

国际贸易“碳中和”研究热点领域及其动向

余建辉^{1,2}, 肖若兰³, 马仁锋³, 张文忠^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 宁波大学地理与空间信息技术系暨陆海国土空间利用与治理研究中心, 宁波 315211)

摘要: 碳中和是世界各国面临的共同问题。经济全球化与贸易自由化背景下国际贸易总量快速增长, 伴随着深度国际分工与产业转移, 贸易产品的生产者与消费者在陆表形成严重的空间位移。利用文献计量软件CiteSpace分析国际贸易主题下碳中和相关文献, 揭示国际贸易“碳中和”研究动向。研究发现: (1) 温室气体在全球范围时空演变, 使跨区域、多尺度的全球碳治理变得更加复杂, 发达国家将高污染与低价值链产业转移至各发展中国家, 以生产者责任划分的碳核算原则不再适用于国际贸易合作。(2) 进出口贸易逐渐成为新兴经济体经济发展动力, 全球碳治理应转向新兴经济体与区域一体化, 全球气候政策设计应遵守国际碳市场公平性底线, 不断优化碳排放量核算体系, 完善碳会计方法, 模拟全球碳减排预期效果。重点提高产业部门碳减排意识和产业清洁技术及能源利用效率, 利用多种手段改变生态系统的增汇减碳能力。新兴经济体在承接发达国家技术援助同时, 应重点关注本国能源产业, 发展可再生能源产业, 提高能源的利用效率, 并运用经济政策与金融工具促进本国的气候变化投融资产业发展。全球碳治理应更加注重公平性与国家间的经济发展、环境资源差异, 利用多样的碳治理工具与协商合作方式, 促使更多国家参与全球化或区域一体化的碳治理模式。(3) 中国亟待通过国内多产业、多部门的增汇减排与国际碳减排、碳中和实践, 健全碳市场机制, 提高碳治理水平, 为国际碳治理合作提供“最大公约数”。

关键词: 国际贸易; 碳中和; 碳减排; 国际贸易经济地理学

1978年改革开放以来, 中国经济快速增长, 并通过承接产业转移与国际贸易不断融入全球经济。自2001年中国加入世界贸易组织(WTO)后, 2002年、2011年中国进出口分别增长了4.9倍、4.7倍, 成倍增长的国际贸易总量使中国国内生产总值10年间年均增长10.3%^[1]。随着国际贸易快速发展, 中国在收获经济全球化的红利时, 也付出了巨大的环境代价。第四次国际产业转移浪潮中, 中国作为世界最主要的产业转移承接地, 承接了大量发达国家转移的低端价值链环节或高碳产业。由于中国制造业生产技术效率普遍较低, 环境限制较少, 大量的劳动密集型产业转移加剧了中国对化石燃料和自然资源的消耗, 对环境产生了巨大的影响^[2]。2010年, 中国能源消费需求占全球的20%, 超过美国成为全球能源消费和碳排放首位国。2019年中国碳排放总量占全球总排放量的27%, 2020年在新冠疫情复工影响下中国碳排放量达98.94亿t, 约占全球碳排放总量的30.7%。

收稿日期: 2021-12-12; 修订日期: 2022-02-28

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0406); 浙江省基础公益研究计划项目(LGF22D010002); 国家自然科学基金项目(42171290)

作者简介: 余建辉(1983-), 男, 甘肃张掖人, 博士, 副研究员, 主要从事区域发展与城市人居环境研究。

E-mail: yujh@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 马仁锋(1979-), 男, 湖北枣阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事经济与文化地理学、人居环境与陆海国土空间规划研究。E-mail: marfxf@126.com

近百年温室气体排放已成为气候变化的主要原因,全球气候变化加剧与生态环境不断恶化引起各国对碳减排的高度重视。2020年,中国宣布将力争在2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和。中国承诺实现从碳达峰到碳中和的时间,远短于发达国家所用时间,这意味着中国作为世界上最大的发展中国家将完成全球最高碳排放强度降幅^[3]。在全球化、贸易自由化国际背景下,贸易使得温室气体转移总量大幅增加,跨国贸易形成了生产者、消费者的碳排放空间位移,加剧了全球碳中和治理困境。国际贸易存在的碳排放转移、碳足迹、碳泄露等问题,使得中国在参与国际气候或碳减排谈判中面临巨大压力。然而,各国对气候治理重视程度不一,国家间经济发展水平存在较大差异,全球气候谈判面临碳排放责任认定、碳市场设计公平性等难题。中国碳中和愿景的实现与国际贸易息息相关,作为发展中国家成员的中国如何平衡经济发展与碳治理,积极参与国际碳治理的制度设计与责任认定,在国际贸易各行业中吸收国际先进减碳、固碳经验与技术手段,将成为中国未来国际贸易活动的难点。

1 文献计量数据源与方法

数据源于web of science核心合集,截至北京时间2021年12月31日。检索方式是WOS的主题词检索,以主题“international trade”AND主题“carbon neutral”,主题“international trade”AND主题“carbon neutrality”,主题“international trade”AND主题“carbon offsets”,主题“international trade”AND主题“carbon balance”,主题“international trade”AND主题“carbon equilibrium”检索。时间跨度为所有年份,选择“Article”和“Review”类对文献进行精炼,检索得389篇文献。文献来源国按数量排名前五分别是中国、美国、德国、英国、澳大利亚。来源出版物数量排名前三分别是Journal of Cleaner Production (ISSN: 0959-6526)有26篇,Energy Policy (ISSN: 0301-4215)有25篇,Energy Economics (ISSN: 0140-9883)有17篇。

利用CiteSpace可视化关键词,得如图1所示国际贸易“碳中和”关键词共词网络图谱。关键词共词图谱对于出现频次较高的关键词进行统计,国际贸易主题下“碳中和”研究中“国际贸易”频次排名第一,出现107次,“消耗量”出现60次,“二氧化碳排放量”出现54次,“能源”出现48次。这说明国际贸易“碳中和”研究热点,与二氧化碳排放量、消耗量、能源等术语关联度较高。能源供给是全球二氧化碳排放的主要来源,在国际贸易中碳排放与碳流动主要形成于化石燃料利用。各国贸易研究关注化石燃料的利用率、能源消费结构、碳流动及碳转移量,这对于平衡区域碳预算和理解碳排放驱动因素具有重要意义。

自动聚类 and 自动提取聚类标签词可以帮助我们理解“碳中和”研究文献网络内容,为保证真实性与准确性,根据聚类文献数量选择文献数量大于30的聚类(表1),进而对前5个聚类标签中文献的主题、摘要和关键词进行描述^[4]。与前5个聚类关联度最高的文献分别是:(1)聚类(0)的剪影值为0.802,与该聚类相关度最高的引文《Investigating the effects of renewable energy on international trade and environmental quality》研究了可再生能源对国际贸易和区域环境的影响,使用可再生能源可以提高环境质量,发展可再生能源的政策可以促进区域经济增长,增强经济发展的可持续性^[5],该研究结果为制定生态友好型国际贸易政策提供了理论支持。(2)聚类(1)的剪影值为0.830,与该聚类相关度最高的引文《Sustainable economic activities, climate change, and carbon risk: An interna-

丰富化石燃料资源的欠发达地区往往会成为排放碳的主要地区^[7]。这表明以碳定价为基础的全球气候治理行动,将为各国可持续发展带来更大的溢出效应。(4)与聚类(3)关联度较高的文献《A synthesis of carbon in international trade》研究了国际贸易中碳流动,认为区域间碳排放转移对于平衡区域碳预算和识别排放驱动因素非常重要,通过碳流动的估算与动态分析将为国家在碳减排行动中提供政策支持^[8];如果将碳排放按产业分类则数据不确定性增加,区域间碳流动需要更高水平的差异化衡量。(5)聚类(4)关键词有非工业私人林地、碳封存与随机决策建模,相关文献《A review of recent multi-region input-output models used for consumption-based emission and resource accounting》表明越来越多的研究利用投入产出分析估算国际贸易中碳排放量,以及国家和超国家层面的碳足迹;然而随着计算机处理能力的提高、经济账户、环境账户和贸易数据的广泛使用,需要进一步提高建模的准确性^[9],随机决策建模可以通过随机取样来确定数据样本并评价政策效益,可以较为客观地反映碳市场、碳封存等的现实变化,以便尽可能准确地预测未来碳排放数据或固碳情况。

2 “碳中和”概念及与国际贸易交互影响

2.1 碳中和的相关概念

1970年以来,国际贸易与环境问题被学界关注,经济全球化与贸易自由化对经济、社会和环境产生了广泛的影响。全球供应链和产业链不仅从根本上改变了商品的生产、交换和消费方式,还改变了生产、消费过程利用全球资源环境的方式。贸易可以在多大程度上影响环境,或者反过来环境会影响贸易的哪些方面一直都是学界辩论的主题^[10]。大量文献表明,国际贸易与碳排放强度之间存在显著相关^[11]。如澳大利亚开采的铝土矿,在中国加工成原铝,然后出口到一家德国汽车制造商,该制造商将铝制作成运往美国市场的汽车底盘。此过程,澳大利亚采矿业以及中国和德国的制造业所消耗的能源、造成的环境污染以及由国际贸易创造的就业机会,都会在美国消费者购买汽车时通过价格体现出来。当地能源使用、空气污染和就业机会虽然不是实体,也会一一体现在商品价值链中,相关研究通常被称为基于消费的“足迹”计算^[12]。

碳中和指在一定时间内通过植树造林、节能减排等形式,抵消直接或间接产生的二氧化碳排放,实现二氧化碳的“零排放”。广义上碳中和是碳排放系统之间的动态平衡,人类活动产生的碳通过地球上的碳循环系统,溶解在海洋,封存在生物圈。狭义上碳中和是指一个组织、团体或个人在一段时间内产生的二氧化碳排放,通过森林碳汇、人工转化、地质封存等方式予以抵消,实现“净零排放”^[13]。国际贸易背景下发达国家在资源生产率及工作条件方面明显改善,其所谓的“净零排放”往往是向其他国家进行碳排放转移实现,而这种将高排放低附加值的产业转移给发展中国家的发展方式,会导致全球碳排放总量的增加。

2.2 国际贸易影响碳中和治理

国际贸易通过全球范围内生产、消费活动对全球碳排放乃至全球气候产生影响,进而影响全球碳中和。国际贸易影响全球碳中和方式(图2)主要有两种:(1)国际贸易规模效应、技术效应和结构效应影响碳中和^[14]。规模效应指一国贸易开放程度可以促进经济增长、扩大生产规模,进而增加碳排放;技术效应指贸易可以提高一国人均收入水平,提高消费者对清洁环境的需求,从而内生更加严格的环境政策,减少碳排放;结构效应

指贸易开放会引起一国产业结构变化进而对碳排放产生影响。贸易开放的结构效应如何影响一国的碳排放取决于污染避难动机与要素丰裕动机的相对强弱。贸易规模效应、技术效应与结构效应的理论结构又被称为“Austrian Capital Theory (ACT) 理论”^[14,15]。Werner等^[14]分析43个国家1971—1996年的二氧化硫浓度,发现规模效应、技术效应和结构效应影响碳排放水平,提出国际商品市场开放程度影响污染程度;Managi^[15]利用1960—1999年63个国家面板数据验证了贸易开放程度与二氧化碳排放之间的关系,结果证明贸易自由化增加了二氧化碳排放。贸易进出口过程中按照传统贸易内涵碳量化一国碳排放量有失公平,更多学者开始关注碳排放责任认定公平性^[16-19]。在人类生产、生活产生CO₂影响下,全球温室气体排放量远超出森林可承受净化量。森林资源在应对气候变化与可持续发展中起到重要作用。由于温室气体过量排放与森林面积减少,气候变化愈发明显,极端天气增加,以气候变暖为主要特征的气候变化导致作物生长速度加快、生育期缩短,导致农作物减产,促使国际贸易成本上升,减缓气候变化对人类生产生活的影响需要通过碳治理努力实现碳中和。(2) 国际贸易在全球范围转移产业,影响全球碳排放格局^[20-22]。国际贸易因为其跨区域、多尺度贸易交往行为,考虑其对碳中和影响时还应考虑由于产业转移带来的碳泄露与碳足迹问题^[10]。国际贸易引起产业转移促使全球价值链重构,碳中和与碳减排问题必须关注碳中和在全球维度的外部性作用。各国减排能力、历史责任和环保观念差异以及搭便车问题的客观存在,使普遍参与且有效执行的多边气候协议还难以实现,现实中各国实施不同力度的减排政策或未参与减排^[23]。这种不对称减排政策可能使碳排放以国际投资、国际贸易为媒介发生跨国转移,在各国经济水平、产业差异环境政策影响下,产生“碳泄漏”,弱化减排政策效果,影响碳中和(图2)。

2.3 碳中和影响国际贸易

全球碳中和背景催生了更为严苛的环境政策,通常被划分为指令性手段与经济激励手段。前者是当今环境政策主要形式,包括制定法律、法规、指标、标准和规定等;后者通过采取与利益相关措施,鼓励环境友好行为、惩治有害环境行为,从而引导污染者

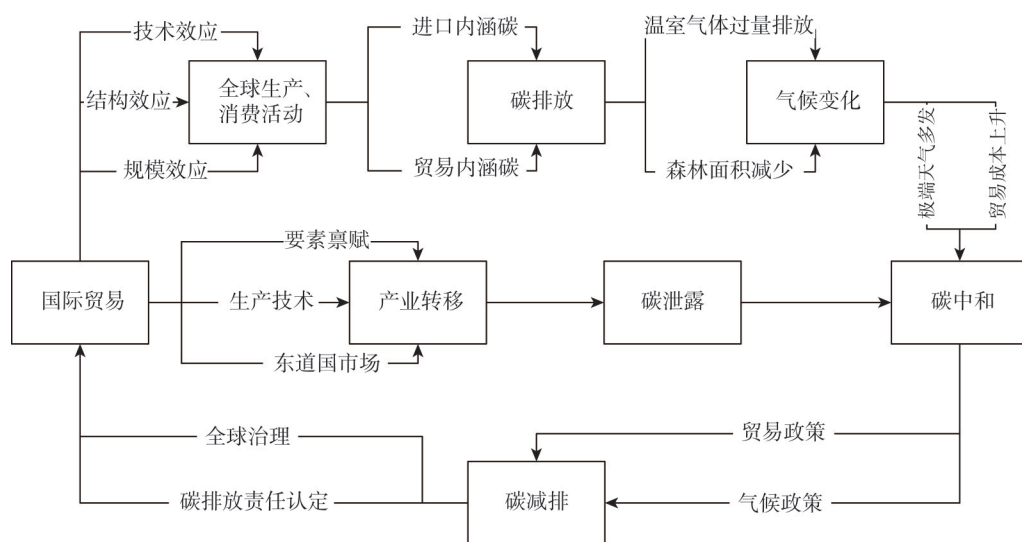


图2 国际贸易与碳中和双向影响路径

Fig. 2 The bidirectional influence path between international trade and carbon neutrality

的行为符合公众利益^[24]。全球贸易自由化与气候变化之间的复杂关系下出现了气候政策与贸易政策,二者之间仍存在冲突,紧张关系突出体现在以保护气候为由的贸易限制政策。面对气候变化挑战,减少化石燃料的生产与消费,控制温室气体排放与增强碳汇是气候保护的总体思路,实现碳中和需同时考虑减碳与固碳。

从环境政策可行性层面看,国际社会倾向于以碳税或碳排放交易机制或者二者结合,以补贴、能源、技术标准等政策工具为手段进行全球碳治理。从环境效果维度考察,碳税在国家税收层面更具稳定性,但在国际市场面对不同交易主体及对象品类难免产生不确定性与差异性。Eichner等^[25]通过程式化模拟欧盟二氧化碳排放控制的混合机制,分析欧洲碳排放交易体系(European Union Emissions Trading System)的双重监管和重叠税收对国家福利分配的影响,结果表明:国际碳税必须要规避双重甚至多重税收,多倍碳税征收必将加大碳税制度不合理性。各国税收政策将使不同国家碳税存在差异,单边重复碳税也会给开征或加征碳税国家带来额外负担,跨区域、跨尺度的合理碳税设计将是保证国际贸易稳定的关键。碳排放交易机制在总量控制与交易机制下,因排放总量固定,若不存在市场失灵情形,个体和整体环境效果皆具有确定性。从效率角度看,通过市场有效配置碳排放权资源,让有需求的买方以最低价格取得排放权,卖方实现排放权的市场供给,能够减少碳排放的社会成本,总体上提高碳治理政策效率。

国际社会划分碳排放责任主要基于生产者责任原则和消费者责任原则。生产者责任概念最早源于经济合作与发展组织(OECD)提出“污染者付费原则”,造成环境污染的单位和个人有责任对其污染源和被污染的环境进行治理。随着碳排放深入研究,不少学者认为生产者责任划分有失公平,产品生产地与消费地的分离会导致发展中国家在国际贸易中增加碳泄露问题,这使得发达国家更积极地向发展中国家转移高碳产业^[26]。《京都议定书》开启了国际间温室气体大容量资源分配的第一步,碳排放权贸易政策以及由此形成的国际碳市场是各国推动气候变化国际议程的最终目的之一。全球碳中和治理背景下,国际碳市场与碳排放的责任认定将会极大地影响国际贸易。

3 国际贸易“碳中和”研究热点

3.1 全球温室气体排放转移的时空演变

全球化导致生产和消费的地理空间分离加剧,经济全球化深入发展,各国国内(区域内)生产已不再仅仅是为了满足自身需求。国际贸易通过国家间贸易,大量商品和资源在世界各地流动和配置,产业也随着市场要素与生产要素禀赋发生转移,国家间贸易带来碳排放的空间转移^[21,22,27]。Zhong等^[21]采用回归模型和多区域投入产出模型研究39个主要经济体通过贸易转移温室气体的主要影响因素,发现发达国家为避免环境影响将高污染、高排放产业转移到发展中国家,导致发展中国家承担更多温室气体减排义务。Althouse等^[22]通过环境协调博弈展示了全球气候缓解的四种可能情景,指出现阶段部分国家层面出现的减排迹象,碳脱钩“成功”例子几乎总是通过将污染和资源密集型活动转移给较落后的国家来实现,贸易使技术先进的国家将最具社会和环境破坏性的生产环节转移到技术边缘国家(表2)。

发达国家为保护本国环境通过国际贸易将高排放、高污染的产业转移到技术落后的发展中国家已成为不争的事实。就全球碳治理代际公平性而言,Davis等^[28]认为发达国家的繁荣不仅建立在两个世纪以来化石燃料排放基础上,发达国家在工业化进程中还产生

表2 研究全球温室气体排放转移代表文献

Table 2 Key literature on global greenhouse gas emission transfer

论文名称	主要观点
Spatiotemporal evolution of global greenhouse gas emissions transferring via trade: Influencing factors and policy implication	基于碳排放时空转移的碳减排责任认定研究，在国际碳治理中发挥重要作用，多个空间尺度上进行温室气体评估，进一步揭示国际贸易导致温室气体转移复杂关系 ^[21]
Frameworks for comparing emissions associated with production, consumption, and international trade	国际贸易产品碳排放量的定义和定量应更加准确，具有普适性；碳核算原则与度量必须公开透明。精准的碳排放统计报告将有助于衡量双边贸易碳排放量，进行公平的碳治理 ^[17]
Ecological macroeconomics in the open economy: Sustainability, unequal exchange and policy coordination in a center-periphery model	污染密集型和资源密集型产业在世界经济中分布并不均衡，污染密集型产业加剧了发展中国家的环境退化和环境脆弱性，发达国家必须积极承担环境治理的责任，全球碳排放定额的合理设计至关重要 ^[22]
Who is responsible for the CO ₂ emissions that China produces?	当一个国家进口商品时，实际上减少了本国生产所产生的温室气体排放。只有在全球范围内找到合理的减排责任分配方法，全球气候问题才能得到善治 ^[18]
A synthesis of carbon in international trade	由于国际贸易，隐含碳从贫穷和新兴国家流向发达国家的总量巨大且不断增长，区域间的碳转移占全球碳排放的很大一部分 ^[10]

了大量温室气体；在代内公平下可以说是发展中国家的碳排放正维持着发达国家的繁荣景象。Kanemoto等^[29]认为尽管主要排放国积极立法，但全球空气污染排放总量仍在增加；国际贸易碳排放密集型生产向管制较弱的国家转移表明，若全球温室气体排放监管政策不考虑商品碳隐含量，即使发达国家执行强有力的排放目标，全球碳排放总量也可能继续上升^[17]。碳转移与碳泄漏问题在全球气候谈判中扮演着越来越重要的角色，而消费者和生产者间减排责任的不公平分配，将不利于全球温室气体减排总目标的实现。

随着全球化不断深化，经济活动的地理隔离变得更加明显。时空演化上国际贸易对温室气体的转移总量大幅增加，然而国际贸易促进了生产者和消费者的空间位移、促进区域在能源技术和生产技术方面的减排合作，可减少国际贸易对区域温室气体核算和温室气体减排义务分配的影响，也有利于促进全球参与温室气体减排。

3.2 全球气候政策与碳治理公平问题

《京都议定书》生效以来，国际碳市场不断壮大成为京都交易市场与非京都交易市场。欧盟、新西兰等发达国家在京都框架下为履行自身义务建立了区域或国家层面的碳排放权贸易体系。在京都框架外，以美国、澳大利亚为代表国家建立了地方性碳排放交易市场，不少国家已形成独立的碳排放权贸易市场，但尚未形成互联互通的国际碳市场。在全球碳治理和全球气候政策背景下，气候政策主要由拥有相对清洁生产技术的发达国家制定，全球气候政策“国际资本主义体系”将“不等量”的国际“碳治理”责任强加给不发达国家。学界提出应采取公平的碳排放政策，采用不同的碳核算原则来制定排放目标和政策设计（表3）。概观已有研究可知，以消费为基础的多区域投入产出模型和一般均衡模型计算国家碳排放量，发现国际贸易中碳排放转移使得碳进口国在不公平碳排放责任认定下正在积累更多的社会经济利益，在相同气候政策限制下发展中国家为获得相同收益将产出更多的温室气体。从国家参与全球碳治理来看，发展中国家面临着环境和自然资源的双重压力，它们经济发展、环境排放与资源消耗尚未脱钩，如果全球各国都实施一致的气候政策并不能实现全球碳减排，国际气候政策设计应该平衡发达国家与发展中国家之间的经济发展与环境资源脱钩状态差异。碳排放的全球性和代际性、公共外部性使个别国家或地区

表3 全球气候政策公平性研究
Table 3 Key literature on global climate policy equity research

文献	建模方法	主要观点
Pathways of human development and carbon emissions embodied in trade	多区域投入产出模型	以消费为基础计量国家碳排放量，在不公平碳排放责任认定下碳进口国正在积累更多的社会经济利益 ^[90]
National policies for global emission reductions: Effectiveness of carbon emission reductions in international supply chains	一般均衡模型、多区域投入产出模型	以消费为基础评估碳排放政策，如果所有国家都实施一致的全球气候政策，发展中国家与发达国家间存在经济发展水平与技术差异，全球气候政策并不能实现全球减排 ^[31]
Examining the role of BRICS countries at the global economic and environmental resources nexus	多区域投入产出模型	金砖国家经济发展、环境排放和资源消耗之间尚未脱钩。相同气候政策限制下发展中国家为获得同收益将产出更多温室气体排放和资源消耗 ^[91]
Climate clubs with tax revenue recycling, tariffs, and transfers	E3ME-FTT模型评估	计算世界气候俱乐部（世界上所有国家都加入该俱乐部）以及核心气候俱乐部（部分国家参与）的碳减排效率，认为碳排放全球性、代际性、公共外部性使个别国家不愿意加入国际气候协议 ^[23]

不愿意加入国际气候协议，设计全球碳排放交易市场制度时尤其需要注意公平性与差异性，才能使尽可能多的国家参与碳治理，最终实现全球二氧化碳的净零排放。

3.3 新兴经济体的碳减排压力

国际贸易网络日益扩大，国际贸易体量不断增大，部分后发国家经济增长迅速，成为新兴经济实体。新兴经济体是碳排放主要国，也是未来碳排放增长国。新兴经济体的经济、技术落后导致能源利用效率较低，因此新兴经济体的碳减排潜力巨大，其国家自主贡献（Nationally Determined Contributions, NDC）对全球气候治理作出至关重要的贡献^[32]。新兴经济体是否参与减排、以何种方式参与减排将对减缓全球气候变化起到关键作用。

因此，新兴经济体提高自身减碳与固碳能力将在国际碳治理中发挥关键作用。当新兴经济体的进出口贸易与碳抵消的速度实现一种稳定的平衡，发展中国家碳治理能使北方国家和南方国家的地区福利都有所增加，在全球气候政策、发展成果分享方面获得更多利益^[33,34]。全球去碳化经济的结构改革将导致发展中国家在严格气候政策下经济发展成本大幅上升，高碳价格将导致发展中国家在国际市场丧失经济竞争力，转变国际资本投资选择，同时引发巨大的转型成本^[35,36]。提高发展中国家的经济与科技水平将有助于参与碳中和的各国收获共同利益，发达国家和新兴经济体之间的技术交流和技术转让十分重要，国际援助成为许多国家实现更严格气候政策的先决条件。通过技术转让或财政补贴等方式促进发展中国家减少碳排放，是实现发展中国家与发达国家减排合作的重要举措。新兴经济体在进行国际贸易时，应更加注意提高国内各产业碳排放标准强度，引进产业时提高环境准入标准，减少总体碳排放；在承接国际产业转移时应严格遵循环境保护标准，合理征收污水税、环保税。新兴经济体经济增长必然会增加能源消耗，为实现可持续发展目标，新兴经济体的产业发展必须提高能源利用效率和发展可再生能源，这是提高能源利用强度和降低碳排放的根本出路。

3.4 实现碳中和路径及其多边治理

3.4.1 国际碳治理制度设计

从国际合作角度看，碳排放政策成为应对气候变化的重要措施。碳排放权交易、碳税等碳治理工具可以实现区域间对接，形成更广阔的跨区域碳排放交易网络，从而减少全球碳排放总量。欧盟碳交易市场是全球最大的碳排放交易系统，2013年欧盟开始统一限制碳

排放总量, 逐渐以拍卖方式进行碳排放权配额。在此系统之下衍生出碳定价、碳现货、碳期货、碳互换、碳排放交易许可证等多种碳中和实践活动。较于碳税而言, 碳定价可以为单一国家或地区设定碳价格上限, 使得碳价格与不同经济水平国家的碳排放目标水平相匹配^[37]。碳排放交易系统下衍生的碳产品更适用于当前严峻的碳治理形势, 国际组织可以在碳配额总量下, 选择碳排放交易许可证、碳期货等多种碳产品适应污染物排放量、排放时间以及对环境影响程度进行碳交易; 当然以拍卖为基础的碳排放交易也可能产生经济红利。Carbone等^[35]通过构建一般均衡模型(Computable General Equilibrium, CGE)评估碳排放许可证在国际贸易中的有效性, 指出当各国严格以本国利益为导向时, 碳排放交易许可证将对国家的碳排放管制起到巨大作用。最重要的是, 碳排放交易许可证的分类管理可以减轻发达国家与发展中国家间温室气体转移的影响, 使得双方在国际贸易中都实现利益最大化。碳排放交易更容易得到各国或国际利益集团的支持, 更有效地促进国际气候治理合作。碳税政策相较于碳排放交易更为稳定, 可根据实际情况进行动态调整, 税收相对于碳交易市场的推行难度与管理难度都更小。Böhringer等^[27]分析碳税对全球福利影响认为, 最具成本效益的税收政策是根据直接排放和电力排放对所有产品征收特定地区关税。随着国际社会对于气候治理的重视程度加深, 全球征收碳税的阻力也会逐渐变小。

实践中不同国家或地区既存在实施碳税, 也存在使用碳排放交易系统进行碳治理, 丹麦、芬兰等国尝试将两者结合实施复合型政策。全球碳减排属于公共产品, 仍缺乏有效的全球气候治理合作机制来遏制全球变暖, 单个国家应该在气候政策设计实施过程中继续努力, 单边国家的减排战略设计与政策实施经验将为国际碳治理提供借鉴。

3.4.2 新兴经济体碳治理重点

新兴经济体碳治理过程, 既要保证本国经济发展, 又要逐步向碳中和的全球目标靠拢。化石燃料的使用是全球二氧化碳排放主要来源, 能源产业成为新兴经济体碳治理的主要对象, 发展可再生能源成为能源绿色改革的重中之重。已有研究证实不同区域、不同发展程度国家间的国际贸易与可再生能源间存在正向联系。Khan等^[5]和Haurie等^[37]通过面板数据模型研究国际贸易与可再生能源间的关系, 可再生能源与北欧国家的国际贸易密切相关。可再生能源有助于减少温室气体排放, 同时也减少对化石燃料市场的依赖; 使用可再生能源可以提高环境质量, 发展可再生能源政策可以促进国家经济和国际贸易的发展^[38]。可再生能源对经济增长有正向影响, 并且对资本形成具有催化作用^[39]; 不同区域研究结果都表明支持政府利用可再生能源促进经济增长, 不仅有利于环境保护, 还有利于经济长期稳定与技术进步^[40]。可再生能源已经成为不可再生能源的重要替代品, 发展可再生能源是新兴经济体在经济发展同时减少温室气体排放的最佳选择。石油改革将对经济社会发展产生重要影响, 石油产品具有非常广泛的作用与功能, 已经渗透到社会生活各方面。Wang等^[41]采用多区域投入产出模型(Multi-regional Input-Output Model, MRIO)和结构分解(Structural Decomposition Analysis, SDA)分析美国石油足迹演化轨迹和关键驱动因素, 发现以美国石油市场为例单一的能源类型会导致一国经济不稳定, 造成国内通货膨胀等财政问题。石油改革可以减少能源价格波动保持经济稳定, 发展可再生能源有助于减少以传统化石燃料为基础的能源依赖, 将工业制造动能转向可再生能源。

国际气候政策中除了全球碳治理制度研究与管理设计外, 利用生物手段改变生态系统的增汇减碳能力、产业部门提高减碳技术利用、多产业部门的制度革新与宏观调控等也影响未来全球碳平衡。草业系统具有丰富的碳载体和多样的碳循环格局, 且碳汇潜力巨大。Ritten等^[42]考察了美国自愿碳抵消计划(如牧场土壤碳抵消计划)企业潜在收入,

发现高碳价格对牧场管理者具有很大吸引力。草场进行碳封存的适应性大于森林,利用广大的草场进行碳封存可能会改变全球碳循环。森林生态系统相较于草地更为复杂,Cecccherini等^[43]利用卫星数据评估欧洲森林面积变化,发现与2011—2015年相比,欧洲2016—2018年森林采伐面积增长49%,生物量损失增加69%。随着矿产经济热度减退,生物经济将成为全球经济下一波浪潮,碳市场需求对森林可持续管理提出了挑战。林业经营方面,Lansing等^[44]和Le Coq等^[45]认可哥斯达黎加的环境服务支付计划,该林业经营模式将金融工具创新地引入了森林管理,对林地所有者或使用带来正向激励。同时需要注意的是,森林是可再生资源,以森林为原料的产品与服务需求不断增加。Lobianco等^[46]利用法国森林部门的生物经济模型(French Forest Sector Model, FFSM++),量化了法国林木产品链的碳封存,指出木制产品的需求增加和替代化石燃料需求增加了森林的采伐量,减少了森林的碳储量。然而,采伐为幼树留下了空间,使幼树的生长速度比取代的老树快,森林碳汇量快速恢复,采用更有效的方法改进采伐管理将有利于森林系统的碳封存。全球碳治理离不开林业增汇减排,除国家层面的林业管理优化,还应明确森林在全球碳循环中的重要作用,积极推进林业议题国际谈判。Clarke^[47]考察2010年澳大利亚森林碳补偿数据认为,国际碳市场是有能力快速筹集所需资金来资助“减少森林砍伐和森林退化”融资机制之一,该融资机制可以支持森林保护和林业可持续管理,在减缓气候变化的国际框架下提高森林碳储量。合理设计国际碳市场,可以避免森林过量砍伐,提高全球森林碳汇储量。

不少研究者还关注产业碳减排。企业生产过程减少碳排放已经成为绿色发展的第一要义,一些公司甚至追求生产过程的“零碳排放”^[48]。产品运输层面,国际运输业需求量依旧强劲增长,除了陆运尾气减排、能源燃料利用效率提升之外,航空运输成为国际贸易中贵重物品、鲜活货物和精密仪器的主要运输方式,在国际贸易运输方式占比不断上升。Li等^[49]采用BP神经网络(Back-propagation)预测29家国际航空公司2021—2023年预期数据,分析航空公司低效率对环境的影响,指出飞机排放碳总量约占人为碳排放的2%,航空碳排放增长迅速,航空业碳排放管理将日益严峻。国际航空运输业减排压力在各国碳中和目标下愈发增强,提高航空公司的运输网络效率与航运服务质量将有利于航空公司提高能源利用效率^[50]。此外,当航空公司经营收益不良时,并购、融资活动能使其他航空公司从中获益,实现规模收益增加,减少碳排放^[51]。同时,建立国际燃油排放征税系统,征收燃料国际碳排放税能进一步减少国际运输中产生的碳排放^[52],征收燃料排放碳税可能改变国际运输服务供需现状,改变不同类型燃料使用,从而影响运输行业对节能减排技术的研发。

3.4.3 全球碳治理的博弈与协调机制

当前国际碳治理的公平性仍存在很多争议,这些争议体现历史排放与代际公平、人均排放与代内公平、减排能力与收入差距、碳排放转移与责任认定、气候谈判的程序公平性等五个层面^[20]。全球碳治理仍存在两大问题亟待解决:一是南、北方碳排放利益冲突,二是全球与区域碳治理的协商合作。

以美国、欧盟为代表的发达经济体认为发展中国家是现阶段碳排放大国,应该承担更多的减排义务;发展中国家则认为历史上人类排放的温室气体累积导致了当前的气候变化,发达国家自工业革命以来的生产、消费活动是大气中温室气体主要来源,且发达国家的减排能力更强,发达国家应对当前全球气候变化负主要责任^[53]。Hochstetler^[54]总结了有关BASIC(基础四国,指巴西、南非、印度、中国)成员在气候谈判中的动机及其与

77国集团的关系。BASIC将成为77国集团在国际碳治理中的前锋，许多77国集团成员认为发展中国家在国际碳治理中的行动取决于基础四国的行动。南、北方在全球碳治理中的博弈实际上是发达国家与发展中国家两大阵营之间的利益冲突。同时，国际碳治理仍存在争议与分歧，即使被称为“富国俱乐部”的八国集团也存在着碳治理不力、减排责任淡薄的现象。Brauch^[55]分析了八国集团在1992—2012年的气候政策表现，指出俄罗斯、德国、英国、法国和意大利积极履行自身温室气体减排义务，加拿大、美国和日本并没有完成减排目标且与设定目标的差距越来越大。然而，在缺乏超主权政府情况下，南、北方利益冲突以及国家碳减排责任认定不匹配难以在短时间内解决，区域或单边碳治理成为现阶段全球碳中和的主要措施。Domingos^[56]分析欧盟实施的航空排放监管政策认为，欧盟虽然拥有更加先进的区域气候政策，但航空排放限令并没有为气候政策改革提供先进经验，反而加深了国家间的不信任程度，恶化了气候保护局势，如果许多国家都采取单边措施可能导致环境保护的凝聚力被不合理地分散。国家之间气候政策、贸易政策的摩擦将导致国际气候谈判屡陷僵局，Biermann^[57]回顾了全球碳治理发展历程，认为政府间气候谈判僵局可能使全球碳治理变得更加复杂。全球碳治理不确定性和复杂性促使国际组织发挥更强大的作用，将催生跨国机制、跨国公共网络和跨国市场等新机制出现（图3）。

然而，经济发展与气候变化是世界各国普遍关注问题，碳减排产品是全球公共产品，碳排放和碳减排都具有全球外部性，气候变化风险正威胁着全人类的共同利益，气候治理需要全球参与。尽管发达国家与发展中国家存在利益冲突，中美两国作为南、北方的利益代表却在气候合作方面达成中美合作的“最大公约数”。2021年4月中美发表了《中美应对气候危机联合声明》，中美将致力于相互合作并与其他国家共同解决气候危机。中美虽在贸易问题上针锋相对，但对于气候问题相当重视，这也说明了当前全球碳中和目标仅通过个别国家努力难以实现，必须通过国家间共同努力或具有影响力的国际组织进行协调，共同向碳中和目标迈进。

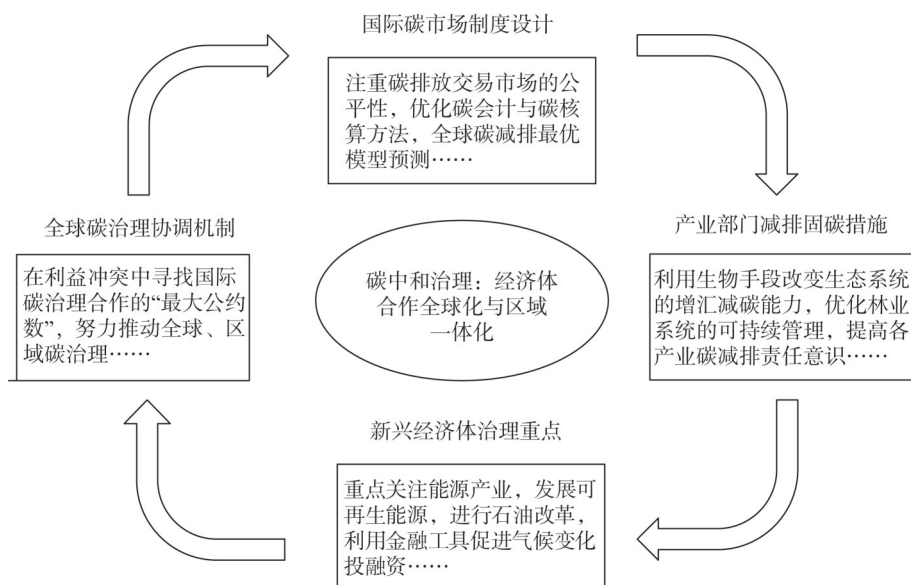


图3 国际贸易碳中和治理：经济体合作全球化与区域一体化

4 国际贸易“碳中和”研究对中国的关切

4.1 全球碳中和的中国碳减排压力

中国在国际贸易链中的地位和话语权虽不断提升,但碳排放问题使中国在国际贸易及国际气候谈判中面临巨大压力。能源是经济发展动力,是国民经济稳定发展的物质基础,中国能源禀赋具有“富煤、贫油、少天然气”特点,将不可避免地造成中国存在对外高度依赖、产能过剩和节能减排的高压^[58]。中国能源转换路径激励驱动框架尚未形成,绿色低碳能源转型表现并不理想。中国国际贸易结构虽不断优化,诸如国际资本密集型和技术密集型制造业加速向中国转移,中国承接的劳动密集型和资源密集型产业也陆续向东南亚国家流动。但现有研究认为,中国依然以生产高碳、低附加值、价值链低端加工品的出口贸易和承接国际产业转移为主,碳排放与碳泄露问题并未得到有效遏制。Liu等^[1]利用多区域投入产出模型对1997—2007年中国消费与供需链中所体现的碳排放进行动态分析,认为造成中国成为高碳排放、高碳泄露的贸易国最大原因是中国与其主要贸易伙伴的碳排放强度差异巨大,中国在国际贸易中产生巨大贸易顺差导致中国承接国际贸易中隐含碳排放,在国际气候谈判中承受巨大压力^[1]。Xie等^[59]研究了1995—2009年中国与美国、日本等世界六大经济体双边贸易中隐含的排放平衡和贸易中的污染条件发现,中国已经成为美国、日本等发达经济体的“污染避难所”,中国作为东亚最大的经济体在“新三角贸易”中扮演着出口平台的角色,对双边贸易中隐含的排放平衡变化影响因素分析认为出口规模对双边贸易中隐含的碳排放有重要的负向影响,为减轻中国在国际气候谈判的压力,中国出口型贸易需要做出改变。中国在未来继续推动贸易自由化时,必须实施政策措施来减少不利的环境影响。通过妥善处理中国与国外市场的关系,即出口规模与进口规模的关系,改变中国进出口贸易清洁程度。中国应该充分利用国内和国外两个市场,积极推进“国际国内双循环”战略的实施,提高生产技术和国际竞争力,降低污染系数相对较高的产业出口份额。

4.2 区域公平的中国碳市场设计

从中国区域碳排放内部因素看,国际贸易带动了国内经济发展与产业集聚。中国东部沿海城市群优越的地理位置与工业基础承接国际产业转移与国际分工,现阶段中国产业发展存在东西不平衡、技术要素投入低等问题,碳排放在中国国内也存在着空间转移。中国碳排放区域差异研究主要基于三种尺度:省际碳排放差异,东、西、中部三大经济区的碳排放差异,依据不同区域划分进行碳排放差异研究。

王铮等^[60]、田云等^[61]和马大来等^[62]在省级尺度对比中国碳排放量时发现,碳排放量较高的地区多是消费结构以煤为主或第二产业占比较高的地区,而经济发达、科技领先的地区碳排放量有明显的下降趋势。中国碳排放效率虽逐步提高,但区域分化仍旧十分明显,中国省际碳排放效率具有较大的差异,东部沿海地区的平均碳排放效率显著高于内陆地区。岳超等^[63]通过碳强度泰尔指数(Theil Index)分析1995—2007年中国各省区碳排放量、人均碳排放和碳排放强度,指出东部地区主要为低排放高增长模式,中西部地区则为高排放低增长与高排放高增长模式;Liu等^[64]、邓吉祥等^[65]和姚亮等^[66]根据中国区域间投入产出表研究中国八大区域的碳排放转移发现,区域承接碳转移的碳效率从大到小顺序是京津、西南、东部沿海、北部沿海、西北、东北、南部沿海、中部区域,北部沿海区域和中部区域碳排放转入量大于转出量,承接了其他区域的高碳负荷产业转移,人口规模、经济发展和能源强度是影响八大区域碳排放变化的主因。人口规模效应对区

域碳排放有较大的正面影响,能源强度效应对碳排放有较强的抑制作用。Han等^[67]采用嵌套投入产出分析识别中国31个地区碳排放流动,将中国地区碳排放转移模式划分为四类,内陆地区主要从事国内碳排放转移,西部地区一般接收碳排放,主要碳外流在东北和中部地区,而东部沿海地区在平衡国内外地区碳排放盈余和赤字方面发挥着至关重要的作用。同时还有学者提出“中国国内贸易污染港”假说,如Wang等^[68]利用多地区投入产出和中国贸易引力模型评估了国际贸易中SO₂排放的影响因素与转移路径,认为中国国内贸易随着经济发展和生产消费的空间分离而蓬勃发展,碳排放从需求方向供给方转移,导致西部地区环境质量恶化,西部欠发达地区成为新的“国内污染港”。

综上,学界十分关注中国区域碳排放差异与碳减排的理论研究与实践,碳排放研究方式与研究内容也在不断深化与创新。研究尺度虽然不同,但是中国碳排放的空间上仍存在明显差异,中国碳排放区域差异与演变存在重要特征:(1)中国国家碳排放总量仍在不断上升,中国正处于碳排放“平台期”。(2)中国碳排放与能源消费大体保持着同步增长态势,以煤炭为主体的能源结构仍是影响中国碳减排的重要难题。(3)在以东、中、西三大地带划分的碳排放空间格局中,东部地区的碳排放效率较高,东部地区对国家减排的政策执行力度较高;中西部地区对国家减排的政策执行力度较低,产业结构调整步伐缓慢,碳排放效率较低^[69]。中国区域碳排放“长期低效率”问题比“长期不公平”问题更严重,中国区域碳排放可以分为“高效高排”型、“低效低排”型、“高效低排”型、“低效高排”型四类地区,未来重点扶持处于“低效低排”型地区,激励处于“低效高排”型地区降低碳排放量,有利于实现中国区域碳减排公平与效率协调。

利用全球减排策略建模分析可以帮助中国更好地认识利弊,从中选择最优的减排政策^[70],将有利于中国发展自身气候政策积极应对全球气候变化。在关注中国国内碳交易市场设计与制度经验积累同时,还应关注国际碳排放市场设计的最新动向和碳会计框架与评价指标。国际社会对于碳会计定义尚不明确,在环境和金融领域中碳会计一词被广泛使用,但各领域对于碳会计定义也各有不同。一般来说,将碳减排、碳排放交易、碳排放量核算等方面纳入会计被统称为碳会计。在金融领域碳会计定义更倾向于企业的碳会计信息披露、碳产品定价、国际碳排放交易业务。碳核算包括对价值链各层次温室气体排放的识别、非货币性和货币性评价监测,以及碳排放对生态系统碳循环影响的识别、评价和监测。Stechemesser等^[71]研究了不同领域碳会计定义认为,现阶段虽然没有涵盖不同尺度(国家、项目、组织和产品)全面而详细的“碳会计”定义,但已经在各尺度上为碳定价提供了单独定义,未来碳会计的重要性将进一步加强。借鉴各国碳会计设计经验,建设中国碳会计信息披露框架,将有助于推动企业、城市等相关领域进行碳减排。

5 结论与展望

计量国际贸易中所讨论碳中和的相关文献发现,国际贸易与碳中和话题关联密切,国际贸易与碳中和间存在双向影响关系。国际贸易中碳中和研究热点聚焦于全球温室气体的排放转移、全球气候政策与公平问题、新兴经济体的碳减排压力与实现温室气体净零排放的路径分析与多边治理;中国作为世界碳排放大国,中国的碳治理、碳排放交易市场的设计、多样化碳减排措施与中国碳中和行动成为学者积极讨论的对象。

全球化导致生产和消费在地理空间上日益分离,国际贸易使温室气体伴随贸易往来发生转移。在全球碳治理和全球气候政策背景下,“国际资本主义体系”将“不平等”的

国际“碳治理”责任强加给不发达国家,导致承接国际产业转移的新兴经济体面临巨大的碳减排压力。在现阶段全球碳中和行动中,首先,应该将“碳”看作为一种可量化的治理对象,进行领土化、数字化的建模分析与预测,利用碳交易市场、碳定价、碳税等碳会计措施在全球范围内进行统一的碳治理。多行业、多方面制度革新和科学技术创新会影响未来全球的碳治理情况,制造业在生产加工过程中应采取减排措施,生产符合消费者需求的低碳产品,积极参与环境治理。能源工业面对可再生能源的巨大需求,应加快技术投入与技术创新,减少石油产品使用,加强行业内技术流通,提高可再生能源在全球范围的生产与使用效率。金融投资与国际贸易相互促进,金融产业应从绿色经济、绿色金融角度设计气候投融资。航空运输业应提高航空运输效率,优化管理措施与服务质量,行业内进行资源整合减少不必要的碳排放;全球航空运输应加强联系,加大网络化建设,促进信息共享、技术共用,共同商定全球燃油管控方案将有利于航空运输的减排减污。由于森林、草地具有重要的碳封存功能,在全球碳市场背景下进一步推动林业保护激励政策的实施与落实,完善林业、草地等碳封存制度设计。

国际碳治理中碳排放认定标准与碳排放责任划分的不平等是实际存在的,新兴经济体通过国际贸易承接产业转移面临着资源环境与经济发展的双重压力,发展中国家需要在国际碳排放责任认定中积极作为。发展中国家应研究新型减排政策,维护切身利益,接受发达国家技术转让与国际援助,发展可再生能源产业。发达国家应提高责任意识,积极承担全球碳治理责任,加强技术转让与国际援助,利用全球多样化减排策略,不断实现碳中和目标。

碳中和对于中国既是机遇更是挑战。中国计划达成碳中和的时间紧迫,一次性能源消费占比过高,进出口贸易依存度高,中国国内碳排放区域差异大,在国际气候谈判中面临巨大压力。积极调整与完善中国碳减排相关制度与碳减排交易市场建设,设计中国气候政策,改革碳税、环境税等环境政策,从减排、固碳、政策推动三方面为中国碳中和提供行动框架与优化方向。推动经济增长模式由要素驱动向创新驱动转变,加大碳减排技术或清洁生产技术的引进、消化和吸收,特别是加强非碳能源的技术创新,通过模型预测非碳能源使用、非碳能源替代率、未来碳排放量,为中国减排政策制定提供数据支持,进而利用差异化政策设定、市场细分等办法优化中国区域碳减排。

参考文献(References):

- [1] LIU Z, MAO X, SONG P. GHGs and air pollutants embodied in China's international trade: Temporal and spatial index decomposition analysis. *PLoS One*, 2017, 12(4): e0176089, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176089>.
- [2] DEAN J M. Does trade liberalization harm the environment? A new test. *The Canadian Journal of Economics*, 2002, 35(4): 819-842.
- [3] 邓旭, 谢俊, 滕飞. 何谓“碳中和”? 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 107-13. [DENG X, XIE J, TENG F. What is carbon neutrality?. *Climate Change Research*, 2021, 17(1): 107-113.]
- [4] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace知识图谱的方法论功能. *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. *Studies in Science of Science*, 2015, 33(2): 242-253.]
- [5] KHAN S A R, YU Z, BELHADI A, et al. Investigating the effects of renewable energy on international trade and environmental quality. *Journal of Environmental Management*, 2020, 272: 111089, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111089>.
- [6] KHAN M K, HAI HONG T, KHAN I U, et al. Sustainable economic activities, climate change, and carbon risk: An international evidence. *Environment Development and Sustainability*, 2021, <http://doi.org/10.1007/s10668-021-01842-x>.
- [7] LIU H, LIU W, FAN X, et al. Carbon emissions embodied in demand-supply chains in China. *Energy Economics*, 2015, 50: 294-305.

- [8] PETERS G P, DAVIS S J, ANDREW R. A synthesis of carbon in international trade. *BiogeoSciences*, 2012, 9(8): 3247-3276.
- [9] WIEDMANN T. A review of recent multi-region input-output models used for consumption-based emission and resource accounting. *Ecological Economics*, 2009, 69(2): 211-222.
- [10] JAYADEVAPPA R, CHHATRE S. International trade and environmental quality: A survey. *Ecological Economics*, 2000, 32(2): 175-194.
- [11] WIEDMANN T, LENZEN M. Environmental and social footprints of international trade. *Nature Geoscience*, 2018, 11(5): 314-321.
- [12] DUAN Y, JI T, LU Y, et al. Environmental regulations and international trade: A quantitative economic analysis of world pollution emissions. *Journal of Public Economics*, 2021, 203: 104521, <https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2021.104521>.
- [13] ZOU C, XUE H, XIONG B, et al. Connotation, innovation and vision of "carbon neutrality". *Natural Gas Industry B*, 2021, 8(5): 523-537.
- [14] WERNER A, BRIAN R, COPELAND M, et al. Is free trade good for the environment?. *The American Economic Review*, 2001, 91(4): 877-908.
- [15] MANAGI S. Trade liberalization and the environment: Carbon dioxide for 1960-1999. *Economics Bulletin*, 2004, 17(1): 1-5.
- [16] ALPAY E, BUCCOLA S, KERKVLIT J. Productivity growth and environmental regulation in Mexican and US food manufacturing. *American Journal of Agricultural Economics*, 2002, 84(4): 887-901.
- [17] KANEMOTO K, LENZEN M, PETERS G P, et al. Frameworks for comparing emissions associated with production, consumption, and international trade. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(1): 172-179.
- [18] LIU Y, JAYANTHAKUMARAN K, NERI F. Who is responsible for the CO₂ emissions that China produces?. *Energy Policy*, 2013, 62: 1412-1419.
- [19] TIAN X, SARKIS J, GENG Y, et al. Examining the role of BRICS countries at the global economic and environmental resources nexus. *Journal of Environmental Management*, 2020, 262: 110330, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110330>.
- [20] 彭水军, 张文城. 国际碳减排合作公平性问题研究. 厦门大学学报: 哲学社会科学版, 2012, (1): 109-117. [PENG S J, ZHANG W C. A study of fairness in international cooperation in carbon reduction. *Journal of Xiamen University: Arts & Social Sciences*, 2012, (1): 109-117.]
- [21] ZHONG Z, ZHANG X, GAO W. Spatiotemporal evolution of global greenhouse gas emissions transferring via trade: Influencing factors and policy implications. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(14): 5065, <https://doi.org/10.3390/ijerph17145065>.
- [22] ALTHOUSE J, GUARINI G, GABRIEL PORCILE J. Ecological macroeconomics in the open economy: Sustainability, unequal exchange and policy coordination in a center-periphery model. *Ecological Economics*, 2020, 172: 106628, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106628>.
- [23] SHAW D, FU Y H. Climate clubs with tax revenue recycling, tariffs, and transfers. *Climate Change Economics*, 2020, 11(4): 1-14.
- [24] 史学瀛, 李树成, 潘晓滨. 碳排放交易市场与制度设计. 天津: 南开大学出版社, 2014: 55-175. [SHI X Y, LI S C, PAN X B. Carbon Emission Trading Market and System Design. Tianjin: Nankai University Press, 2014: 55-175.]
- [25] EICHNER T, PETHIG R. EU-type carbon emissions trade and the distributional impact of overlapping emissions taxes. *Journal of Regulatory Economics*, 2010, 37(3): 287-315.
- [26] 李富佳. 区际贸易隐含碳排放转移研究进展与展望. 地理科学进展, 2018, 37(10): 1303-13. [LI F J. Progress and prospects of research on transfer of carbon emissions embodied in inter-regional trade. *Progress in Geography*, 2018, 37(10): 1303-1313.]
- [27] BÖHRINGER C, BYE B, FÆHN T, et al. Alternative designs for tariffs on embodied carbon: A global cost-effectiveness analysis. *Energy Economics*, 2012, 34(s2): 143-153.
- [28] DAVIS S J, CALDEIRA K. Consumption-based accounting of CO₂ emissions. *PNAS*, 2010, 107(12): 5687-5692.
- [29] KANEMOTO K, MORAN D, LENZEN M, et al. International trade undermines national emission reduction targets: New evidence from air pollution. *Global Environmental Change*, 2014, 24: 52-59.
- [30] STEINBERGER J K, ROBERTS J T, PETERS G P, et al. Pathways of human development and carbon emissions embodied in trade. *Nature Climate Change*, 2012, 2(2): 81-85.
- [31] NABERNEGG S, BEDNAR-FRIEDL B, MUÑOZ P, et al. National policies for global emission reductions: Effectiveness of carbon emission reductions in international supply chains. *Ecological Economics*, 2019, 158: 146-157.
- [32] ZHANG X, ZHANG H, YUAN J. Economic growth, energy consumption, and carbon emission nexus: Fresh evidence

- from developing countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(25): 26367-26380.
- [33] LI J, HAMDI-CHERIF M, CASSEN C. Aligning domestic policies with international coordination in a post-Paris global climate regime: A case for China. *Technological Forecasting and Social Change*, 2017, 125: 258-274.
- [34] ZHANG K, LIANG Q-M. Recent progress of cooperation on climate mitigation: A bibliometric analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 123495, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123495>.
- [35] CARBONE J C, HELM C, RUTHERFORD T F. The case for international emission trade in the absence of cooperative climate policy. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2009, 58(3): 266-280.
- [36] CRAMTON P, STOFT S. Global climate games: How pricing and a green fund foster cooperation. *Economics of Energy & Environmental Policy*, 2012, 1(2): 125-136.
- [37] HAURIE A, MORESINO F. A stochastic control model of economic growth with environmental disaster prevention. *Automatica*, 2006, 42(8): 1417-1428.
- [38] ARMEANU Ș D, VINTILĂ G, GHERGHINA Ș C. A cross-country empirical study towards the impact of following ISO management system standards on Euro-area economic confidence. *Amfiteatru Economic*, 2017, 19(44): 144-165.
- [39] ZAFAR M W, ZAIDI S A H, KHAN N R, et al. The impact of natural resources, human capital, and foreign direct investment on the ecological footprint: The case of the United States. *Resources Policy*, 2019, 63: 101428, <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101428>.
- [40] ZAFAR M W, SHAHBAZ M, HOU F, et al. From nonrenewable to renewable energy and its impact on economic growth: The role of research & development expenditures in Asia-Pacific economic cooperation countries. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 212: 1166-1178.
- [41] WANG Q, JIANG F. Drivers of United States oil footprints trajectory: A global assessment. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 240: 118150, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118150>.
- [42] RITTEN J P, BASTIAN C T, RASHFORD B S. Profitability of carbon sequestration in western rangelands of the United States. *Rangeland Ecology & Management*, 2012, 65(4): 340-350.
- [43] CECCHERINI G, DUVEILLER G, GRASSI G, et al. Abrupt increase in harvested forest area over Europe after 2015. *Nature*, 2020, 583(7814): 72-77.
- [44] LANSING D M, GROVE K, RICE J L. The neutral state: A genealogy of ecosystem service payments in Costa Rica. *Conservation & Society*, 2015, 13(2): 200-211.
- [45] LE COQ J-F, FROGER G, PESCHE D, et al. Understanding the governance of the payment for environmental services programme in Costa Rica: A policy process perspective. *Ecosystem Services*, 2015, 16: 253-265.
- [46] LOBIANCO A, CAURLA S, DELACOTE P, et al. Carbon mitigation potential of the French forest sector under threat of combined physical and market impacts due to climate change. *Journal of Forest Economics*, 2016, 23: 4-26.
- [47] CLARKE M. The over-the-counter market for forest carbon offsets: An insight into pricing in a market without common price signals. *Australian Forestry*, 2013, 73(3): 171-176.
- [48] KILIAN B, HETTINGA J, JIMÉNEZ G A, et al. Case study on Dole's carbon-neutral fruits. *Journal of Business Research*, 2012, 65(12): 1800-1810.
- [49] LI Y, CUI Q. Carbon neutral growth from 2020 strategy and airline environmental inefficiency: A network range adjusted environmental data envelopment analysis. *Applied Energy*, 2017, 199: 13-24.
- [50] LIU J, YUAN C, HAFEZ M, et al. The relationship between environment and logistics performance: Evidence from Asian countries. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 204: 282-291.
- [51] CHEN Z, WANKE P, ANTUNES J J M, et al. Chinese airline efficiency under CO₂ emissions and flight delays: A stochastic network DEA model. *Energy Economics*, 2017, 68: 89-108.
- [52] SHENG Y, SHI X, SU B. Re-analyzing the economic impact of a global bunker emissions charge. *Energy Economics*, 2018, 74: 107-119.
- [53] ARNULF G, YASUMASA F. Inter-generational and spatial equity issues of carbon accounts. *Energy*, 1991, 16(11-12): 1397-1416.
- [54] HOCHSTETLER K A. The G-77, BASIC, and global climate governance: A new era in multilateral environmental negotiations. *Revista Brasileira de Política Internacional*, 2012, 55(s): 53-69.
- [55] BRAUCH H G. Climate paradox of the G-8: Legal obligations, policy declarations and implementation gap. *Revista Brasileira de Política Internacional*, 2012, 55(s): 30-52.
- [56] DOMINGOS N D P. Fighting climate change in the air: Lessons from the EU directive on global aviation. *Revista Brasileira de Política Internacional*, 2012, 55(s): 70-87.

- [57] BIERMANN F. Beyond the intergovernmental regime: Recent trends in global carbon governance. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2010, 2(4): 284-288.
- [58] PINGKUO L, HUAN P. What drives the green and low-carbon energy transition in China? An empirical analysis based on a novel framework. *Energy*, 2021: 122450, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122450>.
- [59] XIE R, ZHAO G, ZHU B Z, et al. Examining the factors affecting air pollution emission growth in China. *Environmental Modeling & Assessment*, 2018, 23(4): 389-400.
- [60] 王铮, 朱永彬. 我国各省区碳排放量状况及减排对策研究. *中国科学院院刊*, 2008, (2): 109-15. [WANG Z, ZHU Y B. Study on the status of carbon emission in provincial scale of China and countermeasures for reducing its emission. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2008, (2): 109-115.]
- [61] 田云, 林子娟. 巴黎协定下中国碳排放权省域分配及减排潜力评估研究. *自然资源学报*, 2021, 36(4): 921-933. [TIAN Y, LIN Z J. Provincial distribution of China's carbon emission rights and assessment of its emission reduction potential under the Paris Agreement. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(4): 921-933.]
- [62] 马大来, 陈仲常, 王玲. 中国省际碳排放效率的空间计量. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(1): 67-77. [MA D L, CHEN Z C, WANG L. Spatial econometrics research on inter-provincial carbon emissions efficiency in China. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(1): 67-77.]
- [63] 岳超, 胡雪洋, 贺灿飞, 等. 1995—2007年我国省区碳排放及碳强度的分析. *北京大学学报: 自然科学版*, 2010, 46(4): 510-516. [YUE C, HU X Y, HE C F, et al. Provincial carbon emissions and carbon intensity in China from 1995 to 2007. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, 46(4): 510-516.]
- [64] LIU X, YANG X, GUO R. Regional differences in fossil energy-related carbon emissions in China's eight economic regions: Based on the Theil Index and PLS-VIP Method. *Sustainability*, 2020, 12(7): 2576, <https://doi.org/10.3390/su12072576>.
- [65] 邓吉祥, 刘晓, 王铮. 中国碳排放的区域差异及演变特征分析与因素分解. *自然资源学报*, 2014, 29(2): 189-200. [DENG J X, LIU X, WANG Z. Characteristics analysis and factor decomposition based on the regional difference changes in China's CO₂ emission. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(2): 189-200.]
- [66] 姚亮, 刘晶茹. 中国八大区域间碳排放转移研究. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(12): 16-9. [YAO L, LIU J R. Transfer of carbon emissions between China's eight major regions. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(12): 16-19.]
- [67] HAN M, YAO Q, LAO J, et al. China's intra- and inter-national carbon emission transfers by province: A nested network perspective. *Science China Earth Sciences*, 2020, 63(6): 852-864.
- [68] WANG Z, LI C, LIU Q, et al. Pollution haven hypothesis of domestic trade in China: A perspective of SO₂ emissions. *Science of the Total Environment*, 2019, 663: 198-205.
- [69] 周迪, 郑楚鹏, 华诗润, 等. 公平与效率协调视角下的中国碳减排潜力与路径. *自然资源学报*, 2019, 34(1): 80-91. [ZHOU D, ZHENG C P, HUA S R, et al. The potentialities and paths of China's carbon emission reduction based on the coordination of fairness and efficiency. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(1): 80-91.]
- [70] LI M, WENG Y, DUAN M. Emissions, energy and economic impacts of linking China's national ETS with the EU ETS. *Applied Energy*, 2019, 235: 1235-1244.
- [71] STECHEMESSER K, GUENTHER E. Carbon accounting: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 36: 17-38.

Research hotspots and trends of carbon neutrality in international trade

YU Jian-hui^{1,2}, XIAO Ruo-lan³, MA Ren-feng³, ZHANG Wen-zhong^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo Universities Collaborative Innovation Center for Land and Marine Spatial Utilization and Governance Research, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: Carbon neutrality is a common problem faced by all countries in the world. Against

the background of economic globalization and trade liberalization, the total volume of international trade grows rapidly. With the deep international division of labor and industrial transfer, producers and consumers of trade objects have caused serious spatial displacement on the land surface. The bibliometric software CiteSpace is applied to analyze relevant literature on carbon neutrality under the theme of international trade and reveal the trend of "carbon neutrality" in international trade. The results show that: (1) The spatiotemporal evolution of greenhouse gases on a global scale has made trans-regional and multi-scale global carbon governance more complex. The developed countries have transferred high-pollution and low-value chain industries to the developing countries, and the principle of carbon accounting based on producer responsibility is no longer applicable to international trade cooperation. (2) Import and export trade is gradually becoming the driving force for the economic development of emerging economies. Global carbon governance should gradually move closer to the globalization of economic cooperation and regional integration. The global climate policy design should start from the fairness of the international carbon market, continuously optimize the carbon emission accounting system, improve the carbon accounting method, and analyze the expected effect of global carbon emission reduction through modeling. It is necessary to improve the awareness of the carbon emission reduction responsibility of industrial sectors, improve the utilization efficiency of industrial clean technology and energy, and to change the capacity of an ecological system to increase carbon sink and reduce emissions. While receiving technical assistance from the developed countries, emerging economies should focus on their energy industries, develop renewable energy industries, improve energy efficiency, and use economic policies and financial instruments to promote the development of their climate change investment and financing industries. Global carbon governance should pay more attention to equity, economic development, and environmental and resource differences among countries, and encourage more countries to participate in global or regional integration of carbon governance by using various carbon governance tools and ways of consultation and cooperation. The Chinese government must improve the carbon market mechanism, raise the level of carbon governance, and provide the "greatest common divisor" for international cooperation on carbon governance through domestic multi-industry and multi-sector emission reduction and international carbon emission reduction and carbon neutrality practices.

Keywords: international trade; carbon neutrality; carbon emission reduction; economic geography of international trade