

引用格式:岳婷,李梦婷,陈红,等.碳中和研究热点与演进趋势:基于科学知识图谱[J].资源科学,2022,44(4):701-715.[Yue T, Li M T, Chen H, et al. Carbon neutrality research hotspots and evolution trend: Based on the scientific knowledge map[J]. Resources Science, 2022, 44(4): 701-715.] DOI: 10.18402/resci.2022.04.05

碳中和研究热点与演进趋势 ——基于科学知识图谱

岳婷¹,李梦婷¹,陈红^{2,3},龙如银^{2,4},王宇杰¹

(1. 中国矿业大学经济管理学院,徐州 221116;2. 江南大学商学院,无锡 214122;3. 江南大学
国家安全与绿色发展研究院,无锡 214122;4. 江南大学江南文化研究院,无锡 214122)

摘要:碳中和是关系到解决全球环境问题、促进国家经济发展、推动社会可持续发展的重要议题。本文以1991—2021年间Web of Science和中国知网数据库收录的7192篇国际学者发表的英文文献、3778篇中国学者发表的中英文文献为研究对象,运用信息可视化软件CiteSpace,从时间分布、空间分布、研究热点冲积图、关键词共现图谱、关键词聚类图谱等方面,揭示了国内外碳中和研究现状与发展趋势。结果表明:①从时间脉络上看,国内外碳中和演进分为3个阶段:萌芽期(1991—2006年)、发展期(2007—2014年)和繁盛期(2015—2021年);进入21世纪后,国内外碳中和发文量均呈现快速增长趋势,2021年中国碳中和研究爆发式增长,年发文量超1500篇。②从空间分布上看,碳中和研究地区和研究机构呈现多极化发展趋势,美国、中国和英国等国家发文量较高,主要以高校和研究机构为主。③从研究热点上看,围绕基础研究与动态监测评价、技术研发与应用、政策设计与路线图3个重大科学问题,碳中和研究主要从碳足迹、能源、碳捕获与封存技术、生命周期评价、碳交易市场和全球治理等热点展开。④从关键词聚类上看,碳中和相关研究可以从个体、行业、国家3个层面聚类成4个主题:个体碳中和态度与行为、碳中和技术、碳市场与碳金融体系、政策引导与全球治理。本文对每个主题的内涵和研究进展进行梳理,总结出碳中和的研究热点与演进趋势,为中国实现碳中和目标提供理论参考。

关键词:碳中和;计量分析;知识图谱分析;关键词分析;可视化;CiteSpace

DOI: 10.18402/resci.2022.04.05

1 引言

碳中和也称净零碳排放,是为解决气候变暖带来的社会及环境问题而倡导的一项全球性战略^[1]。中国作为全球CO₂排放大国,在2020年9月正式提出将采取更加有力的政策措施,力争2030年前CO₂排放达到峰值,2060年前实现碳中和^[2,3]。随后,中央财经委员会第九次会议再次强调实现碳达峰、碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革,要把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局之

中^[4]。这意味着推进碳达峰、碳中和目标已成为中国可持续发展的重要工作,对中国环境保护和社会经济发展具有重大意义^[5],因此碳中和研究热点与演进趋势愈加受到广泛关注。

对国内外碳中和研究梳理发现,现阶段相关研究主要从减碳技术、可再生能源、碳补偿、碳金融等角度出发,强调了实施碳中和的必要性和重要性。其中,研究综述多集中在碳足迹^[6]、碳减排技术^[7]、碳排放权^[8]、碳市场^[9]和资源安全^[10,11]等方面,部分文献

收稿日期:2021-10-18;修订日期:2022-03-29

基金项目:国家自然科学基金项目(72074211;71603257);国家社会科学基金重大项目(19ZDA107)。

作者简介:岳婷,女,江苏铜山人,博士,副教授,博士生导师,研究方向为行为决策与绿色消费、能源与环境经济政策。E-mail: yueting2729@163.com

通讯作者:龙如银,男,安徽淮南人,博士,教授,博士生导师,研究方向为行为决策与绿色消费、能源与环境经济政策。E-mail: longruyin@163.com

对碳中和领域的现状和发展趋势进行了研究,但受限于文献数据少、时间跨度短^[12],或仅聚焦于制度层面^[13],未能给出基于演化视角的研究发展趋势,未能系统全面地评述碳中和研究并呈现出碳中和研究全貌。因此,亟需对国内外碳中和研究现状及发展趋势进行系统性的研究。

基于此,本文将碳中和研究分为中国研究和国际研究,借助可视化软件 CiteSpace,综合运用科学知识图谱法,对国内外碳中和研究进行分析,揭示国内外碳中和研究现状与发展趋势。首先,通过国内外碳中和研究的年发文量和被引频次分布,总结出时间视角下的碳中和演化趋势,并绘制世界各国碳中和目标时间表;其次,从国家分布、机构分布和期刊发文情况探究碳中和研究的空间分布;然后,通过研究热点冲击图、关键词共现图谱和聚类图谱总结中外碳中和研究热点,并凝练其中的重要科学问题;同时,对热点关键词下的代表性文章进行分析,探究不同关键词的研究情况;然后,对中外共同关注的碳中和主题进行梳理,揭示主题词视角下的碳中和演化趋势;最后,总结碳中和研究现状和研究趋势,并对中国碳中和未来研究进行展望。

2 方法与数据

2.1 研究方法

科学知识图谱将学科研究的发展进程、演变机理以及内在的逻辑关系可视化,是科学计量学的发展与创新^[14]。与传统方法相比,可以更客观、科学、高效地发现学科发展的结构、脉络以及规律^[15]。CiteSpace 软件正是具有上述独特优势的知识图谱绘制工具,是一款专门用于学术文献分析的信息可视化工具^[16],可以对某一学科或领域的文献进行计量,从而探究学科领域的研究热点和变化趋势^[17]。

2.2 数据收集

本文数据来源于中国知网(期刊类型为北大核心、CSSCI 和 CSCD)、Web of Science 核心数据库中的 SCI-EXPANDED 和 SSCI 数据库,文献类型选择 Article。首先,碳中和与净零碳排放均指人类活动造成的 CO₂ 排放量与吸收量在一定时期内达到平衡^[5,18],实现碳中和首先需要计算 CO₂ 排放量即核算碳足迹;其次,实现碳中和的途径包括进行碳补偿和采用低碳或零碳技术^[19]。因此,综合学者们对碳中和的定义,本文从碳中和的近义词、实现碳中和

的过程和方法等角度确定以下关键词:碳中和(carbon neutral/carbon neutrality)、零碳排放(zero carbon emission)、碳足迹(carbon footprint)、碳补偿(carbon offsets),检索时间截至 2021 年 12 月 25 日,通过人工筛选,剔除不符合主题的相关文章,并清除重复的文章。

本文按照文章作者是否是中国学者进行分类,将国际学者发表的 7192 篇外文文献作为国际碳中和研究的发文数量;将中国学者发表的 1747 篇外文文献和 2031 篇中文文献合并在一起,作为中国碳中和研究的发文数量,共计 3778 篇。其中,中外学者共同发表的合作文章能体现中外学者在碳中和研究上的努力,因此将这类文章同时归于中国和国际碳中和研究,即 7192 篇国际碳中和研究和 3778 篇中国碳中和研究均包含 482 篇中外学者合作文章。在分析碳中和研究时间分布和空间分布时,将国际和中国碳中和研究进行整合,并清除重复的文章。

3 时空知识图谱与研究趋势分析

3.1 时间分布

对碳中和文献的年发文量和被引频次进行梳理,有助于分析中外碳中和研究的现状与趋势。碳中和研究的文献最早发表于 1991 年,为了分析碳中和研究的成果情况,本文统计了 1991—2021 年发表的文献情况(图 1)。由图 1 可知,国际与中国碳中和研究的发文数量呈现持续增加的趋势,从时间脉络上可以将碳中和的演进历程划分为 3 个阶段。

第一阶段:1991—2006 年的萌芽期,国际与中国碳中和研究的发文量均呈现缓慢上升趋势,但每年发文数量不超过 10 篇。1992 年联合国环境与发展会议(UNCED)通过《联合国气候变化框架公约》(以下简称《公约》)^[20],《公约》的提出推动了碳中和研究的起步,在此阶段研究的学者较少,研究力度不大,发表的论文数量不多。

第二阶段:2007—2014 年的发展期,国际与中国碳中和研究的发文数量大量增加,国际年发文量增速明显大于中国年发文量,国际碳中和研究年发文量达到 400 篇,中国年发文量达到 150 篇。《京都议定书》于 2005 年正式生效^[21],激发了学者们对碳中和研究的热情,由于研究和论文发表需要一定的周期,因此在第一阶段并未呈现发文量的明显增长,而是到第二阶段才开始出现发文量的攀升。

2022年4月

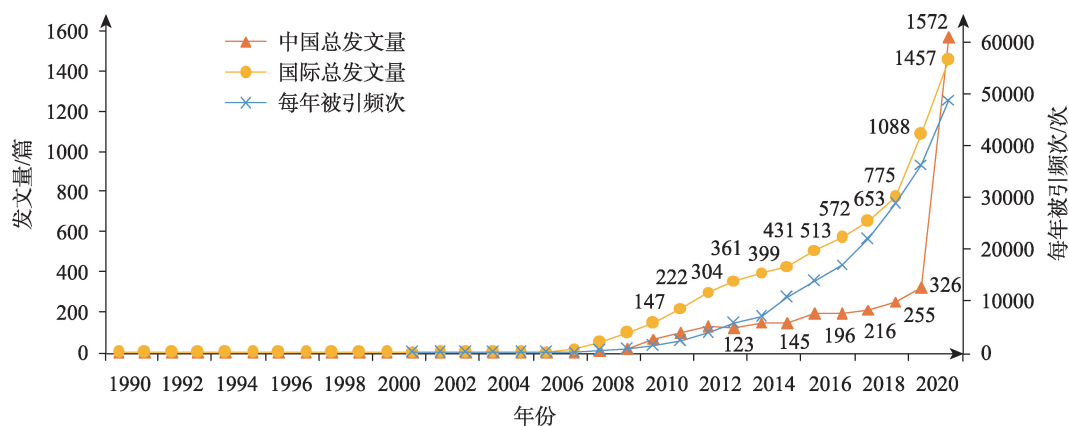


图1 1991—2021年碳中和研究的年发文量和被引频次分布

Figure 1 Distribution of annual publications and citation frequency of carbon neutrality research, 1991–2021

注:图中2021年数据为2021年1月1日—2021年12月25日的数据。

2009年哥本哈根世界气候大会主要关注“责任共担”这一问题,越来越多的国家和地区加大了气候治理的投入力度。同时,国内外也掀起了碳中和相关领域的研究热潮,研究学者不断增加,发文数量迅速增多,研究范围也在不断拓展。

第三阶段:2015—2021年的繁盛期,国际与中国碳中和研究的发文量整体上呈现快速上升趋势,年发文量均已超过1400篇;在提出2060年碳中和目标之后,中国碳中和研究爆发性增长,2021年(此处以2021年12月25日前的结果统计,约等同于全年)发文量超过国际碳中和年发文量。2015年通过的《巴黎协定》为2020年后应对全球气候变化作出了安排,提出将21世纪全球气温升幅限制在 2°C 以内^[22]。这掀起了碳中和领域研究的高潮,此阶段发文数量激增,研究深度也在进一步深入。中国发文量不断增加表明中国学者对碳中和研究热点的关注,也表明中国实现碳中和目标的决心和毅力,中国正从不同领域探索实现碳中和的方法路径。

3.2 空间分布

本部分从碳中和研究的国家分布、机构分布与期刊发文情况来探究碳中和研究的时空分布。为提高数据准确性,将中国碳中和研究和国际碳中和研究进行整合,并清除重复的文章。

考察碳中和相关研究地区分布及国家合作情况,生成了碳中和研究国家合作网络图谱,如图2。由图2可知,检索到的全部文献包含165个国家或地区,网络整体密度仅为0.0884,这表明不同国家之

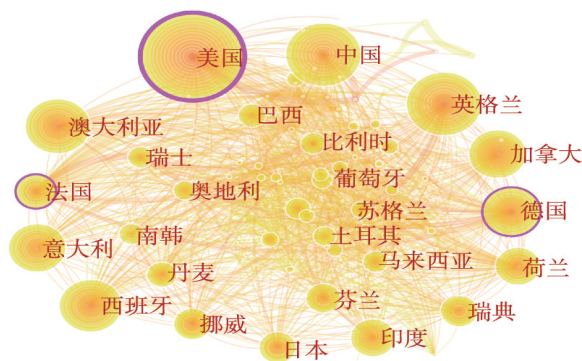


图2 碳中和研究国家合作网络

Figure 2 National collaborative network for carbon neutrality research

间合作较多;从节点的大小可以看出,碳中和研究地区分布呈现多极化发展趋势,其中美国发文量最多($n=1645$),其次是中国、英国、西班牙和意大利等;从每个节点的中心性(节点外圈线颜色越深,中心性越高)来看,美国具有最高的中心度(中心性=0.22),其次是法国、德国、西班牙和英国等,表明这些国家在碳中和研究中发挥着重要的枢纽作用;而中国的中心度较低,中心性仅为0.03,说明中国在碳中和研究中的地位仍需进一步加强。

考察碳中和研究机构分布与合作情况,生成了碳中和研究机构合作网络图谱,如图3。全球共有572个机构或组织发表过碳中和相关文章,数量众多,但各机构、组织之间的合作较少,网络整体密度仅为0.01。中国科学院发文量最多($n=191$),其次是清华大学、中国科学院大学、阿尔托大学和悉尼大



图3 碳中和研究机构合作网络

Figure 3 Institutional collaboration network for carbon neutrality research

学等;同时,中国科学院也具有最高的中心度(中心性=0.13),其次是欧盟委员会、悉尼大学、清华大学和剑桥大学等,这些机构或组织在碳中和研究中发挥着重要作用。

此外,为了考察发表碳中和主题的期刊情况,按照同一期刊发文数量将期刊进行排序(表1),本表只列举了排名前10的期刊。由表1可知,排名前3的发文期刊有 *Journal of Cleaner Production*、*Sustainability* 和 *Applied Energy*。期刊 *Journal of Cleaner Production* 主要研究方向包括环境科学、清洁生产与技术、可持续发展和可持续消费等;期刊 *Sustainability* 主要研究方向涉及环境、文化、经济和社会的可持续发展,而期刊 *Applied Energy* 研究主题则包括能源节约、能源资源的利用、能源过程的分析 and 优化等。从发文的期刊分布特点来看,发表碳中和相关主题的期刊绝大多数集中在能源、经济、生产、环境和可持续发展等相关领域。

3.3 时间分布下的研究趋势分析

萌芽期(1991—2006年):自工业革命以来,世界人口迅速增加和工业经济蓬勃发展使自然资源消耗速度明显加快,经济发展与资源环境之间的冲突日益尖锐,开始有学者关注环境问题尤其是全球变暖问题^[23]。1992年《公约》中提出,各缔约国应控制温室气体的排放,将温室气体浓度维持在一个稳定水平,从而尽量延缓全球变暖效应^[20]。1992年UNCED颁布的《关于森林问题的原则声明》中强调了森林在全球碳循环中的重要作用以及碳汇在减轻温室气体排放中的潜在作用^[24]。此后,有关全球变暖、森林碳减排的文献逐年增多。其中,Cannell^[25]从全球大气循环的角度分析砍伐森林对大气CO₂浓度以及对物种多样性的影响,并提出减少森林砍伐以降低碳释放、增加造林以存储更多的碳、使用森林产品替代化石燃料等措施。1997年的《京都议定书》使更多的学者关注到温室气体排放问题^[21]。

发展期(2007—2014年):随着社会的发展,学者们的研究领域更加广泛,开始从不同的角度研究碳中和。在能源燃料方面,由于以粮食作物为基础的生物燃料受到广泛批评,学者将注意力转向以木材为基础的第二代生物燃料,并探究生物能源的性质及碳排放的情况^[26]。在电力系统方面,欧盟于2008年提出使用可再生能源和提高节能效率两个目标^[27],有关可再生能源、能源政策、能源安全和能源利用效率的研究不断发展。在技术方面,有学者开始研究碳捕获与封存(CCS)技术,不断探索CCS技术的理论和实施的可行性^[28]。在碳交易市场方面,《京都议定书》建立起灵活减排合作机制^[21],学者

表1 碳中和研究发文期刊数量

Table 1 The number of publications on carbon neutrality research

排名	来源出版物	数量	占比/%
1	<i>Journal of Cleaner Production</i>	995	11.13
2	<i>Sustainability</i>	411	4.59
3	<i>Applied Energy</i>	208	2.32
4	<i>Energies</i>	195	2.18
5	<i>Science of the Total Environment</i>	187	2.09
6	<i>International Journal of Life Cycle Assessment</i>	154	1.72
7	<i>Journal of Environment Management</i>	138	1.54
8	<i>Energy</i>	128	1.43
9	<i>Resources Conservation and Recycling</i>	114	1.27
10	<i>Construction and Building Materials</i>	112	1.25

2022年4月

们不断探索碳交易模式及其可行性,并不断丰富碳金融体系。在环境行为方面,越来越多的学者开始关注公民个人和家庭在减碳过程中的作用,Bristow^[29]运用陈述偏好法,分析并预测公众对个体碳交易和碳税的接受程度。

繁盛期(2015—2021年):学者们围绕《巴黎协定》从不同方面对碳中和进行更深入的探索。有学者使用能源模型分析不同行业的能源需求,从而探索欧盟实现气候中性的途径^[30]。也有学者模拟分析不同政策情景下的碳排放、能源消费和GDP的演进趋势,并提出要进一步强化能源与气候目标的协同设计^[31]。《2030可持续发展议程》进一步强调了环境目标和全球治理在全球发展中的重要性^[32]。《巴黎协定》签订之后,陆续有国家和地区提出了与碳中和或净零排放相关的减排目标^[18],《碳中和联盟声明》提出了21世纪中叶实现零碳排放的承诺^[33]，“欧洲绿色协议”提出欧洲于2050年将在全球范围内率先实现碳中和,这为全球气候治理树立了良好的榜样^[34]。截至2022年1月,共有136个国家提出碳中和或净零碳排放目标,覆盖全球88%的排放和85%的人口^[35],其中14个国家或组织将碳中和目标写入法案,30个国家将碳中和写入政策文件,世界各国碳中和目标时间如表2所示。总体来看,此阶段的碳中和研究脉络愈发清晰,对各国实现碳中和目标具有重要的实践价值。

4 内容知识图谱与研究趋势分析

4.1 研究热点冲积图

为了探究碳中和研究热点随时间发展的变化趋势,运用CiteSpace软件每5年提取碳中和研究关键词并生成路径网络,研究热点冲积图如图4。

冲积图的每一列代表一个时期的关键词网络,内容相关的关键词聚集在一起形成关键词节点,并以方块的形式表示,块的高度反映关键词节点在该时期出现的比例^[36]。关键词节点按频数大小从下到上排序,块的颜色按照关键词节点的排序情况进行标注,每一列中块的位置越低、序号越小,则排名情况越高,说明该关键词节点的重要性越高。两列之间块与块的连接体现出不同时期关键词的变化趋势。冲积图可以通过方块之间的联系与线条的粗细变化,形象地表现碳中和关键词随时间变化的动态过程。

由图4可知,在2021年关键词网络中,排名第1的关键词节点出现频率为6.5%,该节点包括economic assessment、direct air capture、separation和carbon footprint等关键词,其中economic assessment与前一阶段2016—2020年中的process simulation、economic analysis和CO₂ utilization等关键词有所关联。1991年研究主题词仅包括carbon cycle、logging residue、carbon balance和energy,而2021年碳中和研究主题词非常丰富,研究范围逐渐广泛,涉

表2 世界各国碳中和目标时间表

Table 2 Timeline of carbon neutrality targets for countries around the world

进展情况	实现目标时间	国家和地区
已立法	2045年	德国、瑞典、葡萄牙
	2050年	日本、法国、英国、韩国、加拿大、西班牙、爱尔兰、丹麦、匈牙利、新西兰、欧盟
已颁布政策文件	2030年	马尔代夫、巴巴多斯
	2035年	芬兰
	2040年	奥地利、冰岛、安提瓜、巴布达
	2050年	美国、意大利、智利、希腊、巴拿马、克罗地亚、立陶宛、哥斯达黎加、斯洛文尼亚、乌拉圭、卢森堡等
	2060年	中国、巴西、乌克兰、斯里兰卡
已声明或已承诺	2050年	澳大利亚、泰国、马来西亚、越南、南非、阿拉伯联合酋长国、哈萨克斯坦、以色列、爱沙尼亚、安道尔
	2060年	俄罗斯联邦、沙特阿拉伯、尼日利亚、巴林
	2070年	印度
已提议或讨论中	2030年	孟加拉国、南苏丹
	2045年	尼泊尔
	2050年	巴基斯坦、阿根廷、哥伦比亚、瑞士、比利时、秘鲁、埃塞俄比亚、缅甸、安哥拉、苏丹、斯洛伐克等
	2060年	印度尼西亚

表3 国际与中国碳中和研究关键词统计

Table 3 International and Chinese carbon neutrality research keywords statistics

排名	频次	关键词(国际研究)	中心性	年份	频次	关键词(中国研究)	中心性	年份
1	2188	carbon footprint	0.03	2007	486	碳足迹	0.10	2010
2	1161	life cycle assessment	0.01	2008	186	影响	0.05	2011
3	718	greenhouse gas emission	0.01	2010	173	生命周期评价	0.04	2012
4	628	impact	0.01	2010	171	能源	0.14	2009
5	612	energy	0.01	1995	168	CO ₂ 排放	0.09	2011
6	582	emission	0.02	2002	161	温室气体排放	0.05	2014
7	576	system	0.01	2008	156	排放	0.06	2012
8	543	climate change	0.03	2003	134	系统	0.02	2013
9	520	performance	0.01	2009	132	表现	0.10	2013
10	501	environmental impact	0.01	2008	123	消费	0.04	2011
11	398	consumption	0.01	2008	119	能源消费	0.03	2006
12	379	management	0.01	2011	119	模型	0.04	2013
13	369	model	0.04	2003	112	中国	0.05	2006
14	261	CO ₂ emission	0.02	2009	97	管理	0.08	2012
15	247	sustainability	0.03	2009	88	气候变化	0.09	2006

print)、二氧化碳(carbon dioxide)和气候变化(climate change)等词的中心性较高,属于关键节点,说明这些词与其他词联系较为紧密。将关键词进行归纳总结,可以凝练成3个重大科学问题:基础研究与动态监测评价(包括碳足迹、温室气体排放、生命周期评价、环境影响等关键词)、技术研发与应用(包括能源、模型、碳捕获与封存技术等关键词)、政策设计与路线图(包括管理、政策、碳金融体系、协同治理等关键词)。

4.3 关键词下的高被引文章分析

对关键词包含的高被引文章进行分析,可以进一步探究不同关键词中的研究情况。

国际碳中和研究中,关键词“碳足迹(carbon footprint)”的最高被引文献是学者Peters^[37]于2011年发表的“Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008”(被引808次),文章开发了与贸易相关的全球CO₂排放数据库,发现通过国际贸易从发展中国家向发达国家的净排放转移大幅增加。该文章被引频次较高,说明学者们对文章内容认可度较高,对碳排放与国际贸易领域关注度较高。关键词“排放(emission)”的最高被引文献是学者Hertwich^[38]于2009年发表的“Carbon footprint of nations: A global, trade-linked analysis”(被引891次),文章发现在全球范围内,72%的温室气体与家庭消费有关,18%与投资有关,以及10%与政府

消费有关。关键词“生命周期评估(life cycle assessment)”中,2018年的“A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass”和2012年的“A review of footprint analysis tools for monitoring impacts on sustainability”被引频次较高,说明这两篇研究综述能较好地总结生物质热和足迹分析工具,在相关研究领域有较高的认可度。

中国碳中和研究中,关键词“碳足迹(carbon footprint)”的最高被引文献是学者Benjaafar、李彦志和Daskin于2013年共同发表的“Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models”(被引597次),文章将碳排放参数与决策变量相联系,构建既考虑成本又考虑碳足迹的决策模型^[39];文章“Consumption-based emission accounting for Chinese cities”被引频次次之,计算了中国13个城市基于消费的CO₂排放量,发现城市消费不仅会增加城市内部的碳排放,还会通过区域间贸易导致其他地区的碳排放增加^[40]。关键词“影响(impact)”的最高被引文献是“Increased plastic pollution due to COVID-19 pandemic: Challenges and recommendations”(被引149次),文章分析了由于新冠肺炎疫情造成的过度使用一次性塑料对生活环境和人类健康的影响^[41]。虽然该文章于2021年发表,但其被引频次较高,说明学者们非常关注新冠肺炎疫情和塑料污染问题,并积极探索解决环境问

题的策略。

总体上看,国际与中国碳中和研究均关注碳足迹、碳补偿、碳减排和减排技术等相关内容,表明各国都意识到碳减排的重要性,都在为实现碳中和而共同努力。外国学者较早地研究碳减排和碳足迹等问题,在相关领域有较高的认可度,但中国学者能够结合本国国情,在碳足迹和碳中和等领域不断研究,国际认可度也在逐渐提高。

4.4 研究热点聚类图谱

分别对国际与中国碳中和相关研究的高频关键词进行聚类分析,CiteSpace软件通过聚类分析法自动生成聚类标签,各聚类标签中包含诸多关键

词。国际碳中和研究形成30个聚类,中国碳中和研究形成24个聚类,分别对关键词数量最多的前8个聚类进行深入分析。聚类分析中的时间线视图可以体现聚类标签所包含的关键词情况和时间跨度,关键词时间线图将各关键词聚类从上到下按大小进行排列,并将各聚类内所含的关键词按出现时间从左到右排列,国际与中国碳中和研究关键词时间线图如图7、8所示。

由图7和图8可以发现,国际与中国碳中和研究热点均集中于“碳足迹”主题,国际学者最早在2000年关注碳足迹,包括 case study、life cycle assessment、carbon capture、hydrogen production 等关

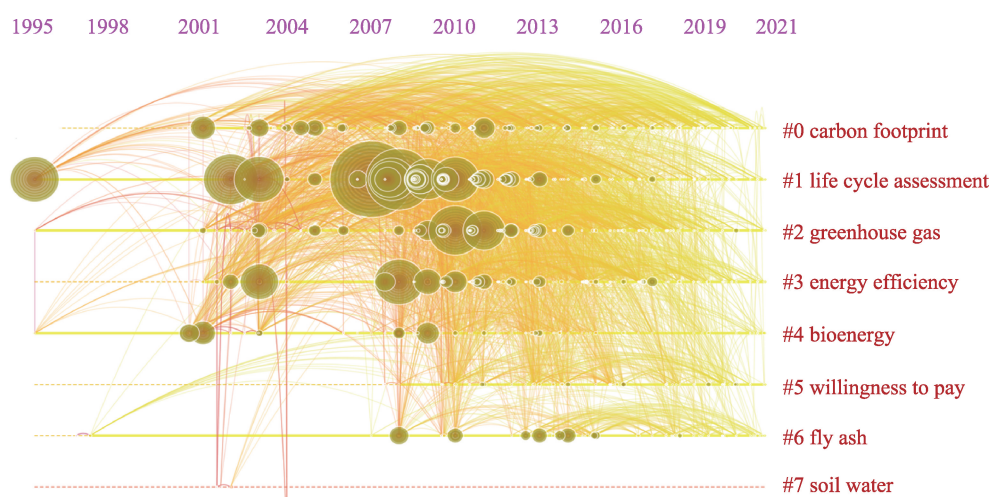


图7 国际碳中和研究关键词时间线视图

Figure 7 Timeline view of international carbon neutrality research keywords

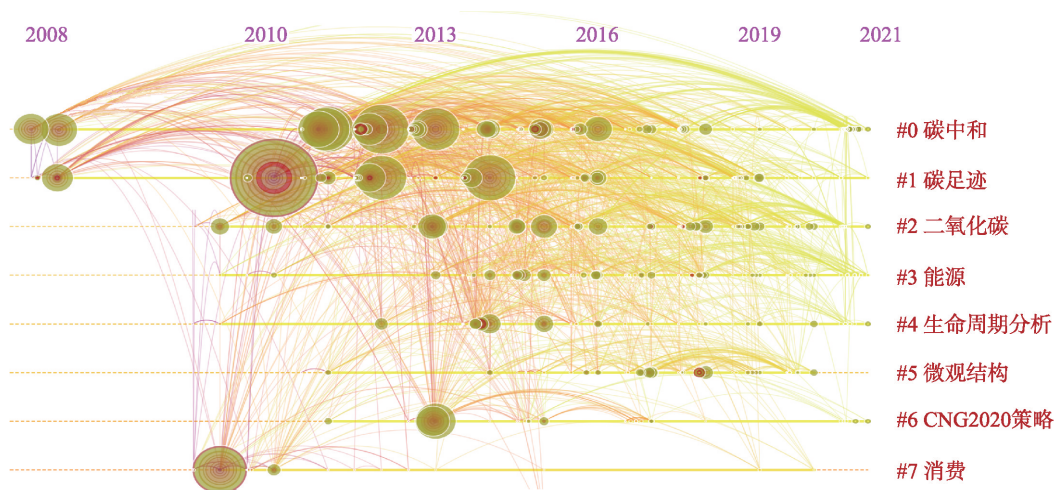


图8 中国碳中和研究关键词时间线视图

Figure 8 Timeline view of Chinese carbon neutrality research keywords

2022年4月

键词;中国学者则于2006年开始关注,研究关键词包括碳捕获、碳排放、碳足迹比较、生命周期分析等。

国际碳中和研究中,#1聚类下的关键词包括 case study、greenhouse gas emission、carbon footprint analysis 等;#3聚类包括 carbon footprint、circular economy、energy efficiency 等;#7聚类包括 atmosphere、carbon dioxide exchange、summer drought、evaporation 等关键词。在中国碳中和研究中,#1聚类包括碳捕获、碳中和、碳足迹比较、生命周期分析等关键词;#5聚类包括水泥含量、碳足迹、可持续建筑材料、矿渣混凝土等。可以看出,聚类分析形成的聚类包含重复的关键词,较难探究主题词分布下的研究趋势,因此本文将从个体、行业、国家3个层面进行深入分析。

4.5 主题词分布下的研究趋势分析

结合国内外碳中和聚类图谱和聚类标签,将高频关键词按照个体、行业、国家3个层面进行分析。碳中和关系到公民的低碳行为、碳中和技术的创新与应用、国家的政策引导,本文将从个体碳中和态度与行为、碳中和技术、碳市场与碳金融体系、政策引导与全球治理这4个方面分析讨论。

(1) 个体碳中和态度与行为

该团簇包括环境行为、环境态度、绿色消费、低碳行为等词语。随着人民生活水平的不断提高,个体能耗消费导致的CO₂排放已成为CO₂排放的重要来源,研究发现个体也是碳减排的潜在贡献者,改变居民的出行行为可以有效减少CO₂的排放^[42]。越来越多的学者开始关注个体对碳减排效果的影响,研究主要包括个体消费碳排放测度、个体碳排放影响因素、低碳政策对居民低碳行为的影响等。研究发现,个体环境行为会受到心理因素、情境因素和社会人口特征因素的影响。其中,心理因素包括态度、环境价值观、环境问题认知、环境责任意识等因素^[43];情境因素包括人际影响、社会规范、法律法规、环境污染状况等因素^[44];社会人口特征因素主要研究年龄、收入、性别、受教育水平、家庭规模等统计特征变量对公民环境行为的影响。

(2) 碳中和技术

碳中和技术可以分为节能减排技术、零碳排放技术和负排放技术:节能减排技术包括改进生产工

艺、提高能源利用效率和减少能源消耗等;零碳排放技术主要指零碳排放清洁能源技术,包括风力发电、光伏发电、核能等技术;负排放技术主要是从大气中捕获、封存和利用CO₂,包括生态碳汇技术和碳捕获利用与封存技术(Carbon Capture Utilization and Storage, CCUS)。

能源安全、国家安全、环境安全 and 经济安全是建立在未来能源问题得以解决的基础上,低碳绿色生产的核心要义在于清洁生产、循环生产、无污染生产、低碳生产和可持续生产^[45]。从绿色清洁生产的角度来看,一方面要提高资源利用效率、减少能源的消耗,另一方面要减少副产物和废弃物的产生。不同行业都在积极探索有效的节能减碳手段,钢铁行业是中国主要的能源消费及CO₂排放行业,常用的减碳手段是使用短流程代替长流程工序、推广氧气高炉与氢能冶炼^[46]。钢铁行业的低碳绿色发展主要围绕调整能源结构、推广节能减排技术、优化工艺结构 and 应用CCUS技术这4项技术^[47]。水泥行业作为传统的基础工业,已成为重要的碳排放源,新型水泥熟料冷却技术、集成模块化窑衬技术和CCUS技术具有较高的减排潜力^[48]。

随着全球人口和经济不断增长,世界能源消耗量依旧大幅增加,以可持续的方式满足全球能源需求,不仅需要提高能源利用效率,还需要新能源的广泛应用。在可再生能源中,太阳能是迄今为止最大的可开发资源,由于太阳能的分散性和不稳定性,太阳能必须被捕获、转换和存储才能被利用^[49]。太阳能发电技术包括光伏发电技术和光热发电技术:光伏发电是利用光伏效应进行发电,是商业化程度较高的成熟技术,适用于小规模 and 大规模应用;光热发电是利用太阳光辐射所产生的热能进行发电,价格昂贵但经济效益较高,适用大规模应用^[7]。风能作为清洁可持续的能源,建设周期短,装机规模灵活,但仍存在初始投资成本高、占用大片土地 and 产生污染物排放等问题^[50]。生物质能作为可再生能源的重要组成部分,目前有关生物质能的研究包含4个方面:生物质能的开发与利用潜力、利用生物质能对生态环境的影响、生物质能开发利用技术、生物质能开发利用可行性分析与发展前景^[51]。

《中国2030年能源电力发展规划研究及2060年展望》中提到,中国应立足新发展阶段,落实新发

展理念,创建新发展格局,统筹经济社会、能源电力、生态环境等方面安全协调发展,推动能源电力系统根本性变革,加快构建绿色低碳可持续发展的现代能源体系^[52]。落基山研究所提出综合能源规划的基本思路,指出应从能源供给侧向能源需求侧转变,重点关注建筑、交通、工业三大类的城市能源消费部门,涵盖的能源形式包括电力、燃气、燃煤、供热、供冷、氢能等,不同种类的能源能够相互替代和阶梯利用^[53]。

负排放技术作为各种排放路径中的的关键技术,对实现碳中和目标具有重要意义^[54]。碳捕获与封存(Carbon Capture and Storage, CCS)技术作为具有大规模减排潜力的技术,是实现碳中和目标不可或缺的重大技术,一直以来受到了广泛的关注。该技术项目最早是麻省理工学院于1989年发起,该项目将化石燃料燃烧产生的CO₂进行捕获,并长期储存在天然地下层中,从而减少温室气体排放^[55]。目前关于CCS技术的研究包括以下几个方面:CCS技术的公众认知、CCS技术发展的模拟仿真、CCS项目运营与应用、CCS产业化发展的障碍^[56]。当前CCS技术并未进行大规模化的商业运作,主要存在开发应用的成本障碍、技术发展的障碍、碳泄露风险以及相关政策、制度和法律法规不完善等^[57]。

负排放技术还包括陆地碳去除与封存、沿海生态系统蓝碳、直接空气捕集法(Direct Air Capture, DAC)^[7]和生物质能-CCS(即结合生物质能和碳捕集与封存的技术)。陆地碳去除与封存是通过植树造林、进行森林管理和提高土壤的碳储量等方法吸收与封存碳^[58];蓝碳是指增加红树林、盐沼湿地、海草床等通过海洋生态系统吸收并固定的碳,以生物碳和沉积物碳为储存形式,拥有巨大的固碳潜能^[59];DAC是直接从空气中捕获CO₂并将其压缩注入储存库,DAC具有很高的去碳潜力^[60]。

(3)碳市场与碳金融体系

该团簇包括碳金融、碳交易市场、碳交易模式、碳排放权交易、国际排放贸易机制、联合履行机制和清洁发展机制等词语。

碳金融市场是温室气体排放权交易及其相关的各种金融活动和交易的总称,碳金融交易来源于《联合国气候变化框架公约》。此外,《京都议定书》还规定了3种补充性的市场机制:联合实施机制、国

际排放权交易和清洁发展机制^[21]。学者们普遍认为市场化手段相对于行政管制手段更具优势,特别是在静态的成本效率对比、促进污染控制技术创新的激励、调动经济主体积极性等方面^[61]。

作为碳金融体系的核心,碳排放权交易机制是一种市场化的碳减排手段,碳排放配额分配是碳市场平稳运行的基础和核心。目前排放权交易有总量控制与交易模式(绝对控制)和基线与信用额模式(相对控制)两种。欧盟排放交易体系属于总量交易,该方案实施的关键在于总量的确定和初始额度的分配;基线与信用额模式是以项目为基础的碳排放控制模式,计算实际排放量,若实际排放量少于基线,经过核证后可进行出售^[62]。全球各碳交易市场的初始配额方式可分为无偿配额分配(包括历史法和基准线法)和有偿配额分配(包括拍卖法和定价法),不同的配额方式各有利弊^[63]。

碳减排的一个重要途径是参与碳排放权交易,其中个体碳交易机制是削减消费端碳排放的重要手段^[64]。实行个体碳交易会造造成高收入群体的福利受损和低收入群体的福利增加,有助于促进社会公平^[65]。个体碳排放权交易的概念是学者Fleming在紧缩与趋同框架下提出的,政府部门应设定一个碳减排目标,并用合理的方式将其分配给每个消费者,即通过市场交易机制促使消费者主动降低碳排放^[66]。个体碳交易机制需要考虑个人碳账户管理、市场运作、监管、许可证分配和交易成本等因素^[29]。

(4)政策引导与全球治理

该团簇包括全球治理、命运共同体、碳中和目标、环境政策、气候政策、能源政策和政府监督等词语。环境问题具有范围广、危害大、影响深等问题,需要各国政府、国际组织、非政府组织和公民个人积极参与,共同努力,协调解决^[67]。目前虽然在环境领域取得了一定的进展,但生态环境恶化,自然资源被不可持续地使用,气候问题依旧严峻。因此,应对和解决全球环境问题需要发展全球多元环境主体并构建全球环境合作机制^[68]。国内学者整理出全球主要国家或集团适应气候变化而采取的国际合作机制,梳理国际合作的重点领域,总结中国开展国际合作面临的问题并提出相应的建议^[69]。同时,2015年可持续发展峰会上正式通过的《改变我们的世界:2030年可持续发展议程》包含17项可持

2022年4月

续发展目标,其将环境目标视为和社会、经济目标同等重要的可持续发展关键^[32]。在2019年联合国气候行动峰会上,66个国家提出“碳中和”目标,并组成“气候雄心联盟”。2020年5月,世界环境日启动了“零排放竞赛”,449个城市21个地区参与其中^[70],表明越来越多的国家和地区参与到环境治理的行动中。2021年10月,中国国务院颁布的《2030年前碳达峰行动方案》从总体要求、主要目标、重点任务、国际合作、政策保障和组织实施6个方面提出了碳达峰具体行动方案^[71]。

5 结论与政策启示

5.1 结论

本文对碳中和领域文献进行计量分析,以可视化的形式呈现了碳中和研究现状、演进历程及主题分布,厘清了碳中和研究的整体知识框架,以期为未来研究打好基础。

(1) 时间分布

碳中和研究发文量总体呈现波动上升趋势,从时间脉络上可以将碳中和研究划分为3个阶段:萌芽期(1991—2006年)、发展期(2007—2014年)和繁盛期(2015—2021年)。进入21世纪后,碳中和发文量快速增长,目前碳中和研究处于繁盛期,2021年中国碳中和研究呈爆发式增长,有更多的学者关注碳中和研究,该领域研究具有广阔的前景。

(2) 空间分布

研究机构和研究方向都呈现多极化发展趋势。国家分布和国际合作上,碳中和研究主要集中在美国、中国、英国、西班牙和意大利等国家,以高校和研究所以主,集中在中国科学院、清华大学、中国科学院大学和阿尔托大学等。研究期刊大多集中在能源、经济、生产和环境等领域,发文量前3名的期刊为*Journal of Cleaner Production*、*Sustainability*、*Applied Energy*。

(3) 主题词研究趋势

关键词共现图谱和聚类图谱表明,碳中和研究主题呈现出多层次、多主体、多系统的趋势,碳中和研究领域逐渐扩大,研究热点可归纳为3个重大科学问题:基础研究与动态监测评价(包括碳足迹、温室气体排放、生命周期评价、环境影响等关键词)、技术研发与应用(包括能源、模型、碳捕获与封存技术等关键词)、政策设计与路线图(包括管理、政策、

碳金融体系、协同治理等关键词)。为具体探究主题词分布下的研究趋势,对个体碳中和态度与行为、碳中和技术、碳市场与碳金融体系、政策引导与全球治理4个主题的相关研究进行了梳理和分析。

5.2 政策启示

自2020年中国提出碳中和目标之后,中国学者越来越关注碳中和领域,中国碳中和研究呈爆发式增长,2021年发文总量超过了国际碳中和年发文量,这说明碳中和领域研究未来仍是中国经济和社会发展的重要议题。国际合作、学科融合、碳中和技术和碳交易市场4个方面值得关注:

(1) 不断深化国际合作

随着经济全球化趋势的增强,环境问题、气候问题依旧严峻,可持续发展是人类共同面对的问题,环境问题是全球各国亟需解决的问题,这需要各国政府、机构、组织和公民积极参与,深化国际合作,构建全球环境合作机制。有关政府可以学习其他国家的碳中和政策体系,积极探索符合中国国情的碳中和路线;高校、研究院所以与国际机构开展国际合作,携手解决实现碳中和目标道路上的共同问题。

(2) 积极推进学科融合

研究结果显示,碳中和研究范围不断扩大、研究内容不断丰富,碳中和研究集中在工学、化学、环境科学、经济学和管理学等学科领域,包括能源、经济、生产、技术、管理和环境等主题,碳中和的实现涉及到林业、工业、建筑、能源、交通、环境和经济等多个行业。随着研究的进一步深入,碳中和的实现必然需要各行业、各领域通力合作,也需要各学科内部、学科之间的交叉合作。相关政府部门应积极建立跨部门协调合作机制,联合高校、科研院所、行业进行协同合作,统筹考虑双碳目标下的多学科交叉融合方案。

(3) 创新和应用碳中和技术

碳中和技术是实现碳中和目标中必不可少的一步,是支撑碳中和目标实现的关键。各行业和研究院所以应积极开展碳中和技术的创新和推广应用,推动能源电力系统根本性改革,构建绿色低碳可持续发展的现代能源体系。加强对节能减排技术、新能源技术、负排放技术和碳捕获与封存技术的研究,解决碳中和技术的成本和发展障碍,提高经济效益,

扩大碳中和技术的应用范围。政府部门也应及时完善相关政策制度和法律法规,促进碳中和技术的创新与应用。

(4)建立和完善碳交易市场

碳排放权交易作为一种市场化的碳减排手段,在全球呈现快速发展趋势,国外已形成相对成熟的碳交易体系,覆盖电力、工业、建筑和航空等多个行业。2021年,中国《碳排放权交易管理办法(试行)》的正式施行标志着全国统一的碳交易市场正式启动。但中国碳交易市场仍处于试运行阶段,存在各试点市场表现差异较大、市场交易量和规模较小、参与主体较少、相关法律法规不健全等问题。因此,中国碳市场要进一步完善市场机制,建立健全相关法律制度,借鉴国际碳市场的发展经验;增加交易品种、丰富碳金融产品;纳入机构投资者和个人投资者,促进市场主体多元化,提高碳市场交易活跃度,推动交易顺利进行。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Global Warming of 1.5 °C[R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018.
- [2] 中国政府网. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[N/OL]. (2020-09-22) [2021-05-20]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm. [Portal of the Central People's Government of the People's Republic of China. Xi Jinping Delivers an Important Speech at the General Debate of the 75th Session of the United Nations General Assembly[N/OL]. (2020-09-22) [2021-05-20]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm.]
- [3] 蔡博峰, 曹丽斌, 雷宇, 等. 中国碳中和目标下的二氧化碳排放路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(1): 7-14. [Cai B F, Cao L B, Lei Y, et al. China's carbon emission pathway under the carbon neutrality target[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(1): 7-14.]
- [4] 中国政府网. 习近平主持召开中央财经委员会第九次会议[N/OL]. (2021-03-05) [2021-05-03]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm. [Portal of the Central People's Government of the People's Republic of China. Xi Jinping presided over the ninth meeting of the central financial and economic commission[N/OL]. (2021-03-05) [2021-05-03]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm.]
- [5] 王灿, 张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理, 2020, 12(6): 58-64. [Wang C, Zhang Y X. Implementation pathway and policy system of carbon neutrality vision[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12(6): 58-64.]
- [6] 付伟, 罗明灿, 陈建成. 碳足迹及其影响因素研究进展与展望[J]. 林业经济, 2021, 43(8): 39-49. [Fu W, Luo M C, Chen J C. Research progress and prospects of carbon footprint and its influencing factors[J]. Forestry Economics, 2021, 43(8): 39-49.]
- [7] 刘萍, 杨卫华, 张建, 等. 碳中和目标下的减排技术研究进展[J]. 现代化工, 2021, 41(6): 6-10. [Liu P, Yang W H, Zhang J, et al. Prospects for emission reduction technologies under carbon neutral targets[J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(6): 6-10.]
- [8] Wang Y, Li J, Lee L C, et al. A review of input-output model application hot spots in the energy and environment fields based on co-words network analysis[J]. Environmental Reviews, 2019, 27(4): 567-574.
- [9] Hua Y, Dong F. China's carbon market development and carbon market connection: A literature review[J]. Energies, 2019, DOI: 10.3390/EN12091663.
- [10] 吴巧生, 周娜, 成金华. 战略性关键矿产资源供给安全研究综述与展望[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1439-1451. [Wu Q S, Zhou N, Cheng J H. A review and prospects of the supply security of strategic key minerals[J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1439-1451.]
- [11] 邵留国, 蓝婷婷. 伴生性关键矿产资源安全研究综述与展望[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1452-1463. [Shao L G, Lan T T. Review of the by-product critical minerals resource security research and prospects[J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1452-1463.]
- [12] 邓明君, 罗文兵, 尹立娟. 国外碳中和理论研究与实践发展述评[J]. 资源科学, 2013, 35(5): 1084-1094. [Deng M J, Luo W B, Yin L J. A systematic review of international theory, research and practice on carbon neutrality[J]. Resources Science, 2013, 35(5): 1084-1094.]
- [13] 张雅欣, 罗荟霖, 王灿. 碳中和行动的国际趋势分析[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 88-97. [Zhang Y X, Luo H L, Wang C. Progress and trends of global carbon neutrality pledges[J]. Climate Change Research, 2021, 17(1): 88-97.]
- [14] 陈悦, 刘则渊, 陈劲, 等. 科学知识图谱的发展历程[J]. 科学学研究, 2008, 26(3): 449-460. [Chen Y, Liu Z Y, Chen J, et al. History and theory of mapping knowledge domains[J]. Studies in Science of Science, 2008, 26(3): 449-460.]
- [15] 王岑岚, 尤建新. 大数据文献评述: 基于软件CiteSpace的可视化研究[J]. 科技管理研究, 2017, 37(21): 180-189. [Wang C L, You J X. Literature review of big data: Visualization analysis based on the software CiteSpace[J]. Science and Technology Management Research, 2017, 37(21): 180-189.]
- [16] 彭飞, 富宁宁, 胡伟, 等. 国内外海洋资源研究知识图谱解析及启示[J]. 资源科学, 2020, 42(11): 2047-2061. [Peng F, Fu N N, Hu W, et al. Analysis and enlightenment of knowledge map of marine resources research at home and abroad[J]. Resources Science, 2020, 42(11): 2047-2061.]
- [17] 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-

2022年4月

- 253.]
- [18] 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.]
- [19] 李岚, 王恒, 黄佳鑫. 中外碳中和领域研究现状及前景: 基于CiteSpace的文献计量分析[J]. 林业经济, 2021, 43(10): 66–79. [Li L, Wang H, Huang J X. The current situation and prospects of carbon neutral: Bibliometric analysis based on CiteSpace[J]. Forestry Economics, 2021, 43(10): 66–79.]
- [20] The United Nations. United Nations Framework Convention on Climate Change[R]. Rio de Janeiro: United Nations Conference on Environment and Development, 1992.
- [21] The United Nations. Kyoto Protocol[R]. Tokyo: United Nations Framework Convention on Climate Change, 1997.
- [22] The United Nations. The Paris Agreement[R]. Paris: 2015 Climate Conference in Paris, 2015.
- [23] Putz F E, Pinard M A. Reduced-impact logging as a carbon-offset method[J]. Conservation Biology, 1993, 7(4): 755–757.
- [24] The United Nations. Declaration on the Principles of Forest Management[R]. Rio de Janeiro: United Nations Conference on Environment and Development, 1992.
- [25] Cannell M G R. Forests, Kyoto and climate[J]. Outlook on Agriculture, 1999, 28(3): 171.
- [26] Holtmark B. Harvesting in boreal forests and the biofuel carbon debt[J]. Climatic Change, 2012, 112(2): 415–428.
- [27] European Community. Second Strategic Energy Review: An EU Energy Security and Solidarity Action Plan[R]. Brussels: European Community, 2008.
- [28] Haszeldine R S. Carbon capture and storage: How green can black be?[J]. Science, 2009, 325(5948): 1647–1652.
- [29] Bristow A L, Wardman M, Zanni A M, et al. Public acceptability of personal carbon trading and carbon tax[J]. Ecological Economics, 2010, 69(9): 1824–1837.
- [30] Capros P, Zazias G, Evangelopoulou S, et al. Energy-system modelling of the EU strategy towards climate-neutrality[J]. Energy Policy, 2019, DOI: 10.1016/j.enpol.2019.110960.
- [31] 莫建雷, 段宏波, 范英, 等.《巴黎协定》中我国能源和气候政策目标: 综合评估与政策选择[J]. 经济研究, 2018, 53(9): 168–181. [Mo J L, Duan H B, Fan Y, et al. China's energy and climate targets in the Paris Agreement: Integrated assessment and policy options[J]. Economic Research Journal, 2018, 53(9): 168–181.]
- [32] 董亮. 协同治理: 2030年可持续发展议程与应对气候变化的国际制度分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(4): 16–25. [Dong L. Synergetic governance: Relations of international institutions for 2030 SDGs and climate change[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(4): 16–25.]
- [33] Carbon Neutrality Coalition(CNC). Plan of Action: Carbon Neutrality Coalition[R/OL]. (2018–09–28) [2021–05–03]. <https://www.carbon-neutrality.global/plan-of-action/>.
- [34] 徐庭娅, 柴麒麟.《欧洲绿色新政》解读及对中国的启示借鉴[J]. 世界环境, 2020, (2): 63–67. [Xu T Y, Chai Q M. Interpretation of Europe's Green New Deal and its enlightenment and reference significance to China[J]. World Environment, 2020, (2): 63–67.]
- [35] Energy and Climate Intelligence Unit. Net Zero Tracker[R/OL]. (2021–11–09) [2022–01–03]. <https://zerotracker.net/>.
- [36] Rosvall M, Bergstrom C T. Mapping change in large networks[J]. Plos One, 2010, DOI: 10.1371/journal.pone.0008694.
- [37] Peters G P, Minx J C, Weber C L, et al. Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108(21): 8903–8908.
- [38] Hertwich E G, Peters G P. Carbon footprint of nations: A global, trade-linked analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(16): 6414–6420.
- [39] Benjaafar S, Li Y, Daskin M. Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013, 10(1): 99–116.
- [40] Mi Z F, Zhang Y K, Guan D B, et al. Consumption-based emission accounting for Chinese cities[J]. Applied Energy, 2016, 184: 1073–1081.
- [41] Patrício Silva A L, Prata J C, Walker T R, et al. Increased plastic pollution due to COVID–19 pandemic: Challenges and recommendations[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, DOI: 10.1016/j.cej.2020.126683.
- [42] Yuan R, Rodrigues J, Behrens P. Driving forces of household carbon emissions in China: A spatial decomposition analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 932–945.
- [43] 滕玉华, 陈丹妮, 饶华. 节能意识与农村居民日常间接节能行为的一致性研究[J]. 生态经济, 2021, 37(8): 105–111. [Teng Y H, Chen D N, Rao H. Research on consistency of energy conservation consciousness and rural residents' daily indirect energy conservation[J]. Ecological Economy, 2021, 37(8): 105–111.]
- [44] 郭清卉, 李世平, 南灵. 环境素养视角下的农户亲环境行为[J]. 资源科学, 2020, 42(5): 856–869. [Guo Q H, Li S P, Nan L. Farming households' pro-environmental behaviors from the perspective of environmental literacy[J]. Resources Science, 2020, 42(5): 856–869.]
- [45] Zhang P L, Duan N, Dan Z G, et al. An understandable and practicable cleaner production assessment model[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 187: 1094–1102.
- [46] 赵紫薇, 孔福林, 童莉葛, 等. 基于3060目标的中国钢铁行业二氧化碳减排路径与潜力分析[J]. 钢铁, 2022, 57(2): 162–174. [Zhao Z W, Kong F L, Tong L G, et al. Analysis of CO₂ emission reduction path and potential of China's steel industry under the “3060 target”[J]. Iron & Steel, 2022, 57(2): 162–174.]
- [47] 董金池, 汪旭颖, 蔡博峰, 等. 中国钢铁行业CO₂减排技术及成本研究[J]. 环境工程, 2021, 39(10): 23–31. [Dong J C, Wang X Y, Cai B F, et al. Mitigation technologies and marginal abatement cost for iron and steel industry in China[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(10): 23–31.]

- [48] 朱淑瑛, 刘惠, 董金池, 等. 中国水泥行业二氧化碳减排技术及成本研究[J]. 环境工程, 2021, 39(10): 15–22. [Zhu S Y, Liu H, Dong J C, et al. Mitigation technologies and marginal abatement cost curves for cement industry in China[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(10): 15–22.]
- [49] Lewis N S, Nocera D G. Powering the planet chemical challenges in solar energy utilization[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2006, 103(43): 15729–15735.
- [50] 向宁, 王礼茂, 屈秋实, 等. 基于生命周期评估的海、陆风电系统排放对比[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 745–755. [Xiang N, Wang L M, Qu Q S, et al. Comparison of emissions from offshore and on-shore wind power systems based on life cycle assessment[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 745–755.]
- [51] Buchholz T, Hurteau M D, Gunn J, et al. A global meta-analysis of forest bioenergy greenhouse gas emission accounting studies[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2016, 8(2): 281–289.
- [52] 曹艺严, 陈济, 刘秉祺, 等. 电力增长零碳化(2020–2030): 中国实现碳中和的必经之路[R]. 北京: 落基山研究所(美国)北京代表处, 2021. [Cao Y Y, Chen J, Liu B Q, et al. Zero Carbonization of Electricity Growth(2020–2030): China's Only Way to Achieve Carbon Neutrality[R]. Beijing: Rocky Mountain Institute Beijing (USA) Representative Office, 2021.]
- [53] 李婷, 郝一涵, 王萌, 等. 城市落实“2060年碳中和”国家战略的创新路径: 以零碳为目标的综合能源规划[R]. 北京: 落基山研究所(美国)北京代表处, 2020. [Li T, Hao Y H, Wang M, et al. An Innovative Path for Cities to Implement the National Strategy of “Carbon Neutrality by 2060”: Comprehensive Energy Planning with Zero Carbon as the Goal[R]. Beijing: Rocky Mountain Institute Beijing (USA) Representative Office, 2020.]
- [54] Bui M, Adjiman C S, Bardow A. Carbon capture and storage (CCS): The way forward[J]. Energy & Environmental Science, 2018, 11(5): 115–115.
- [55] Asif M, Suleman M, Haq I, et al. Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption and hybrid system: Current status and challenges[J]. Greenhouse Gases: Science & Technology, 2018, 8(6): 998–1031.
- [56] Wilberforce T, Olabi A G, Sayed E T, et al. Progress in carbon capture technologies[J]. The Science of the Total Environment, 2021, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143203.
- [57] Roefs P, Moretti M, Welkenhuysen K, et al. CO₂-enhanced oil recovery and CO₂ capture and storage: An environmental economic trade-off analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 239: 167–177.
- [58] 沈维萍, 陈迎. 气候行动之负排放技术: 经济评估问题与中国应对建议[J]. 中国科技论坛, 2020, (11): 153–161. [Shen W P, Chen Y. Negative emissions technologies to address climate change: Economic assessment issues and China's response[J]. Forum on Science and Technology in China, 2020, (11): 153–161.]
- [59] 隋玉正, 陈小璇, 李淑娟, 等. 海岸带蓝碳时空演变及其服务价值评估: 以胶州湾为例[J]. 资源科学, 2019, 41(11): 2119–2130. [Sui Y Z, Chen X X, Li S J, et al. Spatiotemporal change of coastal blue carbon and its service value evaluation: A case study of Jiaozhou Bay[J]. Resources Science, 2019, 41(11): 2119–2130.]
- [60] Fasihi M, Efimova O, Breyer C. Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 224: 957–980.
- [61] 赵永斌, 丛建辉, 杨军, 等. 中国碳市场配额分配方法探索[J]. 资源科学, 2019, 41(5): 872–883. [Zhao Y B, Cong J H, Yang J, et al. An innovative allowance allocation method in China's unified national emissions trading scheme[J]. Resources Science, 2019, 41(5): 872–883.]
- [62] Carmona R, Fehr M, Hinz J, et al. Market design for emission trading schemes[J]. SIAM Review, 2010, 52(3): 403–452.
- [63] 王勇, 王丁玉, 陈彦汝. 不同配额分配方式对中国碳交易市场运行的影响: 基于流动性、波动性与有效性视角的考察[J]. 资源科学, 2021, 43(12): 2503–2513. [Wang Y, Wang D Y, Chen Y R. Impact of different quota allocation methods on the operation of China's carbon trading market: From the perspective of liquidity, volatility and effectiveness[J]. Resources Science, 2021, 43(12): 2503–2513.]
- [64] Parag Y, Capstick S, Poortinga W. Policy attribute framing: A comparison between three policy instruments for personal emissions reduction[J]. Journal of Policy Analysis and Management, 2011, 30(4): 889–905.
- [65] Fawcett T. Personal carbon trading: A policy ahead of its time?[J]. Energy Policy, 2010, 38(11): 6868–6876.
- [66] Meyer A. Contraction & Convergence: The Global Solution to Climate Change[M]. Cambridge: Green Books, 2000.
- [67] 黄爱宝. 全球环境治理与生态型政府构建[J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2008, (3): 70–76. [Huang A B. Global environmental governance and ecological government construction[J]. Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition), 2008, (3): 70–76.]
- [68] 赵斌. 人类命运共同体理念与全球气候治理创新[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2021, 41(2): 103–110. [Zhao B. The concept of “A Community of Shared Future for Mankind” and innovation in global climate governance[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences), 2021, 41(2): 103–110.]
- [69] 姜晓群, 周泽宇, 林哲艳, 等. “后巴黎”时代气候适应国际合作进展与展望[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(4): 484–495. [Jiang X Q, Zhou Z Y, Lin Z Y, et al. International cooperation on adaptation in post-Paris times: Thoughts and prospects[J]. Climate Change Research, 2021, 17(4): 484–495.]
- [70] UNFCCC. Cities, Regions and Businesses Race to Zero Emissions [R/OL]. (2020–06–05) [2021–05–03]. <https://unfccc.int/news/cities-regions-and-businesses-race-to-zero-emissions>.
- [71] 中国政府网. 国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知 [N/OL]. (2021–10–26) [2021–12–30]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm. [Portal of the Central People's Government of the People's Republic of China.

Circular of the State Council on the Issuance of an Action Plan to
Peak Carbon Emissions by 2030[N/OL]. (2021-10-26) [2021-12-

30]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.]

Carbon neutrality research hotspots and evolution trend: Based on the scientific knowledge map

YUE Ting¹, LI Mengting¹, CHEN Hong^{2,3}, LONG Ruyin^{2,4}, WANG Yujie¹

(1. School of Economics and Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Business, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. Research Institute of National Security and Green Development, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 4. Institute for Jiangnan Culture, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Carbon neutrality is an important issue in addressing global environmental problems, promoting national economic development, and facilitating sustainable social development. This study used the CiteSpace software to analyze the keywords and research hotspots of 7192 English publications by international scholars and 3778 Chinese and English publications by Chinese scholars in the Web of Science and the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) from 1991 to 2021. It revealed the current status and development trend of carbon neutrality research in China and abroad from the aspects of temporal distribution, spatial distribution, keyword co-occurrence map, and keyword clustering map. The results show that: (1) Temporally, carbon neutrality research in China and abroad can be divided into three stages: the emerging period from 1991 to 2006, the development period from 2007 to 2014, and the prosperous period from 2015 to 2021. In the twenty-first century, the number of carbon neutrality-related publications has shown a rapid growth trend, and carbon neutrality research in China showed an explosive growth in 2021, with an annual publication volume exceeding 1500. (2) Spatially, carbon neutrality research areas and research institutions have shown a trend of multi-polarization development. Countries such as the United States, China, and the United Kingdom publish a relatively large number of papers, which are mainly dominated by universities and research institutes. (3) From the perspective of research hotspots, carbon neutrality research focuses on three major scientific issues of basic research and dynamic monitoring and evaluation, technology development and application, and policy design and roadmaps. Carbon footprint, energy, carbon capture and storage technology, life cycle assessment, carbon trading market, and global governance are important research hotspots. (4) From the perspective of keyword clustering, carbon neutrality research can be clustered into four topics from the individual, industry, and country levels: individual attitude and behavior toward carbon neutrality, carbon neutrality technology, carbon market and carbon financial system, and policy guidance and global governance. This study examined the connotation and research status of each topic, and summarized the hotspots and trend of change of carbon neutrality research to provide theoretical and practical help for China to achieve the carbon neutrality goals.

Key words: carbon neutrality; econometric analysis; knowledge map analysis; keyword analysis; visualization; CiteSpace