

段慧敏, 彭梦菲, 张旭薪, 等. 高 CO₂ 短激处理对油菜护绿和贮藏品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(2): 308–316. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030069

DUAN Huimin, PENG Mengfei, ZHANG Xuxin, et al. Effects of Short-time High Concentration CO₂ Treatment on Keeping Green and the Physiological Quality of Oilseed Rape during Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(2): 308–316. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030069

· 贮运保鲜 ·

高 CO₂ 短激处理对油菜护绿和贮藏品质的影响

段慧敏¹, 彭梦菲¹, 张旭薪¹, 代理响¹, 郑家轩^{1,2}, 刘霞^{1,2,*}

(1.天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457;

2.天津鲜食原品生物科技有限公司, 天津 300450)

摘要: 气体短激诱导果蔬抗性, 延长其保鲜期并提高贮后品质。为探究高二氧化碳 (Carbon dioxide, CO₂) 短激对油菜护绿保鲜品质的影响, 本文以油菜为研究对象, 分析了 50%、70%、90% 浓度的 CO₂ 气体短激处理油菜 30 min, 于 4±0.5 °C 条件下贮藏 20 d 期间油菜色泽、黄化指数、叶绿素含量、呼吸强度、乙烯释放量、多酚氧化酶 (Polyphenol oxidase, PPO) 和过氧化物酶 (Phenylalanine ammoniolyase, POD)、失重率、硬度、V_C 含量、可溶性固形物 (Soluble solids content, SSC) 和感官品质的变化规律。研究结果表明, 与对照组相比, 随着贮藏时间的增加, 高 CO₂ 短激处理组均能够有效维持油菜的外观, 延缓黄化现象的发生, 叶绿素含量显著高于对照组 ($P<0.05$), 黄化指数显著低于对照组 ($P<0.05$), 其中 90%CO₂ 处理组的效果最优, 护绿效果明显。贮藏 20 d 时, 50%CO₂、70%CO₂、90%CO₂ 的总叶绿素含量分别比对照组高 10.85%、17.46%、25.08%。同时, 高 CO₂ 短激处理减弱了贮藏期间油菜的呼吸强度和乙烯释放量, 对 PPO 和 POD 活性有明显的抑制作用, 显著延缓失重率升高和硬度的下降, 保持较高的 V_C 含量和 SSC, 极大地提高了感官品质得分。由此可知, 高浓度 CO₂ 短激处理能够更好地维持油菜的贮藏品质, 与对照组在室温下较短 (2~3 d) 的货架期相比, 延长贮藏期至 20 d, 为油菜护绿保鲜技术的开发提供了理论依据。

关键词: 高 CO₂, 短激, 油菜, 护绿, 贮藏, 品质

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)02-0308-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030069



本文网刊:

Effects of Short-time High Concentration CO₂ Treatment on Keeping Green and the Physiological Quality of Oilseed Rape during Storage

DUAN Huimin¹, PENG Mengfei¹, ZHANG Xuxin¹, DAI Lixiang¹, ZHENG Jiakuan^{1,2}, LIU Xia^{1,2,*}

(1. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;

2. Tianjin Fresh Food Original Biological Technology Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: Short-time gas stimulation could induce resistance in fruits and vegetables, prolonging their shelf life and improving their quality during storage. To investigate the effect of high concentration (50%, 70%, 90%) carbon dioxide (CO₂) short stimulation (30 min) on keeping green color and preservative quality, the oilseed rape color, yellowing index, chlorophyll content, respiratory intensity, ethylene release, polyphenol oxidase (PPO) peroxidase (POD), weight loss rate, hardness, vitamin C (V_C) content, soluble solids content (SSC) and sensory quality were investigated during 20 d storage at 4±0.5 °C. Results showed that the high-concentration & short-time CO₂ treatment could effectively maintain the overall appearance quality of oilseed rape, delayed the occurrence of yellowing, increased chlorophyll content ($P<0.05$), and inhibited the increase of the yellowing index ($P<0.05$), among which, 90% CO₂ treatment group showed the best effect. On the 20 d of storage, the total chlorophyll content of 50% CO₂, 70% CO₂, and 90% CO₂ treatment groups was 10.85%,

收稿日期: 2024-03-07

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发项目 (2020BBF03014)。

作者简介: 段慧敏 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品保鲜物流与加工, E-mail: 18235347361@163.com。

* 通信作者: 刘霞 (1976-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 农产品保鲜物流与加工, E-mail: liuxia831930@163.com。

17.46%, and 25.08% higher than the control group, respectively. Meanwhile, the CO₂ stimulation treatment significantly weakened the respiratory intensity and ethylene release of oilseed rape during storage and inhibited the activity of PPO and POD. Furthermore, short-time CO₂ treatment delayed the increase of weight loss rate and the decrease of hardness, maintained high V_C content and SSC and greatly improved the score of sensory quality. On the whole, the 90% CO₂ treatment possessed the best and most obvious effect for oilseed rape greening, extending the storage period to 20 d compared to the shorter shelf life (2~3 d) at room temperature. The study provides a theoretical basis for the development of oilseed rape green preservation technology.

Key words: high concentration CO₂; short-time stimulation; oilseed rape; keep green; storage; quality

油菜(*Brassica chinensis* var. *chinensis*), 又称油白菜、青菜等, 原产于我国, 属十字花科芸薹属芸薹种白菜亚种的一个变种^[1], 是我国营养价值最丰富的常见绿叶蔬菜之一, 内含维生素、矿物质、纤维素、黄酮、多酚等营养成分^[2], 具有良好的抗氧化作用, 可以增强身体免疫力, 促进细胞的新陈代谢, 具有抗衰老、预防心脑血管等疾病的功效^[3]。油菜叶片表面积较大, 组织脆嫩, 采后呼吸、蒸腾作用较为剧烈, 产生大量呼吸热, 并伴随着失水、黄化、萎焉现象的发生。同时, 贮运过程易发生机械损伤、易受微生物感染而腐烂^[4]。因此, 虽然油菜可全年供应, 但其在室温下较短(2~3 d)的货架期常使其商品价值降低^[5]。

高浓度 CO₂ 连续处理是一种安全、经济、广泛应用的果蔬采后保鲜方法^[6]。对于呼吸跃变型果蔬, CO₂ 处理可通过改变酶的活性降低果实的呼吸速率和乙烯释放量等, 延长果实的贮藏期^[7]。例如, 高浓度 CO₂ 连续处理可延缓西兰花在 2 °C 贮藏过程中的黄化进程、抑制其叶绿素降解, 20% 浓度的 CO₂ 连续处理草莓果实可改善其贮藏品质^[8-9]。然而, 不当的高浓度 CO₂ 连续处理果蔬常发生气体伤害, 而且不同种类、品种果蔬伤害阈值不同。因此, 由于连续 CO₂ 处理技术难以掌握, 区别于连续处理的脉冲、短激等技术应运而生^[9-13]。

近期研究表明, CO₂ 脉冲可控气氛能有效降低鲜切苹果的膜脂过氧化程度和褐变, 高浓度 CO₂ 短时处理可有效提高薄皮葡萄保鲜品质^[14-15]。众所周知, 高浓度 CO₂ 短时处理对于去除柿子涩味能够起到显著作用, 并可通过增强活性氧清除酶活性, 保持细胞膜完整性来缓解果实冷害现象^[16-17]。Capotorto 等^[18]采用 10%CO₂ 处理鲜切洋蓟 48 h, 降低了其呼吸速率、褐变指数, 总酚含量和抗氧化活性, 最大程度保存新鲜样品挥发性特征, 降低营养物质的降解。然而, 高 CO₂ 短激处理对蔬菜护绿保鲜的影响研究却鲜有报道, 研发适宜的气体短激技术来保持油菜等绿叶菜的色泽、品质和减少采后损失意义重大。

因此, 本研究以油菜为研究对象, 探明高 CO₂ 短激处理对整颗油菜采后护绿等贮藏生理生化指标的影响, 以期为高 CO₂ 短激护绿保鲜奠定理论基础、提供技术手段。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

“五月慢”油菜 购于天津市滨海新区金元宝农

贸市场, 当天采收后由供应商 2 h 内运送至实验室, 挑选大小一致、无黄化、无病虫害、无化学损伤的新鲜油菜作为实验材料; CO₂ 气体 纯度 99.99%, 天津市军粮城常福气体有限公司; 丙酮 分析纯, 天津渤化化学试剂有限公司; 醋酸钠 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 邻苯二酚、愈创木酚 分析纯, 南京市光复化工研究所; 聚乙二醇 6000(分析纯)、曲拉通 X-100(生物技术级) 上海麦克林生化科技有限公司; 草酸 分析纯, 天津市津科精细化工研究所; 2,6-二氯酚靛酚 97% 高纯, 上海源叶生物科技有限公司。

Check Point 3 气体成分分析仪 丹麦 Damsensor 公司; TGL-16M 高速冷冻离心机 上海卢湘仪离心机仪器有限公司; GXH-3051H 果蔬呼吸测定仪 北京均方理化科技有限公司; Agilent 19091J-413 气相色谱仪 安捷伦科技有限公司; EPOCH-1908028 酶标仪 美国伯腾仪器有限公司; WR-18 精密色差仪 深圳市时代之峰科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 经过前期预实验确定 CO₂ 浓度为 50%、70%、90%。将选定的油菜在 4±0.5 °C 条件下预冷 24 h 后放入气调罐中, 先用 N₂ 排出罐中的杂质气体, 随后充入 CO₂ 气体, 用气体成分分析仪随时监测气体浓度, 分别将样品于 50%、70%、90% 的 CO₂ 气体浓度环境中放置 30 min, 空白对照组浸泡于充满空气的气调罐中。每组样品三个重复, 每次重复 5 kg, 气调后所有样品于 4±0.5 °C 下贮藏 20 d, 每 4 d 进行一次指标测定。

1.2.2 指标测定及方法

1.2.2.1 色泽的测定 用精密色差仪测定油菜色差, 随机从每个处理中选择 10 棵油菜, 选取从外到内第二层叶片中上部相对称的两个点, 避开叶片主动脉和边缘, 记录 L*、a*、b* 值, 按下列公式计算 ΔE。

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

1.2.2.2 黄化指数的测定 参照魏宝东等^[1]的测定方法, 根据油菜叶片黄化面积的大小, 将黄化面积分为 4 级。

$$\text{黄化指数}(\%) = \frac{\sum \text{黄化级别} \times \text{该黄化的叶片数}}{\text{总叶片数} \times 4} \times 100$$

1.2.2.3 叶绿素含量的测定 参照曹建康^[19]的测定

方法,稍作修改。取 1.0 g 油菜样品放入研钵中,加入少量石英砂、碳酸钙和 10.0 mL 80% 丙酮研磨,研磨后移入离心管中,在 4 ℃、10000×g 条件下离心 10 min,收集上清液。以 80% 丙酮参比调零,测定上清液在 663、645、652 nm 处的吸光度值。

$$\text{叶绿素含量} = \frac{\rho \times V}{m \times 1000}$$

式中: ρ 为由 Arnon 公式得出的叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素的质量浓度,mg/L; V 为样品提取液总体积,mL; m 为样品质量,g。

1.2.2.4 呼吸强度的测定 参照 Du 等^[14]的测定方法,稍作修改。采用果蔬呼吸测定仪测定。

$$\text{呼吸强度}(\text{CO}_2 \cdot \text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})) = \frac{(W_2 - W_1) \times V \times M \times 1000}{V_0 \times m \times t}$$

式中: W_1 为空白实验呼吸罐中 CO_2 总量,%; W_2 为测定后呼吸罐中 CO_2 总量,%; V 为呼吸罐的总体积,L; M 为 CO_2 的摩尔质量,g/mol; V_0 为测定温度下 CO_2 摩尔体积,L/mol; m 为测定果蔬的质量,kg; t 为测定时果蔬呼吸时间,h。

1.2.2.5 乙烯释放量的测定 参照王迪^[20]的测定方法,稍作修改。油菜在样品瓶内密闭 1 h,用进样器从带有橡胶塞的容器顶空取 1.0 mL 气体,在气相色谱仪上测定。条件设置参数为:载气 N_2 流量:25 mL/min;燃气 H_2 流量:30 mL/min;助燃气体空气流量:300 mL/min;柱箱温度是 60 ℃;加热器温度是 240 ℃,单位以 $\mu\text{L}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ 表示。

1.2.2.6 PPO 及 POD 活性的测定 参照曹建康^[19]的测定方法,稍作修改。称取 3.0 g 油菜样品加入 3.0 mL 预冷过的提取缓冲液置于研钵中,冰浴条件下研磨成匀浆,于 4 ℃、10000×g 条件下离心 30 min,收集上清液为酶提取液,低温条件下备用。

PPO 采用邻苯二酚比色法进行测定。在试管中依次加入 4.0 mL 50 mmol/L pH5.5 乙酸-乙酸钠溶液和 1.0 mL 50 mmol/L 邻苯二酚溶液,最后加入 100 μL 的酶提取液。以蒸馏水为参比,记录反应体系开始 15 s 在波长 420 nm 处的吸光度值即为初始值,连续测定,每隔 1 min 记录一次,至少获得 6 个点的的变化。以每克油菜样品每分钟吸光度变化值增加 1 为 1 个活性单位,单位为 U/g。

POD 采用愈创木酚比色法测定。在试管中加入 3.0 mL 25 mmol/L 愈创木酚溶液和 0.1 mL 酶提取液,迅速加入 200 μL 0.5 mmol/L H_2O_2 溶液启动反应。以蒸馏水为参比,反应 15 s 时开始记录反应体系在 470 nm 处的初始波长值,每隔 1 min 记录一次,连续测定至少 6 个点。以每克油菜样品每分钟吸光度变化值增加 1 时为 1 个过氧化物酶活性单位,单位为 U/g。

1.2.2.7 失重率的测定 参照曹建康^[19]的测定方法。以每个处理组中的重量和初始重量之差与初始重量的比值计算。

$$\text{失重率}(\%) = \frac{\text{贮藏前质量} - \text{贮藏后质量}}{\text{贮藏前质量}} \times 100$$

1.2.2.8 硬度的测定 硬度的测定利用质构仪来进行测定,选取单刀剪切模式(HDP/BSK 探头),测定参数设置为:压缩百分比为 60%、测试速度为 30 mm/s、测试前、后速度均为 40 mm/s,压力为 5.0 g。硬度以剪切油菜叶片的最大力表示,单位为 g。

1.2.2.9 V_C 含量的测定 参考曹建康^[19]的 2,6-二氯酚靛酚滴定法。称取 10.0 g 油菜样品加入草酸溶液(20.0 g/L)于研钵中研磨后,转入容量瓶中,定容至 100 mL。静置 10 min 后,在三角瓶中加入 10.0 mL 上清液,用已标定的 2,6-二氯酚靛酚溶液滴定并记录其用量(草酸溶液作为空白), V_C 含量计算公式如下:

$$V_C \text{含量}(\text{mg}/100 \text{g}) = \frac{V \times (V_1 - V_0) \times \rho}{V_s \times m} \times 100$$

式中: V_1 为样品滴定消耗的染液体积,mL; V_0 为空白滴定消耗的染液体积,mL; ρ 为 1 mL 染液溶液相当于 V_C 的质量,mg/mL; V_s 为滴定时所取样品提取液体积,mL; V 为样品提取液总体积,mL; m 为样品质量,g。

1.2.2.10 可溶性固形物的测定 可溶性固形物利用数显糖度计来进行测定,每次用之前采用蒸馏水润洗调零,并用擦镜纸擦干。随机选取油菜从外而内第二层叶片研磨并用纱布过滤,滴加在检测镜上进行测定,读取数值,以质量分数(%)表示。

1.2.2.11 感官评价 参照吴洋洋^[21]的测定方法,选择 8 名食品专业人员组成感官评价小组,按照色泽、口感、滋味、形态、质地五个方面对油菜进行感官评价(表 1)。

表 1 油菜感官评价标准
Table 1 Sensory evaluation of oilseed rape

| 评分项目 | 评价标准 | 得分(分) |
|------|--------------------|-------|
| 色泽 | 叶片呈鲜亮的绿色,均匀一致 | 8~10 |
| | 叶片呈现较亮的绿色,较均匀 | 5~7 |
| | 叶片不呈绿色,颜色偏黄 | 1~4 |
| 口感 | 清脆适口,叶片多汁,无粗糙感 | 8~10 |
| | 较清脆适口,叶片较多汁,无粗糙感 | 5~7 |
| | 不清脆适口,叶片少汁,有粗糙感 | 1~4 |
| 滋味 | 柔和苦味,有油菜清香味 | 8~10 |
| | 滋味偏苦,油菜清香味偏弱 | 5~7 |
| | 具有严重苦味,无油菜清香味 | 1~4 |
| 形态 | 叶片坚挺、平整,无萎焉、腐烂 | 8~10 |
| | 叶片较坚挺、平整,出现少量萎焉、腐烂 | 5~7 |
| | 叶片萎焉,卷曲,腐烂现象严重 | 1~4 |
| 质地 | 质地较硬 | 8~10 |
| | 质地略微变软 | 5~7 |
| | 质地柔软 | 1~4 |

1.3 数据处理

所有的指标测定均设置三个平行,采用 Excel

2010 和 SPSS 26.0 软件对原始数据进行处理和方差分析, 采用 Duncan 检验进行方差显著性分析, 显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。采用 GraphPad Prism 8.0.2 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同浓度高 CO₂ 短激对油菜外观及色泽的影响

油菜的色泽是最直观的油菜新鲜度评价指标, 也是消费者购买时重要的衡量指标^[22]。图 1 显示了不同浓度高 CO₂ 短激对油菜贮藏期外观及色泽的影响。从外观表型可见, 贮藏前 8 d 对照组和各处理组均没有发生黄化; 贮藏 12 d 时对照组开始黄化, 而经高浓度 CO₂ 短激的处理组则未发生黄化; 贮藏 20 d 时对照组明显黄化, 失去商品价值, 而 70% 与 90% 高浓度 CO₂ 短激组则均有较好的商品价值(图 1A)。可见, 经过高 CO₂ 短激处理的油菜延缓了黄化进程, 其中 90%CO₂ 处理的油菜绿色保持最为明显。

使用色差仪分析油菜贮藏期色泽变化表明, 代表黄蓝水平的 b^* 值(越大则越偏向于黄色, 黄化现象越严重)随贮藏时间的延长, b^* 值总体呈上升趋势, 与外观视觉观察一致, 贮藏期间 90%CO₂ 组的 b^* 值始终显著低于对照组($P < 0.05$), 贮藏 20 d 时, 70%CO₂ 和 90%CO₂ 处理组的 b^* 值分别仅为对照组的 82%、

75%(图 1B)。颜色变化的指数 ΔE 可从总体上评价油菜贮藏期间色泽变化情况^[23]。由图 1C 所示, 随着贮藏时间的延长, ΔE 逐渐增大, 与外观变化一致, 贮藏前 8 d 各组之间差异不显著($P > 0.05$), 从 12 d 开始发现明显的色泽差异。贮藏 20 d 时, 70%CO₂ 和 90%CO₂ 处理组色泽总体变化显著低于对照组($P < 0.05$), 分别降低了 17.51%、27.91%。

总之, 随着贮藏时间的延长, 油菜的色泽参数逐渐升高, 逐渐变暗并失去绿色, 高 CO₂ 短激处理可有效延缓外观色泽的变化, 90%CO₂ 处理的效果最明显, ΔE 变化最小, 与外观现象一致。

2.2 不同浓度高 CO₂ 短激对油菜黄化指数及叶绿素含量的影响

黄化是新鲜的绿色蔬菜采后品质劣变的重要表现, 这种“黄化现象”与叶绿素降解密切相关, 常用黄化指数来衡量其黄化的程度^[24-25]。由图 2A 可知, 随着贮藏时间的延长, 油菜贮藏期黄化指数呈现逐渐上升趋势, 贮藏前 4 d 油菜黄化现象不明显, 各组之间差异不显著($P > 0.05$), 4 d 后 70% 与 90% 高 CO₂ 短激处理组的黄化指数显著低于对照组($P < 0.05$)。贮藏 12~16 d 时, 对照组的黄化指数迅速提高, 至贮藏 20 d 时, 50%CO₂、70%CO₂、90%CO₂ 处理组的

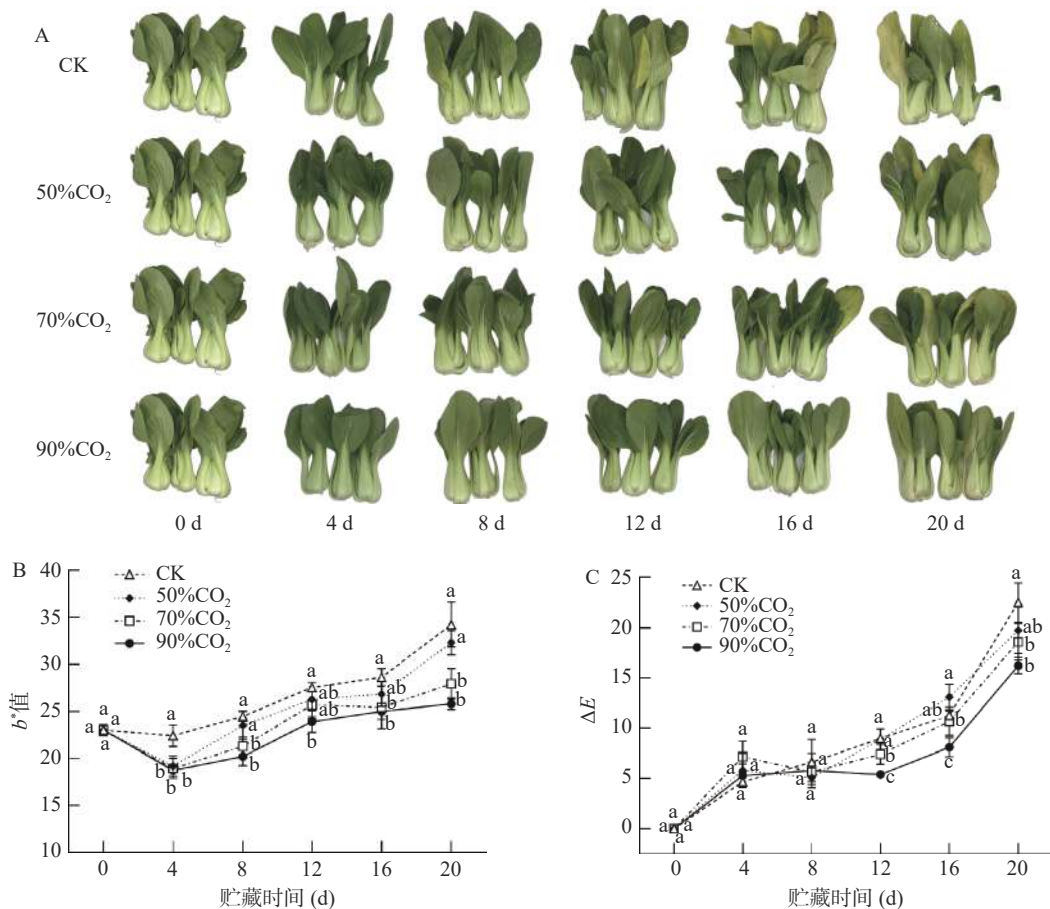


图 1 贮藏过程中不同浓度高 CO₂ 短激对油菜外观及色泽的影响

Fig.1 Effects of different concentrations of high carbon dioxide short-time stimulation on appearance and color of fresh oilseed rape during storage

注: 图 A、B、C 分别为外观品质、 b^* 值、 ΔE 值; 不同小写字母表示同一贮藏时间各组间差异显著, $P < 0.05$, 图 2~图 5 同。

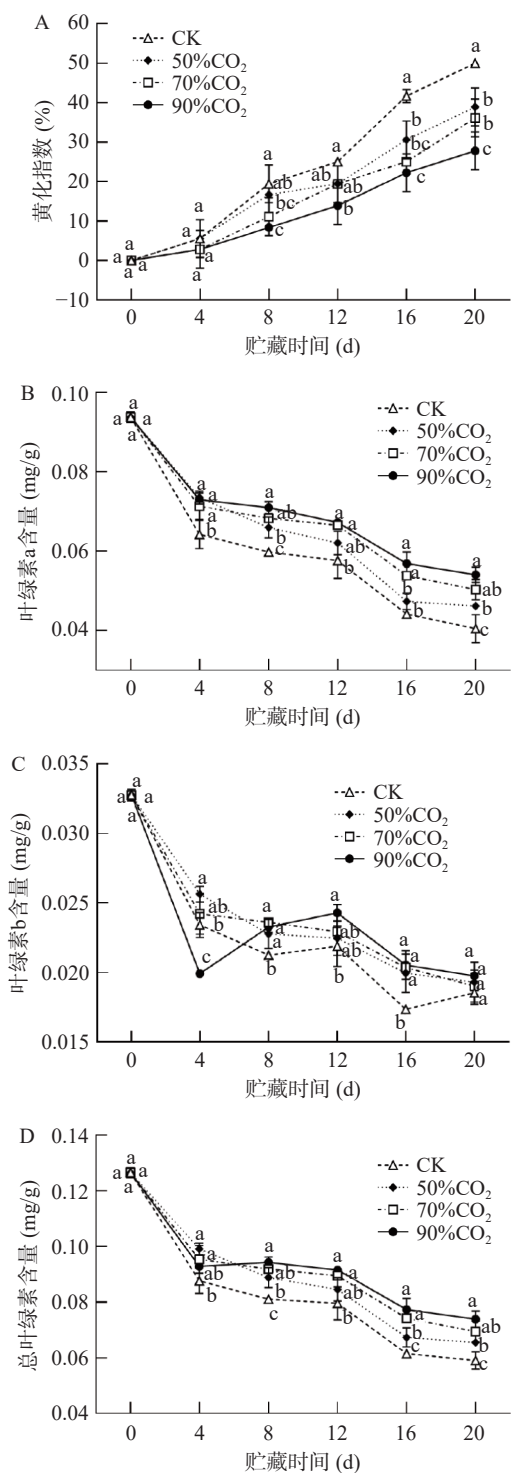


图 2 贮藏过程中不同浓度高 CO₂ 短激对油菜黄化指数(A)及叶绿素含量(B、C、D)的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of high carbon dioxide short-time stimulation on yellowing index (A) and chlorophyll content (B, C, D) of fresh oilseed rape during storage

黄化指数分别较对照组降低了 22.22%、27.78%、44.44%。由此表明, CO₂ 处理能够明显延缓油菜黄化进程, 其中, 90%CO₂ 处理组的效果最为显著, 可有效延缓油菜变黄的进程, 有效延长油菜的贮藏期。

叶绿素是绿叶菜色泽展现的主要色素^[26], 参与光合作用, 叶绿素含量的下降会直接影响油菜的外观品质, 叶片颜色由绿转黄, 使油菜的新鲜度下降^[27]。

由图 2B~图 2D 可知, 油菜的总叶绿素、叶绿素 a、叶绿素 b 含量随着贮藏时间的延长而降低, 贮藏至 20 d 时, 经过 CO₂ 处理的油菜总叶绿素、叶绿素 a 含量均显著高于对照组 ($P < 0.05$), 50%CO₂、70%CO₂、90%CO₂ 的总叶绿素含量分别较对照组高 10.85%、17.46%、25.08%; 叶绿素 a 含量分别较对照组高 14.07%、24.20%、33.58%; 叶绿素 b 含量分别较对照组高 4.32%、2.70%、7.03%。叶绿素在前 4 d 降解速度较快, 但在色泽上并未体现, 可能是由于油菜前 4 d 叶绿素总含量较高, 没有在外观与色泽指数上体现。已有研究表明较低浓度 CO₂ 连续处理对西兰花^[9]、蕹菜^[28]、莲皮^[29] 等具有抑制叶绿素降解的作用, 可见无论较低浓度连续处理还是较高浓度短激均可抑制叶绿素降解, 起到一定护绿作用, 延缓油菜等结叶菜的黄化, CO₂ 短激处理中, 90%CO₂ 浓度较 70%、50% 浓度的效果更佳。这可能是因为在高浓度 CO₂ 短激作用下, 启动了油菜的自我保护机制, 与衰老相关的叶绿素降解代谢被抑制, 相关机制有待进一步深入研究^[30]。

2.3 不同浓度高 CO₂ 短激对油菜呼吸强度和乙烯释放量的影响

采后果蔬失去了营养供应, 生命活动主要以分解代谢为主, 呼吸强度反应了油菜本身消耗营养物质的快慢, 是直接影响油菜耐贮性的重要因素^[31-32]。图 3A 显示, 随着贮藏时间的延长, 呼吸强度整体呈现先升后降的趋势, 为呼吸跃变型果蔬。油菜贮藏 4 d, 各处理组呼吸强度较对照组表现出减弱的趋势。在贮藏第 8 d 时陡然上升出现呼吸峰值, 90% CO₂ 处理组的呼吸强度显著低于对照组 ($P < 0.05$), 高浓度 CO₂ 短激只降低了各处理组的呼吸强度, 并没有影响呼吸高峰产生的时间。呼吸峰值的出现是植物开始衰老的表现, 随后下降的原因可能是因为油菜机体的能量逐渐供应不足^[33], 经 CO₂ 处理的油菜更能维持较低的呼吸强度, 减少自身消耗和延缓油菜衰老进程, 延长油菜的贮藏期。

乙烯是一种诱导果实成熟、促进果实衰老的植物内源性激素, 调控果蔬成熟过程中所发生的生理生化变化, 是果蔬成熟衰老的关键调控因子, 乙烯释放量越大, 果实成熟的越快^[32]。由图 3B 可知, 油菜在贮藏过程中乙烯释放量的变化与呼吸强度呈相似趋势, 这可能是由于油菜的呼吸作用受到乙烯的影响。贮藏 4 d 时乙烯释放量减弱, 呼吸高峰和乙烯释放高峰均在第 8 d 出现, 50%CO₂、70%CO₂、90%CO₂ 处理组乙烯释放量峰值较对照组降低 27.47%、12.82%、32.97%; 8 d 后不断下降, 20 d 时又缓慢上升。CO₂ 短激处理减少了油菜的内源乙烯释放量, 与对照组相比差异显著 ($P < 0.05$), 其中 90%CO₂ 处理组的乙烯释放量明显低于其他两个处理组。已有研究表明 CO₂ 气调持续处理对鲜切梨、澳洲青苹等具有有效抑制乙烯释放量的作用^[20,34], 高 CO₂ 短激

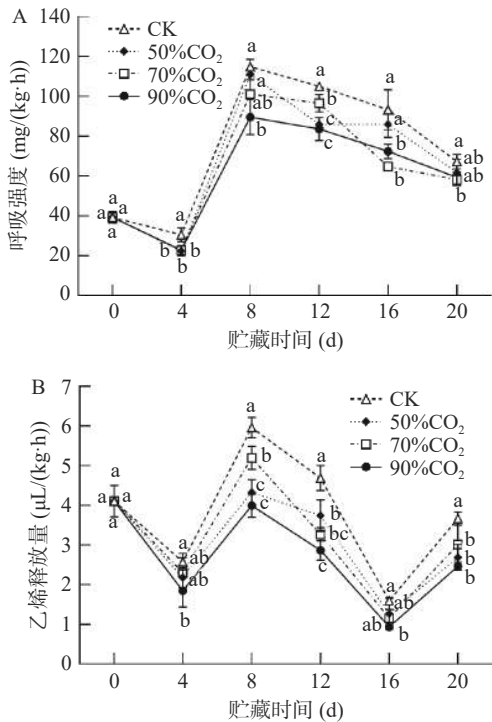


图 3 贮藏过程中不同浓度高 CO₂ 短激对油菜呼吸强度(A)及乙烯释放量(B)的影响

Fig.3 Effects of different concentrations of high carbon dioxide short-time stimulation on respiratory intensity (A) and ethylene release (B) of fresh oilseed rape during storage

也可延缓乙烯释放, 延长油菜的贮藏期。CO₂ 可能作为一种乙烯抑制剂, 抑制乙烯的生成同时影响其信号传导。

2.4 不同浓度高 CO₂ 短激对油菜 PPO 及 POD 活性的影响

PPO 参与细胞壁中木质素的合成, 会对光合速率、叶绿素含量和油菜叶片黄化产生影响^[35-36]。图 4A 得出, PPO 活性随着贮藏时间的延长呈现上升趋势, 贮藏前 4 d 各组之间没有显著差异, 贮藏第 8 d, 70% 和 90%CO₂ 处理组较对照组显著降低, 贮藏第 12~16 d, 处理组较对照组均呈现显著降低趋势 ($P < 0.05$)。贮藏 20 d 时, 50%CO₂、70%CO₂、90%CO₂ 处理组 PPO 活性分别为 0.2172、0.2107、0.1972 U/g, 比对照组降低了 13.50%、16.09%、21.47%。POD 是存在于油菜中活性较高的酶, 与油菜的呼吸作用、黄化密切相关^[37]。如图 4B 所示, 采后油菜在贮藏期内的 POD 整体呈现先上升后下降的趋势, 对照组在第 12 d 出现酶活峰值 (4.16 U/g), 50%CO₂、70%CO₂ 和 90%CO₂ 处理组在第 16 d 出现峰值, 峰值分别为 4.68、3.71、3.63 U/g。贮藏 20 d 时, 各处理组和对照组之间存在显著差异 ($P < 0.05$), 50%CO₂、70%CO₂ 和 90%CO₂ 处理组的 POD 活性分别为: 3.40、2.15、1.58 U/g, 较对照组峰值降低 21.86%、22.94%、43.37%。

总体来看, 不同浓度的 CO₂ 处理均能不同程度上抑制 POD 和 PPO 的活性, 90%CO₂ 处理组的油菜

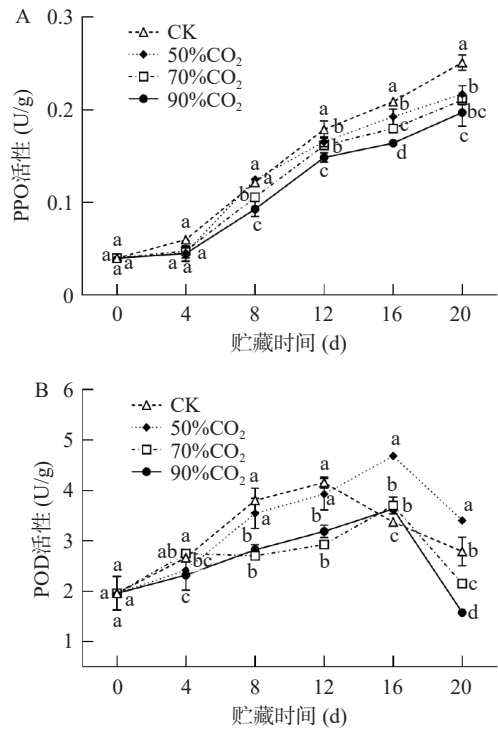


图 4 贮藏过程中不同浓度高 CO₂ 短激对油菜 PPO(A)及 POD(B)活性的影响

Fig.4 Effects of different concentrations of high carbon dioxide short-time stimulation on PPO (A) and POD (B) activity of fresh oilseed rape during storage

抑制效果最好。类似的结果也在 Tian 等^[38]、Song 等^[39] 的 CO₂ 持续气调处理研究中得到验证, 高浓度 CO₂ 短激与较低浓度持续处理均可有效抑制油菜 PPO、POD 活性的上升, 延缓油菜采后氧化衰老。

2.5 不同浓度高 CO₂ 短激对油菜失重率、硬度、V_C 及 SSC 的影响

果蔬贮藏过程中往往由于蒸腾失水和呼吸作用造成失重率上升, 使其发生失水萎蔫和食用品质的下降^[40]。油菜贮藏 0 d 和 4 d 时, 各处理组之间没有显著差异 ($P > 0.05$), 在贮藏 8 d 时, 与对照组相比, 70%CO₂ 组和 90%CO₂ 组的失重率出现了小幅提高, 而到贮藏 12~16 d 时, 高浓度 CO₂ 处理显著抑制了失重率的升高 ($P < 0.05$)。贮藏 20 d 时, 50%CO₂、70%CO₂、90%CO₂ 处理组的失重率分别为 8.45%、7.61%、6.28%, 较对照组降低了 12.09%、20.78%、34.65%(图 5A)。同时, 对于非木质化果蔬来讲, 果蔬在贮藏过程中硬度往往也随贮藏时间延长而不断下降^[41]。由图 5B 可见, 油菜贮藏 20 d 后, 对照组硬度由最初的 2751.73 g 下降至 1455.49 g, 50%CO₂ 和 70%CO₂ 处理组硬度变化差异不显著 ($P > 0.05$), 分别下降至 1747.18 g 和 1892.67 g, 而 90%CO₂ 处理组硬度则仅下降至 1996.95 g, 较对照高出了 36.51%。可见, 高 CO₂ 短激处理可显著抑制失重率和硬度的下降速率, 90%CO₂ 处理组对油菜失重率和硬度的控制效果最佳, 有效抑制了油菜的失水萎蔫和脆度, 延缓了油菜的衰老软化。

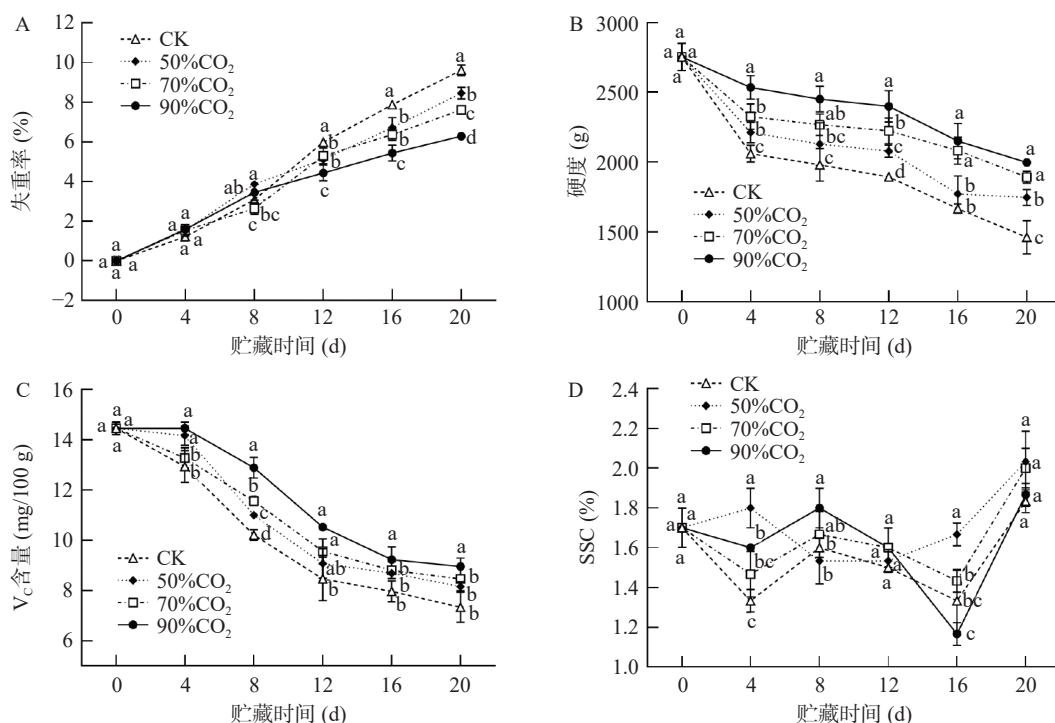


图5 贮藏过程中不同浓度高CO₂短激对油菜失重率(A)、硬度(B)、V_C含量(C)及SSC(D)的影响

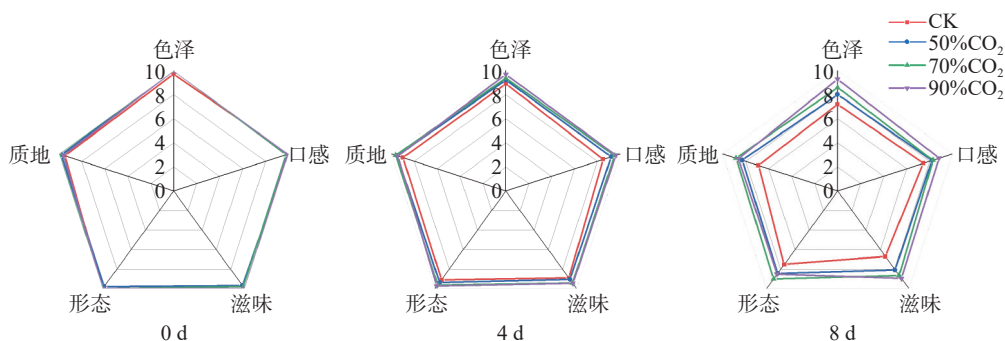
Fig.5 Effects of different concentrations of high carbon dioxide short-time stimulation on loss weight (A), hardness (B), V_C content (C), SSC (D) of fresh oilseed rape during storage

对于果蔬重要的营养指标V_C和可溶性固形物来讲,一般其含量会随贮藏时间的延长而下降。图5C显示,油菜贮藏0 d时V_C含量为14.46 mg/100 g,到贮藏8~12 d时V_C含量降幅最快,而此时50%CO₂、70%CO₂、90%CO₂短激处理组的V_C含量则分别保持在9.08、9.56和10.53 mg/100 g,与贮藏初期相比,损失率为37.21%、33.86%、27.20%,而对照组则高达41.52%;贮藏20 d时,3组高CO₂短激组的V_C含量为:8.15、8.46、8.96 mg/100 g,分别较对照组(7.33 mg/100 g)提高11.19%、15.38%、22.13%。然而,油菜贮藏过程可溶性固形物含量随着贮藏时间的延长呈波动变化趋势,造成油菜SSC含量扰动的原因可能是贮藏过程中失水量不同,造成了SSC主要成分浓度变化不均,但就整体趋势而言,高CO₂短激处理组在贮藏期有效维持了油菜SSC含量(图5D)。因此,本研究结果表明,高CO₂短激处理有利于油菜果实的贮藏,维持更高的营养价值。

总体来看,高CO₂短激能够延缓失重率的上升,减缓硬度下降速率,保持较高的营养成分,提高油菜的耐藏性能,其中90%CO₂处理的效果最好。

2.6 不同浓度高CO₂短激对油菜感官评价的影响

为进一步评定高浓度CO₂短激对油菜贮藏品质的影响,综合油菜的色泽、风味、口感、质地的感官评价分析见图6。由图6可知,贮藏前4 d,各处理组对油菜感官评价的总体得分差异较小,颜色鲜亮,叶片平整,口感清脆适口;贮藏8 d时,对照组感官品质下降严重,各高浓度CO₂短激处理组的感官评分相接近;贮藏12 d时,对照组油菜叶片亮度下降明显,有黄色斑点开始出现,清香味减弱,高CO₂短激处理组仍然保持较好的色泽和风味,感官评分与对照组出现显著差异(P<0.05);贮藏16 d时,对照组各项指标在4.00分左右,高CO₂短激处理组各项感官评价指标保持在5.50分以上,色泽、口感、滋味、形态、质地指标明显优于对照组;贮藏20 d时,对照组基本失去其商品价值评分低于4分,而各处理组评分在



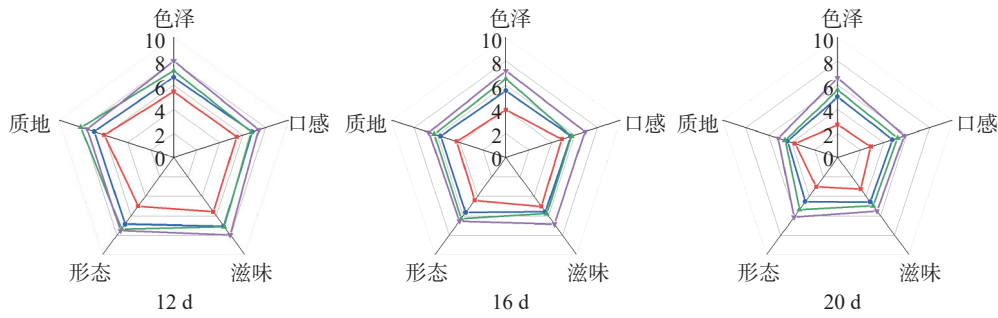
图 6 贮藏过程中不同浓度高 CO₂ 短激对油菜感官品质的影响

Fig.6 Effects of different concentrations of high carbon dioxide short-time stimulation on sensory quality of fresh oilseed rape during storage

4~7 之间, 其中 90%CO₂ 处理组的平均得分达 5.85 分, 综合保鲜效果最佳, 有效延长了油菜的货架期。

3 结论

本研究使用高浓度 CO₂ 短激作为油菜贮藏前诱抗预处理手段, 作为一种物理保鲜方式, 拥有无毒无害, 无残留, 不会对环境造成污染等优点。通过对不同浓度 CO₂ 短激 (50%CO₂、70%CO₂、90%CO₂) 处理效果分析, 结果表明, 高浓度 CO₂ 短激处理能够提高油菜的耐贮性, 增强油菜的耐贮藏能力, 有效延缓油菜采后黄化和失水萎蔫, 其中 90%CO₂ 处理的效果最为显著, 可有效延长其货架期、维持更好的品质。

总之, 高浓度 CO₂ 短激工艺为绿叶菜等易腐、易黄化、易受微生物侵染果蔬的保鲜提供了安全有效的保鲜新思路。但目前高 CO₂ 短激工艺对延缓绿叶菜黄化的作用机制尚不清楚, 下一步将继续探索该工艺对叶绿素降解途径的研究。

© The Author(s) 2025. 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] 魏宝东, 赵帅, 程顺昌, 等. 不同浓度 CO₂ 对油菜常温下贮藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(8): 212-215. [WEI B D, ZHAO S, CHENG S C, et al. Effect of different concentrations of CO₂ on storage quality of oilseed rape at room temperature[J]. Food and Fermentation Industry, 2013, 39(8): 212-215.]
- [2] AN R H, LIU X S, LUO S F, et al. Taxifolin delays the degradation of chlorophyll in pakchoi (*Brassica rapa* L. subsp. chinensis) by regulating the ascorbate-glutathione cycle[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 191: 111982.
- [3] AL UBEED H M S, WILLS R B H, BOWYER M C, et al. Comparison of hydrogen sulphide with 1-methylcyclopropene (1-MCP) to inhibit senescence of the leafy vegetable, pak choy[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 137: 129-133.
- [4] SATO T, SHIMODA Y, MATSUDA K, et al. Mg-dechelation of chlorophyll a by Stay-Green activates chlorophyll b degradation through expressing Non-Yellow Coloring 1 in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2018, 222: 94-102.
- [5] TAN X, ZHAO Y, SHAN W, et al. Melatonin delays leaf senescence of postharvest Chinese flowering cabbage through ROS

homeostasis[J]. *Food Research International*, 2020, 138: 109790.

[6] LIU S S, LIU Y. Reducing CO₂ accumulation and its phytotoxicity to lettuce with absorbent in hermetic storage as a simulation of long-term fumigation[J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2014, 17(3): 435-439.

[7] 刘志旭, 朱璇, 赵亚婷, 等. 高浓度 CO₂ 短时处理对西梅采后贮藏品质及抗氧化代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(12): 311-318. [LIU Z X, ZHU X, ZHAO Y T, et al. Effects of short-term treatment with high concentration CO₂ on post-harvest storage quality and antioxidant metabolism of plums[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(12): 311-318.]

[8] LI D, ZHANG X C, LI L, et al. Elevated CO₂ delayed the chlorophyll degradation and anthocyanin accumulation in postharvest strawberry fruit[J]. *Food Chemistry*, 2019, 285: 163-170.

[9] ZHANG Y X, CHEN Y, GUO Y Y, et al. Elevated CO₂ delayed yellowing by maintaining chlorophyll biosynthesis and inhibiting chlorophyll degradation and carotenoid accumulation of postharvest broccoli[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 194: 112089.

[10] HOU S D, YANG Q, ZHENG J X, et al. A novel postharvest preservation technology of fruit—Intermittent high oxygen treatment: A case study on “Lingwu” long jujube[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(12): e17209.

[11] AHN D, KIM I, LIM J, et al. The effect of high CO₂ treatment on targeted metabolites of ‘Seolhyang’ strawberry (*Fragaria × ananassa*) fruits during cold storage[J]. *LWT*, 2021, 143: 111156.

[12] LI D, LI L, XIAO G N, et al. Effects of elevated CO₂ on energy metabolism and γ -aminobutyric acid shunt pathway in postharvest strawberry fruit[J]. *Food Chemistry*, 2018, 265: 281-289.

[13] 张高鹏, 曲珈莹, 侯雪宁, 等. 不同高氧预处理时间对枸杞鲜果贮藏保鲜作用比较[J]. 现代食品科技, 2023, 39(7): 130-137.

[ZHANG G P, QU J Y, HOU X N, et al. Effects of different high-oxygen pretreatment durations on the storage quality of *Lycium barbarum* (Goji) berries[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2023, 39(7): 130-137.]

[14] DU M J, LIU Z T, ZHANG X T, et al. Effect of pulsed controlled atmosphere with CO₂ on the quality of watercored apple during storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 278: 109854.

[15] 王雪孟, 侯双迪, 郑家轩, 等. 高浓度 CO₂ 短激与保鲜剂复合处理对大青葡萄采后褐变的影响[J]. 天津科技大学学报, 2023, 38(1): 16-22. [WANG X M, HOU S D, ZHENG J X, et al. Effects of high concentration of CO₂ short stimulation and preservation compound treatment on postharvest browning of Daqing Grapes[J]. *Journal of Tianjin University of Science and Technology*, 2023, 38(1): 16-22.]

[16] BESADA C L E N P. Short-term high CO₂ treatment allevi-

- ates chilling injury of *Persimmon* cv. Fuyu by preserving the parenchyma structure[J]. *Food Control*, 2015, 51: 163-170.
- [17] NOVILLO P, SALVADOR A, MAGALHAES T, et al. Deastringency treatment with CO₂ induces oxidative stress in persimmon fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 92: 16-22.
- [18] CAPOTORTO I, INNAMORATO V, CEFOLA M, et al. High CO₂ short-term treatment to preserve quality and volatiles profile of fresh-cut artichokes during cold storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 160: 111056.
- [19] 曹建康. 果蔬生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2016. [CAO J K. Guidance on physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2016.]
- [20] 王迪. 高二氧化碳处理调控鲜切梨果实品质机制的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020. [WANG D. Regulatory mechanism of high carbon dioxide treatment on quality of fresh-cut pears[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.]
- [21] 吴洋洋. 促生长草甘膦降解菌筛选及其对油菜营养品质的影响研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023. [WU Y Y. Screening of growth-promoting glyphosate-degrading bacteria and its effect on the nutritional quality of rape[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.]
- [22] LUO F, CHENG S C, CAI J H, et al. Chlorophyll degradation and carotenoid biosynthetic pathways: Gene expression and pigment content in broccoli during yellowing[J]. *Food Chemistry*, 2019, 297: 124964.
- [23] LIU X, WANG T, LU Y Z, et al. Effect of high oxygen pretreatment of whole tuber on anti-browning of fresh-cut potato slices during storage[J]. *Food Chemistry*, 2019, 301: 125287.
- [24] WANG N, KONG X M, LUO M L, et al. SGR mutation in pak choi prolongs its shelf life by retarding chlorophyll degradation and maintaining membrane function[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 191: 111986.
- [25] 刘少伟. 褪黑素对小白菜采后品质劣变的效果及其机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2021. [LIU S W. The effect and mechanism of postharvest melatonin treatment on pakchoi quality deterioration[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2021.]
- [26] 肖婷, 何欣遥, 吴姗姗, 等. 乙醇熏蒸对小白菜的护绿机理[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(21): 173-180. [XIAO T, HE X Y, WU S H, et al. The mechanism of green preservation of pakchoi by ethanol fumigation[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2020, 46(21): 173-180.]
- [27] 谢晓宇. 采后西兰花保鲜技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020. [XIE X Y. Research on fresh-heeping technology of post-harvest broccoli[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.]
- [28] 谢鑫鑫, 陈满堂, 林碧英, 等. 不同浓度 CO₂ 对菠菜产量和品质的影响[J]. *热带作物学报*, 2012, 33(12): 2166-2170. [XIE X X, CHEN M T, LIN B Y, et al. The influence of different CO₂ concentrations on yield and quality of water spinach[J]. *Journal of Tropical Crops*, 2012, 33(12): 2166-2177.]
- [29] 舒小芳, 郗海燕, 韩延超, 等. CO₂ 气调处理对鲜莲贮藏品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(2): 243-253. [SHU X F, GAO H Y, HAN Y C, et al. Effects of CO₂ controlled atmosphere treatments on the storage quality of fresh lotus[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2023, 23(2): 243-253.]
- [30] KAEWSUKSAENG S, TATMALA N, SRILAONG V, et al. Postharvest heat treatment delays chlorophyll degradation and maintains quality in Thai lime (*Citrus aurantifolia* Swingle cv. Paan) fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2015, 100: 1-7.
- [31] 梁泽. 高 CO₂ 对枸杞鲜果采后糖酸积累和酚类代谢调控作用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023. [LIANG Z. Study on the effect of elevated carbon dioxide on sugar acid accumulation and phenolic metabolism in postharvest wolfberry[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.]
- [32] 李栋. 高浓度 CO₂ 处理调控采后草莓花色苷合成机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021. [LI D. The regulation of elevated CO₂ on anthocyanin synthesis in postharvest strawberry fruit[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.]
- [33] AL UBEED H M S, WILLS R B H, BOWYER M C, et al. Interaction of the hydrogen sulphide inhibitor, propargylglycine (PAG), with hydrogen sulphide on postharvest changes of the green leafy vegetable, pak choy[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 147: 54-58.
- [34] 田雪婷. CO₂ 及 1-MCP 处理延缓‘澳洲青苹’果实叶绿素降解特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020. [TIAN X T. Study on CO₂ and 1-MCP treatment to delay chlorophyll degradation characteristics of ‘Granny Smith’ apple fruits[D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2020.]
- [35] JIANG Y Q, WANG X D, LI X J, et al. Combination of 1-methylcyclopropene and phytic acid inhibits surface browning and maintains texture and aroma of fresh-cut peaches[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 200: 112328.
- [36] 卢雪雷, 韩延超, 陈杭君, 等. 褪黑素处理对小白菜贮藏品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(1): 198-205. [LU R X, HAN Y C, CHEN H J, et al. Effect of melatonin treatment on storage quality of *Brassica chinensis* L.[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2022, 22(1): 198-205.]
- [37] 王盼盼, 管维良, 孙志栋, 等. 芥末精油复合 1-甲基环丙烯保鲜处理对绿花菜贮藏期间品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(11): 270-279. [WANG P P, GUAN W L, SUN Z D, et al. The effect of mustard essential oil combined 1-methylcyclopropene preservation treatment on the quality of broccoli during refrigerated storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(11): 270-279.]
- [38] TIAN S P, LI B Q, XU Y. Effects of O₂ and CO₂ concentrations on physiology and quality of litchi fruit in storage[J]. *Food Chemistry*, 2005, 91(4): 659-663.
- [39] SONG L L, LIU S W, YU H T, et al. Exogenous melatonin ameliorates yellowing of postharvest pak choi (*Brassica rapa* subsp. *chinensis*) by modulating chlorophyll catabolism and antioxidant system during storage at 20 °C[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 311: 111808.
- [40] 张悦, 李安, 潘立刚, 等. 1-甲基环丙烯结合植酸处理对菠菜保鲜效果的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(1): 231-238. [ZHANG Y, LI A, PAN L G, et al. Effects of combined treatment with 1-methylcyclopropene and phytic acid on quality preservation of spinach[J]. *Food Science*, 2023, 44(1): 231-238.]
- [41] 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]. *Northwest Agricultural Journal*, 2022, 31(5): 586-594.]