

# 基于CiteSpace的土壤有机碳来源研究热点与前沿分析

杨俊雯

云南师范大学地理学部, 云南 昆明

收稿日期: 2026年6月24日; 录用日期: 2026年7月18日; 发布日期: 2026年8月18日

## 摘 要

土壤有机碳在全球碳循环和气候变化中发挥关键作用, 其来源和累积路径是理解土壤碳固存和稳定机制的重要基础。本文以2011~2026年CNKI中收录的229篇土壤有机碳来源相关文献为数据源, 运用CiteSpace对发文量趋势、作者、机构、关键词和突现词等方面进行可视化分析。结果表明: (1) 该领域研究大致经历了萌芽、缓慢增长和快速增长三个阶段, 2023年后发文量增势显著; (2) 安韶山、张旭东、何红波等学者与中科院系统和西北农林科技大学等机构是该领域的主要研究力量, 但整体合作网络密度偏低, 跨机构跨学科合作仍不充分; (3) 关键词聚类显示, 研究热点聚焦土壤有机碳来源、碳累积与稳定机制、不同来源碳对气候变化和植被恢复的响应机制等角度, 形成了7个主题聚类; (4) 时序演进和突现分析表明, 微生物来源碳是近年来的研究热点, 研究范式从单一的碳来源识别, 逐步拓展到多尺度多要素耦合下的土壤碳固存与稳定机制。由于土壤碳源结构具有较强的空间异质性, 未来应结合多种精细化手段, 提高不同来源碳的定量精度, 进一步完善不同地区的碳来源机制, 并深化气候变化与植被恢复对SOC来源结构及碳汇功能的影响。

## 关键词

土壤有机碳, 植物源碳, 微生物源碳, 土壤有机碳稳定性, 可视化分析

# Analysis of Research Hotspots and Frontiers on Soil Organic Carbon Sources Based on CiteSpace

Junwen Yang

Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: June 24, 2026; accepted: July 18, 2026; published: August 18, 2026

## Abstract

Soil organic carbon plays a crucial role in the global carbon cycle and climate change, and understanding its sources and accumulation pathways is fundamental to elucidating mechanisms of soil carbon sequestration and stability. This study uses 229 publications on soil organic carbon sources indexed in CNKI from 2011 to 2026 as data sources, applying CiteSpace for visual analysis of publication trends, authors, institutions, keywords, and emerging terms. Results show: (1) research in this field has generally gone through three phases—emergence, slow growth, and rapid expansion—with a significant increase in publications after 2023; (2) scholars such as An Shaoshan, Zhang Xudong, and He Hongbo, along with institutions including the Chinese Academy of Sciences and Northwest A&F University, are key contributors, but overall collaboration network density remains low, and interdisciplinary and inter-institutional cooperation is still insufficient; (3) keyword clustering reveals that research hotspots focus on sources of soil organic carbon, carbon accumulation and stabilization mechanisms, and responses of different carbon sources to climate change and vegetation recovery, forming seven thematic clusters; (4) temporal evolution and burst detection analyses indicate that microbial-derived carbon has become a recent research hotspot, and the research paradigm has gradually shifted from identifying single carbon sources to exploring soil carbon sequestration and stability under multi-scale and multi-factor coupling. Given the strong spatial heterogeneity of soil carbon source structures, future studies should integrate multiple refined methods to improve the quantitative accuracy of different carbon sources, further refine regional carbon source mechanisms, and deepen understanding of how climate change and vegetation restoration affect SOC source composition and carbon sink functions.

## Keywords

Soil Organic Carbon, Plant-Derived Carbon, Microbial-Derived Carbon, Soil Organic Carbon Stability, Visualization Analysis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

土壤是陆地生态系统中容量最大的活性炭库[1], 土壤中储存的有机碳含量约是大气碳储量和植被碳储量的三倍以上[2]。土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)是指由腐殖质、动植物残体和微生物残体构成的含碳有机物质在土壤有机质中的总和。土壤有机碳库是大气 CO<sub>2</sub> 重要的源和汇, 其在全球碳循环中具有关键作用, 其微小变化会对全球碳平衡和生态系统、乃至全球气候变化产生显著影响[2]-[4]。明确 SOC 的来源及其动态变化和驱动因素, 能够更好管理土壤有机碳库。

土壤有机碳的来源分为两大类, 一是由凋落物、根系分泌物构成的植物源碳, 常用木质素来表征; 二是由微生物残体及其代谢产物组成的微生物源碳, 常用氨基糖来指示[6]。传统观点认为, 植物源碳是 SOC 的主要来源, 它以凋落物和根系及其分泌物的形式将植被光合作用固定的碳储存在土壤中[5]。随着生物标志物技术在土壤碳循环研究中的运用日益广泛, 越来越多的学者认为微生物源碳是土壤有机碳库的关键来源, 并提出了“土壤微生物碳泵”理论, 进一步强调了微生物源碳在土壤有机碳库固存中的重要作用[7]。即植被凋落物和残体进入土壤后, 一部分被微生物分解, 形成植物源碳; 一部分被微生物作为养分吸收同化成自生生物量, 进而形成微生物源碳[8][9]。植物源碳和微生物源碳的积累受气候、土地

利用方式[10]、土壤理化性质[11]和植被覆盖[7]等多种因素的影响,因此,探究土壤有机碳来源对研究 SOC 的累积机制至关重要。

当前,土壤有机碳来源及其变化已成为地理学、环境科学、农学、生态学等多学科交融的研究热点,研究对象涵盖草地、林地、湿地、农田、东北地区、黄土高原、青藏高原和喀斯特地区等多种生态系统,研究内容不断拓展,研究手段日益丰富,但现有研究较为分散,不同研究方向之间缺乏系统梳理。为了更好地推动该领域的研究,揭示土壤有机碳来源的发展态势、研究热点与前沿,对已有文献进行可视化分析是很有必要的。基于此,本文利用 CiteSpace 对 2011~2026 年这 16 年土壤有机碳来源领域的研究文献进行分析,归纳其研究热点与发展趋势,并展望未来研究方向,为土壤有机碳的积累和土壤有机碳库的管理提供理论依据。

## 2. 数据来源和研究方法

### 2.1. 数据来源

研究聚焦于近 16 年来我国土壤有机碳来源方面的研究文献,以中国知网(CNKI)数据库为数据来源。在 CNKI 数据库中采用高级检索,设置主题为“土壤有机碳”and (“植物源碳”or “微生物源碳”or “木质素”or “氨基糖”),检索时间区间为 2011 年 1 月 1 日至 2026 年 6 月 16 日,共检索出 725 篇文献。为确保文献有效性和数据准确性,经过人工筛选检查,剔除不相关的无效文献,最终得到 229 篇文献。

### 2.2. 研究方法

本研究基于中国知网(CNKI)数据库,借助 CiteSpace 分析软件,采用文献计量分析方法,对土壤有机碳来源主题领域的发文量、作者、机构、关键词热点与变化趋势进行可视化分析,以揭示该领域的发展阶段、研究力量分布、研究热点与前沿。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 发文量时间变化趋势分析

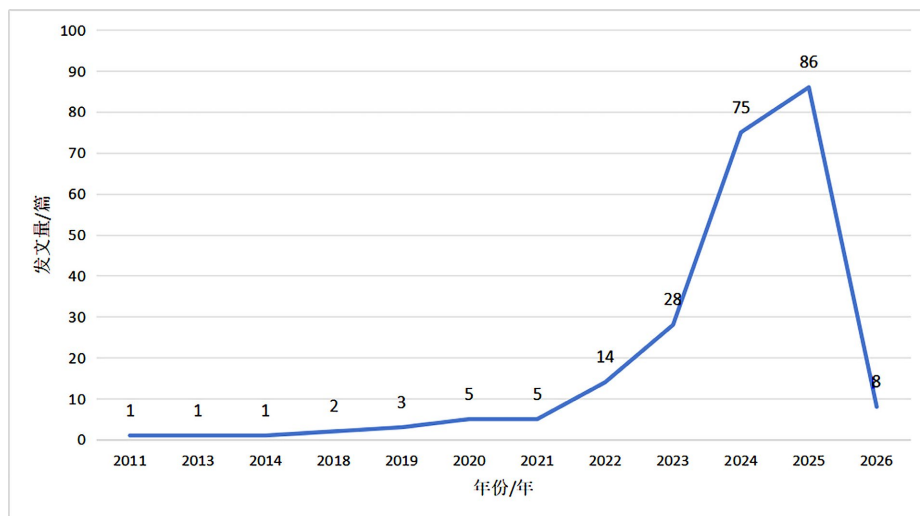


Figure 1. Time distribution of published articles

图 1. 发文量时间分布图

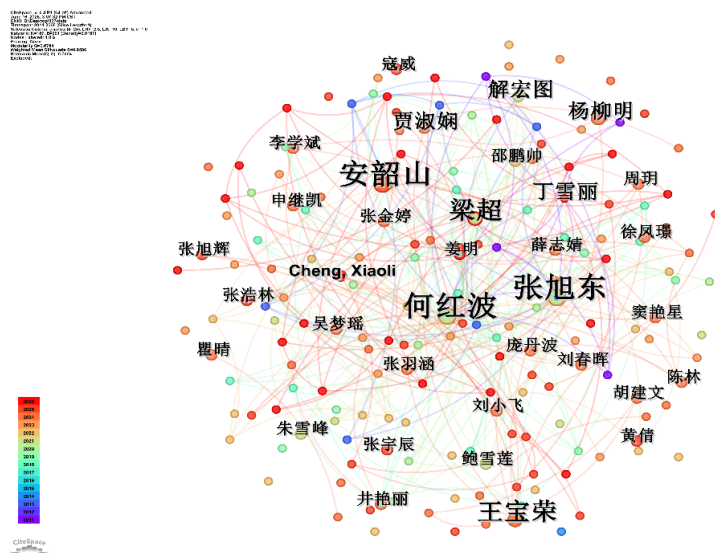
发文量时间变化特征能够反映该研究领域的发展阶段和学术关注度。2011~2026 年,我国土壤有机

碳来源领域的发文量总体上呈增长趋势，尤其是 2023 年以后，增势尤为明显(图 1)。该领域的发展大致分为三个阶段：① 萌芽探索阶段(2011~2019 年)，该阶段发文数量较少，仅有 8 篇，尚未形成研究热点，研究集中在木质素和植物源碳输入的传统研究思路上；② 缓慢增长阶段(2020~2022 年)，这一阶段文献数量增长虽缓，但该研究领域开始受到关注，研究者开始关注植物残体输入经微生物转化与同化后进入稳定碳库的过程，逐渐认识到微生物源碳在 SOC 中的贡献作用，标志着土壤有机碳来源研究由“植物源碳贡献为主”逐渐向“微生物源碳贡献为主”转变；③ 快速增长阶段(2023~2026 年)，这一阶段的发文量增长迅速，共 197 篇，2025 年发文量高达 86 篇，研究内容不再单一局限于识别 SOC 的来源，而是向“微生物碳泵”、土壤有机碳稳定机制、土壤团聚体与矿物保护，以及生态系统碳汇等方面拓展，研究方法手段也更加多样化，同位素技术逐渐与生物标志物技术结合被运用于研究。

### 3.2. 研究力量分布

### 3.2.1. 作者合作网络分析

利用 CiteSpace 对作者合作关系进行可视化分析,得到了如图 2 的网络图谱,图中包含节点数  $N=187$ ,节点连线  $E=291$ ,网络密度 Density 为 0.0167。节点 N 表明有 187 位作者对 SOC 来源进行了研究,其中梁超[12]、王宝荣[13]等作者节点突出,说明这些学者在该领域发文量较高且在学术合作中发挥重要作用,是引领该领域发展的主要知识生产体,尤其是在微生物源碳主导土壤有机碳累积的研究方面。结合合作关系和网络密度来看,图中节点连线 E 显著高于节点数 N,表明各研究者间合作关系密切,出现了多核心的跨团队合作,但边缘节点仍保持单一内部合作的关系,整体尚未形成高度紧密的网络结构。网络合作仍有优化和提升空间,各作者应打破孤立研究的格局并加强合作,积极构建多中心协同网络。从时间色谱来看,作者合作关系逐年增强,侧面反映 SOC 的来源研究从单一机制探究逐步转向多尺度多层次的耦合机制。



**Figure 2.** Author collaboration network diagram  
**图 2.** 作者合作网络图

### 3.2.2. 机构合作网络分析

机构合作网络图谱显示(图 3), 该研究领域包含 132 个研究机构和 128 条网络合作连接线, 网络密度达 0.0148。就节点规模而言, 西北农林科技大学、中国科学院沈阳运用生态研究所、中国科学院大学和沈阳农业大学为核心节点, 是该领域知识产出的核心力量。中科院系统和农业类高校构成了双核心驱动格局, 二

者是 SOC 来源研究的重要支撑力量,前者聚焦于长期生态过程背景下的微生物转化机制,后者则倾向于施肥制度、土壤改良、秸秆还田等农田管理对碳源的影响;但整体上中科院系统的节点数多且连接关系密集,其中心中介性优于农业类高校,在该领域更具有影响力。结合节点连线和网络密度分析,该领域已形成一定规模的合作格局,但外围机构间联系较弱,整体合作密度仍处于中低水平,呈现出“核心联系紧密、边缘协作不足”的特点,跨机构跨学科的协同合作仍有待强化。从时间色谱来看,机构间的合作网络不断扩大、合作关系逐年增强;研究主体多元化发展,早期由中科院系统主导,逐渐演变为以中科院系统为核心、多所高校与科研院所共同参与的研究格局,实现了单一探索向多主体共同推进的格局转变。

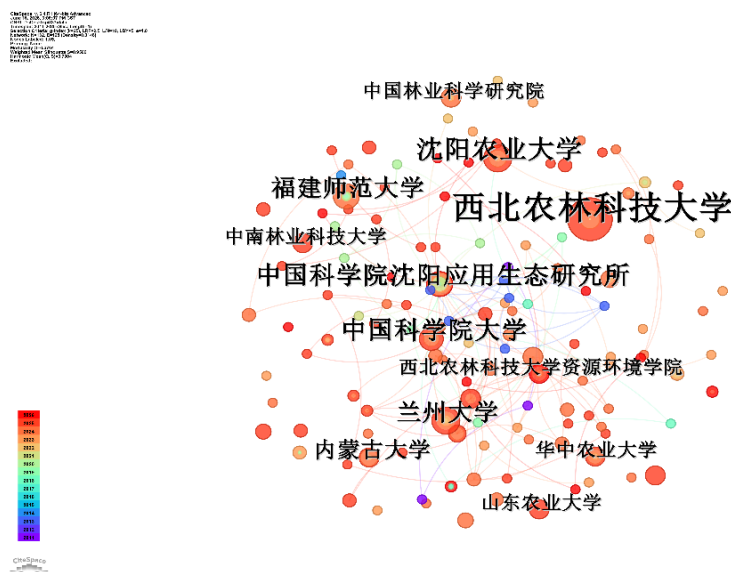


Figure 3. Institutional cooperation network diagram  
图 3. 机构合作网络图

### 3.3. 土壤有机碳来源研究热点分析

#### 3.3.1. 关键词共线分析

关键词是对研究内容高度概括的核心词汇,对关键词共线进行分析可以反映出该领域的研究热点。在分析图中,节点 N 的大小代表关键词出现频次,节点越大频次越高,节点颜色则揭示关键词的时间分布与变化[14]。运用 CiteSpace 对数据库进行可视化分析,绘制关键词共线图谱(图 4)。图谱中包含 155 个节点和 202 条连线,网络密度为 0.0169,说明研究内容覆盖面较广,但研究热点间尚未形成联系紧密的网络结构。由图 4 可知,“氨基糖”、“木质素”、“团聚体”、“有机碳”和“植被恢复”是图谱中的核心节点,说明大多研究都对土壤有机碳的来源进行辨识,并探讨了植物源碳和微生物源碳对 SOC 贡献及其影响因子;与“木质素”相比,“氨基糖”的节点规模和中心中介性更高,这与理论发展趋势相符,即“土壤微生物碳泵”和微生物源碳的作用受到重视。从时间色谱来看,早期研究集中在“木质素”和“有机碳”等关键词上,该阶段关注植物残体和植物源碳对土壤有机碳的贡献;中期研究开始出现“团聚体”“碳组分”“植物源碳”等关键词,这一时期的研究分类更加细化,研究对象从 SOC 总量转向 SOC 的不同组分碳,并结合团聚体和矿物的保护机制来分析 SOC 来源以及 SOC 的稳定机制;近期则集中于“氨基糖”“植被恢复”“林龄”“增温”等关键词,表明当前研究强调微生物源碳的贡献作用,同时还关注全球变化和生态恢复过程中土壤碳的固存与稳定机制。整体而言,该领域从植物源碳研究转向了微生物源碳研究。



Figure 4. Keyword co-occurrence diagram  
图 4. 关键词共线图

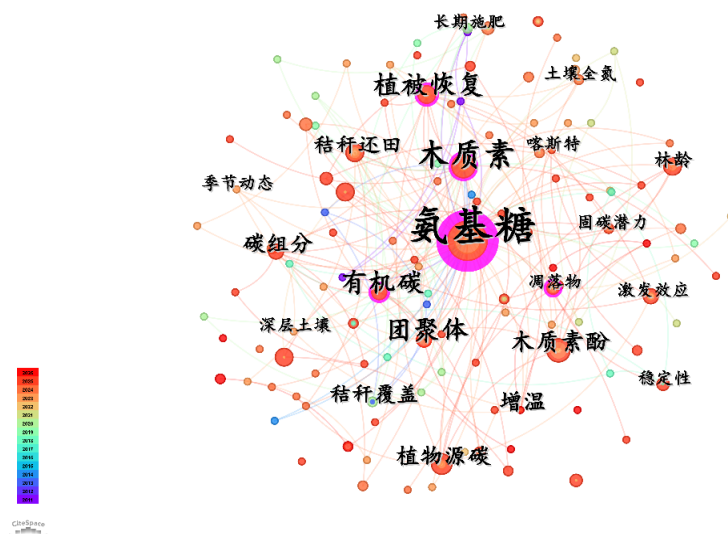


Figure 4. Keyword co-occurrence diagram  
图 4. 关键词共线图

### 3.3.2. 关键词时间线分析

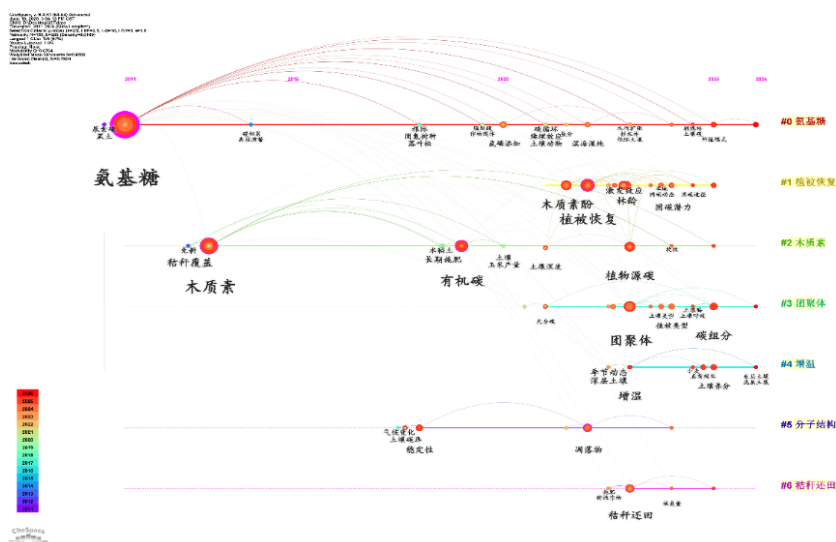


Figure 5. Keyword timeline  
图 5. 关键词时间线图

为更好揭示土壤有机碳来源研究领域的知识演进特征与发展脉络，在关键词共线图的基础上绘制了时间线图谱(图 5)，图中形成了#0 氨基糖、#1 植被恢复、#2 木质素、#3 团聚体、#4 增温、#5 分子结构、#6 秸秆还田这 7 大核心聚类，以#0 氨基糖为核心的微生物残体碳研究是该领域发展的主要方向。基于时序演化，土壤有机碳来源领域的研究可划分为三个阶段：第一阶段(2011~2015 年)为认知奠基期，该时期研究集中于以“植物源碳”、“有机碳”为核心的“#2 木质素”聚类，重点围绕植物源碳介导的土壤有机碳总量变化来展开，关注植物残体输入及其降解特征，强调植物碳的核心作用，处于碳来源辨识的基础阶段。第二阶段(2016~2020 年)为机制深化期，“#0 氨基糖”聚类出现并逐渐成为核心，与“#2 木质

素”聚类共存，反映了 SOC 来源的研究角度从单一的植物源碳转向了微生物源碳，且二者都是 SOC 的重要来源；同时“#3 团聚体”和“#5 分子结构”聚类快速崛起，表明研究开始关注土壤结构对 SOC 固存的影响，团聚体和矿物的物理保护机制也受到关注，这一阶段在碳来源识别的同时还对 SOC 累积与稳定的机制进行探究，此外“#1 植被恢复”也开始显现。第三阶段(2021~2026)为系统耦合期，“#0 氨基糖”聚类仍是该领域的研究核心，“#3 团聚体”聚类进一步强化，说明团聚体的物理保护机制在 SOC 稳定性中的作用受到持续关注；在全球气候变化的背景下，“#1 植被恢复”和“#4 增温”聚类不断凸显，这些聚类聚焦“增温”“激发效应”“固碳潜力”等关键词，植被恢复通过改变凋落物输入、土壤理化性质和微生物结构来影响 SOC 来源的格局，增温则调控微生物碳利用效率和碳分解速率，这一时期研究视角已从微观机制转变到了宏观背景下的生态系统响应。整体而言，该领域研究内容从“单一碳来源识别”逐步演化为“多过程耦合驱动下的土壤碳循环与稳定系统”。

3.3.3. 关键词突现分析

关键词突现能反映某时期内该领域研究热点的快速变化，近 5 年突现的关键词可以表征研究前沿的发展趋势[15]。基于关键词突现分析结果(图 6)，2011~2026 年土壤有机碳来源研究的热点演化大致可分为三个阶段：① 初期探索阶段(2019~2021 年)：关键词“长期施肥”“有机碳”和“氨基糖”突现明显，其中“长期施肥”突现强度最高，表明该时期研究主要聚焦于农田管理措施对 SOC 积累及其组分变化的影响，同时微生物源碳开始成为 SOC 来源解析的重要研究视角。② 机制强化阶段(2022~2024 年)：“团聚体”“氮肥”“土壤全氮”“氮磷添加”等关键词突现，该阶段的研究范式转向了养分添加、土壤结构对 SOC 累积与稳定机制的影响，土壤团聚体在 SOC 稳定性中的作用受到广泛关注；由于氮添加会影响木质素积累和微生物分解，因此氮添加对不同来源碳累积的影响成为这一时期的另一研究热点。③ 前沿拓展阶段(2024~2026 年)：该阶段的突现词为“分布格局”，以往的土壤有机碳来源研究仅局限于单一地区、单一生态系统乃至单一土层，具有显著的空间异质性；而当前的研究不仅关注 SOC 的来源和稳定机制，还更加关注不同区域、不同生态系统和不同土层和环境梯度下 SOC 来源结构的差异及其驱动机制，构成了多角度多层次多格局的综合研究视角。

Top 8 Keywords with the Strongest Citation Bursts

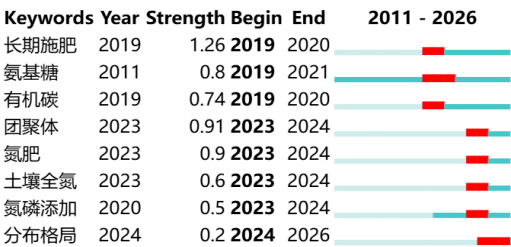


Figure 6. Keyword emergence diagram  
图 6. 关键词突现图

4. 结论与展望

本研究通过对 2011~2026 年间 CNKI 数据库中土壤有机碳来源相关文献的可视化分析，梳理了该领域的发展进展、研究热点与演化趋势。结合分析发现，我国土壤有机碳来源研究呈现三大发展特征：一是来源认知的转变，早期研究侧重植物源碳的贡献作用，逐步转变为微生物源碳主导土壤有机碳形成，强调“微生物碳泵”在植物碳输入和矿物保护中的连接作用。二是研究重点深化，由单一的“碳来源识

别”向“碳固存与稳定机制”延伸,团聚体保护、氮添加、碳组分变化等与碳稳定性相关的研究日益增多,逐渐成为土壤有机碳领域的研究热点。三是研究呈多尺度耦合趋势,研究尺度从单一区域拓展到多区域多层次,但区域研究仍不均衡,主要集中在黄土高原、青藏高原和东北地区;研究内容也从单一土壤过程扩展至“植被输入、微生物转化、团聚体与矿物保护、土壤碳稳定性”的多要素耦合机制;同时农业管理、以增温和降水变化、CO<sub>2</sub>浓度升高为代表的气候变化,以及植被恢复和生态修复措施等背景因子也被纳入碳来源研究,推动了研究向综合化生态系统发展,使其更好为现实需求和战略发展服务。

未来,我国土壤有机碳来源研究可从以下方面考虑:结合 PLFAs、同位素和宏基因组学和代谢组学等精细化手段强化微生物源碳的形成机制,即微生物群落组成及其代谢过程对微生物利用效率和 SOC 转化的影响;深化团聚体结构、矿物保护与有机碳稳定性间的研究,明确不同来源碳的累积与稳定路径;拓展多区域多尺度的研究,加强对不同生态脆弱地区、不同生态系统下 SOC 来源结构的研究,提升土壤碳汇模拟与预测的精确度;进一步深化植物源碳和微生物源碳对全球气候变化和生态恢复的响应机制,解析植被变化、气候变化、土地利用变化等因子对 SOC 来源以及 SOC 固存稳定的影响,为我国“双碳”战略和碳中和目标的实现、以及全球变化背景下森林碳汇的科学评估与管理提供理论支撑。

## 参考文献

- [1] Ni, H., Jing, X., Xiao, X., Zhang, N., Wang, X., Sui, Y., *et al.* (2021) Microbial Metabolism and Necromass Mediated Fertilization Effect on Soil Organic Carbon after Long-Term Community Incubation in Different Climates. *The ISME Journal*, **15**, 2561-2573. <https://doi.org/10.1038/s41396-021-00950-w>
- [2] 张锐. 亚热带植被恢复过程中植物和微生物源碳对土壤有机碳的贡献[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2025.
- [3] Sprunger, C.D. and Philip Robertson, G. (2018) Early Accumulation of Active Fraction Soil Carbon in Newly Established Cellulosic Biofuel Systems. *Geoderma*, **318**, 42-51. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.040>
- [4] Simpson, A.J., Simpson, M.J., Smith, E. and Kelleher, B.P. (2007) Microbially Derived Inputs to Soil Organic Matter: Are Current Estimates Too Low? *Environmental Science & Technology*, **41**, 8070-8076. <https://doi.org/10.1021/es071217x>
- [5] 王晓. 杉木林土壤有机碳来源及贡献随林龄变化研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2025.
- [6] 杨阳, 王宝荣, 窦艳星, 等. 植物源和微生物源土壤有机碳转化与稳定研究进展[J]. 应用生态学报, 2024, 35(1): 111-123.
- [7] 覃振凯. 马尾松纯林及其与红锥混交林土壤有机碳来源与稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2025.
- [8] 刘新颖, 陶玉兰, 王延平, 等. 三种温带成熟林土壤植物源和微生物源有机碳的变化[J]. 土壤学报, 2025, 62(6): 1828-1838.
- [9] Shi, L., Xu, T., Zhang, Y., Zhang, L., Tao, H., Zhao, J., *et al.* (2025) Arbor-Shrub Mixed Vegetation Restoration Strategies Cause Greater Increases in Plant-Derived Carbon than Microbial-Derived Carbon in Limestone Hills. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **393**, Article ID: 109836. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109836>
- [10] Glaser, B., Turrión, M.B., Solomon, D., Ni, A. and Zech, W. (2000) Soil Organic Matter Quantity and Quality in Mountain Soils of the Alay Range, Kyrgyzia, Affected by Land Use Change. *Biology and Fertility of Soils*, **31**, 407-413. <https://doi.org/10.1007/s003749900187>
- [11] Zhang, M., Che, R., Cheng, Z., Zhao, H., Wu, C., Hu, J., *et al.* (2023) Decades of Reforestation Significantly Change Microbial Necromass, Glomalin, and Their Contributions to Soil Organic Carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **346**, Article ID: 108362. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108362>
- [12] 梁超, 朱雪峰. 土壤微生物碳泵储碳机制概论[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(5): 680-695.
- [13] 王宝荣. 土壤微生物残体对不同生态系统有机碳形成的贡献及机理[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2024.
- [14] 王君惠, 杨雪辰, 美合日阿依·希尔亚孜旦. 基于 CiteSpace 与 VOSviewer 的农田土壤有机碳研究进展[J/OL]. 西南民族大学学报(自然科学版): 1-9. <https://link.cnki.net/urlid/51.1672.N.20260528.1748.002>, 2026-07-27.
- [15] 童凌晨, 李强, 岳鹏鹏. 基于 CiteSpace 的喀斯特土壤有机碳研究进展[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2022, 40(4): 22-34.