

DOI:10.16433/j.1673-2383.202409220001

王若冰,崔肖爽,满勇,等.食品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇的检测及去除研究进展[J].河南工业大学学报(自然科学版),2025,46(1):114-125.

WANG R B, CUI X S, MAN Y, et al. Research progress on detection and removal of deoxynivalenol in food[J]. Journal of Henan university of technology(natural science edition), 2025, 46(1): 114-125.

食品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇的检测及去除研究进展

王若冰,崔肖爽,满勇,宋琛琛,孙亚明,何丽君*

河南工业大学 化学化工学院,河南 郑州 450001

摘要:采用快速、灵敏和准确的方法结合高效的样品前处理技术检测食品中的脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON),以及高效去除食品中的 DON 污染,是防控 DON 污染、减少经济损失和保障食品安全的重要举措。综述了色谱法和免疫分析法结合液-液萃取、固相萃取、磁性固相萃取和 QuEChERS 法等样品前处理技术在检测食品中 DON 的应用,介绍了物理、化学和生物法去除 DON 的优缺点、脱毒途径和产物,并对未来的发展趋势进行了展望,以期对 DON 的全面风险控制提供参考。

关键词:呕吐毒素;检测;去除;样品前处理;食品

中图分类号:TS207.3

文献标志码:A

文章编号:1673-2383(2025)01-0114-12

Research progress on detection and removal of deoxynivalenol in food

WANG Ruobing, CUI Xiaoshuang, MAN Yong, SONG Chenchen, SUN Yaming, HE Lijun*

School of Chemistry and Chemical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Adopting rapid, sensitive, and accurate methods combined with efficient sample pretreatment techniques to detect deoxynivalenol (DON) in food, as well as removing DON contamination from food effectively, are important measures for preventing and controlling DON contamination, reducing economic losses, and ensuring food safety. This paper reviews the application of chromatographic and immunoassay methods in combination with sample pretreatment techniques such as liquid-liquid extraction, solid-phase extraction, magnetic solid-phase extraction, and QuEChERS method for the detection of DON in food. It also introduces the advantages and disadvantages, detoxification pathways, and products of physical, chemical and biological methods for removing DON. Finally, the future development trend is outlooked. This paper provides an outlook on future trends, aiming to provide a reference for comprehensive risk management of DON.

Key words: deoxynivalenol; detection; removal; sample pretreatment; food

脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON),别名呕吐毒素,是一种由黄色镰刀菌和禾谷镰刀菌产生的毒性较高的真菌次级代谢产物。由于产毒真菌的广泛分布,DON可以在世界各地

的农田中产生,主要污染小麦、玉米和大麦等作物。据联合国粮食及农业组织(FAO)统计,每年约有 25% 的食品受到 DON 的污染,造成了严重的经济损失并引发了一系列食品安全事件^[1]。

收稿日期:2024-09-22

基金项目:国家自然科学基金项目(32172290);郑州市科技协同创新专项重点项目(21ZZXTCX04)

作者简介:王若冰(2000—),女,硕士研究生,研究方向为分析化学。

*通信作者:何丽君,教授,博导,E-mail:lijunhe@haut.edu.cn。

DON 的主要毒性位点是 C12-C13 环氧基团、C9 和 C10 位之间的不饱和键和 C3—OH 基团(图 1),可引起人和动物的多种免疫应激反应^[2],如核糖体应激、胃肠道毒性和正常生理功能受损等^[3],被世界卫生组织列为 3 类致癌物。DON 具有耐高温、耐酸等特性,很难在食品生产和加工过程中通过热处理消除^[4]。随着人们生活水平和健康意识的提高,如何有效地防控食品中的 DON 污染是当前研究的热点。

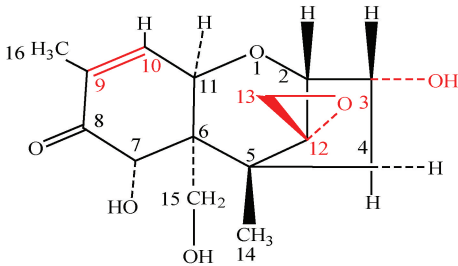


图 1 DON 的化学结构及主要毒性位点
Fig.1 Chemical structure and main toxicity site of DON

真菌毒素因其在世界范围内的分布和毒性风险而引起了全球的关注,世界各国都对食品中 DON 的含量制定了相关的限量标准^[5]。GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》规定,粮食和粮食制品中 DON 的限量标准为 1 000 $\mu\text{g}/\text{kg}$;美国食品和药物管理局规定,人类食用碾磨小麦产品中的 DON 的限量标准是 1 000 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 2023 年欧盟实施的最新法规(EU) No. 2023/915 规定,直接供人食用的谷类食品 and

加工食品中 DON 含量不得超过 750 $\mu\text{g}/\text{kg}$,婴儿加工谷类食品中 DON 含量不得超过 200 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。因此,快速、灵敏和准确检测食品中 DON 的含量,高效去除被污染食品中的 DON,以实现 DON 的全面风险控制,对减少经济损失、确保食品安全及保障人类健康具有重要意义。

目前检测 DON 的方法包括具有高效分离性能的色谱法、基于抗原抗体特异识别的免疫法和基于生化识别元件与物理换能器相结合的生物传感法。色谱法和免疫法在 DON 检测应用广泛,而生物传感法尚处于起步阶段,本文主要介绍色谱法和免疫法。去除 DON 的方法主要有物理、化学和生物 3 种方式。总结了近年来食品中 DON 的检测以及去除的最新研究进展,旨在为 DON 的全面风险控制提供参考。

1 DON 的检测方法

DON 在食品中的含量直接反映其被黄色镰刀菌和禾谷镰刀菌污染的程度,也是决定食品能否进入市场的关键指标。因此,需要准确、快速和灵敏的 DON 检测方法,以确保食品安全。具有高效分离性能的色谱法和利用抗原-抗体特异性识别的免疫测定法是检测 DON 的两种主要方法。需注意的是,由于食品的基质类型多样、成分复杂,且 DON 含量低,对食品样品中 DON 进行直接检测面临着诸多挑战,所以,在检测之前需要对样品进行前处理。表 1 为不同食品样

表 1 不同食品样品中 DON 的样品前处理及其检测方法
Table 1 Sample pretreatment and detection method for DON in different food samples

食品样品	前处理技术	检测方法	回收率/%	RSD/ $(\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	LOD/ $(\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	参考文献
爆米花	QuEChERS	GC-MS	61.0 ~ 118.0	18.0	65.0	[6]
肉汤	LLE	GC-MS/MS	89.5 ~ 103.6	1.2 ~ 5.5	2.6	[7]
小麦粉	LLE	GC-MS/MS	95.0 ~ 127.0	76.0 ~ 94.0	0.5	[8]
玉米粉	LLE	HPLC-FD	>80.0	70.0	20.0	[9]
玉米	LLE	HPLC-MS/MS	79.0 ~ 106.0	79 ~ 99	—	[10]
薏苡	LLE	ELISA	77.32 ~ 93.73	4.6 ~ 9.7	—	[11]
半夏曲	SPE	HPLC-MS/MS	69.20 ~ 118.20	0.03 ~ 9.92	0.02 ~ 4.17	[12]
坚果	SPE	UPLC-MS/MS	80.0 ~ 107.0	0.7 ~ 4.9	0.3 ~ 8.0	[13]
大米	MSPE	HPLC-MS	86.3 ~ 103.1	—	0.001 ~ 0.003	[14]
动物饲料	MSPE	HPLC-UV	75.0 ~ 97.0	—	—	[15]
花生、小麦和玉米	QuEChERS	UPLC-MS/MS	70.1 ~ 119.0	2.45 ~ 9.97	0.28 ~ 42.18	[16]
玉米粉	QuEChERS	HPLC-MS/MS	61.0 ~ 117.0	0.12 ~ 30.00	0.001 ~ 5.000	[17]
玉米饲料原料	QuEChERS	UPLC-MS/MS	62.60 ~ 112.53	0.15 ~ 10.00	0.5 ~ 30.0	[18]
谷物	QuEChERS	GC-MS/MS	76.0 ~ 114.0	1.25 ~ 10.00	—	[19]
玉米和小麦	QuEChERS	GICA	57.01 ~ 58.95	9.83	11.32 ~ 286.70	[20]
稻谷	QuEChERS	TRFIA	91.0 ~ 106.0	15.10 ~ 146.10	0.2 ~ 5.0	[21]

注:“—”表示无。

品基质中 DON 的样品前处理技术及其检测方法。

1.1 DON 的样品前处理技术

DON 多存在于玉米、大米、大麦和小麦等基质成分复杂的粮食中,并且样品中 DON 含量通常低至 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 数量级,使用分析仪器直接定量往往无法得出准确的结果。因此,需要进行样品前处理以达到萃取富集目标物和消除基质干扰的目的,确保检测的灵敏度和准确性^[22]。常用的样品前处理技术包括液-液萃取(Liquid-liquid extraction, LLE)^[23]、固相萃取(Solid phase extraction, SPE)^[24]、磁性固相萃取(Magnetic solid phase extraction, MSPE)^[25]和 QuEChERS 技术(Quick、Easy、Cheap、Effective、Rugged、Safe)^[26]等。

LLE 是一种应用广泛的样品前处理技术,基于相似相溶原理,将目标分子萃取到一种溶剂中,进而实现目标物和杂质的分离^[27]。用乙酸乙酯作为 LLE 溶剂,可有效萃取 DON、15-DON 和 3-DON 等真菌毒素^[28],多次重复进行 LLE 过程可提高萃取效率,无须使用免疫亲和柱,LLE 后基质效应有极大降低。Hamed 等^[29]建立了一种盐析辅助 LLE 方法,用于提取功能性植物奶中的 DON 和 T-2 等多种真菌毒素,无须进一步净化。用甲酸化的乙腈作为 LLE 的萃取溶剂,通过盐析能诱导萃取溶剂从含有目标分析物的混合物中分离。LLE 具有操作简单、价格低廉等优点,但是溶剂耗费量大,富集效率不高。

SPE 基于色谱分离原理,利用合适的固体吸附剂选择性地富集样品中的目标物,再通过淋洗和加热等将目标物从固体吸附剂中解吸出来,从而实现目标物的分离和纯化,是食品中 DON 常用的样品前处理技术之一^[30]。C18 柱、氨基柱和硅胶柱是 SPE 中常用的吸附剂,一些新型吸附剂也被报道用于 DON 的萃取。包懿等^[31]采用乙腈/水(体积比 85:15)提取样品中的 DON,再过 HLB 固相萃取柱进行净化,可对小麦和大麦等谷物中 DON 进行有效萃取。张文文等^[32]建立了 DON 的氨基柱-在线固相萃取-超高效液相色谱-串联质谱联用分析方法,采用乙腈/水(体积比 84:16)对小麦中的 DON 进行提取,用氨基柱净化提取液。SPE 具有富集效率高、溶剂用量少和专一性高等优点,但耗时久,吸附剂的制备较为烦琐。

MSPE 是一种以磁性材料为吸附剂的分散固相萃取技术,在外加磁场下即可实现磁性吸附剂

与分析物的迅速分离^[33]。一些具有多孔结构、比表面积大的新型材料被发展用于食品中 DON 的萃取、富集和净化。具有核壳结构的磁性共价有机框架($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{COF}-\text{TpBD}$)可作为 MSPE 吸附剂,用于玉米中 DON 的萃取富集;由于磁性 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{COF}-\text{TpBD}$ 与 DON 之间的疏水、氢键和 $\pi-\pi$ 堆积相互作用, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{COF}-\text{TpBD}$ 能有效萃取 DON,发展的样品前处理技术快速且操作简单^[34]。MIL-101(Cr)@ Fe_3O_4 纳米复合材料中的介孔分子筛结构和大量未饱和的 Cr(III)位点可有效地与富含电子的官能团结合,将其作为 MSPE 吸附剂能用于农产品中 DON 和 AFB₁ 等 9 种真菌毒素的纯化和富集^[35]。MSPE 是解决复杂样品基质等问题较有效的前处理方法之一,适用于多类型目标分析物,具有快速、高效的优势。

QuEChERS 法作为一种快速、简便和高效的样品预处理技术,广泛用于食品安全、农产品质量控制和环境监测中,主要涉及溶剂提取、盐析分层以及吸附除杂 3 个主要过程,能在萃取目标物的同时去除样品中的基质干扰物^[36]。QuEChERS 结合超高效液相色谱-串联质谱技术可对大米、豆类和花生等多种粮谷作物中 DON 进行有效萃取和测定,其中,采用 0.5% 甲酸化的乙腈/水(体积比 84:16)提取 DON,采用 *N*-丙基乙二胺净化样品^[37]。徐子婷等^[38]将 QuEChERS 作为样品前处理技术能有效萃取调味面制品中的 DON,其中,采用甲酸-乙腈-水溶液作为溶剂提取 DON,加入氯化钠和无水硫酸镁盐析分层,部分上清液经无水硫酸镁、*N*-丙基乙二胺硅烷、C18 和中性氧化铝粉末净化,结合超高效液相色谱-串联质谱,对调味面制品中 DON 进行了测定。QuEChERS 技术结合了萃取和净化技术,具有萃取回收率高、操作简便和适用范围广等优点,但容易产生较高的基质效应。

1.2 色谱法测定食品中 DON

色谱法以其高分离效能、高检测性能和分析快速的特点而成为食品安全分析中应用最广泛的一种方法^[39]。由于食品样品基质的复杂性和目标物的低含量,色谱仪器通常需结合样品前处理技术。用于食品中 DON 检测的色谱法主要包括高效液相色谱法(High-performance liquid chromatography, HPLC)^[40]和气相色谱法(Gas chromatography, GC)^[41],它们主要用于实验室分析,具有灵敏度高、准确性好和稳定性强等优点。

HPLC 适用于分析沸点高、不易挥发、热不稳

定且具有不同极性的有机化合物的分析。鉴于 DON 的较强极性及其在有机溶剂和水中的较大溶解度, HPLC 成为检测 DON 的一种常用方法^[42]。DON 的最大紫外吸收波长为 218 nm, 且其本身具有荧光发射基团, 所以用 HPLC 检测 DON 时可用荧光 (Fluorescence, FL) 和紫外 (Ultraviolet, UV) 检测器; 由于质谱 (Mass spectrometer, MS) 检测器的通用性以及高的选择性和灵敏度, 也常与 HPLC 结合用于检测 DON^[43]。将 MSPE 作为样品前处理技术, 结合 HPLC-MS 方法, 可测定玉米中的 DON, 方法的线性范围为 0.05 ~ 50 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 检出限 (Limits of detection, LOD) 为 0.02 ~ 1.67 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 回收率为 73.8% ~ 105.3%, 相对标准偏差 (Relative standard deviation, RSD) 小于 8.5%^[34]。任淑艳等^[44]采用乙腈/水 (体积比 84:16) 提取小麦和小麦粉中的 DON, 结合 HPLC-UV 测定 DON 含量, 发现小麦和小麦粉中 DON 的平均含量分别为 133 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 417 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 检出率为 100%, 最大值为 970 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[44]。LC-MS/MS 法可用于快速测定 DON, 其中, DON 的基质匹配标准曲线的决定系数 (r^2) 均大于 0.99, 线性关系良好, 加标回收率为 81.1% ~ 116.7%, RSD 为 1.6% ~ 14.6%^[45]。HPLC 结合 UV 和 FL 检测器, 能对全麦粉中 DON 及其衍生物等 9 种真菌毒素进行测定, 方法的回收率为 75.78% ~ 118.24%, LOD 和 LOQ 分别为 1.5 ~ 20 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 5.0 ~ 60 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[46]。HPLC 目前已成为检测 DON 及其衍生物的最佳选择, 但是分离时间较长, 仪器成本相对高, 对检测人员有一定的要求。

GC 适用于分析易挥发、沸点低的组分。由于 DON 的沸点高 (543.88 $^{\circ}\text{C}$), 且其为四环倍半萜结构, 环上的 3 个羟基易形成稳定的氢键, 使其难挥发, 因此, 用 GC 法检测 DON 时, 必须对其进行衍生化。常见的衍生剂有三甲基氯硅烷、三甲基硅烷、三氟乙酸酐和五氟丙酸酐等^[47]。GC 虽有多种检测器, 但其常与 MS 联用检测 DON。将 QuEChERS 技术与 GC-MS 联用, 能实现未爆和爆过的爆米花中 DON 的快速测定, 回收率为 61% ~ 118%, RSD 小于 18%, 方法的 LOD 和 LOQ 分别低于 65 mg/kg 和 196 mg/kg , 均低于欧盟规定的最大限量^[6]。Tang 等^[7]建立了一种可同时准确分析 DON 及其两种 DON 衍生物的 GC-MS 法, 用毛细管气相色谱柱能在 15 min 内分离目标物, 方法线性范围为 10 ~ 2 000 ng/mL , $r^2 > 0.99$ 。GC-MS/MS 可同时检测小麦粉内的 DON、3-Ac-

DON 和 15-Ac-DON 等 10 种毒素, 用己烷进行 LLE, 采用质谱的 SRM 模式定量分析, 方法的 LOQ 为 1 ~ 20 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 回收率为 69% ~ 127%^[8]。GC-MS 技术具有分析快、灵敏度高和能同时检测多种真菌毒素的优点, 但需要净化和衍生化步骤, 操作较复杂。

1.3 抗原-抗体特异性识别的免疫分析法

免疫分析法是基于抗原和抗体的特异性结合反应, 结合抗体或抗原 (含半抗原) 上标记物的信号放大作用, 实现微量目标物的定性和定量检测, 具有灵敏度高、检测费用低和简便快捷等优点。目前, 免疫分析法是最具代表性的快速检测 DON 的技术, 主要包括酶联免疫检测法 (Enzyme-linked immunosorbent assay, ELISA)^[48]、胶体金免疫层析法 (Colloidal gold immunochromatographic assay, GICA)^[49] 和时间分辨荧光免疫层析技术 (Time-resolved fluoroimmunoassay, TRFIA)^[50], 其中, ELISA 在免疫分析法中最为经典。

ELISA 是通过免疫吸附活性抗原-抗体-酶, 同时底物在酶的作用下催化转化为有色产物, 通过分光光度法对其进行测量的方法, 其既能够快速检测 DON 又能对其进行初步定量^[51]。DON 等真菌毒素属于小分子物质, 因一次只能结合一个抗体, 常采用竞争检测模式。专门用于检测食品中 DON 的商品化 ELISA 试剂盒对 DON 的检测浓度最低为 1.147 ng/mL , 检测范围为 1.50 ~ 130.31 ng/mL , 半抑制浓度 (IC_{50}) 为 9.84 ng/mL ^[52]。Han 等^[53]开发一种自组装直接竞争酶联免疫吸附试剂盒, 用于检测食品和谷物中的 DON, 该试剂盒的 LOD 为 0.62 ng/mL , 线性范围为 1.0 ~ 113.24 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。ELISA 法具有准确、可靠和高通量等特点, 可广泛应用于食品中 DON 的检测, 但是易出现交叉反应、结果假阳性率高和基质效应严重等问题。

GICA 是以小分子化合物为检测对象, 基于胶体金层析免疫竞争原理, 运用侧流技术发展起来的一种 DON 快速检测方法^[54]。Jin 等^[55]开发了一种检测食品中 DON 的免疫层析检测卡, 胶体金长度为 45 nm, 检测时间仅为 20 ~ 25 min, 可有效检测 6.25 ~ 6 250 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 范围内的样品。GICA 具有快速、特异和操作简单等优点, 成为现场快速检测的重要方式, 但是样品种类繁多及成分复杂, 容易影响抗原-抗体反应和胶原蛋白的吸附性, 从而导致假阳性结果^[56]。

TRFIA 是一种结合免疫反应的高特异性和

标记示踪剂的高灵敏性的微量分析方法^[57],具有灵敏度高、检测速度快和结果稳定等优点,成为真菌毒素检测领域的研究热点。基于铈离子聚苯乙烯荧光微球的 TRFIA 试纸条可用于 DON 的灵敏定量,单道免疫层析试纸条检测 DON 的检出限为 0.17 μg/L,该试纸条在 4 ℃ 条件下可保存 1 年以上,批间 RSD 小于 10%,符合商业化生产的要求^[58]。Liang 等^[59]研制了以多重时间分辨荧光微球为基础的免疫层析试纸条,用于谷物中 DON 的快速现场定量检测,检出限为 0.81 ng/g,对 DON 的检测范围较宽(1.0~234 ng/g),该方法具有高的灵敏度和稳定性。TRFIA 由于

其具有灵敏度高、检测速度快、结果稳定等优点,成为真菌毒素检测领域的研究热点,在食品快检领域已经引起广泛的关注和应用。

2 呕吐毒素的去除方法

DON 的防控在食品生产中至关重要。既要 从源头上严格控制 DON 的产生,对于已经污染了 DON 的食品,更要采取有效的去除方式处理。目前用于 DON 去除的方法主要有物理去除、化学去除和生物去除 3 种方法。表 2 比较了不同的 DON 去除方法及其优缺点。

表 2 DON 的去除方法及其优缺点
Table 2 DON detoxification methods and their advantages and disadvantages

去除方法	原理	优点	缺点	参考文献
物理去除	吸附剂吸附	利用吸附剂吸附 DON	吸附容量大、经济实用、范围广	效率低、会导致非特异性吸附 [60-62]
	热处理	利用高温破坏 DON 的结构	安全性高、无污染、操作简单	温度过高易造成营养损失、去除不彻底 [63-64]
	高压处理	破坏 DON 的分子结构	不影响食品品质	对 DON 的破坏作用有限 [65-66]
	冷等离子体处理	破坏 DON 的分子键、产生活性氧物种	高效和无残留	昂贵的冷等离子体设备,高能耗 [67-68]
化学去除	臭氧化	通过氧化作用破坏 DON 的结构	绿色环保、高效和无残留	成本高且易破坏食品中的营养物质 [69-71]
	碱处理	高 pH 值条件下,DON 的分子结构发生变化	DON 降解彻底	处理后有残留、影响食品品质以及造成二次污染 [72-73]
	光催化降解	利用光催化剂与 DON 的氧化还原反应实现去除	安全环保、高效	催化效果不稳定、光催化材料回收效率较低 [74-76]
生物去除	酶降解	通过降解酶的去环氧化、去乙酰化和糖基化等实现 DON 去除	高效、绿色、安全、降解产物毒性低、不可逆	反应条件要求较高、产品未产业化 [77-81]

2.1 物理去除法

DON 的物理去除法包括物理吸附、热处理、高压处理及冷等离子技术等^[60]。物理吸附主要是利用吸附剂从样品中吸附 DON,常用的吸附剂有活性炭、膨润土、蒙脱石和合成树脂等^[61]。Zhang 等^[62]用铝、铁、钛对蒙脱石进行改性以增大层间距,改性的蒙脱石对 DON 的最大吸附效率达 35%,是未改性蒙脱石的 3~4 倍。热处理对 DON 的去除则主要是依靠高温破坏 DON 的分子结构^[63]。Wang 等^[64]发现在 75 ℃ 和 175 ℃ 下微波加热受 DON 污染的玉米,可使 DON 浓度分别减少约 10% 和 40%。高压处理采用具有热变化的高压处理方式影响 DON 并改变其结构,从而减少 DON 含量并降低其毒性^[65]。采用高压处理技术可以控制玉米粒中 DON 的产生和含量,550 MPa、45 ℃ 处理 20 min 时,玉米中未检测到 DON^[66]。冷等离子体是在高压电场下形成的部分电离或完全电离的气体,包括光子、离子和自

由电子等,并且能产生单线态氧、超氧化物、过氧化物和羟基自由基等活性物质,它们能破坏 DON 的化学键,使其降解为无毒或低毒的小分子物质^[67]。Chen 等^[68]系统研究了介质阻挡放电等离子体对 DON 的去除效果,以空气为工作气体,电压为 50 kV,处理 8 min 时,DON 的降解效率达到 83.99%。物理去除方法有较高的效率,但易造成营养成分损失,脱毒不完全。

2.2 化学去除法

化学去除法通过 DON 与脱毒剂之间的化学反应,改变 DON 的结构,使其降解为低毒甚至无毒的产物,是一种彻底的脱毒方法。常见的化学去除法包括臭氧化处理、碱处理和光催化处理等,其对应的产物及脱毒位点如图 2 所示。DON 的 C12-C13 环氧结构被破坏,能形成降解产物 M1、M4、M6、M8、M9;其 C9-C10 中的双键被破坏,形成降解产物 M3、M4、M6 和 M10;C3 中的羟基被破坏,形成降解产物 M9 和 M10。根据结构

与毒性之间的关系,可以推断 DON 的毒性是否显著降低。

臭氧处理主要通过氧化作用破坏 DON 的 C9 和 C10 位之间的不饱和键、C12 和 C13-环氧基上的双键以及 C3 和 C7 上的羟基,形成含双键少、分子质量较低的产物;且臭氧可自动分解成氧气,无残留^[69]。臭氧处理可对小麦制粉中不同工艺阶段中的 DON 降解,包括润麦前、润麦后和润麦水洗涤,结果表明,臭氧处理均能将小麦中 DON 水平降低至 1 mg/kg 以下,且对面筋品质无显著影响^[70]。采用饱和臭氧水溶液(80 mg/L)对 DON 标准品(15 mg/L)处理 7 min,降解效率可达到 83%,没有检测到副产物^[71]。虽然臭氧氧化在减少或消除谷物中的 DON 是有效和安全的,但需要专门的设备,成本高昂,不适合大规模使用。

碱处理法通过 DON 与碱反应,使其毒性相关的基团结构被破坏,导致毒性降低或消失,常用的碱性试剂有 NaOH、Na₂CO₃ 和 NaHCO₃ 等。唐贤华等^[72]发现 DON 在酸性和中性环境中稳定,碱性环境中会降解,强碱环境下降解更迅速。采用海藻酸钠/羧甲基纤维素钠复合钙功能微球吸附玉米糖浆中的 DON,用去离子水洗脱吸附的 DON,去离子水中的 DON 在热 NaOH 溶液(pH12)和 70 ℃ 的条件下处理 1 h 能被降解^[73]。

碱处理的优势是去除完全,但化学残留物可能会导致谷物品质改变。

近年来,光催化降解在食品领域受到广泛关注和发展,它具有反应条件温和、无二次污染和脱毒彻底等优点。具有较大比表面积的半导体纳米材料,如 TiO₂、BiVO₄、ZnO 等常用作光催化剂,当光能大于半导体材料带隙能时,光催化剂价带中的电子(e⁻)跃迁到导带,并产生带正电的空穴(h⁺),在 e⁻和 h⁺协同作用下,催化剂表面能够产生自由基,逐步破坏 DON 分子 C3 位的羟基、C9 和 C10 之间的不饱和键以及 C12 和 C13 位的环氧基。质子化 g-C₃N₄/氧掺杂 g-C₃N₄ 可作为可见光催化剂,用于 DON 的降解。结果表明,在可见光照射 150 min 后,材料对 DON 的降解效率可达 86.6%,降解效率分别为氧掺杂 g-C₃N₄、质子化 g-C₃N₄ 和 g-C₃N₄ 的 1.13、1.50 和 3.24 倍^[74]。Xu 等^[75]用水热法合成 HT-rGO/TiO₂,该光催化剂对啤酒中 DON 的降解效率高达 78.56%。Wu 等^[76]制备了一种新型核壳结构的 UCNP@TiO₂ 复合材料,用于光催化降解 DON,光照 60 min 后降解效率高达 90.7%,而纯 TiO₂ 的降解效率仅为 70.7%;经过 5 次循环实验后,其降解效率仍保持在 92.5%。光催化降解是一种很有前途的绿色降解技术,但光催化材料合成过

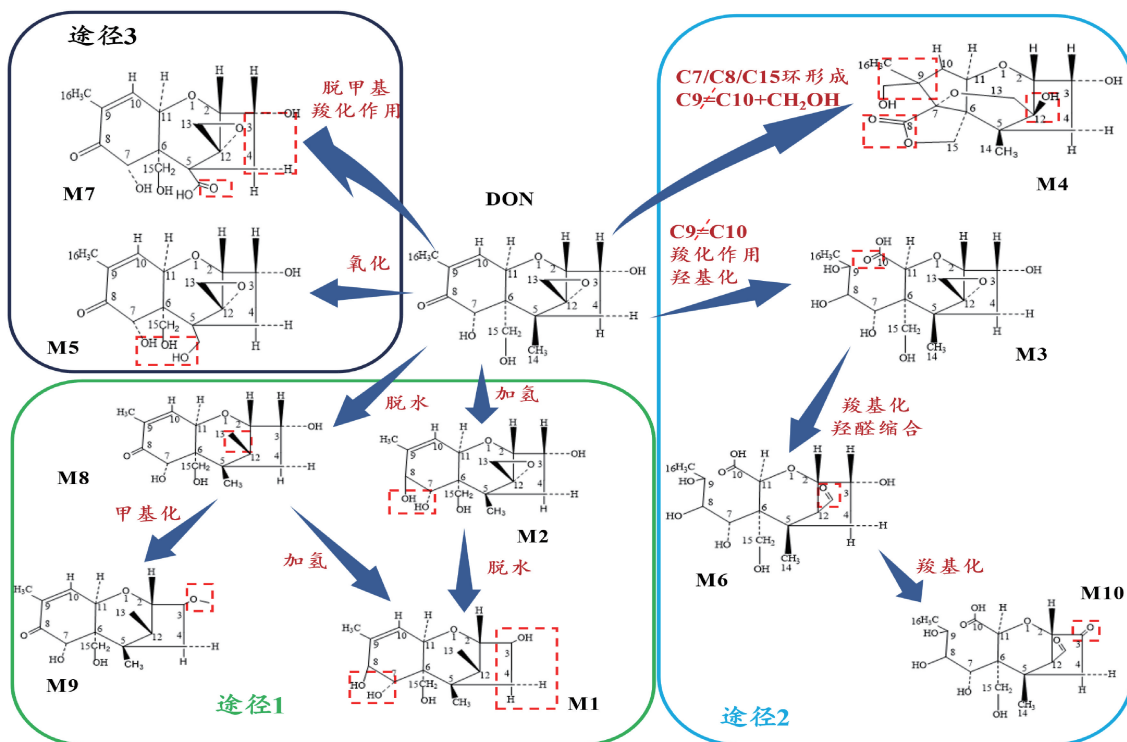


图 2 化学脱毒 DON 的产物及脱毒位点

Fig. 2 Products and sites of detoxification of DON by chemical detoxification

程较复杂且烦琐,在真菌毒素去除中的应用目前仍处在实验室阶段。

化学去除法彻底、高效,但实施条件要求较高,除此之外,化学试剂本身可能会对粮食中的某些营养物质产生破坏,且有残留在食品中的风险,其安全性有待进一步考察。

2.3 生物去除法

目前,DON 的生物去除主要包括生物吸附、生物降解和基因工程等。这些方法利用微生物产生的酶将 DON 分解成非毒性或低毒性产物。生物法去除 DON 涉及脱环氧化、氧化、异构化、糖苷化或乙酰化反应,将 DON 降解成各种衍生物,包括 3-乙酰基-DON (3-acetyldeoxynivalenol, 3-AcDON)、15-乙酰基-DON (15-acetyldeoxynivalenol, 15-AcDON)、脱环氧化 DON (Deepoxy-deoxynivalenol, DOM-1)、DON-3-葡萄糖苷 (DON-3-glucoside, DON-3-Glc)、3-酮基-DON (3-keto-DON) 和 DON-3-O-葡萄糖醛酸 (DON-3-glucuronide, DON-3-GlcA) 等(图 3)。DON 中 C-12 和 C-13 的深度氧化导致低含氧化合物 DOM-1 的形成,许多微生物可以使 DON 去环氧化产生 DOM-1^[77]。体内和体外毒性试验比较表明,

DOM-1 不具有毒性或具有低毒性。

研究发现,副干酪乳杆菌 lhz-1 细胞壁能与 DON 形成复合物,在 24 h 内使溶液中 DON 的含量降低 40.7%^[78]。此外,一些丝状真菌也能吸附大量的 DON。Wang 等^[79]在组装 *Thinopyrum-elongatum* 基因组的基础上克隆了镰刀菌头孢疫病抗性基因 (Fhb7),Fhb7 在小麦基因组的 245 kb 区域编码一种催化谷胱甘肽 S-转移酶 (GST),GST 可与 DON 的 C12-C13 环氧基偶联产生一种新物质,从而降低 DON 的毒性。Devosia 菌株在 35 °C、pH7 时能氧化 DON 上 C-3 位的羟基,生成 3-keto-DON。在微生物生物转化过程中,3-AcDON 和 15-AcDON 位于 C-3 的羟基被氧化之前可被去乙酰化,形成中间产物 DON,然后部分转化为最终产物 3-keto-DON^[80]。由于氯化钼能影响混合菌 SH7 的菌群组成、基因表达水平和代谢产物,所以氯化钼作为生长因子能促进混合菌 SH7 对 DON 的降解^[81]。微生物细胞壁吸附 DON 或微生物酶降解 DON,具有反应条件温和、环境友好和特异性强等特点,但该方法成本高、周期长,不适合大规模应用。

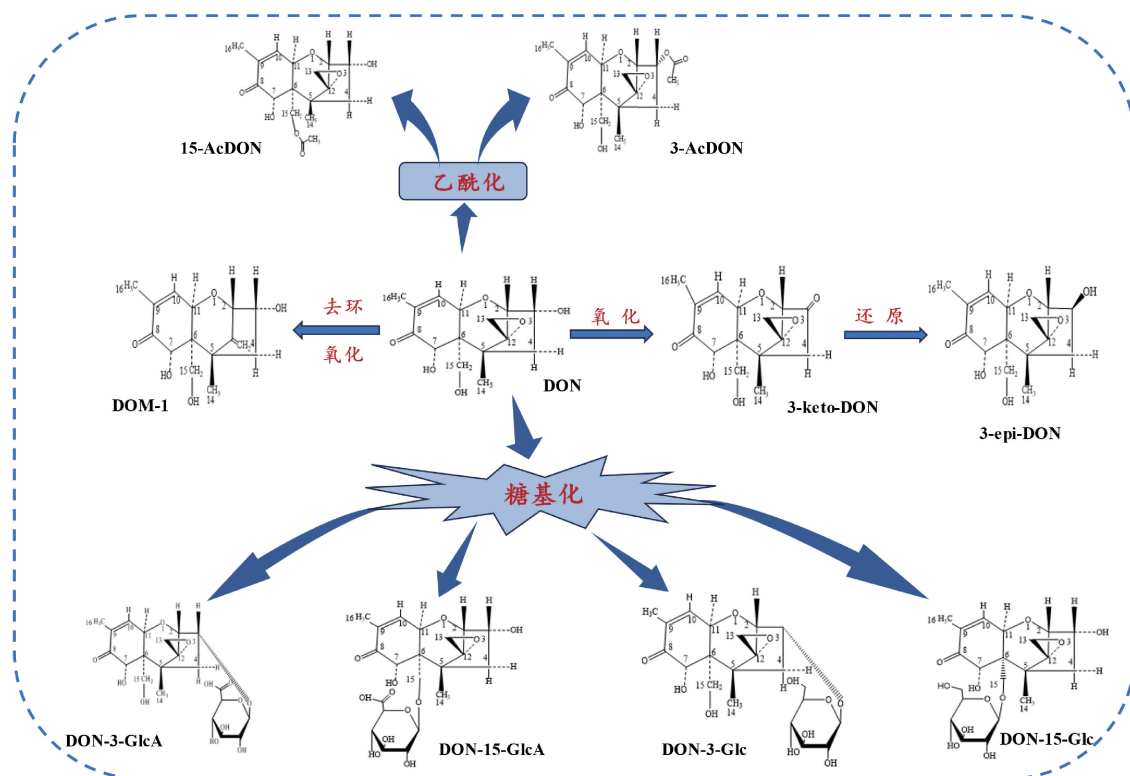


图 3 DON 生物脱毒的产物及脱毒位点

Fig. 3 Products and sites of detoxification of DON by biological detoxification

3 结论及展望

DON 具有污染范围广、污染频率高和毒性强等特点,对食品安全及人类健康构成严重威胁。总结了食品样品中 DON 的常用检测方法如色谱法和免疫分析法,以及检测之前需要的样品前处理技术如 LLE、SPE、MSPE 和 QuEChERS 等,并综述了物理、化学和生物法对 DON 的去除及 DON 的脱毒途径及产物,为实现食品中 DON 的全面风险控制和保障食品安全提供了有效策略。但是,目前发展的 DON 的检测和去除技术仍存在一些问题,例如检测结果易受食品基质干扰,去除技术同时会破坏食品品质等。就 DON 检测而言,应根据 DON 的结构特点和样品基质的组成,发展能选择性萃取富集特定样品中 DON 的功能材料,开发更高效和更高选择性的样品前处理技术,减小或消除样品基质影响,以提高检测结果的准确性。就 DON 去除而言,应强调去除机理的阐明、去除产物的安全性和食品样品的组成,根据去除机理设计和构建更为绿色的去除材料和方式,同时考虑方法的成本和适用范围,这是将来全面防控 DON 污染的研究热点与重点。

参考文献:

- [1] BAHIR M A, SARHANE B, ERRACHIDI I, et al. Knowledge, attitudes, and practices of red meat handlers in Moroccan slaughterhouses [J]. *World's veterinary journal*, 2023, 13(1): 109-124.
- [2] YOU L, ZHAO Y Y, KUCA K, et al. Hypoxia, oxidative stress, and immune evasion: a trinity of the trichothecenes T-2 toxin and deoxynivalenol (DON) [J]. *Archives of toxicology*, 2021, 95(6): 1899-1915.
- [3] PESTKA J. Toxicological mechanisms and potential health effects of deoxynivalenol and nivalenol [J]. *World mycotoxin journal*, 2010, 3(4): 323-347.
- [4] 向霞,朱恩恒,韩楠玉. 三种主要真菌毒素及其毒素降解酶的研究进展 [J]. *生物技术通报*, 2024, 40(1): 45-56.
- [5] MISHRA S, SRIVASTAVA S, DEWANGAN J, et al. Global occurrence of deoxynivalenol in food commodities and exposure risk assessment in humans in the last decade: a survey [J]. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2020, 60(8): 1346-1374.
- [6] FERREIRA I, FERNANDES J O, CUNHA S C. Optimization and validation of a method based in a QuEChERS procedure and gas chromatography-mass spectrometry for the determination of multi-mycotoxins in popcorn [J]. *Food control*, 2012, 27(1): 188-193.
- [7] TANG K J, LIU H Z, LI X Z, et al. An efficient gas chromatography-mass spectrometry approach for the simultaneous analysis of deoxynivalenol and its bacterial metabolites 3-keto-DON and 3-epi-DON [J]. *Journal of food protection*, 2018, 81(2): 233-239.
- [8] STANCIU O, JUAN C, BERRADA H, et al. Study on trichothecene and zearalenone presence in Romanian wheat relative to weather conditions [J]. *Toxins*, 2019, 11(3): 163.
- [9] 沈萍,蒋晨,汪小平. 免疫亲和柱净化-高效液相色谱快速测定玉米中脱氧雪腐镰刀菌烯醇方法初探 [J]. *上海农业科技*, 2018(2): 29-31.
- [10] 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.
- [11] CAVALIERE C, D'ASCENZO G, FOGLIA P, et al. Determination of type B trichothecenes and macrocyclic lactone mycotoxins in field contaminated maize [J]. *Food chemistry*, 2005, 92(3): 559-568.
- [12] 南文萍,倪倩,张俐,等. SPE 结合 UPLC-MS/MS 同时测定半夏曲中 24 种真菌毒素含量 [J]. *现代中药研究与实践*, 2023, 37(3): 59-65.
- [13] 袁光蔚,莫紫梅,王海波,等. 固相萃取-液相色谱/质谱法测定坚果中 7 种真菌毒素 [J]. *食品工业*, 2023, 44(9): 252-257.
- [14] PAN S D, YE M J, GAO G S, et al. Correction: synthesis of a monodisperse well-defined core-shell magnetic molecularly-imprin-

- ted polymer prior to LC-MS/MS for fast and sensitive determination of mycotoxin residues in rice [J]. *Analytical methods*, 2019, 11(25): 3269-3270.
- [15] LEE H M, SONG S O, CHA S H, et al. Development of a monoclonal antibody against deoxynivalenol for magnetic nanoparticle-based extraction and an enzyme-linked immunosorbent assay [J]. *Journal of veterinary science*, 2013, 14(2): 143-150.
- [16] 赵淑娥, 肖庚鹏, 袁璐, 等. QuEChERS 提取快速液相色谱-串联质谱法同时测定食品中多种真菌毒素 [J]. *江西化工*, 2023, 39(6): 37-40, 44.
- [17] 何卓霖, 李子琨, 穆蕾, 等. 同位素内标-高效液相色谱-串联质谱法同时测定小麦和玉米中 19 种真菌毒素 [J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(7): 150-157.
- [18] 张大伟, 高和杨, 周旌, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法同时检测饲料原料、饲料成品中 18 种真菌毒素含量 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(22): 5867-5876.
- [19] RODRÍGUEZ-CARRASCO Y, MOLTÓ J C, BERRADA H, et al. A survey of trichothecenes, zearalenone and patulin in milled grain-based products using GC-MS/MS [J]. *Food chemistry*, 2014, 146: 212-219.
- [20] XU Y, YANG H W, HUANG Z B, et al. A peptide/maltose-binding protein fusion protein used to replace the traditional antigen for immunological detection of deoxynivalenol in food and feed [J]. *Food chemistry*, 2018, 268: 242-248.
- [21] 张少波, 邓常继, 张海涛, 等. 时间分辨荧光免疫层析法同时定量检测粮食中玉米赤霉烯酮和呕吐毒素 [J]. *粮食科技与经济*, 2022, 47(1): 80-84.
- [22] 胡文尧, 龙美名, 胡玉斐, 等. 食品中真菌毒素样品前处理方法的研究进展 [J]. *色谱*, 2020, 38(3): 307-316.
- [23] RUAN C Q, DIAO X, LI N, et al. Determination of ochratoxin A and citrinin in fruits using ultrasound-assisted solvent extraction followed by dispersive liquid-liquid microextraction with HPLC with fluorescence detection [J]. *Analytical methods*, 2016, 8(7): 1586-1594.
- [24] 黄照荣, 冯华业. 固相萃取技术在食品分析中的应用 [J]. *食品安全导刊*, 2021(18): 166-168.
- [25] 徐洪文, 徐华, 朱瑜, 等. 磁性固相萃取技术在食品真菌毒素分析中的应用 [J]. *食品科学*, 2021, 42(11): 261-270.
- [26] 鹿剑, 任水英. QuEChERS 方法在食品中多组分农残检测中的研究进展 [J]. *中国酿造*, 2016, 35(9): 28-32.
- [27] YANG J Y, LI J, JIANG Y M, et al. Natural occurrence, analysis, and prevention of mycotoxins in fruits and their processed products [J]. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2014, 54(1): 64-83.
- [28] SLOBODCHIKOVA I, VUCKOVIC D. Liquid chromatography-high resolution mass spectrometry method for monitoring of 17 mycotoxins in human plasma for exposure studies [J]. *Journal of chromatography A*, 2018, 1548: 51-63.
- [29] HAMED A M, ARROYO - MANZANARES N, GARCÍA - CAMPAÑA A M, et al. Determination of *Fusarium* toxins in functional vegetable milks applying salting-out-assisted liquid-liquid extraction combined with ultra-high-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. *Food additives & contaminants Part A, Chemistry, analysis, control, exposure & risk assessment*, 2017, 34(11): 2033-2041.
- [30] 刘杨. 固相萃取技术在食品检测前处理中的应用进展 [J]. *食品安全导刊*, 2019(28): 68-69.
- [31] 包懿, 刘斌, 华蕾, 等. 固相萃取柱净化-高效液相色谱法测定谷物中的呕吐毒素残留量 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(6): 1496-1500.
- [32] 张文文, 殷锡峰, 高英春, 等. 固相萃取-超高效液质联用法检测 4 种农药对小麦中呕吐毒素的控制作用 [J]. *质量安全与检验检测*, 2021, 31(6): 12-14, 17.
- [33] LI M M, XIONG Y T, QING G Y. Innovative chemical tools to address analytical chal-

- lenges of protein phosphorylation and glycosylation [J]. Accounts of chemical research, 2023, 56(18): 2514-2525.
- [34] WEI D, PAN A, ZHANG C, et al. Fast extraction of aflatoxins, ochratoxins and enniatins from maize with magnetic covalent organic framework prior to HPLC-MS/MS detection [J]. Food chemistry, 2023, 404: 134464.
- [35] GUO D K, HUANG Q W, ZHAO R, et al. MIL-101 (Cr) @ Fe₃O₄ nanocomposites as magnetic solid-phase extraction adsorbent for the determination of multiple mycotoxins in agricultural products by ultra-high-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. Food control, 2023, 146: 109540.
- [36] 王晓, 王秀嫔, 李培武, 等. 农产品中真菌毒素样品前处理和检测方法研究进展 [J]. 化学试剂, 2019, 41(4): 325-332.
- [37] 殷锡峰, 梁红芳, 张文文, 等. 快速样品前处理技术-超高效液相色谱串联质谱法测定粮谷中 7 种真菌毒素 [J]. 生物加工过程, 2024, 22(1): 106-112.
- [38] 徐子婷, 郝莉花, 马静, 等. QuEChERS-SPE-超高效液相色谱-串联质谱法测定调味面制品中的 12 种真菌毒素 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(6): 311-319.
- [39] 徐一达, 袁晓, 王海鸣, 等. 色谱法检测真菌毒素的研究进展 [J]. 粮油食品科技, 2018, 26(6): 54-61.
- [40] PALMA P, CALDERÓN R, GODOY M, et al. Occurrence and risk estimation of zearalenone and deoxynivalenol in oats, wheat flour, and cereals consumed in Chile during 2016-2022 [J]. Journal of food composition and analysis, 2024, 134: 106476.
- [41] 夏丹, 高丽荣, 郑明辉. 全二维气相色谱分析持久性有机污染物的应用进展 [J]. 色谱, 2017, 35(1): 91-98.
- [42] 刘慧, 吴颖, 黄华. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其衍生物检测方法的研究进展 [J]. 食品科学, 2021, 42(15): 356-365.
- [43] YORK J L, MAGNUSON R H, SCHUG K A. On-line sample preparation for multiclass vitamin, hormone, and mycotoxin determination in chicken egg yolk using LC-MS/MS [J]. Food chemistry, 2020, 326: 126939.
- [44] 任淑艳, 赵薇, 赵岚, 等. 2014—2018 年黑龙江省小麦和小麦粉中脱氧雪腐镰刀菌烯醇污染水平调查与分析 [J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(12): 4011-4015.
- [45] 蒋文佳, 胡蓉, 李真, 等. LC-MS/MS 快速检测粮食中 3 种真菌毒素的方法研究 [J]. 粮食与油脂, 2023, 36(6): 153-157.
- [46] ZHANG Y Y, PEI F, FANG Y, et al. Comparison of concentration and health risks of 9 *Fusarium* mycotoxins in commercial whole wheat flour and refined wheat flour by multi-IAC-HPLC [J]. Food chemistry, 2019, 275: 763-769.
- [47] IBÁÑEZ-VEA M, LIZARRAGA E, GONZÁLEZ-PEÑAS E. Simultaneous determination of type-A and type-B trichothecenes in barley samples by GC-MS [J]. Food control, 2011, 22(8): 1428-1434.
- [48] 刘云翔, 高鹏超, 詹志来, 等. 基于酶联免疫分析的中药薏苡仁玉米赤霉烯酮残留快速检测技术研究 [J]. 中国中药杂志, 2023, 48(11): 2919-2924.
- [49] 蔡语铮, 郭歌, 温广陌, 等. 现场即时检测技术在真菌毒素检测中的研究进展 [J]. 食品研究与开发, 2024, 45(11): 202-208.
- [50] 谢艳君, 杨英, 孔维军, 等. 基于不同纳米材料的侧流免疫层析技术在真菌毒素检测中的应用 [J]. 分析化学, 2015, 43(4): 618-628.
- [51] 范孝英, 李芳. 酶联免疫吸附 (ELISA) 法在食品微生物检测中的应用分析 [J]. 食品安全导刊, 2021(9): 152, 154.
- [52] 韩丽, 张文举, 王自良, 等. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇间接竞争酶联免疫吸附测定试剂盒的研制及初步应用 [J]. 动物营养学报, 2019, 31(11): 5229-5237.
- [53] HAN L, LI Y T, JIANG J Q, et al. Development of a direct competitive ELISA kit for detecting deoxynivalenol contamination in

- wheat [J]. *Molecules*, 2019, 25(1): 50.
- [54] 李康, 应美蓉, 盛慧萍, 等. 胶体金免疫层析技术在真菌毒素快速检测中的应用 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2013, 4(1): 201-206.
- [55] JIN Y, LIU R R, ZHU L X, et al. Quantitative detection of deoxynivalenol in food and feed based on nanogold immunochromatographic assay [J]. *IOP conference series: earth and environmental science*, 2019, 242: 042017.
- [56] 曾运婷, 李再新. 小麦中呕吐毒素检测方法的研究进展 [J]. *广东化工*, 2023, 50(21): 142-144.
- [57] 王坤, 侯玉泽, 胡晓飞, 等. 时间分辨荧光免疫分析技术在真菌毒素检测的应用 [J]. *中国免疫学杂志*, 2013, 29(2): 197-201.
- [58] SUN J D, WANG L Z, SHAO J D, et al. One-step time-resolved fluorescence microsphere immunochromatographic test strip for quantitative and simultaneous detection of DON and ZEN [J]. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 2021, 413(26): 6489-6502.
- [59] LIANG J F, LI X W, HUANG B, et al. Rapid, on-site quantitative determination of mycotoxins in grains using a multiple time-resolved fluorescent microsphere immunochromatographic test strip [J]. *Biosensors and bioelectronics*, 2024, 258: 116357.
- [60] MURTAZA B, WANG L L, LI X Y, et al. Recalling the reported toxicity assessment of deoxynivalenol, mitigating strategies and its toxicity mechanisms: comprehensive review [J]. *Chemico-biological interactions*, 2024, 387: 110799.
- [61] 雷娟, 徐永平, 李淑英. 吸附法去除饲料中霉菌毒素的研究进展 [J]. *中国饲料*, 2023(6): 9-14.
- [62] ZHANG Q, ZHANG Y L, LIU S S, et al. Adsorption of deoxynivalenol by pillared montmorillonite [J]. *Food chemistry*, 2021, 343: 128391.
- [63] 刘远晓, 李萌萌, 卞科, 等. 热处理在小麦储藏与加工中的应用研究进展 [J]. *食品科学*, 2019, 40(13): 326-333.
- [64] 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.
- [65] HOJNIK N, MODIC M, TAVČAR - KALČER G, et al. Mycotoxin decontamination efficacy of atmospheric pressure air plasma [J]. *Toxins*, 2019, 11(4): 219.
- [66] KALAGATUR N K, KAMASANI J R, MUDILI V, et al. Effect of high pressure processing on growth and mycotoxin production of *Fusarium graminearum* in maize [J]. *Food bioscience*, 2018, 21: 53-59.
- [67] LIU M J, FENG J X, YANG X D, et al. Recent advances in the degradation efficacy and mechanisms of mycotoxins in food by atmospheric cold plasma [J]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2024, 270: 115944.
- [68] 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.
- [69] 王莉, 罗颖鹏, 罗小虎, 等. 臭氧降解污染小麦中呕吐毒素的效果及降解产物推测 [J]. *食品科学*, 2016, 37(18): 164-170.
- [70] ZHUANG K, ZHANG C, ZHANG W, et al. Effect of different ozone treatments on the degradation of deoxynivalenol and flour quality in *Fusarium* - contaminated wheat [J]. *CyTA - journal of food*, 2020, 18(1): 776-784.
- [71] SUN X L, JI J, GAO Y H, et al. Fate of deoxynivalenol and degradation products degraded by aqueous ozone in contaminated wheat [J]. *Food research international*, 2020, 137: 109357.
- [72] 唐贤华, 张崇军, 隋明. 不同处理方式对黄曲霉毒素 B₁ 和呕吐毒素含量的影响 [J]. *粮食与食品工业*, 2019, 26(6): 38-41, 44.

- [73] SHALAPY A, ZHAO S Q, ZHANG C X, et al. Adsorption of deoxynivalenol (DON) from corn steep liquor (CSL) by the microsphere adsorbent SA/CMC loaded with calcium [J]. *Toxins*, 2020, 12(4): 208.
- [74] CHEN X G, CHU B B, GU Q H, et al. Facile fabrication of protonated g-C₃N₄/oxygen-doped g-C₃N₄ homojunction with enhanced visible photocatalytic degradation performance of deoxynivalenol [J]. *Journal of environmental chemical engineering*, 2021, 9(6): 106380.
- [75] XU J C, SU S F, SONG X L, et al. A simple nanocomposite photocatalyst HT-rGO/TiO₂ for deoxynivalenol degradation in liquid food [J]. *Food chemistry*, 2023, 408: 135228.
- [76] WU S J, WANG F, LI Q, et al. Photocatalysis and degradation products identification of deoxynivalenol in wheat using upconversion nanoparticles@TiO₂ composite [J]. *Food chemistry*, 2020, 323: 126823.
- [77] LIU M, ZHAO L, GONG G X, et al. Invited review: remediation strategies for mycotoxin control in feed [J]. *Journal of animal science and biotechnology*, 2022, 13(1): 19.
- [78] ZHAI Y Y, HU S S, ZHONG L, et al. Characterization of deoxynivalenol detoxification by *Lactobacillus paracasei* LHZ-1 isolated from yogurt [J]. *Journal of food protection*, 2019, 82(8): 1292-1299.
- [79] WANG H W, SUN S L, GE W Y, et al. Horizontal gene transfer of Fhb7 from fungus underlies *Fusarium* head blight resistance in wheat [J]. *Science*, 2020, 368(6493): ea-ba5435.
- [80] WANG G, WANG Y X, JI F, et al. Biodegradation of deoxynivalenol and its derivatives by *Devosia insulae* A16 [J]. *Food chemistry*, 2019, 276: 436-442.
- [81] CUI C Y, LV H X, LIU Y J, et al. Degradation of deoxynivalenol by a mixed bacteria with lanthanum chloride as a growth factor [J]. *Food control*, 2024, 160: 110335.

(责任编辑 姚玮华)

(上接第 57 页)

- [30] ROSS P D, SUBRAMANIAN S. Thermodynamics of macromolecular association reactions: analysis of forces contributing to stabilization [J]. *Biophysical journal*, 1980, 32(1): 79-81.
- [31] HELD C, SADOWSKI G. Thermodynamics of bioreactions [J]. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*, 2016, 7: 395-414.
- [32] WU X Z, ZHU W J, LU L, et al. Synthesis and anti- α -glucosidase activity evaluation of betulinic acid derivatives [J]. *Arabian journal of chemistry*, 2023, 16(5): 104659.

(责任编辑 姚玮华)