

“双碳”背景下土壤碳固存研究的演变与最新动态

石 婷^{1,2}, 王晋峰^{1,2}, 程 曼³, 石 娇^{1,2}, 李建华^{1,2},
孙 楠⁴, 王恒飞^{1,2}, 徐明岗^{1,2,4}

(1. 山西农业大学 资源环境学院, 山西 晋中 030801; 2. 山西农业大学 生态环境产业技术研究院/土壤环境与养分资源山西省重点实验室, 山西 太原 030031; 3. 山西大学 黄土高原研究所, 山西 太原 030006; 4. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所/北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室, 北京 100081)

摘要: 在全球变暖背景下, 维持、提高和稳定土壤碳固存是助力“碳达峰、碳中和”(简称“双碳”)目标实现的重要手段。旨在为土壤碳固存的实践应用和全球气候变化的应对提供重要科学支持, 以 Web of Science 核心合集数据库中收录的 2 107 篇土壤碳固存相关论文为数据源, 通过文献计量工具 VOSviewer 和 CiteSpace 从合作网络、文献共被引、关键词等角度进行可视化计量分析。结果表明, 2002 年以来, 土壤碳固存研究领域的发文数量不断增长, 尤其是 2016 年以后相关文献快速增加。领域内高产国家主要集中于中国、美国和澳大利亚, 中国总发文量第一, 美国的国际影响力最大(中心度最高), 并且中国与美国之间建立了密切的合作关系; 研究机构发文数量以中国科学院最多, 排名前 10 的机构中的 5 所(中国科学院、西北农林科技大学、中国农业科学院、中国农业大学、南京农业大学)均来自中国; 目前形成了以 LAL RATTAN、SMITH PETE、ZHAO Xin、TIAN Xiaohong 和 XU Minggang 为核心的紧密学术团体。近年来, 研究热点主要集中在“土壤微生物在土壤碳循环中的作用”“秸秆还田等农业实践对碳储存的影响”“有机碳转化效率”等。未来应加强不同管理措施对土壤碳固存的影响、土壤微生物与碳循环关系、改进土壤碳循环模型等方面的研究。

关键词: 土壤碳固存; 土壤有机碳; 文献计量; CiteSpace; VOSviewer; 可视化分析

中图分类号: S153.6⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-2481(2024)06-0095-12

Evolution and Latest Trends of Soil Carbon Sequestration Research Under the Background of Carbon Peaking and Carbon Neutrality

SHI Ting^{1,2}, WANG Jinfeng^{1,2}, CHENG Man³, SHI Jiao^{1,2}, LI Jianhua^{1,2},
SUN Nan⁴, WANG Hengfei^{1,2}, XU Minggang^{1,2,4}

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China; 2. Institute of Eco-environment and Industrial Technology/Shanxi Province Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China; 3. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 4. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning/State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In the context of global warming, maintaining, improving and stabilizing soil carbon sequestration is an important means to achieve the goal of "carbon peaking and carbon neutrality". In order to provide crucial scientific support for the practical application of soil carbon sequestration and the response to global climate change, in this study, a dataset of 2107 papers related to soil carbon sequestration from the Web of Science Core Collection database was utilized. The visualization analysis was conducted by the bibliometric tools such as CiteSpace and VOSviewer, focusing on the collaboration networks co-citations and keywords. The results showed that the publication output in the field of soil carbon sequestration persistently increased since 2002, particularly after 2016. The most prolific countries in this field are primarily China, the United States, and Australia, with China being the highest total publication output and the United States exhibiting the greatest international influence(highest centrality). A close collaboration relationship has been established between China and the United States. Among research

收稿日期: 2024-02-20

基金项目: 山西省 2023 年度研究生教育创新项目(2023KY308); 科技基础资源调查专项(2021FY100500)

作者简介: 石 婷(1989-), 女, 山西霍州人, 讲师, 主要从事土壤碳固存与农业可持续发展研究工作。

通信作者: 徐明岗(1961-), 男, 陕西武功人, 研究员, 院士, 主要从事农田土壤有机质提升与农业可持续发展研究工作。

institutions, the Chinese Academy of Sciences contributes the most publications, with 5 of the top ten institutions (Chinese Academy of Sciences, Northwest Agriculture and Forestry University, Chinese Academy of Agricultural Sciences, China Agricultural University, Nanjing Agricultural University) from China. An academic community centered around Lal Rattan, Smith Pete, Zhao Xin, Tian Xiaohong and Xu Minggang has emerged. Recent research focused predominantly on topics such as "the role of soil microorganisms in soil carbon cycling", "the impact of agricultural practices such as straw returning on carbon storage", and "the conversion efficiency of organic carbon". In the future, research on the effects of different agricultural practices on soil carbon storage, the relationship between soil microorganisms and the carbon cycle, and the improvement of soil carbon cycle models should be enhanced.

Key words: soil carbon sequestration; soil organic carbon; bibliometrics; CiteSpace; VOSviewer; visualization analysis

全球气候变暖是 21 世纪人类面对的重大挑战之一。应对气候变暖、减少碳减排、增加碳汇等是当今国际政治、经济以及科学研究的热点。当前,“双碳”目标已成为我国的重要战略目标,即力争二氧化碳排放在 2030 年达到峰值,并努力争取 2060 年实现碳中和。土壤是地球上大气圈、水圈、岩石圈、生物圈几个圈层相互作用最活跃的交界面^[1]。土壤碳库储量为 2.4 万亿 t,约为地球系统植被碳库的 3~4 倍、大气碳库的 2~3 倍^[2],超过大气和植被有机碳储量的总和,是陆地生态系统最大的活跃碳库^[3]。土壤碳库微小的变化将深刻影响整个陆地生态系统的碳循环过程^[4-5],每年土壤碳库和大气 CO₂ 的交换量是人为排放的 10 倍以上,在调节全球气候变化和碳循环反馈中起到了极其重要的作用^[6]。在其他碳封存或低碳技术尚未广泛商业化应用的情况下,土壤碳固存可以为人类在未来 10~20 a 内争取宝贵时间^[7]。因而,土壤碳封存技术被《联合国气候变化框架公约》列为实现“双碳”目标的关键途径之一。

随着大数据时代的到来,大量纷杂的研究成果在科学计量学和数据可视化技术的推动下变得更加简单明了,且比传统的文献综述更具科学性与可读性^[8]。文献计量工具 VOSviewer 适合构建可视化大型网络图谱,运用关联强度的相似性测量分析各种合作关系,比如以图谱中的关键词共现网络进行聚类分析,可以得出科学领域的研究热点;CiteSpace 则是一款用于分析和可视化共引网络的 Java 应用程序,通过对每篇文献的作者、机构、国家、期刊等信息进行提取(文献的所有作者及其所属机构和国家等),并对所提取信息进行分析,形成可视化网络图谱,总结特定学科和领域研究进展和规律^[9-13]。

目前,对于利用文献计量学知识手段研究土壤碳固存的文献成果相对较少,并存在检索文献不

全面、分析方法单一、知识图谱解读欠缺等问题^[14]。本研究基于 Web of Science 核心数据库,结合 CiteSpace、VOSviewer 等软件,对国内外土壤碳固存的发文数量、主要国家、研究机构、研究学者、文献共被引、关键词共现及聚类分析等进行详细解读,分析其研究脉络和发展趋势,并探究土壤碳固存领域的研究热点,以期能为土壤可持续管理和减缓气候危机提供重要科学支撑。

1 数据和方法

1.1 数据收集

本研究采用的所有文献数据来源于 Web of Science 核心合集数据库。检索日期为 2023-05-26,检索条件:以“soil carbon sequestration”or“soil organic carbon sequestration”or“soil sequestering carbon”为全部检索词,文献类型设置为论文(Article)和综述(Review)。考虑到专业术语在表达上的区别,笔者以 OR 连接相近含义的术语,以英文双引号(“”)将词组分隔为一个整体,使检索范围更精确并减少疏漏。为减小误差、提高精度,将文献导入到 Endnote 中逐条整理挑选,删除与研究主题和检索式不符合的文献,经筛选后最终得到 2 107 篇文献。

1.2 研究方法

利用 Web of Science 自带分析检索结果功能,运用 Excel 对检索文献的发文量进行计量分析;利用 VOSviewer 对检索文献的发文国家(地区)、机构之间的合作网络进行可视化分析。利用 CiteSpace (6.1R6)对检索文献的发文国家、发文机构、发文作者、文献共被引、关键词共现、关键词聚类、关键词突现等指标进行计量分析,通过信息提取、定性与定量相结合等方法,梳理归纳土壤碳固存领域研究热点,并揭示该领域的发展轨迹和前沿趋势^[15]。

2 结果与分析

2.1 时间发展脉络

文献发表的趋势和数量能够反映出该领域研究的发展进程和速度^[16]。根据2002—2022年的2 032篇论文的年度产出情况(图1),土壤碳封存的研究最早开始于美国,早在20世纪90年代美国能源部就提出将空气中的CO₂封存于土壤中,从而减少温室效应的负面影响。2001年,美国率先提出了固碳科学和固碳科学技术的概念^[17-18]。联合国粮食及农业组织(FAO)于2002年发布了《土壤有机碳:对粮食生产和环境的重要性和潜力》的报告,该报告第1次提出了土壤碳固存的概念^[3]。2015年在法国举行的第21届联合国气候变化大会会议明确了耕地土壤中有机碳封存对减缓气候变化和粮食安全的重要性。在会上,法国农业部发起了关于“促进粮食安全和减缓气候变化的千分之四全球土壤增碳计划”的倡议(“4P1000”)^[19-20]。自此,土壤碳固存领域的研究成果不论是数量还是影响力上都有了显著的提升。学者们对其关注度也在不断增加,尤其是在2016年后增长迅速,2022年发文数量达到了294篇,上升到了一个新的高度。当前各国纷纷制定政策和行动计划,鼓励和支持土壤碳固存研究和实践,土壤碳固存领域的研究前景光明,未来在这个领域可能会有更多的突破和创新,为减缓气候变化和实现可持续发展作出积极贡献。

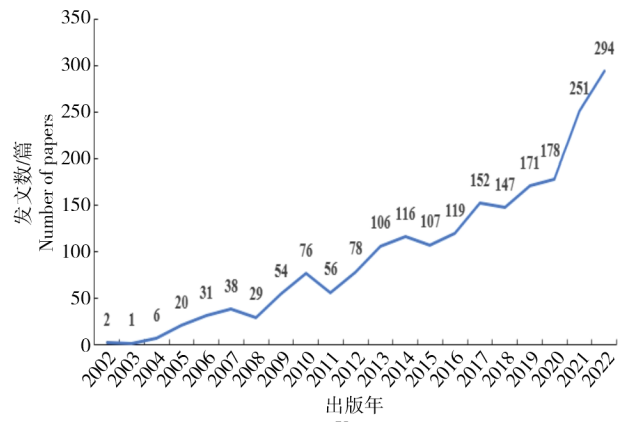


图1 土壤碳固存论文年度发文数量
Fig.1 Annual number of papers on soil carbon sequestration

2.2 发文国家与国际合作

为了更好地解析土壤碳固存领域的发文国家和关联度,对检索的2 107篇文献进行了国家合作图谱可视化分析。设置CiteSpace面板中的“Country”选项,其余为系统默认设置,可获得该领域发文国家的知识图谱(图2),可视化图谱中有110个节点、957条连线,网络密度为0.002 5。图2标注了发文量大于20篇的国家,图中每个节点表示国家,节点间的连线代表2个国家之间的联系,节点的大小表示发文的数目。为了更好地剖析该领域的发文国家,对知识图谱结果进行进一步的挖掘(表1)。从论文产出的角度看,中国和美国发表量最多,其后的8个国家论文产量差别较小。

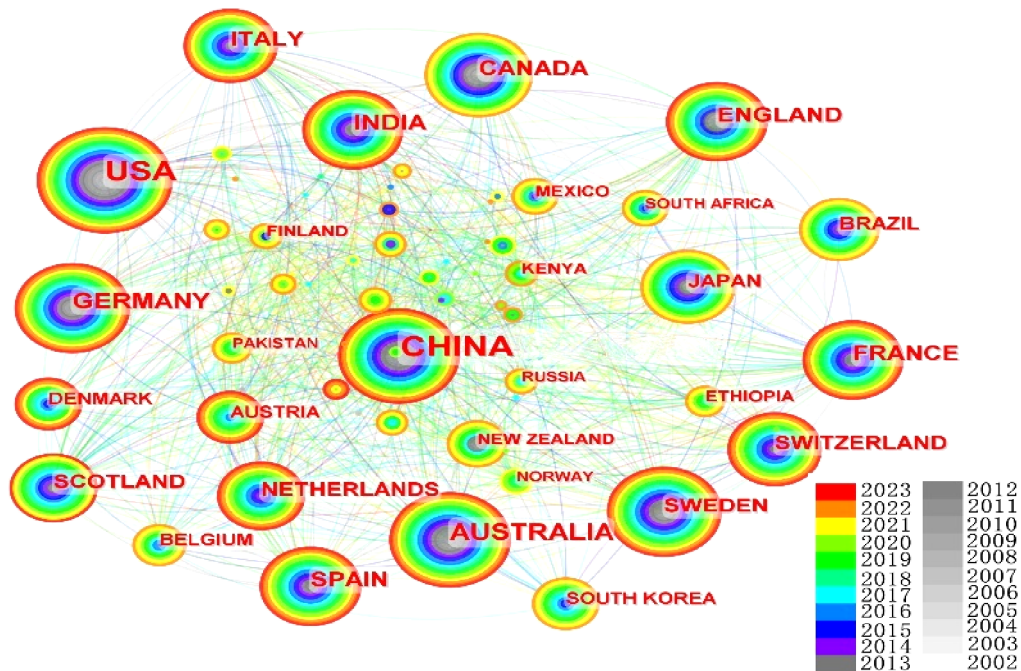


图2 土壤碳固存论文高产国家可视化图谱
Fig.2 Visual map of high-yield countries on soil carbon sequestration

表 1 按照发文数量和中心度排序的前 10 位高产国家
Tab.1 Top 10 high-yield countries ranked by the number and centrality of the paper published

排名 Rank	发文量/篇 Number of papers	中心度 Centrality	国家 Country	数值 Value
	国家 Country			
1	中国	732	美国	0.37
2	美国	585	法国	0.17
3	澳大利亚	192	德国	0.14
4	德国	154	澳大利亚	0.11
5	印度	142	意大利	0.10
6	英国	106	印度	0.08
7	加拿大	100	英国	0.08
8	西班牙	96	中国	0.05
9	法国	95	加拿大	0.04
10	意大利	92	西班牙	0.02

由图 2 可知,中国土壤碳固存研究起步较晚(2005 年),与美国相比,目前在土壤碳固存领域的基础研究和技术方面仍存在一定差距,但已经取得了较大的发展,研究也相对深入。国家中心性代表该国家在某特定研究领域的国际影响力。对国家的中心性进行排名,中心度值大于等于 0.1 的节点被视为关键性的节点,美国、法国、德国、澳大利亚、意大利这 5 个国家中心度大于等于 0.1,说明这 5 个

国家在土壤碳固存领域具有很高的创新性,其中美国中心性最高(0.37),表明美国的国际影响力最大,在土壤碳固存领域中发挥着巨大的作用。虽然中国发文数量是第 1,但其中心性(0.05)仅为美国的 13.5%。表明近年来中国在土壤碳固存领域较为活跃,但研究成果的国际影响力还有待提高,未来应加强在该领域的科研创新性和引领性。

为了更好地反映土壤碳固存领域的发文国家之间的联系,将 Web of Science 核心合集数据库的数据导入 VOSviewer,生成该领域发文国家合作关系网络图谱(图 3)^[14]。与 CiteSpace 一样,图中每个节点表示国家,节点大小与国家的发文量成正比,2 个节点的连线表示两国间的联系,连线的粗细表示合作强度^[16]。从图 3 可以看出,中国与美国之间建立了密切的合作关系,与此同时,两国与其他国家也有一些紧密的合作。说明中美两国对土壤碳固存研究重视程度都较高、投入力度也大。值得注意的是,澳大利亚、加拿大与中国合作紧密程度仅次于美国。从 Web of Science 核心合集数据库论文发表收录情况和国家间的合作网络关系可知,土壤碳固存领域中美两国的研究已具有显著的地位和较高的影响力^[14]。

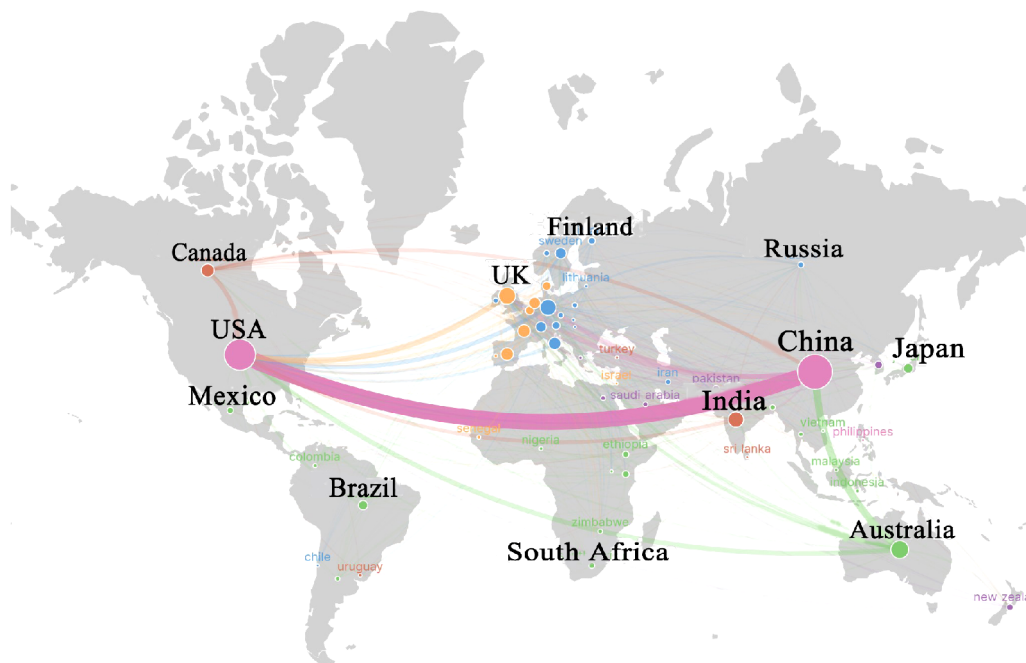


图 3 土壤碳固存的国际合作网络
Fig.3 National collaboration network on soil carbon sequestration

2.3 发文机构与合作

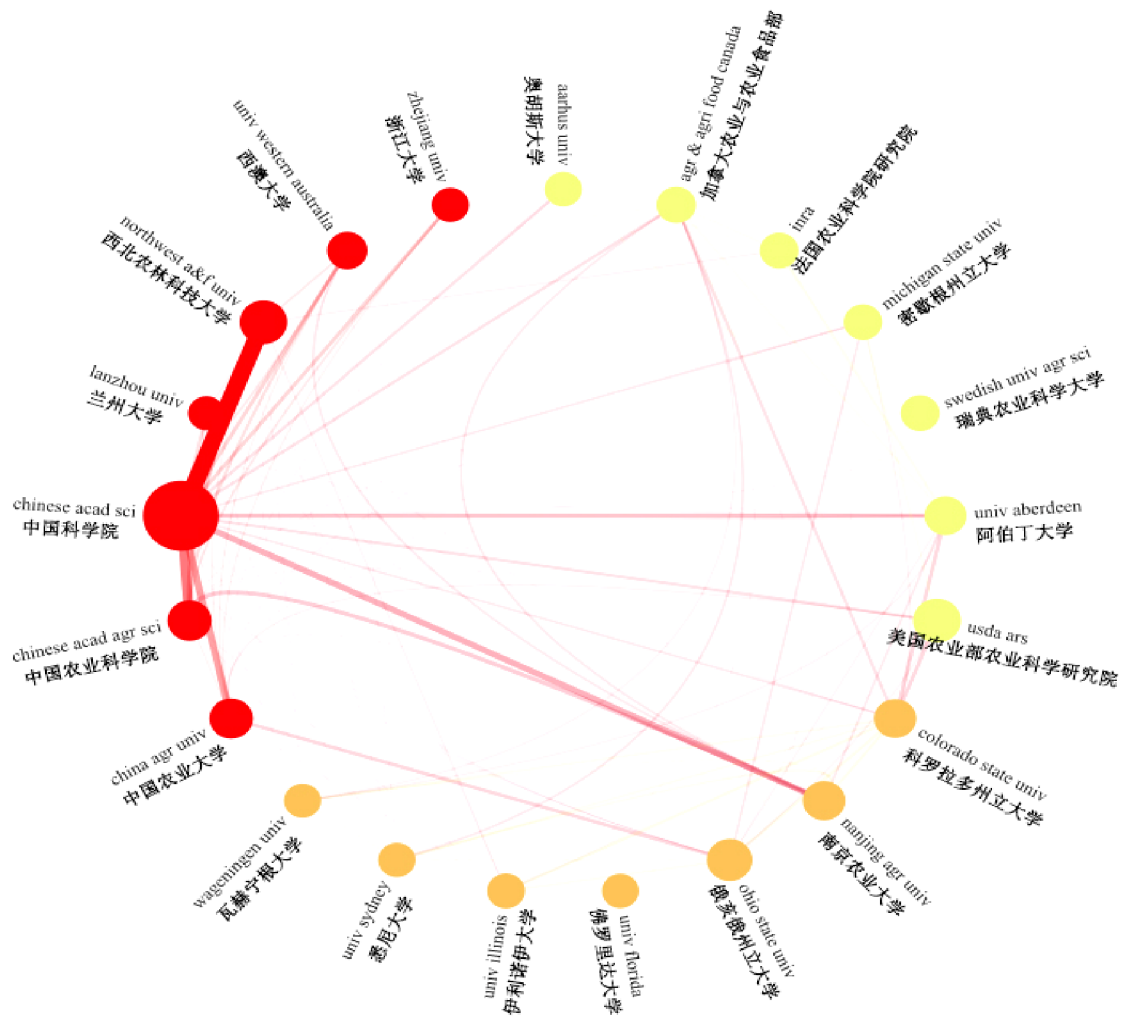
为了更好地反映土壤碳固存领域的发文机构和相关度,将 Web of Science 核心合集数据库的数

据导入 VOSviewer,生成该领域发文机构合作关系网络图谱(图 4)^[16]。图谱中每个节点表示机构,节点大小与机构的发文量成正比,2 个节点的连线表

示机构间的联系,连接线的粗细表示合作强度。国家高等院校和科研机构等在某个科学领域的论文发表数量和趋势可以间接显示出一个国家在该领域的权威性和人才队伍建设情况^[16]。

土壤碳固存领域发文量排名前10的机构依次为中国科学院(286篇)、美国农业部农业科学院(77篇)、西北农林科技大学(74篇)、俄亥俄州立大学(65篇)、中国农业科学院(55篇)、中国农业大学(54篇)、南京农业大学(48篇)、科罗拉多州立大学

(46篇)、阿伯丁大学(45篇)以及西澳大学(38篇)。在所有机构中,中国机构占比最大,排名前10的机构有5所都来自中国,占比50%。在所有机构的合作中,中国科学院、西北农林科技大学、中国农业科学院、中国农业大学、南京农业大学之间建立了较强的合作关系,说明这5所机构能充分利用不同高校和科研单位的资源,从而激发出新的研究视角,促进了土壤碳固存领域的学术创新。



颜色表示合作年份,黄色到红色依次代表较早到最新年份
Color represented the year of cooperation, and yellow to red represented the earlier to the latest year

图4 土壤碳固存论文高产机构合作网络(发文量不小于15篇)
Fig.4 Collaborative network of high-yield institutions on soil carbon sequestration (Number of papers not less than 15)

2.4 发文作者与合作

为了更好地反映土壤碳固存领域的核心作者和他们的合作关系,对检索文献进行了作者合作图谱可视化分析。设置CiteSpace面板中的“Author”选项,其余为系统默认值,可获得该领域核心作者的知识图谱(图5)。核心作者是推动科学领域学术创新和发展的主要力量,对其发文量进行分析,可

以有效识别某研究领域的发展趋势和脉络。根据普莱斯理论^[21]: $N=0.749(N_{max})^{1/2}$ (N_{max} 为发文量最大的作者, N 为核心作者的最低发文数量)计算,发文数量 ≥ 3 篇($N=2.802$)的学者可被认为是核心作者。图5展示了发文量大于3篇的作者,每个节点表示作者,2个节点的连线代表了作者之间的联系,节点的大小则是发文的数量。图谱中共有660个节

点、715 条连接,网络密度 0.003 3。由图 5 可知,土壤碳固存领域研究文献的作者合作网络雏形初现,影响力最大的学者是 LAL RATTAN,他是美国俄

亥俄州立大学土壤科学杰出教授、土壤碳循环和土壤碳固存领域的重要研究者,曾获得诸多荣誉和奖项,致力于研究可持续土壤管理和碳封存。

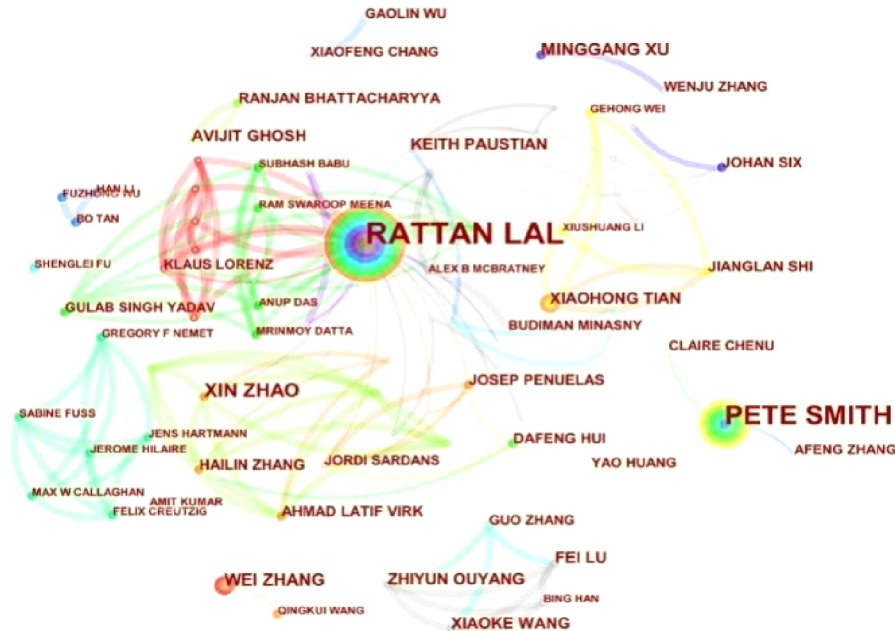


图 5 土壤碳固存论文高产作者的合作网络
Fig.5 Collaborative networks of high-yield authors on soil carbon sequestration

土壤碳固存领域高产(发量不小于 5 篇)学者分别为:Lal Rattan(50 篇),Smith Pete(24 篇),Zhao Xin(9 篇),Tian Xiaohong(6 篇),Ghosh Avijit(6 篇),Paustian Keith(6 篇),Lu Fei(6 篇),Virk Ahmad Latif(6 篇),Bhattacharyya Ranjan(5 篇),Xu Minggang(5 篇),Nair P K Ramachandran(5 篇),Nair Vimala D(5 篇),Six Johan(5 篇)。总体而言,土壤碳固存领域形成了以 Lal Rattan、Smith Pete、Zhao Xin、Tian Xiaohong 和 Xu Minggang 为核心的覆盖面较广的学术研究团体,学者们之间的交流与合作较为紧密,这使得该领域的研究力量相对集中,学者们之间联系密切,有利于该领域的深度合作探究。

2.5 文献共被引

在每一个研究领域,都会由于作者之间的引用行为形成一批同行认同的基础性的经典研究成果。这些成果在理论、方法、研究过程等方面为后续的研究提供了重要的基础和参考^[9]。图 6 是以 4 a 为时间切片的文献共被引分析,图中展示了被引频次大于 30 的 15 篇文献,将被引频次及中心度值均较高的 10 篇文献总结如表 2 所示,其中,“Geoderma”“Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America”和“Global Change

Biology”等 3 本期刊的文献占到 60%,可见这 3 本期刊在土壤碳固存领域的发文具有较高影响力。

选取部分具有代表性的文献进行重点解读。被引频次最多的文献是 MINASNY 等^[22]于 2017 年在 Geoderma 上发表的“Soil carbon 4 per mille”。该文献主要通过科学方法调查估算了全球 20 个地区的土壤有机碳储量和固碳潜力,评估了“千分之四全球土壤增碳计划”在这些地区是否可行,研究结果强调了各地区在土壤碳固存方面应采取的具体措施。它提供了土壤碳固存在大尺度上的一些量化的实证结果,是后续研究的重要参考,因此,被引频次排名第 1。

中心度是建立起 2 个不相关节点之间关系的桥梁。由表 2 可知,POEPLAU 等^[23]于 2015 年发表在 Agriculture Ecosystems & Environment 上的“Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops-A meta-analysis”文献中心度最高,为 0.23,该文献通过一个碳响应函数来描述 SOC 储量随时间的变化,首次量化了覆盖作物提高有机碳的潜力,最后表明在特定情况下覆盖作物种植是一种可持续的有效的缓解气候变化的措施的结论。其他排名前 10 的文献中主要关注于土壤碳固存的影响因素^[24-26]、如何评估不同尺度土壤碳

固存的减排效果^[27-28]、实现土壤碳固存的具体措施^[25, 29]、土壤微生物对碳固存过程的影响机制^[30]以及通过机器学习的方法评估土壤碳流失量^[31]等。

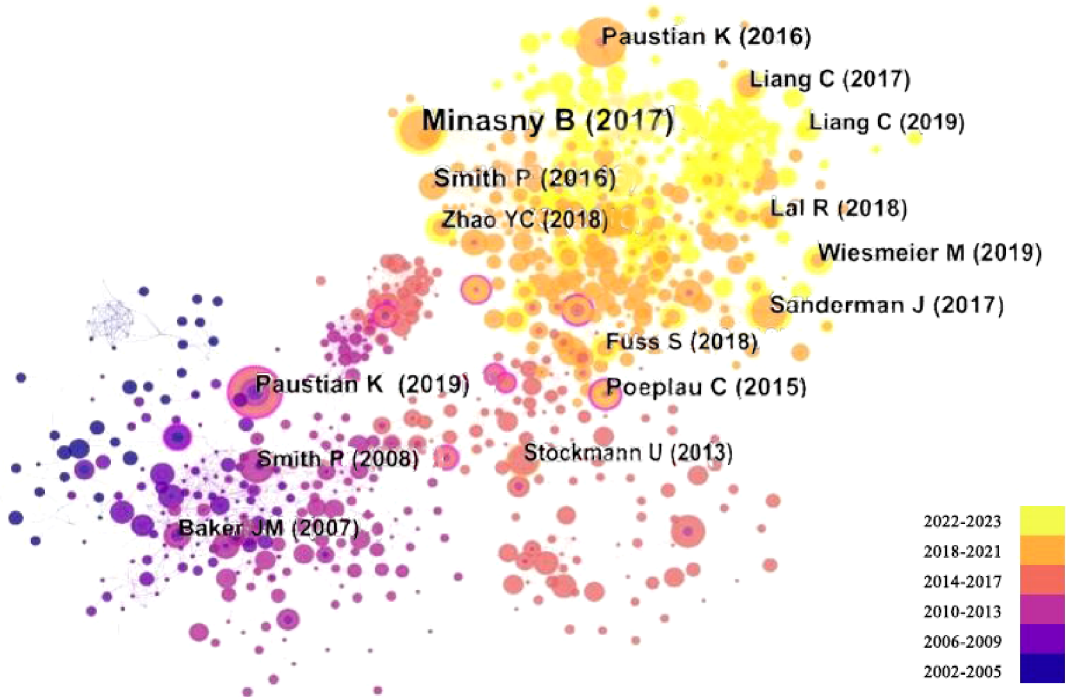


图6 土壤碳固存文献的共被引分析
Fig. 6 Co-citation analysis of literature on soil carbon sequestration

表2 关键文献的基本信息
Tab.2 Basic information of key literature

排名 Rank	标题 Title	第一作者 First author	发文期刊 Journal	被引频次 Citation frequency	中心度 Centrality
1	Soil carbon 4 per mille	MINASNY B	Geoderma	105	0.09
2	Climate-smart soils	PAUSTIAN K	Nature	84	0.05
3	Soil organic carbon storage as a key function of soils—A review of drivers and indicators at various scales	WIESMEIER M	Geoderma	46	0.01
4	Soil carbon debt of 12,000 years of human land use	SANDERMAN J	Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America	45	0.02
5	Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies	SMITH P	Global Change Biology	45	0.09
6	The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage	LIANG C	Nature Microbiology	44	0.01
7	Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops—A meta-analysis	POEPLAU C	Agriculture Ecosystems & Environment	42	0.23
8	Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects	FUSS S	Environmental Research Letters	37	0.02
9	Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems	LAL R	Global Change Biology	36	0.01
10	Economics and policy driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands	ZHAO Y C	Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America	35	0.02

2.6 基于关键词共现的研究热点分析

2.6.1 关键词共现分析 关键词是论文核心的聚焦。关键词共现是通过检索文献集中出现的词语

和词组,推演出土壤碳固存主题间关系的知识图谱,从而有利于我们更加全面了解该主题相关领域的研究热点。在 CiteSpace 中设置阈值 TopN=50,

TopN%=10,得到网络节点 632 个,边数 1 244 条,网络密度为 0.006 2 的土壤碳固存关键词共现图谱(图 7)^[16]。图中每个节点表示关键词,2 个节点的连线代表了关键词之间的联系,节点大小代表关键词频次,频次越大,圆圈越大。节点数量代表关键词

数量,边数代表关键词之间的连线数量。频次的高低反映了研究的广泛程度,中心度作为衡量节点权力的大小,可以反映其在网络中的重要性^[32]。将被引频次及中心度值排名前十的关键词总结如表 3 所示。

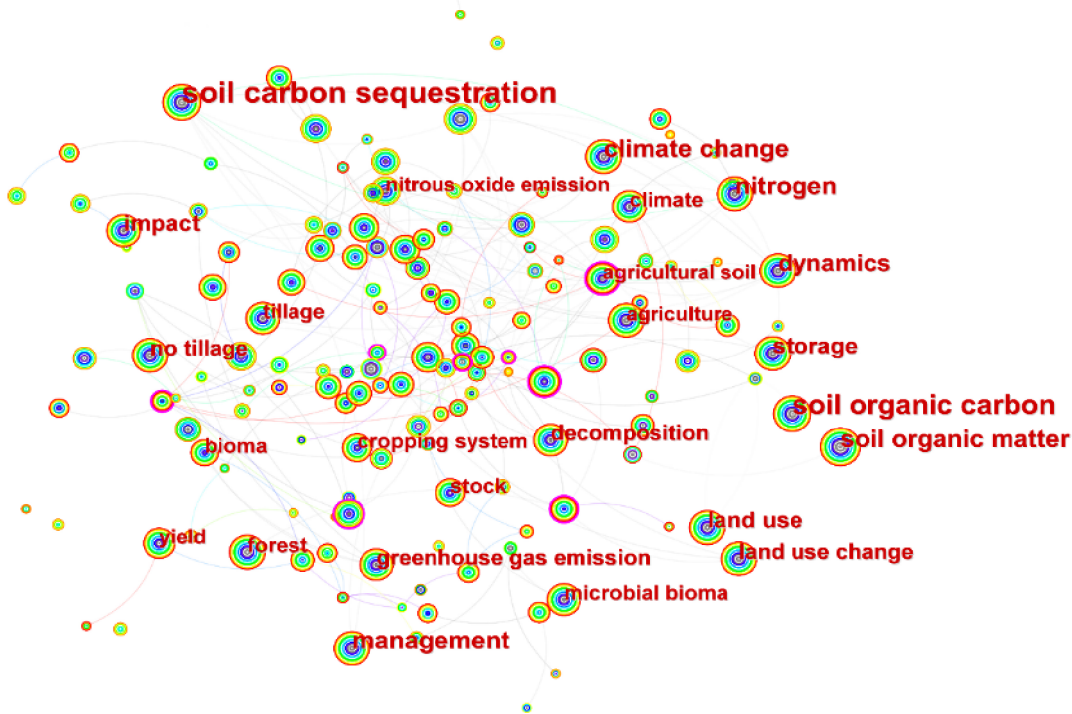


图 7 土壤碳固存论文关键词的共现图谱
Fig.7 Key words co-occurrence map of soil carbon sequestration

表 3 按照频次和中心度排序的前 10 个关键词
Tab.3 Top 10 key words ranked by the frequency and centrality

排名 Rank	频次 Frequency		中心度 Centrality	
	关键词 Key word	数值 Value	关键词 Key word	数值 Value
1	土壤碳固存 Soil carbon sequestration	1 201	农业土壤 Agricultural soil	0.14
2	土壤有机碳 Soil organic carbon	680	管理措施 Management practice	0.14
3	氮 Nitrogen	394	沉积 Deposition	0.14
4	土壤有机质 Soil organic matter	367	造林 Aafforestation	0.13
5	管理措施 Management	333	土壤侵蚀 Soil erosion	0.13
6	气候变化 Climate change	329	温室气体 Greenhouse gas	0.12
7	动力学 Dynamics	277	黑碳 Black carbon	0.11
8	储量 Storage	207	减缓 Mitigation	0.10
9	影响 Impact	199	溶解有机碳 Dissolved organic carbon	0.10
10	土地利用 Land use	195	土地利用改变 Land-use change	0.10

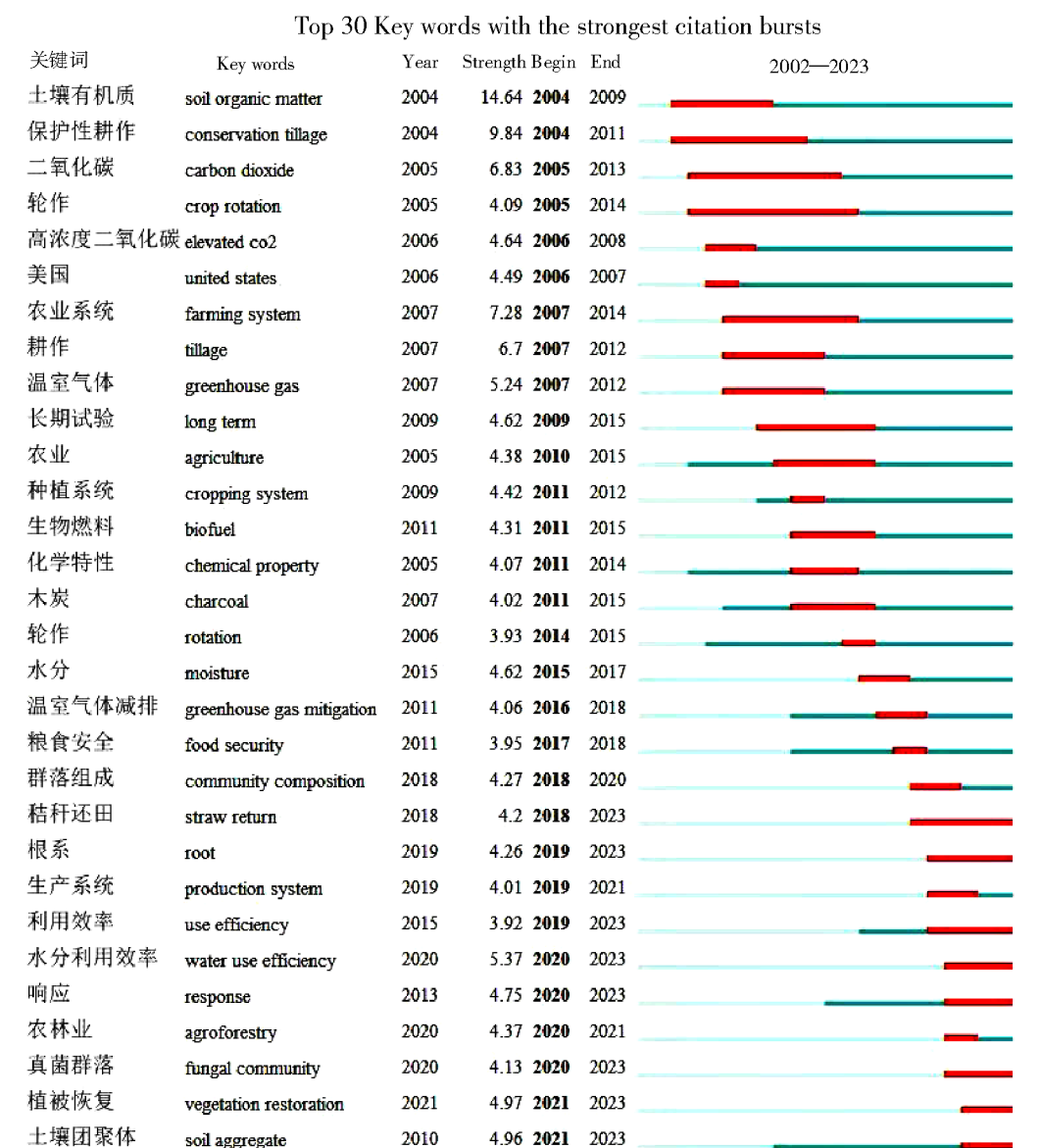
选取具有代表性的关键词进行重点解读(表 3)。频次大于 300 的高频关键词有 6 个:土壤碳固存(1 201 次)、土壤有机碳(680 次)、氮(394 次)、土壤有机质(367 次)、管理措施(333 次)、气候变化(329 次)。说明土壤碳固存领域的研究大多集中在土壤碳氮元素间的相互作用、土壤碳固存的减排效

果、实现土壤碳固存的具体措施方面。从高频关键词的中心性来看,中心性大于 0.1 的高频关键词包括农业土壤、管理措施、沉积、造林、土壤侵蚀、温室气体、黑碳,说明这些关键词在土壤碳固存研究领域的中介作用显著^[14],即这些关键词起到了连接不同研究领域、传递关键信息或资源的重要作用,它

们在整个研究领域中扮演着重要的中间人角色,促进了不同研究领域之间的交流和合作,推动了该领域的研究发展。深度分析关键词共现可知,土壤碳固存领域主要研究热点为“土壤碳氮元素间耦合作用”“土壤碳固存的减排效果”“管理实践等因素对于土壤碳沉积和储存的重要作用”,与前文中被引频次排名前10的文献关注点基本一致。综合来看,土壤碳固存是一个复杂的过程,受到多种因素和管理实践的影响,深入剖析这些因素的相互作用、理解其动态过程和机理,对于维持和提高土壤碳库,应对气候变化至关重要。

2.6.2 关键词突现分析 突变词是指在一段时间

内词频相对增长率突然增大的关键词。如果某个突变权重较高的词,增长势头不断加强,推测该词语很大可能涉及相关领域中一些研究热点^[33]。突现强度指某一关键词在其突现时间段内出现频次的权重,展现该关键词出现频次突然增加的强度^[34]。因此,关键词突现指标能够反映该领域各时段的前沿性研究成果,并为预测未来的研究热点提供参考^[8],笔者利用CiteSpace中的bust term(突变词)检测功能对土壤碳固存研究进行前沿探析,按突现持续时间进行排序,选取排名前30的突变关键词(图8)。



红色线条代表该关键词成为学术研究热点的具体历时阶段,浅蓝色代表节点还未出现,深蓝色表示节点开始出现
Red line represented the specific diachronic stage when the keyword became a hot topic of academic research, light blue represented that the node had not yet appeared, and the dark blue indicated that the node had begun to appear

图8 土壤碳固存前30个突现词
Fig.8 Top 30 keywords with the strongest citation bursts on soil carbon sequestration

由图 8 可知,2004—2010 年间突现强度高且持续时间长的关键词有土壤有机质、保护性耕作、二氧化碳、轮作、农业系统、温室气体,说明在土壤碳固存的早期探索中,研究人员着重探究如何通过提高土壤有机质含量、采用保护性耕作、轮作等方法来降低二氧化碳和温室气体的排放量,从而为土壤碳固存提供科学依据,这些研究为今后的土壤碳固存策略和实践奠定了基础。2011—2017 年,长期试验、农业、生物燃料、化学特性、木炭是热点关键词,说明随着研究的深入,研究人员开始聚焦于长期试验、农业系统、生物燃料以及土壤的化学特性等关键因素。这些研究探究了在长时间尺度下的试验条件下,农业实践对土壤的碳储存和生物燃料生产的影响,这些研究有助于我们更好地理解土壤碳固存的机制。2018 年至今的突现词有群落组成、秸秆还田、根系、利用效率、水分利用效率、真菌群落、土壤团聚体等。说明近几年来,土壤碳固存领域的研究不仅突现了生物因素在土壤碳循环中的作用,还强调了秸秆还田等农业实践对碳储存的影响。同时,研究还关注植物根系、有机碳转化效率以及水分管理对碳固存的贡献。这些前沿研究的探索共同揭示了土壤碳固存的过程和机理,为我们有效应对气候变化提供了有力的科学支持。

2.6.3 未来研究的热点与展望 基于关键词共现、关键词聚类、关键词突现的研究热点分析,对土壤碳固存领域的研究进展和前沿趋势进行了系统的梳理和分析^[32]。由以上分析可知,土壤碳固存领域的研究未来应从几个方面深入:第一,不同农业实践对碳储存的影响。运用多重方法定量分析秸秆还田、绿肥覆盖、有机肥施用、恢复生物多样性、轮作等管理措施对增加土壤碳固存的贡献^[15],深入探索这些实践对土壤碳固存能力的提升机制,寻找最佳的土壤管理策略。第二,土壤微生物与碳循环关系的深入研究。目前关于土壤有机碳的形成的微生物介导机制的研究中相对成熟的理论有微生物效率—基质稳定理论^[35]和土壤微生物碳泵理论^[30]。这 2 个理论不仅强调了微生物对土壤有机碳分解的修饰过滤作用,同时还突出了微生物合成代谢产物和死亡残体对有机碳积累的贡献^[36]。鉴于微生物在土壤碳循环中扮演着关键角色,未来研究将更加关注微生物对有机碳分解、稳定和累积的影响机制。第三,改进土壤碳循环模型。碳循环模型可以有效地预测土壤有机碳对未来气候变化的响应,但目前众多碳循环模型对土壤有机碳循环的模拟

和预测仍存在巨大的不确定性^[37-38]。未来需聚焦在基于不同尺度土壤碳循环模型的科技创新,结合土壤碳固存机理对现有模型进行完善和改进,尝试构建可以直接通过试验数据对模型参数和过程进行验证的模型,大大提升模型的模拟和预测精度。第四,发展更准确、全面的土壤碳固存评估和监测方法。随着生物信息、人工智能和大数据共享等技术的飞速发展,应将研究重点聚焦于不同尺度下的土壤有机碳组分、界面的分析及模拟方法,发展基于“大数据、互联网”的人工智能土壤碳动态系统,实现对不同因素和管理措施对土壤碳固存的准确评估,制定智能化的土壤管理策略。比如 TAO 等^[39]创造性地通过人工智能技术结合过程模型,深度揭示了土壤碳循环过程的空间格局,其研究构建的机理模型、生态大数据与人工智能相融合的新范式为土壤碳固存领域研究提供了新思路。

3 结论

土壤碳固存的研究自 2002 年起,20 a 来有关土壤碳固存研究的文献数量快速增加并具有不断增长的潜力。本文以文献计量软件为基础,通过定性和定量分析土壤碳固存领域的研究论文,从高产国家、机构、作者及其合作情况可视化结果来看,领域内高产国家主要集中于中国、美国和澳大利亚,中国总发文量第一,美国的国际影响力最大(中心度最高),并且中国与美国之间建立了密切的合作关系,中美两国在土壤碳固存领域的研究已具有显著的地位和较高的影响力;研究机构以中国科学院发文数量最多,排名前 10 的机构有 5 所都来自中国,占比 50%;目前形成了以 Lal Rattan、Smith Pete、Zhao Xin、Tian Xiaohong 和 Xu Minggang 为核心的联系紧密的学术团体。

基于关键词共现的研究热点分析,对土壤碳固存领域的研究进展和前沿趋势进行了系统的梳理和分析。总的来说,土壤碳固存研究方向逐渐演变,并且研究内容在广度和深度上不断扩展。从研究热点来看,目前土壤碳固存研究主要集中在“土壤微生物在土壤碳循环中的作用”“秸秆还田等农业实践对碳储存的影响”“有机碳转化效率”等。尽管当前各国纷纷制定政策和行动计划,鼓励和支持土壤碳固存研究和实践,土壤碳固存的文章数量也上升到了一个新的高度,但是,由于各国实际环境和农业管理方法不同,其采取的土壤碳固存实践方式差别很大,截至目前,没有一个国家达到

“4P1000”倡议的期望目标,说明土壤碳固存领域还有很多方面不够成熟,未来应做出更大突破和创新。综合来看,未来土壤碳固存的研究将聚焦于4个关键领域:不同管理措施对土壤碳固存的影响、土壤微生物与碳循环关系、改进土壤碳循环模型、发展更为准确和全面的土壤碳固存评估和监测方法等方面的研究,这些研究方向将为土壤碳固存的实践应用和全球气候变化的应对提供重要的科学支持。

参考文献:

- [1] 史方颖,张凤宝,杨明义. 基于文献计量分析的土壤有机碳矿化研究进展与热点[J]. 土壤学报,2022,59(2):381-392.
SHI F Y, ZHANG F B, YANG M Y. Research hotspots and progress of soil organic carbon mineralization based on bibliometrics method[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(2): 381-392.
- [2] 杨阳,窦艳星,王宝荣,等. 黄土高原土壤有机碳固存机制研究进展[J]. 第四纪研究,2023,43(2):509-522.
YANG Y, DOU Y X, WANG B R, et al. Advances in soil organic carbon sequestration mechanisms on the Chinese Loess Plateau[J]. Quaternary Sciences, 2023, 43(2): 509-522.
- [3] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304:1623-1627.
- [4] 徐明岗,张文菊,杨学云,等. 农田土壤有机质提升理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2022:3-8.
XU M G, ZHANG W J, YANG X Y. Theory and practice of farmland soil organic matter improvement[M]. Beijing: Science Press, 2022: 3-8.
- [5] 李廷亮,王嘉豪,黄璐,等. 秸秆还田替代化肥对土壤有机碳组分及冬小麦产量的影响[J]. 山西农业科学, 2022, 50(6): 771-780.
LI T L, WANG J H, HUANG L, et al. Effects of straw returning and replacing chemical fertilizer on soil organic carbon fractions and winter wheat yield[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(6): 771-780.
- [6] DONHAUSER J, QI W H, BERGK-PINTO B, et al. High temperatures enhance the microbial genetic potential to recycle C and N from necromass in high-mountain soils[J]. Global Change Biology, 2021, 27(7): 1365-1386.
- [7] 王宇飞,王语宽. 重视农业土壤碳固存,助力“双碳”目标实现:积极应对农业土壤“千分之四”计划[J]. 环境保护, 2021, 49(C2):61-64.
WANG Y F, WANG Y K. Attention to agricultural soil carbon sequestration and help to achieve the targets of carbon peak and carbon neutrality: positively respond to the "the 4 per 1 000 initiative for agricultural soils"[J]. Environmental Protection, 2021, 49(C2): 61-64.
- [8] 肖明,邱小花,黄界,等. 知识图谱工具比较研究[J]. 图书馆杂志, 2013, 32(3): 61-69.
XIAO M, QIU X H, HUANG J, et al. Comparison of software tools for mapping knowledge domain[J]. Library Journal, 2013, 32(3): 61-69.
- [9] VAN ECK N J, WALTMAN L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping[J]. Scientometrics, 2010, 84(2): 523-538.
- [10] 李杰,魏瑞斌. VOSviewer应用现状及其知识基础研究[J]. 农业图书情报学报, 2022, 34(6): 61-71.
LI J, WEI R B. VOSviewer application status and its knowledge base[J]. Journal of Library and Information Science in Agriculture, 2022, 34(6): 61-71.
- [11] CHEN C M. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature[J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2006, 57(3): 359-377.
- [12] 陈悦,陈超美,刘则渊,等. CiteSpace知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
CHEN Y, CHEN C M, LIU Z Y, et al. The methodology function of Cite Space mapping knowledge domains[J]. Studies in Science of Science, 2015, 33(2): 242-253.
- [13] 孙岩,张会芳,段俊枝,等. 基于Web of Science的农业生态安全知识图谱分析[J]. 河南农业科学, 2019, 48(9): 168-176.
SUN Y, ZHANG H F, DUAN J Z, et al. An analysis of agricultural ecological security knowledge map based on web of science[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, 48(9): 168-176.
- [14] 刘波,李学斌,陈林,等. 基于文献计量分析的土壤碳固存研究进展[J]. 土壤通报, 2021, 52(1): 211-220.
LIU B, LI X B, CHEN L, et al. Research progress on soil carbon sequestration based on bibliometric analysis[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(1): 211-220.
- [15] 盛云梦,刘倩. 基于CiteSpace的国际人工智能研究热点与趋势分析[J]. 软件工程, 2022, 25(11): 35-38, 34.
SHENG Y M, LIU Q. Research hotspots and trend analysis of international artificial intelligence based on CiteSpace[J]. Software Engineering, 2022, 25(11): 35-38, 34.
- [16] 胡剑波,张宽元. 国内外碳汇研究的特征、脉络与展望:基于CiteSpace的知识图谱分析[J]. 兰州财经大学学报, 2023, 39(2): 9-24.
HU J B, ZHANG K Y. Characteristics, trends, and prospects of domestic and international carbon sink research-knowledge graph analysis based on CiteSpace[J]. Journal of Lanzhou University of Finance and Economics, 2023, 39(2): 9-24.
- [17] 戴尔卓,黄宇,赵东升. 草地土壤固碳潜力研究进展[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 3908-3918.
DAI E F, HUANG Y, ZHAO D S. Review on soil carbon sequestration potential in grassland ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 3908-3918.
- [18] 潘根兴,周萍,李恋卿,等. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 327-337.
PAN G X, ZHOU P, LI L Q, et al. Core issues and research progresses of soil science of carbon sequestration[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(2): 327-337.
- [19] LESSMANN M, ROS G H, YOUNG M D, et al. Global variation in soil carbon sequestration potential through improved cropland management[J]. Global Change Biology, 2022, 28(3): 1162-1177.
- [20] RUMPEL C, AMIRASLANI F, CHENU C, et al. The 4p1000 initiative: Opportunities, limitations and challenges for implementing soil organic carbon sequestration as a sustainable de-

- velopment strategy[J]. *Ambio*, 2020, 49(1):350-360.
- [21] 曹梦,李勇,勾宇轩,等. 基于知识图谱的土壤中抗生素研究进展分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(5):627-635.
CAO M, LI Y, GOU Y X, et al. Knowledge mapping analysis of antibiotics in soil research based on the CiteSpace software [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(5):627-635.
- [22] MINASNY B, MALONE B P, MCBRATNEY A B, et al. Soil carbon 4 per mille[J]. *Geoderma*, 2017, 292:59-86.
- [23] POEPLAU C, DON A. Carbon sequestration in agricultural soils *via* cultivation of cover crops-A meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 200:33-41.
- [24] WIESMEIER M, URBANSKI L, HOBLEY E, et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales[J]. *Geoderma*, 2019, 333:149-162.
- [25] LAL R. Digging deeper: a holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(8):3285-3301.
- [26] ZHAO Y C, WANG M Y, HU S J, et al. Economics- and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16):4045-4050.
- [27] SMITH P. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(3):1315-1324.
- [28] FUSS S, LAMB W F, CALLAGHAN M W, et al. Negative emissions: Part 2: Costs, potentials and side effects[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(6):063002.
- [29] PAUSTIAN K, LEHMANN J, OGLE S, et al. Climate-smart soils[J]. *Nature*, 2016, 532:49-57.
- [30] LIANG C, SCHIMEL J P, JASTROW J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage[J]. *Nature Microbiology*, 2017, 2:17105.
- [31] SANDERMAN J, HENGL T, FISKE G J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(36):9575-9580.
- [32] 刘则渊,王贤文,陈超美. 科学知识图谱方法及其在科技情报中的应用[J]. *数字图书馆论坛*, 2009(10):14-34.
LIU Z Y, WANG X W, CHEN C M. Scientific knowledge mapping and its application in scientific and technological information field[J]. *Digital Library Forum*, 2009(10):14-34.
- [33] 宋长青,谭文峰. 基于文献计量分析的近30年国内外土壤科学发展过程解析[J]. *土壤学报*, 2015, 52(5):957-969.
SONG C Q, TAN W F. The historical venation of soil science in the past 30 years-based on the bibliometric analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(5):957-969.
- [34] 陈敏,秦华,常健玮,等. 基于文献计量分析的土壤微生物入侵研究现状及发展趋势[J]. *土壤学报*, 2022, 59(6):1492-1503.
CHEN M, QIN H, CHANG J W, et al. Research on soil microbial invasion based on knowledge graph analysis and its development trend[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(6):1492-1503.
- [35] COTRUFO M F, WALLENSTEIN M D, BOOT C M, et al. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization; do labile plant inputs form stable soil organic matter?[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(4):988-995.
- [36] 周正虎,刘琳,侯磊. 土壤有机碳的稳定和形成:机制和模型[J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(10):11-22.
ZHOU Z H, LIU L, HOU L. Soil organic carbon stabilization and formation: mechanism and model[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(10):11-22.
- [37] BAILEY V L, BOND-LAMBERTY B, DEANGELIS K, et al. Soil carbon cycling proxies: Understanding their critical role in predicting climate change feedbacks[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(3):895-905.
- [38] LUO Y Q, SCHUUR E A G. Model parameterization to represent processes at unresolved scales and changing properties of evolving systems[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(3):1109-1117.
- [39] TAO F, HUANG Y Y, HUNGATE B A, et al. Microbial carbon use efficiency promotes global soil carbon storage[J]. *Nature*, 2023, 618:981-985.