

# 中国省际贸易隐含碳排放测算及跨区域补偿机制

邢贞成\*

**摘要:**贸易隐含碳减排是实现中国“双碳”目标的重要组成部分,而公平合理的贸易碳排放责任分担及补偿机制是缓解贸易“碳泄漏”问题及推进合作碳减排进程的关键。本文基于最新的中国省际多区域投入产出模型,从责任与收益对等原则出发,提出贸易碳排放责任公平共担方案,并结合不同区域的碳减排成本因素,设计中国省际贸易碳补偿机制。研究发现:2017年中国省际贸易隐含碳排放占总排放量的46.6%,且碳转移主要发生在相邻省份之间。人口稠密及经济体量大的省份具有较高的贸易碳排放责任,不过不同地区的碳排放责任结构有所差异。工业发达的内陆省份具有较高的生产侧责任,而经济发达的沿海省份具有较高的消费侧责任。因此,碳补偿方向主要表现为发达省份向欠发达省份补偿,同时补偿量受双方贸易产品碳强度差异影响。由于不同地区的补偿标准差异,省域间的碳补偿量与碳补偿额并非完全一致。最后,基于碳补偿方案,本文从补偿方式、运行模式及监督保障等方面建议构建中国省际贸易碳补偿机制,推动区域间合作减排进程。

**关键词:**多区域投入产出;碳转移;排放责任;碳补偿

## 一、引言

为了积极应对全球气候变化,推动中国经济高质量发展,习近平总书记提出碳达峰、碳中和重大战略目标(习近平,2020),不仅体现了我国作为负责任大国的国际担当,同时为我国碳减排工作确定了关键性锚点(蔡博峰等,2021)。碳减排工作有效实施的关键在于将国家目标转化为地方行动。我国不同省域在发展阶段、资源禀赋以及产业结构等方面存在诸多差异,同时省域间广泛而密切的贸易联系对各地的碳排放及碳中和进程产生了差异巨大的影响(杨军等,2022)。各地区如果忽略贸易导致的跨区域碳联系,仅从生产端孤立地实施碳排放控

\*邢贞成,南京大学大气科学学院,邮政编码:210023,电子信箱:xzc@nju.edu.cn。

本文是国家社会科学基金项目“中国省域碳排放责任界定及补偿机制研究”(22CJY052)的阶段性成果。感谢匿名审稿人提出的宝贵意见。文责自负。

制,容易造成“碳泄漏”“搭便车”及利益冲突问题,阻碍跨区域合作减排工作的开展,不利于全国减排目标的实现(潘安,2018)。因此,从经济效益与环境成本均衡视角出发,厘清区域间广泛而复杂的碳关联效应,提出公平合理的贸易碳排放责任分担方案,建立中国省际贸易碳排放补偿机制,通过区域间的利益协调及优势互补激活协同减排效应,推动跨区域合作减排进程,是实现全国“双碳”目标的基础性工作,也是目前亟需解决的重要问题。

日益纵深发展的区域间经济贸易不仅对各地经济发展产生深远影响,同时也对当地的碳排放产生不可忽视的影响(彭水军等,2015;丛建辉等,2021),对区域碳排放责任界定造成争议和困难。贸易碳排放责任主体的认定大致经历了从生产端到消费端再到双方共同承担三个阶段(Kander et al.,2015)。“生产者责任”原则的优势在于实践操作性强,但是容易造成“碳泄漏”问题(Mehling et al.,2018);而“消费者责任”原则虽然可以避免“碳泄漏”问题,但是缺乏对生产端的约束,同时对消费者来说也缺乏公平(潘安等,2019)。对于贸易隐含碳排放责任划分,“共同但有区别责任”原则可以被理解为减排应当由生产者和消费者共同承担,但不是将碳排放责任简单地分配到生产者和消费者,而是要通过设定责任分担系数,在生产者和消费者之间寻求一个平衡点,兼顾公平性和有效性,充分调动贸易双方的减排积极性,从生产侧和消费侧共同促进节能减排,从而共同促进减排目标达成(彭水军等,2016)。

除了隐含碳排放的转移,价值链分工也会造成区域间的增加值转移,即所谓的增加值贸易(王直等,2015)。不同地区在经济发展、资源禀赋以及产业结构等方面存在巨大差异,导致这些地区在贸易中承担的碳排放与获得的增加值存在不对等问题(Wiedmann & Lenzen,2018)。将贸易隐含的碳排放与增加值转移纳入统一的投入产出分析框架下进行研究,可以探讨贸易碳不公平性问题(潘安等,2019)。任亚楠等(2022)运用双边贸易隐含排放分析模型,通过构建贸易碳生产率和贸易失衡度指标,揭示了我国对外贸易中的碳排放和经济损益失衡现象。基于多区域投入产出模型(MRIO),潘安等(2019)利用增加值和隐含碳分别衡量出口的贸易利益与环境成本,通过构建和测算关系指数考察中国出口的损益失衡关系。Xiong和Wu(2021)通过分析中美贸易中的增加值及碳排放转移,揭示了中美贸易中的经济效益和环境成本的不均衡性,且中国单位增加值的环境成本远高于美国。姜鸿等(2022)通过构建嵌套MRIO表,考察中国省域进出口贸易隐含碳和增加值贸易,利用碳排放权价值测算各省份对外贸易的环境净损失及中国省域绿色贸易利益。

“共同但有区别责任”的原则是目前被国际环境法确立的、公认的较为公平的原则,也被作为各国碳排放责任认定与国际气候治理的基本依据(张同斌等,2018)。将“共同但有区别责任”原则应用于贸易碳排放责任划分,需要由生产者和消费者共同承担减排责任,并且要兼顾公平性和有效性,充分调动贸易双方的减排积极性,从生产侧和消费侧共同促进节能减排。因此,公平共担的责任划分只有考虑贸易中增加值和碳排放转移量的不对等(王育宝、何

宇鹏, 2021), 才能为减排责任的公平分配提供更合理的依据(邓楚雄等, 2020)。基于贸易利益的碳排放责任共担方案能够使贸易双方实现责任与收益对等的目标(王文治等, 2019), 因而被广泛用于研究国际排放责任分担(彭水军等, 2016; Jakob et al., 2021)、省际排放责任分担(汪燕等, 2020; 杨军等, 2022; 王文治, 2022)以及行业间排放责任分担(Zhen & Li, 2021)。但是, 现有的排放责任分担研究大多停留在提出方案阶段, 而对于如何落实并有效执行分担方案鲜有涉及, 不利于推动区域间合作减排进程。

“碳补偿”是全球变化和低碳背景下产生的生态补偿研究的新领域, 它是指某一碳排放主体以经济或非经济方式对碳汇主体或生态保护者给予一定补偿的行为(赵荣钦等, 2015)。国内外关于碳补偿研究主要集中在森林碳补偿(Soto et al., 2016)、农业碳补偿(陈儒、姜志德, 2018)、旅游业碳补偿(丁晨希、王立国, 2020)、区域间横向碳补偿(Wang et al., 2020)等方面。关于碳补偿额度测度方法主要有三种: 一是生态系统价值法, 该方法是通过测算出碳汇增加所产生的价值来确定碳补偿额度(Arowolo et al., 2018); 二是支付意愿法, 该方法是通过询问支付者或受偿者的意愿金额来确定碳补偿额度(Lu & Wang, 2018); 三是碳收支平衡法, 它以区域碳收支的盈亏作为衡量准则, 碳盈余表示该地区应获得生态补偿金额, 反之碳赤字则应该支付生态补偿金额(周嘉等, 2019)。但是, 现有碳补偿研究只关注领土排放, 没有将贸易引致的碳转移责任纳入考虑中, 导致补偿方案的科学性及信服力有所欠缺, 不利于碳补偿工作的有效推行及区域间的公平发展。

为此, 本文从责任与收益对等原则出发, 同时考虑贸易中的经济收益与环境成本, 提出中国省际贸易碳排放责任公平共担方案; 在此基础上, 通过将双边省域的分担责任与实际排放量进行比较, 确定省域间的碳补偿量及补偿方向, 并结合不同区域的碳减排成本因素, 量化碳补偿价值, 提出中国省际贸易碳排放补偿方案; 最后, 基于碳补偿方案, 从补偿方式、运行模式及监督保障等方面构建中国省际贸易碳补偿机制, 为构建利益协调、优势互补和多方共赢的区域协同碳减排机制提供研究支撑和路径参考。因此, 本文主要的创新和贡献在于: 基于排放责任分担设计跨区域贸易碳补偿机制, 反过来又通过补偿实践实现责任公平共担, 二者相辅相成, 实现“定责+补偿”理论与实践的有机结合; 以双边省域减排责任与实际排放的差距为准绳确定双边碳补偿量, 为贯彻落实责任分担方案提供了方法参考, 在补偿实践中激发协同减排效应, 助力实现全国减排目标; 将贸易转移责任纳入碳补偿框架, 使得补偿方案更具科学性和信服力, 丰富了生态补偿理论体系及碳补偿方法与实践, 也为应对国际贸易“碳泄漏”问题提供了碳补偿方式的路径参考。

## 二、研究方法 with 数据来源

### (一) 碳排放和增加值拓展的MRIO模型

根据投入产出表的行平衡模型, 推导出产出向量  $X$  与最终需求  $Y$  之间的关系:

$$X = (I - A)^{-1} \times \left( \sum_s Y^s \right) = L \times \left( \sum_s Y^s \right) \quad (1)$$

式(1)中,  $Y^s$  表示  $s$  地区的最终需求向量,  $A$  表示直接消耗矩阵,  $L = (I - A)^{-1}$  表示 MRIO 模型的 Leontief 逆矩阵, 该矩阵表示满足一个单位最终需求所需的总生产产出。

通过增加碳排放行向量构建碳拓展的 MRIO 模型, 可以追踪人类经济活动通过产业关联拉动所造成的直接和间接的碳排放。基于公式(1), 推导出  $s$  地区的最终需求所驱动的  $r$  地区的碳排放量为:

$$ec_{Y^s}^r = \sum_t D^r L^{rt} Y^{ts} \quad (2)$$

式(2)中,  $D^r = (d_i^r)_{n \times 1} = (c_i^r / x_i^r)_{n \times 1}$  表示  $r$  地区的直接碳排放强度向量,  $c_i^r$  是  $r$  地区的  $i$  部门的直接碳排放量,  $x_i^r$  是  $r$  地区的  $i$  部门的总产出,  $d_i^r$  是  $r$  地区的  $i$  部门的直接碳排放强度,  $ec_{Y^s}^r$  表示  $s$  地区对所有地区的最终需求通过产业链对  $r$  地区的碳排放的拉动, 本研究将其定义为  $s$  地区向  $r$  地区的碳转移。

类似于碳拓展的 MRIO 模型, 增加值拓展的 MRIO 模型可以追踪其他区域的最终需求在本地产生的隐含增加值产出部分。例如, 由  $s$  地区的最终需求所驱动的在  $r$  地区产生的增加值为:

$$ev_{Y^s}^r = \sum_t V^r L^{rt} Y^{ts} \quad (3)$$

式(3)中,  $V^r = (v_i^r)_{n \times 1} = (v_i^r / x_i^r)_{n \times 1}$  表示  $r$  地区的增加值系数向量,  $v_i^r$  是  $r$  地区的  $i$  部门的增加值,  $v_i^r$  表示  $r$  地区的  $i$  部门的单位产出所生产的增加值,  $ev_{Y^s}^r$  表示  $s$  地区对所有地区的最终需求通过产业链对  $r$  地区的增加值的拉动, 本研究将其定义为  $s$  地区向  $r$  地区的增加值转移。

## (二) 贸易隐含碳排放责任分担模型

贸易碳排放责任应当由生产者和消费者共同承担, 将减排责任简单地分配到生产端和消费端都是不公平的, 而是要通过设定责任分担系数有区别地进行分配, 实现双方责任与受益一致的目标, 充分调动贸易双方的减排积极性 (Jakob et al., 2021)。

基于受益与责任对等的公平共担原则, 即  $r$  省份和  $s$  省份按照各自获得的经济收益来确定各自的贸易碳排放责任, 将它们之间的贸易碳排放总量 ( $ec_{Y^s}^r + ec_{Y^r}^s$ ) 分摊到这两个省份, 结果如下式所示:

$$CR^r = (ec_{Y^s}^r + ec_{Y^r}^s) \times \frac{ev_{Y^s}^r}{ev_{Y^s}^s + ev_{Y^r}^r} \quad (4)$$

$$CR^s = (ec_{Y^s}^r + ec_{Y^r}^s) \times \frac{ev_{Y^r}^s}{ev_{Y^s}^s + ev_{Y^r}^r}$$

式(4)中,  $CR^r, CR^s$  分别表示  $r$  省份和  $s$  省份所需承担的贸易碳排放责任。

推广到一般情况,可以计算任意省份  $k$  在省际贸易中对其他所有省份的减排责任:

$$\begin{aligned}
 CR^k &= CR_p^k + CR_c^k \\
 CR_p^k &= \sum_{t \neq k} ec_{Y^t}^k \times \frac{ev_{Y^t}^k}{ev_{Y^t}^k + ev_{Y^k}^k} \\
 CR_c^k &= \sum_{t \neq k} ec_{Y^t}^k \times \frac{ev_{Y^t}^k}{ev_{Y^t}^k + ev_{Y^k}^k}
 \end{aligned} \tag{5}$$

式(5)中,  $CR^k, CR_p^k, CR_c^k$  分别表示  $k$  省份的总贸易碳排放责任、生产侧责任和消费侧责任。可以看出,每个省份在省际贸易中获得单位经济收益而需承担的减排责任相等,即  $\frac{CR^r}{ev_{Y^r}^r} = \frac{CR^s}{ev_{Y^r}^s}$ , 满足收益与责任对等原则,体现出分配方案的公平性,有利于调动各地区的减排积极性。

### (三)贸易隐含碳排放补偿模型

本部分以贸易碳排放责任公平分担方案为基准,通过与实际排放比较确定需要进行补偿的排放量。如图1所示,  $r$  省份和  $s$  省份在省际贸易中的实际排放量分别为:

$$CE^r = ec_{Y^s}^r, CE^s = ec_{Y^r}^s \tag{6}$$

假设由  $s$  省份向  $r$  省份进行生态补偿,结合公平分担原则下  $r$  省份和  $s$  省份的减排责任,可以计算贸易碳排放补偿量:

$$\begin{aligned}
 CQ^{sr} &= CE^r - CR^r = CR^s - CE^s \\
 &= ec_{Y^s}^r - (ec_{Y^s}^r + ec_{Y^r}^s) \times \frac{ev_{Y^s}^r}{ev_{Y^s}^r + ev_{Y^r}^r} = \frac{ec_{Y^s}^r ev_{Y^r}^s - ec_{Y^r}^s ev_{Y^s}^r}{ev_{Y^r}^s + ev_{Y^s}^r}
 \end{aligned} \tag{7}$$

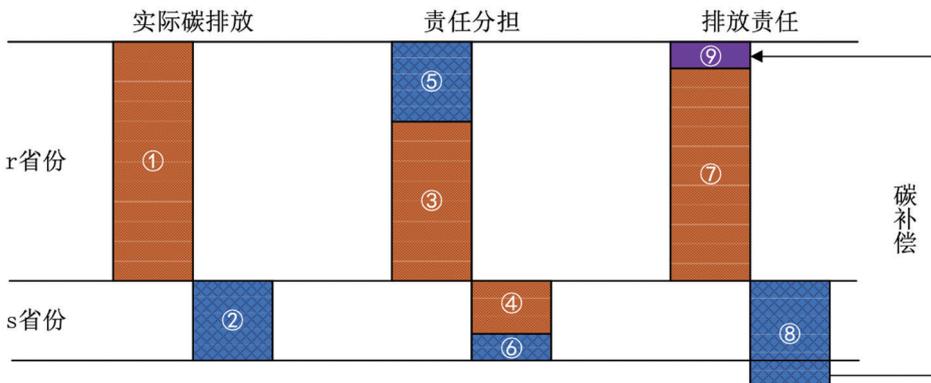


图1 双边贸易碳排放补偿示意图

图1中,①表示  $r$  省份在贸易中的实际排放量  $CE^r = ec_{Y^s}^r$ ; ②表示  $s$  省份在贸易中的实际排放量  $CE^s = ec_{Y^r}^s$ ; ③表示  $r$  省份生产侧的排放责任  $CR_p^r = ec_{Y^s}^r \times \left[ \frac{ev_{Y^r}^s}{(ev_{Y^r}^s + ev_{Y^s}^r)} \right]$ ; ④表示  $r$  省

份消费侧的排放责任  $CR_c^r = ec_{Y^r}^s \times [ev_{Y^r}^r / (ev_{Y^r}^s + ev_{Y^r}^r)]$ ; ⑤表示  $s$  省份消费侧的排放责任  $CR_c^s = ec_{Y^r}^r \times [ev_{Y^r}^s / (ev_{Y^r}^s + ev_{Y^r}^r)]$ ; ⑥表示  $s$  省份生产侧的排放责任  $CR_p^s = ec_{Y^r}^s \times [ev_{Y^r}^s / (ev_{Y^r}^s + ev_{Y^r}^r)]$ ; ⑦表示  $r$  省份的总排放责任  $CR^r = CR_p^r + CR_c^r$ ; ⑧表示  $s$  省份的总排放责任  $CR^s = CR_p^s + CR_c^s$ ; ⑨表示  $s$  省份向  $r$  省份的碳补偿量  $CQ^{sr} = CE^r - CR^r = CR^s - CE^s$ 。

然后,考虑到不同地区的碳排放价值差异,以受补偿地的碳减排成本作为当地的碳补偿标准计算碳补偿价值。基于距离函数的导数特性以及它与收益函数和成本函数的对偶性,Färe等(1993)提出了估算非期望产出影子价格的公式如下:

$$p_b = p_y \times \frac{\partial \bar{D}(x, y, b; g) / \partial b}{\partial \bar{D}(x, y, b; g) / \partial y} \quad (8)$$

式(8)中,  $p_b, p_y$  分别为碳排放和经济产出的影子价格,  $\bar{D}(x, y, b; g)$  表示方向性距离函数,同时假定期望产出的影子价格就等于它的市场价格,即  $p_y$  等于1元。

假设  $x$  为投入向量,  $y$  为期望产出向量,  $b$  为非期望产出向量,则设  $g = (g_y, g_b)$  表示方向向量,根据 Chambers等(1998)的定义,方向性距离函数可表示为:

$$\bar{D}(x, y, b; g_y, g_b) = \max \{ \beta : (y + \beta g_y, b + \beta g_b) \in P(x) \} \quad (9)$$

式(9)中,  $P(x)$  指环境生产可能集,表示固定数量的投入所能生产的所有期望产出和非期望产出的可能集合。

采用非参数方法 DEA 求解方向性距离函数,具体公式如下:

$$\begin{aligned} \bar{D}(x, y, b; g_y, g_b) &= \max \beta \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^n \lambda_j x_j &\leq x_0 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j &\geq y_0 + \beta g_y \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j b_j &= b_0 + \beta g_b \\ \beta &\geq 0, \lambda_j \geq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)中,  $\lambda_j$  表示强度变量,用于构建前沿面;  $\beta$  表示方向性距离函数值。

结合  $r$  省份的碳排放补偿标准  $p_b^r$ ,则可计算出  $s$  省份向  $r$  省份的生态补偿额为:

$$CM^{sr} = p_b^r \times CQ^{sr} = p_b^r \times \frac{ec_{Y^r}^r \cdot ev_{Y^r}^s - ec_{Y^r}^s \cdot ev_{Y^r}^r}{ev_{Y^r}^s + ev_{Y^r}^r} \quad (11)$$

式(11)中,  $CM^{sr}$  表示  $s$  省份向  $r$  省份的碳排放补偿额。

#### (四)数据来源及处理

本文基于最新的2017年中国省际间投入产出表开展研究,该MRIO表来源于李善同等(2021)的研究成果,具体包括中国30个省份(不包括澳门、香港、台湾和西藏地区)及42个行

业部门。本文所用的2017年中国省域各行业的碳排放数据及2017年各省的能源消耗数据来源于CEADs数据库(Guan et al., 2021)。为了将MRIO表与排放清单的行业分类相匹配,将投入产出表的42个部门和排放清单的45个部门都合并为27个部门<sup>①</sup>。

在计算碳影子价格的方向性距离函数中,选取资本存量、劳动力和能源消费作为投入指标,选取GDP为期望产出指标,二氧化碳排放量为非期望产出指标。劳动力数据来自《中国统计年鉴》,资本存量数据参照张军等(2004)的做法,采用“永续盘存法”计算2017年各省的资本存量,基础数据来源于《中国统计年鉴》和各地方的统计年鉴。

### 三、结果与讨论

#### (一)中国省际贸易碳排放责任分担

基于碳拓展的MRIO模型及相关数据,利用MATLAB 2016a测算中国省际贸易隐含碳排放(即中国省域间碳转移)。2017年中国省际贸易隐含碳排放为47.4亿吨,占中国总排放量的46.6%,说明中国省际贸易碳排放治理是我国实现“双碳”目标的关键着力点。从省份碳净转移来看,如图2所示,共有17个省市处于碳净流出状态,即它们的碳流出量大于碳流入量。其中,广东、河南、北京、上海、浙江、天津的净碳流出量较大,这些地区均为经济和人口大省,且相对来说能源资源欠缺,为满足产业发展和日常生活需要,需要从其他地区引进能源密集型产品,因此造成大量的隐含碳排放流出。内蒙古、山东、辽宁、山西、河北等13个省市的碳流入量大于碳流出量,呈现为碳净流入状态。这些地区均是能源资源大省,煤炭、石油等矿产资

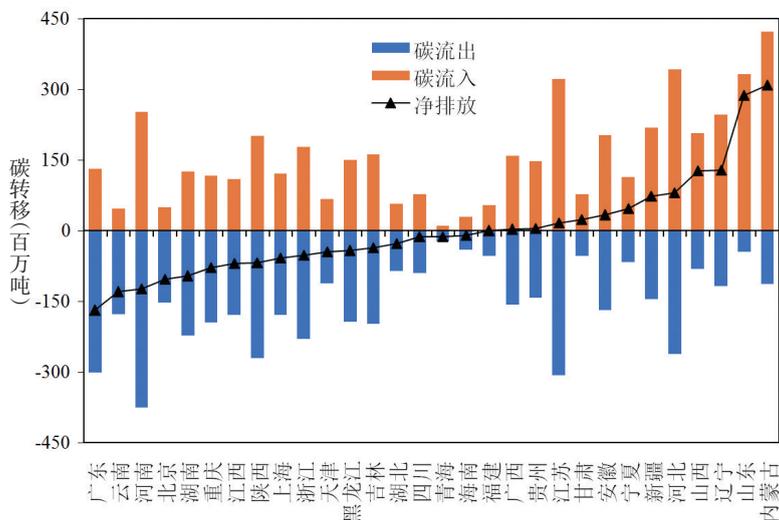


图2 2017年中国30个省份的碳流出、碳流入及净排放

<sup>①</sup> 例如,将投入产出表中的房地产、租赁和商务服务、科学研究、技术服务等服务业归类到其他服务业部门;将排放清单中的黑色金属采选业与有色金属采选业合并为金属采选业。

源丰富,产业结构以重工业为主,能源消费高且能源结构呈高碳特征,同时为其他地区产业发展贡献了大量的初级能源产品,因此造成大量的隐含碳流入。从碳排放净转移流角度看,主要的净碳转移发生在相邻省份之间,例如河北→内蒙古(39.8百万吨)、浙江→江苏(33.9百万吨)、浙江→安徽(30.2百万吨)、河南→山东(32.4百万吨)及广东→广西(36.9百万吨)。这主要得益于距离相近带来的交通便利性,促使相邻省份之间的产业转移和贸易活动更加频繁。

从区域碳排放责任来看,如图3所示,山东、河北、江苏、河南、广东、内蒙古的贸易碳排放责任最大,比重分别达到7.6%、7.4%、7.2%、5.5%、5.2%、5.2%,而最小的5个省份(北京、甘肃、宁夏、青海、海南)的贸易碳排放责任占比合计只占4.7%,其中宁夏、青海、海南的占比更是小于1%。造成贸易碳责任区域差异明显的原因主要在于经济体量、产业结构、人口数量的差异,工业越发达以及人口越稠密的省份往往具有较高的贸易碳排放责任。从碳排放责任结构来看(图3),内蒙古、山东、辽宁、山西、宁夏的生产侧责任占比最高,分别达到70.0%、68.1%、61.0%、59.7%、59.3%,而北京、上海、广东、重庆、天津等17个省市的生产侧责任小于消费侧责任。可以看出,贸易碳排放责任结构呈现出以下空间分布特征:经济欠发达的内陆省份,产业结构以工业为主,具有较高的生产侧责任;而经济发达的沿海省份,人口稠密及生活水平较高,同时产业结构以服务业为主,位于生产价值链下游,从而具有较高的消费侧责任。因此,“责任与收益对等”的公平共担原则将更多的排放责任分配给最终消费品高的省份,而将更少的碳排放责任分配给产品调出地,即获益较高的省份承担更多的碳排放责任,资源型省份承担责任得到降低,消费侧的碳减排约束增强。

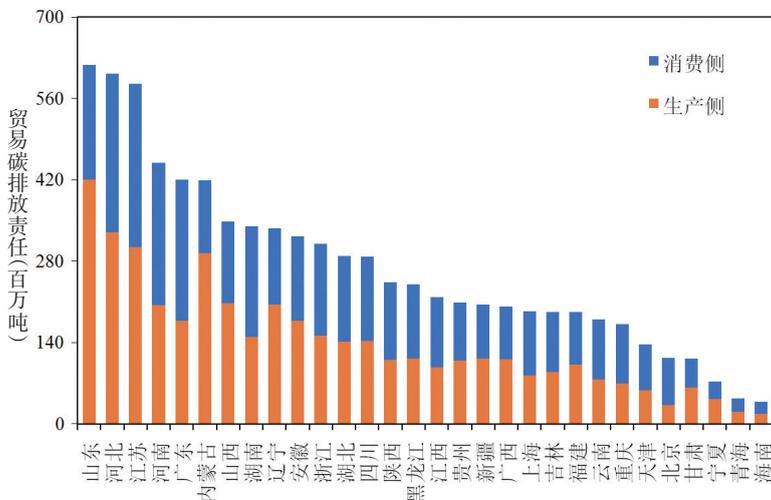


图3 2017年中国30个省份的贸易碳排放责任及结构组成

王文治(2022)基于CEADs编制的中国MRIO模型和碳排放清单,考虑省际贸易隐含的利益因素与各省域的技术减排贡献,对中国省域贸易碳排放责任进行了分担。图4对比了本研究中基于“责益对等原则”的贸易排放责任分担方案与王文治(2022)基于“受益原则”下的方

案,可以看出,两个方案下的中国省域排放责任的分担结果基本一致(相关性显著,见表1)。不过,仍有一些省份如内蒙古、江苏、山东、广东的排放责任在两种方案下存在较大差异,这可能是由于两个研究所用的基础数据来源不同所导致的,王文治(2022)所用的MRIO表来自CEADs,而本研究中所用的MRIO表源于李善同等(2021)的研究成果。值得一提的是,虽然王文治(2022)已提出与本文类似的排放责任分担方案,但是并没有给出更具体的实施路径,不利于排放责任分担的实现,而本研究在此基础上设计出中国省际贸易碳排放补偿机制,为贯彻落实责任分担方案提供了方法参考,并在补偿实践中激发协同减排效应,助力实现全国减排目标。

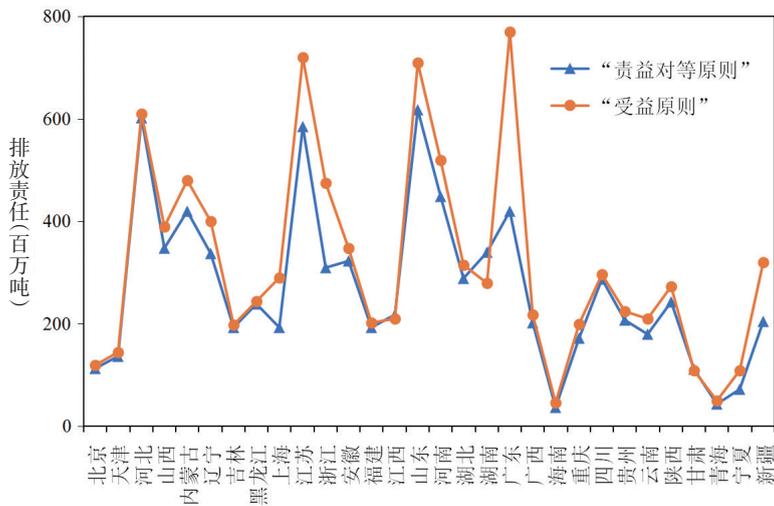


图4 贸易碳排放责任分担方案对比

表1 排放责任分担方案相关性分析结果

测算原则	指标	“责益对等原则”	“受益原则”
“责益对等原则”	皮尔逊相关性	1	0.937**
	显著性(双尾)		0
	个案数	30	30
“受益原则”	皮尔逊相关性	0.937**	1
	显著性(双尾)	0	
	个案数	30	30

注:\*\*表示在0.01级别(双尾)的相关性显著。

## (二)中国省际贸易碳排放补偿的量化

本研究通过将中国省际贸易碳排放分担责任与各省的实际排放量进行比较,确定需要进行补偿的碳排放量。图5显示了2017年中国省际贸易碳排放补偿关系及补偿量,图中包含435个不同深浅的彩色方格,其余465个白色方格无数据,每一个彩色方格表示对应的纵向省份对横向省份的碳补偿量,颜色深浅表示补偿量的大小。从省域间的碳补偿量来看,河北→

内蒙古、江苏→新疆、河南→内蒙古、江苏→内蒙古、浙江→安徽的贸易碳排放补偿量最大,分别达到17.1百万吨、16.3百万吨、15.7百万吨、13.0百万吨及11.5百万吨。补偿量的大小受贸易双方产业结构差异的影响,内蒙古等能源大省为其他地区生产了大量的碳排放的工业产品,承接了其他地区的碳排放转移;而人口稠密的经济发达地区,通过产业转移和购买工业产品满足最终消费,将大量的碳排放转移出去,从而导致这些省份之间的碳补偿量较大。可以看出,该碳排放补偿方案通过平衡生产地与消费地之间的责益失衡问题,不仅可有效缓解“生产者责任原则”导致的“碳泄漏”问题,同时能够在一定程度上解决“消费者责任原则”导致的减排动力不足、实施困难的问题。

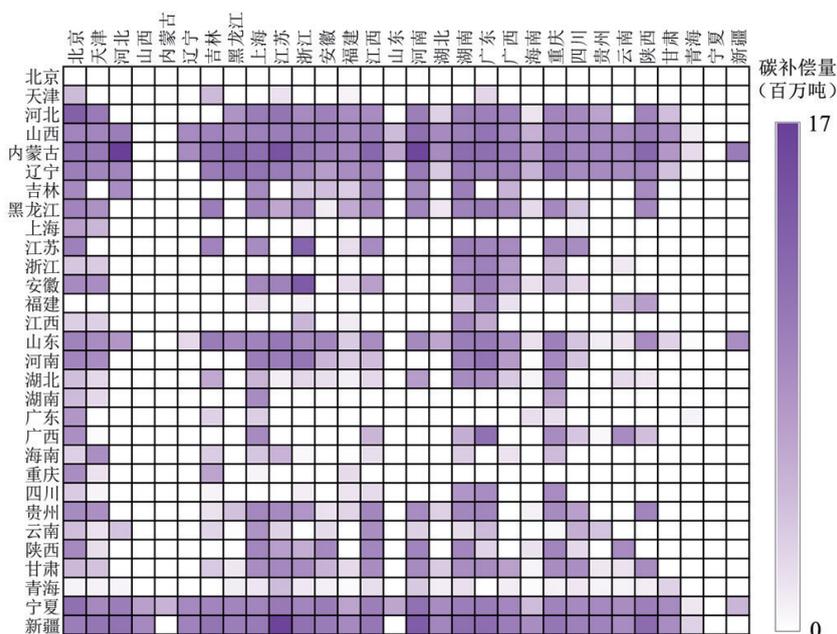


图5 2017年中国省际贸易碳排放补偿关系及补偿量

应用MaxDEA软件求解式(10)计算方向性距离函数值,并结合式(8)进一步计算2017年中国30个省份的碳影子价格,如图6所示。可以看出,发达省份的碳影子价格也较高,如北京(6.1万元/吨)、福建(2.4万元/吨)、上海(2.2万元/吨)、浙江(1.8万元/吨)、重庆(1.8万元/吨)、广东(1.7万元/吨)、天津(1.6万元/吨)、江苏(1.6万元/吨)。而辽宁、青海、陕西、甘肃、河北、贵州、内蒙古、新疆、山西、宁夏等欠发达省份的碳影子价格较低,均低于0.5万元/吨。事实上,由于发达地区的生产技术和效率较高,单位碳排放产生的经济价值较大,从而使得碳影子价格较高,而欠发达地区的生产较为落后,减排空间较大、成本较小,从而具有较低的碳影子价格。

基于中国省际贸易碳排放补偿量,以受补偿地的碳影子价格为补偿标准,确定相应的补偿价值。图7显示了2017年中国省际贸易碳排放补偿价值。可以看出,不同于碳补偿量,浙江→江苏、浙江→安徽、广东→河南、广东→浙江、广东→广西的贸易碳排放补偿额最大,分别

达到1435.3亿元、941.8亿元、676.8亿元、622.8亿元及613.3亿元。碳排放补偿额的大小同时受到补偿量及补偿标准的影响,虽然浙江→江苏和广东→浙江的碳补偿量只有9.2百万吨和3.4百万吨,但是由于江苏和浙江的碳影子价格较高,从而导致浙江→江苏和广东→浙江的碳补偿额排名显著提升。

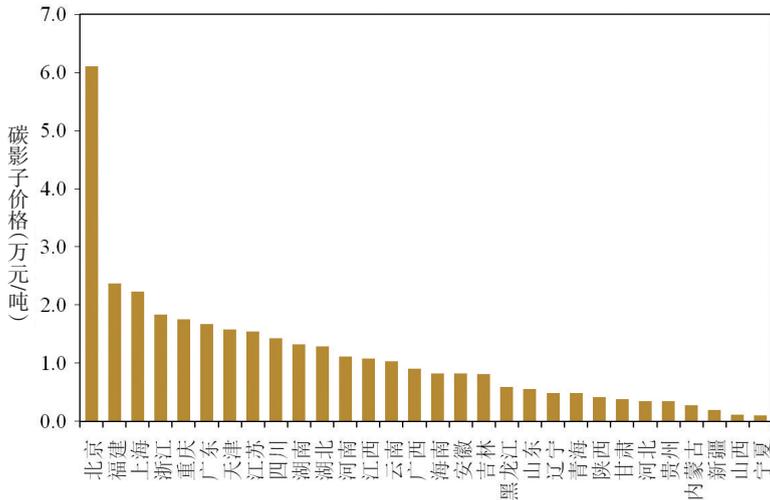


图6 2017年中国30个省份碳影子价格

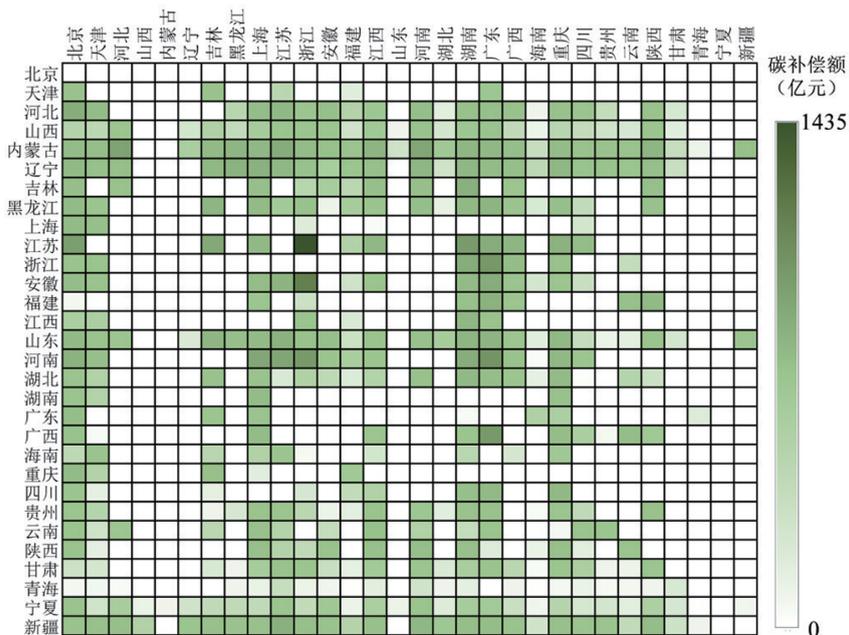


图7 2017年中国省际贸易碳排放补偿关系及补偿价值

为了进一步明晰不同省份的补偿大小及结构差异,本文进一步绘制了中国省份对外补偿额和受补偿额结构组成,结果如图8所示。可以看出,广东、湖南、北京、浙江、上海、重庆等13个省份需要对外净补偿,而其余17个省份需要受到其他地区的净补偿。从补偿额结构来看,

对外净补偿省份的对外补偿额较大且显著大于受补偿额。事实上,这些省市是经济较为发达的地区,GDP总量高,产业结构以低排放、高附加值的产品为主;同时人口众多、消费水平较大,通过贸易从其他地区输入了大量的高排放、低附加值产品满足巨大的消费需求。因此,这些省市在贸易中对外补偿额远远大于其应受补偿额。而对于净受补偿省份来说情况正好相反,它们的受补偿额显著大于对外补偿额,这主要是因为这些省市能源禀赋丰富,产业结构以高排放、低附加值的重工业为主。资源型省份在省际贸易中承担了大量的隐含碳排放,具有巨大的减排潜力,但目前减排能力有限。因此,针对省域间碳补偿,需要结合当地补偿意愿及偏好,通过沟通协商,推动补偿主客体因地制宜采取合适方式,如资金补助、对口协作、产业转移、人才培训和共建园区,开展“造血式”组合生态补偿模式,充分发挥各自资源、生态、经济等优势,提高碳补偿效率,推动区域间合作减排。

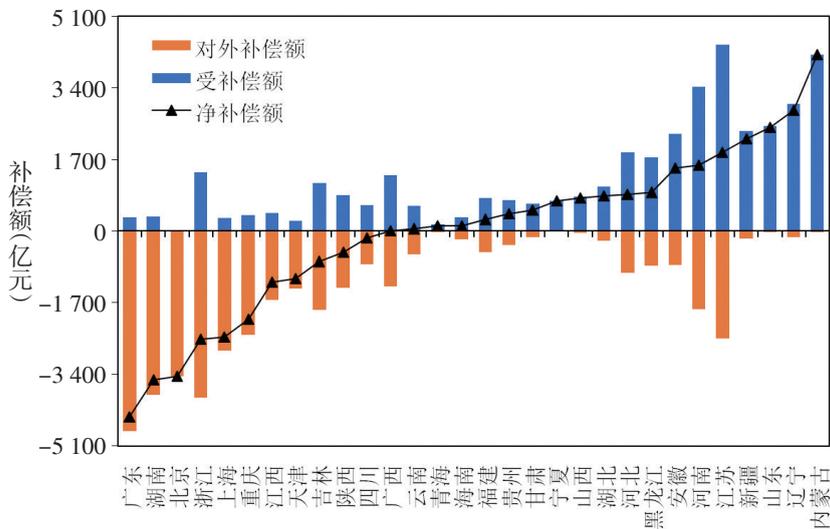


图8 2017年中国省域贸易碳排放补偿额及其结构组成

#### 四、结论和政策建议

##### (一) 研究结论

本文利用多区域投入产出模型追踪中国省际贸易引致的碳排放和增加值转移,并基于责任与收益对等原则提出贸易碳排放责任分担方案,建议要设计中国省际贸易碳排放补偿机制,通过在实施补偿实践中,贯彻落实责任分担方案,实现排放责任公平共担的目标。同时,基于中国省域差异化利益诉求,结合当地补偿意愿及偏好,通过沟通协商,推动补偿主客体因地制宜采取合适方式开展“造血式”组合生态补偿模式,充分发挥各自资源、生态、经济等优势,推动区域间合作减排进程,助力实现全国“双碳”目标。相应的结论如下:

第一,2017年中国省际贸易隐含碳排放占中国总排放量的46.6%,贸易碳排放治理是我

国实现“双碳”目标的关键组成部分。由于交通便利性所带来的频繁的产业转移和贸易活动,相邻省份之间的碳转移更为显著。从碳排放责任来看,山东、河北、江苏、河南、广东等工业发达或人口稠密的省份往往具有较高的贸易碳责任。从碳责任结构来看,经济欠发达的内陆省份,产业结构以工业为主,具有较高的生产侧责任;而经济发达的沿海省份,人口稠密及生活水平较高,同时产业结构以服务业为主,位于生产价值链下游,从而具有较高的消费侧责任。

第二,碳补偿量的大小受贸易双方产业结构差异的影响,内蒙古等能源大省为其他地区生产了大量的高排放的工业产品,承接了其他地区的碳排放转移;而人口稠密的经济发达地区,通过产业转移和购买工业产品满足最终消费,将大量的碳排放转移出去,从而导致这些省份之间的碳补偿量较大。从补偿标准来看,由于发达地区的生产技术和效率较高,单位碳排放产生的经济价值较大,从而使得碳影子价格较高,而欠发达地区的生产较为落后,减排空间较大、成本较小,从而具有较低的碳影子价格。

第三,碳排放补偿额的大小同时受到补偿量及补偿标准的影响,由于江苏和浙江的碳影子价格较高,从而导致浙江→江苏和广东→浙江的碳补偿额排名相对于补偿量显著提升。从补偿额结构来看,对外净补偿省份的对外补偿额较大且显著大于受补偿额,而对于净受补偿省份来说情况正好相反,这主要是因为不同省份生产和消费的贸易产品具有显著的碳强度差异所导致的。同时,为了保障中国省际贸易碳补偿的有效实施,需要创建完善的贸易碳补偿机构及运作模式、丰富贸易碳补偿方式与融资渠道、完善贸易碳补偿法规与监督机制。

## (二)中国省际贸易碳排放补偿机制

### 1. 建立贸易碳补偿机构及运作模式

建立专门的贸易碳补偿机构,是中国省际贸易碳补偿机制运行的重要组织保障。该机构需要由中央政府牵头,财政部门、环境部门、地方政府等共同参与,并组织相关领域的专家进行指导。建立完善的贸易碳补偿运作模式,是实施中国省际贸易碳补偿的基础。采取省市间的财政支付转移、中央财政支持的贸易碳补偿运作模式,设立基金委员会主持基金的日常运作,并负责每年补偿资金的统一收取与分配。具体来说,根据前文中给出的中国省际贸易碳补偿方案,针对对外净补偿省份,从当地财政收入中提取相应的资金作为补偿专用资金,上交至中央财政部门;针对净受补偿省份,由中央财政划拨相应数额的补偿款,补偿资金应用于工业生产减排、CCS等基础设施的建设,实现省域间精准的贸易碳补偿。

### 2. 丰富贸易碳补偿方式与融资渠道

中国现行的生态补偿方式以资金补偿为主,且生态补偿资金来源以税收为主,融资渠道较为单一,不利于实现中国省际贸易碳补偿机制的灵活运行,需要推行多元化的生态补偿方式与融资渠道。在补偿方式方面,推动补偿主客体因地制宜采取合适方式,如资金补助、对口协作、产业转移、人才培训和共建园区,开展“造血式”组合生态补偿模式,通过设备改造、技术

升级、生产补贴等方式提高受补偿地区的减排效率并降低减排成本,推动区域经济低碳化发展。在融资渠道方面,政府除了征收环境税(如碳税)外,还可以吸纳社会资金来参与减排活动,通过发行相应的基金和债券,鼓励更多的企业、社会组织和公民参与碳补偿的运用,不仅能够丰富补偿融资渠道,还能同时提升公民的低碳意识和行为。

### 3. 完善贸易碳补偿法规与监督机制

建立完善的生态补偿法律体系,是生态补偿机制运行的根本保障。针对贸易碳补偿这一新的研究领域,目前所出台的法律文件不太适用,为了进一步推进中国省际贸易碳补偿工作,需要制定专门的《贸易碳生态补偿法》。同时,建立贸易碳补偿监督机制,是规范中国省际贸易碳补偿的重要一环。具体来说,首先应该在贸易碳补偿组织管理机构下设置监督部门,在碳补偿工作当中建立目标责任制,明确各职能部门在工作当中的权利与义务,从而监管各部门碳补偿工作的完成情况;其次应将碳补偿工作列入到政府绩效考核当中,并制定具体的奖惩措施,以此来提高各部门的工作积极性及减排意识;最后,建立由社会各界组成的社会监督委员会,让社会力量参与到碳补偿监督工作当中来,保证碳补偿工作的公正透明。

### 参考文献:

- [1] 蔡博峰,曹丽斌,雷宇,等. 中国碳中和目标下的二氧化碳排放路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(01): 7-14.
- [2] 陈儒,姜志德. 中国省域低碳农业横向空间生态补偿研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(04): 87-97.
- [3] 丛建辉,石雅,高慧,等. “双碳”目标下中国省域碳排放责任核算研究——基于“收入者责任”视角[J]. 上海财经大学学报, 2021, 23(06): 82-96.
- [4] 邓楚雄,张光杰,李科. 跨省贸易中水污染物与增加值的虚拟转移及其环境不平等测度[J]. 环境经济研究, 2020, 5(02): 18-33.
- [5] 丁晨希,王立国. 自愿机制下森林旅游地经营者碳补偿意愿的影响因素研究——基于江西省10个森林公园464份样本的调查分析[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2020, 54(01): 104-113.
- [6] 姜鸿,高洁,张艺影. 基于碳排放权价值的中国省域绿色贸易利益测度[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(05): 34-45.
- [7] 李善同,潘晨,何建武,等. 2017年中国省际间投入产出表:编制与应用[M]. 北京:经济科学出版社, 2021.
- [8] 潘安. 全球价值链视角下的中美贸易隐含碳研究[J]. 统计研究, 2018, 035(001): 53-64.
- [9] 潘安,谢奇灼,戴岭. 中国出口贸易利益与环境成本的失衡[J]. 环境经济研究, 2019, 4(03): 10-29.
- [10] 彭水军,张文城,孙传旺. 中国生产侧和消费侧碳排放量测算及影响因素研究[J]. 经济研究, 2015, (01): 170-184.
- [11] 彭水军,张文城,卫瑞. 碳排放的国家责任核算方案[J]. 经济研究, 2016, (3): 137-150.
- [12] 任亚楠,田金平,陈吕军. 中国对外贸易的经济增加值——隐含碳排放失衡问题研究[J]. 中国环境管理, 2022, 14(05): 49-59.
- [13] 汪燕,王文治,马淑琴. 中国省域间碳排放责任共担与碳减排合作[J]. 浙江社会科学, 2020, (01):

40-51+156.

[14] 王文治, 杨爽, 王怡. 全球贸易隐含碳的责任共担及其跨区域补偿[J]. 环境经济研究, 2019, 4(03): 30-47.

[15] 王文治. 我国省域消费侧碳排放责任分配的再测算——基于责任共担和技术补偿的视角[J]. 统计研究, 2022, 39(06): 3-16.

[16] 王育宝, 何宇鹏. 增加值视角下中国省域净碳转移权责分配[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(01): 15-25.

[17] 王直, 魏尚进, 祝坤福. 总贸易核算法: 官方贸易统计与全球价值链的度量[J]. 中国社会科学, 2015, (09): 108-127+205-206.

[18] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[N]. 人民日报, 2020-09-23(003).

[19] 杨军, 杨泽, 丛建辉, 张雅茜. 责任和收益匹配原则下中国省域碳排放责任共担方案优化[J]. 资源科学, 2022, 44(09): 1745-1758.

[20] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952—2000[J]. 经济研究, 2004, (10): 35-44.

[21] 赵荣钦, 刘英, 李宇翔, 等. 区域碳补偿研究综述: 机制、模式及政策建议[J]. 地域研究与开发, 2015, 34(05): 116-120.

[22] 张同斌, 孟令蝶, 孙静. 碳排放共同责任的测度优化与国际比较研究[J]. 财贸研究, 2018, 29(10): 23-35.

[23] 周嘉, 王钰萱, 刘学荣, 时小翠, 蔡春苗. 基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J]. 地理科学, 2019, 39(12): 1955-1961.

[24] Arowolo, A. O., X. Deng, O. A., Olatunji, et al. Assessing Changes in the Value of Ecosystem Services in Response to Land-Use/Land-Cover Dynamics in Nigeria[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 597-609.

[25] Chambers, R. G., Y. Chung, and R. Färe. Profit, Directional Distance Functions, and Nerlovian Efficiency[J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1998, 98: 351-364.

[26] Färe, R., S. Grosskopf, C. A. K. Lovell, et al. Derivation of Shadow Prices for Undesirable Outputs: A Distance Function Approach[J]. *The Review of Economics and Statistics*, 1993: 374-380.

[27] Guan, Y., Y. Shan, Q. Huang, et al. Assessment to China's Recent Emission Pattern Shifts[J]. *Earth's Future*, 2021, 9(11): e2021EF002241.

[28] Jakob, M., H. Ward, and J. C. Steckel. Sharing Responsibility for Trade-Related Emissions Based on Economic Benefits[J]. *Global Environmental Change*, 2021, 66: 102207.

[29] Kander, A., M. Jiborn, D. D. Moran, et al. National Greenhouse-Gas Accounting for Effective Climate Policy on International Trade[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(5): 431-435.

[30] Lu, J. L. and C. Y. Wang. Investigating the Impacts of Air Travellers' Environmental Knowledge on Attitudes Toward Carbon Offsetting and Willingness to Mitigate the Environmental Impacts of Aviation[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 59: 96-107.

[31] Mehling, M. A., H. van Asselt, K. Das, et al. Beat Protectionism and Emissions at a Stroke[J]. *Nature*, 2018, 559(7714): 321-324.

[32] Soto, J. R., D. C. Adams, and F. J. Escobedo. Landowner Attitudes and Willingness to Accept Compensation from Forest Carbon Offsets: Application of Best-Worst Choice Modeling in Florida USA[J]. *Forest Policy and Economics*, 2016, 63: 35-42.

[33] Wang, W., W. Wang, P. Xie, et al. Spatial and Temporal Disparities of Carbon Emissions and Interregional Carbon Compensation in Major Function-Oriented Zones: A Case Study of Guangdong Province[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 245: 118873.

[34] Wiedmann, T. and M. Lenzen. Environmental and Social Footprints of International Trade[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(5): 314–321.

[35] Xiong, Y. and S. Wu. Real Economic Benefits and Environmental Costs Accounting of China-US Trade[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 279: 111390.

[36] Zhen, W. and J. Li. The Formation and Transmission of Upstream and Downstream Sectoral Carbon Emission Responsibilities: Evidence from China[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, 25: 563–576.

## Measurement of Trade Embodied Carbon Emissions from China's Inter-provincial and Cross Regional Compensation Mechanisms

Xing Zhencheng

(School of Atmospheric Sciences of Nanjing University)

**Abstract:** The trade embodied carbon emission reduction is an important component of achieving China's carbon target. Fair and reasonable responsibility sharing and compensation mechanism for carbon emission embodied in trade is the key to alleviate the problem of trade "carbon leakage" and promote the process of cooperative carbon emission reduction. Based on the latest China's multi-regional input-output model, this paper proposes a fair responsibility sharing scheme of trade-embodied carbon emissions from the principle of reciprocity of responsibility and benefit, and designs a trans regional trade carbon compensation mechanism combined with the carbon abatement cost factors in different regions. The study finds that the carbon emissions embodied in China's inter-provincial trade accounted for 46.6% of China's total emissions in 2017, and the inter-regional embodied carbon transfer mainly occurs between neighboring provinces. Provinces with dense population and large economic volume had higher responsibility for trade carbon emissions, but the structure of carbon emission responsibility varies between different provinces. Industrialized inland provinces have higher production-side responsibilities, while economically developed coastal provinces have a high consumption-side responsibility. The direction of carbon compensation mainly appeared to be from developed to less developed provinces. However, due to different compensation standards in different regions, the carbon compensation volume between provinces is not completely consistent with the carbon compensation value. Finally, based on the carbon compensation scheme, this paper builds a carbon compensation mechanism for China's inter-provincial trade from the aspects of compensation mode, operation mode, supervision and security, promoting the process of interregional cooperation to reduce emissions.

**Keywords:** Multi-regional Input-Output; Carbon Transfer; Emission Responsibility; Carbon Compensation

**JEL Classification:** Q21, Q58

(责任编辑:朱静静)