

双孢蘑菇复合生物保鲜剂的制备及其在贮藏保鲜的应用

商立超^{1,2}, 王文亮¹, 弓志青¹, 崔文甲¹, 贾凤娟¹, 赵凤春², 王延圣^{1*}

(1. 山东省农业科学院农产品加工与营养研究所, 农业农村部新食品资源加工重点实验室, 山东省农产品精深加工技术重点实验室, 山东济南 250100) (2. 山东农业大学生命科学学院, 山东泰安 271000)

摘要: 为开发安全新型的双孢蘑菇复合生物保鲜剂, 对3大类、12种常见生物保鲜剂进行择优筛选试验, 筛选出对双孢蘑菇白度、开伞度、质地、发粘度、气味有较好保护作用的保鲜剂, 并探讨抗坏血酸(Vc)、乳酸链球菌素(Nisin)和卡拉胶复合生物保鲜剂对双孢蘑菇采后贮藏保鲜效果。经筛选发现, Vc、Nisin和卡拉胶对延缓双孢蘑菇褐变发生有较好效果, 然后将三者进行复合优化, 表明Vc 0.80 g/L、Nisin 0.40 g/L和卡拉胶 5.40 g/L制备的复合生物保鲜剂效果最优, 在贮藏末期白度值高于阴性对照(CK) 21.32%。与对照组相比, 复合生物保鲜剂处理显著降低双孢蘑菇贮藏期间的失重率和腐烂率, 抑制硬度下降, 延缓多酚氧化酶(PPO)活性的增强, 加快总酚含量峰值出现并促进酚类物质积累, 促进ABTS阳离子自由基清除率峰值出现, 并且可有效延缓菇体抗氧化能力的降低。试验结果表明, Vc-Nisin-卡拉胶复合生物保鲜剂对双孢蘑菇贮藏品质具有良好的保护作用。该研究可为开发新型安全高效的双孢蘑菇复合生物保鲜剂提供参考和依据。

关键词: 双孢蘑菇; 抗坏血酸; 乳酸链球菌素; 卡拉胶; 生物保鲜剂; 采后保鲜

文章编号: 1673-9078(2022)07-184-196

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.7.1090

Preparation of Compound Biological Preservative for *Agaricus bisporus* and Its Application in Storage and Preservation

SHANG Lichao^{1,2}, WANG Wenliang¹, GONG Zhiqing¹, CUI Wenjia¹, JIA Fengjuan¹, ZHAO Fengchun², WANG Yansheng^{1*}

(1. Institute of Agricultural Products Processing and Nutrition, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of New Food Resources Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shandong Key Laboratory of Deep Processing Technology for Agricultural Products, Jinan 250100, China)
(2. College of Life Science, Shandong Agricultural University, Tai'an 271000, China)

Abstract: In order to develop new and safe compound biological preservative for *Agaricus bisporus*, 3 categories and 12 kinds of common biological preservative were selected through the optimal screening experiment, and the preservative with better protective effect on the whiteness, opening degree, texture, hair viscosity and smell of *Agaricus bisporus* was screened out. The effects of ascorbic acid (Vc), Nisin and carrageenan on the preservation of *Agaricus bisporus* after storage were investigated. After screening, it was found that Vc, Nisin and carrageenan had a good effect on delaying the Browning of *Agaricus bisporus*. Then the optimization results showed that the compound biological preservative prepared by Vc 0.80 g/L, Nisin 0.40 g/L and carrageenan 5.40 g/L had the

引文格式:

商立超,王文亮,弓志青,等.双孢蘑菇复合生物保鲜剂的制备及其在贮藏保鲜的应用[J].现代食品科技,2022,38(7):184-196

SHANG Lichao, WANG Wenliang, GONG Zhiqing, et al. Preparation of compound biological preservative for *Agaricus bisporus* and its application in storage and preservation [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(7): 184-196

收稿日期: 2021-09-29

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目(2021CXGC010809); 山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2022A36; CXGC2022B07); 山东省食用菌创新团队产后加工岗位专家项目(SDAIT-07-09)

作者简介: 商立超(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: shanglc826@163.com

通讯作者: 王延圣(1988-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 果蔬加工与贮藏, E-mail: sdnky_wys@163.com

best effect. The whiteness value at the end of storage was 21.32% higher than that of the negative control (CK). Compared with the control group, the compound biological preservative treatment significantly reduced the weight loss rate and decay rate of *Agaricus bisporus* during storage, inhibited the decline of hardness, delayed the enhancement of polyphenol oxidase (PPO) activity, accelerated the peak of total phenol content and promoted the accumulation of phenols, promoted the peak of ABTS cation free radical clearance, and effectively delayed the reduction of antioxidant capacity of *Agaricus bisporus*. The results showed that the Vc-Nisin-carrageenan compound biological preservative had a good protective effect on the storage quality of *Agaricus bisporus*. This study can provide reference and basis for developing new, safe and efficient compound biological preservative of *Agaricus bisporus*.

Key words: *Agaricus bisporus*; ascorbic acid; streptococcus lactis; carrageenan; biological preservative; postharvest preservation

双孢蘑菇 (*Agaricus bisporus*) 又名白色蘑菇、纽扣蘑菇、洋蘑菇, 伞菌目, 蘑菇科, 蘑菇属, 是世界上分布范围最广和最受青睐的食用菌之一^[1], 可鲜销、罐藏、盐渍。随着科技的不断发展, 国内双孢蘑菇工厂化生产逐渐成为主流, 菇房能够精确控制温度、湿度和光线等生长条件^[2], 从而实现一年四季不间断生产。截至目前, 我国双孢蘑菇的产量和产值均居世界第一位, 出口量相当大, 其中种植最多的省份是福建、山东、河南等, 年栽培总面积 $6.8 \times 10^8 \text{ m}^2$, 产量 $4.6 \times 10^5 \text{ t}$ (约占全国生产总量 75%)。双孢蘑菇味道鲜美, 口感极佳, 富含维生素和矿物质等营养物质, 具有抗癌、降血压、提高人体免疫力等多种保健功能^[3]以及高蛋白、低脂肪、低热量的特点^[4], 被赋予“植物肉”、“素中之王”的美称。双孢蘑菇表面没有任何保护结构, 在采摘过程中极易受到机械损伤, 且采后代谢旺盛, 均会导致菇体出现褐变、失水、开伞、菌柄过长等问题, 不宜贮藏, 造成巨大的经济损失。

普遍认为, 影响双孢蘑菇保鲜因素有温度、呼吸强度、相对湿度、气体环境和采摘时菇体成熟度等^[5], 因此可通过控制以上因素实现贮藏保鲜的目的。目前, 双孢蘑菇的保鲜手段有低温贮藏、辐射保鲜、气调保鲜、涂膜保鲜等^[6], 但低温和辐射保鲜耗能大, 单一气调保鲜效果差, 而化学保鲜虽在其他果蔬早已应用, 如柑橘等, 但安全系数低^[7,8]。相对而言, 生物涂膜保鲜健康、来源广泛, 并且近年来已有研究发现生物源 (包括植物源、动物源和微生物源) 保鲜剂对某些果蔬采后贮藏保鲜具有良好效果^[9,10], 但问题是单一保鲜剂效果不明显, 因此基于有效保鲜成分之间的协同作用, 将单一保鲜剂复合为可食用涂膜应用于贮藏保鲜, 有效保鲜成分之间通过协同作用能够显著提高保鲜效果, 俨然已成为如今贮藏保鲜技术的研究热点之一^[5]。

本文主要以茶多酚、L-精氨酸、L-谷氨酸、Vc、大蒜提取液、 ϵ -聚赖氨酸、Nisin、生姜提取液、果胶、黄原胶、卡拉胶和水溶性壳聚糖等 12 种常见

保鲜剂作为试验材料, 通过评比白度、开伞度、质地、发粘度和气味初步筛选出对双孢蘑菇保鲜效果较好的单一保鲜剂, 随后将择优筛选出的保鲜剂通过响应面进行复合并优化浓度, 研究 Vc-Nisin-卡拉胶复合生物保鲜剂对双孢蘑菇的保鲜效果, 为寻找安全高效的双孢蘑菇贮藏保鲜剂提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜双孢蘑菇、生姜、大蒜, 山东省济南市历城区苏家市场; 茶多酚 (纯度 99%)、 ϵ -聚赖氨酸 (纯度 95%)、Vc (食品级, 纯度 99%), 上海源叶生物科技有限公司; L-谷氨酸、L-精氨酸、邻苯二酚 (纯度均为 99%), 阿拉丁试剂 (上海) 有限公司; Nisin (效价 1100 IU/mg), 浙江新银象生物工程有限公司; 卡拉胶、黄原胶、果胶、水溶性壳聚糖 (均为食品级), 河南万邦实业有限公司; 2,2'-联氮-双-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸二铵盐) (ABTS) (纯度 98%), 上海麦克林生物试剂公司; 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) (纯度 98%), 北京酷来搏科技有限公司; 浓盐酸、甲醇、乙酸、乙酸钠 (均为分析纯), 国药集团化学试剂公司; LW-S500B 型无孔包装盒, 福建厦门鲜元包装有限公司。

1.2 仪器与设备

NewClassic ME 型电子天平, 梅特勒-托利多仪器 (上海) 有限公司; IN612C 型低温恒温培养箱, 重庆雅马拓科技有限公司; CR-400 型色差仪, 河北美能达建材科技有限公司; UV-6100 型紫外分光光度计, 上海元析仪器有限公司; HH-S6 型数显恒温水浴锅, 江苏金怡仪器科技有限公司; SB25-12DTD 型超声波清洗机, 宁波新芝生物科技股份有限公司; FSH-2 型可调高速匀浆机, 常州市伟嘉仪器制造有限公司; DTY-ZBJ-40 型制冰机, 北京德天佑

科技公司; TGL-16A 型离心机, 湖南平凡科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 保鲜剂配制与样品处理

1.3.1.1 保鲜剂配制

通过查阅和研读有关贮藏保鲜方面的资料, 确定了待筛选的保鲜剂类别和浓度, 分别为茶多酚 (5.00 g/L)、L-谷氨酸 (10.00 mmol/L)、L-精氨酸 (10.00 mmol/L)、Vc (0.50 g/L)、大蒜提取液 (料液比 1:5 g/mL)、 ϵ -聚赖氨酸 (0.30 g/L)、Nisin (0.40 g/L)、生姜提取液 (料液比 1:3 g/mL)、果胶 (5.00 g/L)、黄原胶 (2.00 g/L)、卡拉胶 (3.00 g/L)、水溶性壳聚糖 (10.00 g/L)。

茶多酚、L-谷氨酸、L-精氨酸、Vc、 ϵ -聚赖氨酸、Nisin 和水溶性壳聚糖保鲜剂的制备: 根据浓度, 将适量固体试剂与适量无菌蒸馏水混匀溶解即可, 低温保存备用。黄原胶保鲜剂的制备: 1.00 g 黄原胶粉与 500 mL 70 °C 无菌蒸馏水混合, 浸泡 10 h 后搅拌均匀即可。果胶保鲜剂的制备: 2.50 g 果胶粉与 500 mL 90~95 °C 无菌蒸馏水混合, 高速剪切至无结块, 然后在 95 °C 下保温 15 min 至溶胶充分即可。卡拉胶保鲜剂的制备: 1.50 g 卡拉胶粉与 500 mL 室温无菌蒸馏水混匀, 浸泡 5 h 后水浴加热, 从室温逐渐加热至 75 °C, 期间不停搅拌至均匀即可。大蒜提取液、生姜提取液的制备: 分别取无病虫害、无机械损伤的大蒜、生姜各 100 g, 按料液比加入

无菌蒸馏水 (大蒜 500 mL、生姜 300 mL), 研磨成匀浆, 然后将大蒜匀浆和生姜匀浆分别在 35 °C 和 45 °C 水浴条件下各不断搅拌 30 min, 最后 12000 r/min 离心 10 min 取上清即可, 低温保存备用。

1.3.1.2 样品处理

试验前, 挑选大小一致、无机械损伤和病虫害的新鲜双孢蘑菇, 并于 4 °C 冷库中预冷 6 h, 预冷结束后使用无菌刀片切除多余菌柄使其能平稳放置, 并将其分组编号; 试验时, 用单一保鲜剂浸泡 30 s, 待水分完全蒸发后装入 PET 无孔保鲜盒中, 一并置于 4 °C 低温恒温培养箱中贮藏。以无菌蒸馏水浸泡 30 s 为阴性对照 (CK)。

1.3.2 择优筛选试验

通过预试验可知, 不同处理组之间的差异在贮藏第 8 d 最显著, 选择贮藏第 8 d 的双孢蘑菇为试验样品, 通过白度值和感官评价高低对保鲜效果进行评价, 择优筛选得到的保鲜剂进行下一步响应面复合优化试验。

白度值测定: 使用便携式色差计测定双孢蘑菇伞盖固定 3 个位点 (正三角形顶点) 并记录, 随附的标准白板用于校准色差。每个处理 3 个重复, 每个重复 50 个子实体。

感官评价: 参考于官楚^[11]的感官评价方法并稍作修改, 制定了感官指标评价标准表, 如表 1 所示。由按国家标准招募和培训后的十名优选评价员 (男女各 5 名)^[12]按照国家标准^[13]对试验样品进行感官评定并打分。每个处理 3 个重复, 每个重复 50 个子实体。

表 1 双孢蘑菇感官指标评价标准

Table 1 Evaluation criteria for sensory indexes of *Agaricus bisporus*

| 得分 | 菌盖色泽 | 开伞度 | 质地 | 发黏度 | 气味 |
|------------|------|-----|--------|-----|-------|
| 8.00~10.00 | 洁白 | 无 | 有弹性、脆嫩 | 不发黏 | 淡淡菇香 |
| 6.00~8.00 | 轻微褐变 | 轻微 | 稍失弹性 | 轻微 | 无蘑菇香气 |
| 4.00~6.00 | 明显褐变 | 明显 | 明显发软 | 明显 | 明显异味 |
| ≤4.00 | 严重褐变 | 严重 | 严重变软 | 严重 | 严重异味 |

1.3.3 响应面法优化试验

1.3.3.1 单因素考察试验

表 2 单因素试验因素水平设计表

Table 2 Factor level design table of single factor test

| 保鲜剂种类 | 浓度梯度/(g/L) | | | | |
|-------|------------|------|------|------|------|
| Vc | 0.20 | 0.50 | 0.80 | 1.10 | 1.40 |
| Nisin | 0.10 | 0.25 | 0.40 | 0.55 | 0.70 |
| 卡拉胶 | 1.00 | 2.00 | 3.00 | 4.00 | 5.00 |

通过预试验得知不同浓度处理组之间差异在贮藏第 8 d 最显著, 因此, 选择贮藏第 8 d 的双孢蘑菇作为评价对象分析 Vc、Nisin 和卡拉胶及其水平

对子实体白度值和感官评价的影响, 单因素试验因素水平设计见表 2。每组试验随机选取 50 个蘑菇进行测定, 重复三次。

1.3.3.2 响应面试验

以 Vc (A)、Nisin (B) 和卡拉胶 (C) 为响应因素, 以白度值为响应值 (Y), 设计三因素三水平响应面试验。响应面试验因素水平见表 3。

1.3.3.3 响应面预测及验证试验

以同一品种双孢蘑菇作为试验对象, 在与响应面试验相同的试验条件下, 依据响应面预测结果即最佳浓度设置试验进行验证, 观察贮藏 0~8 d 双孢

蘑菇白度值的变化情况。以白度值为纵坐标,以贮藏天数为横坐标作图。

白度值测定方法同 1.3.2, 设置 3 组平行, 每组处理 50 个双孢蘑菇。

表 3 响应面试验因素水平

Table 3 Factors and levels in response surface design

| 因素 | 水平/(g/L) | | |
|---------|----------|------|------|
| | -1 | 0 | 1 |
| A Vc | 0.50 | 0.80 | 1.10 |
| B Nisin | 0.25 | 0.40 | 0.55 |
| C 卡拉胶 | 3.00 | 5.00 | 7.00 |

1.3.4 贮藏品质测定试验

1.3.4.1 子实体外观指标的测定

失重率测定: 采用称重法。重复三次, 每次处理固定 25 个子实体。其计算方式如下:

$$\text{失重率}/\% = \frac{\text{贮藏前质量} - \text{贮藏后质量}}{\text{贮藏前质量}} \times 100\%$$

硬度测定: 利用 TA. XT. plus 型质构仪对双孢蘑菇菌盖表面进行测定, 选用直径 2.00 mm 的圆柱形平端探头 (P/2), 把双孢蘑菇去掉菇柄使其稳固在质构仪操作台上, 测试点为菌盖中心点, 选择压缩测试模式, 测前速度 1.00 mm/s、测中和测后速度 2.00 mm/s, 下压深度为 6.00 mm, 接触出发力为 5.00 g, 力-时间关系曲线图像自动生成, 以图像最高峰为硬度指标, 每次测定随机选取 50 朵蘑菇并取其平均值。

腐烂率测定: 定义双孢蘑菇腐烂面积高于 50% 即为腐烂。其计算方式如下:

$$\text{腐烂率}/\% = \frac{\text{双孢蘑菇腐烂数}}{\text{双孢蘑菇总数}} \times 100\%$$

每次测定随机选取 50 朵蘑菇, 重复三次。

1.3.4.2 子实体生理指标的测定

取样: 用直径 1.00 cm 打孔器在子实体伞盖赤道位置选择等距离三个点, 取皮下深度为 5.00 mm 果肉组织, 随后立即用大小均一的锡箔纸包装并液氮冷冻处理, 置于 -80 °C 冰箱保存备用。以无菌蒸馏水浸泡为阴性对照 (CK 组), 以不作任何处理为空白对照 (BC 组), 每次处理 50 个子实体。

总酚含量测定: 参照范存斐等^[14]的方法。

PPO 活性测定: 参照 YU Kaibo 等^[15]的方法。

DPPH 自由基清除率: 参照 QIAO Jingya 等^[16]的方法。

ABTS 阳离子自由基清除率: 参照贾仕杰等^[17]的方法。

1.4 数据统计与分析

各项指标结果均以平均数±标准误差表示, 使用 IBM SPSS 25.0 软件对数据进行方差分析, 运用 Duncan 多重比较法对差异显著性进行比较分析 ($p < 0.05$), 使用 Microsoft Excel 2019 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 单一保鲜剂择优筛选结果

抗氧化型、抑菌型和成膜型保鲜剂对双孢蘑菇白度值和感官评价的影响见图 1。茶多酚处理组白度值和感官评价分值显著下降 ($p < 0.05$), 分别为 73.77 和 17.47 分, 低于 CK 6.01% 和 16.89%, 表明茶多酚自身颜色会严重降低菇体商品价值; L-谷氨酸和 L-精氨酸都属于非必需氨基酸^[18,19], 在水果保鲜有所应用^[20], 本研究中 L-精氨酸在一定程度上可延缓双孢蘑菇褐变, 但效果并不突出, 白度仅为 80.18, 而 L-谷氨酸处理组白度值 78.36 和感官评分 22.18, 与对照组并无明显差别, 表明无保鲜效果; Vc 可清除机体内 H_2O_2 和 $\cdot O_2^-$, 保护细胞膜, 其作为一种天然保鲜剂, 在切花、果实、种子和块根上的保鲜作用已得到证实^[21,22], 而通过本研究发现, Vc 处理组的白度值在所有组别中下降幅度最小, 贮藏末期为 82.13, 较贮藏前仅降低 9.67%, 同时开伞和发黏程度明显降低, 质地和气味保持良好, 感官评价高达 29.51 分, 并达到显著水平 ($p < 0.05$), 表明 Vc 能够有效延缓双孢蘑菇褐变, 延缓衰老。综合考虑, 选择 Vc 作为抗氧化型保鲜材料进行下一步试验。

大蒜、生姜属于香辛料, 张强等^[23]将其应用到冷却肉保鲜上并证明保鲜效果良好, 但本研究发现, 大蒜、生姜提取液白度值分别为 73.46、75.51, 感官评价 14.25、17.19 分, 对双孢蘑菇不仅无保鲜效果, 反而降低了品质, 这两组处理的白度值分别低于 CK 组 6.76% 和 4.16% 并显著 ($p < 0.05$); ϵ -聚赖氨酸是由 25~30 个赖氨酸残基构成, 在人体内降解为必需氨基酸^[24], 对冷鲜猪肉有较好保鲜效果^[25], 但对双孢蘑菇保鲜效果一般, 白度值 81.45, 仅高出 CK 组 3.37%; Nisin 是由 34 个氨基酸组成的多肽类化合物, 稳定性好、食用安全, 被广泛应用于果蔬、乳制品、肉制品等食品贮藏保鲜中^[26], Nisin 处理组白度值和感官评价最高, 分别为 83.42 和 26.14 分, 高于 CK 组 5.89% 和 40.00%, 说明 Nisin 能够通过有效抑制微生物活动, 减少其对菇体表面的侵害, 保持子实体细胞完整性, 从而延缓双孢蘑菇腐烂变质及褐变的产生, 维持双孢蘑菇白度值和

感官品质, 保证其商品价值。综合考虑, 选择 Nisin 作为抑菌型保鲜材料进行下一步试验。

多糖类涂膜保鲜是利用其粘附性使得果蔬样品表面带有一层薄膜, 从而抑制呼吸作用、保持酚类、类黄酮、抗坏血酸等物质较高含量水平, 以及提高抗氧化酶活力^[27], 最终延缓果蔬新鲜度下降, 延长货架期。已有研究表明, 多糖涂膜能够有效保持果实色泽和硬度, 延缓营养流失, 降低腐烂率, 比如樱桃^[28]、番茄^[29]等。由图 1 可知, 较 CK 组 (白度值 78.79; 感官评价 20.42 分) 而言, 果胶处理组感官评价 22.57 分, 虽略有提高, 但白度值 (77.12) 却不增反降, 表明果胶可能促进褐变的发生; 黄原胶和水溶性壳聚糖处理组在感官评价 (24.12 分和 26.45 分) 和白度值两方面都有所提高, 但在延缓褐变方面, 两组处理白度值分别为 79.71 和 78.68, 较 CK 组均不显著, 无明显差别; 而卡拉胶处理组在贮藏第 8 d 的白度值依然高达 82.96 并显著 ($p<0.05$), 感官评价 28.87 分, 分别是 CK 组的 1.05 倍和 1.41 倍。因此, 综合考虑, 选择卡拉胶作为成膜型保鲜材料进行下一步试验。

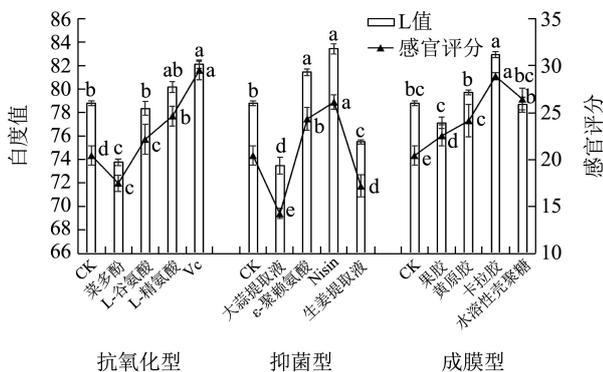


图 1 三种类型保鲜剂对双孢蘑菇白度值和感官评价的影响

Fig.1 Effects of three preservative types of on whiteness and sensory score of *Agaricus bisporus*

注: 同一类型保鲜剂不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($p<0.05$)。

2.2 单因素试验结果

2.2.1 Vc 浓度选择

不同浓度 Vc 对双孢蘑菇白度值和感官评价的影响见图 2。随着 Vc 浓度逐渐增大, 白度值和感官评价均先缓慢升高后逐渐减小。由图 2a 可知, 白度值分别为 79.35、82.96、83.89、82.57 和 74.81。相对于 CK 组 77.37, 0.20~1.10 g/L Vc 均可提高白度值, 分别提高 2.56%、7.23%、8.43%、6.72%, 0.50、0.80、1.10 g/L 达到显著水平 ($p<0.05$); 由图 2b 可知, 感官评价 23.70、29.20、33.90、33.30

和 24.00 分。Vc 在 0.20~1.10 g/L 浓度范围内可抑制开伞、发黏以及异味的产生。产生此结果的原因为 Vc 是能将醌类物质还原成酚类物质的还原剂, 还是 PPO 分子结构中铜离子的螯合剂, 能够降低或抑制 PPO 活性, 两方面协同保持新鲜度^[30]。但是过多 Vc 则会因被氧化分解而积累较多的脱氢抗坏血酸 (DHAA), DHAA 又会与氨基酸反应促进褐变的发生^[31], 本试验结果也证明了这一点, 1.40 g/L Vc 处理组白度值低于 CK 组 4.94%。因此考虑选择 0.50、0.80、1.10 g/L 作为响应面因素考察水平。

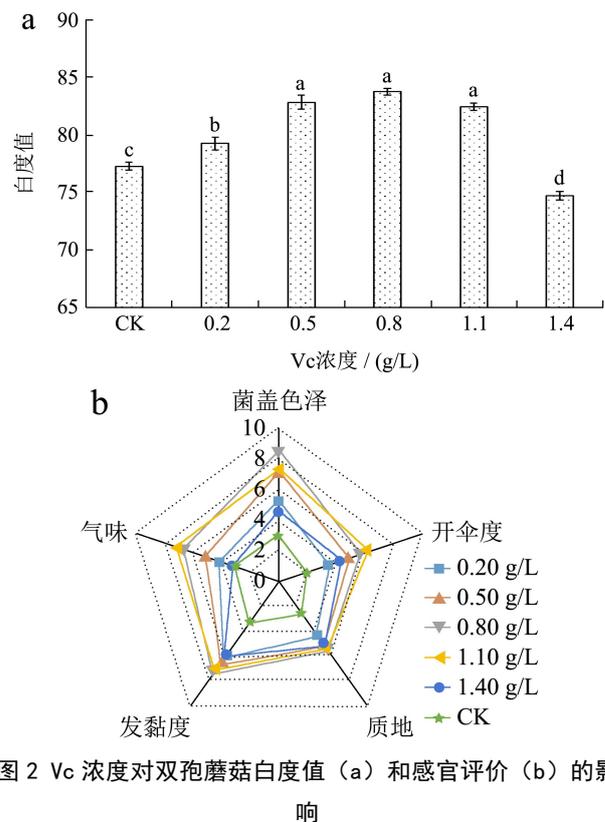


图 2 Vc 浓度对双孢蘑菇白度值 (a) 和感官评价 (b) 的影响

Fig.2 Effects of Vc concentration on whiteness value (a) and sensory score (b) of *Agaricus bisporus*

注: 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($p<0.05$)。图 3、4、8~11 同。

2.2.2 Nisin 浓度选择

不同浓度 Nisin 对双孢蘑菇白度值和感官评价的影响见图 3。随着 Nisin 浓度不断增加, 白度值和感官评价菌呈现先增大后降低趋势。由图 3a 和图 3b 可知, 0.10、0.25、0.40、0.55 g/L 处理组白度值分别为 78.84、81.88、84.23 和 82.17, 高于 CK 组 1.90%、5.83%、8.87%、6.20%, 其中 0.25~0.55 g/L 均显著高于 CK 组, 并且感官评价分别为 20.30、25.90、33.70 和 29.00 分, 这表明 Nisin 可降低双孢蘑菇褐变、开伞和发黏程度、延缓变软进程、抑制异味产生, 这是因为 Nisin 能改变细菌细胞膜内外

渗透压、破坏细胞膜完整性、影响磷脂化合物合成，进而减少微生物的侵害，延长货架期。0.55 和 0.70 g/L 处理组虽在控制开伞、保持质地和抑制发黏方面较出色，但因 Nisin 本身为淡黄色，颜色会随浓度增大而加深，当双孢蘑菇白度值分别低于 80.00 和 69.00 时，从批发和消费者角度出发，是不被接受的^[32,33]。最终 Nisin 浓度选择 0.25、0.40、0.55 g/L 作为响应面因素考察水平。

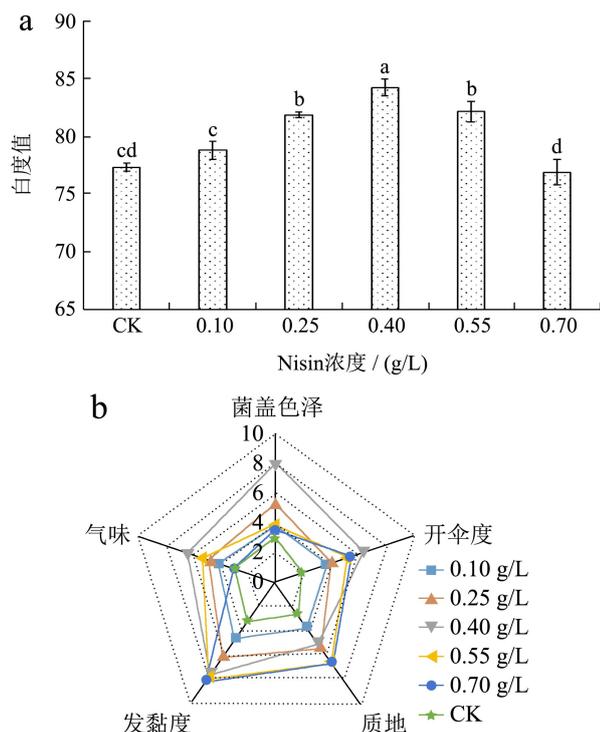


图 3 Nisin 浓度对双孢蘑菇白度值 (a) 和感官评价 (b) 的影响

Fig.3 Effects of Nisin concentration on the whiteness value (a) and sensory score (b) of *Agaricus bisporus*

2.2.3 卡拉胶浓度选择

不同浓度卡拉胶对双孢蘑菇白度值和感官评价的影响见图 4。由图 4a 可知，所有浓度卡拉胶均能抑制双孢蘑菇白度值下降，分别为 82.86、83.78、84.85、83.75 以及 83.96；由图 4b 可知，感官评价分别为 26.20、28.60、34.70、27.90 和 20.80 分，依然满足消费者需求^[33]。这是由于卡拉胶作为多糖类可食性涂膜成分之一，能够附着在双孢蘑菇表面进而阻滞水分、氧气和溶质的流动，降低生理代谢水平，提高感官属性和新鲜度^[34]。与 CK 组相比较，1.00~9.00 g/L 卡拉胶处理组均可保持较高的白度值并显著 ($p < 0.05$)，但随着浓度增加白度值并没有得到提高，反而会影响感官品质。感官评价中，5.00 g/L 处理组效果最好；而 7.00 和 9.00 g/L 处理组虽在一定程度上保持质地和控制开伞，但浓度过大会导致

异味产生以及黏度增加，这是导致它们感官评价低的主要原因，更不易被消费者接受。因此考虑，选取 3.00、5.00 和 7.00 g/L 作为响应面因素考察水平。

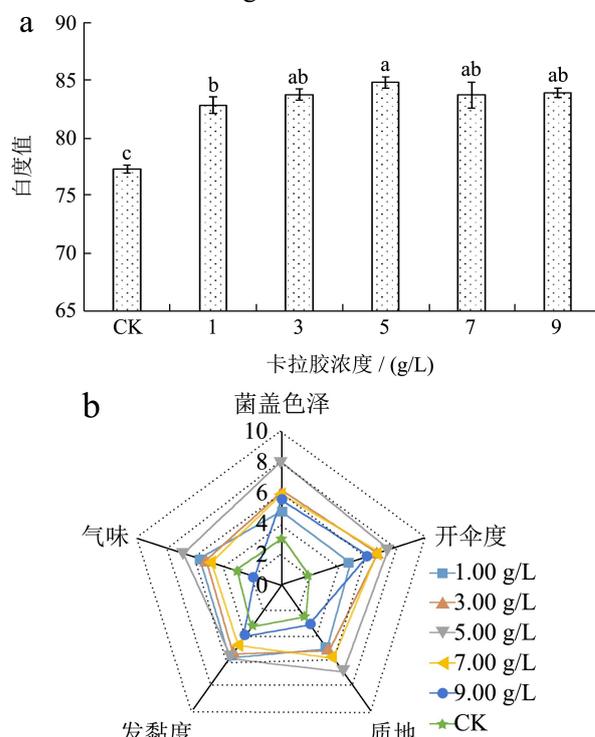


图 4 卡拉胶浓度对双孢蘑菇白度值 (a) 和感官评价 (b) 的影响

Fig.4 Effects of carrageenan concentration on the whiteness value (a) and sensory score (b) of *Agaricus bicarporus*

表 4 响应面试验设计及结果

Table 4 Design of response surface experiment and results

| 试验号 | A Vc/(g/L) | B Nisin/(g/L) | C 卡拉胶/(g/L) | Y 白度值 |
|-----|---------------|------------------|----------------|----------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 86.46 |
| 2 | -1 | 1 | 0 | 82.19 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 86.32 |
| 4 | 0 | -1 | -1 | 80.93 |
| 5 | -1 | 0 | -1 | 78.46 |
| 6 | 1 | 0 | 1 | 80.38 |
| 7 | 1 | -1 | 0 | 80.42 |
| 8 | -1 | 0 | 1 | 81.89 |
| 9 | 0 | -1 | 1 | 82.56 |
| 10 | 1 | 0 | -1 | 80.79 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 85.75 |
| 12 | 1 | 1 | 0 | 81.22 |
| 13 | 0 | 1 | 1 | 83.36 |
| 14 | -1 | -1 | 0 | 80.76 |
| 15 | 0 | 1 | -1 | 81.37 |

表 5 响应面方差分析

Table 5 The variance analysis of response surface experiment

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方和 | F 值 | P 值 | 显著性 |
|----------------|-------|-----|-------|--------|---------|-----|
| 模型 | 76.07 | 9 | 8.45 | 41.53 | 0.0004 | ** |
| A | 0.03 | 1 | 0.03 | 0.15 | 0.7167 | |
| B | 1.51 | 1 | 1.51 | 7.40 | 0.0418 | * |
| C | 5.51 | 1 | 5.51 | 27.08 | 0.0035 | ** |
| AB | 0.099 | 1 | 0.099 | 0.49 | 0.5161 | |
| AC | 3.69 | 1 | 3.69 | 18.12 | 0.0080 | ** |
| BC | 0.032 | 1 | 0.032 | 0.16 | 0.7064 | |
| A ² | 41.49 | 1 | 41.49 | 203.88 | <0.0001 | ** |
| B ² | 10.39 | 1 | 10.39 | 51.03 | 0.0008 | ** |
| C ² | 22.07 | 1 | 22.07 | 108.43 | 0.0001 | ** |
| 残差 | 1.02 | 5 | 0.20 | | | |
| 失拟项 | 0.73 | 3 | 0.24 | 1.73 | 0.3865 | 不显著 |
| 净误差 | 0.28 | 2 | 0.14 | | | |
| 总和 | 77.09 | 14 | | | | |

注：“*”表示对结果影响显著 ($p<0.05$)；“**”表示对结果影响极显著 ($p<0.01$)。

2.3 响应面试验结果

2.3.1 三因素响应面试验

根据单因素试验结果,采用 Box-Behnken 中心组合设计原理,进行三因素三水平 RSM 分析试验,分别考察 Vc 浓度 (A)、Nisin 浓度 (B) 和卡拉胶浓度 (C) 对白度值 (Y) 的影响,结果见表 4。

2.3.2 响应面方差分析

采用多元回归拟合上述试验结果,得到以白度值为目标函数、各参数编码值的多元二次方程:
 $Y=86.18-0.06A+0.43B+0.83C-0.16AB-0.96AC+0.09BC-3.35A^2-1.68B^2-2.44C^2$, 对其进行显著检验与方差分析,结果见表 5。

从表 5 可知,该回归模型 $p=0.0004<0.01$,表明二次回归方程模型显著;失拟项 $p=0.3865>0.05$,表明该回归方程拟合度较高; $R^2=0.9868$,表明模型可充分拟合试验数据,可用来预测复合生物保鲜剂最优配方。通过该模型方差分析可知:在所有作用因素中,一次项 B 对双孢蘑菇白度值影响显著 ($p<0.05$),一次项 C、交互项 AC 和二次项 A²、B²、C² 对双孢蘑菇白度值影响极显著 ($p<0.01$),一次项 A、交互项 AB 和 BC 对双孢蘑菇白度值影响均不显著 ($p>0.05$)。F 值大小表示各因素对试验的影响程度,从表 5 可知,对双孢蘑菇白度值影响顺序为:卡拉胶 (C)>Nisin (B)>Vc (A)。

2.3.3 两因素交互影响综合评分响应面分析

不同因素交互影响双孢蘑菇白度值响应面,见

图 5~图 7。等高线形状反映交互效应强弱,其中椭圆形表示两种因素交互作用显著,圆形则表示两种因素交互作用不显著^[35]。

Nisin 和 Vc 双因素交互作用对双孢蘑菇白度值的影响见图 5。由此可知,Nisin 与 Vc 交互作用对白度值影响是先上升后下降,整体图像呈弧形。当 Nisin 浓度 0.40 g/L、Vc 浓度 0.80 g/L 时,白度值 86.32,等高线接近圆形,表明 A、B 两种因素交互作用对双孢蘑菇白度值影响不明显。Nisin 和 Vc 过多均会降低商品价值,过少则无明显保鲜效果。

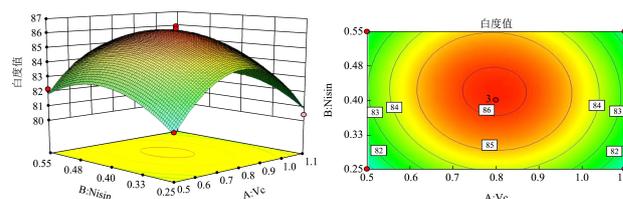


图 5 Vc 与 Nisin 交互影响白度值的响应面和等高线图

Fig.5 Response surface and contour plot of interaction between Vc and Nisin on whiteness value

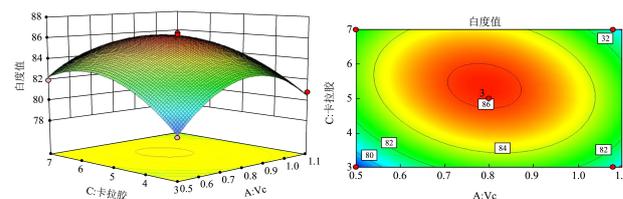


图 6 Vc 与卡拉胶交互影响白度值的响应面和等高线图

Fig.6 Response surface and contour plot of interaction between Vc and carrageenan on whiteness value

卡拉胶和 Vc 双因素交互作用对双孢蘑菇白度

值的影响见图 6。经分析,卡拉胶与 Vc 交互作用所产生的 3D 图像呈一个弧面,白度值随两者浓度增加而先升高后降低。当卡拉胶浓度 5.00 g/L、Vc 浓度 0.80 g/L 时,白度值 86.46,等高线为椭圆形,表明 A、C 两种因素交互作用对双孢蘑菇白度值影响明显,这是因为卡拉胶可作为基质使 Vc 附着在子实体表面,保证 Vc 充分发挥抗氧化功能,从而起到稳定持续的缓释保鲜作用。

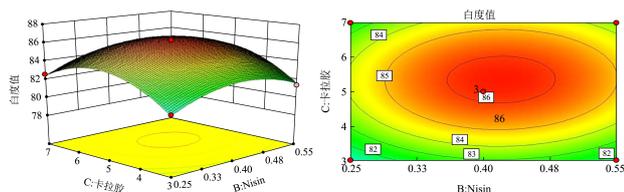


图 7 Nisin 与卡拉胶交互影响白度值的响应面和等高线图

Fig.7 Response surface and contour plot of interaction between Nisin and carrageenan on whiteness value

Nisin 和卡拉胶双因素交互作用对双孢蘑菇白度值的影响见图 7。图 7 表明 Nisin 和卡拉胶两者交互作用所构成的 3D 模型图呈弧形。随着两者浓度的增加,白度值先升高后降低。等高线图趋向椭圆形,表明交互作用显著,并且要比卡拉胶和 Vc 双因素交互作用更显著。当 Nisin 浓度 0.40 g/L、卡拉胶浓度 5.00 g/L 时,白度值最高。卡拉胶同样作为基质会使 Nisin 牢牢地附着在菇体表面,充分发挥缓释效用,抑制大多数微生物生长和繁殖活动,持续保护菇体

表 6 最优配方对贮藏期双孢蘑菇失重率、硬度和腐烂率的影响结果

Table 6 Effects of optimal formula on weight loss, hardness and decay rate of *Agaricus bisporus* during storage

| 项目 | 天数/d | BC 组 | CK 组 | 复合生物保鲜剂组 |
|-------|------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 失重率/% | 0 | - | - | - |
| | 2 | 1.35±0.12 ^{Da} | 1.61±0.11 ^{Da} | 0.98±0.23 ^{Db} |
| | 4 | 3.03±0.21 ^{Cb} | 3.79±0.12 ^{Ca} | 2.43±0.11 ^{Cc} |
| | 6 | 5.13±0.11 ^{Ba} | 5.51±0.23 ^{Ba} | 3.39±0.34 ^{Bb} |
| | 8 | 6.91±0.23 ^{Ab} | 7.67±0.13 ^{Aa} | 4.75±0.15 ^{Ac} |
| 硬度/g | 0 | 507.65±9.95 ^{Aa} | 504.04±13.26 ^{Aa} | 508±12.97 ^{Aa} |
| | 2 | 478.89±12.55 ^{Aa} | 439.26±21.46 ^{Bb} | 500.26±12.86 ^{Aa} |
| | 4 | 329.81±21.22 ^{Bb} | 319.31±11.07 ^{Cb} | 441.66±9.46 ^{Ba} |
| | 6 | 316.29±26.54 ^{Bab} | 294.38±21.04 ^{Cb} | 348.69±12.93 ^{Ca} |
| | 8 | 259.69±21.65 ^{Cb} | 269.63±15.53 ^{Db} | 312.8±14.65 ^{Da} |
| 腐烂率/% | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0.33±0.14 ^{Ca} | 1.00±0.82 ^{Da} | 0 |
| | 4 | 1.00±0.82 ^{Cb} | 3.00±0.82 ^{Ca} | 0.33±0.14 ^{Bb} |
| | 6 | 4.33±0.47 ^{Bb} | 7.33±0.94 ^{Ba} | 2.00±0.82 ^{Bc} |
| | 8 | 9.33±2.05 ^{Aa} | 12.33±1.25 ^{Aa} | 4.33±1.70 ^{Ab} |

注:同行不同小写字母表示同以贮藏天数不同处理间差异显著 ($p < 0.05$); 同列不同大写字母表示同一指标不同贮藏天数差异显著 ($p < 0.05$)。

减轻微生物侵害作用。已有研究证明,以壳聚糖为基质、Nisin 为抑菌成分的涂膜可以抑制 PPO 和 POD 的活性,减缓贮藏过程中机体酚类物质的损失,从而降低褐变程度,延缓白度值的下降^[36]。

2.3.4 预测及验证试验结果

依据响应面图和等高线图,清楚表明三因素不同浓度对双孢蘑菇整体白度值产生的影响。通过对二次抛物线函数模型极值分析,得到天然复合生物保鲜剂最佳浓度条件:Vc 0.79 g/L、Nisin 0.42 g/L、卡拉胶 5.36 g/L,在此最优浓度条件下,白度值 86.28。为进一步验证响应面分析结果的可靠性以及方便实际操作,选择 Vc 0.80 g/L、Nisin 0.40 g/L、卡拉胶 5.40 g/L 作为最优浓度。

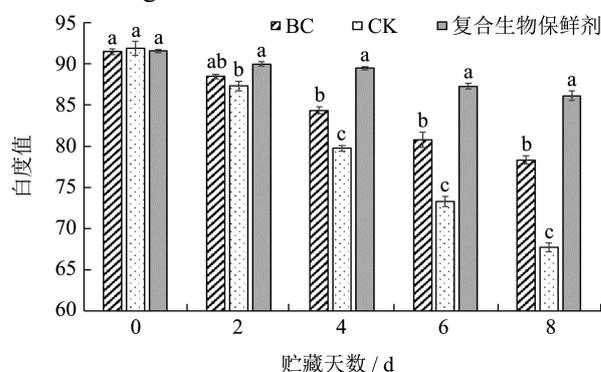


图 8 响应面结论验证试验结果图

Fig.8 Result diagram of conclusion verification test on response surface

响应面验证试验结果如图 8, 三组处理白度值在贮藏期 0~8 d 内均呈下降趋势, 且在整个贮藏期内复合生物保鲜剂组白度值始终高于两组对照, 在第 4、6 和 8 d 达到显著水平 ($p<0.05$), 其中测得第 8 d 双孢蘑菇白度值 86.10, 并且高出 BC 组 9.00%, CK 组 21.32%, 与模型预测值接近。因此, 采用响应面法优化得到的复合生物保鲜剂浓度准确可靠并具有较好保鲜效果, 可进行下一步双孢蘑菇的品质测定试验。

2.4 品质测定试验结果

2.4.1 最优配方对贮藏期双孢蘑菇表观指标的影响

最优配方对贮藏期双孢蘑菇表观指标的影响结果见表 6。由表 6 可知, 失重率、硬度和腐烂率均会随着贮藏时间延长而发生相应变化, 这说明采后双孢蘑菇依然进行着旺盛的生理代谢活动。复合生物保鲜剂处理组在贮藏期第 2 d 开始至贮藏末期, 其失重率 (0.98%~4.75%) 均显著低于两组对照 ($p<0.05$); 在硬度保持方面, CK 组硬度下降的最快, BC 组次之, 复合生物保鲜剂组在中贮藏末期依然保持 312.80 g 硬度水平并显著 ($p<0.05$); 在腐烂率方面, 复合生物保鲜剂处理组在贮藏期第 4 d 刚出现腐烂的现象, 较对照组推迟 2 d, 同时在整个贮藏期间, BC 组和 CK 组腐烂率均显著高于复合生物保鲜剂处理组 ($p<0.05$), 尤其是第 8 d, 复合生物保鲜剂处理组仅为 4.33%。以上试验结果足以表明复合生物保鲜剂能够降低双孢蘑菇生理代谢水平, 对于实体抗逆能力和新鲜度的保持具有积极意义。

2.4.2 最优配方对贮藏期双孢蘑菇生理指标的影响

2.4.2.1 PPO 活力的变化及分析

当植物组织衰老或受损时, PPO 与底物亚细胞区域化被破坏使得 PPO 被活化, 与酚类物质发生氧化反应生成醌类物质, 进一步聚合生成黑褐色或深棕色沉积物, 因此 PPO 与组织褐变存在直接关系^[22]。由图 9 不难看出, BC 组、CK 组和复合生物保鲜剂处理组 PPO 活性随贮藏时间延长均呈现先急速上升后缓慢上升趋势, 这与杨丰菊^[37]研究真空渗透下不同钙处理双孢蘑菇中 PPO 活性的反映大体一致, 说明子实体内 PPO 在胁迫环境中具有重要作用。整个贮藏期间, 复合生物保鲜剂处理组 PPO 活性始终显著低于 BC 组和 CK 组 ($p<0.05$), 特别是贮藏期 2、4、6 d, PPO 活性几乎不变, 分别为

5525.86、5861.21 和 5914.43 U/g FW。复合生物保鲜剂处理组在贮藏前后仅上升了 3406.39 U/g FW, 上升幅度仅为 CK 组的 33.93%、BC 组的 60.08%。由此可知, 复合生物保鲜剂能够有效延缓双孢蘑菇贮藏期间 PPO 活性的增加。

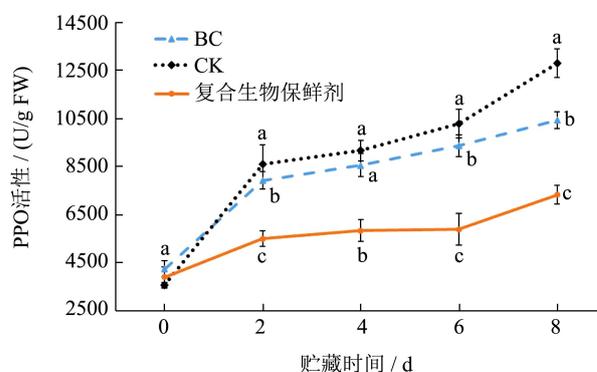


图 9 最优配方对贮藏期双孢蘑菇 PPO 活力的影响

Fig.9 Influence of optimal formula on PPO activity of *Agaricus bisporus* during storage

2.4.2.2 总酚含量的变化及分析

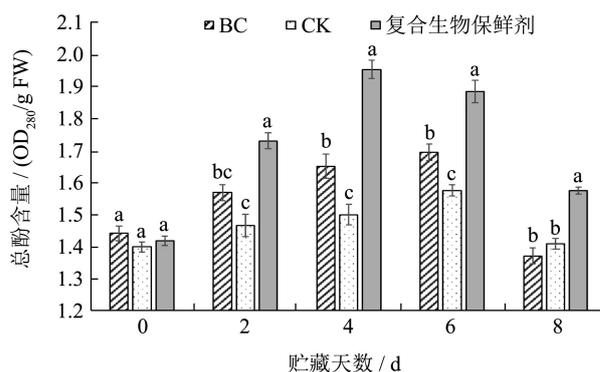


图 10 最优配方对贮藏期双孢蘑菇总酚含量的影响

Fig.10 Influence of optimal formula on total phenol content of *Agaricus bisporus* during storage

植物体内存在某些次级代谢途径能够提高机体抗逆性, 如苯丙烷代谢, 其生成的酚类物质、木质素等有不同的抗逆活性^[38]。苯丙氨酸酶 (PAL) 是苯丙烷代谢关键酶之一, 其活性大小与酚类等物质含量高低密切相关^[39]。木质素合成原料之一是酚类物质^[40], 木质素有效积累会提高细胞抵抗病原菌感染能力^[41]。酚类物质作为非酶抗氧化系统的底物, 其含量可影响机体氧化损伤和褐变程度^[42]。由图 10 可以看出, 在贮藏期内, 复合生物保鲜剂处理组、BC 组和 CK 组的总酚含量均呈现先上升后下降规律, 这和 LI 等^[43]研究 L-精氨酸对双孢蘑菇总酚含量的结果基本一致。不同的是, 复合生物保鲜剂处理组在贮藏期第 4 d 就已出现峰值 (1.95 OD₂₈₀/g FW), 不仅快于 BC 组和 CK 组 2 d, 而且峰值含量分别是 BC 组 (1.69 OD₂₈₀/g FW) 和 CK 组 (1.58

OD₂₈₀/g FW) 的 1.15 和 1.58 倍并达到显著性水平 ($p<0.05$)。总酚含量的增加可能是由复合生物保鲜剂抑制了 PPO 活性导致的。不难看出,在贮藏期 2~8 d 内,复合生物保鲜剂处理组总酚含量均始终高于对照组 ($p<0.05$),并维持较高含量水平。从上述结果得知,复合生物保鲜剂处理可加快双孢蘑菇贮藏期间总酚含量峰值出现并促进酚类物质积累。

2.4.2.3 总抗氧化能力的变化及分析

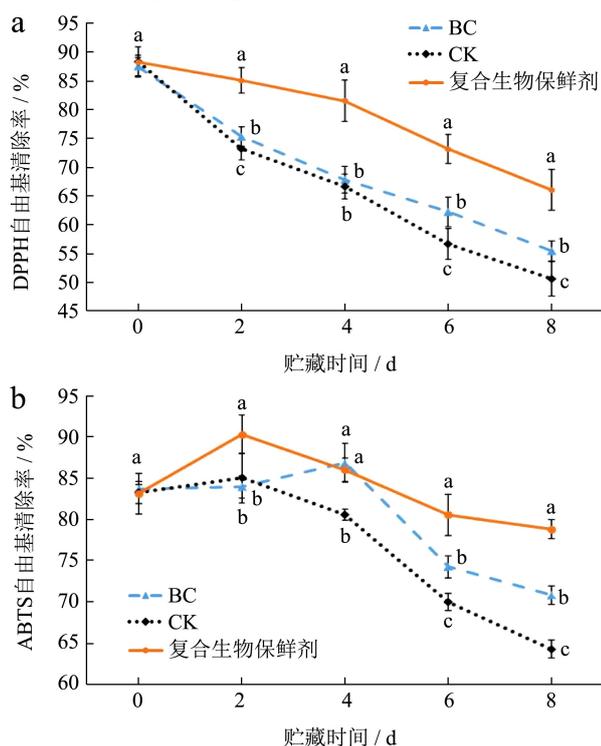


图 11 最优配方对贮藏期双孢蘑菇 DPPH 清除率 (a) 和 ABTS 清除率 (b) 的影响

Fig.11 Influence of optimal formula on DPPH clearance rate (a) and ABTS clearance rate (b) of *Agaricus bisporus* during storage

植物遭遇不良胁迫时,其体内会立即产生活性氧簇 (ROS) [44],少量 ROS 会提高植物体抗菌能力[45],过多 ROS 就会损伤细胞[46],但机体存在 ROS 清除系统,可及时清除过量 ROS 从而保护细胞[47]。DPPH 自由基和 ABTS 阳离子自由基清除率均为衡量 ROS 清除系统总抗氧化能力的重要指标。由图 11 (A) 知,在整个贮藏期间,所有试验组 DPPH 自由基清除率均呈现逐渐下趋势,但复合生物保鲜剂处理组始终显著高于 BC 组和 CK 组 ($p<0.05$),它与对照组间差距在贮藏第 4 d (81.55%) 达到最大,高出 BC 组 22.23%以及 CK 组 22.34%,在贮藏第 8 d 清除率依然高达 66.08%,这表明复合生物保鲜剂处理可延缓 DPPH 自由基清除能力的降低。由

图 11b 可知,随贮藏时间延长,三组处理的 ABTS 阳离子自由基清除率呈现先短暂上升后下降的趋势。复合生物保鲜剂处理组 ABTS 阳离子自由基清除率在贮藏第 2、6、8 d 三个时间点均显著高出对照组 ($p<0.05$),在贮藏期第 2 d 达到峰值 (90.34%),比 BC 组峰值的出现提前 2 d,并且下降速度远远低于对照组。这说明复合生物保鲜剂处理能够促进双孢蘑菇贮藏期间 ABTS 阳离子自由基清除率峰值出现,并且可有效延缓菇体抗氧化能力的降低。

3 结论

本研究以双孢蘑菇为试验对象,通过白度值和感官评价双指标择优筛选,研究了茶多酚、L-谷氨酸、L-精氨酸和 Vc 对子实体的抗氧化能力,大蒜提取液、 ϵ -聚赖氨酸、Nisin 和生姜提取液的抑菌保鲜效果,以及果胶、黄原胶、卡拉胶和水溶性壳聚糖的成膜保鲜效果。初步结果表明, Vc、Nisin 和卡拉胶有效延缓子实体褐变、保持一定新鲜度。在此基础上进一步研究,经复合优化得到的复合生物保鲜剂 (Vc 0.80 g/L、Nisin 0.40 g/L、卡拉胶 5.40 g/L),能够有效延缓双孢蘑菇硬度下降、失重率和腐烂率的上升,提高采后抗氧化能力,延缓酚类物质含量和自由基清除能力的降低、抑制 PPO 活力增加,延长货架期 3~4 d。但是本研究仅仅是在短期低温条件下,通过复合生物保鲜剂处理,对双孢蘑菇失重率、硬度、腐烂率、总酚含量、PPO 活性、DPPH 自由基和 ABTS 阳离子自由基清除率的变化趋势进行了研究,将来可对 ROS 清除系统相关酶活性和营养物质含量的变化进行研究,还可以对这些变化产生的原因或机理展开更深入的研究,以便更加全面地解释复合生物保鲜剂对双孢蘑菇衰老的影响。

参考文献

- [1] CHEN Meiyuan, LIAO Jianhua, LI Hongrong, et al. ITRAQ-MS/MS proteomic analysis reveals differentially expressed proteins during post-harvest maturation of the white button mushroom *Agaricus bisporus* [J]. Current Microbiology, 2017, 74(5): 641-649
- [2] 高春燕.食用菌主栽品种及栽培管理技术[N].河北科技报,2020-09-01(005)
GAO Chunyan. Main varieties and cultivation management techniques of edible fungi [N]. Hebei Science and Technology Journal, 2020-09-01(005)
- [3] XUE Ying, XIE Jing, XU Xianshun, et al.

- UPLC-QqQ/MS combined with similarity assessment of 17 nucleic acid constituents in 147 edible fungi from Sichuan Basin, China [J]. *Food Research International*, 2019, 120: 577-585
- [4] Lavinia Claudia Buruleanu, Cristiana Radulescu, Andreea Antonia Georgescu, et al. Statistical characterization of the phytochemical characteristics of edible mushroom extracts [J]. Taylor Francis, 2018, 51(7): 1039-1059
- [5] 任浩.短期厌氧气调对双孢蘑菇采后生理及品质的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2021
- REN Hao. Effects of short-term anaerobic regulation on postharvest physiology and quality of *Agaricus bisporus* [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2021
- [6] 夏紫茜,李辣梅,严涵,等.食用菌采后保鲜研究进展[J].中国果菜,2021,41(5):15-22
- XIA Ziqian, LI Lamei, YAN Han, et al. Research progress on preservation of edible fungi after harvest [J]. *China Fruits and Vegetables*, 2021, 41(5): 15-22
- [7] JING Jiayi, ZHANG Hongyan, XUE Yaobi, et al. Effects of INA on postharvest blue and green molds and anthracnose decay in citrus fruit [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(5): 1396-1406
- [8] Camel Lagnika, Min Zhang, John Nsor Atindana, et al. Effects of ultrasound and chemical treatments on white mushroom (*Agaricus bisporus*) prior to modified atmosphere packaging in extending shelf-life [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2014, 51(12): 3749-3757
- [9] Maria G Li Destri Nicosia, Sonia Pangallo, Ginat Raphael, et al. Control of postharvest fungal rots on citrus fruit and sweet cherries using a pomegranate peel extract [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 114: 54-61
- [10] JIANG Tianjia, FENG Lifang, ZHENG Xiaolin, et al. Physicochemical responses and microbial characteristics of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) to gum Arabic coating enriched with natamycin during storage [J]. *Food Chemistry*, 2013, 138(2-3): 1992-1997
- [11] 于官楚.振动胁迫对双孢蘑菇贮藏品质及采后生理的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2020
- YU Guanzhu. Effects of vibration stress on storage quality and postharvest physiology of *Agaricus bisporus* [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020
- [12] GB/T 16291.1-2012,感官分析选拔、培训与管理评价员一般导则 第1部分:优选评价员[S]
- GB/T 16291.1-2012, General Guidelines for Selection, Training And Management of Evaluators in Sensory Analysis - Part 1: Selection of Evaluators [S]
- [13] GB/T 29605-2013,感官分析 食品感官质量控制导则[S]
- GB/T 29605-2013, Sensory Analysis Guide for Sensory Quality Control of Food [S]
- [14] 范存斐,毕阳,王云飞,等.水杨酸对厚皮甜瓜采后病害及苯丙烷代谢的影响[J].中国农业科学,2012,45(3):584-589
- FAN Cunfei, BI Yang, WANG Yunfei, et al. Effects of salicylic acid on postharvest diseases and phenylpropane metabolism of muskmelon [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(3): 584-589
- [15] YU Kaibo, ZHOU Lei, SUN Yuefang, et al. Anti-browning effect of *Rosa roxburghii* on apple juice and identification of polyphenol oxidase inhibitors [J]. *Food Chemistry*, 2021, 359: 129855
- [16] QIAN Jingya, CHEN Shubei, HUO Shuhao, et al. Impact of pulsed magnetic field treatment on enzymatic inactivation and quality of cloudy apple juice [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 58(8): 2982-2991
- [17] 贾仕杰,张海华,张焕,等.东北6种红树莓叶酚类化合物的鉴定及抗氧化活性分析[J].食品科学,2019,40(20): 227-233
- JIA Shijie, ZHANG Haihua, ZHANG Huan, et al. Identification and antioxidant activity analysis of phenolic compounds from six red raspberry leaves in northeast China [J]. *Food Science*, 2019, 40(20): 227-233
- [18] ZHANG Xinhua, MIN Dedong, LI Fujun, et al. Synergistic effects of l-arginine and methyl salicylate on alleviating postharvest disease caused by *Botrytis cinerea* in tomato fruit [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(24): 4890-4896
- [19] R B H Wills, Yongxin Li. Use of arginine to inhibit browning on fresh cut apple and lettuce [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 113: 66-68
- [20] 李芋萱,曾凯芳,邓丽莉.外源 L-Arg 处理对蜜橘果实贮藏品质的影响[J].食品科学,2015,36(24):313-318
- LI Yuxuan, ZENG Kaifang, DENG Lili. Effects of exogenous l-arg treatment on storage quality of tangerine fruit [J]. *Food Science*, 2015, 36(24): 313-318
- [21] SHI Jiang, SHI Guoan, TIAN Zhen. Effect of exogenous

- hydrogen peroxide or ascorbic acid on senescence in cut flowers of tree peony (*Paeonia suffruticosa* Andr.) [J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2015, 90(6): 689-694
- [22] LIU Kaidong, YUAN Changchun, CHEN Yan, et al. Combined effects of ascorbic acid and chitosan on the quality maintenance and shelf life of plums [J]. Scientia Horticulturae, 2014, 176: 45-53
- [23] 张强,孙玉军,蒋圣娟,等.洋葱、生姜、大蒜提取物对冷却肉保鲜效果的研究[J].食品工业科技,2015,36(4):310-314
ZHANG Qiang, SUN Yujun, JIANG Shengjuan, et al. Study on the fresh-keeping effect of onion, ginger and garlic extracts on chilled meat [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(4):310-314
- [24] TAN Zhilei, BO Tao, GUO Fengzhu, et al. Effects of ϵ -poly-L-lysine on the cell wall of *Saccharomyces cerevisiae* and its involved antimicrobial mechanism [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 118: 2230-2236
- [25] 张全景,冯小海,徐虹,等. ϵ -聚赖氨酸在冷鲜猪肉保鲜中的应用[J].食品科学,2011,32(2):290-296
ZHANG Quanjing, FENG Xiaohai, XU Hong, et al. Application of ϵ -polylysine in preservation of chilled pork [J]. Food Science, 2011, 32(2): 290-296
- [26] 王佳宇,胡文忠,管玉格,等.乳酸链球菌素抑菌机理及在食品保鲜中的研究进展[J].食品工业科技,2021,42(3): 346-350
WANG Jiayu, HU Wenzhong, GUAN Yuge, et al. Research progress on antibacterial mechanism of *Streptococcus lactin* and its application in food preservation [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(3): 346-350
- [27] WANG Shiow Y, GAO Haiyan. Effect of chitosan-based edible coating on antioxidants, antioxidant enzyme system, and postharvest fruit quality of strawberries (*Fragaria x aranassa* Duch.) [J]. LWT - Food Science and Technology, 2013, 52(2): 71-79
- [28] 洪理杰,范阳,刘秉珍,等.苦荞粗多糖涂膜处理对中国樱桃的保鲜效果[J].食品工业科技,2021,42(14):296-301
HONG Lijie, FAN Yang, LIU Bingzhen, et al. Effects of Tartary buckwheat crude polysaccharide coating on preservation of Chinese cherry [J]. Food Science and Technology, 2021, 42(14): 296-301
- [29] Carolina E Genevois, Marina F de Escalada Pla, Silvia K Flores. Application of edible coatings to improve global quality of fortified pumpkin [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2016, 33: 506-514
- [30] 钱和,刘长虹,张添.芦荟制品的酶促褐变及其控制措施[J].食品工业科技,2002,10:36-39
QIAN He, LIU Changheng, ZHANG Tian. Enzymatic Browning of aloe vera and its control measures [J]. Food Industry Science and Technology, 2002, 10: 36-39
- [31] 姜绍通,罗志刚,郑志,等.甘薯加工过程酶促褐变及控制研究[J].农业工程学报,2001,2:136-139
JIANG Shaotong, LUO Zhigang, DENG Zhi, et al. Study on enzymatic browning and control of sweet potato during processing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 2: 136-139
- [32] WU Shujuan, NIE Ying, ZHAO Jinhong, et al. The synergistic effects of low-concentration acidic electrolyzed water and ultrasound on the storage quality of fresh-sliced button mushrooms [J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11(2): 314-323
- [33] MENG Demei, SONG Tianzi, SHEN Lin, et al. Postharvest application of methyl jasmonate for improving quality retention of *Agaricus bisporus* fruit bodies [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(23): 6056-6062
- [34] 李帅,钟耕辉,刘玉梅.多糖类可食性膜的研究进展[J].食品科学,2018,39(3):309-316
LI Shuai, ZHONG Genghui, LIU Yumei. Research progress of polysaccharide edible membrane [J]. Food Science, 2018, 39(3): 309-316
- [35] 王端好,王震,胡吉祥,等.生料液态酿酒工艺研究与品质检测[J].食品研究与开发,2021,42(10):129-134
WANG Duanhao, WANG Zhen, HU Jixiang, et al. Research and quality inspection of liquid brewing process for raw materials [J]. Food Research and Development, 2021, 42(10): 129-134
- [36] 邱天.迷迭香酸、Nisin、聚赖氨酸联合抑菌效果及其涂膜保鲜效果的研究[J].现代食品,2020,21:77-81
QIU Tian. Study on bacteriostatic effect of rosinic acid, Nisin and polylysine and preservation effect of coating film [J]. Modern Food, 2020, 21: 77-81
- [37] 杨丰菊.钙、曲酸及其复合体系真空渗透处理对双孢蘑菇采后品质的调控研究[D].郑州:河南农业大学,2014
YANG Fengju. Study on vacuum osmosis treatment of calcium, kojic acid and their compound system on postharvest quality of *Agaricus bisporus* [D]. Zhengzhou:

- Henan Agricultural University, 2014
- [38] Munazza Nazir, Muhammad Asad Ullah, Muhammad Younas, et al. Light-mediated biosynthesis of phenylpropanoid metabolites and antioxidant potential in callus cultures of purple basil (*Ocimum basilicum* L. var *purpurascens*) [J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 2020, 142(1): 107-120
- [39] M J Stadnik, H Buchenauer. Inhibition of phenylalanine ammonia-lyase suppresses the resistance induced by benzothiadiazole in wheat to *Blumeria graminis* F. sp. *tritici* [J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2000, 57(1): 25-34
- [40] Mojtaba Mohammadi, Homayoon Kazemi. Changes in peroxidase and polyphenol oxidase activities in susceptible and resistant wheat heads inoculated with *Fusarium graminearum* and induced resistance [J]. *Plant Science*, 2002, 162(4): 491-498
- [41] Gail L Shadle, S Varsha Wesley, Kenneth L Korth, et al. Phenylpropanoid compounds and disease resistance in transgenic tobacco with altered expression of L-phenylalanine ammonia-lyase [J]. *Phytochemistry*, 2003, 64(1): 153-161
- [42] 张洪军,潘艳娟,王建清.大蒜/肉桂精油复配 PE 膜对双孢菇的保鲜研究[J].*包装与食品机械*,2015,33(4):21-25
ZHANG Hongjun, Pan Yanjuan, Wang Jianqing. Study on the preservation of *Bisporus agaricus* by garlic/cinnamon essential oil combined with PE film [J]. *Packaging and Food Machinery*, 2015, 33(4): 21-25
- [43] LI Beibei, DING Yang, TANG Xiuli, et al. Effect of L-arginine on maintaining storage quality of the white button mushroom (*Agaricus bisporus*) [J]. *Springer US*, 2019, 12(4): 563-574
- [44] Waszczak Cezary, Carmody Melanie, Kangasjärvi Jaakko. Reactive oxygen species in plant signaling [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2018, 69: 209-236
- [45] LI Taotao, SHI Dingding, WU Qixian, et al. Sodium para-aminosalicylate delays pericarp browning of litchi fruit by inhibiting ROS-mediated senescence during postharvest storage [J]. *Food Chemistry*, 2019, 278: 552-559
- [46] JIANG Guoxiang, XIAO Lu, YAN Huiling, et al. Redox regulation of methionine in calmodulin affects the activity levels of senescence-related transcription factors in litchi [J]. *BBA - General Subjects*, 2017, 1861(5): 1140-1151
- [47] De Freitas Silva Larisse, Rodríguez Ruiz Marta, Houmani Hayet, et al. Glyphosate-induced oxidative stress in *Arabidopsis thaliana* affecting peroxisomal metabolism and triggers activity in the oxidative phase of the pentose phosphate pathway (OxPPP) involved in NADPH generation [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2017, 218: 196-205

(上接第 281 页)

- [33] 朱静娴,李丽君,赵淑芳,等.基于SRAP分子标记的23株大球盖菇遗传多样性和亲缘关系分析[J].*山东农业科学*, 2018,50(3):22-28
ZHU Jingxian, LI Lijun, ZHAO Shufang, et al. Genetic diversity and phylogenetic relationship analysis of 23 *Stropharia rugosoannulata* strains based on SRAP molecular marker [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2018, 50(3): 22-28
- [34] 任纪帆,朱静娴,王庆佶,等.大球盖菇“山农球盖3号”品种的选育[J].*菌物学报*,2020,39(6):977-982
REN Jifan, ZHU Jingxian, WANG Qingzhe, et al. Breeding of *Stropharia rugosoannulata* ‘Shannongqiugai No.3’ [J]. *Mycosystema*, 2020, 39(6): 977-982
- [35] 崔晓瑞,王丽,石菲菲,等.超声波辅助碱法提取大球盖菇蛋白质工艺的优化[J].*食品安全质量检测学报*,2020, 11(20):7536-7543
CUI Xiaorui, WANG Li, SHI Feifei, et al. Optimization of extraction process of *Stropharia rugosoannulata* protein by ultrasonic-assisted alkali [J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2020, 11(20): 7536-7543
- [36] 钱磊,张业尼,陈雪,等.大球盖菇漆酶的分离纯化及酶学性质研究[J].*生物技术通报*,2018,34(4):127-132
QIAN Lei, ZHANG Yeni, CHEN Xue, et al. Purification and enzymatic characterization of laccase from *Stropharia rugosoannulata* [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2018, 34(4): 127-132
- [37] 徐宁,陆欢,冯立国,等.HS-SPME-GC-MS法分析卵孢小奥德磨子实体不同部位挥发性成分及营养成分分析[J].*菌物学报*,2020, 39(10):1933-1947
XU Ning, LU Huan, FENG Liguang, et al. Volatile components analysed by HS-SPME-GC-MS in different parts of fruiting bodies and nutritional composition of *Oudemansiella raphanipes* [J]. *Mycosystema*, 2020, 39(10): 1933-1947