

# 国际贸易隐含碳研究进展\*

邢源源 王雅婷 王雪源

**摘要:**国际贸易隐含碳作为温室气体减排关键议题,对于全球气候治理具有重要意义。贸易隐含碳与碳泄漏和碳漏洞相关,碳泄漏是导致贸易隐含碳的原因之一,现行碳排放核算体系中忽视贸易隐含碳导致了碳漏洞问题。多区域投入产出模型和产品生命周期法等可用于测算贸易隐含碳排放规模及碳足迹,结构分解法和指数分解法等可用于锚定贸易隐含碳排放的影响因素。关于发达国家和发展中国家贸易隐含碳的实证研究趋于丰富。消费者和生产者之间如何分担温室气体减排责任一直是国际气候政策谈判中高度敏感的问题。一些学者质疑诸如碳关税等碳边境调整机制减少碳泄漏的有效性和实用性,另有学者运用多区域投入产出表中相关数据进行实证分析,并提出解决贸易隐含碳问题的新方案。本文梳理贸易隐含碳的起源演变、测算方法和影响因素的相关研究进展,以期为深入分析并解决贸易隐含碳排放问题提供理论支持。

**关键词:**国际贸易隐含碳 温室气体排放 气候政策 责任分担 多区域投入产出

## 一、引言

世界各国降碳和脱碳诉求日益迫切。《联合国气候变化框架公约》(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)下的《巴黎协定》(2016)的核心目标是限制并减少各国二氧化碳等温室气体(greenhouse gas, GHG)排放,将21世纪升温幅度控制在2℃以内,并努力限制在1.5℃。《巴黎协定》气候目标和《格拉斯哥气候公约》(Glasgow Climate Pact, 2021)要求到21世纪中叶,人为二氧化碳排放量下降到净零(Trout et al., 2022),据此各国相继出台减排政策和措施。过去几十年全球生产格局发生了巨大转变,国际贸易和国际投资引发商品和服务生产专业化、模块化、碎片化,同时带动价值链、生产链和供应链全球化。国际商品和服务的生产与消费发生区位分离,碳排放等环境影响也呈现地理分离化。气候治理与贸易变化态势凸显了碳排放责任分担等相关问题:贸易和消费在多大程度上增加碳排放?发达国家的碳减排政策是真正减少碳排放,还是伴随生产转移将碳排放转移到监管宽松国家?出口行业碳排放的责任方究竟是本国生产商还是国外消费者?如何从全球碳排放最优化角度合理设计国别碳减排政策和国际气候协议?为回答上述问题,需要科学测度并细致刻画碳排放规模和流动轨迹。

然而,目前大多数温室气体和碳排放核算体系及气候政策仅以生产为核算基础,忽略以消费为核算基础的跨境交易,忽视商品和服务贸易中转移的隐含碳排放,比如《联合国气候变化框架公约》签约国根据领土排放原则即生产者责任制报告碳排放。伴随碳达峰、碳中和甚至领土内生

\* 邢源源,辽宁大学中国商务发展研究院(北京),邮政编码:110036,电子邮箱:xingyuanyuan@lnu.edu.cn;王雅婷(通讯作者)、王雪源,辽宁大学金融与贸易学院,邮政编码:110036,电子邮箱:2167943069@qq.com, wxyhath@126.com。基金项目:中国—上海合作组织国际司法交流合作培训基地2017年度能源经济合作资助项目;教育部中外语言交流合作中心2020年度国际教育重点创新项目;中国—上海合作组织新动上合国际教育培训专家智库项目。感谢匿名审稿人的修改建议,文责自负。

产净零排放逐步实现(Jakob, 2021b),进口隐含碳排放问题也引起学者关注。多个有关气候变化的国际研究报告验证了忽视核算贸易隐含碳已导致严重的碳漏洞问题。美国气候工程基金会(Climate Works Foundation)发布的咨询报告《欧洲碳漏洞》(Becque et al, 2017)表明,虽然欧盟因温室气体减排行动而广受赞誉,有望于2020年实现温室气体在1990年水平上减少20%的目标,但是如果考虑到贸易隐含碳,1995—2009年间欧盟27个成员国碳排放总量不仅没有降低,反而增加了11%。各国的气候政策差异和领土排放原则不同导致欧盟和其他国家在核算碳排放规模和落实气候承诺时忽略了进口贸易隐含碳,致使排放测算中出现碳漏洞(carbon loophole)。全球多达22%的温室气体排放源自几乎没有碳排放监管的地区,最终到达欧盟等碳市场监管日益严格的地区和国家,碳漏洞规模巨大。除非堵住碳漏洞,否则全球碳排放气候目标将难以实现。全球效率信息研究院(Global Efficiency Intelligence)研究员Hasanbeigi & Darwili(2022)估算,美国等发达国家在制定气候政策时所忽视的碳漏洞规模每年达80亿吨,等于美国本土每年碳排放量的1.5倍,且逐年扩大。自1995年以来,贸易隐含碳排放量占全球二氧化碳排放总量的比例一直保持在20%~25%之间。尽管2008年以来贸易隐含碳排放占全球排放总量比例趋于稳定,但全球二氧化碳排放总量一直增加,贸易隐含碳排放总量也随之增加。2019年,全球碳排放总量的22%隐含在进口商品中,并计入出口生产国的碳排放,进口消费国即最终用户得以逃避排放归属责任。

为实现全球经济真正脱碳,贸易隐含碳是必须研究并亟待解决的关键问题之一。本文阐释贸易隐含碳、碳泄漏、碳漏洞三个概念和相关理论假说,总结贸易隐含碳测度方法,梳理贸易隐含碳排放规模、碳足迹及影响因素测度研究,归纳区域和国别贸易隐含碳及政策效应的研究进展,评述近期贸易隐含碳减排责任分担的研究结论及政策主张,进而提出未来研究方向。

## 二、贸易隐含碳相关概念与理论假说

### (一)贸易隐含碳

1994年,经济合作与发展组织(OECD)的科技和产业理事会主任Andrew W. Wyckoff和美国太平洋西北国家实验室经济和社会分析组K8-15经济学家Joseph M. Roop在《能源政策》(*Energy Policy*)上发表了论文《进口制成品中隐含碳:对温室气体排放国际协议的影响》(Wyckoff & Roop, 1994),该文被学界普遍视为国际贸易隐含碳的首发成果。文章提出忽视国际贸易活动对钢铁或化学品等碳密集型产品的影响会扭曲碳排放测算,忽略贸易隐含碳会人为压低排放水平。《联合国气候变化框架公约》将隐含碳定义为商品从原料获取、制造加工和仓储运输到分销出售给消费者的整个过程中直接或间接排放的二氧化碳,也有研究称为“贸易隐含排放”(emissions embodied in trade, EET)或者“隐含排放”(embodied emissions),亦有使用“虚拟排放”(virtual emissions)或“隐藏排放”(hidden emissions)等词。Darwili & Schröder(2023)提出,贸易隐含碳可测度国际碳排放转移规模和模式。出口隐含碳(emissions embodied in exports, EEX)与进口隐含碳(emissions embodied in imports, EEM)之间的差额即为国际碳排放转移量,同时等于以生产为基础的排放量(production-based emissions, PBE)与以消费为基础的排放量(consumption-based emissions, CBE)之间差额。总体而言,发达国家为“净进口”碳排放国家( $PBE < CBE$ ),发展中国家为“净出口”碳排放国家( $PBE > CBE$ )。碳排放沿产品贸易价值链从发达国家转移到发展中国家。发达国家在生产外包的同时也实现了“碳排放外包”(emission outsourcing),进而达成了经济增长和碳排放的脱钩。然而,发达国家碳排放量减少并没有转化为相应的全球碳排放量减少。贸易隐含碳规模和方向在很大程度上由国际技术差异决定,或者说,由能源碳强度和生能能源强度的跨国差异决定。在存在技术差异的情况下,以同等价格交换相同产品将意味着贸易隐含碳排放的转移。

## (二)碳泄漏与碳漏洞

与贸易隐含碳相关的另外两个概念是碳泄漏(carbon leakage)与碳漏洞(Hasanbeigi & Darwili, 2022),三者既相互联系,又存在区别。根据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的定义,碳泄漏指因一国(地区)采取应对气候变化的单方面行动并未导致全球碳排放减少,而是被贸易伙伴国取代,即伴随进口国(一般是碳定价国)对商品和服务的需求转移到出口国(一般是非碳定价国),出口国的生产导致出口国碳排放增加。比如,由于欧盟、澳大利亚、韩国、美国、加拿大陆续推出单边碳定价政策,碳泄漏在全球范围内呈现扩散趋势。碳漏洞则源于缺乏碳排放法规制约的地区和碳排放监管日益严格的地区之间的排放差额,是由于各国的气候政策差异所造成的排放。碳泄漏是贸易隐含碳的主要诱因之一,会增加贸易隐含碳。贸易隐含碳的部分构成可视为碳泄漏的直接后果,忽视贸易隐含碳会导致碳排放核算发生扭曲和低估,产生核算中的碳漏洞。贸易隐含碳的出现和增加映射出基于生产者责任的全球和国别碳核算并不全面,存在碳漏洞。

Branger & Quirion(2014)将碳泄漏定义为因一个地区实施气候变化减缓措施而导致第三国温室气体排放量的增加。Jakob(2021a)分析了碳泄漏的潜在机制、经验评估、未来走势和防泄漏政策,包括免费分配排放许可证和边境碳调整。碳泄漏通常被归因于能源市场效应、贸易专业化和搭便车三个潜在机制(Jakob, 2021b)。首先,一个区域的气候政策降低了其对化石燃料的需求,从而降低了该化石燃料的世界市场价格。反过来,可以预期这种价格下降会导致其他国家消费增加,即出现“绿色悖论”。其次,气候政策可能会提高能源价格,从而对国际贸易模式产生影响,即本国较高能源价格导致其进口更多的能源密集型产品和服务,出口国因能源价格较低而具有比较优势。国际贸易将能源密集型商品和服务生产转移到环境标准较宽松或无标准的国家,从而抵消了实施气候政策的国家所取得的部分减排成果。再次,单边气候政策导致的其他国家排放增加涉及策略互动。博弈论分析指出,减排可能构成策略替代,即应对他国减排的最佳对策是增加自己的排放,从而搭对方提供缓解气候变化公共产品的便车。所以,在国际协议达成之前,减少排放的国家将自己置于不利的谈判境地,从而导致其他协议成员国降低减排目标。由于其他国家的消极政策,先行者的一些减排成果将被抵消。

## (三)相关理论假说及其实证

贸易隐含碳的相关理论假说包括环境库兹涅茨曲线(environmental Kuznets curve, EKC)和污染天堂假说(pollution haven hypothesis, PHH)(Walter & Ugelow, 1979; Copeland & Taylor, 1994),阐释在经济增长不同阶段、不同国家参与国际贸易对环境的影响以及排放的国际流动模式。

此后的实证研究或验证或反对上述理论假说,或扩展至贸易对碳排放、福利和收入的影响。Shapiro(2016)量化了国际贸易对二氧化碳排放的影响,分析了管制航运部门碳排放的福利及其后果,建立了一个贸易与环境相结合的多区域投入产出模型(multiregional input-output analysis, MRIO),量化国际贸易中二氧化碳的环境成本,并使用面板数据回归法估计了关键参数。研究发现,国际贸易增加了5%的二氧化碳排放量,全球每年从国际贸易中获得的收益相当于5.5万亿美元,超过了国际贸易因二氧化碳排放而产生的成本161倍,这说明尽管自由贸易可能会因额外的二氧化碳排放而产生环境成本,但相对于贸易利益来说很小。作者也评估了几个航运碳排放法规提案的福利后果,这些政策均大幅增加富裕国家福利,但以降低贫穷国家福利为代价,造成了不平等,同时增加了不受监管的二氧化碳排放。尽管如此,这些政策都增加了全球福利,因为其降低贸易环境成本的程度超过了降低贸易收益的程度,产生了一系列从富国到穷国的收益和机遇转移,进而使这些政策惠及所有国家。Sat(2016)将制造业区分为肮脏和清洁行业,全面分析了土耳其跨国公司制造业污染情况,实证研究结果非常支持土耳其作为“污染天堂”的结论。Wiebe & Yamano(2016)运用经合组织成员国投入产出表(intercountry input-output, ICIO)和国际能源署燃料燃烧数据,估算最终需

求和国际贸易隐含碳排放量。研究发现,大多数经合组织成员仍是隐含碳排放净进口国,非经合组织成员因经济与出口增长及人均收入上涨而导致碳排放量不断增加。Cherniwchan et al(2017)提出了研究贸易与环境关系问题的新方法、新测度和新发现,对企业、行业和国家层面生产活动变化所产生的隐含碳排放进行了分解分析,特别是对异质性企业贸易模型(Melitz, 2003)进行了扩展,纳入了环境因素,并应用企业层面数据以验证污染天堂假说。研究发现,企业层面碳排放存在显著异质性,并且与贸易高度相关,证实了企业层面的污染天堂假说成立。Kim et al(2018)关注了贸易开放对发达国家减少二氧化碳排放的有利影响。发达国家具备促进高技术工业发展的有效机制,因此其环境法规能有效控制能源密集型生产。发达国家将能源密集型设备的生产外包给环境政策较为宽松的发展中国家,并将能源密集型产品作为其全球供应链中的零部件再进口。贸易开放对发达国家的有利环境效应可能以牺牲发展中国家为代价。Murthy & Gambhir(2018)使用不同模型模拟环境库兹涅茨曲线,分析环境库兹涅茨曲线和污染天堂假说在印度是否成立,结果证实印度呈现N型环境库兹涅茨曲线,并证明印度在经济发展进程中确实沦为发达国家的污染天堂。Jiborn et al(2018)、Baumert et al(2019)、Jiborn et al(2020)改进并调整碳泄漏核算方法,纳入技术因素进行测算,以检验关于发达经济体碳泄漏和经济增长脱钩的争议是否成立、发达国家“有系统地将排放外包”给发展中国家的说法是否成立,并评估了国际贸易如何驱动发达国家采用以生产为基础的碳排放核算方式。Baumert et al(2019)证明,发达国家碳排放外包规模远小于之前的估计,发达国家和发展中国家之间的明显鸿沟已逐步消失,许多发达国家尤其是欧洲国家正在“内包”排放,而不是“外包”。Assogbavi & Déés(2023)指出,由于各国减排政策及执行存在差异,碳泄漏会通过将碳排放密集型生产转移到环境监管不严格的国家来抵消全球范围内的减排成果。具体研究方法为,运用面板数据和标准引力模型来评估收紧环境政策是否起到激励离岸高污染活动的作用。研究发现,在考察环境政策最严格国家的进口时,确实发现了碳泄漏的证据,这表明致力于实现碳中和目标的经济体需要解决气候政策方面的全球合作问题。

### 三、贸易隐含碳测度及影响因素分析

测算与度量贸易隐含碳是研究并解决贸易隐含碳问题的关键技术环节。贸易隐含碳测度明确将隐形碳消费源头转化为有形碳责任主体。精准测度贸易隐含碳可明晰碳排放责任归属,进而优化全球气候治理。

#### (一)贸易隐含碳测度方法

测算贸易隐含碳排放可采用过程分析法和投入产出法(input-output analysis, IOA)。过程分析法又称为自下而上法(bottom-up),即从局部到总体汇总各产品、服务、产业、行业、国别、地区、区域的碳排放。具体做法是分析产品和服务生命周期(life cycle assessment, LCA),识别并记载所有投入品、原材料和能源在整个生命周期循环过程中的碳排放数量和流动轨迹。该方法要求有丰富细致的数据,统计实施较难,主要适用于数据质量较高国家的特定产品或服务。投入产出法又称为自上而下(top-down)法,其逻辑理念与过程分析法相反,主要依据国际和国别投入产出表中的数据来测算直接和间接碳排放。

目前贸易隐含碳相关研究大多采用投入产出法。经济学家里昂惕夫最早系统地提出了投入产出模型,以表现一国(地区)一年内的经济循环状况(Leontief, 1951),之后又将投入产出法应用于经济结构及其环境效应分析(Leontief, 1970)。投入产出法将经济体系中各产业的相互关联具体化和完善化,并制作生成投入产出表。投入产出表横向反映产品需求,纵向反映生产要素投入,展示要素在各产业部门之间的流动及循环状况。投入产出模型已成为能源和环境领域量化研究最重要的基准模型之一,实际运用中又发展出单区域投入产出模型(single-region input-output analysis, SRIO)

和多区域投入产出模型(MRIO)两种。

单区域投入产出模型用于计算一国或少数几国的不同经济部门在国际贸易中投入产出变化情况,模型操作简单,所需数据量较少。但是,单区域投入产出模型假设各国在产品生产上技术同质,而现实中各国能源结构、生产技术差异很大,技术同质假设导致单区域投入产出模型误差较大。模型也并未区分各个对外贸易伙伴,而将一国(地区)的所有贸易国视为一个整体来研究双边贸易隐含碳排放情况,无法清晰划分出具体两国之间双向碳排放流动情况。多区域投入产出模型试图弥补单区域投入产出模型的不足,将各国因技术水平不同而导致的碳排放系数差异纳入研究假设,摒弃了技术同质性假设。考虑到加工贸易在产品生产过程中作用,该模型将产品分为中间需求和最终需求两部分。多区域投入产出模型将不同国家、不同部门均纳入同一投入产出表中,将产品来源去向详细追溯到一国具体产业部门,其核算更为细致准确。但是,多区域投入产出模型计算过程非常繁琐复杂,且对数据可获得性要求较高,尚需进一步完善。

学者们不断扩展和改善投入产出模型以准确测算隐含碳排放。Galli et al(2013)将多区域投入产出模型扩展到环境保护框架下,建立包括生态足迹、碳足迹(carbon footprint)和水足迹的足迹家族系列指标,以追踪人类活动对环境生态所带来的压力,并将该系列指标与国民经济账户和贸易统计数据相结合,从而评估与一国具体产品和服务消费相关的生态资产占用、温室气体排放以及淡水资源消耗和污染。Greenstone et al(2013)总结了测算碳社会成本(social cost of carbon, SCC)的方法以及监管决策的相关研究。碳社会成本是进行气候政策成本效益分析的关键工具。该方法在收益分析中纳入了减少碳排放监管行动的预期社会收益,在成本分析中纳入了隐含碳排放对福利的影响,即通过对各国贸易过程中隐含碳的具体计算分析其带来的福利影响。Kander et al(2015)提出了测算贸易隐含碳的新方法,即经技术因素调整后的核算体系,该方法的主要贡献是将碳排放强度标准化到世界平均水平。Peters et al(2017)运用多区域投入产出模型研究了全球发达国家和发展中国家贸易隐含碳排放量变化趋势和原因。研究发现,在 21 世纪初全球经济强劲增长后,碳排放从发展中国家出口到发达国家;2007 年以来,特别是 2008 年全球金融危机以来,发展中国家碳排放量有所下降,尤其是中国下降得非常明显;运用结构分解法分析其原因,发现中国的若干长期性变化可解释此现象,包括碳排放强度提高、生产结构变化和出口产品多样化等。Duarte et al(2018)采用多区域投入产出引力模型研究了全球贸易隐含碳排放足迹、规模及其影响因素,通过粗略估算双边贸易隐含碳排放规模及足迹来评估贸易中隐含碳排放的决定因素。Darwili & Schröder(2023)又提出了一种经技术因素调整后的新核算方法,将生产技术标准化为世界平均水平,并推导出衡量碳泄漏的新指标和新方法,定义为净弱碳泄漏(net weak carbon leakage),指因本国生产并出口而避免的外国排放量与因本国消费并进口而导致的外国排放量之间的差额。跨国研究表明,净泄漏量与人均收入之间存在正相关性。净泄漏的变化一般很小,说明国内排放量的减少没有被外国排放量的增加所抵消。

学者们通过对测算隐含碳排放的数据库加以对比分析,考察了基于不同数据库的测算结果的差异程度。Moran & Wood(2014)指出,考虑到贸易隐含碳,应当以消费作为碳排放核算基础,而以消费作为碳排放核算基础和政策工具要求各种数据库核算的稳定性和可复制性,阐释并协调 MRIO 模型不同数据库之间的差异将有助于实现此目标。据此提出整合 EORA、WIOD、EXIOBASE 和 OpenEU 四个独立数据库,使其趋同为统一解决问题的方案。Moran & Wood 观察到各个数据库之间的环境账户(F)具有最大的方差,假设变量间不存在依赖性,可使用蒙特卡洛法计算分析四个数据库最终品消费(Y)和(F)账户的差异。具体来说,通过使用估计相对标准误差(RSE)提出了四个场景,每个场景对应于 F、Y 和中间品消耗 Z 不同的相对标准误差,以此来协调统一一账户。研究发现,在初始环境账户中,最大误差在 20% 以内;基于消费的核算结果显示出最大的差异,许多国家差异达到

20%~50%，这主要是受到经济结构和最终需求差异的影响。上述发现虽然不能支持最初的假设，但是模型之间的差异是相当稳定的，没有年份波动，这表明虽然 MRIO 模型使用四个不同数据库不能产生一致的定量测度结果，但可获得相同的定性判断结果。由于使用不同投入产出数据库计算碳足迹的结果不尽相同，Wieland et al(2017)提出了衡量碳足迹评估数据库差异的新方法，即结构生产层次分解法(structural production layer decomposition, SPLD)，并以 2011 年欧盟 28 国碳足迹为例分析了 EXIOBASE、EORA、GTAP 和 WIOD 四个数据库之间的差异；在所有数据库比较中可以发现，国内贸易数据对碳足迹的影响比国际贸易更大。针对各投入产出数据库测算隐含碳的排放方法和指标差异而导致测算结果差异的问题，Giljum et al(2019)使用结构分解分析法和结构生产层分解法评估了在使用多区域投入产出模型时，EXIOBASE、EORA 和 ICIO 数据库之间的差异对全球原材料碳足迹和隐含碳排放测算的影响。

另有相关研究关注投入产出环境模型不确定性分析和敏感性分析、投入产出分析前沿与延伸等。Wilting(2012)指出环境多区域投入产出模型需要大量数据，且数据具有特定不确定性，需进行敏感性测试和不确定性分析以减少不确定性。Kitzes(2013)构建环境扩展投入产出(environmentally-extended input-output, EEIO)模型以评估经济消费活动对环境的影响，阐释该模型的目标、分析原理和计算及其分析方法的优势和局限性。由于投入产出模型涉及大量数据运算和很多复杂乘数运算，Kolokontes et al(2019)调整了投入产出模型中各种运算矩阵和乘数因子，并对部分运算板块提出替代方法和适用扩展。Agez et al(2020)指出，由于生命周期评估依赖对价值链及其与环境互动的详细描述，但严重的数据差距限制了描述完整性，因此，有必要结合产品生命周期评估和环境扩展投入产出分析的优势来组建混合的 PLCA-EEIO 数据库，以获取能涵盖多产品生产系统且更为具体和完整的碳排放情况。Cabernard & Pfister(2021)指出，环境多区域投入产出模型在研究全球价值链对环境的影响方面具有关键作用，但目前数据库在空间(如 EXIOBASE3)或部门分辨率(如 EORA26 和 GTAP)及其指标覆盖范围方面受限。为提高现有 MRIO 数据库的分辨率、质量和指标覆盖率，作者运用 EORA26、FAOSTAT 和以前研究结果得出国家和部门具体份额，并对每个元素进行加权的，以分解和改进有限空间分辨率；改进的数据库涵盖 189 个国家或地区、163 个部门以及 1995—2015 年间的一整套环境和社会经济指标。他们运用修正后的投入产出数据库测算了欧盟 27 国的隐含碳排放，发现欧盟碳足迹具有显著变化，2015 年导致欧盟三分之一水资源压力和一半生物多样性丧失的碳足迹是由 EXIOBASE3 中世界其他国家(rest of the world, ROW)造成的。这主要归因于欧盟粮食进口分别在埃及和马达加斯加造成了较高的水压力和生物多样性丧失。他们将碳、水压力和生物多样性丧失足迹添加到绿色经济进步(green economy progress, GEP)测量框架之中，发现大多数国家没有实现其环境目标，许多国家碳足迹分布越来越广泛，因此实现绿色经济要通过全球供应链来管理。Fry et al(2022)创建了多尺度嵌套 MRIO 表，将地区、国别等局部影响与全球价值链联系起来，在分析次国家空间细节方面取得了显著进展，推进工业生态学和工业生态虚拟实验室(IELabs)从国际和国家投入产出表时代进入次国家投入产出表时代。研究结果表明，在进行基于消费的碳足迹评估时，嵌套 MRIO 表提供了更多细节和数据，从而改进了区域影响量化评估。

## (二) 贸易隐含碳流动、碳足迹与影响因素分析

测算贸易隐含碳流动和碳足迹能够具体化并显性化贸易隐含碳在不同国家和部门之间的转移，并实现碳排放的追根溯源，从而提供数据支持，便利各国有的放矢地开展降碳工作。碳足迹是指企业、组织、产品或个体在物流、运输、生产和消费等全周期中产生温室气体(主要为二氧化碳)的排放集合。碳足迹以二氧化碳当量计算，并非温室气体的简单加总，而是温室气体气候影响潜力的加总。碳消耗越多，二氧化碳排放越多，碳足迹分布更为密集；反之，碳足迹分布较为稀疏。

Wood et al(2018)结合 EXIOBASE3 数据库，运用多区域投入产出模型测算了经合组织成员和

非经合组织成员的贸易隐含碳排放量和流动足迹,并进行对比分析可以发现,就如何促进经济增长与隐含碳排放脱钩而言,经合组织成员和非经合组织成员差异较大。Cezar & Polge(2020)考察国际贸易中商品和服务生产及分销所产生的隐含碳排放量时,既考虑一国国内生产导致的隐含碳排放,也纳入国际贸易隐含碳排放量。研究发现,2015年因国际贸易诱致的生产和分配产生了80亿吨碳排放,占到全球320亿吨碳排放总量的1/4。诸多学者运用多区域环境投入产出模型、结构分解模型、全生命周期评估等工具方法分析了国际贸易隐含碳排放流向,结果表明,中国是碳排放净出口国,而美国是净进口国;发达经济体消费二氧化碳比实际排放多,而新兴经济体或大宗商品生产国则相反。这种碳排放量反差主要归因于国际贸易中商品产业部门的结构差异,其他原因包括一国经济或人口规模、生产设备碳排放效率以及融入全球价值链程度。Escobar et al(2020)将生命周期评价与贸易流量分析相结合,以高空间分辨率量化农产品生产和贸易隐含碳排放量,估算2010—2015年间巴西大豆出口隐含碳足迹。研究发现,大豆作为世界交易量最大农产品,也是巴西主要农业出口作物,对环境有重大影响;大豆与自然植被损失直接相关;大豆的整个供应链采购地区、进口国和子阶段碳排放都存在极大空间变异性。Demeter et al(2021)使用环境扩展投入产出模型研究了旅游业的隐含碳排放及碳足迹,分析了环境扩展投入产出模型下旅游业碳足迹定义、数据和测算结果,并提出将旅游业部门的碳流动与国际气候承诺联系起来,推进可持续发展目标。Pirson & Bol(2021)使用自下而上的生命周期法估算了物联网终端设备在生产和贸易过程中产生的隐含碳排放量和碳足迹,并通过十年期宏观分析估算全球物联网终端设备生产所导致的隐含碳足迹流动情况,强调设计和部署物联网终端设备时考虑环境限制的必要性。

由于近年来低碳议题频繁被提上日程,因此关于隐含碳排放量影响因素的话题也愈发引起关注。Grossman & Krueger(1991)首次使用结构分解方法探寻了贸易影响环境的因素和途径。此后,学者们对贸易隐含碳排放影响因素研究主要沿用分解理念,使用不同分解法将隐含碳排放量分解为不同组成部分,通过分析各部分变动进而汇总整体变动,力求从源头分析碳排放增长的原因。研究中发展出了结构分解法(structural decomposition analysis, SDA)和指数分解法(index decomposition analysis, IDA)。SDA属于算数分解法范畴,可分析出较多效应,但一些效应含义模糊,不利于多期动态比较;IDA属于指数分解范畴,原理简单,易于理解,方便操作,强调指数含义和分解规则。相比于IDA,SDA对数据要求比较高,操作更加繁琐。IDA中的对数平均迪氏指数(logarithmic mean Divisia index, LMDI)法可以保持各分解指标一致性,有效分析总体指标且没有残差,防止伪回归问题,操作性和适应性强,近年来广泛应用于环境研究中,尤其是对碳排放的分解和分析。

Cansino et al(2015)基于对数平均迪氏指数法对西班牙35个生产部门隐含碳排放的影响进行了分析,影响因素包括碳强度因子(CI)、能源强度因子(EI)、经济结构组成(ES)、经济活动因子(EA)和人口(P)。研究发现,可再生能源可以有效抑制二氧化碳排放。Su & Thomson(2016)详细分析了中国135个行业一般贸易出口和加工贸易出口的隐含碳排放,并应用结构分解法分析了2006—2012年间隐含碳排放量的影响因素,研究发现,降低排放强度在减少碳排放量方面发挥关键作用,而扩大出口贸易规模对隐含碳排放量增加贡献最大。Jiborn et al(2018)通过结构分析法将贸易规模、贸易结构、能源结构和技术效应等作为影响因素,分析了瑞典和英国的贸易隐含碳排放,发现技术调整有利于抑制碳排放,且两国贸易结构也会对双方碳排放造成影响,两国进口相对于出口更为碳密集。Shapiro & Walker(2018)研究发现,在1990—2008年间,尽管美国制造业的实际产出大幅增长,但制造业最常见的空气污染物排放量却下降了60%。为解释此现象,该文运用分解模型将制造业排放的变化分解为制造业总产出规模、产品的构成和污染强度引起的变化,估测了自1990年以来污染排放量下降的三种可能的原因:第一,中国、墨西哥和其他国家污染密集型产品的生产减少了美国的污染,美国的生产转移到上述国家,并进口相关产品产生了贸易隐含碳;第二,环境监管可能

促使企业使用更多有效的减排技术;第三,如果高生产率降低了污染强度,那么生产率的提高可能会减少污染排放。该分解也表明,几乎美国制造业污染排放的所有变化都是由狭义产品类别中污染强度的变化所导致的。Liobikienė & Butkus(2019)使用 1990—2012 年间 147 个国家的面板数据,运用系统 GMM 模型及结构分解模型测算了影响各国碳排放的因素,发现 GDP 规模显著影响温室气体排放,但尚无证据表明城市化和外国直接投资对温室气体排放的规模效应。贸易规模和温室气体排放之间存在负相关关系,这与碳泄漏效应相矛盾。在技术效应方面,GDP、城市化程度和贸易规模只通过能源效率而不是通过可再生能源来促进碳排放减少,各国应在保证经济增长的同时实现技术发展和能源效率的更快增长。

#### 四、贸易隐含碳的实证研究

##### (一)区域与国别贸易隐含碳排放

国外学者主要应用投入产出模型,从消费端和生产端实证分析全球、区域和国别贸易隐含碳,包括国家之间整体进出口贸易隐含碳以及单个产品部门进出口贸易隐含碳的排放量及流动情况。

关于国家之间的贸易隐含碳核算成果较为丰富。Steen-Olsen et al(2012)运用 GTAP 7 数据库和多区域投入产出模型来评估欧盟的碳、水和土地三种环境足迹在国际贸易中的生产、消费和转移情况。研究发现,欧盟通过进口碳密集产品,将环境压力转移到世界其他地区;2004 年欧盟公民的平均消费活动导致 13.3 吨二氧化碳当量的温室气体排放,而全球平均水平仅为 5.7 吨二氧化碳当量;其中英国是最主要的温室气体排放净进口国,波兰是最大的温室气体排放净出口国。Jakob & Marschinski(2013)认为,从贸易隐含碳的净转移中不能直接得出有关贸易专业化模式的结论。贸易隐含碳净出口国不仅因为生产相对碳密集商品,也可能因相应的碳投入使用低效所致。该文对六个最大的隐含碳排放出口国和进口国以及五个最大的双边排放转移的碳贸易平衡进行了细化的拉氏指数(Laspeyres index)分解,将隐含碳净流量归因于贸易平衡、能源强度、能源系统碳强度和贸易专业化四个因素。研究发现,美国净碳进口约 50%可归因于其贸易逆差,而贸易差额的影响对中国和法国低于 10%,对德国、俄罗斯和日本约为 15%。中国(高碳强度)和法国(低碳强度)的国内能源系统碳强度分别约占碳贸易净余额的 25%和 50%,而其他国家的碳强度则可以忽略不计。他们证实了中国和美国在碳密集型产品出口方面的相对专业化,但专业化只能解释中国碳出口总量的 29%以及美国进口总量的 43%。Fernández-Amador et al(2017)根据生产和消费排放清单评估了二氧化碳排放与经济增长的关系。其中,以人均实际国内生产总值(GDP)衡量经济增长,以生产端和消费端的化石燃料燃烧产生的人均二氧化碳排放量衡量二氧化碳排放;使用 Fernández-Amador 在 2016 年开发的数据集,这些数据包括 1997 年、2001 年、2004 年、2007 年和 2011 年 178 个经济体在《京都议定书》通过后 14 年和 2005 年生效后前 6 年各生产阶段到最终消费的碳排放。结果表明,因为收入增加而产生的消费具有更强的碳密集属性,而因为生产所产生的消费碳密集度较低,但两种收入弹性都小于 1,表明碳排放和经济增长之间相对脱钩;当经济水平发展到环境库兹涅茨曲线的拐点之后时,发展带来的碳效率收益很小;单位产出的排放强度可能会随着人均收入的增加而下降,但生产和消费增加所带来的数量效应远超收入增加所带来的二氧化碳排放强度下降效应;随着发达国家和发展中国家的收入不断增加,可以预料在生产和消费中的隐含碳排放将不断上升。Becque et al(2017)指出,根据 2009 年的数据,欧盟成员国卢森堡、奥地利、法国、瑞典和爱尔兰是按百分比计算的最大碳净进口国(进口与出口的碳排放量差值),而德国、法国、意大利、西班牙和荷兰是按绝对值计算的最大碳进口国。总体而言,欧盟内部最大的碳进口国为德国、法国和意大利。Darwili & Schröder(2023)研究发现,1990—2011 年间虽然发达国家与《京都议定书》要求的相关领土排放即以生产为基础的碳排放(PBE)减少,但是贸易隐含碳排放量增加。2008 年,发达国家向发展中国家转移了 1.6

亿吨二氧化碳,这一数量超过了《京都议定书》期间所实现的减排数量。

关于单个国家的贸易隐含碳排放规模的研究较为细致。Levitt et al(2017)测度了基于消费(以消费为核算基础,包含跨境交易)的澳大利亚温室气体排放,具体方法为运用多区域投入产出模型数据和世界投入产出数据库,分析1995—2009年间澳大利亚基于消费的温室气体排放。研究发现,自2001年以来,以消费为基础的排放增长速度一直快于以生产为基础的排放;澳大利亚进口产品隐含碳排放正日益成为一个重要的排放来源;对澳大利亚进口产品隐含碳排放量分析发现,中国和澳大利亚的贸易增长在很大程度上促进了澳大利亚消费排放的增加。Guedidi & Baghdadi(2020)运用面板数据和引力模型研究了1990—2015年间中东和北非(MENA)地区国家碳排放、区域贸易协定(RTAs)环境条款和全球价值链(GVCs)之间的关系。研究发现,区域贸易协定对碳排放有正向影响,而中东和北非地区良好的制度质量弱化了碳足迹。中东和北非国家参与全球价值链加剧了上游低技术制造业和下游高技术制造业以及初级产业的环境恶化。中东和北非地区后向参与全球价值链时,区域贸易协定可以减少碳排放。Nguyen(2022)采用多区域投入产出模型,通过比较越南出口隐含碳排放规模和贸易附加值,分析了越南出口活动对经济和环境的影响,并提出了未来调整越南出口战略的建议。研究发现,2006—2015年间越南的出口中二氧化碳排放量和碳排放强度均有所增加,贸易附加值强度降低,出口生产比国内生产带来更多的贸易增加值和更低的碳排放。Banerjee(2021)使用2011—2014年投入产出模型,量化比较了印度与两个最大贸易伙伴即美国和英国的双边贸易隐含碳排放,进而估算碳泄漏规模,并考察影响贸易隐含碳排放规模的重要驱动因素及其效应。空间分解分析证明了印度与美、英的产出排放强度差异对贸易隐含碳排放失衡的影响最大,据此建议印度应选择排放密集度较低的能源以降低排放强度并缓解全球环境压力。Montoya et al(2021)分析了巴西在国际贸易活动中使用可再生能源和不可再生能源如何影响全球气候变化。研究中运用了综合能源矩阵和生态投入产出模型,分别衡量不同经济部门使用可再生和不可再生能源产生的国际贸易隐含碳排放量。结果显示,巴西的能源矩阵是全球平均水平的三倍,可再生能源占总能源的47.5%。全国能源足迹为267.4公吨,其中61.7%来自国内,38.3%来自进口,全国碳足迹为765.1公吨,其中61.5%来自国内,38.5%来自进口。进口增加了巴西的不可再生能源使用的碳足迹,因为进口商品和服务中只有3.8%的排放来自可再生能源。相比之下,巴西的出口有助于世界碳足迹的清洁化,因为出口中39.4%的排放来自可再生能源。巴西是不可再生能源排放量的净进口国和可再生能源排放的净出口国,为缓解气候变化做出了积极贡献。

关于行业层面排放规模和流向的实证研究也比较充分。Aichele & Felbermayr(2015)提出了检测碳泄漏的新方法,即根据贸易隐含碳来评估《京都议定书》约束下的消费需求导致的碳泄漏量。他们根据经合组织和联合国公布的数据,对1995—2007年间40个国家、12个行业的双边贸易隐含碳构建数据库,运用引力模型方程来测算碳泄漏。研究发现,一国单方面征收碳税会导致从没有征收碳税的国家进口碳的增加;气候承诺国家比没有承诺的国家从无气候承诺出口国的碳进口高出约8%,进口产品的碳强度要高出3%左右;12个部门中至少有5个部门存在碳泄漏;受影响的行业包括金属、其他非金属矿物产品、纸张和纸浆。另一方面,木材和木制品、纺织品似乎不受碳泄漏的影响。Yamano & Guilhoto(2020)考察了2005—2015年间65个经济体的最终需求,讨论了国际贸易隐含碳排放量估算的来源和方法,利用经合组织成员间投入产出表和国际能源机构燃料产生二氧化碳排放的统计数据,应用新细化方法,即遵循领土原则和居民原则,区分基于经济产出和最终需求排放、进出口总额中隐含碳排放的差异,按主要燃料源估算出以生产为基础的工业排放和家庭燃料排放,测算出最终需求和国际贸易隐含碳。研究发现,2015年约有8.8亿吨碳排放与国际贸易有关,约占全球碳排放量的27%;化学和非金属矿物产品、基本金属和金属制品、计算机电子和电气设备、能源产品开采和提取、机械设备、机动车、纺织服装和皮革等7个工业部门二氧化碳排放量约占出口的三分之二。

更多文献倾向于研究隐含碳排放的长期变化趋势和转移方向。Wood et al(2020)根据碳排放历史趋势和气候政策,预测未来国际排放转移走向,使用全球多区域投入产出模型和 EXIOBASE 数据库,验证了 1970—2015 年间二氧化碳排放的长期趋势。具体方法为,采用宏观计量能源—环境—经济模型(macro-econometric energy-environment-economic model),根据《巴黎协定》中的国家自主贡献(nationally determined contributions, NDCs)对各国差异化碳政策进行建模,分析并预测 2016—2050 年间碳排放转移。研究发现,国际碳排放转移已于 2016 年达峰,之后一直下降并趋于稳定,此结论得到多个模型支持。情景模拟表明,在差异化碳排放政策下,发达国家与发展中国家之间碳排放转移可能会缓慢增加,但在 2040 年之前不太可能回到 2015—2016 年的峰值;根据《巴黎协定》国家自主贡献,不仅不会导致“碳泄漏”,而且发达国家与发展中国家之间净排放转移倾向于减少;发达国家实现国内脱碳后,进口所占排放量占总碳足迹的百分比可能会增加;气候政策应侧重于通过包括国际援助在内的各种机制,使人们注意到解决碳排放问题的重要性并使之合法化;目前的《巴黎协定》国家自主贡献几乎只涉及领土排放,建议扩大 2020 年到期的下一轮国家自主贡献范围,通过引导国内消费和国际援助等政策措施,将解决碳排放问题落到实处。Weber et al(2021)研究了 1995—2009 年间 41 个国家 35 个部门的碳排放强度,考察其变化趋势和驱动因素,并采用世界投入产出数据库(WIOD)计算具体隐含碳排放量。研究发现,相对“肮脏”国家往往专门从事排放密集型行业;排放密集型国家生产污染密集型商品的份额正在上升;化石燃料大量燃烧导致“肮脏”部门单位产出排放量增加,体现化石燃料禀赋环境负向效应。上述发现表明,贸易自由化会增加全球排放量,据此凸显在设计碳减排战略时考虑国际贸易因素的重要性。Hasanbeigi & Darwili(2022)为剔除新冠疫情因素对国际贸易的影响,对 2019 年前的数据开展了研究,建立了环境扩展型多区域投入产出模型,使用最新的 EXIOBASE3 数据库(3.8.2)(EXIOBASE 2022),整合细化多个国家钢铁、铝和水泥等行业碳强度和原材料投入产出表,测度贸易隐含碳总体规模、地区分布和全球贸易转移情况。研究发现,全球前 10 大碳排放流由中国、美国和日本主导,印度、俄罗斯、加拿大和韩国在全球前 20 名碳排放国中也扮演重要角色;大多数发达国家进口碳排放高于出口碳排放,而发展中国家或地区与之相反。隐含碳排放地区流量排名前三位依次为中国到其他亚太地区、中国到美国、其他亚太地区到中国。中国是最大的碳排放净出口国,美国是最大碳排放净进口国,排放主要来自中国(3.49 亿吨)、加拿大(1.58 亿吨)和墨西哥(7600 万吨),美国总碳进口占国内消费总碳排放的 22%。欧盟 27 国是隐含碳主要进口国和出口国。发展中国家向中等收入国家碳排放转移超过向美国和欧盟等传统高消费国家碳排放转移。

过去十年中,发展中国家向美国、欧盟、七国集团等北方国家的碳排放转移已趋稳定,相反,南南贸易或发展中国家与欧洲和北美以外的国家贸易导致隐含碳规模增长。自 1995 年以来,这些国家之间实际排放转移增长了四倍,全球商品贸易中钢铁和化工产品贸易隐含碳比重最高,在服务贸易中,海运和空运服务隐含碳比重也很高。大宗钢材、钢材制品、水泥、熟料、铝和化学品行业存在区域间和区域外的显著贸易隐含碳流动。2021 年钢铁贸易中隐含碳总量约 7 亿吨,相当于全球钢铁行业二氧化碳排放总量的 19%,中国是最大钢铁贸易隐含碳净出口国,占全球出口钢材隐含碳的三分之一,美国是最大净进口国。大宗钢材贸易隐含碳占钢铁贸易隐含碳流动的二分之一,另一半由含钢商品(如汽车、金属制品、机械、家用电器等)贸易隐含碳组成。2019 年水泥熟料贸易隐含碳总量约 1.41 亿吨,占全球水泥工业二氧化碳排放总量的 6%;铝贸易隐含碳总量约 1.47 亿吨,占全球铝工业二氧化碳排放总量的 22%。

近年来关于中国贸易隐含碳排放的实证研究渐趋丰富。Su & Ang(2014)利用空间聚集水平估算了中国出口隐含碳。研究发现,当在国家层面上使用全国平均碳强度进行汇总时,来自中部地区和东部沿海地区(碳强度较低)排放被高估,而来自东北部和西北部地区(碳强度较高)的排放被低估;净效应伴随地区数量增加,中国出口二氧化碳总量有所下降。Weitzel & Ma(2014)基于中国出口导向的特定

贸易结构,并应用投入产出模型分析了 2007 年中国出口隐含碳排放量,再将中国计算结果与全球其他国家数据相比较发现,与标准模型(1782 公吨)相比,30 个省份模型(1730 公吨)和出口加工模型(1630 公吨)产生的中国出口隐含碳排放量更低,如果不考虑省际贸易,排放量甚至更低(1522 公吨)。

## (二) 贸易隐含碳的政策效应

贸易隐含碳问题引致的重要气候政策是碳边境调整(border carbon adjustments, BCAs),现实政策工具为欧盟排放权交易系统(European Union Emissions Trading System, EU ETS)、欧盟碳边界调整机制(carbon border adjustment mechanism, CBAM)和欧盟碳关税,以及酝酿中的低碳气候俱乐部。2005 年,欧盟引入欧盟排放权交易系统,又称配额与交易(cap and trade),旨在分配或出售排放限额或许可,并设计了促进碳减排的消费者行为倡议方案。目前,欧盟的 EU ETS 逐步被更为严格的欧盟碳边界调整机制所取代。欧盟称 CBAM 是对进入欧盟的碳密集型产品生产过程中排放的碳进行公平定价的标志性工具。CBAM 的逐步引入与 EU ETS 下免费配额分配的逐步淘汰相一致,以支持欧盟工业脱碳。另有诺贝尔经济学奖得主诺德豪斯及社会名流主张设立低碳气候俱乐部(Lee & Baron, 2021)。诺德豪斯(Nordhaus, 2015)认为,“对非会员进行处罚”的气候俱乐部是克服应对气候变化和大幅减少排放的集体行动问题的最有效方式。

相关实证研究旨在关注如何制定合理的气候政策和减排政策,以减少隐含碳排放对环境的负面影响,基本结论是,若一国(地区)污染密集型行业产品的出口占较大份额,则该国(地区)参与全球气候制度安排可能产生巨大实际或预期经济成本。Sato et al(2015)设定若干指标衡量了制造业对碳排放泄漏的潜在暴露程度,用以分析英国和德国的详细数据。在 159 个工业子部门中,碳泄漏风险脆弱部门在排放、增值和就业方面所占份额虽然较小,但仍不可忽视;碳排放增加并非仅发生在国内,而是嵌入在进口中并发生在其他国家,即存在贸易隐含碳。两个国家部门之间的能源价差每增加 10%,进口增加 0.2%。能源价格差异只能解释国际贸易流动中观察到的低于 0.01%的变化。假设欧盟排放权交易系统的碳排放价格为每吨二氧化碳 40 欧元至 65 欧元,欧盟从世界其他地区的进口将增加不到 0.05%,出口将减少 0.2%。

关于碳关税对贸易隐含碳排放的抑制作用和其实效效果的量化分析也较多,且研究普遍认为实施碳关税的减排效果显著。Böhringer et al(2016)运用博弈论模型考察发现,当面对碳关税威胁时,未监管碳排放地区能否因碳关税诱发而控制碳排放,进而降低全球减排的成本。在博弈中,一些发达国家组成联盟监管碳排放,并选择是否对不受监管的地区征收碳关税,不受监管的发展中国家和地区通过降低、报复或无视关税来应对,博弈的收益由数值模型生成。分析表明,联盟国家宣布减排时,一方面,国内经济受到影响;另一方面,由于联盟国家亦为发展中国家出口目的地,减排的影响外溢到发展中国家,包括中国和俄罗斯皆处于不利地位,同时叠加关税威胁;在纳什均衡中,使用关税是一种可信而有效的威胁,它诱导非联盟地区的合作,相对于联盟地区单独行动的情况,降低了全球减排的成本;在均衡中,只有很少的成本节约来自对那些仍然不合规的地区征收关税。Larch & Wanner(2017)开发了多部门、多要素的结构引力模型,用反事实法引入碳关税进行分析,并且将隐含碳排放变化定量分解为规模、结构和技术效应,分析碳关税对贸易、福利和碳排放的影响。研究发现,碳关税可改变国家内部和国家之间的生产构成,进而降低全球碳排放和碳泄漏,但其代价是世界贸易规模减小,同时气候政策承诺国的福利大幅度下降,降幅高达 4.7%,其中发展中国家的福利降幅最大;全球碳排放减少的三分之二由结构效应驱动,三分之一由规模效应驱动;对生产商征税比对产品征税减排效果更强;碳泄漏削弱了全球气候协议的有效性,如果全球气候协议规定的各国减排承诺目标完全实现,全球碳排放量将减少 8.4%;由于全球碳排放的减少和污染密集型行业竞争力的增强,未做出气候政策承诺的国家的福利有所增加;引入碳关税后,全球碳排放量将减少 9.3%;对未承诺减排国家征收碳关税抵消了未承诺国家的大部分福利收益。

关于碳边境调整的研究成果也非常显著,在量化了碳边境调整所带来的减排量基础上,分析非碳定价经济体和污染密集型行业所需承受的关税负担之后,对碳边境调整设计中需要考虑的一系列问题,包括哪些行业应纳入该机制,如何评估相关排放进行了思考。Sakai & Barrett(2016)通过量化碳边境调整实际可征收排放量,确定非碳定价经济体所面临的关税负担如何受到与贸易条款、产品碳强度以及部门和国家覆盖范围相关问题的影响,研究发现碳边境调整政策是复杂、昂贵和无效的政策工具,质疑诸如碳关税等碳边境调整政策减少碳泄漏的有效性和实用性,进一步增强了反对实施碳边境调整政策的理由。Kortum & Weisbach(2017)提出使用碳边境调整这一政策工具解决碳定价背景下的碳泄漏问题。碳定价是对排放的温室气体进行定价,以鼓励减排并应对气候变化。然而碳定价措施不当可能导致排放密集型活动从碳定价较高的国家转移到碳定价较低或没有碳定价的国家,从而导致碳泄漏。这就凸显了碳边境调整的必要性,其目的是根据进口商品的碳含量或出口国的碳价格对进口商品碳排放征税,以实现公平竞争。文章深入探讨了实施碳边境调整相关措施的考量和挑战,包括边境税率的确定、行业或产品的选择、核算方式的选择、国际贸易与合作以及法律和潜在的潜在影响,认为各国必须仔细设计和密切协调以确保碳边境调整有效且可接受。Cosbey et al(2019)认为,实践中执行碳边境调整政策需要估算进口产品整个供应链上的隐含碳排放规模,要求进口商支付国内碳价格乘以进口的碳足迹,或者交出相应数量的排放许可。Marcu et al(2020)确定了欧盟碳边境调整设计中需要考虑的一系列问题,包括哪些行业应纳入该机制,如何评估进口相关排放,如何获得碳边境调整政策的豁免,以及碳边境调整的收入如何使用。该研究强调了政策制定者面对诸如环境保护、对行业竞争力影响和行政可行性方面等不同目标所面临的权衡,并强调了某些设计之间的相互关系,据此提出了三种碳边境调整设计方案。Moran et al(2020)研究了欧盟排放权交易系统(EU ETS)的效果,将已有微观层面研究与多区域投入产出模型相结合,估算出欧盟内部每种消费者行为对碳排放的潜在效力和吸收率。研究发现,采用欧盟碳配额与交易的消费者行为倡议方案可以减少约25%的碳排放。Kortum & Weisbach(2021)构建多国均衡模型和动力学路线图(dynamics roadmaps)以量化最优单边碳政策,并根据全球碳流动数据校准BAU(business as usual)竞争均衡,然后计算相对于该基准的最优政策;竞争均衡中产生最优结果的税收和补贴表明,在国内设定开采税、碳边境调整税和出口补贴的组合可以间接控制所有碳泄漏;最优政策还可以通过通过对进口商品进行碳边境调整税和对出口商品提供特定补贴的组合来控制碳泄漏。Böhringer et al(2022)评估了碳边境调整政策对减少碳泄漏、提升竞争力以及对成本收益的潜在的环境与经济影响。研究发现,单方面的碳定价会通过两个渠道加剧全球的碳泄漏现象:其一,导致对高污染的化石燃料需求变少,进而全球化石燃料价格下降,使得其他无碳定价的国家在不需任何代价的情况下增加了对化石燃料的需求,全球的碳泄漏会增加。其二,导致碳密集型企业的运营成本上升,进而减产甚至退出市场,而国外监管较少的碳密集型厂商的生产增加不仅对本国造成严重竞争,还会加剧全球碳泄漏。边境碳调整可能引发国际贸易战和国际气候政策中的地下合作,各国为了谋求自身利益会破坏公平的碳边界划定,从而边境碳调整变得不再有效。所以,一方面需要寻求边境碳调整的替代性工具,比如基于产出的再贴现(output based rediscount, OBR),即能源密集型和贸易敞口(energy-intensive and trade exposed, EITE)企业根据其生产中的低碳环保程度获得免费津贴或抵消。欧盟、美国加利福尼亚州、加拿大和新西兰使用此政策,但其弊端是它们不承担除此之外碳排放的全部成本;另一方面,只有在全球范围内统一碳定价才能形成公平有效的碳市场,最大限度地减少碳排放。

关于正在酝酿中的低碳气候俱乐部政策也在逐步纳入研究中,在将其与碳边境调整的对比分析中,为其未来更好地制定发展政策提供理论支持。Winter(2023)指出,发达国家加强气候行动体现在2022年6月G7领导人峰会承诺成立气候俱乐部以有效执行《巴黎协定》,承诺提高气候政策透明度,重点关注工业以减少碳泄漏。在欧盟宣布将排放权交易系统过渡到碳边境调整机制之后,有人

呼吁各国制定最低共同价格的碳关税俱乐部,其他人则认为碳关税俱乐部会适得其反。该文重点关注碳边境调整机制在实现 G7 气候俱乐部目标方面的利弊,认为使用碳边境调整政策作为气候俱乐部的执行机制面临五个挑战:第一,《巴黎协定》第 2 条规定签署方对气候缓解行动具有共同但有区别的责任,碳边境调整政策却将碳减排负担转移给欠发达国家,这种行为不符合第 2 条,而豁免则破坏碳边境调整政策的效率和有效性。第二,并非所有部门或产品都面临同样的碳泄漏风险,减排量和减排的成本效益在囊括的产品数量上正在减少。第三,如何确定进口隐含碳排放税率。弱税率基准对俱乐部外的减排几乎没有激励作用,而强税率基准则可能转移负担。最简单的选择是只对直接生产排放征税,更复杂的系统包括间接排放,但还需要确定间接排放涉及的供应链长度。排除间接排放意味着总生产排放量的一部分未定价,包括间接排放则增加了计算调整因子的复杂性,各国政府不得不在定价排放准确化和行政复杂性之间进行权衡。第四,成员国是否利用出口退税来保持国际竞争力。欧盟碳边境调整机制提案不包括出口退税,但加拿大和日本目前已经建立了竞争力缓解机制,将俱乐部扩大到 G7 之外可能需要出口退税,这可能会引发对气候俱乐部的更多批评。第五,对于国内碳定价和非碳定价政策的处理,碳边境调整可能不利于非定价政策。

贸易隐含碳也会影响各国进口关税、非关税壁垒等国际贸易政策工具的制定和修订。Shapiro (2021)认为,目前多数国家污染密集型行业的进口关税和非关税壁垒均低于清洁行业,污染行业和清洁行业之间的关税和非关税壁垒差异为国际贸易中的污染行业的二氧化碳排放创造了隐性的激励,这种现象称为贸易政策的环境偏差(environmental bias)。贸易政策的环境偏差普遍存在,经估算,贸易政策中的全球隐性补贴为每吨二氧化碳 85 至 120 美元,甚至大于二氧化碳排放的全球社会成本,其通常估计为每吨二氧化碳 40 美元左右。Shapiro (2021)使用多区域投入产出模型计算了 48 个国家和 163 个行业的贸易隐含碳排放。研究发现,第一,贸易政策环境偏差程度大于碳排放的最佳税收,且贸易政策对较脏的商品征收较低的税率,而最优碳定价政策会对较脏商品征收较高的税率。第二,各国在选择贸易政策时没有明确考虑到二氧化碳排放,或对其进行征税或进行补贴,且各国对清洁商品的保护力度大于对肮脏商品的保护,因此大多数国家虽然没有在国际上采取碳关税,但却在本国贸易政策中含蓄地制定了碳补贴。利用贸易政策谈判来减少贸易政策对环境的偏差有助于应对气候变化。这一提议在欧盟等已经制定了国内碳排放定价的地区尤其重要,但这些地区目前的贸易政策可能会鼓励而不是阻止肮脏商品的生产泄漏到其他地区。Hsiao(2022)提出国内环境监管不足会造成全球性后果,所以,当国内环境监管失败时,国际社会可以借助针对排放国的进口配额进行干预。文章建立动态框架下的投入产出模型以评估进口关税作为国内监管替代品的减排效果,并定量研究了印度尼西亚和马来西亚棕榈油行业的隐含碳排放,进而验证了国际气候行动协调与承诺的重要性,同时运用反事实分析法评估碳排放监管的影响。研究发现,若对棕榈油的进口采用国际协调一致的碳关税,则与国内环境监管导致的碳减排效果相同。

## 五、贸易隐含碳减排责任分担

贸易隐含碳减排责任的明确划分和合理分担成为优化全球气候政策不可回避的问题。一直以来,生产者责任制和消费者责任制成为争论的中心,多数研究更倾向于消费者责任制。贸易隐含碳作为以消费为基础的排放核算概念,具有较大的研究潜力和指标意义。

比较以生产为基础和以消费为基础的减排脱碳措施,以及融入最近国外学者提出的技术调整和收益,是目前评估和解决国际贸易活动中碳泄漏问题的最合适手段,然而究竟采用生产者责任制还是消费者责任制仍存在争议。Davis & Caldeira(2010)关于隐含碳的论文较为重要,引用率较高,提出 2004 年全球 23% 二氧化碳排放量主要由中国和其他新兴市场国家向发达国家消费者出口而产生,基于消费的二氧化碳排放核算更为合理,产品和服务的生产者和消费者共同分担排放责任可以

促进各国就全球气候政策达成一致。Jakob et al(2014)指出,将进口贸易中碳排放价格等同于这些排放的社会成本(即基于消费排放定价)并不是最佳政策,为了减少碳泄漏并使各国对全球碳排放承担相应的责任,应该将碳排放归因于消费而不是生产,并且应该考虑一系列贸易措施来减少碳泄漏,重点放在改革碳排放密集行业。然而,也有学者支持生产者责任制,Jakob et al(2013)认为,对于一国而言,基于消费者责任制的碳排放核算并不一定比基于生产者责任制核算导致更少的碳泄漏。研究发现,如果欧盟对中国出口产品实施碳关税,将导致中国的出口生产从碳排放强度较低的部门转向碳排放强度较高的部门,这反而会增加碳泄漏。

一些学者在分析生产者责任制和消费者责任制基础上,运用实证研究数据客观比较了二者的优缺点。Afionis et al(2017)探究将碳排放责任归因于消费者而非生产者的理论逻辑,分别考虑公平和公正、碳排放覆盖率、鼓励绿色生产以及政治利益等问题,并考虑在实践中采用消费者责任制时各种情境对国际气候政策的影响,探讨如何调整消费者责任制以适应政治现实,并确定可能用于直接或间接处理隐含碳排放政策的机制。Tukker et al(2020)通过多区域投入产出模型分别核算了多国基于生产者角度和消费者角度所产生的隐含碳排放,并且采用环境扩展框架下的多区域投入产出表评估各种隐含碳排放责任分担核算制度对最终隐含碳排放量化计算所产生的差异;通过对比分析并细化消费者责任制发现,与生产者责任制相比,消费者责任制更为合理。Jakob et al(2021)指出,消费者和生产者之间如何分担温室气体排放责任是国际气候政策谈判中高度敏感的问题;传统基于生产核算将责任分配给排放地区,经常受到基于消费核算体系的挑战;基于生产核算和基于消费核算都缺乏良好的经济理论基础。未来的研究应以成熟经济理论为基础,推导出如何在生产者和消费者之间分担与贸易相关的减排责任,并使用多区域投入产出数据将这种新方法应用于双边贸易关系,提出一个“经济利益共担责任”(economic benefit shared responsibility, EBSR)的方案。

在减排责任划分的基础上,研究也开始走向针对降碳的具体措施,包括引入碳的社会成本、制定减排降碳战略框架和贸易政策监管等措施。Egger & Nigai(2015)通过构建包括能源部门的 Eaton-Kortum 模型,从结构上估计了模型的关键参数,并将其校准到 31 个经合组织成员和世界其他地区在 2000 年的数据,引入碳的社会成本这一新概念以计算二氧化碳排放的负外部性。研究发现,在一个国家的碳排放影响全球环境的情况下,针对国内能源生产者征税的方法更有效,如果不存在外溢效应,则针对能源密集型投入征税会最大限度减少二氧化碳排放,对能源投入征税和对能源生产者征税对福利和碳排放水平的影响在数量上是不同的。气候工程基金会发布的咨询报告《欧洲碳漏洞》(Becque et al, 2017)认为,各国必须认识到进口带来的隐含碳排放问题,制定遏制消费排放的战略框架和行动计划;需要制定减少进口隐含碳的目标,确保计划可行且可监测;因进口而导致大量隐含碳排放的欧洲国家应采取必要步骤,开始测量并每年报告其基于消费的碳足迹,并努力使所使用的方法和模型更加协调一致;各国需要采取行动,通过政策选择减少以消费为基础的排放,可以采取引入全新政策工具的形式,也可以优化和扩大现有政策工具,积极减少商品和服务中的隐含碳排放;解决碳漏洞问题并非难有成效,政府拥有广泛的政策选择,有助于填补碳漏洞;预计通过“承认、衡量、行动”三个步骤,排放量可以减少到《巴黎协定》提出的目标。Böhringer et al(2018)认为可以利用贸易政策作为对外国排放源的隐性监管,即将碳排放纳入贸易政策中,有效限制进口商品的贸易隐含碳,体现在碳关税对进口商品的直接或间接碳排放征税,称之为“隐含碳关税”。由于经合组织成员是非经合组织成员碳排放的大型净进口国,隐含碳关税将扩大经合组织气候政策的范围。研究中运用了贸易和能源相结合框架下的可计算一般均衡模型,模拟将隐含碳关税纳入贸易政策的影响。研究发现,隐含碳关税确实能有效减少碳泄漏,但单方面气候政策在全球成本效益方面的改善空间非常有限,与对全球成本节约和再分配影响相比很小,其主要福利效应是将经合组织气候政策的负担转移到发展中国家;且隐含碳关税产生的再分配影响很大,一些实施关税的经合组织地区甚

至经历了气候政策的负净成本,而大多数非经合组织成员由于征收关税而遭受了巨大的福利损失。2017年,占全球温室气体排放量约89%的国家实施了某种形式的气候政策(Iacobuta et al, 2018),约50个国家和次国家管辖区实施了碳定价,覆盖全球温室气体排放量的15%左右。Ward et al(2019)指出,统一的全球碳价格可能会对印度和中国等发展中国家的工业竞争力产生重大不利影响,因为这些国家倾向于使用效率较低的技术和碳密集型能源,其产品的价格涨幅将高于工业化国家。Lee & Baron(2021)指出,发达国家希望找到可以推动世界在21世纪中叶实现净零排放危机的灵丹妙药,但诺德豪斯主张的低碳气候俱乐部并非这样的灵药。低碳气候俱乐部的拥护者正在以一种注定要失败的简单性来解决人类面临的最棘手的问题。欧盟的CBAM并非解决全球重工业脱碳问题的唯一模板,欧盟需要证明该计划不是贸易保护主义措施。Hasanbeigi & Darwili(2022)认为,虽然基于消费者责任的碳排放核算似乎符合公平正义原则,但受制于国家间政治经贸等多边关系的复杂性,难以实际执行,即使各国制定了相关政策,也会因为缺乏相应的监督管理而作罢。为解决贸易隐含碳问题,一些国家和地区引入绿色公共采购(green public procurement, GPP)和购买清洁产品(buy clean)政策,要求用政府资金购买钢铁、水泥、混凝土等碳密集型基础设施材料时,需选择低于设定碳强度阈值的生产商。欧洲理事会已正式接受碳边界调整机制框架,旨在减少化肥、钢铁、水泥、铝和电力生产进口贸易导致的碳泄漏(European Council, 2022)。

除降低贸易隐含碳排放措施的设计与讨论之外,关于这些措施的实施效果也值得分析。Weisbach et al(2022)通过设计世界上只有一个地区实施降碳政策的场景,探究了如何设计碳税才能使政策发挥更好的效果,并且将碳泄漏的可能因素纳入模型中,通过对模型的求解及校准,模拟出不同的政策影响。研究发现,最有效的政策是对化石燃料的供给和需求同时征税,单独对化石燃料的上游开采者和下游使用者征税将由于贸易和碳泄漏而变得无效。具体而言,对化石燃料的开采征税也就是对其供应征税,这会提高其全球价格,从而导致国外开采增加。相比之下,对生产中使用化石燃料或对商品中隐含的化石燃料消费征收,都是对化石燃料的需求征税,将降低其全球价格,导致其在国内外的使用或消费增加。最优政策是对供给和需求联合征税,从而抵消这些影响,使征税地区能够控制世界其他地区的反应。将这一微小的变化纳入碳税的设计有可能极大提高碳税在减少全球排放方面的有效性。此外,对生产和消费都征税可以最大化效率。在没有行政成本时,可以同时在国内生产和国内消费的排放征税;在存在贸易的情况下,可以最大限度地提高单边碳税的效率。但是,生产税率应该低于消费税率,以解决碳泄漏问题。由于行政和管理成本过高,在对商品进口实施边境调整的收益很小时,为了兼顾效率与成本,最好的政策是针对化石燃料开采和国内生产征税。但这只在能源供应的国外弹性较低时有效,随着能源供应的国外弹性上升,商品的边界调整变得更为可取。所以,征税联盟需要纳入在能源供应方面具有高弹性的国家,将这些国家纳入联盟中可以替代商品边界调整政策,使税收制度变得更简单、更有效率。

## 六、结论与展望

贸易隐含碳所带来的环境问题、气候政策的制定及其有效性在全球范围内引起广泛关注,国内外学者对贸易隐含碳的概念内涵、排放规模、流动足迹、影响因素等进行了大量理论和实证研究。从多维度 and 全局性战略视角看,这些研究对实现气候问题的全球治理和生产生活方式的根本变革,深入研究全球、区域和各国的贸易隐含碳问题极为重要,有利于厘清控碳责任,探索控碳策略,为未来全球各国更加高效的减排降碳提供一定的理论支撑。从我国高质量参与全球化和区域自由贸易合作角度看,准确测算贸易隐含碳的国别分布有助于我国与合作伙伴在明确减排责任的前提下开展公平谈判,为各方理性探讨“共同但有区别的责任”、科学制定减排策略提供研究支点。目前G7等发达国家联盟不断加大气候政策力度,加强气候承诺(Bierbrauer et al, 2021),全球的气候政策越来越趋

于严格。此外,欧盟碳关税提前一年执行,将于2023年10月试运行,2026年全面实施后将覆盖钢铁、水泥、铝、化工、电力、氢气等产品,影响到动力电池、光伏等新能源行业。欧盟另出台《新电池法》以测算动力电池企业碳足迹,并在2027年设定阈值,若碳排放高于该数值,则无法进入欧盟市场销售。此外,欧盟实施碳关税也将带动更多国家建立健全碳足迹机制。上述政策对发展中国家特别是中国带来了较大挑战,中国企业加速投资低碳材料和绿色生产技术,新能源企业已建立全球第一批零碳产业园,致力于减少电池生产碳足迹。我国目前已在8个省市建立碳市场交易试点,这些试点在实现碳减排目标、控制温室气体排放、减少贸易隐含碳排放方面发挥了重要作用。

未来贸易隐含碳的实证研究将会更为丰富细致。更多发展中国家、区域经济一体化组织会成为该领域新的研究对象和研究主体。各经济体现有行业和未来新兴行业都存在大量研究空间。特别是进入数智时代,在全球价值链不断变迁的视角下,贸易隐含碳足迹和流动方向均有待继续跟踪考察,而云计算、大数据技术结合实地调研抽样可提供更加完备和详尽的数据。另外,从微观角度考察企业绿色化转型、数字化转型对贸易隐含碳的影响也是未来重要研究方向之一。

#### 参考文献:

- Afionis, S. et al(2017), "Consumption-based carbon accounting: Does it have a future?", *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 8(1):1-19.
- Agez, M. et al(2020), "Hybridization of complete PLCA and MRIO databases for a comprehensive product system coverage", *Journal of Industrial Ecology* 24(4):774-790.
- Aichele, R. & G. Felbermayr(2015), "Kyoto and carbon leakage: An empirical analysis of the carbon content of bilateral trade", *Review of Economics and Statistics* 97(1):104-115.
- Arce, G. et al(2016), "Carbon emissions embodied in international trade: The post-China era", *Applied Energy* 184:1063-1072.
- Assogbavi, K. K. & S. Déés(2023), "Environmental policy and the CO<sub>2</sub> emissions embodied in international trade", *Environmental and Resource Economics* 84(2):507-527.
- Balistreri, E. J. et al(2018), "Carbon policy and the structure of global trade", *World Economy* 41:194-221.
- Banerjee, S. (2020), "Carbon emissions embodied in India-United Kingdom trade: A case study on North-South debate", *Foreign Trade Review* 55(2):199-215.
- Banerjee, S. (2021), "Addressing the carbon emissions embodied in India's bilateral trade with two eminent Annex-II parties: With input-output and spatial decomposition analysis", *Environment, Development and Sustainability* 23(4):5430-5464.
- Baumert, N. et al(2019), "Global outsourcing of carbon emissions 1995-2009: A reassessment", *Environmental Science & Policy* 92:228-236.
- Becque, R. et al(2017), "Europe's carbon loophole", Draft report, Climate Works Foundation, Available at <https://www.climateworks.org/report/the-carbon-loophole-in-climate-policy/>.
- Bierbrauer, F. et al(2021), "A CO<sub>2</sub>-border adjustment mechanism as a building block of a climate club", Kiel Institute for the World Economy, Kiel Policy Brief, Report No. 151.
- Böhringer, C. et al(2016), "The strategic value of carbon tariffs", *American Economic Journal: Economic Policy* 8(1):28-51.
- Böhringer, C. et al(2018), "Embodied carbon tariffs", *Scandinavian Journal of Economics* 120(1):183-210.
- Böhringer, C. et al(2022), "Potential impacts and challenges of border carbon adjustments", *Nature Climate Change* 12(1):22-29.
- Branger, F. & P. Quirion(2014), "Climate policy and the 'carbon haven' effect", *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 5(1):53-71.
- Cabernard, L. & S. Pfister(2021), "A highly resolved MRIO database for analyzing environmental footprints and green economy progress", *Science of the Total Environment* 755(Part1), no. 142587.

- Cansino et al(2015), "Driving forces of Spain's CO<sub>2</sub> emissions: ALMDI decomposition approach", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 48(C):749—759.
- Cezar, R. & T. Polge(2020), "CO<sub>2</sub> emissions embodied in international trade", *Bulletin de la Banque de France* 228, no. 1.
- Cherniwchan, J. et al(2017), "Trade and the environment: New methods, measurements, and results", *Annual Review of Economics* 9:59—85.
- Copeland, B. R. & M. S. Taylor(1994), "North-South trade and the environment", *Quarterly Journal of Economics* 109(3):755—787.
- Cosbey, A. et al(2019), "Developing guidance for implementing border carbon adjustments: Lessons, cautions, and research needs from the literature", *Review of Environmental Economics and Policy* 13(1):3—22.
- Darwili, A. & E. Schröder(2023), "On the interpretation and measurement of technology-adjusted emissions embodied in trade", *Environmental and Resource Economics* 84(1):65—98.
- Davis, S. J. & K. Caldeira(2010), "Consumption-based accounting of CO<sub>2</sub> emissions", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(12):5687—5692.
- Demeter, C. et al(2021), "Assessing the carbon footprint of tourism businesses using environmentally extended input-output analysis", *Journal of Sustainable Tourism* 30(1):128—144.
- Dobson, S. & J. Winter(2018), "Assessing policy support for emissions intensive and trade exposed industries", The School of Public Policy Publications, University of Calgary.
- Duarte, R. et al(2018), "Factors driving embodied carbon in international trade: A multiregional input-output gravity model", *Economic Systems Research* 30(4):545—566.
- Egger, P. & S. Nigai(2015), "Energy demand and trade in general equilibrium", *Environmental and Resource Economics* 60(2):191—213.
- Escobar, N. et al(2020), "Spatially-explicit footprints of agricultural commodities: Mapping carbon emissions embodied in Brazil's soy exports", *Global Environmental Change* 62, no. 102067.
- European Council(2022), "Council agrees on the carbon border adjustment mechanism", Available at <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2022/03/15/carbon-border-adjustment-mechanism-CBA-council-agrees-its-negotiating-mandate/>.
- Fernández-Amador, O. et al(2017), "Carbon dioxide emissions and economic growth: An assessment based on production and consumption emission inventories", *Ecological Economics* 135:269—279.
- Fernández-Amador, O. et al(2023), "Energy footprints and the international trade network: A new dataset. Is the European Union doing it better?", *Ecological Economics* 204, no. 107635.
- Fry, J. et al(2022), "Creating multi-scale nested MRIO tables for linking localized impacts to global consumption drivers", *Journal of Industrial Ecology* 26(1):281—293.
- Galli, A. et al(2013), "A footprint family extended MRIO model to support Europe's transition to a one planet economy", *Science of the Total Environment* 461—462(sep. 1):813—818.
- Giljum, S. et al(2019), "The impacts of data deviations between MRIO models on material footprints: A comparison of EXIOBASE, EORA and ICIO", *Journal of Industrial Ecology* 23(4):946—958.
- Greenstone, M. et al(2013), "Developing a social cost of carbon for US regulatory analysis: A methodology and interpretation", *Review of Environmental Economics & Policy* 7(1):23—46.
- Grossman, G. & A. Krueger(1991), "Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement", NBER Working Paper, No. 3914.
- Guedidi, I. & L. Baghdadi(2020), "CO<sub>2</sub> emissions, environmental provisions and global value chains in MENA countries", Economic Research Forum Working Paper, No. 1428.
- Hasanbeigi, A. & A. Darwili(2022), "Embodied carbon in trade: Carbon loophole", Global Efficiency Intelligence, Florida, United States.
- Henders, S. et al(2015), "Trading forests: Land-use change and carbon emissions embodied in production and ex-

- ports of forest—risk commodities”, *Environmental Research Letters* 10(12), no. 125012.
- Hsiao, A. (2022), “Coordination and commitment in international climate action: Evidence from palm oil”, <https://economics.sas.upenn.edu/system/files/2022-03/Empirical%2004062022.pdf>.
- Iacobuta, G. et al(2018), “National climate change mitigation legislation, strategy and targets: A global update”, *Climate Policy* 18(9):1114—1132.
- Jakob, M. (2021a), “Why carbon leakage matters and what can be done against it”, *One Earth* 4(5):609—614.
- Jakob, M. (2021b), “Climate policy and international trade – A critical appraisal of the literature”, *Energy Policy* 156(1), no. 112399.
- Jakob, M. & R. Marschinski(2013), “Interpreting trade-related CO<sub>2</sub> emission transfers”, *Nature Climate Change* 3(1):19—23.
- Jakob, M. et al(2013), “Between a rock and a hard place: A trade-theory analysis of leakage under production and consumption-based policies”, *Environmental & Resource Economics* 56(1):47—72.
- Jakob, M. et al(2014), “Consumption versus production-based emission policies”, *Annual Review of Resource Economics* 6(1):297—318.
- Jakob, M. et al(2021), “Sharing responsibility for trade-related emissions based on economic benefits”, *Global Environmental Change* 66(2), no. 102207.
- Jiborn, M. et al(2018), “Decoupling or delusion? Measuring emissions displacement in foreign trade”, *Global Environmental Change* 49:27—34.
- Jiborn, M. et al(2020), “Consumption versus technology: Drivers of global carbon emissions 2000—2014”, *Energies* 13(2), no. 339.
- Kander, A. et al(2015), “National greenhouse-gas accounting for effective climate policy on international trade”, *Nature Climate Change* 5(5):431—435.
- Kim, D. H. et al(2018), “Carbon dioxide emissions and trade: Evidence from disaggregate trade data”, *Energy Economics* 78:13—28.
- Kitzes, J. (2013), “An introduction to environmentally-extended input-output analysis”, *Resources* 2(4):489—503.
- Kolokontes, A. D. et al(2019), “Input-output models and derived indicators: A critical review”, *Scientific Annals of Economics and Business* 66(3):267—308.
- Kortum, S. & D. Weisbach(2017), “The design of border adjustments for carbon prices”, *National Tax Journal* 70(2):421—446.
- Kortum, S. & D. Weisbach(2021), “Optimal unilateral carbon policy”, Energy Policy Institute at the University of Chicago Working Paper, No. 2021—138.
- Larch, M. & J. Wanner(2017), “Carbon tariffs: An analysis of the trade, welfare, and emission effects”, *Journal of International Economics* 109(C):195—213.
- Lee, B. & R. Baron(2021), “Why the EU’s proposed CBAM must not be used to launch a carbon club”, World Economic Forum Agenda articles, Available at <https://www.weforum.org/agenda/2021/06/eu-carbon-border-clubs-climate-cbam/>.
- Leontief, W. (1951), “Input-output economics”, *Scientific American* 185(4):15—21.
- Leontief, W. (1970), “Environmental repercussions and the economic structure: An input-output approach”, *Review of Economics and Statistics* 52(3):262—271.
- Levitt, C. et al(2017), “Australia’s consumption-based greenhouse gas emissions”, *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 61(2):211—231.
- Liobikienė, G. & M. Butkus(2019), “Scale, composition, and technique effects through which the economic growth, foreign direct investment, urbanization, and trade affect greenhouse gas emissions”, *Renewable Energy* 132(C):1310—1322.
- Marcu, A. et al(2020), “Border carbon adjustments in the EU: Issues and options”, ERCST, Roundtable on Climate Change and Sustainable Transition, Available at <https://ssrn.com/abstract=3703387>.

- Melitz, M. (2003), "The impact of trade on aggregate industry productivity and intra-industry reallocations", *Econometrica* 71(6):1695–1725.
- Montoya, M. et al(2021), "Renewable and non-renewable in the energy-emissions-climate nexus: Brazilian contributions to climate change via international trade", *Journal of Cleaner Production* 312, no. 127700.
- Moran, D. & R. Wood(2014), "Convergence between the Eora, WIOD, EXIOBASE, and OPENEU's consumption-based carbon accounts", *Economic Systems Research* 26(3):245–261.
- Moran, D. et al(2020), "Quantifying the potential for consumer-oriented policy to reduce European and foreign carbon emissions", *Climate Policy* 20(s1):28–38.
- Murthy, K. V. & S. Gambhir(2018), "Analyzing environmental Kuznets curve and pollution haven hypothesis in India in the context of domestic and global policy change", *Australasian Accounting Business & Finance Journal* 12(2):134–156.
- Nguyen, P. T. (2022), "Carbon emissions versus value-added in export-driven countries: Case of Vietnam", *Journal of Economic Structures* 11, no. 12.
- Nordhaus, W. (2015), "Climate clubs: Overcoming free-riding in international climate policy", *American Economic Review* 105(4):1339–1370.
- OECD(1994), *The Environmental Effects of Trade*, OECD Publication, Paris.
- Peters, G. P. et al(2017), "Towards real-time verification of CO<sub>2</sub> emissions", *Nature Climate Change* 7:848–850.
- Pirson, T. & D. Bol(2021), "Assessing the embodied carbon footprint of IoT edge devices with a bottom-up life-cycle approach", *Journal of Cleaner Production* 322, no. 128966.
- Sakai, M. & J. Barrett(2016), "Border carbon adjustments: Addressing emissions embodied in trade", *Energy Policy* 92(C):102–110.
- Sat, N. A. (2016), "Multinational corporations and their effects on environment: Pollution haven hypothesis testing in the case of Turkey", *Gazi University Journal of Science Part B: Art Humanities Design and Planning* 4(2):25–36.
- Sato, M. et al(2015), "Sectors under scrutiny: Evaluation of indicators to assess the risk of carbon leakage in the UK and Germany", *Environmental & Resource Economics* 60(1):99–124.
- Shapiro, J. S. (2016), "Trade costs, CO<sub>2</sub>, and the environment", *American Economic Journal: Economic Policy* 8(4):220–254.
- Shapiro, J. S. (2021), "The environmental bias of trade policy", *Quarterly Journal of Economics* 136(2):831–886.
- Shapiro, J. S. & R. Walker(2018), "Why is pollution from US manufacturing declining? The roles of environmental regulation, productivity, and trade", *American Economic Review* 108(12):3814–3854.
- Steen-Olsen, K. et al(2012), "Carbon, land, and water footprint accounts for the European Union: Consumption, production, and displacements through international trade", *Environmental Science & Technology* 46(20):10883–10891.
- Su, B. & B. W. Ang(2014), "Input-output analysis of CO<sub>2</sub> emissions embodied in trade: A multi-region model for China", *Applied Energy* 114(C):377–384.
- Su, B. & E. Thomson(2016), "China's carbon emissions embodied in (normal and processing) exports and their driving forces, 2006–2012", *Energy Economics* 59:414–422.
- Sun, Y. et al(2020), "Tourism carbon footprint inventories: A review of the environmentally extended input-output approach", *Annals of Tourism Research* 82(4), no. 102928.
- Taylor, M. (2005), "Unbundling the pollution haven hypothesis", *Advances in Economic Analysis & Policy* 3(2):1–28.
- Trout, K. et al(2022), "Existing fossil fuel extraction would warm the world beyond 1.5°C", *Environmental Research Letters* 17, no. 064010.
- Tukker, A. et al(2020), "Consumption-based carbon accounting: Sense and sensibility", *Climate Policy* 20(1):1–13.
- Walter, I. & J. L. Ugelow(1979), "Environmental policies in developing countries", *Ambio* 8(2/3):102–109.
- Ward, H. et al(2019), "How global climate policy could affect competitiveness", *Energy Economics* 84(S1), no. 104549.
- Weber, S. et al(2021), "CO<sub>2</sub> embodied in trade: Trends and fossil fuel drivers", *Environmental Science and Pollution Research*

- tion Research* 28:27712—27730.
- Weisbach, D. et al(2022), “Trade, leakage, and the design of a carbon tax”, NBER Working Paper, No. 30244.
- Weitzel, M. & T. Ma(2014), “Emissions embodied in Chinese exports taking into account the special export structure of China”, *Energy Economics* 45(Sep. ):45—52.
- Wiebe, K. S. & N. Yamano(2016), “Estimating CO<sub>2</sub> emissions embodied in final demand and trade using the OECD ICIO 2015: Methodology and results”, OECD Science, Technology and Industry Working Papers 2016/5.
- Wieland, H. et al(2017), “Structural production layer decomposition: A new method to measure differences between MRIO databases for footprint assessments”, *Economic Systems Research* 30(1):1—24.
- Winter, J. (2023), “The challenge of border carbon adjustments as a mechanism for climate clubs”, *PLOS Clim* 2(2): e0000135, Available at <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000135>.
- Wilting, H. C. (2012), “Sensitivity and uncertainty analysis in MRIO modeling: Some empirical results with regard to the Dutch carbon footprint”, *Economic Systems Research* 24(2):141—171.
- Wood, R. et al(2018), “Growth in environmental footprints and environmental impacts embodied in trade: Resource efficiency indicators from EXIOBASE3”, *Journal of Industrial Ecology* 22(3):553—564.
- Wood, R. et al(2020), “Beyond peak emission transfers: Historical impacts of globalization and future impacts of climate policies on international emission transfers”, *Climate Policy* 20(S1): S14—S27.
- World Bank & Ecofys(2018), “State and trends of carbon pricing 2018”, Available at <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/29687/9781464812927.pdf?sequence=5&isAllowed=y>.
- Wyckoff, A. W. & J. M. Roop(1994), “The embodiment of carbon in imports of manufactured products: Implications for international agreements on greenhouse gas emissions”, *Energy Policy* 22(3):187—194.
- Yamano, N. & J. Guilhoto(2020), “CO<sub>2</sub> emissions embodied in international trade and domestic final demand: Methodology and results using the OECD inter-country input-output database”, OECD Science, Technology and Industry Working Papers, No. 2020/11.

### Research Progress on Embodied Carbon in International Trade

XING Yuanyuan WANG Yating WANG Xueyuan  
(Liaoning University, Shenyang, China)

**Abstract :** As a key issue of greenhouse gas emission reduction, embodied carbon in international trade is of great significance for optimizing global climate governance. The concept of embodied carbon in international trade is related to carbon leakage and carbon loophole. Carbon leakage leads to embodied carbon in international trade. Carbon loopholes are caused by ignoring the embodied carbon in trade under the current emission accounting system. Methods like multiregional input-output models and product life cycle methods are used to calculate the scale of emissions embodied in trade and carbon footprint. Structural Decomposition Analysis and Index Decomposition Analysis are used to anchor the influencing factors of emissions embodied in trade. Empirical research on emissions embodied in trade for developed and developing countries is flourishing. How to share responsibility for greenhouse gas emissions between consumers and producers has always been a highly sensitive issue in international climate policy negotiations. Some researchers question the effectiveness and practicalities of carbon tax under the Border Carbon Adjustment scheme to reduce carbon leakage. Some researchers are proposing novel approach and scheme to solve problems of emissions embodied in trade for bilateral trade relationships using multiregional input-output data empirical analysis.

**Keywords :** Embodied Carbon in International Trade; Greenhouse Gas Emission; Climate Policy; Responsibility Sharing; Multiregional Input-Output

(责任编辑:李仁贵)  
(校对:刘洪愧)