

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240609004

稻谷中真菌毒素的暴露污染、检测技术及 防控研究进展

朱燕, 姚香澳, 宫智勇*

(武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北省农产品加工与转化重点实验室, 武汉 430023)

摘要: 真菌毒素具有肾毒性、肝毒性和致畸、致癌、致突变性, 能够危害食品安全和影响人体健康。作为全球最主要的粮食作物之一, 稻谷是世界近一半人口的主食来源, 其在采收前后常受到真菌毒素的污染。本文概括了稻谷中真菌毒素污染的主要种类及危害, 并对国内外稻谷暴露污染水平进行统计分析, 阐述比较了稻谷中真菌毒素常见检测分析技术, 如免疫法、色谱法、色谱-质谱法和光谱法等技术的发展现状, 讨论了稻谷采收前后常用的化学、物理和生物防控措施, 涵盖稻谷加工和储存环节的控制。对现有研究进展进行归纳总结, 对维护稻谷生产和食品安全、保障人们身体健康具有重要意义, 有利于稻谷及其制品的可持续发展, 为保障稻谷质量安全和减少真菌毒素危害提供了重要参考依据。

关键词: 稻谷; 真菌毒素; 暴露; 防控

Research progress on exposure, detection and control of mycotoxins in rice grains

ZHU-Yan, YAO Xiang-Ao, GONG Zhi-Yong*

(Key Laboratory of Agricultural Products Processing and Transformation of Hubei Province,
College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

ABSTRACT: Mycotoxins possess nephrotoxicity, hepatotoxicity, teratogenicity, carcinogenicity, and mutagenicity. They endanger food safety and affect human health. As one of the major global grains, rice is the staple food for nearly half of the world's population. It is often contaminated by mycotoxins before and after harvest. This paper reviewed the main types and hazards of mycotoxins contamination in rice, and conducted statistical analysis of global exposure, elaborated and compared the development status of common detection techniques, such as immunoassays, chromatographic methods, chromatographic-mass spectrometric methods, and spectroscopic methods, discussed the commonly used chemical, physical, and biological prevention and control measures before and after rice harvest, including the control of rice processing and storage. The summary of the existing research progress is of great significance for maintaining the production and food safety of rice and ensuring human health. It is conducive to the sustainable development of rice and its products, and provides an important reference for ensuring the quality safety of rice and reducing the harm of mycotoxins.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF1104601)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2023YFF1104601)

*通信作者: 宫智勇, 博士, 教授, 主要研究方向为食品营养与安全。E-mail: gongwhqg@163.com

*Corresponding author: GONG Zhi-Yong, Ph.D, Professor, Wuhan Polytechnic University, No.68, Xuefu South Road, Wuhan 430023, China. E-mail: gongwhqg@163.com

KEY WORDS: rice; mycotoxins; exposure; control

0 引言

真菌毒素是由丝状真菌产生的低分子量有毒次级代谢物, 主要由某些子囊菌属的真菌产生^[1]。真菌毒素具有多样性, 来源广泛, 无臭无味, 在食品中难以识别。真菌毒素的产生可能发生在稻谷生产的各个阶段, 包括采收前、采收后、干燥和储存阶段^[2], 这些毒素化学性质稳定, 加工、储存均难以去除^[3], 可能直接或间接传入消费者体内。通过食物链在人和动物体内累积, 因其毒性强大而对人类和动物健康构成潜在威胁。目前全球范围内稻谷受真菌毒素污染普遍且暴露水平受不同因素影响而产生差异, 因此本文主要从国内外稻谷中真菌毒素的暴露污染现状、现有检测分析技术研究进展及稻谷采收前后常见的防控脱毒策略 3 个方面展开综述, 以期对稻谷中真菌毒素的风险评估及综合防控研究提供参考。

1 真菌毒素概述

1.1 真菌毒素分类

迄今已分离鉴定的真菌毒素超过 500 种, 可污染稻谷的真菌毒素主要有黄曲霉毒素(aflatoxins, AFBs)、赭曲霉毒素(ochratoxin)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)、玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEN)以及伏马菌素(fumonisin, FBs)等, 其中黄曲霉毒素 B₁ (aflatoxin B₁, AFB₁)、赭曲霉毒素 A (ochratoxin A, OTA)和伏马菌素 B₁ (fumonisin B₁, FB₁)因其毒性强、污染广泛而受到更多关注^[4-5]。

此外, 随着全球气候变迁和检测技术的发展, 一些新的真菌毒素逐渐引起人们的关注。这些毒素尚未规定限量监管, 没有被标准检测方法覆盖, 且其毒性研究和污染水平数据有限, 因此被称为“新兴”真菌毒素^[6]。谷物中主要的新兴真菌毒素包括白僵菌素(beauvericin, BEA)、恩镰孢菌素(enniatins, ENNs)、fusaproliferin (FUS)、串珠镰刀菌素(moniliformin, MON)、桔霉素(citrinin, CIT)、杂色曲霉毒素(sterigmatocystin, STC)、环匹阿尼酸(cyclopiazonic acid, CPA)及链格孢毒素等。其中, 新兴镰刀菌毒素(BEA、ENNs、FUS、MON 等)污染广泛, 主要发生在谷物外壳中, 且 BEA 和 FUS 尤为值得关注^[6-7]。

隐蔽型真菌毒素是指由植物代谢、微生物酶或食品加工产生, 并且在被真菌毒素污染的物质中与其母体真菌毒素共存的一类化合物。这些被掩蔽的真菌毒素可能常规检测方法无法检测, 导致其暴露风险的低估, 降低了稻谷的质量和安全性而增加经济损失。隐蔽型毒素通常具有与其母体相似的较低的毒性作用, 但当其生物利用率更高时则

会表现出比母体更强的毒性作用。目前, 关于稻谷中隐蔽型真菌毒素毒性的文献有限, 而既往研究表明, 谷物中最常检测到的隐蔽型真菌毒素主要有脱氧雪腐镰刀菌烯醇-3-葡萄糖苷(deoxynivalenol-3-glucoside, DON-3-G)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇-15-葡萄糖苷(deoxynivalenol-15-glucoside, DON-15-G)、雪腐镰刀菌醇-3-葡萄糖苷(nivalenol-3-glucoside, NIV-3-G)、 α -玉米赤霉烯醇-14-葡萄糖苷(α -zearalenol-14-glucoside, α -ZEL-14-G)、 β -玉米赤霉烯醇-14-葡萄糖苷(β -zearalenol-14-glucoside, β -ZEL-14-G)、HT-2 毒素-3-葡萄糖苷和 T-2 毒素-3-葡萄糖苷。此外, 动植物体在受到外源毒素侵害时, 母体毒素与糖、氨基酸、硫酸盐等结合生成的衍生物是隐蔽型毒素的主要来源之一^[7-8]。

1.2 主要真菌毒素的危害

黄曲霉毒素被广泛视为真菌毒素中毒性最强且备受关注的种类^[9]。AFB₁、AFB₂、AFG₁ 和 AFG₂ 已从水稻中分离得到, 其中以 AFB₁ 毒性最大。AFB₁ 是一种强效肝毒素, 可对人体造成致畸、致癌、致突变危害, 已被国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)列为人类 I 级致癌物^[10]。赭曲霉毒素具有很强的肾毒性和肝毒性, 其中以 OTA 毒性最大^[11]。脱氧雪腐镰刀菌烯醇又名呕吐毒素, 主要作用靶器官是肝脾和肠道等消化器官, 具有细胞毒性、神经毒性和免疫抑制作用。DON 急性中毒时会导致呕吐、头昏和腹泻, 严重时甚至可能损害造血系统而导致死亡^[12]。玉米赤霉烯酮主要由镰刀菌产生, 主要作用靶器官是生殖器官, 暴露于这种污染物会导致动物血液中孕酮和血清睾酮水平降低而出现性功能障碍、不孕和流产。ZEN 在人体内的代谢机制尚不清楚, 但其对动物会产生各种免疫毒性和基因毒性^[13]。伏马菌素中 FB₁ 污染最广泛, 约占粮食污染中伏马毒素 60%以上, 主要作用靶器官是肝脏和肾脏, 其暴露与神经管缺陷、心血管疾病和食管癌患病率相关^[14]。这 5 种真菌毒素在稻谷中发生较为广泛、污染程度较重, 受到监测与研究较多^[15]。

新兴毒素中镰刀菌毒素检出率较高, 其中 BEA 和 ENNs 污染主要出现在玉米、小麦粉和稻谷样品中, 两者毒性作用机制相似, 可诱导 DNA 损伤引起细胞凋亡、影响早期胚胎发育危害生殖系统、阻碍适应性免疫反应的启动、以及暴露破坏肠道屏障完整性, 影响机体对外源性物质的生物利用度, 造成动物更易感病且生产性能降低^[16]。

隐蔽型真菌毒素是天然真菌毒素的衍生物, 主要分为与基质相关、未经修饰、修饰 3 种形式的真菌毒素, 其中修饰真菌毒素又分为化学修饰和生物修饰。它们通常比天然真菌毒素具有更高的吸收率和生物利用度, 因此具有严重的健康影响。稻谷中的真菌毒素在加工过程中可能转

化为隐蔽形式产生混合毒性,因其难以检测和去除从而增加人体暴露风险,对其结构进行解析在真菌毒素的研究中是极具挑战性的一个部分^[17]。

2 稻谷中真菌毒素污染现状

全世界有 60%~80%的作物受到真菌毒素的感染^[18],作为全球消费量第二大的谷物,稻谷是全球约 75%的人口消费的重要粮食之一,也是真菌毒素潜在污染的重要来源之一。虽然与其他粮食相比,稻谷受真菌污染较轻^[7],但由于许多国家对稻谷的大量消费,稻谷中真菌毒素污染的研究仍引起了广泛关注。KHODAEI 等^[19]曾对 2018—2020 年所有发表在 Scopus 和 Web of Science 的有关谷物中真菌毒素的综述文献进行了统计分析,发现全球范围内针对稻谷中真菌毒素污染的研究主要集中在 AFB₁、OTA、ZEN、DON 等毒素,其中 AFB₁ 被认为是最危险的真菌毒素,真菌毒素污染在发展中国家仍然很严重,仍然是这些地区主要关注的问题。

中国是最大的发展中国家,也是全球最大的水稻生产国之一,国内的水稻总体上具有一定的安全性,但在热带、亚热带和温带地区,普遍存在 AFs 的污染,且在热带地区,这种污染程度明显高于温带地区。稻谷和糙米中 AFB₁、DON 和 FB₁ 检出率相对较高^[5],此外,过往研究表明农贸市场中大米 AFs 超过最高允许残留限量(maximum residue limit, MRL)的比例高于超市中的大米,大部分 AFB₁ 存在于稻壳和麸皮中,糠中 AFB₁ 含量是糙米的 8.4 倍^[20]。中国不同地区的气候条件差异大,中国南方因其气候潮湿炎热,稻谷真菌毒素污染比北方更为严重^[21]。如四川省地处盆地,夏季高温高湿,长江三角洲地区极度潮湿的雨季条件,这些不利条件都会促进真菌毒素在储存的稻谷中迅速繁殖^[22]。

近年来针对稻谷中真菌毒素的污染调查地区涵盖了中国主要的水稻产区。由于南北地区的大纬度跨度形成了不同的温带,导致气候条件差异巨大,从而导致产毒真菌的组成和分布各不相同。在东北地区,适宜的气候条件、土壤性质和充足的阳光使其成为中国最好的水稻产区。而在南方地区,高温高湿的水稻生长季节为产毒真菌提供了有利的生长条件^[23]。根据中国 GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》规定,稻谷中 AFB₁ 和 OTA 限量指标分别为 10 μg/kg 和 5.0 μg/kg,但其未对稻谷及其制品制定 DON、FB₁ 和 ZEN 的限量指标。根据欧盟委员会(European Commission, EC)对水稻种子中真菌毒素的最大允许数量,AFs 为 4 μg/kg, AFB₁ 为 2 μg/kg, OTA 为 5 μg/kg, ZEN 为 100 μg/kg, DON 为 1250 μg/kg。表 1 是近 5 年内中国稻谷中真菌毒素污染水平调查的相关统计数据,中国主要水稻产区 AFB₁ 和 OTA 的平均浓度在国标限量范围内, DON 和 ZEN 的平均浓度在 EC 限量范围内;河北省唐山市 2021 年的稻谷中 AFB₁ 污染水平超出 EC 的限量可

能是因为采样数量过少,上海浦江仓储来自上海和黑龙江的稻谷的污染情况相较其他省份较低,可能是由于仓储条件下稻谷的储存条件比普通农户储存条件更为严格。

印度是另一个重要的水稻生产国,稻恶苗病是一种新的水稻新发病害,主要由 FB₁ 引起。尤其值得注意的是,在印度,香稻和芳香稻品种更容易受到这种病害的影响。FB₁ 会导致水稻各部位的褐变,且在冷藏条件下难以去除,对健康的米粒造成长期影响^[20]。WENNDT 等^[30]对北印度农村不同季节的稻谷真菌毒素污染暴露进行了分析,结果显示 AFB₁ 暴露在冬季最高,且 AFB₁ 含量在麸皮和谷壳中最高,在谷粒中较低。

包括泰国、越南、菲律宾等国家在内的东南亚地区也是重要的水稻生产地。KIM 等^[31]发现越南湄公河三角洲水稻中 AFs 和 FBs 污染普遍存在,稻谷 AFs 发病率高于加拿大、韩国和卡塔尔。研究表明,热带地区收获的水稻在高湿度条件下,相比于其他作物,谷粒中的曲霉容易增殖,累积的 AFB₁ 含量更高。而 OTA 在不同国家的水稻中也广泛存在,主要是由于不当的温度储存条件所致^[32]。米糠是稻谷碾磨过程中产生的副产品,由于产毒真菌在糊粉层的增殖,米糠经常被真菌毒素污染。WIPADA 等^[33]对来自柬埔寨、老挝、缅甸和泰国的 125 份米糠样品进行真菌毒素的检测,发现 2020 年 8~12 月东南亚地区最常见的真菌毒素为 Afs、FBs、DON、OTA 和 ZEN。且所有米糠样品均被 AFs、FB₁ 和 ZEN 污染,最大污染浓度分别为 271.1、7013.8 和 1728.4 μg/kg。OTA 和 DON 在米糠中普遍存在,检出率分别为 99%和 94%,最大浓度分别为 43.7 和 218.9 μg/kg。

作为发达国家的日本和韩国也同样关注稻谷中真菌毒素污染的问题。针对来自韩国 6 个不同地区的稻谷样本的研究显示,镰刀菌是污染稻谷最严重的真菌之一, DON 主要由禾谷镰刀菌产生,谷物在开花和籽粒早期阶段对其易感性最高^[34]。在日本,大米的粮食自给率约为 100%,糙米因其比精米富含更多营养物质而更受民众喜爱。TOMOYA 等^[35]在 2019—2023 年期间对日本的 550 份糙米和小麦进行调查分析发现,糙米样本中未检出黄曲霉毒素(这可能是因为日本温和的气候不利于黄曲霉毒素的产生),而 STC 的污染更为常见和广泛。

近年内国外稻谷中真菌毒素污染水平调查的相关统计数据如表 2 所示。

由此可见,稻谷中真菌毒素污染在全球范围内普遍存在,主要受到 AFB₁、OTA、FB₁ 的污染,各个国家和地区的稻谷污染水平存在差异,主要受到气候、土壤条件、农业管理实践以及食品安全监管等因素的影响。热带和亚热带地区因气候潮湿稻谷污染水平较高,温带相比较轻;发展中国家通常面临更大的水稻污染挑战,稻谷和其他谷物相比虽然受真菌毒素污染较轻,但其作为全球人口主要粮食来源,仍受到不同国家和地区的高度关注。

表 1 近 5 年内中国稻谷中真菌毒素污染水平
Table 1 Level of mycotoxin contamination in rice in China in the past 5 years

毒素	地区	调查年份	样本量/份	检测方法	检出率/%	超标率/%	检出平均浓度/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	参考文献
AFB ₁	上海、安徽、江苏、浙江	2019	150	UPLC-MS/MS	2.00	N/A	0.19	[24]
		2019	120	UPLC-MS/MS	2.50	未超标	0.20	[25]
	上海浦江仓储有限公司 (产地为黑龙江、上海)	2020	60	UPLC-MS/MS	6.67	N/A	0.15	[26]
	广东	2018—2019	120	UPLC-MS/MS	8.33	1.67	1.05	[27]
	辽宁	2020	320	免疫层析法	27.50	未超标	0.46	[28]
	河北省唐山市	2021	35	N/A	85.71	5.71	6.00	[29]
OTA	上海、安徽、江苏、浙江	2019	150	UPLC-MS/MS	15.30	0.70	0.29	[24]
		2019	120	UPLC-MS/MS	1.67	N/A	0.26	[25]
	上海浦江仓储有限公司 (产地为黑龙江、上海)	2020	60	UPLC-MS/MS	1.67	N/A	0.11	[26]
	广东	2018—2019	120	UPLC-MS/MS	0.00	未超标	0.00	[27]
	上海、安徽、江苏、浙江	2019	150	UPLC-MS/MS	83.30	N/A	19.93	[24]
FB ₁		2019	120	UPLC-MS/MS	70.00	N/A	21.98	[25]
	上海浦江仓储有限公司 (产地为黑龙江、上海)	2020	60	UPLC-MS/MS	46.67	N/A	19.91	[26]
	广东	2018—2019	120	UPLC-MS/MS	9.17	N/A	14.80	[27]
	上海、安徽、江苏、浙江	2019	150	UPLC-MS/MS	22.00	N/A	31.24	[24]
DON		2019	120	UPLC-MS/MS	17.50	N/A	33.40	[25]
	上海浦江仓储有限公司 (产地为黑龙江、上海)	2020	60	UPLC-MS/MS	1.67	N/A	63.03	[26]
	广东	2018—2019	120	UPLC-MS/MS	1.67	未超标	6.09	[27]
ZEN	上海、安徽、江苏、浙江	2019	150	UPLC-MS/MS	29.30	N/A	3.06	[24]
		2019	120	UPLC-MS/MS	33.33	N/A	3.63	[25]
	上海浦江仓储有限公司 (产地为黑龙江、上海)	2020	60	UPLC-MS/MS	1.67	N/A	7.02	[26]
	广东	2018—2019	120	UPLC-MS/MS	3.33	未超标	6.18	[27]

注: N/A 表示未提到, 下同。超高效液相色谱-串联质谱法(ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, UPLC-MS/MS)。

表 2 国外稻谷中真菌毒素污染水平
Table 2 Level of mycotoxin contamination in rice abroad

毒素	地区	采样年份	样本量/份	检测方法	检出率/%	超标率/%	平均浓度/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	参考文献
AFB ₁	墨西哥	2018	33	UPLC-MS/MS	21.21	N/A	17.43	[36]
	巴基斯坦	2019—2020	200	HPLC-FLD	62.50	50.00	2.65±0.20	[37]
	泰国	2017	300	LC-MS/MS	3.67	N/A	N/A	[38]
	印度	2022	50	HPLC-FLD	54.00	N/A	3.32	[39]
	黎巴嫩	2020—2021	105	ELISA	100.00	1.00	0.5±0.30	[40]
	阿联酋	2021	128	ELISA	38.00	20.8	1.66±0.89	[41]
OTA	墨西哥	2018	33	UPLC-MS/MS	3.03	N/A	29.89	[36]
	黎巴嫩	2021	105	ELISA	53.00	N/A	1.29 ± 0.32	[42]
	阿联酋	2021	127	ELISA	58.00	1.6	1.40 ± 0.42	[42]
DON	巴西	2014—2015	93	UPLC-Q-Orbitrap HRMS	N/A	N/A	9.76	[43]

表 2(续)

毒素	地区	采样年份	样本量/份	检测方法	检出率/%	超标率/%	平均浓度/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	参考文献
ZEN	巴西	2014—2015	93	UPLC-Q-Orbitrap HRMS	N/A	1.08	3.03	[43]
BEA	巴西	2014—2015	93	UPLC-Q-Orbitrap HRMS	N/A	N/A	9.71	[43]
	泰国	2017	300	LC-MS/MS	37.00	N/A	N/A	[38]
ENN B	巴西	2014—2015	93	UPLC-Q-Orbitrap HRMS	N/A	N/A	2.60	[43]

注: 高效液相色谱-荧光检测器(high performance liquid chromatography-fluorescence detector, HPLC-FLD); 液相色谱-串联质谱法(liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC-MS/MS); 酶联免疫吸附法(enzyme linked immunosorbent assay, ELISA); 超高效液相色谱-四极杆-静电场轨道阱高分辨质谱法(ultra performance liquid chromatography-quadrupole-electrostatic field orbital trap high resolution mass spectrometry, UPLC-Q-Orbitrap HRMS)。

3 真菌毒素检测方法

目前, 真菌毒素的检测方法主要分为 3 类, 快速检测、实验室检测和现场实时监测^[44]。快速检测法适用于现场快速筛查, 初步定性; 实验室检测通常依赖大型仪器, 样品前处理步骤较为复杂, 且对实验人员操作要求较高, 但通常检测结果灵敏度高且适合多重真菌毒素同时检测; 现场实时监测多和传感器等智能设备相关联, 实现在生产储存环节的实时监控。

3.1 快速检测法

ELISA 是真菌毒素常用的一种现场快速检测方法, 特异性强, 但容易出现假阳性。通常包括双抗体夹心法、直接法、间接非竞争法和间接竞争法^[44]。因为真菌毒素是单一抗原表位的小分子物质, 所以适用于竞争免疫分析法。ELISA 基本原理是活性抗原-抗体-酶的免疫吸附, 同时底物在酶的作用下被催化为有色产物, 通过分光光度法进行测量, 实现对真菌毒素的快速筛查和初步定量。ELISA 可以通过纳米颗粒、微阵列技术和光纤进一步修饰, 修饰后具有高度特异性, 易于微型化而应用在实时免疫传感器上。ELISA 技术已用于稻谷中 DON、FB₁、AFB₁ 和 OTA 的检测^[45]。

免疫层析法(immunochromatographic assay ICA)是样品和标记探针混合物在试纸条上移动, 抗原抗体特异性结合并在试纸条上显示出探针标记物的信号, 通过检测信号实现对真菌毒素的定性定量分析^[44]。因试纸条操作简单, 检测时间短且价格低廉而适用于大批样本现场快速检测。常用的方法是胶体金免疫层析、荧光免疫层析法。荧光试纸条的性能决定检测效果, 但荧光物质稳定性不佳是免疫层析法发展面临的主要挑战。利用有机材料将荧光物质包裹成纳米微球和研发新材料, 如近红外荧光材料, 可提高稳定性并减少背景干扰。将 ICA 迁移到微流控芯片平台上, 通过优化抗原抗体修饰和固定技术, 可以显著提高检测的

灵敏度和重复性, 是未来研究的重点^[46]。

表面增强拉曼散射(surface enhancement of Raman scattering, SERS)可以克服传统拉曼光谱中的弱散射, 使得测物拉曼信号大大增强。在黄曲霉毒素分析的预测能力和模型性能方面, 远优于傅里叶变换近红外反射方法^[47]。目前, 便携式拉曼光谱已用于检测稻谷中 AFB₁^[48]。拉曼光谱技术在多重真菌毒素检测方面取得显著进展, 降低了成本、提高了灵敏度和特异性, 但面临着增强机制不清晰、基底材料成本高、复现性差、数据库不完善等问题, 需要加强理论研究、降低成本、改善基底复现性, 并完善“拉曼光谱指纹”数据库^[46]。

3.2 实验室检测法

实验室检测方法主要是先制备样品, 再用色谱法定量分析。样品需要经过复杂的前处理过程, 通常先从样品中提取待测物, 常用提取方法有超临界流体萃取(supercritical fluid extraction, SFE)、微波辅助萃取(microwave-assisted extraction, MAE)和加速溶剂萃取(accelerated solvent extraction, ASE)法; 然后对样品净化提纯, 常采用固相萃取(solid-phase extraction, SPE)、免疫亲和层析(immunoaffinity chromatography, IAC)、固相微萃取(solid phase micro-extraction, SPME)、基质固相分散法、快速样品前处理技术(quick、easy、cheap、effective、rugged、safe, QuEChERS); 可能还需经过衍生化处理后再用荧光检测器检测。QuEChERS 法^[49]是糙米中 AFs 和 OTA 的最常用的提取方法。

气相色谱法(gas chromatography, GC)是镰刀菌毒素最常用的检测方法, 适用于紫外和荧光吸收弱且具有一定挥发性的物质。由于大多数真菌毒素找不到合适的衍生化试剂而在检测中受到限制^[44]。液相色谱-质谱法(liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS)适用于非挥发性、热不稳定和极性化合物, 与 LC-MC 相比, 液相色谱-高分辨率质谱(liquid chromatography-high-resolution mass

spectrometer, LC-HRMS)通过减小柱粒度、保持更好更快的分离效率、获得更窄的峰、提高分辨率和精度和对没有参考标准的化合物进行定性筛查分析而得以更好地发展^[8]。章璐幸等^[50]基于自建数据库的超高效液相色谱-四极杆-飞行时间质谱法(ultra-performance liquid chromatography/quadrupole time-of-flight-tandem mass spectrometry, UPLC-Q-TOF/MS)在 46 批水稻中筛查出了 AFB₁ 和 AFB₂, 筛出率各为 2.2%, 检出限为 0.50~400 μg/kg。蒋文佳等^[51]用基质匹配法消除基质效应, 建立 LC-MS/MS 同时快速测定水稻中 AFB₁、DON 和 ZEN 的检测方法。此外, 高效液相色谱-串联质谱法(high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, HPLC-MS/MS)、HPLC 结合 FLD 和串联质谱法、高效薄层色谱法(high performance thin layer chromatography, HPTLC)、UPLC 已广泛应用于谷物真菌毒素检测中。HPLC 结合 FLD 和串联质谱法已经在检测稻谷中多种真菌毒素方面得到了广泛报道。例如, 采用荧光检测器的 HPLC 已成功用于稻谷中 AFB₁、OTA、ZEA、DON、CIT 和雪腐镰刀菌醇(nivalenol, NIV)等毒素的检测。而 HPLC-MS/MS 则已成功用于稻谷中 AFB₁、OTA 和 CIT 等毒素的定量分析^[52]。

目前, LC-MS/MS 被认为是真菌毒素残留检测首选的方法, 已成为同时定量各种食品和饲料基质中多种真菌毒素的金标准^[53]。LC-MS/MS 相较于其他方法具有较高的灵敏度和选择性, 但在分析多重物质时方法烦耗时。且用真菌毒素高浓度标准品和对应的同位素内标时, 因纯度高、毒性大, 会对实验者及实验环境造成一定的危害。LC-MS/MS 通常用于定性分析, 其通过预设的标准品实现定性, 因此无法获取标准对照品以外的真菌毒素的残留信息^[54]。

3.3 现场实时监测法

在生产和储存环节对真菌毒素进行实时监测通常依赖光谱法和传感器法。传统光谱法中, 近红外光谱(near infrared, NIR)、中红外光谱、傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)和拉曼光谱提供了有关真菌毒素结构的定性和定量信息^[55]。近红外反射光谱(near infrared reflectance spectroscopy, NIRS)在 838 种不同品种农产品的黄曲霉毒素污染和真菌感染检测中表现出超强能力^[56]。红外吸收光谱(infrared absorption spectroscopy, IR)可用于真菌毒素的间接分析, 通过分析真菌感染引起的食品样品内在结构的变化(如蛋白质和碳水化合物化合物的变化)来实现。傅里叶变换衰减全反射红外光谱(attenuated total reflection Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR-ATR)依赖于两束光束之间的辐射干扰, 提供了与特定官能团的存在与否以及聚合物材料的化学结构相关的信息^[8]。

常用的传感器主要有电子鼻和生物传感器。电子鼻通

过固态传感器检测受污染食物释放的挥发性化合物^[57], 已用于检测玉米中 AFs 和 FBs 以及麦麸和硬粒小麦中的 DON, 但对非挥发性的真菌毒素效果则不理想^[8]。BOROWIK 等^[58]使用电子鼻成功检测到禾谷镰刀菌株产生的 DON 和 ZEN, 检测回收率为 88%~94%, 准确率为 90%~96%。JI 等^[59]基于智能手机图像处理平台与微流控技术结合同时检测 OTA 和 AFB₁, 该方法对 AFB₁ 和 OTA 的检测范围分别为 0.1~200 ng/mL 和 0.1~500 ng/mL, 检出限均为 0.1 ng/mL。SHKEMBI 等^[60]将多肽、酶、抗体、细胞、核酸以及适体、分子印迹聚合物和重组抗体等其他材料作为生物传感器中的传感元件, 基于光学表面等离子体共振(surface plasmon resonance, SPR)和荧光、压电(石英晶微天平)和电化学(阻抗, 电位和安培)原理, 可以对稻谷中 AFB₁ 进行快速检测。

此外, 代谢组学和基因组学是目前应用于稻谷真菌毒素分析的两种具有前景的组学技术, 可以确定水稻中某些真菌毒素的基因表达。AL 等^[61]基于聚合酶链反应(polymerase chain reaction, PCR)的内部转录间隔核糖体 DNA (ITS-rDNA)测序已成功鉴定受污染稻谷中的曲霉属和青霉属真菌。

不同检测技术的对比及优缺点如表 3 所示。

4 稻谷中真菌毒素防控策略

真菌毒素污染取决于不同的因素。(1)真菌种类。并非所有真菌都具有威胁性, 也并非所有真菌的次级代谢产物都具有毒性。作为一种战防御机制, 真菌只在特定情况下产生这些代谢物。曲霉菌、镰刀菌及青霉菌是影响稻谷的主要真菌属, 可导致谷粒变质变色、生存力和质量下降, 并最终造成经济损失, 从而影响国家的粮食安全。(2)微生物间相互作用。彼此之间以及与其他微生物的相互作用, 其中水分活度、pH、温度、湿度、光照等条件都会影响微生物的生理活动。(3)环境条件。产地条件、气候条件、采前采后做法以及它们所处的农场管理制度(有机还是传统)都会对真菌毒素的繁殖产生影响^[67]。因此, 稻谷真菌毒素污染防控的重点集中在稻谷采收前后的策略制定, 而防控技术主要包括化学、物理和生物 3 个方面。

4.1 化学防控策略

在采收前, 稻谷生长过程中的病虫害控制、土壤施肥管理、合理使用杀菌剂是真菌毒素污染防控的有效措施^[68]。商业杀虫剂、杀菌剂和除草剂有利于保护作物生长, 但其滥用、过度使用就会导致土壤酸化、有益微生物的减少、破坏生态平衡和产生抗药性, 不利于农业持续化生产并且造成农药残留等问题。因此, 天然绿色杀菌剂因其安全性和环保性而成为研究的热门领域。HAN 等^[69]设

表 3 真菌毒素检测技术对比
Table 3 Comparison of mycotoxin detection technologies

类别	应用场景	检测方法	优点	缺点	参考文献
现场快速检测	对大批待检食品进行快速筛查,旨在初步明确被感染真菌毒素的种类及浓度范围	ELISA	具有高特异性和高灵敏度	由于抗体交叉反应性和基质干扰,在确定复杂基质中低水平的多种分析物时,容易出现假阳性,测试的可靠性常受到质疑	[52]
		ICA	操作简单快速、成本低、无需复杂仪器就能完成定性判断;便携性好,能同时检测多种毒素	灵敏度有限,荧光试纸条稳定性差,检测结果可能受到样品复杂基质的干扰	[62]
		SERS	检测灵敏度高、检出限较低;能提供特定的“指纹”光谱,可用于定性和定量检测;结合机器学习等技术,可对复杂的真菌毒素光谱进行分析;可实现快速提取、鉴别和检测多种真菌毒素	需要更强大的机器学习算法;真菌毒素对 Au 底物形成和 SERS 稳定性的影响还需要进一步研究	[63]
实验室检测	对含量极低的物质进行检测时具有高灵敏度的优势,适用于复杂样品中多重真菌毒素的定量和定性分析	GC	适用于检测无色基团和荧光基团、紫外和荧光吸收弱且具有一定挥发性的真菌毒素	多数真菌毒素难以找到适配的衍生化试剂,其衍生化处理过程复杂且耗时	[44]
		气相色谱串联质谱法	能够定性和定量分析挥发性化合物	成本高、操作复杂、难以监测挥发性标记物的变化	[64]
		LC-MS/MS	灵敏度高、准确度高、可同时定量检测,可对微量物质进行检测	需要大型昂贵仪器,不适用于实验室之外,且对操作人员技术要求高	[52]
现场实时监测	适用于样品生产、存储等环节的原位和在线监测,有助于对重要生产环节进行质量把控,还能对存储环节进行持续监测	NIR	无需预处理、重现性好;适用范围广,可实现无损检测;可同时分析多个组分,适合于生产过程中的在线监测	灵敏度相对较低,受样品品质影响大,模型建立复杂,定量分析困难	[65]
		电子鼻	快速无损检测,经济实惠,可区分不同污染程度	不适用于非挥发性真菌毒素	[66]
		生物传感器	高灵敏、低成本、设计简单、并自动执行整个过程	稳定性和可靠性可能受外界环境因素影响	[44]

计并合成了一种新型松香基三唑衍生物杀菌剂,对稻谷镰刀菌有较好的抑制效果,为水稻纹枯病的防治提供新的杀菌剂选择。KAUSHAL 等^[70]利用废弃的柑橘类水果作为原料,开发了一种植物性杀菌剂用于防治水稻的腐脚病,其抗真菌活性可能源于其主要含有的类黄酮和酚类化合物,这些化合物可能会改变真菌细胞膜的通透性和完整性,导致真菌细胞内部成分的泄漏。

在采收后,稻谷中真菌毒素主要使用酸、碱、氧化剂、还原剂、氯化剂、水解剂、生物制剂(如植物提取物和精油)、氨、硅藻土等进行化学降解,但这些物质通常难以去除而残留在稻谷中。已有研究表明,臭氧、过氧化氢、亚硫酸氢钠、亚硫酸钠和焦亚硫酸钠对黄曲霉毒素具有良好的降解效果^[71],其中臭氧熏蒸被认为是重要的采后处理方法,其降解机制主要是通过和真菌毒素化学结构中的双键反应。在稻谷的储存过程中,天然防腐剂植物精油(plant essential oils, NEOs)已显示出良好的抗菌和抗氧化特性,这些精油通常从肉桂、丁香、柠檬草、牛至、百里香、肉豆蔻、薄荷和罗勒中提取,主要活性化合物是苯丙素、酚

类、萜类、类固醇、芳香烃和生物碱。其对 DON、AFB₁、ZEA 和 OTA 具有显著的抗真菌产毒活性^[8]。

4.2 物理防控策略

稻谷采收前,及时种植、及时收获、抗性品种培育、轮作间作、低地灌溉、土壤管理技术是有效的物理防控策略^[71]。抗性品种培育有助于预防真菌感染、感染后真菌的生长以及感染后抑制真菌毒素的生物合成;轮作有助于打破由于前一季的结转而导致的真菌连续攻击链;世界水稻生产总面积的 75%左右都是低地灌溉种植系统^[22],可以有效提高水稻植株的生长和产量;而植物检疫措施和虫害控制等其他措施也对真菌毒素的收获前管理至关重要^[72]。

在采收后,物理方法是稻谷中真菌毒素去污最普遍的干预方法。主要是将光、超声波或超高温分选、洗涤碾磨过程相结合^[21],其关键步骤是去除麸皮。主要包括各种程序(如清洗、机械或电子分选、洗涤、浮选、溶剂萃取)、热加工技术(如烹饪、煮沸、油炸、烘烤、微波加热等)、

辐照、紫外线辐射、冷等离子体(cold atmospheric plasma, CAP)、脉冲光等方法^[53]。其中 CAP 技术是传统热法的一种经济、安全的替代方法^[73], 具有满足可持续发展需求的潜力。通过去除粮食外部部位(如去皮、抛光)以及高水分热处理(如焙烧、挤压、高压蒸煮), 稻谷中的黄曲霉毒素可有效降低 25%~88%。而紫外光和近红外辐射能够使稻谷中的黄曲霉毒素减少近 99%^[21]。对稻谷来说, 砻谷和碾米等工艺可以显著降低毒素污染水平, 但也会导致营养素的流失。因此, 通过分析稻谷中真菌毒素含量的分布, 并研究在适度加工后不同的碾减率和留白度下, 真菌毒素含量与稻谷营养素含量的变化情况, 以探究稻谷适度加工的最佳处理方法, 在未来将是一个值得探究的课题。

4.3 生物防控策略

稻谷采收前的生物防控措施主要是通过微生物的竞争抑制和利用拮抗细菌来减少产毒真菌的生长和真菌毒素的产生, 从而降低稻谷感染的风险。通过在稻谷生长的土壤中接种高竞争力的无毒菌株, 如非毒性的曲霉属菌株, 与产毒霉菌进行生物竞争。这些无毒菌株与有毒菌株来自相同物种, 能够减少或抑制真菌毒素的产生, 从而降低稻谷感染的概率^[21]。

虽然已建立的物理和化学方法被广泛用于稻谷采收后真菌毒素的去污, 但它们往往导致营养损失或化学残留, 安全性差且能耗高, 用微生物方法替代物理或化学手段的趋势日益增长。目前, 主要的生物降毒方法包括微生物吸附、微生物竞争性抑制和酶降解。所使用的微生物包括酵母菌、乳酸菌、杆菌、无毒霉菌和海洋微生物^[21], 在众多微生物中, 乳酸菌、地衣芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌和酿酒酵母菌具有结合 AFB₁、DON 和 OTA 的活性。已有研究表明^[71], 黄曲霉毒素生物防治的 3 种主要机制是拮抗法(特定物种将在田间竞争产毒菌株生存)、生长抑制法(特定微生物将阻止产毒菌株的生长和最终定植)和抑制毒素的产生。其中最成功的生物防治措施是利用产氧曲霉菌株的黄曲霉菌株来与产毒菌株竞争。虽然生物防治剂对各种真菌毒素有效, 对环境友好且价格低廉。但因其没有关于在食品应用中的使用的法律法规, 生物防治剂在食品加工、储存过程中的有效性和安全性有待进一步探讨^[8]。此外稻谷采收后储存过程中主要控制点是监测储存和加工条件的湿度和温度^[68]。一般来说, 产毒真菌生长的温度范围为 10~40.5°C, 相对湿度为 70%, pH 为 4~8^[72]。因此, 在稻谷采收后整个贮存期间, 相对湿度必须保持在 70%左右, 并降低温度, 以尽量减少真菌的生长和代谢。此外, 使用改良气体储存也可以抑制产毒真菌的生长。

5 结束语

全球稻谷大部分产自亚热带地区, 在温暖潮湿的环

境下, 稻谷收获前后都易受到真菌毒素污染。尽管相比于其他谷物而言, 稻谷受到真菌污染程度较轻, 但作为全球人口主要饮食来源, 其污染问题仍不可小觑。在发展中国家, 稻谷真菌毒素污染仍然是一个严重的问题, 尤其是 AFB₁ 被认为是最危险的真菌毒素之一。除了 AFB₁ 外, OTA、ZEN、DON 等毒素也是主要关注的对象。稻谷中真菌毒素检测方法主要有色谱法、免疫法、光谱法, 现有检测方法中高效液相色谱-质谱法是针对稻谷中真菌毒素污染检测的有效方法, 检测灵敏度高, 适用于多重真菌毒素的检测。此外, 各种应用于真菌毒素现场快速检测的方法随着技术的不断完善也将得以创新。稻谷中真菌毒素的污染取决于不同的因素, 其防控措施主要集中于稻谷采收前后的物理、化学、生物防控, 生物防控因其环保高效而日趋取代化学和物理防控手段。通过对稻谷中真菌毒素的暴露污染、检测分析、防控方法等研究进展总结归纳, 有利于维护稻谷生产和食品安全。同时, 随着技术的进步, 未来可能还会有更先进、快速、准确的检测方法出现, 这将进一步提高稻谷品质和食品安全的保障水平。

参考文献

- [1] AGRIOPOULOU S, STAMATELOPOULOU E, VARZAKAS T. Advances in occurrence, importance, and mycotoxin control strategies: Prevention and detoxification in foods [J]. *Foods*, 2020, 9(2): 137.
- [2] WINTER G, PEREG L. A review on the relation between soil and mycotoxins: Effect of aflatoxin on field, food and finance [J]. *Eur J Soil Sci*, 2019, 70(4): 882–897.
- [3] 潘程, 张云鹏, 刘晓萌, 等. 农产品中真菌毒素检测技术研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(11): 3571–3580.
PAN C, ZHANG YP, LIU XM, *et al.* Recent progress of mycotoxin determination in agricultural products [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(11): 3571–3580.
- [4] 程裕贵, 胡靖康, 江湖, 等. 粮食中主要真菌毒素及分析方法研究进展[J/OL]. *中国粮油学报*, 1–15. [2024-08-01]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000727>
CHENG YG, HU JK, JIANG H, *et al.* Mycotoxins contamination in cereals and analytical methods [J/OL]. *J Chin Cere Oils Assoc*, 1–15. [2024-08-01]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000727>
- [5] 闫兆凤, 黄常刚, 杨欣. 中国主粮中真菌毒素污染现状[J]. *卫生研究*, 2022, 51(4): 685–691.
YAN ZF, HUANG CG, YANG X. Contamination status of mycotoxins in staple food in China [J]. *J Hyg Res*, 2022, 51(4): 685–691.
- [6] 申慧婧, 张弛, 周爽, 等. 食品中新兴真菌毒素检测技术及其污染现状研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(12): 203–213.
SHEN HJ, ZHANG C, ZHOU S, *et al.* Research progress of emerging mycotoxin detection technology and its contamination status in food [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(12): 203–213.
- [7] 李雅静, 秦曙, 杨艳梅, 等. 中国谷物真菌毒素污染研究现状[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(3): 186–194.
LI YJ, QIN S, YANG YM, *et al.* Research status of cereal mycotoxin contamination in China [J]. *J Chin Cere Oils Assoc*, 2020, 35(3): 186–194.

- [8] PRIYANTHI C, DOMINIC A, AZAM A. Green and sustainable technologies for the decontamination of fungi and mycotoxins in rice: A review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2022, 124: 278–295.
- [9] RITA AS, FILIPA C, ANDREIA F, *et al.* Mycotoxins contamination in rice: analytical methods, occurrence and detoxification strategies [J]. *Toxins*, 2022, 14(9): 647–647.
- [10] PEIHUAN H, MD HM, WENJING Y, *et al.* Rapid and stable detection of three main mycotoxins in rice using SERS optimized AgNPs@K30 coupled multivariate calibration [J]. *Food Chem*, 2023, 398: 133883–133883.
- [11] 张太, 毛丹, 王少敏, 等. 赭曲霉毒素 A 的研究进展[J]. *分析科学学报*, 2021, 37(5): 699–705.
ZHANG T, MAO D, WANG SM, *et al.* Research progress of ochratoxin A [J]. *J Anal Sci*, 2021, 37(5): 699–705.
- [12] 姜冬梅, 王荷, 武林霞, 等. 小麦中呕吐毒素研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(2): 423–432.
JIANG DM, WANG H, WU LX, *et al.* Research progress of deoxynivalenol in wheat [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(2): 423–432.
- [13] KUMAR DM, SHEETAL D, SHIKHA P, *et al.* Occurrence, impact on agriculture, human health, and management strategies of zearalenone in food and feed: A review [J]. *Toxins*, 2021, 13(2): 92–92.
- [14] 黎晓雯, 罗俊崇, 张梦丹, 等. 伏马毒素 B₁ 的毒性和检测方法[J]. *动物医学进展*, 2019, 40(6): 112–115.
LI XM, LUO JC, ZHANG MD, *et al.* Toxicity and detection method of fumonisin B₁ [J]. *Prog Vet Med*, 2019, 40(6): 112–115.
- [15] CHANDRAVARNAN P, AGYEI D, ALI A. The prevalence and concentration of mycotoxins in rice sourced from markets: A global description [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2024, 146: 104394.
- [16] 汪爽, 赫丹, 韩君, 等. 粮食中新兴真菌毒素的污染现状及毒理学研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(11): 9–17.
WANG S, HE D, HAN J, *et al.* Updates of natural occurrence and toxicology studies of emerging toxins in grains [J]. *J Chin Cere Oils Assoc*, 2023, 38(11): 9–17.
- [17] JI J, ZHANG DC, YE J, *et al.* MycotoxinDB: A data-driven platform for investigating masked forms of mycotoxins [J]. *J Agric Food Chem*, 2023, 71(24): 9501–9507.
- [18] ELENA C, ROBERTA G, ELENA D, *et al.* Antifungal effect of all-trans retinoic acid against *Aspergillus fumigatus* *in vitro* and in a pulmonary aspergillosis *in vivo* model [J]. *Antimicrob Agents Chemother*, 2021, 65(3): e01874-20.
- [19] KHODAEI D, JAVANMARDI F, KHANEGHAH AM. The global overview of the occurrence of mycotoxins in cereals: A three-year survey [J]. *Curr Opin Food Sci*, 2021, 39: 36–42.
- [20] SUN XD, SU P, SHAN H. Mycotoxin contamination of rice in China [J]. *J Food Sci*, 2017, 82(3): 573–584.
- [21] ZHANG J, TANG X, CAI YF, *et al.* Mycotoxin contamination status of cereals in China and potential microbial decontamination methods [J]. *Metabolites*, 2023, 13(4): 551.
- [22] GONÇALVES A, GKRILLAS A, DORNE LJ, *et al.* Pre- and postharvest strategies to minimize mycotoxin contamination in the rice food chain [J]. *Compr Rev Food Sci F*, 2019, 18(2): 441–454.
- [23] QI ZH, ZHOU X, TIAN L, *et al.* Distribution of mycotoxin-producing fungi across major rice production areas of China [J]. *Food Control*, 2022, 134: 108572.
- [24] 范楷, 祭芳, 徐剑宏, 等. 长三角地区市场常见农产品中 40 种真菌毒素的污染状况和特征分析[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(13): 2870–84.
FAN K, JI F, XU JH, *et al.* Natural occurrence and characteristic analysis of 40 mycotoxins in agro-products from Yangtze Delta region [J]. *Sci Agric Sin*, 2021, 54(13): 2870–2884.
- [25] 唐占敏. 长三角地区谷物中典型真菌毒素识别及污染研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
TANG ZM. Study on identification and pollution of typical mycotoxins in grains in Yangtze River Delta region [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.
- [26] 温晓燕. 仓储小麦和稻谷中主要真菌毒素污染水平及快速识别技术研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
WEN XY. Study on main mycotoxin contamination levels and rapid identification techniques in stored wheat and paddy [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.
- [27] 刘志婷, 池岚, 屠鸿薇, 等. 广东省稻谷中真菌毒素污染状况研究[J]. *中国食品卫生杂志*, 2020, 32(6): 654–659.
LIU ZT, CHI Y, TU HW, *et al.* Occurrence of multi-mycotoxin in paddy rice in Guangdong Province [J]. *Chin J Food Hyg*, 2020, 32(6): 654–659.
- [28] 崔高飞. 辽宁地产稻谷质量现状分析及风险评价[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022.
CUI GF. Current situation analysis and risk assessment of rice quality [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022.
- [29] 李晓龙, 吴丹, 李英军, 等. 粮食中主要真菌毒素的调查分析与研究[J]. *食品安全导刊*, 2022, (32): 106–109.
LI XL, WU D, LI YJ, *et al.* Analysis and research of main mycotoxins in grain [J]. *China Food Saf Magaz*, 2022, (32): 106–109.
- [30] WENNDT AJ, SUDINI HK, MEHTA R, *et al.* Spatiotemporal assessment of post-harvest mycotoxin contamination in rural North Indian food systems [J]. *Food Control*, 2021, 126: 108071–108071.
- [31] KIM TLP, MINH TT, MARTHE BD, *et al.* Impact of season, region, and traditional agricultural practices on aflatoxins and fumonisins contamination in the rice chain in the Mekong Delta, Vietnam [J]. *Toxins*, 2021, 13(9): 667–667.
- [32] KATSURAYAMA MA, MARTINS ML, IAMANAKA TB, *et al.* Occurrence of aspergillus section flavi and aflatoxins in Brazilian rice: from field to market [J]. *Int J Food Microbiol*, 2018, 266: 213–221.
- [33] WIPADA S, OLUWATOBI K, WARAPA M, *et al.* The occurrence and co-occurrence of regulated, emerging, and masked mycotoxins in rice bran and maize from Southeast Asia [J]. *Toxins*, 2022, 14(8): 567–567.
- [34] OK EH, KIM MD, KIM D, *et al.* Mycobiota and natural occurrence of aflatoxin, deoxynivalenol, nivalenol and zearalenone in rice freshly harvested in South Korea [J]. *Food Control*, 2014, 37: 284–291.
- [35] TOMOYA Y, YOSHIKO S, EIKO S, *et al.* Survey and risk assessment of aflatoxins and sterigmatocystin in Japanese staple food items and the evaluation of an in-house ELISA technique for rapid screening [J]. *Food Control*, 2024. DOI: 10.1016/j.foodcont.2023.110154
- [36] MOLINA PIB, RUÍZ AMA, GUERRERO FMC, *et al.* Preliminary survey of the occurrence of mycotoxins in cereals and estimated exposure in a northwestern region of Mexico [J]. *Int J Environ Heal R*, 2022, 32(10): 2271–2285.
- [37] KASHIF M, RIAZ M, AKHTAR S, *et al.* Seasonal and geographical

- analysis of aflatoxins in different varieties of brown rice collected from two districts of punjab-pakistan [Z]. 2024.
- [38] SINPHITHAKKUL P, POAPOLATHEP A, KLANGKAEW N, *et al.* Occurrence of multiple mycotoxins in various types of rice and barley samples in Thailand [J]. *J Food Protect*, 2019, 82(6): 1007–1015.
- [39] VALIDANDI V, KURELLA S, GORAIN S, *et al.* Exposure assessment and risk characterisation of aflatoxins in randomly collected rice samples from local markets of Hyderabad, India [J]. *Food Addit Contam A*, 2024, 41(6): 664–674.
- [40] HASSAN HF, KORDAHI R, DIMASSI H, *et al.* Aflatoxin B₁ in rice: Effects of storage duration, grain type and size, production site, and season [J]. *J Food Protect*, 2022, 85(6): 938–944.
- [41] ALWAN N, BOU GH, DIMASSI H, *et al.* Exposure assessment of aflatoxin B₁ through consumption of rice in the United Arab Emirates [J]. *Int J Env Res Pub He*, 2022, 19(22): 15000.
- [42] HASSAN HF, ABOU GA, CHARARA A, *et al.* Exposure to ochratoxin A from rice consumption in Lebanon and United Arab Emirates: A comparative study [J]. *Int J Env Res Pub He*, 2022, 19(17): 11074.
- [43] MOREIRA GM, NICOLLI CP, GOMES LB, *et al.* Nationwide survey reveals high diversity of *Fusarium* species and related mycotoxins in Brazilian rice: 2014 and 2015 harvests [J]. *Food Control*, 2020, 113: 107171.
- [44] 温慧娇, 廖芷晴, 靳贵英. 真菌毒素检测方法进展[J]. *中国药品标准*, 2023, 24(5): 465–475.
- WEN HJ, LIAO ZQ, JIN GY. Progress in detection methods for mycotoxin [J]. *Drug Stand China*, 2023, 24(5): 465–475.
- [45] SARMAST E, FALLAH A A, JAFARI T, *et al.* Occurrence and fate of mycotoxins in cereals and cereal-based products: A narrative review of systematic reviews and meta-analyses studies [J]. *Curr Opin Food Sci*, 2020. DOI: 10.1016/j.cofs.2020.12.013
- [46] 陈瑞鹏, 孙云凤, 霍冰洋, 等. 真菌毒素多重检测技术研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(17): 267–274.
- CHEN RP, SUN YF, HUO BY, *et al.* Progress in multiple detection technologies for mycotoxins [J]. *Food Sci*, 2021, 42(17): 267–274.
- [47] LEE KM, DAVIS J, HERRMAN TJ, *et al.* An empirical evaluation of three vibrational spectroscopic methods for detection of aflatoxins in maize [J]. *Food Chem*, 2015, 173: 629–639.
- [48] LIU SH, WEN BY, LIN JS, *et al.* Rapid and quantitative detection of aflatoxin B₁ in grain by portable Raman spectrometer [J]. *Appl Spectrosc*, 2020, 74(11): 1365–1373.
- [49] 赵英莲, 张梓琪, 赵鑫, 等. QuEChERS 技术在食品真菌毒素检测中的研究进展[J]. *中国酿造*, 2020, 39(1): 1–5.
- ZHAO YL, ZHANG ZQ, ZHAO X, *et al.* Research progress on QuEChERS technology in the detection of mycotoxins in food [J]. *China Brew*, 2020, 39(1): 1–5.
- [50] 章璐幸, 周征, 曹琳, 等. 基于自建数据库的超高效液相色谱-四极杆-飞行时间质谱法测定谷物中 7 种真菌毒素[J]. *色谱*, 2023, 41(11): 1002–1009.
- ZHANG LX, ZHOU Z, CAO L, *et al.* Determination of seven mycotoxins in cereals by ultra performance liquid chromatography-quadrupole-time of flight mass spectrometry based on the self-built database [J]. *Chin J Chromatogr*, 2023, 41(11): 1002–1009.
- [51] 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.
- JIANG WJ, HU R, LI Z, *et al.* Study on the rapid determination method of three mycotoxins in grain by LC-MS/MS [J]. *Cere Oils*, 2023, 36(6): 153–157.
- [52] AL-ZOREKY SN, SALEH AF. Limited survey on aflatoxin contamination in rice [J]. *Saud J Biol Sci*, 2019, 26(2): 225–231.
- [53] LOGAN N, CAO C, FREITAG S, *et al.* Advancing mycotoxin detection in food and feed: Novel insights from surface-enhanced raman spectroscopy (SERS) [J]. *Adv Mater* 2024, 36(15): e2309625–e2309625.
- [54] 章璐幸, 黄朝辉, 罗淑青, 等. 应用超高效液相色谱-四极杆-飞行时间质谱法建立谷物中 18 种真菌毒素非靶向筛查数据库及确证方法[J]. *色谱*, 2023, 41(1): 66–75.
- ZHANG LX, HUANG CH, LUO QS, *et al.* Establishment of non-targeted screening database and confirmation method for 18 mycotoxins in grains using ultra performance liquid chromatography-quadrupole-time of flight mass spectrometry [J]. *Chin J Chromatogr*, 2023, 41(1): 66–75.
- [55] PUTTHANG R, SIRISOMBOON P, SIRISOMBOON CD. Shortwave near-infrared spectroscopy for rapid detection of aflatoxin B₁ contamination in polished rice [J]. *J Food Protect*, 2019, 82(5): 796–803.
- [56] TAO FF, YAO HB, HRUSKA Z, *et al.* Recent development of optical methods in rapid and non-destructive detection of aflatoxin and fungal contamination in agricultural products [J]. *Trac-Trend Anal Chem*, 2018, 100: 65–81.
- [57] LIPPOLIS V, CERVELLIERI S, DAMASCELLI A, *et al.* Rapid prediction of deoxynivalenol contamination in wheat bran by MOS-based electronic nose and characterization of the relevant pattern of volatile compounds [J]. *J Sci Food Agric*, 2018, 98(13): 4955–4962.
- [58] BOROWIK P, DYSHKO V, TKACZYK M, *et al.* Analysis of wheat grain infection by *Fusarium* mycotoxin-producing fungi using an electronic nose, GC-MS, and qPCR [J]. *Sensors*, 2024, 24(2): 326.
- [59] JI W, ZHANG Z, TIAN Y, *et al.* Shape coding microhydrogel for a real-time mycotoxin detection system based on smartphones [J]. *ACS Appl Mater Interf*, 2019, 11(8): 8584–8590.
- [60] SHKEMBI X, SVOBODOVA M, SKOURIDOU V, *et al.* Aptasensors for mycotoxin detection: A review [J]. *Anal Biochem*, 2022, 644: 114156.
- [61] AL HL, ALKAHTANI MDF, AMEEN F. Molecular detection of mycobiota and the associated mycotoxins in rice grains imported into Saudi Arabia [J]. *J Saud Soc Agric Sci*, 2021, 20(1): 25–30.
- [62] İNCE B, ULUDAĞ İ, DEMIRBAKAN B, *et al.* Lateral flow assays for food analyses: Food contaminants, allergens, toxins, and beyond [J]. *Trac-Trend Anal Chem*, 2023, 169: 117418.
- [63] ZHANG Y, ZHAO C, PICCHETTI P, *et al.* Quantitative SERS sensor for mycotoxins with extraction and identification function [J]. *Food Chem*, 2024. DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.140040
- [64] GU S, WANG J, WANG Y. Early discrimination and growth tracking of *Aspergillus* spp. contamination in rice kernels using electronic nose [J]. *Food Chem*, 2019, 292: 325–335.
- [65] DACHOUPAKAN SC, WONGTHIP P, SIRISOMBOON P. Potential of near infrared spectroscopy as a rapid method to detect aflatoxins in brown rice [J]. *J Near Infrared Spec*, 2019, 27(3): 232–240.
- [66] JIARPINIJUN A, OSAKO K, SIRIPATRAWAN U. Visualization of volatome profiles for early detection of fungal infection on storage Jasmine brown rice using electronic nose coupled with chemometrics [J].

- Measurement, 2020, 157: 107561.
- [67] SHABEER S, ASAD S, JAMAL A, *et al.* Aflatoxin contamination, Its impact and management strategies: An updated review [J]. *Toxins*, 2022, 14(5): 307.
- [68] GIBELLATO SL, DALSOQUIO LF, DO NICA, *et al.* Current and promising strategies to prevent and reduce aflatoxin contamination in grains and food matrices [J]. *World Mycotoxin J*, 2021, 14(3): 293–304.
- [69] HAN X, XU R, GU S, *et al.* Discovery of novel acrylopimaric acid triazole derivatives as promising antifungal agents [J]. *Pest Manag Sci*, 2024.
- [70] KAUSHAL S, HUNJAN MS, KAUR Y, *et al.* Utilization of dropped *Citrus reticulata* Blanco fruit as a botanical fungicide to control foot rot disease in rice caused by *Fusarium fujikuroi* [J]. *Eur J Plant Pathol*, 2024, 2024: 1–16.
- [71] ABDOULIE J, HUALI X, XIAOQIAN T, *et al.* Worldwide aflatoxin contamination of agricultural products and foods: From occurrence to control [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2021, 20(3): 2332–2381.
- [72] MSHELIA LP, SELAMAT J, SAMSUDIN NIP. Strategies for controlling and decontaminating mycotoxins in foods and feeds: A review [J]. 2023.
- [73] HAMAD GM, MEHANY T, SIMAL-GANDARA J, *et al.* A review of recent innovative strategies for controlling mycotoxins in foods [J]. *Food Control*, 2023. DOI: 10.1016/j.foodcont.2022.109350

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

作者简介



朱 燕, 硕士研究生, 主要研究方向为食品营养与安全。

E-mail: zhuyan_34@qq.com



宫智勇, 博士, 教授, 主要研究方向为食品营养与安全。

E-mail: gongwhqg@163.com