DOI:10.12441/spyswjs.20241202002 [文章编号] 1673-1689(2025)07-0125-12

上海市售大米、玉米、大豆和面粉中多种真菌毒素的健康风险评估

朱佐银[1] 王 杰[1] 马君梅[2] 赵含珂[1] 程海生[1] 黄成宝[1] 杨俊花[1*]

(1. 上海市农业科学院农产品质量标准与检测技术研究所,上海 201403; 2. 西宁市农产品质量安全检测中心,青海 西宁 810003)

摘要:【目的】评估粮食中多种真菌毒素对消费者健康的潜在风险。**【方法】**采用点评估模型和概率评估模型分析上海市成年居民通过大米、玉米、大豆和面粉摄入黄曲霉毒素(aflatoxins,AFs)、赭曲霉毒素(ochratoxin A,OTA)、玉米赤霉烯酮(zearalenone,ZEN)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenols,DONs)和伏马毒素(fumonisins,FBs)的膳食暴露风险。**【结果】**玉米中 AFs 和大豆中黄曲霉毒素 G_1(aflatoxin G_1,AFG_1)的暴露限值(margin of exposure values,MoE)>10 000,不存在膳食暴露风险;大米、面粉中 AFs 和大豆中黄曲霉毒素 B_1(aflatoxin B_1,AFB_1)、黄曲霉毒素 B_2(aflatoxin B_2,AFB_2)和黄曲霉毒素 G_2(aflatoxin G_2,AFG_2)的 MoE< 10 000,存在较小的健康风险。经 4 种粮食摄入的 ZEN、DONs 和 FBs 的每日摄入估计量(estimated daily intake,EDI)<每日最大可耐受摄入量(provisional maximum tolerable daily intake,PMTDI),无膳食暴露风险。在第 95 百分位数(P95)暴露水平时,经大米摄入 OTA 的 EDI>100 ng/kg;大豆中 OTA 和面粉中 DONs 在部分暴露水平下风险商值(risk quotient,RQ)>100%,均存在较小的健康风险。**【结论】**上海市成年居民通过 4 种粮食摄入 AFs、OTA、ZEN、DONs 和 FBs 的整体暴露水平处于安全范围,但部分真菌毒素在高暴露水平下仍存在健康风险。该研究为上海市粮食中真菌毒素的风险管理提供了科学依据。

关键词:粮食;真菌毒素;风险评估;膳食暴露

Health Risk Assessment of Multiple Mycotoxins in Rice, Maize, Soybean, and Wheat Flour Marketed in Shanghai

ZHU Zuoyin[1] *WANG Jie*[1] *MA Junmei*[2] *ZHAO Hanke*[1] *CHENG Haisheng*[1] *HUANG Chengbao*[1] *YANG Junhua*[1*]

(1. The Institute for Agro-food Standards and Testing Technology, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China; 2. Xining Agricultural Product Quality and Safety Testing Center, Xining 810003, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to evaluate the potential health risks to consumers from exposure to multiple mycotoxins in grains. [**Method**] Point and probabilistic assessment models were adopted to analyze the dietary exposure risks of adult residents in Shanghai to aflatoxins (AFs), ochratoxin A (OTA), zearalenone (ZEN), deoxynivalenols (DONs), and fumonisins (FBs) through consumption of rice, maize, soybeans, and wheat flour. [**Result**] The margin of exposure values (MoE) for AFs in maize and aflatoxin G_1 (AFG_1) in soybeans exceeded 10 000, indicating no dietary exposure risk. In contrast, AFs in rice and wheat flour, as well as aflatoxin B_1 (AFB_1), aflatoxin B_2 (AFB_2), and aflatoxin G_2 (AFG_2) in soybeans, showed MoE below 10 000, suggesting a minor health risk. The estimated daily intake (EDI) values of ZEN, DONs, and FBs from the four grains were

基金项目:上海市科委社会发展科技攻关项目(21DZ1201300)。

通信作者:杨俊花(1980—),女,研究员,硕士研究生导师,主要从事真菌毒素毒理学研究。E-mail:yangjunhua@saas.sh.cn

收稿日期:2024-12-02 **修回日期:**2025-01-15

below the provisional maximum tolerable daily intake (PMTDI), indicating no dietary risk. At the 95th percentile (P95) exposure level, the EDI of OTA from rice exceeded 100 ng/kg, while the risk quotient (RQ) of OTA in soybeans and DONs in wheat flour surpassed 100% under certain exposure scenarios, indicating a potential minor health risk. [**Conclusion**] Overall, the exposure to AFs, OTA, ZEN, DONs, and FBs through consumption of four grains among adult residents in Shanghai was within safe limits. However, certain mycotoxins posed potential health risks under high-exposure conditions. These findings provide scientific basis for the risk management of mycotoxins in grains in Shanghai.

Keywords: grain; mycotoxin; risk assessment; dietary exposure

真菌毒素广泛污染饲料和粮食，多种真菌毒素共同污染的现象较为普遍[1]。在我国，粮食中比较常见的真菌毒素包括ZEN、AFs、DONs和FBs等[2]。近年来，国内外关于粮食中真菌毒素污染情况的报道持续增多。全球谷物真菌毒素污染调查显示，在19 757份谷物样品中，有72%的样品检出OTA、AFs或DON[3]。有研究者调查发现，全球100个国家的玉米中FBs污染率高达80.00%[4]。崔杰等[5]对安徽省2017—2021年805份谷物及其制品的监测结果显示，真菌毒素总检出率为80.37%。研究者对2021年唐山市的监测数据表明，当地玉米中DON和ZEN的检出率分别为80.00%和96.67%，且85.70%的稻谷中检测出AFB_1[6]。作者所在实验室[7]对上海市4种粮食（大米、玉米、大豆和面粉）进行调查，发现所有样本均存在不同程度的真菌毒素污染，其中DON检出率最高（61.35%），其次为OTA（47.18%）。由此可见，粮食受真菌毒素污染的问题较为普遍，真菌毒素污染不仅会影响粮食的质量与安全，还会对人类和动物肾脏、肝脏、胃肠道及生殖系统造成严重健康损害[8-11]。

风险评估为真菌毒素风险评价提供了更直观的评价方法，能够简洁、清晰地分析污染粮食的各种真菌毒素是否存在健康风险。目前，真菌毒素膳食暴露评估常用的模型包括简单分布模型、点评估模型、概率评估模型[12]。其中，点评估模型存在信息覆盖有限、评估结果单一且偏保守的缺点；当点评估计算的结果大于每日最大耐受量（allowable daily intake，ADI）时，需采用更准确的概率评估法进一步明确潜在危害风险[13]。这些评估模型在食品真菌毒素膳食暴露评估中应用比较广泛。例如，针对海南、福建等地龙眼及其制品中FBs、OTA、ZEN等21种真菌毒素的暴露评估显示，其EDI为0~0.012 37 μg/kg，对人体健康威胁较小[14]。郭耀东等[15]使用概率评估法计算我国玉米中AFB_1的膳食暴露情况，结果表明AFB_1对我国总体肝癌发病率的贡献较小，健康风险较低。李依玲等[16]结合点评估模型和概率评估模型对小麦及其制品中DON的摄入暴露量进行评估，发现高消费人群的DON暴露水平较高，存在一定的慢性健康风险。

粮食中真菌毒素存在潜在健康风险，开展相关健康风险评估十分必要。因此，该研究在已有数据基础上，采用点评估模型和概率评估模型对上海市售的4种粮食（大米、玉米、大豆和面粉）中的AFs（AFB_1、AFB_2、AFG_1、AFG_2）、OTA、DONs［DON、3-乙酰基-脱氧雪腐镰刀菌烯醇（3-acetyl-deoxynivalenol，3-ADON）、15-乙酰基-脱氧雪腐镰刀菌烯醇（15-acetyl-deoxynivalenol，15-ADON）］、ZEN和FBs［伏马毒素B_1（fumonisin B_1，FB_1）、伏马毒素B_2（fumonisin B_2，FB_2）、伏马毒素B_3（fumonisin B_3，FB_3）］的膳食健康风险进行全面分析，旨在为粮食安全监管、公众健康保护及相关政策制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品中真菌毒素的检测与分析

作者所在课题组前期于2021年9月—2022年9月通过线下结合线上的方式开展样品采集工作。采样点覆盖上海市16个区的100多家中大型超市和农贸市场，采集的粮食包括大米（n=82）、玉米（n=50）、大豆（n=78）和面粉（n=90）。随后，采用超高效液相色谱-串联质谱法（UPLC-MS/MS）测定上述粮食中12种真菌毒素（ZEN、AFB_1、AFB_2、AFG_1、AFG_2、OTA、DON、3-ADON、15-ADON、FB_1、FB_2、FB_3）的质量分数[17]。

1.2　居民消费数据

上海市居民4种粮食的膳食消费数据来源于作者所在课题组已有数据[18]和《第五次中国总膳食研究》[19]。

1.3　AFs的膳食风险评估

AFs被国际癌症研究机构列为一类致癌物[20]。由于致癌物不存在效应阈值，食品添加剂联合专家委员会（Joint Expert Committee on Food Additives，JECFA）未对AFs规定摄入量限值。因此，作者采用MoE法对AFs膳食暴露风险进行评估[21]。AFs的MoE由各AFs的基准剂量下限（benchmark dose lower limit，BMDL）和EDI的比值确定。其中AFB_1的BMDL值为0.17 μg/kg，AFB_2、AFG_1和AFG_2的BMDL值均为0.25 μg/kg。MoE计算中，所有小于检出限（limit of detection，LOD）的结果均按1/2LOD计算。MoE的计算方法见式（1）。

$$X_{MoE}=\frac{\omega_{BMDL}}{\omega_{EDI}} \quad (1)$$

式中：

X_{MoE}——MoE；

ω_{BMDL}——AFs的BMDL，μg/kg；

ω_{EDI}——AFs的EDI，μg/kg。

1.4　OTA、ZEN、FBs和DONs膳食暴露的点评估

上海市成年男性平均体质量为67.2 kg，成年女性平均体质量为54.4 kg[22]。粮食中真菌毒素的检出值参考作者所在课题组前期研究数据，所有低于LOD的结果均按1/2LOD计算[17]。JECFA将DON、3-ADON与15-ADON合并考量，统称DONs，设定其总PMTDI为1 000 ng/kg；将FB_1、FB_2和FB_3合并考量，统称FBs，设定其总PMTDI为2 000 ng/kg；将ZEN的PMTDI设定为500 ng/kg；设定OTA的暂定每周可耐受摄入量（provisional tolerable weekly intake，PTWI）为100 ng/kg。该研究以JECFA制定的上述标准为依据，按照真菌毒素EDI计算模型对真菌毒素膳食暴露量进行评估[16]，EDI计算见式（2）。

$$A_{EDI}=\frac{F\times\omega}{1\,000\times W} \quad (2)$$

式中：

A_{EDI}——EDI，μg/kg；

F——4种粮食的日消费水平，g/d；

ω——4种粮食中真菌毒素的质量分数，μg/kg；

W——体质量，kg。

1.5　OTA、ZEN、FBs和DONs膳食暴露的概率评估

采用蒙特卡洛模型，通过有放回抽样的方法从构建的样品分布中抽取真菌毒素质量分数数据，计算个体的真菌毒素膳食暴露量。对每种真菌毒素均模拟5 000次抽样，并以JECFA制定的各真菌毒素PMTDI为评价标准。在概率评估过程中，低水平数据参照联合国世界卫生组织（World Health Organization，WHO）推荐的方法进行预处理：当小于LOD的样品数量占比超过60%时，所有小于LOD的结果分别以0、1/2LOD和LOD计算摄入量；当小于LOD的样品数量占比未超过60%时，所有小于LOD的结果均以1/2LOD计算摄入量[23]。同时，在概率评估中引入成年全人群组，该组以上海市成年全人群平均体质量61.5 kg为参考[23]。真菌毒素的膳食摄入风险水平可通过RQ进行量化分析：若RQ≤100%，表明摄入风险处于可接受水平，不会对人体产生不良影响；若RQ>100%，表明摄入风险超出可接受水平，且RQ越大对应的健康风险越高。OTA、ZEN、FBs和DONs的RQ按式（3）计算。

$$X_{RQ}=\frac{A_{EDI}}{A_{PMTDI}}\times 100\% \quad (3)$$

式中：

X_{RQ}——RQ，%；

A_{EDI}——EDI，μg/kg；

A_{PMTDI}——PMTDI，μg/kg。

1.6　数据分析

使用Microsoft Office Excel 2019进行数据处理，采用SPSS 26.0进行统计分析。基于Monte Carlo模拟技术的@Risk7.5 Industrial Edition专业风险分析软件对粮食中真菌毒素膳食风险概率进行评估。

2　结果与讨论

2.1　真菌毒素的污染状况分析

使用相关聚类分析和共污染指数分析混合污染特征，并通过自主设计的JAVA语言程序分析所有污染交叉组合的概率，该JAVA语言程序已申请软件著作权，相关污染分析结果亦已发表[17]。粮食常受到AFs、DON及其衍生物（3-ADON和15-ADON）、OTA、FBs和ZEN的污染。其中，DON检出率最高（72.33%），其次为OTA

（59.33%）和 3-ADON（39.00%），其余毒素从高到低依次为：FB_3（24.67%）、AFB_1 与 FB_1（均为 23.67%）、AFB_2（23.33%）、AFG_1 与 15-ADON（均为 21.67%）、FB_2（19.67%）、ZEN（18.00%）、AFG_2（6.33%）。研究中涉及的 300 份粮食样本中，所有样本均受到 2 种及以上真菌毒素的复合污染；且在粮食中 FB_3 与 3-ADON、FB_1 与 FB_2、DON 与 FB_1 以及 DON、3-ADON 与 15-ADON 的关系较为密切。

2.2 粮食中 AFs 的膳食暴露风险评估

MoE 是评估 AFs 膳食暴露风险的常用方法：当 MoE≤10 000 时，表明通过膳食暴露的 AFs 可能危害人体健康，且 MoE 越小对应的健康风险越高；当 MoE>10 000 时，表明通过膳食暴露的 AFs 对人体健康无害[24]。上海市成年居民通过 4 种市售粮食摄入 AFB_1 和 AFB_2、AFG_1 和 AFG_2 的风险评估结果分别见表 1 和表 2。结果显示，上海市成年居民经大米、面粉、大豆和玉米摄入 AFs 的 EDI 分别为 0.127 3~0.224 3、0.032 8~0.046 4、0.018 1~0.207 2、0.000 9~0.008 9 ng/kg，且上海市成年女性的 AFs 的 EDI 高于成年男性。MoE 结果显示，玉米中 AFs 和大豆中 AFG_1 的 MoE>10 000，表明通过玉米摄入 AFs 和通过大豆摄入 AFG_1 不存在膳食暴露风险。而大米、面粉中的 AFs 和大豆中 AFB_1、AFB_2、AFG_2 的 MoE 为 758~6 928（<10 000），表明大米、面粉中的 AFs 和大豆中的 AFB_1、AFB_2、AFG_2 的膳食暴露可能对人体健康产生不良影响。另外，上海市成年女性通过大豆摄入 AFB_1 和通过大米摄入 AFB_2 的 MoE<1 000，表明这 2 种暴露途径的健康风险水平相对较高。

在上海市 4 种市售粮食中 AFB_1、AFB_2、AFG_1 和 AFG_2 的膳食暴露风险评估中发现，大米和面粉中 AFs 以及大豆中 AFB_1、AFB_2 和 AFG_2 均存在膳食风险。类似地，贾韶蔚等[25]在 2015—2020 年对开封市部分食品中 AFs 污染的调查显示，6 类食品的 MoE<10 000，其中谷物及其制品的 MoE 低至 270，表明开封市部分食品存在 AFs 的膳食暴露健康风险，且谷物类食品风险较高。韩德娟等[26]也发现泰安市粮油食品中 AFB_1 存在较高风险。石萌萌等[27]发现广西居民通过膳食摄入 AFB_1 的平均暴露量为 10.38 ng/kg，P95 水平的高暴露量为 25.49 ng/kg，对应的 MoE 分别为 16 和 7，说明广西

表 1 粮食中 AFB_1 和 AFB_2 的膳食暴露风险评估

Table 1 Risk assessment of dietary exposure to AFB_1 and AFB_2 in grains

考察系数		AFB_1		AFB_2	
		EDI/（ng/kg）	MoE	EDI/（ng/kg）	MoE
大米	男	0.148 3	1 146	0.223 2	1 120
	女	0.149 0	1 141	0.224 3	758
面粉	男	0.032 8	5 182	0.046 2	5 414
	女	0.033 0	5 157	0.046 4	5 388
大豆	男	0.190 0	895	0.046 1	5 420
	女	0.207 2	820	0.050 3	4 968
玉米	男	0.002 5	>10 000	0.008 9	>10 000
	女	0.002 5	>10 000	0.009 0	>10 000

表 2 粮食中 AFG_1 和 AFG_2 的膳食暴露风险评估

Table 2 Risk assessment of dietary exposure to AFG_1 and AFG_2 in grains

考察系数		AFG_1		AFG_2	
		EDI/（ng/kg）	MoE	EDI/（ng/kg）	MoE
大米	男	0.127 3	1 963	0.127 3	1 963
	女	0.127 9	1 329	0.127 9	1 329
面粉	男	0.036 3	6 878	0.036 1	6 928
	女	0.036 5	6 845	0.036 3	6 895
大豆	男	0.018 1	>10 000	0.048 9	5 110
	女	0.019 8	>10 000	0.053 4	4 685
玉米	男	0.000 9	>10 000	0.000 9	>10 000
	女	0.000 9	>10 000	0.000 9	>10 000

居民通过膳食摄入 AFs 的风险不可忽视。Zhang 等[28]发现广州居民通过食品摄入 AFB_1 的 MoE 为 100~1 000，存在健康风险，且郊区居民的健康风险高于城市居民。国外相关报道同样表明食品中 AFs 的暴露存在较大的风险。例如，Nugraha 等[29]发现原产于印度尼西亚的玉米和花生中 AFB_1 的 MoE<10 000，部分样品 MoE<1 000，表示印度尼西亚的玉米和花生中 AFB_1 暴露风险较高。Huong 等[30]针对儿童食品 AFB_1 膳食暴露的研究显示，儿童食品中 AFB_1 膳食暴露量为 118.7 ng/kg，MoE 为 3~532，并提出真菌毒素摄入可能是导致儿童眩晕的原因之一。上述研究结果与本研究结论较为一致，均表明粮食膳食暴露 AFs 可能对人体产生一定的健康风险。AFs 已被 WHO 列为一类致癌物，JECFA 因此未对 AFs 制定 PMTDI，并明确指出：即使 AFs 的每日暴露量<1 ng/kg，仍存在致癌风险和健康危害。基于此，对 AFs 的监管需要在粮食种

植源头、加工运输和贮藏等各个环节进行全面管控，这也对相关监管部门提出了更高的风险管控要求。

2.3　粮食中OTA、ZEN、DONs和FBs膳食暴露的点评估

由于不同人群对粮食的每日摄入量存在个体差异，因此作者分别计算了均值、第50百分位数（P50）、第75百分位数（P75）、第90百分位数（P90）和P95这5个暴露水平下，上海市居民经大米、面粉、大豆和玉米摄入真菌毒素的暴露量，见表3。在不同暴露水平下，上海市居民经大米摄入ZEN、DONs和FBs的EDI分别为0.64~14.61、6.37~53.71、1.27~1.30 ng/kg，经面粉摄入ZEN、DONs和FBs的EDI分别为0.16、1.64~357.15、0.33~0.96 ng/kg，经大豆摄入ZEN、DONs和FBs的EDI分别为0.08~51.16、0.79~81.27、0.16~1.89 ng/kg，经玉米摄入ZEN、DONs和FBs的EDI分别为0~0.01、0.05~11.49、0.82~6.59 ng/kg。上海市居民经4种粮食摄入ZEN、DONs和FBs的EDI均低于JECFA制定的PMTDI，表明上海市成年居民通过大米、面粉、大豆和玉米摄入ZEN、DONs和FBs不存在膳食暴露风险。由于JECFA为OTA制定的是PTWI，因此该研究对OTA的暴露量计算采用每周摄入估计量（estimated weekly intake，EWI）。结果显示，上海市成年居民经面粉、大豆和玉米摄入OTA的EWI为0.01~14.18 ng/kg，低于JECFA设定的100 ng/kg限值，表明上海市成年居民通过这3种粮食摄入OTA时，不存在膳食暴露风险。对于大米中的OTA，除P95暴露水平外，上海市成年居民通过大米摄入OTA均不存在毒性危害和健康风险；而在P95暴露水平下，上海市成年男性和成年女性居民的OTA的EWI分别为108.31 ng/kg和108.82 ng/kg，均超过了JECFA制定的100 ng/kg限值，表明该暴露水平下，通过大米膳食摄入OTA存在一定的健康风险。

表3　粮食中OTA、ZEN、DONs和FBs膳食暴露的点评估

Table 3　Point assessment of dietary exposure to OTA, ZEN, DONs, and FBs in grains　　单位：ng/kg

考察系数		大米				面粉				大豆				玉米			
		OTA的EWI	ZEN的EDI	DONs的EDI	FBs的EDI	OTA的EWI	ZEN的EDI	DONs的EDI	FBs的EDI	OTA的EWI	ZEN的EDI	DONs的EDI	FBs的EDI	OTA的EWI	ZEN的EDI	DONs的EDI	FBs的EDI
均值	男	40.13	3.60	25.24	1.29	0.64	0.16	74.38	0.95	2.22	20.44	21.84	1.73	0.10	0.01	2.02	1.73
	女	40.32	3.62	25.36	1.30	0.64	0.16	74.73	0.96	2.42	22.29	23.82	1.89	0.10	0.01	2.03	1.74
P50	男	11.69	0.64	6.37	1.27	0.46	0.16	1.64	0.33	0.22	0.08	0.79	0.16	0.01	0	0.05	0.82
	女	11.75	0.64	6.40	1.28	0.46	0.16	1.65	0.33	0.24	0.09	0.86	0.17	0.01	0	0.05	0.82
P75	男	23.52	2.72	6.37	1.27	0.46	0.16	65.75	0.33	0.81	0.08	12.09	0.16	0.15	0	0.19	2.43
	女	23.63	2.73	6.40	1.28	0.46	0.16	66.06	0.33	0.88	0.09	13.19	0.17	0.15	0	0.19	2.45
P90	男	56.71	9.05	6.37	1.27	0.46	0.16	194.65	0.33	6.21	0.08	50.62	0.16	0.25	0	3.00	4.50
	女	56.97	9.09	6.40	1.28	0.46	0.16	195.57	0.33	6.78	0.09	55.22	0.17	0.25	0	3.02	4.53
P95	男	108.31	14.54	53.46	1.27	0.46	0.16	355.46	0.33	13.00	46.50	73.87	0.16	0.41	0	11.41	6.54
	女	108.82	14.61	53.71	1.28	0.46	0.16	357.15	0.33	14.18	51.16	81.27	0.17	0.42	0	11.49	6.59

2.4　粮食中OTA、ZEN、DONs和FBs膳食暴露的概率评估

膳食暴露风险点评估模型通常会忽略消费者的个体差异和粮食中真菌毒素的污染水平，因此该研究进一步采用概率评估模型对上海市成年居民通过大米、面粉、大豆和玉米摄入真菌毒素的暴露风险进行评估，并引入成年全人群组（后文表中均以“全”表示），与成年男性和成年女性进行对比分析。

大米中ZEN、DONs和FBs阳性样本占比均低于60%，因此对阴性样本分别赋予0、1/2LOD和LOD以计算风险，见表4。上海市成年居民经大米摄入OTA、ZEN、DONs和FBs的EDI分别为7.06~33.26、0.08~4.91、4.91~242.87、0.01~0.84 ng/kg；且该地区成年男性的真菌毒素摄入量均高于成年女性，成年全人群的真菌毒素摄入平均水平与成年男性、成年女性的平均水平相当。4种真菌毒素均表现为RQ<100%，表明上海市成年居民通过大米

表 4　大米中 OTA、ZEN、DONs 和 FBs 膳食暴露的概率评估

Table 4　Probabilistic assessment of dietary exposure to OTA, ZEN, DONs, and FBs in rice

考察系数		OTA-1/2LOD		ZEN-0		ZEN-1/2LOD		ZEN-LOD		DONs-0	
		EWI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%
均值	男	11.36	11.36	0.90	0.18	1.02	0.20	1.16	0.23	5.55	0.56
	女	10.04	10.04	0.80	0.16	0.90	0.18	1.03	0.21	4.91	0.49
	全	10.57	10.57	0.08	0.02	0.95	0.19	0.99	0.20	5.17	0.52
P50	男	7.99	7.99	0.90	0.18	0.76	0.15	1.16	0.23	5.55	0.56
	女	7.06	7.06	0.79	0.16	0.67	0.13	1.03	0.21	4.91	0.49
	全	7.44	7.44	0.08	0.02	0.71	0.14	0.99	0.20	5.17	0.52
P75	男	15.60	15.60	2.50	0.50	1.35	0.27	2.70	0.54	28.31	2.83
	女	13.79	13.79	2.21	0.44	1.19	0.24	2.39	0.48	25.02	2.50
	全	14.52	14.52	0.23	0.05	1.26	0.25	2.30	0.46	26.35	2.64
P90	男	25.66	25.66	3.94	0.79	2.13	0.43	4.08	0.82	48.78	4.88
	女	22.68	22.68	3.49	0.70	1.88	0.38	3.61	0.72	43.11	4.31
	全	23.88	23.88	0.37	0.07	1.98	0.40	3.48	0.70	45.40	4.54
P95	男	33.26	33.26	3.94	0.79	2.71	0.54	4.91	0.98	61.05	6.11
	女	29.40	29.40	4.25	0.85	2.40	0.48	4.34	0.87	53.96	5.40
	全	30.96	30.96	0.45	0.09	2.52	0.50	4.18	0.84	56.83	5.68

考察系数		DONs-1/2LOD		DONs-LOD		FBs-0		FBs-1/2LOD		FBs-LOD	
		EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%
均值	男	59.65	5.97	106.38	10.64	0.01	0	0.37	0.02	0.73	0.04
	女	52.72	5.27	94.03	9.40	0.01	0	0.33	0.02	0.65	0.03
	全	55.52	5.55	99.01	9.90	0.01	0	0.34	0.02	0.68	0.03
P50	男	34.34	3.43	93.90	9.39	0.01	0	0.37	0.02	0.73	0.04
	女	30.35	3.03	83.00	8.30	0.01	0	0.33	0.02	0.65	0.03
	全	31.96	3.20	87.40	8.74	0.01	0	0.34	0.02	0.68	0.03
P75	男	80.92	8.09	157.69	15.77	0.08	0	0.43	0.02	0.78	0.04
	女	71.53	7.15	139.38	13.94	0.07	0	0.38	0.02	0.69	0.03
	全	75.32	7.53	146.78	14.68	0.08	0	0.40	0.02	0.72	0.04
P90	男	148.78	14.88	214.33	21.43	0.15	0.01	0.49	0.02	0.82	0.04
	女	131.50	13.15	189.45	18.94	0.13	0.01	0.43	0.02	0.72	0.04
	全	138.48	13.85	199.50	19.95	0.14	0.01	0.45	0.02	0.76	0.04
P95	男	202.45	20.25	242.87	24.29	0.19	0.01	0.52	0.03	0.84	0.04
	女	178.94	17.89	214.67	21.47	0.17	0.01	0.46	0.02	0.75	0.04
	全	188.44	18.84	226.06	22.61	0.18	0.01	0.48	0.02	0.78	0.04

摄入 OTA、ZEN、DONs 和 FBs 时，不存在膳食暴露风险。

面粉和大豆中真菌毒素的膳食暴露风险概率评估结果见表 5~6。这 2 种粮食中各类真菌毒素的阳性样本占比均低于 60%，因此对阴性样本同样赋予 0、1/2LOD 和 LOD 以计算风险。结果显示，上海市成年居民经面粉摄入 OTA、ZEN、DONs 和 FBs 的 EDI 分别为 1.09~13.56、0~0.36、5.23~1 279.00、0.62~13.36 ng/kg；经大豆摄入 OTA、ZEN、DONs 和 FBs 的 EDI 分别为 0.36~135.09、0.02~202.46、0.34~43.22、0.19~1.07 ng/kg。另外，成年男性经面粉摄入真菌毒素的风险更高；且当面粉中 DONs 阴性样本按 1/2LOD 计算时，成年男性、成年女性及成年全人群的 RQ>100%，表明在该计算方式下，通过面粉摄入 DONs 存在一定的健康风险。相较于大米和面粉，成年女性经大豆摄入真菌毒素的可能性更高。当大豆中 OTA 阴性样本按 1/2LOD 计算时，成年女性 P90 和 P95 的

表5　面粉中OTA、ZEN、DONs和FBs膳食暴露的概率评估

Table 5　Probabilistic assessment of dietary exposure to OTA, ZEN, DONs, and FBs in wheat flour

考察系数		OTA-0		OTA-1/2LOD		OTA-LOD		ZEN-0		ZEN-1/2LOD		ZEN-LOD	
		EWI/(ng/kg)	RQ/%	EWI/(ng/kg)	RQ/%	EWI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%
均值	男	7.06	7.06	5.09	5.09	1.17	1.17	0	0	0.18	0.04	0.36	0.07
	女	6.59	6.59	4.75	4.75	1.10	1.10	0	0	0.18	0.04	0.33	0.07
	全	6.73	6.73	4.85	4.85	1.12	1.12	0	0	0.17	0.03	0.34	0.07
P50	男	7.06	7.06	4.53	4.53	1.17	1.17	0	0	0.18	0.04	0.36	0.07
	女	6.59	6.59	4.23	4.23	1.09	1.09	0	0	0.18	0.04	0.33	0.07
	全	6.73	6.73	4.32	4.32	1.12	1.12	0	0	0.17	0.03	0.34	0.07
P75	男	10.67	10.67	7.38	7.38	2.12	2.12	0	0	0.18	0.04	0.36	0.07
	女	9.96	9.96	6.89	6.89	1.97	1.97	0	0	0.18	0.04	0.33	0.07
	全	10.17	10.17	7.04	7.04	2.02	2.02	0	0	0.17	0.03	0.34	0.07
P90	男	12.83	12.83	9.91	9.91	2.96	2.96	0	0	0.18	0.04	0.36	0.07
	女	11.98	11.98	9.25	9.25	2.77	2.77	0	0	0.18	0.04	0.33	0.07
	全	12.24	12.24	9.45	9.45	2.83	2.83	0	0	0.17	0.03	0.34	0.07
P95	男	13.56	13.56	11.19	11.19	3.47	3.47	0	0	0.18	0.04	0.36	0.07
	女	12.65	12.65	10.44	10.44	3.24	3.24	0	0	0.18	0.04	0.33	0.07
	全	12.93	12.93	10.67	10.67	3.31	3.31	0	0	0.17	0.03	0.34	0.07

考察系数		DONs-0		DONs-1/2LOD		DONs-LOD		FBs-0		FBs-1/2LOD		FBs-LOD	
		EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%
均值	男	177.59	17.76	1 279.00	127.90	192.89	19.29	0.71	0.04	1.06	0.05	1.41	0.07
	女	165.73	16.57	1 194.00	119.40	188.46	18.85	0.63	0.03	0.94	0.05	1.25	0.06
	全	169.33	16.93	1 220.00	122.00	183.92	18.39	0.66	0.03	0.99	0.05	1.32	0.07
P50	男	100.70	10.07	5.60	0.56	128.89	12.89	0.71	0.04	1.06	0.05	1.41	0.07
	女	93.99	9.40	5.23	0.52	126.92	12.69	0.62	0.03	0.93	0.05	1.25	0.06
	全	96.03	9.60	5.34	0.53	122.89	12.29	0.66	0.03	0.98	0.05	1.31	0.07
P75	男	243.10	24.31	17.68	1.77	265.90	26.59	5.65	0.28	5.98	0.30	6.31	0.32
	女	226.90	22.69	16.50	1.65	259.25	25.93	5.00	0.25	5.29	0.26	5.58	0.28
	全	231.80	23.18	16.85	1.69	253.54	25.35	5.26	0.26	5.57	0.28	5.88	0.29
P90	男	449.90	44.99	80.68	8.07	450.87	45.09	10.11	0.51	10.41	0.52	10.72	0.54
	女	419.90	41.99	75.29	7.53	448.27	44.83	8.93	0.45	9.20	0.46	9.48	0.47
	全	429.00	42.90	76.93	7.69	429.90	42.99	9.41	0.47	9.69	0.48	9.98	0.50
P95	男	613.00	61.31	253.60	25.36	592.88	59.29	12.76	0.64	13.06	0.65	13.36	0.67
	女	572.10	57.21	236.60	23.67	580.40	58.04	11.28	0.56	11.55	0.58	11.81	0.59
	全	584.50	58.46	241.80	24.18	565.32	56.53	11.88	0.59	12.16	0.61	12.43	0.62

RQ>100%，说明对大豆OTA高暴露水平的女性而言，存在一定的健康风险。

玉米中真菌毒素膳食暴露的概率评估结果见表7。玉米中FBs的阳性样本占比高于60%，因此对其阴性样本赋予1/2LOD以计算风险。上海市成年居民通过玉米摄入OTA、ZEN、DONs和FBs的EDI分别为0.01~0.37、0~0.02、0.02~39.34、3.55~18.62 ng/kg。由于这4种真菌毒素的RQ<100%，表明上海市成年居民通过玉米摄入真菌毒素时无暴露风险。

2.5　结合点评估和概率评估分析OTA、ZEN、DONs和FBs的暴露风险

作者采用点评估模型和概率评估模型分析了4种粮食中OTA、ZEN、DONs和FBs的膳食暴露风险。结果表明，除面粉中的DONs和大豆中的OTA外，上海市成年居民通过这4种粮食摄入其他真菌毒素时，无健康风险。李文廷等[31]发现云南省成年居民大米真菌毒素的膳食暴露量为

表 6 大豆中 OTA、ZEN、DONs 和 FBs 膳食暴露的概率评估

Table 6 Probabilistic assessment of dietary exposure to OTA, ZEN, DONs, and FBs in soybeans

考察系数		OTA-0		OTA-1/2LOD		OTA-LOD		ZEN-0		ZEN-1/2LOD		ZEN-LOD	
		EWI/(ng/kg)	RQ/%	EWI/(ng/kg)	RQ/%	EWI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%
均值	男	0.36	0.36	0.39	0.39	4.16	4.16	3.51	0.70	0.16	0.03	39.64	7.93
	女	0.43	0.43	25.53	25.53	0.50	0.50	4.26	0.85	0.04	0.01	48.05	9.61
	全	0.39	0.39	0.42	0.42	0.45	0.45	3.80	0.76	0.03	0.01	42.89	8.58
P50	男	0.36	0.36	0.39	0.39	4.16	4.16	2.42	0.48	0.10	0.02	13.67	2.73
	女	0.43	0.43	25.50	25.50	0.50	0.50	2.93	0.59	0.02	0	16.57	3.31
	全	0.39	0.39	0.42	0.42	0.45	0.45	2.62	0.52	0.02	0	14.79	2.96
P75	男	1.05	1.05	1.07	1.07	10.90	10.90	4.89	0.98	0.15	0.03	49.40	9.88
	女	1.27	1.27	70.46	70.46	1.32	1.32	5.92	1.18	0.04	0.01	59.88	11.98
	全	1.13	1.13	1.16	1.16	1.18	1.18	5.29	1.06	0.03	0.01	53.45	10.69
P90	男	1.67	1.67	1.68	1.68	16.98	16.98	8.14	1.63	0.25	0.05	112.64	22.53
	女	2.02	2.02	110.95	110.95	2.06	2.06	9.87	1.97	0.06	0.01	136.54	27.31
	全	1.80	1.80	1.82	1.82	1.84	1.84	8.81	1.76	0.05	0.01	121.88	24.38
P95	男	2.04	2.04	2.05	2.05	20.62	20.62	10.61	2.12	0.37	0.07	167.01	33.40
	女	2.47	2.47	135.09	135.09	2.50	2.50	12.86	2.57	0.09	0.02	202.46	40.49
	全	2.20	2.20	2.22	2.22	2.23	2.23	11.48	2.30	0.08	0.02	180.72	36.14

考察系数		DONs-0		DONs-1/2LOD		DONs-LOD		FBs-0		FBs-1/2LOD		FBs-LOD	
		EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%
均值	男	3.72	0.37	11.20	1.12	11.36	1.14	0.27	0.01	0.30	0.02	0.33	0.02
	女	4.51	0.45	13.58	1.36	13.77	1.38	0.33	0.02	0.36	0.02	0.35	0.02
	全	4.03	0.40	12.12	1.21	12.29	1.23	0.30	0.01	0.33	0.02	0.40	0.02
P50	男	2.58	0.26	0.34	0.03	7.37	0.74	0.19	0.01	0.22	0.01	0.24	0.01
	女	3.12	0.31	0.42	0.04	8.94	0.89	0.23	0.01	0.26	0.01	0.29	0.01
	全	2.79	0.28	0.37	0.04	7.98	0.80	0.20	0.01	0.23	0.01	0.30	0.01
P75	男	5.17	0.52	0.85	0.09	15.61	1.56	0.38	0.02	0.41	0.02	0.43	0.02
	女	6.26	0.63	1.03	0.10	18.92	1.89	0.46	0.02	0.49	0.02	0.46	0.02
	全	5.59	0.56	0.92	0.09	16.89	1.69	0.41	0.02	0.44	0.02	0.53	0.03
P90	男	8.59	0.86	2.82	0.28	26.93	2.69	0.63	0.03	0.66	0.03	0.68	0.03
	女	10.41	1.04	3.42	0.34	32.65	3.27	0.77	0.04	0.80	0.04	0.73	0.04
	全	9.29	0.93	3.06	0.31	29.14	2.91	0.68	0.03	0.71	0.04	0.84	0.04
P95	男	11.19	1.12	7.02	0.70	35.65	3.57	0.82	0.04	0.85	0.04	0.87	0.04
	女	13.56	1.36	8.51	0.85	43.22	4.32	1.00	0.05	1.03	0.05	0.94	0.05
	全	12.10	1.21	7.60	0.76	38.58	3.86	0.89	0.04	0.92	0.05	1.07	0.05

1.710 2 μg/kg，其中 HT-2 毒素暴露量达 836 μg/kg，远超 JECFA 制定的 PMTDI（0.06 μg/kg），表明云南省市售大米也存在一定的健康风险。赵毕等[32]针对浙江省全人群 OTA 膳食暴露演变趋势的研究显示，OTA 每日暴露量为 0.004~7.360 ng/kg，仅在少数高剂量暴露水平下出现暴露量超过 PMTDI 的情况。这与本研究的结果相似——通过粮食摄入 OTA 产生的健康风险，往往出现在粮食中 OTA 高剂量污染的情况下，此时才会显现 OTA 的毒性危害风险。不同的是，作者仅针对成年居民的膳食风险展开评估，未纳入年龄差异等影响因素；已有研究表明，低龄人群对膳食中真菌毒素的敏感性更高，更易受到危害[33]。

上海市成年居民经面粉摄入 DONs 的均值暴露水平已超过了 PMTDI，提示可能存在 DONs 毒性危害和健康风险。另有研究针对上海市居民面粉中 DONs 的概率评估结果显示，约 10% 的上海市居民经面粉摄入的 DONs 超过 PMTDI，存在健

表7　玉米中OTA、ZEN、DONs和FBs膳食暴露的概率评估

Table 7　Probabilistic assessment of dietary exposure to OTA, ZEN, DONs, and FBs in maize

考察系数		OTA-0		OTA-1/2LOD		OTA-LOD		ZEN-0		ZEN-1/2LOD	
		EWI/(ng/kg)	RQ/%	EWI/(ng/kg)	RQ/%	EWI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%
均值	男	0.02	0.02	0.19	0.19	0.07	0.07	0	0	0.01	0
	女	0.01	0.01	0.05	0.05	0.02	0.02	0	0	0	0
	全	0.01	0.01	0.12	0.12	0.05	0.05	0	0	0.01	0
P50	男	0.02	0.02	0.19	0.19	0.07	0.07	0	0	0.01	0
	女	0.01	0.01	0.05	0.05	0.02	0.02	0	0	0	0
	全	0.01	0.01	0.12	0.12	0.05	0.05	0	0	0.01	0
P75	男	0.03	0.03	0.26	0.26	0.15	0.15	0	0	0.02	0
	女	0.01	0.01	0.07	0.07	0.04	0.04	0	0	0	0
	全	0.02	0.02	0.17	0.17	0.09	0.09	0	0	0.01	0
P90	男	0.05	0.05	0.33	0.33	0.22	0.22	0	0	0.02	0
	女	0.01	0.01	0.08	0.08	0.06	0.06	0	0	0	0
	全	0.03	0.03	0.21	0.21	0.14	0.14	0.01	0	0.01	0
P95	男	0.05	0.05	0.37	0.37	0.26	0.26	0	0	0.02	0
	女	0.01	0.01	0.09	0.09	0.07	0.07	0	0	0	0
	全	0.03	0.03	0.24	0.24	0.16	0.16	0.01	0	0.01	0

考察系数		ZEN-LOD		DONs-0		DONs-1/2LOD		DONs-LOD		FBs-1/2LOD	
		EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%	EDI/(ng/kg)	RQ/%
均值	男	0.01	0	1.28	0.13	1.86	0.19	16.93	1.69	5.12	0.26
	女	0	0	0.93	0.09	0.48	0.05	4.32	0.43	6.21	0.31
	全	0.01	0	0.82	0.08	1.19	0.12	10.85	1.09	5.54	0.28
P50	男	0.01	0	0.89	0.09	0.07	0.01	14.87	1.49	3.55	0.18
	女	0	0	0.64	0.06	0.02	0	3.80	0.38	4.30	0.22
	全	0.01	0	0.57	0.06	0.04	0	9.54	0.95	3.84	0.19
P75	男	0.02	0	1.78	0.18	0.14	0.01	25.36	2.54	7.10	0.36
	女	0	0	1.29	0.13	0.04	0	6.47	0.65	8.61	0.43
	全	0.01	0	1.14	0.11	0.09	0.01	16.26	1.63	7.69	0.38
P90	男	0.02	0	2.96	0.30	0.41	0.04	34.65	3.47	11.80	0.59
	女	0	0	2.14	0.21	0.10	0.01	8.84	0.88	14.30	0.72
	全	0.01	0	1.90	0.19	0.26	0.03	22.22	2.22	12.77	0.64
P95	男	0.02	0	3.85	0.38	0.89	0.09	39.34	3.93	15.36	0.77
	女	0	0	2.79	0.28	0.23	0.02	10.04	1.00	18.62	0.93
	全	0.01	0	2.47	0.25	0.57	0.06	25.22	2.52	16.62	0.83

康风险[34]。面粉作为我国居民的主食之一，若高水平摄入DONs高污染的面粉，可能导致较高的健康风险。另外，本研究发现上海市成年居民通过粮食摄入ZEN和FBs时无膳食暴露风险。但现有研究表明，我国约有10%的消费人群长期面临通过谷物膳食暴露ZEN的健康风险[35]；另一方面，我国主要食品中FBs的水平较低，处于可控范围[36]。尽管ZEN和FBs的毒性相对较低，且JECFA对这2种毒素分别制定了较高的PMTDI，分别为0.5 μg/kg和2.0 μg/kg，但长期摄入含有ZEN和FBs的粮食，仍可能引发慢性毒性危害[37]，因此ZEN和FBs也应纳入粮食真菌毒素的常规监管体系。

真菌毒素污染是粮食安全领域最常见的问题之一，多数国家已制定相关的安全限量标准，JECFA也为常见真菌毒素制定了PMTDI或PTWI。在此基础上，风险评估为定量分析特定人群通过膳食摄入真菌毒素的健康风险提供了有效方法。作者采用限量阈值理论、点评估模型和概率评估

模型分析了上海市成年居民经市售粮食摄入真菌毒素的健康风险。但是，目前的风险评估方法只能针对单一真菌毒素开展，而实际情况中，粮食常受到多种真菌毒素污染，存在真菌毒素危害叠加的潜在风险，这表明膳食真菌毒素风险评估方法仍需进一步完善和发展。

3 结论

该研究使用MoE法、点评估模型和概率评估模型分析了上海市成年居民通过4种市售粮食摄入AFs、OTA、ZEN、DONs和FBs的膳食暴露风险。结果表明，玉米中AFs和大豆中AFG_1的MoE>10 000，不存在膳食暴露风险；大米、面粉中AFs和大豆中AFB_1、AFB_2、AFG_2的MoE<10 000，存在较低的健康风险。上海市成年居民经4种粮食摄入ZEN、DONs和FBs的EDI<PMTDI，无膳食暴露风险。而在P95暴露水平下，经大米摄入OTA的EDI>100 ng/kg；大豆中OTA和面粉中DONs在部分暴露水平下的RQ>100%，均存在一定的健康风险。综上，上海市成年居民通过4种粮食摄入AFs、OTA、ZEN、DONs和FBs的整体风险可控，但个别毒素在高暴露水平下仍存在健康风险。真菌毒素膳食暴露风险评估是食品安全领域的重要工作，不仅能为消费者健康提供保障，还能推动食品产业发展和国际贸易合作，进而助力优化食品安全监管体系，提升对真菌毒素污染的监测能力，实现风险的及时发现和有效控制。

参考文献

[1] 徐炜，张玉磊，施妍，等. 真菌毒素降解酶及其在饲料与食品行业中的研究现状[J]. 食品与生物技术学报，2023，42(1)：1-17.
XU W，ZHANG Y L，SHI Y，et al. Studies on mycotoxin degrading enzymes and their applications in feed and food industries[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2023，42(1)：1-17.(in Chinese)

[2] LIM C W，YOSHINARI T，LAYNE J，et al. Multi-mycotoxin screening reveals separate occurrence of aflatoxins and ochratoxin a in Asian rice[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2015，63(12)：3104-3113.

[3] SCHATZMAYR G，STREIT E. Global occurrence of mycotoxins in the food and feed chain：facts and figures[J]. World Mycotoxin Journal，2013，6(3)：213-222.

[4] GRUBER-DORNINGER C，JENKINS T，SCHATZMAYR G. Global mycotoxin occurrence in feed：a ten-year survey[J]. Toxins，2019，11(7)：375.

[5] 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 Z Q，LI W D. Study on mycotoxins pollution in cereals and their products in Anhui province from 2017 to 2021[J]. Anhui Journal of Preventive Medicine，2024，30(3)：195-199.(in Chinese)

[6] 李晓龙，吴丹，李英军，等. 粮食中主要真菌毒素的调查分析与研究[J]. 食品安全导刊，2022(32)：106-109.
LI X L，WU D，LI Y J，et al. Analysis and research of main mycotoxins in grain[J]. China Food Safety Magazine，2022(32)：106-109.(in Chinese)

[7] 朱佐银，赵含珂，程海生，等. 2021—2022年上海地区大米、玉米、大豆和面粉中多种真菌毒素混合污染特征和交互作用分析[J]. 中国农业科学，2024，57(12)：2454-2466.
ZHU Z Y，ZHAO H K，CHENG H S，et al. Study on characterization and interaction analysis of co-contamination of multi-mycotoxins in the flours of rice，maize，soybean and wheat flour in Shanghai from 2021 to 2022[J]. Scientia Agricultura Sinica，2024，57(12)：2454-2466.(in Chinese)

[8] SCHÖNEBERG T，JENNY E，WETTSTEIN F E，et al. Occurrence of *Fusarium* species and mycotoxins in Swiss oats：impact of cropping factors[J]. European Journal of Agronomy，2018，92：123-132.

[9] TAVARES A，MENDONÇA I，LOURO H，et al. A contribution to hazard assessment of combined exposure to mycotoxins using *in vitro* toxicity testing[J]. Toxicology Letters，2015，238(2)：S352-S353.

[10] SCHOEMAN A，FLETT B C，JANSE VAN RENSBURG B. Evaluating three commonly used growth media for assessing fumonisin analogues FB_1，FB_2 and FB_3 production by nine *Fusarium verticillioides* isolates[J]. Food Additives & Contaminants：Part A，2017，34(2)：291-298.

[11] 叶永丽，张晓娟，唐莉莉，等. 基于氧化应激和线粒体功能障碍的伏马毒素B_1诱导线虫神经毒性机制[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(3)：26-35.
YE Y L，ZHANG X J，TANG L L，et al. Mechanism investigation of neurotoxicity of *Caenorhabditis elegans* induced by fumonaxin B_1-mediated oxidative stress and mitochondrial dysfunction[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43(3)：26-35.(in Chinese)

[12] 王向未，仇厚援，张志恒，等. 食品中膳食暴露评估模型研究进展[J]. 浙江农业学报，2012，24(4)：733-738.
WANG X W，QIU H Y，ZHANG Z H，et al. Diet exposure

assessment methods in food [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2012, 24(4): 733-738. (in Chinese)

[13] 丁小霞，李培武，白艺珍，等. 中国花生黄曲霉毒素风险评估中膳食暴露非参数概率评估方法[J]. 中国油料作物学报，2011，33(4)：402-408.
DING X X, LI P W, BAI Y Z, et al. Non-parametric probability assessment of risk evaluation on dietary exposure to Chinese peanut aflatoxins [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2011, 33(4): 402-408. (in Chinese)

[14] 尹青春，陈小妹，周凌聿，等. 龙眼及其制品中44种真菌毒素高通量检测方法的建立及其膳食暴露风险评估[J]. 现代食品科技，2024，40(7)：254-266.
YIN Q C, CHEN X M, ZHOU L Y, et al. Development of a high-throughput detection assay and dietary exposure risk assessment for 44 mycotoxins in longan and its products [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(7): 254-266. (in Chinese)

[15] 郭耀东，陈璐，袁亚宏，等. 基于概率分析的玉米食品中黄曲霉毒素B_1膳食暴露及风险评估[J]. 食品科学，2013，34(11)：24-27.
GUO Y D, CHEN L, YUAN Y H, et al. Dietary exposure and risk assessment of aflatoxin B_1 in corn-based foods in China using probabilistic approach [J]. Food Science, 2013, 34(11): 24-27. (in Chinese)

[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)：815-822，843.
LI Y L, LIU J L, 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, 843. (in Chinese)

[17] ZHU Z Y, GUO W B, CHENG H S, et al. Co-contamination and interactions of multiple mycotoxins and heavy metals in rice, maize, soybeans, and wheat flour marketed in Shanghai city [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 474: 134695.

[18] HAN Z, NIE D X, EDIAGE E N, 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.

[19] 吴永宁，赵云峰，李敬光. 第五次中国总膳食研究[M]. 北京：科学出版社，2018：31-32.

[20] 李莉，李硕，王海燕，等. 食品中致癌性生物毒素检测标准概述[J]. 食品工业科技，2019，40(13)：310-315，321.
LI L, LI S, WANG H Y, et al. Review of standard dectection methods of carcinogenic biotoxins in foods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(13): 310-315, 321. (in Chinese)

[21] BENFORD D, BOLGER P M, CARTHEW P, et al. Application of the margin of exposure (MoE) approach to substances in food that are genotoxic and carcinogenic [J]. Food and Chemical Toxicology, 2010, 48: S2-S24.

[22] 贺月. 上海市干湿沉降中多环芳烃赋存特征、溯源和健康风险研究[D]. 上海：华东师范大学，2022.

[23] 李丽娜. 上海市多介质环境中持久性毒害污染物的健康风险评价[D]. 上海：华东师范大学，2007.

[24] BOOBIS A, FLARI V, GOSLING J P, et al. Interpretation of the margin of exposure for genotoxic carcinogens: elicitation of expert knowledge about the form of the dose response curve at human relevant exposures[J]. Food and Chemical Toxicology, 2013, 57: 106-118.

[25] 贾韶蔚，王丰舟，过治勇，等. 开封市2015—2020年部分市售食品中黄曲霉毒素污染状况调查及膳食暴露风险评估[J]. 保健医学研究与实践，2022，19(10)：6-10，24.
JIA S W, WANG F Z, GUO Z Y, et al. Investigation of aflatoxin contamination status and dietary exposure risk assessment in some commercially available foods in Kaifeng from 2015 to 2020 [J]. Health Medicine Research and Practice, 2022, 19(10): 6-10, 24. (in Chinese)

[26] 韩德娟，李凤玲，李晋. 2021年泰安市粮油食品中黄曲霉毒素B_1污染状况及膳食暴露风险评估[J]. 中国油脂，2023，48(7)：73-78.
HAN D J, LI F L, LI J. Risk assessment of aflatoxin B_1 pollution status and dietary exposure in grain and oil food in Tai'an in 2021[J]. China Oils and Fats, 2023, 48(7): 73-78. (in Chinese)

[27] 石萌萌，梁江，赵鹏，等. 广西居民膳食中黄曲霉毒素暴露风险评估[J]. 中国食品卫生杂志，2020，32(4)：432-436.
SHI M M, LIANG J, ZHAO P, et al. Dietary exposure assessment of aflatoxins of residents in Guangxi [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2020, 32(4): 432-436. (in Chinese)

[28] ZHANG W W, LIU Y F, LIANG B H, et al. Probabilistic risk assessment of dietary exposure to aflatoxin B_1 in Guangzhou, China [J]. Scientific Reports, 2020, 10: 7973.

[29] NUGRAHA A, KHOTIMAH K, RIETJENS I M C M. Risk assessment of aflatoxin B_1 exposure from maize and peanut consumption in Indonesia using the margin of exposure and liver cancer risk estimation approaches[J].

Food and Chemical Toxicology，2018，113：134-144.

[30] HUONG B T M，TUYEN L D，MADSEN H，et al. Total dietary intake and health risks associated with exposure to aflatoxin B_1，ochratoxin a and fuminisins of children in Lao Cai province，Vietnam[J]. Toxins，2019，11(11)：638.

[31] 李文廷，申颖，李洁，等. 2019年云南市售大米真菌毒素污染水平及风险评估[J]. 食品安全质量检测学报，2021，12(14)：5861-5869.
LI W T，SHEN Y，LI J，et al. Contamination level and risk assessment of mycotoxin in rice sold in Yunnan province in 2019[J]. Journal of Food Safety & Quality，2021，12(14)：5861-5869.(in Chinese)

[32] 赵毕，吴平谷，章荣华，等. 浙江省5大类食物中赭曲霉毒素A暴露评估[J]. 中国食品卫生杂志，2022，34(2)：315-321.
ZHAO B，WU P G，ZHANG R H，et al. Ochratoxin A dietary exposure assessment in five food categories from Zhejiang province[J]. Chinese Journal of Food Hygiene，2022，34(2)：315-321.(in Chinese)

[33] 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]. 玉米科学，2021，29(5)：88-94.
MENG F L，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)

[34] 殷芳媛，田明胜，王李伟，等. 上海市居民小麦粉中脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其乙酰衍生物的暴露评估[J]. 卫生研究，2015，44(4)：661-665.
YIN F Y，TIAN M S，WANG L W，et al. Dietary exposure assessment of deoxynivalenol and its acetylated derivatives in wheat flour in Shanghai[J]. Journal of Hygiene Research，2015，44(4)：661-665.(in Chinese)

[35] 王伟，邵兵，朱江辉，等. 中国谷物制品中重要镰刀菌毒素膳食暴露评估研究[J]. 卫生研究，2010，39(6)：709-714.
WANG W，SHAO B，ZHU J H，et al. Dietary exposure assessment of some important *Fusarium* toxins in cereal-based products in China[J]. Journal of Hygiene Research，2010，39(6)：709-714.(in Chinese)

[36] 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]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2014，42(1)：78-82，88.
GUO Y D，LIU Y R，YUAN Y H，et al. Fumonisins contamination in major food products and its dietary risk assessment in China[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)，2014，42(1)：78-82，88.(in Chinese)

[37] 胡海生，高洁，杨厚兵，等. 粮食中真菌毒素及其代谢物的产生和影响[J]. 食品安全导刊，2024(8)：167-169.
HU H S，GAO J，YANG H B，et al. Production and influence of mycotoxins and their metabolites in grain[J]. China Food Safety Magazine，2024(8)：167-169.(in Chinese)

（责任编辑：刘冬梅）