

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241205002

引用格式: 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. (in Chinese with English abstract).

# 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

任贝贝, 刘梦颖, 陈福尊, 高佳, 赵晨曦, 路杨, 王丽英\*

(河北省疾病预防控制中心, 石家庄 050021)

**摘要:** **目的** 了解河北地区谷物及其制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)及其衍生物的污染状况及暴露风险。**方法** 对河北地区2016年到2023年风险监测的1594份谷物及其制品,采用同位素稀释液相色谱-串联质谱法测定DON及其衍生物,分析其浓度,根据成人膳食消费量评估河北省居民对谷物及其制品中DON的暴露风险。**结果** DON在小麦及其制品中检出率最高,检出率范围在61.40%~97.78%。DON在玉米及其制品中检出率范围在36.13%~86.75%。DON在米类中检出率较低,在大米中检出率为0%;在薏米中检出率为20.31%。风险评估显示,成人慢性暴露范围为0.02~0.62  $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$ ,结果均小于每日最大容许摄入量指导值1.0  $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$ 。**结论** DON在谷物及其制品中污染较为普遍,谷物及其制品中小麦及其制品的DON检出率和污染水平均最高,玉米类的污染水平次之,米类的污染水平相对较低。成人通过摄入面类、玉米和米类造成DON的膳食暴露无显著慢性摄入风险。面类是人群DON暴露的主要来源,应持续关注谷物及其制品中DON污染问题,降低膳食暴露风险。

**关键词:** 河北省; 谷物及其制品; 脱氧雪腐镰刀菌烯醇; 风险评估

## Contamination situations and exposure risks assessments of deoxynivalenol and its derivatives in grains and their products in Hebei Province from 2016 to 2023

REN Bei-Bei, LIU Meng-Ying, CHEN Fu-Zun, GAO Jia, ZHAO Chen-Xi,  
LU Yang, WANG Li-Ying\*

(Hebei Provincial Center for Disease Control and Prevention, Shijiazhuang 050021, China)

**ABSTRACT: Objective** To investigate the contamination situations and exposure risks of deoxynivalenol (DON) and their derivatives in grains and their products in Hebei Province. **Methods** Totally 1594 grains and their products in Hebei Province from 2016 to 2023 were investigated. DON and its derivatives were determined by

收稿日期: 2024-12-05

基金项目: 河北省医学科学研究课题计划资助项目(20210101)

第一作者: 任贝贝(1986—),女,硕士,副主任技师,主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 13931143601@163.com

\*通信作者: 王丽英(1982—),女,博士,主任技师,主要研究方向为食品安全检测。E-mail: wangliyong2011@163.com

isotope dilution liquid chromatography-tandem mass spectrometry. Their concentrations were analyzed, and the exposure risk of DON to grains and their products among residents in Hebei Province was evaluated based on adult dietary consumption. **Results** The detection rates of DON were the highest in wheat and their products, ranging from 61.40% to 97.78%. The detection rates of DON in corn and its products were ranging from 36.13% to 86.75%. The detection rate of DON in rice was relatively low, with a detection rate of 0% in rice and 20.31% in Job's tears. Risk assessment showed that the chronic exposure range for adults was 0.02–0.62  $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$ , which was lower than the provisional maximum tolerable daily intake guidance value of 1.0  $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$ . **Conclusion** DON contamination is relatively common in grains and their products. Among these, wheat and their products exhibit the highest detection rate and contamination levels of DON, followed by corn-based products, while rice-based products show relatively lower contamination levels. For adults, the dietary exposure to DON through the consumption of wheat-based foods, corn, and rice does not pose a significant chronic intake risk. Wheat-based foods are the primary source of DON exposure in the population. Continuous monitoring of DON contamination in grains and their products is necessary to reduce dietary exposure risks.

**KEY WORDS:** Hebei Province; grains and their products; deoxynivalenol; risk assessment

## 0 引言

脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)属 B 型单端孢霉烯族化合物。单端孢霉烯族化合物是镰孢属的菌种产生的一组生物活性和化学结构相似的有毒代谢产物, 主要污染小麦、玉米、大麦、燕麦等谷物及其制品<sup>[1-3]</sup>。天然污染谷物的单端孢霉烯族化合物主要有 T-2 毒素、DON 和雪腐镰刀菌烯醇(nivalenol, NIV)等<sup>[4-5]</sup>。单端孢霉烯族化合物的主要毒性作用为细胞毒性、免疫抑制和致畸作用及可能的弱致癌性<sup>[6]</sup>。DON 毒性稳定、耐热、耐酸、耐贮藏, 主要污染大麦、小麦、玉米、燕麦等<sup>[7]</sup>。DON 的两种乙酰化产物 3-乙酰基脱氧雪腐镰刀菌烯醇(3-acetyldeoxynivalenol, 3-ADON)和 15-乙酰基脱氧雪腐镰刀菌烯醇(15-acetyldeoxynivalenol, 15-ADON)是真菌 DON 生物合成的中间体, 常与 DON 同时存在<sup>[8-9]</sup>。低剂量 DON 可能引起动物的食欲下降、代谢紊乱等, 大剂量可导致呕吐, 人摄食被 DON 污染的谷物制成的食品后可能会引起呕吐、腹泻、头晕等以消化系统和神经系统为主要症状的真菌毒素中毒症<sup>[10-12]</sup>。

由于 DON 的毒性, 不同人群的 DON 暴露值得关注<sup>[13-14]</sup>。目前谷物及其制品中 DON 的健康风险评估也得到了越来越多的研究<sup>[15-16]</sup>。通过对整个小麦加工链的研究, 可以了解 DON、3-ADON 和 15-ADON 在小麦产品加工链中的分布情况, 并评估不同人群的 DON 膳食风险<sup>[17]</sup>。河北省处于华北平原地区, 夏季闷热潮湿, 食品存储不当容易发生霉变, 致使真菌毒素的污染风险增高。本研究对 2016—2023 年河北省内采集的 1594 份谷物及其制品中 DON 及其衍生物的污染状况进行监测和比较, 分析了不同的样品种类和包装类型中 DON 的污染状况, 并评估了不同年龄段人群通过不同谷物的摄入量的暴露风险, 为本地区 DON 及其衍生物的防控和管理提供相应的数据支持,

为流行病学调查提供理论指导和饮食风险数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品与试剂

选择河北省 11 个地级市为采样点。为保证所采样品的代表性, 取具有本地地域代表特征的行政县、区为采样点。样品从每个分采样点随机进行采样。2016 年到 2023 年全省采集谷物及其制品样品共计 1594 份, 包括 45 份生湿面制品(面条、饺子皮、馄饨皮、烧麦皮)、124 份生干面制品(挂面)、239 份小麦粉、443 份小麦、85 份馒头、22 份油炸型方便面、302 份玉米面(糝、片)、238 份玉米(玉米粒)、32 份大米和 64 份薏米。样品采集后置于塑料自封袋内, 编号并记录, 于  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  冰箱冷冻保存。

乙腈(色谱纯, 德国 Merck 公司); DON 标准品(质量浓度 200 mg/L, 美国 Sigma-Aldrich 公司);  $^{13}\text{C}_{15}$ -DON 标准品(质量浓度 25  $\mu\text{g}/\text{mL}$ , 美国 Romer Labs 公司); 3-ADON 标准品(纯度 >96%)、15-ADON 标准品(纯度 >98%)(加拿大 TRC 公司); 实验所用水为超纯水(一级水)。

### 1.2 仪器与设备

Waters TQ-S 高效液相色谱-串联三重四极杆质谱仪(美国 Waters 公司); JJ600 电子天平(精度 0.01 g, 常熟市双杰测试仪器厂); GM 200 碾磨仪(德国莱驰公司); XM-800UVF 超声仪[小美超声仪器(昆山)公司]; 3-30K 高速台式离心机(德国 Sigma 实验室离心机公司)。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 检测方法

根据 2016 年到 2023 年《国家食品污染物和有害因素风险监测工作手册》中规定的食品中真菌毒素多组分测定

的标准操作程序(同位素稀释液相色谱-串联质谱法)进行谷物及其制品中 DON 及其衍生物的检测<sup>[18]</sup>。

### 1.3.2 结果评价

根据 GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》规定限量值小麦、小麦粉和玉米、玉米面(渣、片)中的 DON 限量值 1000 μg/kg 对样品中 DON 进行判定合格与否。

## 1.4 膳食暴露评估

本研究采用点评估方法计算 18 岁及以上成年人来源于谷物及其制品的 DON 暴露量,根据所测得的不同谷物及其制品中 DON 的污染水平和居民的食物消费量数据,计算得到每人每日膳食暴露量,通过与暂定每日最大容许摄入量(provisional maximum tolerable daily intake, PMTDI)进行比较,评价慢性暴露风险。计算见式(1):

$$EDI = \frac{R \times F}{bw} \quad (1)$$

式中: EDI 为日膳食暴露量(estimated daily intake), μg/(kg·bw·d); R 为样品中 DON 浓度, μg/kg; F 为食品消费量, g/d; bw 为体重, kg。DON 的 PMTDI 按照食品添加剂联合专家委员会(Joint Expert Committee on Food Additives, JECFA)提出的 1.0 μg/(kg·bw·d)。

## 1.5 数据处理

使用 Excel 2016 进行数据的导入和整理,运用 OriginPro 8 对实验数据进行处理和分析。考虑到未检出数据的不确定性,根据世界卫生组织(World Health Organization, WHO)对未检出数据的处理原则<sup>[13]</sup>:未检出数据的比例高于 60%时,所有未检出数据用检出限(limit of detection, LOD)替代;未检出数据的比例小于等于 60%时,所有未检出数据用 1/2 LOD 替代<sup>[19]</sup>。本研究中 DON、3-ADON、15-ADON 的 LOD 为 20 μg/kg。

## 2 结果与分析

### 2.1 食品中 DON 及其衍生物污染情况

#### 2.1.1 不同类别食品中 DON 及其衍生物污染情况

谷物及其制品食品类别包括小麦及其制品、玉米及其制品、米类 3 大类样品,其中小麦及其制品包括生湿面制品(面条、饺子皮、馄饨皮、烧麦皮)、生干面制品(挂面)、

小麦粉、小麦、馒头、油炸型方便面;玉米及其制品包括玉米面(糝、片)、玉米(玉米粒);米类包括大米和薏米。DON 在小麦及其制品中检出率最高,检出率范围在 61.40%~97.78%。从样品类型来看,生湿面制品(面条、饺子皮、馄饨皮、烧麦皮)检出率最高,检出率为 97.78%;其次为生干面制品(挂面)检出率为 97.58%;馒头检出率为 96.47%;油炸型方便面为 95.45%;小麦粉检出率为 90.38%;小麦检出率为 61.40%。DON 在小麦中检出率最低,在小麦制品中检出率明显偏高,其原因可能与小麦收获后的运输、储存条件有关。DON 在玉米及其制品中检出率范围在 36.13%~86.75%,玉米面(糝、片)中检出率为 86.75%,玉米(玉米粒)中检出率为 36.13%。玉米(玉米粒)检出率明显低于玉米面(糝、片),相对于玉米(玉米粒),玉米面(糝、片)在储存过程中更容易受 DON 的污染。DON 在米类中检出率较低。在大米中检出率为 0%,在薏米中检出率为 20.31%。按食品类别 DON 检出率从高到低依次为小麦及其制品>玉米及其制品>米类。

DON 超标样品为生干面制品(挂面)、小麦、玉米面(糝、片)、玉米(玉米粒)。按样品种类超标率从高到低依次为小麦>玉米面(糝、片)>玉米(玉米粒)>生干面制品(挂面)。不同类别食品中 DON 检出情况见表 1、表 2。

DON 衍生物 3-ADON 和 15-ADON 整体检出率较低。3-ADON 检出率范围为 0%~4.29%,15-ADON 检出率范围为 0%~36.09%。3-ADON 检出最大值食品类别为小麦,检测值为 66.9 μg/kg;15-ADON 检出最大值食品类别为玉米面(糝、片),检测值为 274 μg/kg。不同类别食品中 3-ADON 和 15-ADON 检出情况见表 3。

以上结果表明,谷物及其制品中 3-ADON 和 15-ADON 检出率均较低,检出值较低,污染情况较轻,而 DON 检出率高,污染程度严重,是 3 类样品的主要污染物。

#### 2.1.2 DON 在不同类型食品中污染水平分布

对不同类型食品中 DON 污染水平分布进行了研究,见图 1、图 2。图 1 为 958 份小麦及其制品中 DON 污染水平数据分布趋势图。图 2 为 540 份玉米及其制品和 96 份米类中 DON 污染水平数据分布趋势图。从图 1 可以看出,小麦及其制品中 DON 的污染浓度主要集中在 500 μg/kg 以下。小麦中有一部分样品 DON 污染浓度在 500~1000 μg/kg。随着 DON 污染数值的增大, DON 浓度在 1000 μg/kg 以上的

表 1 2016—2023 年河北省三大类谷物及其制品中 DON 污染状况

Table 1 Contamination of DON in 3 major types of grains and their products in Hebei Province from 2016 to 2023

样本种类	样品数量/份	DON			
		检出率/%	检出范围/(μg/kg)	平均值/(μg/kg)	超标率/%
小麦及其制品	958	78.91 (756/958)	ND~4183	263.9	3.34 (32/958)
玉米及其制品	540	64.44 (348/540)	ND~3065	227.8	1.85 (10/540)
米类	96	13.54 (13/96)	ND~275	28.1	0

注: ND 表示未检出。表 2~4 同。

表 2 2016—2023 年河北省谷物及其制品中 DON 污染状况  
Table 2 Contamination of DON in grains and their products in Hebei Province from 2016 to 2023

样本种类	样品数量/份	DON							
		检出率/%	检出范围/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	平均值/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	超标率/%	$P_{50}$ /( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	$P_{75}$ /( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	$P_{90}$ /( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	$P_{95}$ /( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )
生湿面制品(面条、饺子皮、馄饨皮、烧麦皮)	45	97.78 (44/45)	ND~914	145.5	0	105	154	298	432
生干面制品(挂面)	124	97.58 (121/124)	ND~1440	216.0	0.81 (1/124)	136	324	515	602
小麦粉	239	90.38 (216/239)	ND~786	125.9	0	88	142	262	366
小麦	443	61.40 (272/443)	ND~4183	394.9	7.00 (31/443)	190	615	961	1430
馒头	85	96.47 (82/85)	ND~691	138.7	0	89	147	333	521
油炸型方便面	22	95.45 (21/22)	ND~334	119.5	0	109	154	230	262
玉米面(糝、片)	302	86.75 (262/302)	ND~3065	288.9	2.32 (7/302)	205	366	639	836
玉米(玉米粒)	238	36.13 (86/238)	ND~1972	150.3	1.26 (3/238)	20	170	456	631
大米	32	0 (0/32)	ND	ND	0	ND	ND	ND	ND
薏米	64	20.31 (13/64)	ND~275	32.2	0	20	20	59	72
合计	1594	70.08 (1117/1594)	ND~4183	237.5	2.63 (42/1594)	103	306	640	897

表 3 2016—2023 年河北省谷物及其制品中 DON 衍生物污染状况  
Table 3 Contamination of DON derivatives in grains and their products in Hebei Province from 2016 to 2023

样本种类	样品数量/份	3-ADON			15-ADON		
		检出率/%	检出范围/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	平均值/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	检出率/%	检出范围/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	平均值/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )
生湿面制品(面条、饺子皮、馄饨皮、烧麦皮)	45	0 (0/45)	ND	ND	0 (0/45)	ND	ND
生干面制品(挂面)	124	0 (0/124)	ND	ND	0 (0/124)	ND	ND
小麦粉	239	0 (0/239)	ND	ND	0 (0/239)	ND	ND
小麦	443	4.29 (19/443)	ND~66.9	20.3	2.71 (12/443)	ND~91	20.6
馒头	85	0 (0/85)	ND	ND	0 (0/85)	ND	ND
油炸型方便面	22	0 (0/22)	ND	ND	0 (0/22)	ND	ND
玉米面(糝、片)	302	2.98 (9/302)	ND~24.8	20.0	36.09 (109/302)	ND~274	43.4
玉米(玉米粒)	238	0 (0/238)	ND	ND	0 (0/238)	ND	ND
大米	32	0 (0/32)	ND	ND	0 (0/32)	ND	ND
薏米	64	0 (0/64)	ND	ND	0 (0/64)	ND	ND

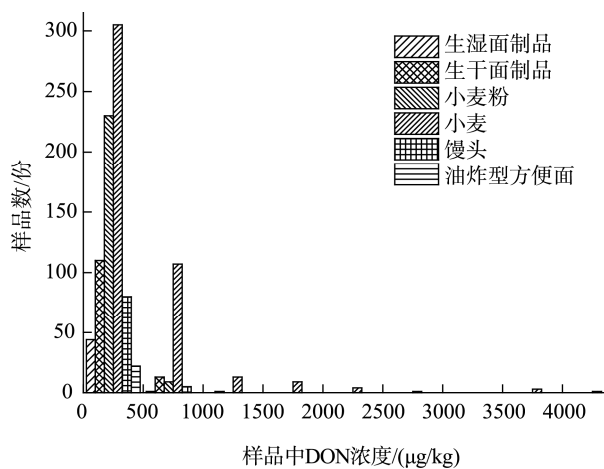


图 1 小麦及其制品中 DON 污染水平数据分布情况  
Fig.1 Contamination level data distribution of DON in wheat and its products

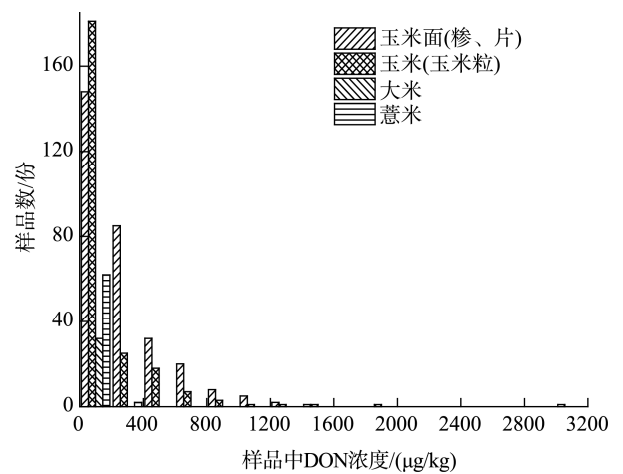


图 2 玉米及其制品及米类中 DON 污染水平数据分布情况  
Fig.2 Contamination level data distribution of DON in corn and its products and rice

样品份数逐渐减少。从图 2 可以看出,玉米及其制品中 DON 的污染浓度主要集中在 400  $\mu\text{g}/\text{kg}$  以下。玉米及其制品中有一部分样品 DON 污染浓度在 400~800  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。米类中 DON 的污染浓度主要集中在 200  $\mu\text{g}/\text{kg}$  以下。同样随着 DON 污染数值的增大,受污染的样品份数逐渐减少。

### 2.1.3 DON 在不同包装类型食品中的污染情况

对不同包装类型的谷物及其制品进行 DON 污染状况研究,结果见表 4。从表 4 中可以看出,生干面制品(挂面)中,散装制品的平均值略高于定型包装食品。小麦粉、玉米面(粳、片)中,定型包装食品平均值高于散装食品。由于 DON 普遍存在于谷物及其制品中,总体来说,DON 在散装食品和定型包装食品中平均值差距不大,也可能跟不同的包装类型样品数量有关。

## 2.2 暴露量与风险评估情况

两种衍生物在所有样品中的检出率和含量均较低,因此在估算膳食摄入风险时,忽略 3-ADON 和 15-ADON 对于膳食摄入的风险贡献,仅对 DON 的膳食暴露水平进行评估。根据中国居民营养与健康状况监测报告之一和中国居民营养与健康状况监测报告之二<sup>[20-21]</sup>,按公式(1)计算成年的 EDI 值,见表 5。从表 5 中可以看出 EDI 的范围为 0.02~0.62  $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$ , EDI<sub>合计</sub> 的范围为 0.56~0.72  $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$ ,结果均小于 PMTDI 指导值 1.0  $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$ ,表明成人通过摄入小麦及其制品、玉米及其制品和米类造成 DON 的膳食暴露无显著慢性摄入风险。3 类食物中小麦及其制品摄入量较大, DON 含量相对较高,是人群 DON 暴露的主要来源,由于玉米及其制品摄入量少,米类 DON 含量相对较低,因此贡献率较低。

表 4 不同包装类型中 DON 污染状况  
Table 4 Contamination of DON with different packaging types

样本种类	散装食品					定型包装食品				
	样品数量/份	检出率/%	检出范围/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$	平均值/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$	超标率/%	样品数量/份	检出率/%	检出范围/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$	平均值/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$	超标率/%
生湿面制品(面条、饺子皮、馄饨皮、烧麦皮)	43	97.67 (42/43)	ND~914	147.6	0	2	100.00 (2/2)	44.3~154	99.2	0
生干面制品(挂面)	27	92.59 (25/27)	ND~763	234.4	0	97	98.97 (96/97)	ND~1440	212.0	1.03 (1/97)
小麦粉	152	88.82 (135/152)	ND~786	122.4	0	87	93.10 (81/87)	ND~446	132.0	0
小麦	443	61.40 (272/443)	ND~4183	394.9	7.00 (31/443)	0	0 (0/0)	/	/	/
馒头	85	96.47 (82/85)	ND~691	138.7	0	0	0 (0/0)	/	/	/
油炸型方便面	0	0 (0/0)	/	/	/	22	95.45 (21/22)	ND~334	119.5	0
玉米面(粳、片)	291	86.25 (251/291)	ND~3065	286.2	2.41 (7/291)	11	100 (11/11)	116~620	361.0	0
玉米(玉米粒)	232	37.07 (86/232)	ND~1972	153.7	1.29 (3/232)	6	0 (0/6)	ND	ND	0
大米	27	0 (0/27)	ND	0	0	5	0 (0/5)	ND	ND	0
薏米	57	17.54 (10/57)	ND~275	32.1	0	7	42.86 (3/7)	ND~68.4	32.9	0

注: /表示未有此项数据。

表 5 不同年龄组居民每日经谷物及其制品摄入 DON 的膳食暴露量  
Table 5 Daily dietary exposure of DON from grains and their products in residents of different age groups

性别	年龄组	体重/kg	小麦及其制品 $(\text{g} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$	EDI <sub>小麦类</sub> $[\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})]$	玉米及其制品 $(\text{g} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$	EDI <sub>玉米类</sub> $[\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})]$	米类 $(\text{g} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$	EDI <sub>米类</sub> $[\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})]$	EDI <sub>合计</sub> $[\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})]$
男性	18~29 岁	67.0	156.9	0.62	5.1	0.02	191.6	0.08	0.72
	30~44 岁	67.0	153.4	0.60	5.7	0.02	206.8	0.09	0.71
	45~59 岁	66.6	151.2	0.60	7.1	0.02	182.5	0.08	0.70
	60~69 岁	62.4	138.4	0.59	9.2	0.03	168.8	0.08	0.70
	70 岁以上	62.4	118.6	0.50	8.2	0.03	150.6	0.07	0.60
女性	18~29 岁	56.7	125.3	0.58	6.9	0.03	152.3	0.08	0.69
	30~44 岁	56.7	126.8	0.59	6.4	0.03	166.5	0.08	0.70
	45~59 岁	59.5	122.8	0.54	8.0	0.03	153.2	0.07	0.65
	60~69 岁	55.6	118.8	0.56	9.9	0.04	141.4	0.07	0.68
	70 岁以上	55.6	96.8	0.46	7.5	0.03	128.0	0.06	0.56

### 3 结 论

本研究表明, 谷物及其制品中小麦及其制品的 DON 检出率和污染水平均最高, 部分样品存在毒素含量超标情况。玉米及其制品的污染水平次之, 米类的污染水平相对较低。DON 是我国小麦污染的主要真菌毒素, 且存在其衍生物 3-ADON 和 15-ADON 的同时污染<sup>[22-25]</sup>。DON 与低水平的 3-ADON 和 15-A-DON 共同存在于小麦及其制品中<sup>[17]</sup>。小麦中 DON 污染主要原因是小麦在田间受到禾谷镰刀菌等真菌侵染, 导致小麦发生赤霉病<sup>[26-28]</sup>。小麦中 DON 防控最有效的方法为注重生长阶段赤霉病的防治; 同时保证收获后采用合适的干燥、储运程序<sup>[29-30]</sup>。

评估结果显示人群对 DON 的总体暴露无显著慢性摄入风险, 小麦及其制品是人群 DON 暴露的主要来源, 玉米类和米类贡献率较低。不同人群谷物制品中 DON 平均暴露量为 0.56~0.72  $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$ , 结果均小于 PMTDI 指导值, 与王小丹等<sup>[31]</sup>报道的我国居民通过谷类食品摄入 DON 平均暴露量 0.78  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 其中小麦制品 DON 平均暴露量的贡献率最高(88.5%)的结果基本一致。本研究不同人群小麦及其制品中 DON 平均暴露量为 0.46~0.62  $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$ , 高于上海市全人群经小麦粉及其制品 DON 的平均暴露量 0.279  $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$ <sup>[32]</sup>, 其原因除了南北方小麦类食品 DON 污染状况不同, 主要为南北方居民小麦类食物消费量不同, 北方食用小麦类食物明显多于南方。因此为降低谷物及其制品中 DON 暴露量, 除采取有效措施降低小麦中 DON 污染水平, 还应该建议居民主食多样化。

### 参考文献

- [1] 张伟, 马青青, 张二鹏. 粮食及其制品中真菌毒素检测及风险评估技术的研究进展[J]. 中国卫生检验杂志, 2022, 3(22): 636-640.  
ZHANG W, MA QQ, ZHANG ERP. Research progress on mycotoxin detection and risk assessment technology in grain and its products [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2022, 3(22): 636-640.
- [2] DELIGEORGAKIS C, MAGRO C, SKENDI A, et al. Fungal and toxin contaminants in cereal grains and flours: Systematic review and meta-analysis [J]. Foods 2023, 12: 4328.
- [3] HAO W, LI A, WANG J, et al. Mycotoxin contamination of feeds and raw materials in China in year 2021 [J]. Frontiers in Veterinary Science, 2022, 9: 929904.
- [4] WOO SY, LEE SY, PARK SB, et al. Simultaneous determination of 17 regulated and non-regulated *Fusarium* mycotoxins co-occurring in foodstuffs by UPLC-MS/MS with solid-phase extraction [J]. Food Chemistry, 2024, 438: 137624.
- [5] JOHNS LE, BEBBER DP, GURR SJ, et al. Emerging health threat and cost of *Fusarium* mycotoxins in European wheat [J]. Nature Food, 2022, 3: 1014-1019.
- [6] CHHAYA RS, O'BRIEN J, CUMMINS E. Feed to fork risk assessment of mycotoxins under climate change influences-recent developments [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 126: 126-141.
- [7] KHANEGHAH AM, MARTINS LM, VON-HERTWIG AM, et al. Deoxynivalenol and its masked forms: Characteristics, incidence, control and fate during wheat and wheat based products processing-A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 71: 13-24.
- [8] BRASE S, ENCINAS A, KECK J, et al. Chemistry and biology of mycotoxins and related fungal metabolites [J]. Chemical Reviews, 2009, 109(9): 3903-3990.
- [9] YAN PP, LIU ZZ, LIU SQ, et al. Natural occurrence of deoxynivalenol and its acetylated derivatives in Chinese maize and wheat collected in 2017 [J]. Toxins, 2020, 12(3): 200.
- [10] 朱燕, 姚香澳, 官智勇. 稻谷中真菌毒素的暴露污染、检测技术及防控研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(15): 264-274.  
ZHU Y, YAO XAO, GONG ZY. Research progress on exposure, detection and control of mycotoxins in rice grains [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(15): 264-274.
- [11] PESTKA JJ, SMOLINSKI AT. Deoxynivalenol: Toxicology and potential effects on humans [J]. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B, 2005, 8(1): 39-69.
- [12] LARSEN JC, HUNT J, PERRIN I, et al. Workshop on trichothecenes with a focus on DON: Summary report [J]. Toxicology Letters, 2004, 153(1): 1-22.
- [13] WANG L, YAN Z, ZHAO QY, et al. A prospective study of total urinary deoxynivalenol in adolescents in Shanghai, China [J]. Chemosphere, 2022, 307: 135727.
- [14] JI X, XIAO Y, WANG W, et al. Mycotoxins in cereal-based infant foods marketed in China: Occurrence and risk assessment [J]. Food Control, 2022, 138: 108998.
- [15] XU A, YU S, LI Y, et al. Total deoxynivalenol contamination of wheat products and coarse grains in Shanghai, China: Occurrence and health risk assessment [J]. Foods, 2024, 13: 3373.
- [16] IQBAL SZ, USMAN S, RAZIS AFA, et al. Assessment of deoxynivalenol in wheat, corn and its products and estimation of dietary intake [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17: 5602.
- [17] JI X, HE Y, XIAO Y, et al. Distribution and safety evaluation of deoxynivalenol and its derivatives throughout the wheat product processing chain [J]. Food Research International, 2024, 192: 114784.
- [18] 国家食品安全风险评估中心. 国家食品污染物和有害因素风险监测工作手册[M]. 北京: 国家食品安全风险评估中心, 2016.  
National Food Safety Risk Assessment Center. National food contaminants and harmful factors risk monitoring work manual [M]. Beijing: National Food Safety Risk Assessment Center, 2016.
- [19] 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.
- [20] 赵丽云, 何宇纳. 中国居民营养与健康状况监测报告之一: 2010—2013 年膳食与营养素摄入状况[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2018.  
ZHAO LY, HE YN. One of the monitoring reports on Nutrition and Health status of Chinese residents: Dietary and nutrient intake status from 2010 to

- 2013 [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2018.
- [21] 朴建华, 霍军生. 中国居民营养与健康状况监测报告之二: 2010—2013年居民体质与营养状况[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2019.
- PU JH, HUO JS. Monitoring report on nutrition and health status of Chinese residents part II: Physical and nutritional status of Chinese residents from 2010 to 2013 [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2019.
- [22] 杨晓倩, 刘岚铮, 曹小丽, 等. 2022年山东省市售小麦粉真菌毒素污染情况调查[J]. 预防医学论坛, 2023, 29(8): 577-581.
- YANG XQ, LIU LZ, CAO XL, *et al.* Rong-chun. Investigation on mycotoxin pollution of wheat flour on market in Shandong province in 2022 [J]. Preventive Medicine Tribune, 2023, 29(8): 577-581.
- [23] 崔杰, 王志强, 李卫东. 安徽省 2017—2021 年谷物及其制品中真菌毒素污染现状研究[J]. 安徽预防医学杂志, 2024, 30(3): 195-199.
- CUI J, WANG ZQ, LI WD. Study on mycotoxins pollution in cereals and their products in Anhui Province from 2017 to 2021 [J]. Anhui Journal Preventive Medicine, 2024, 30(3): 195-199.
- [24] ZHOU H, XU A, LIU M, *et al.* Mycotoxins in wheat flours marketed in Shanghai, China: Occurrence and dietary risk assessment [J]. Toxins, 2022, 14: 748.
- [25] 任贝贝, 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, 2023, 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, 2023, 12(5): 1669-1676.
- [26] YaNG F, JACOBSEN S, JØRGENSEN HJL, *et al.* Fusarium graminearum and its interactions with cereal heads: Studies in the proteomics era [J]. Frontiers in Plant Science, 2013, 4: 37.
- [27] CONKOVA E, LACIAKOVA A, ŠTYRIAK I, *et al.* Fungal contamination and the levels of mycotoxins (DON and OTA) in cereal samples from Poland and East Slovakia [J]. Czech Journal of Food Sciences, 2006, 24: 33-40.
- [28] 王丽英, 任贝贝, 刘印平, 等. 河北地区面粉制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其衍生物和玉米赤霉烯酮污染水平调查与分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(12): 4023-4028.
- WANG LY, REN BB, LIU YP, *et al.* Investigation and analysis of deoxynivalenol and its derivatives and zearalenone pollution levels in flour products in Hebei Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(12): 4023-4028.
- [29] ZHANG Q, LI Z, DONG W, *et al.* A Model for predicting and grading the quality of grain storage processes affected by microorganisms under different environments [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20: 4120.
- [30] 王瑞虎, 李萌萌, 关二旗, 等. 小麦储藏过程中真菌毒素变化趋势及预警技术研究进展[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(11): 1-8.
- WANG RH, LI MH, GUAN ERQ, *et al.* Research progresses of mycotoxins variation trend and early warning technology during wheat storage [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 64(1): 1-8.
- [31] 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, 53(4): 394-397.
- WANG XD, YANG X, XU HB, *et al.* Exposure status and health risk assessment of deoxynivalenol from cereals in Chinese population in different regions [J]. Chinese Journal Preventive Medicine, 2019, 53(4): 394-397.
- [32] 宇盛好, 李亦奇, 张露菁, 等. 上海市市售小麦粉及其制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇的膳食暴露评估[J]. 上海预防医学, 2023, 25(8): 729-734.
- YU SH, LI YQ, ZHANG LJ, *et al.* Dietary exposure assessment of deoxynivalenol in wheat flour and its products sold in Shanghai. [J]. Shanghai Journal of Preventive Medicine, 2023, 25(8): 729-734.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)