



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

《天津科技大学学报》网络首发论文

题目: 1-MCP 熏蒸对采后韭菜常温贮藏下护绿效果的影响
作者: 王鑫喆, 高菲, 江祉昕, 寇润蕾, 刘霞
DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20250156
收稿日期: 2025-10-17
网络首发日期: 2026-09-03
引用格式: 王鑫喆, 高菲, 江祉昕, 寇润蕾, 刘霞. 1-MCP 熏蒸对采后韭菜常温贮藏下护绿效果的影响[J/OL]. 天津科技大学学报.
<https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20250156>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20250156

1-MCP 熏蒸对采后韭菜常温贮藏下护绿效果的影响

王鑫喆¹, 高 菲¹, 江祉昕¹, 寇润蕾¹, 刘 霞^{1,2}

(1. 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457; 2. 天津鲜食原品生物科技有限公司, 天津 300450)

摘 要: 韭菜作为一种营养与药用价值兼具的石蒜科多年生草本植物, 其采后的贮藏期短、易腐烂变质的问题制约了产业发展, 韭菜采后易因叶绿素降解导致黄化劣变, 严重影响商品价值。本研究以新鲜韭菜为材料, 研究不同浓度 1-甲基环丙烯 (1-MCP) 熏蒸处理对常温贮藏下护绿效果的影响及其相关机制。分析感官品质、叶绿素含量等护绿效果的核心指标, 结合失重率、维生素 C、呼吸强度、抗氧化酶活性及膜脂过氧化指标的变化, 结果表明: 1-MCP 熏蒸处理可显著延缓叶绿素降解, 其中 5 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 熏蒸效果最优, 贮藏 6 d 时叶绿素含量较对照组高 18.06%, 且能维持良好的绿色外观。1-MCP 通过阻断乙烯受体, 抑制叶绿素降解关键酶活性, 增强过氧化氢酶、过氧化物酶等抗氧化酶功能, 减少膜脂过氧化, 从而保护叶绿体结构完整性。本研究为韭菜采后护绿保鲜提供了理论依据与技术参数。

关键词: 韭菜; 1-甲基环丙烯 (1-MCP) 熏蒸; 常温贮藏; 护绿效果

中图分类号: TS255.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510 (0000)00-0000-00

1-MCP Fumigation on the Green Protection Effect of Postharvest

Chinese Chives Stored at Room Temperature

WANG Xinzhe¹, GAO Fei¹, JIANG Zhixin¹, KOU Runlei¹, LIU Xia^{1,2}

(1. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;

2. Tianjin Fresh Food Original Biological Technology Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: As a perennial herb of the Amaryllidaceae family, Chinese chives possesses notable nutritional and medicinal value. However, its postharvest development is constrained by a short storage life, susceptibility to decay, and rapid quality deterioration. After harvest, Chinese chives are prone to yellowing due to chlorophyll degradation, which significantly compromises their commercial appeal. This study investigated the effects of fumigation with different concentrations of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on the green color preservation and related physiological mechanisms in fresh Chinese chives stored at room temperature. By evaluating key indicators such as sensory quality, chlorophyll content, weight loss rate, vitamin C levels, respiration rate, antioxidant enzyme activities, and membrane lipid peroxidation, the results demonstrated that 1-MCP fumigation significantly delayed chlorophyll degradation. The most effective concentration was 5 $\mu\text{L/L}$, which maintained chlorophyll content 18.06% higher than the control after 6 days of storage while preserving a desirable green appearance. The mechanism likely involves 1-MCP blocking ethylene receptors, thereby inhibiting the activity of chlorophyll-degrading enzymes, enhancing the activities of antioxidant

收稿日期: 2025-10-17; 修回日期: 2026-02-02

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFD2100800)

作者简介: 王鑫喆(1999—), 男, 天津人, 硕士研究生; 通信作者: 刘 霞, 教授, liuxia831930@163.com

enzymes such as catalase and peroxidase, reducing membrane lipid peroxidation, and helping to maintain chloroplast structural integrity. This study provides a theoretical basis and practical technical parameters for postharvest green preservation and quality maintenance in Chinese chives.

Key words: Chinese chives; 1-methylcyclopropene (1-MCP) fumigation; store at room temperature; green protection effect

韭菜别称丰本、草钟乳等，为石蒜科多年生宿根草本植物，其营养丰富，富含维生素 C、维生素 B₁、维生素 B₂、烟酸、类胡萝卜素、多种碳水化合物及矿质元素。韭菜的纤维素含量显著高于大葱和芹菜，所含的不溶性纤维素能有效促进肠道蠕动，降低大肠癌风险^[1]。然而，韭菜受生长特性、地域性栽培模式以及采后高含水量、表皮组织发育不完全等因素影响，在采后贮运过程中极易发生劣变，主要表现为失水萎蔫、腐烂变质、早衰黄化等现象，严重损害其色泽、质地、风味及口感等商品品质。

1-甲基环丙烯 (1-methylcyclopropene, 1-MCP) 是新型乙烯受体抑制剂，具有结构简单、化学性质稳定且无毒的特点。近年来，1-MCP 的保鲜效果显著、应用范围广及操作简便，在果蔬采后保鲜领域广泛应用^{[2]-[3]}。采后果蔬贮藏期生理代谢旺盛，既消耗内源营养，又释放大量的乙烯，而乙烯积累会提升呼吸强度、加速成熟衰老。1-MCP 可通过不可逆结合乙烯受体位点，有效阻断乙烯生物合成途径，抑制贮藏期劣变相关生理生化反应，维持品质并延长货架期^[4]。相较于传统低浓度长时熏蒸，短时高浓度 1-MCP 能快速饱和果蔬内外乙烯受体，缩短处理时长以减少果蔬代谢损耗，且温湿度波动时仍保持稳定作用，对乙烯高释放果蔬的保鲜效果更突出。目前，适宜浓度的 1-MCP 处理已在蓝莓、菠萝^{[5][6]}等多种果蔬保鲜中成功应用。

本研究通过实验探究不同浓度的 1-甲基环丙烯 (1-MCP) 对韭菜叶片常温贮藏下的感官及营养品质的影响，确定最适宜的 1-MCP 浓度，揭示其对韭菜叶片储存过程中护绿效果的作用规律，旨在为延长韭菜的货架期提供科学依据及技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用韭菜为平韭 2 号，叶片宽大肥厚、叶色深绿，购买于天津金元宝滨海农产品交易市场。

挑选长短均匀、颜色相近、无病虫害、无机械损伤的新鲜整株韭菜为实验材料。

1.2 实验方法

将韭菜整株随机分为 5 组，每组 1 kg，分别装入筐中，对照组 (CK 组) 不进行任何处理，其余 4 组分别在 1.0、3.0、5.0、7.0 μL/L 1-MCP 条件下密闭熏蒸处理 12 h，每组均设置 3 组平行。各处理组熏蒸完毕通风 1 h 后，放入带打孔聚乙烯袋中，室温 (20±2) °C、90% 相对湿度 (RH) 贮藏，每天取样一次，测定韭菜品质变化。

1.3 指标测定方法

1.3.1 感官评价

参考 Li 等^[7]的方法，并针对韭菜的具体品质特性进行优化。由 10 名经过培训的参评人员对每个样品分别从色泽、气味等方面进行评价，具体评分细则见表 1。

表 1 韭菜的感官评价细则

Tab. 1 Sensory evaluation criteria for Chinese chives

项目	评分标准	分值
色泽 (基于 RHS 植 物比色卡)	鲜绿色(接近 RHS 141A-B)	17~20
	淡绿色(接近 RHS 141C-D)	13~16
	黄绿色(接近 RHS 144A-B)	9~12
	褐绿色(接近 RHS 146A-B)	5~8
	褐色/深黄褐色(接近 RHS 165A-B 或更深)	0~4
干缩程度	饱满	17~20
	轻微萎蔫	13~16
	萎蔫较严重	9~12
	萎蔫严重	5~8
	完全萎蔫	0~4
光泽度	光亮	17~20
	略微暗淡	13~16
	暗淡	9~12
	大部分暗淡	5~8
	完全暗淡	0~4
气味	自身气味	17~20
	自身气味较淡	13~16
	稍有异味	9~12
	异味严重	5~8

	异味和腐败味	0~4
	叶片完全完整	17~20
	叶片基本完整, 叶尖或边缘偶见轻微干枯或小裂口	13~16
完整性	叶片存在部分断裂或小面积破损	9~12
	叶片有明显破损、撕裂或断裂	5~8
	叶片严重破碎、断裂或缺失	0~4

注: 各项评分取值为 0~20 之间的任意整数。

为确保感官评价结果的一致性与可靠性, 对 10 名评价员对在贮藏期间所有处理组韭菜样品的评分进行评估者间信度分析。采用 Kendall 和谱系数 (Kendall's W) 对全体评价员的评分进行检验。计算得所有样品感官评分的 Kendall 和谱系数为 0.82, 且达到极显著水平 ($P<0.01$), 表明 10 位评价员的评分具有高度一致性, 感官评价结果可信度良好。

1.3.2 叶绿素含量的测定

采用紫外-可见分光光度计方法^{[8][9]}测定韭菜中的叶绿素含量。

1.3.3 失重率、维生素 C 含量、可溶性固形物含量与呼吸强度的测定

采用称重法测定韭菜失重率^[10]。

采用 2,6-二氯酚法^[11]测定维生素 C 含量。滴定量确定后, 称取 5 g 样品于研钵中, 加入 5 mL 偏磷酸, 在冰上研磨至匀浆, 准确称取 2 g 匀浆样品置于烧杯中, 用偏磷酸定容至 50 mL, 过滤, 准确吸取 10 mL 滤液放入锥形瓶中, 用标定过的 2,6-二氯酚酚溶液滴定, 直至溶液呈现粉红色 15 s 不褪色, 同时进行空白实验。

参考 Voon 等^[12]的方法通过便携式 PAL-1 型手持折光仪测定可溶性固形物含量。

采用 GXH-3051H 型果蔬呼吸测定仪测定韭菜的呼吸强度 ($\text{mg}/(\text{kg h})$)^[13]。

1.3.4 丙二醛含量与相对电导率的测定

参考王相等^[14]的方法进行测定丙二醛的含量。

$$c = 6.45 \times (A_{532} - A_{600}) - 0.56 \times A_{450} \quad (1)$$

$$X = \frac{c \times V}{V_s \times m \times 1000} \quad (2)$$

式中: A_{450} 、 A_{532} 、 A_{600} 分别为 450、532、600 nm 处吸光度; V 为样品提取液体积, mL; V_s 为测定时所需的样品提取液体积, mL; m 代表称取的样品质量, g; c 为丙二醛浓度, $\mu\text{mol/L}$; X 为丙二醛含量,

$\mu\text{mol/kg}$ 。

利用电导率仪测量电导率^[15], 相对电导率 γ 按照式 (3) 计算。

$$\gamma = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \times 100\% \quad (3)$$

式中: γ_1 和 γ_2 分别为处理后的电导率和总电导率。

1.3.5 抗氧化酶的酶活性测定

过氧化氢酶 (CAT) 的酶活性: 采用硫酸终止法测定^[16]。称取 1 g 韭菜置于研钵中, 加入 6 mL pH 7.8 的磷酸盐缓冲溶液 (PBS), 加入少量石英砂, 在冰浴上研磨成匀浆, 再加入 10 mL PBS 研磨均匀, 加入 PBS 润洗研钵转移至 50 mL 容量瓶, 5 °C 静置 10 min, 取 10 mL 样品, 4 °C、6000 r/min 离心 10 min; 上清液即为过氧化氢酶提取液, 转入小试管中保存于 4 °C 冰箱中备用; 取 2 支小试管, 分别为对照管和样品管, 在 240 nm 处以蒸馏水调零, 测定吸光度。

多酚氧化酶 (PPO) 酶活性的测定: 称取 1 g 样品, 加入 9 mL pH 7.2 磷酸缓冲液 (PBS), 匀浆, 离心, 取上清液即为酶液。采用酶联免疫试剂盒 (ELISA) 进行测定。

过氧化物酶的酶活性: 采用愈创木酚法测定^[17]。取 5 g 韭菜, 切碎, 放入研钵中; 加适量的磷酸缓冲液研磨成匀浆; 将匀浆全部转入离心管, 3000 r/min 离心 10 min, 上清液转入 25 mL 容量瓶; 沉淀用 5 mL 磷酸缓冲液再离心 2 次, 上清液转入容量瓶中, 用磷酸缓冲液定容, 低温保存至备用。反应体系: 2.9 mL 0.05 mol/L 磷酸缓冲液、1 mL 2% H_2O_2 、1 mL 0.05 mol/L 愈创木酚和 0.1 mL 酶液, 以加热煮沸 5 min 的酶液为对照; 反应体系加入酶液后, 立即在 37 °C 水浴中保温 15 min, 再迅速转入冰浴中, 加入 2 mL 20% 三氯乙酸终止反应, 5000 r/min 离心 10 min, 适当稀释, 测定 470 nm 波长处的吸光度。

1.4 数据处理

所有指标的测定均重复 3 次, 实验数据采用 SPSS 21.0 软件进行 ANOVA 分析, 利用 Excel 2010 软件进行数据整理, 并运用 Duncan 的多重范围检验法考察不同实验组之间的显著性差异。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 1-MCP 处理对韭菜在贮藏期间感官与叶绿素含量的影响

在常温条件下,不同 1-MCP 浓度熏蒸处理对韭菜贮藏期间感官品质的影响图 1 所示。随着贮藏时间的延长,韭菜的感官评分呈现下降趋势,1-MCP 处理组下降幅度显著低于 CK 组 ($P<0.05$),这可能与 1-MCP 抑制乙烯信号通路、降低呼吸与蒸腾作用有关^[18],有助于延缓韭菜外观品质的下降。相比之下,CK 组韭菜的感官评分在贮藏后期迅速下降,在第 6 d 时降至 45 分。而 1-MCP 处理组在同期保持较高评分,分别为 50、57、69 和 66 分,其中 5 $\mu\text{L/L}$

处理组的评分最高。当 1-MCP 应用到西兰花及蕨菜^{[19]-[20]}时,在储存过程中其外在品质显著提升,与本研究结果一致。

叶绿素的降解是果实衰老的直观表现。不同浓度 1-MCP 熏蒸处理对韭菜叶绿素含量的影响如图 2 所示。各处理组随着贮藏时间延长,叶绿素含量不断下降,在贮藏 5 d 时,CK 组韭菜叶片叶绿素的含量相较于处理组急剧下降,与处理组差异显著 ($P<0.05$);在贮藏 6 d 后,各处理组叶绿素含量分别为 0.80、0.81、0.85、0.84 mg/g,分别比 CK 组高 11.11%、12.5%、18.06%、16.67%。

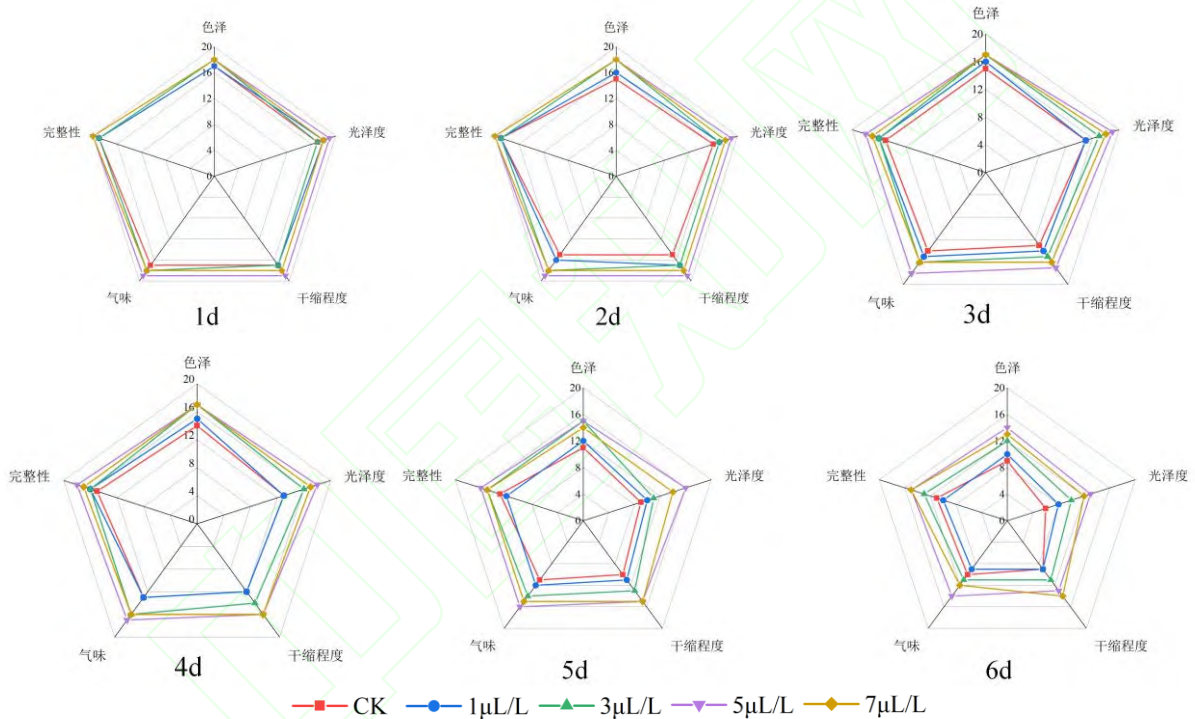
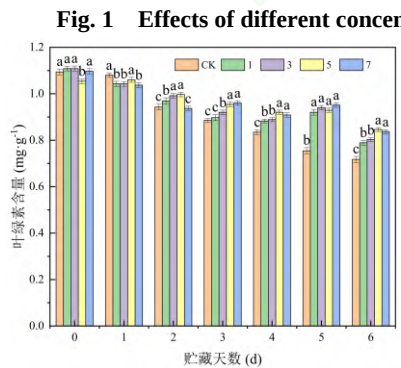


图 1 不同浓度 1-MCP 熏蒸处理对韭菜感官品质的影响



注: 平均值 $\pm$ SD, $n=3$, Duncan 法, $P<0.05$

图 2 不同浓度 1-MCP 熏蒸处理对韭菜叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effects of different concentrations of 1-MCP

Fig. 1 Effects of different concentrations of 1-MCP fumigation treatment on the sensory quality

fumigation treatment on chlorophyll content of Chinese chives

以上分析表明,1-MCP 处理可能通过调控叶绿素降解相关酶的活性,有助于延缓贮藏期间韭菜叶绿素的下降,1-MCP 处理延缓绿叶蔬菜黄化是共性现象,如在菠菜上效果显著^[6],但本研究表明,韭菜达到最佳护绿效果所需的 1-MCP 浓度高于菠菜常用浓度,这提示不同蔬菜的乙烯受体系统或组织屏障可能存在差异,导致其有效作用阈值不同。综合来看,5 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 熏蒸处理在保持韭菜色泽、延缓叶绿素降解与感官品质下降方面表现出较好效

果,贮藏6 d时叶绿素含量较对照组高18.06%,有利于延长其贮藏期。

2.2 不同浓度1-MCP处理对韭菜在贮藏期间失重率、维生素C、可溶性固形物含量与呼吸强度的影响

韭菜在贮藏期间失重率、维生素C含量、可溶性固形物含量和呼吸强度的变化如图3所示。

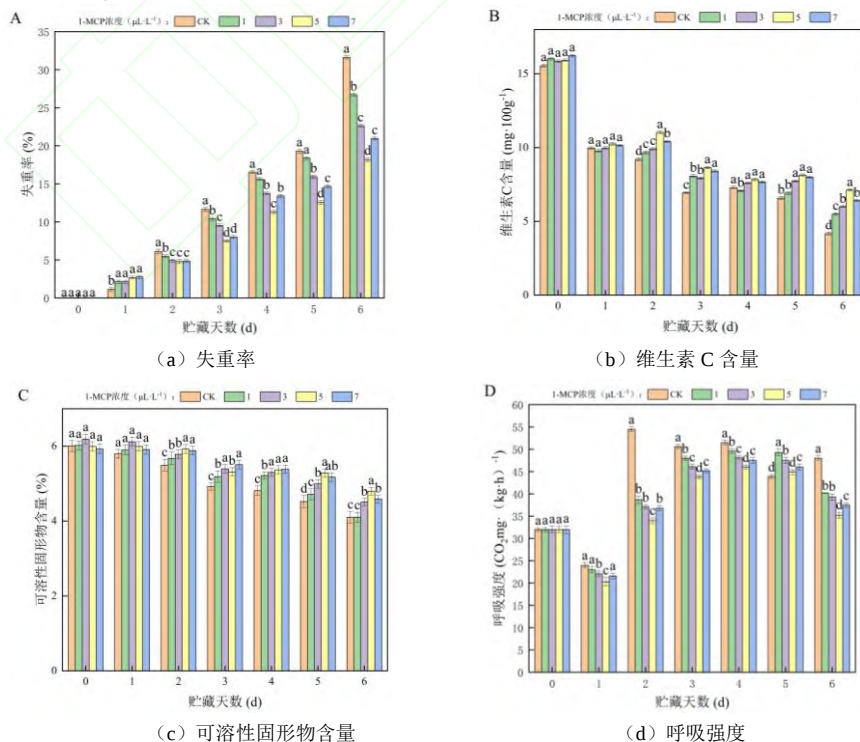
失重率是反映采后品质劣变的重要指标,其主要由组织水分通过蒸腾作用散失所导致,并与细胞膜系统完整性密切相关。由图3(a)可知,1-MCP熏蒸处理可减缓韭菜在贮藏期间失重率的上升。在贮藏终点,1.0、3.0、5.0、7.0 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP熏蒸处理组的失重率较CK组分别下降16.12%、28.84%、42.58%、33.88%。其中,5 $\mu\text{L/L}$ 处理组的失重率最低,与其他各组差异显著($P<0.05$),说明1-MCP处理有助于减少贮藏期间韭菜的水分和物质损失,且以5 $\mu\text{L/L}$ 处理的效果最为明显。

由图3(b)可知,随着贮藏时间的延长,各组维生素C含量均呈下降趋势,CK组下降的幅度最大。贮藏6 d时,CK组韭菜较初始维生素C含量下降73.41%,1-MCP熏蒸处理组分别下降65.47%、61.37%、55.03%、59.06%,5 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP处理组维生素C含量损失最少,且与CK组差异显著($P<0.05$),1.0、3.0、7.0 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP熏蒸处理组

维生素C含量分别为5.39、6.03、6.39 $\text{mg}/100\text{g}$,与CK组均呈现显著差异($P<0.05$)。这可能是由于1-MCP处理能通过影响相关代谢途径,减缓韭菜维生素C的下降,延缓整体代谢,从而维持品质。这一机制在多种非跃变型蔬菜中普遍存在,它能有效降低小白菜的呼吸与失重,并减缓油豆角中维生素C的损耗^[21],与本研究结果相似。

由图3(c)可知,韭菜在贮藏期间可溶性固形物含量均呈下降趋势。贮藏结束后,相较于初始状态,CK组可溶性固形物含量下降了31.67%,而1-MCP熏蒸处理组分别下降了31.67%、25.00%、20.00%、23.33%,除1 $\mu\text{L/L}$ 处理组,其他各组与CK组均差异显著($P<0.05$),其中5 $\mu\text{L/L}$ 熏蒸处理组效果最好。这表明1-MCP处理可通过抑制相关代谢过程,有效抑制可溶性固形物的分解^{[22][23]},保持较好的食用品质。

呼吸作用是采后果实最主要的代谢活动,其强度越高,意味着物质消耗与果实衰老速度越快。由图3(d)可知,不同浓度1-MCP熏蒸处理组的呼吸强度分别为49.43、48.23、46.52、47.3 $\text{CO}_2\text{ mg}/(\text{kg h})$,其中5 $\mu\text{L/L}$ 处理组效果最优。1-MCP处理通过竞争性阻断乙烯受体,抑制乙烯信号转导,显著降低韭菜创伤诱导的呼吸跃变强度($P<0.05$)。



注: 平均值 $\pm$ SD, $n=3$, Duncan 法, $P<0.05$

图 3 韭菜在贮藏期间失重率、维生素 C 含量、可溶性固形物含量和呼吸强度的变化

Fig. 3 Changes in weight loss rate, Vitamin C content, soluble solids content and respiratory intensity of Chinese chives during storage

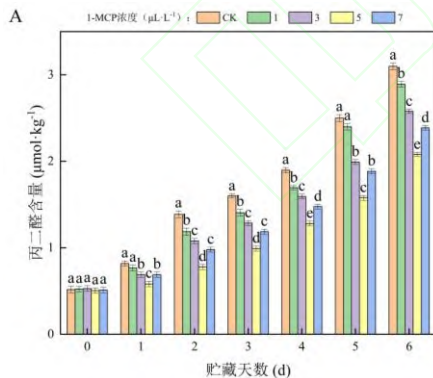
综上所述, 5 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 处理组在失重率、维生素 C 含量、可溶性固形物及呼吸强度等指标上均表现出较好效果, 表明该浓度处理能够从多个方面延缓韭菜在贮藏期间的品质下降, 实现更优的护绿效果^{[24]-[26]}。

2.3 不同浓度 1-MCP 处理对韭菜在贮藏期间丙二醛含量和相对电导率的影响

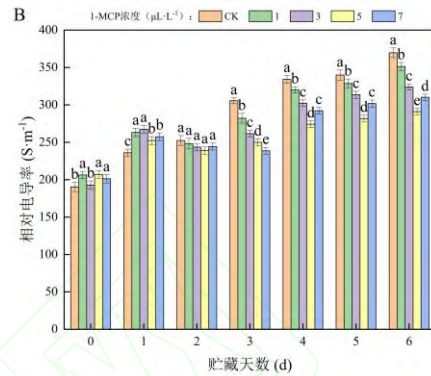
丙二醛含量和相对电导率都可以反映果实细胞膜的损伤程度, 其含量的上升会加剧果实的腐烂。韭菜在贮藏期间丙二醛含量和相对电导率的变化如图 4 所示。

由图 4 (a) 可知, MDA 含量随着时间的增加而增加, 细胞膜的通透性也随之增加。在贮藏末期, 5 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 熏蒸处理组的 MDA 含量显著低于其他处理组, 较 CK 组下降了 32.3%。

由图 4 (b) 可知, 在韭菜的贮藏过程中, 电导率与贮藏时间呈正相关关系, 贮藏结束时, 1.0、3.0、5.0、7.0 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 熏蒸处理组的电导率相较于 CK 组的 369.5 S m^{-1} 分别降低了 5.14%、12.34%、21.27%、15.85%, 其中 5 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 熏蒸处理组电导率显著低于其他处理组 ($P<0.05$)。



(a) 丙二醛含量



(b) 相对电导率

注: 平均值 $\pm$ SD, $n=3$, Duncan 法, $P<0.05$

图 4 韭菜在贮藏期间丙二醛含量和相对电导率的变化

Fig. 4 Changes in malondialdehyde content and relative electrical conductivity of Chinese chives during storage

综上所述, 1-MCP 通过显著降低韭菜贮藏期间的丙二醛含量与相对电导率, 从膜结构保护层面为护绿效果提供关键支撑, 间接推测其对叶绿体等细胞器具有保护作用。减轻膜脂过氧化是 1-MCP 发挥保鲜作用的核心生理环节, 对照组在贮藏过程中 MDA 积累和相对电导率上升较为明显, 可能与乙烯介导的氧化损伤及膜结构变化有关。本研究中膜损伤指标的降低, 与其在蔬菜上维持膜完整性的报道一致^[20]。

2.4 不同浓度 1-MCP 处理对韭菜在贮藏期间抗氧化相关酶活性的影响

韭菜在贮藏期间酶活性的变化如图 5 所示。

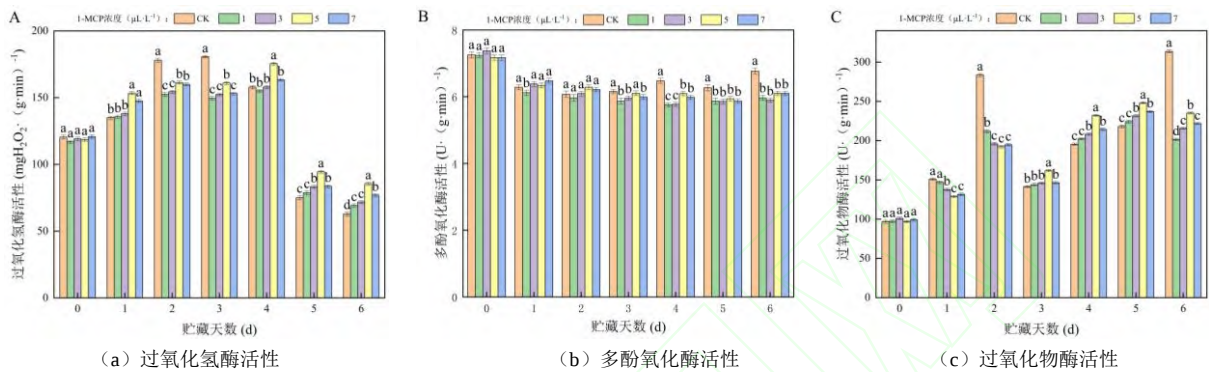
由图 5 (a) 可知, 不同浓度 1-MCP 熏蒸处理的韭菜过氧化氢酶 (CAT) 活性随着贮藏时间的延长呈现先升高后降低的趋势。贮藏 5 d 时, 各处理组韭菜的 CAT 活性出现明显下降, 这一现象可能与韭菜细胞生理代谢逐渐转向衰老阶段有关。贮藏 6 d 时, 5 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 熏蒸处理组韭菜 CAT 活性比 CK 组高 36.5%, 且显著高于其他处理组 ($P<0.05$)。

由图 5 (b) 可知, 在贮藏期间, 1-MCP 熏蒸处理对韭菜 PPO 活性的影响并不显著。从贮藏 4 d 开始, 1-MCP 熏蒸处理组的 PPO 活性均低于 CK 组; 在贮藏结束时, 1-MCP 熏蒸处理组的 PPO 活性分

别比对照组低 11.76%、13.24%、10.29%、10.29%，其中 5 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 熏蒸处理组效果最佳。这可能是因为细胞膜透性增加，导致酚类底物大量释放并与 PPO 接触^[27]，引发其活性显著跃升。

由图 5 (c) 可知，在整个贮藏过程中，韭菜过氧化物酶 (POD) 活性呈先升高后降低再缓慢升高的趋势。各 1-MCP 熏蒸处理组在贮藏 3 d 时，POD

活性开始下降，CK 组下降幅度最大，这与感官评价结果一致；贮藏 6 d 时，CK 组的 POD 酶活性显著高于 1-MCP 熏蒸处理组 ($P<0.05$)，其中 5 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 熏蒸处理组 POD 酶活性最高，说明 5 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 熏蒸处理组能够更为有效地延缓韭菜的衰老进程。



注: 平均值 $\pm$ SD, $n=3$, Duncan 法, $P<0.05$

图 5 韭菜在贮藏期间酶活性的变化

Fig. 5 Changes in enzyme activity during leeks storage

综上所述, 5 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 通过影响 CAT、POD、PPO 活性, 从多个方面维持韭菜在贮藏期间的色泽品质。该处理可能通过延缓 CAT 活性下降, 增强对过氧化氢的清除能力, 从而减轻活性氧对叶绿体结构的氧化损伤, 同时对 PPO 活性也表现出一定的调控作用。此外, 在该浓度处理下, POD 活性维持在相对较高的抗氧化水平。激活抗氧化酶系统是 1-MCP 缓解采后氧化应激的关键途径^[28], 本研究中 CAT 与 POD 的响应, 与 1-MCP 提升西兰花抗氧化能力的机制相似。然而, 不同蔬菜起主导作用的抗氧化酶类可能不同, 例如在西兰花中 SOD 的作用更突出^[19], 而在蕹菜^[20]及本研究的韭菜中, CAT 与 POD 的协同防护则更为重要。这些酶活性变化可能共同作用, 减轻了氧化损伤与褐变程度, 从而有助于延缓韭菜贮藏期间叶绿素的降解与色泽劣变。

3 结 论

本研究通过不同浓度 (1.0、3.0、5.0、7.0 $\mu\text{L/L}$) 1-MCP 熏蒸处理韭菜在常温 (20 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ 、90% RH 贮藏, 根据韭菜贮藏期间各指标的变化, 明确了 1-甲基环丙烯 (1-MCP) 处理对韭菜采后护绿效果的影响, 确定 5 $\mu\text{L/L}$ 为最优处理浓度。在该浓度下,

1-MCP 可显著抑制叶绿素降解, 维持感官绿色, 并有效调节多项生理与酶学指标: 包括抑制呼吸与乙烯释放、降低失重率与维生素 C 损失、减轻膜脂过氧化, 同时增强 CAT 与 POD 活性、抑制 PPO 活性。当 1-MCP 处理浓度超过 5 $\mu\text{L/L}$ 时, 对韭菜的护绿效果减弱, 表明存在浓度饱和和效应。

本研究确定了 5 $\mu\text{L/L}$ 为筛选范围内的最适处理浓度, 后续研究可设置更密集浓度梯度, 利用 Logistic 或二次多项式等非线性回归模型, 精确量化 1-MCP 对韭菜保鲜的剂量与效应关系, 并计算其理论最适浓度及置信区间, 为产业化应用提供更精准参数。

参考文献:

- [1] 贾丽娥, 刘升, 段小明, 等. 韭菜采后保鲜技术研究进展[J]. 保鲜与加工, 2018, 18(1): 138-141.
- [2] 范梦缘, 王世卓, 郑家轩, 等. 高浓度 CO_2 协同 1-MCP 对沙葱护绿保鲜效果的影响[J/OL]. 天津科技大学学报, 1-8[2026-03-13]. <https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20250031>.
- [3] 代理响, 何宛宸, 何洪鑫, 等. 1-MCP 协同高浓度 CO_2 短激对青皮无花果采后软化的影响[J]. 天津科技大学学报, 2024, 39(05): 31-36+80. DOI:10.13364/j.issn.1672-651

- 0.20230164.
- [4] 赵曼如, 胡文忠, 于皎雪, 等. 1-MCP 的作用机理及在采后果蔬保鲜方面的应用[C]//中国食品科学技术学会. 中国食品科学技术学会第十六届年会暨第十届中国食品业高层论坛论文摘要集. 大连: 大连民族大学生命科学院生物技术与资源利用教育部重点实验室, 2019: 506.
- [5] 赵倩, 张鹏, 贾晓昱, 等. 不同采收期对 1-MCP 处理后蓝靛果贮藏品质的影响[J]. 包装工程, 2023, 44(11): 78-86.
- [6] 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.
- [7] Li Wenxiang, Zhang Min. Effect of three-stage hypobaric storage on cell wall components, texture and cell structure of green asparagus[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(1): 112-118.
- [8] 李娇洋, 朱婧玉, 杨帆, 等. 沙葱与韭菜采后生理特性和品质变化的比较[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(4): 135-141.
- [9] Shi Junyan, Gao Lipu, Zuo Jinhua, et al. Exogenous sodium nitroprusside treatment of broccoli florets extends shelf life, enhances antioxidant enzyme activity, and inhibits chlorophyll-degradation[J]. Postharvest Biology & Technology, 2016, 116: 98-104.
- [10] Massolo J F, Concellón A, Chaves A R, et al. 1-Methylcyclopropene (1-MCP) delays senescence, maintains quality and reduces browning of non-climacteric eggplant (*Solanum melongena* L.) fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 59(1): 10-15.
- [11] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [12] Voon Y Y, Hamid N, Rusul G, et al. Volatile flavour compounds and sensory properties of minimally processed durian (*Durio zibethinus* cv. D24) fruit during storage at 4°C[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 46(1): 76-85.
- [13] Du Meijun, Liu Zitian, Zhang Xiantao, et al. Effect of pulsed controlled atmosphere with CO₂ on the quality of watercored apple during storage [J]. Scientia Horticulturae, 2021, 278: 109854.
- [14] 王相友, 闫聪聪, 刘战丽. 可食性涂膜对双孢蘑菇生理和品质的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 141-145.
- [15] 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, 2007.
- [16] 杨兰芳, 曾巧, 李海波, 等. 紫外分光光度法测定土壤过氧化氢酶活性[J]. 土壤通报, 2011, 42(1): 207-210.
- [17] 王伟华, 姜丽, 王利斌, 等. 采后 1-MCP 和乙烯利处理对茭白呼吸代谢及细胞结构的影响[J]. 现代食品科技, 2017, 33(12): 129-136.
- [18] 张鹏, 李明阳, 万文婷, 等. 喷施 1-甲基环丙烯对水培油菜品质和生理变化的影响[J]. 食品科技, 2023, 48(9): 30-37.
- [19] 国崇文. 1-MCP、生物保鲜剂结合 PE 包装对西兰花贮藏品质的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018: 20-29.
- [20] 王辉. 1-MCP 处理对蕨菜采后生理特性的影响[J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(10): 161-166.
- [21] 马永强, 石忠志. 1-MCP 处理对油豆角贮藏期间衰老及品质的影响[J]. 现代食品科技, 2006, 22(4): 8-12.
- [22] 韩志平, 陈志远, 黄蕊, 等. 1-MCP 对黄花菜贮藏保鲜效果的研究[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2012, 28(6): 49-51.
- [23] 李相阳. 1-MCP 及 CO₂ 处理对菜心采后品质及生理变化的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [24] 陈金印, 刘康. 1-甲基环丙烯(1-MCP)在果蔬贮藏保鲜上的应用研究进展[J]. 江西农业大学学报, 2008(2): 215-219.
- [25] Jiang Weibo, Sheng Qiang, Zhou Xiangjuan, et al. Regulation of coriander senescence by 1-methylcyclopropene and ethylene[J]. Postharvest Biology and Technology, 2002, 26(3): 339-345.
- [26] Ella L, Zion A, Nehemi A, et al. Effect of the ethylene action inhibitor 1-methylcyclopropene on parsley leaf senescence and ethylene biosynthesis[J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, 30(1): 67-74.
- [27] Qiao Liping, Gao Man, Zheng Jiaxuan, et al. Novel browning alleviation technology for fresh-cut products: preservation effect of the combination of *Sonchus oleraceus* L. extract and ultrasound in fresh-cut potatoes[J]. Food Chemistry, 2021, 348: 129132.
- [28] 张雯雯, 吴小华, 李一婧, 等. 气调复合 1-MCP 对萨米脱甜樱桃果实贮藏期品质的影响[J]. 甘肃农业大学

学报, 2023, 58(2): 93-100.

