

张楠, 吕连宏, 王斯一, 等. 基于文献计量分析的碳中和研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(2): 464-472.

ZHANG N, LÜ L H, WANG S Y, et al. Analysis of research progress in carbon neutrality based on bibliometrics [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(2): 464-472.

## 基于文献计量分析的碳中和研究进展

张楠, 吕连宏\*, 王斯一, 赵明轩, 白梓函, 罗宏

中国环境科学研究院

**摘要** 碳中和是应对全球气候变化的重要举措, 对于全球气候治理与人类命运共同体建设具有极其重要的理论与实践意义, 国内外学者对碳中和的研究也在持续进行。基于 Web of Science 核心合集中的 SCI-E 与 SSCI 网络数据库进行检索, 利用文献计量的方法, 对 1991—2021 年碳中和研究相关论文进行数据分析与挖掘。结果表明: 1991—2021 年碳中和研究领域的发文量呈现显著上升趋势, 研究主要集中在自然科学领域, 发文量排名前 3 的期刊分别是 *Sustainability*、*Journal of Cleaner Production* 和 *Applied Energy*; 中国国家自然科学基金委员会共资助该领域 459 篇研究论文, 远高于其他国家的相关机构; 研究的中坚力量集中在美国 and 英国, 其论文篇均被引频次分别为 51.24、43.21 次, 远高于中国 (16.91 次); 目前碳中和的相关研究可以概括为碳中和技术与碳中和政策两大方面, 而生物质、氢能源、碳捕集和封存等将会成为未来实现碳中和的关键性技术和主要研究方向。

**关键词** 碳中和; 可视化分析; 文献计量; 研究方向

中图分类号: X321 文章编号: 1674-991X(2023)02-0464-09 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20220275

### Analysis of research progress in carbon neutrality based on bibliometrics

ZHANG Nan, LÜ Lianhong\*, WANG Siyi, ZHAO Mingxuan, BAI Zihan, LUO Hong

Chinese Research Academy of Environmental Sciences

**Abstract** Carbon neutrality is an important initiative to address global climate change, and it has extremely important theoretical and practical significance for global climate governance and the building of a community of human destiny. The research on carbon neutrality has been continuously conducted by scholars internationally. Based on the search of SCI-E and SSCI databases in the Web of Science core collection, the carbon neutral literature from 1991 to 2021 was analyzed and mined by using bibliometric methods. The study showed that the number of carbon neutral publications was on the rise, and the research areas were mainly concentrated in the natural sciences, with the top 3 journals in terms of the number of publications being *Sustainability*, *Journal of Cleaner Production* and *Applied Energy*. National Natural Science Foundation of China funded 459 studies in this field, much higher than the relevant institutions in other countries; the backbone of the research was concentrated in the United States and the United Kingdom, whose average citations per article were 51.24 and 43.21, respectively, much higher than those of China (16.91). The current carbon neutral research could be summarized in two major aspects, namely carbon neutral technology and carbon neutral policy, while biomass, hydrogen energy, carbon capture and storage, etc. were the key technologies and research directions for achieving carbon neutrality in the future.

**Key words** carbon neutrality; visual analysis; bibliometrics; research direction

低碳全球化已成为一个全球化的新命题。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 发布的《全球升温 1.5 °C 特别报告》指出, 若不能在 21 世纪中叶将温室气体排放量减少到净零, 那么把全球气温控制在工业化前水平以上 1.5 °C 以内的目标将无法实现。而《巴黎协定》明确规定, 全球应在 21 世纪末将

升温幅度控制在 2 °C, 并努力控制在 1.5 °C 以内。

在此背景下, 碳中和概念得到越来越多国家的重视, 其也被称作净零温室气体排放<sup>[1-2]</sup>。在全球气候治理视域下, 碳中和已成为一项重要参考指标, 唯有实现全球温室气体净零排放, 全球气温的升高进程才有可能得到有效控制<sup>[3-5]</sup>。中国政府于 2020 年

收稿日期: 2022-03-25

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (2021YSKY-07); 国家社会科学基金项目 (21BJY247)

作者简介: 张楠 (1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为能源与环境经济, zhangnan\_0126@163.com

\* 责任作者: 吕连宏 (1981—), 男, 正高级工程师, 博士, 研究方向为能源与环境经济, lvlh@craes.org.cn

明确提出力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和。欧盟、日本、韩国等也都承诺于 2050 年实现碳中和。碳中和愿景提出以后,国内相关顶层设计与政策部署进程明显加快。

目前,国内外学者对碳中和领域的研究正逐步增加。研究主要围绕整体碳中和实现路径<sup>[6-8]</sup>、不同行业碳中和路径分析<sup>[9-10]</sup>、碳中和政策体系<sup>[11-12]</sup>以及碳中和目标下的相关研究<sup>[9,13-14]</sup>等领域,但对碳中和领域的研究现状和热点分析的研究较为鲜见。笔者综合利用文献数据可视化软件 CiteSpace 和 VOSviewer,分析碳中和领域的研究论文,对该领域的作者、主题、关键词等进行分析,统计历年发文量、高被引文献、核心关键词等,以可视化图谱的方式呈现该领域的发展脉络与研究态势,探究其研究方向与前沿热点,归纳该领域研究的国内外差异,以期对碳中和的深入研究提供借鉴与参考。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

数据来源于 Web of Science 核心合集 (WoS) 中的 Science Citation Index Expand (SCI-E) 与 Social Science Citation Index Expand (SSCI) 网络数据库。WoS 收录了全世界重要和有影响力的研究论文,是公认的最重要的文献检索平台<sup>[15]</sup>。综合考虑论文来源的全面性、时效性和前沿性,本研究的检索式主要由“碳中和”作为检索词,为 TS=(“carbon neutral\*” OR “net zero emissions” OR “carbon offset\*”),设定检索语种为 English,文献检索类型为论文或综述论文。检索时间范围为 1991—2021 年,检索时间为 2021 年 12 月 16 日,共得到 3 573 篇相关论文。

### 1.2 研究方法

采用文献计量的方法对论文的相关特征进行分析。文献计量学是集数学、统计学、文献学为一体的交叉学科,注重量化的综合性知识体系,通常利用 CiteSpace 和 VOSviewer 软件对相关论文进行科学统计分析<sup>[16-17]</sup>。CiteSpace 是由陈超美教授开发的信息可视化软件,着眼于分析科学论文中蕴含的潜在知识,是在科学计量学、数据和信息可视化背景下逐渐发展起来的一款多元、分时、动态的文献可视化分析软件。它可以提供引文空间的知识聚类 and 分布,也可以提供作者、机构、国家/地区等知识单元的共现分析<sup>[18]</sup>。VOSviewer 是由 Nees Jan van Eck 和 Ludo Waltman 于 2009 年开发的用于绘制科学知识图谱的文献计量分析软件,该软件具备如文献耦合、

共被引、合作以及共此分析等所有常见的文献计量分析功能<sup>[19]</sup>。综合考虑 2 款软件的优点,本研究利用 CiteSpace 和 VOSviewer 软件进行碳中和领域的论文计量分析<sup>[20-21]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 碳中和研究特征概述

#### 2.1.1 发文量演变特征

1991—2021 年碳中和领域历年发文量的分布情况见图 1。由图 1 可知,整体来看,碳中和领域的发文量呈逐年上升趋势,说明碳中和研究不断受到学者们的关注和重视。其研究态势大致经历了 3 个阶段: 1) 1991—1997 年,为碳中和研究领域的萌芽期。该阶段碳中和相关论文开始出现,但研究较少且部分年份存在空缺,学界对碳中和领域关注度较低。2) 1998—2016 年,为碳中和研究领域的发展期。该阶段碳中和相关论文的研究数量平稳增加,该领域逐渐受到学者们的重视。1997 年 12 月,《联合国气候变化框架公约》第 3 次缔约方大会在日本京都召开。149 个国家和地区的代表通过了旨在限制发达国家温室气体排放量以抑制全球变暖的《京都议定书》,吸引了大量学者进一步投入到气候变化的研究领域<sup>[22-25]</sup>,但该阶段对于碳中和领域的相关研究还较少。3) 2017 年至今,为碳中和研究领域的爆发期。该阶段,受自然和人类活动的共同影响,全球发生了以变暖为显著特征的气候变化。2016 年《巴黎协定》的正式签署,开启了全球气候治理的新起点。2020 年 9 月,中国国家主席习近平宣布中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和。随后,随着日本、韩国等国家碳中和目标的提出,碳中和相关研究呈现出爆发式上升的趋势,研究成果迅速增加,这在一定程度上也体现了研究的热度与政策导向的关系。

#### 2.1.2 研究领域学科类别分布

表 1 列出了碳中和研究领域主要学科类别排名的统计情况(仅展示排名前 10 的学科类别)。WoS 共涵盖 252 个学科类别,检索得到的碳中和相关论文共涉及其中的 142 个类别,占总类别的 56.35%,碳中和的研究学科分布较为广泛,主要集中在自然科学的能源燃料 (energy fuels) 和环境科学 (environmental sciences) 类别,社会科学领域研究较少。

#### 2.1.3 发文期刊

对某一研究领域论文的来源期刊进行分析,可确定该领域来源期刊中的核心期刊。1991—2021 年

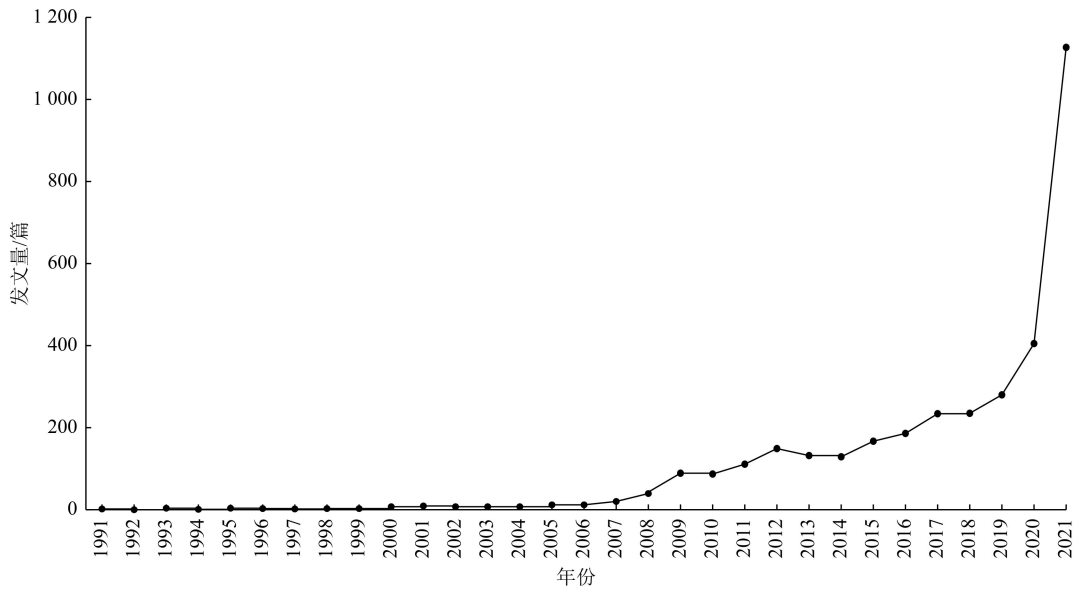


图 1 1991—2021 年碳中和研究领域发文量变化

Fig.1 Distribution of the number of articles published in the field of carbon neutral research in 1991-2021

表 1 碳中和研究领域不同学科类别发文量及占比

Table 1 Number and proportion of papers published by different subject categories in the field of carbon neutrality research

排名	WoS学科类别	发文量/篇	占比/%
1	energy fuels	963	26.95
2	environmental sciences	938	26.25
3	green sustainable science technology	503	14.08
4	environmental studies	491	13.74
5	engineering chemical	432	12.09
6	engineering environmental	292	8.17
7	chemistry multidisciplinary	289	8.09
8	chemistry physical	283	7.92
9	materials science multidisciplinary	223	6.24
10	economics	221	6.19

表 2 碳中和研究领域主要发文期刊

Table 2 Leading journals published in the field of carbon neutrality research

期刊	发文量/篇	2021年影 响因子	JCR 分区	所属 国家
<i>Sustainability</i>	116	3.251	Q2	瑞士
<i>Journal of Cleaner Production</i>	109	9.297	Q1	美国
<i>Applied Energy</i>	96	9.746	Q1	英国
<i>Energies</i>	84	3.004	Q3	瑞士
<i>Renewable &amp; Sustainable Energy Reviews</i>	77	14.982	Q1	美国
<i>Journal of Environmental Management</i>	73	6.789	Q1	英国
<i>Energy Policy</i>	64	6.142	Q1	英国
<i>Energy</i>	59	7.147	Q1	英国
<i>Environmental Science And Pollution Research</i>	38	4.223	Q2	德国
<i>Fuel</i>	37	6.609	Q1	英国

注: JCR为Journal Citation Reports。

碳中和研究领域发文量排名前 10 的期刊如表 2 所示。该领域发文期刊共有 919 家,主要发文期刊集中于顶级期刊,且影响因子较高。发文量排名前 3 的期刊分别是 *Sustainability*、*Journal of Cleaner Production* 和 *Applied Energy*,其发文量分别为 116、109 和 96 篇。由此可见,碳中和研究领域虽然起步较晚,但随着全球气候变化形势的日益严峻,各界学者和权威专业期刊对其关注度逐渐提高。

### 2.1.4 碳中和基金投入情况

对 1991—2021 年碳中和研究领域论文中有基金资助的论文进行分析,结果表明,资助论文数量超过 100 篇的基金机构有 5 个,分别是中国国家自然科学基金委员会 (459 篇)、欧盟委员会 (159 篇)、英

国国家科研与创新署 (144 篇)、美国能源部 (132 篇) 和美国国家科学基金会 (124 篇)。表明中国、美国、英国在碳中和研究领域的基金投入力度较大。

## 2.2 碳中和主要研究力量与合作分析

### 2.2.1 地区分布

碳中和研究领域论文来自于 110 个国家/地区,利用 VOSviewer 对论文来源国家进行分析,得出国际合作关系图如图 2 所示。图中节点越大,表示该国发文量越多,连线粗细与合作紧密程度成正比,连线越粗,代表国家之间合作越紧密<sup>[26]</sup>。由图 2 可知,各国家间合作密切,共同致力于碳中和研究,其中中

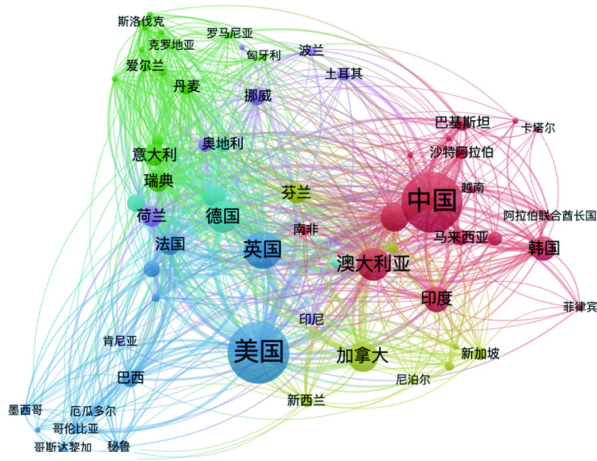


图 2 国际合作关系网络

Fig.2 Map of the international partnership network

国、美国、英国在合作图中中心性较强,代表这 3 个国家在碳中和研究领域与世界各国有着较为紧密的合作关系。

对碳中和研究领域主要发文国家历年的发文量进行统计,结果如图 3 所示。统计了 1991—2021 年碳中和研究领域论文产出较多的 10 个国家及其论文篇均被引频次,结果如表 3 所示。由图 3、表 3 可知,在碳中和研究领域,发文量大于 300 篇的国家为美国、中国和英国,分别占总发文量的 25.33%、24.13%、11.95%,其中美国起步较早,实力最强;澳大利亚、德国与加拿大 3 个国家均超过 200 篇,日本、印度、韩国、意大利、瑞典、法国、西班牙、荷兰和芬兰 9 个国家均超过 100 篇。发文量超过 100 篇的 15 个国家中,中国是唯一的发展中国家,可见此领域的研究发达国家明显强于发展中国家。发文量超过

50 篇的 9 个国家/地区中,欧洲占 6 个,亚洲为 2 个,而巴西是唯一来自南美洲的国家。

此外,美国和英国无论是发文量还是论文篇均被引频次都处于领先水平,表明英美两国在碳中和领域具有较高影响力和国际话语权。碳中和研究领域早期的 5 篇论文中有 4 篇来自美国,另有 1 篇来自德国,2010 年之前的论文有 60% 来自于美国,较早的起步奠定了美国在此领域的主导地位。相比之下,虽然中国论文产出居前 3,但是论文的篇均被引频次较低。可见,中国在碳中和研究领域的发文量稳步上升,但中国论文的总影响力还有待进一步提升,在提高研究数量的同时更要保证研究质量。

### 2.2.2 研究机构

通过对发文作者所在机构进行分析,有助于了解碳中和研究领域的核心机构<sup>[27]</sup>。对 1991—2021 年碳中和研究领域发文量较高的 10 个机构及其论文篇均被引频次进行统计,结果见表 4。从表 4 可以看出,发文量排名前 10 的机构中有 7 个位于发达国家,仅有中国科学院、清华大学、中国科学院大学来自发展中国家。伦敦帝国理工学院的论文篇均被引频次远高于其他机构,显示了英国在碳中和研究领域的强劲实力。近年来,我国多个研究机构在碳中和研究领域发文量较多,发展加快,但存在篇均被引频次不高的问题。

碳中和研究重要研究机构之间的合作关系如图 4 所示。由图 4 可知,中国科学院 (Chinese Academy of Sciences)、天津大学 (Tianjin University)、澳大利亚昆士兰大学 (The University of Queensland)、新加坡国立大学 (National University of Singapore)、加拿

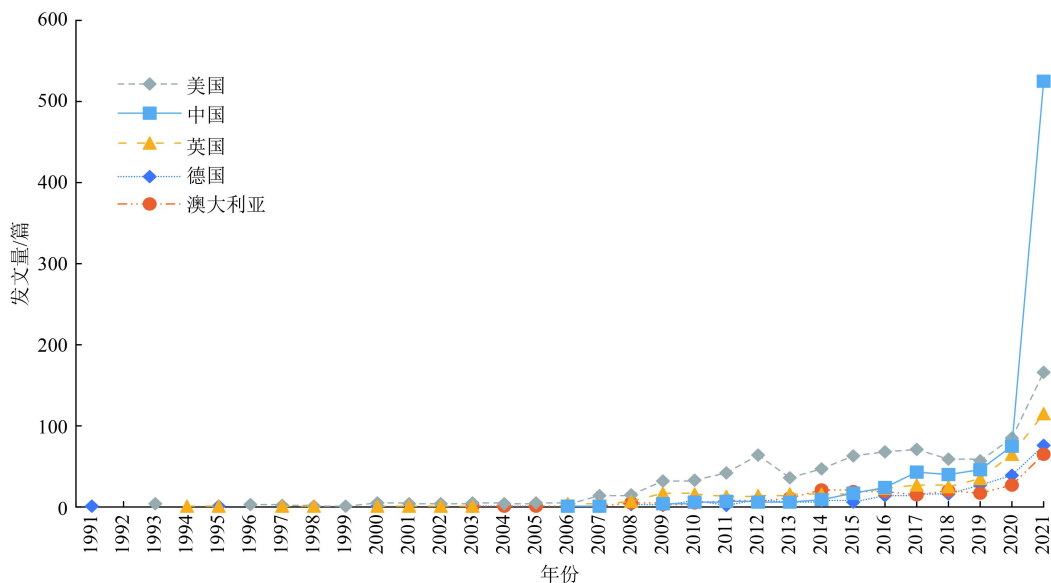


图 3 1991—2021 年主要国家在碳中和研究领域的发文量

Fig.3 Number of publications in the field of carbon neutrality in major countries in 1991-2021

表 3 1991—2021 年碳中和研究领域主要发文国家发文量及论文被引情况

Table 3 Number of publications and citations of papers from major countries in the field of carbon neutrality research in 1991-2021

排序	国家	发文量/篇	发文量占比/%	总被引频次	篇均被引频次
1	美国	905	25.33	46 37	51.24
2	中国	862	24.13	14 58	16.91
3	英国	427	11.95	18 45	43.21
4	澳大利亚	255	7.14	9 78	38.33
5	德国	243	6.80	9 17	37.73
6	加拿大	217	6.07	6 36	29.29
7	日本	188	5.26	4 47	23.77
8	印度	153	4.28	4 19	27.40
9	韩国	145	4.06	2 76	19.02
10	意大利	122	3.41	2 77	22.59

表 4 1991—2021 年碳中和研究领域主要发文机构论文被引情况

Table 4 Citations of papers from major institutions in the field of carbon neutrality in 1991-2021

序号	研究机构	所属国家	篇均被引频次
1	中国科学院(Chinese Acad Sci)	中国	30.43
2	美国能源部(DEO)	美国	98.07
3	加利福尼亚大学(Univ California)	美国	63.45
4	清华大学(Tsinghua Univ)	中国	16.56
5	法国国家科学研究中心(CNRS)	法国	38.86
6	美国农业部(USDA)	美国	34.94
7	中国科学院大学 (Univ Chinese Acad Sci)	中国	14.48
8	加州大学伯克利分校 (Univ California, Berkeley)	美国	82.58
9	伦敦帝国理工学院 (Imperial College London)	英国	152.00
10	昆士兰大学(Univ Queensland)	澳大利亚	59.51

大阿尔伯塔大学 (University of Alberta) 等机构存在较为紧密的合作关系。

### 2.3 碳中和研究热点及前沿分析

#### 2.3.1 研究热点主题分析

论文的关键词可以揭示碳中和领域研究的特点和发展趋势<sup>[28-29]</sup>。VOSviewer 提供 4 种视图之一的“Label View”，图中节点与字体的大小取决于该节点的权重，权重越大，字体与节点越大；节点间的连线表示节点间曾经共同出现过<sup>[19,30]</sup>。通过 VOSviewer 对相关论文关键词进行热点分析，结果如图 5 所示。由图 5 可知，气候变化 (climate change)、可再生能源 (renewable energy)、转换 (conversion)、生物质

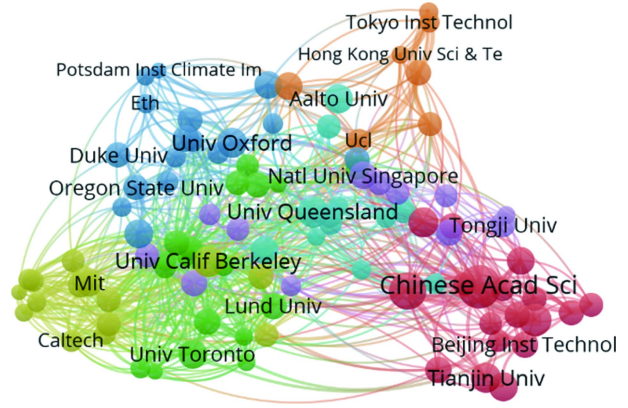


图 4 碳中和及相关研究重要机构之间的合作关系  
Tokyo Inst Technol—东京理工大学; Hong Kong Univ Sci & Te—香港理工大学; Ucl—伦敦大学; Aalto Univ—阿尔托大学; Potsdam Inst Climate Im—波茨坦气候影响研究所; Eth—苏黎世联邦理工学院; Univ Oxford—哈佛大学; Duke Univ—杜克大学; Oregon State Univ—俄勒冈州立大学; Natl Nuiv Singapore—新加坡国立大学; Tongji Univ—同济大学; Mit—麻省理工学院; Lund Univ—隆德大学; Caltech—加州理工学院; Univ Toronto—多伦多大学; Beijing Inst Technol—北京理工大学。

图 4 碳中和及相关研究重要机构之间的合作关系  
Fig.4 Collaboration between important institutions for carbon neutral and related research

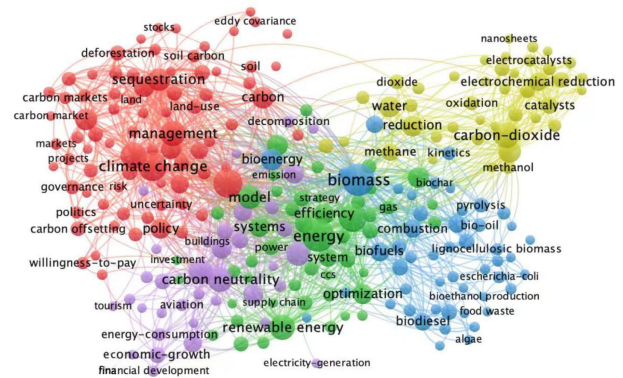


图 5 碳中和领域的研究热点分布  
Fig.5 Distribution of research hotspots in the field of carbon neutrality

(biomass) 等节点所在区域是重要的研究领域。

为进一步深化关键节点的研究内容，通过对关键词节点和重点节点论文进行合并、整理，分析得出碳中和领域主要可以分为碳中和技术和碳中和政策两大研究热点，其中碳中和技术主要集中在能源使用、碳捕集和封存以及能量转换等领域的研究，而碳中和政策的覆盖范围较为广阔，主要包括碳市场、碳足迹、绿色发展等领域。

在碳中和技术方面，重要的节点论文研究包括：Zeman 等<sup>[31]</sup> 研究指出，CNHCs 是氢气或传统生物燃料的可行替代物；Newton 等<sup>[32]</sup> 研究指出，可以通过改造建成环境，使城市走向碳中和性蓝绿城市；

Lewis 等<sup>[33]</sup> 探究了以化学键的形式储存太阳能转换的能量的可能性; Ragauskas 等<sup>[34]</sup> 研究发现, 农业能源作物和生物精炼厂制造技术整合的新制造模式, 为开发可持续的生物动力和生物材料提供了潜力; Brennan 等<sup>[35]</sup> 对生物质燃料的生产、加工和提取生物燃料及副产品进行了回顾与展望; 另有相关学者探究了电化学<sup>[36]</sup>、碳氢燃料<sup>[37]</sup>、电活性材料<sup>[38]</sup>、电催化析氢<sup>[39]</sup> 等技术前沿问题<sup>[35,40-41]</sup>。

在碳中和政策方面, 重要的节点论文包括: Booth<sup>[42]</sup> 指出, 利用 NEI 加权生物源将二氧化碳纳入碳交易计划, 并对生物能源进行可再生能源补贴能更有效地减少排放; Zeng 等<sup>[43]</sup> 研究了在碳中性环境下能源管理中油耗评价的直接方法; Ahmad 等<sup>[44]</sup> 利用 STIRPAT 方法探究了能源使用强度、土地集聚、二氧化碳排放和经济进步在不同发展水平的动态关联程度; Luysaert 等<sup>[45]</sup> 研究指出, 老龄森林是全球二氧化碳的汇集地, 全球 15% 的森林面积至少占全球净生态系统生产力的 10%; Mitchard<sup>[46]</sup> 探究了热带森林碳循环与气候变化的关系, 指出由于热带森林可能成为一个碳源, 将使全球变暖限制在 2 °C 以下变得更加困难; Song 等<sup>[47]</sup> 探究了二氧化碳的高效、选择性和可持续催化作用, 指出由于二氧化碳在热力学上的稳定性和动力学上的惰性, 以经济有效和对环境无害的方式进行二氧化碳转化是很有希望的, 但仍然具有挑战性。

### 2.3.2 研究知识演进分析

关键词突发检测可以识别研究领域的新兴趋势, 反映某一话题在一定时期内受到了学术界的特别关注<sup>[48-49]</sup>。借助于 CiteSpace 软件的突现词功能, 对 1991—2021 年碳中和相关研究的关键词进行最小持续时长为 1 年的突现分析, 将突现词按照突现时间的长短进行排序, 结果见表 5。红色范围表示出现频率变化最大的时间段, 即在该时间段内影响力最大<sup>[50]</sup>。

通过分析 1991—2021 年突现关键词图谱, 得出关键词 carbon market(碳市场) 开始突现时间为 2009 年, 结束突现时间为 2017 年, 持续时长为 8 年, 突现强度为 11.13, 说明 carbon market(碳市场) 是 2009—2017 年时间段内的研究热点。同时对突现时间为 2017—2021 年且突现强度大于 4 的关键词进行整合, 结果见表 6。

从表 6 可以看出, catalyst(催化剂)、hydrogen evolution(氢气进化)、conversion(转化)、methanol(甲醇) 等关键词从突现开始年持续到 2021 年, 表明对具体的热量转化以及能源利用的讨论已经成为碳

表 5 1991—2021 年突现关键词图谱

Table 5 Emergent keywords mapping in 1991-2021

关键词	节点出现年份	突现强度	突现开始年份	突现结束年份	突现图谱 (1991—2021年)
carbon storage (碳储存)	1991	6.43	1994	2014	
carbon sequestration (碳封存)	1991	26.07	1995	2016	
forest (森林)	1991	11.13	1995	2015	
soil (土壤)	1991	5.84	1995	2013	
forestry (森林)	1991	5.11	1996	2016	
carbon offset (碳补偿)	1991	24.31	1996	2016	
climate (气候)	1991	5.36	1996	2011	
plantation (种植)	1991	3.56	1997	2015	
carbon (碳)	1991	4.78	1999	2015	
biome (生物群落区)	1991	13.60	1995	2014	

注: 表中仅展示了突现时间前 10 名突现关键词图谱。

表 6 2017—2021 年关键词突现整合

Table 6 Consolidated table of emergent keywords in 2017-2021

关键词	突现开始年份	突现结束年份	强度
electroreduction(电还原)	2018	2021	11.81
catalyst(催化剂)	2018	2021	8.00
conversion(转化)	2019	2021	5.19
bio oil(生物油)	2018	2021	5.16
formic acid(甲酸)	2017	2021	4.65
hydrogen evolution(氢气进化)	2019	2021	4.49
methanol(甲醇)	2019	2021	4.45
green(绿色环保)	2019	2021	4.42
electrochemical reduction(电化学还原)	2019	2021	4.37
carbon footprint(碳足迹)	2019	2021	4.26
nitrogen(氮气)	2017	2021	4.22
transition(转型)	2018	2021	4.12
politics(政治)	2019	2021	4.01
electrode(电极)	2019	2021	3.75
ammonia(氨气)	2018	2021	3.74
cellulose(纤维素)	2019	2021	3.67
attitude(态度)	2019	2021	3.60
hydrocarbon(碳氢化合物)	2016	2019	5.59
CO <sub>2</sub> capture(二氧化碳捕获)	2018	2019	4.72
aviation(航空)	2017	2019	4.71
electrocatalytic reduction(电催化还原)	2018	2019	4.67
EU ETS(欧盟排放交易计划)	2017	2019	4.38

注: 表中仅展示了强度大于 4 的突现关键词。

中和的前沿动态与发展趋势。

从突现强度看, electroreduction(电还原)突现强

度最大 (11.81), 突现时间为 2018 年, 表明该领域逐渐注重二氧化碳等温室气体减排技术的发展与创新。从时间周期看, carbon sequestration(碳封存)、carbon offset(碳抵消)、forestry(林业)、forest(森林)、carbon storage(碳储存)等突现的时间周期较长, 说明该领域对碳捕集和封存等方面研究一直较为关注。从突现的开始时间看, 自 2016 年起, electroreduction(电还原)、catalyst(催化剂)、conversion(转换)、hydrogen evolution(氢气进化)、methanol green(绿色甲醇)、electrochemical reduction(电化学还原)、carbon footprint(碳足迹)、nitrogen(氮气)等词活跃涌现, 是近几年该领域重点聚焦的热点前沿。

### 3 结论与建议

(1) 碳中和研究领域发文量不断增加。1991—2021 年, 该领域共发文 3 573 篇, 且呈现上升趋势, 中国在 2020 年发文量首次超过美国, 位居世界第一。各国在该领域的合作日趋密切, 其中中国、美国、英国之间有着较为紧密的合作关系。

(2) 碳中和领域研究方向主要集中在自然科学方面, 发文期刊多以自然科学内容为主, 其中 *Sustainability*、*Journal of Cleaner Production* 和 *Applied Energy* 发文量较大。

(3) 碳中和领域的研究力量主要集中在发达国家, 发文量排名前 10 的机构中仅有 3 个属于发展中国家。伦敦帝国理工学院是该领域的主要研究机构, 在发文量及论文篇均被引频次方面均具有明显优势; 中国科学院、清华大学和中国科学院大学一直保持较高的发文量, 但存在论文篇均被引频次较低的问题。

(4) 目前碳中和的相关研究可以概括包括能源使用、碳捕集和封存以及能量转换等领域的碳中和技术和包括碳市场、碳足迹、绿色发展等领域的碳中和政策。综合分析热点分布图与突现关键词, 生物质、氢能源、碳捕集和封存等是未来实现碳中和的关键性技术和主要发展方向。

(5) 建议中国要进一步加大碳中和领域的科研投入, 提升论文整体水平, 提高国际影响力; 进一步把握研究热点, 在生物质、氢能源、碳捕集和封存等方面开展深入研究, 在国际上发出更多声音; 进一步加强国内外交流合作, 加强不同学科、不同方向的研究作者及团队的交流, 实现碳中和研究的交叉融合; 进一步加深能源技术创新力度, 深入研究与发展“绿氢”, 解决氢能储存、运输和加注等重点/难点问题, 为更好地实现碳中和目标助力。

### 参考文献

- [ 1 ] 邓旭, 谢俊, 滕飞. 何谓“碳中和”[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 107-113.  
DENG X, XIE J, TENG F. What is carbon neutrality[J]. *Climate Change Research*, 2021, 17(1): 107-113.
- [ 2 ] BATAILLE C G F. Physical and policy pathways to net-zero emissions industry[J]. *WIREs Climate Change*, 2020, 11(2): 633.
- [ 3 ] 付允, 马永欢, 刘怡君, 等. 低碳经济的发展模式研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2008, 18(3): 14-19.  
FU Y, MA Y H, LIU Y J, et al. Development patterns of low carbon economy[J]. *China Population Resources and Environment*, 2008, 18(3): 14-19.
- [ 4 ] ISSAC NEWTON A, GOMATHI P. Research output on global warming: a scientometric analysis[J]. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2019, 14(6): 2022-2031.
- [ 5 ] ZANDALINAS S I, FRITSCHI F B, MITTLER R. Global warming, climate change, and environmental pollution: recipe for a multifactorial stress combination disaster[J]. *Trends in Plant Science*, 2021, 26(6): 588-599.
- [ 6 ] 胡鞍钢. 中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J]. *北京工业大学学报(社会科学版)*, 2021, 21(3): 1-15.  
HU A G. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches[J]. *Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition)*, 2021, 21(3): 1-15.
- [ 7 ] 柴麒敏. 美丽中国愿景下我国碳达峰、碳中和战略的实施路径研究[J]. *环境保护*, 2022, 50(6): 21-25.  
CHAI Q M. Study on the transition pathways towards carbon emission peak and neutrality in beautiful China perspective[J]. *Environmental Protection*, 2022, 50(6): 21-25.
- [ 8 ] 王深, 吕连宏, 张保留, 等. 基于多目标模型的中国低成本碳达峰、碳中和路径[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(9): 2044-2055.  
WANG S, LÜ L H, ZHANG B L, et al. Multi objective programming model of low-cost path for China's peaking carbon dioxide emissions and carbon neutrality[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(9): 2044-2055.
- [ 9 ] REN M, LU P T, LIU X R, et al. Decarbonizing China's iron and steel industry from the supply and demand sides for carbon neutrality[J]. *Applied Energy*, 2021, 298: 117209.
- [ 10 ] 舒麒彪, 赵勇, 赵良, 等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(5): 1663-1672.  
SHU Y B, ZHAO Y, ZHAO L, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(5): 1663-1672.
- [ 11 ] CHENG Y, SINHA A, GHOSH V, et al. Carbon tax and energy innovation at crossroads of carbon neutrality: designing a sustainable decarbonization policy[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 294: 112957.
- [ 12 ] 张耀坤, 王永军, 杨成, 等. 基于三维分析框架的中国碳中和政策体系研究[J]. *全球能源互联网*, 2021, 4(6): 549-559.  
ZHANG Y K, WANG Y J, YANG C, et al. Research on carbon-neutral policy system based on three-dimensional analysis

- framework[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2021, 4(6): 549-559.
- [13] 王凤, 安芮坤, 赵璟祎. 碳中和目标下的政府制度创新[J]. *南京工业大学学报(社会科学版)*, 2021, 20(6): 85-93.  
WANG F, AN R K, ZHAO J Y. Government institutional innovation under carbon neutrality goal[J]. *Journal of Nanjing Tech University (Social Science Edition)*, 2021, 20(6): 85-93.
- [14] TAN J L, WANG R. Research on evaluation and influencing factors of regional ecological efficiency from the perspective of carbon neutrality[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 294: 113030.
- [15] 赵玉婷, 詹丽雯, 李小敏, 等. 基于CiteSpace分析的国内外战略环境影响评价研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(6): 1746-1753.  
ZHAO Y T, ZHAN L W, LI X M, et al. Research progress of domestic and foreign strategic environmental assessment based on CiteSpace analysis[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(6): 1746-1753.
- [16] 赵蓉英, 许丽敏. 文献计量学发展演进与研究前沿的知识图谱探析[J]. *中国图书馆学报*, 2010, 36(5): 60-68.  
ZHAO R Y, XU L M. The knowledge map of the evolution and research frontiers of the bibliometrics[J]. *Journal of Library Science in China*, 2010, 36(5): 60-68.
- [17] 李思奇, 邬娜, 吴佳, 等. 基于CiteSpace的中国产业转移研究热点与趋势分析[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(3): 599-608.  
LI S Q, WU N, WU J, et al. Analysis of research hotspots and trends of China's industrial transfer based on CiteSpace[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(3): 599-608.
- [18] 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.  
CHEN Y, CHEN C M, LIU Z Y, et al. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. *Studies in Science of Science*, 2015, 33(2): 242-253.
- [19] 高凯. 文献计量分析软件VOSviewer的应用研究[J]. *科技情报开发与经济*, 2015, 25(12): 95-98.  
GAO K. Research on the application of bibliometric analysis software VOSviewer[J]. *Sci-Tech Information Development & Economy*, 2015, 25(12): 95-98.
- [20] 宋秀芳, 迟培娟. VOSviewer与Citespace应用比较研究[J]. *情报科学*, 2016, 34(7): 108-112.  
SONG X F, CHI P J. Comparative study of the data analysis results by VOSviewer and Citespace[J]. *Information Science*, 2016, 34(7): 108-112.
- [21] 廖胜姣. 科学知识图谱绘制工具VOSviewer与Citespace的比较研究[J]. *科技情报开发与经济*, 2011, 21(7): 137-139.  
LIAO S J. The comparative study on the scientific knowledge mapping tools: VOSviewer and Citespace[J]. *Sci-Tech Information Development & Economy*, 2011, 21(7): 137-139.
- [22] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告: I. 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2(1): 3-8.  
DING Y H, REN G Y, SHI G Y, et al. National Assessment Report of Climate Change: I. climate change in China and its future trend[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1): 3-8.
- [23] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近50年中国地面气候变化基本特征[J]. *气象学报*, 2005, 63(6): 942-956.  
REN G Y, GUO J, XU M Z, et al. Climate changes of China's mainland over the past half century[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(6): 942-956.
- [24] KERR R A. How urgent is climate change[J]. *Science*, 2007, 318(5854): 1230-1231.
- [25] NEAL L. Bias about climate change[J]. *Science*, 2006, 313(5793): 1573.
- [26] 赵丹群. 基于CiteSpace的科学知识图谱绘制若干问题探讨[J]. *情报理论与实践*, 2012, 35(10): 56-58.  
ZHAO D Q. Probe into several problems relating to mapping knowledge domains based on CiteSpace[J]. *Information Studies: Theory & Application*, 2012, 35(10): 56-58.
- [27] 乔宇, 闫振飞, 冯承莲, 等. 基于文献计量学的环境内分泌干扰物研究热点分析[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(2): 424-434.  
QIAO Y, YAN Z F, FENG C L, et al. Research focus analysis of endocrine disrupting chemicals (EDCs) based on bibliometrics[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(2): 424-434.
- [28] ZHOU Q, KONG H B, HE B M, et al. Bibliometric analysis of bronchopulmonary dysplasia in extremely premature infants in the Web of Science database using CiteSpace software[J]. *Frontiers in Pediatrics*, 2021, 9: 705033.
- [29] LIU B, ZHANG L, WANG X W. Scientometric profile of global rice research during 1985-2014[J]. *Current Science*, 2017, 112(5): 1003.
- [30] KASAVAN S, YUSOFF S, GUAN N C, et al. Global trends of textile waste research from 2005 to 2020 using bibliometric analysis[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(33): 44780-44794.
- [31] ZEMAN F S, KEITH D W. Carbon neutral hydrocarbons[J]. *Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2008, 366(1882): 3901-3918.
- [32] NEWTON P W, ROGERS B C. Transforming built environments: towards carbon neutral and blue-green cities[J]. *Sustainability*, 2020, 12(11): 4745.
- [33] LEWIS N S, NOCERA D G. Powering the planet: chemical challenges in solar energy utilization[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(43): 15729-15735.
- [34] RAGAUSKAS A J, WILLIAMS C K, DAVISON B H, et al. The path forward for biofuels and biomaterials[J]. *Science*, 2006, 311(5760): 484-489.
- [35] BRENNAN L, OWENDE P. Biofuels from microalgae: a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(2): 557-577.
- [36] 王瑞, 许义榕, 孟渴欣, 等. 二氧化碳转化制取燃料及高值化学



- 品研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2020, 10(4): 639-646.
- WANG R, XU Y R, MENG K X, et al. Development of research on the conversion of carbon dioxide into fuel and high value-added products[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(4): 639-646.
- [ 37 ] TU W G, ZHOU Y, ZOU Z G. Photocatalytic conversion of CO<sub>2</sub> into renewable hydrocarbon fuels: state-of-the-art accomplishment, challenges, and prospects[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(27): 4607-4626.
- [ 38 ] EFTEKHARI A, LI L, YANG Y. Polyaniline supercapacitors[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 347: 86-107.
- [ 39 ] SIVULA K, van de KROL R. Semiconducting materials for photoelectrochemical energy conversion[J]. *Nature Reviews Materials*, 2016, 1: 15010.
- [ 40 ] LU X F, YU L, LOU X W D. Highly crystalline Ni-doped FeP/carbon hollow nanorods as all-pH efficient and durable hydrogen evolving electrocatalysts[J]. *Science Advances*, 2019, 5(2): eaav6009.
- [ 41 ] 胡昕怡, 徐伟健, 施珂珂, 等. 土壤/沉积物中黑碳的老化模拟研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2020, 10(5): 860-870.
- HU X Y, XU W J, SHI K K, et al. Research progress of aging simulation of black carbons (BCs) in soils/sediments[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(5): 860-870.
- [ 42 ] BOOTH M S. Not carbon neutral: assessing the net emissions impact of residues burned for bioenergy[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(3): 035001.
- [ 43 ] ZENG J M, LIU L D, LIANG X, et al. Evaluating fuel consumption factor for energy conservation and carbon neutral on an industrial thermal power unit[J]. *Energy*, 2021, 232: 120887.
- [ 44 ] AHMAD M, LI H, ANSER M K, et al. Are the intensity of energy use, land agglomeration, CO<sub>2</sub> emissions, and economic progress dynamically interlinked across development levels[J]. *Energy & Environment*, 2021, 32(4): 690-721.
- [ 45 ] LUYSSAERT S, SCHULZE E D, BÖRNER A, et al. Old-growth forests as global carbon sinks[J]. *Nature*, 2008, 455(7210): 213-215.
- [ 46 ] MITCHARD E T A. The tropical forest carbon cycle and climate change[J]. *Nature*, 2018, 559(7715): 527-534.
- [ 47 ] SONG Q W, ZHOU Z H, HE L N. Efficient, selective and sustainable catalysis of carbon dioxide[J]. *Green Chemistry*, 2017, 19(16): 3707-3728.
- [ 48 ] 李秀霞, 胡凡刚, 袁林, 等. 基于加权中值相关和半阈值策略的突发关键词监测[J]. *情报理论与实践*, 2015, 38(3): 53-58.
- LI X X, HU F G, YUAN L, et al. Burst keywords monitoring based on weight midcorrelation and half-thresholding strategy[J]. *Information Studies: Theory & Application*, 2015, 38(3): 53-58.
- [ 49 ] 党政, 代群威, 赵玉连, 等. 生物矿化在重金属污染治理领域的研究进展[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(7): 1182-1192.
- DANG Z, DAI Q W, ZHAO Y L, et al. Research progress of biomineralization in the treatment of heavy metal contamination[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(7): 1182-1192.
- [ 50 ] 陈甜倩, 高阳, 冯喆, 等. 基于CiteSpace的土壤生态系统服务研究热点与趋势[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(7): 204-219.
- CHEN T Q, GAO Y, FENG Z, et al. Hotspots and trends of soil ecosystem services based on CiteSpace[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(7): 204-219. ◇