

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241203005

引用格式: 王晓敏, 韩祎陟, 郑书展, 等. 2023年和2024年中国小麦中霉菌毒素污染现状研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(11): 33-40.

WANG XM, HAN YZ, ZHENG SZ, et al. Investigation on the current situation of mycotoxin contamination in *Triticum aestivum* L. from China in 2023 and 2024 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(11): 33-40. (in Chinese with English abstract).

2023年和2024年中国小麦中霉菌毒素污染 现状研究

王晓敏¹, 韩祎陟¹, 郑书展¹, 贾先春², 张大伟², 周雪婷², 关舒³,
李天宇³, 刘 旻⁴, 任彩霞^{1*}

[1. 呼和浩特海关技术中心, 呼和浩特 010020; 2. 江南大学生物工程学院, 无锡 214000;
3. 百奥明饲料添加剂(中国)有限公司, 无锡 214101; 4. 天津海关动植物与食品检测中心, 天津 300457]

摘要: **目的** 探究2023—2024年我国小麦样品中多种霉菌毒素污染情况。**方法** 随机采集我国小麦主产区共248份小麦样品(2023年145份; 2024年103份), 同时使用液相色谱-串联质谱法(liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC-MS/MS)和酶联免疫吸附试验(enzyme linked immunosorbent assay, ELISA)测定小麦中多种霉菌毒素的含量。**结果** 248份小麦中霉菌毒素的污染率达到98.0%, 这些毒素的阳性率范围在0.4%~87.1%, 平均污染水平在0.4~604.3 μg/kg。2024年小麦中呕吐毒素、玉米赤霉烯酮等管制毒素, 交链孢酚、恩镰孢菌素等新型毒素的阳性均值均低于2023年; 此外, 玉米赤霉烯酮ELISA法检测结果(2023: 91.5%, 88.5 μg/kg; 2024: 92.2%, 79.4 μg/kg)与LC-MS/MS法(2023: 28.7%, 17.7 μg/kg; 2024: 29.1%, 5.0 μg/kg)相差较大。**结论** 2024年小麦霉菌毒素污染程度比2023年低, 同时也发现呕吐毒素-3-葡萄糖苷、交链孢酚和白僵菌素等在小麦中的污染水平较高。

关键词: 小麦; 霉菌毒素; 液相色谱-串联质谱法; 酶联免疫吸附试验

Investigation on the current situation of mycotoxin contamination in *Triticum aestivum* L. from China in 2023 and 2024

WANG Xiao-Min¹, HAN Yi-Zhi¹, ZHENG Shu-Zhan¹, JIA Xian-Chun², ZHANG Da-Wei²,
ZHOU Xue-Ting², GUAN Shu³, LI Tian-Yu³, LIU Yang⁴, REN Cai-Xia^{1*}

[1. Technical Center of Hohhot Customs, Hohhot 010020, China; 2. School of Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi 214000, China; 3. Biomin Feed Additive (China) Co., Ltd., Wuxi 214101, China; 4. Animal, Plant & Foodstuff Inspection Center of Tianjin Customs District P. R. China, Tianjin 300457, China]

ABSTRACT: Objective To investigate multiple mycotoxin contamination and patterns in *Triticum aestivum* L. samples from China in 2023 and 2024. **Methods** A total of 248 *Triticum aestivum* L. samples were randomly

收稿日期: 2024-12-03

基金项目: 海关总署科研项目(2022HK122, 2023HK082)

第一作者: 王晓敏(1988—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为真菌毒素检测, 农兽残检测。E-mail: 332639722@qq.com

*通信作者: 任彩霞(1982—), 女, 工程师, 主要研究方向为真菌毒素检测, 食品理化检测。E-mail: 21717954@qq.com

collected from the main *Triticum aestivum* L.-producing areas of the country (2023: 145; 2024: 103). Simultaneously, liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) and enzyme linked immunosorbent assay (ELISA) was used to determine the content of various mycotoxins in *Triticum aestivum* L.. **Results** The total exceeding rate of mycotoxin contamination in 248 *Triticum aestivum* L. was 98.0%. The positivity rate for these mycotoxins ranged from 0.4% to 87.1%, with average contamination levels ranging from 0.4 to 604.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$. Positive mean values for regulated toxins such as deoxynivalenol and zearalenone, and emerging toxins such as alternariol and enniatins in *Triticum aestivum* L. were lower in 2024 than in 2023. In addition, the results of zearalenone ELISA (2023: 91.5%, 88.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 2024: 92.2%, 79.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$) had relatively large difference from those of LC-MS/MS (2023: 28.7%, 17.7 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 2024: 29.1%, 5.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$). **Conclusion** *Triticum aestivum* L. mycotoxin contamination is less severe in 2024 than in 2023. Higher levels of contamination with deoxynivalenol-3-glucoside, alternariol and beauvericin are also found in *Triticum aestivum* L..

KEY WORDS: *Triticum aestivum* L.; mycotoxin; liquid chromatography-tandem mass spectrometry; enzyme linked immunosorbent assay

0 引言

小麦是世界上最重要的主粮之一，每年贡献约占全球卡路里消耗量的 18%，也是动物饲料的重要组成部分，其质量安全影响着全球粮食安全^[1]。然而，经生长收割、储存和加工过程后，小麦产量的损失率多达一半。其中，霉菌毒素污染是小麦产量损失的重要因素^[2-3]。霉菌毒素是一类由产毒真菌经各种生物合成途径产生的次级代谢产物。常见对小麦影响较大的毒素有呕吐毒素(deoxynivalenol, DON)和玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEN)，主要来源于镰刀菌属。这类霉菌还能产生其他例如雪腐镰刀菌烯醇(nivalenol, NIV)、T-2 毒素(T-2 toxin, T-2)和 HT-2 毒素(T-2 toxin, HT-2)等^[4]。此外，一些不受监管的新型毒素和隐蔽性毒素因其高发生率也不容忽视，例如交链孢酚(alternariol, AOH)、白僵菌素(beauvericin, BEA)、3 乙酰基呕吐毒素(3-acetyldeoxynivalenol, 3ACDON)和 15 乙酰基呕吐毒素(15-acetyldeoxynivalenol, 15ACDON)等^[5]。这些毒素经由食物链进入动物或人体内，会对其健康造成不同程度的危害，例如过敏反应、肝肾毒性、遗传毒性和免疫抑制等，甚至导致癌变或死亡^[6]。然而，霉菌毒素污染的预防控制是一项艰巨的任务，这主要是因为：污染谷物的霉菌毒素复杂多样且迭代更新，一类真菌可产生多种毒素，而一种毒素也能由不同真菌产生^[7]；其次，霉菌毒素分子量小，残留水平低^[8]。现已知的霉菌毒素都具有化学稳定性，大部分食品或饲料加工步骤都无法完全将其消除，从而威胁消费者的生命安全和我国小麦及其产品的进出口贸易^[9]。

当前，小麦中霉菌毒素的污染重点主要集中在单端孢霉烯类毒素，研究范围也只在个别省市，缺少对我国小麦中多种毒素污染的整体描述^[10-12]。因此，本研究利用液相色谱-串联质谱法(liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC-MS/MS)和酶联免疫吸附试验(enzyme linked immunosorbent assay, ELISA)同时检测来自中国各地的 248 份小麦样品中霉菌毒素含量，旨在探究 2023 年和 2024 年我国小麦中霉菌毒素污染现状及规律，为相关行业进行霉菌毒素防治和原料选择提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

所有小麦样品来自于 2023—2024 年度中国 9 个省份，共计 248 份，均由百奥明饲料添加剂(中国)有限公司提供，具体信息见表 1，在某些数据处理过程中，部分省份由于样品量较少(陕西、天津、浙江、山西)，统一做“其他”处理。

ELISA 试剂盒(奥地利 Romer 公司、河北伊莱莎生物技术有限公司)；甲醇、乙腈、甲酸、醋酸铵(色谱纯，德国 Merck 公司)；氯化钠(分析纯，国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

Agilent 1290-Sciex QTRAP 5500 高效液相色谱-串联质谱仪(美国安捷伦公司、美国 SCIEX 公司)；Milli-Q 超纯水仪(德国默克密理博公司)；BSA2202S-CW 分析天平(精密密度 0.01 mg，德国赛多利斯公司)；离心机 SIGMA 3-15(美国 SIGMA 公司)；RAS Mill 研磨机(奥地利 Romer 公司)。

表 1 样品产地信息

Table 1 Informations on the origin of the samples

采样省份	河南	河北	安徽	江苏	山东	湖北	陕西	天津	浙江	山西
2023 年	31	32	12	19	33	10	2	3	0	3
2024 年	24	17	12	19	17	0	7	3	4	0

1.3 实验方法

LC-MS/MS 法: 准确称取研磨过的小麦样品 10.00 g±0.05 g 于 250 mL 三角烧瓶中, 参照张大伟等^[13]的方法进行样品前处理以及检测。

ELISA 法: 针对 DON, 准确称取研磨过的小麦样品 10.00 g±0.05 g 于 250 mL 三角烧瓶中, 加入 100 mL 超纯水振荡提取 30 min, 定量滤纸过滤, 收集滤液至 50 mL 离心管, 待测。将试剂盒提前恢复至室温, 向空白孔中加入 100 μL 酶联偶合物, 再加入 50 μL 样品待测液, 移液器抽吸至孔内液体混匀。吸取 100 μL 混合液到抗体板中, 孵育 5 min。弃掉孔内液体, 重复洗板 4 次, 用吸水纸吸干至无水珠, 加入 100 μL 底物溶液, 避光孵育 5 min 后加入 50 μL 停止液, 置于酶标仪中读数。DON 检出限为 200 μg/kg, 线性范围 200~2500 μg/kg。

针对 ZEN, 准确称取研磨过的小麦样品 20.00 g±0.05 g 于三角烧瓶中, 加入 100 mL 的 70% 甲醇水溶液和 4.00 g±0.05 g 氯化钠, 振荡提取 30 min, 定量滤纸过滤, 收集滤液至 50 mL 离心管, 待测。将试剂盒提前恢复至室温, 向空白孔中加入 100 μL 酶联偶合物, 再加入 50 μL 样品待测液, 移液器抽吸至孔内液体混匀。吸取 100 μL 混合液到抗体板中, 孵育 10 min。弃掉孔内液体, 重复洗板 4 次, 用吸水纸吸干至无水珠, 加入 100 μL 底物溶液, 避光孵育 5 min 后加入 50 μL 停止液, 置于酶标仪中读数。ZEN 检出限为 20 μg/kg, 线性范围 20~1000 μg/kg。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2022 和 IBM SPSS statistics 26 进行数据均值计算、显著性分析和线性回归分析, Origin 2021 进行相关性分析和图像绘制。

2 结果与分析

2.1 2023、2024 年污染概况

2.1.1 总体污染情况

2023 年和 2024 年 248 份小麦样品中 53 种霉菌毒素阳性率、阳性均值和阳性最大值如表 2 所示。2023 年采集 145 份小麦样品, 其中未检测到任何毒素的小麦样品 3 份, 占比为 2.1%(见图 1); 检出 1~5 种霉菌毒素的样品 58 份, 阳性率为 40.0%; 含有 6~10 种霉菌毒素的样品 80 份, 阳性率为 55.2%; 检出毒素种类大于 10 种的样品 4 份, 阳性率为 2.8%。2024 年共采集 103 份小麦样品, 未检测到任何毒素的小麦样品 2 份, 占比为 1.9%; 检出 1~5 种霉菌毒素的样品 45 份, 阳性率为 43.7%; 含有 6~10 种霉菌毒素的样品 41 份, 阳性率为 39.8%; 检出毒素种类大于 10 种的样品 15 份, 阳性率为 14.6%。这表明小麦样品中多种霉菌毒素污染共存现象严重。2023 年和 2024 年收集的 248 份样品仅有 5 份未检出霉菌毒素, 污染率达到 98.0%, 这些毒素的阳

性率范围在 0.4%~87.1%, 平均污染水平在 0.4~604.3 μg/kg; 其污染情况见表 2 和图 1。

表 2 2023—2024 年小麦样品中 53 种霉菌毒素调查结果
Table 2 Investigation outcomes of 53 kinds of mycotoxins in *Triticum aestivum* L. samples in 2023—2024

霉菌毒素	2023—2024 年(248 份样品)		
	阳性率/%	阳性均值 (μg/kg)	阳性最大值 (μg/kg)
OTA	0.40	28.14	28.14
T-2	0.40	2.05	2.05
HT-2	/	/	/
AFB ₁	1.21	5.88	13.50
AFB ₂	/	/	/
AFG ₁	/	/	/
AFG ₂	/	/	/
FB ₁	4.03	24.48	43.05
FB ₂	2.02	3.26	4.62
FB ₃	1.21	10.48	14.26
DON	87.10	604.30	10845.57
PAT	/	/	/
ZEN	29.84	15.83	212.10
D3G	44.35	195.67	1184.40
NIV	4.84	106.80	583.80
3ACDON	18.95	36.23	146.16
15ACDON	7.66	40.62	85.89
AOH	67.34	66.70	1344.00
T-2 四醇	/	/	/
T-2 三醇	/	/	/
BEA	56.85	7.95	125.79
STG	2.42	1.02	1.60
ENNA	22.58	0.89	5.80
ENNB	79.44	6.12	114.87
ENNB ₁	70.97	3.40	52.71
ENNA ₁	50.81	1.24	11.68
MON	22.18	22.20	75.18
MPA	2.42	20.07	59.64
酪青霉毒素	0.81	3.31	6.03
ZEA	/	/	/
PA	2.42	125.23	268.80
GLI	/	/	/
OTB	/	/	/
DIA	/	/	/
NEO	/	/	/
15ACDIA	0.81	5.63	8.63
FUX	/	/	/
麦角新碱	1.21	0.51	0.66
麦角柯宁碱	/	/	/
麦角生碱	/	/	/
麦角胺	/	/	/
麦角环肽	/	/	/

表 2(续)

霉菌毒素	2023—2024 年(248 份样品)		
	阳性率/%	阳性均值 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	阳性最大值 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)
麦角克碱	/	/	/
麦角异新碱	2.42	0.36	0.74
麦角异柯宁碱	/	/	/
双氢麦角醇	2.42	4.99	10.90
麦角异克碱	0.81	1.23	1.76
异麦角克普汀	/	/	/
麦角咪-8-甲醇	/	/	/
麦碱	/	/	/
α -ZOL	/	/	/
β -ZOL	/	/	/

注: /表示未有相关内容。赭曲霉毒素 A (ochratoxin A, OTA); 黄曲霉毒素 B₁ (aflatoxin B₁, AFB₁); 黄曲霉毒素 B₂ (aflatoxin B₂, AFB₂); 黄曲霉毒素 G₁ (aflatoxin G₁, AFG₁); 黄曲霉毒素 G₂ (aflatoxin G₂, AFG₂); 伏马毒素 B₁ (fumonisin B₁, FB1); 伏马毒素 B₂ (fumonisin B₂, FB₂); 伏马毒素 B₃ (fumonisin B₃, FB₃); 展青霉素(patulin, PAT); 呕吐毒素-3-葡萄糖苷(deoxynivalenol-3-glucoside, D3G); 杂色曲霉毒素(sterigmatocystin, STG); 恩镰孢菌素 A (enniatiin A, ENNA); 恩镰孢菌素 B (enniatiin B, ENNB); 恩镰孢菌素 B₁ (enniatiin B₁, ENNB₁); 恩镰孢菌素 A₁ (enniatiin A₁, ENNA₁); 串珠镰刀菌素(moniliformin, MON); 霉酚酸(mycophenolic acid, MPA); 玉米赤霉烯醇(zearalenol, ZEA); 青霉酸(penicillic acid, PA); 胶黏毒素(gliotoxin, GLI); 赭曲霉毒素 B (ochratoxin B, OTB); 蛇形毒素(diacetoxyscirpenol, DIA); 新茄病镰刀菌烯醇(neosolaniol, NEO); 15-乙酰基蛇形毒素(15-acetoxyscirpenol, 15ACDIA); 镰刀菌烯酮(fusarenon X, FUX); α -玉米赤霉烯醇(alpha-zearalenol, α -ZOL); β -玉米赤霉烯醇(beta-zearalenol, β -ZOL)。

2.1.2 小麦中管制毒素检出情况分析

DON 是由镰刀菌属产生的次级代谢产物, 属单端孢霉烯类化合物, 常见于温带大陆性气候下生长的谷物中^[14]。镰刀菌往往会引起小麦以及一些其他谷物产生赤霉病(fusarium head blight, FHB), DON 因其高发生率成为小麦中 FHB 发生的重要标志^[15]。已有研究表明, DON 会诱发动物厌食和呕吐, 还对免疫系统和肠道平衡以及肝肾器官有损伤^[16]。如表 3 所示, 2023 年小麦样品中 DON 的阳性率为 89.0%, 阳性样品平均值为 773.9 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》规定, 小麦中 DON 最大残留限量是 1000 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 所检阳性样品中, 超出限量标准的小麦有 31 份, 超标率 21.0%。2024 年 DON 毒素阳性率为 84.5%, 但阳性均值和超标率均有所下降, 分

表 3 2023 年和 2024 年小麦中 DON 和 ZEN 污染情况

Table 3 Contamination of *Triticum aestivum* L. with DON and ZEN in 2023 and 2024

年份	霉菌毒素	阳性率/%	超标率/%	平均值/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	中值/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	最大值/($\mu\text{g}/\text{kg}$)
2023 年	DON	89.0	21.0	773.9	268.5	10845.6
	ZEN	30.3	2.0	20.4	7.1	212.1
2024 年	DON	84.5	11.6	434.8	122.0	4242.0
	ZEN	29.1	1.2	11.2	5.0	67.2

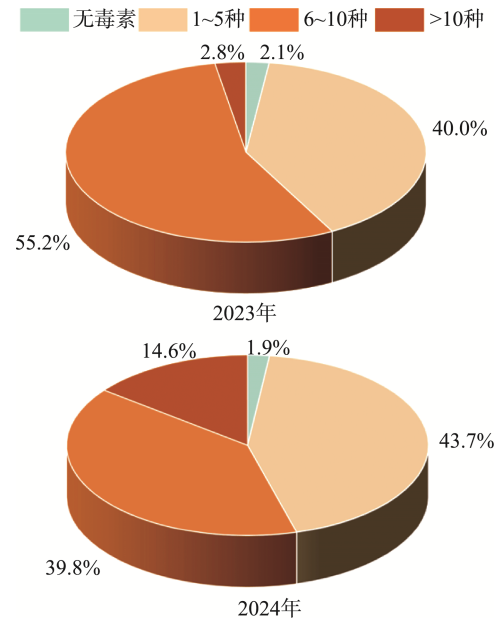


图 1 2023 年和 2024 年小麦中霉菌毒素污染组成
Fig.1 Composition of mycotoxin contamination in *Triticum aestivum* L. in 2023 and 2024

别为 434.8 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 11.6%。ZEN 是一种会导致动物生育力下降及高雌激素血症的非甾体毒素^[17], 首次在发霉玉米中被发现, 可由镰刀菌、禾谷镰刀菌、半镰刀菌等产生。ZEN 在结构上因与内源性雌激素相似而主要引起生殖系统的病变^[18]。2023 年 ZEN 的阳性率为 30.3%, 阳性样品平均值为 20.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 小麦中 ZEN 的最大残留限量为 60 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 所检阳性样品中, 超出限量标准的小麦有 4 份, 超标率为 2.00%。相较于 2023 年, 2024 年所采小麦样品中 DON 和 ZEN 的阳性率和阳性均值均有所下降。

2.1.3 呕吐毒素类隐蔽型毒素污染情况及相关性分析

在一些特定情况下, 霉菌毒素会通过另一分子结合而解毒, 这种产物就被称之为某一毒素的隐蔽性毒素^[2]。D3G、3ACDON、15ACDON 和 NIV 都是隐蔽性的脱氧雪腐镰刀菌烯醇。隐蔽性毒素在动物体消化道内分解后可能表现出比原型更高或相似的毒性, 也可能通过加工、消化等方式释放出毒素原型^[19-21]。其污染情况如表 4 所示, D3G 的污染程度为小麦样品中呕吐毒素类隐蔽性毒素中最高(2023 年: 43.5%、198.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 2024 年: 45.6%、193.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$)。当前研究也表明, D3G 是呕吐毒素类隐蔽型毒素的调查研究焦点^[22]。但值得注意的是, 虽然 3ACDON (2023 年: 21.4%,

35.7 μg/kg; 2024 年: 15.5%, 36.8 μg/kg)和 15ACDON (2023 年: 11.0%, 25.3 μg/kg; 2024 年: 2.9%, 55.9 μg/kg)的发生率没有 D3G 高, 但体外研究显示 15ACDON 和 3ACDON 的毒性或高于 D3G, 欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)曾将 15ACDON+3ACDON+D3G 的总可耐受摄入量设定为 1 μg/(kg bw d)^[23-24]。NIV 只在 2024 年的小麦中有检出, 阳性率为 11.7%, 阳性均值为 213.6 μg/kg。

此外, 本研究也发现这些隐蔽性毒素的浓度水平与 DON 原型浓度水平均具有正相关。图 2 显示了 2023 年和 2024 年 DON 及其隐蔽型毒素浓度之间的相关性, 由于 2023 年采集的小麦样品中未检出 NIV, 此处不做相关性分析。由图 2 可知, DON 与 15ACDON、3ACDON、D3G 和 NIV 呈正相关。其中, 2023 年 DON 与 15ACDON 的相关性最强, 而 2024 年与 DON 相关性最强的是 D3G 和 3ACDON。此外, 分别对 2023 年及 2024 年中 DON 和其他隐蔽性毒素浓度做线性回归分析, 2023 年线性回归方程为 $DON=462.476+22.076 \times 15ACDON+7.274 \times 3ACDON-1.015 \times D3G$, r^2 为 0.620; 2024 年线性回归方程 $DON=38.694-3.729 \times 15ACDON+1.071 \times D3G+28.996 \times 3ACDON-2.169 \times NIV$, r^2 为 0.997。结果同上, 根据平方相关系数亦可知小麦中 DON 污染水平与另外 4 种隐蔽性毒素具有较强相关性。

2.1.4 新型毒素检出情况

除各国法律法规有限量标准的毒素外, 一些新出现但未立法规定限量值的新型毒素也在小麦中被检出, 例如 AOH、恩镰孢菌素类(enniatiins, ENNs)、BEA、MON

等。如表 5 所示, 污染程度较为严重的是 AOH, 23 年的阳性均值达到了 116.4 μg/kg, AOH 是一种可通过阻碍细胞增殖的毒性化合物, 摄入过多可引起机体内分泌失调或癌变^[25]。ENNs 和 BEA 在小麦中的阳性率较高但浓度水平仅在 0~11.0 μg/kg, 二者毒性原理相似, 都可作为离子载体破坏离子稳态, 影响细胞活力和诱导细胞凋亡^[5,26-27];2024 年小麦中 AOH、ENNs 等新型毒素的阳性均值均低于 2023 年。有研究表明, MON 的毒性作用主要与暴露于高剂量霉菌毒素后的急性毒性有关, 会影响机体免疫系统, 增加感染风险^[28], 其污染情况见表 5。

2.2 样品产地分析

我国小麦主产区主要种植冬小麦, 按照小麦产地面积由大到小进行省份排序依次是河南、山东、河北、安徽和江苏等^[29]。表 6 分析了上述 5 个省份小麦中备受关注的霉菌毒素污染情况。由表 6 可知, 从阳性均值看, 2023 年河北产地小麦的 DON 污染情况最严重(阳性率 96.9%, 均值 1152.4 μg/kg), 显著高于河南产地($P<0.05$), 但与其他省份污染水平无显著差异($P>0.05$); 同年, 小麦 ZEN 的污染范围在 7.8~31.9 μg/kg, 各产地污染水平无显著差异($P>0.05$)。这可能是因为 DON 和 ZEN 发生率与 FHB 有关, 而这种植物病在气候相近的区域发生情况也接近, 这 5 个省份在小麦开花、成熟阶段具备温暖潮湿的天气条件, 有利于镰刀菌属的生长^[30]。AOH 和 BEA 在 5 省采集样品中均有检出。其中, 2023 年河南、安徽产地小麦中 AOH 的污

表 4 2023 年和 2024 年小麦中隐蔽型毒素毒素污染情况
Table 4 Contamination of *Triticum aestivum* L. with modified mycotoxins in 2023 and 2024

霉菌毒素	2023 年				2024 年			
	阳性率/%	均值 /(μg/kg)	中值 /(μg/kg)	最大值 /(μg/kg)	阳性率/%	均值 /(μg/kg)	中值 /(μg/kg)	最大值 /(μg/kg)
D3G	43.5	198.0	128.3	1184.4	45.6	193.4	113.8	699.3
NIV	0.0	0.0	0.0	0.0	11.7	213.6	159.4	583.8
3AcDON	21.4	35.7	26.7	146.2	15.5	36.8	27.2	95.3
15AcDON	11.0	25.3	17.7	83.6	2.9	55.9	47.0	85.9

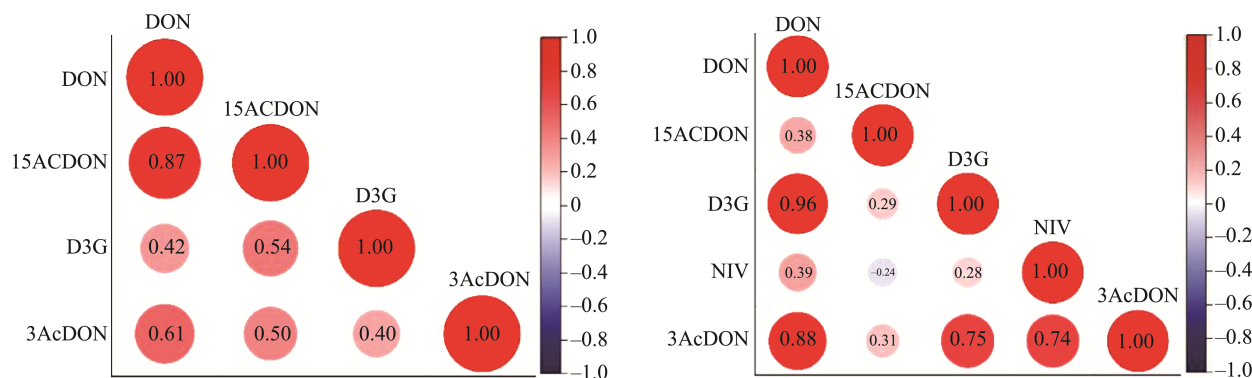


图 2 2023 年和 2024 年小麦中 DON 及其隐蔽型毒素浓度相关性分析
Fig.2 Correlation analysis of DON and its modified toxin concentrations in *Triticum aestivum* L. in 2023 and 2024

表 5 2023 年和 2024 年小麦中新型毒素污染情况
Table 5 Contamination of *Triticum aestivum* L. with emerging mycotoxins in 2023 and 2024

霉菌毒素	2023 年				2024 年			
	阳性率/%	均值 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	中值 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	最大值 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	阳性率/%	均值 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	中值 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	最大值 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)
AOH	71.7	116.4	40.5	1344.0	61.2	17.0	6.6	150.8
BEA	39.3	10.2	2.1	125.8	81.6	5.7	1.1	105.4
ENNA	26.9	1.4	0.9	5.8	16.5	0.4	0.3	1.1
ENNB	77.2	8.2	3.4	114.9	82.5	4.0	1.1	72.7
ENNB ₁	75.9	4.7	1.8	52.7	64.1	2.1	0.9	21.4
ENNA ₁	55.9	1.9	0.9	11.7	43.7	0.5	0.3	4.4
MON	18.6	28.8	16.0	114.5	27.2	15.6	7.0	75.2

染情况明显高于其他几省($P<0.05$)。2024 年各产地小麦 DON 污染范围在 85.0~661.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 污染程度较轻, 河北、江苏、山东污染水平较 2023 年显著下降($P<0.05$); ZEN 污染范围在未检出~10.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 河北、安徽和山东等地污染水平较 23 年也显著下降($P<0.05$); 河南、安徽产地的 AOH 和河南、河北产地的 BEA 污染程度明显减轻($P<0.05$)。具体数值如表 6 所示。

2.3 检出方法的对比分析

2.3.1 DON 不同检测方法结果分析

根据试剂盒说明书得到 DON 的检出限为 200 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。由表 7 可知, 2023 年和 2024 年 ELISA 法检测 DON 的总体阳性率都远低于 LC-MS/MS 法, 仅为 LC-MS/MS 法的 50%左右, 这一情况出现的原因是某些样品 DON 含量低, 仅被 LC-MS/MS 法检出。因此, 为判断 ELISA 试剂盒检出限之上的测定数据与 LC-MS/MS 法是否接近, 利用试剂盒的检出限和 DON 在小麦中的限量值(1000 $\mu\text{g}/\text{kg}$)分别作为区间范围点, 对两种方法的检测结果分区间分析。结果表明, 小麦中 DON 残留量超出试剂盒检出限时,

两种方法检测结果均无显著性差异($P>0.05$)。这也说明本试验中使用的酶联免疫试剂盒对于小麦基质中 DON 残留的检测结果的准确性较好。

2.3.2 ZEN 不同检测方法结果分析

如表 8 所示, 相较于 LC-MS/MS 法, ELISA 法检测小麦中 ZEN 的阳性率偏高, 2023 年和 2024 年阳性率分别为 91.5%和 92.2%, 而 LC-MS/MS 法阳性率仅有 28.7%和 29.1%。以试剂盒的检出限(20 $\mu\text{g}/\text{kg}$)和 ZEN 在小麦中的限量值(60 $\mu\text{g}/\text{kg}$)分别作为区间范围点, 对两种方法的检测结果分区间分析。结果显示, 两种浓度区间 ELISA 法检测 ZEN 的结果都显著高于 LC-MS/MS 法($P<0.05$)。这可能是由于实验室所使用的试剂盒生物耗材特异性识别能力较低, 对 ZEN 的结构类似物 α -ZOL、 β -ZOL、 α -玉米赤霉醇、 β -玉米赤霉醇和玉米赤霉酮等产生交叉反应; 其次, ELISA 法本身易受环境影响, 本研究周期较长, 气温和湿度的变化可能导致结果不准确; 且 ELISA 法的前处理较为简便, 样品基质效应也可能对酶联免疫过程造成一定影响。

表 6 不同产地小麦霉菌毒素污染情况
Table 6 Mycotoxin contamination of *Triticum aestivum* L. from different origins

年份	霉菌毒素	河南 (23 年: 31 份 24 年: 24 份)		河北 (23 年: 32 份 24 年: 17 份)		安徽 (23 年: 12 份 24 年: 12 份)		江苏 (23 年: 19 份 24 年: 19 份)		山东 (23 年: 33 份 24 年: 17 份)	
		阳性率 /%	均值 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	阳性率 /%	均值 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	阳性率 /%	均值 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	阳性率 /%	均值 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	阳性率 /%	均值 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)
2023	BEA	35.5	9.2 ^{Aa}	21.9	3.4 ^{Aa}	75.0	8.2 ^{Aa}	57.9	4.8 ^{Aa}	30.3	13.5 ^{Aa}
	DON	83.9	350.7 ^{Ab}	96.9	1152.4 ^{Aa}	83.3	460.8 ^{Aab}	100.0	789.6 ^{Aab}	84.9	1014.0 ^{Aab}
	ZEN	48.4	14.5 ^{Aa}	25.0	31.9 ^a	25.0	16.7 ^{Aa}	26.3	7.8 ^{Aa}	24.2	27.8 ^a
	AOH	100.0	230.2 ^{Aa}	37.5	14.4 ^{Ab}	100.0	193.3 ^{Aa}	94.7	33.0 ^{Ab}	54.6	21.9 ^{Ab}
2024	BEA	87.5	0.9 ^{Bb}	52.9	0.6 ^{Bb}	100.0	6.2 ^{Ab}	68.4	20.9 ^{Aa}	100.0	3.9 ^{Ab}
	DON	91.7	661.1 ^{Aa}	94.1	85.0 ^{Ba}	100.0	595.1 ^{Aa}	73.7	162.5 ^{Ba}	64.7	156.8 ^{Ba}
	ZEN	41.7	10.6 ^{Aa}	/	/	91.7	6.3 ^{Ba}	5.3	7.8 ^{Aa}	/	/
	AOH	66.7	17.5 ^{Bab}	70.6	4.9 ^{Ab}	91.7	37.2 ^{Ba}	31.6	8.27 ^{Ab}	41.2	14.4 ^{Aab}

注: 相同指标不同小写字母表示同一年份不同省份毒素浓度水平存在显著差异($P<0.05$); 相同指标不同大写字母表示同一省份不同年份毒素浓度水平存在显著差异($P<0.05$); /表示未检出。

表 7 LC-MS/MS 法和 ELISA 法测定小麦中 DON 的含量
Table 7 Determination of DON content in *Triticum aestivum* L. by LC-MS/MS and ELISA

组别	2023 年			2024 年		
	阳性率/%	>1000 $\mu\text{g}/\text{kg}$	200~1000 $\mu\text{g}/\text{kg}$	阳性率/%	>1000 $\mu\text{g}/\text{kg}$	200~1000 $\mu\text{g}/\text{kg}$
ELISA 法	48.8	2199.0 ^a	453.8 ^a	43.7	1968.9 ^a	521.1 ^a
LC-MS/MS 法	88.4	2502.5 ^a	459.6 ^a	84.5	2020.8 ^a	496.7 ^a

注: 相同指标不同小写字母表示存在显著差异($P < 0.05$), 下同。

表 8 LC-MS/MS 法和 ELISA 法测定小麦中 ZEN 的含量
Table 8 Determination of ZEN content in *Triticum aestivum* L. by LC-MS/MS and ELISA

组别	2023 年			2024 年		
	阳性率/%	>60 $\mu\text{g}/\text{kg}$	20~60 $\mu\text{g}/\text{kg}$	阳性率/%	>60 $\mu\text{g}/\text{kg}$	20~60 $\mu\text{g}/\text{kg}$
ELISA 法	91.5	88.5 ^a	40.0 ^a	92.2	79.4 ^a	43.9 ^a
LC-MS/MS 法	28.7	17.7 ^b	2.0 ^b	29.1	5.0 ^b	2.0 ^b

3 讨论

本研究采集了中国小麦主产区样品进行霉菌毒素检测, 对不同年份、不同省份和不同检测方法的毒素检出情况进行分析。研究表明, 小麦被霉菌毒素污染的风险较高, 2 年收集的 248 份样品仅有 5 份未检出霉菌毒素, 被污染的样品中, 毒素共存的现象较为严重。同前人的研究结果一样^[31-33], DON 仍然是小麦中污染率和含量最高的霉菌毒素, 且高于报道的 2010—2017 年中国小麦样品中 DON 的均值(250.8 $\mu\text{g}/\text{kg}$)^[34]。受管制的毒素中, ZEN 是除 DON 之外污染第二严重的霉菌毒素, 小麦中 DON 和 ZEN 的发生主要由谷物收割前或储存条件不当被镰刀菌属污染所引起。FBs、OTA 和 AFs 在小麦中的污染程度较小, 这也与 ZHAO 等^[33]的研究结果相同。

本研究还发现, 多种新型毒素在小麦中暴露出较高污染率和污染水平, 例如 AOH (67.3%)、BEA (56.9%) 和 ENNB (79.4%)。过去的调查结果证实 BEA、ENN 是污染最普遍的新型毒素, 也只有当新型毒素的浓度水平远超于一般情况时才会对动物造成不良影响, 但这些新型毒素与受管制的其他毒素同时污染作物时, 其对动物的毒性可能会产生协同或累加效应, 造成动物健康和生产性能的危害^[35]。

在此次小麦霉菌毒素含量分析中, 试验采取了 ELISA 法和 LC-MS/MS 法两种检测方法。从检测结果来看, DON 含量在 ELISA 试剂盒检出限之上的检测结果与 LC-MS/MS 法接近, 其阳性率低于 LC-MS/MS 法是因为检出限差异。而检测小麦中 ZEN 时, 不论是哪一种浓度水平, ELISA 法检测结果都远高于 LC-MS/MS 法, 这一结果与余容等^[36]、贾卫昌等^[37]和董艾青等^[38]研究结果相似, ELISA 法早已被证实具有便捷、经济和快速等优点, 检测结果也能满足市场要求。但本研究用到的试剂盒对于小麦基质中 ZEN 的测定结果假阳性概率较大, 可能造成结果误导, 在实际检测应用中, 将两种方法结合使用更为有效。

总体来看, 2024 年霉菌毒素污染情况较 2023 年有所好转, 这可能是由于 2024 年小麦开花成熟期产地降水量较少, 而降雨量是产毒真菌定植和毒素暴露的关键驱动因

素, 温暖而潮湿的环境有助于镰刀菌属的生长繁殖, 随即带来如 DON、ZEN 及其他镰刀菌属所产毒素的污染^[39-43]。

4 结论

本研究对 2 年采集到的 248 份小麦样品中霉菌毒素进行分析。结果表明, 基于实验室方法检出限得到 2023 年和 2024 年总体阳性率分别为 97.9% 和 98.1%, 各类毒素的检出率在 0.4%~87.1%, 平均污染水平在 0.4~604.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。其中, 小麦中 DON、ZEN、D3G 和 AOH 的污染程度较高。24 年霉菌毒素整体污染情况较 23 年有所好转。此外, 本研究也给小麦中多毒素共存现象提供了依据。从产地来看, 各省地理位置接近, 霉菌毒素污染情况差异不明显且与年份有较大关联。此外, 由于各地样本数量不一, 此次试验结果并不能完全反映各省真实毒素污染情况, 未来还需要增加样本采集数量, 并扩大采集范围, 以期为行业相关人员提供更多数据参考。

参考文献

- MAULENBAY A, RSALIYEV A. Fungal disease tolerance with a focus on wheat: A review [J]. *Journal of Fungi*, 2024, 10(7): 482.
- LESLIE JF, MORETTI A, MESTERHÁZY Á, et al. Key global actions for mycotoxin management in wheat and other small grains [J]. *Toxins*, 2021, 13(10): 725.
- XU XM, NICHOLSON P, THOMSETT MA, et al. Relationship between the fungal complex causing fusarium head blight of wheat and environmental conditions [J]. *Phytopathology*, 2008, 98(1): 69-78.
- WANG J, ZHANG F, YAO T, et al. Risk assessment of mycotoxins, the identification and environmental influence on toxin-producing ability of *Alternaria alternata* in the main Tibetan Plateau Triticaceae crops [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 13: 36824588.
- HASUDA AL, BRACARENSE APFRL. Toxicity of the emerging mycotoxins beauvericin and enniatins: A mini-review [J]. *Toxicon*, 2024, 239: 107534.
- KHAN R, ANWAR F, GHAZALI FM. A comprehensive review of mycotoxins: Toxicology, detection, and effective mitigation approaches [J]. *Heliyon*, 2024, 10(8): e28361.
- YU J, PEDROSO IR. Mycotoxins in cereal-based products and their impacts on the health of humans, livestock animals and pets [J]. *Toxins*, 2023, 15(8): 480.
- YANG Y, LI G, WU D, et al. Recent advances on toxicity and determination methods of mycotoxins in foodstuffs [J]. *Trends Food Science and Technology*, 2020, 96: 233-252.
- CASU A, CAMARDO LM, TOSCANO P, et al. Changing climate, shifting mycotoxins: A comprehensive review of climate change impact on

- mycotoxin contamination [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2024, 23(2): e13323.
- [10] 朱风华, 陈甫, 徐进栋, 等. 2018年山东省饲料原料及配合饲料霉菌毒素污染状况调查[J]. *中国畜牧杂志*, 2019, 55(8): 151–156.
ZHU FH, CHEN F, XU JD, *et al.* Investigation on mycotoxin contamination of feed ingredients and compound feed in Shandong Province in 2018 [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2019, 55(8): 151–156.
- [11] 程传民, 柏凡, 王宇萍, 等. 2013年四川省饲料原料中霉菌毒素污染情况调查[J]. *饲料博览*, 2014(7): 38–41.
CHENG CM, BAI F, WANG NP. Investigation of mycotoxin contamination of feed ingredients in Sichuan Province in 2013 [J]. *Feed Review*, 2014(7): 38–41.
- [12] 苗丽. 常用饲料原料中玉米赤霉烯酮和呕吐毒素含量研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015.
MIAO L. A filed investigation of zearalenone and deoxynivalenol pollution in the common used feedstuffs [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2015.
- [13] 张大伟, 杨海麟, 华宇, 等. 玉米中隐蔽性毒素和新型毒素污染情况分析——基于2020年中国玉米主产区采样情况[J]. *粮油食品科技*, 2021, 29(6): 119–130.
ZHANG DW, YANG HL, HUA Y, *et al.* Analysis on the mask-mycotoxins and emerging-mycotoxins in maize—Samples from the maize cultivated region in 2020, China [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2021, 29(6): 119–130.
- [14] CHEN C, FRANK K, WANG T, *et al.* Global wheat trade and codex *Alimentarius* guidelines for deoxynivalenol: A mycotoxin common in wheat [J]. *Global Food Security*, 2021, 29: 100538.
- [15] GOLGE O, KABAK B. Occurrence of deoxynivalenol and zearalenone in cereals and cereal products from Turkey [J]. *Food Control*, 2020, 110: 106982.
- [16] 张璐瑶, 范志勇, 王永伟, 等. 饲料中呕吐毒素生物脱毒技术研究进展[J]. *饲料工业*, 2024, 45(11): 133–138.
ZHANG LY, FAN ZY, WANG YW, *et al.* Progress of biological detoxification technology of vomitoxin in feeds [J]. *Feed Industry*, 2024, 45(11): 133–138.
- [17] D'MELLO JPF, PLACINTA CM, MACDONALD AMC. Fusarium mycotoxins: A review of global implications for animal health, welfare and productivity [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 1999, 80(3): 183–205.
- [18] CAI P, LIU S, TU Y, *et al.* Toxicity, biodegradation, and nutritional intervention mechanism of zearalenone [J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 911: 168648.
- [19] TAN H, ZHOU H, GUO T, *et al.* Recent advances on formation, transformation, occurrence, and analytical strategy of modified mycotoxins in cereals and their products [J]. *Food Chemistry*, 2023, 405: 134752.
- [20] ZHANG H, WU L, LI W, *et al.* Conversion of deoxynivalenol-3-glucoside to deoxynivalenol during chinese steamed bread processing [J]. *Toxins*, 2020, 12(4): 225.
- [21] 谭洋岚, 刘娜, 朱闰月, 等. 隐蔽型真菌毒素的主要类型与分析方法研究进展[J]. *中国科学: 化学*, 2016, 46(3): 251–256.
TAN YL, LIU N, ZHU RY, *et al.* Major types of masked mycotoxins and state-of-the-art methodological advance for their detection [J]. *Scientia Sinica (Chimica)*, 2016, 46(3): 251–256.
- [22] 余佃贞, 田野, 武爱波. 粮食中隐蔽型真菌毒素污染的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(2): 349–354.
YU DZ, TIAN Y, WU AIB. Research advance of masked mycotoxins contaminated in grains [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2018, 9(2): 349–354.
- [23] 杨信, 李布勇, 范小平, 等. 饲料中隐蔽呕吐毒素研究进展[J]. *中国饲料*, 2017(21): 7–10, 15.
YANG X, LI BY, FAN XP, *et al.* Research advances on hidden deoxynivalenol in feed [J]. *China Feed*, 2017(21): 7–10, 15.
- [24] EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain, KNUTSEN HK, ALEXANDER J, *et al.* Risks to human and animal health related to the presence of deoxynivalenol and its acetylated and modified forms in food and feed [J]. *EFSA Journal*, 2017, 15(9): e04718.
- [25] NAGDA A, MEENA M. Alternaria mycotoxins in food and feed: Occurrence, biosynthesis, toxicity, analytical methods, control and detoxification strategies [J]. *Food Control*, 2024, 158: 110211.
- [26] DE-SÁ SVM, SOUSA-MONTEIRO C, FERNANDES JO, *et al.* Evaluating the human neurotoxicity and toxicological interactions impact of co-occurring regulated and emerging mycotoxins [J]. *Food Research International*, 2024, 184: 114239.
- [27] 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]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2023, 38(11): 9–17.
- [28] JONSSON M, ATOSUO J, JESTOI M, *et al.* Repeated dose 28-day oral toxicity study of moniliformin in rats [J]. *Toxicology Letters*, 2015, 233(1): 38–44.
- [29] 赵广才. 中国小麦种植区域的生态特点[J]. *麦类作物学报*, 2010, 30(4): 684–686.
ZHAO GC. Ecology characteristics of Chinese wheat planting region [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(4): 684–686.
- [30] KRAUTHAUS EN, HERMANN J, WEINER T, *et al.* Mehrjährige erhebungen zum vorkommen von ährenfusarien und dem mykotoxin deoxynivalenol in getreide aus rheinland-pfalz [J]. *Gesunde Pflanzen*, 2003, 55(5): 136–143.
- [31] XU W, HAN X, LI F. Co-occurrence of multi-mycotoxins in wheat grains harvested in Anhui Province, China [J]. *Food Control*, 2019, 96: 180–185.
- [32] SANTOS ID, PIZZUTTI IR, DIAS JV, *et al.* Mycotoxins in wheat flour: Occurrence and co-occurrence assessment in samples from Southern Brazil [J]. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 2021, 14(2): 151–161.
- [33] ZHAO J, CHENG T, XU W, *et al.* Natural co-occurrence of multi-mycotoxins in unprocessed wheat grains from China [J]. *Food Control*, 2021, 130: 108321.
- [34] WANG X, YANG D, QIN M, *et al.* Risk assessment and spatial analysis of deoxynivalenol exposure in Chinese population [J]. *Mycotoxin Research*, 2020, 36(4): 419–427.
- [35] KOLAWOLE O, SIRI-ANUSORNSAK W, PETCHKONGKAEW A, *et al.* A systematic review of global occurrence of emerging mycotoxins in crops and animal feeds, and their toxicity in livestock [J]. *Emerging Contaminants*, 2024, 10(3): 100305.
- [36] 余容, 杨发树, 杜雪莉, 等. 6种酶联免疫试剂盒在饲料呕吐毒素检测中的准确性评价[J]. *中国畜牧杂志*, 2015, 51(6): 73–77.
SHE R, YANG FS, DU XL, *et al.* The accuracy evaluation of 6 kinds of ELISA kits for deoxynivalenol (DON) detection in feeds and raw material [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2015, 51(6): 73–77.
- [37] 贾卫昌, 朱寅. 高效液相色谱法与酶联免疫法检测小麦中呕吐毒素的比较研究[J]. *粮食与食品工业*, 2015, 22(3): 97–100.
JIA WC, ZHU Y. A comparative research on the determination of deoxynivalenol in wheat with HPLC method and ELISA [J]. *Cereal & Food Industry*, 2015, 22(3): 97–100.
- [38] 董艾青, 刘少文, 柏凡, 等. 不同方法检测霉菌毒素的比较研究[J]. *中国饲料*, 2017(4): 27–30.
DONG AIQ, LIU SW, BAI F, *et al.* Study on comparison of the different method to detect concentration of mycotoxins [J]. *China Feed*, 2017(4): 27–30.
- [39] 敬樊, 李勇刚, 王静之, 等. 气候变化对商洛旱地冬小麦农艺性状的影响[J]. *山西农业科学*, 2024, 52(4): 84–91.
JIN F, LI YG, WANG JZ, *et al.* The impact of climate change on the agronomic traits of winter wheat in the dryland of Shangluo [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2024, 52(4): 84–91.
- [40] 中国气象局, 2023年中国气候公报[EB/OL]. (2024-02-23) [2024-11-28]. https://www.cma.gov.cn/zfxg/gk/gk/qxbg/202402/t20240223_6084527.html
China Meteorological Administration, China climate bulletin [EB/OL]. (2024-02-23) [2024-11-28]. https://www.cma.gov.cn/zfxg/gk/gk/qxbg/202402/t20240223_6084527.html
- [41] 央视网, 国家气候中心: 今春全国平均气温为历史同期最高[EB/OL]. (2024-06-03) [2024-11-30]. <https://news.cctv.cn/2024/06/03/ARTIEot4lafSK8MW7fSYTqqV240603.shtml>
China Central Television, National Climate Centre: National average temperature this spring is the highest in the same period in history [EB/OL]. (2024-06-03) [2024-11-30]. <https://news.cctv.cn/2024/06/03/ARTIEot4lafSK8MW7fSYTqqV240603.shtml>
- [42] FRANZ E, BOOIJ K, VANDER-FELS-KLERX I. Prediction of deoxynivalenol content in dutch winter wheat [J]. *Journal of Food Protection*, 2009, 72(10): 2170–2177.
- [43] ZHANG C, QU Z, HOU J, *et al.* Contamination and control of mycotoxins in grain and oil crops [J]. *Microorganisms*, 2024, 12(3): 567.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)