

DOI: 10.11766/trxb201908190236

严康, 汪海珍, 楼骏, 徐建明. 基于 Web of Science 对土传病害研究现状和趋势的计量分析[J]. 土壤学报, 2020, 57 (3): 680–690.

YAN Kang, WANG Haizhen, LOU Jun, XU Jianming. Bibliometric Analysis of Status Quo and Trend of the Research on Soil-borne Diseases Based on the Web of Science Database[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (3): 680–690.

基于 Web of Science 对土传病害研究现状和趋势的计量分析*

严 康¹, 汪海珍^{1†}, 楼 骏^{1, 2}, 徐建明¹

(1. 浙江大学土水资源与环境研究所, 浙江省农业资源与环境重点实验室, 杭州 310058; 2. 湖州师范学院生命科学学院, 浙江省媒介生物学与病原控制重点实验室, 浙江湖州 313000)

摘 要: 土传病害是限制我国作物产量和品质的重要因素, 同时土传病害的田间蔓延也使得作物产量对农药依赖程度越来越大, 造成环境污染问题。为了了解土传病害国内外的研究状况, 本文利用 CiteSpace 知识图谱分析工具、VOSviewer 可视化分析软件与 HistCite 引文图谱分析工具, 对 Web of Science 核心合集数据库中土传病害研究领域的发文数量与学科分布、发文的主要国家(地区)与机构、发文的主要学术期刊、主要研究学者、主要研究热点及其变化趋势等进行计量分析。结果表明: (1) 土传病害相关研究受到的重视程度越来越高, 进一步支持土壤科学工作者对土传病害的研究将有重要意义。(2) 美国、中国、澳大利亚、法国等国家在该领域发文较多, 且国家之间合作密切。(3) 土传病害研究领域的本地引用次数列前二的期刊为 *Phytopathology* 和 *Plant Disease*, 其中 5 年影响因子较高的主要发文期刊有: *Soil Biology & Biochemistry*、*Plant Disease*、*Plant and Soil* 以及 *Applied Soil Ecology* 等。(4) 土传病害领域高产学者有 Shen Qirong(沈其荣)、Gilligan Christopher A、Mazzola Mark、Weller David M、Cao Aocheng(曹堃程)和 Cai Zucong(蔡祖聪)等。(5) 生物防控是土传病害的一个研究热点, 典型的病原微生物有立枯丝核菌、大丽轮枝菌、尖孢镰刀菌、青枯雷尔氏菌等。(6) 土传病害未来研究趋势主要集中于土壤微生物多样性与土传病害间的关系、寄主植物与病原微生物间的关系及土传病害防控机制与技术等方面。

关键词: 土传病害; 生物防控; 计量分析; CiteSpace; VOSviewer; HistCite

中图分类号: S15 **文献标志码:** A

Bibliometric Analysis of Status Quo and Trend of the Research on Soil-borne Diseases Based on the Web of Science Database

YAN Kang¹, WANG Haizhen^{1†}, LOU Jun^{1, 2}, XU Jianming¹

(1. Institute of Soil and Water Resources and Environmental Science, Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Key Laboratory of Vector Biology and Pathogen Control of Zhejiang Province, College of Life Sciences, Huzhou University, Huzhou, Zhejiang 313000, China)

Abstract: [Objective] Soil-borne diseases are important factors affecting yield and quality of crops. In order to understand the

* 国家重点研发计划重点专项子课题(2016YFD0800207)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFD0800207)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wanghz@zju.edu.cn

作者简介: 严 康 (1995—), 男, 博士研究生, 研究方向为土壤微生物生态。E-mail: my_kangyan@163.com

收稿日期: 2019-08-19; 收到修改稿日期: 2019-11-22; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2020-01-17

current research status and trends of soil-borne diseases, we conducted a bibliometric analysis. 【Method】Based on the core collection database of the Web of Science, bibliometric analysis was conducted using the CiteSpace knowledge map analysis tool, VOSviewer visual analysis software and HistCite Citation Analysis Tool, for number of publications and their distributions in disciplines, contributor countries (regions) and institutions, carrier journals, authors and main scholars involved, hotspots and trends in the field of soil-borne crop diseases. 【Result】(1) During the period between 1990 and 2018, the number of research papers addressing the topic of soil-borne disease increased. It is important to continue supporting soil scientists in their research on soil-borne diseases; (2) The United States, China, Australia and France are the major contributors of academic articles in this field, and have established close cooperation relationships with each other in recent years; (3) “*Phytopathology*” and “*Plant Disease*” are the top two journals in local citation frequency. “*Soil Biology & Biochemistry*”, “*Plant Disease*”, “*Plant and Soil*”, and “*Applied Soil Ecology*” are the main journals that have high impacts in the field of soil-borne diseases in the recent 5 years; (4) Qirong Shen, Christopher A Gilligan, Mark Mazzola, David M Weller, Aocheng Cao, and Zucong Cai are the most productive scholars in this field; (5) Biocontrol is a research hotspot in this field. The most typical soil-borne pathogenic microorganisms studied are *Rhizoctonia solani*, *Verticillium dahliae*, *Fusarium oxysporum*, and *Ralstonia solanacearum*; (6) The research in this field tends in future to focus mainly on relationships between soil microbial diversity and soil-borne diseases and between host plants and pathogenic microorganisms, and development of management practices effective to prevent and control those soil-borne diseases. 【Conclusion】This paper is based on bibliometric data of the researches in the field of soil-borne disease. In recent years, intensive studies have been conducted on soil-borne diseases. With the aid of the high-throughput sequencing technology, the knowledge of soil microbial communities and rhizosphere microorganisms has been greatly expanded. Application of the next generation sequencing technology to the study of soil-borne diseases will help us explore interactions between pathogenic microorganisms and soil microbial communities, and develop more effective methods to control soil-borne diseases.

Key words: Soil-borne diseases; Biological control; Bibliometric analysis; CiteSpace; VOSviewer; HistCite

作物的土传病害是指生活史中部分或者大部分存在于土壤当中的病原体(真菌、细菌、病毒、线虫和原生动物)在外部条件适宜时侵染植物进而引发的病害^[1]。土传病害已经成为一个世界性的问题^[2-3],危害农业的可持续发展。过去的几十年里已经开展了大量关于土传病原微生物的研究,立枯丝核菌^[4]、大丽轮枝菌^[5]、尖孢镰刀菌^[6]、青枯雷尔氏菌^[7]、生孢链霉菌^[8]和根结线虫^[9]等均为常见的土传病原体,它们具有广泛的寄主范围,可以引起作物减产,造成巨大的经济损失。由于集约化种植、单一连作等生产模式,土传病害越来越成为限制作物产量和质量的重要因素^[10]。此外,土传病害的蔓延使得作物产量对农药依赖程度越来越大,进而造成环境污染的问题^[11]。因此,开展土传病害的研究并对其进行合理防控具有科学意义和实际价值。

在土传病害的防治中,常采用的有效方法主要有:(1)化学熏蒸,如施用氯化苦、1,3-二氯丙烯与异硫氰酸甲酯等熏蒸剂^[12]。溴甲烷最先作为一种土壤熏蒸剂曾被广泛应用于土传病害防治中,现因其

被确认为是破坏臭氧层的物质而被禁用^[13];(2)嫁接或者选育一些抗病品种,如通过嫁接抗性砧木可以有效减少番茄细菌性枯萎病的发生^[14];(3)在作物种植前采用高温、蒸汽灭菌、热水渗滤等物理方式防治土传病害,这些物理措施不会对环境造成污染^[15];(4)接种荧光假单胞菌^[16]、木霉菌^[17]等拮抗微生物,或使用从该拮抗微生物中提取出来的抗生物质来防控土传病害^[3,16-17]。(5)接种可以引起作物系统免疫的微生物,达到促进作物生长,提高作物抗性的目的,在一定程度上避免或减少土传病害带来的损失^[18-19]。(6)作物轮作以及田间覆盖等农艺措施,例如将菠萝和香蕉进行轮作可以有效降低土壤中尖孢镰刀菌的数量,降低下茬香蕉土传枯萎病的发病率^[10];蔡祖聪团队报道了土壤中添加易分解有机物料并结合灌溉覆膜可达到强还原土壤灭菌作用,显著抑制病原微生物的生长^[20]。

目前关于土传病害及其防治的研究较多,但是对该领域的发文数量、学科分布、发文地区、主要学术期刊、研究学者(团队)、研究热点及其变化趋

势等的计量分析却鲜有报道。引文网络分析工具 CiteSpace 具有准确、高效的特点, 现已被广泛应用到医学、体育、教育以及经济学等多个领域^[21], 另外一个文献计量软件 VOSviewer 亦已经广泛应用到多个学科的计量研究^[22]。由 Web of Science (WOS) 的数据库检索到的发文数量, 可体现科学界对于一个领域的关注重视程度以及该领域的发展程度^[23]。基于 CiteSpace 得到的不同学科发文比重可反映不同学科对该领域的研究程度, 另一指标中介中心性则体现了一个学科与其他学科的交叉融合程度, 且 CiteSpace 中关键词的突现分析可揭示领域的研究发展趋势^[24]。采用文献计量工具 VOSviewer, 对主要发文国家/地区及机构、作者进行计量分析, 可得到不同国家/地区及机构、主要研究学者(团队)在某一领域中的研究程度与合作强度^[25]。关键词能简要表达全文主旨, 代表文章主要研究内容, 基于 VOSviewer 关键词共现网络, 可反映一个领域研究热点^[26]。CiteSpace 和 VOSviewer 均可以进行作者、机构、文献共被引、期刊共被引的分析, 但是两者的分析结果存在差异, VOSviewer 更加接近 Web of Science (WOS) 的数据^[27]。

本文结合 CiteSpace 和 VOSviewer 软件的各自优势, 利用 CiteSpace 对土传病害研究领域学科分布及关键词突现指标进行分析, 利用 VOSviewer 软件对主要发文国家/地区、机构及作者合作关系进行分析, 基于 VOSviewer 的关键词共现网络, 分析该领域的研究热点。同时运用 HistCite 引文图谱分析工具的重要参数即本地总引用次数 (Total local citation score, TLCS) 与总引用次数 (Total global citation score, TGCS) 来定位主要学术期刊等信息^[28]。通过计量分析, 全面了解土传病害研究领域发展现状与前沿趋势, 并对土壤科学及其工作者在该领域的研究展开了剖析, 以期对未来土传病害研究及防控提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文文献计量的数据来源于美国汤森路透公司 (Thomson Reuters) WOS 核心合集数据库, 该数据库被广泛应用于文献计量的研究中^[25]。文献检索的主题词土传病害设置为 (soil borne disease) OR

(soilborne disease) OR (soil-borne disease)。设置检索时间为 1990 年至 2019 年, 所有文献的检索日期为 2019 年 2 月 21 日, 选定文献类型为 Article 和 Review。通过检索, 得到的文献数量是 3795 篇。

1.2 研究方法

利用 WOS 核心合集自带的分析工具、CiteSpace 软件、VOSviewer 软件与 HistCite 软件对 1990—2019 年间发表的 3795 篇文献从发文量及学科分布、发文国家/地区与机构、期刊来源、研究团队、研究热点及发展趋势进行计量分析。CiteSpace 分析的节点类型 (Node Types) 选择学科领域 (Category) 分析学科分布, 选择 2014 年以后的关键词 (Keyword) 突现指标 (Burstness) 来描述近五年来的研究发展趋势。通过 VOSviewer 科研合作网络来分析主要的发文国家/地区 (Countries)、机构 (Organizations)、作者 (Authors) 之间的合作关系, 并分析节点间的连接总强度 (Total link strength, TLS)。基于 VOSviewer 的共现分析 (Co-occurrence), 选定所有关键词 (All keywords) 这一选项, 并设置阈值 (35) 统计出现次数较多的关键词, 反应该领域的研究热点。其中, 关键词 biological control 与 biocontrol 属于同义词, 对其进行合并。此外, 利用 HistCite 中本地总引用次数 (TLCS) 与总引用次数 (TGCS) 两个重要参数来确定土传病害研究领域的主要学术期刊。

2 结果与讨论

2.1 发文数量与学科分布

检索结果表明发文量逐年增加 (图 1a), 亦即土传病害越来越受到人们的重视。土传病害的研究涉及多个学科与领域。在 WOS 类别中发文较多的有植物科学、农学等 (图 1b)。对 WOS 类别选定 soil science 来精炼, 归属到土壤科学的文献数量增加幅度相较于植物科学来说并不大。基于 WOS 核心合集检索到的结果与蔡祖聪等基于百链网检索到的结果一致^[29], 即总体发文数量上升, 但是发表在土壤科学相关期刊上的文章有限 (百链网检索占比不足 2%)。利用 CiteSpace 进行领域的共现分析, 结果表明土传病害的研究涉及多个研究领域, 已引起多个学科的共同关注 (表 1)。发文数量排在前三位的学科有植物科学、农学、农艺学, 但环境科学与生态学的中介中心性最高。值得注意的是, 土壤科学领

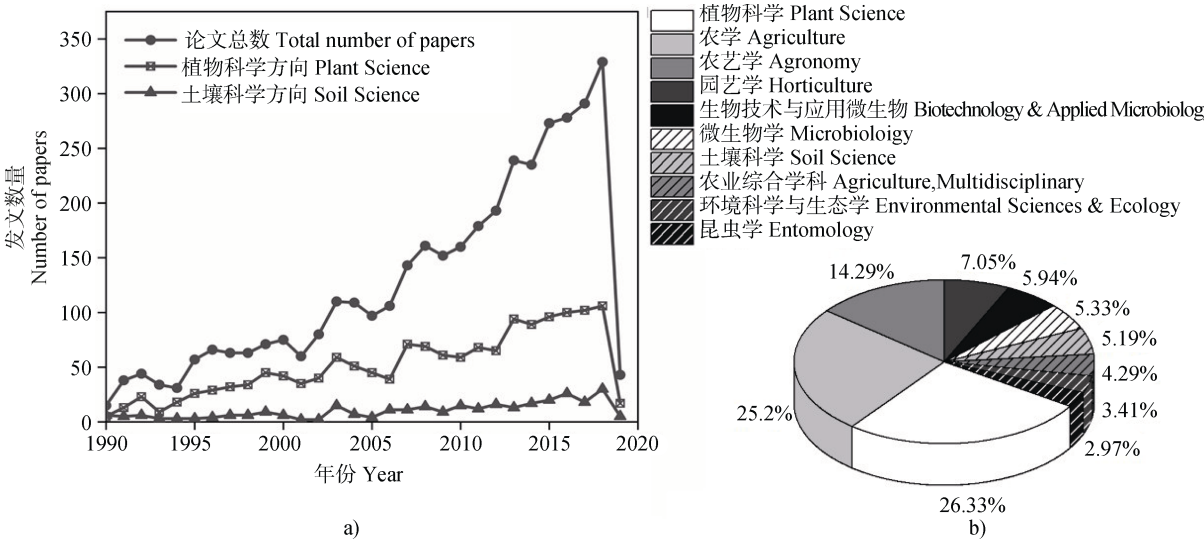


图 1 1990—2019 年文献产出量 (a) 及前十发文学科的占比 (b)
Fig. 1 Document output (a) and proportions of the top 10 disciplines (b) during 1990-2019

表 1 发文数量与中介中心性排名前十的学科

Table 1 Top 10 disciplines in terms of number of papers and intermediary centrality

学科分类	发文数量	中介中心性
Category	Number of papers/篇	Centrality
植物科学 Plant Science	1542	0.16
农学 Agriculture	1476	0.24
农艺学 Agronomy	837	0.08
园艺学 Horticulture	413	0.00
生物技术与应用微生物 Biotechnology & Applied Microbiology	348	0.09
微生物学 Microbiology	312	0.10
土壤科学 Soil Science	304	0.00
农业综合学科 Agriculture, Multidisciplinary	251	0.09
环境科学与生态学 Environmental Sciences & Ecology	200	0.35
昆虫学 Entomology	174	0.02

域发文数量较少（前十学科中占比 5.19%）、中介中心性低，且土壤科学在土传病害研究领域与其他学科交叉有限。土壤科学在揭示土壤病原微生物生长状况及防控上具有优势^[29]，加强土壤学工作者对土传病害的研究将促进土传病害和土壤学领域的协同发展。

2.2 发文的主要国家/地区与机构

利用 VOSviewer 可视化软件对世界各国在土传病害研究领域发文数量及各国间的合作关系进行分析，结果如图 2 所示，图中圈的大小反映了国家/地

区发文情况，连线则表示相互间联系的密切程度。发文数量统计结果为，美国最多（发文 1 080 篇），其次为中国（发文 472 篇）。此外，澳大利亚、法国、德国、意大利、印度、西班牙、加拿大、日本等也均在土传病害研究领域发表了很多优秀论文。中国主要发文机构包括南京农业大学（发文 80 篇）、中国农业科学院（发文 76 篇）、中国科学院（发文 43 篇）、中国农业大学（发文 28 篇）、浙江大学（发文 24 篇）、华中农业大学（发文 18 篇）、南京师范大学（发文 14 篇）等。

根据 VOSviewer 的总联系强度 (TLS) 参数值来看, 美国 (TLS 值为 429)、中国 (TLS 值为 196)、英国 (TLS 值为 142)、法国 (TLS 值为 138) 等国家在土传病害研究领域的国际合作联系密切。由图 2 中的连线可知, 美国、澳大利亚、加拿大、日本等在土传病害问题的研究上与中国合作紧密。另由机构合作分析网络中可见, 美国农业部农业研究组织 (USDA ARS) 与论文产出各主要机构的合作关

系密切 (图 3), 总联系强度参数 (TLS) 大小为美国农业部农业研究组织 (USDA ARS, TLS 值为 155)、华盛顿州立大学 (Washington State Univ, TLS 值为 82)、法国农业科学研究院 (INRA, TLS 值为 71)、佛罗里达大学 (Univ Florida, TLS 值为 66)。由图 3 中的连线可见, 南京农业大学和中国农科院、浙江大学、美国农业部农业研究组织、中国科学院等机构均有较密切合作。

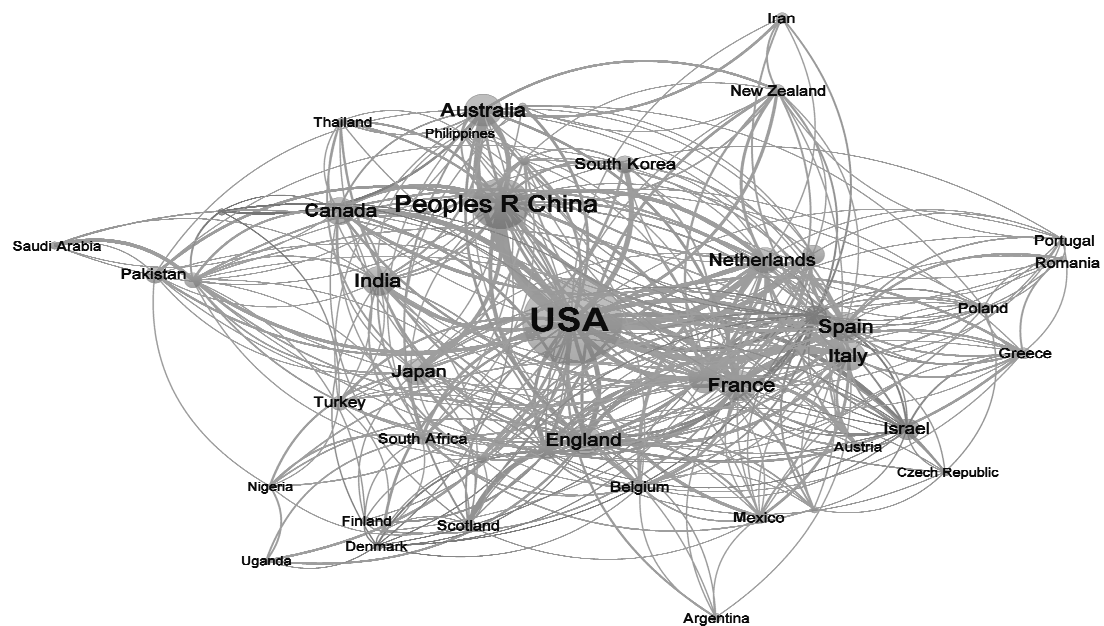


图 2 论文产出国之间的合作
Fig. 2 Cooperations between paper contributor countries

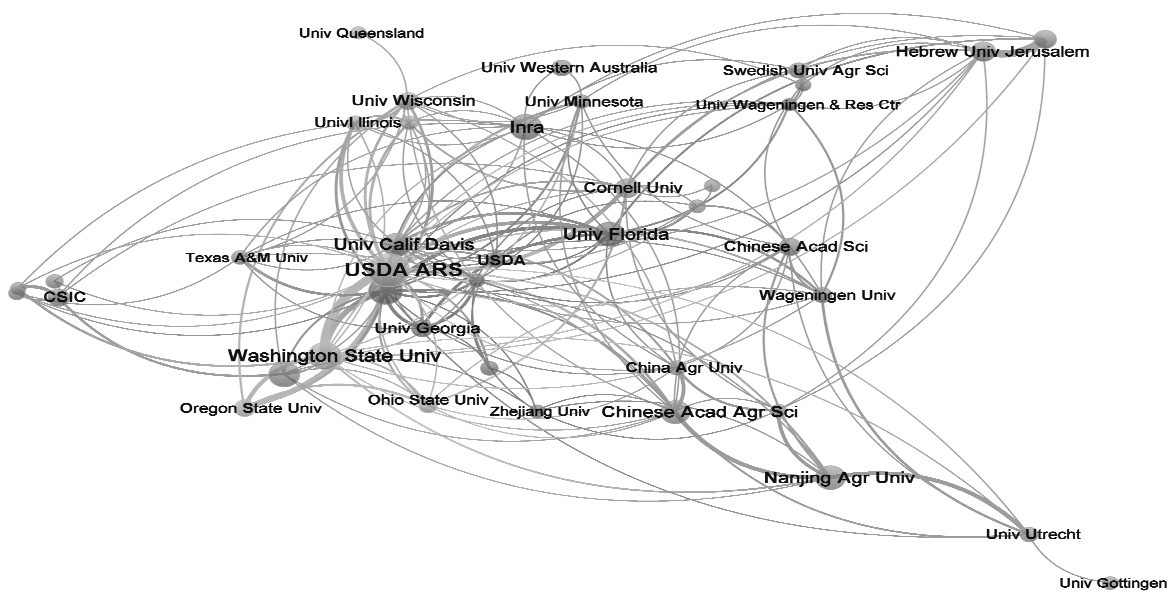


图 3 论文产出主要机构之间的合作
Fig. 3 Cooperations between main paper contributor institutions

2.3 发文的主要国际刊物

由 HistCite 软件分析结果可见，发文数量 TOP3 的期刊是 *Plant Disease*（发文 193 篇）、*European Journal of Plant Pathology*（发文 148 篇）和 *Crop Protection*（发文 136 篇）。本地引用次数（TLCS）、总引用（TGCS）次数较高的期刊有 *Phytopathology*、*Plant Disease* 等，其中大多数期刊被归类至植物科学

（*Plant Science*）中，也有典型的土壤科学期刊如 *Soil Biology & Biochemistry* 和 *Applied Soil Ecology* 等，但是发表在这些期刊上的文章数量远少于植物科学的相关期刊（表 2）。土传病害研究领域主要的发文期刊中影响因子较高的有：*Soil Biology & Biochemistry*（6.065）、*Plant Disease*（3.770）、*Plant and Soil*（3.761）以及 *Applied Soil Ecology*（3.714）等。

表 2 1990—2019 年土传病害研究领域研究发文量排名 TOP10 期刊

Table 2 Top10 journals in terms of number of papers published addressing soil borne diseases during the 1990—2019

期刊名称	发文量	影响因子（五年）	本地引用	总引用
Journal	Number of papers	Impact Factor (5 Years)	TLCS	TGCS
<i>Plant Disease</i>	193	3.770	685	3 571
<i>European Journal of Plant Pathology</i>	148	1.754	395	2 667
<i>Crop Protection</i>	136	2.353	470	2 264
<i>Phytopathology</i>	134	3.670	885	5 332
<i>Plant Pathology</i>	87	2.563	269	1 663
<i>PLoS One</i>	70	3.337	0	918
<i>Australasian Plant Pathology</i>	69	1.360	171	1 236
<i>Plant and Soil</i>	69	3.761	436	2 528
<i>Soil Biology & Biochemistry</i>	67	6.065	463	2 437
<i>Applied Soil Ecology</i>	65	3.714	161	948

2.4 发文的主要研究学者

如图 4 所示，圆圈大小表示发文数量的多少，图中仅显示合作关系密切的作者之间的联系。由发文数量上来看，Shen Qirong（沈其荣，发文 50 篇）、Gilligan Christopher A（发文 19 篇）、Mazzola Mark（发文 17 篇）、Weller David M（发文 16 篇）、Cao Aocheng（曹坳程，发文 14 篇）、Cai Zucong（蔡祖聪，发文 10 篇）等是土传病害研究领域高产作者。另根据 VOSviewer 的总联系强度参数（TLS）分析表明，沈其荣（TLS 参数为 127）、曹坳程（TLS 参数为 71）、王秋霞（TLS 参数为 71）、颜冬冬（TLS 参数为 71）等与该领域其他作者间合作密切。

2.5 土传病害研究热点

2.5.1 生物防控 关键词简要表达全文主旨，代表文章主要研究内容，一个关键词出现频率越大，表示相关主题受关注程度就越高。biocontrol 是出现次数最高的关键词，出现次数 766 次，表明对于土

传病害的生物防控是目前研究的热点（图 5）。在关键词共现网络中与 biocontrol 关系密切的有根际（rhizosphere）、哈茨木霉（*Trichoderma harzianum*）、荧光假单胞菌（*Pseudomonas fluorescens*）、系统抗性（systemic resistance）、立枯丝核菌（*Rhizoctonia solani*）、尖孢镰刀菌（*Fusarium oxysporum*）、机制（mechanisms）、抑制（suppression）、多样性（diversity）、生长（growth）、土传病原微生物（soil-borne pathogens）、熏蒸（fumigation）、存活（survival）等（图 5）。

以青枯病为例，目前生物防控青枯病致病性劳尔氏菌的措施主要分成两个方面：（1）从田间植物根际土壤中筛选出拮抗菌来防控青枯病。如图 5 所示，生物防控关键词与一些典型拮抗菌（荧光假单胞菌、木霉等）关系密切。拮抗微生物如哈茨木霉、荧光假单胞菌均为土传病害生物防治的潜力菌株^[16-17]。有研究报道施用含有木霉的生物有机肥可以明显降低根际土壤中劳尔氏菌的相对丰度，对烟

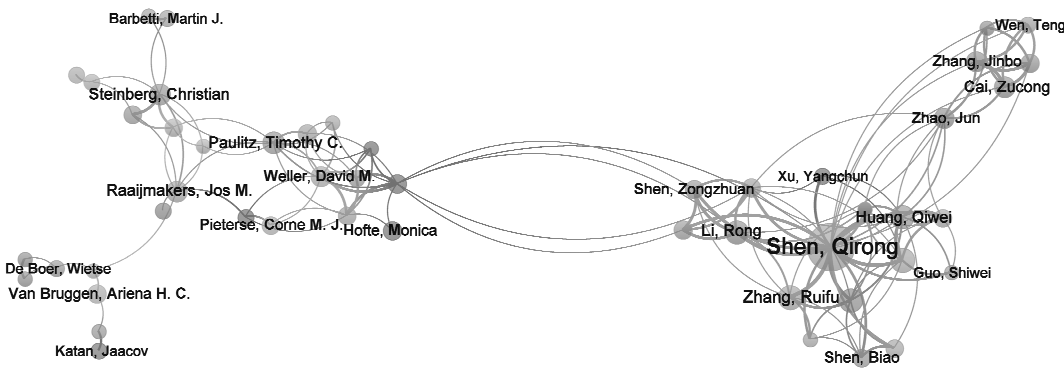


图 4 重要作者之间的合作关系
Fig. 4 Cooperations between major authors.

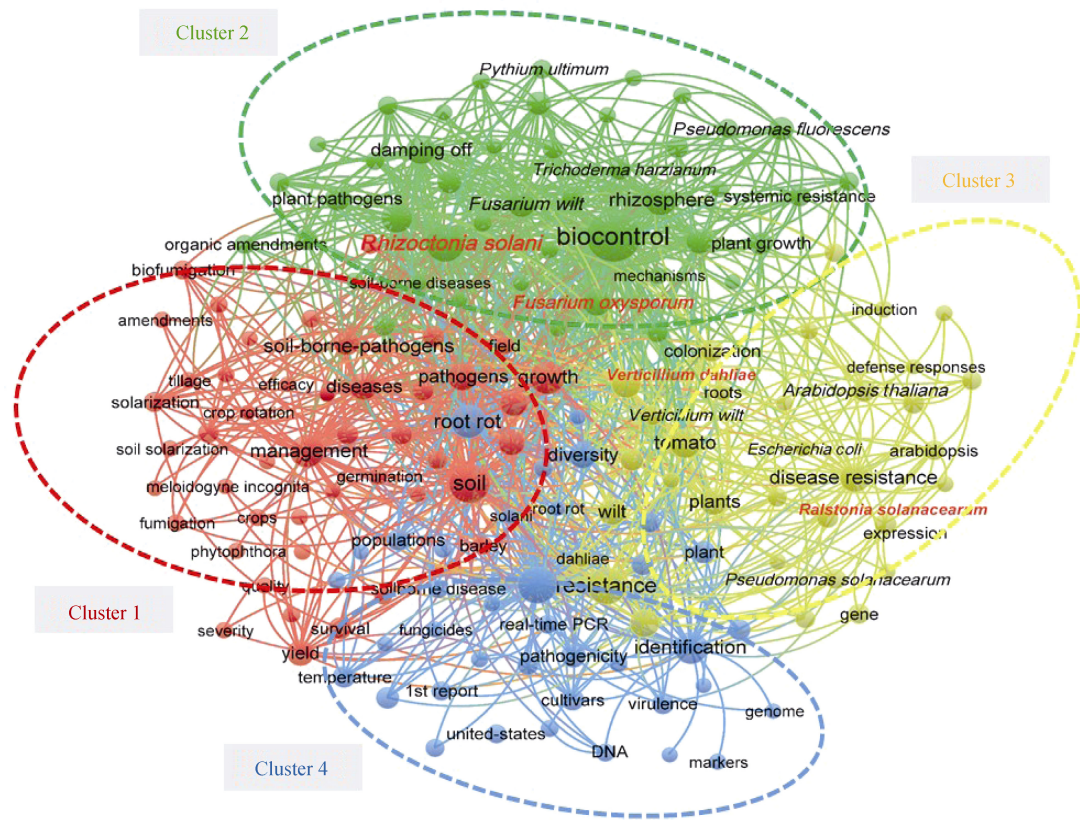


图 5 关键词共现网络
Fig. 5 Keywords co-occurrence network

草的青枯病有一定的防控效果^[30]。(2) 利用无致病力的劳尔氏菌抑制致病性劳尔氏菌的生长。有研究表明将无致病力的劳尔氏菌接种于番茄土壤中, 无致病力的病原微生物可抑制致病菌的生长^[18]。此外, 目前熏蒸结合生物防治的方法能在较大程度上减少土壤中病原微生物的相对丰度, 抑制土传病害^[3]。

2.5.2 重点关注的病原微生物 这些高频关键词

中, 出现频数排名前四的土传病原微生物分别是立枯丝核菌 (*Rhizoctonia solani*)、大丽轮枝菌 (*Verticillium dahlia*)、尖孢镰刀菌 (*Fusarium oxysporum*) 和青枯雷尔氏菌 (*Ralstonia solanacearum*) 等典型的病原微生物, 出现频数排名前三名的均为典型的真菌病害, 也反映了土传病原微生物中真菌占主导地位。这些土传病原微生物寄主范围广, 且会使重要的粮食经济作物减产甚至绝收, 造成巨大的经济损失^[4-7]。如禾本科

作物(玉米、水稻等)、豆科(大豆、花生等)、茄科(烟草、马铃薯等)、十字花科(如油菜)等均为立枯丝核菌的侵染对象^[4]。立枯丝核菌能广泛适应土壤的温度湿度条件,具有很强的生存能力^[4]。大丽轮枝菌是一种典型的土传病原微生物,可以引起作物患黄萎病,并且能以微菌核的形式长时间存活在土壤当中,很难控制^[5]。尖孢镰刀菌导致香蕉的枯萎病,造成巨大的经济损失^[3]。青枯雷尔氏菌是一种典型的细菌性病害,寄主范围很广,包括多种重要的经济作物,通过伤口或根尖、裂缝进入到根部、并侵入植物木质部导管,阻碍植物水分运输^[7]。

2.5.3 土传病害研究热点聚类 根据关键词共现网络(图 5),土传病害研究领域关键词可以划分为四个聚类,图中不同的颜色表示不同的聚类。关键词聚类一主要是土传病害的熏蒸和田间管理措施,包括的主要关键词有 amendments(改良)、biofumigation(生物熏蒸)、crop rotation(轮作)、fumigation(熏蒸法)、management(管理)、methyl bromide(溴甲烷)、tillage(耕种)等。关键词聚类二主要是土传病害的生物防控,在本聚类中涵盖了典型的拮抗微生物,包括的主要关键词有 biocontrol(生物防控)、*Bacillus subtilis*(芽孢杆菌)、*Clavaria mycorrhizal*(丛枝菌根)、*Fluorescent pseudomonads*(假单胞菌)、*Trichoderma harzianum*(哈茨木霉)、bacterial communities(细菌群落)、antifungal activity(抗真菌活性)、microbial communities(微生物群落)、rhizosphere(根际)、rhizobacteria(根际细菌)、systemic resistance(系统抗性)等。关键词聚类三主要是植物对土传病害诱导抗性及其机制,包括的主要关键词有 *Arabidopsis-thaliana*(拟南芥)、colonization(定殖)、gene(基因)、gene expression(基因表达)、infection(感染)、protein(蛋白)、salicylic acid(水杨酸)、systemic acquired-resistance(诱导抗病性)等。水杨酸是植物启动自身免疫机制,抵御外界病原微生物入侵过程中的关键信号分子,参与植物对生物和非生物的胁迫的应答^[31]。关键词聚类四主要是土传病原微生物及相关分子研究技术,包括的关键词有 1st report(初次报道)、climate change(气候变化)、diversity(多样性)、ecology(生态)、genetic diversity(遗传多样性)、genome(基因组)、real-time PCR(实时荧光定量 PCR)、markers(标记)、strains(菌株)、

transmission(传播)、virulence(毒性)、quantification(量化)等。需要指出的是,对土传病原微生物的数量生态学研究越来越引起了重视,利用现代分子生物学手段对土壤中病原微生物(特定基因)定量的相关研究越来越多^[3,10]。

2.6 土传病害研究领域发展趋势

基于 CiteSpace 对土传病害研究领域关键词突现指标的分析,选择 2014 年以后的突现词来描述近五年来的研究发展趋势(表 3)。通过对研究热点(图 5)及关键词突现分析(表 3),进行总结与归纳,可以发现目前土传病害研究领域主要呈现以下几个研究趋势。

2.6.1 土壤微生物多样性与土传病害间的关系

关键词突现指标中,多样性(diversity, 16.967)、微生物群落(microbial community, 11.230)、细菌群落(bacterial community, 10.826)等有很高的突现强度(表 3),这些关键词在关键词共现网络中出现次数也较高(图 5)。高通量测序技术的发展极大推动了对微生物群落与多样性等的理解,为探求病原微生物与土壤微生物群落间的交互作用提供了有力手段^[3,10],并使得在基因水平上研究土壤微生物成为了可能。通过研究土壤微生物多样性对功能明确的典型土传病原微生物(如 2.5.2 中所提及)存活及其侵入寄主植物的影响,可明晰土壤微生物多样性与土传病害间的关系^[29],并对高效防控土传病害、挖掘土壤微生物多样性与功能信息以及土壤生物学的发展起到推动作用。

2.6.2 寄主植物与病原微生物间的关系 植物生长(plant growth, 14.161)、尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*, 11.753)、拟南芥(*Arabidopsis-thaliana*, 11.658)与根际微生物组(rhizosphere microbiome, 9.341)等突现强度也较高,在关键词共现网络中也出现了典型病原微生物与易感植物(图 5)。其中,拟南芥(*Arabidopsis-thaliana*)是研究植物病害的模式植物,拟南芥的植物微生物组在植物免疫中发挥重要作用^[32]。需要指出的是,自 2017 年以来关于根际微生物组的研究逐渐引起重视(表 3),土传病原微生物和根际微生物相互关系是决定作物健康生长的关键因素^[1]。植物根际有益菌和有害菌共同互作决定寄主植物的健康生长,研究土传病害发生的根际微生态机理将加深对土传病害的认识,获得更有效的土传病害防控措施。

表 3 近 5 年关键词突现指标

Table 3 Keywords with the strongest citation bursts in the recent 5 years

关键词 Keyword	突现强度 Strength	起始 Begin	结束 End
种植制度 cropping system	8.688	2014	2015
植物疾病 plant disease	9.692	2014	2019
微生物群落 microbial community	11.230	2014	2019
体外 in vitro	8.660	2014	2017
效力 efficacy	5.924	2014	2017
美国 United States	6.020	2014	2015
多样性 diversity	16.967	2014	2019
首次报道 1s treport	14.052	2015	2019
拟南芥 Arabidopsis-thaliana	11.658	2015	2019
抗真菌性 antifungal activity	9.149	2015	2019
尖孢镰刀菌 Fusarium oxysporum	11.753	2015	2019
植物生长 plant growth	14.461	2015	2019
有机改良剂 organic amendment	7.138	2015	2019
细菌群落 bacterial community	10.826	2016	2019
毒性 virulence	13.795	2016	2019
黄萎病 Verticillium wilt	10.569	2016	2019
致病性 pathogenicity	7.875	2016	2019
根际微生物组 rhizosphere microbiome	9.341	2017	2019
马铃薯 potato	3.699	2017	2019
青枯雷尔氏菌 Ralstonia solanacearum	7.568	2017	2019
细菌性枯萎 Bacterial wilt	9.229	2017	2019
响应 response	4.665	2017	2019

2.6.3 土传病害防控机制与技术 首次报道 (1st report, 14.052)、毒性 (virulence, 13.795)、有机改良剂 (organic amendment, 7.318) 等的突现强度也较高 (表 3)。首次报道 (1st report) 的论文主要关注于土传病害防控机制的研究, 如 Shrestha 等^[33]首次报道苏云金芽孢杆菌可以降解病原真菌的细胞壁, 在一定程度上抑制了菌核病。毒性 (virulence) 往往是指一些病原微生物会释放有毒的代谢物质, 近期有研究表明生物炭的添加有利于在植物根附近去除毒力因子, 降低病原微生物对植物的危害作用^[34]。此外, 有机改良剂 (organic amendment) 的合理施用在一定程度上可抑制土传病害的发生与蔓延。如沈其荣团队长期从事土壤微生物与有机 (类) 肥料的研究与开发工作, 前期工作中筛选到大量土传病原微生物的拮抗菌, 如 SQR9、NJN-6 等均对病

原微生物生长具有明显抑制作用^[35-36], 并将拮抗菌制备成生物有机肥, 且结合土壤熏蒸更能减少土壤中病原微生物相对丰度, 起到抑制土传病害的作用^[3]。高效、绿色及长效的土传病害防治技术开发与应用, 仍将是该领域未来的一个研究重点。

3 结 论

全球范围内对土传病害相关研究重视程度越来越高。土传病原微生物属于土壤生物的研究范畴, 病原微生物存活在土壤环境中, 土壤学工作者对土传病害及其生物防控研究的重视将对土壤学的发展起到一定的推动作用。美国、中国、澳大利亚、法国等国家在该领域发文较多, 相互合作密切。土传病害研究领域主要的发文期刊主要有 Plant

Disease、*European Journal of Plant Pathology* 和 *Crop Protection*, 本地应用次数较高的期刊有 *Phytopathology* 和 *Plant Disease* 等。国内学者沈其荣、曹勘程、蔡祖聪等在土传病害研究领域均发表了较多文章, 研究方向有所侧重。典型的土传病原微生物有立枯丝核菌、大丽轮枝菌、尖孢镰刀菌、青枯雷尔氏菌等, 生物防控是土传病害的研究热点, 根据关键词共现网络主要可以分为土传病害的熏蒸和田间管理措施、土传病害的生物防控、植物对土传病害诱导抗性及其机制及土传病原微生物及相关分子研究技术等 4 大类。随着高通量测序的发展, 极大地扩展了对土壤微生物群落结构的理解, 近些年来对微生物群落、根际微生物的研究已逐年增加。土传病害未来研究趋势主要集中于土壤微生物多样性与土传病害间的关系、寄主植物与病原微生物间的关系及土传病害防控机制与技术等方面。

参考文献 (References)

- [1] Yang Z, Dai C C, Wang X X, et al. Advance in research on rhizosphere microbial mechanisms of crop soil-borne fungal diseases[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 12—22. [杨珍, 戴传超, 王兴祥, 等. 作物土传真菌病害发生的根际微生物机制研究进展[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 12—22.]
- [2] Butler D. Fungus threatens top banana[J]. *Nature*, 2013, 504 (7479): 195—196.
- [3] 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 & Biochemistry*, 2019, 128: 164—174.
- [4] Ajayi-Oyetunde O O, Bradley C A. *Rhizoctoniasolani*: Taxonomy, population biology and management of *Rhizoctonia* seedling disease of soybean[J]. *Plant Pathology*, 2018, 67 (1): 3—17.
- [5] Keykhasaber M, Pham K T K, Thomma B P H J, et al. Reliable detection of unevenly distributed *Verticillium dahliae* in diseased olive trees[J]. *Plant Pathology*, 2017, 66 (4): 641—650.
- [6] McGovern R J. Management of tomato diseases caused by *Fusariumoxysporum*[J]. *Crop Protection*, 2015, 73: 78—92.
- [7] Salanoubat M, Genin S, Artiguenave F, et al. Genome sequence of the plant pathogen *Ralstonia solanacearum*[J]. *Nature*, 2002, 415 (6871): 497—502.
- [8] Shi W C, Li M C, Wei G S, et al. The occurrence of potato common scab correlates with the community composition and function of the geocaulosphere soil microbiome[J]. *Microbiome*, 2019, 7: 14. <https://doi.org/10.1186/s40168-019-0629-2>.
- [9] Koenning S R, Overstreet C, Noling J W, et al. Survey of crop losses in response to phytoparasitic nematodes in the United States for 1994[J]. *Journal of Nematology*, 1999, 31 (4S): 587—618.
- [10] Wang B B, Li R, Ruan Y Z, et al. Pineapple-banana rotation reduced the amount of *Fusarium oxysporum* more than maize-banana rotation mainly through modulating fungal communities[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 86: 77—86.
- [11] Li H Z, Zeng E Y, You J. Mitigating pesticide pollution in China requires law enforcement, farmer training, and technological innovation[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2014, 33 (5): 963—971.
- [12] Yan D D, Wang Q X, Mao L G, et al. Evaluation of chloropicrin gelatin capsule formulation as a soil fumigant for greenhouse strawberry in China[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60 (20): 5023—5027.
- [13] Committee U N E P, Banks J. 2002 report of the Methyl Bromide Technical Options Committee; 2002 Assessment. UNEP Nairobi Ozone Secretariat, 2002.
- [14] Rivard C L, O'Connell S, Peet M M, et al. Grafting tomato to manage bacterial wilt caused by *Ralstonia solanacearum* in the southeastern United States[J]. *Plant Disease*, 2012, 96 (7): 973—978.
- [15] Katan J. Physical and cultural methods for the management of soil-borne pathogens[J]. *Crop Protection*, 2000, 19 (8/9/10): 725—731.
- [16] Haas D, Défago G. Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent pseudomonads[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2005, 3 (4): 307—319.
- [17] Harman G E, Howell C R, Viterbo A, et al. *Trichoderma* species—opportunistic, avirulent plant symbionts[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2004, 2 (1): 43—56.
- [18] Cardinale F, Ferraris L, Valentino D, et al. Induction of systemic resistance by a hypovirulent *Rhizoctonia solani* isolate in tomato[J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2006, 69 (4/5/6): 160—171.
- [19] Chen G K, Zhou B J, Zhou D N, et al. Control effects of avirulent strain Tbw1-7-3 of *Ralstoniasola nacearum* on tobacco bacterial wilt[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2015, 48 (11): 7—10, 32. [陈国康, 周帮菊, 周丹妮, 等. 无致病力青枯菌株对烟草青枯病的控制作用[J]. *烟草科技*, 2015, 48(11): 7—10, 32.]
- [20] Liu L L, Chen S H, Zhao J, et al. Watermelon planting is capable to restructure the soil microbiome that regulated by reductive soil disinfestation[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 129: 52—60.
- [21] 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): 359—377.

- [22] van Eck N J, Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping[J]. *Scientometrics*, 2010, 84 (2): 523—538.
- [23] Chuan L M, Zheng H G, Zhao T K, et al. Trends in research on contaminated soil remediation based on web of science database[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35 (1): 12—20. [串丽敏, 郑怀国, 赵同科, 等. 基于 Web of Science 数据库的土壤污染修复领域发展态势分析[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35 (1): 12—20.]
- [24] Li B B, Xu M X, Gong C, et al. Hotspots and trends in international soil quality research[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32 (11): 1983—1998. [李彬彬, 许明祥, 巩晨, 等. 国际土壤质量研究热点与趋势——基于大数据的 Citespace 可视化分析[J]. *自然资源学报*, 2017, 32 (11): 1983—1998.]
- [25] Hu Y M, Zhou J, Liu H L, et al. Bibliometric analysis of studies on remediation of heavy metals contaminated soils based on web of science[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (3): 707—720. [胡远妹, 周俊, 刘海龙, 等. 基于 Web of Science 对土壤重金属污染修复研究的计量分析[J]. *土壤学报*, 2018, 55 (3): 707—720.]
- [26] Mao G Z, Shi T T, Zhang S, et al. Bibliometric analysis of insights into soil remediation[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018 (18): 2520—2534.
- [27] Song X F, Chi P J. Comparative study of the data analysis results by vosviewer and citespace[J]. *Information Science*, 2016, 34 (7): 108—112, 146. [宋秀芳, 迟培娟. Vosviewer 与 Citespace 应用比较研究[J]. *情报科学*, 2016, 34 (7): 108—112, 146.]
- [28] Garfield E. From the science of science to Scientometrics visualizing the history of science with HistCite software[J]. *Journal of Informetrics*, 2009, 3 (3): 173—179.
- [29] Cai Z C, Huang X Q. Soil-borne pathogens should not be ignored by soil science[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (2): 305—310. [蔡祖聪, 黄新琦. 土壤学不应忽视对作物土传病原微生物的研究[J]. *土壤学报*, 2016, 53 (2): 305—310.]
- [30] Yuan S F, Li M Y, Fang Z Y, et al. Biological control of tobacco bacterial wilt using *Trichoderma harzianum* amended bioorganic fertilizer and the arbuscular mycorrhizal fungi *Glomus mosseae*[J]. *Biological Control*, 2016, 92: 164—171.
- [31] Kouzai Y, Kimura M, Watanabe M, et al. Salicylic acid-dependent immunity contributes to resistance against *Rhizoctonia solani*, a necrotrophic fungal agent of sheath blight, in rice and *Brachypodium distachyon*[J]. *New Phytologist*, 2018, 217 (2): 771—783.
- [32] Lundberg D S, Lebeis S L, Paredes S H, et al. Defining the core *Arabidopsis thaliana* root microbiome[J]. *Nature*, 2012, 488 (7409): 86—90.
- [33] Shrestha A, Sultana R, Chae J C, et al. *Bacillus thuringiensis* C25 which is rich in cell wall degrading enzymes efficiently controls lettuce drop caused by *Sclerotinia minor*[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2015, 142 (3): 577—589.
- [34] Jaiswal A K, Frenkel O, Tsechansky L, et al. Immobilization and deactivation of pathogenic enzymes and toxic metabolites by biochar: A possible mechanism involved in soilborne disease suppression[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 121: 59—66.
- [35] 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 and Fertility of Soils*, 2011, 47 (5): 495—506.
- [36] Yuan J, Raza W, Shen Q R, et al. Antifungal activity of *Bacillus amyloliquefaciens* NJN-6 volatile compounds against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, 78 (16): 5942—5944.

(责任编辑: 卢 萍)