

微孔气调包装对鲜切菠萝蜜保鲜效果的影响

赵文汇¹, 刘欣瑶¹, 梁金甜¹, 樊爱萍^{1,2}, 潘艳南¹, 唐莉¹, 曾丽萍^{1,2*}

(1.红河学院 化学与资源工程学院, 云南 蒙自 661199;

2.云南省绿色食品中越双边国际联合实验室, 云南 蒙自 661199)

摘要: **目的** 为探究微孔气调包装(MMAP)对鲜切菠萝蜜的保鲜效果,明确O₂体积分数、CO₂体积分数和打孔数的最佳处理条件。**方法** 本研究以菠萝蜜为原料,通过单因素和正交-模糊综合评价法,研究冷藏期间MMAP对鲜切菠萝蜜品质(菌落总数、质量损失率、可溶性固形物(TSS)、色差、可滴定酸(TA)、硬度、VC含量和丙二醛(MDA)质量摩尔浓度)的影响。**结果** 与对照相比,MMAP抑制了微生物生长,维持了较高TSS、TA和VC含量,减少了MDA的积累,提高了鲜切菠萝蜜的整体品质,延长货架期至少6 d。筛选出MMAP最佳处理条件:O₂体积分数为5%,CO₂体积分数为6%,216 cm²的打孔数为15个。**结论** MMAP是一种安全、低廉、简单的保鲜技术,可有效抑制鲜切菠萝蜜在贮藏过程中组织软化、营养损失、风味变化等品质裂变问题,具有很大的工业应用潜力。

关键词: 鲜切菠萝蜜;微孔气调包装;优化;保鲜

中图分类号:TB489;TS205.7 文献标志码:A 文章编号:1001-3563(2024)05-0065-09

DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.05.008

Effects of Microporous Modified Atmosphere Packaging on Preservation of Fresh-cut Jackfruit

ZHAO Wenhui¹, LIU Xinyao¹, LIANG Jintian¹, FAN Aiping^{1,2}, PAN Yannan¹,
TANG Li¹, ZENG Liping^{1,2*}

(1. College of Chemistry and Resources Engineering, Honghe University, Yunnan Mengzi 661199, China;

2. Yunnan Province Green Food China-Vietnam Bilateral International Joint Laboratory, Yunnan Mengzi 661199, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the preservation performance of microporous modified atmosphere packaging (MMAP) on fresh-cut jackfruit, and define the optimal treatment conditions for O₂ volume fraction, CO₂ volume fraction and number of punched holes. With fresh-cut jackfruit as the test material, through single factor and orthogonal-fuzzy comprehensive evaluation method, the effects of MMAP on the qualities (total bacterial count, color difference, firmness, weight loss, total soluble solids (TSS), titratable acidity (TA), vitamin C (VC), and malondialdehyde (MDA) content of fresh-cut jackfruit during cold storage were investigated. Compared with the control, MMAP inhibited the growth of microorganisms, maintained higher contents of TSS, TA, and VC, reduced the accumulation of MDA, improved the overall quality of fresh-cut jackfruit, and extended the shelf life for at least 6 days. The optimal treatment conditions for MMAP were screened as 5% O₂ volume fraction, 6% CO₂ volume fraction and 15 holes/216 cm². MMAP is a safe, cheap, and simple preservation technology and can effectively inhibit tissue softening, nutrient loss and flavor change of

收稿日期:2023-08-28

基金项目:云南省教育厅科学研究基金项目(2023J1113);云南省大学生创新创业项目(CX2022134);云南省地方本科高校基础研究联合专项面上项目(202301BA070001-074)

*通信作者

fresh-cut jackfruit during storage, which has great potential for industrial application.

KEY WORDS: fresh-cut jackfruit; microporous modified atmosphere packaging; optimization; preservation

菠萝蜜 (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) 是一种典型的热带水果, 广泛种植于我国海南、云南、广西等热带和亚热带地区^[1]。因其香味浓郁, 爽脆清甜, 深受消费者的喜爱。此外, 菠萝蜜不仅含有丰富糖类、维生素、矿物质等营养物质, 还富含多酚、黄酮和甾醇等活性成分, 具有抗氧化功能和药用价值^[2-3]。近年来, 屏边县在政府和企业的推动下, 大力发展菠萝蜜种植产业, 已建成云南省最大的专业菠萝蜜种植生产基地。然而, 菠萝蜜是一种大型水果且外皮坚硬难剥离, 给销售、运输和食用带来极大不便, 制约了该产业的发展。鲜切是解决菠萝蜜销售的有效途径。尽管鲜切果蔬的便利性深受消费者欢迎, 然而机械伤会加速鲜切果蔬的一系列的生理生化反应, 出现组织软化、呼吸失调、营养损失、酶促褐变、微生物生长和对环境敏感高等问题^[4-6]。国内外研究学者采用物理保鲜技术 (如低温^[7]、气调保鲜^[8]、冷杀菌^[9]等)、化学保鲜技术 (如涂膜^[10]、1-甲基环丙烯 (1-MCP)^[11]、外源褪黑素^[12]等) 和生物保鲜技术 (溶菌酶^[13]、拮抗微生物^[14]、天然提取物^[15]等) 以及复合保鲜技术^[16-17] 对各类鲜切果蔬进行保鲜处理, 提高鲜切果蔬贮藏期间的货架期和品质。

气调包装是一种价格低廉、安全性高、应用广泛的保鲜技术, 微孔气调包装 (Microporous Modified Atmosphere Packaging, MMAP) 属于气调包装的一种, 微孔气调包装的微孔膜可以在气调的基础上结合果蔬生理特点自行设计微孔膜的孔径大小和数量, 从而改善薄膜的透气性, 以达到低成本保鲜的效果^[18]。果蔬品种、产地、成熟度、贮藏条件等多种因素均会影响气调保鲜的效果, 针对不同果蔬的生理特性需要调整气调包装中 O_2 和 CO_2 的比例才能达到抑制果蔬生理代谢和延缓品质衰老的效果^[19]。本文以屏边菠萝蜜为原料, 通过单因素试验、正交设计-模糊综合评价法分析 O_2 体积分数、 CO_2 体积分数和打孔数对鲜切菠萝蜜品质的影响, 拟解决鲜切菠萝蜜在贮藏、运输和销售过程中出现品质劣变和安全性问题, 以期满足市场的多元化需求, 从而推动屏边菠萝蜜产业链的发展。

1 实验

1.1 材料与试剂

实验材料: 菠萝蜜采摘于云南红河州屏边县实验基地, 品种为“马来西亚一号”, 采摘当天运回实验室。选用无病虫害、无机械伤、果型端正、大小均一、7~8 成熟度的菠萝蜜于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下预冷 24 h。在相对洁净的空间 ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) 的条件下, 用消毒的不锈钢刀沿

着主轴切开菠萝蜜, 去除果茎后取出完整的果苞, 分装称量后用于后续微孔气调保鲜。

主要试剂: 孟加拉红琼脂培养基、平板计数琼脂培养基, 北京奥博生物技术有限责任公司; 氢氧化钠、乙醇 (体积分数为 95%)、盐酸、三氯乙酸、硫代巴比妥酸等均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

实验仪器: T6 新世纪紫外-可见分光光度计, 北京普析通用仪器有限责任公司; SW-CJ-1F 洁净工作台, 苏净集团苏州安泰空气技术有限公司; LDZX-50KBS 型立式压力蒸汽灭菌器, 上海申安医疗器械厂; 250HL 恒温恒湿培养箱, 江苏金怡仪器科技有限公司; H3-20KR 台式高速冷冻离心机, 湖南可成仪器设备有限公司; HWS26 型电热恒温水浴锅, 上海一恒科技仪器有限公司; TA.new plus 型质构仪, 上海瑞盼国际贸易有限公司; LB90A 型糖度计, 广州市明睿电子科技有限公司; WSC-S 测色色差计, 上海精密仪器仪表有限公司; BC/BD-200HEP 型冰箱, 青岛海尔特种电冰柜有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 原料处理

采用聚乙烯盒 (长×宽×高为 $18\text{ cm}\times 12\text{ cm}\times 5.5\text{ cm}$), 每盒装入上述处理好的菠萝蜜后以聚丙烯膜 (膜面积为 216 cm^2 , 厚度为 $70\text{ }\mu\text{m}$) 进行气调封装, 根据实验方案设置相应的打孔数 (孔径为 $30\text{ }\mu\text{m}$)。每盒样品质量为 $(200\pm 10)\text{ g}$, 置于 $(10\pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下进行贮藏。

1.3.2 试验设计

1.3.2.1 单因素试验

通过文献查阅及预试验, 固定 O_2 体积分数、 CO_2 体积分数、打孔数 3 个因子的水平分别为 7%、9% 和 15 个, 采用单因素试验研究 O_2 体积分数 (3%、5%、7%、9% 和 11%)、 CO_2 体积分数 (3%、6%、9%、12% 和 15%)、打孔数 (后文均指在 216 cm^2 中的打孔数, 5、10、15、20 和 25 个) 3 个因素对冷藏至第 10 天鲜切菠萝蜜的硬度、可溶性固形物 (TSS) 含量、可滴定酸 (TA) 含量的影响。

1.3.2.2 正交试验设计

在单因素试验基础上, 以 O_2 体积分数 (A)、 CO_2 体积分数 (B)、打孔数 (C) 为自变量, 测定贮藏 10 d 后鲜切菠萝蜜的各项指标, 并进行正交设计。试验自变量因素及水平如表 1 所示。

表 1 正交试验因素水平
Tab.1 Orthogonal test factor level

水平	因素		
	A/%	B/%	C/个
1	3	6	5
2	5	9	10
3	7	12	15

1.3.2.3 模糊综合评价法

采用模糊综合评价法,可用于实验中多个指标评价 MMAP 对鲜切菠萝蜜的保鲜效果,引入隶属度函数,正效应公式见式(1),负效应公式见式(2)。

$$M = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

$$M = 1 - \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中: X_i 为分析点数据值; $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 为各试验组的最大值和最小值。

综合评价系数 (S) 的计算见式(3)。

$$\Delta S = \sum \lambda_i M_i \quad (3)$$

式中: M_i 为隶属度; λ_i 为加权重。

需考虑的保鲜指标中硬度、TSS、TA、VC 含量为正效应;质量损失率、色差 (ΔE)、丙二醛 (MDA) 为负效应,其综合评价的权重子集 λ 为 {0.20, 0.20, 0.20, 0.10, 0.10, 0.10, 0.10}。后续通过正交-模糊综合评价法筛选出微孔气调包装的最佳参数 (命名为 MMAP),与不做的任何处理 (命名为 CK) 的鲜切菠萝蜜进行保鲜效果的比较。

1.4 指标测定

1.4.1 菌落总数的测定

菌落总数参照 GB 4789.2—2022 的方法测定。

1.4.2 色差的测定

选取赤道附近的菠萝蜜置于色差仪上,测定鲜切菠萝蜜的 L^* 、 a^* 和 b^* 值,仪器用标准白板 ($L_0=94.31$, $a_0=0.04$, $b_0=0.42$) 矫正,通过比较 ΔE 值反映鲜切菠萝蜜色泽的改变,其公式见式(4)。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad (4)$$

式中: L^* 、 a^* 和 b^* 分别为样品的色泽值

1.4.3 硬度的测定

参考文献[20]的方法并稍加修改。硬度的测定采用 TA. new plus 质构仪进行测试,使用 TA/2 探头,测前速度为 2 mm/s,测试速度、测后速度为 1 mm/s,测试距离为 3 mm。每组随机抽取 3 个菠萝蜜果苞,选取赤道附近且取样点间隔大于 5 mm,平行 6 次取平均值。

1.4.4 质量损失率的测定

质量损失率的测定参照 Wang 等^[21]的方法,准确称取每个取样点的初始质量和取样终点质量,计算式见式(5)。

$$W_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中: W_1 为质量损失率,%; m_1 为样品初始质量, g; m_2 为样品取样终点质量, g。

1.4.5 TSS 含量的测定

将菠萝蜜果肉挤压后取其汁液,并用手持糖度计测定其 TSS 含量,平行 3 次取平均值,结果以%表示。

1.4.6 TA 含量的测定

TA 含量的测定采用酸碱滴定法进行测定,称取 5.00 g 菠萝蜜果肉研磨成匀浆,并移至 100 mL 容量瓶中定容,然后进行过滤,吸取 20 mL 滤液用 0.01 mol/L 的 NaOH 标准溶液滴定。根据 NaOH 消耗量计算鲜切菠萝蜜贮藏过程中的 TA 含量,结果以%表示。

1.4.7 VC 含量的测定

VC 含量采用分光光度法^[22]进行测定。称取 2.00 g 样品,加入 5 mL 体积分数为 1% 的盐酸研磨匀浆并转移至 10 mL 棕色离心管中,离心 20 min (4 °C、10 000 r/min);取 1 mL 上清液,加入盛有 0.2 mL 体积分数为 10% 盐酸的 10 mL 容量瓶中,定容后以蒸馏水为空白,于 243 nm 处测定其吸光值,结果用 mg/100 g 表示。

1.4.8 MDA 含量的测定

采用硫代巴比妥酸法^[23]进行测定。称取 1.00 g 样品,加入 5 mL 质量浓度为 100 g/L 的三氯乙酸冰浴研磨后,离心 20 min (4 °C、10 000 r/min)。取 2 mL 粗提液与 2 mL 质量浓度为 6.7 g/L 的硫代巴比妥酸中混合,沸水浴 20 min,然后冷却再次进行离心获得上清液。在 450、532 和 600 nm 处的测定其吸光度值,结果用 nmol/g 表示。

1.5 数据分析

使用 SPSS22.0 (IBM) 软件进行实验数据的显著性分析 ($P < 0.05$ 为显著性差异,标注“*”; $P < 0.01$ 为极显著性差异,标注“**”),采用 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 O₂ 体积分数对鲜切菠萝蜜品质的影响

贮藏至第 10 天时, O₂ 体积分数对鲜切菠萝蜜品质的影响见表 2。初始 O₂ 体积分数超过 5% 时,样品的硬度、TSS 和 TA 含量逐渐下降。当初始 O₂ 体积分数为 11% 时,鲜切菠萝蜜的各项品质指标下降明显 ($P < 0.05$)。有学者研究表明高的 CO₂ 体积分数或过

低的 O₂ 体积分数均可诱发厌氧（发酵）代谢，引发生理损伤或腐烂，并可能诱发由厌氧（发酵）代谢引发的异味^[24]。因此各项品质指标下降可能是由于 O₂ 浓度过高，呼吸作用强，营养物质消耗大，影响其风味和质地。综合来看，在固定 CO₂ 体积分数 9%和打孔数 15 个的条件下，O₂ 体积分数 5%的鲜切菠萝蜜的硬度最大，TSS、TA 含量最高。因此，选择 O₂ 体积分数 3%~7%作为进一步试验分析的依据。

表 2 O₂ 体积分数对鲜切菠萝蜜品质的影响
Tab.2 Effect of O₂ volume fraction on quality of fresh-cut jackfruit

O ₂ 体积分数/%	硬度/N	TSS 含量/%	TA 含量/%
3	5.14±0.03 ^b	24.54±0.17 ^b	0.29±0.01 ^{ab}
5	5.31±0.03 ^a	24.88±0.25 ^a	0.32±0.01 ^a
7	5.13±0.06 ^b	24.48±0.05 ^b	0.28±0.03 ^{abc}
9	5.01±0.10 ^{bc}	23.12±0.14 ^c	0.27±0.02 ^{bc}
11	4.88±0.08 ^d	22.43±0.17 ^d	0.24±0.03 ^c

2.2 CO₂ 体积分数对鲜切菠萝蜜品质的影响

贮藏至第 10 天时，CO₂ 体积分数对鲜切菠萝蜜品质的影响见表 3。CO₂ 体积分数为 6%~12%时，鲜切菠萝蜜硬度、TSS 和 TA 含量维持较高水平且差异不显著（ $P>0.05$ ）。当 CO₂ 体积分数达到 15%时，鲜切菠萝蜜的各项品质指标下降明显（ $P<0.05$ ）。有学者研究表明高浓度的 CO₂ 可抑制微生物的生长和延缓呼吸作用，还可调节可溶性糖的转化，维持细胞的完整性，从而保持果实糖酸比和果实硬度，达到延长贮藏期目的，然而过高的 CO₂ 浓度反而会加速果实的生理损伤^[25]。因此各项品质指标下降可能是由于呼吸代谢促使包装体系中 O₂ 浓度下降，CO₂ 不断积累，诱导果实无氧呼吸，影响其果实硬度、TSS 和 TA 含量。综合来看，选择 CO₂ 体积分数 6%~12%作为进一步试验分析的依据。

表 3 CO₂ 体积分数对鲜切菠萝蜜品质的影响
Tab.3 Effect of CO₂ volume fraction on quality of fresh-cut jackfruit

CO ₂ 体积分数/%	硬度/N	TSS 含量/%	TA 含量/%
3	5.01±0.04 ^b	24.45±0.08 ^b	0.27±0.02 ^{bc}
6	5.21±0.03 ^a	24.67±0.36 ^{ab}	0.32±0.04 ^a
9	5.18±0.02 ^a	24.87±0.11 ^a	0.33±0.01 ^a
12	5.19±0.01 ^a	24.80±0.12 ^{ab}	0.31±0.01 ^{ab}
15	4.97±0.07 ^b	23.42±0.19 ^c	0.26±0.01 ^c

2.3 打孔数对鲜切菠萝蜜品质的影响

气调包装的打孔数会影响包装的渗透性，薄膜上打微孔可调节包装内的 O₂ 与 CO₂ 的比例，防止 O₂

过低导致无氧呼吸的发生^[26]。贮藏至第 10 天时，打孔数对鲜切菠萝蜜品质的影响见表 4。打孔数为 5 个时，鲜切菠萝蜜的硬度最低，这可能是薄膜渗透性低，导致包装体系中 O₂ 过低，而 CO₂ 过高，发生无氧呼吸损伤细胞结构，从而导致硬度下降明显。当打孔数为 25 个时，鲜切菠萝蜜的品质指标最差（ $P<0.05$ ），这可能归因于打孔数增多，薄膜的渗透性增强，包装内的 CO₂ 逸出，袋内 O₂ 含量逐渐升高，导致鲜切菠萝蜜呼吸速率升高，营养物质不断消耗。与其他处理组相比，打孔数为 15 个时，TA 含量最高，打孔数为 10 个时，硬度最大和 TSS 含量最高。因此，选择打孔数 5~15 个作为进一步试验分析的依据。

表 4 打孔数对鲜切菠萝蜜品质的影响
Tab.4 Effect of hole number on quality of fresh-cut jackfruit

打孔数/个	硬度/N	TSS 含量/%	TA 含量/%
5	4.82±0.13 ^c	24.42±0.19 ^b	0.28±0.02 ^{ab}
10	5.21±0.01 ^a	24.98±0.19 ^a	0.30±0.04 ^{ab}
15	5.06±0.06 ^{ab}	24.68±0.05 ^b	0.32±0.04 ^a
20	5.08±0.09 ^{ab}	23.97±0.19 ^c	0.28±0.03 ^{ab}
25	4.98±0.17 ^{bc}	23.88±0.04 ^c	0.26±0.01 ^b

2.4 正交试验优化结果分析

根据单因素，采用 L₉（3⁴）正交试验进行微孔气调包装参数优化，结果如表 5 所示。通过模糊综合评价法，对微孔气调包装的保鲜效果进行评价，9 组数据中，综合评价系数 S 的范围为 0.32~0.82。结果表明，3 个变量因素对鲜切菠萝蜜保鲜效果影响程度从大到小依次为 O₂ 体积分数（A）、打孔数（C）、CO₂ 体积分数（B）。得到微孔气调包装对鲜切菠萝蜜保鲜效果的影响的最佳工艺条件为 A₂B₁C₃，即 O₂ 体积分数为 5%、CO₂ 体积分数为 6%、打孔数为 15 个。

2.5 微孔气调包装对鲜切菠萝蜜保鲜效果的影响

2.5.1 菌落总数

菌落总数是用来评价鲜切果蔬安全性及货架期的重要指标。如图 1 所示，所有样品的菌落总数均呈增长趋势，且整个贮藏期内 MMAP 的菌落总数显著低于 CK 的（ $P<0.05$ ）。贮藏至第 6 天时，CK 表面出现肉眼可见的菌落，组织软化并伴有少量黏液，感官性状表明已无法食用，后续则不再测定其菌落总数。而 MMAP 的菌落总数在整个贮藏期内未出现明显的霉变，且贮藏至第 10 天时，菌落总数为 5.19 lg（CFU/g）。相比于 CK，MMAP 处理可有效抑制菌落总数的增加，这可能归因于微孔气调包装中适宜的气体比例和微孔薄膜的透气性，从而抑制了表面微生物的生长及改善水蒸气凝结现象，起到了良好的保鲜效果。

表 5 正交试验测定结果
Tab.5 Results determined by orthogonal test

序号	A	B	C	硬度/N	TSS 含量/%	TA 含量/%	VC 含量/ [mg·(100 g) ⁻¹]	质量 损失率/%	ΔE	MDA 质量摩尔浓度/ (nmol·g ⁻¹)	S
1	1	1	1	5.21	23.97	0.23	28.71	0.52	56.10	4.68	0.40
2	1	2	2	4.19	22.47	0.26	15.89	0.81	54.33	2.49	0.32
3	1	3	3	4.46	24.43	0.28	40.53	1.48	53.56	3.85	0.46
4	2	1	2	5.68	25.20	0.29	32.15	0.73	49.89	3.57	0.73
5	2	2	3	5.76	22.57	0.32	46.53	0.38	49.29	2.35	0.82
6	2	3	1	5.63	25.37	0.30	32.74	0.59	52.01	5.95	0.75
7	3	1	3	3.97	22.17	0.31	43.22	0.41	50.60	2.54	0.54
8	3	2	1	4.06	26.87	0.25	31.83	0.88	54.44	4.49	0.45
9	3	3	2	4.08	23.70	0.27	32.43	0.58	57.80	2.36	0.40
K ₁	1.18	1.67	1.60								
K ₂	2.29	1.58	1.44								
K ₃	1.39	1.61	1.82								
k ₁	0.39	0.56	0.53								
k ₂	0.76	0.53	0.48								
k ₃	0.46	0.54	0.61								
R	0.37	0.03	0.13								
因素主次顺序							A>C>B				
最佳工艺							A ₂ B ₁ C ₃				

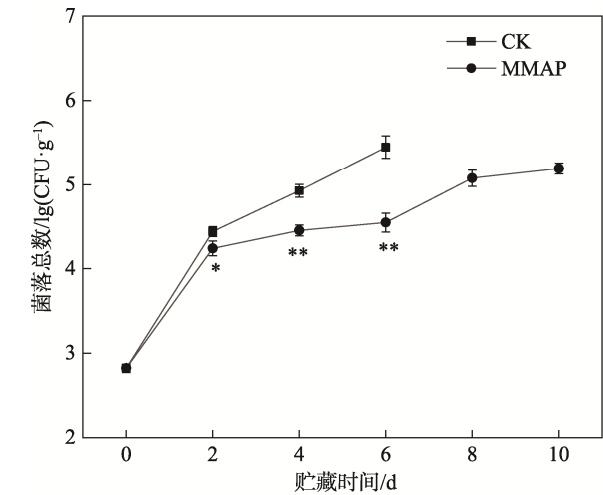


图 1 微孔气调包装对鲜切菠萝蜜
菌落总数的影响
Fig.1 Effect of microporous modified
atmosphere packaging on total bacterial
count of fresh-cut jackfruit

2.5.2 色差

颜色是能直接反映果蔬品质的指标之一。 L^* 值代
表明亮度、 a^* 值代表红绿、 b^* 值代表黄蓝。通过测定
 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值分析贮藏过程中果皮的颜色变化。

如图 2 所示,随着贮藏时间的延长, L^* 值和 ΔE 逐渐
下降, a^* 值和 b^* 值不断上升。整个贮藏期内,MMAP
对鲜切菠萝蜜颜色的影响均优于 CK,这说明 MMAP
可以保持鲜切菠萝蜜贮藏期间的光泽度。同时延缓菠
萝蜜向红黄颜色方向发展的趋势,延缓果实的成熟与
衰老。

2.5.3 硬度和质量损失率

硬度是果蔬成熟、贮藏和销售过程中由于代谢和
水分损失而发生的一种可见变化^[27]。如图 3a 所示,
在整个贮藏期间,所有样品的硬度逐渐降低。贮藏
至第 2 天时,2 种处理的硬度明显下降但差异不显著
($P>0.05$),随着贮藏时间延长,MMAP 的硬度显
著高于 CK 的 ($P<0.05$)。贮藏至第 6 天时,CK 的硬
度下降速率快,这可能是微生物作用加速了果胶及
其他细胞壁成分的降解,以及呼吸代谢和水分的蒸
发,使得果肉加速软化。

质量损失主要包括水分损失和干物质的损耗。如
图 3b 所示,随着贮藏时间的延长,质量损失逐渐增
加,MMAP 在延缓质量损失率上升的效果优于 CK
的。这可能是 MMAP 加强了内外的气体交换,抑制
了菠萝蜜呼吸作用的同时避免了无氧呼吸,从而减缓
其新陈代谢,减少营养物质的消耗和质量损失。

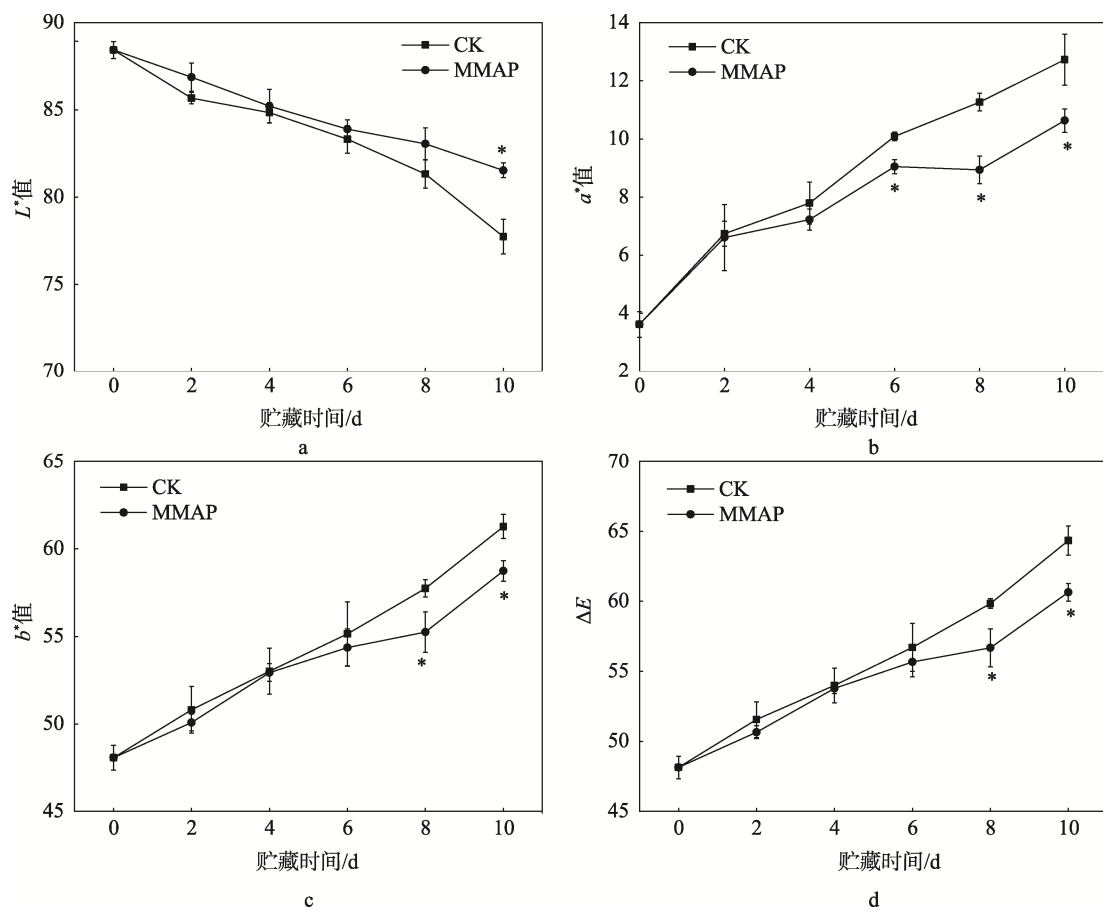


图2 微孔气调包装对鲜切菠萝蜜色差的影响
Fig.2 Effect of microporous modified atmosphere packaging on color difference of fresh-cut jackfruit

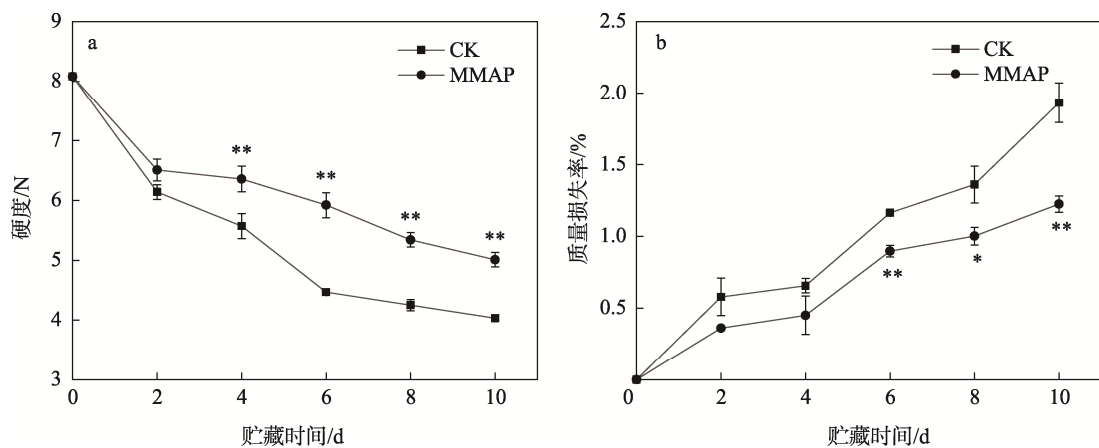


图3 微孔气调包装对鲜切菠萝蜜硬度 (a) 和质量损失率 (b) 的影响
Fig.3 Effect of microporous modified atmosphere packaging on firmness (a) and weight loss (b) of fresh-cut jackfruit

2.5.4 TSS 和 TA 含量

TSS 和 TA 可反映果蔬的风味、可接受度及贮藏品质。从图 4a 可以看出, TSS 含量随着时间的变化, 呈现上升的趋势, 随着果实的不断后熟, 淀粉逐渐转化为小分子的糖, 导致果实甜度和 TSS 含量增加。贮藏 0~6 d 时, CK 的 TSS 含量高于 MMAP 的, 而贮藏

8~10 d 时, MMAP 的 TSS 含量高于 CK 的。前期 CK 的生理代谢旺盛加速了淀粉的转化速率, 使得 CK 高于 MMAP; 后期由于呼吸作用不断消耗糖等营养物质, 而微孔气调包装抑制呼吸等生理生化活动, 从而使得 CK 低于 MMAP。TA 含量的变化见图 4b, 随着贮藏时间的延长, TA 含量先上升后下降, CK 的 TA

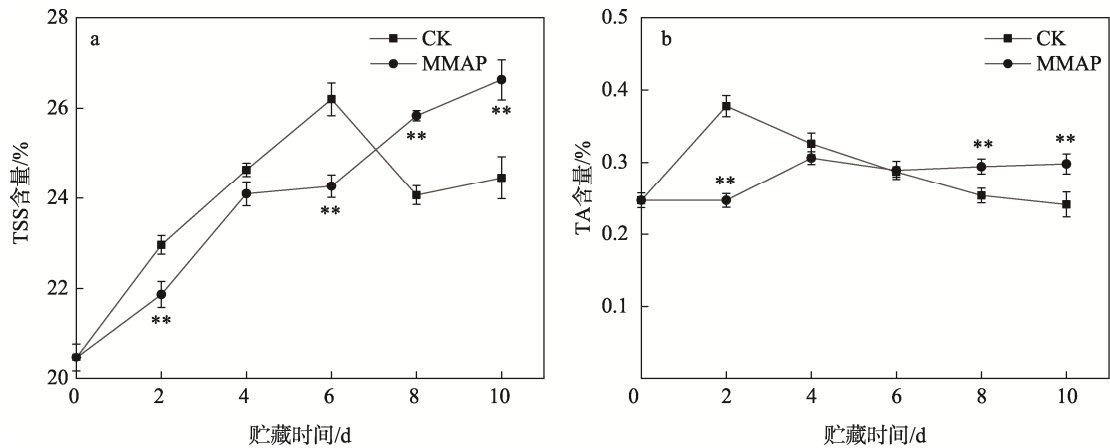


图 4 微孔气调包装对鲜切菠萝蜜 TSS (a) 和 TA (b) 含量的影响
Fig.4 Effect of microporous modified atmosphere packaging on TSS (a) and TA (b) content of fresh-cut jackfruit

含量在第 2 天达到峰值, 而 MMAP 则在第 4 天。鲜切菠萝蜜在后熟期间不断积累有机酸, 而 MMAP 可以延缓鲜菠萝蜜的后熟。贮藏 6 d 以后 MMAP 的 TA 含量显著高于 CK 的 ($P>0.05$), 由此可看出, MMAP 延缓了 TA 下降的速度。

2.5.5 VC 含量

VC 是菠萝蜜的营养成分之一, 同时也是重要的非酶抗氧化物质, 贮藏过程中当含量过低会造成活性氧损伤, 因此可以根据其含量变化评价菠萝蜜的保鲜效果。如图 5 所示, 在整个贮藏期间, 所有样品的 VC 含量均呈现逐渐的下降趋势, 且 MMAP 处理显著高于 CK ($P<0.05$)。贮藏至第 10 天时, MMAP 和 CK 的 VC 含量分别为 18.76 mg/100 g 和 16.24 mg/100 g, MMAP 比 CK 高出了 16.19%, 这说明 MMAP 可以维持较高的 VC 含量。其原因可能是气调微孔包装内气体通过微孔交换快速达到平衡, 抑制了鲜切菠萝蜜的生理代谢速率, 较好地保持鲜切菠萝蜜的抗氧化

性, 有效地延缓了果实衰老。大量的研究也证实了气调包装延缓了灵武长枣^[28]、拉萨刺梨^[29]和鲜切梨^[30]果实中 VC 含量的下降。

2.5.6 MDA 质量摩尔浓度

MDA 质量摩尔浓度的变化与细胞组织的衰老和膜系统脂质氧化密切相关, 可用于反映果实老化损伤后组织或细胞膜的脂质过氧化的程度。如图 6 所示, 随着贮藏时间的延长, MDA 质量摩尔浓度总体呈上升趋势, CK 的 MDA 质量摩尔浓度始终高于 MMAP 的 ($P<0.05$)。贮藏前期丙二醛的初始质量摩尔浓度为 0.46 nmol/g, 贮藏至第 10 天时, CK 和 MMAP 的 MDA 质量摩尔浓度分别为 8.70 nmol/g 和 6.41 nmol/g, CK 的 MDA 质量摩尔浓度上升明显 ($P<0.05$)。以上数据表明, MMAP 可以显著抑制鲜切菠萝蜜中 MDA 的上升。这可能是微孔气调包装通过调节包装内气体的体积分数变化来降低果蔬呼吸强度, 更好地维持了细胞膜

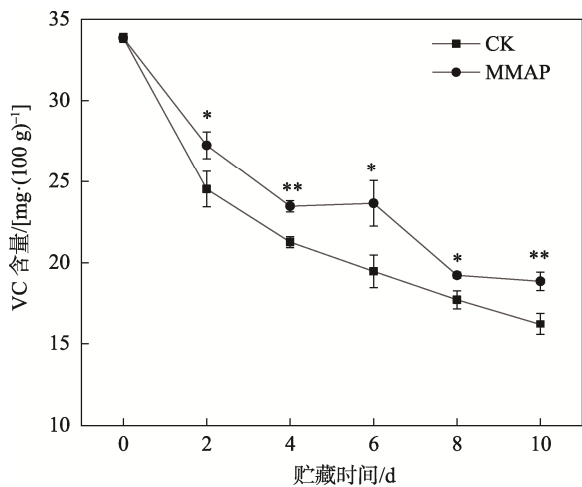


图 5 微孔气调包装对鲜切菠萝蜜 VC 含量的影响
Fig.5 Effect of microporous modified atmosphere packaging on VC content of fresh-cut jackfruit

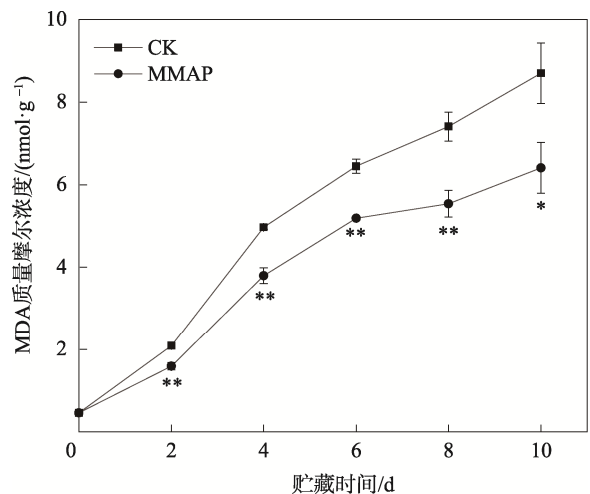


图 6 微孔气调包装对鲜切菠萝蜜 MDA 质量摩尔浓度的影响
Fig.6 Effect of microporous modified atmosphere packaging on MDA content of fresh-cut jackfruit

的透性。同时能维持较高的抗氧化成分,延缓自由基积累对细胞的损伤,更好地保护细胞的完整性,从而降低了MDA的积累^[31-32]。

3 结语

通过单因素和正交试验优化确定微孔气调包装鲜切菠萝蜜的最佳条件: O₂ 体积分数为 5%、CO₂ 体积分数为 6%、打孔数为 15 个。与 CK 进行比较,MMAP 抑制了鲜切菠萝蜜表面微生物的生长,延缓了质量损失率的上升和硬度的下降,保持较高的 TSS、TA 和 VC 含量,同时降低了 MDA 的积累,达到延缓果实的衰老并保持采后品质的保鲜效果。微孔气调包装主要是通过改变微孔参数调节包装体系中的 O₂ 和 CO₂ 的比例来降低果实的呼吸作用,抑制菠萝蜜的生理代谢,延缓其生理变化;降低表面微生物的生长,延缓由微生物引起的腐烂变质;同时维持较高营养物质及抗氧化成分以降低细胞损伤和脂质过氧化的程度。通过上述微生物及理化指标分析可知,低温条件下(10℃),鲜切菠萝蜜的保质期仅有 4 d,经过微孔气调包装可将鲜切菠萝蜜的保质期延长至 10 d。此外,气调微孔膜包装膜具有安全性高、成本低、易实现产业化等优点。文中的研究为鲜切菠萝蜜的产业化发展提供了一种潜在的方法。

参考文献:

- [1] 徐飞,刘启泽,何素明,等.两种模式贮藏过程中菠萝蜜质构特性及理化品质变化[J].食品工业科技,2020,41(18):272-279.
- [2] XU F, LIU Q Z, HE S M, et al. Texture Characteristics and Physicochemical Quality Changes of Jackfruit Pulp during Storage in Two Modes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(18): 272-279.
- [3] RUTTIPRON P, URAIWAN P, WARAWUT K, et al. Inhibition of Pantoea Agglomerans Contamination of Fresh-Cut Jackfruit by Exposure to Weak Organic Acid Vapors[J]. LWT, 2020, 139(1): 110586.
- [4] RANA S S, PRADHAN R C, MISHRA S. Optimization of Chemical Treatment on Fresh Cut Tender Jackfruit Slices for Prevention of Browning by Using Response Surface Methodology[J]. International Food Research Journal, 2018, 25(1): 196-203.
- [5] TABASSUM N, KHAN M. Modified Atmosphere Packaging of Fresh-Cut Papaya Using Alginate Based Edible Coating: Quality Evaluation and Shelf Life Study[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 259: 108853.
- [6] JIANG Q Y, ZHANG M, MUJUMDAR A, et al. Combination Strategy of CO₂ Pressurization and Ultrasound: To Improve the Freezing Quality of Fresh-Cut Honeydew Melon[J]. Food Chemistry, 2022, 383(1): 132327.
- [7] WEN B, LI D, TANG D, et al. Effects of Simultaneous Ultrasonic and Cysteine Treatment on Antibrowning and Physicochemical Quality of Fresh-Cut Lotus Roots during Cold Storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 168: 111294.
- [8] VIACAVA G E, PONCE A G, GOYENECHE R, et al. Freshly Characterization and Storability of Mini Head Lettuces at Optimal and Abusive Temperatures[J]. Food Science and Technology International = Ciencia y Tecnologia De Los Alimentos Internacional, 2016, 22(1): 47-57.
- [9] 郑鄢燕,魏亚博,王宇滨,等.气调贮藏对腐败菌引起的鲜切黄瓜品质、滋味和挥发性物质变化的影响[J].食品科学,2021,42(5):252-261.
- [10] ZHENG Y Y, WEI Y B, WANG Y B, et al. Effect of Controlled Atmosphere Storage on Changes in Quality, Taste and Volatile Compounds of Fresh-Cut Cucumber Caused by Spoilage Bacteria[J]. Food Science, 2021, 42(5): 252-261.
- [11] 吴志霜,张慈.高压氩气和氮气处理对鲜切苹果冷藏的保鲜效果[J].食品科学,2011,32(20):290-295.
- [12] WU Z S, ZHANG H. Effects of High Pressure Argon and High Pressure Nitrogen Treatments on Fresh-Keeping of Fresh-Cut Apples during Cold Storage[J]. Food Science, 2011, 32(20): 290-295.
- [13] OLAWUYI I F, PARK J J, LEE J J, et al. Combined Effect of Chitosan Coating and Modified Atmosphere Packaging on Fresh-Cut Cucumber[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(3): 1043-1052.
- [14] NA D L, LING K L, DAN L D, et al. Integrated Analysis of Nutritional Quality Changes and Molecular Regulation in 'Qingcui' Plum Fruit Treated with 1-MCP during Storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2024: 112591.
- [15] ZHENG H H, LIU W, LIU S, et al. Effects of Melatonin Treatment on the Enzymatic Browning and Nutritional Quality of Fresh-Cut Pear Fruit[J]. Food Chemistry, 2019, 299: 125116.
- [16] 冯叙桥,范林林,韩鹏祥,等.溶菌酶涂膜对鲜切“寒富”苹果的贮藏保鲜作用研究[J].现代食品科技,2014,30(11):125-132.
- [17] FENG X Q, FAN L L, HAN P X, et al. Effect of Lysozyme Coatings on the Storage and Preservation of Fresh-Cut "Hanfu" Apples[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(11): 125-132.
- [18] RUSSO P, PEÑA N, DE CHIARA M L V, et al. Probiotic Lactic Acid Bacteria for the Production of Multifunctional Fresh-Cut Cantaloupe[J]. Food Research International, 2015, 77: 762-772.
- [19] 闫训友,杜洪利,朱爱红,等.丁香提取物对鲜切鸭

- 梨保鲜效应的研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(4): 347-350.
- YAN X Y, DU H L, ZHU A H, et al. Study on Preservation of Fresh-Cut Ya-Pears of Clove Medicine Extraction[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(4): 347-350.
- [16] FAN K, ZHANG M, BHANDARI B, et al. A Combination Treatment of Ultrasound and E-Polylysine to Improve Microorganisms and Storage Quality of Fresh-Cut Lettuce[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 113: 108315.
- [17] 郁杰, 张雨宸, 谢晶. 低强度 UV-A 光循环照射结合 ϵ -聚赖氨酸处理对 4 °C 下鲜切菠菜保鲜效果的研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(18): 154-160.
- YU J, ZHANG Y C, XIE J. The Effect of Cyclic Irradiation of Low-Intensity UV-a Combined With ϵ -Polylysine on the Preservation of Fresh-Cut Spinach at 4 °C[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(18): 154-160.
- [18] 伍丹. 预处理结合微孔气调包装对鲜切茄子和橙子保鲜效果的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- WU D. Study on the Effect of Pretreatment Combined with Microporous Modified Atmosphere Packaging on Fresh-Cut Eggplants and Oranges[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [19] GHIDELLI C, PÉREZ-GAGO M B. Recent Advances in Modified Atmosphere Packaging and Edible Coatings to Maintain Quality of Fresh-Cut Fruits and Vegetables[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(4): 662-679.
- [20] 梅成铭. 鲜切菠萝蜜常温 and 低温贮藏期间品质变化研究[D]. 海口: 海南大学, 2020.
- MEI C M. Study on Quality Changes of Fresh-Cut Jackfruit during Ordinary and Low Temperature Storage[D]. Haikou: Hainan University, 2020.
- [21] WANG H, WU Y, YU R, et al. Effects of Postharvest Application of Methyl Jasmonate on Physicochemical Characteristics and Antioxidant System of the Blueberry Fruit[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 258: 108785.
- [22] CHI H, SONG S, LUO M, et al. Effect of PLA Nanocomposite Films Containing Bergamot Essential Oil, TiO₂ Nanoparticles, and Ag Nanoparticles on Shelf Life of Mangoes[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 249: 192-198.
- [23] FAN K, ZHANG M, JIANG F J. Ultrasound Treatment to Modified Atmospheric Packaged Fresh-Cut Cucumber: Influence on Microbial Inhibition and Storage Quality[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 54: 162-170.
- [24] CHENG P F, YUN X Y, XU C, et al. Use of Poly(ϵ -Caprolactone)-Based Films for Equilibrium-Modified Atmosphere Packaging to Extend the Post-harvest Shelf Life of Garland Chrysanthemum[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(6): 1946-1956.
- [25] 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(18): 4261.
- [26] 王康飞, 王桂英, 王德铮. 不同保鲜方式对葡萄保鲜效果影响的对比研究[J]. 包装工程, 2020, 41(15): 19-24.
- WANG K F, WANG G Y, WANG D Z. Comparative Study on the Effects of Different Preservation Methods on Grape Preservation[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(15): 19-24.
- [27] PERETTO G, DU W X, AVENA-BUSTILLOS R J, et al. Electrostatic and Conventional Spraying of Alginate-Based Edible Coating with Natural Antimicrobials for Preserving Fresh Strawberry Quality[J]. Food and Bioprocess Technology, 2017, 10(1): 165-174.
- [28] 刘慧, 张静林, 刘杰超, 等. 抗坏血酸结合自发气调包装对灵武长枣贮藏品质和抗氧化性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 257-263.
- LIU H, ZHANG J L, LIU J C, et al. Effect of Ascorbic Acid Combined with Modified Atmosphere Packaging on Storage Quality and Antioxidant Activity of Lingwuchangzao Jujube Fruit[J]. Food Science, 2021, 42(1): 257-263.
- [29] 李元会. 不同方式贮藏对拉萨刺梨品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(9): 239-243.
- LI Y H. Effects of Different Storage Methods on Quality of Rosa Roxburghii Fruits from Lhasa[J]. Food Science, 2018, 39(9): 239-243.
- [30] WANG D, LI W, LI D, et al. Effect of High Carbon Dioxide Treatment on Reactive Oxygen Species Accumulation and Antioxidant Capacity in Fresh-Cut Pear Fruit during Storage[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 281: 109925.
- [31] 蔡佳昂, 赵霞, 周静, 等. 1-甲基环丙烯与微孔气调包装复合技术对红苕尖保鲜品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(7): 199-206.
- CAI J A, ZHAO X, ZHOU J, et al. Effects of 1-MCP and Micro-Porous Films on Quality of Sweet Potato Leaves[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(7): 199-206.
- [32] 马佳佳, 隋思瑶, 孙灵湘, 等. 微孔自发气调包装对冠玉枇杷的保鲜效果[J]. 现代食品科技, 2020, 36(11): 137-146.
- MA J J, SUI S Y, SUN L X, et al. The Preservation Effects of Microporous Spontaneous Controlled Atmosphere Packaging on Guanyu Loquat[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(11): 137-146.