



李冰,陈林,庞丹波,李学斌. 基于文献计量分析近 11 年土壤有机碳的研究进展[J]. 中国农业大学学报,2024,29(04):138-151.

LI Bing, CHEN Lin, PANG Danbo, LI Xuebin. Research progress of soil organic carbon in recent 11 years based on bibliometric analysis[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(04): 138-151.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.04.12

基于文献计量分析近 11 年土壤有机碳的研究进展

李冰 陈林 庞丹波 李学斌*

(宁夏大学 生态环境学院/西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地/西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室,银川 750021)

摘 要 为了解土壤有机碳的研究现状和热点动态,基于文献计量分析,在 Web of Science 核心数据库中以土壤有机碳为主题词进行检索,通过筛选将得到的 891 篇相关高被引论文作为研究数据,利用 VOSviewer 和 Citespace 软件对以土壤有机碳为主题词的文献进行定量分析。结果表明:1)高被引文献在 2012—2022 年间总体呈上下波动状态。2)环境科学、生态学和多学科科学等学科是土壤有机碳研究涉及的主要学科领域,多学科科学逐渐成为研究的主要趋势,在该领域占有重要地位。3)Yakov Kuzyakov 和中国科学院是土壤有机碳研究相关领域的主要贡献作者和机构;中国科学院和 Yong Sik Ok 分别为该研究领域内与其他科研机构和作者之间合作最为密切的机构和作者。4)通过对关键词和突现词的分析得出,该领域的主要研究热点和发展趋势主要集中在土壤中 CO₂ 含量的变化对大气中温室气体含量与气候变化之间的关系、农业土地利用中土壤有机碳封存与固定和热解温度对生物炭影响的相关研究。总体而言,在全球气候变暖的背景下,土壤有机碳的研究仍然是目前研究的热点主题,今后应更加注重不同环境、不同区域间的协同研究,从而进一步探明全球气候变化对土壤有机碳的影响。

关键词 文献计量;土壤有机碳;知识图谱;可视化分析

中图分类号 S153.6

文章编号 1007-4333(2024)04-0138-14

文献标志码 A

Research progress of soil organic carbon in recent 11 years based on bibliometric analysis

LI Bing, CHEN Lin, PANG Danbo, LI Xuebin*

(School of Ecology and Environment, Ningxia University/Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China/Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract In order to understand the research status and hotspot trends of soil organic carbon, based on bibliometric analysis, soil organic carbon as the main topic was searched in the core database of Web of science, and 891 relevant highly cited papers were selected as research data. VOSviewer software and Citespace software were used to quantitatively analyze the literature with soil organic carbon as the theme word. The results showed that: 1) The highly cited literature showed an overall fluctuating trend from 2012 to 2022. 2) Environmental science, ecology and multidisciplinary science were the main disciplines involved in soil organic carbon research, and multidisciplinary science had gradually become the main trend of research and occupying an important position in this field. 3) Yakov Kuzyakov and the Chinese

收稿日期: 2023-07-23

基金项目: 宁夏重点研发计划项目(2021BEG02005, 2023BEG02049);宁夏自然科学基金项目(2023AAC03061);国家自然科学基金项目(31960359);第三批宁夏青年科技人才托举工程项目(TJGC2018068);宁夏不同草地类型碳汇潜力评估与增汇技术研发项目(2023BEG02049)

第一作者: 李冰(ORCID:0009-0006-5544-7813),硕士研究生,E-mail:lb1119@163.com

通讯作者: 李学斌(ORCID:0000-0002-6928-115X),研究员,主要从事土壤碳循环相关研究,E-mail:lixuebin@nxu.edu.cn

Academy of Sciences were the major contributors and institutions in the fields related to soil organic carbon research. The Chinese Academy of Sciences and Yong Sik Ok were the institutions and authors that cooperate most closely with other scientific research institutions and authors in this research field. 4) Through the analysis of keywords and emergent words, the main research hotspots and development trends in this field mainly focused on the relationship between the change of soil carbon dioxide content and atmospheric greenhouse gas content and climate change, soil organic carbon sequestration and fixation in agricultural land use, and the influence of pyrolysis temperature on biochar. In general, in the context of global warming, research soil organic carbon remains a hot topic. In the future, more attention should be paid to the collaborative research between different environments and different regions, so as to further explore the impact of soil organic carbon change on climate change.

Keywords bibliometrics; soil organic carbon; mapping knowledge domain; visual analysis

近年来,在全球气候变化和全球变暖的背景下,土壤作为最大的有机碳库,土壤有机碳受到了人们广泛的关注与研究。土壤有机碳是通过微生物作用所形成的腐殖质、动植物残体和微生物体的合体,具有不同程度的分解能力和稳定性^[1]。土壤有机碳库是陆地碳库中的重要组成部分,也是陆地生态系统中最大的碳库^[2]。土壤表层的有机碳含量占地球陆地生态系统总碳含量的60%以上^[3],其微小的变化都可能影响大气中CO₂的浓度,因而在全球碳循环过程中发挥着重要作用^[4]。土壤有机碳是土壤肥力的物质基础,包含着植物生长所需的多种营养元素,对土壤的物理、化学及生物性质产生一定的影响^[5]。除此之外土壤有机碳也在全球碳平衡中发挥着重要作用,是影响全球“温室效应”变化的主要因素和全球碳循环的核心^[6]。根据分解的难易程度,可将土壤有机碳分为易氧化有机碳和难氧化有机碳2种类型,其中易氧化有机碳含量的高低代表着土壤能释放出来的有效肥力的多少;难氧化有机碳则更多地反映出土壤中储藏营养物质的多少,其稳定性决定了养分转化的难易程度^[7-8]。土壤有机碳含量的动态变化主要受自然因素(气候、地形、土壤养分和土壤微生物)和人为因素(土地利用方式、农田管理措施)的影响^[9]。目前,国内外学者对土壤有机碳的输入和输出等影响土壤有机碳动态变化方面进行了大量研究。研究发现土地利用类型也是影响土壤有机碳动态变化的一个主要因素,土壤有机碳的含量变化及其在土壤中的分布都会对全球碳循环和气候变化产生重大影响^[10-13]。Ogle等^[14]通过荟萃分析,量化了温带和热带地区湿润和干燥气候条件下农业土地利用和管理方式对土壤有机碳储量的影响;Kong等^[15]评估了碳输入在土壤有机碳封存中的长期作用,并确定土壤中碳稳定的潜在机制;Wang等^[16]研究了青藏高原

高寒地区不同土地利用类型土壤有机碳的分布特征及其控制因素。虽然现在对土壤有机碳变化影响因子的研究较多,但对不同土地利用类型中土壤碳循环过程与大气中碳交换对全球气候变化产生的影响,以及采取何种有效措施减少土壤中的碳排放量等,都是未来需要解决的问题。

文献计量学是一种应用数学和统计学的方法来分析文献,通过计算和分析等过程对文献进行定量分析的一种科学方法,对综述性文章的撰写起着重要作用^[17-19]。Citespace软件是由陈超美教授研发团队开发的一款用于对科学文献分析、挖掘及文献可视化的应用软件^[20],是文献计量学的重要研究方法。VOSviewer软件是一种专门用于文献知识单元和可视化分析的开发工具,其最大的优势在于具有很强的图形展示能力,非常适合大规模样本数据库的分析,可对关键词、作者、国家及其合作关系等进行绘制^[21]。Citespace和VOSviewer软件作为文献分析的重要工具,主要用于文章关键词共现、文献知识图谱的可视化分析,可对收集整理的文献进行科学统计及深度挖掘,自开发以来,在各研究领域被广泛应用,成为近年来文献分析的重要工具之一^[22-23]。目前,国内外关于土壤有机碳研究领域的可视化分析较少。本研究选取Web of Science(WOS)核心合集数据库中收录的论文作为数据样本,使用Citespace和VOSviewer软件,分析2012—2022年这11年土壤有机碳相关研究领域研究热点,旨在分析土壤有机碳研究现状、热点和发展趋势,以期为更好的把握未来的研究方向提供思路。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

基于文献计量学方法分析研究与土壤有机碳

有关的高被引文章。本研究选择 Web of Science 中收录的核心合集作为检索的数据库,进行相关文献检索。使用“*Soil organic carbon*”作为主题词,文献类型选择高被引论文,考虑到时效性,检索时间设置为 2012—2022 年,选择所需的文献信息,将检索后得到的文献资料保存为纯文本文件。最终得到 891 篇有效文献,将其作为分析数据样本进行分析,并生成相关网络图谱。

1.2 研究方法

本研究基于 Web of Science 核心合集作为数据库,借助 Citespace 和 VOSviewer 分析软件,采用文献计量分析方法,对近 11 年土壤有机碳研究领域的高被引文献的发文量、关键词、机构、国家、作者、文献被引频次、主要学科和发文期刊分别通过 WOS 系统自带的统计分析功能对数据进行整理和可视化分析,分析土壤有机碳相关文献的研究现状、热点和前沿。

2 统计结果与数据分析

2.1 发文量分析

发文量是以出版年为依据,以每年发表的文章数作为年总发文量,能体现一个研究领域的发展趋势。对 2012—2022 年土壤有机碳高被引文献进行检索,将检索得到的 891 篇高被引论文进行统计(图 1)。高被引论文量呈上下波动状态,在 2019 年高被引论文发文量最多,2022 年高被引论文发文量较少,2012—2022 年均发文量达到了 89 篇,说明土壤有机碳仍然是相关科学家的研究热点。

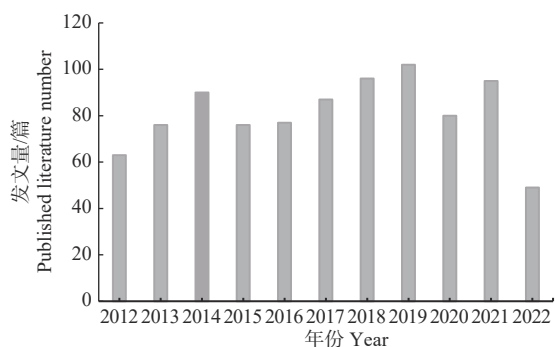


图 1 土壤有机碳论文年均发文量

Fig. 1 Annual number of soil organic carbon published

2.2 关键词共现分析

关键词是一篇学术论文中不可或缺的组成部

分之一,是作者对论文主要内容的总结精炼和概括,它能更深层次的了解一篇学术论文中的主要研究方向、技术方法和研究热点。利用 VOSviewer 软件进行分析,设置关键词出现阈值为 10,对筛选出的 186 个关键词进行聚类分析,得出土壤有机碳相关文献的关键词共现网络图(图 2)。图中圆圈越大,表明该关键词在文献中出现的频次越高,体现了该领域的研究热点;圆圈的不同颜色代表了该研究领域下的不同主题集群。

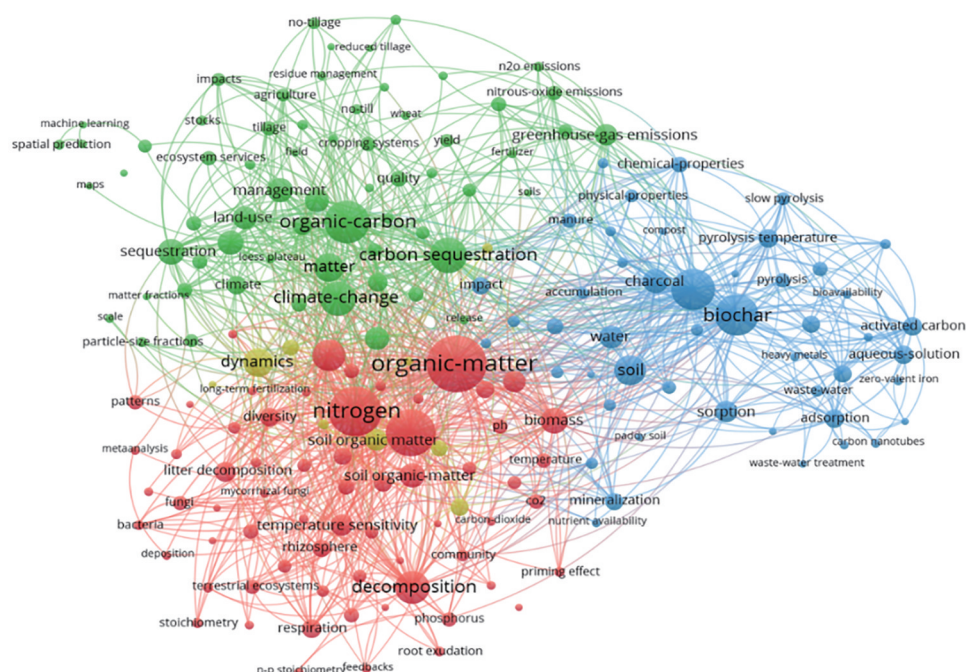
频次排名前 10 的关键词构成了 2012—2022 年间土壤有机碳的主要研究内容。由图 2 可知,图中共有 4 种颜色,说明该研究领域的研究热点分为 4 个主题,分别以有机物质(Organic matter, 148 次)和氮(Nitrogen, 122 次)、有机碳(Organic-carbon, 98 次)和碳封存(Carbon sequestration, 76 次)、生物炭(Biochar, 97 次)和黑碳(Black carbon, 94 次)、动态(Dynamic, 57 次)和土壤有机质(Soil organic matter, 38 次)为核心。不同的关键词聚类知识图谱,展现了不同关键词之间研究主题的相互关联性。

关键词突现性指一定时期内关键词出现频率的快速增加,能反映该时段的研究热点或研究的新兴趋势。基于 Citespace 软件对 2012—2022 年的关键词突现指标进行分析(表 1),排名前 5 的突现词主要有 Charcoal(木炭)、Agricultural soils(农业土壤)、Sorption(吸附)、Pyrolysis temperature(热解温度)和 Oxidation(氧化),突现强度都大于 5。Pyrolysis temperature(热解温度)的突现强度高、突现年份近,是当下的研究热点和未来可能的热点趋势。

2.3 主要发文机构及合作关系分析

发文机构是科学研究领域成果产出的重要主体。由表 2 可以看出发文量排名前 3 的机构分别是中国科学院(104 篇),其次是中国科学院大学(34 篇)和科罗拉多州立大学(33 篇);发文量超过 20 篇的研究机构共 8 个,其中中国科学院的发文量明显高于其他发文机构。此外,中国科学院和科罗拉多州立大学中介中心性最高,为 0.11,表明中国科学院和科罗拉多州立大学是土壤有机碳研究领域的核心科研机构,对土壤有机碳进行了较深入的研究。

利用 VOSviewer 软件对土壤有机碳研究主要科研机构合作关系进行分析,共有 1 466 个机构开



圆圈的大小代表关键词的权重。圆圈之间的距离表示了2个圆圈之间的合作性,合作性越强则距离越短。圆圈的颜色代表了各自的聚类。下同。

The size of each circle represents the weight of this keyword. The distance between two circles indicates the cooperation between two circles, the stronger the cooperation, the shorter the distance, and the weaker the cooperation, the farther the distance. The colors of the circles represent their clusters. The same below.

图2 土壤有机碳研究论文关键词共现网络图

Fig. 2 Key words network map of main literature of soil organic carbon research

表1 土壤有机碳研究关键词突现分析

Table 1 Key words outburst analysis of soil organic carbon research

Keywords 关键词	突现强度 Strength	开始 Begin	结束 End	2012—2022 年突现情况 Bursts from 2012 to 2022
木炭 Charcoal	9.07	2012	2014	
吸附 Sorption	6.27	2012	2015	
氧化 Oxidation	5.59	2012	2014	
二氧化碳评估 Elevated CO ₂	4.36	2013	2015	
储存 Storage	4.99	2014	2015	
酶活性 Enzyme activity	4.85	2016	2020	
温室气体排放 Greenhouse gas emissions	5.30	2017	2019	
重金属 Heavy metals	5.03	2017	2020	
农业土壤 Agricultural soils	8.52	2018	2020	
热解温度 Pyrolysis temperature	5.75	2019	2022	

注:红色部分表示关键词持续的长度,蓝色部分表示尚未进入突显阶段的年份。

Notes: Red bars indicate years in which keywords burst occurred, blue bars indicate years in which keywords burst do not occur.

表2 土壤有机碳研究发文前10的科研机构
Table 2 Top 10 research institutions for soil organic carbon research

排序 Rank	科研机构 Scientific institution	年份 Year	发文量/篇 Published literature number	中介中心性 Centrality
1	中国科学院 Chinese Academy of Sciences	2013	104	0.11
2	中国科学院大学 University Chinese Acad Science	2015	34	0.03
3	科罗拉多州立大学 Colorado State University	2013	33	0.11
4	悉尼大学 University Sydney	2013	24	0.04
5	南京农业大学 Nangjing Agricultural University	2016	21	0.06
6	高丽大学 Korea University	2018	21	0.02
7	加州大学伯克利分校 University California Berkeley	2014	21	0.08
8	西北农林科技大学 Northwest A&F University	2014	20	0.02
9	北亚利桑大学 Northern Arizona University	2014	19	0.05
10	美国地质调查局 United States Geol Survey	2014	18	0.03

展了土壤有机碳相关的研究。通过软件中的发文机构聚类设置关键词出现阈值为9,共筛选出84个发文机构并进行聚类分析(图3)。图中的圆点大小代表科研机构发文数量的多少;圆点间连线代表机构间合作关系的强弱;颜色代表科研机构的聚类,不同的颜色代表不同机构的研究方向,相同颜色的

机构代表其具有相近的研究内容。由图3可知,网络图分布比较紧密,各个科研机构之间的线条数量多,表明科研机构之间存在比较紧密的合作,学术交流频繁。中国科学院所属研究机构和其它机构间合作最紧密,其次是科罗拉多州立大学和加州大学伯克利分校。研究机构之间高层次和更大范围

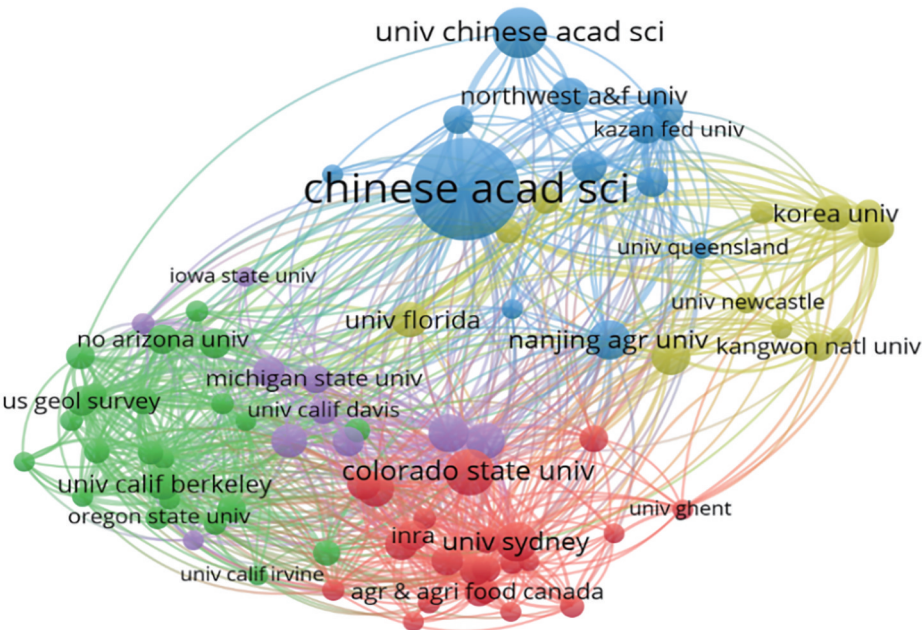


图3 土壤有机碳研究主要科研机构合作关系网络图
Fig. 3 Network of major research institutions for soil organic carbon research

的合作交流,可以深入的推动土壤有机碳研究领域的高质量发展和进一步的深入交流。

2.4 主要发文国家及合作关系分析

土壤有机碳高被引论文发文排名前10的国家见图4。2012—2022年高被引论文发文量共1 364篇,发文量排名前3的国家分别是美国,发文335篇,占比24.56%;中国发文310篇,排名第2,占比22.73%;德国发文171篇,排名第3,占比12.54%。美国和中国高被引论文发文量占总发文量的47.29%,远高于其他几个国家,表明美国和中国的学者对该领域有着较高的关注程度和研究兴趣。

在科技全球化发展的大背景下,不同国家之间进行科研合作已经成为了一种主流趋势。美国、中国、德国和澳大利亚之间合作交流程度深且与其他国家的合作较为紧密(图5)。国家圆点之间连接线多,表明国家之间学术交流较为频繁,各国之间的紧密合作可以有效促进对土壤有机碳进行更广泛而深入的研究。

2.5 主要发文作者及合作关系分析

作者合作关系网络图能够提供潜在研究者的信息和具有较大影响力的研究小组的信息^[24]。将检索得到的891篇文献导入到VOSviewer软件中进行分析,并利用软件生成相关图谱(图6)。图中的

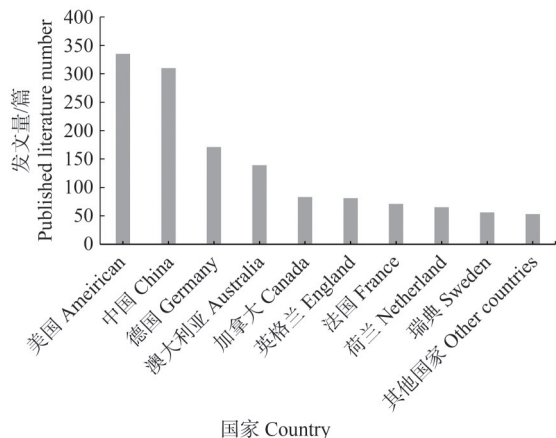


图4 土壤有机碳研究领域发文前10的国家

Fig. 4 Top 10 countries in soil organic carbon research

圆点代表该研究领域的发文作者,圆点的大小代表作者在该研究领域发文数量的多少;不同圆点的颜色是对作者的聚类,相同的颜色代表了作者之间的研究内容或者方向相近。以 Yong Sik Ok、Zeng Guang Ming 和 Joerg Ringlebe 等人为核心的作者群体与其他作者群体之间有较多的合作关系,他们对该领域的研究发展起到了重要的推动作用。同一研究集群内的作者之间合作交流较多,充分反映了该研究领域的深度和广度都有所增加,也反映了科研人员对该研究领域的重视。

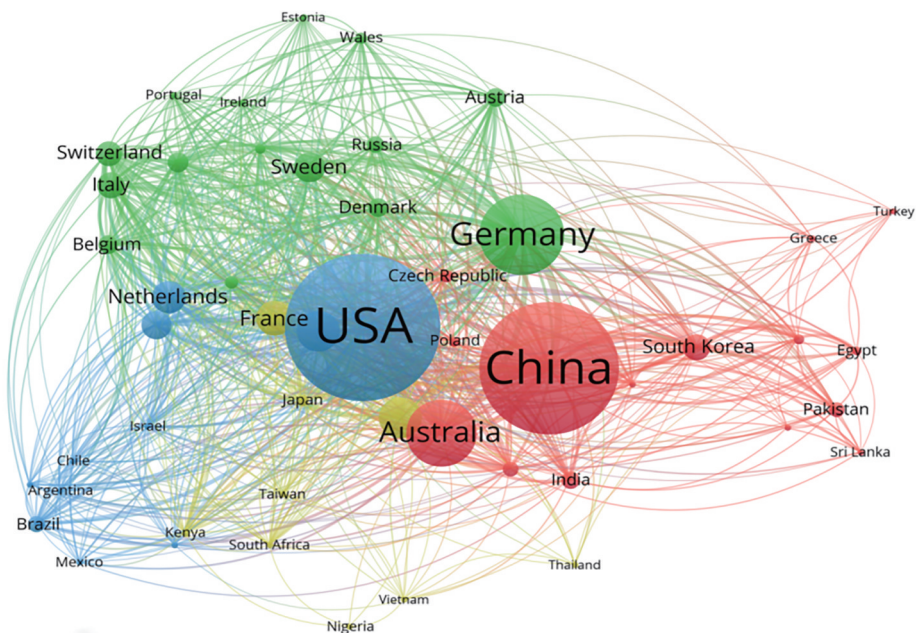


图5 土壤有机碳研究领域主要发文国家合作关系网络图

Fig. 5 Soil organic carbon research is mainly published in the national cooperative relationship network map

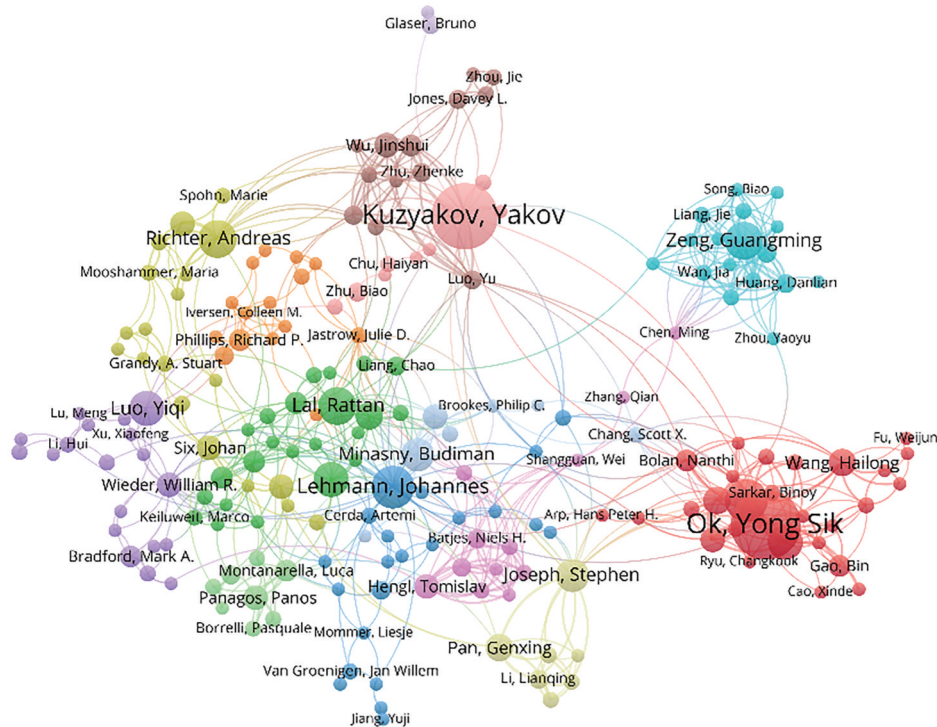


图6 土壤有机碳研究领域主要作者合作关系网络图

Fig. 6 Map of the network of leading authors in soil organic carbon research

发文作者是科研工作的重要主体,通过对发文作者及其合作关系网络图谱进行分析,可以反映出该领域的核心作者群及合作关系^[25]。在WOS核心合集数据库中检索到的891篇高被引文献中,发文量排名前10的作者总发文量为155篇。其中发文量排名前3的作者分别是Yong Sik Ok、Yakov

Kuzyakov和Joerg Ringlebe,发文量占比分别为22.89%、18.64%和9.32%。Yakov Kuzyakov的中介中心性最高为0.23,说明Yakov Kuzyakov为土壤有机碳研究领域的主要人物(表3)。

2.6 高被引论文被引频次分析

文献被引频次是衡量一个国家科研文献被其

表3 土壤有机碳研究发文量排名前10的作者

Table 3 Top 10 authors of soil organic carbon research

排序 Rank	作者 Author	机构 Institution	年份 Year	发文量/篇 Published literature number	中介中心性 Centrality
1	Yong Sik Ok	Korea University	2014	27	0.09
2	Yakov Kuzyakov	Georg-August University Göttingen	2013	22	0.23
3	Joerg Ringlebe	University of Wuppertal	2018	11	0.02
4	Budiman Minasny	University of Sydney	2013	10	0.07
5	Daniel C. W. Tsang	Hong Kong Polytechnic University	2019	9	0.00
6	Zeng Guang Ming	Hunan University	2016	9	0.00
7	Johannes Lehmann	Cornell University	2015	8	0.02
8	Andreas Richter	University of Bremen	2014	8	0.13
9	Luo Yi Qi	Cornell University	2013	7	0.02
10	Ali El-naggar	University of Alberta	2018	7	0.01

他国家或机构认可程度的重要标志^[26-27]。高被引论文指同一年同一个 ESI(基本科学指标数据库)学科发表的所有论文中被引次数排在前 1% 的论文^[28]。2012—2022 年 WOS 核心数据库收录的与土壤有机碳研究相关的高被引文献被引次数排名前 10 的论文如表 4 所示。其中被引次数最多的是 2014 年发表在 *Chemosphere* 上的 Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review, 被引次数最高为 2 509 次; 该文章主要总结并讨论了生物炭作为土壤和水中污染物吸附剂的用途^[29]。文献被引频次排在第 2 的文章是 2014 年发表在 *European journal of soil science* 上的 Total carbon and nitrogen in the soils of the world, 被引次数为 2 290 次; 该文章主要讨论了大气 CO₂ 浓度增加引起的土壤有机碳和氮动态的可能变化^[30]。文献被引频次排在第 3 的是 2015 年发表在 *Nature* 上的 Climate change and

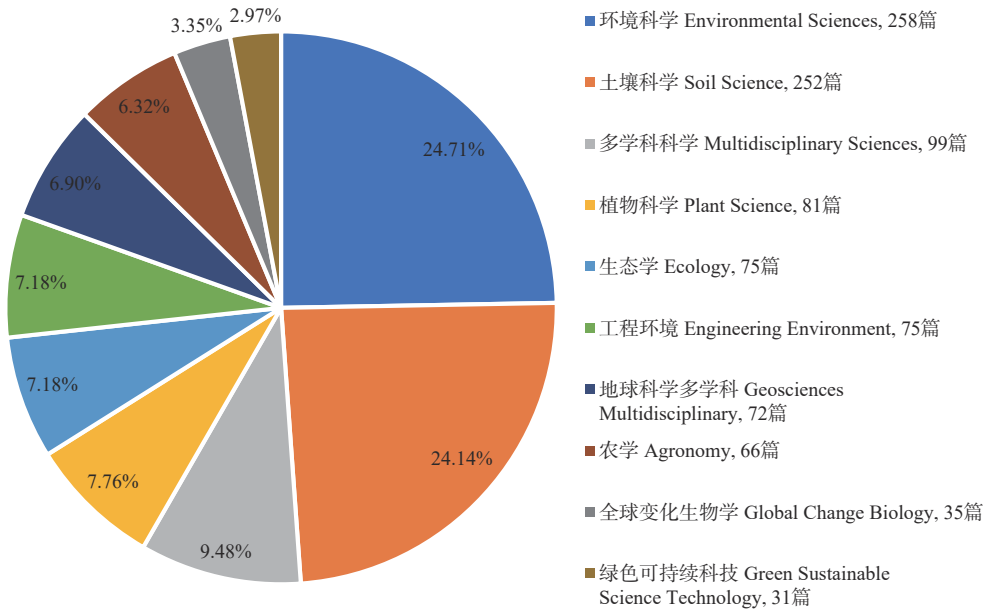
the permafrost carbon feedback, 被引频次为 1 739 次; 该文章表明气候变暖会加速土壤中微生物对有机碳的分解速率, 增加温室气体的排放量^[31]。文献被引频次前 3 的引用量分别占总被引频次的 15.00%、13.69% 和 10.40%。排名前 10 位的高被引文章大部分来自美国、欧洲以及一些其他发达地区和国家, 表明这些国家开展与土壤有机碳的相关研究较早, 所掌握的研究方法比发展中国家更加系统和完善, 而且由于其语言的普遍性和高质量的期刊水平等因素, 这些国家的相关研究在全球的影响力较高。

2.7 主要学科领域分析

学科领域是相对独立的知识体系, 它是指科学领域或一门学科的分支。对 2012—2022 年间高被引文献的学科领域进行分析(图 7), 发文量排名第 1 的学科是 Environmental Sciences(环境科学), 发文

表 4 土壤有机碳研究领域高被引文献排名前 10 的文章
Table 4 Top 10 articles with high citations in soil organic carbon research

排序 Rank	第一作者 First author	题名 Title	来源期刊 Source publication	被引频次 Citation frequency
1	Ahmad M ^[29]	Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review	<i>Chemosphere</i>	2 509
2	Batjes N H ^[30]	Total carbon and nitrogen in the soils of the world	<i>European Journal of Soil Science</i>	2 290
3	Schuur E A G ^[31]	Climate change and the permafrost carbon feedback	<i>Nature</i>	1 739
4	Lehmann J ^[32]	The contentious nature of soil organic matter	<i>Nature</i>	1 702
5	Hengl T ^[33]	SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning	<i>Plos One</i>	1 586
6	Cotrufo M F ^[34]	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	<i>Global Change Biology</i>	1 435
7	Mohan D ^[35]	Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent-A critical review	<i>Bioresource Technology</i>	1 433
8	Ghanbari F ^[36]	Application of peroxymonosulfate and its activation methods for degradation of environmental organic pollutants: Review	<i>Chemical Engineering Journal</i>	1 294
9	Zhang B C ^[37]	Bacterial diversity and community along the succession of biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert, Northern China	<i>Journal of Basic Microbiology</i>	1 174
10	Burns R G ^[38]	Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions	<i>Soil Biology& Biochemistry</i>	1 119



扇形面积的大小表示各学科数量占总体的百分比。

The size of the sector represents the percentage of the number of subjects in the total.

图7 土壤有机碳研究领域发文量排名前10的学科

Fig. 7 Top 10 disciplines in the field of soil organic carbon research

量为258篇,学科占比28.92%;其次是Soil Science(土壤学),发文量为252篇,学科占比28.25%;发文量第3的学科为Multidisciplinary Sciences(多学科科学),发文量为99篇,学科占比为11.10%;之后是Plant Sciences(植物科学)和Ecology(生态学)。说明土壤有机碳研究领域主要集中在环境科学、土壤学和多学科科学等学科上。土壤有机碳多学科科学现在已经逐渐发展为土壤有机碳领域一门重要的学科,各学科之间相互渗透和交叉,使得土壤有机碳研究领域能够得到快速的发展。与此同时在多学科交叉研究、信息资源相互交流、科学技术不断发展和科学研究日趋复杂化的大背景下,科研合作已经变成了一种顺应潮流的发展趋势,推动不同学科知识之间的相互流动和融合^[39]。

3 讨论

在多学科科学交叉专业逐渐成为主流的研究背景下,随着现代科学研究的深入,通过协作解决科学难题、促进科学技术进步,科研合作的重要性正在被越来越多的人所认识。从学科领域来看,多学科科学逐渐成为了土壤有机碳研究领域的一种主要学科,学科之间的交叉研究能更好地将资源进行整合,解决全球气候变化的综合性问题,科研成

果也更容易取得重大突破和更好地激发科研创新能力。因此,在全球范围内不同学科之间的联系必须是紧密的,多学科交叉研究也就显得尤为重要。

研究前沿趋势一般指学术研究未来最具发展潜力的研究主题。而某一领域通常拥有海量的文献数据,因此如何从海量文献中探寻出研究前沿,为学术研究找到新的突破口,成为关键性问题。热解温度作为当下的研究热点和未来可能的前沿趋势,相关研究主要集中在热解温度对生物炭性质的影响上。高温热解生物炭可以增强土壤碳的长期固存,还可以通过增强微生物功能减少养分流失,增加土壤中有机碳的含量,对提高作物生产力、碳封存和养分利用效率方面具有良好作用^[40-41]。

本研究表明土壤有机碳的研究热点主要集中在4个不同主体的研究上。集群1所关注的主要是土壤养分与微生物之间的关系。该聚类下所包含的关键词“有机物质”“氮”“碳”“微生物量”“分解”等出现频率较高。微生物作为土壤中最活跃的物质,其作用机制一方面会对土壤有机质的分解产生影响,另一方面微生物的分解速率也受有机物质中的碳氮比影响。除此之外,微生物量与土壤有机碳之间也相互关联,土壤微生物是土壤有机质中最活跃的成分,涉及到土壤肥力,对陆地生产力系统有

着一定程度的控制^[42];同时微生物量也是陆地生态系统碳库的一种重要组成部分,是整个生态系统中养分和能量循环的关键和动力^[43-44]。在全球气候变化的背景下,矿物-有机质-微生物一直是土壤学中研究的热点话题。国内外学者对土壤矿物-有机质结合机制以及土壤微生物群落开展了大量研究,但是关于微观机制等方面的研究仍然比较匮乏^[45]。

集群2主要关注的是不同土地利用和气候改变对有机碳变化的影响。该聚类下所包含的“有机碳”“碳封存”“储存”“气候改变”“土地利用”“管理”“物质”等关键词出现的频率较高。自1995年IGPB(国际地圈生物圈计划)和HDP(全球变化人文计划)共同提出了人与生物对土地利用变化及对气候变化影响的LUCC(土地利用/土地覆盖变化)研究计划^[46]后,土地利用变化成为了全球气候变化研究的热点内容。土壤有机质具有提高土壤固碳水平的能力,同时土地利用方式的变化对全球气候变化和碳循环产生一定的影响,在全球内土壤有机碳相关研究与生物炭、碳储量和土地利用变化的研究呈现出连续增加的趋势,土壤有机碳对气候变化响应的研究会是未来生态学和多学科科学研究的热点话题^[43]。

集群3主要是与碳吸附相关的研究。该聚类下所包含的“黑碳”“生物炭”“土壤”“木炭”“吸附”等关键词出现的频率较高。生物炭和木炭具有较大的孔隙度和比表面积,具有较强的吸附力和抗生物分解能力,它可以有效的将碳吸附固生在生物炭中间,减少温室气体的排放量^[47];同时作为土壤改良剂可以刺激土壤微生物的活动和生长,提高土壤微生物活性功能和改变土壤群落结构,对土壤进行一定的改良^[48-50]。

集群4主要研究的是土壤中物质的动态变化过程。该聚类下所包含的“土壤有机质”“动态”“周转”“机制”“稳定化”等关键词出现的频率较高。土壤有机质的周转是一个动态的过程,包括输入、分解、转化和输出构成的生态系统碳循环过程^[51]。

通过对土壤有机碳的关键词出现频次和高突现关键词进行综合分析表明,影响土壤有机质的主要因素有温度和土地利用方式。在全球范围内,土壤有机碳含量对气候的变化作用十分显著,主要表现为温度升高、微生物活性变强、代谢明显增加和土壤有机碳含量上升等。人类活动也是最主要的

影响因素,其中土地利用变化对土壤有机质的影响是一个复杂过程,土壤质地、气候变化和微生物生活环境都会受不同土地利用方式的影响,从而使有机碳的稳定性发生变化、数量缩减。

近年来,在全球气候变化的大背景下,通过对关键词分析,有机碳封存是实现可持续农业和缓解全球变暖的重要方式之一。分析土地利用变化和气候变化与土壤中有机碳的封存与固定之间的关系,对我国实现碳中和、碳达峰目标具有重要意义。为了应对全球气候变化,随着IPCC(政府间气候变化专门委员会)第4次评估报告的提交^[52],全球气候变化与温室气体增加之间的相互关系已经变成了一种不容置疑的事实。有效地增加温室气体的排放,增加碳汇是缓解气候变化的首要任务。IPCC在第4次评估报告中提出农业中近90%的减排量可以通过固定土壤中的有机碳来实现。土地利用方式影响土壤有机碳储存,良好的农田管理措施可以有效提高农田土壤碳吸收速率,农田土壤的固碳趋势对CO₂减排和温室气体的排放起着重要减缓作用,这是实现土壤碳汇功能、实现碳平衡和缓解气候变化的一种重要方式;同时,报告指出采取良好的措施增加土壤固碳含量,以减少大气中的二氧化碳气体含量,将土壤固碳与农业相结合,从而作为减缓气候变化的重要方式^[53-54]。2023年3月,IPCC在瑞士发布第6次评估报告综合报告《气候变化2023》^[55],这份报告整合了自2018年以来IPCC发布的3份特别报告的调查结果,其中《气候变化与土地报告》对土地利用变化和气候作用的反馈进行了综合评估,该报告提供了有助于应对气候变化和土地退化等可持续的土地管理措施。

法国农业部长于2015年12月在第21届联合国气候变化大会上正式提出“千分之四计划”^[56-57],该计划不仅表明了土壤碳库与气候变化在碳循环过程中的重要性,同时也体现出了通过改善土壤有机质来缓解气候变化这一途径的重要意义,尽管“千分之四计划”实现面临着很大的挑战,但显示了土壤在减缓气候变化中占有重要地位。结合国内的发展趋势,中国在2014年首次提出2030年的“碳达峰”计划^[58]并在2020年第75届联合国大会一般性辩论会上,宣布在2030年实现碳达峰、2060年实现碳中和目标。同时在“双碳目标”的重大国家战略背景下,为实现碳减排,通过合理控制温室气体排

放和改变土地利用等方式为“双碳”目标的实现争取到一定的缓冲期。随着碳中和、碳达峰的提出和推广,土壤有机碳循环与气候变化的相互作用已成为热点问题,得到了学者们的进一步研究,这也直接推动了土壤有机碳及相关研究领域的进一步发展。同时对于全世界来说,土地利用变化对全球及区域尺度上生态系统碳循环和储存会产生影响,但土地利用变化对生态系统碳循环的影响并不是一个简单的过程,而是一个复杂的过程,其中包含多种因素,例如气候变化、土壤肥力、植被类型和农业生产活动等^[59]。随着土地利用变化对碳排放影响的研究日益深入,相关研究方法与模型不断地改进和完善,土地利用变化逐渐成为了陆地生态系统的核心,因此,如何精确估算土地利用/覆被变化,进而准确估算区域和陆地碳汇平衡已变得日益重要。然而,目前关于土地利用/覆盖变化对生态系统碳循环的研究中仍然存在着较大的不确定性。因此,为了更好的了解土壤有机碳的变化机制,未来研究需要更深入的定量分析不同时期的LUCC的碳源、碳汇效应,以及土地利用与土地管理对土壤有机碳库的影响,从而进一步探求土壤有机碳的变化机制对生态系统碳循环的影响^[60]。

4 结 论

借助文献计量分析法,分析相关领域的研究热点与趋势。通过对Web of Science核心数据库中2012—2022年间土壤有机碳研究领域的891篇高被引文章进行文献分析,利用VOSviewer软件和Citespace软件,结合发文量、关键词、发文机构和发文作者等网络知识图谱,得出以下结论:

1)土壤有机碳相关领域的高被引论文发文量在2012—2022年间呈上下浮动,2019年高被引论文发文量最高,土壤有机碳相关的研究取得了重大进展。

2)通过对关键词进行分析,土壤有机碳的主要研究内容有土壤有机质的吸附作用和在全球变暖背景下,农田土壤碳循环对气候变化的影响;聚类结果表明,热解温度对生物炭的影响是近一步深入研究的方向和可能的研究热点。

3)土壤有机碳研究高被引文献涉及的主要学科领域为环境科学、土壤学和多学科科学等学科,多学科科学逐渐发展成为一种主要学科,各学科之

间的相互交流更有利于加深对该领域的研究。

4)主要发文国家为美国和中国,其中美国和中国的发文量占比分别为24.56%和22.73%,远高于其他国家;主要发文机构和发文作者为中国科学院和Yong Sik Ok;Yakov Kuzyakov与其他作者之间的合作交流最多。

在全球范围内,土壤碳排放位于生态系统碳循环的主导地位,未来应该重视对土壤有机碳的长期动态监测。通过对碳循环进行定量研究,有助于学科之间的发展,为实现我国的双碳目标和为解决当前所面临的重大生态环境问题提供科学依据。

参考文献 References

- [1] 吴梦瑶. 贺兰山不同海拔土壤团聚体及有机碳稳定性研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2021
Wu M Y. Stability of soil aggregates and organic carbon at different altitudes in Helan Mountain[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021 (in Chinese)
- [2] Stockmann U, Adams M A, Crawford J W, Field D J, Henakaarchchi N, Jenkins M, Minasny B, McBratney A B, de Remy de Courcelles V, Singh K, Wheeler I, Abbott L, Angers D A, Baldock J, Bird M, Brookes P C, Chenu C, Jastrow J D, Lal R, Lehmann J, Zimmermann M. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164: 80-99
- [3] Lal R, Kimble J M, Follett R, Stewart B A. Soil processes and the carbon cycle [M]. In: Scharpenseel H W, eds. *Carbon Turnover in Different Climates and Environments*. Boca Raton: CRC Press, 2018: 577-590
- [4] 刘宇新. 武功山退化山地草甸土壤有机碳及团聚体稳定性研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2015
Liu Y X. Study on soil organic carbon and aggregate stability of degraded mountain meadow in Wugong Mountain[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2015 (in Chinese)
- [5] Duru M, Therond O, Martin G, Martin-Clouaire R, Magne M A, Justes E, Journet E P, Aubertot J N, Savary S, Bergez J E, Sarthou J. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35 (4): 1259-1281
- [6] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 91(1/3): 217-232
- [7] 王彩霞, 刘帅, 王勇, 王旭东. 不同保护性耕作方式对微团聚体有机碳氧化稳定性的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(5): 149-155
Wang C X, Liu S, Wang Y, Wang X D. Effect of different conservational tillage modes on the oxidation stability of soil organic carbon in soil micro-

- aggregates[J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2010, 38(5): 149-155 (in Chinese)
- [8] 徐华君, 殷志刚. 阿尔泰山区土壤有机碳组成及分布规律研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 33-36
- Xu H J, Yin Z G. Study on soil organic carbon composition and distribution law in Altai Mountains[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(1): 33-36 (in Chinese)
- [9] 齐边斌, 赵鑫勇, 吕德国. 影响土壤有机碳动态变化的因素研究进展[J]. 北方果树, 2019, 212(4): 1-4
- Qi B B, Zhao X Y, Lv D G. A review of the factors affecting soil organic carbon dynamics[J]. *Northern Fruits*, 2019, 212(4): 1-4 (in Chinese)
- [10] 吴建国, 徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳的影响: 理论、方法和实践[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004
- Wu J G, Xu D Y. *Effects of Land Use Change on Soil Organic Carbon: Theory, Method and Practice*[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2004 (in Chinese)
- [11] Jackson R B, Banner J L, Jobbágy E G, Pockman W T, Wall D H. Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands[J]. *Nature*, 2002, 418(6898): 623-626
- [12] Six J, Conant R T, Paul E A, Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155-176
- [13] Wu T Y, Schoenau J J, Li F M, Qian P Y, Malhi S S, Shi Y C, Xu F L. Influence of cultivation and fertilization on total organic carbon and carbon fractions in soils from the Loess Plateau of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 77(1): 59-68
- [14] Ogle S M, Breidt F J, Paustian K. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 72(1): 87-121
- [15] Kong A Y Y, Six J, Bryant D C, Denison R F, van Kessel C. The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(4): 1078-1085
- [16] Wang Z W, Huang L M, Shao M A. Spatial variations and influencing factors of soil organic carbon under different land use types in the alpine region of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *CATENA*, 2023, 220: 106706
- [17] 邱均平. 文献计量学的定义及其研究对象[J]. 图书馆学通讯, 1986, 12(2): 71
- Qiu J P. Definition of bibliometrics and its research object[J]. *Journal of Library Science in China*, 1986, 12(2): 71
- [18] 周煜杰, 贾夏, 赵永华, 王茜, 叶璇, 安毅仁. 基于文献计量的土壤微生物海拔分布规律研究[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(10): 1281-1291
- Zhou Y J, Jia X, Zhao Y H, Wang X, Ye X, An Y R. Review on soil microbial patterns along the elevation gradient based on the knowledge mapping analysis[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(10): 1281-1291 (in Chinese)
- [19] Khatun R, Xiang H, Yang Y, Wang J W, Yildiz G. Bibliometric analysis of research trends on the thermochemical conversion of plastics during 1990—2020[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 317: 128373
- [20] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 胡志刚, 王贤文. 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, Hu Z G, Wang X W. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. *Studies in Science of Science*, 2015, 33(2): 242-253 (in Chinese)
- [21] 陈林, 曹萌豪, 宋乃平, 李学斌, 邱开阳, 庞丹波. 中国荒漠草原的研究态势与热点分析-基于文献计量研究[J]. 生态学报, 2021, 41(24): 9990-10000
- Chen L, Cao M H, Song N P, Li X B, Qiu K Y, Pang D B. Research situation and hot spot analysis of desert grassland in china: Based on bibliometric research[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(24): 9990-10000 (in Chinese)
- [22] Chen C M, Song I Y, Yuan X J, Zhang J. The thematic and citation landscape of data and knowledge engineering (1985—2007)[J]. *Data & Knowledge Engineering*, 2008, 67(2): 234-259
- [23] Li L L, Ding G H, Feng N, Wang M H, Ho Y S. Global stem cell research trend: Bibliometric analysis as a tool for mapping of trends from 1991 to 2006[J]. *Scientometrics*, 2009, 80(1): 39-58
- [24] Liang Y D, Li Y, Zhao J, Wang X Y, Zhu H Z, Chen X H. Study of acupuncture for low back pain in recent 20 years: A bibliometric analysis via CiteSpace[J]. *Journal of Pain Research*, 2017, 10: 951-964
- [25] 李洋, 戴国斌, 张君贤. 近十年(2007—2017)我国武术文化研究热点、演进与前沿-基于知识图谱的可视化分析[J]. 南京体育学院学报, 2018, 1(10): 69-80, 2
- Li Y, Dai G B, Zhang J X. Recent ten years (2007—2017) research hotspots, trends and frontiers of Chinese Wushu culture: Visual analysis based on knowledge map[J]. *Journal of Nanjing Sports Institute*, 2018, 1(10): 69-80, 2 (in Chinese)
- [26] 闫淑兰, 赵秀红, 罗启仕. 基于文献计量的重金属固化稳定化修复技术发展动态研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(2): 229-238
- Yan S L, Zhao X H, Luo Q S. Bibliometrics-based development trends of solidification/stabilization technology for the remediation of sites contaminated by heavy metals[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(2): 229-238 (in Chinese)
- [27] 张超, 马亚亚, 刘国彬, 王杰, 李静. 黄土高原植被恢复过程中土壤微生物的演变特征[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 240-247
- Zhang C, Ma Y Y, Liu G B, Wang J, Li J. Evolution of soil microbial community during vegetation restoration in loess plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(6): 240-247 (in Chinese)
- [28] 魏一品, 李晨英, 韩明杰, 赵勇, 张红伟. 全球主要小麦研究机构的国际学术影响力比较分析[J]. 世界农业, 2016(9): 63-72, 149, 258
- Wei Y P, Li C Y, Han M J, Zhao Y, Zhang H W. Comparative analysis of international academic influence of major wheat research institutions in the world[J]. *World Agriculture*, 2016(9): 63-72, 149, 258 (in Chinese)
- [29] Ahmad M, Rajapaksha A U, Lim J E, Zhang M, Bolan N, Mohan D, Vithanage M, Lee S S, Ok Y S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review[J]. *Chemosphere*, 2014, 99: 19-33
- [30] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 10-21
- [31] Schuur E A G, McGuire A D, Schädel C, Grosse G, Harden J W, Hayes D J, Hugelius G, Koven C D, Kuhry P, Lawrence D M, Natali S M, Olefeldt D, Romanovsky V E, Schaefer K, Turetsky M R, Treat C C, Vonk J E. Climate change and the permafrost carbon feedback[J]. *Nature*, 2015, 520(7546): 171-179

- [32] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter[J]. *Nature*, 2015, 528(7580): 60-68
- [33] Hengl T, de Jesus J M, Heuvelink G B M, Gonzalez M R, Ruiperez Gonzalez M, Kilibarda M, Blagotić A, Shangguan W, Wright M N, Geng X Y, Bauer-Marschallinger B, Guevara M A, Vargas R, MacMillan R A, Batjes N H, Leenaars J G B, Ribeiro E, Wheeler I, Mantel S, Kempen B. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0169748
- [34] Cotrufo M F, Wallenstein M D, Boot C M, Denef K, Paul E. 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
- [35] Mohan D, Sarswat A, Ok Y S, Pittman C U. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent: A critical review[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 160: 191-202
- [36] Ghanbari F, Moradi M. Application of peroxymonosulfate and its activation methods for degradation of environmental organic pollutants: Review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 310: 41-62
- [37] Zhang B C, Kong W D, Wu N, Zhang Y M. Bacterial diversity and community along the succession of biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert, Northern China[J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2016, 56(6): 670-679
- [38] Burns R G, DeForest J L, Marxsen J, Sinsabaugh R L, Stromberger M E, Wallenstein M D, Weintraub M N, Zoppini A. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58: 216-234
- [39] 贺超城, 吴江, 魏子瑶, 刘福珍. 科研合作中机构间科研主导力及邻近性机理-以中国生物医学领域为例[J]. 情报学报, 2020, 39(2): 148-157
- He C C, Wu J, Wei Z Y, Liu F Z. Research dominance between institutions and its proximity mechanism in research collaboration: A case study of chinas biomedical field [J]. *Journal of the China Society for Scientific and Technical Information*, 2020, 39(2): 148-157 (in Chinese)
- [40] Kalina M, Sovova S, Svec J, Trudicova M, Hajzler J, Kubikova L, Enev V. The effect of pyrolysis temperature and the source biomass on the properties of biochar produced for the agronomical applications as the soil conditioner[J]. *Materials*, 2022, 15(24): 8855
- [41] Aziz S, Bibi S, Hasan M M, Biswas P, Ali M I, Bilal M, Chopra H, Mukerjee N, Maitra S. A review on influence of biochar amendment on soil processes and environmental remediation [J]. *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews*, 2023: 1-35
- [42] Taylor L A, Arthur M A, Yanai R D. Forest floor microbial biomass across a northern hardwood successional sequence[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(3): 431-439
- [43] 周咪, 肖海兵, 聂小东, 李忠武, 邓楚雄, 刘俊宇, 张宇婷. 近30年国内外土壤有机碳研究进程解析与展望[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 391-400
- Zhou M, Xiao H B, Nie X D, Li Z W, Deng C X, Liu J Y, Zhang Y T. Analysis and prospect of soil organic carbon research process in recent 30 years at home and abroad[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(3): 391-400 (in Chinese)
- [44] Franzluebbers A, Hons F, Zuberer D. Soil organic carbon, microbial biomass, and mineralizable carbon and nitrogen in sorghum [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59: 460-466
- [45] 张斌, 张福韬, 陈曦, 王东睿. 土壤有机质周转过程及其矿物和团聚体物理调控机制[J]. 土壤与作物, 2022, 11(3): 235-247
- Zhang B, Zhang F T, Chen X, Wang D R. Soil organic matter turnover and controlling mechanisms of mineralogy and aggregation: New insights [J]. *Soils and Crops*, 2022, 11(3): 235-247 (in Chinese)
- [46] Turner B L, Skole D, Sanderson S, Fischer G, Fresco L, Leemans R. Land-use and land-cover change: Science/research plan[Z]. Stockholm and Geneva: IGBP Repoa, 1995
- [47] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3324-3333
- Chen W F, Zhang W M, Meng J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16): 3324-3333 (in Chinese)
- [48] 张梦阳, 夏浩, 吕波, 丛铭, 宋文群, 姜存仓. 短期生物炭添加对不同类型土壤细菌和氨氧化微生物的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(7): 1260-1271
- Zhang M Y, Xia H, Lv B, Cong M, Song W Q, Jiang C C. Short-term effect of biochar amendments on total bacteria and ammonia oxidizers communities in different type soils [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(7): 1260-1271(in Chinese)
- [49] Gomez J D, Denef K, Stewart C E, Zheng J, Cotrufo M F. Biochar addition rate influences soil microbial abundance and activity in temperate soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 28-39
- [50] Li Y C, Li Y F, Chang S X, Yang Y F, Fu S L, Jiang P K, Luo Y, Yang M, Chen Z H, Hu S D, Zhao M X, Liang X, Xu Q F, Zhou G M, Zhou J Z. Biochar reduces soil heterotrophic respiration in a subtropical plantation through increasing soil organic carbon recalcitrancy and decreasing carbon-degrading microbial activity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 122: 173-185
- [51] 肖潇, 段建南. 土壤有机碳及其计算机模型实现研究[J]. 农村经济与科技, 2008, 19(2): 75-76
- Xiao X, Duan J N. Study on soil organic carbon and its computer model realization [J]. *Rural Economy and Science-Technology*, 2008, 19(2): 75-76 (in Chinese)
- [52] IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- [53] 程琨, 潘根兴. “千分之四全球土壤增碳计划”对中国的挑战与应对策略[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(5): 457-464
- Cheng K, Pan G X. “Four per mille initiative: Soils for food security and climate” challenges and strategies for China’s action [J]. *Climate Change Research*, 2016, 12(5): 457-464(in Chinese)
- [54] Smith P, Martino Z, Cai D. ‘Agriculture’, in *Climate change 2007: Mitigation* [J] *Agricultural and Food Sciences, Environmental Science*, 2007
- [55] IPCC. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022
- [56] Ministry of France. Understand the “4 per 1000” initiative [EB/OL]. [2022-05-20]. <http://4p1000.org/understand>
- [57] Minasny B, Malone B P, McBratney A B, Angers D A, Arrouays D, Chambers A, Chaplot V, Chen Z S, Cheng K, Das B S, Field D J,

- Gimona A, Hedley C B, Hong S Y, Mandal B, Marchant B P, Martin M, McConkey B G, Mulder V L, O'Rourke S, Winowiecki L. Soil carbon 4 per mille[J]. *Geoderma*, 2017, 292: 59-86
- [58] 张明芳, 于雷, 戴梓萱, 吕天琦, 祁磊, 王涛, 郑翔宇. 基于CNKI数据库对中国土地利用方式变化影响土壤有机碳趋势研究的文献计量分析[J]. 华中师范大学学报:自然科学版, 2022, 56(6): 1044-1051
- Zhang M F, Yu L, Dai Z X, Lv T Q, Qi L, Wang T, Zheng X Y. Bibliometric analysis of the influence trend of land use change on soil organic carbon in China based on CNKI database [J]. *Journal of Central China Normal University: Natural Sciences*, 2022, 56(6): 1044-1051 (in Chinese)
- [59] 辛蕊. 基于 CLUE-S 模型的哈尔滨地区土地利用变化格局模拟与展望[J]. 农业展望, 2019, 15(9): 71-76
- Xin R. Simulation of land use change patterns in Harbin area based on CLUE-S model and its prospects [J]. *Agricultural Outlook*, 2019, 15(9): 71-76 (in Chinese)
- [60] 陈朝, 吕昌河, 范兰, 武红. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5358-5371
- Chen Z, Lv C H, Fan L, Wu H. Effects of land use change on soil organic carbon: A review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5358-5371 (in Chinese)
- 责任编辑:董金波



第一作者简介: 李冰,宁夏中卫人,在读硕士研究生,主要研究方向为土壤碳循环相关方面。2022年毕业于宁夏大学环境科学专业,获理学学位,硕士就读于宁夏大学生态学专业,荣获2022—2023学年三等学业奖学金。2019年参与校级创新创业项目“调查享誉世界的麦草方格-以沙坡头麦草方格为例”,2021主持校级创新创业项目“降水变化对荒漠草原物种多样性和生产力的影响”。能够熟练运用办公软件和数据分析软件等。在生活中,性格开朗热情,具有积极向上的生活态度,对待工作责任心强、勤恳踏实。



通讯作者简介: 李学斌,中共党员,博士,研究员,博士生导师,现任宁夏大学党委常委、副校长、宁夏生态学会副理事长。长期从事草地资源、生态与环境等方面研究。先后主持国家自然科学基金项目4项:荒漠草原典型植物群落枯落物分解对水氮耦合的响应机制、灌丛沃岛逆向演替对荒漠草原退化草地恢复的影响、围封条件下荒漠草原枯落物输入对土壤氮库储量及稳定性影响以及农牧交错区退耕封育对土壤有机碳库储量和稳定性影响及机制研究,主持横向及其他省部级项目8项。发表学术论文50余篇,其围栏封育对土壤碳库储量及稳定性影响机制获自治区科技进步三等奖。