

低温等离子体处理对鲜参切片的杀菌效果及表面色泽的影响

徐艳阳*, 鲁海玲, 陈云洁, 查宏晓

(吉林大学食品科学与工程学院, 长春 130062)

摘 要: **目的** 探讨低温等离子体处理对鲜参切片微生物的杀菌效果及色泽的影响, 获得优化杀菌工艺条件。**方法** 以杀菌率为指标, 考察放电电源功率(W)、等离子体处理时间(min)、气体流速(cm^3/min) 3 个因素的杀菌效果, 然后根据单因素实验的结果, 应用三因素三水平响应面优化实验设计, 获得最佳杀菌工艺, 并测定低温等离子体处理鲜参切片的色泽变化。**结果** 低温等离子体处理鲜参切片的最佳杀菌工艺条件为: 放电电源功率 340 W、等离子体处理时间 4.7 min、气体流速 $10 \text{ cm}^3/\text{min}$, 在此条件下的杀菌率为 99.89%; 影响因素的显著性大小顺序为: 等离子体处理时间>放电电源功率>气体流速。鲜切参片经低温等离子体处理后 L^* 、 a^* 、 b^* 变化不显著; ΔE^* 为 2.40, 总色差值较小, 说明处理后色泽无明显变化。与酸性氧化电位水杀菌相比, 低温等离子体处理的杀菌率提高了 5.3%, 杀菌时间缩短了 57%, 杀菌效果更好。**结论** 低温等离子体处理对鲜参切片微生物的杀菌效果显著, 可以作为一种更高效、更省时的非热杀菌方法。

关键词: 鲜参切片; 低温等离子体; 杀菌; 保鲜; 响应面法

Effects of low temperature plasma treatment on sterilization effects and surface color of fresh-cut ginseng slices

XU Yan-Yang*, LU Hai-Ling, CHEN Yun-Jie, ZHA Hong-Xiao

(College of Food Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130062, China)

ABSTRACT: Objective To explore the sterilization effects of low-temperature plasma treatment on microorganisms in fresh ginseng slices and its influence on the color of fresh ginseng slices, and obtain the optimized sterilization process conditions. **Methods** With the sterilization rate as the index, the sterilization effects of 3 factors of discharge power (W), plasma treatment time (min) and gas flow rate (cm^3/min) were investigated. Then, according to the results of single factor experiment, the experimental design was optimized by response surface of 3 factors and 3 levels to obtain the best sterilization process, and the color change of fresh ginseng slices treated by low temperature plasma was measured. **Results** The optimum sterilization process conditions of low-temperature plasma treatment of fresh ginseng slices were as follows: Discharge power of 340 W, plasma treatment time of 4.7 min and gas flow rate of $10 \text{ cm}^3/\text{min}$. Under these conditions, the sterilization rate was 99.89%. The order of significance of influencing factors was: Plasma treatment time>discharge power>gas flow rate. Moreover, the changes of L^* , a^* and b^* of

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20200402064NC)

Fund: Supported by the Science and Technology Development Plan of Jilin Province (20200402064NC)

*通信作者: 徐艳阳, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品营养与安全。E-mail: xuyy@jlu.edu.cn

*Corresponding author: XU Yan-Yang, Ph.D, Associate Professor, College of Food Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130062, China. E-mail: xuyy@jlu.edu.cn

fresh-cut ginseng slices after low-temperature plasma treatment were not significant. The ΔE^* was 2.40, and the total chromatic aberration value was small, indicating that the color had no obvious change after treatment. Compared with acid oxidation potential water sterilization, the sterilization rate of low-temperature plasma treatment was increased by 5.3%, the sterilization time was shortened by 57%, and the sterilization effect was better. **Conclusion** Low-temperature plasma treatment has remarkable sterilization effect on microorganisms on the surface of fresh ginseng slices, which can be used as a more efficient and time-saving non-thermal sterilization method.

KEY WORDS: fresh-cut ginseng slices; low temperature plasma; sterilization; preservation; response surface methodology

0 引言

人参(*Panax ginseng* C.A. Mey.)是五加科(Araliaceae)人参属多年生直立草本植物的根和根茎,是我国传统名贵的中药和保健食品原料^[1]。现代医学研究证明人参及其制品在促进人体的新陈代谢、调节生理功能、恢复体力、提高免疫力、抗衰老、抗辐射、抑制肿瘤方面具有明显的作用,对治疗心血管疾病、糖尿病、神经衰弱有较好的疗效。我国人参的产量占世界总产量的 80%以上,而吉林省长白山区的产量占全国总产量的 85%^[2]。随着 2012 年我国原卫生部第 17 号公告批准人参(人工种植)列为新资源食品,人们对“保鲜人参”的需求与日俱增,市场需求不断扩大,但是由于人参的收获和加工季节性很强,鲜参采收后不耐贮藏,极易出现“烧热”“跑浆”、发霉、黑腐、软化等现象。因此,亟待开展新型保鲜加工技术研究,以解决这种供需紧张、产品单一的迫切性矛盾。

果蔬经鲜切处理后,切口暴露于空气中,为微生物提供了一个利于生长的环境,促进微生物的生长繁殖,因此,需要对鲜切果蔬采取即时的杀菌处理,才能保证产品的货架期和新鲜度^[3-4]。杀菌是果蔬保鲜加工的关键技术,除了传统的热杀菌方法以外,近年来出现了超高压技术、辐照技术、超声波技术、脉冲强光技术、酸性电解水和等离子技术等冷杀菌方法^[5-7]。与热杀菌相比,冷杀菌技术避免了食品营养成分因加热流失,又有利于保持色、香、味等。等离子体(plasma)是由高能电离气体所产生含有原子、电子、离子等粒子组成的导电性流体,因其无论在性质和组成上都不同于气体、液体、固体 3 种形态,故称为物质的第四态^[8]。根据带电粒子温度的高低,等离子体分为低温等离子体和高温等离子体^[9]。当离子温度小于电子温度时为轻度电离,总体温度无明显变化,称为“低温等离子体”^[10]。由于低温等离子体中大量的正负离子、紫外光子、自由基使微生物细胞膜和核酸受到损伤、破坏,以及活性氧化物和氮化物等活性物质对蛋白质和 DNA 的氧化作用^[11],使低温等离子体具有作用时间短、杀灭微生物种类多、安全无害和应用范围广等特点,受到国内外研究者的广泛关注^[12-17]。近年来低温等离子体在杀菌方面的应用研究倍受

国内外学者关注,并在生鲜果蔬杀菌方面也有了一定的研究进展。例如王卓等^[18]研究发现介质阻挡放电低温等离子体在 45 kV 电压处理蓝莓 50 s 后,可以有效减少其表面细菌和真菌的数量,同时诱导了蓝莓的抗氧化酶活力,提高了蓝莓贮藏期间的品质。ZHANG 等^[19]应用大气压冷等离子体处理鲜切梨块,在 65 kV 电压下处理 1 min,结果表明冷等离子体对嗜温需氧菌、酵母菌和霉菌的生长均有抑制作用,过氧化物酶和果胶甲基酯酶活性降低。另外,张勇等^[20-24]应用低温等离子体处理西兰花、梨汁、牛肉干、鲜切胡萝卜、草莓等,结果均表明低温等离子体可有效杀灭食品上的微生物。

目前未见低温等离子体在人参杀菌保鲜加工方面的研究,因此本研究以长白山人参为研究对象,应用低温等离子体处理鲜参切片,探讨对其表面微生物的杀灭效果及其对色泽的影响,以期低温等离子体在人参保鲜加工中的应用提供指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

三年生长白山人参:珲春华瑞参业生物工程股份有限公司。

胰蛋白胨、酵母浸粉(生物制剂,北京奥博星生物技术有限责任公司);氯化钠、葡萄糖、磷酸二氢钾(分析纯,北京化工厂);琼脂粉(生物制剂,广州塞国生物科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

SY-DT02S 低温等离子体处理仪(苏州市奥普斯等离子体科技有限公司);ZS-AEOW-1500 酸性氧化电位水生成器(长春云卫科技有限公司);SX721pH/ORP 测量仪(上海三信仪表厂);AL104 型电子分析天平(上海梅特勒-托利多仪器有限公司);BXM-30R 立式压力蒸汽灭菌器、HPX-9272 数显电热培养箱(上海博讯实业有限公司医疗设备厂);SW-CJ-1FD 洁净工作台(苏州安泰空气技术有限公司);VOSHIN-800R 无菌均质器(无锡沃信仪器有限公司);CR-400 色差计(深圳市三恩时科技有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 液体培养基的制备

分别称取胰蛋白胨 5.0 g、酵母浸粉 2.5 g、葡萄糖 1.0 g，加入 1000 mL 蒸馏水溶解，混匀后用 1.0 mol/L 氢氧化钠溶液调节 pH 至 7.0±0.2，于 121 °C 高压灭菌 20 min，备用。

1.3.2 菌悬液的制备

称取 25.0 g 鲜人参置于盛有 225 mL 磷酸盐缓冲溶液的无菌均质袋中，均质 3 min，制成 1:10 (m:V) 样品匀液。然后吸取 25 mL 1:10 (m:V) 样品匀液于盛有 225 mL 液体培养基的锥形瓶中，在(36±1) °C、120 r/min 条件下进行摇床培养 48 h。取培养液 5 mL 于盛有一定体积磷酸盐缓冲溶液的锥形瓶中混匀，即为 8~9 lg CFU/mL 菌悬液。

1.3.3 鲜参切片的染菌

鲜参用自来水清洗、沥干，切成 1.0~1.5 cm 厚片，在 80 °C 水中漂烫 1 min，迅速冷却至室温，按鲜参切片:菌悬液=1:3 (g/mL) 浸泡 20 min 后，取出在室温[(25±3) °C]下静置 1 h。

1.3.4 低温等离子体处理的工艺流程

设定低温等离子体处理参数→样品放入处理腔内→打开真空泵→待真空度降至 100 Pa 以下→打开一路气体(空气)→开启放电电源→取出样品

1.3.5 单因素实验设计

根据预实验结果和实验设备的实际情况，选择放电电源功率、处理时间、气体流速 3 个因素进行单因素实验。

以染菌后未经任何处理的鲜参切片为对照组，检测其菌落总数，作为计算杀菌率的初始数值。

(1) 放电电源功率对低温等离子体杀菌率的影响

分别取染菌的鲜参切片 5 份，每份 10.0 g，于放电电源功率为 100、200、300、400、500 W 低温等离子体处理仪中处理，固定其他因素(时间 3 min、气体流速 40 cm³/min)，然后测定鲜参切片菌落总数并计算杀菌率。

(2) 处理时间对低温等离子体杀菌率的影响

分别取染菌的鲜参切片 5 份，每份 10.0 g，在低温等离子体处理仪中处理 1、2、3、4、5 min，固定其他因素(放电电源功率为 300 W、气体流速 40 cm³/min)，然后测定鲜参切片菌落总数并计算杀菌率。

(3) 气体流速对低温等离子体杀菌率的影响

分别取染菌的鲜参切片 5 份，每份 10.0 g，在气体流速为 0、10、20、30、40、50、60 cm³/min 的低温等离子体中处理，固定其他因素(时间 3 min、放电电源功率 300 W)，然后测定鲜参切片菌落总数并计算杀菌率。

1.3.6 响应面优化实验与对比实验设计

在单因素实验结果的基础上，应用 Design-Expert 7.0 软件，按照 Box-Behnken 设计原理，以处理时间(min)、放电电源功率(W)、气体流速(cm³/min)为自变量，杀菌率(%)为考察指标进行三因素三水平的响应面优化实验，因素及

水平设计见表 1。取染菌后未经任何处理的鲜参切片，每份 10.0 g，检测器菌落总数，作为对照组；取染菌的鲜参切片，每份 10.0 g，使用低温等离子体处理，检测其菌落总数作为实验组，计算杀菌率。

表 1 响应面设计的因素与水平
Table 1 Factors and levels of response surface design

因素	水平		
	-1	0	1
电源功率/W	200	400	600
处理时间/min	1	3	5
气体流速/(cm ³ /min)	0	10	20

酸性氧化电位水是电解氯化钠或盐酸水溶液后，生成的以次氯酸为主要成分的酸性水溶液。生产过程中无有害化学物质添加，使用后无残留。且杀菌过程中无需加热即可有效杀灭微生物，在果蔬保鲜方面应用广泛^[25-29]。

应用酸性氧化电位水生成器电解饱和氯化钠溶液 15 min，制得酸性氧化电位水，其 pH 为 2.43~2.58，氧化还原电位为 1134~1167 mV，有效氯质量浓度为 61.3~66.7 mg/L。取 10 g 染菌后的鲜参切片于酸性氧化电位水中浸泡杀菌：浸泡时间为 11 min、料液比为 1:10 (g/mL)、浸泡温度为 25 °C。重复 3 次实验，取平均值。

1.3.7 菌落总数的测定和杀菌率的计算

按照 GB 4789.2—2016《食品微生物学检验：菌落总数测定》的方法测定鲜参切片的菌落总数，经过低温等离子体杀菌处理后，按公式(1)计算其杀菌率：

$$Y/\% = \frac{N_0 - N_1}{N_0} \times 100\% \tag{1}$$

式(1)中：Y 为杀菌率，%；N₀ 为未处理的鲜参切片残留菌落总数，CFU/g；N₁ 为低温等离子体处理的鲜参切片残留菌落总数，CFU/g。

1.3.8 色差的测定

鲜人参刷洗干净后，横切成 1.0~1.5 cm 厚片，于无菌环境中立即用色差计测定鲜参切片横截面的颜色，测定参数包括亮度值(L*)、红度值(a*)和黄度值(b*)。总色差ΔE*按公式(2)计算：

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \tag{2}$$

式(2)中：L*表示亮度，L*=0 表示黑色，L*=100 表示白色；a*>0 表示红度，相反则为绿度；b*>0 表示黄度，相反则为蓝度。

1.3.9 数据处理与分析

每组实验重复 3 次，结果以平均值±标准偏差表示，应用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析及 Duncan 多重比较分析，Design-Exper 7.0 软件进行响应面优化实验，Origin

2020 软件作图, 并进行数据分析, 图中不同小写字母代表差异显著($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果与分析

2.1.1 放电电源功率对鲜参切片微生物杀菌效果的影响

由图 1 可知, 放电功率在 100~500 W 内, 低温等离子体的杀菌率随着功率的增大而增大, 初始菌落总数为 6.85 lg CFU/g, 经过不同功率的低温等离子体处理后, 菌落总数有不同程度的降低。电源功率在 100~400 W 时, 杀菌率显著增大($P<0.05$), 由 69.8% 增加至 96.4%, 菌落总数从 6.33 减小到 5.39 lg CFU/g; 电源功率在 400 W 以上时, 曲线趋于平缓, 此时功率的增大对鲜参切片中菌落总数无显著性影响($P>0.05$), 这是因为随电源功率的升高, 激发产生的等离子体浓度越高, 产生的活性成分更多, 杀菌效果越明显, 但当等温等离子体处理腔内活性成分达到饱和状态, 进一步增大电源功率也不能继续提高杀菌率, 因此确定 400 W 为进一步响应面优化实验的零水平。魏巧云等^[30]处理红枣果干、曹丽娜等^[31]处理槟榔, 发现随着功率升高, 杀菌率先增大后趋于平缓, 与本研究结果一致。

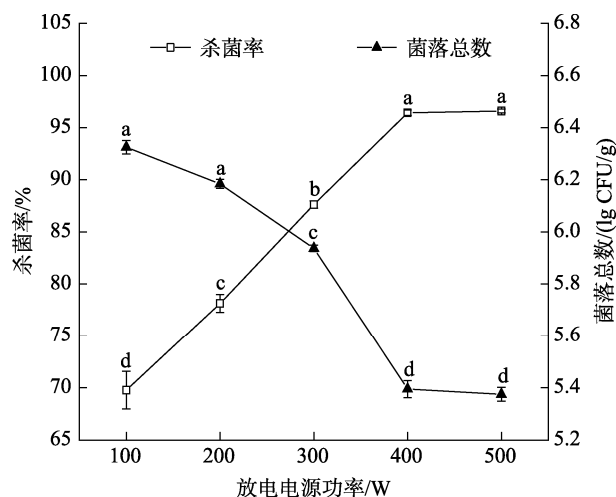


图 1 放电电源功率对鲜参切片微生物杀菌效果的影响($n=3$)

Fig.1 Effects of discharge powers on microbial germicidal efficacies of fresh-cut ginseng slices ($n=3$)

2.1.2 处理时间对鲜参切片微生物杀菌效果的影响

由图 2 可知, 随着时间从 1 增加到 5 min 时, 鲜参切片上的菌落总数逐渐减小, 从 6.22 降至 5.52 lg CFU/g, 杀菌率达 97.9%。当时间增至 3 min 时, 杀菌率显著提高($P<0.05$), 但时间在 3 min 以上, 曲线趋于平缓, 此时时间的增加对鲜参切片中菌落总数无显著影响($P>0.05$), 因此确定 3 min 为进一步响应面优化实验的零水平。孙艳等^[32]处理黄瓜与 MISRA 等^[33]处理草莓的研究表明杀菌率随时间延长先上升后平缓, 与本研究结果一致。

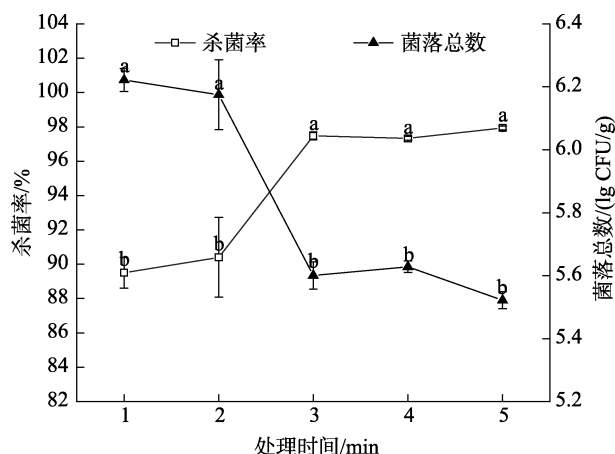


图 2 处理时间对鲜切参片微生物杀菌效果的影响($n=3$)

Fig.2 Effects of treatment times on microbial germicidal efficacies of fresh-cut ginseng slices ($n=3$)

2.1.3 气体流速对鲜参切片微生物杀菌效果的影响

由图 3 可知, 气体流速在 0~60 cm³/min 间的杀菌率先增加后降低。气体流速从 0 增大到 10 cm³/min 时, 杀菌率由 91.4% 提高到 99.3%, 显著提高($P<0.05$); 气体流速在 10~30 cm³/min 间的杀菌率变化不显著($P>0.05$); 气体流速由 30 增大到 60 cm³/min 时, 杀菌率显著下降($P<0.05$)。气体流速为 0 cm³/min 时, 真空度过高, 处理腔内气体少于产生足够等离子体所需含量, 杀菌效果较弱。气体流速在 10~30 cm³/min 时, 既保证处理腔内真空度, 也满足产生等离子体所需。气体流速越大真空度越低, 从而导致杀菌效果减弱。因此确定 10 cm³/min 为进一步响应面优化实验的零水平。

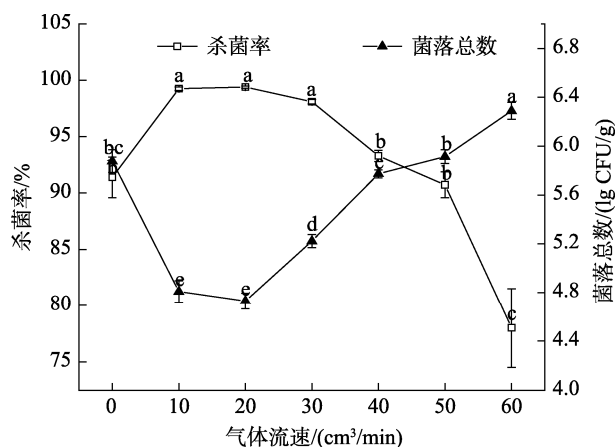


图 3 气体流速对鲜切参片微生物杀菌效果的影响($n=3$)

Fig.3 Effects of gas flow rates on microbial germicidal efficacies of fresh-cut ginseng slices ($n=3$)

2.2 响应面优化实验结果与分析

2.2.1 回归模型的建立及显著性分析

在单因素实验结果的基础上, 以放电电源功率(X_1)、

处理时间(X_2)、气体流速(X_3) 3 个因素为 Box-Behnken 实验的自变量, 鲜切参片微生物的杀菌率(Y)为响应值, 进行三因素三水平响应面优化实验, 设计方案及结果见表 2。

表 2 响应面实验设计及结果
Table 2 Experimental design and results for response surface design

实验 编号	编码值			Y/%
	X_1/W	X_2/min	$X_3/(cm^3/min)$	
1	0	0	0	99.50
2	-1	0	-1	70.50
3	0	0	0	99.70
4	0	-1	-1	67.89
5	0	1	1	99.70
6	0	1	-1	91.10
7	0	-1	1	70.70
8	1	0	1	98.00
9	-1	-1	0	61.40
10	1	-1	0	84.90
11	1	1	0	99.20
12	0	0	0	96.40
13	0	0	0	99.40
14	0	0	0	99.60
15	-1	1	0	89.90
16	-1	0	1	88.50
17	1	0	-1	92.10

表 3 回归模型方差分析
Table 3 Analysis of variance for regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	2696.68	9	299.63	49.43	<0.0001**
X_1	511.20	1	511.20	84.33	<0.0001**
X_2	1144.33	1	1144.33	188.78	<0.0001**
X_3	151.47	1	151.47	24.99	0.0016**
X_1X_2	50.62	1	50.62	8.35	0.0233*
X_1X_3	36.97	1	36.97	6.10	0.0429*
X_2X_3	10.34	1	10.34	1.71	0.2329
X_1^2	104.95	1	104.95	17.31	0.0042**
X_2^2	426.12	1	426.12	70.30	<0.0001**
X_3^2	185.78	1	185.78	30.65	0.0009**
残差	42.43	7	6.06		
失拟项	34.43	3	11.48	5.74	0.0623
纯误差	8.00	4	2.00		
总和	2739.11	16			

注: *差异显著, $P<0.05$; **差异极显著, $P<0.01$ 。

应用 Design-Expert 7.0 软件对实验数据进行分析, 结果见表 3。方差分析结果表明: 因素 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 极显著($P<0.01$); 因素 X_1X_2 、 X_1X_3 显著($P<0.05$); 因素 X_2X_3 不显著, 因此得到杀菌率对放电电源功率、处理时间、气体流速的二次多项回归模型, 见公式(3):

$$Y=98.90+7.99X_1+11.96X_2+4.35X_3-3.56X_1X_2-3.04X_1X_3-4.99X_1^2-10.06X_2^2-6.64X_3^2 \quad (3)$$

F 可以反映出各因素对实验指标的重要性, F 越大, 表明对实验指标的影响越大, 即重要性越大。因此, 各因素的影响程度大小顺序为: 处理时间>放电电源功率>气体流速。

该模型 $P<0.0001$, 表明差异极显著; 失拟项 $P=0.0623>0.05$, 差异不显著; 相关系数 R^2 为 0.9845, 校正系数 $R_{Adj}^2=0.9646$, 说明该模型与实际拟合良好, 可用于低温等离子体对鲜切参片微生物杀菌效果的预测。

2.2.2 响应面实验结果与分析

利用 Design-Expert 7.0 软件对回归模型构建响应面和等高线图, 分析各因素对杀菌率的影响, 结果见图 4。根据等高线图分析自变量之间交互作用的显著程度, 其中圆形表示两个自变量之间交互作用不明显, 椭圆形表示交互作用显著。由图 4 可知, 放电电源功率和处理时间、放电电源功率和气体流速之间的等高线图均为椭圆形, 表明每两个自变量之间均有交互作用; 且放电电源功率与处理时间的交互作用最显著, 放电电源功率和气体流速次之。

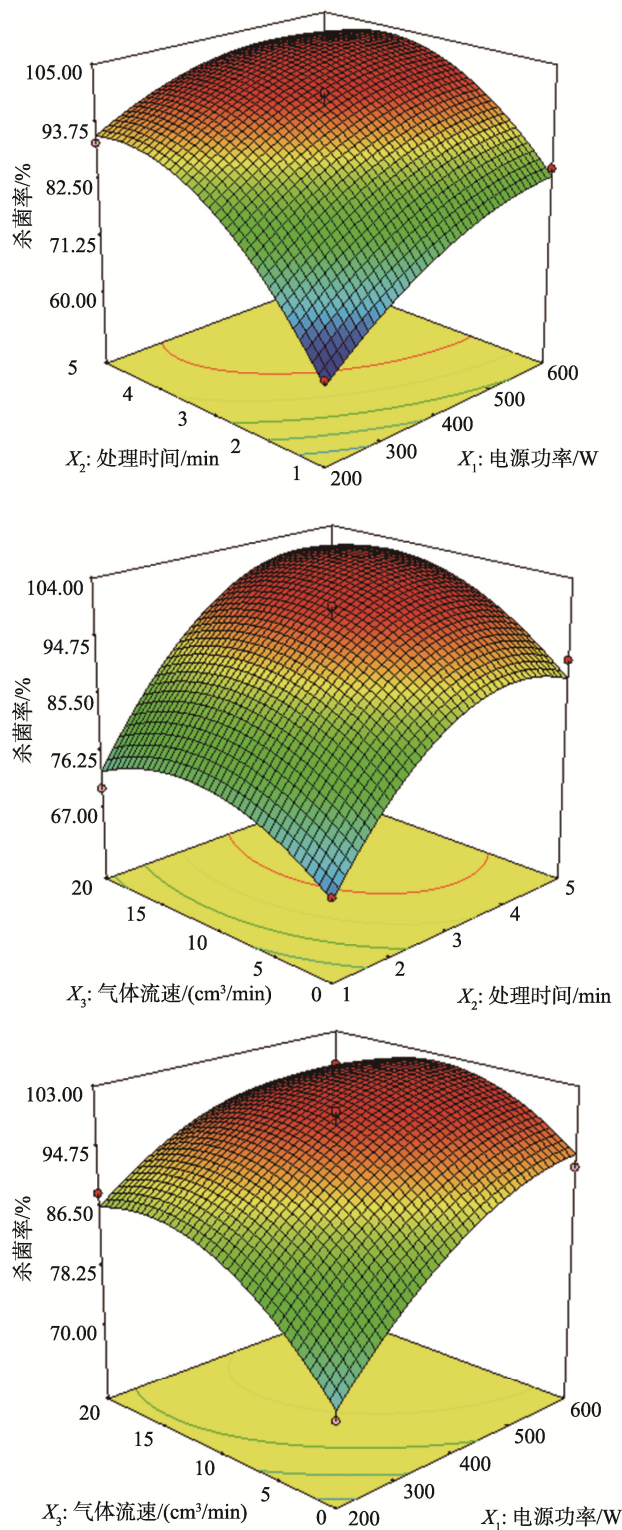


图 4 各因素间交互作用对低温等离子体杀菌率影响的响应面图
Fig.4 Response surface diagrams of the interaction of various factors on sterilization rates of low temperature plasma

2.2.3 验证实验与对比实验结果

由回归模型(3)得到低温等离子体理论上的最佳杀菌条件为: 放电电源功率为 341.08 W、处理时间为 4.69 min、

气体流速为 10.12 cm³/min, 在此条件下的杀菌率为 99.99%; 综合考虑到实际操作条件, 将最佳杀菌条件调整为放电电源功率为 340 W、处理时间为 4.7 min、气体流速为 10 cm³/min, 在此条件下进行 3 次验证实验, 杀菌率为 99.89%±0.097%, 实际测定值与理论预测值的相对误差为 0.10%, 说明实验结果与模型拟合良好, 该响应面法得到的低温等离子体最佳杀菌工艺条件可靠, 可用于鲜参切片的低温等离子体杀菌工艺。

应用酸性氧化电位水对染菌鲜切参片杀菌后, 计算出其平均杀菌率为 94.6%±1.31%。低温等离子体的杀菌率为 99.89%, 与酸性氧化电位水相比, 低温等离子体处理时间缩短了 57%, 杀菌率提高了 5.3%, 且对环境无污染。说明低温等离子体技术是一种更高效、更省时的杀菌方式。

2.3 低温等离子体处理对鲜参切片色泽的影响

鲜参切片经低温等离子体处理前后颜色的 L^* 、 a^* 、 b^* 如表 4 所示, 无显著差异($P>0.05$); ΔE^* 为 2.40, 总色差值较小, 说明处理后色泽无明显变化。综合说明低温等离子体处理后的鲜参切片色泽无显著变化。

表 4 鲜参切片在低温等离子体处理前后的色差(n=3)
Table 4 Color difference of fresh-cut ginseng slices before and after low temperature plasma treatment (n=3)

鲜参切片的颜色	L^*	a^*	b^*
处理前	83.26±0.77 ^A	-1.21±0.12 ^A	14.25±0.89 ^A
处理后	82.48±0.14 ^A	0.74±0.14 ^A	13.09±0.91 ^A

注: 同列相同大写字母表示无显著差异($P>0.05$)。

经低温等离子体处理后, 鲜参切片的表面色泽如图 5 所示, 可以看出无明显差别。

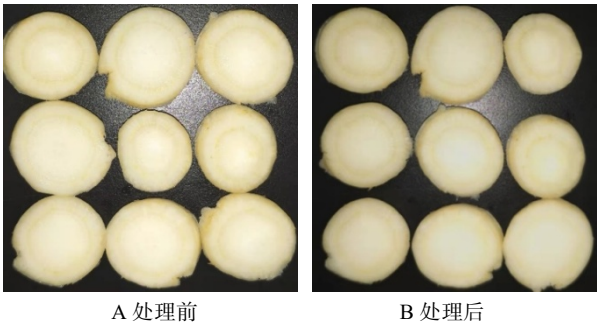


图 5 低温等离子体处理前后鲜参切片的色泽
Fig.5 Color of fresh-cut ginseng slices before and after low temperature plasma treatment

3 结 论

本研究应用低温等离子体对鲜切参片进行了杀菌实验研究, 以放电电源功率、低温等离子体处理时间、气体

流速为影响因素, 杀菌率为评价指标, 进行三因素三水平的响应面优化实验, 得到低温等离子体处理的最佳条件, 并建立了鲜切参片微生物杀菌的二次多项式数学模型。低温等离子体处理的最佳条件为: 放电电源功率 340 W、处理时间 4.7 min、气体流速 10 cm³/min, 在此优化条件下杀菌率为 99.89%, 且处理后鲜参切片的色泽无显著变化。同时, 与酸性氧化电位水杀菌相比, 低温等离子体处理的杀菌率提高了 5.3%, 杀菌时间缩短了 57%, 杀菌效果更好, 且对颜色无显著影响。因此, 低温等离子体处理是一种有效的杀菌方式, 能够为人参和果蔬类农产品的深加工和保鲜贮藏提供一种非热加工方式。

参考文献

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 2020 年版一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
Chinese Pharmacopoeia Commission. Chinese Pharmacopoeia: 2020, I [M]. Beijing: China Medical Science Press, 2020.
- [2] 徐艳阳, 赵玉娟, 高峰, 等. 高效液相色谱法分析中国人参不同部位中多酚类化合物[J]. 食品科学, 2021, 42(4): 240–246.
XUE YY, ZHAO YJ, GAO F, *et al.* Analysis of polyphenol compounds in different parts of ginseng (*Panax ginseng* C.A. Meyer) produced in China by HPLC [J]. Food Sci, 2021, 42(4): 240–246.
- [3] BERTHOLD PA, GARBOWSKA M, STEFANSKA, *et al.* Microbiological quality of selected ready-to-eat leaf vegetables, sprouts and non-pasteurized fresh fruit-vegetable juices including the presence of *Cronobacter* spp. [J]. Food Microbiol, 2017, 65: 221–230.
- [4] 张婷婷, 时月, 和朝军, 等. 货架陈列期间光照处理对鲜切青椒品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(21): 216–221.
ZHANG TT, SHI Y, HE ZJ, *et al.* Effect of light exposure treatment on the quality of fresh-cut green bell pepper (*Capsicum annuum* L.) during shelf display [J]. Food Sci, 2019, 40(21): 216–221.
- [5] 刘育颖. 非热杀菌技术在鲜榨果汁加工中的应用研究[J]. 食品科技, 2019, 44(8): 87–90.
LIU YY. Application of non-thermal sterilization technology in fresh juice processing [J]. Food Sci Technol, 2019, 44(8): 87–90.
- [6] 胡叶, 李保国, 石茂, 等. 鲜切即食果蔬冷杀菌技术研究进展[J]. 包装工程, 2020, 41(7): 43–49.
HU Y, LI BG, SHI M, *et al.* Research progress of cold sterilization technology of fresh-cut ready-to-eat fruits and vegetables [J]. Pack Eng, 2020, 41(7): 43–49.
- [7] GAO K, CHEN JB, WANG YH, *et al.* Effects of Co-60-gamma and electron beam irradiation on storage quality of *Panax ginseng* [J]. Food Bioproc Technol, 2018, 11(9): 1627–1638.
- [8] HERTWIG C, MENESES N, MATHYS A. Cold atmospheric pressure plasma and low energy electron beam as alternative nonthermal decontamination technologies for dry food surfaces: A review [J]. Trends Food Sci Technol, 2018, 77: 131–142.
- [9] 张晔, 刘志伟, 谭兴和, 等. 冷等离子体食品杀菌应用研究进展[J]. 中国酿造, 2019, 38(1): 20–24.
ZHANG Y, LIU ZW, TAN XH, *et al.* Research progress of cold plasma application in food sterilization [J]. China Brew, 2019, 38(1): 20–24.
- [10] 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.
WANG JM, HUANG MM, QIAO WW, *et al.* Disinfection technology of cold plasma and its application in food [J]. J Agric Sci Technol, 2015, 17(5): 55–62.
- [11] LOPEZ M, CALYO T, PREETO M, *et al.* A review on non-thermal atmospheric plasma for food preservation mode of action, determinants of effectiveness, and applications [J]. Front Microbiol, 2019, (10): 622.
- [12] 韩格, 陈倩, 孔保华. 低温等离子体技术在肉品保藏及加工中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(3): 286–292.
HAN G, CHEN Q, KONG BH. Recent advances in application of cold plasma technology in meat preservation and processing [J]. Food Sci, 2019, 40(3): 286–292.
- [13] MEDVECKA V, MOSOVAKA S, MIKULAJIVA A, *et al.* Cold atmospheric pressure plasma decontamination of allspice berries and effect on qualitative characteristics [J]. Eur Food Res Technol, 2020, 246(11): 2215–2223.
- [14] ADAM AM, YADAV B, PRASAD AJ, *et al.* *Salmonella* inactivation and rapid cooling of fresh cut apples by plasma integrated low-pressure cooling [J]. Food Res Int, 2021, 147: 110464–110472.
- [15] TARABOVA B, TAMPIERI F, MARAN E, *et al.* Chemical and antimicrobial effects of air non-thermal plasma processing of fresh apple juice with focus on safety aspects [J]. Foods, 2021, 10(9): 2055–2075.
- [16] HOSSEINI SM, HOSSEINZADEH SB, ROSTAMI S, *et al.* Design and characterisation of jet cold atmospheric pressure plasma and its effect on *Escherichia coli*, colour, pH, and bioactive compounds of sour cherry juice [J]. Int J Food Sci Technol, 2021, 56(10): 4883–4892.
- [17] 李欣欣, 李大宇, 赵子瑞, 等. 低温等离子体处理功率对酱牛肉贮藏品质的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(5): 1934–1940.
LI XX, LI DY, ZHAO ZR, *et al.* Effect of low-temperature plasma treatment power on storage quality of spiced beef [J]. J Jilin Univ (Eng Ed), 2020, 50(5): 1934–1940.
- [18] 王卓, 周丹丹, 彭菁, 等. 低温等离子体对蓝莓果实的杀菌效果及其品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(15): 101–107.
WANG Z, ZHOU DD, PENG J, *et al.* Efficacy of cold plasma on microbial decontamination and storage quality of blueberries [J]. Food Sci, 2018, 39(15): 101–107.
- [19] ZHANG YT, ZHANG JH, ZHANG YY, *et al.* Effects of in-package atmospheric cold plasma treatment on the qualitative, metabolic and microbial stability of fresh-cut pears [J]. J Sci Food Agric, 2021, 101(11): 4473–4480.
- [20] 张勇, 张志伟, 程晨霞, 等. 低温等离子体处理提高鲜切西兰花贮藏品质[J]. 现代食品科技, 2021, 37(2): 164–170.
ZHANG Y, ZHANG ZW, CHENG CX, *et al.* Storage quality improvement of fresh-cut broccoli by cold plasma treatment [J]. Mod Food Sci Technol, 2021, 37(2): 164–170.
- [21] 于弘慧, 马挺军, 孙运金, 等. 低温等离子体杀菌工艺的优化及其对梨汁品质和抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(9): 212–216.
YU HH, MA TJ, SUN YJ, *et al.* Optimization of processing parameters of low temperature plasma sterilization and its effect on quality and oxidation resistance of pear juice [J]. Sci Technol Food Ind, 2018, 39(9): 212–216.
- [22] SUNG KJ, JUNG LE, HA CE, *et al.* Inactivation of *Staphylococcus*

- aureus* on the beef jerky by radio-frequency atmospheric pressure plasma discharge treatment [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2014, 22: 124–130.
- [23] MAHBOT NK, SIYU LP, WAN Z, *et al.* In-package cold plasma decontamination of fresh-cut carrots: Microbial and quality aspects [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2020, 53(15): 154002–154011.
- [24] RANA S, MEHTA D, BANSAL V, *et al.* Atmospheric cold plasma (ACP) treatment improved in-package shelf-life of strawberry fruit [J]. *J Food Sci Technol*, 2020, 57(1): 102–112.
- [25] KEATSRIROTE S. Combined effects of acidic electrolyzed water and ultrasound treatments to decontaminate fresh tumeric [J]. *Int J Geomat*, 2020, 19(72): 211–216.
- [26] 刘瑞, 于章龙, 薛冲, 等. 市售豆芽携带细菌种属鉴定及酸性电解水的杀菌效果[J]. *食品科学*, 2017, 38(17): 168–173.
- LIU R, YU ZL, XUE C, *et al.* Identification of bacterial species and microbial inactivation by acidic electrolyzed water on commercial bean sprouts [J]. *Food Sci*, 2017, 38(17): 168–173.
- [27] 纪颖, 林河通, 刘晔, 等. 酸性电解水结合复合膜对橘柚保鲜效果的研究[J]. *热带作物学报*, 2021, 42(8): 2397–2404.
- JI Y, LIN HT, LIU Y, *et al.* Preservation effect of acidic electrolyzed water and composite coating on tangelo [J]. *Chin J Trop Crop*, 2021, 42(8): 2397–2404.
- [28] 蒋璇靓, 赵迅, 陈洪彬, 等. 酸性电解水处理对余甘子采后生理及品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(20): 168–173.
- JIANG XL, ZHAO X, CHEN HB, *et al.* The effect of acidic electrolyzed water treatment on postharvest physiology and quality of *Phyllanthus emblica* fruit [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 47(20): 168–173.
- [29] ZHAO XM, MENG XM, LI WX, *et al.* Effect of hydrogen-rich water and slightly acidic electrolyzed water treatments on storage and preservation of fresh-cut kiwifruit [J]. *J Food Measurment Charact*, 2021, 15(6): 5203–5210.
- [30] 魏巧云, 袁园, 高婷, 等. 高压电场低温等离子体对红枣干果的冷杀菌工艺优化及其对品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(16): 317–324.
- WEI QY, YUAN Y, GAO T, *et al.* Optimization of cold sterilization process and its effect on quality of dried jujube by high voltage electric field cold plasma [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(16): 317–324.
- [31] 曹丽娜, 章建浩, 王晓婷, 等. 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[J]. *食品与机械*, 2020, 36(5): 133–139.
- CAO LN, ZHANG JH, WANG XT, *et al.* Effect on the cold sterilization of areca catechu packaging products by high voltage electric field and cold plasma [J]. *Food Mach*, 2020, 36(5): 133–139.
- [32] 孙艳, 张志伟, 王世清. 常压低温等离子体对黄瓜表面大肠杆菌杀菌效果及品质的影响[J]. *粮油食品科技*, 2018, 26(1): 61–67.
- SUN Y, ZHANG ZW, WANG SQ. Effect of atmospheric pressure low temperature plasma on sterilization rate of *Escherichia coli* on sliced cucumber surface and quality attributes [J]. *Sci Technol Cere Oils Foods*, 2018, 26(1): 61–67.
- [33] MISRA NN, PATIL S, MPSISEEV T, *et al.* In-package atmospheric pressure cold plasma treatment of strawberries [J]. *J Food Eng*, 2014, 125(3): 131–138.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

作者简介



徐艳阳, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品营养与安全。
E-mail: xuyy@jlu.edu.cn