

高品质榨菜微波水浴联合灭菌工艺优化

Optimizing the process of microwave combined with water bath sterilization of high quality pickled mustard

赵丹¹ 刘雄^{1,3} 张磊² 赵天天¹ 田俊青¹ 李朝盛³

ZHAO Dan¹ LIU Xiong^{1,3} ZHANG Lei² ZHAO Tian-tian¹ TIAN Jun-qing¹ LI Chao-sheng³

(1. 西南大学食品科学学院, 重庆 400715; 2. 重庆师范大学生命科学学院, 重庆 401331;

3. 重庆市特色泡菜科技专家大院, 重庆 408000)

(1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. College of Life Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China;

3. Chongqing Specialty Tuber Mustard Technology Experts Compound, Chongqing 408000, China)

摘要:以脱盐榨菜为研究对象,通过单因素试验探究微波温度、微波时间、水浴时间、微波功率和装袋量对榨菜硬度、色泽变化和感官评分的影响,进行 5 因素 3 水平的响应面设计,建立回归方程,筛选出最优工艺配方。结果表明:榨菜最优灭菌工艺为微波 1 080 W,微波处理时间 3 min,温度 71 °C,装袋量 100 g,水浴时间 1 min。该法处理后的榨菜品质优于传统榨菜灭菌工艺,且可以大大降低灭菌过程中的能耗和时间。

关键词:微波;水浴;灭菌;榨菜;质构;品质

Abstract: The influence factors of different microwave power, temperature and time, water bath time, and packed weight in pickled mustard were investigated based on single factor test with the hardness, color variation as comprehensive scores. Regression equation was established to figure out the optimal solution. The Result showed that optimum sterilization conditions were figured out as follows. 100 g packed pickled mustard were processed by microwave for 3 min at 71 °C with power 1 080 W, combined with water bathing for 1 min. The technology of microwave assisted water bath sterilization could be applied in pickled mustard sterilization. This process could make the pickled mustard with better quality than the traditional sterilization process.

Keywords: microwave; water bath; sterilization; pickled mustard; hardness; quality

方便榨菜因其质脆、色美、味鲜等特点深受广大消费者的喜爱。为了满足当前消费者的低盐需求,榨菜在销售前需要脱盐处理,脱盐处理后由于含盐量较低,易生长大量微生物

影响榨菜的品质和消费者的健康。榨菜传统的灭菌方式为 95 °C 水浴 10 min,由于处理温度高、时间长,严重影响了榨菜的色泽、硬度、风味等品质^[1]。

由于微波灭菌具有处理时间短、灭菌强度易控制、灭菌效果好等优点,近年来在食品工业中的应用较为广泛,例如:中草药^[2]、肉制品^[3]、新鲜果蔬^[4]、腌制品^[5]及水产品^[6]等领域。Brbosa 等^[7]对比了热灭菌和微波灭菌对肉制品品质的影响和优缺点,得出微波灭菌对肉制品的风味和质构影响不明显。Huang 等^[8]对比微波和热灭菌处理后的牛肉香肠,发现微波灭菌后的品质比热灭菌好。Sun 等^[9-10]研究发现新鲜竹笋经过微波和普通热处理后,前者处理的竹笋抗氧化性增强、色泽变化小、营养保持较完整。Lau 等^[11]用微波处理盐渍芦笋,处理后的芦笋温度分布均匀,且处理时间是水浴加热一半以下,而芦笋品质较水浴处理明显提高。

微波灭菌虽广泛地应用于食品领域,但对于软包装食品,密封后进行微波灭菌,经常会出现涨袋现象^[10]。传统的解决方法为降低微波功率或者增加包装袋的质量,但这对产品的灭菌效果及成本有一定的影响。因此本试验以脱盐榨菜为原料采用先微波后封口再水浴的方式,利用单因素和响应面法优化榨菜微波水浴联合灭菌的工艺,根据硬度、色泽变化程度、微生物数量多个指标综合评价灭菌的效果,建立回归方程,优化并得出微波水浴联合灭菌的最佳工艺参数,以期对微波灭菌技术的广泛应用和高品质榨菜的灭菌工艺提供参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

腌渍成熟的榨菜:涪陵辣妹子食品集团有限公司。

1.2 主要的仪器和设备

试验用微波灭菌机:YQ2G-03 型,南京友青食品高新技

作者简介:赵丹,女,西南大学在读硕士研究生。

通信作者:刘雄(1970—),男,西南大学教授,博士。

E-mail: liuxiong848@hotmail.com

收稿日期:2017-05-09

术发展有限公司；

质构仪:CT-3型,美国博勒飞公司；

测色仪:Utrascan Pro型,上海一恒科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 榨菜灭菌工艺流程

原料榨菜整理(去根)→切分(控制榨菜的规格 10 mm×5 mm×5 mm)→装袋→微波灭菌→封口→水浴灭菌→测定指标(含质构、色泽、微生物、感官评分)

1.3.2 试验设计

(1) 微波时间对灭菌效果的影响:在装带量 30 g、微波功率 1 080 W、微波温度 90 ℃、水浴 2 min 的条件下,分别设置微波处理的时间为 1,2,3,5,7,9 min,测定处理后榨菜的色泽、质构、微生物和感官评分。

(2) 微波温度对灭菌效果的影响:在装袋量 30 g、微波功率 1 080 W、微波时间 3 min、水浴 2 min 的条件下,分别设置微波处理的温度为 70,80,90,100 ℃,测定处理后榨菜的色泽、质构、微生物和感官评分。

(3) 微波功率对灭菌效果的影响:在装袋量 30 g、微波时间 3 min、微波温度 90 ℃、水浴 2 min 的条件下,分别设置微波处理的功率为 360,720,1 080,1 440,1 800 W,测定处理后榨菜的色泽、质构、微生物和感官评分。

(4) 装袋量对灭菌效果的影响:在微波功率 1 080 W、微波时间 3 min、微波温度 90 ℃、水浴 2 min 的条件下,分别设置微波处理样品的装袋量为 30,60,90,120 g,测定处理后榨菜的色泽、质构、微生物和感官评分。

(5) 水浴时间对灭菌效果的影响:在装带量为 30 g、微波功率 1 080 W、微波时间 3 min、微波温度 90 ℃的条件下,分别设置水浴时间为 0.5,1.0,2.0,3.0,4.0,5.0,6.0 min,测定处理后榨菜的色泽、质构、微生物和感官评分。

1.4 理化指标测定

1.4.1 色泽的测定 参照文献[12]。

1.4.2 感官评分 打开榨菜包装,观察榨菜片颜色,闻其气味,再进行品尝,对其口感进行鉴定,感官评分人员为经过专业感官评分训练的在校学生 10 人,评分标准见表 1。

1.4.3 微生物的测定

(1) 菌落总数:参照 GB 4789.2—2010《食品微生物学检验 菌落总数测定》,采用平板计数法。

(2) 大肠菌群:参照 GB 4789.3—2010《食品微生物学检验 大肠菌群计数》,采用 MPN 计数法。

1.4.4 榨菜质构的测定 将样品放置于操作板上。测试类型:采用 TPA 模式;可恢复时间:0 s;压缩量:30%;同一触发点负载:5 g;探头:TA 44;夹具:TA-BT-KI;测试速率:1.0 mm/s;返回速率:1.0 mm/s;循环次数:2;负载单元:25 000 g^[13]。

1.4.5 数据处理 采用 Excel 2007 和 SPSS 22.0 对试验数据进行作图及统计分析,差异显著性(P<0.05)。采用 Design-Expert(version 8.0.6)软件对响应面试验得到的数据进行线性回归和方差分析。

Central-Composite 试验数据组处理时先将各响应值归一化,然后按式(1)计算该组的综合评分。

表 1 感官评分标准

Table 1 Criteria for sensory quality evaluation of pickle mustard tubers

色泽	口感	外观	风味
色泽翠绿,新鲜光亮,15~20分	口味适中,咀嚼性好,有特有的榨菜香气,20~30分	无菜屑、杂质及异物,无油水分离,15~20分	有浓郁的榨菜风味,20~30分
色泽黄绿,无光泽,10~15分	咀嚼性一般,无异味,10~20分	无异物,出现轻微的油水分离,10~15分	榨菜风味清淡,10~20分
染色深黄,无光泽,10分以下	基本上无咀嚼性,10分以下	有异物,油水分分离严重,10分以下	存在苦味、焦味、酸败味等,10分以下

$$Y_4 = (0.5 \times Y_1 - 0.2 \times Y_2 - 0.3 \times Y_3) \times 100, \quad (1)$$

式中:

Y_1 ——榨菜的硬度,g;

Y_2 ——榨菜色泽变化程度(ΔE);

Y_3 ——榨菜菌落总数,CFU/g;

Y_4 ——综合评分值。

2 结果与分析

2.1 灭菌条件对榨菜品质的影响

2.1.1 处理条件对榨菜微生物的影响 微生物是衡量食品是否达到可食用标准的重要指标。依据国家标准规定榨菜中菌落总数 $\leq 5\ 000$ CFU/g,且大肠菌群 ≤ 3.0 MPN/g,同时菌落总数越少产品的品质在贮藏期间才能较好地保持,经测定各灭菌处理组均未检出大肠菌群,且菌落总数见表 2~6。在微波处理时间 ≤ 2 min 及微波处理功率为 360 W 时微生物的数量较多,不符合榨菜的微生物数量标准。微生物的数量随着灭菌处理强度的增加而减少,却随着装袋量的增加而增加。

2.1.2 微波处理时间对榨菜品质的影响 由图 1 可知,随着微波处理时间的增加,感官评分之间的差异不显著;不同微波处理时间对榨菜的硬度和色泽的影响显著。在微波处理时间为 1~5 min 时榨菜的硬度变化显著,在 5 min 后变化平缓,榨菜属于腌制的蔬菜类产品,其脆性与细胞壁的原果胶成分紧密相关。原果胶对于保持榨菜的脆性起着重要的作用^[14],随着温度升高原果胶水解为水溶性果胶,进一步水解原果胶将失去其原有作用,使蔬菜组织的硬脆度下降,组织变软^[15],在组织被破坏后榨菜的硬度变化就较为平缓。榨菜的颜色在 5 min 时变化显著,榨菜色泽变化是由于酚类和单宁物质,在酶作用下,氧化形成醌,再经一系列反应,生成黑色素^[16],长时间的微波处理会使得细胞结构松散导致其与氧气接触更充分,因此在 5 min 前颜色变化迅速,之后基本保持稳定。结合微波处理 2 min 内微生物数量超标,所以微波处理时间要 > 2 min,因此选定 5 min 为微波处理时间的 0 水平。

表 2 微波处理时间对榨菜微生物数量的影响[†]

Table 2 Effects of different microwave time on pickle microorganism quantity

微波处理时间/min	1	2	3	5	7	9
微生物数/(CFU · g ⁻¹)	—	—	113	32	6	3

表 3 微波处理温度对榨菜微生物数量的影响[†]

Table 3 Effects of different microwave temperature on pickle microorganism quantity

微波处理温度/°C	60	70	80	90	100
微生物数/(CFU · g ⁻¹)	546	269	185	112	0

表 4 微波处理功率对榨菜微生物数量的影响[†]

Table 4 Effects of different microwave power on pickle microorganism quantity

微波处理功率/W	360	720	1 080	1 444	1 800
微生物数/(CFU · g ⁻¹)	—	280	113	33	5

表 5 装袋量对榨菜微生物数量的影响[†]

Table 5 Effects of different packaging weight on pickle microorganism quantity

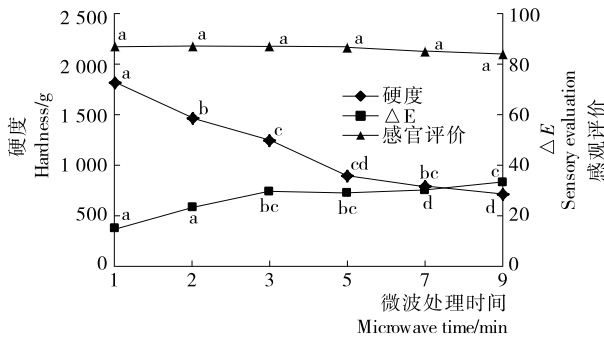
装袋量/g	30	60	90	120
微生物数/(CFU · g ⁻¹)	112	274	467	744

表 6 水浴时间对榨菜微生物数量的影响[†]

Table 6 Effects of different water bath time on pickle microorganism quantity

水浴时间/s	30	60	120	180	240	300
微生物数/(CFU · g ⁻¹)	297	193	106	41	22	3

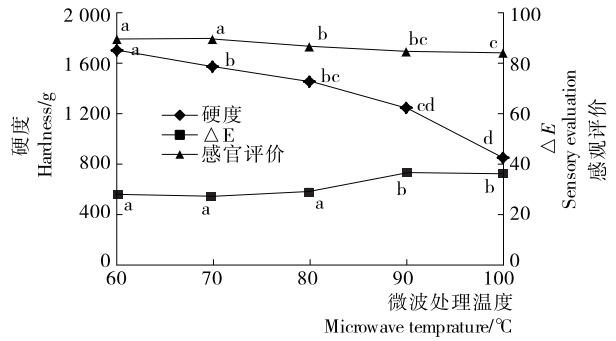
2.1.3 微波处理温度对榨菜品质的影响 由图 2 可知,随着微波处理温度的增加,榨菜的感官评分差异显著,尤其是 70 °C 和 80 °C 的感官评分;榨菜的硬度随着微波温度的增加而显著降低,因为高温破坏了榨菜中的纤维结构,使其质地变软^[17];60~80 °C 内 ΔE 的变化不明显,在 80 °C 以后 ΔE



字母不同表示两者有显著差异 ($P < 0.05$)。

图 1 微波处理时间对榨菜品质的影响

Figure 1 Effects of different microwave time to pickled mustard tuber's quality



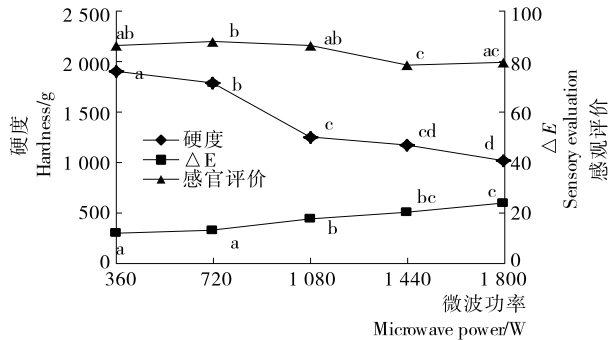
字母不同表示两者有显著差异 ($P < 0.05$)

图 2 微波处理温度对榨菜品质的影响

Figure 2 Effects of different microwave temperature to pickled mustard tuber's quality

的值显著增加,温度初步升高时加快了榨菜中酶的活性因此褐变速度加快,而在 90~100 °C 时温度过高使得氧化酶的活性丧失因此色泽变化不大^[16]。综合分析,选择 70 °C 作为微波处理温度的 0 水平。

2.1.4 微波处理功率对榨菜品质的影响 由图 3 可知,随着微波处理功率的增加感官评分在逐渐降低,硬度也逐渐降低,且在 360~1 080 W 内差异显著,而榨菜的颜色却逐步地加深,且在 720 W 以后增加显著。由于微波处理功率为 360 W 时微生物的数量高于榨菜的生产标准,因此微波处理时功率要高于 360 W。综合考虑,选择 1 080 W 作为微波功率的 0 水平。



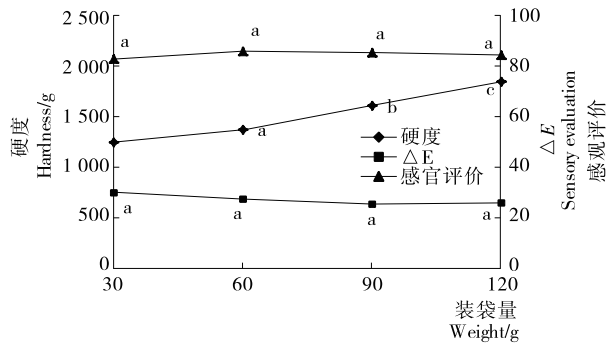
字母不同表示两者有显著差异 ($P < 0.05$)

图 3 微波功率对榨菜品质的影响

Figure 3 Effects of different microwave power to pickled mustard tuber's quality

2.1.5 装袋量对榨菜品质的影响 由图 4 可知,随着装袋量逐渐增加,榨菜的硬度逐渐增大,且在 60 g 后硬度的增加变化显著,装袋量对于感官评分和榨菜的色泽没有显著的影响,且根据日常方便榨菜的包装量设定装袋量在 60~120 g。

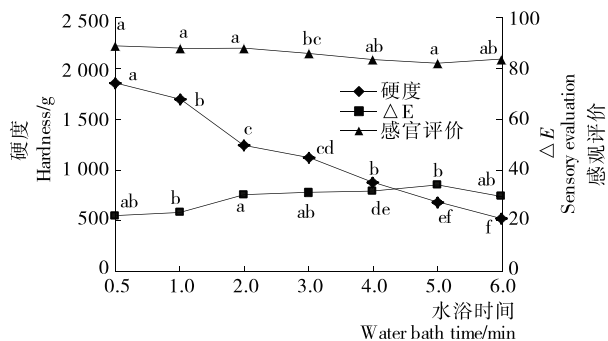
2.1.6 水浴时间对榨菜品质的影响 由图 5 可知,随着水浴时间的延长,硬度逐渐降低,且在水浴时间 0.5~2 min 后硬度变化差异显著,由于榨菜在水浴初始阶段属于逐步升温过程,榨菜还可以保持其较好的品质。而榨菜的色泽却在 1 min 后发生显著性的变化,在微生物符合标准的情况下,水浴时间的 0 水平为 1.5 min。



字母不同表示两者有显著差异(P<0.05)

图4 装袋量对榨菜品质的影响

Figure 4 Effects of different packaging weight to pickled mustard tuber's quality



字母不同表示两者有显著差异(P<0.05)

图5 水浴时间对榨菜品质的影响

Figure 5 Effects of different water bath time to pickled mustard tuber's quality

综合上述单因素试验结果,选择对榨菜灭菌效果影响较大的微波温度、微波时间、微波功率、水浴时间和装带量进行响应面设计,因素和水平编码见表7。

表7 Central-Composite 试验设计因素水平及编码

Table 7 Independent variables and levels used in Central-Composite design

因素	A 微波功率/W	B 微波时间/min	C 微波温度/℃	D 水浴时间/min	E 装袋量/g
-1	720	3	60	1.0	60
0	1 080	5	70	1.5	90
1	1 440	7	80	2.0	120

2.2 响应面结果分析

榨菜品质的综合评分结果见表8。以Y值为响应值,采用 Design-Expert(version8.0.6)软件,基于 Central-Composite 进行响应面设计,对试验数据进行回归分析,并建立数据模型,得到 A、B、C、D、E 对综合评分 Y 的二次多项式回归方程:

$$Y = 19.77 - 8.69A - 7.47B - 2.08C + 1.35D - 1.02E - 0.87AB - 1.36AC + 0.88AD - 0.4AE - 1.16BC - 0.79BD - 0.14BE + 0.65CD + 0.082CE + 0.62DE - 4.13A^2 - 2.34B^2 - 3.25C^2 - 2.51D^2 - 0.23E^2. \quad (2)$$

表8 响应面试验分析方案及结果†

Table 8 Experiment design and results for response surface analysis

编号	A	B	C	D	E	Y 综合评分
1	0	0	0	0	0	22.8
2	-1	-1	-1	1	-1	16.7
3	1	1	1	1	1	-15.5
4	1	-1	-1	1	-1	10.9
5	1	1	-1	1	1	-8.5
6	0	0	0	0	2.378	23.8
7	-1	-1	1	1	1	26.3
8	0	0	0	0	-2.378	23.9
9	1	-1	1	1	1	-1.2
10	0	0	0	2.378	0	17.1
11	-1	-1	-1	-1	-1	20.3
12	0	0	0	0	0	22.6
13	-1	1	1	1	1	8.5
14	1	-1	-1	-1	1	-0.9
15	-1	1	-1	1	-1	2.2
16	1	-1	-1	-1	-1	6.5
17	0	-2.38	0	0	0	30.2
18	0	0	0	0	0	23.1
19	0	2.38	0	0	0	-6.4
20	0	0	0	0	0	26.2
21	-1	1	-1	-1	1	8.2
22	1	1	-1	1	-1	-1.2
23	-1	1	1	-1	1	-1.0
24	1	-1	-1	1	1	13.3
25	-1	1	-1	1	1	4.3
26	-1	-1	1	-1	1	14.4
27	-1	-1	-1	-1	1	18.7
28	0	0	0	0	0	20.7
29	-1	-1	1	1	-1	22.4
30	-1	1	1	-1	-1	7.4
31	1	1	1	1	-1	-11.9
32	-1	-1	1	-1	-1	20.6
33	1	1	1	-1	-1	-16.8
34	0	0	2.378	0	0	-4.0
35	1	1	-1	-1	1	-11.2
36	0	0	0	0	0	18.5
37	-2.38	0	0	0	0	29.1
38	1	1	-1	-1	-1	-6.5
39	0	0	0	0	0	22.9
40	0	0	0	0	0	23.0
41	1	-1	1	-1	-1	4.7
42	0	0	-2.378	0	0	17.5
43	-1	-1	-1	1	1	17.4
44	-1	1	1	1	-1	7.2
45	-1	1	-1	-1	-1	15.7
46	0	0	0	-2.378	0	4.8
47	1	-1	1	-1	1	4.4
48	2	0	0	0	0	-15.9
49	1	1	1	-1	1	-12.9
50	1	-1	1	1	-1	10.2

由表 9 可知,榨菜综合评分模型的 $P < 0.05$,失拟项 $P > 0.05$,说明此模型显著,未知因素对试验结果干扰小,且残差均由随机误差引起。由表中数据可以看出 A、B、 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 的 P 值均 < 0.01 ,对综合评分的影响达到极显著水平;而 C^2 的 P 值 < 0.05 ,对综合评分的影响达到显著水平;其余项影响不显著。

比较回归方程的一次项系数绝对值可知:对于综合评分,因素的影响强弱顺序为 $A > B > C > D > E$;即对于榨菜指标综合评分而言,各因素影响的强弱顺序为微波功率 $>$ 微波时间 $>$ 微波温度 $>$ 水浴时间 $>$ 装袋量。

表 9 二次响应模型方差分析[†]

Table 9 ANOVA of response surface model

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	7 299.45	20	364.97	9.39	$< 0.000 1$
A	3 102.31	1	3 102.31	79.81	$< 0.000 1$
B	2 419.22	1	2 419.22	62.24	$< 0.000 1$
C	187.07	1	187.07	4.81	0.04
D	78.91	1	78.91	2.03	0.16
E	45.27	1	45.27	1.16	0.29
AB	24.27	1	24.27	0.62	0.44
AC	59.15	1	59.15	1.52	0.23
AD	24.84	1	24.84	0.64	0.43
AE	5.15	1	5.15	0.13	0.72
BC	42.90	1	42.90	1.10	0.30
BD	19.74	1	19.74	0.51	0.48
BE	0.61	1	0.61	0.02	0.90
CD	13.38	1	13.38	0.34	0.56
CE	0.22	1	0.22	0.01	0.94
DE	12.44	1	12.44	0.32	0.58
A^2	737.40	1	737.40	18.97	0.00
B^2	306.58	1	306.58	7.89	0.01
C^2	588.99	1	588.99	15.15	0.00
D^2	352.16	1	352.16	9.06	0.01
E^2	2.95	1	2.95	0.08	0.78
残差	1 127.20	29	38.87		
失拟项	995.90	22	45.27	2.41	0.17
纯误差	131.30	7	18.76		
总计	8 426.64	49			

[†] * 表示在 $P < 0.05$ 水平上显著, ** 表示在 $P < 0.01$ 水平上极显著。

利用 Design-Expert (version 8.0.6) 软件进行工艺参数的优化组合,每个因素对榨菜的品质都有一定的影响。依据综合评分预测值最高处理组作为灭菌的最佳工艺标准。最优预测组工艺的条件为微波功率 967.25 W,微波时间 3.00 min,微波温度 70.98 °C,装袋量 101.36 g,水浴时间 1 min。为了方便操作,调整灭菌条件为微波功率为 1 080 W (由于该微波灭菌设备的总功率为 1 800 W,平均分为 5 档,因此取值受到限制;考虑到功率对榨菜灭菌效果的影响因此

选取了较接近的功率,即 1 080 W 的处理功率)、微波时间 3 min、微波温度 71 °C、装袋量 100 g、水浴时间 1 min。优化工艺的验证实验见表 10,该工艺条件下优化组的预测值与实际值的误差范围在 8% 以内,因此此预测效果可信,且优化组榨菜品质优于传统灭菌组。

表 10 优化工艺验证试验

Table 10 Experimental validation of optimal food additive levels for simultaneous addition

组别	硬度/g	色泽(ΔE)	微生物/ (CFU · g ⁻¹)	综合评价
预测组	1 493.43	9.30	453.6	27.52
实际组	1 362.00	10.03	342.0	27.10
传统灭菌组	1 049.00	15.86	920.0	4.50

3 结论

(1) 通过单因素试验及响应面优化法,得出榨菜微波水浴联合灭菌的最优工艺参数为:微波功率 1 080 W、微波处理时间 3 min、微波温度 71 °C、装袋量 100 g、水浴时间 1 min。灭菌后的榨菜脆度、色泽、微生物数量都优于传统的榨菜灭菌方法。

(2) 本研究采用的微波水浴联合灭菌是将未封口的包装袋微波后再进行封口和水浴灭菌,该方法可以避免微波过程中涨袋,但封口过程却会接触空气,因此采用该灭菌方法的榨菜能否长期储存仍需进一步探讨。

参考文献

- [1] 陈健初,叶兴乾,吴丹.真空软包装榨菜和萝卜热力灭菌工艺研究[J].食品工业,2008(6):11-13.
- [2] 武娜,张利红,万露,等.丹参微波灭菌工艺优化及评价[J].解放军药学学报,2015(4):288-290.
- [3] 樊伟伟,黄惠华.微波灭菌技术在食品工业中的应用[J].食品与机械,2007,23(1):143-147.
- [4] 万本屹,董海洲,刘传富.微波加热对食品中维生素的影响[J].食品与机械,2001(4):11-12.
- [5] 陈昌实,黄智洵,余恺,等.糖水荔枝罐头生产中应用微波灭菌技术的研究[J].食品与机械,2005,21(5):49-53.
- [6] DUAN Zhen-hua, ZHANG Min, HU Qing-guo, et al. Characteristics of microwave drying of bighead carp[J]. Drying Technology, 2005, 23(3): 637-643.
- [7] GUSTAVO V B C, ILCE M M, KEZBAN C. Advanced retorting, microwave assisted thermal sterilization (MATS), and pressure assisted thermal sterilization (PATS) to process meat products[J]. Meat Science, 2014(98): 420-434.
- [8] HUANG Li-han, SITES J. Automatic control of a microwave heating process for in-package pasteurization of beef frankfurters[J]. Food Engineering, 2006(80): 226-233.
- [9] SUN Ting, TANG Ju-ming, POWERS J R. Antioxidant activity and quality of asparagus affected by microwave circulated water combination and conventional sterilization[J]. Food Chemistry, 2007, 100(2): 813-819.

(下转第 209 页)

- [29] SONG J T, DUNG C W, CHAILA P O, et al. Novel, simple and low-cost alternative method for fabrication of paper-based microfluidics by wax dipping[J]. *Talanta*, 2011, 85(5): 2 587-2 593.
- [30] GIRISH Chitnis, DING Zhen-wen, CHANG Chun-li, et al. Laser-treated hydrophobic paper: an inexpensive microfluidic platform[J]. *Lab on a Chip*, 2011, 11(6): 1 161.
- [31] NIE Jin-fang, ZHANG Yun, LIN Li-wen, et al. Low-cost fabrication of paper-based microfluidic devices by one-step plotting [J]. *Analytical Chemistry*, 2012, 84(15): 6 331-6 335.
- [32] MOHAMMAD A T, SHEN Wei, ZEINEDDINE R, et al. Validation of Paper-Based Assay for Rapid Blood Typing[J]. *Analytical Chemistry*, 2012, 84(3): 1 661-1 668.
- [33] VELLA S J, BEATTIE P, CADEMARTIRI R, et al. Measuring markers of liver function using a micropatterned paper device designed for blood from a fingerstick [J]. *Analytical Chemistry*, 2012, 84(6): 2 883-2 891.
- [34] ARENA A, DONATO N, SAIITA G, et al. Flexible ethanol sensors on glossy paper substrates operating at room temperature[J]. *Sensors and Actuators B*, 2010, 145(1): 488-494.
- [35] LI Xu, TIAN Jun-fei, SHEN Wei. Progress in patterned paper sizing for fabrication of paper-based microfluidic sensors [J]. *Cellulose*, 2010, 17(3): 649-659.
- [36] JOKERST J C, ADKINS J A, BISHA B, et al. Development of a paper-based analytical device for colorimetric detection of select foodborne pathogens[J]. *Analytical Chemistry*, 2012, 84(6): 2 900-2 907.
- [37] 肖良品, 刘显明, 刘启顺. 用于亚硝酸盐快速检测的三维纸质微流控芯片的制作[J]. *食品科学*, 2013(22): 341-345.
- [38] 窦斌. 基于微流控芯片和 SERS 的瘦肉精类物质检测[D]. 大连: 大连理工大学, 2014: 28-43.
- [39] HOSSAIN S M Z, LUCKHAM R E, MCFADDEN M J, et al. Reagentless bidirectional lateral flow bioactive paper sensors for detection of pesticides in beverage and food samples[J]. *Analytical Chemistry*, 2009, 81(21): 9 055-9 064.
- [40] ZHANG Meng, GE Lei, GE Shen-guang, et al. Three-dimensional paper-based electrochemiluminescence device for simultaneous detection of Pb(2+) and Hg(2+) based on potential-control technique[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2013, 41: 544-550.
- [41] WANG Hu, LI Ya-jie, WEI Jun-feng, et al. Paper-based three-dimensional microfluidic device for monitoring of heavy metals with a camera cell phone [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2014, 406(12): 2 799-2 807.

(上接第 93 页)

- [5] JR O L S, NORILER D, WIGGERS V R, et al. Cyclone optimization by complex method and CFD simulation[J]. *Powder Technology*, 2015, 277: 11-21.
- [6] 王蓉, 王华. 国产吸粮机与进口吸粮机比较[J]. *粮食流通技术*, 2005(2): 13-14, 21.
- [7] 吴建章, 刘秀芳, 温长春. 吸粮机双筒型吸嘴性能的研究[J]. *粮食与饲料工业*, 2005(12): 16-17.
- [8] 吴建章, 胡健. 吸粮机中叶轮式闭风器的气密性研究[J]. *粮食与饲料工业*, 2009(11): 11-13.
- [9] 刘秀芳. 吸粮机单筒型吸嘴性能的研究[J]. *河南工业大学学报: 自然科学版*, 2005(1): 75-77.
- [10] 张贝贝, 柳波, 任昊君. 吸粮机气力输送效率优化设计仿真[J]. *计算机仿真*, 2016, 33(10): 207-211.
- [11] 丁问司, 何祥滨. 吸粮机三级离心风机内部流场的数值模拟[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(11): 78-84.
- [12] 王明旭, 秦超, 李永祥, 等. 气力输送过程中粮食颗粒的输送特性研究[J]. *农机化研究*, 2014(9): 18-22.
- [13] 沈骝, 梁财, 陈晓平, 等. 气力输送中不同物料的流动特性及倾斜管阻力特性[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2014, 44(5): 975-980.
- [14] MA A C, WILLIAMS K C, ZHOU J M, et al. Numerical study on pressure prediction and its main influence factors in pneumatic conveyors[J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(23): 6 247-6 258.
- [15] LIANG Cai, CHEN Xiao-ping, ZHAO Chang-sui, et al. Flow characteristics and shannon entropy analysis of densephase pneumatic conveying of variable moisture content under high pressure [J]. *Chemical Engineering and Technology*, 2007, 30(7): 926-931.
- [16] 杨伦, 谢一华. 气力输送工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 107-118.
- [17] 侯国祥. 流体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 311-355.

(上接第 182 页)

- [10] 李爱军, 郭建中. 微波在软包装竹笋灭菌保鲜上的应用研究[J]. *食品工业科技*, 2003, 24(5): 73-74.
- [11] LAU M H, TANG Ju-ming. Pasteurization of pickled asparagus using 915 MHz microwaves[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 51(4): 283-290.
- [12] 赵兴娥, 王颖, 王微, 等. 不同透明包装对榨菜品质的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(4): 288-292.
- [13] FARAHNKY A, AZIZI R, GAVAHIAN M. Accelerated texture softening of some root vegetables by Ohmic heating[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 113(2): 275-280.
- [14] 张志强. 低盐酱菜脆度保持的研究[J]. *江苏调味副食品*, 2002(1): 61-62.
- [15] 王肖莉, 屈小玄, 王守凤, 等. 煮烫对榨菜感官品质的影响[J]. *中国调味品*, 2012, 37(9): 22-24.
- [16] AKALIN M K, TEKIN K, AKVIIZ M, et al. Sage oil extraction and optimization by response surface methodology[J]. *Industrial Crops & Products*, 2015, 76: 829-835.
- [17] SWAMY G J, SANGAMITHRA A, CHANDRASEKAR V. Response surface modeling and process optimization of aqueous extraction of natural pigments from *Beta vulgaris*, using Box-Behnken design of experiments[J]. *Dyes & Pigments*, 2014, 111: 64-74.