

基于文献计量的 CO₂ 捕获技术研究进展分析



门政斐, 刘彬*, 李春家

青岛科技大学化工学院, 山东青岛 266042

摘要: CO₂ 的捕获工作对缓解全球气候变暖问题有着重要意义。目前 CO₂ 的捕获技术仍处于初步阶段, 难以实现大规模应用, 受到学者的广泛关注。基于此, 借助引文分析软件 VOSviewer 对 Web Of Science 核心数据库中 2012-2022 年关于 CO₂ 捕获的 38706 篇文献进行计量化分析、可视化表达, 从年度发展趋势、发文国家、发文机构、发文作者等多个方面分析 CO₂ 捕获技术的研究现状, 并通过绘制关键词共现图和时序聚类网络图等方式对未来的发展态势做出合理性预测。结果表明: 碳捕获技术已经成为全球研究热点, 2012-2022 年 CO₂ 捕获技术的有关文章发文量稳步增长, 其中中国和美国在该领域处于领先地位, 做出了卓越贡献; 该领域的研究相对缺乏国际合作, 容易导致技术壁垒; CO₂ 捕获技术的研究热点包括捕获剂的选择、捕获后 CO₂ 的再次利用等。文献计量结果有助于把握研究现状, 探索发展方向, 为 CO₂ 捕获技术的进一步研究提供思路和方法。

关键词: 二氧化碳; 碳捕集; 吸收剂; 碳中和; 文献计量学

DOI: [10.57237/j.res.2023.02.005](https://doi.org/10.57237/j.res.2023.02.005)

Research on Technology Progress of Carbon Dioxide Capture Based on Bibliometrics

Men Zhengfei, Liu Bin*, Li Chunjia

College of Chemical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China

Abstract: Carbon dioxide capture is important for mitigating the global warming problem. Scholars and researchers have paid wide attention to carbon dioxide capture technology which is still in the preliminary stage and difficult for large-scale application. Using citation analysis software VOSviewer, we analyzed the current status of carbon dioxide capture technology by examining 38,706 papers in the Web of Science core database from 2012 to 2022. Our analysis focused on annual publication trends and made reasonable predictions for future development. The results show that the number of articles on carbon dioxide capture technology have steadily increased from 2012 to 2022, with China and the United States leading the field and making outstanding contributions. The research hotspots of carbon dioxide capture technology include the selection of capture agents and the reuse of captured carbon dioxide. These measured outcomes can help to grasp the current status of research, explore the development direction, and offer ideas and methods for further studies of carbon dioxide capture technology.

基金项目: 山东省自然科学基金一般项目《醇胺溶液吸收 CO₂ 的生物酶催化反应机理研究》(ZR2022QB174).

*通信作者: 刘彬, liubinchem@qust.edu.cn

收稿日期: 2023-05-11; 接受日期: 2023-06-20; 在线出版日期: 2023-06-29

<http://www.resenvsci.org>

Keywords: Carbon Dioxide; Carbon Capture; Absorbent; Carbon Neutralization; Bibliometrics

1 引言

碳排放的主要来源包括各种化石燃料的燃烧等日常生产活动[1]。温室气体尤其是 CO₂ 的过量排放导致全球气候变暖等问题，威胁着人类赖以生存的环境。中国人口基数多，各地区发展差异大，新能源的利用普及度相对较低，长期主要依赖化石能源特别是煤炭石油等碳排放量较高的传统能源，消耗量占全球总消耗量的八成。2021 年各国碳排放量数据显示，中国已经成为世界上第一大 CO₂ 排放国家，排放的 CO₂ 量占全球排放总量的 45% [2]。2022 年 9 月 22 日，中国在第七十五届联合国大会上提出“CO₂ 排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”。[3]但中国现有的能源结构已相对完善，短期实现碳减排的压力较大，且碳减排技术仍处于探索阶段，需要各种减排技术的组合，效率低下、难以真正投入生产使用。[4]

根据 IEA（国际能源署）的报告，实现 2050 年的碳中和排放目标应转变全球的生产、运输和使用方式。其中，碳减排工作到 2050 年将主要依赖于新兴技术，特别是 CO₂ 捕获技术[5]。目前 CO₂ 捕获技术的研究已初具规模，也有部分工厂尝试投入使用，但其高昂的成本和能耗仍是亟待解决的问题，具有较大的探索空间。通过分析前人已取得的研究成果，能够厘清其发展脉络，把握该领域的研究现状，洞悉未来的发展方向。文献计量学通过数学、统计学、文献学的有机结合，将海量的所选定领域文献数据量化，并通过知识图谱等形式展示，在一定程度上能够客观地反映该领域的研究现状、研究热点、已取得的重要成果，并合理预测发展趋势，为该领域的研究人员提供进一步思路与指导。

基于此，本文借助文献计量化工具 VOSviewer，梳理了近 10 年 CO₂ 捕获领域的研究热点及阶段性前沿方向的演变脉络，阐明研究成果，旨在把握最新研究方向，为 CO₂ 捕获技术发展提供参考，助力实现“碳达峰、碳中和”。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文数据来源于外文文献数据库 WOS（Web Of

Science）。WOS 是国际公认的学术信息资源数据库，收录了全球各领域高水准、高影响力的国际学术期刊，能够较为全面地反映该领域的研究成果。

以主题为检索项，以“CO₂ 捕获”为检索词，以精准匹配的方式对主题进行检索，检索范围为全部期刊，时间范围为 2012-2023 年，检索时间为 2023 年 1 月 1 日。共检索获得文献 38706 篇，为满足文献分析软件的实际需求，所有数据均保存为“纯文本”文件，记录内容为“全记录与引用的参考文献”，以此作为分析对象，导入 VOSviewer 中进行下一步的文献计量网络分析。

2.2 研究方法

科学知识图谱法能够将复杂的知识领域通过数据挖掘等方法以清晰的图形显示出来，是近年来图书馆情报学、信息计量学等领域较为新兴而热门的研究方法。目前已有多种软件工具被广泛应用于绘制知识图谱，如 CiteSpace、UCINET、VOSviewer 等。本文主要采用由荷兰莱顿大学 Van Eck 与 Walt-man 研发 VOSviewer 软件（1.6.18 版本），该软件通过绘制作者、引文、关键词等共现图谱[6]，分析文献作者之间的耦合关系，直观展现国内外 CO₂ 捕获领域的总体研究方向、热点及各时间节点的前沿方向，在聚类技术、图谱绘制等方面具有独特优势。[7, 8]同时结合文献计量法，深度挖掘文献数据，对相关内容进行计量化分析、可视化表达。

表 1 2012-2022 发表的文献类型分析

文献类型	数量/篇	百分比
研究论文	35 674	92.16%
综述文章	2 442	6.30%
会议记录	866	2.23%
网络首发	468	1.20%
社论	186	0.48%
会议文摘	332	0.85%
新闻报道	30	0.07%
信函	16	0.04%
订正文章	35	0.09%
专著章节	36	0.09%
撤回文章	2	0.005%
其他	4	0.01%

3 数据分析

3.1 文献类型分析

为更好地筛选合适的样本, 提高研究结果的有效性, 利用文献数据库的筛选功能对检索到的文献进行文献类型统计。表 1 列出了检索到的 38706 篇文章的文献类型, 其中研究论文 35674 篇, 占比 92.16%。研究论文多针对某一问题进行实验并得出结论, 具有较强的创新性。在各种文章类型中, 研究论文相较于综述文章等其他文章类型, 可以更好地反映该领域的研究进展和发展前沿方向。

3.2 文献发表数量及增长趋势

在文献计量学中, 年度发文量是分析研究领域发展、探究主题热点和趋势变化的重要数据, 它反映了该领域知识量的增进情况, 以及该领域研究者的研究进度。[9]检索结果显示, 2012-2022 年 10 年间该领域共发文 38706 篇。如图 1 所示, 2012-2022 年, 有关 CO₂ 捕获领域文章发文量一直在增加, 但由于受研究水平等条件制约, 增速有所下降。使用 SPSSPRO 进行最小二乘法函数拟合, 预测 2023 年的全年发文量将达到 5464 篇。碳减排的需求日益迫切, 吸引了全球众多学者关注, 对 CO₂ 捕获技术的研究稳步推进, 也必将诞生更多丰硕的成果。

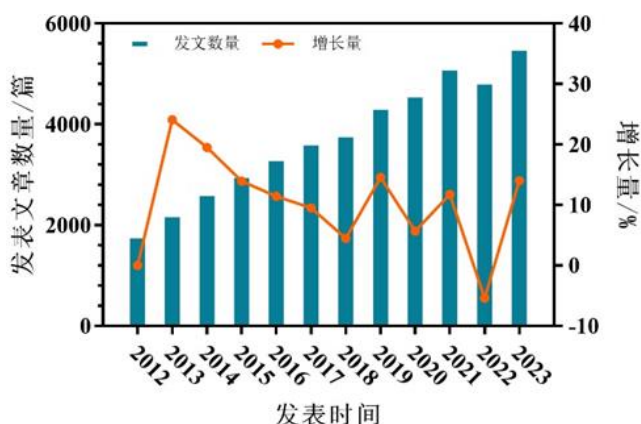


图 1 2012-2022 年发表的文献数量及 2023 年发文量预测

3.3 学科类别分析

根据 WOS 的学科分类, 得出近 10 年在 CO₂ 捕获领域研究中排名前 5 的学科, 如表 2 所示。由于 CO₂ 捕获技术与化工业及能源业的强相关性, 大多数文章

集中于两学科, 占比 65.18%。其中化工类是最多的学科, 共发表了 14494 篇文章, 主要在于化工技术在 CO₂ 捕获技术中的实践, 以及捕获后 CO₂ 在化工行业的再利用等。能源与燃料领域共发文 10750 篇, 位居第二, 反映了 CO₂ 捕获工作对调整能源结构、发展新能源的重要作用。此外, 化学等基础学科同样有着较多文章, 可以得出 CO₂ 捕获技术在微观、理论领域同样受到学者重视。

表 2 排名前 5 的各学科发文量以及占比

学科	发文量/篇	占比
化工	14 494	37.42%
能源与燃料	10 750	27.76%
化学多学科	6 881	17.77%
物理化学	6188	15.97%
环境工程	5377	13.88%

3.4 发文国家分析

3.4.1 发文国家分布

某领域的国家发文量, 在一定程度上可以反映出该国政府对此领域研究的重视、支持程度, 以及该国学者的学术成果。对 CO₂ 捕获领域内的 38706 篇论文归属国进行统计分析, 部分论文属于多国学者合著, 其所属国家均统计入内。[9]

经统计, 所选论文来自 94 个国家和地区, 说明 CO₂ 捕获领域研究已成为全球热点, 吸引了世界上绝大多数国家和地区研究。在该领域发文量前 15 位的国家如图 2 所示, 其发文总数占有已发表论文总量的 95% 以上, 可以代表研究 CO₂ 捕获技术较为前沿的国家。数据显示, 发文量排名前 3 的国家为中国、美国、英国。中国共发文 13068 篇, 为第 2 名美国 (7241 篇) 的 1.8 倍, 充分彰显了中国对 CO₂ 捕获工作的重视程度, 以及学者在该领域学术研究的丰硕成果。

早在十三五发展规划时期 (2016 年-2020 年), 中国便提出了加快改善生态环境的要求, 高度重视节约资源和保护环境, 在碳减排方面也开始采取一些措施。正值十四五发展规划时期 (2021 年-2025 年), 政府有关部门明确提出改善中国的能源结构, 降低化石能源的比重, 实现进一步节能减排。政策影响研究方向, 又通过给予基金等支持鼓励该领域学术研究的的发展, 为中国碳捕获领域研究注入了强大动力。[10]

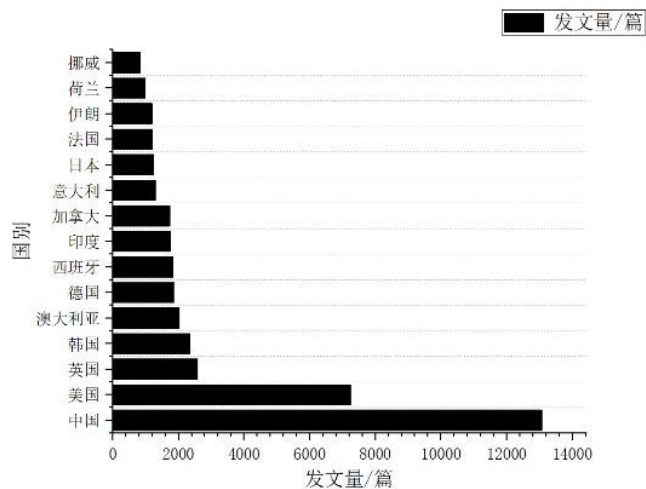


图2 发文章排名前15的国家发文章比较（条形图）

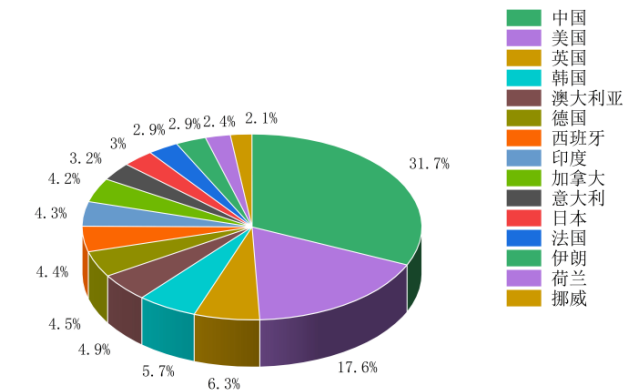


图3 发文章排名前15的国家发文章比较（饼图）

3.4.2 发文国家影响力

论文的被引用次数在一定程度上可以反映该文献被其他学者认可的程度，相对于发文章更可凸显其影响力，但分析该领域全部文献工作繁冗并且难以具有代表性。[9]为此，按单篇文章被引次数排序后，筛选出被引次数较高的文章约 10000 篇，对该部分文章所属作者进行国家和地区分析。结果表明，中美两国在该领域仍以

绝对优势领先。由于各国发文总量不同，为使数据更具全面性、客观性，引入总被引次数/（筛选后的）总发文章量来计算各国文章的均被引频次，结果如表 3 所示。篇均被引频次排名前 5 的国家分别为美国、德国、英国、澳大利亚、法国。值得注意的是，德国总发文章量仅排名第 6，总被引数排名第 5，但篇均被引频次却排名第 2。

近年来，德国重视科研人才的培养，大力支持相关领域研究，相关学者热情高涨，得以在 CO₂ 捕获领域论文篇均被引频次的领先。据德国智库 Agora 能源转型论坛研究数据显示，2021 年德国 CO₂ 排放总量 7.72 亿吨，较上年增长约 3300 万吨，增幅达到 4.5%，位居世界第六。为应对气候变化的挑战，德国一直致力于让 CCS（碳捕获、储存）技术成为减少 CO₂ 排放的重要途径和措施。[11]早在 2010 年，德国某研究所就开始探索使用“碳酸盐循环”（carbonate looping）和“化学链”（chemical looping）两种碳捕获方法，以期减少 CO₂ 的排放，并对回收的 CO₂ 加以利用。该研究得到了欧盟、德国联邦经济事务部以及各工业合作方共计 700 万欧元的资助。德国积极响应欧盟能源气候计划，大力普及 CCS 技术，建立相关法律和制度框架，用法制保障和助力 CCS 技术发展；同时加大宣传力度，在公众间普及相关知识，实现全民共同支持相关技术发展。[12]

中国的总发文章量和总被引频次均位居第 1 位，但篇均被引频次仅位居第 8 位。这表明中国在 CO₂ 捕获领域研究已颇具成果，但由于研究起步相对较晚，还处于探索阶段，仍存在技术上不够成熟、研究不够深入等问题，部分研究成果缺乏创新性、质量不高。此外，个别高校学生出于寻求个人利益等因素，发表“灌水文章”，导致该领域论文质量良莠不齐，篇均被引频次相对较低。为此，应完善高校学术评价制度，避免单以论文及学术成果评价学生，同时建立健全监督及惩戒制度，净化学术环境，提高论文质量。[13]

表 3 发文章前 10 的国家及被引情况

国家	发文章/篇	发文章排序	总被引数	总被引排序	被引数/发文章	被引数/发文章排序
中国	3003	1	243910	1	81.22	8
美国	1940	2	197244	2	101.67	1
英国	683	3	61800	3	90.48	3
澳大利亚	602	4	54268	4	90.14	4
南非	493	5	38307	7	77.70	10
德国	488	6	47469	5	97.27	2
西班牙	472	7	40191	6	85.15	6
加拿大	400	8	33153	8	82.88	7
印度	320	9	24284	10	75.89	9
法国	309	10	27590	9	89.28	5

3.4.3 主要发文国家间合作关系

图3展示了CO₂的捕获领域发文量前20位国家之间的学术合作关系。图中错综复杂的关系网,充分体现了各国家之间的合作关系,CO₂的捕获课题研究已经成为了全球性的合作课题。根据VOSviewer的图例,可以看出中美两国在该网络中处于核心地位,且两国之间的合作最为频繁,这也与两国的综合国力以及对CO₂捕获研究的重视程度契合。中美两国作为世界上的碳排放大国,在该课题的研究上均积极承担国际责任,发挥了重要作用。

以德国、法国为代表的欧盟国家在该领域也与其他国家有着密切合作。得益于第二次工业革命,这些欧盟国家经济相对发达,追求高质量发展,十分重视

环境保护。例如,欧盟将CCS项目视为“ZEP 零排放电力平台计划”的重要技术之一,并提供了近1亿欧元的资金支持;欧盟投资银行也曾宣布对CCS和其他重大技术提供10亿欧元的资金支持,在物质条件上提供了保障。[14, 15]

此外,亚洲的日本、韩国等国家不仅致力于国内研究,也与其他国家学者存在密切交流。日本在2020年发布《2050年碳中和增长战略》,把资源循环利用产业作为实现碳中和的目标之一;[16, 17]韩国政府在2009年就正式提出低碳绿色增长模式,并将其作为国家发展的首要战略。[18]这部分发达国家经济发展迅速,对国家工业的依赖性不强,为清洁经济、循环经济的转型提供了客观条件。

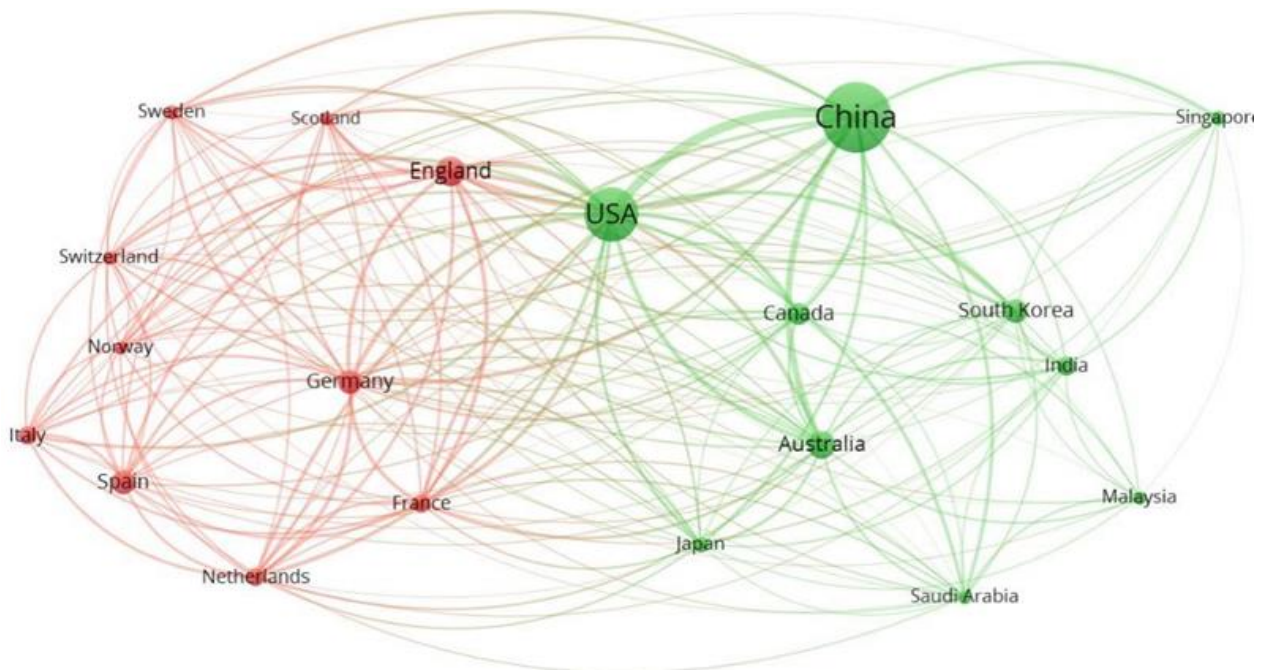


图4 发文量排名前20的国家间合作网络

注:图中每个节点表示一个国家或地区,线条粗细表示两国之间合作发文量的多少。越处于中心位置,表明与其他国家和地区合作的越多。

3.5 发文机构分析

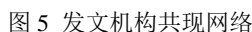
经统计,所导入的30000余篇文献共涉及10133个学术机构,包括高校、科研院所、企业等。为更好地探究各个机构间的合作情况,根据实际文献数量,利用VOSviewer的筛选功能,以50篇为阈值,共提取满足阈值的53个发文机构,以此绘制的主要发文机构

之间的合作关系如图4所示。数据显示,发文量排名前10的机构分别为:中国科学院(1839篇)、美国能源部(1404篇)、法国国家科学研究中心(705篇)、加州大学(680篇)、中国科学院大学(653篇)、最高科研理事会(635篇)、印度理工学院(562篇)、清华大学(519篇)、浙江大学(519篇)、法国研究型大学(488篇)。

中国的科研机构在发文量前10机构中有4所,仅

美国和法国的科研机构同样发布了较多的论文，其发表论文总量各占 20%。同时，交错复杂的共现网

络也表明，各国科研机构之间已经建立了密切的合作关系，正在推进该领域深入的进一步研究，实现从理论到实际，达到实现全球减排目标的伟大探索。由于各国综合国力及实际科研水平不同，个别发展中国家可能相对落后，未来各国科研机构应该筑牢人类命运共同体理念，与部分发展中国家的科研机构开展相关合作，共享学术成果，积极利用国家创新资源，进一步推动创新合作通道的开放，巩固国家之间友好的合作外交关系。[19]



注：图中圆圈大小与机构的发文量呈正比，圆圈之间越粗表示机构间的合作越密切。

3.6 发文作者影响力

国际责任，通过学术论坛等形式促进各国学者之间的技术交流与合作。2021 年 4 月，第六届碳捕集利用与封存国际论坛在北京召开，为他国提供了良好范例。

[20]

普莱斯定律指出, [21]同一主题的一半论文为一群高生产能力作者所撰, 这一作者集合的数量上约等于全部作者总数的平方根。本文共统计到 38705 篇文章, 共有 68049 名作者, 取其平方根为 260 名。根据统计, 前 260 名作者共计参与了 20387 篇论文, 占论文总数的 52.67%, 已超过半数。这表明 CO₂ 捕获领域的核心作者群已初步形成。

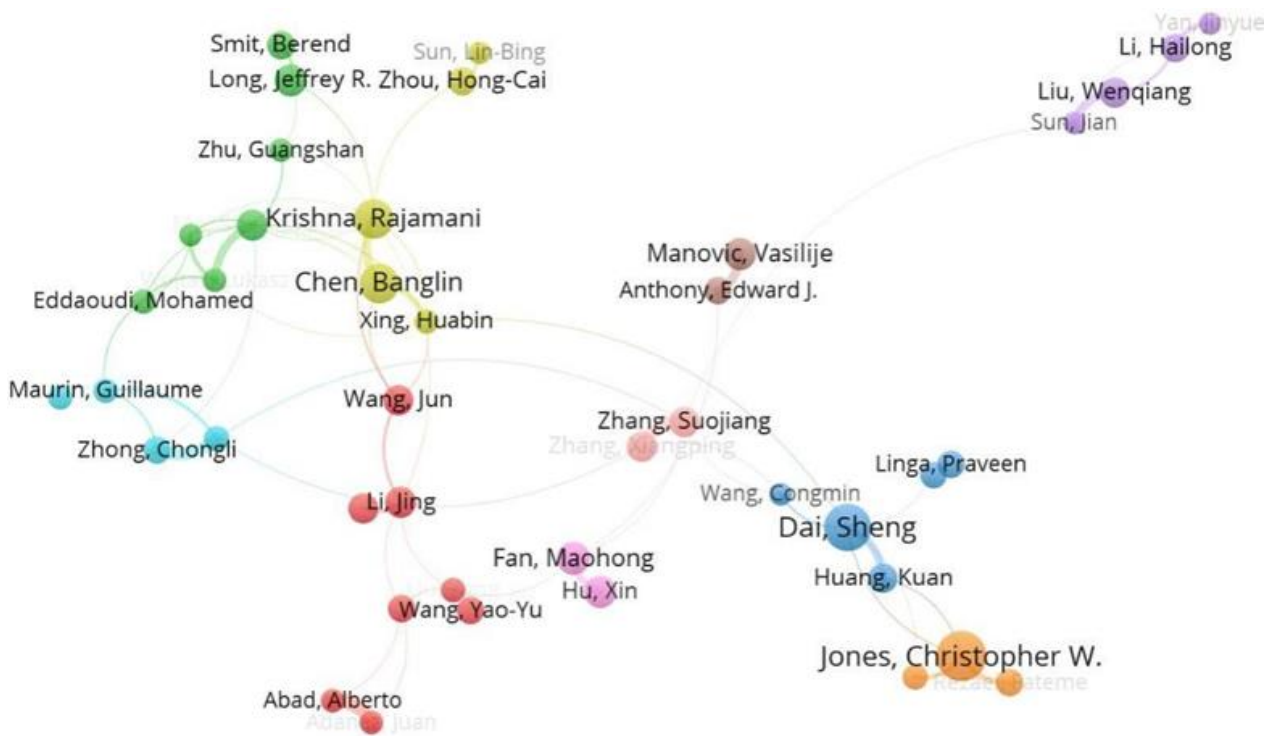


图6 作者的合作网络分析

表 4 为发文量和被引次数（文章所属作者有多人的，仅以第一作者计入）前 10 名的作者。根据统计，发文量排名前 10 的作者中，中国学者有 9 位，足可以看出国家对 CO₂ 捕获研究工作的支持以及国内学者的研究热情，但排名前 10 的高被引作者中中国学者仅占 10%。中国学者在进行相关领域研究时，应注重成果质量，实现产出的资源共享。此外，发文作者与被引作者数排名前 10 的作者（仅以第一作者计入）没有重合的作者，说明 CO₂ 捕获领域的研究仍存在着不少困难，难以实现高效与高质量产出的兼得，CO₂ 捕获研究前途光明但曲折。

表 4 发文量和被引次数排名前 10 的作者

排序	发文作者	发文量/篇	被引作者	被引数
1	Zhang Y	266	Chu, Steven	2307
2	Wang Y	242	Nugent, Patric	1687
3	Liu Y	235	Leung, Dennis Y. C.	1634
4	Liu J	205	Rogelj, Joeri	1615
5	Zhang L	196	Adanez, Juan	1582
6	Li J	191	Lin, Song	1576
7	Li Y	191	Burtch, Nicholas C	1566
8	Liang ZW	172	Bui, Mai	1494
9	Kim J	166	Boot-Handford, M. E.	1431
10	Wang J	166	Samanta, Arunkuma	1291

4 研究热点与发展趋势

4.1 研究热点分析

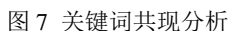
文献的关键词位于文献首，反映了该文献的研究领域和大致方向，能够帮助读者初步了解该文献。Callo 等[22]提出共词分析的概念，即通过统计反映文献主题的关键词，根据关键词的出现频率和共现关系（即多个关键词被列入同一篇文献中），利用文献分析软件绘制关键词共现网络图，分析各文献的内在联系，推测研究热度变化趋势。

将全部关键词呈现到共现网络图中，不但难以形成较为清晰的网络，而且也容易将一些无实际意义的词汇纳入统计。根据文献实际数量，将关键词的最小出现频次设置为 137，所统计的 154670 个关键词中有 350 个符合条件。剔除无实际意义的量词，合并同义词汇，最终得到有效词数为 208 个。将筛选后的关键词导入 VOSviewer 进行可视化处理，刻画关键词之间的共现关系，结果如图 6 所示。由此根据关键词聚类，可将目前 CO₂ 捕获领域的研究方向分为三大类。

第 1 类为红色集群，主要关键词有 adsorption（吸附）、metal organic framework（有机金属框架）、synthesis

第2类为绿色集群,主要关键词有 system(系统)、

此外，还有少部分关键词属于蓝色集群，重点关注 CO_2 捕获反应过程分析和理论计算。该部分集群与其他集群相比，关键词较少，且与其他集群关联性较差，表明目前该方向研究相对较少，尚存在缺口，研究对象单一。 CO_2 捕获的反应过程包含物理反应和化学反应，提高反应速率离不开精准的模拟计算，因此，后续该领域应针对设备升级及模拟计算进行更加深入的研究。



关键词的出现时间在一定程度上也反映了 CO₂ 捕获研究热点的演进路径。VOSviewer 软件绘制的主题词聚类时序图根据颜色的变化,可直观地展示研究热点随时间发生的演变,进而推测出 CO₂ 捕获领域的发展趋势。如图 7 所示,可知 CO₂ 捕获领域早期的研究热点集中于吸收剂的选择,如二乙醇胺(DEA)、单乙醇胺(MEA)和碳酸钾等。随着研究的深入,单纯对吸收剂的研究不能满足碳减排的需要,开始寻求更加高效的碳减排方法。图中圆圈内主题词由蓝色向绿色过渡,表明研究热点转向为利用高分子聚合物进行 CO₂

未来 CO_2 捕获可能面临以下方面的挑战：1) 寻找低耗高效的吸收剂仍是研究热点。目前学者正在研究各种吸收剂的组合，以期达到更好的吸收效果。[26, 27] 2) CO_2 捕获过程的反应机理仍待研究深入，国内外对其微观理论计算与模拟方面研究相对较少，过程中真正的催化活性中心和复杂的中间产物还没有通过可靠的表征手段确定。3) CO_2 捕获后的运输与储存问题，由于其对金属材料有强腐蚀性，对运输管道的损耗量严重，寻找合适的防腐防垢的技术也是未来必须解决的问题。[28]

- [8] JIMENEZ-GARCIA M, RUIZ-CHICO J, PENA-SANCHEZ A R, et al. A Bibliometric Analysis of Sports Tourism and Sustainability (2002-2019) [J]. Sustainability, 2020, 12 (7).
- [9] 张泽坤, 万丹, 徐浩, 延卫, 金晓亮. 基于文献计量的电催化还原 CO₂ 研究状况及发展趋势分析 [J]. 环境工程, 2022, 40 (11): 222-230.
- [10] 平新乔, 郑梦圆, 曹和平. 中国碳排放强度变化趋势与“十四五”时期碳减排政策优化 [J]. 改革, 2020 (11): 37-52.
- [11] 孙国旺. 德国 CO₂ 捕获和封存技术发展展望 [J]. 全球科技经济瞭望, 2009, 24 (09): 39-45.
- [12] 王涵宇, 吴思萱, 张扬清, 孙依云, 潘一涛, 曹瑄玮, 张雅萌. 德国推进碳中和的路径及对中国的启示 [J]. 可持续发展经济导刊, 2021, No. 23 (03): 27-30.
- [13] 许悦, 季庆庆. 协同治理视域下高校学术不端行为的治理研究 [J]. 教育理论与实践, 2022, 42 (27): 14-17.
- [14] 甘满光, 张力为, 李小春, 李琦, 陆诗建. 欧洲 CCUS 技术发展现状及对中国的启示 [J]. 热力发电, 2023, 52 (04): 1-13.
- [15] Jiutian Zhang, Zhiyong Wang, Jia Ning Kang, Xiangjing Song, Dong Xu. Several key issues for CCUS development in China targeting carbon neutrality [J]. Carbon Neutrality, 2022, 1 (1).
- [16] 舟丹. 各国对碳减排的态度 [J]. 中外能源, 2022, 27 (08): 78.
- [17] 张德元. 欧盟、日本碳减排路径对中国具有重要借鉴意义 [J]. 中国经贸导刊, 2021, No. 1012 (15): 50-51.
- [18] 张庆阳, 郭明佳. 各国碳减排路线图 (连载六) 韩国: 5 年内争做第七绿色强国 [J]. 环境教育, 2015, No. 176 (05): 63-65.
- [19] 许海东. 论科研院所的国际合作交流工作 [J]. 中国市场, 2021, No. 1072 (09): 96-97.
- [20] 付晓. 第六届碳捕集利用与封存国际论坛在京召开 [J]. 中国会展 (中国会议), 2021, No. 488 (08): 18.
- [21] Ben Purvis, Yong Mao, Darren Robinson. Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins [J]. Sustainability Science, 2019, 14 (3).
- [22] CALLON M, COURTIAL J P, TURNER W A, et al. From translations to problematic networks: an introduction to co-word analysis [J]. Social Science Information, 1983, 22 (2): 191-235.
- [23] 惠武卫, 姬存民, 赵合楠等. 低浓度 CO₂ 捕集技术研究进展 [J]. 天然气化工—C1 化学与化工, 2022, 47 (04): 19-24+98.
- [24] 宿辉, 崔琳. 二氧化碳的吸收方法及机理研究 [J]. 环境科学与管理, 2006 (08): 79-81.
- [25] WANG Y B, WANG J T, MA C, et al. Fabrication of hierarchical carbon nanosheet-based networks for physical and chemical adsorption of CO₂ [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 534: 72-80.
- [26] HANDOKO A D, WEI F, JENNDY, et al. Understanding heterogeneous electrocatalytic carbon dioxide reduction through operando techniques [J]. Nature Catalysis, 2018, 1 (12): 922-34.
- [27] 薛博, 刘勇, 王沉等. 碳捕获、封存与利用技术及煤层封存 CO₂ 研究进展 [J]. 化学世界, 2020, 61 (04): 294-297.
- [28] 张俊勇, 孙有才. 碳捕获与封存(CCS)发展前景 [J]. 再生资源与循环经济, 2013, 6 (12): 13-16.
- [29] 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.
- [30] WONG C-S. Science Mapping: A Scientometric Review on Resource Curses, Dutch Diseases, and Conflict Resources during 1993-2020 [J]. Energies, 2021, 14 (15).