

网络出版时间:2025-03-10

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20250307.1336.012

基于 CiteSpace 的小麦赤霉病研究热点与趋势分析

关卫东¹, 金牧兰², 李芮³, 李邦耀⁴, 董文成¹

(1. 中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心/黄河大黑河流域水资源开发与生态环境效应创新基地, 内蒙古呼和浩特, 010013;

2. 乌兰察布市林业和草原监测规划站, 内蒙古乌兰察布 012000; 3. 石嘴山市惠农区农业技术推广服务中心, 宁夏石嘴山 753000;

4. 银川市农业技术推广服务中心, 宁夏银川 750000)

摘要: 小麦赤霉病研究对于农业生产和保障全球粮食安全具有重要意义。为深入了解小麦赤霉病研究进展和动态前沿, 运用 CiteSpace 软件, 对近 20 年来 Web of Science 核心合集中 1 236 篇小麦赤霉病研究文献进行系统分析。结果表明, 近 20 年来小麦赤霉病研究发文量总体呈上升趋势, 美国以 345 篇的发文量位居榜首, 中美、中英、中加等国际合作网络较为紧密。研究内容主要集中在病原菌特性、病害防治技术、抗病品种选育等方面; 当前研究热点以抗病性鉴定、分子标记辅助选择、新型生物防治剂开发等为主; 热门技术方法涉及分子代谢组学、基因组学、遥感监测技术等。展望未来, 小麦赤霉病研究将更加注重跨学科合作, 致力于开发高效、环保的病害防控策略, 以应对全球粮食安全挑战。

关键词: 小麦赤霉病; Cite Space 软件; 信息可视化; 研究趋势

中图分类号: S512.1; S435.12

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)04-0510-11

Analysis of Research Hotspots and Trends in Fusarium Head Blight Based on CiteSpace

GUAN Weidong¹, JIN Mulan², LI Rui³, LI Bangyao⁴, DONG Wencheng¹

(1. Hohhot General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey/Innovation Base for Water Resource

Exploration and Eco-Environmental Effects in the Daheihe Basin of the Yellow River, China Geological Survey, Hohhot, Inner

Mongolia 010013, China; 2. Wulanchabu Forestry and Grassland Monitoring Station, Wulanchabu, Inner Mongolia 012000, China;

3. Agricultural Technology Extension Service Center of Huinong District, Shizuishan, Ningxia 753000, China;

4. Yinchuan Agricultural Technology Extension Service Center, Yinchuan, Ningxia 750000, China)

Abstract: Research on Fusarium head blight holds significant importance for agricultural production and global food security. To gain a comprehensive understanding of the research progress and emerging trends in this field, this study used CiteSpace software to systematically analyzed 1 236 literatures on Fusarium head blight in the Web of Science core collection in the past 20 years. The results indicate that the overall publication output in Fusarium head blight research had shown an upward trend, with the United States leading the field with 345 publications. International collaboration networks were relatively tight, such as those between China and the United States, China and the United Kingdom, and China and Canada. The research content primarily revolved around pathogen characteristics, disease control techniques, and the breeding of resistant varieties. Current research hotspots centered on disease resistance identification, molecular marker-assisted selection, and the development of innovative biological control agents. The prevalent technical methods primarily encompassed metabolomics, genomics, and remote sensing monitoring technologies. Looking ahead, Fusarium

收稿日期: 2024-07-25

修回日期: 2024-09-13

基金项目: 中国地质调查项目 (DD20230466, DD20230521, DD20242330)

第一作者 E-mail: 1244860992@qq.com (关卫东)

通讯作者 E-mail: 1061175027@qq.com (董文成)

head blight research will place greater emphasis on interdisciplinary collaboration, aiming to develop efficient and environmentally friendly disease control strategies to address the challenges posed by global food security.

Keywords: Fusarium head blight; CiteSpace software; Information visualization; Research trends

小麦赤霉病(Fusarium head blight, FHB)是由禾谷镰孢菌复合种引起的真菌病害,在全球小麦种植区广泛发生,是造成小麦产量和品质严重下降的主要原因之一,常被喻为“小麦癌症”^[1]。FHB 在小麦幼苗到抽穗均可发生,且症状多样,包括苗枯、茎基腐、秆腐和穗腐等,特别是在穗部形成阶段,受害尤为严重,常造成籽粒品质下降和显著减产,严重时可能颗粒无收^[2]。受 FHB 感染的麦粒由于积聚大量的脱氧雪腐镰刀菌烯醇和 3-乙酰基脱氧雪腐镰刀菌烯醇等有害毒素,不仅萌发能力降低,还可能引发人畜中毒等问题^[3]。自 19 世纪末在英格兰首次记录以来,该病害已逐渐蔓延至全球多个小麦种植区,在加拿大、中国、美国中西部以及南美部分地区,已造成了巨大的经济损失,给全球粮食安全带来了严重威胁^[4]。1993—2001 年间,美国因 FHB 爆发损失 76 亿美元^[5];2000—2010 年间,FHB 流行造成巴西小麦减产 11.6%~39.8%^[6];2014—2016 年间,加拿大西部因 FHB 造成的损失超过约 10 亿美元^[7]。在中国,受全球气候变化、耕作制度变革和秸秆还田技术推广等多重因素的影响,FHB 在 2003 年、2012 年、2015 年、2016 年和 2018 年等呈现偏重甚至严重的流行^[8-9],发病区域已从长江中下游冬麦区和东北春麦区逐渐向北扩散并西移,淮河流域麦区逐渐成为新的重发区^[10],黄淮冬麦区、陕西关中麦区和宁夏麦区也频繁受到病害侵袭^[11]。已有多篇报道综述了 FHB 抗性育种策略、防治措施以及防治药剂等方面研究现状^[3,12-13],但目前对 FHB 全球研究成果的系统性整理与综合评估报道较少,对 FHB 研究中的关键问题、前沿研究方向以及长远发展态势等方面仍不太清晰,因此,有必要进一步梳理和分析近年来的相关研究,以推动该领域的深入发展。

文献计量学以文献为研究对象,通过运用数学和统计学方法对文献进行量化分析和评价,以揭示科学研究发展趋势和研究热点,目前已被广泛应用于作物科学领域。其中具有代表性的应用包括农作物基因组研究领域发展态势分析^[14]、小

麦数量性状位点(quantitative trait locus, QTL)定位国际研究热点分析^[15]、小麦氮素监测研究计量分析^[16]以及 FHB 农业遥感监测趋势分析等^[17]。本研究从全球视角出发,利用文献计量学方法对 2003—2023 年 FHB 研究领域发展进行全面回顾与分析,加深国内学者对世界范围内 FHB 研究现状与发展的了解和认识,进而为科研人员和决策者在该领域的相关工作提供指导与借鉴。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本文以 Web of Science 核心合集为检索基础,检索式为 TS=(Fusarium head blight OR FHB OR Fusarium graminearum OR Scab AND Wheat),发文时间为 2003—2023 年,语言为英语,检索时间为 2024 年 2 月 25 日,共得到 1 240 篇文献,剔除无关和重复文献后最终得到 1 236 篇文献,作为本文分析的数据源。

1.2 研究方法

采用 CiteSpace 6.3R1 可视化软件为分析工具,以知识图谱理论为核心理论,结合引文分析、共现分析等方法,对 FHB 研究领域的发文量、核心作者、机构、关键词、被引文献网络等进行系统梳理分析,对高频关键词进行聚类 and 突现检测,揭示该领域的研究热点、发展趋势及潜在的研究方向。

2 结果与分析

2.1 FHB 研究年度发文量分析

由图 1 可知,2003 和 2004 年文献数量相对较少,随着年份推移,相关研究文献逐渐增多,发文量在 2005 年至 2016 年间呈现波动增长趋势,2017—2022 年 FHB 相关研究文章快速增加,2022 年发文量高达 104 篇,占总发文量 8.4%。快速增长的主要原因可以归结为 2016 年以后,全球范围内有利于 FHB 流行的气候条件愈发增多,如耕作制度的转变^[18]、连续的阴雨天气^[19]、高湿度和适宜的温度^[20],为病原菌的繁殖和侵染

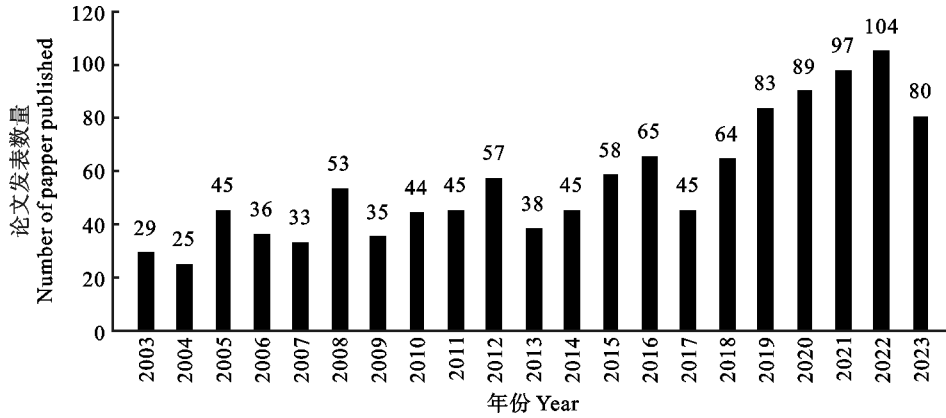


图 1 2003—2023 年 FHB 研究发文量统计
 Fig. 1 Statistics of FHB research publications from 2003 to 2023

提供了有利环境,导致 FHB 的不同程度流行,伴随着更多研究资金的投入和国际合作交流逐渐深化,相关研究快速发展。

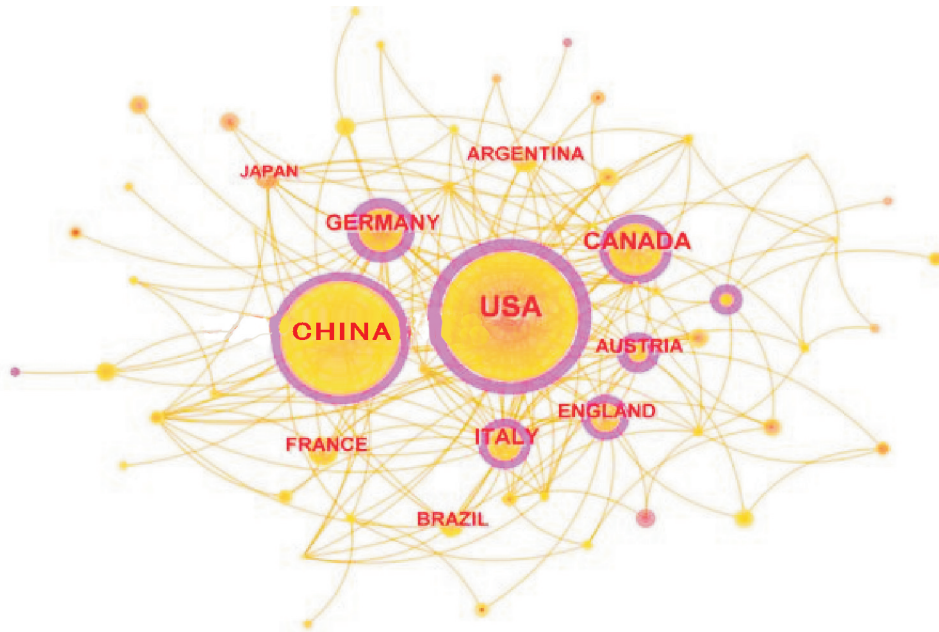
2.2 FHB 研究地域、机构及核心作者分析

2.2.1 地域和机构分析

利用“Country”功能对发文国家进行分析,得到节点数为 67、连线数 193、密度 0.08 的国家合作网络图谱(图 2)。图 2 中中部节点间连线较为密集,周边较稀疏,无独立节点,表明中国、美国、加拿大、德国、澳大利亚等国联系相对紧密,交流合作程度较高,统计发现半数的成果集中于美国(345

篇)和中国(280 篇),两国的发文数量占 53.4%,其次为加拿大、德国和意大利,分别有 145、89 和 73 篇,说明虽然中国较美国整体研究水平还有一定差距,但在该领域技术能力、创新水平和成果质量已位居世界前列,在国际上具有较高的权威性和认可度。

通过“Institution”分析功能对发文机构进行梳理,得到发文机构共现网络图谱(图 3)。图 3 中各节点紧密相连,未见孤立节点,说明研究机构间存在着紧密的合作关系,既包括国家内部的合作,如江苏省农科院与中国农业科学院、南京农业



图中节点大小代表发文数量多少,节点越大,发文量越多;节点间连线表示彼此之间存在交流与合作,连线越多,合作程度越深。下同。

The size of the nodes in the figure represents the number of publications. The larger the node, the more publications it signifies. The connecting lines between nodes indicate the existence of exchanges and collaborations among them, and the more lines, the deeper level of collaboration. The same in figures 3 and 4.

图 2 2003—2023 年 FHB 研究发文国家合作网络
 Fig. 2 Collaboration network of publishing countries for FHB research from 2003 to 2023



图 3 2003—2023 年 FHB 研究发文机构间合作关系

Fig. 3 Collaborative relationships among FHB research institutions from 2003 to 2023

大学之间的合作网络,也涉及跨国合作,如美国农业部与加拿大农业及食品部之间的合作。对机构发文量进行统计,如表 1 所示,美国农业部以 165 篇的发文量位居榜首,其多个下属研究机构在抗病基因鉴定与功能分析、病原遗传与分子生物学以及抗病资源发掘与利用等方面取得众多成果,紧随其后的是加拿大农业及农业食品部,以 41 篇的发文量位居第二。从数量上看,尽管美国整体

上发文数量高于中国,但中国在发文前十名机构中的个数却多于美国,表明中国在 FHB 研究方面成果地域分布较为均衡,有助于避免对单一机构的过度依赖,从而提高整体科研成果的稳定性和持续性。从机构类型来看,国际上的研究机构主要以政府部门和高校为主,类型相对单一,相比之下,中国则形成了政府部门、研究机构和高校齐头并进的发展态势。

表 1 2003—2023 年 FHB 研究机构发文数量统计(前 10)

Table 1 Top 10 research institutions' publication amount in FHB research from 2003 to 2023

排名 Rank	国家 Country	机构名称 Name of organization	性质 Property	频次 Frequency
1	美国 USA	美国农业部 United States Department of Agriculture	政府部门 Governmentdepartments	165
2	加拿大 Canada	加拿大农业及农业食品部 Agriculture & Agri-Food Canada	政府部门 Governmentdepartments	97
3	美国 USA	北达科他州立大学 North Dakota State University	大学 University	57
4	美国 USA	堪萨斯州立大学 Kansas State University	大学 University	55
5	澳大利亚 Australia	维也纳自然资源与生命科学大学 University of Natural Resources & Life Sciences	大学 University	43
6	中国 China	江苏省农科院 Jiangsu Academy of Agricultural Sciences	研究机构 Researchinstitution	41
7	德国 Germany	霍恩海姆大学 University Hohenheim	大学 University	38
8	中国 China	南京农业大学 Nanjing Agricultural University	大学 University	37
9	中国 China	中国农业科学院 Chinese Academy of Agricultural Sciences	研究机构 Researchinstitution	36
10	中国 China	中国农业农村部 Ministry of Agriculture & Rural Affairs	政府部门 Governmentdepartments	33

2.2.2 核心作者分析

发文量较高的作者对文献产出和学术进展起到关键推动作用,在该领域表现出较高影响力。基于 CiteSpace 软件中的”Author”分析功能对 FHB 领域高产作者分布情况进行梳理,如表 2 所示,明尼苏达大学的 Dong Yanhong 以 28 篇的发文量位居榜首,其在 FHB 领域的研究涵盖了病原学、抗性机制、评估方法以及基因组学等多个方面^[21-23],其他如 Bai Guihua、Buerstmayr Hermann、Miedaner Thomas、Brown-guedira Gina 等作者也在该领域有着突出的贡献。根据普赖斯定律,若某领域核心作者的发文量占比超过 50%,则表明该领域已形成稳定的核心作者群^[24],通过公式 $M=0.74 \times (N_{max})^{1/2}$ (N_{max} 为最高产作者发文量)计算出核心作者发文量阈值为 4.55,即发文量大于或等于 4 的作者为核心作者。统计发

现,核心作者的总发文量为 588 篇,占比仅为 37.5%,表明尽管已形成一定数量的高产作者及研究团队,但作者间的科研合作程度仍相对较低,且尚未形成一批高产且高影响力的核心作者及研究团队。

2.3 知识基础

高被引文献代表该领域内的杰出研究成果,对学术发展起到了重要的推动作用。利用“Reference”功能识别 FHB 研究领域核心文献和关键研究成果,对数据源中 1 236 篇文献的参考文献进行文献共被引分析,获得节点数量为 449、连线数为 1 028 的文献共被引网络,如图 4 所示。图 4 中节点代表收集到的各篇文章被引情况,网络中连线代表了文献之间的共被引关系,节点面积越大,该文献被引频次越高,重要程度越高,节点间连线数量越多,该文献与其他研究知识联系越紧密。

表 2 2003—2023 年 FHB 研究作者发文量统计(前 10)

Table 2 Top 10 authors' publication frequency in FHB research from 2003 to 2023

作者 Author	频次 Frequency	首发年份 First published year	作者 Author	频次 Frequency	首发年份 First published year
Dong Yanhong	28	2006	Li Tao	16	2016
Bai Guihua	25	2007	Fedak George	13	2003
Buerstmayr Hermann	22	2003	Huang Wenjiang	13	2019
Miedaner Thomas	21	2011	Lemmens Marc	11	2003
Brown-guedira Gina	18	2006	Dong Yingying	10	2020

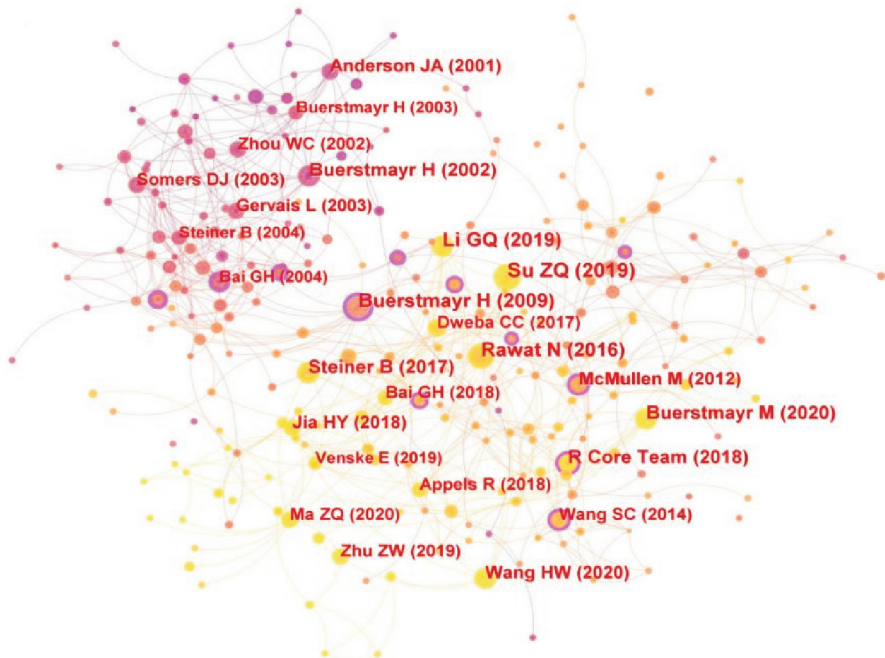


图 4 2003—2023 年 FHB 研究文献共被引网络

Fig. 4 Co-citation network of FHB research literature from 2003 to 2023

进一步分析被引频次最高的 10 篇文献,如表 3 所示,发现其中一半为综述文章,主要从遗传学、育种策略和病害防治三个方面对 FHB 研究进行整理和论述。在遗传学方面,Buerstmayr 等^[25]总结了 52 项 QTL 定位研究、9 篇标记辅助选择研究和 7 篇标记辅助种质评价研究,FHB 抗性 QTL 分布在除 7D 染色体外的其他小麦染色体上,部分 QTL 在多个独立定位研究中被重复发现,证明了其稳定性和在育种计划中的潜在应用价值。Jia 等^[26]聚焦中国小麦地方品种“望水白”的 FHB 抗性研究,报道了通过正向和反向遗传学方法,取得了在抗性 QTL 鉴定、候选功能基因发现等方面的进展。Buerstmayr 等^[5]和 Steiner 等^[18]从育种策略视角,基于过去十年间 FHB 抗性育种的研究成果,重点讨论了形态和物候性状对 FHB 抗性的影响及其在抗性育种中的潜在

应用,为育种方法的选择提供了新的视角。也有报道从病害防治的角度出发,回顾了小麦和大麦赤霉病在美国的流行情况,并总结了持续性、协调性和协作性研究项目的成果^[27]。另一半研究报道集中于 FHB 的关键抗性基因及其功能研究,Su 等^[28]指出,编码组氨酸富集钙结合蛋白的基因 *TaHRC* 是 *Fhb1* 介导的 FHB 抗性的关键因素;Li 等^[29]进一步从分子层面提供了关于 *Fhb1* 位点的证据;Rawat 等^[30]通过克隆 *Fhb1* 基因揭示了其编码的嵌合蛋白的抗性作用;Wang 等^[31]通过分子标记技术鉴定了与 FHB II 型抗性相关的基因组区域,通过克隆分析长穗偃麦草 *Fhb7* 基因,揭示了其在化解镰刀菌毒素中的关键作用,展示出基因水平转移事件的可能性。这些研究不仅从分子层面深化了对 FHB 抗性的理解,也为未来的抗病育种提供了新的候选基因和策略。

表 3 2003—2023 年 FHB 研究关键文献被引频次统计(前十)

Table 3 Top ten cited frequency of key literature on FHB research from 2003 to 2023

排名 Rank	题目 Title	年份 Year	作者 Author	频次 Times	期刊 Journal
1	A deletion mutation in <i>TaHRC</i> confers <i>Fhb1</i> resistance to Fusarium head blight in wheat	2019	Su Z Q	81	Nature Genetics
2	Mutation of a histidine-rich calcium-binding-protein gene in wheat confers resistance to Fusarium head blight	2019	Li G Q	66	Nature Genetics
3	Wheat <i>Fhb1</i> encodes a chimeric lectin with agglutinin domains and a poreforming toxin-like domain conferring resistance to Fusarium head blight	2016	Rawat N	63	Nature Genetics
4	QTL mapping and marker-assisted selection for Fusarium head blight resistance in wheat; a review	2009	Buerstmayr H	61	Plant Breeding
5	Breeding for Fusarium head blight resistance in wheat-progress and challenges	2020	Buerstmayr M	60	Plant Breeding
6	Molecular mapping of QTLs for Fusarium head blight resistance in spring wheat. I. Resistance to fungal spread (type II resistance)	2002	Buerstmayr H	59	Theoretical and Applied Genetics
7	Breeding strategies and advances in line selection for Fusarium head blight resistance in wheat	2017	Steiner B	57	Tropical Plant Pathology
8	Horizontal gene transfer of <i>Fhb7</i> from fungus underlies Fusarium head blight resistance in wheat	2020	Wang H W	53	Science
9	A unified effort to fight an enemy of wheat and barley: Fusarium head blight	2012	McMullen M	49	Plant Disease
10	A journey to understand wheat Fusarium head blight resistance in the Chinese wheat landrace Wangshuibai	2019	Jia H Y	43	Crop Journal

3 FHB 研究热点与前沿

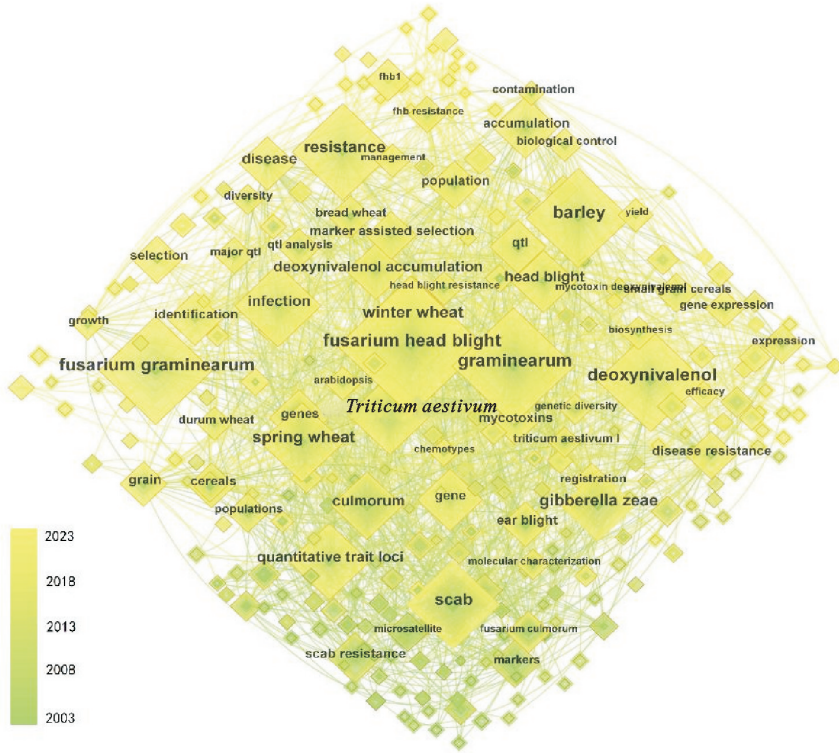
3.1 主要研究热点

关键词是对文章主题的概括和研究重点的提炼,反映论文的核心内容,通过关键词共现分析,了解关键词之间的关联强度与频次,能够揭示研究领域热点与趋势。将节点设置为“Keyword”进行分析,获得 588 个节点、2 725 条连线的关键词

共现图谱,如图 5 所示。除与检索主题词近意的“head blight”外,禾谷镰刀菌 (*Fusarium graminearum*)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇 (deoxynivalenol)、抗性 (resistance)、数量性状位点 (quantitative trait loci)、侵染 (infection)、黄色镰刀菌 (culmorum)、鉴定 (identification)、基因 (gene) 和积累 (accumulation) 都是代表性高频关键词,反映了 FHB 研究的多个重要方向,如病原菌生物

学、毒素产生与检测、作物抗病性研究、遗传学和分子生物学、病菌侵染过程与病害发展以及病原菌鉴定等。研究涉及的作物种类及其与 FHB 的关系也是分析的重点,高频词如大麦(barley)、春

小麦(spring wheat)、冬小麦(winter wheat)、普通小麦(*Triticum aestivum*)和硬粒小麦(durum wheat)等,表明研究范围不仅局限于普通小麦这一主要受害作物,也拓展到了其他作物。



图中的矩形框代表关键词,矩形框面积大小反映关键词频次多少,面积越大,频次越高;矩形框之间的连线代表关键词之间的共现关系,连线越多,共现程度越高。

The rectangular frames depicted in the illustration signify keywords, with the size of the frame indicating the frequency of the keyword occurrence; a larger frame area corresponds to a higher frequency; The connecting lines between the rectangular frames represent the co-occurrence relationships between keywords, with a greater number of lines suggesting a higher degree of co-occurrence.

图 5 2003—2023 年 FHB 研究关键词共现图谱

Fig. 5 Co-occurrence network of keywords in FHB research from 2003 to 2023

为探究不同关键词之间潜在联系和依赖性,了解研究领域内不同概念和子领域的分布情况,对关键词共现图谱进行对数似然比(log-likelihood ratio, LLR)聚类分析。聚类结果如图 6 所示,其中模块值 Q 为 0.43,平均轮廓值 S 为 0.99,表明聚类结构可信。图 6 中共显示了 8 个类型,编号 0~7,编号越小则类型规模越大,所含关键词越多。根据聚类结果可将关键词整体分为三大类,第一类为 FHB 分子生物学与遗传学研究(0、1、2、7),热点集中在 FHB 生物学基础、遗传学特性以及与之相关的分子生物学机制,如病原菌的基因表达、代谢过程、毒素产生以及通过 QTL 分析等方式来探索与 FHB 抗性相关的基因位点^[32],这些基础研究为深入理解 FHB 的发病机制及抗病育种提供了重要的理论支撑。第二类为病害防治与农药应用(3、5、6),这部分研究主要关注 FHB 的

防治技术和管理策略,三唑类杀菌剂的研究和应用是防治 FHB 的重要手段之一,生物防治和生防菌的研究则为赤霉病的绿色防治提供了新的思路。第三类为遥感监测与智能诊断(4),遥感技术、深度学习、高光谱成像、卷积神经网络等技术的引入,不仅提高了对 FHB 发生和发展的实时监测能力,还为预测模型的构建和防控策略的优化提供了强大的技术支持^[33]。

3.2 热点演化阶段分析

关键词的频率变化反映了研究主题的演变,是把握研究动态的重要手段。利用 CiteSpac 的“Burst term”功能,提取 2003—2023 年间该研究领域的高频关键词变化趋势,并识别出前 25 个突现关键词,结果如图 7 所示。发现近 20 年 FHB 研究有三个主要阶段,第一阶段(2003—2007 年),

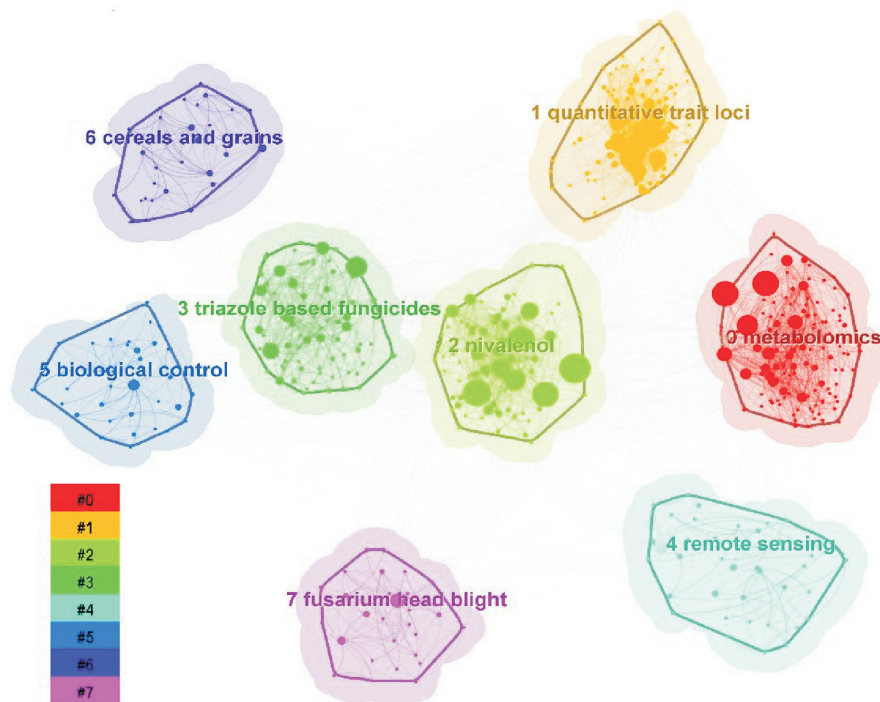


图 6 2003—2023 年 FHB 研究关键词聚类图谱

Fig. 6 Clustermap of keywords in FHB research from 2003 to 2023

表 4 基于对数似然比计算的关键词聚类结果

Table 4 Keyword clustering results based on log-likelihood ratio calculation

编号 No.	年份 Year	规模 Size	聚类结果 Clustering result
# 0	2011	121	代谢组学、基因表达、禾谷镰孢菌、转录因子、表达 Metabonomics; Gene expression; <i>Fusarium graminearum</i> ; Transcription factor; Expression
# 1	2010	118	QTL、标记辅助选择、微卫星标记、春小麦、数量性状位点定位 QTL; Marker assisted selection; Microsatellite markers; Spring wheat; QTL mapping
# 2	2010	96	雪腐镰刀菌醇、自然毒素、真菌毒素、单端孢霉烯、脱氧雪腐镰刀菌烯醇 Nivalenol; Natural toxins; Mycotoxin; Trichothecene; Deoxynivalenol
# 3	2010	83	三唑类杀菌剂、黄色镰刀菌、冬小麦、积累、元分析 Triazole based fungicides; Culmorum; Winter wheat; Accumulation; Meta-analysis
# 4	2014	38	遥感、深度学习、高光谱成像、卷积神经网络、特征融合 Remote sensing; Deep learning; Hyperspectral imaging; Convolutional neural network; Feature fusion
# 5	2013	35	生物防治、生物防治剂、菌株、预测、粉红螺旋聚孢霉 Biological control, Biological control agents, Strains, prediction; <i>Clonostachys rosea</i>
# 6	2013	31	谷物、真菌、病害治理、镰刀菌属、抗真菌性 Grain; Fungus; Disease management; <i>Fusarium</i> ; Antifungal
# 7	2011	30	小麦赤霉病、抗病性、植物防御、基因结构、假禾谷镰孢菌 Fusarium head blight; Disease resistance; Plant defense; Genetic architecture; <i>Fusarium pseudograminearum</i>

主要聚焦于分子标记技术和 FHB 抗性相关基因的深入探索,通过构建遗传图谱为抗性机制研究提供了基础数据^[34],同时“cereals”、“triticum aestivum”、“rye”等突变词的相继出现,表明研究对象逐渐多元化,FHB 与其他谷类作物的关系逐渐被重视^[35-36]。第二阶段(2012 年—2019 年),在继续揭示 FHB 抗性机制的基础上重点研究抗病性与高产量之间的平衡关系,致力于寻找提高小麦产量的方法^[37]。第三阶段(2020 年至今)研究

热点已逐渐转向病害管理、生物防治及分子机制等方面。面对农业生产模式的转变和气候变化的挑战,单一的防治措施已难以满足持续控制 FHB 的需求,研究者开始关注多种防治手段的有机结合,以实现更高效、更环保的病害管理。生物防治因环境友好性和可持续性而受广泛关注,如 Xu 等^[38]筛选出具有抗 FHB 潜力的菌株 XY-1,为生物防治提供理论基础;Rojas^[39]团队则发现了内生真菌奥尔森青霉 ML37 在小麦穗部的定殖能

力及其对植物防御机制的激活作用,证实了其作为生物替代品的潜力。此外,随着精准农业的发展,综合管理策略与新型防治方法也逐渐成为研究的新方向,通过利用遥感技术和大数据分析等现代科技手段,实现对 FHB 的精准监测和防治效果评估^[40]。在防治效果方面,研究集中于对比新型防治技术与传统方法的效能,Wang 等^[41]评估了氧化石墨烯与杀菌剂(代森锰锌、环唑醇和苯醚甲环唑)联合使用对镰刀菌的抑制作用,发现氧化石墨烯与杀菌剂联合使用对菌丝生长、菌丝生物量和孢子萌发具有显著的协同抑制效果,氧化石墨烯与现有杀菌剂的强协同活性展示了其在害

虫防治中的巨大应用潜力;Xia 等^[42]比较了不同管理策略在抑制赤霉病和提高农学性能方面的效果,发现现代管理策略显著优于传统策略。在分子机制方面,基因编辑技术展现出了巨大的潜力和应用价值,Fanelli^[43]与其团队利用基因编辑技术对小麦进行抗病性改良,发现长穗偃麦草的 *Fhb7E* 位点可赋予小麦对 FHB 的出色抗性,减少产量损失和籽粒中的毒素积累;Steed 等^[44]通过喷雾接种法筛选出具有增强抗性的小麦野生近缘物种导入系,这些研究不仅有助于深入理解 FHB 的抗性机制,也为抗病育种提供了重要的基因资源。

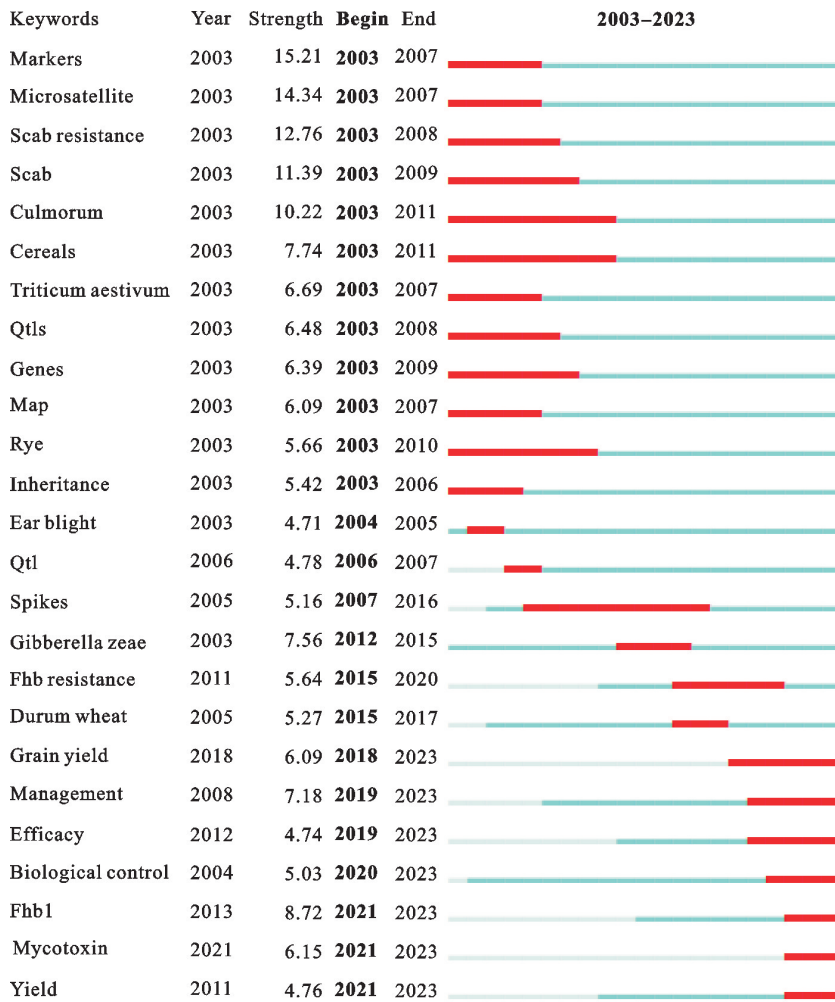


图 7 2003—2023 年 FHB 研究关键词突变时间序列变化

Fig. 7 Time series changes of keyword mutations in FHB research from 2003 to 2023

4 结论与展望

4.1 结论

通过对 FHB 研究信息进行深入挖掘,本文得出以下主要结论:(1)近 20 年来,FHB 研究热

度不断上升,发文量呈稳步增长态势,显示出该领域的研究正进入一个新的高潮期。(2)中美、中英、中加等跨国合作研究较为频繁,显示出 FHB 研究具有广泛的国际合作基础,中国和美国 FHB 研究领域占据重要地位,两国的总发文量远超其

他国家,其中江苏省农科院、南京农业大学与中国农业科学院成果丰硕,发文量名列前茅,在国际间具有较大的影响力。(3)当前研究主要集中于 FHB 的发病机理、抗病基因挖掘、抗病品种选育以及病害监测与预警等方面,热门技术方法主要以代谢组学、多组学联合分析等现代生物技术手段为主。

4.2 展望

随着基因组学、生物信息学、生物防治技术及遥感技术的日益成熟,未来 FHB 研究领域的多学科交叉融合趋势将愈发显著,将更加注重基因编辑与植物抗性机制的深入探索和生物防治与宿主微生物的相互作用研究,同时新型真菌毒素与抗真菌化合物的发现与利用及光学传感技术与遥感监测预警,将共同构成 FHB 防治研究的重要方向。

在基因编辑与植物抗性机制方面,利用基于遗传的抗性来控制 FHB 仍是最具成本效益和可持续性的方法,FHB 抗性是一种典型的数量性状,由多个具有微小效应的数量性状位点所控制,尽管目前已有超过 500 个与 FHB 抗性相关的数量性状位点,其中 *Fhb1*~*Fhb7* 已被精准定位,但如“苏麦 3”、“望水白”等高抗性品种仍较少,因此,培育抗病品种、抗性基因的精细定位和实际效果评价将是今后抗病育种的重要内容。

在生物防治与宿主微生物研究方面,虽有大量的报道指出多种真菌和细菌具有作为生物防治剂的潜力,但开发高效、易用且保质期长的生物制剂仍存在一定困难,未来的研究应关注如何提高生物制剂的稳定性和活性,以及如何优化其在田间条件下的应用策略。

真菌毒素与抗真菌化合物的研究也是 FHB 防治领域的重要方向之一,未来应聚焦于赤霉病病原菌产生的真菌毒素的分子结构和生物活性及抗真菌化合物的筛选和作用机理研究,揭示真菌毒素对小麦产量和品质的影响机制及抗真菌化合物的筛选和作用机理研究,有助于发现新的抗真菌化合物和毒素降解方法,为 FHB 的防治提供新的药剂选择。

光学传感技术能够对小麦叶片、穗部等关键部位精准检测,通过捕捉病害引起的光谱特征变化,实现对赤霉病发生程度的快速评估,有高灵敏度、无损检测等特点。随着分辨率和成像技术的提升,未来光学传感技术将更加注重对病害细节

的捕捉和分析,以提高监测的准确性和时效性。遥感监测预警利用卫星遥感、无人机等平台,结合多源、多时相的数据融合处理技术,可对 FHB 的发生和流行进行大范围、高精度的监测和预警,通过集成更先进的光学传感器和数据处理技术,结合机器学习、深度学习等人工智能技术,提高遥感监测预警系统的智能化水平,实现对 FHB 发生的自动识别和预警。

参考文献:

- [1]董吉卫,黄敏,宋浩.小麦赤霉病防治药剂研究进展[J].现代农药,2022,21(1):23.
DONG J W, HUANG M, SONG H. Research progress of fungicides for Fusarium head blight [J]. *Modern Agrochemicals*, 2022, 21(1): 23.
- [2]郭明明,王康君,张广旭,等.赤霉病对小麦籽粒产量和品质的负效应分析[J].中国植保导刊,2023,43(2):5.
GUO M M, WANG K J, ZHANG G X, et al. Negative effect of Fusarium head blight on grain yield and quality of main wheat cultivars in the Huanghuai area [J]. *China Plant Protection*, 2023, 43(2): 5.
- [3]周晴晴,路艳琴,陆景倩,等.小麦赤霉病生防机制研究进展[J].江苏农业科学,2023,51(3):1.
ZHOU Q Q, LU Y Q, LU J Q, et al. Research progress on biological control mechanism of wheat scab [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(3): 1.
- [4]MAWCHA K T, ZHANG N, WANG Y, et al. Advances in wheat breeding for resistance to Fusarium head blight [J]. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*, 2022, 58(4): 167.
- [5]BUERSTMAYR M, STEINER B, BUERSTMAYR H. Breeding for Fusarium head blight resistance in wheat progress and challenges [J]. *Plant Breeding*, 2020, 139(3): 429.
- [6]GODDARD R, STEED A, SCHEEREN P L, et al. Identification of Fusarium head blight resistance loci in two Brazilian wheat mapping populations [J]. *Plos Ones*, 2021, 16(3): 458.
- [7]CHIN T, PLESKACH K, TITTELMIER S A, et al. A status update on Fusarium head blight on Western Canadian wheat [J]. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 2023, 45(3): 277.
- [8]曾娟,姜玉英.2012年我国小麦赤霉病暴发原因分析及持续监控与治理对策[J].中国植保导刊,2013,33(4):38.
ZENG J, JIANG Y Y. Analysis of the outbreak causes of wheat Fusarium head blight in China in 2012 and strategies for sustained monitoring and management [J]. *China Plant Protection*, 2013, 33(4): 38.
- [9]黄冲,姜玉英,吴佳文,等.2018年我国小麦赤霉病重发特点及原因分析[J].植物保护,2019,45(2):160.
HUANG C, JIANG Y Y, WU J W, et al. Occurrence characteristics and reason analysis of wheat head blight in 2018 in China [J]. *Plant Protection*, 2019, 45(2): 160.
- [10]张爱民,阳文龙,李欣,等.小麦抗赤霉病研究现状与展望[J].遗传,2018,40(10):858.
ZHANG A M, YANG W L, LI X, et al. Current status and perspective on research against Fusarium head blight in wheat [J]. *Hereditas*, 2018, 40(10): 858.
- [11]靳鹏飞,朱运启,王峭,等.陕西关中2018年春季小麦冻害及引发赤霉病调查与分析[J].植物保护,2019,45(4):185.
JIN P F, ZHU Y Q, WANG Q, et al. Investigation and analysis of winter wheat frost damage and Fusarium head blight in Guanzhong of Shaanxi province in spring of 2018 [J]. *Plant Protection*, 2019, 45(4): 185.
- [12]马鸿翔,王永刚,高玉姣,等.小麦抗赤霉病育种回顾与展望[J].中国农业科学,2022,55(5):837.
MA H X, WANG Y G, GAO Y J, et al. Review and prospect

- on the breeding for the resistance to Fusarium head blight in wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(5): 837.
- [13] 刘悦, 史文琦, 曾凡松, 等. 生物炭对小麦赤霉病的防治效果及产量的影响[J]. *植物保护*, 2020, 46(4): 270.
LIU Y, SHI W Q, ZENG F S, et al. Effect of biochar on controlling wheat Fusarium head blight and yield [J]. *Plant Protection*, 2020, 46(4): 270.
- [14] 袁雪, 钱万强, 郭溪川, 等. 基于文献计量的农作物基因组研究领域发展态势分析[J]. *生物技术通报*, 2019, 35(12): 118.
YUAN X, QIAN W Q, GUO X C, et al. Development trend analysis of crop genome research based on bibliometrics [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2019, 35(12): 118.
- [15] 何子伟, 张琦, 徐延浩, 等. 基于 Web of Science 的小麦 QTL 定位研究英文文献计量分析[J]. *麦类作物学报*, 2019, 39(3): 314.
HE Z W, ZHANG Q, XU Y H, et al. Bibliometric analysis of the researches on QTL mapping in wheat based on web of science database [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(3): 314.
- [16] 查文童, 朱志畅, 郭双霜, 等. 基于文献计量学的小麦氮素监测研究进展分析[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(23): 1.
ZHA W T, ZHU Z C, GUO S S, et al. A bibliometric-based analysis of research advances in the field of nitrogen monitoring in wheat [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(23): 1.
- [17] HUSSAIN S, MUSTAFA G, HAIDER K I, et al. Global trends and future directions in agricultural remote sensing for wheat scab detection: insights from a bibliometric analysis [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(13): 3431.
- [18] STEINER B, BUERSTMAYR M, MICHEL S, et al. Breeding strategies and advances in line selection for Fusarium head blight resistance in wheat [J]. *Tropical Plant Pathology*, 2017, 42(3): 165.
- [19] HAO J J, XIE S N, SUN J, et al. Analysis of *Fusarium graminearum* species complex from wheat maize rotation regions in Henan (China) [J]. *Plant Disease*, 2017, 101(5): 720.
- [20] CUMMINGS J A, MYERS K, BLACHEZ A F, et al. First report of Fusarium head blight caused by *Fusarium cerealis* in barley in New York [J]. *Plant Disease*, 2017, 101(11): 1955.
- [21] DONG Y H, MENG X L, WANG Y N, et al. Screening of pathogenicity-deficient *Fusarium oxysporum* mutants established by *Agrobacterium tumefaciens*-mediated transformation [J]. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 2021, 43(1): 140.
- [22] JIANG G L, DONG Y, LEWIS J M, et al. Characterization of resistance to *Fusarium graminearum* in a recombinant inbred line population of wheat: Resistance to fungal spread, mycotoxin accumulation, and grain yield loss, and trait relationships [J]. *Crop Science*, 2006, 46(6): 2590.
- [23] CHU C, NIU Z, ZHONG S, et al. Identification and molecular mapping of two QTLs with major effects for resistance to Fusarium head blight in wheat [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2011, 123(7): 1107.
- [24] 丁学东. 文献计量学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 1993.
DING X D. Basis of bibliometrics [M]. Beijing: Peking University Press, 1993.
- [25] BUERSTMAYR H, BAN T, ANDERSON J A. QTL mapping and marker-assisted selection for Fusarium head blight resistance in wheat: A review [J]. *Plant Breeding*, 2009, 128(1): 1.
- [26] JIA H, ZHOU J, XUE S, et al. A journey to understand wheat Fusarium head blight resistance in the Chinese wheat landrace Wangshuibai [J]. *The Crop Journal*, 2018, 6(1): 48.
- [27] MCMULLEN M, BERGSTROM G, WOLF ED, et al. A unified effort to fight an enemy of wheat and barley: Fusarium head blight [J]. *Plant Disease*, 2012, 96(12): 1712.
- [28] SU Z, BERNARDO A, TIAN B, et al. A deletion mutation in *TaHRC* confers *Fhb1* resistance to Fusarium head blight in wheat [J]. *Nature Genetics*, 2019, 51(7): 1099.
- [29] LI G, ZHOU J, JIA H, et al. Mutation of a histidine-rich calcium-binding-protein gene in wheat confers resistance to Fusarium head blight [J]. *Nature Genetics*, 2019, 51(7): 1106.
- [30] RAWAT N, PUMPHREY M O, LIU S, et al. Wheat *Fhb1* encodes a chimeric lectin with agglutinin domains and a pore-forming toxin-like domain conferring resistance to Fusarium head blight [J]. *Nature Genetics*, 2016, 48(12): 1576.
- [31] WANG H, SUN S, GE W, et al. Horizontal gene transfer of *Fhb7* from fungus underlies Fusarium head blight resistance in wheat [J]. *Science*, 2020, 368(6493): 844.
- [32] PAUL P A, BRADLEY C A, MADDEN L V, et al. Meta-analysis of the effects of QoI and DMI fungicide combinations on Fusarium head blight and deoxynivalenol in wheat [J]. *Plant Disease*, 2018, 102(12): 2602.
- [33] LI L, DONG Y, XIAO Y, et al. Combining disease mechanism and machine learning to predict wheat Fusarium head blight [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(12): 2732.
- [34] CUTHBERT P A, SOMERS D J, BRULÉ-BABEL A. Mapping of *Fhb2* on chromosome 6BS: A gene controlling Fusarium head blight field resistance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2007, 114(3): 429.
- [35] CHEN J, GRIFFEY C A, MAROOF M A S M, et al. Validation of two major quantitative trait loci for Fusarium head blight resistance in Chinese wheat line W14 [J]. *Plant Breeding*, 2006, 125(1): 99.
- [36] GOSWAMI R S, KISTLER H C. Pathogenicity and in planta mycotoxin accumulation among members of the *Fusarium graminearum* species complex on wheat and rice [J]. *Phytopathology*, 2005, 95(12): 1397.
- [37] SALAMEH A, BUERSTMAYR M, STEINER B, et al. Effects of introgression of two QTL for Fusarium head blight resistance from Asian spring wheat by marker-assisted backcrossing into European winter wheat on Fusarium head blight resistance, yield and quality traits [J]. *Molecular Breeding*, 2011, 28(4): 485.
- [38] XU X, CHENG Y, FANG Z, et al. Identification and utilization of a new *Bacillus amyloliquefaciens* XY-1 against Fusarium head blight [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1055213.
- [39] ROJAS E C, JENSEN B, JØRGENSEN H J L, et al. The fungal endophyte *Penicillium olsonii* ML37 reduces Fusarium head blight by local induced resistance in wheat spikes [J]. *Journal of Fungi*, 2022, 8(4): 345.
- [40] XIAO Y, DONG Y, HUANG W, et al. Regional prediction of Fusarium head blight occurrence in wheat with remote sensing based susceptible exposed infectious removed model [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 114: 103043.
- [41] WANG X, PENG F, CHENG C, CHEN L, et al. Synergistic antifungal activity of graphene oxide and fungicides against Fusarium head blight in vitro and in vivo [J]. *Nanomaterials* 2021; 11(9): 2393.
- [42] XIA R, SCHAAFSMA A W, WU F, et al. The change in winter wheat response to deoxynivalenol and Fusarium head blight through technological and agronomic progress [J]. *Plant Disease*, 2021, 105(4): 840.
- [43] FANELLI G, KUZMANOVIĆ L, GIOVENALI G, et al. Un-targeted metabolomics reveals a multi-faceted resistance response to Fusarium head blight mediated by the *Thinopyrum elongatum* *Fhb7E* locus transferred via chromosome engineering into wheat [J]. *Cells*, 2023, 12(8): 1113.
- [44] STEED A, KING J, GREWAL S, et al. Identification of Fusarium head blight resistance in *Triticum timopheevii* accessions and characterization of wheat-*T. timopheevii* introgression lines for enhanced resistance [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 943211.