

不同高氧包装方式对菜心的保鲜作用

王萍^{1,2}, 王玲¹, 于新², 陈于陇¹, 郭靖^{1,2}, 陈飞平¹, 罗政¹, 殷娟¹

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610) (2. 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东广州 510225)

摘要:以新鲜菜心为试材, 采用双向拉伸聚丙烯膜 (Biaxially Oriented Polypropylene, BOPP) 及低密度聚乙烯薄膜 (Low density polyethylene, LDPE) 高氧 (>80%) 环境下进行包装, 研究菜心在 4 °C 下包装袋内气体成分、营养品质、抗氧化活性及木质素含量等方面的变化。结果表明, 在贮藏期间, 高氧包装可有效延缓呼吸速率的快速升高, 加快总酚含量的上升, 提高菜心抗氧化能力, 贮藏 8 d 时, BOPP-H 包装及 LDPE-H 包装总酚含量比对照组分别高了 1.75% 和 6.27%; 在贮藏早期刺激了过氧化氢酶 (CAT) 酶活性, 贮藏后期提高了超氧化物歧化酶 (SOD) 酶活性, 减少了 H₂O₂ 积累, 降低了木质素合成; 贮藏 8 d 时 BOPP-H 包装及 LDPE-H 包装木质素含量比对照组分别低了 5.70% 和 1.43%, LDPE-H 包装比 BOPP-H 包装低了 2.40%。综合以上结果表明, 高氧包装有利于菜心的贮藏保鲜, 且 LDPE-H 包装比 BOPP-H 包装能更有效地维持总酚含量、减少木质素合成。

关键词: 菜心; 高氧包装; 包装膜; 保鲜

文章编号: 1673-9078(2021)02-155-163

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.2.0680

The Fresh-keeping Effect of Different High-oxygen Packaging Methods on Non-heading Chinese Cabbage

WANG Ping^{1,2}, WANG Ling¹, YU Xin², CHEN Yu-long¹, GUO Jing^{1,2}, CHEN Fei-ping¹, LUO Zheng¹, YIN Juan¹

(1. Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China) (2. College of Light Industry and Food Science, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China)

Abstract: Using fresh non-heading Chinese cabbage as the test material, and biaxially oriented polypropylene film (BOPP) and low-density polyethylene (LDPE) for the packaging of fresh non-heading Chinese cabbage under a high oxygen (>80%) environment, the changes in gas composition of the packaging bag, and the nutritional quality, antioxidant activity and lignin content of the fresh cabbage stored at 4 °C were examined. The results showed that during storage, high-oxygen packaging could effectively retard the rapid increase of the respiration rate of cabbage, accelerate the increase in total phenolic content of cabbage, and increase the antioxidant capacity of cabbage. On the 8th day of storage, the total phenolic contents of the cabbage packed by BOPP-H and LDPE-H were 1.75% and 6.27% (both were higher than that of the control group). In the earlier storage stage, the activity of catalase (CAT) was stimulated to increase, while in the late storage stage, the activity of superoxide dismutase (SOD) increased, the accumulation of H₂O₂ decreased, and synthesis of lignin was reduced. On the 8th day of storage, the lignin contents of the cabbage packed by BOPP-H and LDPE-H were 5.70% and 1.43% (both were lower than that of the control group), with that of LDPE-H packaging being 2.40% lower than that of BOPP-H packaging. The above results indicate that high-oxygen

引文格式:

王萍, 王玲, 于新, 等. 不同高氧包装方式对菜心的保鲜作用[J]. 现代食品科技, 2020, 37(2): 155-163

WANG Ping, WANG Ling, YU Xin, et al. The fresh-keeping effect of different high-oxygen packaging methods on non-heading chinese cabbage [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 37(2): 155-163

收稿日期: 2020-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31671912&31901756); 广东省农业科学院院长基金 (202012); 广东省农业科学院新兴学科团队建设项目 (201805XX); 广东省重点领域研发计划项目 (2019B020222001)

作者简介: 王萍 (1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品物流与保鲜

通讯作者: 陈于陇 (1968-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品物流与保鲜

packaging is beneficial to the storage and preservation of cabbage, and LDPE-H packaging can maintain the total phenol content and reduce lignin synthesis more effectively than BOPP-H packaging.

Key words: Non-heading Chinese cabbage; high oxygen packaging; packing film; fresh-keeping effect

菜心 (*Brassica campestris* L. ssp. *Chinensis* Makino) 又称菜薹, 十字花科芸薹属, 是一种茎、叶和花同食的蔬菜^[1,2], 富含丰富的 Vc、氨基酸、黄酮类物质。但菜心采后茎部易出现木质化, 切口腐败, 叶片衰老、黄化等品质问题^[3]。虽然 1-甲基环丙烯 (1-Methylcyclopropene, 1-MCP)、褪黑素 (Melatonin)、氯吡脞 (Forchlorfenuron, CPPU)、赤霉素 (Gibberellin, GA₃) 和茉莉酸甲酯 (Methyl Jasmonate, MeJA) 等^[4]能有效延缓菜心采后品质的下降, 但随着人们对食品安全的重视, 使得保鲜剂的应用受限。基于低温基础上的气调保鲜方法由于安全性高、效果好而越来越受到推崇。

气调保鲜是利用果蔬的呼吸作用、环境中气体浓度和包装薄膜渗透作用的动态平衡而建立的贮藏方法, 是果蔬在采后贮运过程中保持品质、降低损耗的有效手段之一^[5,6]。高氧气调包装 (High oxygen atmospheric packaging, HOAP) 是人工气调贮藏的方式之一。自英国学者 Day^[7]首次提出高氧包装, 能在鲜切果蔬贮藏中抑制酶促褐变, 减少厌氧发酵, 抑制微生物生长; 此后国内外有关高氧对果蔬采后品质变化及腐烂发生影响的研究逐渐增多。前期研究发现高氧气调包装能有效维持菜心、百香果的贮藏品质^[8-10]。植物体能对外界环境产生一定的应激反应, 当逆境 (如机械损伤、极端温度、干旱等) 出现时, 植物细胞会感应逆境的变化, 诱导活性氧信号的产生, 调控其生理代谢来适应环境的变化。H₂O₂ 是活性氧的一种, 当植物遇到逆境时, 会激发 H₂O₂ 合成, 植物细胞壁上的氧化酶利用 H₂O₂ 氧化激活木质素单体, 形成酚自由基, 后者自动聚合形成木质素^[11]。SOD、CAT 等是重要的活性氧清除酶, 它们能有效地阻止高浓度活性氧的积累。因此, 提高这些酶的活性是许多园艺作物应对氧化胁迫和延缓衰老的重要机制^[12]。

BOPP 和 LDPE 是两种被广泛应用的包装材料。BOPP 无色、无毒、防水、防潮, 具有较高的强韧性和拉伸强度, 加工性能较好且质量稳定, 被广泛应用于食品、茶叶、香烟等的包装^[13-16]。研究发现, 以 BOPP 为基础材料结合不同面积比例的纤维素膜组成的复合膜, 通过改变包装袋内的水分散发、气体组分及湿度, 对花椰菜的贮藏品质影响不同^[17]。LDPE 具有保湿作用和一定透气性能, 因此在采后流通中被广泛应用^[18]。Li 等^[19]发现 0.05 mm LDPE 包装的白灵菇能够延

缓褐变, 从而延长贮藏期。

因此在本研究中, 选用了不同透湿和透气性能的 BOPP 和 LDPE 两种包装膜, 比较两种高氧包装膜对菜心贮藏期间抗氧化酶活性和木质素的调控作用, 旨在明确不同高氧包装薄膜对菜心贮藏品质的影响, 为高氧包装在采后菜心贮运保鲜中的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与处理

供试宁夏菜心购于天河农贸市场, 采摘期 35 d 左右, 采摘当天为 0 d, 选择无机械损伤、无病虫害, 成熟度及颜色一致的菜心, 4 °C 预冷, BOPP 袋的厚度为: 32.00 μm, 透氧率: 1344.80 mL/(m²·d·atm), CO₂ 透过率: 2256.60 mL/(m²·d·atm), 及 LDPE 袋 (厚度: 30.00 μm, 透氧率: 5625.00 mL/(m²·d·atm), CO₂ 透过率: 2812.50 mL/(m²·d·atm)), 每袋长×宽为 35 cm×25 cm。将挑选好的的菜心随机放入包装袋内, 每袋包装菜心 300±1 g, 空气包装组 (BOPP-CK, LDPE-CK) 直接用热封机热封, 高氧包装组 (BOPP-H, LDPE-H) 统一用袋式气调包装机包装 (参数设置为: O₂ 含量 100%, 抽气时间 8 s, 充气时间 1.20 s, 热封时间 1 s), 然后, 统一放入 4 °C 冷库贮藏, 于 0、2、4、6、8 d 取样品, 每种包装每次各取 3 袋作为实验重复。

1.2 仪器与设备

BOPP 膜, 广东威孚包装材料有限公司; LDPE 膜, 研究室自主研发改性低密度聚乙烯薄膜; 袋式气调保鲜包装机, 上海炬钢机械制造有限公司 MAP-500D 型; 纯氧, 广州信和气体有限公司; Checkmate9900 型顶空气体分析仪, 丹麦 PBI 公司; TN-375 型手持式红外线二氧化碳分析仪, 广州泰纳电子科技有限公司; 岛津 UV-1800 型紫外-可见分光光度计, 日本岛津公司。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 O₂ 与 CO₂ 含量

在菜心包装袋取上、下各取三个部位分别贴上密封橡胶垫片。参考于茂兰^[20]的方法, 用顶空气体分析仪测定包装袋内氧气与二氧化碳含量。将干净无堵塞探头针缓慢插入包装袋内注意避免刺入菜心, 测量后

缓慢拔出, 每个部位依次测定。测得的数据取平均值, 作为 O₂ 与 CO₂ 含量。

1.3.2 呼吸速率

参考刘文浩^[21]的方法, 并加以修改。将菜心取出, 称重后放入密封罐, 二氧化碳检测仪放入密封罐, 盖紧密封口, 记录初始数值, 每隔 1 min 记录一次 CO₂ 浓度, 共记录 6 次。

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

式中: W₁: 实验前呼吸罐中 CO₂ 总量, %; W₂: 实验后呼吸罐中 CO₂ 总量, %; V: 呼吸罐内总体积, L; M: CO₂ 的摩尔质量, g/mol; V₀: 测定温度下 CO₂ 摩尔体积, L/mol; m: 测定菜心的重量, kg; t: 测定时菜心呼吸时间, h。

1.3.3 Vc 含量测定

参考王惠惠^[22]的方法, 并加以改进。称取 0.50 g 样品, 加入 5 mL 1% 草酸, 加入 0.20 g 活性炭, 5000 r/min 离心 5 min, 过滤后取滤液, 稀释 1.50 倍, 加入 1 mL 250 g/L 乙酸钠溶液; 空白组加入 1 mL 30 g/L 硼酸-250 g/L 乙酸钠溶液, 放在黑暗处避光 20 min 后加入 1 mL 0.20 g/L 邻苯二胺溶液, 避光 40 min 后分别在波长为 355 nm 和 425 nm 处测定其吸光值。

1.3.4 总酚含量测定

参考孙小静^[23]的方法, 并加以修改。称取 0.60 g 样品, 加入 8 mL 70% 乙醇浸提 2 次, 每次 2 h (避光), 合并提取液, 定容至 20 mL, 取适量提取液用 70% 乙醇稀释 2 倍后, 取 1 mL 稀释液于离心管中, 先后加入 0.50 mL 福林酚溶液、1.50 mL 碳酸钠溶液 (1 mol/L), 反应 2 h 后于 760 nm 处测定吸光值, 根据以没食子酸为标准品获得的标准曲线计算总酚含量。

1.3.5 H₂O₂ 含量测定

采用南京建成 H₂O₂ 试剂盒检测。H₂O₂ 与硫酸钛生成过氧化物-钛复合物黄色沉淀, 可被 H₂SO₄ 溶解后, 利用分光光度计在 405 nm 处测定, 其生成量可计算出 H₂O₂ 含量。

1.3.6 SOD 和 CAT 活性测定

采用上海通蔚公司植物 SOD 活性试剂盒, 应用双抗体夹心法测定样本中 SOD 水平。用酶标仪在 450 nm 波长下测定吸光度, 通过标准曲线计算样品中 SOD 活性浓度。

采用上海通蔚公司植物 CAT 活性试剂盒, 应用双抗体夹心法测定样本中 CAT 水平。用酶标仪在 450 nm 波长下测定吸光度, 通过标准曲线计算样品中 CAT 活性浓度。

1.3.7 木质素的测定

参考 Huang 等^[24]的方法, 并加以修改。称取菜心

冻样 0.50 g, 迅速加入 10 mL 95% 乙醇溶液混合均匀, 放置于沸水浴加热 30 min。取出冷却至室温后, 于 5000 r/min 离心 5 min, 弃去上清液, 加入 95% 乙醇 10 mL, 按上述工艺重复处理 3~4 次, 至溶液无色, 收集沉淀并干燥。将干燥物溶于 1 mL 25% (V/V) 溴化乙酰-冰醋酸溶液中, 80 °C 恒温水浴 30 min 后加入 1 mL 1 mol/L NaOH 溶液终止反应, 再加入 1 mL 冰醋酸和 0.10 mL 7.50 mol/L 盐酸羟胺, 并用冰醋酸定容至 5 mL, 稀释 55 倍得到样品提取液, 在 280 nm 处测样品提取液吸光值, 根据标准曲线计算木质素含量。

1.4 数据统计分析

以上每个试验重复 3 次, 结果表示为平均值±标准偏差。测定的数据采用 Excel 2003 软件处理, 利用 SPSS Statistics 24 进行差异显著性分析, 运用 SigmaPlot 10.0 软件分析作图。

2 结果与分析

2.1 菜心 O₂/CO₂ 含量变化

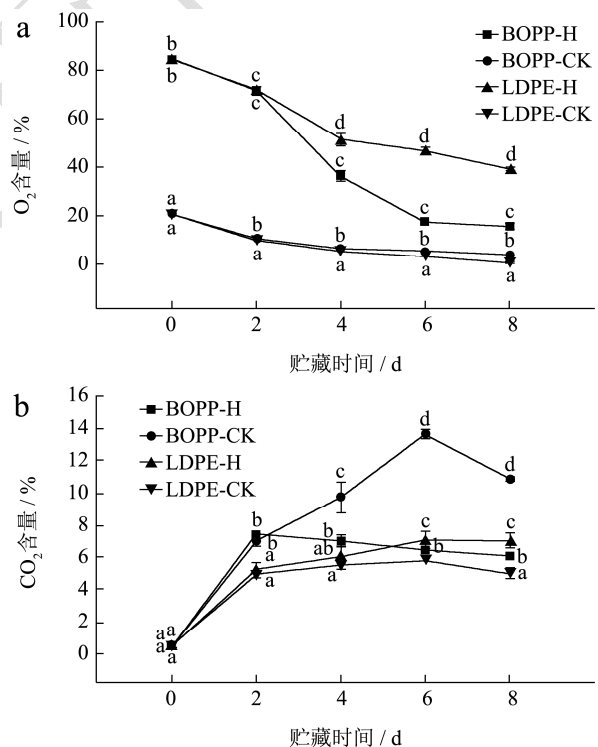


图 1 袋内 O₂ 和 CO₂ 含量变化

Fig.1 The changes of O₂ and CO₂ contents in the bag

注: 不同小写字母表示同一列比较具有显著性差异 (p<0.05), 下图同。

包装袋内 O₂ 含量变化如图 1a 所示, 在 0 d 时, BOPP-H、LDPE-H 包装 O₂ 含量均为 84.73%。随着贮藏时间的增加两种包装袋内 O₂ 含量都呈现下降趋势。

在贮藏 8 d 时, BOPP-H、LDPE-H 包装 O₂ 含量分别为 15.73%和 39.31%; LDPE-H 较 BOPP-H 包装维持高氧的时间长, 是因为 BOPP 包装氧气透过率低, 内外气体交换速率低, 袋内氧气被菜心消耗而迅速下降, 而 LDPE 可通过透氧补充消耗的氧气, 因而 BOPP-H 包装内氧气含量相较 LDPE-H 包装更低。整个贮藏期, BOPP-CK 包装袋内 O₂ 含量显著 ($p<0.05$) 高于 LDPE-CK 包装, 是因为 LDPE-CK 呼吸速率较高, 因而 LDPE-CK 包装内氧气消耗速度更快, 所以袋内氧气含量下降速度加快。

包装袋内 CO₂ 含量变化如图 1b 所示, 贮藏 2 d 期间, 四种包装袋内 CO₂ 含量迅速积累, 上升较快。推测可能是因为贮藏前期菜心呼吸速率较快, 代谢旺盛, 因此袋内 CO₂ 含量积累较快。贮藏 2 d 后, BOPP-CK 包装 CO₂ 含量积累不断上升, 显著($p<0.05$) 高于其他各组包装处理; LDPE-CK 包装是整个贮藏期 CO₂ 含量积累最低的一组; LDPE-H 包装在贮藏前 4 d 期间 CO₂ 含量低于 BOPP-H 包装, 但在贮藏后期要略高于 BOPP-H 包装, 差异显著 ($p<0.05$)。以上结果可以看出, BOPP、LDPE 包装袋内气体组分变化不同, 这与王生有^[25]采用聚烯烃薄膜 (PO) 高氧包装火龙果结果相似。采用 LDPE 膜包装后期 O₂/CO₂ 含量基本维持在一个较好的平衡点, 说明 LDPE 膜 O₂/CO₂ 透过率较好, 有利于袋内外气体交换的进行。Siro^[26]等认为采用可渗透的包装膜代替高阻隔膜的优点是包装中 CO₂ 的积累和 O₂ 的消耗较低。

2.2 菜心呼吸速率变化

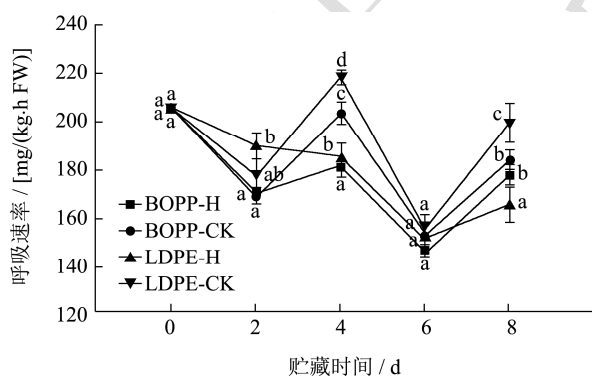


图 2 菜心呼吸速率变化

Fig.2 The changes of respiration rate in Chinese flowering cabbage

呼吸速率的改变对果蔬贮藏期的品质具有重要作用。如图 2 所示, 菜心在两种材料结合高氧包装下, 两种包装菜心的呼吸速率变化趋势基本一致。在贮藏前 2 d, 四种包装的菜心呼吸速率都呈现下降趋势; BOPP-CK、LDPE-CK 包装第 4 d 都出现呼吸高峰, 峰

值分别为 218.56 mg/(kg·h·FW) 和 203.06 mg/(kg·h·FW), 而 BOPP-H、LDPE-H 包装在贮藏期内未出现明显的呼吸高峰。贮藏 8 d 时, BOPP-H、LDPE-H 包装呼吸速率分别比 BOPP-CK、LDPE-CK 包装低 3.48%和 17.37%。可见高氧贮藏可以抑制菜心呼吸, 这与 Lu^[27]等研究高氧贮藏草莓呼吸速率结果一致。说明高氧包装可以抑制果蔬的呼吸作用, 延缓果蔬衰老, 延长货架期。另外, 冬枣用 100% O₂ 处理对呼吸有显著地抑制作用^[28]。陈学红^[29]等研究也发现, 100% O₂ 气调包装的鲜切莴笋在贮藏期间呼吸强度显著低于 60% O₂ 处理, 说明高氧包装能够有效抑制鲜切莴笋的呼吸作用。

BOPP 和 LDPE 两种包装材料对菜心呼吸速率的影响也不同, 无论是高氧包装还是空气包装下, BOPP 包装菜心的呼吸速率都要低于 LDPE 包装。结合包装袋内气体组分的变化影响发现适宜的高氧状态更有利于抑制菜心的呼吸速率。LDPE 包装膜能够充分地 与外界进行 O₂/CO₂ 交换, 能够维持包装袋内菜心的正常呼吸作用, 而 BOPP 包装膜透氧率较低, 氧气被消耗而不足, 可能导致无氧呼吸。

2.3 菜心 Vc 含量变化

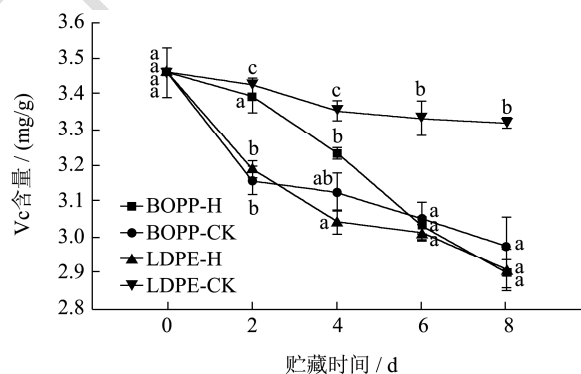


图 3 菜心 Vc 含量变化

Fig.3 The change of Vc content in Chinese flowering cabbage

Vc 含量是衡量果蔬营养品质的重要指标。如图 3 所示, Vc 的含量随着储藏时间的增加逐渐减少, 贮藏 8 d 时, BOPP-H、BOPP-CK、LDPE-H、LDPE-CK 包装菜心 Vc 的损失率分别达到 16.17%、13.98%、15.92%、4.07%。可见, 在两种包装材料下, 高氧都不利于 Vc 含量的维持。说明高氧胁迫加速了 Vc 的损耗, 使其分解速度加快。推测可能是在贮藏过程中高氧提高了菜心的氧化应激反应, 导致其生理活动加快, 从而加快 Vc 的消耗^[30,31]; 另一方面是因为高氧使菜心产生过多的氧自由基, 导致氧化伤害, 抗氧化物质 Vc 为了对抗这种氧化伤害, 从而使 Vc 含量减少^[32]。综合分析, LDPE 包装较 BOPP 包装更有利于 Vc 含量

的维持。

2.4 菜心总酚含量变化

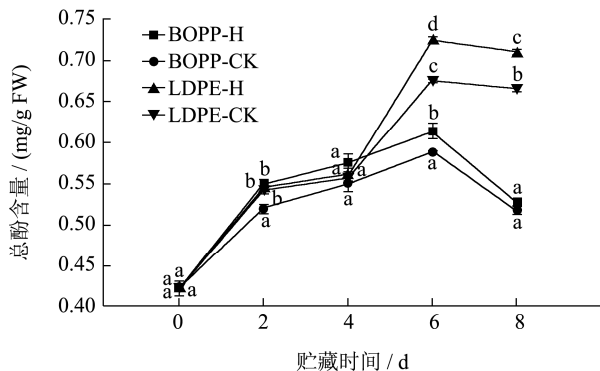


图4 菜心总酚含量变化

Fig.4 The changes of total phenol content in Chinese flowering cabbage

酚类是植物代谢过程中的次生代谢产物，不仅是果蔬中重要的营养物质，也是植物体内重要的植保素。酚类物质具有较强的抗氧化能力，可有效清除不断积累的活性氧和自由基。如图4所示，菜心总酚含量随贮藏时间呈先上升后下降的趋势，在贮藏6 d达到最大值，BOPP-H、LDPE-H 包装总酚含量分别比BOPP-CK、LDPE-CK 包装高了4.12%和6.78%。可见，高氧包装均能够促进菜心总酚含量升高。BOPP 与LDPE 包装菜心总酚含量变化趋势大致相同。LDPE 及BOPP 包装菜心在贮藏6 d后，总酚含量降低。这与Ayala Zavala^[33]等研究高氧处理草莓总酚含量变化一致。在贮藏第8 d，LDPE-H 包装菜心总酚含量比BOPP-H 包装高25.73%。推测是因为LDPE-H 包装长期的高氧状态刺激菜心酚类物质的合成，从而使植物具备较强的抗氧化能力^[34]。

2.5 菜心 H₂O₂ 含量的变化

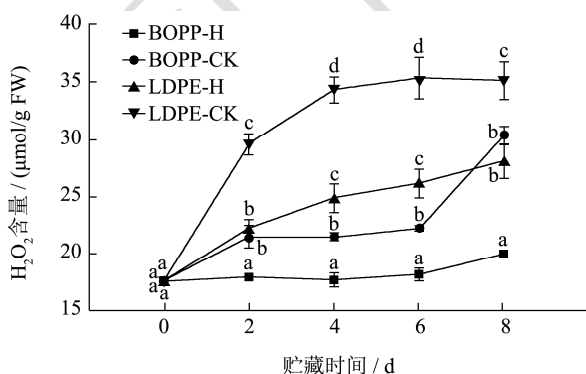


图5 菜心 H₂O₂ 含量变化

Fig.5 The change of H₂O₂ content in Chinese flowering cabbage

在植物体内，各种亚细胞细胞器在正常代谢过程中产生活性氧，维持在一定的动态平衡，植物体内活

性氧的平衡对植物组织衰老变化起着重要作用^[35]。H₂O₂是生物体内的活性氧自由基之一，当生物体受到外界环境的刺激及逆境胁迫时，会造成自由基的累积，从而促进木质素单体合成，加速木质素积累，影响植物体生命活动，加速衰老，降低果蔬品质^[36]。如图5所示，菜心 H₂O₂ 含量呈现上升趋势，BOPP-CK、LDPE-CK 包装 H₂O₂ 含量始终高于 BOPP-H、LDPE-H 包装，贮藏8 d，BOPP-CK、LDPE-CK 包装 H₂O₂ 含量比 BOPP-H、LDPE-H 包装分别高了36.01%和20%。说明高氧包装能抑制 H₂O₂ 的生成。这与Liu^[37]研究高氧环境（80% O₂）贮藏蘑菇 H₂O₂ 含量均显著低于加湿空气下贮藏的结果一致；Wang 等^[13]研究也发现高氧包装刺激更多的活性氧清除酶蛋白生成，减少活性氧的含量。研究结果显示，不论是高氧包装还是空气对照包装，BOPP 包装较 LDPE 包装能更有效抑制 H₂O₂ 的生成。

2.6 菜心 SOD 及 CAT 活性变化

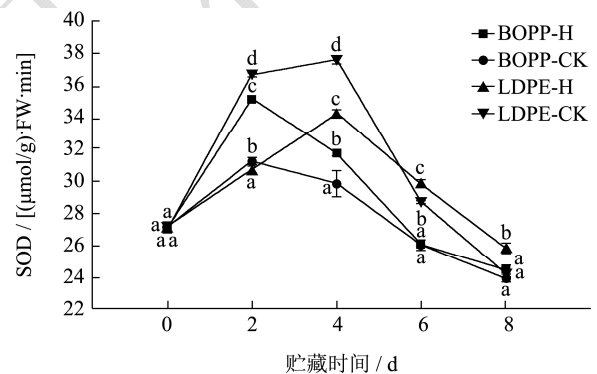


图6 菜心 SOD 活性变化

Fig.6 The change of SOD activity in Chinese flowering cabbage

菜心 SOD 的变化情况如图6所示，菜心 SOD 活性均呈现先上升后下降的趋势，在贮藏2 d时，BOPP 两种包装 SOD 活性达到最大值，差异显著 ($p < 0.05$)，BOPP-H 包装 SOD 活性比 BOPP-CK 包装高11.18%。陈学红等^[29]的研究结果认为，高氧包装能保持鲜切莴苣较高的 SOD 酶活性，抑制 O₂ 自由基生成量的增加，有效延缓鲜切莴苣的衰老。高氧包装在草莓果实上的应用也得到了类似的研究结果^[38]。在贮藏前4 d，LDPE-CK 包装 SOD 活性高于 LDPE-H 包装，差异显著 ($p < 0.05$)。原因可能是 LDPE-CK 包装在贮藏前期，H₂O₂ 含量积累较快，促进菜心体内 ROS 清除酶的活性，因此 SOD 活性增加较快；SOD 作为体内抗氧化酶系统的主要成分，是一种典型的诱导酶，适度的刺激条件可诱导其合成^[39]。贮藏8 d时，BOPP 和 LDPE 包装相比较发现，BOPP-H 包装 SOD 活性比 BOPP-CK 包装高2%；LDPE-H 包装 SOD 活性比

LDPE-CK 包装高 5.90%，LDPE-H 包装 SOD 活性比 BOPP-H 包装高 5.20%。说明高氧更有利于保持 SOD 含量，LDPE-H 包装相对于 BOPP-H 包装更利于植物体内 ROS 清除酶系统的运作。

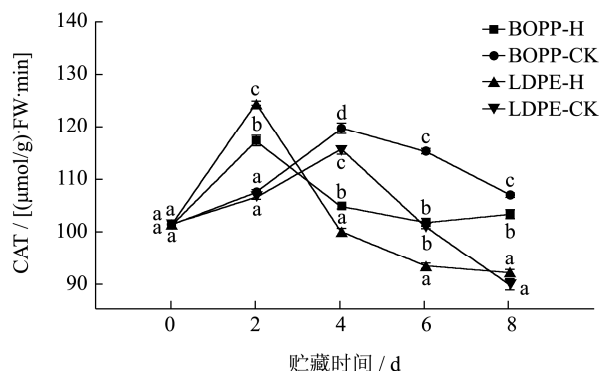


图7 菜心 CAT 活性变化

Fig.7 The change of CAT activity in Chinese flowering cabbage

菜心 CAT 活性的变化情况如图 7 所示，BOPP 及 LDPE 包装 CAT 活性均呈现先上升后下降趋势。贮藏 2 d 时，BOPP-H 包装及 LDPE-H 包装 CAT 酶活最高分别为 117.24 和 124.44 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{FW}\cdot\text{min})$ ，贮藏 4~8 d 四种包装酶活呈现下降趋势。CAT 能够分解清除 H_2O_2 ，降低体内活性氧水平^[40]，高氧包装抑制 H_2O_2 的生成，促进 ROS 清除酶的活性，诱导抗氧化酶蛋白的生成^[15]。以上结果表明，高氧包装在贮藏 2 d 较对照刺激 CAT 酶活的生成，而在后期，抑制 CAT 酶活生成。原因可能是高氧刺激了 CAT 酶活，导致菜心 H_2O_2 迅速分解，积累量减少。后期随着氧气浓度下降，高氧对 CAT 的刺激作用减弱，所以 CAT 酶活相比对照组更低。贮藏 4~8 d 时，BOPP-H 包装高于 LDPE-H 包装，差异显著 ($p<0.05$)，说明不同包装材料高氧包装对酶活的影响不同。

2.7 菜心木质素含量变化

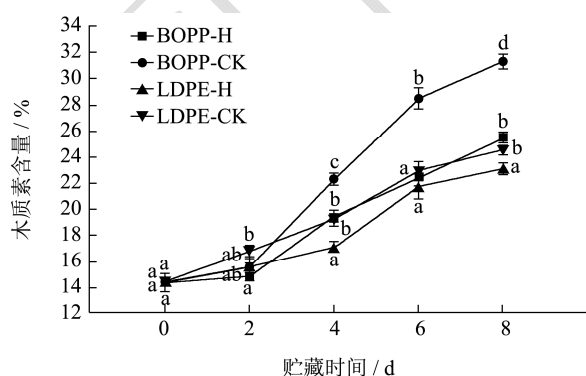


图8 菜心木质素含量变化

Fig.8 The changes of lignin content in Chinese flowering cabbage

菜心衰老的主要特征之一就是茎部木质化，菜茎

出现老化空心，口感变韧，如图 8 所示，在贮藏过程中，菜心木质素含量呈现上升趋势，且随着贮藏期的延长增加速度加快。贮藏 8 d 时，BOPP-H、BOPP-CK、LDPE-H 及 LDPE-CK 包装处理的菜心木质素含量相比于 0 d 分别高出了 47.73%、54.03%、37.86%、41.51%。其中 BOPP-H、LDPE-H 包装木质素含量均低于 BOPP-CK、LDPE-CK 包装。这与王惠惠^[41]用 PP 膜高氧 ($\text{O}_2>90\%$) 包装菜心研究结果一致。Weng 等^[14]、李桦等^[42]、孙涵等^[43]研究发现高氧状态下能抑制木质素合成途径的关键酶活，抑制了木质素积累，从而延缓木质化进程。木质素的形成往往伴随一定 H_2O_2 水平的存在^[44]，植物可通过多种途径产生 H_2O_2 等活性氧。在正常情况下，植物产生和消除活性氧的能力处于动态平衡，但当植物遇到逆境或衰老时，体内活性氧水平提高，SOD 及 CAT 清除酶活性也随之增加，从而使 H_2O_2 控制在较低的水平^[45,46]。高氧包装菜心在贮藏过程中消耗 Vc 来抵御氧化伤害，同时高氧包装可以维持较高的总酚含量，增加抗氧化活性，在贮藏早期提高 CAT 含量，清除过量 H_2O_2 ，贮藏后期提高 SOD 含量，增加活性氧清除酶活性，从而减少木质素积累。以上结果表明，高氧包装能抑制木质素合成，贮藏 8 d 时，LDPE-H 包装木质素含量比 BOPP-H 包装低 9.44%，差异显著 ($p<0.05$)，说明 LDPE-H 包装较 BOPP-H 包装更利于延缓木质素合成，保持菜心茎部柔嫩品质。

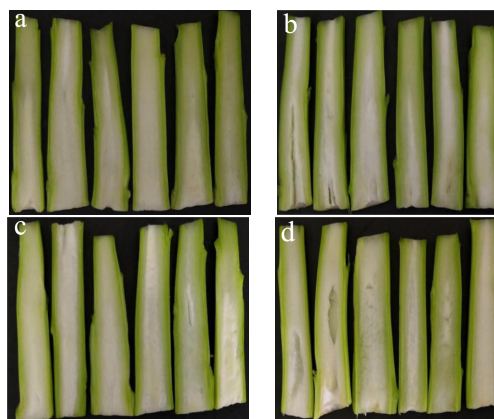


图9 高氧包装菜心在贮藏 8 d 后的茎部剖面图

Fig.9 Stem profile of Chinese flower cabbage packed with high oxygen after 8 d storage

注：a: LDPE-H; b: LDPE-CK; c: BOPP-H; d: BOPP-CK.

3 结论

BOPP 和 LDPE 高氧包装较空气包装都能促进总酚含量的上升；在贮藏早期刺激 CAT 酶活性、贮藏后期提高 SOD 酶活，促进活性氧清除酶的活性，减少 H_2O_2 积累，降低木质素合成。在贮藏 8 d 时，LDPE-H

包装较 BOPP-H 包装总酚含量高 25.73%, 木质素含量低 9.44%, 可以看出 LDPE-H 更利于菜心总酚含量的保持、减少木质素合成。

参考文献

- [1] 李相阳,姜微波.贮藏温度对菜心采后品质变化的影响[J].食品工业科技,2003,(s1):187-190
LI Xiang-yang, JIANG Wei-bo. Effects of storage temperature on qualities of flowering chinese cabbage [J]. Science and Technology of Food Industry, 2003, (s1): 187-190
- [2] 翟志宏,林镇国,陈慧华,等.广东菜心周年种植温度适宜性及其变化趋势[J].广东农业科学,2016,43(3):66-71
ZHAI Zhi-hong, LIN Zhen-guo, CHEN Hui-hua, et al. Temporal and spatial variation of temperature suitability index for *Brassica parachinensis* in Guangdong [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2016, 43(3): 66-71
- [3] 张华,刘自珠.菜薹(菜心)的市场需求与育种现状[J].中国蔬菜,2010,3:10-12
ZHANG Hua, LIU Zi-zhu. Market demand and breeding status of brassica parachinensis bailey (Chinese flower cabbage) [J]. China Vegetables, 2010, 3: 10-12
- [4] 姜晓阳,张昭其,杨暹,等.菜心采后生理及贮运保鲜技术研究进展[J].保鲜与加工,2011,11(1):47-50
JIANG Xiao-yang, ZHANG Zhao-qi, YANG Xian, et al. Research progress of postharvest physiology and storage and transport technologies [J]. Storage and Process, 2011, 11(1): 47-50
- [5] Oliveira M, Abadias M, Usall J, et al. Application of modified atmosphere packaging as a safety approach to fresh-cut fruits and vegetables-a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 46(1): 13-26
- [6] Zhang M, Meng X Y, Bhandari B, et al. Recent developments in film and gas research in modified atmosphere packaging of fresh foods [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56(13): 2174-2182
- [7] Day B P F. High oxygen modified atmosphere packaging for fresh prepared produce [J]. Postharvest News and Information, 1996, 7(3): 31N-34N
- [8] Wen M, Wang H H, Chen Y L, et al. Inhibition effect of super atmospheric O₂ packaging on H₂O₂ production and the key enzymes of lignin biosynthesis in fresh-cut Chinese cabbage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 159: 111027
- [9] Wang L, Wen M, Chen F P, et al. High oxygen atmospheric packaging (HOAP) reduces H₂O₂ production by regulating the accumulation of oxidative stress-related proteins in Chinese flowering cabbage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 165: 111183
- [10] Chen F P, Xu X Y, Luo Z, et al. Effect of high O₂ atmosphere packaging on postharvest quality of purple passion fruit (*Passiflora edulis* Sims) [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(9): e13749.1-e13749.7
- [11] 陈惠云.竹笋绿色保鲜贮藏技术研究与应用[D].杭州:浙江农林大学,2015
CHEN Hui-yun. Research and application of bamboo shoots green storage technology [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2015
- [12] Xia Y, Chen T, Qin G, et al. Synergistic action of antioxidative systems contributes to the alleviation of senescence in kiwifruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 111: 15-24
- [13] Dong L C, Ki H S, Wan J L, et al. Improvement of paint adhesion to a polypropylene bumper by plasma treatment [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001, 15(6): 653-664
- [14] Aniunoh K, Harrison G M. The processing of polypropylene cast films. I. Impact of material properties and processing conditions on film formation [J]. Polymer Engineering & Science, 2010, 50(6): 1151-1160
- [15] Lamberti G, Brucato V, Titomanlio G. Orientation and crystallinity in film casting of polypropylene [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 84(11): 1981-1992
- [16] Elias M B, Machado R S, Canevarolo S V. Thermal and dynamic-mechanical characterization of uni- and biaxially oriented polypropylene films [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2000, 59(1-2): 143-155
- [17] Madonna M, Pramod V, Mahajan, et al. Influence of different types of modified atmosphere packaging films and storage time on quality and bioactive compounds in fresh-cut cauliflower [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 22: 100374
- [18] 揣成智,李树,王建清,等.果蔬保鲜膜的研制[J].现代塑料加工应用,1998,10(1):1-6
CHUAI Cheng-zhi, LI Shu, WANG Jian-qing, et al. Development of fruit and vegetable plastic wrap [J]. Modern Plastics Processing and Application, 1998, 10(1): 1-6
- [19] Li X H, Li Y Y, Zhang Li, et al. Effects of modified atmosphere packaging of PE film with different thickness on quality of *Pleurotus nebrodensis* [J]. Advanced Materials Research, 2011, 1035: 371-374

- [20] 于茂兰,陈于陇,徐玉娟,等.气调包装对带叶荔枝褐变及品质的影响[J].现代食品科技,2014,30(1):108-114
YU Mao-lan, CHEN Yu-long, XU Yu-juan, et al. Effect of high oxygen atmospheric packaging on the browning and quality of litchi fruits with leaves [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(1): 108-114
- [21] 刘文浩.熏硫及脱硫处理对龙眼贮藏生理的影响及转录组研究[D].广州:华南农业大学,2016
LIU Wen-hao. Study of transcriptome and storage physiological effect of sulfur and desulfurization treatment on longan fruit [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016
- [22] 王惠惠,陈于陇,肖更生.高氧气调包装对鲜切菜心品质的影响[J].中国食品学报,2014,14(2):161-170
WANG Hui-hui, CHEN Yu-long, XIAO Geng-sheng. Effect of super atmospheric oxygen packaging on the quality of fresh-cut flowering cabbages [J]. Chinese Journal of Food, 2014, 14(2): 161-170
- [23] 孙小静.不同品种脱水桑叶菜主要营养品质特征与综合评价[A].中国蚕学会,国家蚕桑产业技术体系.全国蚕桑资源多元化利用学术研讨会论文集[C].中国蚕学会,国家蚕桑产业技术体系:中国蚕学会,2014:7
SUN Xiao-jing. Nutritional quality characteristics and comprehensive evaluation of different varieties of dehydrated mulberry leaf vegetables [A]. Chinese Silk Worm Society, National Sericulture Industrial Technology System. Proceedings of the national symposium on diversified utilization of sericulture resources [C]. Chinese Silk Worm Society, National Sericulture Industrial Technology System: Chinese Silk Worm Society, 2014: 7
- [24] Huang W N, Liu H K, Zhang H H, et al. Ethylene-induced changes in lignification and cell wall-degrading enzymes in the roots of mungbean (*Vigna radiata*) sprouts [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, 73: 412-419
- [25] 王生有.高氧气调包装对火龙果采后生理及品质的影响[D].南昌:江西农业大学,2014
WANG Sheng-you. Effects of high O₂ atmospheric packaging on postharvest physiology and quality in pitayas [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2014
- [26] Siro I, Devlieghere F, Jacxsens L, et al. The microbial safety of strawberry and raspberry fruits packaged in high-oxygen and equilibrium-modified atmospheres compared to air storage [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2006, 41: 93-103
- [27] Lu H Y, Wang K D, Wang L, et al. Effect of super-atmospheric oxygen exposure on strawberry (*Fragaria ananassa* Fuch.) volatiles, sensory and chemical attributes [J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 142: 60-71
- [28] 李鹏霞,王贵禧,梁丽松,等.高氧处理对冬枣货架期呼吸强度及品质变化的影响[J].农业工程学报,2006,22(7):180-183
LI Peng-xia, WANG Gui-xi, LIANG Li-song, et al. Effects of high-oxygen treatments on respiration intensity and quality of 'dongzao' jujube during shelf-life [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(7): 180-183
- [29] 陈学红,秦卫东,马利华,等.高氧气调包装对鲜切莴苣呼吸和酶活性的影响[J].食品与发酵工业,2011,37(12):208-212
CHEN Xue-hong, QIN Wei-dong, MA Li-hua, et al. Effects of high-oxygen modulated packaging on respiration and enzyme activity of fresh-cut lettuce [J]. Food and Fermentation Industry, 2011, 37(12): 208-212
- [30] Purvis A C. The role of adaptive enzymes in carbohydrate oxidation by stressed and senescing plant tissues [J]. Hortence, 1997, 32(7): 1165-1168
- [31] Oms-Oliu G, Odriozola-Serrano I, Soliva-Fortuny R, et al. The role of peroxidase on the antioxidant potential of fresh-cut 'piel de sapo' melon packaged under different modified atmospheres [J]. Food Chemistry, 2008, 106(3): 1085-1092
- [32] Esther, Pintó, Irene, et al. Role of fermentative and antioxidant metabolisms in the induction of core browning in controlled-atmosphere stored pears [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2001, 81: 364-370
- [33] Ayala Zavala J F, Wang S Y, Wang C Y, et al. High oxygen treatment increases antioxidant capacity and post-harvest life of strawberry fruit [J]. Food Technol & Biotechnology, 2007, 45(2): 166-173
- [34] Zheng Y, Wang C Y, Wang S Y, et al. Effect of high-oxygen atmospheres on blueberry phenolics, anthocyanins, and antioxidant capacity [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(24): 7162-7169
- [35] Krknen A, Kuchitsu K. Reactive oxygen species in cell wall metabolism and development in plants [J]. Phytochemistry, 2015, 112(1): 22-32
- [36] Fan M C, Li W X, Hu X L, et al. Effect of micro-vacuum storage on active oxygen metabolism, internal browning and related enzyme activities in Laiyang pear (*Pyrus bretschneideri* Reld) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 72: 467-474
- [37] Liu Z L, Wang X Y. Changes in color, antioxidant, and free

- radical scavenging enzyme activity of mushrooms under high oxygen modified atmospheres [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2012, 69: 1-6
- [38] 陈学红,郑永华,杨震峰,等.高氧处理对草莓果实采后活性氧代谢和腐烂的影响[J].*南京农业大学学报*,2005,28(1): 99-102
- CHEN Xue-hong, ZHENG Yong-hua, YANG Zhen-feng, et al. Effects of high oxygen treatment on active oxygen metabolism and fruit decay in postharvest strawberry [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2005, 28(1): 99-102
- [39] 杨淑慎,高俊凤.活性氧,自由基与植物的衰老[J].*西北植物学报*,2001,2:215-220
- YANG Shu-shen, GAO Jun-feng. Reactive oxygen species, free radicals and plant senescence [J]. *Journal of Northwest Flora*, 2001, 2: 215-220
- [40] 赵晓敏,杨静,李学文,等.1-MCP 常温处理对库尔勒香梨活性氧相关代谢的影响[J].*食品与发酵工业*,2014,40(9):219-223
- ZHAO Xiao-min, YANG Jing, LI Xue-wen, et al. Effect of 1-methylcyclopropene treatment on the metabolism of reactive oxygen in Korle fragrant pear [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2014, 40(9): 219-223
- [41] 王惠惠.鲜切菜心关键技术研究[D].湛江:广东海洋大学,2013
- WANG Hui-hui. Research on key techniques of fresh-cut flowering cabbage [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2013
- [42] 李桦,梁春强,吕茫,等.草酸对冷藏‘华优’猕猴桃果实木质化及相关酶活性的影响[J].*园艺学报*,2017,44(6):1085-1093
- LI hua, LIANG Chun-qiang, LV Jiang, et al. Effects of oxalic acid treatment on lignification and related enzymes activities in 'huayou' kiwifruit during cold storage [J]. *Journal of Horticulture*, 2017, 44(6): 1085-1093
- [43] 孙涵,王相友,李玲.高氧动态气调对双孢蘑菇细胞壁代谢及木质化进程的影响[J].*食品科学*,2018,39(11):255-262
- SUN Han, WANG Xiang-you, LI Ling. Effect of high-oxygen dynamic controlled atmosphere on cell wall metabolism and lignification proces of *Agaricus bisporus* [J]. *Food Science*, 2018, 39(11): 255-262
- [44] Kärkönen A, Warinowski T, Teemu H. et al. On the mechanism of apoplastic H₂O₂ production during lignin formation and elicitation in cultured spruce cells-peroxidases after elicitation [J]. *Planta*, 2009, 230: 553-567
- [45] 肖婷,何欣遥,吴姗鸿,等.乙醇熏蒸对小白菜的护绿机理研究[J].*食品与发酵工业*, 2020,21:173-180
- XIAO Ting, HE Xin-yao, WU Shan-hong, et al. Mechanism research on green preservation of pakchoi by ethanol fumigation [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 21: 173-180
- [46] 柳凤,欧雄常,詹儒林,等.*Fusarium mangiferae* 对芒果顶芽内活性氧代谢的影响[J].*果树学报*,2015,32(1):94-99
- LIU Feng, OU Xiong-chang, ZHAN Ru-lin, et al. Effects of *Fusarium mangiferae* on active oxygen metabolism in apical bud of mango [J]. *Journal of Fruit Science*, 2015, 32(1): 94-99

(上接第 248 页)

- [41] Zeng Lanting, Zhou Ying, Gui Jiadong, et al. Formation of volatile tea constituent indole during the oolong tea manufacturing process [J]. *Pubmed*, 2016, 64(24): 5009-5011
- [42] Ma Chengying, Li Junxing, Chen Wei, et al. Study of the aroma formation and transformation during the manufacturing process of oolong tea by solid-phase micro-extraction and gas chromatography-mass spectrometry combined with chemometrics [J]. *Food Research International (Ottawa, Ont)*, 2018, 108: 411-422
- [43] 陈林,陈键,陈泉宾,等.做青工艺对乌龙茶香气组成化学模式的影响[J].*茶叶科学*,2014,4:387-395
- CHEN Lin, CHEN Jian, CHEN Quan-bin, et al. Effects of green-making technique on aroma pattern of oolong tea [J]. *Journal of Tea Science*, 2014, 4: 387-395
- [44] Gui Jiadong, Fu Xiumin, Zhou Ying, et al. Does enzymatic hydrolysis of glycosidically bound volatile compounds really contribute to the formation of volatile compounds during the oolong tea manufacturing process [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 63(31): 6905-6914