

碳排放权文献基础与国际发展态势的 可视化研究

——基于科学知识图谱分析

吴 方^{1,2} 王济干² 吴凤平²

(1. 中国药科大学国际医药商学院,江苏南京 211198; 2. 河海大学商学院,江苏南京 211100)

摘 要:借助文献计量学软件 CiteSpace 可视化技术,选择“Web of ScienceTM (SCI/SSCI/AHCI/CPCI)”核心合集作为数据源,以 1990—2016 年有关碳排放权的 2 327 条文献为研究对象,对国际范围内碳排放权领域的文献基础、研究热点和发展态势进行辨识和追踪。研究得出以下结论:近年来,国际碳排放权研究呈现出浓厚的运用量化工具和算法的研究趋势;碳排放分配与交易模型的构建与仿真为碳排放权相关政策的制定提供了理论依据和决策支持,仍是今后的研究热点,且研究对象会更加关注中国;近 30 年国际碳排放权研究可划分为 4 个发展阶段,从第 1 阶段碳排放权研究意识的觉醒期到第 4 阶段碳排放权研究纵深期梳理可见,系统、科学地构建碳排放权制度理念逐渐明晰,定量、深入地分析碳排放强度方法逐渐拓展。这是国际碳排放权研究演进历程中传承、创新的重要体现,也是我国推进低碳发展、建设生态文明建设的重要借鉴和参考。

关键词:碳排放权;文献基础;发展态势;CiteSpace;科学知识图谱

中图分类号:F205 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-4970(2018)04-0052-08

在发展低碳经济的过程中,碳排放权交易制度越来越受国际社会的关注^①。我国作为世界上最大的 CO₂ 排放国之一,制定严格的碳减排目标和有效的碳减排措施受世界瞩目。“十三五”规划纲要明确提出,我国在 2017 年启动全国碳排放权交易,推动建设全国统一的碳排放交易市场。2016 年,我国碳交易的 6 个试点地区(包括深圳、上海、北京、广东、天津和福建),顺利完成履约。截至 2017 年底,碳市场建设在认真总结国外碳市场和国内试点经验的基础上,我国完成了碳排放交易体系的总体设计,已正式启动全国碳排放交易体系,建立全国碳排放权交易市场,成为推动绿色低碳发展的一项重大创新实践。2017 年 10 月 18 日,习近平总书记在十九大报告中明确提出,生态文明建设成效显著,包括大

力度推进生态文明建设全党全国贯彻绿色发展理念的自觉性和主动性显著增强,能源资源消耗强度大幅下降。同时指出,引导应对气候变化国际合作,我国要成为全球生态文明建设的重要参与者、贡献者、引领者。

近年来,国内外关于碳排放研究的综述性文献主要集中在“碳排放测算”“碳排放效率”“碳减排成本”等方面,关于“碳排放权”的国际综述性与前沿性的研究成果甚少,尤其缺少文献精读与可视化分析。为此,以“Web of ScienceTM (SCI/SSCI/AHCI/CPCI)”核心合集作为数据源、1990—2016 年碳排放权的相关文献为研究对象,从半衰期、中心性、高频关键词和突现度等 4 个方面,对国际范围内碳排放权领域的文献基础、研究热点和国际前沿进行辨识

收稿日期:2018-02-03

基金项目:国家自然科学基金项目(41471457);中国博士后科学基金第 56 批面上资助项目(2014M561569);中国药科大学国际医药商学院院长科研基金资助项目(CPUSIPB-LFJJ-04)

作者简介:吴方(1982—),女,河南周口人,副教授,博士后,从事资源配置理论与方法研究。

①国际上有两种碳交易体系:一种是基于配额的碳交易,是为完成《京都议定书》规定的温室气体减排目标,在“总量—贸易”体系下购买,由国家制定、分配(或拍卖)的减排配额;另一种是基于项目的碳交易,它是无减排义务的经济主体之间进行排放权交易的市场,是自发和法律相结合的温室气体减排、注册和交易机制,典型代表就是 2003 年成立的芝加哥气候交易所。

和追踪, 以为后续研究提供一些有价值的借鉴和思考。

一、数据来源与研究设计

1. 数据来源

为对国际碳排放权的知识结构和发展态势进行分析, 选择 Web of Science™ (SCI/SSCI/AHCI/CPCI) 核心合集作为数据源。具体检索方法为: 设置检索主题(carbon emission permits)或主题(carbon allocation rights); 以“ All language”和“ All document types”; 不限制检索结果, 同时, 选择时间跨度为所有年份以确保数据来源的全面性; 索引源为 SCI-EXPANDED、SSCI、A&HCI、CPCI-S、CPCI-SSH、ESCI。经过检索, 得到 2 327 条结果, 将“全纪录与引用的参考文献”以 HTML 格式予以保存。文献更新至 2016 年 12 月 31 日。

2. 研究设计

首先, 通过梳理奠基性文献和关键性文献分析碳排放权研究领域的文献基础; 其次, 根据经典文献整理碳排放权研究的知识结构, 并建立相关的理论框架; 然后, 运用高频关键词的共现分析来展现该领域的研究热点; 最后, 结合突现词监测算法分析未来的国际发展态势。

CiteSpace 又称引文空间, 是一款通过可视化手段分析海量科学知识结构、规律和分布情况的可视化分析软件。这一概念源自 20 世纪 60 年代, Garfield 等首次尝试应用引文分析的方法研制出促进学科发展累积性研究的网络图^[1], 随后, 美国德雷塞尔大学 Chaomei Chen 博士团队^[2]开发的 CiteSpace 软件成为可视化展示某一学科领域文献共被引网络的常用工具^[3]。

二、碳排放权研究的文献基础

分析碳排放权研究的文献基础有助于确定并预测研究前沿和发展趋势。Macka 等在加菲尔德发明的 SCI 基础上预言“论文会因为引证关系而形成网络”^[4], 并由此形成了普赖斯的前沿理论。在此基础上, CiteSpace 创造性地将某研究领域概念化成一个从研究前沿 $\Psi(t)$ 到知识基础 $\Omega(t)$ 的时间映射 $\Phi(t)$ ^[5], 那么, 研究前沿的引文也就成为了相应的知识基础。为了更好地展示该领域的研究基础, 将中心度在 0.01 以上且被引频次和突现性较大的经典文献汇总(表 1), 其主要由早期奠基性文献和关键性文献构成。

表 1 被引经典文献指标信息

序号	年份	作者	半衰期	中心度	频次	突现性
1	2007	IPCC	5	0.31	31	7.33
2	2010	Ellerman	4	0.24	12	3.63
3	1993	Felder S	21	0.24	11	—
4	1989	Raich JW	11	0.19	41	3.88
5	1972	Montgomery WD	42	0.17	32	—
6	1980	Farquhar GD	24	0.16	36	—
7	1960	Coase RH	38	0.14	38	—
8	2007	Litton CM	6	0.12	35	5.18
9	1981	Keyes MR	20	0.12	16	3.36
10	2007	Ainsworth EA	6	0.12	8	—
11	2012	Poorter H	2	0.1	18	6.26
12	2006	Demaily D	6	0.08	15	4.29
13	1989	Farquhar GD	12	0.07	27	—
14	1995	Haynes BE	11	0.07	26	—
15	2001	Hogberg P	5	0.06	31	—
16	2003	Giardina CP	10	0.06	20	—
17	2014	Cui LB	2	0.05	16	—
18	1992	Gower ST	13	0.05	12	—
19	1997	Landsberg JJ	7	0.04	41	—
20	1974	Weitzman ML	34	0.04	26	—
21	2013	Zhou P	3	0.04	23	9.68
22	1991	Agarwal Anil	2	0.04	7	—
23	1989	Nemani RR	12	0.04	5	—
24	1997	Cairns MA	10	0.03	35	—
25	2012	Wei C	4	0.03	19	7.98
26	2002	Sands PJ	2	0.03	14	—
27	2005	Babiker MH	5	0.03	12	—
28	1968	Dales J H	40	0.02	26	—
29	2006	Sijm J	4	0.02	21	5.49
30	1994	Bovenberg AL	5	0.02	11	—

1. 碳排放权研究的奠基性文献

将采集到的题录导入 CiteSpace 软件, 节点类型选为“Cited Reference”, 时间切片(Time Slicing)选择 1 年为筛选周期, 时间范围为 1990—2016 年, 每个时间被引前 10 位的参考文献进入共被引网络图谱, 选择 timeline 视图模式, 并适当调节 Fisheye 值以保持视图信息的可见性, 其他选取系统默认值, 获得包含 1 354 个节点和 1 395 条连线的奠基性文献时间序列的知识网络(图 1)。

文献影响的持久力是衡量奠基性文献的重要指标, 半衰期能够反映文献的老化程度, 因此, 半衰期值越大, 意味着文献越具有影响力。Dales 首次提了排污权交易制度, 他认为, 在环境容量稀缺度提高的背景下, 污染权交易是解决环境资源外部性的有效方案, 主要包括实行排污许可证制度, 且排污许可证是可以转让或买卖交易的^[6]。Montgomery 对污染权交易表示认可, 并将开发的交易算法应用于美国犹他州 Cub 河流域的水质交易市场(WQT), 在该算法中考虑了自然存在于 WQT 市场的 3 种复杂性: 交易商的组合匹配、交易商异质性、减排技术中的离散型^[7]。传统观点认为, 点源排放具有相对较高的减

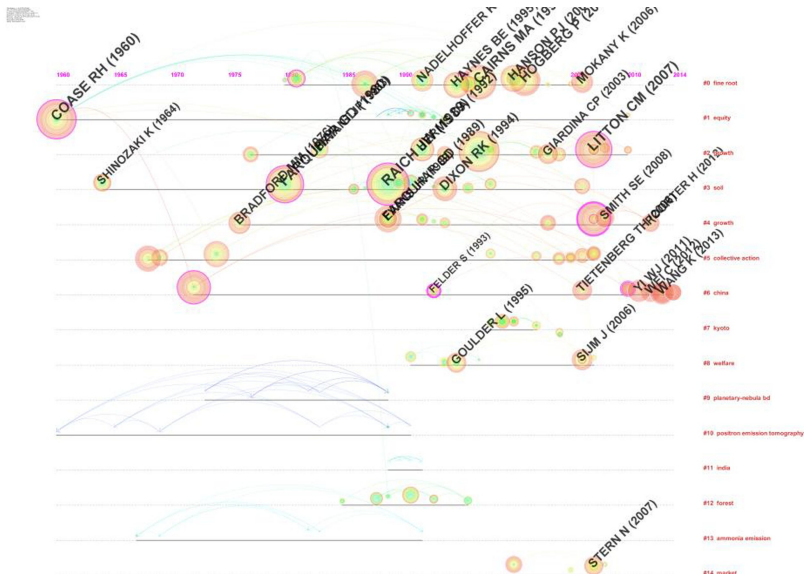


图1 碳排放权研究奠基性文献的时间序列图谱

排成本,因此,这需要非点源在减排中付出更多的努力。诺贝尔经济学奖得主 Coase 首次表达了科斯定理的基本含义,认为如果产权被明确界定,而且没有交易成本,那么双方谈判能够改善资源配置,而最终结果与初始产权配置无关^[8]。以上文献发表较早,且创新性地提出了排放权、交易费用、交易算法等观点,为碳排放权的后续性研究奠定了坚实的基础。

2. 碳排放权研究的关键性文献

基于社会网络分析和结构洞理论,CiteSpace 开发出知识网络中关键节点,即发现知识转折点^[2]。社会网络理论认为,“中心性”和“突现性”高的节点意味着,该点在文献网络中起到较大的影响作用或具有重要的转折意义,对该领域的学术演进发挥着关键基础作用。其中,中心性强是指共现频次较多且中心性超过 0.10 的重要节点,用来说明处于该点的文献在不同知识网络间的发挥桥梁作用的重要程度;突现性高是指引用量突然发生变化的关键节点,

这类节点文献通常代表该研究领域的兴起或转变。

从图 2 可以看出,处在图谱中心位置的最大关键点是 2007 年 11 月 17 日政府间气候变化专门委员会(IPCC)在西班牙正式发布的综合报告(中心度 0.31),指出控制温室气体排放量的行动刻不容缓,为 2012 年后新的国际减排行动框架谈判提供了科学依据,在国际上引发了新一轮对碳排放问题的关注。在图谱的中心位置,Ellerman (2010) 针对欧盟排放交易体系(EU—ETS)试验的第一个阶段(2005—2007)进行的详细的描述和分析,并依此提出了排放量受限时应该如何进行碳排放权交易和定价的问题。由于 EU—ETS 是世界上首个最大的、最重要的多国倡议成员国保护环境的碳排放交易计划,因此 Ellerman 等(中心度 0.24)的研究成果^[9]一时受到学者们的广泛关注。以上文献为碳排放权研究提供了重要的理论依据,澄清了碳排放交易体系的内容,而且,不同学者对碳排放权交易的认识和不

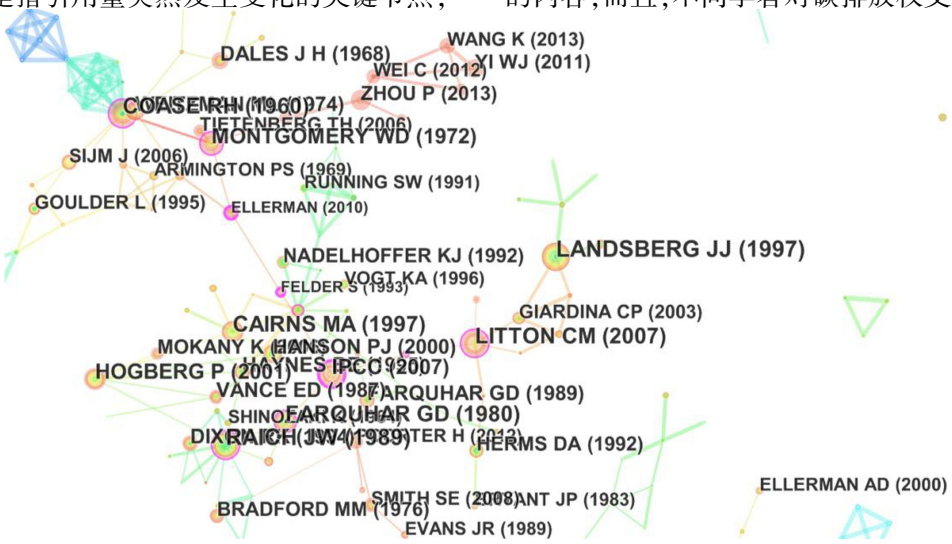


图2 碳排放权研究的关键性文献图谱

“growth”节点为中心的分支上,与净初级

表 2 碳排放权研究热点信息统计

序号	频次	中心度	关键词
1	195	0.18	carbon
2	187	0.10	allocation
3	184	0.03	growth
4	146	0.04	nitrogen
5	143	0.04	emissions
6	137	0.05	model
7	132	0.03	carbon allocation
8	126	0.01	climate-change
9	124	0.04	climate change
10	123	0.04	biomass
11	114	0.02	photosynthesis
12	87	0.01	policy
13	85	0	energy
14	76	0	dynamics
15	70	0	CO ₂ emissions
16	68	0	carbon-dioxide
17	68	0	permits
18	67	0	plants
19	63	0	emissions trading
20	62	0	management
21	59	0	carbon sequestration
22	58	0	organic-matter
23	57	0	temperature
24	53	0	elevated CO ₂
25	51	0	systems
26	51	0	productivity
27	51	0	China
28	49	0	atmospheric CO ₂

生产量、碳排放、氮、生物量有关,说明近阶段碳排放权发展的研究仍然以生物圈的生物量和净初级生产量为立足点,探寻碳排放发展的新趋势;以“permits”节点为中心的分支上,与二氧化物(dioxide)与碳排放有关,说明许可权更多的热点问题仍然集中于碳排放的问题;以“China”节点为中心的分支上,政策与碳排放依然是学者们广泛关注的热点问题。

2. 碳排放权研究的前沿动态

利用 CiteSpace 工具中的文献突现词测量技术,通过分析研究时期内新词短期激增或词频动态显著变化来把握该学科领域的研究前沿。节点类型选为“Burst Terms”,其他选项与前文相同,得到突现词时间分布图谱(图 4)。

根据突现度高低排序,共探测到 12 个突现词(表 3)。近 30 年来,“CO₂ emissions”为词频变化率最高的主题词,其次是“system”和“carbon footprint”。

综合文献基础和突现词时间分布,对 1990 年以来碳排放权研究进行主题归纳。结合突现词时间分布图谱和信息统计表,发现近 30 年的碳排放权研究

主要分为以下 4 个阶段。

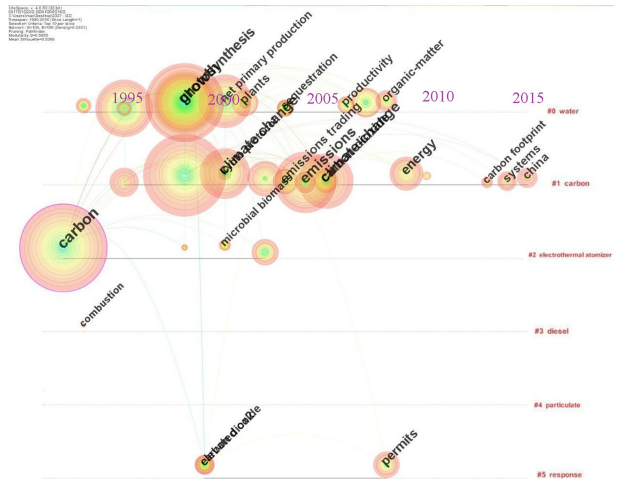


图 4 基于突现词时间分布的碳排放权研究前沿图谱

表 3 碳排放权研究突现词信息统计

序号	突现词	频次	中心度	突现词主题	年份
1	10.82	70	0	CO ₂ emissions	1995
2	9.02	51	0	systems	2014
3	7.59	31	0	carbon footprint	2013
4	5.2	13	0	positron emission tomography	1992
5	4.78	63	0	emissions trading	2003
6	4.62	76	0	dynamics	2007
7	4.49	11	0	semi-permanent cultivation	2004
8	4.23	25	0	combustion	1993
9	4.04	184	0.03	growth	1998
10	4.04	38	0	kyoto protocol	2000
11	3.49	18	0	carbon-monoxide	1993
12	3.36	143	0.04	emissions	2004

第一阶段,研究意识觉醒期。从表 3 和图 4 可知,1995 年“CO₂ emissions”为词频变化率最高的主题词,结合 1995 年之前词频变化率较高的主题词(positron emission tomography, 1992; combustion & carbon-monoxide, 1993)和相关文献梳理可知,该阶段研究者开始关注全球气候变暖背景下,以 UNFCCC 和 Kyoto Protocol 为核心体系下的碳排放机理问题。1988 年,政府间气候变化专门委员会(IPCC)成立;1992 年签署《联合国气候变化框架公约(UNFCCC)》,标志着该领域逐渐引起政府及各界的重视。1994 年,Poul 通过构造丹麦 CO₂ 边际减排成本和减排量间关系的成本曲线,提出减排 CO₂ 并不会增加社会经济负担^[19]。正因为不同区域的 CO₂ 边际减排成本差异,1995 年,Janssen 提出按照历史责任对碳排放权进行初始分配的方式,认为该分配方式将未来碳排放权的初始分配的政策目标与碳排放的历史责任相结合^[20]。

第二阶段,研究奠基期。从表 3 和图 4 可知,2003 年“emissions trading”为词频变化率较高的主题词,结合 1996—2003 年词频变化率较高的主题词

(growth,1998;kyoto protocol,2000)和相关文献梳理可知,1996年,Richels等提出了区域合作的理念,认为应该在全球范围内进行碳排放交易或征收碳税,并通过灵活的跨区域、跨期交易来降低碳减排成本,从而使不同区域的边际减排成本趋于一致^[21]。随后,1997年12月《京都议定书(Kyoto Protocol)》出台,研究者开始关注如何通过建立科学合理的碳交易分配原则来实现可持续发展。1998年,Benestad指出一个国家的碳减排义务应当与其当代经济活动中所需要的能源数量相联系,能源消耗量大的国家碳减排的义务就高,反之则低,这就是能源需求分配方式,该方式体现了碳排放权初始分配中的现实性原则^[22]。Ellerman等借助EPPA模型对国际间碳排放权交易进行模拟,理论上支持了Kyoto Protocol提出的地区间交易的3大灵活机制,并认为碳交易不仅可以促进碳减排、获取收益,而且应该减少交易限制^[23]。2002年,Muller认为,国家碳减排议程主要由发达国家制定,导致各国碳排放总量存在差异^[24]。2003年,Fischer提出初始碳排放权的人口分配方式,即基于平等人均权利模型认为碳排放权的初始分配应该坚持国际公平和个体平等原则^[25],这与同时期Heil等^[26]的结论不谋而合。2003年,Fischer等从经济效率、环保有效性、政治可接受性、创新驱动等方面对碳排放的免费分配和拍卖方式进行了比较^[27]。2002年,Cramton等认为拍卖分配方式比免费分配效率高,碳排放权的拍卖能够提高交易效率和交易的公平性原则^[28]。

第三阶段,研究拓展期。从图3~4、表3可知,2013年“carbon footprint”为词频变化率较高的主题词,结合2004—2013年词频变化率较高的主题词(semi-permanent cultivation & emissions 2004; dynamics,2007)和相关文献梳理可知,该阶段的研究者开始从宏大的战略主题向相关实质性问题发展,很多主题的研究一直持续至今。随着研究的深入,该阶段的研究者开始关注如何结合实证分析、探寻碳排放权的有效配置方法。Sinn最早提出了“绿色悖论”,认为碳排放权有偿配置将导致能源价格上升,此时碳含量高的燃料因需求下降而价格降低^[29]。2008年,Alberola等以燃气轮机联合循环电厂为研究对象,提出天然气的使用成本如果高于煤炭和碳排放权的使用成本之和,则煤炭依然会作为电力企业的选择项^[30]。2010年,Ellerman指出,在欧盟碳排放交易体系中,免费配额将会以成本形式转嫁给消费者,由此所获取的利润远高于碳减排成本,因此免费分配不能反映CO₂减排的边际成本^[9]。Lopomo等均比较赞同Ellerman的观点,认为拍卖分

配方式不仅创新效应优于免费分配方式,而且该方式能够通过企业间的竞价博弈产生初始碳排放权的均衡价格^[31]。2011年,Montero认为,合理的分配方式会对企业创新产生积极影响,反之,对企业创新的影响也成为衡量碳排放权初始分配方式有效性的关键所在^[32]。由于欧盟碳配额(EUA)和核证减排量(CER)^①之间存在着差价,2013年,Nazifi通过变参数分析,从市场缺乏竞争性、对获取核证减排量的约束、对EUA和CER监管的改变,以及CER自身的不确定性4个方面首次对该问题进行了解释^[33]。

第四阶段,研究纵深期。一方面,“system”成为2014年词频变化率较高的主题词;另一方面,“China”成为2015年研究成果的高频词汇。可见,该阶段的研究主题日益丰富,碳排放权成为这一时期研究的焦点,开始深入探究影响因素,并探索一系列新主题。2014年,Zetterberg在欧盟碳交易体系以及交易动机的研究中阐释了“祖父法”,提出该方法主要依据企业所上报的上一年度产量和单位产品的碳排放量,而为了获取更多的额外配额以营利,将会无形中增强企业谎报、多报数据等弄虚作假的动机^[34]。因此,Ahn以韩国电子行业为研究对象,通过评价碳排放初始权分配方法,提出如何碳排放初始权分配制度以确保企业准确、认真地完成碳核查数据统计将成为进一步讨论的重要课题^[35]。

从突现词研究结果可知,越来越多的中国学者开始在国际期刊上以“China”为研究对象产生了大量的研究成果。值得注意的是,2014年的突现词为体系“system”,不同于分配方式、分配原则、碳价格、碳交易等,体系“system”更多代表了系统、科学地构建碳排放权制度的理念。运用经济学的多区域、多部门均衡模型,McKibbin等首次评价了国际碳排放权许可交易体系对控制全球碳排放的影响,并关注该体系对贸易和国际资本流动的影响^[36]。2015年的突现词为碳足迹“carbon footprint”,概念最早源于哥伦比亚大学Wackernagel提出的生态足迹^[37],Finkbeiner认为该概念是全球气候变化中温室气体排放量的一种表征^[38]。2007年,“碳足迹”这一概念在国内出现且研究相对较少,但是目前成为全球普遍认可的应对气候变化、定量分析碳排放强度的研究方法,该趋势正好符合理论演化的规律,“system”是碳排放权制度、因素的统一,“carbon

①核证减排量(Certified Emission Reduction,CER)是清洁发展机制(CDM)项目下允许发达国家与发展中国家联合开展的CO₂等温室气体核证减排量,这些项目产生的减排数额可以被发达国家作为履行他们所承诺的限排或减排量。

footprint”是碳排放权研究方法、视野的拓展,这也是研究趋于全面性、创新性的最好诠释。

四、结 语

借助文献计量学 CiteSpace 软件,选择“Web of Science™(SCI/SSCI/AHCI/CPCI)”核心合集作为数据源,以 1990—2016 年碳排放权的 2 327 条相关文献为研究对象,对近 30 年来国际碳排放权领域研究基础、热点和前沿等问题进行可视化分析。基于科学知识图谱和相关统计数据,分别从国际范围内碳排放权领域的文献基础、研究热点和发展态势 3 个方面展开了分析,得出以下主要结论。

(1)从半衰期和中心性两个角度研究发现:国际碳排放权研究呈现出浓厚的运用定量化工具和算法的研究趋势

从半衰期和中心性两个角度研究 1990 年以来国际碳排放权研究领域的奠基性文献和关键性文献,发现 *Pollution、Property and Price、Markets in licenses and efficient pollution control programs、The Problem of Social Cost、IPCC 第四次评估报告、Price Carbon* 等多部具有奠基性和关键性价值的文献报告。这些文献报告在碳排放权研究领域表现的极为重要,不仅奠定并推动了碳排放权领域的发展和进步,而且在一定程度上引领着碳排放权研究的发展趋势。进一步分析发现,具有国际知名度的专家 Dales J H、Montgomery WD、Coase R H 等于较早时期就创新性地提出了排放权、交易费用、交易算法等观点,这些是碳排放权研究中高影响力成果的主要载体,而且也契合了近年来碳排放权研究日益呈现出浓厚的运用定量化工具和算法的研究趋势。

(2)高频关键词统计结果显示:今后的研究热点仍是碳排放分配与交易模型的构建,而且研究对象会更加中国化

自 DICE 模型提出以来,“model”成为了学者们研究碳排放权的主要借鉴或创新工具。此外,以“growth”节点为中心的分支上,与净初级生产量、碳排放、氮、生物量有关,说明近阶段碳排放权发展的研究仍然在于如何以生物圈的生物量和净初级生产量为立足点,探寻碳排放发展的新趋势;以“permits”节点为中心的分支上,与二氧化碳与碳排放有关,说明许可权更多的热点问题仍然集中于碳排放的问题;以“China”节点为中心的分支上,政策与碳排放依然是学者们广泛关注的热点问题。这一结论可以较好地说明,碳排放分配与交易模型的构建仍是今后的研究热点,通过模型仿真为碳排放权相关政策的制定提供理论依据和决策支持,而且研

究对象会更加关注中国。

(3)突现词测量技术表明:国际碳排放权量化、系统化研究的趋势不断加强,呈现出 4 个发展阶段,且每个发展阶段的研究热点各有侧重

在研究前沿时区视图上,近 30 年国际碳排放权研究呈现出 4 个发展阶段。第一阶段,研究意识觉醒期,该阶段研究者集中于关注全球气候变暖背景下,以《UNFCCC》和《Kyoto Protocol》为核心体系下的碳排放机理问题。第二阶段,研究奠基期,“Kyoto Protocol”和“growth”是这一时期的两大突现主题词,该阶段碳排放权领域的研究者主要关注如何通过建立科学合理的碳交易分配原则来实现可持续发展的问題。第三阶段,研究拓展期,该阶段,碳排放权研究从宏大的战略主题向相关实质性问题发展,很多主题的研究一直持续至今。而且,研究重心更加面向应用价值,聚焦于关注如何结合实证分析、探寻碳排放权的有效配置方法。第四阶段,研究纵深期,该阶段的研究主题日益丰富,系统、科学的构建碳排放权制度理念逐渐明晰,定量、深入分析碳排放强度方法逐渐拓展,这是国际碳排放权研究演进历程中传承、创新的重要体现,也是我国推进低碳发展、建设生态文明的重要借鉴和参考。

参考文献:

[1] GARFIELD E, SHER I, TORPIE R J. The use of citation data in writing the history of science[R]. Philadelphia: Institute for Scientific Information, 1964: 86.

[2] CHEN C. Searching for intellectual turning points: progressive knowledge domain visualization [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(S1): 5303-5310.

[3] CHEN C. Top 10 unsolved information visualization problems[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2005, 25(4): 12-16.

[4] MACKA Y, LINDSAY A, GOLDSMIT H, et al. The science of science : Festschrift Bernal (JD)——society in the technological age [M]. London: Souvenir Press, 1964.

[5] CHEN C. CiteSpace II : detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature[J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2006, 57(3): 359-377.

[6] DALES J H. Pollution property and prices: an essay in policy-making and economics[D]. Toronto: University of Toronto, 1968.

[7] MONTGOMERY D W. Markets in licenses and efficient pollution control programs [J]. Journal of Economic Theory, 1972, 5(3): 395-418.

[8] COASE R H. The problem of social cost[J]. The Journal

- of Law Economics,1960(3):1-45.
- [9] ELLERMAN D,PERTHUIS C D,CONVERY F J. Pricing carbon: the European Union emissions trading scheme [J]. Economics Papers from University Paris Dauphine , 2010 , 43 (1) :69-79.
- [10] ZHOU P L,ZHANG D Q,ZHOU W J,et al. Modeling economic performance of interprovincial CO₂ emissionreduction quota trading in China [J]. Applied Energy, 2013(112): 1518-1528.
- [11] YI W J,ZOU L L,GUO J,et al. How can chin area chits CO₂ intensity reduction targets by 2020? A regional allocation based on equity and development [J]. Energy Policy, 2011(39): 2407-2415.
- [12] CHU W,NI J L, DU L M. Regional allocation of carbon dioxide abatement in China[J]. China Economic Review, 2012(23): 552-565.
- [13] WEITZMAN M L. Prices vs quantities [J]. Review of Economic Studiews, 1974, 41(4):477-491.
- [14] MUSTAFA H B. Climate change policy, market structure,and carbon leakage[J]. Journal of International Economics, 2005(65): 421- 445.
- [15] HARRO V A , FRANK B. European emissions trading and the international competitiveness of energy-intensive industries: a legal and political evaluation of possible supporting measures[J]. Energy Policy, 2007(35): 497-506.
- [16] DAMIEN D, PHILIPPE Q. CO₂ abatement, competitiveness and leakage in the European cement industry under the EUETS: grandfathering vs. output-based allocation[J]. Climate Policy, 2006, 6(1): 93-113.
- [17] CUI L B, FAN Y, ZHU L, et al. How will the emissions trading scheme save cost for achieving China's 2020 carbon intensity reduction target? [J]. Applied Energy, 2014,136(12):1043-1052.
- [18] NORDHAUS W D. Rolling the 'DICE': an optimal transition path for controlling greenhouse gases [J]. Resource and Energy Economics, 1993, 15(1): 27-50.
- [19] POUL E M. Constructing CO₂ reduction cost curves the case of Denmark [J]. Energy Policy, 1994, 22 (11): 964-970.
- [20] JANSSEN R. Greenhouse gas emissions in Norway: do carbon taxes work [J]. Energy Policy, 1995 (32): 493-505.
- [21] RICHEL S R, STURM P. The costs of CO₂ emission reductions: some insights from global analyses [J]. Energy Policy, 1996, 24(10-11): 875-887.
- [22] BENESTA D. Implementation strategies for environmental Taxes[M]. Paris: OECD, 1998.
- [23] ELLERMAN A D, JACOBY H D, DECAUX A. The effects on developing countries of the Kyoto Protocol and CO₂ emissions trading[M]. Washington D C:World Bank Publications, 1998.
- [24] MULLER B. Equity in climate change: the great divide [M]. Oxford :Oxford Institute for Energy Studies, 2002.
- [25] FISCHER C. Combining rate-based and cap-and-trade emissions policies [J]. Climate Policy, 2003 (3): 89-103.
- [26] HEIL M T, WODON Q T. Future inequality in CO₂ emissions and the impact of abatement proposals [J]. Environmental and Resource Economics, 2000, 17 (2): 163-181.
- [27] FISCHER C, PARRY I, PIZER W. Instrument choice for environmental protection when technological innovation is endogenous[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2003(45): 523-545.
- [28] CRAMTON P, KERR S. Tradeable carbon permit auctions: how and why to auction not grandfather [J]. Energy Policy, 2002, 30(4): 333-345.
- [29] SINN H W. Public policies against global warming: a supply side approach [J]. International Tax and Public Finance, 2008, 15(4): 360-394.
- [30] ALBEROLA E, CHEVALLIER J, CHEZE B. Price drivers and structural breaks in European carbon prices 2005—2007 [J]. Energy Policy, 2008, 36 (2): 787-797.
- [31] LOPOMO G, MARX L M, MCADAMS D, et al. Carbon allowance auction design: an assessment of options for the United States [J]. Review of Environmental Economics and Policy, 2011, 5(1): 25-43.
- [32] MONTERO J P. A note on environmental policy and innovation when governments cannot commit [J]. Energy Economics, 2011(33): 13-19.
- [33] NAZIFI F. Modelling the price spread between EUA and CER carbon prices [J]. Energy Policy, 2013(56): 434-445.
- [34] ZETTERBERG L. Benchmarking in the European Union emissions trading system: abatement incentives [J]. Energy Economics, 2014(43): 218-224.
- [35] AHN J. Assessment of initial emission allowance allocation methods in the Korean electricity market [J]. Energy Economics, 2014(43): 244-255.
- [36] MCKIBBIN W J, SHACKLETON R, WILCOXEN P J. What to expect from an international system of tradable permits for carbon emissions [J]. Resource and Energy Economics, 1999, 21(3): 319-346.
- [37] WACKERNAGEL M. Our ecological footprint: reducing human impact on the earth [M]. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996 .
- [38] FINKBEINER M. Carbon foot printing:opportunities and threats [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2009, 14(2):91-94 .

(责任编辑:高 虹)