藏时间由 5 d 延长到 20 d。PBI 保鲜袋专一性强,安全性高,可以维持袋内 CO₂ 浓度,抑制果蔬的呼吸作用和乙烯合成,降低果蔬生理病害的发生和营养成分的消耗,从而达到保鲜的目的^[20]。李艳娇等^[21]发现,1-MCP+PBI 气调保鲜袋可延缓可溶性固形物含量、病情指数、转黄指数、POD 酶活性,延缓果实硬度下降,抑制可滴定酸含量上升。目前,有关采用微孔膜和 PBI 气调膜包装材料应用于杨梅保鲜中的研究较少。

1-甲基环丙烯(1-MCP)是一种乙烯受体抑制剂,具有无毒、稳定性好、易于合成、使用浓度低等优点^[22],可有效抑制果实的呼吸和乙烯释放,从而延缓果实的软化,保持果实品质^[23]。吉宁等^[24]发现,PE30 袋结合 1-MCP 处理能抑制采收后百香果果实贮藏期间的呼吸高峰,并保持果实的原有风味。郭智鑫等^[25]发现,1-MCP+乙烯吸附剂对黄桃采收后保鲜效果最好,能够更好地保持黄桃货架期品质。二氧化硫作为一种还原剂,具有保质、护色、延缓果蔬衰老的作用,通常用作一种有效的果蔬杀菌剂。目前,二氧化硫主要以熏蒸、缓释等方式应用于水果保鲜^[26]。

宁密密等^[27]发现,阳光玫瑰葡萄采收后使用 SO₂ 胶囊贴片处理可更好地保持其细胞壁结构的完整性,延缓果实硬度的下降,提高其耐贮性。集贤等^[28]发现,采用 SO₂ 与 ClO₂ 组合处理对贮藏期间阳光玫瑰葡萄质构参数的劣变具有较好的减缓作用。因此,1-甲基环丙烷和二氧化硫保鲜剂可作为水果果实贮藏保鲜的潜在物质,且结合气调包装能够维持果实的特有品质。

目前,采用不同包装保鲜材料在东魁杨梅果实保鲜中的研究尚未见报道。试验拟以云南省石屏县东魁杨梅为试验对象,分别采用不同自发气调袋贮藏东魁杨梅,探究其对杨梅成熟软化以及抗氧化性能的影响,以期延长东魁杨梅保鲜货架期,为气调复合保鲜技术在东魁杨梅贮藏中的应用提供依据。

1 材料和方法

1.1 材料与设备

1.1.1 材料与试剂

东魁杨梅:采自云南省红河州石屏县,挑选大小均匀、无病虫害和机械伤果实,当天运送至实验室,经预冷后进行各种处理;

微孔膜气调袋:85 cm×70 cm,厚度 0.05~0.06 mm,孔径 15~20 μm,国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津);

PBI 气调袋:35 cm×24 cm,厚度 0.15 mm,以色列 PBI 公司;

二氧化硫保鲜剂:分析纯,天津禄盛保鲜科技有限公司;

1-MCP:分析纯,咸阳西秦生物科技有限公司;

乙醇、氯化钡:分析纯,天津市福晨化学试剂厂;

冰醋酸、氢氧化钠、酚酞、L-苯丙氨酸、二硫苏糖醇、氢氧化钠:分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司;

草酸、EDTA、聚乙烯吡咯烷酮:分析纯,天津市大茂化学试剂厂;

愈创木酚、三氯乙酸、α-萘胺、硫代巴比妥酸、无水醋酸钠:分析纯,天津市光复发展有限公司。

1.1.2 仪器与设备

手持折射仪:PLA-1 型,日本 ATAGO 公司;

指针式水果硬度计:GY-3 型,衢州艾普计量仪器有限公司;

数显恒温水浴锅:HH-8 型,常州国华电器有限公司;

紫外分光光度计:UV-1800 型,日本岛津公司;

分析天平:AR224CN型,奥豪斯仪器(上海)有限公司;

pH计:8685A型,衡欣科技股份有限公司;

冷冻离心机:H1850-R型,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;

酶标仪:1510型,赛默飞世尔科技(中国)有限公司。

1.2 方法

1.2.1 处理方法 通过预试验确定 3.0 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 处理、二氧化硫粉剂的效果最佳,将挑选好的新鲜杨梅随机分成5组,每个处理组分为10袋,每袋50颗杨梅。将杨梅样品用研磨器于液氮中研磨成粉末,并于 -80°C 超低温冰箱贮藏,进行生理生化指标测定,每个指标重复3次。

(1) Ta组:预冷后的杨梅经4 g 二氧化硫粉剂熏蒸0.5 h后,用浓度为3.0 $\mu\text{L/L}$ 的1-MCP熏蒸处理12 h,采用PBI气调袋包装后于 4°C 贮藏。

(2) Tb组:预冷后的杨梅经4 g 二氧化硫粉剂熏蒸0.5 h后,用浓度为3.0 $\mu\text{L/L}$ 的1-MCP熏蒸处理12 h,采用微孔膜气调袋包装后于 4°C 贮藏。

(3) Tc组:预冷后的杨梅经4 g 二氧化硫粉剂熏蒸0.5 h后,用浓度为3.0 $\mu\text{L/L}$ 的1-MCP熏蒸处理12 h,于 4°C 贮藏。

(4) Td组:预冷后的杨梅用PBI气调袋包装,于 4°C 贮藏。

(5) Te组:预冷后的杨梅用微孔膜气调袋包装后,于 4°C 贮藏。

1.2.2 呼吸强度测定 参照李自芹等^[29]的方法。

1.2.3 腐烂率测定 按式(1)计算腐烂率^[30]。

$$c = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

c ——腐烂率,%;

m_1 ——腐烂果实个数,个;

m_2 ——果实总数,个。

1.2.4 失重率测定 采用称量法^[31]。

1.2.5 可滴定酸含量测定 采用酸碱滴定法^[32]。

1.2.6 可溶性糖含量测定 采用蒽酮试剂法^[33]。

1.2.7 硬度测定 采用果实硬度计^[34]。

1.2.8 脯氨酸含量测定 参照文献[33]。根据显色液的吸光度值,计算果蔬组织样品中脯氨酸含量,以 $\mu\text{g/g}$ 表示。

1.2.9 相对电导率测定 采用电导率仪测定^[35]。

1.2.10 代谢相关酶活力测定 参照文献[33]。

(1) 苯丙氨酸解氨酶(PAL):根据反应液的吸光度值的差值,计算苯丙氨酸解氨酶活性,以U表示。

(2) 多聚半乳糖醛酸酶(PG):采用比色法测定果蔬组织中PG活性,以 $\mu\text{g}/(\text{h}\cdot\text{g})$ 表示。

(3) 纤维素酶(Cx):根据样品反应管和对照管溶液

吸光度值的差值,计算果蔬组织样品中Cx活性,以 $\mu\text{g}/(\text{h}\cdot\text{g})$ 表示。

(4) 超氧化物歧化酶(SOD):根据显色液的吸光度值,计算果蔬组织样品中SOD活性,以U/g表示。

(5) 过氧化氢酶(CAT):根据溶液吸光度值,计算每克果蔬组织中CAT活性,以U/g表示。

(6) 过氧化物酶(POD):采用愈创木酚法测定果蔬中POD活性,以U/g表示。

(7) 抗坏血酸过氧化物酶(APX):根据溶液吸光度值,计算每克果蔬组织中过APX活性,以U/g表示。

(8) 多酚氧化酶(PPO):根据显色液的吸光度值,计算果蔬组织样品中PPO活性,以U/g表示。

1.2.11 超氧阴离子(O_2^-)自由基产生速率测定 参照曹建康等^[33]的方法。

1.2.12 二氧化硫残留量测定 参照GB 5009.34—2022。

1.2.13 数据处理 采用Excel 2016进行数据整理,结果以平均值 $\pm$ 标准差表示;用SPSS19.0软件的Duncan法对各项指标组内组间进行显著性分析,小写字母不同表示差异显著($P<0.05$);用Origin 2021软件作图。

2 结果与分析

2.1 对气调包装杨梅呼吸强度、腐烂率和失重率的影响

由图1可知,随着贮藏时间的延长,东魁杨梅呼吸强度呈上升趋势,表明东魁杨梅属于呼吸跃变型果实,Ta组果实呼吸高峰显著低于其他4个处理组,呼吸强度总体处于较低水平,抑制了东魁杨梅的呼吸作用($P<0.05$)。贮藏第14天,Ta组的果实呼吸强度分别比Tb组、Tc组、Td组和Te组低6.56%,11.26%,5.34%,9.31%,表明Ta组能够降低果实在贮藏过程中的呼吸强度,延缓果实的后熟和衰老过程,这可能是贮藏环境中二氧化碳浓度的增加,抑制了东魁杨梅的呼吸作用。综上,Ta组可以有效抑制东

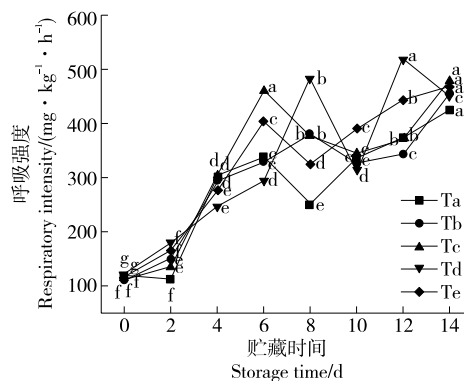


图1 1-甲基环丙烯和二氧化硫处理对气调包装杨梅呼吸强度的影响

Figure 1 Effect of 1-MCP and sulfur dioxide treatment on the respiration intensity of bayberry in MAP

魁杨梅果实的呼吸强度,减缓衰老进程,与张鹏等^[36]的研究结果相似。

由图 2 可知,随着贮藏时间的延长,东魁杨梅腐烂率逐渐增加,贮藏 0~2 d,各组果实腐烂速度相对缓慢,贮藏第 4~12 天,Ta 组与其他处理组的腐烂率显著增加。贮藏第 14 天,腐烂率从高到低分别为 Tc 组=Te 组>Tb 组>Td 组>Ta 组。Tc 组、Td 组、Te 组的腐烂率高于 Ta 组,是因为普通包装和微孔膜包装的透气性能较差,导致 O₂ 迅速流失,从而使杨梅的呼吸由有氧呼吸转变为厌氧呼吸,引起微生物感染,表明 Ta 组可以抑制杨梅的腐烂变质,并将 4℃ 下东魁杨梅的贮藏期延长至 14 d,这与刘佰霖等^[37]的研究结果相似。

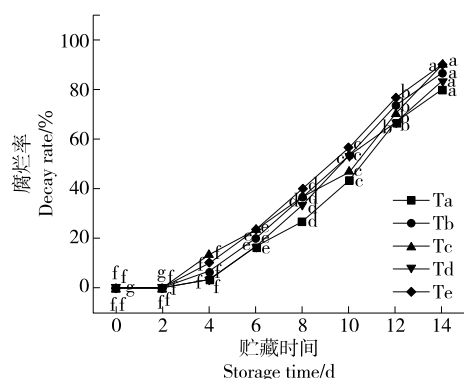


图 2 1-甲基环丙烯和二氧化硫处理对气调包装杨梅腐烂率的影响

Figure 2 Effect of 1-MCP and sulfur dioxide treatment on the decay rate of bayberry in MAP

由图 3 可知,随着贮藏时间的延长,东魁杨梅失重率呈上升趋势。贮藏第 6 天,Ta 组、Tb 组的杨梅果实失重率与 Tc 组、Td 组、Te 组之间存在显著差异 ($P < 0.05$),Ta 组的果实失重率最少,当贮藏时间 > 10 d 时,5 个处理组的

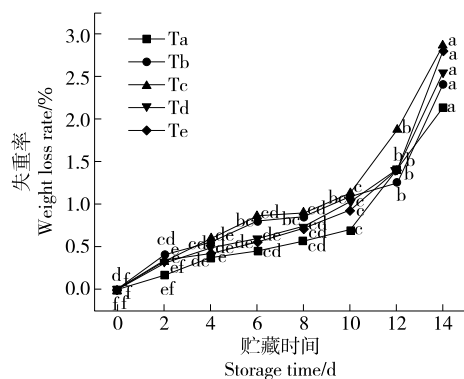


图 3 1-甲基环丙烯和二氧化硫处理对气调包装杨梅失重率的影响

Figure 3 Effect of 1-MCP and sulfur dioxide treatment on the weight loss rate of bayberry in MAP

失重率迅速上升,其中 Tc 组果实失水较为严重。贮藏结束时,Tc 组、Td 组和 Te 组的失重率分别为 2.86%, 2.55%, 2.81%,而 Ta 组、Tb 组的仅为 2.14%, 2.41%,且 Ta 组失重率最低,在贮藏期间未出现严重的软化现象,表明 Ta 组能够延缓杨梅呼吸强度,减少组织内部水分蒸腾,延长其正常的生理活动,降低其失重率,与蒋方国等^[38]的研究结果相似。

2.2 对气调包装杨梅可溶性糖和可滴定酸含量的影响

由图 4~图 5 可知,随着贮藏时间的延长,可溶性糖和可滴定酸含量均呈下降趋势,这是因为贮藏过程中糖和有机酸作为呼吸底物被不断消耗,以维持衰老过程中的正常呼吸^[30]。Ta 组在贮藏 0~4 d 的可溶性糖和可滴定酸含量变化较小,贮藏结束时,Ta 组的可溶性糖含量分别为 Tb 组、Tc 组、Td 组、Te 组的 1.34, 1.21, 1.53, 1.34 倍,可滴定酸含量分别为 Tb 组、Tc 组、Td 组、Te 组的 1.04, 1.11, 1.05, 1.09 倍,且 Ta 组显著高于 Tc 组、Td 组和 Te 组 ($P <$

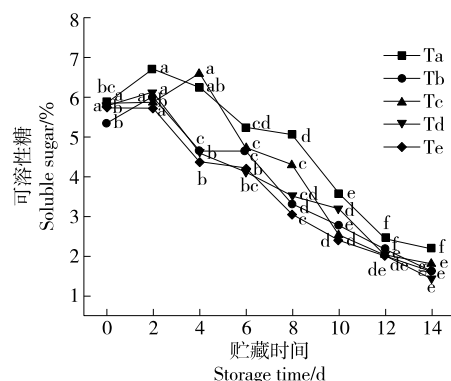


图 4 1-甲基环丙烯和二氧化硫处理对气调包装杨梅可溶性糖的影响

Figure 4 Effect of 1-MCP and sulfur dioxide treatment on the soluble sugar of bayberry in MAP

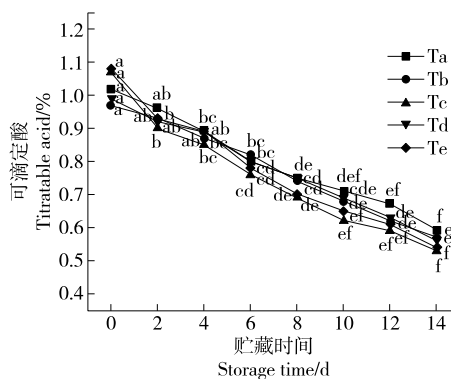


图 5 1-甲基环丙烯和二氧化硫处理对气调包装杨梅可滴定酸的影响

Figure 5 Effect of 1-MCP and sulfur dioxide treatment on the titratable acid of bayberry in MAP

0.05),说明1-MCP和二氧化硫结合微孔膜处理可抑制杨梅的呼吸,这可能是因为果实的呼吸作用降低了可溶性糖和可滴定酸的消耗。综上,Ta组可延缓杨梅中可溶性糖和可滴定酸含量的下降,延缓杨梅的风味变化,与黄帅等^[39]的研究结果一致。

2.3 对气调包装杨梅硬度和脯氨酸含量的影响

由图6可知,贮藏期间,东魁杨梅的硬度不断下降,Ta组、Tb组均能延缓杨梅硬度的下降,Ta组在整个贮藏期的硬度均高于其他处理组,表明Ta组能更好地延缓采后东魁杨梅硬度的下降,延缓果实衰老,与洪凯等^[40]的研究结果相似。

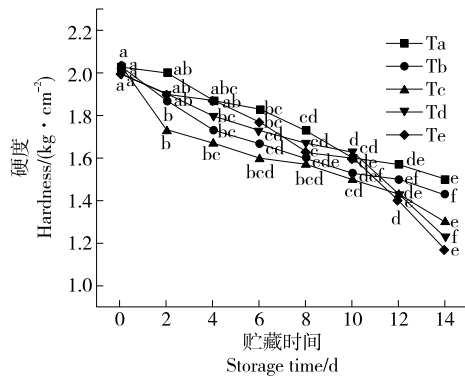


图6 1-甲基环丙烯和二氧化硫处理对气调包装杨梅硬度的影响

Figure 6 Effect of 1-MCP and sulfur dioxide treatment on the hardness of bayberry in MAP

脯氨酸作为渗透调节物质可保持细胞的渗透性平衡,降低逆境对植物造成的伤害,在受到外界不利条件的影响下,常常有大量脯氨酸积累,可提高植物的抗逆性^[41]。由图7可知,贮藏期间,脯氨酸含量整体呈先上升后下降趋势,贮藏第4天,Ta组果实脯氨酸含量达到高峰,在贮藏末期仍最高。贮藏第14天,5个处理组之间差异显著($P<0.05$),其中Ta组脯氨酸含量高达404.07 $\mu\text{g/g}$,分别为Tb组、Tc组、Td组、Te组的1.36,1.52,1.21,1.32倍,表明Ta组可以延缓杨梅脯氨酸含量的下降,甚至促进杨梅脯氨酸的积累,提高抗逆性,这与吕小华等^[42]的研究结果一致。

2.4 对气调包装杨梅PG和Cx活性的影响

由图8可知,各处理组杨梅果实的PG活性呈先上升后下降趋势,在贮藏第6天达到峰值。整个贮藏期间,Ta组的PG活性总体上表现最低,贮藏第14天的活性较其他处理组分别低180.40,150.15,50.37,219.05 $\mu\text{g}/(\text{h} \cdot \text{g})$,说明Ta组的PG活性受到抑制,这可能是复合处理结合PBI袋包装能够维持袋内良好的气体环境,有利于果实细胞保持完整性,表明Ta组对杨梅细胞壁的保护更强,能保持

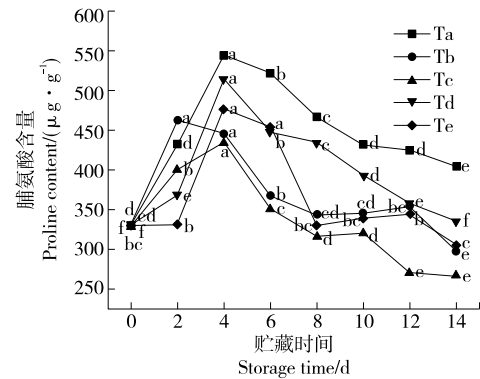


图7 1-甲基环丙烯和二氧化硫处理对气调包装杨梅脯氨酸的影响

Figure 7 Effect of 1-MCP and sulfur dioxide treatment on the proline of bayberry in MAP

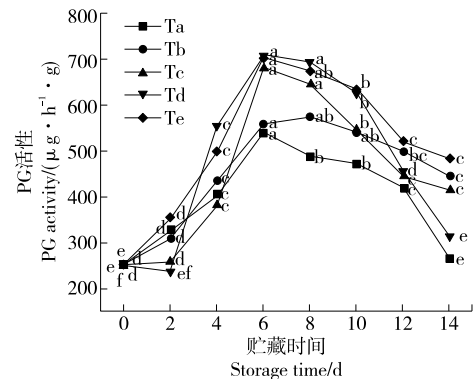


图8 1-甲基环丙烯和二氧化硫处理对气调杨梅PG活性的影响

Figure 8 Effect of 1-MCP and sulfur dioxide treatment on the PG activity of bayberry in MAP

较低的PG活性,这与1-MCP复合处理可有效抑制贮藏期间小白杏PG的趋势一致^[43]。

由图9可知,各处理组Cx活性随着贮藏时间的延长呈先上升后下降趋势,在贮藏第6天出现峰值后下降。对照组的Cx活性变化趋势较为显著,表明其细胞壁受损速率较快。Ta组的Cx活性变化趋势相对平缓,贮藏结束时,其Cx活性仍处于较低水平($P<0.05$),这归因于包装内低氧的环境减缓了杨梅中原果胶分解速度,说明Ta组可以维持杨梅的抗逆性能力,延缓果实细胞衰老,与张鹏等^[44]的研究结果类似。

2.5 对气调包装杨梅相对电导率和 O_2^- 自由基产生速率的影响

由图10可知,整个贮藏期间,杨梅果实的相对电导率呈上升趋势,这是由于果实内部的细胞膜失去完整性,导致水分流失和细胞间隙增大所致。贮藏中期,Ta组、Tb组的相对电导率上升相对缓慢,表明复合处理可以较好地

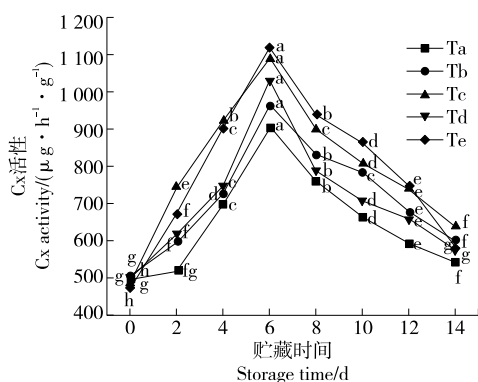


图9 1-甲基环丙烯和二氧化硫处理对气调包装杨梅 Cx 活性的影响

Figure 9 Effect of 1-MCP and sulfur dioxide treatment on the Cx activity of bayberry in MAP

保持细胞完整性,减少细胞溶解,其中 Ta 组的相对电导率处于较低水平 ($P < 0.05$),且贮藏第 14 天较其他组分别降低了 5.47%, 18.83%, 14.13%, 8.62%。Ta 组可维持最低的相对电导率,表明 Ta 组对于维持细胞膜完整性具有积极作用,能更好地抑制杨梅相对电导率的上升,与林旭东等^[45]的变化趋势类似。

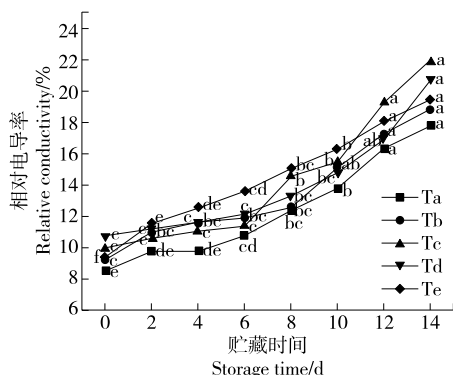


图10 1-甲基环丙烯和二氧化硫处理对气调包装杨梅相对电导率的影响

Figure 10 Effect of 1-MCP and sulfur dioxide treatment on the relative conductivity of bayberry in MAP

O_2^- 是果蔬组织 ROS 代谢失调的主要产物,其积累会导致细胞的衰老和解体。由图 11 可知,随着贮藏时间的延长,杨梅果实的 O_2^- 自由基含量整体呈上升趋势,Ta 组、Tb 组的 O_2^- 自由基含量整体上处于较低水平 ($P < 0.05$),这可能与复合处理结合气调包装处理诱导 ROS 代谢相关酶活性的上升有关。Ta 组、Tb 组杨梅的 O_2^- 自由基产生速率均低于其他组,其中 Ta 组较好地抑制了 O_2^- 自由基产生速率,贮藏结束时,Ta 组分别比 Tb 组、Tc 组、Td 组、Te 组低 6.42%, 16.42%, 13.21%, 18.31%,表明 Ta 组减少了 O_2^-

自由基在果实体内的积累,减轻了 ROS 对果实的损伤。陆玉卓等^[46]研究发现,1-MCP+MAP 处理可以抑制 O_2^- 自由基生成速率的上升,延缓国色天香李的成熟和衰老进程。

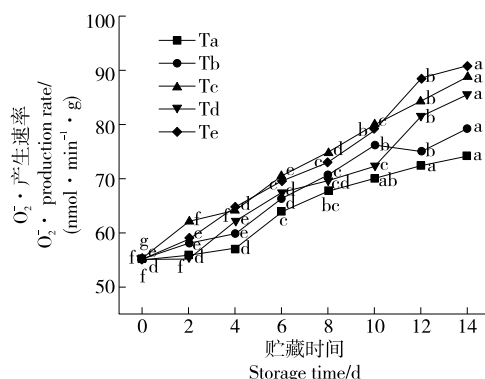


图11 1-甲基环丙烯和二氧化硫处理对气调包装杨梅 O_2^- 自由基产生速率的影响

Figure 11 Effect of 1-MCP and sulfur dioxide treatment on O_2^- free radical production rate of bayberry in MAP

2.6 对气调包装杨梅 SOD、CAT、POD、APX 活性的影响

由图 12 可知,SOD 活性在贮藏期间整体呈先上升后下降趋势,在贮藏第 6 天达到高峰。Ta 组、Tb 组杨梅的 SOD 活性均高于其他组,其中 Ta 组的 SOD 活性最高,提高了果实组织对 O_2^- 自由基的清除能力,贮藏结束时 Ta 组杨梅的 SOD 仍具有较高活性 ($P < 0.05$),分别为 Tb 组、Tc 组、Td 组、Te 组的 0.53, 3.22, 3.12, 3.39 倍,表明 Ta 组可以使杨梅保持较高的 SOD 活性,延缓果实成熟衰老进程。张琪等^[47]也发现,经 1-MCP 处理的库尔勒香梨 SOD 活力呈先上升后下降趋势。

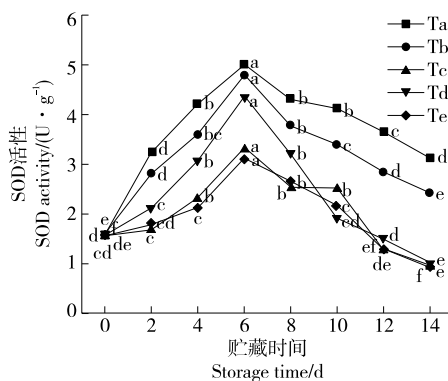


图12 1-甲基环丙烯和二氧化硫处理对气调包装杨梅 SOD 活性的影响

Figure 12 Effect of 1-MCP and sulfur dioxide treatment on the SOD activity of bayberry in MAP

由图 13 可知,东魁杨梅的 CAT 活性呈先上升后下降趋势,各处理组在贮藏第 6 天有最高峰,Ta 组杨梅的 CAT 活性均高于其他处理组,第 6 天时为最低峰组的 1.10 倍。贮藏结束时,Ta 组、Tb 组、Tc 组、Td 组、Te 组的 CAT 活性分别为 365.74,274.60,181.37,328.43,251.49 U/g,Ta 组果实 CAT 活性仍处于较高水平($P<0.05$),增强了对活性氧的清除能力,表明 Ta 组对东魁杨梅 CAT 活性有促进作用,与罗冬兰等^[48]的变化趋势类似。

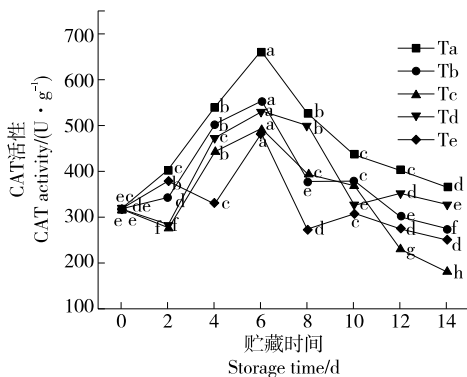


图 13 1-甲基环丙烯和二氧化硫处理对气调包装杨梅 CAT 活性的影响

Figure 13 Effect of 1-MCP and sulfur dioxide treatment on the CAT activity of bayberry in MAP

由图 14 可知,各处理组杨梅 POD 活性在贮藏期间呈先上升后下降趋势,贮藏第 4 天有最大值,且 Ta 组的 POD 活性高于其他处理组。贮藏第 14 天,Ta 组的 POD 活性较 Tb 组、Tc 组、Td 组、Te 组分别增加了 0.57, 0.79, 0.87, 0.98 U/g($P>0.5$),表明 Ta 组对果实 POD 活性的上升有较好的维持作用,能够增强果实自身对 H_2O_2 的清除能力,这与 1-MCP 处理可有效维持贮藏期间蓝莓 POD 活性^[49],从

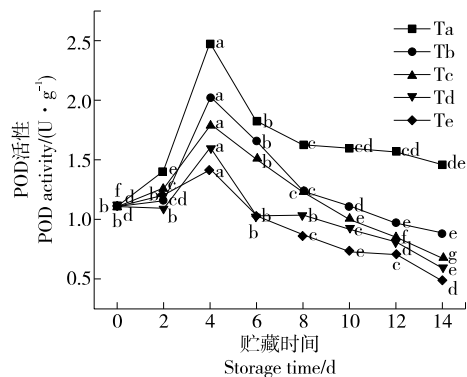


图 14 1-甲基环丙烯和二氧化硫处理对气调包装杨梅 POD 活性的影响

Figure 14 Effect of 1-MCP and sulfur dioxide treatment on the POD activity of bayberry in MAP

而延缓组织衰老的结果一致。

由图 15 可知,各处理组的 APX 活性均呈先升高后降低趋势,并在贮藏第 6 天达到峰值。贮藏第 14 天,Ta 组、Tb 组的 APX 活性显著高于其他处理组($P<0.05$),显著抑制了 APX 活性的下降,其中 Ta 组的活性为 Tb 组的 1.03 倍,表明 Ta 组能够诱导杨梅果实中 APX 的表达,增强其抗氧化能力,与侯杰等^[50]的研究结果一致。

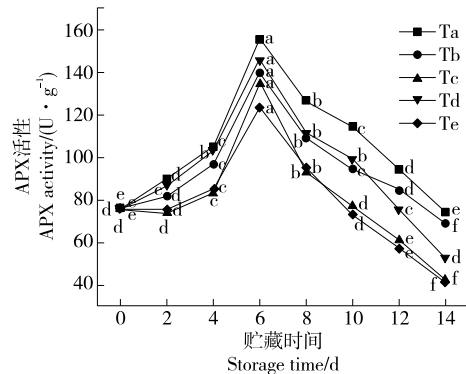


图 15 1-甲基环丙烯和二氧化硫处理对气调包装杨梅 APX 活性的影响

Figure 15 Effect of 1-MCP and sulfur dioxide treatment on the APX activity of bayberry in MAP

2.7 对气调包装杨梅 PAL 和 PPO 活性的影响

由图 16 可知,东魁杨梅 PAL 活性整体呈先上升后下降趋势,其中,Ta 组和 Tb 组的 PAL 活性分别在贮藏第 4, 8 天达到最大值。贮藏期间,Ta 组果实 PAL 活性均高于其他处理组,贮藏第 14 天,较 Tb 组、Tc 组、Td 组、Te 组分别提高了 25.35%, 28.78%, 9.16%, 7.05%,表明 Ta 组对杨梅贮藏期间 PAL 活性有促进作用,可延缓果实的成熟衰老,与吴方智等^[51]的研究结果类似。

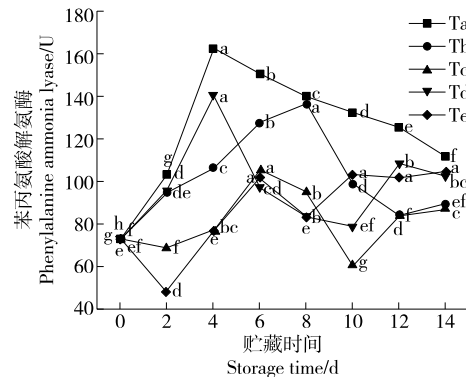


图 16 1-甲基环丙烯和二氧化硫处理对气调包装杨梅 PAL 活性的影响

Figure 16 Effect of 1-MCP and sulfur dioxide treatment on the PAL activity of bayberry in MAP

由图 17 可知,随着贮藏时间的延长,杨梅的 PPO 活性呈先上升后下降趋势,Tc 组、Td 组和 Te 组的 PPO 活性在贮藏第 4 天达到高峰,而 Ta 组、Tb 组处于较低水平,说明复合处理结合气调包装可以抑制酚类物质氧化,减少褐变的发生。贮藏结束时,Ta 组 PPO 活性分别比 Tb 组、Tc 组、Td 组、Te 组降低了 25.00%,55.00%,30.77%,47.06% ($P<0.05$),表明 Ta 组对东魁杨梅 PPO 活性有抑制作用,有效延缓了杨梅果实的褐变反应,延长了贮藏期。马胜男等^[52]也发现 OG+MAP 处理可以保持较低的 PPO 活性,延长红丰梨的贮藏期限。

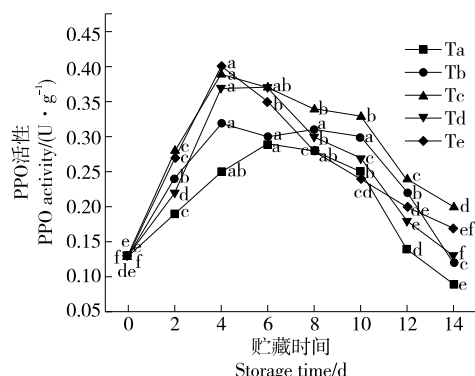


图 17 1-甲基环丙烯和二氧化硫处理对气调包装杨梅 PPO 的影响

Figure 17 Effect of 1-MCP and sulfur dioxide treatment on the PPO of bayberry in MAP

2.8 贮藏后二氧化硫残留量

GB 2760—2024 规定,二氧化硫在新鲜水果中的残留量应低于 50 mg/kg。由图 18 可知,随着贮藏时间的延长,二氧化硫残留量呈下降趋势,Ta 组、Tb 组、Tc 组的二氧化硫残留量均未达到限量标准,属于安全食品。

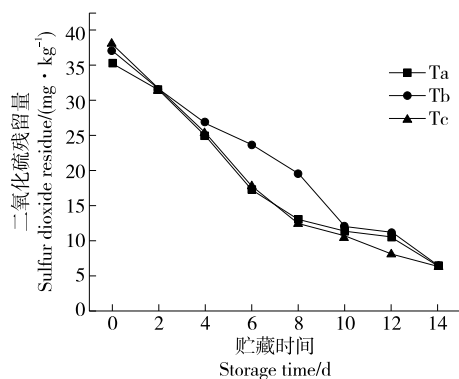


图 18 1-甲基环丙烯和二氧化硫处理杨梅的二氧化硫残留量

Figure 18 Sulfur dioxide residues in the bayberry treated with 1-MCP and sulfur dioxide

3 结论

探讨了 1-甲基环丙烯与二氧化硫结合气调包装对东魁杨梅贮藏品质的影响。结果表明,对比单一气调袋处理,复合处理较好地维持了杨梅的品质,且 1-甲基环丙烯与二氧化硫结合气调包装可有效维持果实品质和较高的抗氧化性能,有效延缓呼吸高峰,减少可溶性糖和可滴定酸损失,维持较高的丙氨酸解氨酶活性,抑制果实聚半乳糖醛酸酶和纤维素酶活性,提高果实抗逆性,延缓腐烂变质;还能增强超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶和抗坏血酸过氧化物酶活性,降低超氧阴离子自由基产生速率,抑制多酚氧化酶活性,减少酶促褐变,使贮藏期延长至 14 d,且其二氧化硫残留量低于国家标准。综上,1-甲基环丙烯+二氧化硫+PBI 气调袋处理对东魁杨梅保鲜效果最佳。

参考文献

- [1] 黄小榕, 薛蕾, 张泽煌, 等. *PDC* 和 *ADH* 基因家族成员在杨梅果实成熟和包装处理期间的表达及其与乙醛和乙醇积累的关系[J]. 果树学报, 2022, 39(10): 1 784-1 797.
- [2] HUANG X R, XUE L, ZHANG Z H, et al. Expression analysis of *PDC* and *ADH* gene family members and their relationship with the accumulation of acetaldehyde and ethanol during fruit ripening and packaging treatments of Chinese bayberry[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(10): 1 784-1 797.
- [3] HE K, LI X G, XIAO Y B, et al. Hypolipidemic effects of *Myrica rubra* extracts and main compounds in C57BL/6j mice [J]. Food & Function, 2016, 7(8): 3 505-3 515.
- [4] REN H Y, HE Y H, QI X J, et al. The bayberry database: a multiomic database for *Myrica rubra*, an important fruit tree with medicinal value[J]. BMC Plant Biology, 2021, 21(1): 452.
- [5] 黄国中, 王琴, 马路凯, 等. 超声—微波辅助解冻对杨梅保鲜品质的影响[J]. 现代食品科技, 2023, 39(3): 186-193.
- [6] HUANG G Z, WANG Q, MA L K, et al. Effect of ultrasonic-microwave assisted thawing on the fresh-keeping quality of red bayberry[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39 (3): 186-193.
- [7] 黄桂丽, 李江阔, 全鑫瑶, 等. 低压静电场对杨梅采后贮藏期间感官和营养品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(11): 22-30.
- [8] HUANG G L, LI J K, QUAN X Y, et al. Effect of low voltage electrostatic field on sensory and nutritional quality of bayberry during postharvest storage[J]. Storage and Process, 2024, 24 (11): 22-30.
- [9] LI J, CHENG H, LIAO X Y, et al. Inactivation of *Bacillus subtilis* and quality assurance in Chinese bayberry (*Myrica rubra*) juice with ultrasound and mild heat[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 108: 113-119.
- [10] SHI L Y, CAO S F, SHAO J R, et al. Chinese bayberry fruit

- treated with blue light after harvest exhibit enhanced sugar production and expression of cryptochrome genes[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 111: 197-204.
- [8] 张禾, 陈烨芝, 孙翠, 等. 低温等离子体对杨梅采后致病菌—桔青霉的抑制作用[J]. 中国食品学报, 2022, 22(7): 183-192.
- ZHANG H, CHEN Y Z, SUN C, et al. Inhibitory effect of cold plasma on the postharvest pathogen *Penicillium citrinum* of Chinese bayberry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(7): 183-192.
- [9] 李海波, 谢超, 梁瑞萍, 等. 基于低压静电场技术(LVEF)协同低温对舟山杨梅保鲜过程中品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(7): 265-270.
- LI H B, XIE C, LIANG R P, et al. Effect of low voltage electrostatic field combined with low temperature on quality of Zhoushan bayberry during fresh-keeping[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(7): 265-270.
- [10] 王威, 严丽, 谢倩, 等. 预冷前后1-MCP处理对杨梅采后贮藏品质的影响[J]. 热带作物学报, 2019, 40(7): 1 406-1 412.
- WANG W, YAN L, XIE Q, et al. Effects of pre-cooling timing and 1-MCP treatment on postharvest quality of *Myrica rubra* [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(7): 1 406-1 412.
- [11] 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.
- 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]. Storage and Process, 2020, 20(4): 236-242.
- [12] 张志敏, 朱祥, 谢榕倩, 等. 采后UV-C处理对树莓贮藏保鲜效果的影响[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(1): 48-52.
- ZHANG Z M, ZHU X, XIE R Q, et al. Effect of postharvest UV-C treatment on storage and preservation of raspberry[J]. Storage and Process, 2020, 20(1): 48-52.
- [13] 张浩, 张润光, 付露莹, 等. 1-MCP与 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 复合保鲜剂对‘红提’葡萄采后生理及贮藏品质的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(7): 1 192-1 204.
- CHEN H, ZHANG R G, FU L Y, et al. Effects of 1-MCP and $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ composite preservative on postharvest physiology and storage quality of red globe grapes[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(7): 1 192-1 204.
- [14] 雷婷婷, 殷诚, 孙陟岩, 等. 气态臭氧结合微孔气调包装对杨梅品质和抗氧化性能的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 112-119.
- LEI T T, YIN C, SUN Z Y, et al. Effect of ozone gas combined with perforated modified atmosphere packaging on quality and antioxidant capacity of Chinese bayberry[J]. Food Science, 2023, 44(13): 112-119.
- [15] 郑鹏蕊, 李东立, 付亚波, 等. 一种自发气调包装袋对杨梅果实采后品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2022, 22(6): 28-34.
- ZHENG P R, LI D L, FU Y B, et al. Effects of a modified atmosphere packaging bag on postharvest qualities of bayberry (*Myrica rubra*) fruits[J]. Storage and Process, 2022, 22(6): 28-34.
- [16] 黄天姿, 李瑞娟, 杨淑霞, 等. 电子束辐照对不同品种猕猴桃品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(17): 297-305.
- HUANG T Z, LI R J, YANG S X, et al. Effects of electron beam irradiation on the quality of different varieties of kiwifruit[J]. Food Science, 2022, 43(17): 297-305.
- [17] 彭思佳, 虞任莹, 童秀子, 等. 1-MCP处理结合激光微孔膜包装对采后水蜜桃的保鲜效果[J]. 食品工业科技, 2022, 43(17): 363-370.
- PENG S J, YU R Y, TONG X Z, et al. Effect of 1-MCP treatment combined with laser microporous film packing on the preservation effect of honey peach fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(17): 363-370.
- [18] 蒋璇靓, 王南, 陈洪彬, 等. 激光微孔保鲜袋包装对采后荔枝果实的保鲜效应[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(24): 124-130.
- JIANG X L, WANG N, CHEN H B, et al. Effect of laser microporous film packaging on the postharvest preservation of litchi fruit[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(24): 124-130.
- [19] 张皓波, 吴喜庆, 杨蕊, 等. 褪黑素结合气调包装处理对黄牛肝菌保鲜效果影响[J]. 食用菌学报, 2023, 30(3): 68-80.
- ZHANG H B, WU X Q, YANG R, et al. Effects of melatonin combined with MAP treatment on preservation of boletus flavus[J]. Acta Edulis Fungi, 2023, 30(3): 68-80.
- [20] 邢江艳, 杜福娟, 李艳娇, 等. 1-MCP结合气调包装对塔西提柠檬采后保鲜的研究[J]. 保鲜与加工, 2022, 22(2): 24-30.
- XING J Y, DU F J, LI Y J, et al. Study on postharvest preservation of Tahiti lemons treated by 1-MCP combined with modified atmosphere packaging[J]. Storage and Process, 2022, 22(2): 24-30.
- [21] 李艳娇, 张月江, 邢江艳, 等. 1-甲基环丙烯结合膜气调处理对河口香蕉贮藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(1): 148-155.
- LI Y J, ZHANG Y J, XING J Y, et al. Effects of 1-MCP combined with membrane air conditioning treatments on the storage quality of estuarine bananas[J]. Food & Machinery, 2021, 37(1): 148-155.
- [22] 刘亚平, 林文艳, 狄建兵, 等. 1-甲基环丙烯对根用芥菜贮藏品质及抗氧化性的影响[J]. 核农学报, 2023, 37(10): 2 001-2 008.
- LIU Y P, LIN W Y, DI J B, et al. Effect of 1-methylcyclopropene on storage quality and antioxidant activity of root mustard[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2023, 37(10): 2 001-2 008.
- [23] 赵婧, 邵小达, 赵晟, 等. 1-甲基环丙烯结合苯丙氨酸处理对桃花色苷合成的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 131-138.
- ZHAO J, SHAO X D, ZHAO S, et al. Effect of combined treatment with phenylalanine and 1-methylcyclopropene on anthocyanin biosynthesis in peach peel[J]. Food Science, 2023,

- 44(13): 131-138.
- [24] 吉宁, 刘仁婵, 张妮, 等. 1-MCP 结合自发气调袋对百香果采后贮藏品质的影响[J]. 包装工程, 2023, 44(17): 18-24.
JI N, LIU R C, ZHANG N, et al. Effect of 1-MCP combined with spontaneous modified atmosphere bag on postharvest storage quality of passion fruit[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(17): 18-24.
- [25] 郭智鑫, 孙畅, 李高阳, 等. 1-MCP 结合乙烯吸附剂处理对黄桃货架期品质的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(9): 213-223.
GUO Z X, SUN CH, LI G Y, et al. Effect of 1-MCP combined with ethylene adsorbent on the shelf-life quality of yellow peach[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(9): 213-223.
- [26] 缪承杜, 宋玉清, 马悦, 等. 新型二氧化硫缓释保鲜垫的制备及在生鲜面保鲜中应用[J]. 现代食品科技, 2024, 40(10): 208-218.
MIAO C D, SONG Y Q, MA Y, et al. Development of a novel SO₂ sustained-release pad for food preservation and its application in preserving fresh noodles[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(10): 208-218.
- [27] 宁密密, 张群, 舒楠, 等. 不同形式 SO₂ 保鲜剂处理对‘阳光玫瑰’葡萄贮藏期间果实硬度和细胞壁代谢的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(19): 169-177.
NING M M, ZHANG Q, SHU N, et al. Effects of different forms of SO₂ preservative on fruit firmness and cell wall metabolism of 'Shine Muscat' grape during storage[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(19): 169-177.
- [28] 集贤, 朱志强, 商佳胤, 等. 二氧化硫和二氧化氯组合处理对采后阳光玫瑰葡萄质地的影响[J]. 包装工程, 2022, 43(9): 74-82.
JI X, ZHU Z Q, SHANG J Y, et al. Effect of combination preservation of sulfur dioxide and chlorine dioxide on postharvest texture of shine-Muscat grape[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(9): 74-82.
- [29] 李自芹, 陈雅, 李文绮, 等. 1-MCP 结合低温贮藏对阳光玫瑰葡萄贮藏品质及生理特性的影响[J]. 包装工程, 2024, 45(1): 148-155.
LI Z Q, CHEN Y, LI W Q, et al. Effects of 1-MCP combined with low temperature storage on storage quality of shine Muscat grapes[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(1): 148-155.
- [30] 赵薇, 薛敏, 张高鹏, 等. 1-MCP 熏蒸与高氧预处理对鲜枸杞贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(10): 62-69.
ZHAO W, XUE M, ZHANG G P, et al. Effects of 1-MCP fumigation and high oxygen pretreatment on the storage quality of fresh lycium barbarum[J]. Food Research and Development, 2023, 44(10): 62-69.
- [31] 张玉蕾, 李雨璐, 王愈. 1-甲基环丙烯与茶多酚处理对樱桃番茄常温贮藏期间品质的影响[J]. 食品科技, 2024, 49(2): 40-47.
ZHANG Y L, LI Y L, WANG Y. Effect of 1-methylcyclopropene and tea polyphenol treatment on the quality of cherry tomato during storage at room temperature [J]. Food Science and Technology, 2024, 49(2): 40-47.
- [32] 吕恩利, 陆华忠, 杨松夏, 等. 气调运输包装方式对荔枝保鲜品质的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(4): 156-160, 93.
LV E L, LU H Z, YANG S X, et al. Effects of packaging methods on fresh-keeping quality of litchi during controlled atmosphere transport[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(4): 156-160, 93.
- [33] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2020: 22-155.
CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Physiological and biochemical experiments of postharvest fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Publishing House, 2020: 22-155.
- [34] 张凤璇, 唐贵敏, 王震, 等. 桑葚品种间质量指标、理化指标和香气成分的比较研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(13): 53-62.
ZHANG F X, TANG G M, WANG Z, et al. Comparative study on quality, physiological indexes and aroma components among mulberry varieties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(13): 53-62.
- [35] 杜喜玲. 低压静电场对草莓保鲜研究[J]. 食品工业, 2023, 44(9): 11-15.
DU X L. Study on strawberry preservation by low voltage electrostatic field[J]. The Food Industry, 2023, 44(9): 11-15.
- [36] 张鹏, 赵倩, 贾晓昱, 等. 1-MCP 结合 EA 对蓝靛果贮藏品质及活性氧代谢的影响[J]. 包装工程, 2023, 44(13): 63-73.
ZHANG P, ZHAO Q, JIA X Y, et al. Effects of 1-MCP combined with EA on storage quality and reactive oxygen species metabolism of blue honeysuckle[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(13): 63-73.
- [37] 刘佰霖, 贾晓辉, 王阳, 等. 自发气调包装对‘新梨 7 号’果实品质及耐贮性的影响[J]. 果树学报, 2020, 37(5): 743-753.
LIU B L, JIA X H, WANG Y, et al. Effect of modified atmosphere packaging on postharvest physiology and quality of 'Xinli No. 7' pears during storage[J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(5): 743-753.
- [38] 蒋方国, 胡海洋, 龚晓源, 等. O₂/CO₂ 主动自发气调对采后松露贮藏品质及微观结构的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 123-129.
JIANG F G, HU H Y, GONG X Y, et al. Effects of O₂/CO₂ active modified atmosphere packaging on storage quality and microstructure of postharvest truffles[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 123-129.
- [39] 黄帅, 张琪, 雷雅馨, 等. 外源褪黑素延缓哈密瓜果实采后冷害及对品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2025, 25(3): 9-17.
HUANG S, ZHANG Q, LEI Y X, et al. Effects of exogenous

- melatonin on postharvest chilling injury and quality of Hami melon fruits[J]. *Storage and Process*, 2025, 25(3): 9-17.
- [40] 洪凯, 黄明, 张勋, 等. MAP包装结合1-MCP处理对脆李硬度和可溶性固形物含量的影响[J]. *保鲜与加工*, 2019, 19(2): 1-7.
- HONG K, HUANG M, ZHANG X, et al. Effects of MAP packaging and 1-MCP treatment on firmness and SSC of crisp plum fruits[J]. *Storage and Process*, 2019, 19(2): 1-7.
- [41] 龚诗琪, 周俞含, 王婧, 等. 氯化钙结合冷激处理抑制爱媛橙冬季快速冻害机理研究[J]. *包装工程*, 2025, 46(5): 101-112.
- GONG S Q, ZHOU Y H, WANG J, et al. Mechanism of inhibiting freezing damage of citrus reticulata 'ai Yuan' by calcium chloride combined with cold shock treatment[J]. *Packaging Engineering*, 2025, 46(5): 101-112.
- [42] 高名月, 赵政阳, 王燕, 等. 气调贮藏对瑞雪苹果的保鲜效果与果皮褐变机制的初探[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(4): 123-129.
- GAO M Y, ZHAO Z Y, WANG Y, et al. Effects of controlled atmosphere on preservation of Ruixue apples and preliminary study on pericarp browning mechanism[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(4): 123-129.
- [43] 支益, 代仁昶, 于嘉恺, 等. 1-甲基环丙烯联合低频极化静电场对小白杏采后冷藏软化的影响[J]. *核农学报*, 2025, 39(11): 2 463-2 471.
- ZHI Y, DAI R C, YU J K, et al. Impact of 1-methylcyclopropylene combined with low-frequency polarized electrostatic field on postharvest softening quality of *Prunus armeniaca* L. during cold storage[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2025, 39(11): 2 463-2 471.
- [44] 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. Regulation of micro-environmental modified atmosphere on the softening of bluberries during storage[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(5): 249-258.
- [45] 林旭东, 沈波涛, 朱麟, 等. MAP结合1-MCP处理对“红美人”柑橘冷藏品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2020, 20(2): 74-78.
- LIN X D, SHEN B T, ZHU L, et al. Effect of different modified atmosphere packagings and 1-MCP treatment on quality of 'Hongmeiren' citrus during cold storage[J]. *Storage and Process*, 2020, 20(2): 74-78.
- [46] 陆玉卓, 姜永峰, 周倩, 等. 1-MCP熏蒸结合PE袋包装对“国色天香”李贮藏品质及生理活性的影响[J]. *北方园艺*, 2023(13): 85-93.
- LU Y Z, JIANG Y F, ZHOU Q, et al. Effects of 1-methylcyclopropene fumigation combined with PE plastic packaging on the storage quality and physiological activity of 'Guose Tianxiang' plum fruit[J]. *Northern Horticulture*, 2023(13): 85-93.
- [47] 张琪, 李宗航, 雷雅馨, 等. 1-MCP对近冰温贮藏库尔勒香梨采后品质与霉腐病影响的研究[J]. *核农学报*, 2025, 39(10): 2 215-2 226.
- ZHANG Q, LI Z H, LEI Y X, et al. Study on the effect of 1-MCP on post-harvest quality and moldy rot of Korla balsam pear stored at near-freezing temperature[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2025, 39(10): 2 215-2 226.
- [48] 罗冬兰, 曹森, 马超, 等. 1-甲基环丙烯结合⁶⁰Co-γ辐照处理在李子保鲜中的应用[J]. *食品与机械*, 2021, 37(7): 143-147.
- LUO D L, CAO S, MA C, et al. Effect of the treatment of 1-MCP combined with ⁶⁰Co-γ irradiation on the storage of plum fruit[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(7): 143-147.
- [49] 袁富容, 杨婷, 冉雅文, 等. 基于主成分分析法评价1-MCP处理对‘蓝丰’蓝莓果实品质及生理的影响[J]. *保鲜与加工*, 2024, 24(9): 8-18.
- YUAN F R, YANG T, RAN Y W, et al. Effects of 1-MCP treatment on 'bluecrop' blueberry fruits quality and physiology based on principal component analysis[J]. *Storage and Process*, 2024, 24(9): 8-18.
- [50] 侯杰, 杨青珍, 王锋, 等. 1-MCP处理对甜樱桃果实凹陷、贮藏品质及活性氧代谢的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(21): 280-286.
- HOU J, YANG Q Z, WANG F, et al. Effect of 1-MCP treatment on fruit pitting, storage quality and reactive oxygen species metabolism of sweet cherry fruit[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(21): 280-286.
- [51] 吴方智, 王水苗, 王斯可, 等. 1-甲基环丙烯处理对鲜花椒果实冷藏品质及褐变关键酶的影响[J]. *食品科学*, 2025, 46(14): 321-328.
- WU F Z, WANG S M, WANG S K, et al. Effect of 1-methylcyclopropene treatment on the quality and key browning-related enzymes of fresh *Zanthoxylum bungeanum* maxim. fruits during cold storage[J]. *Food Science*, 2025, 46(14): 321-328.
- [52] 马胜男, 郝义, 纪淑娟, 等. 不同聚乙烯膜厚度对1-甲基环丙烯处理的‘红丰’梨果实冷藏期间果实品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(18): 49-56.
- MA S N, HAO Y, JI S J, et al. Effect of different polyethylene film thickness on fruit quality of 'Hongfeng' pear treated with 1-methylcyclopropene during cold storage[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(18): 49-56.