

“守护粮食食品安全，全球携手在行动”特约专栏文章之一

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.06.001

RUDOLF K, ESKOLA M, BERTHILLER F, 等. 全球食品和饲料链中生物毒素早期预警、监测和毒性评估的挑战和解决方案[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(6): 1-8.

KRSKA R, ESKOLA M, BERTHILLER F, et al. Global challenges and solutions in the early warning, monitoring and toxicity assessment of biotoxins in the food and feed chain[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(6): 1-8.

# 全球食品和饲料链中生物毒素 早期预警、监测和毒性评估的 挑战和解决方案

Rudolf Krska<sup>1,2</sup>, Eskola Mari<sup>3</sup>, Berthiller Franz<sup>1</sup>, Nielen Michel<sup>4</sup>, Oswald Isabelle<sup>5</sup>,  
Elliott Chris<sup>2</sup>, McNerney Oonagh<sup>6</sup>, Botana Luis Miguel<sup>7</sup>, Malachová Alexandra<sup>8</sup>

1. 维也纳自然资源与生命科学大学, 生物分析与农业代谢组学研究所, 农业生物技术系, 奥地利 图尔恩 3430;
2. 贝尔法斯特女王大学, 生物科学学院, 全球食品安全研究所, 英国 北爱尔兰 贝尔法斯特 BT9 5DL;
3. Medfiles 临床实验有限公司, 芬兰 万塔 01640;
4. 瓦赫宁根大学, 有机化学实验室, 荷兰 瓦赫宁根 6708 PB;
5. 图卢兹大学, 食品毒理学研究中心, 法国 图卢兹塞地斯 F-31027;
6. IRIS 数字工程公司, 西班牙 巴塞罗那 08940;
7. 圣地亚哥德孔波斯特拉大学, 兽医学院药理学系, 西班牙 卢戈 27002;
8. 奥地利饲料和食品质量、安全和创新能力中心, 奥地利 图尔恩 3430)

**摘要:** 确保世界人口不断增长下的食品供应安全和保障是巨大和紧迫的需求。然而, 全球农业和食品行业仍易受植物、藻类, 尤其是真菌产生的生物毒素污染问题的挑战; 随着全球变暖和极端天气事件频发, 这些有毒代谢产物的发生愈发难以预测。为了提升食品和饲料链中生物毒素的预警、监测和毒性评估方法, 总结在各个科学领域和方法中创新所需的多学科、多部门互补能力, 具体包括使用卫星和无人机成像的大数据方法、便携式监测设备以及使用蛋白质组学和转录组学对(新兴)生物毒素进行(联合)毒性测试。

**关键词:** 食品和饲料安全; 预测; 早期预警; 藻毒素; 真菌毒素; 植物毒素

**中图分类号:** TS201.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2021)06-0001-08

**网络首发时间:** 2021-11-03 13:09:37

**网络首发地址:** <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.ts.20211102.0905.002.html>

**收稿日期:** 2021-08-27

**基金项目:** 本工作由奥地利饲料和食品质量、安全和创新能力中心(FFoQSI)共同资助。COMET-K1 能力中心 FFoQSI 是由奥地利运输、创新和科技部和数字与经济事务部以及奥地利地方政府在 COMET 项目的创新能力中心资助的。COMET 项目由奥地利研究促进局 FFG 负责。

**Supported by:** This work was co-funded by the Austrian Competence Centre for Feed and Food Quality, Safety and Innovation (FFoQSI). The COMET-K1 competence center FFoQSI is funded by the Austrian ministries BMVIT and BMDW and the Austrian provinces Niederösterreich, Upper Austria, and Vienna within the scope of COMET—Competence Centers for Excellent Technologies. The program COMET is handled by the Austrian Research Promotion Agency FFG.

**作者简介:** Rudolf Krska, 男, 1964 年出生, 教授, 原国际真菌毒素学会主席, 所长, 研究方向为生物分析与食品安全, 食品过敏源检测和污染物分析。E-mail: rudolf.krska@boku.ac.at. 作者详细介绍见 PC12-PC17。本文英文原文详见 P9-P15。

## Global Challenges and Solutions in the early Warning, Monitoring and Toxicity Assessment of Biotoxins in the Food and Feed Chain

RUDOLF Krska<sup>1,2</sup>, ESKOLA Mari<sup>3</sup>, BERTHILLER Franz<sup>1</sup>, NIELEN Michel<sup>4</sup>, OSWALD Isabelle<sup>5</sup>, ELLIOTT Chris<sup>2</sup>, MCNERNEY Oonagh<sup>6</sup>, BOTANALUIS Miguel<sup>7</sup>, MALACHOVÁ Alexandra<sup>8</sup>

(1. Institute of Bioanalytics and Agro-Metabolomics, Department of Agrobiotechnology (IFA-Tulln), University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna (BOKU), 3430 Tulln, Austria; 2. Institute for Global Food Security, School of Biological Sciences, Queen's University Belfast, Belfast BT9 5DL, Northern Ireland, UK; 3. Medfiles Ltd, Rajatorpantie 41 C, 01640 Vantaa, Finland; 4. Laboratory of Organic Chemistry, Wageningen University, 6708 PB Wageningen, Netherlands; 5. Toxalim (Research Center in Food Toxicology), University of Toulouse, F-31027 Toulouse cedex 3, France; 6. IRIS Technology Solutions S.L., 08940 Cornellà de Llobregat, Spain; 7. Departamento de Farmacología, Facultad de Veterinaria, Universidade de Santiago de Compostela, Lugo, 27002 Spain; 8. FFoQSI GmbH, FFoQSI Austrian Competence Centre for Feed & Food Quality, Safety and Innovation, 3430 Tulln, Austria)

**Abstract:** There is a massive and urgent need to ensure safety and security of the food supply of the world's growing population. However, global agriculture and food industries continue to be vulnerable to problems of contamination with biotoxins produced by plants, algae and particularly by fungi; with global warming and extreme weather events making the occurrence of these toxic metabolites even more unpredictable. In this paper we summarize the multidisciplinary, multi-sectoral complementary competencies needed to innovate in various scientific fields and approaches, so strongly needed to develop improved early warning, monitoring and toxicity assessment of biotoxins in the food and feed chain. These include big data approaches using satellite and drone images, portable monitoring devices and (combined) toxicity testing of (emerging) biotoxins using proteomics and transcriptomics.

**Key words:** food and feed safety; prediction; early warning; phycotoxins; mycotoxins; plant toxins

### 1 食品和饲料链中的生物毒素

食品、宠物食品和动物饲料中受到有毒的天然物质（即生物体产生的所谓生物毒素）污染是整个食品和饲料链（包括水产养殖业）利益相关方十分关心的问题。上述生物体包括真菌、植物和藻类，它们分别产生真菌毒素、植物毒素和藻毒素。这些有害的次级代谢物通常是由机体的防御机制产生的，以响应其生长环境的变化。生物毒素一般以复杂的混合物形式存在于各种水产和农产品中，包括人类和动物的食品。生物毒素对人类和动物健康产生危害，可诱发多种急性和慢性的不良影响，如 DNA 损伤、癌症形成以及损害中枢神经系统、肾脏、肝脏和免疫系统，影响生殖发育，甚至死亡<sup>[1]</sup>。这些毒素不仅威胁人类身体健康，而且对牲畜和宠物的健康、福利和生产力均产生不利影响。根据欧洲食品和饲料快速预警系统（RASFF）的数据，欧盟拒收进口食品的主要原因是真菌毒素污染超标<sup>[2]</sup>。目前，欧洲

食品安全局（EFSA）在最近的科学意见中认为普通欧洲消费者特别是儿童每天接触多种生物毒素可能对其健康造成影响<sup>[3-5]</sup>。

尽管投入了大量的研究资金，但对这些有毒次级代谢物的预防和控制（早期预警系统、监测和毒理学评估）仍然面临诸多问题，农业、食品和饲料行业易受到生物毒素污染的影响。此外，气候变化正日益影响全球生物毒素分布地图<sup>[6-7]</sup>。环境的变化影响生物之间的相互作用，会促进某些产毒生物的生长，并改变所产毒素的类型和数量。由于气候变化，生物毒素对农业和水产养殖以及人类和动物的影响将会增加。造成这种情况的原因之一是温度、湿度和虫害对作物造成损害，而这些因素都将有助于真菌传播和真菌毒素产生。如 2013 年塞尔维亚的严重干旱导致 70% 的玉米受到黄曲霉毒素（AFs）污染<sup>[8]</sup>，而用这些玉米喂养奶牛导致牛奶中发现高水平污染的黄曲霉毒素 M1，高达欧盟法定限量的两倍。据报道，植物

毒素和藻毒素也面临类似的挑战。除了全球藻毒素发生的变化外,另一个例子是最近入侵欧洲水域的河豚携带致命的河豚毒素 (TTX)<sup>[9]</sup>。每年约有 6 万人的中毒事件与藻类产生的毒素有关,总死亡率约为 1.5%<sup>[10]</sup>。鉴于藻类的扩散和在新的地理区域流行所构成新的全球健康风险,应欧盟委员会要求,EFSA 就海洋生物毒素(包括目前受欧盟法律限制的种类和新兴毒素)制定了一系列科学意见<sup>[11]</sup>。此外,EFSA 研究表明接触植物毒素,特别是吡咯烷生物碱(PAs)和托烷生物碱(TAs),不仅对人类健康产生影响,而且会对儿童和某些植物性食品高消费者构成健康威胁<sup>[3]</sup>。

近年来,欧洲异常天气条件降低了粮食和饲料的质量和安全性,由于生物毒素发生率异常的高,造成了严重的经济损失<sup>[12]</sup>。据欧盟估计,每年真菌毒素造成的损失在 5%~10%的水平,这相当于主要粮食作物中仅小麦的损失就高达 12~24 亿欧元。与此同时,2050 年世界人口估计将超过 90 亿,生物毒素的不利影响是食品安全的重要风险因素<sup>[13]</sup>。有毒有害藻华(HABs)的发生会严重影响海洋养殖场中贝类和鱼类的生产。根据联合国粮食及农业组织(FAO)提供的贝类水产养殖数据,2000—2009 年 HABs 对欧洲经济的损失达 7 540 万美元,占贝类行业总价值的 7%。仅就欧洲贻贝产业而言,2000—2009 年期间的损失为 3 200 万美元<sup>[14]</sup>。此外,越来越多的证据表明欧洲新兴出现的藻毒素与气候变化有关,主要是由于微藻随着海水变暖向北移动<sup>[15]</sup>。在欧洲,致命的河豚毒素(TTX)已经是一个法律问题,但事实上,它与细菌和微藻类有关,这使得对它的监测特别复杂。最近有证据表明,长期低剂量摄入 TTX 也是危险的。类似于 TTX,剧毒的孢粉毒素和奥斯丁毒素同样值得关注,尤其是在南欧。在地中海国家,上述毒素在过去几年中扩张速度非常惊人,现在从希腊到南葡萄牙都有它们的身影。此外,由于海水变暖导致海洋甲藻(*Gambierdiscus* spp.)向北移动,由海洋甲藻产生的雪卡毒素(CTX)的扩张也令人担忧<sup>[16]</sup>。在最严重的时期,由于 HABs 造成了大量鱼类死亡,养殖户可能损失当年的全部投资。因此,在欧洲和世界各地,农业、水产养殖业和食品行业以及所有需要在可

持续经济环境中获得营养、安全和经济的食品的人类都受到生物毒素的各种形式的威胁。目前对多学科知识和行动的需求是前所未有的,需要制定综合创新方法来解决食品安全和保障问题,特别是与生物毒素有关的问题。面对这些挑战,需要进行前沿研究和对研究人员多学科培训,以创新和综合的方式控制和减少食品和饲料链中的生物毒素。

## 2 生物毒素预警和监测的先进技术

生物毒素的预测、早期预警和监测对于避免其对人类和动物健康威胁以及经济损失至关重要,亟需开发用于农业和水产养殖业中一系列生物毒素的预警和监测的新技术。新型预警系统基于卫星图像应用、现场检测方法以及大数据处理和管理方面的尖端技术和专业知识。对于真菌毒素和植物毒素等生物毒素或生物毒素的形成方面的现场检测和遥感,需要采取适当风险降低措施的工具。

### 2.1 真菌毒素

精准预测农作物中强致癌物质黄曲霉毒素 B1 (AFB1) 等真菌毒素的发生,可为农民和整个食品供应系统提供预警,及时采取适当措施。当 2012 年在巴尔干地区和 2013 年在法国发生的异常天气条件导致玉米生产严重中断时,需要这种预测技术指导法律规定限量的临时提高,并提醒欧盟委员会采取减损措施以确保粮食供应<sup>[17]</sup>。AFB1 在花生供应链中污染问题对欧洲造成了明显的食品安全风险<sup>[18]</sup>,仅 2018 年 RASFF 就通报了 400 多起进口拒收的报告<sup>[19]</sup>。根据欧盟统计局的数据,中国是欧盟前三大花生供应国之一,2017 年占 12% 的份额。因此,一种检测和收集整个花生链相关数据的综合解决方案将有助于更好地评估黄曲霉毒素发生的风险,便于在早期阶段做出更好的决策。现代技术支持包括免费提供的卫星图像、田间和天气信息、热图像和高光谱图像等多源数据用以开发大数据模型。现有的高分辨率和大量的卫星图像<sup>[20]</sup>提供了大量的光谱指标,是预测初级生产中真菌毒素水平的良好基础。然而,需要进一步开发基于机器学习技术的先进算法,以提取不同输入数据和谷物或花生中的真菌毒素

之间的潜在相关性。利用卫星提供的光谱波段对植物光谱响应与真菌毒素存在之间关系的研究仍然缺乏。基于卫星预测农作物中真菌毒素发生和增长的解决方案可以绘制大型农业用地的地图并精确控制真菌毒素的污染。当识别污染区域后将针对性地应用产后技术减少真菌毒素污染风险。

为预测大型花生筒仓运输和储存过程中黄曲霉毒素的形成，需要进一步优化和应用创新的产后环境实时监测系统<sup>[21]</sup>，如欧盟资助项目 MyToolBox<sup>[22]</sup>中开发的基于黄曲霉生长过程中二氧化碳产生的预测模型<sup>[21]</sup>。欧盟卫生总局的报告中<sup>[23]</sup>建议在花生生产、加工和出口的所有阶段都要进行官方控制。然而，通常使用的基于大型设备的确证分析方法（液相色谱-串联质谱法-HPLC-MS/MS）非常繁琐，真菌毒素分析通常需要 3~5 d。因此，首先使用基于侧流免疫层析法（LFIA）的快速半定量方法进行快速筛选，可以在 5 min 内得到结果<sup>[24]</sup>。快速检测的另一种选择

是先进的检测平台，其中包括中红外衰减全反射-傅里叶变换红外光谱方法，经济实惠的手持式近红外便携式仪器以及在荧光-可见光光谱范围内操作的便携式仪器，这些方法都可应用在花生生产链对黄曲霉毒素进行灵活的现场/在线检测<sup>[25]</sup>。这种解决方案对企业内部控制非常有利，特别是在花生批次中遇到的异常黄曲霉毒素污染的时候，使操作人员能够进行成本效益高、频繁和快速的检测。由于待检测的黄曲霉毒素含量相对较低，便携式质谱（MS）方法显示出巨大的潜力，其可根据花生和花生产品中的黄曲霉毒素官方限量提供准确的现场检测及合适的灵敏度选择。这种创新的分析解决方案将提高花生供应链中各个阶段的监测能力，从而为更快、更好的决策提供基础。通过不同应用程序产生的数据将来可以传输并存储在数字平台上，用于自动风险评估，并向终端用户发送风险概况信息，整个流程如图 1 所示。

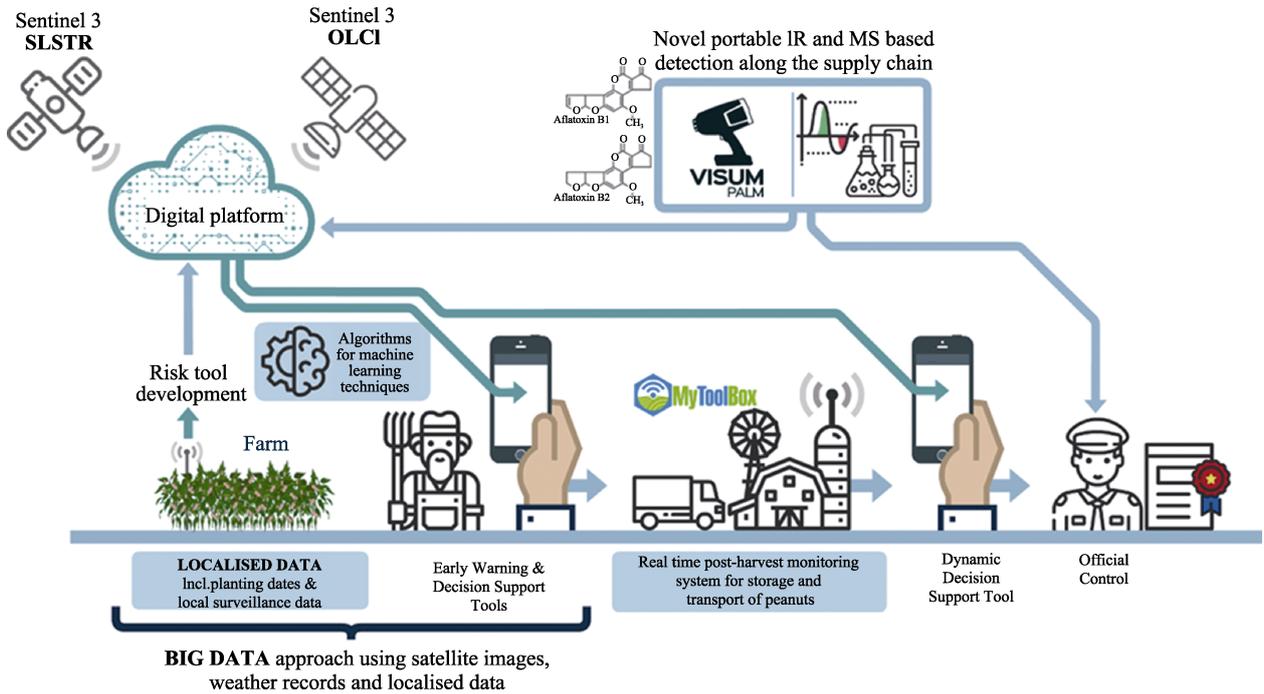


图 1 控制和减少花生中黄曲霉毒素污染的概念流程图

Fig.1 High level concept diagram for the control and reduction of aflatoxin contamination in peanuts across continents

## 2.2 藻毒素类

在最佳生长条件下，微藻可在海洋甚至淡水环境中产生 HABs。而过量施肥加上强降水共同导致水体富营养化加剧<sup>[26]</sup>，使得 HABs 更加频繁的发生，所产生的高含量藻毒素会导致鱼类大量死

亡。当摄入这些污染鱼类后，海洋生物毒素对人类同样具有高度急性毒性，其不良反应从口腔周围的轻微刺痛感到死亡不等。不同的国家已经制定了海产品中藻毒素限量以及相关检测方法标准。世界各地对麻痹性贝类毒素（通常称为麻痹

性贝类中毒 (PSP)、失忆性贝类毒素 (失忆性贝类中毒 (ASP))、亲脂性毒素、雪卡毒素 (CTXs)、短裸甲藻毒素或河豚毒素 (TTXs) 都有法律规定<sup>[27]</sup>。欧洲立法规定了双壳软体动物、棘皮动物、被囊动物和海洋腹足动物中海洋毒素的限量<sup>[28]</sup>。目前,海洋生物毒素的典型分析方法是基于高效液相色谱/荧光检测法、高效液相色谱/紫外法和高效液相色谱-质谱/质谱法。多年来,小鼠动物实验一直是监测藻毒素的参考方法。然而,根据动物福利保护的要求,在使用动物试验时必须考虑到所有可能的替代、改进和减少的方法。因此,正在开发小鼠生物测定法替代方法,例如生物测定法<sup>[29]</sup>。

关于导致野生和养殖鱼类大量死亡的海洋生物毒素的信息非常少<sup>[30]</sup>。海洋生物毒素的研究主要受制于纯物质的可获得性差和其未知的化学结构<sup>[31]</sup>。为了防止藻类引起的鱼类和贝类污染,在欧盟资助的项目 ASIMUTH 中开发了藻类繁殖预测模型。该项目使用欧盟哥白尼地球观测计划中海洋服务提供的卫星数据,这项服务提供了包括叶绿素和浮游植物的浓度等一系列海洋参数的每日信息。ASIMUTH 将这些卫星数据与海基监测数据以及当前水柱和表面水流行为的区域知识相结合,不仅有助于准确预测 HABs 的积累,而且还有助于预测它们在未来几天的可能动向,为养殖户提供了一个重要的早期预警系统,使他们能够在有毒有害藻类大量繁殖之前提前收获<sup>[32]</sup>。

### 2.3 植物毒素

为了对食物链中真菌毒素和植物毒素更有效的控制和预警,需要在田间地头、边境检查、工业和零售整个食物链的不同阶段对其进行现场检测。真菌毒素和植物毒素的早期检测可使受污染的粮食合理利用,例如用于动物饲料而非用于生物燃料。由于真菌毒素和植物毒素的种类繁多,浓度相对较低,便携式质谱 (MS) 可为毒素现场检测提供通用、灵敏和适合的检测方法。然而,无论是较重的可移动的商业质谱系统,还是轻型的便携式质谱设备,均未在分析真菌毒素或植物毒素中研究和应用。初步研究表明,使用基于实验室的常压质谱方法无需色谱分离就可以检测到相关水平的生物毒素<sup>[33-35]</sup>。在近期两项具有未来

应用潜力的便携式质谱研究中,使用常压质谱对于最普遍污染的脱氧雪腐镰刀烯醇进行了优化、验证和基准测试<sup>[36-37]</sup>。这种高度创新的分析化学解决方案将有效提高食品链各个阶段的监测能力,从而加强食品和饲料的安全保障。

### 3 评估生物毒素毒性的创新方法

评估包括真菌毒素和贝类毒素在内的不同种类生物毒素毒性的创新方法急需建立,特别是当它们以混合物的形式存在时。由于缺乏关于共存的真菌毒素和贝类毒素混合物的毒性数据,EFSA 无法可靠评估接触这些生物毒素混合物的健康风险。许多领域缺乏毒性数据,特别是慢性毒性数据:如作用模式 (MoA)、毒物动力学、对人类和动物的毒性不良影响,包括混合物的综合影响,以及这些毒素混合物在器官和细胞水平上的相互作用。需要更多的研究来获取这些数据<sup>[38]</sup>。欧盟资助的 EuroMix 项目研究开发了对不同生命阶段的多种来源化学品混合物的风险评估的分层策略<sup>[39]</sup>。

长期接触低至中等剂量的镰刀菌毒素可能对人类和动物的健康产生重大的慢性影响,导致生长发育受损或免疫功能紊乱。然而,这些相关疾病往往是亚临床或症状非常不明显的。EFSA<sup>[4-5]</sup> 目前对所谓的新兴镰刀菌毒素对人类和动物的毒性知之甚少。“新兴”真菌毒素一词是指既没有常规测定也没有立法监管的一类新型的真菌毒素;然而,关于它们所带来危害的证据正在迅速增加<sup>[40]</sup>。由于它们与已有限量的真菌毒素共同存在,因此了解新兴真菌毒素与已有限量的真菌毒素毒性相互作用就显得非常重要。利用肠道细胞系和外植体培养物对新兴真菌毒素进行肠道屏障功能的研究,并采用毒性分析以及最先进的转录组学和蛋白质组学方法,将提供有关新兴镰刀菌毒素的毒性作用、作用模式和相互作用的新数据。

有几种数学和统计模型用于确定接触真菌毒素混合物是否会对细胞培养物产生协同、相加或拮抗效应<sup>[41]</sup>。

生物标志物可以反映细胞水平的改变和早期/低剂量相关的病理变化,将为评估毒性作用提供强有力的工具。由于这些生物标志物通常与毒素非特异性关系,因此它们具有更大的潜力来反映

暴露于毒素混合物和随着时间的推移重复暴露现象,并有助于识别混合物/共同暴露的活性物质和暴露于混合物的健康危害<sup>[42]</sup>。目前,包括真菌毒素在内的大多数生物毒素尚不存在特异性和经过验证的生物标志物。新方法可以利用体外研究和多组学技术来揭示受调控镰刀菌毒素影响的生物标志物。经过验证的生物标志物还将提供关于低剂量毒素混合物的综合毒性效应的独特信息,使风险评估人员能够可靠地评估接触生物毒素混合物对人类和动物健康的慢性风险。

#### 4 气候变化和生物毒素

最近,FAO 评估和总结了气候变化对食品安全的影响<sup>[26]</sup>;特别是考虑了食源性病原体 and 寄生虫、农药、重金属,以及有害藻华和真菌毒素。FAO 指出“今天,我们知道气温升高、海洋变暖和酸化、严重干旱和野火、不合时宜的强降水和酸雨、冰川融化和海平面上升以及极端天气事件加剧正在对粮食系统造成前所未有的破坏。”应对人类活动对地球气候的影响是人类面临的巨大挑战之一<sup>[43]</sup>。其最大的影响是气候系统前所未有的变暖,进而引发更频繁和更极端的天气事件,包括热浪和降雨分布和强度的变化。这些影响将导致农业耕种和可种植的作物范围的调整。气候影响以及我们如何改变农业以应对气候变化,都将造成适应不同气候条件的真菌病原体的污染范围和发生率的变化。不断变化的天气条件是影响真菌、新陈代谢和与宿主植物相互作用的主要驱动变量。因此,目前不断被强调的气候多变性和不确定性调整,不仅是政策制定者需要面临的问题,也是农民每天需要面临的,因为气候变化会对真菌和真菌毒素发生影响。然而,科学界没有为这一问题挑战做好充分准备。

由欧盟理事会发起的《农业、粮食安全和气候变化联合计划倡议》(FACCE-JPI)指出“解决与气候变化有关的食物安全问题也是粮食安全的重要组成部分。减少和控制这些风险与公共卫生和经济均相关<sup>[44]</sup>。”在真菌毒素领域,减轻生物毒素问题的必要性变得尤为明显。最新的研究综述显示,估计全球多达 80%的植物源食品受到了这些有毒次级真菌代谢物污染<sup>[45]</sup>。

#### 5 结论

为了在气候变化的世界中更好的保护人类和动物健康,有效应对食品和饲料中生物毒素的挑战,需要采取一系列措施来建立创新的综合解决方案,包括提升食品和饲料中共存生物毒素的预警、监测和毒性评估能力。为实现这一目标,需要在农业、食品科学、分析化学、组学和毒理学的各个学科中,具备顶级科学水平的多学科的技能。未来需要进一步开展更前沿的研究,例如使用无人机图像的大数据方法以及使用蛋白质组学、转录组学和代谢组学工具,以控制和减少从田间到餐桌的生物毒素,并尽量减少食品和饲料损失。在欧盟-中国项目 MyToolBox<sup>[17]</sup>框架下 2019 年在北京举行的专题研讨会也证明,当前仍然非常需要智能和综合的策略来解决真菌毒素问题,以实现更安全的食品和饲料产品,并尽量减少损失和出口拒收<sup>[45]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] HSIED D. Potential human health hazards of mycotoxins. In S. Natori, K. Hashimoto, and Y. Ueno (ed.), *Mycotoxins and phytotoxins. Mycotoxins and phycotoxins '88*/edited by S. Natori, K. Hashimoto, and Y. Ueno. Proceedings of the Seventh International IUPAC Symposium August 16-19, 1988, Tokyo, Japan. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 1988: 69-80.
- [2] MARIN S, RAMOS A J, CANO-SANCHO G, SANCHIS V. Mycotoxins: Occurrence, toxicology, and exposure assessment[J]. *Food Chemistry and Toxicology*, 2013, 60: 218-237.
- [3] EFSA journals: Scientific opinions on various plant toxins: No. 2011, 9(11): 2405; No. 2011, 9(11): 2406; No. 2013, 11(10): 3386; No. 2016, 14(11): 4593; No. 2016, 14(4): 4424; No. 2017, 15(7): 4908.
- [4] EFSA journals: Scientific opinions on the risks for human and animal health related to the presence of modified forms of certain mycotoxins in food and feed: No. 2014, 12(12): 3916; No. 2016, 14(4): 4425; No. 2017, 15(1): 4655; No. 2017, 15(4): 4751; No. 2017, 15(9): 4718.
- [5] EFSA Journals: Scientific opinions on the risks for human and animal health related to the presence of certain mycotoxins in food and feed: No. 2011, 9(6): 2197; No. 2011, 9(12): 2481; No. 2013, 11(6): 3262; No. 2014, 12(8): 3802; No. 2017, 15(7): 4851; No. 2017, 15(9): 4718
- [6] MEDINA A, RODRIGUEZ A, MAGAN N. Climate change and mycotoxigenic fungi: impacts on mycotoxin production[J].

- Current Opinion in Food Science, 2015, 5: 99-104.
- [7] WU F, MITCHELL N J. How climate change and regulations can affect the economics of mycotoxins[J]. World Mycotoxin Journal, 2016, 5(9): 653-663.
- [8] MIOCINOVIC J, KESKIC T, MILORADOVIC Z, et al. The aflatoxin M1 crisis in the Serbian dairy sector: the year after[J]. Food Additives and Contaminants: Part B Surveillance, 2017, 1(10): 1-4.
- [9] BARANIUK C. Invasive toxic pufferfish causes havoc in European waters. Available online: <https://www.newscientist.com/article/mg23731602-700-invasive-toxic-pufferfish-causes-havoc-in-european-waters/>, last access: 26<sup>th</sup> July, 2021.
- [10] ANDJELKOVIC M. Seminar on Emerging Toxins. May 21-22, 2012. Vigo, Spain.
- [11] EFSA Journals: Marine biotoxins in shellfish – Scientific Opinions of the Panel on Contaminants in the Food Chain: No. 2008: 589; No. 2008: 723; No. 2008: 1016; No. 2009: 1019; No. 2009: 1181; No. 2009: 1306; No. 2009, 7(12): 1393; No. 2010, 8(6): 1628; No. 2010, 8(6): 1627; No. 2017, 15(4): 4752.
- [12] HAJNAL E J, KOS J, KRULJ J, et al. Aflatoxins contamination of maize in Serbia: the impact of whether conditions in 2015[J]. Food Additives and Contaminants: Part A, 2017, 11(34): 1999-2010.
- [13] RÖÖS E, BAJŽELJ B, SMITH P, et al. Greedy or needy? Land use and climate impacts of food in 2050 under different livestock futures[J]. Global Environmental Change, 2017, 47: 1–12.
- [14] FERREIRA M, LAGO J, VIEITES J M, et al. World production of bivalve mollusks and socioeconomic facts related to the impact of marine biotoxins. In Botana L M Seafood and Freshwater Toxins: Pharmacology, Physiology and Detection. CRC Press, 2014: 291-311.
- [15] BOTANA L M. Toxicological perspective on climate change: aquatic toxins[J]. Chemical Research in Toxicology, 2016, 29: 619-625.
- [16] OTERO P, PEREZ S, ALFONSO A, et al. First toxin profile of Ciguateric fish in Madeira Arquipelago (Europe)[J]. Analytical Chemistry, 2010, 82(14): 6032-6039.
- [17] KRŠKA R, DE NIJS M, MCNERNEY O, et al. Safe food and feed through an integrated tool for mycotoxins management: the MyToolBox approach[J]. World mycotoxin journal, 2016, 9: 487-495.
- [18] ESKOLA M, KOS G, ELLIOTT C T, et al. Worldwide contamination of food-crops with mycotoxins: Validity of the widely cited 'FAO estimate' of 25%[J]. Critical review in food Science and nutrition, 2020, 16(60): 2773-2789.
- [19] PARISI S, BARONE C, SHARMA R K. EU border rejection cases: Reason and RASFF Notification[J]. Chemistry and Food Safety in the EU, 2016: 47-92.
- [20] REMBOLD F, MERONI M, URBANO F, et al. ASAP: A new global early warning system to detect anomaly hot spots of agricultural production for food security analysis[J]. Agricultural systems, 2019, 168: 247-257.
- [21] GARCIA-CELA E, CELA F, GARI F J, et al. Carbon dioxide production as an indicator of *Aspergillus flavus* colonization and aflatoxin/ cyclopiazonic acid contamination in shelled peanuts stored under different interacting abiotic factors[J]. Fungal Biology, 2020, 124: 1-7.
- [22] MyToolBox, EU-funded project. Available online: <https://www.mytoolbox.eu/>, last access: 26<sup>th</sup> July, 2021.
- [23] EUROPEAN COMMISSION/DG(SANTE) 2017-6079. Final report of an audit carried out in China from 13 June 2017 to 23 June 2017 in order to assess the control system in place to control aflatoxin contamination in peanuts intended for export to the European Union. Ref. Ares 2018, 512737-29/01/2018.
- [24] ZHENG M, NG W S, CHIN L J, et al. A lateral flow test for detection of total aflatoxin in roasted peanuts[J]. In Food Contaminants, 2008, 16: 285-296.
- [25] KOS G, SIEGER M, McMULLIN D, et al. A novel chemimetric classification for FTIR spectra of mycotoxin- contaminated maize and peanuts at regulatory limits[J]. Food Additives and Contaminants: Part A, 2016, 10(33): 1596-1607.
- [26] FAO. Climate Change: Unpacking the burden on food safety. Food safety and quality series No. 8, 2020, Rome, available online: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/ca8185en>, downloaded: 26<sup>th</sup> July, 2021.
- [27] RODRIGUEZ P, ALFONSO A, VALE C, et al. First toxicity report of tetrodotoxin and 5, 6, 11-trideoxyTTX in the trumpet shell *Charonia lampas lampas* in Europe[J]. Analytical Chemistry, 2008: 5622-5629.
- [28] EUROPEAN COMMISSION. Official Journal of the European Union, 2004, L 226, 22.
- [29] BOTANA A M, OTERO P, RODRIGUEZ P, et al. Current situation on analysis of marine toxins[J]. Review in Analytical Chemistry, 2013, 32(1): 15-34.
- [30] RASMUNSEN S A, ANDERSEN A J C, ANDERSEN N G, et al. Chemical diversity, origin and analysis of phycotoxins[J]. Journal of natural production, 2016, 79(3): 662-673.
- [31] ANDERSEN A J C, DE MEDEIROS L S, BINZER S B, et al. HPLC-HRMS quantification of the ichthyotoxin Karmitoxin from *Karlodinium armiger*[J]. Marine Drugs, 2017, 15(9): 278-291.
- [32] ASIMUTH EU-funded project. Available online: <http://www.maretec.org/en/projects/current/Asimuth>, last access: 26<sup>th</sup> July, 2021.
- [33] NIELEN M W F, VAN BEEK T A. Macroscopic and microscopic spatially-resolved analysis of food contaminants and constituents using laser-ablation electrospray ionization mass spectrometry imaging[J]. Analytical and bioanalytical chemistry, 2014, 406: 6805-6815.
- [34] SCHRAGE M, SHEN Y, CLAASSEN F W, et al. Rapid and simple neurotoxin-based distinction of Chinese and Japanese star anise by direct plant spray mass spectrometry[J]. Journal of

- Chromatography A, 2013, 1317: 246-253.
- [35] SHEN Y, VAN BEEK T A, CLAASSEN F W, et al. Rapid control of Chinese star anise fruits and teas for neurotoxic anisatin by Direct Analysis in Real Time high resolution mass spectrometry[J]. Journal of Chromatography A, 2012, 1259: 179-186.
- [36] GEBALLA-KOUKOULA A, GERSSEN A, NIELEN M W F. Direct analysis of lateral flow immunoassays for deoxynivalenol using electrospray ionization mass spectrometry[J]. Anal Bioanal Chem, 2020, 412: 7547-7558.
- [37] GEBALLA-KOUKOULA A, GERSSEN A, NIELEN M W F. From smartphone lateral flow immunoassay screening to direct MS analysis: development and validation of a semi-quantitative direct analysis in real-time mass spectrometric (DART-MS) approach to the analysis of deoxynivalenol[J]. Sensors (Basel), 2021, 21(5): 1861.
- [38] EFSA Journal: Guidance on harmonized methodologies for human health, animal health and ecological risk assessment of combined exposure to multiple chemicals. 2019, 17(3): 5634.
- [39] EuroMix 2019, EU-funded project. Summary available online: <https://cordis.europa.eu/project/id/633172>, last access: 26th July, 2021.
- [40] 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: 7052-7070.
- [41] 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, 16(57): 3489-3507.
- [42] SILINS I, HÖGBERG J. Combined toxic exposures and human health: biomarkers of exposure and effect[J]. Int J Environ Res Public Health, 2011, 8(3): 629-647.
- [43] POWELL J. Scientists unanimous on anthropogenic global warming in 2019[J]. Bulletin of Science, Technology and Society, 2020, 37: 183-184.
- [44] FACCEJPI. Joint programming initiative on agriculture, food security and climate change. Available online: <https://www.facejpi.net/en/facejpi.htm>, downloaded: 26th July, 2021.
- [45] ESKOLA M, KOS G, ELLIOTT C T, et al. Worldwide contamination of food-crops with mycotoxins: Validity of the widely cited “FAO estimate” of 25%[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(16): 2773-2789.
- [46] LESLIE J, POSCHMAIER B, van EGMOND H, et al. The MyToolbox EU-China partnership—progress and future directions in mycotoxin research and management[J]. Toxins, 2020, 12(11): 712. 
- 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：蔡婷  
专业校对：叶全  
(国家粮食和物资储备局科学研究院粮油质量安全研究所)