

基于CiteSpace的森林生态系统碳汇研究热点与演进可视化分析

张 娜

云南师范大学地理学部, 云南 昆明

收稿日期: 2026年4月24日; 录用日期: 2026年5月24日; 发布日期: 2026年6月11日

摘 要

森林生态系统是陆地生态系统最大的碳库, 具有巨大的碳汇功能, 对缓解全球气候变化发挥着重要的作用。本文运用CiteSpace软件, 分析CNKI数据库中1990~2025年有关森林生态系统碳汇的文献, 对相关的发文量、作者、研究机构、关键词等方面进行可视化分析。结果表明: 1996~2025年我国森林生态系统碳汇研究呈现稳步发展且不断深化的趋势。从发展特征来看, 已从静态碳储量清查向动态过程与机理解析深化; 研究内容从单一碳汇评估发展至多要素耦合与多目标协同, 碳汇与氮循环、生物多样性保护等生态系统服务的关联研究逐步深入; 研究导向从基础理论研究向对接国家“双碳”战略的应用导向转型, “碳中和”相关研究成为近年热点。同时, 揭示了当前研究存在的局限, 受文献检索局限及软件分析模式化影响, 量化分析与可视化解析的结合仍不够紧密。

关键词

森林生态系统碳汇, CiteSpace, 研究热点, 可视化分析

Visualization Analysis of Research Hotspots and Evolution of Forest Ecosystem Carbon Sink Based on CiteSpace

Na Zhang

Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: April 24, 2026; accepted: May 24, 2026; published: June 11, 2026

Abstract

Forest ecosystem is the largest carbon pool of terrestrial ecosystem, which has a huge carbon sink

function and plays an important role in mitigating global climate change. This paper uses CiteSpace software to analyze the literature on forest ecosystem carbon sinks from 1990 to 2025 in CNKI database, and makes a visual analysis of the relevant papers, authors, research institutions, keywords and other aspects. The results showed that the research on carbon sink of forest ecosystem in China from 1996 to 2025 showed a trend of steady development and deepening. From the perspective of development characteristics, it has deepened from static carbon inventory to dynamic process and mechanism analysis. The research content has developed from single carbon sink assessment to multi-factor coupling and multi-objective coordination, and the research on the relationship between carbon sink and ecosystem services such as nitrogen cycle and biodiversity conservation has gradually deepened. The research orientation has shifted from basic theoretical research to the application orientation of docking the national “double carbon” strategy, and the research on “carbon neutrality” has become a hot spot in recent years. At the same time, it reveals the limitations of the current research. Affected by the limitations of literature retrieval and the modeling of software analysis, the combination of quantitative analysis and visual analysis is still not close enough.

Keywords

Forest Ecosystem Carbon Sink, CiteSpace, Research Hotspots, Visual 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

气候变暖是由多种温室气体排放引发的全球性生态环境问题，其中 CO₂ 是最主要的温室气体[1]。根据政府间气候变化专门委员会(The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的第六次评估报告(AR6)，自前工业化时代起，由人类活动引起的 CO₂ 排放是推动全球气候变暖的主要驱动力[2]，严重威胁全球生态安全与人类生存发展，如何有效减缓和适应气候变化，已经成为世界各国政府、科研机构等高度关注的核心议题[1]，应对气候变化威胁的国际合作增多，比如 1997 年的《京都议定书》、2015 年的《巴黎协定》[3]。相关研究也随之增加，主要有两条演进脉络：一是通过产业结构优化、能源替代等方式减少人为碳排放，二是通过强化生态系统固碳能力增加碳吸收[4]。

森林生态系统是陆地生态系统的主体，覆盖全球陆地面积的 31%左右，它具有改善和维护区域生态环境、调节气候、涵养水源、保持水土、维护生物多样性等多重生态功能，更在全球碳循环和碳平衡、气候调节中发挥着不可替代的核心作用[5]。森林生态系统碳库是一个复杂的有机整体，包括四大核心组成部分，即生物量碳库、凋落物碳库、死木碳库和土壤有机碳碳库[3]。各碳库通过光合作用、呼吸作用、分解作用等过程参与全球碳循环，其碳储量占陆地生态系统总碳储量的 60%以上[6]，是实现碳减排与碳增汇共同推进的重要载体，对缓解大气温室气体浓度升高、减缓全球气候变化具有不可替代的作用[7]。

近年来，在“碳达峰、碳中和”战略背景下，森林生态系统碳汇作用更加明显[8]。当前，森林生态系统碳汇相关研究已成为生态学、环境科学、林学等多学科交叉融合的研究热点，研究内容不断拓展、研究方法日趋多元，但现有研究仍存在碎片化问题[9]，为了更好地推动森林生态系统碳汇的相关研究，探讨森林生态系统的研究热点与前沿，对已有相关文献进行梳理总结，可以有效分析这一领域的研究状况、特点和发展趋势。因此，本文利用 CiteSpace 对森林生态系统碳汇领域已有的文献发文量、作者机构合作、关键词图谱进行分析，梳理该领域研究脉络与发展特征，并展望未来研究方向，为森林生态系统碳汇研究的发展、双碳目标的实现提供理论参考。

2. 数据来源与研究方法

2.1. 数据来源

研究关注二十世纪以来我国的森林生态系统碳汇的研究文献,以中国知网(CNKI)数据库为数据来源,用“森林生态系统碳汇”为主题进行关键词检索,检索的时间区间设置为1990年1月1日至2025年12月31日,共检索出817条文献信息,包含534篇《中文核心期刊要目总览》、中文社会科学引文索引(CSSCI)期刊文献。为确保文献的研究匹配度和数据的有效性,人工复核逐一检查,剔除了卷首语、征稿启事、招募令、书评和研讨会通知等非学术类无效文献,最终获得有效文献290篇。

2.2. 研究方法

信息可视化(Information Visual)的概念最早在1989年由斯图尔特·卡德、约克·麦金利和乔治·罗伯逊提出,其本质是将大规模非数值型信息转化为图像[10]。基于较为庞大的文献数量,如果采用传统的文献分析方法,无法全面反映近30年来我国森林生态系统碳汇研究的热点和前沿趋势,同时也容易产生主观判断,而基于文献计量与知识图谱的可视化分析能够梳理重要文献的结构和分布,揭示学术进展和前沿热点,进而直观展示某一领域的研究概况[9]。因此采用陈超美教授研究开发的知识图谱工具CiteSpace(6.4.R1版本)对筛选过的有效文献进行多源、分时、动态的可视化分析[11],从发文量时间分布特征、作者合作、机构合作、关键词聚类等方面探索森林生态系统碳汇研究的学术热点和发展动态。

3. 研究文献时空分布与合作网络分析

3.1. 发文量时间分布特征

1996~2025年,我国森林生态系统碳汇领域的发文量整体呈现“萌芽起步-快速增长-高位波动”的发展态势(图1)。研究起步阶段(1996~2001年)发文量极低,年均不足1篇,相关研究尚未形成规模;2006年后进入快速增长通道,2010年发文量达18篇,标志着该领域正式成为研究热点;2016年发文量达到峰值24篇,随后进入高位波动阶段,整体热度维持在较高水平,反映了森林碳汇研究随政策导向与学科发展的动态演变过程。

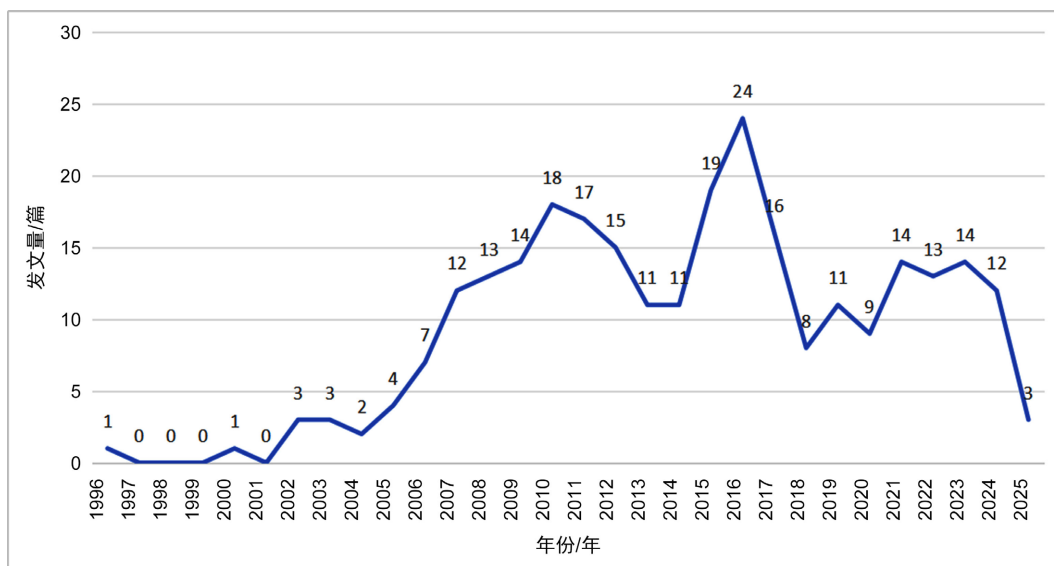


Figure 1. Time distribution of published articles

图1. 发文量时间分布图

3.2. 作者合作网络分析

1996~2025年我国森林生态系统碳汇领域的479位作者构建合作网络图谱($N = 479$, $E = 686$, $Density = 0.006$)。如图2, 结果显示, 该领域作者合作网络整体较为分散, 网络密度仅为0.006, 尚未形成高度紧密的学术共同体, 跨团队合作仍有提升空间。延晓冬、贾根锁、王兵、周国逸等节点规模较大, 是领域内的核心枢纽作者, 其中周国逸的发文量最多, 研究内容主要集中于陆地生态系统生态学与生态水文学的交叉前沿, 核心是阐述森林生态系统水、碳循环耦合过程及其全球变化相应机理[12]-[14]; 于贵瑞、刘允芬等学者则在生态系统碳通量研究中形成了稳定的合作团队[15]-[18]。从时间维度看, 作者合作在2010~2020年最为活跃, 近期新兴研究者的合作网络尚未形成新的集聚效应, 反映了森林碳汇研究正从快速扩张向精细化、多学科交叉的方向转型。

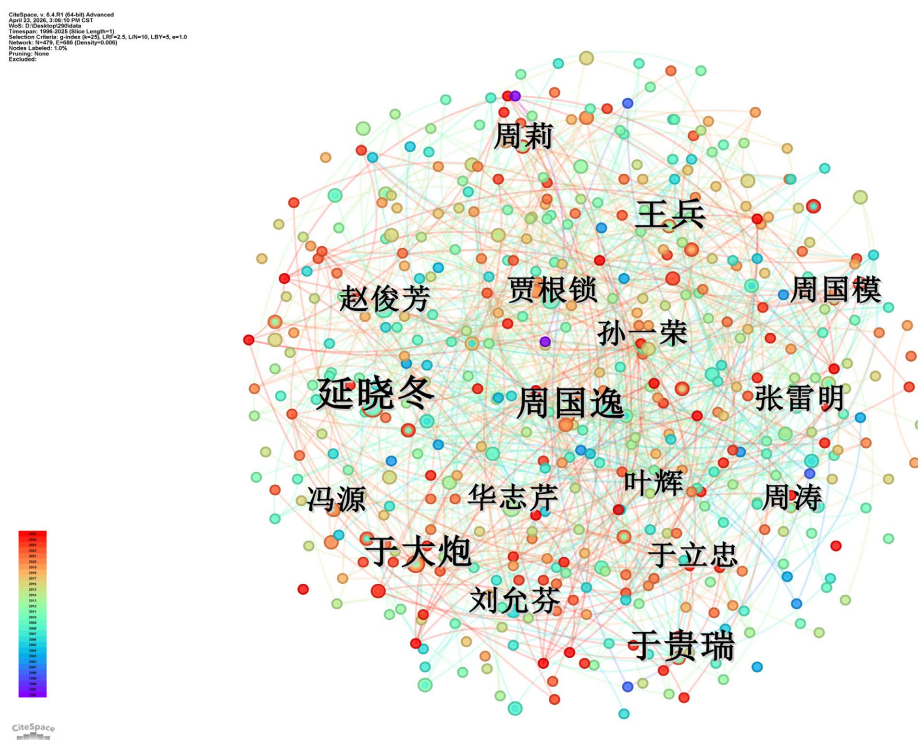


Figure 2. Author collaboration network diagram

图2. 作者合作网络图

3.3. 机构合作网络分析

1996~2025年我国森林生态系统碳汇领域的机构合作网络进行可视化分析($N = 318$, $E = 315$, $Density = 0.0062$)。如图3, 结果显示, 该领域机构合作网络整体较为松散, 网络密度仅为0.0062, 尚未形成跨机构、跨区域的大规模协同研究格局。图谱呈现多中心集聚特征, 其中中国科学院大学、北京林业大学、东北林业大学及中国林业科学研究院为核心节点, 是该领域内的主要研究力量; 中科院系统(地理科学与资源研究所、沈阳应用生态研究所等)与林业院校形成了两大研究集群, 但跨集群的合作关系较少。从时间维度看, 研究主体呈现多元化发展趋势, 早期以中科院系统为主导, 中期林业院校逐步崛起, 近期则形成了科研院所与高校共同推进的格局, 同时新兴机构的加入也为领域研究注入了新活力。

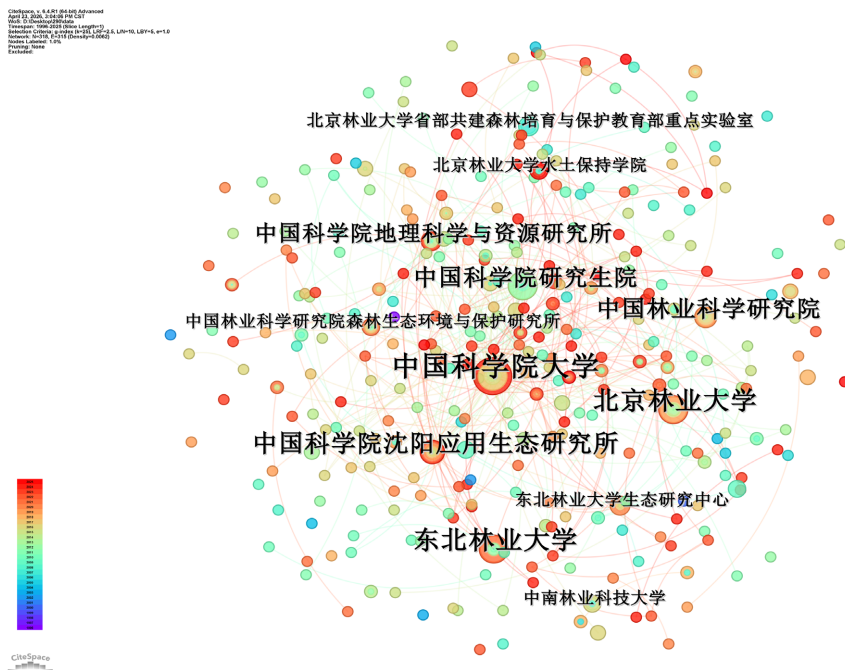


Figure 3. Institutional cooperation network diagram
图 3. 机构合作网络图

4. 森林生态系统碳汇研究热点的可视化分析

4.1. 关键词共现分析

关键词是论文的重要组成部分，直接反映文章的核心内容。对关键词进行分析有助于了解该领域得研究二点和演进脉络，在共现图谱中，节点大小代表关键词出现频次，节点越大，关键词出现得频次越高[19]。

基于 CNKI 数据库 1996~2025 年森林碳汇相关文献，构建关键词共现网络(图 4)。网络包含节点 445 个、连线 1351 条，网络密度为 0.0137，表明研究主题整体较为分散；Q 值为 0.5831，S 值为 0.8504，网络聚类结构显著，聚类内部一致性较高。如图 4 所示，“森林生态系统”、“碳储量”、“碳汇”为三大核心节点，说明国内大多研究都关于森林生态系统碳汇[3] [4] [6]；节点颜色反映关键词的时间分布，早期研究集中于森林土壤、光合作用等基础生态过程[20]-[22]，中期转向碳循环、碳通量等过程机理研究[23] [24]，近年则围绕碳中和、气候变化等议题展开[25] [26]，呈现出从基础机理到应用对接的演化趋势。

4.2. 关键词时间线分析

为进一步揭示森林碳汇研究领域的时间演进规律与聚类结构，绘制了 CiteSpace 时间轴图谱。结果显示(图 5)，1996~2025 年间森林碳汇研究形成了 12 个显著聚类，“#0 碳储量”、“#1 森林生态系统”和“#2 碳汇”为规模最大的前三大聚类，表明“森林生态系统碳储量”是该领域的核心研究方向。从演化路径来看，森林生态系统碳汇研究经历了三个阶段：第一阶段(2000~2010 年)为基础清查期，研究集中于“#0 碳储量”与“#1 森林生态系统”聚类，核心关键词包括碳贮量、森林土壤、生物量等，主要围绕典型森林生态系统的碳库存量进行精准清查与数据积累，构建了基础数据库。第二阶段(2010~2018 年)为过程深化期。随着生态学研究的深入，“#5 湍度相关”、“#7 碳循环”等聚类快速崛起，关键词转向碳通量、净初级生产力(NPP)和模型模拟。这一阶段的研究实现了从静态估算向动态过程模拟的转变，借助通量观测技术，深入解析了森林碳循环的内在机制。第三阶段(2018 年至今)为战略应用期。在“碳中和”战

略背景下，“#2 碳汇”聚类呈现爆发式增长，关键词呈现出向碳中和、固碳能力、碳汇功能承载力等宏观应用领域延伸的趋势。

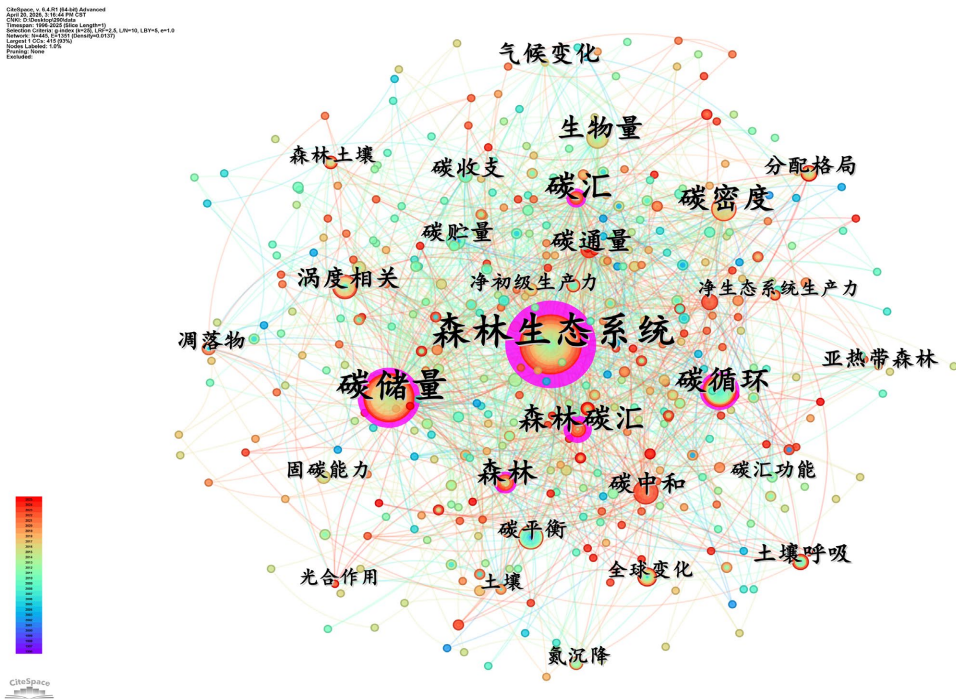


Figure 4. Keyword co-occurrence diagram
图 4. 关键词共现图

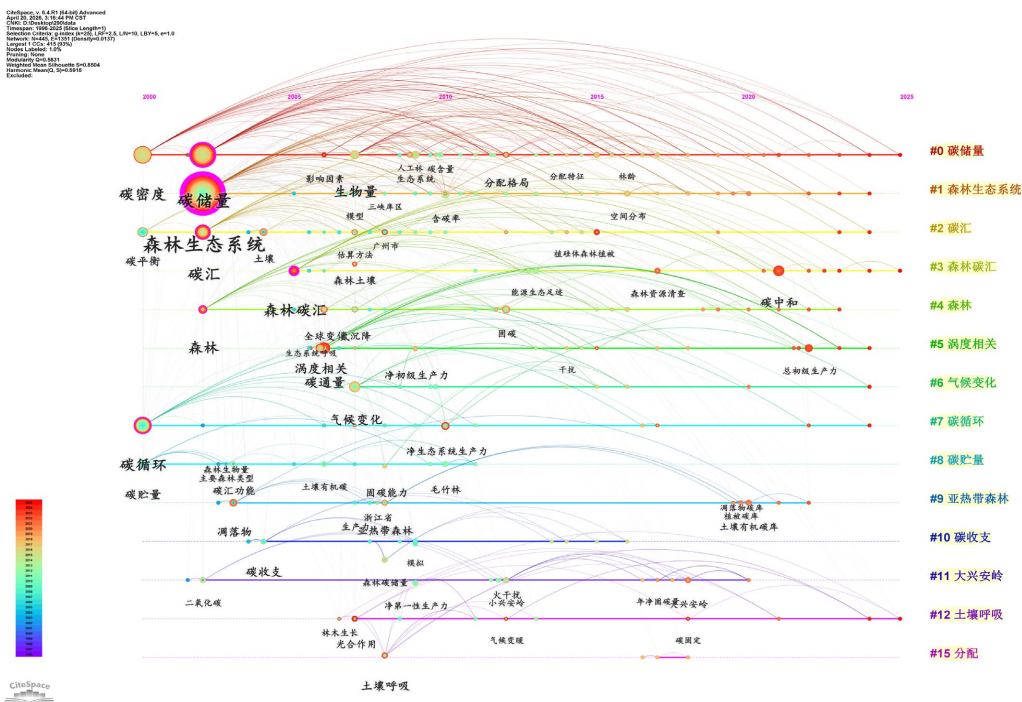


Figure 5. Keyword timeline
图 5. 关键词时间线图

4.3. 关键词突现分析

关键词突现分析结果显示(图 6), 1996~2025 年森林生态系统碳汇研究的热点演化可分为四个阶段: (1) 早期探索期(2009~2012): 热点集中于东北地区、毛竹林、森林沼泽等区域碳储量估算与情景模拟, 以区域性探索为主; (2) 快速发展期(2013~2017): 碳密度(突现强度 = 6.36)、碳储量(突现强度 = 4.59)成为爆发性热点, 模型模拟方法广泛应用, 集中于森林碳汇的定量评估, 是这个领域的核心发展阶段; (3) 拓展深化期(2018~2020): 林火干扰、凋落物碳库、涡动协方差等关键词突现, 开始关注干扰机制与动态过程监测; (4) 政策对接与前沿期(2021~2023): 碳中和(突现强度 = 5.04)成为最强突现词, 碳通量、总初级生产力等过程研究持续升温, 表明森林生态系统碳汇研究已对接“双碳”战略, 形成政策导向、机理深化的格局。

Top 25 Keywords with the Strongest Citation Bursts

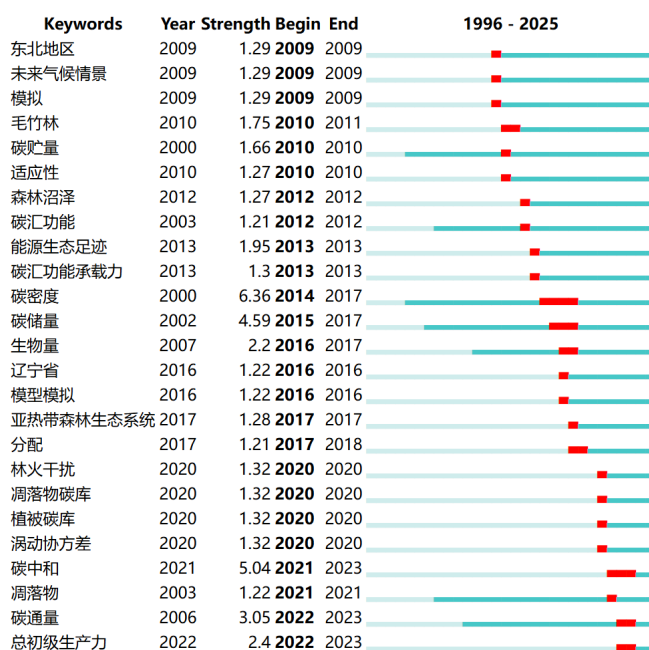


Figure 6. Keyword emergence diagram

图 6. 关键词突现图

5. 结论与展望

本文运用 CiteSpace 软件, 对 1996~2025 年我国森林生态系统碳汇相关研究文献进行可视化分析, 从发文量趋势、作者机构合作、研究热点等维度, 梳理了森林生态系统碳汇的发展进展、热点与演化趋势。研究表明, 相较于传统文献梳理方式, 量化可视化分析具有更强的客观性与系统性, 可清晰直观呈现研究的时空演化与聚类特征, 有利于把握领域研究脉络。同时, 结合文献计量分析结果发现, 我国森林生态系统碳汇研究呈现三大发展特征: 一是从静态碳储量清查向动态碳汇过程与机制深化, “碳通量”、“涡动协方差”等过程类研究持续增加; 二是内容从单一碳汇评估向多要素耦合与多目标协同拓展, 碳汇与氮循环、生物多样性保护等生态系统服务的关联研究日益增多; 三是导向从研究基础理论向对接“双碳”战略的应用导向转型, “碳中和”相关研究成为近年热点, 研究与实践应用的结合紧密。此外, 受文献检索局限及软件分析模式化的局限, 当前研究仍存在量化与质性分析结合不够紧密的问题。

未来,我国森林生态系统碳汇研究可从以下方面考虑:强化量化与质化研究的有机融合,在现有文献计量量化分析的基础上,深化质性解析,弥补软件分析的模式化不足,更全面地呈现领域研究本质;丰富研究方法与技术手段,结合长期定位监测、多模型耦合、多源数据融合等技术,推动研究从样地尺度向区域乃至全球尺度延伸,提升森林碳汇模拟与预测的精准度;集中研究范式、内容与导向的持续深化,重点关注森林生态系统碳汇动态变化机制、多要素耦合效应,以及碳汇标准化核算、潜力提升路径、碳汇交易机制等应用方向,推动研究成果向政策制定、碳汇管理等实践领域转化;紧扣国家“双碳”战略需求,强化研究的实践导向,充分发挥森林生态系统固碳增汇功能,为我国碳中和目标如期实现、生态保护与气候治理协同发展提供针对性的科学支撑。

参考文献

- [1] Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., *et al.* (2023) IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- [2] Piao, S. and Wang, X. (2023) Biological Systems under Climate Change: What Do We Learn from the IPCC AR6. *Global Change Biology*, **29**, 5120-5121. <https://doi.org/10.1111/gcb.16857>
- [3] 朱建华, 田宇, 李奇, 等. 中国森林生态系统碳汇现状与潜力[J]. 生态学报, 2023, 43(9): 3442-3457.
- [4] 何玲, 张劲, 付甜, 等. 基于 CiteSpace 的森林碳汇研究现状及热点趋势可视化分析[J]. 广西林业科学, 2025, 54(2): 231-241.
- [5] 刘华, 雷瑞德. 我国森林生态系统碳储量和碳平衡的研究方法及进展[J]. 西北植物学报, 2005(4): 835-843.
- [6] 刘世荣, 王晖, 李海奎, 等. 碳中和目标下中国森林碳储量、碳汇变化预估与潜力提升途径[J]. 林业科学, 2024, 60(4): 157-172.
- [7] Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., *et al.* (2011) A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, **333**, 988-993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- [8] 陈雅如, 赵金成. 碳达峰、碳中和目标下全球气候治理新格局与林草发展机遇[J]. 世界林业研究, 2021, 34(6): 1-5.
- [9] 毛江涛, 徐文婷, 谢宗强. 森林碳汇研究热点与趋势——基于知识图谱分析[J]. 生态学报, 2023, 43(19): 8241-8253.
- [10] Robertson, G.G., Card, S.K. and Mackinlay, J.D. (1993) Information Visualization Using 3D Interactive Animation. *Communications of the ACM*, **36**, 57-71. <https://doi.org/10.1145/255950.153577>
- [11] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
- [12] Wu, Y., Yin, X., Zhou, G., Bruijnzeel, L.A., Dai, A., Wang, F., *et al.* (2024) Rising Rainfall Intensity Induces Spatially Divergent Hydrological Changes within a Large River Basin. *Nature Communications*, **15**, Article No. 823. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44562-8>
- [13] Zhou, G., Houlton, B.Z., Wang, W., Huang, W., Xiao, Y., Zhang, Q., *et al.* (2013) Substantial Reorganization of China's Tropical and Subtropical Forests: Based on the Permanent Plots. *Global Change Biology*, **20**, 240-250. <https://doi.org/10.1111/gcb.12385>
- [14] Zhou, G., Wei, X., Chen, X., Zhou, P., Liu, X., Xiao, Y., *et al.* (2015) Global Pattern for the Effect of Climate and Land Cover on Water Yield. *Nature Communications*, **6**, Article No. 5918. <https://doi.org/10.1038/ncomms6918>
- [15] 刘允芬, 于贵瑞, 李菊, 等. 红壤丘陵区人工林能量平衡闭合研究——以江西省泰和县千烟洲为例[J]. 林业科学, 2006(2): 13-20.
- [16] 刘允芬, 于贵瑞, 温学发, 王迎红, 等. 千烟洲中亚热带人工林生态系统 CO₂ 通量的季节变异特征[J]. 中国科学.D 辑: 地球科学, 2006(S1): 91-102.
- [17] 于贵瑞, 方华军, 伏玉玲, 等. 区域尺度陆地生态系统碳收支及其循环过程研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5449-5459.
- [18] 于贵瑞, 王秋凤, 于振良. 陆地生态系统水——碳耦合循环与过程管理研究[J]. 地球科学进展, 2004(5): 831-839.
- [19] 杨丽萍, 黄丽芸, 龙娟, 等. 我国林业科普研究进展与热点分析[J]. 广西林业科学, 2024, 53(5): 678-686.
- [20] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981~2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2007(6): 804-812.

- [21] Yang, Y., Shi, Y., Sun, W., Chang, J., Zhu, J., Chen, L., *et al.* (2022) Terrestrial Carbon Sinks in China and around the World and Their Contribution to Carbon Neutrality. *Science China Life Sciences*, **65**, 861-895.
<https://doi.org/10.1007/s11427-021-2045-5>
- [22] 查同刚, 张志强, 朱金兆, 等. 森林生态系统碳蓄积与碳循环[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 112-119.
- [23] 谢馨瑶, 李爱农, 靳华安. 大尺度森林碳循环过程模拟模型综述[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 41-54.
- [24] 方精云, 黄耀, 朱江玲, 等. 森林生态系统碳收支及其影响机制[J]. 中国基础科学, 2015, 17(3): 21-25.
- [25] 方运霆, 刘冬伟, 段伊行, 等. 气候变暖对森林生态系统碳汇功能的影响: 机制、方法和主要进展[J]. 生态学杂志, 2024, 43(9): 2551-2565.
- [26] Zhang, Q., Song, J. and Mayuka, R.N. (2025) Climate Change and Forestry Carbon Sink: A Literature Review and Visualization Perspective. *Frontiers in Forests and Global Change*, **8**, Article 1487503.
<https://doi.org/10.3389/ffgc.2025.1487503>