

基于 Web of Science 核心合集数据库和 CiteSpace 中植物内生真菌多样性研究的文献计量学分析

郑涵蔡元^{#1}, 黄先寒^{#2}, 罗增远¹, 代兴汛¹, 刘鲁峰^{*1,3}

1 云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201

2 中国科学院昆明植物研究所 中国科学院东亚植物多样性与生物地理学重点实验室, 云南 昆明 650201

3 省部共建云南生物资源保护与利用国家重点实验室, 云南 昆明 650201

郑涵蔡元, 黄先寒, 罗增远, 代兴汛, 刘鲁峰. 基于 Web of Science 核心合集数据库和 CiteSpace 中植物内生真菌多样性研究的文献计量学分析[J]. 微生物学通报, 2024, 51(9): 3690-3705.

ZHENG Hancaiyuan, HUANG Xianhan, LUO Zengyuan, DAI Xingxun, LIU Lufeng. Bibliometric analysis of plant endophytic fungal diversity research based on Web of Science Core Collection database and CiteSpace[J]. Microbiology China, 2024, 51(9): 3690-3705.

摘要:【背景】内生菌几乎存在于所有目前已研究过的植物中, 感染内生真菌的植物宿主往往具有生长快速、抗逆境、抗病害、抗天敌等优势。目前, 植物内生菌多样性得到了广泛关注, 然而现阶段对该领域进行定量统计、分析的研究报道较少。【目的】对植物内生真菌多样性领域文献运用计量学方法进行分析, 探讨该领域的研究现状及研究热点。【方法】通过文献计量学方法, 基于 Web of Science (WOS)核心合集数据库, 以“endophytic fungal diversity and plant”为检索词进行主题检索, 统计 1992–2022 年间“植物内生真菌多样性”研究文献的刊文数量、期刊、研究机构、主要作者和关键词的分布情况, 并利用 CiteSpace 软件进行可视化分析。【结果】通过关键词突现分析发现 biodiversity (生物多样性)、symbiosis (共生)、soil (土壤) 3 个关键词与该领域文献发表量突增的时段密切相关。并通过关键词聚类分析, 得到 9 个关键词标签, 具体 3 个热点研究方向。【结论】“Endophytic fungal diversity and plant”研究的英文文献数量从 2019 年开始快速增加, 内生真菌多样性、内生真菌促进宿主生长、内生真菌次生代谢产物药用性为现阶段的研究热点。未来应该加强该领域高影响力作者、机构的合作, 针对本领域的 3 个热点及不足展开深入、系统的研究。

关键词: 植物; 内生真菌多样性; 文献学统计; Web of Science; CiteSpace

资助项目: 省部共建云南生物资源保护与利用国家重点实验室开放课题(gz kf2022003); 云南省重大科技专项(202202AE090021); 云南省高校植物有益内生菌功能发掘与应用科技创新团队建设项目

[#]对本文贡献相同

This work was supported by the Open Research Program of State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Bio-resource in Yunnan Province (gz kf2022003), the Major Science and Technology Project in Yunnan Province (202202AE090021), and the Construction Project of Innovation and Technology Team for Discovering and Applying Functions of Beneficial Endophytic Bacteria in Higher Education Institutions in Yunnan Province.

[#]These authors contributed equally to this work.

*Corresponding author. E-mail: llf8839@sina.com

Received: 2023-12-01; Accepted: 2024-03-06; Published online: 2024-03-29

Bibliometric analysis of plant endophytic fungal diversity research based on Web of Science Core Collection database and CiteSpace

ZHENG Hancaiyuan^{#1}, HUANG Xianhan^{#2}, LUO Zengyuan¹, DAI Xingxun¹, LIU Lufeng^{*1,3}

1 College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, Yunnan, China

2 CAS Key Laboratory for Plant Diversity and Biogeography of East Asia, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650201, Yunnan, China

3 State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Bio-resources in Yunnan, Kunming 650201, Yunnan, China

Abstract: [Background] Endophytes exist in almost all plants that have been studied so far, and plant hosts infected with endophytes often experience rapid growth and develop resistance to stress, diseases, and natural enemies. Studies have been conducted regarding the endophyte diversity, while few studies involve quantitative statistics and analysis. [Objective] To study the current research status and hotspots of endophytic fungal diversity by bibliometrics. [Methods] The relevant articles were retrieved from the Web of Science (WOS) Core Collection with the keywords of “endophytic fungal diversity and plant” and the time interval of 1992–2022. The number of articles, journals, research institutions, main authors, and keywords were analyzed and the distribution was visualized by CiteSpace. [Results] The keyword burst analysis showed that biodiversity, symbiosis, and soil were closely related to the period of article surging in this field. The cluster analysis of keywords yielded 9 keyword tags in 3 hot research directions. [Conclusion] The number of articles published in English about endophytic fungal diversity and plant has grown rapidly since 2019. Endophytic fungal diversity, promotion of host growth by endophytic fungi, and medicinal properties of secondary metabolites of endophytic fungi are currently the focuses of research in this field. In the future, high-impact authors and institutions should enhance collaboration and carry out in-depth and systematic research on the three hot spots and shortcomings in this field.

Keywords: plant; endophytic fungal diversity; bibliometric statistics; Web of Science; CiteSpace

内生真菌(endophytic fungi)一词由德国科学家 DeBarry 于 1886 年提出,并于 19 世纪开始对内生菌开始进行科学研究^[1]。植物内生菌是与植物相关的有益微生物,它们在整个或部分生命周期内侵入活体植物的组织,而不会引起明显的损害或疾病症状,也不会对植物产生任何负面影响^[2]。内生真菌普遍存在于各类植物的根、茎、叶、花、果实和种子中。据有关资料,仅植物体内可培养和未培养的内生菌数

量就达数百万种^[3]。大量研究表明,内生真菌对植物会产生多重积极影响,例如:可通过提高植物对营养元素的积累促进植物生长、可产生植物激素调节植物生长、增强植物在逆境条件下的胁迫抵抗能力等^[4-6]。另外,目前对内生真菌的研究表明,其多样性主要体现在宿主多样性^[7]、物种多样性^[8]、分布多样性^[9]等方面。现阶段,植物内生真菌相关方面的综述研究仍较少^[10],亟须深入挖掘。

近年来,随着相关科技文献数量显著增加,文献计量学受到高度重视。文献计量法通常采用数学与统计模型分析文献数量特征,该方法通过对文献量、作者等文献信息进行计量处理,实现研究领域中热点文献、热点主题及知识演进等的可视化分析,进而帮助研究者更好地掌握相关研究领域的动态变化和发展趋势^[11]。Web of Science (WOS)核心合集是全球最大、覆盖学科最多的综合性学术信息资源库,利用WOS强大的搜索能力和丰富的文献计量信息,可以快速准确地获得反映该领域发展趋势、最新发展和当前挑战的有价值的科学信息^[12]。截至目前,仍缺乏对植物内生真菌多样性研究进展的系统性探讨,因此开展植物内生真菌多样性进展的研究十分必要。基于WOS核心合集数据库对“植物内生真菌多样性”通过CiteSpace特有的关键词时区线和突现分析,进一步明确国内外与该领域相关的研究热点、研究进展、存在问题,为进一步深入研究提供良好的借鉴与参考。

1 数据与方法

1.1 数据来源和检索策略

检索选择WOS中的“Web of Science 核心合集”为数据源,于2023年11月1日进行检索,策略如下:以TS=(endophytic fungal diversity and plant)为检索式,时间跨度为1991年1月1日至2022年12月31日。文献纳入标准:检索语种为英语(English),文献排除标准:(1)研究方向为昆虫学、食品科学、工程学、动物学、兽医学、能源燃料、公共环境职业健康、病毒学、解剖学、人类学、教育研究、内分泌学、渔业、普通内科、科学哲学、数学、营养学、古生物学、影像医学和光谱学;(2)文献类型为会议摘要、会议录用、重复发表、书籍章节、社科材料和信函等;(3)非英文文献;(4)与主题无关的文

献。通过逐篇阅读文献标题、摘要、关键词和研究方向等内容,排除与主题无关的文章,最终确定1 373篇相关文献数据。

1.2 分析方法

本研究利用WOS中的“分析检索结果”功能,对检索得到的“植物内生真菌多样性”研究论文进行统计分析。采用文献计量法,从论文的发表年份、数量、研究机构、作者、期刊、研究类群、研究方法、研究热点及关键词词频等方面进行统计和比较。并下载相关数据保存为纯文本文件(.TXT格式)。使用Microsoft Excel 2019软件制作文献发表量变化趋势及文献引用频率趋势图,并利用CiteSpace文献计量分析软件(6.2.R7)创建可视化图谱,分析植物内生真菌多样性相关出版物中的作者、机构和关键词等特征。CiteSpace软件设置如下:时间跨度为1991–2022年,时间切片为“1”,术语来源:全选,选择标准:前50,节点类型:1次1个,可视化:集群视图——静态,显示合并网络。节点代表作者、机构和关键词,节点越大,发表的论文越多,每个节点的颜色代表论文发表的时间,节点之间的链接代表合作关系。连接数代表合作的强度,连线越多,表示2个节点之间的关系越强。连线的颜色表示2个节点何时开始合作。中心性是用来衡量一个元素的重要性的指标。如果中心性大于0.1,则认为该元素相对重要,并以紫色外环表示,紫色外环越厚,则说明其中心性越强^[13]。

2 结果与分析

2.1 出版物和时间趋势

出版物数量的历时变化,在一定程度上反映了该领域研究历史和发展情况的动态演变过程^[14]。WOS核心合集数据库在1991–2022年间共收录了1 373篇关于植物内生真菌多样性的文献。如图1所示,该领域文献的年发文量

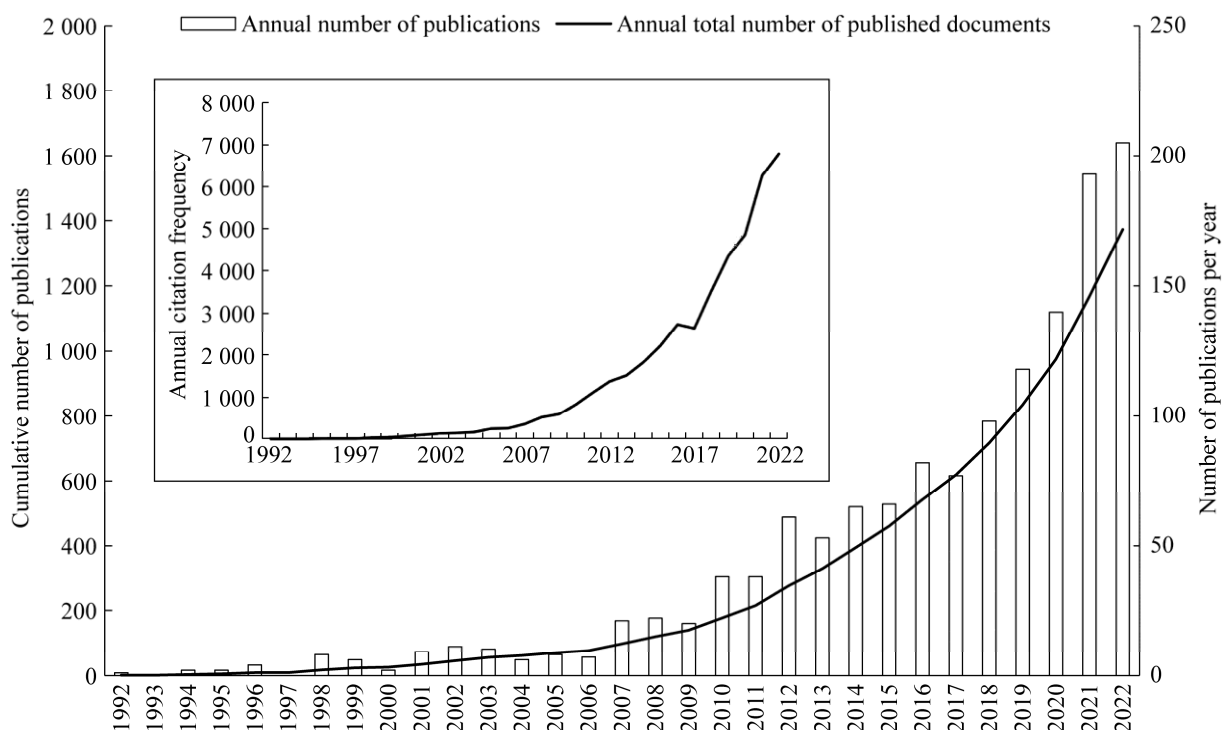


图 1 1991–2022 年文献发表量变化趋势及文献引用频率趋势图

Figure 1 The trend chart of article publication volume and article citation frequency from 1991 to 2022.

从 1992 年(1 篇, 0.07%)至 2006 年(7 篇, 0.51%)呈缓慢增长的趋势。从 2007 年(21 篇, 1.53%)至 2018 年(94 篇, 7.12%)呈稳定增长的趋势。从 2019–2022 年, 累计发文量达 755 篇, 占 WOS 核心合集数据库所记载文献量的 54.90%, 并且该时期年均发文量在 100 篇以上, 呈快速增长的趋势。表明从 2019 年开始, 研究者对植物内生真菌多样性领域的关注度日益增长, 并且年累计发文量和年引用频率整体呈稳定上升趋势, 该领域受到广大研究者的高度关注。

2.2 文献期刊分析

对刊载相关研究文献的期刊进行统计分析, 可确定该领域的重要期刊, 有助于相关研究者选择重点期刊进行文献查阅^[15], 也能为研究者选择投稿期刊与文献研究提供有价值的参考^[16]。通过对 1 373 篇文献进行统计分析, 发

现这些文献发表在 314 种期刊上。由表 1 可知, 在 314 种期刊中, *Frontiers in Microbiology* 是发表文献最多的期刊, 共计 67 篇, 占总发文量的 4.87。此外, 发文量前十的期刊所发表的文献占总发文量的 26.74%。发文量前十的期刊影响因子总和为 55.7, 平均期刊影响因子为 5.74, 这说明在数据库中关于植物内生真菌多样性的文献质量大部分较高。

对刊载相关研究文献的引用频次进行统计分析, 可发现该领域影响力较高的文献, 有助于相关研究者对该研究领域进行初步了解^[15]。由表 2 可知, 在 1 373 篇文献中, 被引频次最高的是“Natural products: a continuing source of novel drug leads”, 被引 1 808 次; 其次是“Fungal endophytes: diversity and functional roles”, 被引 1 759 次。结合被引频次排名前 10 的文献发现, 植物内生真菌多样性研究近年

表 1 1992–2022 年文献发表量前 10 期刊及其影响因子

Table 1 Top 10 journals and their impact factors in 1992–2022

序号 No.	期刊 Journal	论文数量 Number of papers	论文百分比 Percentage of papers (%)	影响因子 Impact factor (2022)
1	<i>Frontiers in Microbiology</i>	67	4.87	5.2
2	<i>Fungal Ecology</i>	64	4.65	2.9
3	<i>Fungal Diversity</i>	42	3.05	20.3
4	<i>PLoS One</i>	39	2.83	3.7
5	<i>Journal of Fungi</i>	35	2.54	4.7
6	<i>Microbial Ecology</i>	28	2.04	3.6
7	<i>South African Journal of Botany</i>	25	1.82	3.1
8	<i>World Journal of Microbiology Biotechnology</i>	24	1.74	4.1
9	<i>Frontiers in Plant Science</i>	22	1.60	5.6
10	<i>Fungal Biology</i>	22	1.60	2.5

表 2 1992–2022 年被引频次前 10 的文献

Table 2 Top 10 cited papers in 1992–2022

序号 No.	题目 Title	期刊和影响因子 Journal and impact factor	发表年份 Publication year	被引频次 Citation frequency
1	Natural products: a continuing source of novel drug leads	<i>Biochimica et Biophysica Acta-General Subjects</i> IF: 3 (2022)	2013	1 808
2	Fungal endophytes: diversity and functional roles	<i>New Phytologist</i> IF: 9.4 (2022)	2009	1 759
3	Fungal endophytes limit pathogen damage in a tropical tree	<i>Proceedings of the National academy of Sciences of the United States of America</i> IF: 11.1 (2022)	2003	887
4	Fungal endophytes: a continuum of interactions with host plants	<i>Annual Review of Ecology and Systematics</i> IF: 6.18 (2003)	1998	756
5	Endophytic fungi: a source of novel biologically active secondary metabolites	<i>Mycological Research</i> IF: 2.81 (2011)	2002	753
6	Diversity and host range of foliar fungal endophytes: are tropical leaves biodiversity hotspots?	<i>Ecology</i> IF: 4.8 (2022)	2007	653
7	Fungal endophytes from higher plants: a prolific source of phytochemicals and other bioactive natural products	<i>Fungal Diversity</i> IF: 20.3 (2022)	2010	436
8	Fungal endophytes: unique plant inhabitants with great promises	<i>Applied microbiology and Biotechnology</i> IF: 5 (2022)	2011	406
9	More than 400 million years of evolution and some plants still can't make it on their own: plant stress tolerance via fungal symbiosis	<i>Journal of Experimental Botany</i> IF: 6.9 (2022)	2008	369
10	Root endophyte <i>Colletotrichum tofieldiae</i> confers plant fitness benefits that are phosphate status dependent	<i>Cell</i> IF: 64.5 (2022)	2016	366

来在内生真菌多样性、促进宿主生长和次生代谢产物药用性方面都有影响力较高的文献发表。

2.3 作者、研究机构及合作情况

2.3.1 作者分析

检索到的 1 373 篇论文共包含 5 863 位作者。其中, 发表论文最多的作者是来自美国亚利桑那大学农业与生命科学学院(The University of Arizona College of Agriculture and Life Sciences)的 A. Elizabeth Arnold 和来自泰国皇太后大学(Mae Fah Luang University)的 Kevin D. Hyde, 发表论文数目分别为 33 篇和 22 篇, 论文发表量分别占总论文发表量的 2.40% 和 1.60% (表 3)。由图 2 可知, A. Elizabeth Arnold、Kevin D. Hyde 和 Luiz Henrique Rosa 等作者圆环相对较大, 且外环颜色较深, 说明这些作者是植物内生真菌领域研究者合作的中心; 近 5 年来, 以 ARNOLD A. Elizabeth、ROSA Luiz Henrique、LEE In-Jung、LUMYONG Saisamorn、ROSA Luiz

表 3 1992–2022 年论文发表量前 10 的作者

Table 3 Top 10 authors with published papers in 1992–2022

序号 No.	作者 Author	论文数量 Number	占论文百分比 Percentage of of papers papers (%)
1	ARNOLD A. Elizabeth	33	2.40
2	HYDE Kevin D.	22	1.60
3	ROSA Luiz Henrique	19	1.38
4	ROSA Carlos A.	14	1.02
5	LUMYONG Saisamorn	14	1.02
6	U'REN Jana M.	13	0.95
7	LEE In-Jung	13	0.95
8	BEZERRA Jadson D. P.	13	0.95
9	KIM Jong-Guk	12	0.87
10	ZABALGOGEAZCOA Inigo	11	0.80

Henrique、KIM Jong-Guk 等研究者形成了合作中心, 虽然部分研究者发文量不多, 但已经成为未来推动植物内生真菌研究领域的新兴动

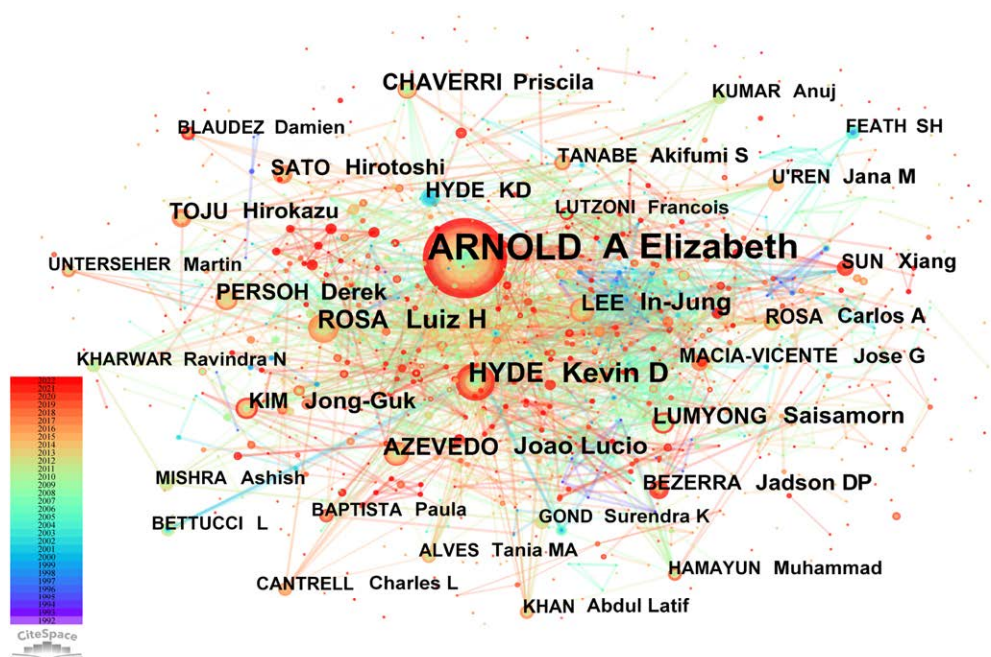


图 2 主要作者之间的合作关系图

Figure 2 Collaboration diagram among the major author.

力;另外,该领域近5年出现了许多新的研究者,证明该领域受到更多的研究者关注。

2.3.2 研究机构分析

检索到的1373篇论文共来自1867个研究机构。由表4可知,论文发表量最多的研究机构为中国科学院(Chinese Academy of Sciences),共发表论文62篇,占论文总发表量的4.52%;其次是法国国家科学研究中心(French National Centre for Scientific Research)和埃及知识库(Egyptian Knowledge Bank),发表论文量均为31篇,占论文总发表量的2.26%。为深入探究主要研究机构间的合作关系,筛选论文发表量超过5篇的研究机构进行统计,并绘制主要机构之间的合作关系图(图3)。从图3中发现,虽然从事该领域研究的工作单位较多,但以少数单位为核心:中国科学院(Chinese Academy of Sciences)、美国农业部(United States Department of Agriculture)、埃及知识库(Egyptian Knowledge Bank)、泰国皇太后大学(Mae Fah Luang University)和法国国家科学研究中心(French National Centre for Scientific Research)中心性较高,证明以上研究机构对于植物内生真

菌领域的研究具有指导意义,并同其他机构开展了大量的合作。

2.4 关键词分析

2.4.1 关键词共现分析

关键词共现分析可以通过对文献中出现频率高且具有重要中心性的关键词进行研究,并以可视化图谱的形式展示出来,以揭示植物内生真菌多样性领域的研究热点^[17]。该方法可以帮助研究者深入了解该领域的发展趋势和前沿方向,从而为未来的研究提供有价值的参考。表5按频率显示了前20个关键词,植物内生真菌多样性研究领域出现频率最高的关键词是多样性(diversity, 772次),其次是内生真菌(endophytic fungi, 641次)、植物(plant, 321次)。通过对该领域的关键词网络进行可视化分析(图4),中心性高的关键词为感染(infection)、根系(root)、植物(plant)、叶片(leaves)、生物多样性(biodiversity),并且以上关键词中心性均 ≥ 0.1 ,表明这几个关键词与周围其他的关键词之间联系密切(中心性 ≥ 0.1 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)。

表4 1992–2022年论文发表量前10的研究机构

Table 4 Top 10 research institutions in terms of published papers in 1992–2022

序号 No.	研究机构 Research institution	论文数量 Number of papers	占论文百分比 Percentage of papers (%)
1	中国科学院 Chinese Academy of Sciences	62	4.52
2	埃及知识库 Egyptian Knowledge Bank	31	2.26
3	法国国家科学研究中心 French National Centre for Scientific Research	31	2.26
4	美国农业部 United States Department of Agriculture	30	2.19
5	美国亚利桑那大学 University of Arizona	27	1.97
6	泰国皇太后大学 Mae Fah Luang University	26	1.89
7	巴西米纳斯联邦大学 Federal University of Minas Gerais	25	1.82
8	法国国家科学研究中心 French National Centre for Scientific Research	24	1.75
9	巴西圣保罗大学 Redirected from University of Sao Paulo	22	1.60
10	中国科学院大学 University of Chinese Academy of Sciences	22	1.60



图 3 主要研究机构之间的合作关系图
Figure 3 Collaboration diagram among the major research institutions.

表 5 出现频率排名前 20 的关键词
Table 5 Top 20 keywords in frequency

序号 No.	关键词 Keyword	频次 Frequency	中心性 Centrality
1	Diversity	772	0.08
2	Endophytic fungi	641	0.08
3	Plant	321	0.14
4	Identification	211	0.09
5	Community	193	0.08
6	Leaves	192	0.14
7	Growth	167	0.08
8	Biodiversity	116	0.13
9	Colonization	101	0.06
10	Soil	96	0.02
11	Host	95	0.06
12	Roots	89	0.15
13	Bacterial	87	0.03
14	Biological control	77	0.06
15	Arbuscular mycorrhizal fungi	76	0.03
16	Metabolites	75	0.05
17	Secondary metabolites	75	0.04
18	Antimicrobial activity	73	0.05
19	Evolution	70	0.06
20	Fungal diversity	69	0.03

2.4.2 关键词聚类结果

时间线图可展现各个研究热点的时间跨度以及不同研究热点之间的相互联系^[18]，进而展示近 30 年来植物内生真菌研究热点变化及未来研究趋势。由图 5 所示，利用软件以每 5 年作为一个时区，将所纳入 737 个关键词结合发表时间和聚类得出 1992 年至今植物内生真菌研究领域文献关键词时间线图谱。分析显示，内生真菌(endophytic fungi)、生物多样性(biodiversity)、真菌群落(fungal community)、基因(gene)等相关关键词在时间线的前、中、后期均有分布。

聚类分析是一种用于将数据点归为相似组的无监督学习方法^[19]。在共现网络的基础上，通过将文献关键词运用对数似然比(log-likelihood ratio, LLR)算法得到聚类模块值(Q)，Q>0.3 表明聚类有效；聚类轮廓性指数(S)>0.7 表明聚类分析结果可信(图 5)。文献纳入关键词 737 个，连线 1 749 条，Q=0.506 4，表明有聚类意义；

学分子结构、药理性应用等。#3 生物多样性(biodiversity)、#7 系统学(systematics)、#8 真菌多样性(fungi diversity)聚焦于植物内生真菌与生态系统多样性方面的研究。

2.4.3 关键词突现分析

关键词突现是指关键词在短时间内出现频次显著增加,表明这段时间内对其关注度增高,可以展示不同时期研究热点的转移以及据此判断潜在的发展趋势与前沿研究^[20],使用“begin”和“end”分别代表突变词出现及结束的时刻,“strength”则代表关键词突变的强度,强度越高说明影响力越大。蓝色线条代表时间间隔,红

色线条则代表关键词突变发生的时间间隔。由图 6 所示,在过去 30 年的研究发展历程中,共出现突现词 25 个,涵盖了植物种类、植物器官、内生真菌多样性、分子鉴定、互利共生、次生代谢产物等方面。叶片(leaves)、乔木(trees)、生物多样性(biodiversity)和侵染(infection)等关键词在突现图谱中强度较高,影响力较大。

从时间轴顺序上可看出,1992–2006 年的植物内生真菌多样性研究主要集中于植物叶片、根际、生物多样性、生物抗性,涉及关键词为棕榈树(palm)、叶片(leaves)、根际(rhizosphere)、生物多样性(biodiversity)、群落(community)、抗性

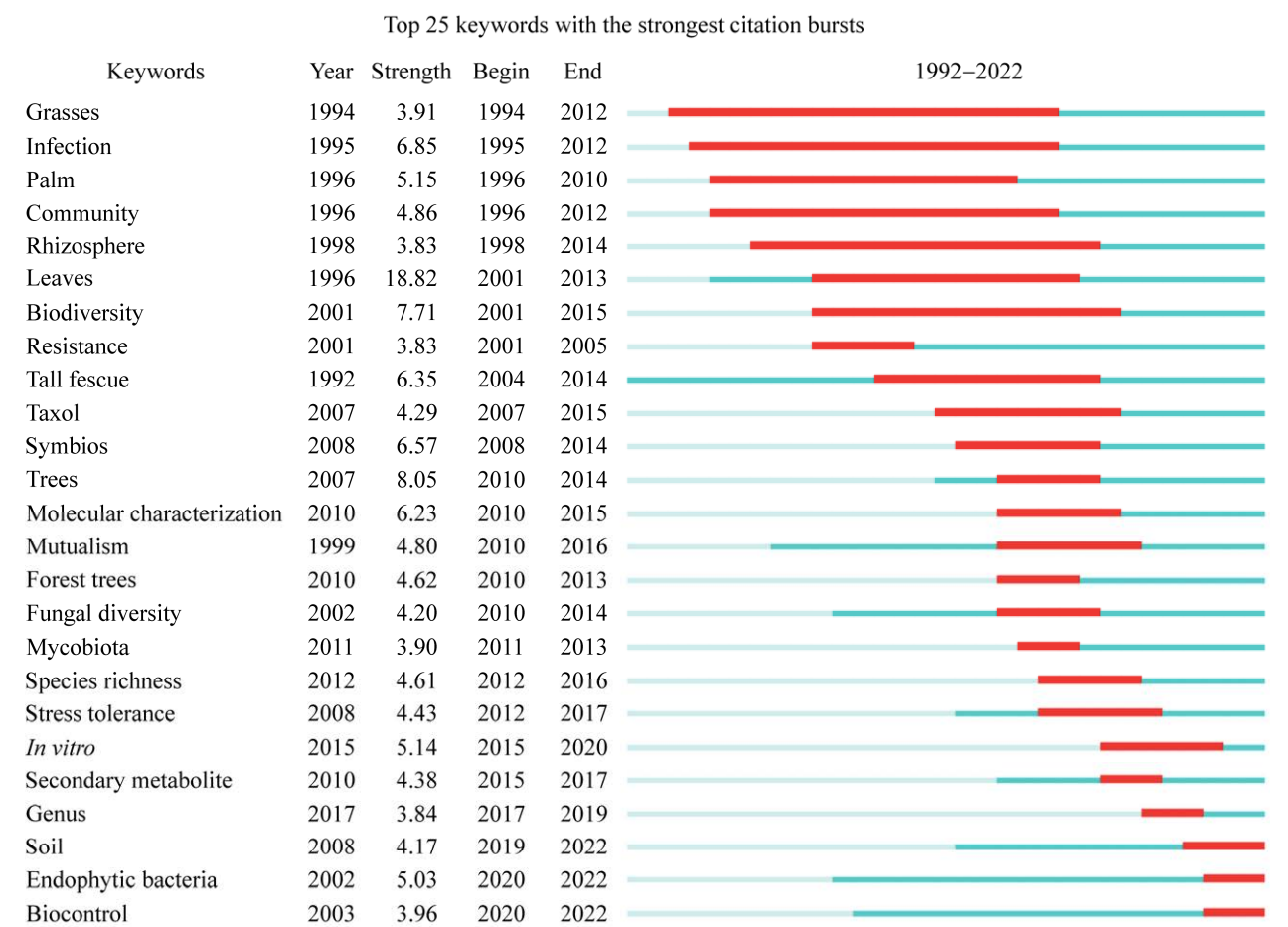


图 6 文献关键词突现图谱 蓝色线条代表时间间隔,红色线条代表关键词突变发生的时间间隔
Figure 6 Literature keyword emergence map. The blue line represents the time interval, and the red line represents the time interval when the keyword mutation occurs.

(resistance)。2007–2018 年,植物内生真菌多样性研究热点逐渐转向内生真菌与植物的互利共生、树木内生真菌、真菌区系、次生代谢产物、物种分类学、内生真菌在植物体外的研究,涉及关键词为物种丰富度(species richness)、真菌区系(mycobiota)、互利共生(mutualism)、共生(symbiosis)、抗逆性(stress tolerance)、次生代谢产物(secondary metabolite)、紫杉醇(taxol)、分类属(genus)、体外(*in vitro*)。随着 2019–2022 年植物内生真菌研究的不断加深,研究内容逐步拓展至内生真菌与根系土壤的关系、内生真菌与内生细菌、生物防治等方面的研究,涉及关键词为土壤(soil)、内生细菌(endophytic bacteria)、生物防治(biocontrol)。

3 讨论与展望

3.1 总论

基于 WOS 核心合集数据库,通过文献计量学分析发现,从 2007 年开始,植物内生真菌多样性研究方向的论文数量增长显著,以植物科学、生物制药领域方面的发文最多。从 1992 年起,植物内生真菌多样性发表的论文量最多的机构是中国科学院,中国科学院大学也在发文量前十的机构中,但通过被引文献和该领域主要作者分析发现,虽然我国已成为植物内生真菌多样性研究的主力军,但我国在高被引、高影响力论文和高影响力研究者方面仍与美国、泰国、韩国等国家存在差距;通过对比 1992–2022 年间 3 段文献发文量变化较大的时间段发现,叶片(leaves)、生物多样性(biodiversity)、侵染(infection)是 1992–2006 年间影响力较强的突现关键词,而共生(symbiosis)、乔木(trees)、分子鉴定(molecular characterization)则是 2007–2019 年间影响力较强的突现关键词,土壤(soil)、内生细菌(endophytic bacteria)、生物防治(biocontrol)则是

2019–2022 年出现的突现关键词。同时结合关键词时区线图谱的 9 个聚类标签分析发现,内生真菌基因、群落的系统分类学、内生真菌与植物共同体、环境因素造成的植物内生真菌的生物多样性、植物内生真菌次生代谢产物及其运用等方面的研究成为主导趋势。根据以上分析结果,本文将现阶段植物内生真菌多样性研究的主要方向归纳为内生真菌多样性、内生真菌促进宿主植物生长、内生真菌次生代谢产物。

3.2 研究热点

3.2.1 内生真菌多样性

植物内生真菌复杂、多样。子囊菌门(*Ascomycota*)、担子菌门(*Basidiomycota*)、毛霉菌门(*Mucoromycota*)是内生真菌的 3 个优势门类,伞菌纲(*Agaricomycetes*)、座囊菌纲(*Dothideomycetes*)、散囊菌纲(*Eurotiomycetes*)、被孢霉亚门(*Mortierellomycotina*)、毛霉亚门(*Mucoromycotina*)、酵母菌纲(*Saccharomycetes*)、粪壳菌纲(*Sordariomycetes*)是其 7 个优势纲(亚门)^[21]。

在植物类群上,番茄(*Solanum lycopersicum*)中内生真菌优势目则为煤炱目(*Capnodiales*)、格孢菌目(*Pleosporales*)、扁棒壳目(*Acrospemales*)、刺盾炱目(*Chaetothyriales*)、散囊菌目(*Eurotiales*)^[22];中国北方的禾本科植物克氏针茅(*Stipa krylovii*)内生真菌以小皮伞属(*Marasmius*)、镰孢菌属(*Fusarium*)和枝顶孢霉属(*Acremonium*)为优势属^[23];29 种来自中国香港的中草药植物内生真菌优势属为链格孢属(*Alternaria*)、刺盘孢属(*Colletotrichum*)、茎点霉属(*Phoma*)和拟茎点霉属(*Phomopsis*)^[24]。由于自然界植物类群丰富多样,而且影响内生真菌组成的因素众多,现阶段仍缺乏对植物优势内生真菌种群的系统探讨。

在植物的内生真菌多样性上,除同一地区、同一生境下 5 种盐生植物内生真菌存在差异^[25],同类植物不同部位的内生真菌也存在差异。其

中,蛇足石杉(*Huperzia serrata*)植物茎、叶中内生真菌的丰度相较于根部更高^[26],而绒毛草(*Holcus lanatus*)茎部菌落结构相对独立,叶与根中菌落结构则较为相似^[27]。同时,内生真菌丰富度与植物年龄存在密切关联,其中阿萨伊果(*Euterpe oleracea*)叶片的内生真菌多样性随着植物年龄的增长而增强^[28]。另外,外界条件是影响植物内生真菌丰富度的另一大因素。据统计,低纬度地区比高纬度地区的禾本科植物内生真菌多样性高^[29],而且群落组成与降水和温度的纬度梯度密切相关^[30];同时,通过研究北极高地 4 种维管植物发现,因极端气候导致的同种植物内生真菌种群数量和结构相较于非极地地区呈现显著特异性^[31]。在农业种植体系中,过量化肥和农药使用会严重降低植物根部内生真菌丰富度,而且施用有机肥农田的内生真菌多样性比施用化肥的多样性更高^[32]。因此,植物内生真菌多样性受到植物种类、部位、年龄,生长环境、气候条件和农业种植模式等多种因素的综合影响。

3.2.2 内生真菌促进宿主生长

植物内生菌几乎普遍存在于各类植物的组织中,它们构成了植物防御与营养吸收的共同体^[33-34]。研究表明,内生真菌和宿主之间的互利共生是通过信号交流和调控建立并维持的,并且内生真菌与宿主之间的信息交流并非单向的,而是双向的^[35]。这种信号交流和调控包括了多种已知的途径:化学信号的传递^[32]、基因表达的调控^[36]及共生关系的维持^[37]等,这也为内生真菌促进宿主植物生长发育提供了有力支撑。

内生真菌对宿主植物生长发育的促进作用表现在改良土壤团粒结构,产生有助于植物生长的化合物,提高植物对氮、磷、钾养分的利用率,提高植物抗性,以及影响植物生理生化过程等多个方面。首先,寄生于根系和根际内

生真菌可对土粒结构进行改良,参与土壤肥力调节和养分释放^[38],因而根系内生真菌成为生态系统中物质和能量流动的主要动力^[39]。其次,内生真菌可在植物体外产生吡啶衍生物、倍半萜和二乙酰胺、吡啶乙酸等抑制其他真菌生长或促进植物生长的化合物^[40],并诱导植物产生系统抗性^[41]。此外,在对软紫草(*Arnebia euchroma*)将内生真菌 *Phialocephala fortinii*、*Rhizodermea veluwensis* 和 *Rhizoscyphus* sp. 接种到山柳(*Salix pseudotangii*)幼苗上,显著提升了该种幼苗对钾元素的吸收^[42];当将 *Cladorrhinum foecundissimum* 接种于棉花根部,也促进棉花对磷的吸收^[43]。内生真菌枫香拟茎点霉(*Phomopsis liquidambaris*) B3 能提高花生(*Arachis hypogaea* L.)产量,并显著提高结瘤率和 N₂ 固定率^[44];并且部分从植物组织中提取到的内生真菌已用于生物肥料中,用于提高作物产量^[45]和抗性^[46];另外,内生真菌间接促进宿主生长的方式还有影响植物的光合作用、促进生物积累量^[47]等。

3.2.3 内生真菌次生代谢产物药用性

内生真菌不仅能够产生与植物理化性状相似的活性成分,在丰富了植物天然产物化学和生物多样性的同时^[48],显著地拓展了内生真菌次生代谢产物的药用性^[49]。当前,对内生真菌的研究多集中在药用植物上,探索新的具有药用活性的物质也逐渐成为国内外研究者的研究热点^[50-51]。从 1993 年,美国蒙大拿州立大学 Strobel 等从短叶红豆杉的韧皮部分离到一株产新型抗癌物质紫杉醇的内生真菌开始,更多的研究者开始从植物内生真菌领域出发,寻找类似的活性化合物运用于生物制药领域^[52]。

内生真菌次生代谢产物的药用性主要表现在次生代谢产物的抗病毒、抗菌、抗癌、抗氧化、消炎等作用。通过对药用植物内生真菌次生代谢产物成分的鉴定,如紫杉醇^[53]、喜树碱^[54]和

鬼臼毒素^[55]等,证明了不同植物内生真菌的代谢产物对特定疾病病毒有抑制作用;从巴西肖乳香(*Schinus terebinthifolia*)分离得到的次生代谢产物表现出抗氧化活性,并对革兰氏阳性菌(Gram positive)金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)、耐甲氧西林金黄色葡萄球菌(methicillin resistant *Staphylococcus aureus*)、肠炎沙门氏菌(*Salmonella enteritidis*)均有良好的抗菌活性^[56];北美桃儿七属(*Podophyllum*)所产生的鬼臼毒素是抗癌药物依托泊苷和天尼泊苷的前体,研究证明,鬼臼毒素的产生与北美桃儿七属内生真菌次生代谢产物有着密不可分的联系^[37]。从海洋马尾藻属(*Sargassum*)分离得到的内生真菌次生代谢产物对多种癌细胞具有较强的细胞毒性作用^[57]。由此可见,植物内生真菌次生代谢产物可为现阶段人类研究难以攻克的治疗药物开辟新思路,具有巨大的研究潜力。

3.3 不足与展望

本文基于 WOS 核心合集数据库,应用 CiteSpace 系统地对植物内生真菌多样性的文献进行了深入分析和讨论,仍发现该领域研究具有诸多不足:(1)受制于植物内生真菌数量庞大,并且其宿主植物种类、生境影响因素复杂多样,缺乏系统地对植物内生真菌优势种、属的分类学组成研究。(2)本文阐述了内生真菌对宿主植物具有改良土壤团粒结构、提高植物对氮、磷、钾养分利用率和提高植物抗性等促生长功能,但仍需加强对该方面的应用转化。(3)植物内生真菌次生代谢产物表现出较强的抗病毒、抗菌、抗癌、抗氧化、消炎等作用,但这部分研究仍处于初步阶段,仍需深入挖掘。针对上述的不足,需要整合发文量较大、影响力较强的机构和作者开展更深入的研究,进一步挖掘植物内生真菌生物资源的潜力。

REFERENCES

- [1] PETRINI O. Fungal Endophytes of Tree Leaves[M]. Microbial Ecology of Leaves. New York: Springer, 1991: 179-197.
- [2] MATERATSKI P, VARANDA C, CARVALHO T, DIAS AB, CAMPOS MD, REI F, DO ROSÁRIO FÉLIX M. Spatial and temporal variation of fungal endophytic richness and diversity associated to the phyllosphere of olive cultivars[J]. Fungal Biology, 2019, 123(1): 66-76.
- [3] ZHANG LH, LI XH, SONG XH, BIAN CZ, KANG XT, ZHAO JQ, QIAO HX, GONG YZ. Assessment of the endophytic fungal composition of *Lactobacillus plantarum* and *Enterococcus faecalis*-fermented *Astragalus membranaceus* using single-molecule, real-time sequencing technology[J]. Frontiers in Veterinary Science, 2022, 9: 880152.
- [4] ZUO YL, HU QN, ZHANG KX, HE XL. Host and tissue affiliations of culturable endophytic fungi associated with xerophytic plants in the desert region of Northwest China[J]. Agronomy, 2022, 12(3): 727.
- [5] ALY AH, DEBBAB A, KJER J, PROKSCH P. Fungal endophytes from higher plants: a prolific source of phytochemicals and other bioactive natural products[J]. Fungal Diversity, 2010, 41(1): 1-16.
- [6] FONTANA DC, de PAULA S, TORRES AG, de SOUZA VHM, PASCHOLATI SF, SCHMIDT D, NETO DD. Endophytic fungi: biological control and induced resistance to phytopathogens and abiotic stresses[J]. Pathogens, 2021, 10(5): 570.
- [7] NISA H, KAMILI AN, NAWCHOO IA, SHAFI S, SHAMEEM N, BANDH SA. Fungal endophytes as prolific source of phytochemicals and other bioactive natural products: a review[J]. Microbial Pathogenesis, 2015, 82: 50-59.
- [8] FERREIRA-SILVA A, HUGHES FM, ROSA CA, ROSA LH. Higher turnover of endophytic fungal assemblages in the tissues of globose cactus *Melocactus ernestii* from Brazilian semi-arid biome[J]. Symbiosis, 2021, 85(1): 79-91.
- [9] KENNEDY JP, ANTWIS RE, PREZIOSI RF, ROWNTREE JK. Evidence for the genetic similarity rule at an expanding mangrove range limit[J]. American Journal of Botany, 2021, 108(8): 1331-1342.
- [10] 廖飞, 何洁, 任亚玲, 韩昌权, 钟孟淮, 胡延春. 基于 Web of Science 数据库的植物内生真菌研究的可视化分析[J]. 微生物学杂志, 2024, 44(3): 86-95.

- LIAO F, HE J, REN YL, HAN CQ, ZHONG MH, HU YC. Visual analysis of research status and trend of endophytic fungi based on Web of Science database[J]. Journal of Microbiology, 2024, 44(3): 86-95 (in Chinese).
- [11] 马勤, 杨继涛, 琚彤军, 李秧秧, 康博文, 同金霞. 基于文献计量的植物 WUE 研究现状分析[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(6): 266-272.
- MA Q, YANG JT, JU TJ, LI YY, KANG BW, TONG JX. An analysis of present status in plant water use efficiency research based on bibliometrics[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(6): 266-272 (in Chinese).
- [12] 付全升, 黄先寒, 申仕康, 邓涛, 孙航. 基于数据库的植物功能性状研究现状文献计量学分析[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(1): 228-240.
- FU QS, HUANG XH, SHEN SK, DENG T, SUN H. Bibliometric analysis of the status quo of plant functional traits research based on databases across the Web of Science[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2021, 27(1): 228-240 (in Chinese).
- [13] 王佳琳, NALISA DL, 李映, 姜宏卫. 2001–2022 年青蒿琥酯的文献计量学分析[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2023. <https://link.cnki.net/urlid/11.5699.R.20231023.0916.002>.
- WANG JL, NALISA DL, LI Y, JIANG HW. Worldwide research trends on artesunate: a bibliometric analysis from 2001 to 2022[J]. Modernization of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica-World Science and Technology, 2023. <https://link.cnki.net/urlid/11.5699.R.20231023.0916.002> (in Chinese).
- [14] CHEN CM, CHEN Y, HOU JH, LIANG YX. 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.
- [15] 吴健, 王敏, 靳志辉, 吴建强, 沙晨燕, 齐晓宝, 唐浩, 黄沈发. 土壤环境中多环芳烃研究的回顾与展望: 基于 Web of Science 大数据的文献计量分析[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1085-1096.
- WU J, WANG M, JIN ZH, WU JQ, SHA CY, QI XB, TANG H, HUANG SF. Review and prospect of research on polycyclic aromatic hydrocarbons in soil environment: a bibliometric analysis based on megadata of Web of Science[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(5): 1085-1096 (in Chinese).
- [16] 罗斌圣, 龙春林. 民族生态学研究的文献计量学可视化分析[J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1510-1519.
- LUO BS, LONG CL. Bibliometric visualization analysis of ethnic ecology research[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(4): 1510-1519 (in Chinese).
- [17] 陈芳, 张士靖. 基于知识图谱的我国医院图书馆研究热点和前沿分析[J]. 中华医学图书情报杂志, 2016, 25(8): 19-23.
- CHEN F, ZHANG SJ. Knowledge mapping-based analysis of hot spots and frontiers in studies on domestic hospital libraries[J]. Chinese Journal of Medical Library and Information Science, 2016, 25(8): 19-23 (in Chinese).
- [18] 魏燕, 童丽梅, 王熙玮, 郭盛, 钱大玮, 段金厥, 张芳. 枸杞多糖类物质研究现状及发展动态的文献计量学分析[J]. 中草药, 2022, 53(24): 7843-7854.
- WEI Y, TONG LM, WANG XW, GUO S, QIAN DW, DUAN JA, ZHANG F. Bibliometric analysis of research status and development of polysaccharides in *Lycii Fructus*[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2022, 53(24): 7843-7854 (in Chinese).
- [19] 刘晓轩, 张驰, 黄思琪, 张伟龙, 陈思雅, 孔雨朦, 周敏, 张喜利, 刘文龙. 黄精多糖类物质研究现状及发展动态的文献计量学分析[J]. 中草药, 2023, 54(21): 7130-7141.
- LIU XX, ZHANG C, HUANG SQ, ZHANG WL, CHEN SY, KONG YM, ZHOU M, ZHANG XL, LIU WL. Bibliometric analysis of current status and development trend of polysaccharide from *Polygonati rhizoma*[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2023, 54(21): 7130-7141 (in Chinese).
- [20] 王艳秋, 孟翔鹤, 秦静波, 江泽强, 李竹青, 张潞潞, 赵蔚波, 李倩茹, 闫圣, 王济. 基于 Citespace 的中医药治疗过敏性紫癜可视化分析[J]. 中国实验方剂学杂志, 2020, 26(10): 173-179.
- WANG YQ, MENG XH, QIN JB, JIANG ZQ, LI ZQ, ZHANG LL, ZHAO WB, LI QR, YAN S, WANG J. Visualization analysis of henoch-schonlein purpura treated by traditional Chinese medicine based on CiteSpace[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2020, 26(10): 173-179 (in Chinese).
- [21] YADAV AN, KOUR D, KAUR T, DEVI R, YADAV A. Endophytic fungal communities and their biotechnological implications for agro-environmental sustainability[J]. Folia Microbiologica, 2022, 67(2): 203-232.
- [22] DONG CJ, WANG LL, LI Q, SHANG QM. Epiphytic and endophytic fungal communities of tomato plants[J].

- Horticultural Plant Journal, 2021, 7(1): 38-48.
- [23] LI XY, WANG J, ZHANG SP, WANG HH, LI X, LI X, ZHANG HW. Distribution of fungal endophytes in roots of *Stipa krylovii* across six vegetation types in grassland of Northern China[J]. Fungal Ecology, 2018, 31: 47-53.
- [24] HUANG WY, CAI YZ, HYDE KD, CORKE H, SUN M. Biodiversity of endophytic fungi associated with 29 traditional Chinese medicinal plants[J]. Fungal Diversity, 2008, 33: 61-75.
- [25] KHALMURATOVA I, KIM H, NAM YJ, OH Y, JEONG MJ, CHOI HR, YOU YH, CHOO YS, LEE IJ, SHIN JH, YOON H, KIM JG. Diversity and plant growth promoting capacity of endophytic fungi associated with halophytic plants from the west coast of Korea[J]. Mycobiology, 2015, 43(4): 373-383.
- [26] SHEN ZH, LIU XB, YANG J, WANG YL, YAO K, HUO QM, FU YP, WEI YH, GUO B. The temporal and spatial endophytic fungal community of *Huperzia serrata*: diversity and relevance to huperzine A production by the host[J]. BMC Microbiology, 2022, 22(1): 281.
- [27] SÁNCHEZ MÁRQUEZ S, BILLS GF, DOMÍNGUEZ ACUÑA L, ZABALGOGEAZCOA I. Endophytic mycobiota of leaves and roots of the grass *Holcus lanatus*[J]. Fungal Diversity, 2010, 41(1): 115-123.
- [28] RODRIGUES KF. The foliar fungal endophytes of the Amazonian palm *Euterpe oleracea*[J]. Mycologia, 1994, 86(3): 376.
- [29] LORO M, VALERO-JIMÉNEZ CA, NOZAWA S, MÁRQUEZ LM. Diversity and composition of fungal endophytes in semiarid Northwest Venezuela[J]. Journal of Arid Environments, 2012, 85: 46-55.
- [30] GIAUQUE H, HAWKES CV. Climate affects symbiotic fungal endophyte diversity and performance[J]. American Journal of Botany, 2013, 100(7): 1435-1444.
- [31] ZHANG T, YAO YF. Endophytic fungal communities associated with vascular plants in the high Arctic zone are highly diverse and host-plant specific[J]. PLoS One, 2015, 10(6): e0130051.
- [32] XIA Y, SAHIB MR, AMNA A, OPIYO SO, ZHAO ZZ, GAO YG. Culturable endophytic fungal communities associated with plants in organic and conventional farming systems and their effects on plant growth[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 1669.
- [33] DONG X, JIANG FF, DUAN DD, TIAN Z, LIU HN, ZHANG YN, HOU FJ, NAN ZB, CHEN T. Contrasting effects of grazing in shaping the seasonal trajectory of foliar fungal endophyte communities on two semiarid grassland species[J]. Journal of Fungi, 2023, 9(10): 1016.
- [34] MOSADDEGHI MR, HOSSEINI F, HAJABBASI MA, SABZALIAN MR, SEPEHRI M. *Epichloë* spp. and *Serendipita indica* endophytic fungi: functions in plant-soil relations[J]. Advances in Agronomy, 2021, 165: 59-113.
- [35] YANG HJ, YE WW, MA JX, ZENG DD, RONG ZY, XU M, WANG YC, ZHENG XB. Endophytic fungal communities associated with field-grown soybean roots and seeds in the Huang-Huai region of China[J]. Peer J, 2018, 6: e4713.
- [36] ADELEKE BS, AYILARA MS, AKINOLA SA, BABALOLA OO. Biocontrol mechanisms of endophytic fungi[J]. Egyptian Journal of Biological Pest Control, 2022, 32(1): 46.
- [37] ALY AH, DEBBAB A, PROKSCH P. Fungal endophytes: unique plant inhabitants with great promises[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, 90(6): 1829-1845.
- [38] YU P, HOCHHOLDINGER F. The role of host genetic signatures on root-microbe interactions in the rhizosphere and endosphere[J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 1896.
- [39] DANG HL, ZHANG T, WANG ZK, LI GF, ZHAO WQ, LV XH, ZHUANG L. Succession of endophytic fungi and arbuscular mycorrhizal fungi associated with the growth of plant and their correlation with secondary metabolites in the roots of plants[J]. BMC Plant Biology, 2021, 21(1): 165.
- [40] CHAND K, SHAH S, SHARMA J, PAUDEL MR, PANT B. Isolation, characterization, and plant growth-promoting activities of endophytic fungi from a wild orchid *Vanda cristata*[J]. Plant Signaling & Behavior, 2020, 15(5): 1744294.
- [41] AKRAM S, AHMED A, HE PF, HE PB, LIU YL, WU YX, MUNIR S, HE YQ. Uniting the role of endophytic fungi against plant pathogens and their interaction[J]. Journal of Fungi, 2023, 9(1): 72.
- [42] YAMAJI K, WATANABE Y, MASUYA H, SHIGETO A, YUI H, HARUMA T. Root fungal endophytes enhance heavy-metal stress tolerance of *Clethra barbinervis* growing naturally at mining sites via growth enhancement, promotion of nutrient uptake and decrease of heavy-metal concentration[J]. PLoS One, 2016, 11(12): e0169089.

- [43] GASONI L, de GURFINKEL BS. The endophyte *Cladorrhinum foecundissimum* in cotton roots: phosphorus uptake and host growth[J]. Mycological Research, 1997, 101(7): 867-870.
- [44] XIE XG, ZHANG FM, YANG T, CHEN Y, LI XG, DAI CC. Endophytic fungus drives nodulation and N₂ fixation attributable to specific root exudates[J]. mBio, 2019, 10(4): e00728-19.
- [45] ADELEKE BS, BABALOLA OO. Biotechnological overview of agriculturally important endophytic fungi[J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2021, 62(4): 507-520.
- [46] MUKHERJEE A, BHOWMICK S, YADAV S, RASHID MM, CHOUHAN GK, VAISHYA JK, VERMA JP. Re-vitalizing of endophytic microbes for soil health management and plant protection[J]. 3 Biotech, 2021, 11(9): 399.
- [47] WANG Y, CHENG HY, CHANG F, ZHAO L, WANG B, WAN Y, YUE M. Endosphere microbiome and metabolic differences between the spots and green parts of *Tricyrtis macropoda* leaves[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 11: 599829.
- [48] RAJAMANIKYAM M, VADLAPUDI V, AMANCHY R, UPADHYAYULA SM. Endophytic fungi as novel resources of natural therapeutics[J]. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2017, 60: e17160542.
- [49] BEN SLAMA H, CHENARI BOUKET A, ALENEZI FN, POURHASSAN Z, GOLIŃSKA P, OSZAKO T, BELBAHRI L. Potentials of endophytic fungi in the biosynthesis of versatile secondary metabolites and enzymes[J]. Forests, 2021, 12(12): 1784.
- [50] DUAN XX, XU FF, QIN D, GAO TC, SHEN WY, ZUO SH, YU BH, XU JR, PENG YJ, DONG JY. Diversity and bioactivities of fungal endophytes from *Distylium chinense*, a rare waterlogging tolerant plant endemic to the Three Gorges Reservoir[J]. BMC Microbiology, 2019, 19(1): 278.
- [51] XING XK, GUO SX, FU JG. Biodiversity and distribution of endophytic fungi associated with *Panax quinquefolium* L. cultivated in a forest reserve[J]. Symbiosis, 2010, 51(2): 161-166.
- [52] FENG L, ZHANG AX, LI L, ZHANG XJ, WANG Z, TAN NH. Diversity of cultivable endophytic fungi in two *Rubia* plants and their potential for production of anti-tumour *Rubiaceae*-type cyclopeptides[J]. Letters in Applied Microbiology, 2021, 73(6): 759-769.
- [53] GUPTA S, CHATURVEDI P, KULKARNI MG, van STADEN J. A critical review on exploiting the pharmaceutical potential of plant endophytic fungi[J]. Biotechnology Advances, 2020, 39: 107462.
- [54] ALY AH, DEBBAB A, PROKSCH P. Fungal endophytes: secret producers of bioactive plant metabolites[J]. Die Pharmazie, 2013, 68(7): 499-505.
- [55] ADELEKE BS, BABALOLA OO. Pharmacological potential of fungal endophytes associated with medicinal plants: a review[J]. Journal of Fungi, 2021, 7(2): 147.
- [56] dos SANTOS Da ROCHA P, PAULA VMB, OLINTO SCF, dos SANTOS EL, de PICOLI SOUZA K, ESTEVINHO LM. Diversity, chemical constituents and biological activities of endophytic fungi isolated from *Schinus terebinthifolius* Raddi[J]. Microorganisms, 2020, 8(6): 859.
- [57] TARITLA S, KUMARI M, KAMAT S, BHAT SG, JAYABASKARAN C. Optimization of physicochemical parameters for production of cytotoxic secondary metabolites and apoptosis induction activities in the culture extract of a marine algal-derived endophytic fungus *Aspergillus* sp.[J]. Frontiers in Pharmacology, 2021, 12: 542891.