邓秀丽, 秦顺新, 宋迪, 等. 不同保鲜处理对生姜采后贮藏品质及香气挥发物的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(14): 390−399. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070025
DENG Xiuli, QIN Shunxin, SONG Di, et al. Effects of Different Preservation Treatments on Post-harvest Storage Quality and Volatile Aroma Compounds in Ginger[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(14): 390−399. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070025

· 贮运保鲜 ·

不同保鲜处理对生姜采后贮藏品质及香气挥发物的影响

邓秀丽, 秦顺新, 宋　迪, 安容慧, 杨相政*
（中华全国供销合作总社济南果品研究院, 山东济南 250000）

摘　要: 本文探究了二氧化氯（Chlorine dioxide，ClO_2）、抗坏血酸（Vitamin C，V_C）、肉桂醛（Cinnamaldehyde，CA）及联合处理（ClO_2+V_C+CA）对生姜采后贮藏品质的影响。在冷藏条件（13±0.5 ℃，相对湿度 90%）下，综合分析不同保鲜处理对生姜的理化指标和相关酶活性的调控作用，并采用气相色谱-离子迁移谱（Gas Chromatography Ion Mobility Spectroscopy，GC-IMS）分析其挥发性香气物质的变化。结果表明：三种保鲜处理均可显著延缓生姜品质劣变（P<0.05），但联合处理具有协同增效的作用。与对照组（Control group，CK）相比，贮藏 120 d 时，联合处理组生姜失水率降低了 57.67%，苯丙氨酸解氨酶（Phenylalanine ammonialyase，PAL）、超氧化物歧化酶（Superoxide dismutase，SOD）、过氧化氢酶（Catalase，CAT）活性分别高了 7.78%、11.22% 和 28.61%，多酚氧化酶（Polyphenol，PPO）和过氧化物酶（Peroxidase，POD）含量显著下降（P<0.05），姜辣素、粗蛋白和总糖含量分别高了 31.65%、35.47% 和 40.02%。此外，GC-IMS 结合主成分分析表明不同处理组特征挥发性物质有差异，联合处理有效促进了青香（香茅醛）、果香（β-月桂烯）、辛辣香气（(E,E)-2,4-己二烯醛）等特性物质的积累与保留。综上，联合保鲜处理可以通过提高生姜采后抗氧化酶活性、减缓香气挥发物流失来维持采后贮藏品质，本研究为生姜保鲜技术开发提供了理论依据和技术参考。

关键词: 生姜保鲜, 二氧化氯, 抗坏血酸, 肉桂醛, 联合处理, 香气挥发物, 气相色谱-离子迁移谱, 采后生理调控
中图分类号: TS255.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)14−0390−10
本文网刊:
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070025

Effects of Different Preservation Treatments on Post-harvest Storage Quality and Volatile Aroma Compounds in Ginger

DENG Xiuli，QIN Shunxin，SONG Di，AN Ronghui，YANG Xiangzheng*
（Jinan Fruit Research Institute All China Federation of Supply and Marketing Co-operatives, Jinan 250000, China）

Abstract: To evaluate the effectiveness of different preservatives on the postharvest quality of ginger, treatments involving chlorine dioxide (ClO_2), ascorbic acid (V_C), cinnamaldehyde (CA), and a combined treatment (ClO_2+V_C+CA) were applied separately. The ginger was stored under refrigerated conditions (13±0.5 ℃, 90% relative humidity), and the impact of these treatments on the physicochemical properties and related enzyme activities of ginger was assessed. Flavour profiles were analyzed using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS). The results indicated that all preservative treatments significantly delayed the deterioration of ginger quality (P<0.05), with the combined treatment demonstrating a synergistic effect. After 120 days of storage, the water loss rate of ginger was reduced by 57.67% compared to the control (CK). The activities of phenylalanine ammonia-lyase (PAL), superoxide dismutase (SOD), and catalase (CAT) increased by 7.78%, 11.22%, and 28.61%, respectively, while polyphenol oxidase (PPO) and peroxidase (POD)

收稿日期: 2025−07−04
基金项目: 济南市“海右计划”产业领军人才项目。
作者简介: 邓秀丽（1997−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬品质调控技术研究, E-mail: dengxiu0514@163.com。
*** 通信作者:** 杨相政（1988−）, 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 果蔬贮藏保鲜技术研究, E-mail: yangxiangzheng318@163.com。

activitie significantly decreased (P<0.05). Retention of gingerol, protein, and polysaccharides improved by 31.65%, 35.47%, and 40.02%, respectively, compared to the control. Moreover, GC-IMS combined with principal component analysis revealed clear differences in volatile profiles among the various treatment groups. The combined treatment promoted the accumulation and retention of important aroma compounds, including green aromas (citral), fruity aromas (β-laurene), and spicy aromas ((E,E)-2,4-hexadienal). In conclusion, the combined preservation approach proved to be an effective strategy for maintaining post-harvest ginger quality by boosting antioxidant enzyme activity and minimizing aroma volatile loss. This research offers a theoretical basis and technical reference for developing ginger preservation technologies.

Key words: ginger preservation; chlorine dioxide (ClO_2); vitamin C (V_C); cinnamaldehyde (CA); combined treatment; aroma volatiles; gas chromatography-mass spectrometry (GC-IMS); post harvest physiological regulation

生姜(*Zingiber officinale* Rosc.)作为重要的药食同源作物，富含姜辣素、总糖及多酚类活性物质，在抗炎、抗氧化及代谢调节等方面具有显著功效，被广泛用作食品、香料、调味剂和药物[1−2]。然而，与大多数蔬菜类似，生姜高含水量(85%~90%)及采后旺盛的生理代谢易导致其失水褐变、腐烂变质及风味劣变[3]。这严重降低了姜茎在采后贮藏过程中的品质、风味和药效，并导致重大经济损失，不利于市场的稳定和最大化的发挥其增收作用[4]。

目前，国内外关于生姜保鲜的研究相对较少，低温结合保鲜剂处理因其高效抑制采后代谢、延缓氧化损伤等优势成为研究热点[5]。其中，化学保鲜剂的协同应用展现出巨大潜力，如二氧化氯(Chlorine dioxide, ClO_2)可高效杀灭表面微生物，降低腐烂率的同时保持其风味物质稳定性[6−7]，抗坏血酸(Vitamin C, V_C)通过调控酚类代谢抑制酶促褐变[8]，而肉桂醛(Cinnamaldehyde, CA)则凭借气相抑菌特性维持组织水分与外观[9]。王霜等[10]通过 40 mg/L ClO_2 处理可有效维持鲜切仔姜良好的色泽，减少丙二醛(Malondialdehyde, MDA)累积和质量损失，延缓总酚及姜辣素含量的降低。邓钦予等[11]发现外援 V_C 能够抑制鲜切竹根姜组织内多酚氧化酶(Polyphenol, PPO)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性，延缓褐变并提高抗氧化效果。此外，CA 能利用自身高挥发性形成气相，Wu 等[12]认为 CA 处理鲜切马蹄具有缓释抑菌保鲜作用，能够在较长时间内保持良好外观和较高水分，减少腐烂变质。然而，单一保鲜剂往往仅针对特定劣变机制，难以全面维持生姜采后品质。唐继兴等[3]通过焦亚硫酸盐缓释、SO_2 脉冲和特克多熏蒸四川仔姜，发现特克多烟熏蒸有效减缓了仔姜硬度和失重率的降低，但缺乏复合保鲜策略对生姜保鲜效果的全面研究。

目前，关于 ClO_2、V_C、CA 保鲜处理对生姜采后贮藏品质及香气挥发物的影响研究较少。基于此，本研究探究冷藏条件下 ClO_2、V_C 及 CA 保鲜处理，对生姜采后生理生化品质、抗氧化酶活性及香气挥发物的影响，以期为生姜等高水分根茎类蔬菜的采后品质管理提供理论参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

生姜(*Zingiber officinale* Rosc. cv. 安丘大姜)购于山东省潍坊市安丘盛大农产品市场，并于采后 24 h 直接运输至济南果品研究所农产品冷链物流与保鲜实验室。实验前将根茎洗净以除去任何黏附的土壤颗粒，选取个头均匀，无明显发芽和病虫害的姜块；ClO_2(分析纯，有效氯含量≥8%)　广东省精细化学品工程技术研究开发中心；V_C(试验纯，99.0%)、CA(分析纯，98%)　麦克林生化科技有限公司；磷酸盐缓冲液(pH7.8)　上海来铂生物集团有限公司；考马斯亮蓝 G-250 试剂　上海安谱实验科技股份有限公司；香兰素标准品　广东佳途科技股份有限公司；乙醇、2-甲基-3-庚酮(色谱级)　美国 Sigma-Aldrich 公司；PAL 活性检测试剂盒(JM-01109P1)、SOD 活性检测试剂盒(JM-01183P1)、CAT 活性检测试剂盒(JM-01084P1)、PPO 活性检测试剂盒(JM-01173P1)、POD 活性检测试剂盒(JM-01185P1)、MDA 检测试剂盒(JM-09865P1)　晶美生物科技有限公司；总糖检测试剂盒(ADS-W-TDX030)　爱迪生生物科技有限公司。

HP 200 全自动色差仪　上海汉谱光电科技有限公司；TE612-L 电子天平　北京赛多利斯仪器系统有限公司；TU-1901 紫外分光光度计　上海美谱达仪器有限公司；TCL-1013 高速台式离心机　上海安亭科学仪器厂；HJ-2A 磁力搅拌器　常州苏瑞仪器有限公司；FlavourSpec1H1-00053 GC-IMS 联用仪　德国 Gesellschaft für analytische Sensorsysteme mbH(G.A.S)公司。

1.2　实验方法

1.2.1　处理方法　ClO_2(200 mg/L)、V_C(1.0%)、CA(0.1%)和 ClO_2+V_C+CA 复合处理(浓度同单一处理组，浓度选择是根据前期实验的筛选优化)分别浸泡生姜 10 min，并以去离子水为对照。将处理后的生姜用 PE 薄膜(35 μm，65 cm×100 cm)包装，每袋约 30 株，单株姜重约 2±0.5 kg，体积约占袋内总容积的 80%~90%。放入 13±0.5 ℃ 恒温库中，采用加湿装置将库中的相对湿度控制在 90%，每 30 d 取样一次。

1.2.2　测试指标和方法

1.2.2.1　色差　参考 Lü等[13]的方法，随机取 6 块生姜，采用 HP 200 全自动色差仪对姜块赤道两侧表皮进行测定，记录 L^*(明暗度)、a^*(红绿度)和 b^*(黄蓝度)。

1.2.2.2 失水率 采用称量法[14], 以生姜质量损失百分比表示, 计算公式为:

$$W(\%) = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100$$

式中: W 表示质量损失率, %; W_0 表示样品贮藏前重量, g; W_1 表示样品贮藏后质量, g。

1.2.2.3 姜辣素含量 参考 Zhang 等[15] 的方法, 取 5.0 g 样品粉末, 加入 45 mL 95% 乙醇, 将悬浮液在 55 ℃ 水浴中孵育 1 h。提取后, 将溶液冷却并在 4 ℃ 下离心(5000×g, 10 min)。取 2 mL 上清液, 用 95% 乙醇稀释至最终体积为 10 mL, 于 280 nm 处测得吸光度, 并根据香兰素作为标准计算姜辣素的含量(mg/g)。标准曲线方程为 y=0.059x−0.0093, R^2=0.9962。

1.2.2.4 粗蛋白、总糖含量 参考李子煜等[16] 的方法测得粗蛋白含量, 取0.5 g 样品, 加入 6 mL 65 mmol/L 磷酸盐缓冲液(pH7.8)冰浴研磨, 将提取液在 4 ℃(1000×g, 20 min)下离心。取待测样品 500 μL, 稀释一定倍数后, 加入2.5 mL 考马斯亮蓝 G-250 试剂, 混匀后, 于 595 nm波长处测得吸光度。

采用总糖检测试剂盒(ADS-W-TDX030)测定总糖含量, 并严格按照说明书进行操作。

1.2.2.5 抗氧化酶活性 采用商业试剂盒测定 PAL 活性(JM-01109P1)、SOD(JM-01183P1)、PPO 活性(JM-01173P1)、POD 活性(JM-01185P1)活性、CAT 活性(JM-01084P1)和 MDA 含量(JM-09865P1), 并严格按照说明书进行操作。

1.2.2.6 风味分析(GC-IMS) 参考杜文瑜等[17] 方法, 称取 2 g 生姜样品, 置于装有 50 μL 内标的 2-甲基-3-庚酮(100×10^{-6})20 mL 的顶空瓶中, 60 ℃ 孵育 20 min。顶空进样, 条件见表 1 和表 2。仪器配套的分析软件包括 GC×IMS Library Search 和三款插件(Reporter 插件、Gallery Plot 插件和 Dynamic PCA 插件)以及 VOCal 软件, 香气挥发物计算公式如下:

$$C = \frac{A}{A_1} \times C_1 \times \frac{V_1}{m}$$

式中: C 表示样品中目标挥发性物质的浓度, μg/kg; A 表示目标物质的峰面积; A_1 表示内标物(2-甲基-3-庚酮)的峰面积; C_1 表示内标物溶液的初始浓度, mg/L, 即 ppm; V_1 表示内标物添加体积, μL; m 表示样品质量, g。

表 1 分析条件

Table 1 Analysis conditions

气相-离子迁移谱单元		自动顶空进样单元	
分析时间	40 min	进样体积	500 μL
色谱柱类型	WAX, 15 m ID: 0.53 mm	孵育时间	20 min
柱温	60 ℃	孵育温度	60 ℃
载气/漂移气	N_2	进样针温度	85 ℃
IMS温度	45 ℃	孵化转速	500 r/min

表 2 气相色谱条件

Table 2 Gas Chromatography conditions

时间(min)	E1(载气流速)(mL/min)	E2(分流流速)(mL/min)	R(状态)
0	150	2	开始采集数据
2	150	2	–
10	150	10	–
20	150	100	–
30	150	150	–
40	150	150	停止

注: "–"表示无操作。

1.3 数据处理

挥发性有利物质在为 GC-IMS 仪器配置的分析软件上进行分析和绘制, VOCal 用于光谱和数据的定性和定量分析, Reporter 和 Gallery Plot 插件用于构建样品挥发物的指纹和差异光谱。动态 PCA 插件主要用于动态主成分分析。使用 SPSS(26.0 版)进行单因素方差分析(ANOVA), 使用邓肯事后比较法对获得的数据进行多次比较。每个样品取三个平行进行分析(n=3), 数据值表示为平均值±标准误差。OriginPro 2021 软件(美国马萨诸塞, OriginLab 股份有限公司)用于图表绘制, 图表中不同小写字母代表差异显著(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 不同保鲜处理对生姜采后冷藏外观影响

外观是反映姜块品质劣变程度及生理状态最直观的指标[18]。如图 1 所示, 贮藏初期(第 0~30 d)所有处理组姜块表皮鲜亮, 呈均匀姜黄色。贮藏 60 d 时, CK 组姜茎顶端出现轻微褐变。贮藏 90 d 时, CK 组姜茎顶端出现轻微腐烂, CK 组与 CA 组表皮出现部分脱落, 并且所有组姜块的表面均发生褐变, 色泽暗沉。Shukor 等[19] 曾报道, 鲜姜对温度敏感, 贮藏后期细胞组织活力下降, 会导致细胞适应环境的能力减弱, 引发酶促褐变。ClO_2、CA 和 V_C 的联合使用可以有效减轻并延缓这种褐变, 贮藏 90 d, 联合组

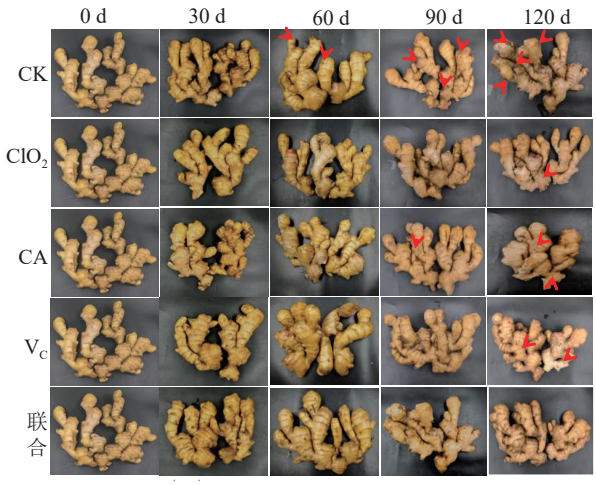


图 1 不同保鲜处理对生姜采后冷藏外观影响

Fig.1 Effect of different preservative treatments on appearance in post harvest refrigerated ginger

褐变程度较轻，依然保持姜黄的色泽。贮藏 120 d 后，CK 组顶端腐烂程度进一步增加，ClO_2、CA 和 V_C 组姜茎顶端出现轻微腐烂，且各组姜块外表皮出现脱落，导致表皮细胞部分坏死。研究表明，姜块贮藏过程中的脱皮、皱缩变软、表皮褐变或发芽都会导致品质下降[20]。联合组茎块顶端外观较为完整，未出现明显的腐烂，表明联合处理可以有效抑制或降低姜茎细胞的损伤程度，延缓褐变并保持较好的贮藏品质，更符合消费市场需求。

2.2　不同保鲜处理对生姜采后冷藏色差影响

色差变化进一步反映了生姜的外观变化过程[21]。如图 2A 所示，各组生姜 L^*呈先下降后上升趋势。CK 组和 ClO_2 处理组在贮藏期间 L^*值始终均处于较低水平，两组之间无显著性差异（$P>0.05$）。CA 组在第 120 d 出现明显上升（上升 13.68%），推测其是由于生姜表皮脱落引起的。联合处理组第 120 d 的 L^*显著高于 CK 组，L^*高了 5.66%（$P<0.05$），较好的保持了生姜亮度。由图 2B 和图 2C 可知，生姜在贮藏期间 a^*值和 b^*整体呈上升的趋势，姜块逐渐向黄褐色转变。120 d 后，CK 组表现出较高的 a^*值和 b^*值，褐变程度最高，ClO_2 和 V_C 处理组次之，两者未表现出显著差异（$P>0.05$），CA 组虽然表现出较高的 a^*值，但 b^*值最低，可以使姜块保持更鲜明的黄色特征。而联合组 a^*值和 b^*值在贮藏过程波动较小。刘晓燕[22] 发现，V_C 能够抑制 POD 活性，ClO_2 能有效的杀灭鲜切莲藕表面微生物，减少褐色产物，V_C 和 ClO_2 联合使用可显著抑制鲜切莲藕褐变（$P<0.05$）。Xylia 等[23] 研究认为，V_C 联合马郁兰精油和壳聚糖能提高鲜切生菜的 L^*值并降低 a^*值，进一步增强鲜切生菜的外观品质。因此，联合处理可以有效提高生姜的外观品质，对原始色泽的稳定效果最佳。

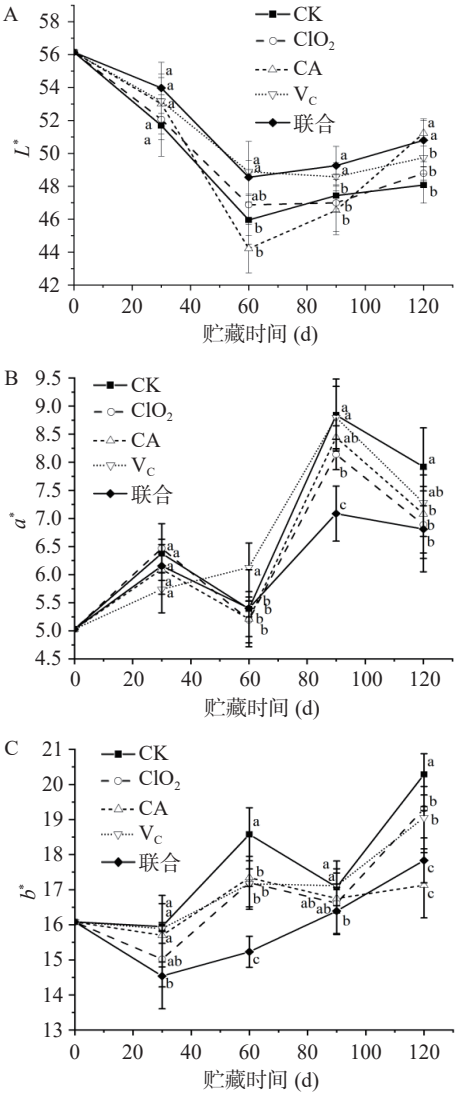


图 2　不同保鲜处理对生姜采后冷藏 L^*值（A）、a^*值（B），b^*值（C）影响

Fig.2　Effects of different preservation treatments on L^* value (A), a^* value (B), and b^* value (C) in post harvest refrigerated ginger

注：不同小写字母表示同一贮藏时间下不同处理组有显著性差异，$P<0.05$，图 3~图 5 同。

2.3　不同保鲜处理对生姜采后冷藏失水率和姜辣素含量影响

姜块在贮藏的过程中会加快体内水分流失和结构退化[24]。如图 3A 所示，各组生姜的失水率随贮藏时间的延长均呈上升趋势。其中，CA 处理的姜块失水率显著高于其他处理组（$P<0.05$），这可能与 CA 本身的挥发性特性有关。V_C 组与 CK 组相比，失水率降低了 42.33%。而 ClO_2 处理和联合处理组分别低了 67.72% 和 57.67%，表现出最佳的保水效果。王霜等[10] 认为，ClO_2 处理可以减少果蔬气孔的蒸腾

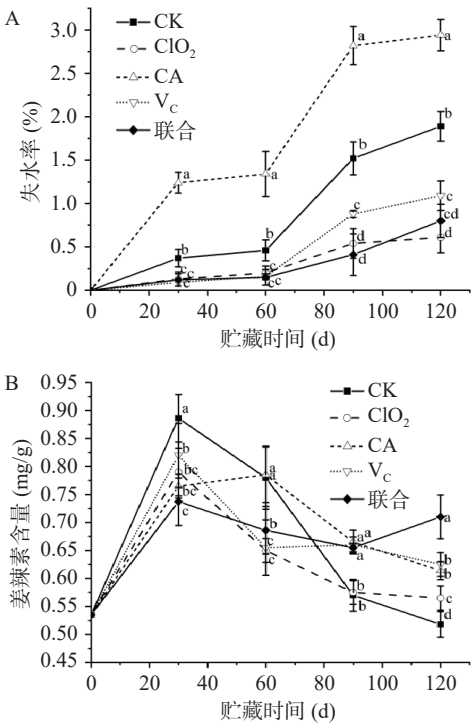


图 3　不同保鲜处理对生姜采后冷藏失水率（A）和姜辣素含量（B）的影响

Fig.3　Effects of different preservation treatments on the water loss rate (A) and gingerol content (B) in post harvest refrigerated ginger

作用。ClO_2 与其他保鲜剂的联合使用能有效延缓果蔬在贮藏过程中水分的丧失和有机物的消耗,减缓其萎蔫速率[25]。因此,联合处理可以有效抑制生姜水分的散失,提高新鲜度。

此外,研究表明,失水率的增加可能会引起姜辣素含量的增加[15]。如图 3B 所示,CK 组在 0~30 d 姜辣素含量显著升高(P<0.05)。但随着贮藏时间的延长,姜辣素发生氧化和分解,使其浓度逐渐降低[26]。CA 组和 V_C 组贮藏 120 d 后姜辣素含量相对于 CK 组高了 20.66% 和 20.08%,有效缓解了姜辣素的氧化分解。联合处理组姜辣素含量在贮藏期间基本维持稳定,至贮藏结束时较 CK 组高了 31.65%。Johnson 等[26] 认为,姜辣素及其衍生物是生姜特征性风味物质的主要活性成分,对生姜的感官品质具有决定性作用。这一结果表明,联合处理可以减缓生姜采后代谢,有效降低姜辣素的降解,提升安丘大姜采后的风味特性。

2.4 不同保鲜处理对生姜采后冷藏粗蛋白、总糖含量影响

植物细胞中的蛋白质、糖类会在贮藏过程内源酶及微生物代谢作用下而发生降解,形成的物质与生姜的外观和风味变化密切相关[4]。如图 4A 所示,随着贮藏时间的延长,各组生姜的粗蛋白含量均呈下降趋势。贮藏 120 d 后,CK 组粗蛋白含量损失严重。ClO_2 处理组粗蛋白含量较 CK 组高了 18.78%。CA 和 V_C 处理组之间无显著性差异(P>0.05),较 CK 组高 24.89% 和 29.71%,联合处理组的粗蛋白含量较 CK 组高了 35.47%,显著优于单一处理组(P<0.05)。同样地,总糖含量的变化趋势与蛋白质相似(图 4B)。贮藏 120 d 后,ClO_2 和 CA 处理组的总糖含量低于 CK 组(P<0.05),但 V_C 和联合组的总糖含量约为 CK 组的 1.2 倍和 1.4 倍,有效保持了生姜营养风味。邓钦予等[11] 探究了 V_C 对鲜切生姜的保鲜作用,结果表明 V_C 可以减缓可溶性糖的消耗。朱书兴[27] 认为,较高的粗蛋白含量可以增强生姜抵御疾病的能力,减少营养物质消耗。这表明联合处理均能有效抑制生姜可溶性糖和粗蛋白的消耗,提高抗病性,维持生姜良好风味。

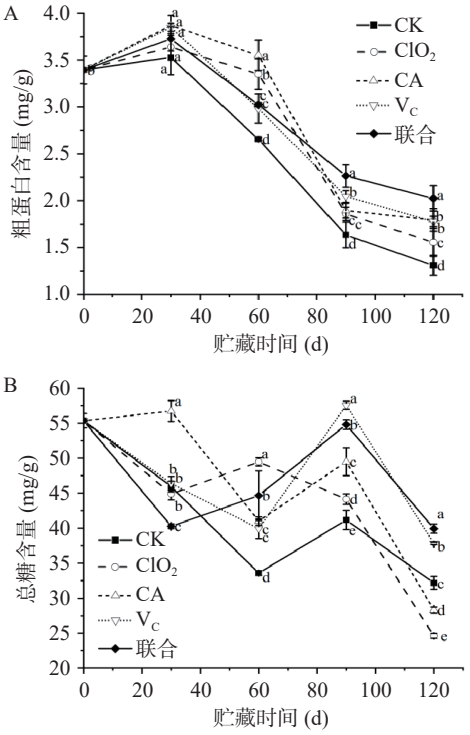


图 4 不同保鲜处理对生姜采后冷藏粗蛋白(A)和总糖含量(B)的影响

Fig.4 Effects of different preservation treatments on the crude protein conten (A) and total sugar conten (B) in post harvest refrigerated ginger

2.5 不同保鲜处理对生姜采后冷藏抗氧化酶活性影响

PAL 的活性与植物抗病性呈正相关[28]。由图 5A 所示,生姜在贮藏期间 PAL 活性呈先升高后降低再升高的趋势,在第 60 d 达到峰值。V_C 和联合处理组在贮藏后期表现出较高的 PAL 活性,120 d 后,PAL 活性较 CK 对照组分别高了 9.76% 和 7.78%,而 ClO_2 处理组的 PAL 活性相对稳定,较 CK 组高了 3.61%,CA 处理组与 CK 组无显著性差异(P>0.05)。因此,V_C 和联合处理可提高生姜 PAL活性,增强组织抗病性。

SOD 是植物抗氧化系统的第一道防线,能够有效减缓细胞衰老速度,促进细胞损伤修复[29]。如图 5B 所示,生姜在贮藏期间 SOD 的活性呈波动式升高。贮藏 120 d 后,ClO_2 和 CA 处理组 SOD 活性与 CK 组相比分别高了 6.86% 和 5.62%,V_C 和联合处理组分别比 CK 组高了 20.95% 和 11.22%。CAT 是 H_2O_2 清除的关键酶,与 SOD 协同作用,降低氧化胁迫[30]。在生姜贮藏过程中,CAT 活性逐渐增加(图 5E),4 组处理均可显著提高 CAT 活性(P<0.05),增强生姜细胞活性。贮藏 120 d 后,CK 组 CAT 活性显著下降(P<0.05),ClO_2 和 CA 处理组较 CK 组 CAT 活性高了 22.87% 和 21.45%,CA 和联合处理组较 CK 组高了 28.61%,两者之间无显著性差异(P>0.05)。表明联合处理可以通过 SOD-CAT 系统有效增强生姜的抗氧化修复能力,减轻氧化损伤,延缓生姜品质劣变,具有潜在的应用价值。Gao 等[31] 通过肉桂醛-壳聚糖包衣脐橙果实,显著降低了脐橙腐烂速率,提高 CAT 和 SOD 活性,诱导 PAL 活性增加,提高脐橙果实的抗病性。

PPO 和 POD 被认为是酶促褐变过程中的关键酶。图 5C 和图 5D 可知,贮藏期间 CK 组 POD 活性呈升高趋势,联合处理先略有升高,60 d 后 POD 活性被明显抑制,而单一处理组间呈稳定的波动状态,三组无明显规律。表明各处理组均可抑制生姜的酶促褐变,其中联合处理组效果最好。此外,生姜通过其抗氧化作用抑制脂质过氧化[32]。由图 5F 可知,在贮藏期间生姜 MDA 含量升高,ClO_2 处理组在贮藏前期(<60 d)表现出较好的膜保护效果,但后

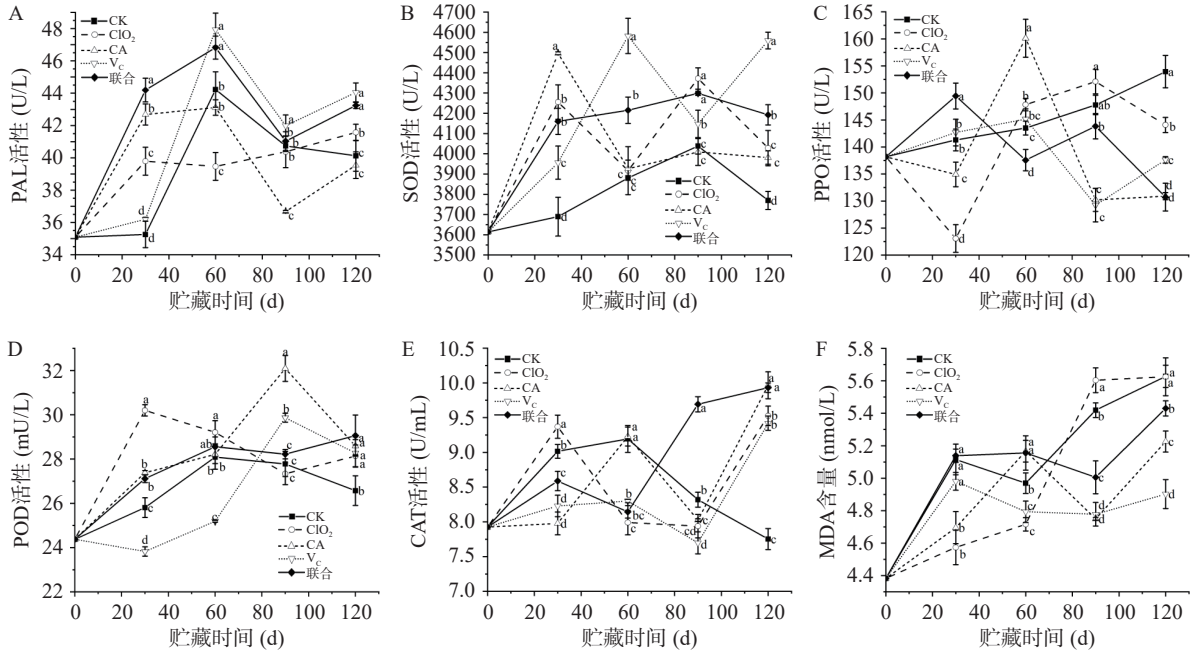


图 5　不同保鲜处理对生姜采后冷藏 PAL(A)、SOD(B)、PPO(C)、POD(D)、CAT(E)和 MDA(F)含量的影响

Fig.5　Effects of different preservation treatments on the contents of PAL (A), SOD (B), PPO (C), POD (D), CAT (E) and MDA (F) in post harvest refrigerated ginger

期 MDA 含量快速升高。贮藏 120 d 后，联合处理组和 CA 组 MDA 含量较 CK 组低了 3.51% 和 3.93%，能够有效减缓 MDA 积累。值得注意的是，V_C 组 MDA 含量较 CK 低 10.86%，表现出明显的膜脂过氧化抑制能力。赵朝光等[33]认为，复合处理(1-MCP+ClO_2)具有协同作用，能够显著抑制仔姜的氧化褐变，抑制 MDA 含量积累和膜脂过氧化，减缓仔姜成熟衰老。

2.6　不同保鲜处理的生姜采后冷藏中挥发性有机物分析

2.6.1　GC-IMS 分析　GC-IMS 分析图(图 6)直观展示了不同处理组生姜挥发性有机化合物(VOCs)的组成和浓度差异趋势。如图 6A，各处理组生姜中 VOCs 成分相似，并且在归一化相对迁移时间(RIP 峰归一化至横坐标 0.5~2.5 ms)，保留时间 0~2500 s 内被全部检出。各谱图均含多个信号峰，表明生姜中 VOCs 种类丰富(图 6B)。以第 0 d 为参照(白色基线)，CA、V_C 及联合处理组的 VOCs 浓度变化显著(红色区域：浓度升高；蓝色区域：浓度降低)，红色与蓝色信号点的分布面积及显色强度均高于其他组，说明其 VOCs 组成及含量与新鲜生姜存在差异。

2.6.2　挥发性成分定性和定量分析　使用 Gallery Plot 指纹图谱(图 7)共鉴定出 74 种挥发性化合物，可分为单体(M)和二聚体(D)，包括醛类 17 种、酯类 9 种、醇类 19 种、酮类 11 种、烃类 8 种、其他类 10 种。贮藏 120 d 后，醛类、酮类和烃类物质增加。其中醛类赋予生姜果香与脂肪香，酮类增强香气复杂度，而烃类含量变化可表征贮藏品质(其异常积累可能导致内部成分劣变)[34]。如表 3 所示，不同处理下

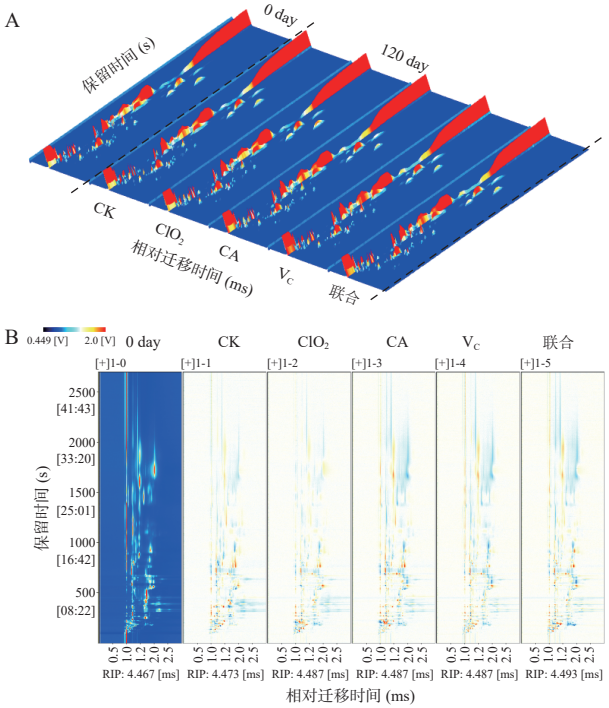


图 6　挥发性化合物的 GC-IMS 三维光谱图(A)和二维差异图(B)

Fig.6　GC-IMS three-dimensional spectra (A) and two-dimensional difference plot (B) of volatile compounds

生姜中挥发性物质组成存在显著差异(P<0.05)。酯类物质如乙酸乙酯和醇类物质 3-甲硫基丙醇在 CA 组中含量最高，表明 CA 处理有利于该类果香和含硫风味物质的保留或生成。相比之下，芳樟醇在贮藏前(0 d 组)含量最高，随贮藏时间延长显著下降(P<0.05)，说明其易在贮藏过程中损失。酮类物质中，2,3-戊二酮在联合处理组中含量最高，表明联合

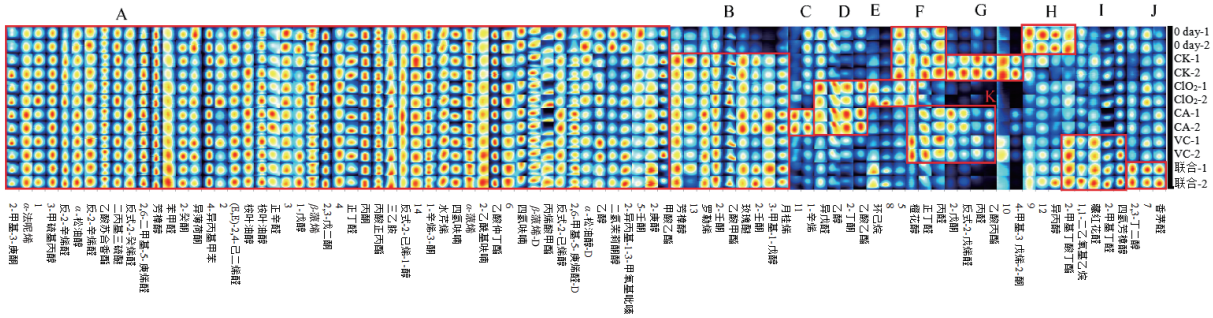


图 7　挥发性香气成分 GC-IMS 指纹图谱

Fig.7　GC-IMS fingerprint of volatile aroma components

表 3　生姜采后冷藏挥发性成分组成

Table 3　Composition of volatile components in post harvest refrigerated ginger

分类	挥发性成分	CAS	相对浓度(μg/kg)						香气特征[34−36]
			0 d	CK	ClO_2	CA	V_C	联合	
醛类	反-2-辛烯醛(D)	2548-87-0	3387.73±259.63^{c}	4135.89±118.24^{a}	4029.50±257.82^{a}	3388.00±146.01^{c}	3818.60±211.28^{ab}	4254.66±66.55^{a}	香蕉蜡质味和青
	反-2-辛烯醛(M)		1758.94±95.83^{a}	1668.10±63.40^{b}	1758.53±124.61^{a}	1690.67±17.93^{b}	1849.08±46.10^{a}	1800.59±22.81^{a}	香草药气味
	反式-2-癸烯醛	3913-81-3	5319.69±143.66^{b}	4973.92±215.38^{b}	5535.90±254.86^{ab}	5991.94±193.27^{a}	5666.89±108.15^{ab}	5857.08±176.73^{a}	蜡质、脂肪、泥土味
	2,6-二甲基-5-庚烯醛(M)	106-72-9	1766.74±49.76^{d}	2578.79±101.12^{c}	2623.74±196.67^{bc}	3090.36±61.30^{a}	2652.20±14.70^{bc}	2995.70±153.81^{ab}	强烈的新鲜甜瓜似清香
	2,6-二甲基-5-庚烯醛(D)		24794.14±21.02^{c}	31210.30±200.87^{a}	30572.69±286.38^{ab}	31190.81±94.78^{a}	30861.04±7.46^{ab}	30339.93±264.96^{b}	
	苯甲醛	100-52-7	1105.40±7.02^{c}	1047.12±0.85^{c}	1117.09±84.48^{bc}	1185.94±35.46^{ab}	1245.60±26.93^{a}	1187.42±18.15^{ab}	苦杏仁味
	(E,E)-2,4-己二烯醛	142-83-6	6423.97±119.37^{a}	5454.82±226.58^{c}	5995.90±360.18^{b}	5760.76±18.94^{c}	6531.43±126.23^{a}	6330.92±74.44^{a}	甜味、辛辣味和花香气味
	正辛醛	124-13-0	2113.68±89.45^{d}	2595.63±122.04^{c}	2791.16±20.70^{b}	2996.30±59.17^{a}	2725.68±76.98^{bc}	2874.22±27.34^{b}	蜡味、柑橘、果香
	正丁醛(D)	123-72-8	153.75±0.89^{c}	216.88±10.64^{a}	145.61±2.35^{c}	186.93±11.05^{b}	187.43±14.25^{b}	134.26±13.88^{c}	刺激气味、果香、绿叶气味
	正丁醛(M)		1038.73±61.72^{b}	1310.65±9.74^{a}	957.87±63.09^{bc}	1047.54±14.06^{b}	1176.62±123.05^{ab}	918.26±63.56^{c}	
	异戊醛	590-86-3	550.69±48.69^{a}	510.40±11.30^{ab}	569.09±6.87^{a}	507.42±11.76^{ab}	444.85±9.80^{bc}	391.99±21.94^{c}	巧克力、脂肪味
	丙醛	123-38-6	277.31±14.36^{c}	304.87±12.57^{b}	147.45±3.81^{e}	288.14±3.93^{bc}	328.94±11.86^{a}	155.99±13.71^{de}	青香、泥土、坚果味
	反式-2-戊烯醛	1576-87-0	86.67±0.25^{d}	356.95±60.39^{a}	52.06±5.41^{d}	353.88±16.82^{a}	239.08±1.08^{b}	97.87±3.59^{cd}	辛辣味
	丙醛	123-38-6	309.72±25.30^{d}	831.35±14.28^{a}	130.12±15.36^{e}	383.22±36.96^{c}	577.38±16.26^{b}	110.03±3.52^{e}	青香、泥土、坚果味
	藏红花醛	116-26-7	347.40±24.95^{c}	431.23±30.52^{bc}	350.97±59.52^{c}	383.65±1.29^{bc}	491.15±15.31^{ab}	535.96±93.49^{a}	酚醛类气味、烟草味和辛辣味
	2-甲基丁醛	96-17-3	994.18±71.78^{d}	1900.39±0.16^{c}	1538.10±203.37^{d}	914.75±16.82^{e}	2049.58±16.07^{b}	2918.86±202.13^{a}	苦杏仁味、可可、麦芽
	香茅醛	106-23-0	3013.31±140.34^{d}	3804.60±265.39^{c}	3860.29±58.23^{c}	4375.96±178.40^{b}	4006.24±35.81^{c}	5746.28±111.22^{a}	柠檬、香茅和玫瑰香气
酯类	乙酸苏合香酯	93-92-5	8956.16±446.47^{a}	9105.58±94.45^{a}	9172.14±614.52^{a}	9533.83±185.58^{a}	9262.77±401.03^{a}	9350.76±265.70^{a}	栀子花香气
	丙酸正丙酯	106-36-5	8449.46±367.23^{a}	7991.23±379.39^{a}	8405.61±10.78^{a}	8357.68±85.29^{a}	8420.18±31.06^{a}	8554.64±160.69^{a}	果香和辛辣气味
	乙酸仲丁酯	105-46-4	6336.45±123.33^{b}	6343.49±42.81^{b}	6321.18±68.49^{b}	6265.57±32.43^{b}	6461.62±16.63^{a}	6541.08±19.09^{a}	果实香味
	丙烯酸甲酯	96-33-3	618.85±14.61^{c}	802.59±80.91^{b}	761.43±86.96^{b}	577.65±17.50^{c}	780.89±25.00^{b}	1143.61±66.89^{a}	辛辣气味
	甲酸乙酯	109-94-4	699.02±86.07^{ab}	779.50±14.05^{a}	603.17±70.00^{b}	769.47±18.25^{a}	803.18±93.32^{a}	549.54±3.30^{b}	辛辣味和菠萝的果香气
	乙酸甲酯	79-20-9	460.89±22.25^{d}	745.35±22.98^{b}	918.07±124.90^{a}	689.46±22.88^{bc}	821.68±14.31^{ab}	794.95±20.96^{ab}	乙醚、甜果味
	乙酸乙酯	141-78-6	1787.64±44.04^{b}	849.53±17.09^{d}	2718.77±837.98^{a}	3271.27±31.49^{a}	1240.02±58.20^{c}	946.82±71.32^{d}	水果香味
	乙酸丙酯	109-60-4	180.64±6.51^{c}	990.61±56.38^{a}	53.96±16.05^{d}	686.43±73.52^{b}	448.49±164.56^{bc}	53.86±0.93^{d}	水果香味
	2-甲基丁酸丁酯	15706-73-7	529.72±107.64^{c}	415.76±40.69^{c}	629.49±40.54^{bc}	625.46±15.55^{bc}	836.53±17.53^{a}	874.48±78.81^{a}	水果香气
酮类	2-癸酮	693-54-9	2321.23±109.50^{b}	2319.58±120.76^{b}	2485.50±116.55^{ab}	2500.25±0.25^{ab}	2674.78±177.76^{a}	2668.73±122.00^{a}	橘子、花香
	异薄荷酮	491-07-6	2049.04±112.55^{a}	1361.40±128.20^{c}	1668.15±154.28^{b}	1571.59±6.76^{bc}	1834.05±4.72^{ab}	1599.20±12.48^{bc}	薄荷香气
	2,3-戊二酮	600-14-6	5567.72±174.63^{a}	5160.48±237.52^{b}	5289.30±210.34^{b}	4983.75±195.47^{c}	5363.48±225.97^{b}	5713.91±247.72^{a}	奶油香气
	丙酮	67-63-0	5410.63±280.08^{a}	5429.18±38.27^{a}	4868.19±211.68^{b}	5074.28±9.86^{ab}	5391.27±20.96^{a}	5311.39±163.87^{a}	–
	1-辛烯-3-酮	4312-99-6	1982.66±27.14^{b}	2006.72±42.86^{b}	2137.01±4.77^{a}	2108.20±28.70^{a}	2089.87±24.20^{a}	2083.30±34.09^{a}	奶油香气
	5-壬酮	502-56-7	1757.18±11.03^{c}	2144.66±156.43^{a}	1954.80±91.22^{abc}	1888.60±33.93^{bc}	1810.41±22.48^{bc}	1899.59±76.68^{bc}	–
	2-壬酮(M)	821-55-6	711.33±168.93^{c}	1179.09±5.62^{b}	1195.99±59.09^{b}	1285.59±17.44^{a}	1251.09±19.42^{ab}	1322.88±15.29^{a}	水果、花、油脂和药草似香气
	2-壬酮(D)		790.13±185.18^{d}	2691.16±242.13^{b}	2451.72±146.04^{b}	3145.86±148.81^{a}	1931.17±61.09^{c}	3132.09±128.86^{a}	

续表 3

分类	挥发性成分	CAS	相对浓度(μg/kg)						香气特征[34−36]
			0 d	CK	ClO_2	CA	V_C	联合	
烃类	2-丁酮	78-93-3	479.96±23.67^{c}	303.17±26.20^{d}	684.18±74.06^{b}	903.45±23.44^{a}	405.46±4.46^{c}	302.76±8.37^{d}	具有醚香、果香、青香
	2-戊酮	67-64-1	118.88±10.57^{c}	343.19±115.09^{b}	47.24±34.98^{c}	379.76±32.90^{a}	304.57±1.63^{b}	58.91±8.49^{c}	甜果香、酒香、木质香
	4-甲基-3戊烯-2-酮	141-79-7	51.13±9.65^{d}	1429.35±209.26^{a}	26.14±5.18^{d}	649.30±44.42^{b}	242.54±43.34^{c}	38.03±1.92^{d}	辛辣的、泥土、青菜气味
	(E,E)-α-金合欢烯	502-61-4	16606.15±10.40^{e}	18187.67±413.47^{d}	19003.97±220.98^{c}	19977.39±301.82^{ab}	19634.34±198.70^{b}	20246.37±139.37^{a}	柑橘草药味
	β-蒎烯(M)	127-91-3	2829.98±81.53^{c}	2513.29±22.75^{d}	3156.56±153.68^{b}	2830.36±95.77^{c}	3013.37±19.16^{bc}	3307.57±30.78^{a}	树脂和松脂香气
	β-蒎烯(D)		1747.64±76.05^{c}	2228.71±238.34^{a}	1877.04±104.16^{bc}	1770.79±80.77^{c}	1919.11±135.54^{b}	2001.92±53.44^{ab}	
	α-水芹烯	99-83-2	856.38±6.01^{ab}	773.66±12.96^{b}	825.90±19.15^{ab}	860.02±59.96^{ab}	881.82±31.88^{a}	886.03±20.49^{a}	黑胡椒和薄荷似香气
	α-蒎烯	80-56-8	7061.48±176.48^{b}	7416.96±25.41^{a}	7315.57±78.47^{a}	7344.75±3.31^{a}	7361.75±65.56^{a}	7356.36±74.50^{a}	松萜气味
	β-罗勒烯	13877-91-3	646.32±4.56^{d}	914.08±52.61^{c}	920.53±27.22^{c}	995.48±22.05^{b}	1009.00±58.63^{a}	998.54±11.52^{b}	柑橘味道
	β-月桂烯	123-35-3	1106.63±161.48^{c}	2175.75±214.95^{b}	2231.34±46.38^{b}	2580.35±66.04^{a}	2114.18±69.14^{b}	2500.97±126.11^{a}	甜橘味和香脂气
	1-辛烯	111-66-0	405.01±20.15^{a}	315.77±16.73^{b}	232.61±95.61^{c}	456.24±14.63^{a}	247.94±13.40^{bc}	203.16±1.09^{c}	汽油味
醇类	3-甲硫基丙醇	505-10-2	36436.44±343.15^{d}	39548.36±135.96^{c}	39870.65±148.89^{c}	44775.94±277.27^{a}	42184.25±131.47^{b}	42938.17±208.26^{b}	圆葱气味
	α-松油醇(M)	98-55-5	3942.02±35.10^{b}	3765.99±84.96^{c}	3848.32±24.70^{bc}	4228.71±85.69^{a}	4169.49±12.11^{a}	4218.41±47.68^{a}	柑橘、木质、花香
	α-松油醇(D)		1584.62±112.47^{a}	1378.30±80.90^{ab}	1325.96±162.39^{b}	1193.39±2.60^{c}	1287.28±46.76^{b}	1356.09±16.33^{b}	
	芳樟醇(M)	78-70-6	33353.25±256.62^{a}	31896.50±476.17^{b}	31074.43±197.01^{c}	29777.51±20.98^{d}	31809.26±1028.77^{b}	29764.25±351.80^{d}	香柠檬香味
	桉叶油醇(M)	470-82-6	1916.03±10.14^{c}	2141.38±162.54^{b}	2094.54±68.68^{b}	2157.93±97.82^{b}	2361.97±50.21^{a}	2277.28±63.44^{a}	樟脑气息和清凉的草药味
	桉叶油醇(D)		29510.12±505.26^{b}	26595.26±297.27^{c}	30536.68±478.88^{a}	28218.28±356.62^{b}	30590.46±366.78^{a}	30844.86±205.05^{a}	
	1-戊醇	71-41-0	461.62±1.85^{a}	375.72±107.30^{a}	440.25±1.87^{a}	393.85±26.08^{a}	468.96±71.65^{a}	490.98±2.56^{a}	面包香、酒香和果香
	反式-2-己烯-1-醇	2305-21-7	861.75±135.59^{b}	996.03±61.20^{ab}	940.64±87.70^{ab}	1123.68±0.03^{a}	967.11±8.63^{ab}	950.46±65.75^{ab}	果香、绿色、草味
	反式-2-己烯醇	928-95-0	1144.53±218.73^{ab}	1156.39±61.37^{ab}	1092.28±113.70^{b}	1378.20±21.79^{a}	1206.87±33.66^{ab}	1122.63±144.51^{ab}	果实气味
	乙醇	64-17-5	1164.07±32.71^{a}	884.65±18.10^{b}	1066.06±128.05^{a}	926.01±1.96^{b}	1181.24±49.35^{a}	1094.74±1.00^{a}	酒的气味
	二氢月桂烯醇	53219-21-9	4350.70±2.06^{a}	2692.67±8.65^{c}	3412.08±65.88^{c}	3045.25±42.52^{d}	3669.27±20.64^{c}	3855.71±19.13^{b}	柑橘、松柏、果香、花香气息
	2-庚醇	543-49-7	857.43±92.86^{c}	1222.89±89.72^{b}	1157.33±39.76^{b}	1474.32±2.13^{a}	1213.75±29.51^{b}	1334.25±30.95^{ab}	鲜柠檬似香气和青草草药气味
	芳樟醇(D)	78-70-6	859.85±42.23^{c}	1135.64±43.96^{a}	1024.99±120.85^{ab}	1107.28±25.10^{a}	1096.23±96.48^{a}	1180.57±2.51^{a}	香柠檬香味
	3-甲基-1-戊醇	589-35-5	41.36±1.41^{d}	255.60±15.72^{c}	262.03±27.49^{c}	364.10±1.36^{a}	312.76±8.05^{b}	353.42±16.48^{a}	葡萄酒和可可香气并青果香香韵
	乙醇	64-17-5	2469.16±41.86^{b}	1535.94±84.61^{d}	3426.66±262.35^{a}	3763.00±22.03^{a}	2388.07±33.25^{b}	1624.40±71.54^{cd}	酒的气味
	橙花醇	106-25-2	3277.79±264.79^{bc}	3819.81±110.67^{ab}	3717.90±344.35^{ab}	2851.22±88.34^{c}	4265.22±18.79^{a}	2325.58±18.67^{c}	花香和柠檬香
	异丙醇	107-87-9	715.99±4.24^{a}	378.65±113.43^{b}	371.13±18.14^{b}	245.31±7.06^{c}	458.43±69.85^{b}	670.43±86.52^{a}	酒精、辛辣气味
	四氢芳樟醇	78-69-3	3782.63±93.33^{bc}	2919.32±673.54^{c}	3428.86±289.60^{bc}	3172.47±143.46^{c}	4783.27±63.34^{ab}	4935.63±215.96^{a}	花香香气
	2,3-丁二醇	513-85-9	908.60±3.22^{b}	526.26±19.00^{d}	799.86±75.63^{c}	822.80±13.17^{c}	699.22±2.26^{c}	1240.10±16.44^{a}	果味、黄油味
其他	二丙基三硫醚	6028-61-1	16212.52±402.65^{b}	17178.54±147.91^{a}	17232.66±492.89^{a}	14595.17±222.03^{c}	16555.12±253.66^{b}	16832.53±143.49^{b}	大蒜似气味
	4-异丙基甲苯	99-87-6	12234.20±171.13^{c}	11294.33±230.26^{d}	11850.58±17.29^{d}	12359.12±241.62^{b}	12471.66±591.36^{ab}	13002.48±323.67^{a}	柑橘、萜类、木香、刺鼻气味
	三乙胺	121-44-8	748.58±8.62^{b}	734.99±6.71^{b}	820.76±0.38^{a}	827.23±1.41^{a}	829.91±41.40^{a}	802.49±29.05^{a}	刺激性气味和胺味
	四氢呋喃	109-99-9	1039.53±62.47^{bc}	1125.95±18.18^{ab}	974.73±130.77^{c}	937.56±24.03^{c}	1202.44±43.87^{a}	1258.32±50.95^{a}	乙醚气味
	2-乙酰基呋喃	1192-62-7	782.29±11.78^{b}	810.01±56.22^{b}	823.99±18.55^{b}	829.35±9.23^{b}	919.12±70.83^{a}	901.02±53.39^{ab}	甜香、焦糖气味
	四氢呋喃	109-99-9	228.74±2.37^{ab}	201.08±6.92^{b}	214.55±12.77^{ab}	230.05±9.67^{ab}	230.45±26.88^{ab}	244.12±3.79^{a}	乙醚气味
	2-异丙基-3-甲氧基吡嗪	25773-40-4	3668.32±20.21^{a}	2778.66±434.22^{b}	3380.83±87.89^{ab}	2984.99±87.80^{b}	3564.66±218.81^{ab}	3814.02±125.53^{a}	绿豆气味
	玫瑰醚	16409-43-1	468.26±6.80^{d}	1001.03±19.61^{b}	911.66±46.99^{bc}	1148.60±25.12^{a}	798.72±43.06^{c}	987.69±25.83^{b}	清甜花香
	环己烷	110-82-7	381.38±39.54^{d}	569.72±8.65^{c}	1122.82±99.33^{a}	606.57±44.11^{c}	679.67±203.65^{bc}	1129.02±51.07^{a}	汽油味
	1,1-二乙氧基乙烷	105-57-7	873.56±32.97^{b}	870.21±103.57^{b}	655.16±177.58^{c}	596.25±63.88^{c}	917.87±94.15^{b}	1205.50±109.60^{a}	花香、果香

注：同一化合物的单体(M)和二聚体(D)，同行不同小写字母表示有显著差异，$P<0.05$；“−”表示未查到；CK、ClO_2、CA、V_C和联合处理的相对浓度为生姜采后冷藏第120 d测得的数据。

处理可能促进了特定酮类物质的生成或积累。多数醛类物质(如反-2-辛烯醛、2,6-二甲基-5-庚烯醛)在各处理组中的相对含量均显著高于 CK 组($P<0.05$)，其中联合处理组在香茅醛、2-甲基丁醛等关键醛类物质中含量最高。同时，该组在萜烯类物质如(E,E)-α-金合欢烯、β-月桂烯及(E,E)-2,4-己二烯醛等特征组分上也显著高于 CK 组，表明联合处理在提升或维持多种关键风味物质方面表现最佳。此外，CK 组中部分醛类(如正丁醛)及含硫化合物(如二丙基三硫醚)含量较高，推测其可能与贮藏过程中发生的氧化

反应及风味劣变有关。此外，45 种化合物在区域 A 均有检出。其中，联合处理组中反-2-辛烯醛、反式-2-癸烯醛、丙烯酸甲酯、2-癸酮、(E,E)-α-金合欢烯、β-蒎烯、1-戊醇约为第 0 d 的 1.2~2 倍，比 CK 组高约 10%~40%。区域 B 标出的物质在新鲜生姜中浓度较低，贮藏 120 d 后其含量显著升高。其中，联合组与 CA 组 2-壬酮、β-罗勒烯、β-月桂烯、3-甲基-1-戊醇含量约是 CK 组的 1.2~1.5 倍。区域 F 和 G 中标出的物质在 CK 样品中含量较高的物质，正丁醛和丙醛具有刺激性气味、果香、青香和坚果味。2-戊酮、反式-2-戊烯醛、丙醛乙酸丙酯、4-甲基-3 戊烯-2-酮具有甜果香、酒香、木质香、辛味和青菜味。区域 H 中标出的物质在第 0 d 含量较高，异丙醇和 2-甲基丁酸丁酯具有酒精、辛辣气味和水果香气。区域 I 和区域 J 中标出的物质在 V_C 组和联合组样品中含量较高，1,1-二乙氧基乙烷、藏红花醛、2-甲基丁醛、四氢芳樟醇有花香、果香、酚醛类气味、烟草味和辛辣味、苦杏仁味、可可、麦芽、花香香气。2,3-丁二醇、香茅醛有果味、柠檬香和玫瑰香气。研究表明，生姜挥发性风味物质含量的变化反映了生姜香气的浓度与品质劣变程度[34]。综上可知，联合处理(ClO_2+CA+V_C)在保持生姜风味物质的积累方面表现最优，香茅醛、反-2-辛烯醛、(E,E)-α-金合欢烯、β-蒎烯、β-罗勒烯、β-月桂烯等特性风味物质含量较高。这有利于实现对生姜综合香气品质和贮藏品质的最佳保持效果，为开发生姜等香辛料的高品质保鲜技术提供理论支持。

2.6.3 PCA 法评价不同保鲜处理生姜的挥发性成分

主成分分析(PCA)结果显示(图 8)，PC1(贡献率 30%)和 PC2(贡献率 27%)累计解释 57% 的变异。PC1 轴上，0 d 样品与 CK 组负向分布，其他处理组正向分布，这一分布特征可能说明，保鲜处理促进了生姜在贮藏过程中风味物质的形成并有效抑制其衰老腐败引起的不良变化[35−36]。PC2 轴上，CK 与 CA 组负向分布，而 0 d、ClO_2、V_C 及联合组正向分布，且彼此空间位置接近，表明这些组别在风味特征上具有一定相似性。此外，联合组在 PC1 与 PC2 轴上均与 CK 组距离最远，说明其风味轮廓与对照组差异最大，对生姜风味的影响最为明显。

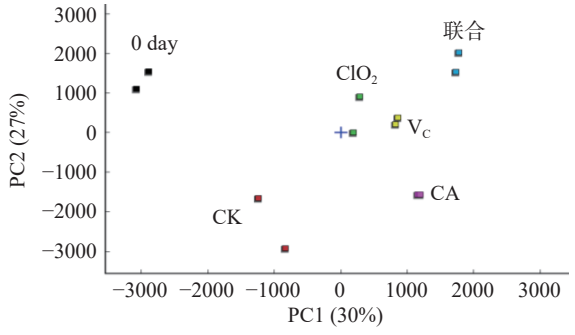


图 8 挥发性香气成分 PCA 图

Fig.8 PCA diagram of volatile aroma components

3 结论

本研究表明，联合处理(ClO_2+VC+CA)可有效维持生姜贮藏期间的外观品质，抑制腐烂与表皮脱落。贮藏 120 d 后，联合处理组 PAL、SOD 和 CAT 活性分别较 CK 组高 7.78%、11.22% 和 28.61%，MDA 含量较 CK 组低了 3.51%，有效延缓生姜的衰老与氧化损伤。同时，联合处理能更好地保留姜辣素(较 CK 组高了 31.65%)、粗蛋白(较 CK 组高了 35.47%)及总糖(对照组的 1.4 倍)等营养成分。GC-IMS 挥发性成分分析表明，联合处理促进青香(香茅醛)、果香(β-月桂烯)、辛辣香气((E,E)-2,4-己二烯醛)等特性物质的积累与保留，主成分分析证实其风味轮廓与对照组差异显著。本研究为生姜综合保鲜提供了有效技术支持，具有较好的应用前景，但相关分子机制及长期贮藏稳定性仍需进一步研究。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 杜美军, 张鲜桃, 刘震远, 等. 1-MCP 与脉冲熏硫联合调控四川仔姜保鲜效果研究[J]. 中国调味品, 2021, 46(3): 7−10. [DU Meijun, ZHANG Xiantao, LIU Zhenyuan, et al. Research on the effect of 1-MCP and pulse sulfur fumigation on the preservation of Sichuan tender ginger[J]. China Condiment, 2021, 46(3): 7−10.]

[2] YANG Zhijun, GUO Zhenghao, YAN Jun, et al. Nutritional components, phytochemical compositions, biological properties, and potential food applications of ginger (*Zingiber officinale*): A comprehensive review[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 128: 106057.

[3] 唐继兴, 徐斌, 赵垚垚, 等. 二氧化氯对仔姜保鲜效果的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(5): 316−321. [TANG Jixing, XU Bin, ZHAO Yaoyao, et al. Effect of chlorine dioxide (ClO_2) treatment on the preservation effect of tender ginger[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(5): 316−321.]

[4] JING Yingying, MENG Fanbing, PENG Zhenyu, et al. Metabolomics reveals the effect of vacuum packaging combined with moderate-temperature preservation on quality changes of tender ginger[J]. Food Chemistry: X, 2025, 25: 102168.

[5] GOMES B A F, ALEXANDRE A C S, de ANDRADE G A V, et al. Recent advances in processing and preservation of minimally processed fruits and vegetables: A review–Part 2: Physical methods and global market outlook[J]. Food Chemistry Advances, 2023, 2: 100304.

[6] MU Yuwen, FENG Yuqin, WEI Lijuan, et al. Combined effects of ultrasound and aqueous chlorine dioxide treatments on nitrate content during storage and postharvest storage quality of spinach (*Spinacia oleracea* L.)[J]. Food Chemistry, 2020, 333: 127500.

[7] SUN Xiuxiu, BALDWIN E, BAI Jinhe. Applications of gaseous chlorine dioxide on postharvest handling and storage of fruits and vegetables–A review[J]. Food Control, 2019, 95: 18−26.

[8] 杨菊, 程谦伟, 孟陆丽, 等. 外源抗坏血酸对香蕉保鲜和抗氧化代谢的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(15): 146−151. [YANG Ju, CHENG Qianwei, MENG Luli, et al. Effects of exogenous ascorbic acid on the storage quality and antioxidant metabolism of bananas[J]. Food Research and Development, 2022, 43(15): 146−151.]

［9］ 许超群, 戴凡炜, 陈于陇, 等. 肉桂醛在水果保鲜中的应用及其包埋技术研究进展[J]. 现代食品科技, 2023, 39(12): 320−327. ［XU Chaoqun, DAI Fanwei, CHEN Yulong, et al. Application of cinnamaldehyde in fruit preservation and research progress on encapsulation technology[J]. Modern Food Science & Technology, 2023, 39(12): 320−327. ］
［10］ 王霜, 刘语思, 张光泉, 等. 二氧化氯处理对低温贮藏鲜切仔姜品质的影响[J]. 食品科技, 2023, 48(3): 50−55. ［WANG Shuang, LIU Yusi, ZHANG Guangquan, et al. Effect of chlorine dioxide treatment on quality of fresh cut baby ginger during low temperature storage[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(3): 50−55. ］
［11］ 邓钦予, 张杨涛, 郑果, 等. 外源抗坏血酸对鲜切竹根姜保鲜特性的影响[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(5): 176−183. ［DENG Qinyu, ZHANG Yangtao, ZHENG Guo, et al. Effects of exogenous ascorbic acid on fresh-keeping characteristics of fresh-cut Zhugen ginger[J]. China Food Additives, 2023, 34(5): 176−183. ］
［12］ WU Xinping, LI Qiuying, YI Yang, et al. Cinnamaldehyde affects the storage quality of freshly cut water chestnuts through the regulation of reactive oxygen species and the AsA-GSH cycle[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 332: 113199.
［13］ LÜ Jingyi, BAI Lin, HAN Xuzhou, et al. Effects of 1-MCP treatment on sprouting and preservation of ginger rhizomes during storage at room temperature[J]. Food Chemistry, 2021, 349: 129004.
［14］ 周弦, 杨培华, 马慧慧, 等. SiNPs 处理对凤头姜仔姜贮藏保鲜品质的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(9): 65−73. ［ZHOU Xian, YANG Peihua, MA Huihui, et al. Effect of SiNPs treatment on the storage and preservation quality of Fengtou tender ginger[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2024, 46(9): 65−73. ］
［15］ ZHANG Yunmeng, PENG Yong, JIA Ruyu, et al. Sodium chloride combined with polypropylene film can maintain the quality of fresh-cut ginger[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 25: 100541.
［16］ 李子煜, 吴婷, 马帅楠, 等. 不同干燥方式对西兰花茎和叶品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(14): 179−188. ［LI Ziyu, WU Ting, MA Shuainan, et al. Effects of different drying methods on the quality of broccoli stems and leaves[J]. Food Science, 2024, 45(14): 179−188. ］
［17］ 杜文瑜, 谭梦男, 刘雪梅, 等. 基于气相色谱-嗅闻-质谱法和风味活度值分析安丘大姜中关键风味活性物质[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(12): 71−79. ［DU Wenyu, TAN Mengnan, LIU Xuemei, et al. Identification of key flavor active compounds in Anqiu ginger based on gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry and odor activity value[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(12): 71−79. ］
［18］ 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 Ronghui, ZHOU Na, WEI Wenwen, et al. Effect of film packaging on shelf-life quality of fresh-cut lettuce[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(3): 107−116. ］
［19］ SHUKOR N I A, MISRAN A, SAARI N, et al. Postharvest quality evaluation on the hot water-dipped *Zingiber officinale*rhizomes stored at low-temperature storage[J]. Food Research, 2023, 7(4): 240−250.
［20］ 朱丹实, 刘仁斌, 杜伟, 等. 生姜成分差异及采后贮藏保鲜技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(17): 375−378,383. ［ZHU Danshi, LIU Renbin, DU Wei, et al. Research progress in ingredient difference among different types of ginger and the postharvest preservation technology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(17): 375−378,383. ］
［21］ PENG Huimin, HU Haijun, XI Keyong, et al. Silicon nanoparticles enhance ginger rhizomes tolerance to postharvest deterioration and resistance to *Fusarium solani*[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 816143.
［22］ 刘晓燕. 鲜切莲藕保鲜技术及货架期预测模型的建立[D]. 雅安: 四川农业大学, 2018. ［LIU Xiaoyan. Study on fresh-keeping technology and the predictive model construction of the shelf-life of fresh-cut *Lotus* Root[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2018. ］
［23］ XYLIA P, CHRYSARGYRIS A, TZORTZAKIS N. The combined and single effect of marjoram essential oil, ascorbic acid, and chitosan on fresh-cut lettuce preservation[J]. Foods, 2021, 10(3): 575.
［24］ PAULI R E, CHEN N J, GOO T T C. Control of weight loss and sprouting of ginger rhizome in storage[J]. HortScience, 1988, 23(4): 734−736.
［25］ 孟祥慧, 马鑫敏, 谷恒梅, 等. 超声-次氯酸钠-植酸联合处理提高鲜切生菜的保鲜效果[J]. 食品工业科技, 2021, 42(19): 336−341. ［MENG Xianghui, MA Xinmin, GU Hengmei, et al. Improvement the fresh-keeping effect of fresh-cut lettuce by US-NaClO-phytic acid[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(19): 336−341. ］
［26］ JOHNSON J B, MANI J S, WHITE S, et al. Quantitative profiling of gingerol and its derivatives in Australian ginger[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 104: 104190.
［27］ 朱书兴. 采后贮藏温度对生姜品质的影响与机制研究[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2023. ［ZHU Shuxing. Study on the Effect and mechanism of post harvest storage temperature on ginger quality[D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University, 2023. ］
［28］ AKBAR M U, AQEEL M, SHAH M S, et al. Molecular regulation of antioxidants and secondary metabolites act in conjunction to defend plants against pathogenic infection[J]. South African Journal of Botany, 2023, 161: 247−257.
［29］ JIA Xiaoyu, DU Meijun, ZHENG Yanli, et al. Automatic periodical SO_2 fumigation improves the storage quality of tender ginger[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(4): e14949.
［30］ PANG Linjiang, LOU Xuefen, XU Ximing, et al. Effects of tea polyphenols and microporous packaging treatment on storage and preservation of leaf-vegetable sweet potatoes[J]. Foods, 2025, 14(7): 1191.
［31］ GAO Yang, KAN Chaonan, WAN Chunpeng, et al. Quality and biochemical changes of navel orange fruits during storage as affected by cinnamaldehyde-chitosan coating[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 239: 80−86.
［32］ SHINGA M H, FAWOLE O A, PAREEK S. *Opuntia ficus*-indica mucilage coating prolongs the shelf life of bananas (*Musa* spp.) by enhancing antioxidant activity and modulating antioxidant enzyme systems[J]. Food Bioscience, 2025, 65: 106039.
［33］ 赵朝光, 吴艺文, 万杨, 等. 3 种保鲜剂单独与复合处理对仔姜贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2023, 23(7): 19−26. ［ZHAO Chaoguang, WU Yiwen, WAN Yang, et al. Effect of three preservatives alone and compound treatments on the storage quality of baby ginger rhizome[J]. Storage and Process, 2023, 23(7): 19−26. ］
［34］ CHEN Jiani, WANG Jinhua, GE Yonghui, et al. Difference in quality and volatile flavor compounds of *Zingiber officinale* roscoe with different drying methods[J]. Journal of Food Quality, 2023, 2023(1): 5560410.
［35］ FENG Zhenhua, ZHANG Minmin, GUO Lanping, et al. Effect of direct-contact ultrasonic and far infrared combined drying on the drying characteristics and quality of ginger[J]. Processes, 2024, 12(1): 98.
［36］ JIA Qianqian, LI Jiaxing, YANG Sen, et al. Gas chromatography–ion mobility spectrometry-based fingerprint analysis of volatile flavor compounds in ginger cultivated under different conditions[J]. Current Research in Food Science, 2025, 10: 101041.