

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.01.016

雷雨晴, 张海洋, 田琳, 等. 冷等离子体对真菌毒素降解的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(1): 120-128.

LEI Y Q, ZHANG H Y, TIAN L, et al. Recent progress on degradation of mycotoxins by cold plasma[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(1): 120-128.

冷等离子体对真菌毒素降解的研究进展

雷雨晴^{1,2}, 张海洋^{1,2}, 田琳^{1,2}, 祁智慧^{1,2}, 李金东^{1,3}, 唐芳^{1,2}✉

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. 粮食储运国家工程研究中心, 北京 100037;
3. 河南工业大学 粮食物资和储备学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 真菌毒素可损害动物和人的健康, 并给食品行业造成经济损失。冷等离子体作为新兴的非热技术, 具有绿色环保、高效等优势, 在真菌毒素降解方面颇有成效。本文总结了冷等离子体处理后真菌毒素降解机理, 论述了不同放电方式及处理条件下的冷等离子体处理后黄曲霉毒素、脱氧雪腐镰刀菌烯醇、玉米赤霉烯酮的降解产物结构, 阐述可能的降解路径, 综述了冷等离子体对真菌毒素纯品及依附于食品基质上的真菌毒素的降解效果, 从真菌毒素降解产物毒性角度, 从结构毒性、细胞毒性、动物毒性三个方面分别探讨冷等离子体处理后的安全性和可行性, 为冷等离子体在降解食品真菌毒素方面的应用提供参考。

关键词: 真菌毒素; 冷等离子体; 降解机理; 降解产物; 降解产物毒性

中图分类号: TS205 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)01-0120-09

Recent Progress on Degradation of Mycotoxins by Cold Plasma

LEI Yu-qing^{1,2}, ZHANG Hai-yang^{1,2}, TIAN Lin^{1,2}, QI Zhi-hui^{1,2}, LI Jin-dong^{1,3}, TANG Fang^{1,2}✉

1. Institute of Grain Storage and Logistics, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China; 2. National Engineering Research Center for Grain Storage and Logistics, Beijing 100037, China; 3. School of Food and Strategic Reserves, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: Mycotoxins are toxic, which can endanger health of animals and humans, causing a lot of economic losses to the food industry. Cold plasma is an emerging non-thermal technology featuring green and high efficiency, which can degrade mycotoxin in an effective way. To provide a theoretical reference for the application of cold plasma in the degradation of food mycotoxins, this paper first summarized the mycotoxins degradation mechanisms after cold plasma treatment. The key point is the structure of degradation products and possible degradation pathways of aflatoxin, deoxynivalenol, and zearalenone after

收稿日期: 2023-08-11

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (ZX2229; JY2309)

Supported by: Fundamental Research Funds of the Central Research Institutes (No. ZX2229; JY2309)

作者简介: 雷雨晴, 女, 1996年出生, 硕士, 研究方向为真菌毒素降解。E-mail: lyq@ags.ac.cn

通讯作者: 唐芳, 女, 1978年出生, 硕士, 副研究员, 研究方向为粮食微生物。E-mail: tf@ags.ac.cn

cold plasma treatment under different discharge modes and treatment conditions. What's more, the degradation effect of cold plasma on pure mycotoxins and mycotoxins on food matrix were reviewed. Finally, the safety and feasibility of cold plasma treatment was talked about from the perspective of toxicity, which was separated into structural, cellular and animal toxicity of the mycotoxin degradation products.

Key words: mycotoxin; cold plasma; degradation mechanism; degradation products; degradation product toxicity

真菌毒素是产毒真菌在合适条件下产生的有毒小分子次级代谢产物。20 世纪 60 年代, 英国发生了一起十几万只火鸡死亡的极端中毒事件, 被认为与真菌毒素污染的花生饲料有关^[1], 真菌毒素由此开始被大众关注。食品中常见的真菌毒素有黄曲霉毒素 (aflatoxins, AFs)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇 (deoxynivalenol, DON)、玉米赤霉烯酮 (zearalenone, ZEN)、伏马毒素 (fumonisins, FBs)、赭曲霉毒素 (ochratoxins, OTs) 等, 真菌毒素的致癌性、致畸性、致突变性、神经毒性、肾毒性、肝毒性^[2]严重危害着动物和人类的健康, 给食品安全带来挑战, 带毒食品也会给社会造成经济损失。尽管在各环节抑制产毒真菌生长是减少真菌毒素污染的主要方法, 但考虑到真菌产生毒素的影响因素复杂, 不可控因素较多等问题, 因此, 真菌毒素的降解手段也被开发出来作为必要的补充措施。

目前常用的真菌毒素降解方法有紫外辐照、脉冲光等物理方法, 臭氧熏蒸、有机酸降解等化学方法, 乳酸菌吸附、酶法降解等生物方法。然而, 部分方法因效率低、存在副产物、降低食品品质等多方面原因, 难以满足行业期望, 因此研究开始转向能够快速控制真菌毒素、对环境友好的创新型技术。冷等离子体作为近年来新兴的非热杀菌技术, 可以克服上述一些缺点, 具有安全、温和、无残留等优势。在真菌毒素降解方面, 冷等离子体技术也有应用潜力, 本文综述了冷等离子体对真菌毒素的降解机理、降解效果及冷等离子体处理后的安全性。

1 冷等离子体技术

1.1 等离子体及冷等离子体

等离子体 (plasma) 的概念最早在 1928 年由

Langmuir^[3]提出, 将含有平衡电荷的电离气体定义为等离子体, 在这个状态下离子和电子的数量基本相等。自然状态下, 物质以固态、液态或气态存在, 当进一步将电能施加到两个电极之间的具有高电势差的气体上时, 由于自由电子与这些气体分子碰撞, 可导致气体变为电离态^[4], 即产生了等离子体, 因此又将等离子体称为物质的“第四态”。根据温度的高低, 可将等离子体分为高温等离子体 (又称平衡等离子体) 和低温等离子体 (又称非平衡等离子体), 高温等离子体的温度约为 $10^6 \sim 10^8$ K, 由处于热力学平衡的离子、电子和气体分子组成; 低温等离子体又可分为热等离子体 ($100 \sim 150$ °C) 和冷等离子体 (< 60 °C), 在热等离子体中, 离子、电子、气体分子等之间存在局部热力学平衡, 然而这些物质在冷等离子体中均处于非平衡状态^[5]。

等离子体一般由包括紫外线、活性物质、带电粒子等在内的多种成分组成^[6], 其中低温状态的冷等离子体因其非热特性, 近年来受到了越来越多食品行业学者的青睐。冷等离子体在产生时大部分施加的能量都集中在电子上而非加热整个电流, 因此总体上能够保持在环境温度附近^[5], 加上冷等离子体本身具有杀菌作用, 在热敏性食品加工方面有广阔的应用前景。此外, 冷等离子体在发挥作用时具有起效快、无化学残留以及可以利用环境空气作为工作气体的环保优势。

1.2 冷等离子体源

冷等离子体的产生需要使用载气 (通常为氧气、氮气、氦气、空气或混合气体)、电源和特殊电极, 常见的冷等离子体发生方式有介质阻挡放电 (dielectric barrier discharge, DBD)、电晕放电 (corona discharge, CD)、等离子体射流 (plasma jet, PJ)、微波放电 (microwave discharge, MD)

和射频放电 (radiofrequency discharge, RD) (图 1)。

DBD 由两个有电位差的电极组成, 用介电材料隔开, 起到限制电流、防止电弧出现以及促进电极空间内气体电离的作用^[7], 其通常采用环境气体作为载气, 具有操作成本低、可大规模应用、处理效率高的优势^[8]。CD 一般是在尖锐的电极上发生, 施加高电压后产生强度不均匀的电场, 电极附近的电场强度超过气体击穿强度后即产生等离子体, CD 的针脚型电极导致的聚焦效应可以带来能量更强、密度更大的等离子体, 从而加快处理过程^[9]。PJ 有两个电极, 载气在两个电极之间流动, 其中外电极接地, 嵌入介电管的中心电极

被射频激发产生等离子体, 产生的 PJ 不受电极空间限制, 适用于处理不规则的表面或 3D 物体^[10]。MD 是无电极放电, 微波源产生的微波经导管被传输到处理室内, 与载气发生非弹性碰撞和电离反应产生等离子体^[11], 与低频源相比, 微波源诱导产生的高能电子更多, 具有高效无污染的特点^[12]。RD 等离子体有感性耦合等离子体、容性耦合等离子体、螺旋波等离子体三种类型, 其中容性耦合等离子体较为常见, 它的基本配置是在真空室内装有两个相距几厘米的平行电极, 施加交流电使得两个电极交替充当阴极和阳极, 从而实现射频放电^[13]。

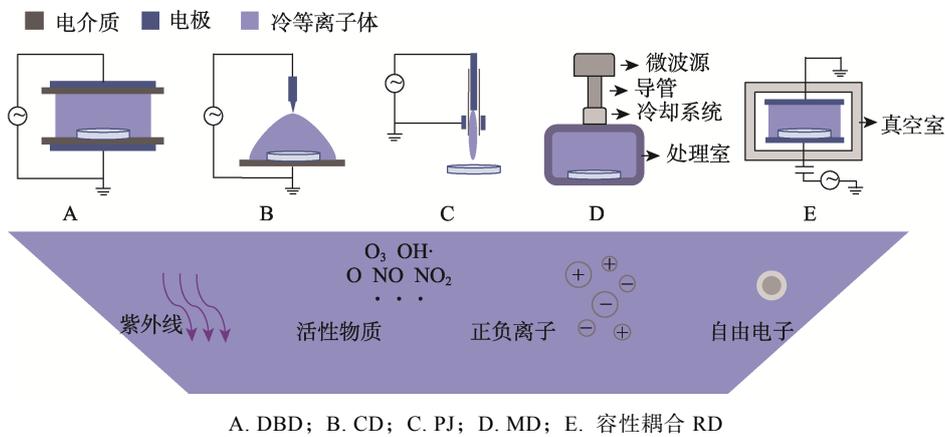


图 1 冷等离子体产生方式
Fig.1 Production methods of cold plasma

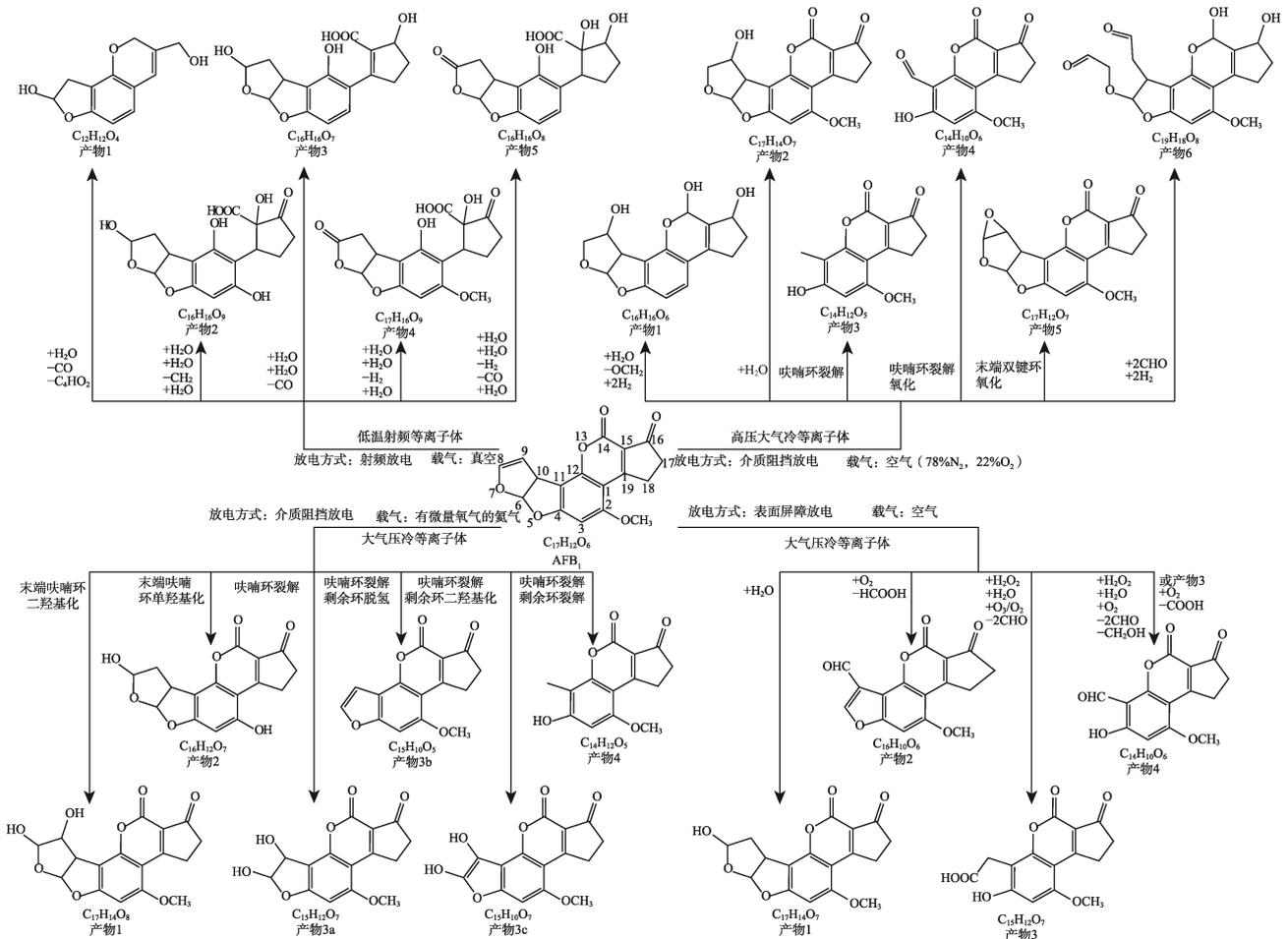
2 冷等离子体降解真菌毒素的机理

冷等离子体在被激发时会产生紫外线、活性物质等多种物质, 还能改变食品的酸碱度, 这些因素在降解真菌毒素过程中发挥不同作用。其中紫外线对毒素有光降解作用, 能够影响 AFB₁ 末端呋喃环结构^[14], 也能作用于毒素分子中低能量可断裂键 (C—O 和 N—H)^[15]; 活性物质包括活性氧 (如 O_3 、 $\cdot OH$ 、 O^+ 、 1O_2 等) 和活性氮 (如 NO 、 $\cdot NO_2$ 、 N_xO_y 等), Hojnik 等^[16]认为相比于轻微的热效应和紫外线, 活性物质是大气压冷等离子体降解真菌毒素的关键因素, 当活性物质与质子溶剂相互作用时能够导致独特的物理化学修饰; 冷等离子体可使处理后的水酸化, 而 DON 的 C-12,13 环氧环在酸性条件下更容易裂解^[17]。然而目前关于冷等离子体降解真菌毒素的具体机制尚无定论, 可能是一种或多种物质发挥效用的

结果。研究人员通过推断冷等离子体处理后真菌毒素的产物结构, 对降解路径有了初步了解。

2.1 黄曲霉毒素

目前有关冷等离子体降解黄曲霉毒素的研究主要集中于 AFB₁。有学者提出了冷等离子体处理后 AFB₁ 可能的降解路径, 降解产物结构如图 2 所示。Wang 等^[18]对 AFB₁ 进行低温射频等离子体处理, 真空环境下 300 W 处理 10 min 后降解率可达 88.3%, 推导得到 5 种产物, 该研究指出 AFB₁ 的降解始于 C8=C9 双键上水分子 (H_2O) 参与的加成反应, 接着是一氧化碳的丢失。Shi 等^[19]探究了高压大气冷等离子体处理对 AFB₁ 的降解效果, 在相对湿度为 40% 的空气中处理 5 min 后, AFB₁ 降解了 76%, 观察到 6 种主要的降解产物, 有两条可能的代谢路径, 路径一主要涉及水分子、氢原子 (H)、醛基 (CHO) 参与的加成反

图 2 冷等离子体处理后黄曲霉毒素 B₁ 的降解产物结构Fig.2 Structure of degradation products of aflatoxin B₁ produced by cold plasma treatment

应 (生成产物 1、2、6), 路径二主要涉及 H₂O[•] 参与的环氧化反应及 OH[•]、H₂O₂、O₃ 共同参与的氧化反应 (生成产物 3、4、5)。Wielogorska 等^[20] 通过 DBD 产生的大气压冷等离子体降解 AFB₁ 的半衰期为 12.4 min, 检测到 6 种新化合物, 推测大部分产物是改变末端呋喃环结构产生的, 而没有发生内酯环的改变或甲基化。Hojnik 等^[16] 利用表面屏障放电的大气压冷等离子系统处理 AFB₁, 60 s 处理降解率达 96%, 120 s 后没有检测到毒素残留, 发现 4 种降解产物, 其中产物 1 的产生始于 C8 位置上的亲电加水, 产物 2 可能是在不稳定的 8,9-二醛中间产物的基础上脱除甲酸产生的, 而产物 3 和 4 是在过氧化物与乙烯基键反应产生的环氧化物基础上进一步氧化成羧基或醛基形成的。值得注意的是, 这些学者推测的冷等离子体处理后 AFB₁ 的降解产物并不相同, 可能是由于仪器、载气、放电方式、产生的作用因子等条件不同导致的, 但这些降解产物普遍失

去了末端呋喃环上的双键, 发生加成或氧化反应, 呋喃环再进一步裂解开环。综合上述研究结果, 推测 AFB₁ 的降解途径普遍从 C8=C9 双键断裂开始, 在 C8 和 C9 位点形成羟基或醛基, 之后呋喃环裂解, 对剩余环进行修饰。

对于其它黄曲霉毒素, AFB₁ 和 AFG₁ 分别比 AFB₂ 和 AFG₂ 在 C8-C9 位置上多一个双键, 因此会对冷等离子体更加敏感^[21], 而这其中 AFB₁ 最敏感, AFG₂ 最不敏感^[22], 但目前没有学者对其它黄曲霉毒素经冷等离子体处理后的降解产物结构式进行解析推测。

2.2 脱氧雪腐镰刀菌烯醇

对于 DON 的冷等离子体降解机理研究较少。Chen 等^[23] 使用以空气为载气、工作电压 50 kV 的 DBD 冷等离子体系统, 8 min 内 DON 降解率可达 83.99%, 质谱分析推断出 4 个分子式和 7 个可能的产物结构 (图 3), 产物 1 可能是水分子参与 C9=C10 双键的加成反应产生的, 也可能是水分

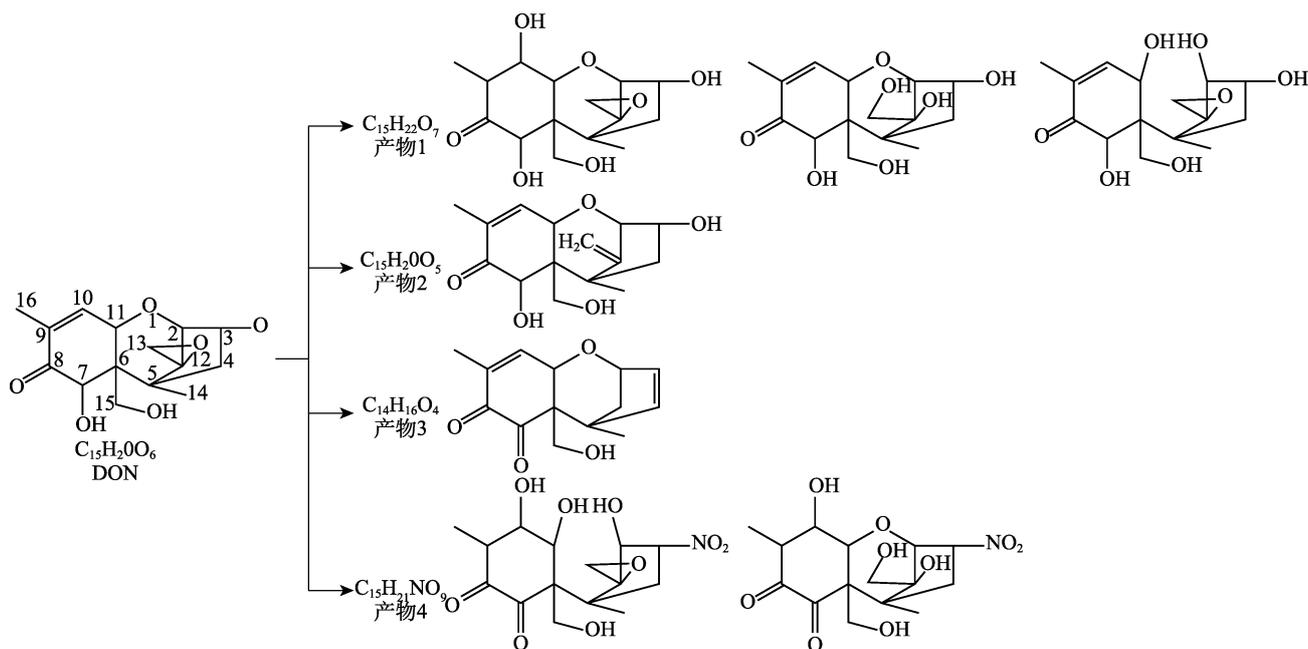


图 3 介质阻挡放电冷等离子体处理后脱氧雪腐镰刀菌烯醇的降解产物结构

Fig.3 Structure of degradation products of deoxynivalenol produced by dielectric barrier discharge cold plasma treatment

子作用于环氧基团发生二羟基化产生的；产物 2 可能是 C12 和 C13 上的环氧基团脱氧形成双键产生的；产物 3 可能是在产物 2 的基础上消除 C12 位双键、C3 位羟基及在 C7 位发生氧化形成羰基产生的；产物 4 则可能是 C3 位置的羟基被硝基取代，C7 位置的羟基被氧化，C9=C10 双键发生加成反应，在 C1 环氧基或 C12 位引入水分子产生的。

2.3 玉米赤霉烯酮

有两份研究给出 ZEN 经冷等离子体处理后的降解产物推测结构式（图 4）。Wielogorska 等^[20]使用 DBD 冷等离子体，通过液质联用分析得到 3 个主要的降解产物，其中产物 1a 和 1b 可能是 ZEN 在 C7 和 C5 处单羟基化产物的异构体，而产物 2 可能是内酯环打开后产生的，但文中并未给出产物 2 的预测结构式。郑哲^[24]用 DBD 低温等离子体处理 ZEN，分析得到一种分子式为 C₁₈H₂₂O₇ 的降解产物，推测了两条可能的降解路径，一是毒素分子与低温等离子体产生的 O₃ 发生克里吉（Criegee）臭氧化反应，使得 C=C 双键断裂；二是 C=C 双键在高场强作用下断裂，与低温等离子体系产生的活性氧自由基发生氧化加成形成醛基。

3 冷等离子体对真菌毒素的降解效率

冷等离子体技术可以降解真菌毒素纯品及依附于食品基质上的真菌毒素。对毒素纯品降解效果较好，Hojnik 等^[25]使用大气压等离子体处理多种真菌毒素，发现 8 min 后 AFs 减少 93%，单端孢霉烯毒素（trichothecenes）减少 90%，FBs 减少 93%，ZEN 减少 100%，降解效率比紫外辐照高；Kiš 等^[26]对 T-2 和 HT-2 毒素进行低压 DBD 等离子体处理，发现氮气作为载气处理 30 min 时，T-2 和 HT-2 毒素的降解率高达 43.25% 和 38.54%；Sakudo 等^[27]使用氮气等离子体处理黄曲霉毒素 B₁（aflatoxin B₁, AFB₁），15 min 内可使毒素降解 90% 以上。

然而大多数情况下，冷等离子体降解食品基质中的真菌毒素效率低于毒素纯品。纯品 DON、ZEN、恩镰孢菌素（enniatins）、伏马毒素 B₁（fumonisin B₁）、T-2 毒素、柄曲霉素（sterigmatocystin）、链格孢菌（*Alternaria alternata* f. sp. *Lycopersici*）毒素在大气压冷等离子体处理 60 s 时几乎都完全降解，但将毒素添加到稻米上以相同条件处理后，降解进程明显延缓^[28]。类似的结果也出现在坚果中，冷等离子体处理在开心果^[29]基质上的 AFB₁ 降解率也出现了一定程度

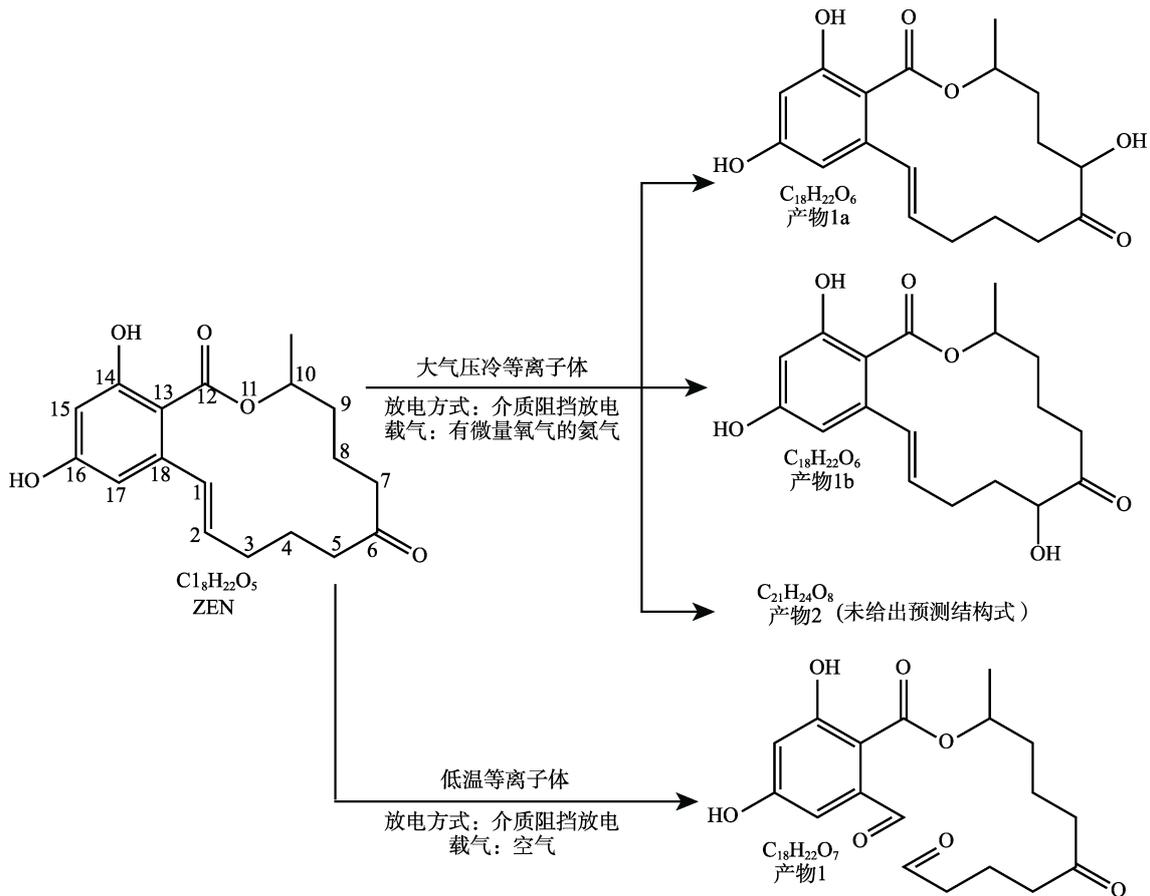


图 4 冷等离子体处理后玉米赤霉烯酮的降解产物结构

Fig.4 Structure of degradation products of zearalenone produced by cold plasma treatment

的减少, 开心果基质中 AFB₁ 降解率由纯品的 64.63% 下降到 52.42% (非热大气压 DBD 空气等离子体, 180 s)。Wang 等^[30]也发现链格孢酚 (alternariol, AOH)、链格孢酚甲基乙醚 (alternariolmethyl ether, AME) 经 DBD 冷等离子体处理, 在红枣汁中的降解效果不如水基。这些研究普遍认为, 食品基质的复杂性是导致冷等离子体毒素降解能力下降的原因, 因为食品的某些成分可能与冷等离子体相互作用而减弱其效力, 此外毒素可能侵入食品内部或不平整的表面, 也使得降解难度增加。但也有反例, Iqdiam 等^[31]发现, 小麦粒上 T-2 和 HT-2 毒素大气压冷等离子体处理 10 min 后的降解效果反而优于盖玻片上的毒素纯品, T-2 和 HT-2 毒素降解率分别由纯品的 63.63% 和 51.5% 提升到 79.8% 和 70.4%, 该研究推测可能与不同基质上毒素回收率有差异以及谷物的大表面积能增加冷等离子体产生的活性物质分布等因素有关。

食品中的部分成分能够影响冷等离子体的真菌毒素降解效率。如抗氧化剂能清除冷等离子体产生的活性物质从而降低处理效果, 在 Ouf 等^[32]的研究中, 三种水果洗涤废水的抗氧化能力排序为草莓>红葡萄>樱桃, 在经双重大气压冷等离子体处理后 AFs、FBs、OTs 在三种洗涤废水中的降解率排序为樱桃>红葡萄>草莓, 证明抗氧化剂的存在降低了冷离子体降解效率; 又如添加花生中花生蛋白、玉米蛋白、白藜芦醇、维生素 E、脂肪酸 (包括油酸、亚油酸、棕榈酸) 等^[33]多种组分后能使常压等离子体、低温射频等离子体对 AFB₁ 的降解效率下降。另有研究发现, 部分物质的加入能够有效促进冷等离子体对真菌毒素的降解。有水分参与的冷等离子体体系可能产生更多活性氧和活性氮, 由此提升该技术的降解能力, 如干燥的 DON 样品在大气压冷等离子体中处理 60 min 后降解率仅为 75.9%, 而溶解在乙腈/水 (20/80, v/v) 溶液中的 DON 在处理 5 min 后即

可 100%降解^[34]；硫酸亚铁 (FeSO_4)、过氧化氢 (H_2O_2) 两种催化剂及高 pH 环境存在时因产生的 H_2O_2 能诱发 $\text{OH}\cdot$ 生成，从而提升毒素降解效果^[35]。

4 冷等离子体降解真菌毒素的产物毒性

4.1 结构毒性

目前关于真菌毒素毒理学的研究广泛，常见毒素的结构与其生物活性的关系已被阐明。 AFB_1 的呋喃环、内酯环、甲氧基结构与其毒性、致癌性、诱变性有关，改变这些结构能够显著降低其毒理学特性，其中末端呋喃环对 AFB_1 的生物活性至关重要，呋喃环上的双键更是影响毒性、致癌性的决定性因素^[36]。 DON 属于单端孢霉烯族毒素，而完整的环氧环结构被认为对单端孢霉烯族毒素的毒性至关重要^[17]，因此环氧环断裂能够降低 DON 毒性，除此之外，3 号位上羟基的改变能参与抑制其毒性^[37]，C8 与 C9 位置上的共轭双键也影响着 DON 的生物活性^[38]。毒素的毒性与其受体-配体的相互作用有关， ZEN 具有与雌激素相似的结构，毒性与其结合和激活雌激素受体的能力有关^[39]，而 ZEN 分子的内酯环、C1 与 C2 间不饱和和键构象的改变及 C6 号位 $\alpha\text{-OH}$ 或 $\beta\text{-OH}$ 的添加都会影响雌激素活性^[40]，从而影响毒性。如图 2~4 所示， AFB_1 、 DON 、 ZEN 在经冷等离子体处理后的降解产物均在上述影响毒素毒性的位点出现键的断裂或官能团的改变，因此，根据文献报道的化学结构和生物活性之间的关系，可以初步推测毒素降解产物的毒性远远低于毒素本身。

4.3 细胞毒性

化学物质的细胞毒性能在一定程度上反映其引起的动物体死亡情况，因此细胞试验可以探究真菌毒素降解产物毒性。 Nishimwe 等^[41]将人肝癌细胞 (HepG2) 在高压大气冷等离子体处理 20 min 后的 AFB_1 中培养 72 h，细胞活力与未添加毒素且未经冷等离子体处理的对照组无显著差异， AFB_1 的细胞毒性和氧化损伤在处理后可明显降低； Wielogorska 等^[20]用大气压冷等离子体处理后的 AFB_1 溶液培养 HepG2 细胞时没有发现附加毒性，表明降解产物无毒或与 AFB_1 不会产生叠加/协同效应； Ott 等^[42]用高压大气冷等离子体处理 DON

溶液 20 min 后，99%以上的毒素结构消解，与未经冷等离子体处理的 DON 溶液相比，可使 80%以上的人克隆结肠腺癌细胞 (Caco-2) 存活，表明 DON 的细胞毒性显著降低； Park 等^[43]用小鼠巨噬细胞 RAW264.7 检测 AFB_1 、 DON 、雪腐镰刀菌烯醇 (nivalenol) 经微波诱导的氩气等离子体处理后的毒性，发现这些真菌毒素的细胞毒性在处理 5 s 后完全消失。

4.3 动物毒性

细胞试验对冷等离子体处理后真菌毒素降解产物毒性评价不够全面，动物试验能为降解产物对人体的危害性提供更可靠的参考，但目前关于这方面的研究较少。 Nguyen 等^[44]对 AFM_1 进行 5 min 高压大气冷等离子体处理，发现培养在处理后的 AFM_1 中的卤虫幼体死亡率仅为 16.1%，比未处理 AFM_1 的存活率提高了 83.7%，表明毒性显著降低； Zhao 等^[45]使用 Wistar 大鼠开展毒性评价，发现低温射频等离子体处理得到的 AFB_1 降解产物的半数致死量 (LD_{50}) 远高于未处理的 AFB_1 ，说明处理后的毒素毒性降低。这些试验结果能够辅助证实毒素结构的改变可明显降低甚至消除毒性，但仍需要更多试验数据支撑。

5 结语

有着非热、安全等优势冷等离子体技术在真菌毒素降解方面展示出巨大的应用潜力，在食品加工领域有广阔的应用前景。然而冷等离子体作为一项新兴技术，有关研究仍处于起步阶段，未来可以从以下几个方面深入开展研究：一是探究冷等离子体对多种真菌毒素的降解效果，包括毒素纯品、人工接种到食品基质上的毒素以及天然污染食品上的毒素，为实际应用提供指导；二是深入开展冷等离子体降解各种真菌毒素机理的研究，探究毒素在纯溶剂及食品基质条件下降解产物是否存在差异，明确降解产物结构，提出可能的降解路径，为提高降解效率提供理论支撑；三是加强对冷等离子体处理后的真菌毒素降解产物的安全性评价，进行更深入的毒理分析，从结构分析、细胞试验、动物试验等多角度确保降解产物无毒性；四是通过优化处理参数，对冷等离

子体的放电方式、载气成分等处理条件开展系统研究,调控真菌毒素的降解效果及降解产物结构,找出适合工业化应用的冷等离子体参数。

参考文献:

- [1] GAVAHIAN M, CULLEN P J. Cold plasma as an emerging technique for mycotoxin-free food: Efficacy, mechanisms, and trends[J]. *Food Reviews International*, 2020, 36(2): 193-214.
- [2] BRADFORD K J, DAHAL P, ASBROUCK J V, et al. The dry chain: Reducing postharvest losses and improving food safety in humid climates[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 71: 84-93.
- [3] LANGMUIR I. Oscillations in ionized gases[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1928, 14(8): 627-637.
- [4] RAO W, LI Y Q, DHALIWAL H, et al. The application of cold plasma technology in low-moisture foods[J]. *Food Engineering Reviews*, 2023, 15: 86-112.
- [5] 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.
- [6] TAPPI S, GOZZI G, VANNINI L, et al. Cold plasma treatment for fresh-cut melon stabilization[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 33: 225-233.
- [7] MISRA N N, YEPEZ X, XU L, et al. In-package cold plasma technologies[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 244: 21-31.
- [8] FEIZOLLAHI E, MISRA N N, ROOPESH M S. Factors influencing the antimicrobial efficacy of Dielectric Barrier Discharge (DBD) Atmospheric Cold Plasma (ACP) in food processing applications[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 61(4): 666-689.
- [9] SCALLY L, BEHAN S, CARVALHO A, et al. Diagnostics of a large volume pin-to-plate atmospheric plasma source for the study of plasma species interactions with cancer cell cultures[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2021, 18(6): e2000250.
- [10] NISHIME T M C, BORGES A C, KOGA-ITO C Y, et al. Non-thermal atmospheric pressure plasma jet applied to inactivation of different microorganisms[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 312: 19-24.
- [11] MUHAMMAD A I, XIANG Q S, LIAO X Y, et al. Understanding the impact of nonthermal plasma on food constituents and microstructure-a review[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11(3): 463-486.
- [12] KIM J E, OH Y J, WON M Y, et al. Microbial decontamination of onion powder using microwave-powered cold plasma treatments[J]. *Food Microbiology*, 2017, 62: 112-123.
- [13] BOGAERTS A, NEYTS E, GIJBELS R, et al. Gas discharge plasmas and their applications[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2002, 57(4): 609-658.
- [14] DENG L Z, TAO Y, MUJUMDAR A S, et al. Recent advances in non-thermal decontamination technologies for microorganisms and mycotoxins in low-moisture foods[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 106: 104-112.
- [15] POPOVIĆ V, FAIRBANKS N, PIERSCIANOWSKI J, et al. Feasibility of 3D UV-C treatment to reduce fungal growth and mycotoxin loads on maize and wheat kernels[J]. *Mycotoxin Research*, 2018, 34(3): 211-221.
- [16] HOJNIK N, MODIC M, WALSH J L, et al. Unravelling the pathways of air plasma induced aflatoxin B₁ degradation and detoxification[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 403: 123593.
- [17] 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(15): 134159.
- [18] 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]. *European Food Research and Technology*, 2015, 241: 103-113.
- [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]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(30): 6222-6230.
- [20] 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]. *Food Chemistry*, 2019, 301: 125281.
- [21] NGUYEN T, FLINT S, PALMER J. Control of aflatoxin M₁ in milk by novel methods: A review[J]. *Food Chemistry*, 2020, 311: 125984.
- [22] SICILIANO I, SPADARO D, PRELLE A, et al. Use of cold atmospheric plasma to detoxify hazelnuts from aflatoxins[J]. *Toxins*, 2016, 8(5): 125.
- [23] CHEN X L, QIU Y, ZHANG J Y, et al. Degradation efficiency and products of deoxynivalenol treated by cold plasma and its application in wheat[J]. *Food Control*, 2022, 136: 108874.
- [24] 郑哲. 低温等离子体用于玉米赤霉烯酮的降解及对玉米品质的影响研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022: 34-38.
- [24] ZHENG Z. Degradation of zearalenone by cold plasma and its effect on corn quality[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022: 34-38.
- [25] HOJNIK N, MODIC M, TAVČAR-KALCHER G, et al. Mycotoxin decontamination efficacy of atmospheric pressure air plasma[J]. *Toxins*, 2019, 11(4): 219.
- [26] KIŠ M, MILOŠEVIĆ S, VULIĆ A, et al. Efficacy of low pressure DBD plasma in the reduction of T-2 and HT-2 toxin in oat flour[J]. *Food Chemistry*, 2020, 316: 126372.
- [27] 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.
- [28] BOSCH L T, PFOHL K, AVRAMIDIS G, et al. Plasma-based degradation of mycotoxins produced by *Fusarium*, *Aspergillus* and *Alternaria* species[J]. *Toxins*, 2017, 9(3): 97.
- [29] MAKARI M, HOJJATI M, SHAHBAZI S, et al. Elimination of *Aspergillus flavus* from pistachio nuts with dielectric barrier discharge (DBD) cold plasma and its impacts on biochemical indices[J]. *Journal of Food Quality*, 2021, 2021: 9968711.
- [30] WANG X Y, HAN Y K, NIU H, et al. *Alternaria* mycotoxin degradation and quality evaluation of jujube juice by cold plasma treatment[J]. *Food Control*, 2022, 137: 108926.
- [31] IQDIAM B M, FEIZOLLAHI E, ARIF M F, et al. Reduction of T-2 and HT-2 mycotoxins by atmospheric cold plasma and its impact on quality changes and germination of wheat grains[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(4): 1354-1371.
- [32] OUF S A, MOHAMED A-A H, EL-SAYED W S. Fungal decontamination of fleshy fruit water washes by double atmospheric pressure cold plasma[J]. *Clean-Soil Air Water*, 2016, 44(2): 134-142.
- [33] 任翠荣, 肖军霞, 王世清, 等. 花生组分对常压等离子体降解黄曲霉毒素 B₁ 的影响[J]. *粮油食品科技*, 2017, 25(2): 28-33.
- REN C R, XIAO J X, WANG S Q, et al. Effect of peanut components on the degradation of aflatoxin B₁ treated by atmospheric pressure plasma[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2017, 25(2): 28-33.
- [34] 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 Engineering Reviews*, 2020, 13: 696-705.
- [35] WANG X Y, WANG S H, YAN Y Z, et al. The degradation of *Alternaria* mycotoxins by dielectric barrier discharge cold plasma[J]. *Food Control*, 2020, 117: 107333.
- [36] UDOVICKI B, STANKOVIC S, TOMIC N, et al. Evaluation of ultraviolet irradiation effects on *Aspergillus flavus* and Aflatoxin B₁ in maize and peanut using innovative vibrating decontamination equipment[J]. *Food Control*, 2022, 134: 108691.
- [37] SHIMA J, TAKASE S, TAKAHASHI Y, et al. Novel detoxification of the trichothecene mycotoxin deoxynivalenol by a soil bacterium isolated by enrichment culture[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, 63(10): 3825-3830.
- [38] FEIZOLLAHI E, ROOPESH M S. Mechanisms of deoxynivalenol (DON) degradation during different treatments: a review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(21): 5903-5924.
- [39] DELLAFIORA L, DALL'ASTA C, GALAVERNA G. Toxicodynamics of mycotoxins in the framework of food risk assessment-an in silico perspective[J]. *Toxins*, 2018, 10(2): 52.
- [40] SHIER W T, SHIER A C, XIE W, et al. Structure-activity relationships for human estrogenic activity in zearalenone mycotoxins[J]. *Toxicon*, 2001, 39(9): 1435-1438.
- [41] 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.
- [42] OTT L C, APPLETON H J, HU S, et al. High voltage atmospheric cold plasma treatment inactivates *Aspergillus flavus* spores and deoxynivalenol toxin[J]. *Food Microbiology*, 2020, 95: 103669.
- [43] PARK B J, TAKATORI K, SUGITA-KONISHI Y, et al. Degradation of mycotoxins using microwave-induced argon plasma at atmospheric pressure[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, 201(9-11): 5733-5737.
- [44] NGUYEN T, PALMER J, PHAN N, et al. Control of aflatoxin M₁ in skim milk by high voltage atmospheric cold plasma[J]. *Food Chemistry*, 2022, 386: 132814.
- [45] ZHAO L L, DU Q J, WANG S Q, et al. Safety and efficacy evaluation of degradation of aflatoxin B₁ by low-temperature radio frequency plasma[J]. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 2016, 12(7): 396-403. 
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。