

微孔气调包装结合 1-MCP、SO₂ 对月季切花保鲜效果的研究

郑艳丽¹, 王有斌², 李锦敏³, 刘菊², 张鹏¹, 雷春燕², 王利强³,
贾晓昱¹, 李江阔^{1*}

(1.天津市农业科学院农产品保鲜与加工技术研究所 国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津),
农业农村部农产品贮藏保鲜重点实验室,天津市农产品采后生理与贮藏保鲜重点实验室,
天津 300384; 2.云南建投物流有限公司,昆明 650501; 3.江南大学 机械工程学院,
江苏 无锡 214122)

摘要: 目的 探究微孔气调包装结合保鲜剂对月季切花在低温下的保鲜效果。方法 以‘卡罗拉’月季切花为对象,分别进行孔密度 20 孔气调包装处理(M20)、20 孔气调包装结合 1-甲基环丙烯(1-MCP)处理(M20+1-MCP)、20 孔气调包装结合 1-MCP 和 SO₂ 保鲜纸处理(M20+1-MCP+SO₂),在(4±0.3)℃条件下贮藏并定期测定鲜切切花感官、呼吸强度、乙烯生成速率、可溶性蛋白含量、总酚含量以及抗氧化酶活性等指标。结果 与 M20 相比,M20+1-MCP 和 M20+1-MCP+SO₂ 处理组在月季切花贮藏期间能够更好地保持感官品质,花青素、可溶性蛋白、总酚、总黄酮生化成分抑制呼吸作用和乙烯生成,减缓氧化损伤标志物丙二醛(MDA)的积累,并维持活性氧(ROS)的氧化还原平衡;在贮藏 30 d 时,M20+1-MCP+SO₂ 处理的苯丙氨酸解氨酶(PAL)、几丁质酶和 β-1,3-葡聚糖酶活性分别为 68.87、18.64 和 14.87 U/g,显著高于其他处理组,并维持较高的过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)活性;瓶插寿命与 MDA 含量、乙烯生成速率、PPO 活性呈极显著负相关($P<0.01$),POD 活性与抗病性和抗逆性相关指标呈正相关。结论 微孔气调包装结合 1-MCP 和 SO₂ 保鲜纸复合处理主要通过维持生化成分、抑制呼吸作用、保持氧化还原平衡、提高抗病能力等途径发挥协同保鲜作用。

关键词: 微孔气调; 1-MCP; SO₂ 保鲜纸; 月季切花; 贮藏保鲜

中图分类号: TB48

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)09-0132-010

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.09.015

Fresh-keeping Effect of Cut Rose Flowers by Microporous Controlled Atmosphere Packaging Combined with 1-MCP and SO₂

ZHENG Yanli¹, WANG Youbin², LI Jinmin³, LIU Ju², ZHANG Peng¹, LEI Chunyan²,
WANG Liqiang³, JIA Xiaoyu¹, LI Jiangkuo^{1*}

(1. Tianjin Key Laboratory of Postharvest Physiology and Storage of Agricultural Products, Key Laboratory of Postharvest Physiology and Storage of Agricultural Products of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Agricultural Products Preservation Engineering Technology Research Center (Tianjin), Institute of Agricultural Products Preservation and Processing Technology, Tianjin Academy of Agricultural Sciences, Tianjin 300384, China; 2. YCIH Logistics Co., Ltd., Kunming 650501, China; 3. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Jiangsu Wuxi 214122, China)

收稿日期: 2024-12-17

基金项目: 农业农村部农产品贮藏保鲜重点实验室开放基金(kt202405); 国家自然科学基金(32302179); 天津市技术开发项目(2022120005000172); 天津市农业科学院青年科研人员创新研究与实验项目(TJNKY012504)

*通信作者

ABSTRACT: The work aims to explore the effect of microporous controlled atmosphere packaging combined with preservative on the preservation of cut rose flowers at low temperature. The cut rose 'Corolla' was treated with 20-hole controlled atmosphere packaging (M20), 20-hole controlled atmosphere packaging combined with 1-methylcyclopropylene (1-MCP) (M20+1-MCP) and 20-hole controlled atmosphere packaging combined with 1-MCP and SO₂ plastic preservation paper (M20+1-MCP+SO₂). Fresh cut flowers were stored at (4±0.3) °C and their sensory, respiratory intensity, ethylene production rate, soluble protein content, total phenol content and antioxidant enzyme activity were measured regularly. Compared with M20, M20+1-MCP and M20+1-MCP+SO₂ treatment group could better maintain the sensory quality of cut flowers during storage. The biochemical components of anthocyanin, soluble protein, total phenol and total flavone inhibited respiration and ethylene production, and slowed down the accumulation of malondialdehyde (MDA), a marker of oxidative damage and maintained the REDOX balance of reactive oxygen species (ROS). After 30 days of storage, the activities of PAL, chitinase and β-1, 3-glucanase in M20+1-MCP+SO₂ treatment group were 68.87 U/g, 18.64 U/g and 14.87 U/g, respectively, which were significantly higher than those in other treatment groups and peroxidase (POD) and superoxide dismutase (SOD) activities were maintained. Bottle life was negatively correlated with MDA content, ethylene production rate and PPO activity ($P<0.01$), while POD activity was positively correlated with disease resistance and stress resistance. The combination of 1-MCP and SO₂ preservative paper with microporous controlled atmosphere packaging plays a synergistic role in preservation through maintaining biochemical components, inhibiting respiration, maintaining REDOX balance and improving disease resistance.

KEY WORDS: microporous controlled atmosphere; 1-MCP; sulphur dioxide preservation paper; cut rose flowers; storage and preservation

切花月季 (*Rosa hybrida* L.) 颜色多样、花型丰富, 已经成为全球普遍的观赏植物^[1]。但是, 切花月季采后贮运过程中极易失水、萎蔫和腐烂, 其保鲜技术亟待研究。为了更好地满足市场需求并提升经济效益, 优化切花传统纸箱包装显得尤为重要。气调包装 (Modified Atmosphere Packaging, MAP) 技术主要通过控制包装内不同的空气组分来延长产品的货架期, 该技术已被证明能够延长采后月季^[2]、石斛兰^[3]、康乃馨^[4]和郁金香^[5]等切花的贮藏寿命。近年来, 基于激光打孔的塑料薄膜 MAP 技术凭借适宜透气透湿的性能, 已被应用于园艺产品采后保鲜。Li 等^[6]研究表明, 以孔径 600 μm、孔数 20 个、7 200 cm² 的聚乙烯袋包装月季切花, 能够在贮藏 12 d 时通过呼吸作用达到稳定的气体比例, 有效保持月季切花的贮藏品质。1-MCP 作为一种有效的乙烯拮抗剂, 在切花保鲜领域 (如月季^[7]、康乃馨^[8]、百合^[9]等) 得到广泛的应用。1-MCP 与其他适宜的保鲜剂结合使用能够产生协同效应, 增强保鲜效果。Tong 等^[10]研究发现, 将 1-MCP 与微孔膜包装相结合, 可以显著减少葡萄贮藏过程中的水分流失、营养消耗, 减缓分解代谢, 有效降低氧化损伤程度。牟雪姣等^[11]研究发现, 使用 1-MCP 处理可延长月季切花的保鲜期, 其最佳浓度为 2 μL/L。

切花采后极易遭受病原真菌侵染, 每年由于采后腐烂造成的经济损失高达 15%~40%。二氧化硫 (SO₂) 保鲜纸是园艺产品防腐保鲜的重要手段, 其通过逐渐

释放 SO₂ 实现长效保鲜效果^[12]。目前, SO₂ 保鲜纸主要用于葡萄保鲜, 尚未检索到应用于月季切花防腐保鲜的相关报道。本实验采用微孔膜包装结合 1-MCP 和 SO₂ 保鲜纸 2 种处理方式, 研究其对月季切花感官品质、营养成分、呼吸强度、乙烯生成速率、抗氧化酶活性、抗病性酶活性的影响, 并探讨不同处理方式之间的差异, 为微孔膜包装在切花保鲜上的应用提供科学依据和理论支持。

1 实验

1.1 材料与仪器

‘卡罗拉’月季花采自云南省昆明市某农场, 选择花色纯正、未开放的鲜花, 将花头朝上竖直插入桶内进行蘸水保活, 蘸水深度为 10~15 cm。切花分为 2 部分: 一部分使用 2 mg/L 的 1-MCP 对切花进行 4 °C 熏蒸处理 24 h, 另一部分则不使用 1-MCP 处理。所有切花上午采收后由冷藏车运输至处理基地, 然后 4 °C 冷库预冷处理或 1-MCP 处理, 24 h 后立即通过顺丰空运至国家农产品保鲜工程技术研究中心 (天津), 并在 (4±0.3) °C 的环境下开盖预冷 24 h 后做进一步的包装处理。

主要材料: 1-MCP 便携包, 国家农产品保鲜工程技术研究中心 (天津); SO₂ 保鲜纸 (300 mm×260 mm), AgroFresh Solutions 公司; 聚乙烯袋 (线性低密度聚乙烯, LLDPE) 尺寸为 400 mm×1 100 mm,

国家农产品现代物流工程技术研究中心; 盐酸、氯化钠、冰醋酸、醋酸钠、无水乙醇、考马斯亮蓝 G-250、氢氧化钠、过氧化氢、三氯乙酸、硫代巴比妥酸、甲醇、碳酸钠、亚硝酸钠、硝酸铝、磷酸、酒石酸钾钠, 均为分析纯, 浓度为 99%, 天津市大茂化学试剂厂; Tron X-100、 β -巯基乙醇、L-苯丙氨酸、愈创木酚, 上海麦克林生化科技股份有限公司; 福林酚、 β -1,3-葡聚糖酶, 北京索莱宝科技有限公司; T-SOD 和几丁质酶试剂盒, 南京建成生物工程研究所。

主要仪器: 岛津 2010 气相色谱仪, 日本岛津公司; 722-100 可见分光光度计, 上海佑科仪器仪表有限公司; Synergy H1 多功能酶标仪, 美国伯腾仪器有限公司; Sigma 3-30K 高速冷冻离心机, 德国 Sigma 离心机有限公司; ML503/02 分析天平, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; CheckPoint II 便携式残氧仪, 丹麦 Dansensor 公司; A11 Basic 研磨机, 德国 IKA 公司。

1.2 方法

1.2.1 处理方法

实验共分为 3 个处理组。第 1 组为微孔膜包装结合 1-MCP 和 SO_2 复合处理 ($\text{M20}+1\text{-MCP}+\text{SO}_2$): 经 1-MCP 处理后的月季切花装入纸箱, 同时装入一张 SO_2 保鲜纸, 然后将纸箱放入厚度为 0.06 mm、打有 20 个 600 μm 微孔的 LLDPE 气调袋 (400 mm $\times$ 1 100 mm)。第 2 组为微孔膜包装结合 1-MCP 处理 ($\text{M20}+1\text{-MCP}$): 经 1-MCP 处理后的月季切花装入纸箱, 不装保鲜纸, 然后将纸箱放入厚度为 0.06 mm、打有 20 个 600 μm 微孔的 LLDPE 气调袋。第 3 组为微孔膜包装单独处理 (M20): 未使用 1-MCP 处理的月季切花装入纸箱, 不装保鲜纸, 然后将纸箱放入厚度为 0.06 mm、打有 20 个 600 μm 微孔的 LLDPE 气调袋。每个纸箱内装 25 枝花, 将纸箱放入气调袋, 每组处理 12 袋。以上操作全部在 (4 ± 0.3) $^{\circ}\text{C}$ 冷库内进行, 处理后各个处理组的切花在此冷库内贮藏 30 d, 每隔 6 d 随机取 2 袋样品测定有关指标 (取样后不放回), 其中 2 袋样品中的 10 枝花用于检测瓶插期表观指标, 其余 40 枝花用于测定其他理化指标。瓶插方法为取 10 枝花分别单枝插在玻璃瓶内, 每个玻璃瓶内盛有 150 mL 蒸馏水作为营养液。

1.2.2 感官指标测定方法

腐烂指数按花朵腐烂面积划分为 4 级 (表 1), 其计算见式 (1)。

$$R_{\text{ot}} = \frac{\sum (W_1 \times m_1)}{W_2 \times m_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: W_1 为腐烂等级; m_1 为腐烂等级对应的花

朵数量; W_2 为最高腐烂等级; m_2 为调查的花朵总数。

表 1 花朵腐烂指数分级标准
Tab.1 Grading standards for flower decay index

等级	标准
0 级	无腐烂
1 级	腐烂面积小于花朵面积的 10%
2 级	腐烂面积占花朵面积的 10%~30%
3 级	腐烂面积大于花朵面积的 30%

瓶插寿命以 20 $^{\circ}\text{C}$ 室温环境下, 外层花瓣萎蔫、弯颈、蓝变或出现枯斑的前一天距离瓶插之日的累计时间计算^[13], 最大花径采用十字交叉测量法测定^[14]。

1.2.3 营养指标测定方法

呼吸强度采用 Huan 等^[15]的方法, 通过便携式残氧仪测定; 乙烯生成速率采用张鹏等^[16]的方法, 通过气相色谱仪测定; 花青素含量采用 Fan 等^[17]的方法测定; 可溶性蛋白含量通过考马斯亮蓝染色法^[18]测定; 总酚含量采用洪镜芬等^[19]的福林酚比色法测定; 总黄酮含量采用赵焕兰等^[20]的方法测定。

1.2.4 酶活性指标测定方法

多酚氧化酶 (PPO) 活性采用邻苯二酚法^[21]测定; 过氧化物酶 (POD) 活性采用愈创木酚法^[20]测定; 丙二醛 (MDA) 含量采用硫代巴比妥酸法^[20]测定; 苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 活性采用比色法^[20]测定。超氧化物歧化酶 (SOD)、几丁质酶和 β -1,3-葡聚糖酶活性均采用试剂盒测定。

1.2.5 数据处理

采用 SPSS 22.0 进行单因素方差差异显著性分析, 数据通过邓肯多重比较进行分析 ($P<0.05$ 表示差异显著), 每次测试取 3 个平行重复。

2 结果与分析

2.1 复合处理对月季切花感官品质的影响

复合处理对月季切花感官评分及整体视觉质量的影响分别见表 2 和图 1, 可见月季切花在 0~30 d 的感官指标均随着贮藏时间的延长逐渐下降, 出现发黄腐烂、弯头甚至花头掉落现象。在贮藏 24 d 时, M20 和 $\text{M20}+1\text{-MCP}$ 处理组均出现严重腐烂和花头掉落的现象, $\text{M20}+1\text{-MCP}+\text{SO}_2$ 处理组的腐烂指数与 M20 和 $\text{M20}+1\text{-MCP}$ 处理组之间存在显著性差异 ($P<0.05$); 在贮藏 30 d 时, M20 处理组的腐烂指数已经达到 76.2%, 未进行后续的瓶插和理化指标实验, 结果表明, $\text{M20}+1\text{-MCP}+\text{SO}_2$ 复合处理的月季切花感官品质更优。

表 2 复合处理对月季切花感官评分
Tab.2 Sensory scoring for cut roses under combined treatments

指标	处理	冷藏时间/d					
		0	6	12	18	24	30
腐烂指数/%	M20	0±0 ^a	0±0 ^a	2.3±0.1 ^a	22.2±1.9 ^a	51.6±4.6 ^a	76.2±4.6 ^a
	M20+1-MCP	0±0 ^a	0±0 ^a	0±0 ^b	5.55±0.9 ^b	32.5±2.8 ^b	56.4±3.6 ^b
	M20+1-MCP+SO ₂	0±0 ^a	0±0 ^a	0±0 ^b	5.74±0.8 ^b	15.7±2.0 ^c	43.5±2.0 ^c
瓶插寿命/d	M20	13.6±0.8 ^a	10.8±1.0 ^a	4.00±1.3 ^c	2.80±1.0 ^c	2.40±0.8 ^b	—
	M20+1-MCP	13.0±1.1 ^a	9.80±0.6 ^a	8.20±1.5 ^b	5.80±0.6 ^b	6.80±1.0 ^a	4.40±0.8 ^b
	M20+1-MCP+SO ₂	13.0±1.1 ^a	9.80±1.5 ^a	9.80±1.1 ^a	7.40±1.0 ^a	7.60±1.3 ^a	6.80±1.4 ^a
最大花径/cm	M20	6.69±1.2 ^a	6.88±1.4 ^a	5.34±1.9 ^b	4.43±1.1 ^b	3.89±0.4 ^b	—
	M20+1-MCP	6.74±0.6 ^a	6.61±0.5 ^a	6.28±0.7 ^{ab}	6.62±1.0 ^a	5.91±0.8 ^a	5.06±0.7 ^a
	M20+1-MCP+SO ₂	6.74±0.6 ^a	6.70±1.1 ^a	7.15±1.0 ^a	6.57±0.8 ^a	5.91±0.8 ^a	5.12±0.9 ^a

注：数据为均数±标准差（SD），同一列不同字母上标表示差异显著（*P*<0.05），—表示全部腐烂，无法统计数据。

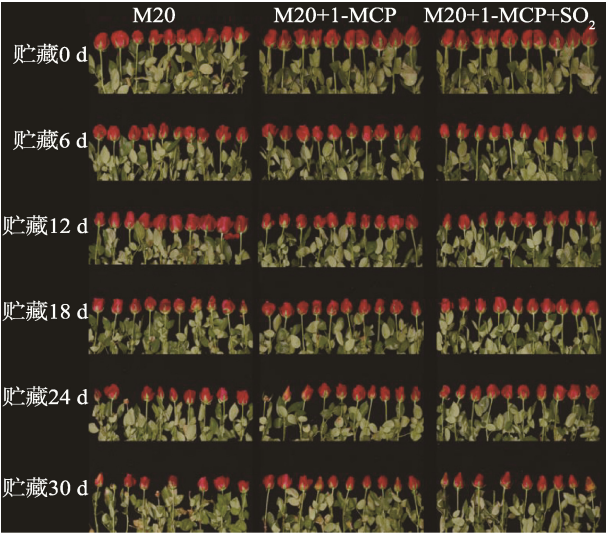


图 1 复合处理对月季切花整体视觉质量的影响
Fig.1 Effect of combined treatment on overall visual quality of cut roses

2.2 复合处理对月季切花呼吸强度和乙烯生成速率的影响

如图 2a 所示，贮藏初期各处理组的月季切花呼吸强度均有明显的下降趋势，这可能是由于低温刺激引起应激反应，导致呼吸强度降低^[22]；M20 和 M20+1-MCP 处理组分别在贮藏 12 和 24 d 达到呼吸高峰，可见使用 1-MCP 推迟了呼吸高峰，但是 M20+1-MCP+SO₂ 处理组在整个贮藏期间没有显著的呼吸高峰，说明 M20+1-MCP+SO₂ 复合处理对月季切花的呼吸作用有较好的抑制效果。乙烯生成速率呈现持续上升的趋势，如图 2b 所示，M20+1-MCP+SO₂ 处理组在贮藏前中期（0~24 d）始终保持最低水平，并且在贮藏 24 d 时明显低于另外 2 个处理组（*P*<0.05）；复合处理能够抑制月季切花中乙烯的生成，M20+1-MCP+SO₂ 复合处理组更有利于延长月季切花的贮藏期。

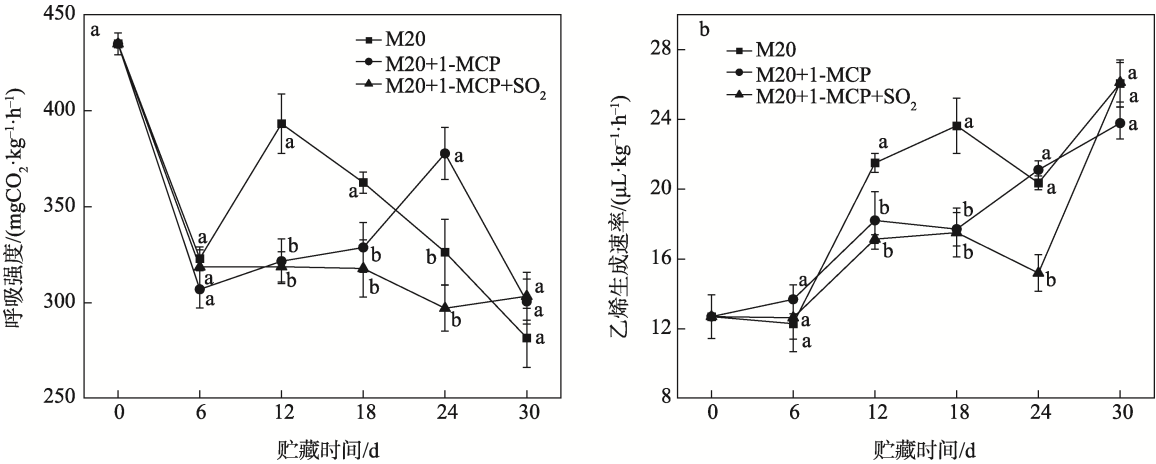


图 2 复合处理对月季切花呼吸强度（a）、乙烯生成速率（b）的影响
Fig.2 Effect of combined treatment on the respiratory intensity (a) and ethylene production rate (b) of cut roses

2.3 复合处理对月季切花营养成分的影响

如图 3a 所示, 月季切花花青素含量在贮藏期间整体呈现先上升后下降的趋势; 各处理组花青素含量均在 24 d 达到峰值, M20+1-MCP、M20+1-MCP+SO₂ 处理组的峰值花青素含量分别为 M20 处理组的 1.09、1.27 倍, 其中 M20+1-MCP+SO₂ 复合处理月季切花中的花青素含量最高。各处理组的月季切花可溶性蛋白含量在整个贮藏期间呈现下降趋势, 如图 3b 所示, 在贮藏前中期 (0~24 d), 各处理组间的可溶性蛋白含量没有显著性差异 ($P>0.05$); 在贮藏 30 d 时, M20+1-MCP+SO₂ 处理组显著高于 M20+1-MCP 和 M20 处理组, 表明 M20+1-MCP+SO₂ 复合处理能延缓可溶性蛋白的消耗。切花总酚含量整体呈现先上升后下降的趋势, 如图 3c 所示, 在贮藏的前 18 d, 各处理组总酚含量差异不显著 ($P>0.05$); 在贮藏中后期 (24~30 d), 各处理组间存在显著性差异 ($P<0.05$), 总酚含量排序为 M20+1-MCP+SO₂>M20+1-MCP>M20。3 组处理的月季切花总黄酮含量整体呈现先上升后下降的趋势, 如图 3d 所示, 在贮藏前期, 3 组处理的

总黄酮含量均呈现较为明显的上升; 在贮藏中后期 (18~30 d), M20+1-MCP+SO₂ 处理组的总黄酮含量最高, 且在贮藏 18 和 30 d 显著高于 M20+1-MCP 和 M20 处理组 ($P<0.05$)。

2.4 复合处理对月季切花 PPO、POD、SOD 活性和 MDA 含量的影响

如图 4a 所示, 随着贮藏时间的延长, 3 组处理的月季切花 PPO 活性整体呈现先上升后下降的趋势; 在贮藏后期 (24~30 d), M20 处理组的 PPO 活性显著高于 M20+1-MCP 和 M20+1-MCP+SO₂ 处理组 ($P<0.05$)。POD 活性整体呈现先上升后下降的趋势, 如图 4b 所示, 在贮藏 24~30 d 时, M20+1-MCP+SO₂ 处理组显著高于其他 2 组。SOD 活性整体呈现先上升后下降的趋势, 如图 4c 所示, 3 组处理均在贮藏 24 d 时达到峰值, M20、M20+1-MCP 和 M20+1-MCP+SO₂ 处理组的 SOD 活性分别为 245.28、262.43 和 274.62 U/g; 24 d 后, 3 组处理的 SOD 活性下降, 且 M20+1-MCP+SO₂ 处理组的 SOD 活性显著高于 M20+1-MCP 和 M20 处理组 ($P<0.05$)。3 组处理的

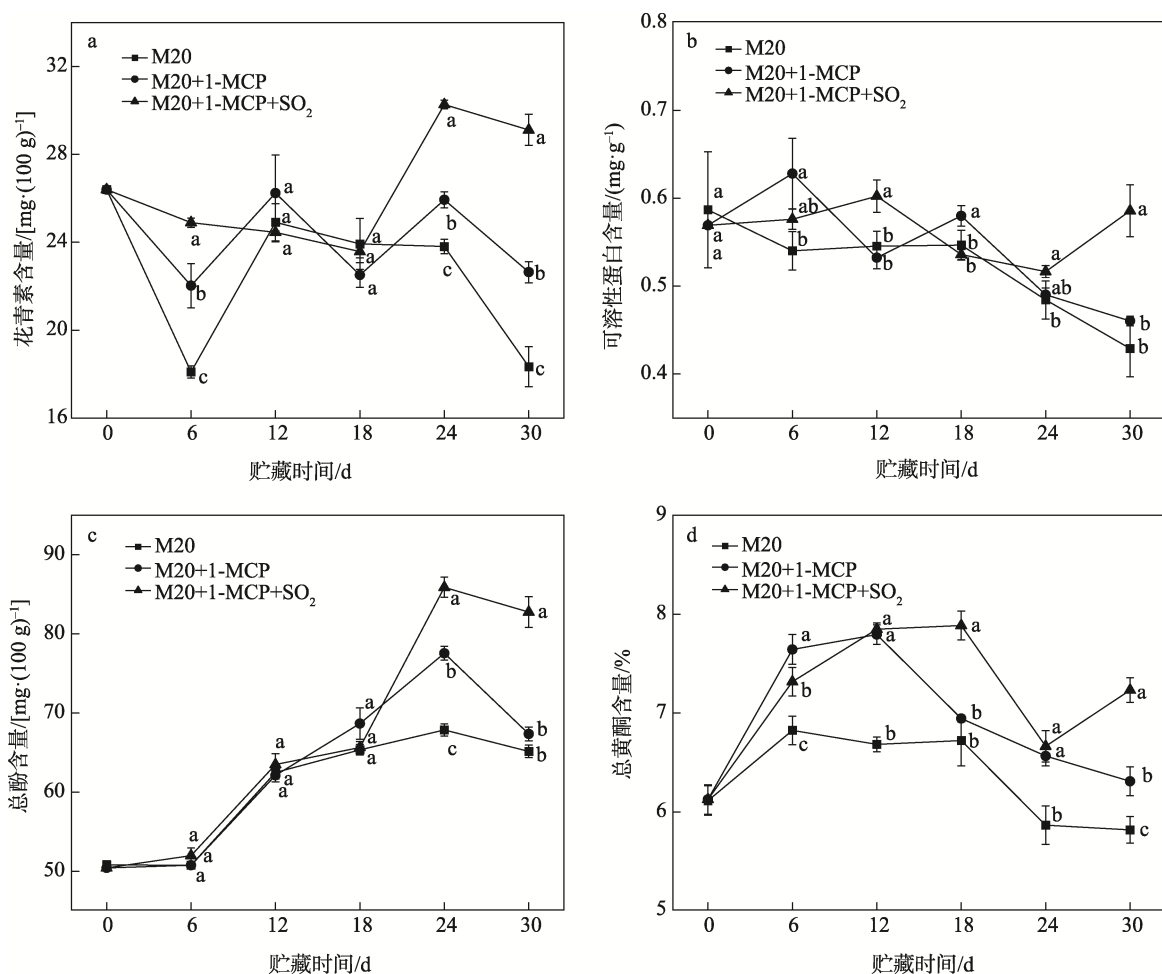


图 3 复合处理对月季切花花青素含量 (a)、可溶性蛋白含量 (b)、总酚含量 (c)、总黄酮含量 (d) 的影响
Fig.3 Effect of combined treatment on anthocyanins content (a), soluble protein content (b), total phenolic content (c), and total flavonoid content (d) in cut roses

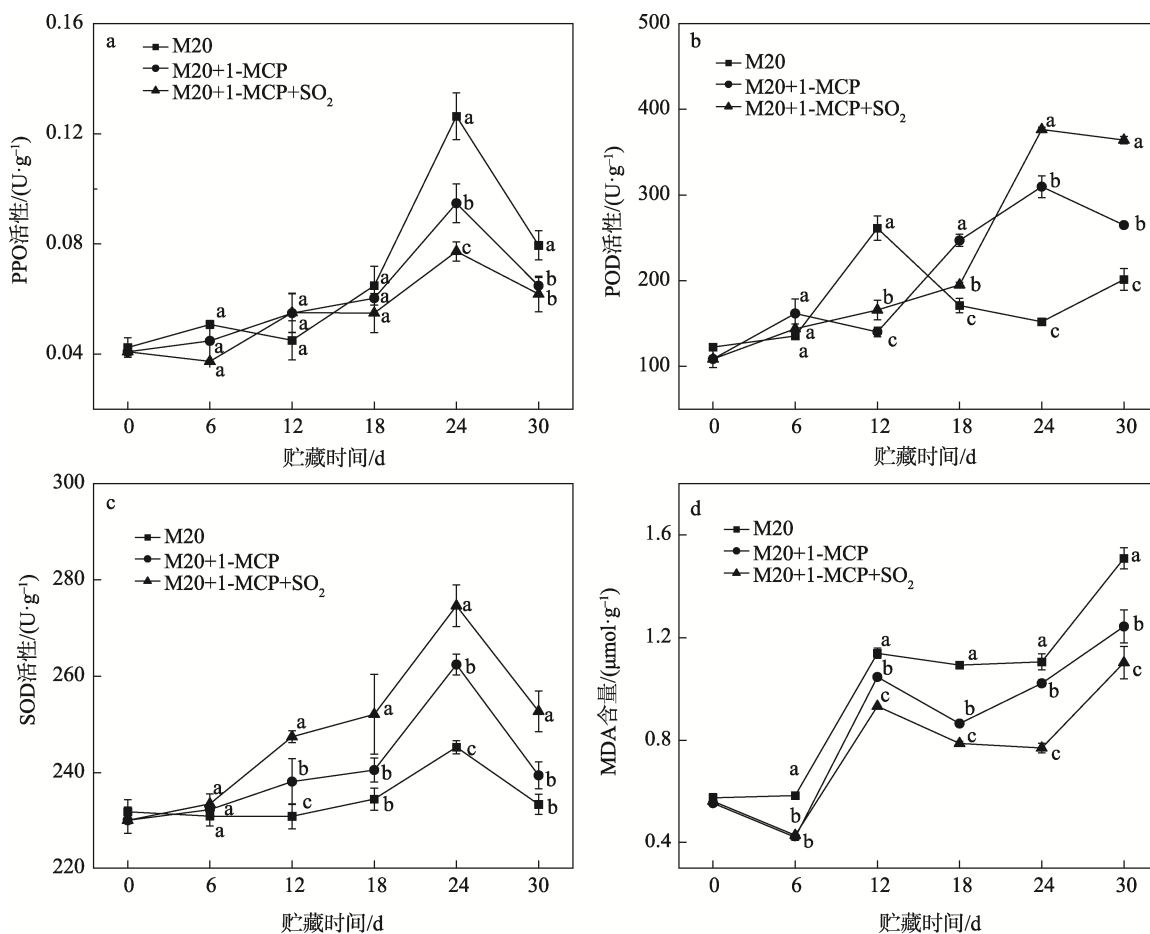


图 4 复合处理对月季切花 PPO 活性 (a)、POD 活性 (b)、SOD 活性 (c)、MDA 含量 (d) 的影响

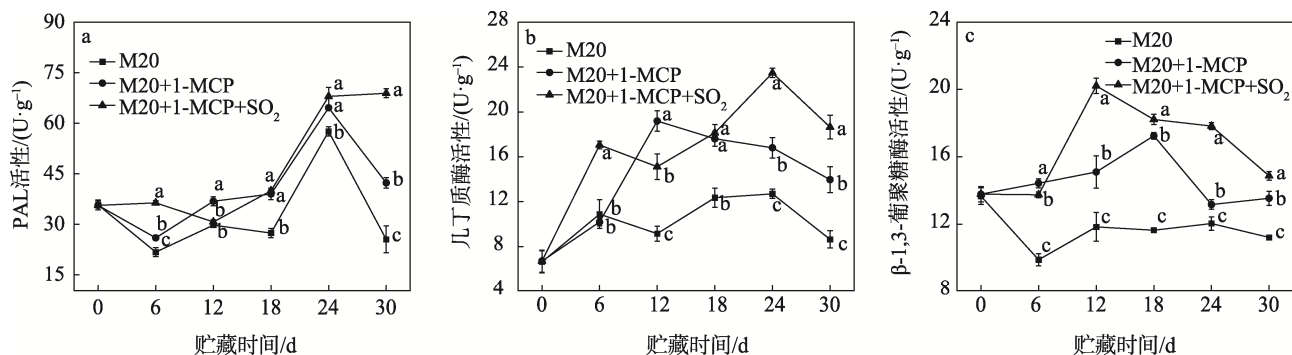
Fig.4 Effect of combined treatment on PPO activity (a), POD activity (b), SOD activity (c) and MDA content (d) in cut roses

月季切花 MDA 含量整体呈现不断上升的趋势, 如图 4d 所示, M20 处理组的 MDA 含量在整个贮藏期间始终最高, 且各处理组存在显著性差异 ($P<0.05$); 在贮藏后期, M20、M20+1-MCP 和 M20+1-MCP+SO₂ 处理组的 MDA 含量分别为 1.509、1.244 和 1.103 $\mu\text{mol/g}$, 可见 M20 处理组约为 M20+1-MCP 和 M20+1-MCP+SO₂ 处理组的 1.21 和 1.37 倍。通过上述指标分析可知, M20+1-MCP+SO₂ 处理组的月季切花在抗氧化防御能力方面表现最佳, 能够有效维持较高的 SOD 和 POD 活性, 降低 MDA 含量, 从而减少细胞膜的损伤, 提高切花的贮藏品质。

2.5 复合处理对月季切花 PAL、几丁质酶、 β -1,3-葡聚糖酶活性的影响

月季切花的抗病防御能力受到苯丙氨酸解氨酶 (PAL)、几丁质酶和 β -1,3-葡聚糖酶活性的影响^[23]。如图 5a 所示, 在整个贮藏过程中, 3 组处理的月季切花 PAL 活性整体呈现先上升后下降的趋势。在贮藏前中期 (0~18 d), 3 组处理的 PAL 活性波动较小; 在贮藏 18~24 d 时, 3 组的 PAL 活性急剧上升; 在贮藏 30 d 时, PAL 活性排序为 M20+1-MCP+SO₂>

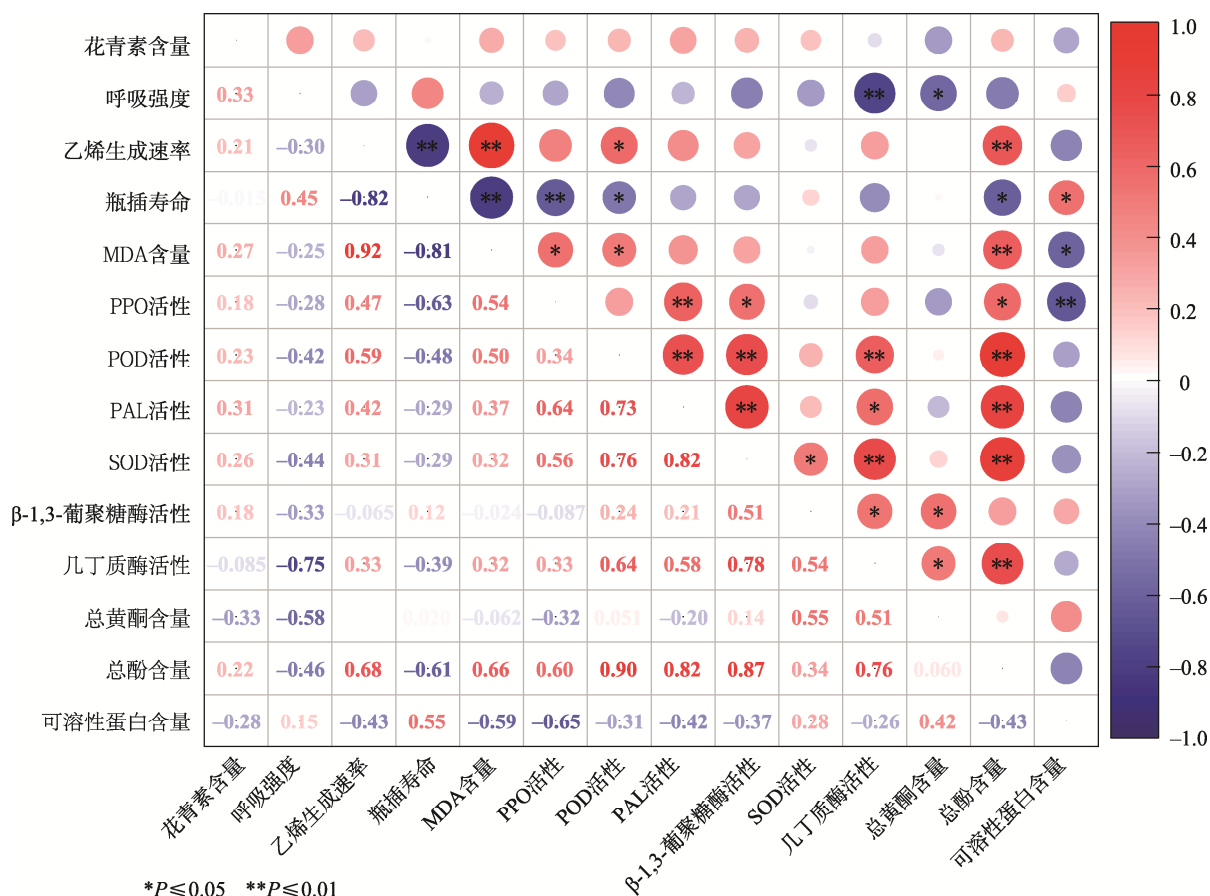
M20+1-MCP>M20, M20 和 M20+1-MCP 处理组的活性明显下降, 各处理组间存在显著性差异 ($P<0.05$)。3 组处理的月季切花几丁质酶活性整体呈现先上升后下降的趋势, 如图 5b 所示, 在贮藏中后期 (12~30 d), M20 处理组的几丁质酶活性最低, 与复合处理组存在显著性差异 ($P<0.05$); 在贮藏 24~30 d 时, 几丁质酶活性排序为 M20+1-MCP+SO₂>M20+1-MCP>M20, 且 3 组间存在显著性差异 ($P<0.05$)。 β -1,3-葡聚糖酶活性整体呈现先上升后下降的趋势, 如图 5c 所示, M20 处理组的 β -1,3-葡聚糖酶活性波动较小, M20+1-MCP 和 M20+1-MCP+SO₂ 处理组的酶活性在整个贮藏期间都显著高于 M20 处理组 ($P<0.05$), M20+1-MCP 和 M20+1-MCP+SO₂ 处理组分别在贮藏 18 和 12 d 达到峰值; 在贮藏中后期 (12~30 d), M20+1-MCP+SO₂ 处理组的酶活性显著高于 M20+1-MCP 处理组 ($P<0.05$)。经防御酶活性指标分析, M20+1-MCP+SO₂ 处理组的月季切花在贮藏过程中表现出较强的抗病防御能力, 这与其保持较高的 PAL、几丁质酶和 β -1,3-葡聚糖酶活性有关。在贮藏 30 d 时, M20+1-MCP+SO₂ 处理组的 PAL、几丁质酶和 β -1,3-葡聚糖酶活性最高, 分别为 68.87、18.64 和 14.87 U/g。

图5 复合处理对月季切花 PAL 活性 (a)、几丁质酶活性 (b)、 β -1,3-葡聚糖酶活性 (c) 的影响Fig.5 Effect of combined treatment on PAL activity (a), chitinase activity (b) and β -1,3-glucanase activity (c) of cut roses

2.6 月季切花各指标相关性分析

对贮藏期间月季切花感官指标、营养指标、抗氧化酶以及抗病酶之间的关系进行分析,结果如图6所示,可见瓶插寿命与MDA含量、乙烯生成速率、PPO活性呈极显著负相关($P<0.01$),说明随着细胞膜透性的增加、乙烯的过量生成以及PPO活性的过度增强,月季切花的瓶插寿命将显著缩短。POD、SOD、PAL、几丁质酶、 β -1,3-葡聚糖

酶活性以及总黄酮、总酚含量是月季切花抗病性和抗逆性的关键因素,严重影响切花品质。POD活性与抗病性和抗逆性指标呈现正相关性,且与PAL、SOD、几丁质酶活性以及总酚含量的相关性达到极显著的水平($P<0.01$),表明M20+1-MCP+SO₂复合处理的月季切花保持较高的POD、SOD、PAL、几丁质酶、 β -1,3-葡聚糖酶活性以及总黄酮、总酚含量,提高了月季切花的抗病性和抗逆性,能够有效保持贮藏品质。



注: 红色表示正相关, 蓝色表示负相关, 无颜色或灰色表示无相关性, 圆形大小代表相关性数值大小。

图6 月季切花各指标相关性矩阵

Fig.6 Correlation matrix of various indexes for cut roses

3 讨论

月季切花的采后品质受到多方面因素影响, 其中花青素含量的变化直接关联到月季切花的颜色变化, 是决定花色的关键因素之一^[11]。在某些情况下, 细胞膜的损伤会降低色素的稳定性, 导致花青素出现化学降解^[14]。本研究中使用 SO₂ 并未引起花瓣褪色, 且保持了较高的花青素含量, 这可能与月季切花的 SO₂ 耐受度和包装内适宜的 SO₂ 浓度有关。花瓣衰老和脱落与乙烯密切相关, 在切花中乙烯与其受体结合并触发乙烯响应基因的表达, 提高呼吸强度, 促进一系列相关酶的反应, 最终导致切花衰老^[24]。1-MCP 不仅可以阻断切花组织中的乙烯结合位点, 还能抑制其响应基因的表达^[25]。Asil 等^[8]研究发现 1-MCP 处理能够抑制康乃馨切花乙烯的生成, 降低切花的膜损伤, 保持花青素的稳定性和含量, 延长康乃馨切花的瓶插寿命。Mirzakhani 等^[26]研究表明, 施用量为 1 或 2 $\mu\text{L/L}$ 的 1-MCP 可以显著抑制月季切花的衰老过程, 延长月季切花的瓶插寿命。有关研究证明, SO₂ 应用在葡萄中可以抑制与乙烯信号相关的基因表达, 从而延缓果实衰老^[27]。本实验研究微孔膜包装结合 1-MCP 和 SO₂ 保鲜纸复合处理对月季切花品质的影响, 结果表明, 复合处理能够有效降低切花采后呼吸强度和乙烯生产速率, 减少切花组织中乙烯的感知, 保持较高的花青素含量, 使切花具有较好的色泽, 最终保持其感官品质和瓶插寿命。

切花采后贮运过程极易出现弯头、萎蔫等品质劣变现象, 原因包括相关酶活性的增强或降低、非酶抗氧化剂(可溶性蛋白、总酚、总黄酮等)和 MDA 含量的变化^[28]。对照组 M20 的花瓣在贮藏 18 d 后感官品质开始明显下降, 其瓶插寿命和最大花径均显著低于 M20+1-MCP 和 M20+1-MCP+SO₂ 处理组 ($P<0.05$)。在贮藏中后期(24~30 d), 各处理组的可溶性蛋白、总酚、总黄酮含量存在显著性差异 ($P<0.05$)。经过 1-MCP 和 SO₂ 复合处理的切花在贮藏后期维持较高的非酶抗氧化剂含量, 表明 M20+1-MCP+SO₂ 复合处理可以提高切花的抗氧化能力, 对保持切花的感官和营养品质起到积极的作用。韩冬梅等^[29]研究发现, SO₂ 保鲜纸在提高龙眼果实类黄酮含量方面起到积极作用; Ali 等^[30]采用 SO₂ 保鲜垫贮藏石榴长达 180 d, SO₂ 保持了石榴低温贮藏过程中的总酚含量和总抗氧化活性。另外, 1-MCP 可以通过提高抗氧化能力, 有效保持食用玫瑰和猕猴桃的贮藏质量^[31]。

SO₂ 是重要的杀菌剂之一, 相较于气体 SO₂ 的直接熏蒸, SO₂ 缓释保鲜纸具有低残留、操作简便和成本低的特点, 适宜短期的贮藏保鲜^[32]。在月季切花的生理过程中, PPO、POD、SOD 以及 MDA 水平相互

关联, 共同构成植物应对氧化应激的防御体系^[23]。在非胁迫条件下, SOD 和 POD 协同作用, 通过降解活性氧(ROS)避免细胞遭受氧化伤害。但在外界环境胁迫, 如病原菌侵袭或低温贮藏等情况下, ROS 的过量生成会提升 SOD 和 POD 活性。若 ROS 过量积累, 会导致细胞膜脂质的过氧化反应, 进一步引起细胞膜损伤和凋亡^[33]。M20+1-MCP+SO₂ 复合处理的月季切花在贮藏后期, POD 和 SOD 活性显著提高, 这反映了植物氧化还原状态得到改善, 显著缓解 MDA 的积累, 从而减轻氧化损伤, 增强植物的抗逆性。在抗病性方面, PAL、几丁质酶和 β -1,3-葡聚糖酶在月季切花中发挥着关键作用。PAL 在切花中的作用主要体现在通过促进酚类化合物的生物合成来提高抗病性^[34]; 几丁质酶和 β -1,3-葡聚糖酶在植物抗病性中扮演着重要角色, 不仅通过直接的水解作用抑制病原体生长, 还通过与其他防御机制的协同作用增强植物的整体防御能力^[35]。在贮藏后期, 复合处理组的 PAL、几丁质酶和 β -1,3-葡聚糖酶的活性显著高于 M20 处理组, 其中 M20+1-MCP+SO₂ 处理组最显著, 这表明微孔膜包装结合 1-MCP 和 SO₂ 保鲜纸复合处理方法在抗病性方面具有显著效果。

4 结语

与 M20 相比, M20+1-MCP 和 M20+1-MCP+SO₂ 处理组在月季切花贮藏期间能够更好地保持感官品质, 有效维持关键营养成分的含量, 抑制呼吸作用和乙烯生成, 减缓氧化损伤标志物 MDA 的积累, 并维持 ROS 的氧化还原平衡。同时, 这些处理不仅能提高 POD 和 SOD 的活性, 还能够保持 PAL、几丁质酶和 β -1,3-葡聚糖酶的较高活性, 从而增强植物的抗病性。结合相关性分析可知, 瓶插寿命与 MDA 含量、乙烯生成速率、PPO 活性呈极显著负相关 ($P<0.01$), POD 活性与 PAL、SOD、几丁质酶活性以及总酚含量呈极显著正相关 ($P<0.01$), 微孔膜包装结合 1-MCP 和 SO₂ 保鲜纸复合处理组的保鲜效果最佳。

参考文献:

- [1] ZHENG X W, YING Y N, LONG Y, et al. Genome Wide Analysis of the EXP Family in *Rosa Chinensis* and Negative Regulation of Black Spot Disease by RcEXPA8[J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 324: 112566.
- [2] HUANG S, GONG B, WEI F J, et al. Pre-Harvest 1-Methylcyclopropene Application Affects Post-Harvest Physiology and Storage Life of the Cut Rose Cv. Carola[J]. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2017, 58(2): 144-151.
- [3] POONSRI W. Effects of Active and Passive Modified At-

- mosphere Packaging on Biochemical Properties of Cut Dendrobium Orchid Flowers[J]. Heliyon, 2021, 7(6): e07197.
- [4] KOU L P, TURNER E R, LUO Y G. Extending the Shelf Life of Edible Flowers with Controlled Release of 1-Methylcyclopropene and Modified Atmosphere Packaging[J]. Journal of Food Science, 2012, 77(5): S188-S193.
- [5] AROS D, ORELLANA K, ESCALONA V. Modified Atmosphere Packaging as a Method to Extend Postharvest Life of Tulip Flowers[J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 2017, 45(3): 202-215.
- [6] LI J M, JIA X Y, JIANG X X, et al. Effect of Microperforation on Quality of Modified Atmosphere Packaged Cut Rose Cv. Corola[J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2024, 99(4): 443-453.
- [7] 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.
- [8] ASIL M H, KARIMI M, ZAKIZADEH H. 1-MCP Improves the Postharvest Quality of Cut Spray Carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) 'Optima' Flowers[J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2013, 54(1): 58-62.
- [9] WEI F J, WANG J, HUANG S, et al. Effect of Pre-Harvest Application of Promalin and 1-MCP on Preservation of Cut Lily and Its Relationship to Energy Metabolism[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 239: 1-8.
- [10] TONG X Z, SONG H B, CHEN Y N, et al. 1-MCP Combined with Laser Microporous Film Packaging Maintains the Quality and Prolongs the Storage Period of Xiahei Grapes[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2024, 59(3): 1550-1559.
- [11] 牟雪姣, 张强, 吴燕, 等. 纳米银和 1-MCP 处理对月季切花的保鲜作用[J]. 天津农学院学报, 2024, 31(1): 24-30.
- MU X J, ZHANG Q, WU Y, et al. Preservation Effect of Nano Silver and 1-MCP Treatment on Cut Rose[J]. Journal of Tianjin Agricultural University, 2024, 31(1): 24-30.
- [12] 刘鹏, 许文才, 李东立, 等. 二氧化硫缓释杀菌包装在“夏黑”葡萄保鲜中的应用研究[J]. 包装工程, 2014, 35(15): 1-4.
- LIU P, XU W C, LI D L, et al. Application of SO₂ Controlled Release Packaging in the Preservation of "Summer Black" Grapes[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(15): 1-4.
- [13] ZHANG Y, XU Y F, SONG Y L, et al. ClO₂ Treatment Delays Petal Senescence and Extends the Vase Life of Paeonia Suffruticosa 'Luoyang Hong' Cut Flowers[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 325: 112650.
- [14] 黄小艳, 方中明, 黄玮婷. 6-BA 和 CaCl₂ 配合对月季‘卡罗拉’切花保鲜的影响[J]. 山地农业生物学报, 2023(1): 25-31.
- HUANG X Y, FANG Z M, HUANG W T. Effect of Combined 6-BA and CaCl₂ on Preservation of Cut Rose "Corolla" Flower[J]. Journal of Mountain in Agriculture and Biology, 2023(1): 25-31.
- [15] HUAN C, AN X J, YU M L, et al. Effect of Combined Heat and 1-MCP Treatment on the Quality and Antioxidant Level of Peach Fruit during Storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 145: 193-202.
- [16] 张鹏, 袁兴铃, 王利强, 等. 1-MCP 处理对“阳光玫瑰”葡萄货架品质的影响[J]. 包装工程, 2021, 42(7): 19-27.
- ZHANG P, YUAN X L, WANG L Q, et al. Effect of 1-MCP Treatment on Shelf Quality of "Sunshine Muscat" Grapes[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(7): 19-27.
- [17] FAN Y, SUN L, SONG S L, et al. Integrated Metabolome and Transcriptome Analysis of Anthocyanin Accumulation during the Color Formation of Bicolor Flowers in Eustoma Grandiflorum[J]. Scientia Horticulturae, 2023, 314: 111952.
- [18] 赵英永, 戴云, 崔秀明, 等. 考马斯亮蓝 G-250 染色法测定草乌中可溶性蛋白质含量[J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2006, 15(3): 235-237.
- ZHAO Y Y, DAI Y, CUI X M, et al. Determination of Protein Contents of Radix Aconiti Kusnezoffii Using Coomassie Brilliant Blue G-250 Dye Binding[J]. Journal of Yunnan Nationalities University (Natural Sciences Edition), 2006, 15(3): 235-237.
- [19] 洪镜芬, 郝聪聪, 姚伟, 等. 不同贮藏温度对‘卡罗拉’月季切花保鲜效果的影响[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(8): 8-14.
- HONG J F, HAO C C, YAO W, et al. Effects of Different Storage Temperatures on the Preservation of 'Carola' Cut Rose Flowers[J]. Storage and Process, 2024, 24(8): 8-14.
- [20] 赵焕兰, 曹嘉灿, 刘奎, 等. 贝莱斯芽孢杆菌发酵液对樱桃番茄贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(20): 12-18.
- ZHAO H L, CAO J C, LIU K, et al. Effect of Bacillus velezensis Fermentation Supernatant on Storage Quality of Cherry Tomatoes[J]. Food Research and Development, 2022, 43(20): 12-18.
- [21] 代羽可欣, 王宇滨, 赵文婷, 等. 热处理对鲜切马铃薯褐变及挥发性物质的影响[J]. 现代食品科技, 2023, 39(4): 289-296.
- DAI Y K X, WANG Y B, ZHAO W T, et al. Effect of Heat Treatment on the Browning and Volatile Compounds of

- Fresh-Cut Potatoes[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2023, 39(4): 289-296.
- [22] 李自芹, 唐湘桂, 郭慧静, 等. 不同预冷方式结合 1-MCP 处理对蟠桃冷藏品质的影响[J]. *包装与食品机械*, 2023, 41(2): 14-19.
- LI Z Q, TANG X G, GUO H J, et al. Effects of Different Precooling Methods Combined with 1-MCP Treatment on Cold Storage Quality of Flat Peach[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2023, 41(2): 14-19.
- [23] 高鹏华, 王其刚, 晏慧君, 等. 外源激素对灰霉菌胁迫下月季花器官生理生化指标的影响[J]. *西南农业学报*, 2022, 35(5): 1166-1172.
- GAO P H, WANG Q G, YAN H J, et al. Effects of Exogenous Hormones on the Physiological and Biochemical Indexes of *Rosa Chinensis* 'Pallida' Flower Organs under *Botrytis Cinerea* Stress[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(5): 1166-1172.
- [24] BLEECKER A B, KENDE H. Ethylene: A Gaseous Signal Molecule in Plants[J]. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 2000, 16: 1-18.
- [25] BARRY C S, GIOVANNONI J J. Ethylene and Fruit Ripening[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2007, 26(2): 143-159.
- [26] MIRZAKHANI A, FARAZMANDI M, SAJEDI N A, et al. Physiological Characteristics and Vase Life Responses of Rose Cut Flowers (*Rosa Hybrida* L. Cv. 'Royal Baccara') to Benzyl Adenine and 1-Methylcyclopropene[J]. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2020, 48(4): 2279-2291.
- [27] YAN D M, YI H L. Transcriptome Analysis Provides Insights into Preservation Mechanism of Postharvest Muscat Hamburg Grapes Treated with SO₂[J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 331: 113108.
- [28] ZHANG Y, WU Z C, FENG M, et al. The Circadian-Controlled PIF8-BBX28 Module Regulates Petal Senescence in Rose Flowers by Governing Mitochondrial ROS Homeostasis at Night[J]. *The Plant Cell*, 2021, 33(8): 2716-2735.
- [29] 韩冬梅, 朱春宇, 张璐, 等. SO₂ 保鲜纸结合冷库预冷对龙眼果实低温贮藏效果的影响[J]. *保鲜与加工*, 2020, 20(1): 1-11.
- HAN D M, ZHU C Y, ZHANG L, et al. Effects of SO₂-Released Paper Combined with Low Temperature Precooling on Longan Fruits Quality after Storage at Low Temperature[J]. *Storage and Process*, 2020, 20(1): 1-11.
- [30] ALI Q, DOGAN A, ERKAN M. Sulfur Dioxide Generating Pads Containing Different Concentrations of Sodium Metabisulfite Maintains Postharvest Quality of 'Hicaznar' Pomegranate[J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 333: 113249.
- [31] ZHANG Y, WANG K, XIAO X, et al. Effect of 1-MCP on the Regulation Processes Involved in Ascorbate Metabolism in Kiwifruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 179: 111563.
- [32] XING S J, TIAN Q M, ZHENG Y G, et al. Sulfur Dioxide Enhances the Resistance of Postharvest Grape Berries to Gray Mold through Hydrogen Peroxide Signaling[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2025, 221: 113325.
- [33] 覃泳智, 周智丽, 刘海涛, 等. 外源水杨酸对高温胁迫微型月季生理指标的影响[J]. *南方农业学报*, 2018, 49(10): 2028-2033.
- QIN Y Z, ZHOU Z L, LIU H T, et al. Effects of Exogenous Salicylic Acid on Physiological Indexes in Miniature Rose under High Temperature Stress[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 49(10): 2028-2033.
- [34] ZULFIQAR F, MOOSA A, CHEN J J, et al. Synergistic Suppression of Grey Mold on Cut Rose Flower by Combined Application of Methyl Jasmonate and Lipopeptides from *Bacillus Altitudinis*[J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2024, 134: 102417.
- [35] 陈燕玲, 岑光莉, 孙婷婷, 等. 植物几丁质酶和 β -1,3-葡聚糖酶及其协同抗病性研究进展[J]. *农业生物技术学报*, 2022, 30(7): 1394-1411.
- CHEN Y L, CEN G L, SUN T T, et al. Progress on Plant Chitinase and β -1,3-Glucanase and Their Synergistic Function in Disease Resistance[J]. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2022, 30(7): 1394-1411.