低温等离子体处理蒜片减菌工艺优化及品质变化

冯雨，胡燕娜，乔旭光，卢晓明*

（山东农业大学食品科学与工程学院，山东省高等学校食品营养与健康重点实验室，山东泰安 271018）

摘要：为了探究低温等离子处理对脱水蒜片减菌效果及品质变化，以减菌率为主要指标，色差为参考指标，分别对处理时间（min）、处理高度（cm）、装载量（kg/m^2）三个因素进行单因素实验。进一步以减菌率作为响应值，开展响应面试验设计，得到最佳减菌处理工艺，并测定低温等离子体处理前后大蒜素含量及挥发性风味成分。结果表明，影响因素排序为：处理时间>处理高度>装载量；响应面优化及考虑实际生产后得出低温等离子体处理蒜片的最佳减菌工艺为：处理时间3 min、处理高度3 cm、装载量1 kg/m^2，在此条件下减菌率为98.11%。在最佳减菌工艺下进行低温等离子体处理，色差为3.14，在可接受范围内，色差无明显变化；处理后脱水蒜片的大蒜素含量升高了31.68%；挥发性风味成分部分被分解，整体含量降低。综合认为，低温等离子体技术减菌效果明显，对品质破坏性小，为蒜片减菌工艺提供了一种新的思路与方法。

关键词：蒜片；低温等离子体；减菌率；大蒜素；挥发性风味成分

文章编号：1673-9078(2025)12-100-108 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1329

Cold Plasma Process Optimization for Bacteria-reducing Treatment of Garlic Slices and Their Quality Changes

FENG Yu, HU Yanna, QIAO Xuguang, LU Xiaoming*

(School of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Shandong Key Laboratory of Food Nutrition and Health for Higher Education, Tai'an 271018, China)

Abstract: In order to explore the bacteria-reducing effect and quality changes of dehydrated garlic slices treated by cold plasma, with bacterial reduction rate as the main index and color difference as the reference index, single-factor experiments were carried out on three factors: treatment time (min), treatment height (cm) and loading amount (kg/m^2), respectively. The response surface test design was further carried out with sterilization rate as the response variable, to obtain the optimal process for bacteria-reducing treatment. The contents of allicin and volatile flavor components before and after the cold plasma treatment were determined. The results showed the order of influencing factors as treatment time>treatment height>loading amount; After the response surface optimization and considering the practical production, the optimal cold plasma process for bacteria-reducingtreatment of garlic slices was: treatment time, 3 min; treatment height, 3 cm; loading amount, 1 kg/m^2. Under these conditions, the bacteria reduction rate was 98.11%, the color difference was 3.14, and the color difference underwent insignificant change (within the acceptable range). After the treatment, the allicin content of the dehydrated garlic slices increased by 31.68%; The volatile flavor components were partially decomposed and the overall content decreased. It is concluded that the cold plasma technology exerts a significant bacteria-reducing effect while causing minimal damage to quality, which provides a new idea and

引文格式：

冯雨,胡燕娜,乔旭光,等.低温等离子体处理蒜片减菌工艺优化及品质变化[J].现代食品科技,2025,41(12):100-108.

FENG Yu, HU Yanna, QIAO Xuguang, et al. Cold plasma process optimization for bacteria-reducing treatment of garlic slices and their quality changes [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 100-108.

收稿日期：2024-09-05；修回日期：2024-12-19；接受日期：2024-12-23

基金项目：山东省重点研发计划（乡村振兴科技创新提振行动计划）重大项目（2024TZXD007）

作者简介：冯雨（2001-），女，硕士研究生，研究方向：农产品加工与贮藏，E-mail：Fyu_cherry@126.com

通讯作者：卢晓明（1986-），女，博士，副教授，研究方向：果蔬加工、功能食品，E-mail：xxalxm@126.com

method for bacteria-reducing treatment of garlic slices.

Key words: garlic slices; cold plasma; bacterial reduction; allicin; volatile flavor substance

大蒜（*Allium sativum* L.）是一种百合科作物，因其独特风味自古用于饮食[1]，是重要的香料和调味品之一[2]。然而，新鲜大蒜含水量超 75%，易在贮运中发芽和腐烂，导致经济损失严重[3]，统计显示，因运输或储存不当新鲜大蒜约损失 30%[4]。干燥可去除食品中 90% 以上水分，是延缓食品腐烂和减少微生物生长的重要加工手段[5]。大蒜及其干制品（脱水蒜片、大蒜粉）是国内外基本调味品，需求逐年增长，社会经济效益显著[6]。欧盟对干制品中微生物含量有严格的限量要求，例如：欧盟香辛料联合会规定香辛料样品中沙门氏菌不得检出，霉菌限量为 10^5 CFU/g，大肠菌群限量为 10^2 CFU/g，黄曲霉毒素 B_1 限量为 5 μg/kg，虽然国内外对蒜片微生物限量无明确标准，但不同国家一些进口企业的订单中明确规定了微生物的限量要求，且要求越来越严格。目前，各企业生产的大蒜脱水制品参差不齐，国内大蒜脱水制品常因微生物不达标需进行减菌处理[7]。常用的蒜片减菌技术有高温蒸汽杀菌和使用杀菌剂（高锰酸钾、含氯化合物）[8]。然而，这些方法各有其局限性，例如品质变差、耗时耗能、有毒物质残留等。

非热处理可以最大限度降低处理对食物营养成分造成的负面影响[9]，包括超高压处理、超声处理、脉冲电场处理等[10]。但由于减菌效果不佳（例如脉冲电场、超声处理）或成本高（例如超高压）使其应用受限[11]。等离子体是物质的第四种状态[10,12]，可以电离空气产生活性减菌物质（活性氧、活性氮、带电粒子），是一种新颖、简单且有前途的方法[13]。其产生方式分热与非热等离子体，热等离子体是在约 20 000 ℃温度下形成，与其周围环境处于热力学平衡状态；非热等离子体可分为准平衡（100~150 ℃）和非平衡等离子体（低于 60 ℃），也叫低温等离子体[14]。低温等离子体技术已成功应用于生物医学领域，用于促进伤口愈合、癌症治疗、人体消毒等[15]。

近年来，低温等离子体技术在食品工业中应用逐渐广泛[16]。与其他杀菌方法相比，其灭菌速度快、无污染、安全且对食品的营养和品质破坏性小[17]。低温等离子体处理对食品的理化特性和营养成分影响较小且可以明显降低菌落总数[18]。徐艳阳等[19]发现，低温等离子体对生姜片的减菌效果显著，且色差无明显变化；田方等[20]指出低温等离子体对鲜切猕猴桃片减菌效果显著的同时可有效保持其感官及营养品质。

目前低温等离子技术主要应用在生鲜食品[21]与液体食品[22]中，对干制品的应用较少，且目前未见其在脱水蒜片减菌方面的应用。因此本文通过研究其对脱水蒜片的减菌效果，生产高质量的大蒜干制品，进而为其产业化应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

脱水蒜片（水分含量 10%±1%、厚度 3±0.5 mm），山东百佳食品有限公司提供。

乙腈（色谱纯），山东禹王实业有限公司化工分公司；氯化钠（分析纯），国药集团化学试剂有限公司；二烯丙基二硫醚（分析纯），北京索莱宝科技有限公司；平板计数琼脂，海博生物技术有限公司；过氧化氢、冰乙酸、甲醇、正己烷、无水乙醇均为分析纯，天津市凯通化学试剂有限公司。

LC-20A 型高效液相色谱，日本岛津公司；RE-52AA 型旋转蒸发仪，上海亚荣生化仪器有限公司；CR400 手持色差仪，柯尼卡美能达控股公司；PG-1000Z/G 宽幅射流型大气低温等离子处理机，南京苏曼等离子科技有限公司；GCMS-TQ8030 三重四极杆气质联用仪，日本岛津公司；79-2 双向磁力加热搅拌器，江苏中大仪器；TGL-18C-C 型高速台式离心机，上海安亭科学仪器厂；800-CJ-1FD 超净工作台，苏州市晟义垚静电科技有限公司；MQD-B1G 恒温培养箱，苏州安泰空气技术有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 低温等离子体处理条件

采用宽幅射流型大气低温等离子处理机，输出电压为 AC 220 V，工作频率为 40 kHz，气源压力为 1.05 kg。

1.2.2 单因素试验设计

处理时间的确定：随机取样品均匀平铺于 5 L 烧杯容器中，样品装载量为 1.4 kg/m²，等离子处理机喷枪与样品表面距离为 7 cm，处理时间分别为 1、2、3、4、5、6 min，根据减菌率和色差来确定最佳杀菌时间。

处理高度的确定：随机取样品均匀平铺于 5 L 烧杯容器中，样品装载量为 1.4 kg/m²，处理时间为 3 min，等离子处理机喷枪与样品表面距离分别为 1、4、7、10、13、16 cm，根据减菌率和色差来确定最佳杀菌高度。

装载量的确定：随机取样品均匀平铺于 5 L 烧杯容器中，处理时间为 3 min，等离子处理机喷枪与样品

表面距离为 7 cm，装载量分别为 0.7、1.4、2.1、2.8、3.5、4.2 kg/m^2，根据减菌率和色差来确定最佳样品装载量。

1.2.3 响应面优化设计

通过单因素实验，初步确定在单因素条件下响应面的试验范围，再运用 Design Expert 软件进行响应面分析优化减菌工艺，开展响应面试验设计，各因素及其水平见表 1。

表 1 因素及水平设计

Table 1 Factor and level design

水平	处理时间/min	处理高度/cm	装载量/(kg/m^2)
−1	2	1	0.7
0	3	4	1.4
1	4	7	2.1

1.2.4 菌落总数

采用平板菌落计数法，依据 GB 4789.2-2022 测定菌落总数。

1.2.5 减菌率

$$W=\frac{C_0-C_1}{C_0}\times 100\% \tag{1}$$

式中：

W——减菌率；

C_0——脱水蒜片处理前菌落总数；

C_1——脱水蒜片处理后菌落总数。

1.2.6 色差

利用色差计分别测定处理组与对照组脱水蒜片的 L^*（亮度）、a^*（红绿度）、b^*（黄蓝度）值。以等离子处理前的样品为参照，依次测定等离子处理后样品的色差，每组平行测定三次，取平均值，比较其色差值 ΔE。

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

式中：

ΔE——脱水蒜片处理前后色差；

ΔL——脱水蒜片处理前后亮度值差值；

Δa——脱水蒜片处理前后红绿测定值差值；

Δb——脱水蒜片处理前后蓝黄测定值差值。

色差与感官之间的关系如表 2，可据此进行相应的评定。

表 2 色差感官评定

Table 2 Sensory evaluation of color difference

ΔE	目视色差程度
0~1	极小差异
1~2	稍有差异
2~3.5	感觉到有差异
3.5~5.5	显著差异

1.2.7 大蒜素测定样品处理

蒜片研磨或匀浆处理（大蒜 : 水 =2:1，*m/V*）后，准确称取 10.0 g 大蒜样品置于 50 mL 带盖离心管内，加入等体积（*m/V*）的正己烷，剧烈摇晃使其混匀，4 ℃下震荡 30 min，5 000 r/min 离心 10 min，收集有机相，依此操作连续萃取三次，将所得有机相合并，在 8 m/s 风速下利用氮吹法挥干有机相，获得浅黄色油状液滴，残留液体用 60% 甲醇复溶，0.22 μm 有机膜过滤后，采用 HPLC 进行分析[23]。

1.2.8 大蒜素含量的测定

采用 Shimadzu LC-20AT HPLC 系统进行分析，色谱柱采用 InertSustain C-18 色谱柱（4.6 mm×250 mm, 5 μm），以及 Agilent 保护柱（4.6 mm×35mm, 5 μm），HPLC 流动相条件为乙腈 : 水 : 甲醇 =50:41:9，流量为 1.0 mL/min，进样量为 10 μL；柱温为 25 ℃；检测器为二极管阵列检测器，波长为 254 nm[23]。

1.2.9 挥发性风味成分的测定

采用气相色谱 - 质谱联用法（GC-MS）测定，参考陈海涛等[24]的方法并稍作修改。

固相微萃取：称取 10 g 蒜泥于顶空气相瓶，用 PTFE-silicone 瓶盖密封，在 80 ℃条件下水浴 20 min，接着将已老化完成的 DVB/CAR/PDMS 型固相微萃取采样针插入顶空瓶，推出纤维柱头，80 ℃水浴萃取 30 min，进行 GC-MS 分析。

气相条件：采用 DB-5 毛细管柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm）。进样口温度设定为 250 ℃。其升温程序如下：起始温度为 40.0 ℃并维持 1.0 min，速度以 2.0 ℃ /min 升温至 130.0 ℃后在保持 1.0 min，以 10.0 ℃ /min 升温至 220.0 ℃后保持 8 min；载气（He）流量为 1.0 mL/min；分流比 30:1；进样量 1.0 μL。

质谱条件：采用电子轰击（EI）离子源，电子能量设为 70 eV；以 280 ℃离子源温度进行全扫描方式扫描；调谐文件为标准调谐；溶剂延迟 5.0 min。

1.2.10 数据统计

采用 Design Expert 8.0.6 软件分析响应面，数据表示为平均值 ± 标准差，当 $P<0.05$ 或 $P<0.01$ 时，则有统计学差异；采用 Origin 8、Excel 2019 整理实验数据并绘图。

2 结果与分析

2.1 单因素实验

2.1.1 不同处理时间对蒜片减菌效果和色差的影响

在处理高度和装载量一定的条件下，选择处理时

间为 1、2、3、4、5、6 min，研究不同处理时间对蒜片减菌效果及色差的影响，结果如图 1 所示。

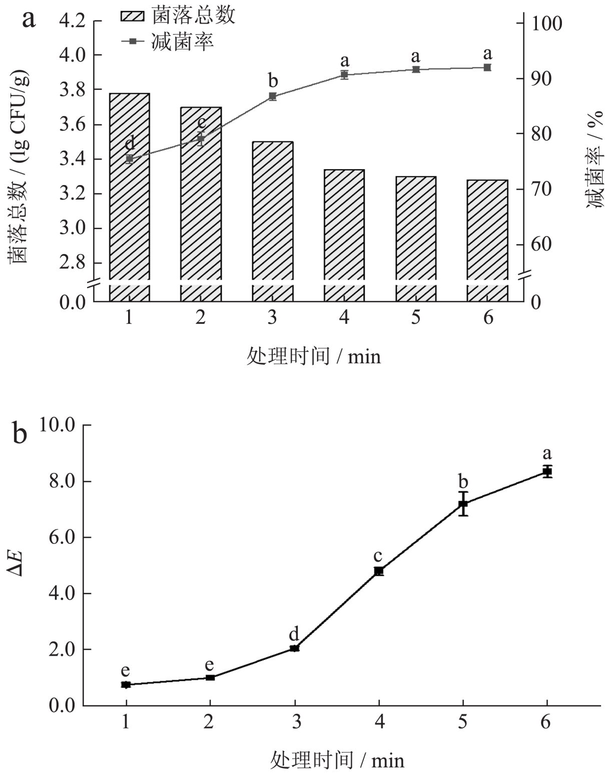


图 1 不同处理时间对杀菌效果（a）及色差（b）的影响

Fig.1 Influence of different treatment time on bactericidal effect (a) and color difference (b)

注：相同字母代表差异不显著（P＞0.05）；不同字母代表差异显著（P＜0.05），下同。

表 2 对蒜片色差进行感官评价时发现：当色差超过 3.50 时，有显著变化，因此确定色差的可接受范围为 0~3.5。处理前蒜片菌落总数为 4.40 lg CFU/g，在等离子体减菌的过程中，初期减菌率随着处理时间的延长而显著提高，这与徐艳阳[19]应用低温等离子体处理生姜片结果一致。当处理时间为 4 min 时，菌落总数为 3.34 lg CFU/g，下降 1.06 lg CFU/g，减菌率达到 92.08%。之后减菌率增加缓慢，没有显著差异（P＞0.05），但此时色差达到 5.03，超过可接受范围（图 1b），而处理时间为 3 min 时色差显著低于 4 min，为 2.17，此时减菌率也保持在较高水平。综合考虑，确定最佳处理时间为 3 min。

2.1.2 不同处理高度对蒜片减菌效果和色差的影响

在处理时间和装载量一定的条件下，选择处理高度分别为 1、4、7、10、13、16 cm，研究不同处理高度对蒜片减菌效果及色差的影响，结果如图 2 所示。

在低温等离子体减菌的过程中，喷枪与样品表面距离在 1 和 4 cm 时，蒜片减菌效果无显著变化，之后随着处理高度的增加，减菌率显著降低，这与孙艳[25]应用低温等离子体处理黄瓜切片的结果一致。减菌率由 96.47% 降至 69.63%。喷枪与样品表面距离越近，色差越大，品质越差。处理高度在 1 cm 时，减菌效果最好，菌落总数与未处理组相比降低 1.47 lg CFU/g，色差为 3.85；当处理高度在 4 cm 时，减菌率无明显下降，此时样品色差为 3.03，色差显著降低，品质更好。因此确定最佳处理高度为 4 cm。

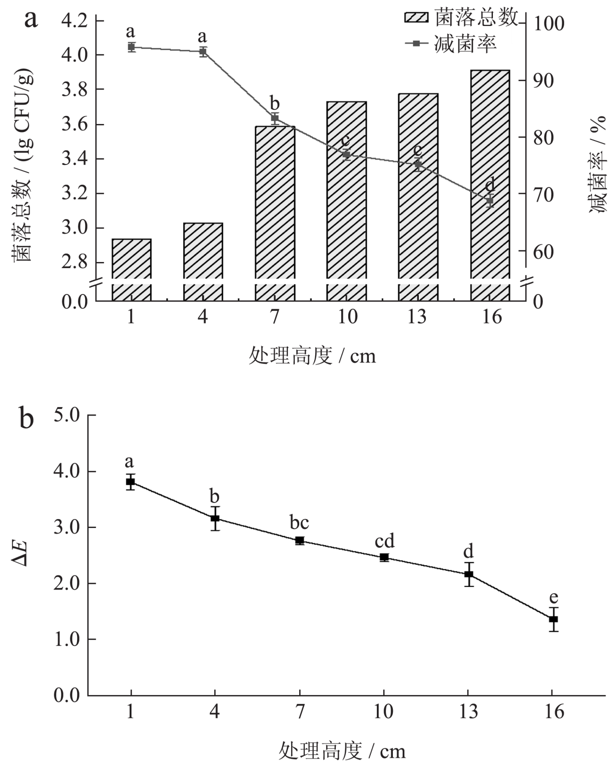
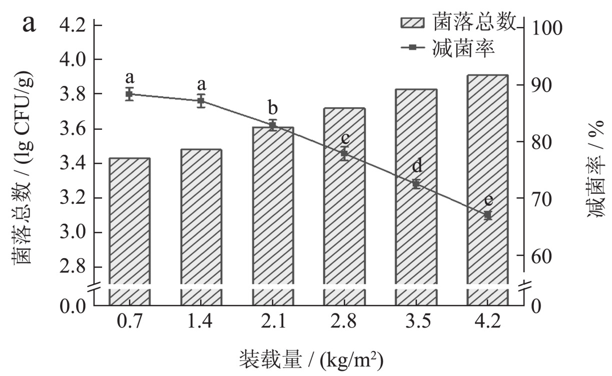


图 2 不同处理高度对杀菌效果（a）和色差（b）的影响

Fig.2 Effects of different treatment heights on bactericidal efficacy (a) and color difference (b)

2.1.3 不同装载量对蒜片减菌效果和色差的影响

在处理时间和处理高度一定的条件下，选择样品装载量为 0.7、1.4、2.1、2.8、3.5、4.2 kg/m^2，研究不同装载量对蒜片减菌效果及色差的影响，结果如图 3 所示。



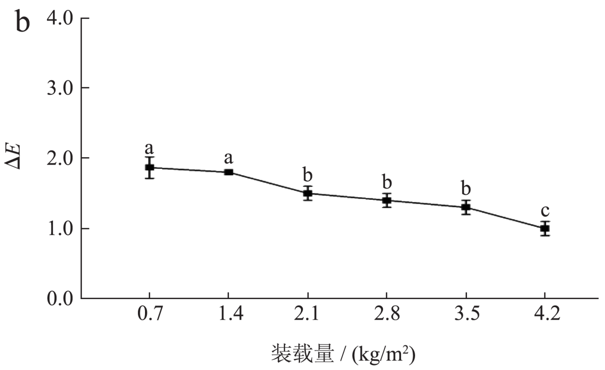


图 3 不同装载量对杀菌效果（a）和色差（b）的影响

Fig.3 The effect of different loading rates on bactericidal efficacy (a) and color difference (b)

在低温等离子体减菌的过程中，随着装载量增加，减菌率显著降低，由 88.40% 降至 67.11%，当装载量为 0.7 kg/m^2 时减菌效果最好，此时菌落总数由 4.40 lg CFU/g 降低为 3.42 lg CFU/g，减菌率为 88.40%，菌落总数下降 0.98 lg CFU/g。当装载量为 1.4 kg/m^2 时减菌率为 88.30 %，菌落总数降低 0.92 lg CFU/g，此时与装载量为 0.7 kg/m^2 相比，蒜片减菌效果差异不显著。由图 3b 可知，在不同的装载量下进行低温等离子体处理的样品色差变化不大，色差均不超过 2，但当装载量超过 1.4 kg/m^2 时，杀菌率迅速降低。装载量在 0.7 kg/m^2 和 1.4 kg/m^2 时的蒜片减菌效果不存在显著差异，且在企业生产中产品装载量越多，经济效益越高[7]，因此确定样品装载量的最佳值为 1.4 kg/m^2。

2.2　响应面优化试验结果及分析

2.2.1　响应面优化试验结果

以单因素实验为基础，将处理时间、处理高度、样品装载量确定为实验因素，以杀菌率为响应值，确定各实验因素的 -1、0、1 取值，对响应面试验结果进行分析，根据响应面给出的设计方案开展试验，试验结束自动生成优化方案，确定最佳的杀菌条件，并分析不同因素之间的交互作用[7]。响应面设计结果如表 3 所示。

2.2.2　响应面优化试验方差分析

对试验的三个因素（X）及响应值（Y）进行二次多元回归分析，进而得出杀菌率（Y）与处理时间（A）、处理高度（B）和装载量（C）之间的回归方程为：

$$Y=95.45+5.93A-2.48B-1.30C-0.45A-0.043AC+1.03BC-3.83A^2-1.87B-0.92C^2$$

回归分析结果见表 4。

表 3 Box-Behnken实验结果

Table 3 Box Behnken test results

编号	处理时间 /min	处理高度 /cm	装载量 /(kg/m^2)	减菌率 /%
1	0	0	0	95.58 ± 1.26^{cd}
2	−1	1	0	81.82 ± 1.53^{i}
3	1	−1	0	98.57 ± 0.63^{a}
4	0	1	1	90.12 ± 1.37^{fg}
5	0	0	0	94.29 ± 1.34^{ef}
6	0	1	−1	91.22 ± 1.45^{ef}
7	0	−1	−1	97.26 ± 1.32^{ab}
8	0	0	0	96.32 ± 0.43^{bc}
9	1	0	−1	98.21 ± 1.45^{a}
10	1	0	1	96.1 ± 1.42^{bc}
11	0	−1	1	92.04 ± 0.88^{ef}
12	0	0	0	93.96 ± 0.63^{de}
13	−1	0	−1	85.21 ± 1.23^{i}
14	1	1	0	91.72 ± 1.28^{ef}
15	−1	0	1	83.27 ± 0.97^{i}
16	0	0	0	97.1 ± 1.04^{ab}
17	−1	−1	0	86.88 ± 1.11^{gh}

注：同一列相同字母为不显著差异（P＞0.05），不同字母为显著差异（P＜0.05）。

表 4 回归模型方差分析

Table 4 Analysis of variance of regression model

项目	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	435.37	9	48.37	28.45	0.000 1	**
A-处理时间	281.08	1	281.08	165.29	<0.000 1	**
B-处理高度	49.35	1	49.35	29.02	0.001 0	**
C-装载量	13.44	1	13.44	7.90	0.026 1	*
AB	0.80	1	0.80	0.47	0.514 6	
AC	7.225E-003	1	7.225E-003	4.249E-003	0.949 9	
BC	4.24	1	4.24	2.50	0.158 2	
A^2	61.84	1	61.84	36.37	0.000 5	**
B^2	14.72	1	14.72	8.66	0.021 6	*
C^2	3.56	1	3.56	2.10	0.191 0	
残差	11.90	7	1.70			
失拟项	4.84	3	1.61	0.91		
纯误差	7.06	4	1.77		0.509 8	
总和	447.28	16				

注：* 为显著 P＜0.05；** 为极显著 P＜0.01。

方程一次项 A、B 的 P 值均＜0.01，为极显著因素，说明处理时间和处理距离对等离子体减菌效果有极显著影响；C 的 P 值＜0.05，为显著因素，说明装载量对等离子体减菌效果有显著影响。根据一次项对应的 F 值可以得到三种因素对等离子体减菌效果影响的强弱关系排序为：A＞B＞C，即处理时间＞处理高度＞装载量。

2.2.3 响应面曲面图和等高线图分析

如图 4，当处理高度一定时，减菌率随着处理时间的增加先增加后逐步平稳；当处理时间一定时，减菌率随着处理高度的增加逐渐降低。当样品装载量一定时，减菌率会随着处理时间的增加先升高后逐步平稳；当处理时间一定时，减菌率随着样装载量的增大而减小。当装载量一定时，减菌率随着处理高度的增大而减小；当处理高度一定时，减菌率随着样装载量的增大而减小。等高线越弯曲，说明两两因素交互作用越明显，如图 4，BC 交互作用最强，与上述方差分析结果一致。

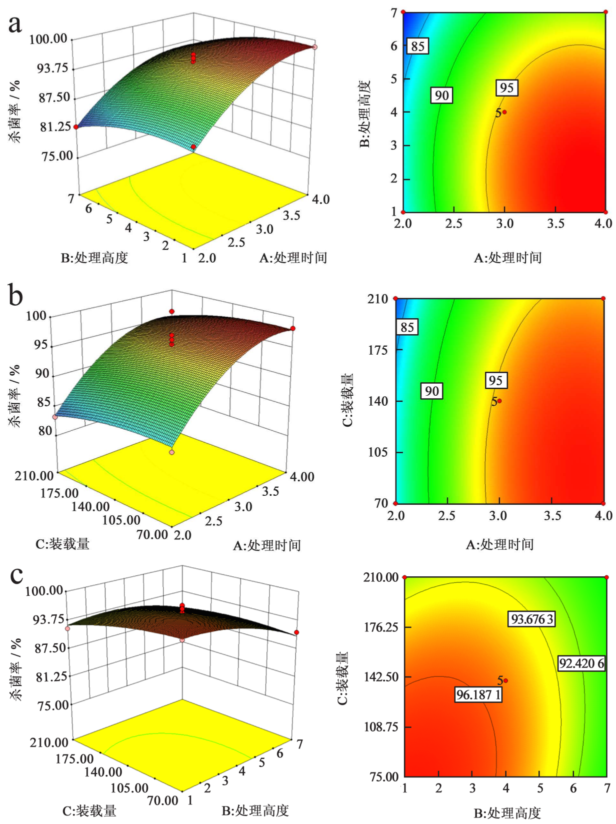


图 4 两两因素交互作用对杀菌率的影响

Fig.4 Effect of two-factor interaction on sterilisation rate

2.2.4 工艺参数优化与验证性试验

根据回归方程预测及响应面的结果分析，得出等离子体处理蒜片的最佳工艺为：处理时间 3.29 min，处理距离 3.01 cm，装载量 0.91 kg/m^2，预测得出减菌率为 98.26%。鉴于实际生产需求，将上述工艺参数调整为：处理时间 3 min，处理距离 3 cm，装载量 1 kg/m^2，进行三组平行验证实验，测得实际减菌率为 98.11%，与预测值无显著差异，且此时色差为 3.14（图 5 所示）。本实验室前期[7]研究了臭氧与紫外对蒜片的减菌效果，减菌率分别为 84.01% 和 88.82%，因此可以看出低温等离子体处理蒜片减菌效果的优越性。

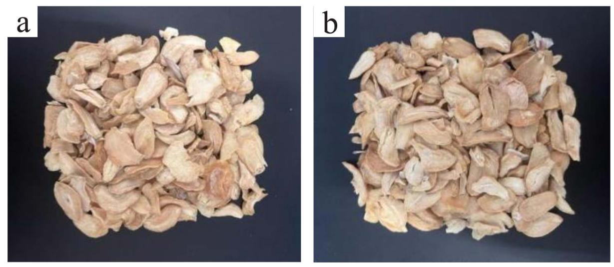


图 5 处理前后色泽变化

Fig.5 Color change before and after treatment

注:（a）处理前，（b）处理后。

2.3 低温等离子体处理前后蒜片大蒜素含量

处理前后蒜片中大蒜素含量如表 5 所示，经低温等离子体处理后，蒜片中大蒜素含量较处理前升高了 31.68%。完整的大蒜并不存在大蒜素成分，当完整大蒜的组织被破坏时，大蒜中的蒜氨酸和蒜氨酸酶被释放出来并发生水解反应生成次磺酸，2 分子的次磺酸会发生缩合反应生成 1 分子的大蒜素和 1 分子的水[26]。因此推测是由于低温等离子体在外加电场的作用下，形成了大量的羟自由基，能与脱水蒜片中次磺酸的氢离子结合形成水分子，进而促进次磺酸脱氢形成大蒜素，其机制有待进一步研究证明。有研究发现蒜片经臭氧、紫外非热减菌处理，处理后大蒜素均不会产生明显的变化[7]。与其他非热减菌处理工艺相比，低温等离子体技术既保留了蒜片良好的品质，又促进了有益物质大蒜素的合成。

表 5 低温等离子体处理对蒜片大蒜素含量的影响

Table 5 Effect of cold plasma treatment on allicin content in garlic flakes

	低温等离子体处理前	低温等离子体处理后
大蒜素含量大蒜素含量/(mg/g)	1.01 ± 0.06^{a}	1.33 ± 0.05^{b}

注：相同字母代表差异不显著（P＞0.05），不同字母代表差异显著（P＜0.05）。

2.4　低温等离子体处理前后挥发性风味成分变化

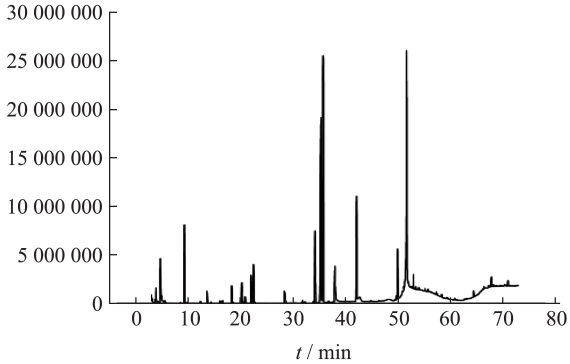


图 6 处理前大蒜中挥发性风味成分总离子流图

Fig.6 Total ion flow diagram of volatile flavor components in garlic before treatment

脱水蒜片中含量最多的挥发性风味成分为硫化物，具有强烈的刺激性气味。脱水蒜片在温等离子处理前共鉴定出 37 种挥发性有机物，处理后共鉴定出 44 种挥发性有机物，主要的挥发性风味成分均为硫化物[28]。由图 6、7 可知，经过低温等离子处理后的蒜片，挥发性有机物含量整体呈下降趋势。这是由于低温等离子体中的电子、活性粒子同气态分子相互碰撞引发的一系列化学反应，破坏了多种化学键的结合，从而起到降解气态物质的作用[29]。陆洋等[30]也证明了低温等离子体对挥发性有机物（VOCs）的消除率达 90%~99%。除此之外，硫化物相对含量降低，酸类、醛类、酯类及醇类物质增多（表 6），刺激性气味减弱。因此可以证明，低温等离子体处理在达到显著减菌效果的同时，还能够改善蒜片中的不良气味。

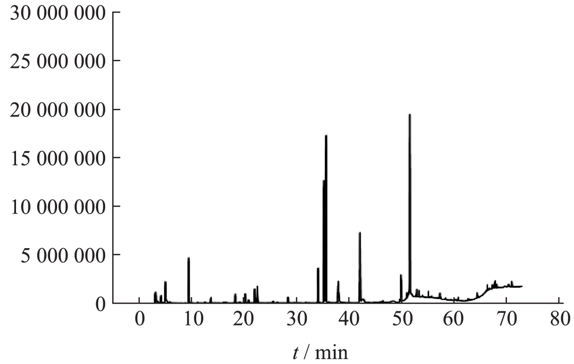


图 7 处理后大蒜中挥发性风味成分总离子流图

Fig.7 Total ion flow diagram of volatile flavor components in treated garlic

表 6 低温等离子体处理前后脱水蒜片中挥发性风味成分的GC-MS结果

Table 6 GC-MS results of volatile flavor components in dehydrated garlic slices before and after cold plasma treatment

序号	化合物种类	化合物名称	保留时间/min	相对含量/%	
				处理前	处理后
1	硫化物	硫化丙烯	3.801	0.83	0.77
2		烯丙基甲基硫醚	5.481	0.08	0.08
3		二甲基二硫醚	9.861	0.04	0.04
4		二烯丙基硫醚	13.569	0.78	0.65
5		2,5-二甲基噻吩	14.331	0.07	ND
6		(Z)-烯丙基-丙烯基硫醚	16.03	0.14	0.10
7		3,4-二甲基噻吩	16.219	0.08	0.07
8		(E)-烯丙基-丙烯基硫醚	16.528	0.17	0.12
9		2,4-二甲基噻吩	20.194	1.44	1.27
10		(Z)-1-甲基-2-丙烯基二硫醚	20.818	0.43	0.40
11		烯丙基甲基二硫醚	21.995	2.16	1.81
12		(E)-1-甲基-2-丙烯基二硫醚	22.471	2.90	2.23
13		1-烯丙基-2-异丙基二硫醚	31.796	0.22	0.12
14		烯丙基丙基二硫醚	32.246	0.08	0.33
15		1-[(E)-1-丙烯基]-2-[(Z)-1-丙烯基]二硫醚	33.849	0.10	ND
16		丙-1-烯-1-丙基-2-烯-1-基二硫醚	34.172	5.84	5.05
17		二烯丙基二硫醚	35.327	20.50	19.71
18		(E)-1-烯丙基-2-丙烯基二硫醚	35.755	28.49	25.80
19		1,2-二 ((E)-丙-1-烯-1-基) 二硫醚	36.762	0.10	ND

续表6

序号	化合物种类	化合物名称	保留时间/min	相对含量/%	
				处理前	处理后
20	硫化物	1,2-二硫杂-3-环戊烯	38.006	4.13	4.43
21		甲基烯丙基三硫醚	42.135	8.83	10.72
22		(E)-1-烯丙基-3-丙烯基三硫醚	42.675	1.57	2.30
23		2-巯基-3,4-二甲基-2,3-二氢噻吩	44.834	0.13	0.15
24		4-甲基-1,2,3-三硫环戊烷	49.41	0.06	0.17
25		丙基烯丙基三硫醚	49.726	0.18	0.32
26		3-乙烯基-1,2-二噻-4-烯	49.957	2.85	2.92
27		二烯丙基三硫醚	51.675	14.99	15.86
28		2-乙烯基-1,3-二噻-4-烯	52.959	0.54	0.52
29		2-氨基-4,5-二甲基噻唑	55.74	0.12	0.13
30		3,4-二氰基噻吩	67.844	0.55	0.73
31		2-亚乙基-[1,3]二噻烷	50.899	ND	0.08
32	酸类	氨基甲磺酸	3.672	0.18	0.10
33		辛酸	57.011	ND	0.14
34		正癸酸	62.75	ND	0.26
35		十二酸	66.805	ND	0.09
36		正十六烷酸	69.724	ND	0.26
37	醛类	2-丙烯醛	3.13	0.09	0.11
38		2-甲基-2-丁烯醛	11.16	ND	0.09
39		5-羟甲基糠醛	67.331	0.11	0.34
40	酯类	酞酸二丁酯	71.017	0.29	0.18
41		十六烷酸甲酯	61.096	ND	0.03
42		棕榈酸异丙酯	61.658	ND	0.06
43		水杨酸-2-乙基己酯	63.805	ND	0.02
44	醇类	烯丙硫醇	4.834	0.63	0.66
45		2-丙烯醇	12.308	0.12	0.15
46		3-异丙基-4-甲基-癸-1-烯-4-醇	58.394	0.17	0.16

注：ND表示未检出。

3 结论

本研究采用不同处理时间、处理高度、装载量对脱水蒜片进行低温等离子体处理，结果表明低温等离子体处理蒜片的最佳减菌工艺为：处理时间3 min、处理高度3 cm、装载量1 kg/m^2，在此条件下的减菌率为98.11%。蒜片经等离子体处理后L^*、a^*、b^*变化不显著，色差为3.14。同时，低温等离子体处理后蒜片中大蒜素含量升高了31.68%，对部分挥发性风味成分有一定的降解作用，但其机制有待后续研究进一步证实和明确。本研究证明了低温等离子体可以作为脱水蒜片的一种新型非热减菌技术，且对脱水蒜片的品质破坏较小，具有广阔的应用前景，为脱水蒜片非热减菌提供了新思路。

参考文献

[1] CHOI J Y, LIM Y J, KANG J M, et al. Changes in bacterial composition and metabolite profiles during kimchi fermentation with different garlic varieties [J]. Heliyon, 2024, 10 (2): e24283.

[2] SHARMA P, SHARMA S R, DHALL R K, et al. Physio-chemical behavior of γ-irradiated garlic bulbs under ambient storage conditions [J]. Journal of Stored Products Research, 2020, 87: 101629.

[3] HAN B Y, DING C J, JIA Y, et al. Influence of electrohydrodynamics on the drying characteristics and physicochemical properties of garlic [J]. Food Chemistry- X, 2023, 19: 100818.

[4] YOUNIS M, ABDELKARIM D, El-ABDEIN A Z. Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic

slices [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2018, 25(2): 332-338.

[5] LAMIDI R O, JIANG L, WANG Y D, et al. Techno-economic analysis of a biogas driven poly-generation system for postharvest loss reduction in a Sub-Saharan African rural community [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 196: 591-604.

[6] 张俊,张忆洁,宋芳芳,等.蒜片及蒜粉的加工技术[J].农村科技,2018,8:47-48.

[7] 刘艳霞.蒜粉减菌技术研究[D].泰安:山东农业大学,2022.

[8] 金帅帅,罗光辉,周娜娜,等.果蔬干制品加工过程中对微生物的控制及其灭菌工艺的研究[J].粮油加工,2014,2:73-76,84.

[9] TIWARI B K, O'DONNELL C P, CULLEN P J. Effect of non thermal processing technologies on the anthocyanin content of fruit juices [J]. Trends in Food Science & Technology, 2009, 20(3): 137-145.

[10] 胡杰,石启丽,冯文伦.非热杀菌技术及其在各食品领域中的应用[J].食品安全导刊,2024,14:129-135.

[11] RASTOGI N K, RAGHAVARAO K S M S, BALASUBRAMANIAM V M, et al. Opportunities and challenges in high pressure processing of foods [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2007, 47 (1): 69-112.

[12] GUO Y L, CUI Y J, CHENG M, et al. Effects of low-temperature plasma modification on properties of CEO-SBA-15/potato starch film [J]. Industrial Crops & Products, 2022, 187: 115440.

[13] SHENG X W, YAN W J, ZHAO L L, et al. Cold plasma-222 nm UV: A new cold sterilizing method for food contact surfaces [J]. Food Control, 2023, 152: 109870.

[14] CHAVAN P, PRENDEVILLE J, HAMID, et al. Cold Plasma Treatment in Food Packaging: Effects on Material Properties, Sterilization, and Safety Considerations [M]. Elsevier Inc, 2024.

[15] PANKAJ S K, BUENO-FERRER C, MISRA N N, et al. Applications of cold plasma technology in food packaging [J]. Trends in Food Science & Technology, 2014, 35(1): 5-17.

[16] YAWUT N, MEKWILAI T, VICHIANSAN N, et al. Cold plasma technology: Transforming food processing for safety and sustainability [J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2024, 18: 101383.

[17] CHEN Y, CHEN G, WEI R, et al. Quality characteristics of fresh wet noodles treated with nonthermal plasma sterilization [J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124900.

[18] ANSARI A, PARMAR K, SHAH M. A comprehensive study on decontamination of food-borne microorganisms by cold plasma [J]. Food Chemistry: Molecular Sciences, 2022, 4: 100098.

[19] 徐艳阳,李雪凤.低温等离子体处理对生姜片杀菌效果及品质的影响[J].中国食品学报,2023,23(2):192-201.

[20] 田方,徐咏菁,孙志栋,等.低温等离子体处理对鲜切猕猴桃片微观结构及理化特性的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(21):167-174.

[21] ZERAATPISHEH F, TABATABAEI Y F, SHAHIDI F. Investigation of effect of cold plasma on microbial load and physicochemical properties of ready-to-eat sliced chicken sausage [J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(10): 3928-3937.

[22] PONRAJ S B, SHARP J A, KANWAI J R, et al. Argon gas plasma to decontaminate and extend shelf life of milk [J]. Plasma Processes and Polymers, 2017, 14 (11): 1600242.

[23] 张斌.蒜米、蒜泥加工过程中品质变化规律及影响因素的研究[D].泰安:山东农业大学,2021.

[24] 陈海涛,孙杰,蒲丹丹,等.萝卜炖牛腩挥发性风味成分的分离与鉴定[J].化学研究与应用,2016,28(7):977-986.

[25] 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.

[26] REITER J, HVBBERS A M, ALBRECHT F, et al. Allicin, a natural antimicrobial defence substance from garlic, inhibits DNA gyrase activity in bacteria [J]. International Journal of Medical Microbiology, 2020, 310(1): 151359.

[27] XIE Y, GENG J, HAN J, et al. Effect of drying technology on the physical, rehydration, flavor, and allicin content of single-clove garlic [J]. Industrial Crops & Products, 2024, 222 (P5): 120020.

[28] 周江菊.顶空固相微萃取气质联用分析大蒜挥发性风味成分[J].中国调味品,2010,35(9):95-99.

[29] 张振甫.低温等离子体板式净化器净化效率影响因素研究[J].高速铁路新材料,2023,2(2):13-16.

[30] 陆洋,席剑飞,顾中铸,等.不同电源及放电形式下低温等离子体降解挥发性有机物的研究进展[J].应用化工,2023,52(4):1175-1181,1187.