

环境中微纳米材料对水稻影响的综合研究：文献计量学视角下的跨学科分析

李萍 宋凯^{通讯作者} 赵微

长春师范大学生命科学学院, 吉林 长春 130032

摘要：本研究专注于探讨微纳米材料对水稻的影响，该议题在全球范围内近年来备受瞩目。随着微纳米材料在多个领域的广泛应用，其对环境和农业生态系统的潜在影响已成为重要研究话题。虽然微纳米材料在促进植物生长和增强抗逆性方面展现出潜力，但其对环境的长期效应及潜在风险尚未完全明了。为此，本研究从 Web of Science Core Collection 数据库中筛选出 2000 年至 2023 年间发布的 429 篇关于微纳米材料对水稻影响的研究，并运用 CiteSpace 和 VOSviewer 等文献计量学工具进行了深入的可视化分析。分析结果表明，该研究领域是跨学科、活跃且持续进展的，其中亚洲国家扮演着关键角色。目前的研究焦点包括微纳米材料对水稻生长、抗逆性、营养吸收的影响，以及这些材料在改善土壤质量、增强植物免疫力和抗逆性方面的潜力。同时，环保型微纳米材料的开发、智能化和精准农业应用，以及微纳米材料的创新应用与市场开发也是当前的主要研究趋势。这些发现不仅为水稻生产与微纳米材料领域的共同发展提供了参考，也为相关政策制定和环境管理提供了科学依据。

关键词：文献计量学，微纳米材料，水稻，CiteSpace，VOSviewer

1. 引言

在现代工业和科技领域，微米（1 微米等于百万分之一米）和纳米（1 纳米等于十亿分之一米）尺度的材料因其独特的物理和化学性质而备受关注。微米级材料广泛应用于如过滤系统和催化剂等领域，而纳米材料则因其在电子、药物传递和材料科学中的应用而闻名。这些材料的小尺寸和高反应性使它们在各种应用中表现出色，但同时也引发了环境安全和健康方面的担忧。随着这些材料的大量生产和使用，它们逐渐进入生态环境中。在生产过程中的废料处理不当、产品使用过程中的磨损以及缺乏有效的废弃物处理机制都可能导致这些微米和纳米材料释放到空气、水体和土壤中。一旦进入环境，这些材料可能会沉积并积累，从而对生态系统产生长期

影响。

目前，微米材料备受关注的是微塑料（ $<5\text{mm}$ ）。这些微塑料按照来源可分为初生微塑料和次生微塑料：初生微塑料是指工业原料或生活用品中的塑料颗粒或树脂颗粒形成的污染物，通过河流和污水处理厂直接排放到水环境中；次生微塑料是指大型塑料污染物在环境中经历断裂和老化的过程后体积缩小，成为微塑料污染物^[1]。纳米材料具有独特的物理和化学性质，对植物的生长发育和抗逆性产生不同的影响。

水稻，作为全球三大粮食作物之一，特别是在亚洲地区，占据重要地位。然而，由于环境污染的加剧，水稻正面临着多方面的威胁。这其中包括来自重金属、塑料、矿物质缺乏、干旱以及盐度等多重因素的

挑战，尤其是近年来，随着微纳米材料的广泛应用，以及污染物在土壤里的分化裂解，导致微纳米颗粒在环境中不断积累，不可避免对水稻生态环境产生深远的影响。

当前关于微纳米材料对水稻影响的研究表明，该领域具有显著的复杂性和多样性。微纳米材料对水稻的影响既有正面效应，如促进种子发芽、幼苗生长和提高植株的抗逆能力等，也有潜在的负面影响，如抑制生长和影响植物的生理功能等。这些发现突显了对现有研究文献进行归纳总结的必要性，以便更全面地理解微纳米材料对水稻的影响。综合分析现有文献还有助于评估微纳米材料对水稻生态系统的长期影响。这包括对土壤微生物群落的影响、对水稻品质和产量的影响，以及对环境安全和食品安全的潜在影响。

文献计量学以文献为研究对象，用数学和统计学方法分析文献的学科分类、数量及变化、主要研究内容及演变等，对特定领域的学术文献进行定性和定量评估。目前主要通过数据库检索，统计文献信息，提取其中的学科、作者、国家、机构、关键词、共被引文献，共被引期刊，共被引作者等信息，基于这些信息的相互链接，构建知识可视化图谱，从而寻找某一领域近年来的发展状况、研究热点与前沿以及预判该领域未来的发展趋势，还可以关注研究该领域的地域分布了解其潜在原因，还有各国、各机构、学者之间的合作关系等等。文献计量学将某领域的研究信息直观的展示出来，使读者能快速的了解某一领域及其前沿动态，为未来该领域的科学探究提供理论支撑^[2]。

基于此，本研究以 Web of Science Core Collection(WoS)作为文献检索来源，以

已经公开发表的微纳米材料与水稻的相互作用的研究论文为研究对象，借助 CiteSpace 和 VOSviewer 等文献计量软件构建该领域的知识共现网络和可视化图谱，挖掘、提炼和总结文献中隐藏的内涵和规律，揭示该领域的发展历程、研究进展、现状、前沿热点和演进脉络等，为水稻生产和微纳米材料领域的协同发展提供借鉴。

2. 材料与方法

2.1. 数据来源

鉴于文献质量的严谨性和参考文献格式的规范性，本文所用文献来源于 WoSCC，（Web of Science 是 Clarivate 推出的数据库检索平台，是全球最大、国际公认的覆盖学科最多的综合性学术信息资源库之一。截至 2023 年，WoS 收录了 23115 种高质量科学期刊。WoSCC 是其一个重要数据库，具有较高的可信度和影响力。））。以 (((TI=(rice or Oryza sativa)) AND TS=(plant*)) AND TS=(nano or nanomaterial*or nanoplastic* or nanoparticl* or micromaterial* or microplastic*)) 进行检索，Document Types=（Article or Review Article），语言选择 English，检索时间跨度为 2000-01-01 至 2023-10-31，检索日期为 2023 年 12 月 8 日。得到的 527 篇文献样本，然后将不符合要求的文献剔除例如标题里含有“Guinea Pig”“jute”“husk”等词的文章。最终得出 429 篇完全符合要求的文献，下载内容选择“Full Record and Cited References”以纯文本文件格式导出，将文件命名为“download*.txt”（图 1）。

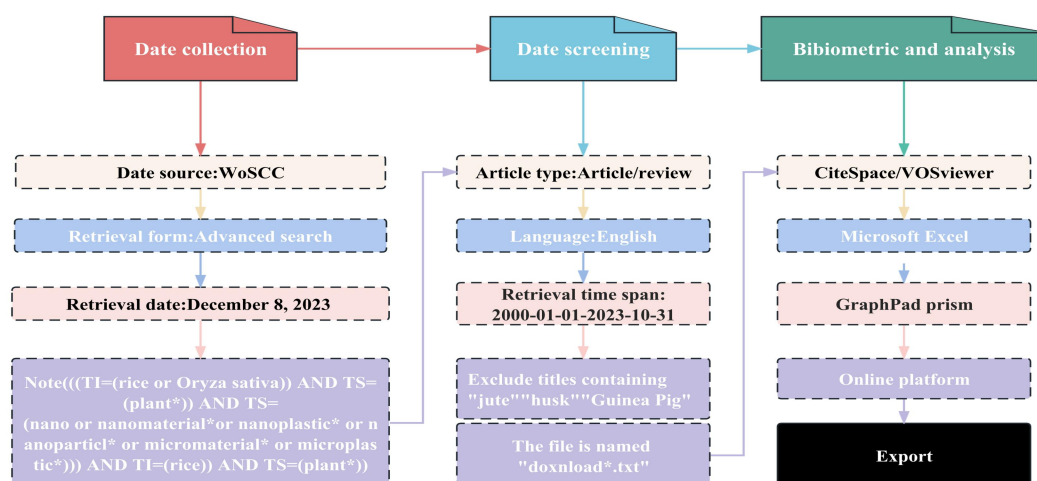


图 1: 文献检索和筛选流程图

2.2. 文献分析以及可视化

本文选择的文献计量软件为 CiteSpace 和 VOSviewer

CiteSpace 软件是由 Chen Chaomei from Drexel University 开发的基于 Java 的文献计量学工具, 用于分析特定主题的发展动态和研究集群。VOSviewer 软件是由 Leiden University 开发的基于网络数据创建可视化图谱。将样本数据导入 CiteSpace 和 VOSviewer, 对该领域的 author、country、institution、keyword、cited reference、cited journal、cited author 等进行统计分析^[3]。

将经过统计处理的文献样本数据导入 GraphPad Prism 绘图软件或网络绘图工具, 进行深入的统计分析和图形绘制。同时, 利用 Microsoft Excel 进行文献增长率的计算, 以量化分析该领域的发展趋势和动态变化。

3. 结果

3.1. 国家或地区发文量

所有的刊文涵盖了 41 个国家或地区。在不同国家或地区发文量中 (图 2A), 中国发文量占比最高 (262 篇, 占比 61.07%), 其次是美国 78 篇 (18.18%)、印度 77 篇

(17.95%)、巴基斯坦 45 篇 (10.49%) 埃及 27 篇 (6.29%)。中国在发文量上分别是美国的 3.36 倍和印度的 3.40 倍, 凸显了中国在该研究领域的领先地位以及对全球研究的显著贡献。图 2B 展示了世界范围内的发文国家的地理分布。

从各国发文量可视化图谱图 2C 中可以看出中国在该研究领域贡献最大 (节点越大, 发文越多), 其次为美国、印度、巴基斯坦、埃及。同时, 图 2C 还展示了各国之间的合作关系, 与中国连接的有 29 个国家, 说明中国与各国在该领域的合作最多。其中中国与美国、中国与巴基斯坦之间的连线最粗, 说明中国与两个国家的合作最密切。另外还有沙特阿拉伯、埃及和巴基斯坦相互之间的合作较为密切。

如图 2D 所示, 2000-2023 年年度刊文量排名前十的国家在该领域的研究趋势发生了显著变化, 在 2015 年之前, 该领域研究并未得到广泛的关注, 自 2015 年开始, 随着对该领域研究的深入, 各国的研究成果呈现爆发式增长。在这一过程中, 中国的增长速度最为显著, 年平均增长率达到了 18.48%。与此同时, 印度年发文量最初落后于美国, 从 2018 年开始, 印度在该领

域的研究迅速崛起，在 2019 年超越美国。此外，巴基斯坦在 2020 年后开始加强对该

领域的研究力度，其 2020 年至 2023 年的年增长率高达 23.09%。

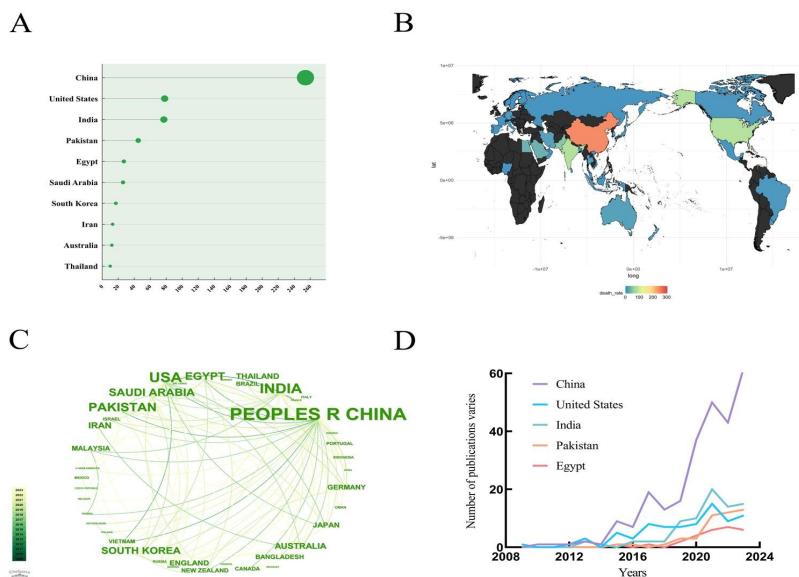


图 2: (A) 该领域最活跃的 10 个国家/地区。(B) 基于不同国家/地区出版物总量的世界地图。(C) 利用 CiteSpace 生成的国家/地区合作网络可视化地图。线条的粗细反映了合作强度。(D) 2009 年至 2023 年排名前五的国家/地区的年发文量变化趋势。

3.2. 机构

表 1 直观地展示了发文量排名前十的机构，其中排名前五的机构包括 Chinese Academy of Sciences、Zhejiang University、Ministry of Agriculture & Rural Affairs、Chinese Academy of Agricultural Sciences、Egyptian Knowledge Bank (EKB)，这些机构的发文量占总发文量的 42.89%。这些机构

对该领域的研究比较深入。Chinese Academy of Sciences 开始时间较早，较先注意到微纳米材料对水稻的影响。图 3 展示了致力于该领域研究的科研机构的可视化图谱，通过 Vosviewer 工具，以发表文章数量超过 3 篇的 102 个机构为基础构建图谱，进行机构协作分析。图中节点大小与发表文章数量呈正相关，其中中国的机构的国内合作比较多，不同国家的机构之间的合作较为紧密。

表 1: 排名前十的机构

排序	机构	发文量	首篇发文时间
1	Chinese Academy of Sciences	48	2012
2	Zhejiang University	46	2015
3	Ministry of Agriculture & Rural Affairs	35	2016
4	Chinese Academy of Agricultural Sciences	28	2016
5	Egyptian Knowledge Bank (EKB)	27	2015
6	Government College University Faisalabad	25	2019

7	University of Massachusetts Amherst	24	2015
8	University of Massachusetts System	24	2015
9	China Agricultural University	22	2015
10	South China Agricultural University	19	2015

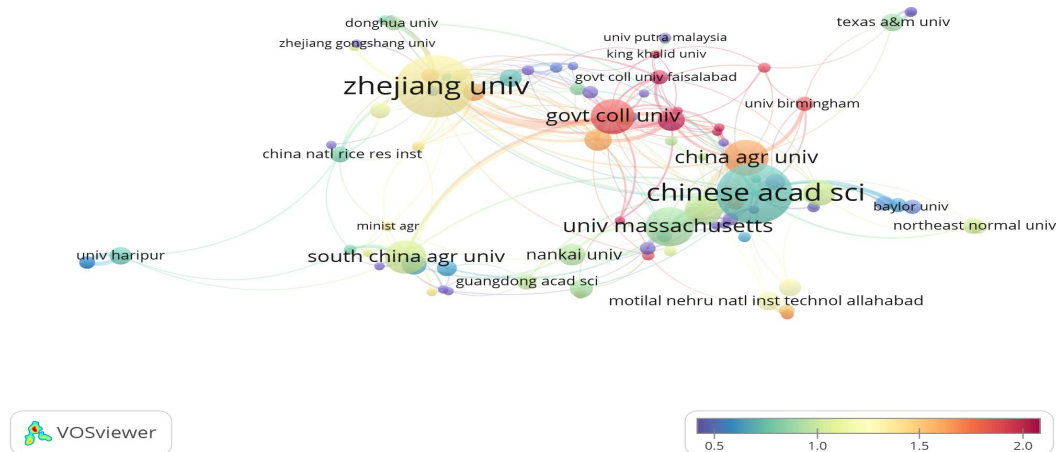


图 3: VOSviewer 生成的机构合作网络可视化地图。在该地图中, 节点代表一个机构, 每个节点的大小代表其相对的研究成果数量。每条线代表两个机构之间合作关系的强度, 强度值显示在线段之间。颜色变化代表规范引用。

3.2. 关键词

关键词共现可以反映一个领域的研究热点, 时区视图可以显示新热点的变化^[4]。关于该领域的高频术语(图 4A)包括 toxicity, growth, accumulation, plants, nanoparticles, oxidative stress, cadmium, phytotoxicity, soil 等。全部关键词共有 2050 个, 图 4B 选择了 T

≥ 20 的 35 个关键词构建共现可视化图谱。聚类分析(图 4C)可以显示研究领域的知识结构, 依据关键词发生的链接强度将网络主要划分为 10 个聚类每一个聚类中的项之间是高度同质的, 包含了 iron plaque, chilling stress, early growth, rice chloroplast, callus induction 等。

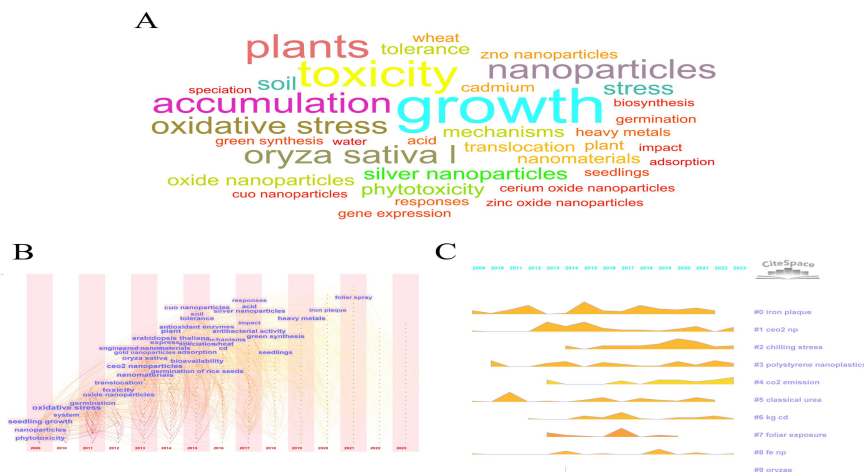


图 4: (A) 关键词共现词云图 ($T \geq 20$), 图片制作于 <https://hiplot.com.cn/>。(B) 关键词时区视图。注 2009–2023 年, 共现关键词 ≥ 33 个。线的颜色代表不同年份; 从 2009 年到 2023 年, 颜色由红到黄。(C) CiteSpace 在时间轴上显示的每个群组。

3.3. 被引用文献

该领域高被引文献前 10 如表 2 所示, 被引次数均在 150 次以上, 其中 Lin, Sijie 于 2009 年发表的 Uptake, Translocation, and Transmission of Carbon Nanomaterials in Rice Plants 总计被引 451 次。图 5 利用 CiteSpace 进行了文献共被引分析, 将所有纳入的文献根据关键词主要分为了 15 个聚类。其中,

“Arabidopsis”(Cluster 7)如, 拟南芥与水稻受到微纳米材料的影响的对比、“water imbibition”(Cluster 6)如, 微纳米材料在水稻组织细胞内聚集会干扰植物的水分吸收、“transient expression”(Cluster 9)如, 碳纳米材料进入植物后相关基因的表达没有显著差异^[5]是相对早期的热点, 而“heavy metals”(Cluster 0)、“nanoplastics”(Cluster 1)、“biochar”(Cluster 4)是目前研究的热点。

表 2: 被引用次数最多的 10 篇文献

排序	文献	作者	时间	引文量	
				总计	每年 r
1	Uptake, Translocation, and Transmission of Carbon Nanomaterials in Rice Plants	Lin, Sijie	2009	451	30.07
2	Impact of nano-CuO stress on rice (<i>Oryza sativa</i> L.) seedlings	Shaw, Arun Kumar	2013	229	20.82
3	Effect of copper oxide nanoparticles on growth, morphology, photosynthesis, and antioxidant response in <i>Oryza sativa</i>	Da Costa, M. V. J.	2016	218	27.25
4	Effect of Cerium Oxide Nanoparticles on Rice: A Study Involving the Antioxidant Defense System and In Vivo Fluorescence Imaging	Rico, Cyren M.	2013	216	19.64
5	Microplastic pollution in rice-fish co-culture system: A report of three farmland stations in Shanghai, China	Lv, Weiwei	2019	204	40.8
6	Effect of silver nanoparticles on rice (<i>Oryza sativa</i> L.) seed germination and seedling growth	Thuesombat, Pakvirun	2014	199	19.9
7	Silica nanoparticles alleviate cadmium toxicity in rice cells: Mechanisms and size effects	Cui, Jianghu	2017	183	26.14

8	Microplastic particles increase arsenic toxicity to rice seedlings	Dong, Youming	2020	180	45
9	Physiological and molecular level effects of silver nanoparticles exposure in rice (<i>Oryza sativa</i> L.) seedlings	Nair, Prakash M. Gopalakrishnan	2014	175	17.5
10	Effect of silver nanoparticles on <i>Oryza sativa</i> L. and its rhizosphere bacteria	Mirzajani, Fateme	2013	173	15.73

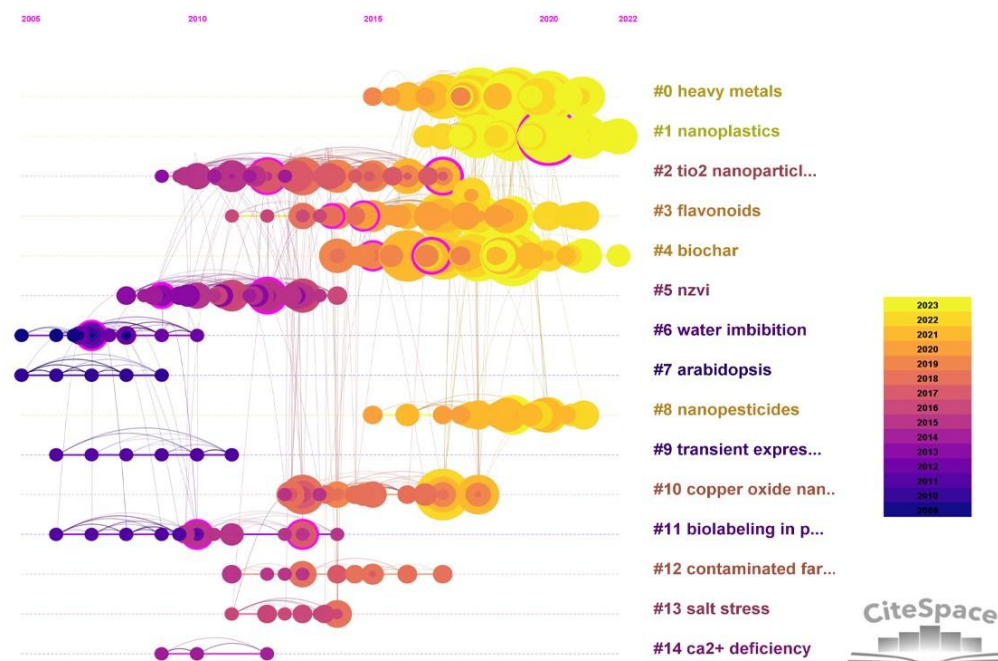


图 5: CiteSpace 的参考文献共引分析。在这张时间轴视图图中, 节点在横轴上的位置表示首次出现的时间点, 连接节点的线条表示共引关系。节点的大小与参考文献的引用次数成正比。黄色越多表示越接近 2023 年, 紫色越多表示越接近 2009 年。

4. 讨论

微纳米材料对水稻影响的文献计量学分析。从 21 世纪初开始, 学者们逐渐关注微纳米材料在水稻领域的应用潜力。研究重点包括两方面: 一方面是微纳米材料对水稻的毒性作用。随着工业发展, 微纳米颗粒被释放到环境中, 粒径较大的颗粒可能会堵塞水稻气孔影响气体交换和水分吸收, 从而进一步影响水稻代谢和发育, 它们还会随着粉尘飘落到水稻叶片上抑制水稻的光合作用, 粒径较小的颗粒能直接进入水稻体内主要诱导水稻活性氧产生, 引起氧化损伤, 更有甚者会引起染色体畸变^[6]。

微纳米塑料除了固有生态毒性还有吸附周围的污染物的复合毒性, 这种复合物对水稻的影响是不确定的, 受到物种类别等多种因素的影响。可降解塑料的出现似乎没有改变这一现状, 塑料在土壤中会经历老化的过程, 目前发现相同条件下可降解微纳米塑料比常规塑料在土壤中老化速度更快, 因此可降解微纳米塑料能否缓解微纳米塑料带来的生态压力还不能确定^[7]。此外微纳米塑料还会通过影响土壤性质, 降低土壤渗透性, 破坏土壤结构从而影响植物生长。另一方面, 学者们关注微纳米材料在水稻上的应用潜力, 通过研究和开发纳米肥料、

纳米种子包衣^[8]等新技术，利用纳米材料的缓释特性，减少资源浪费和环境污染，加强水稻的环境适应力从而有效提高水稻的产量和品质，保障国家粮食安全，促进农业可持续发展。同时，微纳米材料的应用还可以减少农药使用，降低环境污染，为农业绿色发展提供有力支持。在这个背景下，可以预见未来几年内，该领域的研究将进一步深入。一方面，学者们将继续探讨微纳米材料在水稻生产中的应用潜力，以期提高水稻的品质和产量（例如，研究如何利用微纳米材料改善水稻的生长环境、提高抗病

虫害能力等）；另一方面，他们还将关注微纳米材料对水稻生态系统的影响，以确保其可持续发展。此外，随着跨学科研究的不断深入，微纳米材料在水稻领域的应用将与其他领域（如生物科学、化学、物理学等）的研究成果相结合，推动农业科技的创新与发展。在这一过程中，国内外学者的合作与交流也至关重要，有助于形成全球性的研究网络，共同应对微纳米材料在水稻领域所面临的挑战。（图 6）

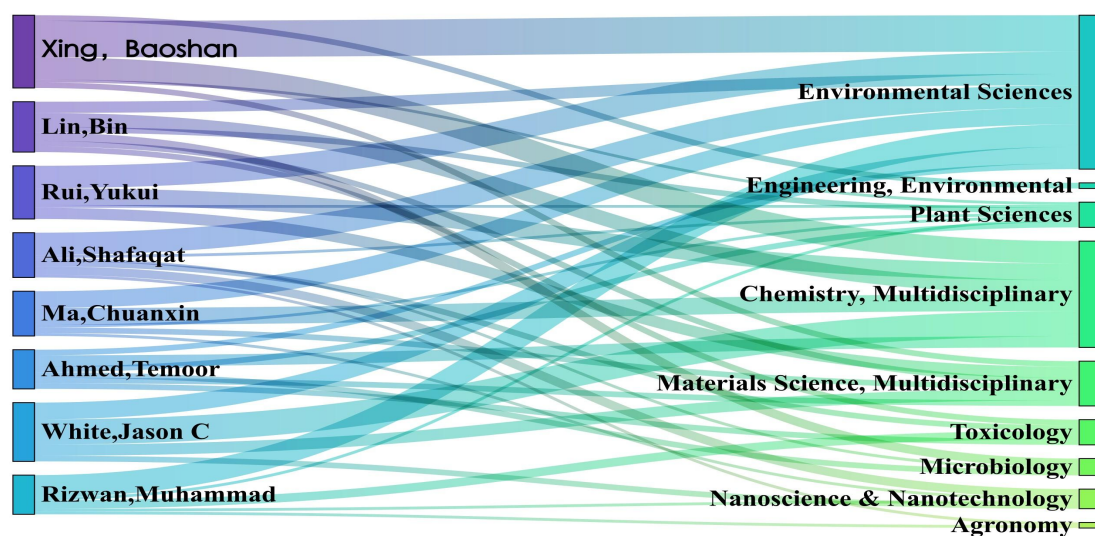


图 6：该领域的作者和学科。图片制作于 <https://www.chiplot.online/>

从发文国家或地区地理分布图中可以看出高产国家或地区主要集中在亚洲以及北美，据统计，中国在微纳米材料对植物影响方面的发文量高居首位，其中一个重要原因是中国作为人口大国，是世界上最大的水稻生产国之一。水稻在中国农业生产中占据着非常重要的地位，因此对于水稻的研究和改进一直备受关注。同时，中国政府非常重视水稻的发展，并出台了一系列相关政策，为微纳米材料对水稻影响的研究提供了良好的环境和条件。这些政策不仅鼓励和支持了相关研究和创新，还推动了该领域的发展，进一步提高了中国在微纳米材料对植物影响方面的发文量。中巴基斯坦的突出变化表明自 2020 年以来，巴基斯坦开始高度

重视微纳米材料对植物影响的研究领域，并积极与中国开展合作。这种紧密的合作关系为巴基斯坦在该领域的研究提供了重要的支持和推动，促使其在该领域飞速发展。

在微纳米材料对水稻影响这一新兴研究领域，研究需要综合考虑纳米材料的特性和水稻的生物学特性，以实现最佳的协同效应。尽管某些国家在水稻研究方面更加深入，如菲律宾作为亚洲国家，在水稻研究方面有着丰富的积累，其发文量超过 1000 篇。然而，在微纳米材料对水稻影响这一新兴研究领域，菲律宾的贡献相对较小。除了资金、技术和设备方面的限制外，这可能还与菲律宾在水稻种植和育种方面的研究重心有关。菲律宾可能更加注

重传统的育种方法、病虫害防治和施肥技术等方面的研究,这些方面的研究对于提高水稻产量和质量至关重要。然而,对于新兴的纳米技术在水稻中的应用,则可能关注较少。而另一些国家在微纳米材料研究方面更加领先,如埃塞俄比亚等非洲国家,主要作物并不是水稻。故而不同的研究重点和研究背景可能导致不同国家在微纳米材料对水稻影响这一领域的研究贡献存在差异。因此,为了促进不同国家在这一领域发展,促进研究的进展和成果的共享,需要加强国际合作和交流机制的建立以及跨学科合作。

在机构方面,Chinese Academy of Sciences、Zhejiang University、Ministry of Agriculture & Rural Affairs、Chinese Academy of Agricultural Sciences、Egyptian Knowledge Bank (EKB)发文量最高。在这些高产出的研究机构中,中国的中国科学院和浙江大学在微纳米材料研究领域表现尤为突出。他们在该领域的研究成果不仅在国内享有盛誉,也在国际上具有较高的影响力。农业农村部以及中国农业科学院作为中国农业领域的权威机构,也在微纳米材料对植物影响领域进行了深入研究,为中国在该领域的发文量贡献了重要力量。值得一提的是,埃及知识库(EKB)作为埃及的国家知识库,也在微纳米材料对植物影响领域取得了显著的成果,为全球科研发展做出了重要贡献。中国在微纳米材料对植物影响领域最具生产力的机构中占据主导地位,这一现象解释了中国为什么能够保持高发文量。

关键词和参考文献分析是学术论文的凝练,可以反映当前的研究热点;有助于了解其演变趋势,预测未来的研究前景和热点^[9, 10]。首先,该领域的研究主要集中在“phytotoxicity”;“plant uptake”;“cadmium”等的研究上。其次,从聚类出现的时间轴上可以看出低温胁迫在2012以后开始出现并在2021年到达峰值并且之后还有相关

研究,另外,在基于CiteSpace构建的关键词时区视图中,用不同的颜色表示出现的时间不同,红色连接的是较早出现的关键词,黄色连接的是当前的研究重点,可以看出研究热点随时间推移发生的变化,如“foliar spray”,“metabolism”,“nanoplastics”等,是近年来出现的热点。

CiteSpace的文献共被引分析时间线视图也可以揭示该领域的演变过程。该领域在早期研究中,Li, Bin等人致力于开发和优化微纳米材料的制备方法,并对其物理化学和生物性质进行表征,并将其应用于水稻病害防治,通过提高农药的靶向性和生物活性,降低农药使用减少环境污染。另外,Xing, Baoshan等人将微纳米材料应用于水稻生长环境观察其对水稻生长的影响,探究微纳米材料对提高水稻抗逆性的作用。其次,Lin, S.等人探究微纳米材料对提高水稻营养吸收和水分利用效率的作用。总之,在前期研究中研究重点主要集中在微纳米材料的制备与表征、对水稻生长和抗逆的影响在水稻病害防治中的应用以及水稻养分吸收和水分利用方面的研究。而现阶段更加关注重金属,纳米塑料和生物炭。在重金属胁迫的研究领域,学者们对镉的研究格外关注。这是因为镉是一种具有毒性的重金属,能够对人和生物的DNA造成损害,同时还能干扰酶的活性。由于工业活动等因素,土壤中的镉含量往往较高^[11],而镉的高迁移率使其能够从土壤中转移到包括作物在内的植物中。这一特性增加了镉沿食物链生物积累的风险,因此对镉的研究显得尤为重要。纳米塑料主要来源于环境中微塑料的降解过程。由于其尺寸较小,纳米塑料能够进入微塑料无法到达的生物体内^[12]。由于纳米塑料具有高比表面积和大量孔隙,它们更容易吸附有毒物质和生物分子。这些特性使得纳米塑料成为一种潜在的危險污染物,因此受到了广泛的关注和研究^[13]。生物炭是一种具有高比表面积、多孔结构和丰富表面官能

团的纳米材料，它可以改善土壤结构，提高土壤肥力，修复重金属及农药残留污染还可以增强植物抗逆性，因而被广泛的使用，如，生物炭改性增强生物炭的性能^[14]；制备生物炭肥料提高植物抗逆能力^[15]。除此之外发光微纳米材料也走进了人们的视线，由于其夜间发光特性，延长了水稻的光周期，且常见的红色长余辉和蓝色长余辉发光光谱与叶绿素吸收光谱高度相似，似乎会促进水稻生长，然而，我们也必须考虑到暗期对营养物质合成和积累的重要性。如果暗期被打断，可能会对水稻的生长产生不利影响。因此，长余辉对水稻的具体影响，需要进一步被挖掘。

5. 局限

本文虽然在一定程度上揭示了纳米材料对水稻的影响。首先，使用 WoSCC 作为唯一的数据来源确实可能忽略了其他数据库中的重要文献。不同的数据库可能有不同的收录范围、标准和偏好，依赖单一数据库可能导致研究结果的偏颇。为了更全面地了解一个领域的研究现状，未来可以考虑整合多个数据库的数据，从而获得更广泛、更具代表性的文献样本，尤其是中国发文量居于首位，所以许多高质量文章发表在中文期刊上，因此需要更加全面地涵盖不同数据库和语言的相关文献。其次，对于新发表的文献，由于其引用频次较低，可能不会被纳入分析范围，这确实可能导致一些潜在的研究热点被遗漏。一种可能的解决方案是，除了引用次数外，还可以考虑其他指标，如文章的下载量、学术评价等，来评估其潜在影响力。另外，由于研究领域和主题的多样性，构建一个能够准确捕捉所有相关文献的检索式确实是一个挑战。过于宽泛的检索式可能导致大量不相关的文献被纳入，而过于狭窄的检索式则可能遗漏重要文献。为了提高检索的准确性，可以尝试使用更先进的检索技术，如自然

语言处理、机器学习等，来帮助构建和优化检索式。综上所述，为了更全面地了解一个研究领域，需要不断地改进和完善研究方法，包括拓展数据来源、优化检索策略、采用更全面的评价指标等。

结论

本研究通过文献计量学分析，从跨学科的视角探讨了微纳米材料对水稻的影响，重点关注了研究趋势、主要发现及新兴主题。研究表明，全球在该领域的研究呈现出显著增长趋势，特别是中国在发表数量和质量上的贡献最为突出。数据分析揭示了几个关键研究方向：微纳米材料对水稻生长、抗逆性、营养吸收的影响，以及它们在改善土壤质量、增强植物免疫力等方面的潜力。

此外，研究还突出了环保型微纳米材料的开发、智能化农业技术的应用，以及精准农业的日益重要性。尽管这些材料在提高农业生产力和推动环境可持续性方面展现出潜力，但它们在环境中的长期影响，尤其是对土壤的积累效应和可能的毒性，仍然是亟需解决的重大问题。

本研究还强调了跨学科合作与国际合作的重要性，以应对这些挑战。随着该领域的不断发展，未来的研究应聚焦于解决微纳米材料对环境和生态系统潜在风险的知识空白，同时探索它们在农业实践中的新应用。政策制定者和行业利益相关者应共同努力，确保在农业中负责任地开发和应用这些材料，既要推动创新，又要关注环境和健康的可持续性。

总之，本研究为微纳米材料对水稻影响领域的动态发展提供了宝贵的见解，有助于加深对这些材料潜在益处与风险的理解，并为未来在可持续农业领域的优化应用奠定了坚实的基础。

参考文献

- [1] M. González-Pleiter, M. Tamayo-Belda, G. Pulido-Reyes, G. Amariei, F. Leganés, R. Rosal, F. Fernández-Piñas, Secondary nanoplastics released from a biodegradable microplastic severely impact freshwater environments, *Environ. Sci.-Nano* 6(5) (2019) 1382-1392.
- [2] X. Zhu, J. Hu, S. Deng, Y. Tan, C. Qiu, M. Zhang, X. Ni, H. Lu, Z. Wang, L. Li, Y. Luo, S. Huang, T. Xiao, S. Liu, X. Li, D. Shang, Y. Wen, Comprehensive Bibliometric Analysis of the Kynurenine Pathway in Mood Disorders: Focus on Gut Microbiota Research, *Frontiers in Pharmacology* 12 (2021).
- [3] L. Lugli, G. Mezzalana, M. Lambardi, H. Zhang, N. La Porta, *Paulownia* spp.: A Bibliometric Trend Analysis of a Global Multi-Use Tree, *Horticulturae* 9(12) (2023).
- [4] Y.W. Zhang, Y.C. Zhao, X.L. Liu, X.Y. Chen, C.B. Ding, L. Dong, J.P. Zhang, S.W. Sun, Q.T. Ding, S. Khatoon, X.Y. Che, Z.Q. Cheng, W.C. Liu, L.Q. Shen, F.Y. Xiao, Chokeberry (*Aronia melanocarpa*) as a new functional food relationship with health: an overview, *J. Future Foods* 1(2) (2021) 168-178.
- [5] C.X. Shen, Q.F. Zhang, J. Li, F.C. Bi, N. Yao, Induction of programmed cell death in *Arabidopsis* and rice by single-wall carbon nanotubes, *American Journal of Botany* 97(10) (2010) 1602-1609.
- [6] S. Maity, A. Chatterjee, R. Guchhait, S. De, K. Pramanick, Cytogenotoxic potential of a hazardous material, polystyrene microparticles on *Allium cepa* L, *J. Hazard. Mater.* 385 (2020).
- [7] Z. Ouyang, S. Li, J. Xue, J. Liao, C. Xiao, H. Zhang, X. Li, P. Liu, S. Hu, X. Guo, L. Zhu, Dissolved organic matter derived from biodegradable microplastic promotes photo-aging of coexisting microplastics and alters microbial metabolism, *J. Hazard. Mater.* 445 (2023).
- [8] F. Tian, W. Chen, C.E. Wu, X. Kou, G. Fan, T. Li, Z. Wu, Preservation of *Ginkgo biloba* seeds by coating with chitosan/nano-TiO₂ and chitosan/nano-SiO₂ films, *International Journal of Biological Macromolecules* 126 (2019) 917-925.
- [9] X. Gu, M.Y. Xie, R.B. Jia, S.F. Ge, Publication Trends of Research on Retinoblastoma During 2001-2021: A 20-Year Bibliometric Analysis, *Frontiers in Medicine* 8 (2021) 12.
- [10] Y.L. Shi, W. Wei, L. Li, Q. Wei, F. Jiang, G.Z. Xia, H.Z. Yu, The global status of research in breast cancer liver metastasis: a bibliometric and visualized analysis, *Bioengineered* 12(2) (2021) 12246-12262.
- [11] X.Y. Zhang, D.M. Chen, T.Y. Zhong, X.M. Zhang, M. Cheng, X.H. Li, Assessment of cadmium (Cd) concentration in arable soil in China, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22(7) (2015) 4932-4941.
- [12] F.A. Monikh, S. Holm, R. Kortet, M. Bandekar, J. Kekäläinen, A. Koistinen, J.T.T. Leskinen, J. Akkanen, H. Huuskonen, A. Valtonen, L. Dupuis, W. Peijnenburg, I. Lynch, E. Valsami-Jones, J.V.K. Kukkonen, Quantifying the trophic transfer of sub-micron plastics in an assembled food chain, *Nano Today* 46 (2022) 12.
- [13] H.X. Xie, X. Tian, X.Y. Lin, R. Chen, S. Hameed, L.M. Wang, Y.L. Yu, B. Li, Y.F. Li, Nanoplastic-Induced Biological Effects In Vivo and In Vitro: An Overview, *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 261(1) (2023) 26.
- [14] L.P. Wu, C.B. Wei, S.R. Zhang, Y.D. Wang, Y. Kuzyakov, X.D. Ding, MgO-modified biochar increases phosphate retention and rice yields in saline-alkaline soil, *J. Clean Prod.* 235 (2019) 901-909.

[15] M.Z. Xu, F. Luo, F. Tu, G. Rukh, Z.Q. Ye, Z.Q. Ruan, D. Liu, Effects of stabilizing materials on soil Cd bioavailability, uptake, transport, and rice growth, *Frontiers in Environmental Science* 10 (2022) 8.

[作者简介] 第一作者：李萍，长春师范大学生命科学学院 2022 级硕士研究生，研究方向为纳米生物学；通讯作者：宋凯，博士，教授，从事纳米生物材料的研究，songkai@ccsfu.edu.cn。

[基金项目] 长春师范大学研究生创新项目“桑黄多糖-纳米硒复合物的生物效应评价”（YZSCX2024100）。