

芳香中药纯露对鲜切双孢菇的抗氧化及保鲜作用

吴克刚¹, 黄煜强^{1,*}, 余冰莹¹, 崔正祥¹, 段雪娟¹, 柴向华¹, 张志辉², 郑鹏飞²

(1. 广东工业大学轻工化工学院, 广东 广州 510006; 2. 英德原野阳光生物科技发展有限公司, 广东 清远 511500)

摘要: 多酚氧化酶 (polyphenol oxidase, PPO) 是鲜切果蔬产品产生褐变中的最重要因素之一。本研究芳香中药纯露对PPO活力的影响及其生物抗氧化作用。水蒸气蒸馏法提取的12种芳香纯露对PPO活力均具有抑制作用, 其中8种芳香纯露对1,1-二苯基-2-三硝基苯肼、2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)阳离子自由基和3-氧代-2-苯基-4,4,5,5-四甲基咪唑啉-1-氧自由基有较强的清除作用, 总抗氧化能力实验表明芳香纯露具有较强的抗氧化活性。采用电子鼻和气相色谱-质谱联用分析芳香纯露中的挥发性成分, 萜类化合物和芳香族化合物为其主要组分。将提取的芳香纯露应用于保鲜双孢菇并测试相关理化性质, 结果显示, 与对照组相比, 芳香纯露处理的双孢菇体内PPO活力被抑制, 褐变指数升高延缓。此外, 总酚含量、硬度、质量损失和微生物菌落总数均得到有效控制。这些结果表明, 使用芳香纯露处理对于保持鲜切双孢菇的品质有积极作用。

关键词: 芳香中药纯露; 多酚氧化酶; 抗氧化作用; 双孢菇保鲜

Antioxidant and Perservation Effect of Aromatic Hydrosol and Its Application in Fresh-Cut *Agaricus bisporus* (Lange) Sing. Preservation

WU Kegang¹, HUANG Yuqiang^{1,*}, YU Bingying¹, CUI Zhengxiang¹, DUAN Xuejuan¹, CHAI Xianghua¹, ZHANG Zhihui², ZHENG Pengfei²

(1. School of Chemical Engineering and Light Industry, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Yingde Harano Sunshine Biotechnology Development Co., Ltd., Qingyuan 511500, China)

Abstract: Polyphenol oxidase (PPO) is one of the most important factors affecting the browning of fresh-cut fruit and vegetable products. In this research, the effect of aromatic hydrosol on the activity of PPO and its biological antioxidant effect were studied. Aromatic hydrosol extracted from 12 kinds of aromatic plants by steam distillation all inhibited the activity of PPO. Eight of the 12 aromatic hydrosols had a significant scavenging effect on 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH), 2,2'-azinobis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS) radical cation, and 2-phenyl-4,4,5,5-tetramethylimidazoline-3-oxide-1-oxyl (PTIO) radicals. Total antioxidant capacity assay showed that they had strong antioxidant activity. Analysis by electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) showed that terpenoids and aromatic compounds were the major volatile components of aromatic hydrosol. The efficacy of aromatic hydrosol was evaluated in preserving the quality of fresh-cut mushrooms (*Agaricus bisporus*). The results showed that compared with the control group, the PPO activity in mushrooms treated with aromatic hydrosol was inhibited, and the increase in browning index (BI) was delayed. In addition, total phenol content, hardness, mass loss and total microbial load were effectively controlled. These results indicate that aromatic hydrosol treatment has a positive effect on maintaining the quality of fresh-cut mushrooms.

Keywords: aromatic hydrosol; polyphenol oxidase; antioxidant effect; *Agaricus bisporus* (Lange) Sing. preservation

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220926-276

中图分类号: TS255.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2023) 15-0227-12

引文格式:

吴克刚, 黄煜强, 余冰莹, 等. 芳香中药纯露对鲜切双孢菇的抗氧化及保鲜作用[J]. 食品科学, 2023, 44(15): 227-238.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220926-276. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2022-09-26

基金项目: 广州市科技计划项目 (202103000078; 202206010181); 广东省林业科技创新重点项目 (2020KJCX010); 广东省农村科技特派员重点项目 (19ZK0364)

第一作者简介: 吴克刚 (1969—) (ORCID: 0000-0002-0346-6768), 男, 教授, 博士, 研究方向为芳香植物天然产物。

E-mail: wukegang2003@163.com

*通信作者简介: 黄煜强 (1998—) (ORCID: 0000-0003-0694-5796), 男, 硕士研究生, 研究方向为芳香植物天然产物。

E-mail: hyq172124@163.com

WU Kegang, HUANG Yuqiang, YU Bingying, et al. Antioxidant and perservation effect of aromatic hydrosol and its application in fresh-cut *Agaricus bisporus* (Lange) Sing. preservation[J]. Food Science, 2023, 44(15): 227-238. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220926-276. <http://www.spkx.net.cn>

芳香中药纯露是指在芳香中药精油提取过程中, 芳香植物材料经水蒸馏后分离出的馏液, 含有微量能与水通过氢键作用结合的极性成分, 是精油的水饱和溶液^[1]。芳香纯露成分天然纯净、香味清淡怡人、精油浓度低、对人体刺激小, 是芳香产业的主要研究方向。多项研究表明, 芳香纯露具有多种生理活性。Cid-Pérez等^[2]报道一种墨西哥牛至属迷迭香薄荷纯露具有抗氧化活性和抑菌活性, 对1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH) 自由基的半抑制浓度为83.70 μg/mL, 对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、单核细胞增生李斯特氏菌、蜡状芽孢杆菌和鼠伤寒沙门氏菌均有抗菌活性。Matulyte等^[3]在模拟体外炎症模型中, 发现肉豆蔻纯露处理的细胞中白细胞介素6释放量约为空白组的1/4, 表明肉豆蔻纯露具有较高的抗炎活性。研究报道, 洋葱、菠萝等食品成分以及各种膳食成分具有抗褐变特性^[4-7], 表明天然提取物在抗褐变方面的巨大潜力。Weerawardana等^[8]报道生姜提取物和肉桂皮精油能抑制番荔枝中多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO) 活力, 延缓水果和蔬菜的褐变, 提高营养价值。Zhang Guangjie等^[9]使用八角茴香精油包合物食用涂料用于保鲜鲜切山药, 结果表明鲜切山药的PPO活力及褐变颜色得到有效控制。精油对鲜切果蔬的保鲜作用, 为天然提取物控制酶促褐变提供新的思路。因此, Politi等^[10]提出要重新考虑将中药纯露作为芳香植物制造厂的主要产品, 而不是副产品。

在食品加工、销售等过程中, 褐变是蔬菜、水果质量下降的主要原因之一, 表面褐变导致特征颜色丧失, 最终导致果蔬的市场潜力和视觉质量显著降低^[11]。PPO是果蔬发生酶促褐变的关键酶, 其将酚类化合物氧化成醌类化合物, 这些醌类化合物及其衍生物通过反应聚合形成黑色素^[12], 从而影响果蔬外观、风味和价值。通过控制PPO活力可以最大限度减少酶促褐变引起的品质损失。在新鲜农产品中, 普遍使用化学抑制剂控制PPO活力, 随着鲜切果蔬市场的快速增长, 越来越多消费者对鲜切食品提出更安全、更健康、更环保的要求, 更愿意购买含有天然添加剂的产品而不是合成添加剂。因此, 研究抑制PPO活力的天然制剂以替代合成添加剂, 对鲜切果蔬市场具有重要意义。

芳香纯露与植物精油同源, 有相似的作用和功效, 且产量大、成本低, 但目前对芳香纯露与PPO活性控制关系方面的研究还较为缺乏, 尤其芳香纯露对鲜切双孢菇保鲜效果还鲜见报道。因此, 本研究提取多种

芳香纯露, 探究其对PPO活力的抑制作用, 并采用电子鼻和气相色谱和质谱联用技术(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 分析芳香纯露挥发性成分, 比较芳香纯露对鲜切双孢菇的保鲜效果, 为提高芳香纯露在食品、农业中应用价值, 开发有高附加值的芳香产品提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

双孢菇(*Agaricus bisporus*) 由广州市香思馨情健康科技有限公司提供; 柠檬香茅(广东)、肉桂叶(广东)、佛手(广东)、大马士革玫瑰(陕西)、墨红玫瑰(广东)、丰花玫瑰(山东)、桂花(福建)、丁香(广西)、沉香(广东)、蛇床子(广西)、丹参(河北)、艾叶(河北) 由广州市香思馨情健康科技有限公司提供。

PPO (25 kU, EC 1.14.18.1) 北京索莱宝科技有限公司; 左旋多巴(分析纯)、2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)(2,2'-azinobis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS)、2-苯基-4,4,5,5-四甲基咪唑啉-3-氧代-1-氧(2-phenyl-4,4,5,5-tetramethylimidazoline-3-oxide-1-oxyl, PTIO) 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 曲酸(99%)、邻苯二酚(分析纯) 上海麦克林生化科技股份有限公司; DPPH 美国西格玛公司; 总抗氧化能力(铁离子还原法) 试剂盒 苏州格锐思生物科技有限公司; 其余所用溶剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

Labserv K3型酶标仪 美国赛默飞世尔公司; UV-2450紫外-可见分光光度计 日本岛津公司; PEN3电子鼻德国Airsense公司; 7890A-5977B GC-MS仪 美国安捷伦公司; NS800分光测色仪 深圳市三恩驰科技有限公司; TAXT.C-18型质构仪 上海保圣实业发展有限公司。

1.3 方法

1.3.1 纯露提取

称取100 g原料, 以料液比1:10 (m/V) 加入去离子水, 浸泡30 min, 水蒸气蒸馏提取2 h, 制得纯露原液。

1.3.2 PPO抑制剂筛选

参照Ho^[13]和Bae^[14]的方法并作修改。在125 μL 0.01 mol/L左旋多巴溶液中添加50 μL不同体积分数纯露样品与25 μL磷酸盐缓冲液(phosphate buffer saline, PBS), 常温下预孵育5 min, 加入50 μL 200 U/mL

PPO溶液孵育25 min, 使用酶标仪于492 nm波长处测定吸光度。以曲酸溶液作为阳性对照组, 以不加入纯露样品为空白组, 以不加入纯露样品和PPO溶液为空白对照组, 以加入纯露样品为实验组, 以不加入PPO溶液为实验对照组。PPO活力抑制率按式(1)计算。

$$\text{PPO活力抑制率}/\% = \frac{(A_1 - A_2) - (A_3 - A_4)}{A_1 - A_2} \times 100 \quad (1)$$

式中: A_1 为空白组 $A_{492 \text{ nm}}$; A_2 为空白对照组 $A_{492 \text{ nm}}$; A_3 为实验组 $A_{492 \text{ nm}}$; A_4 为实验对照组 $A_{492 \text{ nm}}$ 。

1.3.3 生物抗氧化活性测定

1.3.3.1 DPPH自由基清除能力的测定

参考Zeljko等^[15]的方法并作修改。将1.0 mL 5 mmol/L DPPH溶液与2.0 mL纯露混合, 以去离子水为空白组, 以乙醇为对照组, 室温避光放置反应10 min后测定517 nm波长处的吸光度。DPPH自由基清除率按式(2)计算。

$$\text{DPPH自由基清除率}/\% = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100 \quad (2)$$

式中: A_1 为DPPH溶液与纯露反应的 $A_{517 \text{ nm}}$; A_2 为纯露与乙醇反应的 $A_{517 \text{ nm}}$; A_0 为DPPH溶液与去离子水反应的 $A_{517 \text{ nm}}$ 。

1.3.3.2 ABTS阳离子自由基清除能力的测定

参考Zeljko等^[15]的方法并作修改。取2.0 mL 7 mmol/L ABTS溶液, 分别加入1.0 mL不同纯露样品溶液, 以去离子水为空白组, 以PBS为对照组, 室温避光放置反应5 min后测定734 nm波长处吸光度。ABTS阳离子自由基清除率按式(3)计算。

$$\text{ABTS阳离子自由基清除率}/\% = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100 \quad (3)$$

式中: A_1 为ABTS溶液与纯露反应的 $A_{734 \text{ nm}}$; A_2 为PBS缓冲液与纯露反应的 $A_{734 \text{ nm}}$; A_0 为样品溶液与去离子水反应的 $A_{734 \text{ nm}}$ 。

1.3.3.3 PTIO自由基清除能力的测定

参考Li Xican等^[16]的方法并作修改。将1.0 mL PTIO溶液分别与3.0 mL不同纯露混合, 密封避光放置反应48 h后测定557 nm波长处吸光度。PTIO自由基清除率按式(4)计算。

$$\text{PTIO自由基清除率}/\% = \left(1 - \frac{A_1}{A_0}\right) \times 100 \quad (4)$$

式中: A_1 为PTIO溶液与纯露反应的吸光度; A_0 为PTIO溶液与去离子水反应的吸光度。

1.3.3.4 总抗氧化能力的测定

参考Ferrza等^[17]的铁离子还原法并作修改。取2.0 mL不同纯露与850 μL 显色液混匀, 以离子水为空白, 室温下反应10 min后测定595 nm波长处OD值。绘制铁离子标准曲线为 $y = 0.0375x - 0.0262$ ($R^2 = 0.9985$), 其中 x 为

标准品Trolox物质的量/nmol, y 为 $\Delta\text{OD}_{590 \text{ nm}}$ ($\Delta\text{OD}_{590 \text{ nm}} = \text{OD}_{\text{测定}} - \text{OD}_{\text{空白}}$)。按式(5)计算总抗氧化能力, 结果以Trolox物质的量计。

$$\text{总抗氧化能力}/(\text{nmol/mL}) = \frac{\Delta\text{OD}_{590 \text{ nm}} + 0.0262}{0.0375 \times 2} \times 10^{-3} \quad (5)$$

1.3.4 香气特征组分分析

1.3.4.1 电子鼻测定

参考Chen Xiaoi等^[18]的方法并作修改。分别取2 mL不同纯露样品放入顶空瓶中, 在20 $^{\circ}\text{C}$ 下平衡50 min, 插入进样针, 将样品上层空气泵入传感器阵列进行分析。电子鼻参数: 冲洗时间80 s; 测定时间100 s; 预采样时间5 s; 腔室流量450 mL/min; 初始注入流量300 mL/min。电子鼻传感器所对应的敏感物质及灵敏度如表1所示。

表1 电子鼻传感器性能描述

Table 1 Performance description of electronic nose sensors

编号	传感器	敏感物质	检测限/(mL/m^3)
S1	W1C	芳烃化合物	10
S2	W5S	氮氧化合物	1
S3	W3C	氨, 对芳香成分敏感	10
S4	W6S	氢化物	100
S5	W5C	短链烯烃, 芳香族化合物	1
S6	W1S	烷类	100
S7	W1W	硫化物和萜类化合物	1
S8	W2S	醇、醛、酮	100
S9	W2W	芳烃化合物、硫的有机化合物	1
S10	W3S	长链烷烃	100

1.3.4.2 纯露成分GC-MS分析

参考Tomi^[19]和Tavares^[20]的方法并作修改。GC-MS条件: HP-5MS弹性石英毛细管柱(60 $\text{m} \times 0.25 \text{ mm}$, 0.25 μm); 升温程序: 50 $^{\circ}\text{C}$ 保持3 min, 2 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至180 $^{\circ}\text{C}$, 再以20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至300 $^{\circ}\text{C}$, 保持10 min; 进样体积1 μL ; 进样口温度250 $^{\circ}\text{C}$; 分流进样(120:1); 载气模式: 流速1 mL/min; 传输线温度300 $^{\circ}\text{C}$; 电子电离源; 离子源温度230 $^{\circ}\text{C}$; 四极杆温度150 $^{\circ}\text{C}$; 扫描范围29~550 amu; 溶剂延迟5.5 min。按式(6)计算化合物保留指数(retention index, RI), 并与文献RI值进行对比进而定性。

$$\text{RI} = 100z + 100 \frac{t_{\text{R}(x)} - t_{\text{R}(z)}}{t_{\text{R}(z+1)} - t_{\text{R}(z)}} \quad (6)$$

式中: z 与 $z+1$ 分别为目标化合物 x 在同等仪器条件下保留时间前后的正构烷烃碳原子数; $t_{\text{R}(z)}$ 、 $t_{\text{R}(z+1)}$ 和 $t_{\text{R}(x)}$ 分别为碳原子数为 z 和 $z+1$ 的正构烷烃以及目标化合物 x 的保留时间/min。

1.3.5 纯露对鲜切双孢菇的保鲜处理

选择成熟度和果实大小一致的双孢菇, 并切成2~3 cm厚的鲜切片。用墨红玫瑰、大马士革玫瑰、丰花

玫瑰、佛手、丁香、桂花、柠檬香茅、肉桂8种纯露溶液对鲜切双孢菇浸泡5 min处理, 风干后用聚乙烯袋进行包装, 在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $(85 \pm 5)\%$ 恒温恒湿箱中贮藏, 每24 h测定相关品质指标。

1.3.6 鲜切双孢菇指标检测

1.3.6.1 褐变度的测定

参考Zheng Huanhuan等^[21]的方法并作修改。分别测定不同纯露处理下鲜切双孢菇的表面褐变度, 记录亮度(L^* 值)、红度(a^* 值)、黄度(b^* 值)。按式(7)计算褐变度。

$$\text{褐变度} = (x - 0.31) \times \frac{100}{0.172} \quad (7)$$

$$\text{式中: } x = \frac{a^* + 1.75 \times L^*}{5.645 \times L^* + a^* - 3.012 \times b^*}$$

1.3.6.2 双孢菇体内PPO活力的测定

参照Du Yunjian等^[22]的方法并作修改。取1.0 g鲜切样品, 加入10.0 mL PBS、硅砂和交联聚乙烯基吡咯烷酮, 研磨成匀浆, 4°C 、8 000 r/min离心5 min, 取上清液即为粗酶液。将1.0 mL粗酶液与1.0 mL PBS、2.0 mL 15 mmol/L左旋多巴溶液混合, 以PBS为对照组, 测定3 min内溶液 $\text{OD}_{492\text{ nm}}$ 的变化($\Delta\text{OD}_{492\text{ nm}}$), 以OD值每增加0.001定义为一个酶活力单位, 单位为 $\text{U}/(\text{g} \cdot \text{min})$ 。按式(8)计算PPO活力。

$$\text{PPO活力} (\text{U}/(\text{g} \cdot \text{min})) = \frac{\Delta\text{OD}_{492\text{ nm}} \times V_r}{m \times V_s \times t \times 0.001} \quad (8)$$

式中: V_r 为提取酶液总体积/mL; m 为取样质量/g; V_s 为测定时取用的粗酶液体积/mL; t 为反应时间/min。

1.3.6.3 总酚含量的测定

参考Zhao Wenting等^[23]的方法并作修改, 采用福林-酚法测定。用没食子酸标准液制作标准曲线 $y = 0.011x + 0.047$ ($R^2 = 0.999$), 其中 x 为没食子酸标准溶液质量浓度/ $\mu\text{g}/\text{g}$, y 为没食子酸标准溶液组和空白组的 $\text{OD}_{765\text{ nm}}$ 差值($\Delta\text{OD}_{765\text{ nm}}$)。不同纯露处理组双孢菇中总酚含量以没食子酸当量表示, 单位为 $\mu\text{g}/\text{g}$ 。

1.3.6.4 硬度的测定

参考Jiang Yongli等^[24]的方法并作修改。双孢菇固定在质构仪操作台上, 保持切面与探头接触面平行, 采用直径为5 mm的TA/2探头, 测前速率3 mm/s, 测试速率1 mm/s, 探头以2 mm/s速率下压, 下压深度6 mm, 在BOSIN软件上得到力与时间的作用曲线, 最大峰值(N_{max})即为硬度。

1.3.6.5 质量损失率的测定

贮藏结束后称量每个样品质量, 质量损失率为相对于初始质量损失的百分比。

1.3.6.6 微生物的测定

按照GB 4789.2—2016《食品微生物学检验 菌落总数测定》方法测定菌落总数。

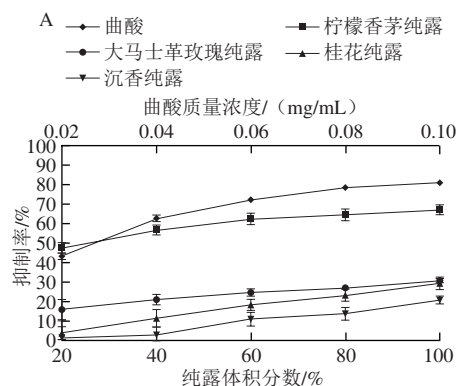
1.4 数据处理

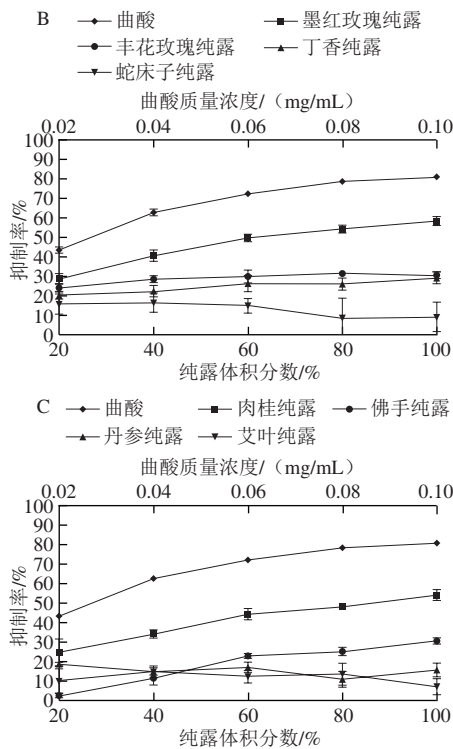
每组实验重复3次, 结果以平均值 \pm 标准差表示, 使用SPSS 25.0软件进行单因素方差分析, 当 $P \leq 0.05$ 时有显著性差异, 采用Origin 2021软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 不同芳香纯露对PPO活力的抑制作用

PPO同时具有单酚酶和双酚酶活性, 并能催化酚类物质氧化形成醌类物质, 进而聚合成棕褐色化合物, 这是导致褐变的主要因素^[25]。如图1所示, 在纯露的实验体积分数范围内, 不同芳香纯露对PPO活力的抑制活性呈不同变化趋势。阳性对照曲酸、柠檬香茅、大马士革玫瑰、桂花、沉香、墨红玫瑰、丰花玫瑰、丁香、肉桂、佛手等纯露对PPO活力的抑制作用呈一定的浓度依赖性, 并逐渐趋于稳定。沉香纯露对PPO活力的抑制作用较弱, 大马士革玫瑰、桂花、丰花玫瑰、丁香、佛手等纯露对PPO的抑制作用较强, 而柠檬香茅、墨红玫瑰、肉桂等纯露对酶的抑制效果最好, 通过SPSS软件计算得到柠檬香茅、墨红玫瑰、肉桂等纯露对PPO活力的半抑制浓度(half inhibitory concentration, IC_{50})分别为23.900%、64.805%、84.851%, 阳性对照曲酸对PPO活力的 IC_{50} 为0.025 mg/mL。所提取的芳香纯露含有抑制酶活性的有效成分, 并表现出较好的抑制效果。曲酸是目前研究最深入的PPO强抑制剂^[26], 但相比于曲酸, 芳香纯露是一种化学组成复杂的水溶液, 抑制酶活性的有效成分含量较低, 因此对PPO活力的抑制作用较低。蛇床子纯露对PPO活力的抑制作用随着体积分数的增加而下降, 丹参和艾叶纯露对PPO活力的抑制作用随着体积分数的变化波动变化, 这些纯露可能含有促进酶活性的有效成分, 因此不具备酶抑制剂的研究价值。可见, 柠檬香茅、墨红玫瑰、肉桂、大马士革玫瑰、桂花、丰花玫瑰、丁香、佛手纯露对PPO活力抑制效果较好, 有进一步研究作为PPO抑制剂的潜在价值。





A. 柠檬香茅、大马士革玫瑰、桂花、沉香; B. 墨红玫瑰、丰花玫瑰、丁香、蛇床子; C. 肉桂、佛手、丹参、艾叶。

图1 不同芳香纯露对PPO活力的抑制能力

Fig. 1 Inhibitory effect of aromatic hydrosol on PPO

2.2 不同芳香纯露的生物抗氧化作用

PPO属于氧化还原酶系，其催化本质是一种氧化还原反应^[27]。许多研究报道芳香纯露结合自由基有效延缓食品的氧化腐败，如DPPH、ABTS阳离子自由基和PTIO自由基^[1,28-29]。如图2和表2所示，同种纯露对不同自由基的清除率存在差异，其中ABTS阳离子自由基清除率与总抗氧化能力显示出较高的相关性^[30]。丁香纯露对DPPH、ABTS阳离子自由基的清除率均达90%以上，而大马士革玫瑰纯露、丰花玫瑰纯露对DPPH、ABTS阳离子自由基的清除率达75%以上，其他芳香纯露对DPPH、ABTS阳离子自由基的清除率只有20%~65%。丁香纯露对PTIO自由基清除率90%以上，这与丁香纯露中的主要挥发物丁香酚有关^[31]，而其他芳香纯露对PTIO自由基的清除率均低于25%。可见芳香纯露更易与DPPH、ABTS类的氮自由基发生反应，而与PTIO类氧活性中心的自由基较难发生反应，这种差异可能是芳香纯露清除自由基的原理及其自由基清除反应速率不同导致^[32]。大量研究报道植物提取物具有良好的抗氧化能力^[33-36]，这与其PPO活力抑制作用呈正相关。在所测芳香纯露中，大马士革玫瑰纯露、丰花玫瑰纯露的总抗氧化能力较高，分别为 (32.887 ± 0.060) 、 (29.092 ± 0.027) nmol/mL，

而自由基清除率较高的丁香纯露的总抗氧化能力仅为 (18.754 ± 0.043) nmol/mL，因此，同种纯露在不同抗氧化实验中表现出较大的差异。综上，纯露具有一定的PPO抑制活性和抗氧化能力，可作为潜在的鲜切果蔬抗褐变剂。

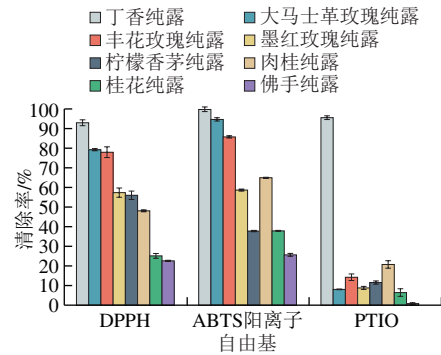


图2 不同芳香纯露的自由基清除作用

Fig. 2 Free radical scavenging capacity of aromatic hydrosol

表2 不同芳香纯露的总抗氧化能力比较

Table 2 Total antioxidant capacity of aromatic hydrosol

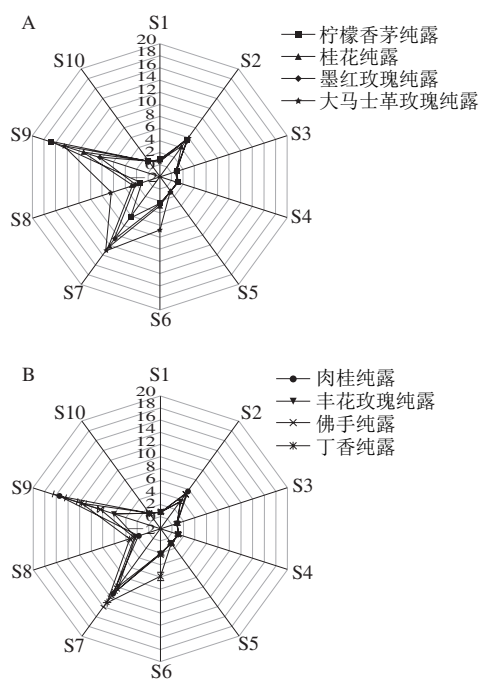
纯露	大马士革玫瑰纯露	丰花玫瑰纯露	丁香纯露	肉桂纯露	墨红玫瑰纯露	桂花纯露	柠檬香茅纯露	佛手纯露
总抗氧化能力/(nmol/mL)	32.887 ± 0.060	29.092 ± 0.027	18.754 ± 0.043	18.709 ± 0.074	16.740 ± 0.020	7.052 ± 0.020	6.976 ± 0.023	6.078 ± 0.020

2.3 香气特征组分分析

2.3.1 电子鼻检测结果

电子鼻是通过模拟人的嗅觉系统检测气味信息的一种智能电子仪器^[37]，具有检测简单物质气味成分的功能。电子鼻能快速、灵敏、无损地识别样品组分，客观地反映被测样品的信息，可广泛应用于精油成分分类、掺假识别等领域^[38-39]。研究报道，芳香族羧酸可作为PPO的竞争性抑制剂，并通过螯合铜发挥抑制作用^[40]。含硫制剂如半胱氨酸，是防止褐变的有效化合物^[41-42]。因此，用电子鼻检测芳香纯露的主要挥发性成分对研究纯露对PPO活力的影响、延缓双孢菇酶促褐变具有指导意义。

如图3所示，芳香纯露在S9、S7、S2感应器处均有较高的响应信号，表明纯露中的主要挥发性成分为芳烃化合物、含硫有机化合物和氮氧化合物，这与Qin Lei等^[43]的研究结果相似。肉桂、柠檬香茅纯露在S9感应器处的响应信号比其他感应器强，丰花玫瑰纯露在S7感应器处的响应信号比其他感应器强，其他芳香纯露在S9、S7感应器上均有强烈响应信号，因此推测含硫有机化合物对PPO活力有更好的抑制作用。电子鼻是快速鉴别芳香纯露主要成分的有效手段，但不同检测器对不同种类的化合物灵敏度不一致，且无法定量分析纯露的挥发性化合物，因此可通过GC-MS确定芳香纯露的主要挥发性物质。



A. 柠檬香茅、桂花、墨红玫瑰、大马士革玫瑰；B. 肉桂、丰花玫瑰、佛手、丁香。

图3 电子鼻传感器对不同物质的响应

Fig. 3 Response of electronic nose sensors to different substances

2.3.2 不同芳香纯露中主要挥发性物质的GC-MS分析结果

GC-MS结果表明，单萜醇是墨红玫瑰纯露挥发性化合物的主要类型，相对含量为44.48%，其中相对含量最高的挥发性化合物为香茅醇（27.69%）、1,3,5-三甲苯（10.49%）、甲基丁香酚（7.55%）和香叶醇（7.26%）（表3）。苯乙醇是大马士革玫瑰纯露主要的芳香族化合物，而甲基丁香酚和丁香酚是主要的酚类化合物。与墨红玫瑰相比，大马士革玫瑰纯露相对含量较低（3.19%），且两者中萜类和芳香族化合物的占比区别较大，但主要化合物均属于醇类化合物（表4）。Demirbolat等^[44]报道，大马士革玫瑰纯露中相对含量最高的化合物为苯乙醇（35.95%），且纯露中含有香茅醇、丁香醇和甲基丁香酚，与本研究结果存在一定差异。丰花玫瑰纯露中挥发性化合物含量极低，主要为甲基丁香酚（44.37%）（表5）。佛手纯露中溶于水的萜烯类化合物含量极低，但醇酮类化合物因含有羟基和羰基，能与水在一定程度形成氢键，因此佛手纯露中鉴定出4-松油醇、*L*- α -松油醇等化合物（表6），这与Luo Cheng等^[45]的研究报道相似。丁香纯露中最主要的挥发性化合物为丁香酚（表7），这与报道的丁香精油组成^[46]相同。研究表明，丁香酚具有较高的抗氧化活性，可抑制产生超氧化物^[47]，因此丁香纯露在生物抗氧化作用中表现出较高的自由基清除率。肉桂纯露中的主要挥发性成分为芳香族化合物，占比高达97.40%，其中

相对含量较高的挥发性化合物为反式肉桂醛（82.14%）、2'-甲氧基肉桂醛（6.07%）和苯甲醛（3.98%）（表8），这与已报道的肉桂精油和纯露结果相似，但是肉桂纯露中报道的乙酸肉桂酯、 α -乙酸松油酯和 α -松油醇^[48]在本研究中未检出。柠檬香茅纯露中挥发性成分含量最高的是柠檬醛的两种顺反异构体，即香叶醛和橙花醛、香叶醇和芳樟醇，但柠檬香茅精油中含有的 β -月桂烯、 α -松油醇、柠檬烯和松油烯^[49]在本研究中未被发现（表9）。桂花纯露中的萜类化合物为主要成分（70.93%），主要挥发性物质为香叶醇（29.69%）和芳樟醇（10.04%）（表10）。本研究中测得芳香纯露的主要挥发物在其精油提取物中均有报道，但化合物相对含量存在一定差异，这与植物产地和使用提取溶剂的不同有关。

表3 墨红玫瑰纯露主要化学成分

Table 3 Major chemical components of aromatic hydrosol from *Rosa chinensis* Jacq 'Crimson Glory' H.T.

编号	保留时间/min	挥发性化合物	分子式	相对含量/%	RI测定值	RI文献值	类型
1	12.40	糠醛	C ₅ H ₄ O ₂	2.00	831	831	醛
2	20.21	苯甲醛	C ₇ H ₆ O	1.09	961	961	芳香醛
3	25.33	苯甲醇	C ₇ H ₈ O	0.68	1 035	1 034	芳香醇
4	26.10	苯乙醛	C ₉ H ₈ O	2.12	1 045	1 045	芳香醛
5	28.22	反-氧化芳樟醇 (呋喃)	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	0.94	1 074	1 074	杂环单萜醇
6	30.12	芳樟醇	C ₁₀ H ₁₈ O	2.86	1 101	1 100	单萜醇
7	31.13	苯乙醇	C ₈ H ₁₀ O	3.59	1 115	1 114	芳香醇
8	35.48	薄荷脑	C ₁₀ H ₂₀ O	1.40	1 175	1 173	单环单萜醇
9	36.79	α -松油醇	C ₁₀ H ₁₈ O	1.49	1 194	1 192	单环单萜醇
10	39.27	香茅醇	C ₁₀ H ₂₀ O	27.69	1 229	1 228	单萜醇
11	39.36	橙花醇	C ₁₀ H ₁₈ O	6.67	1 231	1 230	单萜醇
12	41.11	香叶醇	C ₁₀ H ₁₈ O	7.26	1 256	1 255	单萜醇
14	47.66	牻牛儿酸	C ₁₀ H ₁₆ O ₂	4.06	1 353	1 355	单萜酸
15	48.19	丁香酚	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	3.89	1 361	1 360	酚
16	51.15	甲基丁香酚	C ₁₁ H ₁₄ O ₂	7.55	1 407	1 406	酚
17	51.51	1,3,5-三甲氧基苯	C ₈ H ₁₀ O ₃	10.49	1 412	1 405	芳香醚
18	70.62	苯甲酸苄酯	C ₁₄ H ₁₂ O ₂	0.96	1 780	1 774	芳香酯
19	72.42	1-十九碳烯	C ₁₉ H ₃₈	6.66	1 879	1 875	脂肪烃
20	72.74	正十九烷	C ₁₉ H ₄₀	3.49	1 899	1 900	正构烷烃
合计				94.89			
		单萜醇		44.48			
		酚		11.44			
		芳香醚		10.49			
		脂肪烃		6.66			
		芳香醇		4.28			
		单萜酸		4.06			
		正构烷烃		3.49			
		芳香醛		3.21			
		单环单萜醇		2.89			
		醛		2.00			
		芳香酯		0.96			
		杂环单萜醇		0.94			

表4 大马士革玫瑰纯露主要化学成分

Table 4 Major chemical components of aromatic hydrosol from *Rosa damascene* Mill.

编号	保留时间/min	挥发性化合物	分子式	相对含量/%	RI测定值	RI文献值	类型
1	31.13	苯乙醇	C ₈ H ₁₀ O	57.38	1 115	1 114	芳香醇
2	39.30	香茅醇	C ₁₀ H ₂₀ O	3.19	1 230	1 228	单萜醇
3	41.36	乙酸苯乙酯	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	2.76	1 259	1 257	芳香酯
4	48.18	丁香酚	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	11.26	1 361	1 360	酚
5	51.15	甲基丁香酚	C ₁₁ H ₁₄ O ₂	17.67	1 406	1 406	酚
6	68.73	香附烯酮	C ₁₅ H ₂₂ O	2.05	1 711	1 717	三环倍半萜酮
7	70.37	3,5,6,7,8,8a-六氢-4,8a-二甲基-6-(1-甲基乙烯基)-2(1H)萘酮	C ₁₉ H ₂₂ O	2.08	1 771	1 772	双环倍半萜酮
8	72.31	苯甲酸-2-苯乙酯	C ₁₅ H ₁₄ O ₂	3.61	1 872	1 860	芳香酯
合计				100.00			
芳香醇				57.38			
酚				28.93			
芳香酯				6.37			
单萜醇				3.19			
双环倍半萜酮				2.08			
三环倍半萜酮				2.05			

表5 丰花玫瑰纯露主要化学成分

Table 5 Major chemical components of aromatic hydrosol from *Rosa rugosa* cv. 'Plena'

编号	保留时间/min	挥发性化合物	分子式	相对含量/%	RI测定值	RI文献值	类型
1	31.16	苯乙醇	C ₈ H ₁₀ O	7.20	1 115	1 114	芳香醇
2	48.18	丁香酚	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	25.69	1 361	1 360	酚
3	51.14	甲基丁香酚	C ₁₁ H ₁₄ O ₂	44.37	1 406	1 406	酚
4	58.76	乙酸丁香酚酯	C ₁₂ H ₁₄ O ₃	22.74	1 530	1 526	芳香酯
合计				100.00			
酚				70.06			
芳香酯				22.74			
芳香醇				7.20			

表6 佛手纯露主要化学成分

Table 6 Major chemical components of aromatic hydrosol from *Citrus medica* L. var. *sarcodactylis* Swingle

编号	保留时间/min	挥发性化合物	分子式	相对含量/%	RI测定值	RI文献值	类型
1	35.84	4-松油醇	C ₁₀ H ₁₈ O	25.24	1 180	1 180	单环单萜醇
2	36.76	L-α-松油醇	C ₁₀ H ₁₈ O	31.88	1 193	1 192	单环单萜醇
3	63.54	表桉木呔喃烯酮	C ₁₅ H ₁₈ O ₂	13.65	1 612	1 623	倍半萜酮
4	66.81	姜黄酮	C ₁₅ H ₂₀ O	29.24	1 671	1 672	倍半萜酮
合计				100.00			
单环单萜醇				57.12			
倍半萜酮				42.88			

表7 丁香纯露主要化学成分

Table 7 Major chemical components of aromatic hydrosol from *Syzygium aromaticum* (L.) Merri.&L.M. Perry

编号	保留时间/min	挥发性化合物	分子式	相对含量/%	RI测定值	RI文献值	类型
1	34.81	乙酸苯酯	C ₉ H ₁₀ O ₂	0.06	1 166	1 167	芳香酯
2	37.07	水杨酸甲酯	C ₈ H ₈ O ₃	0.09	1 197	1 197	芳香酯
3	41.01	4-烯丙基苯酚	C ₉ H ₁₀ O	0.10	1 254	1 254	酚
4	48.28	丁香酚	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	97.94	1 363	1 360	酚
5	58.75	乙酸丁香酚酯	C ₁₂ H ₁₄ O ₃	1.77	1 530	1 526	芳香酯
合计				99.96			
酚				98.04			
芳香酯				1.92			

表8 肉桂纯露主要化学成分

Table 8 Major chemical components of aromatic hydrosol from *Cinnamomum cassia* Presl

编号	保留时间/min	挥发性化合物	分子式	相对含量/%	RI测定值	RI文献值	类型
1	20.20	苯甲醛	C ₇ H ₆ O	3.98	961	961	芳香醛
2	26.08	水杨醛	C ₇ H ₆ O ₂	0.54	1 045	1 047	芳香醛
3	27.75	苯乙酮	C ₈ H ₈ O	0.13	1 068	1 068	芳香酮
4	31.13	苯乙醇	C ₈ H ₁₀ O	0.20	1 115	1 114	芳香醇
5	34.75	苯丙醛	C ₉ H ₁₀ O	0.15	1 165	1 163	芳香醛
6	35.06	冰片	C ₁₀ H ₁₈ O	0.12	1 170	1 169	双环单萜
7	40.40	邻甲氧基苯甲醛	C ₈ H ₈ O ₂	1.28	1 246	1 242	芳香醛
8	42.45	反式肉桂醛	C ₉ H ₈ O	82.14	1 275	1 272	芳香醛
9	43.88	3-甲氧基苯乙酮	C ₉ H ₁₀ O ₂	0.03	1 296	1 295	芳香酮
10	53.41	香豆素	C ₉ H ₈ O ₂	1.49	1 443	1 443	芳香内酯
11	54.48	(Z)-3-(2-甲氧基苯基)丙-2-烯醛	C ₁₀ H ₁₀ O ₂	1.39	1 460	1 463	芳香醛
12	59.04	2'-甲氧基肉桂醛	C ₁₀ H ₁₀ O ₂	6.07	1 535	1 512	芳香醛
合计				97.52			
芳香醛				95.55			
芳香内酯				1.49			
芳香醇				0.20			
芳香酮				0.16			
双环单萜				0.12			

表9 柠檬香茅主要化学成分

Table 9 Major chemical components of aromatic hydrosol from *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf

编号	保留时间/min	挥发性化合物	分子式	相对含量/%	RI测定值	RI文献值	类型
1	21.98	甲基庚烯酮	C ₈ H ₁₄ O	4.45	987	987	酮
2	22.33	2,3-脱氢-1,8-桉树脑	C ₁₀ H ₁₆ O	3.99	992	991	单环单萜醚
3	28.20	氧化芳樟醇	C ₁₀ H ₁₆ O ₂	1.14	1 074	1 074	杂环单萜醇
4	30.12	芳樟醇	C ₁₀ H ₁₈ O	6.85	1 101	1 100	单萜醇
5	30.50	6-甲基-3,5-庚二烯-2-酮	C ₈ H ₁₄ O	1.18	1 106	1 106	酮
6	35.08	2-(4-甲基环己-2,4-二烯-1-基)丙-2-醇	C ₁₀ H ₁₈ O	2.06	1 170	1 170	单环单萜醇
7	35.48	薄荷脑	C ₁₀ H ₂₀ O	1.04	1 175	1 173	单环单萜醇
8	37.50	(1S,6R)-3-甲基-6-丙-1-烯-2-基环己基-2-烯-1-醇	C ₁₀ H ₁₈ O	2.05	1 204	1 210	单环单萜醇
9	39.28	香茅醇	C ₁₀ H ₂₀ O	0.75	1 229	1 228	单萜醇
10	39.32	橙花醇	C ₁₀ H ₁₈ O	0.69	1 230	1 230	单萜醇
11	40.26	(Z)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛(香叶醛)	C ₁₀ H ₁₈ O	19.27	1 243	1 244	单萜醛
12	41.11	香叶醇	C ₁₀ H ₁₈ O	9.30	1 256	1 255	单萜醇
13	42.28	(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛(橙花醛)	C ₁₀ H ₁₈ O	33.03	1 273	1 273	单萜醛
14	47.66	牻牛儿酸	C ₁₀ H ₁₆ O ₂	1.37	1 353	1 355	单萜酸
合计				87.17			
单萜醛				52.30			
单萜醇				17.59			
酮				5.63			
单环单萜醇				5.15			
单环单萜醚				3.99			
单萜酸				1.37			
杂环单萜醇				1.14			

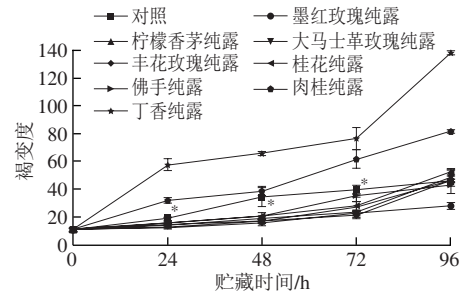
表 10 桂花纯露主要化学成分
Table 10 Major chemical components of aromatic hydrosol from *Osmanthus fragrans* (Thumb.) Lour.

编号	保留时间/min	挥发性化合物	分子式	相对含量/%	RI测定值	RI文献值	类型
1	26.12	苯乙醛	C ₉ H ₈ O	3.35	1 045	1 045	芳香醛
2	28.22	反-氧化芳樟醇(呋喃)	C ₁₀ H ₁₆ O ₂	8.16	1 074	1 074	杂环单萜醇
3	29.37	顺-5-乙烯基四氢- $\alpha,\alpha,5$ -三甲基-2-呋喃甲醇	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	8.04	1 090	1 091	杂环单萜醇
4	30.13	芳樟醇	C ₁₀ H ₁₆ O	10.04	1 101	1 100	单萜醇
5	35.55	2,2,6-三甲基-6-乙烯基四氢-2H-呋喃-3-醇	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	2.32	1 176	1 173	杂环单萜醇
6	41.11	香叶醇	C ₁₅ H ₂₆ O	29.69	1 256	1 255	单萜醇
7	47.57	三乙酸甘油酯	C ₉ H ₁₆ O ₆	5.94	1 352	1 350	酯
8	53.88	β -二氢紫罗兰醇	C ₁₁ H ₁₈ O	7.46	1 450	1 449	单环倍半萜醇
9	55.20	丙位癸内酯	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	8.71	1 472	1 472	内酯
10	56.42	β -紫罗兰酮	C ₁₁ H ₁₈ O	5.22	1 491	1 493	单环倍半萜酮
11	69.51	洋川芎内酯A	C ₁₂ H ₁₈ O ₂	2.43	1 740	1 729	内酯
12	69.95	蒿本内酯A	C ₁₂ H ₁₈ O ₂	2.33	1 756	1 758	内酯
合计				93.68			
单萜醇				39.73			
杂环单萜醇				18.52			
内酯				13.46			
单环倍半萜醇				7.46			
酯				5.94			
单环倍半萜酮				5.22			
芳香醛				3.35			

2.4 不同芳香纯露对鲜切双孢菇的保鲜作用

2.4.1 鲜切双孢菇的褐变度变化

褐变是影响新鲜农产品外观的主要因素，鲜切产品的褐变程度所造成的视觉外观强烈影响消费者的购买意愿^[50]，褐变度可以反映鲜切双孢菇的褐变程度^[51]，可直观评价不同纯露的抗褐变效果。随着贮藏时间的延长，不同芳香纯露处理对鲜切双孢菇褐变度的影响差异较大。如图4所示，在贮藏的前72 h，与对照组相比，除肉桂纯露，其他芳香纯露均能显著降低鲜切双孢菇的褐变，延缓酶促褐变反应，尽管切片表面褐变度仍缓慢增加，但是纯露处理组的褐变程度明显低于对照组。在0~72 h贮藏期间，芳香纯露处理组与对照组差异显著 ($P \leq 0.05$)，但不同的是，肉桂纯露促进了鲜切双孢菇的褐变，其他纯露则能降低褐变度，有效抑制鲜切双孢菇的酶促褐变，这可能是由于肉桂纯露中可能含有促进酶促褐变的化学成分。此外，丁香纯露比肉桂纯露加速双孢菇切片褐变的速率更快，这与丁香纯露中丁香酚的自氧化褐变作用远大于对PPO酶促褐变的抑制作用有关^[52]。结果表明，肉桂纯露和丁香纯露均不具有保鲜鲜切双孢菇的应用价值。当贮藏96 h时，柠檬香茅、桂花、大马士革玫瑰、丰花玫瑰、佛手纯露处理鲜切双孢菇的褐变度与对照组差异不显著 ($P > 0.05$)，而墨红玫瑰纯露处理的切片颜色稳定，褐变程度最低，具有良好的保鲜作用。



*.同一贮藏时间，对照组与所有纯露处理组差异显著 ($P \leq 0.05$)。图5~7同。

图 4 不同芳香纯露对鲜切双孢菇褐变度的影响

Fig. 4 Effect of aromatic hydrosol on browning degree of fresh-cut mushroom

2.4.2 鲜切双孢菇内PPO活力的变化

如图5所示，贮藏期间对照组鲜切双孢菇的PPO活力总体呈上升趋势，并且显著高于经芳香纯露处理的鲜切双孢菇样品 ($P \leq 0.05$)。普遍认为，鲜切双孢菇的褐变是由于酚类物质被PPO氧化导致形成褐色物质，而且PPO对棕色聚合物的形成具有协同作用。芳香纯露处理可抑制双孢菇内PPO活力，这可能是抑制鲜切双孢菇褐变的原因，这与体外抑制结果一致。不同芳香纯露处理对鲜切双孢菇内PPO活力抑制能力不同，在贮藏0~48 h期间，实验组双孢菇内PPO活力总体呈下降趋势，在贮藏48~96 h期间，PPO活力逐渐上升，但芳香纯露处理组PPO活力全部低于对照组，说明芳香纯露能有效延缓双孢菇的褐变，这与褐变度结果一致。植物体内PPO以膜结合形式 (mPPO) 和可溶性形式 (sPPO) 存在于类囊体中^[53]，在贮藏前期mPPO在细胞中稳定存储，sPPO活力被抑制，随着贮藏时间延长，越来越多mPPO自发释放转化成sPPO形式^[54]，因此，在贮藏前期PPO活力被抑制，褐变度变化缓慢，然后PPO活力逐渐上升，褐变度随之迅速变化。值得注意的是，在所测试的芳香纯露中，墨红玫瑰纯露处理的双孢菇内PPO活力一直维持在较低水平，表明该纯露在对PPO活力的抑制作用最强，抗褐变能力最好，保鲜效果最佳。

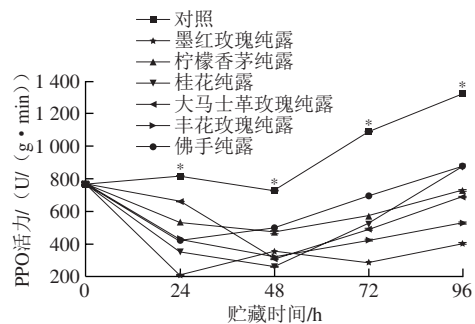


图 5 不同芳香纯露对鲜切双孢菇PPO活力的影响

Fig. 5 Effect of aromatic hydrosol on PPO activity of fresh-cut mushroom

2.4.3 鲜切双孢菇的总酚含量

如图6所示, 芳香纯露处理鲜切双孢菇的总酚含量与对照组差异显著 ($P \leq 0.05$)。贮藏0~24 h内, 对照组双孢菇切片的酚类物质含量迅速减少, 这与酚类物质作为产生色素的底物、参与酶促褐变生成棕色聚合物有关^[55]。芳香纯露处理组的酚类物质含量较对照组高, 说明芳香纯露可以通过抑制双孢菇体内酚类物质氧化减少酚类物质含量的下降^[5], 因此褐变度变化没有对照组明显。在24~96 h贮藏时间内, 对照组总酚含量继续下降, 芳香纯露处理组中除大马士革玫瑰纯露总酚含量保持下降趋势外, 其他芳香纯露处理鲜切双孢菇内总酚含量有所上升, 产生这种现象的原因可能大部分芳香纯露可抑制活性氧的产生和抑制PPO活力, 因此酚类物质得到积累^[56]。

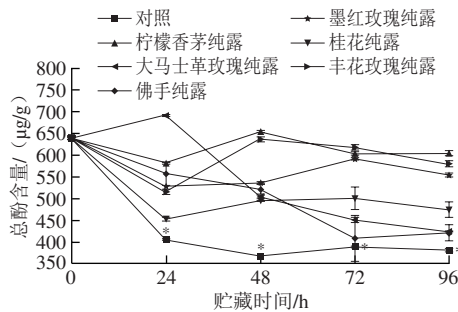


图6 不同芳香纯露对鲜切双孢菇总酚含量的影响

Fig. 6 Effect of aromatic hydrosol on total phenol content in fresh-cut mushrooms

2.4.4 鲜切双孢菇的硬度

硬度是鲜切双孢菇重要的感官品质, 影响其质地和品质^[57]。如图7所示, 随着贮藏时间延长, 双孢菇的硬度下降^[58], 但芳香纯露处理组的双孢菇下降较对照组慢, 而在贮藏48 h后, 对照组硬度迅速下降直至贮藏结束, 72 h后对照组硬度适中显著低于芳香纯露处理组 ($P \leq 0.05$), 表明芳香纯露能更好地维持双孢菇质地特性, 延迟软化。

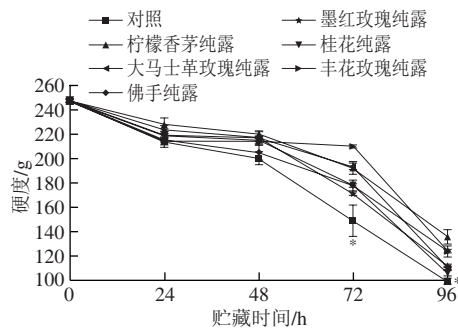


图7 不同芳香纯露对鲜切双孢菇硬度的影响

Fig. 7 Effect of aromatic hydrosol on hardness of fresh-cut mushrooms

2.4.5 鲜切双孢菇的质量损失率

如图8所示, 随着贮藏时间的延长, 双孢菇切片的质量损失也相应增加。在双孢菇贮藏过程中, 水分蒸发、

生理代谢作用均会造成双孢菇的质量损失, 同时, 双孢菇表皮的薄膜结构并不能防止切片的失水^[59]。所有双孢菇样品的质量均减少, 芳香纯露处理组和对照组鲜切双孢菇的质量损失上升趋势相似, 芳香纯露处理组双孢菇在贮藏期间较好地保持了质量, 质量损失率维持在较低水平, 在贮藏结束时分别为: 墨红玫瑰纯露 (18.8 ± 0.2)%、丰花玫瑰纯露 (25.4 ± 0.1)%、柠檬香茅纯露 (25.9 ± 0.4)%、佛手纯露 (28.0 ± 0.1)%、桂花纯露 (32.6 ± 0.4)%、大马士革玫瑰纯露 (35.2 ± 0.1)%。在所有芳香纯露中, 墨红玫瑰纯露处理双孢菇质量损失最低, 保鲜效果最好, 这可能与墨红玫瑰纯露中气体水合物形成有关, 并且水分子被氢键限制, 从而减少了失水量^[60]。

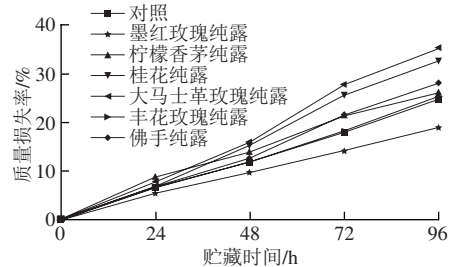
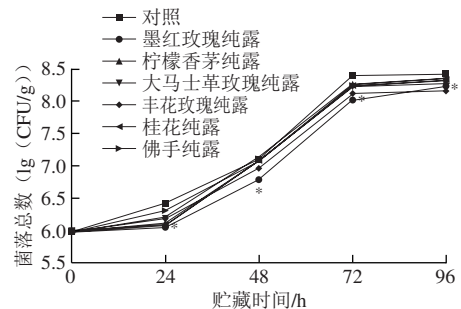


图8 芳香纯露作用下鲜切双孢菇的质量损失率变化

Fig. 8 Effect of aromatic hydrosol on mass loss of fresh-cut mushrooms

2.4.6 鲜切双孢菇的菌落总数

微生物腐败菌群的存在会导致鲜切果蔬贮藏过程中品质的巨大损失^[61], 实际上, 鲜切果蔬被微生物污染不可避免^[62]。如图9所示, 实验测得双孢菇中初始总菌落数为5.97 (lg (CFU/g)), 在贮藏96 h期间, 对照组中微生物菌落总数迅速增长, 因此, 鲜切双孢菇很容易受到微生物污染并发生腐烂。但在纯露处理组的菌落总数与对照组相比有所减少, 墨红玫瑰纯露处理组的菌落数增长速率最小。研究报道, 墨红玫瑰纯露与玫瑰精油组成相似, 其抗菌活性主要来源于香茅醇、香叶醇和橙花醇^[62]。因此, 墨红玫瑰纯露对双孢菇常见腐败菌具有生长抑制作用。



*. 墨红玫瑰纯露处理组与对照组差异显著 ($P \leq 0.05$)。

图9 不同芳香纯露对鲜切双孢菇菌落总数的影响

Fig. 9 Effect of aromatic hydrosol on total microbial load on fresh-cut mushrooms

3 结论

通过体外实验测试所提取芳香纯露对PPO的抑制活性,结果显示墨红玫瑰纯露等8种纯露具有较高的PPO抑制活性,其中柠檬香茅纯露、墨红玫瑰纯露抑制效果最好,IC₅₀分别为23.900%、64.805%。在生物抗氧化能力检测中,芳香纯露对DPPH、ABTS阳离子、PTIO自由基均有较强的清除能力。GC-MS分析8种芳香纯露主要挥发性成分,主要为含氧萜类化合物和含氧芳香族化合物,其中墨红玫瑰纯露的主要挥发化合物为香茅醇(27.69%)。纯露溶液的主要化学成分往往发挥主要保鲜作用,以鲜切双孢菇为模型,芳香纯露处理可以有效延缓双孢菇采后褐变并保持其品质,与对照组相比,纯露能显著降低双孢菇内PPO活力、保持总酚含量、维持硬度、降低质量损失、减少微生物污染,在所测纯露中,墨红玫瑰纯露的保鲜效果最为优异。因此,芳香纯露作为一种天然提取产物,效优价廉、安全性高,具有保护鲜切果蔬品质和安全的潜力。

参考文献:

- JAKUBCZYK K, TUCHOWSKA A, JANDA-MILCZAREK K. Plant hydrolates: antioxidant properties, chemical composition and potential applications[J]. Biomed Pharmacother, 2021, 142: 112033. DOI:10.1016/j.biopha.2021.112033.
- CID-PÉREZ T S, AVILA-SOSA R, OCHOA-VELASCO C E, et al. Antioxidant and antimicrobial activity of mexican oregano (*Poliomintha longiflora*) essential oil, hydrosol and extracts from waste solid residues[J]. Plants, 2019, 8(1): 22. DOI:10.3390/plants8010022.
- MATULYTE I, JEKABSONE A, JANKAUSKAITE L, et al. The essential oil and hydrolats from *Myristica fragrans* seeds with magnesium aluminometasilicate as excipient: antioxidant, antibacterial, and anti-inflammatory activity[J]. Foods, 2020, 9(1): 37. DOI:10.3390/foods9010037.
- MOON K M, LEE B G, CHO W K, et al. Swertiajaponin as an anti-browning and antioxidant flavonoid[J]. Food Chemistry, 2018, 252: 207-214. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.01.053.
- MOON K M, KIM C C, YEUL M J, et al. Xanthone-related compounds as an anti-browning and antioxidant food additive[J]. Food Chemistry, 2019, 274: 345-350. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.08.144.
- DE GONZALEZ L P G, BARRETT D M, WROLSTAD R E, et al. Enzymatic browning inhibited in fresh and dried apple rings by pineapple juice[J]. Journal of Food Science, 1993, 58(2): 399-404. DOI:10.1111/j.1365-2621.1993.tb04284.x.
- LEE M K, KIM Y M, KIM N Y, et al. Prevention of browning in potato with a heat-treated onion extract[J]. Bioscience Biotechnology Biochemistry, 2002, 66(4): 856-858. DOI:10.1271/bbb.66.856.
- WEERAWARDANA M B S, THIRIPURANATHAR G, PARANAGAMA P A. Natural antibrowning agents against polyphenol oxidase activity in *Annona muricata* and *Musa acuminata*[J]. Journal of Chemistry, 2020, 2020: 1-6. DOI:10.1155/2020/1904798.
- ZHANG Guangjie, GU Lingbiao, LU Zhifang, et al. Browning control of fresh-cut Chinese yam by edible coatings enriched with an inclusion complex containing star anise essential oil[J]. RSC Advances, 2019, 9(9): 5002-5008. DOI:10.1039/c8ra08295b.
- POLITI M, MENGHINI L, CONTI B, et al. Reconsidering hydrosols as main products of aromatic plants manufactory: the lavandin (*Lavandula intermedia*) case study in Tuscany[J]. Molecules, 2020, 25(9): 2225. DOI:10.3390/molecules25092225.
- ALI S, MUHAMMAD A A, NAWAZ A, et al. Effect of pre-storage ascorbic acid and *Aloe vera* gel coating application on enzymatic browning and quality of lotus root slices[J]. Journal of Food Biochemistry, 2020, 44(3): e13136. DOI:10.1111/jfbc.13136.
- MAYER A M, HAREL E. Polyphenol oxidases in plants[J]. Phytochemistry, 1979, 18(2): 193-215. DOI:10.1016/0031-9422(79)80057-6.
- HO Y S, WU J Y, CHANG C Y. A new natural antioxidant biomaterial from *Cinnamomum osmophloeum* Kanehira leaves represses melanogenesis and protects against DNA damage[J]. Antioxidants, 2019, 8(10): 474. DOI:10.3390/antiox8100474.
- BAE S M, LEE S C. Effect of subcritical water extraction conditions on the activity of alcohol metabolizing enzymes, ACE inhibition, and tyrosinase inhibition in *Protaetia brevitarsis* larvae[J]. Food Science and Biotechnology, 2020, 29(6): 867-872. DOI:10.1007/s10068-019-00728-z.
- ZELJKOVIĆ S Ć, TOPČAGIĆ A, POŽGAN F, et al. Antioxidant activity of natural and modified phenolic extracts from *Satureja montana* L.[J]. Industrial Crops and Products, 2015, 76: 1094-1099. DOI:10.1016/j.indcrop.2015.08.009.
- LI Xican. 2-Phenyl-4,4,5,5-tetramethylimidazoline-1-oxyl 3-oxide (PTIO-) radical scavenging: a new and simple antioxidant assay *in vitro*[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(30): 6288-6297. DOI:10.1021/acs.jafc.7b02247.
- FERRAZ M C, PROCOPIO F R, DE FIGUEIREDO FURTADO G, et al. Cinnamon and paprika oleoresin emulsions: a study of physicochemical stability and antioxidant synergism[J]. Food Research International, 2021, 150(Pt A): 110777. DOI:10.1016/j.foodres.2021.110777.
- CHEN Xiaoi, CHEN Haiqiang, XIAO Jie, et al. Variations of volatile flavour compounds in finger citron (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis*) pickling process revealed by E-nose, HS-SPME-GC-MS and HS-GC-IMS[J]. Food Research International, 2020, 138(Pt A): 109717. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109717.
- TOMI K, KITAO M, KONISHI N, et al. Enantioselective GC-MS analysis of volatile components from rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) essential oils and hydrosols[J]. Bioscience Biotechnology Biochemistry, 2016, 80(5): 840-847. DOI:10.1080/09168451.2016.1146066.
- TAVARES C S, MARTINS A, FALEIRO M L, et al. Bioproducts from forest biomass: essential oils and hydrolates from wastes of *Cupressus lusitanica* Mill. and *Cistus ladanifer* L.[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 144: 112034. DOI:10.1016/j.indcrop.2019.112034.
- ZHENG Huanhuan, LIU Wei, LIU Shuai, et al. Effects of melatonin treatment on the enzymatic browning and nutritional quality of fresh-cut pear fruit[J]. Food Chemistry, 2019, 299: 125116. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.125116.
- DU Yunjian, DOU Siqi, WU Shengjun. Efficacy of phytic acid as an inhibitor of enzymatic and non-enzymatic browning in apple

- juice[J]. Food Chemistry, 2012, 135(2): 580-582. DOI:10.1016/j.foodchem.2012.04.131.
- [23] ZHAO Wenting, WANG Yue, MA Yue, et al. Effect of vacuum impregnation on enzymatic browning of fresh-cut potatoes during refrigerated storage[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2022, 57(2): 983-994. DOI:10.1111/ijfs.15453.
- [24] JIANG Yongli, YU Li, HU Yunwen, et al. Electrostatic spraying of chitosan coating with different deacetylation degree for strawberry preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 139: 1232-1238. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2019.08.113.
- [25] LEE M K, HWANG Y H, RYU H, et al. *Galla rhois* water extract inhibits enzymatic browning in apple juice partly by binding to and inactivating polyphenol oxidase[J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132277. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.132277.
- [26] BATTAINI G, MONZANI E, CASELLA L, et al. Inhibition of the catecholase activity of biomimetic dinuclear copper complexes by kojic acid[J]. Journal of Biological Inorganic Chemistry, 2000, 5(2): 262-268. DOI:10.1007/s007750050370.
- [27] MOON K M, KWON E B, LEE B, et al. Recent trends in controlling the enzymatic browning of fruit and vegetable products[J]. Molecules, 2020, 25(12): 2754. DOI:10.3390/molecules25122754.
- [28] SHEN X J, CHEN W B, ZHENG Y J, et al. Chemical composition, antibacterial and antioxidant activities of hydrosols from different parts of *Areca catechu* L. and *Cocos nucifera* L.[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 96: 110-119. DOI:10.1016/j.indcrop.2016.11.053.
- [29] GARZOLI S, LAGHEZZA MASCI V, FRANCESCHI S, et al. Headspace/GC-MS analysis and investigation of antibacterial, antioxidant and cytotoxic activity of essential oils and hydrolates from *Rosmarinus officinalis* L. and *Lavandula angustifolia* Miller[J]. Foods, 2021, 10(8): 1768. DOI:10.3390/foods10081768.
- [30] DONG J W, CAI L, XING Y, et al. Re-evaluation of ABTS center dot plus assay for total antioxidant capacity of natural products[J]. Natural Product Communications, 2016, 10(12): 2169-2172. DOI:10.1177/1934578x1501001239.
- [31] HUANG X W, FENG Y C, HUANG Y, et al. Chemical composition, antioxidant and the possible use as skin-care ingredient of clove oil (*Syzygium aromaticum* (L.) Merr. & Perry) and citronella oil (*Cymbopogon goeringii*) from China[J]. Journal of Essential Oil Research, 2013, 25(4): 315-323. DOI:10.1080/10412905.2013.775082.
- [32] CHEN Y J, WANG J J, OU Y W, et al. Cellular antioxidant activities of polyphenols isolated from *Eucalyptus* leaves (*Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* GL9)[J]. Journal of Functional Foods, 2014, 7: 737-745. DOI:10.1016/j.jff.2013.12.003.
- [33] WANG H F, YIH K H, HUANG K F. Comparative study of the antioxidant activity of forty-five commonly used essential oils and their potential active components[J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2020, 18(1): e2225. DOI:10.38212/2224-6614.2225.
- [34] GEORGIEVA A, DOBREVA A, TZVETANOVA E, et al. Comparative study of phytochemical profiles and antioxidant properties of hydrosols from Bulgarian *Rosa alba* L. and *Rosa Damascena* Mill.[J]. Journal of Essential Oil Bearing Plants, 2019, 22(5): 1362-1371. DOI:10.1080/0972060x.2019.1699867.
- [35] AAZZA S, LYOUSSE B, MIGUEL M G. Antioxidant activity of some Moroccan hydrosols[J]. Journal of Medicinal Plants Research, 2011, 5(30): 6688-6696. DOI:10.5897/Jmpr11.1176.
- [36] DJABOU N, MOHAMED D E, TABTI B, et al. Chemical composition and antioxidant activity of hydrosol extracts obtained by liquid-liquid extraction (LLE) of *Daucus muricatus* L.[J]. Journal of Essential Oil Research, 2014, 26(6): 393-399. DOI:10.1080/10412905.2014.964427.
- [37] GARDNER J W G, BARTLETT P N. Electronic noses. principles and applications[J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11(7): 1087-1098. DOI:10.1088/0957-0233/11/7/702.
- [38] WANG Q, LI L, DING W, et al. Adulterant identification in mutton by electronic nose and gas chromatography-mass spectrometer[J]. Food Control, 2019, 98: 431-438. DOI:10.1016/j.foodcont.2018.11.038.
- [39] GORJI-CHAKESPARI A, NIKBAKHT A M, SEFIDKON F, et al. Classification of essential oil composition in *Rosa damascena* Mill. genotypes using an electronic nose[J]. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2017, 4: 27-34. DOI:10.1016/j.jarmap.2016.07.004.
- [40] CHENG D, WANG G L, TANG J L, et al. Inhibitory effect of chlorogenic acid on polyphenol oxidase and browning of fresh-cut potatoes[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 168: 111282. DOI:10.1016/j.postharvbio.2020.111282.
- [41] ZHOU X R, XIAO Y J, MENG X H, et al. Full inhibition of Whangkeumbae pear polyphenol oxidase enzymatic browning reaction by *L*-cysteine[J]. Food Chemistry, 2018, 266: 1-8. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.05.086.
- [42] PHONPALA Y, BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, et al. Sulfur-containing compounds heated under alkaline condition: antibrowning, antioxidative activities, and their effect on quality of shrimp during iced storage[J]. Journal of Food Science, 2009, 74(6): S240-S247. DOI:10.1111/j.1750-3841.2009.01189.x.
- [43] QIN Lei, ZHOU Zheng, ZHAO Ziyuan, et al. Rapid identification of different cinnamon using coated direct inlet probe coupled with atmospheric-pressure chemical ionization mass spectrometry[J]. Food Analytical Methods, 2021, 14(7): 1402-1414. DOI:10.1007/s12161-021-01981-x.
- [44] DEMIRBOLAT İ, EKINCI C, NUHOGLU F, et al. Effects of orally consumed *Rosa damascena* Mill. hydrosol on hematology, clinical chemistry, lens enzymatic activity, and lens pathology in streptozotocin-induced diabetic rats[J]. Molecules, 2019, 24(22): 4069. DOI:10.3390/molecules24224069.
- [45] LUO Cheng, LI Dongliang, WANG Yang, et al. Chemical composition and insecticide efficacy of essential oils from *Citrus medica* L. var. *sarcodactylis* Swingle against *Tribolium castaneum* Herbst in stored medicinal materials[J]. Journal of Essential Oil Bearing Plants, 2019, 22(5): 1182-1194. DOI:10.1080/0972060x.2019.1685914.
- [46] ALSHAIKH N, PERVEEN K. Anti-candidal activity and chemical composition of essential oil of clove (*Syzygium aromaticum*)[J]. Journal of Essential Oil Bearing Plants, 2017, 20(4): 951-958. DOI:10.1080/0972060x.2017.1375867.
- [47] SRINIVASAN K. Antioxidant potential of spices and their active constituents[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2014, 54(3): 352-372. DOI:10.1080/10408398.2011.585525.
- [48] DO D N, NGUYEN D P, PHUNG V D, et al. Fractionating of lemongrass (*Cymbopogon citratus*) essential oil by vacuum fractional distillation[J]. Processes, 2021, 9(4): 593. DOI:10.3390/pr9040593.
- [49] GAO H Y, ZENG Q, REN Z N, et al. Effect of exogenous gamma-aminobutyric acid treatment on the enzymatic browning of fresh-cut potato during storage[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(12): 5035-5044. DOI:10.1007/s13197-018-3442-1.

- [50] SZCZEPANSKA J, BARBA F J, SKAPSKA S, et al. High pressure processing of carrot juice: effect of static and multi-pulsed pressure on the polyphenolic profile, oxidoreductases activity and colour[J]. Food Chemistry, 2020, 307: 125549. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.125549.
- [51] ZHOU X, IQBAL A, LI J X, et al. Changes in browning degree and reducibility of polyphenols during autoxidation and enzymatic oxidation[J]. Antioxidants, 2021, 10(11): 1809. DOI:10.3390/antiox10111809.
- [52] HAN Q Y, LIU F, LI M, et al. Comparison of biochemical properties of membrane-bound and soluble polyphenol oxidase from Granny Smith apple (*Malus × domestica* Borkh.)[J]. Food Chemistry, 2019, 289: 657-663. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.02.064.
- [53] LIU F, ZHAO J H, WEN X, et al. Purification and structural analysis of membrane-bound polyphenol oxidase from Fuji apple[J]. Food Chemistry, 2015, 183: 72-77. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.03.027.
- [54] GAO H, CHAI H K, CHENG N, et al. Effects of 24-epibrassinolide on enzymatic browning and antioxidant activity of fresh-cut lotus root slices[J]. Food Chemistry, 2017, 217: 45-51. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.08.063.
- [55] LIU X, LU YU Z, YANG Q, et al. Cod peptides inhibit browning in fresh-cut potato slices: a potential anti-browning agent of random peptides for regulating food properties[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 146: 36-42. DOI:10.1016/j.postharvbio.2018.08.001.
- [56] YAN M, YUAN B, XIE Y, et al. Improvement of postharvest quality, enzymes activity and polyphenoloxidase structure of postharvest *Agaricus bisporus* in response to high voltage electric field[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 166: 111230. DOI:10.1016/j.postharvbio.2020.111230.
- [57] SHEKARI A, HASSANI R N, AGHDAM M S. Exogenous application of GABA retards cap browning in *Agaricus bisporus* and its possible mechanism[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 174: 111434. DOI:10.1016/j.postharvbio.2020.111434.
- [58] GAO M S, FENG L F, JIANG T J. Browning inhibition and quality preservation of button mushroom (*Agaricus bisporus*) by essential oils fumigation treatment[J]. Food Chemistry, 2013, 149: 107-113. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.10.073.
- [59] LAGNIKA C, ZHANG M, MOTHIBE K J. Effects of ultrasound and high pressure argon on physico-chemical properties of white mushrooms (*Agaricus bisporus*) during postharvest storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 82: 87-94. DOI:10.1016/j.postharvbio.2013.03.006.
- [60] SHI D F, YIN C M, FAN X Z, et al. Effects of ultrasound and gamma irradiation on quality maintenance of fresh *Lentinula edodes* during cold storage[J]. Food Chemistry, 2022, 373(Pt B): 131478. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.131478.
- [61] SANTANA C C, VANETTI M C D, KASUYA M C M. Microbial growth and colour of minimally processed shiitake mushroom stored at different temperatures[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2008, 43(7): 1281-1285. DOI:10.1111/j.1365-2621.2007.01606.x.
- [62] ULUSOY S, BOSGELMEZ-TINAZ G, SECILMIS-CANBAY H. Tocopherol, carotene, phenolic contents and antibacterial properties of rose essential oil, hydrosol and absolute[J]. Current Microbiology, 2009, 59(5): 554-558. DOI:10.1007/s00284-009-9475-y.