臭氧熏蒸联合气调包装对鲜西洋参采后品质的影响

邓秀丽，任紫烟，宋迪，秦顺新，杨相政，贾连文*
（中华全国供销合作总社济南果品研究所，山东济南 250000）

摘要：为了探究低温（0±1 ℃）、臭氧（O_3）熏蒸和气调包装（MAP）的联合处理对鲜西洋参采后品质的影响，以 PE 为对照，采用 0.5×10^{-6} O_3 熏蒸 30 min 并结合 4 种气调包装材料（IE3900-MY、IE3900-L400、IE3900-MK10 和 L400 PBAT-HP101），通过多维度指标（外观品质、袋内 CO_2 和 O_2 含量、失水率、腐烂率、抗氧化酶活性及皂苷含量）综合评价其保鲜效果。本文发现，O_3 熏蒸与 L400 PBAT-HP101 包装可显著延缓鲜西洋参品质劣变，120 d 贮藏期其失水率较 PE 组降低 1.19%，腐烂率降低至 1/7；O_3 熏蒸与 IE3900-MK10 气调组可激活抗氧化防御系统，PAL、SOD 和 CAT 等抗氧化酶活性分别提升了 13.39%，5.19%和 11.16%；O_3 熏蒸与 IE3900-MY 和 IE3900-L400 气调组可以快速调节袋内 CO_2 和 O_2 含量变化，与 PE 组相比，其 CO_2 含量降低了约 23.85%，O_2 含量提高了约 13.24%。此外，O_3 熏蒸与 L400 PBAT-HP101 处理调节皂苷代谢：贮藏 120 d 后，虽然 Rg1 含量降低 28.24%，但 Re 和 Rb1 含量分别提高 23.44%和 52.46%。综上，O_3-MAP 联合技术可以通过调控酶活性和皂苷稳态以延长贮藏期，O_3 熏蒸与 L400 PBAT-HP101 处理组对鲜西洋参内在品质和相关皂苷成分的保存效果最为显著，该研究结果可为高附加值中药材的绿色保鲜提供理论基础和技术参考。

关键词：鲜西洋参；O_3 熏蒸；气调包装；联合保鲜；抗氧化防御系统；皂苷含量

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.9.0862

The Effect of O_3 Fumigation Combined With Modified Atmosphere Packaging on Post Harvest Quality of Fresh American Ginseng

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

Abstract: In order to investigate the effects of the synergistic treatment of low temperature (0±1 ℃), ozone (O_3) fumigation, and gas-conditioned packaging (MAP) on the postharvest quality of fresh American ginseng, the experiment was conducted using 0.5×10^{-6} O_3 fumigation for 30 min in combination with four gas-conditioned packaging materials (IE3900-MY, IE3900-L400, IE3900-MK10 and L400 PBAT-HP101), with the PE group used as the control. The preservation quality was evaluated comprehensively by multi-dimensional indexes (appearance quality, CO_2 and O_2 content in the bag, water loss rate, spoilage rate, antioxidant enzyme activity, saponin content and glycoside content). The results showed that the treatment with O_3 fumigation and L400 PBAT-HP101 packaging led to a significantly delay in the quality deterioration. On the 120 th day of storage, the water loss rate was decreased by 1.19%, and the decay rate was decreased by to 1/7 of PE growp. The treatment with O_3 fumigation and IE3900-MK10 packaging resulted in the activation of the antioxidant defense system, and the activities of antioxidant enzymes were activated, such as PAL, SOD and CAT, were increased by 13.39%, 5.19% and 11.16%, respectively. Additionally, the treatment with O_3 fumigation and IE3900-MY packaging and the treatment with IE3900-L400 packaging regulated CO_2 and O_2 levels, reducing CO_2 content by approximately 23.85% and increasing O_2 content by 13.24% compared to the PE group. Furthermore, the treatment with O_3 fumigation and L400 PBAT-HP101 packaging was shown to regulate saponin metabolism: after 120 d of storage, although the Rg1 content was reduced by 28.24%, the Re and Rb1 contents were increased by 23.44% and 52.46%, respectively. In conclusion, the treatment with O_3-MAP synergistic technology was demonstrated to prolong the storage period by regulating enzyme activity and saponin homeostasis, and the treatment with O_3 fumigation and L400 PBAT-HP101 was identified as the most effective in preserving the intrinsic quality and saponin compositions of fresh American ginseng. The results of this study can provide a theoretical basis and technical support for the green preservation of high value-added traditional Chinese medicinal materials.

收稿日期：2025-06-21；修回日期：2025-09-06；接受日期：2025-09-17

基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFD2101005）；中果研究院（威海）现代农业研究院项目

作者简介：邓秀丽（1997-），女，硕士，研究方向：农产品冷链物流与贮藏保鲜，E-mail：dengxiuli0514@163.com

通讯作者：贾连文（1976-），男，硕士，研究员，研究方向：果蔬采后贮藏保鲜技术及装备研究，E-mail：lianwejia@163.com

Key words: fresh American ginseng; O_3 fumigation; modified atmosphere packaging(MAP); synergistic preservation; antioxidant defense system; saponin content

西洋参（*Panax quinquefoium* L）作为一种兼具药用和保健价值的珍贵中药材，具有抗疲劳、补元气、增强机体免疫力和防治动脉粥样硬化等功效[1]。近年来市场需求持续攀升，尤其是 2020 年国家卫生健康委员会将其正式列入“食药同源”目录，其可作为食品原料使用，进一步拓宽了西洋参的销售渠道。鲜西洋参富含更高的人参皂苷和活性物质，还保留了西洋参加工过程中热不稳定的生物酶等生物活性物质，具有更完整的食用和药用价值[2]。但当前国内鲜西洋参市场尚处于起步阶段，销售多以干参为主。主要原因在于鲜西洋参水分含量高（70%~80%），在贮藏期间容易发生腐烂或内源酶催化皂苷等有效成分降解，从而影响了鲜西洋参的生产与销售[3,4]。因此，开发高效、安全的鲜西洋参保鲜技术具有重要的产业意义。

目前，鲜参的保鲜技术多依赖传统低温或简单冷冻，存在解冻后质地变软、有效成分流失等问题，难以实现规模化生产或满足高端市场需求[5]。为突破传统保鲜技术的局限，章月红等[6]采用 15 kGy 以下电子束射线处理对西洋参所测皂苷成分没有影响，但该技术在实际应用中设备要求较高。Jeon 等[7]采用抗菌剂结合气调（2%，5%和 8% CO_2），将人参保质期延长至 3 个月，并有效降低其外观品质变化和腐烂率，但化学抗菌剂的潜在残留问题不容忽视。臭氧（O_3）作为一种强氧化性物理杀菌剂，凭借其高效灭活微生物、无化学残留及设备改造成本低等优势，已在果蔬采后保鲜领域得到广泛应用，并可与现有分选线实现集成[8,9]。气调包装（MAP）通过调节包装内气体组成（通常为 O_2 和 CO_2 的特定比例），即可满足包装工艺需求，又能维持产品所需的特定气体环境[10]。近年来，O_3 处理与 MAP 技术的联合应用展现出显著的保鲜优势。研究证实，O_3 结合 MAP 技术能显著抑制辣椒失重与丙二醛积累[11]，并延缓杨梅硬度下降及品质劣变[12]。Cengiz 等[9]通过臭氧和平衡气体包装提高“Angelino”李子的储存稳定性和贮藏寿命。这些结果为 O_3-MAP 联合策略在保鲜领域的可行性和应用前景提供了科学依据。基于此，本研究采用低温（0±1 ℃）结合臭氧处理及不同气调包装（IE3900-M、IE3900-L400、IE3900-MK10 和 L400 PBAT-HP101）的三因素保鲜方案，考察其对鲜西洋参贮藏期间品质指标的影响。本研究以期为鲜西洋参的绿色保鲜及产业化应用提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与主要仪器

文登西洋参于 2024 年 11 月 20 日购自山东省威海市道地参业发展有限公司，为威海市道地参业基地 4 年生鲜西洋参，主根直径约 1.0~1.5 cm，长度≥5 cm。24 h 内送至济南果品研究所保鲜实验室。实验前剔除病虫害、腐烂发霉的样品，选取外观完整、无严重机械损伤的鲜西洋参作为实验材料。

MAP 袋（型号：IE3900-MY、IE3900-L400、IE3900-MK10、L400 PBAT-HP101）及 PE 膜由上海海纳包装技术有限公司提供。GF-30G-A 臭氧发生器，科尔诺臭氧发生器公司；Check Point 便携式气体测定仪，丹麦 PBI 公司；HP 200 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；TCL-1013 高速台式离心机，上海安亭科学仪器厂；TU-1901 紫外可见分光光度仪，北京普析通用仪器有限责任公司。

1.2 实验设计

实验共设置 5 个处理组，包括 4 种不同型号的 MAP 袋（IE3900-MY、IE3900-L400、IE3900-MK10、L400 PBAT-HP101）和 PE 膜，规格 65 cm×100 cm，包装袋性能如表 1。

经过前期实验，确定臭氧熏蒸最佳处理条件为：处理浓度 0.5×10^{-6}，处理时间 30 min。在最佳条件下，经臭氧处理的鲜西洋参可将贮藏期由 60 d 延长至 100~120 d。

样品处理：开启臭氧发生装置（臭氧产量 300 g h^{-1}），该装置通过高压放电将氧气转化为臭氧，经气体分布器均匀通入容积为 2 m^3 的密闭处理舱。舱内设置导流板（流速 0.8±0.1 m s^{-1}），确保气体动态混合均匀。预实验采用臭氧示踪剂（溴化钾-淀粉试剂）验证气流分布均匀性，结果显示舱内各点位臭氧浓度偏差<0.1×10^{-6}。调节发生器放电功率（调节范围 1~5 kW），使用紫外吸收式臭氧检测仪连续监测出口处臭氧浓度。当出口处臭氧浓度为 0.5×10^{-6} 并维持 3~5 min 后，将鲜西洋参置于处理舱中心区域，样品采用单层网格托盘摆放，间隔 3~5 cm，开启循环风机

（风速 0.8±0.1 m s^{-1}），计时处理 30 min。

将处理后的鲜西洋参立即取出，分别装入不同气调袋中，每袋约（1.5±0.1）kg 样品，体积约占袋内总容积的 80%~90%，包装后于（0±1）℃、相对湿度（85±5）%条件下贮藏 120 d。每 30 d 测定一次，每次测定均随机选取 3 个未开封的独立包装作为平行样本（*n*=3），从贮藏容器的上中下三层分别取样，测定后样品不再放回。

表 1 包装袋性能

Table 1 performance characteristics of packaging films

阻隔性参数	厚度/μm	H_2O 透过率/(g/m^2 24 h)	O_2 透过率/(cm^3/m^2 24 h 0.1 MPa)	CO_2 透过率/(cm^3/ m^2 24 h 0.1 MPa)
IE3900-MY	30	8.58	5285.15	21290.39
IE3900-L400	30	9.29	5478.09	24227.95
IE3900-MK10	30	8.57	4505.77	20208.46
L400 PBAT-HP101	30	7.89	4090.07	20284.10
PE	30	9.81	4105.16	12906.64

1.3 实验方法

1.3.1 外观品质

参考 Lv 等[12]的方法，随机取 10 根鲜西洋参，采用 HP 200 全自动色差仪测定鲜西洋参上、中、下表皮的色泽参数，记录明暗值（*L**）、红绿值（*a**）和黄蓝值（*b**）。

1.3.2 腐烂率、失水率

腐烂率采用称量法[13]，当表皮出现发霉、斑点、凹陷、部分变色即为腐烂。失水率以鲜西洋参质量损失百分比表示[14]。

$$D=\frac{m}{M}\times 100\% \quad (1)$$

式中:

D——腐烂率，%;

m——腐烂样品重量，g;

M——样品总重量，g。

$$T=\frac{W-W_i}{W}\times 100\% \quad (2)$$

式中:

T——失水率，%;

W——贮藏前样品重量，g;

W_i——贮藏后样品重量，g。

1.3.3 袋内 O_2 和 CO_2

采用便携式气体分析仪（Check Point，丹麦 PBI）测定袋内 O_2 和 CO_2 浓度，选取上中下 3 个点，将仪器的无菌针头刺入包装袋内部，通过传感器吸入袋内气体进行分析，每次测定完成后，立即用密封胶带封闭针孔，以避免气体泄漏影响后续测定结果。

1.3.4 抗氧化酶活性

苯丙氨酸解氨酶（PAL）活性（JM-01109P1）、超氧化物歧化酶（SOD）活性（JM-01183P1）、过氧化氢酶（CAT）活性（JM-01084P1）、多酚氧化酶（PPO）活性(JM-01173P1）、过氧化物酶（POD）活性（JM-01185P1）和 MDA（JM-09865P1）含量采用商业试剂盒（晶美生物科技有限公司）测定，严格按照说明书进行操作。

1.3.5 皂苷含量

1.3.5.1 总皂苷含量

参考鲁海玲等[15]方法并稍做修改，在人参皂苷 Re 标准品中加入体积分数为 50%甲醇溶液，制成 0.56 mg mL^{-1}

的标准品，用 10 mL 具塞比色管分别吸取 20、40、80、160 μL 标准品，于 80 ℃水浴，直至挥干溶剂，取出，先后加入 0.2 mL 香草醛-冰醋酸溶液（质量分数 5%）和 0.8 mL 高氯酸溶液，混匀。置于 60 ℃水浴锅中孵化 15 min，取出后立即冰浴 2 min。5 mL 冰醋酸为空白，在 560 nm 波长处测吸光度。

$$X_i = \frac{C_i \times V \times 100}{V_i \times m} \quad (3)$$

式中:

X_i——试样中总皂苷含量（以人参皂苷 Re，mg/100 g）;

V——样液定容体积（mL）;

V_i——显色体积（mL）;

C_i——标准曲线测得 Re 质量;

m——称样质量（g）。

1.3.5.2 皂苷 Rg1、Re、Rb 含量

参考鲁海玲等[15]的方法并稍微做修改，高效液相色谱法测定：色谱条件：C_{18}（4.6 mm×150 mm，5 μm）；检测波长：203 nm；流量：1.0 mL min^{-1}；柱温：25 ℃；进样量：20 μL。流动相：A 为乙腈，B 为质量分数 0.1%磷酸溶液，按表 2 梯度洗脱。

表 2 梯度洗脱的条件

Table 2 Gradient elutiom conditloms for HPLC analyals

时间/min	体积分数/%	
	流动相 A	流动相 B
0~10	18~20	82~80
10~26	20~22	80~78
26~50	22~40	78~60
50~60	40~18	60~82

样品处理：分别制备人参皂苷 Rg1（674.1 μg mL^{-1}）、Re（640 μg mL^{-1}）和 Rb1（610 μg mL^{-1}）系列标准溶液，取 0.5、1.0、1.5、2.0 mL 定容至 5 mL 容量瓶，建立标准曲线。取 1 g 干燥后的西洋参粉末于具塞锥形瓶中，加入 50 mL 水饱和正丁醇，称重，水浴加热回流提取 1.5 h，冷却后称重，用水饱和正丁醇补足减少的质量，摇匀后过滤。取 25 mL 过滤液，于蒸发皿中蒸干，残渣加体积分数 50%甲醇溶液溶解，转移至 10 mL 容量瓶中，定容至刻度，摇匀过滤，取续滤液。试样检测吸取 20 μL 试样待测液进行高效液相检测，并根据标准曲线分别计算试样中人参皂苷 Rg1、Re、Rb1 的含量。

1.3.6 统计分析数据

所有实验数据均采用 SPSS 26.0 软件（美国芝加哥，SPSS 股份有限公司）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。数据值表示为平均值±标准误差，每个样品取三个平行进行分析（n=3）。采用 OriginPro 2021 软件（美国马萨诸塞，OriginLab 股份有限公司）进行图表绘制，图表中不同小写字母代表差异显著（P>0.05）。

2 结果与讨论

2.1 外观

鲜西洋参中的活性成分易受环境因素（如温度、湿度、氧气等）的影响而氧化分解，造成霉变、重量下降，或失去其应有的色泽[16]。由图 1A 可知，不同气调包装处理对鲜西洋参的保鲜效果存在显著差异（P<0.05）。初始（0 d）鲜西洋参表面为黄白色（表面清洗后），表皮光亮，根茎紧实完整。贮藏 60 d 后，PE 根须处开始褐变，并在贮藏 90 d 后出现轻微腐烂。而气调组变化不明显。这可能与 O_3 与气调包装的协同抑菌作用有关，雷婷婷等[17]认为：适宜浓度的 O_3 处理能破坏微生物的细胞组织，有效抑制霉菌生长并延缓农产品腐败进程，而气调包装通过调节包装内微环境（O_2 和 CO_2 比例），可进一步调节微生物的繁殖和组织代谢活动。贮藏 120 d 后，鲜西洋参质

地轻微软化，根茎褐变明显。除 L400 PBAT-HP101 组外，各组鲜西洋参根须均出现少许腐烂或断裂。表明 L400 PBAT-HP101 组形成气调环境更有利于鲜西洋参维持良好的外观品质，保持新鲜度。由图 1B 进一步可以发现：贮藏初期的鲜西洋参新鲜完整，贮藏 60 d 后 PE 组和 IE3900-MK10 气调组根须处开始出现少许白色霉点，其中 PE 组根须处还伴随轻微腐烂，而其他组未观察到明显霉变。随着贮藏时间的延长（120 d 后），IE3900-MY、IE3900-MK10 和 IE3900-L400 组均出现少量霉点，PE 组根须处霉点增多，根茎腐烂加重。而 L400 PBAT-HP101 组基本没有出现霉点，显著改善西洋参的外观品质。研究表明，包装内适宜的气调环境可以有效保持果蔬表面洁净，减少其表面霉变或变色，提高产品的商品价值和消费者喜爱度[18,19]。这表明 O_3 处理联合 L400 PBAT-HP101 组的气调环境能够更有效的抑制鲜西洋参的褐变和品质劣变，减少腐烂软化。

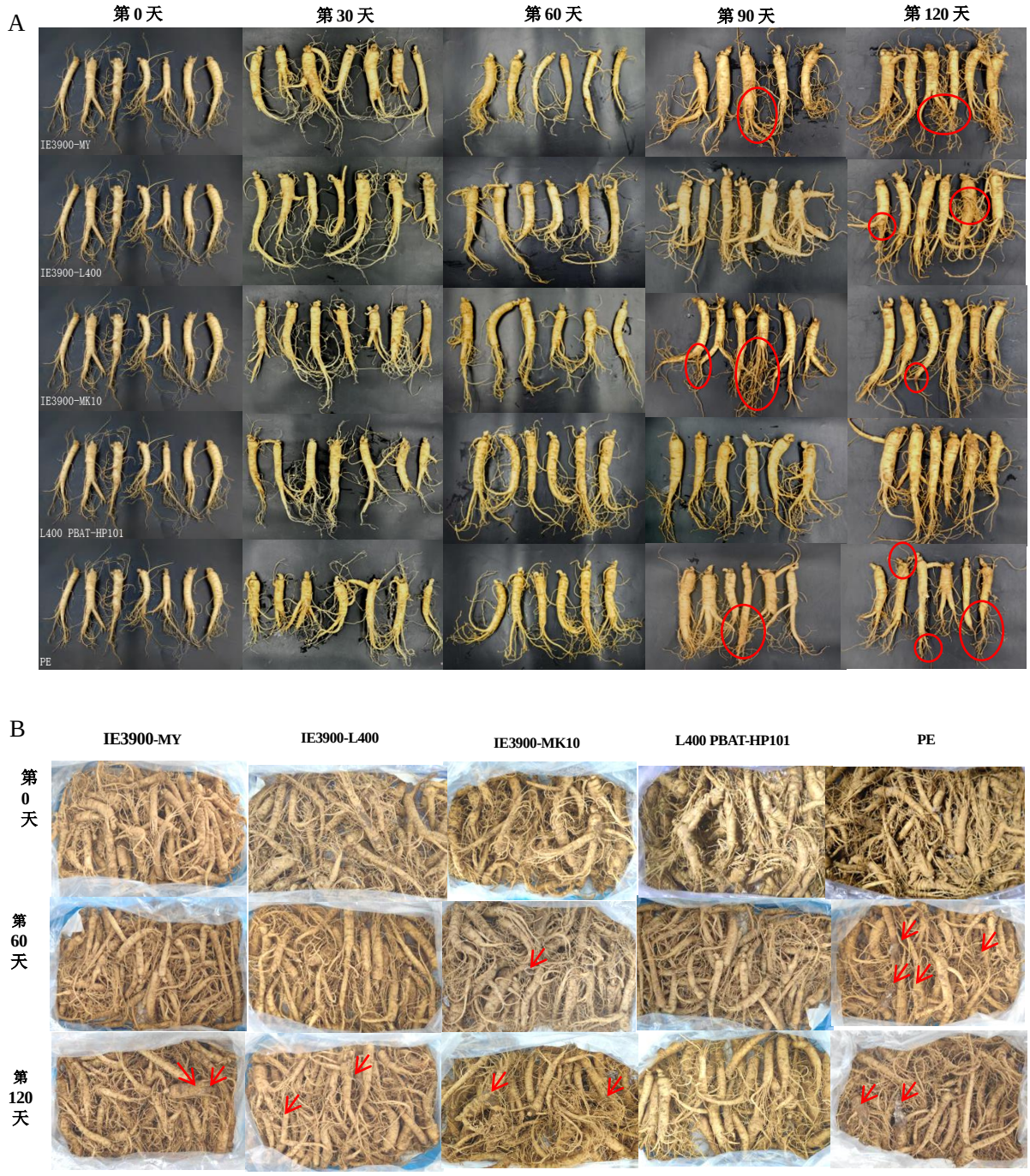

图 1 O_3联合 MAP 对鲜西洋参外观的影响：个体外观（A）和未经清洗整体外观（B）

Fig.1 The effect of O_3 combined with MAP on the appearance: individual appearance (A) and overall appearance without cleaning (B)

2.2 袋内 CO_2/O_2 含量、失水率和腐烂率

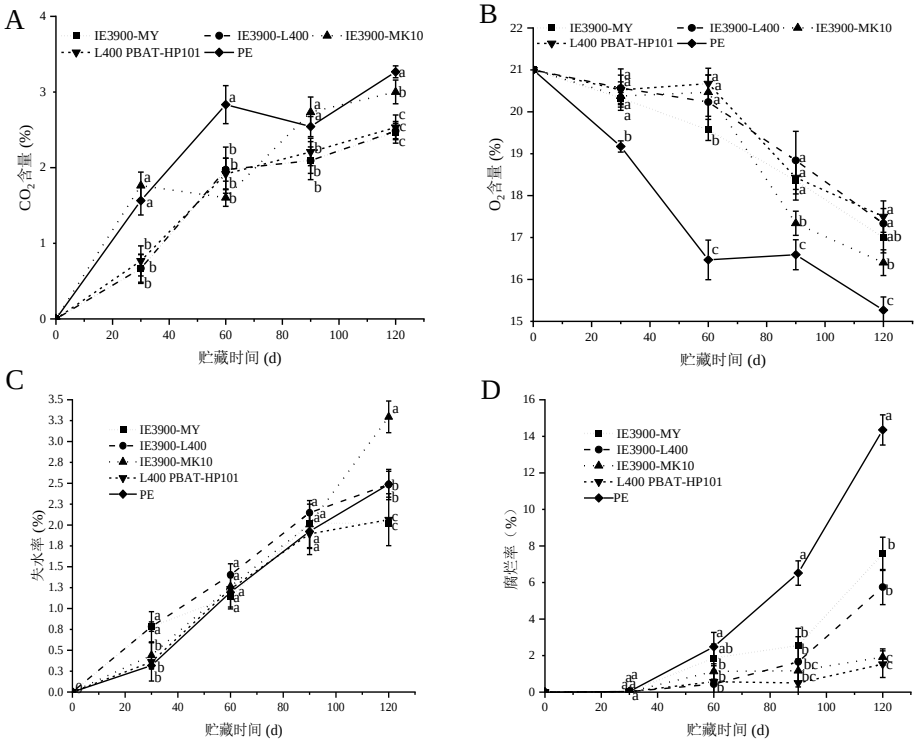

图 2 O_3联合MAP对鲜西洋参袋内CO_2含量（A）和O_2含量（B）、失水率（C）和腐烂率（D）的影响

Fig.2 Influence of O_3 synergistic MAP on the CO_2 (A) and O_2 content (B), water loss rate (C) and decay rate (D) of American ginseng

注：图中上标不同字母表示差异显著（P<0.05），相同字母表示差异不显著（P>0.05）。下图同。

O_2 和 CO_2 浓度的变化主要受包装材料的渗透性和样品采后呼吸作用的影响[9]。图 2A 和 B 所示，鲜西洋参在贮藏期间 CO_2 含量不断升高，O_2 含量不断降低。PE 组 PE 处理组 CO_2 含量（3.27%）显著高于其他组（P<0.05），O_2 含量（15.26%）显著低于其他组（P<0.05），表明 PE 材料的气体渗透性较差，导致鲜西洋参呼出的 CO_2 难以排出，O_2 不断被消耗。其次是 IE3900-MK10 组，贮藏 120 d 后 CO_2 含量（3.00%）较 PE 组降低 8.25%，O_2 含量（16.40%）提高 6.91%，表明该材料的气体渗透性对抑制鲜西洋参的呼吸代谢具有一定作用。而 L400 PBAT-HP101、IE3900-MY 和 IE3900-L400 三个气调组气体含量无显著差异（P>0.05），其 CO_2 含量稳定在 2.49%（较 PE 组降低 23.85%），O_2 含量约为 17.28%（较 PE 组提升 13.24%），表明这三种气调包装具有均衡的气体渗透性，能够有效调节袋内鲜西洋参的呼吸代谢。

由图 2C 所示，鲜西洋参在贮藏期间失水率不断增加。在 90 d 贮藏期内，各处理组的失水率无显著差异（P>0.05）。贮藏 90 d 后，O_3 联合 IE3900-MK10 气调组失水率最高，达 3.29%，这可能是由于 O_3 处理激活了抗逆性相关酶活性，加速了鲜西洋参组织的代谢消耗。研究表明，O_3 处理可诱导植物体内 PAL、SOD 和 CAT 等酶活性升高，从而增强细胞代谢活动，而气调包装的特定气体环境可以进一步促进了这一生理响应，导致水分消耗增加[17,20]。PE 包装组和 IE3900-L400 气调组，失水率约 2.48%，两组间无显著性差异（P>0.05），这可能是由于两包装材料的水蒸气透过率较大。而 IE3900-MY（2.02%）和 L400 PBAT-HP101 气调组（2.06%）有效抑制鲜西洋参水分流失，较 PE 组分别降低了 18.55%和 16.93%，表明这两种气调包装材料具有良好的保水性，显著保持了鲜西洋参的新鲜度。

由图 2D 可知，各气调包装处理下的鲜西洋参均出现不同程度的腐烂。PE 组腐烂率显著高于其他处理组（P<0.05），约为 IE3900-MY 和 IE3900-L400 气调组的 2 倍。L400 PBAT-HP101 和 IE3900-MK10 气调组的防腐效果最佳，腐烂率降低至 PE 组的 1/7。因此，O_3 熏蒸联合 L400 PBAT-HP101 处理组防腐效果最优，这可能与其独特的气体阻隔性能和 O_3 的抑菌作用密切相关。Jeon 等[7]研究认为，中渗透膜（PD-961，CO_2 含量约为 2%）包装与人参的呼吸速率更加匹配，可以通过调控微环境抑制人参的代谢活动。因此，本研究中 L400 PBAT-HP101 包装在储存过程中所产生的微环境能够更有效的调节鲜西洋参贮藏品质，减少腐烂变质。

2.3 色差

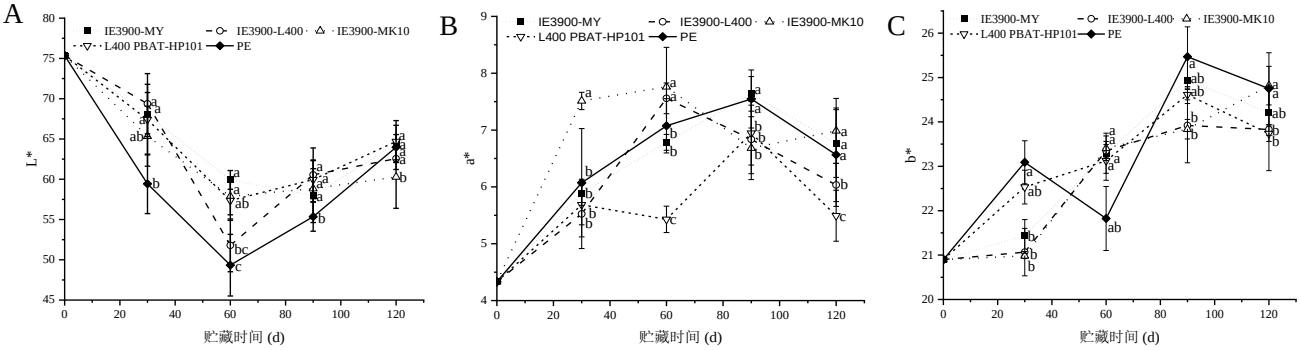

图 3 O_3联合 MAP 对鲜西洋参色差 *L**（A）、*a**（B）、*b**（C）的影响

Fig.3 The effect of O_3 combined with MAP on the color parameters *L (A), *a** (B), *b** (C) of American ginseng**

由图 3A 可知，鲜西洋参在贮藏期间 *L**值呈先降低又升高的趋势，贮藏 120 d 时，各实验组的 *L**值无显著性差异（$P>0.05$），但 PE 包装组的 *L**明显低于气调包装处理（$P<0.05$），表明 PE 处理的鲜西洋参表面较暗。与 PE 组相比，气调包装处理能有效延缓鲜西洋参 *a**值和 *b**值的上升速率。由图 3B、C 可知，与 PE 组相比，贮藏 120 d 后，IE3900-L400 气调组的 *a**值和 *b**值分别降低了 8.08%和 3.72%，能够抑制鲜西洋参氧化褐变，L400 PBAT-HP101 气调组的 *a**值和 *b**值分别降低了 16.31%和 3.73%，显著降低了鲜西洋参褐变程度，更好地保持其表面色泽。而 IE3900-MY 和 IE3900-MK10 气调组 *a**值和 *b**值与 PE 组无显著性差异（$P>0.05$）。Mancuso 等[21]认为，人参的氧化褐变在影响人参外观品质的同时，也会加速人参药用品质的分解。

2.4 PAL、SOD 和 CAT 抗氧化活性

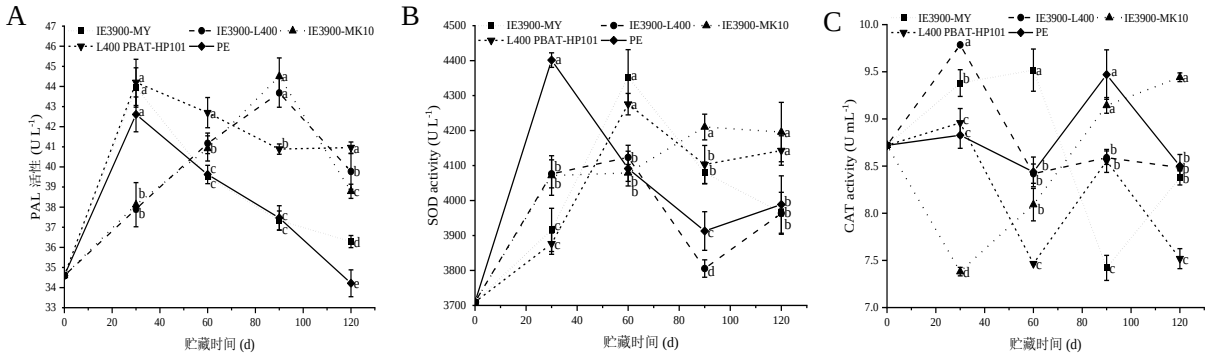

图 4 O_3联合MAP包装对鲜西洋参PAL（A）、SOD（B）和CAT（C）的影响

Fig.4 Influence of O_3 synergistic MAP on PAL (A), SOD (B), and CAT (C) of American ginseng

PAL、SOD和CAT三者活性的动态平衡是维持细胞稳态、提高组织抗病性和延缓细胞衰老的关键[22,23]。由图 4A可知，西洋参在贮藏过程中PAL含量呈先上升后下降的趋势，贮藏 120 d后，PE包装处理的西洋参PAL活性显著下降（34.21 U L^{-1}），与PE组相比，IE3900-MY PAL活性提高了 6.05%。而IE3900-L400 与IE3900-MK10 处理组分别提高了 16.28%和 13.39%。L400 PBAT-HP101 组在贮藏期间始终保持较高的PAL活性，其PAL活性提高了 16.48%，说明O_3联合该处理能有效延缓PAL活性衰减，维持西洋参的抗病能力。此外，SOD和CAT作为植物抗氧化系统的核心酶，通过级联反应联合清除活性氧（ROS），维持细胞内ROS的动态平衡[24,25]。如图 4B和 4C所示，鲜西洋参在贮藏期间SOD和CAT活性呈现联合波动的趋势。贮藏 120 d后，IE3900-MK10 处理组SOD和CAT活性显著提高，较PE组增加了 5.19%和 11.16%，有效的激活了鲜西洋参抗氧化防御系统，提高抗氧化酶活性。这进一步验证O_3处理与IE3900-MK10 气调包装形成的气体环境能够激活鲜西洋参的抗病与抗氧化酶活性，提高植物抵御环境中不良变化的能力，但这种反应似乎也加速了植物细胞组织的消耗，造成质量损失（失水率增加 32.66%）。而L400 PBAT-HP101 处理组SOD活性提高了 3.72%，CAT活性在贮藏后期降低了 11.53%，IE3900-MY和IE3900-L400 处理组与PE组SOD与CAT活性无显著性差异（$P>0.05$），表现出稳定的动态平衡，有效抑制鲜西洋参质量的损失。Shingn等[26]曾报道：SOD与CAT之间这种稳态机制能有效保护细胞膜结构完整性，可在采后贮藏阶段为植物组织

提供基础性氧化防护。

2.5 PPO、POD 活性和 MDA 含量

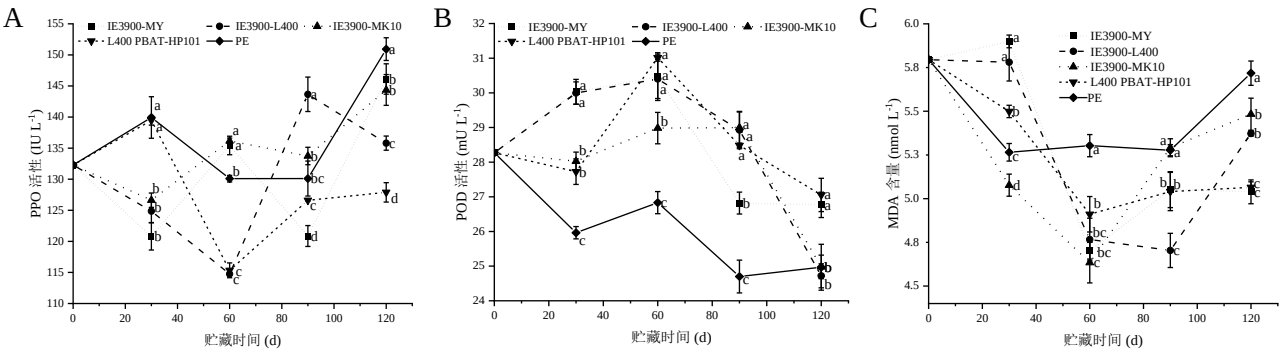

图 5 O_3联合MAP包装对鲜西洋参PPO（A）、POD（B）和MDA（C）的影响

Fig 5 Influence of O_3 synergistic MAP on PPO (A), POD (B), and MDA (C) of American ginseng

PPO是调控酶促褐变反应的关键酶，其活性的增强导致酚类物质氧化和组织褐变[27]。如图 5A所示，PPO活性在贮藏期间呈上升的趋势。PE包装的鲜西洋参在贮藏期间PPO活性显著升高（P<0.05），贮藏 120 天后，与PE相比，L400 PBAT-HP101 处理组PPO活性降低了 15.34%，IE3900-L400 处理组降低了 10.03%，而IE3900-MY和IE3900-MK10 组分别降低了 3.19%和 4.40%。因此，O_3联合L400 PBAT-HP101 处理对PPO活性的抑制作用最为显著。而POD在褐变过程中具有双重作用：一方面可与PPO联合促进酚类氧化；另一方面通过分解H_2O_2减轻氧化损伤，维持细胞膜完整性，延缓组织衰老[28]。如图 5B所示，O_3联合气调包装组的POD活性呈典型的先升后降的趋势。而PE组POD活性在贮藏期间整体呈下降趋势。贮藏 120 d后，L400 PBAT-HP101 和IE3900-MY处理组的POD活性最高，比PE组增加 8.03%和 7.21%，而IE3900-MK10I、E3900-L400 和PE处理组之间没有显著差异（P>0.05）。此外，Zhang等[28]和Oguzkorkut等[29]认为，人参POD活性的降低和MDA含量的增加，是导致细胞结构损伤的主要原因。由图 5C可知，贮藏 120 d后，L400 PBAT-HP101 和IE3900-MY处理组MDA积累显著低于PE组（仅为PE组的 0.8 倍），而IE3900-MK10I和E3900-L400 处理组次之，比PE组减少 6.12%和 4.20%。这表明O_3联合L400 PBAT-HP101 可以有效激活PPO的抗氧化活性，减缓MDA积累，防止膜脂过氧化加剧，减缓组织衰老。

2.6 皂苷含量

表 3 O_3联合MAP对鲜西洋参皂苷含量的影响

Table 3 Effect of O_3 synergistic MAP packaging on the saponin content of fresh American ginseng

人参皂苷		总皂苷含量/(g/100 g)	Rgl 含量/(mg kg^{-1})	Re 含量/(mg kg^{-1})	Rbl 含量/(mg kg^{-1})
0 d		1.41±0.05^{a}	109.01±17.82^{c}	4 030.51±45.33^{a}	7 663.65±51.12^{a}
120 d	PE	1.25±0.01^{b}	234.40±1.86^{a}	2 529.81±18.21^{c}	2 725.77±16.32^{c}
	L400 PBAT HP101	1.24±0.02^{b}	168.20±6.91^{b}	3 122.88±13.64^{b}	4 155.76±22.95^{b}

注：表中上标不同字母表示差异显著（P<0.05），相同字母表示差异不显著（P>0.05）。

人参皂苷是西洋参中最主要的药理成分[30]。由表 3 可知，鲜西洋参在初始时总皂苷含量为 1.41±0.05 g/100 g，贮藏 120 d 后，总皂苷含量减少了约 11.35%，PE 组与 L400 PBAT-HP101 气调组之间的差异不显著（P>0.05）。而 Rg1、Re 和 Rb1 含量在贮藏初期（0 d）分别为 109.01±17.82、4 030.51±45.33 和 7 663.65±51.12 mg kg^{-1}，贮藏 120 d 后，两组的 Rg1 含量上升，Re 和 Rb1 含量显著下降（P<0.05）。这是由于 Rg1 结构更加稳定，在鲜西洋参贮藏过程中可通过 Re、Rb1 转化生成，而 Re 和 Rb1 因其独特的苷元结构和糖基连接方式，在增强人体免疫调节、抗氧化及抗疲劳等作用上表现出更大的药用价值[31]。而 L400 PBAT-HP101 与 PE 组相比，Rg1、Re 和 Rb1 含量变化更加稳定，不仅有效抑制了 Rg1 含量的转化升高（与 PE 相比减少 28.24%），还减少了 Re 和 Rb1 含量的氧化分解（与 PE 相比提高了 23.44%和 52.46%），最大限度的保留了鲜西洋参的营养价值和药用价值。Hu 等[32]曾报道，通过抑制气体包装中的呼吸代谢和内源酶代谢，人参皂苷含量可以得到有效保持。

3 结论

鲜西洋参中的活性成分易受环境因素的影响而氧化分解。本研究表明，O_3 熏蒸与气调包装可显著延缓鲜西洋参贮藏期间的品质劣变，其中 L400 PBAT-HP101 处理组表现出最优的综合保鲜效果。整合分析各指标变化发现，不同处理组的保鲜效果差异主要源于其对微环境调控能力和生理代谢的协同作用。PE 包装组因透气性和气体调节能力差，导致 CO_2 积累（较 L400 PBAT-HP101 组高 23.85%）和 O_2 不断消耗（低 13.24%），进而引发鲜西洋参明显的品质劣变：贮藏 60 d 后出现霉斑，色泽参数 *a**值和 *b**值显著升高（$P<0.05$），失水率较 L400 PBAT-HP101 组增加 1.19%，腐烂率上升 7 倍。O_3 熏蒸联合 IE3900-MK10 气调包装虽气体调节能力相对较弱，但能有效激活鲜西洋参抗病和抗氧化代谢酶活性。在贮藏 120 d 后 PAL、SOD 和 CAT 活性分别提升了 13.39%，5.19%和 11.16%，但其代谢活动的增强也加速了代谢消耗，导致失水率增加 32.66%。相比之下，O_3 熏蒸联合 IE3900-MY、IE3900-L400 和 L400 PBAT-HP101 气调包装有效维持了袋内气体平衡，维持氧化代谢的动态平衡。其中，L400 PBAT-HP101 处理组保鲜效果最优，贮藏 120 d 后其表面霉变较少，外观新鲜，POD 活性提高 8.03%，PPO 活性降低了 15.34%，MDA 含量降低 20.08%，有效抑制了氧化褐变和细胞膜损伤。更为重要的是，该处理组对人参皂苷的保存效果显著，其稳定性是评价贮藏效果的关键指标，L400 PBAT-HP101 处理组对皂苷成分的保存效果最为显著。贮藏 120 d 后虽然 Rg1 含量降低 28.24%，但 Re 和 Rb1 含量分别提高 23.44%和 52.48%，表明该处理能选择性保留关键活性成分，最大程度维持鲜参的药用价值。此外，鲜西洋参的独特风味物质（如挥发性萜类化合物）和质地特征在保鲜过程中的变化规律同样值得关注。其活性成分的降解与细胞微观结构的破坏存在显著相关性。未来研究需进一步构建基于理化指标、感官特性和生物活性等多维度的鲜参品质评价体系，以更全面评估保鲜技术的综合效益。

参考文献

[1] 李家磊,卢淑雯,任传英,等.西洋参贮藏保鲜技术的研究进展[J].中国食物与营养,2015,21(11):27-31.

[2] 陈德经.西洋参保鲜过程中有效成分的变化[J].食品科学,2014,35(14):155-158.

[3] 鲁海玲.鲜参切片的杀菌工艺及贮藏货架期预测研究[D].长春:吉林大学,2022.

[4] 金银萍,乔思薇,潘蓉,等.西洋参果中氨基酸和糖类成分的测定研究[J].特产研究,2024,121:1-6.

[5] 李媛,王允,张国珍,等.不同贮藏处理对西洋参鲜根品质及成分的影响[J].中国中药杂志,2010,35(2):145-148.

[6] 章月红,李兆龙,岳巍,等.西洋参辐照效应的研究[J].核农学报,2014,28(6):1024-1029.

[7] JEON B S, LEE C Y. Shelf-life extension of american fresh ginseng by controlled atmosphere storage and modified atmosphere packaging [J]. Journal of Food Science, 1999, 64: 328-331.

[8] GONCALVE A A, LIRA SANTOS T C. Improving quality and shelf-life of whole chilled pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by ozone technology combined with modified atmosphere packaging [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 99: 568-575.

[9] CENGIA C, ÇIGDEM U P, MUHAMMED Y. The impact of ozone and equilibrium-modified atmosphere packaging on storage stability and health-promoting indicators of fresh Angelino plums [J]. Food Science and Technology International, 2026, 32(1): 104-118.

[10] 王雨行.基于冷激-臭氧-自发气调包装三效协同的辣椒采后贮藏保鲜关键技术研究[D].保定:河北农业大学,2022.

[11] 雷婷婷,殷诚,孙陟岩,等.气态臭氧结合微孔气调包装对杨梅品质和抗氧化性能的影响[J].食品科学,2023,44(13):112-119.

[12] LV J, BAI L, HAN X, 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.

[13] WU S, ZHANG Y, WANG M, et al. 1-Methylcyclopropene and bacillus treatment affects blueberry storage quality and antioxidant levels [J]. Horticulturae, 2024, 10(8): 859.

[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.

[15] 鲁海玲,徐艳阳.新型复合保鲜贮藏方法对鲜参切片品质的影响及货架期预测[J].食品工业科技,2024,45(4):282-289.

[16] 王刚.当归党参保鲜贮藏技术研究[D].兰州:甘肃农业大学,2015.

[17] 雷婷婷,殷诚,孙陟岩,等.气态臭氧结合微孔气调包装对杨梅品质和抗氧化性能的影响[J].食品科学,2023,44(13):112-119.

[18] POLA W, SUGAYA S, SRILAONG V, et al. Color appearance and physico-chemical changes in dried chili as affected by modified atmosphere packaging and temperature during storage [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021,45: e15967.

[19] QU P, MIN Z, KAI F, et al. Microporous modified atmosphere packaging to extend shelf life of fresh foods: A review [J]. Critical Reviews

in Food Science and Nutrition, 2022, 62: 51-65.

[20] PINTO L, PALMA A, CEFOLA M, et al. Effect of modified atmosphere packaging (MAP) and gaseous ozone pre-packaging treatment on the physico-chemical, microbiological and sensory quality of small berry fruit [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 26: 100573.

[21] MANCUSO C, SANTANGELO R. Panax ginseng and panax quinquefolius: from pharmacology to toxicology [J]. Food and Chemical Toxicology, 2017, 107: 362-72.

[22] 郝建勋.人参产品的质量评价及其影响因素[D].长春:吉林农业大学,2012.

[23] JIN X, LIU Z, WU W. POD, CAT and SOD enzyme activity of corn kernels as affected by low plasma pretreatment[J]. International Journal of Food Properties, 2022, 26: 38-48.

[24] RAJPUT VD, HARISH SINGH RK, VERMA KK, et al. Recent developments in enzymatic antioxidant defence mechanism in plants with special reference to abiotic stress [J]. Biology, 2021, 10(4): 267.

[25] PANG L, LOU X, XU X, 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.

[26] SHINGN 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.

[27] ZHANG N, HUANG X, GUO YL, et al. Evaluation of storage period of fresh ginseng for quality improvement of dried and red processed varieties [J]. Journal of Ginseng Research, 2022, 46: 290-295.

[28] ZHANG W, YU P, LIU W, et al. Mechanism of sodium nitroprusside regulating ginseng quality [J]. Scientific Reports, 2025, 15: 1562.

[29] OGUZKORKUT G, KUCUKMEHMETOGLU S, GUNES G. Effects of modified atmosphere packaging on physicochemical properties of fresh-cut '*Deveci*' pears [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46: e16002.

[30] KIM Y, LEE J W, JO I H, et al. Volatile compositions of panax ginseng and panax quinquifolium grown for different cultivation years [J]. Foods, 2022, 12(1): 136.

[31] FANG X, WANG M, ZHOU X, et al. Effects of growth years on ginsenoside biosynthesis of wild ginseng and cultivated ginseng [J]. BMC Genomics, 2022, 23: 325.

[32] HU W Z, JIANG A L, QI HP. Physiological behavior and quality of fresh ginseng stored in modified atmospheres generated by several package films [J]. Food Science and Technology, 2014, 51: 3862-3869.