

不同自发气调包装膜处理下茄子低温贮藏品质的比较

罗静红^{1,2}, 陈晴¹, 蔡鹏^{2,3}, 唐月明^{1,2}, 杨艺雯^{1,2}, 罗芳耀^{1,2}, 高佳^{1,2*}

(1. 四川省农业科学院农产品加工研究所, 食物与营养健康研究所, 四川成都 610066) (2. 四川省蔬菜工程技术研究中心, 四川彭州 611934) (3. 四川省农业科学院园艺研究所, 四川成都 610066)

摘要: 为了调查不同透气性参数的包装袋对茄子采后低温自发气调包装贮藏过程中品质变化的影响, 明确适宜茄子低温贮藏的包装膜材料。采用尺寸为 20 cm×50 cm 的 5 种不同透气性参数的高密度聚乙烯 (High Density Polyethylene, HDPE) 袋对茄子进行密封包装, 在 (12±0.5) °C 下贮藏 30 d, 测定贮藏过程中包装袋内气体成分、果皮硬度、果肉色差、感官评价、过氧化物酶 (Peroxidase, POD)、过氧化氢酶 (Catalase, CAT) 和多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO) 活性的变化情况。结果表明, 包装膜透气性会显著影响茄子采后自发气调贮藏 (Modified Atmosphere Packaging, MAP) 过程中的各项测定指标。O₂ 和 CO₂ 透气性参数分别为 (4 623±834) cm³·(m²·d·0.1 MPa)⁻¹ 和 (18 033±3 356) cm³·(m²·d·0.1 MPa)⁻¹ 的包装处理贮藏 10 d 后包装袋内 O₂ 4.94% (φ)~6.29% (φ) 和 CO₂ 4.16% (φ)~4.62% (φ) 含量达到相对稳定水平, 贮藏第 30 天时茄子仍保持最高的外观指数 (66.11) 和最低的腐烂指数 (18.75)、冷害指数 (7.50), 果皮硬度和果肉色差 Hue 值维持较好, 维持 POD 和 CAT 抗氧化酶的活性, 抑制 PPO 活性水平维持在较低范围区间。因此, 该包装膜可作为适宜的 MAP 包装材料结合低温贮藏方法延长茄子采后保鲜期 30 d, 为生产中茄子采后贮藏方法提供重要参考。

关键词: 茄子; 自发气调包装; 透气性; 冷害; 贮藏品质

文章编号: 1673-9078(2026)07-132-139

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.7.0596

Comparison of Eggplant Quality among Different Modified Atmosphere Packaging Films during Low-temperature Storage

LUO Jinghong^{1,2}, CHEN Qing¹, CAI Peng^{2,3}, TANG Yueming^{1,2}, YANG Yiwen^{1,2}, LUO Fangyao^{1,2}, GAO Jia^{1,2*}

(1. Institute of Agro-products Processing Science and Technology, Institute of Food and Nutrition Health, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China) (2. Sichuan Research Center of Vegetable Engineering and Technology, Pengzhou 611934, China) (3. Institute of Horticulture, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China)

Abstract: The effect of packaging bags with different gas permeability parameters on the quality changes of eggplants during postharvest low-temperature modified atmosphere packaging (MAP) storage was investigated, and suitable packaging film materials for eggplant preservation under low-temperature storage were identified. Five types of high-density polyethylene (HDPE) bags (20 cm×50 cm) with varying gas permeability parameters were used to seal and store eggplants at (12 ± 0.5) °C for 30 days. Changes in in-bag gas composition (O₂ and CO₂); peel firmness; flesh color difference; sensory evaluation scores; and activities of peroxidase

引文格式:

罗静红,陈晴,蔡鹏,等.不同自发气调包装膜处理下茄子低温贮藏品质的比较[J].现代食品科技,2026,42(7):132-139.

LUO Jinghong, CHEN Qing, CAI Peng, et al. Comparison of eggplant quality among different modified atmosphere packaging films during low-temperature storage [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(7): 132-139.

收稿日期: 2025-04-28; 修回日期: 2025-07-01; 接受日期: 2025-07-08

基金项目: 四川省农作物育种攻关项目 (2021YFYZ0022); 国家现代农业产业技术体系四川省大宗蔬菜创新团队 (SCCXTD-2024-5)

作者简介: 罗静红 (1993-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 果蔬贮藏保鲜与加工, E-mail: 937251130@qq.com

通讯作者: 高佳 (1983-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬贮藏保鲜与加工, E-mail: jiagao129@163.com

(POD), catalase (CAT), and polyphenol oxidase (PPO) were measured during storage. The results showed that all measured indicators were significantly influenced by the gas permeability parameters of the packaging film during postharvest MAP storage. Packaging with O₂ and CO₂ permeability parameters of $(4\ 623 \pm 834)\ \text{cm}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot 0.1\ \text{MPa})^{-1}$ and $(18\ 033 \pm 3\ 356)\ \text{cm}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot 0.1\ \text{MPa})^{-1}$, respectively, achieved relatively stable gas levels, with in-bag O₂ of 4.94% (φ)~6.29% (φ) and CO₂ of 4.16% (φ)~4.62% (φ) within ten days of storage. After 30 days, the eggplants displayed the highest appearance index (66.11), lowest decay index (18.75), and lowest chilling injury index (7.50), with good preservation of peel firmness and flesh color difference (hue value). Additionally, POD and CAT antioxidant enzyme activities were sustained, and PPO activity remained low. Therefore, this packaging film is a suitable MAP material that can be used in combination with low-temperature storage to extend the shelf life of eggplants by 30 days, thus, providing an important reference for the postharvest storage methods of eggplants during production.

Key words: eggplant; modified atmosphere packaging; gas permeability; chilling injury; storage quality

茄子 (*Solanum melongena* L.) 是茄科 (*Solanaceae*) 茄属 (*Solanum* L.) 一年生或两年生植物, 果实鲜嫩可口, 维生素、膳食纤维、花青素和多酚等营养物质丰富^[1], 具有降低胆固醇、抗癌、抗衰老等功效, 是一种深受消费者青睐的茄果类蔬菜。茄子作为一种喜温蔬菜, 其组织细胞结构较为柔软, 加之通常在夏秋季节成熟采收, 如果采后处理不当, 极易失水萎蔫腐烂或者受到低温损伤, 常温下保鲜期短 (3~5 d)。低温贮藏是生产中最常用的果蔬采后保鲜技术手段, 但茄子是冷敏型蔬菜, 过低的贮藏温度容易引发冷害, 表现为果面出现凹陷锈斑, 内部果肉组织褐变^[2], 导致商品价值降低、货架期缩短。同时, 单独低温贮存并不能解决贮藏过程中由于失水造成的果实萎蔫。因此, 开发一种适宜低温贮藏条件下能减轻茄子失水、腐烂且避免冷害发生的保鲜方式尤为重要。

包装技术作为果蔬采后商品化处理和贮藏保鲜品质调控的常用方法, 包装材料的选择直接影响果蔬呼吸代谢、水分迁移及衰老进程^[3]。自发气调包装 (Modified Atmosphere Packaging, MAP) 是一种相对成本低、方便好用的包装保鲜技术, 其通过聚乙烯薄膜 (Polyethylene, PE) 材料的选择性透气特性, 建立包装内外 O₂/CO₂ 动态平衡体系, 有效调控果蔬采后生理活动, 从而有效延长贮藏期。PE 薄膜材料是世界上使用最广泛的高分子包装材料, 常被用作自发气调保鲜袋对果蔬进行贮藏保鲜。近年研究表明, MAP 通过调节果蔬呼吸速率和代谢水平, 提高甜柿^[4]、秋葵^[5]等果蔬抗寒性, 实现对果蔬贮藏品质的显著提升。

近年在茄子包装保鲜研究方面也取得了较大进展, 前人分别在包装材料的类型、厚度以及结合化学保鲜剂开展研究。张冬寒等^[6]研究发现 PE 膜包装比微孔薄膜包装袋包装茄子效果更好。李春媛等^[7]比较了聚乙烯 (PE) 微孔保鲜膜和聚氯乙烯 (PVC) 保鲜膜两种自发气调包装 (MAP) 处理茄子的效果, PVC 包装

处理有利于茄子色泽维持, 微孔膜包装有利于果实中芦丁含量的保持。史君彦等^[8]研究了 20 °C 条件下不同厚度 PE 膜包装处理对圆茄保鲜效果的影响, 0.06 mm PE 包装处理能更好维持圆茄硬度和外观品质, 减少水分流失。谢晶等^[9]的研究表明气调包装 (2% CO₂+5% O₂+93% N₂) 能够抑制鲜切茄子的褐变、萎蔫等感官品质的下降, 并抑制 PPO 活性的增加和细菌的生长繁殖, 尤其在结合保鲜液处理后效果更加明显, 贮藏 8 d 仍保持较好的品质。

除了包装材料透气性, 贮藏温度也是影响果蔬采后 MAP 贮藏品质的重要因素^[10,11]。本试验基于已有的研究基础, 选择最适宜茄子贮藏的温度条件 (12 °C)^[12], 采用 5 种具有梯度透气性参数的高密度聚乙烯 (High Density Polyethylene, HDPE) 膜包装材料, 研究不同透气性参数的 MAP 处理与低温贮藏相结合对茄子贮藏品质的影响, 拟通过评价包装材料对包装袋内 O₂ 和 CO₂ 含量、茄子贮藏品质和酶活性的影响, 筛选出适宜茄子的低温 MAP 贮藏保鲜方法。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选用 ‘黑冠’ 品种茄子, 采自四川省成都市新津花园镇茄子种植基地。所选果实成熟度均符合商品茄采收标准, 采后 2 h 内立即运回实验室, 经筛选去除机械损伤和病斑果实, 置于 (12±0.5) °C 冷库中预冷 24 h 备用。

高密度聚乙烯包装膜材料 (MAP), 生产商为四川兴达塑料有限公司, O₂ 和 CO₂ 透气性参数如表 1 所示; 磷酸二氢钠、乙酸乙酯, 购于成都金山化学试剂有限公司; 愈创木酚, 中国余山化工厂; 磷酸氢二钠、过氧化氢, 成都市科隆化学品有限公司; 邻苯二酚,

上海麦克林生化科技有限公司；二硫苏糖醇、交联聚乙烯吡咯烷酮，北京索莱宝科技有限公司，以上试剂均为分析纯；实验用水为蒸馏水。

Check Mate II型氧气/二氧化碳气体分析仪，丹麦 Dansensor 公司；TA.XT plus 型质构仪，英国 SMS 公司；CR-400 型色差仪，日本 Konica Minolta 公司；TU-1810 型紫外可见分光光度计，北京普析通用仪器有限责任公司；CP214 型电子天平，奥豪斯仪器（上海）有限公司；Centrifuge5810R 型冷冻离心机，德国 Eppendorf 公司；Synergy HTX 型酶标仪，美国 Bio Tek 公司。

表 1 包装膜透气性参数

Table 1 Permeability parameters of packaging films			
处理	包装袋	O ₂ 透过量	CO ₂ 透过量
/(m PE)	厚度/μm	/[cm ³ ·(m ² ·d·0.1 MPa) ⁻¹]	/[cm ³ ·(m ² ·d·0.1 MPa) ⁻¹]
CK	不包装	—	—
10	10	21 360±1 540	76 080±4 558
20	20	10 867±462	41 867±2 031
25	25	8 087±650	31 520±2 471
30	30	4 623±834	18 033±3 356
65	65	1 865±155	7 213±740

1.2 试验方法

1.2.1 样品处理

将预冷后的茄子随机分为 6 组，每组 80 根茄子。处理组分别用 5 种供试 HDPE 包装膜（表 1）密封包装，包装袋尺寸为 20 cm×50 cm，每袋 2 根茄子；对照组不包装。处理组和对照组均在（12±0.5）℃冷库贮藏 30 d。以包装处理当天记为第 0 天，分别在贮藏第 1、10、20、30 天取样测定指标。测定时分别从每个处理中随机抽取 10 袋样品，测定包装袋内 O₂ 和 CO₂ 体积分数（对照组除外）、果皮硬度、果肉色差、外观指数、腐烂指数和冷害指数，并取 20 根茄子果实腰部 2 cm 厚果肉样品去皮，液氮粉碎冻样后在 -80 ℃下保存用于酶活性指标测定。

1.2.2 指标测定

1.2.2.1 O₂和CO₂体积分数

从冷库中取出样品后立即采用氧气/二氧化碳气体分析仪测定，结果以体积分数 %（φ）表示。

1.2.2.2 果皮硬度

采用 TA.XT plus 质构仪测定。探头直径为 2 mm，探头测试速度为 1 mm·s⁻¹，穿刺深度 20 mm，穿刺测试位置为每根茄子腰部。果皮硬度记为穿刺果实表面时测试力的峰值，以牛顿（N）表示。

1.2.2.3 果肉色差

采用 CR-400 色差仪测定。测试茄子纵剖后腰部靠近果皮 2 cm 处的果肉色差，注意避开果实种子，每果取两个点进行测定。

1.2.2.4 外观指数、腐烂指数和冷害指数

外观指数^[13]评定分为 9 级：1~2 级，失去食用价值至腐烂变质；3~4 级，失去商品性至食用价值最低限，表面粗糙，色泽变浅；5~6 级，商品性明显下降；7~8 级，稍有变化，光泽下降；9 级，新鲜，有光泽。

$$C = \frac{\sum(a \times b')}{(9 \times b)} \times 100$$

(1)

式中：

C——外观指数；

a——级别；

b'——该级个数；

b——总个数。

腐烂指数^[14]评定划分为 4 级：0 级，无腐烂；1 级，果蒂处腐烂长菌；2 级，果面腐烂面积小于 1/3；3 级，果面腐烂面积 1/3-1/2；4 级，果面腐烂面积大于 1/2。

$$D = \frac{\sum(a \times b')}{(4 \times b)} \times 100$$

(2)

式中：

D——外观指数；

a——级别；

b'——该级个数；

b——总个数。

冷害指数^[15]评定划分为 4 级：0 级，无冷害；1 级，冷害表面积 0%~25%；2 级，冷害表面积 25%~50%；3 级，冷害表面积 50%~75%；4 级，冷害表面积 75%~100%。

$$E = \frac{\sum(a \times b')}{(4 \times b)} \times 100$$

(3)

式中：

E——外观指数；

a——级别；

b'——该级个数；

b——总个数。

1.2.2.5 POD、CAT和PPO活性

参照曹建康等^[16]的方法略有改动，分别在 470、240、410 nm 下测定吸光度值的变化情况（每 10 s 记录一次），共记录 3 min，采用 -80 ℃下保存的冷冻样品测定。

1.3 数据处理

试验数据用 Microsoft Excel 2010 软件进行统计与

计算, 每个处理每个时间节点测定 20 个样本, 鲜样指标设 20 个重复, 冻样指标设 3 个重复, 所有平均值数据误差记为标准误差 SE; 采用 SPSS 3.0 数据分析软件进行单因素方差分析; 采用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 贮藏期间袋内 O₂ 和 CO₂ 体积分数的变化

对不同处理组包装袋内 O₂ 和 CO₂ 体积分数进行测定, 结果如图 1 所示, 茄子在 12 °C 贮藏 30 d 期间, 10、20 和 25 μm PE 袋处理包装袋内的 O₂ 含量均呈不同程度下降趋势; 30 和 65 μm PE 袋处理贮藏前期 O₂ 含量迅速下降, 第 10 天后呈缓慢上升趋势。整个贮藏期间, 10 μm PE 袋处理的 O₂ 含量维持在较高水平, 显著高于其他处理。贮藏第 10 天, 30 和 65 μm PE 袋处理的 O₂ 含量显著降低, 第 10 天之后, 略微升高并趋于平稳, 且 30 μm PE 袋处理的 O₂ 含量维持在 4.94% (φ) ~6.26% (φ)。10 和 20 μm PE 袋处理的 O₂ 含量在贮藏期间整体呈缓慢降低的趋势。贮藏至第 30 天, 10 μm PE 袋处理的 O₂ 含量显著高于其他处理组, 达 14.71% (φ)。

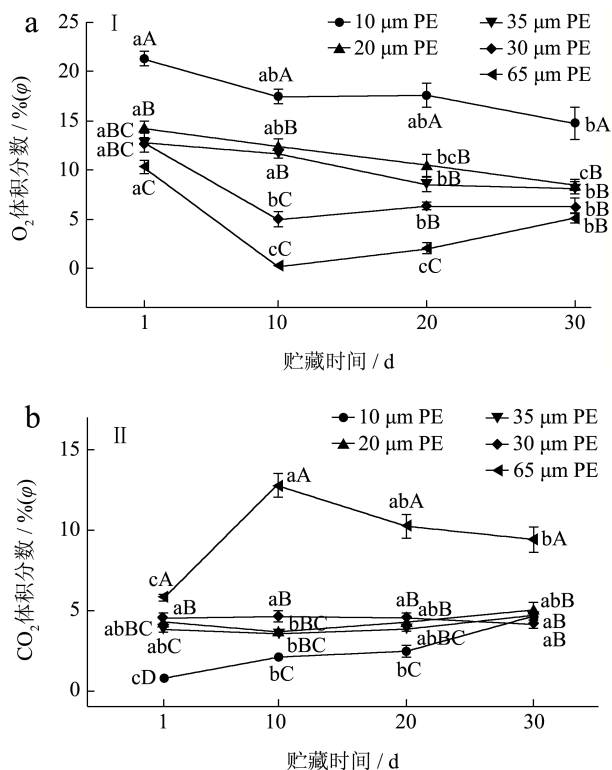


图 1 包装袋内 O₂ (I) 和 CO₂ (II) 体积分数的变化

Fig.1 Changes of O₂ (I) and CO₂ (II) content in the package bag

注: 图中小写字母表示同一处理在不同时间节点之间差异显著性 ($P < 0.05$), 大写字母表示同一时间节点下不同处理之间的差异显著性 ($P < 0.05$)。下同。

在贮藏过程中, 65 μm PE 袋处理的 CO₂ 含量始终显著高于其他 4 个包装处理。前 10 天, 65 μm PE 袋处理的 CO₂ 含量大幅度增加, 从第 1 天的 5.80% (φ) 迅速上升到第 10 天的 12.80% (φ) 峰值, 之后缓慢降低, 第 20 天和第 30 天维持在 9.46% (φ) ~10.26% (φ) 水平。20、25 和 30 μm PE 袋 3 个处理贮藏期间 CO₂ 含量保持相对稳定, 维持在 3.55% (φ) ~5.05% (φ) 之间, 无显著变化。10 μm PE 袋处理在第 1 天时 CO₂ 含量显著低于其他 4 个处理, 之后缓慢升高, 到第 30 天时升高至 4.73% (φ)。

2.2 贮藏期间果皮硬度的变化

对不同处理组茄子的果皮硬度进行测定, 结果如图 2 所示, CK 处理的果皮硬度在贮藏期间呈上升趋势, 其余 5 个包装处理组的茄子果皮硬度整体呈现出先上升后下降的趋势。贮藏第 1 天, 各处理组的果皮硬度与对照无显著差异。贮藏期间, CK 处理的果皮硬度显著升高, 从初始时的 697.39 N 升高到第 30 天时的 902.75 N。除 10 μm PE 袋处理之外, 其余 4 个包装处理的果皮硬度在贮藏过程中变化幅度小, 维持在 665.34~800.98 N 之间; 而 10 μm PE 袋处理组在 20 天前果皮硬度变化不大, 第 30 天时降低到 504.45 N, 显著低于其他处理组。第 30 天, 各处理组果皮硬度相较第 1 天时的变化情况来看, 10、20、25 和 65 μm PE 袋处理组果皮硬度分别下降了 26.31%、6.33%、4.04% 和 1.97%, 30 μm PE 袋处理升高了 6.55%, 可见 25、30 和 65 μm PE 袋处理组均能较好维持贮藏期间茄子果皮硬度, 而 10 μm PE 袋处理组果皮硬度下降最显著。

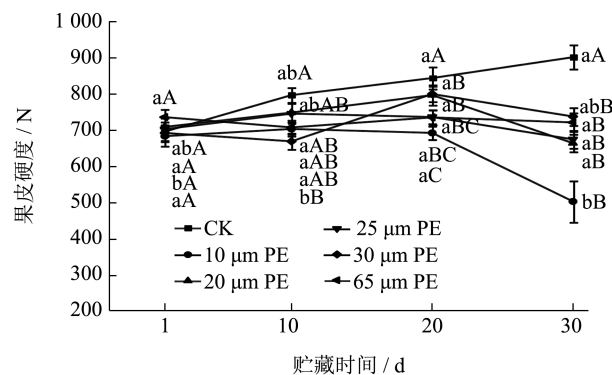


图 2 果皮硬度的变化

Fig.2 Changes in peel firmness

2.3 贮藏期间果肉色差 Hue 值的变化

对不同处理茄子的果肉色差 Hue 值进行测定, 结果如图 3 所示。色度角 Hue 值可作为衡量茄子果肉新鲜程度的重要指标, Hue 值越大, 果肉颜色越趋于新鲜状态, 色泽越饱满^[12,17]。贮藏第 1 天, 各处理的

Hue 值与对照无显著差异, 维持在 100.61~102.05 之间。贮藏期间, 除了 30 和 65 μm PE 袋处理, 其他 4 个处理的 Hue 值呈整体下降趋势。CK 和 10 μm PE 袋处理的 Hue 值在第 20 天显著降低, 分别降至 97.70 和 98.54, 下降了 2.74% 和 2.86%。贮藏结束时, 30 和 65 μm PE 袋处理的茄子 Hue 值显著高于其他 4 个处理, 且与第 1 天的 Hue 值相比无显著差异。

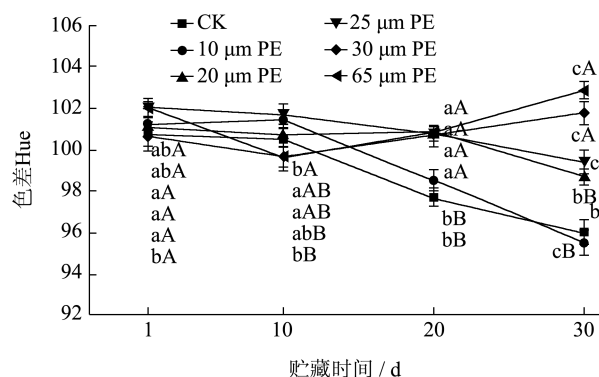


图 3 果肉色差 Hue 值的变化

Fig.3 Changes of Hue value of flesh color difference

2.4 贮藏期间外观指数、腐烂指数和冷害指数的变化

通过观察打分法对不同处理组茄子在贮藏期间的外观指数、腐烂指数和冷害指数进行了评估打分。结果如图 4 所示, 随着贮藏时间的延长, 各处理的外观指数呈不同程度的下降趋势, 而腐烂指数和冷害指数则呈现不同程度的上升趋势。

随贮藏时间延长, 各处理组茄子外观指数呈不同程度下降趋势。贮藏第 1 天, 各处理组外观指数无显著差异。第 10 天, CK 处理的茄子外观指数显著降低, 其他 5 个包装处理组较第 1 天无显著变化差异; 贮藏中后期, 6 个处理组外观指数均显著降低; 贮藏至第 30 天, 10 μm PE 袋处理外观指数陡然降低, 低至 13.89, CK 处理组次之, 外观指数仅为 35.56, 30 μm PE 袋处理外观指数为 66.11, 显著高于其他处理组, 且整个贮藏期间下降幅度最小。

随贮藏时间延长, 各处理组茄子腐烂指数呈不同程度升高趋势。贮藏前 10 天, 各处理组腐烂指数均为 0; 贮藏第 20 天, 各处理组均出现腐烂情况, 腐烂指数均升高; 贮藏第 30 天, 各处理组腐烂指数急剧升高, 其中 10 μm PE 袋处理组腐烂指数最高, 达 95.00, 30 μm PE 袋处理组腐烂指数相对较低, 仅为 18.75, 且整个贮藏期间腐烂指数升高较缓慢。

贮藏前期无冷害发生, 随贮藏时间延长, 各处理组茄子冷害指数呈不同程度升高趋势。贮藏第 20 天, 只有 CK 和 10 μm PE 袋处理出现冷害, 冷害指数分别

为 2.50 和 7.50; 贮藏至第 30 天, 各处理组冷害指数升高明显, 其中 10、25 和 65 μm PE 袋处理冷害指数急剧升高, 在 72.50~75.00 之间, 30 μm PE 袋处理冷害指数最低, 仅为 7.50。

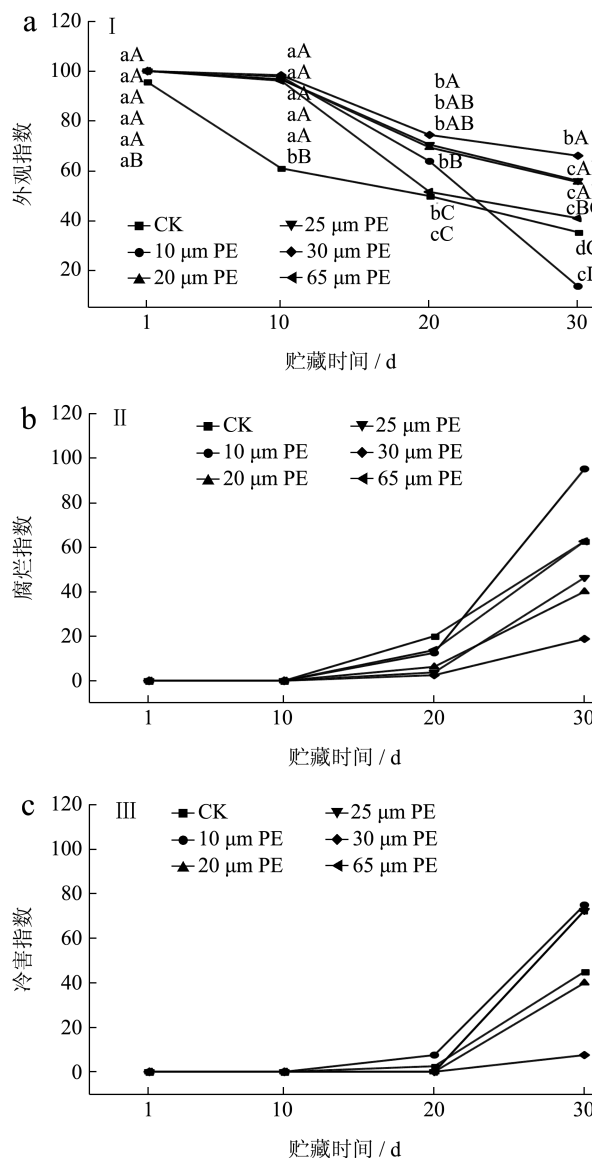


图 4 贮藏期间外观、腐烂和冷害情况变化

Fig.4 Change in appearance, decay and cold damage during storage

2.5 贮藏期间 POD、CAT 和 PPO 活性的变化

图 5 反映了茄子在 12 $^{\circ}\text{C}$ 下 MAP 贮藏期间 POD、CAT 和 PPO 活性的变化情况。结果可见, 除 10 μm PE 袋处理外, 其他 5 个处理组茄子果实的 POD 活性变化规律相似, 表现为先升后降。贮藏至第 20 天, 各处理的 POD 活性均显著升高达到峰值, POD 活性是第 1 天的 2.5~9.9 倍, 且 CK 处理的 POD 活性显著高于其他处理, POD 活性为 $1\,879.33\text{ U}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$; 第 30 天时, 10 μm PE 袋处理的 POD 活性继续大幅度升高, 显著高于其他处理, CK 和 65 μm PE 袋处理的 POD

活性显著降低, 其中 65 μm PE 袋处理的 POD 活性显著低于其他处理, 仅为 $191.44 \text{ U} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 。

贮藏期间, CAT 活性在不同处理组之间表现出差异, 第 1 天时, 30 μm PE 袋处理的 CAT 活性显著高于其他处理; 第 10 天时, 30 μm PE 袋处理的 CAT 活性小幅度降低, 而 CK、10、20 和 25 μm PE 袋处理的 CAT 活性显著升高; 第 20 天时, 25、30 和 65 μm PE 袋处理的 CAT 活性显著降低, CK 和 20 μm PE 袋处理的 CAT 活性显著高于其他处理组; 第 30 天时, CK 处理的 CAT 活性显著高于包装处理, 达 $367.35 \text{ U} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$, 30 μm PE 袋处理的 CAT 活性最低, 为 $197.77 \text{ U} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 。总体而言, 贮藏第 10 天之后, CK 处理组的 CAT 活性持续升高且始终保持较高水平, 30 μm PE 袋处理组 CAT 活性持续降低且始终保持较低水平。

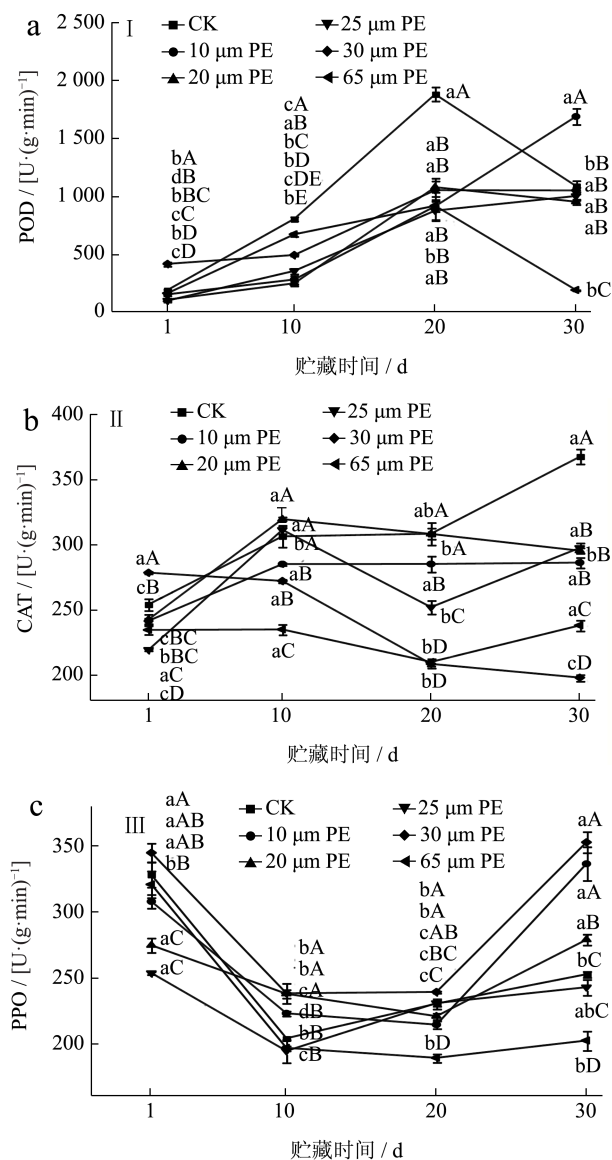


图 5 POD、CAT 和 PPO 活性的变化

Fig.5 Changes in POD, CAT and PPO activities

PPO 活性在贮藏期间表现为先下降后上升的趋势。第 1 天时, 各处理组 PPO 活性维持在 $253.86 \sim 344.99 \text{ U} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$, 20 和 25 μm PE 袋处理的 PPO 活性显著低于其他处理; 第 10 天时, 各处理的 PPO 活性迅速下降, 然后在第 10~20 天内变化较稳定, 保持在 $194.80 \sim 239.47 \text{ U} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$; 第 30 天时, 各处理组 PPO 活性显著升高, 但是 PPO 活性较第一天变化不大, 维持在 $202.697 \sim 352.97 \text{ U} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 。

3 讨论

3.1 自发气调包装对茄子外观品质的影响

透气性是包装膜材料影响果蔬 MAP 保鲜效果最重要的参数之一^[18]。不同包装袋的透气性能有所差异, 会导致各处理组袋内 O_2 和 CO_2 含量在整个贮藏过程中存在不同的变化, 自发气调包装袋内气体成分在一定程度上反映了贮藏期间茄子的呼吸速率和品质劣变进程。从实验结果来看, 包装袋内的 O_2 体积分数与膜的透气性呈正相关, 而 CO_2 体积分数则与透气性呈负相关, 这说明可以通过包装膜透气性高低调节茄子贮藏期间呼吸速率高低, 进而影响贮藏过程中果实的品质劣变进程。30 μm PE 袋处理中贮藏后期包装袋内 O_2 4.94% (φ) $\sim$ 6.29% (φ) 和 CO_2 4.16% (φ) $\sim$ 4.62% (φ) 维持了相对稳定, 有利于降低茄子贮藏期呼吸强度, 延缓果实的品质劣变。而具有较高透气性的 10 μm PE 处理袋内 O_2 的消耗量远小于 O_2 与外界交换进来的量, 导致袋内 O_2 含量过高而达不到通过气调抑制茄子呼吸的效果, 反而加速了茄子的腐烂和品质劣变; 较低透气性的 65 μm PE 处理袋内 CO_2 产生量快于 CO_2 与外界交换出去的量, 导致 CO_2 体积分数过高, 这容易引起高 CO_2 伤害或低氧胁迫^[19]。田玉肖等^[20]研究表明, 适宜的 PE 包装袋 (0.025 mm) 能有效延缓朝天椒在低温贮藏下的腐烂和外观品质的劣变。安容慧等^[21]对比研究了不同厚度 PE 薄膜对鲜切生菜的保鲜作用, 结果表明 20 μm 厚度的 PE 薄膜更适合作为鲜切生菜保鲜的包装材料, 不适宜的包装材料反而不利于货架期的维持。柳俊超等^[19]也研究发现高阻气性的膜会抑制鲜切豇豆的有氧呼吸, 从而发生无氧呼吸, 引起品质劣变。因此选择符合果蔬贮藏需求的透气性包装膜, 从而达到有利于果蔬贮藏的微气体环境非常关键^[22]。本研究筛选的 MAP 包装方式 (30 μm PE) 可延长茄子保鲜期, 将冷害指数和腐烂指数维持在 7.50 和 18.75 以下, 贮藏结束时茄子表皮仍有光泽, 最大程度保持外观商品性。侯建设等^[23]的研究也表明塑料薄膜袋包装在减轻青椒冷害和腐烂上作用显著, 维持较低的细胞膜透

性水平,贮藏 30 d 后冷害指数仅为 0.13 左右。

硬度和色泽是判断果蔬商品性的重要指标,适宜的包装处理可以较好保持茄子贮藏期间的外观品质。CK 与包装处理的果皮硬度变化趋势相反,这可能是由于 CK 处理没有包装导致茄子水分流失,果皮严重皱缩,韧性增大,由此刺破果皮所需的力增大,引起硬度值的升高;而包装处理为茄子贮藏提供了较为适宜的贮藏条件,避免了因水分流失导致的果皮衰老。其中,10 μm PE 袋处理的果皮硬度在贮藏第 30 天下降较快,这是由于该处理下茄子的冷害和腐烂情况严重,表皮大面积萎缩凹陷,导致果实绵软。10 μm PE 袋处理和 CK 组的茄子一样在贮藏后期果肉色差 Hue 值显著降低,这可能是由于不适宜的处理方式加速了茄子的衰老和腐烂,加剧微生物的侵染和细胞结构的破坏,引起了果实褐变的发生^[9,24]。

3.2 自发气调包装对茄子的抗氧化系统的影响

活性氧自由基的积累是造成冷害、衰老等生理生化失调产生的重要因素。抗氧化酶是抗氧化系统最重要的组成,具有清除自由基、维持细胞内氧化还原平衡、增强植物抗性等功能,POD 和 CAT 是生物体内常见的抗氧化防御体系的酶,能防止自由基的侵害^[25]。POD 和 CAT 活性在各处理组间差异明显,其中 CK 处理组的 POD 和 CAT 活性较高,推测可能是对照组的茄子在贮藏期间受到环境和生理胁迫较大,大量产生活性氧自由基,激活了抗氧化酶系统的 POD 和 CAT 活性。适宜的包装处理(25 和 30 μm PE)可以较好保持茄子果肉的 POD 和 CAT 活性的动态平衡,维持细胞稳态。贮藏前期各处理茄子果肉 POD 活性的升高有利于清除活性氧自由基,但值得注意的是,本研究中 10 μm PE 袋处理茄子的 POD 活性在贮藏后期持续升高,贮藏至第 30 天,POD 活性超过了 CK,且该处理组外观指数显著最低,腐烂指数显著最高,这也再次印证了不适宜的 MAP 处理反而会加剧茄子的生理胁迫和微生物侵染,从而破坏细胞,激活抗氧化系统的防御机制,诱导 POD 显著升高^[2]。

PPO 是果蔬酶促褐变的关键酶。有研究表明,随着 PPO 活性增高,鲜切茄子的褐变也随之加重^[9,26]。本研究中贮藏结束后 PPO 活性较第一天变化很小,且贮藏过程中有显著下降,说明低温有利于抑制 PPO 活性,延缓褐变。有研究表明 PPO 会参与植物对生物与非生物胁迫的响应,受到低温、干旱等胁迫的诱导,从而增强植物的抗性^[27,28]。

综上,膜透气性差(65 μm PE)易造成包装袋内过低 O_2 和过高 CO_2 的气体环境,抑制 POD、CAT 和

PPO 活性,相关研究也表明高二氧化碳环境能抑制相关酶活^[29,30],但容易造成低氧胁迫,加速茄子劣变;透气性适中(25 和 30 μm PE)可平衡气体交换,维持酶活稳定性。综合其他指标,30 μm PE 袋处理综合表现最佳,既能维持 POD 和 CAT 抗氧化酶的活性,又能使 PPO 活性水平维持在较低范围区间,维持果肉色泽新鲜,延缓品质劣变。

4 结论

在适宜的贮藏温度条件下,MAP 保鲜技术通过调节薄膜透气性从而调节果蔬呼吸和新陈代谢,有助于保持茄子商品性,延长保鲜期。本试验研究中,包装膜的 O_2 和 CO_2 透过量对茄子的包装袋内气体成分、外观品质以及 POD、CAT、PPO 活性的变化具有显著影响。30 μm PE 袋处理表现出最优的保鲜效果,有效维持了包装袋内 O_2 和 CO_2 气体成分的相对平衡稳定,保持较高的果皮硬度及果肉色差 Hue 值,延缓茄子品质劣变,茄子的商品性最好;而 10 和 65 μm PE 袋处理由于包装袋透气性过高或过低加速了茄子品质劣变。通过本试验可见,适宜的 MAP 处理能有效抑制茄子果实贮藏过程中的呼吸强度,保持茄子外观商品性和酶活稳定,延长采后贮藏期至 30 d,成本低且操作简便。

参考文献

- [1] AYAZ F A, COLAK N, TOPUZ M, et al. Comparison of nutrient content in fruit of commercial cultivars of eggplant (*Solanum melongena* L.) [J]. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 2015, 65(4): 251-260.
- [2] SHI J Y, ZUO J H, ZOU F H, et al. Low-temperature conditioning enhances chilling tolerance and reduces damage in cold-stored eggplant (*Solanum melongena* L.) fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 141: 33-38.
- [3] LI Q, YANG X, WU Z, et al. Flower like ZnO hybrid mediated visible light harvesting film with upgraded photodynamic antibacterial capacity for effective food preservation [J]. Food Chemistry, 2025, 478: 1-14.
- [4] ZHAO Q, JIN M, GUO L, et al. Modified atmosphere packaging and 1-methylcyclopropane alleviate chilling injury of 'Youhou' sweet persimmon during cold storage [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 24: 100479.
- [5] KANWAL R, ASHRAF H, SULTAN M, et al. Effect of 1-methyl cyclopropane and modified atmosphere packaging on the storage of okra (*Abelmoschus esculentus* L.): Theory and Experiments [J]. Sustainability, 2020, 12: 7547.
- [6] 张冬寒,司占军.不同包装材料对茄子保鲜的影响[J].上海包装,2017,8:55-57.
- [7] 李春媛,董成虎,刘刚,等.不同保鲜包装对高唐紫茄贮藏品质的影响[J].保鲜与加工,2018,18(4):18-22,28.

- [8] 史君彦,杨娜,高丽朴,等.不同厚度聚乙烯膜包装处理对圆茄保鲜效果的影响[J].北方园艺,2015,23:146-149.
- [9] 谢晶,王肽,杨胜平.复合保鲜剂结合MAP对鲜切茄子贮藏品质的影响[J].食品与机械,2015,31(4):134-137.
- [10] TAO J J, ZUO J H, WATKINS C B, et al. Low storage temperature affects quality and volatile compounds in fresh tomatoes [J]. Food Chemistry, 2024, 460: 140400.
- [11] DHANDAPANI S, PHILIP V S, NABEELA NASREEN S A, et al. Effects of storage temperatures on nitrogen assimilation and remobilization during post-harvest senescence of pak choi [J]. Biomolecules, 2023, 13(10): 1540.
- [12] 陈晴,王祖莲,李焕秀,等.低温处理提高自发气调包装墨茄的贮藏品质[J].现代食品科技,2020,36(9):134-141,292.
- [13] BARBAGALLO R N, CHISARI M, CAPUTA G. Effects of calcium citrate and ascorbate as inhibitors of browning and softening in minimally processed ‘Birgah’ eggplants [J]. Postharvest Biology and Technology, 2012, 73: 107-114.
- [14] 朱通,徐俐,刘涵玉,等.采收成熟度对刺梨果实贮藏品质的影响[J].食品科学,2014,35(22):330-335.
- [15] LI P Y, YIN F, SONG L J, et al. Alleviation of chilling injury in tomato fruit by exogenous application of oxalic acid [J]. Food Chemistry, 2016, 202: 125-132.
- [16] 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.
- [17] 严灿.草莓采后全程冷链保鲜技术研究[D].上海:上海海洋大学,2016.
- [18] JIAO J, GUO L, LIU H, et al. Effect of different packaging film thicknesses on chilling injury in postharvest ‘Cuixiang’ Kiwifruit [J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 2020, 1: 1-14.
- [19] 柳俊超,王丹,马越,等.不同透性包装材料对鲜切豇豆感官品质的影响[J].食品工业,2015,36(1):54-57.
- [20] 田玉肖,唐月明,高佳,等.膜透气性参数对朝天椒(*Capsicum annuum* var.conoides)自发气调包装冷藏效果的影响[J].食品与发酵工业,2020,46(14):163-168.
- [21] 安容慧,周娜,魏雯雯,等.薄膜包装对鲜切生菜货架期品质的影响[J].包装工程,2024,45(3):107-116.
- [22] DHALIWAL M S .Effect of packaging and storage environments on quality and shelf-life of bell pepper (*Capsicum annuum*) [J]. Indian Journal of Agricultural Sciences, 2016, 86(6): 738-742.
- [23] 侯建设,李中华,江杰.冷害温度下薄膜包装对青椒贮藏效果的研究[J].食品科技,2002,9:66-67,70.
- [24] ZHANG W, HAN M T, WANG Y B, et al. Overall quality changes of fresh-cut cowpeas (*Vigna unguiculata* L. Walp.) during storage: Correlation of packaging materials and quality [J]. Food Chemistry, 2025, 477: 143547.
- [25] TRUNG T D, 李健,张凤娟,等.干旱胁迫下不同甘蔗品种叶片抗氧化酶活性和渗透调节物质含量的变化[J].热带作物学报, 2018,39(5):858-866.
- [26] SARENGAOWA, WANG L Y, LIU Y M, et al. Effect of ascorbic acid combined with modified atmosphere packaging for browning of fresh-cut eggplant [J]. Coatings, 2022, 12: 1580.
- [27] HE F, SHI Y J, ZHAO Q, et al. Genome-wide investigation and expression profiling of polyphenol oxidase (PPO) family genes uncover likely functions in organ development and stress responses in populus trichocarpa [J]. BMC Genomics, 2021, 22: 731.
- [28] JIA H F, ZHAO P C, WANG B J, et al. Overexpression of polyphenol oxidase gene in strawberry fruit delays the fungus infection process [J]. Plant Molecular Biology Reporter, 2015, 34: 592-606.
- [29] CHANG E H, LEE J S, KIM J G. Cell wall degrading enzymes activity is altered by high carbon dioxide treatment in postharvest ‘Mihong’ peach fruit [J]. Scientia Horticulturae, 2017, 225: 399-407.
- [30] WANG D, MA Q, BELWAL T, et al. High carbon dioxide treatment modulates sugar metabolism and maintains the quality of fresh-cut pear fruit [J]. Molecules, 2020, 25: 4261.