

植物促生根际菌在植物栽培中的应用研究计量分析

兰峰云¹, 方坤^{2*}, 刁兆轲¹, 郝立莉¹, 沈敬林¹, 邹蒙^{3,4}

(1. 青岛城发城市更新有限公司, 山东 青岛 266041; 2. 青岛市市政工程设计研究院有限责任公司, 山东 青岛 266061;
3. 南京林业大学, 江苏 南京 210037; 4. 南京林业大学金浦研究院, 江苏 南京 210042)

摘要:【目的】本研究是为了解植物生长促进根际细菌(plant growth promoting rhizobacteria, PGPR)在国内外研究现状, 探讨 PGPR 在农业生产种植中的潜在应用和发展前景, 包括其在植物促生、改善土壤质量以及减少化学农药使用等方面的潜力。【方法】基于 Web of Science 核心合集数据库, 利用 CiteSpace 等工具对发文数量与学科分布、发文国家及机构间的合作关系、发文期刊、主要研究热点以及发展趋势进行可视化分析。【结果】主要发文国家包括中国、印度、美国、巴西和澳大利亚, 其中植物科学领域的研究最为突出。主要发文期刊包括 *Frontiers in Microbiology*、*Applied Soil Ecology* 和 *Bioresource Technology* 等。此外, 关键词聚类分析显示, 研究主要集中在有氧稳定性、微生物生物量, 以及微生物多样性等 10 个方面。【结论】PGPR 在植物栽培中的应用已经成为研究的热点领域, 且研究主要集中于促生菌类对于植物根际群落以及菌群作用等方面。未来的研究趋势可能包括菌剂对于植物根际群落、与其他农业技术的整合以及更深入的机制研究, 以进一步推动植物栽培领域的发展。

关键词: 植物栽培; 植物生长促进根际细菌; 根系群落; CiteSpace; 可视化分析

中图分类号: Q938.1; S31 文献标志码: A 文章编号: 2095-7300(2025)01-0105-12

Quantitative Analysis of the Application of Plant Growth Promoting Rhizo bacteria in Plant Cultivation

LAN Fengyun¹, FANG Kun², DIAO Zhaoke¹, HAO Lili¹,
SHEN Jinglin¹, ZOU Meng^{3,4}

(1. Qingdao Chengfa Urban Renewal Co., Ltd., Qingdao 266041, China; 2. Qingdao Municipal Engineering Design Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266061, China; 3. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;
4. Jinpu Research Institute of Nanjing Forestry University, Nanjing 210042, China)

Abstract:【Objective】This study is to understand the current research status of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) both domestically and internationally, and to explore the potential applications and development prospects of PGPR in agricultural production and planting, including its potential in

收稿日期: 2024-10-23

基金项目: 双碳目标下胶东半岛城市高架桥下阴性植物适应性研究

作者简介: * 为通信作者, 方坤, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 城市景观设计与规划, E-mail: mylove0531@163.com; 兰峰云, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 城市工程管理与建设, E-mail: 745493863@qq.com。

引文格式: 兰峰云, 方坤, 刁兆轲, 等. 植物促生根际菌在植物栽培中的应用研究计量分析[J]. 湖南生态科学学报, 2025, 12(1): 105-116. LAN F Y, FANG K, DIAO Z K, et al. Quantitative analysis of the application of plant growth promoting rhizo bacteria in plant cultivation[J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2025, 12(1): 105-116.

promoting plant growth, improving soil quality, and reducing the use of chemical pesticides. 【Method】Based on the Web of Science core collection database, CiteSpace and other tools were used to visually analyze the number of publications and disciplinary distribution, collaboration relationships between publishing countries and institutions, publishing journals, major research hotspots, and development trends. 【Result】The main publishing countries included China, India, the United States, Brazil, and Australia, and their research in the field of plant science was the most prominent. The main publishing journals included *Frontiers in microbiology*, *Applied Soil Ecology*, and *Bioresource Technology*. In addition, keyword clustering analysis showed that research mainly focused on 10 areas including aerobic stability, *microbial biomass*, microbial diversity. 【Conclusion】The application of PGPR in plant cultivation had become a hot research topic, and research mainly focus on the effects of microbial agents on plant rhizosphere communities and microbial communities. In addition, future research trends may include the effects of microbial agents on plant rhizosphere communities, integration with other agricultural technologies, and deeper mechanistic studies to further promote the development of plant cultivation.

Keywords: plant cultivation; plant growth promoting rhizobacteria (PGPR); root community; CiteSpace; visual analysis

在传统栽培和生产过程中,普遍施用化肥来满足植物养分和生长需求,同时通过施用农药来防治病虫害,保护植物健康,从而间接提高植物对养分的吸收和利用效率,促进其生长^[1-2]。然而化肥农药等农业化学品可以在短时间内有效促进植物生长发育,但过量施用农业化学品可能会对环境和生态系统产生不利影响,包括由于肥料的冲刷和蒸发而造成地下水和空气污染等^[3-4]。目前的研究发现微生物可以改良土壤。它们还能够合成生长激素,从而促进植物的生长和发育^[5-6]。基于微生物与植物之间的互作关系研制成的植物生长促进根际细菌(plant growth promoting rhizobacteria, PGPR)在栽培中的应用已经成为现代农业领域的一个焦点^[7]。PGPR是一种工业制备的生物制品,它由经过筛选、驯化或改良的真菌、细菌、放线菌等微生物菌株经过大规模繁殖,然后通过浓缩、吸附以及干燥等工艺步骤制成^[8]。这些PGPR在经过制备过程后仍保持活性,具备生物学功能,并可应用于农业、环境修复和其他领域,以提供特定的生态和农业效益^[9-12]。

PGPR与植物根系互动,有多重益处。首先,PGPR可以增强植物的养分吸收能力,提供额外的氮、磷和其他关键养分,从而改善作物的生长情况、提升产量^[13]。其次,它们可以抑制病原微生物的生长,降低病害发生的风险,减少对农药的依赖^[14-15]。此外,PGPR还有助于改善土壤结构,提高土壤的水分保持能力,对抗土壤侵蚀,提高土壤的农业生产

潜力^[16-17]。具体包括:1)巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*),通过产生外源酶、吡啶乙酸、氢氰酸、磷酸溶解、生物膜形成,以及对多种真菌病原体的抗性物质,提高植物抗性;2)丛枝菌根真菌(*Arbuscular mycorrhiza*)可以提高寄主植物对氮的吸收且能够改良土壤结构;3)枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)能够显著缓解Cd对连翘生长的胁迫,提高植株对Cd的耐受程度,抑制连翘中Cd的积累^[18-20]。

这一领域的研究在过去几十年里迅速发展,吸引了广泛的科研兴趣和商业投资。PGPR的应用对于提高农业生产效率、减少化学农药的使用、改良土壤以及实现可持续农业的目标具有重大意义^[21]。然而,尽管PGPR在植物栽培中的潜力巨大,但其应用仍然面临一系列挑战,包括微生物的选择、应用方法的优化以及环境影响的评估等方面的问题。故而,深入了解PGPR在植物栽培中的研究趋势对于解决这些问题和实现可持续农业至关重要。

因此,本研究进行文献计量分析,以探讨植物栽培中PGPR应用的研究趋势和热点问题,为未来的研究方向提供有价值的见解。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究数据样本来源于“Web Of Science (WOS)核心合集数据库”。本研究的数据来自Web

of Science 核心合集数据库索引: Science Citation Index Expanded (SCI-E, 1999 年至今)、Social Sciences Citation Index (SSCI, 2005 年至今)、Arts & Humanities Citation Index (A&HCI, 2005 年至今)、Conference Proceedings Citation Index-Science (CPCI-S, 1999 年至今)、Conference Proceedings Citation Index-Social Science & Humanities (CPCI-SSH, 1995 年至今)、Emerging Sources Citation Index (ESCI, 2015 年至今)、Current Chemical Reactions (CCR-Expanded, 1985 年至今) 和 Index Chemicus (IC, 1993 年至今)。在高级检索中输入主题词: (“PGPR”) OR (“PGPB”) AND (“Plant Cultivation”), 时间跨度为 2001 年 1 月 1 日—2023 年 8 月 31 日, 设定文献类型为 Article 和 Review, 语种类型为 English, 共检索出核心学术期刊论文 2 184 篇。

1.2 数据分析方法

本研究采用了 WOS 核心合集数据库自带的分析工具以及 CiteSpace、VOSviewer 和 HistCite 等软件, 进行了文献计量分析。分析内容包括文献的发表地区、学科分布、发表期刊、重要文献, 以及研究热点等方面。通过 CiteSpace 软件, 获得了数据源文献中的关键词聚类图谱、关键文献的中心性度量以及绘制了关键词时间图谱。利用 VOSviewer 软件, 研究了发文国家和机构之间的合作情况, 同时进行了所有关键词的共现分析, 以反映该领域的研究热点和未来趋势。此外, 还使用 HistCite 软件计算了文献的本地引用次数和总引用次数, 以确定 PGPR 研究领域的主要学术期刊。

2 结果与分析

2.1 文献产出时序及学科分析

检索结果显示, 有关 PGPR 研究领域的出版物数量逐年上升, 表明该领域正受到越来越多的关注, 并呈现出不断发展的趋势。如表 1 所示, 近 23 年来 PGPR 研究领域发文量最大的国家为中国 (549 篇), 其次为印度 (316 篇)、美国 (263 篇)、巴西 (210 篇) 以及澳大利亚 (105 篇) 等。如图 1(a) 所示, 2001 年至 2008 年为研究起步阶段, 该阶段发文量较少, 研究热点主要集中于植物根际微生物群落变化以及其对植物生长潜在影响方面; 2009 年至 2014 年, 关于 PGPR 领域的研究进入稳定发展阶

段, 相较之前热度有了明显提升, 其研究热点主要集中于 PGPR 对农业生产和发展策略方面; 2015 年至 2022 年为快速增长阶段, 关于 PGPR 领域的研究热度达到峰值, 该阶段的研究热点主要为土壤 PGPR 对植物生理生长代谢机制机理研究; 2022 年以后该领域的研究仍保持一定增长, 研究热点侧重于筛选特定 PGPR 来满足农业生产需求。现阶段在 PGPR 领域, 中国是发表文章数量最多的国家。这与中国近年来实施土地保护与优化政策相关, 研究人员密切关注土壤根际群落和抑制病原微生物的土壤菌群构建等领域^[22-23]。土壤作为最终 PGPR 施用的环境介质, 其微生态健康、施用途径和有效性等方面是研究学者关注的重要课题, 但目前该领域的研究仍有待进一步深入。

表 1 主要发文国家

Table 1 Main issuing countries

排名	国家	发文量	总联系强度	总被引频次/次	篇均被引频次/次
1	中国	549	215	9 848	18
2	印度	316	80	6 299	20
3	美国	263	218	14 082	53
4	巴西	210	94	4 603	22
5	澳大利亚	105	117	4 301	41
6	意大利	105	79	3 874	37
7	西班牙	96	81	3 245	34
8	德国	95	133	5 930	62
9	加拿大	87	83	4 027	46
10	日本	63	63	1 117	17

如图 1(b) 所示, PGPR 领域的研究涉及多个学科领域, 自 2001 年至 2023 年 8 月 31 日, 发文量占比最高的为 Microbiology, 其次为 Biotechnology Applied Microbiology、Plant Sciences、Environmental Sciences、Soil Science、Agronomy、Agriculture Dairy Animal Science、Agriculture Multidisciplinary、Food Science Technology、Multidisciplinary Sciences 以及 Ecology。其中 Plant Sciences、Microbiology 和 Soil Science 在近 23 年是 PGPR 研究领域发文量最大的三个学科, 占比分别为 14.1%、11.3% 和 9.6%, 表明微生物在促进植物生长、土壤改良、农业生产等方

面一直是植物学和微生物学领域关注的核心问题。

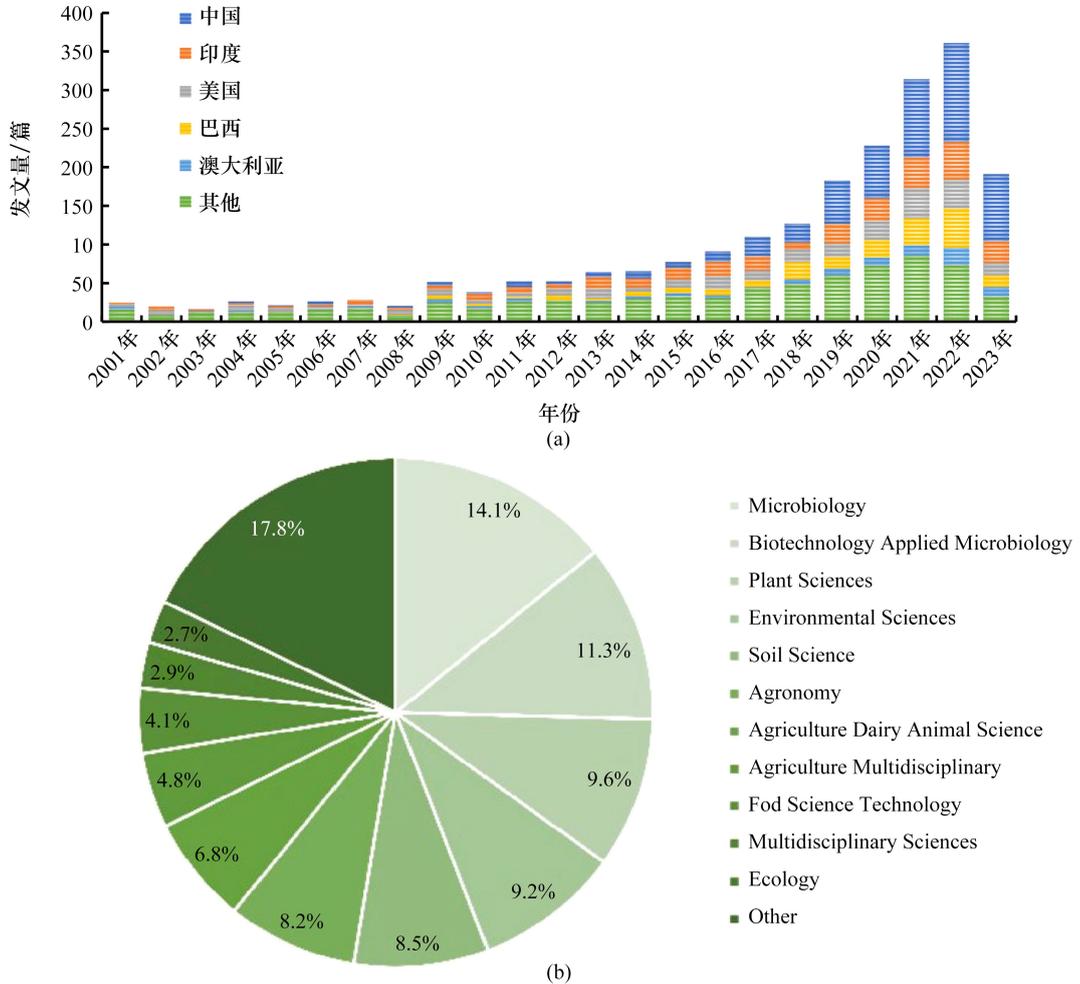


图1 主要国家发文量(a)年度变化及(b)学科领域分布

Figure 1 (a) Annual changes in publication volume of major countries and (b) distribution of subject areas

注:2023年数据截至2023年8月31日,下同。

2.2 发文的国家/地区与机构

使用 VOSviewer 可视化软件,对 PGPR 研究领域的国家/地区和机构之间的合作进行了整合分析,结果如图 2 所示。在图 2(b)中,圆圈的大小代表着该国家/地区或机构的文章发表数量的多少,而圆圈之间的距离则反映了它们之间合作的密切程度,距离越小表示合作关系越紧密。由表 1 总联系强度统计结果可知,发文量高于 150 篇且合作密切的国家有中国(TLS 为 215)、印度(TLS 为 80)、美国(TLS 为 218)、巴西(TLS 为 94)以及澳大利亚(TLS 为 117)等。其中全球 PGPR 研究领域的总被引频次为 61 720 次,篇均被引频次为 28 次,引用频

次最高的国家为美国(总被引频次为 14 082 次,篇均被引频次为 53 次),其次为中国(总被引频次为 9 848 次,篇均被引频次为 18 次)、印度(总被引频次为 6 299 次,篇均被引频次为 20 次)、德国(总被引频次为 5 930 次,篇均被引频次为 62 次)、巴西(总被引频次为 4 603 次,篇均被引频次为 22 次)等,这些国家对于 PGPR 相关的研究较为深入。图 2(b)表明与中国合作密切的国家主要有印度、美国、澳大利亚以及加拿大等。另由机构合作分析网络可见,发文数量高于 30 篇且合作关系密切的机构有南京农业大学、中国农业大学、中国科学院、西班牙高等科研理事会、巴西联邦圣保罗大学[图 2(a)],总联系强度分别为 34、59、76、10、35,且由图

2(a)的连线可知,南京农业大学、中国农业大学以及中国科学院等机构均有较密切合作。

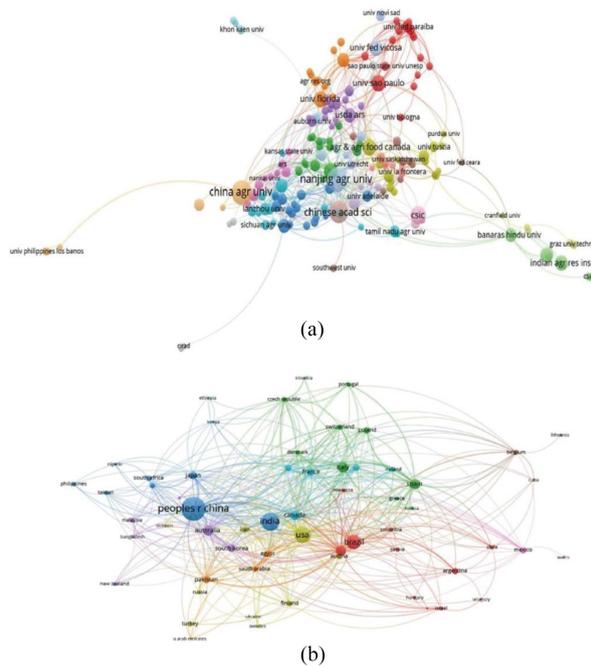


图 2 文献产出 (a) 机构及 (b) 国家

Figure 2 Literature output (a) institutions and (b) countries

2.3 发刊的主要国际刊物和重要文献

由 HistCite 软件计算得到 PGPR 研究领域发文数量排名前十的期刊,如表 2 所示,发表论文较多的学术期刊主要有: *Frontiers in Microbiology* (117 篇)、*Applied Soil Ecology* (57 篇)、*Bioresource Technology* (50 篇)、*Microorganisms* (47 篇) 以及 *Frontiers In Plant Science* (40 篇) 等。其中 2022 年影响因子大于 5 的期刊有 *Frontiers in Microbiology* (5.2)、*Bioresource Technology* (11.4)、*Frontiers In Plant Science* (5.6) 以及 *Science of The Total Environment* (9.8)。本地引用次数 (TLCS) 表征的是发文期刊在 PGPR 研究领域的影响力,其中较高的期刊有 *Journal of Dairy Science* (607 次)、*Bioresource Technology* (302 次)、*Applied Microbiology And Biotechnology* (248 次) 以及 *Journal Of Applied microbiology* (175 次)。这表明这些期刊上发表的文章在 PGPR 研究领域的影响较大,可以更全面地评估这些期刊在 PGPR 研究领域的影响力和重要性,以指导进一步的研究和发展方向。

表 2 2001—2023 年相关领域研究发文量排名 Top10 的期刊
Table 2 Ranking of top 10 publication of journals in related fields of research from 2001 to 2023

期刊名称	发文量/ 篇	影响因子 (2022 年)	本地 引用 次数/ 次	总引用 频次/ 次
<i>Frontiers in Microbiology</i>	117	5.2	0	2 542
<i>Applied Soil Ecology</i>	57	4.8	116	2 031
<i>Bioresource Technology</i>	50	11.4	302	2 709
<i>Microorganisms</i>	47	4.5	0	501
<i>Frontiers in Plant Science</i>	40	5.6	0	2 547
<i>Plant and Soil</i>	38	4.9	125	2 883
<i>Animal Feed Science and Technology</i>	37	3.2	121	957
<i>Journal of Dairy Science</i>	37	3.5	607	2 277
<i>Science of The Total Environment</i>	37	9.8	25	612
<i>Agronomy-Basel</i>	36	3.7	0	260

PGPR 研究领域高被引文献排名前十的文献如表 3 所示,总引用频次最高的是德国学者 Lehmann J 发表在 *Soil Biology & Biochemistry* 上的 *Biochar effects on soil biota—A review* (总被引频次 2 965 次),主要综述了关于生物炭(一种土壤改良剂)在全球范围内的研究。他指出,尽管生物炭被广泛用于改善土壤肥力和减缓气候变化,但研究主要集中在其对土壤化学性质的影响,而对其对土壤生物的影响关注较少。文章提到早期研究探讨了生物炭作为土壤改良剂的不同应用,如管理病原体、携带接种物和吸附化合物等。然而,目前尚缺乏生物炭对土壤生物影响的深入研究,尤其是生物炭的理化性质变化对土壤生物的影响机制。

其次为荷兰学者 Calvo P 发表在 *Plant and Soil* 上的 *Agricultural uses of plant biostimulants* (总被引频次 1 005 次),这篇文章主要介绍了植物生物刺激剂——一种用于促进植物生长的由多种物质和微生物组成的产品。文章指出,尽管植物生物刺激剂在农业中的使用广泛,但许多科学界人士认为它们缺乏同行评审的科学评估。文章定义了植物生物刺激剂,并回顾了五类主要类型:PGPR、腐殖酸、富马酸、蛋白水解物和海藻提取物。文献表明,越来

越多的科学证据支持这些刺激剂在不同植物种类中的应用,且它们通常能促进根系生长、增强营养

吸收和抗逆性。文章的主要焦点是强调植物生物刺激剂的重要性和科学研究的必要性^[25]。

表3 Top10 高被引文献信息
Table 3 Top 10 highly cited literature information

标题	第一作者	发文国家	发文期刊(2022年)	总引用频次/次
<i>Biochar effects on soil biota—A review</i>	Lehmann, J	USA	Soil Biology & Biochemistry	2 965
<i>Agricultural uses of plant biostimulants</i>	Calvo P	USA	Plant and Soil	1 005
<i>Plant-microbe interactions promoting plant growth and health; perspectives for controlled use of microorganisms in agriculture</i>	Berg G	Austria	Applied Microbiology and Biotechnology	885
<i>Plant growth-promoting rhizobacteria; context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture</i>	Backer R	Canada	Frontiers in Plant Science	688
<i>Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture</i>	Richardson A E	Austria	Plant and Soil	563
<i>A review on the plant microbiome; ecology, functions, and emerging trends in microbial application</i>	Compant S	Austria	Journal of Advanced Research	547
<i>Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants</i>	Richardson A E	Austria	Australian Journal of Plant Physiology	513
<i>Molecular determinants of rhizosphere colonization by Pseudomonas</i>	Lugtenberg B J J	Netherlands	Annual Review of Phytopathology	505
<i>Relationship between antibacterial activity of chitosan and surface characteristics of cell wall</i>	Chung Y C	China	Genetics and Molecular Biology	491
<i>Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils</i>	de Souza R	Brazil	Genetics and Molecular Biology	469

澳大利亚学者 Berg G 发表在 *Applied Microbiology and Biotechnology* 上的 *Plant-microbe interactions promoting plant growth and health; perspectives for controlled use of microorganisms in agriculture* (总被引频次 885 次), 这篇文章主要介绍了与植物相关的微生物在植物的生长和健康方面扮演着重要的角色。文章指出, 微生物可以通过改善植物的营养吸收和激素刺激直接促进植物生长, 同时通过多种机制抑制植物病原体, 但这通常是间接的。已得到充分研究的微生物包括氮螺菌、根瘤菌、芽孢杆菌、假单胞菌、沙雷氏菌等, 它们对植物生长和健康具有积极影响。文章还讨论了利用这些植物-微生物相互作用开发的微生物接种剂, 其可作为生物肥料、植物强化剂和生物农药。最后, 强调了微生物接种剂市场的快速增长及基因组技术在开发高效产品中的

重要性, 并呼吁跨学科研究以推动生物防治产业并为传统和有机农业提供环保策略^[26]。

加拿大学者 Backer R 发表在 *Frontiers in Plant Science* 上的 *Plant growth-promoting rhizobacteria; context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture* (总被引频次 688 次), 这篇文章主要介绍了植物与微生物相互作用对农业的重要性, 特别是利用促进植物生长的有益微生物 (PGPR) 来促进作物的生长和提高其耐受性。文章强调了根际微生物组在吸引不同微生物群落方面的关键作用, 以及 PGPR 如何通过促进植物生长和调节植物抵抗非生物胁迫的响应来提供益处。此外, 文章还提到了将 PGPR 技术商业化的前景, 以减少合成肥料和农药的使用, 促进可持续农业发展^[27]。

加拿大学者 Richardson A E 发表在 *Plant and Soil* 上的 *Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture* (总被引频次 563 次), 这篇文章探讨了农业生产中磷供应不足的问题, 特别是在发展中国家, 需要培育更高效利用低磷土壤的植物。文章提出了三种策略, 可以通过植物和微生物来提高磷利用效率, 包括改善根系生长和结构, 通过根分泌物促进磷的释放或矿化, 以及增加每吸收单位磷产生的植物产量。文章批判性地审查了通过改变根系特征、操控根系分泌物或管理植物与微生物的互作来培育更高效利用磷的植物的证据。此外, 文章还讨论了通过育种或基因改良来培育磷高效利用植物的机会和可能的限制因素, 强调了磷高效利用领域的潜在发展^[28]。高被引文献的研究结果表明学者对 PGPR 领域的植物促生、抗逆性以及生态效应等方面研究较为深入。

2.4 研究热点及发展趋势

2.4.1 关键词分析

使用 VOSviewer 进行 PGPR 领域的关键词知识图谱绘制, 我们得到了图 3(a)。在图中, 圆圈的大小表示关键词在文献中出现的频率的高低, 而进一步对高频关键词进行整理后, 我们得到了表 4。结果显示, 高频关键词包括 plant growth(植物生长)、aerobic stability(有氧稳定性)、soil(土壤)、microbial community(微生物菌落)、bacteria(细菌)以及 rhizosphere(植物根际)等。这些关键词在 PGPR 领域的研究中具有重要地位, 并且在研究热点方面发挥着关键作用。

其次使用 Citespace 进行关键词聚类分析。通过数似然比算法获得了图 3(b) 的聚类结果。模块化 Q 值用于评估聚类网络的稳定性, 模块度 (Q 值) 和轮廓度 (S 值) 是判断图谱有效性的指标。一般认为 $Q > 0.3$ 和 $S > 0.7$ 表明图的同质性强, 聚类结果显著可信^[29-30]。根据聚类分析结果, Q 值为 0.485 6 (> 0.3), S 值为 0.807 1 (> 0.7), 表明聚类结果显著可信, 关键词分类合理。由图 3(b) 可知, PGPR 研究领域高频关键词主要集中于 10 个聚类, 分别为 #0 aerobic stability(有氧稳定性)、#1 microbial biomass(微生物生物量)、#2 microbial diversity(微生物多样性)、#3 microbial inoculants(微生物菌剂)、#4 evolution(进化)、#5 soil microbiome(土壤微生物组)、#6 abiotic stress(非生物胁迫)、#7 bioaugmentation(生

物增强)、#8 rumen fermentation(瘤胃发酵)以及 #9 bacteria inoculants(细菌接种剂)。结合前述分析结果, 进一步对 PGPR 领域研究热点进行总结归纳, 主要分为以下两个研究热点。

表 4 高频关键词及中心性

Table 4 High frequency keywords and centrality

排名	关键词	频次	中心性
1	plant growth	294	0.07
2	aerobic stability	274	0.04
3	soil	267	0.06
4	diversity	263	0.05
5	lactic acid bacteria	260	0.02
6	growth	245	0.08
7	microbial community	241	0.04
8	bacteria	233	0.10
9	quality	189	0.01
10	rhizosphere	183	0.04

研究热点一: 植物根际微生物群落。植物在建立在新环境中时, 可以通过改变土壤微生物群落的结构和功能特性来增强自身的成功^[31], 其与植物-土壤之间形成互作网络, 促进植物根系的生长和发育, 以及养分吸收, 其中土壤因子对根际微生物群落结构影响较大^[32]。近年来, 关于植物根际微生物研究很多, 从起初不同植物根系群落结构研究到目前植物对氮的吸收与根际微生物群落组成关系的研究^[33]、季节变化对耐旱植物根际微生物变化影响^[34]、植物生物钟对植物根际群落结构层和功能影响以及基因型与植物根际微生物群落研究等^[35], 其涉及多个层面的相互作用, 但在机理机制方面仍没有完整的解释, 在未来是一个值得广泛研究的领域, 需要进一步的实验和研究来解释。

研究热点二: PGPR 应用。目前已经有研究发现添加丛枝菌根真菌、解淀粉芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌等 PGPR 并结合土壤改良剂可提高农作物和园艺植物的生长效果^[36-43]。研究人员利用枯草芽孢杆菌紫丁香青霉菌协同效应来减缓土壤退化, 提高西瓜产量^[44]; 还有利用微生物生物膜接种剂来促进温室条件下菊花品种的生长和提高其产量^[45], 这些

研究不仅改善了土壤的质地和养分含量,还提高了植物的养分吸收能力和抗逆性。此外,它们减少了对化肥和农药的依赖,降低了环境污染风险。

PGPR 在盐碱地土壤改良、抵御病虫害和非生物胁迫、提高农业作物产量质量等方面都有良好的应用前景。

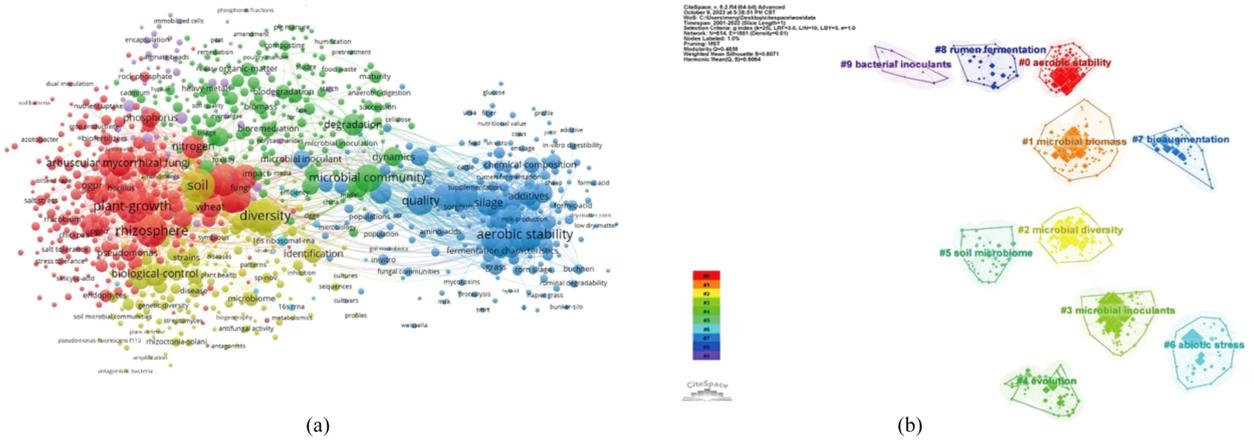


图3 关键词(a)共现(b)聚类
Figure 3 Keywords (a) co-occurrence and (b) clustering

2.4.2 研究趋势分析

使用 CiteSpace 进行关键词聚类时间线图分析。在这个图谱中,关键词聚类被展示在一个二维时间轴上,相同聚类的关键词被放置在相同的水平线上,这有助于显示每个聚类中关键词的数量,并展示了各个聚类关键词出现的时间跨度。通过这个图谱,可以了解特定聚类在研究领域的兴起、发展和衰退过程。对于 PGPR 领域的关键词聚类时

间线图谱进行分析,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,近 23 年该领域的研究主题涉及以下 9 个方面,分别为#0 aerobic stability(有氧稳定性)、#1 plant growth promotion(植物促生)、#2 microbial inoculants(微生物菌剂)、#3 plant growth-promoting rhizobacteria(植物促生根际菌)、#4 bioremediation(生物修复)、#5 sustainable agriculture(可持续农业)、#6 root exudates(根系分泌物)、#7 biological control(生物防

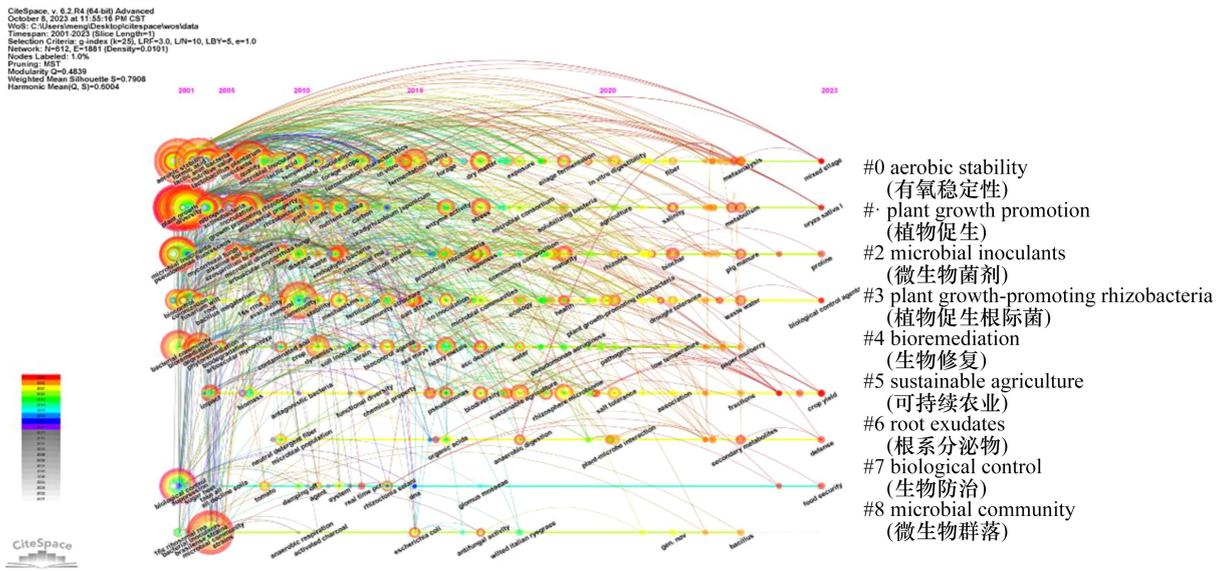


图4 关键词聚类时间线图谱
Figure 4 Keywords time graph

治)以及#8 microbial community(微生物群落)。此外,2001年出现的 plant growth promotion(植物促生)是聚类中节点最大、中介中心性值最高的节点(在图中明显用红圈标出)。随着时间的推移,该聚类逐渐演化出一些新的关键词,包括 growth promoting rhizobacteria(促进植物生长的根际细菌)、nutrient uptake(营养元素吸收)、enzyme activity(酶活性)、microbial consortium(微生物群落)、solubilizing bacteria(溶解细菌)等。而且与其他菌类之间的关键词,如 microbial inoculants(微生物菌剂)、plant growth-promoting rhizobacteria(植物促生根际菌)以及 microbial community(微生物群落)等

联系变得更加丰富。这表明在一定程度上出现了多主题的共现。

利用 CiteSpace 对近 23 年来 PGPR 研究文献的关键词进行了突现分析。关键词突现分析的目的是探测在特定研究领域内某一段时间内频次显著上升的关键词,从而反映该领域的研究动态。在关键词突现表中,起始年份表示关键词频率开始显著上升的年份,而结束年份表示该关键词频率保持稳定的年份。突现强度则衡量了该关键词在一定时间内频率变化的幅度,数值越大表示频率上升越显著。在本研究中共包含 24 个突现关键词,它们的详细信息如表 5 所示。

表 5 2001—2023 年相关领域关键词突现图谱

Table 5 Keyword emergence graph in relevant fields from 2001 to 2023

关键词	突现强度	起始年份	结束年份	时间区间
biocontrol	7.31	2001	2010	
root colonization	5.29	2001	2007	
formic acid	8.8	2002	2013	
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	6.39	2002	2015	
fermentation	7.99	2004	2011	
gradient gel electrophoresis	6.7	2004	2013	
plantarum	5.54	2004	2014	
soil	5.36	2005	2010	
grass silage	4.93	2005	2014	
phosphate solubilizing bacteria	6.15	2006	2015	
microorganisms	5.65	2006	2014	
microbial populations	4.72	2006	2016	
arbuscular mycorrhizal fungi	4.74	2011	2017	
nitrogen fixation	7.83	2012	2017	
microbial biomass	5	2012	2018	
biomass	6.39	2013	2018	
glomus intraradices	4.76	2013	2016	
corn silage	4.66	2013	2018	
yield	4.64	2013	2016	
am fungi	5.26	2014	2016	
grass	6.98	2016	2018	
populations	4.8	2018	2020	
rhizosphere microbiome	5.41	2019	2021	
fermentation quality	6.72	2021	2023	

注:全部字段代表研究时间段 2001—2023 年,其中红色线段为关键词突现时间段,对应表格中起始年份和结束年份部分,蓝色线段为其余年份。

从突现强度上看,数值越高反映该关键词在该领域的研究时间段内有所增强,影响较大,引起研究人员的更多关注和探索。其中 biocontrol(生物防治)、formic acid(甲酸)、nitrogen fixation(固氮)等的突现强度较高,分别为 7.31、8.8 以及 7.83。biocontrol(生物防治)的高突现强度反映了研究人员对可持续农业和生态友好农业实践的不断关注,研究人员正在寻求减少化学农药的使用,利用生物体来控制害虫和病原体的方式^[46]。formic acid(甲酸)的突现可能涉及多个领域,包括化学、农业和医学等,表明其在不同研究领域的重要性^[47]。而 nitrogen fixation(固氮)的出现反映了对提高农业氮肥利用效率和减少氮污染的关注,这对于可持续农业和生态系统健康至关重要^[46,48]。这些关键词反映了当前研究趋势,即在农业和生态领域寻求更加环保和可持续的解决方案。其次从持续时间上,荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)时间跨度最大(2002—2015年),它以其在培养基上产生的绿色荧光而闻名。这种细菌在环境中广泛存在,有些菌株对植物、土壤和水生生态系统具有重要的影响,包括一些有益的生物作用,如土壤生态系统中的氮固定和生物防治。此外,荧光假单胞菌也可以应用于农业和生物技术领域,例如作为一种生物农药来保护植物免受病虫害的侵害^[49-50]。除此还有 biocontrol(生物防治)、phosphate solubilizing bacteria(磷溶解细菌)、gradient gel electrophoresis(梯度凝胶电泳)等持续时间较长,时间跨度较大。同时 populations(种群)、rhizosphere microbiome(根际微生物群落)、am fungi(丛枝菌根真菌)等突现词代表了当前最新的研究热点领域,表明未来主要发展趋势可能是关于菌剂提升植物根系微生物功能和代谢潜力的深入研究,以及微生物组成和多样性等方面研究^[51-53]。

3 讨论与结论

本研究基于 Web of Science 核心合集数据库中 2001—2023 年 2 184 篇关于植物生长促进根际细菌研究领域的文献,通过可视化分析探讨了该领域的主要研究国家、学科领域、期刊来源、研究热点以及发展趋势。以下是本研究的主要发现和结论:

3.1 主要研究国家与机构合作情况

PGPR 相关研究的全球发展呈现出多国合作的

趋势。尤其在过去十年里,中国成为该领域文献发文量最大的国家,国内多家知名机构如南京农业大学、中国科学院、中国农业大学等,参与了大量的相关研究,且这些机构之间的合作关系密切。这表明,PGPR 的研究在中国已成为一个重要的学术方向,并且国内的研究机构在推动该领域发展方面发挥了重要作用。

3.2 主要期刊与研究热点

根据文献来源分析,PGPR 研究领域的主要期刊包括 *Frontiers in Microbiology*、*Applied Soil Ecology*、*Bioresource Technology*、*Microorganisms*、*Frontiers in Plant Science* 等。这些期刊均为在土壤微生物、PGPR 以及植物生理学等领域具有较高影响力的出版物。在研究热点方面,当前 PGPR 研究的重点主要集中在植物根际微生物群落的构成与 PGPR 的应用,特别是在提高作物生产力、抗逆性及土壤健康方面的应用。

3.3 研究发展趋势

随着全球可持续农业的发展,PGPR 领域的研究也呈现出新的发展趋势。未来,PGPR 研究可能会更加注重以下几个方面:1) PGPR 在促进植物生长和抗逆性方面的功能和代谢潜力的深入探索;2) 微生物组成和多样性对植物生长及其生态功能的影响;3) 根际生态系统的建模与预测,以更好地理解植物与土壤微生物的相互作用;4) PGPR 在可持续农业、生态系统恢复等领域的应用潜力。这些研究方向不仅能够推动 PGPR 在农业生产中的实际应用,还为生态系统的健康与恢复提供理论依据。

参考文献:

- [1] 张红珍. 农药化肥使用不当的危害及提高农产品质量安全的方法[J]. 现代农业科技, 2022, 51(2): 203-204.
- [2] 张红升, 张萍, 张树杰, 等. 中国蔬菜产业发展中化肥和农药使用问题的思考[J]. 园艺与种苗, 2021, 41(4): 54-56.
- [3] 郭利杰. 当前农药化肥残留的危害及防止措施[J]. 河南农业, 2018, 29(34): 24.
- [4] 肖亚玲. 化学农业的危害及抑制路径探讨[J]. 种子科技, 2017, 35(11): 3, 6.
- [5] GU Y A, DONG K, GEISEN S, et al. The effect of microbial inoculant origin on the rhizosphere bacterial community composition and plant growth-promotion [J]. Plant and

- Soil, 2020, 452(1):105-117.
- [6] EGAMBERDIEVA D, KUCCHAROVA Z, DAVRANOV K, et al. Bacteria able to control foot and root rot and to promote growth of cucumber in salinated soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(2):197-205.
- [7] 陈芳, 李字辉, 孙孝贵, 等. 微生物菌剂对加工番茄产量及品质的影响[J/OL]. *新疆农业科学*:1-10[2024-11-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1097.S.20231011.1131.002.html>.
- [8] 赖锟阳, 肖建才, 王红阳, 等. 微生物菌肥调控药用植物品质形成的作用机制及应用与展望[J]. *中国中药杂志*, 2024, 49(4):912-923.
- [9] 普继雄, 赵娟莉, 马桂梅, 等. 微生物菌剂对大棚草莓产量和品质的影响[J]. *云南农业科技*, 2023, 52(5):12-13, 22.
- [10] 韩军, 薛焱, 胡宇, 等. 保水剂在牧草生产和草地沙化治理中的应用现状与前景[J]. *中国农学通报*, 2024, 40(3):158-164.
- [11] 刘劲松, 严涛. 浅谈微生物菌剂在环境修复中的应用[J]. *中国环保产业*, 2023, 29(5):62-64, 67.
- [12] 谢嘉炜. 液态微生物菌剂的制备技术及其应用研究[D]. 无锡:江南大学, 2022.
- [13] 胡留杰, 李燕, 田时炳, 等. 菌渣还田对菜地土壤理化性状、微生物及酶活性的影响研究[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(1):98-104.
- [14] WANG Z, HU X H, SOLANKI M K, et al. A synthetic microbial community of plant core microbiome can be a potential biocontrol tool[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(13):5030-5041.
- [15] MACIAG T, KOZIEŁ E, RUSIN P, et al. Microbial consortia for plant protection against diseases: More than the sum of its parts[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(15):12227.
- [16] ZHU X M, CHEN B, CHU L Z, et al. Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 227:98-115.
- [17] HAM S M, CHANG I, NOH D H, et al. Improvement of surface erosion resistance of sand by microbial biopolymer formation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144:7.
- [18] ÇAM S, KÜÇÜK Ç, ALMACA A. *Bacillus* strains exhibit various plant growth promoting traits and their biofilm-forming capability correlates to their salt stress alleviation effect on maize seedlings[J]. *Journal of Biotechnology*, 2023, 369:35-42.
- [19] SAIA S, BENÍTEZ E, GARCÍA-GARRIDO J M, et al. The effect of arbuscular mycorrhizal fungi on total plant nitrogen uptake and nitrogen recovery from soil organic material[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2014, 152(3):370-378.
- [20] 宋璐, 张花, 李保珍, 等. 枯草芽孢杆菌对镉胁迫下连翘生长生理的影响[J]. *森林与环境学报*, 2022, 42(6):617-622.
- [21] DANAN C, BULTEL C, ELIASZEWICZ M. Safety assessment of "familiar" microorganisms used in food and agriculture[J]. *Sciences Des Aliments*, 2004, 24(5):423-429.
- [22] 韦中, 沈宗专, 杨天杰, 等. 从抑病土壤到根际免疫:概念提出与发展思考[J]. *土壤学报*, 2021, 58(4):814-824.
- [23] 张俊伶, 张江周, 申建波, 等. 土壤健康与农业绿色发展:机遇与对策[J]. *土壤学报*, 2020, 57(4):783-796.
- [24] LEHMANN J, RILLIG M C, THIES J, et al. Biochar effects on soil biota—A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9):1812-1836.
- [25] CALVO P, NELSON L, KLOPPER J W. Agricultural uses of plant biostimulants[J]. *Plant and Soil*, 2014, 383(1):3-41.
- [26] BERG G. Plant-microbe interactions promoting plant growth and health: Perspectives for controlled use of microorganisms in agriculture[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2009, 84(1):11-18.
- [27] BACKER R, ROKEM J S, ILANGUMARAN G, et al. 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.
- [28] RICHARDSON A E, LYNCH J P, RYAN P R, et al. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture[J]. *Plant and Soil*, 2011, 349(1):121-156.
- [29] 袁家丽, 齐君. 基于 CiteSpace 的我国恢复性环境文献可视化研究[J]. *西南林业大学学报(社会科学)*, 2023, 7(5):79-87.
- [30] 张雪冰, 张泽和, 鲁显楷. 森林生态系统土壤微生物碳利用效率对氮沉降增加的响应及其机制[J]. *地球科学进展*, 2023, 38(10):999-1014.
- [31] 吴文洁, 张燕飞, 王瑜. 基于知识图谱的我国制造业高质量发展研究可视化分析[J]. *科技广场*, 2021, 34(4):20-31.
- [32] LIU L L, HUANG X Q, ZHANG J B, et al. Deciphering the relative importance of soil and plant traits on the development of rhizosphere microbial communities[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 148:107909.
- [33] BELL C W, ASAO S, CALDERON F, et al. Plant nitrogen uptake drives rhizosphere bacterial community assembly during plant growth[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 85:170-182.

- [34] AHMAD M, IQBAL Z, BUSHRA, et al. Seasonal changes modulate the rhizosphere of desert plant species[J]. *Agronomy*, 2022, 13(1):57.
- [35] HUBBARD C J, BROCK M T, VAN DIEPEN L T, et al. The plant circadian clock influences rhizosphere community structure and function[J]. *The ISME Journal*, 2018, 12(2):400-410.
- [36] 喻彩丽, 李亮, 张贝, 等. 丛枝菌根真菌和解磷菌对青梅根系发育、磷吸收及土壤磷有效性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(17):240-248.
- [37] 殷小冬, 李其胜, 贾艳艳, 等. 一株巨大芽孢杆菌的促生特性及其对小麦种子发芽的影响[J]. *南方农业*, 2023, 17(2):208-210.
- [38] 王萍, 李一曼, 王雪佳, 等. 巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉锌的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(12):5798-5807.
- [39] 李永丽, 源春彦, 周洲, 等. 解淀粉芽孢杆菌菌株 P-r21 抑菌广谱性及对番茄灰霉病的防治[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(6):105-110.
- [40] 李少青. 丛枝菌根真菌对酸胁迫下杉木幼苗生长生理的影响[J]. *防护林科技*, 2023, 41(5):6-9.
- [41] 侯颖, 张立伟, 王立涛, 等. 丛枝菌根真菌对香樟幼苗生长和抗寒生理指标的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2023, 51(9):95-100.
- [42] 韩蕾蕾, 张乐乐, 王慧娟, 等. 丛枝菌根真菌对镉胁迫小麦褪黑素代谢的调节作用[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(17):59-67.
- [43] 褚德朋, 许永幸, 丁蓬勃, 等. 浒苔多糖协同解淀粉芽孢杆菌 CAS02 促进烤烟生长的研究[J]. *中国烟草学报*, 2023, 29(4):76-84.
- [44] CHEN P, ZHANG J L, LI M, et al. Synergistic effect of *Bacillus subtilis* and *Paecilomyces lilacinus* in alleviating soil degradation and improving watermelon yield[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 13:1101975.
- [45] KANCHAN A, SIMRANJIT K, RANJAN K, et al. Microbial biofilm inoculants benefit growth and yield of *Chrysanthemum* varieties under protected cultivation through enhanced nutrient availability[J]. *Plant Biosystems—an International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 2019, 153(2):306-316.
- [46] TAILOR A J, JOSHI B H. Harnessing plant growth promoting rhizobacteria beyond nature: A review[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2014, 37(9):1534-1571.
- [47] LI T, CHEN F X, JIANG Z X, et al. Determination and correlation of solubility for D-xylose in volatile fatty acid solvents[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2014, 22(4):429-434.
- [48] ALLAGA H, BÓKA B, POÓR P, et al. A composite bioinoculant based on the combined application of beneficial bacteria and fungi[J]. *Agronomy*, 2020, 10(2):220.
- [49] SILVERIO M P, KRAYCHETE G B, ROSADO A S, et al. *Pseudomonas fluorescens* complex and its intrinsic, adaptive, and acquired antimicrobial resistance mechanisms in pristine and human-impacted sites[J]. *Antibiotics*, 2022, 11(8):985.
- [50] MOHAN V, WIBISONO R, CHALKE S, et al. The anti-*Listeria* activity of *Pseudomonas fluorescens* isolated from the horticultural environment in New Zealand[J]. *Pathogens*, 2023, 12(2):349.
- [51] WU S L, FU W, RILLIG M C, et al. Soil organic matter dynamics mediated by arbuscular mycorrhizal fungi—an updated conceptual framework[J]. *New Phytologist*, 2024, 242(4):1417-1425.
- [52] PARK I, SEO Y S, MANNAA M. Recruitment of the rhizomicrobiome army: Assembly determinants and engineering of the rhizosphere microbiome as a key to unlocking plant potential[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14:1163832.
- [53] LAYTON-MATTHEWS K, REIERTSEN T K, ERIKSTAD K E, et al. Consequences of cross-season demographic correlations for population viability[J]. *Ecology and Evolution*, 2023, 13(7):e10312.

责任编辑:蒋一锄
英文校对:王芬