

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250529001

引用格式: 解宇菲, 乔海鸥, 胡佳薇, 等. 2022—2024年陕西省小麦和小麦粉中镰刀菌毒素和交链孢毒素的污染状况及分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(16): 94–99.

XIE YF, QIAO HO, HU JW, *et al.* Contamination and analysis of fusarium and alternaria toxins in wheat and wheat flour in Shaanxi Province, 2022—2024 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(16): 94–99. (in Chinese with English abstract).

2022—2024年陕西省小麦和小麦粉中镰刀菌毒素和交链孢毒素的污染状况及分析

解宇菲, 乔海鸥, 胡佳薇, 赵迪*

(陕西省疾病预防控制中心, 西安 710054)

摘要: **目的** 了解陕西省小麦和小麦粉中镰刀菌毒素和交链孢毒素污染情况。**方法** 2022—2024年在陕西省9个地市随机采集小麦和小麦粉共140份,采用高效液相色谱-质谱法检测样品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)、3-乙酰脱氧雪腐镰刀菌烯醇(3-acetyldeoxynivalenol, 3-AcDON)、15-乙酰脱氧雪腐镰刀菌烯醇(15-acetyldeoxynivalenol, 15-AcDON)、雪腐镰刀菌烯醇(nivalenol, NIV)、玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEN)、细交链孢菌酮酸(tenuazonic acid, TeA)、交链孢酚(alternariol, AOH)、交链孢酚单甲醚(alternariol monomethyl ether, AME)、赭毒素(tentoxin, TEN)的含量。**结果** 陕西省小麦和小麦粉中镰刀菌毒素和交链孢毒素均检出。小麦中DON、3-AcDON、15-AcDON、NIV、ZEN、TeA、TEN和AME的检出率分别为83.3% (50/60)、5.00% (3/60)、10.0% (6/60)、11.6% (7/60)、8.33% (5/60)、100% (60/60)、100% (60/60)和98.3% (59/60)。小麦粉中DON、TeA、TEN和AME的检出率分别为87.5% (70/80)、96.2% (77/80)、88.7% (71/80)和63.7% (51/80)。阳性样品中DON与15-AcDON、TeA与TEN含量之间表现出很强的正相关性。小麦粉DON的膳食暴露量为959.8 ng/(kg·bw·d),小于每日摄入耐受量值,TeA、TEN、AME的膳食暴露量分别为159.2、18.1和2.30 ng/(kg·bw·d),小于毒理学关注阈值。**结论** 2022—2024年陕西省小麦和小麦粉普遍受到镰刀菌毒素和交链孢毒素污染,TeA和TEN检出率最高,DON次之。小麦粉镰刀菌毒素和交链孢毒素的暴露风险处于可接受范围内。

关键词: 小麦; 小麦粉; 镰刀菌毒素; 交链孢毒素; 污染

Contamination and analysis of fusarium and alternaria toxins in wheat and wheat flour in Shaanxi Province, 2022—2024

XIE Yu-Fei, QIAO Hai-Ou, HU Jia-Wei, ZHAO Di*

(Center for Disease Control and Prevention of Shaanxi Province, Xi'an 710054, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the contamination of fusarium and alternaria toxins in wheat and wheat flour in Shaanxi Province. **Methods** A total of 140 samples of wheat and wheat flour were randomly collected in circulation of 9 cities from 2022 to 2024. Deoxynivalenol (DON), 3-acetyldeoxynivalenol (3-AcDON),

收稿日期: 2025-05-29

第一作者: 解宇菲(1993—),女,硕士,研究实习员,主要研究方向为食品理化检验。E-mail: 1811617545@qq.com

*通信作者: 赵迪(1987—),女,硕士,助理研究员,主要研究方向为食品理化检验。E-mail: 254181360@qq.com

15-acetyldeoxynivalenol (15-AcDON), nivalenol (NIV), zearalenone (ZEN), tenuazonic acid (TeA), alternariol (AOH), alternariol monomethyl ether (AME) and tentoxin (TEN) were determined by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. **Results** The fusarium and alternaria toxins were detected in wheat and wheat flour. The detection rates of DON, 3-AcDON, 15-AcDON, NIV, ZEN, TeA, TEN, AME in wheat were 83.3% (50/60), 5.00% (3/60), 10.0% (6/60), 11.6% (7/60), 8.33% (5/60), 100% (60/60), 100% (60/60) and 98.3% (59/60), respectively. The detection rates of DON, TeA, TEN, AME in wheat flour were 87.5% (70/80), 96.2% (77/80), 88.7% (71/80) and 63.7% (51/80), respectively. A strong positive correlation between DON and 15-AcDON content was demonstrated in the positive samples, so was between TeA and TEN content. The DON dietary exposure was 959.8 ng/(kg · bw · d), which was less than the corresponding tolerable daily intake value. The TeA, TEN, AME dietary exposures were 159.2, 18.1 and 2.30 ng/(kg · bw · d), which were below the corresponding threshold of toxicological concern values in wheat flour. **Conclusion** Wheat and wheat flour in Shaanxi Province are generally contaminated with fusarium and alternaria toxins from 2022 to 2024, with the highest detection rates of TeA and TEN, following by DON. The fusarium and alternaria toxins exposure risk of wheat flour are within an acceptable risk range.

KEY WORDS: wheat; wheat flour; fusarium toxins; alternaria toxins; contamination

0 引言

镰刀菌毒素是由镰刀菌产生的一类有毒次级代谢产物。小麦赤霉病的主要病原菌就是镰刀菌, 因此小麦很容易受到镰刀菌毒素的污染。交链孢毒素是由丝状真菌交链孢霉产生的一类有毒次级代谢产物。交链孢霉在自然界广泛分布, 是一种腐生菌和植物致病菌, 最常污染小麦、高粱、大麦等谷物。镰刀菌毒素脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)、3-乙酰脱氧雪腐镰刀菌烯醇(3-acetyldeoxynivalenol, 3-AcDON)、15-乙酰脱氧雪腐镰刀菌烯醇(15-acetyldeoxynivalenol, 15-AcDON)可引起人体免疫系统失调、消化系统紊乱^[1-3], 雪腐镰刀菌烯醇(nivalenol, NIV)具有免疫毒性、基因毒性和生长生殖毒性^[4-6], 玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEN)具有很强的生殖毒性和致畸作用^[7-8]。交链孢毒素交链孢酚(alternariol, AOH)和交链孢酚单甲醚(alternariol monomethyl ether, AME)具有较强的致突变性和遗传毒性作用^[9-11], 细交链孢菌酮酸(tenuazonic acid, TeA)具有细胞毒性和急性毒性^[12-13], 腾毒素(tentoxin, TEN)具有植物毒性^[14]。陕西是我国农业的发源地之一, 主产粮食作物小麦, 同时陕西饮食以面食为主, 小麦具有十分庞大的消费量, 因此长期监测陕西小麦镰刀菌毒素和交链孢毒素的污染情况十分必要。

根据研究报道^[15-19], 小麦易受镰刀菌毒素 DON、3-AcDON、15-AcDON、NIV、ZEN 和交链孢毒素有 TeA、AOH、AME、TEN 的侵染。GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》中规定小麦和小麦粉中镰刀菌毒素 DON 和 ZEN 的限量值为 1000 μg/kg 和 60 μg/kg。欧盟制定的谷物及其制品中 DON 的限量标准为 750 μg/kg。部分地区开展了谷物中 DON 和 4 种交链孢毒素的膳食暴露

风险评价, 研究结果显示 DON 的膳食暴露无显著慢性摄入风险, 但存在急性暴露风险, TeA 和 TEN、AOH 的膳食暴露无显著慢性摄入风险, AME 的膳食暴露量水平较高^[20-23]。本研究采用高效液相色谱-质谱法测定小麦和小麦粉中镰刀菌毒素和交链孢霉毒素的含量, 分析陕西小麦和小麦粉的污染情况, 为食品安全风险监测和评估提供可靠的数据支持, 为小麦风险预警和防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

Dionex U3000 超高效液相色谱仪(美国赛默飞世尔科技公司); 5500Q-trap 三重四极杆串联质谱仪(配电喷雾离子化源和流动注射泵, 美国 AB SCIEX 公司); Multi ReaX EU 涡旋振荡器(美国海道夫公司); SQP 分析天平[感量 0.1 mg, 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司]; MFV-24 氮吹仪(广州得泰仪器科技有限公司); CR22N 离心机(日本 HITACHI 公司); Milli-Q 型超纯水制备系统(美国 Millipore 公司); Oasis HLB 固相萃取柱(200 mg/6 cc, 美国 Waters 公司)。

乙腈、甲醇、甲酸(色谱纯, 德国 MERCK 公司); DON、3-AcDON、15-AcDON、NIV、ZEN(纯度>99%)、TeA、AOH、TEN、AME(质量浓度 100 μg/mL)、¹³C₁₅-DON、¹³C₁₇-3-AcDON、¹³C₁₅-NIV、¹³C₁₈-ZEN、¹³C₁₄-AOH、¹³C₁₅-AME、¹³C₁₀-TeA(质量浓度 10.0 μg/mL)、¹³C₁₇-15-AcDON(质量浓度 25.0 μg/mL)(美国 Romer 公司); TEN-D₃(纯度>99%, 加拿大 TRC 公司)。

1.2 样品采集

2022—2024 年在陕西省 9 个地级市采集小麦 60 份、小麦粉 80 份(表 1)。小麦采自种植环节。小麦粉采自市售

小麦粉供应量大的农贸市场或商超, 样品产地均来自陕西省。每份样品一式两份(1份待检, 1份备样), 实验室粉碎后 4 °C 密封保存, 统一检测。

表 1 小麦和小麦粉采样地点分布情况表

Table 1 Distribution of wheat and wheat flour sampling sites

地市名称	小麦采样数	小麦粉采样数	小麦粉产地采样数
西安市	9	20	15
铜川市	4	12	10
宝鸡市	9	13	12
咸阳市	11	14	27
渭南市	16	16	13
延安市	0	2	0
汉中市	5	2	0
安康市	2	1	0
商洛市	4	0	0
合计	60	80	80

1.3 检测方法

根据《国家食品污染物和有害因素风险监测工作手册》中的食品中真菌毒素多组分测定的标准操作程序^[24]。准确称取 5.0 g 样品(精确至 0.001 g)于 50 mL 离心管, 加入 20 mL 乙腈-水-甲酸(70:29:1, V:V:V)溶液, 涡旋 1 min, 振荡提取 30 min, 取 1.0 mL 提取液至 1.5 mL 离心管中, 10000 r/min 离心 5 min。准确移取 0.5 mL 上清液于另一 1.5 mL 离心管中, 加入 1.0 mL 水, 涡旋混匀, 4 °C 下 10000 r/min 离心 5 min, 吸取上清液过 0.22 μm 滤膜。吸取 180 μL 样品滤液于 300 μL 内插管中, 再加入 20 μL 混合内标溶液(1.25 μg/mL ¹³C₁₅-DON、¹³C₁₇-3-AcDON、¹³C₁₇-15-AcDON、¹³C₁₅-NIV、¹³C₁₈-ZEN), 液相色谱-串联质谱法测定镰刀菌毒素的含量。

根据《国家食品污染物和有害因素风险监测工作手册》中的食品中交链孢霉毒素测定的标准操作程序^[24]。称取 5 g 试样(精确至 0.001 g)于 50 mL 刻度离心管中, 加入 200 μL 混合内标工作液(500 ng/mL TeA-D₁₃、200 ng/mL AOH-D₂、20 ng/mL AME-D₃、100 ng/mL TEN-D₃), 漩涡混匀 10 s, 静置过夜。样品加入 25 mL 磷酸二氢钠-甲醇-乙腈混合提取液, 盖紧盖子, 漩涡混匀 10 s, 高速涡旋振荡器上振荡提取 15 min, 于 4 °C, 10000 r/min 离心 10 min, 取 5.0 mL 上清液, 加入 15 mL 0.05 mol/L 磷酸二氢钠溶液(pH 3.0), 混匀, 10000 r/min 离心 10 min, 上清液待净化。HLB 固相萃取柱依次用 5 mL 甲醇和 5 mL 水活化。将稀释后的样品提取液全部过柱, 再用 5 mL 20% 甲醇溶液淋洗, 于负压状态下抽干柱子 5 min。依次用 5 mL 甲醇和 5 mL 乙腈洗脱, 合并洗脱液于小试管中, 45 °C 水浴氮吹近干, 残渣先用 200 μL 甲醇复溶, 漩涡混匀 10 s, 再加 1.8 mL 水, 漩涡混

匀 10 s, 于 4 °C, 12000 r/min 离心 10 min, 液相色谱-串联质谱分析仪上清液测定交链孢霉毒素的含量。

1.4 暴露风险评估

1.4.1 小麦粉的镰刀菌毒素、交链孢霉毒素膳食暴露量

本研究采用点评估方法, 根据公式(1)计算镰刀菌毒素、交链孢霉毒素膳食暴露量。

$$D=X \times C/W \quad (1)$$

式中: D 为镰刀菌毒素、交链孢霉毒素膳食暴露量, ng/(kg · bw · d); X 为小麦粉的日均摄入量, g/d; C 为小麦粉中镰刀菌毒素、交链孢霉毒素的含量, μg/kg; W 为个体体重, 60 kg。

1.4.2 小麦粉膳食中镰刀菌毒素、交链孢霉毒素的暴露风险评估

在镰刀菌毒素膳食暴露量评估基础上, 利用每日摄入耐容量(tolerable daily intake, TDI)来评估镰刀菌毒素长期膳食摄入风险。当 $D \leq TDI$ 时, 表示该污染物的健康风险可以接受, D 越小, 风险越小; 当 $D > TDI$ 时, 表示有不可接受的健康风险, D 越大, 风险越大。

在交链孢霉毒素膳食暴露量评估基础上, 利用毒理学关注阈值(threshold of toxicological concern, TTC)评估交链孢霉毒素的膳食暴露风险。若暴露量 $D \leq TTC$ 值, 说明该污染物的食品安全风险可接受; 若暴露量 $D > TTC$ 值, 说明该污染物的食品存在一定的安全风险, 需要引起关注。

1.5 数据处理

镰刀菌毒素和交链孢霉毒素标准曲线的线性方程和结果数据通过 AB SCIEX Analyst Software 工作站分析得到。采用 WPS Office Excel 2023(16120)软件对镰刀菌毒素和交链孢霉毒素污染水平的实验数据进行处理和分析。参考总膳食研究低水平数据处理办法, 未检出数据的比例小于等于 60%, 所有未检出数据用 1/2 检出限(imit of detection, LOD)替代; 未检出数据的比例高于 60%时, 所有未检出数据用 LOD 替代^[21-22,25]。利用 SPSS 25.0 对小麦和小麦粉中镰刀菌毒素和交链孢霉毒素含量进行相关性分析及显著性分析。

2 结果与分析

2.1 线性范围、检出限及加标回收率

DON 在 1.00~200 ng/mL 质量浓度范围的线性方程为 $Y=0.0539X+0.00643$, $r=0.9978$; 3-AcDON 在 1.00~200 ng/mL 质量浓度范围的线性方程为 $Y=0.0632X-0.0203$, $r=0.9978$; 15-AcDON 在 1.00~200 ng/mL 质量浓度范围的线性方程为 $Y=0.0237X-0.0282$, $r=0.9988$; NIV 在 5.00~200 ng/mL 质量浓度范围的线性方程为 $Y=0.0211X-0.0144$, $r=0.9983$; ZEN 在 0.50~50.0 ng/mL 质量浓度范围的线性方程为 $Y=7.32e+004X-2.25e+003$, $r=0.9963$ 。DON、3-AcDON、

15-AcDON、NIV 和 ZEN 的检出限为 10.0、10.0、10.0、35.0 和 5.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。分析过程通过加标回收实验和平行双样控制分析质量, 每 10 个样做一个平行样, 每批样品做一个空白样和样品加标。加标回收实验的回收率为 91.2%~109.5%, 平行双样的相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)小于 10%。

TeA 在 4.00~200 ng/mL 质量浓度范围的线性方程为 $Y=0.0751X-0.0325$, $r=0.9996$; TEN 在 0.20~10.0 ng/mL 质量浓度范围的线性方程为 $Y=0.0586X+0.00726$, $r=0.9965$; AME 在 0.20~10.0 ng/mL 质量浓度范围的线性方程为 $Y=0.0759X-0.00106$, $r=0.9995$; AOH 在 2.50~50.0 ng/mL 质量浓度范围的线性方程为 $Y=0.0734X-0.0528$, $r=0.9997$ 。TeA、TEN、AME 和 AOH 的检出限为 2.00、0.10、0.10 和 1.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。分析过程通过加标回收实验和平行双样控制分析质量, 每 10 个样做一个平行样, 每批样品做一个空白样和样品加标。加标回收实验的回收率为 93.6%~107.5%, 平行双样的 RSDs 小于 10%。

2.2 陕西省小麦中镰刀菌毒素和交链孢毒素污染状况

陕西省小麦被镰刀菌毒素 DON 及其衍生物、NIV、ZEN 和交链孢毒素 TeA、TEN、AME 污染。检出率最高为 TeA 和 TEN, 其次是 AME。阳性平均值最高的是 DON, 其次是 TeA(表 2)。小麦中镰刀菌毒素 DON、3-AcDON、15-AcDON、NIV 和 ZEN 的检出率分别为 83.3%、5.00%、10.0%、11.6%和 8.33%, 阳性污染水平(平均含量评价)分别为 600、15.6、19.7、92.3 和 8.65 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。DON 最大浓度达到 3210 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 超我国小麦 DON 的限量标准(1000 $\mu\text{g}/\text{kg}$)。

小麦样品全部检出交链孢霉毒素。TeA、TEN 和 AME 的检出率为 100.0%、100.0%和 98.3%, 阳性污染水平分别为 128、25.6 和 29.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (表 2)。TeA 的含量主要集中在 2.00~500 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 占比为 96.6%。TEN 的含量主要集中在 0.10~50.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 占比为 91.6%。

表 2 2022—2024 年陕西省小麦中镰刀菌毒素和交链孢毒素的污染水平

Table 2 Fusarium and alternaria toxins contamination of wheat in Shaanxi Province from 2022 to 2024

名称	样品数	平均值 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	浓度范围 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	检出率/%
DON	60	600.00	ND~3210.0	83.3 (50/60)
3-AcDON	60	15.60	ND~35.0	5.00 (3/60)
15-AcDON	60	19.70	ND~81.0	10.0 (6/60)
NIV	60	92.30	ND~456.0	11.6 (7/60)
ZEN	60	8.65	ND~80.8	8.33 (5/60)
TeA	60	128.00	13.3~874.0	100 (60/60)
TEN	60	25.60	2.18~79.5	100 (60/60)
AME	60	29.20	ND~87.5	98.3 (59/60)

注: ND. 未检出, 下同。

2.3 陕西省小麦粉中镰刀菌毒素和交链孢毒素污染状况

陕西省小麦粉被镰刀菌毒素 DON 和交链孢毒素 TeA、TEN、AME 污染。检出率最高为 TeA, 其次是 TEN。阳性平均值最高的是 DON, 其次是 TeA(表 3)。小麦粉只有镰刀菌毒素 DON 检出, 检出率为 87.5%, 阳性污染水平为 267 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 最大浓度 947 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 超欧盟限量标准, 但低于我国限量标准。小麦粉中交链孢霉毒素 TeA、TEN 和 AME 的检出率为 96.2%、88.7%和 63.7%, 阳性污染水平分别为 44.3、5.04 和 0.63 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

表 3 2022—2024 年陕西省小麦粉中镰刀菌毒素和交链孢毒素的污染水平

Table 3 Fusarium and alternaria toxins contamination of wheat flour in Shaanxi Province from 2022 to 2024

名称	样品数	平均值 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	浓度范围 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	检出率 /%	超标率 /%
DON	80	267.00	ND~947.00	87.5 (70/80)	0
3-AcDON	80	5.00	ND	0	-
15-AcDON	80	5.00	ND	0	-
NIV	80	17.5	ND	0	-
ZEN	80	2.50	ND	0	0
TeA	80	44.30	ND~167.00	96.2 (77/80)	-
TEN	80	5.04	ND~16.00	88.7 (71/80)	-
AME	80	0.63	ND~3.29	63.7 (51/80)	-

注: -表示没有限值。

2.4 小麦和小麦粉中镰刀菌毒素和交链孢毒素联合污染情况及相关性分析

通过对阳性样品的统计分析, 小麦和小麦粉样品同时被镰刀菌毒素和交链孢毒素污染, 主要以 DON、TeA、TEN 和其他毒素的混合污染最为常见。其中被 2 种、3 种、4 种和 5 种毒素同时污染的样品分别占总样品的 14.3% (20/140)、23.6% (33/140)、45.7% (64/140)和 16.4% (23/140)。本研究对小麦和小麦粉中镰刀菌毒素和交链孢毒素含量进行相关性分析, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。由于 AOH 在所有样本中均未检出, ZEN 只有一份样品检出, 因此只含有 7 种毒素的相关性分析。由表 4 可以看出, 正相关性最强的是 DON 与 15-AcDON ($r=0.825$, $P<0.01$)、TeA 与 TEN ($r=0.805$, $P<0.01$), 其次是 3-AcDON 与 15-AcDON ($r=0.572$, $P<0.01$)、3-AcDON 与 DON ($r=0.554$, $P<0.01$), 其他毒素之间是弱相关($r<0.4$, $P<0.05$)或无相关性($P>0.05$)。上述结果表明镰刀菌毒素和交链孢霉毒素之间的污染相关性弱; 被 DON 污染的样品, 很有可能伴随着 3-AcDON、15-AcDON 的污染; 被 TeA 污染的样品, 大概率伴随 TEN 的污染。

表 4 小麦和小麦粉中镰刀菌毒素和交链孢毒素相关性分析
Table 4 Correlation analysis of fusarium and alternaria toxins in wheat and wheat flour

相关系数	DON	3-AcDON	15-AcDON	NIV	TeA	TEN	AME
DON	1	0.554**	0.825**	-0.135	-0.014	0.064	0.046
3-AcDON	0.554**	1	0.572**	0.186*	0.061	0.394**	-0.243
15-AcDON	0.825**	0.572**	1	-0.121	0.123	0.229**	-0.129
NIV	-0.135	0.186**	-0.121	1	0.237**	0.364**	-0.167
TeA	-0.014	0.061	0.123	0.237**	1	0.805**	-0.127
TEN	0.064	0.394**	0.229**	0.364**	0.805**	1	-0.293**
AME	0.046	-0.243**	-0.129	-0.167	-0.127	-0.293**	1

注: **在 0.01 水平(双侧)上极显著相关, *在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

2.5 小麦粉的镰刀菌毒素和交链孢毒素膳食暴露风险评估

参考第五次中国总膳食研究中陕西省 12 类食品样品聚类后食物品种及消费量^[26], 陕西省居民平均每日小麦粉消费量(挂面、馒头、油饼和蛋糕消费量加和)为 215.69 g。小麦粉中 DON、TeA、TEN、AME 的膳食暴露量分别为 959.8、159.2、18.1 和 2.30 ng/(kg·bw·d)。镰刀菌毒素 DON 的 TDI 值为 1300 ng/(kg·bw·d)^[27]。镰刀菌毒素 DON 的膳食暴露量 959.8 ng/(kg·bw·d) 小于 TDI 值。按照 TTC 决策树, 由于交链孢毒素 AME 具有遗传毒性, 其 TTC 值为 2.50 ng/(kg·bw·d)^[28], 交链孢毒素 AME 的膳食暴露量 2.30 ng/(kg·bw·d) 小于其 TTC 值。按照 TTC 决策树中 Cramer 的化合物分级(根据物质化学结构不同将其分为 I、II、III 类), TeA 和 TEN 属于第 III 类化合物, 其 TTC 值为 1500 ng/(kg·bw·d)^[28]。交链孢毒素 TeA 的膳食暴露量 159.2 ng/(kg·bw·d) 小于其 TTC 值, 约为 TTC 值的 11%。交链孢毒素 TEN 的膳食暴露量 18.1 ng/(kg·bw·d) 小于其 TTC 值, 约为 TTC 值的 1.2%。结果表明, 本年度通过小麦粉 DON、TeA、TEN、AME 膳食暴露对消费者健康影响风险较小。

3 讨论与结论

本研究结果表明, 2022—2024 年陕西省小麦和小麦粉都受到镰刀菌毒素不同程度的污染。小麦和小麦粉中检出 DON、3-AcDON、15-AcDON、NIV 和 ZEN, DON 与 15-AcDON 含量表现出非常强相关性。2022—2024 年陕西省小麦粉中 DON 的检出率和超标率分别为 87.5% 和 0.0%, 较胡佳薇等^[29]2013—2016 年陕西省小麦粉及其制品的检出率 86.9% 和超标率 6.70%, 超标率显著下降, 这是因为 GB 2715—2016《食品安全国家标准 粮食》要求小麦中霉变粒小于等于 2%, 小麦粉 DON 项目列入出厂检验指标。小麦粉中镰刀菌毒素 DON 的膳食暴露量小于 TDI 值, 处于可接受的风险范围内。

陕西省小麦和小麦粉均受到交链孢毒素不同程度的污染。小麦和小麦粉中检出 TeA、TEN 和 AME, TeA 与 TEN

含量表现出非常强的相关性, 与赵凯^[30]研究结果相符。陕西省小麦粉中 TeA、TEN、AOH 和 AME 的平均浓度分别为 44.3、5.04、0.63 和 0 μg/kg。何玲等^[31]对四川省市售小麦及其制品中交链孢霉毒素进行检测, TeA、TEN、AOH 和 AME 的平均浓度分别为 27.2、4.78、0.75 和 0.57 μg/kg。陈蓓等^[32]对江苏省内小麦粉中 4 种交链孢霉毒素进行检测, TeA、TEN、AOH 和 AME 的平均浓度分别为 56.1、6.7、2.0 和 1.2 μg/kg。由此可知, 小麦粉中 TeA 污染最严重, 其次是 TEN, AOH 和 AME 污染水平较低。小麦粉中交链孢霉毒素 TeA、TEN、AME 的膳食暴露量小于 TTC 值, 对消费者健康影响的风险较小。我国关于交链孢霉毒素污染谷物的研究相对较少, 而且目前世界范围内都没有制定交链孢霉毒素的限量标准, 因此我国应多开展交链孢霉毒素的调查研究, 收集污染数据, 加快制定交链孢霉毒素的限量标准, 保障我国食品安全。

参考文献

- [1] MARESCA M. From the gut to the brain: Journey and pathophysiological effects of the food-associated trichothecene mycotoxin deoxynivalenol [J]. *Toxins*, 2013, 5(4): 784–820.
- [2] SOBROVA P, ADAM V, VASATKOVA A, et al. Deoxynivalenol and its toxicity [J]. *Interdisciplinary Toxicology*, 2010, 3(3): 94–99.
- [3] 徐哲, 刘天国, 刘博, 等. 我国四大麦区小麦籽粒镰刀菌毒素检测与污染分析[J]. *植物保护*, 2021, 47(3): 200–205.
XU Z, LIU TG, LIU B, et al. Determination and contamination analysis of Fusarium mycotoxins in wheat grains from four different wheat regions [J]. *Plant Protection*, 2021, 47(3): 200–205.
- [4] TAKAHASHI M, SHIBUTANI M, SUGITA-KONISHI Y, et al. A 90-day subchronic toxicity study of nivalenol, a trichothecene mycotoxin, in F344 rats [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2008, 46(1): 125–135.
- [5] KUBOSAKI A, AIHARA M, PARK BJ, et al. Immunotoxicity of nivalenol after subchronic dietary exposure to rats [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2008, 46(1): 253–258.
- [6] 黄晓静, 王少敏, 毛丹, 等. 镰刀菌属真菌毒素的毒性研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2017, 8(8): 3117–3127.
HUANG XJ, WANG SM, MAO D, et al. Research progress on toxicity of Fusarium mycotoxins [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2016, 7(2): 453–458.
- [7] METZLER M, PFEIFFER E, HILDEBRAND AA. Zearalenone and its metabolites as endocrine disrupting chemical [J]. *World Mycotoxin Journal*, 2010, 3(4): 385–401.
- [8] 李顺意, 于秋香, 向腊, 等. 真菌毒素玉米赤霉烯酮生物降解的研究进

- 展[J]. 生物工程学报, 2018, 34(4): 489–500.
- LIU SY, YU QX, XIANG L, *et al.* Progress in bio-degradation of mycotoxin zearalenones [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2018, 34(4): 489–500.
- [9] OSTRY V. Alternaria mycotoxins: An overview of chemical characterization, producers, toxicity, analysis and occurrence in foodstuff [J]. World Mycotoxin Journal, 2008, 1(2): 175–188.
- [10] SCHRADER TJ, CHERRY W, SOPER K, *et al.* Further examination of the effects of nitrosylation on Alternaria alternata mycotoxin mutagenicity *in vitro* [J]. Mutation Research, 2006, 606(1): 61–71.
- [11] 姜冬梅, 王瑶, 姜楠, 等. 农产品及其制品中交链孢酚和交链孢酚单甲醚研究进展[J]. 食品科学, 2017, 21(38): 287–293.
- JIANG DM, WANG Y, JIANG N, *et al.* Review on alternariol and alternariol monomethyl ether in agro-products [J]. Food Science, 2017, 21(38): 287–293.
- [12] RYCHLIK M, LEPPER H, WEIDNER C, *et al.* Risk evaluation of the alternaria mycotoxin tenuazonic acid in foods for adults and infants and subsequent risk management [J]. Food Control, 2016(68): 181–185.
- [13] 满燕, 梁刚, 李安, 等. 链格孢霉毒素检测方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(2): 453–458.
- MAN Y, LIANG G, LI AN, *et al.* Research progress of detecting methods for alternaria toxins [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2016, 7(2): 453–458.
- [14] 郭诗曼, 冯启. 链格孢霉毒素的研究进展[J]. 广州化工, 2020, 48(17): 9–12.
- GUO SM, FENG Q. Research progress on alternaria toxins [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2020, 48(17): 9–12.
- [15] 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 mycotoxin contamination in grains in China [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(3): 186–194.
- [16] 何玲, 秦忠雪, 任琳, 等. 2018 年四川省小麦中真菌毒素污染调查[J]. 现代预防医学, 2020, 47(8): 1502–1504.
- HE L, QIN ZX, REN L, *et al.* Investigation on contamination of mycotoxins in wheat from Sichuan in 2018 [J]. Modern Preventive Medicine, 2020, 47(8): 1502–1504.
- [17] 张洁, 王谢, 马青青, 等. 谷物中 4 种交链孢毒素污染情况及检验方法探讨[J]. 江苏预防医学, 2021, 32(2): 143–152.
- ZHANG J, WANG X, MA QQ, *et al.* Contamination status and discussion of detection methods of 4 kinds of alternaria toxins in cereals [J]. Jiangsu Journal of Preventive Medicine, 2021, 32(2): 143–152.
- [18] 仁贝贝, 王丽英, 路杨, 等. 河北省小麦、玉米及其制品中 16 种真菌毒素污染水平调查与分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(5): 1669–1676.
- REN BB, WANG LY, LU Y, *et al.* Investigation and analysis of 16 kinds of mycotoxins pollution levels in wheat, corn and products in Hebei Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(5): 1669–1676.
- [19] DONGMEI J, DIZHE W, LIUQING W, *et al.* Multiwalled carbon nanotube for one-step cleanup of 21 mycotoxins in corn and wheat prior to ultraperformance liquid chromatography–tandem mass spectrometry analysis [J]. Toxins, 2018, 10: 409.
- [20] 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, 1: 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, 1: 176–180.
- [21] 任贝贝, 刘梦颖, 陈福尊, 等. 2016—2023 年河北省谷物及其制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其衍生物污染状况及暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(10): 82–88.
- REN BB, LIU MY, CHEN FZ, *et al.* Contamination situations and exposure risks assessments of deoxynivalenol and its derivatives in grains and their products in Hebei Province from 2016 to 2023 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(10): 82–88.
- [22] 商蕾, 范梦超, 吕俊庆, 等. 谷物制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇污染状况及暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(11): 26–32.
- SHANG L, FAN MC, LV JQ, *et al.* Pollution status and exposure risk assessment of deoxynivalenol in grain products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(11): 26–32.
- [23] 赵迪, 袁文婷, 乔海鸥, 等. 陕西省市售谷物中 4 种交链孢毒素的监测及暴露风险评估[J]. 中华食品卫生杂志, 2024, 11(36): 1252–1257.
- ZHAO D, YUAN WT, QIAO HOU, *et al.* The monitoring and exposure assessment of 4 kinds of alternaria toxins in grains on sale in Shaanxi Province [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2024, 11(36): 1252–1257.
- [24] 国家食品安全风险评估中心. 国家食品污染和有害因素风险监测工作手册(中卷)[M]. 北京: 国家食品安全风险评估中心, 2022.
- China National Center for Food Safety Risk Assessment. National manual on risk monitoring of food contamination and harmful factors [M]. Beijing: China National Center for Food Safety Risk Assessment, 2022.
- [25] 王绪卿, 吴永宁, 陈君石. 食品污染监测低水平数据处理问题[J]. 中华预防医学杂志, 2002, 36(4): 278–279.
- WANG XQ, WU YN, CHEN JS. Low-level data processing problems in food contaminant monitoring [J]. Chinese Journal Preventive Medicine, 2002, 36(4): 278–279.
- [26] 吴永宁, 赵云峰, 李敬光. 第五届中国总膳食研究[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- WU YN, ZHAO YF, LI JG. The fifth China total diet study [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [27] 马易怡. 上海市城市居民膳食脱氧雪腐镰刀菌烯醇危险性评估[D]. 上海: 复旦大学, 2008.
- MA YY. Risk assessment of dietary intake of deoxynivalenol by Shanghai urban residents [D]. Shanghai: Fudan University, 2008.
- [28] EFSA Panels on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). Scientific opinion on the risks for animal and public health related to the presence of alternaria toxins in feed and food [J]. EFSA Journal, 2011, 9(10): 2407–2415.
- [29] 胡佳薇, 乔海鸥, 田丽, 等. 2013—2016 年陕西省谷物及其制品中真菌毒素的污染状况[J]. 卫生研究, 2017, 46(6): 1013–1015.
- HU JW, QIAO HOU, TIAN L, *et al.* Mycotoxin contamination in cereals and their products in Shaanxi province from 2013 to 2016 [J]. Journal of Hygiene Research, 2017, 46(6): 1013–1015.
- [30] 赵凯. 食品中交链孢毒素污染、生物利用及风险评估研究[D]. 北京: 中国疾病预防控制中心营养与健康所, 2015.
- ZHAO K. Natural occurrence, bioavailability and risk assessment of alternaria mycotoxins in foods [D]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2015.
- [31] 何玲, 秦忠雪, 任琳, 等. 四川省市售小麦及其制品中链格孢霉毒素污染状况调查[J]. 预防医学情报杂志, 2020, 36(11): 1433–1437.
- HE L, QIN ZX, REN L, *et al.* Investigation on contamination of alternaria toxins from wheat and its products sold in Sichuan Province [J]. Journal of Preventive Medicine Information, 2020, 36(11): 1433–1437.
- [32] 陈蓓, 吉文亮, 朱峰, 等. 江苏省内小麦粉中 4 种交链孢毒素污染情况调查[J]. 中国公共卫生, 2018, 34(3): 397–399.
- CHEN B, JI WL, ZHU F, *et al.* Contamination of four Alternaria toxins in wheat flour sampled in Jiangsu Province [J]. Chinese Journal of Public Health, 2018, 34(3): 397–399.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)