

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.01.023

王昌敏, 舒英格, 蔡华. 基于知识图谱分析的土壤有机碳稳定性研究. 土壤, 2023, 55(1): 187–195.

基于知识图谱分析的土壤有机碳稳定性研究^①

王昌敏, 舒英格*, 蔡 华

(贵州大学农学院, 贵阳 550025)

摘 要: 土壤有机碳稳定性发生变化可能会打破土壤中碳的收支平衡, 进而导致大气温室气体排放增加。本文以 Web of Science 核心合集数据库为数据源, 利用文献计量学方法定量分析了 1991—2022 年土壤有机碳稳定性相关的 2 144 篇文献, 并分别以发文数量、总被引频次和联系强度等指标, 对国家、机构和主题等进行了分类与可视化展示。土壤有机碳稳定性相关研究发文数量总体呈上升趋势。中国的发文量最高, 为 793 篇, 但影响力低, 科研创新能力有待加强; 美国的中介中心性最高(0.38), 其国际影响最大。目前, 土壤有机碳稳定性的研究主要集中在土地利用转变、环境效应和耕作制度等对有机碳组分、矿化速率、周转、分布特征及其稳定性的影响。下一步的研究注重对土壤有机碳稳定性进行多角度的综合研究, 明确有机碳稳定性机制之间的关系及模型构建; 研究不同生态系统有机碳的稳定性及固碳的贡献量, 提高矿物碳稳定、土壤侵蚀、组学、微生物碳泵和湿地等主题的关注度。

关键词: 土壤有机碳稳定性; 文献计量; 研究热点; 概念主题图

中图分类号: S15 文献标志码: A

Research on Stability of Soil Organic Carbon Based on Knowledge Mapping

WANG Changmin, SHU Yingge*, CAI Hua

(College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025)

Abstract: The change in soil organic carbon (SOC) stability may break the balance of the carbon budget in soil and then lead to an increase in greenhouse gas emissions in the atmosphere. In this paper, based on the Web of Science Core Collection database and by using bibliometric methods, 2 144 papers related to the stability of SOC from 1991 to 2022 were quantitatively analyzed. The countries, institutions, and themes were classified and visualized according to the number of articles, total citation frequency, and relevance. The results show that the number of research papers on SOC stability is rising. China has the highest number of articles (793 in total) but with relative low influence, thus need to strengthen the scientific research and innovation capacity; US has highest intermediate centrality (0.38) and the largest international impact. So far, the research on the stability of SOC mainly focuses on the effects of land use change, environmental effects, and farming systems on the components, mineralization rate, turnover, distribution characteristics, and stability of organic carbon. Future research should pay attention to the comprehensive study of SOC stability from various aspects, clarify the relationship between the mechanisms of organic carbon stability and build the models, explore the stability of organic carbon in different ecosystems and the contribution of carbon sequestration, and promote the attention to topics such as mineral carbon stability, soil erosion, omics, microbial carbon pump, and wetland.

Key words: Soil organic carbon stability; Bibliometrics; Research hotspots; Thematic map of concepts

土壤是最大的陆地碳汇, 有机碳储量约 1 580 Gt^[1]。然而, 当前在很大程度上仍不清楚, 为什么有些土壤有机碳会持续存在数千年, 而另一些则很容易分解^[2]; 由于土壤有机碳储量巨大, 其 0.1% 的变化将引起大气圈 1 mg/L 的 CO₂ 浓度变化^[3], 会显著改变大气中碳含量, 进而影响全球气候变化^[4]。因此,

土壤有机碳稳定性成为预测和评估土壤碳循环以及大气碳含量变化的关键因子。为实现全球控温目标, 我国积极开展“双碳”行动^[5]。提高土壤有机碳稳定性是在全球气候变化背景下减轻 CO₂ 排放的有效手段之一^[6]。所以开展土壤有机碳稳定性相关研究意义重大。

①基金项目: 贵阳市科技局重大专项(筑科合同[2011401]01 号)资助。

* 通讯作者(maogen958@163.com)

作者简介: 王昌敏(1995—), 女, 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要从事土壤有机碳稳定性研究。E-mail: 327536075@qq.com

土壤有机碳稳定性被定义为有机碳对分解和矿化作用的抗性^[7]。土壤有机碳稳定性机制包括:有机碳分子结构稳定、物理稳定机制(团聚体对有机碳的保护)、化学稳定机制(有机碳与土壤矿物结合进行的化学保护)、生物稳定机制(微生物特性和激发效应)、环境效应(水分、温度等)。有机碳复杂的化学分子结构(如芳香键、脂肪键等)既能减缓有机碳的分解^[8],又能影响化学稳定性^[9];土壤团聚体降低了有机碳空间可及性和土壤氧气扩散,从而防止微生物和酶的分解^[10];土壤矿物质(铁、铝氧化物)通过螯合、共沉淀以及表面吸附等过程与有机碳形成有机-矿物复合体^[11],增加有机碳稳定性。近年来,对矿物介导的化学稳定性研究已成为热点^[12]。物理和化学保护以多种方式强烈相互作用^[13],有机碳与矿物质强烈结合而受到保护,并通过团聚体进一步增强物理隔离^[14]。与土壤微生物特性相比,物理化学保护更能解释有机碳稳定性的差异^[15]。微生物特性也很重要,土壤微生物直接参与土壤有机碳的分解^[16-17],且微生物合成产物本身就是土壤有机质的重要组成部分^[2]。微生物活性还增强了对土壤团聚体和矿物质组合的保护作用。激发效应也可通过影响土壤有机碳的矿化速率,进而改变土壤有机碳积累量^[18]。当土壤水分状况处于中等水平时,土壤有机碳矿化度最低^[19]。温度上升可以刺激微生物活动,提高微生物残留物对有机碳的贡献^[20]。有机碳的稳定性还取决于生物群和环境条件的空间异质性的复杂影响^[21]。综上所述,有机碳稳定性是由生物、物理、化学和环境条件之间复杂的相互作用共同决定。

当前,关于土壤有机碳稳定性研究内容丰富,涉及领域广泛,但少有文献从知识图谱的视角,对土壤有机碳稳定性研究热点和未来的研究方向进行解析。知识图谱是运用统计学和数学等方法,通过可视化分析各文献信息单元间结构关系和联系的文献计量学方法。因此,本文运用知识图谱对关于有机碳稳定性的文献进行聚类 and 可视化分析,探究关于土壤有机碳稳定性已有文献内在的关联和潜在的热点,明确土壤有机碳稳定性研究的发展历程和结构关系,以期今后识别和开拓新的土壤有机碳稳定性研究方向提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文以 Web of Science 核心数据库为检索源,检索式为: (TI=((stability*) and ("soil organic carbon"

or "SOC")) OR (AB = ((stability *) and ("soil organic carbon" or "SOC")))). 检索起止时间为 1991 年 1 月 1 日至 2022 年 5 月 23 日。检索到包括研究型论文、会议摘要和综述等共计 16 200 篇文献。逐条筛选并去除研究主题和检索式不符合的文献。将所得结果导入到 CiteSpace 软件中,使用“Remove duplicates (WOS)”命令,执行去重,最后共获取文献 2 144 篇。

1.2 数据分析

运用 Excel 和 Origin 软件对年发文量、发文国家、发文机构和发文作者等进行统计与图表绘制;同时运用 CiteSpace、VOS viewer 和 R 语言 bibliometrix 软件包对文献的标题、摘要、关键词中提取重要的名词短语进行文献共词、共现和主题趋势分析。在 CiteSpace 中选择时间跨度为 1991—2022 年,时间节点设置为 1 a,节点类型选择“Country”、“Institution”和“Keyword”,节点强度 Cosine,阈值选择 TOP 50。在 VOS viewer 中计数方法设置为 Full counting。利用 HistCite 分析发文机构及运算期刊本地引用等指标。

2 结果与分析

2.1 时间发展脉络

学术领域每年的发文数量能在一定程度上代表该领域在近年来被关注的趋势^[22]。有机碳稳定性研究每年发文量总体呈上升趋势,大致可分为两个阶段(图 1)。第一阶段为 1991—2003 年,发文量少,研究处于萌芽期,增长比较缓慢。1991 年发表了第一篇关于有机碳稳定性的论文,13 a 内每年发文不超过 20 篇。第二阶段为 2003—2022 年,有机碳稳定性的研究总体上处于稳步增长期。自 2003 年开始,有机碳稳定性的论文数量总体上呈稳步增长趋势。2013 年

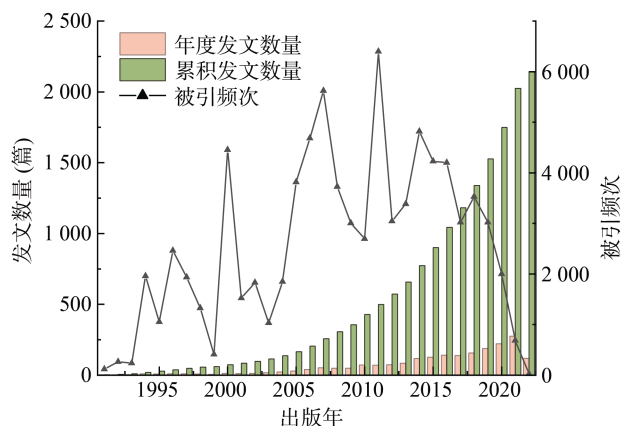


图 1 年度发文数量与累积发文数量及被引频次
Fig. 1 Numbers of annual and cumulative publications and frequency of citations

全球大气 CO₂ 浓度首次超过了 400 mg/kg^[23], 在此之后发文数量增长较快。2020 年全球 CO₂ 浓度达到 413.2 mg/kg 的新高^[5], 且同年发文数量达到最高, 共 276 篇, 被引频次高达 683 多次。

2.2 发文国家及其合作

中国是总发文数量第一的国家, 发文量为 793 篇, 总被引频次高达 12 989 次(图 2A)。高发文数量和引用频次表明该研究主题受到领域内学者们较高的关注。美国的总发文数量排名第二, 发文量为 483 篇, 总被引频次高达 31 415 次, 且平均被引频次高达 64.38, 高引用频次和平均被引频次表明美国在本领域的创新性和影响力均较高。中国的有机碳稳定性研究起步较晚, 但从 2014 年开始年均发文量超过美国, 成为年均发文数量第一的国家, 且年均发文量呈

现出快速增长的势态(图 2B)。

中介中心性是测试节点在网络中重要性, 并以此来发现和衡量文献重要程度的指标^[24], 国家中介中心性可用来代表该国家在某研究领域的国际影响力^[25]。图 3A 显示了各个国家的发文数量、合作关系及其文章影响力。节点大小代表文章数量, 连线代表合作关系, 紫色外圈代表中介中心性。对论文产出国进行了网络分析, 发文国家中, 中国与美国、法国和加拿大等国之间合作较为紧密; 与美国合作较为密切的国家/地区主要有巴西、德国、加拿大等。对国家的中介中心性进行分析, 美国的中介中心性最高为 0.38。中国虽年均发文数量位居第一, 但中介中心性仅为 0.17。这表明近年来中国虽在该领域研究较多, 但国际影响力不高, 应加强在该领域的科研创新能力。

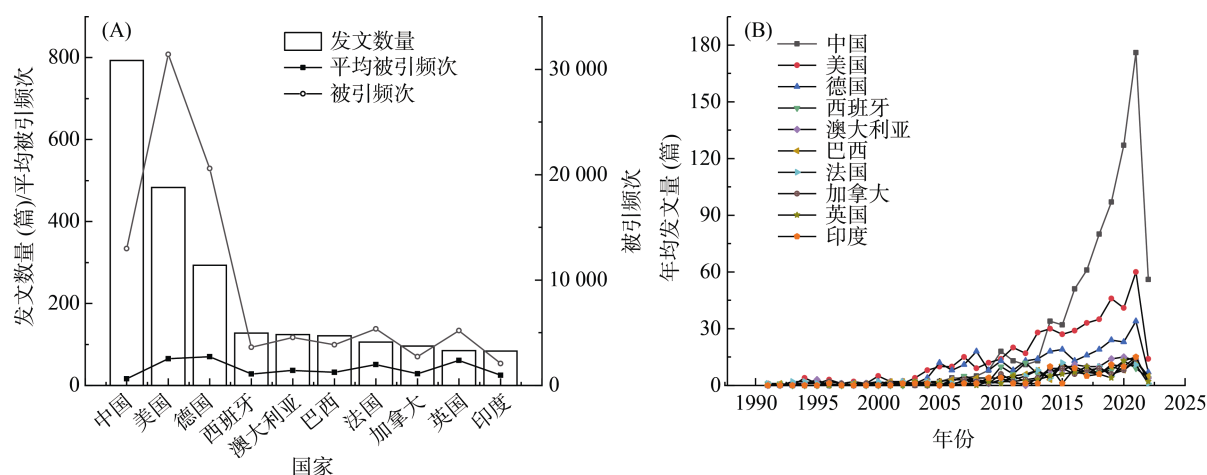


图 2 排名前 10 位的国家的发文数量与被引频次(A)及其 1991—2022 年的年发文量(B)

Fig. 2 Number of papers and citations of top 10 countries (A) and annual number of papers published in 1991—2022 (B)

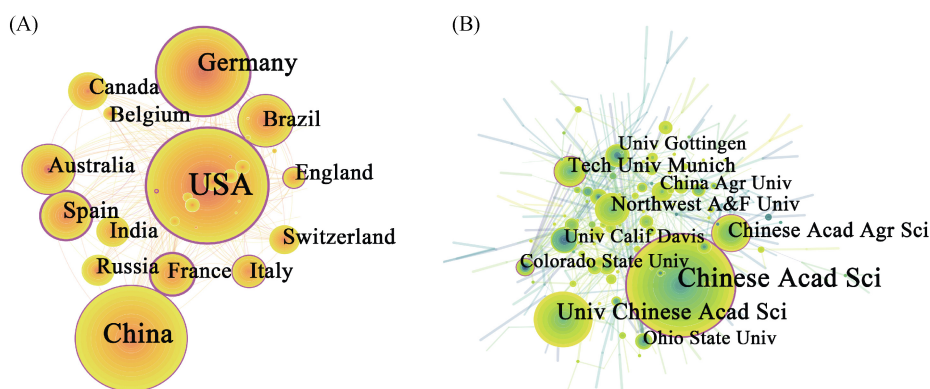


图 3 国家合作共现图谱(A)及机构合作共现图谱(B)

Fig. 3 Networks of country cooperation (A) and institutional cooperation (B)

2.3 发文机构

经 VOS viewer 统计, 共包括 1 961 个研究机构。合作发表 2 篇以上文章的机构共有 733 个, 占合作机构总数的 37.38%, 这表明机构之间的合作比较紧密,

学术交流与合作较为频繁。中国科学院是总发文数量第一的机构, 中介中心性最高(图 3B)。对中国科学院从属机构进行展开分析: 中国科学院东北地理与农业生态研究所(47 篇), 研究区域主要在湿地、林地、

黑土地地区,研究内容为不同土地利用方式、耕作制度和秸秆管理、氮添加和凋落物、植物入侵覆盖对有机碳组分、团聚体内有机碳、有机碳分子特征、矿化、稳定性及热稳定机制的影响;沈阳应用生态研究所(43 篇),研究区域主要在温带地区、亚热带地区,主要研究内容为森林土壤管理措施、林分轮伐期对有机碳流失和碳库动态的影响;南京土壤研究所(43 篇),研究区域主要在温带地区,研究内容为丛枝菌根真菌对团聚体碳积累影响,干湿循环、秸秆和生物炭添加、施肥、微生物特性对腐殖质结构变化、有机碳分解和矿化的影响;中国科学院地理科学与资源研究所(27 篇),研究区域主要在黄土高原、青藏高原,研究内容为造林和坡位、自然植被恢复过程对有机碳周转时间、循环和碳收支变化的影响,以及氮富集条件下土壤有机碳变化的微生物机制。

2.4 高被引文献

高被引论文为被引频次排在领域前 1% 的论文,其比较客观地反映了该学科领域的研究方向和研究动态。表 1 为有机碳稳定性主题被引频次排名前 10 位的高被引论文,发表年份集中在 1998—2011 年。

目前被引频次最高的论文,由 Six 等^[26]于 2000 年发表,该文将免耕和传统耕作系统中的团聚体周转与土壤有机质动态联系起来,为土壤有机碳被长期稳定和封存提供新的研究思路。排名第 2 的高被引论文聚焦一种关于土壤有机碳动力学的新观点,即有机质持续稳定存在,不是因为有机质本身的内在属性,而是因为周围环境的物理化学和生物影响降低了分解,从而增加有机质稳定性,使有机质持续稳定存在^[2]。从高被引文献不难看出,有机碳稳定性主要从有机碳组分^[27]、耕作方式^[26]、有机碳来源^[28]、分子结构、活性矿物表面、气候等物理、化学和生物特性^[2]几个视角进行研究,这些因子共同影响有机碳稳定性。

2.5 关键词共现

基于 VOSviewer 可视化软件对文献的关键词进行共现网络分析。出现频次最高的为 stability(822 次),核心词汇为频次 ≥ 21 ($N=21.47$)的关键词,本研究共包含 201 个核心词汇。

关键词的共现和聚类(5 类)如图 4 所示。红色聚类组内的核心词汇为土壤有机碳、团聚体有机碳、耕作方式等,该聚类研究内容主要是耕作、土地利用方

表 1 1991—2022 年土壤有机碳稳定性研究前 10 位高被引论文
Table 1 Top 10 highly cited papers on topic of soil organic carbon stability from 1991 to 2022

排名	文章题目	第一作者	第一作者所属国家	年份	发表期刊	被引次数
1	Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture	Six J ^[26]	瑞士	2000	Soil Biology & Biochemistry	383
2	Persistence of soil organic matter as an ecosystem property	Schmidt M W I ^[2]	瑞士	2011	Nature	302
3	Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils	Six J ^[29]	瑞士	1998	Soil Science Society of America Journal	241
4	Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon	Six J ^[30]	瑞士	2000	Soil Science Society of America Journal	224
5	Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply	Fontaine S ^[28]	加拿大	2007	Nature	172
6	Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls	Sollins P ^[10]	美国	1996	Geoderma	156
7	Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter	Jastrow J D ^[31]	美国	1996	Soil Biology & Biochemistry	141
8	Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use	John B ^[27]	美国	2005	Geoderma	127
9	Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage	Six J ^[32]	瑞士	2002	Agronomie	101
10	Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates	Puget P ^[33]	法国	2000	European Journal of Soil Science	97

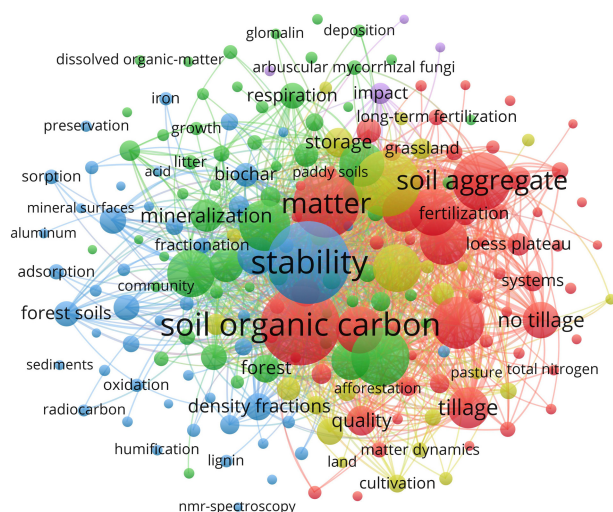


图 4 关键词共现网络分析

Fig. 4 Keywords co-occurrence network analysis

式对土壤有机碳组分、各粒级团聚体中有机碳含量的影响。土壤团聚体对土壤有机碳的物理保护，防止微生物和酶对土壤有机碳的分解。研究表明，微团聚体中 C/N 变化范围较窄，说明土壤有机碳在微团聚体中比在大团聚体中更稳定^[34]；耕作系统中，有机碳大量储存在大型团聚体(>2 mm)和粉粒/黏粒(<0.053 mm)中，免耕系统提高了>2 mm 团聚体中的脂肪族、甲氧基和疏水性碳，表明土壤碳的稳定性得到了提高^[35]。土地利用转换对团聚体各粒级有机碳含量的影响随转换时间而变化^[36-37]。不同土地利用方式下不同土壤团聚体有机碳含量大小顺序为：大团聚体>粉质黏土>微团聚体^[38]。因此可以改变土地利用方式来改变土体团聚体组成，以促进土壤有机碳的稳定。

蓝色聚类组内的核心关键词为稳定性、生物质炭、木质素等，该聚类主要研究土壤有机碳稳定性的影响因素。木质素分解、外源添加生物质炭影响土壤有机碳矿化、周转及稳定性。土壤有机碳稳定性指数与木质素残留量呈正相关^[39]；生物质炭通过改善有机碳的分子结构来提高土壤有机碳的稳定性^[40]，但也有研究表明，生物质炭增加了水稻土中木质素的分解，降低了木质素的稳定性^[41]。土壤有机碳的稳定还受到铁、铝矿物的影响，几乎所有结晶矿物均能与土壤有机碳发生反应，通过螯合、共沉淀以及表面吸附等过程与有机碳形成有机-矿物复合体^[11]，可减少微生物的降解，使有机碳的稳定性进一步提高^[42-43]。

绿色聚类组内的核心关键词是凋落物、分解、微生物等，该聚类主要研究微生物对凋落物的分解及凋落物分解对矿物伴生有机质(MAOM)的影响。微生物分解速率取决于时间尺度的大小，这导致有机碳稳定

性随时间而变化^[21]。凋落物分解影响有机碳的稳定性^[44]，一般情况下，分解速率快的凋落物不如分解速率慢的凋落物积累的 MAOM 稳定^[45]。

黄色聚类组内的核心关键词是氮、秸秆等，该聚类探讨氮肥添加和秸秆还田对土壤有机碳矿化及其稳定性的影响。研究表明，氮肥施用主要通过增加大团聚体中粗颗粒有机质及粉粒和黏粒结合碳来增加土壤碳稳定性，并且促进土壤长期固碳^[46]；低施氮量可以使土壤有机碳免受化学和生物降解的影响；而在高氮添加下，植被生产力显著提高，增加了植物源碳输入，反而增强了微生物降解土壤有机碳的能力^[47-48]；氮肥和秸秆施肥对土壤团聚体有机碳含量及其矿化作用有较大影响^[49]，需进一步研究氮肥和秸秆在有机碳稳定中的贡献。

紫色聚类组内的核心词为土壤侵蚀、沉积等。侵蚀和沉积会导致土壤质地、有机碳、铁、土壤团聚体、深度等改变，进而改变土壤有机碳稳定性。侵蚀和沉积土壤有机碳含量不同，但有机官能团相似，侵蚀土壤比沉积土壤中的有机碳更稳定^[50]，且随着土层深度增加土壤有机碳的稳定性增加^[51]。迄今为止，土壤侵蚀是否会导致有机碳矿化或螯合尚未达成共识，关于侵蚀运输的净效应和过程机制之间相互作用的研究较少。在下一步的研究中应侧重侵蚀性迁移过程及其对流动沉积物土壤有机碳稳定性的影响。

将上述研究热点深入挖掘得到，铁、铝氧化物对土壤有机碳稳定及储存机理是当前一大研究热点，土壤铁、铝氧化物储存和稳定有机碳的机制仍不明确，而纳入土壤碳模型则更是一个挑战。运用同位素标记和光谱技术探测矿物-有机碳的动态界面过程，将是解决这一问题的主要研究方向。

2.6 研究趋势分析

主题图显示了主题内部(概念之间的相关性)和外部(节点的凝聚力)关联的语义强度，这两个关联分别以密度和中心性来衡量。右上象限(Q1)显示驱动或运动主题，右下象限(Q2)显示基本主题，左下象限(Q3)显示新兴或衰退主题，左上象限(Q4)显示较少使用且可能研究不足的发达主题。如图 5 所示，蓝色集群中的 soil organic matter(土壤有机质)、soil carbon(土壤碳)和 microbial biomass(微生物生物量)等主题位于 Q1，表明此集群是有机碳稳定性中最重要的研究(高度中心性)。粉色集群中的 soil organic carbon(土壤有机碳)、aggregate stability(团聚体稳定性)和 carbon sequestration(碳固存)等主题被运动主题(Q1)和基本主题(Q2)所截取，表明这些主题的研究是非常充分

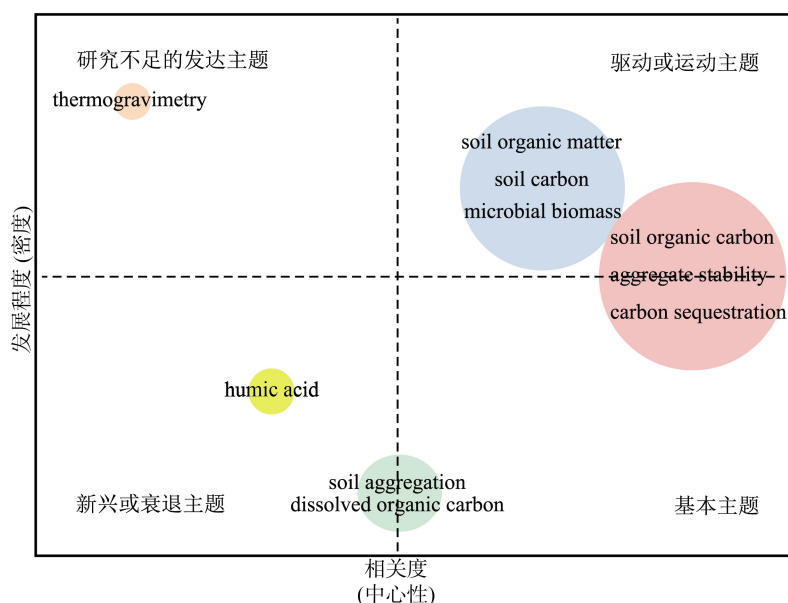


图 5 有机碳稳定性的概念主题图

Fig. 5 Thematic map of concepts in organic carbon stability

的。绿色集群中的主题具有低密度和低中心性的特点,这表明对其主题的研究还不够深入,在有机碳稳定性研究中具有相当重要的地位。随着时间的推移,这些主题可能会转向 Q3,这意味着对该主题的研究可能会继续下降。黄色集群中的 humic acid(胡敏酸)位于 Q3,这是边缘性主题,其可能是新兴主题也有可能是衰退主题。根据对主题图分析,未来可继续深入研究土壤有机碳稳定性与团聚体稳定性、微生物和碳固存之间的关系。

图 6 显示了 1991—2022 年土壤有机碳稳定性研究的主题趋势。由图 6 可知,频率最高的词(以 2018 年最大的气泡表示)为土壤有机碳,使用频率为 308。土壤团聚体是 2020 年和 2021 年土壤有机碳稳定性研究中讨论最多和最具趋势的话题。对土壤有机碳稳定性研究感兴趣的研究人员,可持续关注土壤团聚体对有机碳的物理保护、矿物介导的化学保护和土壤微生物间的强烈相互作用,进一步挖掘土壤有机碳稳定的机制。图 6 还表明土壤有机碳稳定性的研究涵盖了土壤结构稳定性、生态恢复、气候变化、团聚体相关碳、微生物群落结构等多个领域,且近年来关键词数量不断增加,并在 2016 年左右达到顶峰,这意味着土壤有机碳稳定性的研究视角迅速拓展。

3 结论与展望

基于 Web of Science 核心数据库,利用文献计

量学方法分析了 1991—2022 年土壤有机碳稳定性相关的 2 144 篇文献。结果表明,相关研究可以分成缓慢发展和波动增长 2 个阶段。美国的研究实力在世界上居于领先地位,中心性最高,国际影响力较大;我国在该领域起步较晚,是总发文数量第一的国家,但文献的平均被引次数较低,在未来的研究中应注重提高创新性和影响力。

当前土壤有机碳稳定性的研究方向不断转化,研究对象呈现多元化,如土壤、植被类型、微生物特性、大气等。土壤有机碳稳定性的研究尺度涉及到生物地理群落、景观、区域到全球等。尽管现在对土壤有机碳稳定性的研究已取得一定成果,但还有许多亟需解决的关键科学问题,因此,提出以下几点建议:①生态系统固碳更应该关注管理和保护,应避免盲目扩大造林面积、围封草地或开垦农田,切实保护好现有生态系统,并从技术创新寻求新的多元化管理路径、实现多路径的协同增效;②明确不同环境下微生物群落与有机碳-矿物相互作用及对矿物碳稳定的影响程度;③探明影响土壤有机碳发生变化的关键因子与稳定机制之间的关系,构建有机碳稳定性、全球碳储量、碳循环模型;④厘清土壤侵蚀-沉积对不同稳定性碳变化规律的影响和贡献量;⑤纳入同位素标记和光谱技术探测矿物-有机碳的动态界面过程;⑥结合同位素示踪、组学与分子生物学等视角探究土壤微生物碳泵周转运行的内在机理,为有机碳稳定性的深入研究提供新思路。

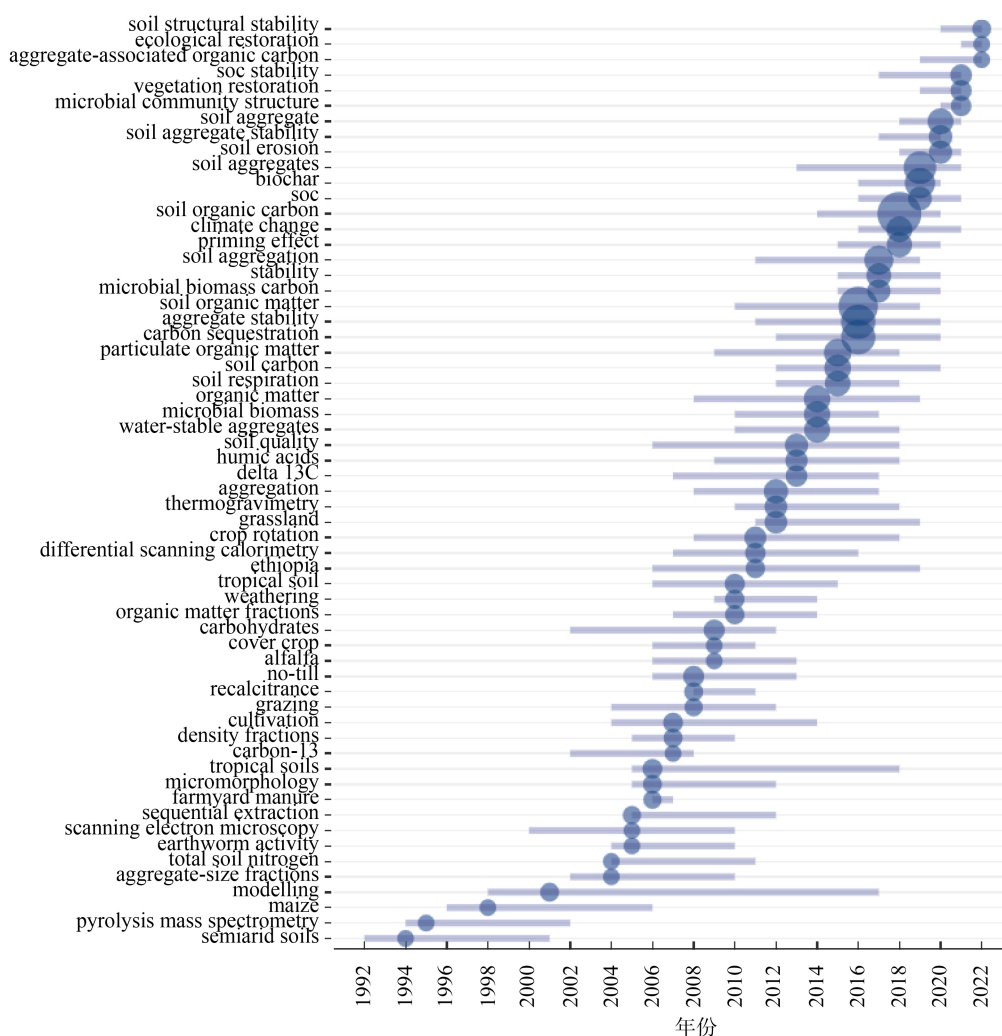


图 6 土壤有机碳稳定性研究的主题趋势

Fig. 6 Trends of topics in soil organic carbon stability

参考文献：

- [1] Chen L F, He Z B, Du J, et al. Patterns and environmental controls of soil organic carbon and total nitrogen in alpine ecosystems of northwestern China[J]. CATENA, 2016, 137: 37–43.
- [2] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. Nature, 2011, 478(7367): 49–56.
- [3] 史方颖, 张风宝, 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.
- [4] Maraseni T N, Pandey S S. Can vegetation types work as an indicator of soil organic carbon? An insight from native vegetations in Nepal[J]. Ecological Indicators, 2014, 46: 315–322.
- [5] 于贵瑞, 郝天象, 朱剑兴. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 423–434.
- [6] Six J, Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 68: A4–A9.
- [7] Stone M M, Plante A F. Relating the biological stability of soil organic matter to energy availability in deep tropical soil profiles[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 89: 162–171.
- [8] Yang J J, Li A Y, Yang Y F, et al. Soil organic carbon stability under natural and anthropogenic-induced perturbations[J]. Earth-Science Reviews, 2020, 205: 103199.
- [9] Wang X, Cammeraat E L H, Cerli C, et al. Soil aggregation and the stabilization of organic carbon as affected by erosion and deposition[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 72: 55–65.
- [10] Sollins P, Homann P, Caldwell B A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls[J]. Geoderma, 1996, 74(1/2): 65–105.
- [11] Heckman K, Lawrence C R, Harden J W. A sequential selective dissolution method to quantify storage and stability of organic carbon associated with Al and Fe hydroxide phases[J]. Geoderma, 2018, 312: 24–35.
- [12] Patzner M S, Mueller C W, Malusova M, et al. Iron mineral dissolution releases iron and associated organic carbon during permafrost thaw[J]. Nature Communications, 2020,

- 11: 6329.
- [13] 陈红, 马文明, 王长庭, 等. 高寒草地灌丛化对土壤团聚体稳定性及其胶结物质的影响[J/OL]. 土壤学报, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20220314.1542.002.html>.
- [14] Dungait J A J, Hopkins D W, Gregory A S, et al. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(6): 1781–1796.
- [15] Chen L Y, Liu L, Qin S Q, et al. Regulation of priming effect by soil organic matter stability over a broad geographic scale[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 5112.
- [16] Xu M, Li X L, Kuypers T W, et al. High microbial diversity stabilizes the responses of soil organic carbon decomposition to warming in the subsoil on the Tibetan Plateau[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(10): 2061–2075.
- [17] 张彬, 陈奇, 丁雪丽, 等. 微生物残体在土壤中的积累转化过程与稳定机理研究进展[J]. 土壤学报. 2022, 59(6): 1479–1491.
- [18] Guenet B, Camino-Serrano M, Ciais P, et al. Impact of priming on global soil carbon stocks[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(5): 1873–1883.
- [19] Sun J N, He F H, Zhang Z H, et al. Temperature and moisture responses to carbon mineralization in the biochar-amended saline soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569/570: 390–394.
- [20] Ding X L, Chen S Y, Zhang B, et al. Warming increases microbial residue contribution to soil organic carbon in an alpine meadow[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 135: 13–19.
- [21] Trumbore S E, Czimczik C I. An uncertain future for soil carbon[J]. *Science*, 2008, 321(5895): 1455–1456.
- [22] 郑梅迎, 林伟, 徐茜, 等. 基于 CNKI 数据库的土壤酸化文献计量分析[J]. 土壤, 2020, 52(4): 811–818.
- [23] Kodaira H. Responding to climate change and expectations for research[J]. *Paddy and Water Environment*, 2014, 12(2): 211–212.
- [24] 杜慧, 关舒文, 王美艳, 等. 基于文献计量法的土壤退化研究现状及热点分析[J]. 中国水土保持, 2020(3): 33–36.
- [25] 罗杨, 吴永贵, 段志斌, 等. 基于 CiteSpace 重金属生物可给性的文献计量分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 17–27.
- [26] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099–2103.
- [27] John B, Yamashita T, Ludwig B, et al. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use[J]. *Geoderma*, 2005, 128(1/2): 63–79.
- [28] Fontaine S, Barot S, Barré P, et al. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply[J]. *Nature*, 2007, 450(7167): 277–280.
- [29] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1367–1377.
- [30] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter I. distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2): 681–689.
- [31] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(4/5): 665–676.
- [32] Six J, Feller C, Denef K, et al. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage[J]. *Agronomie*, 2002, 22(7/8): 755–775.
- [33] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates[J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(4): 595–605.
- [34] An S S, Mentler A, Mayer H, et al. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China[J]. *CATENA*, 2010, 81(3): 226–233.
- [35] Ndzelu B S, Dou S, Zhang X W, et al. Tillage effects on humus composition and humic acid structural characteristics in soil aggregate-size fractions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213: 105090.
- [36] Li B Q, Li G L, Fu Y, et al. Distribution of soil organic carbon within aggregate size fractions following the conversion of cropland to black locust forest on the southern Loess Plateau, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 74(1): 59–66.
- [37] 陈曦, 王改玲, 刘焕焕, 等. 黄土高原吕梁山不同撂荒年限土壤团聚体稳定性及有机碳分布特征[J]. 土壤, 2021, 53(2): 375–382.
- [38] Luo Y X, Li Y X, Leng Z Y, et al. Dynamics of organic carbon fractions in soil aggregates of mollisols under different land-use in northeast China[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2021, 30(4A): 4544–4552.
- [39] Wu J P, Deng Q, Hui D F, et al. Reduced lignin decomposition and enhanced soil organic carbon stability by acid rain: Evidence from ^{13}C isotope and ^{13}C NMR analyses[J]. *Forests*, 2020, 11(11): 1191.
- [40] Amoakwah E, Arthur E, Frimpong K A, et al. Soil organic carbon storage and quality are impacted by corn cob biochar application on a tropical sandy loam[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(4): 1960–1969.
- [41] Sun J L, Li H B, Zhang D S, et al. Long-term biochar application governs the molecular compositions and decomposition of organic matter in paddy soil[J]. *GCB Bioenergy*, 2021, 13(12): 1939–1953.
- [42] Chen M M, Zhang S R, Liu L, et al. Organic fertilization increased soil organic carbon stability and sequestration by improving aggregate stability and iron oxide transformation in saline-alkaline soil[J]. *Plant and Soil*, 2022, 474(1): 233–249.
- [43] -A Osafo N O, Jan J, Valero A, et al. Organic matter

- character as a critical factor determining the fate and stability of its association with iron in sediments[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(6): 1865–1875.
- [44] Zhang W D, Wang S L. Effects of NH_4^+ and NO_3^- on litter and soil organic carbon decomposition in a Chinese fir plantation forest in South China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 47: 116–122.
- [45] Córdova S C, Olk D C, Dietzel R N, et al. Plant litter quality affects the accumulation rate, composition, and stability of mineral-associated soil organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 125: 115–124.
- [46] Huang T, Yang H, Huang C, et al. Effects of nitrogen management and straw return on soil organic carbon sequestration and aggregate-associated carbon[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(5): 913–923.
- [47] Liu H F, Xue S, Wang G L, et al. Effects of nitrogen addition on soil oxidisable organic carbon fractions in the rhizospheric and bulk soils of Chinese pines in north-western China[J]. *Soil Research*, 2018, 56(2): 192.
- [48] Chen Q Y, Yuan Y L, Hu Y L, et al. Excessive nitrogen addition accelerates N assimilation and P utilization by enhancing organic carbon decomposition in a Tibetan alpine steppe[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 764: 142848.
- [49] Wang Z, Wang Z, Ma L J, et al. Combined effects of nitrogen fertilizer and straw application on aggregate distribution and aggregate-associated organic carbon stability in an alkaline sandy loam soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(6): 1105–1116.
- [50] Nie X D, Yuan Z J, Huang B, et al. Effects of water erosion on soil organic carbon stability in the subtropical China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(10): 3564–3575.
- [51] Ma W M, Li Z W, Ding K Y, et al. Stability of soil organic carbon and potential carbon sequestration at eroding and deposition sites[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(6): 1705–1717.