



张莹,吕平香,戴长春. 基于文献计量的微生物农药研究热点与趋势分析[J]. 中国农业大学学报, 2026, 31(02): 116-128.

ZHANG Ying, LYU Pingxiang, DAI Changchun. Research hotspots and trend analysis of microbial pesticides based on bibliometrics [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(02): 116-128.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.02.10

基于文献计量的微生物农药研究热点与趋势分析

张莹¹ 吕平香¹ 戴长春^{2*}

(1. 中国农业科学院 植物保护研究所, 北京 100193;

2. 东北农业大学 植物保护学院, 哈尔滨 150030)

摘要 为了解微生物农药产业的发展趋势,利用CiteSpace软件分析了近10年微生物农药研究领域的发展历程、研究热点、新兴趋势及知识结构。结果表明:1)2018年以来,Web of Science核心集数据库(WOS)和中国知网(CNKI)数据库微生物农药研究发文量呈持续上升趋势。2)中国、美国和意大利在该领域做出显著贡献并拥有较大影响力。3)研究热点主要集中在害虫抗性治理、诱导系统抗性、胁迫、土壤修复、多样性和可持续农业等方面。4)研究热点不断演化和变动,WOS数据库前期主要围绕害虫抗性治理、多样性和土壤改良展开,后期更加关注微生物-植物-病原菌的相互作用和机制研究;CNKI数据库前期研究集中在菌株筛选和田间效果,后期则更注重产品的推广应用。5)在WOS数据库中,2000—2025年为微生物农药知识基础产出的繁荣期,针对拮抗特性与作用机制的研究处于核心位置,结合微生物组学分析技术,构成了此领域重要的理论和技术基础。未来菌种资源挖掘、菌株改良、机制阐释、发酵工艺和剂型创新将是重点关注方向。本研究结果有助于了解国内外微生物农药研究的发展趋势,为未来微生物农药领域研究提供科学图谱与方向指引。

关键词 微生物农药;可视化分析;文献计量学;CiteSpace

中图分类号 S476

文章编号 1007-4333(2026)02-0116-13

文献标志码 A

Research hotspots and trend analysis of microbial pesticides based on bibliometrics

ZHANG Ying¹, LYU Pingxiang¹, DAI Changchun^{2*}

(1. Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China;

2. College of Plant Protection, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract To understand the development trend of microbial pesticide industry, this paper uses CiteSpace software to analyze the development history, research hotspots, emerging trends and knowledge structure of microbial pesticide research in the past ten years. The results showed that: 1) Since 2018, the number of published papers on microbial pesticides in the Web of Science (WOS) core set database and China National Knowledge Infrastructure (CNKI) database has shown a continuous upward trend. 2) China, the United States and Italy have made significant contributions and have great influence in this field. 3) The research hotspots mainly focus on pest resistance management, induced systemic resistance, stress, soil remediation, diversity and sustainable agriculture. 4) The research hotspots are constantly evolving and changing. In the early stage, the WOS database mainly focused on pest resistance management, diversity and soil improvement, while in the later stage, it paid more attention to the interaction relationship and mechanism of microorganism-plant-

收稿日期: 2025-06-21;接受日期: 2025-11-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD1500303)

第一作者: 张莹(ORCID:0009-0002-6641-708X),博士研究生,E-mail:bj_zhangying@163.com

通讯作者: 戴长春(ORCID:0000-0002-1226-9643),副教授,主要从事农业昆虫与害虫防治研究,E-mail:changchundai@163.com

pathogen in the later stage. The preliminary studies on CNKI database focused on strain screening and field effects, and later more attention was paid to the promotion and application of products. 5) In the WOS database, the period from 2000 to 2025 is a prosperous period for the production of microbial knowledge base. The research on antagonistic characteristics and mechanism of action is at the core position. Combined with microbiome analysis technology, it constitutes an important theoretical and technical basis in this field. In the future, strain resource mining, strain improvement, mechanism interpretation, fermentation process and dosage form innovation will be the focus of attention. The research results contribute to understanding the development trend of microbial pesticide research at home and abroad, and providing a scientific map and direction guidance for future research in the field of microbial pesticide.

Keywords microbial pesticide; visual analysis; bibliometrics; CiteSpace

粮食安全与农业生产的可持续性需要平衡产量、生态保护和人类健康。长期以来,化学农药因其高效、便捷的特性被广泛用于病虫害防治,但过度依赖和不合理使用带来了不容忽视的负面影响^[1]。近年来,随着农业科技的进步和发展,作为化学农药替代品的微生物农药越来越受到重视。微生物农药是以天然的或经基因修饰的细菌、真菌、病毒以及原生动物等为有效成分的一种生物源农药,具有杀菌、杀虫和除草等功效,对环境和人类健康具有低风险性、对病虫害控制具有高效性^[2]。微生物农药的应用在农业可持续发展、生态环境保护和食品安全保障等方面具有不可替代的作用,是国家高质量发展的内在要求。我国“十四五”全国农药产业发展规划明确要求到2025年化学农药使用总量持续负增长,主要农作物病虫害绿色防控覆盖率达到55%以上,微生物农药的应用是核心抓手^[3]。

截至2016年12月31日,我国已登记微生物农药有效成分42个^[4];到2022年12月31日,已达56种^[5-6],可见微生物农药规模呈逐年增长趋势。近年来,越来越多的微生物农药产品开始推向市场使用,其研究已引发全球的关注,在菌株筛选、产品研发与应用等方面产生大量的研究成果。已有研究对常见剂型种类及特点^[7]、产品质量、安全性评价和使用技术相关标准^[8]、助剂研发^[9]、管理现状^[10]、产业发展^[11]、防治重大病虫害及应用情况^[12]等方面进行了详尽的阐述,但鲜有研究从文献计量角度剖析其整体脉络。全面分析微生物农药相关的热点主题和知识基础有助于了解该产业的发展趋势,为我国微生物农药领域的科学研究提供参考价值。

文献计量学可以通过深度挖掘数据资源,利用可视化分析技术展现某一研究领域的发展脉络和

核心主题。CiteSpace是一种科学文献可视化分析工具,它通过将文献数据转化为科学知识图谱,阐述一个特定领域科学知识的分布、形成、积累、扩散和转换过程,揭示一个知识领域研究前沿的突现与演变进程^[13-15]。

从宏观角度梳理微生物农药研究的整体脉络,揭示研究前沿的突现特征与动态演变过程,有助于深入解析研究动态与核心热点。本研究基于文献计量学方法,系统分析全球微生物农药领域的研究现状,借助中国知网(CNKI)和Web of Science(WOS)的文献搜集功能,采用CiteSpace科学可视化工具,对2015—2025年间微生物农药研究的热点议题、演化路径和知识基础进行分析与图谱呈现,阐明近10年微生物农药在农业领域的研究焦点和发展趋势,助力未来中国微生物农药领域的持续研发与实践。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究对2015—2025年微生物农药相关文献进行收集、整理和分析,中文文献数据来自CNKI学术期刊数据库。选择学术期刊界面中的“高级检索”功能,依据国内已登记微生物农药有效成分名单确定检索词,通过多次检索和修改后确定检索式:主题=(微生物农药+芽孢杆菌+荧光假单胞杆菌+沼泽红假单胞菌+嗜硫小红卵菌+绿僵菌+白僵菌+微孢子虫+木霉+淡紫拟青霉+厚孢轮枝菌+寡雄腐霉+盾壳霉+粘帚霉+核型多角体病毒+质型多角体病毒+颗粒体病毒)。检索时间范围为2015年1月1日—2025年5月28日,选择文献来源为“北大核心”和“中国科学引文数据库(CSCD)”,学科为植物保护、农业基础科学、园艺、

农艺学和林业,文献类型为“研究论文”“综述”,去除不相关文献,对最终获得的3 299篇文献进行可视化分析。

国际研究文献数据来源于WOS核心集数据库,检索时间范围为2015年1月1日—2025年5月28日。依据国外登记较多的微生物农药活性成分确定检索词范围,通过多次检索和修改后确定检索式TS=Microbial pesticide or Bacillus thuringiensis or Bacillus subtilis or Metarhizium anisopliae or Beauveria bassiana or Trichoderma harzianum or Helicoverpa armigera nucleopolyhedrovirus or Spodoptera exigua multicapsid nucleopolyhedrovirus or The Autographa californica multiple nucleopolyhedrovirus,选择文献类型为“Article”,研究方向为“Agriculture”,最终检索出5 096篇文献进行CiteSpace可视化分析。

1.2 研究现状分析

基于CiteSpace的可视化功能,分别对CNKI数据库和WOS核心集数据库在2015—2025年度微生物农药研究的发文量和主要发文国家进行分析。因数据来源截至2025年5月28日,2025年度发文量数据不全,因此没有统计2025年度发文量。使用中介中心性表示对象的重要性,中介中心性越高,表示节点越重要。

1.3 研究进展可视化分析

基于CiteSpace知识图谱分析法,首先,通过关键词共现分析和突现检测提取高频关键词和突现词,以此揭示学科领域的研究热点和变化趋势;然后,通过文献共被引聚类 and 突现分析反映该领域的知识结构,识别知识基础的关键转折点。

1.3.1 关键词共现分析、突现检测和时区图

使用CiteSpace 6.4. R1 Advanced进行可视化分析,参数设置及操作过程如下:时间段

(TimeSlicing)为2015-01—2025-05,切片时间(Years per slice)为1年,设置TopN=50和g-index(k)=15进行关键词共现分析和时区图制作,突现性检测设置 $\gamma=1$ 。导出数据至Excel分析关键词频次和突现词信息。

1.3.2 文献共被引聚类 and 突现分析

使用CiteSpace 6.4. R1 Advanced进行可视化分析,基于WOS核心集数据库数据运行CiteSpace,节点类型选择“reference”,参数设置及操作过程如下:时间段为2015-01—2025-05,切片时间为1年,为了确保共被引文献的全面性,设置TopN%=100%和g-index(k)=25进行节点筛选。对共被引文献数据进行聚类分析,聚类名称采用对数似然算法(LLR),采用时间线图(TimeLine)生成引文网络。突现性检测设置 $\gamma=1$,导出数据至Excel制作文献共被引突现表。CNKI数据库缺乏标准化引用数据,导出的文献不包含完整的“参考文献”信息,而共被引分析需要完整的施引文献。因此,本研究缺少CNKI数据库的知识基础分析。

2 结果与分析

2.1 微生物农药研究论文现状分析

2.1.1 年度发文量变化趋势

2015—2024年在WOS数据库中发表研究论文数量总体上划分为2个阶段:2015—2018年为平稳阶段,年发文量维持在300~400篇。2019—2024年为波动增长阶段,其中,2019年发文量骤增,比2018年增加了30.2%;2021年发文量略低于2020年;此后,发文量快速上升,2024年达到高峰值692篇,比2015年增加了112.9%。2020—2024年均发文量500篇以上(图1)。

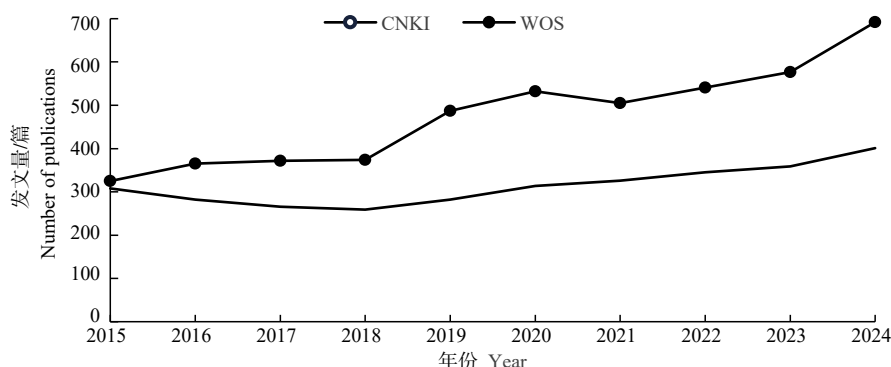


图1 CNKI和WOS数据库发文量动态

Fig. 1 Number of publications in WOS and CNKI databases

2015—2024年CNKI数据库发文量年度变化趋势亦划分为2个阶段：2015—2018年为逐渐下降期，年发文量为259~308篇，2018年较2015年减少了15.9%；2018—2024年为缓慢增长期，其中2024年发文401篇，比2018年发文量增加了54.8%。

2.1.2 发文国家分析

WOS数据库中微生物农药相关发文量排名前10的国家见表1。发文量排名前3的国家为中国、美国及印度，发文量分别为1378篇、608篇和491篇。中心性 >0.1 的国家排名顺序依次为美国、中国和意大利。中心性超过0.1的节点，说明该节点为中心节点，在研究中较为重要且具有较大的影响力^[13]。

2.2 微生物农药研究热点分析

关键词是针对研究领域主要内容的高度概括，通常代表领域内的研究热点和核心主题，频次越高，说明关键词受到的关注度越高，可能是当前的重点方向^[13-15]。微生物农药相关研究领域高频关键词及频次分布见表2。WOS数据库高频关键词涉

及微生物农药产品类别（*Bacillus subtilis*、*Bacillus thuringiensis*、*Trichoderma harzianum*、*Beauveria bassiana*、Probiotics）、筛选和鉴定（Antifungal activity、Identification）、作物生长（Growth performance、Yield）、土壤养分（Soil、Rhizosphere）、多样性及菌群研究（Diversity、Community、Microflora、Intestinal morphology）、病虫害及抗性治理（Disease、Management、Resistance）、作用机制（Mechanisms、Expression）等。CNKI数据库高频关键词显示，微生物农药研究的热点类别集中在球孢白僵菌、枯草芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌、贝莱斯芽孢杆菌、苏云金芽孢杆菌，微生物菌剂、内生细菌和植物根际促生菌，效果和活性上的主题多集中在防治效果、拮抗作用和促生作用，防治或关注对象主要为大丽轮枝菌、草地贪夜蛾、根腐病和微生物群落。高通量测序、贝莱斯芽孢杆菌和草地贪夜蛾分别出现在2017、2018和2019年，是新兴的高频关键词。

表1 WOS数据库中发文量前10国家

Table 1 The top 10 countries in WOS database

排名 Rank	国家 Country	发文量/篇 Numbers of paper	中心性 Centrality
1	中国 China	1 378	0.18
2	美国 USA	608	0.34
3	印度 India	491	0.08
4	巴西 Brazil	465	0.07
5	巴基斯坦 Pakistan	218	0.03
6	南非 South Africa	181	0.02
7	西班牙 Spain	176	0.08
8	埃及 Egypt	172	0.05
9	墨西哥 Mexico	168	0.05
10	意大利 Italy	138	0.10

注：WOS数据库中微生物农药相关文献仅涉及农业研究方向。

Note: The literature related to microbial pesticides in the WOS database only involves agricultural research directions.

2.3 微生物农药研究趋势分析

突现词是频率突然显著升高的关键词，能揭示短时间快速增长的研究热点，展现学科研究的新兴趋势以及研究热点随时间的变化。突现词强度越大表示该关键词的关注度增长越显著，对于发掘微生物研究热点话题、预测前沿趋势有着重要意义^[13-15]。通过绘制关键词时区图，进一步分析微生物农药研究主题的

时序变化，展示研究主题的发展和演变过程^[16]。

2.3.1 WOS核心集数据库研究趋势分析

结合关键词突现表（表3）和关键词时区图（图2）发现，近10年来，WOS数据库微生物农药研究的热点主要集中在害虫抗性治理、促进作物生长、作用机制和农业可持续发展。热点的演化和变迁概括为3个时间段：

表2 WOS和CNKI数据库中高频关键词及频次分布
Table 2 High-frequency keywords and frequency distribution in WOS and CNKI databases

排序 Rank	WOS			CNKI		
	频次/次 Frequency	关键词 Keyword	首次出现年份 First appearance year	频次/次 Frequency	关键词 Keyword	首次出现年份 First appearance year
1	765	Bacillus subtilis	2015	225	球孢白僵菌	2015
2	471	Soil	2015	224	枯草芽胞杆菌	2015
3	339	Diversity	2015	188	防治效果	2015
4	285	Growth performance	2015	182	鉴定	2015
5	278	Bacillus thuringiensis	2015	175	解淀粉芽孢杆菌	2015
6	226	Rhizosphere	2015	162	贝莱斯芽孢杆菌	2018
7	223	Identification	2015	125	拮抗作用	2015
8	220	Probiotics	2015	121	大丽轮枝菌	2015
9	218	Antifungal activity	2017	95	微生物菌剂	2015
10	218	Resistance	2015	81	内生细菌	2015
11	204	Disease	2015	74	苏云金芽孢杆菌	2015
12	180	Trichoderma harzianum	2015	63	植物根际促生菌	2015
13	171	Community	2015	63	高通量测序	2017
14	167	Beauveria bassiana	2015	61	促生作用	2015
15	167	Management	2015	55	金龟子绿僵菌	2016
16	145	Microflora	2017	54	草地贪夜蛾	2019
17	142	Expression	2015	53	发酵条件	2015
18	125	Intestinal morphology	2018	46	根腐病	2015
19	122	Yield	2015	42	微生物群落	2015
20	103	Mechanisms	2015	41	番茄	2015

1)2015—2016年,这一时期研究多围绕毒素、玉米、Bt棉、害虫抗性和抗性治理等关键词展开,可概括为对Bt作物产生抗药性的害虫防治研究,其在害虫抗性机制、杀虫活性、新菌株筛选鉴定和应用等方面都有较综合的研究。枯草芽胞杆菌和木霉菌防治植物病害的活性,以及在促进植物生长和提高产量方面的应用研究也较为集中。

2)2017—2020年,在这一阶段植物根际促生菌的作用机制和促生作用、土壤微生物菌群的多样性和土壤微生物组等内容成为新兴热点主题,研究内容主要包括诱导系统抗性、次级代谢物、酶活性、基因表达和根系的吸收能力等。

3)2021年迄今,研究内容主要集中在微生物农药对植物病害的治理上。胁迫和免疫反应等研究成为

新的热点内容,在缓解或降低土壤盐分浓度和提高植物氧化耐受性、协助植物缓解胁迫以及微生物菌剂通过提高作物的免疫反应、增强作物的抗病性等方面受到较多关注。随着分子生物学和生物信息学等学科的发展与应用,微生物农药的作用机制包括酶活性、生物合成、机制、序列和全基因组序列等研究持续深入。此外,可持续农业在这一时期突现,且突现强度较大,微生物农药应用对天敌、微生物群落和水生生物等的影响和评价是这一时期的重要主题。

2.3.2 CNKI数据库研究趋势分析

结合突现关键词(表3)和关键词时区图(图3)发现,近10年来,微生物农药的研究热点主要集中在筛选、鉴定、防治效果、细菌群落和土壤养分等方面。热点的演化和变迁大致分3个时间段:

表 3 WOS 和 CNKI 数据库中的突现关键词
Table 3 Keywords with the strongest citation bursts in WOS and CNKI databases

WOS			CNKI		
关键词 Keyword	突现强度 Strength	持续年份 Duration year	关键词 Keyword	突现强度 Strength	持续年份 Duration year
Toxin 毒素	11.47	2015—2017	鉴定	5.21	2015—2016
Corn 玉米	10.27	2015—2017	寡雄腐霉	4.23	2015—2017
Plant-growth 作物生长	10.07	2015—2019	白僵菌	4.03	2015—2018
Bt cotton Bt 棉	9.35	2015—2017	烟粉虱	3.20	2015—2016
Bacillus-thuringiensis 苏云金杆菌	7.61	2015—2020	生长	3.17	2015—2018
Insect resistance 害虫抗性	7.26	2015—2016	定殖	5.22	2016—2021
Biodegradation 生物降解	9.60	2016—2020	孢子萌发	3.15	2016—2019
Resistance management 抗性治理	7.22	2016—2017	玉米	3.83	2017—2019
Microflora 微生物群	6.67	2016—2018	小菜蛾	2.91	2018—2018
Purification 纯化	6.44	2016—2021	田间防效	6.21	2019—2021
Roots 根	5.88	2016—2018	杀虫活性	4.13	2019—2021
Fall armyworm 秋粘虫	6.96	2016—2017	绿僵菌	4.19	2020—2021
Adsorption 吸收	6.07	2017—2020	生防细菌	3.94	2020—2020
Induced systemic resistance 诱导系统抗性	6.09	2018—2019	群落结构	5.48	2021—2022
Diseases 病害	6.86	2019—2022	生长发育	3.92	2021—2022
Endophytic bacteria 内生菌	5.44	2019—2021	肠道细菌	3.62	2021—2021
Persistence 持续性	5.38	2020—2023	稻瘟病	3.43	2021—2022
Stress 胁迫	10.51	2021—2025	黄萎病	3.33	2021—2023
Immune-response 免疫反应	8.11	2021—2022	发酵条件	3.75	2022—2023
Metabolites 代谢物	6.49	2021—2025	红火蚁	3.49	2022—2022
Oxidative stress 氧化胁迫	5.20	2022—2025	草莓	3.31	2022—2023
Microbiota 微生物群	7.44	2023—2025	酶活性	3.01	2022—2025
Enzyme activity 酶活性	7.16	2023—2025	细菌群落	6.57	2023—2025
Biosynthesis 生物合成	4.37	2023—2025	土壤养分	6.49	2023—2025
Digestibility 消化率	5.20	2023—2025	生物炭	3.02	2023—2025
Sustainable agriculture 可持续农业	8.86	2024—2025	土壤改良	4.16	2024—2025
Mechanism 机制	5.42	2024—2025	灰霉病	3.67	2024—2025
Sequence 序列	4.88	2024—2025	花生	3.40	2024—2025
Gene expression 基因表达	4.69	2024—2025	西瓜	2.90	2024—2025
Natural enemy 天敌	4.34	2024—2025	胞外多糖	2.90	2024—2025

1)2015—2017 年,微生物农药研究多围绕球孢白僵菌、枯草芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌、拮抗活性、大丽轮枝菌、植物根际促生菌、金龟子绿僵菌、连作障碍和高通量测序等展开,可概括为针对微生物农药活性评价的研究,其在菌株筛选鉴定、拮抗效果、促生作用、发酵优化、生物学特性和抑菌机制等方面都有较综合的研究。这一阶段关键词“鉴定”的突现强度最

大,表明菌株鉴定是这一阶段的主要研究热点。

2)2018—2022 年,这一阶段的研究集中在贝莱斯芽孢杆菌、草地贪夜蛾、微生物肥料、根际微生物和群落结构等主题,可概括为针对微生物农药功能的研究,在田间防效、土壤改良、协同作用、群落结构、杀虫活性和微生物多样性等方面都有深入的研究。这一阶段突现强度最大的关键词是“田间防



图中节点的大小表示关键词频率的高低,节点对应在横轴上的年份表示该关键词首次出现的时间,节点上不同颜色外圈表示该关键词在不同年份的出现频率,节点间连线表示关键词间存在共现关系,粉色外圈表示具有较强中心性。下同。

The size of the nodes in the graph represents the frequency of the keywords. The year associated with a node on the horizontal axis indicates its first appearance time of the corresponding keyword. The different colored rings of a node denote the annual occurrence frequency of the keyword. The connecting lines between nodes indicate co-occurrence relationships between keyword, and the pink outer ring indicates strong centrality. The same below.

图2 WOS数据库关键词时区图

Fig. 2 Time zone map of keyword in the WOS database

效”,在前一阶段研究的基础上,这一阶段更注重微生物农药产品的登记和田间应用效果。

3) 2023年迄今,这一时期的研究较关注土壤养分、土壤改良、灰霉病、根肿病、花生、西瓜、油茶、烤烟和果实品质等。这一阶段,微生物农药在经济作物和水果上的应用较多,进一步表明近几年微生物农药应用的作物范围越来越广泛。

2.4 微生物农药热点知识结构分析

“文献共被引”即不同文献被同时引用,说明文献之间研究方向、研究主题密切相关,其共被引频次越高,关联性越强^[13]。因此,多篇文献共被引,就会形成被引聚类,聚类文献之间研究方向、研究主题关系密切,从而形成知识域^[17]。为进一步了解微生物农药近10年的知识基础和知识结构,展示不同研究主题之间的关系,识别学科内的研究分支和不同时期的关键文献,对WOS数据库中微生物农药研究论文中的参考文献“Reference”进行了文献共被引分析。

2.4.1 主要共被引文献聚类分析

通过共被引文献聚类分析,得到8个聚类(#0~#7),代表微生物农药研究领域的8个知识群组(表4)。聚类#0 *Trichoderma*、聚类#7 *Organic matter*和聚类#6 *Cry1ac*的主题文献主要发表在2004和2005年;聚类#2 *Bacillus thuringiensis*、聚类#3 *Penicillium digitatum*和聚类#4 *Entomopathogenic fungi*的主题文献主要发表在2007和2008年;聚类#5 *Microbial diversity*和聚类#1 *Growth*的主题文献主要发表在2011和2012年,是新兴起的研究方向。共被引时间线图可展示领域从早期经典文献到最新研究的发展历程,将相同聚类的文献排列在同一水平线上,形成共被引文献时间线图(图4)。共被引时间线图是对研究历程兴衰过往、现有热点的最直观表现^[18],通过对图4的直观解读分析,可以得到以下信息:1)整体看来,2000—2025年为微生物农药研究的繁荣期,该时间段产生了大量重要的高被引和高中心性文献。2)聚类#2 *Bacillus*

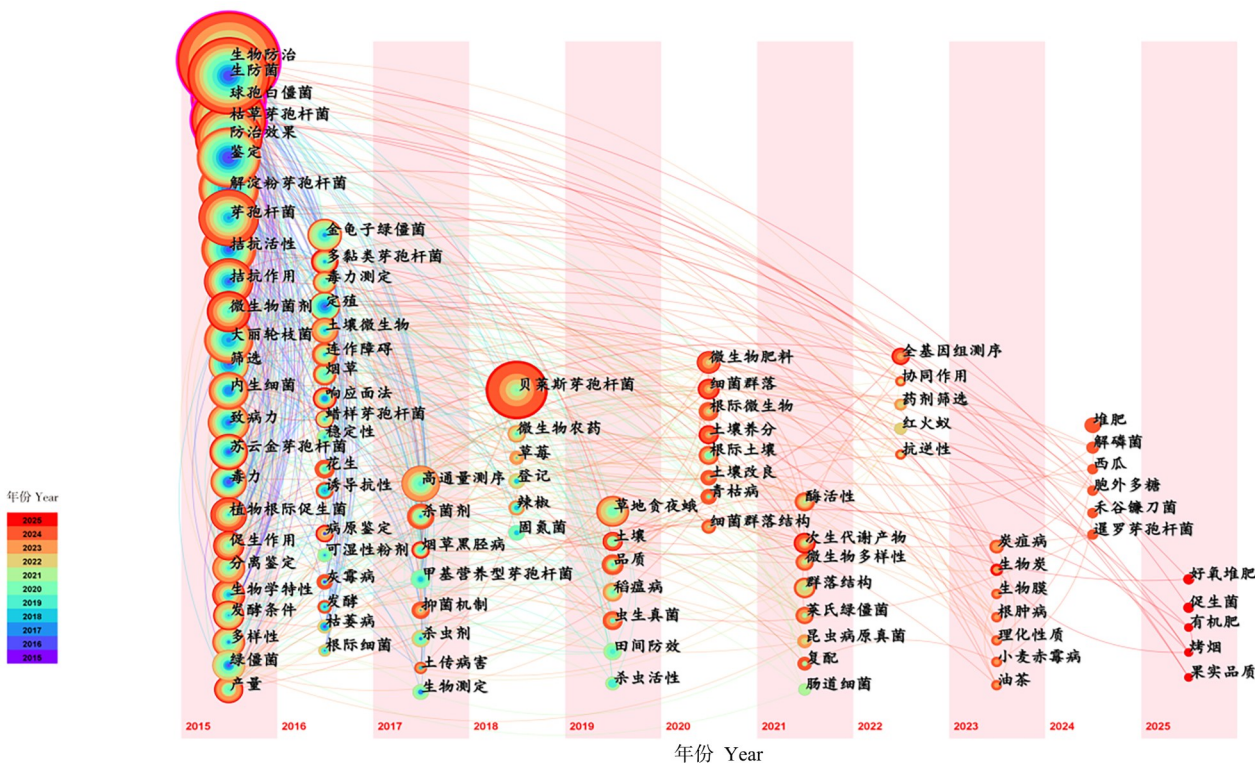


图 3 CNKI 数据库关键词时区图

Fig. 3 Time zone map of keyword in CNKI database

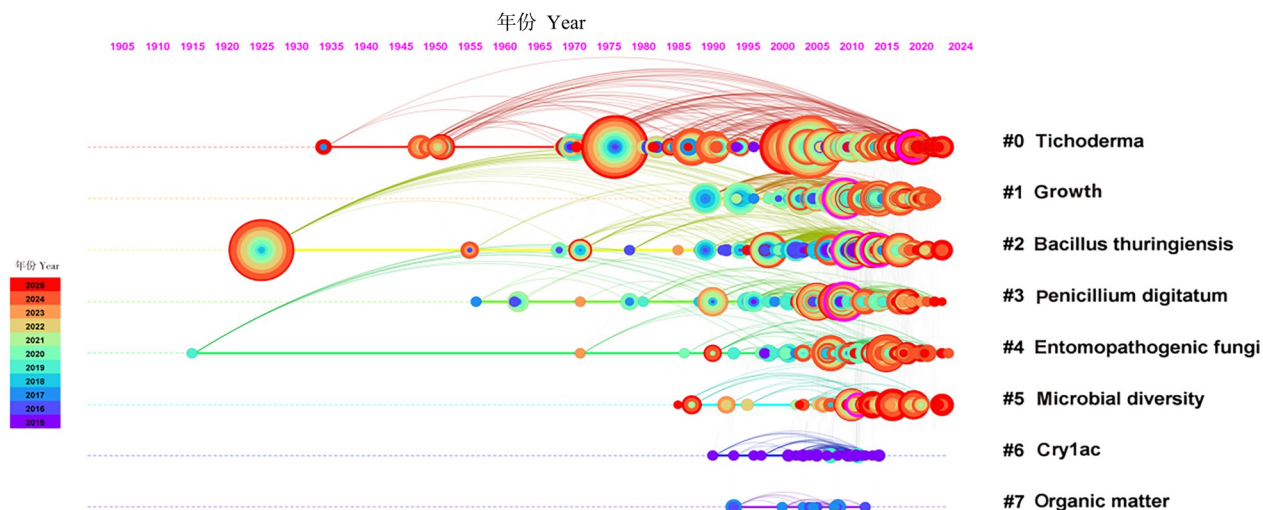
表 4 WOS 数据库文献共被引分析的聚类标签

Table 4 Co-citation cluster labels in WOS database

聚类 Clustering	共被引文献数量/篇 Number of co-citation reference	主要年份 Main year	同质性 Silhouette	LLR 聚类标签内容 Cluster labels
#0 Trichoderma 木霉	165	2004	0.833	trichoderma, trichoderma harzianum, biocontrol, antagonism, biostimulant
#1 Growth 生长	156	2012	0.959	growth performance, performance
#2 Bacillus thuringiensis 苏云金芽胞杆菌	114	2007	0.945	bacillus thuringiensis, resistance management, spodoptera frugiperda, fall armyworm, resistance
#3 Penicillium digitatum 指状青霉	104	2007	0.909	penicillium digitatum, cyclic lipopeptides, lipopeptide, biological control, pgpr
#4 Entomopathogenic fungi 虫生真菌	70	2008	0.941	entomopathogenic fungi, beauveria bassiana, ipm, virulence, entomopathogens
#5 Microbial diversity 生物多样性	38	2011	0.918	microbial diversity, biological control, high-throughput sequencing, gut microbiota, microbiome
#6 CryIac 蛋白	24	2005	0.968	cryIac, beta-1, RNAi, 3-galactosyltransferase, resistance
#7 Organic matter 有机物	10	2004	0.997	organic matter, risk assessment, molecular ecology, non-target arthropods, environmental monitoring

thuringiensis 和聚类#0 *Trichoderma* 研究起步较早, 分别在1925和1935年诞生了早期奠基性文献, 为2个聚类后期的研究奠定了重要理论基础。聚类#0 *Trichoderma* 的研究在1950年达到小高潮, 后逐渐趋冷, 在1975年前后达到第二次高峰, 且研究热度一直持续至今, 其中2000—2005年为研究热度最集中的时期, 较多高被引和高中心性文献出现。聚类

#2 *Bacillus thuringiensis* 的研究主要在1985年以后趋于成熟, 在1995—2015年间出现了大量的核心文献。3) 研究起步较晚, 近几年来关注度、影响力仍然较高的是聚类#5 Microbial diversity, 在2005—2020年高被引文献持续密集出现。4) 聚类#6 Cry1ac 和聚类#7 Organic matter 的相关研究起步较晚, 且研究热度中断, 没有持续。



每个节点对应一篇文献, 节点越大表示该文献被引频次越高。节点对在横轴上的年份表示该文献发表的年份, 节点上不同的颜色代表该文献在不同年份被引用的历史记录, 节点间的连线表示文献间的传承关系, 粉色外圈表示具有较强中心性。

Each node represents a single publication. Node size is proportional to the total citation frequency. The node's position on the horizontal axis marks its year of publication. The multi-colored rings illustrate the historical record of citations received each year. Links between nodes represent citation relationships, and a pink outer ring highlights publications with strong centrality.

图4 WOS数据库共被引文献时间线图

Fig. 4 Timeline view of co-cited literature in WOS database

2.4.2 重要突现文献分析

突现文献指在某一时间段内被引用频次突然发生变化的文献, 这些文献往往代表学科研究领域的兴起或转变, 可通过突现文献识别新兴研究主题, 结合高中心性发现关键转折点文献^[13,15]。通过CiteSpace检索出近10年突现强度位居前列的文献(表5)。近5年发生突现的文献也同样值得关注, 可由此预测未来微生物农药研究领域的新兴趋势。

根据文献突现情况可知, 突现强度最高的是Hashem等^[19]发表在*Saudi Journal of Biological Sciences*上的“*Bacillus subtilis*: A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress”, 突现强度为18.34, 文献突现从2022年持续至2025年, 论文综述了枯草芽孢杆菌在根际的活性、作为根系定殖菌的作用、生防潜力、生防相关机

制以及在生物和非生物胁迫条件下提高作物生产力的能力, 为今后相关研究提供理论参考。其次突现强度较高的文献是Tabashnik等^[20]在*Nature Biotechnology*上发表的“Surge in insect resistance to transgenic crops and prospects for sustainability”, 通过分析全球范围的害虫对Bt作物的抗性监测数据, 发现害虫对转Bt作物的抗性水平持续升高, 设置大量非转基因作物的庇护所, 可以延缓害虫抗性的发展。Lacey等^[21]发表在*Journal of Invertebrate Pathology*的论文“Insect pathogens as biological control agents: Back to the future”突现强度为12.92, 论文全面综述了昆虫病毒、病原细菌、病原真菌、线虫在农作物和林业上的应用, 包括产品研发现状、市场应用前景和未来的发展方向, 为微生物农药的研究提供了强有力的文献基础。而Bolyen等^[22]发表在*Nature Biotechnology*的

表 5 WOS 数据库共被引文献的突现
Table 5 The co-citation burst of publications in WOS database

第一作者 First author	文章题目 Title	突现强度 Strength	持续年份 Duration year	中心性 Centrality
Tabashnik B E	Insect resistance to Bt crops : lessons from the first billion acres	13. 85	2015—2018	0. 03
Farias J R	Field-evolved resistance to Cry1F maize by <i>Spodoptera frugiperda</i> (Lepidoptera : Noctuidae) in Brazil	11. 75	2016—2019	0. 02
Huang F	Cry1F resistance in fall armyworm <i>Spodoptera frugiperda</i> : Single gene versus pyramided Bt maize	10. 09	2016—2019	0. 02
Carriere Y	Optimizing pyramided transgenic Bt crops for sustainable pest management	9. 24	2017—2020	0. 18
Lacey L A	Insect pathogens as biological control agents : Back to the future	12. 92	2019—2020	0. 01
Tabashnik B E	Surge in insect resistance to transgenic crops and prospects for sustainability	14. 47	2019—2022	0. 31
Elshaghabeef M F	Bacillus as potential probiotics : Status , concerns , and future perspectives	4. 79	2020—2022	0. 05
Gouda S	Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture	4. 73	2021—2023	0. 02
Köhl J	Mode of action of microbial biological control agents against plant diseases : relevance beyond efficacy	8. 55	2022—2023	0. 01
Backer R	Plant growth-promoting rhizobacteria : Context , mechanisms of action , and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture	7. 76	2022—2023	0. 01
Hashem A	<i>Bacillus subtilis</i> : A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress	18. 34	2022—2025	0. 08
Sood M	<i>Trichoderma</i> : The “secrets” of a multitalented biocontrol agent	8. 25	2022—2025	0. 11
Bolyen E	Reproducible , interactive , scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2	12. 16	2022—2025	0. 21
Caulier S	Overview of the antimicrobial compounds produced by members of the <i>Bacillus subtilis</i> group	6. 46	2022—2025	0. 11
Lahlali R	Biological control of plant pathogens : A global perspective	4. 49	2023—2025	0. 07

“Reproducible , interactive , scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2”亦在微生物农药研究领域占据重要地位 ,文献突现强度为 12. 16,文章详细介绍了 QIIME 2 微生物组生物信息平台的功能、核心组成和分析流程,是微生物组数据分析的重要工具。这些高强度突现文献代表领域内理论和技术研究的重大突破。Tabashnik 等^[20]和 Bolyen 等^[22]发表的论文中心性最高,说明害虫抗性的全球化监测和微生物组数据分析是领域内的关键转折点,是重要的基础理论和开创性方法。

近期出现的突现文献代表新兴热点的诞生,通过梳理近 5 年的突现文献发现研究热点转移到植物病害生物防治的研究上。这一时期的突现文献主题包括:深入研究微生物杀菌剂的作用模式,筛选具有最佳控制效果的菌株或菌株组合,评估菌株的安全性以及对人类或环境可能存在的风险^[23];植物根际微生物(PGPR)促进植物生长和抗病的机制,包括改善养分供应和吸收、产生植物激素和信号分子、合成挥发性有机物和分泌抗生素等,探索植物根系与 PGPR 之间的信号交换,以及这些信号如何

通过诱导系统抗性来调节植物的非生物胁迫响应^[24];通过使用现代方法和技术,如纳米封装和微胶囊化,结合在生物技术、纳米技术、农业生物技术、化学工程和材料科学等多学科的研究成果,改进植物根际促生菌的配方和剂型,以提升制剂在生物肥、刺激根系生长、根修复和抗病性等方面的效能和稳定性^[25];依据生物合成途径和化学性质对芽胞杆菌类群的抗菌代谢物进行分类,厘清其复杂的系统发育关系^[26];深入研究木霉的生物防治活性及作用机制,包括木霉在根际生物化学和分子水平上的生态学意义以及共生对植物寄主在生理生化机制方面的影响,揭示植物-木霉-病原菌三者的互作关系^[27]。

近年来有关研究日趋成熟,涌现大量研究成果,这些关注的热点为预测微生物农药研究领域的新兴趋势奠定了基础。

3 结 论

本研究通过梳理2015—2025年WOS核心集数据库和CNKI数据库中微生物农药相关的文献,得出如下几方面结论:

1)从时间上分析,微生物农药领域的研究持续进行,近几年的研究热度有明显增加的趋势。在发文量方面,在WOS核心集中以2015年为起点,研究趋势一直处于上升的状态,其中2019—2025年为研究发展的高潮期。中国发文量最多,且领先于其他国家,说明我国微生物农药的研究在国际领域已占有重要地位。

2)关键词分析显示,WOS和CNKI数据库研究热点存在差异。WOS数据库中关于微生物农药的研究更加多维度 and 全面,在菌种资源挖掘、害虫抗性治理、微生物菌剂-植物-病原菌的互作关系、作用机制和环境风险评估上都形成了系统的研究体系。CNKI数据库中关于微生物农药的研究热点主要集中在微生物农药的筛选、鉴定、防治效果和应用推广等方面,近年来的研究多围绕土壤健康修复这一主题展开,应用的作物种类有不断扩大的趋势,早期主要应用在玉米、水稻等粮食作物,现在已覆盖到西瓜、草莓等水果和花生、烟草、油茶等经济作物上。但是,CNKI数据库在制剂加工工艺、作用机制和安全风险评估等方面的研究还不够完善,产出文献的影响力与WOS核心集数据库还有差距。

3)共被引文献分析显示,国际上微生物农药研究领域重要的奠基性文献最早诞生于1925年,随后此领域的研究趋冷,相关文献零星出现;直至2000—2025年,该时间段大量高被引和高中心性文献持续密集出现,这25年间为国际上微生物农药研究的繁荣期,针对木霉菌、枯草芽胞杆菌、苏云金芽胞杆菌、虫生真菌的拮抗特性与作用机制的研究处于核心位置,结合微生物组学分析技术,构成了微生物农药领域相关研究的重要知识基础和研究方法。

4)本研究依旧具有局限性,对于WOS数据库主题检索产生的文献数据可能无法全面覆盖微生物农药研究的所有相关文献。本研究按照主题词搜索共采集到4万多篇文献,但本研究仅选择研究方向为“Agriculture”中的5 096篇文献进行分析,其他研究方向上的研究成果,尤其是环境科学和生态学交叉研究的文献并未涉及。本研究关键词分析使用分组TopN=50和g-index(k)=15选取对象,而最新的热点、学科交叉的新兴热点以及边缘热点,由于其影响力还没有体现,目前关键词频次不高,软件在读取数据的过程中无法捕捉,导致这部分结果缺失^[28]。另外,作者本身认知的局限性,如检索策略、数据处理、节点筛选和结果展示等,也会导致研究结果不够客观和全面,导致结论依据不足。

4 展 望

基于以上研究结果,预测未来微生物农药的研究应更加注重以下方面:一是注重菌种资源挖掘,开发高效、广谱和适应性强的菌种资源;二是重视生防工程菌的研发和发酵工艺的优化;三是注重剂型创新,通过使用现代方法和技术,如纳米封装和微胶囊化,结合使用在生物技术、纳米技术、化学和材料技术等方面的应用成果,改进剂型,以提高田间稳定性和药效持久性;四是明确作用机制,深入研究微生物-植物-病原菌三者间的互作关系及抗病信号通路,揭示植物免疫机制;五是关注菌种遗传改良,利用基因工程、生物合成等新技术改良微生物菌株,开发复合功能菌种。

参考文献 References

- [1] Dorne J L C M, Fink-Gremmels J. Human and animal health risk assessments of chemicals in the food chain: Comparative aspects and future perspectives

- [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2013, 270(3): 187-195
- [2] 王以燕, 袁善奎, 农向群, 李梅. 微生物农药常见术语及释义[J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(2): 283-288
- Wang Y Y, Yuan S K, Nong X Q, Li M. Terminologies and definitions of microbial pesticides[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2022, 38(2): 283-288 (in Chinese)
- [3] 农业农村部, 国家发展改革委. “十四五”全国农药产业发展规划[EB/OL]. [2025-05-30] http://www.zzys.moa.gov.cn/gsgg/202202/t20220216_6388804.htm
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Development and Reform Commission. ‘14th Five-Year’ National Pesticide Industry Development Plan [EB/OL]. [2025-05-30]. http://www.zzys.moa.gov.cn/gsgg/202202/t20220216_6388804.htm (in Chinese)
- [4] 袁善奎, 王以燕, 师丽红, 周普国. 我国生物源农药标准制定现状及展望[J]. 中国生物防治学报, 2018, 34(1): 1-7
- Yuan S K, Wang Y Y, Shi L H, Zhou P G. Current situation and prospects of biological pesticides related standards in China[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2018, 34(1): 1-7 (in Chinese)
- [5] 白小宁, 李友顺, 赵安楠, 李富根, 袁善奎, 王以燕, 王柔. 2021年及近年我国农药登记情况和特点分析[J]. 农药科学与管理, 2022, 43(1): 1-11, 23
- Bai X N, Li Y S, Zhao A N, Li F G, Yuan S K, Wang Y Y, Wang R. Analysis on the situation and characteristics of pesticide registration in China in 2021 and recent years[J]. *Pesticide Science and Administration*, 2022, 43(1): 1-11, 23 (in Chinese)
- [6] 王以燕, 袁善奎, 农向群, 李梅. 浅谈微生物农药管理的规范化[J]. 农药, 2021, 60(6): 391-394, 400
- Wang Y Y, Yuan S K, Nong X Q, Li M. Discussion on standardization of microbial pesticide management[J]. *Agrochemicals*, 2021, 60(6): 391-394, 400 (in Chinese)
- [7] 王以燕, 袁善奎, 农向群, 李梅. 我国微生物农药常见剂型种类及管理[J]. 中国生物防治学报, 2021, 37(4): 640-645
- Wang Y Y, Yuan S K, Nong X Q, Li M. Main types and management of common formulations of microbial pesticides in China[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2021, 37(4): 640-645 (in Chinese)
- [8] 王以燕, 袁善奎, 农向群, 李梅. 我国微生物农药产品质量、安全性评价和使用技术相关标准[J]. 农药, 2021, 60(12): 872-877
- Wang Y Y, Yuan S K, Nong X Q, Li M. Current situation of standards for quality control, risk assessment and application technology of microbial pesticides in China[J]. *Agrochemicals*, 2021, 60(12): 872-877 (in Chinese)
- [9] 刘振华, 邢雪琨. 微生物农药助剂研究进展[J]. 基因组学与应用生物学, 2016, 35(8): 2109-2113
- Liu Z H, Xing X K. Research progress of microbial pesticide additives[J]. *Genomics & Applied Biology*, 2016, 35(8): 2109-2113 (in Chinese)
- [10] 束长龙, 曹蓓蓓, 袁善奎, 周普国. 微生物农药管理现状与展望[J]. 中国生物防治学报, 2017, 33(3): 297-303
- Shu C L, Cao B B, Yuan S K, Zhou P G. The present situation and prospect of microbial pesticide management [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2017, 33(3): 297-303 (in Chinese)
- [11] 邱德文. 生物农药的发展现状与趋势分析[J]. 中国生物防治学报, 2015, 31(5): 679-684
- Qiu D W. Analysis of the development situation and trends of biological pesticides in China[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2015, 31(5): 679-684 (in Chinese)
- [12] 徐小龙, 任美玲, 郑然, 张婷. 微生物农药在病虫害防治中的应用进展[J]. 农药科学与管理, 2024, 45(5): 26-31
- Xu X L, Ren M L, Zheng R, Zhang T. Application of microbial pesticides in disease and pest control[J]. *Pesticide Science and Administration*, 2024, 45(5): 26-31 (in Chinese)
- [13] Chen C M. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature[J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2006, 57(3): 353-377
- [14] 李杰, 魏永路, 徐匆, 杨凤玺, 朱根发. 基于文献计量的石斛属植物研究态势与热点分析[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(8): 141-155
- Li J, Wei Y L, Xu C, Yang F X, Zhu G F. Analysis on the research trends and hotspots of *Dendrobium* genus plants based on bibliometrics[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(8): 141-155 (in Chinese)
- [15] 田雁冰, 谷青青, 沈梅. 基于 Web of Science 和 CiteSpace 的马铃薯研究进展分析[J/OL]. 分子植物育种, 2025; 12 [2025-05-09]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.s.20240313.1525.012>
- Tian Y B, Gu Q Q, Shen M. Analysis of potato research progress based on Web of Science and CiteSpace[J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, 2025; 12 [2025-05-09]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.s.20240313.1525.012>
- [16] Wu M F, Long R Y, Bai Y, Chen H. Knowledge mapping analysis of international research on environmental communication using bibliometrics [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 298: 113475
- [17] 潘黎, 侯剑华. 国际高等教育研究的热点主题和研究前沿: 基于8种SSCI高等教育学期刊2000—2011年文献共被引网络图谱的分析[J]. 教育研究, 2012, 33(6): 136-143
- Pan L, Hou J H. Hot topics and fronts of international higher education research: Based on analysis of document co-citation of 8 international higher education journals from SSCI during 2000—2011[J]. *Educational Research*, 2012, 33(6): 136-143 (in Chinese)
- [18] 程结晶, 丁慢慢, 朱彦君. 国外信息管理领域知识流的新兴趋势及可视化分析[J]. 现代情报, 2017, 37(4): 170-177
- Cheng J J, Ding M M, Zhu Y J. Research on emerging trends and visualization of knowledge flow in foreign information management field[J]. *Journal of Modern Information*, 2017, 37(4): 170-177 (in Chinese)
- [19] Hashem A, Tabassum B, Fathi Abd_Allah E. *Bacillus subtilis*: A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2019, 26(6): 1291-1297
- [20] Tabashnik B E, Carrière Y. Surge in insect resistance to transgenic crops and prospects for sustainability[J]. *Nature Biotechnology*, 2017, 35(10): 926-935
- [21] Lacey L A, Grzywacz D, Shapiro-Ilan D I, Frutos R, Brownbridge M, Goettel M S. Insect pathogens as biological control agents: Back to the future [J]. *Journal of Invertebrate Pathology*, 2015, 132, 1-41
- [22] Bolyen E, Rideout J R, Dillon M R, Bokulich N A, Caporaso J G. QIIME 2: Reproducible, interactive, scalable, and extensible microbiome data science [J]. *Nature Biotechnology*, 2019, 37(8): 852-857
- [23] Köhl J, Kolnaar R, Ravensberg W J. Mode of action of microbial biological control agents against plant diseases: Relevance beyond efficacy[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 845
- [24] Backer R, Rokem J S, Ilangumaran G, Lamont J, Praslickova D, Ricci E, Subramanian S, Smith D L. Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1473
- [25] Gouda S, Kerry R G, Das G, Paramithiotis S, Shin H S, Patra J K.

- Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture[J]. *Microbiological Research*, 2018, 206: 131-140
- [26] Caulier S, Nannan C, Gillis A, Licciardi F, Bragard C, Mahillon J. Overview of the antimicrobial compounds produced by members of the *Bacillus subtilis* group[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 302
- [27] Sood M, Kapoor D, Kumar V, Sheteiwy M S, Ramakrishnan M, Landi M, Araniti F, Sharma A. *Trichoderma*: The “secrets” of a multitaled biocontrol agent[J]. *Plants*, 2020, 9(6): 762
- [28] 赵丹群. 基于CiteSpace的科学知识图谱绘制若干问题探讨[J]. 情报理论与实践, 2012, 35(10): 56-58
- Zhao D Q. Probe into several problems relating to mapping knowledge domains based on CiteSpace [J]. *Information Studies (Theory & Application)*, 2012, 35(10): 56-58 (in Chinese)

责任编辑:董金波



第一作者简介: 张莹,博士,副研究员。2009年7月—2012年3月,从事害虫生物防治研究;2012年3月至今,从事期刊编辑出版工作。发表论文10余篇,参编论著1部。



通讯作者简介: 戴长春,东北农业大学副教授,硕士研究生导师。主要研究方向为农业昆虫与害虫防治。主持国家重点研发等国家级和省部级科研课题5项,在 *Pest Management Science* 等杂志发表SCI论文10余篇,授权发明专利1件、实用新型专利1件、软件著作权1件,主编、副主编、参编教材和论著10部。