

## 减压贮藏对南果梨后熟进程及抗氧化能力的影响

陈敬鑫<sup>1,2</sup>, 张亚丽<sup>1</sup>, 高晓雅<sup>1</sup>, 吕静祎<sup>1,2</sup>, 葛永红<sup>1,2</sup>, 米红波<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup>渤海大学食品科学与工程学院 辽宁锦州 121013

<sup>2</sup>生鲜农产品贮藏加工及安全控制技术国家地方联合工程研究中心 辽宁锦州 121013)

**摘要** 为探究减压贮藏对南果梨后熟进程及抗氧化能力的影响,以商业成熟期的南果梨果实为试验材料,于 2 kPa 和 25 kPa 减压条件下贮藏 1 个月后,在(20±2)℃、101 kPa 条件下模拟其后熟过程,并测定其后熟品质和抗氧化能力的变化。结果表明:2 kPa 和 25 kPa 减压条件均能较好地维持南果梨果实品质;第 10 天和第 15 天时,各减压处理组的  $h^{\circ}$  均显著高于对照组( $P < 0.05$ );自第 5 天起,对照组果肉硬度均显著低于各处理组( $P < 0.05$ );自第 10 天起,减压贮藏组的类黄酮含量均显著高于对照组( $P < 0.05$ );而各处理组的可溶性固形物和可滴定酸含量与对照组无显著差异( $P > 0.05$ )。同时,与对照组相比,各处理组果实的呼吸峰推迟约 5 d,且乙烯释放量显著降低( $P < 0.05$ )。此外,至第 20 天时,各减压处理果实的多酚氧化酶活性仍显著低于对照组( $P < 0.05$ ),而其过氧化物酶活性显著高于对照组( $P < 0.05$ )。其中,(4±2)℃、2 kPa 条件下减压贮藏对南果梨果实后熟进程的延缓作用最为明显,且其抗氧化能力得到较好地维持。

**关键词** 减压;果实后熟;色泽;呼吸峰;过氧化物酶

**文章编号** 1009-7848(2023)11-0202-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.11.020

南果梨,蔷薇科(Rosaceae)梨属(*Pyrus*)中的秋子梨(*Pyrus ussuriensis* Maxim.),盛产于辽宁鞍山和锦州等地,在内蒙古、吉林及河北等地也有少量分布<sup>[1]</sup>。南果梨果实香气浓郁、酸甜多汁且略带酒香味道,深受消费者的喜爱,被誉为“梨中之王”<sup>[2]</sup>。南果梨的成熟时间一般集中于 9 月中上旬,常温条件下其后熟时间为 14 d 左右,属于典型的呼吸跃变型果实。商业采摘时,南果梨果皮呈绿黄色,果肉较硬,口感较差,缺乏独特的香味,而经过后熟后果实的口感、风味和色泽均会有所改善<sup>[3]</sup>。后熟过程中,南果梨的呼吸代谢较为旺盛,果实体内营养物质的消耗较快,导致其货架期较短<sup>[4]</sup>。长期的低温贮藏使得南果梨果肉易发生褐变,严重影响南果梨的食用品质<sup>[5]</sup>。

减压贮藏是在冷藏和气调贮藏技术之后发展起来的一种贮藏方法,又称负压贮藏或低压贮藏<sup>[6]</sup>。

减压贮藏的原理主要是通过降低果蔬周围环境的气压,使各种气体组分的分压降低,创造一种利于果蔬保鲜的低氧低压环境<sup>[7]</sup>。作为一种安全的果蔬物理保鲜贮藏技术,减压贮藏对果实的保鲜效果优于冷藏和传统气调贮藏<sup>[8]</sup>,同时也是一种可替代化学熏蒸剂杀死昆虫的方法<sup>[9]</sup>。目前,作为一种最为先进的果蔬贮藏技术,减压贮藏也日益受到从事果蔬采后保鲜技术研究人员的关注<sup>[10-12]</sup>。

本研究以商业成熟期的南果梨果实为试材,研究采后两种减压贮藏条件对其后熟进程及抗氧化能力的影响,以期为减压贮藏在南果梨果实采后保鲜中的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

南果梨于 2021 年 9 月 27 日购于辽宁省锦州市松山新区南山果园,挑选大小相同、成熟期一致(商业成熟期,即绿熟期)、无病害、无机械损伤的果实为试验材料。

氢氧化钠、邻苯二酚,天津市福晨化学试剂厂;30%  $H_2O_2$ ,天津市天力化学试剂有限公司;愈创木酚,上海生物工程股份有限公司;盐酸,锦州古城化学试剂有限公司;甲醇,天津市津东天正精细化学试剂厂;乙酸,天津市大茂化学试剂厂;乙

收稿日期:2022-11-06

基金项目:国家自然科学基金项目(31901745);辽宁省博士科研启动基金计划项目(2020-BS-238);辽宁省教育厅基本科研经费项目(LJKZ1025);辽宁省科技厅科技特派团项目(2021JH5/10400025)

第一作者:陈敬鑫,男,博士,副教授

通信作者:米红波 E-mail: mihongbo1001@163.com

酸钠,天津市风航化学试剂有限公司;聚乙二醇 6000(PEG 6000)、Triton X-100,北京沃凯生物科技有限公司;聚乙烯吡咯烷酮(PVPP),上海阿拉丁生化科技股份有限公司。以上试剂均为分析纯级。

## 1.2 仪器与设备

GY-4 数显果实硬度计,北京海富达科技有限公司;CR-400 彩色色差计,柯盛(杭州)仪器有限公司;PAL-3 手持数显糖度计,上海浦予工业科技有限公司;GC-7820 型气相色谱仪,济南爱来宝仪器设备有限公司;Thermo Evolution 201 型紫外-可见分光光度计,广州佳晖科技有限公司;PC-3 塑料真空干燥器,上海越磁电子科技有限公司;Allegar 64R 高速冷冻离心机,美国贝克曼库尔特公司;PBI-Dansensor 便携顶空分析仪,英肖仪器仪表(上海)有限公司。

## 1.3 处理方法

挑选约 300 个南果梨果实,随机平均分为 5 份,其中 2 份果实经 2 kPa 减压处理后,分别放于  $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$  (2 kPa-20  $^{\circ}\text{C}$  组) 和  $(4\pm 2)^{\circ}\text{C}$  (2 kPa-4  $^{\circ}\text{C}$  组) 条件下贮藏;另 2 份果实经 25 kPa 处理后也分别放于  $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$  (25 kPa-20  $^{\circ}\text{C}$  组) 和  $(4\pm 2)^{\circ}\text{C}$  (25 kPa-4  $^{\circ}\text{C}$  组) 条件下贮藏;剩余 1 份放于  $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、101 kPa 条件下模拟其后熟过程,作为对照组(101 kPa-20  $^{\circ}\text{C}$  组),并于样品处理当天开始取样,记为第 0 天。各处理组在减压条件下贮藏 1 个月于  $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、101 kPa 条件下进行后熟,减压贮藏结束当天为第 0 天。取样周期为 5 d,且当天测定硬度、可溶性固形物及可滴定酸等指标;同时去皮切块后迅速放于液氮中冷冻,于  $-80^{\circ}\text{C}$  存放,用于其它指标的测定。

## 1.4 指标测定

1.4.1 色泽和硬度的测定 果实色泽采用色差仪测定<sup>[13]</sup>。在果实赤道色泽均匀部位等距取 3 点,分别测定后读取其  $a^*$  (红绿值) 和  $b^*$  (黄蓝值) 值。果实黄绿色泽的变化以色度角  $h^{\circ}$  表示,  $h^{\circ}$  越小,果实转黄程度越大,成熟度越高。

$$\text{当 } a^* < 0 \text{ 且 } b^* > 0 \text{ 时, } h^{\circ} = \tan^{-1}(b^*/a^*) + 180 \quad (1)$$

$$\text{当 } a^* > 0 \text{ 且 } b^* > 0 \text{ 时, } h^{\circ} = \tan^{-1}(b^*/a^*) \quad (2)$$

硬度测定参照曹建康等<sup>[14]</sup>的方法。果实取样削去表皮,在其赤道处等距选取 3 处进行测定,取

平均值。

1.4.2 可溶性固形物和可滴定酸的测定 可溶性固形物(Total soluble solids, TSS)含量采用手持糖度计测定<sup>[14]</sup>。

可滴定酸(Titratable acid, TA)含量测定采用滴定法<sup>[14]</sup>。果实果肉切块榨汁后称取 10.00 g,转移到 100 mL 容量瓶并定容至刻度,摇匀后静置 30 min 过滤,吸取 20 mL 于三角瓶中,加入 2~3 滴 1% 酚酞指示剂,用已标定的氢氧化钠溶液(0.1 mol/L)滴定至初显粉色且半分钟内不褪色,重复测定取其平均值。

$$\text{可滴定酸含量}(\%) = \frac{V \times c \times f \times (V_1 - V_0)}{V_s \times m} \times 100 \quad (3)$$

式中,  $V$ ——样品提取总体积, mL;  $c$ ——NaOH 浓度, mol/L;  $f$ ——折算系数(以苹果酸计-0.067), g/mmol;  $V_1$ ——滴定样品时消耗 NaOH 体积, mL;  $V_0$ ——滴定蒸馏水消耗 NaOH 体积, mL;  $V_s$ ——滴定时所取滤液体积, mL;  $m$ ——样品质量, g。

1.4.3 呼吸强度与乙烯释放率的测定 参照 Silva 等<sup>[15]</sup>的方法并略作修改。每个处理组随机取 8 个果实,分别置于 1 000 mL 玻璃烧杯中,密封后放于  $(20\pm 0.5)^{\circ}\text{C}$  恒温箱 1.5 h,用 PBI Dansensor 便携顶空分析仪测定烧杯内的二氧化碳含量。呼吸强度以每小时每千克果实释放  $\text{CO}_2$  的质量表示。

$$\text{呼吸强度}[\text{mg CO}_2/(\text{kg}\cdot\text{h})] = \frac{1.96 \times V \times V_{\text{CO}_2}}{m \times t} \quad (4)$$

式中,  $V$ ——烧杯体积, mL;  $V_{\text{CO}_2}$ ——烧杯中  $\text{CO}_2$  的体积分数, %; 1.96——转换系数;  $m$ ——果实质量, g;  $t$ ——测定时间, h。

乙烯释放量用气相色谱法<sup>[15]</sup>测定,以每小时每千克果实释放的乙烯体积表示。

$$\text{乙烯释放量}[\mu\text{L}/(\text{kg}\cdot\text{h})] = \frac{c \times V}{m \times t} \quad (5)$$

式中,  $c$ ——气相色谱测定的样品气体中乙烯含量,  $\mu\text{L/L}$ ;  $V$ ——密闭容器的体积, mL;  $t$ ——测定的时间, h;  $m$ ——果实质量, g。

1.4.4 总酚和类黄酮的测定 总酚和类黄酮测定参照曹建康等<sup>[14]</sup>方法且略有改动。称取约 1.00 g 冷冻果肉,加入 1% 盐酸-甲醇溶液,混匀后于  $4^{\circ}\text{C}$  条件下避光浸提 20 min,于 10 000 r/min  $4^{\circ}\text{C}$  条

件离心 20 min,测定上清液在波长 280 nm 和 325 nm 处的吸光度,以 1%盐酸-甲醇溶液为空白调零。

1.4.5 过氧化物酶和多酚氧化酶活性的测定 过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性测定采用愈创木酚法,多酚氧化酶(Polyphenol oxidase, PPO)活性测定采用比色法,均参照曹建康等<sup>[14]</sup>的方法进行测定。称取约 0.50 g 冷冻南果梨果肉,加入 3 mL 的提取缓冲液,混匀后于 10 000 r/min、4 °C 条件下离心 30 min,收集其上清液即为酶提取液。

POD 反应体系如下:0.5 mL 酶液+3 mL 25 mmol/L 愈创木酚溶液+200  $\mu$ L 0.5 mol/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液,测定其在 4 min 内于波长 470 nm 处吸光度的变化值。以每分钟吸光值变化 0.01 为一个酶活力单位,即 POD 活性以 0.01  $\Delta$ OD<sub>470nm</sub>/min·g 表示。

PPO 反应体系如下:3.0 mL 50 mmol/L 乙酸-乙酸钠缓冲液 (pH=5.5)+1.0 mL 10 mmol/L 邻苯二酚溶液+100  $\mu$ L 酶液,测定其在 4 min 内于波长 420 nm 处吸光度的变化值。以每分钟吸光值变化 1 为一个酶活力单位,即 PPO 活性以  $\Delta$ OD<sub>420nm</sub>/min·g 表示。

## 1.5 数据分析

所有指标测定均重复 3 次以上。使用 SPSS 21.0 软件和 Origin 2018 软件进行统计分析并绘图。采用单因素方差分析和 Duncan's 检验进行显著性差异分析, $P < 0.05$  时视为差异显著。

## 2 结果与讨论

### 2.1 减压贮藏对后熟过程中南果梨色泽和果肉硬度的影响

图 1a 是南果梨果实在后熟过程中果实表皮的变化情况,可以看出减压贮藏可以延缓南果梨后熟过程中果皮的转黄。从图 1b 可知,在后熟过程中所有组的色度角( $h^\circ$ )均呈现下降趋势。减压贮藏 1 个月后,所有处理组的  $h^\circ$  均显著低于对照组 ( $P < 0.05$ ),这说明在减压贮藏期间,南果梨果实表皮有轻微转黄的现象,然而不同减压贮藏条件下果皮转黄的程度没有显著差异 ( $P > 0.05$ )。随着后熟时间的增加,在第 10 天和第 15 天,各处理组的  $h^\circ$  均显著高于对照组 ( $P < 0.05$ );相同减压条件下,4 °C 处理组显著高于 20 °C 处理组 ( $P < 0.05$ ),

说明 25 kPa 和 2 kPa 减压贮藏条件均能不同程度地延缓果实后熟过程中果皮转黄,同时低温和减压之间具有协同作用。在后熟 20 d 时,25 kPa-20 °C、2 kPa-20 °C、25 kPa-4 °C 和 2 kPa-4 °C 的  $h^\circ$  分别比对照高 1.92%、2.09%、2.52% 和 3.51%,且 2 kPa-4 °C 组  $h^\circ$  均显著高于其它组 ( $P < 0.05$ ),说明 2 kPa-4 °C 减压贮藏延缓果实果皮转黄的效果最好,这与图 1a 的结果相一致。前人研究发现,芒果经 12 °C、10 kPa 减压贮藏后可有效延缓其果实的转黄速率<sup>[16]</sup>。Kou 等<sup>[11]</sup>研究发现,70 kPa 和 40 kPa 低压处理可在一定程度上抑制番茄中叶绿素的降解和番茄红素的合成,进而延缓番茄的转红速率。据此推测,减压贮藏对果实变黄的延缓作用可能是由于低压影响了叶绿素、类胡萝卜素等色素物质的合成与代谢,进而抑制果实表皮色泽的变化<sup>[17]</sup>。

由图 1c 可得,在第 0 天时,所有组果肉硬度均无显著差异 ( $P > 0.05$ ),这表明减压贮藏能抑制果实果肉硬度的下降。随着后熟时间的延长,果肉硬度呈现下降的趋势。从第 5 天开始,对照组果肉硬度的下降速度均显著高于其它组 ( $P < 0.05$ );在第 10 天,各组间均有显著性差异 ( $P < 0.05$ ),且处理组与对照组间有极显著差异 ( $P < 0.01$ ),这表明减压贮藏能显著延缓南果梨果实后熟过程中硬度的下降,抑制果实软化,且抑制效果大小为:2 kPa > 25 kPa,4 °C > 20 °C。黄海英等<sup>[18]</sup>研究表明,80 kPa 减压贮藏可通过抑制富士苹果中  $\beta$ -半乳糖苷酶活性和多聚半乳糖醛酸酶而阻止原果胶的水解,延缓贮藏期果实硬度的下降。同样,王晓丹等<sup>[19]</sup>发现 0.025、0.050、0.075 MPa 减压处理均能显著延缓番木瓜果实贮藏过程中硬度下降。由此可见,减压贮藏对于硬度下降的抑制作用可能是因为抑制了后熟期间果实细胞壁降解酶活性及果胶物质的降解,进而延缓果实软化<sup>[20]</sup>。

### 2.2 减压贮藏对后熟过程中南果梨果实可溶性固形物和可滴定酸含量的影响

在后熟过程中,南果梨果实因体内有机物转化为可溶性糖、氨基酸和维生素而导致 TSS 含量呈上升趋势<sup>[21]</sup>。从图 2a 中可得,在减压贮藏结束时,25 kPa-20 °C 和 2 kPa-20 °C 组均显著高于对照 ( $P < 0.05$ ),而 25 kPa-4 °C 和 2 kPa-4 °C 组与对照组无显著差异 ( $P > 0.05$ ),这说明 20 °C 条件下

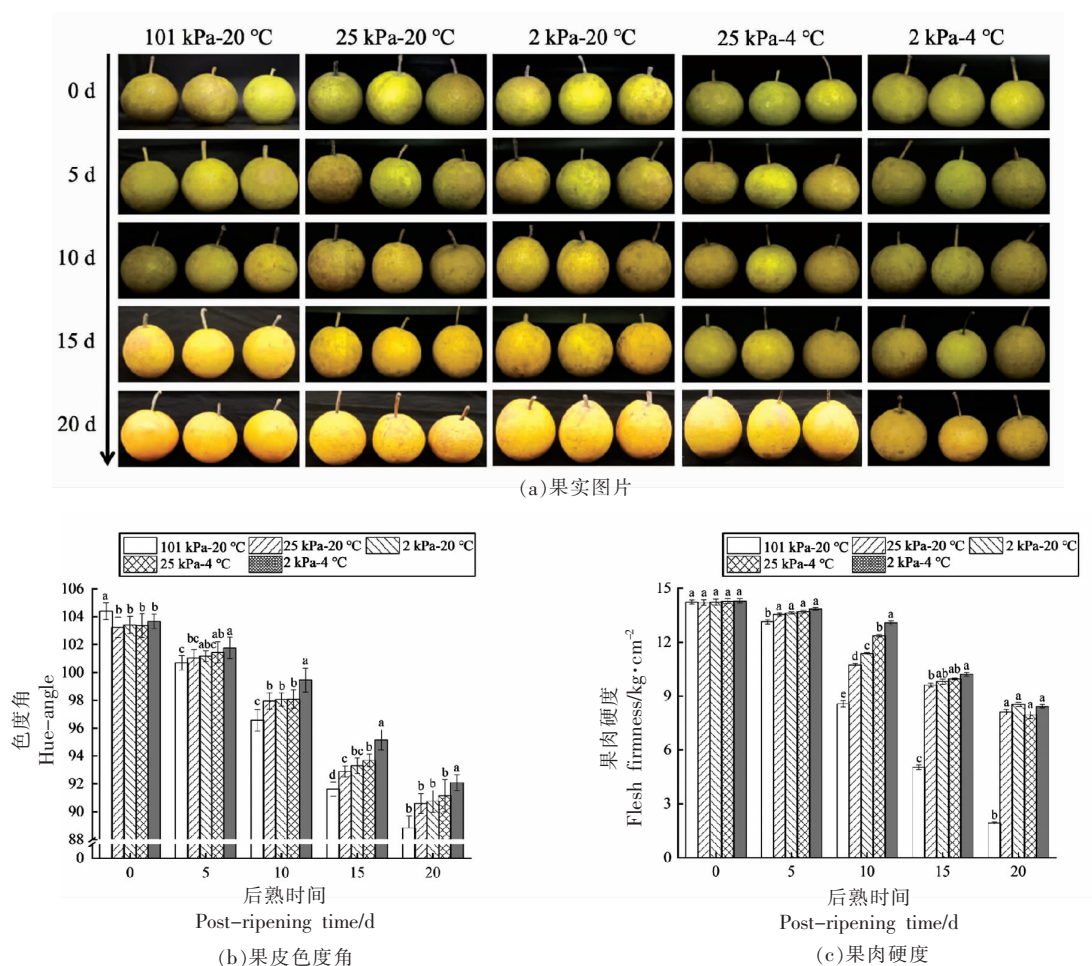
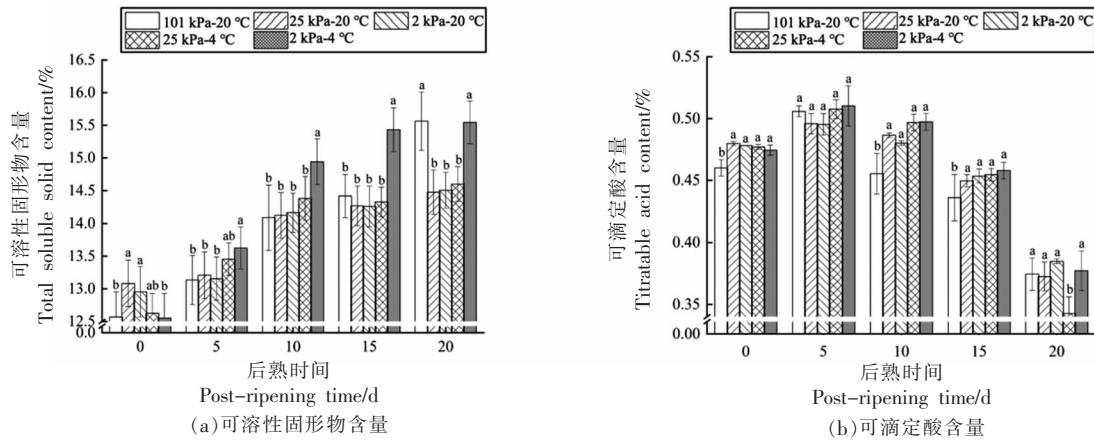


图 1 减压贮藏对后熟过程中南果梨色泽(a)、色度角(b)和果肉硬度(c)变化的影响  
Fig.1 Effects of hypobaric storage on color (a), hue-angle (b) and flesh firmness (c) of 'Nanguo' pear during ripening after storage

减压贮藏的南果梨 TSS 含量的增加仍在发生,而低温有助于进一步抑制减压贮藏期间 TSS 含量的增加<sup>[1]</sup>。正因如此,从第 5 天到第 15 天 2 kPa-4 °C 组的 TSS 含量均显著高于其它组( $P < 0.05$ ),这表明低温与低压可协同抑制南果梨的后熟进程。番木瓜果实经 0.025,0.050,0.075 MPa 减压处理后 TSS 含量也能很好地维持在较高水平上<sup>[20]</sup>;0.05 MPa 减压处理也有助于维持 2~4 °C 下贮藏后杨梅果实中的 TSS 水平<sup>[22]</sup>,这些结果均与本试验的结果相似。

南果梨果实的 TA 含量在后熟过程中呈先上升后下降的趋势,如图 2b 所示。前期 TA 含量的增加说明南果梨中有机酸的合成仍在进行,而随

着后熟进程的发生,其呼吸作用将首先消耗大量的有机酸<sup>[10,23]</sup>。第 0 天时,对照组的 TA 含量低于其它组,这是由于减压贮藏过程中南果梨果实的有机酸合成仍在发生。第 5 天时,所有组的 TA 含量均达到最大值,且各组间无显著差异( $P > 0.05$ )。随后,所有组 TA 含量开始下降,且第 10 天和第 15 天时对照组的 TA 含量均低于其它处理组,差异显著( $P < 0.05$ ),这表明减压贮藏均可抑制南果梨果实 TA 含量的下降。也有研究发现,40 kPa 减压处理可显著抑制杨梅果实 TA 含量的下降<sup>[23]</sup>;而 0.025,0.050 MPa 和 0.075 MPa 处理后 0 °C 贮藏下的蓝莓果实 TA 含量维持在较高水平上<sup>[10]</sup>。



注:不同小写字母表示不同处理组之间的差异显著性( $P < 0.05$ )。

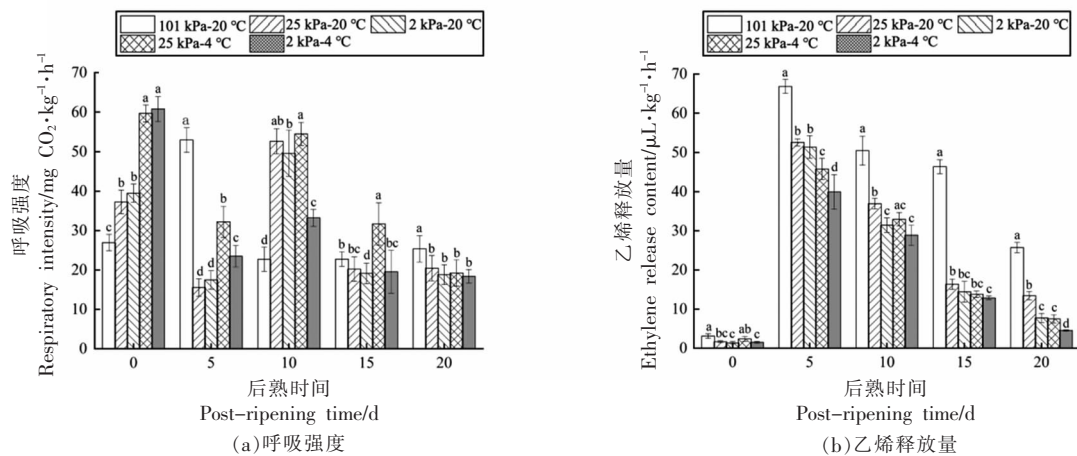
图2 减压贮藏对后熟过程中南果梨果实可溶性固形物(a)和可滴定酸(b)含量的影响

Fig.2 Effects of hypobaric storage on the content of total soluble solids (a) and titratable acids (b) of 'Nanguo' pear during ripening after storage

### 2.3 减压贮藏对后熟过程中南果梨果实呼吸强度和乙烯释放量的影响

由图3a可知,在后熟期间,南果梨果实的呼吸强度呈先上升后下降的趋势,呈典型的呼吸跃变型。第0天时,各处理组果实的呼吸强度均显著高于对照组( $P < 0.05$ ),这可能是由于经减压贮藏的果实转移至20 °C、101 kPa环境条件时,低压低温环境胁迫的突然解除短暂地增强了其呼吸作用<sup>[3]</sup>。至第5天时,各处理组果实的呼吸强度均大幅度降低,且显著低于对照组( $P < 0.05$ )。对照

组果实的呼吸高峰出现在第5天,而各处理组的呼吸高峰出现在第10天,其中2 kPa-4 °C的峰值仅为对照组的62.76%。由此可见,减压贮藏推迟了南果梨后熟过程中呼吸峰的出现,且低压低温的协同作用降低了其果实呼吸峰值。在后熟20 d时,经减压贮藏的南果梨呼吸强度均显著低于对照组( $P < 0.05$ ),说明贮藏期间的低压胁迫对后熟过程中南果梨呼吸作用的抑制可持续至少20 d以上,这对于延长其货架期具有重要意义。资料显示,0.04 MPa和0.07 MPa处理可显著抑制20 °C贮



注:不同小写字母表示不同处理组之间的差异显著性( $P < 0.05$ )。

图3 减压贮藏对后熟过程中南果梨果实呼吸强度(a)和乙烯释放量(b)的影响

Fig.3 Effects of hypobaric storage on respiratory intensity (a) and ethylene release rate (b) of 'Nanguo' pear during ripening after storage

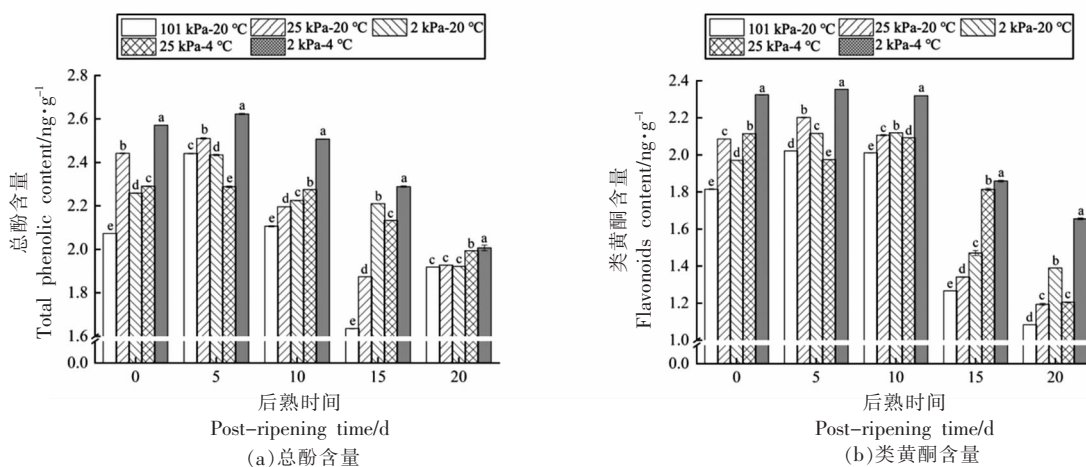
藏下的番茄果实的呼吸速率,推迟其呼吸峰<sup>[11]</sup>;在 20 °C 条件下,45.6 kPa 压力处理会抑制贮藏期间桃子果实的呼吸速率,并延迟其峰值<sup>[12]</sup>;20 kPa 和 30 kPa 减压处理在抑制芒果的呼吸作用的同时也推迟了呼吸峰的出现<sup>[16]</sup>。

由图 3b 可得,在后熟过程中,南果梨果实的乙烯释放量也呈现先上升后下降的趋势,且自第 5 天后,所有处理组乙烯释放量均一直显著低于对照组( $P < 0.05$ ),这说明减压贮藏对南果梨后熟过程中乙烯生成具有较强的抑制作用。此外,所有组果实的乙烯高峰期均出现在第 5 天,且处理组果实的乙烯峰值均显著低于对照组( $P < 0.05$ )。减压贮藏的抑制效果可能是由于减压抑制了乙烯合成相关酶的活性<sup>[24]</sup>。有研究发现,低温也能够抑制乙烯的生成<sup>[3]</sup>。本试验结果表明,经 2 kPa、4 °C 贮藏的

南果梨后熟过程中呼吸作用和乙烯生成的抑制效果最为明显,可见贮藏期间的减压和低温环境对南果梨后熟进程的影响具有协同作用,这与谢建华等<sup>[16]</sup>的研究结果是一致的。

#### 2.4 减压贮藏对后熟过程中南果梨果实总酚和类黄酮含量的影响

果蔬组织中的酚类及类黄酮等次生代谢产物具有较强的抗氧化性<sup>[25]</sup>,与果实贮藏及加工中品质风味形成、成熟衰老及组织褐变等密切相关<sup>[26]</sup>。在后熟期间,果实的总酚含量呈先上升后下降的趋势,如图 4a 所示。第 5 天之后,各组果实的总酚含量逐步下降,到第 10 天时,各处理组的总酚含量均高于对照组( $P < 0.05$ ),这表明减压贮藏能够延缓后熟期间南果梨的总酚含量的下降,从而使果实维持较高的抗氧化活性,延长其货架期。



注:不同小写字母表示不同处理组之间的差异显著性( $P < 0.05$ )。

图 4 减压贮藏对后熟过程中南果梨果实总酚(a)和类黄酮(b)含量的影响

Fig.4 Effects of hypobaric storage on total phenols (a) and flavonoids content (b) of 'Nanguo' pear during post-ripening

由图 4b 可得,后熟过程中南果梨类黄酮含量的变化趋势与总酚含量相似。从后熟第 10 天起,减压贮藏组的类黄酮含量均显著高于对照组( $P < 0.05$ ),这表明减压贮藏也可以减缓后熟过程中南果梨类黄酮含量的下降。同样,后熟期间,2 kPa-4 °C 处理组南果梨的类黄酮含量始终保持最高。以上结果表明减压贮藏可以延缓总酚及类黄酮含量的下降。Huan 等<sup>[6]</sup>采用(25±5)kPa 减压处理可使猕猴桃维持较高的总酚含量;而 0.025,0.05 MPa 和 0.075 MPa 减压贮藏能显著维持蓝莓果实的总

酚及类黄酮含量,且 0.025 MPa 贮藏 50 d 后的效果最佳<sup>[12,27]</sup>。

#### 2.5 减压贮藏对后熟过程中南果梨果实过氧化物酶和多酚氧化酶活性的影响

由图 5a 可知,在后熟过程中,所有组南果梨果实的 POD 活性均呈先上升后下降趋势。第 5 天时,各处理组南果梨的 POD 活性均显著高于对照组( $P < 0.05$ ),且各处理组间差异也显著( $P < 0.05$ ),这表明减压和低温均有益于提高果实的 POD 活性。自第 10 天起,各处理组的 POD 活性开始虽有

所下降,但 25 kPa-4 °C 和 2 kPa-4 °C 组的 POD 活性仍保持高于对照组,可见减压贮藏不仅提高了后熟期间南果梨果实的 POD 活性,并可延缓其活性的下降。James 等<sup>[10]</sup>研究表明 0.025, 0.050 MPa 和 0.075 MPa 不同减压贮藏可显著提高蓝莓果实 POD 活性;(10+5), (80+5)kPa 2 个减压处理能有效保持水蜜桃中 POD 酶活性<sup>[9]</sup>;0.04 MPa 和 0.07 MPa 减压处理后,番茄果实能维持较高的 POD 活性<sup>[11]</sup>;40 kPa、(0±0.5)°C 贮藏杨梅果实后,不仅提高了前期 POD 活性,同时也减缓了后期下降速率,使其活性维持在较高水平<sup>[23]</sup>;Hashmi 等<sup>[28]</sup>也发现 50 kPa 短时减压处理会提高草莓果实的 POD 活性。

如图 5b 所示,在整个后熟过程中,PPO 活性一直呈下降趋势,且对照组的 PPO 活性均显著高

于各处理组( $P < 0.05$ ),这表明减压贮藏有效抑制了后熟期间南果梨的 PPO 活性。Li 等<sup>[29]</sup>研究表明,25 kPa 减压贮藏可抑制采后鸭梨果实贮藏过程中 PPO 活性,延长其贮藏期。可见,减压贮藏提高了南果梨果实 POD 活性并抑制 PPO 活性,这有效地增强了南果梨果实的抗氧化能力<sup>[25]</sup>,从而维持果实内的氧化还原平衡,延缓其成熟衰老,维持其良好品质<sup>[30]</sup>。对于蓝莓果实,0.025, 0.05 MPa 和 0.075 MPa 减压贮藏可显著降低其 PPO 活性<sup>[27]</sup>;笋剥壳后于温度(6±1)°C、相对湿度 80%~85%、55 kPa 减压环境下贮藏后,其 PPO 活性显著受到了抑制<sup>[31]</sup>;50 kPa、减压处理 4 h 可在一定程度上抑制草莓果实 PPO 活性<sup>[28]</sup>;0.025 MPa 低压处理的鸭梨果实中 PPO 活性比对照果实低 70%,可见 0.025 MPa 可显著降低 PPO 活性<sup>[29]</sup>。

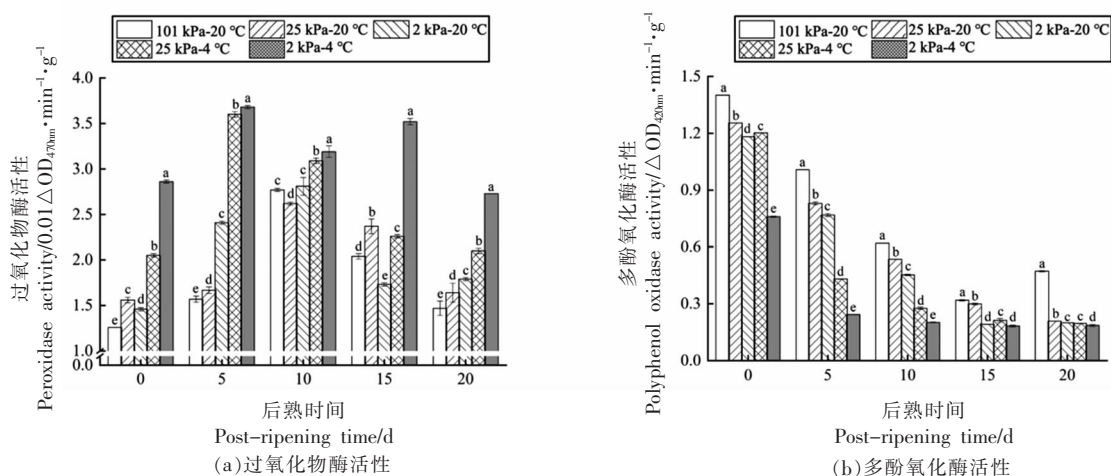


图 5 减压贮藏对后熟过程中南果梨果实过氧化物酶(a)和多酚氧化酶(b)活性的影响

Fig.5 Effects of hypobaric storage on peroxidase (a) and polyphenol oxidase (b) activities of 'Nanguo' pear during ripening after storage

### 3 结论

研究了 2 kPa 和 25 kPa 减压贮藏对南果梨果实后熟进程及抗氧化能力的影响。结果表明,25 kPa 和 2 kPa 减压贮藏均显著抑制了后熟过程中南果梨色泽的变化,减缓了其硬度的下降,降低了乙烯释放率,并推迟了呼吸高峰的出现;2 kPa 处理维持了后熟过程中较高的 TSS 和 TA 水平,延缓了类黄酮含量的下降。同时,25 kPa 和 2 kPa 减压贮藏均延缓了总酚含量和 POD 活性的下

降,抑制 PPO 的活性,从而提高了其抗氧化能力。此外,2 kPa 减压处理对南果梨后熟进程的延缓作用优于 25 kPa 处理,且贮藏过程中减压与低温条件具有一定的协同作用。

### 参 考 文 献

- [1] SHI F, ZHOU X, ZHOU Q, et al. Membrane lipid metabolism changes and aroma ester loss in low-

- temperature stored 'Nanguo' pears[J]. Food Chemistry, 2017, 245(15): 446-453.
- [2] 李莉峰, 叶春苗, 韩艳秋. 不同干燥方式对南果梨干理化指标及质构特性的影响[J]. 食品工业, 2018, 39(10): 46-49.
- LI L F, YE C M, HAN Y Q. Effects of different drying methods on dry physicochemical index and texture characteristics of 'Nanguo' pear[J]. Food Industry, 2018, 39(10): 46-49.
- [3] SHI F, ZHOU X, YAO M M, et al. Low-temperature stress-induced aroma loss by regulating fatty acid metabolism pathway in 'Nanguo' pear[J]. Food Chemistry, 2019, 297(5): 124927.
- [4] WANG J W, JIANG Y G, LI G D, et al. Effect of low temperature storage on energy and lipid metabolisms accompanying peel browning of 'Nanguo' pears during shelf life[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 139(1): 75-81.
- [5] 李磊, 李栋, 方旭东, 等. 南果梨贮藏期果皮超微结构变化与褐变的关系[J]. 食品科技, 2016, 41(9): 60-69.
- LI L, LI D, FANG X D, et al. The relationship between the peel ultrastructural changes and browning of 'Nanguo' pear fruit [J]. Food Science and Technology, 2016, 41(9): 60-69.
- [6] HUAN C, LI H H, JIANG Z Y, et al. Effect of hypobaric treatment on off-flavour development and energy metabolism in 'Bruno' kiwifruit[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 136: 110349.
- [7] THOMPSON A K. Fruit and vegetable storage: Hypobaric, hyperbaric and controlled atmosphere [M]. London: Springer Briefs in Food, Health, and Nutrition Springer, 2016: 44-47.
- [8] 陈敬鑫, 徐帆, 葛永红, 等. 采后果实减压贮藏技术的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(8): 250-255.
- CHEN J X, XU F, GE Y H, et al. Advances in hypobaric storage of postharvest fruits[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(8): 250-255.
- [9] 陈文烜, 宋丽丽, 廖小军. 减压对水蜜桃采后呼吸途径和活性氧代谢的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 16(7): 170-175.
- CHEN W X, SONG L L, LIAO X J. Effects of hypobaric storage on respiration pathway and active oxygen metabolism in Juicy peach fruit[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(7): 170-175.
- [10] JAMES A, YAO T, MA G W, et al. Effect of hypobaric storage on Northland blueberry bioactive compounds and antioxidant capacity[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 291(3): 110609.
- [11] KOU X H, WU J Y, WANG Y, et al. Effects of hypobaric treatments on the quality, bioactive compounds, and antioxidant activity of tomato[J]. Journal of Food Science, 2016, 81(7): H1816-H1824.
- [12] ZHANG X D, XIN L, WANG C, et al. Short-term hypobaric treatment enhances chilling tolerance in peaches[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(9): e15362.
- [13] FANG H X, ZHOU Q, CHENG S C, et al. 24-Epibrassinolide alleviates postharvest yellowing of broccoli via improving its antioxidant capacity [J]. Food Chemistry, 2021, 365: 130529.
- [14] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 28-105.
- CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Experiment guidance of postharvest physiological and biochemical of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 28-105.
- [15] SILVA W B, SILVA G M C, SANTANA D B, et al. Chitosan delays ripening and ROS production in guava (*Psidium guajava* L.) fruit[J]. Food Chemistry, 2018, 242(9): 232-238.
- [16] 谢建华, 翁建淋, 郑俊峰, 等. 减压冷藏对芒果贮藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(7): 129-132, 159.
- XIE J H, WENG J L, ZHENG J F, et al. Effects of hypobaric and refrigerated preservation on postharvest quality of mango fruit [J]. Food & Machinery, 2017, 33(7): 129-132, 159.
- [17] KIM K, YOO J, LEE J, et al. Effects of 1-methylcyclopropene (1-MCP) and polyethylene (PE) film liner treatments on the fruit quality of cold-stored 'Gamhong' apples[J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2018, 59(1): 51-57.
- [18] 黄海英, 李晓娟, 李正英. 富士苹果在减压贮藏过程中相关品质指标与硬度的相关性分析[J]. 农产品加工, 2020(8): 59-62, 68.
- HUANG H Y, LI X J, LI Z Y. The correlative studies on related quality index and fruit hardness in the process of hypobaric storage of fushi apple[J]. Farm Products Processing, 2020(8): 59-62, 68.



- [19] 王晓丹, 王雅君, 曾教科, 等. 采后减压预处理对番木瓜果实贮藏品质及抗氧化活性的影响[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(2): 16–21.  
WANG X D, WANG Y J, ZENG J K, et al. Effect of different gradients of hypobaric pretreatment on storage qualities and antioxidant activities of papaya [J]. Preservation and Processing, 2020, 20(2): 16–21.
- [20] NGUYEN L L P, PHAM T T, SYIUM Z H, et al. Delay of 1-MCP treatment on post-harvest quality of ‘Bosc Kobak’ Pear[J]. Horticulturae, 2022, 8(2): 89–90.
- [21] 李美玲, 林育钊, 王慧, 等. 能量状态在果蔬采后衰老中的作用及其调控研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(9): 290–295.  
LI M L, LIN Y Z, WANG H, et al. Recent advances in the role and regulation of energy status in senescence of harvested fruits and vegetables [J]. Food Science, 2019, 40(9): 290–295.
- [22] 郑俊峰, 谢建华, 张巧芬, 等. 减压贮藏对杨梅果实采后品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(2): 33–37.  
ZHEN J F, XIE J H, ZHANG Q F, et al. Effects of hypobaric storage on postharvest qualities of chinese bayberry (*Myrica rubra*) fruits[J]. Preservation and Processing, 2021, 21(2): 33–37.
- [23] 杨虎清, 吴峰华, 周存山, 等. “东魁”杨梅在减压贮藏过程中品质及相关酶活性的变化[J]. 中国食品学报, 2010, 10(1): 161–166.  
YANG H Q, WU F H, ZHOU C S, et al. Changes of quality and some enzyme activities of ‘Dongkui’ chinese bayberry during hypobaric storage [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2010, 10(1): 161–166.
- [24] ZHANG G J, CUI X H, NIU J P, et al. Visible light regulates anthocyanin synthesis via malate dehydrogenases and the ethylene signaling pathway in plum (*Prunus salicina* L.)[J]. Physiologia Plantarum, 2021, 172(3): 1739–1749.
- [25] KOBORI R, YAKAMI S, KAWASAKI T, et al. Changes in the polyphenol content of red raspberry fruits during ripening [J]. Horticulturae, 2021, 7(12): 569.
- [26] ZHAO H D, WANG B G, CUI K B, et al. Improving postharvest quality and antioxidant capacity of sweet cherry fruit by storage at near-freezing temperature [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 246(10): 68–78.
- [27] LI H, JAMES A, HE X M, et al. Effect of hypobaric treatment on the quality and reactive oxygen species metabolism of blueberry fruit at storage [J]. CyTA—Journal of Food, 2019, 17(1): 937–948.
- [28] HASHMI M S, EAST A R, PALMER J S, et al. Hypobaric treatment stimulates defence-related enzymes in strawberry[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 85(5): 77–82.
- [29] LI J, BAO X L, XU Y C, et al. Hypobaric storage reduced core browning of Yali pear fruits [J]. Scientia Horticulturae, 2017, 225: 547–552.
- [30] FAN Y T, LI C Y, LI Y H, et al. Postharvest melatonin dipping maintains quality of apples by mediating sucrose metabolism [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2022, 174: 43–50.
- [31] DAI D, ZHENG J, ZHOU C M, et al. Effects of hypobaric storage on preservation quality of shelled bamboo shoots (*Acidosasa edulis*) and its underlying physiological and molecular mechanisms[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(2): 366.

## Effects of Hypobaric Storage on Ripening Progress and Antioxidant Capacity of ‘Nanguo’ Pear

Chen Jingxin<sup>1,2</sup>, Zhang Yali<sup>1</sup>, Gao Xiaoya<sup>1</sup>, Lü Jingyi<sup>1,2</sup>, Ge Yonghong<sup>1,2</sup>, Mi Hongbo<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>College of Food Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121013, Liaoning

<sup>2</sup>National & Local Joint Engineering Research Center of Storage, Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products, Jinzhou 121013, Liaoning)

**Abstract** To investigate the effect of hypobaric storage on the ripeness progress and antioxidant capacity of ‘Nanguo’ pear, pears at commercial ripeness stage were used as experimental materials and stored under 2 kPa and 25 kPa low pressure conditions for one month before being transferred to the condition of (20±2) °C and 101 kPa to simulate the

ripening progress and observe their ripening quality and antioxidant capacity. The results showed that 2 kPa and 25 kPa hypobaric conditions could maintain the ripening quality of 'Nanguo' pears, the yellowing of the fruit peel, and the reduction of fruit firmness, total phenolic and flavonoid contents were inhibited. The contents of soluble solids and titratable acids were maintained well. The appearance of respiratory peak and decreased ethylene release were delayed. Meanwhile, the activity of polyphenol oxidase was decreased, and peroxidase activity was increased. Notably, 2 kPa hypobaric storage at  $(4\pm 2)$  °C performed better to delay the ripening process of 'Nanguo' pears after storage, and their antioxidant capacity was also maintained well.

**Keywords** hypobaric; fruit ripeness; color; respiratory peak; peroxidase