

# 基于 Web of Science 的气候变化 对真菌毒素影响的文献计量分析

曹汐雨<sup>1,2</sup>, 付旭冉<sup>1,2</sup>, 叶金<sup>3</sup>, 孙秀兰<sup>1,2</sup>,  
王伟<sup>4</sup>, 曹际娟<sup>5</sup>, 孙嘉笛<sup>1,2</sup>  
(江南大学食品学院<sup>1</sup>, 无锡 214122)

(国家市场监督管理总局重点实验室(食品安全风险物质甄别与防控)<sup>2</sup>, 无锡 214122)

(国家粮食和物资储备局科学研究院<sup>3</sup>, 北京 100037)

(国家食品安全风险评估中心<sup>4</sup>, 北京 100022)

(大连民族大学生命科学学院, 生物技术与资源利用教育部重点实验室<sup>5</sup>, 大连 116600)

**摘要:**随着全球变暖, 极端天气事件如高温和干旱频繁发生, 不仅对农作物的生长产生了负面影响, 还大大增加了粮食真菌毒素污染的风险, 减少粮食产量。为探讨气候变化对真菌毒素影响的研究趋势, 本文以1999—2025年 Web of Science 核心数据库中收录的373篇相关文献为研究对象, 采用文献计量学方法, 使用 VOSviewer 软件对文献数量、发表时间、研究机构、来源出版物和关键词等方面进行了可视化分析。结果表明, 自2010年以来, 气候变化对真菌毒素影响的相关研究逐年增加, 373篇文献分别来自73个国家或地区、536个研究机构, 主要集中在意大利、美国和英国等国家, 这些国家在该领域的合作研究中占据重要地位。我国也在近年来积极开展相关研究, 并与美国、意大利等国展开广泛合作。关键词分析显示, 玉米(maize)、污染(contamination)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)、温度(temperature)、小麦(wheat)、水分活度(water activity)和黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>(AFB<sub>1</sub>)等是该领域的研究热点。通过对这些关键词的深入分析, 进一步证实了温度、水分活度、二氧化碳和光照等环境因素之间存在复杂的交互作用, 共同影响着真菌毒素的产生和积累。尽管近年来相关研究有所增加, 但关于各环境因素如何相互作用以影响真菌毒素产生的具体研究仍显不足。因此, 未来亟须加强气候变化对真菌毒素影响的研究力度, 改进气候预测模型, 并构建有效的防控体系, 以应对气候变化对粮食生产的潜在威胁。

**关键词:**气候变化; 真菌毒素; 文献计量分析; VOSviewer 软件分析; 粮食安全

DOI: 10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001265

中图分类号: TS207.2 文献标识码: A 文章编号: 1003-0174(2026)01-0001-12

网络首发时间: 2025-11-10 09:00:17

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.2864.TS.20251107.1649.008>

## Bibliometric analysis of the effects of climate change on mycotoxins based on Web of Science

Cao Xiyu<sup>1,2</sup>, Fu Xuran<sup>1,2</sup>, Ye Jin<sup>3</sup>, Sun Xiulan<sup>1,2</sup>, Wang Wei<sup>4</sup>, Cao Jijuan<sup>5</sup>, Sun Jiadi<sup>1,2</sup>

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University<sup>1</sup>, Wuxi 214122)

(Key Laboratory of Screening, Prevention, and Control of Food Safety Risks,  
State Administration for Market Regulation<sup>2</sup>, Wuxi 214122)

(Institute of Grain and Oil Quality and Safety, Academy of National Food  
and Strategic Reserves Administration<sup>3</sup>, Beijing 100037)

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(32125031)

收稿日期: 2025-05-15

第一作者: 曹汐雨, 女, 2001年出生, 硕士, 食品安全与快速检测, 570237660@qq.com

通信作者: 孙嘉笛, 女, 1990年出生, 副研究员, 食品微生物检测与控制, sunjiadi@jiangnan.edu.cn

(China National Center for Food Safety Risk Assessment<sup>4</sup>, Beijing 100022)  
(Key Laboratory of Biotechnology and Bioresources Utilization of Ministry of Education,  
School of Life Sciences, Dalian Minzu University<sup>5</sup>, Dalian 116600)

**Abstract:** With global warming, the extreme weather events such as elevated temperatures and droughts have occurred frequently, which not only exerted negative impacts on crop growth but also greatly elevated the risk of mycotoxin contamination in grains and reduced grain yields. To explore the research trends regarding the effects of climate change on mycotoxins, 373 relevant literatures indexed in the Web of Science Core Database from 1999 to 2025 were selected as the research objects in this study. Bibliometric methods and VOSviewer software were employed to conduct visual analysis on the number of literatures, publication time, research institutions, source publications, and keywords. The results revealed that since 2010, the number of studies related to the effects of climate change on mycotoxins. The 373 literatures were derived from 73 countries or regions and 536 research institutions, mainly concentrating in Italy, the United States, the United Kingdom and the countries, which occupied an important position in collaborative research in this field. China has also actively carried out related research in recent years and conducted extensive cooperation with the United States, Italy and other countries. Keyword analysis revealed that maize, contamination, DON, temperature, wheat, water activity, and food security were the research hotspots in this field. In-depth analysis of these keywords further confirmed that there existed complex interactions among environmental factors, such as temperature, water activity, carbon dioxide, and light, which jointly affected the production and accumulation of mycotoxin. Although the number of relevant studies has increased in recent years, specific research on how various environmental factors interact to affect mycotoxin production still remains insufficient. Therefore, it is urgent to strengthen research efforts on the effects of climate change on mycotoxins in the future, improve climate prediction models, and the construct effective prevention and control systems to effectively address the potential threats of climate change to grain production.

**Key words:** climate change; mycotoxins; bibliometric analysis; VOSviewer software analysis; food security

真菌毒素作为真菌次生代谢产物,可广泛污染小麦、稻谷和玉米等农产品<sup>[1]</sup>,其通过直接摄入和食物链传递会对人类及动物健康构成双重威胁<sup>[2]</sup>。这类物质不仅可引发急性中毒,还与免疫缺陷、致癌等慢性疾病密切相关。目前,已鉴定出 400 余种真菌毒素,其中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> (AFB<sub>1</sub>)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇 (DON)、玉米赤霉烯酮 (ZEN) 等 12 种毒素被列为重点监控对象。其污染程度受气象条件、农艺措施、贮藏工艺等多种因素影响<sup>[3]</sup>。研究表明,全球有 60%~80% 的谷物被真菌毒素污染<sup>[4]</sup>。2021 年我国 8 个省小麦中 DON 检出率超过 95%,链格孢霉毒素 (TEA) 检出率达 100%<sup>[5]</sup>,年均均有 2 100 万 t 谷物受污染,造成直接经济损失 240 亿元<sup>[6]</sup>。

气候变化是一个全球性问题,对人类社会和自然环境产生了深远影响。人类活动引起的气候变化已经导致大气、海洋和陆地的变暖,且这种变暖趋势预计将持续加剧<sup>[7]</sup>。此外,气候变化还将带来更剧烈和频繁的极端天气,例如高温、干旱和洪水等。中国气象局指出,随着气候变暖的加剧,中国将面临更

加频繁的极端高温、强降水以及大范围的洪水灾害等问题。极端气候不仅直接影响粮食的质量和产量,还可能在生长和储存过程中增加粮食作物被真菌毒素污染的风险<sup>[8]</sup>。Casu 等<sup>[9]</sup>认为,气候变化使真菌毒素更易适应新环境,甚至形成更具侵袭性的病原体,增加了农作物受真菌病害威胁的风险。Kos 等<sup>[10]</sup>指出,欧洲气候环境变化为黄曲霉菌生长提供了有利条件,同时禾谷镰孢菌的污染频率上升,未来农作物被高毒性毒素污染的风险将增加。Gilbert 等<sup>[11]</sup>研究表明,CO<sub>2</sub>浓度的升高会影响黄曲霉毒素生物合成调控基因的表达。随着气候变化,不同地区的真菌种群及其污染模式发生变化。气温升高促使嗜热真菌向温暖地区迁移,嗜冷真菌向寒冷区域转移。同时,气候变化还削弱了粮食作物对真菌的抗性,使其更易受真菌病害影响<sup>[9]</sup>。

气候变化对真菌毒素的产生具有显著影响,但当前针对这一领域的研究趋势探讨相对匮乏。为全面深入地把握气候变化对真菌毒素影响的研究动

态,本文基于 Web of Science (WOS) 核心数据库,采用 VOSviewer 软件对该领域相关文献进行了可视化分析。VOSviewer 是一种文献计量分析工具,能够通过可视化技术展示文献之间的关系、研究热点以及研究趋势<sup>[12]</sup>。该工具广泛应用于科学文献分析,能够帮助研究人员快速识别研究领域的核心主题和新兴趋势。王梓乐等<sup>[13]</sup>利用 VOSviewer 软件分析了真菌检测技术领域的发展历程和前沿性研究热点,通过构建共现网络、聚类分析和关键词图谱,揭示了研究领域内的主要研究方向和潜在的交叉学科研究机会。本文通过对文献发表、研究国家和机构、科研合作以及未来发展趋势的梳理分析,并基于关键词贡献分析进一步探讨了环境因子对真菌毒素的影响,使研究人员能快速了解本研究领域的发展,为后续研究提供参考。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

本文以 WOS 核心合集数据库为数据源,对气候变化下真菌毒素的影响的相关文献进行分析,采用检索式为 All Fields = “Climate Change” AND “Mycotoxin” 和 All Fields = “weather” AND “Fungal toxin”,检索时间跨度为 1999—2025 年,数据检索截止时间为 2025 年 4 月 15 日,选取 Article 和 Review 2 种文献类型,共检索到 468 篇文献,下载“纯文本文件”格式的“全记录及引用参考文献”数据,删除重复文件后得到 373 篇文献,以 txt 格式导出并导入 VOSviewer 软件进行可视化。

### 1.2 研究方法

基于文献计量法<sup>[14]</sup>,本文使用 WOS 检索文献,采用 VOSviewer 软件进行可视化分析。为获得简洁清晰的信息网络,将研究国家间合作网络分析阈值设定为 5,发表期刊的分析阈值设定为 4,关键字聚类分析的阈值设定为 20。通过统计文献发文分布、引用频次、研究国家和机构、来源出版物和关键词,生成可视化图谱,探讨该领域的研究热点、方向和演变趋势,以加深研究者对该领域的认识,并为进一步研究提供参考<sup>[15]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 气候变化对真菌毒素影响的发文分布分析

检索 WOS 数据库发现,1999—2025 年,与气候变化对真菌毒素影响相关的文献共 373 篇。图 1

可见,该领域年发文量呈递增趋势,2021—2022 年达到峰值 47 篇,但总体规模仍较小。值得关注的是,现有成果集中于综述与预测模型开发,而真菌毒素生长机理、污染阈值及产毒基因表达等基础实验研究明显不足。Turano 等<sup>[16]</sup>通过大豆幼苗谷氨酸合成酶活性实验揭示了环境因子的作用机制;Al - Anati 等<sup>[17]</sup>系统论证了 OTA 的生态分布特征及其与气候因子的剂量 - 效应关系,发现青霉菌与黑曲霉分别适应温带/高温气候的生态位分化现象。Paterson 等<sup>[18]</sup>提出“气候变化 - 真菌毒素循环”理论框架,证实了温度、降水等气候参数可通过改变真菌代谢通路导致毒素变异,特别在气候过渡带可能引发新型毒素生成。这些突破性发现推动了该领域研究的持续深化,近 5 年发文量年均增幅达 18.6%。

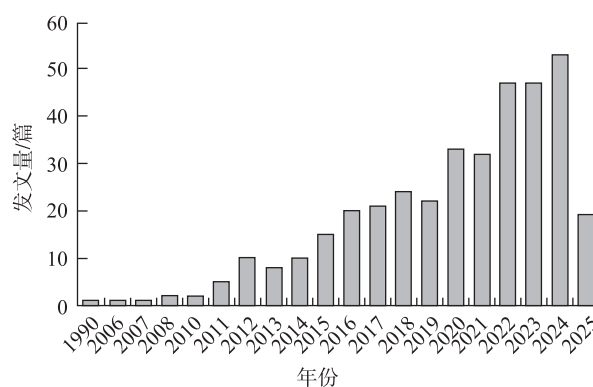


图1 1999—2025 年在 WOS 数据库中与气候变化对真菌毒素的影响相关研究论文年发表量

### 2.1.1 高频被引文章

表 1 列举了 WOS 数据库高被引文献前 10 篇文章。Eskola 等<sup>[19]</sup>的研究论文被引频次最高为 841 次,该团队通过对全球食品作物真菌毒素污染的分析,指出联合国粮农组织 (FAO) 提出的 25% 污染率估算存在显著偏差,实际污染比例可能为 60% ~ 80%。Chakraborty 等<sup>[20]</sup> (被引 639 次) 则整合气候模型与流行病学方法,以小麦赤霉病为实证案例,系统揭示了气候变化 - 植物病害 - 粮食安全三者的动态耦合机制。Bryden 等<sup>[21]</sup> 的文章 (被引 502 次) 则从毒理学与畜牧学交叉视角,系统阐述了农业产业链中真菌毒素的防控策略,重点解析了气候变化对毒素生成动力学及饲料安全的影响路径。这些标志性研究共同聚焦于环境变迁背景下真菌毒素对食品供应链安全及公共卫生风险的作用机制。

表 1 1999—2025 年在 WOS 数据库中发表的与气候变化对真菌毒素影响相关单篇被引次数排名前十的文章

排名	第一作者	来源出版物	发表年份	被引频次	参考文献
1	Eskola M(奥地利)	Critical Reviews in Food Science and Nutrition	2020	841	[19]
2	Chakraborty S(澳大利亚)	Plant Pathology	2011	639	[20]
3	Bryden W L(澳大利亚)	Animal Feedence & Technology	2001	502	[21]
4	Pestka J J(美国)	Animal Feed Science & Technology	2007	451	[22]
5	Paterson R R M(葡萄牙)	Food Research International	2010	392	[18]
6	Streit E(奥地利)	Journal of the Science of Food & Agriculture	2013	308	[23]
7	Magan N(英国)	Plant Pathology	2011	280	[24]
8	Mitchell N J(美国)	Food Additives & Contaminants	2016	270	[25]
9	Marroquín - Cardona(墨西哥)	Food & Chemical Toxicology	2014	248	[26]
10	Bandyopadhyay R(尼日利亚)	World Mycotoxin Journal	2016	225	[27]

### 2.1.2 研究国家及地区

图 2 显示,1999—2025 年间研究气候变化对真菌毒素影响的主要国家和地区中,意大利(64 篇)、美国(55 篇)、英国(36 篇)等国家发文量位居前

列。利用 VOSviewer 软件对这些国家间的合作关系进行贡献分析,结果如图 3 所示。美国和英国在 2018 年前后与其他国家合作最多,奠定了研究基础;意大利在 2020 年后发表大量文章,推动了气候变化对真菌毒素影响研究进展。近两年,中国开始广泛研究并与其他领先团队合作,但国际合作仍需加强。

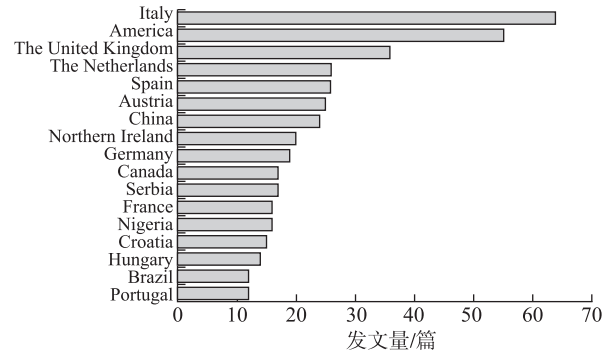


图 2 气候变化对真菌毒素影响相关研究国家发文量

### 2.1.3 主要发文期刊及发文机构分析

通过分析发文期刊的研究领域,可以有效帮助研究人员确定相关核心期刊。在 WOS 数据库中,涉及气候变化对真菌毒素影响的研究方向共有 150 多种期刊,发文量排名前 10 的期刊见表 2。其中,发表文献数量最多的期刊是 Toxins,共刊载 49 篇文献;World Mycotoxin Journal 位居第二,共刊载 30 篇文献;

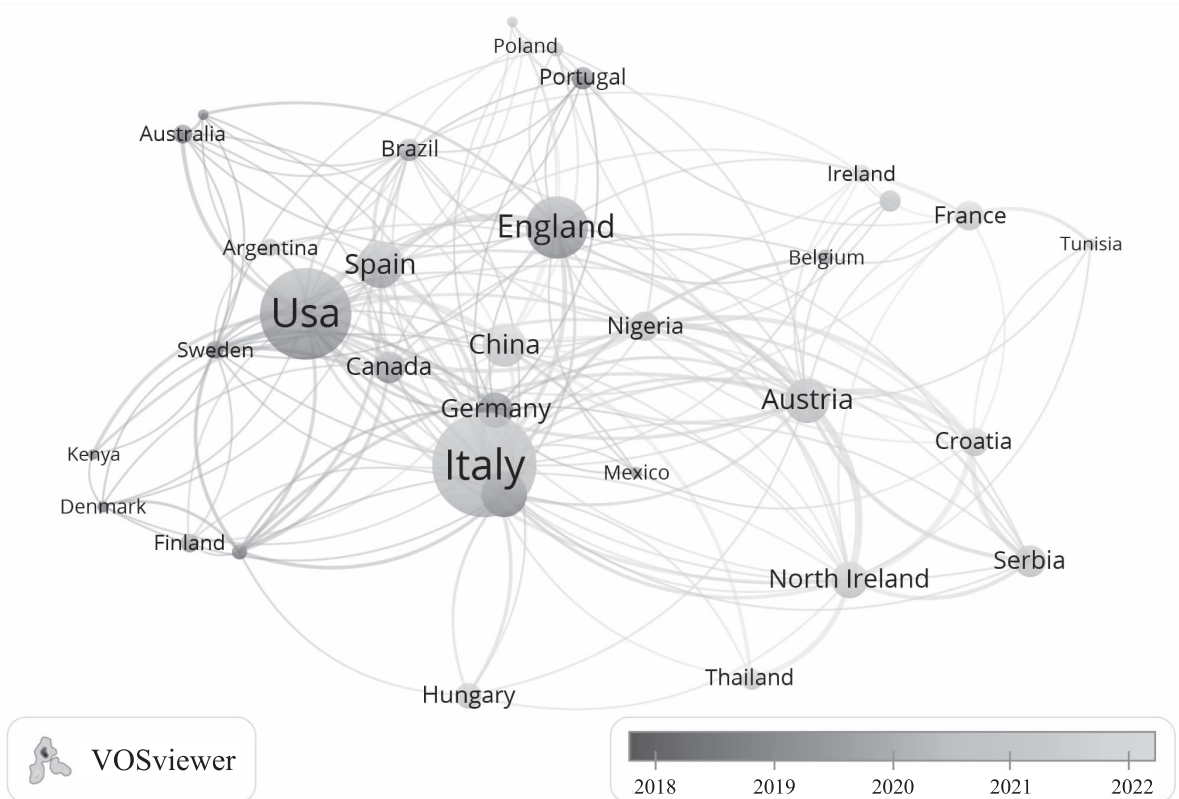


图 3 1999—2025 年气候变化对真菌毒素影响相关研究论文发表国家间的合作关系及时间线

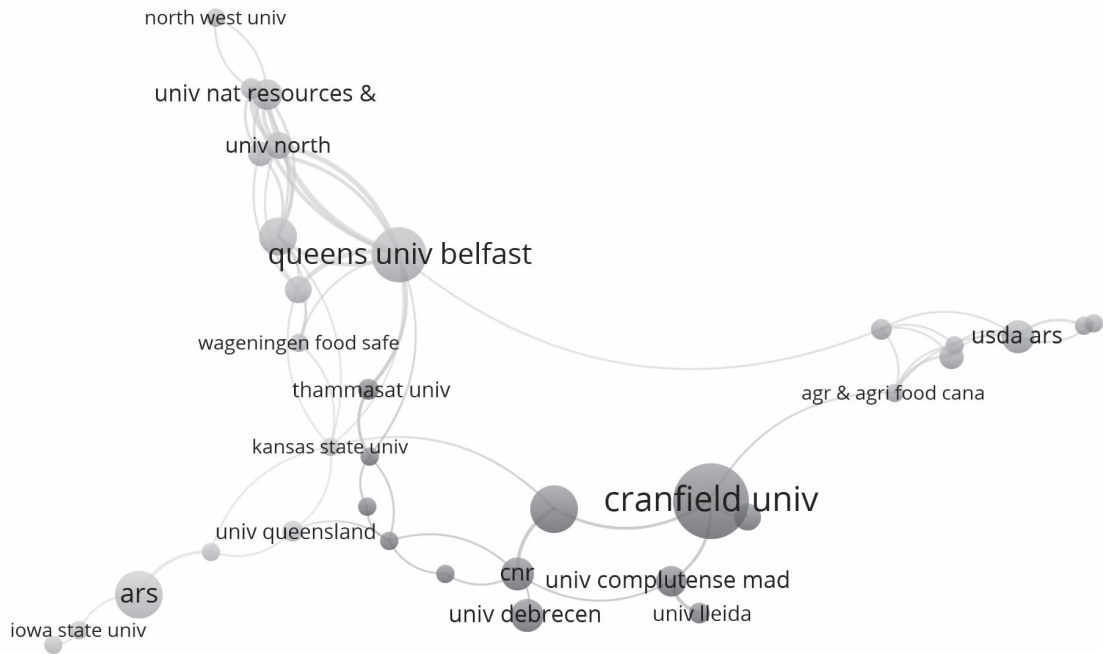


图 4 1999—2025 年 WOS 数据库中气候变化对真菌毒素的影响研究机构共现网络图

Microorganisms 位居第三,共刊载 11 篇文献。这些期刊主要关注真菌毒素和微生物,与气候变化对真菌毒素影响的研究领域高度契合。受全球研究趋势的影响,欧洲和北美等地区对气候变化研究的资助和关注度较高,这可能是学者选择这些地区期刊的原因之一。

表 2 1999—2025 年 WOS 数据库中气候变化对真菌毒素的影响研究发文载量排名前十的期刊

排名	期刊名称	发表量	占比/%
1	Toxins	49	13.13
2	World Mycotoxin Journal	30	8.6
3	Microorganisms	11	3.3
4	Food Additives and Contaminants Part A - Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment	11	3.0
5	Frontiers in Microbiology	11	3.0
6	International Journal of Food	10	3.0
7	Food Research International	10	2.4
8	Foods	9	2.4
9	Mycotoxin Research	9	2.4
10	Current Opinion in Food Science	7	2.1

#### 2.1.4 研究机构分析

根据表 3,发文量排名前五的机构分别是克兰菲尔德大学、贝尔法斯特女王大学、卡托利卡大学、美国农业科学研究院和诺威萨塞尔维亚大学。这些机构均拥有强大的学术实力,各机构间的共线网络如图 4 所示。北京大学作为我国在发文机构中上榜的

表 3 1999—2025 年 WOS 数据库中气候变化对真菌毒素的影响研究发文载量排名前十的机构

排名	发文机构	发表量
1	克兰菲尔德大学	28
2	贝尔法斯特女王大学	18
3	卡托利卡大学	15
4	美国农业科学研究院	15
5	诺威萨塞尔维亚大学	11
6	美国农业部农业研究局	9
7	德布勒森大学	9
8	维也纳自然资源与生命科学大学	8
9	马德里康普顿斯大学	8
10	北京大学	7

代表,突显了我国对气候变化影响下真菌毒素问题的日益重视,并将在该领域开展深入的研究与交流。

#### 2.1.5 文献关键词分析

在学术文献中,关键词作为知识组织的核心要素,其功能主要体现在 3 个方面:文献检索的精确导航作用、学术传播的枢纽作用,以及知识管理的结构化功能。本研究基于 WOS 数据库,运用 VOSviewer 可视化工具对“气候变化 - 真菌毒素”领域文献进行关键词共现分析。图 5 显示,经阈值筛选(出现频次  $\geq 15$ ),最终构建的知识图谱包含 48 个节点和 899 条关联边(总连接强度 3 897)。核心分析表明“climate change”与“mycotoxins”构成网络核心枢纽,其中心性指数分别达 0.89 和 0.76。

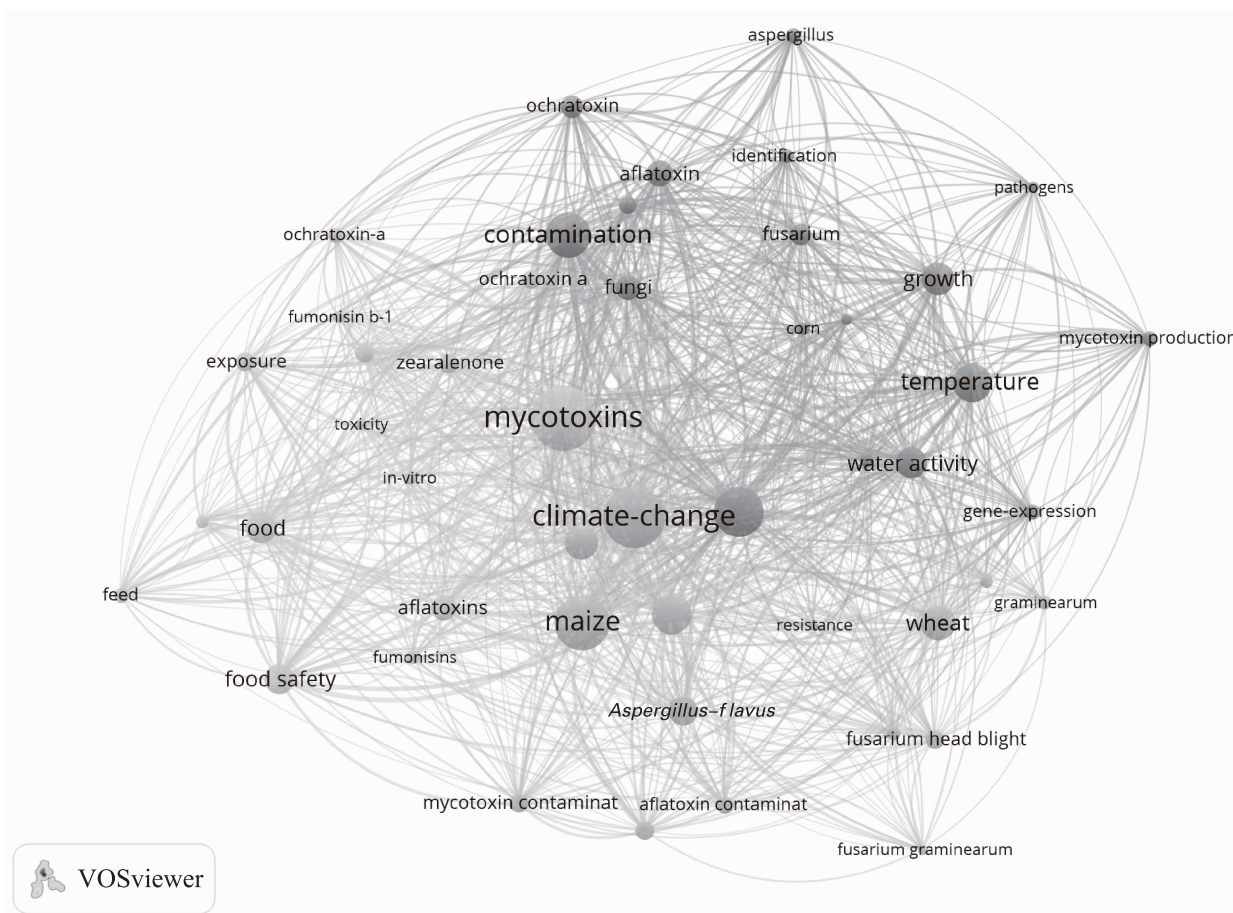


图5 在 WOS 数据库中与气候变化对真菌毒素的影响研究相关的高频关键词网络图

高频关键词聚类分析揭示了三大研究维度:环境驱动因素,包括温度(temperature)、水分活度(water activity)与真菌产毒机制(mycotoxin production)关联紧密;作物安全体系,涵盖玉米(maize)、小麦(wheat)的霉菌污染(contamination)及真菌毒素(deoxynivalenol, aflatoxin, zearalenone, fumonisins)生物积累;风险防控路径,涉及食品安全(food safety)标准体系、生长(growth)抑制技术及黄曲霉(*Aspergillus flavus*)等产毒菌的生物控制策略。

值得注意的是,特定病害如镰刀菌头枯病(*Fusarium head blight*)与毒素类型在共现网络中形成显著聚类,印证了气候变化通过影响病原体(如镰刀菌属、曲霉菌属)生态位,进而改变毒素时空分布的研究假设。该可视化图谱不仅揭示了当前研究聚焦于气候要素-作物病理-毒素生成的级联效应,更通过知识网络结构指明了多学科交叉的创新方向,为粮食风险管理与食品安全预警提供了理论框架。

## 2.2 环境因子对真菌毒素的影响研究热点

研究表明,真菌毒素生物合成过程中存在三重环境梯度协同作用:气候要素(温度、相对湿度、降水模态)中,温度参数在文献计量分析中呈现出最高的表征权重,如表4所示,温度出现了178次;基质微环境(水分活度、pH值、渗透压)中的核心指标水分活度在文献中高频出现102次;宿主互作因子(作物抗性基因表达、防御代谢物含量)<sup>[28]</sup>,其关键词二氧化碳及二氧化碳活性升高合计出现89次,与CO<sub>2</sub>浓度变化共同构成作物-真菌互作界面。文献数据显示,“Climate change”作为核心变量出现192次,显著高于泛化概念环境因素(14次),这印证了该领域研究呈现双重范式:既通过气候大数据建模揭示宏观关联(如温湿度波动与镰刀菌毒素积累的时空相关性),又聚焦于CO<sub>2</sub>浓度梯度、水分活度阈值等关键参数开展微观机制解析(如黄曲霉菌产毒代谢通路调控)。这种多尺度研究方法有效衔接了气候变化情景预测与真菌毒素风险预警体系构建。

表4 关键词出现频率

关键词	出现频率	连线强度
温度 (Temperature)	55	603
水分活度 (Water activity)	40	326
二氧化碳 (Carbon dioxide)	8	62
二氧化碳 (Elevated CO <sub>2</sub> )	10	86
气候变化 (Climate change)	192	1 258
环境因子 (Environmental factors)	14	128

## 2.2.1 环境因子对真菌毒素的影响

### 2.2.1.1 温度

在真菌毒素生物合成调控中,温度作为关键环境变量展现出双重作用机制:既通过代谢通路调控毒素生成效率,又影响真菌-宿主互作模式。研究表明,不同产毒真菌存在显著的温度响应特异性。例如,在黄曲霉体系中,菌体生长的最适温度为 37 °C,而 AFB<sub>1</sub> 合成的最适温度为 28 °C,二者之间呈现解耦现象。在玉米基质中,储藏温度从 20 °C 升至 30 °C 时,AFB<sub>1</sub> 含量呈现指数增长趋势(4.88 ~ 349.64 μg/kg),这与温度驱动的真菌群落重构(Bray-Curtis 相似性指数下降 42%)及氧化应激响应(SOD 活性提升 3.2 倍)密切相关<sup>[29,30]</sup>。在镰刀菌代谢调控中,Nazari 等<sup>[31]</sup>的研究表明 *Fusarium sporotrichioides* 的 T-2/HT-2 毒素比例在 15 ~ 30 °C 时为 1.3 ~ 2.6,极端温度下该比值增至 2.6 ~ 5.2,表明低温(< 15 °C)可通过抑制 CYP450 酶活性改变毒素代谢通路。*F. verticillioides* 与 *F. graminearum* 的毒素合成存在温度阈值效应。Mshelia 等<sup>[32]</sup>的研究指出,伏马毒素(FB)、玉米赤霉烯酮(ZEA)和脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)在 30 °C 时达到生物合成峰值,而在 35 °C 时则完全抑制。

Vaquera 等<sup>[33]</sup>研究发现,当温度超过 30 °C 时, *Alternaria arborescens* 会大量产生和积累 AAL 毒素。这可能是因为高温可能激活了该真菌体内产生 AAL 毒素的酶和代谢途径,从而促进其生长速率和毒素总量。赭曲霉毒素 A(OTA)在 22.5 °C 时的含量显著高于 27.5 °C 时的含量,其负温度敏感性源于 NRPS 合成酶(OTA1 基因)的构象变化<sup>[34]</sup>。

该温度响应规律揭示了真菌毒素合成存在“最适温度窗”现象。在全球气候变暖背景下,区域温度波动可能打破原有毒素生成平衡,需建立基于温度预测模型的真菌毒素风险监测预警体系。

### 2.2.1.2 水分活度

在真菌毒素生物合成调控中,水分活度( $A_w$ )作为关键环境参数,通过影响微生物水分子可利用性

来调节其生理代谢。食品中  $A_w$  值对真菌侵染具有阈值效应:当  $A_w < 0.80$  时,可有效抑制黄曲霉在水稻中的定殖及毒素合成<sup>[35]</sup>;而当  $A_w \geq 0.93$  时,则促进黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>(AFB<sub>1</sub>)产毒量达到峰值<sup>[28]</sup>。在曲霉属(*Aspergillus* spp)中,寄生曲霉(*A. parasiticus*)在  $A_w = 0.95$  时达到最大产毒量,而产毒最适  $A_w$  值提升至 0.99;赭曲霉(*A. ochraceus*)在  $A_w = 0.995$  时产毒量最高;疣孢青霉(*P. verrucosum*)则表现出产毒最适  $A_w$  窗口(0.90 ~ 0.95)宽于生长最适值(0.95)的特征<sup>[36]</sup>。

$A_w$  与温度梯度存在显著协同效应,其交互作用可通过三维响应曲面量化表征。实验数据显示,当  $A_w = 0.995$  时,黑曲霉(*Aspergillus niger*)在 13 d 培养周期内赭曲霉毒素 A(OTA)产量达(133.0 ± 1.5) ng/g,而  $A_w$  降至 0.971 时,其产量衰减 90%<sup>[37]</sup>。极端温湿度协同条件可诱导产毒量级跃迁,黄曲霉在  $A_w = 0.90$  结合 37 °C 条件下 AFB<sub>1</sub> 产量达 643 μg/kg,而硫磺曲霉(*A. sulphureus*)在  $A_w = 0.98$  与 20 °C 条件下 OTA 含量升至 724 μg/kg<sup>[38]</sup>。这种非线性关系表明, $A_w$  阈值(0.85 ~ 0.95)和温度窗口(25 ~ 35 °C)共同构成真菌产毒的关键生态参数。

### 2.2.1.3 CO<sub>2</sub>

基于 CO<sub>2</sub> 浓度对真菌毒素生物合成调控机制的研究表明,其作用呈现双重特性<sup>[39]</sup>,既可作为代谢激活因子,也可作为生长抑制因子<sup>[40]</sup>。

在镰刀菌属毒素合成路径中,CO<sub>2</sub> 通过重构质子梯度( $\Delta pH = 0.8 \sim 1.2$ )影响次生代谢酶活性。促毒效应方面:Kahla 等<sup>[41]</sup>发现,FL4 菌株在 1 000 mg/kg CO<sub>2</sub> 条件下,T-2 与 HT-2 毒素产量达 400 mg/kg,为对照组的 7.1 倍( $P < 0.01$ ),BEA 毒素产量激增 29 倍( $P < 0.001$ )。该现象可能与 MAPK 信号通路上调(2.3 倍)及乙酰化酶基因 FgHOS<sub>3</sub> 过表达相关;抑毒效应方面:FS 菌株继代培养至第 7 代时,T-2 与 HT-2 毒素产量下降至对照组的 76.9% ( $P < 0.05$ ),而 BEA 毒素产量却增加 12 倍( $P < 0.01$ ),提示菌株存在表观遗传适应机制。

关于黄曲霉毒素合成体系的研究显示,CO<sub>2</sub> 浓度梯度与毒素抑制率之间存在显著的剂量效应关系。在体积分数 20% CO<sub>2</sub> 环境下,AFB<sub>1</sub> 产量降低 53.2%;体积分数 30% CO<sub>2</sub> 时,展青霉素生成量减少 61.7% ( $P < 0.001$ );体积分数 40% CO<sub>2</sub> 时,对 *Roquefortine C* 合成抑制率达 72.4% ( $P < 0.001$ )<sup>[42]</sup>。该抑制作用与过氧化物酶体  $\beta$ -氧化途径受阻(ATP 生成量

下降 41%, SOD 活性降低 68%) 密切相关。结果表明, CO<sub>2</sub> 对真菌毒素的调控兼具菌株特异性与代谢途径选择性, 其双向作用机制为开发基于气调控制的真菌毒素防控技术提供了参考。

#### 2.2.1.4 光照

在真菌光生物学研究中, 光照作为关键环境调控因子, 可通过光受体介导的信号传导网络影响真菌的生理周期、形态发生及次级代谢产物合成<sup>[43]</sup>。光质参数的调节效应呈现显著的波长依赖性: 蓝光光谱(390 ~ 455 nm) 可显著增强黑曲霉分生孢子生成效率(较暗培养提升  $2.0 \times 10^2$  倍), 同时诱导伏马菌素 B<sub>2</sub> 生物合成量增加 40%; 而相同波段却抑制了赭曲霉毒素 A 产量(降幅达 40 倍)。更具应用价值的是, 持续日光辐照可使 OTA 合成量降低 20% ~ 30%, 揭示了光降解作用在毒素防控中的潜在应用价值<sup>[44]</sup>。

光周期调控机制研究显示, 光暗交替模式对镰刀菌属具有菌株特异性影响。Fanelli 等<sup>[45]</sup> 指出, 黄褐镰刀菌和层出镰刀菌在 627 nm 红光与 450 nm 蓝光协同作用下, 生物量积累与伏马菌素产量均呈正相关, 该属真菌对光照响应存在显著的种间差异, 部分菌株的光调控敏感性低于曲霉属菌株。由表 5 可见, 光参数的波长选择性( $\lambda$ )、辐照度( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 及曝光时长( $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 共同构成真菌毒素合成调控的三维光环境模型, 为开发基于光质优化的农产品储藏技术提供了参考。

表 5 不同光照条件对不同真菌毒素的影响

光照条件	作用菌种	作用效果	参考文献
120 $\mu\text{mol}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 光照强度	指状青霉菌	在固体培养基上抑制扩大	[46]
700 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 光照强度		几乎完全抑制孢子产生和菌丝生长	[46]
150 $\pm$ 20 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 光照强度	灰霉病菌	菌落直径变小	[46]
1.2 $\text{mW}/\text{cm}^2$	白色念珠菌	菌落数量下降 99%	[47]
太阳光照射 8 h	赭曲霉	OTA 降至 70 ~ 95 $\mu\text{g}/\text{kg}$	[48]
24h VIS	黄曲霉	菌落直径减小, 抑制菌落生长	[49]
205 $\pm$ 14 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 光照强度	禾谷镰刀菌	延缓约 0.5 h 分生孢子发芽	[50]

#### 2.2.2 真菌毒素积累对粮食作物的影响

在粮食作物病害发生机制及损失评估中, 真菌毒素的生物积累是关键驱动因素。真菌侵染导致作物组织损伤及次生代谢紊乱, 最终引发产量损失与

品质退化<sup>[51]</sup>。具体表现为: 产量损失: 真菌病害阻碍作物正常生长进程, 造成显著减产。Cappelli 等<sup>[52]</sup> 指出, 真菌病害约占植物疾病总数的 70%, 导致全球农作物产量损失 12%。品质恶化: 真菌毒素污染不仅破坏粮食营养成分, 还会导致商品性降低(如变色、异味等感官属性异常), 直接影响食用价值<sup>[51]</sup>。在储藏环节, 菌体持续代谢加剧品质劣变, 可显著缩短货架期<sup>[53]</sup>。环境污染威胁: Mogopodi<sup>[54]</sup> 的研究表明, 真菌毒素污染已蔓延至谷物及油料作物全产业链条, 对粮食安全构成系统性威胁。值得注意的是, 实际污染水平可能远超现行安全阈值。此外, 气候变化加剧了这一问题: 有研究预测, 全球变暖 2  $^{\circ}\text{C}$  将使欧洲冬小麦中的脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON) 污染水平激增 2 倍, 同时导致小麦产量下降 40%<sup>[55]</sup>。真菌毒素对粮食生产的负面影响具有多维度特征, 涉及生态、遗传及农业生产等多重因子<sup>[56]</sup>。未来研究需聚焦于: 预测模型的精准化; 病理系统研究的拓展; 应对气候变化挑战的应用性防控行动。

### 3 结语

根据 WOS 数据库的统计, 1999—2025 年间, 关于气候变化对真菌毒素影响的研究文献共计 373 篇, 呈现逐年稳步增长的趋势。近年来, 中国在这一领域的研究关注度显著提高。从发表期刊的分布来看, 相关研究主要集中在毒素学、真菌毒素学和微生物学领域, 符合气候变化对真菌毒素影响的研究方向。研究热点包括气候变化、真菌毒素玉米、污染、脱氧雪腐镰刀菌烯醇、温度、小麦、水分活度、黄曲霉等关键词。特别值得关注的是, 研究者对环境因子, 尤其是温度、水分活度、二氧化碳浓度和光照与真菌毒素直接的关系投入较多的关注。气候变化可能导致真菌毒素的积累增加, 从而加剧对粮食产量的影响, 最终造成经济损失。

尽管目前的研究取得一定进展, 但仍存在一些不足之处。首先, 现有研究主要集中于单一环境因子(如温度、水分活度)的影响机制, 而对多因子复合效应的系统性研究明显不足<sup>[57]</sup>。气候变化是一个复杂的系统性问题, 温度、湿度、二氧化碳浓度和光照等因素之间存在复杂的相互作用, 这些交互作用对真菌毒素生物合成路径的调控机制尚未充分阐明<sup>[58]</sup>。其次, 现有成果主要局限于实验室尺度的理论模拟, 缺乏田间尺度的验证性试验和可转化的应用范式, 这制约了科研成果向农业实践的技术转移。

此外,当前研究尚未建立具有地域适应性的分析模型<sup>[59]</sup>,亟须通过多区域对比实验构建分级防控体系,以支撑全球尺度的真菌毒素风险预警与防控体系构建<sup>[60]</sup>。

未来研究应着重于几个方面:首先,综合环境因子,建立环境因子驱动的真菌毒素污染预测模型<sup>[55]</sup>。其次,构建更全面的动态风险评估机制,将气候变化对真菌毒素污染的预测模型与粮食损失数据相结合,综合考虑温度、湿度、二氧化碳浓度和光照等因素对粮食产量变化的影响<sup>[61]</sup>。此外,应加强生态学、基因组学、农业科学和公共卫生等领域的跨学科研究,以全面理解气候变化对真菌毒素的影响,并开发有效的干预措施<sup>[62]</sup>。最后,加强国际合作,共享数据和研究成果,协调全球应对策略,减少温室气体排放,以减缓气候变化速度,从而降低其对真菌毒素积累的潜在影响<sup>[63]</sup>。

此外,随着技术的不断进步,未来在气候变化与真菌毒素研究领域可以引入一些新的技术手段:

人工智能建模<sup>[64]</sup>:基于深度学习算法构建多因子耦合预测模型,通过解析多源异构数据间的非线性关联机制,精准量化气候参数与真菌毒素生物合成的动态响应关系。该技术可突破传统统计模型的维度限制,为建立跨时空尺度的风险预警系统提供算法支撑。Cui等<sup>[65]</sup>基于机器学习集成算法构建的脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)与玉米赤霉烯酮(ZEN)动态预警模型,其交叉验证精度分别达到98.15%和90.74%。经连续12个月的应用验证,该模型成功实现小麦仓储环境中2种真菌毒素浓度的实时预测,所有监测节点的预测值均显著低于《食品安全国家标准》中规定的阈值限量。

遥感动态监测体系<sup>[66]</sup>:Mathies等<sup>[67]</sup>利用遥感技术结合多光谱卫星影像和机器学习方法,预估与作物健康相关的土壤真菌群落组成。通过反演大气温湿场、土壤墒情指数及作物冠层生理参数等关键指标<sup>[68]</sup>,可建立真菌毒素污染风险空间分异图谱<sup>[69]</sup>,实现污染源的早期识别与靶向防控。

这些措施将有助于构建更具韧性的粮食预测系统,以应对极端天气和气候变化带来的不确定性。

#### 参考文献

[1]李嘉豪,王田林,蔡宇铮,等. 纳米材料在真菌毒素去除中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(6): 344-353  
Li J, Wang T, Cai Y, et al. Research progress on applica-

tion of nano-materials in mycotoxin removal[J]. Food Science, 2025, 46(6):344-353

[2]Sun L, Li R, Tai B, et al. Current status of major mycotoxins contamination in food and feed in Asia: a review[J]. ACS Food Science & Technology, 2023, 3(2):231-244

[3]Shabeer S, Asad S, Jamal A, et al. Aflatoxin contamination, its impact and management strategies: an updated review[J]. Toxins, 2022, 14(5):307

[4]Darwish W S, Ikenaka Y, Nakayama S M M, et al. An overview on mycotoxin contamination of foods in Africa[J]. The Journal of Veterinary Medical Science, 2014, 76(6):789-797

[5]郭浩,李萌萌,王瑞虎,等. 小麦中真菌毒素污染现状及色谱同时检测技术研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(6):347-359  
Guo H, Li M, Wang R, et al. Contamination status of mycotoxins in wheat and research progress of chromatographic simultaneous detection techniques[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(6):347-359

[6]尹清强,常娟,王平,等. 饲料中多种霉菌毒素的危害与生物防控[J]. 饲料工业, 2021, 42(21):9-14  
Yin Q, Chang J, Wang P, et al. Hazard and biological control of multi-mycotoxins in feed[J]. Feed Industry, 2021, 42(21):9-14

[7]刘彦随,刘玉,郭丽英. 气候变化对中国农业生产的影响及应对策略[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4):905-910  
Liu Y, Liu Y, Guo L. Impact of climatic change on agricultural production and response strategies in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4):905-910

[8]Chhaya R S, O'Brien J, Cummins E. Feed to fork risk assessment of mycotoxins under climate change influences - recent developments[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 126:126-141

[9]Casu A, Camardo Leggieri M, Toscano P, et al. Changing climate, shifting mycotoxins: a comprehensive review of climate change impact on mycotoxin contamination[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(2):e13323

[10]Kos J, Anić M, Radić B, et al. Climate change: a global threat resulting in increasing mycotoxin occurrence[J]. Foods, 2023, 12(14):2704

[11]Gilbert M K, Mack B M, Payne G A, et al. Use of functional genomics to assess the climate change impact on *Aspergillus flavus* and aflatoxin production[J]. World Mycotoxin Journal, 2016, 9(5):665-672

[12]刘瑞峰,王剑,田梦玲,等. 食用农产品消费行为研究进展的文献计量分析[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30

- (7):230-245  
Liu R, Wang J, Tian M, et al. Bibliometric analysis of research progress on the consumption behavior of edible agricultural products[J]. Journal of China Agricultural University, 2025, 30(7):230-245
- [13] 王梓乐, 陈冬东, 彭涛. 基于 Web of Science 数据库的真菌毒素检测技术可视化计量分析[J]. 生物技术进展, 2025, 15(2):314-324  
Wang Z, Chen D, Peng T. Bibliometric analysis of mycotoxin detection technology based on Web of Science database: visualization and quantification[J]. Current Biotechnology, 2025, 15(2):314-324
- [14] 汪博. 基于 Cite Space 知识图谱的荀子研究热点与趋势分析[J]. 邯郸学院学报, 2021, 31(2):10-19  
Wang B. The knowledge graph of domestic xunzi research [J]. Journal of Handan University, 2021, 31(2):10-19
- [15] 宋子珍, 赵钦栋, 宋春晓, 等. 农户气候变化适应性行为研究前沿及未来趋势: 基于近 20 年文献可视化计量分析[J]. 河南牧业经济学院学报, 2024, 37(3):16-25  
Song Z, Zhao Q, Song C, et al. Hot spots and research trends in the study of farmers' climate change adaptation behavior: a visual econometric analysis based on the literature of the last 20 years[J]. Journal of Henan University of Animal Husbandry and Economy, 2024, 37(3):16-25
- [16] Turano F J, Muhitch M J. Differential accumulation of ferredoxin - and NADH - dependent glutamate synthase activities, peptides, and transcripts in developing soybean seedlings in response to light, nitrogen, and nodulation [J]. Physiologia Plantarum, 1999, 107(4):407-418
- [17] Al - Anati L, Petzinger E. Immunotoxic activity of ochratoxin A[J]. Journal of Veterinary Pharmacology and Therapeutics, 2006, 29(2):79-90
- [18] Paterson R R M, Lima N. Further mycotoxin effects from climate change[J]. Food Research International, 2011, 44(9):2555-2566
- [19] 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
- [20] Chakraborty S, Newton A C. Climate change, plant diseases and food security: an overview [J]. Plant Pathology, 2011, 60(1):2-14
- [21] Bryden W L. Mycotoxin contamination of the feed supply chain: implications for animal productivity and feed security [J]. Animal Feed Science and Technology, 2012, 173(1-2):134-158
- [22] Pestka J J. Deoxynivalenol: toxicity, mechanisms and animal health risks[J]. Animal Feed Science and Technology, 2007, 137(3-4):283-298
- [23] Streit E, Naehrer K, Rodrigues I, et al. Mycotoxin occurrence in feed and feed raw materials worldwide: long - term analysis with special focus on Europe and Asia[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(12):2892-2899
- [24] Magan N, Medina A, Aldred D. Possible climate - change effects on mycotoxin contamination of food crops pre - and postharvest[J]. Plant Pathology, 2011, 60(1):150-163
- [25] Mitchell N J, Bowers E, Hurburgh C, et al. Potential economic losses to the US corn industry from aflatoxin contamination[J]. Food Additives & Contaminants. Part A, Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment, 2016, 33(3):540-550
- [26] Marroquín - Cardona A G, Johnson N M, Phillips T D, et al. Mycotoxins in a changing global environment - A review[J]. Food and Chemical Toxicology, 2014, 69:220-230
- [27] Bandyopadhyay R, Ortega - Beltran A, Akande A, et al. Biological control of aflatoxins in Africa: current status and potential challenges in the face of climate change [J]. World Mycotoxin Journal, 2016, 9(5):771-790
- [28] 王刚, 王玉龙, 张海永, 等. 真菌毒素形成的影响因素 [J]. 菌物学报, 2020, 39(3):477-491  
Wang G, Wang Y, Zhang H, et al. Factors that affect the formation of mycotoxins: a literature review [J]. Mycosystema, 2020, 39(3):477-491
- [29] Ma Y, Li M, Wang Z, et al. Mechanism of HOG - MAPK pathway in regulating mycotoxins formation under environmental stresses [J]. Sheng Wu Gong Cheng Xue Bao, 2022, 38(7):2433-2446
- [30] Shi H, Li J, Zhao Y, et al. Effect of *Aspergillus flavus* contamination on the fungal community succession, mycotoxin production and storage quality of maize kernels at various temperatures [J]. Food Research International, 2023, 174:113662
- [31] Nazari L, Patteri E, Terzi V, et al. Influence of temperature on infection, growth, and mycotoxin production by *Fusarium langsethiae* and *F. sporotrichioides* in durum wheat [J]. Food Microbiology, 2014, 39:19-26
- [32] Mshelia L P, Selamat J, Iskandar Putra Samsudin N, et al. Effect of temperature, water activity and carbon dioxide on fungal growth and mycotoxin production of acclimatised isolates of *Fusarium verticillioides* and *F. graminearum* [J]. Toxins, 2020, 12(8):478
- [33] Vaquera S, Patriarca A, Cabrera G, et al. Temperature and water activity influence on simultaneous production of AAL toxins by *Alternaria arborescens* on tomato medium [J]. Eu-

- ropean Journal of Plant Pathology, 2017, 148(4):1003 – 1009
- [34] Dhungana B, Ali S, Byamukama E, et al. Effects of temperature, water activity, and fungal isolate on ochratoxin A accumulation in oat grain inoculated with *Penicillium verrucosum* and development of a methodology to screen oat cultivars for ochratoxin A accumulation[J]. Cereal Chemistry, 2019, 96(5):950 – 957
- [35] Liu X, Guan X, Xing F, et al. Effect of water activity and temperature on the growth of *Aspergillus flavus*, the expression of aflatoxin biosynthetic genes and aflatoxin production in shelled peanuts[J]. Food Control, 2017, 82:325 – 332
- [36] Manna M, Kim K D. Influence of temperature and water activity on deleterious fungi and mycotoxin production during grain storage[J]. Mycobiology, 2017, 45(4):240 – 254
- [37] Dallagnol A M, Bustos A Y, Martos G I, et al. Antifungal and antimycotoxigenic effect of *Lactobacillus plantarum* CRL 778 at different water activity values[J]. Revista Argentina de Microbiologia, 2019, 51(2):164 – 169
- [38] Gizachew D, Hsu Y C, Szonyi B, et al. Effect of water activity, temperature, and incubation period on fungal growth and ochratoxin A production on Nyjer seeds[J]. Mycotoxin Research, 2019, 35(1):1 – 8
- [39] Fasoyin O E, Wang B, Qiu M, et al. Carbon catabolite repression gene *creA* regulates morphology, aflatoxin biosynthesis and virulence in *Aspergillus flavus*[J]. Fungal Genetics and Biology, 2018, 115:41 – 51
- [40] Saleh A M, Abdel – Mawgoud M, Hassan A R, et al. Global metabolic changes induced by arbuscular mycorrhizal fungi in oregano plants grown under ambient and elevated levels of atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2020, 151:255 – 263
- [41] Kahla A, Verheecke – Vaessen C, Delpino – Deelias M, et al. Acclimatisation of *Fusarium langsethiae*, *F. poae* and *F. sporotrichioides* to elevated CO<sub>2</sub>: impact on fungal growth and mycotoxin production on oat – based media[J]. International Journal of Food Microbiology, 2023, 394:110176
- [42] Taniwaki M H, Hocking A D, Pitt J I, et al. Growth and mycotoxin production by food spoilage fungi under high carbon dioxide and low oxygen atmospheres[J]. International Journal of Food Microbiology, 2009, 132(2 – 3):100 – 108
- [43] 王媛媛, 朱涵予, 刘冬梅, 等. 光照对高等真菌生长发育影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(21):324 – 329
- Wang Y, Zhu H, Liu D, et al. Research progress in the effects of light on the growth and development of higher fungi[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(21):324 – 329
- [44] Fanelli F, Schmidt – Heydt M, Haidukowski M, et al. Influence of light on growth, conidiation and the mutual regulation of fumonisin B<sub>2</sub> and ochratoxin A biosynthesis by *Aspergillus niger*[J]. World Mycotoxin Journal, 2012, 5(2):169 – 176
- [45] Fanelli F, Geisen R, Schmidt – Heydt M, et al. Light regulation of mycotoxin biosynthesis: new perspectives for food safety[J]. World Mycotoxin Journal, 2016, 9(1):129 – 146
- [46] 孙建城, 王玉坤, 龙超安. 环境光因子对采后病原真菌发育的影响及对致病力的调控机制[J]. 植物生理学报, 2018, 54(9):1384 – 1390
- Sun J, Wang Y, Long C. Effects of light on the development of postharvest pathogenic fungi and regulatory mechanism of pathogenicity[J]. Plant Physiology Journal, 2018, 54(9):1384 – 1390
- [47] 孙廷丽, 周少璐, 黎玉莲, 等. 光催化材料抗真菌性能检测中光照条件的影响[J]. 环境卫生学杂志, 2018, 8(1):55 – 59
- Sun T, Zhou S, Li Y, et al. Effect of irradiation on antifungal activity induced by photocatalytic materials[J]. Journal of Environmental Hygiene, 2018, 8(1):55 – 59
- [48] Ameer Sumbal G, Hussain Shar Z, Hussain Sherazi S T, et al. Decontamination of poultry feed from ochratoxin A by UV and sunlight radiations[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(8):2668 – 2673
- [49] Kováč T, Šarkanj B, Crevar B, et al. *Aspergillus flavus* NR-RL 3251 growth, oxidative status, and aflatoxins production ability *in vitro* under different illumination regimes[J]. Toxins, 2018, 10(12):528
- [50] Beyer M, Rödning S, Ludewig A, et al. Germination and survival of *Fusarium graminearum* macroconidia as affected by environmental factors[J]. Journal of Phytopathology, 2004, 152(2):92 – 97
- [51] 祁智慧, 张海洋, 田琳, 等. 粮食真菌群落组成及多样性研究进展[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(5):24 – 31
- Qi Z, Zhang H, Tian L, et al. Research progress in community composition and diversity of fungi from the grain[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(5):24 – 31
- [52] Cappelli S L, Domeignoz Horta L A, Gerin S, et al. Potential of undersown species identity versus diversity to manage disease in crops[J]. Functional Ecology, 2024, 38(7):1497 – 1509
- [53] 程玲云, 胡明燕, 高牡丹, 等. 小麦粉真菌毒素污染、国

- 内外限量标准与防控研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(7):38-44
- Cheng L, Hu M, Gao M, et al. Research progress on fungal toxins pollution of wheat flour, limit standard and control at home and abroad[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(7):38-44
- [54] Mogopodi D, Babalola O, Msagati T A M. Editorial: fungal toxic secondary metabolites in foods and feeds; recent sustainable analytical techniques and innovative preventative and remediation strategies for their formation and toxicity [J]. Frontiers in Fungal Biology, 2024, 5:1442327
- [55] Van Der Fels - Klerx H J, Liu C, Battilani P. Modelling climate change impacts on mycotoxin contamination [J]. World Mycotoxin Journal, 2016, 9(5):717-726
- [56] 陈晓玲, 全志薇, 马卓, 等. 我国科学数据开放共享的实现路径研究[J]. 社会科学前沿, 2022, 11(9): 3791-3802
- Cheng X, Quang Z, Ma z, et al. Research on the realization path of scientific data open sharing in China [J]. Advances in Social Sciences, 2022, 11(9), 3791-3802
- [57] Liu Z, Basso P, Hossain S, et al. Multifactor transcriptional control of alternative oxidase induction integrates diverse environmental inputs to enable fungal virulence[J]. Nature Communications, 2023, 14:4528
- [58] Medina A, Mohale S, Samsudin N I P, et al. Biocontrol of mycotoxins: dynamics and mechanisms of action[J]. Current Opinion in Food Science, 2017, 17:41-48
- [59] Ozsari S, Kumru E, Ekinci F, et al. Deep learning - based classification of macrofungi: comparative analysis of advanced models for accurate fungi identification [J]. Sensors, 2024, 24(22):7189
- [60] Mu W, Kleter G A, Bouzembrak Y, et al. Making food systems more resilient to food safety risks by including artificial intelligence, big data, and Internet of Things into food safety early warning and emerging risk identification tools [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(1): e13296
- [61] Wu F, Bhatnagar D, Bui - Klimke T, et al. Climate change impacts on mycotoxin risks in US maize [J]. World Mycotoxin Journal, 2011, 4(1):79-93
- [62] Perrone G, Ferrara M, Medina A, et al. Toxicogenic fungi and mycotoxins in a climate change scenario: ecology, genomics, distribution, prediction and prevention of the risk [J]. Microorganisms, 2020, 8(10):1496
- [63] 袁佳双, 张永香, 陈迎, 等. 认识减缓气候变化最新进展科学助力碳中和[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(5):523-530
- Yuan J, Zhang Y, Chen Y, et al. Understanding the latest progress in mitigating climate change and facilitating carbon neutrality [J]. Climate Change Research, 2022, 18(5): 523-530
- [64] Li Y, Qiao Y, Ma Y, et al. AI in fungal drug development: opportunities, challenges, and future outlook [J]. Frontiers in Cellular and Infection Microbiology, 2025, 15:1610743
- [65] Cui H, Wang S, Yang X, et al. Predictive models for assessing the risk of *Fusarium pseudograminearum* mycotoxin contamination in post-harvest wheat with multi-parameter integrated sensors [J]. Food Chemistry: X, 2022, 16: 100472
- [66] Wang J, Zhang S, Lizaga I, et al. UAS - based remote sensing for agricultural Monitoring: current status and perspectives [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227:109501
- [67] Sørensen M B, Faurdal D, Schiesaro G, et al. Exploring crop health and its associations with fungal soil microbiome composition using machine learning applied to remote sensing data [J]. Communications Earth & Environment, 2025, 6:355
- [68] Stone C, Mohammed C. Application of remote sensing technologies for assessing planted forests damaged by insect pests and fungal pathogens: a review [J]. Current Forestry Reports, 2017, 3(2):75-92
- [69] Yu W, Xing H, Wang C, et al. Assessing soil fungal diversity under different sampling schemes in conjunction with remote sensing technologies in a subtropical forest [J]. Geoderma, 2024, 450:117058.