

护色保脆剂对鱼香肉丝辅料品质的变化

杨爽¹, 何丽^{1,2}, 但利¹, 刘洪^{1,2}, 周巧丽³, 刁尚鹏⁴, 邢亚阁^{1*}

(1. 西华大学食品与生物工程学院, 食品微生物四川省重点实验室, 川渝共建特色食品重庆市重点实验室, 四川成都 611743)

(2. 宜宾西华大学研究院食品非热技术重点实验室, 四川宜宾, 644000)(3. 成都全益食品有限公司, 四川成都

610200)(4. 德昌茂源长童耳朵食品有限公司, 四川凉山 615000)

摘要: 鱼香肉丝辅料的品质对其口感、色泽和质构具有重要影响。该实验以鱼香肉丝辅料为原料, 为探究护色保脆剂对鱼香肉丝辅料品质的影响, 选用抗坏血酸钙、氯化钠质量浓度以及浸泡时间三个因素进行了单因素实验, 并且以鲜笋、木耳硬度值和鲜笋 W 值为指标测定护色保脆剂对鱼香肉丝辅料品质的影响, 最后采用 Box-Beheken 响应面分析法确定了最优的氯化钠质量浓度、抗坏血酸钙质量浓度以及浸泡时间。研究表明: 最佳工艺条件为氯化钠质量浓度 0.8 g/100 mL, 抗坏血酸钙质量浓度 0.06 g/100 mL, 浸泡时间 15 min。在该工艺条件下, 预测出鲜笋 W 值 77.15、鲜笋硬度值 2 484.62 g、木耳硬度值为 352.79 g。经验证, 实际得到的鲜笋 W 值为 77.09, 鲜笋硬度值为 2 480.16 g, 木耳的硬度值为 350.18 g。综上所述, 所建立的响应曲面试验模型可以应用于实际数据的预测并且该条件下处理的鱼香肉丝辅料具有更好的感官特性, 品质最佳。该研究成果为后续鱼香肉丝辅料的护色提供了重要的数据参考信息。

关键词: 鱼香肉丝; 护色保脆剂; 单因素; 响应面分析法

文章编号: 1673-9078(2025)10-231-240

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.10.1076

Effects of Color and Crispness Protection Agents on Fish-flavored Shredded Pork Accessories

YANG Shuang¹, HE Li^{1,2}, DAN Li¹, LIU Hong^{1,2}, ZHOU Qiaoli³, DIAO Shangpeng⁴, XING Yage^{1*}

(1. College of Food and Biological Engineering, Xihua University, Sichuan Key Laboratory of Food Microbiology, Chongqing Key Laboratory of Sichuan-Chongqing Co-construction of Characteristic Food, Chengdu 611743, China)(2. Key Laboratory of Food Non-Thermal Technology, Institute of Xihua University, Yibin 644000, China)(3. Chengdu Quanyi Food Co. Ltd., Chengdu 610200, China)(4. Dechang Maoyuan Changtong Ear Food Co. Ltd., Liangshan 615000, China)

Abstract: The quality of accessories in fish-flavored shredded pork considerably affects its taste, color, and texture. Using the accessories of fish-flavored shredded pork as raw materials, this study was performed to explore the effect of color and crispness protection agents on their quality. Three factors (calcium ascorbate mass concentration, sodium chloride mass concentration, and soaking time) were evaluated in single-factor experiments. The effect of color and crispness protection agents on the quality of fish-flavored shredded pork accessories was determined using the hardness values of fresh bamboo shoots and black fungus and the W value of fresh bamboo shoots as indicators. According to Box-Beheken response surface analysis, the optimal sodium chloride concentration, calcium ascorbate concentration, and soaking time were estimated as 0.8 g/100 mL, 0.06 g/100 mL, and 15 min,

引文格式:

杨爽,何丽,但利,等.护色保脆剂对鱼香肉丝辅料品质的变化[J].现代食品科技,2025,41(10):231-240.

YANG Shuang, HE Li, DAN Li, et al. Effects of color and crispness protection agents on fish-flavored shredded pork accessories [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(10): 231-240.

收稿日期: 2024-07-24; 修回日期: 2024-08-30; 接受日期: 2024-09-13

基金项目: 四川省科技计划项目 (2024YFHZ0207); 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目 (cstc2021 jscx-cy1hX0014)

作者简介: 杨爽 (1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品保鲜, E-mail: 18383138661@163.com

通讯作者: 邢亚阁 (1980-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: xingyage1@aliyun.com

respectively. Under these processing conditions, the predicted W value of fresh bamboo shoots was 77.15, hardness value of fresh bamboo shoots was 2 484.62 g, and hardness value of fungus was 352.79 g. Empirical results showed that the W value of fresh bamboo shoots was 77.09, hardness value of fresh bamboo shoots was 2480.16 g, and hardness value of black fungus was 350.18 g. In summary, the established response surface test model can be applied to predict actual data, and fish-flavored shredded pork accessories treated under these conditions exhibited better sensory properties and optimal quality. These results provide important data and reference information for the color protection of fish-flavored shredded pork accessories.

Key words: fish-flavored shredded pork; color and crispness protection agent; single factor; response surface analysis

四川著名的鱼香肉丝，其成品呈鲜红色，十分诱人。鱼香肉丝的主要食材包括猪肉，而竹笋和黑木耳则是其重要的辅料。已有研究表明，鱼香肉丝不仅美味，还具备抗心血管、慢性病、神经退行性疾病和某些肿瘤等多种疾病的潜在功效。但是，然而，在高温杀菌（ $\geq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）处理后，鱼香肉丝中的辅料如木耳和鲜笋常会出现颜色变黄、质地变软的现象，这对制品的品质产生了很大的影响，最后导致了消费者的食欲下降^[1-4]。

为了保持辅料的色泽和质构，防止其褐变，已有的技术主要集中在生鲜蔬菜、鲜果等产品的防褐变处理上。这些技术主要通过使用特定的食品添加剂或者优化处理方式来实现，目的是延长产品的色泽保鲜期，而非单纯的防腐处理^[4-6]。针对鱼香肉丝辅料的特性，探索适宜的护色保脆技术显得尤为重要。梁娇等^[7]用不同方法对瓜瓢进行了护色，并用响应曲面法对制品的配方及护色工艺进行了研究。王新惠等^[8]通过对竹笋香辣酱的护色、保脆试验，找出了竹笋香辣酱的最优工艺参数。在此基础上，张婷等^[9]研究了鲜切牛蒡子的护色和保脆作用，并采用响应面分析方法对其进行了优化，发现了半胱氨酸、抗坏血酸钙以及乳酸钙对鲜切牛蒡子的护色和保脆作用均有最佳的护色和保脆作用。Mola 等^[10]用亚氯酸钠、氯化钙、抗坏血酸钙三种不同质量浓度的水溶液浸泡 3 min 后，发现这种护色和保脆剂可以延缓水果的褐变，并使其硬度保持不变。Sillveria 等^[11]将加利亚瓜切片用抗坏血酸钙、氯化钙和乳酸钙混合液浸泡 1 min 后，发现该护色和保脆剂既能保证加利亚瓜的硬度，又不影响其风味。抗坏血酸钙，即维生素 C 的钙盐，是一种强效的抗氧化剂。在食品保鲜领域，抗坏血酸钙被广泛用于防止食品因氧化而变色和营养损失。它能够通过清除自由基、稳定色素分子等方式，有效延缓食品特别是富含多酚类物质的鲜笋和黑木耳的褐变过程。因此，本研究选择抗坏血酸钙作为护色剂的主要成分，旨在通过其抗氧化作用提升鱼香肉丝辅料的色泽稳定性^[3]。

本文以鱼香肉丝辅料为原料，对其护色、保脆性

进行了研究。以黑木耳、鲜笋为材料，采用单因素实验法，研究了抗坏血酸钙质量浓度、氯化钠质量浓度及浸泡时间对鲜笋颜色及硬度的影响，最后，采用响应面法得到了护色保脆的最佳工艺条件。在本研究中，虽然鱼香肉丝的完整配方并非直接研究对象，但为了确保实验结果的实用性和参考价值，在辅料的处理与配比上，参照了权威教材《中国烹饪概论》中的相关章节，并在实践中进行了多次验证与调整^[12]。这一不仅使得实验结果更具可靠性，也为后续川菜产业发展中遇到的蔬菜黄化、软化等难题提供了重要的理论依据和技术支持^[12]。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

鲜笋，购于成都市红光镇如意冻品水产；木耳，购于成都红光沃尔玛有限公司；铝箔真空袋，由裕华包装有限公司提供；氯化钠、抗坏血酸钙（食品级），均购于成都迪维乐普科技有限公司。

G154DWS 全自动高压灭菌锅，致微（厦门）仪器有限公司；WF32 精密色差仪，深圳市威福光电科技有限公司；TA-XTPLUS 质构仪，英国 StableMicroSystems 公司；TW-BZJ-2-4 真空包装机，上海沃迪股份有限公司；BCD-361WPCX 冰箱，合肥美菱股份有限公司；IJ59E 电磁炉，浙江尼泊尔有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 原料的处理

以新鲜竹笋为材料，将其洗净、晾干、切段（长 $7\text{ cm}\times 0.4\text{ cm}\times 0.4\text{ cm}$ ），分别以氯化钠浓度（0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 g/100 mL）、抗坏血酸钙浓度（0、0.02、0.04、0.06、0.08、0.1、0.12 g/100 mL）、浸泡时间（0、5、10、15、20、25、30 min）的浸泡液中浸泡，固液质量浓度比 1:2.5（g/mL），取出晾干，放入铝箔真空袋抽真空，经过高温灭菌（ $121\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，15 min），然后在室温（ $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）贮藏 6 d，检测色差、质构、感官。

1.2.2 护色剂选择的单因素实验

为了明确探究不同因素对鲜笋和木耳护色保脆效果的具体影响，本研究采用了单因素试验设计方法。如表 1 所示，试验过程中，逐一考察了氯化钠质量浓度、抗坏血酸钙质量浓度以及浸泡时间这三个关键因素。在保持抗坏血酸钙质量浓度为 0.06 g/100 mL 和浸泡时间为 15 min 的条件下，设置多个水平的氯化钠质量浓度（0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 g/100 mL），分别进行试验，以观察不同浓度对鲜笋和木耳护色保脆效果的影响。同样地，在固定氯化钠质量浓度为 0.8 g/100 mL 和浸泡时间为 15 min 的前提下，改变抗坏血酸钙的质量浓度（0、0.02、0.04、0.06、0.08、0.1、0.12 g/100 mL），逐一检测各浓度下的护色保脆效果。在控制氯化钠质量浓度为 0.8 g/100 mL 和抗坏血酸钙的质量浓度为 0.06 g/100 mL 的条件下，设置不同的浸泡时间（0、5、10、15、20、25、30 min），以评估浸泡时长对鲜笋和木耳品质的影响。通过感官评定、色泽测定和质构分析，全面评估了不同处理条件下鲜笋和木耳的护色保脆效果，最终优选出了各自因素下最佳的护色保脆条件。

表 1 单因素护色保脆试验								
Table 1 Single factor test of color-protecting								
护色剂		实验条件						
氯化钠/(g/100 mL)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	
抗坏血酸钙/(g/100 mL)	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.12	
浸泡时间/min	0	5	10	15	20	25	30	

1.2.3 响应面试验设计（Box-Behnken）

在单因素试验的基础上，确定了氯化钠、抗坏血酸钙和浸泡时间的最佳工艺条件。采用 Design-Expert 8.0.6 软件进行三因素三水平响应面实验，确定各影响因素对鱼香肉丝辅料护色、保脆效果。护色保脆剂配方优化的 Box-Beheken 如表 2 所示。

表 2 Box-Beheken试验因素与水平			
Table 2 Factors and levels of Box-Beheken test			
水平	A 氯化钠/ (g/100 mL)	B 抗坏血酸钙/ (g/100 mL)	C 浸泡时间/ min
-1	0.6	0.04	10
0	0.8	0.06	15
1	1.0	0.08	20

1.2.4 色泽的测定及色差的计算方法

利用色差仪对新鲜竹笋中部的表皮的色差进行检测，其色差值， W 越大表示鲜笋的颜色越白。亨特白度 W 计算公式为^[13]：

$$W=100-[(100-L)^{*2}+a^{*2}+b^{*2}]^{\frac{1}{2}}$$

(1)

式中：
 W ——白度指数；
 L ——色差明亮度；
 a^{*} ——红绿值；
 b^{*} ——黄绿值。

1.2.5 质构的测定

参考马银鹏等^[14]的方法，略有修改后测定。本实验选用 P/36R 探头进行测试。TPA 主要工作参数：测试前速度 2.0 mm/s，测试中速度 2.0 mm/s，测试后速度 1.0 mm/s，竹笋位移 2 mm、木耳形变 70%，触发力 5.0 g。分别测量硬度、弹性、咀嚼度，取 3 组平行样测定的平均值。

1.2.6 感官的测定

感官评价组成员由食品与生物工程学院的 20 名学生组成，其中男女生比例为 1:1，对实验中的黑木耳、鲜竹笋进行了感官评价，其中木耳感官评定标准见表 3，鲜笋感官评定标准见表 4^[15-17]。

表 3 木耳感官评分标准		
Table 3 Sensory rating criteria for agaric fungus		
项目	评定标准	得分
色泽 (25分)	形状饱满，表面平滑，色泽接近黑木耳	21~25
	形状较饱满，表面较平滑，色泽较浅	11~20
	形状不饱满，表面不平滑，色泽浅棕，无黑色	0~10
气味 (25分)	具有木耳应有的气味，无异味	21~25
	木耳味道弱，无异味	11~20
	风味较差，有明显异味	0~10
口感 (25分)	柔软，有脆感	21~25
	较柔软，稍有脆感	11~20
	不柔软，无脆感	0~10
滋味 (25分)	具有木耳应有的滋味	21~25
	木耳味道弱，滋味一般	11~20
	滋味较差	0~10

表 4 鲜笋感官评分标准		
Table 4 Sensory evaluation criteria for fresh bamboo shoots		
项目	评定标准	得分
色泽 (25分)	组织比较饱满，笋丝颜色稍黄	21~25
	组织比较饱满，笋丝颜色稍黄	11~20
	组织软烂，笋丝与鲜笋色泽相似度差	0~10
气味 (25分)	具有鲜笋应有的气味，无异味	21~25
	鲜笋味道较弱，无异味	11~20
	风味较差，有明显异味	0~10
口感 (25分)	脆嫩适中	21~25
	较脆嫩	11~20
	无或稍有脆嫩感	0~10
滋味 (25分)	具有鲜笋应有的滋味	21~25
	滋味较淡，但仍可品尝到鲜笋的甜味	11~20
	滋味较差	0~10

1.2.7 统计分析

所得数据以平均值 $\pm$ 标准差表示, 运用 SPSS 22.0 统计分析软件对数据进行分析, 采用 Origin 8.5 软件进行数据处理与统计分析, 试验数据均为 3 次重复测定结果的平均值。采用单因素方差分析样本间的显著性差异, $P < 0.05$ 表示显著性差异。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 氯化钠质量浓度对护色效果的影响

鱼香肉丝的品质主要取决于辅料的颜色和质地, 而鱼香肉丝的品质则直接关系到与顾客的满意程度。鲜笋经过高温杀菌后, 会出现发黄的现象, 这就会使它的色泽发生变化。一般用白度指数 (W) 来表示, 如果 W 值较小, 说明鲜笋的黄化情况比较严重^[18,19]。

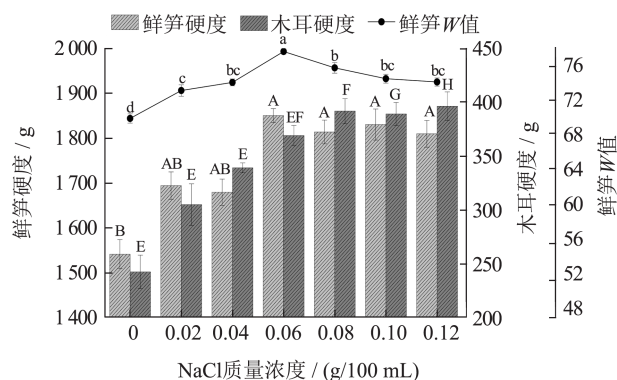


图 1 NaCl 质量浓度对鲜笋 W 值、硬度值及木耳硬度的影响

Fig.1 Effects of NaCl concentration on W value, hardness value and agaric hardness of fresh bamboo shoots

注: 图中不同字母表示数据间差异显著。下同。

从图 1 中可以看出, 氯化钠在一定质量浓度范围内 (0~0.6 g/100 mL) 能够显著提高鲜笋和木耳的硬度和护色效果, 这主要归因于氯化钠通过降低酶活性的具体机制。氯化钠通过调节细胞内外渗透平衡, 使得细胞内部的水分减少, 从而降低酶细胞的活性。当酶细胞的活性被抑制时, 其作用于底物的反应速率减缓, 进而减缓了鲜笋和木耳的软化及褐变过程^[19-21]。这种机制可能涉及对酶活性位点的直接或间接影响, 如改变酶构象或阻碍底物与酶的结合。但是在质量浓度为 0.8 g/100 mL 时, 鲜笋的硬度和 W 值稍微有点下降, 鲜笋硬度值从 1 540.57 g 增加到 1 849.81 g, 然后降低到了 1 813.16 g, 木耳的硬度值则从 242.17 g 上升到 399 g, 而鲜笋的 W 值幅度变化从 73.64 到达 75.99 的峰值后降低到了 75.26。这可能是由于高浓度盐溶液对细胞结构造成了一定程度的损伤, 影响了其

整体品质。因此, 在实际应用中, 需要找到一个平衡点, 既保证足够的护色保脆效果, 又避免对品质产生负面影响。但是, 增加氯化钠溶液的质量浓度, 对鲜笋和木耳的护色和保脆作用均不显著 ($P > 0.05$)。所以, 综合考虑以 0.8 g/100 mL 的氯化钠质量浓度对鲜笋和木耳的护色和保脆作用最好, 表明在此质量浓度下氯化钠对鲜笋和木耳的护色和保脆作用显著 ($P < 0.05$)。

2.1.2 抗坏血酸钙质量浓度对护色效果的影响

从图 2 可以看出, 在抗坏血酸钙质量浓度小于 0.06 g/100 mL 的情况下, 鲜笋的 W 值随抗坏血酸钙质量浓度的升高而升高, 从 70.14 上升到了 76.77。随着抗坏血酸钙质量浓度的增加, 鲜笋和木耳的硬度和色泽均得到显著改善。抗坏血酸钙作为抗氧化剂, 能够有效清除自由基, 防止脂质过氧化和色素降解, 从而保持辅料的鲜亮色泽和脆嫩口感。然而, 当浓度过高时, 其效果可能趋于饱和, 甚至产生负面影响^[22]。在抗坏血酸钙质量浓度为 0.08 g/100 mL 时, 鲜笋 W 值达到峰值 74.26。这可能与提高抗坏血酸钙的质量浓度和 pH 值有关, 抗坏血酸钙在水溶液中的稳定性与其 pH 值密切相关。一般来说, 随着抗坏血酸钙浓度的增加, 溶液的 pH 值可能会有所变化, 但这种变化通常较为微弱, 且受到溶液中其他成分 (如缓冲剂、电解质等) 的影响。然而, 抗坏血酸钙在碱性条件下容易发生氧化分解, 生成脱氢抗坏血酸, 从而降低其抗氧化活性, 这对铜离子的结合并不利^[23,24]。而在 0~0.08 g/100 mL 的抗坏血酸钙质量浓度范围内, 鲜笋硬度值一直增加从 1 786.27 g 增加到 2 345.79 g, 但是木耳的硬度值在 0.06 g/100 mL 达到峰值 466.67 g, 综合考虑护色效果和抗坏血酸的生产成本, 确定抗坏血酸质量浓度为 0.06 g/100 mL。

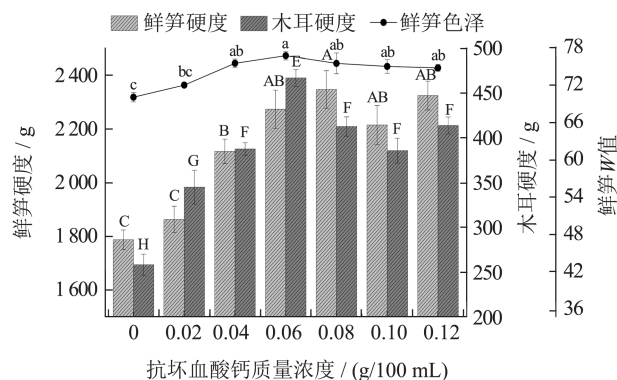


图 2 抗坏血酸钙质量浓度对鲜笋 W 值、硬度值及木耳硬度的影响

Fig.2 Effects of calcium ascorbate concentration on W value, hardness value and agaric hardness of fresh bamboo shoots

2.1.3 浸泡时间对护色效果的影响

浸泡时间对护色保脆剂在鲜笋和黑木耳中的渗透和扩散速率具有显著影响。护色保脆剂中的有效成分，如抗坏血酸钙和氯化钠，需要一定的时间才能充分渗透到食材的细胞结构中，发挥其护色和保脆的作用。护色保脆剂溶液的浸泡时间对鲜笋的 *W* 值、鲜笋以及黑木耳的硬度均有明显的提高 ($P<0.05$)。从图 3 可以看出，氯化钠质量浓度、浸泡时间对鲜笋、黑木耳硬度的影响规律基本一致，在质量浓度较低的情况下，随着氯化钠质量浓度的增大，各处理时间的延长，二者的硬度差异不大 ($P>0.05$)。

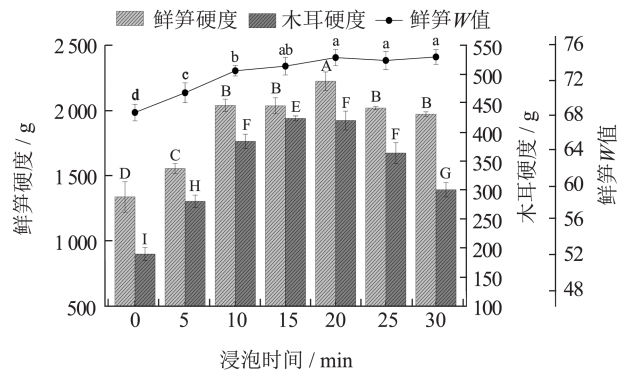


图 3 浸泡时间对鲜笋 *W* 值、硬度值及木耳硬度的影响
Fig.3 Effect of soaking time on *W* value, hardness value and agaric hardness of fresh bamboo shoots

浸泡时间从 0~15 min 时，三者的值几乎都在增加，在 0~10 min 时鲜笋硬度值从 1 337.67 g 增加到了 2 038.07 g，而随后在 15 min 时稍微降低至 2 035.39 g，木耳硬度值从 190.17 g 一直上升到了 420.12 g，鲜笋 *W* 值平稳上升，从 68.26 增加到 73.56。这表明护色保脆剂中的有效成分在食材内部的扩散速率也受浸泡时间的影响。随着浸泡时间的增加，有效成分在食材内部的分布更加均匀，从而提高了整体的护色和保脆效果。在浸泡时间为 15 min 时达到最佳效果，在此时间点，护色保脆剂中的有效成分与食材中的目标物质（如酶、色素等）发生了充分的化学反应，达到了一个相对稳定的平衡状态。这种平衡状态使得护色和保脆效果达到最佳。然而，当浸泡时间进一步延长至超过 15 min 时，鲜笋的硬度和 *W* 值略有下降，表明过长的浸泡时间可能对食材的质地产生不利影响。所以，在 0.8 g/100 mL 氯化钠质量浓度或浸泡时间为 15 min 的条件下，其保脆效果较好。在充分考虑 3 个因素对鲜笋与木耳护色和保脆作用的基础上，以成本效益为依据，选择了质量浓度为 0.06 g/100 mL 抗坏血酸钙、

0.8 g/100 mL 氯化钠以及浸泡时间为 15 min 的护色保脆剂作为响应面试验的中心点。

2.2 响应面优化试验结果

2.2.1 响应面优化试验结果与方差分析

在响应面优化试验中，以氯化钠质量浓度 (A)、抗坏血酸钙质量浓度 (B) 以及浸泡时间 (C) 三个因素作为自变量，分别考察了它们对鲜笋 *W* 值、鲜笋硬度和黑木耳硬度的影响。通过构建响应面模型，得到了不同因素组合下的预测响应值，并进行了方差分析以评估各因素的显著性及交互作用。

响应面试验方案和结果见表 5，添加护色剂后以鲜笋 *W* 值为回归模型方差分析见表 6，添加护色剂后以鲜笋硬度值为响应值的回归模型方差分析见表 7，添加护色剂后以木耳硬度值为响应值的回归模型方差分析见表 8。

表 5 响应面试验方案和结果						
Table 5 Response surface test scheme and results						
编号	因素和编码水平			响应值		
	A	B	C	鲜笋 <i>W</i> 值	鲜笋硬度/g	木耳硬度/g
1.00	0	0	0	74.32	1 899.02	398.43
2.00	0	0	0	74.10	1 594.40	380.27
3.00	-1	-1	0	74.38	1 588.53	380.82
4.00	0	-1	1	76.11	1 678.35	393.01
5.00	-	0	-1	74.09	1 639.44	352.79
6.00	-1	1	0	75.18	1 629.26	381.31
7.00	0	1	1	76.15	1 948.32	399.27
8.00	1	1	0	76.18	1 649.63	352.83
9.00	-1	0	1	74.14	1 697.15	358.64
10.00	1	0	1	76.10	1 500.03	370.01
11.00	0	0	0	75.86	1 683.57	384.09
12.00	0	0	0	76.49	1 798.98	356.00
13.00	0	-1	-1	76.86	2 477.83	426.61
14.00	0	1	-1	76.65	2 382.79	424.25
15.00	0	0	0	76.91	2 450.68	430.86
16.00	1	-1	0	77.15	2 379.40	428.50
17.00	1	0	-1	76.67	2 484.62	430.39

表 6 添加护色剂后以鲜笋 W 值为响应值的回归模型方差分析
Table 6 Variance analysis of regression model with W value of fresh bamboo shoots as response value after adding color protectors

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性程度
回归模型	19.33	9	2.15	45.17	<0.01	**
A	0.86	1	0.86	18.09	<0.01	**
B	2.71	1	2.71	56.98	<0.01	**
C	3.34	1	3.34	70.28	<0.01	**
AB	0.95	1	0.95	20.00	<0.01	**
AC	0.28	1	0.28	5.92	<0.05	*
BC	0.44	1	0.44	9.28	<0.01	**
A^2	5.90	1	5.90	124.02	<0.01	**
B^2	3.71	1	3.71	77.96	<0.01	**
C^2	0.30	1	0.30	6.21	<0.05	*
剩余	0.33	7	0.048			
失拟	0.17	3	0.056	1.34	0.380 7	不显著
纯误差	0.17	4	0.042			
总误差	19.67	16				
R^2	0.983 1					
R^2 adj	0.961 3					

注：* 表示差异较显著 ($P < 0.05$)，** 表示差异显著 ($P < 0.01$)。表 7、8 同。

经方差分析，三种回归模型的显著性 P 值都在 0.01 以内，调整决定系数 R^2 adj 都在 0.90 以上，失拟项结果不显著 ($P > 0.05$)，具有统计学意义，相关系数鲜笋 W 值 $R^2=0.983\ 1$ 、 R^2 adj=0.961 3，鲜笋硬度值

$R^2=0.993\ 3$ ， R^2 adj=0.984 7，木耳硬度值 $R^2=0.994\ 6$ ， R^2 adj=0.987 6。这表明鲜笋的 W 值和鲜笋木耳的硬度多元线性回归具有良好的相关性，其弹性值 R^2 adj=0.980 2、感官评分 R^2 adj=0.994 3，说明该模型拟合程度较高，可以很好的反映出各因素对响应值的影响，可以对鲜笋、木耳护色保脆的工艺参数进行分析预测。

鲜笋 W 值方程回归系数显著性检验表明，一次项 B、C 和二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 对弹性值有非常显著的影响，鲜笋硬度值方程回归系数显著性检验表明，一次项 A、B、C 和二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 对弹性值影响也极其显著，木耳硬度值方程回归系数显著性检验表明，一次项 A、B、C 和二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 对弹性值影响非常显著，说明各因素之间呈二次关系。所以影响鲜笋 W 值的因素顺序为 $C > B > A$ ，影响鲜笋和木耳硬度的因素顺序为 $C > A > B$ 。

综上，三个回归模型极显著、拟合度较高、响应灵敏和精确度高，可对鲜笋与木耳护绿保脆的工艺条件进行预测分析，回归方程分别为：

鲜笋 W 值 = $76.85 + 0.33A + 0.58B + 0.65C + 0.49AB - 0.27AC - 0.33BC - 1.18A^2 - 0.94B^2 - 0.26C^2$

鲜笋硬度 (g) = $2\ 435.06 - 65.46A - 38.53B + 76.83C + 98.61AB - 72.13AC + 78.13BC - 349.13A^2 - 395.86B^2 - 369.27C^2$

木耳硬度 (g) = $428.12 - 2.99A - 2.70B + 3.68C + 7.59AB - 18.74AC - 9.87BC - 17.81A^2 - 22.18B^2 - 38.76C^2$

表 7 添加护色剂后以鲜笋硬度值为响应值的回归模型方差分析
Table 7 Analysis of variance of regression model with hardness value of fresh bamboo shoots as response value after adding color protectant

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性程度
回归模型	2.13E+06	9	2.37E+05	115.59	<0.01	**
A	34 278.78	1	34 278.78	16.75	<0.01	**
B	11 877.26	1	11 877.26	5.8	<0.05	*
C	47 219.72	1	47 219.72	23.07	<0.01	**
AB	38 895.73	1	38 895.73	19.00	<0.01	**
AC	20 809.51	1	20 809.51	10.17	<0.05	*
BC	24 418.75	1	24 418.75	11.93	<0.05	*
A^2	5.13E+05	1	5.13E+05	250.73	<0.01	**
B^2	6.60E+05	1	6.60E+05	322.34	<0.01	**
C^2	5.74E+05	1	5.74E+05	280.50	<0.01	**
剩余	14 328.43	7	2 046.92			
失拟	3 968.79	3	1 322.93	0.51	0.696 1	不显著
纯误差	10 359.64	4	2 598.9			
总误差	2.14E+06	16				
R^2	0.993 3					
R^2 adj	0.984 7					

表 8 添加护色剂后以木耳硬度值为响应值的回归模型方差分析

Table 8 Analysis of variance of regression model with agaric hardness as response value after adding color protectant

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性程度
回归模型	1.30E+04	9	1.44E+03	142.34	<0.01	**
A	71.34	1	71.34	7.05	<0.05	*
B	58.27	1	58.27	5.76	<0.05	*
C	108.29	1	108.29	10.7	<0.05	*
AB	230.46	1	230.46	22.77	<0.01	**
AC	1 404.75	1	1404.75	138.76	<0.01	**
BC	389.37	1	389.37	38.46	<0.01	**
A ²	1.34E+03	1	1.34E+03	131.97	<0.01	**
A ²	2.07E+03	1	2.07E+03	204.59	<0.01	**
B ²	6.33E+03	1	6.33E+03	624.90	<0.01	**
C ²	70.86	7	10.12			
失拟	40.78	3	13.59	1.81	0.285 5	不显著
纯误差	30.08	4	7.52			
总误差	1.30E+04	16				
R ²	0.994 6					
R ² adj	0.987 6					

2.2.2 响应面各因素交互作用分析

响应面的陡峭程度可以直观地反映出各因素对响应值的影响，当曲线的斜率较大时，对应的因素对响应值的影响也会随之增大^[26,27]。等高线的形状可以直接反映出二者的相互作用。当等高线为椭圆时，表明它们之间存在着很强的相互作用，当等高线为圆弧时，它们之间的相互作用不显著^[28]。从图 4~12 可以看出，抗坏血酸钙质量浓度和氯化钠质量浓度以及浸泡时间之间的互作效应，对鲜笋的色泽、黑木耳及鲜笋的硬度均有明显的影响。这些因素之间的相互作用显示在图 4~12 中。在一定的质量浓度下，提高抗坏血酸钙质量浓度和氯化钠质量浓度，延长浸泡时间，可提高鲜笋的 *W* 值，并提高鲜竹笋和木耳的硬度。随着抗坏血酸钙和氯化钠质量浓度的增加，鲜笋的 *W* 值与鲜笋、木耳的硬度有相似的变化趋势。

氯化钠作为常见的食品防腐剂，能够通过调节渗透压来影响食品中的水分活度，从而减缓微生物生长和酶促反应，有助于保持食品的色泽和质地。抗坏血酸钙是强效的抗氧化剂，能够有效清除自由基，防止食品因氧化而变色或变质。图 4~6 表明，鲜笋 *W* 值与鲜笋、木耳硬度之间存在交互作用，二者交互作用对鲜笋 *W* 值及木耳硬度均有显著影响，*p*₁=0.002 9，*p*₂=0.003 3，*p*₃=0.002 0。如图 4 所示，当氯化钠浓度

和抗坏血酸钙浓度同时增加时，鲜笋的 *W* 值呈现先增后减的趋势。这种趋势表明，适量的氯化钠可能增强抗坏血酸钙在食品中的稳定性和有效性，而抗坏血酸钙则可能通过其抗氧化性能进一步增强氯化钠的防腐效果。两者在适量范围内具有协同作用，能够显著提升鲜笋的 *W* 值，但过量则会导致效果减弱。等高线图的椭圆形状进一步证明了这种显著的交互作用。图 5 和图 6 展示了氯化钠浓度和抗坏血酸钙浓度对鲜笋硬度和木耳硬度的影响。可以看出，随着两者浓度的增加，鲜笋和木耳的硬度也呈现先增后减的趋势，且等高线图显示其交互作用显著。

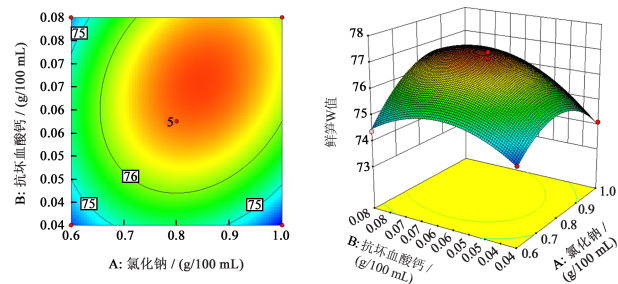


图 4 氯化钠和抗坏血酸钙对鲜笋 *W* 值影响的响应面图和等高线图

Fig.4 Response surface and contour diagram of the effect of sodium chloride and calcium ascorbate concentrations on *W* value of fresh bamboo shoots

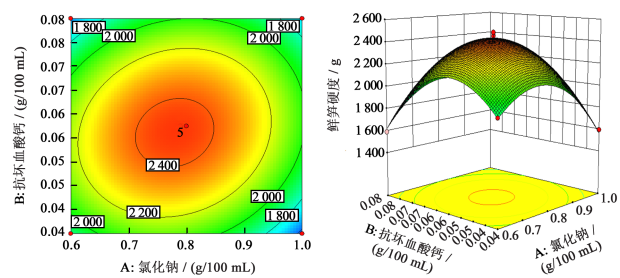


图 5 氯化钠和抗坏血酸钙对鲜笋硬度值影响的响应面和等高线图

Fig.5 Response surface and contour map of the effects of sodium chloride and calcium ascorbate concentrations on the hardness values of fresh bamboo shoots

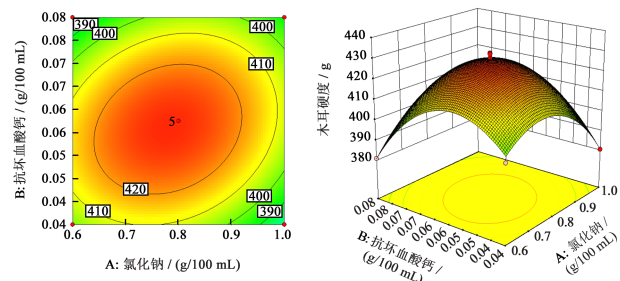


图 6 氯化钠和抗坏血酸钙对木耳硬度值影响的响应面和等高线图

Fig.6 Response surface and contour map of effects of sodium chloride and calcium ascorbate concentrations on hardness values of auricularia auriculata

浸泡时间直接影响氯化钠和抗坏血酸钙在食品中的渗透深度和均匀性。过短的浸泡时间可能导致溶质未能充分渗透，影响护色保脆效果；而过长的浸泡时间则可能引发食品过度软化或不良风味的发展。图 7~9 显示了抗坏血酸钙含量与浸泡时间交互作用对鲜笋与鲜笋、木耳硬度之间的交互作用，二者交互作用对鲜笋与木耳硬度的影响均达极显著水平， $p_1=0.0187$ ， $p_2=0.0106$ ， $p_3=0.0004$ 。从等高线曲线可以看出，随着抗坏血酸钙添加量的增大，随着浸渍时间的延长，呈现出一致的等高线，其等高线为椭圆状，表明二者之间存在着强烈的相互作用，并对鲜笋和木耳的硬度产生了很大的影响。而且抗坏血酸钙作为抗氧化剂，其效果可能随着浸泡时间的延长而增强，但过长的时间同样可能导致不良后果。这种交互作用可能表现为在一定时间范围内，抗坏血酸钙浓度和浸泡时间的增加能够显著提升鲜笋的 W 值。同时，抗坏

血酸钙对鲜笋和木耳硬度的提升作用也受到浸泡时间的影响。合理的浸泡时间能够确保护色保脆剂充分发挥作用，同时避免过度处理导致的软化。

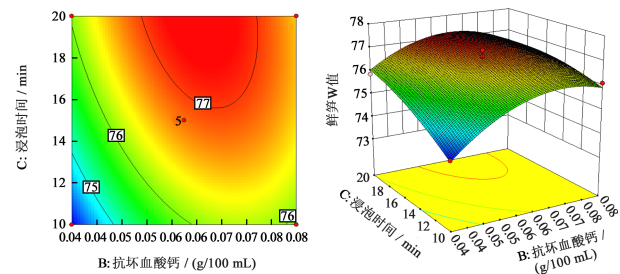


图 7 抗坏血酸钙质量浓度和浸泡时间对鲜笋 W 值影响的响应面和等高线图

Fig.7 Response surface and contour map of the effect of calcium ascorbate concentrations and soaking time on W value of fresh bamboo shoots

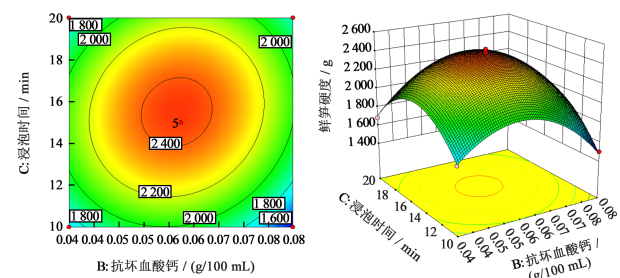


图 8 抗坏血酸钙质量浓度和浸泡时间对鲜笋硬度值影响的响应面和等高线图

Fig.8 Response surface and contour diagram of the effect of calcium ascorbate concentrations and soaking time on the hardness value of fresh bamboo shoot

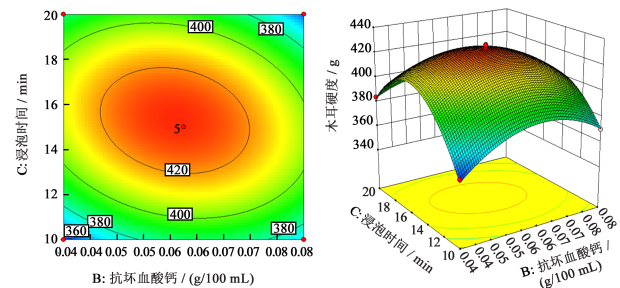


图 9 抗坏血酸钙质量浓度和浸泡时间对木耳硬度值影响的响应面和等高线图

Fig.9 Response surface and contour map of effects of calcium ascorbate concentrations and soaking time on hardness value of agaric fungus

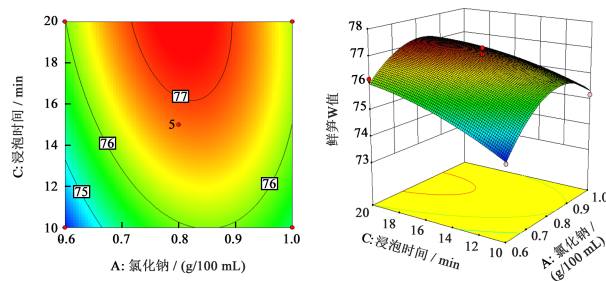


图 10 氯化钠质量浓度和浸泡时间对鲜笋 W 值影响的
响应面和等高线图

Fig.10 Response surface and contour map of the effect of
sodium chloride concentrations and soaking time on W
value of fresh bamboo shoot

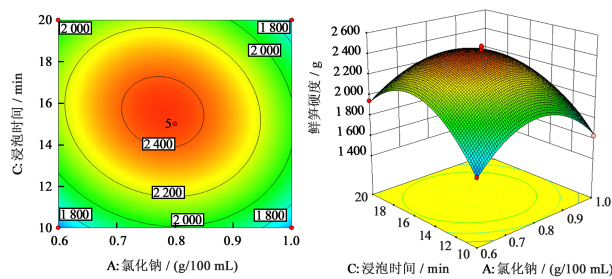


图 11 氯化钠质量浓度和浸泡时间对鲜笋硬度值影响的
响应面和等高线图

Fig.11 Response surface and contour map of the effect of sodium
chloride concentrations and soaking time on hardness
value of agaric fungus

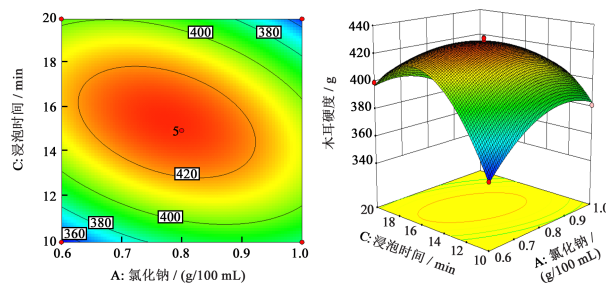


图 12 氯化钠质量浓度和浸泡时间对木耳硬度值影响的
响应面和等高线图

Fig.12 Response surface and contour map of the effect of sodium
chloride concentrations and soaking time on the hardness
value of agaric fungus

图 10~12 表明, 鲜笋 W 值与鲜笋、木耳硬度之间存在交互作用, 二者交互作用对鲜笋与木耳硬度均有

显著影响, $p_1=0.045\ 3$, $p_2=0.015\ 3$, $p_3<0.000\ 1$ 。从等高线曲线可以看出, 随着氯化钠质量浓度和浸泡时间的延长, 其等高线呈椭圆状, 表明二者之间存在着强烈的相互作用, 并对鲜笋和木耳的硬度产生了很大的影响。而且浸泡时间的长短会影响氯化钠对鲜笋的渗透作用, 进而影响其 W 值。适当延长浸泡时间有助于氯化钠更好地发挥作用, 但过长的浸泡时间可能导致鲜笋过度软化, 降低 W 值。同样, 浸泡时间对鲜笋和木耳的硬度也有显著影响。过短的浸泡时间可能无法充分达到护色保脆的效果, 而过长的浸泡时间则可能使它们变得过软。

在综合考虑鲜笋 W 值、鲜笋及黑木耳硬度的基础上, 分别对方程各自变量求极值, 得到质量浓度和浸泡时间的极值点 $A=0.8\ \text{g}/100\ \text{mL}$, $B=0.06\ \text{g}/100\ \text{mL}$, $C=15\ \text{min}$, 即质量浓度为 $0.8\ \text{g}/100\ \text{mL}$ 的氯化钠和 $0.06\ \text{g}/100\ \text{mL}$ 的抗坏血酸钙以及浸泡时间为 $15\ \text{min}$ 的联合处理下, 鲜笋 W 值、鲜笋及木耳硬度值都较优。在优化的试验条件下, 预测出鲜笋 W 值为 77.15 , 鲜笋硬度值 $2\ 484.62\ \text{g}$ 、木耳的硬度值为 $352.79\ \text{g}$ 。

2.2.3 响应面因素水平优化结果及模型验证

使用 Design Expert 软件对鲜笋、木耳的 W 值和硬度的试验结果进行了优化预测, 并考虑到现实因素, 最后得到了质量浓度为 $0.8\ \text{g}/100\ \text{mL}$ 的氯化钠、 $0.06\ \text{g}/100\ \text{mL}$ 的抗坏血酸钙和浸泡时间为 $15\ \text{min}$ 的最优工艺参数, 在此条件下预测出鲜笋 W 值 77.15 、鲜笋硬度值 $2\ 484.62\ \text{g}$ 、木耳硬度值为 $352.79\ \text{g}$ 。

为了验证所建模型的准确性和可靠性, 对优化后的工艺条件进行了实验验证。实际得到的鲜笋 W 值为 77.09 , 鲜笋硬度值为 $2\ 480.16\ \text{g}$, 木耳的硬度值为 $350.18\ \text{g}$, 验证实验结果与理论预测结果相接近, 表明所建立的响应曲面试验模型可以应用于实际数据的预测。

在最佳工艺条件下, 未处理组和处理组的组木耳、鲜笋经高温杀菌保鲜 $6\ \text{d}$ 后, 其感官评分如表 9 所示。处理组各项评分中与未处理组差异显著 ($P<0.05$), 而未处理组与处理组之间的得分亦有显著性差异 ($P<0.05$)。处理组各项分值均在 20 分以上, 未处理组各项分值均在 17 分以上, 结果表明, 护色保脆剂对鲜笋、木耳的硬度和白度值都有明显的影响。

表 9 未处理条件下与最佳条件下木耳、鲜笋的感官评定结果

Table 9 Sensory evaluation results of agaric fungus and fresh bamboo shoot under untreated condition and optimal condition

品种	评定项目				
	外观	色泽	口感	滋味	总分
处理组木耳	21.57 ± 0.12 ^a	21.53 ± 0.90 ^a	21.97 ± 0.74 ^a	20.17 ± 0.63 ^a	85.23 ± 0.12 ^a
未处理组木耳	18.60 ± 0.70 ^b	18.97 ± 0.33 ^b	17.27 ± 0.76 ^b	17.73 ± 0.49 ^b	72.57 ± 1.10 ^b
处理组鲜笋	21.73 ± 0.26 ^a	22.27 ± 0.74 ^a	21.67 ± 0.09 ^a	20.37 ± 0.86 ^a	86.03 ± 1.86 ^a
未处理组鲜笋	17.73 ± 1.20 ^b	17.43 ± 0.05 ^c	17.6 ± 0.62 ^b	18.27 ± 0.45 ^b	71.03 ± 1.25 ^b

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异（ $P<0.05$ ）。

3 结论

通过采用单因素实验、Box-Behnken 8.0 中心组合设计原则及响应分析方法，对鱼香肉丝辅助材料品质的护色、保脆工艺进行了优选，确定了最佳配方。由此得出了鱼香肉丝辅料的护色、保脆效果最好的工艺参数是：氯化钠质量浓度为 0.8 g/100 mL，抗坏血酸钙质量浓度为 0.06 g/100 mL，浸泡时间为 15 min，实际鲜笋和木耳的硬度值分别为 2 480.16 g、350.18 g，鲜笋 W 值为 77.09。氯化钠、抗坏血酸钙及浸泡时间对鲜笋、木耳的护色、保脆效果均有明显效果，且二者间互作效应极显著鲜笋和木耳的 W 值和硬度值。响应面优化下的预测值与实测值结果相接近，木耳与鲜笋在未处理组与最佳处理条件下高温灭菌贮藏 6 d 后，在鲜笋、木耳的感官品质上存在显著差异。护色保脆效果明显提高了辅料的硬度，提高了产品的 W 值，并且产品的感官质量也明显提高。尽管相关文献报道较多，但本文在针对鱼香肉丝辅料的护色保脆处理上仍具有一定的创新性，特别是在实验设计、参数优化以及综合评价体系等方面的尝试和探索。本文的研究成果为后续鱼香肉丝辅料的护色保脆处理提供了重要的数据支持和理论依据，具有一定的实际应用价值。

参考文献

[1] 金麟玉.成都“美食之都”城市品牌视觉设计研究[D].成都:西华大学,2020.

[2] 张春江,张良,黄峰,等.中式肉类菜肴加工中营养品质变化研究进展[J].生物产业技术,2017,4:76-81.

[3] 张超,程福慧,梁峥,等.护色剂对干制玫瑰护色效果及芳香品质的影响[J].中国食品添加剂,2024,35(5):205-214.

[4] 伊丽达娜·开赛尔,白羽嘉,郑丽萍,等.杏果脯预处理的烫漂与护色工艺优化[J].食品研究与开发,2023,44(24):107-114.

[5] 牛慧婷,冯炜弘,尹燕,等.冬果梨汁无硫护色剂的筛选及优化[J].农业科技与信息,2023,(12):118-121,131.

[6] 潘银珍,谢玉娟,李仲巧,等.鱼香肉丝工业化生产胡萝卜护色工艺优化[J].食品工业科技,2023,44(8):252-258.

[7] 梁娇,吴雨莲,李述刚,等.籽瓜皮果卷配方及护色工艺优化研究[J].塔里木大学学报,2020,32(3):80-90.

[8] 王新惠,刘达玉,肖龙泉,等.竹笋香辣酱护色保脆工艺的研究[J].食品科技,2016,41(9):117-119.

[9] 张婷,杨润强,陈旭,等.护色保脆复配物对鲜切牛蒡品质及酶促褐变的影响[J].食品科学,2014,35(4):236-242.

[10] MOLA S, UTHAIRATANAKIJ A, SRILAONG V, et al. Impacts of sodium chlorite combined with calcium chloride, and calcium ascorbate on microbial population, browning, and quality of fresh-cut rose apple [J]. Agriculture and Natural Resources, 2016, 50(5): 331-337.

[11] SILVEIRA A C, AGUAYO E, CHISARI M, et al. Calcium salts and heat treatment for quality retention of fresh-cut ‘Galia’ melon [J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 62(1): 77-84.

[12] 薛计勇,施忠贤,蔡鼻.中国烹饪概论[M].华中科技大学出版社,2021.

[13] 董桂君,乔勇进,刘晨霞,等.氯化钙处理对茭白采后品质的影响[J].食品与发酵科技,2021,57(4):23-31.

[14] 马银鹏,孔祥辉,张丕奇,等.不同后熟和储藏时间菌包对黑木耳品质的影响[J].食品工业,2019,40(11):166-169.

[15] 孔沛筠,常雅宁,屈咪,等.灭菌方式对木耳感官品质的影响[J].食品工业,2018,39(12):80-83.

[16] 刘金鑫,张玉斌,郭兆斌,等.响应面试验优化鲜切青笋的护色工艺[J].食品与发酵科技,2017,53(3):49-54.

[17] 孙亚男.扬州狮子头菜肴的中央厨房加工机理及品质调控研究[D].无锡:江南大学,2021.

[18] 韩晋琳,毕小朋,蒲开阳,等.鱼香肉丝方便菜肴生产工艺优化及挥发性风味成分鉴定[J].西华大学学报(自然科学版),2023, 42(3):19-36.

[19] ZHANG L, ZHANG M, WANG D, et al. ANN-GA optimized composite color protectant combined with magnetic field assisted freezing: Effects on the quality of mushroom (*Agaricus bisporus*) [J]. Food Chemistry, 2024, 453: 139713.

[20] 王红颖.NaCl溶液处理块茎抑制鲜切马铃薯褐变技术及机理研究[D].泰安:山东农业大学,2019.

[21] 黄继伟,肖宇,黄韬睿,等.鱼香肉丝方便菜肴包中蔬菜包的工艺优化研究[J].农产品加工,2022,3:23-25,30.

[22] XING JJ, CHENG LL, FENG S, et al. Humidity-controlled heat treatment of fresh spinach noodles for color preservation and storage quality improvement [J]. Food Chemistry: X, 2023, 20(30): 101042.

[23] 张钟,冯丽娇.鲜切淮山片护色工艺与无硫护色剂的研究[J].包装与食品机械,2015,33(6):12-16,21.

[24] 马超,陈海明,文云杰,等.复合护色剂对芒果汁存储期间色度的影响及交互作用[J].食品科技,2018,43(3):55-59.

[25] 隋勇,施建斌,蔡沙,等.响应面法优化低糖甘薯果脯制作工艺[J].食品工业,2021,42(5):83-87.

[26] 张莉,胡婕,范荣波,等.响应面法优化芹菜黄瓜复合粉工艺的研究[J].中国调味品,2020,45(10):24-29.

[27] LI Y S, T F, CUI K, et al. Optimization of ultrasonic extraction of anthocyanin in mulberry residue by response surface methodology [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 559(1): 012024.

[28] 芦星淼,缪钢,孙梅,等.响应曲面法优化鲜青花椒护色剂配方[J].食品研究与开发,2019,40(24):45-51.