

CO₂ 气调对鲜切百合鳞茎贮藏品质的影响

宿珈嘉¹, 邱晓坤¹, 聂江力^{1*}, 裴毅¹, 李喜宏², 姜瑜倩²

¹天津农学院园艺园林学院 天津 300384

²天津科技大学食品科学与工程学院 天津 300457)

摘要 针对百合鲜切鳞茎在贮藏过程中易褐变及营养流失等问题,以兰州百合鳞茎为试材,在(4±1)℃,5%O₂条件下,分别采用5%,10%,15%,20%的CO₂贮藏百合鳞片15d,测定其外观、风味物质及营养品质。结果表明:用不同浓度的CO₂气调贮藏百合鳞茎均有效果,其中10%CO₂气调环境贮藏效果最佳,能有效抑制百合鳞茎褐变,维持较低的失重率和较高的果实硬度,减少风味物质的流失,延缓淀粉、还原糖、可溶性糖、可溶性固形物(TSS)的流失。贮藏15d时,其总酚、丙二醛(MDA)含量、过氧化物酶(POD)活性分别为1.89 mg/g,0.70 mmol/g,3.90 U/(min·g),均与对照组和其它处理组存在显著差异($P<0.05$)。此外,5%CO₂气调降低了百合的褐变度,而其它品质指标低于10%CO₂处理组;15%CO₂气调处理的百合鳞茎总酚含量和糖类物质损失较严重,膜脂过氧化程度过高;20%CO₂气调处理的百合软化程度高,表明百合受到高浓度CO₂伤害,TSS、淀粉、MDA、总酚含量、POD活性均与10%CO₂处理组存在显著差异($P<0.05$)。结论:5%O₂+10%CO₂为百合气调保鲜贮藏的适宜浓度。本试验为百合鲜切鳞茎保鲜技术的研发提供了参考。

关键词 百合鳞茎; CO₂; 气调处理; 贮藏品质

文章编号 1009-7848(2025)01-0293-12 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2025.01.028

兰州百合是唯一可以药食两用的甜百合,主产于甘肃省中部,富含蛋白质、多糖、维生素和秋水仙碱,具有抗炎、抗肿瘤、抗氧化、抗衰老、降糖等作用,是当地一种非常重要的经济作物^[1]。近年来,全球鲜切果蔬(Fresh-cut fruits and vegetables, FFV)市场迅速增长,FFV指以新鲜果蔬产品为原料,经清洗、筛选、切割、成型、保存与包装后,加工为健康、高营养、方便食用的产品^[2]。百合在FFV的生产中须将完整的鳞茎剥开,这种操作导致鳞茎片出现失水、褐变和腐败的问题,降低了百合的外观品质、风味物质和营养价值。开发安全、高效的保鲜技术以提高其贮藏品质非常重要。

近年来,诸多研究表明化学保鲜(如二氧化氯、1-甲基环丙烯、水杨酸)、物理保鲜(如低温贮藏、气调保鲜)等贮藏保鲜技术可以有效抑制百合鳞茎褐变,降低呼吸速率,控制腐败和营养流失^[3-6]。例如:巩慧玲等^[7]使用ClO₂熏蒸百合,可降低其腐烂程度,延缓褐变和软化程度,提高百合的贮藏品

质。吴超等^[4]研究发现外源水杨酸可有效抑制百合采后生理变化,保持鳞茎的贮藏品质。化学保鲜会在果蔬表面有一定的残留,具有食品安全隐患,而气调保鲜技术是在一定温、湿度下,通过控制贮藏环境中气体的组成和比例的保鲜方式,具有易于操作、安全、无残留等特点。通常采用增加CO₂浓度,降低O₂浓度,来抑制植物的呼吸作用和代谢活动,进而延长新鲜果蔬的贮藏期^[8-9]。目前,气调保鲜技术已广泛应用于桃、石榴、苹果、大蒜、茭白等果蔬中,并获得较好的贮藏保鲜效果^[10-11]。研究表明高浓度CO₂气调可用于延长鲜切果蔬的保质期,抑制衰老^[12]。舒小芳等^[13]发现低O₂、高CO₂气调处理可调控鲜莲的生理代谢,减少其在贮藏期间酚类物质氧化,延缓营养物质的流失及褐变度的升高。Wang等^[14]研究表明高浓度CO₂能抑制鲜切梨的氧化损伤,提高鲜切梨的品质。然而,高CO₂气调用于鲜切百合鳞茎的贮藏保鲜鲜有报道。

本试验在5%O₂浓度基础上,协同不同浓度的CO₂气调处理新鲜百合鳞茎,以明确贮藏过程中百合可溶性糖、还原糖、淀粉含量等营养品质的变化,以及对百合风味物质和酶促褐变的影响,探究百合气调保鲜的最佳CO₂浓度。为鲜切百合采

收稿日期: 2024-01-20

基金项目: 甘肃省科技计划项目(22CX8NE193);天津市农业产学研用“揭榜挂帅”项目(GBGG202312)

第一作者: 宿珈嘉,女,硕士

通信作者: 聂江力 E-mail: niejiangli@tjau.edu.cn

后贮藏保鲜技术的开发提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 试验材料与处理 百合鳞茎, 甘肃省兰州市七里河区西果园村, 均为当日新鲜采收。运至实验室后挑选大小均匀、无病虫害、无机械损伤的新鲜百合为试验材料, 于 0 °C 冷库预冷 24 h, 备用。

将预冷后的百合用清水冲洗, 并晾干表面水分, 剥离并去除外层和内层鳞片, 选择 2~6 层大小均匀的新鲜百合鳞片, 随机分为 4 个处理组, 每个处理组 800 g, 分别放入不同气调瓶中。O₂ 浓度固定为 5%, 处理组分别以 30 mL/min 的速率持续通入氮气并用气体分析仪记录数值, 待氮气充满, 分别通入 5%, 10%, 15%, 20% 的 CO₂, 其余用 5% O₂ 补足, 对照组以大气状态 (21% O₂) 为对照。贮藏温度为 (4±1) °C, 各处理组每 3 d 取样 1 次, 并调节气体环境, 共贮藏 15 d。

1.1.2 试剂 聚乙二醇、TritonX-100、没食子酸、苯酚等均为分析纯级, 合肥千盛生物科技有限公司; 碳酸钠、三水合乙酸钠、邻苯二酚、苯丙氨酸等均为分析纯级, 润友化学(深圳)有限公司; 酒石酸钾钠、愈创木酚、四硼酸钠、碘化钾、福林酚等均为分析纯级, 广州雪奥贸易有限公司; 氢氧化钠、高氯酸、浓硫酸等均为分析纯级, 天津市化学试剂供销公司。

1.2 仪器与设备

SR-66 精密色差仪, 乐迪仪器(宁波)有限公司; ME503TE 电子天平, 嘉手仪器设备(上海)有限公司; AK002B 高精度数显糖度仪, 深圳市测友科技有限公司; X-4(BX) 气体分析仪, 武汉美睿仪器有限公司; TA-XT2i 质构仪, 南京欧熙科贸有限公司; PEN3 电子鼻, 德国 AIRSENSE 公司; SpectraMax190 酶标仪, 山东云泽精密仪器有限公司; TGL-16M 高速冷冻离心机, 江西风光科技有限公司; WB100-8F 数显恒温水浴锅, 上海助蓝仪器科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 色泽和褐变度测定 利用色差仪测定百合色泽, 每组随机挑选适量百合鳞片, 每片百合选取赤道部位, 校正后进行 L*、a*、b* 值测定。其中 L* 代

表明暗度, L* 值越大则百合鳞片越亮, 反之越暗; b* 代表黄蓝色, b* 值越大则百合鳞片越黄, 反之越蓝; a* 代表红绿色。褐变度 (Browning degree, BD) 根据式 (1)(2) 计算。

$$BD = \frac{100 \times (x - 0.31)}{0.172} \quad (1)$$

$$x = \frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*} \quad (2)$$

1.3.2 失重率测定 失重率采用称量百合鳞茎贮藏前、后质量的方法测定, 计算方法见式 (3):

$$\text{失重率}(\%) = \frac{\text{贮藏前的质量} - \text{贮藏第 } N \text{ 天的质量}}{\text{贮藏前的质量}} \times 100 \quad (3)$$

1.3.3 硬度测定 参考 Faruq 等^[15]的方法略有改动。采用 TA-XT2i 质构仪 P100 探头进行质地多面分析 (TPA), 预压速度 2×10⁻³ m/s, 下压速度 2×10⁻³ m/s, 返回速度 2×10⁻³ m/s, 触发力 5 g, 停留时间 5 s。每个鳞片切取圆柱形 (直径 1 cm) 进行测定。

1.3.4 还原糖含量测定 参考舒小芳等^[13]方法略有改动。在研钵体中加入蒸馏水和 5.0 g 百合鳞片组织, 研磨成匀浆后定容至 25 mL, 80 °C 超声 1 h 使还原糖浸出, 25 °C 下 10 000 r/min 离心 5 min, 分离上清液保留, 在沉淀中加入 15 mL 蒸馏水, 80 °C 超声 30 min, 离心方式同上, 提取合并 2 次上清液, 定容至 50 mL。用酶标仪测定吸光度, 查出标准曲线相对应的葡萄糖含量, 按公式 (4) 计算, 以质量分数 (%) 表示。

$$\text{还原糖含量}(\%) = \frac{m' \times V \times N}{V_s \times m \times 1000} \times 100 \quad (4)$$

式中: m' 为从标准曲线查出的蔗糖质量, μg; V 为样品提取液总体积, mL; N 为样品提取液稀释倍数; V_s 为测定时提取液体积, mL; m 为样品质量, g。

1.3.5 可溶性糖含量测定 参照舒小芳等^[13]的方法并稍作改进。采用苯酚-硫酸试剂法测定。称取 1.0 g 百合鳞片组织, 研磨成浆并用沸水浸提得到提取液。按顺序将 0.5 mL 提取液、1.5 mL 蒸馏水、1 mL 0.09 g/mL 的苯酚溶液、5 mL 浓硫酸加入试管中, 测定波长 485 nm 处的吸光度。

1.3.6 可溶性固形物 (TSS) 含量测定 取 20 g 百合鳞片用匀浆机打成百合浆, 2 层纱布过滤百合

浆,使用手持糖度仪测定其 TSS 含量。

1.3.7 淀粉含量测定 参照马君义等^[16]的方法略有改动。采用酸水解法测定。将 1.3.5 节提取可溶性糖后的残渣于沸水浴中糊化 15 min,冷却后加入 2 mL 高氯酸(9.2 mol/L),搅拌提取 15 min。加蒸馏水混匀并过滤至 100 mL 容量瓶中。残渣中加入 2 mL 高氯酸(4.6 mol/L)溶液,提取 15 min,加蒸馏水混匀过滤。将 2 次滤液合并得到淀粉提取液。测定波长 630 nm 处的吸光度。

1.3.8 电子鼻风味物质的测定 参照韦雪等^[17]的方法略有改动,取 2 g 百合鳞片加 2 g 饱和氯化钠溶液于研钵体中研磨,转移至顶空瓶中,40 ℃水浴 30 min。设置洗涤时间 180 s,测样时间 200 s。每次顶空提取前,待传感器响应值恢复初始数值后测量。电子鼻传感器名称及性能见表 1。

1.3.9 丙二醛(MDA)含量测定 参照刘棕鑫等^[18]的方法略有改动,取 1.0 g 百合样品,加入 5.0 mL 100 g/L 三氯乙酸溶液研磨匀浆,10 000 r/min 离心 20 min,将 2.0 mL 上清液与 2.0 mL 0.67%硫代巴比妥酸溶液混匀,沸水浴 20 min,用上述方法再离心 1 次,取上清液测定 OD_{450nm}、OD_{532nm}、OD_{600nm}。计算方法见公式(5)(6)。

$$c(\mu\text{mol/L}) = 6.45 \times (\text{OD}_{532\text{nm}} - \text{OD}_{600\text{nm}}) - 0.56 \times \text{OD}_{450\text{nm}} \quad (5)$$

$$\text{丙二醛含量}(\mu\text{mol/L}) = \frac{c \times V}{V_s \times m \times 1000} \quad (6)$$

1.3.10 总酚含量测定 参照高凯等^[19]的方法略有改动。采用 Folin-Ciocalten 法。酚液提取:取 1 g 冻干粉末与 10 mL 提取缓冲液(70%甲醇含 0.1%乙酸)混匀,25 ℃超声 15 min,振荡 1 h 后,于 4 ℃ 10 000 r/min 离心 10 min,提取上清液,沉淀中加入 500 μL 提取缓冲液,按上述方法再次超声、离心、振荡,合并 2 次上清液。总酚含量测定:使用移液枪精确吸取 25 μL 酚提取液于 96 孔板中,再加入 125 μL 福林酚,于室温下反应 10 min,加入 125 μL Na₂CO₃,于室温下反应 30 min,测定波长 765 nm 处的吸光度,以甲醇为参比。

1.3.11 多酚氧化酶(PPO)、过氧化物酶(POD)活性测定 PPO 和 POD 活性测定方法均参照 Huang 等^[20]的方法略有改动^[20]。

酶液提取:称取 0.4 g 百合鳞片冻干粉样品,

表 1 电子鼻传感器性能描述

Table 1 The performance descriptions of electronic nose sensors

传感器 序号	传感器 名称	传感器基本特性
1	R1	对芳香族化合物灵敏
2	R2	对氮氧化合物较为灵敏
3	R3	对氨类、芳香族化合物灵敏
4	R4	对氢气有选择性
5	R5	对短链烷烃芳香族化合物灵敏
6	R6	对甲烷灵敏
7	R7	对硫化物、萜烯类化合物灵敏
8	R8	对醇类、醛酮芳香族化合物灵敏
9	R9	对芳香族化合物、有机硫化物灵敏
10	R10	对长链烷烃灵敏

加入 1 mL 提取缓冲液,涡旋,于 12 000 r/min,4 ℃离心 30 min,得到上清液,即为酶提取液。

PPO 活性测定:将 0.8 mL 50 mmol/L、pH 5.5 的乙酸-乙酸钠缓冲液、0.2 mL 50 mmol/L 邻苯二酚溶液和 20 μL 酶提取液混合,立即计时 15 s,记录波长 420 nm 处的吸光度,60 s 记录 1 次,连续测定 6 个点的吸光度,以蒸馏水为参比。

POD 活性测定:将 0.1 mL 酶提取液、0.6 mL 25 mmol/L 愈创木酚溶液和 40 μL 0.5 mol/L H₂O₂ 溶液混合,计时 15 s,测定波长 470 nm 处的吸光度,记录反应体系方式与 PPD 活性测定方法相同。

1.4 数据处理与统计分析

所有指标测定进行 3 次重复,使用 SPSS 26.0 进行单因素 ANOVA 检验和方差分析进行数据统计,以 $P < 0.05$ 为显著性检验标准。采用 Origin 2018 绘图。

2 结果与分析

2.1 CO₂ 处理对百合鳞茎色泽与褐变度的影响

鲜切百合鳞茎贮藏过程中表现色泽的变化直接影响百合的商品价值。如图 1a 所示,对照组在贮藏 6 d 后百合鳞片发生明显褐变,并在贮藏 15 d 后褐变程度加重;而 5%CO₂ 处理组在贮藏 15 d 期间 BD 显著低于 20%处理组和对照组($P < 0.05$),无明显褐变。由图 1b、1c 可知,对照组百合鳞茎亮

度降低,且黄化严重,在贮藏9~15 d期间,对照组百合鳞茎的 L^* 、 a^* 值与其它处理组相比具有显著差异($P<0.05$),在贮藏15 d,20%处理组 a^* 值与5%和10%处理组均有显著差异($P<0.05$),可能是由于 CO_2 浓度过高对百合产生伤害;由图1d可

知,在贮藏9~15 d期间,对照组的 b^* 值显著升高,5%和10%处理组的 b^* 值始终保持较小数值。结果表明,适宜浓度 CO_2 可抑制百合鳞片的褐变,而过高浓度的 CO_2 容易造成鳞片损伤。

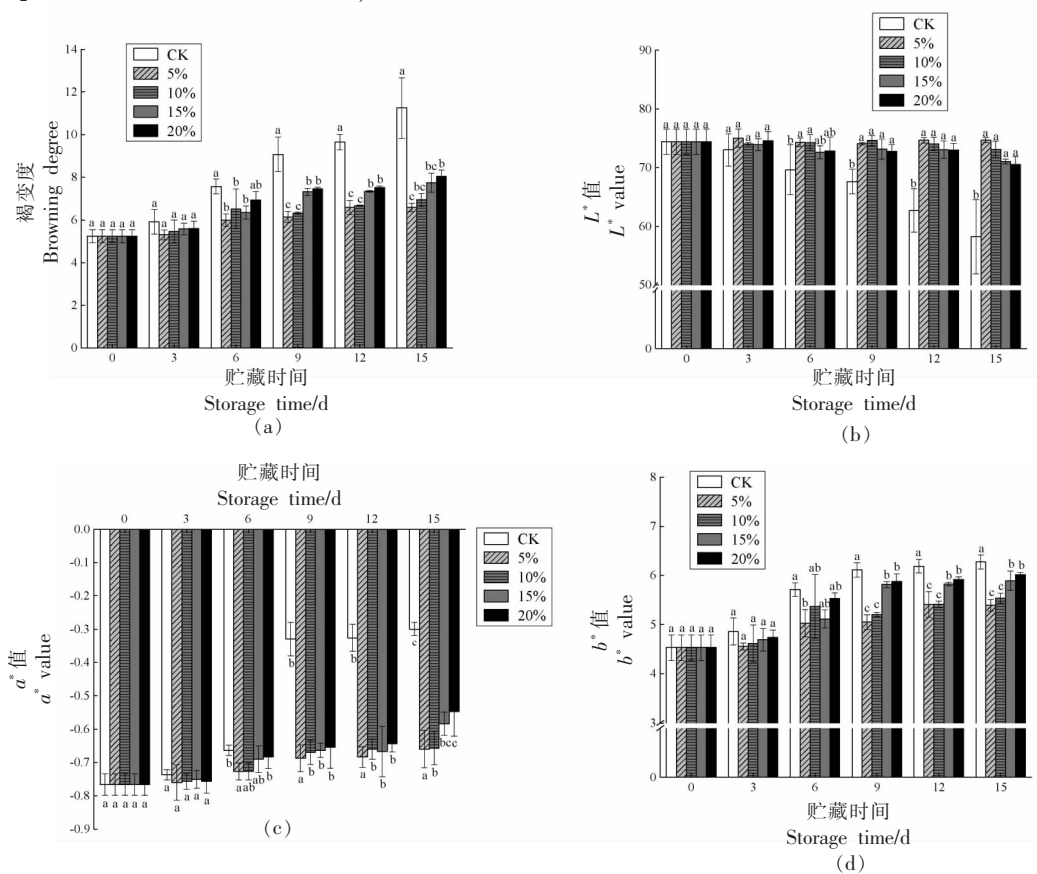


图1 高浓度 CO_2 对百合鳞茎褐变度(a)、 L^* 值(b)、 a^* 值(c)和 b^* 值(d)的影响

Fig.1 Effect of high concentration of CO_2 on the browning degree (a), L^* value (b), a^* value (c) and b^* value (d) of lily bulbs

2.2 高浓度 CO_2 对百合鳞茎失重率与硬度的影响

失重和软化是限制百合鳞片贮藏期的主要因素。水分、糖、有机酸和营养物质的流失,以及生理代谢都会导致果蔬在贮存过程中失重率的增加^[21]。由图2a可知,在贮藏9~15 d时,高浓度 CO_2 处理的百合失重程度较低,与对照组存在显著差异($P<0.05$),在贮藏15 d时,15%和20% CO_2 处理组虽与对照组存在显著差异,但与5%和10% CO_2 处理组也有显著差异($P<0.05$),对照组,5%,10%,15%,20% CO_2 处理组的失重率分别为5.58%,3.07%,2.92%,3.20%,3.35%,其中10% CO_2 处理组的失重率最低,比对照组降低1.91倍。

水分流失是导致百合鳞片贮藏硬度下降的主要因素。如图2b所示,在贮藏期间,百合鳞片的硬度呈持续下降的趋势,处理组与对照组在贮藏6 d时差异逐渐显著($P<0.05$)。在贮藏结束时,10% CO_2 处理组的百合鳞片硬度为1640.58 g,显著高于对照组和其它处理组($P<0.05$)。表明10% CO_2 处理能保持百合软化和失水,在维持失重程度和硬度方面表现出较好的效果。

2.3 高浓度 CO_2 对百合鳞茎糖类物质含量的影响

在植物体内,还原糖是提供百合生理生化代谢的主要能量物质。如图3a所示,在贮藏期间,对照组百合鳞片的还原糖含量呈先上升后下降的趋

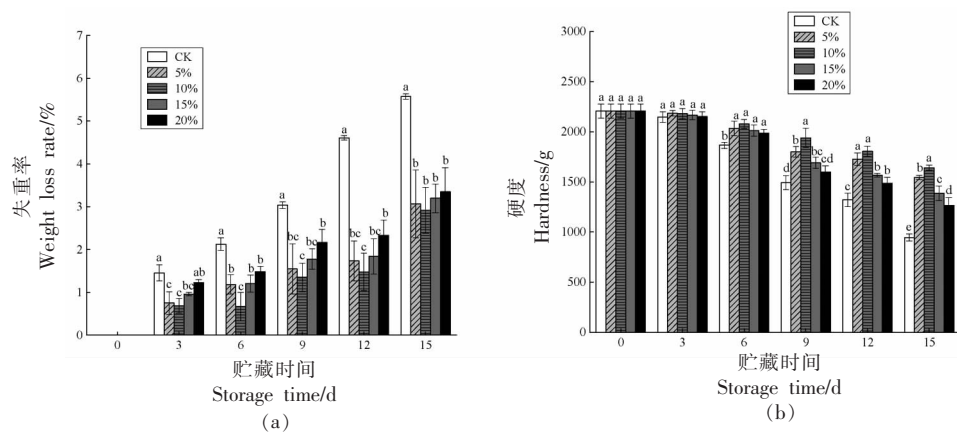


图 2 高浓度 CO₂ 对百合鳞茎失重率(a)、硬度(b)的影响

Fig.2 Effect of high concentration of CO₂ on weight loss rate (a), hardness (b) of lily bulbs

势, 处理组百合的还原糖含量呈先下降后趋于平缓的趋势, 在贮藏期间, 处理组与对照组百合鳞片的还原糖含量均存在显著差异, 而对照组之间无显著差异 ($P < 0.05$), 贮藏结束时, 对照组和 5%, 10%, 15%, 20% CO₂ 处理组的还原糖含量分别是 0.74%, 0.82%, 0.81%, 0.80%, 0.81%。

可溶性糖是代谢的中间产物, 可作为果蔬呼吸作用的底物, 也可通过淀粉降解来补充^[2]。如图 3b 所示, 在贮藏过程中, 对照组和处理组的可溶性糖含量呈先上升后下降的趋势, 在贮藏结束时, 处理组与对照组有显著差异 ($P < 0.05$), 10% CO₂ 处理组的可溶性糖含量为 7.79%, 均高于其它处理

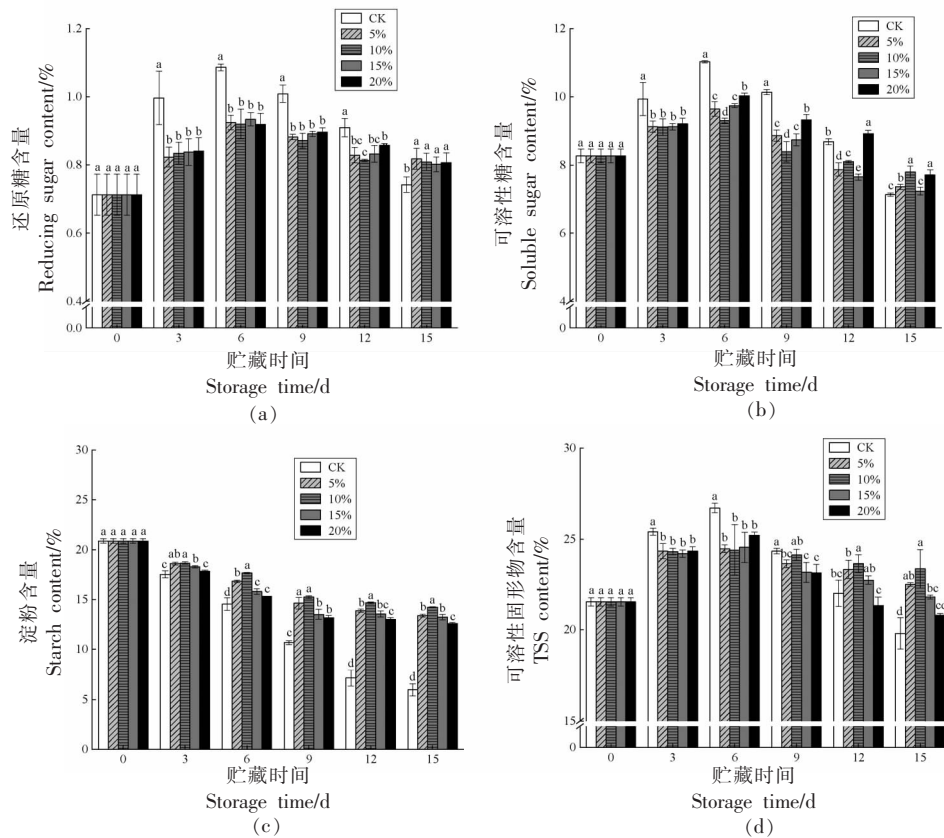


图 3 高浓度 CO₂ 对百合鳞茎还原糖(a)、可溶性糖(b)、淀粉(c)、可溶性固形物(d)的影响

Fig.3 Effect of high CO₂ on reducing sugar (a), soluble sugar (b), starch (c), TSS(d) of lily bulbs

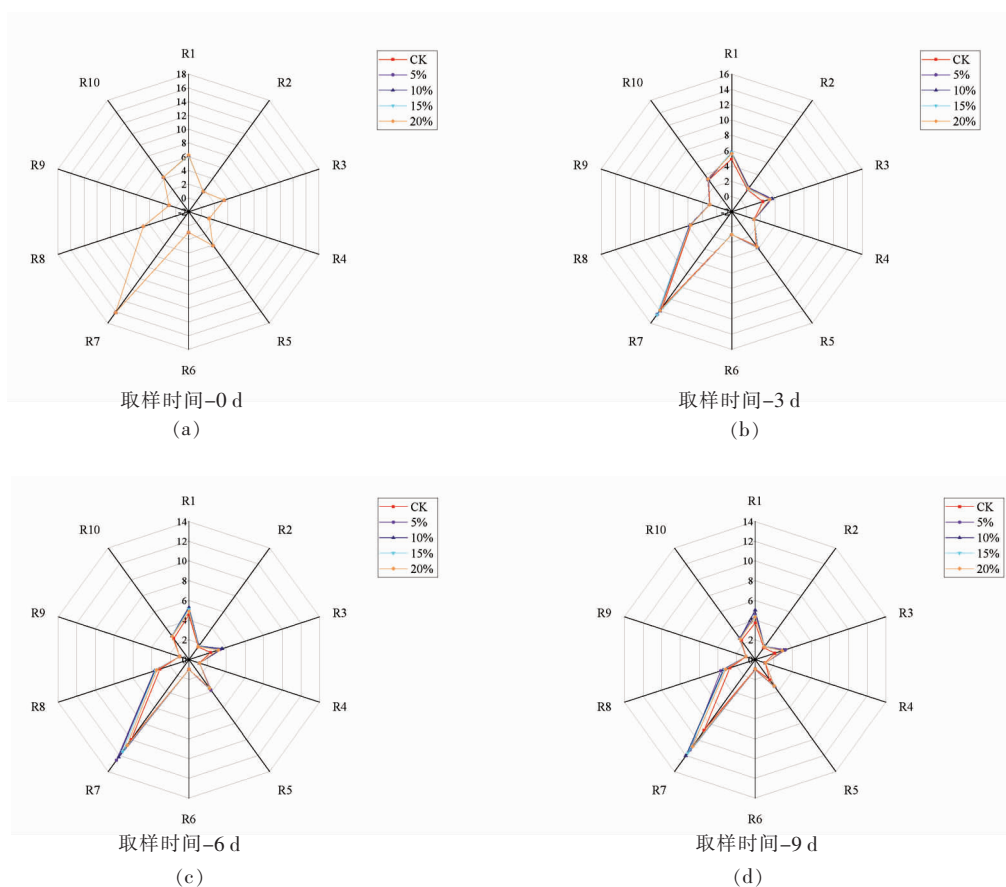
组和对照组,比对照组高 0.66%,说明 10%CO₂ 处理可有效延缓百合贮藏过程中可溶性糖的消耗。

淀粉是百合鳞茎中主要的能量物质之一。如图 3c 所示,在贮藏过程中,对照组和处理组的百合鳞茎淀粉含量呈现持续下降的趋势;在贮藏期间,5%,10%,15%CO₂ 处理组均显著高于对照组 ($P<0.05$),10%CO₂ 处理组淀粉含量均高于其它处理组,在贮藏结束时,比对照组高 2.93 倍,表明 10%CO₂ 处理能延缓淀粉降解的速率。

可溶性固形物是果实口感和品质的关键指标。如图 3d 所示,在贮藏期间,对照组和 20%CO₂ 处理组 TSS 含量呈先上升后下降的趋势,5%,10%,20%CO₂ 气调处理的百合鳞茎 TSS 含量与对照组有显著差异 ($P<0.05$),呈先上升后趋于平缓的趋势,在贮藏 15 d 时,10%CO₂ 处理组 TSS 含量为 23.37%,高于对照组和其它处理组,说明 10%CO₂ 气调处理在百合贮藏期间能有效抑制淀粉低温糖化,延缓糖类物质的消耗,从而延缓 TSS 含量的降低,维持百合鳞茎的果实品质。

2.4 高浓度 CO₂ 对百合鳞茎风味物质的影响

电子鼻的响应值能反映不同浓度 CO₂ 处理的百合鳞片挥发性成分的变化。如图 4 所示,各处理百合电子鼻响应值整体呈下降的趋势,R1、R3、R4、R5、R7、R8、R9 和 R10 传感器在 15 d 响应值比初始响应值显著降低 ($P<0.05$),说明随着贮藏时间延长,百合的芳香成分、氢化物、硫化物、萜烯类化合物、烷烃类化合物含量逐渐降低。各传感器对百合风味物质的响应程度不同,R7(硫化物和萜烯类化合物)响应值最高,其次为 R1、R3、R5、R8 和 R10(芳香族化合物)。在贮藏 0~15 d 内,10%CO₂ 处理组在除 R4、R6、R10 的传感器外显著高于对照组 ($P<0.05$),5%和 10%CO₂ 处理的百合鳞片响应值均高于 15%和 20%CO₂ 处理组,而 5%和 10%CO₂ 处理组之间的响应值差异不显著 ($P<0.05$),整体上看,10%处理组的响应值较 5%处理组更优,表明 10%CO₂ 气调能保持百合的香气成分,减少贮藏期间风味物质的流失。



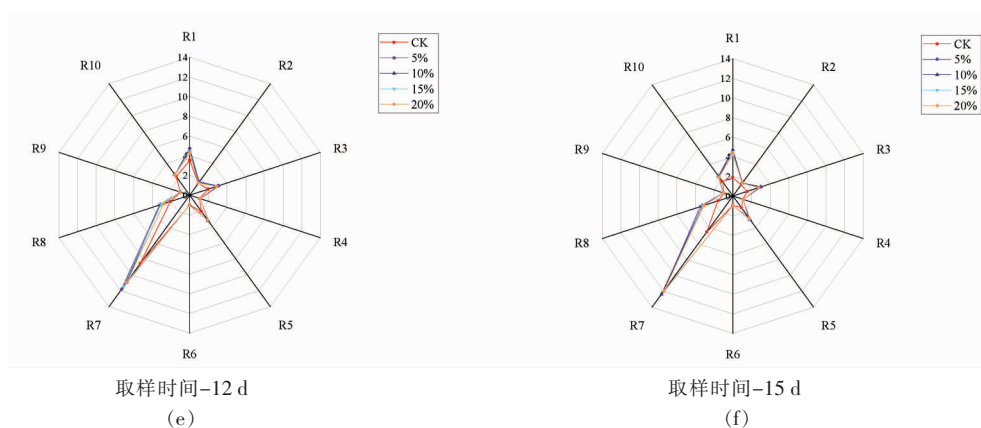


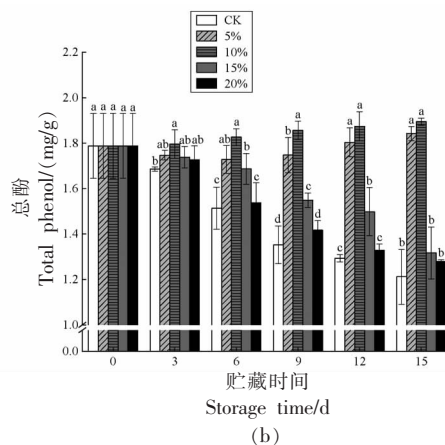
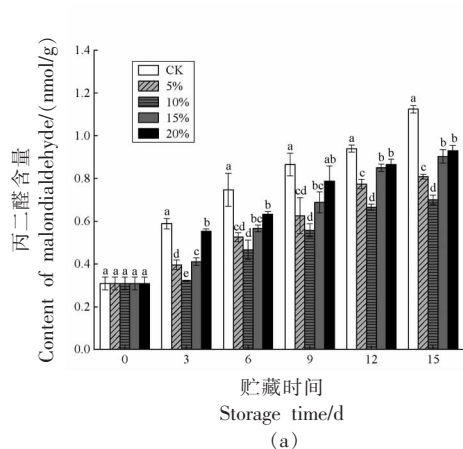
图 4 高浓度 CO₂ 对百合鳞茎电子鼻响应值在 0 d(a), 3 d(b), 6 d(c), 9 d(d), 12 d(e), 15 d(f) 的影响
 Fig.4 Effect of high concentration CO₂ on the electronic nose response value of lily bulbs at 0 d (a), 3 d (b), 6 d (c), 9 d (d), 12 d (e), 15 d (f)

2.5 高浓度 CO₂ 对百合鳞茎 MDA、总酚和相关酶的影响

MDA 是脂质过氧化的最终产物之一,是细胞内膜破坏产生有毒代谢物的标志,可作为植物衰老的指标^[23]。由图 5a 可知,在贮藏 0~15 d 内,对照组和各处理组 MDA 含量均有所升高,10%CO₂ 处理组的 MDA 含量最低,与对照组和其它处理组均存在显著差异 ($P < 0.05$),说明适宜浓度的 CO₂ 处理可以削弱脂质过氧化,减少细胞膜的损伤,从而延缓百合衰老和品质劣变。

百合在贮藏过程中易产生褐变,导致营养和感官品质降低,酶促褐变主要是由于多酚氧化酶和过氧化物酶在有氧条件下催化酚类物质氧化为醌类物质,进而呈现出褐色或黑色色素^[24]。由图 5b 可知,在 0~15 d 期间,15%,20%CO₂ 处理组和对

照组的百合鳞茎总酚含量呈持续下降趋势,5%,10%CO₂ 处理组的百合总酚含量呈持续上升趋势,在贮藏结束时,5%,10%CO₂ 处理的百合鳞茎总酚含量分别为 1.84 mg/g 和 1.89 mg/g,显著高于对照组和其它处理组 ($P < 0.05$)。由图 5c 可知,在贮藏 0~15 d 期间,对照组和处理组的 POD 活性呈持续上升趋势,10%CO₂ 处理组的 POD 活性始终低于对照组和其它处理组,在贮藏结束时,10%CO₂ 处理的百合鳞茎 POD 活性为 0.95 U/(min·g),显著低于对照组和其它处理组。由图 5d 可知,对照组和气调组 PPO 活性呈先上升后下降的趋势,在贮藏 9 d 达到最大值,10%CO₂ 处理组的 PPO 活性在贮藏期间始终小于对照组和其它处理组,在贮藏结束时,比对照组低 1.43 倍。



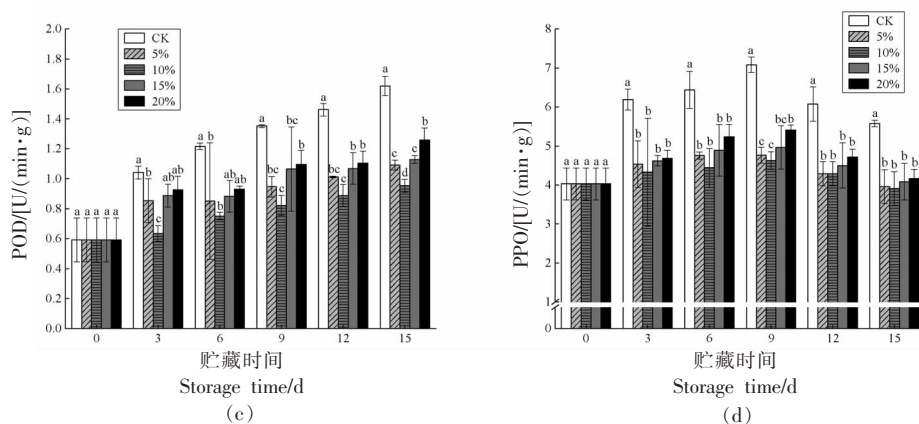


图5 高浓度CO₂对百合鳞茎丙二醛(a)、总酚(b)、POD(c)、PPO(d)的影响

Fig.5 Effect of high CO₂ on malondialdehyde (a), total phenol (b), POD (c), PPO (d) of lily bulbs

3 讨论

外观和品质是决定FFV可接受性的2个基本因素,百合鳞茎在采后贮藏不当易出现褐变、失水、营养流失、真菌病害等问题,影响消费者的接受度^[2]。本试验表明鲜切百合鳞茎软化,风味物质流失,淀粉和糖类物质变化,表皮褐变是影响其食用品质和商品价值的关键因素。结果表明,当5% O₂+10%CO₂气调处理时,可有效降低百合的失重率、褐变度,维持百合的表皮硬度。当CO₂浓度过高时,百合无氧呼吸增强,诱导厌氧发酵反应,产生酚类和醇类等挥发性物质,损害百合抗氧化系统,导致表皮组织褐变,产生不良气味,加速鳞茎软化和营养物质流失^[25]。研究发现在CO₂浓度超过10%时,会加速成熟青芒果实产生乙醛和乙醇、表皮褪色、成熟不均匀和风味流失等损伤。不同果蔬对CO₂耐受力存在差异,葡萄、猕猴桃、木瓜的CO₂耐受力较低分别约为5%,7%,8%,柠檬、油桃的CO₂耐受力为10%左右,甜樱桃的CO₂耐受力较高约为30%^[26],而鲜切大蒜等鳞茎类蔬菜在CO₂浓度为21%时会产生伤害^[25]。本试验得出百合鳞片的CO₂耐受力在10%左右,在CO₂浓度为5%~10%的贮藏环境下,能保持百合鳞片的最佳外观品质。

风味是体现百合贮藏品质的重要指标,电子鼻能模仿人类和动物的嗅觉,通过多个气体传感器、信号处理和模式识别系统对气味进行感知和判断^[27],本研究发现百合鳞茎对R7传感器响应值最高,表明百合中含有较多的硫化物和萜烯类

化合物;其次对R1、R3、R5、R8传感器较为敏感,表明其中含有较高的芳香族化合物。研究表明,果蔬的香气成分是在成熟过程中生长素水平的变化导致糖及其衍生物和次生代谢产物的积累而产生的挥发性化合物^[28]。本试验中,随着贮藏时间的延长,糖类物质作为呼吸底物被逐渐消耗,百合鳞片中的香气成分含量也逐渐降低,而气调处理能减弱百合鳞片在贮藏中的呼吸作用,抑制其风味物质的流失,延长百合鳞片品质。气调贮藏在处理番茄、丝瓜等果蔬中均有减少芳香类物质损失的作用^[29]。

鳞茎是百合的重要储存器官,其中含有大量的淀粉和可溶性糖,百合鳞茎在低温条件下会产生与马铃薯、南瓜类似的低温糖化现象^[5]。本研究发现,对照组的淀粉含量呈持续下降的趋势,处理组淀粉含量呈先下降后趋于平缓的趋势,而对照组和处理组的可溶性糖、还原糖和TSS均呈先升高后下降的趋势,这是由于在贮藏前期百合鳞茎在低温条件下,大量淀粉转化为糖,导致淀粉含量降低和糖类物质含量升高,而在贮藏后期,糖类物质作为呼吸底物被消耗,导致可溶性糖、还原糖和TSS含量降低^[16]。适宜浓度的气调处理能降低百合鳞茎的呼吸速率,减缓营养物质的流失,10%CO₂处理的百合鳞茎的淀粉、还原糖、可溶性糖、TSS含量均显著高于对照组($P < 0.05$),说明10%CO₂气调处理的百合能有效延缓其糖类物质的降解,这与Sánchez-Mata等^[30]研究的菜豆、猕猴桃等果蔬在气调贮藏中可维持较高水平的半乳糖、阿拉伯

糖、鼠李糖、纤维素和淀粉等糖类物质的研究结果一致。

百合在贮藏过程中变色主要是由于酶促褐变导致,酶促褐变是果实在有氧条件下由于 PPO 的作用使邻位酚氧化为醌,或由醌类自发产生过氧化氢(H₂O₂),使 POD 催化 H₂O₂ 氧化酚类化合物,从而导致褐变^[31]。适宜浓度的 CO₂ 处理有助于保持贮藏过程中百合细胞的氧化平衡,而过高浓度的 CO₂ 会造成伤害,引起厌氧呼吸产物乙醛和乙醇的上升,从而产生大量自由基,有学者研究表明酚类物质具有较高的还原能力和清除 DPPH、FRAP 等自由基的能力,PPO 和 POD 又作为抗氧化酶参与清除自由基,自由基的增加导致酚类物质被过度消耗,果实细胞组织被破坏^[32-33]。MDA 是膜脂过氧化产物,其含量可以反映膜结构完整性^[23],在采后贮藏期间,逆境胁迫下的细胞壁和细胞膜完整性被逐步破坏,酶与液泡中的酚类物质接触,进而引发鳞茎褐变^[34]。本研究发现 10%CO₂ 处理的 MDA、PPO 和 POD 含量显著低于对照组,而总酚含量显著高于对照组($P<0.05$),表明 10% CO₂ 气调通过维持鲜切百合鳞茎组织的膜结构完整性,抑制酶的活性,从而降低酚类物质氧化,延缓百合褐变。

4 结论

本文针对鲜切百合鳞茎在贮藏过程中易褐变和营养物质流失等问题,固定 O₂ 的浓度为 5%,通过改变 CO₂ 的浓度,对兰州百合气调保鲜 15 d,测定、分析其相关品质指标,得出以下结论:在贮藏期间,对照组和处理组百合的褐变度、失重率等指标均呈升高趋势,硬度、电子鼻响应值呈下降趋势,可溶性糖、还原糖、可溶性固形物等糖类物质均呈先上升后下降的趋势,这些指标与百合表现色泽、风味、口感密切相关,减缓品质指标的劣变可达到保鲜的效果。5%CO₂ 处理虽可以降低百合褐变度,但与 10%CO₂ 处理组相比较软化、失重、糖类物质流失较为严重;10%CO₂ 处理降低了百合褐变度、失重率及 POD 和 PPO 活性,维持了百合的硬度、风味物质、糖类物质含量;15%CO₂ 在一定程度上可以维持百合的表现品质和营养物质,然而其硬度、总酚、MDA、POD 等指标与 10%CO₂ 处理

组相比均有显著差异($P<0.05$);20%CO₂ 处理使百合受到高 CO₂ 伤害,软化和营养物质流失较为严重。

综上所述,气调保鲜技术可调控百合的生理代谢从而影响其外观和营养品质的变化,在温度为(4±1)℃,O₂ 浓度 5%,CO₂ 浓度为 10%的贮藏条件下,能延缓百合鳞片品质劣变,维持最佳的贮藏品质,可作为鲜切百合鳞茎贮藏保鲜的有效技术开展应用。

参 考 文 献

- [1] YANG W Z, WANG P, ZHANG W, et al. Review on preservation techniques of edible lily bulbs in China[J]. *CyTA—Journal of Food*, 2022, 20(1): 172–182.
- [2] LI X, ZHANG C Y, WANG X Q, et al. Integration of metabolome and transcriptome profiling reveals the effect of modified atmosphere packaging (MAP) on the browning of fresh-cut Lanzhou lily (*Lilium davidii* var. unicolor) bulbs during storage [J]. *Foods*, 2023, 12(6): 1335.
- [3] 巩慧玲, 袁惠君, 冯再平, 等. 1-MCP、ClO₂ 对兰州百合贮藏保鲜效果的影响[J]. *食品工业科技*, 2010, 31(10): 338–339, 355.
GONG H L, YUAN H J, FENG Z P, et al. Effect of 1-MCP and ClO₂ on the storage and preservation effect of Lanzhou lily[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2010, 31(10): 338–339, 355.
- [4] 吴超, 郭方其, 陈世平, 等. 外源水杨酸(SA)对食用百合长期低温储藏过程中生理代谢影响[J]. *分子植物育种*, 2016, 14(9): 2495–2501.
WU C, GUO F Q, CHEN S P, et al. Effect of exogenous salicylic acid (SA) on physiological metabolism of edible lily during long-term low temperature storage[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2016, 14(9): 2495–2501.
- [5] YU J P, XU S J, LIU X Y, et al. Starch degradation and sucrose accumulation of lily bulbs after cold storage [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(8): 4366.
- [6] 张鹏, 康丹丹, 魏宝东, 等. 微环境气调包装对兰州百合采后衰老与防御酶的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(13): 317–323.

- ZHANG P, KANG D D, WEI B D, et al. Effects of micro-environment air conditioning packaging on postharvest senescence and defense enzymes of Lanzhou lily[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(13): 317-323.
- [7] 巩慧玲, 王晓敏, 袁惠君, 等. ClO₂处理对兰州百合低温贮藏的防腐保鲜效果[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(11): 359-364.
- GONG H L, WANG X M, YUAN H J, et al. Effect of ClO₂ treatment on preservation and preservation of Lanzhou lily at low temperature[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(11): 359-364.
- [8] 刘新美, 孙璐. 我国气调贮藏技术在果蔬上的应用现状及展望[J]. *中国果菜*, 2020, 40(9): 10-13.
- LIU X M, SUN L. The application status and prospect of gas control storage technology in fruits and vegetables in China[J]. *Chinese Fruits and Vegetables*, 2020, 40(9): 10-13.
- [9] FANG Y J, WAKISAKA M. A review on the modified atmosphere preservation of fruits and vegetables with cutting-edge technologies[J]. *Agriculture*, 2021, 11(10): 992.
- [10] ZHOU H J, ZHANG X N, SU M S, et al. Controlled atmosphere storage alleviates internal browning in flat peach fruit by regulating energy and sugar metabolisms [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022, 186: 107-120.
- [11] 任紫烟, 魏雯雯, 杨相政, 等. 气调贮藏对茭白抗氧化系统的影响[J]. *食品科技*, 2023, 48(4): 40-46.
- REN Z Y, WEI W W, YANG X Z, et al. Effects of controlled atmosphere on antioxidation system of water bamboo[J]. *Food Science and Technology*, 2023, 48(4): 40-46.
- [12] WANG D, MA Q, LI D, et al. Moderation of respiratory cascades and energy metabolism of fresh-cut pear fruit in response to high CO₂ controlled atmosphere[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 172: 111379.
- [13] 舒小芳, 郜海燕, 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 air conditioning on storage quality of fresh lotus [J]. *Acta Food Sinica*, 2023, 23(2): 243-253.
- [14] WANG D, LI W X, LI D, et al. Effect of high carbon dioxide treatment on reactive oxygen species accumulation and antioxidant capacity in fresh-cut pear fruit during storage [J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 281: 109925.
- [15] FARCUH M, COPEL B, LE-NAVENE G, et al. Texture diversity in melon (*Cucumis melo* L.): Sensory and physical assessments[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 159: 111024.
- [16] 马君义, 韩小芬, 陈楠, 等. 兰州百合鳞茎冷藏保鲜过程中碳水化合物含量及淀粉酶活性的变化[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(10): 73-77.
- MA J Y, HAN X F, CHEN N, et al. Changes of carbohydrate content and amylase activity in Lanzhou lily bulbs during refrigeration and preservation[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(10): 73-77.
- [17] 韦雪, 赵晓燕, 王丹, 等. 不同 CO₂ 比例的鲜切马铃薯气调保鲜效果[J]. *现代食品科技*, 2023, 39(5): 148-156.
- WEI X, ZHAO X Y, WANG D, et al. Effects of air conditioning on fresh-cut potatoes with different CO₂ ratios[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2023, 39(5): 148-156.
- [18] 刘棕鑫, 崔素芬, 李思洁, 等. 多场耦合效应对小麦储藏品质影响的研究[J]. *中国粮油学报*, 2024, 39(1): 18-24.
- LIU Z X, CUI S F, LI S J, et al. Study on effects of multi-field coupling effect on storage quality of wheat[J]. *Journal of Cereals and Oils of China*, 2024, 39(1): 18-24.
- [19] 高凯, 张文涛, 汤尧, 等. 加拿大产藜麦可溶性酚类物质组成及抗氧化活性[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(7): 107-113.
- GAO K, ZHANG W T, TANG Y, et al. Composition and antioxidant activity of soluble phenols from Quinoa from Canada[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2016, 42(7): 107-113.
- [20] HUANG H, WANG L, BI F C, et al. Combined application of malic acid and lycopene maintains content of phenols, antioxidant activity, and membrane integrity to delay the pericarp browning of litchi fruit during storage[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 849385.
- [21] WANG Y, SU S N, CHEN G G, et al. Relationship between cuticular waxes and storage quality