

一种平菇复合保鲜剂的研制及其保鲜效果研究

田 双¹, 孙菲宇¹, 袁梦晗¹, 王小军², 陶明焯¹

(1.南京师范大学食品与制药工程学院, 江苏 南京 210023)

(2.南京师范大学生命科学学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 通过探讨不同单一保鲜剂对平菇在贮藏过程中保鲜效果的影响, 筛选出适合平菇的复合保鲜剂. 以平菇为试验材料, 经保鲜剂处理后置于保鲜袋中, 在 4 ℃ 条件下贮藏, 以失重率、感官评价分数、腐烂指数、褐变度为评价指标, 采用单因素试验结合正交试验, 研究不同浓度柠檬酸、抗坏血酸、大蒜提取液对平菇贮藏效果的影响. 结果表明, 复合保鲜剂的最佳浓度配比为: 柠檬酸浓度为 0.9 g/L, 抗坏血酸浓度为 1.0 g/L, 大蒜提取液浓度为 250 g/L. 与单一保鲜剂相比, 经此复合保鲜剂处理后, 10 d 内平菇的失重率及褐变度增加得到更好的抑制, 延长了平菇的货架期.

[关键词] 平菇复合保鲜剂, 柠檬酸, 抗坏血酸, 大蒜提取液, 响应面优化

[中图分类号] TS255.36 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2025)01-0055-10

Development of a Composite Preservative for *Pleurotus ostreatus* and Research on Its Preservation Effect

Tian Shuang¹, Sun Feiyu¹, Yuan Menghan¹, Wang Xiaojun², Tao Mingxuan¹

(1.School of Food Science and Pharmaceutical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2.School of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The objective of this study is to investigate the effects of different single preservatives on the preservation of *Pleurotus ostreatus* during storage. Additionally, the study aims to identify composite preservative formulations that are suitable for use with *Pleurotus ostreatus*. The *Pleurotus ostreatus* are treated with preservatives and placed in preservation bags and stored at 4 ℃, and the effects of different concentrations of citric acid, ascorbic acid and garlic extract on the storage effect of the mushrooms are investigated by using the one-way test combined with the orthogonal test with the weight loss rate, sensory evaluation scores, decay index and browning degree as the evaluation indexes. The findings indicate that the optimal ratio of the composite preservative is 0.9 g/L citric acid, 1.0 g/L ascorbic acid, and 250 g/L garlic extract, which can inhibit the weight loss and the increase of browning degree of *Pleurotus ostreatus* and prolong the shelf-life of *Pleurotus ostreatus* within 10 days after treatment with the composite preservative compared with the single preservative.

Key words: composite preservative for *Pleurotus ostreatus*, citric acid, ascorbic acid, garlic extract, response surface optimization

平菇(*Pleurotus ostreatus*), 又名凤尾菇、侧耳, 侧耳科侧耳属真菌, 多呈不规则形状^[1]. 平菇因其丰富的营养成分, 如蛋白质、维生素、矿物质、健康脂肪和纤维素等^[2], 而广受欢迎. 然而, 平菇的水分含量较高^[3], 呼吸速率较快, 贮藏时容易受到微生物的侵害. 平菇缺乏保护性角质层, 其组织嫩, 在贮藏时还容易受到物理损伤. 这些因素会促使菇体发生色变和质地劣化, 严重时损害其营养价值和商业价值^[4]. 为了延长平菇的保鲜期, 目前可以采用的保鲜技术有: 干燥脱水^[5]、低温冷藏^[6]、保鲜剂浸泡^[7]、包装^[8]、辐射照射^[9]、脉冲电场^[10]和超声波处理等^[9]. 其中, 干燥脱水会导致多糖、蛋白质和风味化合物的降解^[11]; 低温冷藏会导致维生素的损失^[12]; 保鲜剂浸泡有利于总糖、抗坏血酸和生物活性化合物在贮藏期间的保存^[9]; 辐照^[13]可能降低不饱和脂肪酸含量; 关于包装、脉冲电场和超声波对平菇的营养成分和生物活性的

收稿日期: 2024-05-17.

基金项目: 南京师范大学 2023 年度创新性实验教学立项建设项目.

通讯作者: 王小军, 副教授, 研究方向: 功能食品中活性物质提取. E-mail: 173549009@qq.com; 陶明焯, 副教授, 研究方向: 食品营养与健康. E-mail: 45017@njnu.edu.cn

影响尚不明确. 在延长平菇贮藏时间的方法中,保鲜剂使用方法简单、成本较低、保鲜效果好. 通过加入不同保鲜剂形成的复合保鲜剂可以起到协同作用,使保鲜效果强于单一保鲜剂. 所以,寻找一种可以延长平菇贮藏时间的复合保鲜剂,对于促进平菇产业的持续发展具有重要意义^[14].

大蒜是一种常见的香辛料,当其作为新型保鲜剂使用时^[15],具有成本低、抑菌作用强、抑菌范围广的特点. 研究显示,采用不同浓度的大蒜提取物处理多种常见的腐败细菌及真菌时,大蒜提取物表现出显著的抑制与杀灭效果. 试验结果证实,大蒜的抗菌作用在多个实际应用中不逊于苯甲酸和山梨酸这两种常用的食品防腐剂,甚至更为有效^[16],这表明大蒜提取物是目前发现的天然植物源抗菌剂中抗菌作用最强的一种. 此外,大蒜提取物中的活性成分大蒜素能够释放出一种特殊的气味^[17],这种气味具有驱赶蝇、蚊等昆虫的效果,有助于保护食品免受其侵害,从而延缓食品腐败过程. 由于大蒜的特殊气味不易被人接受,因此需要进行脱臭处理^[18]. 经过微波脱臭处理的大蒜提取液在酸性条件下抑菌效果更加明显^[19].

柠檬酸是一种有机弱酸,具有酸化、抗褐变和保鲜等功能^[20],是一种安全的保鲜剂. 张鲁斌等^[21]的研究结果表明,用柠檬酸溶液处理鲜切粉葛能够显著降低其在贮藏期间的褐变程度,这主要归功于柠檬酸对粉葛中总酚含量的显著降低作用,从而维持粉葛较好的商品价值.

抗坏血酸,也称维生素 C,因其出色的抗氧化特性^[22],常被用作果蔬保鲜剂,减缓果蔬后熟和衰老过程. 邓钦予等^[23]的研究表明,用抗坏血酸处理能有效保持竹根姜的硬度和色泽,抑制其活性氧和褐变酶活性上升,延长货架期.

本文选择脱臭大蒜提取液、柠檬酸和抗坏血酸进行复配,研究复合保鲜剂对平菇的保鲜效果.

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 试验材料

新鲜平菇子实体、新鲜大蒜,均购自南京市苏果超市亚东新城店.

1.1.2 主要试验试剂

柠檬酸、抗坏血酸,国药集团化学试剂有限公司;脱臭大蒜提取液,自制.

1.2 主要仪器与设备

JA5003N 电子天平,上海精科天美有限公司;HH-8 数显恒温水浴锅,金坛市杰瑞尔电器有限公司;GL-22M 高速冷冻离心机,湖南赛特湘仪器有限公司;722 可见光光度计,上海精密科学仪器有限公司;SN-SHZ 循环水真空泵,上海尚仪仪器设备有限公司;M1-211A 微波炉,广东美的厨房电器制造有限公司;MOLreseakh 1005a 分析型超纯水机,舒活泉人工智能有限公司.

1.3 试验方法

1.3.1 样品处理

样品预处理:选择形状均匀、无病虫害及损伤的新鲜平菇,清除样品表面杂质,室温放置 5 min,使平菇的温度自然平衡至室温.

脱臭大蒜提取液制备:取洗净去皮的新鲜大蒜捣成粘稠状蒜泥. 取 25 g 蒜泥用无菌蒸馏水配成质量分数为 50%的大蒜匀浆,放入离心瓶,6 000 r/min 离心 10 min,过滤,微波处理上清液 700 W 加热 2 min,得到脱臭大蒜提取液.

1.3.2 单因素试验

将处理好的平菇分别置于不同浓度柠檬酸(0.7、0.9、1.1 g/L)、抗坏血酸(0.5、1.0、1.5 g/L)和大蒜提取液(200、250、300 g/L)中浸泡 5 min,取出自然晾干后进行失重率、腐烂指数、感官评价分数、褐变度的测定,之后用食品密封袋包装好,于 4 ℃贮藏,贮藏周期为 10 d,每两天测定一次上述平菇保鲜效果指标. 本试验设置蒸馏水作为保鲜剂的水对照组以及不做任何处理的空白对照组.

1.3.3 响应面试验设计

在单因素试验的基础上,选定柠檬酸(浓度分别为 0.7、0.9、1.1 g/L)、抗坏血酸(浓度分别为 0.5、1.0、1.5 g/L)和大蒜提取液(浓度分别为 200、250、300 g/L)进行三因素三水平的正交试验,因素水平设计见表 1. 选择处理后的平菇分别放入不同浓度配比的复合保鲜剂溶液中浸泡 5 min,后续步骤同单因素试验.

表 1 三因素三水平表
Table 1 Three factors and three levels table

水平	因素		
	柠檬酸浓度/(g/L)	抗坏血酸浓度/(g/L)	大蒜提取液浓度/(g/L)
-1	0.7	0.5	200
0	0.9	1.0	250
1	1.1	1.5	300

1.3.4 指标测定方法

(1)失重率测定:对样品进行称重,重复 3 次,取平均值为初始重量,随后进行不同的保鲜处理,每 2 d 称重一次,周期为 10 d,记录数据. 计算公式^[24]为:

$$\text{失重率}(\%) = (\text{贮藏前质量} - \text{测定时质量}) \times 100\% / \text{贮藏前质量}.$$

(2)感官评定分数:感官评价标准参照付伟等^[25]的测定方法,评分标准见表 2. 取出贮藏在冰箱中的平菇,开袋后分装在 500 mL 透明烧杯中,并在 5 min 内从平菇的色泽、黏性、菌盖状态、菌褶状态及气味 5 个角度进行评分. 每 2 d 进行一次测定,周期为 10 d.

表 2 平菇感官描述检验评分标准
Table 2 Scoring criteria for sensory descriptive test of *Pleurotus ostreatus*

项目	得分			
	4 分	3 分	2 分	1 分
色泽	青灰色	青褐色	黄褐色	黄色
黏性	菌盖光滑	略有黏性	黏度较大	黏液出现
菌盖状态	基本平展、完整,无卷边,白色	欠平展、完整,有卷边,少量斑块,白色	不平展、完整,中度褐变,大量斑块,乳白色	不平展、严重褐变,局部腐烂,乳黄色
菌褶状态	不破不倒,乳白色	少量破或倒,乳白色	少量破或倒,乳白色至乳黄色	菌褶大量破、倒,乳黄色
气味	有平菇特有的香味	平菇特有的香味变淡	有轻微异味	有强烈异味

(3)腐烂指数(corruption index, CI)测定:按分级评分法,腐烂级别定义为:0 级:无腐烂;1 级:0≤腐烂体面积<10%;2 级:10%≤腐烂体面积<30%;3 级:30%≤腐烂体面积<50%;4 级:50%≤腐烂体面积<100%^[26]. 计算公式为:

$$CI = \left[\sum (\text{腐烂级别} \times \text{该级总菇数}) \right] / [\text{腐烂最高级} \times \text{总菇数}].$$

(4)褐变度测定:褐变度测定参考许原等^[27]的方法. 取 3~5 g 平菇样品,按 1:20(样品:沸腾蒸馏水)的质量比,沸水余烫样品约 30 s,迅速取出冷却、研磨,转移入离心瓶,10 000 r/min 离心 2 min,收集上清液,在 450 nm 处测定吸光度记为褐变度 OD 值. 考虑到样品匀浆经 20 倍的沸水稀释,需要按照特定的计算公式来确定样品的褐变度值:

$$\text{褐变度} = \text{褐变度 OD 值} \times 20.$$

1.4 数据处理与作图

采用 Excel 软件进行数据的初步统计处理,SPSS Statistics25 软件对试验数据进行分析,Graphpad 软件进行数据作图,Design Expert13 进行响应面模型设计和方差分析处理.

2 结果与讨论

2.1 单因素结果

2.1.1 失重率

图 1(a)为不同浓度的柠檬酸溶液对平菇失重率的影响. 由图可知,随着贮藏天数的增加,平菇失重率总体上显示出增长的趋势,这可能是由于平菇的表皮结构薄而多孔^[28],具有较高的呼吸速率,以及微生物在平菇贮藏期间生长繁殖,会使平菇呼吸、脱水、褐变速率增加,进而使得平菇质量损失增加^[29]. 与水对照组相比,加入 0.7、0.9、1.1 g/L 柠檬酸溶液的试验组均可显著降低失重率($P<0.05$). 随着柠檬酸浓度的增加,平菇失重率的变化呈现先降后升的趋势,该结果与刘丽等^[30]的研究结果一致. 当柠檬酸溶液浓度达到 0.9 g/L 时,平菇的失重率降至最低点. 图 1(b)为不同浓度的抗坏血酸对平菇失重率的影响. 由图可知,平菇在贮藏过程中,随着贮藏天数的增加,其失重率呈现出上升的趋势. 随着抗坏血酸浓度的不断升高,平

菇的失重率呈现先降后升的趋势^[30],在抗坏血酸浓度为 1.0 g/L 时失重率最低. 图 1(c) 为不同浓度的大蒜提取液对平菇失重率的影响. 由图可知,平菇在贮藏过程中,随着贮藏天数的增加,其失重率呈现出上升的趋势. 随着大蒜提取液浓度的增加,平菇失重率呈现出先降后升的趋势,这可能是由于大蒜素在平菇表面形成一层保护膜^[31],该膜能够阻止平菇内部水分的迁移、抑制其呼吸和代谢活动、减少质量损失^[32]. 因此,可以推断大蒜提取物对于延长平菇的保鲜期限具有显著效果^[33]. 张志敏等^[34]在大蒜素处理对刺梨失重率的影响研究中有相似的结论.

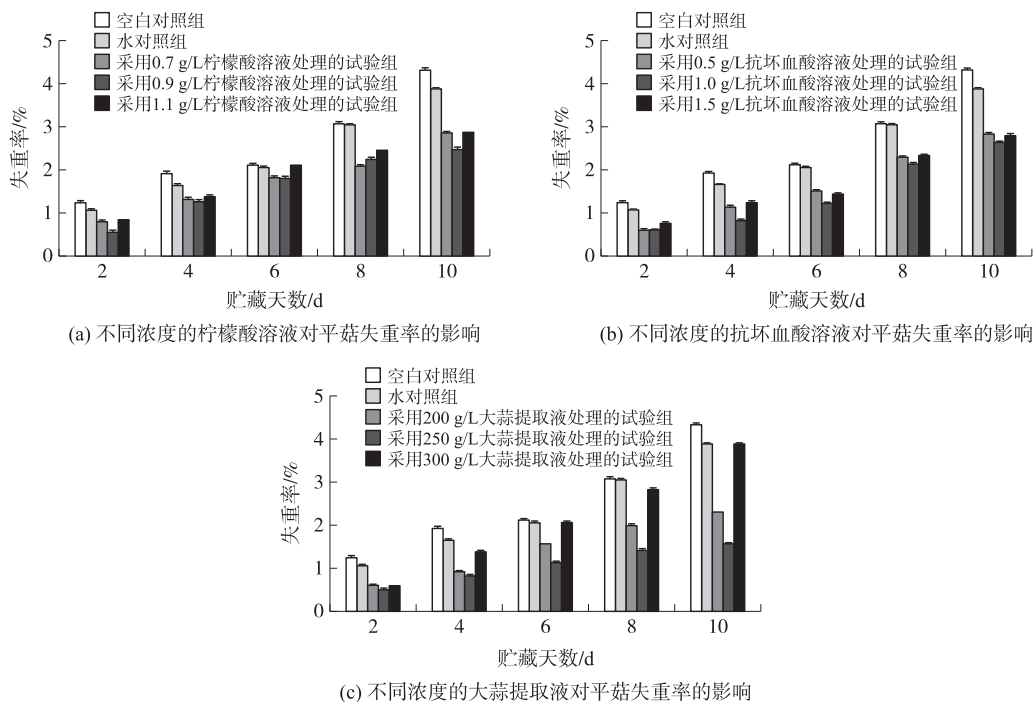


图 1 不同保鲜剂对平菇失重率的影响

Fig. 1 Effect of different preservatives on weight loss rate of *Pleurotus ostreatus*

2.1.2 腐烂指数

在整个试验过程中,仅有空白对照组和水对照组试验样品出现腐烂. 由此可知,选取的 3 种保鲜剂都具有明显的抑菌作用. 图 2 为不同单一保鲜剂对平菇进行处理后贮藏第 10 d 的图片.

2.1.3 感官评价分数

不同浓度的柠檬酸溶液、抗坏血酸溶液和大蒜提取液对平菇感官评定分数的影响如图 3 所示. 图 3 (a) 为柠檬酸浓度增加对感官评价分数的影响,结果显示其分数变化不大;随着贮藏时间的增加,柠檬酸处理组的感官评价分数下降速度较两个对照组更缓慢. 由图 3 (b) 可知,随着贮藏时间的增加,采用抗坏血酸处理的平菇在感官评价得分上表现出较慢的下降速率,且其得分均高于两个对照组. 由图 3 (c) 可知,随着贮藏时间的增加,大蒜提取液处理的平菇感官评价分数始终高于两个对照组.

2.1.4 褐变度

褐变度是衡量平菇品质的关键指标之一^[35],平菇的褐变度通常在采摘后呈现上升趋势^[36-37]. 图 4 为采用不同浓度的柠檬酸、抗坏血酸和大蒜提取液作为保鲜剂处理平菇,在贮藏 0~10 d 时平菇的褐变度变化图. 由图 4 (a)、(b) 可知,随着贮藏时间的延长,平菇的褐变程度普遍上升. 采用柠檬酸和抗坏血酸处理显著降低了平菇的褐变度,与两个对照组相比,差异均达到了显著 ($P < 0.05$). 当柠檬酸、抗坏血酸的浓度逐渐升高时,平菇的褐变程度表现为先减少后增加的趋势. 褐变度的上升趋势可归因于柠檬酸的过量添加,使周围环境的 pH 值过低,促进褐变的发生^[38];或过多抗坏血酸被氧化分解而积累较多脱氢抗坏血酸,该物质能够与氨基酸发生反应,从而加速褐变过程^[39]. 柠檬酸和抗坏血酸处理后的平菇褐变度分别于 0.9 g/L 和 1.0 g/L 时达到最低,因此确定柠檬酸和抗坏血酸的最佳保鲜浓度分别为 0.9 g/L 和 1.0 g/L. 如图 4 (c) 所示,平菇在贮藏期间内褐变度普遍上升,但经大蒜提取液处理的试验组与水对照组相比,其褐变程度显著降低 ($P < 0.05$). 图中褐变度于 250 g/L 时达到最低,因此复配时选用 250 g/L 的大蒜提取液作为复配成分.



图2 不同保鲜剂对平菇外观腐烂程度的影响

Fig. 2 Effect of different preservatives on the degree of decay of the appearance of *Pleurotus ostreatus*

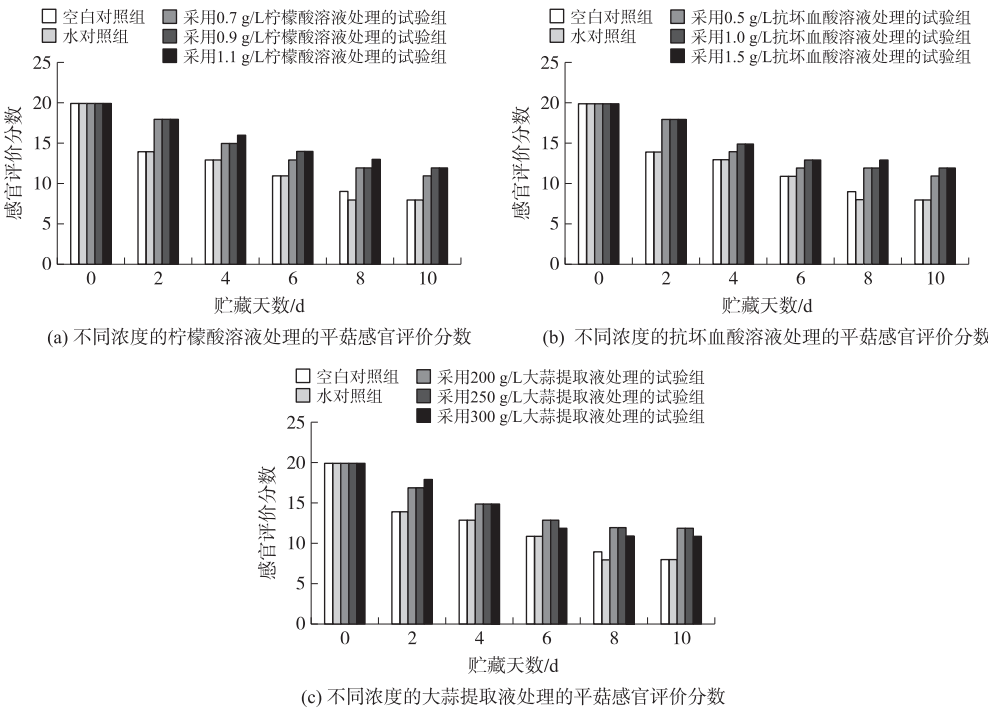


图3 不同保鲜剂对平菇的感官评价分数的影响

Fig. 3 Effect of different preservatives on the sensory evaluation scores of *Pleurotus ostreatus*

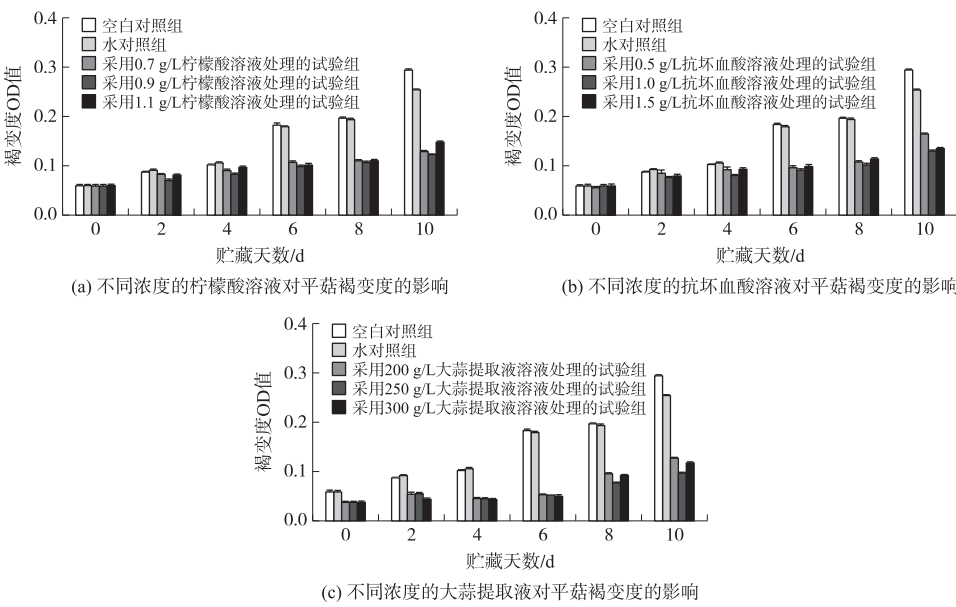


图 4 不同保鲜剂对平菇褐变度的影响

Fig. 4 Effects of different preservatives on the browning degree of *Pleurotus ostreatus*

2.2 响应面分析

2.2.1 响应面试验设计及结果

基于单因素试验结果,采用 Box-Behnken 设计方法,进行 3³RSM 分析试验,分别分析了大蒜提取液浓度(A)、抗坏血酸浓度(B)和柠檬酸浓度(C)对褐变度(Y)的影响,结果见表 3.

表 3 响应面试验设计及结果

Table 3 Design and results of response surface experiment				
试验号	A(大蒜提取液浓度/(g/L))	B(抗坏血酸浓度/(g/L))	C(柠檬酸浓度/(g/L))	Y(褐变度)
1	250	1.5	0.7	1.341
2	300	0.5	0.9	1.336
3	250	1.5	1.1	1.354
4	250	0.5	0.7	1.373
5	200	0.5	0.9	1.424
6	250	0.5	1.1	1.366
7	300	1	1.1	1.367
8	250	1	0.9	1.256
9	300	0.5	0.9	1.347
10	250	1	0.9	1.271
11	200	1	0.7	1.386
12	250	1	0.9	1.303
13	300	1	0.7	1.375
14	250	1	0.9	1.266
15	200	1.5	0.9	1.347
16	200	1	1.1	1.411
17	300	1.5	0.9	1.359

2.2.2 响应面方差分析

采用多元回归分析方法对试验结果进行拟合,构建了一个以综合评分为目标函数、各参数编码值的多元二次方程: $Y=+1.27-0.015\ 7A-0.012\ 9B+0.002\ 9C+0.023\ 6AB-0.008\ 3AC+0.005\ 0BC+0.060\ 1A^2+0.033\ 8B^2+0.050\ 7C^2$. 对构建的多元二次回归模型进行显著性检验和方差分析(ANOVA),以验证模型的有效性,结果如表 4 所示.

从表 4 可知,该回归模型 P 值为 0.000 3, $P<0.01$,表明二次回归方程模型极显著;失拟项 P 值为 0.969 0, $P>0.05$,证实该模型具有较高拟合度;该回归模型 $R^2=0.962\ 5$,表明模型可充分拟合试验数据,Predicted $R^2=0.903\ 4$ 与 Adjusted $R^2=0.914\ 3$ 两者相差小于 0.2,说明模型具有较好的预测能力.

表 4 响应面方差分析
Table 4 ANOVA of response surface

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	P 值	显著性
模型	0.035 3	9	0.003 9	19.980 0	0.000 3	极显著
A	0.002 1	1	0.002 1	10.800 0	0.013 4	显著
B	0.001 4	1	0.001 4	7.350 0	0.030 2	显著
C	0.000 1	1	0.000 1	0.337 0	0.579 8	
AB	0.002 6	1	0.002 6	13.270 0	0.008 3	极显著
AC	0.000 3	1	0.000 3	1.390 0	0.277 3	
BC	0.000 1	1	0.000 1	0.509 6	0.498 4	
A ²	0.015 0	1	0.015 0	76.260 0	<0.000 1	极显著
B ²	0.004 7	1	0.004 7	24.170 0	0.001 7	极显著
C ²	0.010 7	1	0.010 7	54.310 0	0.000 2	极显著
残差	0.001 4	7	0.000 2			
失拟项	0.000 1	3	0.000 0	0.077 2	0.969 0	不显著
净误差	0.001 3	4	0.000 3			
总和	0.036 7			16	$R^2=0.969\ 0; R^2_{\text{adj}}=0.914\ 3; R^2_{\text{pre}}=0.903\ 4$	

综合上述结果,该模型可以较好地模拟平菇褐变度的具体情况,可用来预测复合保鲜剂最优配方. 由方差分析可知,在所有影响因素中,一次项 A 大蒜提取液浓度、B 抗坏血酸浓度对褐变度的影响程度达显著水平 ($P<0.05$),而交互项 AB 和二次项 A²、B²、C² 对褐变度的影响程度达极显著水平 ($P<0.01$),褐变度与各影响因素不是单纯的线性相关,不仅受各单因素的影响,一定程度上也受到各因素间的交互影响. 在选定的因素水平的范围内,各因素对褐变度影响程度的顺序为: A 大蒜提取液浓度>B 抗坏血酸浓度>C 柠檬酸浓度.

图 5~图 7 是褐变度响应面及等高线图. 响应曲面的坡度反映了各因素对响应值的影响程度,坡面越陡,影响程度越大. 等高线图反映了各因素间交互作用的强度,椭圆代表显著,规则圆状表示不显著. 由图 5 可见,在一定范围内,随着大蒜提取液浓度与柠檬酸浓度增加,褐变度先降后升,整体图像呈弧形;靠近大蒜提取液等高线密集,说明大蒜提取液对褐变度影响比柠檬酸明显. 由图 6 可见,随着大蒜提取液与抗坏血

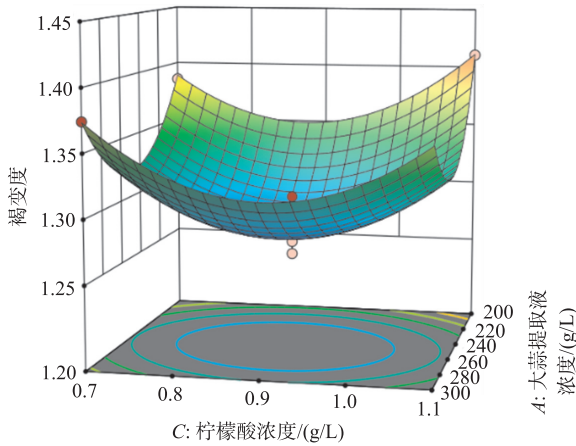


图 5 不同浓度柠檬酸和大蒜提取液的交互作用
Fig. 5 Interaction of different concentrations of citric acid and garlic extract solution

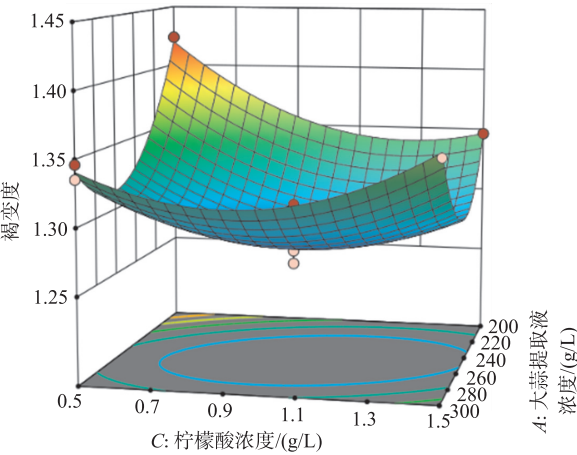


图 6 不同浓度抗坏血酸和大蒜提取液的交互作用
Fig. 6 Interaction of different concentrations of ascorbic acid and garlic extract solution

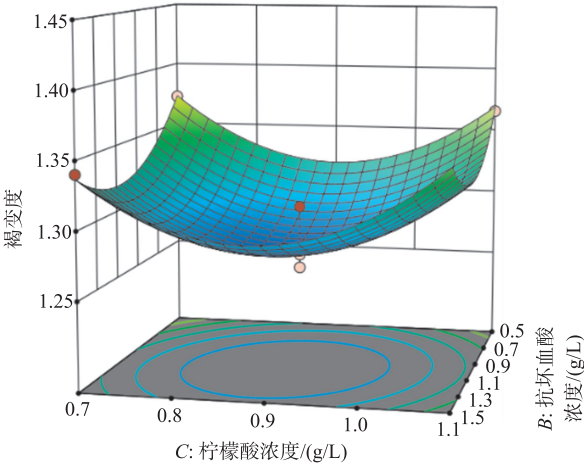


图 7 不同浓度柠檬酸和抗坏血酸溶液的交互作用
Fig. 7 Interaction of citric acid and ascorbic acid solutions at different concentrations

酸浓度增加,褐变度先降后升,等高线呈椭圆形,说明大蒜提取液、抗坏血酸对褐变度影响大. 由图 7 可见,随着柠檬酸与抗坏血酸浓度增加,褐变度先降后升,整体图像是弧形,等高线呈椭圆形,靠近抗坏血酸的一端等高线密集,曲面坡度陡,说明抗坏血酸对褐变度影响大. 由图可观察出曲面有最小值,故对回归方程求偏导,可得到模型预测的褐变度最低值. 当柠檬酸浓度为 0.9 g/L,抗坏血酸浓度为 1.0 g/L,大蒜提取液浓度为 250 g/L 时,平菇褐变度最小值为 1.256.

2.2.3 最佳工艺条件预测及验证

根据二阶拟合的模型,结合响应面分析,选择褐变度最低值为优化目标,最终预测得出试验最佳工艺条件为:A 大蒜提取液浓度为 254.88 g/L、B 抗坏血酸浓度为 1.08 g/L 和 C 柠檬酸浓度为 0.894 g/L,此时褐变度为 1.27. 经试验验证发现,在该条件下得到的褐变度为 1.33,与预测值偏差小于 5%,说明模型复现效果良好,满足试验需求.

2.3 复合保鲜剂保鲜效果试验

2.3.1 复合保鲜剂对平菇腐烂指数的影响

单一保鲜剂和复合保鲜剂处理后的平菇在贮藏周期内未出现腐烂现象,仅空白对照组和水对照组出现腐烂. 这表明无论是复合型保鲜剂还是单一保鲜剂,都能有效延长平菇的货架期. 图 8 为平菇经复合保鲜剂进行处理后贮藏第 10 d 时的照片.



图 8 复合保鲜剂对平菇贮藏期间外观及品质的影响

Fig. 8 Effect of composite preservatives on the appearance and quality of *Pleurotus ostreatus* during storage

2.3.2 复合保鲜剂对平菇失重率、感官评定和褐变度的影响

图 9 为复合保鲜剂保鲜效果试验图. 图 9(a) 为不同保鲜剂对平菇失重率的影响,由图可知,经复合保鲜剂处理后的平菇失重率明显低于各种单一保鲜剂处理组. 图 9(b) 为不同保鲜剂对平菇感官评价分数的影响,相较于两个对照组,经复合保鲜剂处理明显提升了平菇的感官评价分数. 贮藏 0~4 d 时,复合保鲜剂与单一保鲜剂的感官评价分数相差不大;6~10 d 时,复合保鲜剂的感官评价分数均高于单一保鲜剂,表现出较好的保鲜效果. 图 9(c) 为不同保鲜剂对平菇褐变度的影响,由图可知,复合保鲜剂处理的平菇褐变度始终低于单一保鲜剂处理组. 因此,复合保鲜剂与单一保鲜剂相比,更有利于延缓褐变、降低失重率,具有更好的保鲜效果.

3 结论

本研究考虑平菇自身的生理特性、贮藏过程中易受外部影响等因素,成功复配了一种复合保鲜剂,并对其保鲜效果进行了试验分析. 通过优化柠檬酸、抗坏血酸和大蒜提取液的浓度配比,跟踪对比 10 d 内平菇失重率、腐烂指数、感官评价分数和褐变度的变化. 通过响应面试验和验证试验,得出复合保鲜剂最佳配方浓度为柠檬酸 0.9 g/L、抗坏血酸 1.0 g/L 和大蒜提取液 250 g/L. 通过交互影响褐变度响应面分析发

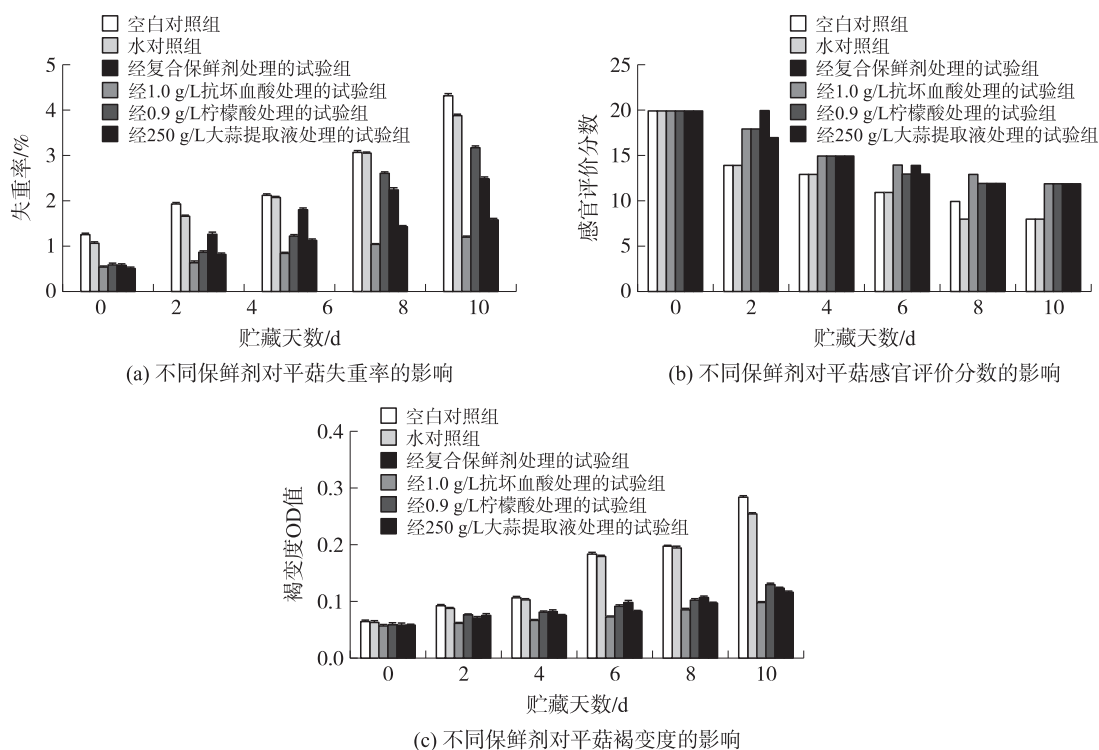


图9 复合保鲜剂保鲜效果试验

Fig. 9 Preservation effect test of composite preservative

现,抗坏血酸和大蒜提取液之间的交互作用极显著 ($P < 0.01$),且具有协同作用,所以可以利用大蒜提取液和两种酸性保鲜剂之间的协同效应,显著提升平菇的保鲜期.与单一保鲜剂相比,三者成本效益高、所需用量小、能更有效地延缓平菇子实体失重率和腐烂率,调节机体内褐变代谢活动的速率,且不会改变平菇的风味和外观,同时满足了消费者对食品安全的期望,因此具有广泛的应用前景.当然,复合保鲜剂保鲜的长期效果可能会因为其中的有效成分被氧化而减弱,长期贮藏可能会导致平菇营养成分损失,当贮藏时间超过 10 d 时,大蒜提取液可能产生不良气味而影响平菇的商品价值.未来研究可以进一步探索复合保鲜剂在不同环境条件下的应用效果,以及其对平菇营养成分的影响.

[参考文献] (References)

- [1] 马超,徐帆,王瑞,等. 平菇复合保鲜剂筛选及其贮藏效果研究[J]. 食品科技,2020,45(8):242-247.
- [2] EFFIONG M E, UMEOKWOCHI C P, AFOLABI I S, et al. Assessing the nutritional quality of *Pleurotus ostreatus* (oyster mushroom)[J]. Frontiers in Nutrition,2024,10:1279208.
- [3] UCAR T M, KARADAG A. The effects of vacuum and freeze-drying on the physicochemical properties and in vitro digestibility of phenolics in oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019,13(3):2298-2309.
- [4] 孙亚男,赵淑芳,李文香,等. 不同预冷方式及贮藏温度对采后平菇保鲜效果的影响[J]. 包装与食品机械,2015,33(4):15-20.
- [5] SU D B, LV W Q, WANG Y, et al. Influence of microwave hot-air flow rolling dry-blanching on microstructure, water migration and quality of *pleurotus eryngii* during hot-air drying[J]. Food Control,2020,114:107228.
- [6] QI Y, LI C L, LI H, et al. Elimination or removal of ethylene for fruit and vegetable storage via low-temperature catalytic oxidation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2021,69(36):10419-10439.
- [7] GUO Y X, CHEN X F, GONG P, et al. Effect of shiitake mushrooms polysaccharide and chitosan coating on softening and browning of shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) during postharvest storage [J]. International Journal of Biological Macromolecules,2022,218:816-827.
- [8] CAI M H, ZHANG G, LI C Z, et al. *Pleurotus eryngii* polysaccharide nanofiber containing pomegranate peel polyphenol/chitosan

- nanoparticles for control of *E. coli* O157:H7[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 192: 939–949.
- [9] MARCAL S, SOUSA A S, TAOFIQ O, et al. Impact of postharvest preservation methods on nutritional value and bioactive properties of mushrooms[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 110: 418–431.
- [10] ARTÉS-HERNÁNDEZ F, CASTILLEJO N, MARTÍNEZ-ZAMORA L, et al. Phytochemical fortification in fruit and vegetable beverages with green technologies[J]. Foods (Basel, Switzerland), 2021, 10(11): 2534.
- [11] MA N, ZHONG L, ZHAO L Y, et al. Effects of drying methods on non-volatile taste components of *tuber indicum*[J]. Current Topics in Nutraceutical Research, 2018, 16(1): 21–27.
- [12] BERNÁS E, JAWORSKA G. Vitamins profile as an indicator of the quality of frozen *Agaricus bisporus* mushrooms[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2016, 49: 1–8.
- [13] TAOFIQ O, FERNANDES A, BARROS L, et al. UV-irradiated mushrooms as a source of vitamin D₂: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 70: 82–94.
- [14] CHEN X N, JIN W B, DONG Y R, et al. Research progress in preservation of postharvest edible fungi[J]. Advanced Materials Research, 2012, 476/477/478: 614–619.
- [15] 付有亮, 黄坤宇. 大蒜提取液的抑菌作用研究[J]. 食品安全导刊, 2022(6): 90–93.
- [16] 刘丽珍, 甄莉娜, 崔乃忠, 等. 大蒜素的提取及抑菌效果研究[J]. 中国调味品, 2021, 46(2): 79–82.
- [17] 代博仁. 大蒜乙醇提取物对腐败芽孢杆菌及其生物膜的抑制作用[D]. 雅安: 四川农业大学, 2020.
- [18] 曹薇. 脱臭大蒜提取物对鸭梨保鲜效果的初步研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2017.
- [19] 田晶, 李俊. 紫皮蒜大蒜素提取工艺优化及其抗氧化和抑菌活性研究[J]. 食品科技, 2023, 48(9): 167–174.
- [20] ZHANG X, LAN W Q, XIE J. Combined citric acid and rosemary extract to maintain the quality of chilled Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(7): e15614.
- [21] 张鲁斌, 宋康华, 谷会, 等. 柠檬酸处理对鲜切粉葛褐化保鲜效果研究[J]. 热带作物学报, 2017, 38(6): 1143–1148.
- [22] ZHENG X Z, GONG M, ZHANG Q D, et al. Metabolism and regulation of ascorbic acid in fruits[J]. Plants, 2022, 11(12): 1602.
- [23] 邓钦予, 张杨涛, 郑果, 等. 外源抗坏血酸对鲜切竹根姜保鲜特性的影响[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(5): 176–183.
- [24] GUNKO S, TRYNUCHUK O, PODPRIATOV H, et al. Changes in the quality parameters of mushrooms depending on the duration and conditions of storage[J]. Food Science and Technology, 2021, 15(1): 125–135.
- [25] 付伟, 焦云红, 王更先, 等. 复方保鲜剂在平菇采后保鲜中的应用研究[J]. 北方园艺, 2014(18): 151–154.
- [26] 王璐. 肉桂酸复合保鲜剂对海鲜菇采后保鲜研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2019.
- [27] 许原, 张梦奇. 3种天然保鲜剂对凤尾菇的保鲜效果[J]. 食品工业科技, 2018, 39(16): 253–257.
- [28] LI F H, HAN Q, WANG W X, et al. Carboxymethyl chitosan-based coatings loaded with glutathione extend the shelf-life of harvested enoki mushrooms (*Flammulina velutipes*) [J]. LWT, 2022, 166: 113807.
- [29] CASTELLANOS-REYES K, VILLALOBOS-CARVAJAL R, BELDARRAIN-IZNAGA T. Fresh mushroom preservation techniques[J]. Foods (Basel, Switzerland), 2021, 10(9): 2126.
- [30] 刘丽, 徐洪岩, 姜俊凤. 不同抗氧化剂对鲜切马铃薯褐变的抑制效果[C]//2018年中国马铃薯大会论文集. 邵通, 中国: 中国作物学会, 2018.
- [31] ABDIPOUR M, HOSSEINFARAH M, NASERI N. Combination method of UV-B and UV-C prevents post-harvest decay and improves organoleptic quality of peach fruit[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 256: 108564.
- [32] 张志敏, 侯彦双, 张兵, 等. 大蒜提取液对新鲜树莓保鲜效果的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(9): 299–305.
- [33] MISHRA B B, GAUTAM S, SHARMA A. Free phenolics and polyphenol oxidase (PPO): The factors affecting post-cut browning in eggplant (*Solanum melongena*) [J]. Food Chemistry, 2013, 139(1/2/3/4): 105–114.
- [34] 张志敏, 侯发民, 李晓明, 等. 大蒜素处理对刺梨采后贮藏保鲜效果的影响[J]. 食品工业, 2020, 41(9): 205–209.
- [35] 张鹏. 不同贮藏温度对灰平菇品质影响及货架期预测模型的建立[J]. 热带农业科学, 2021, 41(12): 53–58.
- [36] 高帅平, 田广瑞, 李顺峰, 等. 不同气调保鲜对平菇贮藏品质和理化性质的影响[J]. 中国瓜菜, 2024, 37(4): 79–86.
- [37] GONG M, ZHANG T Y, WU Y Y, et al. Synergizing postharvest physiology and nanopackaging for edible mushroom preservation[J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141099.
- [38] 赵欣, 韩建欣, 武晋海, 等. 响应面法优化复合护色剂对柿汁褐变的影响[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(1): 146–153.
- [39] 肖川泉, 张楠, 罗小丹, 等. 南酸枣复合果泥配方与护色工艺的优化研究[J]. 中国调味品, 2024, 49(1): 25–32.

[责任编辑: 严海琳]