

基于文献计量分析土壤微生物对气候变暖的响应

高峰^{1,2,3}, 李学斌^{*1,2,3}, 陈林^{1,2,3}, 庞丹波^{1,2,3}, 李天凯^{1,2,3}

1 宁夏大学生态环境学院, 宁夏 银川 750021

2 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏 银川 750021

3 宁夏大学西北土地退化与生态系统恢复国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021

高峰, 李学斌, 陈林, 庞丹波, 李天凯. 基于文献计量分析土壤微生物对气候变暖的响应[J]. 微生物学通报, 2023, 50(5): 2280-2295.

GAO Feng, LI Xuebin, CHEN Lin, PANG Danbo, LI Tiankai. Research progress in response of soil microorganisms to global warming: based on bibliometric analysis[J]. Microbiology China, 2023, 50(5): 2280-2295.

摘要: 【背景】面对全球气候变暖, 土壤微生物在陆地生态系统对全球变暖反馈中起到了至关重要的作用。【目的】了解土壤微生物对气候变暖响应研究的发展现状、研究热点及前沿动态, 厘清当前该研究领域的知识结构关系。【方法】以 1999–2021 年 Web of Science 核心数据库中土壤微生物对气候变暖响应研究已发表的 3 189 篇论文为数据源, 利用 Vosviewer 和 CiteSpace 软件对年发文量、文献被引频次、作者、机构、国家、学科和关键词等进行可视化分析。【结果】研究总体呈逐步增长趋势, 经历缓慢增长、稳步增长和高速增长 3 个阶段; 高被引论文均发表在国际顶级期刊上, 研究成果具有较高的学术影响力。在学科融合与合作交流方面, 环境科学、生态学和土壤学是该研究领域的主要学科, 而多学科交叉学在该领域占有重要地位; 作者骆亦其、Schuur 和周集中是该领域核心学者, 作者之间的合作关系主要以同一研究团队内部合作为主; 主要的科研机构有中国科学院、加利福尼亚大学和美国能源部, 各科研机构之间合作较为紧密; 中国、美国和欧洲是土壤微生物对气候变暖响应研究领域的主要力量, 国家之间相互合作程度高。该领域的主要研究热点是气候变暖改变了土壤微生物的群落结构组成、多样性和生理生化功能, 进而对地球化学物质循环产生影响; 土壤微生物在土壤碳库释放中的作用机理和调控机制是该领域研究前沿。【结论】目前, 不同生态系统研究中土壤微生物对增温的响应与适应机制存在着差异, 而且对微生物碳功能基因和多环境交互因子的研究较少。因此, 建议后期应更加聚焦特定生态系统的细化研究, 开展大范围、大尺度、长时期的定位研究, 加强对微生物碳降解和碳固定功

资助项目: 宁夏回族自治区重点研发计划(2021BEG02005); 国家自然科学基金(31960359); 第三批宁夏回族自治区青年科技人才托举工程项目(TJGC2018068)

This work was supported by the Key Research and Development Program of Ningxia Hui Autonomous Region (2021BEG02005), the National Natural Science Foundation of China (31960359), and the Third Batch of Ningxia Hui Autonomous Region Youth Science and Technology Talent Lifting Project (TJGC2018068).

*Corresponding author. E-mail: lixuebin@nxu.edu.cn

Received: 2022-07-22; Accepted: 2022-10-10; Published online: 2022-11-23

能基因的研究, 多关注环境因子变化的交互作用对土壤微生物生态过程的影响。

关键词: 土壤微生物; 全球气候变暖; 土壤碳循环; 可视化分析; 研究热点

Research progress in response of soil microorganisms to global warming: based on bibliometric analysis

GAO Feng^{1,2,3}, LI Xuebin^{*1,2,3}, CHEN Lin^{1,2,3}, PANG Danbo^{1,2,3}, LI Tiankai^{1,2,3}

1 School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China

2 Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China

3 Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China

Abstract: [Background] Soil microorganisms play a crucial role in the response of terrestrial ecosystem to global warming. **[Objective]** To unravel the status quo, hotspots, and frontiers of research on the response of soil microorganisms to global warming and to clarify the knowledge structure in this field. **[Methods]** Based on the 3 189 papers on the response of soil microorganisms to global warming published in Science Citation Index Expanded of Web of Science from 1999 to 2021, the annual number of papers in this field, cited frequency of the papers, authors, affiliations, countries, subjects, and keywords were visualized by Vosviewer and CiteSpace. **[Results]** The number of papers shows an overall increasing trend: first slow increase, then steady increase, and finally rapid increase in detail. The highly cited papers are all published in top international journals, the research outcomes of which have high academic influence. As for interdisciplinary research and collaboration, Environmental Science, Ecology, and Soil Science are the main disciplines, and Multidisciplinary Sciences occupies an important position in this field. Moreover, professors Luo Yiqi, Schuur, and Zhou Jizhong are the core scholars in this field. Cooperation among the authors in the same research team is common. The main affiliations are the Chinese Academy of Sciences, University of California, and the US Department of Energy, with close cooperation among the affiliations. Besides, China, the US, and Europe are the main forces in this field and frequent cooperation among countries in this field is observed. The research focus is that global warming changes the community structure, diversity, and physiological and biochemical functions of soil microorganisms, further influencing geochemical cycle. The research frontiers are the mechanism of action and regulatory mechanism of soil microorganisms in release of soil carbon pool. **[Conclusion]** The response and adaptation mechanism of soil microorganisms in different ecosystems to global warming are different. A few studies of microbial carbon function-related genes and interaction of multiple environmental factors are available. Therefore, efforts should be made to carry out research on specific ecosystems and large-scale long-term positioning research, strengthen the research on microbial carbon degradation- and carbon fixation-related genes, and emphasize the impact of the interaction of multiple environmental factors on soil microbial

ecological processes.

Keywords: soil microorganism; global warming; soil carbon cycle; visualization; research hotspots

随着全球气候变暖所引发环境问题的日益突出,气候变暖已成为科学界、政府部门及国际社会非常关注的话题。自工业化以来,全球地表温度上升了 0.78 °C,预计到 21 世纪末将再上升 1.4–4.4 °C^[1]。气候变暖不仅会影响地上植被的适应策略,同时也深刻地影响着陆地生态系统的地下生物化学过程^[2–4]。土壤微生物是陆地土壤生物地球化学循环的主要驱动力,在陆地生态系统的生物化学循环、生产力和稳定性等方面发挥着至关重要的作用^[5]。据估计全球土壤中存在数万种微生物^[6],土壤微生物包括真菌、藻类(蓝藻除外)、地衣等真核生物,以及细菌、蓝藻、放线菌等原核生物^[7]。土壤微生物在对气候变暖的反馈机制中起到了至关重要的作用,气候变暖显著改变了土壤微生物的数量、丰富度和碳氮元素的转化功能^[8–10]。许多研究表明,在实验增温条件下,土壤微生物群落的变化严重影响土壤有机质降解、氮周转、碳排放和凋落物分解^[11–12]。增温可以通过筛选适应温度升高的微生物物种直接影响土壤微生物群落结构和生理功能,也可以通过影响土壤属性和植物生长间接影响土壤微生物群落和生理功能^[13–16]。

土壤微生物对增温响应会影响土壤碳库储量^[17]。土壤是陆地生态系统中最大的碳库,即使是土壤碳库的微小变化也可能对大气二氧化碳浓度产生很大影响,并通过正反馈进一步加剧全球气候变暖^[18]。已有研究认为,这种正反馈受到土壤微生物对增温响应的调控,微生物对增温的响应可能通过提高或降低增加的土壤生化反应速率来调控土壤二氧化碳的预期排放

量^[19–21]。土壤微生物以土壤有机碳为主要碳源进行物质代谢,并通过分泌酶参与土壤有机碳的分解过程^[22]。增温可以通过改变微生物群落结构组成甚至影响土壤微生物的生理功能,进一步影响土壤中的各类生化反应速率,从而刺激或抑制土壤碳排放^[23]。

目前,关于土壤微生物对气候变暖响应的相关研究十分庞杂,而文献计量法可有效总结研究成果并揭示未来的发展方向^[24]。因此,本文基于 Web of Science 数据库,利用 Vosviewer 和 CiteSpace 分析软件,从文献计量角度就土壤微生物对气候变暖响应研究的发文量、文献被引频次、学科领域、作者、机构、国家和关键词等进行分析,探究土壤微生物对气候变暖响应已有文献的内在关联和潜在热点,理清当前该研究领域的知识结构关系,揭示土壤微生物对气候变暖响应研究的发展现状、研究热点及前沿动态,以期对相关科研人员开展研究提供参考。

1 研究数据与方法

1.1 数据来源

本文选用国际公认的权威数据库 Web of Science 核心合集(science citation index expanded, SCIE)数据库作为数据源,编制高级检索式:(TS=((“microb*” or “edaphon”) and (“warming”))) or (TS=((“microb*” or “edaphon”) and (“temperature increase”)))进行检索,文献类型选择 Article 和 Review,检索时间设置为 1999–2021 年(检索日期为 2022 年 4 月 2 日)。将检索结果导入 CiteSpace 软件中进行去重处理后,共计检索到已发表文献 3 189 篇。

1.2 分析方法

CiteSpace 知识图谱是由美国德雷塞尔大学陈超美团队开发, 其可对文献的关键词、国家、机构和作者等进行分析, 是用来分析、挖掘及进行科研文献可视化的应用软件, 是文献计量学的重要研究手段^[25]。Vosviewer 是荷兰莱顿大学 Eck 等基于 VOS 可视化技术, 专门开发用于分析文献知识单元的可视化工具, 其突出的优点是图形展示能力强, 非常适合分析大规模样本数据, 可绘制作者、机构与国家及其合作关系^[26]。本文借助 CiteSpace 和 Vosviewer 分析软件, 对土壤微生物响应气候变暖的研究领域文献发文量、文献被引频次、作者、机构、国家、学科和关键词等分别进行可视化分析。

2 结果与分析

2.1 发文量分析

在 1999–2021 年间, 土壤微生物对气候变暖的响应研究发表文献共 3 189 篇, 年均发文量 138.65 篇, 自 1999 年以来, 发文量总体呈逐步增长趋势(图 1)。从发文数量时间序列看, 其发展历程大致可以分为 3 个阶段: (1) 1999–2004 年的缓慢增长阶段, 年度发文量在

18–26 篇之间, 土壤微生物对气候变暖响应开展的相关研究比较少; (2) 2005–2010 年的稳步增长阶段, 该阶段中, 年度发文量在 33–75 篇之间, 总发文量相比上阶段增长近 3 倍, 土壤微生物对气候变暖响应研究的发展较为稳定, 总体呈现稳定上升状态; (3) 2011–2021 年的高速增长阶段, 此阶段发文量呈现激增状态, 年度发文量在 113–500 篇之间, 发文量占总发文量的 87.58%, 发文量最高在 2021 年达到了 500 篇。

2.2 文献被引频次分析

从被引频次来看, 3 189 篇论文总被引频次为 124 126 次, 篇均被引频次 38.92 次。见表 1, 被引频次最高的论文是 Schmidt 于 2011 年发表在 Nature 期刊上题为“Persistence of soil organic matter as an ecosystem property”的文章, 该文研究了土壤微生物和环境对土壤有机质分解的影响机制, 从而改进了土壤有机质分解对全球变暖响应的预测^[27]。被引频次第二的文章是“Climate change and the permafrost carbon feedback”, 该文对永久冻土中微生物在有机碳储量对气候变化的响应中的作用进行了研究。结果表明, 气候变暖会导致环境变化, 加速微生物对有机碳的分解, 释放温室气体二氧化碳

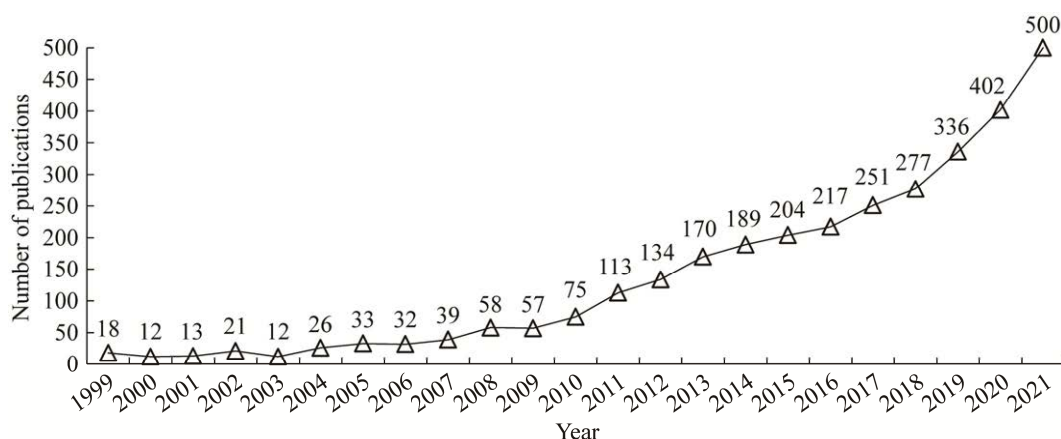


图 1 土壤微生物对气候变暖的响应研究年度发文量分布

Figure 1 Distribution of annual publications on the response of soil microorganisms to global warming.

表 1 土壤微生物对气候变暖响应研究被引频次前 10 的文献

Table 1 Top 10 most frequently cited literatures on the response of soil microorganisms to global warming

排序 Rank	文献名 Article title	第一作者 First authors	来源期刊 Source publication	发表年份 Publication year	被引频次 Citation frequency
1	Persistence of soil organic matter as an ecosystem property	Schmidt MWI	<i>Nature</i>	2011	2 966
2	Climate change and the permafrost carbon feedback	Schuur EAG	<i>Nature</i>	2015	1 465
3	Three decades of global methane sources and sinks	Kirschke S	<i>Nature Geoscience</i>	2013	1 130
4	Anaerobic oxidation of methane: progress with an unknown process	Knittel K	<i>Annual Reviews</i>	2009	971
5	Vulnerability of permafrost carbon to climate change: implications for the global carbon cycle	Schuur EAG	<i>Bioscience</i>	2008	968
6	Soil erosion and the global carbon budget	Lal R	<i>Environment International</i>	2003	882
7	Temperature and soil organic matter decomposition rates-synthesis of current knowledge and a way forward	Conant RT	<i>Global Change Biology</i>	2011	825
8	Soil-carbon response to warming dependent on microbial physiology	Allison SD	<i>Nature Geoscience</i>	2010	802
9	Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils-effects of no-tillage	Six J	<i>Agronomy</i>	2002	798
10	Plant-soil feedbacks: The past, the present and future challenges	Putten WH	<i>Journal of Ecology</i>	2013	780

和甲烷^[28]。被引频次前 3 的论文均发表在顶级期刊 *Nature* 及其子刊上,具有较高的学术影响力。

2.3 学科领域分析

如图 2 所示,发文量第一的学科是 Environmental Sciences (环境科学),发文量高达 979 篇,学科占比 30.70%;其次是 Ecology (生态学),发文量 737 篇,学科占比 23.11%;排名第三的是 Soil Science (土壤科学),发文量 587 篇,学科占比 18.41%。而 Multidisciplinary Sciences (多学科交叉学)排名第六,发文量 232 篇。说明该领域研究主要集中在环境科学、生态学和土壤学等学科上,多学科交叉学在该领域具有重要地位。

2.4 作者及其合作关系

经 VOSviewer 统计显示共有 12 933 名作者开展了土壤微生物对气候变暖响应的研究。见

表 2,发文数量前 10 的作者有美国俄克拉荷马大学周集中(Zhou JZ)和骆亦其(Luo YQ)、哥本哈根大学的 Michelsen、亚利桑那州立大学的 Schuur 及清华大学杨云峰(Yang YF)等,发文篇数范围在 26–55 篇之间,中介中心性范围在 0.00–0.09 之间,被引频次范围在 422–3 348 之间。

中介中心性由 CiteSpace 计算生成,中介中心性可以识别网络中高度连接的节点,反映该作者的论文在学科领域知识发展过程中的关键性和影响力,体现网络结构中论文的重要性^[29]。根据中介中心性排序,骆亦其(发文 47 篇,中介中心性 0.09,被引频次 2 255)、Schuur (发文 36 篇,中介中心性 0.05,被引频次 2 227)和周集中(发文 55 篇,中介中心性 0.03,被引频次 3 348),是土壤微生物对气候变暖的响应研究领域核心作者,核心作者对促进学科发展、拓宽

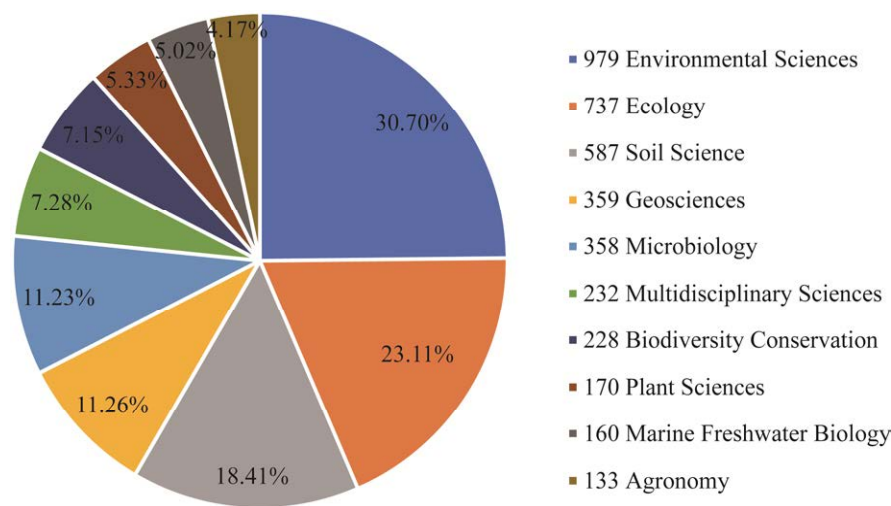


图 2 土壤微生物对气候变暖的响应研究发文量前 10 的学科
Figure 2 Top 10 disciplines on the response of soil microorganisms to global warming.

表 2 土壤微生物对气候变暖的响应研究发文量前 10 的作者
Table 2 Top 10 authors on the response of soil microorganisms to global warming

排序	作者	所属机构	发文量	中介中心性	被引频次
Rank	Author	Institution	Number of publication	Centrality	Total cited frequency
1	Zhou JZ	The University of Oklahoma	55	0.03	3 348
2	Luo YQ	The University of Oklahoma	47	0.09	2 255
3	Michelsen A	University of Copenhagen	45	0.02	1 306
4	Schuur EAG	Arizona State University	36	0.05	2 227
5	Yang YF	Tsinghua University	32	0.01	2 228
6	He ZL	The University of Oklahoma	28	0.01	2 645
7	Liu Y	Sichuan Agricultural University	27	0.00	422
8	Wang SP	Chinese Academy of Sciences	27	0.01	977
9	Frey SD	University of Newhampshire	26	0.01	2 388
10	Wu LY	The University of Oklahoma	26	0.00	1 739

研究领域起到决定性作用。使用 VOSviewer 软件对作者合作关系进行网络共现分析,如图 3 所示。图 3 中的圆点代表不同作者,圆点越大表示作者发文量越多;两个圆点之间连线代表合作关系的强弱,连线越粗则合作关系越紧密;颜色代表作者的聚类,软件将研究内容或者方向相近的作者进行归类,不同的颜色代表了不同作者的学术大方向,同一颜色的作者研究方向类似^[30]。由图 3 及相关论文可知,同属于俄克拉荷马大学的骆亦其、周集中、贺志理和吴

力游之间存在较强的合作关系,作者间的合作主要以同一研究团队内部合作为主。

2.5 研究机构及其合作关系

经 VOSviewer 统计,共有 2 844 个机构开展了土壤微生物对气候变暖的响应相关研究,发文量排名前 10 的科研机构有中国科学院、中国科学院大学、美国加利福尼亚大学、美国能源部和美国俄克拉荷马大学等(表 3)。发文篇数范围为 51–489 篇,中介中心性范围为 0.01–0.14。其中,发文量最高的科研机构为中国科学院,发

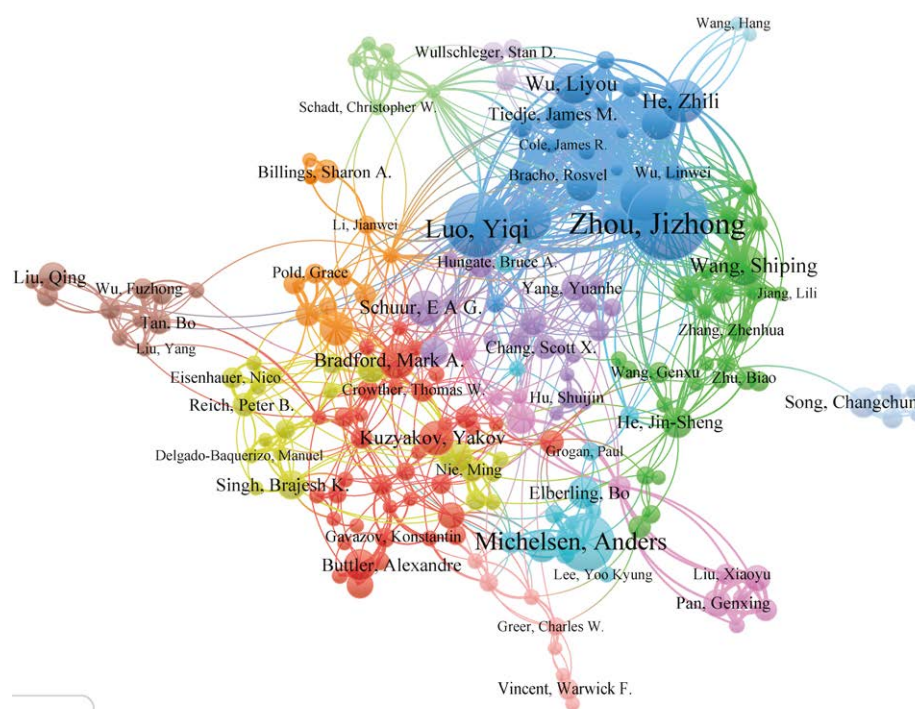


图 3 土壤微生物对气候变暖的响应研究主要作者合作关系网络图

Figure 3 The network map of the cooperation relationship between the main authors on the response of soil microorganisms to global warming.

表 3 土壤微生物对气候变暖的响应研究发文量前 10 的科研机构

Table 3 Top 10 scientific research institutions on the response of soil microorganisms to global warming

排序 Rank	科研机构 Scientific institution	发文量 Number of publication	中介中心性 Centrality	所属国家 Country
1	Chinese Academy of Sciences	489	0.14	China
2	University of Chinese Academy of Sciences	197	0.02	China
3	University of California	184	0.05	USA
4	United States Department of Energy	179	0.02	USA
5	The University of Oklahoma	162	0.03	USA
6	Helmholtz Association	146	0.02	Germany
7	University of Copenhagen	105	0.07	Denmark
8	Tsinghua University	60	0.01	China
9	Arizona State University	56	0.03	USA
10	Colorado State University	51	0.04	USA

文 489 篇，其次分别是中国科学院大学和加利福尼亚大学，分别发文 197 篇和 184 篇，是土壤微生物对气候变暖响应研究领域的主要科研机构。此外，中国科学院的中介中心性 0.14 为最高，是该领域的核心科研机构。

图 4 展示了科研机构合作关系网络图，图中的圆点大小代表机构发文量，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，不同的颜色代表了不同机构的学术大方向，同一颜色的机构研究内容相近^[30]。由图 4

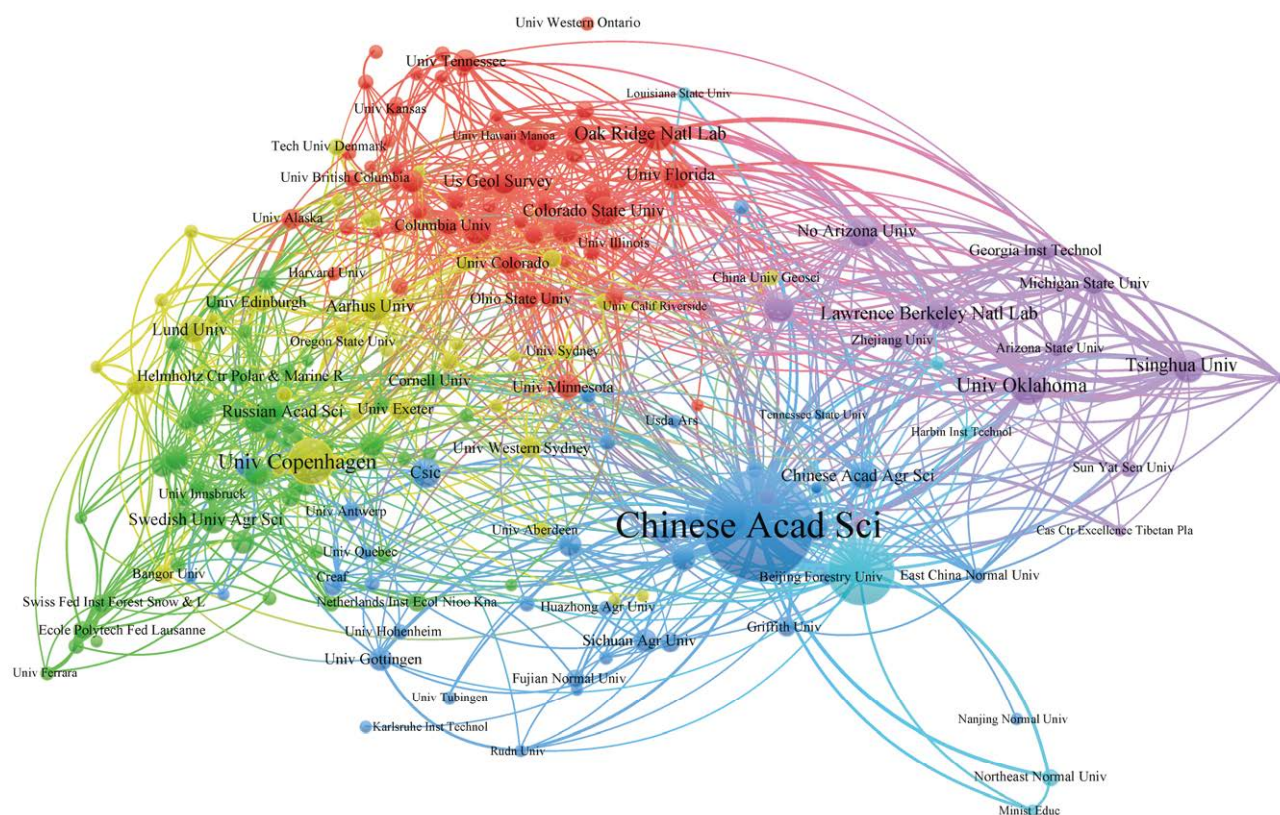


图 4 土壤微生物对气候变暖的响应研究主要科研机构合作关系网络图

Figure 4 Network map of the cooperation relationship between major scientific research institutions on the response of soil microorganisms to global warming.

及相关论文可知,网络图的离散程度低,各科研机构之间的连线多,表明科研机构之间合作较为紧密,学术交流较为频繁。其中,中国科学院所属研究机构与其他机构相互合作交流程度高,与其合作的机构有清华大学、兰州大学、南京农业大学、中国农业科学院及俄克拉荷马大学、美国能源部等。

2.6 国家及其合作关系

经 VOSviewer 统计,有 140 个国家开展了土壤微生物对气候变暖响应的相关研究,整理统计出发文量前 10 的国家如图 5 所示。美国是发文数量第一的国家,发文量为 1 119 篇;其次是中国,发文量 957 篇,而欧洲各国合计发文量为 1 302 篇,表明中国、美国和欧洲是土

壤微生物对气候变暖响应研究领域中的中坚力量。由图 6 可知,各国之间连线密集,表明国家之间相互合作程度高,其中美国、中国、德国和加拿大之间合作强度高且与其他国家的合作较为紧密。

2.7 研究热点前沿趋势分析

关键词是每一篇学术论文的组成部分,是作者对论文主要内容的精练概括。经 CiteSpace 统计,3 189 篇文章中共计有 705 个关键词。见表 4,频次前 10 的关键词出现频次极高,构成了 1999–2021 年间土壤微生物对气候变暖响应最主要的研究内容。

CiteSpace 绘制的论文关键词聚类知识图谱,展现了关键词间的相互关联,并从文献计量

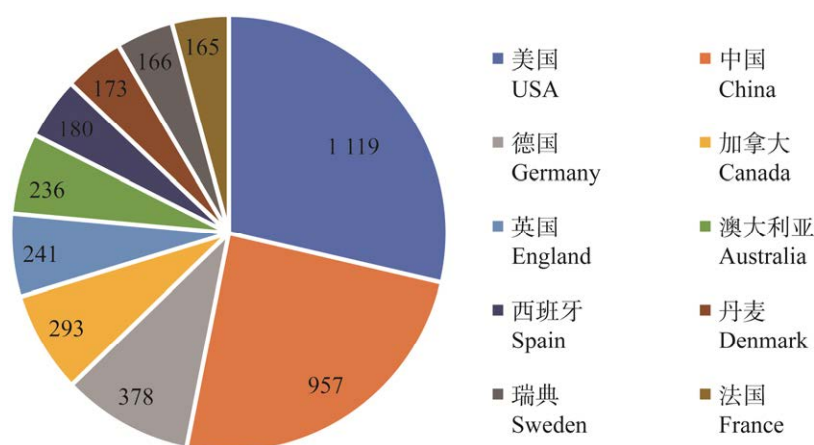


图 5 土壤微生物对气候变暖的响应研究领域发文章量前 10 的国家

Figure 5 Top 10 countries on the response of soil microorganisms to global warming.

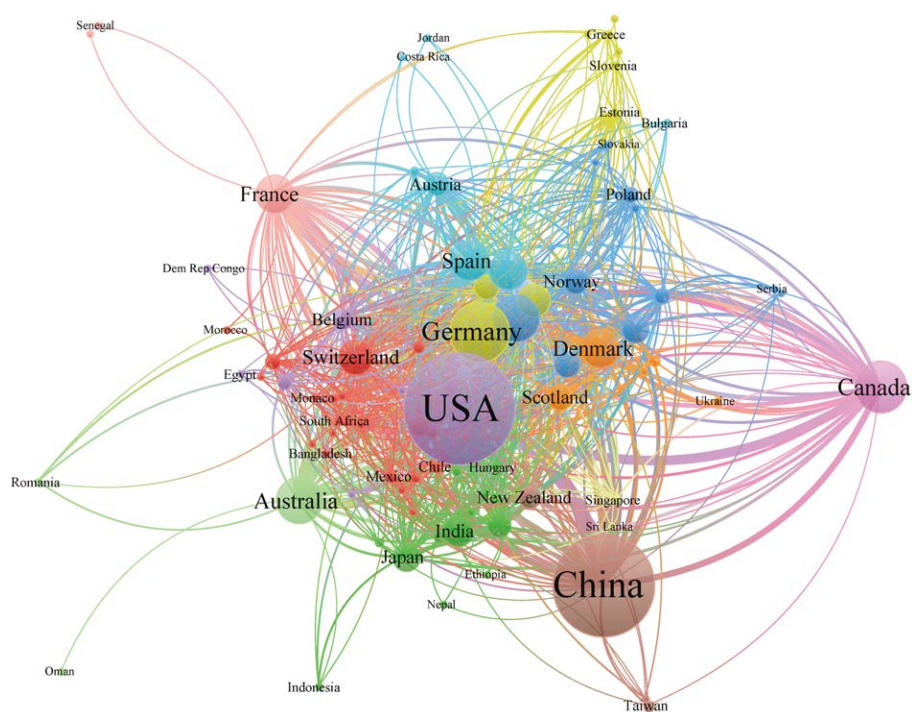


图 6 土壤微生物对气候变暖的响应研究主要国家合作关系网络图

Figure 6 Network map of national cooperative relationships on the response of soil microorganisms to global warming.

学角度确定领域的热点研究^[29]。关键词聚类知识图谱前 10 的群集如图 7 所示, 群集标签依次为#0 Soil respiration (土壤呼吸)、#1 Plant-microbe interactions (植物-微生物互馈作用)、#2

Reductase (还原酶)、#3 Seepage (渗流)、#4 Greenhouse gas emission (温室气体排放)、#5 Termites (白蚁)、#6 Rhizodeposition (根际沉积)、#7 Nitrous oxide (氧化亚氮)、#8 Blanket peat (泥

表 4 土壤微生物对气候变暖的响应研究出现频次前 10 的关键词

Table 4 The top 10 keywords on the response of soil microorganisms to global warming

排序 Rank	关键词 Keyword	频次 Frequency	中介中心性 Centrality
1	Climate change	926	0.11
2	Carbon	422	0.04
3	Temperature	394	0.02
4	Microbial community	355	0.02
5	Respiration	354	0.03
6	Response	333	0.01
7	Diversity	316	0.02
8	Organic matter	288	0.02
9	Temperature sensitivity	279	0.01
10	Microbial bioma	276	0.06

炭层)、#9 Increased temperature (温度升高)。群集#0、群集#4、群集#7 和群集#8 所研究的主题相似, 主要探讨增温通过改变土壤微生物的群落结构和生理生化功能, 进而影响地球化学循环中碳、氮、磷和硫等物质在土壤中的库存和

流失。群集#1、群集#5 和群集#6 主要以动植物与微生物之间的关系为研究对象, 研究变暖条件下, 土壤微生物群落与动植物之间关系的变化特征及其关系变化的影响。群集#2 探讨了增温对土壤微生物分泌酶活性的影响, 进而影响土壤中各类代谢还原反应速率。群集#3 研究微生物及其代谢活动影响土壤的渗流作用。群集#9 探讨了温度升高对土壤微生物多样性、群落结构组成和生理功能的影响。综上所述, 土壤微生物对气候变暖响应的研究热点是气候变暖改变土壤微生物的群落结构组成、多样性和生理生化功能, 进而对土壤性质、地球化学物质循环和微生物与动植物体的关系产生影响。

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^[31]。本文利用 CiteSpace 软件中关键词突变 bust term (突变词)检测分析, 得到共现网络突现词前 20 位的关键词(表 5), 突现

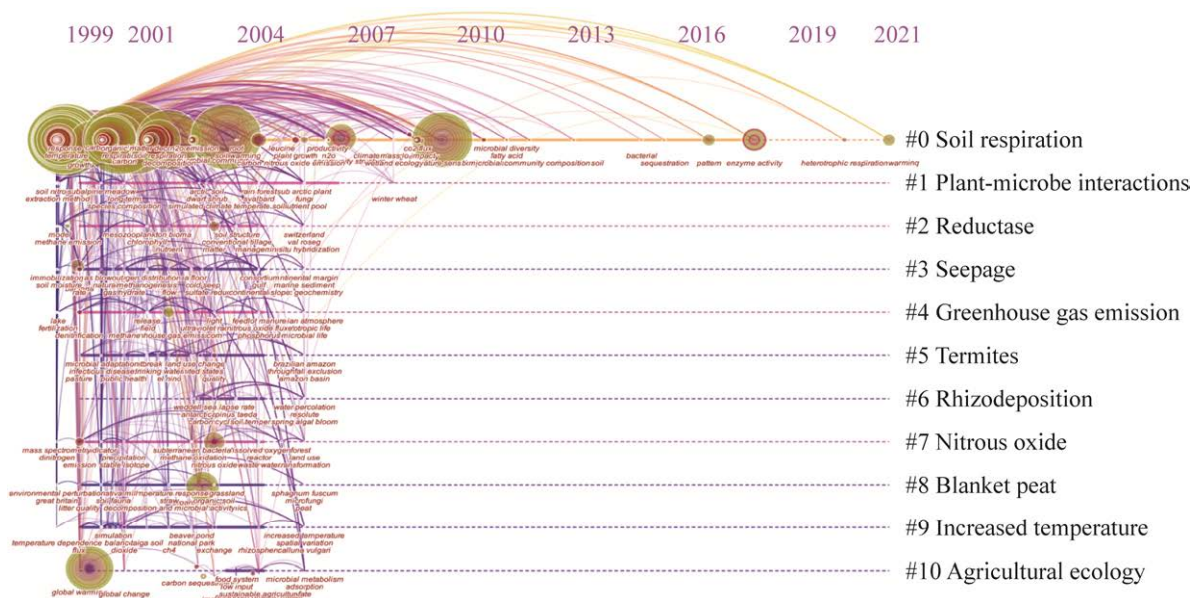






















图 7 土壤微生物对气候变暖的响应研究关键词聚类情况网络图(时间线视图)

Figure 7 Network map of keyword clustering on the response of soil microorganisms to global warming (timeline view).

表 5 引用频次突增前 20 位突现关键词

Table 5 Top 20 keywords with the strongest citation bursts

关键词	突现强度	开始	结束	Time: 1999–2021
Keywords	Strength	Begin	End	
CO ₂	5.56	1999	2006	
Global warming	5.03	1999	2009	
Nutrient	7.76	2001	2011	
Growth	5.61	2004	2011	
Soil nitrogen	5.34	2004	2012	
Denitrification	4.69	2005	2014	
Microbial bioma	7.02	2006	2008	
CO ₂ flux	6.58	2007	2011	
Carbon cycle	4.89	2008	2012	
Plant growth	5.01	2010	2013	
Elevated CO ₂	4.93	2010	2013	
Carbon cycle feedback	5.05	2011	2016	
Thermal adaptation	5.56	2013	2016	
Phospholipid fatty acid	4.73	2013	2016	
Release	5.52	2014	2016	
Meta-analysis	5.24	2014	2017	
Nitrogen fertilization	4.87	2018	2021	
Heterotrophic respiration	4.56	2018	2019	
CH ₄ emission	4.84	2018	2021	
Greenhouse gas emission	7.89	2019	2021	

每个条块代表 1 年，较粗条块代表关键词突现年份，普通黑线部分表示其他年份

Each bar represents a year, the thicker bars represent the years of keywords burst, and the ordinary black lines indicate other years.

强度高、突现年份近的关键词表示研究前沿,以探索目前该领域的研究前沿及演化趋势。

由表 5 可知, 1999–2016 年, 突现强度最高的关键词是 nutrient (养分), 其次是 microbial bioma (微生物生物量)、CO₂ flux (二氧化碳通量)、CO₂ (二氧化碳) 和 growth (增长) 等。表明 21 世纪初, 大量研究集中在温度升高对土壤微生物在陆地生态系统养分循环中的作用与功能的影响上, 以及升温对土壤微生物生物量和群落结构的影响上。多数研究表明, 温度升高增加了土壤微生物生物量^[32–33]。但部分研究发现, 在相对贫瘠的生态系统中, 温度升高对土壤微生物生物量无显著影响^[34]。而在最近的 5 年

中,2017–2021年,Greenhouse gas emission (温室气体排放)成为突现强度最高的关键词,其次是 nitrogen fertilization (氮添加)和 CH₄ emission (甲烷排放)等。表明土壤微生物在土壤碳-气候反馈中的作用机制是当前研究者们关注的重点。温室气体排放、甲烷排放^[35]和异养呼吸等是近几年出现的突现关键词,表明在将全球气温升高控制在 1.5–2.0 °C的大背景下,探寻土壤微生物对土壤碳释放的作用机理和调控机制,为预测全球土壤碳库储量动态变化提供理论支持。因此,土壤微生物对土壤碳释放的作用机理和调控机制是该领域的研究前沿趋势。

3 讨论与结论

发文数量和文献被引频次可以在一定程度上反映一个领域的科研产出成果,而科研产出成果可以促进科学发展和社会进步^[36]。该领域发文量经历 1999–2004 年的缓慢增长、2005–2010 年的稳步增长、2011–2021 年的高速增长 3 个阶段,这可能与土壤微生物学的发展和人类对气候变暖的认识有关。20 世纪末期,人类逐渐认识并日益重视气候变化问题,为应对气候变化的危害,科学家们开始关注并持续开展相关研究。近几十年以来,随着各种先进科学技术的出现,特别是 2005 年发布第 1 台二代测序仪来,高通量测序技术呈现指数式发展,土壤微生物学成为地球科学与生命科学的新兴学科增长点 and 交叉前沿^[37]。这也是从 2005 年开始该领域研究呈现稳定上升状态的重要原因。从被引频次来看,被引频次前 10 的论文均发表在 *Nature*、*Nature Geoscience* 和 *Annual Reviews* 等高质量、高影响力、高认可度的顶级期刊上,表明该领域的研究成果具有较高的学术影响力。

在多学科交叉研究、信息资源相互融合、科学技术创新驱动、科学研究逐渐复杂的大背景下,科研合作成为一种符合主流的发展趋势,促进了不同学科知识的流动和融合^[38]。从学科领域(图 2)中可以发现,多学科交叉学已成为该领域一门重要的学科,学科之间的交叉研究能更好地整合资源,利于综合性地解决全球气候变化问题,更容易取得原创性重大科研突破,激发科研创新力。从科研机构合作关系网络图和作者合作关系网络图中可以看出,虽然各科研机构之间合作较为紧密,学术交流较为频繁,但是作者间的合作主要还是以各个研究团队内部合作为主。从国家合作关系网络图可以发现,国家之间相互合作程度高,气候变暖是一个全

球性问题,任何单一的国家都难以应对这一问题,全球范围内国家之间的紧密合作是必须的。因此,后期应加强各研究机构间学者的学术交流,建立研究者与研究者、研究机构间、国家与国家间、跨学科的多元化合作互惠机制。

通过对关键词分析发现,土壤微生物对气候变暖响应的主要研究是气候变暖背景下土壤微生物在土壤碳循环过程中的功能与作用。气候变暖可以通过改变微生物群落组成和影响土壤微生物的生理功能,进而刺激或抑制土壤碳的排放。研究表明,在土壤微生物群落组成中真菌/细菌比值越大,土壤碳的释放速率越小,平均停留时间越长^[39]。Frey 等^[40]的研究发现长期增温后土壤微生物群落真菌丰度降低,细菌群落丰度增加。但 Zhang 等^[41]研究发现,增温显著改变了微生物群落结构,真菌在群落中所占的比例较细菌有明显增高,降低了土壤碳的排放。另外也有研究指出,增温对土壤微生物群落几乎无影响^[42–43]。Nottingham 等^[21]的研究表明增温通过影响微生物生理学的变化进而加强土壤碳的流失,包括微生物碳利用效率的提高,微生物群落组成向适应高温的微生物类群转变及水解酶活性的增加。也有研究指出增温提高了真菌的活性,增强了微生物对土壤有机碳的分解代谢^[44]。

综合已有研究结果来看,当前研究多集中在增温改变土壤微生物群落结构组成,以及增温会导致土壤微生物代谢活性增加或降低,进而对土壤碳库产生影响^[45–48]。然而,对土壤微生物有关碳固定和碳降解功能基因研究较少,因此建议后期加强对微生物碳降解和碳固定功能基因的研究,为气候变暖背景下土壤碳循环的微生物驱动机制提供新的思路。目前,开展的土壤微生物对气候变暖响应的研究受增温设备和方法等限制,增温范围小、增温时间短,

增温效果不能很好地模拟自然界气候变暖,而且在不同生态系统研究中土壤微生物对增温的响应与适应机制存在着差异^[49-51]。因此建议后期应更加聚焦特定生态系统的细化研究,开展大范围、大尺度、长时期的定位研究。全球气候变化引起的不只是气温上升,全球气候变化还会导致植被特征、降水变化、二氧化碳富集和氮磷沉降等其他环境要素产生变化^[52]。因此,后期关注多环境因子变化的交互作用对土壤微生物生态过程的影响,以揭示土壤微生物对全球气候变化的响应机制和适应策略。

借助文献计量分析方法,与传统的文献分析对比,基于文献计量学软件的可视化分析有助于我们直观、准确地了解相关领域的研究热点内容,从而避免了传统文献分析的片面性^[36]。本文以1999–2021年Web of Science SCI-E数据库土壤微生物对气候变暖响应研究领域已发表论文作为研究对象,以文献计量方法进行可视化分析。得出如下结论。

(1) 土壤微生物对气候变暖的响应研究总体呈逐步增长趋势,经历了1999–2004年的缓慢增长阶段、2005–2010年的稳步增长阶段和2011–2021年的高速增长阶段,并且近年来呈现激增状态。从被引频次来看,高被引文章均发表在国际顶级期刊上,表明该领域的研究成果具有较高的学术影响力。

(2) 从学科领域来看,环境科学、生态学和土壤学等是该研究领域的主要学科,而多学科交叉学在该领域占有重要地位。主要作者方面,骆亦其、Schuur和周集中是该领域核心学者,而作者之间的合作关系主要以同一研究团队内部合作为主;主要的科研机构有中国科学院、加利福尼亚大学和美国能源部,各科研机构之间合作较为紧密;中国、美国和欧洲是土壤微生物对气候变暖响应研究领域的中坚力量,国

家之间相互合作程度高。

(3) 从高频关键词来看,该领域主要研究内容有气候变暖对微生物群落结构的影响,以及在变暖背景下微生物在土壤碳循环中的调控作用;聚类结果表明,主要研究热点是气候变暖通过改变土壤微生物的群落结构组成、多样性和生理生化功能,进而对土壤性质、地球化学物质循环和植物-微生物互馈作用等产生影响。随着近年来全球碳中和工作的加速推进,土壤微生物对土壤碳释放的作用机理和调控机制是该领域的研究前沿趋势。

REFERENCES

- [1] IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]//MASSON-DELMOTTE, V., P. ZHAI, A. PIRANI, S.L. CONNORS, C. PÉAN, S. BERGER, N. CAUD, Y. CHEN, L. GOLDFARB, M.I. GOMIS, M. HUANG, K. LEITZELL, E. LONNOY, J.B.R. MATTHEWS, T.K. MAYCOCK, T. WATERFIELD, O. YELEKÇI, R. YU, and B. ZHOU (eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, DOI: 10.1017/9781009157896.
- [2] WANG H, LIU HY, CAO GM, MA ZY, LI YK, ZHANG FW, ZHAO X, ZHAO XQ, JIANG L, SANDERS NJ, CLASSEN AT, HE JS. Alpine grassland plants grow earlier and faster but biomass remains unchanged over 35 years of climate change[J]. Ecology Letters, 2020, 23(4): 701-710.
- [3] CHEN Y, FENG JG, YUAN X, ZHU B. Effects of warming on carbon and nitrogen cycling in alpine grassland ecosystems on the Tibetan Plateau: a meta-analysis[J]. Geoderma, 2020, 370: 114363.
- [4] CARRILLO Y, DIJKSTRA F, LECAIN D, BLUMENTHAL D, PENDALL E. Elevated CO₂ and warming cause interactive effects on soil carbon and shifts in carbon use by bacteria[J]. Ecology Letters, 2018, 21(11): 1639-1648.
- [5] DELGADO-BAQUERIZO M, ELDRIDGE DJ, OCHOA V, GOZALO B, SINGH BK, MAESTRE FT. Soil microbial communities drive the resistance of ecosystem multifunctionality to global change in

- drylands across the globe[J]. *Ecology Letters*, 2017, 20(10): 1295-1305.
- [6] 林先贵, 陈瑞蕊, 胡君利. 土壤微生物资源管理、应用技术与学科展望[J]. *生态学报*, 2010, 30(24): 7029-7037.
LIN XG, CHEN RR, HU JL. The management and application of soil microbial resources and the perspectives of soil microbiology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(24): 7029-7037 (in Chinese).
- [7] JENKINSON D, LADD J. Microbial biomass in soil: measurement and turnover[J]. *Soil biochemistry*, 1981: 5.
- [8] YU H, DENG Y, HE ZL, van NOSTRAND JD, WANG S, JIN DC, WANG AJ, WU LY, WANG DH, TAI X, ZHOU JZ. Elevated CO₂ and warming altered grassland microbial communities in soil top-layers[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 1790.
- [9] XUE K, XIE JP, ZHOU AF, LIU FF, LI DJ, WU LY, DENG Y, HE ZL, van NOSTRAND JD, LUO YQ, ZHOU JZ. Warming alters expressions of microbial functional genes important to ecosystem functioning[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: 668.
- [10] CHENG L, ZHANG NF, YUAN MT, XIAO J, QIN YJ, DENG Y, TU QC, XUE K, van NOSTRAND JD, WU LY, HE ZL, ZHOU XH, LEIGH MB, KONSTANTINIDIS KT, SCHUUR EA, LUO YQ, TIEDJE JM, ZHOU JZ. Warming enhances old organic carbon decomposition through altering functional microbial communities[J]. *The ISME Journal*, 2017, 11(8): 1825-1835.
- [11] OCHOA-HUESO R, DELGADO-BAQUERIZO M, GALLARDO A, BOWKER MA, MAESTRE FT. Climatic conditions, soil fertility and atmospheric nitrogen deposition largely determine the structure and functioning of microbial communities in biocrust-dominated mediterranean drylands[J]. *Plant and Soil*, 2016, 399(1): 271-282.
- [12] CREAMER CA, de MENEZES AB, KRULL ES, SANDERMAN J, NEWTON-WALTERS R, FARRELL M. Microbial community structure mediates response of soil C decomposition to litter addition and warming[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 80: 175-188.
- [13] ZHANG KP, SHI Y, JING X, HE JS, SUN RB, YANG YF, SHADE A, CHU HY. Effects of short-term warming and altered precipitation on soil microbial communities in alpine grassland of the Tibetan Plateau[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: 1032.
- [14] GRAY SB, CLASSEN AT, KARDOL P, YERMAKOV Z, MILLE RM. Multiple climate change factors interact to alter soil microbial community structure in an old-field ecosystem[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(6): 2217-2226.
- [15] LI GL, KIM S, PARK M, SON Y. Short-term effects of experimental warming and precipitation manipulation on soil microbial biomass C and N, community substrate utilization patterns and community composition[J]. *Pedosphere*, 2017, 27(4): 714-724.
- [16] CONTOSTA AR, FREY SD, COOPER AB. Soil microbial communities vary as much over time as with chronic warming and nitrogen additions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 88: 19-24.
- [17] HAGERTY SB, van GROENIGEN KJ, ALLISON SD, HUNGATE BA, SCHWARTZ E, KOCH GW, KOLKA RK, DIJKSTRA P. Accelerated microbial turnover but constant growth efficiency with warming in soil[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(10): 903-906.
- [18] NOTTINGHAM AT, MEIR P, VELASQUEZ E, TURNER BL. Soil carbon loss by experimental warming in a tropical forest[J]. *Nature*, 2020, 584(7820): 234-237.
- [19] SALAZAR-VILLEGAS A, BLAGODATSKAYA E, DUKES JS. Changes in the size of the active microbial pool explain short-term soil respiratory responses to temperature and moisture[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: 524.
- [20] LI YM, LÜ WW, JIANG LL, ZHANG LR, WANG SP, WANG Q, XUE K, LI BW, LIU PP, HONG H, RENZEN WM, WANG A, LUO CY, ZHANG ZH, DORJI T, TAŞ N, WANG ZZ, ZHOU HK, WANG YF. Microbial community responses reduce soil carbon loss in Tibetan alpine grasslands under short-term warming[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(10): 3438-3449.
- [21] NOTTINGHAM AT, WHITAKER J, OSTLE NJ, BARDGETT RD, MCNAMARA NP, FIERER N, SALINAS N, CCAHUANA AJQ, TURNER BL, MEIR P. Microbial responses to warming enhance soil carbon loss following translocation across a tropical forest elevation gradient[J]. *Ecology Letters*, 2019, 22(11): 1889-1899.
- [22] CONANT RT, RYAN MG, ÅGREN GI, BIRGE HE, DAVIDSON EA, ELIASSON PE, EVANS SE, FREY SD, GIARDINA CP, HOPKINS FM, HYVÖNEN R, KIRSCHBAUM MUF, LAVALLEE JM, LEIFELD J, PARTON WJ, MEGAN STEINWEG J, WALLENSTEIN MD, MARTIN WETTERSTEDT JÄ, BRADFORD MA. Temperature and soil organic matter decomposition rates-synthesis of current knowledge and a way forward[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(11): 3392-3404.

- [23] SINGH BK, BARDGETT RD, SMITH P, REAY DS. Microorganisms and climate change: terrestrial feedbacks and mitigation options[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, 8(11): 779-790.
- [24] 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 FY, ZHANG FB, YANG MY. Research hotspots and progress of soil organic carbon mineralization based on bibliometrics method[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(2): 381-392 (in Chinese).
- [25] 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 CM, LIU ZY, HU ZG, WANG XW. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. *Studies in Science of Science*, 2015, 33(2): 242-253 (in Chinese).
- [26] 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 MH, SONG NP, LI XB, QIU KY, PANG DB. Research situation and hotspot analysis of desert grassland in China: based on bibliometric research[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(24): 9990-10000 (in Chinese).
- [27] SCHMIDT MWI, TORN MS, ABIVEN S, DITTMAR T, GUGGENBERGER G, JANSSENS IA, KLEBER M, KÖGEL-KNABNER I, LEHMANN J, MANNING DAC, NANNIPIERI P, RASSE DP, WEINER S, TRUMBORE SE. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. *Nature*, 2011, 478(7367): 49-56.
- [28] SCHUUR EAG, MCGUIRE AD, SCHÄDEL C, GROSSE G, HARDEN JW, HAYES DJ, HUGELIUS G, KOVEN CD, KUHRY P, LAWRENCE DM, NATALI SM, OLEFELDT D, ROMANOVSKY VE, SCHAEFER K, TURETSKY MR, TREAT CC, VONK JE. Climate change and the permafrost carbon feedback[J]. *Nature*, 2015, 520(7546): 171-179.
- [29] 严陶韬, 薛建辉. 中国生物多样性研究文献计量分析[J]. *生态学报*, 2021, 41(19): 7879-7892.
YAN TT, XUE JH. Bibliometric analysis of biodiversity research literature in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(19): 7879-7892 (in Chinese).
- [30] van ECK NJ, WALTMAN L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping[J]. *Scientometrics*, 2010, 84(2): 523-538.
- [31] 吴胜男, 王晓锋, 刘婷婷, 王继龙, 袁兴中, 何奕忻, 孔维苇. 基于 CiteSpace 的湿地恢复研究进展[J]. *生态学报*, 2022, 42(3): 1224-1239.
WU SN, WANG XF, LIU TT, WANG JL, YUAN XZ, HE YX, KONG WW. Research progress of wetland restoration based on CiteSpace[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(3): 1224-1239 (in Chinese).
- [32] AN SR, NIU XJ, CHEN WY, SHENG H, LAI SC, YANG ZQ, GU XH, ZHOU SQ. Mechanism of matrix-bound phosphine production in response to atmospheric elevated CO₂ in paddy soils[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 239: 253-260.
- [33] KUZYAKOV Y, HORWATH WR, DORODNIKOV M, BLAGODATSKAYA E. Review and synthesis of the effects of elevated atmospheric CO₂ on soil processes: no changes in pools, but increased fluxes and accelerated cycles[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 128: 66-78.
- [34] NIKLAUS PA, KÖRNER C. Responses of soil microbiota of a late successional alpine grassland to long term CO₂ enrichment[J]. *Plant and Soil*, 1996, 184(2): 219-229.
- [35] 章妮, 陈克龙, 祁闻, 暴涵. 模拟增温对青海湖鸟岛土壤产甲烷菌群落特征的影响[J]. *微生物学杂志*, 2022, 42(1): 17-25.
ZHANG N, CHEN KL, QI W, BAO H. Effects of simulated warming on methanogens community characteristics in bird island of Qinghai Lake[J]. *Journal of Microbiology*, 2022, 42(1): 17-25 (in Chinese).
- [36] 杨阳, 李海亮, 虞凡枫, 牛世全. 氮沉降对土壤微生物影响研究热点与趋势分析: 基于 Citespace 可视化分析[J]. *土壤通报*, 2022, 53(1): 116-126.
YANG Y, LI HL, YU FF, NIU SQ. Research hotspots and trends of the effects of nitrogen deposition on soil microorganisms: based on citespace visual analysis[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(1): 116-126 (in Chinese).
- [37] 朱永官, 沈仁芳, 贺纪正, 王艳芬, 韩兴国, 贾仲君. 中国土壤微生物组: 进展与展望[J]. *中国农业文摘-农业工程*, 2018, 30(3): 6-12, 38.
ZHU YG, SHEN RF, HE JZ, WANG YF, HAN XG, JIA ZJ. China soil microbiome initiative: progress and prospect[J]. *Agricultural Science and Engineering in China*, 2018, 30(3): 6-12, 38 (in Chinese).
- [38] 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 CC, WU J, WEI ZY, LIU FZ. Research dominance between institutions and its proximity mechanism in research collaboration: a case study of China biomedical field[J]. *Journal of the China Society for Scientific and*

- Technical Information, 2020, 39(2): 148-157 (in Chinese).
- [39] 胡明慧, 赵建琪, 王玄, 熊鑫, 张慧玲, 褚国伟, 孟泽, 张德强. 自然增温对南亚热带森林土壤微生物群落与有机碳代谢功能基因的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 359-369.
- HU MH, ZHAO JQ, WANG X, XIONG X, ZHANG HL, CHU GW, MENG Z, ZHANG DQ. Effects of natural warming on soil microorganisms communities and functional genes of soil organic carbon metabolism in subtropical forests[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(1): 359-369 (in Chinese).
- [40] FREY SD, DRIJBER R, SMITH H, MELILLO J. Microbial biomass, functional capacity, and community structure after 12 years of soil warming[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(11): 2904-2907.
- [41] ZHANG W, PARKER KM, LUO Y, WAN S, WALLACE LL, HU S. Soil microbial responses to experimental warming and clipping in a tallgrass prairie[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(2): 266-277.
- [42] SCHINDLBACHER A, RODLER A, KUFFNER M, KITZLER B, SESSITSCH A, ZECHMEISTER-BOLTENSTERN S. Experimental warming effects on the microbial community of a temperate mountain forest soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(7): 1417-1425.
- [43] ZHOU XQ, CHEN CR, WANG YF, XU ZH, DUAN JC, HAO YB, SMAILL S. Soil extractable carbon and nitrogen, microbial biomass and microbial metabolic activity in response to warming and increased precipitation in a semiarid Inner Mongolian grassland[J]. *Geoderma*, 2013, 206: 24-31.
- [44] 杨林, 陈亚梅, 和润莲, 邓长春, 刘军伟, 刘洋. 高山森林土壤微生物群落结构和功能对模拟增温的响应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2855-2863.
- YANG L, CHEN YM, HE RL, DENG CC, LIU JW, LIU Y. Responses of soil microbial community structure and function to simulated warming in alpine forest[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(9): 2855-2863 (in Chinese).
- [45] SHEIK CS, BEASLEY WH, ELSHAHED MS, ZHOU XH, LUO YQ, KRUMHOLZ LR. Effect of warming and drought on grassland microbial communities[J]. *The ISME Journal*, 2011, 5(10): 1692-1700.
- [46] JING YL, WANG Y, LIU SR, ZHANG XD, WANG QK, LIU K, YIN Y, DENG JF. Interactive effects of soil warming, throughfall reduction, and root exclusion on soil microbial community and residues in warm-temperate oak forests[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 142: 52-58.
- [47] RUI JP, LI JB, WANG SP, AN JX, LIU WT, LIN QY, YANG YF, HE ZL, LI XZ. Responses of bacterial communities to simulated climate changes in alpine meadow soil of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2015, 81(17): 6070-6077.
- [48] XUE K, M YUAN M, SHI ZJ, QIN YJ, DENG Y, CHENG L, WU LY, HE ZL, VAN NOSTRAND JD, BRACHO R, NATALI S, SCHUUR EAG, LUO CW, KONSTANTINIDIS KT, WANG Q, COLE JR, TIEDJE JM, LUO YQ, ZHOU JZ. Tundra soil carbon is vulnerable to rapid microbial decomposition under climate warming[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(6): 595-600.
- [49] 曾红丽, 白炜, 房佳辰, 徐磊, 商光烈. 模拟增温对高寒沼泽草甸土壤细菌群落的影响[J]. 环境科学与技术, 2022(4): 164-172.
- ZENG HL, BAI W, FANG JC, XU L, SHANG GL. Effects of simulated warming on soil bacterial communities of alpine swamp meadow in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022(4): 164-172 (in Chinese).
- [50] 姚世庭, 芦光新, 邓晔, 党宁, 王英成, 张海娟, 颜琿璘. 模拟增温对土壤真菌群落组成及多样性的影响[J]. 生态环境学报, 2021, 30(7): 1404-1411.
- YAO ST, LU GX, DENG Y, DANG N, WANG YC, ZHANG HJ, YAN HL. Effects of simulated warming on soil fungal community composition and diversity[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(7): 1404-1411 (in Chinese).
- [51] 王丽霞, 郭宏宇, 霍玉珠, 庞金玲, 王欢欢, 马成仓, 王银华. 增温和增氮对天津滨海湿地芦苇凋落物分解微生物群落组成和多样性的影响[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2022, 42(1): 37-44.
- WANG LX, GUO HY, HUO YZ, PANG JL, WANG HH, MA CC, WANG YH. Effects of warming and nitrogen input increase on composition and diversity of decomposing microbial communities of *Phragmites australis* litter in Tianjin coastal wetland[J]. *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 2022, 42(1): 37-44 (in Chinese).
- [52] ZHOU ZH, WANG CK, LUO YQ. Meta-analysis of the impacts of global change factors on soil microbial diversity and functionality[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 3072.