

响应面法优化香菇片硬化保脆工艺

崔国梅¹ 刘丽娜¹ 田广瑞¹ 王安建¹ 禹子琪² 高帅平¹

(1. 河南省农业科学院农产品加工研究中心, 河南 郑州 450002; 2. 河南农业大学, 河南 郑州 450002)

摘要: [目的] 抑制以鲜香菇为主要原料的产品在加工及贮藏过程中的质构劣变。[方法] 以硬度为主要指标, 通过单因素试验和响应面法分析硬化保脆剂及其添加量对香菇片质构特性的影响。[结果] 最佳的硬化保脆条件为氯化钙 0.15%, 海藻酸钠 0.11%, 葡萄糖酸- δ -内酯 2.0%, 复合溶液中浸渍时间为 100 min; 适宜的灭菌条件为 105 °C 灭菌 25 min。[结论] 优化后的工艺条件可以显著改善香菇片的质构特性, 37 °C 下贮藏 45 d, 其口感硬脆、菇味浓郁, 色泽与鲜香菇接近, 且符合国家卫生标准。

关键词: 香菇片; 质构特性; 灭菌工艺; 感官评分

Optimization of hardening and crispness preservation process of *Lentinula edodes* slices by response surface methodology

CUI Guomei¹ LIU Lina¹ TIAN Guangrui¹ WANG Anjian¹ YU Ziqi² GAO Shuaiping¹

(1. Institute of Agro-products Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou, Henan 450002, China;

2. Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: [Objective] This study aims to restrain the texture deterioration of the products with fresh *Lentinus edodes* as the main raw material during processing and storage. [Methods] With hardness as the indicator, single factor tests and response surface methodology were employed to analyze the effects of different additives and addition amounts on the quality of *L. edodes* slices. [Results] The optimum hardening and crispness preservation conditions were as follows: soaking in the composite composed of calcium chloride 0.15%, sodium alginate 0.11%, and gluconate- δ -lactone composite 2.0% for 25 min. The optimized sterilization process was 105 °C for 25 min. [Conclusion] The optimized processing conditions could significantly improve the texture characteristics of *L. edodes* slices. After storage at 37 °C for 45 days, the *L. edodes* slices processed with the optimal conditions demonstrated a crisp taste and the color close to fresh *L. edodes*. The products met the national hygienic standard.

Keywords: *Lentinus edodes* slices; texture characteristics; sterilization process; sensory score

香菇(*Lentinus edodes*)起源于中国, 是一种珍贵食用菌^[1], 其食用价值极高, 具有独特风味^[2], 且富含香菇多糖、核酸等多种活性物质, 具有抗癌、抗炎、免疫调节、降“三高”、提升免疫力、促进钙吸收等多种药用价值^[3-6]。

香菇加工及贮藏过程中因微生物、酶活动及自身生理生化活动如细胞壁降解等原因容易造成质构劣变, 导致口感软绵、无弹性。目前, 有关香菇加工方面的研究主要集中在干制及复水^[7-9]、风味物质^[10-11]及活性物质提取^[12-13]等方面, 而对质构的研究较少, 或者仅单纯研究 Ca^{2+} 浸渍浓度及时间等其对质构的影响。但香菇中果胶酸

含量较低, 单纯的 Ca^{2+} 处理效果难达预期。郭李萌^[14]研究发现, 0.7% 柠檬酸、0.4% 氯化钠、0.4% 异抗坏血酸钠、0.1% 氯化钙混合液, 95 °C 漂烫 5 min, 可有效防止双孢菇褐变, 但对质构的维持效果不明显。研究拟利用 Ca^{2+} 、海藻酸钠及葡萄糖酸- δ -内酯的协同作用, 配以适当的杀菌工艺, 提高香菇片的质构品质, 旨在提高香菇片的品质, 同时也为其他食用菌产品质构品质提升产品质量提高提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲜香菇: 产自河南省西峡县, 采摘后运回实验室于

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(编号: 242102111068, 242102110348); 河南省农业科学院科技创新团队专项(编号: 2024TD35)

通信作者: 王安建(1959—), 男, 河南省农业科学院农产品加工研究中心研究员, 硕士。E-mail: 309294051@qq.com

收稿日期: 2024-06-20 **改回日期:** 2024-12-20

(4±1)℃冷藏备用;

氯化钙、海藻酸钠:食品级,黑龙江新和成生物科技有限公司;

葡萄糖酸- δ -内酯:食品级,安琪酵母股份有限公司;

盐酸、氢氧化钠、硼酸、甲基红指示剂、溴甲酚绿指示剂、丙酮、冰乙酸、福林酚、无水乙醇、无水碳酸钠、葡萄糖、苯酚、浓硫酸、氯化钠、没食子酸等均为国产分析纯;

菌落总数测试片、沙门氏菌测试片、大肠菌群测试片、金黄色葡萄球菌测试片:广州达元绿洲食品安全股份有限公司。

1.2 仪器与设备

分析天平:JA5003B型,上海精科天美科学仪器有限公司;

切片机:60-A型,3.5 mm,广州荣安商贸有限公司;

物性测定仪:TMS-Pro型,美国FTC公司;

真空包装机:ST-35型,温州市大江真空包装机械有限公司;

超纯水机:Advanced-I型,台湾艾柯成都康宁实验专用纯水设备厂;

立式反压蒸汽灭菌锅:DY04-18-26-00型,上海亚东压力容器制造有限公司;

生化培养箱:SPX-250型,上海海向仪器设备厂;

集热式恒温加热磁力搅拌器:DF-101S型,河南省予华仪器有限公司;

紫外可见分光光度计:UV-1800型,岛津仪器(苏州)有限公司;

高速万能粉碎机:LD-Y300A型,上海顶帅电器有限公司;

恒温磁力搅拌器:DF-10型,巩义市予华仪器有限公司;

台式高速冷冻离心机:H2050R型,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;

全自动凯氏定氮仪:K1100型,海能未来技术集团股份有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 香菇片加工工艺

原料选择→清洗→漂烫→冷却→切片→硬化→离心脱水→真空包装→杀菌→冷却→入库

选择新鲜、无病虫害、无污染的香菇进行清洗,结合预试验及生产实践,设定烫漂温度100℃、烫漂时间1.5 min,冷却,切片。将切片后的香菇置于硬化溶液中浸渍硬化(先置于钙离子及葡萄糖酸- δ -内酯混合溶液中浸渍一定时间,再置于海藻酸钠溶液中浸渍一定时间),离心脱水,真空分装,杀菌,冷却,入库。对照组未经硬化工艺,切片后直接离心脱水。处理后的样品于37℃培养箱中放置15 d后测定指标,最终产品于37℃培养箱中放置

45 d后测定指标。

1.3.2 硬化保脆单因素试验 结合预试验,选择氯化钙(0.05%,0.10%,0.15%,0.20%,0.25%)、海藻酸钠(0.05%,0.08%,0.11%,0.14%,0.17%)、葡萄糖酸- δ -内酯(1%,2%,3%,4%,5%)和乳酸钙(0.05%,0.10%,0.15%,0.20%,0.25%)4种硬化剂按料液比($m_{\text{香菇}}:V_{\text{浸渍液}}$)1:4(g/mL)将香菇切片浸渍80 min,采用质构仪测其硬度。

1.3.3 响应面试验 通过单因素试验,以氯化钙添加量、海藻酸钠添加量、葡萄糖酸- δ -内酯添加量为因素,利用Box-Behnken响应面试验优化香菇硬化保脆工艺。

1.3.4 硬化保脆时间优选 筛选出最优硬化条件后,按最优配比分别浸渍40,60,80,100,120,140 min,脱水,装袋,105℃高压灭菌20 min,测定产品硬度。

1.3.5 灭菌工艺 香菇灭菌温度分别为85,95,105,115℃,各温度分别灭菌20,25,30 min,冷却,取30袋产品于37℃恒温箱贮藏7 d,观察胀袋情况。

1.4 指标测定

1.4.1 粗蛋白含量 参照GB 5009.5—2016。

1.4.2 总膳食纤维含量 参照GB 5009.88—2014。

1.4.3 粗多糖含量 参照周浩宇等^[15]的方法并修改。将鲜香菇与去离子水按 $m_{\text{香菇}}:V_{\text{水}}$ 为1:3(g/mL)于破壁机中打碎,沸水提取1 h,4℃、10 000 r/min离心10 min,沉淀物重复提取1次,合并上清液。参照GB/T 15672—2009测定粗多糖含量。

1.4.4 总酚含量 参照Nie等^[16]的方法并修改。将鲜香菇与体积分数为60%的乙醇溶液按 $m_{\text{香菇}}:V_{\text{乙醇}}$ 为1:3(g/mL)于破壁机中破碎,超声提取60 min,4℃、10 000 r/min离心10 min,取上清液备用。采用Folin-Ciocalteu法测定总酚含量,并以没食子酸当量(mg/g)表示。

1.4.5 质构分析 采用直径为75 mm的圆柱形探头P/75进行TPA测试,测前速度30 mm/min,测试速度60 mm/min,测后速度60 mm/min,样品形变量80%,两次压缩停顿时间为5 s,触发力为0.5 N,每次测20个样品取平均值。

1.4.6 微生物含量 按菌落总数测试片、沙门氏菌测试片、大肠菌群测试片、金黄色葡萄球菌测试片说明书进行测试。

1.4.7 感官评定 选择10名感官评定人员(男女各半)按表1进行专项评定,其中硬度、色泽、风味、形态权重分别为0.4,0.2,0.2,0.2。

1.5 数据分析

采用SPSS 23.0及Design-Expert 12进行数据统计分析,结果以mean±SD表示,并用Origin 8.5.1软件制图。

表 1 感官评分标准

Table 1 Sensory evaluation standards

等级	硬度	色泽	风味	形态
一级(90~100分)	硬脆接近鲜菇	与鲜菇接近	菇味浓郁,无异味	菇片外形完整
二级(80~90分)	硬脆较好	色泽稍暗	菇味较浓,无异味	菇片较为完整
三级(70~80分)	硬脆一般	色泽较暗	菇味较淡,无异味	菇片一般完整
四级(60~70分)	硬脆较差	色泽偏黄或偏褐色	菇味不明显,有异味	菇片外形较差

2 结果与分析

2.1 硬化保脆单因素试验

由图 1 可知,香菇切片硬度随着 CaCl_2 及乳酸钙添加量的增加先增大后减小,硬度增大的原因可能是 Ca^{2+} 能够激活香菇中内源性果胶甲酯酶^[17],使 Ca^{2+} 与果胶酸反

应生成不溶于水的果胶酸钙凝胶,增强了组织细胞间黏附力,从而起到硬化保脆作用;硬度降低可能是 Ca^{2+} 浓度过高,香菇组织细胞在高渗透压下可能造成细胞内容物流出,使组织变软^[18]。 CaCl_2 的保脆效果略好于乳酸钙,因此从成本及硬化效果来看,优选 CaCl_2 ,并选择 0.10%,0.15%,0.20% 3 个水平进行响应面试验。

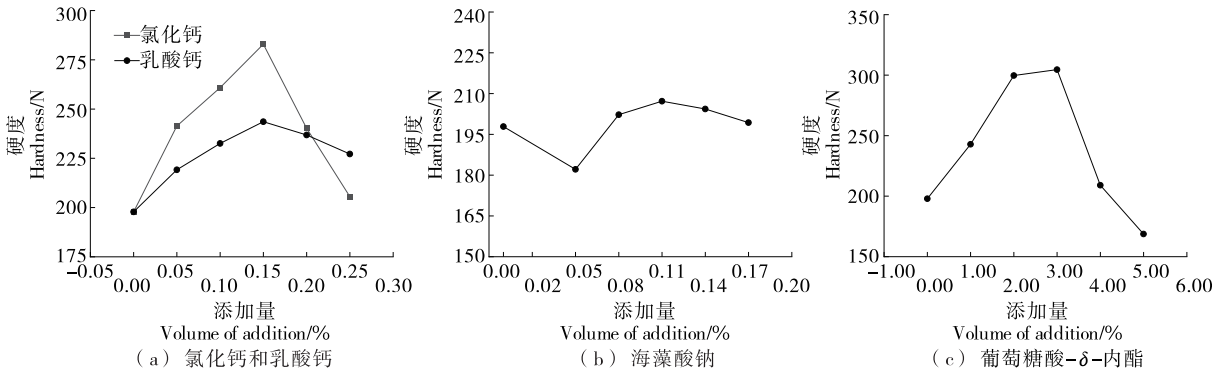


图 1 4 种硬化剂对香菇硬度的影响

Figure 1 Effects of four hardening reagents on the hardness of *Lentinus edodes* slices

单纯地添加海藻酸钠对香菇的硬化保脆并未起到明显的效果,但 Ca^{2+} 与海藻酸钠之间存在离子交联反应,海藻酸钠属于阴离子型高分子多糖,其分子中的古洛糖醛酸片段与 Ca^{2+} 交联形成钙桥及不可逆的凝胶结构,并填充于香菇组织内部,从而能够抵御来自温度等外界干扰造成的质构劣变。海藻酸钠添加量过高,难以渗透至香菇内部且表面发黏,添加量过低则效果不佳,故选择 0.08%,0.11%,0.14% 的海藻酸钠进行响应面试验。

葡萄糖酸- δ -内酯溶于水后解离生成的葡萄糖酸能够使蛋白质溶胶进一步生成凝胶。仅 4% 添加量的葡萄糖酸- δ -内酯与对照组无显著差异,其余组硬化效果均较好。硬度先上升后下降,可能是随着葡萄糖酸- δ -内酯添加量的增大,溶液酸性增强,蛋白质发生水解或肽链发生断裂。此外,葡萄糖酸- δ -内酯添加量过高,溶液呈酸味。综合考量,选择 1%,2%,3% 的葡萄糖酸- δ -内酯进行响应面试验。

2.2 响应面试验

2.2.1 响应面优化试验设计及结果 根据单因素试验结果,选择氯化钙添加量、海藻酸钠添加量和葡萄糖酸- δ -内

酯添加量为因素,以香菇硬度为响应值进行三因素三水平响应面优化试验,试验因素水平见表 2,试验设计及结果见表 3。

表 2 响应面因素水平表

Table 2 Factors and levels of response surface experiment

水平	A 氯化钙 添加量/%	B 海藻酸钠 添加量/%	C 葡萄糖酸- δ -内酯 添加量/%
-1	0.10	0.08	1.0
0	0.15	0.11	2.0
1	0.20	0.14	3.0

使用 Design-Expert 12 软件对硬度进行回归分析,得二次多元回归方程

$$Y=343.62-6.25A+8.86B-6.19C-7.25AB-18.15AC+1.63BC-20.57A^2-19.90B^2-6.20C^2. \quad (1)$$

由表 4 可知,模型 $P<0.01$,极显著;失拟项 $P>0.05$,不显著;决定系数 $R^2=0.967\ 3$,校正系数 $R^2_{\text{Adj}}=0.925\ 2$,说明二次回归方程拟合度较好,该模型能够准确预测香菇

表3 响应面试验设计及结果

试验号	A	B	C	硬度/N
1	-1	-1	0	286.6
2	1	-1	0	296.2
3	-1	1	0	324.6
4	1	1	0	305.2
5	-1	0	-1	314.1
6	1	0	-1	330.3
7	-1	0	1	339.7
8	1	0	1	283.3
9	0	-1	-1	320.2
10	0	1	-1	328.9
11	0	-1	1	302.9
12	0	1	1	318.1
13	0	0	0	345.2
14	0	0	0	338.0
15	0	0	0	344.7
16	0	0	0	345.0
17	0	0	0	345.2

片的硬度。一次项A、C和交互项AB影响显著($0.01 < P < 0.05$),一次项B、交互项AC、二次项 A^2 和 B^2 影响极显著($P < 0.01$)。根据 F 值可知,各因素对硬度影响的主次顺序为海藻酸钠添加量>氯化钙添加量>葡萄糖酸- δ -内酯添加量。海藻酸钠添加量本身对香菇片硬度影响不明显,但在氯化钙添加量的协同作用下,海藻酸钠添加量对

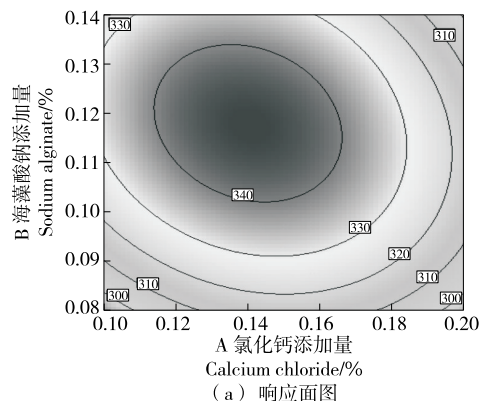
表4 响应面回归模型方差分析[†]

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	6 728.26	9	747.58	23.00	0.000 2**
A	312.50	1	312.5	9.62	0.017 3*
B	628.35	1	628.35	19.34	0.003 2**
C	306.28	1	306.28	9.42	0.018 1*
AB	210.25	1	210.25	6.47	0.038 5*
AC	1 317.69	1	1 317.69	40.55	0.000 4**
BC	10.56	1	10.56	0.33	0.586 4
A^2	1 782.01	1	1 782.01	54.84	0.000 1**
B^2	1 666.99	1	1 666.99	51.30	0.000 1**
C^2	161.72	1	161.72	4.98	0.060 9
残差	227.48	7	32.50		
失拟项	187.83	3	62.61	6.32	0.053 5
纯误差	39.65	4	9.91		
总和	6 955.74	16			

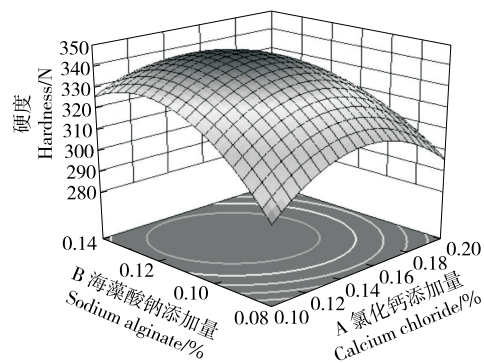
[†] *为显著($0.01 < P < 0.05$),**为极显著($P < 0.01$); $R^2=0.967 3$, $R^2_{Adj}=0.925 2$ 。

硬度的影响变得尤为强势,且葡萄糖酸- δ -内酯添加量与氯化钙添加量也具有一定的协同作用。

2.2.2 交互作用分析 以硬度为响应值,依据回归方程建立响应面如图2~图3所示。响应面越陡峭说明响应值对香菇片硬度的影响越灵敏,而等高线越接近椭圆说明交互作用越强^[19-20]。



(a) 响应面图



(b) 等高线图

图2 海藻酸钠添加量和氯化钙添加量的交互作用

Figure 2 Interaction effects of sodium alginate and calcium chloride

由图2可知,当固定氯化钙添加量以海藻酸钠添加量为自变量时,硬度呈先上升后下降趋势。当海藻酸钠添加量为0.08%~0.14%时,图像较陡峭,说明海藻酸钠对香菇片硬度的影响较为显著。当固定海藻酸钠添加量以氯化钙添加量为自变量时,硬度呈先上升后下降趋势。当

氯化钙添加量为0.1%~0.2%时,图像较陡峭,说明氯化钙对香菇片硬度的影响较显著。

由图3可知,当固定氯化钙添加量以葡萄糖酸- δ -内酯添加量为自变量时,硬度呈先上升后平稳略升趋势,葡萄糖酸- δ -内酯添加量过高,产品呈酸味,限制了其添加量

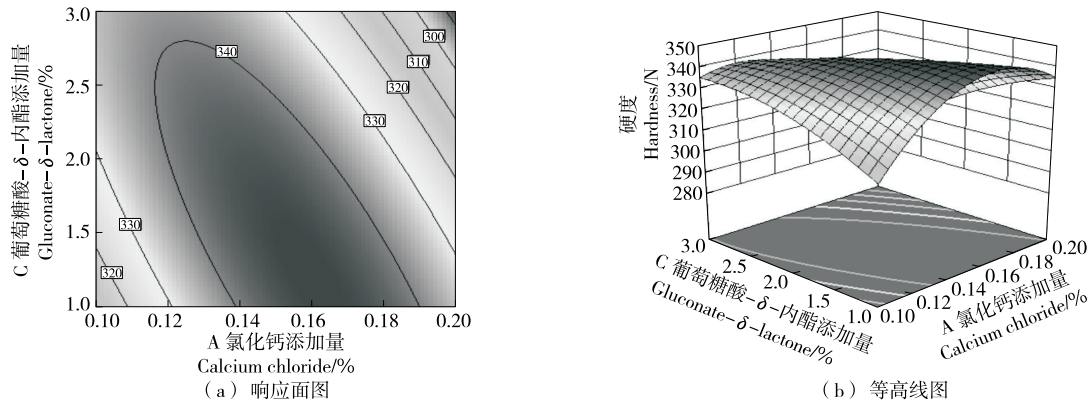


图3 氯化钙添加量和葡萄糖酸-δ-内酯添加量的交互作用
Figure 3 Interaction effects of gluconate-δ-lactone and calcium chloride

的增加。当葡萄糖酸-δ-内酯添加量为1%~3%时,图像较为陡峭,说明葡萄糖酸-δ-内酯添加量对香菇片硬度的影响较为显著。当固定葡萄糖酸-δ-内酯添加量以氯化钙添加量为自变量时,硬度呈先上升后下降趋势。当氯化钙添加量为0.1%~0.2%时,图像也比较陡峭,说明氯化钙添加量对香菇片硬度影响较显著,与方差分析结果一致。

2.2.3 验证实验 通过 Box-Behnken 响应面分析香菇片的回归模型,得到最佳工艺为氯化钙添加量 0.153%,海藻酸钠添加量 0.116%,葡萄糖酸-δ-内酯添加量 1.424%,硬度预测值为 346.01 N。为了方便生产,将最佳工艺修正为氯化钙添加量 0.15%,海藻酸钠添加量 0.11%,葡萄糖酸-δ-内酯添加量 2.0%,此时香菇硬度为 343.7 N,与预测值接近。孙娜等^[21]研究表明,1.5%氯化钙与1.0% δ-葡萄糖酸内酯、0.3%海藻酸钠对五叶草莓果脯的硬化效果最好,其钙离子添加量显著高于试验香菇片的,可能是因为草莓中果胶含量较丰富,需要较多的钙离子交联形成凝胶网络结构。

2.3 硬化时间

由图4可知,浸渍时间为100,120,140 min的硬度无显著差异,结合生产效率及硬化效果,取最佳硬化时间为100 min。

2.4 灭菌试验

由表5可知,85℃的香菇全部胀袋,因杀菌温度较低,无法起到良好的灭菌作用。115℃的香菇虽未胀袋,但其杀菌温度较高,能耗大且更易降低产品硬度从而导致品质下降。95℃灭菌30 min及105℃灭菌20 min的杀菌方式均出现一定的胀袋情况且比例较高,经衡量选择105℃灭菌25 min作为香菇片的杀菌工艺。

2.5 产品质构特性及感官评分对比

由图5可知,工艺优化组的硬度、弹性、胶黏性、咀嚼性、内聚性均显著优于对照组($P<0.05$),其中硬度提高了73.2%,弹性提高了26.3%;黏附性显著低于对照组。这可

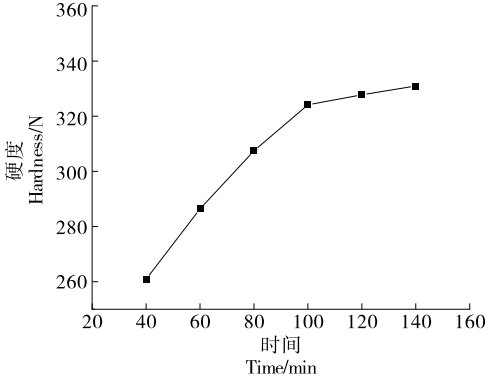


图4 浸渍时间与香菇片硬度的关系
Figure 4 Relationship between different soaking time and hardness of *Lentinus edodes* slices

表5 杀菌结果		
Table 5 Results of sterilization		
杀菌温度/℃	杀菌时间/min	胀袋状况
85	20	全部胀袋
	25	全部胀袋
	30	全部胀袋
95	20	全部胀袋
	25	全部胀袋
	30	4个胀袋
105	20	26个胀袋
	25	均未胀袋
	30	均未胀袋
115	20	均未胀袋
	25	均未胀袋
	30	均未胀袋

能是因为香菇片的微观结构如纤维排列、空隙大小、分布等香菇片内在特性的影响导致香菇片硬化保脆后细胞间结合力变小。赵哲坤等^[22-24]研究发现,香菇等果蔬的硬

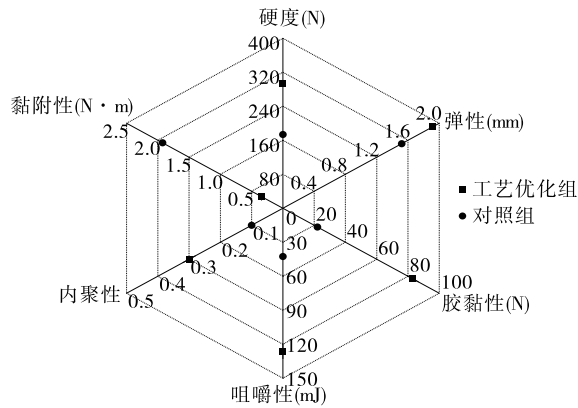


图5 质构特性点图

Figure 5 Dot chart of texture properties

度与弹性、咀嚼性呈正相关,与黏附性呈负相关,与试验结果一致。

由图6可知,工艺优化组的硬度、色泽及综合评分显著高于对照组($P<0.05$),说明该工艺对香菇硬度及综合评分有积极效果。色泽优于对照组,可能是因为钙离子能够增强细胞膜结构的稳定性,维持细胞壁结构完整,减少自由基对细胞的伤害,还能够提高香菇片中抗氧化酶

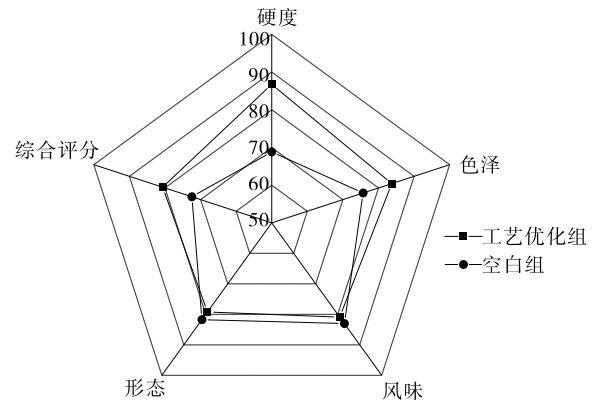


图6 感官评价雷达图

Figure 6 Radar chart of sensory evaluation

活性,减少活性氧的累积,从而有助于防止香菇片褐变。也有可能是钙离子参与香菇片逆境胁迫的应答反应,如高温等,从而影响其在逆境下的色泽表现。

2.6 产品理化及微生物指标检验

由表6可知,工艺优化组与对照组在理化及微生物指标上差异不明显,说明工艺优化对香菇片产品一些常规理化指标的影响较小。

表6 香菇片的理化及微生物指标

Table 6 Physical, chemical, and microbial indicators of *Lentinula edodes* slices

组别	粗蛋白/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	膳食纤维/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	粗多糖/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	总酚/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	菌落总数/ ($\text{CFU} \cdot \text{g}^{-1}$)	大肠菌群/ ($\text{CFU} \cdot \text{g}^{-1}$)
优化组	235.96 ± 11.63	303.26 ± 14.67	64.51 ± 3.86	3.93 ± 0.27	<100	未检出
对照组	227.61 ± 8.19	298.56 ± 12.54	66.35 ± 2.96	4.00 ± 0.19	<100	未检出

3 结论

以硬度为指标,针对影响香菇片品质的关键工艺条件进行了优化,筛选出最佳硬化条件为氯化钙添加量0.15%,海藻酸钠添加量0.11%,葡萄糖酸- δ -内酯添加量2.0%,浸渍时间为100 min,105 $^{\circ}\text{C}$ 灭菌25 min。产品贮藏45 d后,以对照组为对照,工艺优化组的硬度、弹性、胶黏性、咀嚼性、内聚性均显著优于对照组($P<0.05$),且其感官评定的硬度、色泽、风味、综合评分均显著优于对照组。香菇片产品的菌落总数、大肠菌群及致病菌均符合相关卫生标准,说明对香菇片产品质构优化后并不影响其他品质及卫生指标。

试验中浸渍采用普通浸渍方法,时间久、效率低,而利用脉冲负压等可以显著缩短浸渍时间,后续可进一步进行研究。针对香菇片货架期短、质构劣变等问题,还可从分子水平、物流及供应链管理、采后处理等方面进行深入研究。一方面可以从分子水平着手,通过基因组测序及转录组学分析,研究与香菇质构特性相关的基因和调

控元件,找到影响香菇质构特性的关键基因,同时集成转录组学、蛋白质组学及代谢组学的相关数据,全视角分析解决香菇等食用菌的质构劣变问题,选育出适合加工的香菇品种。另一方面,可以从物流及供应链管理方面发力。此外,受市场供应的影响,因成本控制等问题需对原料进行超前或超量采购,对原料适时采摘、分级、遇冷、保鲜等手段必不可少,从源头管控产品品质。总之,香菇片作为一种深加工方式,其技术工艺需要在实际应用中探索、总结和完善。

参考文献

- [1] YU S G, WU X L, FERGUSON M, et al. Diets containing shiitake mushroom reduce serum lipids and serum lipophilic antioxidant capacity in rats[J]. The Journal of Nutrition, 2016, 146(12): 2 491-2 496.
- [2] SHI D F, ZHOU R R, FENG X, et al. Effects of low-dose γ -irradiation on the water state of fresh *Lentinula edodes*[J]. LWT, 2020, 118: 108764.

- [3] DENG S M, ZHANG G X, KUAI J J, et al. Lentinan inhibits tumor angiogenesis via interferon γ and in a T cell independent manner[J]. Journal of Experimental & Clinical Cancer Research, 2018, 37(1): 260.
- [4] LI W Y, WANG J L, HU H P, et al. Functional polysaccharide Lentinan suppresses human breast cancer growth via inducing autophagy and caspase-7-mediated apoptosis[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 45: 75-85.
- [5] YAO H Y, FAN Z, CHENG H L, et al. Recent development of thermoelectric polymers and composites[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2018, 39(6): 1 700-1 727.
- [6] WANG L M, LIU Y C, ZHANG Z M, et al. Polymer composites-based thermoelectric materials and devices[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 122: 145-155.
- [7] QIU Y, BI J F, JIN X, et al. Investigation on the rehydration mechanism of freeze-dried and hot-air dried shiitake mushrooms from pores and cell wall fibrous material[J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132360.
- [8] HU L N, BI J F, JIN X, et al. Microstructure evolution affecting the rehydration of dried mushrooms during instant controlled pressure drop combined hot air drying (DIC-HA)[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 79: 103056.
- [9] SU D B, SUN W H, LI B Z, et al. Influence of ultrasonic pretreatments on microwave hot-air flow rolling drying mechanism, thermal characteristics and rehydration dynamics of *Pleurotus eryngii*[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(5): 2 100-2 109.
- [10] ZHANG Z Y, ZHANG X Y, XIN G, et al. Umami taste and its association with energy status in harvested *Pleurotus geesteranus* stored at different temperatures[J]. Food Chemistry, 2019, 279: 179-186.
- [11] LI B, LIU C Y, FANG D L, et al. Effect of boiling time on the contents of flavor and taste in *Lentinus edodes*[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2019, 34(6): 506-513.
- [12] PÉREZ-BASSART Z, FABRA M J, MARTÍNEZ-ABAD A, et al. Compositional differences of β -glucan-rich extracts from three relevant mushrooms obtained through a sequential extraction protocol[J]. Food Chemistry, 2023, 402: 134207.
- [13] 李静敏, 薛长湖, 梅轩玮, 等. 基于碳水化合物结合结构域的香菇多糖特异性荧光探针的构建与应用[J]. 食品工业科技, 2024, 45(19): 240-246.
- LI J M, XUE C H, MEI X W, et al. Construction and application of a lentinan-specific fluorescent probe based on a carbohydrate binding-module[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(19): 240-246.
- [14] 郭李萌. 预处理对双孢菇品质特性的影响[D]. 太原: 山西农业大学, 2018.
- GUO L M. Effect of pretreatment on quality characteristics of *Agaricus bisporus*[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2018.
- [15] 周浩宇, 俞明君, 聂远洋, 等. 热加工方式对香菇营养特性和抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(15): 106-114.
- ZHOU H Y, YU M J, NIE Y Y, et al. Effects of heat processing methods on nutritional properties and antioxidant activity of *Lentinus edodes*[J]. Food Science, 2021, 42(15): 106-114.
- [16] NIE X B, ZHANG R C, CHENG L L, et al. Combining the biocontrol yeast *Pichia kluyveri* with UV-C treatment to control postharvest decay of king oyster mushrooms (*Pleurotus eryngii*) caused by *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* [J]. Biological Control, 2020, 149: 104327.
- [17] RICO D, MARTÍN-DÍANA 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): 1 196-1 206.
- [18] MERCADO J A, MATAS A J, POSÉ S. Fruit and vegetable texture: role of their cell walls[M]// Encyclopedia of Food Chemistry. Amsterdam: Elsevier, 2019: 1-7.
- [19] 王彩虹, 刘玉洁, 孙思雨, 等. 基于响应面法优化洋葱酱的制备工艺[J]. 中国调味品, 2020, 45(11): 111-116.
- WAGN C H, LIU Y J, SUN S Y, et al. Optimization of preparation process of onion paste based on response surface methodology[J]. China Condiment, 2020, 45(11): 111-116.
- [20] 贾庆超, 梁艳美. 模糊数学评价结合响应面法优化枸杞鸡枞菌复合饮料配方[J]. 中国酿造, 2021, 40(4): 115-121.
- JIA Q C, LIANG Y M. Optimization of *Lycium barbarum* and *Termitomyces albuminosus* compound beverage formula by fuzzy mathematics evaluation combined with response surface methodology[J]. China Brewing, 2021, 40(4): 115-121.
- [21] 孙娜, 朱秀娟, 胡文斌, 等. 模糊数学感官评价法优化低糖五叶草莓果脯加工工艺[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(2): 80-87, 93.
- SUN N, ZHU X J, HU W B, et al. Optimization of processing technology of low sugar *Fragaria pentaphylla* lozinsk preserved fruits by fuzzy mathematical sensory evaluation method[J]. Storage and Process, 2021, 21(2): 80-87, 93.
- [22] 赵哲坤, 吴林凤, 罗晓恒, 等. 用于鲜切加工的香菇营养品质和质构特性研究[J]. 食药菌, 2022, 30(3): 221-225.
- ZHAO Z K, WU L F, LUO X H, et al. Study on nutritional quality and texture characteristics of *Lentinula edodes* used for fresh cutting processing[J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2022, 30(3): 221-225.
- [23] 杨植, 王振磊. 基于 TPA 法评价枣果实质地及聚类分析[J]. 新疆农业科学, 2019, 56(10): 1 860-1 868.
- YANG Z, WAGN Z L. Evaluation and cluster analysis of jujube fruit texture based on TPA method[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2019, 56(10): 1 860-1 868.
- [24] FARCUH M, COPEB B, LE-NAVENEC G, et al. Texture diversity in melon (*Cucumis melo* L.): sensory and physical assessments[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 159: 111024.