

宋琪, 周杨, 朱红惠, 丁陈君, 陈方. 微生物肥料研究领域发展现状与趋势[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29 (3): 783-792

Song Q, Zhou Y, Zhu HH, Ding CJ, Chen F. Present situation and trends in the field of microbial fertilizer research [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2023, 29 (3): 783-792

微生物肥料研究领域发展现状与趋势

宋琪¹ 周杨² 朱红惠²✉ 丁陈君¹✉ 陈方¹¹中国科学院成都文献情报中心 成都 610299²广东省科学院微生物研究所 广州 510070

摘要 在全球气候变暖、粮食危机以及自然资源枯竭等大背景下,微生物肥料因其绿色环保、肥效高等优势在农业生产中广泛应用.通过文献调研和文献计量方法,对微生物肥料领域研究历史进行概述,以近20年来微生物肥料领域研究为例,对Web of Science和CNKI数据库中发表的论文数量、主要研究机构以及研究方向分布等进行统计分析,借助可视化软件CiteSpace分析论文研究方向及前沿热点等.微生物肥料领域的发文量总体上呈现逐年增长趋势,中国科学院、印度农业研究理事会以及南京农业大学等是该领域发文量较多的研究单元;从研究方向及热点来看,国内外的研究在微生物菌种、微生物与植物生长等方面相对比较集中,国外更关注微生物肥料作用机制以及农业可持续发展的相关研究,而国内近些年来则更关注农作物产量和微生物肥料应用方面的研究.基于研究现状和发展趋势分析,提出重视微生物菌种资源的保藏与挖掘、聚焦微生物肥料机制机理解析、扩大田间试验、推动农业科技创新等建议,以促进我国微生物肥料发展,为农业可持续发展和实现“双碳”目标提供参考. (图6 表6 参65)

关键词 微生物肥料;文献计量;发展趋势;生态环境;启示建议

Present situation and trends in the field of microbial fertilizer research

SONG Qi¹, ZHOU Yang², ZHU Honghui²✉, DING Chenjun¹✉ & CHEN Fang¹¹ Chengdu Library and Information Center, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China² Institute of Microbiology, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China

Abstract In the context of global warming, food crises, and the depletion of natural resources, microbial fertilizers are widely used in agricultural production because of their environmental protection advantages. In this paper, using literature investigation and bibliometric methods, the research history of microbial fertilizer fields is summarized. Past 20 years of research within the field was evaluated based on, the number of papers, major research institutions, and research direction distribution in the Web of Science and CNKI databases published, and the research direction and frontier hotspots of papers were analyzed using the visual analysis software CiteSpace. The number of articles published in the field of microbial fertilizers has generally shown an increasing trend annually. The Chinese Academy of Sciences, Indian Council of Agricultural Research, and Nanjing Agricultural University are the research units with the largest publications in this field. Research on microbial and plant growth is relatively concentrated both nationally and internationally from the research direction and hot spots; however, in recent years, research on the mechanism of microbial fertilizer and sustainable development of agriculture has attracted substantial international attention, whereas research on crop yield and microbial fertilizer application is of greater concern in China. To provide a reference for the sustainable development of agriculture and the realization of carbon peaking and carbon neutrality goals, several suggestions for the development of microbial fertilizers in China have been put forward. These specifically focus on the preservation and excavation of microbial strain resources, exploring the mechanism of microbial fertilizers, enlarging field experiments, and promoting science and technology innovation in agriculture.

Keywords microbial fertilizer; bibliometrics; trend; ecological environment; suggestion

收稿日期 Received: 2022-04-28 接受日期 Accepted: 2022-09-19

中国科学院战略生物资源专项项目“战略生物资源网络信息平台建设”(KFJ-BRP-006)和中国工程院咨询项目“中国微生物安全与健康产业发展战略研究2”(2021-XZ-8)资助 Supported by the Special Project of Strategic Biological Resources of Chinese Academy of Sciences “Construction of Strategic Biological Resources Network Information Platform”(KFJ-BRP-006) and Consulting Project of Chinese Academy of Engineering “Study on Development Strategy of Microbial Safety and Health Industry in China II”(2021-XZ-8)

✉通信作者 Corresponding author (Email: dingcj@clas.ac.cn; zhuhh_gdim@163.com)

不断增长的人口对粮食的巨大需求以及自然资源的枯竭成为各国面临的一个重大挑战^[1-3]。目前,提高作物产量的方式主要依赖外部肥料的投入。早期化肥、农药等的使用极大地推动了农业的发展^[4],在新阶段全球气候变化背景下,过量施用化肥造成碳排放增加以及对生态环境的破坏与污染,严重威胁到农业的可持续发展。同时随着生活品质的不断提高,人们对绿色、有机、优质食品的追求日益增加,亟须改变提高作物产量的方式。微生物广泛分布于所有生态系统中,是地球物质循环的主要参与者,对动植物的生长和健康发挥重要作用。随着农业微生物资源不断被挖掘利用,微生物在农业领域的应用也越来越广泛。其中,微生物肥料作为化肥的有效替代物,是提高农产品产量和品质、促进农业可持续发展的重要途径之一。微生物肥料是指含有特定微生物活体的制品^[5],其通过土壤、环境、植物营养元素的供应以及所产生代谢产物对植物产生有益的作用^[6]。微生物肥料种类繁多且分类复杂,目前农业农村部批准登记的微生物肥料产品种类包含农用微生物菌剂^[7](根瘤菌菌剂、固氮菌菌剂、解磷类微生物菌剂、硅酸盐微生物菌剂、光合细菌菌剂、有机物料腐熟剂、促生菌剂、菌根菌剂和生物修复菌剂)、复合微生物肥料^[8]以及生物有机肥^[9]共三大类11个品种。在登记的10 245个企业产品中,各种微生物菌剂产品最多,约占登记总数的53%,生物有机肥和复合微生物肥料分别约占登记总数的30%和17%^[10],产品涵盖了细菌、放线菌和真菌各大类别。随着微生物学和肥料科学研究的不断深入以及生物技术的进一步突破,在全球气候变化、粮食紧缺以及农业可持续发展的形势下,各国都将进一步加强对微生物肥料的研发布局。本文通过文献计量与文献调研,对国内外微生物肥料领域历史概况、以近20年来CNKI数据库与WOS数据库文献收录文献为例的研究现状、研究热点及未来趋势进行分析总结,并据此对我国在该领域的发展提出相关参考建议。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

研究以科睿唯安公司Web Of Science平台中的科学引文索引扩展版(Science Citation Index Expanded, SCI-E)数据库为数据源,制定检索式(TS = (((microbial or microorganism or bacter* or PGPR OR PGPB or "plant growth promoting rhizobacteria" or "plant growth promoting bacteria") and fertili*) AND (agriculture or (plant growth))) NOT (biochar or veterinary* or ruminant or livestock or aquacultures or struvite or "N-15 tracing" or mulch))),对微生物肥料领域近20年来(2002-2021年)出版的文献进行主题检索,共检索到6 494篇(检索日期为2022年7月28日),排除地质学、大气气象学研究方向以及其他与微生物肥料主题明显不相关文献后,共对6 293篇论文和综述论文进行后续分析。中国知网文献检索以检索式“微生物肥料+植物根际促生菌+减肥减药+耐盐微生物+耐干旱微生物+生物肥料+固氮

菌+解磷菌+环保肥料+解钾菌”对近20年来(2002年-2021年)发表的中文学术期刊文献进行主题检索,共检索到6 805篇(检索日期为2022年8月4日)。

1.2 研究方法

研究热点一般是指一段时间内研究者高度关注且持续探讨的研究主题,对关键词的共现关系与聚类关系分析可以较为准确地揭示研究热点与核心议题。突然涌现的突现词可以用来分析研究前沿和研究转折,这些关键词是在主题演变过程中起到重要作用的节点,可以发现哪些主题在哪些年份在微生物肥料领域研究方面作出了承前启后的突出贡献,并可以用来表征研究领域转向,预测研究方向。本文利用WOS数据库的文献计量功能分析微生物肥料研究领域的发文量、主要研究机构、研究方向等方面;利用CiteSpace可视化软件^[11](version 6.1.R2)挖掘分析WOS数据库检索的文献,分析、描绘微生物肥料领域研究的关键词共现知识图谱以及突现词涌现情况。此外,本文还结合相关文献的精读补充,对该领域研究热点进行归纳和总结。

2 领域发展现状

2.1 发文总体概况

近20年来,微生物肥料领域发文量总体上均呈现逐年增长趋势(图1)。中国是发文最多的国家,有1 300篇,美国排名第二,有864篇,再次是印度(793篇)、巴西(484篇)和德国(367篇)等。对微生物肥料领域WOS数据库中的文献被引频次进行统计(表1),中国与全球的分布大体一致:在被引频次处在0-10次上的文献占比最多,其次为11-20次以及21-30次。与全球相比,中国高被引频次(41-50, 51-100, 100次以上)的文献占比略低。

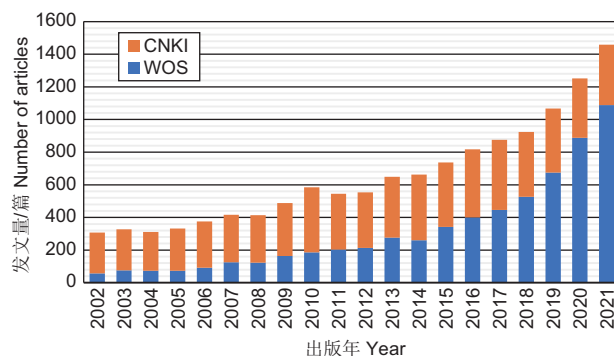


图1 近20年来国内外微生物肥料领域发文量年度变化趋势。

Fig. 1 Annual change trend of published papers in microbial fertilizer field at home and abroad in recent 20 years.

2.2 研究机构和人员发文统计

在研究机构方面,中国科学院、印度农业研究理事会、南京农业大学、中国科学院大学、巴西农业研究公司(Embrapa)是微生物肥料领域发文量较多的研究单元(表2),中国科学院具有完整的自然科学学科体系,在微生物研

表1 WOS数据库中微生物肥料领域全球与中国文献被引频次占比统计比较

Table 1 Statistics on citation frequency of papers in the field of microbial fertilizer in the world and China in WOS database

被引频次 Citations	0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-100	< 100
全球 Global	50.58%	17.35%	9.79%	5.86%	3.75%	7.71%	4.96%
中国 China	52.85%	17.85%	9.77%	6.62%	3.31%	6.92%	2.69%

究所、天津工业生物技术研究所、生态环境研究中心、沈阳应用生态研究所、分子植物科学卓越创新中心等多个研究所/中心布局微生物肥料相关研究；印度农业研究理事会是印度全国性的农业科研协调机构，其在农作物科学、自然资源管理、农业工程等领域发挥着重要作用；南京农业大学资源与环境科学学院主要聚焦农业和农村源的生态环境问题，以“农学-生态-环境”学科交叉融合为特色，开展农业资源与环境、生态学以及环境科学与工程等方面的研究；巴西农业研究公司是巴西农业研究系统中的最大组成部分，旨在通过科技研发加强食物安全和提高作物产量等。对该领域发文作者进行分析发现，发文量排名前五位学者中我国占了2位（表3），分别为南京农业大学沈其荣院士以及李荣教授，沈其荣院士长期从事土壤微生物等的研究与推广工作，研究成果为经济作物产业可持续发展提供了技术支撑；李荣教授的研究以新型微生物肥料研制与土壤微生物区系调控和植物微生物互作为主。Babalola OO在土壤-植物微生物相互作用方面拥有超过20年的研究经验，专注于根际宏基因组学方面的研究；Prasanna R主要在细菌、酶和植物学领域专注相关生物肥料和固氮等方面；Kuzakov Y是著名土壤生态学家，在土壤与植物互作尤其根-土界面碳根际过程方面有杰出成就。

2.3 主要研究方向分析

近20年来，WOS数据库中微生物肥料领域文献研究方向最多的是农业，有2 900篇，约占总发文量的46%，其次为环境科学生态学（1 488篇）、植物科学（1 263篇）、微生物学（720篇）和生物技术应用微生物学（507篇）（图2）。而CNKI数据库中微生物肥料领域发文量较多的研究主题分别为根瘤菌、微生物肥料、生物肥料、微生物、土壤微生物、固氮菌等，发文量较多的学科包括农业基础科学（2 499篇）、农艺学（2 159篇）、农作物（1 859篇）、生物学（1 062篇）以及园艺学（997篇）。总体来看，两数据库的研究方向都集中在农业及环境相关领域。

在微生物肥料领域，被引频次前十的高被引文献列表见表4，其中印度学者2012年发表的有关农业中植物根际促生菌（PGPRs）的综述论文被引频次最高，达到957次。该文综述并讨论了PGPRs在农业改良相关方面应用进展及其作用机制，指出了PGPRs在促进植物生长的不同特性方面的发展和配制^[12]。其余论文的研究内容包括微生物提高土壤肥力^[13]、改

善土壤和根际环境^[14-16]、增加植物耐受性^[17]等，也大都涉及土壤细菌、根际细菌等的研究。这些高被引文献研究方向最多的为农业（3篇）和生物技术应用微生物学（3篇），其次是微生物学、植物科学以及科学技术其他主题。

3 领域发展趋势

3.1 历史概况

国内外微生物肥料的相关研究最早从豆科植物开始，早在17世纪，豆科植物的解剖结构就已被解析，而直到19世纪末，科学家们才发现豆科植物的结瘤细胞宿主内共生固氮菌（现被称为根瘤菌）可为植物提供额外的氮素^[18-20]。1895年，德国学者Noble研发出世界上最早的微生物肥料根瘤菌菌剂“Nitragin”，并成功申请了专利^[21]。此后根瘤菌菌剂在美国、英国、澳大利亚等国家得到了大范围推广^[22]。除了将根瘤菌运用到农业生产中外，自20世纪以来，具有固氮、溶磷和解钾能力的细菌也被相继从土壤中分离出来，并进一步被应用到农业生产当中，如圆褐固氮菌、贝氏固氮菌等自身固氮菌和解磷芽孢杆菌以及具有较强的无机磷溶解能力的青霉菌^[23]、解钾的胶质芽孢杆菌等。日本琉球大学比嘉照夫教授还研发出采

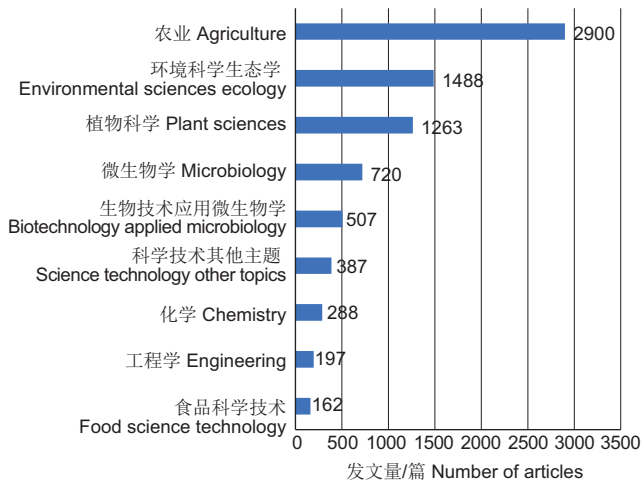


图2 微生物肥料领域WOS文献研究方向分布。
Fig. 2 Distribution of WOS literature research direction in microbial fertilizer field.

表2 微生物肥料领域WOS文献TOP5国家及机构发文章量统计

Table 2 Statistics on the number of publications in microbial fertilizer field issued by countries and institutions in WOS database

国家 Country	发文章/篇 Number of articles	机构 Institute	发文章/篇 Number of articles
中国 China	1300	中国科学院 Chinese Academy of Sciences	343
美国 America	864	印度农业研究理事会 Indian Council of Agricultural Research	262
印度 India	793	南京农业大学 Nanjing Agricultural University	142
巴西 Brazil	484	中国科学院大学 University of Chinese Academy of Sciences	140
德国 Germany	367	巴西农业研究公司 Embrapa	138

表3 微生物肥料领域WOS数据库TOP5发文章作者

Table 3 Author of highly cited literature of microbial fertilizer in WOS database

序号 No.	作者 Name	所属机构 Institute	国家 Country	发文章/篇 Number of articles	H指数 H-index
1	沈其荣 Shen QR	南京农业大学 Nanjing Agricultural University	中国 China	76	89
2	奥卢布科拉·奥卢兰蒂·巴巴罗拉 Babalola OO	南非西北大学 North West University South Africa	南非 South Africa	37	35
3	拉德哈·普拉桑纳 Prasanna R	印度农业研究理事会 Indian Council of Agricultural Research	印度 India	30	42
4	雅科夫·库兹亚科夫 Kuzakov Y	德国哥廷根大学 University of Gottingen	德国 Germany	22	88
5	李荣 Li R	南京农业大学 Nanjing Agricultural University	中国 China	22	36

Table 4 List of top 10 highly cited articles in microbial fertilizer field

图3 WOS数据库微生物肥料领域关键词共现图谱。
Fig. 3 Co-occurrence map of keywords in microbial fertilizer field in WOS database.

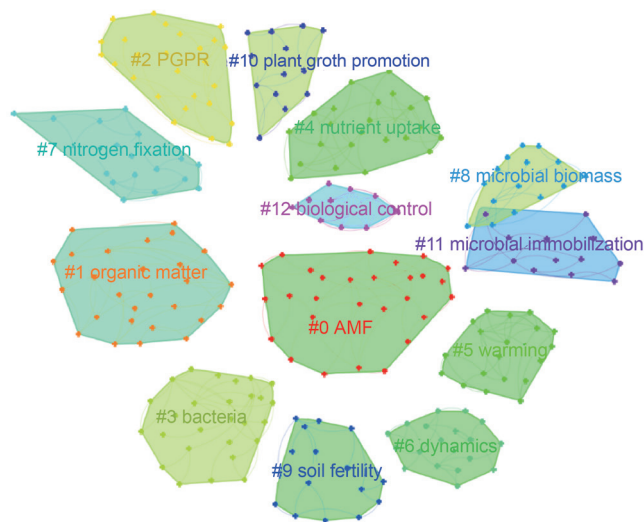


图4 WOS数据库微生物肥料领域关键词聚类图谱。
Fig. 4 Cluster map of keywords in microbial fertilizer field in WOS database.

与农业系统关系的研究^[44]、AMF充当生物刺激剂的研究^[45]、AMF等微生物提高作物产量和品质的研究^[46]等；(3)由聚类#5(warming)、聚类#11(microbial immobilization)和聚类#12(biological control)构成的“可持续农业与生态环境”主题，表明第3个热点领域为微生物肥料的生态服务方面，体现在微生物固定化与生物防治相关方面，如生物环境修复及有效性的研究^[47]、微生物与农业耕作管理的研究^[48]等。对WOS

数据库中近20年来微生物肥料领域的文献数据在CiteSpace中执行关键词突现探测功能，以每1年作为突现时间的最小单位，共出现116个突现词，对其中的30个展示发现，节点词出现的时间均为2002年(或更早之前)，“microbial activity(微生物活性)”突现时间最长(13年)，突现强度较高的有“sustainable agriculture(可持续农业, 23.55)、tolerance(耐受性, 22.33)、microbial activity(微生物活性, 21.92)”等词，“impact(影响)、bacterial(细菌)、mechanism(机制)、gene(基因)”突现时间延续至今，且与“sustainable agriculture(可持续农业)、ACC deaminase(ACC脱氨酶)”等词构成近两年微生物肥料领域研究人员的关注重点(表5)，这些结果表明微生物肥料领域近年来的关注重点为分子机制与可持续发展等方向。

3.2.2 国内研究热点分析 与国外相比，国内微生物肥料领域在农业中的发展集中在近10年^[49]，对近10年来(2012-2021年)微生物肥料领域CNKI获取的文献数据在CiteSpace中进行关键词共现的可视化分析(图5)，共形成211个关键词节点，240条共现连线，网络密度0.010 8。根瘤菌、土壤、产量、生物肥料、固氮菌、解磷菌等是重点研究领域。进一步对关键词进行共现网络聚类分析(图6)，聚类后的模块值Q为0.828 2(> 0.3)，同质性S为0.961 2(> 0.5)，表明微生物肥料领域研究的关键词聚类效果显著，子社团分区度较高，子社团内部合作较为紧密，学术交流频繁，研究领域比较接近^[50]。关键词聚类后共形成12个聚类，根据聚类成员组成析出核心主题，如图6所示，核心主题可以归纳为由聚类#0(筛选)、聚

表5 WOS数据库微生物肥料领域关键词突发性检测信息表
Table 5 WOS database keywords of sudden detection information table in microbial fertilizer field

关键词 Keyword	突现强度 Strength	突现词时间跨度 Span	突现持续时间 Duration	2002-2021
微生物活性 Microbial activity	21.92	2002-2014	13	-----
矿化 Mineralization	17.85	2002-2010	9	-----
萃取法 Extraction method	15.35	2002-2013	12	-----
氮素矿化 Nitrogen mineralization	12.63	2002-2010	9	-----
真菌 Fungi	10.58	2002-2010	9	-----
重氮营养醋杆菌 <i>Acetobacter diazotrophicus</i>	10.46	2002-2008	7	-----
结瘤 Nodulation	9.80	2003-2013	11	-----
森林 Forest	14.42	2006-2014	9	-----
温度 Temperature	11.73	2007-2013	7	-----
耕种 Tillage	9.56	2007-2012	6	-----
改善 Amendment	13.45	2013-2017	5	-----
病害 Disease	9.56	2014-2015	2	-----
群落结构 Community structure	15.22	2015-2019	5	-----
系统 System	12.89	2015-2017	3	-----
土地利用 Land use	10.52	2017-2018	2	-----
分解 Decomposition	9.98	2017-2018	2	-----
生物多样性 Biodiversity	17.66	2018-2019	2	-----
影响 Impact	13.60	2018-2021	4	-----
抗性 Resistance	11.29	2018-2019	2	-----
新属 Gen nov	11.10	2018-2019	2	-----
耐受性 Tolerance	22.33	2019-2021	3	-----
细菌 Bacterial	21.11	2019-2021	3	-----
机制 Mechanism	18.67	2019-2021	3	-----
基因 Gene	13.30	2019-2021	3	-----
可持续农业 Sustainable agriculture	23.55	2020-2021	2	-----
水 Water	18.49	2020-2021	2	-----
利用率 Use efficiency	17.50	2020-2021	2	-----
胁迫 Stress	13.82	2020-2021	2	-----
ACC脱氨酶 ACC deaminase	13.71	2020-2021	2	-----
酸 Acid	10.22	2020-2021	2	-----

果表明国内微生物肥料领域近年来的关注重点为分子机制与农业增产。

4 讨论

农业是重要的温室气体排放源,面对气候变化给新阶段农业发展带来的挑战,我国作为农业大国之一,积极应对、合理施策、进行农业低碳发展是应对气候变化、确保“双碳”目标实现的有效路径。因此,研发和应用微生物肥料是形势需要,也是发展的必然。然而我国在该领域还面临诸多问题,如在政策方面,微生物资源开发利用的政策仍不完善,微生物政策宣传与普及率不高、微生物资源相关产业政策设计滞后以及资源保护与地方政府利益存在“冲突”^[56];在微生物肥料包括整个农业微生物领域,还存在微生物资源收集和挖掘难度大、缺少相关信息数据库且尚未形成相关监测体系等问题;在微生物肥料应用上尤其是商业化推广方面,还存在菌种保活和田间应用效果不稳定等问题。目前,我国微生物肥料实行登记制,由“农业农村部微生物肥料和食用菌菌种质量监督检查测试中心”进行监管。未来为进一步扩大微生物肥料使用,加快推进农业现代化、实现“双碳”目标,还需积极发挥科技支撑作用。为此,本文提出以下几点相关建议。

(1) 重视微生物菌种资源的保藏与挖掘,加快筛选及推广应用新的功能菌种。积极发挥主要研究机构的创新引领作用,提升我国在微生物肥料领域的话语权。我国在微生物肥料可用菌种的保藏领域已取得了一定的成绩,如2010年世界微生物数据中心(World Data Center for Microorganism, WDCM)正式落户中国科学院微生物研究所;2017年,我国牵头发起“模式微生物基因组测序、数据挖掘及功能解析全球合作计划”(Global Catalogue of Microorganisms 10K Type Strain Sequencing Project)^[57]等。未来应在现有的分离筛选技术基础上,结合基于种水平宏基因组、宏转录组学、代谢组学、蛋白质组学等相关技术,建立新功能菌种快速定向新方法;进一步完善统筹微生物菌种资源数据平台及相关数据信息的管理,加强对微生物菌种资源的使用登记制度。

(2) 进一步开展微生物肥料作用机制机理解析以及肥效制约因子等方面的研究。国内在这些方面已经取得了一定的突破,如中国科学院分子植物科学卓越创新中心研究团队发现了SHR-SCR分子调控模块通过决定皮层细胞的命运调控豆科植物根瘤起始的分子机制^[58];铁作为根际微生物和土传病原菌争夺的核心稀缺资源之一,南京农业大学等研究人员对铁载体介导的根际细菌与青枯菌之间的铁竞争进行研究,在微生物组水平的铁和植物保护竞争之间建立了因果机制联系^[59];微生物肥料菌种芽孢杆菌应对植物免疫防卫实现根际定殖的新策略得到了进一步揭示^[60];微生物肥料合成菌群构建方面也取得了重要进展^[61]等。但作为微生物肥料研究重点之一,施用微生物肥料所引起的土壤及植物根部微生物群落变化及其与土壤及植物的协同作用仍需进一步探索;由细菌、真菌、蓝绿藻、地衣和苔藓植物等孢子植物类群与土壤形成的有机复合体——生物土壤结皮(biological soil crusts, BSCs)也需更多关注。

(3) 促进合成生物学技术在农业的应用,同时扩大田间试验,加强微生物菌种定殖存活以及田间应用效果稳定性方面的研究。目前市场上已经有一部分微生物肥料的相关产品,其分别对花生、小麦、水稻、玉米、大豆等一种或多种农作物

具有不同的相关适用性。近年来,通过合成生物学技术构建生态稳定的合成菌群在提高微生物肥料效果稳定性方面起到了重要作用。通过阐明群落互作特征与功能之间的关系对肥料微生物进行科学组合和配比,能够为实现定向调控植物微生物组、促进作物健康生长、更好发挥微生物肥料作用奠定基础,而合成菌群是实现这些目标的重要手段。南京农业大学微生物生态与根际健康实验室基于生物多样性-生态系统功能理论模型和微生物群落成员的互作关系,构建了稳定增强植物微生物群落有益功能的人工合成菌群^[62-64]。未来针对不同类型土壤、不同作物还需进一步探索最佳工艺条件,增强微生物肥料的肥效稳定性、提高微生物的定殖存活率及肥效,同时应当将基于生态原理的合成有益菌群组合策略应用于农业,并将相关研究成果转化应用于微生物肥料或菌剂产品,以促进解决微生物肥料田间应用效果稳定性差的问题。

(4) 推动农业科技创新,加大跨学科科研项目经费投入,促进多学科交叉融合、前沿及核心技术研发及应用,统筹推进多行业联合,为实现农业可持续发展以及“双碳”目标做出积极贡献。信息技术对科学研究活动产生了巨大影响,随着大数据与人工智能的应用,“互联网+”向“AI+”的转型,未来需要将计算机科学、数学、生物学等相结合,扩大知识维度,利用科研信息化手段推动微生物肥料和农业领域相关研究与应用^[65],依靠现代生物、信息通信、装备技术、资源管理等现代科技与管理系统,促进微生物肥料行业数字化、精准化发展,提高农业生产力和应对气候变化的能力,改善农业生产现状并实现减碳增汇。此外,微生物肥料的开发和应用不是单纯的科学研究领域,需要多行业(如公共管理和社会组织、制造业、金融业、教育行业等)的广泛参与,应充分发挥政府、市场和社会在农业碳中和中的合力,积极推动研究成果及应用取得更大突破。

5 结论

本文通过文献调研和基于CiteSpace软件的文献计量方法对国内外微生物肥料领域进行研究,包括国内外文献发文量、国家、研究机构、发文作者等,通过研究方向和关键词聚类进行了研究热点和趋势分析,结果表明:(1)国内外微生物肥料的相关研究始于豆科植物。(2)近年来,该领域的发文量总体呈现逐年增长趋势,中国科学院、印度农业研究理事会、南京农业大学等是该领域发文量较多的研究单元;随着人们对环境友好型社会关注度的提高以及不断增长的人口对粮食的巨大需求,微生物肥料研究领域以农业和生态环境相关学科及研究方向为主。(3)从研究热点和趋势来看,国内外的研究均集中在微生物菌种、微生物与植物生长等方面,具体来讲,农业作为国内持续关注的重点,研究人员关注农作物产量和微生物肥料应用等方面问题对策的研究相对更多,而国外则更关注微生物肥料作用分子机制和可持续发展的相关研究。未来为进一步扩大微生物肥料使用,加快推进农业现代化、实现“双碳”目标,本文提出以下几点相关建议:(1)重视微生物菌种资源的保藏与挖掘,加快筛选及推广应用新的功能菌种。(2)进一步开展微生物肥料作用机制机理解析以及肥效制约因子等方面的研究。(3)促进合成生物学技术在农业的应用,同时扩大田间试验,加强微生物菌种定殖存活以及田间应用效果稳定性方面的研究。(4)推动农业科技创新、多学科交叉融合、前沿和核心技术研发及应用等。

参考文献 [References]

- Matson PA, Parton WJ, Power AG, Swift MJ. Agricultural intensification and ecosystem properties [J]. *Science*, 1997, **277** (5325): 504-509
- Cassman KG. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture [J]. *PNAS*, 1999, **96** (11): 5952-5959
- Tilman D, Cassman KG, Matson PA, Naylor R, Polasky S. Agricultural sustainability and intensive production practices [J]. *Nature*, 2002, **418** (6898): 671-677
- Alori ET, Glick BR, Babalola OO. Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture [J]. *Front Microbiol*, 2017, **8**: 971-979
- 中华人民共和国农业农村部. 肥料登记管理办法[EB/OL]. (2022-01-07). [2022-03-11]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/CYZCFGs/202201/t20220127_6387831.htm [Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Measures for the administration of fertilizer registration [EB/OL]. (2022-01-07). [2022-03-11]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/CYZCFGs/202201/t20220127_6387831.htm]
- 王涛, 乔卫花, 李玉奇, 奥岩松. 轮作和微生物菌肥对黄瓜连作土壤理化性状及生物活性的影响[J]. 土壤通报, 2011, **42** (3): 578-583 [Wang T, Qiao WH, Li YQ, Ao YS. Effects of crop rotation and microbial fertilizer on physical and chemical properties and biological activity of cucumber continuous cropping soil [J]. *Chin J Soil Sci*, 2011, **42** (3): 578-583]
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 20287-2006 农用微生物菌剂[S]. (2006-05-25). [2022-08-15]. <https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/gb/newGbInfo?hcno=A92C9E1BC611DEE314AD4D14B0C667DC> [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. GB 20287-2006 Microbial inoculants in agriculture [S]. (2006-05-25). [2022-08-15]. <https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/gb/newGbInfo?hcno=A92C9E1BC611DEE314AD4D14B0C667DC>]
- 中华人民共和国农业农村部. NY/T 798-2015 复合微生物肥料[S]. (2015-05-21). [2022-08-15]. <http://www.bzko.com/Common/ShowDownloadUrl.aspx?urlid=0&id=203460> [Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. NY/T 798-2015 Compound microbial fertilizer [S]. (2015-05-21). [2022-08-15]. <http://www.bzko.com/Common/ShowDownloadUrl.aspx?urlid=0&id=203460>]
- 中华人民共和国农业农村部. NY 884-2012 生物有机肥[S]. (2012-06-06). [2022-08-15]. <http://www.bzko.com/std/193532.html#> [Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. NT 884-2012 Biological organic fertilizer [S]. (2012-06-06). [2022-08-15]. <http://www.bzko.com/std/193532.html#>]
- 农业农村部微生物肥料和食用菌菌种质量监督检验测试中心. 登记产品[EB/OL]. [2022-08-15]. <http://www.biofertilizer95.cn/zhdjcpml> [Center for Quality Supervision and Test for Microbial Fertilizers and Mushroom Spawn of the Ministry of Agriculture. Registered products [EB/OL]. [2022-08-15]. <http://www.biofertilizer95.cn/zhdjcpml>]
- Sebastian Y, Chen CM. The boundary-spanning mechanisms of Nobel Prize winning papers [J]. *PLoS ONE*, 2021, **16** (8): 31
- Bhattacharyya PN, Jha DK. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture [J]. *World J Microbiol*, 2012, **28** (4): 1327-1350
- Hayat R, Ali S, Amara U, Khalid R, Ahmed I. Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review [J]. *Ann Microbiol*, 2010, **60** (4): 579-598.
- Diacono M, Montemurro F. Long-term effects of organic amendments on soil fertility: a review [J]. *Agron Sustain Dev*, 2010, **30** (2): 401-422
- Ma Y, Prasad M, Rajkumar M, Freitas H. Plant growth promoting rhizobacteria and endophytes accelerate phytoremediation of metalliferous soils [J]. *Biotechnol Adv*, 2011, **29** (2): 248-258
- Kuzayakov Y. Review: factors affecting rhizosphere priming effects [J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2002, **165** (4): 382-396
- Yang J, Kloepper JW, Ryu CM. Rhizosphere bacteria help plants tolerate abiotic stress [J]. *Trends Plant Sci*, 2009, **14** (1): 1-4
- Hellriegel H, Wilfarth H. Untersuchungen über die Stickstoffnahrung der gramineen und leguminosen [M]. *Berlin: Buchdruckerei der "post" kayssler*, 1888
- Beijerinck MW. Rhizobial systematic [J]. *Bot Zeitung*, 1888, **46**: 796-804
- Huisman R, Geurts R. A roadmap toward engineered nitrogen-fixing nodule symbiosis [J]. *Plant Commun*, 2020, **1** (1): 16
- Naveed M, Mehboob I, Shaker MA, Hussain MB, Farooq M. Biofertilizers in Pakistan: initiatives and limitations [J]. *Int J Agric Biol*, 2015, **17** (3): 411-420
- 赵秉强, 张福锁, 廖宗文, 许秀成, 徐秋明, 张夫道, 姜瑞波. 我国新型肥料发展战略研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, **10** (5): 536-545 [Zhao BQ, Zhang FS, Liao ZW, Xu XC, Xu QM, Zhang FD, Jiang RB. Research on development strategies of fertilizer in China [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2004, **10** (5): 536-545]
- 曾玲玲, 崔秀辉, 李清泉, 刘峰, 王成, 王俊强, 张成亮, 季生栋. 微生物肥料的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2009, **37** (9): 116-119 [Zeng LL, Cui XH, Li QQ, Liu F, Wang C, Wang JQ, Zhang CL, Ji SD. Research progress on microbial fertilizer [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2009, **37** (9): 116-119]
- 比嘉熙夫, 冯玉润译. 拯救地球大变革[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997 [Teruo H, Feng YR. Great Change to Save the Earth [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997]
- Hiltner L. Über nevere erfahrungen und probleme auf dem gebiet der boden bakteriologie und unter besonderer beurchsichtigung der grundungung und broche [J]. *Arbeit Deut Landw Ges Berlin*, 1904, **98**: 59-78
- Malik KA, Bilal R, Mehnaz S, Rasul G, Mirza MS, Ali S. Association of nitrogen-fixing, plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR) with kallar grass and rice [J]. *Plant Soil*, 1997, **194**: 37-44
- Liu Y, Gao J, Bai ZH, Wu SH, Li XL, Wang N, Du XF, Fan HN, Zhuang GQ, Bo HT, Zhuang XL. Unraveling mechanisms and impact of microbial recruitment on Oilseed Rape (*Brassica napus*

- L.) and the rhizosphere mediated by plant growth-promoting rhizobacteria [J]. *Microorganisms*, 2021, **9** (1): 20
- 28 Jog R, Pandya M, Nareshkumar G, Rajkumar S. Mechanism of phosphate solubilization and antifungal activity of *Streptomyces* spp. isolated from wheat roots and rhizosphere and their application in improving plant growth [J]. *Microbiology (UK)*, 2014, **160**: 778-788
- 29 Cassan F, Vanderleyden J, Spaepen S. Physiological and agronomical aspects of phytohormone production by model plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR) belonging to the genus *Azospirillum* [J]. *J Plant Growth Regul*, 2014, **33** (2): 440-459
- 30 Venturi V, Keel C. Signaling in the rhizosphere [J]. *Trend Plant Sci*, 2016, **21** (3): 187-198
- 31 青宁生. 我国农业微生物学的先驱——张宪武[J]. 微生物学报, 2008, **48** (5): 569-570 [Qing NS. Zhang Xianwu, the pioneer of agricultural microbiology in China [J]. *Acta Microbiol Sin*, 2008, **48** (5): 569-570]
- 32 尹莘耘. “5406”的新进展及其应用[J]. 农业科技通讯, 1984 (9): 23-24 [Yin SY. New progress and application of “5406” [J]. *Bull Agric Sci Technol*, 1984 (9): 23-24]
- 33 Barea JM. Future challenges and perspectives for applying microbial biotechnology in sustainable agriculture based on a better understanding of plant-microbiome interactions [J]. *J Soil Sci Plant Nutr*, 2015, **15** (2): 261-282
- 34 Nehra VMC. A review on plant growth promoting rhizobacteria acting as bioinoculants and their biological approach towards the production of sustainable agriculture [J]. *J Appl Nat Sci*, 2015, **7** (1): 540-556
- 35 Smith DL, Subramanian S, Lamont JR, Bywater-Ekegard M. Signaling in the phytomicrobiome: breadth and potential [J]. *Front Plant Sci*, 2015, **6**: 709
- 36 Trivedi P, Leach JE, Tringe SG, Sa TM, Singh BK. Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health [J]. *Nat Rev Microbiol*, 2020, **18** (11): 607-621
- 37 Shen FT, Lin SH. Shifts in bacterial community associated with green manure soybean intercropping and edaphic properties in a tea plantation [J]. *Sustain*, 2021, **13** (20): 11478-11493
- 38 Subbarao GV, Nakahara K, Hurtado MP, Ono H, Moreta DE, Salcedo AF, Yoshihashi AT, Ishikawa T, Ishitani M, Ohnishi-Kameyama M, Yoshida M, Rondon M, Rao IM, Lascano CE, Berry WL, Ito O. Evidence for biological nitrification inhibition in *Brachiaria pastures* [J]. *PNAS*, 2009, **106** (41): 17302-17307
- 39 Zhao S, Li K, Zhou W, Qiu S, Huang S, He P. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2016, **216**: 82-88
- 40 Souza R, Ambrosini A, Passaglia LMP. Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils [J]. *Genet Mol Biol*, 2015, **38** (4): 401-419
- 41 Du Jardin P. Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation [J]. *Sci Horticult*, 2015, **196**: 3-14
- 42 Bindraban PS, Dimkpa C, Nagarajan L, Roy A, Rabbinge R. Revisiting fertilisers and fertilisation strategies for improved nutrient uptake by plants [J]. *Biol Fert Soils*, 2015, **51** (8): 897-911
- 43 Gabre VV, Venancio WS, Moraes BA, Furman FDG, Galvão CW, Gonçalves DRP, Etto RM. Multiple effect of different plant growth promoting microorganisms on beans (*Phaseolus vulgaris* L.) crop [J]. *Braz Arch Biol Technol*, 2020, **63**: 1678
- 44 Sun R, Li W, Dong W, Tian Y, Hu C, Liu B. Tillage changes vertical distribution of soil bacterial and fungal communities [J]. *Front Microbiol*, 2018, **9**: 699
- 45 Rouphael Y, Franken P, Schneider C, Schwarz D, Giovannetti M, Agnolucci M, De Pascale S, Bonini P, Colla G. Arbuscular mycorrhizal fungi act as biostimulants in horticultural crops [J]. *Sci Horticult*, 2015, **196**: 91-108
- 46 Bona E, Cantamessa S, Massa N, Manassero P, Marsano F, Copetta A, Lingua G, D'Agostino G, Gamalero E, Berta G. Arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting pseudomonads improve yield, quality and nutritional value of tomato: a field study [J]. *Mycorrhiza*, 2017, **27** (1): 1-11
- 47 Park JH, Lamb D, Paneerselvam P, Choppala G, Bolan N, Chung JW. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal (loid) contaminated soils [J]. *J Hazard Mater*, 2011, **185** (2-3): 549-574
- 48 Backer R, Rokem JS, Ilangumaran G, Lamont J, Praslickova D, Ricci E, Subramanian S, Smith DL. Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture [J]. *Front Plant Sci*, 2018, **9**: 1473
- 49 邹锦丰, 周传志. 微生物肥料研究进展及发展前景[J]. 现代农业科技, 2021 (22): 142-144 [Zou JF, Zhou CZ. Research progress and development prospect of microbial fertilizer [J]. *Mod Agric Sci Technol*, 2021 (22): 142-144]
- 50 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, 2016 [Li J, Chen CM. Citespace: Scientific Text Mining and Visualization [M]. Beijing: Capital Economic and Trade University Press, 2016]
- 51 曾祥炼, 席晓黎, 吴耀领, 王和玉, 王莉. 酒糟堆肥固氮微生物的筛选及性能研究[J]. 贵州农业科学, 2021, **49** (7): 57-61 [Zeng XL, Xi XL, Wu YL, Wang HY, Wang L. Screening and performance of nitrogen-fixing microorganisms in lees compost [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2021, **49** (7): 57-61]
- 52 侯福星, 赵媛, 胡坪坤, 李彬, 张文. 寒旱区新型耐盐脲酶微生物筛选及鉴定[J]. 干旱区资源与环境, 2021, **35** (11): 178-183 [Hou FX, Zhao Y, Hu PS, Li B, Zhang W. Screening and identification of new salt-tolerant urease microorganisms in cold regions [J]. *J Arid Land Resour Environ*, 2021, **35** (11): 178-183]
- 53 杨婉秋, 敬洁, 朱灵, 高永恒. 川西北高寒草甸植物根际促生菌筛选及其特性研究[J]. 草地学报, 2021, **29** (6): 1174-1182 [Yang WQ, Jing J, Zhu L, Gao YH. Screening and characteristics of plant growth-promoting rhizobacteria from alpine meadow plants in northwestern Sichuan [J]. *Acta Agres Sin*, 2021, **29** (6): 1174-1182]
- 54 张志强, 崔亚青, 王素华, 吴志刚, 朱皓强. 我国复合微生物肥料的现状及发展前景[J]. 生物技术世界, 2015 (8): 235-237 [Zhang ZQ, Cui YQ, Wang SH, Wu ZG, Zhu HQ. Present situation and development prospect of compound microbial fertilizer in China [J]. *World Biotechnol*, 2015, **8**: 235-237]
- 55 李国, 黄春波, 郑淑清, 陈艳, 贾春亮. 农业可持续发展中土壤肥

- 料存在的问题与对策思考[J]. 农业与技术, 2018, **38** (2): 55-55
- [Li G, Huang CB, Zheng SQ, Chen Y, Jia CL. Problems and countermeasures of soil fertilizer in agricultural sustainable development [J]. *Agric Technol*, 2018, **38** (2): 55-55]
- 56 唐雪. 我国农业微生物资源开发与利用政策研究[D]. 上海: 东华大学, 2018 [Tang X. Present policy research of development and utilization of microbial resources of agricultural in China [D]. Shanghai: Donghua University, 2018]
- 57 Wu LH, McCluskey K, Desmeth P, Liu SJ, Hideaki S, Yin Y, Moriya O, Itoh T, Kim CY, Lee JS, Zhou YG, Kawasaki H, Hazbon MH, Robert V, Boekhout T, Lima N, Evtushenko L, Boundy-Mills K, Bunk B, Moore ERB, Eurwilaichitr L, Ingsriswang S, Shah H, Yao S, Jin T, Huang JQ, Shi WY, Sun QL, Fan GM, Li W, Li X, Kurtboke I, Ma JC. The global catalogue of microorganisms 10K type strain sequencing project: closing the genomic gaps for the validly published prokaryotic and fungi species [J]. *Giga Sci*, 2018, **7** (5): 4
- 58 Dong WT, Zhu YY, Chang HZ, Wang CH, Yang J, Shi JC, Gao JP, Yang WB, Lan LY, Wang YR, Zhang XW, Dai HL, Miao YC, Xu L, He ZH, Song CP, Wu S, Wang D, Yu N, Wang ET. An SHR-SCR module specifies legume cortical cell fate to enable nodulation [J]. *Nature*, 2021, **589** (7843): 586-590
- 59 Gu SH, Wei Z, Shao ZY, Friman VP, Cao KH, Yang TJ, Kramer J, Wang XF, Li M, Mei XL, Xu YC, Shen QR, Kummerli R, Jousset A. Competition for iron drives phytopathogen control by natural rhizosphere microbiomes [J]. *Nat Microbiol*, 2020, **5** (8): 1002-1010
- 60 Zhang H, Xiong Q, Wu G, Dong X, Zhang R. *Bacillus velezensis* tolerance to the induced oxidative stress in root colonization contributed by the two-component regulatory system sensor ResE [J]. *Plant Cell Environ*, 2020, **44** (9): 3094-3102
- 61 Sun X, Xu Z, Xie J, Thomsen VH, Tan T, Zheng D, Strube ML, Dragos A, Shen Q, Zhang R, Kovacs AT. *Bacillus velezensis* stimulates resident rhizosphere *Pseudomonas stutzeri* for plant health through metabolic interactions [J]. *ISME J*, 2022, **16** (3): 774-787
- 62 Wei Z, Yang TJ, Friman VP, Xu YC, Shen QR, Jousset A. Trophic network architecture of root-associated bacterial communities determines pathogen invasion and plant health [J]. *Nat Commun*, 2015, **6**: 8413
- 63 Hu J, Wei Z, Friman VP, Gu SH, Wang XF, Eisenhauer N, Yang TJ, Ma J, Shen QR, Xu YC, Jousset A. Probiotic diversity enhances rhizosphere microbiome function and plant disease suppression [J]. *mBio*, 2016, **7** (6): e01790
- 64 Li M, Wei Z, Wang JN, Jousset A, Friman VP, Xu YC, Shen QR, Pommier T. Facilitation promotes invasions in plant-associated microbial communities [J]. *Ecol Lett*, 2019, **22** (1): 149-158
- 65 马俊才, 刘斌, 吴林襄. 利用科研信息化手段推动微生物研究与应用[J]. 中国科学院院刊, 2013, **28** (4): 519-524 [Ma JC, Liu B, Wu LH. Promoting microbial research and application by means of scientific research informatization [J]. *Bull Chin Acad Sci*, 2013, **28** (4): 519-524]