

# 自发气调包装结合1-MCP处理下杏鲍菇乙烯代谢和褐变进程的变化

亢瑞琪<sup>1,2</sup>, 郭峰<sup>1,2</sup>, 焦贺<sup>1,2</sup>, 胡花丽<sup>1,2,3</sup>, 张映瞳<sup>1,2,3</sup>, 周宏胜<sup>1,2,3</sup>, 刘雪松<sup>1,2,3</sup>, 凌军<sup>1,2,3</sup>, 李鹏霞<sup>1,2,3</sup>, 罗淑芬<sup>1,2,3\*</sup>, 冯颖<sup>1\*</sup>

(1. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110866) (2. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所, 江苏南京 210014) (3. 江苏省农业科学院, 农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室, 江苏南京 210014)

**摘要:** 为明确自发气调包装结合1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)处理对杏鲍菇采后衰老的影响, 在低温货架条件(12~15℃)下, 以打孔的19 μm聚乙烯保鲜袋(Modified Atmosphere, MA)为对照组, 并用MA和MA结合1-MCP保鲜卡对杏鲍菇进行处理, 研究其采后乙烯代谢和褐变进程的变化。结果表明: MA处理可有效抑制杏鲍菇的呼吸速率, 但对控制其乙烯释放效果不佳, 当结合1-MCP处理时, 有效抑制了其组织乙烯合成关键酶(ACC Synthase, ACS)和(ACC Oxidase, ACO)活性, 由此乙烯生成速率低于对照组9.75%~51.61%。此外, MA可显著延缓杏鲍菇的采后褐变和腐烂, 当MA与1-MCP联合处理时, 可通过提高其组织的过氧化物酶(Peroxidase, POD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)和超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)活性, 抑制其相对电导率上升和(Malondialdehyde, MDA)积累; 同时保持其货架后期较高的总酚含量, 和更低的(Polyphenol Oxidase, PPO)和(Phenylalanine Ammonia-lyase, PAL)活性, 最终进一步减缓其采后酶促褐变进程, 在16~20 d时对照组褐变度高于MA组3.93~4.29倍、高于MA联合1-MCP组8.85~9.42倍。综上, MA联合1-MCP复合处理可在单独MA的基础上进一步减缓杏鲍菇的采后衰老, 延长低温货架期约7 d, 为食用菌采后保鲜提供了理论及技术支持。

**关键词:** 杏鲍菇; 气调包装; 1-甲基环丙烯; 乙烯代谢; 褐变; 衰老

文章编号: 1673-9078(2025)02-142-152

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.2.1473

## Changes in Ethylene Metabolism and Browning Processes of Postharvest *Pleurotus eryngii* under Modified Atmosphere Packaging Combined with 1-MCP Treatment

KANG Ruiqi<sup>1,2</sup>, GUO Feng<sup>1,2</sup>, JIAO He<sup>1,2</sup>, HU Huali<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Yingtong<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Hongsheng<sup>1,2,3</sup>,  
LIU Xuesong<sup>1,2,3</sup>, LING Jun<sup>1,2,3</sup>, LI Pengxia<sup>1,2,3</sup>, LUO Shufen<sup>1,2,3\*</sup>, FENG Ying<sup>1\*</sup>

引文格式:

亢瑞琪, 郭峰, 焦贺, 等. 自发气调包装结合1-MCP处理下杏鲍菇乙烯代谢和褐变进程的变化[J]. 现代食品科技, 2025, 41(2): 142-152.

KANG Ruiqi, GUO Feng, JIAO He, et al. Changes in ethylene metabolism and browning processes of postharvest *Pleurotus eryngii* under modified atmosphere packaging combined with 1-MCP treatment [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(2): 142-152.

收稿日期: 2023-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(31901755); 江苏省苏北科技专项项目(XZ-SZ202106)

作者简介: 亢瑞琪(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬保鲜与加工, E-mail: 1316444021@qq.com

通讯作者: 罗淑芬(1988-), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 果蔬保鲜与加工, E-mail: luoshufen666@126.com; 共同通讯作者: 冯颖

(1975-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬加工及其活性物质研究, E-mail: fywjg@sina.com

(1.School of Food Science, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866, China)(2.Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Institute of Agricultural Facilities and Equipment, Nanjing 210014, China)(3.Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Cold Chain Logistics Technology for Agro-Products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** To examine the effects of modified atmosphere (MA) packaging combined with 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment on postharvest senescence of *Pleurotus eryngii*, experiments were conducted under low-temperature storage conditions (12~15 °C). Samples were packaged in a 19- $\mu$ m polyethylene bag (MA) or in a card containing the anti-staling agent 1-MCP (MA + 1-MCP), at temperatures ranging 12~15 °C. The control group was *P. eryngii* packaged in a 19- $\mu$ m polyethylene bag with eight holes. Ethylene metabolism and browning processes of *P. eryngii* after harvest were investigated. MA packaging significantly inhibited the respiration rate of *P. eryngii* but performed poorly in controlling the ethylene production rate. Notably, the activities of 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) synthase and ACC oxidase, the key enzymes involved in ethylene synthesis, were effectively inhibited by MA packaging combined with 1-MCP. Therefore, the ethylene production rate of *P. eryngii* in the MA + 1-MCP group was lower than that of the control group by 9.75%~51.61%. In addition, MA packaging significantly delayed postharvest browning and decay of *P. eryngii*. Combining MA packaging with 1-MCP enhanced the activities of peroxidase, catalase, and superoxide dismutase and inhibited increases in relative conductivity and accumulation of malondialdehyde in *P. eryngii*. In addition, the combined treatment led to a higher total phenolic content in *P. eryngii* at the end of shelf life, and lower polyphenol oxidase and phenylalanine ammonia-lyase activities. As a result, the postharvest enzymatic browning process of *P. eryngii* was further slowed down by the combined treatment. At 16~20 days, the degrees of browning of the control group were 3.93~4.29 and 8.85~9.42 times those of the MA and MA+1-MCP groups, respectively. In conclusion, the MA+1-MCP composite treatment slowed the postharvest senescence of *P. eryngii* compared with the performance of MA packaging alone, thereby extending the shelf life at low temperatures for about 7 days. The findings provide theoretical and technical support for the postharvest preservation of edible mushrooms.

**Key words:** *Pleurotus eryngii*; modified atmosphere packaging; 1-methylcyclopropene; ethylene metabolism; browning; senescence

杏鲍菇 (*Pleurotus eryngii*) 是隶属于真菌门侧耳属<sup>[1]</sup>的子实体, 富含蛋白质和无机元素, 氨基酸种类齐全, 尤其赖氨酸和精氨酸含量丰富, 脂肪含量偏低, 是一种理想的保健食品, 具有改善肠胃功能, 增强肌体免疫功能, 防止动脉硬化, 抗氧化和降胆固醇等功效<sup>[2]</sup>。然而, 杏鲍菇含水量高 (85%~95%)、质地脆嫩, 采后呼吸作用和生理代谢旺盛, 加之其本身无保护结构, 极易产生机械损伤, 这导致其常温贮藏时间较短, 易出现组织绵软、褐变、腐烂、失水萎蔫和自溶等品质劣变现象, 营养成分快速流失, 商品价值迅速下降<sup>[3]</sup>。围绕影响杏鲍菇品质的外在因素, 如温度、湿度、气体成分和微生物等, 常用的保鲜措施有低温、气调、辐照处理、化学保鲜剂等<sup>[4-8]</sup>。

自发气调包装是将果蔬密封在具有特定透气性能的包装袋中, 利用果蔬自身的呼吸作用和材料的透气性, 自行调节交换密封环境中的 O<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 含量, 通过减低果蔬生理代谢速度并抑制呼吸速率<sup>[9]</sup>, 从而延长果蔬贮藏期的保鲜方式。胡花丽等<sup>[10]</sup>发现

19  $\mu$ m 的聚乙烯袋可有效保持杏鲍菇贮藏前期粗纤维的含量及其可滴定酸含量, 从而减缓杏鲍菇的采后衰老; 刘达玉等<sup>[11]</sup>研究发现 TiO<sub>2</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 复合纳米薄膜保鲜袋真空包装处理可有效保持杏鲍菇贮藏期间的风味品质, 延长其贮藏保鲜期; 宁明岸等<sup>[12]</sup>发现 2.47 mg/L 臭氧结合低温自发气调包装处理可有效保持平菇的贮藏品质和色泽。目前也有研究者将自发气调包装与其他保鲜方式结合应用于食用菌保鲜。例如, Gholami 等<sup>[13]</sup>研究表明使用负载纳米粘土颗粒的低密度聚乙烯包装膜 + MAP 的处理方式可将白蘑菇的保质期由 10 d 延长至 15 d; Dhalsamant 等<sup>[14]</sup>研究发现将草菇放入装有 5 g 丁香结合 40 个穿孔低密度聚乙烯薄膜包装中, 保质期可以延长 6 d, 微生物生长也显著减少。

1-甲基环丙烯 (1-methylcyclopropene, 1-MCP) 是一种乙烯受体抑制剂<sup>[15]</sup>, 目前已在梨、苹果、番木瓜、甘薯、广叶绣球菌、香菇等果蔬及食用菌保鲜上得到应用。近年来, 报道了 1-MCP 与多种保鲜方法结合, 以进一步加强和改善 1-MCP 对果蔬的保

鲜效果。例如,彭思佳等<sup>[16]</sup>采用激光微孔膜包装结合 2  $\mu\text{L/L}$  浓度的 1-MCP 处理水蜜桃改善了单独激光微孔膜的保鲜效果,进一步延长了其货架期 7 d;杨国辉等<sup>[17]</sup>提出聚赖氨酸联合 1-MCP 处理可有效抑制草菇表面细菌生长,维持草菇采后品质;但 MA 结合 1-MCP 应用于杏鲍菇保鲜的研究鲜有报道。本试验采用聚乙烯保鲜袋结合 1-MCP 保鲜卡对杏鲍菇进行处理,研究该复合处理对杏鲍菇采后褐变及乙烯代谢的影响,旨在探究一种有效延长杏鲍菇贮藏期和提升其采后品质的保鲜方法,为杏鲍菇的采后保鲜提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

本实验采用杏鲍菇为实验材料,挑选自徐州鑫丰农业科技有限公司,采摘后 4 h 内进行预处理。选用的实验材料为大小形状均匀、菇体表面完整无机械损伤。

1-甲基环丙烯,山东奥维特生物科技有限公司;福林酚试剂,上海文亿化学试剂有限公司;巯基乙醇,上海麦克林生化科技有限公司;盐酸,南京化学试剂有限公司;氢氧化钠,西陇科学股份有限公司;磷酸吡哆醛,上海凌峰化学试剂有限公司;愈创木酚,上海源叶生物科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

H3-16KR 台式高速冷冻离心机,湖南可成仪器设备有限公司;BSA124S 电子天平,赛多利斯科学仪器有限公司;Seven multi pH 计,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;TU-181000000 紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;IKA A11 Basic 液氮研磨器,艾卡(广州)仪器设

备有限公司;Technologies 7280A 气相色谱仪,美国 Agilent 公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 原料处理

##### 1.3.1.1 保鲜卡制作

1-MCP 保鲜卡委托山东奥维特生物科技有限公司所制作,保鲜卡内 1-MCP 粉末质量分别为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.5 和 2.0 g。

##### 1.3.1.2 保鲜处理

1-MCP 处理剂量的筛选:将挑选的杏鲍菇随机分成 9 组,每组 3 个平行,每个平行 10 个杏鲍菇。按照表 1 所示,将其装入本课题组前期研究出的长 47.5 cm、宽 24 cm、厚度约为 19  $\mu\text{m}$  的聚乙烯保鲜袋内<sup>[10]</sup>,向保鲜袋内放置干燥的、不同剂量的 1-MCP 保鲜卡;将处理好的样品立即封口,随后立即置于低温货架条件(12~15  $^{\circ}\text{C}$ )下进行模拟贮藏。保鲜袋打孔作为对照组,孔数 8 个,孔径 1.5 cm。贮藏至第 20 天时,观察杏鲍菇表型,同时通过分析 MA 结合不同处理剂量 1-MCP 对杏鲍菇感官评价的影响,确定 1-MCP 的处理剂量。

##### 1.3.1.3 最优 1-MCP 处理剂量的保鲜实验

研究 MA 结合 1-MCP (MA+1-MCP) 对杏鲍菇品质的影响:将挑选的杏鲍菇随机分成 3 组,每组 18 个平行,每个平行 10 个杏鲍菇,分别进行 MA 打孔处理(对照组)、MA 和 MA+1-MCP 处理,1-MCP 的处理剂量采用上述实验筛选出的 1-MCP 处理剂量。将处理好的杏鲍菇置于 12~15  $^{\circ}\text{C}$  下贮藏,每 4 d 取样 1 次,鲜样进行感官评价后,进行呼吸速率、乙烯生成速率和相对电导率的测定,取样部位为子实体中心部位的菇柄,采用液氮进行速冻后保存于 -80  $^{\circ}\text{C}$  下,用于各项指标的测定。

表 1 MA 结合 1-MCP 处理组 (g)

Table 1 The groups of MA combined with 1-MCP treatment (g)

样品组	对照组	MA	MA+1-MCP	MA+1-MCP	MA+1-MCP	MA+1-MCP	MA+1-MCP	MA+1-MCP	MA+1-MCP
1-MCP 剂量	0	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.5	2.0

表 2 杏鲍菇感官评定标准

Table 2 The sensory evaluation criteria of *Pleurotus eryngii*

气味	色泽	萎蔫程度	质地	分值
新鲜菇味	菌体呈洁白色,不褐变	不萎蔫	肥厚有弹性	8~10
正常菇味,无特殊气味	菌体呈淡白色,稍有褐变	轻微萎蔫	质地微软	6~7
较淡菇味,略有异味	菌体呈淡黄色,褐变明显	萎蔫明显	肉质软,韧性差	4~5
无菇香味,异味明显	菌体呈深黄色,褐变严重	萎蔫严重	肉质软,无韧性	0~3



### 1.3.2 指标测定

#### 1.3.2.1 感官评定

采用高帅平等<sup>[18]</sup>的方法, 贮藏期间根据杏鲍菇的气味、色泽、萎蔫程度、质地 4 个方面进行感官评定, 由 7 名经过训练的专业人员进行感官打分评定, 取平均值, 分值低于 4 分则认为失去商品价值, 具体评定标准列于表 2。

#### 1.3.2.2 呼吸速率和乙烯释放量的测定

将每个处理中每个平行的杏鲍菇称重后置于提前打好孔(孔径为 1.5 cm)的“乐扣乐扣”保鲜箱中并塞上密封胶塞, 密封 4 h 后, 使用注射器采集箱内气体 20 mL, 于安捷伦 7820 型气相色谱进行测定, 色谱条件: FID 检测器, 柱子温度 70 °C, 转化炉温度 375 °C, N<sub>2</sub> 压力 0.4 MPa, H<sub>2</sub> 压力 0.3 MPa, 空气压力 0.5 MPa, 定量方法采用外标法, 单位为 mg/(kg·h) 和 μg/(kg·h), 每组做 3 个平行, 取平均值即为呼吸速率和乙烯释放量。

#### 1.3.2.3 乙烯代谢相关酶测定

参考王瑶等<sup>[19]</sup>的方法, 略有改动。1-氨基环丙烷-1-羧酸(1-Aminocyclopropane-1-carboxylic acid, ACC)含量的测定, 称取 0.5 g 样品, 加 5 mL 0.2 mol/L 三氯乙酸(Tricarboxylic acid, TCA), 冰浴并研磨成浆, 放入 4 °C 下提取 12 h 后, 于 4 °C、12 000 r/min 条件下离心 20 min, 收集上清液。取 1.5 mL 上清液封入青霉素瓶(10 mL)中, 注入 0.5 mL 混合液(体积分数为 5% 的次氯酸钠: 饱和氢氧化钠=2:1), 4 °C 下放置 2 h 后, 强力震荡 5 s, 静置 5 min 后抽取 2.5 mL 气体注入气相色谱(安捷伦 7820), 测定乙烯的生成量, 然后换算成 ACC 含量, 重复 3 次。

ACS 活性测定, 提取液的制备: 称取 1 g 样品, 加入 2 mL 磷酸缓冲液(400 mmol/L, pH 值 8.5; 0.1 mol/L EDTA; 体积分数为 0.5% 的巯基乙醇; 10 μmol/L 磷酸吡哆醛)提取, 离心取上清液。酶活性测定: 取 0.8 mL 上清液加入到 1.6 mL 反应体系(250 μmol/L 磷酸吡哆醛; 50 mmol/L Hepes-KOH, pH 值 8.5)中, 32 °C 水浴 3 h, 加入 0.2 mL 50 mmol/L 的 HgCl<sub>2</sub> 终止反应, 用橡皮塞密封, 同时注入 134 μL NaClO 和 66 μL 饱和 NaOH 溶液, 立即振荡 15 s, 取 2.5 mL 样品气体检测乙烯浓度, 重复 3 次, 结果以 nmol/(g·h) 表示。

ACO 活性测定, 提取液的制备: 称取 1 g 样品, 加入 1 mL 提取液[含有 Tris-HCl 缓冲液(100 mmol/L, pH 值 7.5), 体积分数为 10% 的甘油, 30 mmol/L 抗坏血

酸钠; 质量分数为 5% 的 PVP; 0.1 mmol/L FeSO<sub>4</sub>; 5 mmol/L DTT], 将小瓶置于 30 °C 下振荡 1 h。酶活性的测定: 取振荡液 0.5 mL 注入盛有 1.8 mL 反应液[含有 100 mmol/L Tris-HCl (pH 值 7.5) 缓冲液, 体积分数为 10% 的甘油, 30 mmol/L 抗坏血酸钠; 30 mmol/L NaHCO<sub>3</sub>, 1 mmol/L ACC, 0.1 mmol/L FeSO<sub>4</sub>]的带橡胶塞小瓶(10 mL)中, 30 °C 保温 20 min, 抽取 2.5 mL 样品气体测定乙烯浓度, 重复 3 次, 结果以 nmol/(g·h) 表示。

#### 1.3.2.4 褐变度

参考周宏胜等<sup>[20]</sup>的方法, 略有改动。取 0.5 g 样品加 5 mL 经 4 °C 预冷的蒸馏水, 冰上静置提取 15 min 后, 4 °C、12 000 r/min, 离心 20 min, 取上清在 410 nm 下测量吸光度 *A*, 褐变度的计算公式为:

$$A = A_{410} \times 10 \quad (1)$$

式中:

*A*——褐变度, OD<sub>410</sub>/g。

#### 1.3.2.5 多酚氧化酶活力的测定

参考高帅平等<sup>[18]</sup>的方法, 略有改动。称取 1 g 样品, 加入 2 mL 0.1 mol/L 磷酸缓冲液(pH 值 7.2), 匀浆, 10 000 r/min 离心 15 min 后, 取上清液。反应体系为: 0.5 mL 样品溶液, 3 mL 0.1 mol/L 的邻苯二酚溶液, 反应温度为 30 °C, 测定 398 nm 处吸光值的变化。以每分钟内吸光度上升 0.1 为 1 个 PPO 活力单位。

#### 1.3.2.6 苯丙氨酸解氨酶活力测定

参考朱凯等<sup>[8]</sup>的方法, 略有改动。称取 1 g 样品加入 2.5 mL 10 mmol/L 硼酸缓冲液(pH 值 8.8, 含 0.1 mmol/L EDTA、体积分数 0.3% Triton X-100 和质量分数 4% PVP), 匀浆, 4 °C 10 000 r/min 离心 20 min 后, 取上清液。反应体系为: 1 mL 0.02 mol/L L-苯丙氨酸、2 mL 0.1 mol/L 硼酸缓冲液(pH 值 8.8)、1 mL 稀释 10 倍的酶液, 摇匀后于 30 °C 中反应 60 min, 再加入 0.2 mL 6 mol/L HCl 溶液终止反应, 于 290 nm 处测定吸光度, 以每小时吸光度增加 0.01 为 1 个 PAL 活力单位。

#### 1.3.2.7 相对电导率

参考张璇等<sup>[21]</sup>的方法, 略有改动。取 10 g 鲜样切成 10 片, 去掉边缘, 用双蒸水洗三次, 去除表面离子。之后用滤纸擦干, 悬浮于 40 mL 双蒸水于 100 mL 烧杯中, 在 25 °C 下振荡 30 min, 立即测定值为 *P*<sub>0</sub>, 10 min 后再测为 *P*<sub>1</sub>, 样品煮沸 10 min, 冷却到室温后测定值为 *P*<sub>2</sub>, 相对电导率计算公式用百

分比表示, 相对电导率计算公式为:

$$P = \frac{P_1 - P_0}{P_2 - P_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

$P$ —相对电导率, %。

### 1.3.2.8 丙二醛含量的测定

参考 Araujo 等<sup>[22]</sup>的方法, 略有改动。取 1 g 样品, 加入 2.5 mL 体积分数为 5% 的三氯乙酸, 研磨后在 10 000 r/min 下离心 20 min, 取上清液 1 mL, 加入 1 mL 质量分数为 0.67% 的硫代巴比妥酸, 混合后水浴煮沸 20 min 冷却后离心, 分别取上清液测定在 450、532、600 nm 处的吸光值, 其单位为  $\mu\text{mol/g}$ , 重复测定 3 次, 结果取平均值。

$$B = \frac{[6.45 - (A_{532} - A_{600}) - 0.56 \times A_{450}] \times V_1 \times V}{V_2 \times W} \quad (3)$$

式中:

$B$ —丙二醛 (MDA) 含量;

$V_1$ —反应液总量, mL;

$V_2$ —反应液中的提取液体积, mL;

$V$ —提取液的总体积, mL;

$W$ —样品质量, g。

### 1.3.2.9 总酚、总黄酮含量的测定

参考韦雪等<sup>[23]</sup>的方法, 略有改动。称取 1 g 样品加 2.5 mL 体积分数为 80% 的乙醇打浆, 4 °C 10 000 r/min 离心 20 min。取 0.1 mL 上清液, 加入 0.9 mL 蒸馏水和 0.5 mL Folin 试剂, 25 °C 反应 3 min, 再加入 1 mL 饱和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 25 °C 反应 1 h, 于 760 nm 测定吸光值, 以没食子酸作标准曲线计算总酚含量。

参考朱凯等<sup>[8]</sup>的方法, 略有改动。称取 1 g 样品加无水乙醇 2.5 mL 打浆。4 °C 超声 30 min, 遮光静置 1.5 h, 离心取得上清液。向试管中加入 4 mL 蒸馏水, 1 mL 上清液, 0.3 mL 质量分数为 5% 的亚硝酸钠, 5 min 后, 加入 0.3 mL 质量分数为 10% 的氯化铝, 6 min 后, 加入 2 mL 1 mol/L 氢氧化钠。遮光静置反应 30 min 后, 立刻向其加入 3.4 mL 蒸馏水, 以芦丁作标准曲线计算总黄酮含量。

### 1.3.2.10 抗氧化酶活性的测定

参考曹建康等<sup>[24]</sup>的方法。

## 1.4 数据统计与分析

本试验所有数据均平行测定 3 次。使用 Excel 2019 统计数据, SPSS 26.0 软件进行单因素 ANOVA 检验, 采用 Duncan 式进行差异显著性分析 ( $P < 0.05$  表示差异显著), Origin 2021 制作图表。

## 2 结果与讨论

### 2.1 MA 结合 1-MCP 处理对杏鲍菇表型和感官得分的影响

本试验采用 MA 结合 1-MCP 对杏鲍菇进行处理, 发现 MA 结合不同剂量的 1-MCP 处理对杏鲍菇的保鲜效果不同 (图 1b)。在货架 20 d 时, 对照组杏鲍菇发生严重褐变、腐烂、不良气味浓烈, 感官评分仅 1.5 分 (图 1a); MA 的杏鲍菇明显褐变, 气味较差, 感官评分 2.52 分; MA 结合 0.2、0.4、0.6、1.0 和 1.5 g 1-MCP 的杏鲍菇产生轻微褐变, 评分分别为 4.8、5.95、6.25、6.55 和 5.9 分; 而 MA 结合 0.8 g 1-MCP 的杏鲍菇呈浅白色, 无褐变和腐烂现象, 感官评分 7.85 分; MA 结合 2.0 g 1-MCP 的杏鲍菇与对照组类似, 发生严重褐变及腐烂现象, 评分仅 1.96 分。可见, MA 结合 0.8 g 1-MCP 处理的杏鲍菇感官评分最高, 外观品质最佳, 更适宜杏鲍菇的贮藏, 故后续以此浓度进行深入研究。

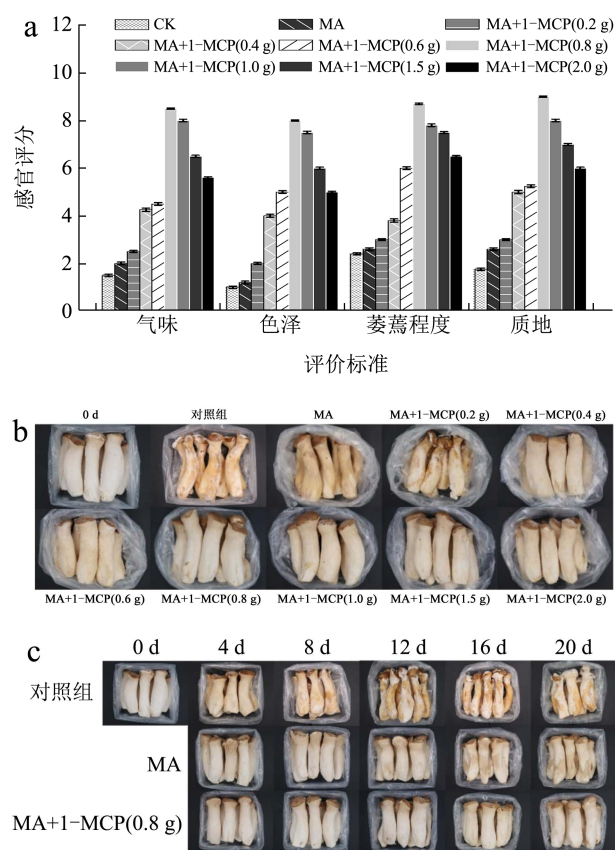


图 1 MA 结合 1-MCP 处理对杏鲍菇感官评分 (a) 和表型 (b、c) 的影响

Fig.1 Effects of MA combined with 1-MCP treatment on sensory score (a) and phenotype (b, c) of *Pleurotus eryngii*

注: 图 a 和 b 为货架期第 20 天时的感官得分及外观品质。

通过进一步的效果验证(图1c)得出,对照组从第4天开始出现轻微褐变,至12d时已发生严重褐变、萎蔫现象,异味强烈失去商品价值;此时MA组仅出现轻微褐变,至16d时,MA组发生明显褐变萎蔫,菇体呈浅黄色,且伴有轻微腐烂气味,肉质软韧性差;此时MA+1-MCP组仍然保持较好的商品性,无明显褐变和腐烂现象;至20d时,MA+1-MCP组发生轻微萎蔫和褐变现象,鲜菇香味较淡,质地微软,其货架期约为18~20d。综上,对照组货架期约为3~4d,MA货架期为10~12d,而MA+1-MCP可在单独MA的基础上,进一步提升杏鲍菇品质,将货架期延长至18~20d。类似地,Li等<sup>[25]</sup>采用激光微孔膜包装结合2 μL/L 1-MCP对水蜜桃进行处理,发现该复合处理较单独包装和1-MCP处理保鲜效果更佳。

## 2.2 MA+1-MCP对杏鲍菇品质的影响

### 2.2.1 MA+1-MCP复合处理对杏鲍菇呼吸速率和乙烯生成速率的影响

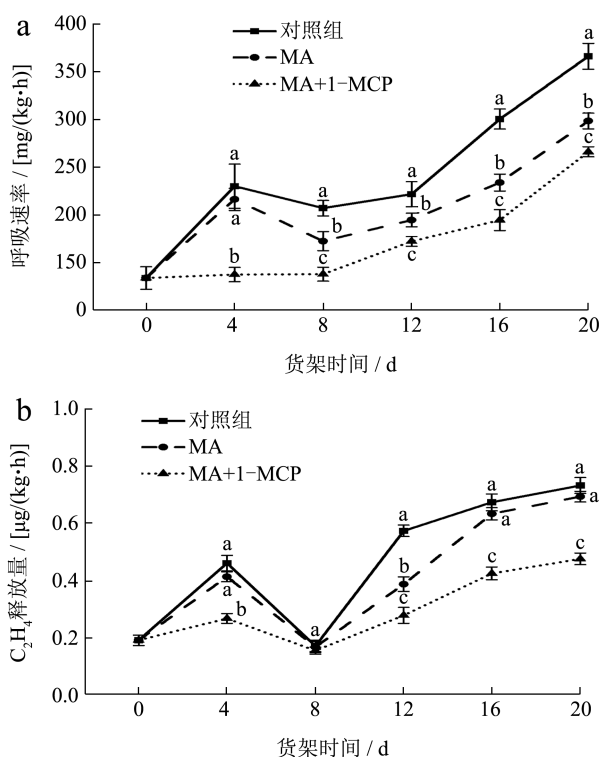


图2 MA+1-MCP处理对杏鲍菇呼吸速率(a)和乙烯释放量(b)的影响

Fig.2 Effects of MA+1-MCP treatment on respiration rate (a) and ethylene release (b) of *Pleurotus eryngii*

注:小写字母不同表示差异显著( $P < 0.05$ ),下同。

呼吸速率是影响果蔬成熟衰老的重要因子。由

图2a可看出在整个货架期间,杏鲍菇的呼吸速率整体呈先上升后下降再上升趋势,MA和MA+1-MCP处理在4d后显著低于对照组( $P < 0.05$ ),其中在8~20d期间复合处理的呼吸速率又显著低于MA组( $P < 0.05$ )。这说明MA结合1-MCP处理可在单独MA的基础上,进一步有效抑制杏鲍菇的呼吸速率。与本实验结果不同,Karagiannis等<sup>[26]</sup>采用代谢组学手段发现,MA结合1-MCP处理反而加速樱桃茎的衰老速度,出现茎褐变和较低的茎牵引力,而单独MA处理显著改变了这些特征,这可能由于低 $O_2$ 和高 $CO_2$ 环境改变了乙烯敏感性,而1-MCP可能诱导了促使果实成熟的脱落酸合成,进而影响果实的整体代谢。

乙烯是促进果实成熟与衰老的重要因子,1-MCP可作为乙烯受体抑制剂被广泛应用于呼吸跃变型果蔬的保鲜,可有效延缓其后熟软化和腐烂,延长果蔬保鲜期。由图2b可看出杏鲍菇的乙烯释放在第4天出现了短暂的峰值,是一种呼吸跃变型果蔬,这与黎春红等<sup>[27]</sup>的研究结果一致。在货架第4天时,对照组与MA+1-MCP组差异显著( $P < 0.05$ ),但与MA组无显著差异;第8天时,对照组与处理组间无差异;在12~20d时,MA+1-MCP组显著低于对照组和MA组( $P < 0.05$ ),但MA组在16d后与对照组无显著差异。由此可见,单独MA处理对杏鲍菇的呼吸作用抑制效果显著,但对其乙烯释放的控制效果不佳,当MA与1-MCP联合时,可同时有效抑制杏鲍菇呼吸速率和乙烯释放。Both等<sup>[28]</sup>研究了1-MCP应用于储存在惰性气体中的“银河”苹果,也发现该复合处理可有效控制乙烯生成量和呼吸强度,减少其生理失调。

### 2.2.2 MA+1-MCP复合处理对杏鲍菇ACC含量、ACS和ACO活性的影响

在植物细胞中,乙烯是由S-腺苷蛋氨酸(SAM)合成的,SAM通过ACS转化为ACC。ACC随后被ACO氧化,产生乙烯、 $CO_2$ 和氰化物,因此乙烯的产生率是由其直接前体ACC水平控制的<sup>[15]</sup>。由图3a所示,杏鲍菇ACC含量在货架期间呈波动变化。在货架期间,MA组ACC含量在第12~16天期间显著低于对照组( $P < 0.05$ ),而MA+1-MCP组在整个货架期间显著低于对照组,且显著低于除16d后的MA组( $P < 0.05$ )。尤其在4d时对照组的ACC含量为MA的1.02倍,而MA组为MA+1-MCP组的1.34倍。这说明MA对抑制ACC含量上升效果



不理想, 当结合 1-MCP 处理时, 对其抑制效果有明显改善。

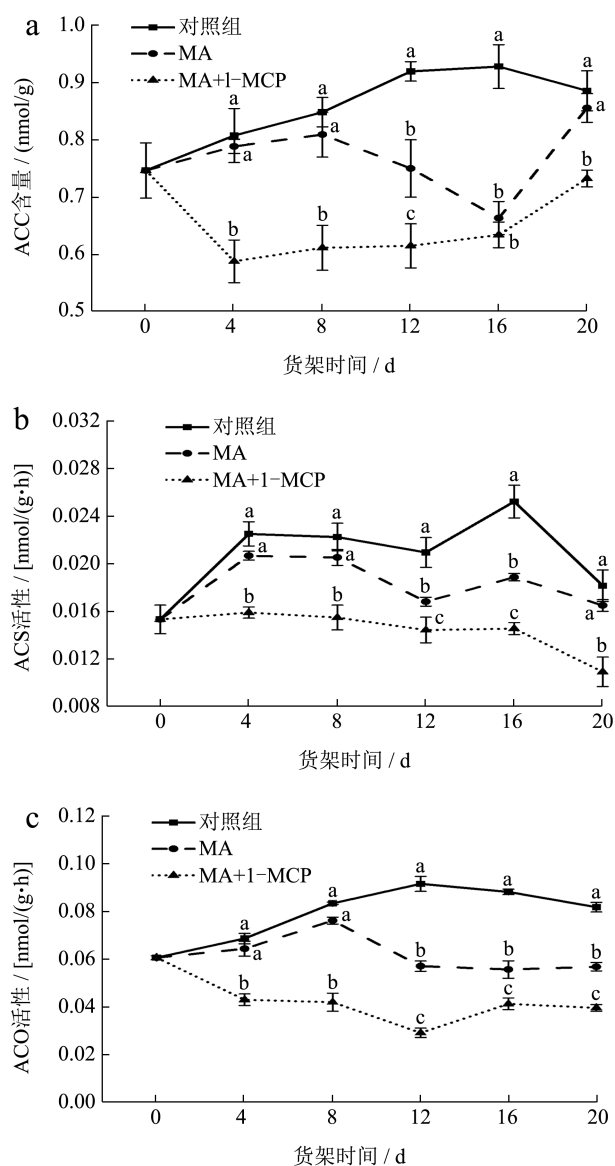


图 3 MA+1-MCP 处理对杏鲍菇 ACC (a) 含量、ACS (b) 和 ACO (c) 活性的影响

Fig.3 Effects of MA+1-MCP treatment on ACC (a) content, ACS (b) and ACO (c) activities of *Pleurotus eryngii*

图 3b 显示, 对照组 ACS 活性在 4~8 d 时与 MA 组无显著差异, 但高于 MA+1-MCP 组 41.78%~43.95%; 在 12~16 d 时, 高于 MA 组 24.66%~33.78%、高于 MA+1-MCP 组 45.35%~73.76%; 在 18 d 时, MA 组与对照组无差异, 而 MA+1-MCP 组显著低于 MA 和对照组 ( $P < 0.05$ )。图 3c 显示, 对照组和 MA 组杏鲍菇 ACO 活性在货架期间呈先上升后下降的趋势, 而 MA+1-MCP 组则呈波动下降的趋势。因此, 在货架期间, MA+1-MCP 组 ACO 活性显著低于

MA 和对照组 ( $P < 0.05$ ), MA 组则仅在 8 d 后显著低于对照组 ( $P < 0.05$ )。结合 ACS 的结果, MA 可有效抑制 ACS 和 ACO 活性上升, 当结合 1-MCP 时对其抑制效果更佳。由此可见, MA 在联合 1-MCP 处理后有效抑制了杏鲍菇的 ACC 含量、ACS 和 ACO 的活性上升, 从而有效控制了其乙烯的生成。Saichol 等<sup>[29]</sup>也得出 MA 结合 1-MCP 处理通过抑制香蕉 ACC 合成酶和 ACC 氧化酶的活性使其乙烯产量降低, 从而延缓了香蕉的贮藏寿命。

### 2.2.3 MA+1-MCP 复合处理对杏鲍菇褐变度、PPO 和 PAL 活性的影响

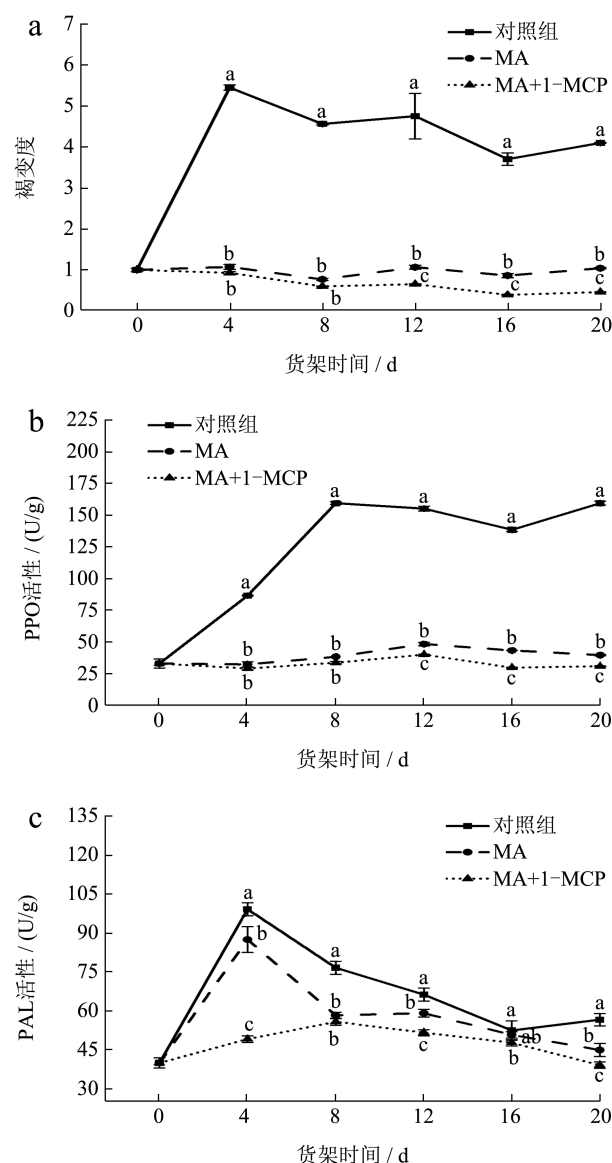


图 4 MA+1-MCP 处理对杏鲍菇褐变度 (a)、PPO (b) 和 PAL (c) 活性的影响

Fig.4 Effects of MA+1-MCP treatment on browning degree (a), PPO (b) and PAL (c) activity of *Pleurotus eryngii*

杏鲍菇采后衰老特征主要体现为褐变和腐烂。在本课题组的前期研究中发现, MA 可有效抑制杏鲍菇的采后呼吸速率、细胞膜透性和 MDA 含量的增加, 并维持较高的可滴定酸含量, 延缓其采后褐变和腐烂<sup>[10]</sup>。在此基础上, 本研究将 1-MCP 制作成便携式保鲜卡应用于 MA, 发现对照组褐变度在 4~12 d 高于 MA 组 4.44~5.06 倍、高于 MA+1-MCP 组 5.86~7.28 倍(图 4a); 在 16~20 d 时高于 MA 组 3.93~4.29 倍、高于 MA+1-MCP 组 8.85~9.42 倍; 在整个货架期间, MA 组显著低于对照组 ( $P < 0.05$ ), 而 MA+1-MCP 组又在 12 d 后显著低于 MA 组 ( $P < 0.05$ )。结合表型结果可知, 单独的 MA 处理在 12 d 时有效控制了杏鲍菇的腐烂, 但仍产生了一定程度的褐变现象, 而 1-MCP 结合 MA 复合处理可进一步延缓杏鲍菇的采后褐变进程, 延长其低温货架保鲜期。

由图 4b 可知, 对照组 PPO 活性在货架 4 d 后急剧上升, 而 MA 和 MA+1-MCP 组则整体较稳定。在整个货架期间, MA 和 MA+1-MCP 组 PPO 活性显著低于对照组 ( $P < 0.05$ ), 其中 MA+1-MCP 在 12 d 后显著低于 MA 组 ( $P < 0.05$ ); 尤其在 16 d 时, 对照组的 PPO 活性是 MA 的 3.22 倍, MA 组是 MA+1-MCP 组的 1.47 倍。图 4c 显示, 酚类物质合成关键酶 PAL<sup>[30]</sup> 的活性在货架期间呈先上升后下降的趋势, 对照组 PAL 活性在 4~8 d 高于 MA 组 13.33%~31.43%、高于 MA+1-MCP 组 37.31%~101.69%; 在 12~20 d 时高于 MA 组 12.11%~25.93%、高于 MA+1-MCP 组 28.39%~44.68%。由此可推测, MA+1-MCP 在单独的 MA 的基础上进一步抑制了杏鲍菇的 PPO 和 PAL 活性, 并延缓了其酶促褐变进程。同时本文褐变度的结果也证明了这一推测。Li 等<sup>[30]</sup> 研究也发现 0.5  $\mu\text{L/L}$  1-MCP 结合微孔膜包装 (Micro-perforated Film Packaging, MFP) 处理可抑制莱阳梨 PAL 活性, 降低细胞膜通透性和 MDA 含量, 来延缓莱阳梨果实冷藏过程中果肉褐变, 由此延长其保鲜期。

#### 2.2.4 MA+1-MCP 复合处理对杏鲍菇相对电导率和 MDA 含量的影响

由图 5a 可知, 对照组相对电导率在 4 d 时分别是 MA 和 MA+1-MCP 组的 2.89 倍和 4.02 倍, 在 12 d 时分别是 MA 和 MA+1-MCP 组的 1.44 倍和 1.94 倍。在整个货架期间, 对照组显著高于 MA 组 ( $P < 0.05$ ), 而 MA 组显著高于 MA+1-MCP 组

( $P < 0.05$ )。由图 5b 可知, 在整个货架期间, MA 和 MA+1-MCP 处理组 MDA 含量显著低于对照组 ( $P < 0.05$ ), 其中 MA+1-MCP 组在 4、16、20 d 时显著低于 MA 组 ( $P < 0.05$ ), 尤其在货架 20 d 时, 对照组 MDA 含量是 MA 的 2.26 倍, 而 MA 组是 MA 结合 1-MCP 处理的 1.53 倍。这表明 MA 可延缓杏鲍菇 MDA 积累, 当结合 1-MCP 进行处理时, 该效果更佳。Li 等<sup>[30]</sup> 发现 0.5  $\mu\text{L/L}$  1-MCP+MFP 处理梨果实同样可以抑制其 MDA 的生成, 降低细胞膜通透性并抑制 MDA 含量在贮藏期间的积累。

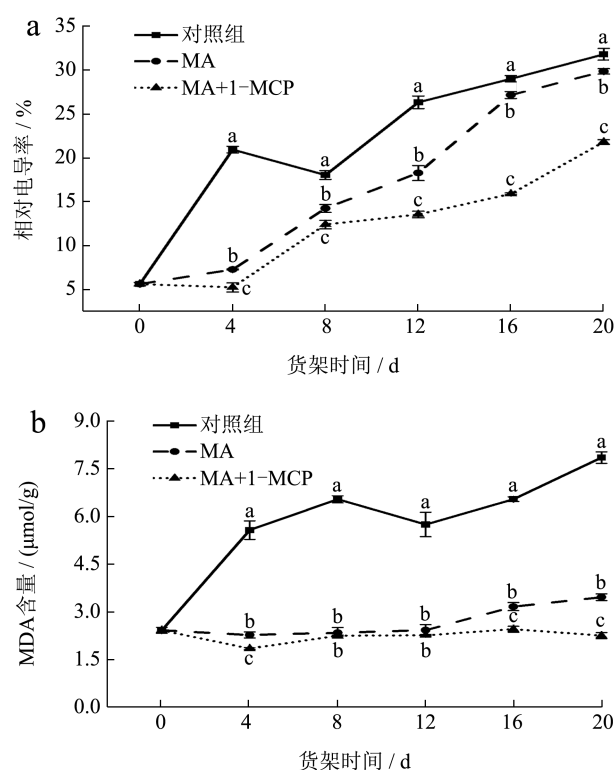


图 5 MA+1-MCP 处理对杏鲍菇相对电导率 (a) 和 MDA (b) 含量的影响

Fig.5 Effects of MA+1-MCP treatment on relative conductivity (a) and MDA (b) content of *Pleurotus eryngii*

植物在衰老过程中活性氧物质的积累会导致膜脂过氧化反应加速, 同时伴随 MDA 的生成, 细胞膜透性逐渐增加, 由此细胞结构和功能逐渐被破坏<sup>[31]</sup>。当生物膜破坏时, 细胞内酚类物质和 PPO 酶接触产生酶促褐变反应, 由此产生褐变<sup>[32]</sup>。综合图 5 的结果我们得出 MA 处理可有效降低杏鲍菇的相对电导率和 MDA 的积累, 而当联合 1-MCP 进行复合处理时效果更佳, 这说明 MA 在联合 1-MCP 后可进一步减缓杏鲍菇组织的膜脂过氧化反应速度, 由此进一步延缓杏鲍菇的采后褐变进程。



### 2.2.5 MA+1-MCP复合处理对杏鲍菇总酚和类黄酮含量的影响

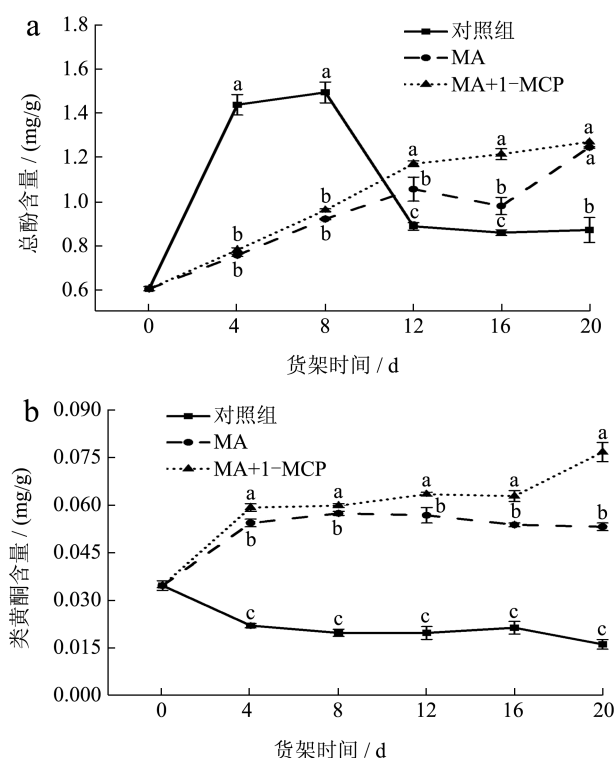


图6 MA+1-MCP处理对杏鲍菇总酚(a)含量和类黄酮(b)含量的影响

Fig.6 Effects of MA+1-MCP treatment on total phenolic (a) content and total flavonoid (b) content of *Pleurotus eryngii*

酚类、类黄酮类等次级代谢产物均可反应果蔬的抗氧化性能。杏鲍菇总酚含量结果(图6a)显示,对照组杏鲍菇总酚含量在货架期间呈先上升后下降的趋势,而MA和MA+1-MCP组整体呈上升趋势。在4~8 d期间,对照组显著高于MA和MA+1-MCP组;而在12~20 d,MA和MA+1-MCP组总酚含量显著高于对照组( $P < 0.05$ ),其中MA组在12~16 d显著低于MA+1-MCP组( $P < 0.05$ ),其中在16 d时,对照组低于MA组12.30%;MA组低于MA结合1-MCP处理19.29%。造成以上结果可能是因为在4 d时杏鲍菇组织细胞开始破裂造成膜系统明显损伤,PPO酶与酚类物质迅速产生酶促褐变反应,由此诱导酚类物质大量合成,从而使褐变底物逐渐增多<sup>[33]</sup>。PAL的活性在4~8 d期间急剧上升,且对照组显著高于MA和MA+1-MCP组的结果也验证了这一推测。而在12 d后,对照组杏鲍菇组织迅速衰老,酶促褐变反应加剧消耗了大量的酚类物质;在此期间,MA处理组刚开始出现轻微褐变反应,MA+1-MCP组则仍未表现出褐变现象,酚类物质底

物消耗少<sup>[34]</sup>;由此,在货架后期对照组杏鲍菇中的总酚含量显著低于MA和MA+1-MCP组。

杏鲍菇的类黄酮含量在货架期间呈下降趋势,而经MA和MA+1-MCP处理后,在4 d时可以维持在较稳定水平(图6b)。由此在整个货架期间,对照组杏鲍菇类黄酮含量显著低于MA组和MA+1-MCP处理组( $P < 0.05$ ),其中MA组又在12~20 d显著低于MA+1-MCP组( $P < 0.05$ )。这可能是由于MA和MA+1-MCP处理降低了杏鲍菇PPO活性,从而直接减少了类黄酮的氧化<sup>[35]</sup>。可见,MA可有效抑制杏鲍菇类黄酮含量的下降,当结合1-MCP时效果更佳,由此进一步提升杏鲍菇机体抗氧化能力。董成虎等<sup>[36]</sup>也研究得出,用浓度为 $1.07 \text{ mg/m}^3$ 的1-MCP处理树莓可以延缓树莓总酚和类黄酮含量的下降,促进树莓贮藏前期花青素的积累。

### 2.2.6 MA+1-MCP复合处理对杏鲍菇抗氧化酶活性的影响

抗氧化酶POD、CAT和SOD是植物抗氧化系统中的主要酶,其活性水平反映植物受外界逆境影响的程度,三者协同作用维持植物体内的自由基含量保持稳态,防止由于自由基过量引起的植物生理失调。由图7a显示,MA+1-MCP组POD活性在货架期间显著高于MA组( $P < 0.05$ ),而MA组显著高于对照组( $P < 0.05$ );尤其在货架4~8 d期间,对照组POD活性低于MA组41.36%~51.10%、MA组低于MA+1-MCP组47.09%~58.18%。在4~8 d期间,对照组CAT活性低于MA组54.26%~65.71%、低于MA+1-MCP组72.36%~72.86%(图7b);在12~16 d时,低于MA组52.42%~63.96%、低于MA+1-MCP处理组75.88%~77.59%。而图7c显示,在整个货架期间,MA和MA+1-MCP组SOD活性显著高于对照组( $P < 0.05$ ),其中MA+1-MCP处理在4~20 d期间显著高于MA组( $P < 0.05$ );尤其在8 d时对照组低于MA组39.34%、MA组低于MA+1-MCP组35.10%。

以上结果说明相比对照组,MA的POD、CAT和SOD活性保持在较高水平,当结合1-MCP处理时效果更佳。因此我们推测MA在联合1-MCP处理后,进一步诱导了杏鲍菇中的抗氧化酶POD、CAT和SOD的活性上升,由此增强了其组织对活性氧的清除能力,从而减缓了其膜脂过氧化反应速度<sup>[37]</sup>,本文MDA和相对电导率的结果也验证这一推测。马胜男等<sup>[38]</sup>发现0.015 mm聚乙烯膜包装结

合 1-MCP 处理同样可以提升‘红丰’梨的抗氧化酶活性，由此提高了其抗氧化能力，进一步保持了其采后品质。

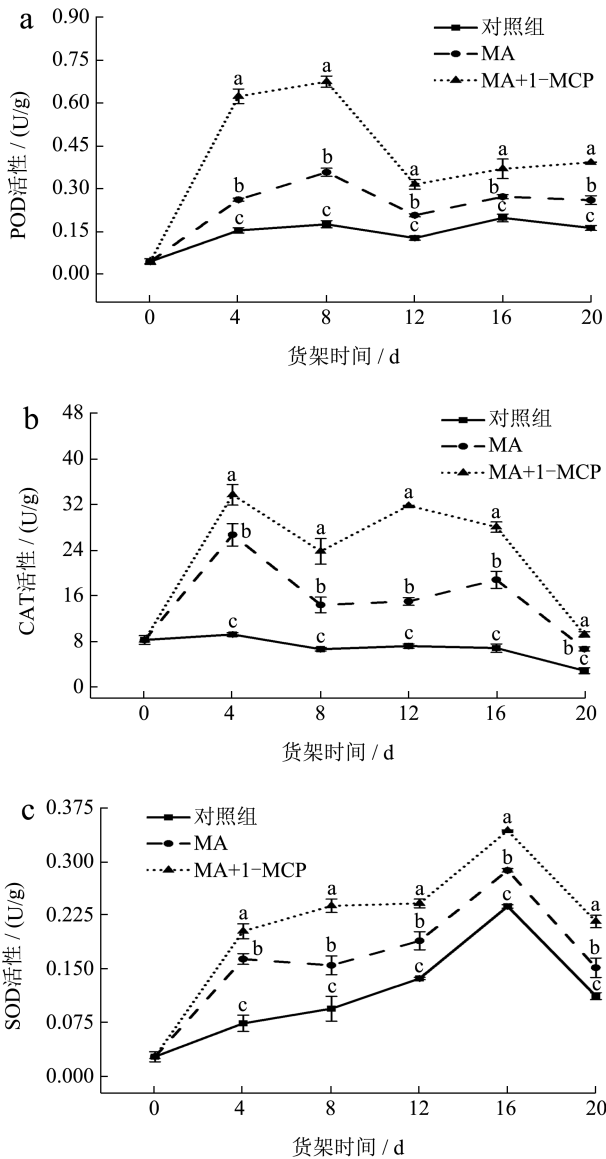


图 7 MA+1-MCP 处理对杏鲍菇 POD (a)、CAT (b) 和 SOD (c) 活性的影响

Fig.7 Effects of MA+1-MCP treatment on the activities of POD (a), CAT (b) and SOD (c) of *Pleurotus eryngii*

### 2.2.7 相关性分析

图 8 为采后杏鲍菇乙烯释放量、褐变相关酶、呼吸速率及抗氧化酶之间的相关性分析结果。由图可知，乙烯释放量与呼吸速率和相对电导率呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )，与 ACC 含量、PPO 活性和 MDA 含量呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )，但与类黄酮含量和 POD 活性呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。同时褐变度与 PPO 活性、ACC 含量、ACS 活性和 MDA 含量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )，与

PAL 活性呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )，但与类黄酮含量和抗氧化酶呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )。该结果表明，杏鲍菇的乙烯释放量与其呼吸速率和 ACC 含量等直接关联，而杏鲍菇的采后褐变与 PPO 活性及抗氧化酶活性直接关联，同时也与乙烯代谢关键酶密切相关。

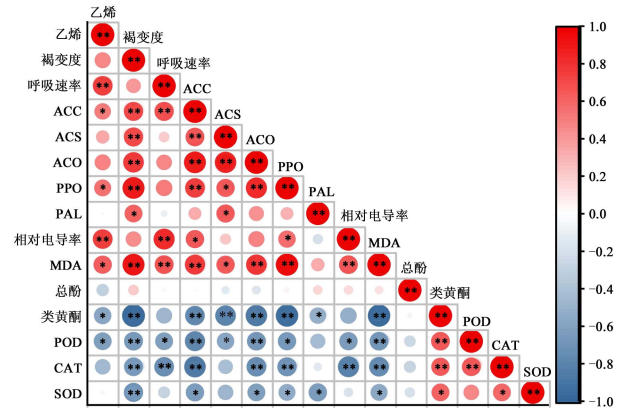


图 8 杏鲍菇货架期间乙烯代谢和酶促褐变相关指标的相关性分析

Fig.8 Correlation analysis of indicators related to ethylene metabolism and enzymatic browning of *Pleurotus eryngii* during shelf life

注：图中 \* 表示显著相关 ( $P < 0.05$ )；\*\* 表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )。

### 3 结论

综上，19  $\mu\text{m}$  聚乙烯保鲜袋结合 1-MCP 保鲜卡处理，可在单独保鲜袋的基础上，通过进一步抑制乙烯合成关键酶活性来降低杏鲍菇乙烯的生成量；同时通过提高其组织的抗氧化酶活性，有效清除其组织活性氧，减缓其膜脂过氧化速度，从而缓解 MDA 对细胞膜产生损伤，由此延缓 PPO 与酚类物质接触而产生酶促褐变的速度。最终，MA 在包装袋打孔的基础上，将货架期由 3~4 d 延长至 10~12 d，MA 在联合 1-MCP 处理后，进一步延长了其低温货架期约 7 d。

### 参考文献

- [1] 李秀凉,杨涵冰,吕莹,等.杏鲍菇多糖组分的分离纯化及结构鉴定[J].食品安全质量检测学报,2022,13(7):2097-2104.
- [2] 马高兴,王晗,杨文建,等.不同提取工艺对杏鲍菇多糖结构特征及免疫活性的影响[J].食品科学,2022,43(17):42-49.
- [3] OKE F, ASLIM B. Protective effect of two edible mushrooms against oxidative cell damage and their phenolic composition [J]. Food Chemistry, 2011, 128(3):

- 613-619.
- [4] 谢丽源,郑林用,彭卫红,等.不同包装膜对杏鲍菇冷藏品质和贮藏效果的影响[J].食品科学,2015,36(22):197-202.
- [5] LI P X, ZHANG X, HU H L, et al. High carbon dioxide and low oxygen storage effects on reactive oxygen species metabolism in *Pleurotus eryngii* [J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 85: 141-146.
- [6] 陆健东,王丹凤,钱炳俊,等.短波紫外线辐照对杏鲍菇保鲜效果的研究[J].浙江农业科学,2014,3:348-351.
- [7] 赵梅,王琦,孙悦,等.纳米壳聚糖复合涂膜对杏鲍菇保鲜效果的影响[J].食品研究与开发,2018,39(9):174-177.
- [8] 朱凯,吴伟杰,房祥军,等.发光二极管蓝光结合紫外线处理对鲜切杏鲍菇贮藏品质的影响[J].食品科学,2022,43(9):223-231.
- [9] 陈淑慧,王彦,赵丹,等.膜材料在果蔬自发气调过程中的应用及发展[J].膜科学与技术,2022,42(3):153-162.
- [10] 胡花丽,李鹏霞,王毓宁.不同薄膜包装对杏鲍菇采收后衰老生理的影响[J].食品与发酵工业,2012,38(7):196-200.
- [11] 刘达玉,胡海洋,陈卫军,等.纳米薄膜真空包装杏鲍菇在贮藏中的风味品质变化[J].食品工业科技,2023,44(14):246-253.
- [12] 宁明岸,史君彦,王清,等.臭氧结合低温自发气调包装对平菇贮藏品质的影响[J].北方园艺,2020,21:80-85.
- [13] RASHID G, EBRAHIM A, SHERVIN A. Investigating the effect of chitosan, nanopackaging, and modified atmosphere packaging on physical, chemical, and mechanical properties of button mushroom during storage[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(1): 224-236.
- [14] KSHANAPRAVA D, K D S, M B L, et al. Effect of natural antimicrobials (clove and garlic) on shelf life and quality of mushroom (*Volvariella volvacea*) under modified atmosphere [J]. Journal of Packaging Technology and Research, 2018, 2(3): 243-249.
- [15] 曹森,马超,黄亚欣,等.1-MCP对猕猴桃后熟品质的影响[J].食品与发酵工业,2019,45(14):184-190.
- [16] 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收水蜜桃的保鲜效果[J].食品工业科技,2022,43(17):363-370.
- [17] 杨国辉,陈天赐,郑舒恒,等.聚赖氨酸和1-MCP联合处理对草菇贮藏期间表面细菌变化的影响[J].微生物学通报,2022,49(8):3232-3243.
- [18] 高帅平,魏书信,王安建,等.两种气调保鲜方式对香菇贮藏品质及生理生化性质的影响[J].食品工业科技,2021,42(4):276-281.
- [19] 王瑶,罗淑芬,胡花丽,等.外源NO处理对采收鲜莲子品质及乙烯代谢的影响[J].现代食品科技,2019,35(11):100-108.
- [20] 周宏胜,孙凤杰,罗淑芬,等.氯吡苯脲处理对采收莲蓬保鲜效果的影响[J].食品科学,2018,39(15):225-232.
- [21] 张璇,胡花丽,王毓宁,等.气调处理对杏鲍菇货架期品质影响的多变量分析[J].食品科学,2014,35(20):265-270.
- [22] ARAÚJO, FERNANDA F D, COSTA L C D, et al. Action of ethylene on postharvest of summer squash 'Menina Brasileira' [J]. Revista Ceres, 2017, 64(4): 360-367.
- [23] 韦雪,赵晓燕,王丹,等.不同CO<sub>2</sub>比例的鲜切马铃薯气调保鲜效果[J].现代食品科技,2023,39(5):148-156.
- [24] 曹建康,姜微波,赵玉梅.果蔬采收后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007.
- [25] LI X R, PENG S J, YU R Y, et al. Co-application of 1-MCP and laser microporous plastic bag packaging maintains postharvest quality and extends the shelf-life of honey peach fruit [J]. Foods, 2022, 11(12): 1733.
- [26] KARAGIANNIS E, MICHAILIDIS M, KARAMANOLI K, et al. Postharvest responses of sweet cherry fruit and stem tissues revealed by metabolomic profiling [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2018, 127: 478-484.
- [27] 黎春红,张雷刚,罗淑芬,等.外源乙烯对采收后杏鲍菇内源乙烯释放和衰老进程的影响[J].食品科学,2018,39(23):182-191.
- [28] BOTH V, BRACKMANN A, THEWES F R, et al. The influence of temperature and 1-MCP on quality attributes of 'Galaxy' apples stored in controlled atmosphere and dynamic controlled atmosphere [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2018, 16: 168-177.
- [29] SAICHOL K, APINYA W, WOUTER G V D. Apparent synergism between the positive effects of 1-MCP and modified atmosphere on storage life of banana fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 85: 173-178.
- [30] LI F J, ZHANG X H, SONG B C, et al. Combined effects of 1-MCP and MAP on the fruit quality of pear (*Pyrus bretschneideri* Rehd cv. Laiyang) during cold storage [J]. Scientia Horticulturae, 2013, 164: 544-551.
- [31] 袁芳,邱诗铭,李丽.不同保鲜剂复合处理对鲜切芒果活性氧代谢、细胞膜透性和褐变的影响[J].食品科学,2020,41(3):218-223.
- [32] LUO S F, HU H L, WANG Y, et al. The role of melatonin in alleviating the postharvest browning of lotus seeds through energy metabolism and membrane lipid metabolism [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 167(C): 111243.
- [33] 高建晓,王毓宁,李鹏霞,等.漆蜡涂膜对鲜莲蓬采收后褐变的影响[J].食品科学,2016,37(18):275-282.
- [34] CHEN Y Z, LIN H T, ZHANG H L, et al. Dicyclohexylcarbodiimide and disodium succinate regulate the browning development in fresh longan pericarp by modulating the antioxidant system and the metabolisms of membrane lipids and phenolics [J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 203: 112388.
- [35] 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.
- [36] 董成虎,任洁,邓勇,等.不同浓度1-MCP处理对树莓贮藏保鲜效果的影响[J].保鲜与加工,2023,23(9):6-11.
- [37] 徐雨晗,包垠秋,易阳,等.乙醇熏蒸处理对鲜切莲藕片褐变和活性氧代谢的影响[J].中国食品学报,2023,23(1):259-266.
- [38] 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.