

范秀芝, 姚芬, 殷朝敏, 等. 香菇预制菜制备工艺优化 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 223–231. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080073

FAN Xiuzhi, YAO Fen, YIN Chaomin, et al. Optimization of the Preparation Process of *Lentinula edodes* Prefabricated Dishes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(12): 223–231. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080073

· 工艺技术 ·

香菇预制菜制备工艺优化

范秀芝¹, 姚 芬¹, 殷朝敏¹, 杨 玲¹, 史德芳^{1,2}, 张 健³, 李新伟⁴, 高 虹^{1,2,4,*}

(1.湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430064;

2.林下经济湖北省工程研究中心, 湖北武汉 430064;

3.随州职业技术学院, 湖北随州 441300;

4.湖北省香菇产业技术研究院, 湖北随州 441309)

摘 要:为获得方便、健康的香菇预制菜, 本研究以活性物质多糖为营养指标, 以色泽为外观指标, 以质构和风味为品质指标, 对制备香菇预制菜的复水、漂烫、护色、杀菌等工艺和条件进行优化。结果表明, 通过复水-漂烫条件联合优化, 获得最优复水-漂烫条件为: 室温复水 50 min, 漂烫 3 min, 此时多糖损失率最低, 为 $24.31\% \pm 3.03\%$, 香菇硬度较低, 咀嚼性适中。以色差值和可表征美拉德反应程度的 A_{294} 和 A_{420} 为评价指标, 通过正交优化获得切片后香菇的复合护色剂为柠檬酸 12 g/L, 抗坏血酸 0.8 g/L, L-半胱氨酸 2.0 g/L, 进一步优化确定护色时间为 20 min, 此时 ΔE 为 17.00 ± 0.08 , 色泽综合评分为 10.295 ± 0.190 。最后通过比较高压杀菌、常压杀菌和辐照杀菌对香菇色泽和风味的影响, 确定预制调理香菇的最优杀菌方式为 $^{60}\text{Co-}\gamma$ 射线辐照冷杀菌。本研究优化的香菇预制菜制备工艺简单、生产周期短, 能较好的保留香菇原有的营养价值与独特的风味, 适合大规模工业化生产。

关键词:香菇, 预制菜, 多糖, 色差, 美拉德反应, 风味物质

中图分类号: TS255.36

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2023)12-0223-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080073

本文网刊:



Optimization of the Preparation Process of *Lentinula edodes* Prefabricated Dishes

FAN Xiuzhi¹, YAO Fen¹, YIN Chaomin¹, YANG Ling¹, SHI Defang^{1,2}, ZHANG Jian³, LI Xinwei⁴,
GAO Hong^{1,2,4,*}

(1. Institute of Agro-Products Processing and Nuclear agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China;

2. Hubei Provincial Engineering Research Center of Under-forest Economy, Wuhan 430064, China;

3. Suizhou Vocational & Technical College, Suizhou 441300, China;

4. Hubei Xianggu Mushroom Industrial Technology Research Institute, Suizhou 441309, China)

Abstract: In order to obtain convenient and healthy *Lentinula edodes* prefabricated dishes (LPD), the processing conditions of rehydration, blanching, color protection and sterilization method were optimized by using the polysaccharides as the nutrition index, and color, texture and flavor as the quality index. Results showed that the optimal rehydration-blanching conditions were: rehydration at room temperature for 50 min, then blanching for 3 min. At this time, the polysaccharides loss rate was the lowest ($24.31\% \pm 3.03\%$), the hardness of *L. edodes* was low, and the chewing was moderate. Subsequently, the value of chromatism, and A_{294} and A_{420} that could characterize the degree of Maillard reaction were used as evaluation indexes, the composition of color protection agent was optimized by orthogonal tests. The results showed that the optimized color protection agent for sliced *L. edodes* was composed of 12 g/L of citrate, 0.8 g/L of ascorbic acid, and 2.0 g/L of L-

收稿日期: 2022-08-09

基金项目: 湖北省重点研发计划项目 (2022BBA0024) 和湖北省食用菌产业技术体系项目 (HBHSDZB-2021-023)。

作者简介: 范秀芝 (1984-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 食用菌活性物质合成调控及精深加工, E-mail: xzhfan@aliyun.com。

* 通信作者: 高虹 (1971-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食用菌加工, E-mail: gaohong@hbaas.com。

cysteine. After further optimization, it was determined that the optimal soak time was 20 min. Under these conditions, the ΔE of sterilized sliced *L. edodes* was 17.00 ± 0.08 , and the comprehensive score of color was 10.295 ± 0.190 . Finally, the color and flavor of LPDs which respectively sterilized by high pressure, normal pressure and γ -irradiation were compared to select the sterilization method. As a result, the cold sterilization, ^{60}Co - γ irradiation was selected as the optimal sterilization method for LPD production. As a summary, the optimized preparation process for LPD, which obtained in this study with simple processing condition and short production cycle, could better retain the nutritional value and unique flavor of *L. edodes*, and would be suitable for large-scale industrial production of LPD.

Key words: *Lentinula edodes*; prefabricated dishes; polysaccharides; color; Maillard reaction; flavor compound

预制菜是以一种或多种食品原辅料,配以或不配以调味料等辅料,经预选、调制、成型、包装等工艺加工而成的预制包装菜肴^[1]。根据烹饪方式的不同,预制菜可分为即食、即热、即烹、即配四大品类,不同品类应在适宜的条件下(常温、冷藏、冷冻)贮藏,并具有一定的保质期^[2]。食用菌作为一类营养丰富、口味良好的食品原料,是开发预制菜的优质原料,在满足“轻烹饪”、“快节奏”餐饮市场需求的同时,可较好地丰富预制菜品种^[3]。

香菇(*Lentinula edodes*)是我国第一大食用菌品种。据统计,2020 年我国香菇总产量为 1188.21 万吨,居世界第一。现代研究表明,香菇中含有丰富的蛋白质、氨基酸、膳食纤维、矿物质、维生素等营养成分,以及香菇多糖、甾醇、香菇嘌呤等活性物质^[4],具有抗肿瘤、抑菌、抗氧化、抗炎、增强免疫、降低胆固醇等多种生物学活性和保健功效^[5-7]。

鲜香菇含水量在 90% 左右,采后易发生品质裂变,贮藏期短,因此,香菇主要以干制品的形式销售或出口。但与新鲜或冷藏的香菇相比,干香菇虽然易于储存、方便运输,但加工前需要复水,这与当下快节奏生活和“懒人经济”相背离,而且消费者只是将复水作为干香菇烹调或加工前的准备工作,并不会关注复水条件对香菇品质的影响。虽已有研究发现不同复水条件对香菇外观、色泽、风味物质种类和含量有影响,如干香菇 40 °C、pH9 复水处理 40 min^[8]或 45 °C 复水 270 min^[9],其挥发性含硫化合物含量较高,“香菇味”浓郁。但以上研究中对 pH 的调节和 270 min 较长的复水时间在实际香菇烹调或加工过程中不实用。

因此,针对干香菇加工前复水等工艺耗时、复水条件影响风味及品质等问题,本研究首次以多糖损失率为筛选指标对复水、漂烫条件进行优化,以减少香菇多糖损失,通过护色条件优化改善外观品质,通过杀菌条件筛选进一步在控制产品品质损失前提下保障食品安全,最后获得一套完善的香菇即烹预制菜制备工艺,方便大众膳食。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

干香菇 湖北长久菌业有限公司;L-半胱氨酸、柠檬酸、D-异抗坏血酸钠、抗坏血酸 食品级,河南老贝生物科技有限公司;葡萄糖、苯酚 分析纯,国

药集团化学试剂有限公司。

UV1800 紫外分光光度计 日本岛津公司;TA-XT Plus 物性测试仪 英国 SMS 公司;CR-10 Plus 色差仪 日本 Konica Minolta 公司;手动 SPME 进样器、二甲基苯/碳分子筛/聚二甲基硅氧烷(DVB/CAR/PDMS)萃取头 美国 Supelco 公司;7890A/5975C 气质联用仪气相色谱-质谱联用仪 美国 Agilent 公司;T18 高速分散机 德国 IKA 公司;3K15 高速冷冻离心机 美国 Sigma 公司;DF101S 集热恒温磁力搅拌器 巩义市予华仪器有限责任公司;FY50 型反压高温蒸煮锅 上海三申医疗器械有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 香菇预制菜加工工艺 干香菇经复水、漂烫、切片、护色、包装和灭菌等工艺制成可常温或低温保存和运输的香菇预制菜。

1.2.2 复水、漂烫条件筛选 结合生产实际及前期试验基础,对复水和漂烫条件进行联合筛选。选择干香菇与水按 1:20 的比例进行复水,复水温度为室温,时间设置为 30、40、50 和 60 min,漂烫温度为 100 °C,时间设为 3、4 和 5 min。通过比较不同处理条件下多糖损失率及质构差异,筛选最优的复水-漂烫条件组合用于香菇预制菜的生产。

1.2.3 护色条件优化

1.2.3.1 护色剂筛选 参考文献 [10-11],将 D-异抗坏血酸钠、柠檬酸、抗坏血酸、L-半胱氨酸分别用做切片后香菇的护色剂,根据食品 GB 2760-2014 食品添加剂使用标准^[12],分别设置其使用浓度为 D-异抗坏血酸钠(1、2、3、4、5 g/L),柠檬酸(5、10、15、20、25 g/L),抗坏血酸(0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 g/L),L-半胱氨酸(0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 g/L)。将漂烫后香菇用切片机切成厚度为 2~3 mm 的香菇片,将香菇片按 1:10 体积放入含不同浓度护色剂水溶液中浸泡 30 min,以清水浸泡的样品为对照组。捞出后装入耐高温蒸煮袋,加入香菇片重量 10% 的食盐水,封口后于 121 °C 杀菌 10 min。比较不同护色剂对样品色差(L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE)和美拉德反应程度(A_{420} 、 A_{294})的影响,筛选护色剂及其添加量用于复合护色剂正交优化。

1.2.3.2 复合护色剂正交优化 在护色剂筛选基础

上,选择柠檬酸、抗坏血酸、L-半胱氨酸组成复合护色剂进行香菇片护色。通过正交优化护色剂添加量(表 1)。以色差(ΔE)、美拉德反应程度(A_{420} 、 A_{294})为筛选指标,根据各评价指标对香菇预制菜色泽的影响,设定各指标权重系数进行综合评分。综合评分= $\Delta E \times 0.6 + A_{420} \times 0.2 + A_{294} \times 0.2$ 。综合评分作为护色对色泽的影响表征,评分越低,影响越小,护色效果越好。

表 1 正交因素水平设计
Table 1 Orthogonal factor level

水平	因素		
	柠檬酸(g/L)	抗坏血酸(g/L)	L-半胱氨酸(g/L)
1	12	0.6	1.8
2	15	0.8	2.0
3	18	1.0	2.2

1.2.3.3 护色时间筛选 在复合护色剂正交优化基础上,将香菇片按 1:10 体积放入最优复合护色剂水溶液中,分别浸泡 10、20、30、40 和 50 min 后,装袋封口,121 ℃ 高压杀菌 10 min。通过比较不同护色时长对灭菌后样品的色差值、美拉德反应程度,筛选最优护色时间。

1.2.4 杀菌方式筛选 采用高压灭菌、常压灭菌和辐照冷杀菌三种方式对护色、包装后香菇预制菜进行杀菌处理。其中高压灭菌条件为 0.1 Mpa, 121 ℃ 灭菌 10 min; 常压灭菌条件为 90 ℃ 水浴 30 min; 辐照冷杀菌通过⁶⁰Co- γ 射线辐照实现,剂量为 3 kGy (经灭菌前菌落总数确定)。杀菌处理后通过色差、美拉德反应程度以及香菇挥发性风味物质比较分析筛选最优杀菌方式。

1.2.5 多糖损失率测定 取同一批次干香菇烘干至恒重,称取 500 g,研磨过 80 目筛,样品混匀后随机取样 5 次,参考 NY/T 1676-2008 绘制葡萄糖标准曲线($y=8.588x-0.002$, $R^2=0.998$),测定干香菇子实体中多糖含量^[13]。收集复水漂烫后剩余水,冷却后定量余水体积(V),取 1 mL 稀释适当倍数后分别利用苯酚硫酸法^[13]和二硝基水杨酸(DNS)法^[14]测定其中总糖和还原糖含量,计算多糖损失率。每个处理设 5 个重复。

$$L = [1 - (Ct - Cr)V/C_0m] \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

式中,L 为多糖损失率,%;Ct 为复水漂烫后余水中总糖浓度,mg/mL;Cr 为余水中还原糖浓度,mg/mL;V 为余水体积,mL;C₀ 为干香菇中多糖含量,g/100 g;m 为干香菇重量,g。

1.2.6 质构特性的测定 香菇复水、漂烫后捞出,沥干表面水分,切掉残留菌柄,采用全质构分析(TPA)测定香菇质构。TPA 测定条件: P/36R 探头,测试前速度为 2.0 mm/s,测试速度 2.0 mm/s,测试后速度为 5.0 mm/s;两次压缩,间隔时间 5 s,压缩比为 60%。每次测定 10 个样品,取平均值。测定结果主

要取硬度、粘着性、弹性、粘聚性、咀嚼性和回复性 6 个指标^[15]。

1.2.7 色差值测定 灭菌结束后,吸干香菇片表面水分,采用色差仪测定香菇片的亮度、红度和黄度值,以仪器自带标准白板为基准($L_0^*=54.6$, $a_0^*=5.4$, $b_0^*=21.2$),根据公式(2)计算总色差 ΔE ,每个处理测 10 次。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad \text{式 (2)}$$

式中, L^* , a^* 和 b^* 分别为样品的亮度,红度和黄度值。

1.2.8 美拉德反应程度测定 糖类、氨基酸和蛋白质在常温或加热时会发生美拉德反应引起褐变^[16],本研究以美拉德反应的中间产物和终产物的吸光度 A_{294} 和 A_{420} ^[17] 表征香菇片的美拉德反应程度,以指导护色剂和杀菌方式筛选。

参考文献 [11,18] 中方法,取 3.0 g 香菇预制菜样品加入 10 mL 预冷的去离子水,5000 r/min 均质 2 min,加入 10 mL 预冷的 20% 三氯乙酸溶液(TCA)混合匀浆,4 ℃,10000×g 离心 10 min,上清液用滤纸过滤后测定 420 和 294 nm 处的吸光度,每个处理重复 5 次。

1.2.9 香菇挥发性风味物质分析 分别取护色后未灭菌、高压灭菌、常压灭菌、辐照冷杀菌的香菇预制菜样品 5.0 g 放入顶空进样瓶中,加入 25 mL 蒸馏水和 3.0 g 氯化钠,60 ℃ 平衡 10 min,顶空吸附 40 min 后置气相色谱仪解析 5 min 进行 GC-MS 分析。

GC 条件: 色谱柱为 Agilent DB-WAX 毛细管柱 (30 m×0.25 mm, 0.25 μ m),初始温度 40 ℃,保持 2 min;以 3 ℃/min 的速率升至 180 ℃,保持 2 min,再以 10 ℃/min 的速率升至 240 ℃,保持 1 min;载气(He)流速 1.0 mL/min,进样口温度 250 ℃,不分流。MS 条件: 电子源温度 230 ℃,电子能量 70 eV,电压 350 V,质量扫描范围 m/z 30~450,传输线温度 280 ℃,四极杆温度 150 ℃。

定性定量方法: 利用 NIST 11.L 谱库的标准质谱图对得到的谱图进行检索和解析,以匹配度大于 80% 作为物质鉴定依据。参考文献 [19-20] 采用峰面积归一化法定量,得到各组分的相对含量进行分析。

1.3 数据处理

试验数据利用 SPSS 21.0 软件进行统计分析和单因素方差分析, $P<0.05$ 表示差异显著。采用 Origin 9.1 软件进行数据分析作图。

2 结果与分析

2.1 复水、漂烫条件筛选结果

香菇中含有水溶性多糖^[21],参考标准测定干香菇子实体中粗多糖含量为 4.70±0.56 g/100 g。有研究指出,高温复水有利于香菇的快速泡发和变软^[9],

但高温会增加多糖的浸出^[22]。因此,考虑到复水可能对多糖的影响以及生产实际,本研究采用在室温条件下复水。

由图 1 可以看出,多糖损失率与复水时间没有明显相关性。在同一复水时间条件下,多糖损失率会随漂烫时间的增加而增加,但除复水 40 min 不同漂烫时间时多糖损失率差异显著外($P<0.05$),其余同一复水时间下不同漂烫多糖损失率差异不显著。当复水 50 min,漂烫 3 min 时多糖损失率最低为 $24.31\% \pm 3.03\%$ 。

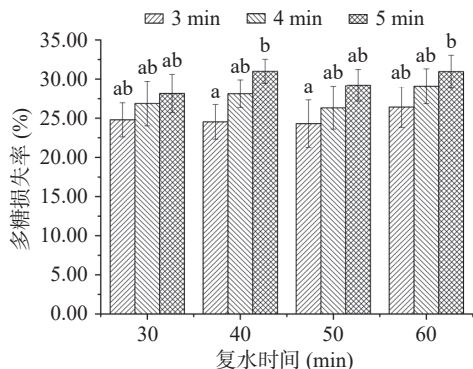


图 1 不同复水、漂烫条件下香菇多糖损失率

Fig.1 Polysaccharides loss rate of *Lentinula edodes* under different rehydration and blanching conditions

注:图例中 3、4 和 5 min 为漂烫时间;小写英文字母表示图上所有不同处理间差异显著性($P<0.05$);图 2~图 3 同。

干香菇复水时萎缩的菌丝会吸水,质地变软^[9]。由 TPA 分析(表 2)可知,随着复水时间的延长,香菇硬度显著变小($P<0.05$),粘着性、咀嚼性没有明显的变化趋势,弹性、黏聚性和回复性在不同处理间差异不显著。赵圆圆等^[9]和 Zivanovic 等^[23]研究指出,香菇的硬度、咀嚼性、弹力及黏聚性与复水温度有一定相关性,以上指标会随温度的升高而增大,而本研究中除硬度外,其他指标差异不显著可能是与复水温度较低有关。

从表 2 可以看出,复水 50 min、漂烫 3 min 时硬

度较低(18041.84 ± 198.87 g),与复水 60 min,漂烫 4 和 5 min 时差异不显著($P<0.05$),粘着性、弹性、黏聚性和回复性较低,且与最小值差异不显著,咀嚼性适中(5456.19 ± 194.22)。因此,结合多糖损失率选择复水 50 min、漂烫 3 min 为最佳复水-漂烫条件。

2.2 护色条件筛选结果

2.2.1 护色剂筛选结果 由表 3 可以看出,分别以 D-异抗坏血酸钠、柠檬酸、抗坏血酸、L-半胱氨酸为护色剂,高温杀菌后切片香菇的 L^* (亮度)、 b^* (黄度)与对照组相比均有不同程度的增加,而 ΔE 均显著低于对照组($P<0.05$),且表征美拉德反应程度的 A_{294} 和 A_{420} 均显著低于对照组的($P<0.05$),表明添加护色剂可有效减少高温杀菌引起的香菇褐变。

当使用 D-异抗坏血酸钠为护色剂时,随其添加量的增加,香菇片的 L^* 、 a^* 、 b^* 基本呈现先增加后减小的趋势,除 ΔE 外,所得色度值与对照组相比差异不显著($P<0.05$),其原因可能是本研究选择的异抗坏血酸钠起始浓度较低,较低的浓度护色效果不显著。随着 D-异抗坏血酸钠添加量的增加, A_{294} 和 A_{420} 呈先减小后增加的趋势,且 A_{294} 在各添加量间差异显著($P<0.05$),分析原因可能是当其添加量较低时,可减少呈色物质的积累,而当添加量增加后,其氧化产物进入美拉德反应导致褐变度增加^[11]。当添加量为 4 g/L 时亮度最高, ΔE 最低,美拉德反应程度最低,护色效果最好。

添加柠檬酸后,香菇片的 L^* 、 b^* 、 a^* 值均显著高于对照组, ΔE 在 5~20 g/L 不同柠檬酸浓度下差异不显著,但均显著低于对照组($P<0.05$)。添加不同浓度抗坏血酸后,香菇片的 ΔE 均显著低于对照组($P<0.05$),当添加量为 0.8 g/L 时,色差值均最小,其余添加量之间差异不显著。比较添加柠檬酸和抗坏血酸对香菇美拉德反应程度的影响发现,分别添加 2 种护色剂后, A_{294} 和 A_{420} 显著低于对照组($P<0.05$),并呈先减小后增加的趋势,其原因可能是低 pH 抑制美拉德反应的初始阶段,并螯合金属离子,但它们具有

表 2 不同复水、漂烫条件下香菇质构特性

Table 2 Texture profile of *Lentinula edodes* under different rehydration and blanching conditions

复水时间(min)	漂烫时间(min)	硬度(g)	粘着性(g·sec)	弹性	黏聚性	咀嚼性	回复性
30	3	19516.11±165.83 ^c	-61.56±6.72 ^a	0.55±0.03 ^{ab}	0.60±0.04 ^c	6371.13±157.69 ^g	0.31±0.01 ^{ab}
	4	19603.32±151.5 ^c	-83.42±4.27 ^{cd}	0.52±0.06 ^a	0.59±0.02 ^{bc}	5939.06±114.8 ^{ef}	0.31±0.02 ^{ab}
	5	19504.66±131.99 ^c	-86.21±6.82 ^d	0.52±0.05 ^a	0.57±0.03 ^{abc}	5763.53±85.51 ^{de}	0.33±0.02 ^{bc}
40	3	19024.16±130.8 ^d	-88.68±9.69 ^d	0.54±0.04 ^{ab}	0.57±0.04 ^{abc}	5876.77±82.29 ^{ef}	0.30±0.01 ^a
	4	18704.77±137.69 ^{bc}	-93.23±7.81 ^d	0.53±0.05 ^{ab}	0.54±0.03 ^{ab}	5413.68±88.02 ^b	0.33±0.01 ^{bc}
	5	18907.12±140.18 ^{cd}	-89.15±8.07 ^d	0.54±0.04 ^{ab}	0.53±0.03 ^a	5391.40±145.27 ^b	0.34±0.01 ^c
50	3	18041.84±198.87 ^a	-63.03±9.88 ^{ab}	0.56±0.06 ^{ab}	0.54±0.02 ^{ab}	5456.19±194.22 ^{bc}	0.32±0.02 ^{abc}
	4	18805.27±161.55 ^{cd}	-89.04±5.23 ^d	0.57±0.04 ^{ab}	0.56±0.02 ^{abc}	5938.61±101.69 ^{ef}	0.31±0.01 ^{ab}
	5	18505.67±141.6 ^b	-73.63±8.12 ^{abc}	0.60±0.03 ^b	0.55±0.03 ^{abc}	6032.15±89.17 ^f	0.34±0.02 ^c
60	3	18518.51±129.51 ^b	-65.25±4.27 ^{ab}	0.52±0.03 ^a	0.54±0.03 ^{ab}	5181.33±101.09 ^a	0.32±0.01 ^{abc}
	4	17873.32±148.93 ^a	-74.36±6.84 ^{bc}	0.57±0.02 ^{ab}	0.56±0.04 ^{abc}	5654.47±128.56 ^{cd}	0.33±0.02 ^{bc}
	5	17967.69±158.99 ^a	-80.79±6.18 ^{cd}	0.58±0.04 ^{ab}	0.52±0.05 ^a	5411.76±117.98 ^b	0.33±0.01 ^{bc}

注:上标不同小写字母表示同一指标在所有取样点检测值间差异显著性($P<0.05$)。

表 3 不同护色剂及添加量对香菇预制菜色泽的影响

Table 3 Effects of different color-preserving agent and additive amount on the color of <i>Lentinula edodes</i> prefabricated dishes								
处理	添加量(g/L)	L^*	a^*	b^*	ΔE	A_{294}	A_{420}	
D-异抗坏血酸钠	对照组	0	29.18±1.06 ^{ab}	14.68±0.47 ^{abc}	13.41±0.70 ^{bc}	28.16±0.15 ^{bc}	0.432±0.022 ^f	0.258±0.015 ^c
		1	28.69±1.47 ^{ab}	14.48±0.77 ^{ab}	13.01±0.89 ^{ab}	28.65±0.19 ^{bc}	0.399±0.018 ^c	0.257±0.018 ^c
		2	26.69±1.13 ^a	14.01±0.48 ^a	11.99±0.70 ^a	30.63±0.12 ^d	0.334±0.026 ^d	0.251±0.012 ^c
		3	29.09±1.63 ^{ab}	15.33±0.671 ^b	14.12±0.51 ^{bc}	28.28±0.12 ^c	0.297±0.017 ^c	0.218±0.017 ^b
		4	30.46±1.64 ^b	15.66±0.63 ^c	14.66±0.74 ^c	27.03±0.11 ^a	0.209±0.015 ^a	0.184±0.015 ^a
		5	29.98±1.44 ^b	15.25±0.78 ^b	14.34±0.77 ^c	27.39±0.18 ^{ab}	0.254±0.022 ^b	0.236±0.012 ^{bc}
柠檬酸	对照组	0	29.18±1.06 ^a	14.68±0.47 ^a	13.41±0.70 ^a	28.16±0.15 ^c	0.432±0.022 ^d	0.258±0.015 ^b
		5	34.46±1.09 ^d	15.95±0.66 ^b	15.56±0.72 ^b	23.42±0.11 ^a	0.318±0.014 ^c	0.251±0.013 ^b
		10	33.81±1.33 ^{cd}	15.98±0.83 ^b	15.31±0.64 ^b	24.06±0.11 ^a	0.299±0.016 ^c	0.203±0.019 ^a
		15	34.37±1.06 ^d	16.05±0.74 ^b	15.57±0.50 ^b	23.54±0.18 ^a	0.264±0.020 ^b	0.194±0.017 ^a
		20	33.76±1.17 ^{cd}	16.08±0.60 ^b	15.81±0.32 ^b	24.03±0.16 ^a	0.229±0.018 ^a	0.186±0.015 ^a
抗坏血酸		25	32.21±1.20 ^{bc}	15.56±0.56 ^{ab}	15.17±0.64 ^b	25.31±0.08 ^b	0.241±0.02 ^{ab}	0.185±0.018 ^a
	对照组	0	29.18±1.06 ^a	14.68±0.47 ^{ab}	13.41±0.70 ^a	28.16±0.15 ^c	0.432±0.022 ^e	0.258±0.015 ^d
		0.2	30.98±1.66 ^{ab}	16.08±0.61 ^b	15.73±0.57 ^{bc}	26.50±0.13 ^b	0.334±0.016 ^d	0.181±0.015 ^{ab}
		0.4	31.11±1.12 ^{ab}	15.49±0.54 ^b	15.42±0.45 ^b	26.22±0.06 ^b	0.297±0.016 ^c	0.173±0.012 ^a
		0.6	31.04±1.43 ^{ab}	14.08±0.48 ^a	15.61±0.50 ^b	25.73±0.11 ^b	0.294±0.013 ^c	0.195±0.013 ^{ab}
L-半胱氨酸		0.8	32.08±1.48 ^b	14.29±0.65 ^a	17.34±0.62 ^d	24.52±0.13 ^a	0.238±0.018 ^a	0.205±0.015 ^{bc}
		1.0	30.52±1.28 ^a	14.02±0.33 ^a	16.62±0.30 ^{cd}	25.98±0.10 ^b	0.268±0.014 ^{bc}	0.225±0.016 ^c
	对照组	0	29.18±1.06 ^a	14.68±0.47 ^b	13.41±0.70 ^a	28.16±0.15 ^c	0.432±0.022 ^e	0.258±0.015 ^b
		0.5	34.05±1.56 ^b	8.28±0.31 ^a	22.37±0.16 ^b	20.79±0.13 ^b	0.349±0.018 ^d	0.239±0.013 ^b
		1.0	34.30±1.57 ^b	8.41±0.48 ^a	22.81±0.60 ^{bc}	20.58±0.09 ^b	0.294±0.012 ^c	0.206±0.012 ^a
		1.5	34.47±1.11 ^b	8.89±0.60 ^a	23.41±0.30 ^{cd}	20.55±0.15 ^b	0.252±0.013 ^b	0.235±0.018 ^b
		2.0	35.81±1.60 ^b	9.02±0.56 ^a	24.51±0.33 ^c	19.42±0.12 ^a	0.191±0.015 ^a	0.198±0.016 ^a
		2.5	35.60±1.04 ^b	8.71±0.34 ^a	23.75±0.55 ^{de}	19.45±0.08 ^a	0.207±0.018 ^a	0.242±0.018 ^b

注: 上标不同小写字母表示某一检测指标在同一护色剂不同浓度处理间差异显著性($P<0.05$)。

一定的缓冲能力,在浓度增加到一定量后会加速褐变^[24]。

与 Li 等^[25]报道 L-半胱氨酸对控制香菇褐变没有明显效果不同,本研究发现添加 L-半胱氨酸时 A_{294} 和 A_{420} 显著低于对照组($P<0.05$),且随添加量的增加与其它 3 种护色剂呈现一致的先减小后增加的趋势,这可能是少量的 L-半胱氨酸通过与其他氨基酸反应减少呈色物质产生,而当添加量高时自身发生美拉德反应增加呈色物质积累^[11]。此外,L-半胱氨酸护色后香菇片的 L^* 、 b^* 显著高于对照组($P<0.05$),而 a^* (红度)值显著低于对照组($P<0.05$),这可能与 L-半胱氨酸与醌作用生成稳定的无色化合物^[26]。

综合比较 4 种护色剂 L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE 值以及美拉德反应程度与对照组的差异,选择柠檬酸、抗坏血酸、L-半胱氨酸组成复合护色剂。并分别选择柠檬酸、抗坏血酸、L-半胱氨酸添加量为 15、0.8 和 2.0 g/L 进行正交优化实验。

2.2.2 复合护色剂正交优化 对柠檬酸(A)、抗坏血酸(B)、L-半胱氨酸(C)添加量 3 个因素进行正交优化,测定并计算 ΔE 、 A_{294} 和 A_{420} 后根据 1.2.3.2 中公式计算色泽综合评分(表 4)。3 个因素对香菇色差值和美拉德反应程度综合评分的影响主次为 $B>A>C$ 。根据各因素 k 值选择对综合评分影响最小的组合 $A_1B_2C_2$ 组成复合护色剂进行后续试验,即柠檬酸 12 g/L,抗坏血酸 0.8 g/L,L-半胱氨酸 2.0 g/L。

表 4 正交试验结果

Table 4 Results of orthogonal experiment

实验号	因素			ΔE	A_{294}	A_{420}	综合评分
	A 柠檬酸	B 抗坏血酸	C L-半胱氨酸				
1	1	1	1	18.36	0.579	0.284	11.189
2	1	2	2	17.23	0.403	0.162	10.451
3	1	3	3	19.01	0.562	0.301	11.579
4	2	1	2	19.40	0.525	0.171	11.779
5	2	2	3	17.74	0.578	0.351	10.830
6	2	3	1	17.52	0.478	0.134	10.634
7	3	1	3	18.29	0.483	0.140	11.099
8	3	2	1	19.65	0.487	0.123	11.912
9	3	3	2	18.23	0.460	0.134	11.057
k_1	11.073	11.355	11.245				
k_2	11.081	11.064	11.096				
k_3	11.356	11.090	11.169				
R	0.283	0.291	0.149				

注: k 表示各因素水平平均值; R 表示各因素极差。

2.2.3 护色时间筛选结果 复合护色剂处理 10~50 min、高压灭菌后香菇预制菜 ΔE 值、美拉德反应程度(A_{294} 和 A_{420})以及综合评分如图 2 所示。其中,表征美拉德反应程度的 A_{294} 和 A_{420} 值均与护色时长没有明显相关性,二者最小值分别出现在护色 30 和 20 min 时,且与其他处理均存在显著差异($P<0.05$)。由于 A_{294} 和 A_{420} 分别为美拉德反应产生的中间产物和终产物有关^[17],不同处理时间的吸光度差异可能与复合护色剂柠檬酸、抗坏血酸和 L-半胱氨

酸对不同物质参与的美拉德反应抑制程度有关。

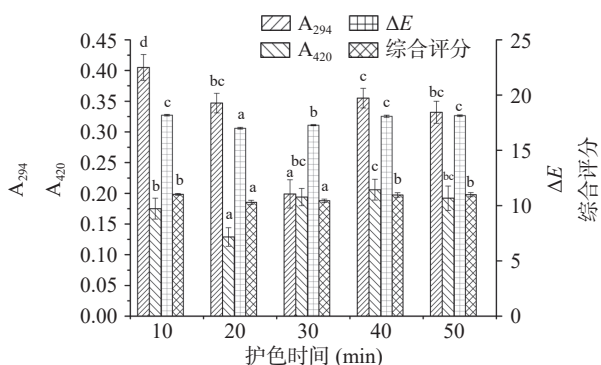


图2 不同护色时间对香菇预制菜色泽的影响

Fig.2 Effects of different color protection time on the color of *Lentinula edodes* prefabricated dishes

色差分析发现,随着护色时间的延长,ΔE 呈现先减小后增加的趋势,且不同处理时长下,ΔE 值差异显著。处理 20 min 时 ΔE 最小(与标准白板越接近),为 17.00 ± 0.08 。计算色泽综合评分后发现,与 ΔE 一致,随护色时间延长综合评分先减小后增加,在 20 min 时评分最小,为 10.295 ± 0.190 ,且与其他处理存在显著差异($P<0.05$)。因此,选择 20 min 为最佳护色时长。

2.3 杀菌方式筛选结果

2.3.1 杀菌方式对预制香菇菜色差和美拉德反应程度的影响 由图 3 可知,不同杀菌方式对 A_{294} 影响不大,差异不显著($P<0.05$),但对 A_{420} 影响较大,尤其是常压杀菌后 A_{420} 显著高于其他 2 种杀菌方式,这可能是相对于高温高压,较高温度长时间的处理更利于美拉德反应的进行。温度是影响褐变的重要因素^[27],随着杀菌温度的降低,香菇色差 ΔE 逐渐减小,由此影响综合评分随杀菌温度的降低也逐渐减小,但常压灭菌和辐照冷杀菌获得综合评分差异不显著。辐照冷杀菌 ΔE 值最小,为 15.78 ± 0.06 ,综合评分最低,为 9.560 ± 0.204 ,表明采用辐照冷杀菌对预制香菇菜的色泽影响最小。

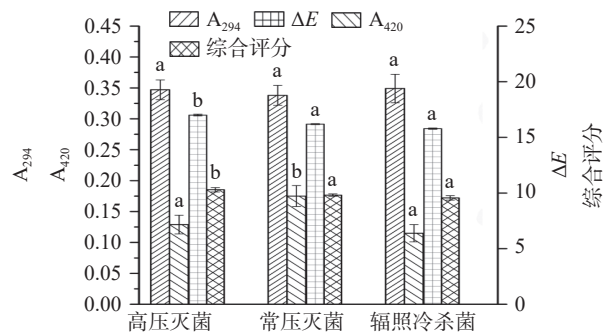


图3 不同杀菌方式对香菇预制菜色泽的影响

Fig.3 Effects of different sterilization method on the color of *Lentinula edodes* prefabricated dishes

2.3.2 杀菌方式对香菇预制菜挥发性风味物质的影响 经 GC-MS 分析后共获得不同杀菌处理香菇预制菜中挥发性风味化合物 49 种,各类物质组成及相对含量如表 5 所示。

经统计,护色后未杀菌香菇中含有 20 种风味物质,高压灭菌、常压灭菌和辐照冷杀菌后香菇中分别得到 36、32 和 26 种风味物质,可以发现热灭菌方式可显著增加香菇中风味物质种类,非热灭菌也可能产生少量新的化合物(表 5),这一结果与在石榴汁^[28]、湘西酸鱼^[29] 等研究报道一致。但通过风味物质相对含量分析发现,虽然杀菌丰富了香菇中挥发性风味物质种类,但会导致风味物质相对含量的减少,三种杀菌方式对风味物质的含量的影响程度依次为高压灭菌>常压灭菌>辐照冷杀菌。其中,高压灭菌后挥发性风味物质相对含量累计为 52.292%,比杀菌前减少近 22%,表明杀菌温度对挥发性风味物质的含量有显著影响^[29-30],分析原因可能是高温杀菌过程中发生了物质的分解^[29];而辐照冷杀菌后相对含量为 63.175%,与护色未杀菌的接近(66.950%)。

醇类物质在挥发性物质中占比最高的,其中具有典型蘑菇风味的 1-辛烯-3-醇在不同处理中含量也最高,但杀菌后其含量会有所损失,常压杀菌和辐照冷杀菌对其含量影响较小。除会引起化合物的损失,杀菌,尤其是热灭菌还会增加风味物质的种类或含

表5 不同杀菌方式对香菇预制菜挥发性风味物质的影响

Table 5 Effect of different sterilization methods on volatile flavor compounds of *Lentinula edodes* prefabricated dishes

类别	编号	保留时间(min)	化合物	分子式	相对含量(%)			
					护色后未杀菌	高压灭菌	常压灭菌	辐照冷杀菌
醇类	1	29.75	1-辛烯-3-醇	$C_8H_{16}O$	42.290	28.125	39.074	34.981
	2	31.40	异辛醇	$C_8H_{18}O$		0.490	0.439	0.401
	3	34.23	1-辛醇	$C_8H_{18}O$	5.949	3.490	4.556	4.740
	4	36.14	4-萜烯醇	$C_{10}H_{18}O$		0.089	0.090	0.076
	5	36.42	反式-2-辛烯-1-醇	$C_8H_{16}O$				2.910
	6	36.43	环辛醇	$C_8H_{16}O$		0.293	0.278	
	7	38.23	1-壬醇	$C_9H_{20}O$	0.602	0.751	0.750	0.788
	8	40.43	2-十二醇	$C_{12}H_{26}O$			0.142	0.130
	9	47.61	苯乙醇	$C_8H_{10}O$	0.454	0.214	0.252	0.200
	10	49.26	十二醇	$C_{12}H_{26}O$			0.235	

续表 5

类别	编号	保留时间(min)	化合物	分子式	相对含量(%)			
					护色后未杀菌	高压灭菌	常压灭菌	辐照冷杀菌
醛类	11	13.43	己醛	C ₆ H ₁₂ O	6.134	1.335	1.021	2.498
	12	17.45	庚醛	C ₇ H ₁₄ O			0.108	
	13	19.37	反式-2-己烯醛	C ₆ H ₁₀ O	0.167			
	14	19.38	2-己烯醛	C ₆ H ₁₀ O				0.099
	15	22.24	辛醛	C ₈ H ₁₆ O	0.244		0.769	0.543
	16	26.92	壬醛	C ₉ H ₁₈ O			0.409	0.590
	17	28.81	反-2-辛烯醛	C ₈ H ₁₄ O		1.400		4.334
	18	30.30	3-呋喃甲醛	C ₅ H ₄ O ₂				0.285
	19	30.30	呋喃甲醛	C ₅ H ₄ O ₂	0.131	4.422	1.231	
	20	32.85	苯甲醛	C ₇ H ₆ O	0.504	0.658	0.681	0.620
	21	33.28	反式-2-壬烯醛	C ₉ H ₁₆ O		0.831	0.888	1.212
	22	34.88	5-甲基呋喃醛	C ₆ H ₆ O ₂		0.232	0.115	
	23	36.71	对甲基苯甲醛	C ₈ H ₈ O		0.251	0.147	
	24	39.12	3-噻吩甲醛	C ₅ H ₄ OS		0.083		
	25	39.67	2-噻吩甲醛	C ₅ H ₄ OS		0.154		
	26	39.86	反,反-2,4-壬二烯醛	C ₉ H ₁₄ O	0.547	0.156	0.165	0.583
	27	43.91	反式-2,4-癸二烯醛	C ₁₀ H ₁₆ O	0.267	0.190	0.270	0.454
	28	20.75	3-辛酮	C ₈ H ₁₆ O	1.701	1.035	1.950	1.489
	29	23.84	2,3-辛二酮	C ₈ H ₁₄ O ₂				0.306
	30	27.90	3-辛烯-2-酮	C ₈ H ₁₄ O		0.120		
	31	35.73	2-十一酮	C ₁₁ H ₂₂ O	0.673	0.913	1.194	1.122
	32	17.86	柠檬烯	C ₁₀ H ₁₆		0.072		
	33	34.39	α-柏木烯	C ₁₅ H ₂₄			0.059	
	34	39.81	3-萜烯	C ₁₀ H ₁₆		0.061		
呋喃类	35	19.20	2-戊基呋喃	C ₉ H ₁₄ O	1.064	1.924	1.494	0.838
	36	32.09	2-乙酰基呋喃	C ₆ H ₆ O ₂		0.167		
羧酸类	37	29.91	乙酸	C ₂ H ₄ O ₂	0.294			
	38	45.14	己酸	C ₆ H ₁₂ O ₂	0.381	0.218	0.098	
	39	52.46	辛酸	C ₈ H ₁₆ O ₂		0.175	0.100	
含硫化合物	40	26.54	二甲基三硫	C ₂ H ₆ S ₃	0.288	0.256	0.190	
	41	13.13	二甲基二硫	C ₂ H ₆ S ₂	0.213			0.132
苯类化合物	42	11.85	甲苯	C ₇ H ₈		0.162	0.087	0.112
	43	15.51	对二甲苯	C ₈ H ₁₀		0.092		
	46	44.47	1-甲氧基-4-[(Z)-1-丙烯基]苯	C ₁₀ H ₁₂ O		0.127		
	47	50.62	邻甲酚	C ₇ H ₈ O		0.129	0.038	
	48	53.44	2,6-二叔丁基对甲酚	C ₁₅ H ₂₄ O		0.075	0.052	
	49	57.37	2,4-二叔丁基苯酚	C ₁₄ H ₂₂ O	0.783	1.839	1.254	2.047
	44	38.73	磷酸三乙酯	C ₆ H ₁₅ O ₄ P		0.413	0.133	
其他	45	41.83	甲氧基苯基肼	C ₈ H ₉ NO ₂	4.265	1.352	1.341	1.686
合计					66.950	52.292	59.610	63.175

量,如在升温过程中将醛、酮还原成醇类或裂解成烃类物质^[29]。此外,与 Rannou 等^[31]的报道一致,热灭菌还会增加有害化合物的种类和含量,如苯类、呋喃和呋喃类似物,并产生更高含量的带有鱼腥或臭味等刺激性不良风味的物质,如庚醛、二甲基二硫、二甲基三硫、3-辛酮等^[16]。

综合杀菌方式对色泽及风味物质组成和含量的影响,确定辐照为香菇预制菜最佳杀菌方式。

3 结论

本研究以活性物质多糖为营养指标,以色泽为外观指标,以质构和风味为品质指标,对香菇预制菜

制备工艺进行优化。结合多糖损失率和质构特性筛选获得香菇预制菜制备的最佳复水-漂烫条件为复水 50 min、漂烫 3 min,与已有报道的香菇复水条件相比^[8-9],不需要调节温度和 pH,而且大大缩短了复水时间,节约了生产成本,有效提高了生产效率。结合色差和美拉德反应程度综合评分筛选获得香菇预制菜复合护色剂为柠檬酸 12 g/L,抗坏血酸 0.8 g/L, L-半胱氨酸 2.0 g/L,护色时间为 20 min;最后,结合色泽、美拉德反应程度综合评分和风味评价,确定最优杀菌方式为⁶⁰Co-γ 射线辐照冷杀菌,剂量为 3 kGy。

整个加工过程工艺简单,除护色剂外无任何外

源物质添加,较好的保留了香菇原有的营养价值与独特的风味,产品营养价值 and 安全性较高。通过工艺优化获得的即烹香菇预制菜,符合消费者对食品安全、健康、食用方便等多方面需求,目前产品已出口到泰国、新加坡、马来西亚等国。

然而,虽然除外观色泽,本研究在预制菜的开发过程中还关注了加工工艺对多糖这一活性物质及风味物质的影响,但所研发的产品仍是面向大众消费者的,产品没有指向性。香菇中除多糖还含有甾醇、香菇嘌呤等多种活性物质,因此,在后续的研究中可以根据市场和消费者需求,在本研究基础上定向开发出功能明确的香菇预制菜系列产品,通过风味物质的绝对定量,开发出风味独特的系列预制菜产品,以填补市场空白。

参考文献

- [1] 中国食品工业协会. T/CNFIA 115-2019 预制包装菜肴[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019. [China National Food Industry Association. T/CNFIA 115-2019 Packaged prepared dishes [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.]
- [2] 王娟, 高群玉, 姜文勇. 我国预制菜行业的发展现状及趋势[J]. 现代食品科技, 2023, 39(2): 99-103. [WANG Juan, GAO Qunyu, LOU Wenyong. The development status and trend of ready meal industry in China[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(2): 99-103.]
- [3] 张韵, 李葱葱, 周圣弘. 食用菌作为预制即热菜肴的应用前景及途径[J]. 食品安全导刊, 2021(34): 138-140. [ZHANG Yun, LI Huihui, ZHOU Shenghong. Application prospect and realization of edible fungi as ready-to-heat cuisine[J]. China Food Safety, 2021(34): 138-140.]
- [4] 郭玲玲, 王艳华. 香菇加工技术研究现状及应用展望[J]. 微生物学杂志, 2019, 39(2): 117-119. [GUO Lingling, WANG Yanhua. Research status quo of Xianggu mushroom processing technique and the application outlook[J]. Journal of Microbiology, 2019, 39(2): 117-119.]
- [5] SHENG K, WANG C, CHEN B, et al. Recent advances in polysaccharides from *Lentinus edodes* (Berk.): Isolation, structures and bioactivities[J]. Food Chemistry, 2021, 358: 126883.
- [6] FINIMUNDY T C, DILLON A, JOO A P H, et al. A review on general nutritional compounds and pharmacological properties of the *Lentinula edodes* mushroom[J]. Food and Nutrition Sciences, 2014, 5(12): 1095-1105.
- [7] ASADA N, KAIRIKU R, TOBO M, et al. Effects of shiitake intake on serum lipids in rats fed different high-oil or high-fat diets[J]. Journal of Dietary Supplements, 2019, 16(3): 345-356.
- [8] 董晓博, 于慧萍, 高沁, 等. 不同复水条件对香菇特征香味物质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(15): 4914-4920. [DONG Xiaobo, YU Huiping, GAO Qin, et al. Effects of rehydration on the characteristic aroma compounds in *Lentinula edodes*[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2019, 10(15): 4914-4920.]
- [9] 赵圆圆, 易建勇, 毕金峰, 等. 复水温度对香菇复水特性及品质的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(2): 181-188. [ZHAO Yuanyuan, YI Jianyong, BI Jinfeng, et al. Effect of rehydration temperature on rehydration properties and quality of shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*)[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(2): 181-188.]
- [10] 胡烨, 胡秋辉, 郁志芳, 等. 复合护色剂预处理及不同冻融条件对冷冻双孢蘑菇品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(23): 192-198. [HU Ye, HU Qiuhui, YU Zhifang, et al. Effects of pre-treatment with browning inhibitor mixtures and different freezing and thawing conditions on quality of frozen *Agaricus bisporus*[J]. Food Science, 2018, 39(23): 192-198.]
- [11] 齐慧林, 杨方, 余达威, 等. 护色剂对调味鱼杀菌过程中护色效果及美拉德反应的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(14): 136-141. [QI Huilin, YANG Fang, YU Dawei, et al. Effect of color protectant on color and Maillard reaction of seasoned fish during sterilization[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(14): 136-141.]
- [12] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 2760-2014 食品安全国家标准 食品添加剂使用标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 2760-2014 National food safety standard for uses of food additives[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.]
- [13] 中华人民共和国农业部. NY/T 1676-2008 食用菌中粗多糖含量的测定[S]. 北京: 中国农业出版社, 2008. [Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. NY/T 1676-2008 Determination of crude mushroom polysaccharides[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.]
- [14] MILLER G L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar[J]. Analytical Chemistry, 1959, 31(3): 426-428.
- [15] 范秀芝, 史德芳, 殷朝敏, 等. ^{60}Co - γ 辐照食用菌菌糕货架期预测及贮藏特性研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(8): 245-250. [FAN Xiuzhi, SHI Defang, YIN Chaomin, et al. Shelf-life prediction and storage characteristics of mushroomy gelatinous candy sterilized by ^{60}Co - γ irradiation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(8): 245-250.]
- [16] 刘培基, 崔文甲, 王文亮, 等. 美拉德反应改善香菇柄酶解液的风味[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(22): 71-78. [LIU Peiji, CUI Wenjia, WANG Wenliang, et al. Flavor improvement of enzymatic hydrolysate of *Lentinus edodes* stalk by Maillard reaction[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(22): 71-78.]
- [17] LUO F, FEI X. Maillard reaction derived from oil-tea camellia seed through roasting[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99: 5000-5007.
- [18] GENG J T, TAKAHASHI K, KAIDO T, et al. Relationship among pH, generation of free amino acids, and Maillard browning of dried Japanese common squid *Todarodes pacificus* meat[J]. Food Chemistry, 2019, 283: 324-330.
- [19] YIN C, FAN X, FAN Z, et al. Comparison of non-volatile and volatile flavor compounds in six *Pleurotus* mushrooms[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99: 1691-1699.
- [20] 刘杨, 黄佳, 贾洪锋, 等. 不同烹饪方法对牛肉挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(10): 305-313. [LIU Yang, HUANG Jia, JIA Hongfeng, et al. Effects of different cooking methods on volatile flavor compounds in beef[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(10): 305-313.]
- [21] WANG J, ZHOU Z, DAN D, et al. Physicochemical properties and bioactivities of *Lentinula edodes* polysaccharides at different development stages[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 150: 573-577.
- [22] 敖珍, 谭红, 宋光林. 提升香菇多糖浸出率的工艺研究[J]. 中国食用菌, 2021, 40(10): 75-78. [AO Zhen, TAN Hong, SONG Guanglin. Study on the technology of improving the extraction rate of lentinan[J]. Edible Fungi of China, 2021, 40(10): 75-78.]

- [23] ZIVANOVIC S, BUESCHER R W, KIM K S. Textural changes in mushrooms (*Agaricus bisporus*) associated with tissue ultrastructure and composition[J]. *Journal of Food Science*, 2003, 65(8): 1404–1408.
- [24] 刘红. 抗氧化剂对美拉德反应的影响[D]. 广州: 暨南大学, 2007. [LIU Hong. Effects of antioxidants on Maillard reaction[D]. Guangzhou: Jinan University, 2007.]
- [25] LI G, WANG Q, SUN P, et al. Effect of L-cysteine pretreatment on the control of formaldehyde and browning of the culinary medicinal shiitake mushroom, *Lentinus edodes* (higher basidiomycetes) during drying and canning processes[J]. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 2015, 17(4): 385–395.
- [26] 徐佳, 涂智鸿, 杨建飞, 等. 复合护色剂抑制杏酒褐变的工艺优化[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(12): 168–175. [XU Jia, TU Zhihong, YANG Jianfei, et al. Optimization of compound color-preserving agent to inhibit browning of apricot wine[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(12): 168–175.]
- [27] XIA Z. Anti-browning of mushroom (*Agaricus bisporus*) slices by glutathione during hot air drying[J]. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 2013, 5(8): 1100–1104.
- [28] TIAN H, LU C, ZHAN P, et al. Effects of sterilization methods on pomegranate juice evaluated by descriptive sensory analysis and gas chromatography-mass spectrometry through partial least-squares regression[J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2020, 35(6): 1–12.
- [29] 孔钰婷, 何丹, 黄群, 等. 杀菌方式对湘西酸鱼挥发性风味物质及质构的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(19): 237–242. [KONG Yuting, HE Dan, HUANG Qun, et al. Effects of sterilization methods on volatile flavor compounds and texture of xiangxi sour fish[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(19): 237–242.]
- [30] CHEN X, YU J, CUI H, et al. Effect of temperature on flavor compounds and sensory characteristics of Maillard Reaction products derived from mushroom hydrolysate[J]. *Molecules*, 2018, 23(2): 247.
- [31] RANNOU C, LAROQUE D, RENAULT E, et al. Mitigation strategies of acrylamide, furans, heterocyclic amines and browning during the Maillard reaction in foods[J]. *Food Research International*, 2016, 90: 154–176.