· 营养与食品卫生 ·

重庆市谷物及其制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其乙酰基衍生物膳食暴露概率评估

宋治眉[1,2],代兴慧[1,2],李旻涛[1,2],陈京蓉[2],冯萍[2],覃梅[2],程莉[2],
赵舰[2],罗书全[2],熊鹰[2],练雪梅[1],王青[2],张华东[2],霍娇[2],程淑群[1]
1. 重庆医科大学公共卫生学院,重庆 400016;2. 重庆市疾病预防控制中心

摘要:目的　了解重庆市谷物及其制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇(dexynivalenol,DON)、3 - 乙酰基脱氧雪腐镰刀菌烯醇(3 - Acetyl - deoxynivalenol,3 - Ac - DON)、15 - 乙酰基脱氧雪腐镰刀菌烯醇(15 - Acetyl - deoxynivalenol,15 - Ac - DON)污染水平,评估重庆市居民 DON 及其乙酰基衍生物三种真菌毒素总的膳食暴露水平及可能的潜在慢性健康风险。**方法**　使用三角分布等模型对 2018—2023 年重庆市监测的 9 类共 794 份谷物及其制品样本中 DON 及其乙酰基衍生物的污染水平分布进行拟合,根据分布类型进行参数估计。本研究使用 2018 年中国健康与营养调查重庆地区数据,采用基于蒙特卡洛模拟的概率评估方法,对重庆市居民的膳食暴露水平予以评估,进行风险特征描述。**结果**　谷物及其制品中 DON、3 - Ac - DON 和 15 - Ac - DON 的平均污染水平分别为 213.00、0.09 ~ 4.48 和 0.75 ~ 5.51 μg/kg。重庆市 3 ~ 6 岁、7 ~ 17 岁、18 ~ 59 岁和 60 岁及以上人群膳食 DON 及其乙酰基衍生物平均摄入量分别为 1.11 ~ 1.19、0.85 ~ 0.94、0.47 ~ 0.48 和 0.50 ~ 0.52 μg/(kg · d)。P_{90} 水平下,大部分人群组的暴露水平超过每日可耐受摄入量,P_{95} 水平下,各人群组的暴露水平为每日可耐受摄入量的 1.12 ~ 2.87 倍。小麦粉制品是重庆市膳食 DON 及其乙酰基衍生物暴露的主要来源。**结论**　重庆市居民 DON 及其乙酰基衍生物(3 - Ac - DON 和 15 - Ac - DON)膳食平均暴露处于安全水平,高暴露人群可能存在潜在的体重减轻风险。

关键词:重庆市;谷物及其制品;膳食暴露;脱氧雪腐镰刀菌烯醇;概率风险评估
中图分类号:TS210.1;TS201.6　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1003 - 8507(2026)02 - 259 - 08
DOI:10.20043/j.cnki.MPM.202508201

Evaluated the dietary exposure to deoxynivalenol and its acetyl derivatives in cereals and their products, Chongqing, China

SONG Zhi - mei*, DAI Xing - hui, LI Min - tao, CHEN Jing - rong, FENG Ping, QIN Mei, CHENG Li,
ZHAO Jian, LUO Shu - quan, XIONG Ying, LIAN Xue - mei, WANG Qing, ZHANG Hua - dong,
HUO Jiao, CHENG Shu - qun
* *School of Public Health, Chongqing Medical University, Chongqing* 400016, *China*

Abstract: Objective　To investigate the contamination levels of deoxynivalenol (DON), 3 - acetyldeoxynivalenol (3 - Ac - DON), and 15 - acetyldeoxynivalenol (15 - Ac - DON) in grains and their products in Chongqing, and to assess the dietary exposure levels and potential chronic health risks posed by these mycotoxins among residents of Chongqing. **Methods**　Functional models (*e. g.* triangular distribution models) were employed to fit contamination data of DON and its acetyl derivativesfrom 794 samples across nine categories of grains and their products collected in Chongqing between 2018 to 2023. Parameter estimation was conducted based on distribution types. Probabilistic assessment (Monte Carlo simulation) was performed using data from the 2018 China Health and Nutrition Survey toestimate the exposure levels and characterize risks against established safety thresholds. **Results**　The average contamination levels of DON, 3 - Ac - DON and 15 - Ac - DON were 213.00, 0.09 - 4.48 and 0.75 - 5.51 μg/kg, respectively. Estimated daily intakes of DON and its derivatives varied by age group: 1.11 - 1.19 μg/(kg · d) (3 - 6 years), 0.85 - 0.94 μg/(kg · d) (7 - 17 years), 0.47 - 0.48μg/(kg · d) (18 - 59 years), and 0.50 - 0.52 μg/(kg · d) (≥60 years). At the 90th percentile (P_{90}), The exposure levels of most population groups exceeded the daily tolerable intake (TDI). At P_{95}, the exposures levels were 1.12 to 2.87 times the TDI for

基金项目:重庆市博士后特别资助项目(2022CQBSHTB2065);重庆市科卫联合面上项目(2025MSXM146)
作者简介:宋治眉(2000—),女,硕士在读,研究方向:公共卫生
通信作者:程淑群,E - mail:871222238@qq.com

all population groups. Wheat flour products were identified as the primary source of DON and its acetyl derivatives. **Conclusion** The average dietary exposure of residents to DON and its acetylderivatives (3 – Ac – DON and 15 – Ac – DON) is at a safe level, and there may be a potential weight loss risk in high – exposure populations.

Keywords: Chongqing municipality; Grains and their products; Dietary exposure; Deoxynivalenol; Probabilistic risk assessment

脱氧雪腐镰刀菌烯醇(dexynivalenol, DON)又称为呕吐毒素,是由镰刀菌属真菌产生的次级代谢产物。作为全球范围内污染最为广泛的真菌毒素之一,DON 主要污染食品类别为谷物及其制品,如小麦、大麦、玉米、燕麦等。产毒菌株在合成 DON 的同时,通常还会伴随产生乙酰基衍生物,即 3 – 乙酰基脱氧雪腐镰刀菌烯醇(3 – Acetyl – deoxynivalenol, 3 – Ac – DON)和 15 – 乙酰基脱氧雪腐镰刀菌烯醇(15 – Acetyl – deoxynivalenol, 15 – Ac – DON),因此这些毒素往往在受污染谷物中共存[1]。

动物研究显示 DON 慢性暴露主要引起实验动物摄食减少和体重减轻,具有免疫毒性和生殖发育毒性[2]。DON 主要毒作用机制可能为通过核糖体应激和线粒体应激,引起促炎细胞因子和饱腹激素的分泌,进而引发厌食、呕吐,导致进一步生长抑制[3]。近期研究显示,DON 还可通过诱导肝脂肪变性与脂质氧化、脂肪生成和脂肪分解的变化,从而引发脂质代谢相关疾病[4]。3 – Ac – DON 和 15 – Ac – DON 是 DON 分子中羟基被乙酰基取代形成,具有相似结构。联合国粮农组织/世界卫生组织联合食品添加剂专家委员会(Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization, JECFA)和欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)在评估时保守认为 3 – Ac – DON 和 15 – Ac – DON 与 DON 有相似的急性和慢性效应[5],将其作为一组化学物进行评估,在本研究中也采用该假设。

目前,我国部分地区对谷物及其制品中 DON 暴露水平进行了健康风险进行研究,例如山东济南、烟台和河北邢台等地区,但大部分研究仅局限于 DON,未将 3 – Ac – DON 和 15 – Ac – DON 纳入研究,缺乏对 DON 及其乙酰基衍生物整体暴露风险的估计[6-8]。重庆市属亚热带季风气候,高温高湿天气居多,全年平均气温达 18.3 ℃左右度,适宜于镰刀菌的繁殖,而目前尚无重庆市居民膳食 DON 暴露水平及其健康风险评估的报道。本文将基于重庆市近五年谷类食品的风险监测数据,结合居民谷类膳食消费量数据开展风险,对于 DON 及其乙酰基衍生物整体暴露风险的评估具有重要的实际意义。本研究中使用的概率评估法是目前食品安全风险评估方法中估算暴露水平最准确的方法之一,可量化风险的不确定性,具有先进性[9]。本次研究的开展能更全面获取居民通过饮食摄入 DON 及其乙酰基衍生物的水平,系统评估其对人体健康的潜在慢性危害,为进一步管理 DON 膳食风险措施的制定提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 材料

1.1.1 食品中 DON 及其乙酰基衍生物数据的来源 本研究中使用的 DON、3 – Ac – DON、15 – Ac – DON 含量的核心数据,来源于重庆市食品安全风险监测系统在 2018 至 2023 年间积累的化学污染物监测历史记录。所有样品的采集工作严格按照我国食品风险污染物和有害因素监测手册的标准程序执行,根据分层随机抽样的原则,在重庆市全境 38 个区县的种植与采购环节,以及包括超市、农贸市场、食杂店等在内的流通环节,系统采集市售谷物及其制品样品[10],共计 9 种食物类别 794 份食物样品,包括大米 52 份、玉米制品 156 份(玉米面 106 份、玉米粒 50 份)、小麦粉及其制品 586 份(小麦粉 330 份、馒头 41 份、生湿面制品 22 份、生干面制品 97 份、方便面 50 份、焙烤食品 46 份)。其中生湿面制品包括面条、饺子皮、馄饨皮和烧麦皮,生干面制品为挂面。本研究所采集的样本若为种植环节,均为当年新产,若为预包装产品,均在保质期内,所有样本均按照手册中规定妥善保存,于规定时间限内完成检测。

1.1.2 膳食消费数据来源 本研究使用的谷类食品膳食消费量数据,来源于 2018 年中国健康与营养调查在重庆区域实施的膳食调查。此项调查采用了多阶段、分层、整群的随机抽样设计,确立了覆盖主城区、郊区及农村的抽样框架,具体为重庆南岸区、江津区、沙坪坝区、綦江区、大足区、奉节县 6 个区/县。调查最终获得 969 人的有效样本。健康与营养调查通过 3 天 24 小时回顾法收集膳食消费数据,连续记录受访者 3 天内所有食物的摄入状况,包括在家和外出进食。本研究从中提取了谷类食品的消费量用于分析。所有数据均以入户调查方式采集,且全程严格遵守伦理要求,由接受过统一培训的调查员开展入户访谈,在进行访谈之前获得调查对象的知情同意。对于 7 岁以下及 75 岁以上的受访者,其膳食数据由成年家庭成员提供,以确保调查数据的准确性。此次调查样本包括 34 名 3 ~ 6 岁的学龄前儿童、111 名 7 ~ 17 岁的学龄儿童、417 名 18 ~ 59 岁的成年人和 407 名 60

岁及以上人群,其中男性为 433 人,女性为 536 人,来自城市地区 501 人,来自农村地区 468 人。

1.2　方法

1.2.1　检测方法和质量控制　谷物及其制品中 DON、3 - Ac - DON、15 - Ac - DON 含量的检测按照 GB 5009.111—2016《食品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其乙酰基衍生物的测定》使用液相色谱 - 串联质谱仪(LC - MS/MS)进行分离和检测[11],各类谷物食品的检出限(limit of detection, LOD)范围为 0.5 ~ 20 μg/kg。在检验过程中,采取空白对照、基质参考标准物质对照、平行样对照等方法进行质量控制。同时还开展人员比对、设备比对、方法比对、实验室间比对等措施进行内部的质量控制。

1.2.2　膳食暴露计算方法　本文采用 JECFA 推荐的概率评估法进行估计,以更加精确地估计出重庆市居民通过谷类食品摄入 DON 及其乙酰基衍生物的暴露水平[12]。使用@ Risk 软件内置的 100 余种分布模型(正态分布、三角分布、泊松分布、贝塔分布等)对污染物、消费量分布进行拟合,根据贝叶斯信息量准则(bayesian information criterion, BIC)选择最佳分布函数,使用最大似然估计和矩估计进行参数估计。本文采用拉丁超立方抽样方法,进行蒙特卡洛模拟,其迭代次数为 100 000,计算重庆市不同性别、居住区和年龄人群组 DON 及其乙酰基衍生物总暴露水平的概率分布。暴露量计算公式如下:

$$EDI_J = \sum_{i=1}^{n} \frac{(F_i \times C_i)}{BW_j} \times 10^{-3}$$

此公式中,估计日摄入量(estimated daily intake, EDI)是指某个体每日每公斤体重的 DON、3 - Ac - DON、15 - Ac - DON 总的暴露水平,μg/(kg · d),F_i 为个体第 i 种谷类食物的消费量,g/d;C_i 为第 i 种谷类食物中 DON、3 - Ac - DON、15 - Ac - DON 的总含量(计算方法为某食物中 DON、3 - Ac - DON、15 - Ac - DON 单独浓度相加),μg/kg;BW_j 为某个体的体质量,kg。

1.2.3　风险特征描述　2017 年 EFSA 根据一项慢性毒性研究中小鼠增重降低的基准剂量下限($BMDL_{05}$)11 mg/(kg d)推导 DON 及其衍生物 3 - Ac - DON、15 - Ac - DON 和 DON - 3 - 葡萄糖苷成组每日可耐受摄入量(tolerable daily intake, TDI)为 1 μg/(kg d)[9]。本研究将谷物及其制品 DON、3 - Ac - DON、15 - Ac - DON 的 EDI 与 TDI 进行比较,系统分析重庆市不同性别、居住地区、年龄人群组 DON 的暴露健康风险水平。EDI/TDI 值≥1 时,认为可能存在潜在的慢性健康风险;EDI/TDI 风险 <1 时,则认为其慢性健康风险在可接受的范围内。

1.2.4　数据处理和统计分析　对低于检测限 LOD 的数据,参照 EFSA 处理左删失数据的替代法进行处理。在下限(lower bound, LB)情况下,低于 LOD 的结果用零替代;在上限(upper bound, UB)情况下,低于 LOD 的结果被报告为 LOD 的值取代,以减少与暴露估计相关的不确定性[13]。本研究使用 SPSS 27.0、Excel 2016、@ Risk 8.2 软件完成数据的处理分析。

2　结　果

2.1　重庆市 DON、3 - Ac - DON 和 15 - Ac - DON 污染情况　由表 1 可知,在 2018—2023 年 9 组 794 份食品样本中,各类食物 DON 的检出率范围在为 4 % ~ 100 %;3 - Ac - DON 检出率为 0.0 % ~ 28.3 %;15 - Ac - DON 检出率为 0.0 % ~ 7.5 %。重庆市谷类食品中 DON 的平均含量为 213.00 μg/kg,在 LB 和 UB 时 3 - Ac - DON 平均含量分别为 0.09 μg/kg、4.48 μg/kg,15 - Ac - DON 的平均含量分别 0.75 μg/kg、5.51 μg/kg。在 9 类食物中,DON 检出率最高的食品是生干面制品,平均含量为 479.23 ~ 480.16 μg/kg;3 - Ac - DON 检出率最高的食品是焙烤食品,平均含量为 1.19 ~ 1.55 μg/kg;15 - Ac - DON 检出率最高的食品是玉米面,平均含量为 5.52 ~ 18.90 μg/kg。在各谷类及其制品中 DON 的超标率为 0.00 % ~ 18.00 %,方便面 DON 的超标率最高,其次为焙烤食品和生干面制品。

表 1　重庆市谷物及制品中 DON 及其乙酰基衍生物含量

Table 1　Levels of DON and its acetylated derivatives in cereals and products from Chongqing

样本种类	样本量(n)	DON						3 - Ac - DON				
		检出率(%)	超标率(%)	LB - 均值(μg/kg)	UB - 均值(μg/kg)	LB - P95(μg/kg)	UB - P95(μg/kg)	检出率(%)	LB - 均值(μg/kg)	UB - 均值(μg/kg)	LB - P95(μg/kg)	UB - P95(μg/kg)
大米及其制品	52	32.69	0.00	9.68	10.01	61.77	61.77	0.00	0.00	0.50	0.00	0.50
大米	52	32.69	0.00	9.68	10.01	8.36	8.36	0.00	0.00	0.50	0.00	0.50
小麦粉及其制品	586	72.18	4.10	233.80	234.21	920.25	920.25	3.07	0.11	3.09	0.00	10.00
小麦粉	330	55.45	0.00	85.22	85.46	316.35	316.35	0.91	0.02	1.35	0.00	10.00
馒头	41	97.56	0.00	221.06	221.07	534.10	534.10	4.88	0.05	0.53	0.54	0.59
生湿面制品	22	100.00	0.00	293.00	293.00	507.70	507.70	0.00	0.00	0.50	0.00	0.50

（续表）

样本种类	样本量（n）	DON						3 – Ac – DON				
		检出率（%）	超标率（%）	LB – 均值（μg/kg）	UB – 均值（μg/kg）	LB – P95（μg/kg）	UB – P95（μg/kg）	检出率（%）	LB – 均值（μg/kg）	UB – 均值（μg/kg）	LB – P95（μg/kg）	UB – P95（μg/kg）
生干面制品	97	90.72	10.30	479.23	480.16	1 521.20	1 521.20	0.00	0.00	7.85	0.00	10.00
焙烤食品	46	100.00	10.87	355.65	355.65	1 636.50	1 636.50	28.26	1.19	1.55	10.39	10.39
方便面	50	88.00	18.00	610.87	612.07	2 826.15	2 826.15	0.00	0.00	10.00	0.00	10.00
玉米制品	156	38.50	0.00	69.66	72.40	256.35	256.35	0.60	0.00	10.50	0.00	11.00
玉米面	106	54.72	0.00	101.60	103.14	455.80	455.80	0.90	0.10	11.31	0.00	15.00
玉米粒	50	4.00	0.00	1.96	7.22	19.56	22.73	0.00	0.00	10.50	0.00	11.00
合计	794	62.97	3.02	213.0	213.00	725.50	725.50	2.39	0.09	4.48	0.00	15.00

样本种类	样本量（n）	15 – Ac – DON				
		检出率（%）	LB – 均值（μg/kg）	UB – 均值（μg/kg）	LB – P95（μg/kg）	UB – P95（μg/kg）
大米及其制品	52	3.85	0.09	0.57	0.54	0.86
大米	52	3.85	0.09	0.57	0.54	0.86
小麦粉及其制品	586	0.34	0.00	0.50	0.00	10.00
小麦粉	330	0.00	0.00	0.50	0.00	10.00
馒头	41	0.00	0.00	0.50	0.00	0.50
生湿面制品	22	0.00	0.00	0.50	0.00	0.50
生干面制品	97	0.00	0.00	10.00	0.00	10.00
焙烤食品	46	2.17	0.21	0.70	0.10	0.62
方便面	50	0.00	0.00	10.00	0.00	10.00
玉米制品	156	5.13	3.75	16.53	13.21	20.35
玉米面	106	7.55	5.52	18.90	43.54	43.54
玉米粒	50	0.00	0.00	11.50	0.00	13.00
合计	794	1.39	0.75	5.51	0.00	20.00

2.2 重庆市居民谷类食品膳食消费量和 DON、3 – Ac – DON 和 15 – Ac – DON 膳食暴露情况 表 2 展示了重庆市居民谷类平均消费数据。重庆市居民大米和生湿面制品的消费量较高，玉米及其制品的消费量较低，各人群亚组各种谷类食品的消费量存在一定的差异。

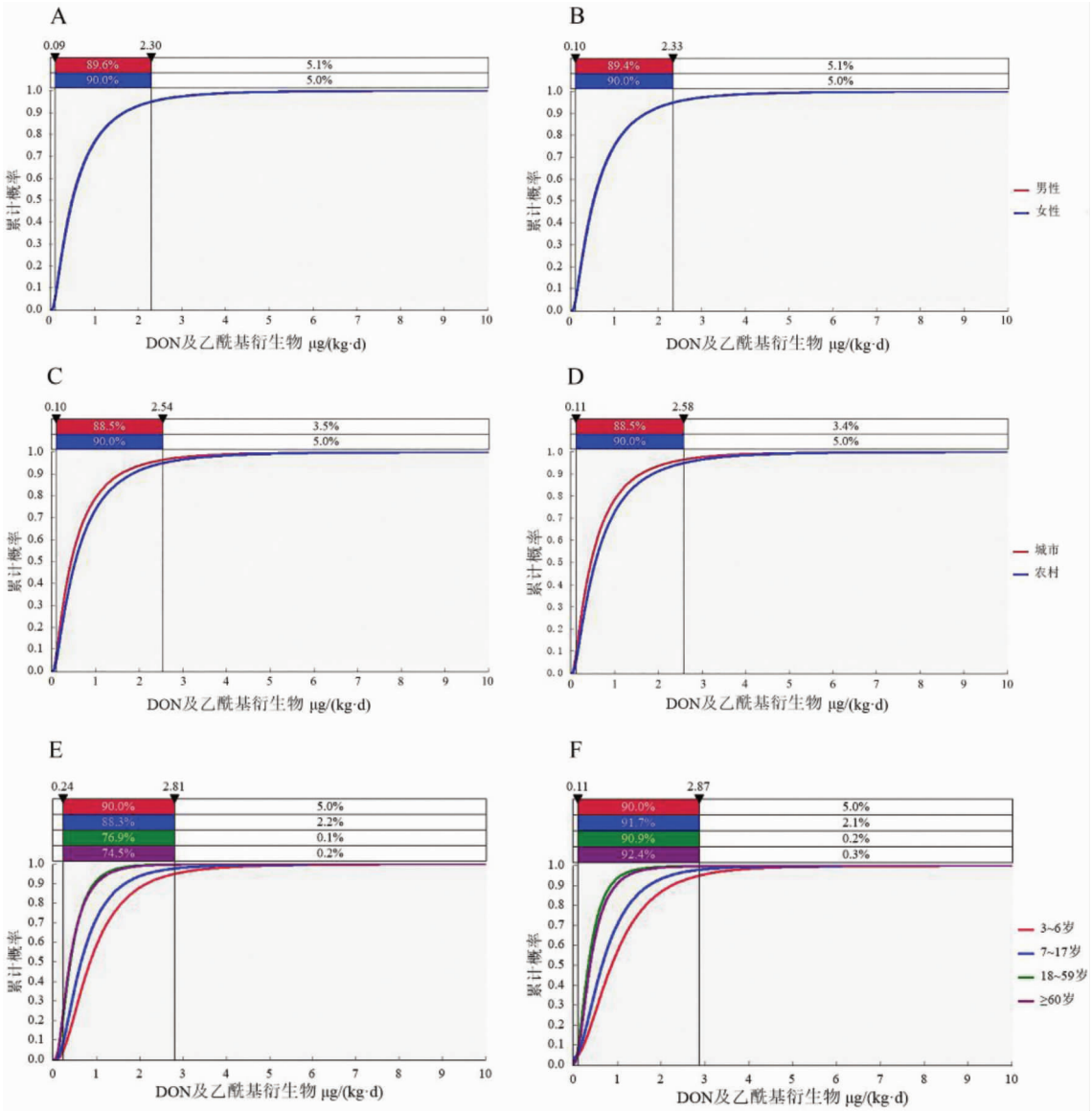
图 1 为不同人群亚组在 LB 和 UB 情况下的谷物及其制品的 DON 总暴露水平。在 UB 情况下，各年龄组 DON 的高暴露水平（P_{95}）为 1.12 ~ 2.87 μg/（kg · d）；各性别组 DON 高暴露水平（P_{95}）为 2.30 ~ 2.37 μg/（kg · d）；各地区组 DON 高暴露水平（P_{95}）为 2.19 ~ 2.59 μg/（kg · d）。男性组 DON 的暴露量与女性组暴露量差异较小，其平均暴露水平分别为 0.76 ~ 0.78 μg/（kg · d）和 0.75 ~ 0.78 μg/（kg · d）。农村组人群 DON 的平均暴露量高于城市组人群，分别为 0.83 ~ 0.85 μg/（kg · d）和 0.70 ~ 0.71 μg/（kg · d）。不同年龄组人群的 DON 及乙酰基衍生物的暴露量呈现低龄人群高于高龄人群，随着年龄的的增加而降低的趋势。3 ~ 6 岁组人群平均暴露量为 1.11 ~ 1.19 μg/（kg · d）；7 ~ 17 岁组人群的平均暴露量为 0.85 ~ 0.94 μg/（kg · d）；18 ~ 59 岁组人群的平均暴露量为 0.47 ~ 0.48 μg/（kg · d）；60 岁以上人群的平均暴露量为 0.50 ~ 0.52 μg/（kg · d）。

2.3 重庆市居民膳食中 DON 暴露风险特征描述 由表 3 可见，对谷物制品摄入 DON 的慢性毒性风险进行分析，在高于 P_{95} 的摄入水平时，不同性别、地区、年龄组人群 DON、3 – Ac – DON 和 15 – Ac – DON 的暴露风险为 TDI 的 1.12 ~ 2.87 倍，可能存在潜在的慢性毒性风险。

表 2 重庆市居民谷类平均消费量（g/d）

Table 2 Average cereal consumption of residents in Chongqing

分组	人数	大米	小麦粉	馒头	生湿面制品	生干面制品	焙烤食品	方便面	玉米粒	玉米面
男性	433	222.63	7.42	17.30	50.30	8.31	9.31	0.53	3.32	0.68
女性	536	187.48	6.63	16.38	48.52	8.96	10.15	0.42	3.91	0.48
城市	501	200.51	7.29	20.71	48.49	1.88	15.01	0.00	3.49	0.73
农村	468	204.20	6.65	12.59	50.21	15.94	4.17	0.97	3.82	0.41
3 ~ 6 岁	34	139.71	5.84	13.78	16.47	15.59	10.00	0.00	5.20	0.59
7 ~ 17 岁	111	167.82	7.52	12.19	31.47	15.02	19.25	0.67	2.25	0.30
18 ~ 59 岁	417	225.97	7.01	22.37	49.75	8.54	8.81	0.32	3.68	0.32
≥60 岁	407	192.67	6.90	12.58	56.43	6.49	8.16	0.61	3.87	0.90
全人群	969	202.29	6.98	16.79	49.32	8.67	9.77	0.47	3.65	0.57



注：A 和 B 为 LB 和 UB 情况下男性和女性人群的暴露水平，C 和 D 为 LB 和 UB 情况下城市和农村地区人群的暴露水平，E 和 F 为 LB 和 UB 情况下不同年龄组人群的暴露水平。

图 1　不同分组人群 DON 及乙酰基衍生物的总暴露量

Fig. 1　Total exposure to DON and its acetylated derivatives across population groups

表 3　重庆市不同人群谷物及其制品 DON 及其乙酰基衍生物暴露风险（EDI/TDI）

Table 3　Exposure risk to DON and its acetylated derivatives from grain products across different populations in Chongqing (EDI/TDI)

分组	平均值		P_{50}		P_{90}		P_{95}	
	LB	UB	LB	UB	LB	UB	LB	UB
男性	0.76	0.78	0.48	0.50	1.67	1.70	2.36	2.37
女性	0.75	0.78	0.50	0.51	1.67	1.70	2.30	2.33
城市	0.70	0.71	0.44	0.45	1.56	1.59	2.19	2.22
农村	0.83	0.85	0.53	0.63	1.83	1.86	2.54	2.59
3～6 岁	1.11	1.19	0.86	0.87	2.16	2.24	2.81	2.87
7～17 岁	0.85	0.94	0.65	0.65	1.66	1.72	2.16	2.21
18～59 岁	0.47	0.48	0.37	0.39	0.90	0.95	1.12	1.19
≥60 岁	0.50	0.52	0.35	0.37	0.92	0.96	1.21	1.23

2.4　重庆市居民膳食 DON 及其乙酰基衍生物暴露的各谷类食品的贡献率　图 2 可见，不同谷类食品对不同类别亚人群膳食 DON 及其乙酰基衍生物总暴露水平的贡献率。在各谷物食品中，DON、3－Ac－DON

和 15 – Ac – DON 暴露贡献率最大的为生湿面制品(22.52 % ~57.48 %),其次是生干面制品(3.30 % ~35.95 %)、馒头(9.23 % ~16.32 %)、焙烤食品(4.88 % ~23.48 %)、大米(6.32 % ~8.21 %)、小麦粉(1.92 % ~2.40 %)、方便面(0.00 % ~2.01 %)、玉米粒(0.33 % ~0.71 %)、玉米面(0.14 % ~0.42 %)。

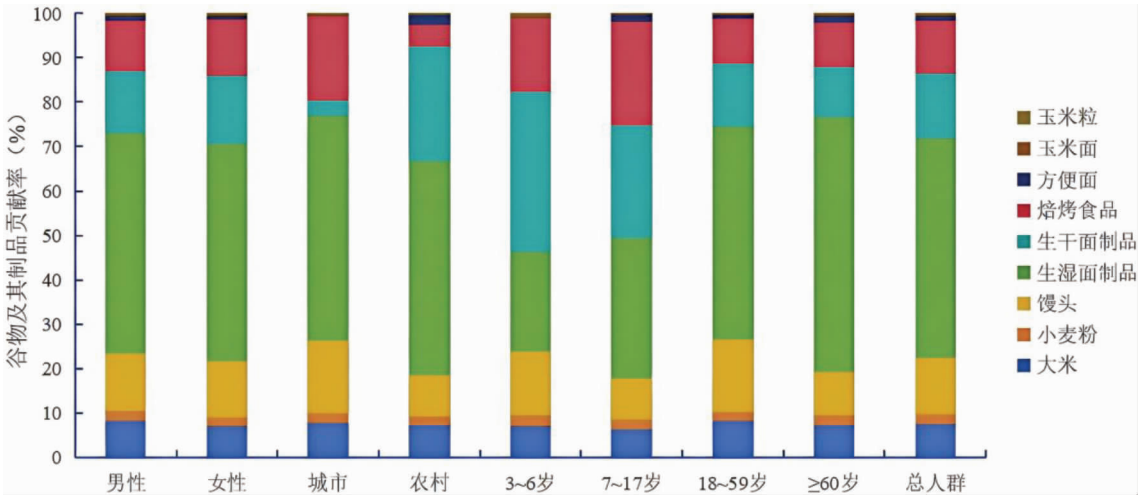


图 2　各谷物及制品对 DON 及其乙酰基衍生物总暴露的贡献率

Fig. 2　Contribution of different cereals and products to total DON and acetylated derivative exposure

3　讨　论

本研究结果显示重庆市谷物及其制品中 DON 总检出率 50.6 %。DON 的含量在小麦粉制品中更高,衍生物 15 – Ac – DON 在玉米制品中的含量更高。这与董峰光等监测的烟台市 DON 及其衍生物含量在谷物食品中的分布情况一致,但重庆市小麦粉及其制品中的 DON 和玉米及其制品的 15 – Ac – DON 水平均高于烟台市平均水平(小麦粉及其制品 DON:223.80 μg/kg vs. 128.85 μg/kg;玉米及其制品 15 – Ac – DON:16.53 μg/kg vs. 4.80 μg/kg)[6]。重庆市小麦粉及其制品和玉米及其制品的 DON 检出率和平均含量均低于大连市相应水平(小麦及其制品:72.18 % vs. 69.0 %;玉米及其制品:70.3 % vs. 35.8 %)。重庆市小麦粉、馒头的 DON 平均含量低于驻马店市相应食品类别的数值,分别为驻马店市的 0.39、0.64 倍[14]。该情况说明,全国 DON 及其乙酰基衍生物的污染水平存在地区性差异,且在不同食品类别间存在一定差异。与国外相比,重庆市大米 DON 含量的平均水平和最高水平低于 JECFA 报告的巴西、韩国、荷兰、英国、挪威五国所有数据的加权平均水平和最高水平[15]。重庆市大米、玉米、小麦粉中 DON 的平均含量为 10.01 μg/kg、7.22 μg/kg 和 85.48 μg/kg,明显小于 EFSA 报道的相应数据 49.7 μg/kg、50.9 μg/kg 和 116 μg/kg。重庆小麦粉制品 DON 含量与 EFSA 报道数据较为接近。

本研究结果显示,DON、3 – Ac – DON 和 15 – Ac – DON 的总膳食暴露水平在不同亚人群中存在一定差异。男性与女性关于 DON 及其乙酰基衍生物暴露水平的差异不明显,而农村地区人群暴露水平明显高于城市地区人群,原因在于农村居民生干面制品消费量较高,而生干面制品 DON 污染较为严重。此外,暴露水平随着年龄的上升存在下降的趋势,这与李依玲等人的研究结果相同[16]。出现低年龄组暴露量更高的原因可能是,婴幼儿的辅食主要以谷类食品为原料,在相同的单位体重下,低年龄岁组人群的谷类食物摄入量更高。

从评估的结果可以看出,在 P_{90} 水平,重庆市 3 ~ 17 岁群体暴露风险(EDI/TDI)均大于 1。在对应 P_{90} 水平下,济南各年龄组中只有 2 ~ 3 岁组人群膳食暴露量超过慢性参考剂量[7],大连市所有年龄组人群的慢性风险均不超过 1[17]。济南市高暴露人群风险低于重庆的原因可能在于济南市小麦粉及其制品中 DON 含量低于重庆市。大连市高暴露人群风险低于重庆市的原因可能在于两点,一是该项研究均未纳入乙酰基衍生物进行评估,可能会导致风险的低估,二是大连市相应食品类别 DON 含量虽然较高,但其消费量较低。在各暴露水平下,山东省小麦及其制品中 DON 暴露风险与重庆市各年龄组人群膳食 DON 暴露风险都较为接近,但山东省小麦及其制品的消费量明显高于山东省,原因可能在于重庆市小麦及其制品 DON 污染水平更高[18]。由此可见,目前我国严重缺

乏已纳入 DON 乙酰基衍生物风险的全面评估结果，可能会导致整体风险的低估。本次研究，包括其他地区仅针对 DON 的研究，均显示存在一定比例的危险人群，提示在全国范围内而言，DON 及其乙酰基衍生物的暴露风险需要引起进一步的关注。从谷类食品的贡献率来看，小麦粉制品是 DON、3 - Ac - DON 和 15 - Ac - DON 的主要来源，原因可能是小面、馒头、包子等是重庆市居民饮食的重要组成部分。这种情况与我国浙江等地区不同，与小麦制品摄入较高的北方地区一致[19]。

本次研究存在的一定的不确定性。其一，在本次研究中未对脱氧雪腐镰刀菌烯醇 - 3 - 葡萄糖苷进行检测，而该物质近年来被 EFSA 纳入 DON 及其衍生物的评估，可能会导致风险的低估。其二，本次研究只考虑了真菌毒素的主要膳食来源，即谷物及其制品，没有考虑坚果及其制品、植物油等其他可能的食物来源，所得出的居民总暴露量较实际偏低。其三，本次评估采用的食物消费量数据使用 3 天 24 小时问卷收集，可能会丢失食用频率较低的食物类别收集，造成风险的低估。且食物消费量数据收集时间为 2018 年，随着时间的变化重庆市居民的消费模式可能发生了一定改变，可能造成风险的低估或高估。

本次研究结果表明，重庆市居民 DON 及其乙酰基衍生物（3 - Ac - DON 和 15 - Ac - DON）膳食平均暴露处于安全水平，高暴露人群可能存在潜在的健康风险（体重减轻）。建议相关部门进一步加强真菌毒素风险监测和监督管理，强化隐患识别，重点关注焙烤食品、生湿面制品、生干面制品相关污染物水平。

利益冲突声明　本研究不存在任何利益冲突

参考文献

[1] Li YF, Gao HH, Wang R, et al. Deoxynivalenol in food and feed: Recent advances in decontamination strategies[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1141378.

[2] Jia BX, Lin HK, 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.

[3] Zhang XR, Li SR, Guo HJ, et al. Deoxynivalenol triggers pyroptosis in mouse hippocampal neurons by activating oxidative stress and interfering with neurotransmitter release[J]. Journal of Hazardous Materials, 2025, 496: 139343.

[4] Ma Z, He Y, Li Y, et al. Effects of deoxynivalenol and its acetylated derivatives on lipid metabolism in human normal hepatocytes[J]. Toxins, 2024, 16(7): 294.

[5] Li FF, Jin J, Rietjens IMCM, et al. Interindividual differences in in vitro human intestinal microbial conversion of 3 - Acetyl - DON and 15 - Acetyl - DON[J]. Toxins, 2022, 14(3): 199.

[6] 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. (In Chinese)

[7] 杨晓倩，曹小丽，刘岚铮，等. 济南市售谷物及其制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇膳食暴露评估[J]. 中国食品卫生杂志，2024，36(11)：1246 - 1251.
Yang XQ, Cao XL, Liu LZ, et al. Dietary exposure assessment of deoxynivalenol in grains and their products in Ji'nan City[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2024, 36(11): 1246 - 1251. (In Chinese)

[8] 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)

[9] Knutsen HK, Alexander J, Barregård L, et al. 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.

[10] 国家卫生和计划生育委员会. GB 2761 - 2017 食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量[S]. 北京：中国标准出版社，2017.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 2761 - 2017 National food safety standard: Maximum levels of mycotoxins in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (In Chinese)

[11] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.111 - 2016 食品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其乙酰基衍生物的测定：GB 5009.111 - 2016[S]. 北京：中国标准出版社，2016.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.111 - 2016 National food safety standard: Determination of deoxynivalenol and its acetylated derivatives in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (In Chinese)

[12] Food, Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization. Principles and methods for the risk assessment of chemicals in food[M]. Ottawa: WHO, 2021.

[13] European Food Safety Authority. Management of left - censored data in dietary exposure assessment of chemical substances[J]. EFSA Journal, 2010, 8(3): 1557.

[14] 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，2024，35(3)：192 - 195，211.
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 Control and Prevention, 2024, 35(3): 192 - 195, 211. (In Chinese)

[15] Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. WHO food additives series 63 FAO JECFA monographs 8: safety evaluation of certain contaminants in food[M]. Geneva: World Health Organization, 2014.

[16] 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 dietary deoxynivalenol intake from wheat and its products for residents in different regions of China[J]. Journal of Hygiene Research, 2022, 51(5): 815 - 822. (In Chinese)

[17] 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)

[18] 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价[J]. 中国标准化,2025(2):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(2): 176 - 180. (In Chinese)

[19] Chen YM, Zhang RH, Tong EY, et al. Occurrence and exposure assessment of deoxynivalenol and its acetylated derivatives from grains and grain products in Zhejiang province, China (2017 - 2020)[J]. Toxins, 2022, 14(9): 586.

收稿日期:2025-08-14

(上接第 237 页)

[8] Ahmed W, Tscharke B, Bertsch PM, et al. SARS - CoV - 2 RNA monitoring in wastewater as a potential early warning system for COVID - 19 transmission in the community: A temporal case study[J]. Science of the Total Environment, 2021, 761: 144216.

[9] Medema G, Heijnen L, Elsinga G, et al. Presence of SARS - Coronavirus - 2 RNA in sewage and correlation with reported COVID - 19 prevalence in the early stage of the epidemic in the Netherlands[J]. Environmental Science & Technology Letters, 2020, 7(7): 511 - 516.

[10] Pang X, Gao T, Ellehoj E, et al. Wastewater - Based surveillance is an effective Tool for trending COVID - 19 prevalence in communities: a study of 10 major communities for 17 months in Alberta[J]. ACS ES T Water, 2022, 2(11): 2243 - 2254.

[11] Wu FQ, Xiao A, Zhang JB, et al. SARS - CoV - 2 RNA concentrations in wastewater foreshadow dynamics and clinical presentation of new COVID - 19 cases[J]. Science of the Total Environment, 2022, 805: 150121.

[12] Kaya D, Falender R, Radniecki T, et al. Correlation between Clinical and Wastewater SARS - CoV - 2 Genomic Surveillance, Oregon, USA[J]. Emerging Infectious Diseases, 2022, 28(9): 1906 - 1908.

[13] Reynolds LJ, Gonzalez G, Sala - Comorera L, et al. SARS - CoV - 2 variant trends in Ireland: Wastewater - based epidemiology and clinical surveillance[J]. Science of the Total Environment, 2022, 838(Pt 2): 155828.

[14] 杜广泓,苏碧慧,王志萍,等. 2022 年广州市环境污水中新型冠状病毒监测结果分析[J]. 中国预防医学杂志,2024,25(9):1143 - 1147.
Du GH, Su BH, Wang ZP, et al. Analysis of SARS - CoV - 2 detection in environmental wastewater in Guangzhou City,2022[J]. China Preventive Medicine, 2024, 25(9): 1143 - 1147. (In Chinese)

[15] 杨喜,程雁鹏,杜琛,等. 基于数字 PCR 方法的污水中新冠病毒监测[J]. 现代预防医学,2024,51(21):3991 - 3995.
Yang X, Cheng YP, Du C, et al. Monitoring of SARS - CoV - 2 in sewage based on digital PCR method[J]. Modern Preventive Medicine, 2024, 51(21): 3991 - 3995. (In Chinese)

[16] 黄金金,倪德航,徐素芹,等. 贵阳市 2023 年 1 034 份城市污水新型冠状病毒监测结果分析[J]. 现代预防医学,2024,51(23):4392 - 4397.
Huang JJ, Ni DH, Xu SQ, et al. Analysis of urban sewage SARS - CoV - 2 monitoring results in Guiyang city in 2023[J]. Modern Preventive Medicine, 2024, 51(23): 4392 - 4397. (In Chinese)

[17] 董柯,邵束钰,许太彬,等. 郑州市城市污水中新型冠状病毒监测结果[J]. 现代疾病预防控制,2024,35(2):86 - 90.
Dong K, Shao SY, Xu TB, et al. Monitoring results of SARS - CoV - 2 in urban sewage in Zhengzhou city[J]. Modern Disease Control and Prevention, 2024, 35(2): 86 - 90. (In Chinese)

[18] 中国疾病预防控制中心. 健康数据,全国新型冠状病毒感染疫情情况[EB/OL]. [2025 - 12 - 10]. https://www.chinacdc.cn/jksj/xgbdyq/.
Chinese Center for Disease Control and Prevention. Health data, national COVID - 19 infection situation[EB/OL]. [2025 - 12 - 10]. https://www.chinacdc.cn/jksj/xgbdyq/. (In Chinese)

[19] 中国疾病预防控制中心. 全国病原病媒生物和宿主动物监测管理信息系统[EB/OL]. [2025 - 12 - 10]. https://npvms.icdc.cn/.
Chinese Center for Disease Control and Prevention. National surveillance and management information system for pathogenic vector organisms and host animals[EB/OL]. [2025 - 12 - 10]. https://npvms.icdc.cn/. (In Chinese)

[20] O'toole Á, Scher E, Underwood A, et al. Assignment of epidemiological lineages in an emerging pandemic using the pangolin tool[J]. Virus Evol, 2021, 7(2): veab064.

[21] Ikner LA, Gerba CP, Bright KR. Concentration and recovery of viruses from water: a comprehensive review[J]. Food and Environmental Virology, 2012, 4(2): 41 - 67.

[22] Chai XR, Liu SY, Liu C, et al. Surveillance of SARS - CoV - 2 in wastewater by quantitative PCR and digital PCR: a case study in Shijiazhuang city, Hebei province, China[J]. Emerging Microbes & Infections, 2024, 13(1): 2324502.

[23] Eshraghi R, Bahrami A, Karimi HM, et al. JN.1 and the ongoing battle: unpacking the characteristics of a new dominant COVID - 19 variant[J]. Pathogens and Global Health, 2024, 118(6): 453 - 458.

[24] Yan J, Liu FY, Hu SH, et al. Regional dynamics and mechanisms behind SARS - CoV - 2 XDV.1 prevalence in Chongqing via genomic surveillance and molecular insights[J]. Virus Research, 2025, 355: 199562.

收稿日期:2025-09-01