

花生表面黄曲霉高压电场低温等离子体 消杀工艺优化及对花生品质的影响

刘 欢¹ NASIRU Mustapha Muhammad² 冯 进² 宋江峰²
祝 红³ 李春阳^{1,2}

(1. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏省农业科学院, 江苏 南京 210014;
3. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:[目的]优化高压电场低温等离子体(HVCP)消杀花生表面黄曲霉处理参数,并分析杀菌对花生品质的影响。[方法]以杀菌率为指标,利用响应面试验优化消杀花生表面黄曲霉的HVCP杀菌工艺参数,观察比较HVCP处理前后的黄曲霉孢子形态,并分析HVCP处理对花生粗脂肪含量、粗脂肪酸价、粗蛋白含量、色泽的影响。[结果]优化的HVCP杀菌工艺参数为处理电压122 kV、处理时间13.5 min、处理频率56 Hz,该条件下的杀菌率达到99.56%,并且黄曲霉孢子形态比未处理组发生明显变化,同时HVCP处理后花生粗脂肪、粗蛋白含量没有显著变化,脂肪酸价显著降低,花生色泽更鲜艳。[结论]HVCP可高效消杀花生表面黄曲霉,提升色泽,降低脂肪酸价,且不影响品质安全。

关键词:高压电场低温等离子体;花生;黄曲霉;杀菌;品质

Optimization of elimination process of *Aspergillus flavus* on peanut surface through high voltage electric field cold plasma and its effect on peanut quality

LIU Huan¹ NASIRU Mustapha Muhammad² FENG Jin² SONG Jiangfeng²
ZHU Hong³ LI Chunyang^{1,2}

(1. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;
2. Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing, Jiangsu 210014, China; 3. School of Food Science
and Bioengineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: [Objective] To optimize the treatment parameters for eliminating *Aspergillus flavus* on peanut surface through high voltage electric field cold plasma (HVCP) and analyze the effects on peanut quality. [Methods] With sterilization rate as the indicator, the HVCP sterilization process parameters for eliminating *Aspergillus flavus* on peanut surface are optimized through a response surface test. The morphological changes of *Aspergillus flavus* spores before and after HVCP treatment are observed and compared, and the effects of HVCP treatment on the crude fat content, crude fatty acid value, crude protein content, and color of peanuts are analyzed. [Results] The optimized HVCP sterilization process parameters are as follows: treatment voltage of 122 kV, treatment time of 13.5 min, and treatment frequency of 56 Hz. Under these conditions, the sterilization rate reaches 99.56%. The morphology of *Aspergillus flavus* spores change significantly compared with the untreated group. Furthermore, the treatment method does not significantly change the crude fat and crude protein content

基金项目:国家农业农村部、财政部产业融合发展项目(编号:农办计财[2023]10号)

通信作者:李春阳(1966—),男,江苏省农业科学院研究员,博士生导师,博士。E-mail:lichunyang968@126.com

收稿日期:2024-11-06 改回日期:2025-02-27

引用格式:刘欢, NASIRU Mustapha Muhammad, 冯进, 等. 花生表面黄曲霉高压电场低温等离子体消杀工艺优化及对花生品质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(3): 108-115.

Citation: LIU Huan, NASIRU Mustapha Muhammad, FENG Jin, et al. Optimization of elimination process of *Aspergillus flavus* on peanut surface through high voltage electric field cold plasma and its effect on peanut quality[J]. Food & Machinery, 2025, 41(3): 108-115.

of peanuts, but it significantly reduces the fatty acid value and improves the color brightness of the peanuts. [Conclusion] HVCP can effectively eliminate *Aspergillus flavus* on the surface of peanuts, and it can also improve the color brightness and reduce the fatty acid value of peanuts, without any influence on the quality and safety.

Keywords: high voltage electric field cold plasma; peanut; *Aspergillus flavus*; sterilization; quality

花生(*Arachis hypogaea* L.),属豆科落花生,在经济作物及油料作物中占有重要地位,同时也是一种高蛋白食品原料,其蛋白质含量可达16%~36%,而脂肪含量高达50%^[1-2]。然而,从种植到收获乃至运输的各个阶段,花生均可能遭受不利环境因素的影响,如高温、高湿度条件以及微生物污染水平的升高,这些是引发花生在贮藏期间出现发热与霉变现象的关键因素,最终导致花生感染上黄曲霉^[3]。黄曲霉不仅能产生高致癌性和致畸性的黄曲霉毒素,还会破坏食品品质,造成严重的食品安全和资源浪费问题^[4]。目前,控制食品真菌感染的策略主要有化学药剂、微生物、辐照和低温贮藏^[5]。然而,这些方法存在各种缺点,包括化学残留,抗性菌株,成本高,效率低等^[6-7]。

低温等离子体作为一种新型的非热杀菌技术,在食品安全领域具有广阔的应用前景^[5-8],目前已被证明可以有效地灭活多种真菌,如黄曲霉、黑曲霉等^[9-10]。常见的产生低温等离子体的放电装置主要有介质阻挡放电(DBD)、电晕放电和等离子体射流^[11]。其中,DBD因其面积大,放电均匀,最适合食品工业应用。DBD是由绝缘介质材料隔开的两个电极之间的高压供电产生的。高压电场低温等离子体(HVCP)是DBD的一种,在两个电极之间产生高能物质^[10],样品可直接在两个电极之间进行处理,达到高效杀菌的目的。在等量处理条件下,等离子体对微生物的灭活效果呈现出一定的规律性,具体表现为:革兰氏阴性菌的灭活效果最为显著,紧随其后的是革兰氏阳性菌,霉菌的灭活效果次之^[12],真菌通常被认为比细菌更能抵抗低温等离子体的处理,因为它们具有复杂的细胞壁结构和细胞器^[13]。因此,很难在短时间内有效灭活食品表面的真菌。

截至目前,优化低温等离子体消杀花生表面黄曲霉处理参数,并分析杀菌后对花生品质影响的研究鲜有报道。研究拟利用高压电场低温等离子体(HVCP)对花生表面黄曲霉进行消杀,并分析该杀菌方法对花生品质的影响,以期为消杀花生表面黄曲霉方法开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

试验花生:品种为小白沙,南京玄武区某农贸市场;

黄曲霉冻干粉:菌种编号B81721,宁波明舟生物科技有限公司;

马铃薯葡萄糖琼脂(PDA):生物试剂,青岛海博生物

技术有限公司;

无水乙醇:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

次氯酸钠:分析纯,上海凌峰化学试剂有限公司;

超纯水:易普易达超纯水机制备。

1.2 仪器与设备

高压电场低温等离子体冷杀菌实验设备:CPCS-1K型,江苏省农业科学院农产品加工研究所联合南京苏曼等离子科技有限公司研发;

超净台:BCM-1300A-II型,苏州安泰空气技术有限公司;

生化培养箱:DZF-6050型,上海航佩仪器有限公司;

高压蒸汽灭菌锅:YX280型,上海三申医疗器械有限公司;

扫描电子显微镜:EVO-LS10型,德国蔡司集团;

手持色差仪:CM-700d型,日本柯尼卡美能达集团;

均质拍打机:XO-6D型,南京先欧仪器制造有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 菌种活化及孢子悬浮液的制备 参照Zhao等^[6]的方法稍作修改。将黄曲霉菌种接种于PDA培养基中,随后放置于恒温培养箱内,在 $(28\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 培养6 d。用0.9%生理盐水挤入长满黄曲霉孢子的培养皿中,用无菌的L形涂布棒轻轻地刮取,收集孢子悬浮液。后用生理盐水洗脱,并通过8层纱布过滤菌丝得到孢子悬浮液。最后,采用血球计数板对黄曲霉孢子进行计数,并将孢子悬浮液菌数稀释至 1×10^6 CFU/mL左右备用。

1.3.2 花生样品处理 参照Sen等^[14]的方法并稍作修改。将花生仁置于体积分数为90%的乙醇溶液中浸泡3 min,用无菌水冲洗干净。将冲洗后的花生仁置于体积分数为1%的次氯酸钠溶液内,持续浸泡15 min。用无菌水冲洗花生仁2次,再在60℃环境下干燥,确保去除花生表面其余微生物。将消毒后的花生仁浸泡于预先准备好的孢子悬浮液中,静置10 min,以便孢子能有效且均匀地附着于花生仁表面。完成接种的花生仁在超净工作台上晾干,晾干后即可进行低温等离子体处理。设定好相应的处理参数,将染菌花生放入聚乙烯餐盒中(极板间距为餐盒高度55 mm),送入机器进行杀菌,杀菌完成后静置2 h,连盒一起称重后,将花生放入装有其重量数倍无菌水的均质袋中,再把均质袋放入拍打均质机中,充分拍打均质,使附着在花生表面的黄曲霉孢子进入无菌水中形成孢子悬

浮液,最后将孢子悬液梯度稀释,均匀涂抹在 PDA 培养基上,培养 2~3 d 后观察结果。

1.3.3 单因素试验设计

(1) 处理电压:固定处理时间 12 min,处理频率 70 Hz,考察处理电压(100,110,120,130,140 kV)对花生表面黄曲霉杀菌率的影响。

(2) 处理时间:固定处理电压 120 kV,处理频率 70 Hz,考察处理时间(6,8,10,12,14 min)对花生表面黄曲霉杀菌率的影响。

(3) 处理频率:固定处理电压 120 kV,处理时间 12 min,考察处理频率(50,60,70,80,90 Hz)对花生表面黄曲霉杀菌率的影响。

1.3.4 响应面试验设计 在单因素试验的基础上,优化试验中以杀菌率为响应值,以处理电压、处理时间、处理频率为影响因素进行响应面试验设计。

1.3.5 杀菌率 菌落总数按照 GB 4789.2—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》执行。参照文献[15]按式(1)计算杀菌率。

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

式中:

S ——杀菌率,%;

N_0 ——杀菌前的菌落总数,CFU/mL;

N ——杀菌后的菌落总数,CFU/mL。

1.3.6 黄曲霉孢子形态结构观察 参照郁明明等^[16]的方法,稍作修改。取未处理以及经低温等离子体处理的染菌花生拍打下来的孢子悬液在 4℃、5 000 r/min 下离心 10 min 后去上清,向所获沉淀中加入体积分数为 2.5% 的戊二醛溶液,随后将其存放于 4℃ 的冷藏环境中固定 24 h 后离心收集菌体,用 PBS 对菌体漂洗 3 次以彻底移除多余的固定液。将样品依次浸入一系列浓度梯度递增的乙醇溶液(体积分数分别为 30%,50%,70%,80%,90%,100%)中进行逐步脱水处理,每一步均需静置 15 min 以确保充分置换。完成脱水后,再用 100% 的乙醇溶液对样品进行两次额外的漂洗,同样每次静置 15 min。菌体喷于铜网上临界点干燥喷金在 20 kV 加速电压下,扫描电镜放大 1 万倍或 1.5 万倍对孢子进行详细观察并捕获高质量图像。

1.3.7 花生品质测定

(1) 粗脂肪含量:参照 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》。

(2) 粗脂肪酸价:参照 GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》。

(3) 粗蛋白含量:参照 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》。

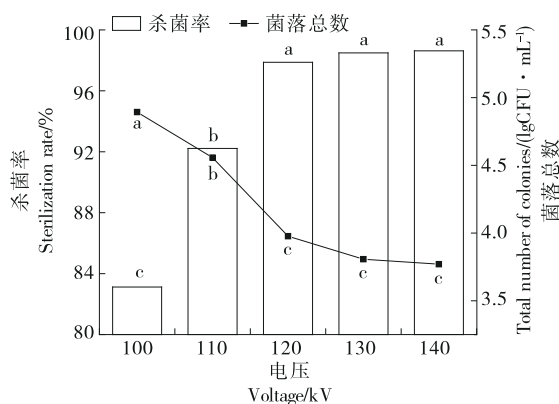
(4) 色泽:采用色差仪测定 L^* 、 a^* 、 b^* 值。

1.3.8 数据处理 所有处理均平行 3 次,数据以均值±标准偏差表示,采用 Excel 2010、SPSS 25.0 和 Design Expert 13 进行数据处理和方差分析,并用 Origin 2018 和 Design Expert 13 软件作图。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 HVCP 处理电压的确定 由图 1 可知,电压逐步升高时,灭菌率先迅速攀升,而后趋于平稳,菌落总数同样呈先快速下降随后渐趋平缓的态势。经统计分析得知,在 100~120 kV 的处理电压区间内,杀菌率存在显著差异($P<0.05$)。当 HVCP 处理电压为 100 kV 时,花生表面黄曲霉菌落总数从初始的 5.67 lg(CFU/mL) 降至 4.89 lg(CFU/mL),杀菌率仅为 83.12%,这或许是因为低电压条件下,难以生成充足浓度的活性物质,从而无法彻底杀灭花生表面的微生物^[17]。当电压提升至 110 kV 时,杀菌率达到 92.22%,菌落总数为 4.56 lg(CFU/mL)。在 120 kV 时,菌落总数为 3.98 lg(CFU/mL),杀菌率则高达 97.87%。进一步将电压上调至 130 kV,菌落总数较未处理减少 1.86 lg(CFU/mL),杀菌率升至 98.49%。在 140 kV 下,杀菌率为 98.63%,与 130,120 kV 时的杀菌率相比差异并不显著。由图 1 可知,当电压高于 100 kV 后,杀菌率会随着电压升高而升高,与 Kim 等^[18]的研究结果基本相符;但当电压超出 120 kV 时,花生表面杀菌效率达到稳定状态,可能是由于高电压条件促进了气体分子的剧烈碰撞,导致电离状态的波动与不稳定,进而促使各种粒子经历更深入的聚集或化学反应消耗,从而使得有效杀菌成分不再显著增加^[19]。因此,选取 120 kV 作为试验的中间参考值,将处理电压范围设定在 110~130 kV。

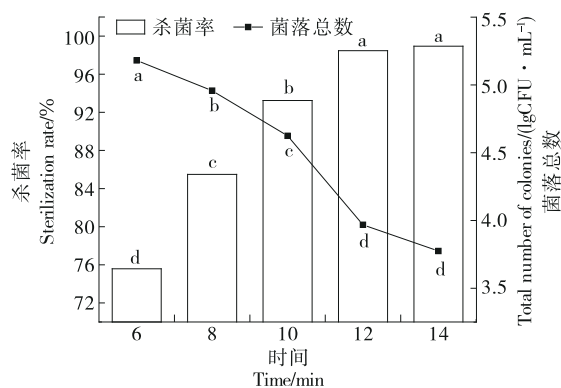


同一指标字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图 1 HVCP 处理电压对杀菌率的影响

Figure 1 Effects of HVCP treatment voltage on sterilization rate

2.1.2 HVCP处理时间的确定 由图2可知,随着处理时长的增加,HVCP针对花生表面黄曲霉的杀菌率总体呈上升趋势,且提升效果显著($P<0.05$)。在单次处理时间为6 min时,菌落总数由最初的5.67 lg(CFU/mL)降至5.18 lg(CFU/mL),杀菌率达到75.58%,当处理时长延长至12 min时,花生表面菌落数锐减至3.97 lg(CFU/mL),杀菌率高达98.47%,表明等离子体技术对食物表面的杀菌成效会随着处理时间的增加而愈发显著^[20]。而当时间超过12 min后,杀菌率的增长趋于平缓,如14 min时,花生表面菌落总数为3.77 lg(CFU/mL),杀菌率升为98.94%,此结果与12 min时相比,并无明显差异,因为当单次杀菌时长超过12 min时,密闭环境内生成的能够与花生表面黄曲霉发生反应的活性粒子浓度已接近饱和状态^[21]。表明HVCP设备对花生的杀菌作用随着时间的推移呈先快速上升而后趋于平稳的趋势,这与魏巧云等^[22]的研究结果吻合。因此,选取12 min作为试验的中间参考值,将处理时间范围设定在10~14 min。



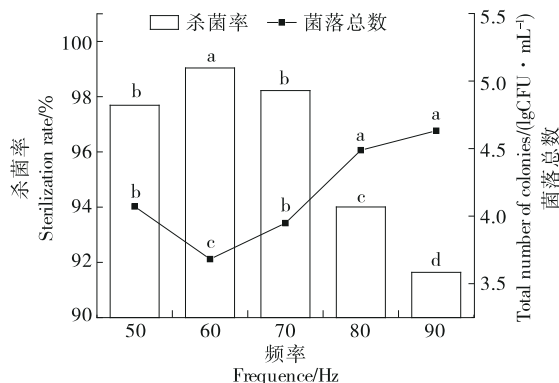
同一指标字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图2 HVCP处理时间对杀菌率的影响

Figure 2 Effects of HVCP treatment time on sterilization rate

2.1.3 HVCP处理频率的确定 由图3可知,随着处理频率的提升,花生表面的杀菌效果起初呈缓慢上升趋势,随后转为下降趋势。在50~60 Hz的处理频率区间内,杀菌率显著提升,而当处理频率处于60~90 Hz时,杀菌率则随着频率的增加而显著降低($P<0.05$)。当处理频率为50 Hz时,花生表面黄曲霉的菌落总数从5.67 lg(CFU/mL)减少至4.07 lg(CFU/mL),当频率从50 Hz增加至60 Hz时,红枣表面的菌落总数进一步从4.07 lg(CFU/mL)下降至3.68 lg(CFU/mL),杀菌率也从97.69%提升至99.04%。推测可能是由于在电压和时间恒定的情况下,低频(<60 Hz)处理导致HVCP放电更为剧烈,进而可能造成包装盒轻微穿孔,使得部分活性成分外泄,从而影响了50 Hz时的杀菌效果^[21]。然而,当处理频率提升至90 Hz

时,杀菌率下降至91.64%,其杀菌效果显著低于60 Hz。因此,选取60 Hz作为试验的中间参考值,将处理频率范围设定在50~70 Hz。



同一指标字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图3 HVCP处理频率对杀菌率的影响

Figure 3 Effects of HVCP treatment frequency on sterilization rate

2.2 响应面试验

采用Design Expert 13软件设计Box-Behnken试验,响应面因素水平见表1,试验设计及结果见表2,方差分析见表3。利用Design Expert 13数据处理软件对表2进行多元回归拟合,得到HVCP对花生表面黄曲霉杀菌的二次多项回归模型方程为:

$$Y=98.61+2.83A+3.08B-0.131\ 3C-0.752\ 5AB-0.052\ 5AC-0.005BC-2.75A^2-1.96B^2-1.16C^2。 \quad (2)$$

由表3可知,构建的二次回归模型呈现出极高的显著性($P<0.000\ 1$)。同时,模型的失拟项并不显著($P=0.355\ 5>0.05$),表明该模型与实际结果之间存在较高的拟合度。模型中 $R^2=0.987\ 0$, $R_{Adj}^2=0.970\ 3$,因此,可用该模型预测花生表面黄曲霉的杀菌率。由 F 值可知,各因素的影响程度从高到低依次为:时间、电压、频率。

表1 因素与水平

Table 1 Factors and levels

水平	A 电压/kV	B 时间/min	C 频率/Hz
-1	110	10	50
0	120	12	60
1	130	14	70

由图4可知,各因素间的交互作用对杀菌率均有影响。其中,AB响应面表现为峰状曲面坡度陡峭,显著影响杀菌率;而AC、BC响应面图坡度平缓等高线近似圆形,交互作用小,与方差分析结果一致。经过对模型深入分析,确定了最优的杀菌参数组合为处理电压122.04 kV、

表 2 试验设计及结果

Table 2 Experimental design and results				
试验号	A	B	C	杀菌率/%
1	0	0	0	99.25
2	-1	1	0	95.47
3	0	-1	1	92.66
4	-1	0	1	91.39
5	1	-1	0	93.84
6	1	1	0	99.02
7	0	0	0	99.05
8	0	1	-1	98.34
9	0	0	0	98.64
10	-1	-1	0	87.28
11	0	0	0	97.89
12	1	0	-1	98.13
13	1	0	1	97.55
14	0	1	1	98.28
15	0	0	0	98.22
16	0	-1	-1	92.70
17	-1	0	-1	91.76

处理频率 56.23 Hz、处理时间 13.43 min,在此条件下,预测的杀菌率可达 100%,但为了实际简便操作稍作调整,选取的最佳杀菌参数组合为处理电压 122 kV、处理频率 56 Hz、处理时间 13.5 min,在此条件下,进行 3 次重复验证

表 3 回归方程系数显著性检验†

Table 3 Significance test of regression equation coefficients					
来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	201.30	9	22.37	59.00	<0.000 1**
A	64.07	1	64.07	169.02	<0.000 1**
B	75.83	1	75.83	200.04	<0.000 1**
C	0.14	1	0.14	0.36	0.565 6
AB	2.27	1	2.27	5.98	0.044 5*
AC	0.01	1	0.01	0.03	0.869 4
BC	<0.01	1	<0.01	<0.01	0.987 5
A ²	31.78	1	31.78	83.85	<0.000 1**
B ²	16.18	1	16.18	42.67	0.000 3**
C ²	5.62	1	5.62	14.82	0.006 3**
残值	2.65	7	0.38		
失拟项	1.38	3	0.46	1.44	0.355 5
纯误差	1.27	4	0.32		
总误差	203.95	16			

† *表示显著($P<0.05$);**表示极显著($P<0.01$); $R^2=0.987\ 0$; $R^2_{Adj}=0.970\ 3$ 。

实验,其实际杀菌率平均值为 99.56%,该结果与预测值的相对误差较小,充分验证了采用该回归方程来分析并预测最佳杀菌率的有效性及准确性。

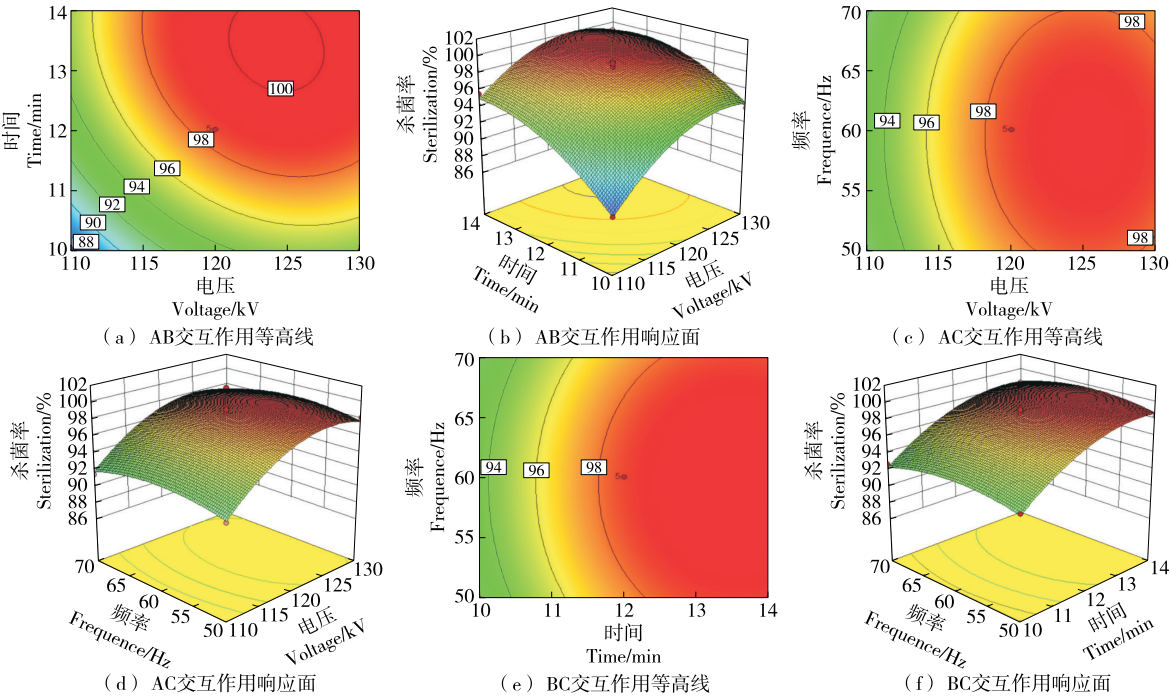


图 4 各因素交互作用对杀菌率的影响

Figure 4 Effects of the interaction of various factors on sterilization rate

2.3 HVCP处理对黄曲霉孢子形态结构的影响

由图5可知,未处理组的孢子形态较为饱满、圆润、表面粗糙;在HVCP装置最佳杀菌工艺处理后黄曲霉孢子表面形态结构与未处理组相比发生显著变化,出现大规模凹陷、皱缩等现象,且细胞表面趋于光滑。推测是由于低温等离子体产生的活性物质会破坏孢子的细胞壁和细胞膜,导致孢子形态塌陷,同时与膜蛋白发生氧化反应,破坏其功能结构,导致蛋白质数量减少,使膜表面趋于光滑^[16]。

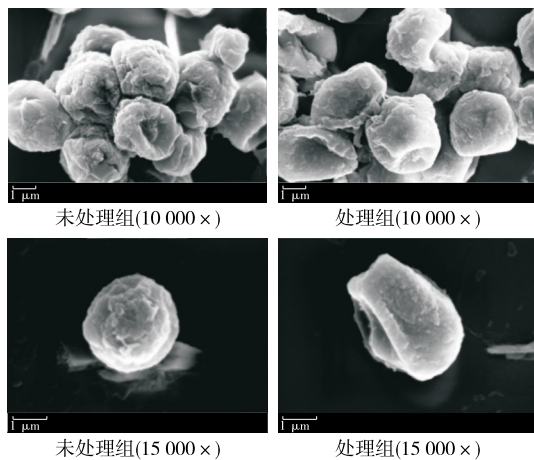


图5 黄曲霉孢子表面形态结构

Figure 5 Surface morphology of *Aspergillus flavus* spores

2.4 HVCP处理对花生品质的影响

通过HVCP不同处理电压、不同处理时间、不同处理频率对杀菌率的优化分析得出时间因素对杀菌率的影响较大,因此固定处理电压为122 kV,处理频率为56 Hz,通过改变处理时间探究HVCP对花生品质的影响。

2.4.1 对花生粗脂肪含量的影响 由图6可知,与未处理的对照样品相比,经HVCP处理不同时间后的花生样品无显著差异($P>0.05$)。这与王向阳等^[23]的试验结果一致。说明HVCP在高效消杀花生表面黄曲霉的同时,并不会使花生粗脂肪含量出现明显改变。

2.4.2 对花生粗脂肪酸价的影响 由图7可知,随着HVCP处理时间的增加,花生粗脂肪酸价显著下降($P<0.05$)。其原因可能是经过HVCP处理后,在高能粒子的作用下,花生的含水量和微生物含量降低,抑制脂肪的水解从而使酸价降低,这更有助于花生的贮藏^[24]。

2.4.3 对花生粗蛋白含量的影响 由图8可知,HVCP处理不会对花生粗蛋白含量造成显著影响($P>0.05$)。说明HVCP在实现高效杀菌的同时,还能保证花生的品质。

2.4.4 对花生色泽的影响 由表4可知,随着HVCP处理

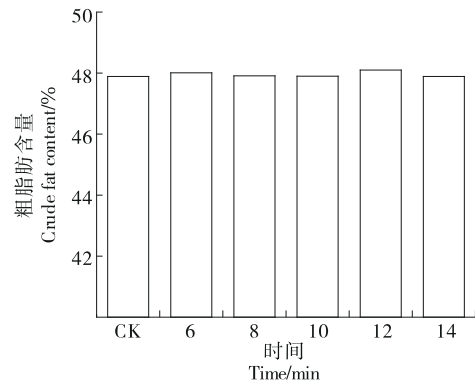
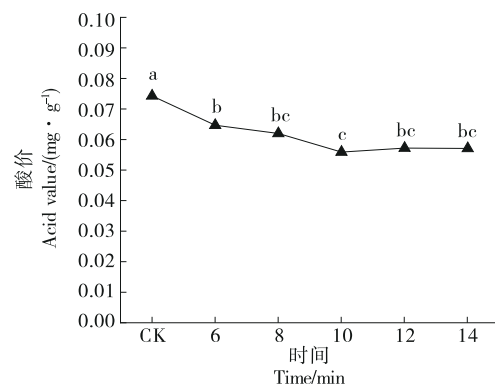


图6 HVCP处理对花生粗脂肪含量的影响

Figure 6 Effects of HVCP treatment on crude fat content of peanuts



字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图7 HVCP处理对花生粗脂肪酸价的影响

Figure 7 Effects of HVCP treatment on crude fatty acid value of peanuts

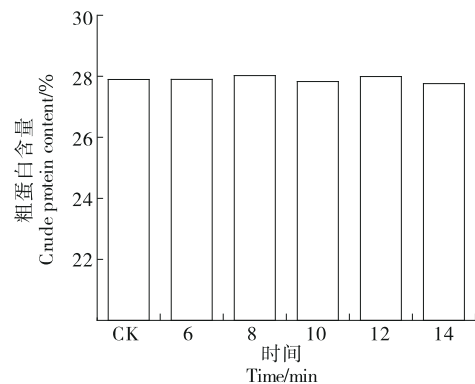


图8 HVCP处理对花生粗蛋白含量的影响

Figure 8 Effects of HVCP treatment on crude protein content of peanuts

时间延长,花生的 b^* 值无显著差异($P>0.05$),但 L^* 值与 a^* 值对比各自对照组变化明显,二者均随处理时间增加先显著上升($P<0.05$),而后缓慢下降, L^* 值在处理12 min时

达到峰值, a^* 值则在处理 10 min 时达到峰值。推测是因为 HVCP 持续蚀刻花生表面, 促使花生红衣内多酚类物质增多, 使得红衣颜色变深, L^* 值、 a^* 值同步增加^[25]。花生经 HVCP 处理后亮度、红度得以提升, 外观更显新鲜。

表 4 HVCP 处理对花生色泽的影响[†]
Table 4 Effects of HVCP treatment on peanut color

处理时间/min	L^*	a^*	b^*
CK	68.89±0.62 ^e	13.35±0.44 ^b	28.46±0.70
6	70.81±0.63 ^d	13.74±0.80 ^{ab}	28.52±0.68
8	71.68±0.61 ^c	13.82±0.55 ^{ab}	28.57±0.86
10	73.52±0.78 ^{ab}	14.26±0.73 ^a	28.54±0.72
12	74.09±0.93 ^a	14.02±0.24 ^{ab}	28.39±0.31
14	73.09±0.58 ^b	13.54±0.63 ^{ab}	28.48±0.54

† 同列字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

3 结论

高压电场低温等离子体消杀花生表面黄曲霉的最佳工艺条件为处理电压 122 kV、处理时间 13.5 min、处理频率 56 Hz, 该条件下的杀菌率达到 99.56%, 未能达到 100% 杀菌, 可能是由于花生籽仁表面并不是十分的光滑平整, 霉菌孢子深藏沟壑中, 未能与活性成分充分接触, 导致杀菌不彻底。等离子体杀菌主要通过电离空气产生各种活性成分对菌体产生氧化作用, 最终使菌体死亡。电镜图也反映出高压电场低温等离子体处理后的黄曲霉孢子皱缩死亡。高压电场低温等离子体处理不仅能高效地消杀花生表面黄曲霉, 降低脂肪酸价, 提升花生色泽, 同时还能很好地保障花生的品质。后续将进一步加强高压电场低温等离子体处理对花生表面微生物消杀及品质影响作用机理的研究。

参考文献

[1] 陈楠, 陈鹏泉, 蒋萌蒙, 等. 不同品种花生热风干燥后品质研究[J]. 花生学报, 2023, 52(4): 69-78.
CHEN N, CHEN P X, JIANG M M, et al. Study on the quality of different varieties of peanut after hot air drying[J]. Journal of Peanut Science, 2023, 52(4): 69-78.
[2] 李萍, 谢永康, 杜沛, 等. 射频对花生热风干燥杀菌及品质变化的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(22): 76-84.
LI P, XIE Y K, DU P, et al. Effect of radio frequency on hot air drying sterilization and quality change of peanut[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2024, 15(22): 76-84.
[3] WU Y, CHENG J H, SUN D W. Blocking and degradation of aflatoxins by cold plasma treatments: applications and

mechanisms[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 647-661.
[4] ADEYEYE S A O. Aflatoxigenic fungi and mycotoxins in food: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(5): 709-721.
[5] GUO J, HE Z P, MA C, et al. Evaluation of cold plasma for decontamination of molds and mycotoxins in rice grain[J]. Food Chemistry, 2023, 402: 134159.
[6] ZHAO L L, SHENG X W, LI S R, et al. Assessment of non-thermal plasma for decontamination against *Aspergillus flavus* and aflatoxin B₁ in maize[J]. Food Control, 2024, 163: 110521.
[7] ZHI A, SHI S S, LI Q, et al. Aflatoxins degradation and quality evaluation in naturally contaminated rice by dielectric barrier discharge cold plasma[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 88: 103426.
[8] LIN C M, PATEL A K, CHIU Y C, et al. The application of novel rotary plasma jets to inhibit the aflatoxin-producing *Aspergillus flavus* and the spoilage fungus, *Aspergillus niger* on peanuts[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 78: 102994.
[9] WANG Y Q, LI B, SHANG H H, et al. Effective inhibition of fungal growth, deoxynivalenol biosynthesis and pathogenicity in cereal pathogen *Fusarium* spp. by cold atmospheric plasma [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 437: 135307.
[10] ZHAO L L, WANG J, SHENG X W, et al. Non-thermal plasma inhibited the growth and aflatoxins production of *Aspergillus flavus*, degraded aflatoxin B1 and its potential mechanisms[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 475: 146017.
[11] NIVEDITHA A, PANDISELVAM R, PRASATH V A, et al. Application of cold plasma and ozone technology for decontamination of *Escherichia coli* in foods- a review[J]. Food Control, 2021, 130: 108338.
[12] HAN L, PATIL S, BOEHM D, et al. Mechanisms of inactivation by high-voltage atmospheric cold plasma differ for *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2016, 82(2): 450-458.
[13] MANDAL R, SINGH A, SINGH A P. Recent developments in cold plasma decontamination technology in the food industry [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 80: 93-103.
[14] SEN Y, ONAL-ULUSOY B, MUTLU M. *Aspergillus* decontamination in hazelnuts: evaluation of atmospheric and low-pressure plasma technology[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 54: 235-242.
[15] 陈涛, 王华民, 靳学远. 红花籽油/火龙果浆乳液的低温等离子体杀菌及贮藏稳定性[J]. 食品与机械, 2023, 39(5): 119-124.

- CHEN T, WANG H M, JIN X Y. Low-temperature plasma sterilization and storage stability of safflower seed oil/dragon fruit pulp emulsion[J]. Food & Machinery, 2023, 39(5): 119-124.
- [16] 郝明明, 谢岩黎. 低温等离子体在不同时间条件下对黄曲霉孢子灭活作用的研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2023, 44(2): 49-55.
- YU M M, XIE Y L. Study on the inactivation of *Aspergillus flavus* spores by low-temperature plasma under different time conditions[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 44(2): 49-55.
- [17] 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.
- MA L J, WANG J M, HUANG M M, et al. Study on the sterilization effect and influence mechanism of low-temperature plasma with different treatment conditions on dielectric barrier discharge[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2019, 59(8): 1 512-1 521.
- [18] 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.
- [19] 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.
- CHAO W W, HUANG M M, WANG J M, et al. Effect of low-temperature plasma on sterilization effect and color of fresh beef[J]. Food Science, 2017, 38(23): 237-242.
- [20] GAUNT L F, BEGGS C B, GEORGHIU G E. Bactericidal action of the reactive species produced by gas-discharge nonthermal plasma at atmospheric pressure: a review[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2006, 34(4): 1 257-1 269.
- [21] HU M, GUO Y. The effect of air plasma on sterilization of *Escherichia coli* in dielectric barrier discharge[J]. Plasma Science & Technology, 2012, 14(8): 735-740.
- [22] 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 Q Y, YUAN Y, GAO T, et al. Optimization of cold sterilization process of high voltage electric field low temperature plasma on dried jujube fruits and its effect on quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(16): 317-324.
- [23] 王向阳, 李淼, 王若兰, 等. 冷等离子体处理对花生中脂质及蛋白理化特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(7): 89-95.
- WANG X Y, LI M, WANG R L, et al. Effect of cold plasma treatment on physicochemical properties of lipids and proteins in peanut[J]. Food Research and Development, 2022, 43(7): 89-95.
- [24] 刘真, 王世清, 肖军霞, 等. 等离子体处理对花生油品质的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(9): 203-218.
- LIU Z, WANG S Q, XIAO J X, et al. Effect of plasma treatment on the quality of peanut oil[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(9): 203-218.
- [25] THIRUMDAS R, DESHMUKH R R, ANNAPURE U S. Effect of low temperature plasma on the functional properties of basmati rice flour[J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2016, 53(6): 2 742-2 751.