

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240830005

引用格式: 顾俊杰, 宋月, 张玫, 等. 2019—2023年大连市小麦、玉米及其制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇膳食暴露评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(3): 44–50.

GU JJ, SONG Y, ZHANG M, *et al.* Dietary exposure assessment of deoxynivalenol in *Triticum*, *Zea mays* and their processed products in Dalian City from 2019 to 2023 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(3): 44–50. (in Chinese with English abstract).

2019—2023年大连市小麦、玉米及其制品中 脱氧雪腐镰刀菌烯醇膳食暴露评估

顾俊杰¹, 宋月², 张玫², 宋晓昀^{2*}

(1. 大连医科大学公共卫生学院, 大连 116044; 2. 大连市疾病预防控制中心, 大连 116035)

摘要: 目的 分析大连地区小麦、玉米及其制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)的污染水平, 并对食用人群 DON 的急慢性膳食暴露风险进行评估。**方法** 2019—2023年在大连市内采集小麦、玉米及其制品样品 287 份, 应用液相色谱-串联质谱法检测 DON 含量, 结合 2018 年大连市居民膳食消费调查数据, 分别使用点估计和简单分布方法评估不同年龄组食用人群的 DON 急、慢性膳食暴露风险。**结果** 77.0%的小麦、玉米及其制品样品检出 DON, 超标率为 3.5%, 平均污染水平为 263.62 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。急性暴露评估显示, 各年龄组人群各类小麦、玉米及其制品的 DON 暴露量均未超过急性参考剂量。慢性暴露评估结果显示, 3~5 岁、6~10 岁、11~17 岁和 18~64 岁年龄组分别有 3.85%、7.30%、1.44%和 0.12%的食用人群 DON 暴露量超过暂定每日最大耐受摄入量。小麦及其制品是各年龄组人群 DON 膳食暴露的主要来源。**结论** 大连市小麦、玉米及其制品中 DON 污染较为普遍, 居民的 DON 膳食急性暴露风险未超出风险值, 不存在急性暴露评估风险。但部分低年龄组人群存在慢性暴露风险, 建议加强对小麦、玉米及其制品中 DON 的污染监测, 并关注高风险人群的健康风险。

关键词: 脱氧雪腐镰刀菌烯醇; 污染状况; 膳食暴露; 风险评估

Dietary exposure assessment of deoxynivalenol in *Triticum*, *Zea mays* and their processed products in Dalian City from 2019 to 2023

GU Jun-Jie¹, SONG Yue², ZHANG Mei², SONG Xiao-Yun^{2*}

(1. School of Public Health, Dalian Medical University, Dalian 116044, China;

2. Dalian Center for Disease Control and Prevention, Dalian 116035, China)

ABSTRACT: Objective To analyze the contamination levels of deoxynivalenol (DON) in *Triticum*, *Zea mays* and their processed products in the Dalian Region and assess the acute and chronic dietary exposures of DON to the consuming population. **Methods** From 2019 to 2023, 287 samples of *Triticum*, *Zea mays* and their processed

收稿日期: 2024-08-30

第一作者: 顾俊杰(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为营养与食品卫生。E-mail: gujunjie_yoyo@163.com

*通信作者: 宋晓昀(1982—), 女, 副主任医师, 主要研究方向为营养与食品卫生。E-mail: sxyljk@126.com

products were collected from Dalian. DON levels were determined using liquid chromatography-tandem mass spectrometry. Combined with the 2018 Dalian City dietary consumption survey data, acute and chronic dietary exposures of DON were assessed in different age groups using point estimation and simple distribution methods. **Results** DON was detected in 77.0% of the *Triticum*, *Zea mays* and their processed products, with a 3.5% over-standard rate. The average DON level was 263.62 $\mu\text{g}/\text{kg}$. Acute exposure assessment indicated that DON exposure levels in all age groups did not exceed the acute reference dose. Chronic exposure assessment revealed that 3.85%, 7.30%, 1.44%, and 0.12% of consuming populations in the 3–5, 6–10, 11–17 and 18–64 age groups, exceeded the provisional maximum tolerable daily intake, respectively. *Triticum* and its products were the primary dietary sources of DON exposure for all age groups. **Conclusion** DON contamination is prevalent in *Triticum*, *Zea mays* and their products in Dalian City. Acute dietary exposure of DON does not exceed the threshold values. However, chronic exposure risks are shown in low age groups. Enhanced monitoring of DON contamination in *Triticum*, *Zea mays* and their processed products is recommended, along with a focus on the health risks for high-risk populations.

KEY WORDS: deoxynivalenol; contamination; dietary exposure; risk assessment

0 引言

脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON), 又名呕吐毒素, 属 B 型单端孢霉烯族毒素^[1]。DON 是污染谷类作物的主要真菌毒素之一, 包括玉米、小麦、大麦等, 可影响谷类作物的产量和质量^[2-7], 并对人和动物具有多种毒性作用, 包括胃肠道毒性、生殖系统毒性、免疫毒性、神经毒性以及肝脏毒性等^[8-12]。DON 主要由禾谷镰刀菌和黄色镰刀菌产生^[13], 谷物从田间种植到收获贮藏各个阶段均可能被真菌毒素污染^[14], DON 毒素的产生与温度、湿度、水分等条件密切相关^[15-17]。DON 对人和动物具有急性和慢性毒性作用^[18-20], 国际癌症研究机构于 1998 年将 DON 列为第 3 类致癌物^[21]。联合国粮农组织/世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会(Joint Food and Agriculture Organization/World Health Organization Expert Committee on Food Additives, JECFA) 2011 年建立了 DON 的急性参考剂量(acute reference dose, ARfD)和暂定每日最大耐受摄入量(provisional maximum tolerable daily intake, PMTDI)分别为 8 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$ 和 1 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$ ^[22]。为控制食品中 DON 的污染, 多个国家和地区制定了谷物 DON 限量标准, 我国 GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》中规定, 谷物及其制品中 DON 限量为 1000 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

在我国, DON 的污染主要发生在长江中下游的温暖潮湿地区以及华北平原、东北平原等小麦和玉米主产区^[15]。调查表明, 东北地区谷物及其制品 DON 检出率和平均污染水平在我国位于前三^[23]。但东北地区谷物及其制品中 DON 的膳食暴露评估鲜有报道。大连位于东北地区最南端, 本地区食品安全风险监测发现, 相比其他谷物及其制品, 小麦和玉米中 DON 检出率较高。鉴于此, 本研究通过分析大连地区小麦及其制品、玉米及其制品中 DON 的污染状况, 结合本地区人群谷物及其制品消费量数据, 对不同年

龄段人群开展 DON 的急性和慢性膳食暴露评估。旨在评估当地小麦、玉米及其制品中 DON 污染带来的健康风险, 为政府部门制定防控措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 DON 污染水平数据

小麦、玉米及其制品中 DON 污染数据来自 2019—2023 年大连市食品安全风险监测。小麦及其制品和玉米及其制品的样品采自流通环节(商店、超市、农贸市场等)或粮库, 每年采样时间为 9~12 月。4 年共采集样品 287 份, 其中小麦及其制品 169 份, 玉米及其制品 118 份。采样后将样品密封, 低温保存。

样品的采集、试样制备、前处理及检测严格按照《国家食品污染和有害因素风险监测工作手册》进行。在样品检测过程中进行实验室内部质量控制及外部能力验证, 采取有证标准物质测定、标准添加回收等质控方式, 保证检测数据准确可靠。

1.1.2 消费量数据

小麦、玉米及其制品的消费量数据来自 2018 年大连市居民膳食消费状况调查。在全市 11 个县市区范围内采用多阶段分层整群随机抽样方法, 抽取 800 户家庭, 对其中 2344 名 3 岁及以上居民基于 3 d 24 h 膳食回顾法开展过去 3 个月各类食品(包括小麦及其制品和玉米及其制品)的消费量和消费频率的问卷调查。考虑到不同年龄组人群小麦、玉米及其制品消费量的差异, 研究将全人群分为 3~5 岁、6~10 岁、11~17 岁、18~64 岁和 65 岁及以上 5 个年龄组。

1.2 方法

1.2.1 急性暴露评估

使用点评估方法, 计算食用人群对小麦、玉米及其制

品来源的 DON 的急性暴露量。计算如公式(1):

$$\text{EXP}_a = \frac{F_i \times C_i}{1000 \times \text{BW}} \quad (1)$$

式中, EXP_a 为某人群每日急性膳食暴露量, $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$; F_i 为第 i 类谷物及其制品食用人群的 $P_{97.5}$ 消费量, g/d ; C_i 为第 i 类谷物及其制品中 DON 的最高污染水平, $\mu\text{g}/\text{kg}$; BW 为某人群的平均体重, kg 。

1.2.2 慢性暴露评估

使用简单分布评估方法, 计算每个个体小麦、玉米及其制品来源的 DON 的慢性暴露量。计算如公式(2):

$$\text{EXP}_c = \sum_{i=1}^n \frac{(F_i' \times C_i')}{1000 \times \text{BW}'} \quad (2)$$

式中, EXP_c 为个体每日慢性膳食暴露量, $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$; F_i' 为个体第 i 类谷物及其制品的每日消费量, g/d ; C_i' 为第 i 类谷物及其制品中 DON 的平均污染水平, $\mu\text{g}/\text{kg}$; BW' 为个体体重, kg 。

1.2.3 风险特征描述

采用危害商值(hazard quotient, HQ)^[24]描述小麦、玉米及其制品的 DON 的暴露风险值, 计算如公式(3):

$$\text{HQ} = \frac{\text{EXP}}{\text{ARfD} / \text{PMTDI}} \quad (3)$$

式中, EXP 为暴露量, $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$; 当开展急性暴露评估时, 暴露量与 DON 的急性参考剂量(acute reference dose, ARfD) [$8 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$]^[22]进行比较; 当开展慢性暴露评估时, 暴露量与 DON 暂定每日最大耐受摄入量(provisional maximum tolerable daily intake, PMTDI) [$1 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$]^[22]进行比较。当 $\text{HQ} < 1$ 时, 认为该物质的暴露风险较低, 可以接受; 当 $\text{HQ} \geq$

1 时, 则认为该物质的暴露风险较高, 需引起重视。

1.3 数据处理

依据世界卫生组织(World Health Organization, WHO)对未检出数据的处理原则^[25], 当未检出数据的比例小于等于 60%时, 所有未检出数据用 1/2 检出限替代; 当未检出数据的比例高于 60%时, 所有未检出数据分别用 0 和检出限替代。采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析。小麦、玉米及其制品的 DON 含量以 P_{50} 、平均值、最小值-最大值表示。食物消费量以平均值、 P_{25} 、 P_{50} 、 P_{75} 、 P_{95} 、 $P_{97.5}$ 表示。采用 Mann-Whitney U 检验和 Kruskal-Wallis H 检验比较不同品种、采样环节、包装方式的小麦、玉米及其制品 DON 的含量, 采用卡方检验比较不同品种小麦、玉米及其制品 DON 检出率和超标率。所有统计学检验均为双侧检验, 检测水平 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 DON 的污染状况

大连地区小麦、玉米及其制品 DON 总检出率为 77.0%, 总超标率为 3.5%, 平均污染水平为 $263.62 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。其中, 小麦及其制品 DON 检出率和污染浓度均显著高于玉米及其制品 ($\chi^2=5.026, P<0.05$; $Z=-1.975, P<0.05$), 见表 1。

不同采样环节、包装方式样品 DON 污染情况比较发现, 粮库采集的玉米及其制品 DON 检出率和污染水平中位数均显著高于流通环节采集样品 ($\chi^2=10.941, P<0.01$; $Z=-5.348, P<0.01$), 散装玉米及其制品样品的 DON 检出率和污染水平显著高于定型包装样品, 见表 2。

表 1 小麦、玉米及其制品中 DON 的污染水平
Table 1 DON contamination levels in *Triticum*, *Zea mays* and their processed products

食品种类	样本量	检出率/%	超标率/%	均值/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$	$P_{50}/(\mu\text{g}/\text{kg})$	范围/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$
小麦及其制品	169	81.7*	4.1	265.36	196.50*	0.00~1990.80
玉米及其制品	118	70.3	2.5	261.13	113.95	0.00~1382.00
合计	287	77.0	3.5	263.62	156.60	0.00~1990.80

注: *. 具有显著性差异, $P<0.05$ 。

表 2 不同采样环节、包装方式、采样年份小麦、玉米及其制品中 DON 的污染水平
Table 2 DON contamination levels in *Triticum*, *Zea mays* and their processed products across different sampling stages, packaging methods and sampling years

分类	具体分类	小麦及其制品			玉米及其制品			合计		
		样本量	检出率/%	$P_{50}/(\mu\text{g}/\text{kg})$	样本量	检出率/%	$P_{50}/(\mu\text{g}/\text{kg})$	样本量	检出率/%	$P_{50}/(\mu\text{g}/\text{kg})$
采样环节	流通环节	169	81.7	196.50	72	62.5	64.05	241	75.9	146.20
	粮库	—	—	—	46	82.6**	559.50**	46	82.6	559.50**
包装方式	散装	99	81.8	238.20	97	75.3**	138.40**	196	78.6	175.10**
	定型包装	70	81.4	157.08	21	47.6	2.50	91	73.6	115.20
采样年份	2019 年	19	84.2	129.40	12	50.0	11.45	31	71.0	80.50
	2020 年	120	84.2	241.80	30	73.3	74.50	150	82.0	177.00
	2022 年	—	—	—	36	61.1	52.75	36	61.1	52.75
	2023 年	30	70	156.36	40	82.5	531.50	70	77.1	212.40

注: —. 无相应采样样品; **. 具有极显著差异, $P<0.01$ 。

2.2 人群小麦、玉米及其制品消费量

各年龄组人群小麦及其制品的食用比例(97.2%~98.6%)远高于玉米及其制品(47.2%~87.3%),小麦及其制品的平均消费量(33.02~55.42 g/d)也高于玉米及其制品(3.93~26.44 g/d)。在各年龄组至少食用一种谷物及其制品的人群中,大于等于65岁人群小麦、玉米及其制品的食用比例(99.2%)和平均消费量(76.51 g/d)最高。见表3。

2.3 人群暴露风险评估

2.3.1 急性暴露风险

各年龄组小麦及其制品食用人群的DON急性暴露量范围为4.31~7.86 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{bw}\cdot\text{d})$, HQ范围为0.54~0.98;玉米及其制品食用人群的DON急性暴露量范围为0.67~

1.43 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{bw}\cdot\text{d})$, HQ范围为0.08~0.18。见表4。

2.3.2 慢性暴露风险

不同年龄组小麦、玉米及其制品食用人群DON平均暴露量范围介于0.28~0.46 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{bw}\cdot\text{d})$ 。3~5岁、6~10岁和11~17岁谷物及其制品的高消费个体(P90~P99)的DON暴露水平分别介于0.83~1.54 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{bw}\cdot\text{d})$ 、0.86~1.24 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{bw}\cdot\text{d})$ 和0.51~1.02 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{bw}\cdot\text{d})$,见表5。慢性暴露评估结果显示,3~5岁、6~10岁、11~17岁和18~64岁年龄组分别有3.85%、7.30%、1.44%和0.12%的食用人群DON暴露量超过暂定每日最大耐受摄入量。各年龄组中小麦及其制品对DON暴露量贡献率均高于玉米及其制品,其贡献率范围为67.4%~89.3%,见图1。

表3 不同年龄组人群小麦、玉米及其制品消费量
Table 3 Consumption of *Triticum*, *Zea mays* and their processed products by different age groups

年龄组	品种	食用比例/% (食用人数/调查人数)	消费量/(g/d)					
			平均值	中位数	P25	P75	P95	P97.5
3~5岁	小麦及其制品	98.1 (52/53)	33.02	30.83	11.82	48.92	72.97	79.31
	玉米及其制品	47.2 (25/53)	3.93	3.50	1.75	3.50	8.95	9.60
	合计	98.1 (52/53)	34.91	31.80	13.57	49.03	73.60	79.70
6~10岁	小麦及其制品	98.6 (137/139)	42.07	29.97	14.44	67.50	105.50	124.49
	玉米及其制品	64.0 (89/139)	12.13	8.75	3.50	17.75	30.45	35.00
	合计	98.6 (137/139)	49.95	38.25	17.94	74.06	121.23	139.38
11~17岁	小麦及其制品	97.2 (139/143)	45.09	38.72	20.19	60.52	104.59	127.53
	玉米及其制品	68.5 (98/143)	14.34	17.50	8.75	18.00	31.50	33.51
	合计	97.2 (139/143)	55.20	47.47	30.95	73.33	119.51	139.60
18~64岁	小麦及其制品	97.2 (1708/1757)	55.42	46.72	25.09	78.13	132.66	159.97
	玉米及其制品	74.9 (1316/1757)	20.01	17.50	8.75	26.25	49.00	62.50
	合计	97.7 (1717/1757)	70.47	60.50	34.56	95.63	161.17	182.35
≥65岁	小麦及其制品	97.6 (246/252)	54.11	46.25	26.28	73.13	124.10	148.22
	玉米及其制品	87.3 (220/252)	26.44	17.50	10.50	35.00	62.50	70.09
	合计	99.2 (250/252)	76.51	69.02	41.18	103.67	172.73	186.84
全部食用人群	小麦及其制品	97.4 (2282/2344)	53.34	44.19	23.19	74.38	128.72	155.80
	玉米及其制品	74.6 (1748/2344)	19.87	17.50	8.75	26.25	53.75	62.50
	合计	97.9 (2295/2344)	68.17	59.84	32.63	92.17	159.00	179.64

表4 大连地区小麦、玉米及其制品消费人群的DON急性暴露风险

Table 4 Acute DON exposure risk in *Triticum*, *Zea mays* and their processed products consumers in the Dalian Region

年龄组	谷物及其制品	食用比例/(食用人数/调查人数)	DON	
			EXPa/[$\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{bw}\cdot\text{d})$]	HQ
3~5岁	小麦及其制品	98.1 (52/53)	7.86	0.98
	玉米及其制品	47.2 (25/53)	0.67	0.08
6~10岁	小麦及其制品	98.6 (137/139)	7.50	0.94
	玉米及其制品	64.0 (89/139)	1.42	0.18
11~17岁	小麦及其制品	97.2 (139/143)	4.65	0.58
	玉米及其制品	68.5 (98/143)	0.85	0.11
18~64岁	小麦及其制品	97.2 (1708/1757)	4.67	0.58
	玉米及其制品	74.9 (1316/1757)	1.26	0.16
≥65岁	小麦及其制品	97.6 (246/252)	4.31	0.54
	玉米及其制品	87.3 (220/252)	1.43	0.18
合计	小麦及其制品	97.4 (2282/2344)	4.84	0.60
	玉米及其制品	74.6 (1748/2344)	1.33	0.17

表 5 大连地区小麦、玉米及其制品消费人群的 DON 慢性暴露风险

Table 5 Chronic DON exposure risk in *Triticum*, *Zea mays* and their processed products consumers in the Dalian Region

年龄组	食用比例/% (食用人数/ 调查人数)	均值		P25		P50		P75		P90		P95		P97.5		P99		最大值	
		EXPc	HQ	EXPc	HQ	EXPc	HQ	EXPc	HQ	EXPc	HQ	EXPc	HQ	EXPc	HQ	EXPc	HQ	EXPc	HQ
3~5岁	98.1 (52/53)	0.46	0.46	0.24	0.24	0.43	0.43	0.57	0.57	0.83	0.83	0.98	0.98	1.09	1.09	1.54	1.54	1.97	1.97
6~10岁	98.6 (137/139)	0.42	0.42	0.18	0.18	0.34	0.34	0.60	0.60	0.86	0.86	1.03	1.03	1.15	1.15	1.24	1.24	1.37	1.37
11~17岁	97.2 (139/143)	0.29	0.29	0.15	0.15	0.24	0.24	0.35	0.35	0.51	0.51	0.72	0.72	0.82	0.82	1.02	1.02	1.19	1.19
18~64岁	97.7 (1717/1757)	0.28	0.28	0.15	0.15	0.25	0.25	0.37	0.37	0.51	0.51	0.61	0.61	0.68	0.68	0.77	0.77	1.08	1.08
≥65岁	99.2 (250/252)	0.30	0.30	0.19	0.19	0.28	0.28	0.41	0.41	0.53	0.53	0.60	0.60	0.71	0.71	0.82	0.82	0.93	0.93
合计	97.9 (2295/2344)	0.29	0.29	0.15	0.15	0.26	0.26	0.39	0.39	0.55	0.55	0.66	0.66	0.77	0.77	0.97	0.97	2.00	2.00

注: EXPc 的单位为 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$ 。

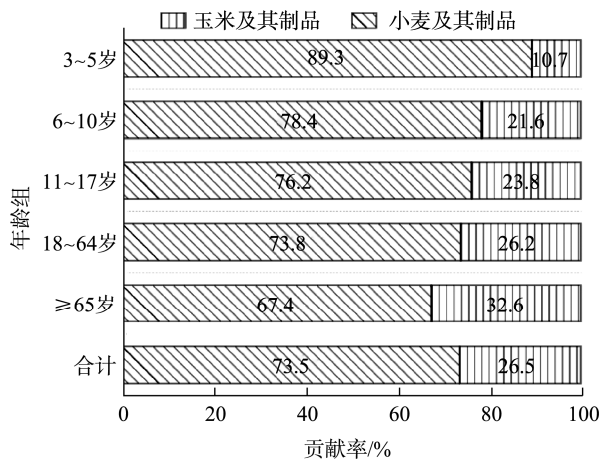


图 1 不同谷物及其制品对 DON 暴露量的贡献率

Fig.1 Contribution rate of different grains and their processed products to DON exposure

3 讨论与结论

本研究分析了大连地区玉米和小麦两种谷物及其制品的 DON 污染水平,并评估了该地区不同年龄组人群来自两种谷物及其制品的 DON 急性和慢性膳食暴露风险。

结果显示,大连地区 287 份小麦、玉米及其制品 DON 的检出率为 77.0%,与王丹^[23]报道的东北其他地区谷物及其制品中 DON 的检出率 70.3%基本持平,但本研究 DON 的总体超标率 3.5%显著高于东北其他地区谷物及其制品 DON 超标率 0.9%^[23]。大连地区的海洋气候导致空气湿度较高,可能是导致两种谷物及其制品中 DON 超标率高于东北其他地区的原因。本研究中小麦及其制品中 DON 的平均值为 263.62 $\mu\text{g}/\text{kg}$,低于河南省^[26]和安徽省^[27]报道的小麦及其制品中 DON 的平均值 353.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 432.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

温度和湿度对 DON 的形成和积累具有显著影响,南方地区的亚热带季风气候及热带季风气候为 DON 的产生提供了有利条件^[28-29],导致上述地区小麦及制品中 DON 平均值高于大连地区。

本研究结果显示,粮库采集的玉米及其制品中 DON 污染水平显著高于流通环节采集的样品。此外,小麦、玉米及其制品散装样品的 DON 污染水平均显著高于定型包装样品。这提示储存和加工环节是影响谷物 DON 污染水平的重要因素和控制污染的关键环节。

急性暴露评估显示,所有年龄组小麦、玉米及其制品食用人群的 DON 急性暴露量均未超过 ARfD,但 3~5 岁儿童小麦及其制品的 DON 急性暴露量为 7.86 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$,对应的 HQ 为 0.98,接近阈值 1。研究表明,儿童单位体重的污染物暴露量显著高于成人^[30-31]。长期暴露于 DON 环境下,可影响儿童的生长发育,导致体重增长缓慢、免疫力低下等问题^[32-33],应予以关注。慢性暴露评估结果显示,各年龄组 DON 暴露量的平均水平均未超过 PMTDI,但低年龄组人群 DON 的平均暴露量高于成年人,同时发现低年龄组 DON 暴露量的 P95~P99 已超过 PMTDI,提示低年龄组的高消费量人群存在 DON 慢性暴露风险。王小丹等^[34]对中国不同地区居民谷类食物 DON 暴露评估显示,49.2%的北方居民谷类食物 DON 暴露量超过 PMTDI,各年龄组中,3~6 岁儿童 DON 平均暴露量最高,达到 2.12 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$ 。李依玲等^[35]对中国不同地区居民小麦及其制品 DON 的暴露评估结果显示,南北各地区居民低年龄组人群(≤ 6 岁组)的 DON 暴露量均高于其他年龄组。SUNDHEIM 等^[36]对挪威不同年龄人群进行 DON 暴露风险评估,结果显示婴儿和儿童的高暴露量超过 PMTDI,高达 3.5 倍。SILVA 等^[37]对巴西小麦粉食品中 DON 暴露评估显示青少年是一个风

险群体。结合以上文献和本研究结论,应格外关注低年龄组人群尤其儿童的 DON 慢性暴露风险。在本研究的各年龄组中,小麦及其制品均为 DON 暴露量的主要贡献食品,这与人群对小麦及其制品消费量高有关,与李依玲等^[35]提出北方地区居民小麦及其制品消费量高是造成 DON 暴露量高的根本原因结论一致。

本研究存在以下不确定性: DON 的乙酰基衍生物^[38] 3-乙酰基-DON (3-acetyldeoxynivalenol, 3-Ac-DON)、15-乙酰基-DON (15acetyldeoxynivalenol, 15-Ac-DON)在谷物中虽然检出率低于 DON,但它们仍可以引起慢性毒性和急性毒性^[39-41],由于本研究样品中 3-Ac-DON 和 15-Ac-DON 的检出率较低,因此暂未考虑其影响,这可能在一定程度上低估了人群谷物及其制品 DON 的暴露风险。

综上所述,大连市居民通过小麦、玉米及其制品摄入 DON 的急性暴露风险总体可控,但低年龄组人群存在慢性暴露风险,建议相关部门对小麦、玉米及其制品开展 DON 的连续监测和定期评估,为控制小麦、玉米及其制品中真菌毒素的污染水平,维护人群健康提供科学依据。

参考文献

- [1] 吴永宁,周爽,任一平,等. 食品中真菌毒素检测方法标准操作程序[M]. 北京:中国质检出版社,2018.
WU YN, ZHOU S, REN YP, *et al.* Food mycotoxin detection method standard operating procedure [M]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2018.
- [2] LESSARD M, SAVARD C, DESCHENE K, *et al.* Impact of deoxynivalenol (DON) contaminated feed on intestinal integrity and immune response in swine [J]. Food and Chemical Toxicology, 2015, 80: 7-16.
- [3] YU M, CHEN L, PENG Z, *et al.* Mechanism of deoxynivalenol effects on the reproductive system and fetus malformation: Current status and future challenges [J]. Toxicology in Vitro, 2017, 41: 150-158.
- [4] SUN Y, HUANG K, LONG M, *et al.* An update on immunotoxicity and mechanisms of action of six environmental mycotoxins [J]. Food and Chemical Toxicology, 2022, 163: 112895.
- [5] RISSATO DF, DESANTI-RAMPAZZO AP, BORGES SC, *et al.* Chronic ingestion of deoxynivalenol-contaminated diet dose-dependently decreases the area of myenteric neurons and gliocytes of rats [J]. Neurogastroenterology & Motility, 2020, 32(4): e13770.
- [6] SKIEPKO N, PRZYBYLSKA-GORNOWICZ B, GAJECKA M, *et al.* Effects of deoxynivalenol and zearalenone on the histology and ultrastructure of pig liver [J]. Toxins, 2020, 12(7): 463.
- [7] REDDY KE, KIM M, KIM KH, *et al.* Effect of commercially purified deoxynivalenol and zearalenone mycotoxins on microbial diversity of pig cecum contents [Z]. 2021.
- [8] ZHANG C, ZHANG KF, CHEN FJ, *et al.* Deoxynivalenol triggers porcine intestinal tight junction disorder: Insights from mitochondrial dynamics and mitophagy [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 248: 114291.
- [9] JIA B, LIN H, YU S, *et al.* Mycotoxin deoxynivalenol-induced intestinal flora disorders, dysfunction and organ damage in broilers and pigs [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 451: 131172.
- [10] LI X, GOU F, ZHU J, *et al.* Deoxynivalenol induced intestinal barrier injury, mitochondrial dysfunction and calcium overload by inositol 1,4,5-triphosphate receptors (IP3Rs)-mitochondrial calcium uniporter (MCU) calcium axis [J]. Science of the Total Environment, 2024, 913: 169729.
- [11] QIAO Y, JI X, GUO H, *et al.* Complementary transcriptomic and proteomic analyses elucidate the toxicological molecular mechanisms of deoxynivalenol-induced contractile dysfunction in enteric smooth muscle cells [J]. Food and Chemical Toxicology, 2024, 186: 114545.
- [12] QIU Y, YANG J, WANG L, *et al.* Dietary resveratrol attenuation of intestinal inflammation and oxidative damage is linked to the alteration of gut microbiota and butyrate in piglets challenged with deoxynivalenol [J]. Journal of Animal Science and Biotechnology, 2021, 12: 71.
- [13] 姜冬梅,王荷,武琳霞,等. 小麦中呕吐毒素研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(2): 423-432.
JIANG DM, WANG H, WU LX, *et al.* Research progress of deoxynivalenol in wheat [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(2): 423-432.
- [14] 张娜娜,张守梅,陈利容,等. 小麦重要生育期和入仓阶段籽粒真菌污染及呕吐毒素积累情况分析[J]. 农产品质量与安全, 2020(4): 33-39, 58.
ZHANG NN, ZHANG SM, CHEN LR, *et al.* Analysis of fungus contamination and deoxynivalenol accumulation of wheat during important growth and warehousing [J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2020(4): 33-39, 58.
- [15] 刘慧,曾祥权,周玉春,等. 谷物类食品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)及其衍生物的研究现状[J]. 食品工业科技, 2021, 42(18): 435-445.
LIU H, ZENG XQ, ZHOU YC, *et al.* Research progress of deoxynivalenol (DON) and its derivatives in cereal foods [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(18): 435-445.
- [16] RYBECKY AI, CHULZE SN, CHIOTTA ML. Effect of water activity and temperature on growth and trichothecene production by *Fusarium meridionale* [J]. International Journal of Food Microbiology, 2018, 285: 69-73.
- [17] 周鸿媛. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)的多代毒性及其联合毒性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018.
ZHOU HY. Study on the multi-generational and combined toxic effects of deoxynivalenol (DON) [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.
- [18] TARDIVEL C, AIRAULT C, DJELLOUL M, *et al.* The food born mycotoxin deoxynivalenol induces low-grade inflammation in mice in the absence of observed-adverse effects [J]. Toxicology Letters, 2015, 232(3): 601-611.
- [19] MARC RA. Mycotoxins and food safety-recent advances [Z]. 2022.
- [20] CHEN D, CHEN P, CHENG Y, *et al.* Deoxynivalenol decontamination in raw and germinating barley treated by plasma-activated water and intense pulsed light [J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12(2): 246-250.
- [21] 宇盛好,李亦奇,彭少杰. 上海市市售婴幼儿谷类辅助食品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇的膳食暴露评估[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(12): 135-138.
YU SH, LI YQ, PENG SJ. Dietary exposure assessment of deoxynivalenol in commercially available infant cereal-based complementary foods in Shanghai [J]. Cereals & Oils 2023, 36(12): 135-138.

- [22] JECFA. Evaluation of certain contaminants in food: Seventy-second [72nd] report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives [R]. World Health Organization Technical Report, 2011.
- [23] 王丹. 我国大陆谷物 DON 检出现状及空间分布特征的生态学研究[D]. 济南: 山东第一医科大学, 2022.
- WANG D. Ecological study on the current status and spatial distribution characteristics of DON detection in cereals in mainland China [D]. Ji'nan: Shandong First Medical University, 2022.
- [24] 马洁, 罗莎, 赵帅, 等. 2016—2022 年天津市市售猪肉、鸡肉中兽药残留监测结果分析及膳食暴露评估[J]. 现代预防医学, 2023, 50(15): 2848–2853.
- MA J, LUO S, ZHAO S, *et al.* Analysis of surveillance results and dietary exposure assessment of veterinary drug residues in pork and chicken sold in Tianjin from 2016 to 2022 [J]. *Modern Preventive Medicine*, 2023, 50(15): 2848–2853.
- [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(4): 63–64.
- WANG XQ, WU YN, CHEN JS. Low-level data processing problems in food contaminant monitoring [J]. *Chinese Journal of Preventive Medicine*, 2002(4): 63–64.
- [26] 张莉, 吴莉, 李爽, 等. 2016—2022 年河南省驻马店市 182 份小麦粉及其制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其衍生物污染水平与膳食风险评估[J]. 河南预防医学杂志, 2024(3): 192–195.
- ZHANG L, WU L, LI S, *et al.* Contamination levels and dietary risk assessment of deoxynivalenol and its derivatives in 182 wheat flour and products in Zhumadian City, Henan Province from 2016 to 2022 [J]. *Modern Disease Prevention and Control*, 2024(3): 192–195.
- [27] 王小丹, 陈志飞, 周爽, 等. 安徽省居民家庭内即食状态谷类食物脱氧雪腐镰刀菌烯醇污染调查和暴露评估[J]. 中国食物与营养, 2019, 25(5): 15–19.
- WANG XD, CHEN ZF, ZHOU S, *et al.* Investigation and exposure assessment of deoxynivalenol contamination in ready-to-eat cereals in households of Anhui Province [J]. *Food and Nutrition in China*, 2019, 25(5): 15–19.
- [28] 任淑艳, 赵薇, 赵岚, 等. 2014—2018 年黑龙江省小麦和小麦粉中脱氧雪腐镰刀菌烯醇污染水平调查与分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(12): 4011–4015.
- REN SY, ZHAO W, ZHAO L, *et al.* Investigation and analysis of deoxynivalenol contamination levels in wheat and wheat flour in Heilongjiang province from 2014 to 2018 [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2020, 11(12): 4011–4015.
- [29] 段鸿渐, 李汶霞, 郝得隆, 等. 2020 年我国粮食及其产品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇毒素污染情况与分布特征[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(22): 8948–8953.
- DUAN HJ, LI WX, HAO DL, *et al.* Contamination status and distribution characteristics of deoxynivalenol in grain and its products in China in 2020 [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(22): 8948–8953.
- [30] ESLAMIZAD S, YAZDANPANA H, HADIAN Z, *et al.* Exposure to multiple mycotoxins in domestic and imported rice commercially traded in Tehran and possible risk to public health [J]. *Toxicology Reports*, 2021, 8: 1856–1864.
- [31] KUIPER-GOODMAN T, HILTS C, BILLIARD SM, *et al.* Health risk assessment of ochratoxin A for all age-sex strata in a market economy [J]. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 2010, 27(2): 212–240.
- [32] ZHANG J, YOU L, WU W, *et al.* The neurotoxicity of trichothecenes T-2 toxin and deoxynivalenol (DON): Current status and future perspectives [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2020, 145: 111676.
- [33] TAN T, CHEN T, ZHU W, *et al.* Adverse associations between maternal deoxynivalenol exposure and birth outcomes: A prospective cohort study in China [J]. *BMC Medicine*, 2023, 21(1): 1–11.
- [34] 王小丹, 杨欣, 徐海滨, 等. 中国不同地区居民谷类食物脱氧雪腐镰刀菌烯醇暴露量及健康风险评估[J]. 中华预防医学杂志, 2019(4): 394–397.
- WANG XD, YANG X, XU HB, *et al.* Exposure levels and health risk assessment of deoxynivalenol in cereal foods among residents in different regions of China [J]. *Chinese Journal of Preventive Medicine*, 2019(4): 394–397.
- [35] 李依玲, 刘佳琳, 黄娇, 等. 中国不同地区居民经小麦及其制品摄入脱氧雪腐镰刀菌烯醇暴露评估[J]. 卫生研究, 2022, 51(5): 815–822, 843.
- LI YL, LIU JL, HUANG J, *et al.* Exposure assessment of deoxynivalenol intake from wheat and its products in residents of different regions in China [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2022, 51(5): 815–822, 843.
- [36] SUNDHEIM L, LILLEGAARD IT, FÆSTE CK, *et al.* Deoxynivalenol exposure in norway, risk assessments for different human age groups [J]. *Toxins*, 2017, 9(2): 46.
- [37] SILVA MV, PANTE GC, ROMOLI JCZ, *et al.* Occurrence and risk assessment of population exposed to deoxynivalenol in foods derived from wheat flour in Brazil [J]. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 2018, 35(3): 546–554.
- [38] KNUTSEN HK, ALEXANDER J. 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.
- [39] PAYROS D, ALASSANE-KPEMBI I, PIERRON A, *et al.* Toxicology of deoxynivalenol and its acetylated and modified forms [J]. *Archives of Toxicology*, 2016, 90(12): 2931–2957.
- [40] YAN P, LIU Z, LIU S, *et al.* Natural occurrence of deoxynivalenol and its acetylated derivatives in Chinese maize and wheat collected in 2017 [J]. *Toxins*, 2020, 12(3): 200.
- [41] GANESAN AR, MOHAN K, KARTHICK RD, *et al.* Distribution, toxicity, interactive effects, and detection of ochratoxin and deoxynivalenol in food: A review [J]. *Food Chemistry*, 2022, 378: 131978.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)