DOI:10.12441/spyswjs.20250107003 [文章编号] 1673-1689(2025)04-0150-13

花椒籽抗菌肽美拉德产物对鲜切生菜的保鲜效果研究

李梦琪 张蔓莎 叶佳朋 李建龙 侯晓艳*

(四川农业大学食品学院,四川 雅安 625014)

摘要:【目的】提升鲜切生菜的保鲜期与品质稳定性。**【方法】**构建花椒籽抗菌肽-壳寡糖美拉德产物用于鲜切生菜的涂膜保鲜处理,通过相关理化与微生物指标的测定评估其应用效果。**【结果】**第 10 天时,MRP 组生菜的失重率、褐变指数、多酚氧化酶(PPO)活性、过氧化物酶(POD)活性及苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性、呼吸强度、丙二醛质量摩尔浓度及菌落总数均显著低于 CK 组、COS 组、NP-6 组及 MIX 组。同时,该组在色泽维持、色素保留及抗坏血酸质量分数等正向品质指标上亦表现最优,综合保鲜性能最强。**【结论】**综合各项指标显示,花椒籽抗菌肽美拉德产物涂膜具有良好的抗菌、抗氧化和保鲜特性,能够显著延长鲜切生菜的保质期,并有效提高其感官质量与营养价值。该研究为天然保鲜材料的开发和应用提供了新思路,也为食品保鲜技术的进一步优化和产业化提供了理论依据。

关键词:花椒籽抗菌肽;壳寡糖;美拉德产物;天然保鲜技术;鲜切生菜

Fresh-keeping Effect of Maillard Reaction Products of *Zanthoxylum bungeanum* Seed Antimicrobial Peptides on Fresh-cut Lettuce

*LI Mengqi ZHANG Mansha YE Jiapeng LI Jianlong HOU Xiaoyan**

(College of Food Science, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to enhance the shelf life and quality stability of fresh-cut lettuce. [**Method**] The Maillard reaction products (MRP) of *Zanthoxylum bungeanum* seed antimicrobial peptides and chitooligosaccharides were developed and applied as a coating on fresh-cut lettuce. The fresh-keeping effect was assessed through comprehensive physicochemical and microbiological analyses. [**Result**] On day 10, the lettuce in the MRP group exhibited significantly lower weight loss, browning index, PPO, POD, and PAL activities, respiratory intensity, malondialdehyde molar concentration, and total microbial count than the CK, COS, NP-6, and MIX groups. Meanwhile, the MRP group outperformed other groups in positive quality parameters, including color retention, pigment preservation, and ascorbic acid mass fraction, demonstrating the strongest overall fresh-keeping effect. [**Conclusion**] The MRP coating possesses potent antimicrobial, antioxidant, and fresh-keeping properties, effectively prolonging the shelf life while enhancing the sensory attributes and nutritional quality of fresh-cut lettuce. This study provides novel insights for the development and application of natural preservative materials and lays a theoretical foundation for the improvement and industrial application of food preservation technologies.

Keywords: *Zanthoxylum bungeanum* seed antimicrobial peptides; chitooligosaccharide; Maillard reaction products; natural preservation technology; fresh-cut lettuce

---

基金项目:四川省自然科学基金青年基金项目(2023NSFSC1212)。

通信作者:侯晓艳(1990—),女,博士,讲师,硕士研究生导师,主要从事天然抗菌剂的开发与利用研究。E-mail:houxiaoyan106@163.com

收稿日期:2025-01-07 **修回日期:**2025-03-28

随着全球人口的增长和消费者生活方式的变化，现代都市人群愈加追求便捷、健康且营养丰富的食品。生菜是一种健康且即食性强的蔬菜，也是低热量、高营养价值的蔬菜，富含维生素、膳食纤维、矿物质和水分，不仅能够提供日常所需的各种营养成分，还具有促进消化、保护视力、改善皮肤健康等多种健康益处[1]。然而，鲜切生菜水分含量高、细胞壁较薄、结构脆弱，切割后的切面直接暴露在空气中，极易发生氧化衰老并遭受微生物污染，导致腐败和品质下降[2]。通常情况下，鲜切生菜在加工后仅能维持2~3 d的新鲜状态，随后其色泽、口感和营养成分便会逐渐劣化。因此，如何有效延长鲜切生菜的保鲜期这一问题亟待解决。

目前，食品保鲜技术主要依赖于传统的物理方法和化学方法，如干燥、冷藏、辐射处理以及化学防腐剂等[3]。虽然这些方法在延长食品保质期方面表现出一定的效果，但也存在显著的局限性和潜在健康风险。如冷藏和辐射处理虽然能够有效抑制微生物的生长和延缓腐败过程，但对某些营养成分和感官品质的影响较大，可能导致食品风味的劣化和营养的流失[4]。化学防腐剂虽能有效抑制食品腐败，但长期使用可能对人体健康造成一定的隐患，例如，苯甲酸、山梨酸以及次氯酸盐等的过量添加会损害机体免疫系统，对皮肤、眼睛和黏膜造成刺激[5]。随着消费者对食品安全与健康的关注日益加深，以及对天然、绿色食品需求的持续增长，天然保鲜技术得到了快速发展。因此，通过创新手段有效延长鲜切生菜的保鲜期，是当前食品行业的重要课题。

近年来，抗菌肽作为食品保鲜领域的重要研究方向，受到了广泛关注[6]。抗菌肽是一类由短链氨基酸组成的具有抗菌作用的天然蛋白质分子。它通过与细菌的细胞膜或细胞质结合，破坏细胞结构或干扰细菌功能，进而抑制细菌的生长和增殖[7]，且对耐药性细菌具有较强的杀灭作用，具有广谱性和安全性[8]。抗菌肽来源广泛，现已发现其存在于植物、动物及微生物等多种生物中[9]。其中，花椒籽抗菌肽作为一种从花椒籽中提取的小分子抗菌肽，具有显著的广谱抗菌活性，能够有效抑制多种常见的食源性致病菌，如金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、大肠杆菌以及沙门氏菌等[10]。尽管抗菌肽具有广谱抗菌活性，但其稳定性较差，在实际开发、贮存和应用过程中面临诸多限制。目前，主流的解决方案是通过与多糖共价结合来提升其抗菌稳定性。常见的共价结合技术包括化学试剂交联、酶促交联以及美拉德反应。相比其他方法，美拉德反应具有无需添加化学试剂、绿色安全且能够自发进行等显著优势，受到广泛关注。在众多可参与美拉德反应的多糖中，壳寡糖是一种来源于虾蟹壳的阳离子型天然低聚糖，因其优异的理化特性和多种生物活性而备受关注，如良好的抑菌性、抗氧化性、成膜性及水溶性等。在食品保鲜领域，壳寡糖通过抑制细菌生长、增强抗氧化能力、改善食品表面特性来提升食品的感官质量，延长食品的保质期[11]。

作者所在实验室前期的研究表明，花椒籽抗菌肽-壳寡糖美拉德产物对生菜中常见的金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、铜绿假单胞菌和沙门氏菌具有良好的抑制作用，其抗菌性和抗菌稳定性均优于单独或混合使用的花椒籽抗菌肽和壳寡糖。因此，通过将花椒籽抗菌肽与壳寡糖进行美拉德反应来构建一种天然生物保鲜涂膜，以期利用两者的协同作用为鲜切生菜提供更稳定有效的保鲜效果，为天然保鲜技术的实际应用提供新的研究思路和实践参考，为食品保鲜领域开发绿色、安全的创新产品提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

生菜：市售，挑选新鲜翠绿、无机械损伤的生菜；花椒籽抗菌肽（肽段序列：AGDKKIKIGINGFGRIGRL；纯度：96.55%）：上海科肽生物技术有限公司合成；壳寡糖：分析纯，上海源叶生物科技有限公司；氯化钠、酚酞、邻苯二酚：分析纯，成都市科隆化学品有限公司；氢氧化钠、草酸、三氯乙酸：分析纯，成都金山化学试剂有限公司；氯化钡：分析纯，上海易恩化学技术有限公司；磷酸盐液缓冲：分析纯，北京博奥拓达科技有限公司；抗坏血酸标准品：分析纯，北京索莱宝科技有限公司；碳酸钙：分析纯，国药集团化学试剂有限公司；硫代巴比妥酸：分析纯，上海泰坦科技有限公司；平板计数琼脂培养基：青岛海博生物技术有限公司。

1.2 仪器与设备

电子天平：ME204型，梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；磁力搅拌器：SN-MS-3D型，上海尚仪

仪器设备有限公司；pH计：PHS-3C型，上海仪电科学仪器股份有限公司；磁力搅拌水浴锅：HCJ-2E型，常州恩培仪器制造有限公司；离心机：ST16R型，美国Thermo Fisher Scientific公司；真空冷冻干燥机：Scientz-12N型，宁波新芝生物科技股份有限公司；紫外可见分光光度计：759S型，上海棱光技术有限公司；立式灭菌器：YXQ-LS-50S型，上海博迅实业有限公司医疗设备厂；全温恒温摇床：ZMY-211B型，上海智城分析仪器制造有限公司；生化培养箱：SHP-250型，北京中兴伟业仪器有限公司。

1.3 研究方法

1.3.1 不同涂膜剂的制备

1）壳寡糖COS涂膜剂的制备：称取COS粉末溶解于超纯水中，配置成2 mg/mL的COS涂膜剂。

2）花椒籽抗菌肽（NP-6）涂膜剂的制备：称取NP-6粉末溶解于超纯水中，配置成2 mg/mL的NP-6涂膜剂。

3）壳寡糖-花椒籽抗菌肽混合物（MIX）涂膜剂的制备：称取COS粉末、NP-6粉末分别溶解于超纯水中，按照糖肽质量比1∶2混合，将pH调至8.0，配置成2 mg/mL的MIX涂膜剂。

4）花椒籽抗菌肽-壳寡糖美拉德产物（MRP）涂膜剂的制备：称取一定量COS粉末、NP-6粉末分别溶解于超纯水中，按照糖肽质量比1∶2混合，将pH调至8.0，置于90 ℃水浴锅中搅拌36 h，进行美拉德反应。反应结束后立即冰浴，并对反应溶液进行离心，取上清液透析24 h，最后进行真空冷冻干燥，制得MRP粉末。称取MRP粉末溶解于超纯水中，配置成2 mg/mL的MRP涂膜剂。

1.3.2 鲜切生菜的预处理

选取无机械损伤、颜色鲜绿且新鲜的生菜作为试验材料。挑选颜色和大小均匀的生菜叶片，去除叶脉后，将剩余部分切割成宽度为2.0~2.5 cm的条状。将鲜切生菜分别浸泡于COS涂膜剂、NP-6涂膜剂、MIX涂膜剂及MRP涂膜剂中，处理时间为3 min。处理后，将生菜置于筛网上沥干，并在室温下通风干燥，待表面无明显水迹后，分装于一次性透明保鲜盒中，每盒装入100 g鲜切生菜作为样品。未处理样品为CK组，处理样品分别标记为COS组、NP-6组、MIX组及MRP组。所有样品在室温条件下贮存，贮藏时间为0~10 d。

1.3.3 外观变化及感官评价

对鲜切生菜的外观进行记录并拍照，邀请经过严格培训的20名感官评价员对0~10 d贮藏期内的鲜切生菜样品进行感官评价，感官评分见表1。

表1 感官评分表

Table 1 Sensory evaluation standards

鲜切生菜特征	感官评分/分				
	8~10	6~8	4~6	2~4	0~2
新鲜度	新鲜翠绿	轻度失水	萎蔫	稍有腐烂	严重腐烂
叶片形态	叶边平整	叶边较平整	叶边略微卷曲	卷曲面积小于1/2	卷曲面积大于1/2
褐变程度	无褐变	轻微褐变	褐变	较重褐变	严重褐变
气味	清香	较清香	稍有异味	异味较重	恶臭
整体品质	完好	较好	商品界限	较坏	完全坏掉

1.3.4 失重率

采用称量法。参照文献[12]的方法并稍加修改。在第0天时分别称量各组鲜切生菜，作为初始质量，在2、4、6、8、10 d再次称量各组鲜切生菜的质量，按照式（1）进行计算。

$$M=\frac{m_0-m_1}{m_0}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

M ——各组生菜的失重率，%；

m_0——各组生菜的初始质量，g；

m_1——不同贮藏期各组生菜的质量，g。

1.3.5 色泽

采用色差仪测定。参照文献[13]的方法并稍加修改。分别于生菜的左上、右上、左下、右下及中间选取5个点测量L^*值、a^*值和b^*值。其中L^*值代表亮度值；a^*值代表红绿值，正值偏红，负值偏绿；b^*值代表黄蓝值，正值偏黄，负值偏蓝；ΔE表示总色差的变化，按照式（2）进行计算。

$$\Delta E=\sqrt{(\Delta L^*)^2+(\Delta a^*)^2+(\Delta b^*)^2} \quad (2)$$

式中：

ΔE——不同贮藏期各组生菜和新鲜生菜之间总色差的差值；

ΔL^*——不同贮藏期各组生菜和新鲜生菜之间L^*值的差值；

Δa^*——不同贮藏期各组生菜和新鲜生菜之间a^*值的差值；

Δb^*——不同贮藏期各组生菜和新鲜生菜之间b^*值的差值。

1.3.6 色素质量分数

采用分光光度法测定。参照文献[14]的方法并稍加修改。将0.2 g鲜切生菜样品与10 mL体积分数95%乙醇及适量碳酸钙混合，充分研磨，于常温下避光提取6 h，随后取上清液分别于470、474、485、642、665 nm测定吸光值。按照式(3)~(7)进行计算，结果以mg/g表示。

$$\rho_1 = 9.99A_{665} - 0.087A_{642} \quad (3)$$

$$\rho_2 = 17.7A_{642} - 3.04A_{665} \quad (4)$$

$$\rho_3 = \rho_1 + \rho_2 \quad (5)$$

$$\rho_4 = 4.92A_{474} - 0.025\,5\rho_1 - 0.255\rho_2 \quad (6)$$

$$\rho_5 = 10.2A_{470} - 11.5A_{485} - 0.003\,6\rho_1 - 0.652\rho_3 \quad (7)$$

式中：

ρ_1——各组生菜的叶绿素a质量分数，mg/g；

ρ_2——各组生菜的叶绿素b质量分数，mg/g；

ρ_3——各组生菜的总叶绿素质量分数，mg/g；

ρ_4——各组生菜的类胡萝卜素质量分数，mg/g；

ρ_5——各组生菜的叶黄素质量分数，mg/g；

A_{665}——665 nm处的吸光值；

A_{642}——642 nm处的吸光值；

A_{474}——474 nm处的吸光值；

A_{470}——470 nm处的吸光值；

A_{485}——485 nm处的吸光值。

1.3.7 褐变指数

采用分光光度法测定。参照文献[15]的方法并稍加修改。将2 g鲜切生菜样品与10 mL体积分数95%乙醇及适量碳酸钙混合，充分研磨后4 000 r/min离心20 min，取上清液于420 nm处测定吸光值，即为样品褐变指数。

1.3.8 PPO活性

采用分光光度法测定。参照《果蔬采后生理生化实验指导》的方法，结果以U/g表示[16]。

1.3.9 POD活性

采用分光光度法测定。参照《果蔬采后生理生化实验指导》的方法，结果以U/g表示[16]。

1.3.10 PAL活性

采用分光光度法测定。参照《果蔬采后生理生化实验指导》的方法，结果以U/g表示[16]。

1.3.11 抗坏血酸质量分数

参照GB 5009.86—2016，采用2，6-二氯靛酚滴定法，结果以mg/100 g表示。

1.3.12 呼吸强度

采用静置法测定。参照《果蔬采后生理生化实验指导》的方法，结果以mg/(kg·h)表示[16]。

1.3.13 丙二醛质量摩尔浓度

采用分光光度法测定。参照《果蔬采后生理生化实验指导》的方法，结果以nmol/g表示[16]。

1.3.14 菌落总数

参照GB 4789.2—2022，结果以CFU/g表示。

1.3.15 Pearson相关性分析

对失重率、L^*值、a^*值、b^*值、ΔE、叶绿素a质量分数、叶绿素b质量分数、总叶绿素质量分数、类胡萝卜素质量分数、叶黄素质量分数、褐变指数、PPO活性、抗坏血酸质量分数、呼吸强度、丙二醛质量摩尔浓度和菌落总数等指标进行Pearson相关性分析。

1.3.16 数据分析

采用IBM SPSS Statistics 28.0软件进行统计分析，显著性水平以Duncan多重比较法检验($P<0.05$)。结果以平均值±标准差表示，并使用Origin 2022软件对数据进行可视化处理。

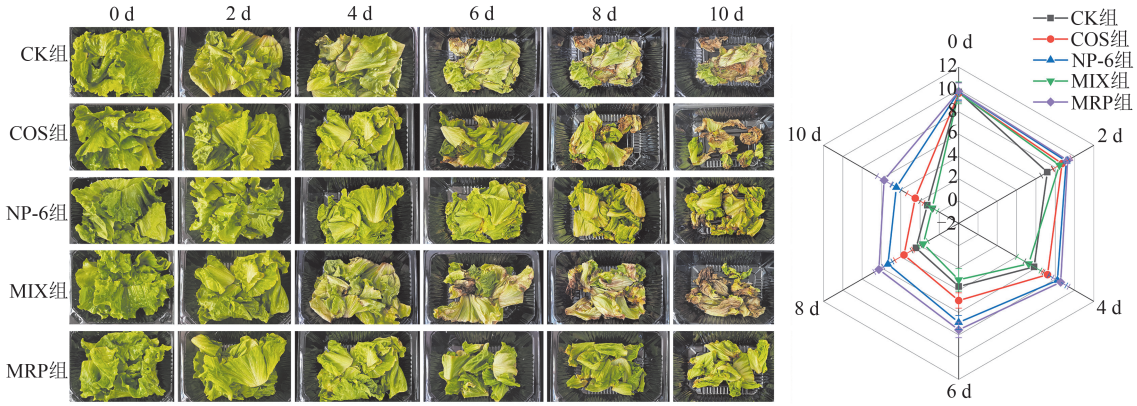
2 结果与讨论

2.1 鲜切生菜的外观变化及感官评价

CK组和不同涂膜处理组鲜切生菜在0~10 d贮存期间的外观变化及感官评价见图1。第0天时，各处理组的鲜切生菜均保持新鲜的绿色，叶片平展饱满，色泽明亮，具有较高的商品价值。随着贮藏时间的延长，CK组和MIX组的鲜切生菜在第4天开始出现褐变，叶片边缘枯萎，失去原有的鲜绿色泽。随后，COS组和NP-6组在第6天时也开始褐变，并出现局部腐烂。整个贮藏过程中，MRP组表现最为出色，在前8 d未见明显变化，叶片依旧饱满翠绿，保持较高的

新鲜度，到第 10 天仅出现轻微褐变，叶片整体状态良好。

鲜切生菜的感官评分结果与外观变化一致。在贮藏第 0 天时，所有处理组的鲜切生菜均保持较高的品质，评分较高。随着贮藏时间的延长，鲜切生菜的感官品质逐步下降。CK 组和 MIX 组的感官评分下降最为迅速，COS 组和 NP-6 组的评分下降则相对较缓。相比之下，MRP 组的感官评分表现最佳，第 10 天的评分仍为 5.73±0.43，明显优于其他处理组，表明 MRP 组涂膜在鲜切生菜保鲜方面效果最佳，有效维持了鲜切生菜在贮藏期内的品质和新鲜度。



(a) 外观变化　　(b) 感官评价

图 1　鲜切生菜的外观变化及感官评分

Fig. 1　Appearance changes and sensory scores of fresh-cut lettuce

2.2　不同处理对鲜切生菜失重率的影响

失重率反映了鲜切生菜中水分的流失情况。采摘后，生菜仍在进行呼吸作用和蒸腾作用。使得叶片逐渐萎蔫、质地变软、口感变差。此外，水分的流失还会加速酶促反应，破坏生菜正常生理功能，降低其抗菌性和耐贮性，缩短保质期，严重影响其商品价值[17]。图 2 为不同处理对鲜切生菜失重率的影响。随着贮藏时间的延长，各处理组的失重率逐渐上升，其中 CK 组的失重率最高，10 d 后达到了（68.27±1.60）%。与之相比，MIX 组和 COS 组的失重率整体低于 CK 组，表现出了一定的保水效果。这是由于壳寡糖作为一种天然多糖材料，具有一定的阻水性和通透性，能延缓鲜切生菜的失水[18]，但随着时间的延长，其保水性能有所减弱。NP-6 组和 MRP 组表现出较好的保水效果，尤其是 MRP 组在整个试验过程中展现了最为稳定和显著的结果，第 10 天的失重率仅为（37.87±0.88）%，是所有组中最低的，说明其提供了有效的保水性能。

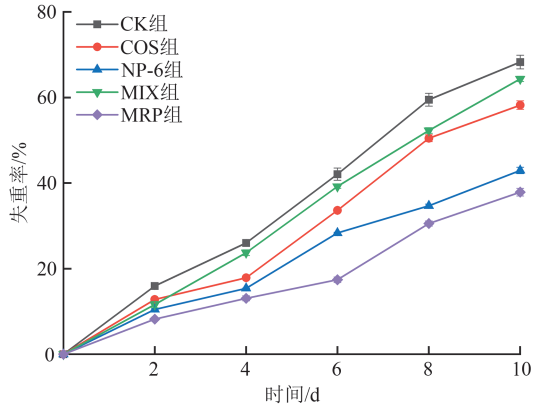


图 2　不同处理对鲜切生菜失重率的影响

Fig. 2　Effects of different treatments on the weight loss of fresh-cut lettuce

2.3　不同处理对鲜切生菜色泽的影响

色泽是评估果蔬品质的重要指标，鲜切生菜色泽的变化直接影响其感官品质。图 3 为不同处理对鲜切生菜色泽的影响。随着贮藏时间的延长，各组样品的 L^* 值呈现出下降的趋势，表明鲜切生菜表面逐步变暗，褐变程度加剧。其中，CK 组、COS 组和 MIX 组的 L^* 值明显降低，亮度减弱最为明显。NP-6 组和 MRP 组的 L^* 值下降幅度较小，第 10 天时分别为 41.30±2.37 和 49.17±1.57，有效减缓了暗化过程。a^* 值总体呈上升趋势，表明鲜切生菜绿色逐渐减退。贮藏到第 6 天时，MIX 组的 a^* 值上升为 0.59±0.52，变为正值，表明其开始褪绿转红，褐变逐渐严重。之后 CK 组和 COS 组的 a^* 值也变为正值，而 NP-6 组和 MRP 组的 a^* 值始终保持在 0 以下，表

明其虽有褪绿情况，但没有发生转红，有效抑制了褐变。各处理组的b^*值均呈上升趋势，表明鲜切生菜逐渐黄化。其中CK组、MIX组和COS组的b^*值明显增加，表现出严重的黄化现象。相对而言，NP-6组和MRP组的b^*值增加较小，减弱了鲜切生菜的黄化。各处理组的ΔE值随着贮藏时间的延长逐渐上升，反映出鲜切生菜在贮藏过程中色泽变化逐渐加剧。其中，CK组和MIX组的ΔE值变化最为明显，COS组和NP-6组的ΔE值变化次之，而MRP组的ΔE值增长最小，第10天时为15.44±1.02，表明MRP在抑制色泽变化和延缓褐变方面效果最佳，能有效维持鲜切生菜贮藏期间的色泽。

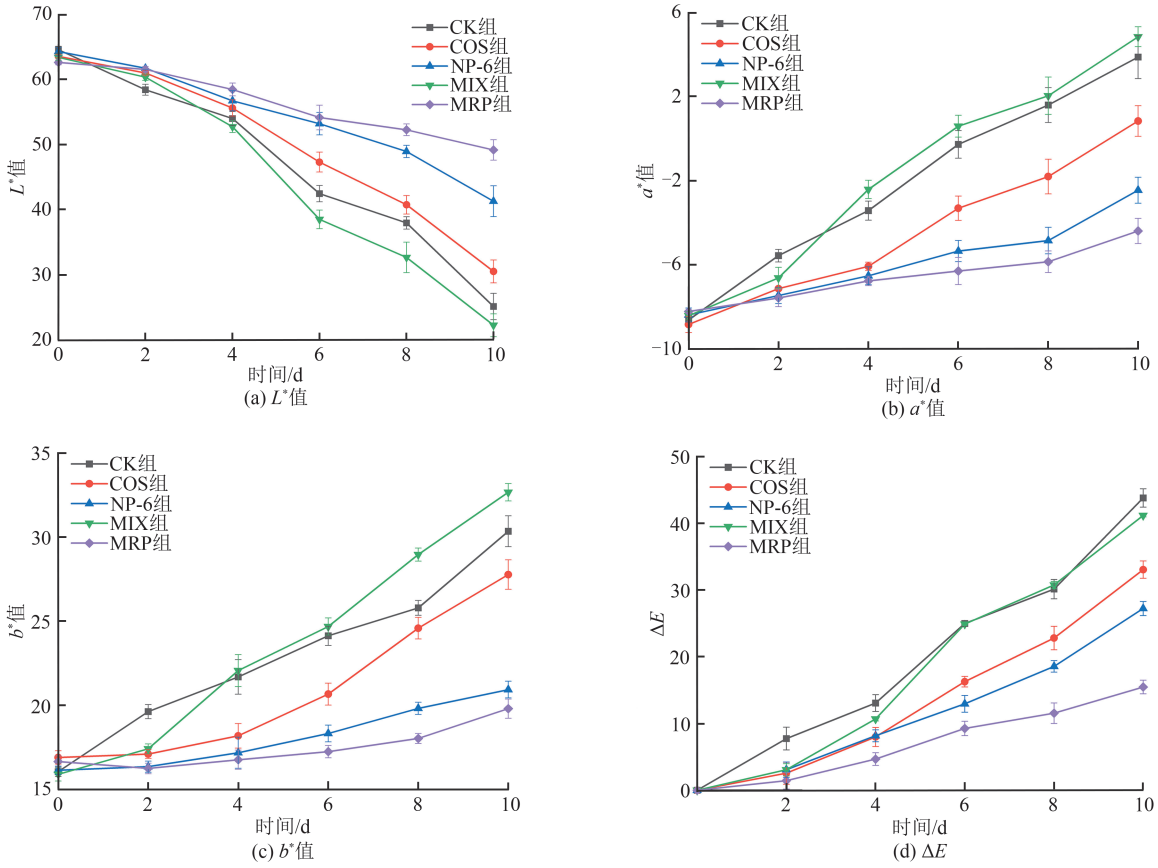


图3　不同处理对鲜切生菜色泽的影响

Fig. 3　Effects of different treatments on the color of fresh-cut lettuce

2.4　不同处理对鲜切生菜色素质量分数的影响

色素质量分数是评估园艺产品质量的重要指标，同时也是果蔬成熟与衰老的标志，其质量分数变化对采摘后果蔬品质具有重要影响[19]。叶绿素是鲜切生菜中的主要色素之一，在贮藏过程中，由于光合作用停止，叶绿素逐渐分解，导致绿色褪去和鲜嫩度降低，最终引起叶片黄化，影响其外观。此外，叶绿素的降解与植物衰老和腐败密切相关[20]。图4为不同处理对鲜切生菜色素质量分数的影响。第0天时，各处理组叶绿素a、叶绿素b及总叶绿素质量分数相近，CK组在0~6 d内呈现出急剧下降的趋势，第6天后下降速率有所减缓，到第10天时叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素的质量分数分别为（0.317±0.076）、（0.126±0.014）、（0.443±0.077）mg/g。MIX组的变化趋势与CK组相似，COS组和NP-6组的降幅则明显小于CK组和MIX组；MRP组在叶绿素保持方面表现出最优效果，降幅最小，总叶绿素质量分数最终维持在（0.867±0.039）mg/g。有研究表明，葡萄糖-赖氨酸美拉德产物可以抑制叶绿素降解为脱镁叶绿素，从而提高色素稳定性，减少叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素的损失[21]。类胡萝卜素和叶黄素的变化同样是衡量鲜切生菜营养价值和保鲜效果的重要指标，其质量分

数变化不仅影响鲜切生菜色泽，还与抗衰老和抗氧化性能密切相关，是一种重要的抗氧化成分，在光合作用和光保护中起着至关重要的作用[22]。CK 组和 MIX 组的类胡萝卜素和叶黄素质量分数明显下降，而 COS 组的下降幅度小于 CK 组和 MIX 组，但整体仍维持在较低水平。相比之下，NP-6 组和 MRP 组表现出较好的色素保持效果，尤其是 MRP 组，类胡萝卜素和叶黄素的质量分数在第 10 天分别为（0.388±0.011）mg/g 和（0.218±0.012）mg/g，表明 MRP 可有效抑制色素的分解，保护了鲜切生菜的营养成分和感官特性。

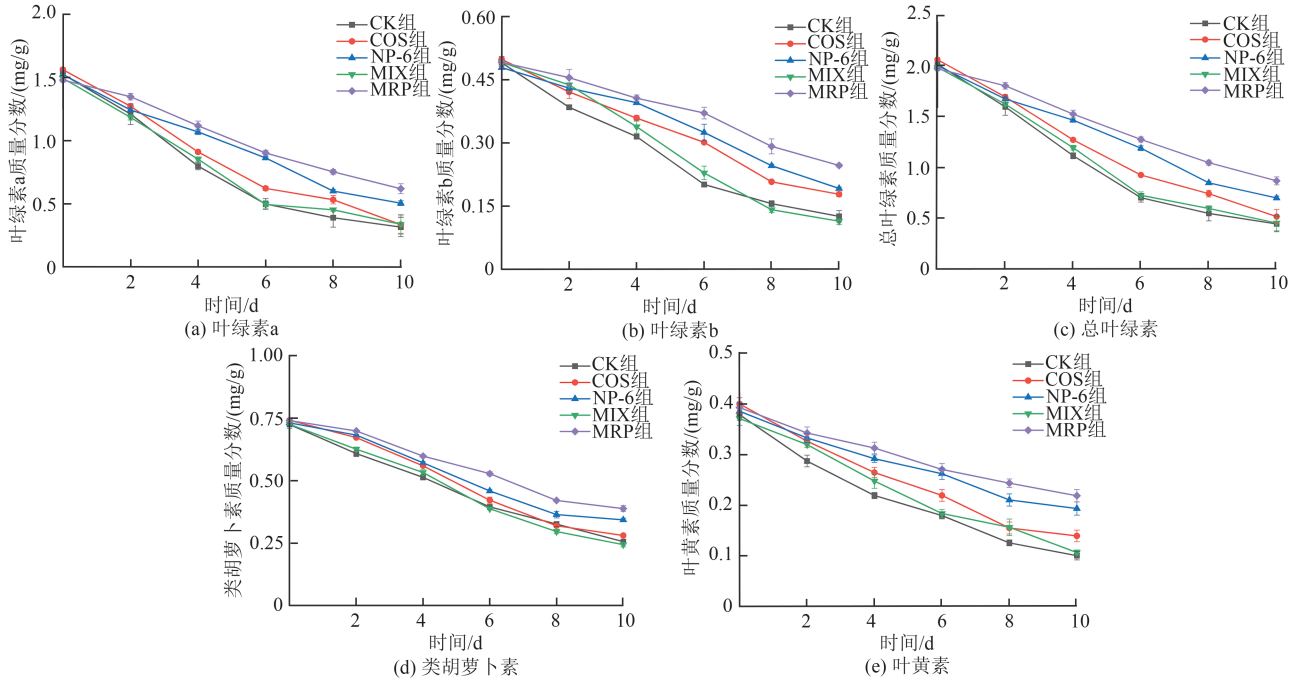


图 4　不同处理对鲜切生菜色素质量分数的影响

Fig. 4　Effects of different treatments on the pigment mass fractions in fresh-cut lettuce

2.5　不同处理对鲜切生菜褐变指数的影响

果蔬褐变的主要诱因之一是酶促褐变，PPO 将酚类物质氧化成醌类物质，继而与其他分子结合，通过聚合反应生成大量黑色素物质，导致组织褐变，从而显著影响鲜切生菜的外观和品质[23]。图 5 为不同处理对鲜切生菜褐变指数的影响。随着贮藏时间的延长，各组的褐变指数均呈上升趋势，其中 MIX 组显示出最严重的褐变现象，在第 6 天时急剧增加至 2.31±0.01。CK 组在 0~2 d 内褐变速度最快，这是由于 CK 组未进行任何涂膜处理，鲜切生菜直接暴露于环境中，与空气中的氧气充分接触，从而发生了严重的酶促褐变。相比之下，COS 组、NP-6 组及 MRP 组的褐变程度相较于 CK 组均表现出不同程度改善，且与 a^* 值的变化趋势一致。其中，MRP 组的褐变指数最低，第 10 天时仅为 1.42±0.06，表现出了最佳的褐变抑制效果，这可归因于美拉德产物的抗酶促褐变能力。有研究表明，美拉德产物能够阻止酶促褐变过程的中间产物还原酮和脱氢还原酮的生成，从而显著抑制食品中的酶促褐变现象[24]。此外，Nooshkam 等[25]的研究指出，美拉德产物具有螯合金属离子的能力，能够显著降低酶促褐变所需金属离子的活性。因此，美拉德产物被认为是抑制水果和蔬菜中酶促褐变的潜在抑制剂。

2.6　PPO 活性的影响

在鲜切生菜的贮藏过程中，PPO 通过催化植物中的酚类物质发生氧化反应，生成醌类中间产物，引发褐变反应，从而降低鲜切生菜的品质[26]。图 6 为不同处理对鲜切生菜 PPO 活性的影响。随着贮藏时间的延长，各组 PPO 活性呈现先上升后降低的趋势，CK 组、COS 组及 MIX 组在第 6 天时达到峰值，分别为（8.82±0.27）、（7.63±0.37）、

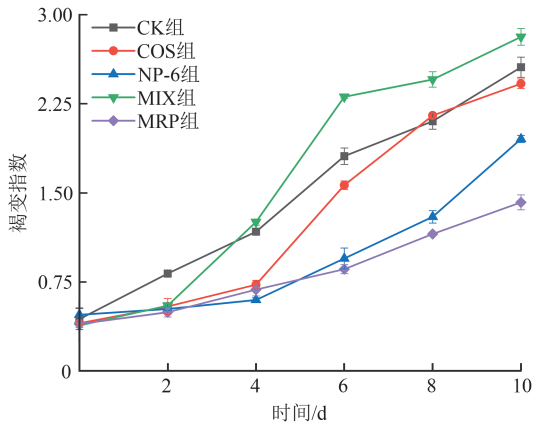


图5　不同处理对鲜切生菜褐变指数的影响

Fig. 5　Effects of different treatments on the browning index of fresh-cut lettuce

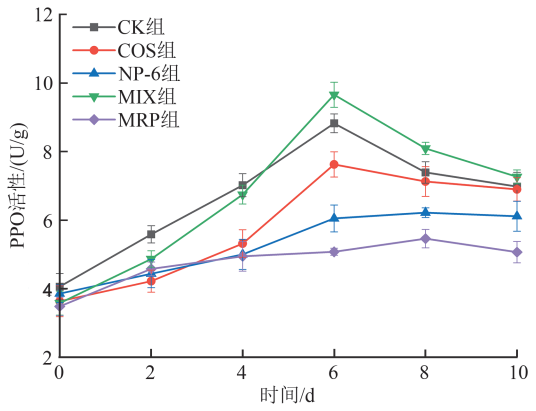


图6　不同处理对鲜切生菜PPO活性的影响

Fig. 6　Effects of different treatments on the PPO activity in fresh-cut lettuce

（9.66±0.36）U/g，这表明鲜切生菜在此阶段的氧化反应最为剧烈，而酶活性的增强直接加速了鲜切生菜品质下降，与褐变指数的变化相一致，此时，CK组、COS组和MIX组的褐变指数均呈快速上升趋势。相比之下，NP-6组和MRP组在整个贮藏过程中酶活性变化较为平稳，且增幅相对较小，显示出显著的酶活性抑制效果，尤其是MRP组的酶活性始终保持在较低水平。大量研究表明，美拉德产物可通过螯合酶所需的金属离子，直接或间接抑制多酚氧化酶（PPO）的活性，具体机制包括改变酶的空间结构、影响其与酚类底物的结合、阻断酶的活性位点以及改变抗氧化作用等[27]。此外，美拉德产物在抑制茄子、马铃薯和苹果的PPO活性方面也有显著效果[28]。因此在鲜切生菜的贮藏过程中，MRP组处理不仅减少了褐变现象的发生，还延长了贮存时间，保持了鲜切生菜的感官品质和新鲜度。

2.7　不同处理对鲜切生菜POD活性的影响

在过氧化氢存在的情况下，POD可催化酚类、类黄酮等物质的氧化和聚合，并参与酚类物质代谢，导致组织褐变[29]。图7为不同处理对鲜切生菜POD活性的影响。可以看出，各处理组的POD活性整体呈先升高后降低的趋势，这是由于鲜切处理破坏了生菜的细胞结构，导致过氧化氢大量释放，促进POD活性升高。同时，PPO反应生成的过氧化氢和醌类物质也为POD反应提供底物。POD的活性下降可能由于营养物质流失、反应底物减少，以及PPO活性减弱，无法持续供给POD反应所需的底物所致。其中，CK组POD活性于第6天达到峰值，为（16.49±0.29）U/g，随后略有下降。COS组的POD活性在第6天也达到峰值，为（14.93±0.27）U/g，但整体水平始终低于CK组。MIX组在整个贮藏期间POD活性高于其他处理组，第4天起即超过CK组，第6天达到峰值，为（17.56±0.39）U/g，表明该处理可能激发了较强的抗氧化反应。相比之下，NP-6组和MRP组的POD活性升幅较缓，在第8天达到峰值，分别为（13.53±0.21）U/g和（12.69±0.23）U/g，变化幅度较小。其中MRP组的POD活性始终维持在较低水平，表明MRP在抑制POD活性方面效果最佳，有利于延缓鲜切生菜的氧化和品质劣变。

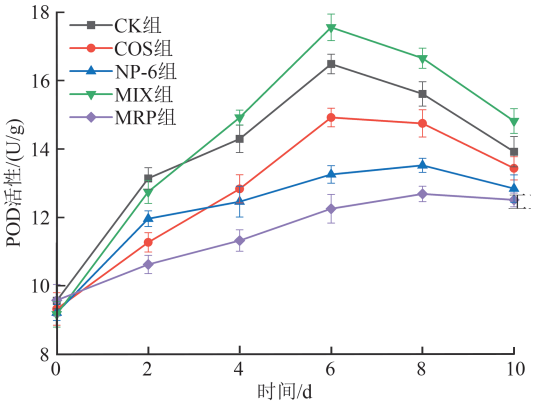


图7　不同处理对鲜切生菜POD活性的影响

Fig. 7　Effects of different treatments on the POD activity in fresh-cut lettuce

2.8　不同处理对鲜切生菜苯丙氨酸解氨酶（PAL）活性的影响

鲜切生菜经切分处理后，由于组织受到损伤

导致乙烯迅速生成，乙烯会诱导与果蔬成熟有关酶的合成，会使PAL的活性增加，从而加速鲜切生菜的衰老与腐败[30]。图8为不同处理对鲜切生菜PAL活性的影响。可以看出，各处理组PAL活性均表现出先升高后降低的趋势，这是由于鲜切处理造成的机械损伤，诱发了逆境胁迫，触发了植株的防御机制，诱导了PAL的合成并与暴露的苯丙氨酸结合。此外，新合成的乙烯作为一种信号分子，促进了苯丙氨酸的分解代谢，生成大量的酚类物质。这些酚类物质在受伤部位激活的PPO的作用下，进一步氧化聚合，最终导致了鲜切生菜的褐变现象。其中，CK组PAL活性在前6 d迅速上升，于第6天达到峰值，为（1.67 ± 0.05）U/g，随后略有下降。COS组PAL活性同样于第6天达到峰值，为（1.37±0.03）U/g，但始终低于CK组，说明其在一定程度上抑制了PAL活性升高。而MIX组表现出最高的PAL活性，0~6 d内酶活性迅速上升，并在第6天达到峰值，为（1.81±0.04）U/g，说明该处理可能诱导了较强的防御响应。NP-6组PAL活性整体变化幅度较小，在第6天达到峰值，为（1.09±0.03）U/g，之后趋于平稳。相比之下，MRP组在整个贮藏期内PAL活性始终维持在较低水平，第6天时峰值仅为（0.91±0.05）U/g，低于其他处理组。这表明MRP处理在抑制PAL活性方面效果最为显著，可能有助于延缓鲜切生菜的褐变及品质劣变。

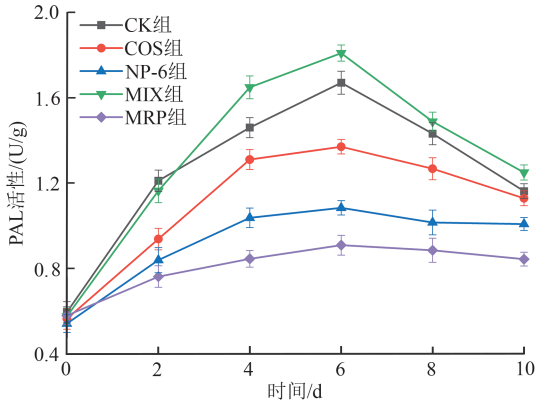


图8 不同处理对鲜切生菜PAL活性的影响

Fig. 8 Effects of different treatments on the PAL activity in fresh-cut lettuce

2.9 不同处理对鲜切生菜抗坏血酸质量分数的影响

抗坏血酸是鲜切生菜中重要的抗氧化成分，不仅在保持营养价值方面起到关键作用，还能通过抑制褐变反应延缓品质劣变。当褐变反应生成醌类物质时，抗坏血酸可作为还原剂，将这些物质还原为无色的酚类，从而中断褐变反应，延缓色泽的劣变[31]。然而，抗坏血酸极易被空气中的氧气氧化，导致其质量分数快速下降，从而影响鲜切生菜的营养价值。图9为不同处理对鲜切生菜抗坏血酸质量分数的影响。在0~2 d内，CK组的抗坏血酸质量分数急剧下降。随后，MIX组的抗坏血酸质量分数也呈现出明显下降的趋势，到第10天时仅剩（1.03±0.20）mg/100 g，表明该组抗坏血酸的损失最为严重，与其褐变现象一致。COS组和NP-6组在抗坏血酸的保持上表现较好，降解速度明显减缓。有研究表明COS的分子链结构较短，其形成分子内氢键的能力较弱，但活性羟基和氨基的存在增强了其抗氧化特性，能够更有效地与自由基反应，从而减缓氧化反应[32]。MRP组在所有处理组中表现出最佳的抗坏血酸保持效果，到第10天仍能保持在（2.95±0.14）mg/100 g的水平。这是由于美拉德产物具有一定的抗氧化活性，能抑制自由基的产生，从而显著延缓了抗坏血酸的流失[33]。

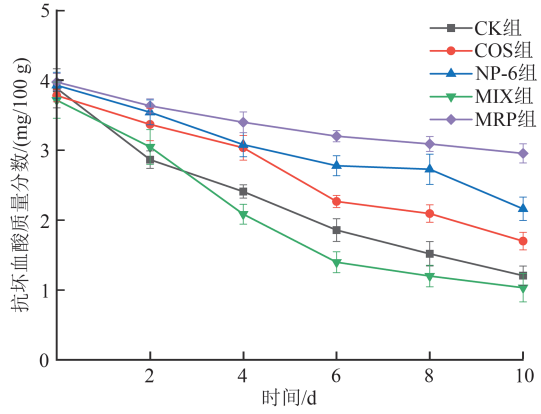


图9 不同处理对鲜切生菜抗坏血酸质量分数的影响

Fig. 9 Effects of different treatments on the ascorbic acid mass fraction in fresh-cut lettuce

2.10 不同处理对鲜切生菜呼吸强度的影响

呼吸强度反映了鲜切生菜新陈代谢的活跃程度，与其衰老过程和品质劣变密切相关。呼吸强度越高，营养物质消耗越快，抗病能力下降，更易受到微生物侵染而腐败[34]。果蔬采收后其呼吸强度往往会出现骤然升高，随后逐渐下降，过程中会出现一个明显的高峰，这个高峰即为呼吸高峰[35]。图10为不同处理对鲜切生菜呼吸强度的影响。CK组和

MIX组的呼吸高峰出现在第2天，呼吸强度分别为（99.73±2.11）mg/（kg·h）和（94.2±3.08）mg/（kg·h），这是由于环境中温度、湿度及氧气的变化对其造成较大的应激反应，导致代谢加速、呼吸强度骤增。COS组、NP-6组及MRP组的呼吸强度高峰推迟到第4天才出现，且峰值明显降低。其中MRP组的呼吸高峰值最低，仅为（76.93±1.70）mg/（kg·h），且随后保持在相对稳定的水平，波动幅度较小。这是由于美拉德产物在鲜切生菜表面形成的保护性薄膜能有效阻挡氧气进入，减少氧化代谢的发生，降低其呼吸强度。有研究表明，美拉德反应产物涂膜可通过控制呼吸强度来延缓果蔬腐败[36]。

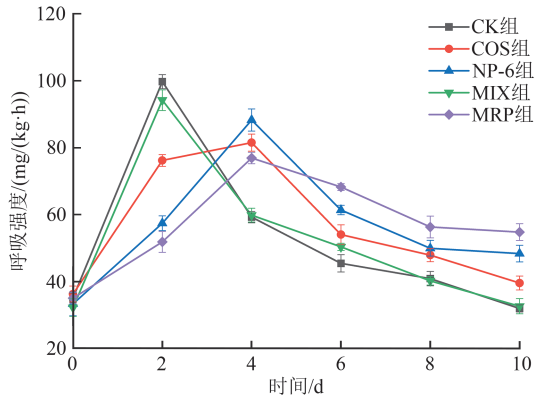


图10　不同处理对鲜切生菜呼吸强度的影响

Fig. 10　Effects of different treatments on the respiratory intensity of fresh-cut lettuce

2.11　不同处理对鲜切生菜丙二醛质量摩尔浓度的影响

在鲜切生菜贮藏过程中，丙二醛作为细胞膜脂质过氧化的主要产物，其质量摩尔浓度的变化能够直接反映鲜切生菜的氧化程度和品质劣化情况。脂质过氧化反应会破坏细胞膜的完整性，从而加速组织衰老和品质下降，而丙二醛的累积量与过氧化程度呈正相关[37]。图11为不同处理对鲜切生菜丙二醛质量摩尔浓度的影响。CK组的丙二醛质量摩尔浓度在贮藏前2 d内迅速上升，表现出显著的初期氧化反应，导致细胞膜脂质迅速氧化，氧化损伤显著加剧。随后，COS组、MIX组及NP-6组的丙二醛质量摩尔浓度虽然也持续上升，但增幅明显低于CK组，表明这些处理能够在一定程度上减缓脂质过氧化的发生。相比之下，MRP组的丙二醛质量摩尔浓度增幅最小，到第10天仅增至（2.71±0.04）nmol/g，表现出最佳的抑制脂质过氧化效果。这是由于MRP可以通过抑制脂肪氧合酶的活性，阻断多不饱和脂肪酸的氧化，进而减少丙二醛等过氧化终产物的生成。

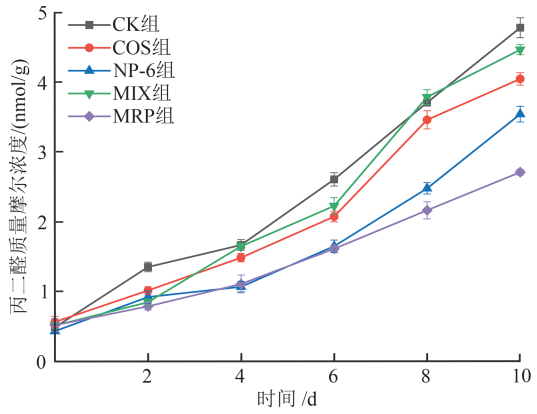


图11　不同处理对鲜切生菜丙二醛质量摩尔浓度的影响

Fig. 11　Effects of different treatments on the malondialdehyde molar concentration in fresh-cut lettuce

2.12　不同处理对鲜切生菜菌落总数的影响

在鲜切生菜的贮藏过程中，菌落总数的变化是评估其卫生质量和保鲜效果的重要指标。由于鲜切生菜在加工过程中破坏了叶片表面的天然屏障，暴露的切面更易成为病原微生物的滋生场所，导致食品安全性下降，常见的食源性致病微生物，如大肠杆菌、沙门氏菌、单增李斯特菌、志贺氏菌属、蜡样芽孢杆菌和假单胞菌等容易在鲜切生菜中滋生，影响其安全性与保鲜效果[38]。我国目前还没有鲜切果蔬的微生物安全标准，一些西方国家制订的鲜切果蔬微生物安全标准为菌落总数应小于1×10^5 CFU/g[39]。图12为不同处理对鲜切生菜菌落总数的影响。对菌落总数的抑制效果表现为：MRP组>NP-6组>COS组>MIX组>CK组。CK组和MIX组的菌落总数在贮藏第4天时已超过1×10^5 CFU/g，表明其微生物抑制能力较差。COS组和NP-6组均在第6天超过该标准限值，显示出一定的抑菌效果，但仍难以有效延长鲜切生菜的安全食用期。MRP组的抑菌效果最显著，在第8天时才超过1×10^5 CFU/g，第10天时菌落总数$(1.96\pm0.01)\times10^6$ CFU/g，表明其对微生物的抑制效果明显优于其他处理。研究表明，壳寡糖美拉德反应产物对铜绿假单胞菌、金黄色葡萄球菌和大肠杆菌等食源性病原菌均有抑制作用[40]。

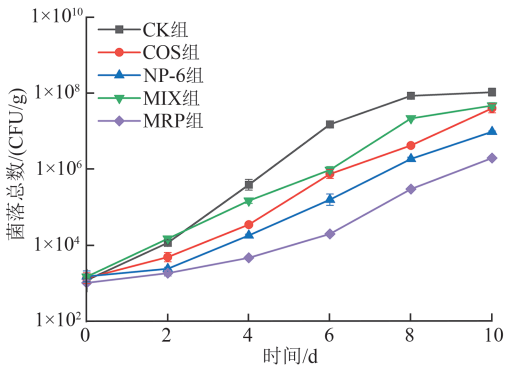


图 12　不同处理对鲜切生菜菌落总数的影响

Fig. 12　Effects of different treatments on the total microbial count in fresh-cut lettuce

2.13　Pearson 相关性分析结果

各指标之间的相关性见图 13。失重率、a^*值、b^*值、ΔE、褐变指数、丙二醛质量摩尔浓度和菌落总数之间呈极显著正相关（$P<0.01$），表明随着贮藏时间的延长，鲜切生菜水分流失增加，叶片颜色偏红偏黄，色差增大，褐变程度加剧。同时，细胞内脂质过氧化水平升高，微生物繁殖增强。相反，失重率与 L^*值、抗坏血酸质量分数、叶绿素 a 质量分数、叶绿素 b 质量分数、总叶绿素质量分数、类胡萝卜素质量分数及叶黄素质量分数之间均呈极显著负相关（$P<0.01$），说明营养成分显著流失、绿色程度下降，是生理衰败的重要体现。此外，PPO 活性、POD 活性与 PAL 活性之间呈极显著正相关（$P<0.01$），反映三者在酶促氧化过程中可能存在协同作用；PPO 活性与菌落总数呈显著正相关（$P<0.05$），与抗坏血酸质量分数、叶绿素 a 质量分数、叶绿素 b 质量分数和总叶绿素质量分数呈显著负相关（$P<0.05$），进一步佐证 PPO 在参与膜脂氧化及褐变反应中的作用。而呼吸强度与大多数品质指标相关性较弱，可能与其在贮藏过程中表现出的非线性波动有关，影响了其与其他指标之间的稳定关联。

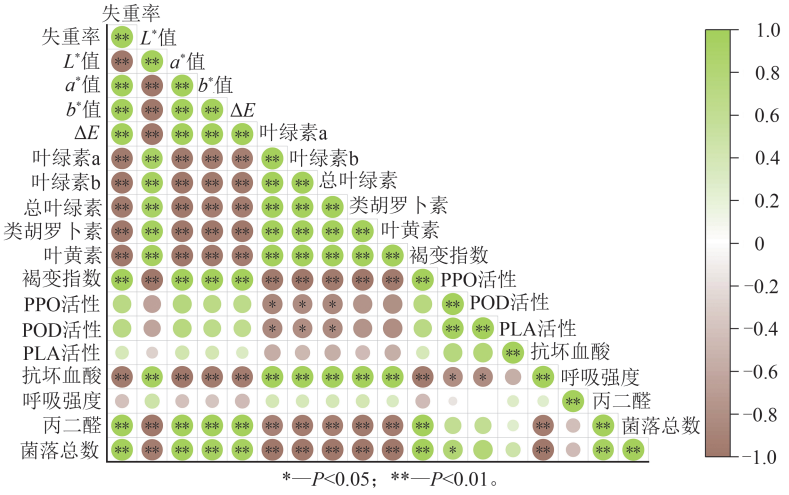


图 13　Pearson 相关性分析

Fig. 13　Pearson correlation analysis

综合分析表明，鲜切生菜在贮藏过程中品质逐步劣变，表现为水分流失、叶色褪绿发黄、营养成分流失、细胞膜氧化破坏及微生物繁殖等，这些变化共同反映出鲜切生菜品质的快速劣化。通过合理的保鲜措施，可以有效减缓这些不利变化，从而延长鲜切生菜的货架期。

3　结论

作者以花椒籽抗菌肽和壳寡糖为原料，通过美拉德反应构建了一种新型生物保鲜涂膜，并将其应用于鲜切生菜的保鲜。第 10 天时，该处理组在失重率（37.87±0.88）%、褐变指数（1.42±0.06）、相关酶（PPO、POD 及 PAL）活性、呼吸强度（76.93±1.70）mg/（kg·h）、丙二醛质量摩尔浓度（2.71±0.04）nmol/g 及菌落总数（1.96±0.01）×10^6 CFU/g 等与品质劣变相关的指标显著低于 CK 组、COS 组、NP-6 组及 MIX 组，表明其对延缓生理衰老和抑制品质下降具有良好效果。同时，其抗坏血酸质量分数（2.95±0.14）mg/100 g、色泽和色素保留等关键营养与感官指标表现最为优秀，整体保鲜效果明显优于各单一处理组。这是由于在美拉德

反应过程中引入了亲水性多糖链，所形成的水合层能够有效锁定水分，从而降低失重率。此外，MRP可以抑制叶绿素酶的活性，延缓脱镁反应进程，进而有效保持叶绿素质量分数。同时，其还可维持抗坏血酸质量分数，增强抗氧化能力。总之，MRP可有效延缓鲜切生菜品质劣变，延长其保质期，在鲜切蔬菜保鲜领域极具应用潜力。然而，本研究尚未完全揭示其具体作用机制，未来可进一步探讨美拉德产物在抑菌、抗氧化及营养保持方面的分子作用，以及其在不同食品体系中的稳定性与适用性。同时，探索与其他天然保鲜材料的协同效应，有助于开发多功能复合涂膜，推动天然保鲜技术的产业化，助力食品安全与可持续发展。

参考文献

[1] WANG Q Y，ZHAO M R，WANG J Q，et al. Effects of microbial inoculants on agronomic characters，physicochemical properties and nutritional qualities of lettuce and celery in hydroponic cultivation[J]. Scientia Horticulturae，2023，320：112202.

[2] RU X，YOU W，ZHANG J，et al. γ-aminobutyric acid treatment inhibits browning and promotes storage quality by regulating reactive oxygen species and membrane lipid metabolism in fresh-cut stem lettuce[J]. Food Chemistry，2024，459：140420.

[3] MAFE A N，EDO G I，MAKIA R S，et al. A review on food spoilage mechanisms，food borne diseases and commercial aspects of food preservation and processing[J]. Food Chemistry Advances，2024，5：100852.

[4] 任宇聪，苏志涵，王兆然，等. 果蔬保鲜技术发展现状探析[J]. 农产品加工，2024(4)：93-96.
REN Y C，SU Z H，WANG Z R，et al. Analysis on the current development status of fruit and vegetable preservation technology[J]. Farm Products Processing，2024(04)：93-96.（in Chinese）

[5] MUTHUVELU K S，ETHIRAJ B，PRAMNIK S，et al. Biopreservative technologies of food：an alternative to chemical preservation and recent developments[J]. Food Science and Biotechnology，2023，32(10)：1337-1350.

[6] TESHOME E，FORSIDO S F，RUPASINGHE H，et al. Potentials of natural preservatives to enhance food safety and shelf life：a review[J]. The Scientific World Journal，2022，2022：9901018.

[7] CORRÊA J A F，EVANGELISTA A G，NAZARETH T D M，et al. Fundamentals on the molecular mechanism of action of antimicrobial peptides[J]. Materialia，2019，8：100494.

[8] 简钟宇，谭鸿，李虹，等. 抗菌肽在抗菌材料中的研究现状[J]. 国外医药(抗生素分册)，2017，38(6)：253-256.
JIAN Z Y，TAN H，LI H，et al. Review of antimicrobial peptides in antibacterial materials[J]. World Notes on Antibiotics，2017，38(06)：253-256.（in Chinese）

[9] LUO Y，SONG Y. Mechanism of antimicrobial peptides：antimicrobial，anti-inflammatory and antibiofilm activities[J]. International Journal of Molecular Sciences，2021，22(21)：11405.

[10] 姜太玲，吴红洋，申光辉，等. 花椒籽蛋白抗菌肽的抑菌作用及其稳定性研究[J]. 现代食品科技，2015，31(08)：129-135.
JIANG T L，WU H Y，SHEN G H，et al. Antibacterial activity and stability of antimicrobial peptides in Chinese prickly ash[J]. Modern Food Science and Technology，2015，31(8)：129-135.（in Chinese）

[11] ZHU Y，SANG L，SHARAFELDIN S，et al. The effects of chitosan oligosaccharides on the structure and shelf-life of whole-millet cakes[J]. Food Chemistry，2025，466：142267.

[12] 李雪瑞，李宏，冯艳芳，等. 1-MCP结合低温通过调控脆性、叶绿素降解缓解叶类蔬菜采后衰老[J]. 西北农业学报，2022，31(5)：586-594.
LI X R，LI H，FENG Y F，et al. Alleviation of post-harvest senescence in leafy vegetables by regulating Brittleness and chlorophyll degradation under combination of 1-MCP and low temperature[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica，2022，31(5)：586-594.（in Chinese）

[13] 万文婷. 保鲜剂在水培生菜和水培油菜保鲜中的应用[D]. 沈阳：辽宁大学，2022.

[14] 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.
AN R H，ZHOU N，WEI W W，et al. Effect of film packaging on shelf-life quality of fresh-cut lettuce[J]. Packaging Engineering，2024，45(3)：107-116.（in Chinese）

[15] 张宏琛，余琳，石慧. 桑叶多酚对鲜切生菜的保鲜效果[J]. 食品与发酵工业，2022，48(7)：195-200.
ZHANG H C，YU L，SHI H. Effect of mulberry (*Morus alba* L.) leaf polyphenols on the preservation of fresh-cut lettuce[J]. Food and Fermentation Industries，2022，48(7)：195-200.（in Chinese）

[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] 唐胜春. 葡甘聚糖/生物高分子复合膜及其在鲜切生菜上的应用[D]. 福州：福建农林大学，2009.

[18] NAVEED M，PHIL L，SOHAIL M，et al. Chitosan oligosaccharide (COS)：an overview[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2019，129：827-843.

[19] 邓伯勋. 园艺产品贮藏运销学[M]. 北京：中国农业出

版社，2002.
[20] 蒲彪，乔旭光．园艺产品加工工艺学[M]．北京：科学出版社，2012.
[21] KUMAR R，RAJAMANICKAM R，NADANASABAPATHI S．Effect of maillard reaction products（mrp）on chlorophyll stability in green peas［J］．Food and Nutrition Sciences，2013，4：879.
[22] BECERRA M O，CONTRERAS L M，LO M H，et al．Lutein as a functional food ingredient：stability and bioavailability［J］．Journal of Functional Foods，2020，66：103771.
[23] 邓吉斯，王百鸿，石慧．不同浓度桑叶多酚对鲜切生菜褐变和假单胞菌的抑制作用[J]．食品与发酵工业，2022，48（10）：206-211.
DENG J S，WANG B H，SHI H．Effect of different concentrations of mulberry leaf polyphenols on the browning of fresh-cut lettuce and inhibition of *Pseudomonas* spp.［J］．Food and Fermentation Industries，2022，48（10）：206-211.（in Chinese）
[24] MOGOL B A，YILDIRIM A，GÖKMEN V．Inhibition of enzymatic browning in actual food systems by the Maillard reaction products[J]．Journal of the Science of Food and Agriculture，2010，90（15）：2556-2562.
[25] NOOSHKAM M，VARIDI M．Vitamins and Hormones［M］．San Diego：Academic Press，2024.
[26] 梁颖，丁莹，闫帅，等．香辛料提取物对鲜切生菜的保鲜作用[J]．江苏农业学报，2014，30（4）：870-874.
LIANG Y，DING Y，YAN S，et al．Preservation of fresh-cut lettuce by spice extracts［J］．Jiangsu Journal of Agricultural Sciences，2014，30（4）：870-874.（in Chinese）
[27] NOOSHKAM M，VARIDI M，BASHASH M．The Maillard reaction products as food-born antioxidant and antibrowning agents in model and real food systems[J]．Food Chemistry，2019，275：644-660.
[28] ATROOZ O M．The effects of Maillard reaction products on apple and potato polyphenoloxidase and their antioxidant activity［J］．International Journal of Food Science and Technology.，2008，43（3）：490-494.
[29] 罗海波，何雄，包永华，等．鲜切果蔬品质劣变影响因素及其可能机理[J]．食品科学，2012，33（15）：324-330.
LUO H B，HE X，BAO Y H，et al．Affecting factors and possible mechanisms of quality deterioration in fresh-cut fruits and vegetables［J］．Food Science，2012，33（15）：324-330.（in Chinese）
[30] 郑重禄．影响鲜切水果质量的因素及其保鲜技术[J]．中国果菜，2004（5）：38.
ZHENG Z L．Factors affecting the quality of fresh-cut fruits and their preservation techniques［J］．China Fruit & Vegetable，2004（5）：38.
[31] 王斌，林薇，袁晓．鲜切果蔬褐变机理及防控技术研究进展[J]．食品科学，2024，46（7）：367-384.
WANG B，LIN W，YUAN X．Research progress on the browning mechanisms and preservative technologies of fresh-cut fruit and vegetables[J]．Food Science，2024，46（7）：367-384.（in Chinese）
[32] WEN F，LIU Y，YANG H，et al．Preparation，characterization，antioxidant，and antifungal activity of phenyl/indolyl-acyl chitooligosaccharides［J］．Carbohydrate Research，2024，538：109077.
[33] QI L，ZHANG H，GUO Y，et al．Preparation，characterization and antioxidant activity analysis of three Maillard glycosylated bone collagen hydrolysates from chicken，porcine and bovine［J］．Food Science and Human Wellness，2024，13（4）：2002-2013.
[34] 王春芳，刘晨霞，王晓，等．不同厚度LDPE薄膜袋对鲜切生菜贮藏品质的影响[J]．上海农业学报，2023，39（1）：113-118.
WANG C F，LIU C X，WANG X，et al．Effects of LDPE film bags with different thickness on storage quality of fresh-cut lettuce［J］．Acta Agriculturae Shanghai，2023，39（1）：113-118.（in Chinese）
[35] 荣建华，闵光，赵思明．不同贮藏方式对生菜品质的影响[J]．华中农业大学学报，2007，26（4）：574-576.
RONG J H，MIN G，ZHAO S M．Effects of different storage methods on quality of lettuce［J］．Journal of Huazhong Agricultural University，2007，26（4）：574-576.（in Chinese）
[36] DHALL R K．Advances in edible coatings for fresh fruits and vegetables：a review[J]．Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2013，53（5）：435-450.
[37] 刘依朦．超声联合钙盐对鲜切西生菜品质的影响及机理研究[D]．沈阳：沈阳农业大学，2022.
[38] 牛璐，易欣欣．鲜切生菜中食源性致病微生物的侵染研究[J]．北京农学院学报，2015，30（1）：132-136.
NIU L，YI X X．Infection of foodborne pathogenic microorganisms in fresh-cut lettuce［J］．Journal of Beijing University of Agriculture，2015，30（1）：132-136.（in Chinese）
[39] 范凯．超声波/涂膜联合气调处理对鲜切生菜和黄瓜冷藏品质及其机理研究[D]．无锡：江南大学，2020.
[40] SUN T，QIN Y，XU H，et al．Antibacterial activities and preservative effect of chitosan oligosaccharide Maillard reaction products on *Penaeus vannamei*［J］．International Journal of Biological Macromolecules，2017，105：764-768.

（责任编辑：李春丽）