

# 不同氧分压和相对湿度气调冰箱对 4 种蔬菜保鲜效果的影响

崔伊, 谷雨阁, 郭慧媛\*

(中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 为探究新型气调冰箱对蔬菜的保鲜效果, 以普通冰箱作为对照, 选取菠菜、生菜、黄瓜和蒜薹 4 种蔬菜分别置于气调冰箱和普通冰箱中冷藏, 分析蔬菜在贮藏期间理化品质、酶活性的变化以及霉菌、酵母菌的繁殖情况。试验证明, 气调冰箱叶菜失重率仅为 8%~12%, 黄瓜和蒜薹失重率低于 5%, 随着氧分压的降低, 失重率降低。蔬菜在氧分压为 15%、相对湿度为 86% 的 A3 气调冰箱贮藏 12 d 后, 生菜可溶性固形物含量提高了 14.41%, 黄瓜可溶性固形物含量仅下降了 21.28%。叶菜总酚含量增加, 菠菜总酚提高了 46.48%, 生菜总酚提高了 56.19%。A3 冰箱内蔬菜细胞膜渗透率变化较小, 生菜仅为 18.65%。气调冰箱对蔬菜过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 和多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO) 活性抑制作用增强, A3 冰箱内蔬菜 POD 酶活性呈现先上升后下降趋势, 显著低于其他贮藏条件。上述结果表明, 供试三种气调冰箱中氧分压为 15%, 相对湿度为 86% 的 A3 气调冰箱对菠菜、生菜、黄瓜和蒜薹的保鲜效果最佳。研究结果为气调技术在冰箱保鲜中的应用提供理论指导。

**关键词:** 气调冰箱; 冷藏保鲜; 蔬菜; 感官品质; 营养品质; 酶活性

文章编号: 1673-9078(2023)08-133-141

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.8.0922

## Effects of Oxygen Partial Pressure and Relative Humidity of Modified Atmosphere Refrigerators on Freshness Preservation of Four Vegetables

CUI Yi, GU Yuge, GUO Huiyuan\*

(College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To study the effects of new modified atmosphere refrigerators on the freshness preservation of vegetables, four vegetables namely spinach, lettuce, cucumber, and garlic shoots, were selected and placed in a modified atmosphere refrigerator and an ordinary refrigerator, respectively. The changes in their physicochemical quality and enzyme activity as well as the reproduction of mold and yeast during storage were analyzed. The experiment showed that the weight loss rates of leafy vegetables in the modified atmosphere refrigerator were only 8%~12%, and the weight loss rates of cucumber and garlic shoots were <5%. Furthermore, the weight loss rate declined as the oxygen partial pressure decreased. The soluble solid contents of leafy vegetables increase by 14.4% and that of cucumber decreased by only 21.28% after 12 d of storage in an A3 modified atmosphere refrigerator with an oxygen partial pressure of 15% and a relative humidity of 86%. The total phenolic contents of leafy vegetables increased by 46.48% for spinach and 56.19% for lettuce. The cell membrane permeability of vegetables stored in the A3 refrigerator changed by only 18.65% for lettuce. The inhibition effects on peroxidase (POD) and polyphenol oxidase (PPO) activities were enhanced by the modified atmosphere refrigerator. Meanwhile, the POD activities of vegetables in the A3 refrigerator showed an increasing and then decreasing trend, and they were significantly lower than those of vegetables under other storage conditions. The above results suggest that, among the three modified atmosphere refrigerators tested, the A3 refrigerator with 15% oxygen partial pressure and 86% relative humidity gives the best preservation effects on spinach, lettuce, cucumber, and garlic shoots. The results provide theoretical guidance for the application of modified atmosphere technology in food preservation by refrigerator.

引文格式:

崔伊, 谷雨阁, 郭慧媛. 不同氧分压和相对湿度气调冰箱对 4 种蔬菜保鲜效果的影响[J]. 现代食品科技, 2023, 39(8): 133-141

CUI Yi, GU Yuge, GUO Huiyuan. Effects of oxygen partial pressure and relative humidity of modified atmosphere refrigerators on freshness preservation of four vegetables [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(8): 133-141

收稿日期: 2022-07-21

作者简介: 崔伊 (2001-), 女, 本科生, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: cy15582665222@163.com

通讯作者: 郭慧媛 (1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 农产品加工及贮藏, E-mail: guohuiyuan@cau.edu.cn

**Key words:** modified atmosphere refrigerators; cold storage; vegetables; sensory quality; nutritional quality; enzyme activity

蔬菜是人体营养物质的主要来源之一,在国民膳食结构中不容忽视。合理饮食离不开蔬菜的适量摄入。相关数据显示,由于缺乏及时有效的保藏和利用,我国每年腐烂变质蔬菜高达 8 000 万 t<sup>[1]</sup>;且随着人民生活水平的提高和健康观念的不断深入,人们更加关注食材的品质和安全,并对食材的新鲜程度和风味口感提出了更高的要求。因此研究和发 展家用冰箱保鲜技术以延缓品质劣变,提高蔬菜贮藏期间品质,对提高我国蔬菜综合利用、改善人民生活品质具有重要意义。

冰箱作为家庭保鲜食物的重要载体,其影响蔬菜贮藏品质变化的关键因素为温度、相对湿度及气体成分<sup>[2]</sup>。目前的普通冰箱能够调控温度,但由于缺少湿度控制装置,冰箱湿度控制在 30%~70%之间<sup>[3]</sup>,不符合蔬菜的最佳贮藏湿度范围(一般为 85%~90%),且湿度波动较大;除此之外,冰箱运行时的气体组分和湿度也会受到冰箱门开关造成的影响,进而对蔬菜的贮藏品质产生不利影响。

为此,新型气调冰箱利用红外传感器对不同功能区精准控温,应用独特的富氧膜分离(Membrane Separation Atmosphere, MSA)技术综合调节氧分压和相对湿度,提高蔬菜的保鲜效果<sup>[4]</sup>。根据气体溶解度和扩散系数的不同,氧气和氮气的渗透速率不同。在气泵的作用下,氧气的渗透速率较快而排出,从而降低冰箱氧分压。但在冰箱工作过程中,气体渗透的同时会有水分的散失,进而造成冰箱相对湿度的被动调控。此外,新型气调冰箱抽屉滑轨自锁密封结构能够长期使蔬菜贮藏在特定较低氧分压、较高相对湿度环境下。目前,关于冰箱的温度和相对湿度因素对食品的保鲜效果的研究较多<sup>[5]</sup>,而对于冰箱气体成分调节的研究相对较少。为获得蔬菜最佳保鲜效果,新型气调冰箱综合调节氧分压和相对湿度的条件参数是研究的关键。

为了探究新型气调冰箱低氧分压与高湿度综合作用对蔬菜保鲜效果的影响,以不同氧分压和相对湿度的气调冰箱为研究对象,分别选取叶菜、果菜、茎菜中代表性蔬菜(生菜、蒜薹、菠菜、黄瓜),测定在贮藏期间(0、3、6、9、12 d)理化品质、生理代谢和微生物的变化,研究三种不同新型气调冰箱(A1:氧分压 21%,相对湿度 90%;A2:氧分压 18%,相对湿度 88%;A3:氧分压 15%,相对湿度 86%)对蔬菜品质的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

#### 1.1.1 材料

试验用材料菠菜、生菜、黄瓜和蒜薹购于北京美廉美超市(学清路店)。挑选大小均匀、成熟度一致、无病虫害、无机械损伤的蔬菜样品。

#### 1.1.2 试剂

浓盐酸、甲醇色谱纯、酒石酸钾钠、氢氧化钠、冰醋酸、无水醋酸钠、聚乙二醇 6000、聚乙烯吡咯烷酮、TritonX-100、愈创木酚、过氧化氢、邻苯二酚、孟加拉红琼脂、磷酸盐缓冲液、平板计数琼脂培养基、无菌生理盐水。以上试剂,无特殊说明外均为分析纯。

### 1.2 仪器与设备

AR5120 型精密电子天平,美国 OHAUS 公司;PAL-1 型数显糖度仪,日本 Atago 公司;DDS-11A 台式电导率仪,上海精密仪器仪表有限公司;LDZX 型立式压力蒸汽灭菌器,上海申安医疗器械厂;DK-S28 型电热恒温水浴锅,上海精宏实验设备有限公司;Centrifuge 5415D 型离心机,德国 Eppendorf 公司;THZ-C 型恒温振荡器,太仓市实验设备厂;SW-CJ-ICU 型洁净工作台,江苏苏净集团有限公司;UV1240 型紫外-可见光分光光度计,日本 Shimadzu 公司;SPX-400 型智能型生化培养箱,宁波江南仪器厂。

BCD-520WICAU1 实验冰箱:参数为温度 4℃,A1 冰箱:氧分压 21.0%~21.5%,相对湿度 90%~92%;A2 冰箱:氧分压 18.0%~18.5%,相对湿度 87%~89%;A3 冰箱:氧分压 15.0%~15.5%,相对湿度 84%~86%,样品放置于气调室中。

BCD-728WDCA 普通冰箱:参数为温度 4℃,氧分压 21.0%~21.5%,相对湿度 82.0%~83.0%。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 样品处理及保鲜

四种新鲜蔬菜分别去除泥沙、表面多余水分和萎蔫损坏部分。将各种蔬菜分成 4 组,分别放入无菌袋中开口放入冰箱的冷藏室贮藏,贮藏时间为 12 d,分别于贮藏 0、3、6、9、12 d 取出蔬菜样品,进行测定。贮藏期间内,为保证气调贮藏效果,每天开关冰箱箱门各 1 次。



### 1.3.2 失重率测定

采用称质量法,通过精密电子天平进行称量。按照以下公式计算样品失重率。

$$R = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

$R$ ——样品失重率, %;

$W_0$ ——样品初始质量, g;

$W_1$ ——每次测定的最终质量, g。

### 1.3.3 营养指标测定

#### 1.3.3.1 可溶性固形物的测定

采用数显糖度计测定。在蔬菜不同部位均匀取汁液数滴,用数显糖度计直接测定。

#### 1.3.3.2 总酚的测定

采用曹建康等<sup>[6]</sup>的方法,用紫外分光光度法测定总酚。称取 2.0 g 果蔬组织样品,加入预冷的  $\varphi=1\%$  HCl-甲醇溶液在冰浴条件下充分匀浆,并于 4 °C 离心提取上清液,在波长 280 nm 下测定溶液的吸光值。以每克果蔬组织在波长 280 nm 处吸光度值表示总酚含量。

### 1.3.4 生理代谢指标测定

#### 1.3.4.1 细胞膜渗透率的测定

用纱布擦净样品,用打孔器取直径 8 mm、大小相同的圆片,共称取 2.0 g。采用曹建康等<sup>[6]</sup>的方法,用电导率仪测定,每个试验组重复做 3 次。按照以下公式计算细胞膜渗透率。

$$\gamma_e = \frac{Y_1}{Y_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

$\gamma_e$ ——细胞膜渗透率, %。

$Y_1$ ——蔬菜组织提取液电导率;

$Y_0$ ——蔬菜组织加热死亡后提取液的电导率。

#### 1.3.4.2 过氧化物酶活性的测定

采用愈创木酚氧化法测定<sup>[7]</sup>过氧化物酶活性,称取 5.0 g 果蔬组织样品,加入 5.0 mL 提取缓冲液在冰浴条件下研磨成匀浆,于 4 °C、12 000 r/min 离心 30 min 后收集上清液。取 0.5 mL 酶提取液加入 3.0 mL 25 mmol/L 愈创木酚溶液和 200  $\mu$ L 0.5 mol/L  $H_2O_2$  溶液反应并开始计时,在反应 15 s 时开始记录反应体系在波长 470 nm 处吸光值,每间隔 1 min 记录一次并连续测定获取至少 6 个点数据,重复三次。以每毫克果蔬样品每分钟吸光度变化值增加 1 为 1 个活性单位,计算公式为:

$$U_1 = \frac{\Delta OD_{470} \times V_1}{V_{s1} \times m_1} \quad (3)$$

式中:

$U_1$ ——过氧化物酶活性,  $\Delta OD_{470}/(\text{min} \cdot \text{mg})$ ;

$\Delta OD_{470}$ ——每分钟反应混合液吸光度变化值;

$V_1$ ——提取液体积, mL;

$V_{s1}$ ——吸取样品液体积, mL;

$m_1$ ——样品质量, g。

#### 1.3.4.3 多酚氧化酶活性的计算

采用邻苯二酚氧化法测定<sup>[8]</sup>多酚氧化酶活性,称取 5.0 g 果蔬组织样品,加入 5.0 mL 提取缓冲液在冰浴条件下研磨成匀浆,于 4 °C、12 000 r/min 离心 30 min 后收集上清液。取 100  $\mu$ L 酶提取液加入 4.0 mL 50 mmol/L、pH 值 5.5 的乙酸-乙酸钠缓冲液和 1.0 mL 50 mmol/L 邻苯二酚溶液反应并开始计时,在反应 15 s 时开始记录反应体系在波长 420 nm 处吸光值,每间隔 1 min 记录一次并连续测定获取至少 6 个点数据,重复三次。以每毫克果蔬样品每分钟吸光度变化值增加 1 为 1 个活性单位,计算公式为:

$$U_2 = \frac{\Delta OD_{420} \times V_2}{V_{s2} \times m_2} \quad (4)$$

式中:

$U_2$ ——多酚氧化酶活性,  $\Delta OD_{420}/(\text{min} \cdot \text{mg})$ ;

$\Delta OD_{420}$ ——每分钟反应混合液吸光度变化值;

$V_2$ ——提取液体积, mL;

$V_{s2}$ ——吸取样品液体积, mL;

$m_2$ ——样品质量, g。

#### 1.3.4.4 霉菌和酵母菌测定

参照 GB 4789.15 食品安全国家标准食品微生物学检验霉菌和酵母计数测定方法测定<sup>[9]</sup>。

### 1.3.5 数据分析

实验各指标测定设 3 个平行,实验数据为 3 次重复试验的平均值 $\pm$ 标准差,实验数据采用 Excel 2019、R 4.2.0、GraphPad Prism 8 软件进行统计分析与制图:同一时间下,不同冰箱冷藏条件间采用单因素方差分析伴随 Duncan 多重检验,以  $P < 0.05$  为显著性标准。贮藏 12 d 的蔬菜样品与新鲜蔬菜间的差异采用  $t$  检验,在表中用\*、\*\*、\*\*\*表示与新鲜蔬菜间存在显著性差异(分别代表  $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 、 $P < 0.001$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同氧分压和相对湿度气调冰箱对蔬菜失重率的影响

失重率是反映蔬菜新鲜程度的重要指标,抑制细胞呼吸和叶片的蒸腾作用对保持蔬菜水分和新鲜状态具有重要作用。在贮藏期间,新型气调冰箱低氧分压

和高湿度综合调节能够有效抑制蔬菜呼吸作用和蒸腾作用,进而降低其失重率并维持新鲜状态<sup>[10]</sup>。四种蔬菜在贮藏期间的失重率变化见图1。

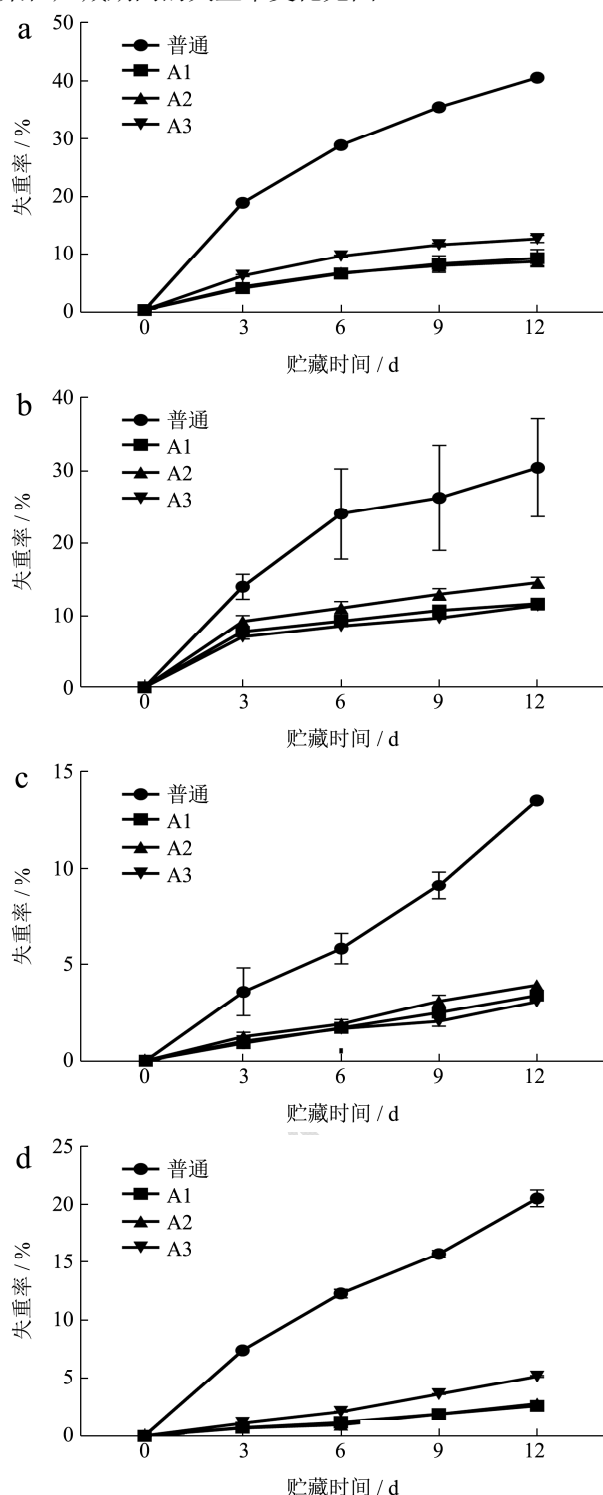


图1 冷藏过程中菠菜(a)、生菜(b)、黄瓜(c)、蒜薹(d)失重率的变化

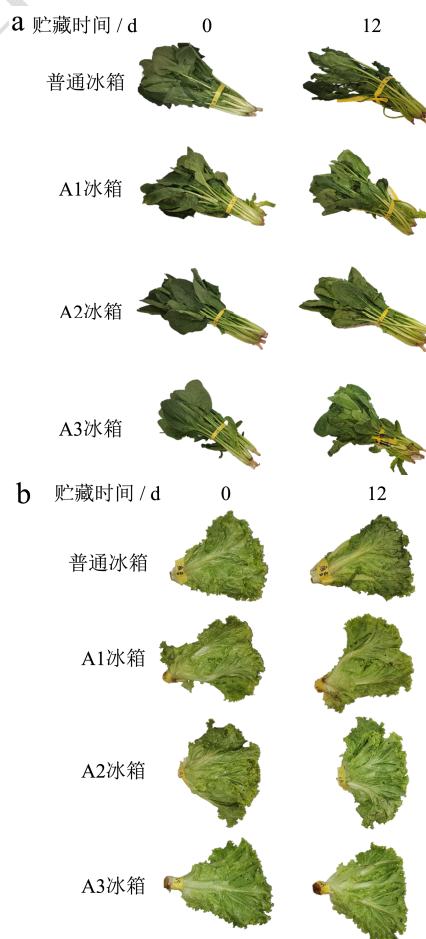
Fig.1 The change of weight loss rate of spinach (a), lettuce (b), cucumber (c), garlic moss (d) during cold storage

图1可以看出,随着贮藏时间的增加,失重率上升。以菠菜和生菜为代表的叶菜类蔬菜失重率最高,

且在普通冰箱和气调冰箱中差别也最大。经测定,普通冰箱内叶菜类失重率高达30%~40%,而气调冰箱内蔬菜失重率仅8%~12%,A3冰箱内贮藏的叶菜类则不到10%。黄瓜、蒜薹在气调冰箱内失重率仅在5%以下。王剑功等<sup>[2]</sup>的研究证明普通冰箱内贮藏的叶菜失重率是高湿度冰箱组的1.35~1.99倍,发现高湿度冰箱在延长果蔬贮藏期的重要作用,本研究成果普通冰箱叶菜失重率是气调冰箱组的3.16~4.55倍左右,其原因主要是气调冰箱组增加氧分压控制因素,可更好地降低叶菜失重率。由于叶菜类比表面积大所造成的呼吸速率与蒸腾速率较强,导致其失重率较高。而黄瓜和蒜薹比表面积较小,外皮较紧实,呼吸和蒸腾速率较小,因此失重率较低。

蔬菜外观品质的变化直接影响着其商品价值的高低,同时在一定程度上可以反映蔬菜贮藏失重率的变化,不同冰箱中四种蔬菜的表现品质变化见图2。

蔬菜采后贮藏期间新陈代谢和呼吸作用旺盛,快速消耗营养物质,外观品质变化大<sup>[11]</sup>。图2看出,在贮藏末期蔬菜在普通冰箱中失去光泽、颜色变深,明显失水变小,表面萎蔫且褐变明显,而在3台气调冰箱中的蔬菜较为新鲜,色泽变淡但仍有清香味,形态良好,气调冰箱对蔬菜外观品质的保藏效果更佳。



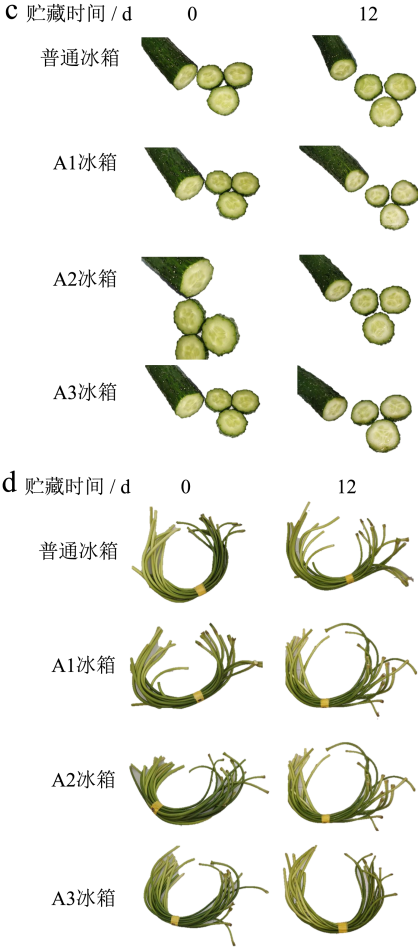


图2 冷藏过程中菠菜 (a)、生菜 (b)、黄瓜 (c)、蒜薹 (d) 外观品质的变化

Fig.2 Changes of appearance quality of spinach (a), lettuce (b), cucumber (c), garlic moss (d) during cold storage

2.2 不同氧分压和相对湿度气调冰箱对蔬菜

营养指标的影响

2.2.1 不同氧分压和相对湿度气调冰箱对蔬菜可溶性固形物的影响

可溶性固形物含量直接反映果蔬成熟程度和贮藏过程中的品质状况<sup>[12]</sup>。淀粉和可溶性固形物之间的相互转化,与糖类物质在蔬菜体内合成、运输以及代谢调控有关<sup>[13]</sup>。

从表1可以看出,贮藏12 d后,气调冰箱内蔬菜的可溶性固形物与普通冰箱相比有显著性差异( $P<0.05$ )。但与贮藏0 d相比,气调冰箱贮藏12 d的蔬菜可溶性固形物无明显差异。在贮藏12 d后四种蔬菜可溶性固形物含量变化趋势不同。黄瓜在贮藏12 d后可溶性固形物含量下降,其中普通冰箱可溶性固形物含量显著低于气调冰箱A1、A2、A3组( $P<0.05$ );A3组可溶性固形物含量变化最小,仅下降了21.28%。而菠菜、生菜、蒜薹三种蔬菜在贮藏12 d后可溶性固形物含量上升,普通冰箱可溶性固形物含量显著高于A1、A2、A3组且具有显著性差异( $P<0.05$ )。

不同蔬菜贮藏时成熟度不同,可溶性固形物含量不同,不同样品可溶性固形物含量可能增加或减少。在贮藏前期,蔬菜中淀粉和纤维素在酶的作用下降解为可溶性糖,可溶性固形物积累量增多;在贮藏后期,呼吸作用强,消耗产能加快,可溶性固形物出现下降趋势<sup>[14]</sup>。王勇等<sup>[15]</sup>研究紫苏可溶性固形物含量与冰点温度的关系发现,可溶性固形物与蔬菜贮藏冰点温度变化关系密切,冰点温度因蔬菜可溶性固形物含量升高而呈现明显的下降趋势,有利于果蔬贮藏防冻,这与本研究中蔬菜在气调冰箱内贮藏可溶性固形物含量上升一致。随着贮藏时间延长,蔬菜呼吸作用消耗营养物质,可溶性固形物含量下降,蔬菜品质降低<sup>[16]</sup>。

2.2.2 不同氧分压和相对湿度气调冰箱对蔬菜总酚的影响

蔬菜中含有丰富的酚类化合物,在抗氧化过程中发挥着重要的作用<sup>[17]</sup>。气调冷藏对多酚的影响取决于蔬菜的类型,在贮藏过程中蔬菜中的总酚含量的变化规律往往不同<sup>[18]</sup>。

表1 冷藏过程中四种蔬菜可溶性固形物含量的变化(%)

| Table 1 Changes of soluble solid content in four kinds of vegetables during cold storage (%) |           |                            |                         |                         |                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 样品名称                                                                                         | 贮藏 0 d    | 贮藏 12 d                    |                         |                         |                         |
|                                                                                              |           | 对照                         | A1                      | A2                      | A3                      |
| 菠菜                                                                                           | 6.60±0.20 | 11.60±0.20 <sup>a***</sup> | 6.50±0.10 <sup>b</sup>  | 6.50±0.40 <sup>b</sup>  | 6.70±0.10 <sup>b</sup>  |
| 生菜                                                                                           | 3.47±1.07 | 5.10±0.10 <sup>a</sup>     | 4.47±0.06 <sup>b</sup>  | 4.10±0.10 <sup>c</sup>  | 3.97±0.12 <sup>c</sup>  |
| 黄瓜                                                                                           | 3.90±1.41 | 1.90±0.36 <sup>b***</sup>  | 2.93±0.20 <sup>a*</sup> | 2.80±0.12 <sup>a*</sup> | 3.07±0.15 <sup>a*</sup> |
| 蒜薹                                                                                           | 3.90±0.20 | 14.90±0.26 <sup>a***</sup> | 9.70±0.06 <sup>b*</sup> | 9.73±0.10 <sup>b*</sup> | 9.73±0.25 <sup>b*</sup> |

注:贮藏末期,同一品种蔬菜的数据相互比较,标注字母不同表示有显著差异( $P<0.05$ )。不同冰箱贮藏12 d和贮藏0 d的数据相互比较,标注\*、\*\*、\*\*\*表示有显著性差异(分别代表 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$ )。表2、3同。

表 2 冷藏过程中四种蔬菜的总酚含量的变化 (mg/g)

Table 2 Changes of total phenolics in four vegetables during cold storage (mg/g)

| 样品名称 | 贮藏 0 d     | 贮藏 12 d                    |                            |                            |                            |
|------|------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|      |            | 对照                         | A1                         | A2                         | A3                         |
| 菠菜   | 34.38±0.91 | 38.35±2.60 <sup>d</sup>    | 48.63±1.43 <sup>b***</sup> | 45.60±2.25 <sup>c**</sup>  | 50.36±1.33 <sup>a***</sup> |
| 生菜   | 30.27±1.62 | 22.67±1.84 <sup>d**</sup>  | 37.48±1.07 <sup>b**</sup>  | 31.28±1.28 <sup>c</sup>    | 47.28±0.96 <sup>a***</sup> |
| 黄瓜   | 46.56±1.66 | 6.63±0.98 <sup>d***</sup>  | 12.26±0.73 <sup>b***</sup> | 17.68±0.43 <sup>a***</sup> | 11.26±0.63 <sup>c***</sup> |
| 蒜薹   | 55.32±0.63 | 27.42±1.94 <sup>d***</sup> | 43.38±0.85 <sup>b***</sup> | 45.03±0.52 <sup>a***</sup> | 36.70±0.72 <sup>c***</sup> |

表 3 冷藏过程中四种蔬菜的细胞膜渗透率变化 (%)

Table 3 Changes of cell membrane permeability of four vegetables during cold storage (%)

| 样品名称 | 贮藏 0 d     | 贮藏 12 d                    |                            |                            |                            |
|------|------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|      |            | 普通                         | A1                         | A2                         | A3                         |
| 菠菜   | 9.64±0.12  | 37.60±0.34 <sup>a***</sup> | 27.63±0.21 <sup>b***</sup> | 13.82±0.19 <sup>d***</sup> | 16.21±0.53 <sup>c***</sup> |
| 生菜   | 18.90±0.23 | 33.31±0.54 <sup>a***</sup> | 9.80±0.09 <sup>d***</sup>  | 20.35±0.11 <sup>b***</sup> | 18.65±0.18 <sup>c</sup>    |
| 黄瓜   | 7.63±0.19  | 49.72±0.19 <sup>a***</sup> | 16.79±0.11 <sup>d***</sup> | 19.91±0.19 <sup>c***</sup> | 21.80±0.19 <sup>b***</sup> |
| 蒜薹   | 15.55±0.23 | 24.74±0.17 <sup>b***</sup> | 26.55±0.13 <sup>a***</sup> | 18.19±0.18 <sup>c***</sup> | 12.95±0.32 <sup>d***</sup> |

由表 2 可知,与新鲜蔬菜相比,贮藏 12 d 蔬菜总酚含量变化明显,不同蔬菜的多酚变化不同。气调冰箱内贮藏的四种蔬菜总酚含量均显著高于普通冰箱 ( $P<0.05$ )。A2 冰箱内贮藏 12 d 的黄瓜和蒜薹总酚含量下降,蒜薹总酚损失率仅为 18.60%。A3 冰箱内贮藏 12 d 的菠菜和生菜总酚含量增加,菠菜总酚含量增加了 46.48%,生菜总酚含量增加了 56.19%,与其他气调冰箱之间具有显著性差异 ( $P<0.05$ ),说明 A2、A3 冰箱的气调保鲜调控效果最好。与普通冰箱相比,气调冰箱内贮藏的菠菜多酚含量明显上升 ( $P<0.05$ ),与糖类、有机酸等转化为合成酚类物质的底物有关<sup>[19]</sup>。A2 气调冰箱对果菜(黄瓜)和茎菜(蒜薹)总酚的保存效果较好,而 A3 气调冰箱对叶菜类(菠菜和生菜)总酚的保存效果较好。

2.3 不同氧分压和相对湿度气调冰箱对蔬菜生理代谢的影响

2.3.1 不同氧分压和相对湿度气调冰箱对蔬菜细胞膜渗透率的影响

细胞膜对细胞内微环境的稳定和生物的正常新陈代谢至关重要,生物膜通透性的增加会使胞内电解质外渗,进而影响蔬菜组织细胞内环境稳态失衡,导致组织结构的显著变化<sup>[20]</sup>。细胞膜电解质的渗透率是细胞活性大小的重要指标之一<sup>[21]</sup>,因此细胞膜渗透率是反映蔬菜在低温贮藏期间的细胞衰老的重要指标<sup>[22]</sup>。

由表 3 可以看出与新鲜蔬菜相比,气调冷藏保鲜条件下蔬菜细胞膜渗透率均有所上升,出现不同程度的组织损伤。A3 冰箱内生菜的细胞膜渗透率为

18.65%,与贮藏 0 d 相比无显著性差异 ( $P<0.05$ )。与其他气调冰箱相比,A3 冰箱内贮藏 12 d 的蔬菜细胞膜渗透率渗透率变化较小,说明 A3 冰箱对蔬菜组织细胞影响较小,气调保鲜效果最好。张莘莘等<sup>[23]</sup>研究也发现,罗汉果在 4℃低温下,氧分压为 2%~3%、二氧化碳分压为 5%的气调冰箱内长时间贮藏细胞膜渗透率为 14.90%,有利于罗汉果的长期贮藏,说明气调贮藏在蔬菜贮藏中的广泛应用。

2.3.2 不同氧分压和相对湿度气调冰箱对蔬菜酶活性的影响

2.3.2.1 不同氧分压和相对湿度气调冰箱对蔬菜过氧化物酶活性的影响

过氧化物酶(Peroxidase, POD)在自然界中广泛存在,可催化蔬菜氧化还原反应发生褐变,降低蔬菜的商品价值<sup>[24]</sup>。蔬菜中大部分的褐变与 POD 酶的活力有关<sup>[25]</sup>。POD 酶主要起到降解 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的作用,避免对细胞膜产生伤害,其活性主要受到氧气浓度的影响。一般情况下,在进行低温处理或遭受低温胁迫情况下,冷敏植物的酶系统表现差异较大<sup>[24]</sup>,黄瓜是典型的冷敏性果蔬<sup>[26]</sup>,因此对生菜、菠菜、蒜薹的 POD 酶活性进行测定。

从图 3 生菜、菠菜、蒜薹三种蔬菜 POD 活性变化可以看出,贮藏过程中 POD 酶活性呈现先上升后下降的趋势,均在贮藏 6 d 时到达峰值。A3 条件下的菠菜在贮藏 12 d 过程中,POD 酶活性始终最低,最高值仅为 4.89 ΔOD<sub>470</sub>/(min·mg)。在贮藏至 12 d 时,A3 冰箱内菠菜 POD 酶活性仅为 0.93 ΔOD<sub>470</sub>/(min·mg),显著低于其余两组 ( $P<0.05$ )。由于低氧分压对 POD 酶活性的抑制作用较强,A3 氧分压最低,因此 A3 中

贮藏的菠菜酶活性最低。贮藏前期,低温胁迫导致蔬菜 POD 酶活性增强,维持体内活性氧代谢平衡,一定程度上提高蔬菜的耐受性<sup>[27]</sup>。贮藏后期,POD 酶活性紊乱导致活性氧代谢失调,活性氧在果蔬组织中过度积累加重对果蔬细胞结构的破坏,影响果蔬生理代谢<sup>[28]</sup>。较低的氧分压也对 POD 酶活性起到一定的抑制作用。

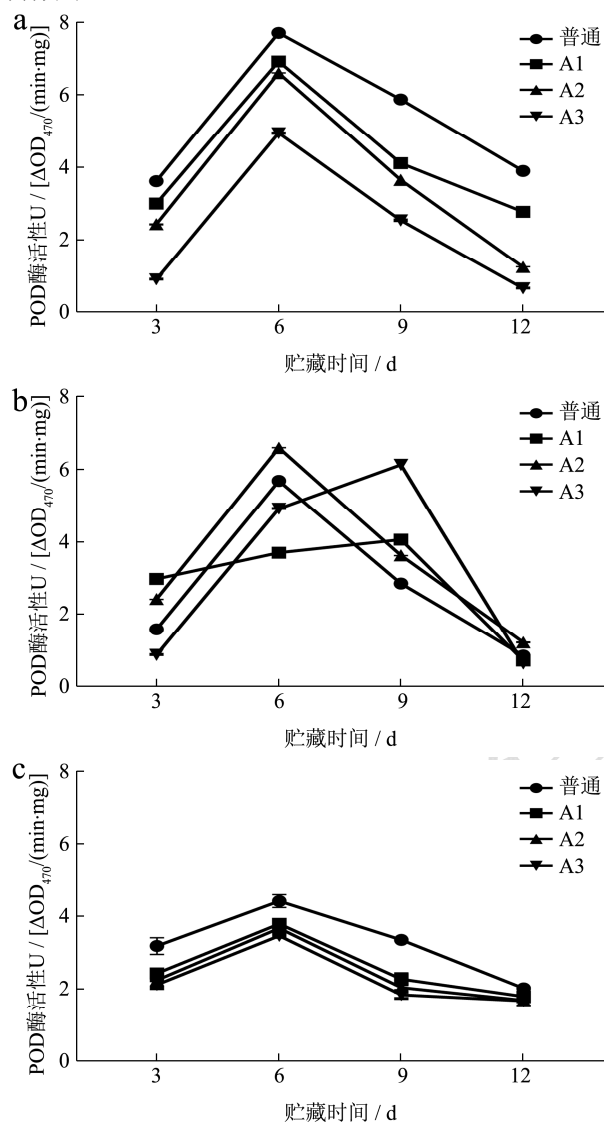


图3 冷藏过程中菠菜(a)、生菜(b)、蒜薹(c)的POD酶活性变化

Fig.3 Changes of POD activity of spinach (a), lettuce (b) and garlic sprouts (c) during cold storage

### 2.3.2.2 不同氧分压和相对湿度气调冰箱对蔬菜多酚氧化酶活性的影响

多酚氧化酶(Polyphenol Oxidase, PPO)与组织褐变关系密切,PPO酶对酚类物质氧化起催化作用并促使形成棕褐色的聚合物<sup>[29]</sup>。不同蔬菜其褐变的主要酚类物质均有所不同,导致酶褐变活性也有所差异。根据王清章等<sup>[30]</sup>的研究,O<sub>2</sub>浓度的下降会抑制多酚氧

化酶的活性,进而抑制多酚氧化酶催化的酚氧化过程,阻止蔬菜褐变反应,更好保持贮藏过程中蔬菜品质。低温处理条件下黄瓜酶系统表现不稳定<sup>[25]</sup>,因此对生菜、菠菜、蒜薹的PPO酶活性进行测定。

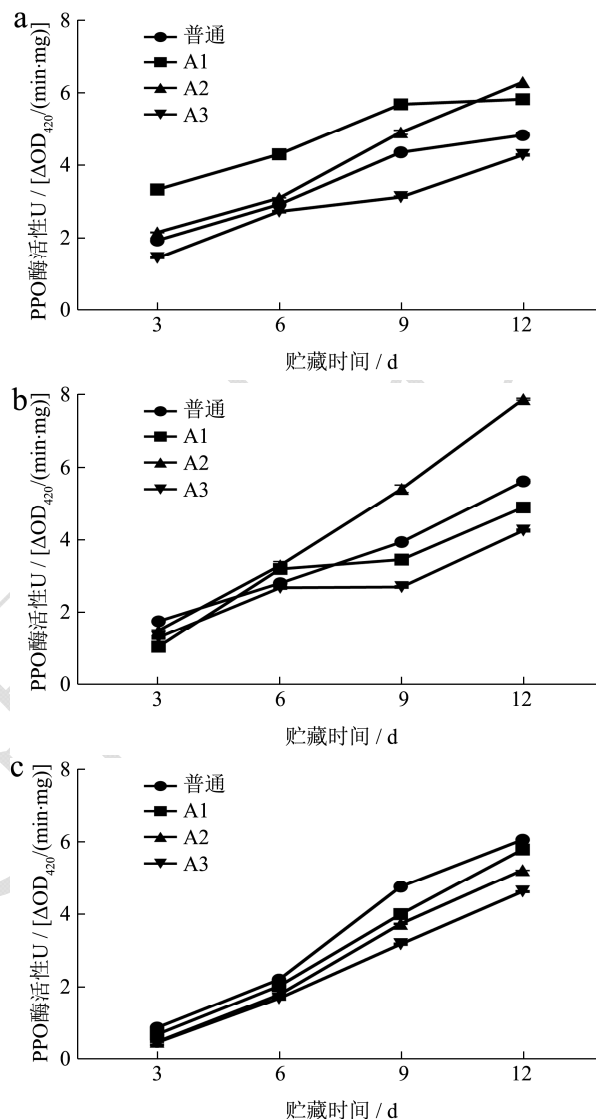


图4 冷藏过程中菠菜(a)、生菜(b)、蒜薹(c) PPO酶活性变化

Fig.4 Changes of PPO activity in spinach (a), lettuce (b) and garlic sprouts (c) during cold storage

如图4所示生菜、菠菜、蒜薹三种蔬菜PPO酶活性变化,贮藏过程中生菜、菠菜、蒜薹PPO酶活性变化呈现上升趋势。张莘莘等<sup>[23]</sup>研究发现,气调贮藏60 d过程中罗汉果果实PPO酶活性呈现先上升后下降趋势,存在峰值。本研究可能由于贮藏时间较短,PPO酶活性处于上升趋势且未到达峰值。低温是影响PPO基因表达的关键因素,能够促进PPO基因的表达,增加酶的表达量并进一步促进酶活化,进而使酶促褐变反应速度加快。通常在植物中存在的为非活性状态的PPO酶,在外界刺激作用的情况下易活化后具有活性<sup>[31]</sup>。在12 d贮藏过程中,蔬菜在A3实验条件下PPO

酶活性始终最低,是因为氧分压的降低增强了对 PPO 酶活性的抑制作用。

## 2.4 不同氧分压和相对湿度气调冰箱对蔬菜

### 表面微生物的影响

新鲜蔬菜丰富的营养素有利于微生物的生长繁殖,加速蔬菜腐败变质,通过控制环境温度、氧浓度、水分活度等影响微生物生长繁殖条件<sup>[32]</sup>。研究发现,低温、低氧分压和低湿度能够有效减缓微生物的生长和繁殖速度<sup>[33,34]</sup>,有利于蔬菜品质的保持。

通过对比试验冰箱和对照冰箱贮藏 12 d 后蔬菜表面霉菌、酵母菌的差异,可以看出普通冰箱中四种蔬菜样品的微生物数量最低且具有显著性差异 ( $P<0.05$ ),而 A1 和 A2 冰箱中四种蔬菜霉菌、酵母菌含量相对较高。钟立青等<sup>[34]</sup>研究发现,相对湿度对真菌的传播有重要的作用,提高环境的相对湿度,会造成真菌的快速繁殖。对比相同氧分压、不同湿度的普通与 A1 冰箱,湿度较高的 A1 冰箱内霉菌、酵母菌生长较快。在三台试验冰箱中,A1 和 A2 冰箱中四种蔬菜霉菌、酵母菌含量较高,而 A3 冰箱中四种蔬菜霉菌、酵母菌含量较低。可见低氧分压、低湿度的协调作用共同抑制蔬菜表面霉菌酵母菌的繁殖。

表 4 贮藏 12 d 样品表面霉菌、酵母菌含量 (lg CFU/g)

Table 4 The content of mold and yeast on the surface of samples

| 样品<br>名称 | 贮藏 12 d                |                        |                        |                        |
|----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|          | 普通                     | A1                     | A2                     | A3                     |
| 菠菜       | 3.33±0.01 <sup>d</sup> | 4.29±0.01 <sup>a</sup> | 3.95±0.02 <sup>c</sup> | 4.03±0.01 <sup>b</sup> |
| 生菜       | 4.74±0.02 <sup>b</sup> | 5.14±0.10 <sup>a</sup> | 4.83±0.05 <sup>b</sup> | 4.79±0.07 <sup>b</sup> |
| 黄瓜       | 3.63±0.05 <sup>d</sup> | 4.25±0.06 <sup>b</sup> | 6.04±0.09 <sup>a</sup> | 4.16±0.06 <sup>c</sup> |
| 蒜薹       | 3.58±0.02 <sup>d</sup> | 4.89±0.02 <sup>a</sup> | 4.65±0.06 <sup>b</sup> | 4.02±0.03 <sup>c</sup> |

## 3 结论

本文以具有代表性的叶菜类的生菜、菠菜,茎菜类的蒜薹和果菜类的黄瓜为研究对象,研究了 4 种蔬菜在不同参数的试验冰箱中贮藏 12 d 的品质变化,以期了解新型气调冰箱对蔬菜保鲜效果的影响。

通过比较分析不同指标试验结果发现:与普通冰箱相比,在气调冰箱中贮藏 12 d 的蔬菜品质保持较好。气调冰箱能有效抑制蔬菜水分的散失,蔬菜失重率仅为 8%~12%,A3 冰箱内贮藏的叶菜类则低于 10%。保持蔬菜的良好外观品质,有效提高蔬菜可溶性固形物、总酚、还原糖的保存率。与普通冰箱相比,气调冰箱内贮藏的蔬菜细胞膜渗透率低,组织结构较为完

整。同时气调冰箱对蔬菜 POD 酶活性抑制作用较强,较大程度抑制 PPO 酶活性,进而改善蔬菜褐变。氧分压 15%,相对湿度 86%的 A3 气调冰箱保鲜效果最好。气调冰箱贮藏条件下霉菌、酵母菌含量相对较高。与 A1、A2 冰箱相比,低氧分压、低湿度的 A3 冰箱内蔬菜表面的微生物含量相对较少,可见 A3 冰箱对蔬菜具有良好的气调保鲜效果。

气调冰箱对蔬菜的保鲜作用可能因蔬菜品种、成熟度的不同而不同,气调技术会导致相对湿度的被动调控,对蔬菜保鲜效果的影响是温度、湿度的综合作用的结果。因此,气调冰箱保鲜技术应进一步优化,实现氧分压和相对湿度的单因素控制,保证蔬菜贮藏的品质最优化。

## 参考文献

- [1] 丁树东,李艳杰,孔瑞琪.现代果蔬气调贮藏库及其应用现状[J].中国果菜,2019,39(12):12-17.
- [2] 王剑功,李江阔,张鹏,等.高湿冰箱温湿度控制性能及蔬菜保鲜效果研究[J].食品工业科技,2016,37(7):293-299.
- [3] 关文强,陶晓彦,张娜,等.高湿度冰箱对青菜和西芹的保鲜效果[J].农业工程学报,2009,25(4):265-269.
- [4] 李晓峰,朱小兵,王铭,等.基于 MSA 控氧保鲜技术冰箱的研制与应用[Z].山东省,青岛海尔股份有限公司,2018-08-17.
- [5] 郭慧媛,吴广枫,曹建康,等.冰箱气调贮藏对水果的保鲜效果[J].食品工业科技,2021,42(2):290-294.
- [6] 曹建康,姜微波,赵玉梅,等.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007.
- [7] Bergmeyer Hu. Methods of Enzymatic Analysis [M]. Elsevier, 2012.
- [8] 田兰兰,郭玉蓉,牛鹏飞,等.富士苹果中多酚氧化酶特性的研究[J].农产品加工·学刊,2011,3:20-23,39.
- [9] GB 4789.15-2016,食品安全国家标准食品微生物学检验霉菌和酵母计数[S].
- [10] 濮艳清.鲜切果蔬高品质短期保鲜包装工艺研究[D].无锡:江南大学,2020.
- [11] 曹怡,徐燕,马铭霞,等.低温自发气调保鲜条件下秀珍菇外观与内在品质的变化规律研究[J].食药菌,2021,29(3):212-215.
- [12] Eunhee P. Consumer preference and physicochemical evaluation of organically grown melons [J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 141: 77-85.
- [13] 马玮,史玉滋,段颖,等.南瓜果实淀粉和可溶性固形物研究进展[J].中国瓜菜,2018,31(11):1-5.
- [14] 何靖柳,刘继,秦文,等.贮藏处理后红阳猕猴桃的品质变化[J].食品工业科技,2014,35(8):318-22.



- [15] 王勇,李雪,田志刚,等.紫苏叶含水率、可溶性固形物含量和冰点的研究[J].东北农业科学,2016,41(5):88-91.
- [16] Aguirre L, Frias J M, Barry R C, et al. Modelling browning and brown spotting of mushrooms (*Agaricus bisporus*) stored in controlled environmental conditions using image analysis [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(2): 280-286.
- [17] 朱惠文,汤静,金鹏,等.贮藏温度对鲜切胡萝卜品质及总酚和  $\gamma$ -氨基丁酸含量的影响[J].食品科学,2019,40(9):213-219.
- [18] King E S, Noll A, Glenn S, et al. Refrigerated and frozen storage impact aronia berry quality [J]. Food Production, Processing and Nutrition, 2022, 4(1): 1-12.
- [19] 葛坤,方岩,王智慧,等.热激对大花蕙兰褐变总酚及相关酶活性的影响[J].山西农业科学,2019,47(7):1156-1159,66.
- [20] 陈代良,陈杭君,刘瑞玲,等.振动胁迫对双孢菇褐变与抗氧化能力的影响[J].农业工程学报,2021,37(17):258-265.
- [21] Gonzalez M E, Barrett D M. Thermal, high pressure, and electric field processing effects on plant cell membrane integrity and relevance to fruit and vegetable quality [J]. Journal of Food Science, 2010, 75(7): R121-R130.
- [22] Fernandes R C, Steffens C A, Anami J M, et al. Quality of 'Cripps Pink' apples stored under controlled atmosphere with ultra-low and extremely low oxygen partial pressures or treated with 1-methylcyclopropene [J]. Bragantia, 2021, 80: 2011115.
- [23] 张苹苹,李喜宏,杨莉杰,等.气调贮藏对罗汉果生理品质的影响[J].食品工业,2018,39(5):178-181.
- [24] 李京赞,刘玉德,石文天,等.植物果蔬的褐变及抑制的研究[J].包装与食品机械,2019,1:63-68.
- [25] 戴忠仁.黄瓜耐冷生理变化规律及相关基因转录组测序和表达分析[D].哈尔滨:东北农业大学,2015.
- [26] 赵普莹.ERFs 调控黄瓜果实贮藏冷害及其与膜脂代谢关系研究[D].广州:华南农业大学,2018.
- [27] Lata R, Chowdhury S, Gond S K, et al. Induction of abiotic stress tolerance in plants by endophytic microbes [J]. Letters in Applied Microbiology, 2018, 66(4): 268-276.
- [28] John G S. Oxygen stress and superoxide dismutases [J]. Plant Physiology, 1993, 101(1): 7.
- [29] Fan X. Chemical inhibition of polyphenol oxidase and cut surface browning of fresh-cut apples [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 459(1): 1-15.
- [30] 王清章,刘怀超.莲藕贮藏中褐变度及多酚氧化酶的初步研究[J].冷藏技术,1996,4:1-4.
- [31] 程双,胡文忠,马跃,等.鲜切果蔬酶促褐变发生机理的研究[J].食品工业科技,2010,31(1):74-77,80.
- [32] 崔琼,周丽娟,崔志伟,等.蔬菜食品安全中的生物学危害与控制[J].食品安全导刊,2018,36:142.
- [33] 胡海梅,陈开松,尚殿波,等.冰箱温度控制与抑菌效果的关系探讨[J].家电科技,2020,2:38-40.
- [34] 钟立青,孙浩益,姚青青,等.集中空调系统温度和湿度对微生物的影响[J].建筑热能通风空调,2017,36(11):28-30,36.