

“守护粮食食品安全，全球携手在行动” 特约专栏文章之四

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.06.004

PAULA A, JONATHAN B, JOHAN De M, 等. 消减食品加工过程中的真菌毒素: 来自欧洲和东南亚的经验分享[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(6): 46-58.

PAULA A, JONATHAN B, JOHAN De M, et al. Mitigation of mycotoxins during food processing: sharing experience among Europe and South East Asia[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(6): 46-58.

消减食品加工过程中的真菌毒素： 来自欧洲和东南亚的经验分享

Paula Alvito^{1,2}, Jonathan Barcelo³, Johan De Meester⁴, Elias Rito⁵, Michele Suman⁶✉

1. 葡萄牙国家卫生研究院, 食品和营养所, 葡萄牙 里斯本 1649-016;
2. 葡萄牙阿威罗大学圣地亚哥校区, 环境与海洋研究中心, 葡萄牙 阿威罗 3810-193;
3. 菲律宾圣路易斯大学, 自然科学学院, 菲律宾 碧瑶 2800;
4. 嘉吉欧洲研发中心, 比利时 菲尔福尔德 B-1800;
5. 欧洲化学品分销商协会, 比利时 布鲁塞尔 16B 1000;
6. 意大利 Barilla SpA -高级研究实验室, 意大利 帕尔马 166-43122)

摘要: 在世界范围内, 由真菌毒素造成的经济损失估计达数十亿美元, 给人类和动物带来安全风险。粮食中真菌毒素的预防可以通过食品加工过程中进行真菌毒素的消减处理。在过去几十年里, 虽然发表的科技论文中报道了大量真菌毒素防控措施, 但实际生产往往需要更容易实施的、简单易行的建议和指导方针。欧洲和东南亚在真菌毒素处理到数据分析、风险评估到污染防控、差异分析到流通途径等方面可以做到相互协作, 互相补充。欧洲和东南亚政府及相关行业必须在综合考虑地域、农业系统和不同国家消费者偏好的背景下, 寻求平衡食品安全和地区贸易二者关系, 协同管控食品供应链。以谷物为例, 加工过程包括初级加工(谷物清理和碾磨操作)和二次加工(如烘焙过程中的发酵和烘烤), 欧洲尤其关注烘焙食品安全性及全麦面包生产工艺对呕吐毒素的影响。结合农业、咖啡工业和科学研究人员的专业知识及亚洲咖啡生产者的具体情况, 重点关注东南亚地区咖啡中赭曲霉毒素 A 污染问题。在农场环境中减少真菌毒素的措施给咖啡农民带来了较大的挑战, 包括在规范种植农场模式下咖啡生产者和消费者之间社会经济效益和个人行为模式的相关影响因素。随着世界变得更加全球化, 食品和饲料供应链也变得日趋复杂, 因此, 需要制定更全面的策略来确保食品供给及品质安全。

关键词: 消减; 食品加工; 真菌毒素; 谷物; 咖啡; 欧洲; 东南亚

中图分类号: TS201.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2021)06-0046-13

网络首发时间: 2021-11-02 16:00:53

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20211101.1946.022.html>

收稿日期: 2021-09-03

基金项目: 葡萄牙阿威罗大学圣地亚哥校区, 环境与海洋研究中心 FCT/MCTES 葡萄牙国家基金 (UIDP/50017/2020+UIDB/50017/2020)

Supported by: CESAM, Centre for Environmental and Marine Studies, University of Aveiro(No. UIDP/50017/2020+UIDB/50017/2020)

作者简介: Paula Alvito, 女, 1963 年出生, 生物学博士, 高级研究员, 研究方向为食品安全和食品毒理学。

E-mail: Paula.Alvito@insa.min-saude.pt.作者详细介绍见 PC22。

通讯作者: Michele Suman, 男, 1973 年出生, 博士, 教授, 研究方向为食品安全与真伪研究。E-mail: michele.suman@barilla.com.作者详细介绍见 PC22-PC23。本文英文原文详见 P59-P70。

Mitigation of Mycotoxins during Food Processing: Sharing Experience among Europe and South East Asia

PAULA Alvito^{1,2}, JONATHAN Barcelo³, JOHAN De Meester⁴, ELIAS Rito⁵, MICHELE Suman⁶✉

(1. Food and Nutrition Department, National Institute of Health Dr. Ricardo Jorge, Avenida Padre Cruz, 1649-016 Lisboa, Portugal; 2. CESAM, Centre for Environmental and Marine Studies, University of Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal; 3. School of Natural Sciences, Saint Louis University, Bonifacio Street, Baguio City, Philippines; 4. Cargill R&D Centre Europe, Havenstraat 84, B-1800 Vilvoorde, Belgium; 5. European Association of Chemical Distributors, Rue du Luxembourg, 16B 1000 Brussels, Belgium; 6. Barilla SpA - Advanced Research Laboratory, via Mantova 166 – 43122 Parma, Italy)

Abstract: Worldwide the issue of mycotoxins results in economic losses estimated at billions of dollars and toxicological risk for both humans and animals. Preventive measures also include decontamination and mitigation actions that can be carried out through food processing. Several proposals have been tested and illustrated also in scientific papers during the last decades, however clear, easy to implement, practical suggestions and guidelines for process adaptation are much more needed. Europe and South East Asia can find synergies and complementarities moving from processing to analysis, from risk assessment to reduction strategies, from gap-analysis to communication roadmaps. Stakeholders from both Europe and Southeast Asia must then ensure that there is a way to ease and harmonize the regulation in the food supply chain in order to ensure food safety and at the same time facilitate trade in both regions, taking into account of the various landscapes, agrosystems and also different consumer preferences within the countries themselves. Concerning the example of cereals, processing steps cover primary processing (cleaning and milling operations) and secondary processing procedures (such as fermentation and thermal treatments during baking), special attention is devoted to the production of baked goods and to the estimation of processing factors for DON in wheat bread production especially in Europe. With reference instead to the specific context of Asian producers, a case-study focuses on ochratoxin A in coffee in Southeast Asia region, combining the expertise of the farming community, coffee industry and science researchers. The strategy to reduce mycotoxins in a farm setting poses several challenges to coffee farmers: it needs to be analyzed in the context of good agricultural practices, socioeconomic and behavioral factors of both coffee producers and consumers. As the world becomes more globalized, food and feed supply chains also become more complexed and hence, a more comprehensive strategy to ensure food contaminants mitigation is needed.

Key words: mitigation; food processing; mycotoxins; cereals; coffee; Europe; South East Asia

已知真菌毒素有 300 多种, 可能具有广泛不同的作用模式。然而, 在欧洲, 仅有大约 10 种最熟知或主要的真菌毒素进行了正式的毒理学评估和综合风险评估^[1]。与之相反, 人们对未受监管的真菌毒素, 包括改性修饰的和新出现的真菌毒素以及真菌毒素与其他食品污染物的组合, 污染发生率和水平以及潜在的毒理学和生物学效应知之甚少^[2-4]。

面对多种不同形式的真菌毒素及其对健康的潜在影响, 很容易得出这样结论, 真菌毒素风险在全球范围内带来的挑战极其复杂。这需要食品

供应链中的所有参与者共同努力。国际癌症研究机构 (IARC) 在关于气候变化对真菌毒素扩散影响的一份报告文件中明确指出, 每天估计约有 5 亿低收入人群以玉米和谷物为食, 生活在撒哈拉以南非洲、拉丁美洲和亚洲的人们暴露在接触到黄曲霉毒素和伏马毒素的风险中^[5]。

2016 年, 东盟制定的食品和饲料中污染物和毒素最高水平 (ML) (包括真菌毒素污染水平) 的原则和标准已完成, 并在逐步完善中。虽然东盟真菌毒素相关政策尚未完全完成, 但东盟食品安全风险评估中心 (ARAC) 于 2019 年初步批准

了一份关于食用花生和玉米的总黄曲霉毒素和黄曲霉毒素 B₁ 的风险评估报告示例 (ARAC)。

东盟食品真菌毒素新加坡实验室 (AFRL) 一直组织年度检测, 为国家食品检测实验室的真菌毒素分析能力提供强有力的支持, 并专门针对诸如谷物、坚果、油籽和香料等多种商品, 其中一些主要生产商来自东盟国家^[6]。

食品加工过程会影响食品中的真菌毒素及其修饰形式: 加工转化过程中的机械能或热能可能导致毒素改性, 诱导与大分子成分如糖、蛋白质或脂质的反应并释放母体化合物^[7]。

真菌毒素防控措施还包括通过食品加工过程实施的真菌毒素消减处理, 并且一些建议在过去几十年中的科学论文中得到验证和说明^[8]。

为了避免在食品中产生不利的二次影响 (将真菌毒素转化为有安全影响或营养状况发生不良变化的其他化合物), 还需要考虑到工业技术的适当管理, 以及根据地理区域和敏感人群而产生的问题。

2010 年, 欧洲国际生命科学研究所以 (ILSI Europe) 的加工相关化合物和天然毒素工作组专门开展了一个项目来评估消减天然毒素的农艺措施, 其中包括专门针对真菌毒素的部分^[9]。随后, 在 2014—2016 年, 该工作组专门开展了另一个项目, 旨在了解消减真菌毒素的可能性, 从而提高出售食品的安全性的。其主要任务是审视食品加工中消减真菌毒素的最新技术。它总结了不同的去污/解毒过程对各种食品的影响; 最后, 该工作成果促进了 2017—2019 年相应的新工作, 并在随后的活动中将“食品加工过程中真菌毒素的反应和潜在消减技术”专家组的科学发现转化为了行业的具体指导。2019 年, 实用指南面世^[10], 利用红绿灯系统方法来确定给定食品中, 哪些过程可以显著消减真菌毒素: 它将帮助国际食品生产商 (各种商品如谷物及衍生产品、可可、果汁、乳制品), 提供清晰、易于实施、实用的工艺建议和工艺调整指南来消减处理真菌毒素污染。

本文是最近一次 WMFmeetsASIA2020 上联合组织的专门会议^[11]的后续工作, 该会议由 ILSI 欧洲工作组相关化合物和天然毒素和 ILSI 东南亚地区-新加坡在曼谷举行的。因此, 本文致力于根

据欧洲和东南亚不同的和互补的经验来说明以下几方面, 即: (1) 比较食品加工效果, 并指出可用于其影响效果的分析工具; (2) 更新加工相关的真菌毒素毒理学评估; (3) 寻求管理框架的协同作用; (4) 采取农场到餐桌的策略, 同时考虑对大中小型企业的看法和影响; (5) 确定东南亚生产者在消减处理真菌毒素方面仍然存在的差距和面临的挑战。本文依据亚洲生产者的具体情况, 结合农业社区、咖啡行业和科学研究人员的专业知识, 探讨了一个研究案例作为示例, 重点关注东南亚地区咖啡中赭曲霉毒素 A 的消减。

1 比较食品加工效果并确定可用于其影响的分析工具

食品加工是将农产品转化为食品的过程。自 30 年前开始, 大量的研究用于调查食品加工是否可以消减真菌毒素的毒理学影响^[8]。研究最多的食品加工过程中真菌毒素包括: (1) 小麦加工过程中 (如碾磨和烘焙) 的单端孢霉烯族毒素, 特别是脱氧雪腐镰刀菌烯醇和 T-2 和 HT-2 毒素^[12]; (2) 玉米制品生产过程中的伏马毒素和黄曲霉毒素, 如玉米饼和玉米片等^[13]; (3) 玉米基食品中的真菌毒素^[14]; (4) 坚果分选和水果干燥过程中的黄曲霉毒素^[8]。

食品加工过程中, 真菌毒素母体可能发生结构修饰包括异构化、脱羧、重排以及与其他小分子的反应^[15]。食品加工促使真菌毒素母体与基质成分 (如蛋白质或淀粉) 形成共价加合物。这种情况在研究咖啡烘焙中的赭曲霉毒素时被观察到^[16], 并且认为在玉米片等玉米产品生产过程中的伏马毒素也会出现^[17]。

鉴定和分离形成的降解产物并研究其毒性应放在优先位置^[15]。食品加工过程中形成的降解产物, 可以通过靶向或非靶向分析加以阐明。靶向方法需要标准物质参考来识别和量化分析物。然而这方法有两点重要的局限性, 包括: (1) 预先确定的化合物集可能与食品加工过程中实际形成的降解产物不同; (2) 食品基质的复杂性可能导致形成不在目标分析化合物集内的降解产物^[18]。为了克服这一困难, 使用稳定同位素标记示踪化合物并结合 LC-HRMS 用于强化待处理的基质,

这为复杂食品和饲料样品中真菌毒素降解产物的非靶向筛选提供了巨大的潜力^[19]。尽管非靶向分析可以阐明降解产物的全谱,但目前只有一项此类研究的报道^[15]。该研究的作者认为,需要发表更多的研究来表征所形成的降解产物,收集其毒性数据,从而完善有关食品加工过程中消减真菌毒素作用的知识。

2 与加工相关真菌毒素的毒理学评估

2.1 受监管和未受监管的真菌毒素

关于游离或真菌毒素母体(未变化形式),相关国家和国际公共卫生和政府机构已对不同的食品商品制定了法律监管限制,以保护消费者的健康并促进国际食品贸易^[20-21]。特别是在欧盟,第 1881/2006 号委员会法规(EC)及其修正案规定了各种食品真菌毒素的最大限量(ML),包括黄曲霉毒素(AFs)、赭曲霉毒素 A(OTA)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)、玉米赤霉烯酮(ZEA)、伏马毒素(FBs)、棒曲霉毒素(PAT)以及 T-2 和 HT-2 毒素^[22]。

在人类风险评估过程中,欧洲食品安全局(EFSA)的食物链污染物小组(CONTAM 小组)审查了有关实验动物、人类、农场和伴生动物中真菌毒素的毒代动力学和体内外毒性的有价值且公开发表的数据。根据这些受评估的数据,CONTAM 小组建立了基于健康的指导值(HBGV)—如用于表征慢性健康风险的可耐受每日摄入量(TDI)或用来表征急性健康风险的急性参考剂量(ARfD)^[23]。

目前,对风险和食品安全的关注已扩展到其潜在的真菌毒素污染上,例如改性修饰和新出现的真菌毒素,几种真菌毒素共存以及真菌毒素和其他食品污染物的组合^[2-4]。

修饰的真菌毒素在消化过程中可能水解为化合物母体、或从基质中释放,从而导致潜在的不良健康影响^[24]。脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)是全球小麦作物中最常见的真菌毒素之一,因此,研究其在食品加工过程中的稳定性非常重要。最近的研究显示,在研磨、发酵和烘焙过程中 DON 稳定性的研究结果显示出一些降低 DON 的机会。此外, DON-3-葡萄糖苷(DON-3G)在面包制作

过程中似乎会增加,因此需要采取措施防止这种情况发生^[25]。

新出现的真菌毒素包括由镰刀菌产生的毒性次生代谢产物(镰刀菌素、恩链菌素 ENN、白僵菌素 BEA 和念珠菌素等)、曲霉(柄曲霉毒素 STE)、青霉(霉酚酸)和链格孢菌(交链孢菌素、交链孢菌素单甲醚和细交链孢菌酮酸)^[26]。这些新出现的真菌毒素尚未设定最大限量,可能是由于认识它们的时间较晚,因此其毒性、浓度水平和发生率的可用数据有限^[27]。CONTAM 小组得出结论: ENN 和 BEA 急性暴露并未显示对人类健康的危害,但也强调需要进行长期研究以评估体内潜在的慢性毒性作用^[28]。STE 可获取数据太有限,无法对 STE 进行可靠的人类和动物膳食影响评估^[29],并建议使用毒理学关注阈值(TTC)方法来评估人类膳食接触链格孢毒素的相对关注程度^[30],如表 1 所示。

真菌毒素与其他食品污染物的组合引起了越来越多的关注,特别是因为与单一真菌毒素相比,多种真菌毒素暴露对健康造成的影响可能导致不同的输出毒性和致癌性^[3,31-32]。例如,在谷物和谷物衍生产品样品中,文献描述了 127 种真菌毒素组合,其中最常见的是 AFs+FUM、DON+ZEA、AFs+OTA 和 FUM+ZEA^[4]。

2.2 真菌毒素的风险评估和基于健康的指导值

CONTAM 专家组认为除了化合物母体外,还适合评估人类暴露于各种毒素的修饰形式,因为许多修饰形式在消化过程中会水解成化合物母体或从基质中释放出来。改性真菌毒素可与游离真菌毒素同时发生,在某些情况下,改性真菌毒素的浓度可能超过加工食品中游离真菌毒素的含量。改性形式的 ZEA、雪腐镰刀菌烯醇、T-2 和 HT-2 毒素和 FUM,分别增加了 100%、30%、10% 和 60%。文献数据显示,经过修饰的真菌毒素可能会显著增加整体真菌毒素水平,尤其是 FUM 和玉米^[24]。最近修饰的真菌毒素已被纳入 EFSA 风险评估^[23]。表 1 列出了国际机构针对人类风险评估中使用的母体、改性修饰和新出现的真菌毒素以及基于健康指导值(HBGV)提出的最新科学意见。

表 1 国际机构提出的最新科学意见, 包括用于人类风险评估的真菌毒素的基于健康水平的推荐值 (HBGV) (改编自文献^[23])

Table 1 Most recent scientific opinions addressed by international bodies including the health-based guidance values (HBGVs) for mycotoxins used in the human risk assessments (adapted from [23]).

真菌毒素	人类风险评估值	发表年份
棒曲霉素	PMTDI of 0.4 µg/kg bw	2000
链格孢菌毒素	TTC approach applied	2011
麦角生物碱	group ARfD 1 µg/kg bw group TDI 0.6 µg/kg bw	2012
橘霉素	other approach, see opinion	2012
拟茎点霉菌素	not established	2012
杂色曲霉素	other approach, see opinion	2013
白僵菌素和镰孢菌素	other approach, see opinion	2014
玉米赤霉烯酮+修饰形式	group TDI 0.25 µg/kg bw	2016
T-2 和 HT-2 毒素+修饰形式	group ARfD 0.3 µg/kg bw group TDI 0.02 µg/kg bw	2017
雪腐镰刀菌烯醇+修饰形式	group ARfD 14 µg/kg bw group TDI 1.2 µg/kg bw	2017
脱氧雪腐镰刀菌烯醇和乙酰化+修饰形式	group ARfD 8 µg/kg bw per eating occasion group TDI 1 µg/kg bw	2017
伏马毒素	group TDI 1 µg/kg bw	2018
赭曲霉毒素 A	BMDL10 4.73 µg/kg bw per day (non-neoplastic) BMDL10 14.5 µg/kg bw per day (neoplastic)	2020
黄曲霉毒素 Aflatoxins	BMDL10 0.4 µg/kg bw per day	2020

注: ARfD = 急性参考剂量; BMDL10 = 使 10% 的受试动物发生不良反应的剂量; bw = 体重; PMTDI = 暂定每日最大耐受量; TDI = 每日可耐受摄入量; TTC = 毒理学关注阈值。

Note: ARfD = acute reference dose; BMDL10 = Benchmark dose lower confidence limit for an extra cancer risk of 10%; bw = body weight; PMTDI = provisional maximum tolerable daily intake; TDI = tolerable daily intake; TTC = threshold of toxicological concern.

关于常规筛查的真菌毒素, 现行法规是根据研究的毒理学数据制定的, 一次只考虑暴露在一种真菌毒素中, 不考虑真菌毒素的综合作用。因此, 评估真菌毒素组合的毒理学影响, 更好地反映饲料和食品污染及其相关的动物和人类健康风险至关重要^[3,23,31,33]。

EFSA 还发布了一份关于暴露于多种化学品风险评估的指导文件, 描述了将多种化学品联合暴露的风险评估 (RA) 方法协调应用到欧洲食品安全局职权范围内的所有相关领域, 即人类健康、动物健康和生态区域^[34]。

3 寻求监管框架的协同增效

随着世界变得更加全球化, 食品和饲料供应链也变得更加复杂, 因此需要更全面的战略来确保消减处理食品污染物。在工业层面消减处理真菌毒素并非易事, 尤其是在考虑跨区域和洲际贸易法规的情况下。进口商和出口商都必须遵守这些国家/地区的法规才能进入其市场。来自欧洲和

东南亚的利益相关方必须确保有方法来缓解和协调食品供应链中的监管, 以确保食品安全, 同时促进两个地区的贸易。

欧盟市场拥有 4.47 亿消费者, 是全球最大的单一市场, 覆盖 27 个可以自由贸易的国家。这一协调整合提升了长期影响力并增加了全球市场份额。然而, 凭借这些优势, 欧盟需要继续找出可能扰乱其单一市场的因素。因此, 在欧盟范围进行协调是优先事项, 以确保所有成员国都有作为合规指南的基础^[35]。

欧盟的利益相关方开始对动物饲料中的有害物质进行风险评估。这包括 EFSA 提供的意见, 涵盖欧洲食品和饲料供应链中 30 多项食品污染物风险评估。EFSA 因而发布了各种指导性文件, 涵盖了真菌毒素风险评估、每日可耐受摄入量、毒性数据以及一些基于群体健康的指导值真菌毒素的确定^[36]。

欧盟监管机构使用这些指导文件为生产商制定一套统一的法规。这些机构还提供单独的建议,

用于制定与消减真菌毒素相关的政策。例如,2011年,联合研究中心发布了真菌毒素情况说明书,向利益相关方提供了该地区受监管的真菌毒素清单以及有关毒性水平、发生数据和各种分析方法的信息^[37]。

在监管方面,欧盟委员会通过 EUR-Lex (<https://eur-lex.europa.eu>) 建立了一个数据库,用于汇编与政策相关的法规、指令、决议和报告以及对生产者和消费者的建议。包括委员会条例(EC)第 401/2006 号,该条例讨论了官方控制食品中真菌毒素水平的规定抽样和分析方法^[38]。该法规符合欧盟委员会(EC)第 882/2004 号法规,规定了官方控制措施,以确保食品污染物符合食品和饲料法^[39]。最新的欧盟相关出版物之一是联合研究中心与欧盟内外的各种研究组织一起对 2017-2018 年真菌毒素分析发展进行的审查,其中包括最新和整理的采样信息,使用 LC-MS/MS 多真菌毒素方法确定谷物中这些污染物的共存情况,并对各种食品中存在的不同类型的真菌毒素进行简要分类^[40]。

从 2016 年开始,已经采取了一系列举措,旨在通过报告、指南和多利益相关方平台,更好地向食品行业宣传这些法规。在各种食品中,通常通过监测、预防和控制农场层面早期实施消减真菌毒素措施。由于东南亚和欧洲的农业条件有利于真菌生长,并且各种农产品都可以作为合适的真菌基质,因此在收获后加工过程中,农耕措施通常包括各种物理或化学过程,以消除或减少真菌生长,防止真菌毒素产生。

4 OTA 对东南亚咖啡生产的影响

咖啡是全球最常饮用的饮料之一,因其风味独特以及对健康的影响而吸引了众多的消费者。国际咖啡组织透露,东南亚,印度尼西亚和越南是全球咖啡产量的主要贡献者。近来,菲律宾和泰国作为咖啡生产国的发展势头正在逐步增强。

东南亚国家的气候条件有利于咖啡生产,但不完善,采后加工措施会导致这些国家生产的咖啡豆出现真菌生长和产生真菌毒素。Khaneghah^[41]报道,年降雨量高和采收加工条件差导致咖啡中赭曲霉毒素 A (OTA) 污染高。赭曲霉毒素 A 是

具有肾毒性、致癌性、致畸性和免疫抑制性的真菌毒素^[42],由曲霉和青霉^[43-44]产生。产赭曲霉毒素的青霉种类不会深入生长到咖啡豆中^[45],这解释了曲霉是咖啡中 OTA 污染的主要原因。

在东南亚,最受欢迎的咖啡品种是阿拉比卡咖啡(小果咖啡 *Coffea arabica*) 和罗布斯塔咖啡(中果咖啡 *Coffea canephora* var. *Robusta*), 占据了全球大部分的咖啡产量^[46]。在菲律宾,还种植了伊克赛尔撒咖啡(*Coffea excelsa*) 和利比里卡咖啡(*Coffea liberica*)。咖啡加工方法类型通常取决于种植的咖啡品种。阿拉比卡咖啡是一种在凉爽地区生长良好的品种,常采用“湿”法加工,而生长在罗布斯塔、伊克赛尔撒和利比里卡等较温暖地区的咖啡品种通常采用“干”法加工。在“湿”法中,通过发酵去除粘液和咖啡浆果。去浆后,晒干可降低带皮咖啡豆的含水量。加工中还促进了发酵^[47],这是细菌和真菌等微生物菌群促进的结果^[48]。真菌菌群的组成受“湿”法发酵和干燥的影响^[45,47]。

“干燥”方法包括在采后立即将未拣的整颗咖啡晒干。当出售绿咖啡豆时,干咖啡浆果(果壳)被去除。在“干燥”方法中,快速干燥过程对于减少 OTA 污染至关重要。除非严格遵循建议的每一步持续时间和措施,否则使用“干”方法加工咖啡时,真菌生长的机会更大^[49]。

这两种咖啡加工方法在东南亚是否成功实施,可能受到咖啡农场类型、咖啡收获量和小气候变化的限制,尤其是在干燥期间。但无论何种加工方法,都会导致咖啡中真菌和 OTA 污染的发生。越南的咖啡农场面积通常为 0.1 至 11.2 公顷,而印度尼西亚的咖啡农场面积常为 0.3 至 8 公顷^[50]。农场规模越大,实施“干”的成本方法将更高,但收入的回报预期也会更高。另一方面,小型庭院咖啡农场可根据农民的技能 and 偏好,引入不同的加工方法。ILSI 指南提供了实用的指导,使用红绿灯系统来确定可以针对采后哪个步骤来减少最终产品的真菌毒素污染。对于咖啡,最重要步骤是脱壳、分类和烘焙^[10]。

咖啡壳是 OTA 的潜在来源,尤其是在干燥过程中产生毒性^[45]。咖啡浆果作为丰富的营养源,也是赭曲霉合适的生长基质。在“干燥”过程中,

干燥的咖啡浆果和果壳通常在干燥后被去除。当干燥中发生真菌生长和产毒时,果肉和果壳中的 OTA 可能会转移到烘焙咖啡豆中。相比之下,有报道认为,使用“湿”法加工的咖啡豆具有较低的真菌污染^[49]。

尽管东南亚地区需要建立标准化的分选方法,但对劣质咖啡豆进行分选可降低咖啡中 OTA 污染的可能性^[51]。劣质咖啡豆会对咖啡冲泡的整体味道产生负面影响^[47],咖啡的 OTA 污染说明加强劣质咖啡豆分类确保良好质量和降低 OTA 暴露的必要性,特别是发霉的咖啡豆可能会使未受污染的咖啡豆也受到真菌污染,尤其是在出售或烘焙前被临时储存的咖啡豆。在“湿”法中,也可以通过浮选提前对劣质咖啡进行分选。然而,“干燥”过程涉及在干燥后对劣质咖啡豆的分选,这意味着需要使用形态特征人工识别劣质咖啡豆。

有报道记录了通过热降解减少咖啡中的 OTA 的方法。通常,随着烘焙温度的升高,咖啡中 OTA 的降解也会增加^[52]。在低至 120 °C 的温度下,OTA 可以转化为 2'R-赭曲霉毒素 A (2'R-OTA),而在高于 240 °C 的较长烘烤时间和温度会导致 OTA 和 2'R-OTA 快速降解^[53]。在最近的研究中,咖啡消耗量与咖啡饮用者血清样本中可检测的 2'R-OTA 相关^[54]。然而,与 2'R-OTA 相比,赭曲霉毒素 A 对人血清白蛋白的亲合力更高^[43]。

中度至深度烘焙咖啡的烘焙温度仅在 215 °C 至 225 °C 之间^[55]。由于在中度至深度烘焙参数下,OTA 将快速外消旋化^[53],建议烘焙咖啡应测试 OTA 衍生物及风味参数的变化及其市场接受程度,因为较长的烘焙时间和高温会增加苦味并产生令人不悦的气味^[56]。此外,高温和长时间处理也会导致多酚降解,并会增加咖啡黑色素^[57-58]。轻度和中度烘烤看似可以保留更多的酚类化合物^[58],但可能无法有效降解 OTA。

总体而言,如何减少农场环境中真菌毒素给东南亚咖啡农民们带来了一些挑战。真菌毒素消减策略需要结合东南亚咖啡生产者和消费者的社会经济和行为因素来分析,因为在采后加工过程中实施良好的农业措施仍将取决于材料和设施的可用性、农民的专业知识和消费者的喜好。其他挑战如农民对咖啡真菌毒素污染的了解程度、以

及与食用 OTA 污染咖啡相关的健康风险,也可能影响到一些良好农业措施如何遵守的问题。

5 欧洲谷物生产商:减少镰刀菌毒素的消减程序

谷物采后,粮食收购者和贸易商可以根据使用的杀菌剂介入霉菌的监测和控制。贸易商在收集时,采集并分析其批次中的霉菌毒素水平。收集器应干燥(如有必要)、清洁和保护作物免受虫害,以确保符合欧盟和国家对食品和饲料安全的监管和商业要求。如果检测发现超出食品和饲料的最大限量,则该批次谷物应该转向非食品应用,如生产沼气。

干磨玉米和小麦的可以提供麦粃、不同出粉率的面粉、及用于生产薄片的玉米粉,而副产物主要用于动物饲料。同等量的玉米和小麦在淀粉行业被用来生产淀粉、玉米胚芽和小麦面筋供人类食用。玉米纤维和粗粉、麦麸、小麦胚芽作为动物饲料原料。

收获的谷物必须经干燥将水分降至<14.5%以下,储存于相对湿度约 70%和尽可能低的波动的温度下。尽管在控制、消减真菌和真菌毒素污染上做出了努力,采后去污方法还是可作为消减不可避免和不可预测污染的应急保底措施。

因为灰尘、碎屑、受损和干瘪的谷物中的真菌毒素含量通常较高,因此,清洁和分选可以很好地减少真菌毒素。碾磨会导致真菌毒素分布发生变化,最高含量通常在外层,麸皮中含量较多,面粉中含量较少。烹饪和烘焙通常对真菌毒素的影响可以忽略不计,但其他成分的稀释作用除外。

Schwake-Anduschus^[59]使用布勒 MLU-202 研磨机将不同批次的小麦研磨后分成八个组分,研究了 DON、DON-3G、ADON、ZEA 和 ZEA-14S 的分布。有趣的是,DON 和 DON-3G 在所有组分中的含量相似,仅麸皮中的含量略高于胚乳。相比之下,大量的 ZEA 和 ZEA-14S,毒素位于富含纤维的部分。DON-3G 相对质量比例是游离 DON 的 2.9%至 11.2%;ZEA-14S 的相对质量比例估计超过游离 ZEA 的总量。实验结果表明,运用碾磨技术策略,能显著降低小麦面粉中的 ZEA 和 ZEA-14S 水平是可行的。但 DON 和 DON-3G 是

在所有组分中均匀分布的，通过技术手段不能去除大量的毒素。在所研究的小麦批次中，ZEA 衍生物修饰形式的相对份额高于 DON 共轭物。

谷物作物在开花时最容易感染镰刀菌，开花时水分和湿度高，会增加感染几率。在英国进行的一项为期两年的观察研究，确定了 DON 在谷物中分布的季节性差异^[60]。Thammawong^[61]研究表明真菌生长主要限于谷物的外层，但真菌毒素可扩散到胚乳中。扩散程度与真菌入侵程度无关，这意味着感染后的环境条件在碾磨组分真菌毒素水平上发挥了作用。Kharbikar 等 2015 年发表的一项研究支持了这一结论，发现白面粉中的 DON 浓度高于 2004 年从英国小麦样品中获得的麸皮，这与当时记录了开花后的大量降雨可能有关^[62]。DON 是高度水溶性的，可在寄主植物内转移，有人提出 2004 年英国丰收前的高降雨量导致了 DON 在谷物中的移动。

欧盟对镰刀菌毒素的立法限制从未加工的谷物到加工产品有所降低。最大限量适用于小麦和小麦加工产品的 DON、ZEA、AFs 和 OTA。根据已发表文献的相关科学研究，可以了解从原材料到深度加工最终产品过程中，不同真菌毒素及其法规低限和小麦加工如何影响污染的全面概述^[12]。欧盟对小麦基的食品四种真菌毒素的监管中，大多数数据都可用于 DON，但是小麦加工中的黄曲霉毒素研究很少。总之，比较清除 DON (22)，OTA (3)，NIV (3)，ZEA (1)，(H) T-2 (3) 的 27 个研究的结果表明可获得高于 80% 的降低，而集中在 DON 的 51 项研磨研究比较，表明在麦粉中可以增加 20%，同时降低至 100%。相应地，观测到麸皮毒素增加：DON 和 ZEA 高达 300%，而 T-2 和 HT-2 毒素高达 500%。加工步骤包括初级加工（清洁和研磨）和次级加工程序（如烘焙中的发酵和热处理）。

玉米利用湿磨或干磨来加工。干磨是去除谷物外壳以获得部分胚乳，产生玉米糝、胚芽和面粉等产品的物理过程。玉米湿磨过程由两步构成：在 50 °C 下浸泡 30~36 h 后，将浸泡的水与玉米粒分离。泡胀的谷粒通过多步碾磨、筛分和离心分离出玉米胚芽、玉米白纤维、玉米蛋白和玉米淀粉。白纤维与浆水混合形成玉米纤维。

玉米的这些研磨过程促使玉米副产品的产生，在分离后获得的这些副产品，常含有不均匀分布的真菌毒素。进入玉米湿磨过程的低水平真菌毒素在其正常使用的加工步骤下，可以从食品配料产品中去除。从玉米淀粉、玉米衍生甜味剂和玉米油中去除黄曲霉毒素和伏马毒素等真菌毒素，湿磨是有效的工艺^[63]。

玉米粒的浸泡可导致真菌毒素的减少，这取决于真菌毒素的溶解度和分散特性。大约 40% 到 70% 的初始污染最终进入了浆水。玉米赤霉烯酮非常疏水，大约初始量的 50% 将保留在玉米蛋白粉中。玉米胚芽中独特的真菌毒素类型，占到真菌毒素的 10% 左右。经过去除细菌、白纤维和麸质后，减少可溶性蛋白质粗淀粉洗涤—这种洗涤过程通常会真菌毒素降低到起始量的几个百分点^[8]。依据三年内对镰刀菌真菌毒素的观察结果，欧盟委员会为淀粉行业提供了适用于湿磨工艺的未加工玉米豁免最大限量。科学数据表明，无论未加工玉米中存在的镰刀菌毒素水平如何，在玉米生产的淀粉中均未检测到镰刀菌毒素或仅检测到非常低的水平。由于浸泡浆水与白纤维混合，伏马毒素主要存在玉米蛋白饲料中^[8,64]。

将小麦经过碾磨成小麦粉和麦麸后，大部分真菌毒素留存在于麦麸中。湿小麦粉分离最终用于生产谷朊粉、小麦淀粉和小麦可溶物。小麦可溶物用作乙醇生产的原料或起始材料。

6 东南亚地区消减真菌毒素方面的观点和存在的差距

消减真菌毒素的监管政策在东南亚地区并不一致。然而，各国政府、粮农组织 FAO、世界卫生组织 WHO 和联合国环境规划署早在 1987 年就联合提出了标准化和建立协调研究和监测计划的推荐措施^[65]。以下是东南亚国家联盟 (ASEAN) 就如何应对真菌毒素消减和监管的现状、以及哪些因素被认为是该地区瓶颈的关键因素进行的阐述。

6.1 监管因素

东盟已采取措施优化东盟成员国之间的贸易。该地区成立了东盟食品安全风险评估中心 (ARAC)，该中心由东盟各地的科学专家组成，

通过开发基于证据的食品安全和质量数据，为公众提供科学意见。ARAC 已启用东盟标准和质量制备食品和产品咨询委员会，该委员会提出了食品和饲料中污染物和毒素的统一最高水平。这些水平基于 CODEX STAN 193—1995（食品中污染物和毒素通用标准），旨在通过建议东盟相关部门机构使用食品和饲料中污染物的统一最高水平，防止东盟地区出现不必要的监管瓶颈^[66]。然而，

监测这些不具约束力的建议给一些中小企业带来了困难，这些中小企业在东盟地区占比高达 97% 并提供高达 80% 的总就业机会^[67]。

6.2 环境因素

与其他地区一样，东盟地区也由各种地形和农业系统组成，不仅在成员国之间，而且在各国家内部。图 1 显示了该地区在温度和湿度方面的气候变化。

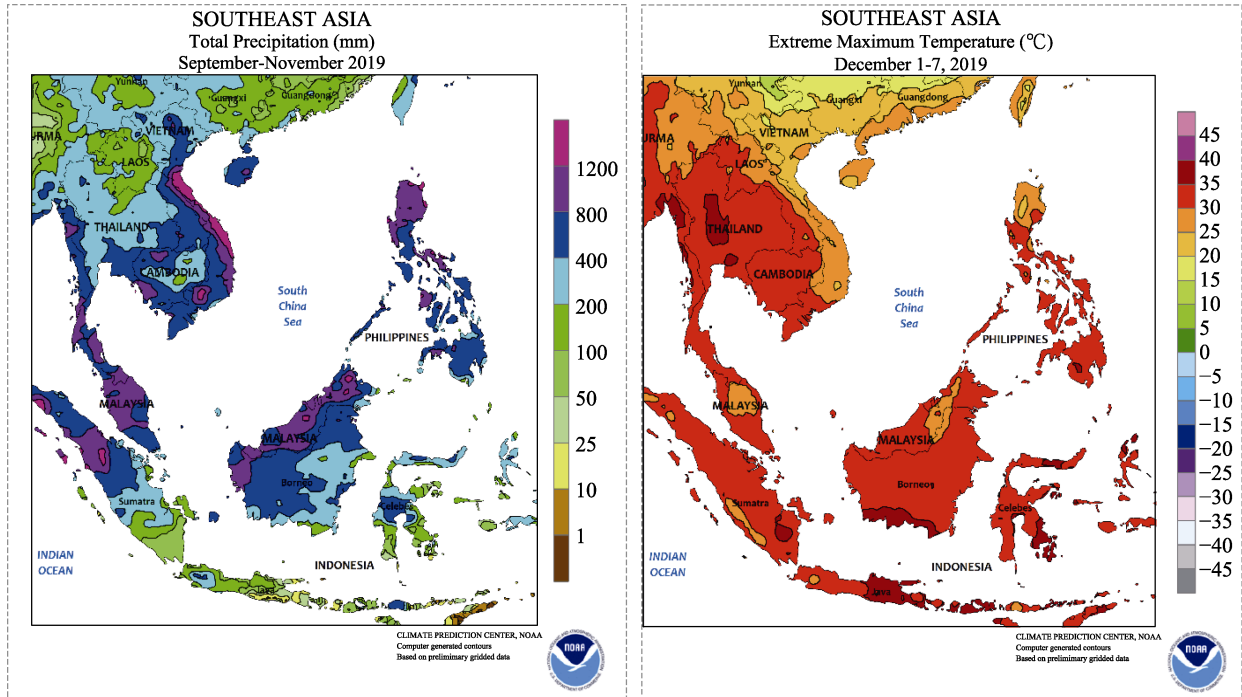


图 1 东南亚地区降水（左）和温度（右）的变化

Fig.1 Variation in precipitation (left) and temperature (right) within the Southeast Asian region

这些差异导致该区域某一地区的某些真菌毒素的流行率高于另一地区。气候变化及其日益增加的不可预测性也将导致东盟地区常见作物（如水稻和玉米）的真菌多样性发生变化。这可能会导致作物产量和质量下降^[68]。

在亚洲其他非东盟国家也存在这些影响。例如，在孟加拉国黄曲霉毒素污染具高度可变性，在以大米为主要饮食的发展中国家，污染程度高于发达国家^[69]。在印度旁遮普地区，由于 8 月至 3 月的寒冷季节加上高湿度、真菌快速生长，因此水稻中 AFs 的污染水平很高^[70]。

就东盟对毒性和发生情况的监测而言，各成员国的情况各不相同。例如，在泰国，两个部委（农业部和公共卫生部）的任务是通过监测和提供证据供泰国决策者评估，防止田间真菌毒素的

增长。另一方面，泰国食品和药物管理局（FDA）制定了真菌毒素的最高限量并进行风险评估，以确保商品中的最大含量对消费者是安全的^[71]。

6.3 经济因素

自由贸易政策和双边贸易协定的增加可能会导致对内和出口产品的两套标准。例如，欧盟和越南于 2020 年 2 月达成双边自由贸易协定，旨在促进两个经济体之间的贸易和投资。然而，随着这项贸易协议的批准，欧盟委员会确定了越南需要解决的贸易技术壁垒。这包括标准化机构参与国际标准的制定和使用相关国际标准作为国内标准的基础，以及审查国家和区域标准以避免信息重叠和减少阻碍贸易的监管瓶颈^[72-73]。其他希望与欧盟签订自由贸易协定的东盟成员国也有望在未来遵循这些建议。最后，由于每个东盟成员国

的消费者偏好不同, 每个国家机构制定的法规也不同。为促进这些自由贸易协定的成功, 需要协调这些政策, 需要更全面的记录。

7 结论和展望

针对欧洲和东南亚情况的比较, 得出了一些结论和展望: 它们也可以被纳入涉及世界其他地区的更为普遍的框架。

许多国际机构正在努力实现真菌毒素监管限值的普遍标准化。迄今为止, 已有 100 多个国家原料、食品和饲料产品制定了真菌毒素法规。对已描述的数百种真菌毒素, 法规中涉及的数量有限但在不断增加。这意味着有关这些毒素的任何法规都将需要与其存在贸易协定的国家协调一致。然而, 必须注意的是, 科学风险评估通常会受到文化和政治的影响, 反之, 又会影响真菌毒素的贸易法规。

通常, 一些商品和加工产品含有不同的真菌毒素, 需要更好的分析策略。关注多种真菌毒素污染, 必须同时检测更多的真菌毒素—近年来, 多种真菌毒素和其共轭形式的水平得到了更好的表征。镰刀菌毒素可由 50 多种镰刀菌产生, 并在合适条件下, 感染一些在开花期发育的谷物(如小麦、玉米)。真菌毒素母体的修饰形式的更多信息正变得可用, 这与真菌毒素种类有关, 其可低至 10% (例如 T-2 和 HT-2 毒素的总和), 但也可高达 100% (例如玉米赤霉烯酮和相关化合物)。

由于溶解度和分配系数的差异, 采前的降雨会产生影响, DON 比 ZEA 有更好的流动性。由于加工过程中的差异, 例如温度、添加剂、加工时间和面包大小, 以及修饰形式的出现, 使得文献中关于 DON 在小麦和小麦制品加工过程中的存在去向仍存在相互矛盾的数据。因此, 必须开展进一步的研究, 以揭示 DON 修饰形式的形成和发生机制。这也适用于其他研究较少的真菌毒素及其共轭形式。

如何管理谷物和以谷物食品生产链中的不同真菌毒素显然取决于所选择的工艺。从未加工的谷物到加工过的谷物产品, 可以根据所使用的工艺, 观察到毒素减少。从未加工的小麦到加工产品, 镰刀菌真菌毒素的限制降低。

在干磨加工中, 真菌毒素的重新分布通常会导导致麸皮和胚芽的含量增加, 而在烘焙面粉和二级面粉中, 与起始原料相比, 真菌毒素的含量较低。在淀粉行业中建立了最大程度降低真菌毒素水平的单元操作, 洗涤粗淀粉最多可减少 99%, 其缺点是真菌毒素最终进入动物饲料副产品中重新分布。使用淡水可以减少小麦谷朊粉中的真菌毒素, 但现代淀粉加工中的一个限制因素是如何达到最小水分利用和水分最大重复利用的目的。

比较欧盟和东南亚的情况使得许多差异变得明显。从气候学角度看, 东南亚属于有利于许多作物产生真菌毒素的区域。查看 Biomin 和 Cargill (<https://notox-online.com/>) 等公司提供的季度报告, 就无法否认, 东南亚和亚洲的黄曲霉毒素、伏马毒素、玉米赤霉烯酮、赭曲霉毒素和新出现毒素的发生率是最高的, 这对主管当局来说, 确保其食物消费群体安全是一个巨大的挑战。

东南亚地区更易生产欧洲不生产的大米和咖啡等主要作物。大米是东南亚地区最重要的主食, 科学文献正突出了在其中发现的真菌毒素的数量和水平。讨论了 OTA 在咖啡生产中的影响, 并表明对于一些黑咖啡, 可以使用采后解决方案提供安全的终端产品。

随着更好的分析工具的出现, 通过食品制造商与主管当局之间的合作, 主管当局能完善和扩大监管计划以执行法规保护人群, 一旦可通过对简单的生物样品检测多种真菌毒素影响来进行更适当的风险评估时, 那么, 未来将会更美好。

随着不同真菌毒素的负面影响得到更好的评估, 更完善的风险评估则能制定。通过规则施加更多限制, 并权衡贸易协定, 允许主要作物的流通。通过部署系列生产步骤影响真菌毒素最终水平生产更安全的食品, 同时不能不考虑气候变化的影响。这将会是欧洲和东南亚面临的共同挑战。

致谢: 这项研究工作作为国际生命科学研究所 (ILSI) 欧洲和 ILSI 东南亚在 WMF 亚洲会议上组织的会议上作的进展报告, 其建立在 ILSI 欧洲加工相关化合物工作组以前的出版物的基础上, 但未由欧洲 ILSI 公开发布。本文表达的观点和本出版物的结论均为作者的观点, 并不代表

ILSI Europe 或其成员公司的观点, 也不代表任何监管机构的观点。作者衷心感谢 Armando Venancio 教授(葡萄牙米尼奥大学)、Michelangelo Pascale 博士(意大利食品生产科学研究所国家研究委员会)、Gloria Pellegrino 博士和 Manuela Rosanna Ruosi 博士(乐维萨, 意大利)、Natalie Thatcher 博士(亿滋国际, 英国)和 Gerrit Speijers 博士(顾问)富有成效的建议和修改意见。

参考文献:

- [1] MARÍN S, CANO-SANCHO G, SANCHIS V, et al. The role of mycotoxins in the human exposome: Application of mycotoxin biomarkers in exposome-health studies[J]. *Food Chem. Toxicol.*, 2018, 121: 504-518.
- [2] SPEIJERS G J A, SPEIJERS M H M. Combined toxic effects of mycotoxins, toxicology letters[J]. 2004, 153, 1: 91-98.
- [3] ALASSANE-KPEMBI I, SCHATZMAYR G, TARANU I, et al. Mycotoxins co-contamination: methodological aspects and biological relevance of combined toxicity studies[J]. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2017, 57, 16: 3489-3507.
- [4] SMITH M C, MADEC S, COTON E, et al. Natural co-occurrence of mycotoxins in foods and feeds and their in vitro combined toxicological effects[J]. *Toxins (Basel)*, 2016, 8(4), doi: 10.3390/toxins8040094.
- [5] International Agency for Research on Cancer. Improving public health through mycotoxin control[Z]. *IARC Sci. Publ. Ser.*, 158, 2012, doi: 10.1016/j.fct.2012.09.032.
- [6] SALAPETCH S. ASEAN policy on mycotoxins: past, present and future In: book of abstracts of lectures and posters, WMFmeetsASIA – the 12th conference of The World Mycotoxin Forum[Z]. Bangkok 13-15th Januray 2020, 2020, 22.
- [7] SUMAN M, GENEROTTI S. Chapter 5: Transformation of mycotoxins upon food processing: masking, binding and degradation phenomena[M]. *Issues Toxicol.*, 2016, 24: 73-96.
- [8] KARLOVSKY P. Impact of food processing and detoxification treatments on mycotoxin contamination[J]. *Mycotoxin Res.*, 2016, 32(4): 179-205.
- [9] SPEIJERS G. Evaluation agronomic practices for mitigation of natural toxins.2010.
- [10] PINTON P. ILSI Europe practical guidance to mitigation of mycotoxins during food processing[Z]. *ILSI Eur. Rep. Ser.*, no. September, 2019.
- [11] The World Mycotoxin Forum.EUROPEmeetsASIA – Mitigation of mycotoxins during food processing – lessons and practical guidance from recent European studies and applicability to South East Asia, 2020, Accessed: Jun. 09, 2020. [Online]. Available: <https://www.wmfmeetsasia.org/>.
- [12] SCHAARSCHMIDT S, FAUHL-HASSEK C. The fate of mycotoxins during the processing of wheat for human consumption[J]. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 2018, 17(3): 556-593.
- [13] SCHAARSCHMIDT S, FAUHL-HASSEK C. Mycotoxins during the processes of nixtamalization and tortilla production[J]. *Toxins (Basel)*, 2019. 11(4): 1-27.
- [14] SCHAARSCHMIDT S, FAUHL-HASSEK C. The fate of mycotoxins during secondary food processing of maize for human consumption[J]. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 2021, 20(1): 91-148.
- [15] STADLER D, BERTHILLER F, SUMAN M, et al. Novel analytical methods to study the fate of mycotoxins during thermal food processing[J]. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2020, 412(1): 9-16.
- [16] BITTNER A, CRAMER B, HUMPF H U. Matrix binding of ochratoxin a during roasting[J]. *J. Agric. Food Chem.*, 2013, 61 (51) : 12737-12743.
- [17] SEEFELDER W, KNECHT A, HUMPF H U. Bound fumonisin B1: Analysis of fumonisin-B1 glyco and amino acid conjugates by liquid chromatography-electrospray ionization-tandem mass spectrometry[J]. *J. Agric. Food Chem.*, 2003, 51(18): 5567-5573.
- [18] KUCHENBUCH H S, BECKER S, SCHULZ M, et al. Thermal stability of t-2 and ht-2 toxins during biscuit-and crunchy muesli-making and roasting, *Food Addit. Contam. - Part A*[J]. *Chem. Anal. Control. Expo. Risk Assess.*, 2018, 35(11) : 2158-2167.
- [19] STADLER D. Untargeted LC-MS based 13C labelling provides a full mass balance of deoxynivalenol and its degradation products formed during baking of crackers, biscuits and bread[J]. *Food Chem.*, 2019, 279: 303-311.
- [20] JEFCA. Safety evaluation of certain food additives and contaminants: Aflatoxins. In *Compendium of Food Additive Specifications*, Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, Ed.; WHO: Geneva, Switzerland, 2008: 305-356.
- [21] JEFCA. Evaluation of certain contaminants in food. Eighty-third report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA); WHO: Geneva, Switzerland, 2017; ISBN 9789241210027., no. 1002. 2017.
- [22] European Commission, Commission Regulation (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs, 2006.
- [23] ESKOLA M, ALTIERI A, GALOBART J. Overview of the activities of the European Food Safety Authority on mycotoxins in food and feed[J]. *World Mycotoxin J.*, 2018, 11(2): 277-289.
- [24] EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain. Scientific Opinion on the risks for human and animal health related to the presence of modified forms of certain mycotoxins in food and feed. *EFSA J.*, 2014, 12(12): 3916.
- [25] AVIDAL A, AMBROSIO V, SANCHIS A J, et al. Enzyme bread improvers affect the stability of deoxynivalenol and deoxynivalenol-3-glucoside during breadmaking[J]. *Food*

- Cheistry., 2016, 208: 288-296.
- [26] GRUBER-DORNINGER C, NOVAK B, NAGL V, et al. Emerging mycotoxins: Beyond traditionally determined food contaminants[J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2017, 65(33): 7052-7070.
- [27] JUAN C, MAÑES J, RAIOLA A, et al. Evaluation of beauvericin and enniatins in Italian cereal products and multicereal food by liquid chromatography coupled to triple quadrupole mass spectrometry[J]. *Food Chemistry*, 2013, 140: 755-762.
- [28] EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain. Scientific Opinion on the risks to human and animal health related to the presence of beauvericin and enniatins in food and feed[J]. *EFSA Journal*, 2014, 12(8): 3802.
- [29] EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain. Scientific Opinion on the risk for public and animal health related to the presence of sterigmatocystin in food and feed[J]. *EFSA Journal*, 2013, 11: 3254.
- [30] EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain. Scientific Opinion on the risks for animal and public health related to the presence of *Alternaria* toxins in feed and food[J]. *EFSA Journal*, 2011, 9(10): 2407.
- [31] ASSUNÇÃO R. Portuguese children dietary exposure to multiple mycotoxins – An overview of risk assessment under MYCOMIX project[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2018, 118, doi: 10.1016/j.fct.2018.05.040.
- [32] BOUAZIZ C. Different apoptotic pathways induced by zearalenone, T-2 toxin and ochratoxin A in human hepatoma cells[J]. *Toxicology*, 254(1-2): 19-28.
- [33] ARCE-LÓPEZ B, LIZARRAGA E, VETTORAZZI A, et al. Human biomonitoring of mycotoxins in blood, plasma and serum in recent years: A review[J]. *Toxins (Basel)*, 2020, 12(3). doi: 10.3390/toxins12030147.
- [34] EFSA Scientific Committee. Guidance on harmonised methodologies for human health, animal health and ecological risk assessment of combined exposure to multiple chemicals[J]. *EFSA Journal*, 2019, 17(3): 5634.
- [35] European Commission. Communication from the Commission to the European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and The Committee of the Regions. 2011, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [36] EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain. Appropriateness to set a group health-based guidance value for fumonisins and their modified forms[J]. *EFSA Journal*, 2018, 16(2): 5172.
- [37] LERDA D. Mycotoxins Factsheet. 2011, [Online]. Available: https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/Factsheet_Mycotoxins_2.pdf.
- [38] European Commission. Commission Regulation (EC) No 401/2006 of 23 February 2006 laying down the methods of sampling and analysis for the official control of the levels of mycotoxins in foodstuffs. *Off. J. Eur. Union*, 2006, 70(401): 12-34. [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006R0401&qid=1490946469496&from=NL>.
- [39] European Commission. Regulation (EC) No 882/2004 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on official controls performed to ensure the verification of compliance with feed and food law, animal health and animal welfare rules. *J. Off.*, 2004, 165: 1-165.
- [40] TITTEMIER S A. Developments in mycotoxin analysis: An update for 2017-2018[J]. *World Mycotoxin Journal*, 2019, 12(1): 3-9.
- [41] KHANEGHAH A M, FAKHRI Y, ABDI L, et al. The concentration and prevalence of ochratoxin A in coffee and coffee-based products: A global systematic review, meta-analysis and meta-regression[J]. *Fungal Biology*, 2019, 123(8): 611-617.
- [42] SOUSA T M A. Evaluation of the effects of temperature on processed coffee beans in the presence of fungi and ochratoxin A[J]. *Journal of Food Safety*, 2019, 39(1): 1-9.
- [43] SUECK F. Interaction of ochratoxin a and its thermal degradation product 2'R-ochratoxin a with human serum albumin[J]. *Toxins (Basel)*, 2018, 10(7), doi: 10.3390/toxins10070256.
- [44] WANG Y. Ochratoxin A producing fungi, biosynthetic pathway and regulatory mechanisms[J]. *Toxins (Basel)*, 2016, 8(3): 1-15, doi: 10.3390/toxins8030083.
- [45] VIEGAS C. Fungal contamination in green coffee beans samples: A public health concern. *J. Toxicol. Environ. Heal. - Part A Curr.* 2017, 80 (13-15): 719-728.
- [46] JESZKA-SKOWRON M, SENTKOWSKA A, PYRZYŃSKA K, et al. Chlorogenic acids, caffeine content and antioxidant properties of green coffee extracts: influence of green coffee bean preparation[J]. *European Food Research and Technology*, 2016, 242(8): 1403-1409.
- [47] POLTRONIERI P, ROSSI F. Challenges in specialty coffee processing and quality assurance[J]. *Challenges*, 2016, 7(2): 19. doi: 10.3390/challe7020019.
- [48] HAILE M, KANG W H. The role of microbes in coffee fermentation and their impact on coffee quality[J]. *Journal of Food Quality*, 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/4836709.
- [49] GEREMEW T, ABATE D, LANDSCHOOT S, et al. Occurrence of toxigenic fungi and ochratoxin A in Ethiopian coffee for local consumption[J]. *Food Control*, 2016, 69: 65-73.
- [50] BYRAREDDY V, KOUADIO L, MUSHTAQ S, et al. Sustainable production of robusta coffee under a changing climate: A 10-year monitoring of fertilizer management in coffee farms in Vietnam and Indonesia[J]. *Agronomy*, 2019, 9(9), doi: 10.3390/agronomy9090499.
- [51] TANIWAKI M H, PITT J I, COPETTI M V, et al. Understanding mycotoxin contamination across the food chain in Brazil: Challenges and opportunities[J]. *Toxins (Basel)*, 2019, 11(7): 1-17.
- [52] LEITÃO A L. Occurrence of Ochratoxin A in coffee: Threads and solutions—a mini-review[J]. *Beverages*, 2019, 5(2): 36. doi: 10.3390/beverages5020036.

- [53] SUECK F, HEMP V, SPECHT J, et al. Occurrence of the ochratoxin A degradation product 2' R-ochratoxin a in coffee and other food: An update[J]. *Toxins (Basel)*, 2019, 11(6): 1-10.
- [54] WARENSJÖ LEMMING E. Mycotoxins in blood and urine of Swedish adolescents—possible associations to food intake and other background characteristics[J]. *Mycotoxin Research*, 2020, 36(2): 2: 193-206.
- [55] FULLER M, RAO N Z. The Effect of time, roasting temperature, and grind size on caffeine and chlorogenic acid concentrations in cold brew coffee[J]. *Sci. Rep.*, 2017, 7(1): 1-9.
- [56] ANISA A, SOLOMON W K, SOLOMON A. Optimization of roasting time and temperature for brewed hararghe coffee (*Coffea Arabica L.*) using central composite design[J]. *International Food Research Journal*, 2017, 24(6): 2285-2294.
- [57] DYBKOWSKA E, SADOWSKA A, RAKOWSKA R, et al. Assessing polyphenols content and antioxidant activity in coffee beans according to origin and the degree of roasting[J]. *Rocz. Panstw. Zakl. Hig.*, 2017, 68(4): 347-353.
- [58] KRÓL K, GANTNER M, TATARAK A, et al. The content of polyphenols in coffee beans as roasting, origin and storage effect[J]. *European Food Research and Technology*, 2020, 246(1): 33-39.
- [59] SCHWAKE-ANDUSCHUS C, PROSKE M, SCIURBA E, et al. Distribution of deoxynivalenol, zearalenone, and their respective modified analogues in milling fractions of naturally contaminated wheat grains[J]. *World Mycotoxin Journal*, 2015, 8(4): 433-443.
- [60] EDWARDS S G. Zearalenone risk in European wheat[J]. *World Mycotoxin Journal*, 2011, 4(4): 433-438.
- [61] THAMMAWONG M. Distinct distribution of deoxynivalenol, nivalenol, and ergosterol in fusarium-infected japanese soft red winter wheat milling fractions[J]. *Mycopathologia*, 2011, 172(4): 323-330.
- [62] KHARBIKAR L L, DICKIN E T, EDWARDS S G. Impact of post-anthesis rainfall, fungicide and harvesting time on the concentration of deoxynivalenol and zearalenone in wheat. *Food Addit. Contam. - Part A*[J]. *Chem. Anal. Control. Expo. Risk Assess*, 2015, 32(12): 2075-2085.
- [63] White Technical Research Group. *Mycotoxins*. 2011.
- [64] PARK J. Distribution analysis of twelve mycotoxins in corn and corn-derived products by LC-MS/MS to evaluate the carry-over ratio during wet-milling[J]. *Toxins (Basel)*, 2018, 10(8): 1-14.
- [65] FLACH M. Mycotoxin prevention and control in foodgrains. 1987, [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/X5036E/x5036E1b.htm>.
- [66] ASEAN Consultative Committee on Standards and Quality. ASEAN Principles and Criteria for the Establishment of Maximum Level for Contaminants and Toxins in Food and Feed. In 23rd PFPWG Meeting, 2016, 1-19.
- [67] LEE C, NARJOKO D, OUM S. SMEs and Economic Integration in Southeast Asia[M]. and S. O. Cassey Lee, Dionisius Narjoko, Ed. 2019.
- [68] MAGAN N M A. What climate change means for fungi, mycotoxins, food and feed safety and security in the Asian Region. In Book of Abstracts of lectures and posters, WMFmeetsASIA—the 12th Conference of The World Mycotoxin Forum, Bangkok 13-15th Januray 2020, 2020, 20.
- [69] ALI N. Aflatoxins in rice: Worldwide occurrence and public health perspectives[J]. *Toxicol. Reports*, 2019, 6: 1188-1197.
- [70] IQBAL S Z, ASI M R, HANIF U, et al. The presence of aflatoxins and ochratoxin A in rice and rice products; And evaluation of dietary intake[J]. *Food Chemistry*, 2016, 210: 135-140.
- [71] MAHAKARNCHANAKUL W. Regulations relating to mycotoxins in food and feed in Thailand. In: Book of Abstracts of lectures and posters, WMFmeetsASIA—the 12th Conference of The World Mycotoxin Forum, Bangkok 13-15th Januray 2020, 2020, 39.
- [72] European Union Delegation in Vietnam. Guide to the EU-Vietnam Trade and Investment Agreements. Vietnam: DG Trade report[R], 2017, [Online]. Available: https://trade.ec.europa.eu/doclib/docs/2016/june/tradoc_154622.pdf.
- [73] European Parliament. Conclusion of the EU-Viet Nam Free Trade Agreement (Resolution). no. May 2017, 2020. 🇪🇺
- 备注：本文的彩色图表详见本期 PC31，也可从本刊官网（<http://lyspkj.ijournal.cn>）、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。

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）
专业校对：伍松陵
译文审核：谭洪卓