

芥末精油复合1-甲基环丙烯保鲜处理对绿花菜贮藏期间品质的影响

王盼盼, 管维良, 孙志栋, 蔡路昀

Effect of Mustard Essential Oil Combined 1-Methylcyclopropene Preservation Treatment on the Quality of Broccoli during Refrigerated Storage

WANG Panpan, GUAN Weiliang, SUN Zhidong, and CAI Luyun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050107>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

1-甲基环丙烯对蓝靛果贮藏品质的影响

Effect of 1-Methylcyclopropene on the Storage Quality of *Lonicera caerulea* L.

食品工业科技. 2021, 42(19): 321-328 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020090055>

1-MCP结合PVC处理对茎瘤芥贮藏品质的影响

Effect of 1-MCP Combined with PVC Treatment on Storage Quality of Tumorous Stem Mustard

食品工业科技. 2021, 42(21): 325-333 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021020123>

1-甲基环丙烯和不同贮藏温度对油桃果实硬度与细胞壁果胶的影响

Effects of 1-Methylcyclopropene and Different Ambient Temperature on Firmness and Cell Wall Pectin in Postharvest Nectarine

食品工业科技. 2021, 42(7): 317-323 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050347>

“1-甲基环丙烯+蓄冷剂+保温包装”模拟运输蓝莓鲜果研究

The effect of “1-MCP treatment + cold storage agent + insulation package” to simulated transportation of the fresh blueberry

食品工业科技. 2017(08): 311-315 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.08.052>

1-MCP对黄金百香果贮藏品质及风味变化的影响

Effect of 1-MCP on Storage Quality and Volatiles Variations in Gold Passion Fruit

食品工业科技. 2021, 42(8): 277-281 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070255>

1-MCP处理对冷藏期间花牛苹果香气成分和果实品质的影响

Effects of 1-MCP treatment on fruit quality and aroma components of Huaniniu apples during cold storage

食品工业科技. 2017(07): 331-339 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.07.056>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王盼盼, 管维良, 孙志栋, 等. 芥末精油复合 1-甲基环丙烯保鲜处理对绿花菜贮藏期间品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 270-279. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050107

WANG Panpan, GUAN Weiliang, SUN Zhidong, et al. Effect of Mustard Essential Oil Combined 1-Methylcyclopropene Preservation Treatment on the Quality of Broccoli during Refrigerated Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(11): 270-279. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050107

· 贮运保鲜 ·

芥末精油复合 1-甲基环丙烯保鲜处理对绿花菜贮藏期间品质的影响

王盼盼^{1,2}, 管维良¹, 孙志栋³, 蔡路昀^{1,3,*}

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 浙江杭州 310058;

2. 渤海大学食品科学与工程学院, 辽宁锦州 121013;

3. 浙大宁波理工学院生物与化学工程学院, 浙江宁波 315100)

摘要: 该实验以绿花菜 (*Brassica oleracea* var. *italica*) 为研究对象, 采用 1-甲基环丙烯 (1-Methylcyclopropene, 1-MCP)、芥末精油 (Mustard essential oil, MEO)、1-MCP 处理复合芥末精油 (1-MCP+MEO) 对新鲜绿花菜进行保鲜处理, 通过感官品质、相对电导率、叶绿素、维生素 C、丙二醛含量等生理生化指标的测定, 考察其对绿花菜贮藏期间品质的影响。结果表明: 随着贮藏时间的增加, 各组保鲜剂处理均能够有效地维持绿花菜贮藏期间的品质, 其中 1-MCP+MEO 处理对绿花菜贮藏效果最优, 有效地维持了绿花菜外观, 避免了黄变和霉斑的出现, 减缓叶绿素含量和维生素 C 降解速率, 使绿花菜的叶绿素含量始终高于其他处理组。1-MCP+MEO 能够抑制绿花菜的相对电导率和丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 含量上升。贮藏第 28 d 时, 复合处理组的相对电导率和丙二醛分别为 14.94% 和 9.1 $\mu\text{mol/g}$, 比对照组少了 43.1% 和 27.6%, 且存在显著性差异 ($P < 0.05$), 使得绿花菜细胞保持较好的完整性, 从而抑制绿花菜的衰老。贮藏 28 d 时, 1-MCP+MEO 处理组能够有效减缓绿花菜总酚和总黄酮含量降低, 复合处理与对照组相比总酚含量高了 51.9%, 总黄酮含量高了 38.4%, 并对与酶促褐变有关的多酚氧化酶 (Polyphenoloxidase, PPO)、过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 活性有明显的抑制作用, 比对照组 PPO 活性、POD 活性分别低了 23.6%、48.1%, 均显著低于对照组 ($P < 0.05$)。该研究旨在为绿花菜保鲜技术的开发提供理论依据, 为保鲜剂研发提供新的思路。

关键词: 绿花菜, 1-甲基环丙烯, 芥末精油, 贮藏品质

中图分类号: TS255.36

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)11-0270-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050107



本文网刊:

Effect of Mustard Essential Oil Combined 1-Methylcyclopropene Preservation Treatment on the Quality of Broccoli during Refrigerated Storage

WANG Panpan^{1,2}, GUAN Weiliang¹, SUN Zhidong³, CAI Luyun^{1,3,*}

(1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. College of Food Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121013, China;

3. College of Biological and Chemical Engineering, NingboTech University, Ningbo 315100, China)

Abstract: The experiment took the broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) as the research object, 1-methylcyclopropene (1-MCP), mustard essential oil (MEO) and 1-MCP combined MEO (1-MCP+MEO) were used to treat fresh green broccoli. The effects of physiological and biochemical indexes such as sensory quality, relative conductivity, chlorophyll, vitamin C

收稿日期: 2023-05-10

基金项目: 宁波市公益类科技计划项目 (2021S042)。

作者简介: 王盼盼 (1998-) (ORCID: 0000-0001-6469-9509), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 3042695846@qq.com。

* 通信作者: 蔡路昀 (1981-) (ORCID: 0000-0003-3996-1565), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: cailuyun@zju.edu.cn。

and malondialdehyde (MDA) content on the quality of broccoli were investigated during storage. The result showed that with the increase of storage time, all groups of preservative treatments could effectively maintain the quality of broccoli during storage, among which 1-MCP+MEO treatment had the best storage effect on broccoli, effectively maintained the appearance of broccoli, avoided yellows and mildew, and slowed down the chlorophyll content and vitamin C degradation rate and made the chlorophyll content of broccoli always higher than that of other treatment groups. 1-MCP+MEO inhibited the increase of relative conductivity and MDA content in broccoli. On the 28th day of storage, the relative conductivity and MDA of the combined treatment group were 14.94% and 9.1 $\mu\text{mol/g}$, respectively, which were 43.1% and 27.6% lower than that of the control group respectively, and there was a significant difference ($P<0.05$), so that the cell integrity of the broccoli was maintained and the senescence of the broccoli was inhibited. After 28 days of storage, 1-MCP+MEO treatment group could effectively reduce the decrease of total phenol and total flavonoid contents, and combined treatment was 51.9% higher than that of control group, and total flavonoid content was 38.4% higher than that of control group. In addition, the activity of polyphenoloxidase (PPO) and peroxidase (POD) related to enzymatic browning was significantly inhibited, and the activity of PPO and POD were 23.6% and 48.1% lower than that of control group, respectively. Significantly lowered than control group ($P<0.05$). This study aims to provide a theoretical basis for the development of broccoli preservation technology and a new idea for the research and development of preservatives.

Key words: broccoli; 1-methylcyclopropene (1-MCP); mustard essential oil (MEO); storage quality

绿花菜(*Brassica oleracea* var. *italica*)又称青花菜、西兰花、意大利芥蓝等,属于十字花科芸苔属甘蓝的一种变种,是十字花科蔬菜的代表^[1]。绿花菜中不仅含有总酚、抗坏血酸、代葡萄糖苷和萝卜硫素等重要功能成分和蛋白质、维生素 C、钙、铁等营养成分,还具有抗氧化、抗炎、延缓衰老、保护肾脏等诸多医疗保健功能^[2]。绿花菜是由十字花科植物中选择出来的一种具有特殊风格的蔬菜。绿花菜在我国各地均有种植,其产量占全世界 7% 以上,且其种植面积在逐年增长。但是,采收后的绿花菜在贮藏过程中易发生褐变、黄化和腐烂等现象,严重影响了其品质^[3]。

当前,绿色蔬菜的保鲜主要有物理保鲜技术如光照、气调调节、低温联合气调、微真空处理、减压冷藏、薄膜保鲜等;化学保鲜技术有乙醇处理、臭氧处理和 1-MCP 处理,通过抑制果蔬的呼吸作用来减缓果蔬的衰老;生物保鲜技术如生物素处理和植物提取液处理^[4],可以通过向果蔬中添加植物的活性物质来达到延长果蔬保鲜期的目的。其中 1-MCP 是一种新型乙烯受体抑制剂,能够促进作物生长过程中生理生化物质转化和代谢循环,能够有效抑制果蔬衰老^[5]。但由于新鲜的果蔬采收后容易受到病原真菌的感染,单一的 1-MCP 处理极大地限制了果蔬的贮藏品质,具有一定的局限性。而在化学结合保鲜技术中,1-MCP 可与对羟基苯甲酸酯、苯甲酸钠、山梨酸钾等化学杀菌剂结合^[6],具有一定的保鲜增鲜效果,但存在杀菌剂残留等安全问题,无法大规模应用。

从天然植物中萃取的精油对果蔬具有较好的抑菌保鲜效果。植物精油主要通过改变细胞膜通透性,紊乱线粒体的功能,抑制核酸的合成,从而达到抑制细菌生长的目的。此外,还可以通过抑制相关酶的活性,有效减缓病原菌的活性^[7]。芥末精油(Mustard essential oil, MEO)是从芥菜叶子中提取出来的一种天然植物精油,以异硫氰酸烯丙酯(Ailyi-isothiocy-

anate, AITC)成分为主,是一种具有抗菌活性的天然物质,常被用作抑菌剂。它可以抑制果实采后腐败原菌的活性,从而有效地防止果实腐烂^[8],芥末精油可通过熏蒸的方式来抑制微生物的繁殖,预防微生物在果实上繁殖而引起的腐烂,有效维持芒果^[9]、红毛丹^[10]、番茄^[11]果实的贮藏品质,进而延长果实的贮藏期。但精油极易挥发,在长时间保存中,精油的挥发量会不断减少,从而影响其保鲜效果^[12]。为有效维持精油的稳定性,将环糊精作为天然活性化合物的载体,与包装食品接触,可以通过形成包合物来保护活性化合物并对其进行控制释放。基于天然生物活性化合物的活性包装材料的工业化生产,包结络合可以被认为是具有前途的替代方法之一^[13]。尤其在果蔬保鲜应用中,起到良好的效果。李奕星等^[10]将 β -环糊精制成微囊,可有效地控制芥末精油的释放,并可在一定程度上避免其对果实造成的药害。在林媛等^[14]的实验中探究山苍子精油结合 1-MCP 处理对杨桃的保鲜效果,结果表明精油和 1-MCP 的共同作用能够有效地维持杨桃的贮藏品质。

本研究采用芥末精油保鲜纸、1-MCP 保鲜剂及其复合处理新鲜绿花菜,以有效维持绿花菜的贮藏品质。通过测定 0~28 d 内绿花菜各个生理生化指标的变化情况来探究芥末精油复合 1-甲基环丙烯保鲜处理对绿花菜贮藏期间保鲜品质的影响。1-MCP 复合 MEO 保鲜是新型的绿色保鲜技术,与传统的贮藏保鲜技术相比更为高效^[15]。复合调控的方法可以有效抑制其呼吸作用、乙烯生成,减缓氧化和水分流失等过程;增强两者的保鲜效果,同时减少拮抗作用;处理方法简单,不需要特殊的设备和环境^[16]。相对于脱水处理、真空包装等方法,可更好地保持绿花菜的品质、口感、色泽和营养,为绿花菜采后贮藏保鲜提供参考。同时不会危害人体健康和造成环境污染,符合可持续发展的环保理念,这对于提高产品质量和市场竞争能力具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

供试绿花菜品种为台绿6号 秋季定植,于12月采自慈溪市三星农业开发有限公司种植基地;聚乙烯(PE)保鲜袋(0.03 mm) 广州齐铭塑料制品有限公司;没食子酸标准品 上海易恩化学技术有限公司罗恩试剂;邻苯二酚、愈创木酚、草酸、硫代巴比妥酸 阿拉丁(试剂)上海有限公司;芥末精油(纯度为99%) 江西芳麟香精有限公司; β -环糊精 上海麦克林生化科技有限公司;1-MCP 保鲜剂(有效浓度为3.3%) 咸阳西秦生物科技有限公司;其他试剂 国药集团。

DDS-11A型电导仪 上海仪电科学仪器股份有限公司;SPARK全波长扫描多功能酶标仪 瑞士Tecan公司;ZRY-300人工气候箱 宁波赛福有限公司;5425R高速冷冻离心机 德国Eppendorf公司。

1.2 实验方法

1.2.1 精油保鲜纸的制备 参考陆滢等^[17]所述的沉淀法制备芥末精油保鲜纸。前期预试验表明,精油熏蒸浓度为400 μ L/L为宜,若大于此浓度,绿花菜会发生褐变等药害现象。将20 g β -环糊精添加至100 mL蒸馏水中,加热至70 $^{\circ}$ C溶解。在30 mL无水乙醇中加入3.0 mL的芥末精油搅拌均匀后,逐滴加入 β -环糊精溶液中,在70 $^{\circ}$ C下,700 r/min的条件下,搅拌2 h,在4 $^{\circ}$ C放置24 h,抽滤后,将其在50 $^{\circ}$ C下烘箱中烘干4 h,即可得到精油包合粉末。将配制好的芥末- β -环糊精包合物粉末以1:40的比例溶解在0.02 g/mL的聚乙烯醇(PVA)溶液中,并在每个保鲜膜(20 cm \times 30 cm)上涂抹32 mL,少量多次地均匀涂抹,最后自然烘干备用。

1.2.2 样品处理 在慈溪市三星农业开发有限公司种植基地,选择大小相近(花球直径12~14 cm,球茎高12~15 cm,单球质量在300~400 g),没有病虫害的绿花菜,用泡沫盒包装,并适时运送到实验室。实验设4个处理。

处理1:1-MCP(1-MCP 6~8 kg/包)处理,每筐内置保鲜袋,装绿花菜(15个花球,根据实际情况定),放1包1-MCP保鲜剂;

处理2:芥末精油保鲜纸(Mustard essential oil, MEO)处理,每筐内置保鲜袋,装绿花菜(15个花球,根据实际情况定),放2张芥末精油保鲜纸;

处理3:1-MCP+MEO(6~8 kg/包)处理,每筐内置保鲜袋,装绿花菜(15个花球,根据实际情况定),放1包1-MCP和1张芥末精油保鲜纸。

处理4(CK):空白对照组,无处理,处理方法同上,选15个花球。

上述4处理三次重复(3个气候箱),合计12筐绿花菜+1个基础样(10个花球)/筐,放置于2 $^{\circ}$ C的人工气候箱,分别于贮藏第0、7、14、21、28 d(共5

个时间点取样,每个时间点从每筐取2~3个球进行测试分析。每处理组取12个绿花菜花球组织进行取样,样品置于-80 $^{\circ}$ C的冰箱中保存,并采用相关仪器对样品进行生理指标的测定,以确保实验结果的准确性和可靠性。

1.2.3 指标测定及方法

1.2.3.1 感官评价 为了更准确地评价不同保鲜剂处理后贮藏0~28 d的绿花菜,组织8人成立评价小组进行感官评价,以闫凯亚等^[18]的感官评定的方式为标准,主要从总体评价、花球颜色、气味、花蕾开放程度等4个方面进行综合评价,采用10分制加权平均分,按照5个等级打分(表1)。

表1 绿花菜的感官评分标准

总体评价	花球颜色	气味	花蕾开放程度	分值
极差,不可用	完全变黄色	有明显腐臭味	花蕾完全开放	1~2
差,影响销售	浅黄色	有异味	3/4花蕾开放	3~4
一般,有明显缺陷	黄绿色	无清香味、有轻度异味	1/2花蕾开放	5~6
好,有小缺陷,但不明显	浅绿色	无清香味	1/4花蕾开放	7~8
极好,无任何缺陷	深绿色	清香、固有香味	无花蕾开放	9~10

注:加权平均的公式为感官评分=总体评价 \times 30%+花球颜色 \times 25%+气味 \times 25%+花蕾开放程度 \times 20%。

1.2.3.2 相对电导率的测定 参考林本芳^[19]所述的方法测定相对电导率。

1.2.3.3 叶绿素含量的测定 根据韩颖等^[20]所述的方法测定叶绿素,将经打浆制得的绿花菜称取1.0 g放入100 mL的三角瓶中,添加20 mL的混合溶液(无水乙醇和丙酮1:1),在暗处放置24 h,以12000 \times g离心10 min,取其上清,反复进行上述处理,直到残留物变成白色。用酶标仪测定663 nm和645 nm处的吸光度,计算叶绿素含量。

$$\text{叶绿素含量(mg/100 g)} = (20.0A_{645} + 8.02A_{663}) \times V / (1000 \times W)$$

式中: A_{645} 、 A_{663} 分别为在645、663 nm处的吸光度; V 为稀释倍数; W 为样品质量,g。

1.2.3.4 丙二醛含量的测定 根据曹建康等^[21]提出的硫代巴比妥酸比色法,称取绿花菜试样1.0 g,加入10 mL 100 g/L的三氯乙酸(TCA),进行均匀浆化,在4 $^{\circ}$ C、12000 \times g条件下离心10 min,取其上清液4 $^{\circ}$ C下保存,待用。取2 mL上清液(以2 mL 100 g/L三氯乙酸溶液为提取液作对照),与2 mL 0.67% (w/v)的硫代巴比妥酸混合后,放入沸水浴中煮20 min,待完全冷却后,再进行离心,分别在450、532、600 nm处测定吸光度值,平行三次,取平均值。

1.2.3.5 总酚、总黄酮含量的测定 参照曹建康等^[21]所述的方法并稍作修改,称取1.0 g绿花菜,加入少许1% HCl-甲醇溶液,在冰浴条件下研磨匀浆后,转入20 mL刻度试管中,定容至刻度,于4 $^{\circ}$ C避光提

取 20 min, 期间摇动数次, 12000×g 离心 10 min 后, 收集上清液备用。以 1% 盐酸-甲醇溶液做空白参比调零, 取滤液分别于波长 280、325 nm 处测定溶液的吸光度值, 平行三次。以每克(鲜重)果蔬组织在波长 280 nm 处吸光度值表示总酚含量, 即 OD_{280}/g ; 在波长 325 nm 处吸光度值表示类黄酮物质含量, 即 OD_{325}/g 。

1.2.3.6 维生素 C 含量的测定 采用曹建康等^[21]的分光光度法并稍作修改。称取 10.0 g 绿花菜样品, 加入 20 mL 50 g/L TCA 溶液, 在冰浴条件下研磨匀浆后, 转入 100 mL 容量瓶中, 定容至刻度, 提取 10 min 后, 收集上清液备用。取 1.0 mL 提取液于试管中, 加入 1.0 mL 的 50 g/L TCA 溶液, 再按制作标准曲线相同的方法, 加入其它成分, 进行反应、测定。记录反应体系在波长 534 nm 处吸光度值。平行三次。根据吸光度值, 在标准曲线 $y=0.0008x+0.101$, $R^2=0.996$, 查出相应的混合液中抗维生素 C 质量, 计算绿花菜中维生素 C 含量。

$$\text{维生素C含量(mg/100 g)} = \frac{V \times m'}{V_s \times m \times 1000} \times 100$$

式中: m' 为由标准曲线求得的抗坏血酸的质量, μg ; V_s 为滴定时所用样品提取液体积, mL; V 为样品提取液总体积, mL; m 为样品质量, g。

1.2.3.7 PPO、POD 活性的测定 PPO、POD 活性的测定均采用曹建康等^[21]报道的方法并稍作修改。称取 5.0 g 绿花菜样品, 加入 5 mL 提取缓冲液, 冰浴研磨匀浆, 于 4 °C、12000×g 离心 30 min, 收集上清液即为酶提取液。PPO 采用邻苯二酚比色法测定。在酶标板中加入 10 μL 酶提取液, 再按 4:1 加入 0.1 mol/L、pH5.5 醋酸缓冲液和 50 mmol/L 邻苯二酚溶液共 200 μL , 混匀后在 420 nm 处每隔 1 min 记录吸光值, 连续记录 3~5 min。以每克绿花菜样品(鲜重)每分钟吸光度变化值增加 1 为 1 个活性单位, 单位是 $\text{U/g}\cdot\text{min}$ 。POD 采用愈创木酚比色法测

定。在酶标板中加入 75 μL 的 50 mmol/L 愈疮木酚溶液和 65 μL 酶提取液, 再加入 85 μL 的 0.06 mol/L H_2O_2 溶液, 混匀后在 470 nm 处每隔 1 min 记录吸光值, 连续记录 3~5 min。以每克绿花菜样品(鲜重)每分钟吸光度变化值增加 1 为 1 个活性单位, 单位是 $\text{U/g}\cdot\text{min}$ 。

$$\text{PPO活性} = \frac{\Delta OD_{420} \times V}{V_s \times m}$$

$$\text{POD活性} = \frac{\Delta OD_{420} \times V}{V_s \times m}$$

式中: ΔOD_{420} 为每分钟反应混合液吸光度变化值; V 为样品提取液总体积, mL; V_s 为测定时所取样品提取液体积, mL; m 为样品质量, g。

1.3 数据处理

各组实验数据重复三次, 采用 Excel 2010 进行数据处理, 计算平均值和标准差。运用 Origin 9.0 软件进行绘图, 采用 SPSS 23.0 软件进行统计分析, 设置显著性水平为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同处理方式对绿花菜感官评价的影响

感官品质可以直接反映出果蔬的颜色和气味, 是衡量果蔬品质的重要指标^[22]。由图 1 可见, 不同保鲜剂处理对绿花菜的感官品质有明显影响。贮藏初期, 绿花菜颜色鲜绿, 气味清香, 形态良好。但在 21 d 后, 对照组的绿花菜出现黄化和霉变。第 28 d 时, 霉变加剧且产生异味。MEO 处理后的绿花菜在 21 d 后出现黄化, 而 1-MCP 处理组的绿花菜没有变黄, 但有霉斑生成; 1-MCP+MEO 处理后的绿花菜在贮藏期 28 d 内未出现黄化和霉变现象, 保鲜效果最好。由图 2 可见, 随着贮藏时间的增加, 各处理组绿花菜的感官评分下降, 其中 21~28 d 时, 1-MCP 和 1-MCP+MEO 处理组与对照组有显著差异($P<0.05$)。1-MCP+MEO 处理后的绿花菜感官评分下降幅度最小。结果表明, 1-MCP+MEO 处理对绿花菜的感官

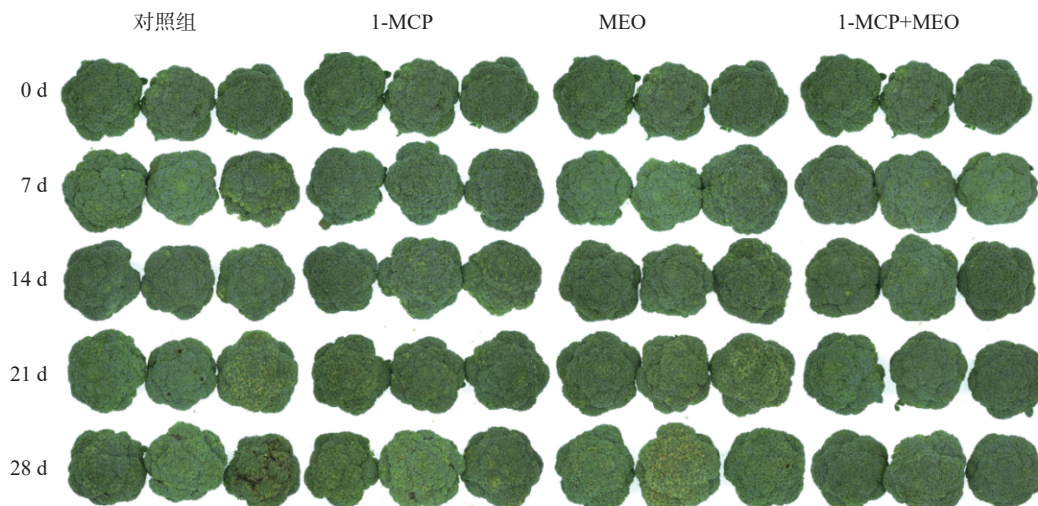


图 1 绿花菜在贮藏过程中外观的变化

Fig.1 Changes in the appearance of broccoli florets during storage

品质影响最大,有利于保持绿花菜的贮藏品质。这是因为 1-MCP+MEO 处理组可通过抑制乙烯作用、减缓呼吸作用和抑菌作用来延缓绿花菜的成熟和衰老过程,从而保持良好的感官品质。1-MCP 可通过抑制乙烯结合和减少氧气消耗,延缓绿花菜的呼吸和衰老速度^[23-24]。MEO 中所含有的异硫氰酸烯丙酯可有效地抑制采后果蔬病害中的灰霉菌,青霉菌,炭疽菌^[25],防止其腐败变质。林媛等^[14]的研究结果与本研究结果相似,山苍子精油结合 1-MCP 处理可有效抑制杨桃的腐败,并维持其感官品质。在 Yang 等^[26]的实验中,也发现了芥末精油复合保鲜膜能有效控制芒果果实的霉变。

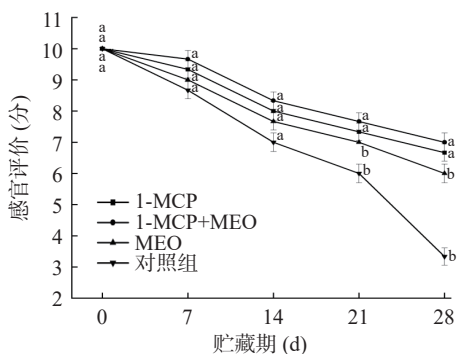


图2 绿花菜在贮藏过程中感官评分的变化

Fig.2 Changes in sensory score of broccoli florets during storage

注:不同字母表示相同贮藏期内,不同处理之间数据存在显著差异($P<0.05$),图3~图8同。

2.2 不同处理方式对绿花菜相对电导率的影响

相对电导率通过衡量细胞膜的通透性来反映细胞膜的完整性,可体现细胞受损程度和蔬菜衰老程度^[27]。由图3可见,不同保鲜剂处理组的绿花菜相对电导率随着贮藏时间的增加而增加,对照组上升幅度最大,最高达到初始值的5倍,达到26.47%。植物在非生物逆境胁迫下往往发生失水,同时细胞膜容易破裂,膜蛋白受损,导致细胞液外渗,从而使相对电导率增大^[28]。3组保鲜处理均能抑制绿花菜相对电导率升高,其中14~28 d,1-MCP和1-MCP+MEO处理组与对照组相比有显著差异($P<0.05$),说明保鲜剂处

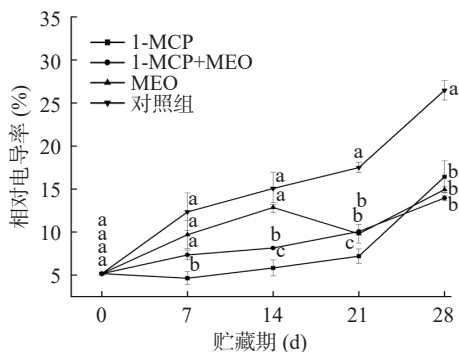


图3 绿花菜在贮藏过程中相对电导率的变化

Fig.3 Changes in the relative conductivity of broccoli florets during storage

理能明显抑制相对电导率的上升。贮藏前期,MEO处理的绿花菜相对电导率增长幅度较大,可能是精油中的活性成分在抑菌过程中对细胞膜造成了一定损伤,导致细胞液外渗,相对电导率增大^[29]。贮藏期第7~21 d时,1-MCP保鲜剂处理组相对电导率上升幅度最小,与其他处理组有显著差异($P<0.05$)。乙烯是植物衰老和呼吸的关键激素,其产生会导致果蔬组织分解和电导率上升。1-MCP能与乙烯受体结合,阻断乙烯信号传递,抑制乙烯的合成和响应,减慢果蔬组织衰老和电导率的上升^[30]。这与陈曦冉等^[31]对软枣猕猴桃的研究结果一致,1-MCP能明显减缓软枣猕猴桃相对电导率的增长速率。此外,1-MCP还能有效抑制果蔬的呼吸作用,减少能量和水分消耗,维持果蔬组织的水分平衡,降低其相对电导率。

2.3 不同处理方式对绿花菜叶绿素含量的影响

叶绿素含量是评价绿花菜品质和蔬菜营养价值的重要指标之一^[32]。由图4可见,不同处理组的绿花菜在贮藏期间叶绿素含量呈明显下降的趋势。采后的果蔬在成熟过程中由于呼吸作用会快速地消耗花苞中的大部分营养物质,加上乙烯等植物激素的变化会加速叶绿素的分解,导致叶片的黄化和腐烂。在贮藏第14 d,对照组叶绿素含量下降幅度最大,其值为33 mg/100 g,仅为初始值的46.42%,与保鲜剂处理组有显著差异($P<0.05$),说明保鲜剂处理可以有效控制叶绿素含量的降低。1-MCP能调节糖代谢并保持较高浓度的可溶性糖以延缓绿花菜的衰老,并调控叶绿素降解相关基因的表达,抑制叶绿素的降解^[33]。植物精油中的活性成分可以调节叶绿素降解酶的活性,从而延缓叶绿素的降解速率^[34]。适当浓度的芥末精油可以提升总酚合成酶的活性,提高总酚含量,在一定程度上延缓绿花菜中叶绿素的降解速率^[35]。这与唐仁勇等^[36]在柑橘精油对芦笋的保鲜效果的研究中关于叶绿素含量的变化一致。贮藏第28 d,1-MCP+MEO处理虽然与其他处理组无显著差异($P>0.05$),但叶绿素含量下降幅度最小,相对对照组减少了9.1%。结果表明,1-MCP+MEO处理能更好地抑制绿花菜叶绿素含量的降低。这是因为1-MCP和芥末精油

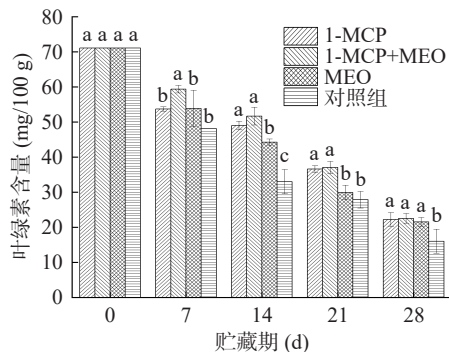


图4 绿花菜在贮藏过程中叶绿素含量的变化

Fig.4 Changes in the chlorophyll content of broccoli florets during storage

的复合处理可通过调节糖代谢、抗氧化作用和叶绿素降解酶活性等机制协同减缓叶绿素的降解和果实的衰老^[37]。

2.4 不同处理方式对绿花菜丙二醛含量的影响

MDA 是膜脂过氧化的产物,其累积会导致细胞质膜和细胞器受损。同时 MDA 的水平可反映植物组织的老化及细胞膜脂过氧化程度^[38]。从图 5 可见,随着贮存时间的延长,各组绿花菜的 MDA 含量整体呈上升趋势,表明绿花菜的细胞膜质氧化程度高,细胞膜已受损。其中对照组的 MDA 含量始终高于保鲜剂处理组,且上升幅度最大,与保鲜剂处理组的差异显著($P<0.05$)。在 14~21 d 的贮藏期间,1-MCP+MEO 处理组的丙二醛含量增长量最少且与其他处理组差异显著($P<0.05$)。在贮藏结束,1-MCP+MEO 处理的西兰花丙二醛含量为 9.1 $\mu\text{mol/g}$,显著低于对照组(12.57 $\mu\text{mol/g}$, $P<0.05$)。结果表明:1-MCP+MEO 处理能较好地延缓绿花菜中 MDA 含量的积累,使西兰花细胞膜保持较好的完整性,从而减缓绿花菜的衰老。这是因为 1-MCP 处理可以清除果实中的大部分氧自由基,从而延缓过氧化作用,有效地抑制了 MDA 的积累^[39]。乙烯参与植物的衰老和氧化应激过程,促进脂质过氧化反应和 MDA 的产生。1-MCP 通过抑制乙烯的合成,降低了乙烯的水平,进而减缓 MDA 的上升^[40]。芥末精油富含的活性成分异硫氰酸烯丙酯,具有较好的抗氧化性,可通过抑制活性氧的产生,延缓 MDA 的积累^[8]。类似的结果也在张娜等^[9]将芥末精油应用于芒果保鲜的研究中得到验证,有效减缓了芒果中 MDA 的上升。1-MCP 与芥末精油的复合处理通过多种机制,如抗氧化作用、抑制活性氧的产生以及调节氧化还原平衡等机制,减缓丙二醛含量上升的过程。这种复合处理具有抗氧化和保护细胞的效果,可以减少丙二醛的生成,保护植物细胞免受过氧化伤害。

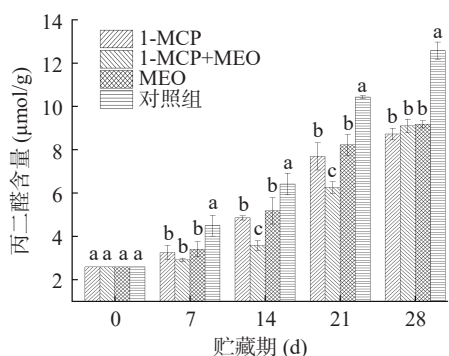


图 5 绿花菜在贮藏过程中丙二醛含量的变化
Fig.5 Changes in MDA content of broccoli florets during storage

2.5 不同处理方式对绿花菜总酚、总黄酮的影响

总酚类物质是一种重要的抗氧化剂,也是衡量果蔬品质的重要指标^[41]。由图 6a 可见,贮藏时间增长时,各保鲜剂处理组的绿花菜总酚含量下降。新鲜

的绿花菜在贮藏过程中容易发生褐变,主要原因是组织呼吸速率较强导致代谢增强,酚类物质与氧气结合导致醌类物质生成^[42]。随着贮藏时间的延长,褐变加重,总酚含量逐渐减少,对照组的绿花菜中总酚含量显著低于其他处理组($P<0.05$)。1-MCP+MEO 处理的绿花菜的总酚含量下降幅度较小,与其他处理组有显著性差异($P<0.05$)。结果表明,1-MCP+MEO 处理可以有效地减缓总酚含量的降低,维持绿花菜中的有效活性成分。1-MCP 可以通过抑制果蔬呼吸代谢作用和自由基形成来维持氧化还原平衡,减缓总酚含量的下降^[30]。芥末精油中的活性成分不仅具有抑菌效果,还可刺激绿花菜组织中总酚合成酶活性增强,从而增加酚类物质的含量^[31]。1-MCP+MEO 处理不仅能通过协同作用发挥生物保鲜剂的抑菌作用,还能提升抑制呼吸作用、减缓褐变的效果和延缓总酚含量的降低。在张金磊等^[43]关于明胶柑橘精油复合膜对草莓进行保鲜的研究中,也观察到抑制了草莓中总酚的氧化。

绿花菜含有丰富的黄酮物质,能够有效清除羟自由基^[44]。经过不同的保鲜剂处理后,绿花菜的总黄酮含量变化不同。由图 6b 可知,绿花菜中的总黄酮含量随着贮藏时间的延长呈下降趋势,在贮藏 7~14 d 期间,总黄酮含量下降速度较快,这可能是因为贮藏前期绿花菜具有较强的生理代谢活动,导致总黄酮下降较快;贮藏后期,组织衰老增强,苯丙氨酸酶活性增强,促进苯丙氨酸转化为黄酮类物质,使得后期黄酮类物质下降速度减缓^[45]。在贮藏 14 d 后,1-MCP+

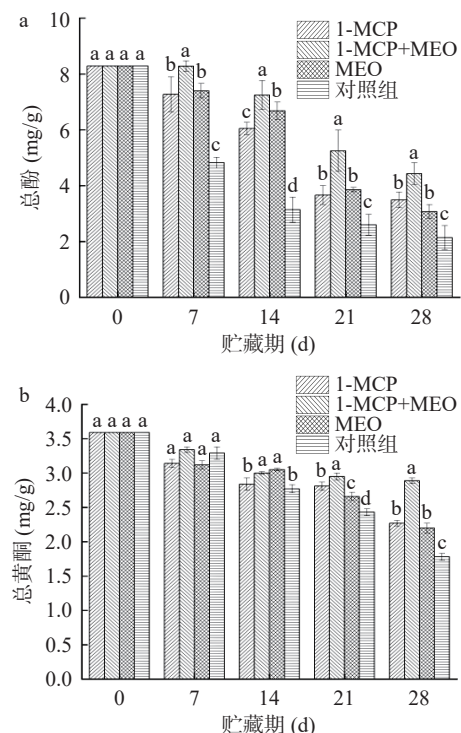


图 6 绿花菜在贮藏过程中总酚(a)含量和总黄酮含量(b)的变化

Fig.6 Changes in the total phenolic content (a) and total flavonoid content (b) of broccoli florets during storage

MEO 处理的绿花菜总黄酮含量显著高于对照组($P < 0.05$)。这是因为 1-MCP 可以通过直接清除活性氧,维持机体的代谢平衡,不会对细胞造成损伤。1-MCP+MEO 处理能有效抑制绿花菜中主要的抗氧化物质(如总酚、总黄酮)的下降^[46]。植物精油中的有效成分具有较高的活性,可以与过氧自由基反应,将活泼氢原子转移到自由基上,并转化为其他低活性物质后再进行清除^[47]。在戴希爽等^[48]关于沙枣胶和孜然精油复合涂膜对番茄保鲜效果的影响的研究中研究结果与本文一致,孜然精油中的活性成分也能有效控制总酚、总黄酮等物质积累。

2.6 不同处理方式对绿花菜维生素 C 含量的影响

维生素 C 是衡量果蔬营养价值的关键指标,但在贮藏的过程中容易降解^[49]。因此,保持绿花菜的高维生素 C 含量,对于保障其在贮藏过程中的品质具有非常重要的作用。由图 7 可见,绿花菜中的维生素 C 含量呈现下降的趋势,这是因为贮藏过程中果实失去营养供应,维生素 C 合成受限导致下降。同时在果实采收后仍会进行一系列的生理变化^[50],氧化速度加快,自由基动态平衡被破坏,导致风味、质地、营养价值以及生理状态的改变,维生素 C 的含量快速下降。从维生素 C 含量来看,各处理组均能有效延缓绿花菜在贮藏过程中维生素 C 的流失,其中,1-MCP+MEO 的处理组在贮藏前 14 d 内效果最佳。但在 21 d 时,1-MCP+MEO 处理组、MEO 处理与对照组相比没有显著差异($P > 0.05$),可能是因为精油的疏水性对细胞膜和生物大分子造成破坏,打破生物膜的稳定性,导致营养物质流失^[51],所以 1-MCP+MEO 和 MEO 处理对缓解维生素 C 降解没有明显效果。而 1-MCP 处理组的维生素 C 含量显著高于其他处理组($P < 0.05$)。1-MCP 处理能够有效降低绿花菜的呼吸作用和新陈代谢活动,抑制抗坏血酸氧化酶的活性,减少自由基的产生,延缓营养品质的损失。刘玉菡等^[52]用 1-MCP 对花椰菜进行保鲜处理同样抑制了维生素 C 的降解,与本研究结果一致。

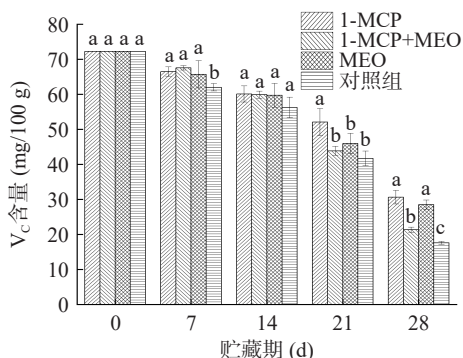


图 7 绿花菜在贮藏过程中维生素 C 含量的变化

Fig.7 Changes in the vitamin C content of broccoli florets during storage

2.7 不同处理方式对绿花菜 PPO、POD 活性的影响

PPO 是影响果蔬褐变的重要氧化酶^[53]。由图 8a

可知,贮藏期间,绿花菜中 PPO 活性整体呈现波动上升趋势,因为正常生理状态下,PPO 以潜伏形式存在,不会与底物发生反应,但随着果蔬衰老,细胞结构被破坏,PPO 会与多酚类物质发生氧化反应生成醌,醌进一步聚合形成黑色物质,导致褐变,使 PPO 活性逐渐增加^[54]。在贮藏 28 d,对照组的 PPO 活性值为 71.78 U/g·min,是初始值的 2.1 倍。贮藏 21 d 后,不同保鲜剂处理组的绿花菜 PPO 活性与对照组存在显著性差异($P < 0.05$),其中 1-MCP+MEO 处理组的 PPO 活性增幅最小,表明其保鲜效果最好。1-MCP 可以与乙烯受体竞争性地结合,延迟绿花菜的呼吸峰值,同时降低了抗氧化成分和酚类物质的含量,有效控制 PPO 活性,防止绿花菜组织发生褐变^[55]。芥末精油中的抗氧化成分可以中和自由基,减少氧化活性,从而减缓 PPO 的上升^[8]。在与 PPO 相关的酶促反应中,酚类物质可作为其反应的底物。植物精油中的活性成分会与 PPO 活性中心竞争结合,对 PPO 的活性进行抑制,以提高其抗氧化能力,或者减少活性氧的生成,进而抑制果蔬褐变^[56]。

POD 是果蔬组织中重要的氧化还原酶,也是果蔬清除自由基的重要酶之一^[57]。POD 可保护果肉细胞避免过氧化氢累积造成的损伤。由图 8b 可知,贮藏期间,绿花菜中 POD 活性整体上升。POD 活性变化可用于指示果实后熟和衰老,抑制其活力可延缓衰老^[44]。在贮藏 14~28 d 内,对照组的 POD 活性始终高于各保鲜剂处理组,且有显著差异($P < 0.05$)。在贮藏期为 28 d 时,对照组的活力值为 183.39 U/g·min,

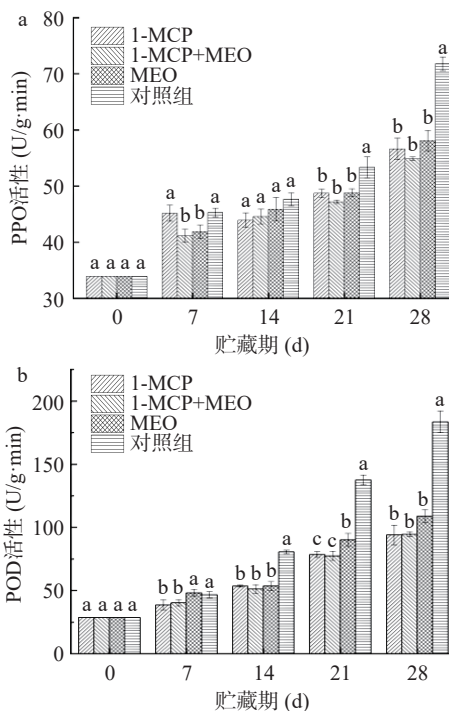


图 8 绿花菜在贮藏过程中 PPO 活性(a)和 POD 活性(b)的变化

Fig.8 Changes in the PPO activity (a) and POD activity (b) of broccoli florets during storage

是初始值的 6.38 倍, 而 1-MCP 和 1-MCP+MEO 处理组 POD 活力值保持在 93.89 U/g·min 左右, 表明两种处理能够有效地抑制 POD 活性的上升。其中, 1-MCP+MEO 处理组保鲜效果最好, 贮藏期内 POD 活性上升幅度始终最小。1-MCP 处理可抑制新鲜绿花菜的呼吸代谢, 降低相关酶的活性^[40]。精油中的活性物质能诱导生成具有抗氧化能力的酚类化合物, 提高抗氧化能力, 维持细胞膜完整性。还可能通过增加活性氧清除酶活性来增强其抗氧化能力。抗氧化能力的增加可以减轻细胞膜的氧化损伤, 防止酚类和氧化酶(PPO/POD)的接触以及随后在表面组织中的酶促褐变^[6]。因此 1-MCP+MEO 处理保鲜剂处理效果最好。类似的结果也在石俊杰^[58]的研究中得到验证, 百里香精油可以有效抑制枇杷果实中 PPO 和 POD 活性上升, 延缓果实的褐变, 延长贮藏期。

3 结论

本研究使用 1-MCP、芥末精油及其复合处理作为新鲜绿花菜的保鲜剂, 对贮藏过程中绿花菜外观和营养相关指标及相关酶活性进行全面分析。结果表明, 1-MCP、MEO 及其复合处理都能够提高绿花菜的耐贮性, 增强绿花菜的耐储藏能力, 从而抑制绿花菜在贮藏过程中发生腐败变质、表面变黄以及营养损失, 使其维持更好的品质。其中复合处理优于单一处理, 能够有效维持绿花菜的感官品质、叶绿素及维生素 C 含量, 降低绿花菜相对电导率及 MDA 的上升幅度, 减缓绿花菜中总酚和总黄酮含量的降低, 抑制与酶促褐变相关的 PPO 和 POD 活性的升高, 有效地保障了绿花菜在贮藏期间的品质, 明显延长其货架期。这为绿花菜等易腐易黄化果蔬的保鲜提供安全有效的思路。虽然复合处理能有效提升贮藏期绿花菜品质的稳定性, 然而 1-MCP 和 MEO 对绿花菜的协同保鲜作用机制尚不清楚且二者用量仍需进一步优化, 以实现降本增效。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

[1] 曾媛, 韩欣如, 薛思玥, 等. 采后熏蒸 1-甲基环丙烯对西兰花保鲜效果的影响及主成分分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(4): 332-340. [ZENG Y, HAN X R, XUE S Y, et al. Effect of 1-methylcyclopropene fumigation on preservation of broccoli and principal component analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(4): 332-340.]

[2] LI H, XIA Y, LIU H Y, et al. Nutritional values, beneficial effects, and food applications of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck)[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 119: 288-308.

[3] LOI M, LIUZZI V C, FANELLI F, et al. Effect of different light-emitting diode (LED) irradiation on the shelf life and phytonutrient content of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*)[J]. Food Chemistry, 2019, 283(JUN.15): 206-214.

[4] 谈元媛, 李忠明. 西兰花采后贮藏及保鲜技术研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(6): 5-11. [TAN Y Y, LI Z M. Research progress of postharvest storage and preservation techniques of broccoli[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(6): 5-11.]

[5] CUSTÓDIA G, ADRIANA G, SANDRA C, et al. 1-Methylcyclopropene and lemongrass essential oil nanocoatings effect on the preservation of cold stored 'Rocha' pear[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 192: 111992.

[6] YANG W, WANG L, BAN Z, et al. Efficient microencapsulation of *Syringa* essential oil; the valuable potential on quality maintenance and storage behavior of peach[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 95: 177-185.

[7] 王颖, 杜易潼, 薛婉玉, 等. 植物源性天然抗氧化剂的机理及其在食品保鲜中的应用[J]. *中国调味品*, 2023, 48(1): 204-209. [WANG Y, DU Y T, XUE W Y, et al. Mechanism of natural plant-derived antioxidants and their application in food preservation[J]. *China Condiment*, 2023, 48(1): 204-209.]

[8] ZHAO R, BEN A L, WEI M X, et al. Essential oil obtained from *Thlaspi arvense* L. leaves and seeds using microwave-assisted hydrodistillation and extraction in situ by vegetable oil and its antifungal activity against *Penicillium expansum*[J]. *LWT*, 2022, 165: 113718.

[9] 张娜, 关文强, 阎瑞香. 芥末精油对芒果采后病原真菌抑制效果和保鲜效应的研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(3): 349-353. [ZHANG N, GUAN W Q, YAN R X. Effects of mustard essential oil on postharvest pathogens and quality of mango[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(3): 349-353.]

[10] 李奕星, 李芬芳, 陈娇, 等. 3 种植物精油对采后红毛丹的保鲜作用[J]. *热带作物学报*, 2018, 39(1): 168-173. [LI Y X, LI F F, CHEN J, et al. Preservation effects of three essential oils on postharvest rambutan (*Nephelium lappaceum* linn.) fruit[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2018, 39(1): 168-173.]

[11] ELENA A G A, ENRIQUE P, AURELIO M L. Response of *Aspergillus niger* inoculated on tomatoes exposed to vapor phase mustard essential oil for short or long periods and sensory evaluation of treated tomatoes[J]. *Journal of Food Quality*, 2017, 2017: 1-7.

[12] 赵亚珠, 刘光发, 魏娜, 等. 基于植物精油的抗菌活性包装在食品保鲜中的研究进展[J]. *包装工程*, 2023, 44(11): 55-63. [ZHAO Y Z, LIU G F, WEI N, et al. A review of antimicrobial active packaging based on plant essential oils and its application in food preservation[J]. *Packaging Engineering*, 2023, 44(11): 55-63.]

[13] TARSILA A R, PATRÍCIA B C, ALLAN M E F R, et al. Natural bioactives in perspective: The future of active packaging based on essential oils and plant extracts themselves and those complexed by cyclodextrins[J]. *Food Research International*, 2022, 156: 111160.

[14] 林媛, 林莹, 蔡婷. 山苍子精油结合 1-MCP 处理对杨桃的保鲜效果[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(7): 150-156. [LIN Y, LIN Y, CAI T. Preservation effects of *Litsea cubeba* essential oil combined with 1-MCP treatment on *Averrhoa carambola* fruits[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2020, 36(7): 150-156.]

[15] 蔡路昀, 吕艳芳, 李学鹏, 等. 复合生物保鲜技术及其在生鲜食品中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(10): 380-384. [CAI L Y, LÜ Y F, LI X P, et al. Research progress in application of complex biological preservation technology in the fresh food[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(10): 380-384.]

- [16] 李文旭, 李境艺, 侯思羽, 等. 不同复合保鲜技术对香菇贮藏品质的影响[J]. *现代农业研究*, 2023, 29(1): 91-93. [LI W X, LI J Y, HOU S Y, et al. Effects of different compound preservation techniques on storage quality of *Lentinus edodes*[J]. *Modern Agriculture Research*, 2023, 29(1): 91-93.]
- [17] 陆滢, 管维良, 陈山乔, 等. 马尾松-虎耳草复合精油保鲜处理对阳光玫瑰葡萄贮藏期内品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(3): 346-355. [LU Y, GUAN W L, CHEN S Q, et al. Effects of *Pinus masoniana* and *Saxifraga stolonifera* (L.) Meerb. essential oils preservative treatment on the storage quality of shine muscat grapes[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(3): 346-355.]
- [18] 闫凯亚, 何叶子, 张敏. 包装方式对西兰花物流保鲜品质的影响[J]. *食品与机械*, 2016, 32(4): 155-159. [YAN K Y, HE Y Z, ZHANG M. Effects of packing ways on logistics preservation quality of broccoli[J]. *Food and Machinery*, 2016, 32(4): 155-159.]
- [19] 林本芳. 生物保鲜剂对西兰花贮藏生理及保鲜效果的研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2013. [LIN B F. Effect of biological fresh keeping agents on the storage physiology and quality of broccolis[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2013.]
- [20] 韩颖, 安容慧, 孙莹, 等. 微酸性电解水对采后西兰花贮藏品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(5): 338-346. [HAN Y, AN R H, SUN Y, et al. Effect of slightly acidic electrolyzed water on the storage quality of postharvest broccoli[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(5): 338-346.]
- [21] 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, 2013. [CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2013.]
- [22] 袁定帅, 陈洁, 赖晓芳, 等. 不同贮藏条件对西兰花感官品质及抗氧化物质的影响[J]. *食品科技*, 2017, 42(4): 40-45. [YUAN D S, CHEN J, LAI X F, et al. Effects of different storage conditions on sensory quality and antioxidants of broccoli[J]. *Food Science and Technology*, 2017, 42(4): 40-45.]
- [23] LIN W Y, LIU Y P, DI J B, et al. Effects of 1-MCP treatment on physiology and storage quality of root mustard at ambient temperature[J]. *Foods*, 2022, 11(19): 2978-2978.
- [24] YADAV V T, ZORA S, NANDAR P K. 1H-cyclopropabenzene and 1H-cyclopropa[b]naphthalene fumigation downregulates ethylene production and maintains fruit quality of controlled atmosphere stored 'Granny Smith' apple[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 176: 111499.
- [25] PENG C, ZHAO S, ZHANG J, et al. Chemical composition, antimicrobial property and microencapsulation of Mustard (*Sinapis alba*) seed essential oil by complex coacervation[J]. *Food Chemistry*, 2014, 165: 560-568.
- [26] YANG Z M, GUAN C, ZHOU C P, et al. Amphiphilic chitosan/carboxymethyl gellan gum composite films enriched with mustard essential oil for mango preservation[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 300: 120290-120290.
- [27] 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.
- [28] 刘凤. 玉米杂交种叶片抗脱水能力及生理生化特性研究[J]. *种子科技*, 2022, 40(2): 46-48. [LIU F. Leaf leaf dehydration resistance and physiological and biochemical properties of maize hybrids[J]. *Seed Technology*, 2022, 40(2): 46-48.]
- [29] 王梦如, 乔海颜, 柯梦雨, 等. 植物源精油的抑菌机制及其在食品保鲜包装中的应用进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(7): 439-444. [WANG M R, QIAO H Y, KE M Y, et al. The antibacterial mechanism of plant-derived essential oils and its application in food preservation packaging[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(7): 439-444.]
- [30] TOSETTI R, WATERS A, CHOPE G A, et al. New insights into the effects of ethylene on ABA catabolism, sweetening and dormancy in stored potato tubers[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 173: 111420.
- [31] 陈曦冉, 张鹏, 贾晓昱, 等. 1-MCP 处理维持软枣猕猴桃活性氧的代谢平衡[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(4): 83-91. [CHEN X R, ZHANG P, JIA X Y, et al. Reactive oxygen metabolism balance in *Actinidia arguta* by 1-MCP treatments[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2022, 38(4): 83-91.]
- [32] 谭芸秀, 李丽, 李永才, 等. 壳聚糖和褪黑素复合涂膜处理对鲜切西兰花品质及叶绿素变化的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(21): 184-192. [TAN Y X, LI L, LI Y C, et al. Effect of chitosan and melatonin compound coating treatment on the quality and chlorophyll change of fresh cut broccoli[J]. *Food Science*, 2023, 44(21): 184-192.]
- [33] XIE Y T, ZHANG F, GUO F Z, et al. Postharvest application of 1-methylcyclopropene delays chloroplast degradation in *Gynura bicolor* DC under sugar scarcity conditions[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 305: 111342.
- [34] 龚宁富, 曹蒙, 苑运芝, 等. 葫芦巴叶挥发性提取物成分分析及对奶白菜的保鲜效果研究[J]. *食品科技*, 2022, 47(8): 194-200. [GONG S F, CAO M, YUAN Y Z, et al. Analysis of volatile extracts from fenugreek leaves and study on preservation effect of milk Chinese cabbage[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(8): 194-200.]
- [35] CHEN W D, LIU H, CHAI Y H, et al. Chitosan-pullulan films enriched with *Artemisia annua* essential oil: Characterization and application in grape preservation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 243: 125216-125216.
- [36] 唐仁勇, 刘孙鹏, 彭家宣, 等. 不同柑橘精油对低温贮藏芦笋的保鲜效果[J]. *中国食品添加剂*, 2021, 32(9): 1-6. [TANG R Y, LIU S P, PENG J X, et al. Effect of different citrus essential oils on asparagus storage at low temperature[J]. *China Food Additives*, 2021, 32(9): 1-6.]
- [37] LI X Y, XIONG T T, ZHU Q, et al. Combination of 1-MCP and modified atmosphere packaging (MAP) maintains banana fruit quality under high temperature storage by improving antioxidant system and cell wall structure[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 198: 112265.
- [38] JIN P C, FU J, DU W W, et al. Effects of 1-MCP on storage quality and enzyme activity of petals of edible rose cultivar 'Dianhong' at low temperatures[J]. *Horticulturae*, 2022, 8(10): 954.
- [39] 张悦, 李安, 潘立刚, 等. 1-甲基环丙烯结合植酸处理对菠菜保鲜效果的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(1): 231-238. [ZHANG Y, LI A, PAN L G. Effects of combined treatment with 1-methylcyclopropene and phytic acid on quality preservation of spinach[J]. *Food Science*, 2023, 44(1): 231-238.]
- [40] POTT D M, OSORIO S, VALLARINO J G. From central to specialized metabolism: An overview of some secondary compounds derived from the primary metabolism for their role in conferring nutritional and organoleptic characteristics to fruit[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 835.
- [41] 刘琳, 李珊珊, 袁仁文, 等. 芥菜主要化学成分及生物活性研

- 究进展[J]. 北方园艺, 2018, 414(15): 180–185. [LIU L, LI S S, YUAN R W. A review of main chemical composition and biological activities of *Brassica juncea* (L.) Czern & Coss[J]. Northern Horticulture, 2018, 414(15): 180–185.]
- [42] 李宁, 关文强, 阎瑞香. 丁香精油对冷藏冬枣果实腐烂及诱导抗病相关酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2012, 32(2): 324–329. [LI N, GUAN W Q, YAN R X. Inhibition of postharvest decay in relation to induced disease resistance of Dongzao jujube fruit treated with clove oil during cold storage and shelf period[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, 32(2): 324–329.]
- [43] 张金磊, 陈兴煌. 明胶柑橘精油复合膜对草莓保鲜效果的影响[J]. 农产品加工, 2021, 537(19): 5. [ZHANG J L, CHEN X H. Effect of gelatin and citrus essential oil composite film on strawberry preservation[J]. *Farm Products Processing*, 2021, 537(19): 5.]
- [44] 陈迪新, 邓元平, 李小静, 等. 茶叶水提取物对草莓保鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(2): 310–315. [CHEN D X, DENG Y P, LI X J, et al. Effects of tea water extracts on quality maintenance of strawberry[J]. *Food Science*, 2014, 35(2): 310–315.]
- [45] 安容慧, 陈皖豫, 胡花丽, 等. 1-甲基环丙烯对娃娃菜贮藏品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(20): 194–203. [AN R H, CHEN W Y, HU H L, et al. Effects of 1-methylcyclopropene on the storage quality and antioxidant properties of baby cabbage[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(20): 194–203.]
- [46] 曾小峰, 商桑, 陈爽, 等. 杀菌方式对血橙汁贮藏过程品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(21): 161–166. [ZENG X F, SHANG S, CHEN S. Effect of sterilization methods on quality and antioxidant activity of blood orange juice during storage[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(21): 161–166.]
- [47] 温朋飞, 彭艳. 植物精油抗氧化作用机制研究进展[J]. 饲料工业, 2017, 38(2): 40–45. [WEN P F, PENG Y. Progress on the mechanism of antioxidant action of plant essential oils[J]. *Feed Industry*, 2017, 38(2): 40–45.]
- [48] 戴希爽, 张忠, 毕阳, 等. 沙枣胶/枯茗醛复合涂膜对番茄采后红粉病的抑制作用及机制[J]. 食品科学, 2022, 43(23): 187–193. [DAI X S, ZHANG Z, BI Y, et al. Inhibitory effect and mechanism of composite coating containing oleaster gum and cuminal on postharvest pink mold rot of tomatoes[J]. *Food Science*, 2022, 43(23): 187–193.]
- [49] SÁNCHEZ-VEGA R, RODRÍGUEZ-ROQUE J M, ELEZ-MARTÍNEZ P, et al. Impact of critical high-intensity pulsed electric field processing parameters on oxidative enzymes and color of broccoli juice[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(3): e14362.
- [50] 孙宇, 张雨涵, 徐皖君, 等. 蓝靛果微波泡沫干燥过程中维生素 C 降解过程模拟[J]. 食品工业科技, 2022, 43(5): 79–86. [SUN Y, ZHANG Y H, XU W J. Simulation of vitamin C degradation during microwave assisted foam-mat drying process[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(5): 79–86.]
- [51] 潘永梅. 植物精油对枇杷果实常温保鲜的效果及其机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013. [PAN Y M. Effect of plant essential oil on loquat fruit preservation and its mechanism[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.]
- [52] 刘玉蕊, 王庆国, 闫晓菲, 等. 1-甲基环丙烯处理对花椰菜贮藏品质的影响[J]. 食品科技, 2022, 47(3): 49–56. [LIU Y H, WANG Q G, YAN X F, et al. Effect of 1-MCP treatment on the storage quality of cauliflower[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(3): 49–56.]
- [53] AKRAM A N, HAFEEZ N, FARID-UL-HAQ M, et al. Foliage application and seed priming with nitric oxide causes mitigation of salinity-induced metabolic adversaries in broccoli (*Brassica oleracea* L.) plants[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2020, 42(10): 1–9.
- [54] 刘芳, 赵金红, 朱明慧, 等. 多酚氧化酶结构及褐变机理研究进展[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(6): 113–119. [LIU F, ZHAO J H, ZHU M H, et al. Advances in research of the structure and browning mechanism of polyphenol oxidase[J]. *Food Research and Development*, 2015, 36(6): 113–119.]
- [55] CHENG Y D, LIU L Q, FENG Y X, et al. Effects of 1-MCP on fruit quality and core browning in ‘Yali’ pear during cold storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 243: 350–356.
- [56] 白宇皓, 李超, 杨志国, 等. 梨多酚氧化酶特性与酶促褐变抑制研究进展[J]. 食品科技, 2022, 47(2): 75–81. [BAI Y H, LI C, YANG Z G, et al. Advances in polyphenol oxidase properties and enzymatic browning inhibition of pear[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(2): 75–81.]
- [57] 张二芳, 唐福临, 邵雅馨, 等. 1-MCP 及乙烯吸收剂对水蜜桃采后生理及贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(23): 20–25. [ZHANG E F, TANG F L, SHAO Y X, et al. Effect of 1-MCP and ethylene absorbent on the physiology and storage quality of honey peach fruit after harvest[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(23): 20–25.]
- [58] 石俊杰. 百里香精油微乳的制备及结合 1-MCP 在枇杷保鲜中应用[D]. 天津: 天津商业大学, 2022. [SHI J J. Preparation of thyme essential oil microemulsion and combining 1-MCP in loquat preservation[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2022.]