

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240906003

引用格式: 卢萍萍, 曾祥辉, 何颖, 等. 2024年湖南省市售爆米花真菌毒素污染状况及人群暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(3): 65-73.

LU PP, ZENG XH, HE Y, *et al.* Mycotoxin contamination and population exposure risk assessment of commercial popcorn from Hunan Province in 2024 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(3): 65-73. (in Chinese with English abstract).

# 2024年湖南省市售爆米花真菌毒素污染状况及人群暴露风险评估

卢萍萍<sup>1#</sup>, 曾祥辉<sup>2#</sup>, 何颖<sup>1</sup>, 谢望梅<sup>1</sup>, 张攀<sup>1</sup>, 李子微<sup>1</sup>, 孙子琅<sup>1</sup>,  
欧阳裕脂<sup>1</sup>, 唐宇姝<sup>1</sup>, 刘志<sup>2\*</sup>, 王博<sup>1\*</sup>

(1. 娄底市疾病预防控制中心, 娄底 417000; 2. 湖南人文科技学院农业与生物技术学院, 娄底 417000)

**摘要:** **目的** 调查研究2024年湖南省市售爆米花8种真菌毒素污染状况, 并对人群暴露进行风险评估。**方法** 在全省14市州共采集样本67份, 采用同位素稀释超高效液相色谱-串联质谱法测定黄曲霉毒素B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub>, 伏马毒素B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>和玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEN) 8种真菌毒素的含量, 并采用内梅罗综合污染指数、慢性膳食暴露风险评估和致癌性风险评估对检出的真菌毒素进行膳食暴露风险评估。**结果** 在所测定的67份爆米花样本中, 伏马毒素B<sub>1</sub>检出率46.27%, 最大值285.0 μg/kg, 伏马毒素B<sub>2</sub>检出5份, 最大值80.0 μg/kg, ZEN检出10份, 最大值47.7 μg/kg, 4种黄曲霉毒素和伏马毒素B<sub>3</sub>均未检出, 伏马毒素B<sub>1</sub>在散装样本的检出率略高于定型包装, 但无统计学差异( $P>0.05$ ); 全省14地市爆米花真菌毒素污染水平对人体健康无明显风险。**结论** 湖南省市售爆米花普遍存在真菌毒素污染问题, 且伏马毒素B<sub>1</sub>是主要污染毒素, 并存在与伏马毒素B<sub>2</sub>或ZEN协同污染现象, 针对伏马毒素污染问题, 建议密切关注, 及时开展溯源调查, 采取相应措施。

**关键词:** 爆米花; 真菌毒素; 污染状况; 风险评估

## Mycotoxin contamination and population exposure risk assessment of commercial popcorn from Hunan Province in 2024

LU Ping-Ping<sup>1#</sup>, ZENG Xiang-Hui<sup>2#</sup>, HE Ying<sup>1</sup>, XIE Wang-Mei<sup>1</sup>, ZHANG Pan<sup>1</sup>,  
LI Zi-Wei<sup>1</sup>, SUN Zi-Lang<sup>1</sup>, OUYANG Yu-Zhi<sup>1</sup>, TANG Yu-Shu<sup>1</sup>, LIU Zhi<sup>2\*</sup>, WANG Bo<sup>1\*</sup>

(1. Loudi Center for Disease Control and Prevention, Loudi 417000, China; 2. School of Agriculture and Biotechnology, Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi 417000, China)

**ABSTRACT: Objective** To investigate and analyze the contamination of 8 kinds of mycotoxins in commercial

收稿日期: 2024-09-06

#卢萍萍和曾祥辉为共同第一作者

第一作者: 卢萍萍(1990—), 女, 主管技师, 主要研究方向为食品理化检验。E-mail: 79527660@qq.com

曾祥辉(1996—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为食品检验。E-mail: zengxianghui96@126.com

\*通信作者: 刘志(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品质量与安全。E-mail: liuzhi\_scholar@126.com

王博(1985—), 男, 硕士, 副主任技师, 主要研究方向为食品安全有机污染物检验与风险评估。E-mail: masterwangbo@hotmail.com

popcorn from Hunan Province of China in 2024, and assess the associated health risks. **Methods** A total of 67 popcorn samples were collected from 14 cities and states in 2024 from Hunan Provinces of China, the content of aflatoxin B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub>, fumonisins B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub>, and zearalenone (ZEN) was determined by isotope dilution ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, the risk assessment was evaluated by the Nemerow comprehensive pollution index method, risk assessment of chronic dietary exposure and carcinogenic risk assessment. **Results** In the 67 tested popcorn samples, the detection rate of fumonisins B<sub>1</sub> was 46.27%, with a maximum value of 285.0 µg/kg, fumonisins B<sub>2</sub> was detected in 5 samples, with a maximum value of 80.0 µg/kg, ZEN was detected in 10 samples, with a maximum value of 47.7 µg/kg, and no detection of 4 kinds of aflatoxin and fumonisins B<sub>3</sub> were found. The detection rate of fumonisins B<sub>1</sub> in loose packaging samples was slightly higher than that in packaged products, but there was no statistically significant difference ( $P>0.05$ ); the level of fungal toxin contamination in popcorn across the 14 prefecture-level cities in the province posed no obvious risk to human health. **Conclusion** Mycotoxin contamination is common in the popcorn sold in Hunan Province, and fumonitoxin B<sub>1</sub> is the main pollution toxin, and there is a co-pollution phenomenon with fumonitoxin B<sub>2</sub> or ZEN. In view of fumonitoxin pollution, it is recommended to pay close attention to the problem, timely traceability investigation, and take corresponding measures.

**KEY WORDS:** popcorn; mycotoxin; contamination status; risk assessment

## 0 引言

爆米花作为一种休闲食品,深受大众欢迎,尤其是在影剧院、商超等大型公共场所,消费需求旺盛。湖南不属于我国玉米的主产区<sup>[1-2]</sup>,制作爆米花的原料或市售爆米花主要来自外省。已有大量的文献资料表明,作为制作爆米花的原材料,玉米受真菌毒素污染的问题一直存在<sup>[3-4]</sup>,真菌毒素污染是玉米产品的主要风险因子,与气候条件、病虫害、田间管理、仓储,甚至品种都有一定关系,主要包括黄曲霉毒素(aflatoxins, AFTs)、呕吐毒素、伏马毒素(fumonisin, FUMs)、玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEN)等几种<sup>[5]</sup>,但对目前爆米花中真菌毒素的污染研究还鲜有报道。

真菌毒素是一类由丝状真菌在适宜条件下产生的对人体危害性很大且具有生物毒性的次级代谢产物,在自然界普遍存在。在我国,比较常见的真菌毒素有 AFTs、ZEN 和 FUMs 等<sup>[6]</sup>,其共同毒性主要是致 DNA 损伤和细胞毒性,低浓度下即可对人和动物健康造成危害,使肝脏、肾脏和胃肠道发生病变<sup>[7-9]</sup>。大多真菌毒素都耐高温,难降解,能够经受住食品加工程序。食品被污染后价值严重降低,甚至不能食用,不但影响经济、贸易和社会发展,而且会对人类造成中毒、致癌和致突变等健康危害<sup>[10-11]</sup>,已成为世界各国高度关注的食品安全热点问题。

目前,我国对真菌毒素检测识别的研究大多集中在谷物、粮食、粮油等农产品上<sup>[12-14]</sup>,作为玉米真菌毒素污染问题的延伸,本研究旨在对我省市售爆米花中真菌毒素污染

状况做调查研究,为食品安全风险评估提供数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品来源

按照《2024 年国家食品安全风险监测计划》采样要求,结合我省实际,采样范围覆盖全省 14 市州,共获样本 67 份,其中包括长沙市 5 份,衡阳市 5 份,郴州市 5 份,邵阳市 5 份,张家界市 4 份,怀化市 5 份,岳阳市 5 份,湘潭市 4 份,常德市 5 份,永州市 5 份,娄底市 4 份,益阳市 4 份,株洲市 5 份,湘西土家族苗族自治州 6 份,采样点类型包括商超、农贸市场、餐饮环节以及网店,样品包装形式有定型包装和散装(包括自行简易包装)两种,具体信息见表 1。

### 1.2 仪器与试剂

Thermo TSQ ACCESSMAX 液质联用仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); Waters BEH C<sub>18</sub> 色谱柱(150 mm×2.1 mm, 1.7 µm)(美国 Waters 公司); Multi Reax 多位涡旋振荡器(德国 Heidolph 公司); 低温高速离心机(德国 Eppendorf 公司); Milli-Q 去离子水发生器(美国 Millipore 公司)。

乙腈(色谱纯,美国 Thermo Fisher Scientific 公司); 乙腈中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> (aflatoxin B<sub>1</sub>, AFTB<sub>1</sub>)、黄曲霉毒素 B<sub>2</sub> (aflatoxin B<sub>2</sub>, AFTB<sub>2</sub>)、黄曲霉毒素 G<sub>1</sub> (aflatoxin G<sub>1</sub>, AFTG<sub>1</sub>)、黄曲霉毒素 G<sub>2</sub> (aflatoxin G<sub>2</sub>, AFTG<sub>2</sub>)混合标准溶液[STD#1088, 质量浓度(1.00±0.01) µg/mL,有效期至 2024.9]、乙腈中伏马毒素 B<sub>1</sub> (fumonisin B<sub>1</sub>, FB<sub>1</sub>)、伏马毒素 B<sub>2</sub> (fumonisin B<sub>2</sub>, FB<sub>2</sub>)、伏马毒素 B<sub>3</sub> (fumonitoxin B<sub>3</sub>, FB<sub>3</sub>)混合标准溶液[STD#2012, 质量浓度(50.00±0.90) µg/mL,

表1 湖南省市售爆米花采样信息( $n=67$ )  
Table 1 Information on popcorn samples collected from retail stores across the Hunan Province ( $n=67$ )

序号	样本来源	样本数/份	来源							
			超市/商场		农贸市场		餐饮环节		网店散装	
			定型	散装	定型	散装	定型	散装	定型	散装
1	长沙市	5	2	3	-	-	-	-	-	-
2	衡阳市	5	-	5	-	-	-	-	-	-
3	郴州市	5	2	3	-	-	-	-	-	-
4	邵阳市	5	3	2	-	-	-	-	-	-
5	张家界市	4	1	1	-	1	-	-	1	-
6	怀化市	5	1	2	-	1	-	-	1	-
7	岳阳市	5	1	4	-	-	-	-	-	-
8	湘潭市	4	2	2	-	-	-	-	-	-
9	常德市	5	-	5	-	-	-	-	-	-
10	永州市	5	3	2	-	-	-	-	-	-
11	娄底市	4	1	2	-	-	-	-	-	1
12	益阳市	4	2	-	1	-	-	-	1	-
13	株洲市	5	2	3	-	-	-	-	-	-
14	湘西州	6	3	-	-	1	-	1	-	1

注: -代表无样本。

有效期至 2025.10)、乙腈中 ZEN 标准溶液[STD#4010, 质量浓度(10.00±0.15)  $\mu\text{g/mL}$ , 有效期至 2025.4)、乙腈中 AFTB<sub>1</sub>、AFTB<sub>2</sub>、AFTG<sub>1</sub>、AFTG<sub>2</sub> 同位素内标混合标准溶液[STD#1080U, 质量浓度(0.500±0.007)  $\mu\text{g/mL}$ , 有效期至 2026.1)、乙腈中 FB<sub>1</sub>、FB<sub>2</sub>、FB<sub>3</sub> 同位素内标混合标准溶液[DZ-STDU, 质量浓度(20.00±0.40)  $\mu\text{g/mL}$ , 有效期至 2026.5)、乙腈中玉米 ZEN 同位素内标标准溶液[STD#4010U, 质量浓度(25.00±0.40)  $\mu\text{g/mL}$ , 有效期至 2026.4](青岛普瑞邦公司)。

### 1.3 样本处理

样品经充分混匀后,普通家用料理机粉碎,于自封袋-20℃冷冻保存,待检。根据《2024年食品安全风险监测化学污染物检测工作手册》<sup>[15]</sup>,结合GB 5009.22—2016《食品安全国家标准 食品中黄曲霉毒素B族和G族的测定》、GB 5009.240—2023《食品安全国家标准 食品中伏马菌素的测定》及相关检测方法<sup>[16]</sup>,准确称取5g(精确到0.01g)试样于50mL离心管中,加入20mL乙腈-水-甲酸(70:29:1, V:V:V)溶液,涡旋振荡提取30min,取1.0mL提取液至1.5mL离心管,10000r/min离心5min。准确转移0.5mL上清液于另一1.5mL离心管中,加入1.0mL水,涡旋混匀,4℃10000r/min离心5min,上清液过0.22 $\mu\text{m}$ 滤膜。吸取180 $\mu\text{L}$ 样品滤液于300 $\mu\text{L}$ 内插管中,加入20 $\mu\text{L}$ 同位素混合内标溶液,混匀待测。同时制备空白、平行、加标回收样本。

### 1.4 仪器条件

#### 1.4.1 液相色谱条件

液相色谱柱: Waters BEH C<sub>18</sub> 色谱柱(150mm×2.1mm, 1.7 $\mu\text{m}$ ); 柱温: 40℃; 进样量: 10 $\mu\text{L}$ ; 流速: 0.25mL/min, 流动相A相: 5mmol/L乙酸铵0.1%氨水[电喷雾负离子模式(electrospray negative ion mode, ESI-)]/0.2%甲酸水溶液

[电喷雾正离子模式(electrospray positive ion mode, ESI+)]; B相: 乙腈; 梯度洗脱程序见表2和表3。

表2 正离子模式液相色谱梯度洗脱程序  
Table 2 Gradient elution procedure of liquid chromatography in positive ion mode

时间/min	流速/(mL/min)	A相/%	B相/%
0.0	0.25	75	25
1.0	0.25	75	25
4.0	0.25	60	40
9.0	0.25	30	70
9.2	0.25	0	100
9.8	0.25	0	100
10.0	0.25	75	25
11.0	0.25	75	25

表3 负离子模式液相色谱梯度洗脱程序  
Table 3 Gradient elution procedure of liquid chromatography in negative ion mode

时间/min	流速/(mL/min)	A相/%	B相/%
0.0	0.25	95	5
1.0	0.25	95	5
1.5	0.25	80	20
5.0	0.25	75	25
5.5	0.25	0	100
8.2	0.25	0	100
8.5	0.25	95	5
12.0	0.25	95	5

#### 1.4.2 质谱条件

离子源: ESI; 扫描方式: 单离子检测扫描(single ion

monitoring, SRM); 喷雾电压: 3.5 kV; 毛细管温度: 290 °C; 蒸发温度: 390 °C; 鞘气压力: 35 psi; 辅助气压力: 15 arb; 8 种真菌毒素及其同位素内标的质谱参数及其检出限见表 4。

### 1.5 质控方式

为确保研究的科学准确, 在严格按照《2024 年国家食品污染和有害因素风险监测工作手册》的基础上, 本研究通过测定空白、平行、加标回收、标准样品的方式对整个实验过程及检测结果进行质量控制。

### 1.6 健康风险评估统计方法

按照美国环保局提出的风险评估原理和方法<sup>[17-19]</sup>。对于爆米花健康暴露风险的估计, 应使用式(1)计算平均每日摄入量(average daily intake, ADI)[mg/(kg·day)]:

$$ADI=(C \times IR \times EF \times ED)/(BW \times AT) \quad (1)$$

式中, ADI 为每日摄入量的估计值[mg/(kg·day)];  $C$  为爆米花中真菌毒素的浓度(mg/kg), 如 AFTs、FUMs、ZEN;  $IR$  为爆米花的摄入量(kg/day), 依据中国居民营养与慢性病状况报告(2020 年), 成人的爆米花摄入量  $IR$  为 0.05 kg/day, 儿童的爆米花摄入量  $IR$  为 0.03 kg/day<sup>[20]</sup>。EF 为暴露频率(day/year); ED 为暴露时间(year); BW 为暴露个体的体重(kg), 成人平均 BW 为 61.75 kg, 儿童平均 BW 为 32.75 kg; AT 为平均剂量的时间段(day)。在本研究中,  $AT=ED \times 365$  d, ED 为中国人均寿命 72 年。

利用式(2)计算出爆米花中特定单一真菌毒素的非致癌性危害系数(hazard quotient, HQ), 利用式(3)计算出多种真菌毒素的非致癌性危害系数(target hazard quotient, THQ)如下:

$$HQ_i=ADI_i/RfD_i \quad (2)$$

$$THQ=\sum_{i=1}^n HQ_i \quad (3)$$

式中,  $i$  表示其中某个危害系数,  $n$  表示危害系数种类。根据中国居民 FUMs 膳食暴露风险评估和欧盟食品中特定污染物的最大限量, FUMs ( $FB_1$ 、 $FB_2$ )的参考剂量(reference dose, RfD)为 0.002 mg/kg, ZEN 的 RfD 为 0.02 mg/kg, 因此, 如果 HQ 和 THQ 小于 1, 则认为真菌毒素对人体健康是安全的<sup>[21]</sup>。癌症风险与癌症斜率因子(slope factor, SF)有关。真菌毒素的风险可以用式(4)计算:

$$Risk_i=ADI_i \times SF_i \quad (4)$$

式中,  $Risk_i$  是一种特定致癌真菌毒素的潜在风险, 根据美国环保局综合风险信息系统(integrated risk information system, IRIS)可知, ZEN 的斜率致癌因子 SF 为 0.1 mg/(kg·bw·d)。当  $Risk \leq 1 \times 10^{-6}$  时, 表示无风险; 当  $1 \times 10^{-6} \leq Risk \leq 1 \times 10^{-4}$  时, 表示风险可接受; 当  $1 \times 10^{-4} \leq Risk$  时, 表示风险不可接受。

从单个产品的角度, 评价单个产品的规范性和安全性。考虑了每种样品的污染物检出值, 残留限量标准, 以及多种污染物同时检出的情况。采用  $P_N$  污染指数评价每

表 4 8 种真菌毒素及其同位素内标的质谱参数及其检出限

Table 4 Mass spectrum parameters and limits of detection of 8 kinds of mycotoxins and their isotope internal targets

真菌毒素	ESI 离子模式	前体离子 ( $m/z$ )	产物离子 ( $m/z$ )	碰撞能量	透镜电压	保留时间 /min	检出限 /( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )
AFTB <sub>1</sub>	+	313	285*/241	22/35	116	5.28	0.1
AFTB <sub>2</sub>	+	315	287*/259	23/26	120	4.57	0.1
AFTG <sub>1</sub>	+	329	243*/311	26/23	124	4.60	0.2
AFTG <sub>2</sub>	+	331	313*/245	24/31	122	3.74	1.0
FB <sub>1</sub>	+	722	334*/352	40/35	146	5.79	10.0
FB <sub>2</sub>	+	706	336*/318	36/35	142	7.17	10.0
FB <sub>3</sub>	+	706	336*/318	36/35	142	6.67	50.0
ZEN	-	317	175*/131	24/30	122	7.69	5.0
<sup>13</sup> C-AFTB <sub>1</sub>	+	330	301	23	121	5.28	/
<sup>13</sup> C-AFTB <sub>2</sub>	+	332	303	25	126	4.57	/
<sup>13</sup> C-AFTG <sub>1</sub>	+	346	257	25	107	4.60	/
<sup>13</sup> C-AFTG <sub>2</sub>	+	348	330	23	118	3.74	/
<sup>13</sup> C-FB <sub>1</sub>	+	756	356	39	140	5.79	/
<sup>13</sup> C-FB <sub>2</sub>	+	740	358	35	130	7.17	/
<sup>13</sup> C-FB <sub>3</sub>	+	740	358	35	130	6.67	/
<sup>13</sup> C-ZEN	-	335	185	26	121	7.69	/

注: \*表示定量产物离子; /为未有此项, 表 10 同。

类污染物的污染等级, 按(5)~(6)式计算。如表 5, 污染指数分为 A、B、C、D、E 共 5 个级别, 分别代表无污染; 污染指数低, 需注意预防; 轻微污染; 中度污染; 重度污染。

$$P_i = C_i / S_i \quad (5)$$

$$P_N = \sqrt{(P_{iave}^2 + P_{imax}^2) / 2} \quad (6)$$

式中,  $P_i$  为真菌毒素单因素污染指标;  $P_N$  为综合污染指数;  $C_i$  为爆米花中真菌毒素的浓度(mg/kg), 如 AFTs、FUMs、ZEN;  $S_i$  为爆米花中 AFTs、FUMs、ZEN 的国家规定的限量标准;  $P_{iave}$  和  $P_{imax}$  分别代表 AFTs、FUMs、ZEN 的  $P_i$  的平均值和最大值。

表 5 产品污染风险分类表

Table 5 Classification table of product contamination risk

分数阈值	等级划分	等级描述
<0.7	A	无污染
0.7~1.0	B	污染指数低, 需注意预防
1.0~2.0	C	轻微污染
2.0~3.0	D	中度污染
>3.0	E	重度污染

### 1.7 数据处理

运用 Excel 2003 软件进行实验数据处理及图表绘制, 以( $\chi^2, P < 0.05$ )判定具有显著差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 整体污染情况

湖南省市售爆米花中 8 种真菌毒素整体检出情况见表 6~7, 本研究中, 在我省所有市售爆米花样本中未检出 AFTB<sub>1</sub>、AFTB<sub>2</sub>、AFTG<sub>1</sub>、AFTG<sub>2</sub> 和 FB<sub>3</sub>, 与任贝贝等<sup>[22]</sup>对河北的玉米及其制品中真菌毒素污染的研究结果形似。不同地区市售爆米花真菌毒素的污染情况见表 8, 结果显

示, 除永州外, 其余所有地区都存在不同程度的污染, 其中邵阳市污染情况最为严重, 检出率达到 100.00% (5/5), 其次为怀化市与常德市, 检出率为 80.00% (4/5)。在长沙、邵阳、常德、娄底、湘西 5 个地区的样本中均检出了 3 种毒素(FB<sub>1</sub>、FB<sub>2</sub>、ZEN), 郴州、怀化、湘潭 3 个地区的样本中均检出 2 种毒素(FB<sub>1</sub>、ZEN), 除永州外, 其余地区均只检出 FB<sub>1</sub> 1 种毒素。本研究检出的真菌毒素主要是 FB<sub>1</sub>, 是所有样本中的优势污染物, 且在散装样本检出率高于定型包装, 但无统计学差异( $P > 0.05$ )(表 9)。

表 6 2024 湖南省市售爆米花中 8 种真菌毒素整体检出情况(n=67)

Table 6 Overall detection situation of 8 kinds of mycotoxins in commercial popcorn from Hunan Province in 2024 (n=67)

毒素名称	检出份数	阳性样本含量情况/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )			
		最大值	最小值	平均值	中位数
AFTB <sub>1</sub>	0	-	-	-	-
AFTB <sub>2</sub>	0	-	-	-	-
AFTG <sub>1</sub>	0	-	-	-	-
AFTG <sub>2</sub>	0	-	-	-	-
FB <sub>1</sub>	31	285.0	11.2	49.9	29.1
FB <sub>2</sub>	5	80.0	10.3	35.2	34.8
FB <sub>3</sub>	0	-	-	-	-
ZEN	10	47.7	6.20	12.8	7.20

注: -代表未检出。

表 7 真菌毒素协同污染情况

Table 7 Co-contamination situation of multi-mycotoxin

毒素种类	样品数量(67)	毒素组合	检出率/%
1 种	28/67	FB <sub>1</sub>	32.83 (22/67)
		ZEN	8.95 (6/67)
2 种	9/67	FB <sub>1</sub> +FB <sub>2</sub>	7.46 (5/67)
		FB <sub>1</sub> +ZEN	5.97 (4/67)

表 8 不同地区爆米花真菌毒素检出情况

Table 8 Detection situation of mycotoxin in different areas

地区	样本数	检出份数(检出率/%)	单一毒素检出份数(检出率/%)			
			FB <sub>1</sub>	FB <sub>2</sub>	FB <sub>3</sub>	ZEN
长沙市	5	3 (60.00)	3 (60.00)	1 (20.00)	0 (0.00)	1 (20.00)
衡阳市	5	3 (60.00)	3 (60.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)
郴州市	5	3 (60.00)	2 (40.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	1 (20.00)
邵阳市	5	5 (100.00)	4 (80.00)	1 (20.00)	0 (0.00)	2 (40.00)
张家界市	4	2 (50.00)	2 (50.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)
怀化市	5	4 (80.00)	2 (40.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	2 (40.00)
岳阳市	5	2 (40.00)	2 (40.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)
湘潭市	4	3 (75.00)	2 (50.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	1 (25.00)
常德市	5	4 (80.00)	4 (80.00)	1 (20.00)	0 (0.00)	1 (20.00)
永州市	5	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)
娄底市	4	2 (50.00)	1 (25.00)	1 (25.00)	0 (0.00)	1 (25.00)
益阳市	4	2 (50.00)	2 (50.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)
株洲市	5	2 (40.00)	2 (40.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)
湘西州	6	2 (33.33)	2 (33.33)	1 (16.67)	0 (0.00)	1 (16.67)

注: 未检出的 4 种 AFTs 未在表中列出。

表 9  $FB_1$  在定型包装与散装中的检出情况( $n=67$ )  
Table 9 Detection situation of  $FB_1$  between shaped packaging and bulk ( $n=67$ )

定型包装		散装	
样品编号	检出情况 /( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	样品编号	检出情况 /( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )
ZZZ2024011	182.0	HH2024009	36.4
CS2024013	65.5	ZJJ2024007	33.7
CS2024014	37.8	CS2024016	18.3
SY2024008	17.2	CZ2024013	16.2
SY2024010	58.7	CZ2024014	47.4
SY2024011	285.0	SY2024009	15.1
HH2024010	15.0	YY2024025	50.8
YY2024021	11.2	HY2024008	13.8
XT2024014	17.9	HY2024009	28.6
YYS2024025	14.7	HY2024011	20.3
YYS2024026	10.1	XT2024012	13.1
ZJJ2024009	15.2	CD2024027	276.0
ZZZ2024011	182.0	CD2024028	37.9
平均值	60.1	CD2024029	29.1
中位数	17.5	CD2024030	32.3
检出率/%	19.40	LD2024013	56.6
		ZZ2024009	20.9
		ZZ2024011	46.3
		ZZZ2024013	23.4
		HH2024009	36.4
		平均值	43.4
		中位数	29.1
		检出率/%	29.85

表 10 湖南省 14 地市爆米花中的真菌毒素的健康风险评估指标

Table 10 Health risk assessment indicators of mycotoxins in popcorn in 14 prefectural cities of the Hunan Province

地区	真菌毒素	ADI/[ $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{day})$ ]		HQ		Risk	
		成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
长沙市( $n=5$ )	$FB_1$	$3.28 \times 10^{-5}$	$3.71 \times 10^{-5}$	0.0164	0.0186	/	/
	$FB_2$	$9.04 \times 10^{-6}$	$1.02 \times 10^{-5}$	0.0045	0.0051	/	/
	ZEN	$5.02 \times 10^{-6}$	$5.68 \times 10^{-6}$	0.0003	0.0003	$5.02 \times 10^{-7}$	$5.68 \times 10^{-7}$
	总和	/	/	0.0180	0.0204	/	/
衡阳市( $n=5$ )	$FB_1$	$1.69 \times 10^{-5}$	$1.91 \times 10^{-5}$	0.0085	0.0096	/	/
	$FB_2$	/	/	/	/	/	/
	ZEN	/	/	/	/	/	/
	总和	/	/	0.0085	0.0096	/	/
郴州市( $n=5$ )	$FB_1$	$2.57 \times 10^{-5}$	$2.91 \times 10^{-5}$	0.0129	0.0146	/	/
	$FB_2$	/	/	/	/	/	/
	ZEN	$6.27 \times 10^{-6}$	$7.09 \times 10^{-6}$	0.0003	0.0004	$6.27 \times 10^{-7}$	$7.09 \times 10^{-7}$
	总和	/	/	0.0087	0.0098	/	/
邵阳市( $n=5$ )	$FB_1$	$7.43 \times 10^{-5}$	$8.41 \times 10^{-5}$	0.0371	0.0420	/	/
	$FB_2$	$6.48 \times 10^{-5}$	$7.33 \times 10^{-5}$	0.0324	0.0366	/	/
	ZEN	$2.19 \times 10^{-5}$	$2.48 \times 10^{-5}$	0.0011	0.0012	$2.19 \times 10^{-6}$	$2.48 \times 10^{-6}$
	总和	/	/	0.0366	0.0414	/	/
张家界市( $n=4$ )	$FB_1$	$1.98 \times 10^{-5}$	$2.24 \times 10^{-5}$	0.0090	0.0112	/	/
	$FB_2$	/	/	/	/	/	/
	ZEN	/	/	/	/	/	/
	总和	/	/	0.0099	0.0112	/	/

## 2.2 单一毒素污染情况

综合表 6~8 可见,就某单一毒素污染情况来看,所涉及的 67 份样本,8 种真菌毒素中除 4 种 AFTs 和  $FB_3$  未检出外,其余 3 种都有一定程度的检出,尤其是  $FB_1$ ,在所有样本中的检出率达 46.27%,最高 285.0  $\mu\text{g}/\text{kg}$ (邵阳),其中邵阳市和常德市的样本中检出率达 80.00% (4/5),最低为娄底市 25.00% (1/4);在长沙、邵阳、常德、娄底、湘西 5 地市的样本中均检出 1 例  $FB_2$ ,最高值 80.0  $\mu\text{g}/\text{kg}$ (邵阳);在 10 份样本中检出 ZEN,最高值 47.7  $\mu\text{g}/\text{kg}$ (邵阳),检出率最高的地区为邵阳市和怀化市 40.00% (2/5)。

## 2.3 协同污染情况

根据表 7,全省 14 地市 67 份样本,仅被单一毒素污染的样本最多,占有所有样本的 41.79% (28/67);被两种毒素( $FB_1+FB_2/FB_1+ZEN$ )协同污染的样本占 13.43% (9/67);就单一毒素污染来看,仅被单一  $FB_1$  污染的样品最多,占有所有样品的 32.83% (22/67),其次是被单一 ZEN 污染的样本,占 8.95% (6/67),被两种毒素协同污染( $FB_1+FB_2/FB_1+ZEN$ )的样本数量相当,分别占到 7.46% (5/67)和 5.97% (4/67)。不论是单一毒素污染还是协同污染的样本占比情况,都与陈皆全<sup>[23]</sup>对广西百色的玉米真菌毒素调查结论相符。值得注意的是,在被两种毒素协同污染的 9 个样本中,同时含有  $FB_1$ 。

## 2.4 风险评估

由于所有样品均未检出  $AFTB_1$ 、 $AFTB_2$ 、 $AFTG_1$ 、 $AFTG_2$  以及  $FB_3$ ,因此本研究利用内梅罗综合污染指数法、慢性膳食暴露风险评估法和致癌性风险评估法对爆米花中检出的真菌毒素污染水平和健康风险进行了评估。由表 10 可知,全省 14 地市的爆米花中单一真菌毒素的 HQ 均远远

表 10(续)

地区	真菌毒素	ADI/[mg/(kg·day)]		HQ		Risk	
		成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
怀化市(n=5)	FB <sub>1</sub>	2.08×10 <sup>-5</sup>	2.35×10 <sup>-5</sup>	0.0104	0.0118	/	/
	FB <sub>2</sub>	/	/	/	/	/	/
	ZEN	5.13×10 <sup>-6</sup>	5.8×10 <sup>-6</sup>	0.0003	0.0002	5.13×10 <sup>-7</sup>	5.80×10 <sup>-7</sup>
	总和	/	/	0.0053	0.0060	/	/
岳阳市(n=5)	FB <sub>1</sub>	2.51×10 <sup>-5</sup>	2.84×10 <sup>-5</sup>	0.0125	0.0141	/	/
	FB <sub>2</sub>	/	/	/	/	/	/
	ZEN	/	/	/	/	/	/
	总和	/	/	0.0125	0.0141	/	/
湘潭市(n=4)	FB <sub>1</sub>	1.25×10 <sup>-5</sup>	1.42×10 <sup>-5</sup>	0.0063	0.0071	/	/
	FB <sub>2</sub>	/	/	/	/	/	/
	ZEN	4.87×10 <sup>-6</sup>	5.51×10 <sup>-6</sup>	0.0002	0.0003	4.87×10 <sup>-7</sup>	5.51×10 <sup>-7</sup>
	总和	/	/	0.0043	0.0048	/	/
常德市(n=5)	FB <sub>1</sub>	7.78×10 <sup>-5</sup>	8.8×10 <sup>-5</sup>	0.0389	0.0440	/	/
	FB <sub>2</sub>	2.82×10 <sup>-5</sup>	3.19×10 <sup>-5</sup>	0.0140	0.0159	/	/
	ZEN	5.83×10 <sup>-6</sup>	6.6×10 <sup>-6</sup>	0.0003	0.0003	5.83×10 <sup>-7</sup>	6.60×10 <sup>-7</sup>
	总和	/	/	0.0425	0.0480	/	/
永州市(n=5)	FB <sub>1</sub>	/	/	/	/	/	/
	FB <sub>2</sub>	/	/	/	/	/	/
	ZEN	/	/	/	/	/	/
	总和	/	/	/	/	/	/
娄底市(n=4)	FB <sub>1</sub>	4.58×10 <sup>-5</sup>	5.19×10 <sup>-5</sup>	0.0229	0.0259	/	/
	FB <sub>2</sub>	8.33×10 <sup>-6</sup>	9.42×10 <sup>-6</sup>	0.0042	0.0047	/	/
	ZEN	7.78×10 <sup>-6</sup>	8.8×10 <sup>-6</sup>	0.0004	0.0004	7.78×10 <sup>-7</sup>	8.80×10 <sup>-7</sup>
	总和	/	/	0.0137	0.0155	/	/
益阳市(n=4)	FB <sub>1</sub>	1.0×10 <sup>-5</sup>	1.14×10 <sup>-5</sup>	0.0050	0.0057	/	/
	FB <sub>2</sub>	/	/	/	/	/	/
	ZEN	/	/	/	/	/	/
	总和	/	/	0.0050	0.0057	/	/
株洲市(n=5)	FB <sub>1</sub>	2.72×10 <sup>-5</sup>	3.08×10 <sup>-5</sup>	0.0136	0.0154	/	/
	FB <sub>2</sub>	/	/	/	/	/	/
	ZEN	/	/	/	/	/	/
	总和	/	/	0.0136	0.0154	/	/
湘西州(n=6)	FB <sub>1</sub>	8.3×10 <sup>-5</sup>	9.4×10 <sup>-5</sup>	0.0415	0.0469	/	/
	FB <sub>2</sub>	3.23×10 <sup>-5</sup>	3.66×10 <sup>-5</sup>	0.5162	0.0182	/	/
	ZEN	2.0×10 <sup>-5</sup>	2.27×10 <sup>-5</sup>	0.0010	0.0011	2.01×10 <sup>-6</sup>	2.27×10 <sup>-6</sup>
	总和	/	/	0.0501	0.0567	/	/

小于 1, 结果表明, 从单一真菌毒素膳食摄入风险来看, 经膳食摄入爆米花的单一真菌毒素是安全的, 不存在摄入风险。成人与儿童的 THQ 最大值分别为 0.0501 和 0.0567, 均远远小于 1, 表明全省 14 地市的成人与儿童通过爆米花所摄入的真菌毒素能导致慢性膳食暴露风险很低。ZEN 于 2017 年被世界卫生组织国际癌症研究机构列为致癌物质清单中, 因此探究爆米花中的 ZEN 的致癌性风险评估是有必要的。从表 10 可知, 除了湘西州和邵阳市的人群, 其他全省 12 市的 Risk 值均小于 10<sup>-6</sup>, 表明这 12 市的成人与儿童通过爆米花所摄入的 ZEN 无致癌性风险。湘西州成人与儿童的 Risk 值分别为 2.01×10<sup>-6</sup> 和 2.27×10<sup>-6</sup>, 邵阳市成人与儿童的 Risk 值分别为 2.19×10<sup>-6</sup> 和 2.48×10<sup>-6</sup>, 均属于 10<sup>-6</sup>~10<sup>-4</sup> 中, 表示湘西州和邵阳市成人与儿童通过爆米花所摄入的 ZEN 风险可接受, 但需要注意防范。通过内梅罗综合污染指数法评价爆米花中检出的真菌毒素污染状况, 从表 11 可得,

单一真菌毒素除 FB<sub>1</sub> 以外, P<sub>i</sub> 和 P<sub>N</sub> 均远小于 1, 表明爆米花中 FB<sub>2</sub> 和 ZEN 污染等级均为安全级别。FB<sub>1</sub> 在单一市级的平均污染指数 P<sub>i</sub> 值为 0.115, 整体的污染指数 P<sub>N</sub> 略微大于 1, 属于轻微污染, 与孟繁磊等<sup>[24]</sup>对吉林玉米真菌毒素膳食风险评估研究结果一致。由表 12 可知, FB<sub>1</sub> 在湘西州的平均污染指数 P<sub>i</sub> 值最大, 为 0.513。这可能是经济发展较弱引起的指标控制和管理力度降低, 所导致湘西州 FB<sub>1</sub> 比其他 13 地市的单一污染指数高。

表 11 爆米花中 3 种真菌毒素污染状况评价结果  
Table 11 Evaluation results of 3 kinds of mycotoxins contamination in popcorn

真菌毒素	P <sub>i</sub>	P <sub>N</sub>	等级划分
FB <sub>1</sub>	0.115	1.011	轻微污染
FB <sub>2</sub>	0.013	0.283	无污染
ZEN	0.032	0.563	无污染

表 12 湖南省 14 地市爆米花中  $FB_1$  污染情况  
Table 12  $FB_1$  contamination situation in popcorn in 14 cities of Hunan Province

地区	$P_i$
湘西州	0.513
长沙市	0.203
郴州市	0.159
邵阳市	0.459
怀化市	0.128
岳阳市	0.155
衡阳市	0.104
湘潭市	0.078
常德市	0.480
永州市	0.000
娄底市	0.283
益阳市	0.062
株洲市	0.168
张家界市	0.122

### 3 讨论

我国目前对玉米及其制品中真菌毒素的限量要求主要参考 GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》，其中对食品中黄曲霉毒素  $B_1$ 、 $M_1$ 、脱氧雪腐镰刀菌烯醇、展青霉素、赭曲霉毒素 A 及 ZEN 做出了限量要求，针对玉米及其制品中真菌毒素要求只涉及 AFTB $_1$ 、脱氧雪腐镰刀菌烯醇、赭曲霉毒素 A、ZEN4 项，不论是食品分类还是污染物类型，都比较粗放，随着经济社会的发展，亟需对现行标准予以完善。经过高温膨化，玉米中的真菌毒素会有一定的损失<sup>[25]</sup>，目前缺乏初加工或加工产品的真菌毒素限量标准，另外还可以对食品类别再细化。实施有效防控措施是降低真菌毒素污染最有效最经济的手段，要对玉米从田间管理到加工生产全环节进行科学管理，后续还可对高温加工对真菌毒素的影响进行深入研究，甚至开展食品中真菌毒素降解技术研究<sup>[26-28]</sup>。由表 1 可见，本次研究样本量偏小，主要来自各地市商超，农贸市场、饭店及网店样本共 10 份，且不具地域代表性，所有样本也只检测了 8 种真菌毒素，难以得到爆米花中真菌毒素污染的真实水平，结果有一定局限性，但由采集的 67 份样品的检出情况看，爆米花真菌毒素污染的隐患是不容忽视的，需引起相关部门的足够重视。为进一步全面了解、掌握爆米花中真菌毒素的污染情况，后期需扩大采样范围，加大采样量，此外，还要扩大毒素监测种类。

有研究表明，玉米真菌毒素污染因不同地区、不同气候条件呈区域性分布<sup>[3]</sup>，我国玉米主产区  $FB_1$  ( $FB_1+FB_2+FB_3$ ) 的检出率在 28.00%~100.00%<sup>[29]</sup>，对照欧盟标准<sup>[30]</sup>，超标率约为 10.00%，这与本研究中的 46.27% 相一致。2024 年湖南省市售爆米花普遍受真菌毒素污染，并且有多种毒素协同污染现象，目前已有研究表明，当 2 种

或 2 种以上毒素同时作用于细胞或动物时，即使每种毒素的剂量在其无效应水平以下，联合后也可产生明显的毒性相加作用<sup>[31]</sup>。因此，爆米花中多种毒素协同污染情况值得密切关注。此外，湖南不是玉米主产区，爆米花及玉米主要来自外省，因此，应加强源头管理，在玉米运输、储存、销售等过程中的管理要进一步加强，且有必要持续对爆米花中多组分真菌毒素进行监测，并对现制现售爆米花的玉米进行监测，呼吁相关部门制定严格细化的限量标准，科学评价爆米花中真菌毒素含量水平，杜绝受真菌毒素污染的玉米变相入口，切实保护消费者健康。

### 4 结论

从本研究结果来看，湖南省 14 地市样本中，真菌毒素普遍有检出，邵阳市售爆米花真菌毒素污染情况最严重，不论是检出率、检出毒素种类，毒素含量，都是所有样本所有地区中最高的；本研究检出的真菌毒素主要是  $FB_1$ ，是所有样本中的优势污染物，且在散装样本检出率高于定型包装，但无统计学差异 ( $P>0.05$ )，说明爆米花在销售、运输及存储环节因包装形式受真菌毒素二次污染的可能性较小，主要还是与玉米本身的污染状况有关；此外，通过风险评估发现，全省 14 地市的成人与儿童通过爆米花所摄入的  $FB_2$  和 ZEN 整体污染指数低，为安全级别；其  $FB_1$ 、 $B_2$  和 ZEN 能导致膳食暴露风险低，因此湖南省全省 14 地市的爆米花真菌毒素水平对人体健康无明显风险，消费者可以放心食用。

### 参考文献

- [1] 郭庆海. 中国玉米主产区的演变与发展[J]. 玉米科学, 2010, 18(1): 139-145.  
GUO QH. The development and evolution of the major maize producing areas in China [J]. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(1): 139-145.
- [2] 李立军, 褚庆全, 胡志全, 等. 我国主要粮食作物区域布局变化研究[J]. 农业现代化研究, 2004(5): 334-339.  
LI LJ, CHU QQ, HU ZQ, et al. Regional distribution on cereal crops in China [J]. Research of Agricultural Modernization, 2004(5): 334-339.
- [3] 兰静, 金海涛, 赵琳, 等. 玉米真菌毒素污染与控制技术研究进展[J]. 农产品质量与安全, 2020(5): 15-21.  
LAN J, JIN HT, ZHAO L, et al. Research advance in mycotoxin contamination in maize and its control technology [J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2020(5): 15-21.
- [4] 闫兆凤, 黄常刚, 杨欣. 中国主粮中真菌毒素污染现状[J]. 卫生研究, 2022, 51(4): 685-691.  
YAN ZF, HUANG CG, YANG X. Current status of mycotoxin contamination in staple foods in China [J]. Journal of Hygiene Research, 2022, 51(4): 685-691.
- [5] 孙向东, 张瑞英, 兰静, 等. 玉米真菌毒素污染防控研究[J]. 农产品质量与安全, 2018(2): 31-35, 48.  
SUN XD, ZHANG RY, LAN J, et al. Prevention and control of mycotoxin pollution in maize [J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2018(2): 31-35, 48.

- [6] LIM CW, YOSHINARI T, LAYNE J, *et al.* Multi-mycotoxin screening reveals separate occurrence of aflatoxins and ochratoxin a in Asian rice [J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 2015, 63(12): 3104–3113.
- [7] FUNG F, CLARK RF. Health effects of mycotoxins: A toxicological overview [J]. *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology* 2004, 42(2): 217–234.
- [8] SHEPHARD GS. Impact of mycotoxins on human health in developing countries [J]. *Food Additives and Contaminants: Part A*, 2008, 25(2): 146–151.
- [9] ZAIN ME. Impact of mycotoxins on humans and animals [J]. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2011, 15: 129–144.
- [10] 黄天培, 何佩茹, 潘洁茹, 等. 食品常见真菌毒素的危害及其防止措施[J]. *生物安全学报*, 2011, 20(2): 108–112.  
HUANG TP, HE PR, PAN JR, *et al.* Health hazard to humans and prevention strategies of food-borne mycotoxins [J]. *Journal of Biosafety*, 2011, 20(2): 108–112.
- [11] 余超, 罗晓燕, 李迎月, 等. 2013—2015年广州市市售普洱茶真菌毒素污染调查[J]. *中国食品卫生杂志*, 2017, 29(6): 719–722.  
YU C, LUO XY, LI YY, *et al.* Analysis on content of mycotoxin in puerh tea in Guangzhou in 2013—2015 [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2017, 29(6): 719–722.
- [12] 王督, 张文, 李培武, 等. 胶体金免疫层析法快速定量分析粮油农产品中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>[J]. *中国油料作物学报*, 2014, 36(4): 529–532.  
WANG D, ZHANG W, LI PW, *et al.* Rapid and quantitative detection of aflatoxin B<sub>1</sub> in plant grain and oilseeds products using colloid golden immunochromatographic method [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2014, 36(4): 529–532.
- [13] 孙娟, 李为喜, 张妍, 等. 用超高效液相色谱串联质谱法同时测定谷物中12种真菌毒素[J]. *作物学报*, 2014, 40(4): 691–701.  
SUN J, LI WX, ZHANG Y, *et al.* Simultaneous determination of twelve mycotoxins in cereals by ultr performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(4): 691–701.
- [14] 王战辉, 米铁军, 沈建忠. 荧光偏振免疫分析检测粮食及其制品中的真菌毒素研究进展[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(23): 4862–4872.  
WANG ZH, MI TJ, SHEN JZ. Advance in fluorescence polarization immunoassay for the determination of mycotoxins in cereals and related products [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(23): 4862–4872.
- [15] 2024年国家食品污染物和有害因素风险监测工作手册[Z].  
National work manual for risk monitoring of contaminants and harmful factors in food 2024 [Z].
- [16] 吴永宁, 周爽, 任一平, 等. 食品中真菌毒素检测方法标准操作程序[M]. 北京: 中国质检出版社, 中国标准出版社, 2018.  
WU YN, ZHOU S, REN YP, *et al.* Standard operating procedures of analytical methods for mycotoxins in food [M]. Beijing: Standard Press of China, Quality Inspection Press of China, 2018,.
- [17] ASSESSment ERPR. Guidance for Superfund. Human Health Evaluation Manual (Part a), Interim Final [Z]. 1989.
- [18] EPA U. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites, appendix A-generic SSLs for the residential and commercial/industrial scenarios. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, United States Environmental Protection Agency [Z]. 2002.
- [19] EPA US. Exposure factors handbook. Office of research and development, Washington, DC 2011 [Z].
- [20] TOMÁS MM, ESTELA HC, MAGDA CM, *et al.* Human health risk associated with the consumption of aflatoxins in popcorn [J]. *Risk Management And Healthcare Policy*, 2020: 2020: 2583–2591.
- [21] LI ZY, MA ZW, YUAN ZW, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468–469: 843–853.
- [22] 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*, 2021, 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*, 2021, 12(5): 1669–1676.
- [23] 陈皆全. 2017—2019年百色市玉米真菌毒素污染状况调查及分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(12): 4029–4033.  
CHEN JQ. Investigation and analysis on mycotoxin pollution of maize in Baise city from 2017 to 2019 [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2020, 11(12): 4029–4033.
- [24] 孟繁磊, 范宏, 谭莉, 等. 吉林省玉米真菌毒素污染状况及其山是风险评估研究[J]. *玉米科学*, 2021, 29(5): 88–94.  
MENG FL, 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.
- [25] 李颖, 张锐利. 真菌毒素物理降解的研究进展[J]. *现代食品*, 2022, 28(17): 27–31.  
LI Y, ZHANG RL. Research progress in physical degradation of mycotoxins [J]. *Modern Food*, 2022, 28(17): 27–31.
- [26] 纪剑, 于坚, 王良哲, 等. 真菌毒素的降解技术研究进展[J]. *食品与生物技术学报*, 2022, 41(5): 1–10.  
JI J, YU J, WANG LZ, *et al.* Research progress in mycotoxin degradation technology [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2022, 41(5): 1–10.
- [27] 陈晓园, 张恩东, 沈乃东, 等. 玉米深加工中真菌毒素污染、检测及降解研究进展[J]. *粮食与饲料工业*, 2019(2): 48–52.  
CHEN XY, ZHANG END, SHEN ND, *et al.* Progress of contamination, determination and degradation of mycotoxins in corn processing [J]. *Cereal & Feed Industry*, 2019(2): 48–52.
- [28] 吕聪, 邢福国, 刘阳. 国内外真菌毒素防控新技术[J]. *中国猪业*, 2017, 12(6): 27–32.  
LV C, XING FG, LIU Y. New Technology of mycotoxin control at home and abroad [J]. *China Swine Industry*, 2017, 12(6): 27–32.
- [29] LIU YX, JIANG Y, LI RJ, *et al.* Natural occurrence of fumonisins B<sub>1</sub> and B<sub>2</sub> in maize from eight province of China in 2014 [J]. *Food Additives and Contaminants: Part B*, 2017, 10(2): 113–117.
- [30] Commission of the European Communities. Setting maximum level for certain contaminants in foodstuffs: EC 1881/2006 [EB/OL]. (2024-05-29) [2018-10-10]. <http://law.Foodmate.Net/show-170518.Html>
- [31] SPEIJERS GJA, SPEIJERS M. Combined toxic effects of mycotoxins [J]. *Toxicology Letters*, 2004, 153: 91–98.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)