DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250813001
引用格式: 赵雅婷, 罗亚平, 刘瑞莉, 等. 基于粮食检测操作规范性探究影响真菌毒素快速检测法结果准确性的因素[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(1): 92–98.
ZHAO YT, LUO YP, LIU RL, *et al*. Explore the factors affecting the accuracy of the rapid mycotoxin detection method based on the standardization of grain detection operation [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(1): 92–98. (in Chinese with English abstract).

基于粮食检测操作规范性探究影响真菌毒素快速检测法结果准确性的因素

赵雅婷, 罗亚平, 刘瑞莉, 徐沛琳, 候振业, 朱玉格, 宋 涛*
(中央储备粮漯河直属库有限公司, 漯河 462000)

摘 要: 目的 探究影响小麦、玉米真菌毒素快速检测法检测稳定性的过程性因素。**方法** 以小麦和玉米这两种主流原粮作为研究对象, 系统评价过筛率(99%、97%、95%、93%、91%)、混匀方式(手工、机械单双向)、取样量(300、400、500、600、700 g)及 3 种市售快速检测仪(赛泰诺、飞测、Charm)对黄曲霉毒素 B_1、玉米赤霉烯酮和脱氧雪腐镰刀菌烯醇检测结果的影响。**结果** 原粮中毒素的检测结果与过筛率呈正相关, 最高值为 667.61 μg/kg, 但 3 种毒素变化幅度差异较大, 这可能是由于不同毒素的赋存特性存在差异; 机械双向混匀方式使样品毒素充分混匀, 检测数据误差降低降低至 8.1%; 样品质量的增加有助于提高检测结果的稳定性, 但混匀难度增加。此外, 赛泰诺、飞测和 Charm 3 种快速检测仪在检测毒素时均存在误差, 这可能与操作过程和系统调控有关。**结论** 优化样品操作步骤, 能够有效提高粮食中真菌毒素快速检测的准确性, 为保障粮食安全和检测效率提供理论依据。

关键词: 小麦; 玉米; 真菌毒素; 快速检测; 关键操作环节

Explore the factors affecting the accuracy of the rapid mycotoxin detection method based on the standardization of grain detection operation

ZHAO Ya-Ting, LUO Ya-Ping, LIU Rui-Li, XU Pei-Lin, HOU Zhen-Ye, ZHU Yu-Ge, SONG Tao*
(*Sinograin Luohe and Reserves Depot Co., Ltd., Luohe* 462000, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigate process factors affecting the stability of rapid testing methods for mycotoxins in *Triticum aestivum* L. and *Zea mays* L.. **Methods** To used *Triticum aestivum* L. and *Zea mays* L. as primary grain samples, a systematic evaluation was conducted on: Screening rates (99%, 97%, 95%, 93%, 91%) mixing methods (manual, mechanical single/double mixing), sample sizes (300, 400, 500, 600, 700 g), and 3 kinds of commercially available rapid testers (SinoTech, FlyingTest, Charm) on detection results for aflatoxin B_1, zearalenone and deoxynivalenol. **Results** Toxin detection levels in raw grain correlated positively with sieving rate, reached a

收稿日期: 2025-08-13
第一作者: 赵雅婷(1996—), 女, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为农产品干燥与储藏品质研究。E-mail: zhaoyating0805@163.com
***通信作者:** 宋涛(1975—), 男, 工程师, 主要研究方向为粮食存储品质研究。E-mail: 17527711948@163.com

maximum of 667.61 μg/kg. However, variation among the 3 kinds of toxins differed significantly, likely due to their distinct distribution characteristics. Mechanical bidirectional mixed ensured thorough toxin dispersion, reduced detection error to 8.1%. Increasing sample mass enhanced result stability but complicated mixing procedures. Furthermore, all 3 kinds of rapid testing instruments (SinoTech, FlyingTest and Charm) exhibited measurement errors during toxin detection, potentially attributable to operational procedures and system calibration. **Conclusion** Optimising sample handling protocols effectively enhances the accuracy of rapid mycotoxin detection in grain, providing a theoretical basis for ensuring food safety and testing efficiency.

KEY WORDS: *Triticum aestivum* L.; *Zea mays* L.; mycotoxins; rapid detection; key operational aspects

0　引　言

粮食安全是关乎全球可持续发展、人类健康与社会稳定的基石性问题, 而真菌毒素污染则是这一领域中极为严峻的挑战之一[1–2]。真菌毒素是由霉菌在适宜的环境条件下产生的次生代谢产物, 具有极强的毒性和致癌性, 广泛存在于各类粮食作物中, 如小麦、玉米、稻谷等[3–4]。其中, 呕吐毒素(deoxynivalenol, DON)[5]、玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEN)和黄曲霉毒素 B_1 (aflatoxins B_1, AFB_1)是常见的真菌毒素[6–7], 它们不仅对人类健康造成严重威胁, 还对畜牧业生产带来巨大的经济损失[8]。DON 可引起呕吐、腹泻、免疫抑制等症状[9]; ZEN 具有类雌激素活性, 可导致动物繁殖障碍[10–11]; 黄曲霉毒素则是目前已知最强的致癌物质之一[12], 长期摄入可引发肝癌等多种癌症[13–14]。因此, 准确、高效地检测粮食中真菌毒素的含量, 对于保障粮食安全、维护人类健康以及促进畜牧业的可持续发展具有至关重要的意义。

近年来, 随着科技的飞速发展, 快速检测技术在真菌毒素检测领域得到了广泛应用[15]。目前市面上快速检测仪检测原理主要为胶体金免疫层析快速定量法[16]和荧光免疫层析快速定量检测法[17–20]。快速检测仪以其快速、便捷、操作简单的特点[21], 能够满足粮食收购、储存、加工等环节中对毒素检测的高效需求, 极大地提高了检测效率和时效性[22–23]。然而, 粮食入库卫生指标检测是一项具有高度重复性、连续性、操作规范性和劳动强度的工作[24–25], 这对检验人员的专业素养、谨慎性和操作准确性提出了极为严格的要求[26]。在高强度、持续的流水化工作模式下, 检验人员的注意力容易分散, 进而可能导致实验过程中一些关键步骤的操作不规范, 最终影响检测结果的准确性[23,27]。

在实际检测过程中, 样品的前处理环节是影响检测结果的关键因素之一[28–29]。样品过筛率、粉末混匀方式、样品质量称取的准确性等涉及人工操作的步骤, 都可能对检测结果产生显著影响。例如, 样品过筛不充分可能导致颗粒大小不均匀, 影响毒素的提取效率; 粉末混匀不均匀可能导致检测样品中毒素分布不均, 从而影响检测结果的代表性; 样品质量称取不准确则会直接影响检测结果的定量准确性。因此, 深入研究这些关键因素对检测结果的影响, 对于优化检测流程、提高检测准确性具有重要的理论和实践意义。

基于此, 本研究选取小麦和玉米这两种在我国粮食生产和消费中占据重要地位的作物作为研究对象, 分别对其中的 DON、ZEN 和 AFB_1 含量进行检测。同时, 选取市场上常见的 3 种快速检测仪—赛泰诺(SinoTech)真菌毒素快速检测仪、飞测(FlyingTest)真菌毒素快速检测仪和 Charm 真菌毒素快速检测仪, 通过在不同实验条件下对这些快速检测仪的检测数据进行分析, 深入探讨样品过筛率、粉末混匀方式、样品质量等关键因素对各类毒素检测结果的影响。本研究旨在为优化真菌毒素快速检测流程、提高快速检测准确性提供科学依据, 从而为保障粮食安全、提升粮食质量检测水平贡献一份力量。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

小麦和玉米均产于 2024 年度, 产地为河南省, 由中央储备粮漯河直属库有限公司提供。

98%甲醇、89%乙醇(分析纯, 天津科密欧化学试剂有限公司); DON 标准品(990 μg/kg±130 μg/kg)、ZEN 标准品(46.5 μg/kg±6.3 μg/kg)、AFB_1 标准品(17.5 μg/kg±2.4 μg/kg)(国家粮食和物资储备局科学研究院)。

1.2　仪器与设备

QD Infinity 赛泰诺真菌毒素快速检测仪(赛泰诺生物技术有限公司); FD-600 飞测真菌毒素快速检测仪(南京微测生物科技有限公司); LF-ROSAREADER-M-NB charm 真菌毒素快速检测仪(北京中检葆泰生物技术有限公司); JJ500 百分之一天平(常熟市双杰测试仪器厂); JFYZ-II 型粮食自动分样器、JFSD-III 粮食水分测试粉碎磨(中储粮程度储藏研究院有限公司); 自主研发混匀器[10~150 r/min (±5 r/min), 中储粮漯河直属库有限公司]; AM5200 波通水分仪[珀金埃尔默企业管理(上海)有限公司]; 20 目谷物选筛(上虞市五四仪器筛具厂)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品准备

分别采集小麦和玉米样品若干份，确保样品具有代表性。将采集的样品在相同设置条件下使用分样器进行混匀、分样，样品基本指标见表 1。

表 1 样品基本指标

Table 1 Basic specifications of samples

品种	收获年度	产地	水分/%	容重/(g/L)	不完善粒/%
玉米	2024	河南省	13.20	734.00	6.10
小麦	2024	河南省	11.70	801.00	5.20

1.3.2 粮食粉碎后过筛率

将小麦和玉米样品分别用粉碎机粉碎，通过 20 目筛网进行筛选，分别得到过筛率为 99%、97%、95%、93%、91%的粮食粉末。对于每个过筛率水平，混匀后分别取适量粉末用于后续实验。

1.3.3 粉末混匀方式处理

对于每个过筛率水平的粮食粉末，分别采用以下 3 种混匀方式进行处理:

(1)手动混匀 60 s。按照固定的混匀方向和力度，对粮食粉末进行 60 s 的手动混匀。

(2)机械单向混匀 60 s。将粮食粉末放入混匀器中，设置混匀器为单向混匀模式，以 100 r/min 转的混匀速度进行 60 s 的混匀。

(3)机械双向混匀 60 s。将粮食粉末放入混匀器中，设置混匀器为双向混匀模式，以 100 r/min 的混匀速度进行 60 s 的混匀。

1.3.4 样品质量处理

在完成粉末混匀后，分别称取 300、400、500、600 和 700 g 的粮食粉末作为检测样品，用于后续的真菌毒素检测实验。

1.3.5 真菌毒素快速检测

分别使用赛泰诺、飞测和 Charm 3 种快速检测仪对不同条件下(表 2)的小麦和玉米样品进行 DON、ZEN 和 AFB_1 的检测：按照称取混匀后样品、取样加液、振荡 5 min、与缓冲液混合、振荡、插入快速检测设备进行检测，期间快速检测仪 1 d 校准一次。具体细节按照各快速检测仪的操作说明书进行，实验平行进行 3 次，记录每次检测的数据。

1.4 数据处理

采用统计学软件 Origin (2024 中文版)和 WPS Office(个人版)对各条件下的样品进行毒素检测数据分析，采用 Origin (2024 中文版)作图。

2 结果与分析

2.1 标准基准物质检测数据

3 种真菌毒素快速检测仪使用标准品检测结果比对如表 3 所示。表 3 中检测结果显示，3 种仪器检测的 DON、ZEN、AFB_1 毒素水平均在误差允许范围内(20%)，说明 3 种仪器均可以进行后续实验。

表 2 粮食收购现场操作关键步骤对小麦/玉米毒素检测结果的影响

Table 2 Effects of grain purchase site operation standards on the detection results of mycotoxins in *Triticum aestivum* L. and *Zea mays* L.

序号	过筛率/%	粉末混匀方式	样品质量/g	检测方法
1	99	机器双项(正 30 s-反 30 s)	500	赛泰诺(胶体金快速定量法)
2	97			
3	95			
4	93			
5	91			
6	95	手动(60 s)	500	赛泰诺(胶体金快速定量法)
7		机器(单项 60 s)		
8		机器双项(正 30 s-反 30 s)		
9	95	机器双项(正 30 s-反 30 s)	300	赛泰诺(胶体金快速定量法)
10			400	
11			500	
12			600	
13			700	
14	95	机器双项(正 30 s-反 30 s)	500	赛泰诺(胶体金快速定量法)
15				charm(胶体金免疫层析法)
16				飞测(荧光免疫层析快速定量检测法)

表 3　基准物质检测数据比对(μg/kg)
Table 3　Comparison of detection data of reference materials (μg/kg)

仪器类型	误差/%	DON (990.0±130.0) μg/kg			ZEN (46.5±6.3) μg/kg			AFB_1 (17.5±2.4) μg/kg		
赛泰诺	20.0	998.8	997.0	1006.1	45.5	48.3	42.4	16.7	17.2	19.0
飞测	20.0	950.0	976.1	991.0	47.3	46.0	50.0	17.7	15.6	15.0
Charm	20.0	985.0	1003.0	994.0	50.0	47.0	49.0	16.0	17.0	16.0

2.2　小麦和玉米过筛率对毒素检测结果的影响

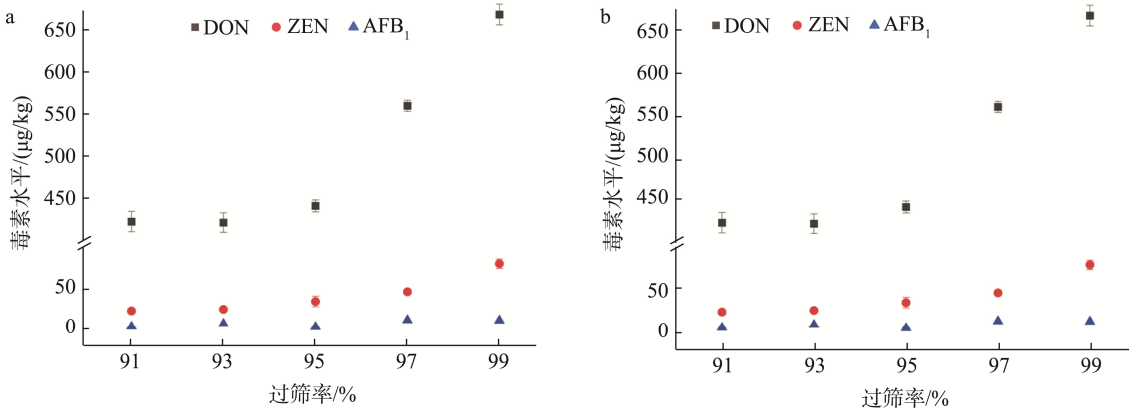
小麦和玉米在不同过筛率(99%、97%、95%、93%、91%)下，DON、ZEN 以及玉米中 AFB_1 的检测结果差异如图 1 所示。通过数据对比发现，样品粉碎后过筛率对毒素测定结果有显著影响，随着过筛率增加，均呈现上升趋势。其中图 1a 显示玉米中 DON 结果均受过筛率影响较为明显，99%过筛率下，毒素水平由 421.47 μg/kg 升至 667.61 μg/kg，最大增幅 246 μg/kg，最大误差为 12.3%，其次是 ZEN，玉米中 ZEN 水平随过筛率增加表现为先缓(22.39~33.67 μg/kg)后陡(33.67~78.71 μg/kg)的上升趋势，最大增幅 56 μg/kg。相比 DON 和 ZEN，AFB_1 的结果变化较小，其原因可能在于不同毒素的赋存特性存在差异：AFB_1 主要由曲霉菌产生，其分布易集中于个别霉变颗粒，呈‘热点’效应，因此检测结果对粉末整体均匀度的敏感性相对较低；而 DON 和 ZEN 由镰刀菌系统侵染所致[30]，在籽粒中分布更为均一，其检测结果的代表性因而更依赖于样品的过筛率和混匀程度。此外，AFB_1 在本研究的玉米样品中的本底含量较低，其检测值波动可能受方法本身的分析误差所掩盖。小麦中 DON 含量随过筛率提高而增加，ZEN 无明显变化，这是因为 2024 年小麦样品中 ZEN 的本底污染水平过低，导致其检测信号落在快速检测方法的非灵敏区间。过筛率越高表明筛后样品留存率较高，更能代表原粮中毒素水平，因此建议实际操作中尽量提高过筛率以确保检测准确性。

2.3　粉末混匀方式对毒素检测结果的影响

对比手动混匀 60 s、机械单向混匀 60 s 和机械双向混匀 60 s 3 种混匀方式下，小麦和玉米样品中 3 种毒素的检测结果差异如图 2 所示。由图 2a 可知，3 种混匀方式对玉米中 DON 含量检测有影响，ZEN 和 AFB_1 变化无明显趋势，手动混匀样品的 DON 值最高为 602.33 μg/kg，误差值为 11.2%。机器单项混匀最低为 524.36 μg/kg，误差值为 8.6%；由图 2b 可知，小麦机械双向混匀模式下 DON 结果较高为 139.33 μg/kg。综合来看机械双向混匀与手动混匀效果接近，机器混匀方式受方向和转速影响，这主要是因为混合动力学存在差异：机械单向混匀仅为单一方向的圆周运动，难以有效打破毒素微粒在粉末中的‘偏析’现象，导致取样代表性差；而机械双向混匀通过正反转向的复合运动，产生了强烈的对流、剪切和扩散效应，能高效实现样品的三维空间均匀混合，从而显著降低了取样误差，使检测结果更具代表性[31]。

2.4　样品质量对毒素检测结果的影响

300、400、500、600 和 700 g 5 种样品质量水平下，小麦和玉米样品中毒素检测结果的变化情况如图 3 所示。从图 3a 中可以发现，玉米中 DON 数据随样品质量增加有上升趋势，最高达到 644.07 μg/kg，同时误差也有上升样品质量达到 500 g 时，DON 检测结果趋于一致，误差值最大 17.7%。样品质量对 ZEN 和 AFB_1 无明显影响；由图 3b 可知，样品质量增加，小麦中 DON 检测数据有平缓上升趋势，对 ZEN 数据检测无显著影响。随着样品质量增加，样本体量变大，取样代表性加强使得样品检测值无限近似真实值，



注：a. 玉米；b. 小麦，下同。
图 1　过筛率对毒素结果的影响
Fig.1　Effects of screening rate on toxin results

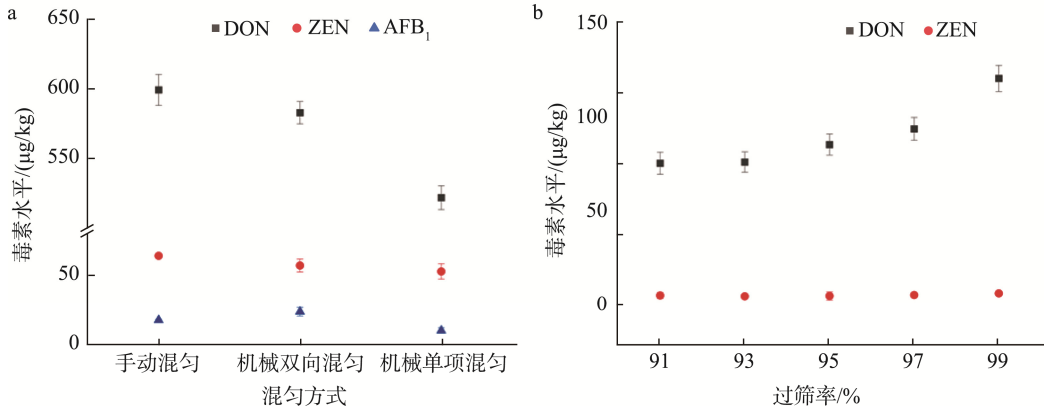


图 2 不同混匀方式对毒素结果的影响

Fig.2 Effects of different mixing methods on the toxin results

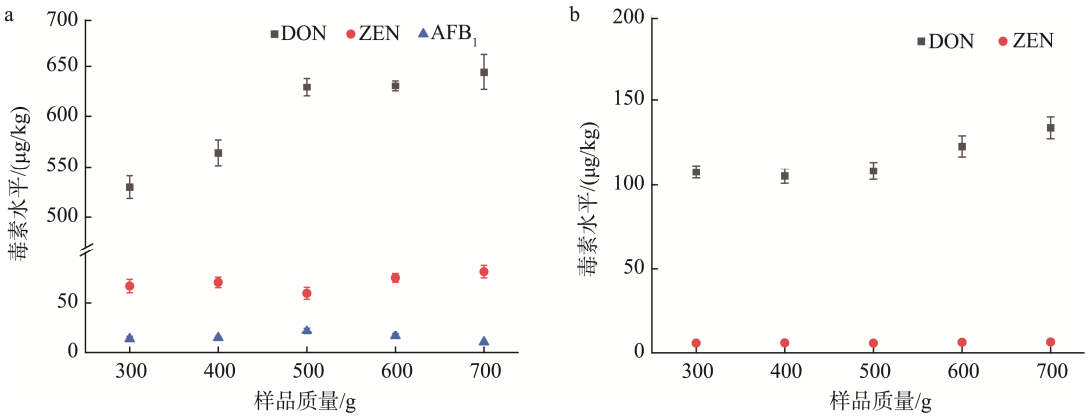


图 3 样品质量对毒素结果的影响

Fig.3 Effects of sample mass on the toxin results

但混匀难度增加会导致结果误差相对升高。因此在实际真菌毒素检测中选取合适的样品质量有助于提高检测准确度，降低系统偏差。

2.5 快速检测仪品牌对毒素检测结果的影响

对比赛泰诺、飞测和 Charm 3 种快速检测仪在相同实验条件下对小麦和玉米样品中毒素的检测结果差异如图 4 所示。从图 4 中可以看到 3 种快速检测仪检测小麦和玉米的 3 种毒素均存在变化，但差距不大，其中玉米检测均值误差较大，最大为 13.3%，这可能是玉米中毒素偏高且分布不均导致[32]，尤其是 3 种快速检测仪检测结果中玉米的 DON 毒素误差均相对偏大。在实际检测过程，操作便捷性也是提高准确性降低人工误差的关键，操作简便有助于降低样

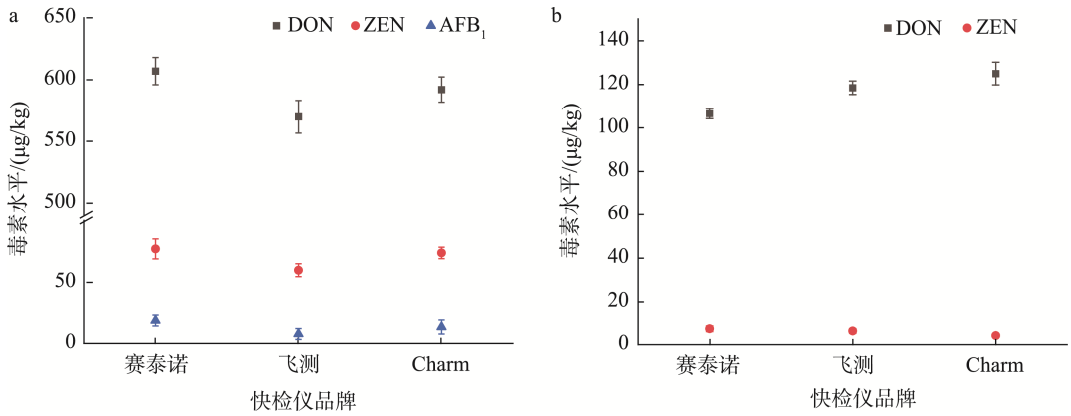


图 4 快速检测仪品牌对毒素结果的影响

Fig.4 Effects of rapid detection instrument brands on toxin results

品与溶液反应的时间误差, 提高检测结果准确性, 因此挑选合适的快速检测仪时可以重点注意其具体操作步骤。

3　结　论

本研究围绕小麦、玉米真菌毒素快速检测稳定性, 就地考查了过筛率、混匀方式、样品质量及仪器品牌对 DON、ZEN、AFB_1 检测结果的影响。结果显示: 随过筛率提高, 玉米 DON、ZEN 检测值持续上升, 最大增幅分别达 246 μg/kg 和 56 μg/kg, 小麦 DON 同步升高, 而 AFB_1 变化平缓; 机械双向混匀 60 s 的 DON 结果低于手动混匀, 误差缩小至 8.6%, 明显优于机械单向混匀; 样品质量由 300 g 增至 700 g, 玉米 DON 呈上升趋势并于 500 g 后趋稳, 但误差同步扩大到 17.7%, ZEN 与 AFB_1 无明显变化; 赛泰诺、飞测、Charm 3 款快速检测仪对同一样品的检测均值误差最大为 13.3%, 玉米 DON 动尤为明显。建议粮食收购现场毒素快速检测时采用高过筛率、机械双向混匀并控制样品质量约 500 g, 以兼顾代表性与均匀性, 从而提升毒素快速检测数据的准确度和可重复性。

参考文献

[1] 郝伟, 杨利芳, 王亮, 等. 食品中常见真菌毒素检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(10): 165–172.
HE Y, YANG LF, WANG L, *et al*. Development of detecting method of mycotoxins in the food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(10): 165–172.

[2] GUO Z, ZHANG J, WANG H, *et al*. Advancing detection of fungal and mycotoxins contamination in grains and oilseeds: Hyperspectral imaging for enhanced food safety [J]. Food Chemistry, 2024, 470: 142689.

[3] 郝文雪. 饲料中玉米赤霉烯酮的便携式电化学免疫传感快速检测研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2022.
HAO WX. Portable electrochemical immunosensor for rapid detection of zearalenone in feed [D]. Nanchang: Agricultural University, 2022

[4] 钱承敬, 张巍巍, 史晓梅, 等. 基于能力验证活动对玉米真菌毒素快速检测技术的评价[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(2): 181–187.
QIAN CJ, ZHANG WW, SHI XM, *et al*. Evaluation of rapid detection technology of mycotoxin in corn based on proficiency testing activity [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(2): 181–187.

[5] RP A, HENRIETTE F, VS P, *et al*. Neither GLP-1 receptors nor GFRAL neurons are required for aversive or anorectic response to DON (vomitoxin) [Z]. American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 2023.

[6] 李壮, 王猛强, 马磊, 等. 农产品中玉米赤霉烯酮限量标准及快速检测技术研究进展[J]. 分析试验室, 2021, 40(8): 985–992.
LI Z, WANG MQ, MA L, *et al*. Research progress on the limit standard and rapid detection technology of zearalenone in agricultural products [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2021, 40(8): 985–992.

[7] 季悦. 粮食中呕吐毒素快速检测技术的开发评价及应用研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2022.
JI Y. Development and evaluation of rapid detection technology for deoxynivalenol in grain and the application research [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2022.

[8] 丁寅寅, 孙晓璐, 廖洪梅, 等. 毕赤酵母水解物对玉米赤霉烯酮和呕吐毒素的吸附机理研究[J]. 中国酿造, 2025, 44(8): 154–160.
DING YY, SUN XL, LIAO HM, *et al*. Adsorption mechanism of *Pichia pastoris* hydrolysate on zearalenone and deoxynivalenol [J]. China Brewing, 2025, 44(8): 154–160.

[9] 毛小晓, 江津津, 万红霞, 等. 呕吐毒素致肠道毒性的研究进展[J]. 食品安全导刊, 2025(1): 172–175.
MAO XX, JIANG JJ, WAN HX, *et al*. Research progress on intestinal toxicity caused by deoxynivalenol [J]. China Food Safety Magazine, 2025(1): 172–175.

[10] 张艳, 王伟, 乔澎波, 等. 荧光免疫分析法测定玉米中赤霉烯酮含量[J]. 现代食品, 2025(5): 200–202.
ZHANG Y, WANG W, QIAO PB, *et al*. Quantitative determination of zearalenone content in corn using fluorescence immunoassay [J]. Modern Food, 2025(5): 200–202.

[11] FAKHRI Y, MEHRI F, RANAEI V, *et al*. The prevalence and concentration of mycotoxins (aflatoxins, deoxynivalenol, zearalenone, and ochratoxin A) in domestic bird eggs: A global systematic review, meta-analysis, and probabilistic risk assessment [J]. Journal of Food Protection, 2025: 100600. DOI: 10.1016/j.fct.2018.06.037

[12] GAO L, LU Y, YANG H, *et al*. Magnetic metal-organic frameworks-based chitosan hydrogel as adsorbent for the detection of aflatoxins in grains [J]. Microchemical Journal, 2025, 210: 112961.

[13] 郭瑞, 叶金, 何若铭, 等. 粮食真菌毒素快速检测产品性能评价与分析[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(4): 24–33.
GUO R, YE J, HE RM, *et al*. Performance evaluation and analysis of rapid detection products for mycotoxins in grains [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(4): 24–33.

[14] 钦巧眉, 毛劲, 程玲, 等. 农产品和食品中黄曲霉毒素检测与阻控技术研究现状及展望[J]. 农业工程学报, 2025, 41(10): 1–14.
QIN QM, MAO J, CHENG L, *et al*. Research status and prospect of the detection, prevention and control techniques for aflatoxins in agricultural products and food [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(10): 1–14.

[15] 袁颖, 曹宇飞, 潘中华, 等. 试样制备方法对小麦呕吐毒素检测结果的影响[J]. 粮食储藏, 2024, 53(4): 67–70.
YUAN Y, CAO YF, PAN ZH, *et al*. Effect of sample preparation on the detection of DON in wheat [J]. Grain Storage, 2024, 53(4): 67–70.

[16] LIU J, KONG Z, WANG Y, *et al*. A rapid quantitative determination method of Luteinizing hormone with gold immunochromatographic strip [Z]. Conference Proceedings: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual Conference, 2017: 17–20.

[17] MINMIN S, HAIYING G, KAI D, *et al*. Fluorescent immunochromatography of vancomycin in plasma: A rapid and sensitive quantitative analysis [J]. Biomedical Chromatography: BMC, 2023, 37(8): e5656.

[18] 刘波, 华彦涛, 赵炫, 等. 快速检测食品中四环素类抗生素残留的胶体金免疫层析方法[J/OL]. 现代食品科技, 1-11. [2025-08-28]. https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.2.1635
LIU B, HUA YB, ZHAO X, *et al*. Colloidal gold immunochromatography

assay for rapid detectionof tetracycline antibiotic residues in food [J/OL]. Modern Food Science and Technology, 1-11. [2025-08-28]. https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.2.1635

[19] 栗慧, 郭晨, 霍俊奇, 等. 时间分辨荧光免疫层析技术在动物源性食品检测中的研究进展[C]. 长沙: 中国食品科学技术学会第二十届年会论文摘要集, 2023.
LI H, GUO C, HUO JQ, *et al*. Research progress of time-resolved fluorescence immunochromatography technology in the detection of animal derived foods [C]. Changsha: The 20th Annual Meeting of Cifst, 2023.

[20] 苗银萍, 赵光升, 李宁, 等. 荧光免疫层析定量检测卡在快速检测 T-2 毒素中的应用[J]. 农产品质量与安全, 2024(6): 82–85.
MIAO YP, ZHAO GS, LI N, *et al*. Application of fluorescence immunochromatographic quantitative detection card in rapid detection of T-2 toxin [J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2024(6): 82–85.

[21] 陈舟. 高效液相色谱仪、酶标仪和快速检测仪检测小麦中呕吐毒素的对比分析[J]. 食品安全导刊, 2021(28): 82–83.
CHEN Z. Comparative analysis of the detection of vomitoxin in wheat by high-performance liquid chromatography, enzyme-linked immunosorbent assay, and rapid detection instruments [J]. China Food Safety Magazine, 2021(28): 82–83.

[22] 王伟, 阮德志, 张艳, 等. 真菌毒素快速检测仪收购现场可行性应用效果评价[J]. 现代食品, 2024, 30(24): 213–216.
WANG W, RUAN DZ, ZHANG Y, *et al*. Evaluation of feasibility and application effect of mycotoxin rapid detector [J]. Modern Food, 2024, 30(24): 213–216.

[23] 胡云, 张一帆, 焦锡涛, 等. 粮食中的真菌毒素检测方法研究进展[J]. 农产品加工, 2024(24): 73–77.
HU Y, ZHANG YF, JIAO XT, *et al*. Progress status of mycotoxin detection methods in grain [J]. Agricultural Products Processing, 2024(24): 73–77.

[24] 张杰, 王玉生, 许建双, 等. 小麦储存期间卫生指标检测、变化及综合治理研究[J]. 中国食品工业, 2025(11): 82–84.
ZHANG J, WANG YS, XU JS, *et al*. Research on detection, changes, and integrated management of hygiene indicators during wheat storage [J]. China Food Industry, 2025(11): 82–84.

[25] ZHANG L, ZHANG G, CHEN J, *et al*. Sensitive lateral flow immunoassay based on integrated green pretreatment for detection of three mycotoxins in maize and wheat [J]. Food Bioscience, 2025, 64: 105908.

[26] 刘晓萌, 康柔嘉, 王寿南, 等. 粮食中真菌毒素污染现状及防控对策研究进展[J]. 粮食储藏, 2025, 54(1): 15–23.
LIU XM, KANG RJ, WANG SN, *et al*. Research progress on comprehensive utilization of grain contaminated with mycotoxins [J]. Grain Storage, 2025, 54(1): 15–23.

[27] ABHISHEK K, HARDIK P, SEEMA B, *et al*. Aflatoxin contamination in food crops: causes, detection, and management: A review [Z]. Food Production, Processing and Nutrition, 2021.

[28] MURTAZA B, LING G L, WANG L, *et al*. Mycotoxin detection in corn and distillers dried grains for food security [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 210: 115194.

[29] ZHANG X, LI D, WANG L, *et al*. An overview of the current situation and future development direction of grain detection: Taking computer vision combined with deep learning [J]. Journal of Food Science and Technology, 2025(prepublish): 1–18.

[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] 唐亚娥, 王坛, 米山. 小麦中呕吐毒素荧光定量免疫层析快速检测产品评价[J]. 食品安全导刊, 2023(25): 90–92.
TANG YE, WANG T, MI S, *et al*. Evaluation of commercial fluorescence quantitative rapid test strips for detection of deoxynivalenol in wheat [J]. China Food Safety Magazine, 2023(25): 90–92.

[32] 刘佳禾, 千佳怡, 杨柠嘉, 等. 国产快速检测仪测定小麦呕吐毒素的处理条件优化研究[J]. 粮油仓储科技通讯, 2025, 41(1): 41–46.
LIU JH, QIAN JY, YANG NJ, *et al*. Research on optimization of processing conditions for determination of vomitoxin in wheat by domestic rapid detection instruments [J]. Science and Technology Communication for Grain and Oil Storage, 2025, 41(1): 41–46.

(责任编辑: 蔡世佳 安香玉)