

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250208003

引用格式: 程玲云, 胡明燕, 高牡丹, 等. 小麦粉真菌毒素污染、国内外限量标准与防控研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(7): 38–44.

CHENG LY, HU MY, GAO MD, *et al.* Research progress on fungal toxins pollution of wheat flour, limit standard and control at home and abroad [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(7): 38–44. (in Chinese with English abstract).

小麦粉真菌毒素污染、国内外限量标准与 防控研究进展

程玲云^{1,2,3,4}, 胡明燕^{1,2,3,4}, 高牡丹^{1,2,3,4}, 程月红^{1,2,3,4}, 朱晓萌^{1,2,3,4},
胡梅^{1,2,3,4}, 杨振东^{1,2,3,4*}

[1. 山东省食品药品检验研究院, 济南 250101; 2. 山东省食品药品安全检测工程技术研究中心, 济南 250101;
3. 国家市场监督管理总局重点实验室(肉与肉制品监管技术), 济南 250101; 4. 产业技术基础公共服务平台,
济南 250101]

摘要: 小麦作为全球粮食体系的基石, 其衍生产品小麦粉不仅是人类日常膳食的重要组成部分, 也是维持全球粮食安全的关键要素。然而, 近年来, 小麦粉中真菌毒素的频发污染已成为食品安全领域的重大挑战, 对食品安全和人类健康构成了重大威胁。小麦粉中主要真菌毒素的类型包括脱氧雪腐镰刀菌烯醇、黄曲霉毒素、玉米赤霉烯酮等, 以脱氧雪腐镰刀菌烯醇的污染情况最为突出, 但目前国内外相关限量标准存在一定差异。本研究旨在全面综述小麦粉中主要真菌毒素的类型、污染现状, 通过对比国内外相关限量标准可以发现不同国家和地区对食品安全风险的评估与管理策略也不同。在以上内容分析探讨基础上提出了综合性的防控策略, 旨在为小麦粉的安全生产、加工及消费提供科学指导与技术支持。

关键词: 小麦粉; 真菌毒素; 污染状况; 防控策略

Research progress on fungal toxins pollution of wheat flour, limit standard and control at home and abroad

CHENG Ling-Yun^{1,2,3,4}, HU Ming-Yan^{1,2,3,4}, GAO Mu-Dan^{1,2,3,4}, CHENG Yue-Hong^{1,2,3,4},
ZHU Xiao-Meng^{1,2,3,4}, HU Mei^{1,2,3,4}, YANG Zhen-Dong^{1,2,3,4*}

(1. Shandong Institute for Food and Drug Control, Ji'nan 250101, China; 2. Shandong Research Center of Engineering and Technology for Safety Inspection of Food and Drug, Ji'nan 250101, China; 3. Key Laboratory of Supervising Technology for Meat and Meat Products, State Administration for Market Regulation, Ji'nan 250101, China; 4. Industrial Technology Foundation Public Service Plat Form, Ji'nan 250101, China)

ABSTRACT: As the cornerstone of the global food system, wheat flour, a derivative product of limited wheat in various countries, is not only an important component of human daily diet, but also a key element in maintaining global food security. However, in recent years, the frequent contamination of fungal toxins in wheat flour has become

收稿日期: 2025-02-08

第一作者: 程玲云(1988—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品科学。E-mail: chenglingyunpan@163.com

*通信作者: 杨振东(1986—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全。E-mail: zdyang777@163.com

a major challenge in the field of food safety, posing a significant threat to food safety and human health. The main types of fungal toxins in wheat flour include deoxynivalenol, aflatoxin, zearalenone, etc. The contamination of deoxynivalenol is the most prominent, but there are certain differences in the relevant limit standards at home and abroad. This study aimed to comprehensively review the types and contamination status of major fungal toxins in wheat flour. By comparing relevant limit standards at home and abroad, it could be found that different countries and regions had different assessment and management strategies for food safety risks. Based on the analysis and discussion of the above content, a comprehensive prevention and control strategy is proposed, aiming to provide scientific guidance and technical support for the safe production, processing, and consumption of wheat flour.

KEY WORDS: wheat flour; fungal toxins; pollution situation; prevention and control strategies

0 引言

小麦粉作为重要的食品原料,其真菌毒素污染情况一直备受关注^[1]。由于气候、耕作方式及储藏条件等多种因素的影响,小麦粉易受到多种真菌毒素的污染,包括脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)、玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEN)、黄曲霉毒素(aflatoxins, AFT)等,全球小麦及小麦粉中真菌毒素的总体污染率较高,其中 DON 的污染最为普遍^[2-3]。在我国小麦粉中 DON 的污染同样严重,如杨晓倩等^[4]研究调查 2022 年 8—10 月山东省市售小麦粉 DON 的检出率达到了 92.31%。通过对比国内外小麦粉中真菌毒素的限量标准,我国虽已制定了小麦粉中 4 种真菌毒素限量,然而与国际标准相比,我国的限量标准可能存在一定差异^[5-7]。这种差异不仅体现在具体数值上,还可能涉及毒素种类的覆盖范围方面。

针对小麦粉中真菌毒素的污染情况,提出有效的防控措施至关重要^[8]。这些措施可以包括加强田间管理,减少真菌侵染的机会;改善储藏条件,降低毒素的产生;采用先进的检测技术,准确快速地监测小麦粉中的真菌毒素含量等^[9-11]。此外,建立科学风险监控体系,也是提升我国小麦粉真菌毒素防控水平的重要途径。

本综述旨在深入汇总小麦粉中主要真菌毒素的类型、污染现状,通过对比国内外相关限量标准,针对我国食品安全风险的评估与管理策略,在此基础上提出了综合性的防控策略,旨在为小麦粉的安全生产、加工及消费提供科学指导与技术支持。

1 小麦粉中真菌毒素污染情况

1.1 污染概况

目前已知 400 多种真菌毒素种类,小麦中常见的镰刀菌毒素包括 DON、AFT、ZEN^[12]。DON 是最常见污染粮食的真菌毒素且污染水平也居镰刀菌毒素之首。近年一些新兴的真菌毒素也备受关注,如恩镰孢菌素(enniatins, ENNs)、白僵菌素(beauvericin, BEA)、链格孢毒素如交链

孢酚(alternariol, AOH)、交链格孢酚单甲醚(alternariol monomethyl ether, AME)、麦角生物碱(ergotalkaloids, EAs)等^[13],这些毒素同样可能对小麦及其制品,包括小麦粉造成污染^[14-16]。小麦粉作为小麦直接下游产品,作为主食其应用领域极为广泛。因此,小麦粉真菌毒素污染问题被社会广泛关注。基于不同国家和地区气候条件、种植习惯、储藏方式、饮食文化等因素的差异均会导致真菌毒素污染程度和类型不同^[17-18]。这种差异性也导致了不同国家和地区对食品安全风险的评估与管理策略的不同,进而导致各国及国际组织对小麦粉中真菌毒素的限量标准不尽相同。

1.2 小麦粉中主要真菌毒素类型

1.2.1 脱氧雪腐镰刀菌烯醇

DON 是小麦粉中最常见的真菌毒素之一。它是由禾谷镰刀菌等产毒真菌在温暖潮湿条件下产生的一种次生代谢产物^[19]。DON 具有免疫毒性、神经毒性,若摄入含有 DON 的食物后,会引起胃肠道症状,如恶心、呕吐、腹泻等,同时还会出现头痛、乏力、食欲不振等全身症状。长期摄入还可能引起癌症等慢性疾病。目前欧盟将其列为三级致癌物,而世界卫生组织和联合国粮农组织将其确定为自然食品污染物^[20-21]。目前国内报道小麦及制品中 DON 污染情况是最多也是污染情况最突出的,如冯凯等^[22]研究调查指出山东小麦及其制品中 DON 含量均值为 149.18 $\mu\text{g}/\text{kg}$,检出率为 79.56%,超标率为 2.35%。宇盛好等^[23]评估上海市售小麦粉及其制品 DON 检出率为 77.3%,含量均值为 226.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

虽然目前我国小麦及制品中 DON 含量均值远低于国家标准,但污染范围广,仍需持续关注。由于 DON 主要分布在小麦籽粒的皮层部位,经过初期加工后,毒素主要转移至麸皮中^[24]。因此目前小麦收购必检项目均以呕吐毒素为主,这也是面粉和面制品加工过程中必不可少的检测项目。

1.2.2 玉米赤霉烯酮

ZEN 又称 F-2 毒素,是玉米赤霉菌的代谢产物,此毒素是从有赤霉病的玉米中首次分离得到。ZEN 具有生殖毒

性和免疫毒性,可干扰人和动物的内分泌系统,引起生殖器官病变、免疫功能下降等健康问题^[25]。但 ZEN 主要污染玉米、小麦等谷物。其中玉米的阳性检出率很高,接近 45%,小麦次之^[26]。孙宝胜^[27]、董峰光等^[28]研究泰州市及烟台部分地区小麦中 ZEN 含量均值远低于国家标准限值,卫生状况良好,处于安全水平。

尽管目前我国小麦及其制品中 ZEN 酮污染风险相对较低,但仍需注意控制其污染。尤其是原料采购时应注意检测原料中 ZEN 含量。

1.2.3 黄曲霉毒素 B₁

黄曲霉毒素 B₁ (aflatoxin B₁, AFB₁)是由黄曲霉和寄生曲霉等真菌产生的一种剧毒物质,是一种毒性极强的剧毒物质,主要存在于发霉的食物当中,如大米、小麦等农作物,目前已被国际癌症研究机构列为 I 类致癌物^[29]。AFB₁ 主要污染玉米、花生等作物,但在小麦粉中也可检测到^[30]。AFB₁ 具有强烈的肝脏毒性,长期摄入可导致肝硬化、肝癌等严重疾病。有研究资料显示,小麦及小麦粉中真菌毒素的全球总体污染率为 58%,但我国黄曲霉毒素污染水平总体较低,风险较高区域集中在小麦主产区,如洪涝灾害可能会影响小麦霉变率,加重污染^[31]。

为避免小麦发生霉变产毒,需避免小麦在收割或加工过程中受到污染;后期原料小麦或成品小麦粉也应保持良好储存条件,避免高温或潮湿环境。

2 小麦粉中真菌毒素的污染原因

2.1 气候

过去 10 年中,气候变化和粮食安全问题在世界范围内引起了广泛关注。高温、干旱胁迫和 CO₂ 浓度升高等极端天气相互作用可能对主要粮食作物真菌致病性和真菌毒素污染的影响也引起广泛关注^[32]。这些天气条件促进了霉菌的生长和繁殖,从而导致霉菌毒素在作物中的积累。目前国内外均有不少关于极端天气导致农作物中霉菌毒素含量水平增加的报道^[33]。有研究发现,江苏、浙江、安徽和陕西等省份小麦粉中 DON 超标率较高^[34],这些地区处于湿润的亚热带地区,冬季不冷,夏季较热,适宜真菌繁殖。此外,我国沿淮河地区以及长江中下游地区阴雨较多, DON 污染情况也较为严重^[35]。因此,科普科学种植及储粮知识,制定有效极端天气应对措施,对防止农作物霉变及避免真菌毒素超标有极其重要作用。

2.2 储藏条件

储藏环境中的高温和高湿度对真菌毒素的生长起着关键性作用。小麦粉储存过程中的水分、温度、氧气等条件的变化都会影响真菌的生长和毒素的产生。一般而言,大多数霉菌的最适生长温度为 25~30 °C,而基质(如小麦粉)的水分含量在 17%~18%时为真菌产毒素的最适条件^[36]。当储藏

环境温度升高、湿度增大时,小麦粉中的真菌会加速生长并产生更多的毒素,如 DON 等^[37]。孙梅峰等^[38]研究显示相互作用的环境因素,特别是适宜温度和水分条件最适宜真菌毒素产毒。

2.3 其他

除了上述因素外,小麦品种、加工方式等也会对小麦粉中真菌毒素的污染产生影响。若种植小麦品种对赤霉病具有抗性,其产生 DON 的风险相对较低^[39]。此外,加工过程中的高温处理虽然可以杀死部分真菌,但也可能导致真菌毒素的降解产物产生新的毒性作用^[40]。

3 国内外相关限量标准情况

3.1 国内外相关限量对比

真菌毒素的污染在全球范围内普遍存在,根据联合国粮食及农业组织的估计,全世界每年约有四分之一的粮食受到真菌污染,其中大约有 2%的农作物因受到严重污染而无法作为食品使用^[41]。为保障食品安全和消费者健康,国际组织和各国对有关限量标准的制定和修订工作从未间断,纷纷制定了小麦粉中真菌毒素的限量标准。

我国现行 GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》规定了小麦粉中 AFB₁、DON、赭曲霉毒素 A (ochratoxina, OTA)和 ZEN 4 种真菌毒素限量,其中小麦及小麦粉中 DON 的限量为 ≤1000 μg/kg; AFB₁ 和 OTA 限量标准均为 ≤5 μg/kg; ZEN 限量为 ≤60 μg/kg^[42-43]。这些标准的制定和执行对于保障我国小麦粉的质量安全、维护消费者健康发挥了重要作用^[44]。

通过对比国外真菌毒素限量发现,美国规定 DON 限量与我国小麦粉中 DON 限量一致^[45]。食品法典委员会(Codex Alimentarius Commission, CAC)与我国相比仅规定了 DON 和 OTA 限量,且限量与我国也是一致。但是 CAC 对原粮小麦 DON 限量和下游产品小麦粉 DON 限量进行了区分。欧盟和美国均制定了黄曲霉毒素 B₁、B₂、G₁、G₂ 总量,欧盟限量为 4.0 μg/kg,严于美国^[46],但是我国仅制定了 AFB₁ 限量,虽然欧盟 AFB₁ 限量较为严格,但制定黄曲霉毒素总量限量比制定 AFB₁ 限量更能保护公众健康的观点仍有较大争议。除此之外,我国制定限量仍有不足之处,如欧盟制定 DON、OTA 和 ZEN 限量时,均根据谷物的加工方式进行了区分,未加工的谷物和经加工后的谷物制品限量是不同的^[47]。虽然原粮真菌毒素超标,但经一定加工处理去除麸皮后,成品中真菌毒素含量有一定降低,这从一定程度上也避免了原粮过度浪费问题^[48]。此外, CAC 和美国均未制定 ZEN 限量,仅我国和欧盟制定了 ZEN 限量,其中欧盟制定小麦粉限量为 75 μg/kg,我国制定限量为 60 μg/kg,相比之下,我国制定 ZEN 限量较为严格,但不足的是我国并未对原粮和成品粮限量进行区分,表 1。

表 1 国内外小麦及小麦粉中真菌毒素限量(μg/kg)
Table 1 Limits of fungal toxins in wheat and wheat flour both domestically and internationally (μg/kg)

组织/ 国家	AFB ₁	黄曲霉毒素 B ₁ 、 B ₂ 、G ₁ 、G ₂ 总量	DON	OTA	ZEN
中国	小麦、大麦、其 他 5.0; 小麦粉、麦片、 其他去壳谷物 5.0	/	大麦、小麦、麦片、小麦粉 1000	谷物、谷物碾磨 加工品 5.0	小麦、小麦粉 60
CAC	/	/	小麦、玉米、大麦 2000; 以小麦、玉米、大麦为原料制成的面粉、粗 粉或麦 1000	小麦、大麦和黑 麦原粮 5.0	/
美国	/	所有食品, 除了 牛奶 20.0	供人食用的最终小麦产品, 如面粉、麸皮和 胚芽 1000	/	/
欧盟	谷物及谷物制 品 2.0	谷物及谷物制品 4.0	未加工的谷物, 不包括杜伦小麦、燕麦和玉米 1250; 未加工的杜伦小麦、燕麦 1750; 供人直接食用的谷物, 作为最终产品销售供 人直接食用的面粉, 麸皮和胚芽 750; 供婴幼儿食用的加工的婴幼儿谷类食品 200	未加工的谷物 5.0; 由未加工的谷物 制备的所有产品, 包括加工的谷物 制品及直接供人 食用的谷物 3.0	未加工谷物, 不包括玉米 100; 供人直接食用 的谷物, 作为 最终产品销售 供人直接食用 的谷物粉, 麸 皮和胚芽 75

注: /表示无此数据。

3.2 我国真菌毒素限量存在问题

风险评估是制定限量标准的重要依据。通过对真菌毒素的毒性、暴露量、人群敏感性等因素进行综合评估, 同时在制定限量标准时, 参考国际上的相关标准和做法有助于保持与国际接轨, 提高标准的科学性和合理性。目前我国小麦原粮和成品粮小麦粉限量值未加区分, 导致原粮控制偏严、成品粮控制偏松, 另外就是对特殊人群的谷类加工食品限量值未加规定或规定宽松^[49]。与 CAC、欧盟、美国等组织和国家的真菌毒素标准还存在一定的差距。因此, 我国下一步亟需开展符合我国实际的膳食暴露评估研究, 制定更加合理的真菌毒素限量, 以便更好地保护我国居民健康和维持社会经济发展。

4 小麦粉中真菌毒素污染的防控措施

4.1 重视田间管理, 降低真菌毒素污染

为预防作物真菌毒素污染, 加强田间管理是防控小麦粉中真菌毒素污染的重要措施。(1)通过杂交育种和转基因技术培育抗真菌的农作物品种, 提高其对环境的适应能力。有研究表明, 在施用不产黄曲霉毒素的菌株的情况下, 可以干扰本地产毒菌株的增殖, 增强宿主作物的抵抗力, 从而防止黄曲霉毒素的生成^[50]。此外, 使用多种菌株作为生物防治剂也可以抑制产毒真菌的生长和真菌毒素的产生。在实施竞争性无毒菌株防控措施后, 真菌毒素的平均含量降低了 30%。同时, 施用不产黄曲霉毒素的菌株干扰

本地产毒菌株的增殖, 使黄曲霉毒素的含量减少了 50%以上^[51]。(2)可使用经批准的杀真菌剂在扬花期前后进行喷洒, 以减少粮食被真菌毒素污染的风险^[52]。

4.2 加强科学储粮, 关注储存条件

粮食中的水分含量大易造成粮食在储存过程中被真菌感染, 导致真菌毒素含量超标。适宜温度和湿度, 也是真菌毒素繁殖的重要条件, 因此, 需保持储存容器的清洁和干燥, 定期对储存的小麦粉进行监测, 及时发现和处理真菌毒素污染问题^[53]。

4.3 建立科学风险监控体系

生产、种植、流通各个环节加大粮食真菌毒素的风险监测和研究预警的管控力度, 建立科学监测体系是防控小麦粉中真菌毒素污染的重要保障。生产企业应严格把关粮食收购标准; 政府和相关机构可完善小麦粉中真菌毒素污染相关的法规标准体系, 制定更加严格和科学的限量标准和检测方法^[54]; 监管部门可加大小麦粉监管力度, 建立完善的检测体系和追溯机制^[55]。同时, 加大对违法违规行为的处罚力度, 提高违法成本, 形成有效的震慑作用。

5 结束语

小麦粉中真菌毒素污染问题是一个全球性的食品安全问题。本文深入分析了小麦粉中真菌毒素污染的现状、限量控制情况及防控措施等方面的问题, 并提出了加强原

料种植田间管理、加强科学储粮, 加强生产、种植、流通各环节小麦真菌毒素的风险监测和研究预警的管控力度, 建立科学监测体系和完善的法规标准等举措进行展望。通过本文的研究和分析, 可以为小麦粉的安全生产和监管提供科学依据和技术支撑, 保障食品安全和消费者权益。

参考文献

- [1] 王缘, 王晓婧, 赵岚. 2022 年黑龙江省玉米样品 16 种真菌毒素监测分析[J]. 公共卫生与预防医学, 2025, 36(1): 144–147.
WANG Y, WANG XJ, ZHAO L. Monitoring and analysis of 16 mycotoxins in corn samples from Heilongjiang Province in 2022 [J]. Journal of Public Health and Preventive Medicine, 2025, 36(1): 144–147.
- [2] GAO YA, WANG ZW, YANG X, *et al.* Aflatoxin M₁ and ochratoxin A induce a competitive endogenous RNA regulatory network of intestinal immunosuppression by whole-transcriptome analysis [J]. Science of the Total Environment, 2022, 854: 158777.
- [3] 侯广月, 徐志娇, 周莉莉, 等. 谷物及其制品中 11 种真菌毒素污染水平的测定与分析[J]. 化学研究与应用, 2025, 37(1): 33–39.
HOU GY, XU ZJ, ZHOU LL, *et al.* Determination and analysis of 11 mycotoxins contamination levels in cereals and its product [J]. Chemical Research and Application, 2025, 37(1): 33–39.
- [4] 杨晓倩, 刘岚铮, 曹小丽, 等. 2022 年山东省市售小麦粉真菌毒素污染情况调查[J]. 预防医学论坛, 2023, 29(8): 577–581.
YANG XQ, LIU LZ, CAO XL, *et al.* Investigation on mycotoxin pollution of wheat flour on market in Shandong Province in 2022 [J]. Preventive Medicine Tribune, 2023, 29(8): 577–581.
- [5] 刘登, 余海英, 骆姗, 等. 国内外粮食中主要真菌毒素污染状况及分析[J]. 粮油仓储科技通讯, 2024, 40(6): 48–54.
LIU D, YU HY, LUO S, *et al.* Analysis and status of major fungal toxins pollution in grain at home and abroad [J]. Grain and Oil Storage Technology Communication [J]. Grain and Oil Storage Technology Newsletter, 2024, 40(6): 48–54.
- [6] 周贻兵, 李磊, 吴玉田, 等. 小麦粉中 2 种新型真菌毒素含量测定方法[J]. 食品工业, 2021, 42(5): 448–451.
ZHOU YB, LI L, WU YT, *et al.* Determination method of two new mycotoxins in wheat flour [J]. The Food Industry, 2021, 42(5): 448–451.
- [7] 张晓航. 浅谈粮食及其制品中真菌毒素检测技术[J]. 中国食品工业, 2024(14): 59–61.
ZHANG XH. Discussion on the detection technology of fungal toxins in grain and its products [J]. China Food Industry, 2024(14): 59–61.
- [8] FALADE TDO, NEYA A, BONKOUNGOU S, *et al.* Aflatoxin contamination of maize, groundnut, and sorghum grown in burkina faso, mali, and niger and aflatoxin exposure assessment [J]. Toxins (Basel), 2022, 14(10): 700.
- [9] 张伟, 冯光伟, 谭洁冰, 等. 河南省小麦粉及其制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其衍生物的分析检测[J]. 中国卫生检验杂志, 2022, 32(4): 394–398.
ZHANG W, FENG GW, TAN JB, *et al.* Determination and analysis of deoxynivalenol and derivatives in wheat flour and its products in Henan Province [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2022, 32(4): 394–398.
- [10] 胡海生, 高洁, 杨厚兵, 等. 粮食中真菌毒素及其代谢物的产生和影响[J]. 食品安全导刊, 2024(8): 167–169.
HU HS, GAO J, YANG HB, *et al.* Production and influence of mycotoxins and their metabolites in grain [J]. China Food Safety Magazine, 2024(8): 167–169.
- [11] 应旭洪, 邓果, 严骏, 等. 粮食中新兴真菌毒素研究进展[J]. 粮食问题研究, 2023(4): 48–52.
YING XH, DENG G, YAN J, *et al.* Research progress on emerging fungal toxins in grains [J]. Grain Issues Research, 2023(4): 48–52.
- [12] WANG YX, HU JQ, DAI YJ, *et al.* Design and characterization of an artificial two-strain bacterial consortium for the efficient biodegradation of deoxynivalenol [J]. Biological Control, 2023, 179: 105172.
- [13] ZHANG TW, WU DL, LI WD, *et al.* Occurrence of *Fusarium* mycotoxins in freshly harvested highland barley (qingke) grains from Tibet, China [J]. Mycotoxin Research, 2023, 39(3): 193–200.
- [14] 徐安琪, 秦璐昕, 周海燕, 等. 上海市售有机和传统面粉中 7 种真菌毒素的污染状况调查[J/OL]. 中国食品卫生杂志, 1–9. [2024-04-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3156.R.20230606.1006.002.html>.
XU ANQ, QIN LX, ZHOU HY, *et al.* Investigation on the contamination of organic and conventional wheat flour in Shanghai City with seven kinds of mycotoxins [J/OL]. Chinese Journal of Food Hygiene, 1–9. [2024-04-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3156.R.20230606.1006.002.html>
- [15] 刘建高, 厉学武, 彭哲, 等. 2021 年我国饲料原料中常见霉菌毒素污染情况调查[J]. 中国家禽, 2023, 45(10): 70–75.
LIU JG, LI XW, PENG Z, *et al.* Investigation of common mycotoxins contamination in feed ingredients in China in 2021 [J]. China Poultry, 2023, 45(10): 70–75.
- [16] OVANDO-MARTINEZ M, OZSISLI B, ANDERSON J, *et al.* Analysis of deoxynivalenol and deoxynivalenol-3-glucoside in hard red spring wheat inoculated with *Fusarium graminearum* [J]. Toxins, 2013, 5(12): 2522–2532.
- [17] 王李惠, 裴阳, 陈晓茹, 等. 一株黄曲霉毒素 B₁ 去除菌的鉴定、去除条件优化及降解途径的转录组学分析[J/OL]. 食品科学, 1–17. [2025-02-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20250122.1559.020.html>
- [18] WANG LH, PEI Y, CHEN XR, *et al.* Identification, optimization of removal conditions of a strain capable of reducing aflatoxin B₁ and transcriptomic analysis [J]. Food Science, 1–17. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20250122.1559.020.html>
- [19] Commission of the European Communities. Setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs: C1881/2006 [EB/OL]. (2018-10-10) [2025-02-08]. <http://law.foodmate.net/show-170518.html>
- [20] GARCIA-CELA E, VERHEECKE-VAESSEN C, GUTIERREZ-POZO M, *et al.* Unveiling the effect of interacting forecasted abiotic factors on growth and aflatoxin B-1 production kinetics by *Aspergillus flavus* [J]. Fungal Biology, 2021, 125: 89–94.
- [21] 尚艳娥, 杨卫民. CAC、欧盟、美国与中国粮食中真菌毒素限量标准的差异分析[J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(1): 10–15.
- [22] SHANG YE, YANG WM. Variation analysis of cereals mycotoxin limit

- standards of CAC, EU, USA, and China [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 37(1): 10–15.
- [21] 孔德旭, 朱延光, 郑焱诚, 等. 玉米中真菌毒素的类型、污染现状及控制对策的研究进展[J]. *粮食储藏*, 2024, 53(4): 29–39, 111.
- KONG DX, ZHU YG, ZHENG YC, *et al.* Current status and produce of corn mycotoxins and recent development in control measures for mycotoxins in maize [J]. *Grain Storage*, 2024, 53(4): 29–39, 111.
- [22] 冯凯, 段苏然, 宋纯艳, 等. 山东省小麦及其制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇膳食暴露风险评估[J]. *中国标准化*, 2025(2): 176–180.
- FENG K, DUAN SR, SONG CY, *et al.* Evaluation of exposure risk of deoxynivalenol in wheat and its products in Shandong Province [J]. *China Standardization*, 2025(2): 176–180.
- [23] 宇盛好, 李亦奇, 张露菁, 等. 上海市市售小麦粉及其制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇的膳食暴露评估[J]. *上海预防医学*, 2023, 35(8): 729–734.
- YU SH, LI YQ, ZHANG LM, *et al.* Dietary exposure assessment of deoxynivalenol in wheat flour and its products sold in Shanghai [J]. *Shanghai Journal of Preventive Medicine*, 2023, 35(8): 729–734.
- [24] 张文乐, 张绍君, 黄渭元, 等. 冷等离子体降解葡萄干中赭曲霉毒素 A 模型[J]. *农业工程*, 2024, 14(12): 104–109.
- ZHANG WL, ZHANG SJ, HUANG WY, *et al.* Model for degrading ochratoxin A in raisins using cold plasma [J]. *Agricultural Engineering*, 2024, 14(12): 104–109.
- [25] HASSAN F, AWADA F, DIMASSI H, *et al.* Assessment of mycotoxins in cornflakes marketed in Lebanon [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 20944.
- [26] DORNER JW. Management and prevention of mycotoxins in peanuts [J]. *Food Additives and Contaminants Part A-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 2022, 25: 203–208.
- [27] 孙宝胜. 新收获小麦中玉米赤霉烯酮监测与分析[J]. *现代面粉工业*, 2021, 35(1): 27–28.
- SUN BS. Detection and analysis of zearalenone in newly harvested wheat [J]. *Modern Flour Milling Industry*, 2021, 35(1): 27–28.
- [28] 董峰光, 阎西革, 宫春波, 等. 2012-2019 年烟台市食品中玉米赤霉烯酮污染状况及暴露评估[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(1): 376–381.
- DONG FG, YAN XG, GONG CB, *et al.* Analysis on contamination of zearalenone and dietary exposure assessment in food samples of Yantai city from 2012 to 2019 [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(1): 376–381.
- [29] 刘付英, 郭颖, 陈雪峰, 等. 地方储备粮收购入库质量分析与研究——以云南为例[J]. *粮食与饲料工业*, 2024(6): 7–14.
- LIU FY, GUO Y, CHEN XF, *et al.* An analytic study on the quality of regionally procured grain reserves with Yunnan as an example [J]. *Cereal and Feed Industry*, 2024(6): 7–14.
- [30] 吴登辉. 粮油真菌毒素检测技术与应用分析[J]. *食品安全导刊*, 2024(35): 150–152.
- WU DH. Analysis of detection technology and application of fungal toxins in grain and oil [J]. *China Food Safety Magazine*, 2024(35): 150–152.
- [31] 刘显白, 陈小萍, 马亚玲. 陇中黄土高原区饲料原料中真菌毒素污染分析[J]. *中国饲料*, 2024(23): 419–426.
- LIU XB, CHEN XP, MA YL. Analysis of fungal toxin contamination in feed raw materials in the Loess Plateau of Gansu [J]. *China Feed*, 2024(23): 419–426.
- [32] EHRlich KC, COTTY PJ. An isolate of *Aspergillus flavus* used to reduce aflatoxin contamination in cottonseed has a defective polyketide synthase gene [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2024, 65: 473–478.
- [33] 陆晶晶, 杨大进. 2013 年中国小麦粉中脱氧雪腐镰刀菌烯醇污染调查[J]. *卫生研究*, 2015, 44(4): 658–660.
- LU JJ, YANG DJ. Pollution investigation of deoxynivalenol in wheat flour of China in 2013 [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2015, 44(4): 658–660.
- [34] 王凤华, 牛锦璐, 邓俊劲, 等. 真菌毒素降解酶及其结构和功能研究进展[J]. *核农学报*, 2025, 39(1): 140–156.
- WANG FH, NIU JL, DENG JJ, *et al.* Advances in the study of fungal toxin-degrading enzymes and their structure and function [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2025, 39(1): 140–156.
- [35] 焦洁, 张环, 李玉芳, 等. 液相色谱-串联质谱法在中药材真菌毒素检测中的应用[J]. *寒旱农业科学*, 2024, 3(11): 1073–1078.
- JIAO J, ZHANG H, LI YF, *et al.* Application of liquid chromatography-tandem mass spectrometry in detection of mycotoxins in chinese medicinal materials [J]. *Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences*, 2024, 3(11): 1073–1078.
- [36] HASKARD CA, EL-NEZAMI HS, KANKANPAA PE, *et al.* Surface binding of aflatoxin B₁ by lactic acid bacteria [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, 67: 3086–3091.
- [37] 沈润琳, 林权佳, 李勇. 潮汕粮品中赭曲霉毒素 A 的检测与污染状况分析[J]. *现代食品*, 2024, 30(21): 195–198, 209.
- SHEN RL, LIN HJ, LI Y. Detection and pollution analysis of ochratoxin A in chaoshan rice cakes [J]. *Modern Food*, 2024, 30(21): 195–198, 209.
- [38] 孙梅峰, 豆小文, 张磊, 等. 真菌毒素毒性及其在生物样本中检测技术研究进展[J]. *中国药理学与毒理学杂志*, 2024, 34(10): 788–800.
- SUN MF, DOU XW, ZHANG L, *et al.* Research progress on the toxicity of fungal toxins and their detection techniques in biological samples [J]. *Chinese Journal of Pharmacology and Toxicology*, 2024, 34(10): 788–800.
- [39] 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. The current situation of fungal toxin contamination in China's staple food [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2022, 51(4): 685–691.
- [40] 郭浩, 李萌萌, 王瑞虎, 等. 小麦中真菌毒素污染现状及色谱同时检测技术研究进展[J/OL]. *食品与发酵工业*, 1–12. [2025-02-07]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.039602
- GUO H, LI MM, WANG RH, *et al.* Contamination status of mycotoxins in wheat and research progress of chromatographic simultaneous detection techniques [J/OL]. *Food and Fermentation Industries*, 1–12. [2025-02-07]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.039602
- [41] 张晶, 高素艳, 杜兆林, 等. 粮油作物真菌毒素污染现状及控制[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(12): 2680–2687.
- ZHANG J, GAO SY, DU ZL, *et al.* Contamination status and control of mycotoxins in grain and oil crops [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(12): 2680–2687.

- [42] 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, 2023, 35(3): 186–194.
- LI YJ, QIN S, YANG YM, *et al.* Research status of mycotoxin contamination in Chinese grains [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 35(3): 186–194.
- [43] OVANDO-MARTINEZ M, OZSISLI B, ANDERSON J, *et al.* Analysis of deoxynivalenol and deoxynivalenol-3-glucoside in hard red spring wheat inoculated with *Fusarium graminearum* [J]. Toxins, 2023, 5(12): 2522–2532.
- [44] ZHANG 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.
- [45] FAO/WHO. General standard for contaminants and tox-ins in food and feed: CXS 193-1995 [EB/OL]. (2021-10-10) [2025-02-07]. <http://down.foodmate.net/standard/sort/11/3329.html>
- [46] FDA. Draft guidance for industry: Action levels for poi. sonous or deleterious substances in human food and animal feed [EB/OL]. (2023-10-10) [2025-02-07]. <https://www.fda.gov/Food/GuidanceRegulation/GuidanceDocumentsRegulatoryInformation/ChemicalContaminantsMetalsNaturalToxinsPesticides/ucm077969.html>
- [47] 王敏, 王霞, 梅博, 等. dMRM 模式-高效液相色谱-串联质谱法测定大米中 17 种真菌毒素[J/OL]. 中国粮油学报, 1-14. [2025-02-08]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001005>
- WANG M, WANG X, MEI B, *et al.* Determination of 17 mycotoxins in rice by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry with dMRM mode [J/OL]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 1-14. [2025-02-08]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001005>
- [48] 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.
- [49] 赵含珂, 朱佐银, 马君梅, 等. 上海仓储粮食中 14 种真菌毒素污染状况分析[J/OL]. 南京农业大学学报, 1-14. [2025-02-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1148.S.20241104.1112.004.html>
- ZHAO HK, ZHU ZY, MA JM, *et al.* Analysis of 14 mycotoxin contaminations in granary in Shanghai [J/OL]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1-14. [2025-02-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1148.S.20241104.1112.004.html>
- [50] TENIOLA OD, ADDO PA, BROST IM, *et al.* Degradation of aflatoxin B (1) by cell-free extracts of *rhodococcus erythropolis* and *mycobacterium Fluoranthenorans* sp. nov. DSM44556(T) [J]. International Journal of Food Microbiology, 2005, 105: 111–117.
- [51] 郝晨阳, 马欣, 张增帅, 等. 粮油原料中的常见真菌毒素及控制研究[J]. 粮油与饲料科技, 2023(1): 8–10.
- HAO CY, MA X, ZAHNG ZS, *et al.* Common mycotoxins in grain and oil raw materials and their control research [J]. Grain Oil and Feed Technology, 2023(1): 8–10.
- [52] FORRER HR, MUSA T, SCHWAB F, *et al.* *Fusarium* head blight control and prevention of mycotoxin contamination in wheat with botanicals and tannic acid [J]. Toxins, 2014(6): 830–849.
- [53] 陈嘉欣, 何咏欣, 蔡伟谊, 等. 真菌毒素污染引发的潜在食品安全问题及其对策探讨[J]. 食品安全导刊, 2022(24): 24–28.
- CHEN JX, HE YX, CAI WY, *et al.* The discussion and countermeasures on potential food safety problems caused by mycotoxin pollution [J]. China Food Safety Magazine, 2022(24): 24–28.
- [54] 张振玲, SWAMY HALADI. 家禽饲料中“新兴”和“隐蔽”真菌毒素的危害及其治理[J]. 畜牧产业, 2021(6): 68–71.
- ZHANG ZL, SWAMY HALADI. Harm and control of “emerging” and “hidden” mycotoxins in poultry feed [J]. Animal Agriculture, 2021(6): 68–71.
- [55] 朱燕, 姚香澳, 宫智勇. 稻谷中真菌毒素的暴露污染、检测技术及防控研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(15): 264–274.
- ZHU Y, YAO XAO, GONG ZY. Research progress on exposure, detection and control of mycotoxins in rice grains [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(15): 264–274.

(责任编辑: 蔡世佳 于梦娇)