

DOI: 10.11766/trxb201909090479

张超, 文涛, 张媛, 赵梦丽, 刘婷, 袁军, 沈其荣. 基于文献计量分析的镰刀菌枯萎病研究进展解析[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1280–1291.
ZHANG Chao, WEN Tao, ZHANG Yuan, ZHAO Mengli, LIU Ting, YUAN Jun, SHEN Qirong. Bibliometric-based Analysis of Advances in Researches on Fusarium Wilt Disease [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1280–1291.

基于文献计量分析的镰刀菌枯萎病研究进展解析*

张 超, 文 涛, 张 媛, 赵梦丽, 刘 婷, 袁 军[†], 沈其荣

(南京农业大学资源与环境科学学院/江苏省固体有机废弃物资源化高新技术研究重点实验室/国家有机类肥料工程技术研究中心/江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 南京 210095)

摘 要: 镰刀菌枯萎病是一种由尖孢镰刀菌引起的、毁灭性极强的真菌作物病害, 为探索镰刀菌枯萎病的相关研究进展及热点, 对尖孢镰刀菌枯萎病进行了引文分析。以“Fusarium wilt”(镰刀菌枯萎病)进行主题搜索, 在 ISI Web of Science 数据库核心集搜索 1985—2019 年的相关文献共 4 873 篇, 采用 CiteSpace 可视化软件进行引文分析, 通过合作、共现、共被引等网络分析, 研究镰刀菌枯萎病的研究热点和前沿趋势。根据发文量统计分析发现: 美国、中国和印度在本领域发文量排名前三位, 而中介中心性指标分析则表明荷兰、美国和印度文献重要性位列三甲, 我国位居前 10 并表现出积极上升趋势。引文分析的关键词突发性检测发现“induction(诱导)”、“genetic diversity(遗传多样性)”、“pathogenicity(致病性)”是近十年的重要热点; 文献共被引聚类分析表明解淀粉芽孢杆菌、系统抗性、非致病性尖孢镰刀菌等方面为本领域的研究前沿。随着枯萎病研究层次的不断深入, 未来研究将会集中在微生物防控、抗病育种、根系-病原菌-有益菌互作机制等方向; 此外, 多组学技术的应用必将有利于解析镰刀菌枯萎病发病机制, 为镰刀菌枯萎病基础研究与防控应用提供理论和技术支持。

关键词: 枯萎病; CiteSpace; 尖孢镰刀菌; 可视化分析; 网络分析

中图分类号: S436.421.1⁺3 **文献标志码:** A

Bibliometric-based Analysis of Advances in Researches on Fusarium Wilt Disease

ZHANG Chao, WEN Tao, ZHANG Yuan, ZHAO Mengli, LIU Ting, YUAN Jun[†], SHEN Qirong

(College of Resources and Environmental Sciences / Jiangsu Provincial Key Lab of Solid Organic Waste Utilization / National Engineering Research Center for Organic-Based Fertilizers / Jiangsu Collaborative Innovation Center of Solid Organic Wastes, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: 【Objectives】 Fusarium wilt, caused by *Fusarium oxysporum*, is a kind of fungal disease highly destructive to crops. A review was prepared of advances and hot spots in the research on through citation analysis. 【Method】 In order to ensure that the

* 国家重点研发计划项目(2017YFD0200805)、国家自然科学基金项目(31902107)和农业部公益性行业(农业)科研专项(201503110)共同资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFD0200805), the National Natural Science Foundation of China (No. 31902107) and the Public Welfare Industry (Agriculture) Scientific Research Special Project of the Ministry of Agriculture of China (No. 201503110)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: junyuan@njau.edu.cn

作者简介: 张 超 (1994—), 硕士研究生, 主要研究土壤微生物。E-mail: 1173463678@qq.com

收稿日期: 2019-09-09; 收到修改稿日期: 2020-04-15; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2020-06-01

review is objective and scientific, literature analysis was performed based on the data collected and retrieved by “Fusarium wilt” as the subject word from the core collection of the database of ISI Web of Science of the period of 1985~2019. A total of 4972 relevant papers were obtained finally by April 1, 2019. All the retrieved documents were downloaded in the format of “full record and quoted references” and “plain text”, and renamed to download-fw.txt format, for easy recognition by CiteSpace for further analysis. Then, the CiteSpace visualization software was used for citation analysis by cooperation, co-occurrence, co-citation, research hotspot and frontier trend. 【Result】 Statistical analysis of volume of the publications shows that the United States, China and India ranked the top three in this field. Analysis of betweenness central indicators shows that the Netherlands, the United States and India were the top three in importance of literature, while China was among the top 10s with a positive upward trend. Further analysis by institution shows that the United States Department of Agriculture, the University of Cordoba, the French National Agricultural Research Institute, the University of Utrecht, etc. were outstanding ones in this field; Domestic research institutions, represented by the Nanjing Agricultural University, actively carried out relevant researches and contributed a huge number of publications addressing the issue “Fusarium wilt is widely distributed and complex crop disease” in the fields of plant science, agronomy and agricultural economics. 【Conclusion】 Further citation analysis shows that “induction”, “genetic diversity” and “pathogenicity” are important hot spots in the recent ten years, and literature co-citation clustering analysis shows that “*Bacillus amyloliquefaciens*”, “systemic resistance”, and “non-pathogenic *Fusarium oxysporum*” were the research frontiers in this field. With the research on Fusarium wilt going on in-depth, it is speculated that the future research will go on keeping focus on microbial control and prevention, breeding of disease resistant crop varieties, and interaction of root - pathogen - beneficial microbes and its mechanism, and moreover, the adoption of the multiple omics technology will sure help understand the pathogenesis of Fusarium wilt and provide a theoretical basis and technical support for fundamental studies on and prevention of Fusarium wilt.

Key words: Fusarium wilt; CiteSpace; *Fusarium oxysporum*; Visual analysis; Network

枯萎病(Fusarium wilt)是世界上分布范围较广, 毁灭性较强的作物病害之一。而镰刀菌枯萎病作为枯萎病的重要代表, 一直以来广受世界各国研究者的关注^[1]。当前, 集约化农业迅速发展的同时, 也给农业可持续生产和生态环境带来诸多挑战。由镰刀菌枯萎病引起的土传病害正威胁我国香蕉^[2]、西瓜^[3]、黄瓜^[4]、百合^[5]等多种重要经济作物的生产。国外关于枯萎病的研究起步较早, 且较为系统和深入, 近年来, 我国枯萎病相关的研究团队逐渐增多^[6-9]。但目前尚未有研究人员对该领域的发展历程、研究现状、前沿热点等进行归纳总结。

CiteSpace(引文空间)是一款用来分析科学文献中蕴含潜在知识的可视化分析软件, 通过CiteSpace可视化可以呈现出科学知识的合作网络、共现网络及共被引网络^[10]。通过合作网络分析可以体现出枯萎病研究领域作者、机构、国家之间的合作关系, 发现本领域重要的研究机构和研究者。共现网络分析通过对科学文献的关键词、学科领域词频的提取, 来研究该领域发展动向和研究热点。通过共被引网络分析, 揭示科学领域的发展方向、

研究前沿学科基础等信息, 总结重要的研究成果^[11]。

为了追踪枯萎病相关研究的发展历程, 寻找相关的研究学者和机构, 明确枯萎病领域的研究现状及其发展趋势。本文基于ISI Web of Science(WoS)数据库核心合集, 以“Fusarium wilt”为主题词进行检索, 共得到4 873篇文献和91 113条引文记录。利用引文空间(CiteSpace)对上述镰刀菌枯萎病的研究文献进行了整合。在此基础上对数据进行处理, 发现了该领域重要的研究成果、研究学者和研究机构, 总结本领域发展方向、归纳热点、判断趋势。为初涉镰刀菌枯萎病领域的研究者提供知识普及和领域把控, 同时为镰刀菌枯萎病的研究指引当前的研究热点和未来的研究方向。

1 材料与方法

1.1 数据来源

为保证研究结果的客观性及科学性, 文献分析数据均来自ISI Web of Science数据库中的核心合集, 通过主题词“Fusarium wilt”进行检索, 时间跨

度为所有年限（1985 年—2019 年），共获到相关文献 4 972 篇（检索日期截至 2019 年 4 月 1 日）。检索得到的文献以“全记录与引用的参考文献”及“纯文本”的格式下载，将下载好的文献重命名为 CiteSpace 能够识别的 download-fw.txt 格式，将文件作为数据分析的基础。

1.2 研究方法

CiteSpace 软件工具可用来帮助用户快速而方便地把握某一科学领域中的前沿方向和热点问题，找出研究中的知识基础和关键文献，识别该领域中的主要研究人员和主要研究机构。CiteSpace 具有使用操作简单、可绘制多种图谱、可视化效果好、提供信息量大、易于图谱解读等优势。

在 WoS 数据库中检索并进行初步分析，统计镰刀菌枯萎病各年限的发文量，可得到镰刀菌枯萎病的发文趋势。打开 CiteSpace 点击 new（新建）新建项目，将保存 download（下载）文件的 data（数据）文件夹加载到 datadirectory（数据字典）加载项中，同时将新建的 project（项目）文件夹加载到 projecthome（项目之家）中，用来保存分析后的数据，其他设置默认后保存项目。将 Timeslicing（时间切片）设置为 1985 年—2019 年，时间前切片为 1（年），在 Notetypes（节点类型）分别单次选中 Author（作者）、Institution（机构）、Country（国家），top 设置为 20，点击 go（运行）后，得到作者、机构、国家的合作网络；将 notetypes（节点类型）分别选中 Keyword（关键词）、Category（学科），其他设置不变，点击 go，弹出关键词、领域共现网络，关键词可视化窗口中，点击突发性检测，可得到关键词突发性检测表；将 notetypes（节点类型）选中 Citedreference（被引文献），Pruning（裁剪功能）选中 Pathfinder（寻径网格），其他设置不变，点击 go，可以初步得到镰刀菌枯萎病文献合作者的共被引网络。通过其他设置对图谱进行美化设置，以便于更好地解读图谱。

1.3 网络属性指标计算

中介中心性（Betweenness centrality）是测度节点在网络中重要性的一个指标，CiteSpace 中使用此指标来发现和衡量文献的重要性，并用紫色外圈对该类文献（或作者、国家、机构等，且带有紫色外圈的节点中介中心性不小于 0.1）进行重点标注^[12]。

具有高中介中心性的文献通常是连接两个不同领域的关键枢纽，在 CiteSpace 中也称其为转折点。这种节点的重要度计算的方法是 Freeman^[13]于 1977 年提出的中介中心性的计算公式，如下：

$$BC_i = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{n_{st}^i}{g_{st}} \quad (1)$$

式中， i 、 s 和 t 分别为三个不同节点， BC_i 为节点 i 的中介中心性（Betweenness centrality）， g_{st} 为节点 s 到节点 t 的最短路径数目， n_{st}^i 为从节点 s 到节点 t 的 g_{st} 条最短路径中经过节点 i 的最短路径数目。就信息传输角度而言，中介中心性越高，节点的重要性越大，去除这些点之后对网络传输影响也越大，因此，本文采用中介中心性来衡量和发现枯萎病领域中重要的文献、作者和机构等。

突发性检测（Burst detection）表示节点在短时间内跃迁的现象，强调突发性。在文献关键词突发性检测中红色圈层为突出节点，表示该关键词在某时间段内被引频次突现增长并在此时间段内引起了高度重视。

在共被引网络中，Sigma 值是结合中介中心性和突发性来衡量节点重要性的一个指标，Sigma 值越高说明网络中节点在结构性和突现性综合表现上最优。

Modularity（Q 值）是网络模块化的评价指标，一个网络的 Q 值越大，则表示网络的聚类越好， $Q > 0.3$ 时就意味着网络结构显著^[14]。

2 结果与讨论

2.1 镰刀菌枯萎病研究发文数量及时间特征

发文数量及其年份可以反映所研究专题随时间发展的轨迹，如发展的起步阶段、发展阶段、稳步阶段等动态信息。基于 ISI Web of Science 数据库核心合集，以“Fusarium wilt”为主题词进行检索，相关文献共 4 873 篇，对发文数量进行统计如图 1 所示，研究人员对镰刀菌枯萎病的研究在 1985 年之前就有所探索，但发文量较少。直至 21 世纪初，镰刀菌枯萎病相关研究的发文量增长加快。尤其是 21 世纪以来，本领域整体发展较为迅速，2018 年更是发文量最高的一年，发文数量突破 350 篇，2019 年截

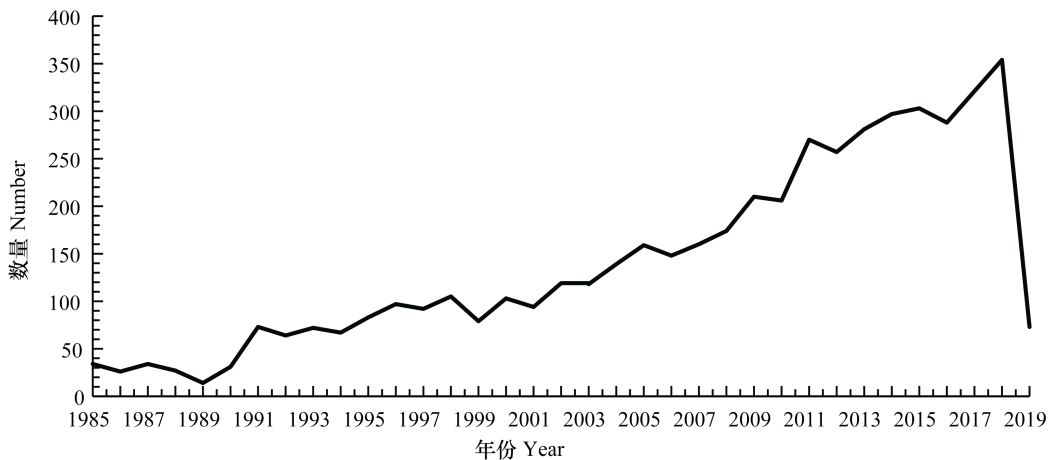


图 1 ISI Web of Science 数据库核心合集中以“Fusarium wilt”主题检索的文献年发文量统计

Fig.1 Statistics of annual published papers retrieved by “Fusarium wilt” from the core collection of the database of the ISI Web of Science

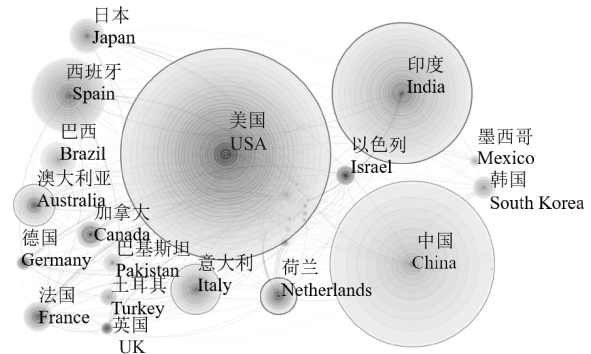
至 4 月 1 日已发表 73 篇，预期 2019 年镰刀菌枯萎病总发文量也可达 300 篇以上。表明了该领域正处于快速发展阶段，越来越多的科研工作者关注并推动这一领域的研究。

2.2 镰刀菌枯萎病的合作研究空间特征

科学合作是指研究学者为生产新的科学知识而一起进行工作。合作图谱是将这一工作关系进行可视化。CiteSpace 提供了三个层次的科学合作网络分析，分别为：作者合作网络、机构合作网络和国家地区的合作网络，可识别出镰刀菌枯萎病研究领域的学者、机构及国家间的合作关系。既为评价其学术影响力提供参考，又有利于发现值得关注的学者和机构。

图 2 为国家地区的合作网络图谱，图中 35 个节点，表示自 1985 年以来共有 35 个国家地区对镰刀菌枯萎病进行了不同程度的研究。其中荷兰（0.27）和美国（0.16）中介中心性较高，表明美国和荷兰在国家合作网络中占有重要地位。美国（903 篇）、中国（701 篇）、印度（614 篇）发文量排在前列。荷兰虽然发文量排在第七位，但其中介中心性排在第一位（0.27），进一步分析发现荷兰对镰刀菌枯萎病的研究起始较晚，文献数量较少，但文献质量较高，被引次数较多，与其他国家交流合作频繁。中国在 20 世纪末才开始探索镰刀菌枯萎病领域，起步较晚，网络中介中心性较低，但在短短 20 年之间发展迅速，发文量达到 701 篇，仅次于美国，正处于快速发展阶段。这与近年来我国集约化农业慢慢凸

现出来的连作障碍等问题有关，也表明了国家和相关研究者关注并支持这方面的研究。



注：圆形节点大小与文献数量成正比，节点外圈代表中介中心性，厚度与中介中心性为正相关；年轮灰度代表文献发表年限，厚度与文献数量成正相关，灰度越深发表时间越早；节点间连线代表两者共现或共被引关系，线条粗细反映关系的强弱，灰度对应二者首次引用年份。下同。Note: Size of the round node is in direct proportion to the number of papers published, the outer circle of the node represents the intermediary centrality, and thickness of the circle is positively related to the intermediary centrality; Gray level of the ring represents year of the publication, and thickness of the ring is positively related to the number of papers in the literature; Lines between the nodes represent the co-occurrence or co-citation relationship between the two, thickness of the line reflects strength of the relationship, and gray level of the line corresponds to the first year when the two were cited. The same below.

图 2 镰刀菌枯萎病研究的国家合作网络

Fig. 2 International cooperative network of research on Fusarium wilt

通过机构合作分析可发现对镰刀菌研究比较先进的研究机构，并与之交流学习。图 3 为机构合作网络分析图谱，由 477 个节点和 754 条连线组成，表示 477 个研究机构之间的合作联系，节点的连线代表机构之间的合作关系。本文统计了各机构的发文数量、中介中心性、首发年份等信息。从图中的连线可以看出，欧美国家研究机构之间的连线更加密集，合作更加频繁。其中南京农业大学在网络中的节点最大，在镰刀菌枯萎病领域发文量最多，但大多是机构间内部合作。中

介中心性排名前十的机构中美国农业研究所、美国农业部、科尔多瓦大学位列前三位，研究起步较早，中介中心性和发文数量均较高，表明了这三个机构在本领域占有重要地位。我国仅有中国科学院和南京农业大学两家机构入围排名前十的机构，他们虽然研究起步稍晚，中介中心性也较低，但积极探索，已同多个机构产生合作关系。尤其是南京农业大学，发文量排名国内第一，中介中心性也排在所有中国机构中的前列，在镰刀菌枯萎病方面的研究正在快速发展。



图 3 镰刀菌枯萎病研究的机构合作特征

Fig. 3 Features of the cooperative network of research on Fusarium wilt between institutions

通过分析作者合作网络能够得到关注镰刀菌枯萎病的研究人员信息，发掘出镰刀菌枯萎病研究领域中的优秀的研究人员，以及研究领域作者之间的相互合作。图 4 中共有 1 289 个节点代表着枯萎病领域中的 1 289 位研究人员发表过本领域文章，图中节点大多独立分散，其中可以清晰发现图中最大的节点是 Shen Q R 教授。说明署名包含 Shen Q R 教授的文献数量最多，为 130 篇（表 1），位居所有镰刀菌枯萎病研究人员发文量的第一位，远高于第二名的 Garibaldi A (58 篇)。进一步分析发现以 Shen Q R 教授为中心，联系的其他作者大部分属于同一个单位，团队内部合作较多，表明了在本领域 Shen Q R 教授领导了一个成规模的团队。从中介中心性来看，排名前三的作者分别是 Viljoen A、Aitken E A B、Czislowski E，其中 Viljoen A 发文 26 篇，首发年份为 2007 年，中介中心性 0.11，其次是 Aitken E A B，发文 9 篇，2012 年首发，中介中心性 0.09

（表 1）。Czislowski E、Yang L、Thatcher L F 等人，虽然发文量较少，起步较晚，但中介中心性较高，说明这几位作者在该领域中合作交流较多，并且与其他作者合作发文的数量较多。值得注意的是高产作者的合作大多存在于内部合作，跨机构合作的现象相对较少。从世界范围的研究者来看，许多研究人员以小范围独立研究为主，团队合作较少，表明大部分枯萎病研究人员分布广泛且独立性较强。

我国与其他国家机构作者合作较少，这可能是导致我国科研人员中介中心性较低的重要原因。中介中心性前十名中仅有两位中国的科研人员，且均来自南京农业大学，表明了南京农业大学枯萎病研究领域处于国内领先地位。整体而言，我国在该领域的研究未来尚有较大的进步空间，我国研究人员应加强与国外优秀科研人员交流学习，以提高我国该领域研究在全世界的地位。

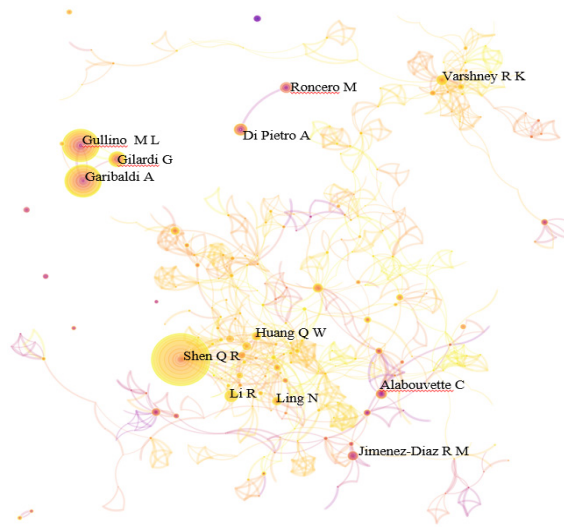


图 4 镰刀菌枯萎病研究作者合作网络

Fig. 4 Cooperative network of research on Fusarium wilt between authors

表 1 镰刀菌枯萎病作者合作分析中介中心性统计

Table 1 Statistics of authors of papers on fusarium wilt and cooperative centrality analysis

作者 Author	中介中心性 Betweenness centrality	频数 Frequency	首发年份 Starting year	作者 Author	中介中心性 Betweenness centrality	频数 Frequency	首发年份 Starting year
Viljoen A	0.11	26	2006	Hervas A	0.04	4	1997
Aitken E A B	0.09	9	2012	Rep M	0.03	20	2005
Czislowski E	0.09	5	2016	Cohen R	0.03	9	1992
Zhang J	0.08	8	2013	Raviv M	0.03	8	2008
Yang L	0.08	5	2015	Kema Ghj	0.03	7	2011
Thatcher L F	0.08	5	2012	Singh K B	0.03	7	1991
Varshney R K	0.07	31	2010	Subbarao K V	0.03	5	2012
Gordon T R	0.07	23	1992	Koike S T	0.03	4	2012
Shen QR	0.06	130	2008	Bakker Pahm	0.02	32	1993
Katan J	0.06	21	1994	Steinberg C	0.02	23	1995
Zhao J	0.06	14	2014	Sharma M	0.02	18	2007
Alabouvette C	0.05	57	1985	Pande S	0.02	16	2007
Jimenez-Diaz R M	0.05	27	1998	Wang Y	0.02	15	2009
Li CY	0.05	10	2011	Zhang X	0.02	12	2014
Wei Y R	0.05	7	2011	Zhang Y Y	0.02	10	2014
Drenth A	0.05	6	2015	Yang Y H	0.02	8	2014
Smith M K	0.05	6	1998	Kraft J M	0.02	7	1992
Pattison A B	0.05	2	2018	Chao C P	0.02	7	2009
Wang J	0.04	7	2016	Shen B	0.02	7	2013
Jimenezdiaz R M	0.04	6	1991	Dita Ma	0.02	6	2011

2.3 镰刀菌枯萎病研究的共现网络特征

对学科领域的共现分析,可构建学科间的关联网络,揭示镰刀菌枯萎病研究中学科间的相互联系。图 5 为领域共现分析网络,图中共有 56 个节点,表明在镰刀菌枯萎病研究中有 56 个学科相互交叉渗透,222 条代表学科领域间相互联系的连线,表明镰刀菌枯萎病学科领域分布广泛、复杂。该领域研究论文主要涉及植物科学、农学和农业经济学领域,除此之外还在园艺、应用微生物、医学微生物、土壤肥料学等领域有较多的发文量。其中生物化学与分子生物学、环境科学与生态学的中介中心性较高。分别为 0.42、0.28 和 0.25,表明镰刀菌枯萎病在这些学科中有重要的研究价值,交叉也最为广泛。

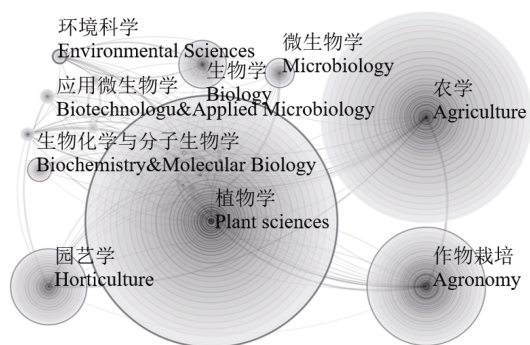


图 5 镰刀菌枯萎病学科领域共现网络

Fig. 5 Co-occurrence network of *Fusarium wilt* related disciplines

关键词是文献主题的精确表达,关键词共现分析有利于识别研究主题演变过程。关键词共现分析和关键词突发性检测有利于发现该研究发展动向和研究热点,将 CiteSpace 节点选择为“keyword”,阈值选择 50,得到关键词共现知识图谱(图 6)。根据图形大小可以看出频次最高的五个关键词分别是“镰刀菌枯萎病”(Fusarium wilt)、“生物防治”(biological control)、“枯萎”(wilt)、“抗性”(resistance)和“尖孢镰刀菌”(Fusarium oxysporum)。中介中心性最高的十个关键词中“生物防治”(biological control)、“镰刀菌枯萎病”(Fusarium wilt)、“枯萎”(wilt)最高。其中,“枯萎病”和“尖孢镰刀菌”这两个关键词为本研究的筛选用词,因此,本研究关注这两个词之外的其他关键词。发现在对枯萎病研究的过程中,病理的发生和病害的防治是枯萎病研究课题的关键内容。

结果中所有关键词首发年份均在 20 世纪 90 年代初期,表明科研人员很早就开始了对于镰刀菌枯萎病的发病机理和防控研究。

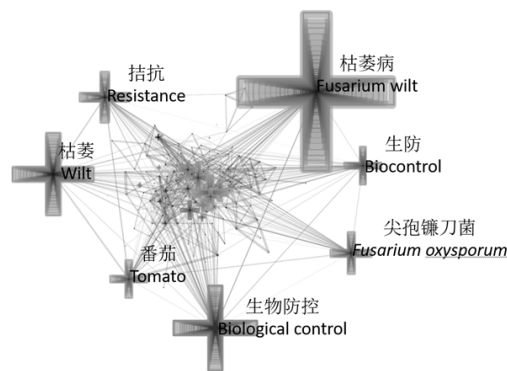


图 6 镰刀菌枯萎病关键词共现网络

Fig. 6 Co-occurrence network of key words in papers on *Fusarium wilt*

突发性检测 (Burst detection) 表示所考察的关键词在短时间内跃迁的现象,强调突发性。通过对关键词突发性的检测,可得知特定时间内的研究热点。按照突发性强度统计出图,发现“induction (诱导)”的突发性最高,突发强度为 31.44 (表 2),说明在镰刀菌枯萎病研究中,“诱导”是其研究中的最大热点,其突发性从起始的 1997 年持续至 21 世纪。进入 21 世纪后,“*Pseudomonas fluorescens* (荧光假单胞菌)”、“cotton (棉花)”、“race (种/属)”、“vegetative compatibility (营养亲和性)”、“induced resistance (诱导抗性)”、“*Trichoderma harzianum* (哈茨木霉)”等关键词研究热度逐渐增多。为了更好地把握当前镰刀菌枯萎病的研究热点,本研究进一步统计了近十年的关键词突发性检测(表 2),其中“induction (诱导)”依然是近十年镰刀菌枯萎病研究的重要热点,突发强度为 11.61。其次分别是“chickpea (鹰嘴豆)”、“genetic diversity (遗传多样性)”、“DNA (基因)”、“systemic resistance (系统抗性)”等关键词热点。随着近年来高通量测序技术的不断完善,测序深度与精度的逐步提升,研究热点转变至分子层面的研究,因此遗传多样性、基因、系统抗性等热点逐渐增多。鹰嘴豆是镰刀菌枯萎病实验中的最为常见的实验材料,此处不做过多分析。值得注意的是“pathogenicity (致病性)”,它是近年来(2016 年—2019 年)最大的研究热点,这也充分体现了枯萎病研究领域更加多元、更加深入的研究特点。

表 2 关键词突发性检测

Table 2 Burst detection of key words

2009—2019 年间关键词	突发强度	起始	结束	1985—2019 年间关键词	突发强度	起始	结束
Keywords from 2009 to 2019	Strength	Begin	End	Keywords from 1985 to 2019	Strength	Begin	End
诱导 Induction	11.61	2009	2011	诱导 Induction	31.44	1997	2003
鹰嘴豆 Chickpea	11.30	2012	2016	荧光假单胞 <i>Pseudomonas fluorescens</i>	29.25	1996	2009
遗传多样性 Genetic diversity	11.09	2012	2013	菌株 Strain	24.18	1991	1997
脱氧核糖核酸 DNA	10.91	2012	2013	棉花 Cotton	18.48	1991	2006
系统抗性 Systemic resistance	10.21	2009	2011	康乃馨 Carnation	18.19	1992	1997
生防因子 Biocontrol agent	9.749	2013	2014	种、属 Race	13.99	1991	2004
立枯病 Damping off	9.747	2009	2011	营养亲和性 Vegetative compatibility	13.81	1992	2004
种群数量 Population	9.155	2014	1915	诱导抗性 Induced resistance	10.19	1996	2003
种、属 Race	9.002	2010	2012	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	9.562	1992	1999
番茄尖孢镰刀菌 <i>F sp lycopersici</i>	8.792	2009	2010	哈茨木霉 <i>Trichoderma harzianum</i>	8.213	1996	2004
荧光假单胞 <i>Pseudomonas fluorescens</i>	8.427	2009	2010	尖孢菌 wcs417r sp strain	7.722	1994	1996
堆肥 Compost	8.1	2010	2012	石竹尖孢镰刀菌 <i>F sp dianthi</i>	6.744	1992	1999
根腐病 Root rot	8.01	2009	2011	营养体亲和性 Vegetative compatibility group	5.49	1993	1997
立枯丝核菌 <i>Rhizoctonia solani</i>	7.772	2012	2014	番茄-荞麦 <i>Lycopersicon-esculentum</i>	4.71	1991	1992
细菌 Bacteria	7.734	2013	2014	抑病土 Suppressive soil	4.397	1991	1995
致病性 Pathogenicity	7.726	2016	2019	栽培品种 Cultivar	4.085	1991	1994
感染 Infection	7.718	2010	2011	不相容 Incompatibility	4.036	1991	1992
促生 Grown promoting	6.541	2013	2014	甜瓜 Muskmelon	4.036	1993	1994
拟南芥 <i>Arabidopsis thaliana</i>	6.478	2016	2017	植物抗毒素 Phytoalexin	3.955	1991	1993
菌株 Strain	5.763	2011	2012	腐霉菌 <i>Pythium ultimum</i>	3.748	1994	2001

2.4 镰刀菌枯萎病研究的共被引图谱

在文献计量学中, 共被引是指两篇文献共同出现在第三篇施引文献的参考文献目录中, 则这两篇文献形成共被引关系。科学文献的相互引证反映了科学发展的客观规律, 是揭示其数量特征和内在规律的一种信息计量研究方法。图 7 反映的文献共被引图谱由 274 个节点和 387 条连线形成了 42 个群组聚类, 包含 11 个较大的群组, $Q=0.844$, 其中最大节点为 Ma LJ 教授的文献, 共被引次数最多 (111 次)。图中 11 个聚类群组标签为镰刀菌枯萎病的 11

个研究前沿, 表明镰刀菌枯萎病研究涉猎广泛。其中前三的聚类群组为#0 解淀粉芽孢杆菌、#1 系统抗性、#2 非致病性尖孢镰刀菌, 文章数量分别为 32、30、24, S 值为 0.945、0.895、0.933, 说明聚类的结果具有高可信度, 这三个聚类群组标签为镰刀菌枯萎病领域的最前沿研究, 即: 提高植物系统抗性; 使用以芽孢杆菌为代表的有益菌防控镰刀菌; 通过非致病镰刀菌防控致病镰刀菌数量。通过总结出三个聚类中 Sigma 最高的三篇文献, 对每个聚类中的重要文件进行挑选, 其中#0 解淀粉芽孢杆菌中

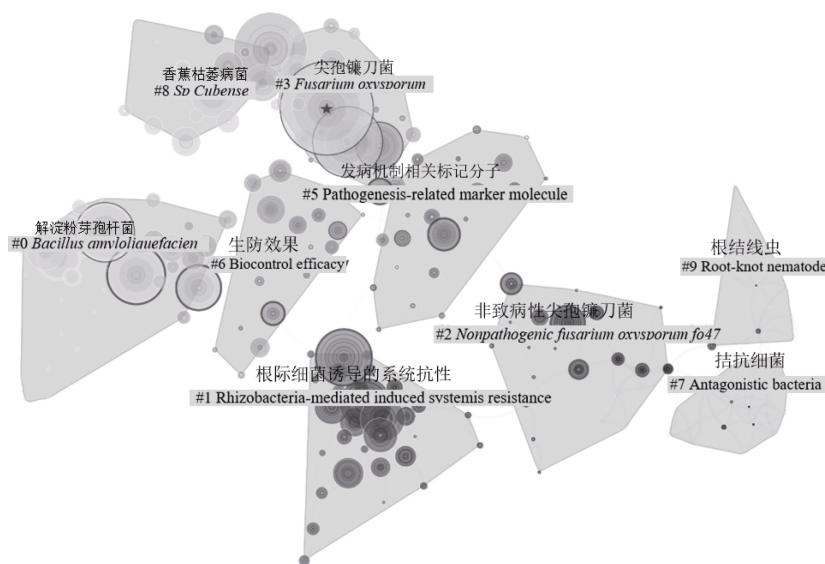


图 7 镰刀菌枯萎病文献共被引图谱

Fig. 7 Graph of co-citation of papers on *Fusarium* wilt

Sigma 最高的文献是 2008 年南京农业大学的 Zhang 等^[15]所发表的文献“Control of *Fusarium* wilt disease of cucumber plants with the application of a bioorganic fertilizer”，该文章采用芽孢杆菌 SQR-5 和 SQR-11 的生物有机肥控制尖孢镰刀菌和黄瓜枯萎病有显著效果。深入剖析后发现#0 解淀粉芽孢杆菌群组中有 19 篇文献来自南京农业大学的沈其荣团队，由此可见沈其荣教授所领导的有机肥与土壤微生物研究团队是该领域中解淀粉芽孢杆菌研究方向的中坚力量。#1 系统抗性中乌特勒支大学的 van Loon 等^[16]在 1998 年发表的“Systemic resistance induced by rhizosphere bacteria”Sigma 最高，主要阐述了根瘤菌介导的系统抗药性在田间条件下是有效的，提供了一种生防机制。#2 非致病性尖孢镰刀菌中 Sigma 最高的文献是“Mechanisms involved in biological control of *Fusarium* wilt of cucumber with strains of nonpathogenic *Fusarium oxysporum*”由巴林大学的 Mandeel^[17]于 1991 年发表，主要内容为非致病性尖孢镰刀菌的增加有利于降低黄瓜枯萎病的发病率。

对前三聚类群组进行总结分析，其主要内容见表 3。Sigma 值越高说明网络中该文章的结构性和突现性综合表现上最优，进一步深入剖析近十年 Sigma 值最高的十篇被引文献（表 4），其中 Sigma

值最高的为 Di PA 的“*Fusarium oxysporum*: Exploring the molecular arsenal of a vascular wilt fungus”，这十篇文献为近十年镰刀菌枯萎病研究的重要基础。值得注意的是 2013 年发表的“Effects of novel bioorganic fertilizer produced by *Bacillus amyloliquefaciens* W19 on antagonism of *Fusarium* wilt of banana”，利用解淀粉芽孢杆菌制作有机肥来预防枯萎病，2012 年发表的“The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology”，从分子层面来分析镰刀菌枯萎病，以及“Application of bioorganic fertilizer can control *Fusarium* wilt of cucumber plants by regulating microbial community of rhizosphere soil”通过有机肥调控微生物群落防控枯萎病。虽发表年限较短，但 Sigma 值较高。通过三篇文献可以侧面看出系统抗性、病原菌的基因分子研究及微生物互作等是近年来的主要研究方向。

我国是农业大国，在农业现代化发展的过程中，作物连作及长期不合理施肥等不良现象导致土壤微生物区系破坏，造成镰刀菌枯萎病爆发频繁，影响经济作物生长发育。因此，减轻病害发生对我国现代化农业发展十分紧迫。南京农业大学有机肥与土壤微生物团队，利用芽孢杆菌和木霉等土壤有益微生物对香蕉、黄瓜、西瓜、番茄等作物的枯萎病进行生物防控，做过大量应用研究^[27-28]。国内研究更偏重实际运用，对作物抗性和产量等研究较多。随

表 3 镰刀菌枯萎病研究聚类分析主要内容

Table 3 Main contents of the cluster analysis of papers on Fusarium wilt

群组编号 Group number	群组专题 Group project	主要研究内容 Main research area
#0	解淀粉芽孢杆菌	轮作促使根际微生物群落组成, 根际微生物多样性增加, 有益微生物丰富, 抑制黄瓜枯萎病 ^[18] ; 生物施肥与熏蒸一体化强化镰刀菌枯萎病的抑制, 降低镰刀菌总数, 促进有益微生物数量和抑制疾病 ^[19] ; 芽孢杆菌和假单胞菌对镰刀菌枯萎病有较好的防治效果, 对非目标微生物群落无不利影响 ^[20]
#1	根际细菌诱导的系统抗性	拟南芥根细菌介导的诱导系统抗性对番茄枯萎病 dc3000 的作用需要存在一个单独的显性基因, 该基因在抗番茄枯萎病 dc3000 感染的基础抗性反应中发挥作用 ^[21] ; 在田间条件下, 促进植物生长的假单胞菌属对某些病原菌、昆虫和线虫的防治效果好 ^[22]
#2	非致病性尖孢镰刀菌	对抑制性土壤的研究表明, 生物控制也可以通过提高每种土壤中原有的自然抑制水平来实现 ^[23-24] ; 在灭菌土壤中, 碳是限制尖孢镰刀菌生长的第一限制基质 ^[25] 。非致病性尖孢镰刀菌菌株是防治番茄枯萎病的有效药剂 ^[26]

表 4 近十年镰刀菌枯萎病研究文献 Sigma 值

Table 4 Sigma analysis of the papers on Fusarium wilt published in the recent ten years

Sigma 值 Sigma value	题目 Subject	发表年限 Publication year
4.47	<i>Fusarium oxysporum</i> : Exploring the molecular arsenal of a vascular wilt fungus	2003
3.99	Effects of novel bioorganic fertilizer produced by <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> W19 on antagonism of Fusarium wilt of banana	2013
3.73	The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology	2012
3.70	Composts from agricultural waste and the <i>Trichoderma asperellum</i> strain T-34 suppress <i>Rhizoctonia solani</i> in cucumber seedlings	2006
3.38	Application of bio-organic fertilizer can control Fusarium wilt of cucumber plants by regulating microbial community of rhizosphere soil	2012
3.19	Control of Fusarium wilt disease of cucumber plants with the application of a bioorganic fertilizer	2008
2.85	Suppression of soil-borne plant diseases with composts: a review	2005
2.81	Recent developments in the molecular discrimination of formae speciales of <i>Fusarium oxysporum</i>	2008
2.63	Predictive factors for the suppression of Fusarium wilt of tomato in plant growth media	2004
2.42	Deciphering the rhizosphere microbiome for disease-suppressive bacteria	2011

着近年来研究层次的不断深入, 镰刀菌枯萎病的研究热点转变至基因分子层面。包括尖孢镰刀菌的致病机理、根际微生物互作、根系分泌物对病原菌的影响以及植物多种基因的表达对病原菌的影响等方向。同时, 本文根据对镰刀菌枯萎病研究热点和研究前沿的深度剖析, 认为未来研究将会继续集中在抗

病基因与抗病育种、生态防控、微生物方面的研究以及枯萎病在全球尺度下的遗传多样性与致病多样性。今后在土壤微生物尤其是根际微生物生态方面的研究会得到长足的发展, 通过多组学研究深入剖析植物-病原菌互作机制, 为我国镰刀菌枯萎病、土壤连作障碍等问题提供理论与技术支持。

3 结 论

通过 CitesSpace 对镰刀菌枯萎病研究文献进行合作网络、共现网络及共被引网络分析,探索该领域的重要基础、研究热点、研究前沿。结果表明,美国和荷兰在该领域的研究占有重要地位,拥有学科内大量优秀的研究机构,其中包括美国农业研究所、乌特勒支大学、科尔多瓦大学等优秀研究机构。许多优秀的学者对镰刀菌领域的研究探索中发表了重要的文献,其中 Larkin R P 教授、Mandeel Q 教授、Vanpeer R 教授研究了非致病性镰刀菌对番茄和黄瓜枯萎病防控以及假单胞菌对康乃馨枯萎病的防控; van Loon L C 教授研究了根际微生物和生物防控; Ma L J 教授则主要从基因组学方面研究了镰刀菌的致病染色体等,以上学者在镰刀菌枯萎病领域发表了多篇重要文献。镰刀菌枯萎病涉及多个交叉学科,其中工程学、生物化学与分子生物学、环境科学与生态学交叉频繁。我国镰刀菌枯萎病研究起步较晚,但发展迅速,未来仍需紧跟国际研究热点和前沿,加强合作交流,注重学科交叉,为攻克土传枯萎病和农业可持续发展贡献力量。

参考文献 (References)

- [1] Hao X J, Liu B, Xie G L. Research progress in biological control of Fusarium wilt disease[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21 (7): 319—322, 337. [郝晓娟,刘波,谢关林. 植物枯萎病生物防治研究进展[J]. 中国农学通报, 2005, 21 (7): 319—322, 337.]
- [2] Xue C. Manipulation of microbial community in banana rhizosphere to suppress Fusarium wilt of banana[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. [薛超. 香蕉根际土壤微生物区系特征与土传枯萎病防控研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.]
- [3] Cao Y, Song X C, Guo D J, et al. Prevention and control of watermelon Fusarium wilt by dazomet fumigation combined with bio-organic fertilizer[J]. Soils, 2018, 50 (1): 93—100. [曹云, 宋修超, 郭德杰, 等. 棉隆熏蒸与微生物有机肥联用对西瓜枯萎病的防控研究[J]. 土壤, 2018, 50 (1): 93—100.]
- [4] Shen Z Z, Sun L, Wang D S, et al. Effects of lime-ammonium bicarbonate fumigation and biofertilizer application on Fusarium wilt and biomass of continuous cropping cucumber and watermelon[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28 (10): 3351—3359. [沈宗专, 孙莉, 王东升, 等. 石灰碳铵熏蒸与施用生物有机肥对连作黄瓜和西瓜枯萎病及生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28 (10): 3351—3359.]
- [5] Wang L B, Cui Y H, Yue L, et al. Research progress on Fusarium wilt of *Lilium brownii* var. *viridulum* [J]. Horticulture and Seed, 2018, 38 (12): 50—53. [王丽波, 崔玥晗, 岳玲, 等. 百合枯萎病的研究进展[J]. 园艺与种苗, 2018, 38 (12): 50—53.]
- [6] Lang J J, Wang L L, Hu J, et al. Mechanism of bio-manure controlling cotton *Verticillium* wilt[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48 (6): 1298—1305. [郎娇娇, 王丽丽, 胡江, 等. 微生物有机肥防治棉花黄萎病机制研究[J]. 土壤学报, 2011, 48 (6): 1298—1305.]
- [7] Zhao L Y, Li W Q, Tang L X, et al. Effect of organic manure on cucumber Fusarium wilt control and its mechanism[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (6): 1383—1391. [赵丽娅, 李文庆, 唐龙翔, 等. 有机肥对黄瓜枯萎病的防治效果及防病机理研究[J]. 土壤学报, 2015, 52 (6): 1383—1391.]
- [8] Cao Y, Ma Y. Advances in Fusarium wilt disease suppression by intercropping[J]. Soils, 2015, 47 (3): 466—473. [曹云, 马艳. 间套作防治作物土传枯萎病的研究进展[J]. 土壤, 2015, 47 (3): 466—473.]
- [9] Zhong S T, Lv N N, Sun Y F, et al. Screening eco-fumigants for banana orchards with serious Fusarium wilt disease and their influences on soil microflora[J]. Soils, 2015, 47 (6): 1092—1100. [钟书堂, 吕娜娜, 孙逸飞, 等. 连作香蕉园生态熏蒸剂的筛选及其对土壤微生物群落结构的影响[J]. 土壤, 2015, 47 (6): 1092—1100.]
- [10] Chen Y, Liu Z Y, Chen J, et al. History and theory of mapping knowledge domains[J]. Studies in Science of Science, 2008, 26 (3): 449—460. [陈悦, 刘则渊, 陈劲, 等. 科学知识图谱的发展历程[J]. 科学学研究, 2008, 26 (3): 449—460.]
- [11] Chen Y, Chen C M, Liu Z Y, et al. The methodology function of Cite Space mapping knowledge domains[J]. Studies in Science of Science, 2015, 33 (2): 242—253. [陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33 (2): 242—253.]
- [12] Tang H J, Li H P, Chen W Y, et al. Research progress on soil organic carbon based on map of scientific knowledge[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56 (3): 541—552. [唐浩竣, 李海萍, 陈文悦, 等. 基于科学知识图谱谈土壤有机碳研究进展[J]. 土壤学报, 2019, 56 (3): 541—552.]
- [13] Freeman L C. A set of measures of centrality based on betweenness[J]. Sociometry, 1977, 40 (1): 35—41.
- [14] Li J, Chen C M. CiteSpace: text mining and visualization in scientific literature[M]. Beijing: Capital University of Economics & Business Press, 2017. [李杰, 陈超美. CiteSpace: 科技文本挖掘及可视化[M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2017.]
- [15] Zhang S S, Raza W, Yang X M, et al. Control of

- Fusarium wilt disease of cucumber plants with the application of a bioorganic fertilizer[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2008, 44 (8): 1073—1080.
- [16] van Loon L C, Bakker P A H M, Pieterse C M J. Systemic resistance induced by rhizosphere bacteria[J]. *Annual Review of Phytopathology*, 1998, 36 (1): 453—483.
- [17] Mandeel Q. Mechanisms involved in biological control of Fusarium wilt of cucumber with strains of nonpathogenic *Fusarium oxysporum*[J]. *Phytopathology*, 1991, 81 (4): 462.
- [18] Jin X, Wang J, Li D L, et al. Rotations with Indian mustard and wild rocket suppressed cucumber Fusarium wilt disease and changed rhizosphere bacterial communities[J]. *Microorganisms*, 2019, 7 (2): 57.
- [19] Shen Z Z, Xue C, Penton C R, et al. Suppression of banana *Panama* disease induced by soil microbiome reconstruction through an integrated agricultural strategy[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 128: 164—174.
- [20] Cucu M A, Gilardi G, Pugliese M, et al. Influence of different biological control agents and compost on total and nitrification-driven microbial communities at rhizosphere and soil level in a lettuce-*Fusarium oxysporum* f. sp. *lactucae* pathosystem[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2019, 126 (3): 905—918.
- [21] Leeman M. Induction of systemic resistance against Fusarium wilt of radish by lipopolysaccharides of *Pseudomonas fluorescens*[J]. *Phytopathology*, 1996, 85 (9): 1021.
- [22] Ramamoorthy V, Viswanathan R, Raguchander T, et al. Induction of systemic resistance by plant growth promoting rhizobacteria in crop plants against pests and diseases[J]. *Crop Protection*, 2001, 20 (1): 1—11.
- [23] Alabouvette C. Fusarium wilt suppressive soils: An example of disease-suppressive soils[J]. *Australasian Plant Pathology*, 1999, 28 (1): 57.
- [24] Alabouvette C, Lemanceau P, Steinberg C. Recent advances in the biological control of Fusarium wilts[J]. *Pesticide Science*, 1993, 37 (4): 365—373.
- [25] Couteaudier Y, Alabouvette C. Quantitative comparison of *Fusarium oxysporum* competitiveness in relation to carbon utilization[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 1990, 7 (4): 261—267.
- [26] Steinberg C, Whipps J M, Wood D, et al. Mycelial development of *Fusarium oxysporum* in the vicinity of tomato roots[J]. *Mycological Research*, 1999, 103 (6): 769—778.
- [27] Cao Y, Xu Z H, Ling N, et al. Isolation and identification of lipopeptides produced by *B. subtilis* SQR 9 for suppressing Fusarium wilt of cucumber[J]. *Scientia Horticulturae*, 2012, 135: 32—39.
- [28] Cao Y, Zhang Z H, Ling N, et al. *Bacillus subtilis* SQR 9 can control Fusarium wilt in cucumber by colonizing plant roots[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2011, 47(5): 495—506.

(责任编辑: 陈荣府)