

高压电场低温等离子体对槟榔包装产品冷杀菌效能特性的影响

Effect on the cold sterilization of *areca catechu* packaging products by high voltage electric field and cold plasma

曹丽娜¹ 章建浩¹ 王晓婷²

CAO Li-na¹ ZHANG Jian-hao¹ WANG Xiao-ting²

魏巧云³ 王艺月³ 严文静³

WEI Qiao-yun³ WANG Yi-yue³ YAN Wen-jing³

(1. 南京农业大学国家肉品质量安全控制工程技术研究中心, 江苏 南京 210095;

2. 江苏省肉类加工与质量控制协同创新中心, 江苏 南京 210095;

3. 南京农业大学食品科学技术学院, 江苏 南京 210095)

(1. National Center of Meat Quality and Safety Control, Nanjing, Jiangsu, 210095, China; 2. Jiangsu Synergetic Innovation Center of Meat Processing and Quality Control, Nanjing, Jiangsu, 210095, China; 3. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu, 210095, China)

摘要:利用响应面法探究高压电场工作频率、电压、时间及氧气比例对槟榔的杀菌效能特性,结果表明:一定范围内,杀菌率随工作频率、电压、时间的提高而显著升高($P<0.05$),当频率 >100 Hz、时间 >150 s,杀菌率变化不显著($P>0.05$);回归分析表明频率的升高与电压、时间临界值的变化呈正相关($R^2=1$),说明频率、电压及时间对槟榔杀菌有明显的交互作用;最佳杀菌参数为处理频率110 Hz、处理电压70.5 kV、氧气比例40%、处理时间180 s,此时的杀菌率为97.20%,与预测值(97.32%)接近,而且槟榔碱含量无明显变化,表明高压电场低温等离子体对槟榔包装产品有显著的杀菌效果,并对产品品质无显著影响。

关键词:低温等离子体;槟榔包装产品;工作电压频率;菌落总数;杀菌率;槟榔碱

Abstract: Response surface methodology was used to explore the sterilization efficiency of *areca catechu* by working frequency, voltage, time and oxygen ratio of high voltage electric field. The

results showed that within a certain range, the sterilization rate increased significantly with the increase of working frequency, voltage and time ($P<0.05$). When the frequency was higher than 100 Hz and the time exceeded 150 s, the sterilization rate did not change significantly ($P>0.05$). Regression analysis results showed that the increase of frequency was positively correlated with the changes of voltage and time critical values ($R^2=1$), indicating that frequency, voltage and time had obvious interaction on *areca catechu* sterilization. The best sterilization conditions were treatment frequency 110 Hz, treatment voltage 70.5 kV, oxygen ratio 40%, treatment time 180 s, sterilization rate 97.20%, which is close to the predicted sterilization rate 97.32%. There was no obvious change in arecoline content, indicating that high voltage electric field and cold plasma have significant sterilization effect on *areca catechu* packaged products and have no significant influence on product quality.

Keywords: cold temperature plasma; *areca catechu* packaging products; working voltage and frequency; total number of colonies; sterilization rate; arecoline

基金项目:江苏省农业创新资金项目(编号: CX[18]1049); 南京市科技计划项目(编号: 201805038); 苏州市科技计划项目(编号: SNG2017074)

作者简介:曹丽娜,女,南京农业大学在读硕士研究生。

通信作者:章建浩(1961—),男,南京农业大学教授,博士。

E-mail: nau_zjh@njau.edu.cn

收稿日期:2020-04-04

槟榔(*Areca catechu*)因具有独特的风味口感,在湖南乃至全中国发展规模迅速。由于槟榔产品的生产加工环境开放度高、包装及从业人员手工操作,易导致槟榔成品微生物超标,这是影响槟榔产品合格率的主要原因^[1-2]。目前,槟榔的杀菌研究主要集中在初生产环节,

如热杀菌、SO₂熏蒸、添加防腐保鲜剂等^[3-4],而关于槟榔成品的有效杀菌方法研究较少,主要有辐照杀菌、微波杀菌、脉冲强光杀菌^[5-7],但这些方法或对槟榔品质造成负面影响,或存在设备价格高、操作要求严格等问题。高压电场低温等离子体冷杀菌(cold plasma cold sterilization, CPCS)是一种新兴的食品冷杀菌技术,该技术可与气调包装完美结合,具有温升小、能耗低、无污染、无残留、作用时间短、操作简便等优点^[8],特别适用于热敏性食品的杀菌。

CPCS 是在电极之间放置密封包装的样品,通过对电极施加高压,激发电极板内空气产生活性氧(ROS)、活性氮(RNS)和紫外线光子等活性成分^[9-10],这些活性成分具有良好的杀菌作用,可与样品表面微生物接触,对细胞 DNA、脂质、蛋白质、细胞膜等造成损伤,从而使微生物失活死亡^[11-13]。同时,这些活性成分的存留时间较短,半衰期较长的臭氧及其他活性成分在 24 h 内会逐渐转变为基态^[14]。研究^[15-16]表明,低温等离子体技术对食品具有很好的杀菌效果。Misra 等^[17]研究发现低温等离子体处理电压 60 kV,处理草莓 5 min 就能有效减少草莓的菌落总数。乔维维等^[18]发现介质阻挡放电低温等离子体在电压强度 72 kV 的条件下处理牛肉 86 s,杀菌率高达 93.75%。目前,关于 CPCS 技术用于槟榔杀菌的研究尚未见报道,试验拟以湖南散装槟榔为原材料,探究 CPCS 对槟榔的杀菌效果影响,在不影响其品质的基础上,优化杀菌工艺参数,为低温等离子体技术在槟榔的冷杀菌领域提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

散装槟榔:菌落总数为 4.6 lg(CFU/g)左右,湖南皇爷食品有限公司;

平板计数培养基(PCA)、氯化钠:青岛海博生物技术有限公司;

槟榔碱标准品:上海源叶生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

高压电场低温等离子体:CPCS-1 型,南京苏曼等离子体科技有限公司;

复合气调包装机:MAP-H360 型,配有气体比例检测装置,苏州森瑞保鲜设备有限公司;

电热恒温培养箱:DHP-9012 型,上海一恒科学仪器有限公司;

液相色谱仪:Agilent 1260 型,美国安捷伦公司。

1.3 方法

1.3.1 槟榔的处理 与槟榔接触的镊子、包装盒提前用 75% 的酒精消毒,并于超净台中灭菌 30 min。称取槟榔 25 g 于聚丙烯包装盒(17 cm×12 cm×3.2 cm)中,随机选

取 3 盒,对照组为空气包装,处理组按不同因素水平气调包装后进行 CPCS 处理,每个处理重复 3 次。

1.3.2 单因素试验

(1) CPCS 处理频率对槟榔杀菌率的影响:固定处理电压 70.5 kV,处理时间 150 s,间隔时间 30 s,气体组成 40% O₂、30% CO₂、30% N₂,处理频率分别为 60,70,80,90,100,110,120 Hz。

(2) CPCS 处理电压对槟榔杀菌率的影响:固定处理频率 100 Hz,处理时间 150 s,间隔时间 30 s,气体组成 40% O₂、30% CO₂、30% N₂,处理电压分别为 42.5,49.5,56.5,63.5,70.5 kV。

(3) CPCS 氧气比例对槟榔杀菌率的影响:固定处理电压 70.5 kV,处理频率 100 Hz,处理时间 150 s,间隔时间 30 s,固定 N₂ 比例 30%,O₂+CO₂ 比例分别为 10%+60%,20%+50%,30%+70%,40%+30%,50%+20%,60%+10%。

(4) CPCS 处理时间对槟榔杀菌率的影响:固定处理电压 70.5 kV,处理频率 100 Hz,气体组成为 40% O₂、30% CO₂、30% N₂,间隔时间 30 s,处理时间分别为 30,60,90,120,150,180,210 s。

1.3.3 响应面法优化 在单因素试验基础上,以处理电压、处理频率、氧气比例、处理时间为自变量,杀菌率为响应值,对槟榔杀菌率进行响应曲面优化。

1.3.4 指标测定

(1) 菌落总数:样品经 CPCS 处理后,置于自封袋中,加入 225 mL 无菌生理盐水,均质器以 12 次/s 正反面各拍打 1 min,选取合适梯度的稀释液 1 mL 于平板,倾注灭菌冷却的 PCA 摇晃混合均匀,每个梯度重复 3 次,凝固后于 37 ℃ 培养箱培养 18~24 h。以未经 CPCS 处理的槟榔为对照组,按 GB 4789.2—2016 方法进行菌落总数计数。

(2) 杀菌率:按式(1)计算杀菌率。

$$Y = \frac{N_0 - N}{N_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

Y——杀菌率,%;

N₀——低温等离子体处理前菌落总数,CFU/g;

N——低温等离子体处理后菌落总数,CFU/g。

(3) 水分含量:按 GB 5009.3—2016 执行。

(4) 粗纤维含量:按 GB/T 5009.10—2016 执行。

(5) 槟榔碱含量:根据文献[19]的方法。

1.3.5 数据分析 试验结果均用 Excel 软件整理作图,方差分析和显著性检验采用 SAS 9.4 软件中 GLM 程序分析(P<0.05),响应曲面试验采用 Design-Expert 8.0.5 软件分析作图,所有试验重复 3 次,结果以(平均值±标准偏差)表示。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 CPCS处理频率对槟榔杀菌率的影响 由图1可知,槟榔杀菌率随CPCS处理频率的增加先显著($P < 0.05$)升高,当处理频率 > 100 Hz后趋于平缓。随着处理频率的增大,等离子设备的放电功率增大,增加了高能粒子的密度,低温等离子体释放的活性物质等杀菌成分与食品微生物接触,从而杀死微生物。Takaki等^[20]发现介质阻挡放电低温等离子体设备在放电过程中,随着放电频率的增大,样品空间内产生更多的活性粒子,而这些活性粒子正是杀菌的关键物质,与试验结果一致。此外,处理频率的变化决定整个体系温度的变化,虽然高频率具有更好的杀菌效果,但会使反应体系的温度升高,不适用于热敏感食品的杀菌,也不利于食品品质的保障。因此选择处理频率为90~110 Hz。

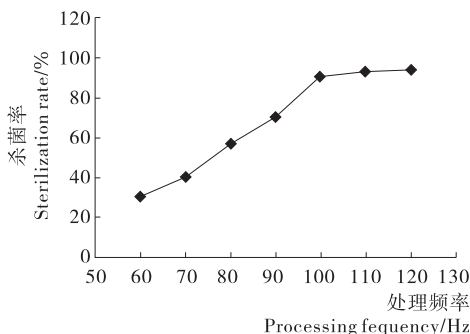


图1 处理频率对杀菌率的影响

Figure 1 Effect of processing frequency on the sterilization rate

2.1.2 CPCS处理电压对槟榔杀菌率的影响 由图2可知,槟榔杀菌率随电压强度的增大显著($P < 0.05$)提高。一般而言,随电压的升高,激发产生的等离子体浓度越高,产生的活性成分更多,有利于臭氧和 H_2O_2 等杀菌成分的生成,杀菌效果越明显^[21]。Kim等^[22]研究发现,等离子体的电压强度对猪腰肉病原菌的杀菌有显著影响,其杀菌率随电压的增高而增大。马良军等^[23]研究发现电压为70,80 kV时,原始菌从8 lg(CFU/mL)分别降至6,3 lg(CFU/mL),杀菌效果随电压强度的增大而提高。试验中在70.5 kV的试验电压下,菌落总数从4.65 lg(CFU/g)降至3.00 lg(CFU/g),可能是因为样品的状态(固态或液态)会影响杀菌效果,液态、光滑表面的样品经CPCS处理后会产明显的杀菌效果,而对于一些表面粗糙的样品如槟榔,达到相同杀菌效果则需更高的条件^[24]。此外,样品的初始菌数越多,同等条件下CPCS杀菌效果越显著。因此选取电压为56.5~70.5 kV。

2.1.3 CPCS氧气比例对槟榔产品杀菌率的影响 目前气调包装技术常用的气体是 O_2 、 N_2 、 CO_2 。气体组成会

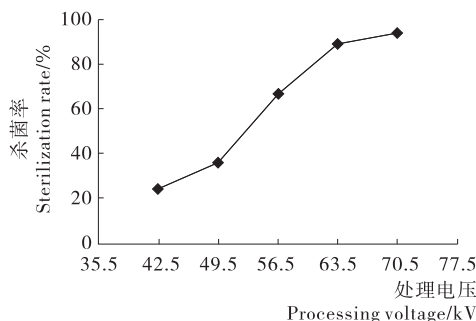


图2 处理电压对杀菌率的影响

Figure 2 Effects of processing voltage on the sterilization rate

影响等离子体形成成分的组成,从而影响杀菌效果。Kim等^[25]发现在纯氩气中加入一定量的氧气会使活性氧的杀菌效果更高。 CO_2 能抑制大多数腐败细菌和霉菌生长繁殖, N_2 是惰性气体,一般不与食品发生化学反应,用以维持包装外形。由图3可知,当氧气比例为10%~40%时,杀菌率显著($P < 0.05$)升高;当氧气比例 $> 40\%$ 时,杀菌率呈下降趋势。研究^[26]表明 O_2 有利于低温等离子体产生活性氧等活性物质,其中含氧活性成分在杀菌过程中起主要作用。马良军等^[27]研究发现,低温等离子处理单增李斯特菌时,随着包装内 O_2 浓度的提高,单增李斯特菌完全致死所需时间明显降低。当包装内 O_2 含量较低时,激发产生的含氧活性成分量少,对微生物的致死作用不明显;逐渐提高 O_2 浓度,叠加 CO_2 的抑菌作用导致杀菌率逐渐上升;当 O_2 含量过于饱和时,激发产生的活性氧等杀菌自由基量有限,即使再增大 O_2 比例,微生物的致死率也不会有显著变化,同时 CO_2 的抑菌作用进一步减弱,二者叠加会导致杀菌率呈缓慢降低趋势。因此,综合考虑选择 O_2 比例为20%~60%。

2.1.4 CPCS处理时间对槟榔产品杀菌率的影响 由图4可知,低温等离子体杀菌效果随处理时间的延长先显著($P < 0.05$)上升,当处理时间超过150 s后趋于平缓。Niemira等^[28]利用等离子体处理苹果时,发现所有处理组的杀菌率随处理时间的增加而增加。Misra等^[17]研究

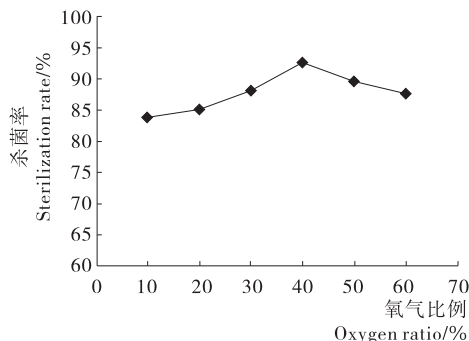


图3 氧气比例对杀菌率的影响

Figure 3 Effects of oxygen ratio on the sterilization rate

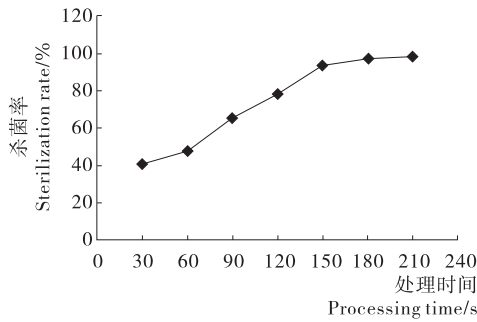


图 4 处理时间对杀菌率的影响

Figure 4 Effects of processing time on the sterilization rate

等离子体对樱桃的杀菌过程,发现随着处理时间的延长,杀菌率越高。Hu 等^[29]研究低温等离子体对大肠杆菌的杀菌过程发现,杀菌率随处理时间的延长先上升后趋于平缓,与试验结果一致。这是由于随着处理时间的延长,产生的等离子体中的活性成分浓度增大,对槟榔表面微生物的钝化效果越好;然而,当活性成分在包装内累积至一定程度时,其对样品表面微生物致死作用有限。因此选取处理时间为 120~180 s。

2.2 响应面试验

2.2.1 响应面因素水平设计 根据单因素试验结果,以处理电压、处理频率、处理时间和氧气比例为影响因素,以杀菌率为指标,设计四因素三水平响应面优化试验,各因素水平见表 1,试验结果见表 2。

2.2.2 回归模型建立及显著性分析 利用 Design-Expert 软件对试验数据进行二次多项式回归拟合分析,得杀菌率对自变量回归方程为:

$$Y = -1\ 160.82 + 11.21A + 16.74B + 1.407C + 0.378D + 0.073AB - 6.75 \times 10^{-3}AC + 0.013AD - 4.64 \times 10^{-3}BC - 3.8 \times 10^{-3}BD + 1.83 \times 10^{-3}CD - 0.084A^2 - 0.172B^2 - 7.68 \times 10^{-3}C^2 - 4.41 \times 10^{-3}D^2. \quad (2)$$

由表 3 可知,回归模型极显著($P < 0.000\ 1$),失拟项不显著($P = 0.156\ 9 > 0.05$),说明该模型与试验拟合较好; $R^2 = 0.972\ 3$, $R_{adj}^2 = 0.944\ 7 > 0.8$,可有效地体现低温等离子体杀菌效果与各处理因素的关系。A、B 和 D 对杀菌率影响极显著,C、AB、AD、 A^2 和 B^2 对杀菌率影响

表 1 Box-Behnken 中心组合试验因素与水平

Table 1 Box-Behnken center composite test factors and level

水平	A 处理频率/Hz	B 处理电压/kV	C 氧气比例/%	D 处理时间/s
-1	90	56.5	20	120
0	100	63.5	40	150
1	110	70.5	60	180

表 2 响应面设计及结果

Table 2 Experiment design and results for response surface analysis

序号	A	B	C	D	杀菌率/%
1	-1	-1	0	0	57.6
2	1	-1	0	0	60.7
3	-1	1	0	0	67.2
4	1	1	0	0	90.8
5	0	0	-1	-1	73.1
6	0	0	1	-1	73.5
7	0	0	-1	1	82.1
8	0	0	1	1	86.9
9	-1	0	0	-1	63.1
10	1	0	0	-1	68.1
11	-1	0	0	1	68.5
12	1	0	0	1	89.3
13	0	-1	-1	0	58.8
14	0	1	-1	0	83.2
15	0	-1	1	0	64.4
16	0	1	1	0	86.2
17	-1	0	-1	0	65.3
18	1	0	-1	0	83.7
19	-1	0	1	0	72.8
20	1	0	1	0	85.8
21	0	-1	0	0	60.4
22	0	1	0	-1	79.8
23	0	-1	0	1	73.8
24	0	1	0	1	90.0
25	0	0	0	0	88.2
26	0	0	0	0	85.1
27	0	0	0	0	87.6
28	0	0	0	0	86.6
29	0	0	0	0	84.2

显著;各因素对槟榔杀菌率影响大小依次为处理电压>处理频率>处理时间>氧气比例。

2.2.3 处理频率和处理电压的交互作用 由图 5 可知,处理频率和处理电压的曲面倾斜程度较大,等高线呈椭圆形,表明处理频率和处理电压对杀菌率影响显著,且两因素间交互作用显著($P < 0.05$),同时,处理电压比处理频率的曲面斜率更大,说明处理电压对杀菌率的影响更显著。

由表 4 可知,一定电压强度下,处理频率越偏离临界值,杀菌率越低。将处理频率临界值对电压进行线性回归分析可知,处理频率对低温等离子体杀菌率影响的临界值随处理电压的升高呈线性上升趋势($y = 0.434x + 76.445$, $R^2 = 1$),且变化显著。当电压从 49.5 kV 上升至

表 3 方差分析结果[†]
Table 3 Analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	3 273.78	14	233.84	35.15	<0.000 1	* *
A	586.60	1	586.60	88.18	<0.000 1	* *
B	1 230.19	1	1 230.19	184.93	<0.000 1	* *
C	45.63	1	45.63	6.86	0.020 2	*
D	439.23	1	439.23	66.03	<0.000 1	* *
AB	105.06	1	105.06	15.79	0.001 4	*
AC	7.29	1	7.29	1.10	0.312 9	
AD	62.41	1	62.41	9.38	0.008 4	*
BC	1.69	1	1.69	0.25	0.622 1	
BD	2.56	1	2.52	0.38	0.545 0	
CD	4.84	1	4.84	0.73	0.408 0	
A ²	461.69	1	461.69	69.41	<0.000 1	* *
B ²	461.69	1	461.69	69.41	<0.000 1	* *
C ²	61.30	1	61.30	9.22	0.008 9	*
D ²	102.45	1	102.45	15.40	0.001 5	*
残差	93.13	14	6.65			
失拟项	81.90	10	8.19	2.92	0.156 9	
纯误差	11.23	4	2.81			
总和	3 366.91	28				

[†] * 为差异显著(P<0.05); * * 为差异极显著(P<0.000 1);
 $R^2=0.972\ 3, R^2_{\text{adj}}=0.944\ 7$ 。

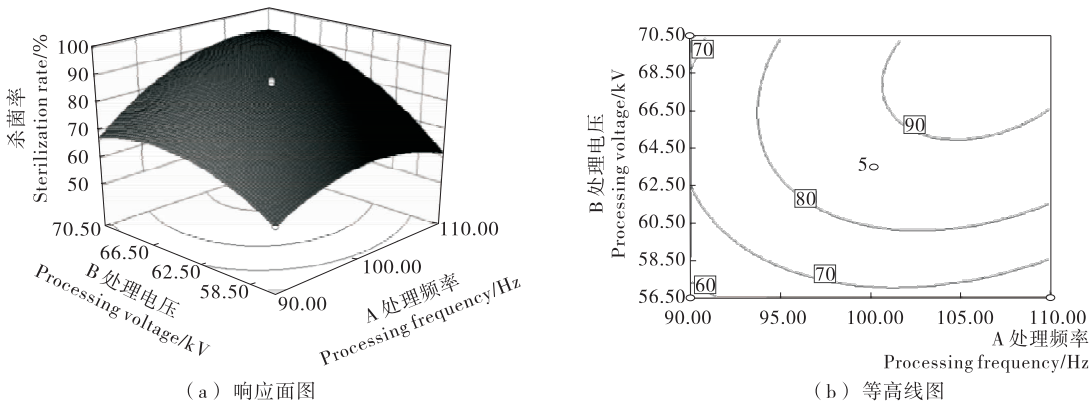


图 5 处理频率和处理电压对杀菌率的交互作用

Figure 5 Response surface of interaction between processing frequency and processing voltage on sterilization rate

表 4 不同处理电压下处理频率对杀菌率影响的临界值

Table 4 The critical value of the influence of processing frequency on the sterilization rate under different processing voltage

处理电压/kV	回归方程	处理频率临界值/Hz	杀菌率/%
0.0	$Y=-0.084\ 3A^2+12.89A-1\ 148.373$	76.45	—
49.5	$Y=-0.084\ 3A^2+16.51A-778.588$	97.92	30.06
56.5	$Y=-0.084\ 3A^2+17.02A-794.321$	100.94	64.75
63.5	$Y=-0.084\ 3A^2+17.53A-826.910$	104.02	85.25
70.5	$Y=-0.084\ 3A^2+18.05A-870.280$	107.05	95.91

70.5 kV 时,杀菌率从 30%迅速上升至 95%附近,表明杀菌率随处理电压的升高呈明显的上升趋势,当处理电压为 70.5 kV 时,杀菌率达最高值,与单因素试验结果基本一致。

由表 5 可知,处理电压对等离子体杀菌率影响的临界值随处理频率的升高呈线性增大趋势($y=0.212\ 8x+46.459, R^2=1$),杀菌率随处理频率的升高先上升后降低,当处理频率继续上升至 120 Hz 时,杀菌率略有降低。低温等离子体产生于密闭包装空间内,所产生的活性氧等自由基的含量在高能粒子间的复杂反应条件下,成分发生转变,因此在较高的处理频率下杀菌率反而降低,表明在实际杀菌过程中,处理频率不宜过高。

2.2.4 处理频率和处理时间的交互作用 由图 6 可知,处理频率和处理时间的曲面倾斜程度较大,等高线呈椭圆形,表明处理频率和处理电压对杀菌率影响显著,且交互作用明显($P<0.05$)。处理频率比处理时间的响应曲面斜率更大,说明处理频率对杀菌率的影响更显著。

由表 6 可知,处理频率对杀菌率影响的临界值随处理时间的延长呈线性上升趋势($y=0.077\ 5x+95.466, R^2=1$)。当处理时间为 150 s 时,杀菌率上升趋于平缓,

表 5 不同处理频率下处理电压对杀菌率影响的临界值

Table 5 The critical value of the influence of processing voltage on the sterilization rate under different processing frequency

处理频率/Hz	回归方程	处理电压临界值/kV	杀菌率/%
0	$Y=-0.172B^2+15.984B-1\ 148.373$	46.46	—
90	$Y=-0.172B^2+22.572B-671.103$	65.61	69.44
100	$Y=-0.172B^2+23.304B-702.373$	67.74	86.98
110	$Y=-0.172B^2+24.036B-749.462$	69.87	90.26
120	$Y=-0.172B^2+24.768B-804.371$	72.00	87.27

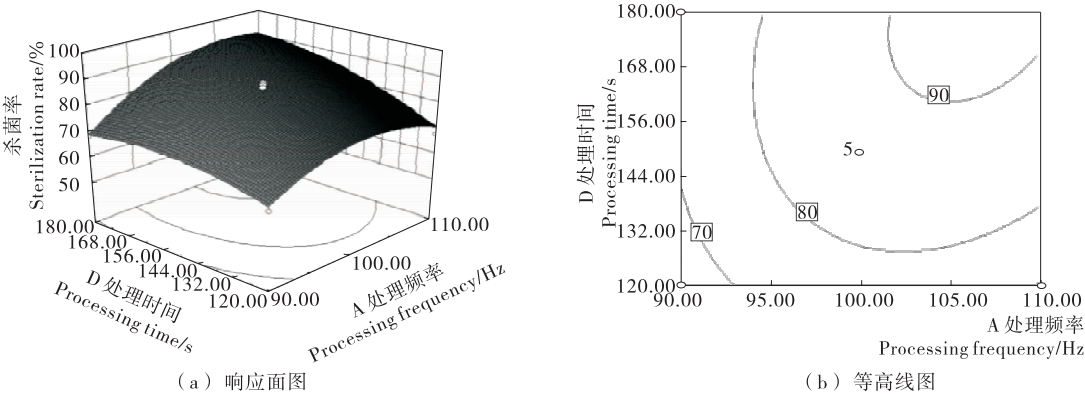


图 6 处理频率和处理时间对杀菌率的交互作用
Figure 6 Response surface of interaction between processing frequency and processing time on sterilization rate

表 6 不同处理时间下处理频率对杀菌率影响的临界值

Table 6 The critical value of the influence of processing frequency on the sterilization rate under different processing time

处理时间/s	回归方程	处理频率临界值/Hz	杀菌率/%
0	$Y=-0.084\ 3A^2+16.10A-804.625$	95.49	—
120	$Y=-0.084\ 3A^2+17.66A-842.245$	104.74	79.94
150	$Y=-0.084\ 3A^2+18.05A-870.280$	107.05	95.91
180	$Y=-0.084\ 3A^2+18.44A-910.672$	109.37	97.73
210	$Y=-0.084\ 3A^2+18.85A-955.484$	111.80	98.26

与单因素试验结果基本保持一致。

由表 7 可知,处理时间对低温等离子体杀菌率影响的临界值随处理频率的上升呈线性升高趋势($y=1.473\ 9x+20.742,R^2=1$)。当处理频率为 0~110 Hz 时,杀菌率显著上升;当处理频率为 110 Hz 时,杀菌率有

所降低。因此,实际杀菌应用过程中,为达到杀菌快速高效的目的,尽量选择处理时间短且处理频率不宜过高的条件。综上,当处理频率为 107.05~110.00 Hz,处理时间为 150.00~182.87 s 时,槟榔杀菌率达最高值。

2.2.5 CPCS 工艺优化 经 Design-Expert 软件分析可

表 7 不同处理频率下处理时间对杀菌率影响的临界值

Table 7 The critical value of the influence of treatment time on the sterilization rate under different frequency

处理频率/Hz	回归方程	处理时间临界值/s	杀菌率/%
0	$Y=-4.41\times10^{-3}D^2+0.183D-804.625$	20.74	—
90	$Y=-4.41\times10^{-3}D^2+1.353D-38.401$	153.40	65.37
100	$Y=-4.41\times10^{-3}D^2+1.483D-37.565$	168.14	87.11
110	$Y=-4.41\times10^{-3}D^2+1.613D-55.140$	182.87	92.35
120	$Y=-4.41\times10^{-3}D^2+11.743D-86.126$	197.61	87.09

知,最佳工艺条件为处理频率 108.78 Hz、处理电压 69.17 kV、氧气比例 44.37%、处理时间 180 s,此条件下杀菌率达 97.32%。考虑到实际设备操作的方便性,调整为处理频率 110 Hz、处理电压 70.5 kV、氧气比例 40%、处理时间 180 s,修正后的杀菌率为 97.20% ($n=3$),相对误差为 0.12%,表明该模型的预测值与实际试验值吻合度高,响应面法优化结果可靠。

2.3 CPCS 对槟榔品质指标的影响

由表 8 可知,CPCS 处理后对槟榔的水分含量、粗纤维、槟榔碱无显著影响 ($P>0.05$),表明高压电场低温等离子体杀菌处理后,对槟榔的主要品质指标无明显影响 ($P>0.05$)。

表 8 低温等离子体对槟榔品质指标的影响

Table 8 Effects of cold plasma on the quality index of Areca catechu %

组别	水分含量	粗纤维	槟榔碱
对照组	28.19 ± 0.95	10.85 ± 0.60	0.44 ± 0.02
处理组	28.58 ± 0.88	11.05 ± 0.48	0.41 ± 0.07

3 结论

高压电场低温等离子体的处理电压、处理频率、处理时间和氧气比例对槟榔杀菌影响显著 ($P<0.05$)。处理频率的升高与处理电压、处理时间临界值的变化呈正相关 ($R^2=1$),处理频率与处理电压、处理频率与处理时间的交互作用对槟榔杀菌率的影响显著 ($P<0.05$);高压电场低温等离子体处理槟榔的最佳条件为处理频率 110 Hz、处理电压 70.5 kV、氧气比例 40%、处理时间 180 s,该条件下的杀菌率为 97.20%,经杀菌后槟榔碱等主要品质指标含量无明显变化。低温等离子体的杀菌效果还受空气湿度、气体流速、包装材料等因素的影响,且对不同品种的槟榔杀菌效果也不尽相同。不同空气湿度及包装材料对槟榔杀菌效果和品质的影响还有待探索。

参考文献

[1] 邓建阳,李浩,蒋雪薇,等.食用槟榔加工工艺及其化学与微生物污染研究进展[J].食品与机械,2018,34(1):173-176.

[2] 邓峥华,邓春明,李帮锐.市售食用槟榔微生物污染状况调查分析[J].海峡预防医学杂志,2015,21(3):66-67.

[3] 姚小玲.槟榔采后贮藏与包装保鲜工艺研究[D].无锡:江南大学,2018:6-9.

[4] 李智,徐欢欢,邓建阳,等.高温干蒸工艺软化槟榔及其灭菌效果研究[J].食品与机械,2015,31(4):194-197.

[5] 徐远芳,邓钢桥,彭玲,等.辐照对食用槟榔的杀菌效果研究及品质的影响[J].核农学报,2014,28(2):240-244.

[6] 杜道林,甘炳春,王有生,等.食用槟榔的微波灭菌研究[J].

食品科技,2005(7):86-88.

[7] 李智.一种槟榔的脉冲强光灭菌方法:中国,CN104188047 A[P].2014-12-10.

[8] FRIDMAN A, CHIROKOV A, GUTSOL A. Non-thermal atmospheric pressure discharges[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2005, 38(2): R1-R24.

[9] GADRI R B, ROTH J R, MONTIE T C, et al. Sterilization and plasma processing of room temperature surfaces with a one atmosphere uniform glow discharge plasma (OAUGDP) [J]. Surface & Coatings Technology, 2000, 131(1/2/3): 528-541.

[10] PERNI S, SHAMA G, HOBMAN J L, et al. Probing bactericidal mechanisms induced by cold atmospheric plasmas with *Escherichia coli* Mutants[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(7): 902-903.

[11] 耿玉秋,农绍庄,伊霞,等.臭氧对脱水蔬菜杀菌效果的影响[J].保鲜与加工,2006,6(5):40-42.

[12] IMLAY J A, CHIN S M, LINN S. Toxic DNA damage by hydrogen peroxide through the Fenton reaction in vivo and in vitro[J]. Science, 1988, 240(4 852): 640-642.

[13] HIRAKAWA T, NOSAKA Y. Properties of O_2^- and $OH \cdot$ formed in TiO_2 aqueous suspensions by photocatalytic reaction and the influence of H_2O_2 and some ions [J]. Langmuir, 2002, 18(8): 3 247-3 254.

[14] JENSEN J, DONNER A, KEENER K M. Use of a novel in-package ozonation process for reducing *salmonella enteritidis* on chicken meat[C]//17th World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR). Québec: The Canadian Society for Bioengineering (CSBE/SCGAB), 2010: 13-17.

[15] 魏高峰,高万玉,秦英杰,等.低温等离子体灭菌机理的研究现状与进展[J].医疗卫生装备,2005,26(9):27-29,31.

[16] 王佳媚,黄明明,乔维维,等.冷源等离子体冷杀菌技术及其在食品中的应用研究[J].中国农业科技导报,2015,17(5):55-62.

[17] MISRA N, MOISEEV T, PATIL S, et al. Cold plasma in modified atmospheres for post-harvest treatment of strawberries[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(10): 3 045-3 054.

[18] 乔维维,黄明明,王佳媚,等.低温等离子体对生鲜牛肉杀菌效果及色泽的影响[J].食品科学,2017,38(23):237-242.

[19] 何际婵,董志超,王建荣.反相高效液相色谱法测定槟榔中槟榔碱的含量[J].中华中医药学刊,2011,29(9):1 969-1 971.

[20] TAKAKI K, JANI M A, FUJIWARA T. Removal of nitric oxide influe gases by multipoint to plane dielectric barrier discharge[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1999, 27(4): 1 137-1 145.

[21] LUND M N, LAMETSCH R, HVIID M S, et al. High-

(下转第 193 页)

- 分含量变化[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(23): 13-17, 87.
- [15] 王乐, 黄峻榕, 张宁, 等. 马铃薯面条制作工艺及品质研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(1): 78-82.
- [16] 孙于庆, 李建新, 闵玉涛, 等. 模糊数学在荞麦方便面配方设计中的应用[J]. 食品科技, 2011, 36(10): 136-138.
- [17] 郑佳欣, 李怡婧, 汪晨阳, 等. 板栗壳鞣质提取及其对 DPPH 自由基清除活性的研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(3): 211-215.
- [18] 李云龙, 李红梅, 胡俊君, 等. 抗氧化苦荞酒加工工艺的研究[J]. 酿酒科技, 2014(12): 5-7.
- [19] 马雨洁. 熟制荞麦面条淀粉模拟消化特性及抗氧化品质研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013: 16-21.
- [20] 彭镰心, 赵钢, 王姝, 等. 不同品种苦荞中黄酮含量的测定[J]. 成都大学学报: 自然科学版, 2010, 29(1): 20-21.
- [21] 濮生财, 鲁璐, 焦威, 等. 不同品种苦荞中的 4 种活性黄酮含量[J]. 应用于环境生物学报, 2015, 21(3): 470-476.
- [22] LUHALOO M, MARTENSSON A C, ANDERSSON R, et al. Composition analysis and viscosity measurements of commercial oat brans[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 1998, 76(1): 142-148.
- [23] 刘新红. 青稞品质特性评价及加工适宜性研究[D]. 西宁: 青海大学, 2014: 15-36.
- [24] FU Bin-xiao. Asian noodles: History, classification, raw materials, and processing[J]. Food Research International, 2008, 41(9): 888-902.
- [25] LI Man, ZHU Ke-xue, PENG Jing, et al. Delineating the protein changes in Asian noodles induced by vacuum mixing[J]. Food Chemistry, 2014, 143(15): 9-16.
- [26] 骆丽君, 李曼, 朱红卫, 等. 真空和面对生鲜面品质特性的影响研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(3): 129-131, 379.
- [27] 薛朕钰, 薛森, 王雪, 等. 添加苦荞黄酮提取物的裸燕麦挤压膨化产品抗氧化剂降血脂功效研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(12): 33-38.
- [28] PENG Lian-xin, WEI Li-juan, YI Qian, et al. In vitro potential of flavonoids from tartary buckwheat on antioxidants activity and starch digestibility[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(6): 2 209-2 218.
- [29] 何财安, 张珍, 刘航, 等. 苦荞多酚对苦荞淀粉和小麦淀粉理化性质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(9): 66-71.
-
- (上接第 186 页)
- [11] 丁莎莎, 黄立新, 张彩虹, 等. 高压均质和胶体磨改性对油橄榄果渣水不溶性膳食纤维性能的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(8): 10-13, 18.
- [12] 程明明. 西番莲果皮水不溶性膳食纤维提取、改性及功能特性研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016: 31-49.
- [13] MORALES-MEDINA R, DONG Dan, SCHALOW S, et al. Impact of microfluidization on the microstructure and functional properties of pea hull fibre[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 103: 105660.
- [14] ROUHOUC M C, ABDELMOUMEN S, THOMAS S, et al. Use of green chemistry methods in the extraction of dietary fibers from cactus rackets (*Opuntia ficus indica*): Structural and microstructural studies [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 116: 901-910.
- [15] 杨健, 王立东, 包国风. 超微粉碎对小米麸皮膳食纤维物理特性的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(13): 128-131.
- [16] 张根生, 葛英亮, 聂志强, 等. 马铃薯渣不溶性膳食纤维超微粉碎改性工艺优化[J]. 食品与机械, 2015, 31(6): 186-189.
- [17] 令博. 葡萄皮渣膳食纤维的改性及其生理功能和应用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012: 15-16.
- [18] 金文筠, HUSSAIN Shehzad, 严守雷, 等. 超微粉碎对藕节膳食纤维理化性质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(6): 2 071-2 076.
- [19] 李梁. 杏皮皮渣膳食纤维理化性质分析及应用研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2012: 19.
- [20] 李莉, 张赛, 何强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(8): 41-45.
- [21] 潘曼. 猕猴桃渣膳食纤维制备工艺及其性质的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2009: 45-47.
- [22] 杨远通. 猕猴桃渣膳食纤维改性及其应用研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2011: 13-31.
-
- (上接第 139 页)
- oxygen packaging atmosphere influences protein oxidation and tenderness of porcine longissimus dorsi during chill storage[J]. Meat Science, 2007, 77(3): 295-303.
- [22] KIM H J, YONG H I, PARK S, et al. Effects of dielectric barrier discharge plasma on pathogen inactivation and the physicochemical and sensory characteristics of pork loin[J]. Current Applied Physics, 2013, 13(7): 1 420-1 425.
- [23] 马良军, 王佳媚, 黄明明, 等. 不同处理条件对介质阻挡放电低温等离子体杀菌效果及影响机理研究[J]. 微生物学报, 2019, 59(8): 1 512-1 521.
- [24] FERNANDEZ A, NORIEGA E, THOMPSON A. Inactivation of *Salmonella enterica* serovar *Typhimurium* on fresh produce by cold atmospheric gas plasma technology[J]. Food Microbiology, 2013, 33(1): 24-29.
- [25] KIM S J, CHUNG T H, BAE S H, et al. Bacterial inactivation using atmospheric pressure single pin electrode micro-plasma jet with a ground ring[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(14): 496-502.
- [26] LAROUCSI M, LEIPOLD F. Evaluation of the roles of reactive species, heat and UV radiation in the inactivation of bacterial cells by air plasmas at atmospheric pressure[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2004, 233(1/2/3): 81-86.
- [27] NIEMIRA B A, SITES J. Cold plasma inactivates *salmonella stanley* and *escherichia coli* O157:H7 inoculated on golden delicious apples[J]. Journal of Food Protection, 2008, 71(7): 1 357.
- [28] HU Miao, GUO Yun. The effect of air plasma on sterilization of *escherichia coli* in dielectric barrier discharge[J]. Plasma Science and Technology, 2012, 14(8): 735-740.