

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2025.02.018

李金东, 张忠杰, 胡科, 等. UV-LED 和冷等离子体对染菌玉米及其附着黄曲霉的影响[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(2): 129-137.

LI J D, ZHANG Z J, HU K, et al. The effect of treatments with UV-LED and high voltage pulse cold plasma on infected corn and *Aspergillus flavus*[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(2): 129-137.

UV-LED 和冷等离子体对染菌玉米及其附着黄曲霉的影响

李金东^{1,2}, 张忠杰¹, 胡科³, 张贵州³, 尹君¹✉

- (1. 国家粮食和物资储备局科学研究院 粮食储运研究所, 北京 100037;
2. 中央储备粮合肥直属库有限公司, 安徽 合肥 230000;
3. 中科芯禾(深圳)科技有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要: 探讨 265 nm-LED 和高压脉冲冷等离子体处理对含水量为 14% 的染菌玉米的脂肪酸值以及黄曲霉 (*Aspergillus flavus*) 孢子灭活效率的影响, 前者结果显示: 265 nm-LED 和高压脉冲冷等离子体均能有效灭活玉米上接种的黄曲霉孢子。经过处理 10 min 后, 真菌灭活率可达 46%, 而后者仅在 20% 以下。对脂肪酸值无显著性影响 ($P>0.05$), 但两种处理方式均对玉米籽粒表面以及淀粉颗粒造成一定程度的损伤。对于黄曲霉孢子来说, 这两种处理方式都会导致细胞外壁破损, 使得其内部物质流出, 导致孢子失活。

关键词: 紫外发光二极管 (UV-LED); 高压脉冲冷等离子体; 黄曲霉; 电镜

中图分类号: TS205 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2025)02-0129-09

网络首发时间: 2025-02-28 09:14:41

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20250227.1755.004>

The Effect of Treatments with UV-LED and High Voltage Pulse Cold Plasma on Infected Corn and *Aspergillus flavus*

LI Jin-dong^{1,2}, ZHANG Zhong-jie¹, HU Ke³, ZHANG Gui-zhou³, YIN Jun¹✉

- (1. Grain Storage and Transportation Research Institute, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China
2. Central reserve grain Hefei direct warehouse Co., Ltd., Hefei, Anhui 230000, China
3. Seedlight (Shenzhen) Technology Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong 518057, China)

Abstract: The objective of this study was to investigate the effects of 265 nm-LED and high-voltage pulsed cold plasma treatments on the quality of maize with a water content of 14%, as well as the inactivation mechanism of *Aspergillus flavus* spores. The experimental results indicate that both 265 nm-LED and high-voltage pulsed cold plasma effectively inactivate fungal infections on corn. Specifically, after 10 min of

收稿日期: 2024-07-03; 修回日期: 2024-08-24; 录用日期: 2024-08-26

基金项目: 横向课题“高功率深紫外芯片技术和应用装备联合研发”(H22030)

Supported by: Horizontal Research Project “Collaborative Research and Development of High-power Deep Ultraviolet Chip Technology and Its Application Equipment” (No. H22030)

第一作者: 李金东, 男, 1999 年出生, 硕士, 研究方向为食品工程, E-mail: 1277363911@qq.com

通信作者: 尹君, 女, 1981 年出生, 博士, 研究员, 研究方向为农业电气化与自动化, E-mail: yjun@ags.ac.cn

265 nm-LED treatment, the inactivation fungal rate of infected corn reached 46%, while high-voltage pulsed cold plasma treatment only achieved an inactivation rate of less than 20%. Furthermore, no significant changes was observed on fatty acid values ($P>0.05$), but both treatments caused moderate damage to the surface of corn kernels and granules. Regarding *Aspergillus flavus* spores, both treatments disrupted the outer cell wall, leading to leakage of intercellular components and eventual spore inactivation.

Key words: UV-light emitting diode; high-voltage pulsed cold plasma; *Aspergillus flavus*; electron microscope

2023 年全国粮食播种面积为 1.19 亿 ha, 比 2022 年增加 63.64 万 ha。其中玉米的播种面积为 4 420 万 ha, 比去年增加 114.88 万 ha, 增长了 2.7%。与此同时, 2023 年玉米产量较上一年增长了 4.2%, 从 2 888.4 亿 kg 增加到 3 004.8 亿 kg。然而, 玉米易受黄曲霉、黑曲霉等真菌污染, 在保持丰产的同时如何确保玉米质量成为当前迫切需要解决的技术难题。

研究表明, 紫外光对饮料、水果、小麦粉等食品具有良好的灭菌效果, 并可有效应用于食品的流通、加工和储存等环节的微生物灭活, 对其理化特性未造成不利影响^[1-2]。冷等离子体技术也被证实对微生物具有良好的灭活效果, Garate 等^[3]使用电晕放电等离子体在短时间内成功杀死大肠杆菌及枯草芽孢杆菌的孢子。Zahoranová 等^[4]发现冷等离子体对小麦种子表面微生物群落生长的抑制作用与处理时间呈正相关。Lee 等^[5]研究发现低温等离子体处理糙米 20 min, 其中的蜡状芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌和大肠杆菌 O157:H7 的细菌灭活效果最佳。Los 等^[6]使用介质阻挡放电冷等离子体处理大肠杆菌和枯草芽孢杆菌时, 发现这些细菌数量显著降低, 且该方法的灭活效果取决于细菌菌株、培养基的成分。Ozen 等^[7]使用低温等离子体处理牛奶, 处理 3 min 后观察到大肠杆菌减少 54%。不同放电形式的等离子体技术对微生物均有一定灭活效果, 但对不同微生物的灭活效果均存在一定差异性, 而高压脉冲冷等离子体技术与 265 nm-LED 对真菌的灭活效果对比以及玉米品质变化鲜有研究。

本研究将 265 nm-LED 紫外灯和高压脉冲冷等离子体设备作为主要工具。以染菌玉米和黄曲霉孢子悬浮液为主要研究对象, 探讨了两套设备对染菌玉米以及黄曲霉孢子的影响, 旨在为设备

产业化应用提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黄曲霉菌株: 国家粮食和物资储备局科学研究院粮食储运研究所微生物实验室分离鉴定和保藏; 玉米: 中储粮地方粮库提供; 马铃薯葡萄糖琼脂培养基 (Potato dextrose agar, PDA): 北京陆桥技术股份有限公司; 磷酸缓冲盐 (Phosphate buffered saline, PBS): 北京索莱宝科技有限公司; 无水乙醇 (分析纯)、95%乙醇 (分析纯): 国药集团化学试剂有限公司; 氢氧化钾-乙醇滴定溶液: 北京谱析标准技术有限公司。

1.2 仪器与设备

MLS-3781L-PC 高压蒸汽灭菌锅: 日本三洋电机公司; BMJ-250C 霉菌培养箱: 上海博迅医疗生物仪器股份有限公司; Axio scope A1 科研级生物显微镜: 德国蔡司公司; Evolution 220 紫外可见分光光度计、HERAsafe KS12 生物安全柜: 美国赛默飞世尔科技公司; Hitachi S-3000N 扫描电子显微镜、E-1010 离子溅射仪、Hitachi S-3000N 扫描电子显微镜: 日本日立; LGJ-10C 真空冷冻干燥器: 四环福瑞科仪科技发展 (北京) 有限公司; Vortex-Genie 2 涡旋震荡器: 奥然科技有限公司; MYP11-2 恒温磁力搅拌器: 上海梅颖浦仪器仪表制造有限公司; 3H20RI 智能高速冷冻离心机: 湖南赫西仪器装备有限公司; UV-LED (265 nm) 设备、高压脉冲冷等离子设备 (频率: 50/60 HZ; 输出电压: (30 ± 1.5) KV; 负载功率: 12~28 W): 中科芯禾科技有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品前处理

将玉米分批放入装有 0.05% 二氧化氯消毒液

的无菌器皿中,浸泡消毒 30 s,再用足量的无菌水清洗 3 次,单批次玉米洗涤时间不超过 120 s。后放入 60 ℃的热风干燥设备,每隔 20 min 在干燥设备中随机取 5 g 玉米,放入快速水分测定仪中测量玉米水分,最终将玉米水分控制在 14.0%w.b.(玉米入库时水分需 $\leq$ 14.0% w.b.)。

将 10 mL 浓度为 1×10^7 CFU/mL 的黄曲霉孢子悬浮液喷撒至密封袋内 10 kg 无菌玉米上,使黄曲霉孢子悬浮液在玉米上的浓度为 10^4 CFU/g,手动摇晃装有玉米的密封袋 30 s,确保黄曲霉孢子悬浮液均匀附着在玉米表面,置于 30 ℃的培养箱中避光培养。培养 3 d,每日取 10 g 样品,进行孢子计数,当样品中的黄曲霉孢子浓度大于 10^6 CFU/g 时停止培养。

1.3.2 真菌灭活

取 20 g 接种真菌的玉米样品,置于干净的培养皿底部,保证玉米籽粒无重叠;再用 265 nm-LED 于辐照距离 5 cm、功率 10 W 的条件下处理玉米样品 1、2、3、4、5、10 min,且每个处理时间的一半时将培养皿内的玉米籽粒翻面。后倒入培养基,使用保鲜膜密封,放入 30 ℃培养箱中避光培养 4 d,进行菌落计数。高压脉冲冷等离子体处理条件与 265 nm-LED 处理条件一致。灭活率按式(1)计算:

$$\text{灭活率} = \frac{N_0 - N}{N_0} \times 100\% \quad \text{式(1)}$$

1.3.3 玉米脂肪酸值的计算

根据 GB/T20570—2015《玉米储存品质判定规则》中的手工滴定法测定。

1.3.4 玉米籽粒表观以及淀粉颗粒的观测

在玉米样品中抽取 10 粒完整、大小一致的玉米籽粒,用解剖刀沿玉米顶端 1 mm 处及尾部 1 mm 处横切去两端,选择靠近玉米糊粉层的胚乳淀粉进行观察^[8]。将切后的玉米籽粒,置于真空冷冻干燥机内,冷冻干燥 24 h。将玉米样品固定在样品盘,离子溅射仪对样品进行喷金,经电子显微镜观察玉米籽粒的外观形态和的淀粉颗粒组织结构。

1.3.5 电导率检测

将处理后的黄曲霉孢子悬浮液在 10 000 r/min 下离心 10 min,取上清液。因胞内核酸在紫外

260 nm 处有最大吸收峰,蛋白质在 280 nm 处有最大吸收峰,用紫外分光光度计分别检测 OD 260 nm、OD 280 nm,由此反应胞内核酸和蛋白质的泄露情况。重复上述离心步骤,用笔型电导率仪器测定离心后的胞外上清液电导率。

1.3.6 微观结构检测

参考 Li^[9]的方法,将两种技术处理后的黄曲霉孢子悬浮液在 10 000 r/min 下离心 5 min,弃去上清液,保留沉淀物并加入 pH 7.2 的固定液(2%多聚甲醛和 2.5%戊二醛的混合液),置于 4 ℃培养箱固定 8 h;再离心去掉固定液将沉淀物用 PBS 溶液冲洗 3 次(10 000 r/min, 10 min);用浓度为 30%、50%、70%、95%的乙醇梯度脱水(10 000 r/min, 10 min),后用无水乙醇脱水 3 次(10 000 r/min, 10 min);将沉淀物置于真空冷冻干燥机冻干,用离子溅射喷金仪喷金 120 s(加速电压 4 kV),最后用扫描电镜(Scanning electron microscope, SEM)观察,设置电压 5.0 kV,放大 10 000 倍。

1.4 数据处理

所有实验均进行至少 3 次平行测定,用 Excel 2021 进行数据统计与前期处理。SPSS 进行分析, $P < 0.05$ 表示在统计学上有显著差异。使用 Excel 2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 对玉米上真菌灭活率的影响

霉菌是危害粮食的主要微生物,其次级代谢产物真菌毒素会对人畜健康造成威胁。如表 1 所示,玉米上真菌的灭活率随着 265 nm-LED 处理时间的增长而显著上升($P < 0.05$)。经过高压脉冲冷等离子体处理的灭活率在 11%~19%之间,各处理时间的玉米真菌灭活率均没有显著差异($P > 0.05$)。

短波紫外线(Short-wave ultraviolet, UVC)主要作用于微生物中的脱氧核糖核酸,通过生成嘧啶二聚体阻止其转录与复制等活动^[10];同时物质水分可能会影响高压脉冲冷等离子体的玉米真菌灭活率,水分含量增大其所含的自由水增多,促使冷等离子体电离的活性物质增多从而提高灭活率^[11]。冷等离子体主要通过产生活性物质与脂质反应作用于微生物的外壁,使其破裂并导致死亡^[12]。

表 1 不同处理方式对 14%含水量的玉米灭菌率
Table 1 Sterilization rate of corn with 14% moisture content under different treatment methods

处理时间/min	1	2	3	4	5	10
A	5.88	17.65	19.61	31.37	32.35	46.08
	17.65	16.67	26.47	25.49	36.27	43.14
	14.71	17.65	24.51	32.35	25.49	50.00
B	10.98	25.22	23.44	18.10	10.98	14.54
	9.20	16.32	7.42	11.87	14.54	23.44
	11.87	14.54	16.32	16.32	16.32	12.76

注：A、B 分别为 265 nm-LED 处理、高压脉冲冷等离子体处理，不同处理时间下真菌孢子灭活率的平均值。

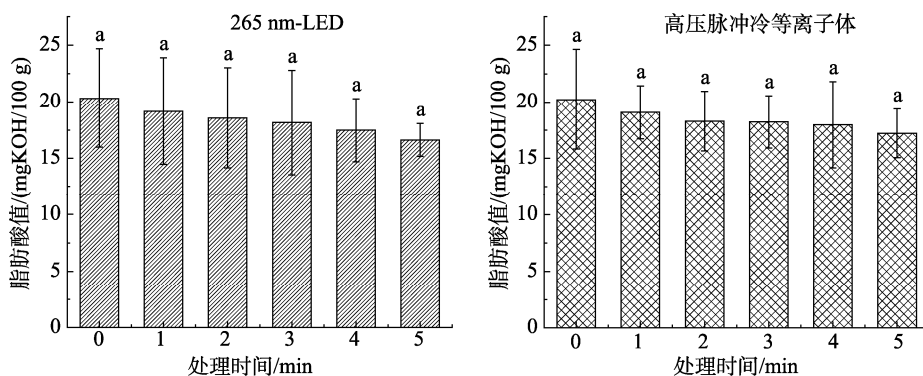
Note: A and B represent the average inactivation rates of fungal spores under treatment with 265 nm LED and high-voltage pulsed cold plasma, respectively, at different treatment durations.

2.2 对玉米脂肪酸值的影响

脂肪酸值是衡量游离脂肪酸含量的重要指标。在外界因素的影响下,玉米籽粒中不饱和脂肪酸发生氧化反应,脂肪酸值增加导致玉米发生变质^[13],故它可作为判断储藏玉米新鲜程度的敏感指标之一。图 1 为不同处理技术对水分含量为 14%的玉米脂肪酸值的影响。经两种技术处理后的玉米脂肪酸起始值分别为 20.34 mg KOH/100 g 与 20.23 mg

KOH/100 g; 在处理时间为 1 min 时,分别下降 1.16、1.13 mg KOH/100 g; 在处理时间为 5 min 时,分别下降 3.71、3.00 mg KOH/100 g; 在处理时间为 10 min 时,脂肪酸值下降最多分别为 3.97、3.11 mg KOH/100 g,但是所有处理时间下的数值与对照组相比均没有显著性差异 ($P>0.05$)。如图可知,经 265 nm-LED 处理后的玉米脂肪酸值下降趋势要大于高压脉冲冷等离子体处理的。

万忠民^[14]认为紫外光可能促进粮食籽粒中的脂肪氧化,在辐照过程中可能产生臭氧^[15],且臭氧的强氧化性促使脂肪分解,导致游离脂肪酸数量减少;另外紫外光可作用蛋白质,引起粮食籽粒的脂肪酶活性降低,因此 265 nm-LED 处理玉米的脂肪酸值有所下降。本研究中高压脉冲冷等离子体同样使玉米脂肪酸值有所下降。王若兰^[16]的研究表明冷等离子体对小麦淀粉的脂肪酸值有所下降,而郑哲^[17]研究的低温冷等离子体对玉米品质的影响,结果为脂肪酸值的上升。出现不同的结果,可能与设备的处理参数以及与放电类型存在关系。



注：不同小写字母代表组间存在显著差异 ($P<0.05$), 下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between groups ($P < 0.05$), and the same applies hereafter.

图 1 不同处理技术对的 14%水分玉米脂肪酸值变化

Fig.1 Changes in fatty acid value of 14% moisture corn treated with different treatment techniques

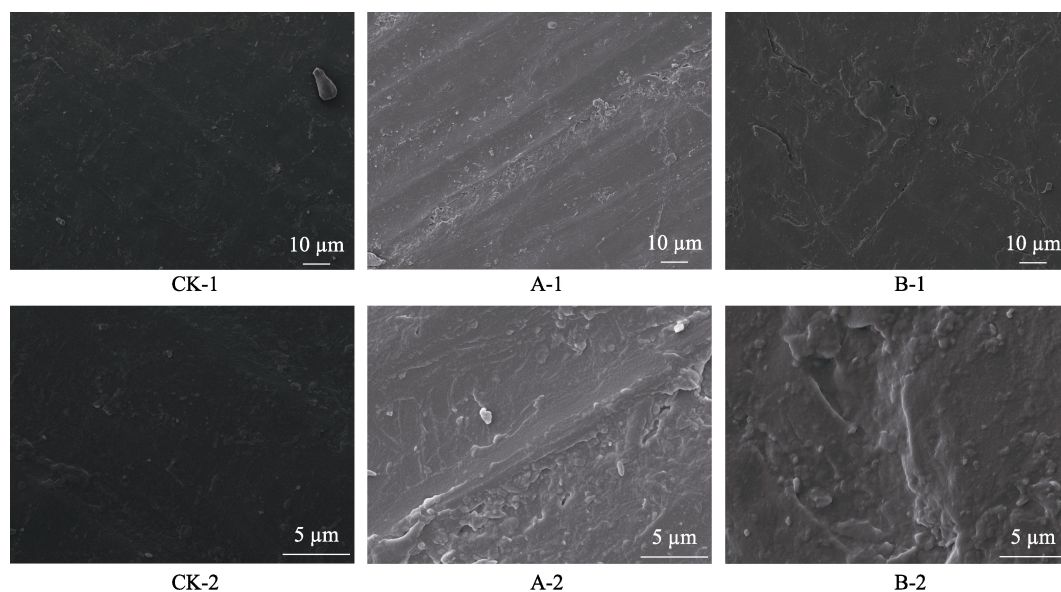
2.3 对玉米籽粒外观以及淀粉颗粒的影响

2.3.1 两种处理方法对玉米表观形态的影响

图 2 为 14%玉米种皮(背面)在不同倍数显微镜下的 SEM 图。对照组 CK-1、CK-2 显示,在两种不同放大倍数下,玉米表面平整,无缝隙及褶皱;A-1、A-2 与对照组相比,玉米表面出现清晰的条纹。当放大 5 000 倍时,A-2 与 CK-2 相比,

玉米籽粒表面有明显的条纹及褶皱出现;B-1、B-2 是高压脉冲冷等离子体处理 10 min 后的玉米表观 SEM 图,与对照组相比,处理后的玉米表面同样出现沟壑及褶皱,放大 5 000 倍后可见明显褶皱及少量孔洞。结果表明,两种处理方法均会对玉米籽粒表面有一定损伤。

李瑞敏^[8]提出冷等离子中的活性氧、活性氮



注: CK 是未处理组, A、B 分别为 265 nm-LED 处理组、高压脉冲冷等离子体处理组; 1: SEM 放大 1 000 倍; 2: SEM 放大 5 000 倍, 下同。

Note: CK is the untreated group, A and B represent the 265 nm-LED treatment group and the high-voltage pulsed cold plasma treatment group, respectively; 1: SEM magnification 1 000 times; 2: SEM magnification 5 000 times, and the same applies hereafter.

图 2 两种处理方式后的玉米表现形态扫描电子显微图

Fig.2 Scanning electron microscopy images of maize apparent morphology after two processing methods

及高能电子等活性物质, 可以跟玉米表面蜡质层的大分子化合物发生电荷转移, 发生刻蚀现象。而紫外辐照同样可以产生活性氧^[18]。

2.3.2 两种处理方法对玉米淀粉微观结构的影响

图 3 为 14%玉米籽粒经过两种处理后的玉米淀粉颗粒 SEM 图。由 CK-1、CK-2 可以看出未处理的淀粉颗粒是无规则紧密组合在一起, 并且呈

光滑的圆球形, 颗粒之间由完整的机制薄层机制蛋白质连接。

从 A-1、A-2 可以看出, 经过 265 nm-LED 处理 10 min 后的玉米淀粉, 表面出现很多凸起, 并伴有少量的孔洞, 但淀粉颗粒间排列与对照相似; 而经高压脉冲冷等离子体处理 10 min 的淀粉颗粒如 B-1、B-2, 淀粉颗粒表面出现粘液状物体, 主

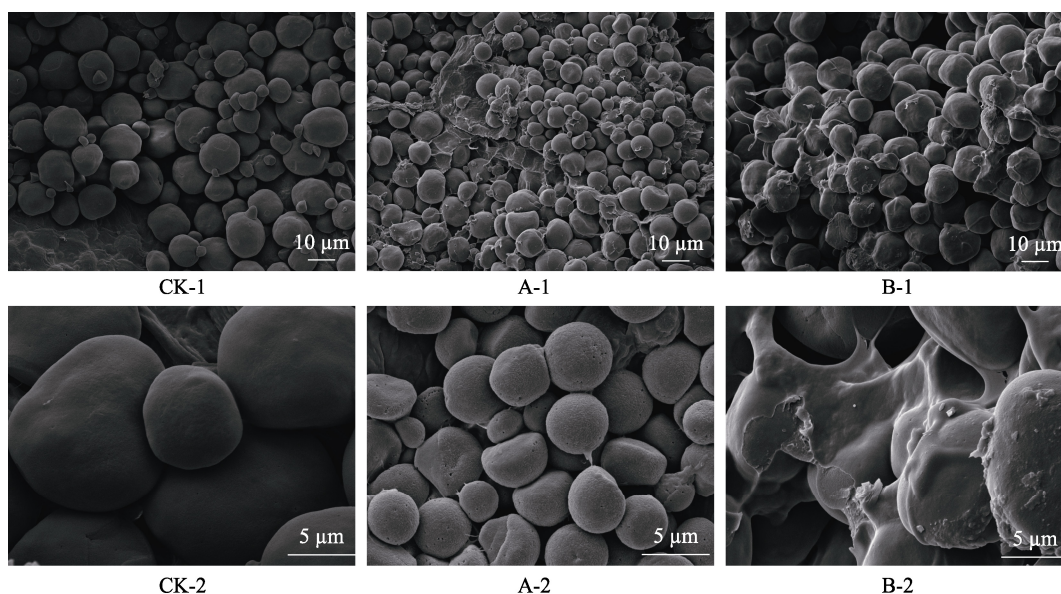


图 3 两种处理方式后的玉米淀粉微观结构扫描电子显微图

Fig.3 Scanning electron microscopy images of the microstructure of corn starch after two processing methods

要是淀粉颗粒之间的基质蛋白裸露甚至发生断裂,两种处理方法各产生的活性物质是与玉米籽粒内部的大分子物质发生反应生成的^[19]。

2.4 对黄曲霉孢子内容物的影响

2.4.1 内容物吸光度的变化

核酸与蛋白质两种生物体内的大分子一般不能由细胞膜中的运输通道从胞内运输至胞外,但如果细胞膜的通透性发生改变或细胞膜破损,这些物质将泄露到胞外。胞外溶液的吸光度数值改变说明胞外溶液的某物质浓度改变,因此可以通过 OD 260 nm 与 OD 280 nm 判断细胞膜的破损情况^[20]。

如表 2 所示,未处理组的 OD 260 nm 值为 0.028,当处理时间为 3 min 时,265 nm-LED、高压脉冲冷等离子体的吸光度值分别上升至 0.031、0.029,说明核酸开始发生泄露;随着处理时间的增长,两种技术处理后的吸光度值不断升高,在

30 min 时,两种技术处理的吸光度值分别达到最高值 0.097 (265 nm-LED)、0.069 (高压脉冲冷等离子体)。

由表 2 可知,经高压脉冲冷等离子体处理的黄曲霉孢子 OD 260 nm 值显著上升 ($P<0.05$),而经过 265 nm-LED 处理的上升更加显著 ($P<0.05$)。由此说明在处理时间为 0~30 min,经过 265 nm-LED 处理的黄曲霉孢子核酸泄露程度要比高压脉冲冷等离子体处理的更加严重。

蛋白质泄露的情况与核酸情况相似,未处理组的 OD 280 nm 值为 0.011,在处理 3 min 时两种处理的吸光度值分别上升至 0.042 (265 nm-LED)、0.027 (高压脉冲冷等离子体),蛋白质发生泄露,并且在 30 min 时,两种处理方法的吸光度值达到最高。由表 2 可知,随着处理时间的增长,265 nm-LED 处理对黄曲霉孢子内容物的泄露更加显著 ($P<0.05$)。

表 2 不同处理方式对黄曲霉孢子内容物的影响

Table 2 Effects of different treatment methods on the content of *Aspergillus flavus* spores

处理时间/min		0	3	5	10	20	30
OD _{260 nm}	A	0.028±0.001 ^c	0.031±0.004 ^c	0.047±0.008 ^d	0.060±0.012 ^c	0.086±0.004 ^b	0.097±0.007 ^a
	B	0.028±0.001 ^c	0.029±0.004 ^c	0.030±0.003 ^c	0.045±0.004 ^b	0.074±0.010 ^a	0.069±0.003 ^a
OD _{280 nm}	A	0.011±0.004 ^d	0.042±0.005 ^c	0.058±0.005 ^b	0.066±0.008 ^b	0.116±0.004 ^a	0.121±0.005 ^a
	B	0.011±0.004 ^c	0.027±0.005 ^{bc}	0.027±0.006 ^{bc}	0.031±0.013 ^b	0.069±0.016 ^a	0.085±0.008 ^a

注: A、B 分别为 265 nm-LED 处理、高压脉冲冷等离子体处理,不同处理时间下黄曲霉孢子吸光度的平均值±标准差。同一行中不同小写字母代表差异显著 ($P<0.05$),下同。

Note: A and B represent the average absorbance ± standard deviation of aflatoxin B1 spores under different treatment times for 265 nm-LED treatment and high-voltage pulse cold plasma treatment, respectively. Different lowercase letters in the same row indicate significant differences ($P<0.05$), the same as below.

结果表明,经两种技术处理后黄曲霉孢子中核酸及蛋白质泄露情况与处理时间呈正相关。同时可以判断出,它们均可以使黄曲霉孢子的细胞外壁受损,胞内核酸与蛋白质大分子通过非正常运输方式移动到胞外。

2.4.2 胞外溶液电导率的变化

王梓源^[21]研究表明当微生物受到外界影响时,会引发胞内的离子流向胞外,从而改变微生物胞外溶液电导率。为进一步探究两种处理方法对黄曲霉细胞外壁的破坏程度,通过处理及离心后的上清液电导率进一步说明黄曲霉孢子细胞外壁的通透性。

由图 4 可知,两种不同处理方法对黄曲霉孢

子胞外溶液电导率的影响,未处理组的初始电导率为 18.53,当处理时间为 3 min 时,265 nm-LED 与对照组出现差异 ($P<0.05$),而高压脉冲冷等离子体与对照组未出现差异 ($P>0.05$),随着处理时间的增长,各处理组与对照组的差异变得更加明显 ($P<0.05$),在 30 min 时,经过两种技术处理后胞外溶液电导率均达到最高值。

结果说明,经过 265 nm-LED 处理的黄曲霉孢子胞内离子流失程度最为严重。而胞外溶液电导率的改变说明,黄曲霉孢子的细胞外壁被损伤,两种处理方法均可对黄曲霉孢子外壁完整性造成不利影响。

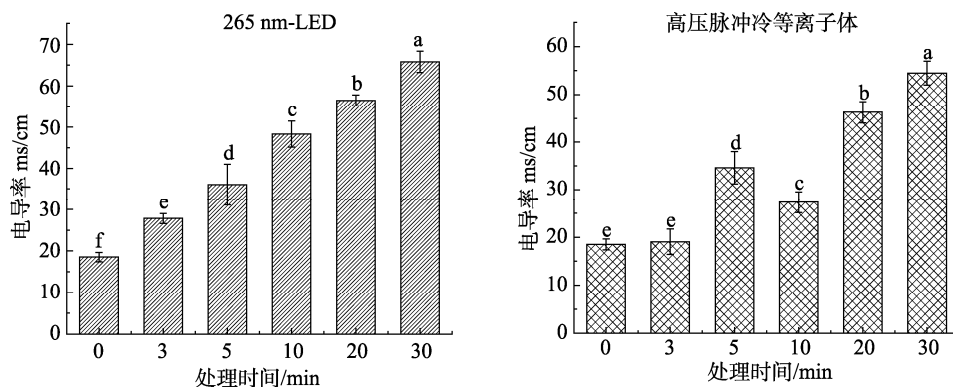


图 4 不同处理方式对黄曲霉孢子胞外溶液电导率的影响

Fig.4 Effect of different treatment methods on the conductivity of extracellular solution of *Aspergillus flavus* spores

2.5 对黄曲霉孢子外观的影响

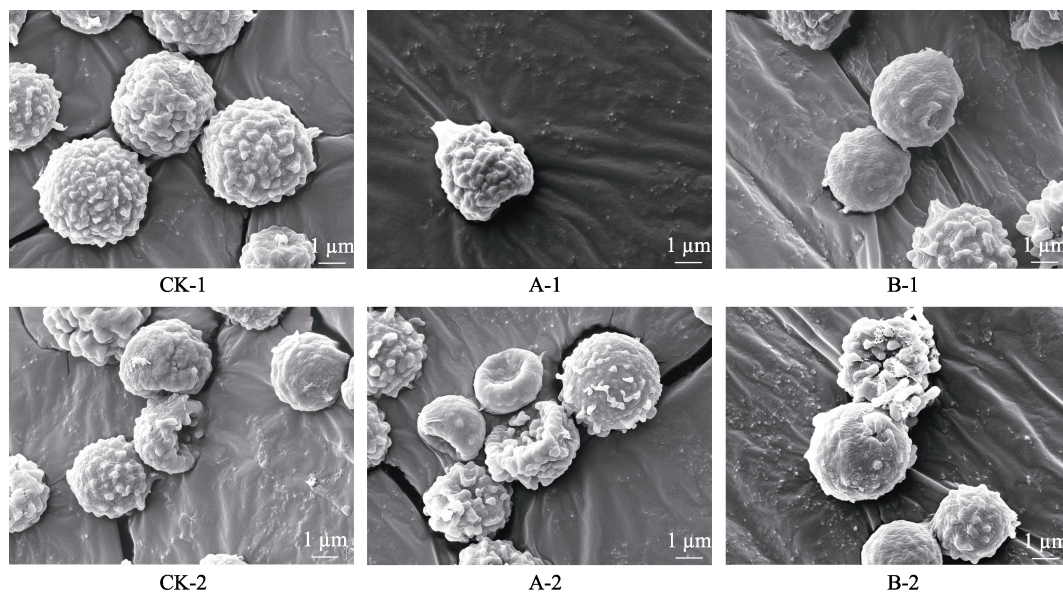
由图 5 可知, 未经处理的黄曲霉孢子形态丰满呈球形、表面完整并伴随许多凸起。经过 265 nm-LED 处理的孢子, 在 5 min 以内, 孢子大小与正常孢子的外形差异较小, 但孢子原表面的凸起变得钝化, 表面变得更加平滑; 在 5 min 之后, 孢子表面依旧平滑同时开始出现凹陷。

由图 6 可知, 经过高压脉冲冷等离子体处理的黄曲霉孢子均存在凹陷的区域, 但与 265 nm-LED 处理的黄曲霉孢子不同的是, 其表面依旧存在大量凸起, 该凸起存在钝化的趋势。这与以上胞内物质外流的结果均相对应, 随着处理时间的

增加, 更多的胞内物质向胞外流出。

3 结论

本研究结果表明经过两种处理技术对玉米上的真菌具有一定灭活效果。对比 265 nm-LED 和高压脉冲冷等离子体的处理结果可知, 265 nm-LED 在灭菌效果更加优越, 在处理 10 min 后, 经 265 nm-LED 处理后的样品灭活率可达 46%, 而高压脉冲冷等离子体仅保持在 20% 以下。经过两种处理的玉米脂肪值均没有显著性变化 ($P>0.05$), 而玉米籽粒表面会出现明显的条纹带以及刻蚀现象。同时, 处理后的黄曲霉孢子内容物会出现显著泄露 ($P<0.05$), 并与处理时间呈正相关; 经过



注: K 为未处理组; A 为 265 nm-LED 处理组; 后缀数字分别为处理时间, 如: 0 为处理 0 min, 下同。

Note: K is the untreated group; A is the 265 nm-LED treatment group; the suffix numbers represent treatment times, e.g., 0 for 0 minutes of treatment, and the same applies hereafter.

图 5 265 nm-LED 处理后的黄曲霉孢子扫描电子显微图

Fig.5 Scanning electron microscopy of *Aspergillus flavus* spores after 265 nm LED treatment

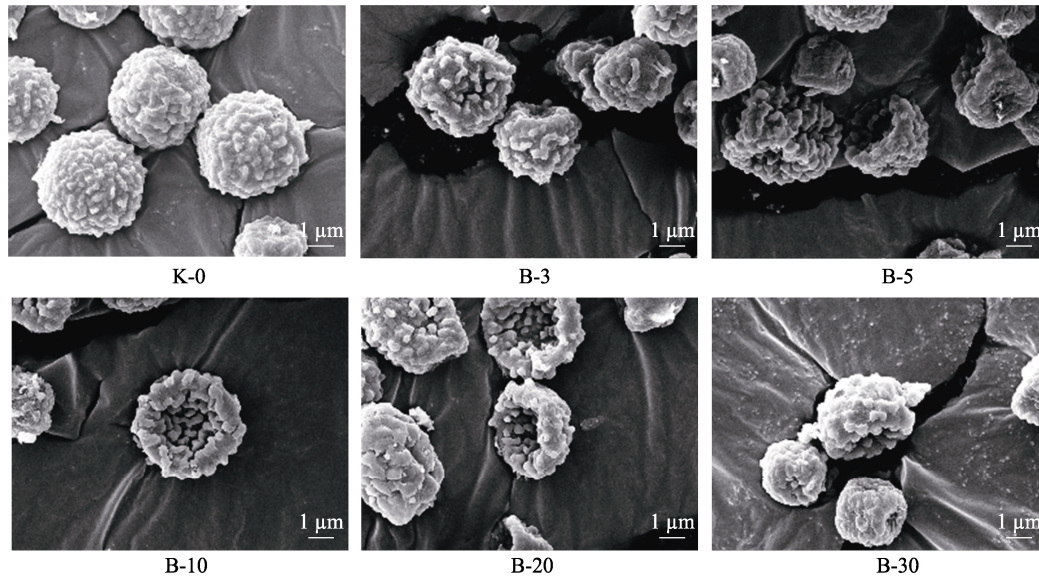


图 6 高压脉冲冷等离子体处理后的黄曲霉孢子扫描电子显微镜

Fig.6 Scanning electron microscopy of *Aspergillus flavus* spores after high-pressure pulse cold plasma treatment

265 nm-LED 处理后的黄曲霉孢子, 在 5 min 时表面凸起钝化, 之后出现内凹, 而经过高压脉冲冷等离子体处理的黄曲霉孢子会持续出现内凹。

参考文献:

- [1] 胡顺爽, 郜海燕, 吴伟杰, 等. 响应面法优化草莓鲜榨汁紫外杀菌工艺[J]. 食品科学, 2018, 39(22): 227-234.
HU S S, GAO H Y, WU W J, et al. Optimization of UV sterilization process of strawberry fresh juice by response surface methodology[J]. Food Science, 2018, 39(22): 227-234.
- [2] 刘骁, 李云菲, 杨茜, 等. 紫外线在肉类杀菌保鲜应用中的研究进展[J]. 包装工程, 2021, 42(13): 42-48.
LIU X, LI Y F, YANG Q, et al. Research progress on application of ultraviolet light in meat sterilization and preservation[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(13): 42-48.
- [3] GARATE E, EVANS K, GORNOSTAEVA O, et al. Atmospheric plasma induced sterilization and chemical neutralization: 25th Anniversary, IEEE Conference Record-Abstracts. 1998 IEEE International Conference on Plasma Science (Cat. No. 98CH36221), 1998[C]. IEEE.
- [4] ZAHORANOVÁ A, HENSELOVÁ M, HUDECOVÁ D, et al. Effect of cold atmospheric pressure plasma on the wheat seedlings vigor and on the inactivation of microorganisms on the seeds surface[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2016, 36(2): 397-414.
- [5] LEE K H, KIM H, WOO K S, et al. Evaluation of cold plasma treatments for improved microbial and physicochemical qualities of brown rice[J]. Food Science & Technology, 2016, 73: 442-447.
- [6] LOS A, ZIUZINA D, BOEHM D, et al. The potential of atmospheric air cold plasma for control of bacterial contaminants relevant to cereal grain production[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 44: 36-45.
- [7] MENDI A, ASLIM B. New candidate for bacteriotherapy: Probiotic prevention against hydrogen peroxide effect on gingival fibroblasts *in vitro*[J]. Journal of Biotechnology, 2012, 161: 43.
- [8] 李瑞敏, 张忠杰, 姚渠, 等. 冷等离子处理对玉米籽粒外观及结构的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(11): 29-34.
LI R M, ZHANG Z J, YAO Q, et al. The effect of cold plasma treatment on the appearance and structure of corn grains[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(11): 29-34.
- [9] LI Y, ZHENG Z, ZHU S, et al. Effect of low-temperature-high-pressure treatment on the reduction of *Escherichia coli* in milk [J]. 2020, 9(12): 1742.
- [10] RASTOGI R P, RICHA, KUMAR A, et al. Molecular mechanisms of ultraviolet radiation-induced DNA damage and repair[J]. Journal of Nucleic Acids, 2010, 2010: 592932-592980.
- [11] LIU Y, SUN Y, WANG Y, et al. Inactivation mechanisms of atmospheric pressure plasma jet on *Bacillus cereus* spores and its application on low-water activity foods[J]. Food Research International, 2023, 169: 112867.
- [12] 万强贵. 辉光放电等离子体对茄病镰刀菌的杀菌作用及机理研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2023.
WAN Q G. Fungicidal effect and mechanism of glow discharge plasma against *Fusarium solani*[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2023.
- [13] 刘玉兰, 郑婷婷, 马宇翔, 等. 臭氧熏蒸对玉米胚中真菌毒素的降解消除作用[J]. 食品科学, 2022, 43(3): 77-82.
LIU Y L, ZHENG T T, MA Y X, et al. Effect of ozone fumigation on the removal of mycotoxins in corn germ[J]. Food Science, 2022, 43(3): 77-82.

- [14] 万忠民, 马佳佳, 鞠兴荣, 等. 短波紫外线对高水分稻谷抑霉效果的研究[J]. 粮食储藏, 2014, 43(1): 10-16.
WAN Z M, MA J J, JU X R, et al. Study on the inhibitory effect of short wave ultraviolet radiation on high moisture rice mold[J]. Grain Storage, 2014, 43(1): 10-16.
- [15] 吴琼. 杀菌消毒用紫外辐射源技术、应用、标准现状与发展趋势[J]. 中国照明电器, 2023(12): 9-15.
WU Q. Technology, application, standard status and development trend of ultraviolet radiation sources for sterilization[J]. China Light & Lighting, 2023(12): 9-15.
- [16] 王若兰, 何鑫, 王向阳, 等. 冷等离子体处理对小麦粉理化性质改善效果研究[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(6): 1-5.
WANG R L, HE X, WANG X Y, et al. The study of cold plasma treatment on improving physicochemical characteristics of wheat flour[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(6): 1-5.
- [17] 郑哲. 低温等离子体用于玉米赤霉酮的降解及对玉米品质的影响研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
ZHENG Z. Degradation of zearalenone by cold plasma and its effect on corn quality[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.
- [18] SANTOS A L, OLIVEIRA V, BAPTISTA I, et al. Wavelength dependence of biological damage induced by UV radiation on bacteria[J]. Archives of Microbiology, 2013, 195(1): 63-74.
- [19] 李兴军. 冷等离子技术在粮食行业的应用研究进展[J]. 粮食问题研究, 2018(3): 32-38.
LI X J. Research progress on the application of cold plasma technology in the grain industry[J]. Grain Issues Research, 2018(3): 32-38.
- [20] SHI Y, ZHU Y J, SHAO S Y, et al. Alkyl ferulate esters as multifunctional food additives: Antibacterial activity and mode of action against *Escherichia coli in vitro*[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66: 12088-12101.
- [21] 王梓源, 李欣颖, 吕俊阁, 等. ϵ -聚赖氨酸对大肠杆菌的抑菌机制[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(21): 34-41.
WANG Z Y, LI X Y, LV J G, et al. The antimicrobial mechanism of ϵ -poly-L-lysine against *Escherichia coli*[J]. Food and Fermentation industries, 2020, 46(21): 34-41. 1674-2975(202011)46:21<34-41;1-DO>10.1186/s13065-020-02000-9