

低温放电等离子体处理对黄曲霉毒素 B₁ 的降解效果及对巴旦木仁品质的影响研究

张文乐, 张绍君, 李圣杰, 江峻峰, 王艺诺, 王俊彦, 王 英*

(新疆农业大学食品科学与药学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 目的 研究低温放电等离子体对黄曲霉毒素 B₁ (aflatoxin B₁, AFB₁) 的降解效果及对巴旦木仁品质的影响。**方法** 以黄曲霉毒素 B₁ 为目标毒素, 首先研究了低温放电等离子体在不同处理时间、不同电压和不同初始浓度下对目标毒素的降解效果, 其次评估了低温放电等离子体处理对巴旦木仁中的理化指标及色差和香气成分的影响。**结果** 低温放电等离子体不同处理条件对 AFB₁ 的降解效果明显, 以 75 kV 低温放电等离子体处理 5 min, 50 μg/mL 的 AFB₁ 的降解率为 95.03%。低温放电等离子体处理对巴旦木仁的理化性质、蛋白浓度、色差均未出现显著性影响($P>0.05$), 巴旦木仁的香气成分也得到了良好的保持。**结论** 低温放电等离子体对 AFB₁ 具有较明显的降解效果, 且对巴旦木仁的品质无影响。这一研究有望为干果中真菌毒素的降解提供新思路, 为保证干果的食品安全提供新途径。

关键词: 低温放电等离子体; 黄曲霉毒素 B₁; 降解效果; 巴旦木

Degradation of aflatoxin B₁ by low temperature discharge plasma treatment and its effect on the quality of *Amygdalus communis*

ZHANG Wen-Le, ZHANG Shao-Jun, LI Sheng-Jie, JANG Jun-Feng,
WANG Yi-Nuo, WANG Jun-Yan, WANG Ying*

(College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

ABSTRACT: Objective To study the degradation effect of aflatoxin B₁ (AFB₁) by low temperature discharge plasma and its influence on the quality of *Amygdalus communis*. **Methods** AFB₁ was taken as the target toxin. First, the degradation effect of target toxin by low temperature discharge plasma at different treatment time, different voltages and different initial concentrations was studied. Second, the effects of low temperature discharge plasma treatment on the physicochemical indexes, color difference and aroma components of *Amygdalus communis* were evaluated. **Results** The degradation rate of AFB₁ under different treatment conditions of low temperature discharge plasma was significant. When 75 kV low temperature discharge plasma was used for 5 min, the degradation rate of AFB₁ at 50 μg/mL was 95.03%. Low temperature discharge plasma treatment had no significant differences on the physicochemical properties, protein concentration, color difference of *Amygdalus communis* ($P>0.05$), and the aroma components of *Amygdalus communis* were also well maintained. **Conclusion** Low temperature discharge plasma

基金项目: 国家自然科学基金项目(2520GZRJJ)、新疆维吾尔自治区高校科研项目(XJEDU2020Y015)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (2520GZRJJ), and the Scientific Research Project of Universities in Xinjiang (XJEDU2020Y015)

***通信作者:** 王英, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品营养与安全。E-mail: wangying0926@xjau.edu.cn

***Corresponding author:** WANG Ying, Ph.D, Associate Professor, College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China. E-mail: wangying0926@xjau.edu.cn

has obvious degradation effect on AFB₁, and has no effect on the quality of *Amygdalus communis*. This study is expected to provide new ideas for the degradation of mycotoxins in dried fruits and a new way to ensure the food safety of dried fruits.

KEY WORDS: low temperature discharge plasma; aflatoxin B₁; degradation effect; *Amygdalus communis*

0 引言

巴旦木(*Amygdalus communis* L)为蔷薇科李属,与核桃、榛子、腰果并称为世界四大干果,巴旦木的国际市场交易量与交易额位列首位^[1]。研究表明,巴旦木仁营养丰富,含有大量不饱和脂肪酸,尤以亚油酸和亚麻酸等不饱和脂肪酸含量较高^[2-3]。在巴旦木的种植、加工、贮藏和运输过程中,易受到真菌毒素的污染,以黄曲霉毒素最为突出^[4]。已测得巴旦木中的黄曲霉毒素主要有 B₁、B₂、G₁、G₂,其中以黄曲霉毒素 B₁(aflatoxin B₁, AFB₁)的毒性最强,可导致人的肝脏和中枢神经损伤,被世界卫生组织(World Trade Organization, WTO)的癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)列为一级致癌物^[5]。目前降解 AFB₁常用的方法主要为化学法、生物法、辐照法等^[6]。但这些方法普遍存在着损害农产品营养品质、降解效率低、不易操作、化学溶剂残留等问题^[7-9]。因此,建立一种成本低廉、操作方便、安全有效、环境友好且不会对巴旦木仁品质产生影响的黄曲霉毒素降解方法,已成为巴旦木仁精深加工产业中急需解决的问题。

低温等离子体,是一种具有多种离子、电子以及激发态的原子等活性物质的电离气体,特性是在常压下即可产生且温度较低,在食品加工方面受到较大关注^[10-13]。等离子体中的活性物质能使分子键断裂,形成低毒或无毒的小分子物质从而降解真菌毒素^[14-16]。研究表明,等离子体能够灭活榛子^[17]、花生^[18]中的黄曲霉菌,且不会对鲜切猕猴桃片^[19]的理化性质产生影响。HU 等^[20]研究发现,低温放电等离子体技术能有效降解 AFB₁。因此,低温等离子体在降解真菌毒素中的效果已得到确认,但其在应用中普遍存在处理量较小和降解机制不明确的问题。例如射流放电等离子体无法对样品表面进行广泛的覆盖,介质阻挡放电等离子体允许放置样品的间隙太小。如果能建立一种大容量、高效率、安全无残留降解巴旦木仁中黄曲霉毒素的方法,将有助于解决长期困扰我国巴旦木仁生产和出口中黄曲霉毒素污染问题,推动干果产业的发展。

2011年,LI 等^[21]、WANG 等^[22]报导了一种放电稳定均匀、具有较大等离子体产生区域的低温气相沿面放电设备,其一体式的特殊结构能够降低传输损耗,提高活性物质产量,可有效降解水溶液中的染料。在此基础上,本课题组采用改进的低温气相沿面放电等离子体设备,发现采用外敷铝箔作为接地电极的情况下仍能触发丝状放电,产生大量活性物质,

能够有效灭活苹果汁雾滴中的耐高渗酵母^[23-24]。对比介质阻挡放电,低温气相沿面放电等离子体可将苹果汁的处理量从 3 mL^[25]提高到 500 mL,极大地提升了处理能力。

鉴于此,本研究采用以空气为工作气体的低温气相沿面放电等离子体降解 AFB₁,研究等离子体在不同处理时间、不同电压和不同初始浓度下对目标毒素的降解效果,并评估低温放电等离子体处理对巴旦木仁的理化指标及色差和香气成分的影响,为低温等离子体处理技术在巴旦木仁中黄曲霉毒素降解中的应用提供理论支撑,为干果中真菌毒素的降解提供新思路。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

巴旦木(北园春干果市场),大小均一,无机械损伤,无病害或腐烂,巴旦木为当年采摘,筛选去壳,烘干备用。

AFB₁(纯度 99.8%,山西点灿贸易有限公司);乙腈(色谱纯)、葡萄糖、淀粉、酚酞、盐酸、硫酸铜、亚甲基蓝、酒石酸钾钠、草酸(分析纯)(天津市致远化学试剂有限公司);硫代硫酸钠、碘化钾、三氯甲烷、氢氧化钠(分析纯,天津市北联精细化学品开发有限公司);无水碳酸钠(分析纯,天津市光复科技发展有限公司);异丙醇(分析纯,天津市永晟精细化工有限公司)。

1.2 仪器与设备

DBD-50 低温等离子体空气常压实验反应器(美国泰克公司);xMarkTM 酶标仪(伯乐生命医学产品有限公司);LGJ-12 冷冻干燥机(上海腾方仪器设备有限公司);LC20A 超高效液相色谱仪、Inert Sustain C₁₈ 色谱柱(100 mm×2.1 mm, 1.7 μm)[日本岛津(中国)有限公司];安捷伦 7890B-5977 系列 GC-MS 气相色谱-质谱联用仪(中国安捷伦科技有限公司);NR10QC 手持式色差仪(深圳市三恩时科技有限公司);AW-60 水分活度测定仪(靖江市中诺仪器仪表有限公司);FK-16A 快速水分测定仪(厦门弗布斯检测设备有限公司);FA2004C 电子分析天平(精度 0.00001 g,山东欧莱博仪器有限公司)。

1.3 方 法

1.3.1 低温放电等离子体处理

低温放电等离子体反应器系统示意图如图 1 所示,该系统由交流(10 kHz)电源、等离子体发生器和处理室组成,因处理物质与之前研究不同故将液态物质处理装置修改为固态物质处理装置^[12]。将待处理物质置于处理室曝气器周

围(单层), 螺旋电极(高压电极)与接地电极之间产生丝状放电, 从而产生大量臭氧(O₃)、过氧化氢(H₂O₂)、羟自由基(·OH)以及激发态粒子等活性物质处理 AFB₁ 及巴旦木仁。并采用郭东权等^[26]的方法对乙腈中 AFB₁ 进行处理, 探究不同因素对 AFB₁ 降解效果影响。

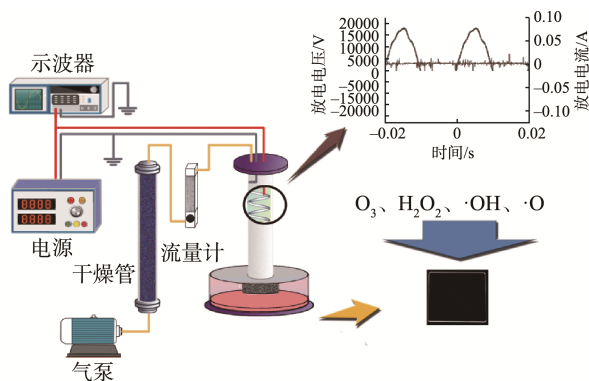


图 1 低温等离子体反应器系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of low temperature plasma reactor system

1.3.2 不同因素对 AFB₁ 降解效果影响

(1) 不同处理时间对 AFB₁ 降解效果影响

选取低温放电等离子体处理时间为 0、3、5、10 min, 乙腈中 AFB₁ 初始浓度为 50 μg/mL, 放电电压为 25 kV, 研究不同处理时间对 AFB₁ 降解效果的影响。

(2) 不同 AFB₁ 初始浓度对其降解效果影响

选取初始浓度为 50、30、10 μg/mL 的乙腈中 AFB₁, 放电电压为 25 kV, 处理时间为 5 min, 研究不同 AFB₁ 初始浓度对其降解效果的影响。

(3) 不同放电电压对 AFB₁ 降解效果影响

选取低温放电等离子体放电电压为 25、50、75 kV, 乙腈中 AFB₁ 初始浓度为 50 μg/mL, 处理时间为 5 min, 研究不同处理时间对 AFB₁ 降解效果的影响。

1.3.3 AFB₁ 降解效果的测定

(1) 测定前处理

将处理后载玻片使用 2 mL 乙腈洗脱 24 h, 洗脱后吸出待测液以岛津液相系统测定 AFB₁ 含量。

(2) 超高效液相色谱仪测试条件

色谱柱: Inert Sustain C₁₈ 色谱柱(100 mm×2.1 mm, 1.7 μm), 柱温: 40°C; 流动相: 水:乙腈+甲醇(50+50)=(50:50, V:V); 流速: 0.3 mL/min; 进样量: 10 μL; 激发波长: 365 nm; 发射波长: 436 nm。

1.3.4 常规理化指标测定

抗坏血酸(vitamin C, VC)采用 2,6-二氯酚靛酚法测定^[27]; 总糖采用斐林试剂滴定法测定^[28]; 还原糖采用斐林试剂滴定法测定^[28]; 单宁采用高锰酸钾滴定法测定^[29]; 蛋白浓度的测定采用 BCA 微板法^[30]; 油脂的含量采用重量法; 酸价的测定参照 GB/T 5530—2005《动植物油脂 酸值和酸度

测定》; 皂化价的测定参照 GB/T 5534—2008《动植物油脂 皂化值的测定》; 水分含量测定采用水分测定仪; 水分活度采用水分活度测定仪。

1.3.5 色差的测定及计算方法

色差值测定与计算方法: 色差值采用色差仪对其进行测定, 每个样品测定重复 10 次, 取平均值。其中色差值用 ΔE 表示, 使用白色校准板进行校准。在白色背景下测量 L^* (亮度)、 a^* (绿色/红色)和 b^* (蓝色/黄色), 读数一式 3 份。根据公式(1)~(3)计算确定色度(C^*)、色相角(H^*)和总色差(ΔE_{ab}^*)^[12]。

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (1)$$

$$H^* = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (2)$$

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (3)$$

1.3.6 芳香物质的测定

(1) 挥发性化合物的富集

巴旦木仁经过粉碎后称样(4.0±0.1) g, 置于 20 mL 顶空瓶内, 进行平衡 10 min 后, 使用固相微萃取 80°C 萃取 50 min。

(2) 气相色谱-质谱联用仪条件

电子电离源的电子能量为 70 eV, 进样口温度 260°C, 离子源 230°C, 四极杆 150°C。辅助加热 250°C, 扫描范围 m/z 35~550。不分流进样, 载气 He, 流量 1 mL/min, 升温程序: 以 40°C 保持 5 min, 3°C/min 升至 120°C 保持 5 min, 10°C/min 升至 250°C, 保持 10 min。

1.3.7 数据分析

所有实验重复 3 次。数据表示为平均值±标准偏差, 采用 SPSS 19.0 对数据进行统计分析, 用 Tukey 的显著差异 (honestly significant difference, HSD) 检验对数据进行分析。处理结果的差异在 $P < 0.05$ 被认为有显著差异, 采用 Origin 2018 进行软件分析。

2 结果与分析

2.1 不同因素对 AFB₁ 降解效果的影响

2.1.1 不同处理时间对 AFB₁ 降解效果的影响

在实验设定范围内, 随着低温等离子体放电时间的增长, AFB₁ 降解率呈明显上升趋势。处理 3 min 时 50 μg/mL 的 AFB₁ 降解率仅(30.38±0.78)%, 在 5 min 时 50 μg/mL 的 AFB₁ 在相同条件下的降解率达到(81.28±0.13)%, 在处理 10 min 时 50 μg/mL 的 AFB₁ 的降解率为(90.87±0.11)%。可见, 当放电电压与 AFB₁ 初始浓度一定时, 在 0~10 min 的处理时间内, 处理时间越长 AFB₁ 的降解效果越好, 且处理时间从 3 min 增长至 5 min 时, 处理效果相较于 5 min 增长 10 min 时降解速率明显提高($P < 0.05$)。

2.1.2 不同 AFB₁ 初始浓度对其降解效果的影响

在实验设定范围内, 随着 AFB₁ 初始浓度的增大,

AFB₁ 降解率呈逐渐下降趋势。初始浓度为 10 μg/mL 的 AFB₁ 降解率高达(66.72±0.04)%, 初始浓度为 30、50 μg/mL 的 AFB₁ 在相同条件下的降解率仅为(25.00±0.04)%、(30.38±0.78)%。可见, 当放电电压与处理时间一定时, AFB₁ 溶液在 10~50 μg/mL 范围内时, AFB₁ 的浓度越低降解效果越好($P<0.05$)。

2.1.3 不同放电电压对 AFB₁ 降解效果的影响

在实验设定范围内, 随着低温等离子体放电电压的增大, AFB₁ 降解率呈明显上升趋势。放电电压为 25、50 kV 时 AFB₁ 降解率为(81.28±0.13)%、(87.58±0.01)%, 放电电压为 75 kV 时 AFB₁ 在相同条件下的降解率达到(95.03±0.08)%。可见当时间一定时, 放电电压提高, 不同初始浓度的 AFB₁ 降解率也进一步提高。可见, 当处理时间与 AFB₁ 初始浓度一定时, 在 25~75 kV 的放电电压范围内, 放电电压越大 AFB₁ 的降解效果越好。

2.2 低温放电等离子体处理对巴旦木仁常规理化指标的影响

研究发现当低温放电等离子体处理时间从 3 min 增长至 5 min 时, 处理效果相较于 5 min 增长至 10 min 时降解速率明显提高($P<0.05$)。因此, 为研究短时间内 AFB₁ 快速降解对所处理物品品质影响, 在后续对巴旦木仁品质影响的研究中, 采用 0、3、5 min 低温放电等离子体对巴旦木仁进行处理。

经过 0、3、5 min 低温放电等离子体处理后的巴旦木仁品质对比见表 1。由表 1 可知巴旦木仁经过低温放电等离子体处理后, 各项理化指标没有发生显著改变($P>0.05$)。这些结果与用低温等离子体处理黄瓜表面的结果相似^[31], 说明经过低温放电等离子体处理后不会使食品理化指标发生改变。

2.3 低温放电等离子体处理对巴旦木仁蛋白含量的影响

待测液使用酶标仪在 562 nm 处的波长下测定吸光度, 并且进行标准曲线的绘制。计算得出, 标准品蛋白浓度与

吸光度值呈线性相关($r^2=0.99979$), 且线性关系良好, 线性回归方程为 $Y=0.16801X+0.02895$ [其中 X 为吸光度, Y 为蛋白质量浓度(mg/mL)]。

根据线性回归方程计算得出样品浓度。当低温放电等离子体以 25 kV 的放电电压处理 0、3、5 min 后巴旦木仁的蛋白浓度分别为(8.9691±0.070)、(8.9346±0.199)、(9.1188±0.139) mg/mL。说明不同处理时间样品的吸光度均未出现显著性差异($P>0.05$), 蛋白质浓度未产生明显变化。

2.4 低温放电等离子体处理对巴旦木仁色泽的影响

表 2 显示了经过低温放电等离子体以 25 kV 的放电电压处理 0、3、5 min 后的巴旦木仁的颜色变化, 对照样品是未经低温放电等离子体处理的巴旦木仁。表格中 L^* 代表样品的亮度, a^* 和 b^* 分别表示红色至绿色的范围、黄色至蓝色的范围, c^* 为色彩饱和度, h^* 为色调角。 L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE^*_{ab} 值几个指标是决定巴旦木仁外观的直接指标^[32]。不同时间低温放电等离子体处理后巴旦木仁各项色泽指标均未发生改变, 均未出现显著性差异($P>0.05$), 说明巴旦木仁经过低温放电等离子体处理后仍能够保持较好的色泽, 巴旦木仁的色泽不会随着处理时间的延长而发生改变。

2.5 低温放电等离子体处理对巴旦木仁芳香物质的影响

巴旦木仁中的挥发性成分较多, 其中不饱和脂肪酸较为丰富, 不饱和脂肪酸氧化可产生多种风味物质。由表 3 可知, 不同低温放电等离子体处理时间下的巴旦木仁中香气成分主要为醛类、烷类、酯类、醇类物质。醛类物质是脂肪降解的产物, 赋予巴旦木烘烤香气, 其中正己醛、辛醛、苯乙醛含有丰富的坚果香气以及烘烤食品的气息^[32]。酯类物质中的乙酸乙酯和乙酸丁酯令巴旦木具有丰富的水果香气^[33]。酯类物质一般具有酒香和果香, 对食品的风味改善起到很大作用^[34]。

表 1 不同时间处理后巴旦木理化指标的对比

Table 1 Comparison of the quality of *Amygdalus communis* treated at different times

处理时间/min	酸价/(mg/g)	皂化值/(mg/g)	过氧化值/(g/kg)	单宁/%	出油率/%	出蛋白率/%	水分活度	水分含量/%
0	1.72±0.01 ^a	250.30±0.20 ^a	1.03±0.01 ^a	0.44±0.01 ^a	52.78±0.17 ^a	41.07±0.50 ^a	0.22±0.02 ^a	1.47±0.01 ^a
3	1.72±0.04 ^a	250.00±0.10 ^a	1.04±0.01 ^a	0.45±0.01 ^a	53.22±0.59 ^a	41.85±0.54 ^a	0.24±0.04 ^a	1.54±0.01 ^a
5	1.72±0.01 ^a	250.40±0.26 ^a	1.04±0.01 ^a	0.47±0.01 ^a	53.29±0.43 ^a	42.54±0.54 ^a	0.22±0.01 ^a	1.24±0.01 ^a

注: 同列相同小写字母表示未出现显著性差异, $P>0.05$, 下同。

表 2 不同时间低温放电等离子体处理后巴旦木色泽的对比

Table 2 Comparison of *Amygdalus communis* color after low temperature discharge plasma treatment at different times

处理时间/min	L^*	a^*	b^*	c^*	h^*	ΔE^*_{ab}
0	46.972±1.42 ^a	18.408±0.80 ^a	33.857±1.35 ^a	38.538±1.40 ^a	61.467±1.50 ^a	60.775±1.49 ^a
3	47.044±1.80 ^a	18.457±0.74 ^a	33.932±1.30 ^a	38.627±1.41 ^a	61.456±1.42 ^a	60.890±1.64 ^a
5	46.994±2.50 ^a	18.483±0.50 ^a	33.969±1.50 ^a	38.672±1.50 ^a	61.449±1.45 ^a	60.834±1.60 ^a

表 3 比较了 0、3、5 min 中主要挥发性化合物的相对含量, 以确定低温放电等离子体处理对巴旦木仁香气的影响。与 0 min 的样品相比, 3、5 min 处理后巴旦木仁中的大部分醇、酯、醛未出现明显变化。经过低温放电等离子体处理后, 巴旦木仁中的部分烷类物质损失, 这

可能是由于低温放电等离子体处理时发生美拉德反应和焦糖化反应, 生成富含坚果香气的醛类挥发性物质。由此可见, 巴旦木仁随着低温放电等离子体的处理, 主要香气成分得到了良好的保持, 使得其含有的风味物质更为丰富。

表 3 低温放电等离子体处理对巴旦木仁芳香物质相对含量的影响

Table 3 Effects of low-temperature discharge plasma treatment on the relative content of aromatic substance from *Amygdalus communis*

种类	名称	保留时间 /min	相对含量/%			
			0 min	3 min	5 min	
醛类物质	3-甲基-丁醛	2.759	1.60	1.46	0.85	
	己醛	5.864	6.17	11.30	5.85	
	庚醛	10.076	0.00	1.90	1.27	
	苯甲醛	12.813	1.53	2.19	1.85	
	辛醛	15.023	0.00	0.00	1.46	
	苯乙醛	16.997	3.71	4.49	3.60	
	壬醛	20.120	7.48	22.45	20.94	
	癸醛	25.057	1.24	2.32	1.36	
	烷类物质	氨基丁烷	1.993	3.45	3.35	2.52
癸烷		14.893	8.35	3.10	1.60	
2,2,4,6,6-五甲基-庚烷		15.060	16.38	8.56	8.86	
4-甲基-癸烷		17.779	1.88	2.83	1.70	
2-甲基-癸烷		18.063	0.99	0.00	0.00	
3-甲基-癸烷		18.393	0.61	0.00	0.00	
十一烷		19.869	1.35	1.12	0.94	
4-甲基-十一烷		20.699	0.00	1.03	0.00	
3-甲基-十一烷		23.289	0.75	0.56	0.51	
十二烷		24.732	1.35	1.31	1.72	
十三烷		30.957	0.56	0.00	0.00	
十四烷		35.539	0.64	0.00	0.00	
酯类物质		乙酸己基酯	15.673	1.47	0.75	0.58
		己酸丁酯	24.369	1.39	0.00	0.55
	2-甲基己基丁酸酯	26.884	0.54	0.37	0.00	
	肉豆蔻酸异丙酯	46.938	4.61	0.00	0.00	
	邻苯二甲酸二丁酯	49.791	1.14	0.94	0.70	
醇类物质	1-己醇	8.709	3.62	3.99	5.28	
	1-庚醇	13.508	0.00	1.62	1.70	
	1-辛烯-3-醇	13.946	1.21	0.00	0.00	
	2-乙基-1-己醇	16.412	1.87	1.97	1.59	
	1-辛醇	18.532	2.41	2.64	2.87	
	1-壬醇	23.434	0.00	0.00	1.32	
其他物质	三乙胺	3.312	2.80	3.26	0.00	
	2,5-二甲基-吡嗪	10.682	5.78	5.79	5.32	
	D-柠檬烯	16.171	9.21	9.53	4.96	
	3-乙基-2,5-二甲基-吡嗪	18.854	3.42	2.14	2.24	

3 结 论

本研究采用了低温放电等离子体对 AFB₁ 进行降解, 并研究其对巴旦木仁品质的影响。结果表明, 低温放电等离子体不同处理条件对 AFB₁ 的降解效果显著; 随着低温等离子体放电时间的增长, AFB₁ 降解率增高, AFB₁ 经 25 kV 等离子体处理 10 min, 50 μg/mL 的 AFB₁ 降解率可达 90.87%; AFB₁ 溶液在 10~50 μg/mL 范围内时, 初始浓度越低 AFB₁ 降解率越高, AFB₁ 经 25 kV 等离子体处理 5 min, 10 μg/mL 的 AFB₁ 降解率可达 66.72%; 放电电压对 AFB₁ 降解率影响最为明显, 随着低温等离子体放电电压的增大, AFB₁ 降解率不断增大, AFB₁ 经 75 kV 等离子体处理 5 min, 50 μg/mL 的 AFB₁ 降解率可达 95.03%。低温放电等离子体处理对巴旦木仁的理化性质、蛋白浓度、色差均未产生显著影响($P>0.05$), 巴旦木仁的香气成分也得到了良好的保持。这些结果表明低温放电等离子体可以有效地降解 AFB₁, 并能保持巴旦木仁的理化性质及色泽和香气。本研究与张岩等^[16]的研究结果相似, 但其使用的是低温射频等离子体, 处理量较小; 本研究使用的是低温介电阻挡放电等离子体, 探究了放电电压对 AFB₁ 降解率的影响, 并使得处理量得到了大量提升从而更适宜于干果中毒素的降解。本研究对低温放电等离子体灭活 AFB₁ 进行探究, 后续还需要进一步优化实验过程, 并对降解产物进行分析, 为低温放电等离子体在食品杀菌中应用及安全性评价提供重要依据。

参考文献

- 王豪, 涂宗财, 罗亚林, 等. 七种坚果仁中多酚、三萜含量及其抗氧化活性比较[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(6): 219-224.
WANG H, TU ZC, LUO YL, *et al.* Comparison of content and antioxidant activities of polyphenols and triterpenes in seven kinds of nuts [J]. Food Ferment Ind, 2019, 45(6): 219-224.
- 李瑞. 采后巴旦木的射频杀菌技术研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019.
LI R. Study on the technology of radio frequency sterilization of postharvest batan wood [D]. Xiayang: Northwest Agriculture and Forestry University, 2019.
- 王颖, 陈平. 花生、杏仁露加工工艺研究[J]. 农牧产品开发, 1997, 10: 26-27.
WANG J, CHEN P. Study on the processing technology of peanut and almond juice [J]. Dev AG Anim Husb Prod, 1997, 10: 26-27.
- 连风, 赵伟, 杨瑞金. 低水分活度食品的微生物安全研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(19): 333-337.
LIAN F, ZHAO W, YANG RJ. Research progress on microbial safety of low water activity foods [J]. Food Sci, 2014, 35(19): 333-337.
- 杨中, 袁州. 胶体免疫层析法测定巴旦木中的黄曲霉毒素 B₁[J]. 广州化工, 2013, 41(20): 102-104.
YANG Z, YUAN Z. Determination of aflatoxins B₁ in batan wood by colloidal gold immunochromatography [J]. Guangzhou Chem Ind, 2013, 41(20): 102-104.
- WANG F, XIE F, XUE XF, *et al.* Structure elucidation and toxicity analyses of the radiolytic products of aflatoxin B₁ in methanol-water solution [J]. J Hazard Mater, 2011, 192(3): 1192-1202.
- 李玉鹏, 王世清, 肖军霞, 等. 低温射频等离子体降解农产品中黄曲霉毒素 B₁ 效果的研究[J]. 粮油食品科技, 2014, 22(5): 54-57.
LI YP, WANG SQ, XIAO JX, *et al.* Study on the degradation of aflatoxins B₁ in agricultural products by low temperature radio frequency plasma [J]. Grain Oils Sci Technol, 2014, 22(5): 54-57.
- HOSSEINI SI, FARROKHI N, SHOKRI K, *et al.* Cold low pressure O₂ plasma treatment of *Crocus sativus*: An efficient way to eliminate toxicogenic fungi with minor effect on molecular and cellular properties of saffron [J]. Food Chem, 2018, 257(15): 310-315.
- SIDDIQUE SS, HARDY GE, BAYLISS KL, *et al.* Cold plasma: A potential new method to manage post-harvest diseases caused by fungal plant pathogens [J]. Plant Pathol, 2018, 67(5): 1011-1021.
- BAO XW, WANG ZR, ZHANG WL, *et al.* Modeling the effect of initial cell concentration and soluble solids on the plasma inactivation of yeast in apple juices [J]. LWT-Food Sci Technol, 2021, (103001): 112227.
- SUROWSKY B, SCHLUTER O, KNORR D. Interactions of non-thermal atmospheric pressure plasma with solid and liquid food systems: A review [J]. Food Eng Rev, 2015, 7(2): 82-108.
- 刘振蓉, 赵武奇, 高贵田, 等. 低温等离子体处理对猕猴桃浊汁品质的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(6): 195-202.
LIU ZR, ZHAO WQ, GAO GT, *et al.* Effect of low temperature plasma treatment on the quality of kiwifruit cloudy juice [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2021, 21(6): 195-202.
- 张文乐, 岳田利, 周嘉佳, 等. 沿面放电等离子体对苹果汁中耐高渗酵母的杀灭效果[J]. 食品科学, 2020, 42(19): 164-169.
ZHANG WL, YUE TL, ZHOU JJ, *et al.* Inactivation of *Zygosaccharomyces rouxii* in apple juice by surface discharge plasma [J]. Food Sci, 2020, 42(19): 164-169.
- PRAKASH A, LIM FT, DUONG C, *et al.* The effects of ionizing irradiation on *Salmonella* inoculated on almonds and changes in sensory properties [J]. Radiat Phys Chem, 2010, 79(4): 502-506.
- 朱士臣, 陈小草, 柯志刚, 等. 低温等离子体技术及其在水产品加工中的应用[J]. 中国食品学报, 2021, 21(10): 305-314.
ZHU SC, CHEN XC, KE ZG, *et al.* Low temperature plasma technology and its application in aquatic products processing [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2021, 21(10): 305-314.
- 张岩, 王安妮, 肖军霞, 等. 低温射频等离子体降解乙腈中黄曲霉毒素 B₁ 的效果与途径分析[J]. 中国粮油学报, 2015, (2): 80-85.
ZHANG Y, WANG ANN, XIAO JX, *et al.* Degradation of aflatoxins B₁ in acetonitrile by low temperature radio frequency plasma [J]. J Chin Cereal Oil Ass, 2015, (2): 80-85.
- DASAN BG, MUTLUU M, BOYACI IH. Decontamination of *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus* spores on hazelnuts via atmospheric pressure fluidized bed plasma reactor [J]. Int J Food Microbiol, 2016, 216:

- 50–59.
- [18] DEVI Y, THIRUMDAS R, SARANGAPANI C, *et al.* Influence of cold plasma on fungal growth and aflatoxins production on groundnuts [J]. *Food Control*, 2017, 77: 187–191.
- [19] 解梦梦, 赵武奇, 贾梦科, 等. 低温等离子体处理对鲜切猕猴桃片质构及理化特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(10): 133–142.
- JIE MM, ZHAO WQ, JIA MK, *et al.* Effects of low temperature plasma treatment on the texture and physicochemical properties of fresh-cut kiwifruit slices [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2021, 21(10): 133–142.
- [20] HU S, KLEIN I, RICHARD L, *et al.* Reduction of aflatoxin in corn by high voltage atmospheric cold plasma [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2017, 10(6): 1042–1052.
- [21] LI J, WANG T, LU N, *et al.* Degradation of dyes by active species injected from a gas phase surface discharge [J]. *Plasma Sources Sci Technol*, 2011, 20(3): 034019.
- [22] WANG T, QU G, REN J, *et al.* Organic acids enhanced decoloration of azo dye in gas phase surface discharge plasma system [J]. *J Hazard Mater*, 2016, 302: 65–71.
- [23] WANG Y, WANG T, YUAN Y, *et al.* Inactivation of yeast in apple juice using gas-phase surface discharge plasma treatment with a spray reactor [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2018, 97: 530–536.
- [24] WANG Y, WANG Z, YUAN Y, *et al.* Application of gas phase surface discharge plasma with a spray reactor for *Zygosaccharomyces rouxii* LB inactivation in apple juice [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2019, 52: 450–456.
- [25] XIANG Q, LIU X, LI J, *et al.* Effects of dielectric barrier discharge plasma on the inactivation of *Zygosaccharomyces rouxii* and quality of apple juice [J]. *Food Chem*, 2018, 254: 201–207.
- [26] 郭东权, 王娴, 董威杰, 等. 电子束辐照对玉米品质及赭曲霉毒素 A 降解效果的探讨[J]. *中国粮油学报*, 2018, 5(33): 36–42.
- GUO DQ, WANG X, DONG WJ, *et al.* Effects of electron beam irradiation on maize quality and degradation of ochratoxin A [J]. *J Chin Cereal Oil Ass*, 2018, 5(33): 36–42.
- [27] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
- CAO JK, JIANG WB, ZHAO YM. Guidance of postharvest physiological and biochemical experiment of fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [28] 朱文慧. 无核白葡萄干在不同贮藏环境中生理生化特性的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
- ZHU WH. Study on physiological and biochemical characteristics of seedless white raisins in different storage conditions [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016.
- [29] 张辉, 王倩, 张政, 等. 不同贮藏对巴旦木贮藏品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(8): 185–188.
- ZHANG H, WANG Q, ZHANG Z, *et al.* Effect of different storage temperature on quality of batan wood during storage [J]. *Food Res Dev*, 2016, 37(8): 185–188.
- [30] WALKER JM. The biconchonic acid (BCA) assay for protein quantitation [J]. *Methods Mol Biol*, 2009, 32(3): 5–8.
- [31] 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 and low temperature plasma on sterilization and quality of *Escherichia coli* on cucumber surface [J]. *Grain Oils Sci Technol*, 2018, 26(1): 61–67.
- [32] 李杰, 王雨, 刘欢, 等. 7 个桃品种品质测定及挥发性香气成分分析[J]. *江西农业学报*, 2021, 33(8): 46–52.
- LI J, WANG Y, LIU H, *et al.* Quality analysis and volatile aroma components analysis of 7 peach cultivars [J]. *J Jiangxi Agric Sci*, 2021, 33(8): 46–52.
- [33] 卢静茹, 林向阳, 张如, 等. HS-SPME-GC-MS 联用分析美国巴旦木香气成分[J]. *食品科学*, 2015, 36(2): 120–125.
- LU JR, LIN XY, ZHANG R, *et al.* HS-SPME-GC-MS analysis of aromatic components in American balsamic wood [J]. *Food Sci*, 2015, 36(2): 120–125.
- [34] 常翔宇. 烘烤巴旦木加工过程中的品质变化研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.
- CHANG XY. Study on the quality change of *Parthenocissus* sp. during the processing [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020.

(责任编辑: 张晓寒 韩晓红)

作者简介



张文乐, 硕士研究生, 主要研究方向为食品营养与安全。

E-mail: zw1980707@foxmail.com



王英, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品营养与安全。

E-mail: wangying0926@xjau.edu.cn