

预制菜肴中芥菜护色及保脆工艺优化

叶阳¹, 肖川泉¹, 袁茜¹, 周雨浓², 罗素琴², 杨强², 王洋^{1*}

(1. 四川轻化工大学生物工程学院, 四川宜宾 644000) (2. 四川宜宾碎米芽菜有限公司, 四川宜宾 644000)

摘要: 为改善以芥菜为原料的预制菜肴在加工贮藏过程中易发生褐变和组织软化等问题, 该研究以多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO) 活性、过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 活性、叶绿素含量、剪切力、色差、维生素 C 为指标, 通过单因素及正交试验设计分析不同漂烫条件以及不同种类和添加量的护色剂、保脆剂对芥菜品质的影响。结果表明, 最佳工艺条件为: 90 °C 漂烫 2 min, 抗坏血酸添加量 0.06% (m/m), 柠檬酸添加量 0.12% (m/m), 植酸添加量 0.012% (m/m), 护色 40 min, 氯化钙添加量 0.24% (m/m), 保脆 30 min。在此工艺条件下, PPO 和 POD 失活率分别达到了 90.40% 和 66.03%, 叶绿素含量最高为 93.60 mg/100 g; 在 18 d 贮藏期后, 经此工艺处理后的芥菜与空白组相比, Vc 含量, 叶绿素含量, a^* 值绝对值和剪切力分别提升了 333.65%, 783.69%, 158.23% 和 318.84%, 得到的芥菜色泽自然、口感脆嫩, 感官评分最高。此工艺能有效维持芥菜绿色色泽和脆嫩口感, 为预制菜肴中其他绿叶蔬菜提供工艺参考。

关键词: 芥菜; 预制菜肴; 热处理; 护色; 保脆

文章编号: 1673-9078(2023)02-72-80

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.2.1268

Process Optimization for Preserving the Color and Crispness of Mustard in Prefabricated Food

YE Yang¹, XIAO Chuanquan¹, YUAN Xi¹, ZHOU Yunong², LUO Suqin², YANG Qiang², WANG Yang^{1*}

(1. College of Bioengineering, Sichuan University of Science and Engineering, Yibin 644000, China)

(2. Sichuan Yibin SuiMiYaCai Co. Ltd., Yibin 644000, China)

Abstract: To prevent the browning and softening of mustard-containing prefabricated food during processing and storage, the effects of different blanching conditions and different types and doses of color and crispness fixatives on the quality of mustard were analyzed using a single-factor orthogonal experimental design. Polyphenol oxidase (PPO) activity, peroxidase (POD) activity, chlorophyll content, shear force, color difference, and vitamin C content were used as indicators. The results indicated that the optimum process conditions were as follows: blanching at 90 °C for two min; using 0.06% (m/m) ascorbic acid, 0.12% (m/m) citric acid, and 0.012% (m/m) phytic acid for color preservation treatment for 40 min; and using 0.24% (m/m) calcium chloride for crispness preservation treatment for 30 min. Under these conditions, the inactivation rates for PPO and POD reached 90.40% and 66.03%, respectively, with the highest chlorophyll content being 93.60 mg/100 g. Compared with the control group, the vitamin C content, chlorophyll content, absolute value of a^* , and shear force of the mustard treated with this process after 18 days of storage increased by 333.65%, 783.69%, 158.23%, and 318.84%, respectively. The processed mustard had a natural color, a crisp and tender taste, and the highest score in sensory testing. This process can effectively preserve the green color and crisp taste of mustard, thus providing a technical reference for processing other green leafy vegetables in prefabricated foods.

Key words: mustard; prefabricated food; heat treatment; color preservation; crispness preservation

引文格式:

叶阳, 肖川泉, 袁茜, 等. 预制菜肴中芥菜护色及保脆工艺优化[J]. 现代食品科技, 2023, 39(2): 72-80

YE Yang, XIAO Chuanquan, YUAN Xi, et al. Process optimization for preserving the color and crispness of mustard in prefabricated food [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(2): 72-80

收稿日期: 2022-10-05

基金项目: 川菜发展研究中心项目 (CC22Z29); 宜宾市科技局 2021 年省级科技计划转移支付项目 (2021ZYNY003)

作者简介: 叶阳 (1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 农畜产品精深加工, E-mail: yeyang161@163.com

通讯作者: 王洋 (1982-), 男, 硕士, 实验师, 研究方向: 农畜产品精深加工, E-mail: dhwy518@163.com

芥菜 (*Brassica juncea*) 是十字花科芸苔属一年生草本植物, 在中国有着悠久的栽培历史^[1], 因其价格低廉且富含营养, 深受亚洲消费者的欢迎。芥菜的营养成分包括碳水化合物、多种微量维生素和矿物质^[2]。此外还含有许多生物活性成分, 如硫代葡萄糖苷及其降解产物、黄酮类化合物和多酚以及大量膳食纤维、叶绿素和挥发性成分等^[3,4]。我国芥菜常年栽培面积约 100 万 hm^2 , 2019 年全国芥菜良种繁育面积约 400 hm^2 , 常年商品化繁(制)种产量 400 t 左右^[5]。芥菜产量虽高, 但其加工产品较少, 多为酱腌制品, 对其资源利用不足。芥菜可加工为即食的蔬菜预制菜, 也可作为辅料同其他畜禽类原料搭配, 开发出营养丰富、低盐健康的川菜预制菜。因此, 开发以芥菜为原料的预制菜肴对于生活节奏加快的现代人来说具有便捷、方便等优势。

然而, 芥菜在加工和存储过程中容易出现失绿、褐变、脆度降低等问题, 严重影响产品品质。引起这些变化的原因包括酶促褐变和非酶褐变, 酶促褐变不仅会导致颜色改变和抗氧化降解, 而且由于醌与其他化合物缩合造成感官和营养损失^[6]。到目前为止, 漂烫一直是最有效的预处理方式, 可减少微生物负荷并破坏损害产品质量的关键酶^[7,8]。如 Hurtado 等^[9]研究发现, 85 $^{\circ}\text{C}$ 加热 7 min 对灭活水果奶昔中的 PPO 和 POD 非常有效, Swami 等^[10]对芦荟-荔枝混合饮料样品进行热处理, 发现经 95 $^{\circ}\text{C}$ 热烫 5 min 后的样品可明显降低 PPO 和 POD 酶活。此外, 护色剂的添加也可起到抑制非酶褐变的发生、螯合金属离子和提高叶绿素稳定性等作用。Chen 等^[11]发现 0.60% 柠檬酸+0.40% 抗坏血酸对鲜切胡萝卜的保色效果最好, 黄月等^[12]在对腌制梅菜的护色研究中发现, 50 g 梅菜添加 0.05 g 柠檬酸、0.20 g 抗坏血酸和 0.20 g L-半胱氨酸的护色效果最好, 还可有效降低亚硝酸盐含量。为防止芥菜组织软化, 余以刚等^[13]研究表明氯化钙浓度 0.1% (m/m), 浸泡时长 35 min 时对配餐中的绿叶蔬菜保脆效果最佳, 并可结合漂烫工艺和其他添加剂进一步增强护绿保脆效果。

本研究提出了一种预制菜肴中芥菜的护绿保脆工艺, 通过单因素试验探究不同预处理条件对芥菜品质的影响, 再通过正交优化试验联合预处理条件进行贮藏期试验, 以期得到炒制芥菜的最佳工艺条件, 缓解芥菜作为预制菜肴原料在加工贮藏过程中出现的褐变和软化问题。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

四川本地芥菜, 市售; 食盐、油及其他辅料, 食品级, 市售; 抗坏血酸、柠檬酸、植酸, 食品级, 谷知味生物科技有限公司; 邻苯二酚、愈创木酚、抗坏血酸标准品、过氧化氢, 分析纯, 成都市科龙化工试剂厂; 其余试剂均为国产分析纯。

1.2 主要仪器与设备

TA-XT Plus 型物性分析仪, 英国 Stable Micro System 公司; TG16G 型离心机, 盐城市凯特实验仪器有限公司; UltraScanVIS 型色差仪, 美国 HunterLab 公司; YMX-958-430 型真空包装机, 泉州市亿闽信贸易有限公司; UV-19001 型紫外分光光度计, 岛津仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 工艺流程

芥菜→清洗→漂烫→护色处理→保脆处理→水洗、沥干→炒制样品→真空包装→杀菌冷却→感官评定→检查→成品

选择鲜绿脆嫩、无虫害、无损伤的芥菜作为原料, 洗净后于恒温水浴锅中进行漂烫处理, 漂烫结束后迅速将芥菜置于冰浴条件下冷却 10 min, 沥干备用。再将芥菜置于护色、保脆液中浸泡, 处理后水洗, 沥干备用。在锅中加入适量食用油, 油温达到 120 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 加入 3% 姜、3% 蒜爆香, 将预处理的芥菜倒入锅中炒制, 炒出芥菜香味后加入青红椒各 5% 增香, 起锅前加 3% 盐、2% 花椒、1% 茴香粉、1% 白砂糖调味, 继续炒制 1 min 后出锅分装。将分装好的芥菜及时进行杀菌处理, 然后放入冰箱迅速冷却, 冰箱温度设置为 4 $^{\circ}\text{C}$ 左右。

1.3.2 漂烫时间与温度确定

设计漂烫温度为 70、75、80、85、90 $^{\circ}\text{C}$, 漂烫时间分别控制在 1.5、2.0、2.5 min。以叶绿素含量、过氧化物酶和多酚氧化酶为指标, 研究热烫处理对芥菜品质的影响。

1.3.3 护绿单因素试验

将漂烫后的芥菜分别浸泡于料液比为 1:5 的护色液中, 护色剂选用柠檬酸、抗坏血酸、植酸。设计柠檬酸添加量 (0.04%、0.08%、0.12%、0.16%、0.20%,

m/m)、抗坏血酸添加量(0.02%、0.04%、0.06%、0.08%、0.10%、 m/m)、植酸添加量(0.008%、0.010%、0.012%、0.014%、0.016%、 m/m)、浸泡时间(20、40、60 min)。处理后取芥菜三个不同部位进行读数,记录芥菜色差变化值 a^* , 取其平均值。

1.3.4 芥菜最佳护色条件优化

根据单因素实验结果, 采用 $L_9(3^4)$ 正交表设计正交试验, 以 a^* 作为正交分析数据, 确定芥菜护色的最优工艺条件, 各因素水平见表 1。

表 1 护色正交试验因素水平

Table 1 Color orthogonal test factor level table			
水平	因素		
	A[柠檬酸添加量(m/m)/%]	B[抗坏血酸添加量(m/m)/%]	C[植酸添加量(m/m)/%]
1	0.12	0.04	0.010
2	0.16	0.06	0.012
3	0.20	0.08	0.014

1.3.5 保脆单因素试验

将漂烫处理后的芥菜于料液比为 1:5 的保脆液中浸泡, 保脆剂选用海藻酸钠、氯化钙和碳酸钙, 设计海藻酸钠添加量(0.06%、0.08%、0.10%、0.12%、0.14%、 m/m)、氯化钙添加量(0.12%、0.16%、0.20%、0.24%、0.28%、 m/m)、碳酸钙添加量(0.06%、0.08%、0.10%、0.12%、0.14%、 m/m)、浸泡时间(30、60、120 min)。采用质构仪测试芥菜处理后的剪切力, 研究不同种类、不同浓度保脆剂对芥菜脆度的影响。

1.3.6 芥菜最佳保脆条件优化

根据单因素实验结果, 采用 $L_9(3^4)$ 正交表设计正交试验, 以剪切力作为正交分析数据, 确定芥菜保脆的最优工艺条件, 各因素水平见表 2。

表 2 保脆正交试验因素水平

Table 2 Fragility orthogonal test factor level table			
水平	因素		
	A[氯化钙添加量(m/m)/%]	B[海藻酸钠添加量(m/m)/%]	C[保脆时间(m/m)/min]
1	0.20	0.10	30
2	0.24	0.12	60
3	0.28	0.14	120

1.3.7 储藏期试验

根据前期实验结果, 选用最佳护色保脆条件进行储藏期试验。分别取 150 g 经不同护色保脆工艺处理后的芥菜同其他辅料一起炒制, 炒制后各取 100 g 分装, 包装采用真空密闭包装。制备好的炒制芥菜于 4 ℃ 条件下储藏, 并在储藏期间每隔 3 d 对各项指标进行测定。

1.4 测定指标

1.4.1 感官评定

选择 10 名感官评定人员对各样品进行感官评分, 评定人员男女比例为 1:1, 年龄范围不限。所有样品随机编号, 评定人员在品评每个样品前进行漱口, 具体评定标准见表 3。

表 3 感官评分标准

Table 3 Sensory evaluation standard		
项目	分值	评价标准
色泽	15~20	鲜绿色, 色泽均匀, 且有光泽
	10~14	绿色稍淡, 色泽均匀, 稍有光泽
	0~9	微黄绿色, 色泽不均匀, 且无光泽
风味	25~30	有炒制芥菜所特有的香味风味, 无杂味
	15~24	芥菜风味较淡不均匀, 无明显异味
	0~14	酸味或苦味较重, 单一物质过重, 有杂味
口感	15~20	咸淡适宜, 芥菜脆嫩爽口
	10~14	略显咸或稍偏淡, 脆度略有欠缺
	0~9	严重偏咸或无味, 基本无脆度
组织状态	25~30	组织均一, 炒制程度适当, 芥菜无焦糊状态
	15~24	组织稍不均匀, 稍有炒制过头, 芥菜略有焦糊
	0~14	组织不均匀, 炒制过头且芥菜有焦糊

1.4.2 POD 活性测定

参考谭飘飘^[14]的方法, 采用愈创木酚比色法进行测定, 以每分钟 470 nm 波长下的吸光值变化 0.001 作为 1 个酶活性单位。

1.4.3 PPO 活性测定

参考杨广等^[15]的方法, 利用邻苯二酚法测定多酚氧化酶的活性。以每分钟 400 nm 波长下的吸光值变化 0.001 作为 1 个酶活性单位。

1.4.4 色差的测定

采用台式色差仪测定芥菜丝不同部位的 a^* 值, 用白板矫正。 a^* 值表示芥菜的红绿色值, 正值越大偏向红色的程度越大, 负值绝对值越大偏向绿色的程度越大。为减少样品本身带来的误差, 同一样品取三个不同部位进行测定, 取其平均值。

1.4.5 剪切力测定

使用物性分析仪 HDP/BS 模具测定芥菜的剪切力, 其中探头下降速度为 2.0 mm/s, 应变力为 80%。一定范围内剪切力越大表明芥菜的脆度越好。

1.4.6 叶绿素含量的测定

依据国标 NY/T 3082-2017《水果、蔬菜及其制品中叶绿素含量的测定分光光度法》进行测定。

1.4.7 Vc 含量的测定

依据 GB 5009.86-2016《食品安全国家标准食品中

抗坏血酸的测定》中的 2,6-二氯酚滴定法进行测定。

1.5 数据统计与分析

各个指标平行测定三次,采用 IBM SPSS Statistics 26.0 进行 ANOVA 检验,各组数据之间采用最小显著差异法 (LSD) 比较, $P < 0.05$ 表示差异显著。采用 Excel 2019 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 芥菜最佳漂烫温度与时间的确定

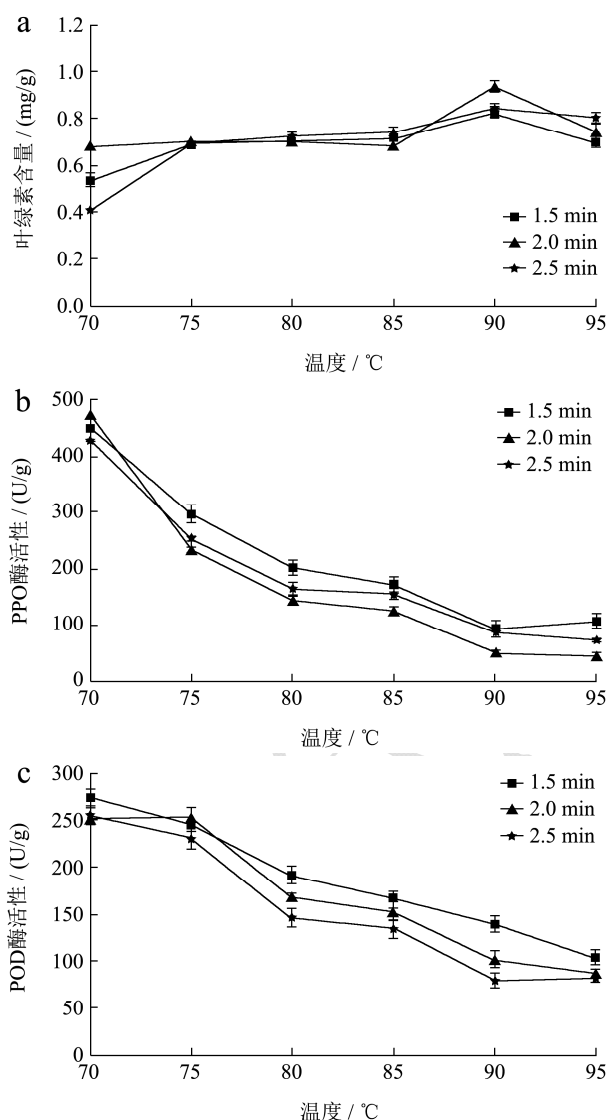


图1 不同漂烫温度及时间对叶绿素含量 (a)、PPO 酶活性 (b) 和 POD 酶活性 (c) 的影响

Fig.1 Effects of different blanching temperature and time on chlorophyll content (a), PPO activity (b) and POD activity (c)

由图 1a 可知,温度在 70~90 °C 范围内,随温度升高,叶绿素含量增加,该结果与马瑞^[16]等研究黄花菜漂烫过程中的叶绿素含量变化类似。热处理条件为 90 °C

漂烫 2 min 时,叶绿素含量最高达到了 93.60 mg/100 g,显著高于其他组 ($P < 0.05$),当温度超过 90 °C 后,叶绿素含量逐渐降低,高温条件使芥菜组织受到破坏,叶绿素从中分离出来,水解成叶绿酸、叶绿醇等物质扩散于水中,最终导致芥菜中叶绿素含量降低。由图 1b 和图 1c 可知,随温度升高 PPO 和 POD 的活性均呈下降趋势,当 95 °C 漂烫 2 min 时 PPO 酶活最低,90 °C 漂烫 2.5 min 时 POD 酶活最低,结合漂烫条件对叶绿素的影响,确定最佳漂烫时间为 2 min,此漂烫时间下,温度在 90~95 °C 范围内对两种酶的灭活效果无显著差异 ($P > 0.05$)。因此,综合确定最佳漂烫条件为 90 °C 漂烫 2 min,此时 PPO 和 POD 的失活率分别达到了 90.40% 和 66.03%。与刘伟等^[17]结果一致,热水热烫能够有效降低蓝莓果汁中的 PPO 和 POD 酶活,但处理温度越高,时间越长,会造成蓝莓组织变软,营养成分及功效成分的流失。说明适当的热处理可通过抑制 PPO 和 POD 活性来延缓芥菜褐变。

2.2 芥菜护色工艺研究

2.2.1 护色剂对芥菜色差的影响

柠檬酸被广泛用于抑制加工果蔬中发生的酶褐变,不仅可以降低基质 pH 抑制 PPO 和 POD 的酶活性,还可以螯合酶活性所必需的金属离子,即在 PPO 活性位点上的铜离子和在 POD 血红素辅基上的亚铁离子^[18]。由图 2a 可知,柠檬酸能显著抑制芥菜褐变 ($P < 0.05$),但护色时间对护色效果影响不大。随柠檬酸添加量增加, a^* 值绝对值缓慢上升,当添加量为 0.16% (m/m) 时 a^* 值绝对值达到最高 (8.02),与未添加抑制剂时的 a^* 值绝对值 (4.21) 相比上升 90.50%,超过此添加量后护绿效果降低,这是因为柠檬酸添加量过多会降低溶液 pH 值,使柠檬酸的螯合作用减弱,从而降低了对酶活性的抑制作用。因此确定柠檬酸添加量为 0.16% (m/m),浸泡时间 40 min。

抗坏血酸是常见的抗褐变剂,其抗褐变作用在于它能够还原酚类物质,抑制 PPO 活性,并消耗氧气^[19],但添加量不宜过多,过量的抗坏血酸被氧化形成大量的脱氢抗坏血酸,与酚类物质形成加合物,促进酚类底物的消耗^[20]。由图 2b 不难看出,抗坏血酸对芥菜褐变的抑制效果显著 ($P < 0.05$),而护色时间对色泽的影响无明显差异 ($P > 0.05$)。当抗坏血酸添加量小于 0.06% (m/m) 时, a^* 值下降明显,最低降至 -8.37,大于 0.06% (m/m) 后, a^* 略有变化,但总体基本不变,说明 0.06% (m/m) 的抗坏血酸用量抑制褐变效果较好。

由图 2c 可知,添加植酸后的芥菜 a^* 值变化范围

在-5~-2，浓度达到 0.012% (m/m) 时护色效果最好，超过 0.012% (m/m) 芥菜的绿色保持效果降低。植酸由于其还原性，可对过氧化物酶产生竞争性抑制作用来抑制褐变发生^[21]，但添加量过高会使体系 pH 值过低，对叶绿素稳定性造成影响，因此确定植酸添加量为 0.012% (m/m)，浸泡时间 40 min。

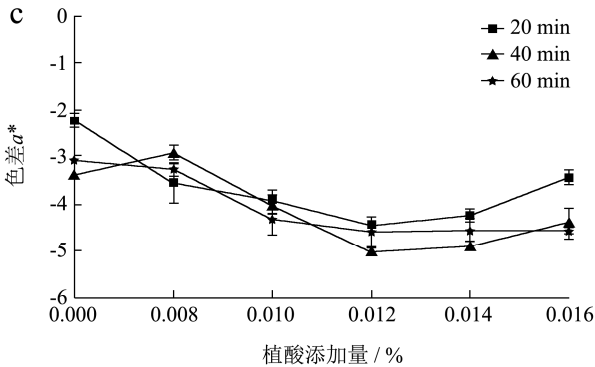
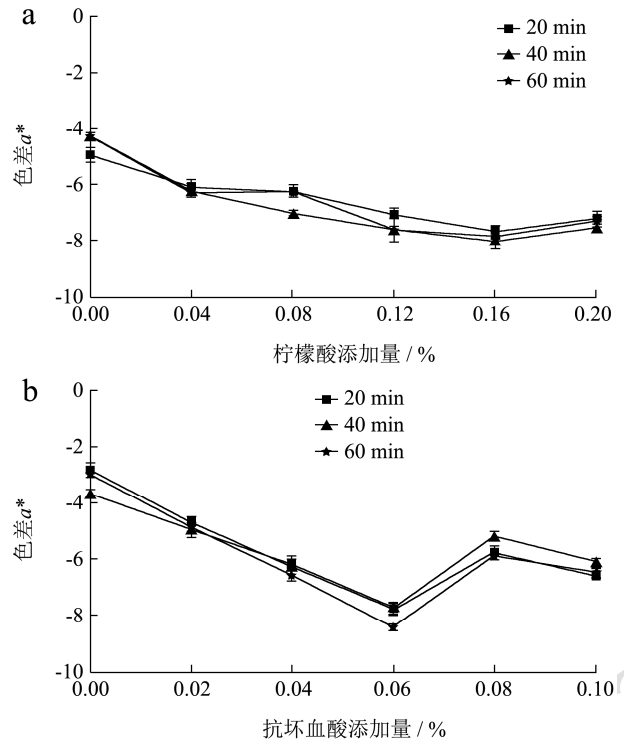


图2 柠檬酸浓度 (a)、抗坏血酸浓度 (b) 和植酸浓度 (c) 对芥菜色泽的影响

Fig.2 Effects of citric acid concentration (a), ascorbic acid concentration (b) and phytic acid concentration (c) on the color of mustard

综合来看，三种护色剂对芥菜护色效果由强到弱依次为：抗坏血酸>柠檬酸>植酸，但护色时间对芥菜色泽影响不大。因此，选取抗坏血酸、柠檬酸和植酸进行护色正交优化试验。

2.2.2 最佳护色条件正交试验优化

由表 4 中极差值 R 可以看出，影响芥菜色泽的各个因素主次顺序为 B (抗坏血酸) > A (柠檬酸) > C (植酸)，最佳护色方案为 B₂A₁C₂，即抗坏血酸添加量为 0.06% (m/m)，柠檬酸添加量为 0.12% (m/m)，植酸添加量为 0.012% (m/m)。

表 4 芥菜复合护色正交试验结果

Table 4 Results of orthogonal experiment of compound color protection of mustard

试验号	A 柠檬酸添加量(m/m)/%	B 抗坏血酸添加量(m/m)/%	C 植酸添加量(m/m)/%	a*值绝对值
1	1	1	1	6.38
2	1	2	2	8.12
3	1	3	3	5.94
4	2	1	2	5.58
5	2	2	3	6.99
6	2	3	1	5.25
7	3	1	3	5.57
8	3	2	1	6.57
9	3	3	2	5.75
K1	6.813	5.843	6.067	
K2	5.940	7.227	6.483	
K3	5.963	5.647	6.167	
R	0.873	1.58	0.417	
主次顺序	B>A>C			
最优组合	B ₂ A ₁ C ₂			

2.3 芥菜保脆工艺研究

2.3.1 保脆剂对芥菜脆度的影响

由图 3a 可以看出,氯化钙添加量为 0.24%(m/m) 时,剪切力最高达到了 17.25 N/mm,此时保脆效果最佳,但是当氯化钙添加量超过 0.24%(m/m) 时,剪切力有所下降,尹爽等^[22]在研究腌制大头菜的保脆工艺时也发现,氯化钙添加量在 0.05%~0.3% 范围内,随添加量升高其保脆作用呈现先升高后下降的趋势。这是因为钙离子能够激活芥菜中内源性果胶甲酯酶^[23],并促使钙离子在内部反应生成不溶于水的果胶酸钙凝胶,增强了细胞间粘附力,促进保脆作用。但氯化钙添加量过高,芥菜组织细胞在高渗条件下渗透溶质泄漏从而降低膨压^[24],导致组织变软,剪切力下降。另外,浸泡时间也对剪切力有影响,当浸泡时间为 60 min 时芥菜剪切力显著 ($P<0.05$) 高于其他组,浸泡时间过短保脆剂中钙离子不能进入芥菜细胞壁,而浸泡时间过长又会对芥菜组织结构造成不利。因此,当氯化钙添加量为 0.24%(m/m),浸泡时间为 60 min 时芥菜剪切力最大。

由图 3b 可知,低添加量海藻酸钠对芥菜硬度影响不大,当添加量为 0.12%(m/m) 时,芥菜剪切力最高为 16.24 N/mm,超过 0.12%(m/m) 后剪切力出现下降趋势。海藻酸钠与芥菜中钙离子会形成不可逆凝胶体,从而强化芥菜组织强度,达到保脆效果,但添加量过高会使未进入芥菜组织内部的海藻酸钠凝聚在芥菜表面,使其表面粘稠,剪切力降低。而当海藻酸钠添加量不超过 0.10%(m/m) 时,浸泡时间对芥菜剪切力影响不大,添加量在 0.1%~0.14%(m/m) 时,浸泡时间为 60 min 的芥菜剪切力显著高于其他组 ($P<0.05$),因此,确定海藻酸钠最佳添加量为 0.12%(m/m),浸泡时间 60 min。李笑梅等^[25]研究发现,当浸泡保脆时间超过 30 min 时,老山芹的脆度出现显著降低 ($P<0.05$),与本实验结果不一致,这可能是由于其浸泡温度保持在 50℃,加速了保脆液进入植物组织内部,若热处理时间过长,则会导致果胶甲酯酶活性降低,其脆度也随之降低。

由图 3c 可知,随碳酸钙添加量增加,芥菜剪切力曲线变化平稳,当碳酸钙添加量为 0.12%(m/m),浸泡 60 min 时,芥菜剪切力略高于其他组,为 6.22 N/mm。李昌宝等^[26]比较了不同保脆剂对番木瓜酱菜质构特性的影响,发现氯化钙的添加能有效延缓番木瓜酱菜脆性的降低,而碳酸钙的添加与对照组相比差异不显

著 ($P>0.05$),这与本实验结果相似。

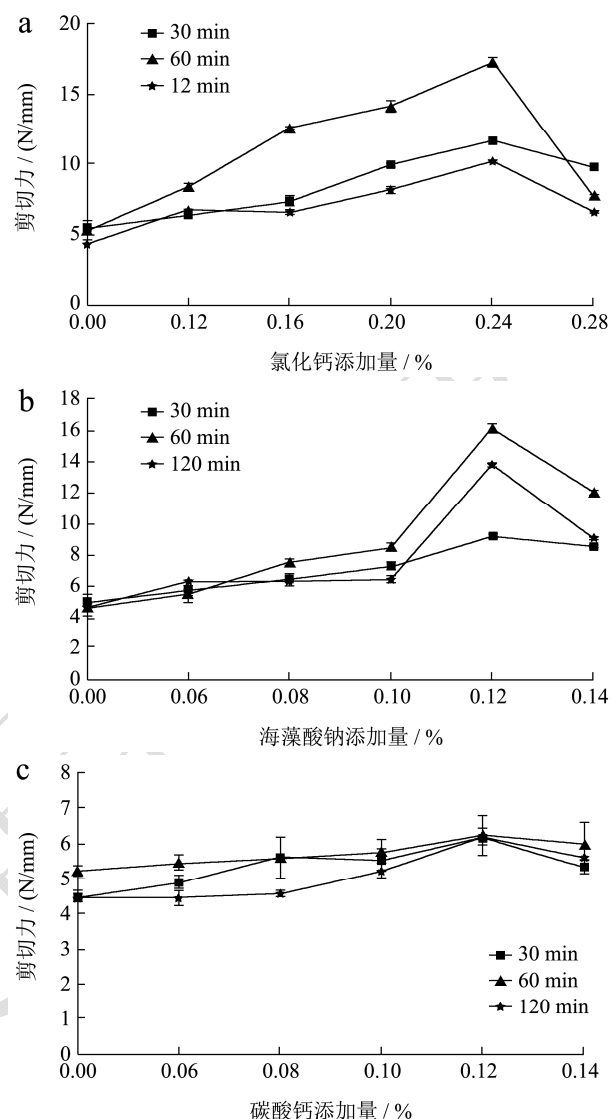


图3 氯化钙添加量(a)、海藻酸钠添加量(b)和碳酸钙添加量(c)对芥菜剪切力的影响

Fig.3 Effects of calcium chloride concentration (a), sodium alginate concentration (b) and calcium carbonate concentration (c) on the shear force of mustard

综合来看,三种添加剂对芥菜的保脆效果由强到弱依次为:氯化钙>海藻酸钠>碳酸钙,但碳酸钙的保脆效果不佳。因此,选用氯化钙、海藻酸钠和保脆时间进行正交优化试验。

2.3.2 保脆工艺正交优化试验

由表 5 中极差值 R 可知,三种因素对芥菜剪切力影响的主次顺序为 A(氯化钙)>B(海藻酸钠)>C(保脆时间)。芥菜保脆的最优水平为 $A_2B_2C_1$,即氯化钙添加量为 0.24%(m/m)、海藻酸钠添加量为 0.12%(m/m)、保脆时间为 30 min。

表 5 芥菜复合保脆正交试验结果

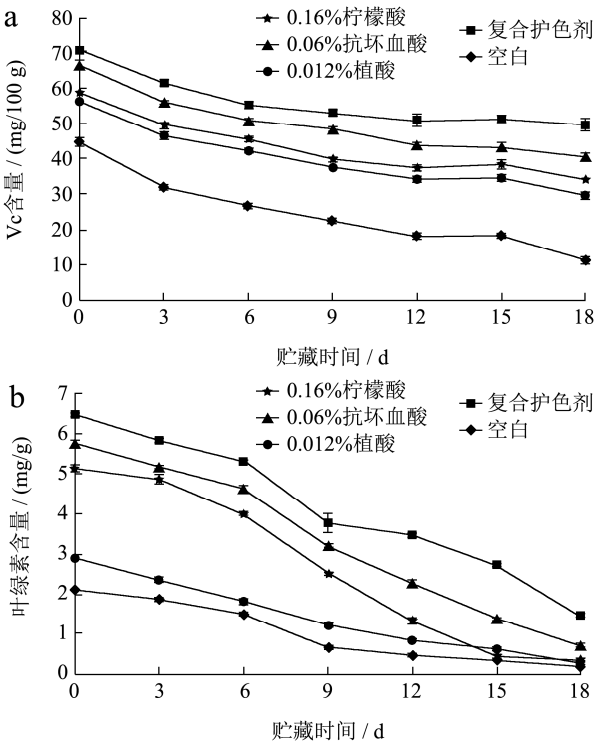
Table 5 Results of compound crispness preserving orthogonal experiment of mustard				
试验号	A[氯化钙添加量(m/m)/%]	B[海藻酸钠添加量(m/m)/%]	C[保脆时间/min]	剪切力/(N/mm)
1	1	1	1	14.56
2	1	2	2	14.90
3	1	3	3	16.11
4	2	1	2	16.49
5	2	2	3	15.80
6	2	3	1	15.50
7	3	1	3	15.19
8	3	2	1	17.06
9	3	3	2	15.21
K1	15.190	15.413	15.707	
K2	15.930	15.920	15.533	
K3	15.820	15.607	15.700	
R	0.740	0.507	0.174	
主次顺序		A>B>C		
最优组合		A ₂ B ₂ C ₁		

2.4 贮藏期护色及保脆工艺研究

芥菜由于在加工中受到机械损伤，容易在贮藏期发生以 Vc 褐变和胺类物质反应为主的褐变现象。叶绿素含量是衡量叶菜类蔬菜品质的关键指标，易受到环境影响而分解，造成叶绿素损失。由图 4 可知，随着贮藏时间的增加芥菜 Vc 含量、叶绿素含量以及 a^* 值绝对值均呈下降趋势，不同工艺的护绿效果为：复合护色剂>抗坏血酸>柠檬酸>植酸，且组间存在显著差异 ($P<0.05$)。与前人研究不同，李凤霞^[27,28]等研究了不同护色剂对雪莲果果脯和苹果果脯的护色效果，结果表明添加不同抑制剂对雪莲果果脯的护色效果为植酸>柠檬酸>抗坏血酸，对苹果果脯的护色效果为植酸>抗坏血酸>柠檬酸，可能是浸泡时间过长，且抗坏血酸的水溶液容易被空气中的氧气氧化，影响了雪莲果果脯的护色效果，而植酸对苹果 PPO 的抑制作用为混合性抑制^[29]，因此其护色效果比抗坏血酸还显著。在贮藏 18 d 后复合护色组的 Vc 含量、叶绿素含量和 a^* 绝对值最高，分别为 49.36 mg/100 g，1.44 mg/g 和 2.72，与空白组相比 (11.38 mg/100 g，0.16 mg/g 和 1.05)，分别提升了 333.65%、783.69%和 158.23%。因此，芥菜在贮藏期的最优护色工艺为：抗坏血酸添加量 0.06% (m/m)，柠檬酸添加量 0.12% (m/m)，植酸添加量 0.012% (m/m)。

由图 5 可以看出，三种保脆方式均能显著增强芥菜的脆度 ($P<0.05$)，保脆效果为：氯化钙>复合保

脆剂>海藻酸钠。添加保脆剂的样品在贮藏期间的组织软化主要是因为微生物和酶活动引起的脆度变化，而未经保脆处理的样品主要是细胞壁的降解和细胞结构的丧失，从而导致芥菜脆度降低^[30]。在经过 18 d 贮藏期后，0.24% (m/m) 氯化钙的保脆效果最佳，与空白组相比剪切力提升了 318.84% ($P<0.05$)。因此，确定最佳保脆条件为：氯化钙添加量 0.24% (m/m)，保脆 30 min。



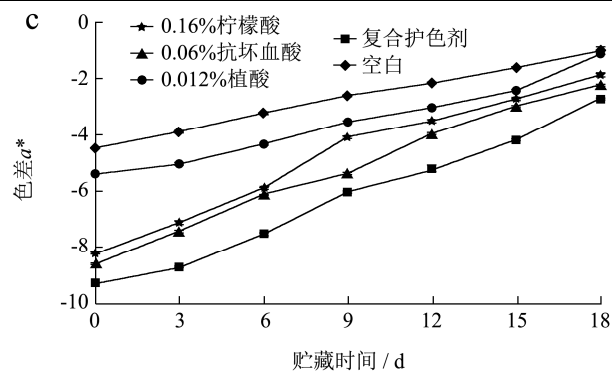


图4 贮藏时间对芥菜Vc含量(a)、叶绿素含量(b)和色差(c)的影响

Fig.4 Effects of storage time on Vc content (a), chlorophyll content (b) and color difference (c) of mustard

综上，贮藏期最优护色保脆工艺为：抗坏血酸添加量0.06%（m/m），柠檬酸添加量0.12%（m/m），植酸添加量0.012%（m/m），护色40 min，氯化钙添加量0.24%（m/m），保脆30 min，可有效缓解芥菜品质

劣化。感官评分结果（表6）表明在此条件下炒制芥菜综合得分最高（78.20分），与其他组差异明显（ $P<0.05$ ）。吴淑清^[31]等也表明1.5%柠檬酸+1.1%Vc+0.7%氯化钙复合保鲜液能使长白萝卜嫩芽色泽保持鲜绿，组织硬挺。

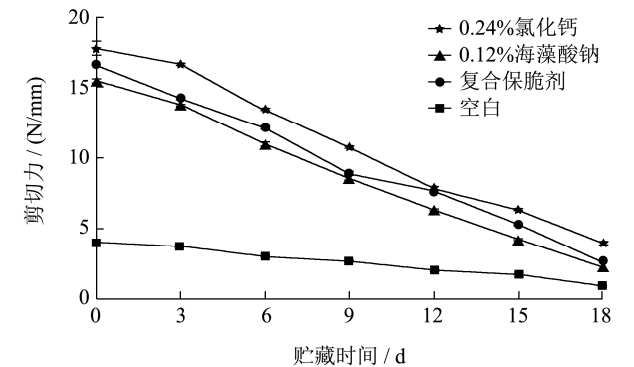


图5 贮藏时间对芥菜剪切力的影响

Fig.5 Effect of storage time on shear force of mustard

表6 最佳工艺感官评价（分）

项目	最佳护色工艺	最佳保脆工艺	护色保脆复合工艺	空白组
色泽	17.20±0.10 ^a	12.80±0.26 ^c	15.20±0.17 ^b	12.20±0.10 ^d
风味	24.50±0.17 ^a	23.00±0.26 ^d	24.20±0.26 ^b	23.30±0.10 ^c
口感	11.80±0.35 ^c	15.90±0.17 ^a	14.40±0.17 ^b	11.70±0.10 ^c
组织状态	22.20±0.26 ^c	25.30±0.26 ^a	24.40±0.00 ^b	20.90±0.10 ^d
总分	75.70±0.56 ^c	77.00±0.92 ^b	78.20±0.61 ^a	68.10±0.26 ^d

注：同行右肩标注不同小写字母表示显著性差异（ $P<0.05$ ）。

3 结论

漂烫处理和护色液、保脆液浸泡处理都有助于抑制预制菜肴中芥菜在加工贮藏中出现的变色、脆度降低等问题，其中最佳漂烫条件为90℃漂烫2 min，此时PPO和POD酶活较低，叶绿素保存率最高，可有效减缓褐变发生；最佳护色工艺为：抗坏血酸浓度0.06%（m/m），柠檬酸浓度0.12%（m/m），植酸浓度0.012%（m/m），护色40 min，经此护色处理的芥菜贮藏18 d后，与空白组相比，Vc含量，叶绿素含量和 a^* 值绝对值分别提升了333.65%，783.69%、158.23%；最佳保脆工艺为：氯化钙添加量0.24%（m/m），保脆30 min，与空白组相比，贮藏18 d后，芥菜剪切力提升了318.84%。结合感官评定，在漂烫和护色保脆复合工艺条件下，芥菜色泽自然、口感脆嫩，感官评分最高。

参考文献

[1] Zhang Chenlu, Di Hongmei, Lin Peixing, et al. Genotypic

variation of glucosinolates and their breakdown products in mustard (*Brassica juncea*) seeds [J]. Scientia Horticulturae, 2022, 294: 110765

[2] Yu Yangyang, Xu Yujuan, Li Lu, et al. Dynamic evolution of flavor substances and bacterial communities during fermentation of leaf mustard (*Brassica juncea* var. *multiceps*) and their correlation [J]. LWT - Food Science and Technology, 2022, 167: 113796

[3] Tian Yan, Deng Fangming. Phytochemistry and biological activity of mustard (*Brassica juncea*): a review [J]. CyTA-Journal of Food, 2020, 18(1): 704-718

[4] Tian Yan, Deng Fangming, Zhao Lingyan, et al. Characterization of extractable components of fresh and fermented Huarong large-leaf mustard and their inhibitory effects on human colon cancer cells [J]. Food Bioscience, 2021, 43: 101280

[5] 万正杰,范永红,孟秋峰,等.中国芥菜种业发展与展望[J].中国蔬菜,2020,12:1-6

[6] Tinello F, Lante A. Recent advances in controlling

- polyphenol oxidase activity of fruit and vegetable products [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2018, 50: 73-83
- [7] Neves F I G, Silva C L M, Vieira M C. Combined pre-treatments effects on zucchini (*Cucurbita pepo* L.) squash microbial load reduction [J]. International Journal of Food Microbiology, 2019, 305: 108257
- [8] Deng L Z, Mujumdar A S, Zhang Q, et al. Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes - a comprehensive review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(9): 1408-1432
- [9] Hurtado A, Picouet P, Jofré A, et al. Application of high pressure processing for obtaining “fresh-like” fruit smoothies [J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(12): 2470-2482
- [10] Swami Hulle N R, Srinivasa Rao P. Effect of high pressure and thermal processing on quality changes of aloe vera-litchi mixed beverage (ALMB) during storage [J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(1): 359-369
- [11] CHEN Chichang, CHANG Xiguang, CHEN Xiangning. Effect of the control of white-blush of fresh-cut carrot and its process optimization [C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental Prevention and Pollution Control Technologies (EPPCT2020), 2020: 400-406
- [12] 黄月, 黄苇, 赵笑梅, 等. 降低腌制梅菜中亚硝酸盐和护色的方法研究[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(20): 112-114
- [13] 余以刚, 伍惠仪, 胡郁汉, 等. 配餐食品中绿叶蔬菜的护绿保脆工艺优化[J]. 现代食品科技, 2020, 36(10): 190-199, 267
- [14] 谭飘飘. 芥菜对镉胁迫的生理代谢响应及外源脯氨酸的调控作用研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021
- [15] 杨广, 江凯, 曹少谦, 等. 蓝莓多酚氧化酶的部分纯化及其酶学特性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(13): 5403-5408
- [16] 马瑞, 张钟元, 赵江涛, 等. 超声辅助烫漂对黄花菜干制品色泽的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(10): 233-238
- [17] 刘伟, 许弯, 胡小琴, 等. 预处理对蓝莓 NFC 果汁品质和风味的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(3): 193-202
- [18] Zhou L, Liu W, Stockmann R, et al. Effect of citric acid and high pressure thermal processing on enzyme activity and related quality attributes of pear puree [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2018, 45: 196-207
- [19] Li Caiyun, Li Jie, Yan Shoulie, et al. The mechanism of interaction between lotus rhizome polyphenol oxidase and ascorbic acid: Inhibitory activity, thermodynamics, and conformation analysis [J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46(5): e14047
- [20] Li Caiyun, Ding Xuefeng, Li Jie, et al. Effects of different concentrations of ascorbic acid on the stability of (+)-catechin under enzymatic conditions [J]. Food Chemistry, 2022: 133933
- [21] Li Fengmao, Tang Yunming. Inhibition mechanism: Phytic acid, NADH as a peroxidase inhibitor [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2021, 244: 118856
- [22] 尹爽, 王修俊, 刘佳慧, 等. 复合保脆剂对腌制大头菜脆度的影响研究[J]. 食品科技, 2016, 41(7): 266-270
- [23] Rico D, Martín-Diana A B, Frías J M, et al. Improvement in texture using calcium lactate and heat-shock treatments for stored ready-to-eat carrots [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(4): 1196-1206
- [24] Mercado J A, Matas A J, Posé S. Fruit and Vegetable Texture: Role of Their Cell Walls [M]. Netherlands: Elsevier, 2019
- [25] 李笑梅, 赵廉诚, 邢竺静, 等. 浸泡保脆工艺的优化对老山芹解冻后品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(3): 139-145
- [26] 李昌宝, 辛明, 林波, 等. 保脆剂对番木瓜酱理化品质及质构特性的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(10): 318-322
- [27] 李凤霞, 胡元庆, 江云, 等. 不同护色剂处理对雪莲果果脯护色效果的影响[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(5): 180-184
- [28] 李凤霞, 雷清玉, 盛红叶, 等. 工艺参数对苹果果脯护色效果的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 207-211, 215
- [29] 易建华, 董新玲, 朱振宝, 等. 褐变抑制剂对苹果多酚氧化酶抑制机理研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 122-125
- [30] LvJingyi, Han Xuzhou, Bai Lin, et al. Effects of calcium chloride treatment on softening in red raspberry fruit during low - temperature storage [J]. Journal of Food Biochemistry, 2020, 44(10): e13419
- [31] 吴淑清, 段红梅, 王顺余, 等. 复合保鲜液对长白樺木嫩芽护色保鲜效果的研究[J]. 中国调味品, 2020, 45(10): 17-23