

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241221002

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

# 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

商蕾\*, 范梦超, 吕俊庆, 齐志彩, 王育灿, 戚义东

(邢台市疾病预防控制中心, 邢台 054000)

**摘要:** **目的** 分析不同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, 并评估其膳食暴露风险。**方法** 收集 2021—2023 年市售的不同种类的谷物样品共计 435 份, 样品用乙腈-水(84:16, V:V)提取, 226 净化柱进行净化处理, 超高效液相色谱三重四极杆质谱仪进行检测, 同位素内标法进行定量, 根据成人膳食消费量对居民的 DON 暴露风险进行评估。**结果** 在 435 份样品中, DON 的检出最高, 检出率达到 90.6%。挂面样品中 DON 的检测平均值最高, 达到 244.8  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。DON 在不同性别居民的膳食暴露量不同, 成年男性在干挂面和小麦粉等面制品中 DON 的急性和慢性膳食暴露风险均高于成年女性; 挂面引起的慢性暴露风险高于其他食品种类; 小麦粉引起的成年男性和女性的急性暴露风险最高分别为 8.84  $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$ 、8.34  $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$ 。**结论** 不同谷物食品中 DON 的检出率最高, 同时小麦粉中 DON 的含量对成年男女的急性暴露风险较高。DON 的污染状况应高度重视, 尤其注意小麦粉对居民的急性暴露风险, 为谷物中 DON 的风险评估和后续研究提供参考。

**关键词:** 谷物类; 挂面; 脱氧雪腐镰刀菌烯醇; 暴露量; 风险评估

## Pollution status and exposure risk assessment of deoxynivalenol in grain products

SHANG Lei\*, FAN Meng-Chao, LV Jun-Qing, QI Zhi-Cai, WANG Yu-Can, QI Yi-Dong

(Xingtai Center for Disease Prevention and Control, Xingtai 054000, China)

**ABSTRACT: Objective** To analyze the contamination levels of deoxynivalenol (DON) and its derivatives in various cereals and their products and assess the dietary exposure risks. **Methods** A total of 435 commercially available grain samples of various types were collected from 2021 to 2023. The samples were extracted with acetonitrile-water (84:16, V:V), purified by the 226 purification column, and analyzed by ultra performance liquid chromatography coupled with triple quadrupole mass spectrometry. Quantification was performed using the isotope internal standard method. The dietary exposure risk of DON for residents was assessed based on adult dietary

收稿日期: 2024-12-21

基金项目: 河北省医学科学研究课题计划项目(20251400)

第一作者/\*通信作者: 商蕾(1985—), 女, 硕士, 副主任技师, 主要研究方向为食品理化检验。E-mail: xts6011@163.com

consumption levels. **Results** Among the 435 samples, the detection rate of DON was the highest, reaching 90.6%. The average detection value of DON in dried noodle samples was the highest, reaching 244.8  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . The dietary exposure amounts of DON were different for residents of different genders. The acute and chronic dietary exposure risks of DON in pasta products such as dried noodles and wheat flour for adult males were higher than those for adult females. The chronic exposure risk of DON caused by dried noodles was higher than that of other food categories; however, the acute exposure risk of DON to adult males and females caused by wheat flour were 8.84  $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$  and 8.34  $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$ . **Conclusion** The detection rate of DON is the highest among different grain foods. Meanwhile, the concentration of DON in wheat flour poses a relatively high acute exposure risk to adult men and women. The contamination situation of DON should all be highly emphasized, in particular, attention shall be paid to the acute exposure risk of wheat flour to residents, which provides a reference for the risk assessment of DON in grains and subsequent research.

**KEY WORDS:** grains; dried noodles; deoxynivalenol; exposure; risk assessment

## 0 引言

根据联合国粮农组织的调查,全球每年都有不同的粮食受到真菌毒素的污染<sup>[1-2]</sup>。目前已知的真菌毒素种类繁多,包括脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)及其衍生物、黄曲霉毒素 B 族和 G 族、玉米赤霉烯酮、赭曲霉毒素等<sup>[2]</sup>。其中, DON 是一种能够破坏生物体免疫系统的真菌毒素,具有一定的致畸性和胚胎毒性<sup>[3-4]</sup>,国际癌症机构将 DON 列为三级致畸物。DON 广泛存在小麦、玉米、大米等谷物及其制品的粮食中<sup>[5-9]</sup>,通过被污染的粮食进入人体,从而对人类健康造成危害<sup>[10-13]</sup>。因此,监测不同种类谷物中 DON 的含量,对本地区的粮食安全保障起到至关重要的作用。

在中国的长江以北地区,居民的饮食结构主要以米面制品为主。冀中南地区属于粮食的主要产区,该地区夏季高温多雨,占全年平均降水的 62%以上,这种潮湿多雨的环境容易导致各种粮食受到真菌毒素的污染<sup>[14-15]</sup>。目前,针对河北省尤其省内中南部地区的不同谷物粮食中的 DON 的污染状况和膳食暴露评估的研究很少。为了解这一状况,本研究通过在市场上购买干挂面、小麦粉、玉米面、小米、薏米等谷物制品,进行 DON 污染物的监测,结合谷物的消费量及成年人群暴露风险水平,通过 DON 对不同性别成年人的慢性和急性暴露风险进行膳食暴露风险评估。为制定 DON 的污染防控和管理措施提供有力的数据支撑,

更好地了解和保护居民的健康,确保谷物制品的安全和质量。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料与试剂

从不同的商店超市、农贸市场等地随机采集市售的谷

物及其制品,主要包括小麦粉、干挂面、玉米面、小米、薏米等 5 类样品,其中小麦粉 265 份,干挂面 104 份,玉米面 22 份,小米 20 份,薏米 24 份,共计样品 435 份样品。

甲酸、乙腈(色谱纯,德国默克公司); DON 标准溶液(质量浓度 100.1  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )、<sup>13</sup>C<sub>15</sub>-DON 标准溶液(质量浓度 25.0  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )、3-乙酰基脱氧雪腐镰刀菌烯醇(3-acetyl-deoxynivalenol, 3-ADON)标准溶液(质量浓度 100.1  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )、15-乙酰基脱氧雪腐镰刀菌烯醇(15-acetyl-deoxynivalenol, 15-ADON)标准溶液(质量浓度 100.2  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )[Romer 国际贸易(北京)有限公司];实验用水为蒸馏水(蒸馏水,香港屈臣氏集团)。

### 1.2 仪器与设备

UPLC H CLASS/XEVO TQD 超高效液相色谱质谱仪、HSS T3 色谱柱(2.1 mm×100 mm, 1.8  $\mu\text{m}$ )[沃特世科技(上海)有限公司]; Mycosep 226 多功能净化柱[Romer 国际贸易(北京)有限公司]; VORIEX GENIE2 涡旋振荡器(德国 IKA 公司); FA2004 电子天平(万分之一,上海精密科学仪器有限公司); GM200 刀式研磨仪(德国莱驰公司); KQ-600E 超声波清洗仪[小美超声仪器(昆山)有限公司]; X-3R 台式高速冷冻离心机[赛默飞世尔科技(中国)有限公司]; N-EVAP112 氮吹仪(美国 Organomation 公司)。

### 1.3 实验条件

#### 1.3.1 样品前处理

根据国家食品污染物和有害因素风险监测工作手册食品中 DON 及其乙酰化衍生物和玉米赤霉烯酮测定的标准操作程序要求,准确称取 2.00 g 样品,放入 50 mL 离心管中,加入 100  $\mu\text{L}$  <sup>13</sup>C<sub>15</sub>-DON(质量浓度 1.0  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )内标使用液,静置 30 min,加入提取液乙腈和水按体积比 84:16(总体积为 8 mL),超声提取 40 min,8000 r/min 离心 5 min,取上清液 4 mL 至玻璃管中,再向其中加入 4 mL 乙腈,混匀,随后将净化柱的填料管插入玻璃管中缓慢推动,然后准确移取 4 mL 过

滤后的上清液至氮吹管中,氮气吹至近干,用乙腈和水按体积比 10:90(总体积为 1 mL)定容,涡旋 30 s,用 0.22 μm 微孔滤膜过滤至进样瓶中,待测定。

### 1.3.2 色谱条件

色谱柱: HSS T3 色谱柱(2.1 mm×100 mm, 1.8 μm), 流速 0.3 mL/min; 进样量 5 μL, 柱温 30 °C。流动相 A 为超纯水, 流动相 B 为乙腈, 梯度洗脱程序见表 1 所示。

表 1 液相色谱梯度洗脱程序

Table 1 Gradient elution program of liquid chromatography

时间/min	流速/(mL/min)	流动相 A/%	流动相 B/%
0.0	0.3	95	5
1.0	0.3	95	5
3.5	0.3	50	50
4.0	0.3	10	90
5.0	0.3	10	90
5.5	0.3	95	5
7.0	0.3	95	5

### 1.3.3 质谱条件

离子源为电喷雾离子源(electron spray ionization, ESI)负离子模式, 采用多反应监测(multiple reaction monitoring, MRM)检测方式, 毛细管电压 3.0 kV, 离子源温度 150 °C, 反吹气流速 150 L/h, 脱溶剂气温度 500 °C, 脱溶剂气流速 800 L/h, 碰撞气为氩气, 碰撞气流量 0.15 mL/min。

## 1.4 膳食暴露评估方法

本研究参考美国环保局(US Environmental Protection Agency, EPA)推荐的风险评估模型<sup>[16]</sup>, 将食物日消费量数据和平均体重, 与 DON 的浓度数据进行整合, 计算 18 岁以上的成年人 DON 的膳食暴露风险。通过与每日最大耐受摄入量(provisional maximum tolerable daily intake, PMTDI)进行比较, 评价慢性暴露风险评估。当每日最大摄入量(estimated daily intake, EDI)小于 PMTDI 时, 表示膳食风险处在可控水平; 反之, 则表明存在膳食暴露的风险, 并且暴露风险随着数值的增大而增大。此外, 根据 DON 的高污染水平和人群的日摄入量, 结合急性参考剂量(acute reference dose, ARfD)进行急性暴露评估, 当污染物的摄入量超过 ARfD 时, 可认为存在急性中毒风险。计算如公式(1):

$$EDI = \sum(C \times I) / M \quad (1)$$

式中: EDI 为污染物每日最大摄入量, μg/(kg·bw); C 为食品中污染物的含量, μg/kg; I 为食品的消费量, kg/d; M 为成人消费者的平均体重, kg。食品消费量和体重数据是依据《中国人群暴露参数手册(成人版)》中的报告, 规定对于成年男性, 米及其制品每人摄入量为 254.0 g/d、面及其制品每人摄入量为 155.3 g/d、其他谷类每人摄入量为 25.6 g/d; 对于成

年女性, 米及其制品每人摄入量为 220.5 g/d、面及其制品每人摄入量为 124.3 g/d、其他谷类每人摄入量为 23.2 g/d。中国成年男性和女性的平均体重分别为 69.6 kg 和 59.0 kg。2010 年世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会将 DON 的 PMTDI 定为 1.0 g/(kg·bw), DON 的 ARfD 为 8.0 μg/(kg·bw)<sup>[17]</sup>。

## 1.5 数据处理

运用 Excel 2016 和 Origin 2022 统计软件对 DON 污染水平的实验数据进行处理和分析, 若 DON 在谷物中的检出值低于检出限时, 定义为未检出, 对于未检出的数据大于数据总量的 60%时, 统计时用 1/2 检出限替代<sup>[8]</sup>。计数资料用%表示, 计量资料采用分位数表示谷物中 DON 的污染水平差异, 检验标准为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 方法学验证

待测物的离子化模式采用 ESI<sup>-</sup>, 利用标准溶液直接进样, 确定目标物的母离子和子离子, 目标物的 MRM 色谱图及具体实验条件见图 1 和表 2。

本研究采用同位素内标法进行定量分析, 实验过程中目标物的线性关系良好, 相关系数均在 0.999, 见表 3。为了验证方法的准确度, 以小麦粉阴性样品为基质, 添加 3 个不同的浓度水平的标准进行加标实验。结果表明, 方法的回收率在 80.9%~102.6%之间。同时对小麦粉的有证标准物质进行测定, 其测定范围也在规定的数值内。综上所述, 本研究方法具有较高的准确度、精密度和回收率, 适用于目标物的定量分析。

### 2.2 谷物制品中 DON 及其衍生物的污染情况

在 435 份样品谷物及其制品中, 有 394 份检出了 DON, 检出率高达 90.6%, 说明 DON 在谷物制品中存在着普遍的真菌污染。样品检出的 DON 平均值为 202.4 μg/kg,  $P_{50}$  值为 103.6 μg/kg,  $P_{95}$  值为 694.0 μg/kg, 最大值为 3961.0 μg/kg; 15-ADON 检出了 1 份, 检出率为 0.2%, 检出平均值为 5.2 μg/kg,  $P_{50}$  值为 5.0 μg/kg,  $P_{95}$  值为 5.0 μg/kg, 最大值为 112.4 μg/kg; 3-ADON 在所有样品中均未检出。根据 GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》的规定, 小麦、玉米中 DON 的限量标准为 1000 μg/kg。在 394 份样品中有 8 份超出国家限量标准, 超标率为 1.8%。详见表 4。

### 2.3 谷物制品中 DON 的含量分布情况

在 435 份样品中, DON 的检出率最高, 比较不同区间的含量有助于了解 DON 的分布规律。从含量区间的数量分布情况来看, 样品数量分布最多的为 0~200 μg/kg, 所占比例为 68.82%。对比不同含量区间的样品, 可以发现 DON 含量小于 600 μg/kg 的样品比例达 92.84%; 样品中 DON 含

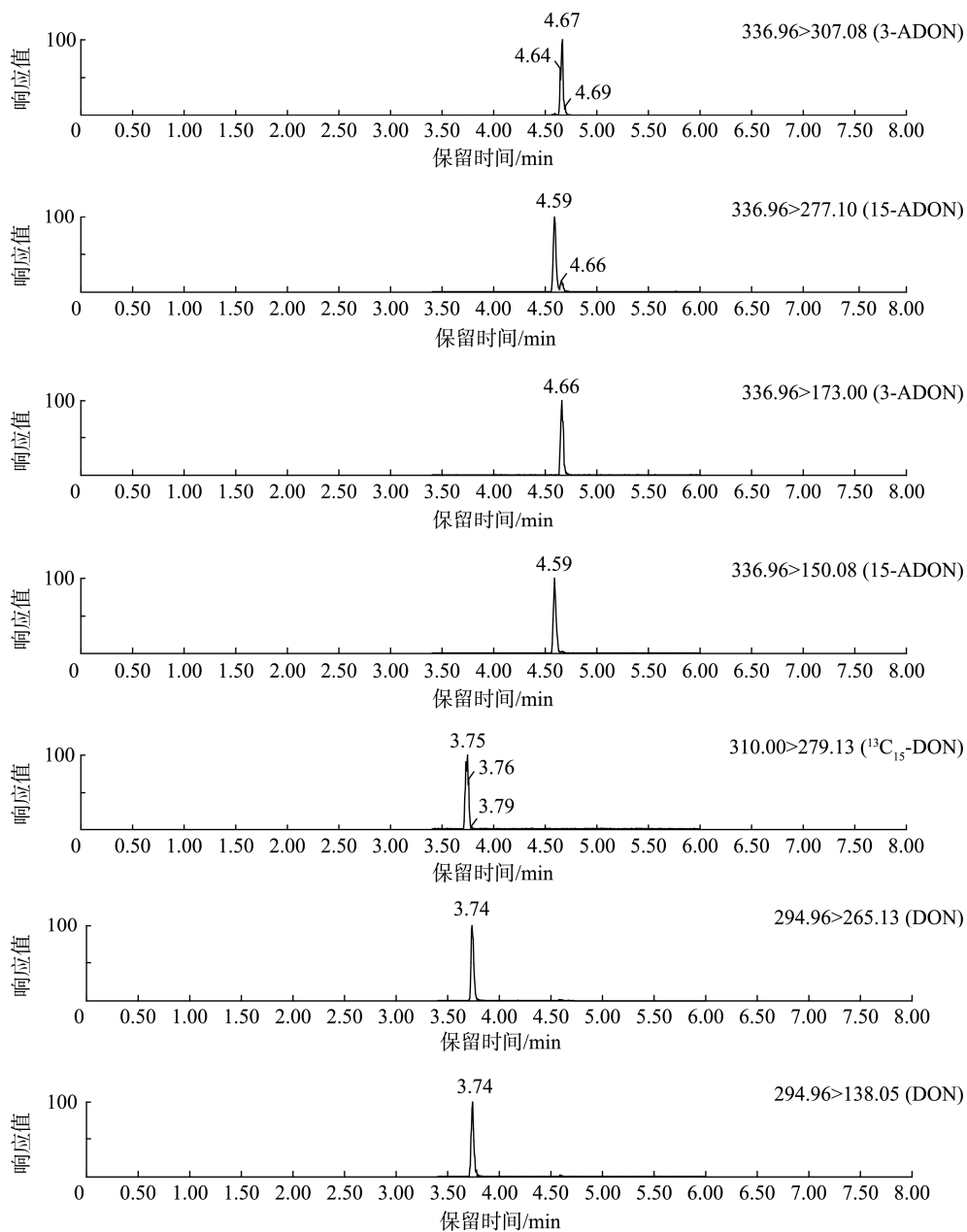


图1 标准溶液MRM色谱图

Fig.1 MRM chromatograms of standard solution

表 2 质谱条件

Table 2 Conditions of mass spectrometry

化合物	母离子 ( <i>m/z</i> )	子离子 ( <i>m/z</i> )	锥孔电压 /V	碰撞能量 /eV
DON	294.96	138.05	22	20
		265.13	22	12
<sup>13</sup> C <sub>15</sub> -DON	310.00	279.13	22	12
3-ADON	336.96	173.00	24	9
		307.08	28	8
15-ADON	336.96	150.08	22	22
		277.10	22	8

表 3 线性曲线方程、线性范围和相关系数

Table 3 Linear curve equations, linear ranges and correlation coefficients

化合物	方程	线性范围 /( $\mu\text{g/L}$ )	<i>r</i>
DON	$Y=0.89703X+0.778158$	20~1000	0.999
15-ADON	$Y=1.83719X+6.34908$	20~1000	0.999
3-ADON	$Y=0.284683X+0.565595$	20~1000	0.999

量高于 600  $\mu\text{g/kg}$  的样品比例仅为 7.16%。见图 2。低含量的样品比例高, 说明市售的谷物及其制品中普遍存在 DON 的污染。

表 4 不同谷物制品中真菌毒素的检出情况

Table 4 Mycotoxins detection situation in different cereals and their products

检测项目	样品数量 /份	检出数量 /份	检出率 /%	超标数 /份	超标率 /%	均值 /( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	标准差 /( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	$P_{50}$ /( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	$P_{95}$ /( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	最大值 /( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )
DON	435	394	90.6	8	1.8	202.4	312.5	103.6	694.0	3961.0
15-ADON	435	1	0.2	0	0.0	5.2	5.1	5.0	5.0	112.4
3-ADON	435	0	0.0	0	0.0	ND	ND	ND	ND	ND

注: ND 表示未检出。

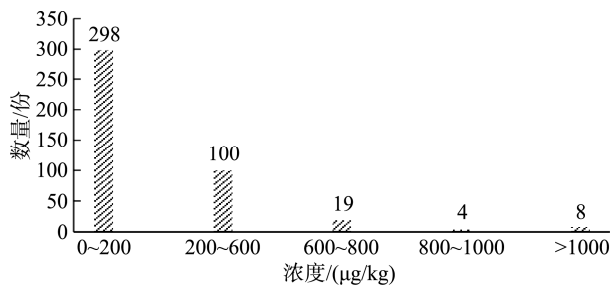


图2 435份样品中DON污染水平数据分布情况

Fig.2 Distribution of DON contamination level data in 435 samples

## 2.4 不同谷物制品中 DON 的污染情况

通过研究发现,干挂面的 DON 检出率为 100.0%,超标率为 1.0%,检出平均值为 244.8  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,  $P_{50}$  值为 163.0  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,  $P_{95}$  值为 605.0  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 最大值为 1376.0  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 有 1 份超出国家限量标准;小麦粉的 DON 检出率为 92.8%,超标率为 2.6%,平均值为 216.1  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,  $P_{50}$  值为

110.0  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,  $P_{95}$  值为 1610.0  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 最大值为 3961.0  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 有 7 份超出国家的限量标准;玉米面、小米和薏米中, DON 的检出率分别为 40.9%、90.0%和 70.8%,检测平均值相对较低分别为 123.7  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、20.3  $\mu\text{g}/\text{kg}$  和 92.4  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,检测的最高值分别为 694.0  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、186.6  $\mu\text{g}/\text{kg}$  和 609.6  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,均未超出国家的限量标准。在 435 份样品中,干挂面的检出率和平均值都高于其他谷物制品,其次为小麦粉。详见表 5。

## 2.5 DON 的膳食暴露量及成年人的暴露风险评估

由于两种衍生物在本次研究中的检出率极小,因此在估算摄入量时,忽略两种衍生物对膳食摄入风险的控制,认为摄入的风险来自于谷物中的 DON,结合谷物制品的消费量,结合暴露量公式分别计算成年男性和成年女性的慢性和急性膳食暴露情况。研究表明,成年男性在干挂面和小麦粉等面制品中 DON 的急性和慢性膳食暴露风险均高于成年女性;从不同的谷物制品上看,干挂面中 DON 引起的慢性暴露风险高于其他谷物制品;小麦粉中 DON 引起的急性暴露风险不论男女均高于其他谷物制品。详见表 6。

表 5 不同谷物类别中 DON 的检出情况

Table 5 DON detection situation in different cereals and their products

样品类型	样品数量 /份	检出数量 /份	检出率 /%	超标数 /份	超标率 /%	均值 /( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	标准差 /( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	$P_{50}$ /( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	$P_{95}$ /( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	最大值 /( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )
干挂面	104	104	100.0	1	1.0	244.8	223.8	163.0	605.0	1376.0
小麦粉	265	246	92.8	7	2.6	216.1	359.6	110.0	1610.0	3961.0
玉米面	22	9	40.9	0	0.0	123.7	198.1	10.0	618.0	694.0
小米	20	18	90.0	0	0.0	20.3	42.2	4.6	69.6	186.6
薏米	24	17	70.8	0	0.0	92.4	198.7	10.0	597.8	609.6

表 6 成年居民不同性别 DON 的慢性和急性暴露风险

Table 6 Risk of slow and acute exposure to DON among adult residents of different genders

食品类别	平均值 /( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	最大值 /( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	成年男性暴露量 /[ $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$ ]		成年女性暴露量 /[ $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$ ]		PMTDI /[ $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$ ]	ARfD /[ $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$ ]
			慢性	急性	慢性	急性		
干挂面	244.8	1376.0	0.55	3.07	0.52	2.90	1.0	8.0
小麦粉	216.1	3961.0	0.48	8.84	0.45	8.34	1.0	8.0
玉米面	123.7	694.0	0.05	0.25	0.05	0.27	1.0	8.0
小米	20.3	186.6	0.07	0.68	0.08	0.70	1.0	8.0
薏米	92.4	609.6	0.34	2.22	0.34	2.28	1.0	8.0

注: 中国成人女性质量 59.0 kg, 成人男性质量 69.6 kg 计算。

### 3 讨论与结论

本研究对市售的 5 类谷物制品中 DON 及其衍生物的污染水平进行调查分析。结果表明, 在干挂面、小麦粉、玉米面、小米和薏米这 5 类谷物中, DON 的污染情况较为普遍, 污染检出率达到了 90.6%。王丽英等<sup>[18]</sup>对河北地区焙烤食品、生面制品和馒头的研究中发现, 主要的污染物为 DON; 李俊玲等<sup>[19]</sup>的研究发现, DON 的污染也较为普遍; 宇盛好等<sup>[20]</sup>对上海市市售的小麦粉的研究发现, DON 的检出率较高, 达到 77.3%; 冯荣虎等<sup>[21]</sup>对深圳面制品中的 DON 研究也发现其检出率较高; MALACHOVA 等<sup>[22]</sup>检测捷克的谷物和面粉样品(共 116 份)的数据表明, DON 在样品中的检出率为 75%。国内外的相关研究与本研究较为吻合<sup>[23-24]</sup>。

研究中还发现, 干挂面中 DON 的检出率和平均值均高于其他 4 类谷物, 检出率达到 100.0%, 平均值为 244.8  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ; 其次为小麦粉, 超标样品共 8 份, 主要是小麦粉和干挂面。由此可见, 粮食及其制品被 DON 污染是普遍存在的问题<sup>[25-27]</sup>。这表明小麦及其初级加工制品中 DON 的污染较为普遍和严重, 小麦粉的污染主要源于小麦生长成熟期阴雨天气的影响, 以及在小麦加工生产运输环节阴暗潮湿的储存条件, 适宜真菌的生长和繁殖, 从而导致 DON 含量的增加; 干挂面的污染主要源于原材料小麦粉在其生产、加工、运输、储存等环节受到产毒真菌的污染导致。因此, 需要加强对小麦粉及其制品中 DON 的污染风险控制和监测, 采取有效控制措施, 比如改善存储条件, 控制温湿度, 防治小麦吸潮长霉, 尽可能减少真菌毒素的污染风险, 从而使 DON 等污染问题得到有效控制。

由于 DON 在谷物制品中的普遍存在, 有一定程度的摄入暴露风险<sup>[28-31]</sup>。成年男性摄入干挂面、小麦粉等 5 种谷物的慢性暴露量在 0.045~0.550  $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$ 之间, 成年女性摄入 5 种谷物的慢性暴露量在 0.049~0.520  $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$ 之间, 暴露风险均可被接受; 成年男性和女性摄入小麦粉的急性暴露量分别为 8.84  $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$  和 8.34  $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$ , 均超过 ARfD 值, 有可能存在急性中毒风险。因此, 为了更好地保障食品安全和公众健康, 建议有关部门加强对小麦粉及其他谷物制品在存储运输过程中温湿度条件的控制, 降低真菌的生长繁殖和毒素的产生, 以降低膳食暴露风险, 确保食品的质量和安

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 黄晴雯. 真菌毒素的分析方法及风险评估研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [3] 全国辉, 谭壮生, 杨庆, 等. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇对健康影响的危害评估[J]. 毒理学杂志, 2021, 35(5): 373-378.  
TONG GH, TAN ZS, YANG Q, *et al.* Hazard assessment of the effects of deoxynivalenol on health [J]. Journal of Toxicology, 2021, 35(5): 373-378.
- [4] 郭红艳, 杨家庆, 刘园, 等. 呕吐毒素的食品污染、吸收代谢及肠道毒性研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(19): 382-390.  
GUO HY, YANG JQ, LIU Y, *et al.* Progress in research on food pollution by and absorption, metabolism and intestinal toxicity of vomitoxin [J]. Food Science, 2022, 43(19): 382-390.
- [5] 郝得隆, 亓志莹, 任兴葡, 等. 我国南北方地区谷物中脱氧雪腐镰刀菌烯醇污染水平差异分析[J]. 中国地方病防治, 2022, 37(2): 91-94.  
HAO DL, QI ZY, REN XP, *et al.* Analysis on the difference of deoxynivalenol pollution level in cereals in north and south in China [J]. Chinese Journal of Control of Endemic Diseases, 2022, 37(2): 91-94.
- [6] 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, 22(12): 8948-8953.  
DUAN HJ, LI WX, HAO DL, *et al.* Pollution situation and distribution characteristics of deoxynivalenol toxin in grains and their products in China in 2020 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 22(12): 8948-8953.
- [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 Food Science Technology, 2018, 71: 13-24.
- [8] 王绪卿, 吴永宁, 陈君石. 食品污染物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 of Preventive Medicine, 2002, 36(4): 278-279.
- [9] 郝得隆, 任兴葡, 段鸿渐, 等. 地区差异影响粮食中脱氧雪腐镰刀菌烯醇含量[J]. 现代预防医学, 2022, 49(11): 2069-2073, 2106.  
HAO DL, REN XP, DUAN HJ, *et al.* Regional differences affect the content of deoxynivalenol in Grain [J]. Modern Preventive Medicine, 2022, 49(11): 2069-2073, 2106.
- [10] MARTINS C, TORRES D, LOPES C, *et al.* Deoxynivalenol exposure assessment through a modelling approach of food intake and biomoni. Toring date-acontribution to the risk assessment of an enteropatho. genicmycotoxin [J]. Food Resint, 2021, 140(1): 109863.
- [11] 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.  
LI YL, LIU JL, HUANG J, *et al.* Exposure assessment of deoxynivalenol in wheat and its products among residents in different regions of China [J]. Journal of Hygiene Research, 2022, 51(5): 815-822.
- [12] 董峰光, 刘伟德, 冯雪英, 等. 烟台谷类食品脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其衍生物污染状况及暴露评估[J]. 现代预防医学, 2021, 48(13): 2358-2361.  
DONG FG, LIU WD, FENG XY, *et al.* Contamination status and dietary exposure assessment of deoxynivalenol and its acetylated derivatives in cereal samples of Yantai City [J]. Modern Preventive Medicine, 2021, 48(13): 2358-2361.
- [13] 林如琴, 吴思婷, 余丹妮, 等. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇脱毒方法研究

- 进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(6): 90–99.
- LIN RQ, WU ST, YU DN, *et al.* Research progress on detoxification technology of deoxynivalenol [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(6): 90–99.
- [14] 张伟, 冯光伟, 谭洁冰, 等. 河南省小麦粉及其制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其衍生物的分析检测[J]. 中国卫生检验杂志, 2022, 32(4): 394–398.
- ZHANG W, FENG GW, TAN JB, *et al.* Contamination status and dietary exposure assessment of deoxynivalenol and its acetylated derivatives in cereal samples of Yantai City [J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2022, 32(4): 394–398.
- [15] 孙大赢, 杜攀, 李坤全, 等. 聊城市 2023 年新收获小麦真菌毒素污染状况分析[J]. 现代食品, 2024, 30(7): 115–117.
- SUN DY, DU P, LI KQ, *et al.* Analysis of mycotoxin pollution in newly harvested wheat in Liaocheng City in 2023 [J]. *Modern Food*, 2024, 30(7): 115–117.
- [16] WITTSIEPE J, FURST P, WILHELM M. The 2005 world health organization re-evaluation of tefs for dioxins and dioxin-like compounds-What are the consequences for german humanback groundlevels [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2007, 210(3): 335–339.
- [17] 尚艳娥, 杨卫民. CAC、欧盟、美国与中国粮食中真菌毒素限量标准的差异分析[J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(1): 10–15.
- SHANG YE, YANG WM. CAC, analysis of differences in maximum limits for fungal toxins in grain between the European Union, the United States, and China [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 37(1): 10–15.
- [18] 王丽英, 任贝贝, 刘印平, 等. 河北地区面粉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和分析[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.
- [19] 李俊玲, 吴俊威, 申磊, 等. 河南省面粉及其制品中真菌毒素污染状况[J]. 江苏预防医学, 2020, 31(3): 334–336.
- LI JL, WU JW, SHEN L, *et al.* The contamination status of fungal toxins in flour and its products in Henan Province [J]. *Jiangsu Journal of Preventive Medicine*, 2020, 31(3): 334–336.
- [20] 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, 35(8): 729–734.
- YU SH, LI YQ, ZHANG LQ, *et al.* Dietary exposure assessment of deoxynivalenol in wheat flour and its products sold in Shanghai [J]. *Shanghai Journal of Preventive Medicine*, 2023, 35(8): 729–734.
- [21] 冯荣虎, 劳翠瑜, 王珍妮, 等. 2019 年深圳市面粉制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇风险监测[J]. 食品工业, 2021, 42(4): 501–504.
- FENG RH, LAO CY, WANG ZN, *et al.* Risk monitoring of deoxynivalenol in shenzhen flour product in year of 2019 [J]. *The Food Industry*, 2021, 42(4): 501–504.
- [22] MALACHOVA A, DZUMAN Z, VEPRIKOVA Z, *et al.* Deoxynivalenol, deoxynivalenol-3-glucoside, and enniatins: The major mycotoxins found in cereal-based products on the czech market [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(24): 12990–12997.
- [23] 马玉彤, 刘太国, 文才艺, 等. 我国不同麦区小麦镰刀菌毒素检测及毒素污染规律分析[J]. 植物保护学报, 2019, 46(2): 266–273.
- MA YT, LIU TG, WEN CY, *et al.* Determination and contamination of Fusarium mycotoxins in different wheat planting regions of China [J]. *Journal of Plant Protection*, 2019, 46(2): 266–273.
- [24] 张国辉, 杨晓玲, 吴小毛, 等. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)的毒素污染分析及防控研究进展[J]. 农业灾害研究, 2022, 12(9): 22–24.
- ZHANG GH, YANG XL, WU XM, *et al.* Research progress on toxin contamination analysis and prevention of deoxynivalenol (DON) from FUSARIUM oxysporum [J]. *Research on Agricultural Disasters*, 2022, 12(9): 22–24.
- [25] 戴煌, 武旭悦, 黄金发, 等. 粮食中脱氧雪腐镰刀菌烯醇检测方法研究进展[J]. 现代食品科技, 2021, 37(12): 319–328.
- DAI H, WU XY, HUANG JF, *et al.* Progress detection methods of deoxynivalenol in grain [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(12): 319–328.
- [26] 王瑜, 郭爱娟. 谷物及其制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其衍生物的检测及污染规律研究[J]. 现代食品, 2022, 28(3): 114–117.
- WANG Y, GUO AIJ. Detection and contamination law of deoxynivalenol and its derivatives in cereals and their products [J]. *Modern Food*, 2022, 28(3): 114–117.
- [27] 刘坚, 孙婷琳, 秦时聪, 等. 高效液相色谱同步检测小麦中脱氧雪腐镰刀菌烯醇和玉米赤霉烯酮的方法研究[J]. 食品科技, 2024, 49(2): 329–333.
- LIU J, SUN TL, QIN SC, *et al.* Study on the method of simultaneous detection of deoxynivalenol and zearalenone in wheat by high performance liquid chromatography [J]. *Food Technology*, 2024, 49(2): 329–333.
- [28] 周鸿, 于辉, 李小平, 等. 江西省地方特色预包装食品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇污染状况调查及膳食暴露评估[J]. 中国卫生检验杂志, 2023, 33(18): 2274–2276.
- ZHOU H, YU H, LI XP, *et al.* Investigation and exposure assessment of deoxynivalenol contamination in local prepackaged characteristic food in Jiangxi Province [J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2023, 33(18): 2274–2276.
- [29] 娄雨豪, 曹冬梅, 张东杰, 等. 不同贮藏条件及加工处理后大麦中脱氧雪腐镰刀菌烯醇膳食风险评估[J]. 食品科学, 2023, 44(1): 132–139.
- LOU YH, CAO DM, ZHANG DJ, *et al.* Dietary risk assessment of deoxynivalenol in barley subjected to different storage conditions or processing treatments [J]. *Food Science*, 2023, 44(1): 132–139.
- [30] 张伟, 卢素格, 谭洁冰, 等. 食品安全指数法评估河南省面粉制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇的膳食暴露风险[J]. 河南预防医学杂志, 2021, 32(12): 923–926, 965.
- ZHANG W, LU SG, TAN JB, *et al.* Risk assessment of dietary deoxynivalenol exposure in flour products from Henan Province by food safety index [J]. *Henan Journal of Preventive Medicine*, 2021, 32(12): 923–926, 965.
- [31] 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]. 现代疾病预防控制, 2023. DOI: 10.13515/j.cnki.hnjpm.1006-8414.2024.03.001,321–325.
- ZHANG L, WU L, LI S, *et al.* Contamination and risk assessment of deoxynivalenol and its derivatives in 182 wheat flour and its products in Zhumadian of Henan, 2016—2022 [J]. *Modern Disease Prevention and Control*, 2023. DOI: 10.13515/j.cnki.hnjpm.1006-8414.2024.03.001,321–325.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)