

低温等离子体降解油料中真菌毒素的研究进展

王小焕¹, 王戡东², 张晨霞¹, 刘玉兰¹, 马宇翔¹

(1. 河南工业大学 粮油食品学院, 郑州 450001; 2. 河北玉星食品有限公司, 河北 邢台 054000)

摘要: 低温等离子体是一种温和、高效的新型非热加工方法, 其在油料中真菌毒素降解方面的研究引起了人们的广泛关注。为了对油料中真菌毒素脱除技术开发提供理论参考, 综述了低温等离子体对油料中真菌毒素的降解效果及降解机制, 同时探讨了低温等离子体处理对油料品质的影响, 并对未来发展方向和应用前景进行了展望。油料中主要污染的真菌毒素有黄曲霉毒素(AFT)、赭曲霉毒素(OT)、玉米赤霉烯酮(ZEN)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)和伏马毒素(FB)。低温等离子体已经被视为一种有效的脱除真菌毒素的技术, 但是其降解真菌毒素的机制尚未完全解析, 其降解产物的安全性需进一步验证。虽然现有研究表明, 低温等离子体处理对油料品质影响较小, 但因为文献较少, 还需进一步验证。未来应将低温等离子体技术与其他现有技术相结合, 进一步提升其安全和有效脱除油料中真菌毒素的能力。

关键词: 低温等离子体; 油料; 降解; 真菌毒素

中图分类号: TS222+.1; TS221 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-7969(2025)05-0125-09

Research progress on degradation of mycotoxins in oilseeds by low temperature plasma

WANG Xiaohuan¹, WANG Jiandong², ZHANG Chenxia¹,
LIU Yulan¹, MA Yuxiang¹

(1. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;
2. Hebei Yuxing Food Co., Ltd., Xingtai 054000, Hebei, China)

Abstract: As a mild and efficient new non-thermal processing method, low temperature plasma has attracted much attention in the study of mycotoxins degradation in oilseeds. In order to provide theoretical reference for the development of mycotoxins removal technology in oilseeds, the degradation effect and degradation mechanism of low temperature plasma on mycotoxins in oilseeds were summarized, the effect of low temperature plasma treatment on the quality of oilseeds was explored, and the direction of the future development and the prospect of the application were prospected. The main mycotoxins contaminated in oilseeds are aflatoxin (AFT), ochratoxin (OT), zearalenone (ZEN), deoxynivalenol (DON) and fumonisin (FB). Low temperature plasma has been recognized as an effective technique for mycotoxins removal, but the mechanism of mycotoxins degradation has not been fully resolved, and the safety of its degradation products needs to be further verified. Although existing studies have shown that low temperature plasma treatment has a low impact on oil quality, further validation is needed because of

the scarcity of literature. In the future, low temperature plasma technology should be combined with other existing technologies to further enhance its ability to safely and effectively remove mycotoxins from oilseeds.

Key words: low temperature plasma; oilseeds; degradation; mycotoxins

收稿日期: 2024-01-08; 修回日期: 2024-11-16

基金项目: “十四五”国家重点研发计划(2023YFF1104605);
河南省重点研发计划(232102110157)

作者简介: 王小焕(1997), 女, 硕士研究生, 研究方向为油脂
制取理论与技术(E-mail) wxh263020@126.com。

通信作者: 马宇翔, 副教授(E-mail) myx366@163.com。

我国是油料生产和消费大国,在我国油料作物是仅次于粮食作物的第二大农作物^[1]。农作物在生长、收获、贮存、加工直至送上餐桌的全过程中,易受真菌或真菌毒素污染^[2]。油料被真菌污染后不仅会造成营养品质下降,还会因真菌产生的毒素在食物链中的富集,对人体健康构成危害^[3]。

油料作物中真菌毒素主要包括黄曲霉毒素(Aflatoxin, AFT)、赭曲霉毒素(Ochratoxin, OT)、玉米赤霉烯酮(Zearalenone, ZEN)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇(Deoxynivalenol, DON)和伏马毒素(Fumonisin, FB)等^[4]。真菌毒素的毒性风险在世界范围内得到了广泛认可,目前已发现的真菌毒素有400多种,其中大部分已被证实对人体和动物的健康有害,包括致畸、致癌、致突变和内分泌干扰等危害^[3]。因此,研究和开发绿色、安全、高效的真菌毒素降解方法,对于保障食品安全和提高油料的品质具有重要意义。

在过去的几十年里,人们已研究出多种方法用于油料中真菌毒素的脱除,包括物理方法(高温^[5]、辐射^[6]、吸附^[7]等)、化学方法(碱处理^[8]、氧化处理^[9])和生物脱毒(微生物^[10]、酶^[11])方法。但这些方法存在一些局限性,如:大多数物理方法设备造价昂贵,成本高;化学方法可能会对食品品质产生不良影响;生物方法一般具有特异性,难以同时应用于多种毒素^[12]。因此,针对油料中真菌毒素的脱除亟需一种新型有效的加工技术。低温等离子体(Low temperature plasma)是一种新型非热加工技术,该技术是通过产生多种活性粒子来降解真菌毒素,具有处理温度低、快速、高效、无污染等优点,属于新型的脱毒方法,在食品加工和食品安全控制等领域具有广阔的应用前景^[13-14]。

本文重点阐述了低温等离子体对油料中真菌毒素的降解效果及降解机制,同时探讨了低温等离子体处理对油料品质的影响,并对未来发展方向和应用前景进行了展望,以期对低温等离子体技术在油料中真菌毒素降解领域的相关研究提供理论参考。

1 油料中主要污染的真菌毒素

油料作物在生长、收获及贮藏等过程中极易被真菌毒素污染。据报道,AFT、OT、ZEN、DON和FB是目前油料中污染较为严重的几类真菌毒素^[2,15]。

1.1 AFT

AFT是一类由黄曲霉和寄生曲霉等曲霉属真菌产生的有毒代谢产物,具有强致畸、致癌和致突变

性^[16-17]。在已发现的AFT中,黄曲霉毒素B₁(AFB₁,结构见图1)的毒性和致癌性最强,已被国际癌症研究机构(IARC)确定为1类致癌物^[18-19]。AFT一旦形成就会在食品基质中持续存在,由于其具有较强的耐热性,故传统的热降解方法很难将其降解^[20]。AFT存在于玉米胚、花生等多种油料中,并且以AFB₁的污染最为严重。

1.2 OT

OT是由赭曲霉、纯绿青霉等霉菌产生的一类真菌毒素,包括7种结构类似的化合物,其中赭曲霉毒素A(OTA,结构见图1)的毒性最强。IARC已将OTA列为2B类致癌物^[2]。OTA不仅具有致癌和致畸性,还会对肝脏、肾脏和其他器官造成损害,大量的OTA堆积还可能会造成动物的肠道坏死^[21]。OT能够污染多种油料,如玉米胚、花生、亚麻籽和葵花籽等。

1.3 ZEN

ZEN(结构见图1),又称F-2毒素,是由镰刀菌属真菌产生的一种非甾体雌激素性真菌毒素。ZEN的化学结构与内源性雌激素相似,是一种2,4-二羟基苯甲酸内酯类化合物。ZEN在低温高湿条件下极易滋生,因而玉米胚、花生、大豆等油料容易受到ZEN的污染^[22-23]。ZEN可通过食物链在人体内蓄积,从而引起生殖发育毒性和免疫毒性,对人类健康造成威胁^[24]。

1.4 DON

DON(结构见图1),又称呕吐毒素,是由镰刀菌属真菌分泌的一种真菌毒素。DON对食品安全和人体健康危害极大,常存在于玉米胚、大豆和亚麻籽等油料及其制品中^[25]。DON的细胞毒性主要来源于其分子中的C-12,13环氧基和C3-OH基团,具有耐高温、耐酸等特性,简单的加工处理很难将其破坏^[26]。由于DON的潜在致癌性和致畸性,IARC将其列为3类致癌物^[27]。人体摄入DON后可能会导致急性和慢性中毒,其中急性中毒的典型症状为呕吐,其他危害包括消化系统紊乱、氧化损伤以及对动物和人类的生殖毒性^[2]。

1.5 FB

FB,又称烟曲霉毒素,是由镰刀菌属真菌产生的一种真菌毒素。FB类型多样,包括FB₁、FB₂和FB₃等多种结构,其中FB₁(结构见图1)污染最广、毒性最强,已被IARC列为2B类致癌物^[28]。玉米胚和花生是FB主要污染的两种油料,特别是对玉米胚的污染最为严重^[2]。FB会对生物体造成多种

毒害作用,包括致癌性、免疫毒性、细胞毒性、器官和组织毒性等^[29]。

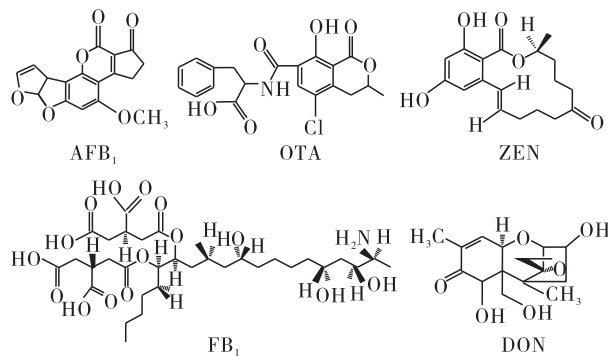


图 1 油料中常见污染真菌毒素的结构

Fig.1 Structure of common contaminating mycotoxins in oilseed

2 低温等离子体对真菌毒素的降解效果

2.1 低温等离子体概述

2.1.1 等离子体概念及特点

等离子体(Plasma)是一种部分或完全电离的气体,通常被称为物质的第四种状态,是通过中性气体施加电流导致气体分子电离而产生的^[30](其产生示意图见图2)。等离子体放电中离子化气体所产生的活性物质包括中性原子、电子、活性氧、活性氮、受激分子以及高能粒子等多种成分,因而等离子体对细菌以及常见的真菌等具有较强的杀伤作用^[31]。等离子体可以通过气体温度、热力学平衡状态和电离度等特征进行分类。根据温度的不同,等离子体可以分为高温等离子体和低温等离子体。低温等离子体可进一步细分为热等离子体和非热等离子体(又称冷等离子体),在大气压下产生的低温等离子体因其独特的优点,如可在空气中运行、效率高、无热损伤和环境友好等,被广泛应用于食品和农业产业^[32-33]。

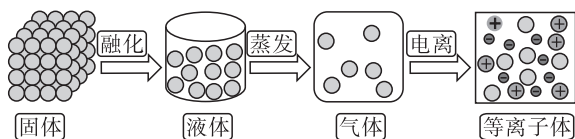


图 2 等离子体产生示意图

Fig.2 Schematic diagram of plasma generation

2.1.2 低温等离子体的产生方式

根据气体放电形式,低温等离子体可分为多种类型,常见的有电晕放电(Corona discharge, CD)、滑动弧放电(Glide arc discharge, GAD)、大气压等离子体射流(Atmospheric pressure plasma jet, APPJ)和介质阻挡放电(Dielectric barrier discharge, DBD)等^[34],如图3所示。不同的等离子体源在不同的温

度下产生的等离子体具有不同的粒子密度,因此具有不同的应用^[35]。

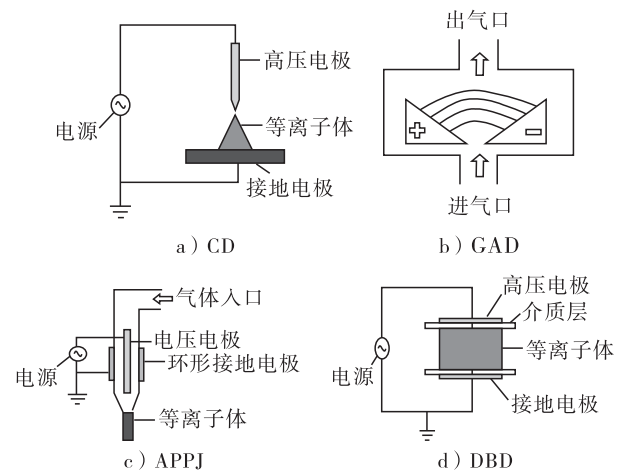


图 3 低温等离子体装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of low temperature plasma device

2.1.2.1 CD

CD的基本原理是通过向尖端高压电极施加电压,从而引起电极附近的气体被局部击穿^[36]。根据电源和频率的不同,CD可以分为直流放电、交流放电和高频放电,其具有系统稳定、反应器结构简单以及能量利用率高等优点,但在放电过程中,电离主要发生在尖端高压电极附近,导致腔内等离子体分布不均匀,并且当电压增加时容易发生火花放电,最终导致气体被击穿^[37]。

2.1.2.2 GAD

GAD过程首先是高压电源在两个电极之间的最短间隙处引起击穿,形成电弧,然后电弧在气流的推动下沿电极运动,同时在这个过程中被拉长,当滑动弧被拉长到临界长度时,由于电源无法提供足够的能量来满足电弧的长度增加,于是滑动弧迅速冷却并熄灭,之后在最短间隙处再次发生击穿,形成新的电弧,并进入新的循环周期。这个过程会不断地重复,从而形成等离子体区域^[38]。

2.1.2.3 APPJ

APPJ有两个共轴电极,中间有高速气体流通过,当自由电子在射频场之间聚集后,与环境中的气体分子发生碰撞产生等离子体^[39]。气体流经过毛细管并将等离子体转移到出口,其诱导对流作用使得反应物质在难以到达的区域、狭窄的缝隙、不规则的几何形状和斑点上具有更高的渗透率。然而,由于其空间限制,通常不推荐用于大面积表面处理,并且使用高气体流量会增加其成本,特别是当使用惰性气体时^[40]。

2.1.2.4 DBD

DBD 是在放电区域涂覆或插入至少一个介质阻挡层的交流放电形式,可以直接或间接地对样品进行处理。由于 DBD 可以利用各种类型的气源在较宽的电压和频率范围内工作,并能够获得分布更均匀的等离子体,其特点是产生大量短寿命的微放电,因此 DBD 是应用最广泛的等离子体之一^[35]。DBD 系统被认为是一种有效的低温等离子体激发系统,在科学研究和工业应用中得到了广泛的使用。

2.2 低温等离子体降解真菌毒素的研究现状

与传统的真菌毒素降解方法相比,低温等离子体降解真菌毒素具有无残留、耗能较低、经济有效等特点。近年来,有关低温等离子体降解真菌毒素的报道主要集中在真菌毒素类型、食品底物、等离子体来源和等离子体处理工艺参数等方面。目前,关于低温等离子体降解真菌毒素的应用在实验室环境下研究的较多,并取得了较好的降解效果,有望在食品工业大规模生产中应用。低温等离子体对真菌毒素的降解效果见表 1。

表 1 低温等离子体降解真菌毒素的研究进展

Table 1 Research progress on mycotoxin degradation by low temperature plasma

样品/ 模型	毒素类型	等离子体源	工艺参数	处理结果	参考文献
载玻片	AFB ₁	射频放电 (RF)	射频功率 80 ~ 120 W, 处理时间 50 ~ 250 s	经 120 W 等离子体处理 150 s 以上, AFB ₁ 降解率可达 95% 以上	[41]
盖玻片	AFB ₁	脉冲等离子体	氮气, 压力 50 662.5 Pa, 处理时间 0 ~ 30 min	处理 15 min 后, AFB ₁ 含量降至初始含量(200 μg/kg)的 1/10 以下	[17]
盖玻片	DON、ZEN、恩镰孢菌素、FB ₁ 和 T2 毒素、杂色曲霉毒素 (ST) 和 AAL 毒素	DBD	空气, 电压 38 kV, 频率 17 kHz, 处理时间 0 ~ 60 s, 放电间隙 2 mm	处理 60 s 可使纯真菌毒素完全降解	[42]
盖玻片	金黄色葡萄球菌肠毒素 B (SEB)	DBD	电压 3 kV, 频率 50 kHz, 处理时间 0 ~ 30 min, 放电间隙 8 mm	处理 30 min 时 SEB 的降解率最大, 为 96%	[43]
玻璃 平板	DON	DBD	电压 85 kV, 频率 50 Hz, 处理时间 0 ~ 20 min	处理 20 min, 在水悬浮液状态下, DON 减少 99% 以上, Caco-2 细胞活力恢复 80% 以上; 在粉末状态下, DON 减少 33%, Caco-2 细胞活力仅恢复 15%	[44]
盖玻片	DON	DBD	电压 0 ~ 30 kV, 频率 3 500 Hz, 占空比 70%, 高压电极与样品的间隙 2 mm	处理 5 min, 乙腈-水 (体积比 20:80) 溶液中 DON 被降解完全; 干燥条件下处理 60 min, DON 降解率仅为 75.9%	[45]
榛子、花生 和开心果	AFB ₁ 、AFB ₂ 、 AFG ₁ 、AFG ₂	低压低温等离子体 (LPCP)	空气、六氟化硫 (SF ₆), 功率 300 W, 电压 20 kV, 处理时间 5 ~ 20 min	空气等离子体处理 20 min 使总黄曲霉毒素 (AFB ₁ 、AFB ₂ 、AFG ₁ 、AFG ₂) 降低了 50%, 而 SF ₆ 等离子体处理 20 min 仅降低了 20%	[46]
花生粉、玉 米粉	AFB ₁	RF	功率 50 ~ 250 W, 处理时间 100 ~ 500 s	150 W 处理 500 s, 花生粗粉和玉米粗粉中 AFB ₁ 的降解率分别为 88.3% 和 92.2%	[47]
花生	AFB ₁	RF	功率 0 ~ 400 W, 处理时间 0 ~ 8 min	300 W 处理 8 min, AFB ₁ 降解率为 79.26%	[48]

续表 1

样品/ 模型	毒素类型	等离子体源	工艺参数	处理结果	参考 文献
榛子	AFB ₁ 、AFB ₂ 、 AFG ₁ 、AFG ₂	DBD	纯 N ₂ 和 3 种 N ₂ /O ₂ 混合气体 (0.1% O ₂ 、1% O ₂ 、21% O ₂), 功率 400 ~ 1 150 W, 处 理时间 1 ~ 12 min	1 000 W 处理 12 min, 榛子中总 黄曲霉毒素和 AFB ₁ 的含量降 低 70% 以上; 对 AFB ₁ 、AFG ₁ 的 降解效果优于 AFB ₂ 和 AFG ₂	[49]
榛子	AFB ₁ 、AFB ₁ + AFB ₂ (TotAFs)	APPJ、RF	大气压等离子体(空气, 功率 655 W, 处理时间 1.7 min); 低压等离子体(空气, 功率 100 W, 处理时间 30 min)	AFB ₁ 降解率 72% ~ 73%; TotAFs 降解率 70% ~ 71%	[50]
花生	AFB ₁ 、AFB ₂	APPJ	压缩空气, 电压 4.4 kV, 频率 70 ~ 90 kHz, 最大功率 650 W, 处理时间 0.5 ~ 5 min	处理 5 min(搅拌)后, AFT 含量 降低 38%	[51]
大豆油	AFB ₁	PTS - 2000D 型 低温等离子体	功率 30 ~ 150 W, 处理时间 15 ~ 240 s	143.30 W 处理 95.08 s, 大豆油 中 AFB ₁ 的脱除率为 (79.65 ± 1.33)%	[52]
大麦粒、油 菜籽和菜 籽粕	ZEN	DBD	空气, 电压 0 ~ 30 kV, 频率 3 500 Hz, 占空比 70%, 处理 时间 0 ~ 3 min	处理 3 min, 油菜籽、菜籽粕和 大麦粒中 ZEN 降解率分别为 91.6%、83.2% 和 64.8%	[53]

2.2.1 低温等离子体对纯毒素的降解

从表 1 可以看出,低温等离子体技术可以高效降解少量纯毒素样品,且降解效果与处理时纯毒素的存在状态有关。Ott 等^[44]研究了高压大气低温等离子体(HVACP)技术利用空气产生活性氧(ROS)和活性氮(RNS)降解 27 株黄曲霉菌培养物和 DON 的效果,发现含 100 μg DON 的 1 mL 水悬浮液经 HVACP 处理 20 min 后,DON 减少 99% 以上,Caco-2 细胞活力恢复 80% 以上,然而,同样处理 100 μg 粉末状 DON,DON 仅减少 33%,Caco-2 细胞活力仅恢复 15%。Feizollahi 等^[45]研究发现,在乙腈-水(体积比 20:80)溶液中经大气压低温等离子体(ACP)处理 5 min 后 DON 被完全降解,而在干燥条件下经 ACP 处理 60 min 后 DON 降解率仅为 75.9%。这些研究表明,经低温等离子体处理时,纯毒素在溶液状态下的降解效果要显著高于干燥条件下的,这可能是由于臭氧是水溶性的,水的存在有利于低温等离子体处理过程中产生的臭氧被样品吸收。此外,在低温等离子体处理过程中,当系统中存在水时,可能会产生更多的 ROS,这可能会增强毒素的降解^[45,54]。

2.2.2 低温等离子体对油料中真菌毒素的降解

目前,利用低温等离子体技术降解油料中真菌毒素,研究较多的油料是花生和榛子,研究较多的真

菌毒素为 AFT。研究表明,食品基质可以影响低温等离子体对真菌毒素的降解效果。Feizollahi 等^[53]研究发现,经 ACP 处理 1 min 和 3 min,与大麦粒相比,ZEN 在油菜籽和菜籽粕中的降解率更高,而且与菜籽粕相比,处理大麦粒和油菜籽时产生的等离子体活性物质浓度更高,说明 ACP 在降解 ZEN 方面存在底物效应。其他基质特性,如含水量、样品粒径等也可能影响低温等离子体对真菌毒素的降解效果。李玉鹏等^[47]研究发现,花生粗粉和玉米粗粉试样中 AFB₁ 的降解率分别低于花生细粉和玉米细粉试样,可能是由于粒度越小,与等离子体活性物质的接触面积更大,从而降解效果更好。另外,低温等离子体技术对油料中真菌毒素的降解效果低于纯毒素,这可能是因为油料中的某些成分与真菌毒素竞争活性物质,降低了参与毒素降解的等离子体活性物质的浓度,同时真菌毒素污染可以渗透到油料内,但等离子体活性物质的渗透性有限所致^[41,48]。尽管在复杂的油料基质中,低温等离子体对真菌毒素的降解效果会有所下降,但它仍然是一个有前景的技术,值得进一步研究和开发。

3 低温等离子体对真菌毒素的降解机制

作为一个新兴领域,关于真菌毒素在低温等离子体处理过程中降解产物结构和途径的研究很少,且现有文献主要是关于 AFB₁ 和 ZEN 降解产物和降

解途径的研究。在低温等离子体处理过程中,真菌毒素的降解途径与其分子结构、等离子体反应物的性质以及等离子体活性物质与毒素分子间的相互作用密切相关^[55]。Shi 等^[19]利用高效液相色谱-飞行时间质谱(HPLC-TOF-MS)对 AFB₁ 经 HVACP 处理后的降解产物进行了鉴定,共检测到 6 种主要降解产物,其中 2 种是臭氧分解产物,其他 4 种是除臭氧外其他活性物质的降解产物,认为 ROS 是 HVACP 处理过程中 AFB₁ 降解的主要因素,其根据降解产物的结构,提出了 2 种可能的降解途径(图 4):第一条路径主要是将水分子(H₂O)、氢原子(H)或醛基(-CHO)添加到 AFB₁ 上的加成反应(图 4a);第二条路径是 HO₂·作用下 AFB₁ 的环氧化反应以及·OH、H₂O₂和 O₃共同作用下 AFB₁ 的氧化反应(图 4b)。值得注意的是,在低温等离子体处理过

程中,紫外线的发射强度远远小于有效降解 AFT 所需的紫外线强度^[56-57]。Wang 等^[58]采用超高效液相色谱-四极杆飞行时间质谱(UPLC/Q-TOF-MS)分析了 AFB₁ 经低温射频等离子体处理后降解产物的可能结构,共鉴定出 5 种 AFB₁ 的可能降解产物,认为降解产物在末端呋喃环上双键的丢失是其毒性相对 AFB₁ 来说降低的原因。Wielogorska 等^[59]在人肝癌(HepG2)细胞上对 AFB₁ 经低温等离子体处理后的降解产物的毒性进行了测试,没有观察到细胞毒性的增加。Nishimwe 等^[20]研究了 AFB₁ 经 HVACP 处理后的细胞毒性。结果表明,HepG2 细胞暴露于经 HVACP 处理 20 min 的 AFB₁ 中 72 h,其细胞活力、caspase-3 活性、DNA 片段化水平和蛋白羰基含量与对照组 HepG2 细胞(未暴露的)相比无显著差异。

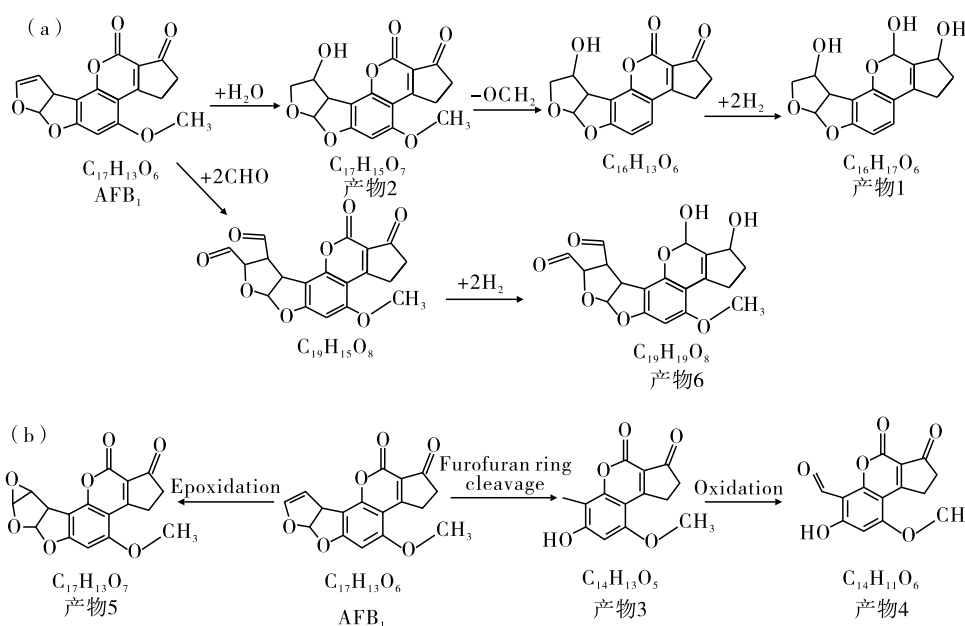
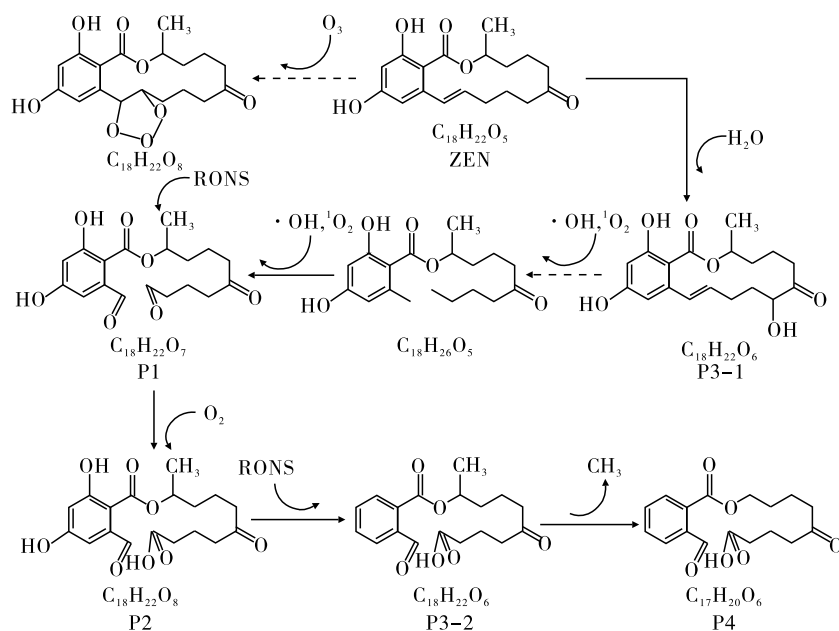


图 4 HVACP 降解 AFB₁ 的可能途径^[19]

Fig. 4 Possible pathways of AFB₁ degradation by HVACP^[19]

在最近的一项研究中,Liu 等^[60]采用液相色谱-质谱联用仪(LC-MS/MS)对 ZEN 经 ACP 处理后的降解产物进行分析,发现 ZEN 经 ACP 处理后产生了 4 种主要降解产物,通过分析提出了可能的降解途径(图 5):ACP 处理时,O₃ 与 ZEN 分子中最活泼的 C=C 发生加成反应导致双键断裂,同时生成 1,2,3-三氧环状化合物中间体,该中间体化合物在活性氮氧化物(RONS)的作用下进一步氧化生成 C₁₈H₂₂O₇(P1)。同时,部分 ZEN 与·OH 发生碰撞,生成 C₁₈H₂₂O₆(P3-1)。ACP 体系中·OH、¹O₂等强氧化活性的物质与 P3-1 进一步反应,导致双

键断裂形成 C₁₈H₂₆O₅ 中间体,然后发生自由基加成反应,体系中的 RONS 与烯烃双键结合,在双键两端形成醛,从而得到 P1。随后,P1 继续被氧化,远离苯环的醛基位发生氧化反应形成羧基生成 P2。由于受到 RONS 的亲电效应,降解产物 P2 苯环上的两个羟基(OH-1 和 OH-3)被破坏形成 P3-2。随着进一步的氧化,P3-2 去甲基化生成 P4。此外,Liu 等^[60]通过细胞实验和动物实验对 ZEN 经 ACP 处理后降解产物的毒性进行了研究,发现 ZEN 经 ACP 处理后,其降解产物的毒性显著降低。

图 5 ACP 降解 ZEN 的可能途径^[60]Fig. 5 Possible pathways of ZEN degradation by ACP^[60]

4 低温等离子体处理对油料品质的影响

Basaran 等^[46]研究发现,经 15 min 空气或 SF₆ 等离子体处理的坚果,与未经处理的样品在气味、外观、质地和整体接受度方面均无显著差异 ($p > 0.05$)。Lee 等^[61]研究发现,利用 LPCP 对常规焙烤芝麻 (RRS)、过度焙烤芝麻 (ORS)、常规焙烤紫苏籽 (RRP) 和过度焙烤紫苏籽 (ORP) 处理 30 min,其感官特性,即色泽、风味和总体接受度与未处理的样品相比没有显著变化。Iqdiem 等^[51]研究发现,APPJ 处理对花生理化品质 (过氧化值、游离脂肪酸含量、酸度值、氧化稳定性) 无显著影响,对花生总体接受度没有负面影响。Afshar 等^[62]研究表明,采用低温等离子体处理葵花籽和芝麻籽,可加速其油脂的氧化和变质,并促进其生物活性成分 (总酚类化合物) 的降解。目前,关于低温等离子体处理对油料品质影响的相关文献较少,还需要进一步的研究。

5 结语

低温等离子体作为一种高效、无残留的新型非热处理技术,在对油料中真菌毒素降解方面极具应用潜力。当前,低温等离子体已经被视为一种有效的脱除真菌毒素的技术,但是其降解真菌毒素的机制尚未完全解析,其降解产物的安全性需进一步验证。低温等离子体技术应用于油料中真菌毒素的降解时,其降解效果和对油料品质的研究较少,同时其对后续油脂制取工艺及产品品质的影响还不明确。当前低温等离子体技术降解油料中真菌毒素的研究仍处于实验研究层面,其在油料加工过程中应用的

可行性还需要更多数据支撑。未来应将低温等离子体技术与其他现有技术相结合,进一步提升其在油料中的脱毒能力,以实现更环保、安全和有效地脱除真菌毒素。

参考文献:

- [1] 白艺珍, 张奇, 李培武. 油料作物主要生物毒素发生危害与检测控制研究[J]. 农产品质量与安全, 2020 (6): 7-12, 48.
- [2] 黄常刚, 闫兆凤, 杨欣, 等. 食用植物油中真菌毒素研究进展[J]. 中国食品卫生杂志, 2023, 35(6): 967-974.
- [3] 姜婷婷, 王淞, 闫枫蕾, 等. 表面等离子共振传感器在食品真菌毒素检测中的应用[J]. 化学试剂, 2023, 45 (10): 124-131.
- [4] 徐晓艳, 王宇, 王梦瑶, 等. 中药材中真菌毒素的检测与脱毒研究进展[J]. 中草药, 2024, 55 (2): 657-669.
- [5] NUMANOGLU E, YENER S, GÖKMEN V, et al. Modelling thermal degradation of zearalenone in maize bread during baking[J]. Food Addit Contam A Chem Anal Control Expo Risk Assess, 2013, 30(3): 528-533.
- [6] 李克, 潘丽红, 罗小虎, 等. 电子束辐照降解玉米中玉米赤霉烯酮和呕吐毒素[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(21): 73-78.
- [7] AFRIYIE-GYAWU E, WILES M C, HUEBNER H J, et al. Prevention of zearalenone-induced hyperestrogenism in prepubertal mice[J]. J Toxicol Environ Health A, 2005, 68(5): 353-368.
- [8] 姬宁. 花生油中黄曲霉毒素 B₁ 碱炼脱毒及安全性评价[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2015.
- [9] REN D, DIAO E, HOU H, et al. Degradation and

- ozonolysis pathway elucidation of deoxynivalenol [J]. *Toxicon*, 2020, 174: 13–18.
- [10] ADEBO O A, KAYITESI E, NJOBEH P B. Reduction of mycotoxins during fermentation of whole grain Sorghum to whole grain Ting (a southern African food) [J/OL]. *Toxins* (Basel), 2019, 11(3): E180[2024-01-08]. <https://doi.org/10.3390/toxins11030180>.
- [11] 曾凡正, 高阳, 李进伟, 等. 花生油生物精炼法去除黄曲霉毒素的研究[J]. *中国油脂*, 2012, 37(1): 6–10.
- [12] 支爱, 何学明, 沈飞, 等. 低温等离子体降解食品中真菌毒素的研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(5): 157–165.
- [13] 叶子充, 杨新文, 成军虎. 低温等离子技术对谷物主要品质的影响研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(12): 15–17.
- [14] 康超娣, 相启森, 赵电波, 等. 冷等离子体在肉品安全控制领域应用研究进展[J]. *食品工业*, 2019, 40(5): 280–284.
- [15] BHAT R, REDDY K R. Challenges and issues concerning mycotoxins contamination in oil seeds and their edible oils: Updates from last decade[J]. *Food Chem*, 2017, 215: 425–437.
- [16] 纪俊敏, 侯杰, 姜苗苗, 等. 油脂中黄曲霉毒素污染及吸附脱除的研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(3): 10–19.
- [17] SAKUDO A, TOYOKAWA Y, MISAWA T, et al. Degradation and detoxification of aflatoxin B₁ using nitrogen gas plasma generated by a static induction thyristor as a pulsed power supply [J]. *Food Control*, 2017, 73: 619–626.
- [18] 莫紫梅. 黄曲霉毒素 B₁ 降解产物及降解安全性评价研究进展[J]. *中国油脂*, 2024, 49(6): 98–105, 123.
- [19] SHI H, COOPER B, STROSHINE R L, et al. Structures of degradation products and degradation pathways of aflatoxin B₁ by high-voltage atmospheric cold plasma (HVACP) treatment[J]. *J Agric Food Chem*, 2017, 65(30): 6222–6230.
- [20] NISHIMWE K, AGBEMAFLE I, REDDY M B, et al. Cytotoxicity assessment of aflatoxin B₁ after high voltage atmospheric cold plasma treatment[J]. *Toxicon*, 2021, 194: 17–22.
- [21] 纪剑, 于坚, 王良哲, 等. 真菌毒素的降解技术研究进展[J]. *食品与生物技术学报*, 2022, 41(5): 1–10.
- [22] 赵天祥, 余祖华, 丁轲, 等. 微生物降解玉米赤霉烯酮的研究进展[J]. *微生物学报*, 2023, 63(10): 3711–3726.
- [23] 宁春妹, 安佳秀, 赵颖, 等. 玉米赤霉烯酮对动物繁殖性能的毒性作用及其机制[J]. *动物营养学报*, 2023, 35(4): 2166–2174.
- [24] 胡美华, 刘秀娟, 万全玉, 等. 聚多巴胺磁性分子印迹聚合物的制备及其在测定食品中玉米赤霉烯酮上的应用[J]. *理化检验: 化学分册*, 2022, 58(9): 1080–1087.
- [25] 金瑞, 李萌萌, 万小乐, 等. 谷物中脱氧雪腐镰刀菌烯醇物理降解研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(13): 331–339.
- [26] 邹诗祺, 宋佳, 曹清明, 等. 呕吐毒素的危害及脱毒研究进展[J]. *饲料工业*, 2024, 45(3): 127–135.
- [27] XU L L, WEN Y Q, LIU Y L, et al. Occurrence of deoxynivalenol in maize germs from North China Plain and the distribution of deoxynivalenol in the processed products of maize germs[J]. *Food Chem*, 2018, 266: 557–562.
- [28] DEY D K, KANG J I, BAJPAI V K, et al. Mycotoxins in food and feed: Toxicity, preventive challenges, and advanced detection techniques for associated diseases[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2023, 63(27): 8489–8510.
- [29] 刘晓萌, 王寿南, 姜德铭, 等. 伏马毒素的污染现状及其生物脱毒研究进展[J]. *中国畜牧杂志*, 2024, 60(2): 143–149.
- [30] HAMAD G M, MEHANY T, SIMAL-GANDARA J, et al. A review of recent innovative strategies for controlling mycotoxins in foods[J/OL]. *Food Control*, 2023, 144: 109350[2024-01-08]. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109350>.
- [31] 牛海丽. 低温等离子体活化水杀菌机制研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2022.
- [32] 蓝蔚青, 陈雪宁, 谢晶. 低温等离子体技术在水产品保鲜中的应用研究进展[J]. *肉类研究*, 2022, 36(6): 60–66.
- [33] XIANG Q, HUANGFU L, DONG S, et al. Feasibility of atmospheric cold plasma for the elimination of food hazards: Recent advances and future trends[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2023, 63(20): 4431–4449.
- [34] 冯燕, 李茹, 胡旌钰, 等. 低温等离子体处理二甲苯废气的研究进展[J]. *当代化工*, 2022, 51(2): 413–417.
- [35] CHEN Y Q, CHENG J H, SUN D W. Chemical, physical and physiological quality attributes of fruit and vegetables induced by cold plasma treatment: Mechanisms and application advances[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2020, 60(16): 2676–2690.
- [36] 韩家林, 兰青青, 李新月, 等. 低温等离子体协同催化处理有机废水进展[J]. *精细石油化工进展*, 2023, 24(6): 53–58.
- [37] 冷雪健, 金福宝, 马山刚, 等. 基于低温等离子体的污染物降解技术研究进展[J]. *应用化工*, 2023, 52(8): 2397–2401, 2407.
- [38] 李海明, 袁萌萌, 邵新红, 等. 低温等离子体对扩展青霉杀菌作用及灭菌机理研究综述[J]. *山东化工*,

- 2021, 50(14): 88–90.
- [39] 刘宸成, 王佳媚, 陈姑, 等. 低温等离子体对动物源食品中脂质氧化作用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(20): 6535–6544.
- [40] KATSIGIANIS A S, BAYLISS D L, WALSH J L. Cold plasma for the disinfection of industrial food – contact surfaces: An overview of current status and opportunities[J]. Compr Rev Food Sci Food Saf, 2022, 21(2): 1086–1124.
- [41] 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, 30(2): 80–85, 91.
- [42] TEN BOSCH L, PFOHL K, AVRAMIDIS G, et al. Plasma – based degradation of mycotoxins produced by *Fusarium*, *Aspergillus* and *Alternaria* species [J/OL]. Toxins (Basel), 2017, 9(3): E97 [2024–01–08]. <https://doi.org/10.3390/toxins9030097>.
- [43] 潘迪, 张大革, 孙运金, 等. 低温等离子体对金黄色葡萄球菌肠毒素 B 的灭活作用[J]. 食品工业科技, 2020, 41(10): 192–195, 202.
- [44] OTT L C, APPLETON H J, SHI H, et al. High voltage atmospheric cold plasma treatment inactivates *Aspergillus flavus* spores and deoxynivalenol toxin [J/OL]. Food Microbiol, 2021, 95: 103669 [2024–01–08]. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2020.103669>.
- [45] FEIZOLLAHI E, ARSHAD M, YADAV B, et al. Degradation of deoxynivalenol by atmospheric – pressure cold plasma and sequential treatments with heat and UV light[J]. Food Eng Rev, 2021, 13(3): 696–705.
- [46] BASARAN P, BASARAN – AKGUL N, OKSUZ L. Elimination of *Aspergillus parasiticus* from nut surface with low pressure cold plasma (LPCP) treatment[J]. Food Microbiol, 2008, 25(4): 626–632.
- [47] 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.
- [48] 刘真, 王世清, 肖军霞, 等. 等离子体降解花生中黄曲霉毒素的影响因素[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(5): 44–48.
- [49] SICILIANO I, SPADARO D, PRELLE A, et al. Use of cold atmospheric plasma to detoxify hazelnuts from aflatoxins[J/OL]. Toxins (Basel), 2016, 8(5): E125 [2024–01–08]. <https://doi.org/10.3390/toxins8050125>.
- [50] SEN Y, ONAL – ULUSOY B, MUTLU M. Detoxification of hazelnuts by different cold plasmas and gamma irradiation treatments [J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2019, 54: 252–259.
- [51] IQDIAM B M, ABUAGELA M O, BOZ Z, et al. Effects of atmospheric pressure plasma jet treatment on aflatoxin level, physiochemical quality, and sensory attributes of peanuts[J/OL]. J Food Process Pres, 2020, 44: 14305 [2024–01–08]. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14305>.
- [52] 杜黎, 陈定, 李俊, 等. 冷等离子体处理去除大豆油中黄曲霉毒素 B₁ 的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(13): 5314–5321.
- [53] FEIZOLLAHI E, ROOPESH M S. Degradation of zearalenone by atmospheric cold plasma: Effect of selected process and product factors [J]. Food Bioprocess Technol, 2021, 14(11): 2107–2119.
- [54] FEIZOLLAHI E, ROOPESH M S. Mechanisms of deoxynivalenol (DON) degradation during different treatments: A review[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2022, 62(21): 5903–5924.
- [55] MISRA N N, YADAV B, ROOPESH M S, et al. Cold plasma for effective fungal and mycotoxin control in foods: Mechanisms, inactivation effects, and applications [J]. Compr Rev Food Sci Food Saf, 2019, 18(1): 106–120.
- [56] LIU R, JIN Q, TAO G, et al. LC – MS and UPLC – quadrupole time – of – flight MS for identification of photodegradation products of aflatoxin B₁ [J]. Chromatographia, 2010, 71(1): 107–112.
- [57] LAROUCSI M, LEIPOLD F. Evaluation of the roles of reactive species, heat, and UV radiation in the inactivation of bacterial cells by air plasmas at atmospheric pressure[J]. Int J Mass Spectrom, 2004, 233(1/2/3): 81–86.
- [58] WANG S Q, HUANG G Q, LI Y P, et al. Degradation of aflatoxin B₁ by low – temperature radio frequency plasma and degradation product elucidation[J]. Eur Food Res Technol, 2015, 241(1): 103–113.
- [59] WIELOGORSKA E, AHMED Y, MENEELY J, et al. A holistic study to understand the detoxification of mycotoxins in maize and impact on its molecular integrity using cold atmospheric plasma treatment [J/OL]. Food Chem, 2019, 301: 125281 [2024–01–08]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125281>.
- [60] LIU M, FENG J, FAN Y, et al. Application of atmospheric cold plasma for zearalenone detoxification in cereals: Kinetics, mechanisms, and cytotoxicity analysis [J/OL]. J Adv Res, 2024, 4: S2090123224001668 [2024–01–08]. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2024.04.024>.
- [61] LEE T, PULIGUNDLA P, MOK C. Degradation of benzo[a]pyrene on glass slides and in food samples by low – pressure cold plasma[J]. Food Chem, 2019, 286: 624–628.
- [62] AFSHAR S, RAMEZAN Y, HOSSEINI S. Physical and chemical properties of oil extracted from sesame (*Sesamum indicum* L.) and sunflower (*Helianthus annuus* L.) seeds treated with cold plasma[J]. J Food Meas Charact, 2022, 16(1): 740–752.