

“守护粮食食品安全，全球携手在行动” 特约专栏文章之五

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.06.005

ISAAC M O, MICHAEL S, ANTHONY N, 等. 尼日利亚纳萨拉瓦州市售灌木芒果、腰果、秋葵、芝麻和高粱的真菌毒素污染情况研究[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(6): 71-82.

ISAAC M O, MICHAEL S, ANTHONY N, et al. Mycotoxin contamination of bush mango, cashew nuts, okra, sesame and sorghum marketed in Nasarawa State, Nigeria[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(6): 71-82.

尼日利亚纳萨拉瓦州市售灌木芒果、腰果、秋葵、芝麻和高粱的真菌毒素污染情况研究

Isaac M Ogara¹, Michael Sulyok², Anthony Negedu³, Kolawole I Ayeni⁴, Zega M Zebedee¹, John D Mamman¹, Abiodun Adedokun¹, Janet I Ogara⁵, Eunice A Adgidzi⁶, Chibundu N Ezekiel^{2,4}✉, Rudolf Krska^{2,4}

- (1. 纳萨拉瓦州立大学, 沙布拉菲亚校区, 农学院农学系 PMB 335, 尼日利亚 纳萨拉瓦州凯菲, 950101;
2. 维也纳自然资源与生命科学大学 (BOKU), 生物分析与农业代谢组学研究所, 农业生物技术学院 (IFA-Tulln), 奥地利 图尔恩, 20. 3430;
3. 原材料研究与发展委员会, 尼日利亚 阿布贾迈塔马, 904101;
4. 巴布科克大学 微生物系, 尼日利亚 奥贡州伊利山雷莫, 121103;
5. 纳萨拉瓦州立大学 农业学院 基础科学系化学组 PMB 335, 尼日利亚 纳萨拉瓦州拉菲亚, 950101;
6. 纳萨拉瓦州立大学 农业学院 家庭科学系, 沙布拉菲亚校区 PMB 335, 尼日利亚 纳萨拉瓦州拉菲亚, 950101)

摘要: 采用 LC-MS/MS 真菌毒素检测法, 对尼日利亚纳萨拉瓦州市场出售的食物作物 (灌木芒果 ($n=12$)、烤腰果 ($n=12$)、干秋葵 ($n=12$)、芝麻 ($n=35$)、高粱 ($n=36$)) 进行了分析研究。结果显示具致肝癌性黄曲霉毒素 B₁ 在灌木芒果、干秋葵和高粱样品中检出率分别为 42%、25% 和 19%, 其平均浓度分别为 19.2、8.27 和 4.75 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 伏马毒素 B₁ 污染了 9% 的芝麻样品 (平均浓度为 12.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$) 和 47% 的高粱样品 (平均浓度为 461 $\mu\text{g}/\text{kg}$); 同时受到黄曲霉毒素 B₁ 和伏马毒素 B₁ 污染的高粱样本至少有 19%。灌木芒果、高粱和干秋葵中检测到了具致肾毒性的赭曲霉毒素 A, 这是首次在于秋葵中报道检测到该毒素。可见, 当地市场出售的这些食物作物受到真菌毒素的污染, 可能威胁消费者的健康, 需要采取积极措施防控污染。

关键词: 黄曲霉毒素 B₁; 谷物; 坚果; 油籽; 食品安全; 真菌毒素; 公共卫生; 蔬菜

中图分类号: TS201.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2021)06-0071-12

网络首发时间: 2021-11-02 15:49:03

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20211101.1748.008.html>

收稿日期: 2021-07-25

作者简介: Isaac M. Ogara, 男, 1964 年出生, 博士, 副教授, 研究方向为植物病理学和真菌毒理学。E-mail: isaacjanet2002@yahoo.com. 作者详细介绍见 PC23。

通讯作者: Chibundu N. Ezekiel, 男, 1981 年出生, 博士, 教授, 研究方向为食品微生物学和真菌毒理学。E-mail: chaugez@gmail.com. 作者详细介绍见 PC24-PC25。本文英文原文详见 P83-P92。

Mycotoxin Contamination of Bush Mango, Cashew Nuts, Okra, Sesame and Sorghum Marketed in Nasarawa State, Nigeria

ISAAC M. Ogara¹, MICHAEL Sulyok², ANTHONY Negedu³, KOLAWOLE I. Ayeni⁴, ZEGA M. Zebedee¹, JOHN D. Mamman¹, ABIODUN Adedokun¹, JANET I. Ogara⁵, EUNICE A. Adgidzi⁶, CHIBUNDU N. Ezekiel^{2,4}✉, RUDOLF Krska^{2,4}

(1. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Nasarawa State University Keffi, Shabu-Lafia Campus, Nasarawa State, Nigeria; 2. Institute of Bioanalytics and Agro-Metabolomics, Department of Agrobiotechnology (IFA-Tulln), University of Natural Resources and Life Sciences Vienna (BOKU), Konrad Lorenz str., 20. 3430, Tulln, Austria; 3. Raw Materials Research and Development Council, 17, Aguiyi Ironsi Road, Maitama, Abuja, Nigeria; 4. Department of Microbiology, Babcock University, Ilishan Remo, Ogun State, Nigeria; 5. Chemistry Unit, Department of Basic Sciences, College of Agriculture, Lafia, Nasarawa State, Nigeria; 6. Department of Home Science, Faculty of Agriculture, Nasarawa State University Keffi, Shabu-Lafia Campus, Nasarawa State, Nigeria.)

Abstract: Food crops (bush mango ($n=12$), roasted cashew nut ($n=12$), dried okra ($n=12$), sesame ($n=35$) and sorghum ($n=36$)) sold in markets in Nasarawa state, Nigeria, were analyzed using a LC-MS/MS mycotoxin method. The hepatocarcinogenic aflatoxin B₁ was detected in 42%, 25% and 19% of bush mango, dried okra and sorghum samples at mean concentrations of 19.2, 8.27 and 4.75 $\mu\text{g}/\text{kg}$, respectively, while fumonisin B₁ contaminated 9% of the sesame (mean: 12.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$) and 47% of the sorghum (mean: 461 $\mu\text{g}/\text{kg}$) samples. At least 19% of the sorghum samples were co-contaminated with aflatoxin B₁ and fumonisin B₁. The nephrotoxic ochratoxin A was detected in bush mango, sorghum and, for the first time to the best of our knowledge, in dried okra. These vended food crops in the local markets are therefore prone to mycotoxin contamination, which may pose a health threat to consumers, and require intentional mitigation efforts.

Key words: aflatoxin B₁; cereals; nuts; oil seeds; food safety; mycotoxins; public health; vegetables

联合国粮农组织指出，全球平均膳食能量摄入量从 2005 年每天的 2 753 kcal/cap，增加到了 2016 年每天的 2 904 kcal/cap^[1]，表明全球食物供应量有了显著的增加。尽管食物供应量剧增，但撒哈拉以南非洲 (SSA) 仍有相当一部分人营养不良，其基本因素虽然复杂，但食物作物受到真菌毒素污染和贫困因素归为其中^[2-3]。尽管这些因素并不局限于某一特定区域，但真菌毒素威胁造成的负担在诸如尼日利亚等的 SSA 国家中还是非常高的，这些地区采收前后的作物栽培和管理的措施非常不完善，并且气候条件助长了食品受真菌毒素污染的频率^[4-11]。每天连续摄入真菌毒素，依据污染食物摄入量，会对人体产生一系列有害影响。这些影响范围从急性（如恶心、呕吐）到慢性（如癌症），甚至死亡^[2,12]。

在尼日利亚，灌木芒果(拉丁学名 *Irvingia gabonensis*，在当地称为 *dika nut* 或 *ogbono*)、腰果(*Anacardium occidentale* L.)、秋葵(*Abelmoschus*

esculentus (L.) Moench)、高粱(*Sorghum bicolor* L.)和芝麻(*Sesamum indicum* L.)食物等作物是大多数家庭消费的主食，可在不同的市场买到。分自芒果果实的大部分干燥种子 (a drupe) 和新鲜秋葵的全果 (制成的一种胶囊) 或者干燥碾成粉可分别做成浓稠的 *ogbono* 和 *okro* 汤^[9,13-15]。高粱是一种谷物，而芝麻是一种小油籽，二者在尼日利亚的不同地区都有广泛种植。在尼日利亚，高粱主要被加工成传统的食物，如 *masa*, *ogi*, *tuwo* 和 *waina*^[4,16]，而芝麻通常首选作食用油，也可作为食物的香料^[16-18]。高粱和芝麻也可作为传统加工饮料 (如 *kunu*) 的原料^[19-20]。烤腰果通常作为即食小吃食用。总之，这些食物作物是尼日利亚家庭膳食中十分主要的摄入成分，尤其在纳萨拉瓦州所属的北部地区。因此，为了保障消费者的健康，有必要对食品的真菌毒理学安全性进行评估。

此前的研究报道了尼日利亚不同地区高粱和芝麻^[4,16,18,21]、灌木芒果^[9]和腰果^[22]的真菌毒素污

染情况。然而,关于纳萨拉瓦州市售的这类食品真菌毒素情况的数据很少。此外,在来自纳萨拉瓦州的玉米^[6,23]、即食家庭食品^[24]和人类尿液^[25]中,测量到了很高含量的真菌毒素混合物。因此,纳萨拉瓦州可能成为真菌毒素中毒的热点地区,因此,有必要评估该州不同食物来源受真菌毒素的影响。此外,监测公共市场出售的食品和通常作为主食消费的食物作物是否受到真菌毒素污染是十分重要的,这样有利于提供数据,进而为可行的干预措施提供信息。因此,本研究旨在阐明在纳萨拉瓦州市售的灌木芒果、腰果、干秋葵、高粱和芝麻的真菌毒素污染情况。

1 材料与方法

1.1 样品采集

从尼日利亚纳萨拉瓦州的主要市场购买了 107 份食物作物,其中灌木芒果($n=12$)、烤腰果($n=12$)、干秋葵($n=12$)、芝麻($n=35$)和高粱($n=36$)。在该州的三个农业区(南部地区(拉菲亚地区)、北部地区(阿克旺加地区)和西部地区(凯菲地区)选择了具代表性的主要市场。在每个市场中,随机选择食物作物供应商;每五家供应商中选一家。从每个随机选择的供应商中采集一份食物作物样本。芝麻和高粱样本每份重 1 kg,每份依取自储藏箱不同部分形成 3~4 份子样品,而其他食物样本重约 300 g,包括 4 个随机选择的预包装食品子样品。采集的食品样本在供应商商店储存不超过 14 d。所有食品样品立即研磨成粉并储存在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至分析用,多种真菌毒素的分析在奥地利生物分析和农业代谢组学研究所(IFA-Tulln)进行。

1.2 样品的多种真菌毒素分析

采用 Sulyok 等^[26]报道的 LC-MS/MS 方法来定量分析食物样品中包括真菌毒素在内的 500 多种微生物代谢物。

1.2.1 化学药品

甲醇(色谱级)和冰醋酸(分析级):默克公司(德国达姆施塔特);乙腈(色谱级):VWR 公司(比利时鲁汶);醋酸铵(质谱级):西格玛奥德里奇公司(奥地利维也纳);真菌毒素标准品根据 Abia 等的研究报道^[27],真菌毒素标准品:其他研究组提供或购自商业公司;实验用水:Elga

Purelab 超分析系统反渗透连续净化制备,威立雅公司(英国巴克斯)。

1.2.2 仪器与设备

50 mL 聚丙烯试管:德国纽布瑞赫特,莎斯特;GFL 3017 振荡培养箱(旋转摇床):德国布格韦德尔;QTrap 5500 LCMS/MS 系统:美国加州福斯特,应用生物系统公司;电喷雾电离源(ESI)源、1290 系列 HPLC 系统:德国瓦尔特布隆,安捷伦公司;色谱柱、保护柱:美国加利福尼亚州托伦斯,飞诺美公司。

1.2.3 代谢物的提取和回收率的测定

每个样品取 5 g,置于 50 mL 聚丙烯试管中,用 20 mL 萃取剂(乙腈:水:醋酸=79:20:1, v/v/v)萃取代谢物。测定回收率时,每个样品取 0.25 g 加入 100 μL 多标物母液,放置一夜,以建立样品和加标物之间的平衡,随后用 1 mL(乙腈:水:乙酸=79:20:1, v/v/v)均一化。上述样品用 GFL 3017 振荡培养箱(旋转摇床)振荡提取 90 min,提取液用稀释溶剂(乙腈:水:醋酸=20:79:1, v/v/v)稀释为 1:1 (v/v),并在 LC-MS/MS 仪器上样并分析^[28]。

1.2.4 LC-MS/MS 参数

微生物代谢物的 LC-MS/MS 筛选测定采用 QTrap 5500 LCMS/MS 系统,配备电喷雾电离源(ESI)源和 1290 系列 HPLC 系统。色谱柱为 Phenomenex Gemini C18(150 mm \times 4.60 mm, 5 μm),保护柱为 Phenomenex C18(4 mm \times 3 mm, 5 μm),温度 25 $^{\circ}\text{C}$,色谱方法、色谱和质谱参数按照 Sulyok 等的报道^[26]。ESI-MS/MS 在多反应监测(MRM)模式下,每个样品两次色谱运行中对每种分析物进行两次裂解反应扫描。各分析物的 MRM 检测窗口分别设置为正离子和负离子模式下其保留时间 ± 20 和 ± 26 s。

鉴定通过获得每种分析物两个 MRMs(串珠镰刀菌素除外,其仅显示一个碎片离子)进行确认。根据欧洲委员会 2002/657 号决议会产生的 4 个识别点值。此外,两个 MRM 跃迁的 LC 保留时间和强度比分别在 0.1 min 和 30%内与真实标准相关值一致。

1.2.5 真菌毒素的定量

基于线性、1/x 称重校准,使用外标定量,多

组分母液梯度稀释。对回收率的浓度进行了校正。该方法的准确性通过多实验室内比较研究得到验证^[26,30], 包括 BIPEA 组织的常规方案 (法国热讷维耶)。检出限和定量限根据欧拉赫姆指南在低浓度水平上加标样品的标准差确定。

1.3 数据分析

SPSS 17.0 Windows 版本用于分析真菌毒素数据。采用简单的描述性统计用于分析食品中真菌毒素/代谢物分布的相关数据。食物作物中的真菌毒素浓度使用方程 $y = \text{Log}_{10}(1 + \text{真菌毒素含量} \mu\text{g/kg})$ 进行转换, 创建用于比较毒素水平的正态分布。所有分析的误差水平均设置为 5%。

2 结果与分析

2.1 LC-MS/MS 方法的测定结果与微生物代谢物概况

表 1 列出了来自纳萨拉瓦州食物作物的 80 种真

菌和细菌代谢物的 LC-MS/MS 方法测定结果。灌木芒果、腰果、干秋葵、芝麻和高粱等的代谢物回收率范围分别为 38.9~167、23.9~602、9.3~243、9.2~225 和 61.0~140。大量偏离 100%回收率的情况主要归因于基质效应, 而萃取步骤的回收率被发现符合大多数分析物的性能标准(例如 70%~120%)^[26]。检测限范围为 0.008~240 $\mu\text{g/kg}$ 。总体而言, 在 107 份食品样本中检出的所有真菌毒素中, 脱氧雪腐镰刀菌烯醇是最常见的真菌毒素 (发生率: 65%; 范围: 8.7~256 $\mu\text{g/kg}$; 平均值: 63.6 $\mu\text{g/kg}$), 而伏马毒素的污染水平最高 (发生率: 22%; 范围: 3.7~2 938 $\mu\text{g/kg}$; 平均值: 477 $\mu\text{g/kg}$ (图 1)。

2.2 高粱和芝麻中的真菌毒素

高粱和芝麻中真菌毒素和其他真菌代谢产物的含量数据见表 2。在高粱样品中, 共检测到 14 种真菌毒素, 包括黄曲霉毒素 B₁ (AFB₁)、伏马毒素 (FB₁)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇 (DON)、赭

表 1 尼日利亚纳萨拉瓦州市售的常见食物作物中代谢物的方法测定结果

Table 1 Method performance characteristics for metabolites in commonly consumed food crops marketed in Nasarawa state, Nigeria

代谢物	检出限 LOD ^a	定量限 LOQ ^b	回收率/% ^c				
			灌木芒果	腰果	干秋葵	白高粱	芝麻
3-硝基丙酸	0.8	2.4	56.3	82.9	30.8	nd	nd
黄曲霉毒素 B ₁	0.24	0.72	38.9	96.1	31.4	64.3	50.4
黄曲霉毒素 G ₁	0.32	0.96	76.6	96.0	30.5	nd	nd
黄曲霉毒素 M ₁	0.4	1.2	73.3	102.7	41.8	nd	nd
田麦角碱	0.12	0.36	100.0	105.4	9.3	nd	nd
交链孢酚	0.4	1.2	100.0	92.8	24.6	77.9	52.5
交链孢酚单甲醚	0.16	0.48	100.0	102.5	33.3	88.9	80.9
交链孢霉烯	0.8	2.4	nd	nd	nd	100.0	100.0
细格菌素	240	-	nd	nd	nd	nd	224.6
抗生素	1.1	3.6	100.0	186.1	243	nd	nd
交链孢毒素-I	0.4	-	nd	nd	nd	70.4	53.7
转移酶抑制剂	0.25	0.75	113	69.1	84.9	92.8	95.4
壳二孢氯素	0.07	0.24	69.9	88.1	99.9	nd	nd
曲霉代谢物	0.8	2.4	100.0	127.7	31.0	nd	nd
曲霉素衍生物	0.5	1.5	100.0	120.6	66.9	nd	nd
曲霉胺	0.03	0.09	100.0	50.3	7	nd	nd
曲霉酸	0.08	0.24	100.0	107.2	103.0	nd	nd
天冬氨酸酯	0.04	0.12	100.0	113.8	60.4	nd	nd
1,3,6,8-四羟基-2-(1-羟基己基)-萹醌	0.04	0.12	50.8	49.1	88.3	nd	nd
奥佛尼红素	0.04	0.12	50	51.6	89.2	98.4	27.4
白僵菌素	0.008	0.024	52	92.8	100.0	83.4	89.7
比卡菌素	40	-	nd	nd	nd	120.0	65
芳环化合物	0.1	0.3	103.2	140.0	17.3	nd	nd
氯霉素	0.03	0.09	100.0	107.0	57.3	nd	nd
羟基大黄素	0.64	1.92	100.0	100.1	45.9	nd	nd

续表 1

代谢物	检出限 LOD ^a	定量限 LOQ ^b	回收率/% ^c				
			灌木芒果	腰果	干秋葵	白高粱	芝麻
弯孢霉素	0.4	1.2	135	89.5	73.9	80.2	60.4
环二肽 cyclo(L-Pro-L-Tyr)	0.8	2.4	83.7	51.3	11.2	nd	nd
环二肽 cyclo(L-Pro-L-Val)	0.64	1.92	100.0	100.0	100.0	nd	nd
环二氨酸	6	20	159.7	103.8	100.0	nd	nd
细胞松弛素 J	2.4	8	82.9	109.4	59.9	nd	nd
脱氧雪腐镰刀菌烯醇	1.6	4.8	nd	nd	nd	79.9	61.7
二羟基美林	0.5	1.7	100.0	102.8	43.4	nd	nd
大黄素	0.056	0.168	100.0	93.5	71.0	80.8	61.5
木贼碱	0.24	0.72	167.1	189.7	144.4	140.1	73.8
迷人醇	0.1	0.3	100.0	92.2	52.8	nd	nd
环二肽 Fellutanine A	1	3.3	100.0	137.3	34.3	nd	nd
D-6,8-二甲基麦角林-I	0.8	2.4	nd	nd	nd	82.3	69.4
伏马毒素 B ₁	8	24	nd	nd	nd	81.2	88.3
伏马毒素 B ₂	2.4	7.2	nd	nd	nd	90.5	90.2
伏马毒素 B ₃	1.6	4.8	nd	nd	nd	92.8	94.4
伏马毒素 B ₄	1.6	4.8	nd	nd	nd	100.0	90.2
镰刀菌酸	40	120	nd	nd	nd	100.0	63.6
水解伏马菌素 B ₁	0.16	0.48	nd	nd	nd	92.3	111.3
整合素 A	0.04	0.13	155.5	602	193.1	nd	nd
整合素 B	0.09	0.3	58.7	64.8	121	nd	nd
Iso-Rhodoptilometrin	0.64	1.92	100.0	105.1	66.1	nd	nd
曲酸	16	48	100.0	73.9	16.0	121.1	43.9
大孢菌素	0.04	0.12	100.0	96.5	68.7	83.2	54.4
畸形素 A	0.2	0.6	nd	nd	nd	61.0	93.0
畸形素 C	0.4	1.2	77.1	114.7	57.3	61.0	100.8
甲基磺草胺	0.04	0.12	100.0	92.1	64.1	nd	nd
单活菌素	0.05	0.18	100.0	106.3	84.1	nd	nd
串珠镰刀菌素	1.6	4.8	100.0	76.0	39.7	88.0	83.7
Monocerin 植物毒素	0.4	1.2	100.0	99.9	63.8	nd	nd
霉酚酸	0.2	0.67	106	97.3	84.7	nd	nd
N-苯甲酰-L-苯基丙氨酸	0.064	0.192	100.0	105.2	72.9	nd	nd
新刺孢曲霉素 A	0.8	2.4	100.0	99.7	35.7	nd	nd
细胞周期抑制剂	0.16	0.48	108.4	99.1	48.8	78.2	61.6
Nivalenol	0.75	2.5	44.1	97.0	71.2	nd	nd
无活菌素	0.05	0.18	100.0	115.7	88.3	nd	nd
去甲基丙酸	0.8	2.4	100.0	23.9	88.2	nd	nd
赭曲霉毒素 A	0.4	1.2	99.3	100.5	70.1	85.1	71.3
赭曲霉毒素 B	0.4	1.2	nd	nd	nd	86.5	96.8
O-甲基杂色曲霉素	0.12	0.36	43.6	105.9	54.1	73.0	68.5
草碱	0.4	1.2	100.0	86.1	45.5	nd	nd
盘多毛孢菌素	0.4	1.2	87.3	108.0	82.3	nd	nd
寻霉素 A	2	6	95.2	102.9	89.9	nd	nd
喹乳酸菌素 A	0.013	0.042	114.6	96.2	30.6	nd	nd
真菌代谢产物	0.2	0.6	114.1	100.0	34.6	nd	nd
开环柄曲霉素	0.15	0.45	100.0	141.0	82.0	nd	nd
酰苣素	0.15	0.45	100.0	88.8	91.7	nd	nd
柄曲霉素	0.1	0.3	98.9	91.9	57.5	80.1	34.2

续表 1

代谢物	检出限 LOD ^a	定量限 LOQ ^b	回收率/% ^c				
			灌木芒果	腰果	干秋葵	白高粱	芝麻
聚多曲菌 A	2.9	9.6	100.0	123.7	71.8	nd	nd
三联苯曲菌素	1.6	-	nd	nd	nd	74.8	9.2
色醇	8	24	116.0	129.7	13.9	64.3	45.8
杂色曲霉毒素 A	0.24	0.72	91.2	90.5	72.2	nd	nd
杂色曲霉毒素 C	0.24	0.72	100.0	90.9	87.4	83.1	66.7
神经肽拮抗剂 WIN-64821	0.32	1.1	100.0	110.9	81.2	nd	nd
花椒毒素	0.05	0.17	100.0	97.6	93.1	nd	nd
玉米赤霉烯酮	0.4	1.2	nd	nd	nd	73.4	47.1

注：^a样品检出限单位μg/kg; S/N = 3 : 1。^b样品定量限单位μg/kg。^c回收率样品(n=5)。nd=未检出。

Note: ^aLimit of detection: expressed as μg/kg sample; S/N = 3 : 1. ^bLimit of quantification: expressed as μg/kg sample. ^cRecovery from spiking food samples (n=5).

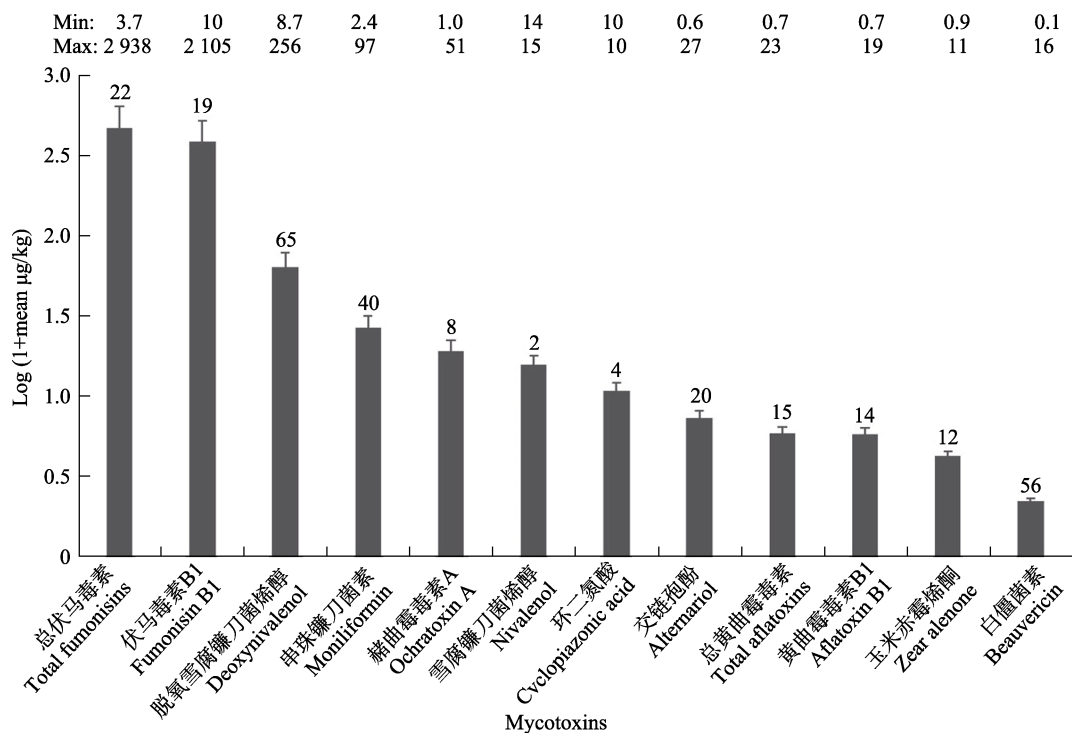


图 1 尼日利亚纳萨拉瓦州销售的 107 份常见食物作物样本中的真菌毒素水平

Fig.1 Mycotoxin levels in 107 commonly consumed food crop samples marketed in Nasarawa state, Nigeria

注：误差线上的数值表示受真菌毒素污染的样本百分比。图的顶部给出了真菌毒素的最小和最大含量 (μg/kg)。

Note: Values on error bars indicate percentage food samples contaminated by mycotoxin. Minimum and maximum mycotoxin concentrations (μg/kg) of mycotoxins are given at the top of the graph.

曲霉毒素 A (OTA) 和玉米赤霉烯酮 (ZEN); 而在芝麻样品中, 检测到 8 种真菌毒素(包括 DON, FB₁ 和 ZEN), 在所有芝麻样品中, 均未检测到 AFB₁ 和 OTA。我们在高粱样品中的 AFB₁、OTA 和 ZEN 研究结果与尼日利亚、埃塞俄比亚和突尼斯之前的报道一致, 这些国家在高粱中也发现了类似的真菌毒素^[4,32-34]。黄曲霉毒素 B₁ 污染了 19% 的高粱样品 (最大: 4.75 μg/kg; 平均值: 2.04 μg/kg)。这低于 Makun 等^[4]和 lahouar 等^[33]

来自尼日利亚和突尼斯流行率的报告水平, 分别是 54%(最大值: 1 164 μg/kg; 平均值: 199.5 μg/kg) 和 59.4% (最大值: 31.7 μg/kg)。造成这差异的显著原因, 可能与高粱样品的质量和数量有关。Makun 等^[4]分析了 168 份明显发霉的高粱, 这可能导致了具有更高的流行率; 而 Lahouar 等^[33]则分析了另外的高粱样本 (n=64)。然而, 我们的结果却高于 Chala 等报告的埃塞俄比亚的 70 份的高粱结果, 其结果为 12.9% (最大值: 62.5 g/kg; 平

表 2 尼日利亚纳萨拉瓦州市售的芝麻和高粱中真菌毒素和其他微生物代谢产物的检测

Table 2 Occurrence of mycotoxins and other microbial metabolites in sesame and sorghum marketed in Nasarawa state, Nigeria

真菌毒素	芝麻(n=35)					高粱(n=36)				
	数值/% ^a	最小值	最大值	平均值	标准差 SD	数值/% ^a	最小值	最大值	平均值	标准差 SD
黄曲霉毒 B ₁	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	—	7(19)	0.72	4.75	2.04	1.39
交链孢酚(AOH)	19(54)	1.01	27.4	7.07	8.08	1(3)	0.65	0.65	0.65	—
交链孢酚甲醚	25(71)	0.25	79.9	8.44	16.2	3(8)	0.25	0.51	0.34	0.10
白僵菌素	23(66)	0.10	5.29	0.75	1.17	26(72)	0.13	16.3	1.03	3.12
脱氧雪腐镰刀菌烯醇	35(100)	37.1	256	114	56.5	35(97)	8.70	19.5	13.4	2.44
伏马毒素 B ₁ (FB ₁)	3(9)	10.2	15.4	12.5	2.66	17(47)	11.9	2 105	461	773
伏马毒素 B ₂	1(3)	6.30	6.30	6.30	—	14(39)	3.72	493	132	192
伏马毒素 B ₃	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	—	7(19)	1.89	264	137	117
伏马毒素 B ₄	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	—	6(17)	16.9	76.5	45.7	27.0
水解 FB ₁	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	—	6(17)	3.95	20.5	12.0	8.19
串珠镰刀菌素	4(11)	3.75	51.3	25.3	22.5	35(97)	7.88	97.1	29.1	19.0
赭曲霉毒素 A	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	—	6(16)	0.96	42.9	16.5	18.6
赭曲霉毒素 B	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	—	5(14)	0.82	5.89	3.00	2.47
玉米赤霉烯酮	10(29)	0.93	4.33	1.82	1.05	3(8)	6.95	10.6	8.25	2.02
真菌代谢物										
交链孢霉烯	11(31)	1.12	25.5	6.92	8.48	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	—
细格菌素	4(11)	1 114	2 540	1 721	697	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	—
交链孢毒素-I	14(40)	2.43	14.6	5.44	4.1	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	—
转移酶抑制剂	5(14)	1.51	27.3	8.67	7.4	6(17)	2.38	33.9	15.2	10.1
奥佛尼红素	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	—	21(58)	0.21	1.59	0.98	0.50
比卡菌素	4(11)	103	134	115	13.2	29(81)	34.3	314	79.9	75.5
弯孢霉素	3(9)	1.03	1.03	1.03	0.00	18(50)	1.03	13.6	5.60	4.21
大黄素	26(74)	0.66	3.32	1.26	0.79	35(97)	0.56	5.71	2.40	1.49
木贼碱	8(23)	2.20	91.6	17.2	30.5	12(33)	1.60	208	50.4	65.3
麦角碱真菌分离物	5(14)	1.15	52.90	17.6	21.2	1(3)	1.61	1.61	1.61	—
镰刀菌酸	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	—	8(22)	44.3	111	70.0	27.2
曲酸	14(40)	554	1 193	719	165	35(97)	199	34 223	6 749	10 253
大孢菌素	11(31)	1.49	11.67	3.01	2.93	35(97)	3.47	48.2	13.4	10.5
畸形素 A	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	—	3(8)	29.3	50.5	39.3	10.7
畸形素 C	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	—	3(8)	6.36	12.0	9.11	2.82
尼杜鲁芬	6(17)	0.29	2.41	1.19	0.89	7(19)	0.15	2.07	0.97	0.78
邻甲基酯	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	—	3(8)	0.40	0.50	0.44	0.05
柄曲霉素(STER)	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	—	24(67)	0.30	19.2	4.51	5.52
三联苯曲菌素	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	—	8(22)	3.45	69.9	30.8	24.8
色醇	35(100)	187	446	287	64.7	27(75)	66.1	164	97.8	28.7
杂色曲霉素 C	1(3)	0.25	0.25	0.25	—	26(72)	0.25	0.84	0.37	0.16

注：^a阳性样品数值(百分比)。Note: ^aNumber (percentage) of positive samples.

均值: 29.5 g/kg)。我们在芝麻样品中未检测到 AFB₁ 的结果与尼日利亚之前的报告一致,在高原地区的 17 种芝麻中均未发现黄曲霉毒素^[18]。然而,却与伊朗和埃及已报道的形成了对比,伊朗和埃及报告芝麻样品中 AFB₁ 含量分别为 18.1% (平均值: 1.62 μg/kg) 并且 60% 以上的芝麻样含

该毒素(平均值: 66.74 μg/kg)^[35-36]。

高粱和芝麻中检出了伏马毒素,包括伏马毒素 B₁、B₂、B₃ 和 B₄。伏马毒素 B₁ 污染了较多的高粱样品(发病率: 47%; 最大值: 2 105 μg/kg; 平均值: 461 μg/kg)、较少芝麻样品(发病率: 9%; 最大: 15.4 μg/kg; 平均值: 12.5 μg/kg)。本

研究高粱样品中检测到的伏马毒素含量(FB_1 、 FB_2 和 FB_3 之和)的最大值和平均值分别高达 2 862 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 730 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。这些值高于之前在埃塞俄比亚高粱中报告的伏马毒素含量(FB_1 、 FB_2 和 FB_3 之和)(最大值: 40.99 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 平均值: 22.22 $\mu\text{g}/\text{kg}$),也高于尼日利亚的四个农业生态区(最大值: 179 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 平均值: 150 $\mu\text{g}/\text{kg}$)^[32,37],但低于尼日利亚尼日尔州四个小气候区 20 份高粱样品中的含量(最大值: 8 400 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 平均值: 6 198 $\mu\text{g}/\text{kg}$)^[34]。然而,本研究的芝麻中 FB_1+FB_2 的含量水平(最大值: 21.7 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 平均值: 18.8 $\mu\text{g}/\text{kg}$)与先前在阿布贾(尼日利亚北部)24 份芝麻样本中报告的水平相似(最大值: 37.9 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 平均值: 25.9 $\mu\text{g}/\text{kg}$)^[38]。脱氧雪腐镰刀菌烯醇是芝麻中最常见的真菌毒素(发生率: 100%; 最大: 256 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 平均值: 114 $\mu\text{g}/\text{kg}$),也是高粱中最常见的真菌毒素(发病率: 97%; 最大: 19.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 平均值: 13.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$)。我们在芝麻中的脱氧雪腐镰刀菌烯醇含量高于 Fapohunda 等^[38]报告的脱氧雪腐镰刀菌烯醇数据(发病率: 58%; 最大: 171 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 平均值: 78.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$)。本研究高粱样品有 16% 污染了赭曲霉毒素 A (最大: 42.9 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 平均含量为 16.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$)。这污染率低于 Makun 等^[21]及 Onyedum 等^[34]分别报道的 94% (最大值: 29.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 平均值: 8.28 $\mu\text{g}/\text{kg}$)和 75% (最大值: 5.60 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 平均值: 2.44 $\mu\text{g}/\text{kg}$)。相反的还有我们的芝麻样品,没有一个被赭曲霉毒素 A 污染的,这与 Makun 等^[21]的观察结果形成了鲜明的对比,他们报告的尼日尔州(尼日利亚北部)19 份芝麻 100% 被赭曲霉毒素 A 污染。约 29% 的芝麻和 8% 的高粱样品含有玉米赤霉烯酮: 最高(平均)浓度分别为 4.33 (1.82) $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 10.6 (8.25) $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。然而,据报道,来自尼日利亚和埃塞俄比亚的芝麻和高粱中的 ZEN 污染率分别为 100% (最大值: 1.25 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 平均值: 0.806 $\mu\text{g}/\text{kg}$)和 32.9% (最大值: 374 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 平均值: 43.8 $\mu\text{g}/\text{kg}$)^[32,39]。我们的这些结果与以往文献报道的有关这两种农作物的结果之间的差异可能归因于多种因素,包括各研究分析的样本量不同、在进行各项分析时分析仪器性能的差异、不同地理环境的影响、农业(采收前后)规范措施,以及污染食物作物的真

菌多样性。在高粱和芝麻中定量的 21 种其他真菌代谢产物中,大黄素(emodin)/曲酸(kojic acid)/大孢菌素(macrosporin)和色醇(tryptophol)分别在 97% 和 100% 的样品中出现。

2.3 灌木芒果、腰果和秋葵中的真菌毒素

在灌木芒果、腰果和干秋葵中,真菌毒素和其他微生物代谢物的分布(发生率和含量)见表 3。在检测到的 10 种真菌毒素中,灌木芒果中检测到 6 种(AFB_1 、 AFG_1 、 AFM_1 、交链孢酚甲醚、环丙酮酸和 OTA),腰果中检测到 2 种(AOH 和 BOU),干秋葵中检测到 7 种(除 AFG_1 、 AFM_1 和 AOH 外)。灌丛芒果样本中的 AFB_1 (最大值: 19.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$)和 AFM_1 (最大值: 1.41 $\mu\text{g}/\text{kg}$)的含量比先前报道的拉各斯(尼日利亚南部)市场 40 份灌木芒果样品中的 AFB_1 (713.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$)和 AFM_1 (25.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$)的最高水平分别低 37 倍和 13 倍^[9]。这些差异的原因主要是采收后的储存时间和条件。本研究中的样品在供应商处存放时间不超过 14 d,而 Ezekiel 等^[9]分析的样品存放时间为 15~90 d,其报道最大污染水平发现在储存时间越长的变色样品中。

在本研究中分析的干秋葵样品只有 3/12 (25%) 受到 AFB_1 污染,其含量达到 8.27 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。此前,在尼日尔州(尼日利亚北部)的 20 份秋葵中未检测到黄曲霉毒素^[40],而我们发现的黄曲霉毒素含量高于贝宁、马里和多哥(最大: 5.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$)^[41]和土耳其(最大: 1.7 $\mu\text{g}/\text{kg}$)^[42]市场上报道的含量。在这里,我们还报告了一份干燥秋葵样品(3.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$)的 OTA 污染情况,之前没有黄秋葵 OTA 污染的报告。秋葵是一种易腐的食物作物,通常是从农场新鲜收获来的;然而,为了延长其保质期,销售商将秋葵果实切成小块以晒干保质。在大多数情况下,秋葵是在裸露的土壤上干燥的,因此,秋葵暴露于土壤真菌和接触环境中产生的霉菌孢子^[13]。也许,这种粗陋的加工/贩卖方式是导致分析的秋葵样品中存在多达 7 种真菌毒素的原因,包括了黄曲霉毒素 B_1 。

在所有腰果样本中均未检出黄曲霉毒素,这与 Lamboni 等^[43]和 sombie 等^[44]的报道一致。他们分别在贝宁和塞拉利昂的 84 和 50 份腰果中未发现黄曲霉毒素。然而,我们的发现与 Milhome 等^[45]和 Adetunji 等^[22]的报道相反,他们记录了来

表 3 在尼日利亚纳萨拉瓦州市售的腰果、灌木芒果和干秋葵中的真菌毒素和其他微生物代谢物

Table 3 Mycotoxins and other microbial metabolites in cashew nut, bush mango and dried okra marketed in Nasarawa state, Nigeria

真菌毒素	腰果(n=12)					灌木芒果(n=12)					干秋葵(n=12)				
	数值 /% ^a	最小 值	最大 值	平均 值	标准 差 SD	数值 /% ^a	最小 值	最大 值	平均 值	标准 差 SD	数值 /% ^a	最小 值	最大 值	平均 值	标准 差 SD
黄曲霉毒素 B ₁	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	5(42)	1.93	19.2	8.16	7.83	3(25)	4.53	8.27	6.24	1.89
黄曲霉毒素 G ₁	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	3(25)	0.50	3.30	2.15	1.47	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
黄曲霉毒素 M ₁	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	1(8)	1.41	1.41	1.41	-	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
交链孢酚(AOH)	1(8)	0.60	0.60	0.60	-	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
交链孢酚甲醚	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	5(42)	0.05	0.32	0.15	0.11	1(8)	0.24	0.24	0.24	-
白僵菌素	1(8)	0.09	0.09	0.09	-	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	10(83)	0.17	15.5	3.19	5.21
环二氮酸	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	2(17)	10.0	10.0	10.0	0.00	2(17)	10.0	10.0	10.0	0.00
串珠镰刀菌素	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	4(33)	2.40	5.31	3.13	1.45
雪腐镰刀菌烯醇	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	2(17)	14.6	15.3	15.0	0.49
赭曲霉毒素 A	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	2(17)	13.2	51.4	32.3	27.1	1(8)	3.39	3.39	3.39	-
真菌代谢物															
3-硝基丙酸	8(67)	1.20	4.44	2.51	1.47	10(83)	1.20	32.3	6.79	9.42	12(100)	8.21	1570	249	508
田麦角碱	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	2(17)	68.3	99.0	83.6	21.7
抗生素	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	1(8)	1.80	1.80	1.80	-
转移酶抑制剂	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	1(8)	0.38	0.38	0.38	-	1(8)	0.38	0.38	0.38	-
壳二抱氯素	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	6(50)	0.39	0.95	0.66	0.22	9(75)	0.29	3.30	1.04	1.01
曲霉菌代谢产物	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	4(33)	1.20	2.93	2.00	0.93
曲霉素	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	2(17)	12.4	13.2	12.8	0.58
曲霉胺	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	6(50)	0.69	1.73	1.12	0.47	1(8)	4.76	4.76	4.76	-
曲霉酸	12(100)	4.67	49.2	16.6	13.9	12(100)	1 170	6 235	2 477	1 453	12(100)	7.27	98.3	39.5	32.6
天冬氨酸酯	12(100)	4.02	637	201	239	12(100)	348	832	477	151	12(100)	8.96	1 795	453	785
1,3,6,8-四羟基-2-(1-羟基己基)-萹醌	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	8(67)	0.29	10.7	2.66	3.49	1(8)	2.34	2.34	2.34	-
奥佛尼红素	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	12(100)	0.81	41.2	11.6	12.2	5(42)	0.30	1.31	0.80	0.40
2,5-二酮哌嗪	12(100)	75.8	91.8	85.0	6.01	6(50)	3.34	44.1	14.7	15.1	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
羟基大黄素	8(67)	0.96	79.7	32.3	38.5	12(100)	0.96	14.7	6.14	4.31	8(67)	2.47	17.9	6.76	5.12
弯孢霉素	1(8)	1.00	1.00	1.00	-	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
环二肽 Cyclo(L-Pro-L-Tyr)	12(100)	10.4	23.9	17.1	5.02	12(100)	1.20	54.4	7.21	14.9	6(50)	8.41	38.0	24.8	11.6
环二肽 Cyclo(L-Pro-L-Val)	12(100)	33.7	96.2	63.6	20.4	12(100)	4.97	266	39.9	72.5	12(100)	3.51	37.7	15.8	13.4
二羟基美林	4(33)	0.85	8.71	4.70	4.45	10(83)	0.85	29.9	10.6	10.8	4(33)	6.98	51.5	28.4	24.4
大黄素	6(50)	1.23	23.1	14.1	9.53	12(100)	1.30	32.7	14.6	10.6	12(100)	1.09	5.48	2.73	1.32
木贼碱	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	8(67)	0.36	7.34	2.30	2.42
迷人醇	12(100)	0.93	908	243	396	12(100)	0.52	13.8	4.29	4.19	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
环二肽	12(100)	9.60	20.5	13.7	3.83	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
整合素 A	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	7(58)	0.16	14.9	2.95	5.38	1(8)	0.92	0.92	0.92	-
整合素 B	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	5(42)	0.15	11.4	4.34	4.69	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
异视紫红质	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	8(67)	0.96	2.66	1.17	0.60	1(8)	0.96	0.96	0.96	-
曲酸	12(100)	114	477	199	122	12(100)	166	11 467	3 516	3 777	12(100)	186	7 380	1 412	2 393
大孢菌素	1(8)	0.53	0.53	0.53	-	1(8)	0.53	0.53	0.53	-	7(58)	0.89	2.08	1.52	0.45
畸形素 C	2(17)	4.08	11.6	7.82	5.29	5(42)	0.60	35.9	12.6	16.9	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
甲基磺草胺	2(17)	0.39	0.56	0.48	0.12	1(8)	0.68	0.68	0.68	-	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
植物毒素	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	1(8)	12.2	12.2	12.2	-
霉酚酸	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	2(17)	1.03	2.94	1.99	1.35	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD

续表 3

真菌毒素	腰果(n=12)					灌木芒果(n=12)					干秋葵(n=12)				
	数值 /% ^a	最小值	最大值	平均值	标准差 SD	数值 /% ^a	最小值	最大值	平均值	标准差 SD	数值 /% ^a	最小值	最大值	平均值	标准差 SD
N-苯甲酰苯胺	9(75)	1.39	88.7	28.2	33.4	12(100)	24.9	130	50.9	27.3	10(83)	2.53	174	54.0	78.6
新刺孢曲霉毒素 A	12(100)	16.1	15 536	4 003	6 544	11(92)	11.0	243	72.8	73.5	10(83)	5.00	104	37.8	41.4
尼杜鲁芬	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	4(33)	0.24	4.07	1.59	1.70	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
细胞松弛素 J	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	2(17)	317	436	376	83.7
去甲基丙酸	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	3(25)	1.20	4.31	2.73	1.56	1(8)	2.84	2.84	2.84	-
邻甲基酯	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	1(8)	0.48	0.48	0.48	-	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
草碱	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	4(33)	0.60	0.60	0.60	0.00	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
盘多毛孢菌素	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	1(8)	0.60	0.60	0.60	-
寻霉素 A	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	1(8)	3.00	3.00	3.00	-	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
喹乳酸菌素 A	10(83)	0.27	1.18	0.59	0.33	11(92)	0.78	4.09	1.78	1.05	3(25)	0.77	3.13	2.24	1.28
代谢物	11(92)	6.93	12.6	9.86	2.07	4(33)	2.76	7.66	4.57	2.16	2(17)	4.04	8.42	6.23	3.10
大环内酯化合物	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	1(8)	0.61	0.61	0.61	-
靛茜素	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	1(8)	0.23	0.23	0.23	-	5(42)	0.23	0.94	0.43	0.31
柄曲霉素	1(8)	0.45	0.45	0.45	-	3(25)	0.29	2.01	0.95	0.93	2(17)	7.28	7.68	7.48	0.29
聚多曲菌素	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	1(8)	15.9	15.9	15.9	-
色醇	12(100)	273	572	344	98.4	5(42)	51.5	127	88.1	37.1	12(100)	401	18 651	6 008	6 252
杂色曲霉素 A	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	11(92)	1.33	12.5	4.61	3.57	3(25)	0.90	1.07	1.00	0.09
杂色曲霉素 C	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	11(92)	1.62	10.7	4.26	3.05	9(75)	0.36	1.51	0.79	0.43
化合物 WIN-64821	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	1(8)	2.18	2.18	2.18	-
花椒毒素	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	4(33)	1.70	3.37	2.31	0.74
细菌代谢物															
氯霉素	4(33)	0.10	0.86	0.52	0.35	3(25)	0.30	1.13	0.66	0.42	1(8)	0.14	0.14	0.14	-
单活菌素	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	3(25)	0.09	0.20	0.13	0.06	9(75)	0.09	1.82	0.81	0.60
无活菌素	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0(0)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	5(42)	0.09	0.60	0.22	0.22

注：^a 阳性样品数值（百分比）。

Note: ^aNumber (percentage) of positive samples.

自巴西和尼日利亚的腰果中黄曲霉毒素分别高达 31.5 μg/kg 和 6.8 ng/g。鉴于多年来报告的腰果真菌代谢物在类型和模式上存在差异，为了更好地了解污染情况，需要对不同处理条件和来自不同大陆的食品原料在实验室间进行综合研究。在灌木芒果、腰果和秋葵干样品中还检测到了其他 51 种真菌代谢物，且含量不同。此外，有三种细菌的代谢物被检测量化，包括在食物作物中唯一检测到的氯霉素。

2.4 食品中检测到的真菌毒素对公众健康的影响

在对公众健康影响的食品真菌毒素中，AFB₁ 是最强的真菌毒素，被归类为 I 类人类致癌物^[46]。它的摄入与肝癌和免疫抑制有关^[2,47]。所有受污染的秋葵、两份灌木芒果和一份高粱样品中的黄曲霉毒素浓度都超过尼日利亚食品中黄曲霉毒素总量 4 μg/kg 的允许限值。尽管本研究调查的样本


量相对较少，但由于每日进食会导致长期摄入黄曲霉毒素，因此任何食物含有黄曲霉毒素都会对公众健康构成潜在风险。此外，样品中 AFB₁ 与其他可能致癌和具肾毒性真菌毒素（如 FB₁ 和 OTA）以及其他新出现的真菌毒素（如 BEU）同时出现，值得引起关注，因为该地区广泛食用这些食物作物^[2,46,48]。在至少 19% 的高粱样品中（尽管 FB₁ 浓度较低），AFB₁ 与 FB₁ 共存；而在灌木芒果和干秋葵样品中，AFB₁ 与 OTA 共存的比例分别超过 17% 和 8%。这两种真菌毒素已被报道可相互作用，加剧了对人类特别是儿童健康的不良影响^[49]；然而，现研究报告的浓度的作用尚不清楚。近来从体外联合毒理学研究中获得的知识表明，几种真菌毒素组合具有潜在的添加和/或协同效应^[50-51]，因此可能需要进一步研究探讨报告的各种毒素的作用效应。

3 讨论与结论

本研究表明, 在尼日利亚纳萨拉瓦州当地市场上出售的主要食物作物灌木芒果、腰果、千秋葵、芝麻和高粱很容易受到真菌毒素污染。由于高粱含有 14 种真菌毒素, 因此是最容易受影响的粮食作物。此外, 本研究发现了之前未报道的千秋葵中有赭曲霉毒素 A, 且与黄曲霉毒素 B₁ 存在共存情况。本文提供的数据为可行的干预措施提出提供了相关参考, 例如: 1) 在家庭层面上在高架平台上烘干这些食品, 以防止接触裸露的土壤; 2) 秋葵和灌木芒果晒干后粉碎, 适当包装在气密塑料容器或玻璃纸袋中, 并在低温 (<10 °C) 下储存, 以防止真菌毒素的产生。此外, 政府应通过相关机构在社区一级提供机械干燥机, 以便于干燥各种农产品, 从而最大限度地减少真菌生长。

参考文献:

- [1] FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). World food and agriculture-Statistical pocketbook 2018; FAO: Rome, Italy, 2018; retrieved from <http://www.wipo.int/amc/en/mediation/rules>.
- [2] INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (IARC). Mycotoxin control in low- and middle-income countries; International Agency for Research on Cancer: Lyon Cedex 08, France, 2015, 1-54.
- [3] EZEKIEL C, ORTEGA-BELTRAN A, BANDYOPADHYAY R. The need for integrated approaches to address food safety risk: the case of mycotoxins in Africa. In First FAO/WHO/AU International Food Safety Conference, Addis Ababa, Ethiopia, February 12-13, 2019; FAO, Rome, Italy, 2019.
- [4] MAKUN H A, GBODI T A, AKANYA O H, et al. Fungi and some mycotoxins found in mouldy sorghum in Niger state, Nigeria[J]. World Journal of Agricultural Science, 2009, 5: 5-17.
- [5] MAKUN H A, APEH D O, ADEYEMI H R Y, et al. Determination of aflatoxins in sesame, rice, millet and acha from Nigeria using HPLC[J]. Chemical Science Transactions, 2014, 3: 1516-1524.
- [6] ADETUNJI M, ATANDA O, EZEKIEL C N, et al. Fungal and bacterial metabolites of stored maize (*Zea mays*, L.) from five agro-ecological zones of Nigeria[J]. Mycotoxin Research, 2014, 30: 89-102.
- [7] ADETUNJI M C, ATANDA O O, EZEKIEL C N, et al. Distribution of mycotoxins and risk assessment of maize consumers in five agro-ecological zones of Nigeria[J]. European Food Research Technology, 2014, 239: 287-296.
- [8] ABDUS-SALAAM R, ATANDA O, FANELLI F, et al. Fungal isolates and metabolites in locally processed rice from five agro-ecological zones of Nigeria[J]. Food Additives and Contaminants: Part B, 2016, 9: 281-289.
- [9] EZEKIEL C N, SULYOK M, SOMORIN Y, et al. Mould and mycotoxin exposure assessment of melon and bush mango seeds, two common soup thickeners consumed in Nigeria[J]. International Journal of Food Microbiology, 2016, 237: 83-91.
- [10] OYEDELE O A, EZEKIEL C N, SULYOK M, et al. Mycotoxin risk assessment for consumers of groundnut in domestic markets in Nigeria[J]. International Journal of Food Microbiology, 2017, 251: 24-32.
- [11] AFOLABI C G, EZEKIEL C N, OGUNBIYI A E, et al. Fungi and mycotoxins in cowpea (*Vigna unguiculata*, L.) on Nigerian markets[J]. Food Additives and Contaminants: Part B, 2020, 13: 52-58.
- [12] KAMALA A, SHIRIMA C, JANI B, et al. Outbreak of an acute aflatoxicosis in Tanzania during 2016[J]. World Mycotoxin Journal, 2018, 11: 311-320.
- [13] ADOM K K, DZOGBEFIA V P, ELLIS W O. Combined effect of drying time and slice thickness on the solar drying of okra[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1997, 73: 315-320.
- [14] EKPE O, UMOH I, EKA O. Effect of a typical rural processing method on the proximate composition and amino acid profile of bush mango seeds[J]. African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development, 2007, 7: 1-12.
- [15] ARAPITSAS P. Identification and quantification of polyphenolic compounds from okra seeds and skins[J]. Food Chemistry, 2008, 110: 1041-1045.
- [16] APEH D, OCHAI D, ADEJUMO A, et al. Mycotoxicological concerns with sorghum, millet and sesame in northern Nigeria[J]. Journal of Analytical and Bioanalytical Techniques, 2016, 7: 1-7.
- [17] IBRAHIM H Y. Energy inputs and crop yield relationship for sesame production in North Central Nigeria[J]. Journal of Agricultural Technology, 2011, 7: 907-914.
- [18] EZEKIEL C N, SULYOK M, WARTH B, et al. Multi-microbial metabolites in fonio millet (acha) and sesame seeds in Plateau State, Nigeria[J]. European Food Research and Technology, 2012, 235: 285-293.
- [19] MAKINDE F, OYELEKE M. Effect of sesame seed addition on the chemical and sensory qualities of sorghum based kunun-zaki drink[J]. African Journal of Food Science and Technology, 2012, 3: 204-212.
- [20] EZEKIEL C N, AYENI K I, EZEKOLI O T, et al. High-throughput sequence analyses of bacterial communities and multi-mycotoxin profiling during processing of different formulations of kunu, a traditional fermented beverage[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 9: 3283. 1-17.
- [21] MAKUN H A, ADENIRAN A L, MAILAFIYA S C, et al. Natural occurrence of ochratoxin A in some marketed Nigerian foods[J]. Food Control, 2013, 31: 566-571.
- [22] ADETUNJI M C, ALIKA O P, AWA N P, et al. Microbiological quality and risk assessment for aflatoxins in groundnuts and roasted cashew nuts meant for human consumption[J]. Journal of Toxicology, 2018, 2018: 1-11.
- [23] OGARA I, ZARAFI B, ALABI O, et al. Mycotoxin patterns in ear rot infected maize: A comprehensive case study in Nigeria[J]. Food Control, 2017, 73: 1159-1168.
- [24] EZEKIEL C N, SULYOK M, OGARA I M, et al. Mycotoxins in

- uncooked and plate-ready household food from rural northern Nigeria[J]. Food and Chemical Toxicology, 2019, 128: 171-179.
- [25] EZEKIEL C N, WARTH B, OGAR A I M, et al. Mycotoxin exposure in rural residents in northern Nigeria: A pilot study using multi-urinary biomarkers[J]. Environment International, 2014, 66: 138-145.
- [26] SULYOK M, STADLER D, STEINER D, et al. Validation of an LC-MS/MS-based dilute-and-shoot approach for the quantification of >500 mycotoxins and other secondary metabolites in food crops: challenges and solutions[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2020, 412(11): 2607-2620.
- [27] ABIA W A, WARTH B, EZEKIEL C N, et al. Uncommon toxic microbial metabolite patterns in traditionally home-processed maize dish (fufu) consumed in rural Cameroon[J]. Food and Chemical Toxicology, 2017, 107: 10-19.
- [28] SULYOK M, KRŠKA R, SCHUHMACHER R. A liquid chromatography/tandem mass spectrometric multi-mycotoxin method for the quantification of 87 analytes and its application to semi-quantitative screening of moldy food samples[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2007, 389: 1505-1523.
- [29] EUROPEAN COMMISSION. Commission decision 2002/657 of 12 August 2002 implementing council directive 96/23/EC concerning the performance of analytical methods and the interpretation of results. Official Journal of the European Union, 2002, L221: 8-36.
- [30] DE GIROLAMO A, CIASCA B, STROKA J, et al. Performance evaluation of LC-MS/MS methods for multi-mycotoxin determination in maize and wheat by means of international proficiency testing[J]. Trends in Analytical Chemistry, 2017, 86: 222-234.
- [31] MAGNUSSON B, ÖRNEMARK U. The fitness for purpose of analytical methods[J]. Eurachem Guide, 2014.
- [32] CHALA A, TAYE W, AYALEW A, et al. Multimycotoxin analysis of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) and finger millet (*Eleusine coracana* L. Gaertn.) from Ethiopia[J]. Food Control, 2014, 45: 29-35.
- [33] LAHOUAR A, JEDIDI I, SANCHIS V, et al. Aflatoxin B₁, ochratoxin A and zearalenone in sorghum grains marketed in Tunisia[J]. Food Additives and Contaminants: Part B, 2018, 11: 103-110.
- [34] ONYEDUM S C, ADEFOLALU F S, MUHAMMAD H L. Occurrence of major mycotoxins and their dietary exposure in North-Central Nigeria staples[J]. Scientific African, 2020, 7: e00188.
- [35] ASADI M, BEHESHTI H R, FEIZY J. A survey of aflatoxins in sesame in Iran[J]. Mycotoxin Research, 2011, 27: 259-263.
- [36] SABRY B A, HATHOUT A S, NOOH A, et al. The prevalence of aflatoxin and *Aspergillus parasiticus* in Egyptian sesame seeds[J]. International Journal of ChemTech Research, 2016, 9: 308-319.
- [37] CHILAKA C A, DE BOEVRE M, ATANDA O O, et al. Occurrence of *Fusarium* mycotoxins in cereal crops and processed products (*Ogi*) from Nigeria[J]. Toxins, 2016, 8: 1-18.
- [38] FAPOHUNDA S O, ANJORIN T S, SULYOK M, et al. Profile of major and emerging mycotoxins in sesame and soybean grains in the Federal Capital Territory, Abuja, Nigeria[J]. European Journal of Biological Research, 2018, 8: 121-130.
- [39] FAPOHUNDA S, ANJORIN S, AKUECHE E, et al. Multi mycotoxin profile of gamma-radiated sesame seeds from Abuja markets, Nigeria using LC-MS/MS[J]. Nature and Science, 2012, 10: 127-134.
- [40] MAKUN H A, MAILAFIYA C S, SAIDI A A, et al. A preliminary survey of aflatoxin in fresh and dried vegetables in Minna, Nigeria[J]. African Journal of Food Science and Technology, 2012, 3: 268-272.
- [41] HELL K, GNONLONFIN B G J, KODJOGBE G, et al. Mycoflora and occurrence of aflatoxin in dried vegetables in Benin, Mali and Togo, West Africa[J]. International Journal of Food Microbiology, 2009, 135: 99-104.
- [42] HACIBEKIROĞLU I, KOLAK U. Aflatoxins in various food from Istanbul, Turkey[J]. Food Additives and Contaminants: Part B, 2013, 6: 260-264.
- [43] LAMBONI Y, FRISVAD J C, HELL K, et al. Occurrence of *Aspergillus* section *Flavi* and section *Nigri* and aflatoxins in raw cashew kernels (*Anacardium occidentale* L.) from Benin[J]. LWT- Food Science and Technology, 2016, 70: 71-77.
- [44] SOMBIE J I N, EZEKIEL, C N, SULYOK M, et al. Survey of roasted street-vended nuts in Sierra Leone for toxic metabolites of fungal origin[J]. Food Additives and Contaminants: Part A, 2018, 35: 1573-1580.
- [45] MILHOME M A L, LIMA C G, DE LIMA L K, et al. Occurrence of aflatoxins in cashew nuts produced in northeastern Brazil[J]. Food Control, 2014, 42: 34-37.
- [46] INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (IARC). Some traditional herbal medicines, some mycotoxins, naphthalene, and styrene[J]. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2002, 82: 171-300.
- [47] GONG Y Y, WILSON S, MWATHA J K, et al. Aflatoxin exposure may contribute to chronic hepatomegaly in Kenyan school children[J]. Environmental Health Perspectives, 2012, 120: 893-896.
- [48] PFOHL-LESZKOWICZ A, MANDERVILLE R A. Ochratoxin A: An overview on toxicity and carcinogenicity in animals and humans[J]. Molecular Nutrition and Food Research, 2007, 51: 61-99.
- [49] SHIRIMA C P, KIMANYA M E, ROUTLEDGE M N, et al. A prospective study of growth and biomarkers of exposure to aflatoxin and fumonisin during early childhood in Tanzania[J]. Environmental Health Perspectives, 2015, 123: 173-178.
- [50] ALASSANE-KPEMBI I, SCHATZMAYR G, TARANU I, et al. Mycotoxins co-contamination: Methodological aspects and biological relevance of combined toxicity studies[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57: 3489-3507.
- [51] VEJDOVSZKY K, HAHN K, BRAUN D, et al. Synergistic estrogenic effects of *Fusarium* and *Alternaria* mycotoxins *in vitro*[J]. Archives of Toxicology, 2017, 91: 1447-1460. 

英译中: 任菲(国家粮食和物资储备局科学研究院粮油加工研究所)
译文审核: 伍松陵、谭洪卓