DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251103004
引用格式: 黄李礼, 罗阳旭, 刘览, 等. 2022—2024年广州市土榨花生油不同消费地区居民黄曲霉毒素B_1暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(6): 87–96.
HUANG LL, LUO YX, LIU L, *et al*. Risk assessment of aflatoxin B_1 exposure among residents in different consumption areas of home-made *Arachis hypogaea* oil in Guangzhou City from 2022—2024 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(6): 87–96. (in Chinese with English abstract).

2022—2024 年广州市土榨花生油不同消费地区居民黄曲霉毒素 B_1 暴露风险评估

黄李礼[1], 罗阳旭[1], 刘　览[1], 张玉华[1], 曾锦衡[1], 宋韶芳[1], 雷江波[1], 欧怡君[2], 邬思璇[1], 赖志桁[1], 白志军[1], 彭荣飞[1], 彭子茗[1], 李　燕[1], 张维蔚[1], 王燕燕[1*]

[1. 广州市疾病预防控制中心(广州市卫生监督所), 广州　510440;
2. 北海市疾病预防控制中心(北海市卫生监督所), 北海　536000]

摘　要: 目的　评估广州市土榨花生油高消费地区与正常消费地区居民的膳食黄曲霉毒素 B_1 (aflatoxins B_1, AFB_1)暴露及健康风险。**方法**　通过膳食调查及蒙特卡洛模拟, 估算居民经植物油、米、面、玉米及坚果(样品采集于 2019—2024 年期间)摄入 AFB_1 的每日暴露量, 并以暴露边际(margin of exposure, MOE)法进行风险表征。同时使用酶联免疫吸附法检测 2022—2024 年期间采集的居民血清中黄曲霉毒素 B_1-白蛋白加合物(AFB_1 albumin adducts, AFB_1-A1b)水平以验证结果。**结果**　高消费地区居民 AFB_1 暴露水平显著高于正常消费地区, 基于 POD 值取 78 ng/kg bw/day 的保守估计下, MOE 值平均数分别为 27.21 与 34.16 (P<0.001)。血清生物标志物检测结果一致, 高消费地区居民 AFB_1-A1b 水平[(4.59±3.86) ng/mL]显著高于正常消费地区[(3.97±4.74) ng/mL](P<0.001)。**结论**　本研究结果显示, 广州市土榨花生油高消费地区居民的 AFB_1 暴露风险相对高于正常消费地区, 且土榨花生油是主要贡献因素。研究提示应强化土榨花生油生产流通环节监管, 并在高风险地区推广精炼油替代, 以降低居民暴露及相关健康风险。本研究以广州市内土榨花生油不同消费地区为对象, 量化了消费水平对 AFB_1 暴露风险的影响, 为实施风险管控提供了直接依据。

关键词: 土榨花生油; 黄曲霉毒素; 风险评估; 食品污染

Risk assessment of aflatoxin B_1 exposure among residents in different consumption areas of home-made *Arachis hypogaea* oil in Guangzhou City from 2022—2024

HUANG Li-Li[1], LUO Yang-Xu[1], LIU Lan[1], ZHANG Yu-Hua[1], ZENG Jin-Heng[1], SONG Shao-Fang[1], LEI Jiang-Bo[1], OU Yi-Jun[2], WU Si-Xuan[1], LAI Zhi-Heng[1], BAI Zhi-Jun[1], PENG Rong-Fei[1], PENG Zi-Ming[1], LI Yan[1], ZHANG Wei-Wei[1], WANG Yan-Yan[1*]

收稿日期: 2025-11-03
基金项目: 广州市卫生健康科技一般引导项目(20251A011061); 广州市医学重点学科建设项目(2025-2027-12)
第一作者: 黄李礼(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为食品安全风险监测。E-mail: haunglili177@163.com
***通信作者:** 王燕燕(1990—), 女, 硕士, 副主任医师, 主要研究方向为食品安全风险监测与评估。E-mail: wangyy13213845@163.com

[1. *Guangzhou Center for Disease Control and Prevention* (*Guangzhou Health Supervision Institute*), *Guangzhou* 510440, *China*; 2. *Beihai Center for Disease Control and Prevention* (*Beihai Health Supervision Institute*), *Beihai* 536000, *China*]

ABSTRACT: Objective To assess the dietary exposure to aflatoxin B_1 (AFB_1) and health risks among residents in high and normal consumption areas of home-made *Arachis hypogaea* oil in Guangzhou City. **Methods** Dietary surveys and Monte Carlo simulation were conducted to estimate the daily exposure to AFB_1 from edible oils, rice, flour, corn and nuts (samples were collected from 2019 to 2024). The margin of exposure (MOE) method was used for risk characterization. Additionally, enzyme-linked immunosorbent assay was employed to detect the levels of AFB_1 albumin adducts (AFB_1-A1b) in the serum of residents collected from 2022 to 2024 to verify the results. **Results** The AFB_1 exposure level in residents of the consumption areas was significantly higher than that in residents of the normal consumption areas. Based on a conservative estimate using a POD value of 78 ng/kg bw/day, the average MOE values were 27.21 and 34.16, respectively (P<0.001). The results of serum biomarker detection were consistent, with the AFB_1-A1b level in the high consumption area [(4.59±3.86) ng/mL] significantly higher than that in the normal consumption area [(3.97±4.74) ng/mL] (P<0.001). **Conclusion** This study shows that the AFB_1 exposure risk of residents in the high consumption area of home-made *Arachis hypogaea* oil in Guangzhou City is relatively higher than that in the normal consumption area, and home-made *Arachis hypogaea* oil is the main contributing factor. The study suggests that supervision over the production and circulation of home-made *Arachis hypogaea* oil shall be strengthened, and refined oil shall be promoted as a substitute in high-risk areas to reduce residents' exposure and related health risks. This study focuses on different consumption areas of traditionally pressed *Arachis hypogaea* oil within Guangzhou, quantifies the impact of consumption levels on AFB_1 exposure risk, and provides direct evidence for the implementation of risk control measures.

KEY WORDS: home-made *Arachis hypogaea* oil; aflatoxins; risk assessment; food contamination

0 引 言

黄曲霉毒素(aflatoxins, AFs)最早被发现于 1960 年, 主要是由黄曲霉、寄生曲霉和集峰曲霉产生的高毒性次生代谢产物[1–2]。目前已分离鉴定出黄曲霉毒素 B_1 (aflatoxins B_1, AFB_1)、黄曲霉毒素 B_2 (aflatoxins B_2, AFB_2)、黄曲霉毒素 B_{2a} (aflatoxins B_{2a}, AFB_{2a})、黄曲霉毒素 G_1 (aflatoxins G_1, AFG_1)等 20 种结构类似的化合物, 其中 AFB_1 毒性最强[3–4]。AFs 能在多种物种中产生肝毒性、遗传毒性和免疫毒性作用[5–8], 世界卫生组织的癌症研究机构已将黄曲霉毒素归类为 1 类致癌物[9]。

AFs 主要污染粮油及其制品, 最佳生长条件为 33~38 ℃, 其主要在热带和亚热带地区繁殖[10], 中国多个地区的花生中均检测出 AFB_1[11–12]。由于居民经常食用易受 AFs 污染的食物, 建立 AFs 的监管体系来限制人群的 AFs 暴露非常重要[13]。广东地处中国南方, 具有终年气候温热、春夏两季跨度时间长、湿度大的气候特征, 这一湿热特征为 AFs 在粮油作物中滋生提供了条件[14]。在当地, 土榨花生油是一种常见的传统食用油, 其生产过程主要依赖手工或简易机械完成。因为缺乏精炼环节, 其更易受到真菌毒素污染[15]。但由于土榨花生油保留了较多花生原有的风味, 故而在广东地区深受消费者青睐[16]。

如果加工小作坊对原料质量把控不严格或原油未经过精炼处理, 可能会导致最终产品中 AFs 以及其他污染物的严重污染[17]。梧州、海南、广州等地区在当地售卖的土榨花生油中均检出了 AFB_1[18–20]。此外, 研究表明广州市郊区居民因普遍食用土榨花生油而存在黄曲霉毒素暴露[13]。

目前对 AFs 膳食暴露风险评估主要是通过暴露边际(margin of exposure, MOE)法进行[21–25]。MOE 法通过比较产生可观测有害效应的剂量(point of departure, POD)与人群实际暴露水平的比值, 评估风险大小。欧洲食品安全局建议将 10000 作为可能存在潜在的公共卫生风险的阈值[26]。在监测人体血清中 AFs 的暴露水平时, 通常检测黄曲霉毒素 B_1-白蛋白加合物(AFB_1 albumin adducts, AFB_1-Alb), 其可反映过去 2~3 个月的黄曲霉毒素暴露水平[27]。

现有 AFs 膳食暴露评估多限于单一地区、难以量化关键暴露因素影响。本研究在既往广州市居民膳食消费和食品污染数据的基础上, 通过选择土榨花生油高消费地区和正常消费地区, 开展个体水平的问卷调查, 整合数据进行膳食暴露评估, 并引入血清 AFB_1-Alb 检测对膳食暴露评估的结果予以验证。本研究旨在为识别特定消费行为引致的健康风险、继而实施有针对性的风险管控和健康干预提供直接证据。

1 材料与方法

1.1 调查对象

基于广州市居民膳食调查数据, 结合长期食用土榨

花生油的居民比例及地区人均消费量数据, 采用典型抽样的方法选取 2 个在常住人口年龄结构(均以老龄人口占比较高)和膳食模式(均属典型岭南膳食模式)上相近的地区居民作为研究对象。最终选取广州市 XL 镇作为土榨花生油高消费地区的代表, DS 街道作为正常消费水平的代表区域。

采用二阶段概率抽样选取研究对象。第一阶段采用与规模成比例的概率抽样法, 从每个地区独立抽取 3 个村/居委会, 抽样概率与各居委会的户籍人口数成正比。第二阶段在每个被抽中的居委会中, 采用简单随机抽样抽取 70 户(约 350 人)作为最终样本。

在 2022—2024 年对所有研究对象进行问卷调查和体格检查, 收集个体特征、饮食习惯等信息, 删去缺失问卷后, 有效问卷共 2095 份(XL 地区 994 份, DS 地区 1101 份)。为保证研究对象具有代表性, 所选取的研究对象均为在当地长期居住的成年人(后文将使用“居民”统称本研究中的“成年居民”)。问卷调查显示, XL 地区居民有 91.65% (911/994)有一年以上食用土榨花生油的经历, 且在调查前一年内食用过土榨花生油, 而 DS 地区这一数据为 43.51% (479/1101)。参与调查的 XL 地区居民体重水平为 (59.22±10.81) kg, DS 地区居民体重水平为 (62.64±12.66) kg。

采集所有的研究对象晨间空腹静脉血液样本以检测 AFB_1-Alb 含量。所有研究对象均已签署知情同意书, 同意进行问卷调查、生物样本采集以及随后使用所获得的数据。

1.2　样品采集及实验室检测

1.2.1　仪器与试剂

安捷伦 1260 Infinity II 高效液相色谱系统、Zorbax Eclipse XDB-C_{18} 色谱柱(4.6 mm × 150 mm, 5 μm)(美国 Agilent 公司); PTX-JA510SL 分析天平[精度 0.001 g, 华志(福建)电子科技有限公司]; TGL-10B 台式高速离心机(上海安亭科学仪器厂); MultiVortex 多样品涡旋混合器(广州得泰仪器科技有限公司); DHS-220 双刀头均质器(北京莱伯泰科仪器股份有限公司); iMark 吸收光酶标仪(美国 Bio-Rad Laboratories 公司); Whatman GF/A 玻璃纤维滤纸(英国 Cytiva 公司); AFB_1-Alb 酶联免疫吸附测定(enzyme-linked immunosorbent assay, ELISA)试剂盒(江苏晶美生物有限公司)。

甲醇(色谱纯, 广州华培实验设备有限公司); AFB_1(质量浓度 2 μg/mL)、AFB_2(质量浓度 0.5 μg/mL)、AFG_1(质量浓度 2 μg/mL)黄曲霉毒素 B_1、B_2、G_1 混合标准品(生物纯, 奥地利 Romer Labs 公司)。

1.2.2　食品中 AFB_1 含量

食品中 AFB_1 含量数据来源于广州市疾病预防控制中心(广州市卫生监督所)对广州市区和郊区食品中 AFB_1 的常规检测, 其中米及米制品、小麦及小麦制品、玉米及玉米制品和坚果类食品的采集时间为 2019—2021 年, 土榨花生油的采集时间为 2022—2024 年。

食品中 AFB_1 的检测方案采用既往研究中已验证的方法[13]。样品覆盖广州市全部 11 个行政区, 采样点包括超市、农贸市场、零售店及家庭作坊, 采集的样品包括米及米制品(141 份)、小麦及小麦制品(155 份)、玉米及玉米制品(177 份)、坚果(438 份)、植物油(共 704 份, 含商业植物油 120 份和土榨花生油 584 份)。检测过程如下: 采用高效液相色谱法对食品中的 AFB_1 进行检测, 固体样品取样不低于 1 kg, 粉碎过筛至小于 2 mm, 混匀缩分至 100 g 后密封保存待测; 液体样品取样不低于 1 L(包装样品取不低于 3 个同批次包装), 均质混合后取任意 100 g (mL)测试。分析时, 精密称取固体样品或植物油 5 g (0.01 g)于 50 mL 离心管, 加入 20 mL 甲醇-水(70:30, *V*:*V*)溶液, 涡旋混匀, 超声 20 min(或均质 3 min), 6000 r/min 离心 10 min(均质液则过玻璃纤维滤纸), 取上清液备用。取 10 mL 此上清液经 Whatman GF/A 玻璃纤维滤纸过滤, 收集滤液; 取 5 mL 滤液加 20 mL 纯水稀释, 测试前过滤。最终使用配备柱后光化学反应器及荧光检测器(激发 360 nm, 发射 450 nm)的高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)系统测定 AFB_1 含量。检测方法检出限(limit of detection, LOD)为 0.1 μg/kg, 最终检测的各食品中 AFB_1 含量如表 1 所示(表中所列含量范围仅包含检测值高于方法 LOD 的样品)。

表 1　2019—2024 年广州市售食品中 AFB_1 水平

Table 1　AFB_1 levels in food sold in Guangzhou from 2019 to 2024

食品种类	样品数/份	<LOD 样品数	AFB_1 水平/(μg/kg)	
			平均值±标准偏差	范围
米及米制品	141	131	0.103±0.387	0.25~4.56
小麦及小麦制品	155	152	0.062±0.105	0.26~1.23
玉米及玉米制品	177	95	0.563±0.990	0.16~5.31
坚果	438	321	0.377±1.170	0.29~12.20
商品植物油	120	75	0.608±1.062	0.35~6.11
土榨花生油	584	268	4.153±10.933	0.22~87.40

1.2.3 人体血清中 AFB_1-Alb 水平检测

采集血样后 2 h 内进行离心, 分装血浆样品后放置于–80 ℃的冰箱中保存, 等待检测。检测步骤按照制造商提供的操作指南进行[28]。具体为微孔板设置空白对照(B_0 孔, 50 μL 0.00 ng/mL 标准品)、6 种质量浓度梯度标准曲线双孔(0.10、0.30、0.90、2.70、8.10 ng/mL)及样品孔(50 μL 8 倍稀释血清: 6.25 μL 血清+43.75 μL 稀释液); 所有孔加入 50 μL AFB_1-Alb 酶标抗体, 37.0 ℃振荡温育 30 min 后倾去液体, 洗涤液洗板 5 次并拍干; 依次加入 50 μL 显色液 A 与 B, 37.0 ℃避光显色 10 min 后加 50 μL 终止液; 立即用酶标仪于 450 nm 检测吸光度, 通过 4 参数逻辑回归拟合标准曲线(r^2≥0.99), 样品浓度经稀释倍数校正。

ELISA 检测实验过程中样品和标准溶液的吸光度值经归一化处理(相对于空白对照, 计算百分吸光度), 并利用 ELISA Calc 软件(v 0.1)建立标准曲线(r^2=0.99984)。样品百分吸光度代入曲线后换算为浓度, 再结合稀释倍数(8 倍)得到实际浓度。方法学评价结果显示, 组内变异系数为 3.26%~13.52%, 组间变异系数为 5.19%, 表明检测具有良好精密度与可靠性。

1.3 食品消费量

食品消费量数据来源于 2011 年广州市城乡居民膳食消费量调查, 该调查采用 3 d 24 h 膳食回顾法, 调查了广州居民所有食物的消费量数据[29]。

本研究选择了植物油、米及米制品、小麦及小麦制品、玉米及玉米制品、坚果 5 类食品来估计居民 AFB_1 的膳食摄入量。这些食物在既往的研究中被发现是广州市居民 AFB_1 暴露的主要来源, 因此本研究选用这 5 类食品代表 AFB_1 总膳食暴露[13]。根据生产条件将植物油划分为土榨花生油和商品植物油, 商品植物油被定义为由正规制造商生产、并经中国食品药品监督管理局抽样检验合格的植物油。散装植物油则通常产自郊区的家庭作坊, 不受此类监管约束。在本研究中, 散装植物油指土榨花生油。

1.4 AFB_1 每日摄入量估计

AFB_1 的总摄入量使用公式(1)计算估计每日摄入量(estimated daily intake, EDI)[30]。

$$\mathrm{EDI}=\sum_{i=1}^{n}=\frac{D_i\ M_i}{W} \tag{1}$$

式中: EDI 为居民每日膳食 AFB_1 摄入量的估计值, ng/kg bw day; D_i 为居民各类食物的每日摄入量均值, g/day; M_i 为各类食物中 AFB_1 的平均水平, μg/kg。W 为每个受访者的体重, kg。食品中低于 LOD 的检测值, 采用 1/2 LOD 进行替换[31]。为量化广州市高消费地区与正常消费地区人群通过摄入植物油的 AFB_1 暴露差异, 本研究引入二分类变量“土榨花生油食用状态”表征个体消费行为, 该变量的概率分布基于两地区问卷调查数据设定, XL 镇居民食用土榨花生油的概率为 91.65%, DS 街道居民食用土榨花生油的概率为 43.51%。使用 CRYSTAL BALL 软件(11.1.2.4.400)估计 AFB_1 的平均每日暴露量。

1.5 风险特征

MOE 的计算见公式(2):

$$\mathrm{MOEs}=\frac{\mathrm{PODs}}{\mathrm{EDI}} \tag{2}$$

PODs 是风险评估中使用的一个概念, 用于计算可能对健康没有明显风险的参考暴露剂量。欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)建议对于有致癌风险的污染物, 采用 10%额外风险对应的基准剂量置信下限(benchmark dose lower confidence limit, $BMDL_{10}$)和 1%额外风险对应的基准剂量置信下限(benchmark dose lower confidence limit, $BMDL_1$)作为计算 MOE 的 PODs, MOE 值低于 10000 表明存在潜在的健康风险[26,32]。EFSA 引用的 AFB_1 的 $BMDL_{10}$ 为 340 ng/kg bw/day, 代表导致对照组 10%肝癌发病率所需剂量的 95%置信区间的下限。基于同行研究[24,33]及 CARLBORG[34]的剂量反应关系数据, AFB_1 的 $BMDL_1$ 估计值为 78 ng/kg bw/day。该值代表导致对照组出现 1%肝癌发病率所需剂量的 95%置信区间的下限。

1.6 质量控制

本研究中食品 AFB_1 含量检测的 LOD 为 0.1 μg/kg, 根据信噪比等于 3:1 确定; 定量限(limit of quantitation, LOQ)确定为信噪比大于 10:1 的点, 即 0.30 μg/kg。通过标记 AFB_1 确定每种食物的回收率, 回收率范围在 95%至 105%之间。

AFB_1-Alb ELISA 试剂盒的 LOD 为 0.05 ng/mL, LOQ 为 0.1 ng/mL, 线性范围为 0.1~8.1 ng/mL, 实验中绘制的标准曲线相关系数为 0.99984。

1.7 数据处理

本研究采用 CRYSTAL BALL 软件(11.1.2.4.400)基于 10000 次迭代的蒙特卡洛模拟(Monte Carlo simulation, MCS)计算居民 AFB_1 饮食暴露情况及 MOE 值的计算, 结果显示为均值(范围从第 10 到第 90 百分位数)。使用 ELISA Calc 软件(v 0.1)建立 AFB_1-Alb ELISA 试剂盒检测实验的标准曲线, 采用 IBM SPSS Statistic 27 进行统计量描述、曼-惠特尼秩和检验(Mann-Whitney U test, MWU)和敏感性分析, 使用 Origin 2024 进行图像绘制。

2 结果与分析

2.1 两地区居民 AFB_1 膳食暴露量

表 2 展示了两地居民植物油、米及米制品、小麦及小麦制品、玉米及玉米制品和坚果等 5 类食品的每日消费量及膳食暴露量 EDI。结果显示, 两地区居民通过植物油的 AFB_1 膳食暴露量最高, 而膳食暴露量最低的是坚果。

表 2　两地区居民通过食用 5 类食品的 AFB_1 膳食暴露量

Table 2　Dietary exposure to AFB_1 from consumption of 5 types of foods among residents in 2 regions

食品类别	平均值±标准偏差/(g/d)	EDI 平均值(95% CI)*/(ng/kg bw/day)		*P*
		XL	DS	
米及米制品	146.5 ± 90.5	1.25 (0.26~3.85)	1.19 (0.24~3.72)	-
小麦及小麦制品	52.3 ± 38.7	0.43 (0.07~1.54)	0.41 (0.07~1.44)	-
玉米及玉米制品	9.2 ± 8.7	0.42 (0.05~1.65)	0.40 (0.05~1.58)	-
坚果	2.3 ± 2.2	0.04 (0.00~0.14)	0.03 (0.00~0.13)	-
植物油	26.4 ± 17.3	4.30 (0.04~25.51)	2.34 (0.04~17.84)	<0.001
总食品		6.43 (0.95~27.89)	4.37 (0.88~20.18)	<0.001

注: *为基于本研究中研究对象的体格检查数据，XL 地区居民体重为(59.22±10.81) kg，DS 地区居民体重为(62.64±12.66) kg；95% CI 为 95%不确定性区间(confidence interval)；*P* 为采用 Wilcoxon 符号秩检验比较两地区居民血清 AFB_1 加合物水平，为双侧检验结果；-为未发现两地区间有统计学差异。

本研究中，从单种类食品的 AFB_1 的 EDI 的平均值来看，两地区人口通过米及米制品、小麦及小麦制品、玉米及玉米制品和坚果类食品的 AFB_1 的 EDI 平均值在 0.03~1.25 ng/kg bw/day 之间，而通过植物油的 AFB_1 的 EDI 在 2.34~4.30 ng/kg bw/day。

根据对常见膳食食品中 AFB_1 的系统评价结果，两地区居民膳食 AFB_1 的 EDI 的结果低于印度[35]、越南[36]、多哥[37]等中低收入国家，同时也低于同为中国地区的四川[38]。而日本[39]和韩国[40]等高收入国家居民的 AFB_1 的 EDI 远低于本研究结果。

从总膳食 AFB_1 的 EDI 的平均值来看，DS 地区为 4.37 ng/kg bw/day，XL 地区为 6.43 ng/kg bw/day，MWU 结果显示，XL 地区居民总膳食 AFB_1 的 EDI 显著高于 DS 地区(P<0.001)。

图 1 显示了两地区居民总膳食 AFB_1 的 EDI 的分布情况。对比两地区居民总膳食的 AFB_1 的 EDI 分布，XL 地区居民暴露水平的离散度较高，其四分位距(interquartile range, IQR)的跨度为 1.70~4.44 ng/kg bw/day，与之相比 DS 地区居民的暴露水平更为集中，其 IQR 的跨度为 2.01~7.71 ng/kg bw/day。两地区居民总膳食的 AFB_1 的 EDI 均呈现长尾效应显著的右偏分布。

图 2 显示了 5 类食品对两地区居民总膳食 AFB_1 的 EDI 的贡献占比。结果表明，植物油是两地区居民 AFB_1 暴露的主要膳食来源，其中在 XL 地区贡献率高达 66.8%，在 DS 地区也达到 53.5%。其次为米及米制品，在 XL 地区贡献为 19.4%，在 DS 地区为 27.2%。此外，其他食品的贡献率均低于 10%，其中坚果类食品在两地区的贡献率均低于 1%。

AFB_1 的 EDI 主要取决于不同地区人群饮食习惯和食品受污染水平[41]，在黎巴嫩[42]、沙特阿拉伯[43]、巴西[44]等国家的研究中大米是对 AFB_1 的 EDI 贡献最高的食品，这与本研究中米及米制品在两地均占有一定比重的结果相吻合。由于这些国家与我国部分地区一样，大米是居民膳食中的主要主食，其较高的摄入量可能是导致这一现象的重要原因。

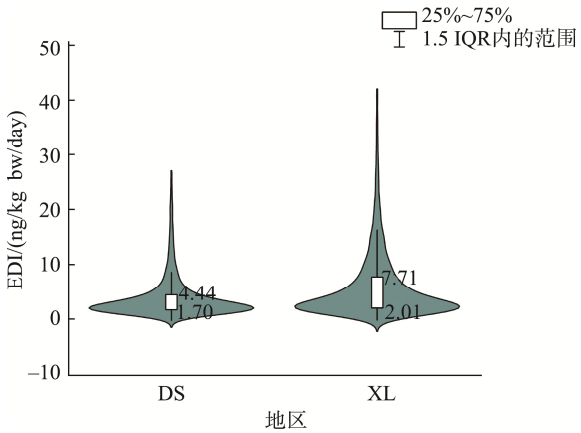


图 1　两地区居民总膳食 AFB_1 的 EDI 的分组小提琴图

Fig.1　EDI grouped violin plots of the total dietary AFB_1 for residents in 2 regions

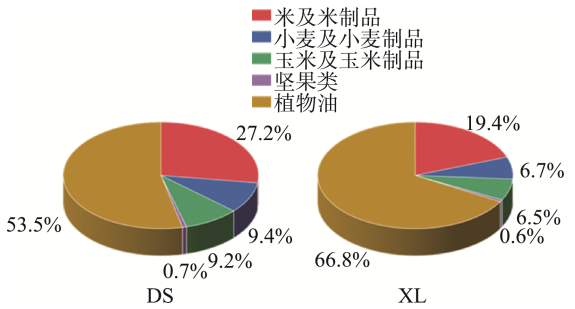


图 2　5 类食品对总膳食 AFB_1 暴露的贡献

Fig.2　Contribution of 5 food categories to total dietary AFB_1 exposure

本研究中 XL 地区和 DS 地区居民 AFB_1 的 EDI 平均数分别为 6.43 ng/kg bw/day 与 4.37 ng/kg bw/day, 居民通过植物油暴露于 AFB_1 的 EDI 水平在不同地区差异明显。

2.2 两地区居民 AFB_1 暴露的 MOE 值

本研究基于 MOE 法评估了广州土榨花生油不同消费地区居民膳食 AFB_1 暴露的潜在健康风险。表 3 显示了两地区居民 AFB_1 暴露的 MOE 值。基于两种不同的基准剂量下限($BMDL_{10}$=340 ng/kg bw/day; $BMDL_1$=78 ng/kg bw/day)评估结果显示, DS 地区、XL 地区的 MOE 值均处于较低水平。这些结果表明所有研究人群均面临较高的 AFB_1 暴露风险。本研究中所有 MOE 值均远低于 10000 的阈值, 其中基于更保守的 $BMDL_1$ 模型计算的值尤其低, 表明存在较高的公共卫生风险。

已有研究证实, AFB_1 不仅与肝细胞癌的发生存在明确的剂量-反应关系, 还可明显增加乙型肝炎病毒感染者的肝细胞性肝癌发生风险, 表现出明显的协同致癌效应[45]。此外, AFB_1 还具有遗传毒性、致突变性、免疫抑制作用及发育毒性等多种有害效应[46]。因此, 本研究中发现的低 MOE 值不仅提示存在理论上的健康风险, 更反映出实际、严重的潜在疾病负担, 尤其在缺乏有效干预措施的情况下, 人群面临较高的 AFB_1 相关健康威胁。

表 3 两地区居民基于 MOE 方法的 AFB_1 暴露风险表征(ng/kg bw/day)

Table 3 Risk characterization of AFB_1 exposure for residents in 2 regions based on the MOE method (ng/kg bw/day)

研究地区	POD		MOE(平均数 95% CI)	
	$BMDL_{10}$	$BMDL_1$	$BMDL_{10}$	$BMDL_1$
DS	340	78	148.91 (16.85~386.78)	34.16 (3.86~88.73)
XL	340	78	118.62 (12.17~357.19)	27.21 (2.79~81.94)

基于 POD 为 170 ng/kg bw/day 和 400 ng/kg bw/day 对本研究中两地区 MOE 进行换算, 以便与其他国家地区进行对比(表 4)。全球范围的多个国家和地区均存在一定的 AFB_1 暴露风险, 同时存在一定的地区差异, 这种差异可能

表 4 不同国家和地区 AFB_1 暴露的 MOE 对比

Table 4 Comparison of MOE for AFB_1 exposure in different countries and regions

研究地区	食品种类	POD/(ng/kg bw/day)	MOE	参考文献
印度	面粉、大米和动物奶	1	0.012	[35]
越南	稻米	400	0.746(成人)	[36]
多哥	玉米面团	170	2.750~0.370 (女性) 0.380~3.750 (男性)	[37]
四川	谷物、红辣椒和辣椒粉	400	44.000 (谷物及谷物制品) 1520.000 (红辣椒和辣椒粉)	[38]
日本	花生、花生制品、可可、巧克力、开心果、白胡椒、红椒、杏仁、乔布泪、荞麦和玉米粒	170	56666.667 (LB) 42500.000 (UB)	[39]
韩国	大豆酱、酱油(当地 AFB_1 饮食摄入主要来源)	170	292.096	[40]
黎巴嫩	谷物	400	466.5	[42]
沙特阿拉伯	大米、杏仁、腰果、榛子、花生、花生酱和香料	400	1902.400 (LB) 722.100 (UB)	[43]
巴西	大米、玉米、花生、花生制品和坚果	400	47.000 (2~6 岁) 76.000(7~69 岁)	[44]
		170	25.000 (全体人口) 6.200 (高消费人群)	
黎巴嫩	香料、香草和坚果	400	316.300	[47]
欧盟	总膳食	400	5000.000~29.000	[48]
荷兰	总膳食	170	102.000 (2~6 岁) 165.000 (7~69 岁)	[49]
山东	自制花生油	170	8.530 (18~44 岁) 9.300 (45~59 岁) 9.560 (>60 岁)	[50]
埃及	葵花油、玉米油和豆油	170	560.000	[51]
广州	大米和大米制品、小麦和小麦制品、玉米和玉米制品、坚果和油	170	26.439 (XL) 38.902 (DS)	本研究

注: LB 为 AFB_1 污染水平取下限情况下计算的 MOE 值; UB 为 AFB_1 污染水平取上限情况下计算的 MOE 值。

与经济水平相关联。欧盟、荷兰和沙特阿拉伯等高收入国家的MOE值较高, 相比之下, 中低收入国家及地区可能由于主食或自榨油消费集中且监管挑战更大, AFB_1 的暴露风险更高。

现有的黄曲霉毒素膳食暴露风险评估研究多局限于对单一地区进行整体风险评估, 虽然可以揭示污染水平和暴露风险, 但难以量化主要暴露因素变化后对暴露风险的影响。本研究在土榨花生油消费背景下, 于广州市范围内同步开展高消费地区和普通消费地区的膳食暴露风险评估, 这种对比研究更为清晰地揭示了土榨花生油消费水平差异对 AFB_1 暴露风险的影响。

XL 地区居民的 MOE 值明显低于 DS 地区, 提示其面临更高的 AFB_1 膳食暴露风险。造成这一差异的关键因素在于两地植物油的消费模式存在明显差异。具体而言, 广州地区土榨花生油的 AFB_1 污染水平远高于商品植物油, XL 地区居民以土榨花生油为主要食用油, DS 地区则以商品植物油为主。因此, XL 地区居民通过植物油摄入的 AFB_1 的 EDI 明显高于 DS 地区。综上, 本研究认为, XL 地区居民对土榨花生油的高消费是导致其 MOE 值偏低、暴露风险较高的主要原因。

2.3　两地区居民血清 AFB_1-Alb

AFB_1 在肝脏经细胞色素 P450 酶(如 CYP1A2/CYP3A4)代谢活化, 生成高活性的 AFB_1-8,9-环氧化物, 并与血浆白蛋白中的赖氨酸 ε-氨基发生亲核加成, 先形成不稳定的 Schiff 碱, 继而经重排形成稳定的共价复合物, 即 AFB_1-Alb[52]。AFB_1-Alb 已被发现可推动肝癌的发生, 其也是临床监测和风险评估的重要工具, 检测 AFB_1-Alb 有助于早期识别潜在致癌风险[53–54]。

两地区居民血清 AFB_1-Alb 的检测结果如表 5 所示。本研究结果显示, 两地区居民血清 AFB_1-Alb 水平的分布特征存在差异(表5, 图3)。在XL地区, 均值为(4.59±3.86) ng/mL, 中位数为 3.77 (IQR: 2.17~5.48) ng/mL; 在 DS 地区, 均值为(3.97±4.74) ng/mL, 中位数为 2.88 (IQR: 0.86~5.12) ng/mL。整体来看, XL 居民血清 AFB_1-Alb 水平略高于 DS, 且分布更为集中; 而 DS 居民的部分个体水平偏高。小提琴图进一步显示, DS 地区分布范围更宽, 并存在长尾现象, 提示人群间暴露差异较大; 相比之下, XL 地区分布较紧密, 暴露水平更均一。

表 5　两地区居民血清 AFB_1-Alb 检出情况(ng/mL)
Table 5　Detection status of serum AFB_1-Alb in residents of 2 regions (ng/mL)

研究地区	平均值±标准偏差	中位数	IQR
XL	4.59±3.86	3.77	3.31 (2.17~5.48)
DS	3.97±4.74	2.88	4.26 (0.86~5.12)

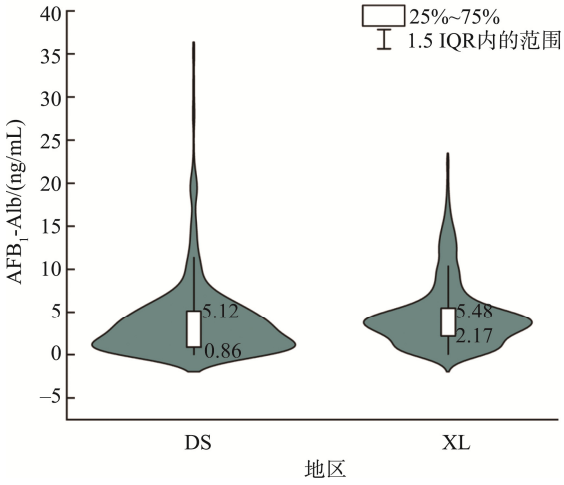


图 3　两地区居民血清 AFB_1-Alb 的分组小提琴图
Fig.3　Grouped violin plots of serum AFB_1-Alb among residents in 2 regions

XL 居民 AFB_1-Alb 的均值与中位数均高于 DS 地区, 支持了该地区因土榨花生油消费量较高而导致的更高暴露风险。同时, XL 居民的 AFB_1-Alb 分布更集中, 提示其饮食来源和暴露模式相对同质化, 多数个体长期处于相似的高暴露水平。而 DS 地区尽管总体均值较低, 但其分布更分散, 且存在部分高暴露的个体, 说明人群内的暴露存在显著差异, 这可能与个体的饮食结构、代谢差异或其他潜在的暴露源(如受污染的玉米或发霉的食物)有关。总体而言, 血清生物标志物的结果进一步支持 XL 地区的居民承担更高的 AFB_1 暴露风险, 但也强调了需要关注 DS 地区潜在的高暴露个体。

2.4　居民膳食 EDI 和血清 AFB_1-Alb 的对比

综合 EDI 与血清 AFB_1-Alb 检测的结果可以发现, 两种暴露评估方法在趋势上基本一致: XL 地区的居民总体暴露风险较高。然而, 二者在分布形式和差异显著性上表现不同。EDI 是基于饮食数据和暴露因子的计算, 体现了膳食摄入的日常差异, 因此在模拟结果中表现为 XL 地区的分布范围广, 个体差异大。而血清 AFB_1-Alb 反映的是过去 2~3 个月的平均暴露及体内代谢情况, 可以反映饮食的短期波动, 因此在群体层面分布更集中, 差异程度较 EDI 小。

此外, AFB_1-Alb 水平不仅受膳食暴露的影响, 还受个体代谢差异、肝功能状态及营养状况等调控[55]。这可能解释了为何在DS地区, 尽管EDI中位数较低, 但仍有部分个体出现高水平的血清 AFB_1-Alb。简而言之, EDI 更偏向对外源性暴露的理论估计, 而 AFB_1-Alb 则更倾向于反映人体实际的内源性暴露负荷。

综上, 单纯依赖 EDI 可能会高估或低估个体的真实风险, 结合生物标志物检测(AFB_1-Alb)可以更准确地评估长期暴露和健康风险。XL 地区表现出群体性的高暴露,

而 DS 地区在低暴露下表现出高个体差异，两者提示在公共卫生策略中应同等重视群体层面的干预与高风险个体的识别。

2.5 不确定性分析

食品安全风险评估存在两种主要不确定性来源，第一种将动物研究结果外推到人类时，模型差异可能导致结果相差几个数量级，第二种是缺乏未观察到有害效应的水平(no observed adverse effect level, NOAEL)、暴露途径和时间的差异等数据限制[56]。将动物实验或其他参考剂量获得的 NOAEL 除以不确定性因子，可以得到一个被认为安全或无显著风险的参考剂量，本研究中 BMDL 即为考虑了不确定性因子的参考计量。

本研究在膳食暴露评估中使用的是 2011 年的膳食调查数据，而人群调查时间为 2022—2024 年，两者存在时间差，可能带来一定的不确定性。采用该数据的原因是目前尚无其他研究或监测数据能够覆盖本研究涉及的全部食品种类。然而，从主要贡献食品来看，本研究估算的米及米制品(146.5 g/d±90.5 g/d)和植物油(26.4 g/d±17.3 g/d)的消费量与近年来岭南地区相关研究结果差异不大。例如，2015—2017 年岭南地区居民米制品消费量为 185 g/d ±90.5 g/d[57]，2018 年深圳居民粮谷类消费量为 297.13 g/d[58]；2023 年广东营养学会总结出岭南膳食模式谷薯类(249 g/d)和植物油(29.0 g/d)的消费特征[59]。因此，本研究所用消费量数据在总体水平和膳食结构上与近年的调查结果保持一致，但数据年份较早。这种差异可能导致对当前特定人群(如高消费地区居民)的暴露量估计不准确，或由于食物具体来源与加工方式的变化而引入错误分类偏倚，从而影响暴露评估。

此外，对于 ELISA 检测血清 AFB_1-Alb，尽管本研究严格遵循制造商操作规程，但未全面实施方法学验证(测量不确定度评估、回收实验及精密度评价)，检测结果可能存在未知方向的系统偏倚(如基质效应导致的回收率偏离)，且低浓度区域的定量准确性受限。

3 结 论

本研究将膳食暴露评估与血清 AFB_1-Alb 生物标志物检测相结合，对广州市两类地区居民的 AFB_1 暴露风险进行了分析。结果显示，两地区居民的 MOE 值远低于安全阈值，表明居民存在较高的健康风险。高消费地区居民的平均每日估计摄入量为 6.43 ng/kg bw/day，基于 $BMOL_1$ 计算的 MOE 为 27.21，明显低于正常消费地区的 34.16，血清 AFB_1-Alb 加合物浓度趋势与其一致。这项研究的结果表明，广州市居民可能面临一定的公共卫生威胁，而土榨花生油高消费行为会增加暴露风险。

因此，建议加强对广州地区土榨花生油的生产和流通环节的监管，对居民展开健康教育，同时建议相关部门继续监测当地居民血清 AFB_1-Alb 水平以及开展健康随访，建立风险预警机制，为制定基于健康的 AFB_1 限量标准提供依据，从而减少人群暴露和相关疾病负担。

参考文献

[1] ABRAR M, ANJUM FM, BUTT MS, *et al*. Aflatoxins: Biosynthesis, occurrence, toxicity, and remedies [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2013, 53(8): 862–874.

[2] EATON DL, GALLAGHER EP. Mechanisms of aflatoxin carcinogenesis [J]. Annual Review of Pharmacology and Toxicology, 1994, 34: 135–172.

[3] DAI C, TIAN E, HAO Z, *et al*. Aflatoxin B_1 toxicity and protective eeffects of curcumin: Molecular mmechanisms and clinical implications [J]. Antioxidants, 2022, 11(10): 2031.

[4] DENG K, GUO X, GUO M, *et al*. One stone towards two birds: Y-shaped DNA probe and rGO-AuNPs aerogel-driven electrochemical aptasensor for AFB_1 and OTA co-detection [J]. Journal of Hazardous Materials, 2025, 496: 139451.

[5] MUGHAL MJ, XI P, YI Z, *et al*. Aflatoxin B_1 invokes apoptosis via death receptor pathway in hepatocytes [J]. Oncotarget, 2017, 8(5): 8239–8249.

[6] CHUAYSRINULE C, MANEEBOON T, MAHAKARNCHANAKUL W. Mutual effects on mycotoxin production during co-culture of ochratoxigenic and aflatoxigenic *Aspergillus* strains [J]. Mycotoxin Research, 2023, 39(1): 57–66.

[7] MARTÍNEZ J, HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ M, MÉNDEZ-ALBORES A, *et al*. Computational studies of aflatoxin B_1 (AFB_1): A review [J]. Toxins, 2023, 15(2): 135.

[8] LIU H, XIE R, HUANG W, *et al*. Negative effects of aflatoxin B_1 (AFB_1) in the diet on growth performance, protein and lipid metabolism, and liver health of juvenile hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus*♀× *Epinephelus lanceolatus*♂) [J]. Aquaculture Reports, 2023, 33: 101779.

[9] GROOPMAN JD, KENSLER TW. Role of metabolism and viruses in aflatoxin-induced liver cancer [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2005, 206(2): 131–137.

[10] NETTO-FERREIRA JC, HEYNE B, SCAIANO JC. Photophysics and photochemistry of aflatoxins B_1 and B_2 [J]. Photochemical & Photobiological Sciences: Official Journal of the European Photochemistry Association and the European Society for Photobiology, 2011, 10(10): 1701–1708.

[11] QI N, YU H, YANG C, *et al*. Aflatoxin B_1 in peanut oil from Western Guangdong, China, during 2016—2017 [J]. Food Additives & Contaminants. Part B, Surveillance, 2019, 12(1): 45–51.

[12] YANG B, ZHANG C, ZHANG X, *et al*. Survey of aflatoxin B_1 and heavy metal contamination in peanut and peanut soil in China during 2017—2018 [J]. Food Control, 2020, 118: 107372.

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

[14] 宋美英, 乐丽华, 罗钰珊, 等. 广东小作坊生产花生油中黄曲霉毒素 B_1 膳食暴露及风险评估[J]. 中国油脂, 2019, 44(4): 96–101.
SONG MY, LE LH, LUO YS, *et al*. Dietary exposure and risk assessment of aflatoxin B_1 in peanut oil produced by individual workshop in

Guangdong [J]. China Oils and Fats, 2019, 44(4): 96–101.

[15] 杨朝慧, 何思蕾, 邓俊锋, 等. 散装土榨花生油消费者 KAP 调查及信息干预效果评价[J]. 中国油脂, 2025, 50(8): 112–116, 139.
YANG CH, HE SL, DENG JF, *et al*. KAP survey and evaluation of information intervention effect for consumers of bulk pressed peanut oil [J]. China Oils and Fats, 2025, 50(8): 112–116, 139.

[16] 蔡天舒, 卓佳青, 张伟爱, 等. 广东消费者对食用油和散装压榨食用油认知与消费行为的调查研究[J]. 中国油脂, 2019, 44(9): 104–108.
CAI TS, ZHUO JQ, ZHANG WAI, *et al*. Investigation on consumption cognition and behavior of consumers on edible oil and bulk pressed edible oil in Guangdong [J]. China Oils and Fats, 2019, 44(9): 104–108.

[17] 田洪芸, 王爱竹, 冯炜, 等. 市售土榨花生油黄曲霉毒素监测结果及监管建议[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(11): 101–102.
TIAN HY, WANG AIZ, FENG W, *et al*. Monitoring results of aflatoxin in commercially available soil squeeze peanut oil and regulatory suggestions [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(11): 101–102.

[18] 李亚, 梁剑锋, 柯立坚, 等. 广西梧州市土榨花生油中黄曲霉毒素 B_1 膳食暴露风险评估[J]. 中国油脂, 2022, 47(11): 80–84.
LI Y, LIANG JF, KE LJ, *et al*. Dietary exposure risk assessment of aflatoxin B_1 in native pressed peanut oil in Wuzhou, Guangxi Province [J]. China Oils and Fats, 2022, 47(11): 80–84.

[19] 吴基任, 潘望, 谭高好, 等. 2021 年海南省小作坊土榨花生油中黄曲霉毒素 B_1 的调查分析[J]. 食品安全导刊, 2021(32): 106–109.
WU JR, PAN W, TAN GH, *et al*. Investigation and analysis of aflatoxin B_1 in flavor peanut oil extracted from small workshops in Hainan Province in 2021 [J]. China Food Safety Magazine, 2021(32): 106–109.

[20] 王燕燕, 陈坤才, 刘于飞, 等. 广州市小作坊生产散装土榨花生油黄曲霉毒素 B_1 污染状况及暴露评估[J]. 华南预防医学, 2023, 49(2): 132–136.
WANG YY, CHEN KC, LIU YF, *et al*. Contamination level and exposure assessment of aflatoxin B_1 in loose-packed peanut oil extracted by a native method in individual workshops in Guangzhou [J]. South China Journal of Preventive Medicine, 2023, 49(2): 132–136.

[21] ATASEVER AM, İNCE GMB, POLAT AB, *et al*. Aflatoxin B_1 levels, dietary exposure and cancer risk assessment in sesame and nut-based foods in Türkiye [J]. Mycotoxin Research, 2025, 41(3): 447–455.

[22] European Food Safety Authority (EFSA). Opinion of the scientific committee on a request from EFSA related to exposure assessments [J]. EFSA Journal, 2005, 3(7): 249.

[23] LEW K, LEYAU YL, SHEN P, *et al*. First total diet study of aflatoxins in singapore: Exposure risk, high-risk foods, and public health implications [J]. Toxins, 2025, 17(7): 324.

[24] MARTA PDC, DANIELA C, CATARINA C, *et al*. Dietary exposure to heterocyclic amines by the Portuguese population: Comparison of different exposure assessment methods [J]. Food and Chemical Toxicology: An International Journal Publihed for the British Industrial Biological Research Association, 2025, 204: 115667.

[25] MUHOLLARI T, SZŰCS S, MCKEE M, *et al*. Heavy metal contamination in unrecorded rakia from Kosovo and its public health implications [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 19150.

[26] European Food Safety Authority (EFSA). Opinion of the scientific committee on a request from EFSA related to a harmonised approach for risk assessment of substances which are both genotoxic and carcinogenic [J]. EFSA Journal, 2005, 3(10): 282.

[27] ZHONG Y, LU H, LU X, *et al*. Correlations of aflatoxin exposure from cooking oil and dietary foods dduring pregnancy with birth weight and gestational age at birth in Guangxi, China [J]. International Journal of General Medicine, 2024, 17: 1171–1184.

[28] 刘藻. 生防菌 W51 对 3 种植物部真菌的生长及毒素降解效果评估[D]. 淮安: 淮阴工学院, 2023.
LIU Z. Evaluation of growth inhibition and mycotoxin degradationeffect of biocontrol bacteria w51 against three plantpathogenic fungi [D]. Huai' an: Huaiyin Institute of Technology, 2023.

[29] 张玉华, 李迎月, 何洁仪, 等. 广州市居民食物消费与营养素摄入状况[J]. 中国公共卫生, 2017, 33(6): 969–972.
ZHANG YH, LI YY, HE JY, *et al*. Food consumption and nutrients intake among residents in Guangzhou City [J]. Chinese Journal of Public Health, 2017, 33(6): 969–972.

[30] World Health Organization, Food and agriculture organization of the United Nations. Evaluation of certain food additives. Seventy-first report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives [R]. World Health Organization Technical Report Series, 2010(956): 1–80.

[31] European Food Safety Authority (EFSA). Food and agriculture organization of the United Nations (FAO). Towards a harmonised total diet study approach: A guidance document [J]. EFSA Journal, 2011, 9(11): 2450.

[32] European Food Safety Authority (EFSA). Opinion of the scientific panel on contaminants in the food chain [CONTAM] related heptachlor as an undesirable substance in animal feed [J]. EFSA Journal, 2007, 5(6): 478.

[33] PEERS F, BOSCH X, KALDOR J, *et al*. Aflatoxin exposure, hepatitis B virus infection and liver cancer in Swaziland [J]. International Journal of Cancer, 1987, 39(5): 545–553.

[34] CARLBORG FW. Cancer, mathematical models and aflatoxin [J]. Food and Cosmetics Toxicology, 1979, 17(2): 159–166.

[35] MEHTA RV, WENNDT AJ, GIRARD AW, *et al*. Risk of dietary and breastmilk exposure to mycotoxins among lactating women and infants 2-4 months in northern India [J]. Maternal & Child Nutrition, 2021, 17(2): e13100.

[36] HUONG BTM, TUYEN LD, DO TT, *et al*. Aflatoxins and fumonisins in rice and maize staple cereals in Northern Vietnam and dietary exposure in different ethnic groups [J]. Food Control, 2016, 70: 191–200.

[37] HANVI MD, LAWSON-EVI P, BOUKA EC, *et al*. Aflatoxins in maize dough and dietary exposure in rural populations of Togo [J]. Food Control, 2021, 121: 107673.

[38] ZHAO B, XU Y, SONG Y, *et al*. Food aflatoxin exposure assessment in Sichuan Province, China [J]. Mycotoxin Research, 2023, 39(3): 261–269.

[39] SUGITA-KONISHI Y, SATO T, SAITO S, *et al*. Exposure to aflatoxins in Japan: Risk assessment for aflatoxin B_1 [J]. Food Additives & Contaminants. Part A, Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment, 2010, 27(3): 365–372.

[40] OK HE, KIM HJ, SHIM WB, *et al*. Natural occurrence of aflatoxin B_1 in marketed foods and risk estimates of dietary exposure in Koreans [J]. Journal of Food Protection, 2007, 70(12): 2824–2828.

[41] UDOVICKI B, TOMIC N, TRIFUNOVIC BS, *et al*. Risk assessment of dietary exposure to aflatoxin B_1 in Serbia [J]. Food and Chemical Toxicology, 2021, 151: 112116.

[42] HOTEIT M, ABBASS Z, DAOU R, *et al*. Dietary exposure and risk aassessment of multi-mycotoxins (AFB_1, AFM_1, OTA, OTB, DON, T-2 and HT-2) in the lebanese food basket cconsumed by adults: Findings from the updated lebanese national consumption survey through a total diet study approach [J]. Toxins, 2024, 16(3): 158.

[43] ALAMIR J, ALMAIMAN L, ALRUJIB Y, *et al*. Aflatoxins in food products consumed in the Kingdom of Saudi Arabia: A preliminary dietary risk assessment [J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(10): 5948–5958.

[44] ANDRADE PD, DE-MELLO MH, FRANÇA JA, *et al*. Aflatoxins in food products consumed in Brazil: A preliminary dietary risk assessment [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2013, 30(1): 127–136.

[45] ALAO JO, ONI MO, BELLO OO, *et al*. The synergism of hepatitis B and aflatoxicosis in hepatocellular carcinoma development: A mini-review [J]. African Journal of Clinical and Experimental Microbiology, 2023, 24(1): 9–15.

[46] BENKERROUM N, ISMAIL A. Human breast milk contamination with aflatoxins, impact on children's health, and possible control means: A review [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(24): 16792.

[47] DAOU R, HOTEIT M, BOOKARI K, *et al*. Public health risk associated with the co-occurrence of aflatoxin B_1 and ochratoxin A in spices, herbs, and nuts in Lebanon [J]. Frontiers in Public Health, 2023, 10: 1072727.

[48] SCHRENK D, BIGNAMI M, BODIN L, *et al*. Risk assessment of aflatoxins in food [J]. EFSA Journal, 2020, 18(3): e06040.

[49] SPRONG RC, WIT-BOS LDE, BIESEBEEK JDTE, *et al*. A mycotoxin-dedicated total diet study in the Netherlands in 2013: Part III – exposure [J]. World Mycotoxin Journal, 2016, 9(1): 109–127.

[50] LI F, ZHAO X, JIAO Y, *et al*. Exposure assessment of aflatoxins and zearalenone in edible vegetable oils in Shandong, China: Health risks posed by mycotoxin immunotoxicity and reproductive toxicity in children [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023, 30(2): 3743–3758.

[51] KHOLIF OT, SEBAEI AS, EISSA FI, *et al*. Determination of aflatoxins in edible vegetable oils from Egyptian market: Method development, validation, and health risk assessment [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 105: 104192.

[52] FERREIRA RG, CARDOSO MV, DEFURTADO KMS, *et al*. Epigenetic alterations caused by aflatoxin B_1: A public health risk in the induction of hepatocellular carcinoma [J]. Translational Research: The Journal of Laboratory and Clinical Medicine, 2019, 204: 51–71.

[53] WU HC, WANG Q, YANG HI, *et al*. Global DNA methylation in a population with aflatoxin B_1 exposure [J]. Epigenetics, 2013, 8(9): 962–969.

[54] YU MW, CHIANG YC, LIEN JP, *et al*. Plasma antioxidant vitamins, chronic hepatitis B virus infection and urinary aflatoxin B_1-DNA adducts in healthy males [J]. Carcinogenesis, 1997, 18(6): 1189–1194.

[55] SUN CA, WU DM, WANG LY, *et al*. Determinants of formation of aflatoxin-albumin adducts: A seven-township study in Taiwan [J]. British Journal of Cancer, 2002, 87(9): 966–970.

[56] EDLER L, HART A, GREAVES P, *et al*. Selection of appropriate tumour data sets for benchmark dose modelling (BMD) and derivation of a margin of exposure (MoE) for substances that are genotoxic and carcinogenic: Considerations of biological relevance of tumour type, data quality and uncertainty assessment [J]. Food and Chemical Toxicology, 2014, 70: 264–289.

[57] GONG W, ZHANG J, WANG H, *et al*. Dietary structure and cardiometabolic risk factors: A comparative analysis of lingnan and central plains regions in China based on China nutrition and health surveillance 2015—2017 [J]. Nutrients, 2025, 17(13): 2173.

[58] 彭晓琳, 王珊珊, 赵丹, 等. 2009—2018 年深圳居民膳食结构变化趋势[J]. 现代预防医学, 2022, 49(9): 1595–1599.
PENG XL, WANG SS, ZHAO D, *et al*. Trend of dietary patterns among Shenzhen residents, 2009—2018 [J]. Modern Preventive Medicine, 2022, 49(9): 1595–1599.

[59] 广东省营养学会《岭南膳食模式》专家组. 岭南膳食模式(2023)主要特征[J]. 营养学报, 2023, 45(5): 417–421
Cantonese Dietary Pattern Expert Group, Guangdong Nutrition Society, Guangdong, China. An introduction to the cantonese dietary pattern (2023) [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2023, 45(5): 417–421.

(责任编辑: 韩晓红 冯东慧)