· 营养与食品卫生 ·

济南市玉米及制品中多种真菌毒素的污染特征分析与累积风险评估

曹小丽,王相际,郑敏,吴虹,田文霞,匡彦,杨晓倩
济南市疾病预防控制中心理化检验所,山东 济南 250021

摘要:目的　分析济南市 2022—2023 年各区县玉米及制品中多种真菌毒素的污染特征,并评估不同年龄组人群的累积暴露风险。**方法**　采集 2022—2023 年济南市 12 个区县 173 份玉米及制品样本,采用同位素稀释液相色谱串联质谱法同时检测 12 种真菌毒素,基于山东省居民膳食消费数据,采用成分分析法结合等效因子(EF)和暴露边界值(MOE),评估不同年龄组人群的累积暴露风险。**结果**　伏马菌素(FBs)的检出情况相对突出(检出率 91.3%,均值 1 506.1 μg/kg),其次为脱氧雪腐镰刀菌烯醇及代谢物(tDON,检出率 89.6%,均值 91.7 μg/kg)和玉米赤霉烯酮(ZEN,检出率 72.8%,均值 41.1 μg/kg)。91.9%样品存在两类及以上毒素共存,其中以 FBs + tDON + ZEN 为主要共污染模式。不同区县污染特征存在差异,莱芜区 FBs 检出水平相对较高(2 653.7 μg/kg),槐荫区 tDON 检出水平相对较高(259.6 μg/kg),而 ZEN 污染在全市范围内未呈现明显的区域差异性。各人群的 MOE 值均低于参考阈值(100),提示需关注其累积暴露水平,低年龄组人群的相关膳食暴露指标相对偏高,同时需要考虑由于样品量及消费数据带来的评估不确定性,性别间暴露水平差异不显著。FBs 对人群累积暴露的贡献率最高(93.6%),是主要风险因子。玉米碾磨制品为主要暴露来源(贡献率为 67%),其消费量与真菌毒素暴露量正相关。**结论**　济南市人群通过摄入玉米及制品存在真菌毒素累积暴露的相关情况,低年龄组人群为重点关注群体,建议开展针对性的膳食健康指导与风险管控。

关键词:多种真菌毒素;玉米及制品;共污染;累积风险评估
中图分类号:TS210.7　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1003 - 8507(2026)06 - 1017 - 07
DOI:10.20043/j.cnki.MPM.202509134

Characterization of spatial contamination and cumulative risk assessment of multiple mycotoxins in corn and its products, Jinan City

CAO Xiao - li, WANG Xiang - ji, ZHENG Min, WU Hong, TIAN Wen - xia, KUANG Yan, YANG Xiao - qian
Department for Physical and Chemical Inspection, Jinan Center for Disease Control and Prevention, Jinan, Shandong 250021, *China*

Abstract: Objective　To analyze the contamination characteristics of multiple mycotoxins in cornand corn products across districts and counties in Jinan City during 2022—2023, and to assess the cumulative exposure risk among different age groups. **Methods**　We collected 173 samples of maize and products from 12 districts and counties in Jinan City from 2022 to 2023, and simultaneously detected 12 mycotoxins by isotope dilution liquid chromatography tandem mass spectrometry, and evaluated the cumulative exposure risk of the population of different age groups based on the data of dietary consumption of residents in Shandong Province by using compositional analysis combined with the equivalence factor (EF) and the exposure boundary value (MOE). **Results**　Fumonisins (FBs) were the most contaminated (detection rate, 91.3%, mean, 1 506.1 μg/kg), followed by deoxynivalenol and metabolites (tDON, detection rate, 89.6%, mean, 91.7μg/kg) and zearalenone (ZEN, detection rate,72.8%, mean,41.1μg/kg). 91.9% of samples contained two or more toxins concurrently, with FB + tDON + ZEN being the predominant co - contamination pattern. Contamination characteristics varied across districts: Laiwu District exhibited relatively higher FB detection levels(2 653.7 μg/kg), while Huaiyin District showed relatively higher tDON levels (259.6 μg/kg). No distinct high - risk areas for ZEN contamination were identified citywide. The MOE values for all population groups fell below the safety threshold (100),indicating potential health risks. At the same time, it is necessary to consider the uncertainty of evaluation caused by sample size and consumption data. The younger age group exhibited relatively higher risks. No statistically significant differences in exposure risk were observed between genders. FBs contributed the most

基金项目:济南市卫生健康委员会科技计划项目(20240307007)
作者简介:曹小丽(1979—),女,硕士,主任技师,研究方向:食品安全
通信作者:杨晓倩,E - mail:164198324@qq.com

(93.6%) to cumulative exposure risk and were identified as the primary risk factor. Corn milling products served as the main exposure source (Contribution rate 67%), with consumption levels positively correlated to mycotoxin exposure. **Conclusion** Mycotoxin contamination in Jinan exhibits a spatial distribution pattern characterized by higher levels in peripheral areas and lower levels in central areas. The population faces potential health risks from cumulative exposure to mycotoxins through the consumption of corn and corn products. Younger age groups, due to their higher intake per unit of body weight, should be prioritized as key targets for prevention and control.

Keywords: Mycotoxin polymorphism; Corn and products; Co - contamination; Cumulative risk assessment

玉米是中国最重要的粮食作物之一,约占世界总产量的 20%。在中国的一些地区,玉米是继小麦和水稻之后的主要主食来源[1-2]。已发表的研究表明,玉米和玉米产品在生长和储存期间极易受到真菌污染[3-6]。杨欣等[7]报告称,全国市场上 60% 的玉米及制品检出两种或两种以上真菌毒素。长期接触这些真菌毒素会对人类和动物产生肝毒性、肾毒性、免疫毒性、致畸性、致癌性和诱变性[8-9]。此外,接触多种真菌毒素混合物可能会对人体产生拮抗、叠加或协同累积效应[10]。即使接触单种真菌毒素的风险低于阈值效应,累积接触混合物也可能达到有效剂量,从而对健康产生不利影响[11-13]。尽管多项研究已证实玉米及其制品中普遍存在多种霉菌毒素共污染现象及其潜在的累积膳食风险[14-15],但现有研究多聚焦于结构相似毒素的累积评估。此外,关于中国不同区域玉米产品的多毒素污染特征与累积风险,目前仍缺乏系统性认知。杨欣等[7]的研究便揭示了其污染水平存在显著的地区差异性。在此背景下,为明确济南市真菌毒素的共存污染模式并系统评估其累积暴露风险,开展本研究显得尤为必要。

济南市地处山东省中西部,南枕泰山,北濒黄河,属温带季风气候,夏季高温高湿,冬季干燥少雨。作为山东省省会与区域性中心城市,济南亦是黄河流域重要的粮食消费枢纽,当地主食以玉米制品为主,涵盖玉米面、玉米糁及即食玉米谷物等品类。本研究基于济南市食品安全风险监测数据,对济南市 12 个区县玉米及制品中真菌毒素的污染特征进行分析,构建了基于膳食暴露量的累积风险评估模型,揭示了不同年龄段人群的累积暴露风险及梯度,为制定靶向防控策略提供了科学依据。

1 材料和方法

1.1 样品采集 2022—2023 年,按照随机采样的原则,从济南市 12 个区县(莱芜区、钢城区、槐荫区、长清区、市中区、历下区、天桥区、商河县、历城区、济阳区、章丘区、平阴县)的当地市场(超市、商店和市场摊位)及玉米种植区共采集了 173 份玉米及其制品,共包含三个亚类:玉米/玉米粒(47 份)、玉米碾磨制品(玉米面、玉米碴、玉米片等,80 份)和玉米面制品(46 份)。样本量要求大于 1 kg,用高速粉碎机进行粉碎和筛分,粒径小于 1 mm,混匀后将样品分成 100 g/份,冷冻保存。

1.2 样品分析 分析的真菌毒素包括 5 类 12 种,即黄曲霉毒素(AFB1、AFB2、AFG1、AFG2)、伏马毒素(FB1、FB2、FB3)、赭曲霉毒素 A (OTA)、玉米赤霉烯酮(ZEN)和脱氧雪腐镰刀菌素及其代谢物(DON、15 - AC - DON、3 - AC - DON)。参考《国家食品污染物和有害因素监测工作手册》中的同位素稀释高效液相色谱 - 质谱法(UPLC - MS/MS)对玉米及其制品中的多种真菌毒素进行分析,实验过程进行空白试验、加标回收、平行双样等严格的质量控制措施,确保检测结果的准确性。样品检测结果依据 GB 2761—2017《食品安全国家标准 - 食品中真菌毒素限量》中规定的玉米及制品中真菌毒素的各项限值进行评价。

1.3 玉米及制品消费数据 玉米及制品的膳食消费数据来自 2012 年中国食品消费调查中山东省的消费数据[16],包括山东省 3 246 名 4 至 96 岁的参与者。其中,404 名参与者是玉米和玉米制品消费者。将消费者分为 5 个年龄组,即 3 ~ 6 岁、7 ~ 12 岁、13 ~ 17 岁、18 ~ 59 岁和≥60 岁,食物摄入量以平均值描述。

1.4 膳食风险评估 本研究基于组分的分析方法,采用暴露边界值(MOE)结合等效因子(EF)进行剂量相加,对真菌毒素混合物(tDON、FB_S 和 ZEN)进行累积风险评估[17]。首先将玉米及制品中每类真菌毒素的污染水平乘以消费量,再除以体重,得到单类真菌毒素的暴露量(EXP_i),然后将单类真菌毒素的暴露量乘以 EF,相加,得到真菌毒素混合物的总暴露量。每类真菌毒素的 EF_i 是将检定的指标化合物的分离点(POD_i)除以单类真菌毒素的 POD(POD_i)得到。其中 POD 值取自欧洲食品安全局(EFSA)的评估报告:tDON 采用 5% 效应基准剂量下限($BMDL_5$ = 110 μg/(kg · bw · d)),基于摄食量减少和体重增长抑制的临界效应;FBs 以非致癌肝毒性为基准,选取 10% 效应($BMDL_{10}$ = 100 μg/(kg · bw · d))小鼠大细胞肝细胞增生为组织病理学标志;ZEN 依据雄性大鼠肝细胞胞浆空泡化发生率,确定无观测不良效应水平(NOAEL = 1 000 μg/(kg · bw · d))。通过比较 POD 值,确定 FBs 毒性最强,设定其等效因子(EF)为 1.0,

则 tDON 和 ZEN 的相对 EF 分别为 0.91 和 0.1。本研究中 tDON、FB_S 和 ZEN 被认为既不具有遗传毒性，也不具有致癌性，MOE 选择 100 作为参考/临界值，当 MOE 值大于 100 时可认为暴露风险较低，反之则需对其风险水平予以一定关注[17]。

根据公式 1、2 和 3 分别计算暴露量、等效因子和暴露边界值：

$$EXP_i = \frac{C_i \times F_i}{bw} \quad (1)$$

$$EF_i = \frac{POD_{index}}{POD_i} \quad (2)$$

$$MOE = \frac{POD_{index}}{Sum(EXP_i) \times (EF_i)} = \frac{POD_{index}}{\sum_{i=1}^{n}(EXP_i) \times (EF_i)} \quad (3)$$

其中 EXP_i 为单个真菌毒素的暴露量（μg/（kg · bw · d））,EF_i 为真菌素素的等效因子，C_i 为玉米和玉米产品样品真菌毒素的平均污染水平（μg/kg），F_i 为玉米及制品的个人消费量（g/d），bw 是指个体体重（kg），$Sum(EXP_i) \times (EF_i)$ 为多种真菌毒素的累积暴露量（μg/（kg · bw · d））。

1.5　统计分析　本研究中，真菌毒素浓度低于检测限（LOD）时，分别以低值（LB = 0）、中值（MB = 0.5LOD）和高值（UB = LOD）替代，确保数据完整性[18-19]。对 5 类毒素计算平均值、中位数、第 95 百分位数（P_{95}）及最大值，并报告检出率。使用 SPSS 26.0 的 Kruskal - Wallis 检验，采用非参数 Kruskal - Wallish 检验分析了不同玉米制品亚类间真菌毒素污染和膳食暴露的分布情况。采用 χ^2 检验评估毒素检出率的显著性差异（$\alpha = 0.05$）。

2　结　果

2.1　玉米及制品中多种真菌毒素的污染特征

2.1.1　不同玉米及制品中多种真菌毒素的共污染状况　如表 1 所示，玉米及制品中真菌毒素污染呈现显著差异性分布特征。FBs 以 91.3% 的检出率最高，其平均浓度（1 506.1 μg/kg）和最大值（17 661.0 μg/kg）均显著高于其他毒素；tDON 次之，检出率 89.6%，均值 91.7 μg/kg；ZEN 检出率 72.8%，均值 41.1 μg/kg，而 AFs 和 OTA 污染水平较低，检出率分别为 24.3% 和 4.62%。依据 GB 2761—2017《食品安全国家标准 - 食品中真菌毒素限量》进行评价，其中 AFB1、DON 无超标样本，有 30 份样品的 ZEN 超标，超标率 17.3%。

多重污染现象普遍存在，91.9% 的样品存在两类及以上毒素共存。其中：双毒素共存占比 26.0%，主要组合为 FBs + tDON（18.5%）；三毒素共存占比 49.1%，典型组合为 FBs + tDON + ZEN（43.3%）；四毒素共存占比 16.8%，以 FBs + tDON + ZEN + AFT（13.9%）复合污染为主。

表 1　玉米及其制品中多种真菌毒素的污染情况

Table 1　Contamination levels of multiple mycotoxins in corn and corn products

样品类型	参数	tDON[a]	FBs^b
玉米及制品（n = 173）	检出率[%，（n）]	89.6（155）	91.3（158）
	均值[μg/kg，MB（LB ~ UB）][d]	145.0（139.6 ~ 150.4）	1 506.1（1 493.5 ~ 1 518.7）
	中位值[μg/kg，MB（LB ~ UB）]	91.7（86.0 ~ 97.7）	420.0（413.8 ~ 425.5）
	P_{95}[μg/kg，MB（LB ~ UB）]	446.7（442.3 ~ 452.6）	7 923.8
	最大值（μg/kg）	916.0	17 661.0
玉米/玉米粒（n = 47）	检出率[%，（n）]	74.5（35）	83.0（39）
	均值［μg/kg，MB（LB ~ UB）］	194.5（189.0 ~ 200.0）	2 176.0（2 158.9 ~ 2193.0）
	中位值［μg/kg，MB（LB ~ UB）］	206.5（203.2 ~ 209.7）	290.5（265.5 ~ 315.5）
	P_{95}［μg/kg，MB（LB ~ UB）］	496.7（493.0 ~ 501.4）	10 281.3
	最大值（μg/kg）	820.8	17 661.0
玉米碾磨制品（n = 80）	检出率[%，（n）]	96.2（77）	97.5（78）
	均值［μg/kg，MB（LB ~ UB）］	145.1（140.0 ~ 150.5）	1 478.8（1 468.7 ~ 1 488.8）
	中位值[μg/kg，MB（LB ~ UB）]	90.9（85.1 ~ 95.8）	509.3（504.5 ~ 521.8）
	P_{95}[μg/kg，MB（LB ~ UB）]	555.1（551.8 ~ 558.3）	8 002.9
	最大值（μg/kg）	916.0	15 112.0
玉米面制品（n = 46）	检出率[%，（n）]	93.5（43）	89.1（41）
	均值［μg/kg，MB（LB ~ UB）］[d]	94.0（88.2 ~ 99.8）	869.3（856.8 ~ 881.8）
	中位值［μg/kg，MB（LB ~ UB）］	64.8（57.8 ~ 71.8）	338.0（325.5 ~ 358.8）
	P_{95}（［μg/kg，MB（LB ~ UB）］	304.2（300.9 ~ 307.4）	3781.0
	最大值（μg/kg）	428.5	5 163.0

样品类型	参数	ZEN	AFs[c]	OTA
玉米及制品（n = 173）	检出率[%，（n）]	72.8（126）	24.3（42）	4.6（8.0）
	均值[μg/kg，MB（LB ~ UB）]4	41.1（40.5 ~ 41.8）	1.4（0.69 ~ 2.06）	0.4（0.2 ~ 0.6）
	中位值［μg/kg，MB（LB ~ UB）］	14.6	0.7（0 ~ 1.4）	0.3（0 ~ 0.5）

（续表）

样品类型	参数	ZEN	AFs[c]	OTA
	P_{95}[μg/kg, MB(LB ~ UB)]	4.3(3.7 ~ 5.0)	0.5(0.0 ~ 1.0)	0.3(0.2 ~ 0.5)
	最大值（μg/kg）	720.0	20.3	10.2
玉米/玉米粒（n = 47）	检出率[%，(n)]	57.4 (27)	6.4 (3)	4.3 (2)
	均值[μg/kg, MB(LB ~ UB)]	31.0(30.0 ~ 32.1)	1.3(0.6 ~ 2.0)	0.3(0.1 ~ 0.5)
	中位值[μg/kg, MB(LB ~ UB)]	8.6	0.7(0.0 ~ 1.4)	0.2(0.0 ~ 0.5)
	P_{95}[μg/kg, MB(LB ~ UB)]	223.6	5.8	0.8(0.7 ~ 0.9)
	最大值（μg/kg）	407.0	19.1	2.0
玉米碾磨制品（n = 80）	检出率[%，(n)]	77.5 (62)	31.5(25)	2.5(2)
	均值[μg/kg, MB(LB ~ UB)]	42.4(41.9 ~ 43.0)	1.2(0.6 ~ 1.9)	0.4(0.2 ~ 0.6)
	中位值[μg/kg, MB(LB ~ UB)]	14.2	0.7(0.0 ~ 1.4)	0.2(0.0 ~ 0.5)
	P_{95}[μg/kg, MB(LB ~ UB)]	232.2	4.0(3.4 ~ 4.6)	0.2(0.0 ~ 0.5)
	最大值（μg/kg）	720.0	9.0	10.2
玉米面制品（n = 46）	检出率[%，(n)]	80.4 (37)	30.4 (14)	8.7 (4)
	均值[μg/kg, MB(LB ~ UB)][d]	49.1(48.6 ~ 49.6)	1.6(1.0 ~ 2.3)	0.5(0.3 ~ 0.7)
	中位值[μg/kg, MB(LB ~ UB)]	26.5	0.7(0.0 ~ 1.4)	0.2(0.0 ~ 0.5)
	P_{95}([μg/kg, MB(LB ~ UB)]	174.9	5.3(4.7 ~ 6.0)	1.7
	最大值（μg/kg）	196.0	6.2	8.2

注：a：tDON = DON + 3 − Ac − DON + 15 − Ac − DON；b：FBs = FB1 + FB2 + FB3；c：AFs = AFB1 + AFB2 + AFG1 + AFG2；d：MB（LB ~ UB）：中值（低值 ~ 高值）。

2.1.2 不同地区 tDON、FBs 和 ZEN 污染特征分析 比较了 12 个区县玉米及制品中检出最多的真菌毒素组合 tDON、FBs 和 ZEN 的污染特征。三类毒素在 12 个区县的玉米及制品中同时检出比例最高的是历城区（72.7%），其次是槐荫区（42.7%）和长清区（40.8%），各地区同时检出的检出率与污染水平之间没有相关性。FBs 污染水平较高的是莱芜区（2 653.7 μg/kg），其次为商河县（2 273.4 μg/kg），平阴县（1 793.9 μg/kg）和长清区（1 702.5 μg/kg）；tDON 污染水平较高的是槐荫区（259.6 μg/kg），其次为市中区（188.5 μg/kg）；而 ZEN 污染水平都相对较低，污染水平最高的槐荫区仅为 60.3 μg/kg。Kruskal − Wallis 检验结果表明，12 区县的 tDON、FBs 和 ZEN 的污染水平均值（MB）分别都有显著性差异（P < 0.001）。

2.2 消费量数据分析 不同年龄段人群对于玉米及制品三个亚类的消费量存在明显差异，总体 18 ~ 59 岁人群的消费量最高，男性高于女性。玉米碾磨制品的消费量（52.0 g/d）明显高于玉米/玉米粒（15.2 g/d）和玉米面制品（14.2 g/d）。在平均消费水平下，玉米/玉米粒消费量最高的是 13 ~ 17 岁人群（45.4 g/d），玉米碾磨制品消费量最高的是 18 ~ 59 岁人群（56.1 g/d），而玉米面制品消费量最高的是≥60 岁人群（18.7 g/d）（图 1）。

2.3 玉米及其制品中的 tDON、FBs 和 ZEN 对不同年龄段人群的风险评估 基于玉米及制品中 tDON、FBs 和 ZEN 的平均含量的中值（表 1），对济南市不同年龄组人群进行累积暴露评估，如表 2 所示：在平均消费水平下，各人群累积暴露边界值（MOE）均低于 100 参考阈值，表明济南市居民对玉米及玉米制品中真菌毒素累积暴露需要予以关注，低年龄组人群因每日玉米及制品摄入量占体重比例较高，且代谢解毒能力相对较弱，因此其累积暴露相较于其他年龄组要高，需重点关注“摄入量控制”，性别间暴露风险差异无统计学意义。FBs 贡献率最高（93.6%），其平均暴露量达 2.050 0 μg/（kg · bw · d），成为主要风险因子。

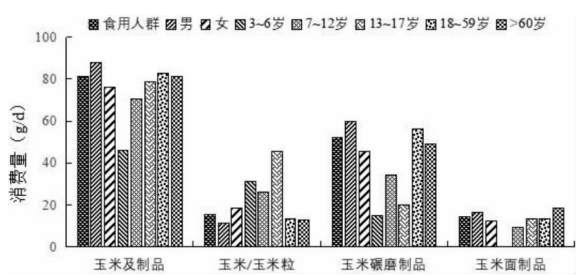


图 1 山东省不同年龄段玉米及制品食用人群的平均消费量

Fig. 1 Average corn and corn product consumption among different age groups in Shandong Province

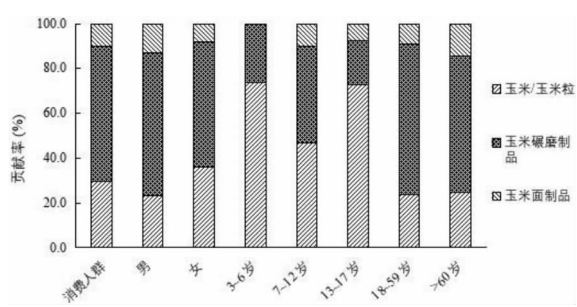


图 2 不同亚类玉米及制品对食用人群累积暴露量的贡献

Fig. 2 Contribution of different corn subtypes and products to cumulative exposure in consumers

三个亚类玉米及制品分析表明,玉米碾磨制品是主要暴露来源(贡献率 67%),其消费量与毒素暴露量呈正相关。18 ~ 60 岁成年人通过该类制品摄入的毒素占比最高(67%),而 3 ~ 6 岁和 13 ~ 17 岁儿童因玉米/玉米粒消费量显著高于其他两个亚类,导致其总暴露量中玉米/玉米粒贡献占比分别达 74% 和 73%。性别差异方面,男性摄入玉米碾磨制品的总暴露贡献率(64%)略高于女性(56%)(图 2)。

表 2　不同年龄组人群对玉米及制品主要真菌毒素的暴露水平均值

Table 2　Mean exposure levels to major mycotoxins in corn and corn products among different age groups

食用人群	真菌毒素	玉米/玉米粒 MB(LB ~ UB)		
		单一毒素暴露量 μg/(kg · bw · d)	累积暴露量 μg/(kg · bw · d)	累积暴露限量值 MOE
食用人群	tDON	0.055 2(0.0536 ~ 0.056 7)	0.667 6(0.661 4 ~ 0.673 9)	149.8(151.2 ~ 148.4)
	FBs	0.617 4(0.612 6 ~ 0.622 3)		
	ZEN	0.008 8(0.008 5 ~ 0.009 1)		
食用人群(男)	tDON	0.040 5(0.039 4 ~ 0.041 7)	0.490 5(0.486 0 ~ 0.495 2)	203.9(205.8 ~ 202.0)
	FBs	0.453 6(0.450 1 ~ 0.457 2)		
	ZEN	0.006 5(0.006 3 ~ 0.006 7)		
食用人群(女)	tDON	0.067 2(0.065 3 ~ 0.069 1)	0.812 9(0.805 2 ~ 0.820 5)	123.0(124.2 ~ 121.9)
	FBs	0.751 7(0.745 8 ~ 0.757 6)		
	ZEN	0.010 7(0.010 4 ~ 0.011 1)		
儿童(3 ~ 6 岁)	tDON	0.344 3(0.334 6 ~ 0.354 1)	4.166 0(4.126 8 ~ 4.204 9)	24.0(24.2 ~ 23.8)
	FBs	3.852 6(3.822 3 ~ 3.882 6)		
	ZEN	0.054 9(0.053 1 ~ 0.056 8)		
少年(7 ~ 12 岁)	tDON	0.190 2(0.184 8 ~ 0.195 6)	2.301 1(2.279 5 ~ 2.322 6)	43.5(43.9 ~ 43.1)
	FBs	2.128 0(2.111 3 ~ 2.144 6)		
	ZEN	0.030 3(0.029 3 ~ 0.031 4)		
青少年(13 ~ 17 岁)	tDON	0.173 1(0.168 2 ~ 0.178 0)	2.094 0(2.074 4 ~ 2.113 6)	47.8(8.2 ~ 47.3)
	FBs	1.936 5(1.921 3 ~ 1.951 6)		
	ZEN	0.027 6(0.026 7 ~ 0.028 6)		
成年人(18 ~ 59 岁)	tDON	0.041 2(0.040 1 ~ 0.042 4)	0.498 9(0.494 3 ~ 0.503 6)	200.4(202.3 ~ 198.6)
	FBs	0.461 4(0.457 8 ~ 0.465 0)		
	ZEN	0.006 6(0.006 4 ~ 0.006 8)		
老年人(> =60 岁)	tDON	0.040 7(0.039 5 ~ 0.041 8)	0.492 1(0.487 5 ~ 0.496 7)	203.2(205.1 ~ 201.3)
	FBs	0.455 1(0.451 5 ~ 0.458 7)		
	ZEN	0.006 5(0.006 3 ~ 0.006 7)		
食用人群	真菌毒素	玉米碾磨制品 MB(LB ~ UB)		
		单一毒素暴露量 μg/(kg · bw · d)	累积暴露量 μg/(kg · bw · d)	累积暴露限量值 MOE
食用人群	tDON	0.122 4(0.118 1 ~ 0.126 9)	1.358 8(1.346 3 ~ 1.371 4)	73.6(74.3 ~ 72.9)
	FBs	1.247 4(1.238 9 ~ 1.255 8)		
	ZEN	0.035 8(0.035 3 ~ 0.036 3)		
食用人群(男)	tDON	0.122 4(0.118 1 ~ 0.126 9)	1.358 8(1.346 4 ~ 1.371 3)	73.6(74.3 ~ 72.9)
	FBs	1.247 4(1.238 9 ~ 1.255 8)		
	ZEN	0.035 8(0.035 3 ~ 0.036 3)		
食用人群(女)	tDON	0.113 7 (0.109 7 ~ 0.117 9)	1.262 2(1.250 7 ~ 1.273 8)	79.2(80.0 ~ 78.5)
	FBs	1.158 7(1.150 8 ~ 1.166 5)		
	ZEN	0.033 2(0.032 8 ~ 0.033 7)		
儿童(3 ~ 6 岁)	tDON	0.133 9(0.129 2 ~ 0.138 9)	1.486 7(1.473 0 ~ 1.500 4)	67.3(67.9 ~ 66.6)
	FBs	1.364 8(1.355 4 ~ 1.374 0)		
	ZEN	0.039 1(0.038 7 ~ 0.039 7)		
少年(7 ~ 12 岁)	tDON	0.192 0(0.185 3 ~ 0.199 2)	2.132 0(2.112 6 ~ 2.151 8)	46.9(47.3 ~ 46.5)
	FBs	1.957 2(1.943 9 ~ 1.970 5)		
	ZEN	0.056 1(0.055 5 ~ 0.056 9)		
青少年(13 ~ 17 岁)	tDON	0.050 9(0.049 1 ~ 0.052 8)	0.565 1(0.559 9 ~ 0.570 4)	176.9(178.6 ~ 175.3)
	FBs	0.518 8(0.515 2 ~ 0.522 3)		
	ZEN	0.014 9(0.014 7 ~ 0.015 1)		
成年人(18 ~ 59 岁)	tDON	0.127 6(0.123 1 ~ 0.132 3)	1.416 6(1.403 7 ~ 1.429 6)	70.6(71.2 ~ 69.9)
	FBs	1.300 4(1.291 6 ~ 1.309 2)		
	ZEN	0.037 3(0.036 8 ~ 0.037 8)		
老年人(> =60 岁)	tDON	0.110 3(0.106 5 ~ 0.114 5)	1.225 0(1.213 8 ~ 1.236 4)	81.6(82.4 ~ 80.9)

（续表）

食用人群	真菌毒素	玉米碾磨制品 MB(LB ~ UB)		
		单一毒素暴露量 μg/(kg · bw · d)	累积暴露量 μg/(kg · bw · d)	累积暴露限量值 MOE
	FBs	1.124 6(1.116 9 ~ 1.132 2)		
	ZEN	0.032 2(0.031 9 ~ 0.032 7)		

食用人群	真菌毒素	玉米面制品 MB(LB ~ UB)		
		单一毒素暴露量 μg/(kg · bw · d)	累积暴露量 μg/(kg · bw · d)	累积暴露限量值 MOE
食用人群	tDON	0.021 9(0.020 5 ~ 0.023 2)	0.222 3(0.218 2 ~ 0.226 4)	449.8(458.4 ~ 441.7)
	FBs	0.202 4(0.199 5 ~ 0.205 3)		
	ZEN	0.011 4(0.011 3 ~ 0.011 6)		
食用人群(男)	tDON	0.026 8(0.025 2 ~ 0.028 5)	0.272 3(0.267 2 ~ 0.277 4)	367.2(374.2 ~ 360.4)
	FBs	0.247 9(0.244 3 ~ 0.251 5)		
	ZEN	0.014 0(0.013 9 ~ 0.014 1)		
食用人群(女)	tDON	0.017 9(0.016 8 ~ 0.019 0)	0.181 5(0.178 1 ~ 0.184 8)	551.0(561.5 ~ 541.1)
	FBs	0.165 2(0.162 8 ~ 0.167 5)		
	ZEN	0.009 3(0.009 2 ~ 0.009 4)		
儿童(3 ~ 6 岁)	tDON	–	–	–
	FBs	–		
	ZEN	–		
少年(7 ~ 12 岁)	tDON	0.049 8(0.046 7 ~ 0.052 8)	0.505 5(0.496 1 ~ 0.514 9)	197.8(201.6 ~ 194.2)
	FBs	0.460 2(0.453 6 ~ 0.466 8)		
	ZEN	0.026 0(0.025 7 ~ 0.026 3)		
青少年(13 ~ 17 岁)	tDON	0.021 4(0.020 1 ~ 0.022 8)	0.217 8(0.213 8 ~ 0.222 0)	459.2(467.7 ~ 450.5)
	FBs	0.198 3(0.195 5 ~ 0.201 2)		
	ZEN	0.011 2(0.011 1 ~ 0.011 3)		
成年人(18 ~ 59 岁)	tDON	0.019 0(0.017 8 ~ 0.020 2)	0.193 1(0.189 4 ~ 0.196 7)	517.9(528.0 ~ 508.4)
	FBs	0.175 8(0.173 2 ~ 0.178 3)		
	ZEN	0.009 9(0.009 8 ~ 0.010 0)		
老年人(> =60 岁)	tDON	0.028 1(0.026 4 ~ 0.029 9)	0.285 9(0.280 5 ~ 0.291 2)	349.8(356.5 ~ 343.4)
	FBs	0.260 3(0.256 5 ~ 0.264 0)		
	ZEN	0.014 7(0.014 5 ~ 0.014 8)		

注：“ – ”表示无相关暴露量数据。

3 讨 论

本研究系统揭示了济南市玉米及制品中 FBs、tDON 和 ZEN 的共污染特征及其人群暴露风险。结果显示，FBs 污染情况相对突出，与山东省[20]及全国数据[7]趋势一致，其高污染水平与高温高湿储存条件促进镰刀菌繁殖相关[21]。共污染现象普遍，tDON – FBs – ZEN 组合占比最高，提示共污染是主要风险。ZEN 虽均值较低，但其检出率 72.8% 高于全国数据(46%)[7]，超标率 17.3%，需警惕其作为雌激素类毒素的潜在内分泌干扰作用。

基于消费数据的累积风险评估显示，济南市居民存在对玉米及制品中真菌毒素的累积暴露的相关情况。除历下区和市中区外，其余区县 MOE 均低于参考阈值，低年龄组人群的相关膳食暴露指标相对偏高。玉米碾磨制品为主要暴露来源，其消费量与毒素暴露量正相关。年龄特异性分析表明 3 ~ 17 岁儿童暴露量相对较高，因其单位体重摄入量高且代谢系统未发育完全；老年人因玉米面制品摄入比例高需关注慢性暴露风险。性别差异较小，男性玉米碾磨制品的暴露贡献率(64.0%)略高于女性(55.9%)，可能与男性更多从事粮食加工相关职业有关。

本研究存在若干不确定性。首先，研究仅采用 2022—2023 年的样本进行调查，且样本量较小，可能导致评估结果存在不确定性。其次，暴露评估使用的是 2012 年山东省的消费数据，而居民生活习惯的改变会造成消费量差异，这可能使评估结果偏高或偏低。第三，在对玉米粒及玉米原粮进行评估时，未纳入加工因素的影响，加工过程可能会不同程度降低毒素含量，进而导致暴露水平被高估。第四，本研究对 tDON、FBs 和 ZEN 的共污染物组合进行累积风险评估，采用来源于不同作用模式的毒性分离点(BMDL5、BMDL10 和 NOALE 值)，以及缺乏关于真菌毒素之间潜在相互作用的数据(即协同/相加或拮抗作用)。例如，玉米赤霉烯酮(ZEN)与脱氧雪腐镰刀菌烯醇(tDON)的协同毒性，可能通过雌激素受体和炎症通路交互作用加剧生殖毒性[22]，但本研究未对此进行毒理学验证，这可能导致低估或高估多种真菌毒素的累积风险。未来需结合生物监测(如血清毒素标志物)和生理药代动力学(PBTK)模型，进一步细化风险

评估。

利益冲突声明　本研究不存在任何利益冲突

参考文献

[1] Qin X, Feng F, Li Y, et al. Maize yield improvements in China: past trends and future directions[J]. Plant Breeding, 2016, 135: 166 – 176.

[2] 肖玉,成升魁,谢高地,等. 我国主要粮食品种供给与消费平衡分析[J]. 自然资源学报,2017,32(6):927 – 936.
Xiao Y, Cheng SK, Xie GD, et al. The balance between supply and consumption of the main types of grain in China[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(6): 927 – 936. (In Chinese)

[3] Oliveira MS, Rocha A, Sulyok M, et al. Natural mycotoxin contamination of maize (Zea mays L.) in the South region of Brazil [J]. Food Control, 2017, 73(Part B): 127 – 132.

[4] Ayeni KI, Atanda OO, Krska R, et al. Present status and future perspectives of grain drying and storage practices as a means to reduce mycotoxin exposure in Nigeria[J]. Food Control, 2021, 126: 108074.

[5] Garbaba CA, Diriba S, Ocho FL, et al. Potential for mycotoxin – producing fungal growth in various agro – ecological settings and maize storage systems in southwestern Ethiopia[J]. Journal of Stored Products Research, 2018, 76: 22 – 29.

[6] Walker RJ, Kagot V, et al. Comparative effects of hermetic and traditional storage devices on maize grain: Mycotoxin development, insect infestation and grain quality[J]. Journal of Stored Products Research, 2018, 77: 34 – 44.

[7] Xin Y, Jie G, Qing L, et al. Co – occurrence of mycotoxins in maize and maize – derived food in China and estimation of dietary intake[J]. Food Additives & Contaminants: Part B, 2019, 12(2): 124 – 134.

[8] Antonissen G, Devreese M, De Baere S, et al. Impact of fusarium mycotoxins on hepatic and intestinal mRNA expression of cytochrome P450 enzymes and drug transporters, and on the pharmacokinetics of oral enrofloxacin in broiler chickens[J]. Food and Chemical Toxicology, 2017, 101: 75 – 83.

[9] Gruber – Dorninger C, Novak B, Nagl V, et al. Emerging mycotoxins: beyond traditionally determined food contaminants[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(33): 7052 – 7070.

[10] Alassane – Kpembi I, Schatzmayr G, Taranu I, et al. Mycotoxins co – contamination: Methodological aspects and biological relevance of combined toxicity studies[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(16): 3489 – 3507.

[11] Oueslati S, Berrada H, Juan – García A, et al. Multiple mycotoxin determination on tunisian Cereals – Based food and evaluation of the population exposure[J]. Food Analytical Methods, 2020, 13(6): 1271 – 1281.

[12] Assunção R, Vasco E, Nunes B, et al. Single – compound and cumulative risk assessment of mycotoxins present in breakfast cereals consumed by children from Lisbon region, Portugal[J]. Food and Chemical Toxicology, 2015, 86: 274 – 281.

[13] Han Z, Nie DX, Ediage EN, et al. Cumulative health risk assessment of co – occurring mycotoxins of deoxynivalenol and its acetyl derivatives in wheat and maize: case study, Shanghai, China [J]. Food and Chemical Toxicology, 2014, 74: 334 – 342.

[14] 孟繁磊,范宏,谭莉,等. 吉林省玉米真菌毒素污染状况及其膳食风险评估研究[J]. ,2021,29(5):88 – 94.
Meng FL, Fan H, Tan L, et al. Contamination status and dietary risk assessment of corn mycotoxins in Jilin Province[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(5): 88 – 94. (In Chinese)

[15] 郭耀东,刘艺茹,袁亚宏,等. 我国主要食品中伏马菌素污染水平分析与风险评估[J]. 西北农林大学学报,2012,2(1):78 – 88.
Guo YD, Liu YR, Yuan YH, et al. Fumonisins contamination in major food products and its dietary risk assessment in China[J]. Journal of Northwest A&F University, 2012, 2(1): 78 – 88. (In Chinese)

[16] Gong W, Liu A, Yao Y, et al. Nutrient supplement use among the Chinese population: A cross ~ sectional study of the 2010 ~ 2012 China nutrition and health surveillance[J]. Nutrients, 2018, 10 (1733): 2 – 17.

[17] Paola B, Roberta P, Paola G, et al. Mycotoxin mixtures in food and feed: holistic, innovative, flexible risk assessment modelling approach: MYCHIF[J]. EFSA Supporting Publication, 2020, 17: 57.

[18] EFSA. Management of left – censored data in dietary exposure assessment of chemical substances[J]. EFSA Journal, 2010, 8 (3): 1557 – 1653.

[19] Ingenbleek L, Sulyok M, Adegboye A, et al. Regional Sub – Saharan Africa total Diet study in Benin, Cameroon, Mali and Nigeria reveals the presence of 164 mycotoxins and other secondary metabolites in foods[J]. Toxins, 2019, 11(1): 54.

[20] Jiang DF, Li FH, Zheng FJ, et al. Occurrence and dietary exposure assessment of multiple mycotoxins in corn – based food products from Shandong, China[J]. Food Addit Contam Part B Surveill, 2019, 12(1): 10 – 17.

[21] Zhang MZ, Zhu DH, Su W, et al. Harmonizing Multi – Source remote sensing images for summer corn growth monitoring[J]. Remote Sensing, 2019, 11: 1266 – 1284.

[22] Widodo OS, Uno S, Kokushi E, et al. Exposure of cattle breeding herds to naturally Co – Contaminated zearalenone and deoxynivalenol: the relevance of a urinary mycotoxin monitoring system for herd health and food safety[J]. Toxins, 2024, 16(9): 402 – 422.

收稿日期:2025-09-08

(上接第 985 页)

[21] Park DY, Rho JW, Kim E, et al. Comparison of absolute and relative grip strength to predict incidence of diabetes mellitus in Korea: a prospective cohort study[J]. Metabolic Syndrome and Related Disorders, 2024, 22(6): 463 – 470.

[22] Almohaisen N, Gittins M, Todd C, et al. Prevalence of undernutrition, frailty and sarcopenia in Community – Dwelling People aged 50 years and above: systematic review and Meta – Analysis[J]. Nutrients, 2022, 14(8): 1537.

[23] Richter EA, Bilan PJ, Klip A. A comprehensive view of muscle glucose uptake: regulation by insulin, contractile activity, and exercise[J]. Physiological Reviews, 2025, 105(3): 1867 – 1945.

[24] Chen YX, Qian M, Gao F, et al. Potential effect of Irisin on sarcopenia: a systematic review [J]. BMC Musculoskeletal Disorders, 2025, 26(1): 520.

[25] Zhang YL, Zhang Y, Wang DJ, et al. Exercise – induced irisin attenuates ferroptosis in polycystic ovary syndrome by modulating the NCOA4 – FTH pathway[J]. Biochim Biophys Acta Mol Basis Dis, 2025, 1872(3): 168108.

[26] Mohammed SN, Jasim MH, Mahmood SH, et al. The role of irisin in exercise – induced muscle and metabolic health: a narrative review[J]. Naunyn – Schmiedeberg's Archives of Pharmacology, 2025, 398(9): 11463 – 11491.

收稿日期:2025-10-13